



## การตรวจจับดินเค็มโดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล Saline Soil Detection Using Satellite Remote Sensing

ภูวดล โกมณเตียร<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

ความเค็มในดิน จัดเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชลประทาน จำเป็นต้องมีการติดตามตรวจสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจอย่างทันท่วงทีสำหรับการจัดการดิน การฟื้นฟู และการปรับปรุงดินให้กลับสู่สภาพเดิม การติดตามตรวจสอบความเค็มในดินจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมีการใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลแบบหลายช่วงคลื่น ซึ่งยังคงต้องแปลงข้อมูลให้ถูกต้องก่อนนำไปใช้เพื่อจำแนกและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การตรวจจับและการประเมินการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอดีต ทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางธรรมชาติและขนาดของการเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้สามารถดำเนินการได้ด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยและอาศัยความรู้ความชำนาญจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลการติดตามตรวจสอบที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการผสมผสานข้อมูลการสำรวจระยะไกลกับข้อมูลภาคสนามและข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีส่วนช่วยในการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งในด้านของขนาด เวลา แหล่งข้อมูลและโครงสร้าง นับเป็นความท้าทายอย่างยิ่งของนักวิจัยในการวิเคราะห์หาตัวชี้วัดความเค็มที่เหมาะสมสำหรับจำแนกดินเค็มได้อย่างจำเพาะเจาะจง ดังนั้นเทคนิคการสำรวจระยะไกลและการสำรวจภาคพื้นดินที่เหมาะสมสามารถนำมาประยุกต์ในการตรวจจับความเค็มได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านความเที่ยงตรงและการประหยัดงบประมาณ

<sup>1</sup> ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม 44150

## ABSTRACT

Nowadays, the soil salinity is becoming a more serious environmental problem, especially in the irrigation areas. The situation must be closely followed-up to provide the supporting data for urgent decision making, restoration, and improve the soil and land. The effectiveness of saline soil detection is depending on the proper application of imagery with different spectrum and also to transform and classify before interpretation. Besides, the detection and assessment of the changes at present and the past is capable to figure out the change of nature as well as the scale of change. This analysis pattern is conducted through the up-to-date equipment and relied on the specialist.

The best saline soil detection results can be obtain after the merging of satellite remote sensing data, field study data and the laboratory data. The Geographic Information System (GIS) is suitable for data manipulation in terms of detecting the scale, time, source and structure of the data. It is very challenging for researcher to properly analyze the specific indicator of Saline Soil. Hence, the satellite remote sensing technique and the ground survey have been applied to effectively detect the salinity it is low cost and accurate.

**คำสำคัญ:** การสำรวจดิน ดินเค็ม การสำรวจระยะไกล

**Keywords:** Soil survey, Saline soil, Remote sensing

## บทนำ

อันตรายของดินเค็มอาจเทียบไม่ได้กับการเกิดแผ่นดินไหวหรือการเกิดดินถล่ม แต่ก็ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อสภาพสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะทางการเกษตร ดินเค็มจะส่งผลกระทบต่อ การเพาะปลูกและผลผลิตทางการเกษตร ทั้งในเขตพื้นที่แห้งแล้งและพื้นที่ชลประทาน มีผู้ประเมินไว้ว่าพื้นที่ซึ่งเกิดภาวะดินเค็มทั่วโลก มีขนาดพื้นที่ประมาณ 1 พันล้านเฮกตาร์ ซึ่งเทียบเคียงได้เท่ากับร้อยละ 7 ของพื้นที่ทวีปยุโรป และประมาณ 77 ล้านเฮกตาร์ มีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์ (Ghassemi et al., 1995)

โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ชลประทานทั่วโลกมี สัดส่วนที่เป็นพื้นที่ดินเค็มประมาณร้อยละ 20 และจะมี มากขึ้นถึงร้อยละ 30 ในบางประเทศ เช่น อียิปต์ อิหร่าน และอาร์เจนตินา ในอนาคตพื้นที่แห้งแล้งจะถูก นำมาใช้เป็นพื้นที่เกษตรกรรมด้วยความจำเป็นจากการ เพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร มีการพัฒนาพื้นที่ ชลประทานเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการ ขยายตัวของพื้นที่ดินเค็มตามมา (Ghassemi et al., 1995)

นอกจากนี้แล้ว ความเค็มยังส่งผลต่อ ปรากฏการณ์เสื่อมสภาพของดิน เช่น การแพร่กระจาย ความเค็มของดิน การชะล้างหน้าดิน และก่อปัญหาทาง วิศวกรรม อีกทั้งเมื่อประเมินผลกระทบในเชิง

เศรษฐศาสตร์มักพบว่าเป็นสาเหตุที่ต้องตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวมากขึ้น โดยปกติแล้วการพิจารณาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ มักไม่ได้รวมถึงความสูญเสียมูลค่าทรัพย์สินของพื้นที่เพาะปลูกซึ่งเกิดจากดินที่เสื่อมคุณภาพและต้นทุนทางอ้อมอื่น ๆ เช่น การเกิดยูโทรฟิเคชันในแม่น้ำและบริเวณปากแม่น้ำและความเสียหายต่อโครงสร้างพื้นฐานและต้นทุนทางสังคมของธุรกิจการเกษตร อย่างไรก็ตามการดำเนินการฟื้นฟูพื้นที่ดินเค็มนั้น ต้องการข้อมูลที่ถูกต้องและเชื่อถือได้เพื่อช่วยในการจัดลำดับความสำคัญและเลือกวิธีการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดำเนินงานในแต่ละกรณี รวมไปถึงผู้ที่มีหน้าที่ตัดสินใจและเกษตรกรผู้เพาะปลูกพืช ก็ยังต้องการความมั่นใจด้วยว่าเทคนิคการประเมินและข้อมูลต่าง ๆ เหล่านั้น มีความถูกต้องและเชื่อถือได้อย่างแท้จริง ซึ่งถ้าหากมีการประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจและสังคมไว้สูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริง ทั้งในด้านของขอบเขต ขนาดและการกระจายตัวของพื้นที่ซึ่งเกิดภาวะดินเค็มแล้วก็อาจเกิดผลเสียตามมาได้ (Ghassemi et al., 1995)

การเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มและการคาดการณ์ลักษณะหรือปริมาณการเสื่อมสภาพที่เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องอาศัยการดำเนินการติดตามตรวจสอบ ดังนั้น การตัดสินใจอย่างถูกต้องและเหมาะสมตามสภาพการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างทันท่วงทีจะสามารถช่วยให้การปรับปรุงวิธีการปฏิบัติการ หรือการดำเนินการแก้ไขฟื้นฟูพื้นที่นั้นๆ ได้เป็นอย่างดี โดยวิธีการติดตามตรวจสอบค่าความเค็มดังกล่าวนี้ สิ่งที่ต้องดำเนินการเป็นลำดับแรกคือพิจารณาสถานที่ซึ่งมีความเข้มข้นของเกลือ จากนั้นจึงตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในเชิงพื้นที่และช่วงเวลา โดยค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทิศทางการแพร่กระจายของเกลือทั้งในบริเวณพื้นผิวดินและ

ภายในชั้นดิน รวมทั้งความสามารถของเครื่องมือสำรวจระยะไกลที่ใช้ในการตรวจจับปริมาณเกลือ (Zinck, 2001)

### ข้อจำกัดในการใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกล

เกลือที่พบในบริเวณพื้นผิวดิน สามารถตรวจจับได้ด้วยข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล ทั้งทางตรงบนบริเวณพื้นที่ซึ่งปกคลุมด้วยผลึกเกลือและคราบเกลือ หรือทางอ้อมผ่านทางพืชชนิดที่อาศัยความเค็มในการเจริญเติบโต หรือพืชที่ได้รับผลกระทบจากความเค็ม (Mougenot et al., 1993) ภาวะความเค็มบนพื้นผิวดินนั้น เป็นกระบวนการที่มีพลวัตสูง ทำให้เกิดข้อจำกัดในการจำแนกข้อมูล เนื่องจากคุณลักษณะของเกลือ สเปกตรัมของคลื่น (ย่านความยาวคลื่น) สภาพพื้นที่และเวลา รวมทั้งยังอาจเกิดความไม่ชัดเจนของข้อมูลการตรวจจับเกลือ เนื่องจากลักษณะพืชที่ปรากฏ และลักษณะพื้นผิวต่างๆ ล้วนมีส่วนทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของคลื่นรังสี

#### ลักษณะคลื่นสเปกตรัมของเกลือ

การสำรวจภาคพื้นดินและการวัดคลื่นการแผ่รังสี แสดงให้เห็นว่าปริมาณและคุณสมบัติแร่ของเกลือรวมทั้งความชื้นในดิน สีของดิน และความขรุขระของพื้นผิว เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสะท้อนคลื่นรังสีของเกลือ (Metternicht and Zinck, 2002) Mougenot et al. (1993) รายงานว่า การสะท้อนของคลื่นรังสีมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพพื้นผิวที่เปลี่ยนไปรวมทั้งการปรากฏหรือไม่ปรากฏคราบเกลือ ความหนาของคราบเกลือ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเรื่องความขรุขระของพื้นที่ (surface roughness) ในพื้นที่ที่พบคราบพื้นผิวจะราบเรียบซึ่งเกิดจากการรบกวนของเกลือชนิดต่าง ๆ และวิธีการจัดการดินที่ส่งผลกระทบต่อการสะท้อนรังสีของ

พื้นที่ที่มีคราบเกลือ อีกทั้งยังก่อให้เกิดลักษณะวัตถุที่มี สันฐานขนาดใหญ่เด่นชัดบนพื้นผิวดิน ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของเกลือที่มีลักษณะโปร่งจะมีโซเดียมซัลเฟต ในปริมาณมาก ในขณะที่คราบเกลือจะมีความเรียบ เนื่องจากมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ (Driessen and Schoorl, 1973) โดยทั่วไปดินที่มีคราบเกลือจะมีพื้นผิว เรียบกว่าดินที่ไม่มีเกลือ และเมื่อมีการเพาะปลูกมักจะมี ปริมาณการสะท้อนของรังสีที่สูงกว่า ในแถบช่วงคลื่นที่ ตามองเห็นและคลื่นอินฟราเรด ในขณะที่ พื้นที่ เพาะปลูกซึ่งไม่มีความเค็มจะมีการสะท้อนของรังสี น้อยลง เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะ ความขรุขระของพื้นที่ อันเกิดจากการไถพรวน

แร่ เกลือ เช่น คลอไรด์ คาร์บอเนต และซัลเฟต อาจมีการดูดกลืนของคลื่นรังสีในย่าน สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เฮไลต์ (NaCl) ซึ่ง มีลักษณะโปร่งแสง อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมีและ โครงสร้างที่ขัดขวางการดูดกลืนในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ และช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน (Hunt et al., 1972) ในทางตรงข้าม คาร์บอเนตมีคุณสมบัติการ ดูดกลืนคลื่นรังสีในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน จาก การสั่นสะเทือนของกลุ่ม  $\text{CO}_3^{2-}$  และโมเลกุลของน้ำที่ เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Mulders, 1987) Siegal and Gillespie (1980) รายงานว่าคุณสมบัติการ ดูดกลืนของคาร์บอเนตในช่วงคลื่นอินฟราเรดกลาง ซึ่ง เป็นการดูดกลืนของน้ำและหมู่ OH ในขณะที่ Mulders (1987) พบว่าช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด (1.5-1.7 ไมโครเมตร) เป็นช่วงการดูดกลืนสำหรับลักษณะพื้นผิว ดินที่มีอิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เป็นองค์ประกอบ

Csillag et al. (1993) ได้ตรวจสอบคลื่นรังสี 5 ช่วง อันได้แก่ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ (0.55-0.77 ไมโครเมตร) คลื่นอินฟราเรดใกล้ (0.9-1.3 ไมโครเมตร) คลื่นอินฟราเรดกลาง (1.94-2.15 2.15-2.3 2.33-2.4

ไมโครเมตร) ที่ส่งผลต่อลักษณะค่าความเค็มของดิน จากการทดลองพบว่า ด้วยองค์ประกอบของความชื้น เพียงเล็กน้อย เกลือจะให้ค่าการสะท้อนสูงในช่วงคลื่น สเปกตรัมที่ตามองเห็นได้ (โดยเฉพาะสีน้ำเงิน) และให้ ค่าการสะท้อนต่ำในช่วงอินฟราเรดกลาง ซึ่งเป็น ลักษณะที่แสดงให้เห็นว่ามีโมเลกุลของน้ำยึดติดแน่นกับ ผลึกเกลือ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นเกลือบริสุทธิ์ที่มี ความชื้นสูง ซึ่งโมเลกุลของน้ำดังกล่าวมักจะมีการจับตัว ในโครงสร้างหยาบ (อิปซัม) มากกว่าโครงสร้างเรียบ (เฮไลต์)

### รูปแบบของความเค็มเชิงพื้นที่

ความเข้มข้นของเกลือในพื้นที่จะสูงหรือต่ำ เป็นหย่อมๆ ทำให้เกิดลักษณะการผสมของคุณลักษณะ ที่หลากหลายภายในแต่ละพิกเซลของข้อมูลดาวเทียม นอกจากนี้ลักษณะคราบเกลือในเชิงโครงสร้าง จากที่มี ลักษณะเรียบไปจนถึงขรุขระ และในเชิงของสี จากสี ขาวไปจนถึงสีดำ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการสะท้อน เกิดความแปรปรวน และจากการทดสอบดินด้วย เครื่องวัดการแผ่รังสีแบบ Crop Scan 8 ช่วงคลื่น ครอบคลุมช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดใกล้ ในกลุ่มดินที่มีความเค็มมากไปจนถึงดินต่างเล็กน้อย และสีดินลดลงจาก 10 YR 6/5 เป็น 10 YR 6/3 พบว่า ค่าการสะท้อนลดลงของในทุกช่วงคลื่น และคราบเกลือ จะให้การสะท้อนที่สูงกว่าพื้นผิวดินที่ไม่มี ความเค็ม อย่างไรก็ตามการรบกวนคราบเกลือจากการคราดไถจะ ทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น ในปริมาณเกลือที่ เท่ากันจะทำให้เกิดการสะท้อนน้อยลง (Epema, 1992)

### ช่วงเวลาการพิจารณาดินเค็ม

ช่วงเวลาที่ดีที่สุดสำหรับการบันทึกข้อมูลและ การรับสัญญาณข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลโดย อาศัยพลังงานแสงธรรมชาติ (เช่น คลื่นที่มองเห็นได้

และคลื่นอินฟราเรด) ต้องคำนึงด้วยว่า ช่วงเวลาใด สามารถตรวจจับเกลือได้ดีที่สุด โดยทั่วไปคือช่วงปลายฤดูแล้ง เนื่องจากมีการละลายของเกลือจากช่วงฤดูฝนที่ผ่านมา พื้นผิวที่มีความเค็มจะปรากฏเป็นสีขาว ในทางกลับกันดินที่เป็นต่างมักจะมีพื้นผิวเป็นสีดำ เนื่องจากมีปริมาณโซเดียมมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ (Mougenot et al., 1993)

การสำรวจจากระยะไกลเชิงแสง (optical remote sensing) มีความเป็นไปได้ในการใช้จำแนกดินเค็มที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันทั้งทางด้านปริมาณความชื้น ความบริสุทธิ์ของเกลือ สารเคลือบและลักษณะพื้นผิวอื่น ๆ ที่สัมพันธ์กับช่วงคลื่น โดยทั่วไปพื้นที่ซึ่งมีความเค็มในระดับปานกลางถึงสูงจะสามารถตรวจสอบได้ง่าย ในขณะที่พื้นที่ซึ่งมีระดับความเค็มต่ำ และพื้นที่ซึ่งมีความเค็มในระยะเริ่มต้นมักจะทำให้เกิดการจำแนกผิดพลาดได้ ดังที่ McGowen and Mallyon (1996) ได้รายงานผลการประเมินระดับความเค็มพบว่าได้ค่าสูงกว่าค่าที่แท้จริงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ข้อมูล Landsat TM ภายใต้การจำแนกแบบความเป็นไปได้มากที่สุด (maximum likelihood) เนื่องจากการรบกวนของวิธีการจัดการดิน พืชท้องถิ่น และชนิดของดิน โดยสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยพิจารณาภาพจากหลายๆ ช่วงเวลา ในทางกลับกันผลการประเมินระดับความเค็มในพื้นที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริงจากการสำรวจระยะไกลนั้น อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนระหว่างดินที่มีความเค็มเล็กน้อยและดินที่ไม่มีมีความเค็มเลย

#### การรบกวนของพืช

โดยทั่วไปพืชมักจะไม่เจริญเติบโตในพื้นที่ที่มีองค์ประกอบของเกลือหรือโซเดียม แต่ในธรรมชาติอาจพบพืชชนิดพิเศษอยู่จำนวนหนึ่ง เช่น *Salicornia* spp.

และพืชปลูกที่ทนต่อความเค็ม เช่น บาร์เลย์ ฝ้าย และพืชตระกูลถั่ว พืชทนเค็มเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการตอบสนองต่อคลื่นรังสีทั้งหมดของพื้นที่ดินเค็ม โดยเฉพาะในแถบสีเขียวและสีแดง (Metternicht, 1998)

พืชที่ชอบเกลือและพืชทนเค็ม เช่น *Cynodon dactylon* และพืชวงศ์ Chenopodiaceae พบได้ทั่วไปในพื้นที่ดินเค็มและเป็นต่าง จากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องตรวจวัดการแผ่รังสีภาคพื้นดิน (Skye Instruments) พบว่า พืชทนเค็มวงศ์ Chenopodiaceae มีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เข้มข้นสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น และมีการสะท้อนกลับในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ในทางตรงข้ามเส้นสเปกตรัมของ *Cynodon dactylon* มีการสะท้อนเพิ่มขึ้นในรูปแบบที่มีค่าความชื้นเป็นบวก ตลอดช่วงแถบคลื่นที่ตามองเห็นได้และคลื่นอินฟราเรดใกล้ ซึ่งบ่งบอกว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อยกว่า และการศึกษาของ Metternicht (1996) พบว่า พืชชอบเกลือเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีในการใช้แบ่งแยกพื้นที่ดินเค็มหรือเป็นต่างออกจากพื้นที่ทั่วไป แต่อาจทำให้เกิดการปะปนของคลื่นรังสีในกลุ่มดินเค็มที่เป็นต่าง

แม้ว่าจะเกิดปรากฏการณ์การรบกวนของพืชต่อคุณสมบัติการสะท้อนของความเค็ม แต่ลักษณะดังกล่าว ก็สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมในเชิงความสัมพันธ์ของข้อมูลการสำรวจระยะไกลกับความเค็มของดินได้ (Szabo et al., 1997) ตัวอย่างเช่น ค่า NDVI และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน มีค่าสหสัมพันธ์สูง ทำให้สามารถแยกพื้นที่ดินเค็มที่เป็นต่างออกจากพื้นที่ทั่วไปได้ แต่ก็ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างดินเค็มและดินที่เป็นต่างได้ (Wiegand et al., 1994)

นักวิจัยบางท่านได้เสนอให้ทำการตรวจจับการแพร่กระจายของความเค็ม ด้วยวิธีการผสมผสานข้อมูลความแตกต่างของพืชและพื้นดินที่ว่างเปล่า (Metternicht and Zinck, 1997) ในขณะที่นักวิจัยท่านอื่นก็ได้เสนอแนะวิธีการจำแนกโดยพิจารณาชนิดของพืชในระดับมหภาคและสถานภาพของพืชที่ได้รับอิทธิพลจากความเค็มในระดับจุลภาค (Dale et al., 1986)

ในกลุ่มพืชไร่ที่มีการเพาะปลูกนั้น ฝ่าย เป็นพืชที่มีลักษณะของตัวบ่งชี้ในอุดมคติ เนื่องจากมีการปลูกในปริมาณมากในบริเวณพื้นที่ชลประทานที่แห้งแล้ง สถานภาพการเติบโตของต้นฝ่ายและผลผลิตที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเค็มได้ เนื่องจากมีค่าสหสัมพันธ์อย่างมากกับสภาพการนำไฟฟ้า เกณฑ์ทั้งสองสามารถประเมินได้จากภาพถ่ายทางอากาศ (Golovina et al., 1992)

#### **ความปะปนกันของคลื่นรังสีกับคุณลักษณะต่าง ๆ ของพื้นผิว**

ความแตกต่างของวัตถุในธรรมชาติและพลวัตต่าง ๆ สามารถทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นรังสีในระดับสูง เช่นพื้นที่ซึ่งมีความเข้มข้นเกลือสูง ซึ่งเป็นคุณลักษณะโดยทั่วไปของวัตถุในพื้นที่แห้งแล้ง เช่นเดียวกันกับพื้นผิวที่ถูกชะล้างจากการไถพรวน และพื้นดินร่วนที่ไม่มีความเค็ม ล้วนแล้วแต่จะก่อให้เกิดความปะปนของคลื่นรังสีได้ เนื่องจากคลื่นรังสีของวัตถุเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับลักษณะของวัตถุพื้นผิวที่มีความเค็ม

โครงสร้างของดินจะมีการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บริเวณผิวดิน หลังจากเกิดเหตุการณ์ฝนตกหรือการชลประทาน (Goldshleger et al., 2001) และจะมีการเปลี่ยนแปลงสีของดินอย่างเห็นได้ชัด ส่วนผสมต่างๆ ของดินจะถูกทำลายในระหว่างที่เกิดกระบวนการ

ดังกล่าว และเมื่อดินละเอียดจะก่อตัวเป็นแผ่นปกคลุมที่ผิวดิน ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีของดินมีปริมาณเพิ่มขึ้น (De Jong and Epema, 2001) เช่นเดียวกับการทดลองของ De Jong (1992) และ Goldshleger et al. (2001) ได้ดำเนินการสำรวจพฤติกรรมของคลื่นรังสีที่จากแผ่นโครงสร้างลักษณะนี้ตลอดช่วงคลื่นรังสี NIR และ SWIR พบว่า ลักษณะของแผ่นโครงสร้างเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการสะท้อนของรังสีเพิ่มขึ้น โดยที่คลื่นรังสีมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของการแพร่กระจายขนาดอนุภาคดินและเนื้อดินในบริเวณพื้นผิวดิน และเสนอแนะว่าแผ่นโครงสร้างลักษณะนี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับคลื่นความร้อนของดินจากระยะไกล

Metternicht (1996) ได้ทำการเก็บข้อมูลในพื้นที่เมืองโคซาบัมบาของประเทศโบลิเวีย โดยใช้เครื่องวัดการแผ่รังสีแบบ Crop Scan หลายแถบ โดยใช้ทั้งสิ้น 8 ช่วงคลื่น ช่วงความถี่ระหว่าง 450-800 นาโนเมตร ความปะปนกันของคลื่นรังสีเกิดขึ้นในบริเวณแผ่นโครงสร้างของดินที่มีความเค็มและแผ่นโครงสร้างของดินร่วนปนทรายแป้ง ในช่วงคลื่นสเปกตรัมสีฟ้าและสีเขียว (450-550 นาโนเมตร) ความสว่างของผิวดินเกิดจากองค์ประกอบอนุภาคทรายแป้งที่มีอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นรังสีมากกว่าแผ่นโครงสร้างของดินเค็มที่เรียบหรือมีลักษณะโปร่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแผ่นโครงสร้างของดินที่ไม่มีความเค็ม จะมีค่าการสะท้อนของคลื่นรังสีน้อยกว่า ลักษณะการสะท้อนของคลื่นรังสีที่ลดลงอย่างชัดเจนในดินที่มีความเค็มลดลง รวมถึงองค์ประกอบของอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวที่ลดลงด้วย

## แหล่งข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล

การตรวจสอบและการติดตามพื้นที่ดินเค็ม มีการใช้แหล่งข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลในหลายรูปแบบ ได้แก่ รูปถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายอินฟราเรด ความร้อน ภาพถ่ายของช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ อินฟราเรดแบบหลายช่วงคลื่นและช่วงคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งข้อมูลการสำรวจระยะไกลที่ได้จากเครื่องบินยานแม่เหล็กไฟฟ้า

### รูปถ่ายทางอากาศ (Aerial photographs)

รูปถ่ายทางอากาศมักพิจารณาาร่วมกันของลักษณะภูมิสัณฐาน (geomorphology) โทโพสเทอหรือสี เพื่ออธิบายกลุ่มดินที่มีความเค็ม โดยการตรวจสอบความถูกต้องในภาคสนามที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเหล่านี้ ในด้านของความแปรปรวนตามปริมาณเกลือที่เป็นองค์ประกอบ ทั้ง ๆ ที่ปัจจุบันนี้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในเรื่องความละเอียดของคลื่นรังสีและรูปทรงสัณฐานของวัตถุของเครื่องถ่ายภาพจากการสำรวจระยะไกลจากดาวเทียม แต่รูปถ่ายทางอากาศยังคงเป็นประโยชน์ต่อ การศึกษาประวัติหรือรายละเอียดของพื้นดิน ซึ่งนิยมใช้ในการทำแผนที่ดินเค็ม โดยเฉพาะภาพถ่ายอินฟราเรดสีในพื้นที่ดินเค็มซึ่งไม่มีพืชปกคลุม (มีสีขาว) และพืชไร่ที่มีเกลือมาก (มีสีน้ำตาลแดง) สามารถแยกแยะจากวัตถุที่เป็นพื้นผิวดินและพืชแบบอื่นๆ ได้ง่าย (Rao and Venkataratnam, 1991) ภาพถ่ายทางอากาศแบบอินฟราเรดสียังสามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่ขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดสูงซึ่งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลดาวเทียมในปัจจุบันไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ หรือไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจากดาวเทียมได้ (Everitt et al., 1988) รูปถ่ายอินฟราเรดสีนั้น สามารถจำแนกความแปรปรวนในพืชที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากระดับความรุนแรงในการตอบสนองของพืชต่อความเค็ม

มักจะแปรผันจากฤดูกาลหนึ่งไปสู่อีกฤดูกาลหนึ่ง รูปถ่ายอินฟราเรดเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการบันทึกข้อมูลหลายช่วงเวลา (Ghassemi et al., 1995)

### อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดกลาง (Visible to middle infrared satellite sensors)

ภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งครอบคลุมช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรด ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางในด้านการประยุกต์ใช้ สำหรับการจำแนกและการทำแผนที่ของพื้นที่ดินเค็มได้ดำเนินการในหลาย ๆ ประเทศ และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เมื่อมีการแยกแยะลักษณะพื้นผิวเพียง 2 ประเภท คือ มีความเค็มและไม่มีความเค็ม (Evans and Caccetta, 2000) โดยปกติ เมื่อมีปริมาณเกลือที่ผิวดินเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้มีการสะท้อนของคลื่นรังสีเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะในแถบสีน้ำเงิน พื้นที่ดินเค็มจะแสดงความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อคลื่นรังสีในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดใกล้มากกว่าพื้นที่ซึ่งไม่มีดินเค็มในทางกลับกัน การสะท้อนจะลดลงเมื่อความชื้นดินเพิ่มขึ้น (Epema, 1990)

การใช้ภาพถ่ายหลายช่วงคลื่นสำหรับการตรวจสอบเกลืออาจใช้ไม่ได้ผลเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ปริมาณความเข้มข้นของเกลือในบริเวณพื้นผิวดินซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญ และดินที่มีองค์ประกอบของเกลือในปริมาณที่ต่ำกว่าร้อยละ 10-15 นั้น ค่อนข้างที่จะแยกออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ของดินได้ยาก (Mougenot et al., 1993)

### อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้คลื่นอินฟราเรดความร้อน (Thermal infrared satellite and airborne sensors)

คลื่นอินฟราเรดความร้อน มักใช้ในการประเมินสภาพความชื้นและความเค็ม ในย่านของ

สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุที่ถูกบันทึกโดยใช้หลักการดูดกลืนพลังงานของเกลือที่ต่างชนิดกัน เช่น ซัลเฟต ฟอสเฟต และคลอไรด์ (Mulders, 1987) ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในระดับต่ำจนถึงปานกลาง เมื่อใช้การตรวจวัดในช่วงความร้อนของสเปกตรัมอย่างเดียว (Metternicht, 1996) จากการศึกษาในประเทศอิหร่านและอียิปต์ ได้มีการใช้คลื่นความร้อนแบนด์ที่ 6 ของ Landsat TM การผสมผสานข้อมูลจะช่วยพัฒนาวิธีการการแยกดินเค็มออกจากดินยิบไซเฟอร์รัสและดินทะเลทรายเนื้อหยาบ อีกทั้งยังช่วยให้มีความเที่ยงตรงเพิ่มมากขึ้น (Goossens et al., 1999)

### สัญญาณคลื่นไมโครเวฟ (Microwave sensing)

ระบบบันทึกข้อมูลยานอวกาศแบบ SAR (synthetic aperture radar) เช่น ERS 1/2, JERS-1, Radarsat ที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจจับประเมินและทำแผนที่ เกษตรกรรม ป่าไม้ พื้นที่ชุ่มน้ำ พืชหญ้าและเมือง (Metternicht, 1999) อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาจำนวนหนึ่งที่ทำการศึกษาตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลคลื่นไมโครเวฟจากอากาศและอวกาศสำหรับการทำแผนที่ของพื้นที่ดินเค็ม โดยมักใช้คลื่นไมโครเวฟช่วงคลื่น C, P และ L (Carver and Bush, 1979)

เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับสัญญาณคลื่นเชิงแสง(optical) พบว่า สัญญาณคลื่นไมโครเวฟมีข้อดีกว่า สำหรับการใช้งานในสภาพดินที่มีลักษณะพิเศษซึ่งผิดแผกไปจากปกติ รวมถึงความเค็ม (Taylor et al., 1996) เช่น กรณีของพื้นที่ดินทรายบริเวณชายฝั่งและทะเลทราย พื้นที่ซึ่งเต็มไปด้วยน้ำ และภูมิประเทศที่ประกอบด้วยลักษณะโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น โครงสร้างดินโปรง หรือเป็นก้อนดิน (Metternicht, 1998) นอกจากนี้แล้วด้วยคุณลักษณะที่ไม่ขึ้นต่อสภาพ

ภูมิอากาศทำให้ไมโครเวฟมีข้อดีเหนืออุปกรณ์รับสัญญาณคลื่นเชิงแสงและคลื่นดาวเทียมอินฟราเรด ทำให้สามารถใช้ประโยชน์ในการเป็นเครื่องมือดำเนินงานเพื่อสนับสนุนการทำแผนที่และการจัดการพื้นที่ดินเค็มได้เป็นอย่างดี

### การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

เครื่องตรวจวัดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (McNeill, 1986) สามารถใช้ประเมินความเค็มของดินได้ด้วยการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าในดิน ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความเค็มของสารละลายดิน ความพรุนและชนิดและปริมาณของอนุภาคดินเหนียวในดิน เครื่องวัดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในภาคสนาม สามารถตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินทั้งก้อน และยังอ้างอิงถึงความเค็มในดินในบริเวณด้านล่างได้อย่างชัดเจน (Johnston et al., 1997)

ชุดเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สามารถวินิจฉัยและทำแผนที่ความเค็มของดินอย่างรวดเร็ว George et al. (1994) และ Mackenize et al. (1989) โดยใช้ความสัมพันธ์โดยตรงของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่มีต่อระดับความเค็มสำหรับการพิจารณาความรุนแรงของการเกิดความเค็ม ให้ค่าความเที่ยงตรงของการวัดอยู่ระหว่าง  $\pm 1$  ถึง  $\pm 7.59$  เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งยังมีความแปรปรวนอยู่มาก (Cannon et al., 1994) ค่าความเที่ยงตรงในการตรวจวัดนั้น ขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของเนื้อดินและปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การศึกษาส่วนมากจึงแนะนำให้ใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้ากับค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการกล่าวถึงข้อจำกัดทางด้านความเที่ยงตรงในการตรวจจับ เครื่องเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าก็ถือว่าเป็นเครื่องมือ



รวดเร็วในการตรวจจับความเค็มของดิน เพื่อประโยชน์ในการประเมิน การทำแผนที่ และการติดตามตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเค็มในดิน

### การประมวลผลภาพถ่ายของข้อมูลการสำรวจระยะไกล

ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณภาคพื้นดิน อากาศ หรือดาวเทียม มักจะถูกแปลงให้สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างดินที่มีความเค็มและไม่มี ความเค็ม หรือความแตกต่างของความเค็มที่ระดับ ต่างๆ กัน การศึกษาความเค็มในดินได้ใช้วิธีการที่ หลากหลายเพื่อการแปลงข้อมูลการสำรวจระยะไกล ได้แก่ การเลือกแบนด์ที่ดีที่สุด อัตราส่วนภาพ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก การแปลงความเข้ม-ความ สว่างของสี-ความอึมตัว การจำแนกแบบฟัสซีและ เทคนิคการกระจายจัดกระจายย้อนกลับของคลื่นเรดาร์

### การเลือกแบนด์ผสมที่ดีที่สุด (Best band combination)

การเลือกแบนด์ผสมที่ดีที่สุดมักเป็นขั้นตอน แรกของการลดขนาดข้อมูลการสำรวจระยะไกล ใน ระหว่างการจัดหมวดหมู่ ซึ่ง Dwivedi and Rao (1992) ได้ทำการประยุกต์ใช้ปัจจัยดัชนีความเหมาะสม (optimum index factor: OIF) กับข้อมูลการสำรวจ ระยะไกลซึ่งครอบคลุมพื้นที่ดินเค็มในที่ราบลุ่มแม่น้ำ สินธุ-คงคา พบว่า แบนด์ที่ดีที่สุดของ TM จำนวน 3 แบนด์ คือ 1-3-5 แต่แบนด์ผสม 3-5-7 และ 3-4-5 ก็ สามารถใช้ได้ เนื่องจากมีค่า OIF ใกล้เคียงกับกลุ่มแรก โดยแบนด์ 3 และ 5 จะเป็นส่วนข้อมูลที่สำคัญที่สุด

Metternicht and Zinck, (1996) ได้ ประยุกต์การวิเคราะห์ค่าความไม่สอดคล้องของการ แปลข้อมูล (transformed divergence: TD) เพื่อ ประเมินความถูกต้องของการจำแนกระดับหรือกลุ่ม ของความเค็ม และเลือกแบนด์ผสมที่ดีที่สุดของ

ภาพถ่ายจากดาวเทียม Landsat TM ในการจำแนกพื้นที่ดินเค็มในประเทศโบลีเวีย 2 แบนด์ คือ โดยแบนด์ จากการผสมข้อมูล 6 (1 2 4 5 6 และ 7) และแบนด์ 5 (1 2 4 6 และ 7) ให้ค่า TD สูงมาก คือ 1,957 และ 1,959 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความเป็นไปได้ สูงสุดที่ 2000

### การแปลงข้อมูลรูปภาพ

#### การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างช่วงคลื่น และองค์ประกอบหลัก (Band ratios and principal component analysis)

อัตราส่วนระหว่างช่วงคลื่นของช่วงคลื่นที่ตา มองเห็นถึงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ต่อช่วงคลื่นอินฟราเรด ต่างๆ นั้น ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพดีกว่า การใช้เพียงหนึ่งช่วงคลื่น สำหรับการจำแนกเกลือในดิน และพืชที่ได้รับอิทธิพลจากความเค็ม (Craig et al., 1998)

ตามทฤษฎีแล้วนั้น การวิเคราะห์องค์ ประกอบหลัก เป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจสำหรับใช้ในการ จำแนกเกลือและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงไป พร้อม ๆ กัน ค่าความสว่างคงที่ของ PC1 และความ เขียวคงที่ของ PC2 ทำให้สามารถแยกแยะดินเค็มออก จากดินที่ไม่เค็มได้ ในขณะที่ค่าความสว่างที่แตกต่างกัน ใน PC3 และความเขียวที่แตกต่างกันใน PC4 จะ สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเค็มในระดับพื้นผิว จากกรณีศึกษาในที่ราบลุ่มแม่น้ำสินธุ-คงคา ได้แสดงให้เห็นว่า PC1 มีประสิทธิภาพในการจำแนกพื้นที่ดินเค็ม แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในวันที่อ้างอิง 2 ช่วง (1975 และ 1992) ไม่สามารถตรวจจับได้จาก PC3 และ PC4 คุณลักษณะนี้เป็นจุดบกพร่องของ PCA ซึ่ง ใช้รูปแบบการตอบสนองคลื่นรังสีของเหตุการณ์ทั้งภาพ (Dwivedi, 1996) ค่าความสว่างที่มากขึ้น จะแสดงถึง

ค่าความชื้นที่มีปริมาณน้อยและมีความเค็มจัด (Peng, 1998)

Csillag et al. (1993) ใช้วิธีการปรับปรุงการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบหลักที่ละชั้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของช่วงคลื่นเดียวสำหรับใช้ในการจำแนกสถานะความเค็ม ด้วยคลื่นรังสีความละเอียดสูงที่ได้จากแถบดูดกลืนช่วง 495-2395 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อใช้ในการทำงานกับกลุ่มข้อมูลขนาดใหญ่ที่มลรัฐแคลิฟอร์เนียและประเทศฮังการี สามารถสร้างความแม่นยำได้ถึงร้อยละ 90

### **การแปลงความเข้ม-ความสว่างของสี-ความอิ่มตัว (Intensity-hue-saturation transformation)**

การแปลงความเข้ม-ความสว่างของสี-ความอิ่มตัว (intensity-hue-saturation: IHS) จะดำเนินการภายหลังจากการจำแนกหมวดหมู่โดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญ (supervised classification) โดยการใช้การแบ่งประเภทของจุดภาพที่มีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด (maximum likelihood) ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้โดย Dwivedi et al. (2001) สำหรับการทำแผนที่ดินเค็มในที่ราบดินตะกอนลุ่มแม่น้ำสินธุ-คงคาทางตอนเหนือของประเทศไทยอินเดีย การแปลง IHS ถูกประยุกต์ใช้ในการรวมข้อมูลภาพดาวเทียมที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง ของอุปกรณ์รับสัญญาณ IRS-1C (5.8 เมตร) และข้อมูลหลายช่วงคลื่นความละเอียดต่ำของอุปกรณ์รับสัญญาณ LISS-III (23.5 เมตร) และ LISS-II (36.5 เมตร) หลังจากการแปลงข้อมูลโดยใช้วิธี IHS แล้ว ภาพของข้อมูลผสมระหว่าง LISS-II, LISS-III กับ IRS-1C จะมีค่าความแม่นยำร้อยละ 89.5

### **การจำแนกแบบฟัซซี (Fuzzy classification)**

ความสำเร็จในการจำแนกความแตกต่างของพื้นที่ดินเค็มและดินต่างด้วยข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลนั้น ต้องใช้การพิจารณาการจัดหมวดหมู่ข้อมูลที่ถูกต้องวิธีปฏิบัติที่นิยมใช้ในการทำแผนที่ความเค็มของดินนั้นยึดหลักการที่ข้อมูลเป็นแบบไม่ยึดหยุ่นมีขอบเขตชัดเจน เช่น ค่าปฏิกิริยาในดิน (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (Richards, 1954) อย่างไรก็ตามในธรรมชาติ ปริมาณเกลือจะมีความแปรผันที่ละน้อยทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง แม้ว่าจะมีหย่อมสีขาวที่เด่นชัดของแผ่นเกลือปรากฏในบริเวณพื้นผิวก็ตาม แต่ก็อาจไม่ปรากฏลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยให้เห็นได้ชัดเจน จนไม่สามารถกำหนดเกณฑ์ของการแพร่กระจายหรือชั้นขอบเขตที่ชัดเจนได้ Zadeh (1965) ได้เสนอหลักการจำแนกแบบฟัซซี ซึ่งมีการจัดกลุ่มลำดับชั้นของข้อมูลที่มีความต่อเนื่อง สามารถจัดการกับการกระจายตัวเชิงพื้นที่ซึ่งมีเกลือและโซเดียมอยู่อย่างกระจุกกระจายได้ดีกว่าวิธีการแบ่งแยกออกจากกันชัดเจน

สำหรับการจัดจำแนกความเค็มในดิน Metternicht (1998) เสนอให้พิจารณาการจำแนกแบบฟัซซี ซึ่งได้ประยุกต์ใช้กับข้อมูลภาพ JERS-1 SAR บริเวณเมืองโคชาบัมบา ประเทศโบลิเวีย พบว่าวิธีการนี้สามารถตรวจจับพื้นที่ดินเค็มได้ที่น่าเชื่อถือ และเป็นตัวแทนที่ดีของสภาพที่เกิดขึ้นจริง ด้วยค่าความแม่นยำรวมร้อยละ 81

ในทุก ๆ กรณี ไม่ว่าจะเป็นการจำแนกแบบฟัซซี หรือการแบ่งแยกออกจากกันชัดเจน อุปสรรคที่สำคัญของการจำแนก คือ ความขรุขระของพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกพืชในพื้นที่เป็นต่างเล็กน้อยจะส่งผลต่อการกระเจิงแสงย้อนกลับของคลื่นเรดาร์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดข้อผิดพลาดในการแบ่งแยกส่วนพื้น

ที่ดินที่เป็นต่าง ดินเค็มที่เป็นต่าง และดินไม่เค็มออกจากกัน

### **เทคนิคการการกระจายย้อนกลับของคลื่นเรดาร์ (Radar backscatter inversion techniques)**

ในการจัดการจำแนกพื้นที่ดินเค็มด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบ SAR มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายย้อนกลับของสัญญาณเรดาร์ร่วมกับการพิจารณาคุณลักษณะของพื้นที่ดินเค็ม โดย Taylor et al. (1996) ใช้ภาพถ่ายคลื่นเรดาร์จากอากาศยาน พบว่า มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีระหว่างค่าการกระจายย้อนกลับ (back scatter) กับค่าการนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดในภาคสนาม

### **การประเมินการเปลี่ยนแปลงของความเค็มเชิงพื้นที่และเวลา**

การติดตามตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความเค็มจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้น ต้องเผชิญกับความยากลำบาก เพราะโดยทั่วไปแล้ว มักไม่มีข้อมูลภาคพื้นดินที่แท้จริงสำหรับสถานการณ์ในอดีตให้นำมาใช้ในการพิจารณา ดังนั้น การตรวจสอบความถูกต้องด้วยข้อมูลการสำรวจระยะไกลย้อนหลังจึงมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น การเอาชนะอุปสรรคเหล่านี้สามารถใช้การผสมผสานข้อมูลการสำรวจระยะไกลจากหลายแหล่ง และบูรณาการข้อมูลที่ได้จากภาคสนามและห้องปฏิบัติการ

#### **การติดตามตรวจสอบความเค็มของดิน**

การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงความเค็มตามช่วงเวลา ต้องการข้อมูลอย่างน้อย 2 ช่วงเวลา พื้นที่ดินเค็มมีความผันแปรตามฤดูกาลเป็นอย่างมาก การใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลแบบอาศัยพลังงานแสงธรรมชาติ (pactive remote sensing) จึงต้องจับภาพ

ในช่วงเวลาเดียวกันของปีเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ ซึ่งช่วงเวลาที่เหมาะสม คือ ปลายฤดูแล้ง

การกำหนดค่าระบบพิกัดภูมิศาสตร์และการซ้อนภาพของข้อมูลหลายช่วงเวลา ถือเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถติดตามลักษณะพื้นดินตามเวลา และสามารถเปรียบเทียบข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลสนับสนุนอื่นๆ Campbell et al. (1994) ได้พัฒนาข้อมูลในโครงการติดตามการใช้ที่ดินบริเวณรัฐเวสเทอร์นประเทศออสเตรเลีย โดยต้องทำการปรับเทียบระหว่างภาพ ในแง่ของค่าเหมือนดินมากที่สุด (like value) เท่าที่จะเป็นไปได้ จึงทำให้ค่าเข้มของจุดภาพของข้อมูลภาพต่างช่วงเวลาสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ นอกจากนี้ ยังต้องเก็บข้อมูลจริงภาคพื้นดินในเวลาเดียวกันด้วย เพื่อตรวจสอบลายเซ็น (spectral signature) จากภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งรวมถึงการตรวจวัดคลื่นรังสีในภาคสนาม การทำแผนที่และคำอธิบายลักษณะพื้นผิว รวมถึงการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ

#### **ความไม่แน่นอนในการติดตามตรวจสอบความเค็มของดิน**

ข้อผิดพลาดต่าง ๆ สามารถเกิดขึ้นได้จากความคลาดเคลื่อนในการกำหนดพิกัดภูมิศาสตร์ให้กับข้อมูลดาวเทียม การระบุและการจับคู่ของจุดภาพที่มีคุณภาพต่ำ และการจัดวัตถุผิดหมวดหมู่ ความผิดพลาดจากแหล่งข้อมูลซึ่งเกิดขึ้นเมื่อภาพถ่ายสองภาพแสดงลักษณะไม่เหมือนกันตามวันที่กำหนดไว้ สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของลักษณะทางสภาพธรรมชาติ รวมถึงขนาดของการเปลี่ยนแปลง

การจัดการกับความไม่แน่นอนเหล่านี้สามารถดำเนินการได้ด้วยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ โดยใช้ระเบียบแบบแผนตามกฎหมาย 'ถ้า-แล้ว' เป็นแนวทางในการติดตามตรวจสอบ (Metternicht, 2001)

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญทำให้สามารถประเมินได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายที่แตกต่างกัน อาจเกิดขึ้นจริงหรือเป็นเพียงวัตถุที่ถูกสร้างขึ้นจากการซ้อนแผนที่มีคลาดเคลื่อน ตัวอย่างเช่น ความเค็มที่เพิ่มขึ้น 2 ระดับ หรือการเปลี่ยนแปลงจากเค็มจัดไปเป็นตื้นจัด ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ข้อมูลนี้ได้นำมาผสมกับแบบจำลองที่เกี่ยวข้องในด้านระดับความเป็นไปได้ ผู้เชี่ยวชาญได้แบ่งระดับของความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในเชิงค่าความมั่นใจซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-1 จากมีความเป็นไปได้น้อยมากจนถึงมีความเป็นไปได้มาก ค่าที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการทำแผนที่โอกาสการเปลี่ยนแปลงระหว่างวันที่อ้างอิง 2 ช่วงเวลา แล้วทำการแก้ไขสิ่งที่ไม่น่าจะเกิดขึ้น จนทำให้ได้แผนที่ 2 ฉบับที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยแผนที่ฉบับแรกแสดงการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ เช่น จากพื้นที่ที่ไม่มีความเค็มเป็นพื้นที่ซึ่งมีความเค็ม หรือจากพื้นที่ซึ่งมีความเค็มเป็นพื้นที่ซึ่งมีความเค็มที่เป็นต่าง นอกจากนี้ยังสามารถแสดงขนาดของการเปลี่ยนแปลง เช่น การเพิ่มระดับความเค็มหนึ่งเท่า หรือเพิ่มระดับความเค็มสองเท่า

### การผสมรวมข้อมูล

การทำแผนที่และการคาดการณ์พื้นที่ดินเค็มในปัจจุบันสามารถดำเนินการร่วมกันระหว่างอุปกรณ์รับบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์รับสัญญาณจากดาวเทียม ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่หลายช่วงคลื่น และยังผสมรวมข้อมูลภูมิทัศน์ในรูปของแบบจำลองต่าง ๆ ได้ โดยมีองค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึงดังนี้

#### ความคลาดเคลื่อนของคลื่นรังสี

ในพื้นที่ดินเค็ม มักเกิดความคลาดเคลื่อนของคลื่นรังสีระหว่างวัตถุพื้นผิวที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น คราบความเค็มที่มีสีขาวและดินทรายแป้งที่มีความวาว

แสง จะมีค่าการสะท้อนกลับสูงทั้งคู่ ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ลักษณะคลื่นรังสีแยกออกจากกันได้ Metternicht (1996) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของช่วงคลื่นที่ต่างๆ ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้แยกคลื่นรังสีที่แยกออกจากกันได้ดี ในเมืองโคซาบัมบาของประเทศโบลิเวีย สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

ก. ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ใช้การได้ดีสำหรับการแยกแยะพื้นที่ที่ไม่มีความเค็มออกจากพื้นที่ที่มีความเค็ม หรือพื้นที่ที่มีความเค็มที่เป็นต่าง

ข. ช่วงคลื่นอินฟราเรดเป็นช่วงที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนทางรังสีต่ำสุด สำหรับใช้แยกพื้นที่ดินเค็มที่เป็นต่าง ออกจากพื้นที่ดินต่าง

ค. ช่วงคลื่นความร้อนสามารถปรับปรุงการแยกพื้นที่ที่มีความเป็นต่างได้ เนื่องจากความเป็นต่างถูกควบคุมด้วยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีการดูดกลืนมากในแบนด์ที่ 6 ของ Landsat TM

ง. ช่วงคลื่นไมโครเวฟจะมีความคลาดเคลื่อนของรังสีต่ำและสามารถจำแนกพื้นที่ระหว่างดินเค็ม ดินต่าง พื้นที่ไม่มีความเค็ม และพื้นที่ดินความเค็มที่เป็นต่าง

ดังนั้น ลักษณะช่วงคลื่นที่แตกต่างกันของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้ความสามารถในการจำแนกมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สำหรับการจำแนกคลื่นรังสีในกลุ่มดินเค็มที่เป็นต่าง ควรมีการผสมผสานข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานข้อมูลการสำรวจระยะไกล งานวิจัยของ Metternicht (1996) แสดงให้เห็นว่าการร่วมกันของข้อมูลในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้และคลื่นอินฟราเรดกับข้อมูลคลื่นไมโครเวฟ สามารถจำแนกความแตกต่างของพื้นที่เป็นต่างและพื้นที่ดินปกติได้ดีขึ้นกว่าการใช้ Landsat TM หรือ JERS-1 SAR เพียงอย่างเดียว โดยมีค่าความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40

### ข้อมูลภูมิประเทศและข้อมูลดิน

การจำแนกกลุ่มของความเค็มและความเป็นต่างเพียงอย่างเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากการฟื้นฟู การทำให้กลับสู่สภาพเดิม และการจัดการพื้นที่ดินเค็มนั้น ต้องพิจารณาระดับความรุนแรงของความเค็มหรือความเป็นต่างร่วมกันด้วย ซึ่งไม่สามารถใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลเพียงอย่างเดียวได้ แต่ต้องใช้การผสมผสานข้อมูลร่วมกันอย่างเต็มรูปแบบระหว่างข้อมูลการสำรวจระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ (De Dapper et al., 1996)

ขั้นตอนแรกของการปรับปรุงองค์ประกอบในการรวมข้อมูลบริบทแวดล้อมของภูมิประเทศเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ในภูมิภาคเมืองโคซาบัมบาของประเทศโบลิเวีย พื้นที่ดินเค็มที่เป็นต่างสูง มีความสัมพันธ์อย่างมากกับตำแหน่งภูมิสัณฐาน โดยเฉพาะที่ราบแบบ playas และ lagunary ในขณะที่พื้นที่ซึ่งไม่มีผลกระทบส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ซึ่งมีความลาดเอียงเล็กน้อย บริเวณชายเขา การผนวกความสัมพันธ์เหล่านี้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และแบบจำลอง ทำให้การจำแนกความเค็มเชิงพื้นที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Metternicht and Zinck, 1996) อย่างไรก็ตามในการศึกษาลักษณะนี้ยังคงพิจารณาพื้นที่ดินเค็มเฉพาะในระดับผิวดินเท่านั้น ซึ่งเป็นพื้นที่ 2 มิติ ที่เป็นการมองทางแนวราบเพียงด้านเดียว ทั้งที่ในความเป็นจริงดินจะมีลักษณะรูปร่างแบบ 3 มิติ และความเค็มก็สามารถเปลี่ยนแปลงตามความลึกได้อย่างมาก เนื่องจากความเค็มที่ระดับพื้นผิวมักจะถูกรักษาด้วยดินชั้นล่างหรือความเค็มชั้นล่าง และยังผันแปรตามฤดูกาลของระดับน้ำใต้ดินอีกด้วย

จากการศึกษาของ McGowen and Mallyon (1996) พบว่า การได้มาซึ่งความแม่นยำสำหรับการตรวจวัดความเค็มในบริเวณพื้นที่แห้งแล้ง

ของรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย มาจากการใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม Landsat TM หลายช่วงเวลา และข้อมูลการตรวจวัดความเค็มภาคพื้นดินด้วยเครื่องมือ EM31 ที่สามารถให้ข้อมูลความเค็มที่ระดับดินชั้นล่าง และข้อมูลพิกัดอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และใช้การผสมผสานกลุ่มข้อมูลอื่นๆ ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ นอกจากนี้แล้ว Mackenzie et al. (1989) ยังได้มีการดำเนินการด้วยวิธีการเดียวกัน โดยได้ทำแผนที่ในบริเวณที่มีความเค็มและแห้งแล้งจากการผสมผสานข้อมูลการตรวจวัดด้วย EM34 ข้อมูลพืช อัตราการซึมน้ำและภาพจากเครื่องกวาดภาพจากเครื่องบิน

วิธีอื่นๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงแผนที่พื้นที่ดินเค็มอย่างมีประสิทธิภาพที่ได้จากการรวมข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Landsat TM รวมทั้งข้อมูลสนับสนุนอื่นๆ เช่น แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่ดิน แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน คุณภาพน้ำใต้ดิน และข้อมูลประวัติความเค็มแล้ว ยังพบว่า การผสมผสานข้อมูลด้วยการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ช่วยนั้น มีประสิทธิภาพมากในการตรวจวัดพื้นที่ที่มีความเค็มน้อยหรือพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดความเค็ม รวมทั้งยังสามารถแก้ไขพื้นที่ที่จัดหมวดหมู่ผิด เช่น บริเวณที่มีความเค็มมากหรือปานกลางได้ (Sah et al., 1995) นอกจากนี้แล้ว Eklund et al. (1998) ได้ทำการศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในการติดตามตรวจสอบความเค็ม โดยแยกตัวตัวชี้วัดที่เหมาะสมและให้ค่าน้ำหนักไว้ ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติที่มีนัยสำคัญต่อการจำแนกความแตกต่างของกลุ่มความเค็ม คือ ความลึกของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นลักษณะที่ทำให้เห็นความแตกต่างของความเค็มได้ดีที่สุด

ปัจจุบันนี้แนวทางการดำเนินการที่มีประสิทธิภาพมากในการติดตามตรวจสอบทางหนึ่ง คือ การเปรียบเทียบแผนที่ความเค็มของดินในอดีตและปัจจุบัน เมื่อมีข้อมูลภาคสนามและข้อมูลจากห้องปฏิบัติการในอดีต ซึ่งได้มีการดำเนินการศึกษาในพื้นที่ภูมิภาคจังหวัดโกเลสถานซึ่งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศอิหร่าน (Naseri, 1998) โดยใช้แผนที่ความเค็มและความเป็นด่างของดินบริเวณพื้นที่ชลประทานหลายแห่ง ในปี ค.ศ. 1972 ซึ่งให้ข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าและ pH จากตัวอย่างที่เก็บ 3 ระดับความลึก (0-50, 50-100 และ >100 เซนติเมตร) บนตารางกริดในช่วง 500 เมตร และทำการเก็บตัวอย่างในจุดเดิมอีกครั้งเมื่อปี ค.ศ.1995 เพื่อตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่า pH จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าของข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ครั้ง ซึ่งผลการเปรียบเทียบที่ได้ มีความแตกต่างอย่างชัดเจนตามหน่วยแผนที่ซึ่งแยกกันโดยสิ้นเชิง ในแง่ของการเพิ่มหรือการลดค่าความเค็มและความเป็นด่าง และในแง่ของการเปลี่ยนกลุ่มการจำแนก ซึ่งวิธีการนี้ต้องใช้เทคนิคการประมาณค่าข้อมูลอย่างแม่นยำเพื่อทำแผนที่ความเค็มที่แสดงความต่อเนื่อง จากบริเวณจุดที่สำรวจในภาคสนามที่ถูกกำหนดไว้อย่างเหมาะสมไปยังบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ (Utset et al.,1998) อันที่จริงเราสามารถติดตามตรวจสอบมิติที่ 3 ของดินในลักษณะของปริมาตรได้ แต่เกินขอบเขตความสามารถทางเทคนิคในปัจจุบันที่ตรวจจับด้วยการสำรวจระยะไกล จึงมีการใช้การสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือ EM เพื่อตรวจวัดความเค็มของดินตามความลึก (George et al., 1998)

Tóth et al. (1998) กล่าวว่า การติดตามตรวจสอบความเค็มในดินและการพิจารณาสิ่งที่เป็นสัญญาณบอกถึงความเค็มในดินแต่แรกเริ่มนั้น ไม่สามารถใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลเพียงอย่างเดียวได้

แต่ต้องใช้การผสมผสานวิธีการต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ทั้งข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล การสำรวจภาคสนาม และการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความสามารถของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ช่วยในการประมวลผล เปลี่ยนแปลงข้อมูลและการแสดงผลข้อมูล

## สรุป

ด้วยคุณสมบัติในการได้มาของข้อมูลที่มีความรวดเร็ว ทันเวลา ค่าใช้จ่ายน้อย และสามารถเรียกค้นทักข้อมูลซ้ำ ณ ที่เดิมได้ การสำรวจระยะไกลจึงมีบทบาทสำคัญสำหรับใช้ในการตรวจจับ การทำแผนที่ และการติดตามตรวจสอบวัตถุพื้นผิวที่มีความเค็ม อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบความถูกต้องในภาคพื้นดินก็ยังคงมีความจำเป็นสำหรับใช้ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนคลื่นรังสีต่อชนิดและปริมาณของเกลือในดินรวมถึงน้ำใต้ดิน ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลลักษณะพื้นดินโดยตรงหรือการพิจารณาจากพืชที่ปกคลุมผิวดินโดยทางอ้อม นอกจากนี้ ระบบบันทึกข้อมูลที่มีความสามารถในการทะลุผ่านพื้นผิวดิน (เช่น เครื่องตรวจสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องบินและเครื่องวัดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าภาคพื้นดิน) ต้องใช้การผสมผสานข้อมูลภาคสนาม (ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน และความเค็ม) และข้อมูลจากย่านความถี่ของสเปกตรัมที่ให้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของดินเค็มที่สามารถเชื่อถือได้

ความเค็มในดิน จัดเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะมีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชลประทาน จำเป็นต้องมีการติดตามตรวจสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจอย่างทันท่วงทีสำหรับการจัดการดิน การฟื้นฟูและการทำให้ดินกลับสู่สภาพเดิม การติดตามตรวจสอบความเค็มใน

ดินจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อมีการใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลแบบหลายช่วงคลื่น ซึ่งยังคงต้องแปลงข้อมูลให้ถูกต้องก่อนนำไปใช้เพื่อจำแนกและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ การตรวจจับและการประเมินการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอดีต ทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางธรรมชาติ และขนาดของการเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้สามารถดำเนินการได้ด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยและอาศัยความรู้ความชำนาญจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลการติดตามตรวจสอบที่ดีที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อมีการผสมผสานข้อมูลการสำรวจระยะไกลกับข้อมูลภาคสนามและข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีส่วนช่วยในการรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่างๆ ทั้งในแง่ของขนาด เวลา แหล่งข้อมูล และโครงสร้าง นับเป็นความท้าทายอย่างยิ่งของนักวิจัยในการวิเคราะห์หาตัวชี้วัดความเค็มที่เหมาะสม เพื่อที่จะจำแนกดินเค็มได้อย่างจำเพาะเจาะจง ดังนั้นเทคนิคการสำรวจระยะไกลและการสำรวจภาคพื้นดินที่เหมาะสม สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในตรวจจับความเค็มได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านความถูกต้องและการประหยัดงบประมาณ

## เอกสารอ้างอิง

Cannon, M., McKenzie, R., and Lachapelle, G. (1994). Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-Based navigation methods. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 335-343.

Carver, K., and Bush, T. (1979). Airborne multispectral remote sensing of saline seeps: the 1978 Harding Co., South Dakota experiment. NASA Contract NAS9-15421, Final Report. Las Cruces, NM: New Mexico State University.

Craig, J. C., Shih, S. F., Boman, B. J., and Carter, G. A. (1998). Detection of salinity stress in citrus trees using narrow-band multispectral imaging. ASAE paper no. 983076. ASAE Annual International Meeting, Orlando, FL, USA, 12-16 July 1998. 10 pp.

Csillag, F., Pa'sztor, L., and Biehl, L. (1993). Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils. *Remote Sensing of Environment* 43: 231-242.

Dale, P., Hulsman, K., and Chandica, A. (1986). Classification of reflectance on color infrared aerial photographs and sub-tropical salt marsh vegetation types. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1783-1788.

De Dapper, M., Goossens, R., Gad, A., and El Badawi, M. (1996). Model-ling and monitoring of soil salinity and waterlogging hazards in the desert delta fringes of Egypt, based on geomorphology, remote sensing and GIS. In O. Slaymaker (Ed.), *Geomorphic hazards*. Chichester, UK: Wiley. pp. 169-182.

Driessen, P. M., and Schoorl, R. (1973). Mineralogy and morphology of salt efflorescences on saline soils in the Great Konya Basin, Turkey. *Journal of Soil Science* 24: 436-442.

Dwivedi, R., Ramana, K., Thammappa, S., and Singh, A. (2001). The utility of IRS-1C, LISS-III and PAN-merged data for mapping salt-affected soils. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 1167-1175.

Dwivedi, R. S. (1996). Monitoring of salt affected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing* 17: 1907-1914.

Dwivedi, R. S., and Rao, B. R. M. (1992). The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt affected

- soils. *International Journal of Remote Sensing* 13: 2051-2058.
- Eklund, P., Kirkby, S., and Salim, A. (1998). Data mining and soil salinity analysis. *International Journal of Geographical Information Science* 12: 247-268.
- Epema, G. F. (1990). Effect of moisture content on spectral reflectance in a playa area in southern Tunisia. *Proceedings International Symposium, Remote Sensing and Water Resources, Enschede, The Netherlands. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*. pp. 301-308.
- Epema, G. F. (1992). Mapping surface characteristics and their dynamics in a desert area in southern Tunisia with Landsat Thematic Mapper. In G. F. Epema, (1992). *Spectral reflectance in the Tunisian desert*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands. pp. 123-142.
- Evans, F., and Caccetta, P. (2000). Broad-scale spatial prediction of areas at risk from dryland salinity. *Cartography* 29: 33-40.
- Everitt, J., Escobar, D., Gerbermann, A., and Alaniz, M. (1988). Detecting saline soils with video imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54: 1283-1287.
- George, R., Beasley, R., Gordon, I., Heisters, D., Speed, R., Brodie, R., McConnell, C., and Woodgate, P. (1998). National Airborne Geophysics Project. Final Report, AFFA, NDSP.
- George, R., Bennett, D., Arkell, P., and Vukelic, B. (1994). Soil salinity in the southwest irrigation area; extent and management options. *Proceedings of the Soils '94 Conference*. Broadwater Resort, Busselton: Australian Society of Soil Science. pp. 101-107.
- Ghassemi, F., Jakeman, A. J., and Nix, H. A. (1995). *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies*. Canberra, Australia: The Australian National University, Wallingford, Oxon, UK: CAB International.
- Goldshleger, N., Ben-Dor, E., Benyamini, Y., Agassi, M., and Blumber, D. (2001). Characterization of soil's structural crust by spectral reflectance in the SWIR region (1.2-2.5 Am). *Terra Nova* 13: 12-17.
- Golovina, N. N., Minskiy, D., Pankova, Y., and Solovyev, D. A. (1992). Automated air photo interpretation in the mapping of soil salinization in cotton-growing zones. *Mapping Sciences and Remote Sensing* 29: 262-268.
- Goossens, R., Alavi Panah, S. K., De Dapper, M., and Kissyar, O. (1999). The use of thermal band of Landsat TM for the study of soil salinity in Iran (Ardakan area) and Egypt (Ismailia Province). *Proceedings International Conference on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management Dehradun, India: Indian Institute of Remote Sensing, NRSA*. pp. 454-459.
- Hunt, G., Salisbury, J., and Lenhoff, C. (1972). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates. *Modern Geology* 3: 121-132.
- Johnston, M., Savage, M., Moolman, J., and du Plessis, H. (1997). Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1627-1633.



- Mackenzie, M., Bellamy, G., Fraser, D., and Ellis, G. (1989). Mapping dry-land salinity recharge using EM conductivity measurements and airborne scanner imagery. Proceedings of the 5th Australian Soil Conservation Conference, vol 1. Perth, WA: Hamilton, Howes and Attwater. pp. 41-48.
- McGowen, I., and Mallyon, S. (1996). Detection of Dryland salinity using single and multitemporal Landsat imagery. Proceedings of the 8th Australasian Remote Sensing Conference, Canberra pp. 26-34.
- McNeill, J. (1986). Rapid, accurate mapping of soil salinity using electromagnetic ground conductivity meters. Technical Note TN-18. Mississauga, Ontario: Geonics, 15 pp.
- Metternicht, G. (1998). Analyzing the relationship between ground based reflectance and environmental indicators of salinity processes in the Cochabamba Valleys (Bolivia). *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 24: 359-370.
- Metternicht, G. (1999). Current status and future prospective of radar remote sensing for cartographic applications. *Cartography* 28: 1-16.
- Metternicht, G. (2001). Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. *Foundations of an expert system. Ecological Modeling* 144: 163-177.
- Metternicht, G. I. (1996). Detecting and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba valleys, Bolivia: a synergistic approach. ITC Publication, vol. 36. Enschede, The Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. (390 pp).
- Metternicht, G. I., and Zinck, J. A. (1996). Modeling salinity-alkalinity classes for mapping salt-affected topsoils in the semi-arid valleys of Cochabamba (Bolivia). *ITC Journal* 1996-2: 125-135.
- Metternicht, G. I., and Zinck, J. A. (1997). Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 18: 2571-2586.
- Mougenot, B., Pouget, M., and Epema, G. (1993). Remote sensing of salt-affected soils. *Remote Sensing Reviews* 7: 241-259.
- Mulders, M. (1987). Remote sensing in soil science. development in soil science. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 379 pp.
- Naseri, M. Y. (1998). Characterization of salt-affected soils for modeling sustainable land management in semiarid environment: a case study in the Gorgan region, Northeast Iran. PhD thesis, Ghent University, Belgium.
- Peng, W. L. (1998). Synthetic analysis for extracting information on soil salinity using remote sensing and GIS: a case study of Yanggao Basin in China. *Environmental Management* 22: 153-159.
- Rao, B. R. M., and Venkataratnam, L. (1991). Monitoring of salt-affected soils-a case study using aerial photographs, Salyut-7 space photographs, and Landsat TM data. *Geocarto International* 6: 5-11.
- Richards, L. (1954). United States salinity laboratory staff, diagnosis and improvement of saline and alkali soils. In L. Richards (Ed.), *Agriculture handbook*, 60. USA: US Department of Agriculture. 160 pp.
- Sah, A., Apisit, E., Murai, S., and Parkpian, P. (1995). Mapping of salt-affected soils using remote sensing and geographic information systems:

- a case study of Nakhon Ratchasima, Thailand. Proceedings of the 16th Asian Conference Remote Sensing, 20-24 November (pp. G-3-1 -G-3-6). Thailand: Nakhon Ratchasima.
- Siegal, B., and Gillespie (1980). Remote sensing in geology. New York: Wiley.
- Szabo, J., Pa'sztor, L., Suba, Z., and Varallyay, G. (1998). Integration of remote sensing and GIS techniques in land degradation mapping. Proceedings 16th International Congress of Soil Science, Montpellier, France, 20-26 August. International Society of Soil Science. 6 pp.
- Taylor, G. R., Mah, A. H., Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S., Hewson, R. D., and Bennett, B. A. (1996). Characterization of saline soils using airborne radar imagery. Remote Sensing of Environment 57: 127-142.
- To'th, T., Kertesz, M., and Pa'sztor, L. (1998). New approaches in salinity/ sodicity mapping in Hungary. Proceedings 16th International Congress of Soil Science, Montpellier, France, 20-26 August 1998. International Society of Soil Science. 6 pp.
- Utset, A., Ruiz, M., Herrera, J., and Deleon, D. (1998). A geostatistical method for soil salinity sample site spacing. Geoderma 86: 143-151.
- Wiegand, C., Anderson, G., Lingle, S., and Escobar, D. (1994). Soil salinity effects on crop growth and yield. Illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. Journal of Plant Physiology 148: 418-424.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. Information and Control 8: 338-353.
- Zinck, J. A. (2001). Monitoring salinity from remote sensing data. In R. Goossens, and B. M. De Vlieghe (Eds.), Proceedings of the 1st Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries Belgium: Ghent University. pp. 359-368.

