

บทที่ 5

การสำรวจธรณีเคมี

(Geochemical Exploration)

5.1 หลักการเบื้องต้นในการสำรวจ

5.1.1 วงแร่และการสำรวจธรณีเคมีที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจธรณีเคมีอาศัยหลักการที่ว่า การแสดงตัวหรือการกระจายตัวของธาตุ (รูป 5.1.1 และ 5.1.2, ตาราง 5.1.1) หรือแร่ที่เราสนใจมักเกิดขึ้นรอบๆ แหล่งแร่ นั่นซึ่งธาตุแต่ละชนิดมีการแพร่กระจายตัวแตกต่างกัน (ตาราง 5.1.2) ในแต่ละสภาพธรณีวิทยาหรือระยะที่ห่างจากแหล่งแร่ (ตาราง 5.1.3) การแสดงตัวนี้อาจเป็นผลมาจากการบวนการจากการเกิดแหล่งแร่โดยตรง (ปฐมผลหรือ primary process) หรือกระบวนการขนานการพื้นผิว (ทุติยผลหรือ secondary process) ก็ได้ ซึ่งทั้งสองลักษณะนี้จะก่อให้เกิดความผิดปกติ(anomalies) ทางธรณีเคมีขึ้นได้ และถ้าหากเกิดความผิดปกติในธาตุบางธาตุมากพอก็สามารถที่จะเป็นตัวการสำคัญที่จะชี้บ่งถึงบริเวณเกิดแร่(mineralization)ได้ (ตาราง 5.1.4 และ 5.1.5) แต่ไม่ใช่ไปจนถึงการหา

แหล่งแร่(mineral deposits) ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจได้ทุกครั้ง

การแสดงตัวเนื่องจากกระบวนการเกิดแหล่งแร่โดยตรงนี้มักเกิดเป็นวง ซึ่งอาจเรียกอีกอย่างว่า วงปฐมผล (lithogeochemical halo หรือ primary dispersion pattern) ซึ่งเป็นการแสดงออกของการเปลี่ยนแปลงสภาพ(alteration) หรือโซนแร่หรือวงแร่(Zoning pattern) อาจมีความกว้างเพียงไม่กี่เซนติเมตร รอบๆ แหล่งแร่เล็กๆ หรืออาจกว้างใหญ่เป็นหลายร้อยหลายพันเมตรรอบแหล่งแร่ใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น แหล่งสังกะสีที่ Tynagh และ Navan ประเทศไอร์แลนด์ พบว่าโซนแร่ที่มีค่าสังกะสีสูงผิดปกติ ปรากฏเป็นวงกว้าง 1 กม รอบแหล่งแร่และมีค่าผิดปกติของแมงกานีสเป็นวงกว้างถึง 10 กม และเหนือแหล่งแร่ขึ้นไป 300 ม ลักษณะของวงแร่ไม่ได้บ่งบอกถึงการเกิดแบบสายแร่เกิดหลัง(epigenetic) หรือจากกระบวนการจากตะกอนภูเขาไฟ(volcanic sediments) แต่กลับเป็นผลมาจากการบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการแข็งตัวโดยตรงจากหินตะกอน(syngenetic sedimentary) ของแหล่งแร่ เหมือนอย่างกรณีของแนวทองแดงของประเทศแซมเบีย Zambia ในทวีปอาฟริกา และแหล่งคูปเปอร์ชีเฟอร์ (Kupcrschifer) ของประเทศเยอรมัน ซึ่งถ้าหากมีความกว้างใหญ่เหมือนอย่างของแซมเบีย และคูปเปอร์ชีเฟอร์แล้วก็สามารถจัดเป็นปริมาตรแร่ก็ได้เพราะมีความยาวเป็นร้อยๆ กิโลเมตร

ส่วนการกระจายตัวหรือแสดงตัวแบบวงทุติยผล(secondary dispersion pattern หรือ secondary geochemical halo)นั้น ยังคงประกอบด้วยส่วนของการเกิดเป็นแหล่งแร่ปรากฏให้เห็นอยู่ ซึ่งอาจปรากฏ

พบในรูปของเศษหิน ดิน ตะกอน หรือน้ำ จากระยะตั้งแต่ไกลจนถึงใกล้จากแหล่งก็ได้ในบางสภาวะการ
ธาตุที่กระจายตัวจากแหล่งแร่อาจจะกลับมายุบรวมกันใหม่(reconcentration) และเกิดเป็นแหล่งแร่ใหม่

รูป 5.1.1 กระบวนการแพร่กระจายของธาตุในทางธรณีเคมี

รูป 5.1.2 การแพร่กระจายของธาตุในสภาวะแวดล้อมพื้นผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับประจุและรัศมีของไอออน

ตาราง 5.1.1 ตัวอย่างการแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมต่างๆ

ตาราง 5.1.2 การกระจายตัวของธาตุในสภาพแวดล้อมแบบพื้นผิว

ตาราง 5.1.3 ตัวอย่างปริมาณสารหนู (As) ในดินซึ่งทำหน้าที่เป็นธาตุแม่สื่อให้สินแร่ทองคำ

ตาราง 5.1.4 การเกิดร่วมกันของธาตุในหินชนิดต่างๆ

ตาราง 5.1.5 ตัวอย่างธาตุแม่สื่อ(path finder) ที่สำคัญในแร่และตัวอย่างที่เก็บ

ได้ เช่น การเกิดแหล่งสินแร่แร่ไดคิน(supergene enrichment orebody) หรือที่มักพบบ่อยก็คือ การเกิด สะสมตัวใหม่เป็นกระจุกๆ ในที่ใหม่จนเกิดไปรบกวนหรือปิดบังบริเวณที่เป็นแหล่งแร่จริงๆ ที่อยู่ข้างใต้

ความจริงการใช้ประโยชน์ของวงพุทธรูปนั้นได้ทำกันมานานพอๆกับการสำรวจหาแหล่งแร่ ตาราง 5.1.6 แสดงแร่และสินแร่ที่มักพบเห็นได้ในบริเวณตอนบนที่หินมีการผุพังจนถึงระดับน้ำไดคิน ในสมัยโบราณนักสำรวจอาจติดตามหาเศษก้อนแร่(ที่เขาสอนใจ)หรืออาจเลียแร่(panning)หาแร่โลหะหนัก เช่น ทองคำไปเรื่อยๆจนพบแหล่งแร่ โดยที่วิธีการสำรวจธรณีเคมีแบบโบราณ คือช่วง ค.ศ.1940-1950 นั้น อาศัยการตรวจวัดธาตุจากเครื่องมือที่เรียก emission spectroscopy หรือจากการวิเคราะห์เคมีอย่างละเอียด เพื่อความีแร่หรือธาตุที่เราสนใจหรือไม่ โดยปกติค่าที่เราใช้วัดความผิดปกติทางเคมีอยู่ในรูปหนึ่งต่อล้าน(part per million หรือ ppm)โดยน้ำหนัก หรือ gm/ton เช่น ค่าธาตุทองแดงในหิน ในปัจจุบันด้วยเครื่องมืออันทันสมัยเราสามารถวัดค่าความละเอียดได้มากถึงหนึ่งต่อพันล้าน(part per billion หรือ ppb หรือ $10^{-7}\%$) โดยน้ำหนัก เช่น ค่าทองหรือทองคำขาวในหิน เป็นต้น

ยังเป็นการสำรวจโดยใช้พืชหรือ**ธรณีพฤกษศาสตร์** (Geobotanical Exploration) หรือกิ่งไม้สีอ่อนด้วยแล้ว สามารถใช้อย่างได้ผลดีมาช้านานแล้ว ไม่ว่าจะเป็นการทำแผนที่ธรณีวิทยา และสำรวจแร่ (หรือน้ำ) แต่วิชาธรณีพฤกษศาสตร์ก็ไม่พัฒนาจนกระทั่งเราเริ่มรู้จักความสัมพันธ์ระหว่างหิน ดิน และ ต้นไม้ได้ดีพอ ในปัจจุบันการสำรวจธรณีพฤกษศาสตร์ใช้กันอย่างกว้างขวางในขั้นการบินสำรวจเบื้องต้น และโดยการแสดงออกของพืชพันธุ์จากภาพดาวเทียมได้แดง (infrared) และภาพชนิดหลายช่วงคลื่น (multispectral images) ซึ่งอยู่ในระบบโทรสัมผัส(remot-sensing technique) อีกแบบหนึ่ง ธรณีพฤกษศาสตร์จึงเป็นธรณีเคมีจริงๆ ที่ส่วนของต้นไม้ การปรากฏของต้นไม้แต่ละชนิด และรูปร่างลักษณะ(ที่เปลี่ยนไป)ของต้นไม้สามารถนำมาเป็นหลักฐานซึ่งแสดงถึงความผิดปกติทางธรณีเคมีได้ ซึ่งออกมาในรูปบริเวณกว้างจนถึงขนาดมาตราส่วนเล็กๆ เช่น มอสตามแหล่งทองแดง (vopper-mosses) หรือไลเคน(lichen) บางชนิดซึ่งคาบเกี่ยวกับเรื่องของจุลชีววิทยา(micro biology)ด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ Watterson และคณะ (1986) ได้ทำการทดลองถึงวิธีการตรวจหาชนิดของแบคทีเรียที่พบในดินที่มีธาตุโลหะ อยู่สูงเหนือแหล่งแร่ทองแดงและแหล่งร่ซัฟไฟด์ได้

สำหรับ**ธรณีสัตววิทยา**(Geozology) ได้ถูกนำมาเกี่ยวข้องกับการเข้าถึงแหล่งแร่โดยอาศัยการสังเกตจากสัตว์ เช่นการตรวจดูเม็ดแร่ในดินจากจอมปลวก(termite mounds) ใช้ได้ผลในหลายแห่งในเขตร้อน และการตรวจหาจากจอมปลวกและปลวกนี้เองอย่างน้อยก็ทำให้เราพบแหล่งทองคำหนึ่งแหล่ง ซึ่งก็คือเหมืองปลวก(Termite Mine) ในประเทศซิมบับเว(Zimbabwe) ทวีปอาฟริกา จนทำให้นักธรณีเคมีหลายท่านทำการเก็บฝิ่งและตรวจหาธาตุพบน้อย(trace elements) ในฝิ่ง (โดยอาศัยหลักที่ว่าฝิ่งหากินไม่ไกลจากรังเกินกว่า 2 กิโลเมตรได้) ตลอดจนการเก็บตัวอย่างของสาหร่าย หอย และปลาตามโคลน

ตาราง 5.1.6 สันแระที่มักพบในบริเวณที่ผิวโลกเกิดการผุพัง (ตัวเอน = แระพน้อย, ในวงเล็บ = แระงทน
เหลือค้ำ หรือ resistates (Peters, 1987)

(pelagic fish) มาวิเคราะห์ หรืออย่างเช่นนกในอเมริกาใต้ที่ชื่อ elmiuero เป็นที่รู้จักกันว่าชอบทำรังอยู่ตามโขดหินควอร์ต(quartz)

เท่าที่ผ่านมาถึงปัจจุบัน การสำรวจโดยวิธีเคมีถือได้ว่าเป็นวิธีการสำรวจที่ได้ผลกับการหาแหล่งแร่มากวิธีหนึ่ง เช่น แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอก (porphyry copper) ที่ชื่อ Casino (คาสีโน) หรือแหล่งทองฝังปะ ชื่อ Jerritt Canyon (เจอร์ริต แคนยอน) และ Aroona (อรูนา) ทางใต้ของออสเตรเลียหรือตะกั่วสังกะสีแถบลุ่มน้ำแมกอาร์เทอร์ (McArthur) ในรัฐ Northern Territory ประเทศแคนาดา แหล่งพวกนี้ค้นพบโดยวิธีธรณีเคมีแทบทั้งสิ้น

สำหรับในเมืองไทยแหล่งแร่โลหะพื้นฐานบริเวณยางเกียง-อมก๋อย(เขตต่อระหว่างจังหวัดตาก-เชียงใหม่) ถือได้ว่าเป็นแหล่งที่เกิดจากผลของการสำรวจธรณีเคมีที่น่าสนใจมากในปัจจุบันแห่งหนึ่ง

ส่วนแหล่งแร่ที่ค้นพบโดยวิธีธรณีฟิสิกส์อย่างเดียวนั้น ได้แก่ แหล่งแร่ยูเรเนียมหลายแหล่งในรัฐยูทา (Utah) และนิวเม็กซิโก (New Mexico) ของสหรัฐอเมริกา

อย่างไรก็ตามการสำรวจที่ให้ผลดีและที่ถูกต้องจนเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันต้องใช้วิธีการสำรวจหลายอย่างและตัวอย่างหลายประเภทประกอบกันและเป็นขั้นเป็นตอน และไม่สามารถบอกได้ว่าอะไรสำคัญกว่าอะไร แหล่งตะกั่ว-สังกะสีของประเทศไอร์แลนด์ (Ireland) พบโดยวิชาธรณีเคมีก่อนเหมืองทองแดงหลายเหมืองค้นพบเพราะอาศัยต้นดอกกุหลาบทองแดง(Copper flower)เป็นตัวกำหนดแหล่งทองแดงมากมายของประเทศนามิเบีย(Namibia) และบอตสวานา(Botswana) ในทวีปอาฟริกาใช้ธรณีฟิสิกส์เข้าช่วยถึงได้พบ และโดยอาศัยแหล่งถ่านพีท(peat) ทำให้เกิดใช้ทั้งธรณีเคมี ธรณีฟิสิกส์ และธรณีฟิสิกส์ในการหาแหล่งทองแดงเนื้อดอก(porphyry copper) ที่ชื่อ Coed-y-Brenin ของประเทศเวลส์

การสำรวจธรณีเคมีบริเวณกว้าง(Reconnaissance Geochemistry)มีประโยชน์ในการกำหนดพื้นที่ขนาดใหญ่ที่น่าสนใจที่ประกอบด้วยพื้นที่เล็กๆ ย่อยๆ เป็นแห่งๆ ที่อาจมีแหล่งแร่ได้ แหล่งแร่ทองแดงเนื้อดอกที่ชื่อ Panguna ตอนบน และ Bougainville ของเกาะ Papua New Guinea และแหล่งชื่อ La Coridad ใน Sonora ก็เกิดจากการสำรวจธรณีเคมีโดยวิธีนี้ก่อน จนต้องทำการเก็บตะกอนท้องน้ำ และเก็บดินควบคู่กับการสำรวจธรณีเคมี ทำให้เรารู้ว่าแหล่งนี้มีสภาพคล้ายกับแหล่งทองแดง Teledo ของฟิลิปปินส์ในแง่อายุ ชนิดหิน และการเกิดสายแร่ควอร์ต ส่วนแหล่ง La Coridad นั้น พบความผิดปกติของทองแดงเป็นระยะทาง 20 กม. จนไปถึงเหมืองเก่า 2 เหมือง จึงทำการสำรวจธรณีเคมี และธรณีฟิสิกส์ชนิด IP และทำแผนที่ธรณีวิทยาประกอบกับการศึกษาเปลือกหินที่ถูกชะ (leached capping) ด้วย

5..1.2 ค่าความผิดปกติ (Anomalies) ค่าปกติ (Background) และค่ารบกวน (Noise)

ทั้งการสำรวจโดยธรณีเคมีและธรณีฟิสิกส์มีหลายอย่างที่สามารถเปรียบเทียบกันได้ และมีหลายอย่างเหมือนกัน อย่างเช่นทั้งธรณีเคมีและธรณีฟิสิกส์ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งของแหล่งแร่ได้ แต่

สามารถบอกแนวทางหรือข้อมูลซึ่งสามารถนำมาตีความในแง่ของแหล่งแร่ที่น่าสงสัยได้ โดยอาศัยลักษณะทางธรณีวิทยาที่เอื้อให้เกิดแหล่งแร่ นั้น ค่าผิดปกติสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขที่แยกจากกลุ่มตัวเลขที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นค่าปกติได้ นอกจากนั้นยังสามารถตรวจจับค่าความแตกต่างนี้ได้ ในธรรมชาติ โดยที่ค่าผิดปกติสามารถกำหนดออกมาให้มีปริมาตรและรูปร่างที่แน่นอนได้ และเกิดขึ้นจนถึงความลึกหนึ่งที่ทราบค่าได้

ส่วนการรบกวนซึ่งมักพบบ่อยในการสำรวจโดยวิธีธรณีฟิสิกส์ก็พบได้จากการสำรวจธรณีเคมีเหมือนกัน ซึ่งออกมาในรูปของการเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์ตัวอย่าง หรือใช้สารเคมีที่ไม่ถูกต้อง หรือแม้แต่ที่เกิดจากธรรมชาติโดยตรง เช่น การเคลื่อนตัวของของไหลอย่างเป็นไปตามระบบ การฟุ้งและการกักกร่อนที่ทำให้เกิดค่าผิดปกติที่ไม่สำคัญ (non-significant anomaly) ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามปัญหาสถานะแวดล้อมเป็นพิษ (environmental pollution) ก็ถือว่าเป็นสิ่งผิดปกติและความน่ากลัวทางธรณีเคมีอีกได้เหมือนกัน การรบกวนทางพื้นดิน (terrane noise) ทั้งทางธรณีเคมีและทางธรณีฟิสิกส์เกิดจากทิศทางความลาดชันของพื้นดินซึ่งก่อให้เกิดผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้ายมวล (mass wasting) และการกักกร่อน และมีผลให้เกิดการรบกวนทางธรณีด้วย เช่น ทำให้เกิดการสะสมตัวของธาตุที่สำคัญ (key elements) เกินกว่าปกติได้

5.2 ขั้นตอนของการสำรวจธรณีเคมี (Sequence of Exploration Geochemistry)

ในการสำรวจธรณีเคมี ไม่ว่าที่ใด โดยวิธีใด หรือไม่ว่าจะเป็นขั้นบริเวณกว้างหรืออย่างละเอียด ขั้นตอนของการสำรวจที่สำคัญมีอยู่เป็นตอนดังต่อไปนี้

1. การเลือกวิธี วัตถุประสงค์จะหาความแม่นยำถูกต้อง ซึ่งการเลือกวิธีโดยขึ้นอยู่กับเงินลงทุน (cost) สภาพทางธรณีวิทยา ชนิดของงานภาคปฏิบัติที่เคยทำมาก่อน และที่สำคัญที่สุดคือขึ้นกับการสำรวจทาง (orientation survey) ซึ่งต้องอาศัยความเจนจัด (หรือความมีประสบการณ์) จากสภาพภูมิประเทศที่เหมือนกัน หรือจากลักษณะของแหล่งแร่ที่เคยทำมาแล้ว

2. โปรแกรมการเก็บตัวอย่างเบื้องต้นว่าจะเก็บอะไร (Check samples) และลึกเท่าใด (depth sample) เพื่อบอกขีดความมั่นใจ และหาตัวทำให้เกิดการรบกวน

3. วิธีการวิเคราะห์ ว่าทำให้องค์ปฏิบัติการหรือทำในสนามโดยตรง ซึ่งต้องมีการตรวจดูค่ามีกี่วิธี และวิธีใดดีที่สุด

4. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งมักนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลทางธรณีวิทยา และข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์เสมอ

5. ความมั่นใจในค่าผิดปกติที่ปรากฏ ซึ่งอาจต้องทำการเก็บตัวอย่างเพิ่มเติม และวิเคราะห์ตัวอย่างให้ละเอียดและมากขึ้นในพื้นที่ย่อยลงไปอีก จากโดยการเก็บตัวอย่างให้ถี่ขึ้น และวิเคราะห์ให้ถี่มากขึ้น

6. การกำหนดพื้นที่เป้าหมาย เพื่อเตรียมการเก็บตัวอย่างใหม่ หรือวิเคราะห์ให้ละเอียดใหม่

การเตรียมการเพื่อการเก็บตัวอย่างใหม่หรือวิเคราะห์เพิ่มเติมเป็นสิ่งสำคัญทางธรณีเคมี ซึ่งทั้งนี้ธรณีเคมีก็เหมือนธรณีฟิสิกส์ก็ต้องสำรวจเพื่อหาความผิดปกติที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการเกิดแหล่งแร่ (ore-deposit model) ให้ได้ ซึ่งรูปแบบอาจเปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิงก็ได้ ข้อมูลหลุมเจาะไม่ตรงกับรูปแบบที่คิดไว้จนต้องเปลี่ยนรูปแบบการเกิดหรือไม่ แหล่งดิบบุก-ทังสแตน-โมลิบดีนัมของเขากะปิเชน (Mt. Pleasant) ในรัฐ New Brunswick ประเทศแคนาดาค้นพบได้ต่อเมื่อนำข้อมูลธรณีฟิสิกส์ ข้อมูลธรณีเคมี และข้อมูลธรณีวิทยาประกอบกันขึ้นหลายครั้ง ในขั้นแรกของการสำรวจได้นำเอาการเก็บตะกอนท้องน้ำมาใช้ในเขตพื้นที่ 260 ตรกม และมีอยู่ 3 แห่งที่พบค่ามีปริมาณทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีสูงกว่าปกติ แต่พบชั้นดินตามผลทั้งตะกอนท้องน้ำและดินให้ข้อมูลว่ามีพื้นที่มีศักยภาพของธาตุเหล่านี้สูงเพียงพื้นที่เดียว และเมื่อถึงขั้นสำรวจธรณีเคมีโดยละเอียด โดยเก็บตัวอย่างดินในระยะห่าง 30x120 เมตร ยังผลให้ต้องเลือกทำการสำรวจธรณีฟิสิกส์ และเจาะสำรวจการสำรวจโดย EM ซึ่งก็ไม่พบตัวชี้บ่งแหล่งแร่แต่อย่างใด แต่การเจาะสำรวจกลับพบการกำเนิดเป็นแหล่งแร่อย่างอ่อนๆ (weak mineralization) บ้าง จนในที่สุดต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลใหม่ โดยมีการเก็บดินมาทำการวิเคราะห์หาแร่โมลิบดีนัม และดิบบุก จนถึงได้พบค่าความผิดปกติของธาตุดังกล่าวได้

เนื่องจากผลวิเคราะห์ยังไม่แจ่มชัดนัก จึงต้องมีการเจาะเพิ่มเติม แต่คราวนี้กลับให้ข้อมูลธรณีวิทยาใหม่ขึ้นจนนำไปสู่การหาข้อมูลธรณีเคมีเพิ่มเติม ดังนั้นคราวนี้จึงเก็บตัวอย่างดินในระยะ 6x30 ม ในพื้นที่ที่ไม่ให้ข้อมูลตามที่ต้องการประกอบกับการทำการวิเคราะห์เคมีตัวอย่างดินด้วยวิธีใหม่ทำให้ได้กลุ่มของค่าผิดปกติชนิดใหม่ขึ้น ซึ่งตอนนี้พอจะสัมพันธ์หรือเข้ากับข้อมูลทางธรณีวิทยาได้ดี และแล้วจึงเก็บตัวอย่างหินมาวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยเฉพาะบริเวณที่คิดว่าเป็นแนวผิดปกติ ผลปรากฏว่าพบแนวแร่ดิบบุกและก็สามารถกำหนดขอบเขตได้ว่าแนวแร่นี้เลื่อนไปเนื่องจากอิทธิพลของธารน้ำแข็งไปเท่าใด ถึงตอนนี้จึงได้ทำการเจาะหลุมอีกแถมเจาะอุโมงค์สำรวจเพื่อดูแนวแร่อย่างจริงๆ ซึ่งต่อมาอีก 11 ปีให้หลังนับตั้งแต่การสำรวจแบบบริเวณกว้าง(ที่พบค่าผิดปกติ 3 แห่ง) เหมืองจึงเกิดขึ้นมาและเป็นเหมืองทังสแตนโมลิบดีนัมที่มีกำลังผลิตถึง 2,000 ตันต่อปี

5.3 ลักษณะขั้นพื้นฐาน

ทั้งการสำรวจโดยธรณีเคมีและธรณีฟิสิกส์ศาสตร์ มีไว้เพื่อนำมาค้นหาแหล่งแร่ข้างได้ แต่บางครั้งก็อาจจะนำไปใช้กับการสำรวจธรณีวิทยาในพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมหรือชั้นดินหนาที่ได้อิทธิพลของชนิดหินต่อพืชพันธุ์ต่างๆ เป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว ดังนั้นบางคนจึงใช้พืชเป็นมาช่วยในการทำแผนที่ธรณีวิทยา เช่น ป่าไผ่เมืองกาญจน์มักจะพบเห็นบ่อยๆ ในบริเวณเขตหินปูนหรือหินควอร์ตไซต์(quartzite) หรือป่าไผ่เมืองเลยก็มักอยู่กับหินเชิร์ต(chert) ดินดิบบุกมักพบมากในบริเวณที่เป็นแหล่งดิบบุกทางใต้หรือต้นสังกะสีมักพบเห็นบ่อยๆ ในแถบภาคตะวันตกโดยเฉพาะที่เป็นแหล่งสังกะสี

ตัวอย่างของการทำแผนที่ธรณีเคมี แต่ไม่ใช่ทำเพื่อการสำรวจธรณีเคมีที่มีอยู่บ้าง เช่น ในอังกฤษ และสกอตแลนด์ แร่โลหะที่ล่อนจากตะกอนท้องน้ำ เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRF) เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างโลหะ เพื่อนำมาใช้หาชนิดหรือลำดับ (phase) ของหินแกรนิตได้ นอกจากนั้นยังนำมาหาชนิดของหินแปรและพื้นที่ที่มีหินภูเขาไฟ และหินตะกอนที่อยู่บ้างได้

วงปฐมผล (primary halo) เช่นอย่างของแหล่งคีนุก Altenbery ของประเทศเยอรมันตะวันออก และสายแร่เงินแห่งเมือง Cobalt รัฐ Ontari ประเทศแคนาดา ซึ่งมักให้ค่าความผิดปกติของธาตุบางตัวสูงเมื่อเข้ามาใกล้แหล่งแร่ นั้น แต่ธาตุที่สำคัญบางตัวก็อาจมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้แหล่งก็ได้ เช่นเมื่อเข้าใกล้แหล่งซัลไฟด์ภูเขาไฟ (volcanogenic sulfide) ซึ่งดูได้จากค่า Fe และ Mn ที่สูงขึ้น กลับปรากฏว่าค่าของ Na และ Ca ลดต่ำลง หรือกรณีของหินควอร์ตไซต์มีเฟลสปาร์ (feldspathic quartzite) ของแหล่งยูเรเนียม แลบทะเลสาบอีเลียค (Elliot Lake) ในรัฐ Ontaro กลับพบว่าค่า Na ลดลงเมื่อเข้าใกล้แหล่ง

วงแร่ที่สัมพันธ์กับการเกิดแหล่งแร่แบบสายเกิดทีหลัง (epigenetic) มักเรียกววงแพร่กระจาย (diffusion aureoles หรือ enveloping halos) ซึ่งถ้าเกิดกับหินข้างเคียงพวกที่ติดกับสายแร่ (wall rock) มักเรียกววงรั่วไหล (leakage halos) ถ้ามีการรั่วไหลขึ้นไปยังหินที่ไม่มีแร่ (barren rock) ตัวการทางธรณีวิทยาที่ควบคุมชนิดและความมากน้อยของค่าผิดปกติในหินข้างเคียง (wall rock) และของที่รั่วไหลออกมาจัดว่าเป็นชนิดเดียวกับที่ควบคุมให้เกิดสารละลายน้ำร้อน (hydrothermal solution) รอบๆแหล่งแร่ ตัวการที่สำคัญได้แก่ 1) การเคลื่อนตัวของธาตุที่เกิดร่วม 2) แนวรอยแตกความไหลซึมของหิน (rock permeability) และ 3) การเข้าทำปฏิกิริยา

ในบางครั้งค่าความเข้ม (strength) ของการเกิดค่าผิดปกติทางเคมีอาจแดงได้ด้วยระดับธรณีเคมี (geochemical relief) ซึ่งเป็นระดับที่ค่าผิดปกติสูงกว่าส่วนราบเรียบซึ่งเป็นค่าปกติหรือสูงกว่าค่าสูงสุดของค่าปกติซึ่งเรียกค่าธรณีประตู่ (threshold) เมื่อถึงขั้นตีความสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาก็คือตำแหน่งทั้งของค่าผิดปกติและความสัมพันธ์กับธรณีวิทยาบริเวณนั้น และจุดที่ต้องคำนึงถึงก็คือตำแหน่งของค่าผิดปกติในดิน (soil anomalies) นั้นเลื่อนไปจากจุดที่เกิดแหล่งแร่หรือที่เกิดเป็นแร่ นั้นๆจริงหรือไม่ และครั้งที่ค่าผิดปกติเกิดอยู่บนเชิงเขาหรือกลางเขาที่มักสัมพันธ์กับการคืบคลาน (creep) ของชั้นดินอยู่เสมอ โดยทั่วไปบริเวณที่มักเกิดค่าผิดปกติในดินและในหินตรงกันก็คือ บริเวณที่พื้นที่ๆทำการเก็บตัวอย่างนั้นมีสภาพภูมิประเทศที่ราบเรียบไม่มีความลาดชัน หรือก็มีน้อยมาก หรือเกิดเมื่อสายแร่วางตัวในแนวตั้ง (vertical dipping body) อนึ่งสำหรับเรื่องตัวอย่างน้ำ ค่าผิดปกติจากน้ำ (hydromorphic anomaly) นั้นอาจเป็นผลมาจากการตกตะกอนของสารใหม่มาซึ่งที่ต่างๆ เมื่อน้ำได้ดินไหลตัดภูมิประเทศ (เช่นในรูปน้ำซับหรือน้ำพุ) ในบริเวณที่มีแหล่งแร่หรือตามจุดที่เปลี่ยนความลาดชัน หรือตามฝั่งแม่น้ำลำคลองหรือหนอง

ในทางธรณีเคมี มีค่าอีก 2 ค่าที่เราควรรู้จัก คือ ธาตุเป้าหมาย (target elements) และธาตุสื่อ (หรือธาตุแม่สื่อ) (pathfinder elements) (ดูตาราง 5.1.5) ธาตุเป้าหมายจัดได้ว่าเป็นธาตุตัวชี้บ่งโดยตรง ซึ่งก็คือ

ธาตุหลักหรือธาตุสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักของสินแร่ที่เราสนใจอยู่ในแหล่งแร่ นั้น เช่น ทองในสายแร่ควอร์ตหรือทองแดงในแร่ Chalcopyrite ในหินเนื้อออก ส่วนธาตุแม่สื่อมักเป็นธาตุที่มักพบเสมอปะปนอยู่ในแหล่งแร่ นั้น ซึ่งมักมีมากอีกทั้งยังตรวจวัดได้ดีกว่าหรือง่ายกว่า มีการแพร่กระจายตัวได้ดีกว่า ธาตุเป้าหมายที่เราสนใจที่ต้องเรียกว่าแม่สื่อเพราะบางครั้งก็สื่อไปหาแหล่งแร่ ได้สำเร็จ บางครั้งก็ไม่ได้ เพียงพบแต่มีปริมาณไม่มาก(สื่อไม่สำเร็จ) ดังนั้นการจะเลือกธาตุใดเป็นธาตุแม่สื่อจึงขึ้นอยู่กับว่ารูปแบบการเกิดแหล่งแร่บริเวณนั้นเป็นเช่นไร ตัวอย่างเช่นธาตุAs(สารหนู)อาจไม่ใช่ธาตุแม่สื่อที่สำคัญที่สุดสำหรับแหล่งทองแดงทุกแหล่ง แต่มักเป็นแม่สื่อสำคัญให้กับแหล่งแร่ทองแดงที่เกิดแบบซัลไฟด์เนื้อหนา (massive sulfide) ตาราง 5.3.1 แสดงถึงชนิดของแหล่งแร่ ธาตุเป้าหมาย และธาตุแม่สื่อที่สำคัญๆ

อัตราส่วนของไอโซโทป เสถียร (stable isotope ratio) มักใช้บ่อยในการสำรวจธรณีเคมีแบบบริเวณกว้าง เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าไอโซโทป C และ O และอาจสะท้อนให้เห็นถึงจุดที่เราเข้าไปใกล้แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีชนิดที่เกิดแบบ Mississippi แล้วหรือยัง นอกจากนั้นไอโซโทปของ Pb S และ Sr มักแสดงลักษณะเป็นวงหรือแนวรอบๆแหล่งแร่ได้

5.4 วิธีการสำรวจและการนำไปใช้ (Methods & Application)

ตารางที่ 5.4.1 แสดงถึงวิธีการสำรวจทางธรณีเคมีที่สำคัญๆ จนอาจเรียกได้เป็นกฎตายตัวได้ว่าการสำรวจแบบบริเวณกว้างนั้นมักทำโดยการสำรวจตะกอนท้องน้ำ(stream-sediment survey) แต่ถ้าเป็นการสำรวจแบบละเอียด(detailed survey)มักใช้วิธีการเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์(soil survey) ส่วนการเก็บตัวอย่างหิน Clithogeochemistry หรือ rock geochemistry) มักพบมากในภาคตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยนี้ทำกันมากก็คือบริเวณแถบจังหวัดเลย ส่วนการเก็บตัวอย่างน้ำ พืช หรือก๊าซมักใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น

5.5 การเก็บตัวอย่างหิน (Rock sampling)

ข้อดีของการเก็บตัวอย่างหิน วิธีการนี้ถือว่ามีความยืดหยุ่นมากที่สุด เราสามารถพิจารณาถึงจุดที่ทำการเก็บตัวอย่างได้ถ้าเป็นบริเวณที่หินโผล่มาก โดยที่เราสามารถเก็บตัวอย่างหินได้จากหลายแห่งไม่ว่าจะเป็นหินโผล่จากเหมืองหรือจากหลุมเจาะก็ได้ แต่ต้องมั่นใจว่าหินที่เราเก็บนั้น 1) ทำความสะอาดอย่างดี 2) ต่อยเปลือกนอกที่อาจผุออกไปจนหมด 3) มีขนาดของตัวอย่างที่เก็บแปรผันไปตามขนาดเม็ดแร่ในหิน กล่าวคือถ้ามีเนื้อละเอียด(fine-grained texture)ขนาดที่เก็บประมาณ 0.5 กก แต่ถ้าเนื้อหยาบ(coarse-grained texture)หรือที่มีผลึกตก(porphyritic texture)การเก็บขนาด 2 กก ซึ่งมักหนักกว่าที่เก็บเป็นตัวอย่างดินหรือตะกอนท้องน้ำ

ในกรณีพิเศษ อาจต้องเก็บเศษหิน เช่นตัว gossan หรือแร่เกรอะกรังมาเพื่อวิเคราะห์หาธาตุ บางตัวเพื่อเป็นแนวทางในการสำรวจ หรือบางครั้งตัวอย่างที่มีคราบเหล็กเหลือง(limonite filling)อยู่ด้วย(โดยการแทรกตัวหรือฉาบอยู่) ซึ่งเก็บมาจากแนวรอยแตกในหินเอามาชะด้วยกรดออกซาลิก(oxalic) เพื่อ

ตาราง 5.3.1 ธาตุแม่สื่อ ธาตุเป้าหมาย และชนิดแหล่งแร่

ตาราง 5.4.1 วิธีการที่สำคัญในการสำรวจธรณีเคมี

แยกเอาเหล็กกับแมงกานีสออกให้สะอาดออกมา และตรวจหาธาตุที่ถูกดูดซับ(adsorbed elements)ไว้ในหิน เช่นที่ทำในการสำรวจธรณีเคมีแถบบริเวณเหมือง Silver City ในรัฐ New Mexico ประเทศอเมริกา (ดู Watts et al., 1983)

การสำรวจธรณีเคมีคัล (Lithogeochemical exploration) มีประโยชน์กว่าวิธีการสำรวจกว่าวิธีอื่นเพราะข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สัมพันธ์โดยตรงกับวงปฐมผล(primary halo)ในการสำรวจชั้นละเอียด (ดูรูป 5.5.1) และกับปริมณฑลธรณีเคมี (geochemical province) สำหรับการสำรวจขั้นต้น (reconnaissance survey) เวลาเก็บตัวอย่างจำเป็นต้องเขียนข้อมูลบางอย่าง นอกเหนือจากชื่อหินและตำแหน่งที่ต้องลงไปซึ่งได้แก่ ชนิดหิน ลักษณะเนื้อหิน โครงสร้างการเกิดชั้นหินหรือการเปลี่ยนแปลง (alteration) อีกอย่างคือ ตัวอย่างหินไม่ถูกรบกวนหรือปนเปื้อน(contaminated) จากสารอื่นภายนอก (extraneous material) เหมือนอย่างดินตะกอนท้องน้ำ ตัวอย่างหิน(ถ้าเก็บอย่างมิดชิด) จะเก็บไว้ได้นานโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีในภายหลัง แต่ไม่ใช่ว่าหินจะไม่ถูกรบกวนเลย เพียงแต่การกวนจะเป็นแบบสัมผัสเมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบอื่น ด้วยเหตุนี้ Fenckoon และคณะ (1981) จึงได้ทำการวิเคราะห์กากที่เหลือ (Insoluble residues) จากการกำจัด(digest)หินปูน ปรากฏว่าทำให้ได้สารใหม่ที่มีปริมาณโลหะเพิ่มมากกว่าเดิม ด้วยวิธีนี้เราสามารถลากแนวเกิดแร่(meneralization trend)ของบริเวณแหล่งตะกั่วในรัฐ Missouri บริเวณตะวันออกเฉียงใต้ได้

ข้อจำกัดของการเก็บตัวอย่างหิน คือ 1)ตำแหน่งที่เก็บมีน้อยถ้าหินโผล่น้อย แม้แต่บริเวณหินโผล่มีมากบางครั้งก็โผล่ให้เห็นในบริเวณที่เราไม่ต้องการเก็บทำให้ยากแก่การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสินแร่กับหินข้างเคียง (รูป 5.5.2) ได้ 2)ค่าตัวอย่างหินที่วิเคราะห์ได้เป็นตัวแทนเฉพาะตำแหน่งที่เก็บเท่านั้น ดังนั้นการเก็บตัวอย่างโดยวิธีนี้จึงไม่เปิดกว้างเท่าใดนัก เราจึงไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของบริเวณที่เราสนใจเท่าใด เนื่องจากตัวอย่างหินเป็นตัวแทนเฉพาะจุดที่เก็บดังนั้นจึงผิดกับตะกอนท้องน้ำที่สามารถบ่งบอกถึงสภาพที่เกิดได้กว้างกว่าเพราะครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่ รองรับน้ำ ปัญหาอีกอย่างก็คือ 3)จุดที่เก็บตัวอย่างมีค่าสูงเฉพาะจุดตัวอย่างที่เก็บ และจะไม่ใช่ตัวแทนของวงปฐมผลเลย ดังนั้นจึงต้องเก็บ 2 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่มีแร่กับที่มีแร่อย่างน้อยหรือไม่มีเลย อีกประการหนึ่งก็คือ 4) ตัวอย่างสามารถตรวจสอบได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ผิดกับน้ำหรือตะกอนท้องน้ำที่ไม่จำเป็นต้องบดแล้วจึงมาวิเคราะห์ เพราะสามารถทำในภาคสนามได้เลย เช่น วิธีเทียบสี(colourimetry) ซึ่งสามารถบอก(แม้ว่าจะไม่ละเอียด)ได้คร่าวๆได้ทันทีว่ามีหรือไม่มี หรือน่าสนใจหรือไม่ น่าได้ในทันที

อนึ่ง สำหรับปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการสำรวจแบบปฐมนิเทศ ในการเตรียมการเก็บตัวอย่างหินให้ได้ดี ได้แสดงไว้ในตาราง 5.5.1

รูป 5.5.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแร่ธาตุต่างๆที่วิเคราะห์ไปตามความลึกของแท่งหิน(cores)ในหลุมเจาะ
และตามชนิดการเปลี่ยนสภาพแหล่งแร่ทองแดงเนื้อคอก Kalamazoo ในรัฐมิชิแกน อเมริกา
(Chaffee, 1976)

รูป 5.5.2 ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างมวลลิ้นแร่ซัลไฟด์ ต่อการกำเนิดแร่เหล็ก

ตาราง 5.5.1 ลำดับรายการปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการสำรวจแบบปฐมนิเทศ ในการเตรียมการเก็บตัวอย่างหิน

5.6 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling)

การเก็บตัวอย่างโดยวิธีนี้มีประโยชน์มาก โดยเฉพาะในพื้นที่ที่หินโผล่น้อย พื้นที่เป้าหมายแผ่กว้างออกไปเป็นวงหรือคล้ายพัด จากจุดที่มีแร่เพียงชนิดเดียวในหินที่อยู่ข้างใต้เหมือนเวลาปาเป้า ถ้าเป้าใหญ่โอกาสปาถูกก็มาก ผลเสียของการเก็บดินเมื่อเทียบกับการเก็บหินก็ก็ต้องพิจารณาถึงค่ารบกวนที่สูงผิดปกติที่มักเกิดบ่อยครั้ง ตลอดจนประวัติศาสตร์การเกิดของดินด้วย ดังนั้นความจำเป็นในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้นในการเก็บตัวอย่างดินเป็นเรื่องสำคัญ (ดูตาราง 5.5.2) และข้อพิจารณาในการเขียนฉบับบันทึก (ดูรูป 5.5.3) ก็มีความสำคัญเช่นกัน

ขั้นแรกเลยเราต้องรู้ว่า ดินนั้นเป็นดินอะไร เป็นดินเคลื่อนย้ายหรือดินอยู่ที่ (transported or residual soils) เป็นดินสมบูรณ์หรือดินเกิดใหม่ (mature or juvenite) มีชั้นหรือไม่มี (zonal or azonal) ต้องพิจารณาถึงตัวควบคุมดินด้วยภูมิอากาศ ภูมิประเทศ เวลา ชนิดหิน และการกระทำของสิ่งมีชีวิต ซึ่งทำให้เราเข้าใจว่าสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดินสีลาแลง (lateritic soil) ไม่สามารถปรากฏให้เห็นในเมืองหนาว และสามารถเกิดในสภาพพอเหมาะหนึ่งๆเท่านั้น หรืออย่างค่าผิดปกติเป็นแนวตรง อาจไม่ใช่เกิดสัมพันธ์กับสายแร่เลย แต่อาจเกิดจากขอบของชั้นดินเก่าที่มีธาตุโลหะมากมาย แล้วต่อมาถูกตัดด้วยดินชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นมาก็ได้ ดังนั้นการเลือกวิธีการเก็บดินและชนิดของตัวอย่างจึงเป็นเรื่องสำคัญในการกำหนดค่าปกติและค่าผิดปกติ (ดูรูป 5.6.1) รวมไปถึงการแสดงผลด้วย (รูป 5.6.2)

รูป 5.6.3 ถึง 5.6.5 แสดงถึงลักษณะของชั้นดินชนิดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้โดยทั่วไปทางธรณีเคมี เรามักเก็บตัวอย่างดินจากชั้น B (ดูรูป 5.6.4) ซึ่งเป็นชั้นที่ประกอบด้วยดินเหนียว (clay) เหล็ก ออกไซด์ และโลหะสะสมตัวอยู่มากที่สุด จะเห็นได้ว่าชั้นดินบางชนิด เช่น ดินชนิดเชอร์โนเซม (Chernozem) และดินแคลซิโมर्फิก (calcimorphic soil) ไม่ปรากฏว่ามีชั้น B แต่เราก็สามารถใช้ชั้นอื่นๆ ได้แทน แต่ต้องเป็นชั้นดินชั้นเดียวกันโดยตลอดในพื้นที่สำรวจ มิเช่นนั้นอาจเกิดมีปัญหาได้ (ดูรูป 5.6.7 และ 5.6.8) ยังผลให้ได้ค่าผิดปกติไม่จริง (false anomaly) ขึ้นได้ แต่ในบางครั้งเราอาจต้องเก็บทุกชั้น โดยเฉพาะตำแหน่งที่สำคัญ เช่น ตอนใกล้ถึงจุดที่คาดคิดว่าน่าจะมีแหล่งแร่ปรากฏอยู่ เพื่อที่จะดูว่าเกิดค่าผิดปกติจริง หรือคงที่เมื่อเปลี่ยนจากชั้น B ไปยัง C ถ้าหากว่าอยู่ห่างไกลจากแหล่งแร่โดยมากชั้น B มักจะมีธาตุโลหะอยู่มากที่สุด แต่ในบริเวณเขตตอบอุ่นจะพบว่าทองนั้นมักพบปรากฏอยู่ในชั้น A ซึ่งมีอิทธิพล และพบว่าชั้นดินในป่ามักเป็นตัวกักเอาธาตุที่เคลื่อนไหวได้ (ทางเคมี) ซึ่งจะสะสมตัวอยู่ในหินและดินโดยดั้นได้ การเก็บตัวอย่างจากชั้นดินหลายชั้นอาจนำไปสู่แหล่งแร่ได้ (รูป 5.6.9)

ดินพัดพา (transported soil) เช่น จากทะเลทรายหรือธารน้ำแข็งถือว่าเป็นตัวการทางธาตุโลหะที่เลวในแง่การสำรวจธรณีเคมี ค่าผิดปกติจากน้ำกลับสามารถบ่งบอกถึงสถานะแวดล้อมที่ลึกกว่าได้ดี และรากพืชอาจทำให้ธาตุโลหะเพิ่มมากขึ้นจากหินไปสู่ดินได้ ดังนั้นปัจจัยควบคุมต่างๆ รวมถึงข้อมูลบางอย่างที่จำเป็นต้องปรากฏในแผนที่ธรณีเคมีด้วย (ดูตาราง 5.6.1) แต่โดยทั่วไปค่าที่วัดได้ระหว่างใน

หินและในดินมักไม่สัมพันธ์กันนัก การใช้ประโยชน์จากการเก็บตัวอย่างดินในแง่ของการสำรวจธรณี
เคมี

ตาราง 5.5.2 ปัจจัยหลักที่จำเป็นต้องหาในช่วงสำรวจแบบปฐมนิเทศ์ของการเก็บตัวอย่างดิน

รูป 5.5.3 ตัวอย่างการเขียนปฐมนิเทศ์ในหลุมสำรวจ

รูป 5.6.1 การกระจายความถี่ของจำนวนค่าปกติและค่าผิดปกติในการเก็บตัวอย่างทางธรณีเคมีที่แตกต่างกัน 3 แบบ (อาจเป็นวิธีเก็บต่างกัน หรือชนิดตัวอย่างต่างกันก็ได้) วิธีแรก (a) ได้ค่าผิดปกติสูงมากที่สุด แต่ค่าปกติก็สูงมากเช่นกัน วิธีที่สอง (b) ได้ค่าผิดปกติห่างจากค่าปกติมาก แต่มีจำนวนค่าปกติและผิดปกติเหลื่อมล้ำกันมากด้วย ส่วนวิธีที่สาม (c) จัดว่าดีที่สุด เพราะค่าผิดปกติแยกจากค่าปกติชัดเจน อย่างไรก็ตามเราสามารถเลือกหาวิธีที่เราควรใช้ได้จากสูตร (t) ถ้าเราให้ X_a และ X_b เป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่แสดงค่าผิดปกติและค่าปกติ n_a และ n_b เป็นจำนวนตัวอย่างของกลุ่มผิดปกติและกลุ่มปกติ ส่วน S_p เป็นค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยซึ่งเราอาจหาค่านี้ได้จากสูตรโดยให้ S_a และ S_b เป็นค่าเบี่ยงเบนของกลุ่มตัวอย่างที่แสดงค่าผิดปกติและค่าปกติ

รูป 5.6.2 การแสดงผลวิเคราะห์ตัวอย่างทางธรณีเคมีในแบบต่างๆ ไปตามระยะทาง ณ ขนาดตะกอนดิน - 80 เมช ในมาตราส่วนต่างๆ ทางซ้ายเป็นมาตราส่วนเลขคณิต ทางขวาเป็นมาตราส่วน log ของธาตุตะกั่ว (Pb) และพลวง (Sb) (Hawkes, 1954)

รูป 5.6.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชั้นดินในระดับความลึกต่างๆ ในรูปเป็นดิน
แบบ podzol (Hardon, 1936)

รูป 5.6.4 การจำแนกชั้นดินอย่างง่าย ออกเป็น 3 ชั้น คือ A B และ C

รูป 5.6.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุโลหะไปตามความลึกของชั้นดินซึ่งเป็นดินชนิด latosol ใน
แซมเบีย และพบว่าปริมาณแอลคาไลน์เพิ่มตามความลึก และ Co และ Ni ไม่เปลี่ยนแปลง ขนาด
ตะกอนดินที่ใช้วิเคราะห์ – 80 เมช ในรูปดินชั้น B ให้ค่าความเข้มข้นธาตุโลหะได้ดีมากเมื่อเทียบกับชั้นอื่น

รูป 5.6.7 ตัวอย่างรูปแบบการเกิดค่าผิดปกติไม่จริง (false anomaly) เนื่องจากการลำเอียงจากการวิเคราะห์ข้อมูล(analytical bias) จึงดูเหมือนได้แนวค่าผิดปกติขึ้นได้

รูป 5.6.8 ตัวอย่างรูปแบบการเกิดค่าผิดปกติไม่จริง อันเนื่องจากการเก็บตัวอย่างคนจากคนละชั้น ผลทำให้การตีความหมายผิดพลาด

รูป 5.6.9 แผนภาพแสดงการเก็บตัวอย่างชั้นดินหลายชั้นที่ช่วยให้เราหาแหล่งแร่ได้ ในสภาพภูมิประเทศต่างกัน (บน) เมื่อพื้นดินมีความเอียงเท (ล่าง) เมื่อพื้นดินไม่มีความลาดเอียง

ตาราง 5.6.1 การตรวจรายการข้อมูลที่ควรแสดงในแผนที่ธรณีเคมีจากการสำรวจดิน

จึงใช้ได้ผลมากในบริเวณแถบเทือกเขา เช่น เทือกเขาแอปพาเลเชียน (Appalachian) ในแคนาดาเป็นแห่งแรก ซึ่งเรียกว่าการเก็บแบบนิวส์บริสวิค("New-Brunswick Style")ซึ่งเป็นเพราะบริเวณนั้นดินไม่ถูกรบกวนด้วยธารน้ำแข็ง แต่ใช้ไม่ได้ผลเลยในบริเวณที่เป็นดินน้ำแข็งพามา อย่างไรก็ตามมีเรื่องที่ต้องคำนึงถึงมากมายในการเก็บตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมพร้อมก่อนการสำรวจในสนามจริง

การเก็บตัวอย่างดินมี 2 แบบ คือ 1)แบบสี่เหลี่ยม(grid pattern) และ2)แบบสันเขา(ridge and spur pattern) รายละเอียดเกี่ยวกับการเก็บตัวอย่างดินได้แสดงไว้ในรูป 5.6.10 ถึง 5.6.13 นอกจากนั้นยังมีการเก็บดินอีกแบบเรียกว่าการเก็บตัวอย่างดินเชิงเขา (ดูรูป 5.6.14)

เวลาเราขุดดินขึ้นมาอาจทำได้โดยใช้สว่านเจาะ(hand auger, ดูรูป 5.6.15 และ 5.6.16)หรือใช้เลียม ชะแลง และพลั่วขุด เมื่อได้ตัวอย่างจึงนำมาอบแห้งแล้วและบีก่อนเบาๆ แล้วจึงนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด -80 เมช (mesh หรือประมาณ 0.2 มม) แล้วจึงนำส่วนที่ตกจากตะแกรง (fine-fraction) ประมาณ 20 ถึง 50 กรัมมาทำการวิเคราะห์ โดยทั่วไปในสภาพปกติมักทำการเก็บตัวอย่างดินทุกๆระยะ 200 ถึง 500 เมตร สำหรับการสำรวจกึ่งรายละเอียด (semi-detailed survey) แต่บางแห่งเมื่อถึงขั้นสำรวจอย่างละเอียด อาจลงไปถึง 100 เมตร หรือ 50 เมตรก็มี เช่น การเก็บตัวอย่างดินสำรวจหาแหล่งแร่ทองคำที่จังหวัดเลย เป็นต้น หรือบางแห่งอาจลงไปถึง 15 เมตร ถ้าเป็นการสำรวจละเอียดมาก และเจาะแหล่งแร่แล้ว

รูป 5.6.17 และ 5.6.18 แสดงถึงการเสนอข้อมูลด้วยผลวิเคราะห์ดินทางธรณีเคมีในรูปแผนที่ รูป 5.6.17 แสดงการกระจายตัวพหุคูณของธาตุทองแดงในดินในหินอัคนี และรูป 5.6.15 แสดงถึงอัตราส่วนของสังกะสีต่อแคลเซียม และบริเวณที่มีอัตราส่วนต่ำกว่าปกติ ซึ่งทั้งสองแบบอาจนำไปสู่แหล่งแร่ที่สนใจได้

5.7 การเก็บตะกอนท้องน้ำ (Stream - sediment Sampling)

อาจเรียกได้ว่าตะกอนท้องน้ำเป็นตะกอนที่ได้จากการผสมของสารหลายอย่าง ตั้งแต่ต้นน้ำไปยังจุดที่เก็บ ดังนั้นตะกอนท้องน้ำจึงประกอบด้วยเศษแร่ที่ได้จากการผุกร่อนของหินหรือดิน หรือจากการไหลของน้ำได้ดินก็ได้ โดยมีตัวการพัดพา (medium of transportation) ที่สำคัญก็คือ น้ำ ธาตุโลหะอาจอยู่ในรูปของเม็ดแร่ หรือปะปนติดอยู่กับดิน หรือเคลือบอยู่ตามเศษหิน หรือเศษแร่ก็ได้ โดยทั่วไปค่าผิดปกติของตะกอนท้องน้ำ(มักแสดงด้วยสัญลักษณ์ในรูป 5.7.1)ลดลงเรื่อยๆเมื่อถึงปลายทางในระยะที่ไม่ไกลจากแหล่งเท่าใด(ดูรูป 5.7.3 ถึง 5.7.5) โดยมากไม่เกิน 5-6 กม (ก็ไกลพอควรแล้ว) มีที่ยกเว้นบ้างได้แก่ที่ลาการิแดด (La Caridad) ซึ่งปรากฏว่าตะกอนท้องน้ำไปได้ไกลจากแหล่งถึง 20 กม ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้การเก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำในการสำรวจธรณีเคมีขั้นต้น(reconnaissance survey)บางแห่งเช่น ที่การสำรวจตะกอนท้องน้ำที่อำเภอปาย จังหวัดเชียงใหม่การเก็บตัวอย่างเพียงตัวอย่างเดียวกลับเป็น

ตัวแทนให้พื้นที่กว้างกว่า 50 ตรกมได้ แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปมักเป็นตัวแทนได้เพียง 7-8 ตรกม เท่านั้น

รูป 5.6.10 การเก็บตัวอย่างดินแบบสี่เหลี่ยมจตุรัสเมื่อไม่สามารถคาดการณ์การวางตัวแหล่งแร่เป้าหมายได้

รูป 5.6.11 การเก็บตัวอย่างดินแบบสี่เหลี่ยมจตุรัสเพื่อใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารหนู (As) ที่ไร้รูปแบบการกระจายตัว ในดินเกิดกับที่เหนือบริเวณแหล่งแร่ทองคำ Sierra Leone อเมริกา ขนาดตะกอนตัวอย่างดินประมาณ – 80 เมช (Mather, 1959)

รูป 5.6.12 การเก็บตัวอย่างดินแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ Petolahti ฟินแลนด์ (Kauranne, 1959)

รูป 5.6.13 การเก็บตัวอย่างดินแบบบนสันเขา (ridge- and -spur pattern) เกาะเซบู ฟิลิปปินส์
ขนาดตะกอน – 80 เมช

รูป 5.6.14 การเก็บตัวอย่างดินตาดั้งเดิม (base-of -slope sampling) แสดงปริมาณโลหะหนัก
เมือง Lemieux รัฐควิเบค แคนาดา (Riddell, 1954)

รูป 5.6.15 ส่วนเก็บตัวอย่าง (a) สำหรับตัวอย่างดิน (b) สำหรับตัวอย่างถ่าน

รูป 5.6.16 การเก็บตัวอย่างถ่านฟอสฟอรัส บริเวณของบึงที่ปกคลุมด้วยหิมะ (Larson, 1976)

รูป 5.6.17 แผนที่ธรณีเคมีแสดงการกระจายตัวของธาตุทองแดงในดินขนาด – 150 เมช เหนือบริเวณหินคาร์บอเนต Butiriku ตะวันออกเฉียงใต้ของอุกานดา (Reedman, 1974)

รูป 5.6.18 แผนที่ธรณีเคมีแสดงอัตราส่วนระหว่าง Zn กับ Cd ในดินบริเวณ Coeur d' Alene รัฐไอดาโฮ อเมริกา (Gott & Motbol, 1972)

รูป 5.7.1 สัญลักษณ์ที่มักนิยมใช้แสดงค่าความเข้มข้นที่เพิ่มจากด้านซ้ายไปขวาของตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่เก็บ
โดยวิธีธรณีเคมี

รูป 5.7.2 แผนที่ธรณีเคมีแสดงค่าของโลหะหนักจากตะกอนท้องน้ำซึ่งแบ่งออกเป็นช่วงๆ – 80 เมช
(Hawkes และคณะ, 1960)

รูป 5.7.3 แผนที่ธรณีเคมีแสดงค่าความเข้มข้นของโมลิบดีนัมจากน้ำในลำธารสาขา(หน่วยเป็น ppb หรือ
หนึ่งต่อพันล้าน) แต่ละโซนแสดงพื้นที่ย่อยของสันปันน้ำ และช่วงค่าความเข้มข้นแสดงเป็นช่วงใน
รูปกราฟ (Dulukhanavo, 1957)

รูป 5.7.4 แผนที่ธรณีเคมีบริเวณกว้างแสดงปริมาณโมลิบดีนัมจากตะกอนที่องน้ำที่ขนาด – 80 เมช แม่น้ำ Sierra Leone อเมริกา (Mather, 1959) พบบริเวณที่มีแหล่งแร่โมลิบดีนัม (พื้นที่ในวงเทา) ตัวเลขมีหน่วยเป็น ppm (หรือหนึ่งในล้านส่วน)

รูป 5.7.5 แผนที่ธรณีเคมีบริเวณกว้างแสดงปริมาณทองแดงจากตะกอนฝิ่งแม่น้ำ (หน่วย ppm) และปริมาณธาตุโลหะหนัก ตัวเลขในวงเล็บ (หน่วย ppb) แถบบริเวณ Musenga & Muntimpa ประเทศแซมเบีย (Govett, 1958)

สำหรับการสำรวจธรณีเคมีชั้นละอียดอาจใช้วิธีเก็บตะกอนท้องน้ำเหมือนกันแต่เป็นทุกๆ 50 หรือ 100 ม ตามลำธารในการเก็บแบบนี้ในทางทฤษฎีค่าของธาตุโลหะควรเพิ่มมากขึ้นไปทางต้นน้ำ และหายไปที่ท้ายน้ำเมื่อเลยหรือเหนือจากตำแหน่งที่ให้แร่ แต่ก็ไม่ใช่ทุกครั้งเสมอไปจนทำให้นักธรณีวิทยาเกิดความปวดหัวและอาจอารมณ์เสียได้เพราะมีตัวการชนิดอื่นเข้ามาเกี่ยว เช่นการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดแร่หรือชนิดแร่ ตลอดจนสภาพของภูมิประเทศ(เช่นจุดเปลี่ยนความลาดชัน) ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดปกติปลอม(false anomalies) ขึ้นได้ (ดูรูป 5.6.7 และ 5.6.8 ในหัวข้อก่อนหน้านี้)

อย่างไรก็ตามอาจถือได้ว่าในการเก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำนั้นง่ายต่อการเก็บและการเตรียมตัวอย่างก็ง่ายกว่า แต่ถึงกระนั้นการรบกวนหรือปนเปื้อนโดยมนุษย์(cultural noise) มักก่อให้เกิดปัญหาได้ง่ายเพราะขณะที่มนุษย์ที่ย่อมไปสิ้นสุดที่ลำน้ำหรือเพราะอารยธรรมของมนุษย์ส่วนใหญ่เริ่มต้นที่ริมน้ำ โดยทั่วไปเราเก็บตัวอย่างประมาณ 50 ถึง 100 กรัม แล้วผ่านตะแกรงขนาด -80 เมช ตัวอย่างส่วนใหญ่จากลำดับลำธารสาขาต่างๆ (เช่นสาขาลำดับที่ 1 หรือสาขาลำดับที่ 2)ที่ยังทำงานอยู่หรือไม่ก็มาจากบ่อหรือบึงหรือดินตะกอนใต้ก้อนหินตรงท้องน้ำ และเราไม่เก็บตัวอย่างตะกอนที่มีอินทรีย์วัตถุเพราะอาจมีปริมาณธาตุโลหะอยู่มาก ในกรณีของการสำรวจขั้นพื้นฐานเรามักหลีกเลี่ยงตะกอนฝั่งแม่น้ำ (stream banks) เสียก่อน แต่พอถึงขั้นสำรวจที่รายละเอียด (semi-detailed survey) หรือขั้นติดตามผล (follow-up survey) เราจึงเก็บตัวอย่างฝั่งแม่น้ำนี้เพื่อหาต้นตอหรือจุดกำเนิดของค่าผิดปกติ ตะกอนฝั่งแม่น้ำเป็นตะกอนเก่าเกิดจากการสะสมตัวของวัสดุที่น้ำพัดพามา และที่มีการเกิดซับซ้อนมักถูกรบกวนด้วยการเลื่อนไหลลงมาของวัสดุเดิม และมักแสดงค่าผิดปกติจากการกระทำของน้ำ ดังนั้นบ่อยครั้งที่เราไม่สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างที่เก็บกับลำธารเดิมได้

สันปันน้ำ (drainage divide) ที่ปรากฏในปัจจุบันระหว่างหุบเขา 2 หุบที่หันหน้าเข้าหากันอาจไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกับที่มีอยู่เดิมในอดีต ดังนั้นเราจึงต้องนำเอาความรู้ทางธรณีสัณฐานวิทยา (geomorphology) และภาพถ่ายทางอากาศ (aerial photographs) เข้าช่วยเพื่อตรวจสอบแนวสันปันน้ำเดิม ดังนั้นเราจึงต้องมีการติดตามค่าผิดปกติเพื่อหาตำแหน่งของบริเวณที่มีแร่จริงๆต่อไป ตัวอย่างเช่นที่เมืองคอนวอลล์(Cornwall) ในอังกฤษ จากการตรวจสอบหาตะกอนร่องน้ำพบว่าดินบุอยู่ไกลจากตำแหน่งที่ให้แร่ถึง 10 กม ซึ่งอธิบายด้วยเหตุผลง่ายๆ คือ จุดที่ให้ค่าผิดปกติใหม่เกิดจากการกระทำของแม่น้ำใหม่บนชั้นสะสมตัวของดินบุเดิมที่เกิดจากการแสน้ำขานานฝั่งสมัยยุคน้ำแข็ง (Pleistocene) ที่พื้นที่แถบนี้ยังจมตัวอยู่ใต้ทะเล

อาจมีหลายคนถามว่าแล้วบริเวณไหนล่ะที่เราพบแร่หนัก(heavy minerals)ได้พอเพียง มีหลายครั้งและก็มีหลายแห่งในประเทศไทย เช่น จังหวัดเลย ภูเก็ต พังงา และกาญจนบุรี ที่เราต้องทำการเลียงแร่ (panning) และเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์เคมีและตรวจสอบแร่ดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในประเทศไทยที่มีทำการศึกษารายละเอียดจริงอยู่บริเวณเดียวคือที่แอ่งอำเภอกะทู้ จังหวัดภูเก็ต (รูป 5.7.6 ก และ ข, Petvarun, 1982) และทางเหนือ – ลำปาง อุตรดิตถ์ (สมบุญณ์ เสกธีระ และคณะ, 2521) ด้วยวิธีการนี้

รูป 5.7.6 ก แผนที่ธารน้ำ (drainage map) แสดงตำแหน่งที่ตะกอนท้องน้ำและค่าปริมาณ Ni (หน่วย ppm) บริเวณจังหวัดลำปาง – อุตรดิตถ์ (สมบูรณ์ เสกธีระ และคณะ, 2521)

รูป 5.7.6 ข แผนที่ธารน้ำแสดงตำแหน่งตะกอนท้องน้ำที่ให้ปริมาณธาตุโลหะบางตัวที่สูงเกินกว่าค่าปกติ
บริเวณจังหวัดลำปาง – อุดรดิตถ์ (สมบูรณ์ เสกธีระ และคณะ, 2521)

ธาตุเป้าหมายและธาตุแม่สื่อที่เราสนใจอาจทำให้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นได้ในแร่หนัก และนอกจากนั้นยังสามารถบอกได้ด้วยว่าเมื่อธาตุที่เราหาอยู่นั้นเป็นแร่อะไรบ้าง การสำรวจด้วยวิธีนี้บางคนเรียกว่า การสำรวจธรณีเคมีแบบผสม หรือแบบจับจ่าย (mixed-media geochemical survey) เพราะจากตำแหน่งที่เราเก็บตัวอย่างเพียงตำแหน่งเดียว เราสามารถตรวจหาแร่ทั้งในสภาพแร่หนักที่แม่เหล็กดูด (magnetite heavy minerals) และแร่หนักแม่เหล็กไม่ดูด (non-magnetic heavy minerals) ได้ นอกจากนั้นยังสามารถแยกส่วนที่เป็นเม็ดขนาดหยาบกว่า (coarse fraction) ออกจากพวกที่ขนาดละเอียดกว่า (fine-fraction) ได้ด้วย ดังนั้นด้วยวิธีการเลี้ยงแร่แบบนี้จึงทำให้เราารู้ได้ว่าจังหวัดเลย พิจิตร และเพชรบูรณ์ เป็นจังหวัดที่น่าจะได้รับความสนใจในเรื่องแหล่งแร่ทองคำในต่างประเทศ เช่นในประเทศออสเตรเลีย และอเมริกา การสำรวจโดยวิธีเลี้ยงแร่ทำให้พื้นที่ เช่น ที่รัฐอลาสกา (Alaska) และที่โซโนรา (Sonora) ได้รับความสนใจอย่างมาก (Overstreet & Marsh, 1981) ในตะกอนท้องน้ำในทะเลทราย (Wadi) สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับการหาแหล่งแร่อย่างได้ผลในประเทศซาอุดี อาระเบีย (ดู Raines & Allen, 1985)

อย่างไรก็ตามการสำรวจด้วยวิธีนี้ใช้ไม่ได้ผลเลยในบริเวณแถบประเทศหนาว เช่น ประเทศแคนาดา และกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวียหรือรัสเซีย เนื่องจากท้องน้ำหลายแห่งเกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็ง จึงต้องใช้ตะกอนทะเลสาบ (lacustrine sediment) แทน เพราะจะได้รับตะกอนที่ไม่ไกลจากทะเลสาบเท่าใด และมาจากพื้นที่รองรับน้ำใกล้ๆ หรือติดกับทะเลสาบนั้น เช่นที่ทำในประเทศแคนาดา มีการเก็บตะกอนทะเลสาบ (ดูรูป 5.7.7 และ 5.7.8) จากบริเวณ 5 ม จากฝั่งและลึก 20 ถึง 30 ม แล้วเอาเม็ดตะกอนขนาดเล็กกว่า 80 เมช มาวิเคราะห์จนสามารถติดตามหาพื้นที่ที่มีค่าผิดปกติทางแร่ได้

5.8 การเก็บตัวอย่างน้ำและพืชพรรณ (Water & Plant Samplings)

การเก็บตัวอย่างน้ำเป็นวิธีเก่าแก่โบราณมากที่สุดในเรื่องธรณีเคมี แต่กลับไม่ค่อยใช้กันมากเท่าที่ควรทางการสำรวจ เนื่องจากตัวอย่างสลายตัวหรือไม่เสถียรเสียก่อนในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวิธีการเก็บตัวอย่างจะง่ายมากก็ตาม (เพียงเอาตัวอย่างใส่ในขวดพลาสติกขนาดครึ่งลิตรที่ทำความสะอาดแล้ว ปิดฝาที่เสร็จ) ตัวการสำคัญที่ควบคุมปริมาณโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำคือการละลายของน้ำ (dilution) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนและความสัมพันธ์ (ทางเคมี) ของธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งเหล่านี้ยากต่อการวิเคราะห์หรือตรวจสอบ ดังนั้นปริมาณธาตุที่นี้ได้จากการวิเคราะห์จึงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการสำรวจหรือเก็บตัวอย่างชนิดอื่น ซึ่งผิดกับตะกอนท้องน้ำซึ่งสะสมตัวอยู่ในลำธารเป็นเวลานานมาก ซึ่งย่อมเป็นตัวแทนพื้นที่รับน้ำได้ดีกว่า สิ่งที่มีผลต่อการตีความตัวอย่างน้ำที่เก็บก็คือ ฤดูกาลเพราะเกลือหรือไอออนของธาตุโลหะละลายได้ดีในช่วงฤดูน้ำหลาก

อย่างไรก็ตาม มีธาตุหลายตัวในน้ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้บริเวณที่มีแร่ได้ดี ด้วยเหตุนี้การเก็บตัวอย่างน้ำจึงมีประโยชน์มากในบริเวณที่หาตะกอนท้องน้ำได้ยากหรือไม่มีเลย โดยทั่วไปการเก็บ

ตัวอย่างน้ำมักใช้ได้ดีกับบริเวณที่คิดว่าจะมีแหล่งแร่ยูเรเนียม เพราะน้ำสามารถพาเอาธาตุบ่งชี้หรือธาตุแม่

รูป 5.7.7 เครื่องมือเก็บตะกอนท้องน้ำพร้อมตะแกรงในล่อนัดขนาดแบบใช้น้ำ ในการสำรวจธรณีเคมี

รูป 5.7.8 เครื่องมือเก็บตะกอนที่มีปลายท่อเก็บแหลมคม เพื่อดักตัวอย่างตะกอนทะเลสาบ (lake sediments)

สื่อบางตัวเช่น V, K, U และ Ra ตัวอย่างน้ำจากทะเลสาบหรือจากหนองบึงอาจเป็นตัวบ่งชี้แหล่งแร่ข้างใต้ได้ หิมะหรือน้ำจากหิมะอาจเป็นตัวการพัดพาเอาธาตุบางตัวได้ โดยเฉพาะบริเวณที่พื้นดินเย็นจนแข็งตลอดปี(permafrost)และมีบางครั้งที่กระบวนการธรรมชาติสามารถทำให้ไอปรอทและสารประกอบโลหะเชิงซ้อนบางชนิดถูกนำขึ้นมาจากพื้นดินได้

น้ำใต้ดินมักมีค่าความเป็นกรดต่ำ ดังนั้นจึงเป็นตัวพาสารหรือธาตุโลหะต่างๆ ได้มากกว่าน้ำผิวดิน การเก็บตัวอย่างทำได้จากบ่อน้ำบาดาลหรือน้ำซับ(spring) และให้เป็นตัวบ่งชี้แร่ได้ดี ในประเทศไทยเรามีบ่อน้ำบาดาลหลายแห่งในภาคอีสานจะไม่นึกเท่าไรก็พบน้ำเค็มทำให้คาดคิดเอาน้ำจะมีเกลืออยู่ข้างได้ จนในที่สุดก็นำไปสู่การสำรวจจนค้นพบเกลือโปแตชปริมาณมากมาย แม้การเก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำบาดาลจะเกิดขึ้นมานานแล้วก็ตาม แต่ตัวอย่างที่เก็บก็มักถูกกวนเนื่องจากการติดตั้งบ่อเจาะได้เสมอ ในรูป 5.7.3 แสดงถึงพื้นที่ที่มีค่าผิดปกติของธาตุ Mo สูง ในบริเวณเหมืองในรัฐอริโซนา ประเทศอเมริกา โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อน้ำบาดาลโดยตรง และบางส่วนได้จากรากพืชที่ยังลึกลงไปใต้ดินมากมาย ด้วย ดังนั้นด้วยวิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งสองแบบ ทำให้เราสามารถกำหนดบริเวณที่มีแร่อยู่ได้

การเก็บตัวอย่างพืชพรรณ เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่เกี่ยวข้องอย่างสำคัญในการเก็บตัวอย่างดินและน้ำ รากต้นไม้(โดยเฉพาะพวกยืนต้น)สามารถหยั่งลึกไปจนถึงระดับน้ำใต้ดินได้ บางชนิดลึกกว่า 50 เมตร และสามารถให้ตัวอย่างที่คงทนต่อสภาพทางเคมี ซึ่งอาจถูกปิดบังด้วยดินข้างบนที่เป็นดินพัดพาได้ ดังนั้นถ้าเราเก็บตัวอย่างดินพัดพาในบริเวณนั้น เราก็ไม่มีทางพบแหล่งแร่ แต่ถ้าเราเก็บรากต้นไม้ยืนต้นมาวิเคราะห์ก็มีสิทธิให้แหล่งแร่ได้ ธาตุที่มักให้ค่าผิดปกติได้ดี ได้แก่ ทองแดง สังกะสี โมลิบดีนัม เงิน ทอง ยูเรเนียม ตะกั่ว และปรอท หลักการเก็บตัวอย่างที่ง่ายมากคือ ต้นไม้สกัดธาตุพวกนี้จากดินได้มาก (มากกว่าธาตุอื่น) แล้วถูกพามาจนถึงใบ และอาจไปสะสมตัวตามจุดต่างๆ ของต้นไม้รวมทั้งใบด้วย เวลาเก็บตัวอย่างจึงต้องเก็บตั้งแต่รากจนถึงลำต้น กิ่ง สาขา ก้าน จนถึงใบ แล้วทำการวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อดูว่าส่วนไหนของต้นไม้ให้ค่าที่น่าสนใจมากที่สุด พอเวลาสำรวจชั้นละเอียดจึงเก็บส่วนที่ให้ค่าที่ได้ผลดีที่สุดของต้นไม้บริเวณที่เราสนใจมาทำการวิเคราะห์ใหม่โดยละเอียด แต่ก็เป็นการยากเหมือนกันที่จะหยั่งรู้ได้ว่าต้นไม้ใดชอบธาตุอะไร หรือต้นไม้ใดไม่ชอบธาตุใด นอกจากนั้นตัวควบคุมสำหรับการเก็บพืชพรรณมีมากมาย เช่น ชนิดของต้นไม้ ส่วนของต้นไม้ อายุต้นไม้ สุขภาพ สภาพดิน การระเหยของน้ำ ตลอดจนช่วงเวลาที่จะเก็บ

โดยทั่วไปไม้ยืนต้นให้ผลดีกว่าไม้ล้มลุก แต่ในสหรัฐอเมริกาทางตะวันตกเฉียงใต้มีการสำรวจและเก็บตัวอย่างจากต้นไม้ ชื่อ mesquite(เมสไคว) ซึ่งเป็นไม้เลื้อย ที่ให้รากลึกลงไปถึง 20 เมตร ก็ให้ผลดีมากหลายพื้นที่ ตัวอย่างที่เก็บหนักประมาณ 20 ถึง 50 กรัม จากส่วนเดียวกันของต้นไม้ เช่น ใบ หรือกิ่ง และต้องนำมาบดเป็นผงแล้วจึงทำการวิเคราะห์ เวลาเก็บตัวอย่างก็ทำคล้ายเก็บตัวอย่างดิน คือเก็บแบบเป็นตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งก็เป็นไปได้ยากในธรรมชาติ เพราะต้นไม้ขึ้นอยู่ตามลำ

ธารในทะเลทราย จึงทำให้ต้องเลือกเก็บเป็นทีๆไป รูป 5.8.1 แสดงการกระจายตัวของธาตุทองแดงและโมลิบดีนัมที่เก็บในน้ำใต้ดินและในเศษใบไม้

5.9 การเก็บตัวอย่างก๊าซ (Gas Sampling)

ตัวอย่างก๊าซโดยเฉพาะปรอทใช้เป็นตัวบ่งชี้แหล่งแร่ซัลไฟด์ได้หลายชนิด ได้เริ่มทำกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 แต่มาใช้งานจริงๆ จังๆ เมื่อเร็วๆนี้ เนื่องจากพึ่งพัฒนาประสิทธิภาพการตรวจวัดปรอทได้ดีได้ไม่นานนัก ปรอทอาจสะสมตัวอยู่ในหิน ดิน บรรยากาศ และน้ำก็ได้ เราใช้เครื่องมือที่เรียก spectrometer ที่ยกไปมาได้สะดวกและตรวจจับปรอทได้โดยตรง เครื่องมือชนิดนี้จึงใช้ติดอยู่กับเครื่องบินหรือรถยนต์ หรือเฮลิคอปเตอร์ก็ได้ เราใช้หลักการที่ว่าปรอทถูกปล่อยออกมาในบรรยากาศ เนื่องจากโลหะซัลไฟด์ที่มีปรอทอยู่ถูกออกซิไดซ์(oxidized) ดังนั้นเมื่ออากาศที่มีปรอท(ที่เราจะวัด)จะถูกอัดเข้าไปในถังบรรจุ แล้วจึงถูกกรองและวัดด้วยเครื่องมือนี้

ส่วนก๊าซชนิดอื่นที่เก็บเป็นตัวอย่างนั้นก็เพื่อตรวจหาวงแร่ของธาตุระเหิดรอบๆ สินแร่ นั้น ก๊าซบางชนิดที่นิยมใช้วัดหรือตรวจหาแหล่งแร่ชนิดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 5.9.1 วิธีที่ได้ผลมาก คือการวัดก๊าซจากหลุมโดยการดูดอากาศออกมาวัด เพราะปริมาณก๊าซจะมากกว่าเดิมอาจถึงพันเท่า ซึ่งทำให้การวัดก๊าซได้ผลดีมากขึ้น หลายครั้งที่ Re & He ที่เก็บจากน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับบริเวณที่มีแหล่งแร่ได้ดีโดยเฉพาะแหล่งแร่ยูเรเนียมในเมืองไทย โดยเฉพาะที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีการวัด Ra ด้วยการเอาถ้วยกักก๊าซคว่ำลงเป็นจุๆแล้ววัดค่า แต่ก็ไม่ค่อยได้ผลเท่าใดนักเนื่องจากการเตรียมการวัดไม่ค่อยดีหรือฟิล์มที่ใส่ในถ้วยไม่ทำปฏิกิริยากับ Ra การเก็บตัวอย่างก๊าซจากเครื่องบิน (airborne geochemistry) มักทำแล้วไม่ค่อยได้ผลเนื่องจากอิทธิพลของลม สภาพอากาศ หิน พืชพรรณที่ปกคลุม และการกระทำของมนุษย์บนผิวดิน แต่บางครั้งก็พบว่า การวัดก๊าซโลหะที่มาจากดินไม้หรืออินทรีย์วัตถุ (organo-metallic vapour) ทำได้ผลดีในบางพื้นที่

ในงานการวิเคราะห์ก๊าซ ส่วนใหญ่ทำกันได้ผลดีในห้องปฏิบัติการ หรือจากเครื่องมือวัดที่ติดตัวไปได้ แต่ในกิจการตรวจหาก๊าซจากแหล่งซัลไฟด์ ใช้สุนัขที่ถูกฝึกอย่างดีในการตรวจ(ไล่ล่า)ก๊าซSO₂ (หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์)โดยการดมกลิ่น สุนัขดังกล่าวเรียกว่าสุนัขนักสำรวจ(prospecting dog) ใช้ได้ผลดีทางยุโรปตะวันออก รัสเซีย และแถบสแกนดิเนเวีย

5.10 การวิเคราะห์ค่าผิดปกติในสนาม และในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ในสนาม

การวิเคราะห์เคมีบางครั้งก็สามารถทำในสนามได้ และเริ่มทำอย่างจริงจัง เมื่อราว ค.ศ.1950 เนื่องจากความรู้เรื่องการเทียบสี (colourimetry) เป็นที่แพร่หลายในวงการของนักสำรวจ เพราะสามารถใช้ในสนามอย่างได้ผลและรวดเร็ว แต่วิธีการนี้ต่อมาไม่ค่อยมีคนนิยมเท่าใด เพราะประสิทธิภาพต่ำ(low

รูป 5.8.1 แผนที่ธรณีเคมีแสดงค่าผิดปกติอันเป็นผลจากการกระจายตัวของโลหะทองแดงและโมลิบดีนัม ใน
น้ำใต้ดิน เมือง Pima รัฐอริโซนา อเมริกา (Huff & Marranzino, 1961)

ตาราง 5.9.1 ตัวอย่างก๊าซบางตัวที่พบเสมอในแหล่งแร่ (Peter, 1987)

sensitivity) ความถูกต้องแม่นยำน้อย และสามารถวัดหรือตรวจหาธาตุได้ไม่กี่ตัว แต่วิธีการนี้มีผลดีคือเสียค่าใช้จ่ายน้อย และได้ผลเร็วในทันที โดยทั่วไปจะใช้ไดไทโซน (dithizone) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดสารประกอบที่ให้สีได้ดีกับโลหะบางชนิด ดังนั้นเมื่อเปลี่ยน pH และตัวเร่งเชิงซ้อนก็สามารถตรวจหาธาตุโลหะบางชนิด เช่น Cu Pb และ Zn โดยเกิดเป็นสีที่แตกต่างกันไปในแต่ละธาตุ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสีของธาตุโลหะมาตรฐานนั้น ๆ ที่รู้ปริมาณแน่นอน (สีเข้ม แสดงว่ามีปริมาณของธาตุนั้นมาก ดังนั้นถ้าตัวอย่างของเรามีสีเข้มก็แสดงว่าน่าจะมีปริมาณธาตุนั้นสูง สีอาจตกอยู่ระหว่างความเข้มของธาตุมาตรฐานหนึ่งๆ เราก็ใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์และบัญชีไตรยางค์เข้าช่วย) ด้วยเหตุที่วิธีนี้เป็นวิธีการดึงเอาโลหะออกจากดินหรือตะกอนที่องน้ำอย่างหลวมๆ โดยเข้าทำปฏิกิริยา(loosely adsorbed) กับสารเคมี(reagent)ที่เติมลงไป และเนื่องจากทำกันโดยไม่ต้องการอุ่นหรือต้มสารเคมี จึงเรียกวิธีนี้ว่าวิธีสกัดเย็น(Cold extractable method) ค่าที่ได้เรียก cold extractable metal (cxMe) ประมาณ 5-20% ของโลหะที่อยู่ในตัวอย่างเท่านั้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงเหมาะที่จะใช้ในการคัดเลือกพื้นที่ที่ไม่สนใจออกไป ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในสนามกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างเดียวกัน ค่าที่ได้เรียก cxMe/Mc ratio ค่านี้มีประโยชน์มากเพราะสามารถใช้ตรวจหาค่าผิดปกติทางน้ำ(hydromorphic anomaly) ได้ผลดี และได้ผลดีกว่าค่าที่ได้จากดิน ณ แหล่งกำเนิด(residual soil)

ในการสำรวจหาแหล่งแร่ฟลูออสปาร์ (fluospar) การวัด pH และ Eh ในน้ำเพื่อหาค่าฟลูออรีน (fluorine) ด้วย selective ion electrode ชนิดพิเศษที่นำมาใช้ภาคสนามปรากฏว่าใช้ได้ผลดีทางตอนเหนือของประเทศสเปน นอกจากนั้น selective ion electrode ยังใช้ได้ผลดีกับการตรวจหาปรอทในน้ำ และก๊าซ CO₂ & O₂ จากตัวอย่างดินอีกด้วย สำหรับเครื่องมือที่เรียก portable radioisotope-excited X-ray fluorescence spectrometer หรือเครื่อง XRF แบบพกพาใช้ได้ผลดีกับการวัดหาปริมาณธาตุโลหะในตัวอย่างที่มีโลหะได้ดี แต่ใช้ไม่ได้ผลเท่าใดนักถ้าธาตุโลหะมีปริมาณน้อย แต่ถ้าตัวอย่างมีแร่เช่น ทองคำหรือเงินฝังปนอยู่ เช่นจากเศษแร่หรือแท่งหิน (core) หรือตามหน้าเหมืองจะมีประโยชน์มาก เพราะถ้าสามารถส่องไปที่จุดนั้นที่เรียก "assay gun" หรือ "ปืนส่อง" แล้วก็อ่านค่าได้ทันที วิธีการแบบเดียวกันนี้สามารถนำมาใช้หาดีบุก ทั้งสแตน โมลิบดีนัม ตะกั่ว สังกะสี และพลอยได้ผลดีพอสมควร จากการสำรวจหาดีบุกและสังกะสีจากหน้าเหมืองที่เมืองควีนวอลล์ ประเทศอังกฤษ ด้วยวิธีนี้ปรากฏว่าได้ผลดีมาก โดยให้ค่าความถูกต้องถึง 0.3% และในการตรวจหา Ba ให้ความถูกต้องถึง 2.4%

ในการตรวจหา Be (ธาตุ Beryllium) ในหิน ณ จุดนั้น โดยการอาบรังสี (nuclear irradiation) สามารถให้ค่าความถูกต้องดีพอสมควร ถ้าทำให้ห้องปฏิบัติการคือ ประมาณ 20 พีพีเอ็ม (ppm) สำหรับตัวอย่างที่บดแล้ว แต่ให้ผลดีน้อยกว่าถ้าวิเคราะห์จากผิวของตัวอย่างหรือหินโผล่โดยตรง อีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียก neutron activation analysis (หรือ Naa) ซึ่งเดิมเป็นการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยเฉพาะ แต่ปัจจุบันสามารถทำการวัดในภาคสนามได้ และใช้ได้ผลดีกับธาตุถึง 30 ธาตุ ซึ่งสามารถวัดค่าที่มีปริมาณ

น้อยๆ ในหินได้ (Potters, 1987) ทั้งจากตัวอย่างหินและตัวอย่างดิน หรือจากตัวอย่างแท่งหิน (core samples) โดยวิธีวิเคราะห์โดยหยังธรณี (borehole-assaying) โดยเฉพาะทองแดงและนิกเกิ้ลได้ดี

การตรวจวัดโดยวิธีอื่น ซึ่งอาจเรียกว่าโทรสัมผัสทางธรณีฟิสิกส์หรือธรณีเคมีก็ได้แล้วแต่ผู้ใช้ จะนำไปเน้นทางด้านใด เครื่องมือ gamma-ray spectrometer ซึ่งทำได้โดยการบินสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ แต่เนื่องจากสามารถหาของธาตุต่างๆ ได้จากระยะไกล (จึงอาจเรียกว่า airborne geochemical prospecting) ได้โดยใช้หลักการวัดค่าการสะท้อนแถบสีจากแสงอาทิตย์ (spectral reflectance technique) ที่สามารถใช้แยกชนิดหิน ที่ใช้กับภาพถ่ายเทียมก็สามารถนำมาใช้ในสนามได้ ที่เรียก hand-held reflectance radiometer แต่เครื่องมือนี้ไม่ได้วัดแร่หรือธาตุโดยตรง แต่ให้ค่าที่สามารถแยกกลุ่มของแร่ใน บริเวณเปลี่ยนแปลงสภาพ (alteration zone) ต่างชนิดได้ Gladwell และคณะ (1983) ได้ทำการทดสอบหินจาก แหล่งทองคำ 2 แหล่งในรัฐออนตาริโอ (Ontario) ประเทศแคนาดา ซึ่งในที่สุดพวกเขาสามารถตรวจหาวง ปฐมผลเปลี่ยนแปลงสภาพ (alteration halos) ได้จากกลุ่มแร่คาร์บอเนต, แร่ดิน (clay) และน้ำที่ดูดซับ (adsorbed water) ได้

นอกจากนั้นในแร่ที่มีการเรืองแสง (fluorescent) บางตัว เช่น แร่ซีไลต์ (Scheelite, W) แร่เพาเวล ไลต์ (powellite, Mo) แร่ไฮโดรซิงไซต์ (hydrozincite, Zn) และแร่ออตูไนต์ (Autunite, U) ฯลฯ ก็สามารถ ทำการตรวจหาหรือสำรวจได้โดยการใช้ตะเกียงยูวี (portable UV lamp) ซึ่งได้ผลดีในหลายพื้นที่ใน เมืองไทย บุญส่ง โอกาส (2528, ติดต่อบุคคล) ได้ใช้ตะเกียงยูวีในการสำรวจหาแหล่งแร่ทั้งสแตนบริเวณ เหมืองธารา และเหมืองคอยหมอก อำเภอเวียงป่าเป้ามาแล้ว แต่ในปัจจุบันสามารถตรวจจับได้ดีขึ้น แม้มี ปริมาณน้อยได้โดยการพัฒนาตัวตรวจจับตัวกรอง และเครื่องอ่านค่าให้ดีขึ้น

การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

การสำรวจแร่โดยวิธีธรณีเคมีเริ่มขึ้นเมื่อราว ค.ศ.1930 ด้วยการนำเอาเครื่อง emission spectrography มาใช้เป็นหลัก ซึ่งต่อมาจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือวัดสีหรือเทียบสี (colourimetry) แทน ในปัจจุบันแนวโน้มได้หันไปที่วิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่ถูกต้อง แม่นยำ แต่ราคาไม่แพง จนทำ ให้เกิดการแข่งขันในการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถให้ขีดความสามารถสูง โดยวัดค่าของธาตุต่างๆ ต่ำสุดได้ดี (low detection limit) และถูกต้องแม่นยำด้วย ส่วนการวัดค่าในภาคสนามมักทำกันในขั้นต้น ของการสำรวจเบื้องต้นเพื่อค้นพื้นที่ที่ไม่สนใจหรือมีศักยภาพน้อยออกไป นอกจากนั้นยังต้องอาศัย เครื่องมือสื่อสาร และการคมนาคมที่ทันสมัย เพื่อลดระยะเวลาในการสำรวจให้น้อยลง ข้อมูลการ วิเคราะห์ที่ดี ข้อมูลทางสถิติที่ดี แผนที่หรือรูปตัดขวางสามารถจะส่งผ่านถึงกันได้อย่างรวดเร็วในปัจจุบัน โดยใช้แฟกซ์ (Facsimile) หรือ e-mail

การเตรียมตัวอย่างในภาคสนามเพื่อส่งไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการก็ง่ายและตรงไปตรงมา ซึ่ง ส่วนมากมักเป็นลักษณะที่ตัวอย่างที่เก็บต้องนำมาตากให้แห้งกลางแจ้งหรืออบในเตาอบอุณหภูมิต่ำ

ประมาณ 70°C ต่อมาจึงนำมาบดและร่อนด้วยตะแกรง ถ้าเป็นตัวอย่างน้ำต้องนำมากรองและทำให้เป็นกรดเพื่อไม่ให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือเกิดการตกตะกอนของเหล็กได้ ตัวอย่างน้ำอาจทำให้เข้มข้นขึ้นโดยการดูดตะ (adsorbition) ด้วยสารดูด (ion exchange resin) แต่ถ้าเป็นตัวอย่างก๊าซมักจะต้องบรรจุลงในขวดโลหะหรือแก้วอย่างแน่นก่อนส่งไปตรวจวัดโดยตรง และอาจนำมาเพิ่มความเข้มข้นด้วย

ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างหินหรือตะกอนที่เจือปนน้ำที่แข็งต้องนำมาบดให้เป็นผงละเอียด และต้องนำมาเพิ่มความเข้มข้นสำหรับธาตุบางตัวเสียก่อน นอกจากนั้นยังต้องนำมาย่อยสลายด้วยกรด หรือเผาให้หลอมละลายด้วยสารช่วยหลอม (flux) ในเบ้าหลอมที่เป็นนิเกิลหรือกราไฟต์ หรือเซรามิกก็ได้แล้วแต่ชนิดธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ถ้าเป็นตัวอย่างพืชพรรณต้องนำมาทำให้แห้งและทำให้เป็นเถ้าถ่าน (ashed) และบางวิธีอาจต้องนำมาย่อยสลายด้วย อนึ่งสำหรับขั้นตอนและกรรมวิธีการเตรียมตัวอย่างสามารถหาได้จากหนังสือ Handbooks of Exploration Geochemistry ซึ่งแต่งโดย Fletcher (1981)

ส่วนจะเลือกวิธีใดในการวิเคราะห์นั้นต้องอาศัยการตกลงที่ตระหว่างนักธรณีวิทยา และนักเคมี วิธีการย่อมขึ้นกับราคา การตรวจสอบในแง่คุณภาพหรือปริมาณ จำนวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ขนาดความเข้มข้นของธาตุ ความเป็นไปได้ของเครื่องมือในการวิเคราะห์ ธาตุวิเคราะห์ได้ในปริมาณที่น้อยที่สุด (detection limit หรือ sensitivity) และความถูกต้องแม่นยำ (accuracy and precision) ในตัวอย่างเพียงตัวอย่างเดียวสามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้หลายวิธีด้วยเหตุนี้ Rose Hawkes และ Webb (1979) และ Moon (1985) จึงได้เปรียบเทียบความสามารถของวิธีการวิเคราะห์อย่างละเอียดแบบธาตุต่อธาตุ (ดังแสดงในรูป 5.10.1 และตาราง 5.10.1)

แทบจะเรียกได้ว่าวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในปัจจุบันที่นิยมมากที่สุด คือ AAS หรือ atomic absorption spectrometry ถึงแม้จะวัดหาค่าปริมาณธาตุได้เพียงธาตุเดียวต่อครั้ง แต่ก็สามารถหาค่าปริมาณธาตุต่างๆ ที่ถูกต้องแม่นยำได้ถึง 40 ธาตุ อีกทั้งยังถูกรวดเร็วและง่ายต่อการเรียนรู้และเข้าใจ ส่วนเครื่องมือที่เรียก emission spectrography ก็ยังใช้กันอยู่โดยเฉพาะในประเทศโซเวียต ซึ่งเป็นวิธีที่ดีในการวัดค่าแบบกึ่งปริมาณ (semi-quantitative) ของธาตุได้หลายธาตุ ครั้งละหลายๆ ได้ในทันที แม้ธาตุเหล่านี้จะมีปริมาณที่แตกต่างกันและมีความสัมพันธ์ทางเคมีที่ต่างกันก็ได้

ในปัจจุบันมีเครื่องมือใหม่ล่าสุดอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในวงการสำรวจหาปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างมากคือ ICP (หรือ Inductively Coupled Plasma) spectrometer ที่เป็น emission spectrograph ที่วัดหาปริมาณของธาตุต่างๆ ได้ในคราวเดียวกัน นอกจากนั้นยังถูกต้องแม่นยำและไม่แพง เครื่องมือ neutron activation analysis (หรือ NAA) ก็ใช้ได้ผลดีพอๆ กับ ICP โดยเฉพาะกับทองคำหรือกับตัวอย่างพืชหรือดินที่มีอิทธิพลมาก โดยทำการวิเคราะห์ทองและธาตุแม่สื่อได้ นอกจากนั้นยังเป็นวิธีการวิเคราะห์ชนิดไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive method) ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ใหม่ได้หลายๆ ครั้ง และวัดหาปริมาณธาตุได้หลายธาตุ

รูป 5.10.1 สรุปตารางธาตุที่แสดงถึงวิธีวิเคราะห์เคมีที่ได้ผลคุ้มค่า(cost effective method) ในการ
สำรวจธรณีเคมี (Moon, 1995)

ตาราง 5.10.1 สรุปชนิดการวิเคราะห์ตัวอย่างธรณีเคมีที่สำคัญที่นิยมใช้ในปัจจุบัน (Moon, 1995)

ในทางธรณีวิทยา การเทียบส่วนหรือเทียบสีสารละลาย (colourimetry) โดยเฉพาะการวิเคราะห์ทางธรณีเคมีใช้ได้ผลดี โดยเฉพาะในหน่วยงานรัฐบาลและมหาวิทยาลัยหลายแห่งในประเทศไทย ได้ใช้วิธีนี้ในการทำการวิเคราะห์หาธาตุหลัก (major element) ในหินมาเกือบ 20 ปี (Charusiri, 1980, 1989) แต่อาจไม่ดีเท่าไหร่นักกับธาตุมีน้อย (trace elements) บางตัว อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีราคาถูกจึงยังคงใช้กับธาตุบางตัว เช่น ทั้งสะเตน โมลิบดีนัม ไทเทเนียม และฟอสฟอรัส

การหาปริมาณธาตุหลักในหินอาจทำได้โดยวิธี X-ray fluorescence หรือ Spectrometry ซึ่งก็ให้ผลดีเพราะถูกและรวดเร็ว วิเคราะห์ได้ครั้งละหลายๆตัวอย่าง แต่ปัจจุบันถูก AAS และ ICP เข้ามาแทนที่ จึงนิยมใช้ในภาคสนามมากกว่า เพื่อตรวจหาธาตุโลหะบางธาตุในตัวอย่างสินแร่

การวิเคราะห์อีกวิธีเรียก electron microprobe (Electron Probe Micro - Analysis หรือ EPMA) ใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดกำลังขยายสูง ส่องดูแร่ที่ต้องการวัดหาปริมาณธาตุ แล้วยิงกระแสนิวเคลียสเข้าไปยังเป้าเพื่อให้ปล่อยรังสีเอกซ์เรืองแสง (X-ray fluorescence) ออกมา ใช้หาธาตุโลหะได้ดี การตรวจหาโดยวิธี fission track และ fluorimetry ใช้ได้ผลดีกับแหล่งยูเรเนียม หรือ specific ion electrodes ใช้ได้ดีกับการวิเคราะห์ธาตุ Halogen ส่วน gas chromatography นิยมให้หาค่ากำมะถันและมีเทน (CH_4)

ห้องปฏิบัติการเคลื่อนที่ (mobile laboratory) เพื่อการวิเคราะห์ธรณีเคมีได้ใช้กันแพร่หลายในยุโรปและในอเมริกามาช้านาน โดยเอาห้องปฏิบัติการใส่ไว้ในรถบรรทุกหรือในเตนท์ หรือแม้แต่ผูกติดกับเฮลิคอปเตอร์แล้วปล่อยไปตามจุดต่างๆ การวิเคราะห์ถ้าเป็นเมื่อก่อนก็ใช้เพียงการเทียบสีและการวิเคราะห์แบบเปียก (wet analysis) แต่ในปัจจุบันหันมาใช้ emission spectrographs, atomic absorption, XRF และ specific ion electrode บางครั้งผู้สำรวจก็รู้สึกมีความมั่นใจและสบายใจที่มีห้องปฏิบัติการอยู่ใกล้ตัว ทั้งๆที่มีบริษัทรับทำการวิเคราะห์อย่างรวดเร็วมีอยู่มากมายที่สามารถรับวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทุกประเภท วิเคราะห์ได้หลายธาตุสะดวกและรวดเร็วก็ตาม ตัวอย่างในประเทศไทยได้แก่ บริษัท SGS บริษัท Mineral Assay บริษัท Chemex (Thailand) และ บริษัท Clays & Minerals (ประเทศไทย) เป็นต้น

5.11 สมุดรณีสานในการสำรวจธรณีเคมี

การเก็บตัวอย่างธรณีเคมีถือว่าเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว และถือได้ว่าเป็นขั้นตอนหรือสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของการสำรวจข้อมูลตัวอย่างจำนวนมากต้องสามารถนำมาศึกษาเพื่อหารูปแบบและแนวทางทางธรณีเคมี แต่ถ้าหากตัวอย่างที่ได้เก็บมาโดยไม่เขียนข้อมูลใดๆไว้เลย ก็อาจทำให้เกิดความสับสนและผิดพลาดได้อย่างง่ายดาย แม้ในสภาวะปกติหลายครั้งที่นักธรณีวิทยาลืมจดบันทึกหมายเลขตัวอย่างที่เก็บจนจำไม่ได้ว่ามาจากไหน ยิ่งคนที่เก็บตัวอย่างซึ่งไม่ใช่ นักธรณีวิทยาที่มีมือดีหรือชำนาญการแล้วละก็เป็นอย่างยิ่งที่ตัวอย่างนั้นไปได้เลย ดังนั้นสมุดบันทึกหรือสมุดรณีสาน (geological fieldnote) จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการเก็บตัวอย่างจำนวนมากๆ จำเป็นที่จะต้องพยายามทำให้ข้อมูลที่เก็บมาได้บันทึกอยู่ในลักษณะ

หรือรูปแบบอันเดียวกัน รูป 5.11.1 แสดงถึงรูปแบบ(format)ที่ใช้กับการบันทึกตัวอย่างหินจากหินโพล์ สำหรับการบันทึกตัวอย่างดินให้ดูรายละเอียดใน soil description format (ในภาคผนวก)

ในการเก็บตัวอย่างดิน สิ่งสำคัญที่ควรบันทึกในสมุดสนามได้แก่ความลึกของชั้นที่เก็บ สี และ เนื้อหิน และถ้าหากมีหลักฐานของการลื่นไถลของชั้นดิน(slump) ชนิดของอินทรีย์วัตถุ ดินพัดพา เศษหิน หรือการปนเปื้อนจากสิ่งอื่น(contamination) ก็จำเป็นต้องใส่ลงไปให้หมด ถ้ามีการตรวจสอบหรือ วิจัยธาตุโลหะก็ใส่ลงไปด้วย นอกจากนี้จุดที่เก็บรูปที่ถ่ายจำเป็นมากที่ต้องบันทึกลงไป

ในการเก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ จำเป็นต้องบันทึกตำแหน่งที่เก็บ โดยใช้ตำแหน่งจริงของลำธารปัจจุบันเป็นหลัก ต้องบอกขนาดของลำธาร ความกว้าง ความลึก ลักษณะตลิ่งชันหรือลาด หินโพล์ มากหรือน้อย ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ ชนิดการปนเปื้อน รูปถ่ายหรือวาดภาพจุดที่เก็บนับว่าเป็นสิ่งที่มี ประโยชน์มาก เพื่อช่วยให้ผู้เก็บสามารถจำได้หากต้องมาเก็บอีกครั้ง

ในการเก็บตัวอย่างหิน เป็นเรื่องสำคัญที่สุด ต้องแสดงข้อมูลให้มากที่สุด โดยเฉพาะชนิดของหิน การเปลี่ยนแปลงและการเกิดเป็นแร่ แนวรอยแตก แต่ก็ต้องเป็นไปตามเวลาที่อำนวย

5.12 การวิเคราะห์ข้อมูลธรณีเคมี

ข้อมูลธรณีเคมีเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างมากในทางธรณีวิทยา และต้องใช้เปรียบเทียบกับสภาพ หรือลักษณะทางธรณีวิทยาเสมอ(ดูรูป 5.12.1) และยิ่งถ้าหากมีข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์เข้ามาช่วยเสริมด้วย แล้ว จะยิ่งทำให้ข้อมูลนั้นง่ายและมีผลต่อการตีความด้วย

โดยทั่วไปลักษณะข้อมูลที่ได้จากแผนที่ธรณีเคมีส่วนใหญ่จะเป็นในรูปตัวเลขที่แสดงไว้เป็นค่า ตามจุดต่างๆ (ดูรูป 5.7.6) หรือสัญลักษณ์แสดงความมากน้อย ซึ่งอาจเป็นวงกลม (รูป 5.7.1) สีเหลี่ยม หรือวงเหลี่ยม (รูป 5.7.6 ก) แล้วแต่ความต้องการของนักธรณีเคมีหรือนักสำรวจในบางครั้งก็อาจใส่ ข้อมูลไว้บนแผนที่ภูมิประเทศหรือแผนที่ธรณีวิทยาเลยก็ได้ สำหรับค่าของธาตุที่ได้จากตัวอย่างตะกอน ท้องน้ำ มักแสดงด้วยภาพตัวหนอน (worm diagram) (รูป 5.7.2) แถบหนาแสดงถึงที่มีปริมาณธาตุนั้น มาก แถบบางแสดงว่าธาตุนั้นมีน้อย ดังที่แสดงในหัวข้อก่อนนี้(ดูหัวข้อ 5.6) รูป 5.6.17 แสดงถึงแผนที่ เส้นชั้นปริมาณธาตุ(isograd) ซึ่งมักทำขึ้นถ้าหากว่ามีปริมาณข้อมูลหลายๆ นอกจากนั้นอัตราส่วนระหว่าง ธาตุ 2 ธาตุ เช่น Cu : Mo หรือ Ag : Zn สามารถนำมา plot และทำเส้นชั้นอัตราส่วนได้รูป 5.6.18 แสดง ถึงอัตราส่วนระหว่าง Zn กับ Cd ในดินบริเวณ Coeur d' Alene มลรัฐไอดาโฮ สหรัฐอเมริกา ด้วยข้อมูล อันนี้ทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับการเลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่ชื่อ Dobson Pass faults ได้

ตาราง แผนภูมิ แผนภาพ และกราฟ มักใช้เสมอในการแสดงหรือเปรียบเทียบข้อมูลทางธรณีเคมี รูป 5.12.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดหินกับค่าที่ได้ทางธรณีเคมี รูป 5.12.2 และ รูป 5.12.3 แสดงรูปตัดทางธรณีเคมีว่าชั้นไหนมีธาตุอะไร ปริมาณขนาดไหน จากรูปจะเห็นว่าหมู่หินที่เรียก

รูป 5.11.1 ส่วนของสมุทรธรณีสันามที่บรรยายถึงลักษณะชนิดและรายละเอียดของหินโพล์ ซึ่ง
ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจัดทำขึ้นโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วย (computer – assisted processing
of geologic data) (ข้อมูลของ USGA จาก Hadson และคณะ, 1975)

รูป 5.12.1 ความสัมพันธ์ระหว่างธรณีวิทยาต่อการกระจายตัวของธาตุ Ni ในดินเกิดกับที่ แลบ Nguge ประเทศแทนซาเนีย (มีตะกอนเชิงเขา และตะกอนน้ำพาปรากฏบริเวณขอบฝั่งแม่น้ำด้วย) (จาก Coope, 1958)

รูป 5.12.2 รูปตัดจากหลุมเจาะ (downhole profile) ผ่านชั้นแหล่งแร่แบบตัดตามชั้น (stratabound) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุต่างๆกับชนิดหิน จากแหล่ง Cu – Au – U Olympic Dam, Roxby Downs, ตอนใต้ของออสเตรเลีย (Roberts & hudson, 1983)

รูป 5.12.3 แผนภาพกิ่งสามมิติทำจากคอมพิวเตอร์ แสดงถึงการกระจายตัวของธาตุพบบง (Sb) จากแหล่ง
Coeur d' Alene รัฐไอดาโฮ อเมริกา ที่สัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อน Osborn (Gott &
Botbol, 1973)

Whenan Member แสดงค่าธาตุที่ตรวจจับได้ใช้ได้ดีเกือบทุกชนิด รูป 5.12.3 แสดงถึงแผนภาพถึงสามมิติที่ได้จากการคำนวณและพิมพ์ออกจากคอมพิวเตอร์

5.13 แนวคิดทางสถิติ

ข้อมูลทางธรณีเคมีมีส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 90 เป็นตัวเลข ตัวเลขเหล่านี้จัดว่าไร้ค่าถ้าปราศจากข้อมูลทางธรณีวิทยา และก็เป็นเพียงข้อมูลเชิงคุณภาพ(qualitative)เท่านั้น ถ้าไม่นำมาตรวจสอบหรือวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยเหตุนี้จึงต้องนำเอาทั้งข้อมูลทางธรณีวิทยาและข้อมูลทางสถิติมาตีความเปรียบเทียบกับ มิฉะนั้นย่อมเหมือนกับดาบอดกล้างทันที ถ้าเพียงใช้ข้อมูลใดข้อมูลหนึ่ง และเมื่อถึงที่สุดแล้วข้อมูลธรณีเคมีจะนำมาสู่รูปแบบ ชนิด และการเกิดเป็นแหล่งแร่ว่าเป็นแบบใด

ในการสำรวจธรณีเคมีไม่ว่าจะเป็นจากธาตุแม่สื่อหรือธาตุเป้าหมาย มักจะมีข้อมูลอยู่ส่วนหนึ่งซึ่งมีค่าเกินกว่าค่าปกติ ซึ่งเรียกค่าเหนือปกติ (threshold value) ค่าเหนือปกติหรือค่าธรณีประตุนี้อาจเป็นแบบเหนือปกติในลักษณะบริเวณกว้าง (regional threshold) เหนือปกติแบบเฉพาะจุด (local threshold) (ดูรูป 5.13.1 ถึง 5.13.4 และตาราง 5.13.1 ถึง 5.13.2) หรือเหนือปกติในทางหิน(lithologic threshold) อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ ค่าเหนือปกตินี้กำหนดหรือพิจารณาจากการตรวจสอบข้อมูลจริงๆ หรือจากการสำรวจลาดเลาหรือสำรวจแบบปฐมนิเทศก์(orientation survey) โดยการวางแผนงาน หรือเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างค่าที่ผิดปกติกับค่าปกติ ในโครงการสำรวจธรณีเคมีส่วนใหญ่มักเลือกค่าเหนือปกติโดยอาศัยขั้นตอนบางอย่างมาช่วยหา

ในการสำรวจก่อนสำรวจจริงหรือตอนสำรวจลาดเลา (orientation survey) อาจใช้ค่าปกติที่เป็นไปได้ (potential background) ในหินมาใช้เป็นแนวทาง โดยดูจากหนังสือ Rose, Hawks และ Webb (1979) เช่น ค่าเฉลี่ยของธาตุ selenium มีประมาณ 0.88 ppm ในหินปูน, 0.6 ppm ในหินดินดาน และ 0.05 ppm ในหินทราย เป็นต้น

ค่าเหนือปกติแต่ละธาตุอาจหาได้จากการกำหนดจุด (plot) ลงในกราฟแผนภาพ (histogram) โดยแบ่งค่าของธาตุออกเป็น 10 ถึง 20 ช่วง แล้วแต่ความมากน้อยของข้อมูล (รูป 5.13.2) ค่าเหนือปกติจะอยู่ประมาณที่สองหรือที่สามของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation)เหนือค่าเฉลี่ย เช่น มาตรฐานร้อยละ 97.5 ของค่าทั้งหมดในการกระจายตัวตามปกติ(Gaussian distribution)ของค่าของธาตุที่เราสนใจ มักจะอยู่ต่ำกว่าค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานและจะจัดอยู่ในส่วนของค่าปกติ ซึ่งแสดงว่าอาจมี 1 ใน 40 ที่มีสิทธิเป็นค่าผิดปกติ(anomaly) ในแง่การกระจายตัวทางคณิตศาสตร์ มักใช้รูปแบบของ lognormal หรือ normal เสมอ โดยทั่วไปค่าของธาตุที่พบมากบนเปลือกโลก เช่น Al Fe และ Mg มักแสดงลักษณะการกระจายตัวปกติ คือ เมื่อนำมาสร้างแผนภาพจะได้ลักษณะการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ(normal-bell curve)เมื่อให้ข้อมูลลงมาตราส่วนเลขคณิต ส่วนบรรดาธาตุมีน้อยทั้งหลาย ซึ่งมักจะได้แก่ธาตุที่เราสนใจ

รูป 5.13.1 แผนภาพแสดงค่าเหนือปกติเฉพาะแห่ง (local threshold) และค่าเหนือปกติบริเวณกว้าง (regional threshold) ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างหินผ่านสายแร่ ค่าที่สูงกว่าปกติ อาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพหินก็ได้ (ในรูป)

รูป 5.13.2 กราฟแสดงค่าต่างๆของตัวอย่าง แกน y เป็นจำนวนตัวอย่าง ส่วนแกน x เป็นปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์ (ฐานลอกลอก หน่วย ppm) ของค่าปกติ ค่าผิดปกติ และค่าเหนือปกติ ของตัวอย่างปกติกับตัวอย่างแสดงสินแร่

รูป 5.13.3 กราฟแสดงฮิสโตแกรมจากข้อมูลในตาราง 5.13.1 ซึ่งได้จากผลรวมของจำนวนตัวอย่างปกติกับตัวอย่างที่เป็นสินแร่ ในรูป 5.13.2

ตาราง 5.13.1 ข้อมูลความเข้มข้นของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จากรูป 5.13.3 โดยแปลงตัวเลขในรูปลอก

ตาราง 5.13.2 การแจกแจงข้อมูลโดยการจัดแบ่งเป็นช่วงข้อมูลและทำให้เป็นเปอร์เซ็นต์สะสม (ข้อมูลจากรูป 5.13.2)

รูป 5.13.4 กราฟแสดงความถี่สะสมของปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ (ฐานลอก) ของตัวอย่างจากรูป 5.13.2

เสมอๆ มักแสดงการกระจายตัวแบบ lognormal ซึ่งแสดงรูปประจักษ์ว่าเมื่อใส่ข้อมูลบนมาตราส่วน logarithmic (รูป 5.13.2 และ 5.13.3) ดังนั้นในการเล่นกับตัวเลขทางธรณีเคมี ความสำคัญจึงอยู่ที่ว่าเราจะใส่ข้อมูลลงในมาตราส่วนใดดีในการสร้างแผนภาพ เทคนิคทางสถิติที่เรียก CHI-square สามารถบอกหรือวิเคราะห์ได้ว่าข้อมูลของเราจะเข้าได้กับการกระจายตัวแบบไหนได้ เครื่องคิดเลขที่ทันสมัยในปัจจุบันสามารถบอกถึง normality หรือ lognormality ได้โดยง่าย โดยปกติการกระจายค่ามักเป็นแบบ lognormal มากกว่า normal ถ้าค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean) เข้าใกล้ค่ามัธยฐาน (median value) มากกว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean)

ในการสำรวจธรณีเคมี มักใช้ค่าที่ร้อยละ 97.5 ของ percentile เป็นค่าปกติ แต่ไม่ใช่จะเป็นค่านี้เสมอไป ต้องนำเอาตัวบ่งชี้ทางธรณีวิทยาและทางสถิติเข้าช่วยเสมอ สมมติถ้าหากภายในค่าทางธรณีเคมีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ อย่างเช่นบางข้อมูลมักอยู่ตรงส่วนปลายสุดของช่วง และไม่มีค่าใดเลยของจำนวนร้อยละ 2.5 ของตัวอย่างที่คาดว่ามันจะเรียกว่า "ค่าผิดปกติ" เป็นค่าที่ผิดปกติ ในทางกลับกัน ถ้าค่าส่วนใหญ่ที่ได้เป็นค่าผิดปกติเมื่อเทียบกับค่าปกติ 2.5 ที่เลือกมา ซึ่งผลก็คือทำให้ได้ลักษณะรูปร่างของแหล่งแร่เล็กลงไป แนวทางที่จะหาตัวอย่างที่จะเป็นค่าผิดปกติสามารถทำได้โดยใช้อัตราส่วนค่าผิดปกติ (anomaly ratio) ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาหารด้วยค่าเหนือปกติที่เลือกสรรไว้ ด้วยวิธีนี้เราสามารถทำให้ค่าผิดปกติมีความหมายชัดขึ้น (ดู Rosenblum, 1980) หรืออีกทางหนึ่งทำได้โดยการตรวจช่วงห่างที่มากที่สุดระหว่างค่าที่อยู่ติดกันในลักษณะจัดค่าเรียงเป็นแถวตามลำดับ (ดู Miesch, 1981)

ในทุกวิถีทางดังกล่าวในการคำนวณค่าผิดปกติ มีสิ่งหนึ่งที่น่าจะนำมาคิดคือ เรามักไม่มีโอกาสเกี่ยวข้องกับค่าปกติธรรมชาติของตัวอย่างเลย เราอาจจะพยายามทำตัวอย่างให้เหมือนกัน แต่ว่าในธรรมชาติเรามักพบตัวอย่าง 2 กลุ่ม หรือมากกว่าเสมอ นั่นหมายความว่าตัวอย่างที่เก็บอาจมี 2 พวก เช่นมาจากคนละหน่วยหินทางธรณีวิทยา หรือเป็นตัวอย่างที่มาจากคนละประเภทของการกระจายตัวทางธรณีเคมี หรืออาจมาจากพวกที่อยู่ในกลุ่มปกติกับพวกที่อยู่ในกลุ่มผิดปกติ ดังนั้นเมื่อสร้างกราฟแผนภาพ (histogram) หรือ Frequency distribution จึงมักปรากฏว่ามี 2 ยอด (peak) แสดงถึง bi-modal แต่ละกลุ่มก็ดูเหมือนจะสร้าง frequency distribution ของตัวเอง ถ้าหากมี 2 กลุ่มที่กลุ่มหนึ่งมากกว่าอีกกลุ่มน้อย ค่าเหนือปกติระหว่างกลุ่มทั้งสองจะปรากฏให้เห็นได้ อย่างไรก็ตามมักพบเสมอว่ากลุ่ม 2 กลุ่มนี้มักคาบเกี่ยวกับ (overlap) กันมากเกินไปหรือเกิดความไม่เท่าเทียมกันระหว่างกลุ่ม ทำให้ไม่ปรากฏค่าเหนือปกติได้ชัดเจน

ทางที่จะแก้ปัญหานี้ก็คือ แสดงข้อมูลด้วย Cumulative Frequency (เช่นในรูป 5.13.4) มากกว่าที่จะแสดงแบบ frequency distribution ปกติ โดยเทียบกับค่าความเข้มข้นของธาตุที่เราสนใจ ในทางสถิติ lognormal distribution ของกลุ่มตัวอย่างเพียงชนิดเดียวจะให้ค่าออกมาเป็นเส้นตรงบน logarithmic probability paper แต่ถ้ามีกลุ่ม 2 กลุ่ม จะเกิดการหักงอขึ้นตรงช่วงต่อทำให้ทราบว่ามีการมีกลุ่มข้อมูล 2 กลุ่ม (รูป 5.13.5) ซึ่งต้องใช้วิธีแก้ปัญหาคิดค้นโดย Sinclair (1974) ดูตาราง 5.13.3 ในรูป 5.13.6 แสดงข้อมูล

รูป 5.13.5 กราฟที่เรียก log probability plot ของตัวอย่างผสม 2 ชุด จากรูป 5.13.2 โดยอาศัยข้อมูลจากตาราง 5.13.2 โดยวิธีของ Sinclair (1974) ในตาราง 5.13.3

ตาราง 5.13.3 แนวทางหรือขั้นตอนในการจัดแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยวิธีของ Sinclair (1974)

รูป 5.13.6 กราฟแสดงการกระจายความถี่สะสมของทองแดง สังกะสี และโมลิบดีนัม ในกลุ่มตัวอย่างตะกอน
ท้องน้ำจากกัวเตมาลา (Lepeltier, 1969)

การสำรวจตะกอนท้องน้ำใน Guatemala เส้นแสดงสังกะสี (Zn) จะโค้งงอขึ้น แสดงว่าค่าส่วนใหญ่(ซึ่งมากกว่าปกติ)มีจำนวนมากเกินไปในการกระจายตัวแบบ lognormal ซึ่งผลที่ได้นี้อาจเนื่องมาจากการปนกันของหน่วยหิน 2 แบบ ซึ่งมีค่าของ Zn ต่ำ หรืออาจมาจากการปนกันเองของพวกที่มีเม็ดหยาบกับอีกพวกที่มีเม็ดละเอียด และในกรณีดังกล่าวนี้ค่าตัวเลขต่ำๆ นี้มักไม่ใช่ส่วนสำคัญของกลุ่ม ในทางตรงข้ามทองแดง(Cu)แสดงลักษณะการหักงอเหมือนกัน แต่ Cu แสดงถึงค่าผิดปกติหรือค่าสูงๆมีมากเกินไป ถ้าหากว่าไม่ใช่เพราะมีค่า Cu สูงมากมาย (ซึ่งมักเป็นค่าที่เราให้ความสนใจมากกว่า)เส้น lognormal XO คงจะต่อเนื่องไปทาง Z มากกว่าไปทาง Y ในกรณีของ Molybdenum (Mo) แสดงในตอนแรกเป็นการโค้งแบบบวก (positive) และต่อมาเป็นแบบลบ (negative) แสดงให้เห็นว่ามีตัวอย่างอยู่ 2 กลุ่มที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือตัวอย่างที่น่าจะสัมพันธ์กับเส้น a และเส้น b (ซึ่งเราก็สามารถคำนวณหากลับไปได้) ดังนั้นถ้าการกระจายตัวของกลุ่มทั้งสองเป็นจริง ค่าเหนือปกติ(threshold)จะอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างส่วนต่อ (A+B) ในปัจจุบัน Cumulative probability plots เป็นที่นิยมใช้กันมาก ในการคำนวณทางสถิติธรณีเคมี (Geochemical Statistics)

5.14 การตีความทางสถิติ

การตีความทางสถิติในการสำรวจธรณีเคมีและการประเมินค่าทางสถิติของค่าเหนือปกติและค่าผิดปกติอาจเกี่ยวข้องกับค่าเพียงค่าเดียวในเวลาหนึ่ง และถึงจุดใดจุดหนึ่ง (ที่เรียก univariate analysis) หรืออาจเกี่ยวข้องกับค่าหลายๆค่าก็ได้ (multivariate analysis)

Univariate analysis ได้แก่การวิเคราะห์แบบ trend-surface analysis กับ moving-average analysis ซึ่งอาศัยการกระจายตัวของค่าทางธรณีเคมีเป็นหลัก ทั้งสองวิธีมักใช้เมื่อตัวอย่างมีมาก จึงต้องอาศัยคอมพิวเตอร์เข้าช่วย trend-surface analysis มักเกี่ยวข้องกับการสร้างผิวทางเลขคณิตให้มาสัมพันธ์กับค่าตัวอย่างหรือข้อมูลจริงๆ ผิวแบบต่างๆ (polynomial models) แสดงไว้ในรูป 5.14.1 หรืออาจแสดงด้วย Fourier models ซึ่งเป็นลักษณะของฟังก์ชัน (function) ของ Periodic wave ความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงกับ trend surface ที่ได้จากการคำนวณจะเรียก residual ที่แสดงในรูป 5.14.2 แผนที่ที่แสดงค่า residual จะแยกเอาส่วนที่เบี่ยงเบนไปจาก regional trend ออกมา และทำให้สามารถแยกส่วนหรือค่าผิดปกติออกจากค่าปกติหรือส่วนปกติได้ ยิ่ง degree สูงมากเท่าใดหรือลำดับ(order)ของ polynomial trend surface มากเท่าใดรูปแบบก็จะยุ่งเหยิงมากขึ้น แต่เราจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ให้กับข้อมูลได้ดีขึ้นและค่าของ residual ก็จะอ่อนลง

Moving - average analysis แสดงถึง trends ตามข้อมูลธรณีเคมีโดยการคำนวณค่าเฉลี่ย สำหรับค่าที่ตกอยู่ในช่วงที่สามารถเลื่อนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งได้บนแผนที่ ยิ่งช่อง (window)กว้างมากเท่าใดก็จะทำให้ได้ผิวเรียบมากขึ้น แต่ถ้าช่องยังเล็กก็จะให้ผลแบบเดียวกับ complex

wave-form ของ Fourier model ซึ่งเป็นการลดจำนวนและความแรงของresidual ดังนั้นในการวัดค่าให้
ถี่(refinement)

รูป 5.14.1 Trend ในสภาพปกติ (อย่างง่าย) จาก curvilinear regression และ
hypersurface analysis โดยเกี่ยวข้องกับตัวแปรอิสระ 1, 2, และ 3 ตัว (Harbaugh,
1964)

รูป 5.14.2 ตัวอย่าง trend surface และ residual (a) แผนที่ข้อมูลดิบ (b) First-degree trend surface (c) Contoured residuals จาก first – degree trend (d) Second-degree trend surface และ (e) Contoured residual จาก second-degree trend พื้นที่ที่ residual เป็นค่าบวกแสดงด้วยแสง (Davis, 1986)

จึงอาจต้องใช้วิธี moving average (low-pass filter) หรือวิธี moving-average residual (high-pass filter) เข้าช่วย ตัวอย่างเช่น ค่าที่อยู่ในช่องหรือ window จะใช้เปรียบเทียบกับค่าที่อยู่นอกช่องมากกว่าพวกที่อยู่ข้างในเหมือนกัน ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งสองรูปแบบ คือ trend-surface และ moving average จะใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกัน แต่อาจให้หรือแสดงถึง trend ที่คล้ายคลึงกัน Nichol, Garrett และ Webb(1969) พบว่าทั้งสองวิธีให้ผลออกมาคล้ายกัน โดยดูได้จากข้อมูลธาตุมีน้อย(minor element)จากหิน ดิน และ ตะกอนท้องน้ำ ในการสำรวจชั้นพื้นฐานใน Sierra Leone (ดูรูป 5.14.3)

Multivariate analysis ที่สำคัญได้แก่ factor analysis, cluster analysis, regression analysis, discriminant analysis และ characteristic analysis

Factor analysis ใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจหาแฟกเตอร์ร่วมกันระหว่างตัวแปรหรือค่าที่ไม่ขึ้นต่อกันจำนวนหนึ่ง หรืออาจเรียก Principal Component Analysis (หรือ PCA) ข้อมูล matrix ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแถวของตัวอย่าง (entities) และแนวดิ่ง(column) ของตัวอย่าง (attributes) เราใช้ข้อมูล matrix นี้หา correlation factor หรือ principal component ซึ่งสามารถสกัดหรือแสดงออกมาเป็นจุดๆ (data points) หรืออยู่ในรูปของ envelope หรือรูปทรงรีรอบจุดที่อยู่กันเป็นกระจุกนั้น วงรีนี้มี 3 แกน ตั้งฉากกันที่เรียก eigenvector ข้อมูลจะถูกนำมาใส่ไว้ตามแกนต่างๆ และจะปรากฏ variance ที่ใหญ่ที่สุด (largest eigen value) ออกมา ส่วน variances ที่ใหญ่ลำดับสองและสามจะปรากฏให้เห็นในแกนที่เหลืออีก 2 แกน ที่สำคัญก็คือ data matrix จำนวนมากและยุ่งเหยิงน้อย มักนำไปสู่แนวคิดที่ก่อให้เกิดการเทียบเคียง ซึ่งวัดและคำนวณได้ เราเรียก factor analysis ที่หาและประเมินค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างว่า X-mode analysis ส่วน factor analysis ที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น ค่าความมากน้อยของธาตุ จะเรียก R-mode analysis ตัวอย่างการใช้ factor analysis ในการสำรวจธรณีเคมี เช่น การศึกษาตะกอนท้องน้ำจากบริเวณ S-Carl ซึ่งเป็นแหล่งตะกั่ว-สังกะสีของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดย Buttmer & Saagar (1983) ด้วยวิธี Factor analysis นี้ สามารถหาตัวแปร 8 ตัวที่มีความสำคัญทางธรณีวิทยาได้ โดยใช้ R-mode analysis ซึ่งแสดงการเทียบเคียงหรือความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มของโลหะกลุ่มหนึ่งกับ "ore-factor" และให้การเทียบเคียงหรือความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มโลหะอีกกลุ่มหนึ่งกับ "bog-factor" ทางน้ำได้

Cluster analysis เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งใช้จำแนกหรือจัดกลุ่มข้อมูลธาตุหลายๆ ตัวเข้าด้วยกัน เพื่อให้เป็นหมู่หรือกลุ่มย่อยโดยอาศัยความสัมพันธ์หรือการเทียบเคียงระหว่างแร่ในกลุ่มเดียวกัน วิธีการทำที่นิยมมากที่สุดคือการจัดตัวแปรให้เป็นรูปกิ่งคล้ายกิ่งไม้ โดยให้ส่วนที่เล็กที่สุดแสดงถึงธาตุแต่ละตัว (หรือ R-mode) ต่อมาจึงเป็นส่วนที่ใหญ่ขึ้น เช่น ตัวอย่าง (Q-mode) และรวมกันเป็นกลุ่มของตัวอย่าง (หรือ P-mode) โดยที่สาขาหลายๆ สาขาจะเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้านและกลายเป็นลำต้นในที่สุด Obial และ Jamer (1973) ได้ใช้ประโยชน์จากการหา cluster analysis กับการศึกษาความหมายค่าธาตุหลายตัวจากตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวพวกเขาสามารถแยกกลุ่มธาตุต่างๆ ออกเป็น 3 กลุ่ม

รูป 5.14.3 แผนที่ธรณีเคมีแสดงการกระจายตัวของนิกเกิลโดย trend – surface analysis (แถวบน) และโดย rolling – mean analysis (แถวล่าง) แถบ Sierra Leone (จาก Nichol และคณะ, 1969)

กลุ่มหนึ่งสัมพันธ์หรือเทียบเคียงได้กับ clay minerals & resistater อีกกลุ่มกับ Mn-& Fe-oxides และอีกกลุ่มสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดเป็นแหล่งแร่ (ดูรายละเอียดในรูป 5.14.4)

Regression Analysis เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้ใน trend-surface analysis เพื่อให้ตรวจหาและวัดความสัมพันธ์ระหว่างธาตุแต่ละตัวในพื้นที่หนึ่งๆ ที่สำรวจโดยธรณีเคมี วิธีการนี้ทำให้เราทราบว่าในพื้นที่นี้เราควรเลือกใช้ธาตุแม่สื่ออะไรดี จึงจะเหมาะสมที่สุด หรือให้ความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับการเกิดเป็นแหล่งแร่ได้มากที่สุด และเพื่อตรวจสอบค่ารอบกวนที่อาจเกิดได้ เช่น ที่ทำให้เกิดทองแดงหรือสังกะสีบนเปลือกหรือผิวที่มีการตกตะกอนของ Mn- และ Fe-oxide โดยหลักการเดียวกับ trend-surface analysis คือต้องสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อให้เข้ากับข้อมูลที่มี ซึ่งในการทำดังกล่าวตัวแปรหลายตัวหรือค่าของธาตุหลายๆตัว จะสัมพันธ์กับตัวแปรตัวหนึ่งที่เลือกมา (ซึ่งก็คือค่าธาตุหนึ่งๆนั่นเอง) และสามารถบอกได้ว่าธาตุอิสระบางตัวอาจทำหน้าที่เป็นธาตุแม่สื่อได้มากกว่าน้อย

Discriminant Analysis ให้แนวทางเกี่ยวกับการวัดหรือตรวจหาว่าตัวอย่างใหม่จะตกอยู่กับกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง แม้กลุ่มจะมีความซับซ้อนและอาจคาบเกี่ยวกันก็ตาม แต่ก็สามารถแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้ เช่น กลุ่มอาจแบ่งเป็นพวกที่ให้แร่กับพวกที่ไม่ให้แร่ หรืออาจแบ่งตามลักษณะหรือชนิดหิน เช่น พวกที่เป็นหินข้างเคียงกับพวกที่เป็นหินอัคนี ในรูป 5.14.5 แสดงถึงกลุ่ม 2 กลุ่มที่สามารถแยกออกจากกันได้โดยการคำนวณหา Discriminant function สำหรับตัวอย่างหนึ่งชุด ตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกประเมินค่าว่าควรจะอยู่ในพวกไหนบ้าง Brabee (1983) อาศัยวิธีการนี้มาใช้ในการสำรวจตัวอย่างดินที่บริเวณ Pine Point รัฐ Northwest Territory ในประเทศแคนาดา ปรากฏว่าตัวอย่างที่มี Zn มาก จะแสดงความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกับการเกิดแหล่งแร่มากที่สุด ซึ่งก็คือหินดินดานที่มีสังกะสีสูงในตัวเอง บางตัวอย่างที่มีสังกะสีสูงอาจมีลักษณะของ Ni-Mo & Cr สูงด้วย ซึ่งก็จัดให้อยู่ในกลุ่มหินดินดานที่ไม่ให้แร่ (ore-barren shale)

ส่วน characteristic analysis เป็นวิธีการคล้ายกับ discriminant analysis โดยวิธีนี้เราสามารถคัดพื้นที่ย่อยๆที่สำคัญออกจากพื้นที่ใหญ่ได้โดยอาศัยความคล้ายคลึงกับรูปแบบทางธรณีเคมี (geochemical model) ที่คิดไว้หรือมีอยู่ โดยดูจากบริเวณที่มีการเกิดแร่แน่ๆ Botbol และคณะ (1978) ได้ใช้วิธีนี้ในการเลือกสรรพื้นที่ที่จะใช้สำรวจขั้นละเอียดในบริเวณแถบ Coeur d'Alene รัฐ Idaho

อาจกล่าวได้ว่างานทางด้านธรณีเคมีให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการสำรวจแร่มาก แต่ข้อมูลนั้นจะน่าสนใจก็ต่อเมื่อมีการตีความหมายโดยอาศัยหลักการทางธรณีวิทยาและสถิติเข้าช่วยเท่านั้น จึงสามารถหารูปแบบ(ที่เป็นไปได้)ของแหล่งแร่ได้ แต่รูปแบบที่เราคิดขึ้นจะเป็นไปได้มากน้อยขนาดใด ยังไม่มีใครบอกหรือพิสูจน์ได้ถ้าไม่มีการเจาะสำรวจ(drilling exploration) เพื่อดูว่าที่ว่าเป็นอย่างนั้นหรืออย่างโน้นนั้นมันจริงเท็จแค่ไหน!

รูป 5.14.4 R-Mode cluster analysis โดยวิธี UPGM จากตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ 170 ตัวอย่างใน Derbyshire ประเทศอังกฤษจากธาตุ 19 ธาตุ จัดแบ่งเป็นกลุ่มแร่ดิน resistate กลุ่ม Mn – Fe และกลุ่มสินแร่ Pb (Obial & James, 1973)

รูป 5.14.5 การกำหนดตำแหน่งโดยการกระจาย bivariate 2 ชุด ซึ่งมีการซ้อนทับข้อมูลระหว่าง A และ B ซึ่งต่อมาสามารถแยกกลุ่มได้โดยวิธี discrimination function (จาก Davis, 1986)