

การประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินด้วยแบบจำลองการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของดินที่
ได้รับผลกระทบจากเกลือในตำบลเมืองเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น
Assessment of Soil Fertility by Spatial Interpolation Model of Salt
Affected Soils in Muang Pere Subdistrict, Ban Phai District, Khon Kaen Province

วรั้มพร วงษ์วรภาส¹ เสาวนุช ทาวอร์พฤษ^{1,*} และ ณัฐพล จิตมัตย์¹
Waramporn Wongwarapas¹, Saowanuch Tawornpruek^{1,*} and Natthapol Chittamart¹

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

รับเรื่อง: 19 มิถุนายน 2566 Received: 19 June 2023

ปรับแก้ไข: 25 กรกฎาคม 2566 Revised: 25 July 2023

รับตีพิมพ์: 26 กรกฎาคม 2566 Accepted: 26 July 2023

* Corresponding author: agrsnt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: การประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในพื้นที่ขนาดใหญ่มีข้อจำกัดด้านเวลา กำลังคน และงบประมาณในการวิเคราะห์ดิน การใช้แบบจำลองการประมาณค่าเชิงพื้นที่ร่วมกับการทำแผนที่ดิจิทัล เพื่อประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการคาดการณ์สมบัติดิน ติดตามระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือเชิงพื้นที่ได้อย่างรวดเร็ว และเป็นฐานข้อมูลสำหรับการจัดการดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือได้อย่างเหมาะสม แต่ยังคงขาดการพัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำและถูกต้อง การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลอง Random Forest (RF) เพื่อการคาดการณ์การกระจายของสมบัติดิน และประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินในพื้นที่ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในกลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในตำบลเมืองเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น

วิธีดำเนินการวิจัย: เก็บตัวอย่างดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือ กลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในตำบลเมืองเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น จำนวน 100 บริเวณ โดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร และวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ค่าร้อยละความอิ่มตัวเบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (EC_e , อีซีอี) และนำเข้าตัวแปรเหล่านี้ในแบบจำลองการประมาณค่าเชิงพื้นที่เพื่อคาดการณ์การกระจายเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน ร่วมกับตัวแปรทำนาย คือ แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) และข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 แล้วทำการประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ดินในพื้นที่ศึกษา

ผลการวิจัย: แบบจำลอง RF สามารถคาดการณ์การกระจายเชิงพื้นที่ของสมบัติดินได้ดีด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ($R^2 = 0.41–0.82$) แต่แบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงในการประมาณค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และอีซีอี ผลการประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินที่

ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร พบว่า กลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในพื้นที่การศึกษามีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในช่วงระดับต่ำถึงปานกลาง

สรุป: แบบจำลอง RF มีความแม่นยำในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์การกระจายเชิงพื้นที่ของสมบัติดินเบื้องต้น และสามารถใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือ, แผนที่ดินดิจิทัล, การประมาณค่าเชิงพื้นที่, ความอุดมสมบูรณ์ดิน

ABSTRACT

Background and Objectives: The assessment of soil fertility in salt-affected soils on a large spatial scale has been constrained by limitations in time, manpower, and budget for soil analysis. The application of spatial interpolation modeling, coupled with digital mapping, for evaluating soil fertility emerges as a crucial tool for swiftly forecasting and monitoring the spatial soil fertility of salt-affected soils. This information can be utilized as data for the effective management of salt-affected soils. However, there persists a lack of development of a precise and accurate model. This study seeks to investigate spatial interpolation using the Random Forest (RF) model to predict properties, and distribution, and assess the fertility level of salt-affected soils of Typic Natraqualfs in Muang Pere subdistrict, Ban Phai district, Khon Kaen province.

Methodology: Soil samples were collected from 100 locations with Typic Natraqualfs in Muang Pere subdistrict, Ban Phai district, Khon Kaen province. The samples were taken from a dept of 0–30 cm and analyzed for organic matter content, available phosphorus and potassium, cation exchange capacity, base saturation percentage, and electrical conductivity of a saturated soil extract. These parameters, along with predicted variables obtained from the Digital Elevation Model (DEM) and Landsat 8's satellite image data, were input into the spatial interpolation model to predict the spatial distribution of soil properties.

Main Results: The RF model accurately predicted the spatial distribution of soil properties with coefficients of determination ($R^2 = 0.41–0.82$). However, notable prediction errors were observed for available phosphorous, available potassium, and electrical conductivity. The model's assessment of soil fertility at a depth of 0–30 cm revealed that the Typic Natraqualfs subgroup in the studied area exhibited low to moderate fertility levels.

Conclusions: The RF model demonstrates an accuracy level that can be utilized for the preliminary prediction of the spatial distribution of soil properties and effective assessment of soil fertility in salt-affected soils.

Keywords: Salt-affected soils, digital soil mapping, spatial interpolation, soil fertility

บทนำ

พื้นที่ดินที่มีผลกระทบจากเกลือหรือดินเค็มในประเทศไทยมีพื้นที่ประมาณ 4.2 ล้านไร่ แจกกระจายอยู่มากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2.1 ล้านไร่ (Land Development Department, 2018) ดินเค็มคือดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือ เป็นดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายได้ง่าย โดยเฉพาะเกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ในปริมาณมาก นอกจากนี้ การสะสมเกลือในดินส่งผลให้ดินมีค่าอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมในสารละลายในดินสูง (Richards, 1954) อิทธิพลของเกลือทำให้ดินมีปริมาณธาตุอาหารหลักอยู่ในระดับต่ำ และส่งผลให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Land Development Department, 2022) สมบัติของดินที่เป็นผลกระทบจากเกลือ ประกอบด้วย ค่าพีเอชของดิน อีซีอี อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน พอสפורัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ของดินมีความแปรปรวนไม่สม่ำเสมอ (Norkaew, 2006; Khongnonglan, 2013) ทำให้การติดตามผลกระทบจากอิทธิพลของเกลือในพื้นที่และการประเมินศักยภาพของดินเพื่อวางแผนการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรทำได้ยาก ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมการทำการเกษตรแบบอัจฉริยะ (Smart agriculture) และการเกษตรแบบแม่นยำ (Precision agriculture) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยฐานข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำและเป็นปัจจุบันเพื่อประกอบการวางแผนงานในการจัดการที่เหมาะสมตรงกับลักษณะที่เป็นข้อจำกัดต่อการใช้อยู่ประโยชน์ของดินอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลดินเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญในระบบการเกษตรแบบอัจฉริยะซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนการใช้ที่ดินเพื่อการปลูกพืช การทำแผนที่ดินดิจิทัล (Digital soil mapping: DSM) เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพในการทำแผนที่สมบัติดินเชิงพื้นที่ (McBratney *et al.*, 2003) ร่วมกับการใช้เทคโนโลยีทางภูมิสารสนเทศเพื่อวิเคราะห์เชิงพื้นที่

และการใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ (Machine learning: ML) ซึ่งอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาสร้างแผนสำหรับการกระจายสมบัติดิน โดยใช้แบบจำลอง Random Forest (RF) ในการวิเคราะห์รูปแบบลักษณะการกระจายของข้อมูลสมบัติดินและคาดการณ์แนวโน้ม ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทำแผนที่ดินดิจิทัลได้ (Grimm *et al.*, 2008; Dharumarajan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2019; Fathizad *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง RF นี้ยังไม่ได้มีการนำมาใช้เพื่อการคาดการณ์การแพร่กระจาย สมบัติ และระดับความอุดมสมบูรณ์ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในประเทศไทย ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้แบบจำลองมาเป็นเครื่องมือในการติดตามการแพร่กระจายประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์เชิงพื้นที่ของดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในประเทศไทย และใช้ในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพประหยัดเวลาและงบประมาณในการสำรวจพื้นที่ภาคสนาม ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลอง RF เพื่อการคาดการณ์การกระจายของสมบัติดิน และประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินในพื้นที่ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในกลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในตำบลเมืองเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาการสะสมเกลือในดินเป็นบริเวณกว้างและกระทบต่อการผลิตพืชในพื้นที่ ซึ่งจะใช้เป็นพื้นที่ต้นแบบสำหรับการศึกษาวิจัยปัญหาเกี่ยวกับดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในพื้นที่อื่น ๆ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือในกลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ที่แจกกระจายอยู่ในบริเวณตำบลเมืองเพีย ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของ

อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น มีเนื้อที่ประมาณ 13,318 ไร่ สภาพภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นที่ราบน้ำท่วมถึง อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 150–200 เมตร พื้นที่ที่มีความลาดชันในพิสัยร้อยละ 0–3

การเก็บตัวอย่างดินและวิเคราะห์ข้อมูลดินในห้องปฏิบัติการ

เก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มในพื้นที่ที่ศึกษาด้วย ส่วนเจาะดินที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร จำนวน 100 จุด พร้อมเก็บค่าพิกัดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างดิน ด้วยเครื่องรับสัญญาณกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Figure 1) นำตัวอย่างดินผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บด และ ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บส่วนที่ร่อนผ่าน ตะแกรงไปวิเคราะห์สมบัติดินในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter: OM; Walkley and Black, 1934) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorous: Avail. P) โดยวิธี Bray II

(Bray and Kurtz, 1945) โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available potassium: Avail. K) โดยวิธี 1 M NH_4OAc ที่ pH 7.0; Pratt, 1965) ความจุ แลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity: CEC; Sumner and Miller, 1996) ค่าร้อยละความ อิ่มตัวเบส (Base saturation percentage: %BS; Soil Survey Division, 1980) และอีซีอี (Electrical conductivity of a saturated soil extract: EC) โดยวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดได้จาก ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Richards, 1954)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลผลวิเคราะห์สมบัติดินจากห้อง ปฏิบัติการด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่ามัธยฐาน เพื่อวัดการกระจาย ของข้อมูล

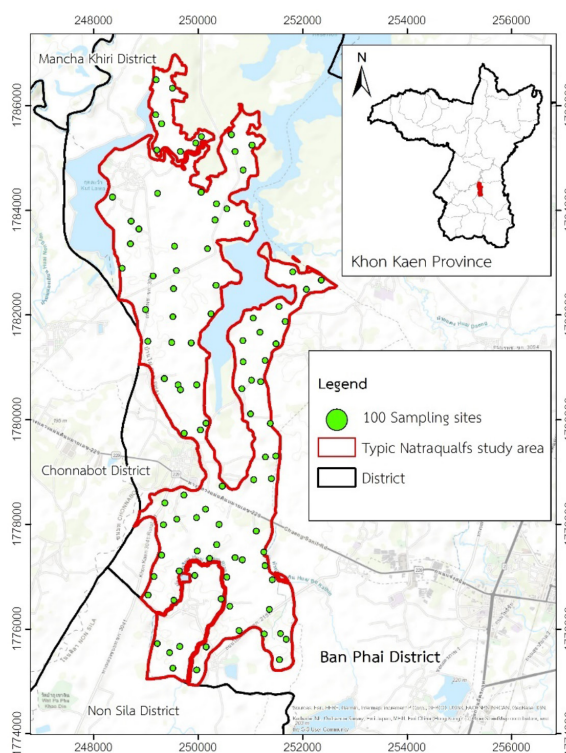


Figure 1 The studied area and 100 sampling sites

การประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลอง

การประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลอง RF (Figure 2) ซึ่งเป็นแบบจำลองหนึ่งของเทคนิคการเรียนรู้ (Machine learning) ทำงานด้วยโปรแกรม R Studio (R Core Team, 2022) โดยการแบ่งชุดข้อมูลสมบัติดิน ประกอบด้วย ข้อมูลด้านความอุดมสมบูรณ์ ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ค่าร้อยละความอิ่มตัวเบส และไอซีซี สำหรับข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการฝึก (Training dataset) จำนวนตัวอย่างคิดเป็นร้อยละ 80 ของตัวอย่างดินที่วิเคราะห์ทั้งหมด ($n = 80$) และข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการทดสอบ (Validate dataset) คิดเป็นร้อยละ 20 ของจำนวนตัวอย่างดิน ($n = 20$) เพื่อนำเข้าแบบจำลองการประมาณค่าเชิงพื้นที่ จากนั้น นำข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการฝึกมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์ โดยใช้วิธี Pearson's correlation กับตัวแปรทำนายที่ได้จากแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM; Copernicus, 2022) เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวของภูมิประเทศ (Terrain analysis) ด้วยโปรแกรม SAGA (QGIS Development Team, 2022) ประกอบด้วย DEM, slope, aspect,

channel network base level (cnbl), channel network distance (cnd), convergence index (conv), analytical hill shading (Hillshade), LS-factor, plan curvature, relative slope position (rsp), catchment area (tca), topographic wetness index (twi) และ valley depth และข้อมูลทำนายที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 OLI จำนวน 6 Band ประกอบด้วย Band 2 (Blue), Band 3 (Green), Band 4 (Red), Band 5 (NIR), Band 6 (SWIR 1) และ Band 7 (SWIR 2) เพื่อการคำนวณค่าสะท้อนพื้นผิวจากสมการที่แสดงใน Table 1 (Gorji *et al.*, 2019) โดยโปรแกรม R studio จากนั้น คัดเลือกชุดตัวแปรทำนายที่มีสหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$, $P < 0.01$) กับข้อมูลสมบัติดิน จากนั้น นำชุดข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการฝึกพร้อมกับชุดตัวแปรทำนายที่คัดเลือกไว้ นำเข้าแบบจำลอง RF เพื่อประมาณค่าเชิงพื้นที่ ยกเว้น การประมาณค่าไอซีซีที่ใช้ตัวแปรทำนาย DEM และตัวแปรทำนายจากการคำนวณค่าสะท้อนพื้นผิวทุกตัวแปร เนื่องจากดัชนีข้างต้นเป็นดัชนีที่นิยมใช้ร่วมกับการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือ (FAO, 2020)

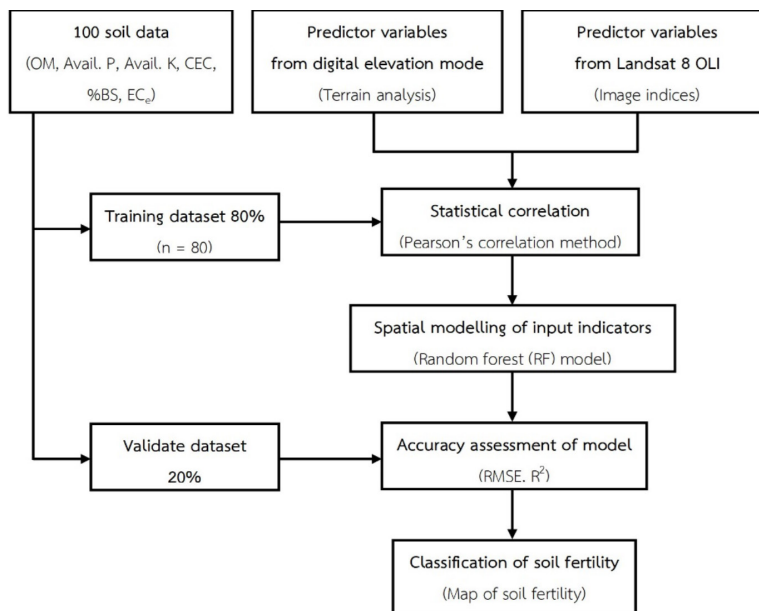


Figure 2 Methodology used in this study

ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับชุดข้อมูลสำหรับทดสอบด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE; สมการที่ [1] และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2 ; สมการที่ 2) ระหว่างค่าจริง (Observed value) กับค่าที่ได้จากการประมาณค่า (Predicted value; Jolliffe and Stephenson, 2003)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x - y)^2}{n}} \quad \text{----- [1]}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{Regression}}{SS_{Total}} = 1 - \frac{\sum (y - x)^2}{\sum (\bar{y} - x)^2} \quad \text{----- [2]}$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด
 x คือ ค่าจริง
 y คือ ค่าที่ได้จากการประมาณค่า
 $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการประมาณค่า
 ผลที่ได้จากแบบจำลองจะได้แผนที่สมบัติดินแยกเป็นรายสมบัติดิน จากนั้น นำแผนที่การกระจายรายสมบัติดินมาซ้อนทับกันเพื่อสร้างแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ดินแบบราสเตอร์ แล้วจำแนกระดับความอุดมสมบูรณ์ดินใหม่ตามเกณฑ์การจำแนกความอุดมสมบูรณ์ดินของกองสำรวจดิน (Soil Survey Division, 1980) ดัง Table 2

Table 1 Spectral band of the Landsat-8 satellite images analyzed: description of the calculated spectral indices

Image bands	Band ratio	Remarks
Salinity index 1	$\sqrt{B4 \times B3}$	
Salinity index 2	$\sqrt{B4 \times B2}$	
Salinity index 3	$\sqrt{B4^2 \times B3^2}$	
Salinity index 4	$\frac{B5 \times B6 - B6^2}{B5}$	
Salinity index 5	$\frac{B2}{B4}$	
Salinity index 6	$B4 \times \frac{B5}{B3}$	
Soil adjusted vegetation index (SAVI)	$\frac{B5 \times B4}{(B5 + B4 + 0.5) \times 1.5}$	Exponential relationship with EC_e

Table 1 Cont.

Image bands	Band ratio	Remarks
Vegetation soil salinity index (VSSI)	$2(B3) - 5(B4 + B5)$	Exponential relationship with EC_e
Normalized difference salinity index (NDSI)	$\frac{B4 - B5}{B4 + B5}$	Exponential relationship with EC_e
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$\frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	Exponential relationship with EC_e
Salinity ratio (SR)	$\frac{B3 - B4}{B2 + B4}$	
Brightness index (BI)	$\sqrt{B3^2 + B4^2 + B5^2}$	

Source: Gorji *et al.* (2019)

Table 2 Criteria for soil fertility assessment by rating score method

Range	OM (g kg ⁻¹)	BS (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Avail. P (mg kg ⁻¹)	Avail. K (mg kg ⁻¹)
Low	<1.5 (1)	<35 (1)	<10 (1)	<10 (1)	<60 (1)
Medium	1.5–3.5 (2)	35–75 (2)	10–20 (2)	10–25 (2)	60–90 (2)
High	>3.5 (3)	>75 (3)	>20 (3)	>25 (3)	>90 (3)

The total score of the soil properties is <7, the soil has a low fertility level. If the score is 8–12, the soil has a moderate fertility level. If the score is >13, the soil has a high fertility level. OM = organic matter, BS = base saturation, CEC = cation exchange capacity, Avail. P = available phosphorus, Avail. K = available potassium.

Source: Soil Survey Division (1980)

ผลการทดลองและวิจารณ์

สมบัติทางเคมีของดิน

ผลวิเคราะห์สมบัติดินของตัวอย่างดินที่ศึกษาพบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และค่าร้อยละความอิ่มตัวเบส มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบปกติ โดยการกระจายของค่า

วิเคราะห์อยู่ใน quartile ที่ 1 และ 3 หรือร้อยละ 50 ของข้อมูล ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และอีซีอี มีการกระจายตัวแบบผิดปกติ และข้อมูลกระจายตัวร้อยละ 50 (Q1, Q3) อยู่ในพิสัยแคบ และมีค่าข้อมูลที่ผิดปกติ (Outliers) ยกเว้นค่าร้อยละความอิ่มตัวเบส สมบัติดินที่มีค่าวิเคราะห์ที่ผิดปกติมากที่สุด คือ ปริมาณ

โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ รองลงมา คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ อีซีอี ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ตามลำดับ (Figure 3) โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 0.34–3.03 กรัมต่อกิโลกรัม อยู่ในระดับต่ำมาก ถึงต่ำ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 1.79–125.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มีค่าต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 9.22–369.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก ปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีค่าต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 3.75–35.25 เซนติโมลต่อกิโลกรัม อยู่ในระดับต่ำถึงสูง ค่าร้อยละความอิ่มตัวเบสมีค่าต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 52.41–100 อยู่ในระดับต่ำถึงสูงมาก อีซีอีมีค่าระหว่าง 0.51–110 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร อยู่ในระดับไม่เค็มถึงเค็มจัด (Table 3)

จากข้อมูลสถิติของสมบัติดิน พบว่า ข้อมูลสมบัติดินทุกสมบัติมีความแปรปรวนสูงมาก เนื่องจากสภาพพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นแอ่ง มีบริเวณที่เป็นทางน้ำผ่าน หรือน้ำท่วมบ้างในช่วงฤดูฝน และบางบริเวณของพื้นที่พบดินที่ได้รับอิทธิพลจากวัตถุต้นกำเนิดสูง โดยพบชั้นวัตถุต้นกำเนิดตื้นกว่าบริเวณอื่น ๆ ร่วมกับอิทธิพลของความลึกของน้ำใต้ดิน และแหล่งน้ำในพื้นที่สอดคล้องกับ Norkaew (2006), Wongpokhrom (2007), Jansom *et al.* (2012) และ Khongnonglan (2013) ที่รายงานว่า สมบัติทางเคมีและธรณีเคมีของดินในแอ่งโคราชบริเวณจังหวัดร้อยเอ็ดและบริเวณจังหวัดขอนแก่น ของดินที่มีผลกระทบจากเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีความแปรปรวนสูงในทุกสมบัติ จากการแบ่งชุดข้อมูลใน Table 3 จะเห็นว่าชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ มีการกระจายของข้อมูลคล้ายคลึงกัน โดยที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความแปรปรวนน้อยที่สุด

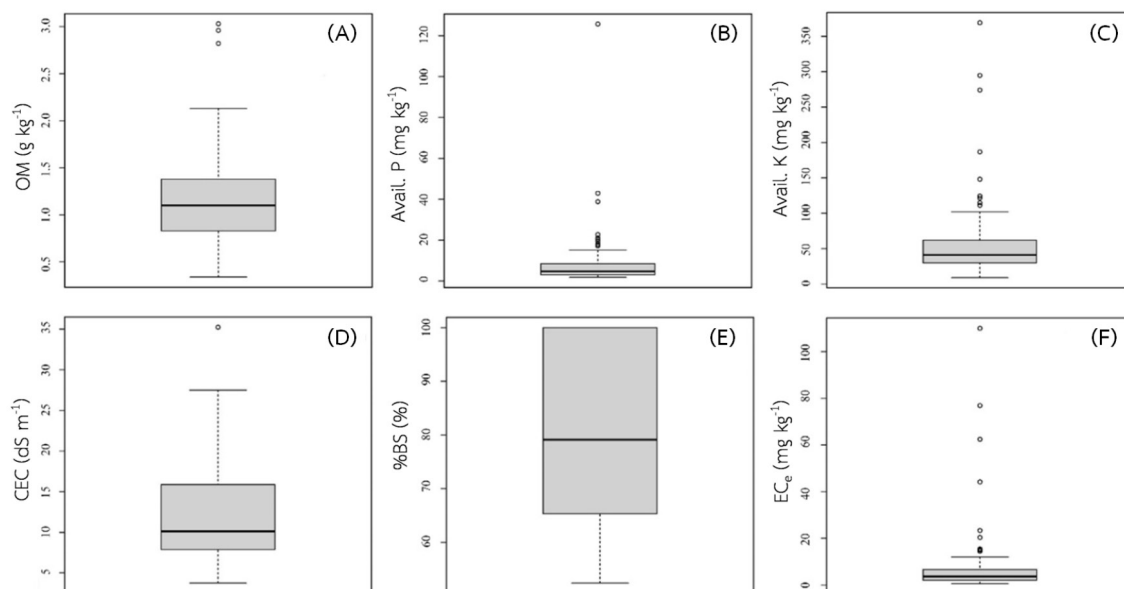


Figure 3 Box plot of distribution of soil properties in the study area: (A) organic matter (OM), (B) available phosphorus (Avail. P), (C) available potassium (Avail. K), (D) cation exchange capacity (CEC), (E) base saturation percentage (%BS), (F) electrical conductivity of a saturated soil extract (EC_e).

Table 3 Descriptive statistics of soil properties based on training and test dataset in the study area

Soil properties	Training dataset				Validate dataset			
	Min	Med	Mean	Max	Min	Med	Mean	Max
OM (g kg ⁻¹)	0.34	1.10	1.17	2.96	0.55	1.07	1.25	3.03
Avail. P (mg kg ⁻¹)	1.79	4.69	7.45	42.93	1.82	4.63	11.99	125.76
Avail. K (mg kg ⁻¹)	11.59	43.16	54.96	294.78	9.22	35.77	64.56	369.13
CEC (cmol kg ⁻¹)	3.75	9.90	11.60	35.25	6.50	12.00	14.60	27.50
%BS (%)	52.41	76.42	79.29	100.00	52.92	90.45	85.78	100.00
EC _e (dS m ⁻¹)	0.51	3.95	7.13	76.85	0.74	3.39	9.14	110.00

OM = organic matter, Avail. P = available phosphorus, Avail. K = available potassium, CEC = cation exchange capacity, %BS = base saturation percentage, EC_e = electrical conductivity of a saturated soil extract, Min = minimum, Med = median, Max = maximum.

การสร้างแผนที่การกระจายสมบัติดินและแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและตัวแปรทำนาย สหสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการฝึก และตัวแปรทำนายที่ได้จากข้อมูล DEM และภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 เพื่อนำเข้าแบบจำลอง (Table 4) พบว่า ตัวแปรทำนายทางด้านสภาพภูมิประเทศที่ได้จาก DEM มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($\pm 0.30-0.44$) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส และไอซีอี ส่วนตัวแปรทำนายด้านค่าสะท้อนพื้นผิวจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($\pm 0.30-0.49$) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และค่าร้อยละความอิ่มตัวเบส จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวแปรทำนายด้านสภาพภูมิประเทศมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลสำหรับการฝึกของสมบัติดินค่อนข้างต่ำ เป็นผลมาจากสภาพพื้นที่ที่มีความแตกต่างทางสภาพภูมิประเทศน้อย และชุดข้อมูลสมบัติดินที่มี

ความแปรปรวนสูง ยกเว้นปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทำนายด้านสภาพภูมิประเทศสูง สอดคล้องกับ Chaplot *et al.* (2001) และ Tajik *et al.* (2020) ที่พบว่า ปัจจัยทางด้านภูมิประเทศมีความสัมพันธ์กับอินทรีย์คาร์บอนในดิน ในขณะที่ตัวแปรทำนายด้านค่าสะท้อนพื้นผิวจากภาพถ่ายดาวเทียมมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลสมบัติดินที่มีความแปรปรวนสูงได้มากกว่าในกรณีพื้นที่ที่ศึกษา มีความแตกต่างทางสภาพภูมิประเทศน้อย สอดคล้องกับ Srisomkiew *et al.* (2021) ที่พบว่า ตัวแปรทำนายด้านค่าสะท้อนพื้นผิวจากภาพถ่ายดาวเทียมมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลสมบัติดินมากกว่าตัวแปรทำนายด้านสภาพภูมิประเทศในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้

การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของสมบัติดินในพื้นที่ศึกษาด้วยแบบจำลอง Random Forest การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของสมบัติดินด้วยแบบจำลอง RF เพื่อสร้างแผนที่การกระจายสมบัติดินที่ความลึก 0–30 เซนติเมตร (Figure 4) ประกอบด้วยแผนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Figure 4A) มี ค่า RMSE = 0.51 และ $R^2 = 0.51$ แผนที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ (Figure 4B) มีค่า RMSE = 22.76 และ $R^2 = 0.66$ แผนที่โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Figure 4C) มีค่า RMSE = 67.99 และ $R^2 = 0.67$ แผนที่ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Figure 4D) มีค่า RMSE = 5.86 และ $R^2 = 0.45$ แผนที่ร้อยละความอิ่มตัวเบส (Figure 4E) มีค่า RMSE = 14.01 และ $R^2 = 0.41$ และแผนที่อึชีอี (Figure 4F) มีค่า RMSE = 19.50 และ $R^2 = 0.82$ (Table 5) จากข้อมูลการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ พบว่า ค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และอึชีอี เป็นสมบัติดินที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเป็นผลมาจาก

สมบัติดินดังกล่าว มีความแปรปรวนสูงในพื้นที่ และมีการกระจายตัวแบบผิดปกติ อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ของสมบัติดินดังกล่าวกลับอยู่ในเกณฑ์สูง ($R^2 = 0.64-0.78$) (Jiang *et al.*, 2016; Ku *et al.*, 2019; Rezayati *et al.*, 2020) เนื่องจากแบบจำลอง RF มีความยืดหยุ่นในการจัดการข้อมูลสมบัติดินได้ดี สอดคล้องกับ Dharumarajan *et al.* (2017) และ Yang *et al.* (2019) ที่รายงานว่าแบบจำลอง RF จะช่วยเพิ่มความแม่นยำของการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของสมบัติดินได้

Table 4 Pearson correlations between soil properties and predicted variables

Predicted variables	OM	Avail. P	Avail. K	CEC	%BS	EC _e
DEM	-0.44**	0.00	-0.24*	-0.04	0.34	0.01
Slope	0.37**	0.05	0.25*	0.00	0.01	0.02
Aspect	0.03	-0.09	0.15	0.21	-0.01	0.05
cnbl	-0.43**	0.00	-0.23*	-0.03	0.40**	0.01
cnd	-0.30**	0.02	-0.21	-0.31**	0.08	-0.03
conv	-0.05	-0.05	0.08	-0.01	0.06	0.13
Hillshade	-0.44**	0.01	-0.22*	-0.03	0.12	0.00
lsfactor	-0.15	0.10	0.07	-0.16	-0.02	0.06
Plan curvature	0.40**	0.01	0.23*	0.02	-0.03	0.01
rsp	-0.23*	-0.03	-0.24*	-0.20	0.07	-0.08
tca	-0.25*	-0.07	-0.16	-0.06	0.00	0.32**
twi	-0.21	-0.17	-0.25*	-0.07	-0.01	-0.02
Valley	0.14	0.12	0.08	0.04	-0.02	0.03
Blue	-0.45**	0.27*	0.25*	-0.25*	0.27*	0.24*
Green	-0.43**	0.16	0.16	-0.25*	0.26*	0.15
Red	-0.43**	0.08	0.06	-0.30**	0.23*	0.07
NIR	-0.49**	0.08	-0.14	-0.41**	0.32**	0.11
SWIR1	-0.49**	-0.07	-0.14	-0.36**	0.22	0.02
SWIR2	-0.44**	-0.06	-0.11	-0.33**	0.24*	0.03
Salinity index 1	-0.43**	0.11	0.10	-0.29*	0.24*	0.10
Salinity index 2	-0.45**	0.13	0.11	-0.29*	0.25*	0.11
Salinity index 3	-0.43**	0.11	0.09	-0.29*	0.24*	0.10

Table 4 Cont.

Predicted variables	OM	Avail. P	Avail. K	CEC	%BS	EC _e
Salinity index 4	0.42**	0.17	0.05	0.26*	-0.16	-0.05
Salinity index 5	0.42**	0.15	0.06	0.31**	-0.12	0.00
Salinity index 6	-0.49**	0.04	-0.13	-0.40**	0.25*	0.06
SAVI	-0.43**	0.03	-0.30**	-0.25*	0.16	0.09
VSSI	0.47**	-0.08	0.09	0.40**	-0.29*	-0.09
NDSI	-0.14	0.01	0.20	-0.11	0.11	0.01
NDVI	-0.15	0.05	-0.27*	-0.08	0.05	0.05
SR	0.42**	0.09	0.09	0.34**	-0.10	0.02
BI	-0.47**	0.09	-0.07	-0.39**	0.30**	0.11

**, * Statistically significant at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively. OM = organic matter, Avail. P = available phosphorus, Avail. K = available potassium, CEC = cation exchange capacity, %BS = base saturation percentage, EC_e = electrical conductivity of a saturated soil extract.

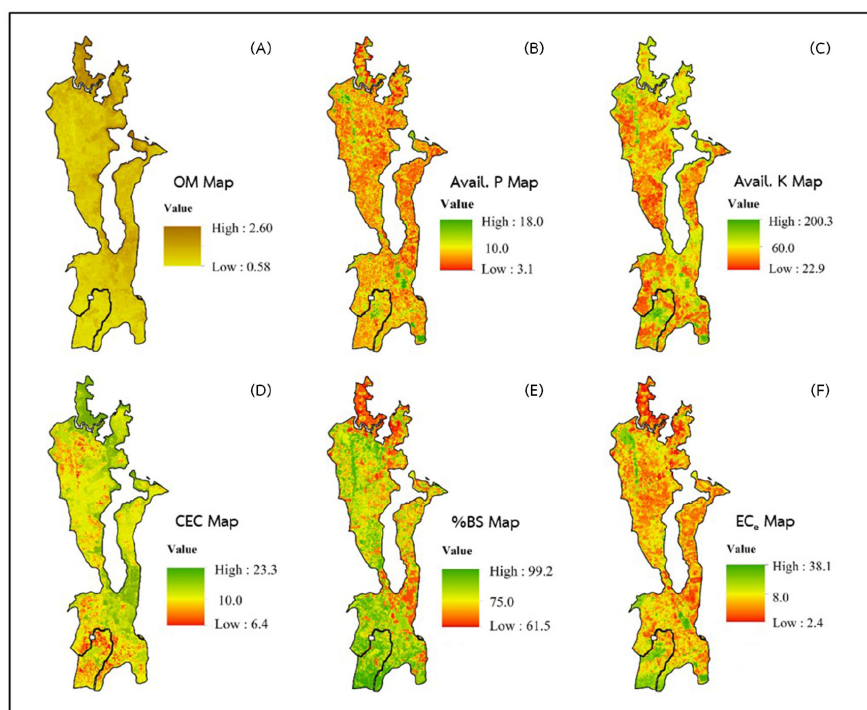


Figure 4 Soil properties distribution map in the study area: (A) soil organic matter, (B) available phosphorous, (C) available potassium, (D) cation exchange capacity, (E) base saturation percentage, and (F) electrical conductivity of a saturated soil extract.

Table 5 The error values of soil properties distribution prediction by Random Forest methods

Soil properties	RMSE	R ²
OM (g kg ⁻¹)	0.51	0.51
Avail. P (mg kg ⁻¹)	22.76	0.66
Avail. K (mg kg ⁻¹)	67.99	0.67
CEC (cmol kg ⁻¹)	5.86	0.45
%BS (%)	14.01	0.41
EC _e (dS m ⁻¹)	19.50	0.82

OM = organic matter, Avail. P = available phosphorus, Avail. K = available potassium, CEC = cation exchange capacity, %BS = base saturation percentage, EC_e = electrical conductivity of a saturated soil extract.

แผนที่ความอุดมสมบูรณ์ดินที่พัฒนาจากแบบจำลอง Random Forest

การสร้างแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ดินของพื้นที่ศึกษาจากแบบจำลอง RF โดยการซ้อนทับของแผนที่การกระจายของสมบัติดินใน Figure 5 พบว่าดินที่ทำการศึกษามีความอุดมสมบูรณ์ที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร อยู่ในระดับปานกลาง มีเนื้อที่ประมาณ 10,059 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 76 ของพื้นที่ และความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับต่ำ มีเนื้อที่ประมาณ 3,258 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 24 ของพื้นที่ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ดินในกลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในตำบลเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ มีความแปรปรวนของระดับความอุดมสมบูรณ์ดินสูง ชัดแย้งกับข้อมูลความอุดมสมบูรณ์ของชุดดินในพื้นที่ (ชุดดินกุลาร้องไห้ และชุดดินประทาย) ที่มีระดับความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง

ในดินบน (Land Development Department, 2022) และแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ดินของจังหวัดขอนแก่น โดยในบริเวณพื้นที่ศึกษามีระดับความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (Soil Resources Survey and Research Division, 2020) อาจเป็นผลจากข้อจำกัดในเรื่องมาตราส่วนของแผนที่ และการสำรวจดิน เนื่องจากแผนที่ดังกล่าวเป็นแผนที่ระดับหยาบ เมื่อใช้แบบจำลองซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง สมบัติดินบางค่า เช่น ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และร้อยละความอิ่มตัวเบส ที่ได้รับอิทธิพลของวัตถุต้นกำเนิดสภาพภูมิประเทศ และระยะทางจากแหล่งน้ำ รวมถึงช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างดินที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีผลกระทบจากเกลือ เมื่อนำไปประเมินความอุดมสมบูรณ์แล้วทำให้ได้ระดับความอุดมสมบูรณ์ดินแตกต่างกัน

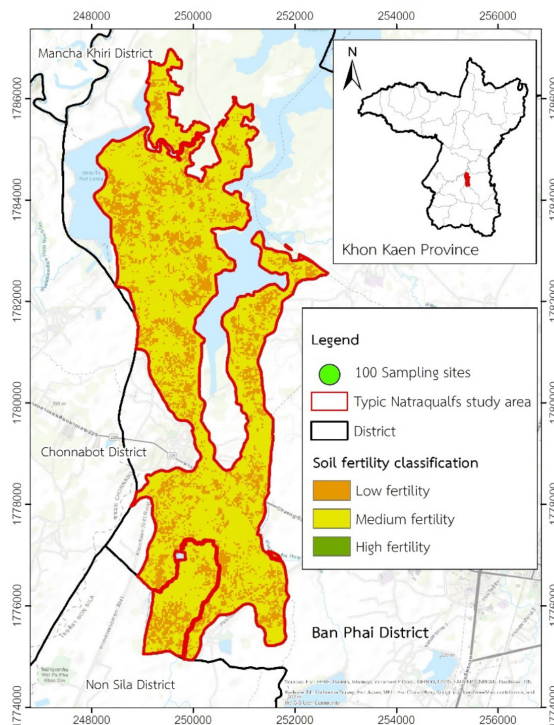


Figure 5 Soil fertility map of Typic Natraqualfs in Muang Pere subdistrict, Ban Pai district, Khon Kaen produced by the data from Random Forest model

สรุป

แบบจำลอง RF สามารถใช้ประมาณค่าเชิงพื้นที่ของสมบัติดิน ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ร้อยละความอิ่มตัวเบส และไอซีอีได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประเมินความอุดมสมบูรณ์ดินในกลุ่มดินย่อย Typic Natraqualfs ในตำบลเมืองเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร พบว่า อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาในพื้นที่ดินที่มีผลกระทบจากเกลือ ซึ่งในบริเวณที่มีระดับความเค็มเล็กน้อยถึงปานกลางที่พบเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ นั้นมีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง

มีความเหมาะสมสำหรับปลูกข้าวชนิดทนเค็มได้ แต่ควรมีการปรับปรุงบำรุงดิน โดยการลดการเผ่าตอซัง และมีการไถกลบตอซัง เพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้ดิน หากต้องการปลูกพืชนอกฤดู ควรเลือกปลูกพืชทนเค็ม เช่น หญ้าดักชี โสนแอฟริกัน และหน่อไม้ฝรั่งในบริเวณที่มีแหล่งน้ำทางการเกษตรเพียงพอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59(1): 39–46.
- Chaplot, V., M. Bernoux, C. Walter, P. Curmi and U. Herpin. 2001. Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils using a morphologic index and digital elevation model. *Soil Sci.* 166(1): 48–60.
- Copernicus, D.E.M. 2022. OpenTopography datasets. Available Source: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>, March 20, 2022.
- Dharumarajan, S., R. Hegde and S.K. Singh. 2017. Spatial prediction of major soil properties using Random Forest techniques - A case study in semi-arid tropics of South India. *Geoderma Reg.* 10: 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.07.005>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. Country Guidelines and Specifications for Mapping Salt-affected Soils. Rome, Italy. 131 p.
- Fathizad, H., M.A.H. Ardakani, H. Sodaiezhadeh, R. Kerry and R. Taghizadeh-Mehrjardi. 2020. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forests in the central desert of Iran. *Geoderma.* 365: 114233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114233>.
- Gorji, T., A. Yildirim, E. Sertel and A. Tanik. 2019. Remote sensing approaches and mapping methods for monitoring soil salinity under different climate regimes. *Int. J. Envir. Geoform.* 6(1): 33–49. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.500452>.
- Grimm, R., T. Behrens, M. Märker and H. Elsenbeer. 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island — Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma.* 146(1–2): 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.008>.
- Jansom, S., R. Katawatin and K. Pannangpetch. 2012. Some important chemical properties of salt-affected soils in Khon Kaen province. *Khon Kaen Agr. J.* 40(Suppl.): 259–263. (in Thai)
- Jiang, Y., L. Zhang, B. Zhang, C. He, X. Jin and X. Bai. 2016. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China. *Agric. Water Manag.* 177: 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.014>.
- Jolliffe, I.T. and D.B. Stephenson. 2003. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.* John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England.

- Khongnonglan, T. 2013. Distribution and Variability of Kula Ronghai Series in Khorat Basin. MS Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Ku, H.H., J.H. Ryu, H.S. Bae, C. Jeong and S.E. Lee. 2019. Modeling a long-term effect of rice straw incorporation on SOC content and grain yield in rice field. *Arch. Agron. Soil Sci.* 65(14): 1941–1954. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1583330>.
- Land Development Department. 2018. 20-Year Soil Resource Management Plan in Thailand (2018-2037). Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Land Development Department. 2022. ID Din Dee. Available Source: <http://iddindee.ddd.go.th/SoilSeries/home.html>, January 22, 2023. (in Thai)
- McBratney, A.B., M.L. Mendonça-Santos and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117(1–2): 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- Norkaew, S. 2006. Variability of Natural Soil System as Affected by Salinity Level of Kula Ronghai Series in Roi Et Province. MS Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Pratt, P.E. 1965. Potassium, pp. 1022–1030. *In* C.A. Black, ed. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- QGIS Development Team. 2022. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. Available Source: <https://www.qgis.org>, September 19, 2022.
- R Core Team. 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rezayati, S., M. Khaledian, T. Razavipour and M. Rezaei. 2020. Water flow and nitrate transfer simulations in rice cultivation under different irrigation and nitrogen fertilizer application managements by HYDRUS-2D model. *Irrig. Sci.* 38: 353–363. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00676-1>.
- Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. United States Salinity Laboratory, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- Soil Resources Survey and Research Division. 2020. Soil Fertility Map in Khon Kaen Province. Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Soil Survey Division. 1980. *Handbook for Land Suitability Classification for Cash Crops*. Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand. 76 pp. (in Thai)

- Srisomkiew, S., M. Kawahigashi and P. Limtong. 2021. Digital mapping of soil chemical properties with limited data in the Thung Kula Ronghai, Thailand. *Geoderma*. 389: 114942. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114942>.
- Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients, pp. 1201–1229. *In* D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner, eds. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Tajik, S., S. Ayoubi and M. Zeraatpisheh. 2020. Digital mapping of soil organic carbon using ensemble learning model in Mollisols of Hyrcanian forests, northern Iran. *Geoderma Reg.* 20: e00256. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00256>.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1): 29-38.
- Wongpokhom, N. 2007. Variability of Natural Soil System as Affected by Salinity Level in Phimai Series: Chemical and Micromorphological Properties. PhD Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Yang, M., D. Xu, S. Chen, H. Li and Z. Shi. 2019. Evaluation of machine learning approaches to predict soil organic matter and pH using vis-NIR spectra. *Sensors*. 19(2): 263. <https://doi.org/10.3390/s19020263>.
- Zhang, H., P. Wu, A. Yin, X. Yang, M. Zhang and C. Gao. 2017. Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of eastern China: a comparison of multiple linear regressions and the random forest model. *Sci. Total Environ.* 592: 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.146>.