

การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและผลกระทบต่อ คุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยในอนาคตด้วยแบบจำลองเชิงพื้นที่ กรณีศึกษาจังหวัดพิษณุโลก Forecasting Future Land Use and Land Cover Changes Using Spatial Modeling: A Case Study of Phitsanulok Province

สุนิสา เทียนแก้ว* และ นิติ เชี่ยมชื่น

Sunisa Tienkaew* and Niti Iamchuen

สาขาวิชาสารสนเทศภูมิศาสตร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา ประเทศไทย

Geographical Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao, Thailand

Received: 15 June 2026, Received in revised form: 13 August 2026, Accepted: 14 August 2026

Available online: 1 September 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: การขยายตัวของเมืองและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานตามกรอบระเบียบเศรษฐกิจในจังหวัดพิษณุโลกซึ่งเป็นจุดตัดของระเบียบเศรษฐกิจแนวตะวันออก-ตะวันตก (EWEC) และแนวเหนือ-ใต้ (NSEC) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (LULC) อย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยและความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์พลวัตการเปลี่ยนแปลง LULC ของจังหวัดพิษณุโลกครอบคลุมปี พ.ศ. 2550, 2557 และ 2564 (2) พยากรณ์รูปแบบ LULC ในอนาคตถึงปี พ.ศ. 2571 ด้วยแบบจำลอง CA-Markov และ (3) ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยและความเสื่อมโทรมด้วยแบบจำลอง InVEST Habitat Quality

วิธีดำเนินการวิจัย: การวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 5 TM (พ.ศ. 2550) และ Landsat 8 OLI/TIRS (พ.ศ. 2557 และ 2564) ความละเอียด 30 เมตร จากคลังข้อมูล USGS Earth Explorer คัดเลือกช่วงฤดูแล้งเพื่อลดการบดบังจากเมฆ จำแนกการใช้ที่ดินออกเป็น 5 ประเภทด้วยเทคนิค Maximum Likelihood Classification (MLC) ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เบ็ดเตล็ด และแหล่งน้ำ จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CA-Markovโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2550 และ 2557 จำลองแผนที่ปี พ.ศ. 2564 เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงจริงของกรมพัฒนาที่ดิน ก่อนใช้เมทริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนผ่านปี พ.ศ. 2557-2564 พยากรณ์การใช้ที่ดินในปี พ.ศ. 2571 ส่วนการประเมินคุณภาพและความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยใช้แบบจำลอง InVEST Habitat Quality โดยกำหนดปัจจัยคุกคาม 4 ปัจจัย ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เกษตรกรรม ถนนสายหลัก และทางรถไฟ อ้างอิงพารามิเตอร์ตามแนวทาง Literature-based Approach จากคู่มือ InVEST และงานวิจัยในเขตร้อน

ผลการวิจัย: แบบจำลอง CA-Markov มีประสิทธิภาพในการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินในระดับที่ยอมรับได้ โดยให้ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) เท่ากับ 0.87 และค่าสัมประสิทธิ์เคปป์ (Kappa coefficient) เท่ากับ 0.79 ผลการคาดการณ์ปี พ.ศ. 2571 พบว่าพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.08 เป็นร้อยละ 6.42 พื้นที่

เกษตรกรรมขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.41 และพื้นที่ป่าไม้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 0.57 ขณะที่พื้นที่เบ็ดเตล็ดลดลงมากถึงร้อยละ 40.51 สะท้อนว่าพื้นที่เบ็ดเตล็ดเป็นแหล่งรองรับหลักของการเปลี่ยนสภาพไปสู่พื้นที่เกษตรกรรมและชุมชน ผลการประเมินด้วยแบบจำลอง InVEST Habitat Quality พบว่าคุณภาพดินที่อยู่อาศัยลดลงจาก 0.544 ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 0.528 ในปี พ.ศ. 2571 ขณะที่ค่าความเสื่อมโทรมของดินที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นจาก 0.137 เป็น 0.154 โดยพื้นที่ที่มีความเสื่อมโทรมสูงขยายตัวจากเขตเมืองไปสู่พื้นที่ชานเมืองและพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบ โดยเฉพาะตามแนวโครงข่ายถนนสายหลักและรอยต่อกับแนวขอบป่า ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับพื้นที่คุณภาพต่ำมาก (Very Low) ของคุณภาพของดินที่อยู่อาศัย

สรุปผลการวิจัย: การบูรณาการแบบจำลอง CA-Markov และ InVEST Habitat Quality แสดงให้เห็นพลวัตการใช้ที่ดินของจังหวัดพิษณุโลกที่ขับเคลื่อนโดยระบบคมนาคม และการขยายตัวของเมือง ส่งผลกระทบผกผันโดยตรงต่อคุณภาพระบบนิเวศ แม้พื้นที่ป่าไม้ขนาดใหญ่จะช่วยชะลออัตราการลดลงของคุณภาพดินที่อยู่อาศัยในภาพรวม แต่บริเวณแนวขอบเมือง ถนนสายหลัก และรอยต่อระหว่างเขตเมืองกับพื้นที่ป่ายังคงเสี่ยงต่อการแตกกระจายของดินที่อยู่อาศัยในระยะยาว องค์ความรู้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลฐานสนับสนุนการวางผังเมือง การกำหนดแนวกั้นชนทางนิเวศและการควบคุมการขยายตัวของเมือง เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาเศรษฐกิจและการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน; แบบจำลอง CA-Markov; แบบจำลอง InVEST

Abstract

Background and Objectives: Rapid urban expansion and infrastructure development along economic corridor frameworks in Phitsanulok Province, which lies at the intersection of the East-West Economic Corridor (EWEC) and the North-South Economic Corridor (NSEC), have continuously driven land-use and land-cover (LULC) changes in the province. These ongoing changes directly affect habitat quality and ecosystem integrity. This study aimed to (1) analyze the spatiotemporal dynamics of LULC change in Phitsanulok Province across three time points, namely 2007, 2014, and 2021; (2) forecast future LULC patterns to the year 2028 using the CA-Markov model; and (3) assess the impacts of land-use change on habitat quality and habitat degradation using the InVEST Habitat Quality module.

Methodology: Satellite imagery was analyzed using Landsat 5 TM data for 2007 and Landsat 8 OLI/TIRS data for 2014 and 2021, both at 30-meter spatial resolution, obtained from the USGS Earth Explorer archive. Dry-season imagery was selected to minimize interference from cloud cover. Land use was classified into five categories—agricultural land, forest land, urban and built-up area, miscellaneous land, and water body—using the Maximum Likelihood Classification (MLC) technique. The CA-Markov model was then validated by using the 2007 and 2014 LULC data to simulate a land-use map for 2021, which was compared against the actual reference map from the Land Development Department. Once validated, the 2014–2021 transition probability matrix was applied to forecast

land use for 2028. In parallel, habitat quality and habitat degradation were assessed using the InVEST Habitat Quality module, incorporating four threat factors—urban and built-up areas, agricultural land, major roads, and railways—with parameters assigned following a literature-based approach drawn from the InVEST User's Guide and relevant tropical-context studies.

Main Results: The CA–Markov model demonstrated satisfactory predictive performance for land-use forecasting, achieving an Overall Accuracy of 0.87 and a Kappa coefficient of 0.79, indicating a high level of agreement between the simulated and actual land-use maps. The 2028 projection showed that urban and built-up areas were expected to increase from 6.08% to 6.42% of the provincial area, while agricultural land was projected to expand by 6.41%, and forest land showed a slight recovery of 0.57%. In contrast, miscellaneous land was projected to decline sharply, by as much as 40.51%, indicating that this land type functioned as the primary reservoir absorbing conversion into both agricultural and urban built-up areas as the province continued to develop. Assessment using the InVEST Habitat Quality model further showed that overall habitat quality declined from 0.544 in 2007 to 0.528 in 2028, while the corresponding habitat degradation index rose from 0.137 to 0.154 over the same period. Spatially, areas experiencing high habitat degradation expanded outward from the urban core toward peri-urban zones and the surrounding agricultural areas, particularly along the major road network and the transitional zones bordering forest edges. Notably, these areas of high degradation coincided closely with the same locations classified as having very-low habitat quality, underscoring a consistent spatial pattern linking urban and infrastructure expansion to ecological deterioration.

Conclusions: The coupled CA-Markov and InVEST Habitat Quality modeling framework effectively demonstrates the land-use dynamics of Phitsanulok Province, showing that these changes are driven primarily by transportation systems and continued urban expansion, both of which exert a direct and inverse effect on ecosystem quality. Although the province's extensive forest cover helps to moderate the overall provincial-level rate of decline in habitat quality, urban fringes, major roads, and the transition zones between urban areas and forest land remain at considerable long-term risk of habitat fragmentation. The knowledge generated through this study can serve as a foundation for supporting urban planning efforts, the delineation of ecological buffer zones, and the management of urban expansion, all of which are necessary to achieve a sustainable balance between continued economic development and the conservation of biodiversity in the province.

Keywords: land-use and land-cover change; CA-Markov Model; InVEST Model

*Corresponding author. E-mail: Sunisa.011044@gmail.com

Introduction

จังหวัดพิษณุโลก เป็นจังหวัดที่มีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากตั้งอยู่ในจุดยุทธศาสตร์กึ่งกลางของประเทศ และเป็นศูนย์กลางของภาคเหนือตอนล่าง การเป็นจุดตัดของระเบียงเศรษฐกิจที่สำคัญ ทั้งระเบียงเศรษฐกิจแนวตะวันออก-ตะวันตก (East-West Economic Corridor: EWEC) และระเบียงเศรษฐกิจแนวเหนือ-ใต้ (North-South Economic Corridor: NSEC) ทำให้จังหวัดพิษณุโลกได้รับการพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่งที่สำคัญของภูมิภาค (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2023) จังหวัดพิษณุโลกเป็นหนึ่งใน 9 จังหวัดของภาคเหนือตอนล่าง และได้รับการกำหนดให้เป็นศูนย์กลางการบริหารและเศรษฐกิจของกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนล่าง 1 (พิษณุโลก ตาก เพชรบูรณ์ สุโขทัย อุตรดิตถ์) ตามแผนพัฒนาภาคของสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ด้วยบทบาทดังกล่าวประกอบกับตำแหน่งจุดตัดระเบียงเศรษฐกิจ พิษณุโลกจึงเป็นพื้นที่ที่มีแนวโน้มเผชิญแรงกดดันจากการขยายตัวของเมืองและโครงสร้างพื้นฐานสูงกว่าจังหวัดอื่นในภูมิภาคเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Land Use and Land Cover: LULC) เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่สุดที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของกิจกรรมมนุษย์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมโลก (Foley *et al.*, 2005) ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างก้าวกระโดด การขยายตัวของความเป็นเมือง (Urbanization) และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางเศรษฐกิจ ได้กลายเป็นแรงขับเคลื่อนทางมานุษยวิทยา (Anthropogenic drivers) ที่ส่งผลให้เกิดการปรับเปลี่ยนสภาพภูมิประเทศอย่างรุนแรงและรวดเร็ว พื้นที่ธรรมชาติและพื้นที่เกษตรกรรมจำนวนมากถูกเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นพื้นที่สิ่งปลูกสร้างและเขตอุตสาหกรรม "การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติและการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ แต่ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อความมั่นคงทางอาหารและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาค" (Trisurat *et al.*, 2010) ดังนั้น การทำความเข้าใจพลวัตการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอดีต จึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการประเมินสถานการณ์ทางสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม "การติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงในอดีตเพียงอย่างเดียว ไม่เพียงพอต่อการรับมือกับความท้าทายด้านการจัดการทรัพยากรในอนาคต" (Arsanjani *et al.*, 2013) จึงจำเป็นต้องบูรณาการเทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing) เข้ากับแบบจำลองเชิงพื้นที่ (Spatial Modeling) "แบบจำลองเชิงพื้นที่ช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์ (Scenario simulation) และประเมินผลกระทบเชิงพื้นที่ก่อนการตัดสินใจดำเนินการจริง ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการทรัพยากรที่ดินได้อย่างเป็นรูปธรรม" (Halmy *et al.*, 2015) นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพมากขึ้น ภัยคุกคามต่อถิ่นที่อยู่อาศัยและการกระจายตัวทางภูมิศาสตร์จึงมีความสำคัญมากขึ้นในการประเมินคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Quality)

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและการขยายตัวของเมืองส่งผลโดยตรงต่อความหลากหลายทางชีวภาพและคุณภาพของระบบนิเวศ โดยเฉพาะการลดลงของพื้นที่ป่าไม้ การขยายตัวของถิ่นที่อยู่อาศัยและการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตลดลง (Caro *et al.*, 2020; Zheng & Li, 2022) การประเมินผลกระทบดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ทั้งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และผลกระทบทางนิเวศร่วมกันได้อย่างเป็นระบบ แบบจำลอง Cellular Automata–Markov (CA–Markov) เป็นหนึ่งในแบบจำลอง

ที่ได้รับความนิยมในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เนื่องจากสามารถผสมผสานการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนผ่านเชิงปริมาณ (Transition Probability) ของ Markov Chain เข้ากับกฎความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของ Cellular Automata ทำให้สามารถจำลองรูปแบบและทิศทางการขยายตัวของพื้นที่ได้อย่างสมจริง (Fitawok *et al.*, 2020; Koko *et al.*, 2020) โดย Markov Chain มีประสิทธิภาพในการคำนวณปริมาณการเปลี่ยนแปลงผ่านเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (Transition Probability Matrix) แต่ยังมีข้อจำกัดในการระบุตำแหน่งเชิงพื้นที่ของการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการบูรณาการร่วมกับ Cellular Automata จึงช่วยเพิ่มศักยภาพในการจำลองการกระจายตัวเชิงพื้นที่ได้ดียิ่งขึ้น (Sang *et al.*, 2011) ขณะเดียวกัน แบบจำลอง Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) โดยเฉพาะโมดูล Habitat Quality ได้ถูกนำมาใช้ประเมินผลกระทบของกิจกรรมมนุษย์ต่อคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยและความสมบูรณ์ของระบบนิเวศอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ระดับความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยจากปัจจัยคุกคาม (Threat Factors) การบูรณาการแบบจำลอง CA-Markov ร่วมกับ InVEST ในลักษณะ Coupled Model พิจารณารับทึงพื้นที่ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการใช้ที่ดินในบริเวณใกล้เคียง รวมถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงระหว่างประเภทการใช้ที่ดิน ในช่วงเวลาต่างๆ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินได้ (Wang *et al.*, 2025; Zheng & Li, 2022) โดยการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายบริบทและหลายมาตราส่วน ทั้งในระดับเมือง ลุ่มน้ำ ตัวอย่างเช่น Yi *et al.* (2022) ที่ประยุกต์ใช้ CA-Markov ร่วมกับ InVEST เพื่อพยากรณ์และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศภายใต้สถานการณ์การพัฒนาปกติและการปรับให้เหมาะสมในเขต Mentougou กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน เช่นเดียวกับ Wang *et al.* (2024) ใช้แนวทางเดียวกันวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยกับปัจจัยขับเคลื่อนเชิงภูมิประเทศและนโยบายในเมือง Lu'an ประเทศจีน โดยมีค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Kappa) สูงถึง 0.91 ดังที่ปรากฏในงานของ Manna *et al.* (2025) ซึ่งประยุกต์ใช้กรอบแนวทางดังกล่าวในกรุงเทพมหานครและพบว่า พื้นที่ถิ่นอาศัยคุณภาพสูงลดลงถึงร้อยละ 35.5 ระหว่างปี ค.ศ. 1995-2045 รวมถึงงานของ Zhang *et al.* (2021) ในลุ่มน้ำ Huaihe ประเทศจีน พบว่า เมื่อพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างขยายตัวมากขึ้น ค่าคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Quality) จะลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์รบกวนความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ และลดความสามารถของพื้นที่ธรรมชาติในการรองรับความหลากหลายทางชีวภาพ การประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงพื้นที่เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยที่ใกล้เคียงที่สุดคือการศึกษาของ Arunyawat & Shrestha (2016) ซึ่งประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อบริการระบบนิเวศด้วยแบบจำลอง InVEST ในลุ่มน้ำวังทอง อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2532-2556 อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวมีขอบเขตครอบคลุมเพียงระดับลุ่มน้ำย่อยหนึ่งอำเภอ มิได้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งจังหวัด ใช้เพียงข้อมูลย้อนหลังโดยไม่มีการพยากรณ์อนาคตด้วยแบบจำลองเชิงความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่อย่าง CA-Markov และดำเนินการก่อนมาช่วงเวลาที่ยังไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของภูมิภาคอย่างเป็นรูปธรรมตามกรอบยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) จากการสืบค้นวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ ยังไม่พบการศึกษาใดที่ประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-Markov ร่วมกับ InVEST Habitat Quality ในระดับจังหวัดสำหรับพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกมาก่อน ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ ได้แก่ (1) จำแนกและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์

ที่ดินในจังหวัดพิษณุโลก ครอบคลุมปี พ.ศ. 2550 2557 และ 2564 (2) พยากรณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตถึง พ.ศ. 2571 (3) ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อคุณภาพดินที่อยู่อาศัย

Methodology

พื้นที่ดำเนินการวิจัย

จังหวัดพิษณุโลกตั้งอยู่ในภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างละติจูด 16 องศา 03 ลิปดา ถึง 17 องศา 33 ลิปดาเหนือ และลองจิจูด 99 องศา 15 ลิปดา ถึง 101 องศา 15 ลิปดาตะวันออก มีพื้นที่รวมทั้งหมดประมาณ 10,816 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย 9 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมืองพิษณุโลก นครไทย ชาติตระการ บางระกำ บางกระทุ่ม พรหมพิราม วัดโบสถ์ วังทอง และเนินมะปราง ภูมิประเทศเป็นพื้นที่สูงบริเวณตอนเหนือและตะวันตก ซึ่งเป็นเทือกเขาหลวงพระบางและเทือกเขาเพชรบูรณ์ พื้นที่ราบลุ่มตะกอนตอนกลางและตอนใต้ของจังหวัด โดยมีแม่น้ำน่านไหลผ่านพื้นที่สำคัญของจังหวัด (Figure 1)

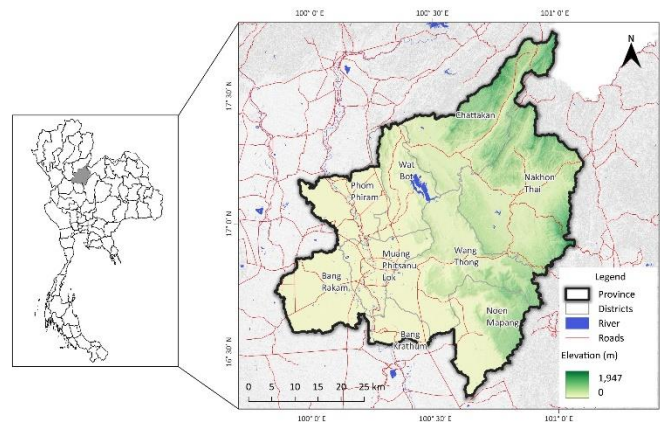


Figure 1 Study area

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

การเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยภาพถ่ายดาวเทียมหลายช่วงเวลาได้รับมาจากคลังข้อมูล USGS Earth Explorer โดยใช้ดาวเทียม Landsat 5 Thematic Mapper (TM ความละเอียด 30 เมตร) สำหรับ พ.ศ. 2550 และ Landsat 8 OLI/TIRS (30 เมตร) สำหรับ พ.ศ. 2557 และ 2564 คัดเลือกภาพฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) เพื่อลดการรบกวนจากเมฆและรับประกันความสม่ำเสมอของค่าสเปกตรัม และข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department: LDD) ในช่วงระหว่างปี พ.ศ.2550 ถึง พ.ศ.2564 และมีข้อมูลปัจจัยอื่น ๆ เช่น โครงข่ายถนนสายหลัก ทางรถไฟ ได้รับการรวบรวมจากเว็บไซต์ OpenStreetMap เพื่อประเมินคุณภาพและการเสื่อมโทรมของดินที่อยู่อาศัยโดยการวิเคราะห์การใช้ที่ดินและการปกคลุมดินในแต่ละปีในแบบจำลอง InVEST

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การจำแนกประเภทการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน

การจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน ผู้วิจัยคัดเลือกภาพถ่ายดาวเทียมเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน– เมษายน) ของแต่ละปีการศึกษา เนื่องจากเป็นช่วงที่ท้องฟ้าโปร่งและมีปริมาณเมฆปกคลุมต่ำที่สุดในรอบปีสำหรับพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของไทย ซึ่งช่วยลดการรบกวนจากเมฆเงาและค่าการสะท้อนแสง (spectral reflectance) โดยคัดเลือกภาพที่มีเปอร์เซ็นต์เมฆปกคลุมไม่เกิน 10% ก่อนกำหนดพื้นที่สนใจ (ROI) ผู้วิจัยสร้างภาพผสมสีเท็จ (False Color Composite) จากแบนด์อินฟราเรดใกล้ ร่วมกับแบนด์แดงและเขียว (Landsat 5 TM: 4-3-2, Landsat 8 OLI: 5-4-3) เพื่อเพิ่มความชัดเจนในการแยกพืชพรรณ (โทนแดง) ออกจากพื้นที่ชุมชน (โทนฟ้าอมเทา) และแหล่งน้ำ (โทนน้ำเงินเข้ม) จากนั้นกำหนด ROI ทั้ง 5 ประเภทการใช้ที่ดิน โดยตรงบนภาพผสมสีเท็จ ร่วมกับการอ้างอิง Google Earth ความละเอียดสูงเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยกระจายตำแหน่ง ROI ให้ครอบคลุมทั่วทั้งจังหวัดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ก่อนใช้เป็นข้อมูลฝึกสอนใน Maximum Likelihood Classification ผู้วิจัยตรวจสอบเส้นโค้งค่าการสะท้อนแสง (spectral signature) ของ ROI แต่ละประเภทในทุกแบนด์ เพื่อยืนยันความเป็นเนื้อเดียวกันภายในกลุ่ม และไม่มีการซ้อนทับเชิงสเปกตรัมระหว่างประเภทที่ดิน โดยแบ่งการใช้ที่ดินแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ (1) พื้นที่เกษตรกรรม (2) พื้นที่ป่าไม้ (3) พื้นที่เบ็ดเตล็ด (4) พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และ (5) แหล่งน้ำ

2. การประเมินความถูกต้องและการตรวจสอบแบบจำลอง

ในการประเมินความถูกต้องแม่นยำเพื่อให้มั่นใจในความน่าเชื่อถือของผลการจำแนกประเภท จำนวนจุดตรวจสอบความถูกต้องกำหนดด้วยสูตรของ Fitzpatrick-Lins (1981) โดยการสุ่มจุดเลือกใช้วิธีการสุ่มแบบสัดส่วน (Stratified Random Sampling) ดังสมการที่ (1)

$$n = \frac{Z^2(p)(q)}{e^2} \quad (1)$$

โดยที่ n คือจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำ, $p = 0.80$, $q = 1 - p$, $Z = 1.96$ (ระดับความเชื่อมั่น 95%), $e = 0.05$ จำนวนตัวอย่างขั้นต่ำเท่ากับ 256 จุด โดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบ Stratified Random Sampling ความถูกต้องของการจำแนกประเมินโดยใช้ความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปาของโคเฮน (K) (Cohen, 1960; Congalton & Green, 2009) ดังสมการที่ (2)

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^R X_{ii} - \sum_{i=1}^R (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^R (X_{i+} \times X_{+i})} \quad (2)$$

โดย K = ค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (Kappa Coefficient)

N = จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

R = จำนวนประเภทของการใช้ที่ดิน

X_{ii} = ค่าความถี่ของจุดที่จำแนกถูกต้อง (ค่าบนแนวทแยงมุมในตารางสับสน)

$X_{(i+)}$ = ผลรวมความถี่ในแถวที่ i

$X_{(+i)}$ = ผลรวมความถี่ในสดมภ์ที่ i

3. การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วย CA-Markov

ในการคาดการณ์การใช้ที่ดินเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอาศัยแบบจำลอง CA-Markov บูรณาการสถิติการเปลี่ยนผ่านเชิงเวลาของใช้มาร์คอฟเข้ากับความสามารถในการจำลองเชิงพื้นที่ของเซลลูลาร์อโตมาตา (Eastman, 2016) องค์ประกอบ CA ใช้ตัวกรองความต่อเนื่อง 5x5 โดยขนาดของแต่ละเซลล์ได้รับอิทธิพลจากสถานะของ 24 เซลล์ข้างเคียงตัวกรอง 5x5 เพราะสามารถจับพลวัตการแพร่กระจายของการขยายตัวของเมืองที่ความละเอียด 30 เมตรได้ดีกว่า (Eastman, 2016; Singh *et al.*, 2015) การศึกษานี้เปรียบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้แผนที่ LULC ปี พ.ศ. 2550 และ 2557 เพื่อจำลองแผนที่การใช้ที่ดินของปี พ.ศ. 2564 (Simulated map) จากนั้นนำแผนที่จำลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินปี พ.ศ. 2564 เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตรวจสอบความถูกต้อง (reference data) ของผลการจำแนกภาพดาวเทียมปี พ.ศ. 2564 ร่วมกับจุดตรวจสอบภาคสนามและการแปลภาพจาก Google Earth และใช้เป็นแผนที่อ้างอิงคำนวณค่าความสอดคล้องเชิงพื้นที่ (Spatial agreement) หากแบบจำลองมีความแม่นยำผ่านเกณฑ์จึงจะดำเนินการคาดการณ์ในอนาคตต่อไป ในปี พ.ศ. 2571 โดยใช้เมทริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนผ่านปี พ.ศ. 2557-2564 ที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว

4. การประเมินคุณภาพและการเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัย

เมื่อมีข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้งในอดีตและที่คาดการณ์ไว้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการประเมินคุณภาพที่อยู่อาศัย สมการที่ (3) และการเสื่อมโทรม สมการที่ (4) ด้วยแบบจำลอง InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) Habitat Quality เพื่อประเมินคุณภาพและความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัย โดยอาศัยปัจจัยคุกคามทางกายภาพที่นำมาวิเคราะห์ในการศึกษานี้ (Table 1 และ Figure 2) ซึ่งประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง โครงข่ายถนนสายหลัก พื้นที่เกษตรกรรม และทางรถไฟ การเข้าถึงถนนสายหลักและการขนส่งทางรถไฟช่วยเพิ่มศักยภาพในการเชื่อมต่อและลดต้นทุนการเดินทาง ซึ่งเป็นการกระตุ้นการเติบโตของพื้นที่เมืองและกิจกรรมทางเศรษฐกิจอย่างมาก เมื่อพื้นที่ต่างๆ สามารถเข้าถึงได้ง่ายขึ้น ย่อมนำไปสู่การขยายตัวของชุมชน ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนหลักที่ทำให้เกิดความขัดแย้งในการใช้ที่ดินและเสื่อมโทรมของระบบนิเวศในพื้นที่ศึกษา การกำหนดน้ำหนัก (0 ถึง 1) ตามระดับผลกระทบ และมีการกำหนดระยะทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อระบุขอบเขตเชิงพื้นที่ของภัยคุกคามแต่ละประเภท (Tang *et al.*, 2024) โดยยิ่งค่าน้ำหนักมีคะแนนสูงเท่าไร ผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัยก็ยิ่งมีความรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น ในการกำหนดพารามิเตอร์ด้านระยะส่งผลกระทบสูงสุด (Maximum Distance) น้ำหนักความรุนแรง (Weight) และรูปแบบการลดหลั่นของผลกระทบ (Decay Function) ผู้วิจัยดำเนินการตามแนวทางมาตรฐานสากลด้วยวิธีการทบทวนวรรณกรรม (Literature-based Approach) อ้างอิงโครงสร้างพารามิเตอร์หลักจากคู่มือแบบจำลอง InVEST (Sharp *et al.*, 2020) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเขตร้อน (Manna *et al.*, 2025) ร่วมกับการปรับเทียบพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับบริบทเชิงพื้นที่และเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย โดยเทียบเคียงรัศมีผลกระทบของโครงข่ายคมนาคมกับระยะแนวกันชนในคู่มือการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA) ของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ONEP)

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (3)$$

โดยที่ Q_{xj} คือดัชนีคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยของพิกเซล H_j คือค่าความเหมาะสมเป็นถิ่นที่อยู่อาศัย (habitat suitability) D_{xj}^z คือระดับความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัย k^z คือค่าคงที่ (half-saturation) และ z คือค่าคงที่ที่กำหนดโดย InVEST ($z = 2.5$) ค่า HQ มีช่วงตั้งแต่ 0 (เสื่อมโทรมที่สุด) ถึง 1 (ดีที่สุด) ตามสมมติฐานที่ว่าพื้นที่ที่มีค่า HQ สูงสนับสนุนความหลากหลายทางชีวภาพที่สูงกว่า (Sharp *et al.*, 2020) ระดับความเสื่อมโทรม D_{xj} คำนวณจากปัจจัยคุกคามแต่ละชนิด

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^Y \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{ir} \quad (4)$$

โดยที่ w_r คือน้ำหนักสัมพัทธ์ของปัจจัยคุกคาม r (threat weight) r_y คือค่า raster ของปัจจัยคุกคาม y i_{rxy} คือฟังก์ชันการสลาย (decay function) ตามระยะห่างจากแหล่งคุกคาม β_x คือระดับการคุ้มครองทางกฎหมาย (accessibility) และ S_{ir} คือค่าความไว (sensitivity)

Table 1 The threat variables and associated coefficients

Threat Factors	Data Source (Year)	MAX_DIST (m)	Weight	Distance decay function	Reference Source
Urban	LDD land use map (2021)	4,000	1.0	exponential	Arunyawat & Shrestha (2016)
Agriculture	LDD land use map (2021)	1,500	0.7	exponential	Arunyawat & Shrestha (2016)
Major road	OpenStreetMap (2021)	2,000	0.6	linear	Li <i>et al.</i> (2022)
Railroad	OpenStreetMap (2021)	1,000	0.4	linear	Li <i>et al.</i> (2022)

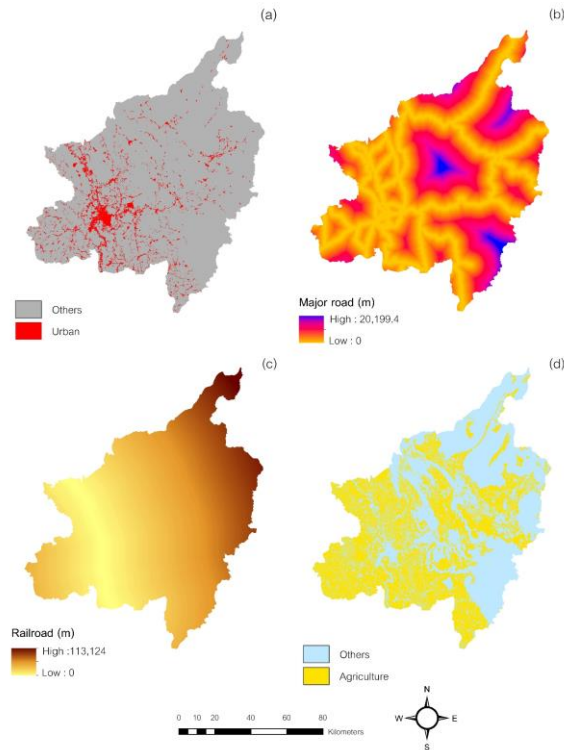


Figure 2 Threats factors for habitat quality assessment (a) Urban, (b) Major road ,
(c) Railroad and (d) Agriculture

สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability) และค่าความไวต่อปัจจัยคุกคาม (Sensitivity to Threat Factors) ที่แสดงใน Table 2 นั้น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอ้างอิงร่วมกับการปรับเทียบเชิงพื้นที่ให้เหมาะสมกับบริบทเฉพาะ (Context-specific calibration) โดยจึงเป็นการผานสามระดับ ได้แก่ (1) ค่าตั้งต้นเชิงทฤษฎีจากคู่มือ InVEST (Sharp *et al.*, 2020) (2) ค่าที่ผ่านการทดสอบเชิงประจักษ์ในบริบทร้อนของไทยและภูมิภาคใกล้เคียง (Arunyawat & Shrestha, 2016; Manna *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2022) และ (3) การปรับสอบเทียบระยะผลกระทบสูงสุด (Maximum Distance) ของโครงข่ายคมนาคมให้สอดคล้องกับระยะแนวกันชนที่กำหนดในคู่มือ EIA ของ ONEP เพื่อให้ผลการประเมินมีความสอดคล้องกับบริบทเชิงนโยบายของประเทศไทย

Table 2 Types of habitats' susceptibility to each threat element

LULC	Habitat suitability	Urban	Agriculture	Major road	Railroad	Reference Source
Forest land	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	Manna <i>et al.</i> (2025)
Water body	0.6	0.7	0.5	0.4	0.3	Sharp <i>et al.</i> (2020)
Miscellaneous land	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	Sharp <i>et al.</i> (2020)
Agricultural land	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	Arunyawat & Shrestha (2016)
Urban and build-up area	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Sharp <i>et al.</i> (2020) (non-habitat)

Table 3 LULC class area for 2007, 2014 and 2021

LULC	In 2007		In 2014		In 2021	
	Sq.km	%	Sq.km	%	Sq.km	%
Agricultural land	4,666.52	45.19	4,754.36	46.04	4,487.97	43.46
Forest land	4,255.08	41.20	4,214.26	40.81	4,278.78	41.43
Miscellaneous land	869.55	8.42	755.70	7.32	851.33	8.24
Urban and build-up area	512.91	4.97	516.09	5	627.92	6.08
Water body	22.55	0.22	85.9	0.83	80.31	0.78
Overall Accuracy	0.84		0.85		0.88	
Kappa Coefficient	0.74		0.75		0.80	

Table 4 Confusion Matrix for LULC 2007

LULC	Agricultural land	Forest land	Miscellaneous land	Urban and build-up area	Water body	UA (%)
Agricultural land	102	3	11	0	1	87.18
Forest land	2	101	0	0	1	97.12
Miscellaneous land	17	2	6	0	3	21.43
Urban and build-up area	1	0	0	13	0	92.86
Water body	0	0	0	0	2	100.00
PA (%)	83.61	95.28	35.29	100.00	28.57	

Table 5 Confusion Matrix for LULC 2014

LULC	Agricultural land	Forest land	Miscellaneous land	Urban and build-up area	Water body	UA (%)
Agricultural land	103	1	11	0	3	87.29
Forest land	1	98	0	0	0	98.99
Miscellaneous land	15	5	7	0	0	25.93
Urban and build-up area	1	0	0	12	0	92.31
Water body	3	1	0	0	4	50.00
PA (%)	83.74	93.33	38.89	100.00	57.14	

Table 6 Confusion Matrix for LULC 2021

LULC	Agricultural land	Forest land	Miscellaneous land	Urban and build-up area	Water body	UA (%)
Agricultural land	116	6	4	5	2	87.22
Forest land	3	93	0	1	1	94.90
Miscellaneous land	5	2	3	0	0	30.00
Urban and build-up area	0	0	0	14	0	100.00
Water body	2	0	0	1	7	70.00
PA (%)	92.06	92.08	42.86	66.67	70.00	

5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CA-Markov

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CA-Markov ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูล LULC ปี พ.ศ. 2550 และ 2557 เป็นข้อมูลตั้งต้นเพื่อจำลองแผนที่การใช้ที่ดินสำหรับปี พ.ศ. 2564 จากนั้นเปรียบเทียบผลการจำลองกับแผนที่การใช้ที่ดินอ้างอิงจริงปี พ.ศ. 2564 ของกรมพัฒนาที่ดิน ผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองมีค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) เท่ากับ 0.87 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.79 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความสอดคล้องระดับมากตามเกณฑ์ของ Fleiss *et al.* (2013) และสอดคล้องกับมาตรฐานที่ยอมรับในการศึกษา CA-Markov ในบริบทที่คล้ายคลึงกัน (Fitawok *et al.*, 2020; Koko *et al.*, 2020) ซึ่งเปรียบเทียบแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินอ้างอิงจากกรมพัฒนาที่ดิน และแผนที่ที่จำลองจาก CA-Markov ปี พ.ศ. 2564 (Figure 4 และ Table 7)

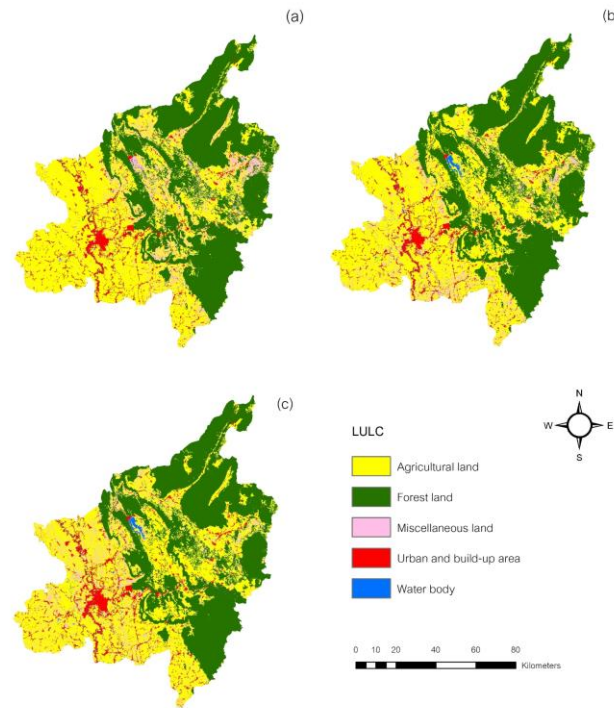


Figure 3 LULC classification of different time periods (a) 2007, (b) 2014 and (c) 2021

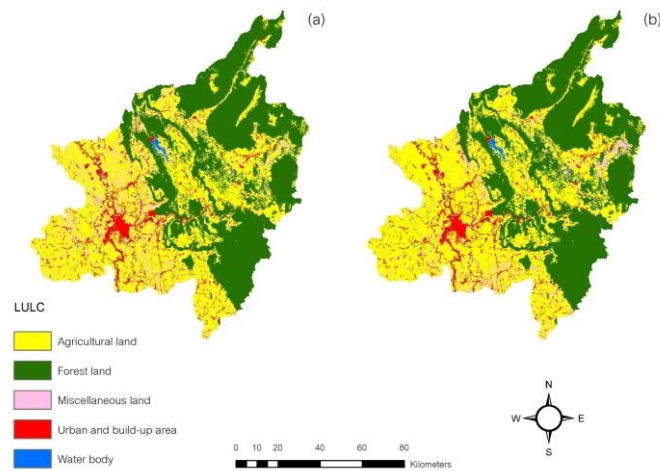


Figure 4 illustration of (a) LDD 2021 reference LULC map and (b) CA-Markov simulated 2021

Table 7 LULC class area of actual and simulated LULC maps in 2021

LULC	Actual data LDD 2021		Simulation 2021	
	Sq.km	%	Sq.km	%
Agricultural land	5,391.82	52.21	4,778.06	46.27
Forest land	3,930.00	38.06	4,302.02	41.66
Miscellaneous land	204.35	1.98	524.61	5.08
Urban and build-up area	585.67	5.67	627.94	6.08
Water body	214.78	2.08	93.99	0.91
Overall Accuracy		0.87		
Kappa Coefficient		0.79		

Table 8 Confusion Matrix for simulated LULC maps in 2021

LULC	Agricultural land	Forest land	Miscellaneous land	Urban and build-up area	Water body	UA (%)
Agricultural land	112	6	10	3	0	85.50
Forest land	0	96	0	0	0	100.00
Miscellaneous land	6	5	5	0	0	31.25
Urban and build-up area	0	0	0	14	0	100.00
Water body	4	0	1	0	3	37.50
PA (%)	91.80	89.72	31.25	82.35	100.00	

ผลการตรวจสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง CA-Markov พื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ป่าไม้ซึ่งเป็นสองประเภทหลักของจังหวัดมีความสอดคล้องกันระหว่างแผนที่จำลองและแผนที่อ้างอิง Overall Accuracy 0.87 และ Kappa Coefficient 0.79 ผู้วิจัยจึงทำการคาดการณ์การใช้ที่ดินปี พ.ศ. 2571 และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังผลลัพธ์ในหัวข้อถัดไป

6. การคาดการณ์ใช้ประโยชน์ที่ดินและการเปลี่ยนแปลง

ผลลัพธ์การคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินใน Table 9 พบว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้น 35.53 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 5.66 ซึ่งมักกระจายตัวสู่ชานเมืองและตามแนวโครงข่ายคมนาคม ส่วนพื้นที่เกษตรกรรมมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น 287.86 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 6.41 ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติเพียงประเภทเดียวที่ยังคงความมั่นคงและมีแนวโน้มพื้นที่ตัวเพิ่มขึ้น ร้อยละ 0.5 ในทางตรงกันข้าม พื้นที่เบ็ดเตล็ดมีแนวโน้มลดลงอย่างรุนแรงถึง 344.85 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 40.51 และแหล่งน้ำมีพื้นที่ลดลงเพียงเล็กน้อย 2.63 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 3.28 สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่เบ็ดเตล็ดเป็นแหล่งรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่แปรสภาพไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรมเชิงพาณิชย์และ

พื้นที่ชุมชนเพื่อรองรับการขยายตัวทางกายภาพและระบบคมนาคมขนส่ง ซึ่งการลดลงอย่างรวดเร็วของพื้นที่เบ็ดเตล็ดที่เป็นพื้นที่กันชนตามธรรมชาติ เสี่ยงต่อความเสื่อมโทรมความหลากหลายทางชีวภาพรอบแนวขอบป่าในระยะยาว

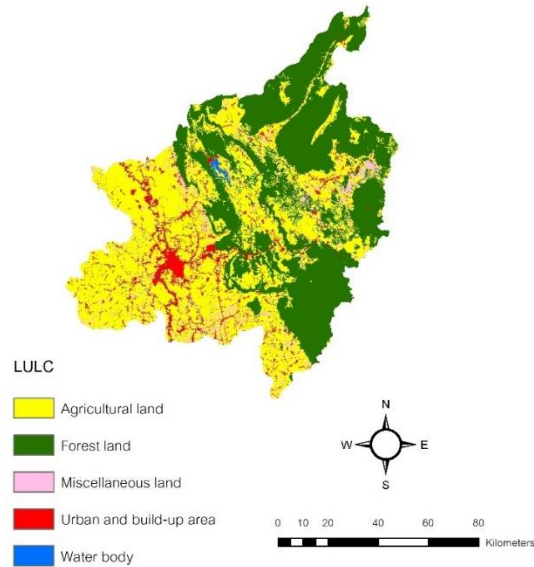


Figure 5 Predicted LULC classification 2028

Table 9 Predicted LULC distribution for the year 2028

LULC	In 2021		In 2028		Change	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Agricultural land	4,487.97	43.46	4,775.83	46.25	+287.86	+ 6.41
Forest land	4,278.78	41.43	4,303.18	41.67	+24.4	+0.57
Miscellaneous land	851.33	8.24	506.48	4.90	-344.85	- 40.51
Urban and build-up area	627.92	6.08	663.45	6.42	+35.53	+5.66
Water body	80.31	0.78	77.69	0.75	-2.63	- 3.28

7. การประเมินคุณภาพและความเสื่อมโทรมของดินที่อยู่อาศัย

เนื่องจากพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างขยายตัวอย่างรวดเร็ว และแบบจำลองการคาดการณ์ก็แสดงแนวโน้มเดียวกัน การประเมินคุณภาพของดินที่อยู่อาศัยจึงกลายเป็นสิ่งสำคัญลำดับต้นๆ ในเรื่องนี้ ได้มีการระบุและวิเคราะห์ปัจจัยคุกคามที่

ประชากรที่รับผิดชอบต่อการเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยและความสมบูรณ์ของถิ่นที่อยู่อาศัย ปัจจัยคุกคาม ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ทางรถไฟ พื้นที่เกษตรกรรม และโครงข่ายถนนสายหลัก

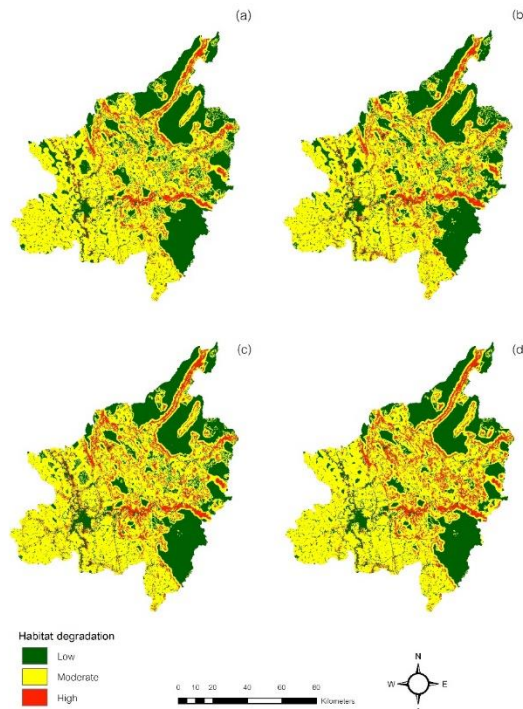


Figure 6 Changes of habitat degradation in Phitsanulok in different time (a) 2007, (b) 2014, (c) 2021 and (d) 2028

ผลการประเมินความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยพื้นที่เมืองถูกแบ่งออกเป็นสามระดับ ได้แก่ การเสื่อมโทรมน้อยปานกลาง และสูง สำหรับปี 2550 2557 และ 2564 และปีที่คาดการณ์ 2571 เพื่อทำความเข้าใจสถานการณ์การเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยในอนาคต การวิเคราะห์นี้ยังมุ่งเน้นการดำเนินการมาตรการป้องกันเพื่อลดการเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยและเพิ่มคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัย แสดงไว้ใน Figure 6

จากการวิเคราะห์พบว่าในปี 2550 ถึง 2557 พื้นที่ที่มีความเสื่อมโทรมระดับปานกลางและสูงเริ่มปรากฏการขยายตัวออกไปยังพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบมากขึ้น และในปี พ.ศ. 2564 แนวโน้มดังกล่าวยิ่งชัดเจนขึ้นโดยพื้นที่ขอบป่า บริเวณรอยต่อกับพื้นที่เกษตรกรรมและชุมชนได้รับผลกระทบสะสมเพิ่มขึ้นอย่างมาก อันเป็นผลโดยตรงจากการขยายตัวของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างอย่างต่อเนื่อง ทำให้รัศมีอิทธิพลของความเสื่อมโทรมระดับสูงขยายออกไปครอบคลุมพื้นที่ธรรมชาติโดยรอบมากขึ้นตามลำดับ สำหรับปี พ.ศ. 2571 ที่คาดการณ์ไว้ แบบจำลองชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีความเสื่อมโทรมระดับสูงจะขยายตัวต่อเนื่องตามแนวการขยายตัวของเมือง โดยเฉพาะบริเวณฝั่งตะวันออกของเมืองที่มีการเปลี่ยนผ่านจากพื้นที่เพาะปลูกไปสู่พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง

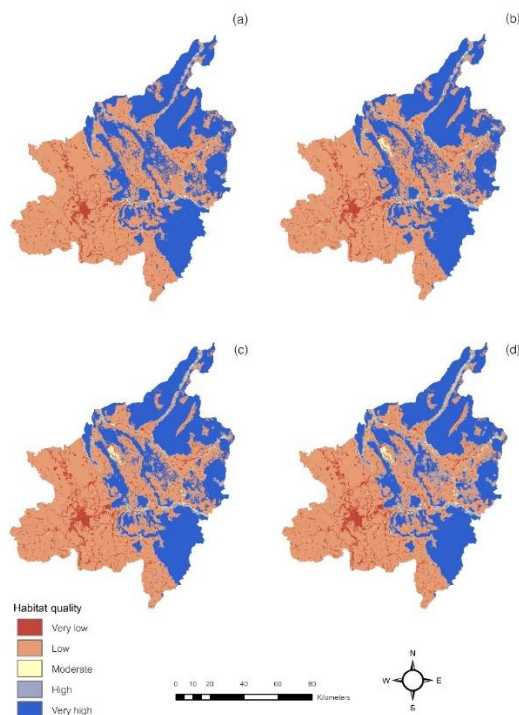


Figure 7 Changes of habitat quality in Phitsanulok in different time (a) 2007, (b) 2014, (c) 2021 and (d) 2028

Table 10 Habitat quality level at different periods in Phitsanulok

Habitat condition	2007	2014	2021	2028
Habitat Quality	0.544	0.539	0.537	0.528
Habitat Degradation	0.137	0.141	0.146	0.154

Area of Habitat Quality	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Levels								
Very Low	512.89	4.97	512.9	4.97	627.91	6.08	663.45	6.43
Low	5,547.26	53.72	5,539.52	53.65	5,367.24	51.98	5,313.69	51.46
Moderate	101.101	0.98	149.194	1.44	158.65	1.54	183.58	1.78
High	416.978	4.04	428.506	4.15	509.35	4.93	675.65	6.54
Very High	3,748.08	36.3	3,696.2	35.79	3,663.15	35.47	3,489.95	33.79
Area of Habitat Degradation	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Levels								
Low	3,379.32	32.61	3,276.71	31.73	3,200.96	31.00	2,949.22	28.56
Moderate	6,062.11	58.50	6,020.11	58.30	5,989.70	58.00	6,171.03	59.76
High	920.88	8.89	1,029.49	9.97	1,135.65	11.00	1,206.06	11.68

การประเมินคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Quality) ใน (Figure 7) และ ค่าเฉลี่ยระดับจังหวัดใน Table 10 พบอัตราการเปลี่ยนแปลงสะสมตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา พ.ศ. 2550-2571 คิดเป็นการลดลงร้อยละ 2.94 จาก 0.544 เป็น 0.528 เมื่อพิจารณาข้อมูลเชิงพื้นที่แยกตามระดับคุณภาพทั้ง 5 ระดับ พบว่าการขยายตัวเชิงปริมาณของพื้นที่คุณภาพต่ำมาก (Very Low) ซึ่งกระจุกตัวตามแนวเมืองและโครงข่ายคมนาคม ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 512.89 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 4.97 ของพื้นที่จังหวัดเป็น 663.45 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 6.43 จากการเติบโตของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างที่ขยายตัวออกไปยังพื้นที่ขอบเมือง ส่วนพื้นที่คุณภาพต่ำ (Low) ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ราบลุ่มส่วนใหญ่ของจังหวัด กลับลดลงจาก 5,547.26 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 53.72 เหลือ 5,313.69 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 51.46 แล้วได้เลื่อนลงมาสู่ระดับพื้นที่คุณภาพต่ำมาก (Very Low) จากอิทธิพลของภัยคุกคามที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของพื้นที่คุณภาพสูงมาก (Very High) ซึ่งสอดคล้องโดยตรงกับพื้นที่ป่าไม้ในเขตสูงยังคงมีสัดส่วนที่มีเด่นชัด และทำหน้าที่ถ่วงดุลไม่ให้ค่าเฉลี่ยรวมลดลงอย่างรวดเร็วจาก 3,748.08 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 36.30 เหลือ 3,489.95 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 33.79 ขณะที่พื้นที่คุณภาพสูง (High) กลับเพิ่มขึ้น ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนที่ลดลงของระดับพื้นที่คุณภาพสูงมาก (Very High) สะท้อนว่าพื้นที่ป่าไม้บริเวณแนวขอบเริ่มได้รับผลกระทบจากภัยคุกคาม ส่วนพื้นที่คุณภาพปานกลาง (Moderate) แม้จะมีสัดส่วนน้อยที่สุด แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงจาก 101.10 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 0.98 เป็น 183.58 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 1.78 ของพื้นที่ ซึ่งเป็นเขตเปลี่ยนผ่านระหว่างพื้นที่คุณภาพดีและคุณภาพต่ำที่ขยายตัวตามแนวรอยต่อป่า เกษตร และเมือง

ในขณะเดียวกัน การประเมินความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Degradation) ใน (Figure 6) ค่าเฉลี่ยสูงขึ้นร้อยละ 12.4 จาก 0.137 เป็น 0.154 เมื่อพิจารณาข้อมูลเชิงพื้นที่ของระดับความเสื่อมโทรมทั้ง 3 ระดับใน Table 10 พบว่า พื้นที่ระดับความเสื่อมโทรมน้อย (Low) ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ป่าไม้ผืนใหญ่ ลดลงจาก 3,379.33 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 32.61 เป็น 2,949.52 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 28.56 ส่วนพื้นที่ระดับปานกลาง (Moderate) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดในทุกช่วงเวลา มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพิ่มขึ้นเพียง 108.92 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 1.8 ขณะที่พื้นที่ระดับความเสื่อมโทรมสูง (High) ซึ่งกระจุกตัวตามแนวเมืองและโครงข่ายคมนาคมในบริเวณเดียวกับพื้นที่คุณภาพต่ำมาก (Very Low) ของคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัยมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 920.88 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 8.89 เป็น 1,206.06 ตารางกิโลเมตร ร้อยละ 11.68 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 31 ของพื้นที่ ซึ่งเป็นอัตราการเติบโตที่สูงที่สุดในบรรดาทั้ง 3 ระดับความเสื่อมโทรม ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นข้อจำกัดของการใช้ค่าเฉลี่ยระดับจังหวัดเพียงอย่างเดียวในการประเมินผลกระทบ และสนับสนุนความจำเป็นในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ควบคู่กับค่าสถิติภาพรวม โดยเฉพาะในพื้นที่รอยต่อระหว่างเขตเมืองกับพื้นที่ป่าอนุรักษ์ซึ่งมีความเสี่ยงสูงสุดต่อการสูญเสียความเชื่อมต่อทางนิเวศ (Ecological Connectivity) ในระยะยาว เนื่องจากพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในระดับสูง มักส่งผลให้คุณภาพของระบบนิเวศลดลงอย่างต่อเนื่อง (Wu *et al.*, 2021; Xie & Zhang, 2023)

Discussion

ผลการศึกษาด้วยแบบจำลอง CA-Markov แสดงให้เห็นว่าคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินของจังหวัดพิษณุโลก โดยให้ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) เท่ากับ 0.87 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa

coefficient) เท่ากับ 0.79 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ในระดับที่ยอมรับสำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-Markov ในพื้นที่เกษตรกรรมยังคงเป็นประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินหลักของจังหวัด อย่างไรก็ตาม พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากร้อยละ 4.97 ในปี พ.ศ. 2550 เป็นร้อยละ 6.08 ในปี พ.ศ. 2564 และคาดว่าจะเพิ่มเป็นร้อยละ 6.42 ในปี พ.ศ. 2571 ส่วนพื้นที่เกษตรกรรมกลับมีทิศทางขยายตัวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 6.41 ในขณะที่พื้นที่เบ็ดเตล็ดลดลงอย่างมากถึงร้อยละ 40.51 สถานะการแปรสภาพทางกายภาพนี้สอดคล้องกับแนวคิดเชิงทฤษฎีของ Zhang *et al.* (2021) ซึ่งชี้ว่า พลวัตของเมืองและพื้นที่รอบนอกที่ขับเคลื่อนด้วยแผนการพัฒนาเศรษฐกิจของภาครัฐและโครงข่ายคมนาคมขนส่ง มักจะเร่งกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นที่ลุ่มต่ำกว้างขวางเปล่า ไปเป็นพื้นที่การเกษตรเชิงพาณิชย์และเขตสิ่งปลูกสร้างชานเมืองเพื่อตอบสนองต่ออุปสงค์ทางเศรษฐกิจ ซึ่งสะท้อนอิทธิพลของโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยจังหวัดพิษณุโลกเป็นจุดตัดของระเบียงเศรษฐกิจแนวเหนือ-ใต้ (North-South Economic Corridor: NSEC) และแนวตะวันออก-ตะวันตก (East-West Economic Corridor: EWEC) ทำให้การลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานและระบบโลจิสติกส์เป็นแรงขับเคลื่อนสำคัญของการขยายตัวของเมือง การพัฒนาดังกล่าวไม่เพียงเพิ่มประสิทธิภาพการคมนาคมและการขนส่ง แต่ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณชานเมืองผ่านการเพิ่มมูลค่าที่ดินและการดึงดูดกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Li *et al.* (2022), Zheng & Li (2022) และ Wang *et al.* (2025) ที่พบว่าโครงข่ายคมนาคมเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดทิศทางการขยายตัวของเมืองและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เมื่อใช้ผลการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินจากแบบจำลอง CA-Markov เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง InVEST Habitat Quality พบว่า คุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Quality) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าเฉลี่ย 0.544 ในปี พ.ศ. 2550 เหลือ 0.528 ในปี พ.ศ. 2571 ขณะที่ค่าความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Degradation) เพิ่มขึ้นจาก 0.137 เป็น 0.154 ในระยะยาวค่าความเสื่อมโทรมของแหล่งที่อยู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าคุณภาพของถิ่นที่อยู่อาศัยลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์แบบผกผัน ในเวลาเดียวกัน แม้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยระดับจังหวัดจะดูไม่สูงมาก แต่สะท้อนถึงแนวโน้มการเสื่อมโทรมของระบบนิเวศที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความสำคัญต่อความเชื่อมโยงของระบบนิเวศ ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า พื้นที่ที่มีความเสื่อมโทรมระดับปานกลางและระดับสูงไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะบริเวณศูนย์กลางเมือง แต่ได้ขยายตัวออกไปยังพื้นที่ชานเมืองและพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบ ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างร่วมกับการพัฒนาโครงข่ายถนนและทางรถไฟ ส่งผลให้เกิดการแตกแยกของถิ่นที่อยู่อาศัย (Habitat Fragmentation) และเพิ่มผลกระทบขอบป่า (Edge Effect) ทำให้พื้นที่ธรรมชาติโดยรอบได้รับอิทธิพลจากปัจจัยคุกคามมากขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยในไทยของ Arunyawat & Shrestha (2016) ซึ่งศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือของประเทศไทย พบว่าดัชนี HQ ในพื้นที่เกษตรกรรมและที่ราบลุ่มมีแนวโน้มลดลงในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป อันเนื่องมาจากการขยายตัวของพื้นที่เกษตรกรรมเชิงพาณิชย์และการเปลี่ยนผ่านการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงเดี่ยว ซึ่งใกล้เคียงกับพลวัตในพื้นที่ราบตอนล่างของจังหวัดพิษณุโลกที่มีดัชนี HQ ลดลงจากการเปลี่ยนสภาพพื้นที่เบ็ดเตล็ดและพื้นที่กันชนเกษตรกรรมไปสู่พื้นที่เมืองและโครงสร้างพื้นฐานคมนาคมขนส่ง ขณะเดียวกัน แนวโน้มการกระจายตัวเชิงพื้นที่ที่มีความสอดคล้องกับข้อค้นพบของ Trisurat *et al.* (2010) ที่ชี้ให้เห็นว่า แม้พื้นที่อนุรักษ์ส่วนใหญ่ทางตอนบนจะยังคงมีดัชนี HQ ในระดับสูงมาก (Very High) เนื่องจากสอดคล้องกับพื้นที่ป่าไม้ที่มีความอุดมสมบูรณ์และได้รับการปกป้องตามกฎหมาย แต่

แนวขอบป่า (Edge zones) และพื้นที่เชื่อมต่อรอบพื้นที่คุ้มครองกลับเผชิญกับระดับความเสื่อมโทรมที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนจากการรบกวนของกิจกรรมมนุษย์และการแผ่ขยายของโครงข่ายถนน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในเขตเมืองหลวงและปริมณฑลที่มีความหนาแน่นสูงอย่างงานของ Manna *et al.* (2025) พบข้อแตกต่างเชิงปริมาณที่ชัดเจน โดยในพื้นที่เมืองขนาดใหญ่ นั้น ดัชนี HQ เฉลี่ยมีค่าต่ำกว่ามาก และมีอัตราการลดลงที่รวดเร็วและรุนแรงกว่า เนื่องจากขาดพื้นที่ป่าไม้ขนาดใหญ่คอยช่วยถ่วงดุลดัชนีเฉลี่ย ต่างจากกรณีของจังหวัดพิษณุโลกที่มีพื้นที่ป่าไม้เป็นฐานหลักเกือบร้อยละ 41 ของพื้นที่ศึกษา ส่งผลให้อัตราการลดลงของ HQ ในระดับภาพรวมของจังหวัดพิษณุโลกเป็นไปในลักษณะค่อยเป็นค่อยไปมากกว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยในระดับพื้นที่ได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งของการศึกษารั้งนี้คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ค่าน้ำหนัก (Weights) ระยะศูนย์กลางสูงสุด (Max distance) และค่าความไวต่อภัยคุกคาม (Sensitivity) ของประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งเป็นการอ้างอิงและปรับปรุงจากวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก แม้จะมีการปรับเทียบเชิงพื้นที่ให้เข้ากับบริบทท้องถิ่นแล้ว แต่ผลลัพธ์ของแบบจำลอง InVEST ในมิติคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยย่อมมีความอ่อนไหวต่อค่าเริ่มต้นเหล่านี้ ดังนั้น การทดสอบและวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ (Sensitivity Analysis) จึงเป็นทิศทางที่จำเป็นสำหรับการศึกษาและต่อยอดการวิจัยเชิงลึกในอนาคต เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการคาดการณ์เชิงพื้นที่และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายสิ่งแวดล้อมได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

Conclusions

การศึกษานี้ได้บูรณาการแบบจำลอง CA-Markov และ InVEST Habitat Quality เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินกับคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยในจังหวัดพิษณุโลก ผลการตรวจสอบพบว่าแบบจำลอง CA-Markov มีความถูกต้องโดยรวม 0.87 และค่า Kappa 0.79 ผลการคาดการณ์ชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างจะยังคงขยายตัวต่อเนื่อง โดยเฉพาะตามแนวโครงข่ายถนนสายหลัก ส่งผลให้พื้นที่เบ็ดเตล็ดลดลง ขณะที่พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อประเมินด้วยแบบจำลอง InVEST Habitat Quality พบว่าคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าความเสื่อมโทรมเพิ่มสูงขึ้น โดยพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือบริเวณขอบเมือง แนวโครงข่ายถนนสายหลัก ทางรถไฟ และพื้นที่พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานใหม่ ซึ่งสะท้อนผลกระทบของการขยายตัวของเมืองต่อความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโยงแบบจำลองการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินกับแบบจำลองประเมินคุณภาพถิ่นที่อยู่อาศัยสามารถสนับสนุนการวางแผนการใช้ที่ดินและการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติในระดับจังหวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดนโยบายด้านผังเมือง การกำหนดแนวกันชนทางนิเวศ และการควบคุมการขยายตัวของเมือง เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาเศรษฐกิจ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน และการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพ อันจะนำไปสู่การพัฒนาพื้นที่อย่างยั่งยืนในอนาคต

References

- Arsanjani, J. J., Helbich, M., Kainz, W., & Boloorani, A. D. (2013). Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014>
- Arunyawat, S., & Shrestha, R. P. (2016). Assessing land use change and its impact on ecosystem services in northern Thailand. *Sustainability*, 8(8), 768. <https://doi.org/10.3390/su8080768>
- Caro, T., Rowe, Z., Berger, J., Wholey, P., & Dobson, A. (2020). An inconvenient misconception: Climate change is not the principal driver of biodiversity loss. *Conservation Letters*, 15(3), e12868. <https://doi.org/10.1111/conl.12868>
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420055139>
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet: Geospatial monitoring and modeling system*. Clark Labs, Clark University.
- Fitawok, M., Derudder, B., Minale, A., Passel, S., Adgo, E., & Nyssen, J. (2020). Modeling the impact of urbanization on land-use change in Bahir Dar City, Ethiopia: An integrated cellular automata–Markov chain approach. *Land*, 9(4), 115. <https://doi.org/10.3390/land9040115>
- Fitzpatrick-Lins, K. (1981). Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(3), 343–351.
- Fleiss, J. L., Levin, B., & Paik, M. C. (2013). *Statistical methods for rates and proportions* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Halmy, M. W. A., Gessler, P. E., Hicke, J. A., & Salem, B. B. (2015). Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov–CA. *Applied Geography*, 63, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.015>

- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. (2020). Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and Markov chain model (CA-Markov). *Sustainability*, 12(24), 10452. <https://doi.org/10.3390/su122410452>
- Li, Z., Ma, Z., & Zhou, G. (2022). Impact of land use change on habitat quality and regional biodiversity capacity: Temporal and spatial evolution and prediction analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1041573. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1041573>
- Manna, H., Pramanik, M., Pal, R., Sarkar, S., Zhran, M., & Halder, B. (2025). Land use land cover change and habitat quality degradation in the tropical megacity of Bangkok: An integrated CA-Markov and InVEST modeling approach (1995–2045). *Environmental and Sustainability Indicators*, 28, 101036. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.101036>
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2023). Guidelines for the preparation of environmental impact assessment reports for transportation projects. Ministry of Natural Resources and Environment. <https://eia.onep.go.th> (in Thai)
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019>
- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S., Chaplin-Kramer, R. & Wolny, S. (2020). *InVEST user's guide: Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs*. The Natural Capital Project, Stanford University. https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/habitat_quality.html
- Singh, S. K., Mustak, S., Srivastava, P. K., Szabó, S., & Islam, T. (2015). Predicting spatial and decadal LULC changes through cellular automata Markov chain models using earth observation datasets and geo - information. *Environmental Processes*, 2, 61-78. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0062-x>
- Tang, Z., Ning, R., Wang, D., Tian, X., Bi, X., Ning, J., Zhou, Z., & Luo, F. (2024). Projections of land use/cover change and habitat quality in the model area of Yellow River delta by coupling land subsidence and sea level rise. *Ecological Indicators*, 158, 111394. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111394>

- Trisurat, Y., Alkemade, R., & Verburg, P. H. (2010). Projecting land-use change and its consequences for biodiversity in Northern Thailand. *Environmental Management*, 45, 626-639.
<https://doi.org/10.1007/s00267-010-9438-x>
- Wang, G., Zhao, Q., & Jia, W. (2024). Spatio-temporal differentiation and driving factors of land use and habitat quality in Lu'an City, China. *Land*, 13(6), 789. <https://doi.org/10.3390/land13060789>
- Wang, P., Li, X., Zhao, Y., & Zhang, K. (2025). InVEST model and landscape indices reveal habitat quality degradation from land use changes in South China. *Ecology and Evolution*, 15(2), e72719.
<https://doi.org/10.1002/ece3.72719>
- Wu, J., Li, X., Luo, Y., & Zhang, D. (2021). Spatiotemporal effects of urban sprawl on habitat quality in the Pearl River Delta from 1990 to 2018. *Scientific Reports*, 11, 13981. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92916-3>
- Xie, B., & Zhang, M. (2023). Spatio-temporal evolution and driving forces of habitat quality in Guizhou Province. *Scientific Reports*, 13, 6908. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33903-8>
- Yi, Y., Zhang, C., Zhu, J., Zhang, Y., Sun, H., & Kang, H. (2022). Spatio-temporal evolution, prediction and optimization of LUCC based on CA-Markov and InVEST models: A case study of Mentougou District, Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2432.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19042432>
- Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, X., & Wang, Z. (2021). Impacts of urban expansion on habitat quality in the Huaihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 125, 107496. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107496>
- Zheng, X., & Li, H. (2022). Spatial-temporal evolution characteristics of land use and habitat quality in Shandong Province, China. *Scientific Reports*, 12, 15422. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19493-x>