

阎佳妮, 赵华甫, 张骏达, 吴克宁. 典型农牧交错区土壤农业利用适宜性评价与匹配分析[J]. 土壤学报, 2027,
YAN Jiani, ZHAO Huafu, ZHANG Junda, WU Kening. Suitability Evaluation of Soil for Agricultural Use and Matching Analysis
in a Typical Farming-Pastoral Ecotone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

典型农牧交错区土壤农业利用适宜性评价 与匹配分析*

阎佳妮¹, 赵华甫^{1†}, 张骏达², 吴克宁¹

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 农业农村部耕地质量和农田工程监督保护中心, 北京 100125)

摘要: 研究内蒙古农牧交错区土地资源的适宜性空间分异规律与土地利用匹配特征, 可为内蒙古农牧交错区可持续土地管理提供科学依据与决策支持。本研究遵从最小因子定律, 应用随机森林、支持向量机和冷热点分析方法, 探讨构建“适宜类划分—适宜程度判别—匹配分析”三级土壤农业利用适宜性评价框架, 并以内蒙古农牧交错区 29 个旗县为研究区开展实证。结果发现, (1) 区域土地适宜性呈现“东耕西牧、中间交错、局部宜林”的宏观格局。东南部旗县为宜耕核心区, 中西部旗县草原特征明显, 而局部宜林高值区则与生态修复及社会需求密切相关。(2) 适宜程度空间分异明显, 宜耕以中度和勉强适宜为主, 宜草以高度适宜为主, 聚集于典型草原带, 宜林高度适宜区呈零散分布。(3) 土地利用匹配分析识别出三类不匹配类型, 分别为生态超载型、空间挤占型和功能失衡型, 其空间分异与区域地理格局耦合。上述结果表明, 内蒙古农牧交错区土地利用存在不匹配现象, 土地开发利用需进行存量优化与功能提升, 以实现农业发展与生态保护协同发展。

关键词: 农牧交错区; 随机森林; 支持向量机; 土壤农业利用适宜性评价; 土地利用匹配分析

中图分类号: F323.1 文献标志码: A

Suitability Evaluation of Soil for Agricultural Use and Matching Analysis in a Typical Farming-Pastoral Ecotone

YAN Jiani¹, ZHAO Huafu^{1†}, ZHANG Junda², WU Kening¹

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Cultivated Land Quality & Farmland Engineering Supervision and Protection Center, MARA, Beijing 100125, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the spatial differentiation patterns of land resource suitability and land-use matching characteristics in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, and to provide scientific basis and decision support for sustainable land management in this region. **【Method】** Following the law of the minimum, this study employed random forest, support vector machine, and hot spot and cold spot analysis methods to explore and construct a three-tiered evaluation framework for Suitability Evaluation of Soil for Agricultural Use, consisting of “suitability classification, suitability degree discrimination, and matching analysis”. An empirical study

*国家重点研发计划项目课题(2023YFD1500103)、国家自然科学基金重点项目(42430705)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500103) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 42430705)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaohuafu@cugb.edu.cn

作者简介: 阎佳妮(2002—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要研究方向为土地评价与保护。E-mail: yanjiani32@163.com

收稿日期: 2025-11-05; 收到修改稿日期: 2026-08-21; 网络首发日期(www.cnki.net): 202 - -

was conducted across 29 banners and counties within the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia. 【Results】 The results showed that: (1) The regional land suitability exhibits a macro pattern of “farming in the east, pastoralism in the west, interlacing in the middle, and localized forestry suitability.” The southeastern banners and counties serve as the core areas for farming suitability, the central and western areas have prominent grassland characteristics, while localized high-value areas for forestry suitability are closely related to ecological restoration and social demands. (2) The spatial differentiation of suitability degrees is significant: arable land is predominantly moderately and marginally suitable, grassland is mainly highly suitable and concentrated in the typical steppe zone, whereas highly suitable areas for forestry are sporadically distributed. (3) The land-use matching analysis identifies three types of mismatches, namely ecologically overloaded, spatially squeezed, and functionally imbalanced, whose spatial differentiation is coupled with the regional geographical pattern. 【Conclusion】 This study indicates that land-use mismatches exist in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia. Future land development and utilization should prioritize stock optimization and functional enhancement to achieve the coordinated development of agricultural growth and ecological protection.

Key words: Farming-pastoral ecotone; Random forest; Support vector machine; Suitability evaluation of soil for agricultural use; Land use matching analysis

土壤是人类赖以生存与发展的根本性资源,也是保障国家粮食安全与维护生态安全的物质要素。在全球极端天气频发、粮食安全压力加大的背景下,科学认识土壤的生产潜力与生态约束,成为合理配置农业空间、实现可持续土地管理的前提条件。土地适宜性评价用于确定土地利用的适宜空间布局,是规划决策的基础工作^[1],解决一块土地最适合用来做什么这一核心问题。

国际上,美国农业部(USDA)自20世纪60年代提出土地潜力分级^[2]及后续发展的土地评价与立地评估体系^[3],通过整合土地的自然与社会经济因素,为土地的多目标利用提供系统性框架。联合国粮农组织(FAO)于1976年发布的《土地评价纲要》从土地适宜性角度出发,其分类体系分为纲、级、亚级和单元^[4],规范评价流程,确保评价的科学性。近年来,多准则决策分析^[5]以及模糊逻辑^[6]、随机森林^[7-8]等机器学习方法被引入土地适宜性评价领域,以克服传统方法在主观性、非线性关系处理与高维特征建模等方面的局限。当前国内土地适宜性评价研究主要基于层次分析法、模糊综合评价等方法,对县域^[9-10]、市域^[11-12]等尺度展开评价,研究内容涵盖农业用地适宜性评价^[13]、国土空间开发适宜性评价^[14-15]、耕地后备资源评价^[16]及城市土地开发适宜性评价^[17-18]等多个方面。在此基础上,第三次全国土壤普查工作特别设置土壤农业利用适宜性评价专题,由中国地质大学(北京)吴克宁教授牵头,编写了《第三次全国土壤普查土壤农业利用适宜性评价技术规范》^[19](以下简称《规范》)。该专题在“大食物观”视角下,科学评定土壤对耕地、园地、林地、草地等农业利用方式的适宜性及适宜程度,为耕地、园地、林地、草地等农业用地管理提供科学支撑,促进农业生产空间布局更加符合自然地理格局。土壤农业利用适宜性评价构建了“土壤农业利用适宜分区—土壤农业利用适宜类—土壤农业利用适宜程度”递进框架^[20],提出将评价成果与耕地保护、农业资源区划与国土空间规划治理结合,统筹耕地布局和国土绿化空间,为落实“宜耕则耕、宜园则园、宜林则林、宜牧则牧”原则提供科学依据^[21-22]。国内也有极少数文章,开展辽河平原典型黑土区^[23]及安徽明光市^[24]土壤农业利用适宜性评价,指出其受坡度、土壤质地、土层厚度等因子影响。以上研究从多个维度进行土壤农业利用适宜性评价,为本文提供了有益的参考和借鉴,但依然有拓展空间:其一,不同区域间的评价指标尚未形成统一标准,限制了成果的比较与推广;其二,在生态过渡带中,为平衡农业生产与生态保护目标,需发展更具适应性的土壤农业利用适宜性评价框架。

内蒙古农牧交错区作为我国北方重要的生态安全屏障和农牧产品供应区域,农牧业在空

间上相互交错,生产活动交替进行^[25]。其土地的合理利用关系着国家生态安全与粮食安全战略的协同实现。在此区域,农业生产与牧业用地的冲突现象频繁发生,农业生产目标与生态保护目标缺乏有效的平衡与协调,引发生态退化风险^[26-27],亟待在“大食物观”和“山水林田湖草沙生命共同体”理念的指引下,通过科学的“三个一批”方式,推动农业生产空间布局与自然地理格局的匹配。为积极响应“结合第三次全国土壤普查,开展土壤农业利用适宜性评价”,以统筹耕地、林地和草地保护,促进永久基本农田集中连片的核心要求,以及精准遏制“北粮南运”加剧态势的国家布局,本研究聚焦内蒙古农牧交错区,构建土壤农业利用适宜性评价框架。据此,本研究致力于解决以下两个核心问题:(1)基于土壤农业利用适宜性评价,如何构建评价指标体系,量化区域宜耕、宜草、宜林地的空间分布格局?(2)如何揭示现状土地利用方式与土地理论适宜性之间的空间差异并分析原因?

1 材料与方法

1.1 研究框架

本研究聚焦于土壤农业利用适宜性评价,即评定土壤对耕地、园地、林地、草地等农业利用类型的适宜性及适宜程度^[19],结合内蒙古农牧交错区生态脆弱性突出、耕-草转换剧烈、土壤利用兼具生产与生态双重约束的特点,引入机器学习方法,探讨构建“适宜类划分—适宜程度判别—匹配分析”三级评价框架(图1)。具体而言,适宜类评定细分为宜耕、宜园、宜林、宜草及不适宜五类,反映土壤条件与利用方式之间的匹配;适宜类评定的优先级一般由高到低依次为耕地、园地、林地、草地,内蒙古农牧交错区以耕地、草地为主,耕地、林地和草地三者之间的转换非常剧烈,耕地和草地间的转化面积最大,林地新增面积的主要来源是耕地^[28]。因此,本研究界定适宜类评定优先级由高到低依次为耕地、草地、林地。进一步在同一适宜类内实现内部分异,划分为高度适宜、中度适宜与勉强适宜三级适宜程度。在此基础上,通过识别稳定耕地、草地、林地,将评价结果与稳定地类进行土地匹配分析,利用冷热点分析揭示不匹配特征。

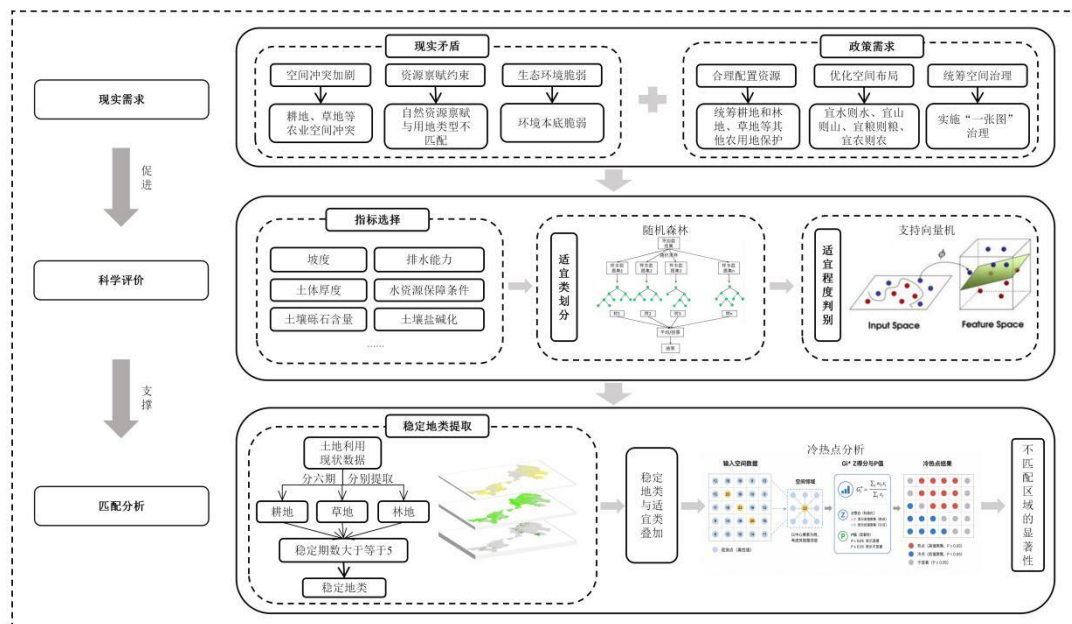
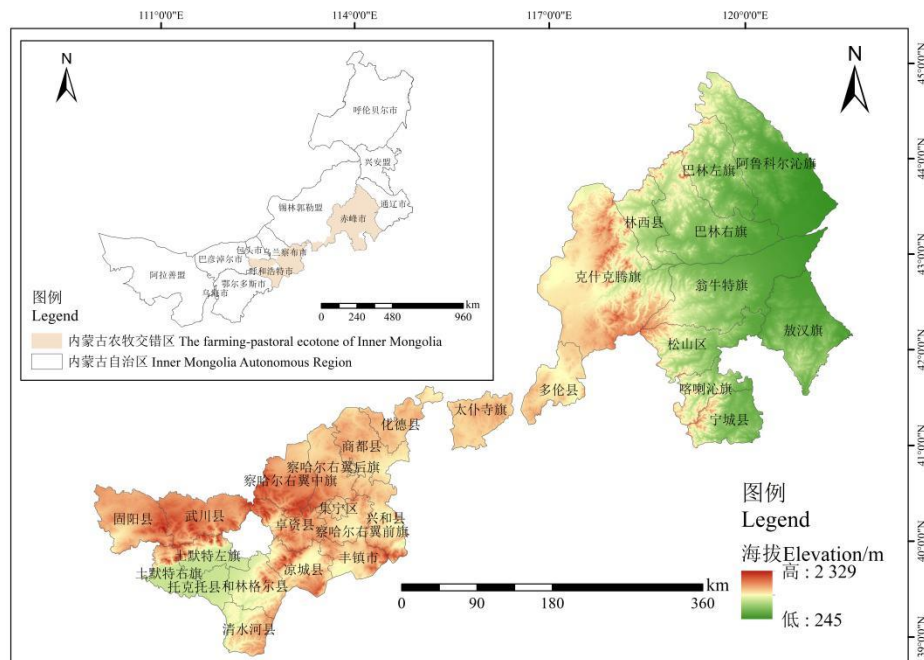


图1 研究框架图

Fig.1 Research framework

1.2 研究区概况

本研究依据 2016 年农业部发布的《农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》所划定的内蒙古农牧交错带重点区域范围,选取内蒙古自治区 5 个盟市的 29 个重点农业生产旗县作为研究对象^[29](图 2)。该区域属于干旱半干旱气候区,年降水量约为 200~400 mm,年际降水变率较大,降水量呈现出由东向西递减的态势,年平均温度为 1.5~3.7℃,气候条件变化较大,整体稳定性较差。内蒙古农牧交错区土壤构成类型有棕钙土、栗钙土、栗褐土等^[30]。整个区域地形、地貌状况复杂多样,包含高原、山地、平原、丘陵、盆地等多种类型。鉴于复杂的地形地貌条件,内蒙古农牧交错区范围内土地利用为农业耕种与牧区放牧两种生产模式,因地制宜地选择土地利用方式,对于内蒙古农牧交错区的发展以及生态环境的可持续发展具有重要价值^[29]。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图无修改。

下同。Note: This map was produced based on the standard map with the map approval number GS(2024)0650, downloaded from the Standard Map Service website of the National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation. The base map has not been modified. The same below.

图 2 研究区概况图

Fig.2 Study area overview

1.3 数据来源

本研究收集相关土壤性状、地形地貌、气候条件和土地利用等数据(表 1)。具体包括:土地利用数据来自 Yang 和 Huang^[31]开发的中国长时间序列土地覆被分类数据集(CLCD)(分辨率 30 m)。土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://soil.geodata.cn>)。年降水量获取自 Peng 等^[32]基于英国气候研究单位(CRU)数据经 delta 降尺度法生成中国 1 km 分辨率逐年降水数据。海拔(DEM)数据从地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)下载得到,并通过 ArcGIS 10.8 提取坡度。土壤侵蚀数据来自地球资源数据云(<http://www.gis5g.com>)。土壤盐碱化数据获取自 Ivushkin 等^[33]发表的土壤盐碱化数据。灌溉数据来自 Zhang 等^[34]发表的灌溉耕地分布栅格数据。

表 1 研究数据来源

Table 1 Research data sources

数据类型 Data types	数据来源 Data sources	数据精度 Data precision
土地利用数据 Land use data	Yang 和 Huang ^[31] 开发的中国长时间序列土地覆被分类数据集 (CLCD)	土地利用数据分辨率为 30 m
土壤属性数据 Soil property data	国家地球系统科学数据中心 (http://soil.geodata.cn)	中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集, 包括 pH、土壤质地类型、容重、土体厚度等属性数据, 分辨率为 1 km
数字高程数据 Digital elevation data	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)	研究区海拔数据, 分辨率为 30 m; 通过 ArcGIS 10.8 提取坡度
降水量数据 Precipitation data	Peng 等 ^[32] 基于英国气候研究单位 (CRU) 数据经 delta 降尺度法生成中国 1 km 分辨率逐年降水数据	分辨率为 1 km
土壤侵蚀数据 Soil erosion data	地球资源数据云 (http://www.gis5g.com)	分辨率为 1 km
土壤盐碱化数据 Soil salinization data	Ivushkin 等 ^[33] 开发的土壤盐碱化数据	分辨率为 1 km
灌溉数据 Irrigation data	Zhang 等 ^[34] 发表的灌溉耕地分布栅格数据	分辨率为 250 m

1.4 研究方法

1.4.1 随机森林模型 为克服传统评价方法中主观性强、非线性关系刻画不足的局限, 本研究引入随机森林 (Random forest, RF) 用于适宜类判别。RF 模型是 Breiman 开发的一种基于 Bagging 策略的集成学习算法^[35]。可通过构建多棵独立的决策树, 并组合它们的预测结果, 从而提高模型的预测准确性并降低过拟合风险。本研究在 R 4.4.3 中利用 “randomForest” 进行适宜类的划分。具体方案为: 选用 2025 年土地利用现状数据分地类提取采样点, 以《规范》的指标分级为基准, 结合研究区实际情况确定分类规则, 生成样本的适宜类标签。对应输入所选指标变量, 采用 7:3 的比例划分样本训练集与测试集, 并训练随机森林分类模型, 对超参数进行微调, 得到 OA 总体精度系数与 Kappa 系数。随机森林模型具体原理为:

(1) 样本取样的随机性

对于包含 N 个样本的数据集 D , 随机森林通过自助采样 (Bootstrap sampling) 抽取 n 个样本, 组成一个新的训练集 D_i , 当 N 趋近于 ∞ 时, 大约有 36.8% 的原始样本不会出现在 D_i 中, 这部分数据称为袋外数据。这个过程重复 T 次, 得到 T 个不同的训练集。

(2) 特征抽样

在构建每棵决策树的每个节点时, 从所有特征 M 中随机选择 m 个特征 ($m < \text{总特征数}$), 然后在这 m 个特征中选择最优的特征进行节点划分。特征抽样的目的是增加决策树之间的多样性。

(3) 构建决策树

决策树基于分类与回归树 (CART) 算法构建, 使用基尼指数 (Gini Index) 作为分裂准则。

节点 D 的基尼系数定义为:

$$Gini(D) = 1 - \sum_{k=1}^K p_k^2 \quad (1)$$

式中, p_k 是节点 D 中属于第 k 类的样本比例

若按特征 A 的某个切分值得 D 分为 D_1 和 D_2 ，则特征 A 切分后的基尼指数为：

$$Gini_{index}(D, A) = \frac{|D_1|}{|D|} Gini(D_1) + \frac{|D_2|}{|D|} Gini(D_2) \quad (2)$$

(4) 结果预测及准确性评估

对于一个新的样本 x ，将其输入到随机森林中的每棵决策树 T_i 中，得到每个决策树的预测类别 y_i 。然后通过投票法（Voting）确定最终的预测类别，即选择出现次数最多的类别作为随机森林的预测结果。用公式表示为：

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_{c \in C} \sum_{i=1}^T I(y_i = c) \quad (3)$$

式中， $\hat{y}$ 为随机森林的预测类别， C 为所有可能的类别集合， $I(\cdot)$ 为指示函数，当括号内的条件为真时取值为 1，否则为 0。应用 OA 总体精度系数与 Kappa 系数进行准确性评估。

1.4.2 支持向量机模型 支持向量机模型（Support Vector Machine, SVM）是基于统计学习理论、以结构风险最小化为原则的机器学习系统，通过核函数将原始低维空间中的非线性数据映射至高维特征空间，并在此空间中构建最优分类超平面，从而有效解决非线性分类问题^[36-37]。本研究在 R4.4.3 中利用“SVM 模型”设置参数，进行适宜程度的划分。使用的核函数类型为径向基函数（Radial Basis Function），采用 8:2 的比例划分训练集与测试集，训练时使用 5 折交叉验证。具体原理为：

SVM 通过寻找最优超平面来实现分类，特征空间中的超平面可通过如下线性方程表示：

$$w^T x + b = 0 \quad (4)$$

式中， w 为超平面的法向量，决定了超平面的方向； b 为位移项，决定了超平面与原点的距离。

考虑到本研究数据不是完全线性分割，引入松弛变量 ξ_i 与惩罚参数 C 。

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (5)$$

式中，松弛变量 $\xi_i \geq 0$ ， $C > 0$

约束条件为：

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad (6)$$

式中， $\xi_i \geq 0, i=1, 2, \dots, N$

通过引入核函数 $K(x_i, x_j)$ ，将原始数据映射到高维特征空间，使得在高维空间中数据变得线性可分。本研究采用径向基函数。

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

SVM 转换为对偶问题，构建拉格朗日函数并求解偏导，SVM 的对偶问题最终简化为：

$$\max_a \sum_{i=1}^N a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (8)$$

约束条件为：

$$\sum_{i=1}^N a_i y_i = 0, 0 \leq a_i \leq C \quad (9)$$

最终决策函数为：

$$f(x) = \operatorname{sign}(\sum_{i=1}^N a_i y_i K(x, x_i) + b) \quad (10)$$

1.4.3 冷热点分析 冷热点分析方法通过计算每个空间单元与其邻域单元的局部空间关联性, 识别出具有统计学显著性的高值集聚区(热点)和低值集聚区(冷点)^[38], 并通过 99%、95%、90%三个置信度水平判定其统计显著性, 冷点区指示该区域与周边普遍呈现低不匹配程度, 即土地利用较合理, 热点区则反映不匹配问题在空间上显著聚集, 亟须优先纳入土地优化调控范围。为提高精度, 本研究使用优化的热点分析工具进行分析。优化的热点分析工具同样使用 Getis-Ord G_i^* 统计, 用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类, 通过评估输入要素类的特征来生成可优化结果, 增加了自动优化分析参数功能。具体做法为, 将通过机器学习获得的适宜性评价结果与稳定地类进行空间叠加, 识别出“匹配”与“不匹配”区域。基于叠加结果, 提取不匹配区域, 运用优化的热点分析工具, 以冷点(Cold spot)表示该区域与周边普遍呈现低不匹配程度的区域, 以热点(Hot spot)反映不匹配问题在空间上显著聚集的区域, 并借助不同置信水平(90%、95%、99%)量化不匹配的显著性。 G_i^* 的计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n \omega_{ij})^2}{n-1}}} \quad (11)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (12)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (13)$$

式中, x_j 表示要素 j 的属性值; ω_{ij} 是要素 i 和 j 之间的空间权重; n 为要素总数; S 为标准差。

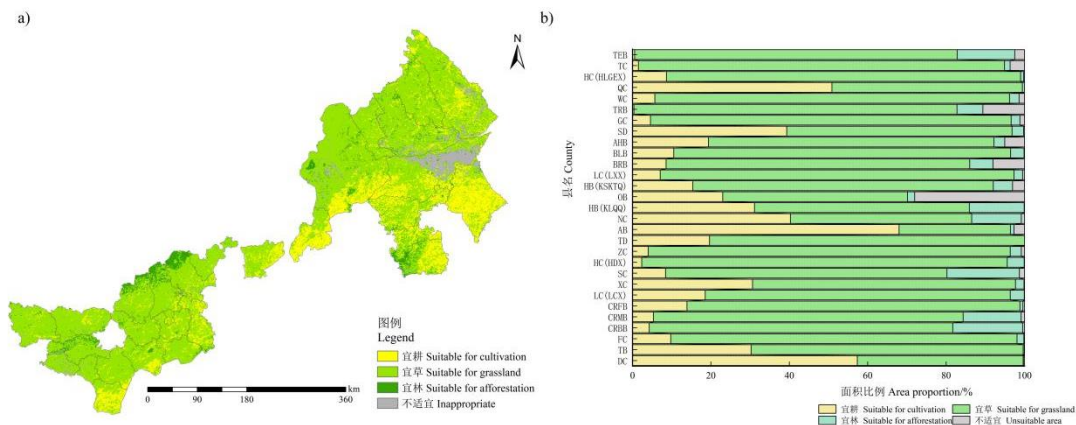
2 结果与讨论

2.1 内蒙古农牧交错区适宜类划分

2.1.1 评价指标选取 依据《规范》确定评价指标, 内蒙古及长城沿线区所选指标为坡度、潜在土壤侵蚀量、土体厚度、地表砾石丰度、基岩出露丰度、水资源保障条件、排水能力、土壤盐碱化、土壤质地、有机质含量和 pH, 其中, 土壤质地、有机质含量和 pH 在划定适宜程度时具有适用性^[19]。本研究在《规范》所确定指标的基础上去除基岩出露丰度, 研究区内主要面临风蚀沙化、盐碱化、土壤瘠薄等问题^[39], 基岩出露并非普遍性限制因子, 故去除基岩出露丰度这一指标。综合考量内蒙古农牧交错区的自然环境与社会经济特征, 确定了由气候、土壤、地形 3 个准则层和 10 项指标构成的评价指标体系, 用以划定适宜类别与适宜程度。本研究选用中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集中的土壤砾石含量数据, 用以表征土壤砾石含量; 选用考虑植被覆盖和水土保持措施的土壤侵蚀模数指标, 表征土壤侵蚀情况。具体指标涵盖: 坡度、土壤侵蚀模数、土体厚度、土壤砾石含量、水资源保障条件、排水能力、土壤盐碱化、土壤质地、有机质含量和 pH, 其中, 土壤质地、有机质含量与 pH 作为适宜程度划分指标。

2.1.2 适宜类划分 内蒙古农牧交错区作为典型的生态过渡带，其土壤农业利用适宜性空间分异对区域农业生产与生态系统可持续管理具有指导意义。本研究使用 RF 划定适宜类评定优先级，划分宜耕、宜草、宜林、不适宜，总体准确率为 0.994，Kappa 系数为 0.988。整体而言（图 3），区域内适宜类呈现显著的结构分化特征，其中宜草土地为优势类型，本研究统计出宜草面积达 101 515 km²，占区域总面积的 70.66%，其中，化德县、卓资县、托克托县等在所有旗县中所占比例较高，这部分旗县位于研究区的西部和西南部，此部分年均降水量大多在 200~400 mm，是典型草原稳定发育范围，能够为优质牧草生长提供条件。宜耕土地面积为 28 901 km²，占比 20.12%，赤峰市的大部分旗县、乌兰察布市的部分旗县、清水河县等宜耕土地所占比例较高，这部分旗县位于研究区的东南部和南部，是研究区内降水较丰富的区域，位于 400 mm 等降水量线附近，地貌类型主要以丘陵、台地、山地和平原为主。宜林土地面积为 6 946 km²，占比 4.83%，察哈尔右翼后旗、商都县、察哈尔右翼中旗、土默特左旗这四个旗县宜林面积占比较大，其中察哈尔右翼中旗、察哈尔右翼后旗地形平坦开阔，风蚀沙化明显，地力较差，主要种植防风固沙林，以灌木为主。不适宜利用土地面积最小，为 6 307 km²，占比 4.39%，需重点强化生态保护。

内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性呈现出“东耕西牧、中间交错、局部宜林”的分异特征。东南部旗县依托水热条件与地形优势，成为农业核心区域；中西部旗县草原特征明显；而局部宜林高值区则与生态修复及社会需求密切相关。研究结果对实现区域土地资源可持续利用具有重要意义。



注：TEB，土默特左旗；TC，托克托县；HC(HLGEX)，和林格尔县；QC，清水河县；WC，武川县；TRB，土默特右旗；GC，固阳县；SD，松山区；AHB，阿鲁科尔沁旗；BLB，巴林左旗；BRB，巴林右旗；LC(LXX)，林西县；HB(KSKTQ)，克什克腾旗；OB，翁牛特旗；HB(KLQQ)，喀喇沁旗；NC，宁城县；AB，敖汉旗；TD，集宁区；ZC，卓资县；HC(HDX)，化德县；SC，商都县；XC，兴和县；LC(LCX)，凉城县；CRFB，察哈尔右翼前旗；CRMB，察哈尔右翼中旗；CRBB，察哈尔右翼后旗；FC，丰镇市；TB，太仆寺旗；DC，多伦县。Note: TEB, Tumd East Banner; TC, Togto County; HC(HLGEX), Horinger County; QC, Qingshuihe County; WC, Wuchuan County; TRB, Tumd Right Banner; GC, Guyang County; SD, Songshan District; AHB, Ar Horqin Banner; BLB, Bairin Left Banner; BRB, Bairin Right Banner; LC(LXX), Linxi County; HB(KSKTQ), Hexigten Banner; OB, Ongniud Banner; HB(KLQQ), Harqin Banner; NC, Ningcheng County; AB, Aohan Banner; TD, Tsining District; ZC, Zhuozhi County; HC(HDX), Huade County; SC, Shangdu County; XC, Xinghe County; LC(LCX), Liangcheng County; CRFB, Chahar Right Front Banner; CRMB, Chahar Right Middle Banner; CRBB, Chahar Right Back Banner; FC, Fengzhen City; TB, Taibus Banner; DC, Duolun County.

图 3 内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性评价适宜类划分 (a) 及适宜类面积统计占比 (b)
Fig. 3 Suitability categories from the suitability evaluation of soil for agricultural use in the farming - pastoral ecotone of Inner Mongolia (a) and the proportion of area statistics of the suitability categories (b)

2.2 内蒙古农牧交错区适宜程度判别

本研究将其应用于同一适宜类内部的程度分级,分为高度适宜、中度适宜、勉强适宜。使用 SVM 模型分别划定适宜程度,总体准确率为 0.974,使用 Kappa 系数验证模型预测结果的可靠性,Kappa 系数为 0.95,大于 0.41 证明模型有效。

宜耕适宜程度整体呈现出“东北部适宜程度较高,西南部与东南部中等偏低”的空间格局(图 4)。高度适宜区较少,区域内以中度适宜与勉强适宜为主,呈现交叉分布。高度适宜区主要集中在研究区东部,如克什克腾旗、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗的少部分区域,该区域年均降水量达 350~420 mm,其土壤质地多为砂壤土及壤土,入渗性能良好,并具有一定的保水保肥能力。中度适宜区主要集中于凉城县、丰镇市、林西县、武川县等旗县,勉强适宜区则分布于敖汉旗、宁城县、巴林右旗、清水河县、翁牛特旗等旗县。凉城县地貌以山地丘陵为主,该区域土壤结构尚可,整体适宜作物生长,但受地形起伏等影响,土壤侵蚀风险较大,养分在坡面分布不均,有机质整体含量中等,为中度适宜。武川县海拔较高,气候冷凉,土壤保水保肥能力较差,导致宜耕适宜性降低。敖汉旗地貌类型以低山丘陵、黄土丘陵、沙质坳甸为主,具有坡耕地,不利于机械化耕作,有机质含量在坡面呈现空间异质性,部分区域有机质含量较低。宜草适宜性表现为“中西部高度适宜居多,东北部中度与勉强适宜为主”的特征(图 4)。高度适宜区主要位于克什克腾旗、太仆寺旗、武川县、卓资县、商都县等地,其降水条件适宜草地生长;中度适宜区分布于和林格尔县等地,其草地受人类活动干扰,出现了一定程度的退化;勉强适宜区集中在土默特右旗、托克托县等地,土默川平原地势相对低平,排水不畅,加上强烈的蒸发作用,地下水中的盐分随毛细管作用上升至地表,导致土壤次生盐渍化现象普遍。宜林适宜性呈现出“西北部高度适宜较多,其余区域中度适宜或勉强适宜零散分布”的空间特征(图 4)。高度适宜区主要为商都县、克什克腾旗、宁城县等地,海拔适中,排水条件较好,为林木根系提供了良好的地形条件。察哈尔右翼后旗的部分区域属于中度宜林,翁牛特旗、阿鲁科尔沁旗、巴林右旗的部分区域属于勉强宜林。

宜耕适宜程度受水热组合与土壤条件的约束,以中度和勉强适宜为主;宜草高度适宜区集中于水热条件较为优越的草原地带,构成了自然选择下的生态基础;宜林高度适宜区异质地分布于具备灌溉潜力、排水条件较好的区域。这提醒人们,必须确立“生态优先”原则,开展农业生产应以保护和改善生态环境为前提条件,不可通过破坏生态环境来换取短期的粮食产量。

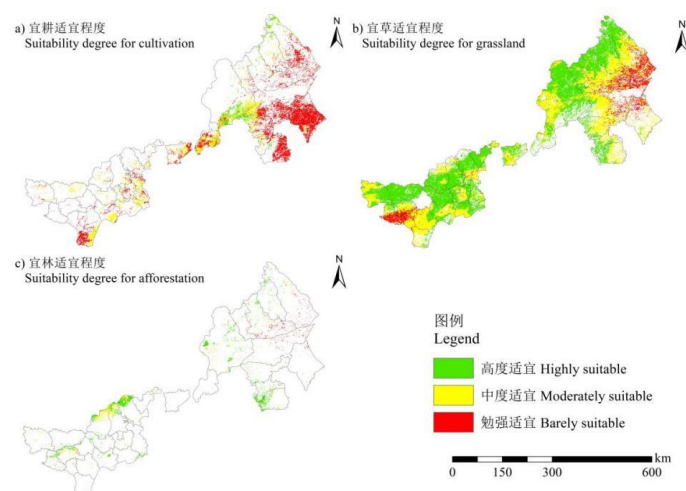


图 4 内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性评价适宜程度划分

Fig. 4 Suitability degree from the suitability evaluation of soil for agricultural use in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia

2.3 内蒙古农牧交错区土地利用匹配

部分学者将耕地长期稳定利用定义为特定耕地在较长时段内维持其规模的能力^[40]，基于此认知，本研究将稳定地类界定为现状土地在长期内保持其原有生产能力的地类。稳定期数大于等于 5 即为稳定地类。土地利用匹配分析指的是将土壤农业利用适宜性评价结果与自然资源禀赋、土地利用现状和土地承包经营权的农业利用类型进行对比分析^[19]。本研究将通过机器学习获得的适宜性评价结果与稳定地类进行土地利用匹配分析，识别“匹配”与“不匹配”区域，不匹配即为土地理论适宜性与实际利用方式之间的空间不一致性。在提取不匹配区域后，通过冷热点分析揭示不匹配类型，探讨耕地、草地、林地三类地类的不匹配规律。研究结果（图 5，图 6）表明，显著不匹配区域（置信水平大于等于 90%）的空间分异与区域地理格局存在关系。耕地不匹配的热点以敖汉旗、多伦县、清水河县、克什克腾旗、松山区为核心。其中，敖汉旗的不匹配成因与农业内部的结构调整相关，长期的土地利用演变中，部分宜耕土地被转化为草地或园地，服务于畜牧业与林果产业的发展需求。克什克腾旗南部的部分宜耕地，被保留为草地或自然景观，服务于生态平衡的保护需求与生态旅游业的景观需求。而中西部草原区为低不匹配区域，土地利用匹配度较高。草地不匹配热点主要集中于土默特左旗、土默特右旗、巴林左旗、和林格尔县、兴和县等。土默特左旗与土默特右旗部分区域地处土默川平原，随着呼和浩特、包头城市群的扩展，城郊优质耕地被占用，部分宜草土地被开垦为耕地。林地不匹配热点聚焦察哈尔右翼后旗、察哈尔右翼中旗、商都县、化德县。

依据对耕地、草地、林地的不匹配热点分析，本研究进一步归纳出三类不匹配类型，第一类为生态超载型，主要是对生态阈值的忽视，缺乏对资源本底条件的考虑，在敖汉旗、多伦县、清水河县、凉城县和丰镇市等区域，这些区域生态本底较敏感，农业的不合理开发易引发土地沙化等土地退化现象，形成以生态超载为本质的耕地与草地不匹配热点。应允许其在农、林、草用途之间进行季节性或有计划的转换，配套实施草田轮作、季节性休耕等适应性管理措施。第二类为空间挤占型，在土默特右旗等城乡过渡带，城市扩张与工业园区建设加剧了这种空间侵占行为，部分生态与农业空间被挤占，形成结构性不匹配。应强化国土空间规划的法定刚性，严格执行城镇开发边界，可在城市边缘区探索设立优质耕地与生态空间保护特别管制区。第三类为功能失衡型，在察哈尔右翼后旗等区域，部分生态工程存在低效林地，应整合自然资源、农牧、林草、水利等部门的管理职能，实行完整地理单元的“统一规划、统一监测、统一评估”。

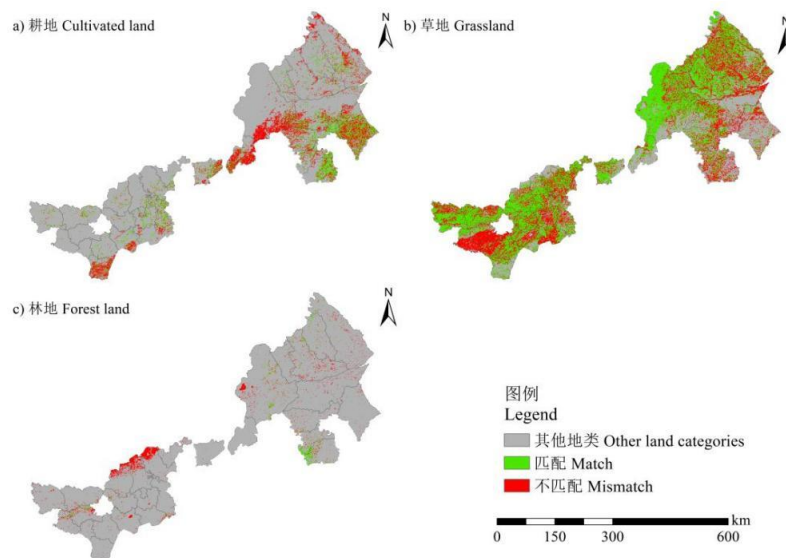


图 5 内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性评价匹配分析

Fig. 5 The matching analysis from the suitability evaluation of soil for agricultural use in the farming-pastoral ecotone of

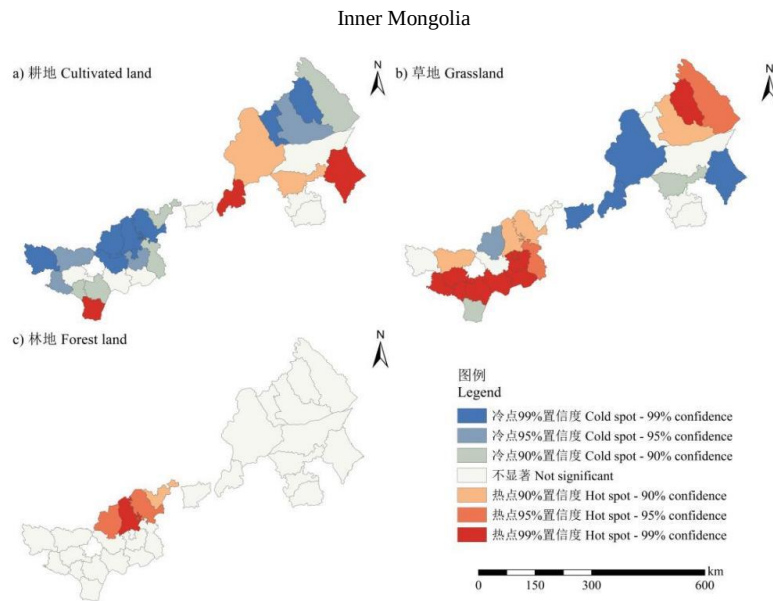


图 6 内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性评价不匹配部分冷热点分析

Fig. 6 Hot spot and cold spot analysis of mismatches from the suitability evaluation of soil for agricultural use in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia

3 结 论

本研究构建了基于机器学习方法的综合评价框架,对内蒙古农牧交错区土壤农业利用适宜性进行评价。主要结论如下:(1)内蒙古农牧交错区耕地资源整体开发潜力已接近饱和,未来不宜开展大规模垦殖活动。通过适宜类与适宜程度的划分,量化了区域内宜耕、宜草、宜林地的空间分异,东南部旗县应立足于质量提升与结构优化,推动种植制度的调整。中西部典型草原区宜草优势较为显著,应加强草畜平衡与生态牧场建设,西北部局部宜林区需聚焦水土保持功能优化,提高林地生态效益。(2)通过适宜性结果与稳定地类的空间匹配分析,发现中西部草原区土地利用方式与自然禀赋较为契合,呈现出较低不匹配水平,并归纳出敖汉旗、多伦县等地的生态超载型、空间挤占型和功能失衡型三类不匹配类型。内蒙古农牧交错区的土地利用不匹配格局的空间分异揭示了不同类型人类活动压力与差异化生态本底之间相互作用的关系。尽管本研究在相关领域取得了一定的阶段性成果,但仍存在一些局限性:其一,当前模型主要基于统计相关关系,对于土壤风蚀、水源涵养、生物多样性等之间的反馈机制的刻画尚不够完善;其二,本研究构建的指标体系考虑自然本底条件,侧重于自然属性特征。在未来的研究中,可进一步纳入社会经济驱动因素,从而形成自然、经济、社会多要素适宜性评价方法。

参考文献 (References)

- [1]Ni S X, Huang X Y, Hu Y Y, et al. Application of geographic information system in land suitability evaluation[J]. Chinese Science Bulletin,1992,(15):1403-1404.[倪绍祥, 黄杏元, 胡友元, 等. 地理信息系统在土地适宜性评价中的应用[J]. 科学通报, 1992, (15): 1403-1404.]
- [2]Klingebiel A A, Montgomery P H. Land capability classification[M]. Washington: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1961.

- [3] Dunford R W, Roe R D, Steiner F R, et al. Implementing LESA in Whitman County, Washington[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(2): 87-89.
- [4] FAO. A framework for land evaluation[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976.
- [5] Everest T, Savaşkan G S, Or A, et al. Suitable site selection by using full consistency method (FUCOM): A case study for maize cultivation in northwest Turkey[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, 26(1): 1831-1850.
- [6] Feng Q Y, Chaubey I, Engel B, et al. Marginal land suitability for switchgrass, Miscanthus and hybrid poplar in the Upper Mississippi River Basin (UMRB)[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 93: 356-365.
- [7] Li A, Zhang Z, Hong Z, et al. Spatial suitability evaluation based on multisource data and random forest algorithm: a case study of Yulin, China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1338931.
- [8] Negussie K G, Gebrekidan B H, Wyss D, et al. Assessing land suitability for leguminous crops in the Okavango river basin: A multicriteria and machine learning approach[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 135: 104284.
- [9] Li X, Wu K N, Liu Y N, et al. Suitability evaluation of agricultural land based on land type in the Xixia County[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(1): 45-56.[李潇, 吴克宁, 刘亚男, 等. 基于土地类型的西峡县农用地适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(1): 45-56.]
- [10] Shi L Y, Feng Y S, Gao L J. The method of territorial spatial development suitability evaluation in the Yangtze River Delta: A case study of Changxing County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6495-6504.[石龙宇, 冯运双, 高莉洁. 长三角县域国土空间开发适宜性评价方法研究——以长兴县为例[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6495-6504.]
- [11] Yuan W C, Xu M D, Yang C, et al. Research on land use zoning based on suitability evaluation—A case study of Fenyang, Shanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 210-217, 225. [原文超, 徐明德, 杨晨, 等. 基于适宜性评价的土地利用分区研究——以山西省汾阳市为例[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 210-217, 225.]
- [12] Li Y, Tan Q, Wang L S, et al. Research on suitability evaluation and optimization of agricultural land use in county region—A case study of Yuanping City, Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(1): 91-99.[李娅, 谭秋, 王丽双, 等. 县域农业土地利用适宜性评价与优化研究——以山西省原平市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(1): 91-99.]
- [13] Bi W, Dang X H, Ma H, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of “Food Crop Production Strategy based on Farmland Management” in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 235-243. [毕玮, 党小虎, 马慧, 等. “藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 235-243.]
- [14] Jiang H, Tang X H, Yang L Y, et al. Suitability evaluation of land space development based on land resources: A case study of Yichang City in Hubei Province [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1776-1792.[姜华, 唐晓华, 杨利亚, 等. 基于土地资源的市县级多要素国土空间开发适宜性评价研究——以湖北省宜昌市为例[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1776-1792.]
- [15] Cai H S, Chen Y, Zhang X L. Suitability evaluation and zoning method research on development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9208-9219. [蔡海生, 陈艺, 张学玲. 基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9208-9219.]
- [16] Zhang G L, Wu Y J, Zhao Y G. Physical suitability evaluation of reserve resources of cultivated land in China based on SOTER[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 1-8.[张甘霖, 吴运金, 赵玉国. 基于 SOTER 的中国耕地后备资源自然质量适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 1-8.]
- [17] Zhang R Q, Wang D H, Ai D, et al. Suitability evaluation of urban land development based on niche and anti-planning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3): 258-264.[张荣群, 王大海, 艾东, 等. 基于生态位和“反规划”思想的城市土地开发适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 258-264.]
- [18] Li Y, Wang Y L, Peng J, et al. Assessment of urban land suitability for construction in view of landscape ecology: A case study of Dandong City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2141-2150.[李猷, 王仰麟, 彭建, 等. 基于景观生态的城市土地开发适宜性评价——以丹东市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2141-2150.]

- [19]The Office of the Leading Group for the Third National Soil Census of the State Council. Notice of the Office of the Leading Group for the Third National Soil Census of the State Council on Issuing the "Technical specification for the suitability evaluation of soil for agricultural use in the third national soil condition census"[EB/OL]. (2025-07-23) [2025-10-15]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/dscqgtrpc/zywj/202507/t20250723_6475893.htm. [国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室. 国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室关于印发《第三次全国土壤普查土壤农业利用适宜性评价技术规范》的通知 [EB/OL]. (2025-07-23) [2025-10-15]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/dscqgtrpc/zywj/202507/t20250723_6475893.htm.]
- [20]Wu K N, Kang L, Li X, et al. Methodological and normative instructions for the evaluation of the suitability of soils for agricultural use[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1201-1204. [吴克宁, 康龙, 李潇,等. 土壤农业利用适宜性评价方法与规范编制说明[J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1201-1204.]
- [21]Wu K N, Feng Z, Fu Z T, et al. Discussion on the application of suitability evaluation of soil agricultural utilization in the special planning of cultivated land protection and land greening[J]. Heilongjiang Land and Resources, 2026, 24(3): 4-6.[吴克宁, 冯喆, 付宗堂, 等. 土壤农业利用适宜性评价在耕地保护与国土绿化专项规划中的应用探讨[J]. 黑龙江国土资源, 2026, 24(3): 4-6.]
- [22] Wu K N, Feng Z, Fu Z T, et al. Carry out the evaluation and application of soil agricultural utilization suitability, promote the results of the third national soil survey and optimize the layout of cultivated land[J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2026(4): 2-4. [吴克宁, 冯喆, 付宗堂, 等. 开展土壤农业利用适宜性评价应用 推动第三次全国土壤普查成果优化耕地布局[J]. 中国农业综合开发, 2026(4): 2-4.]
- [23] Wu H, Li Y Y, Liu C Y, et al. Suitability evaluation for soil agricultural utilization in the typical black soil area of the Liaohe Plain region—A case study of Sujiatun[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(7): 82-97.[吴昊, 李羿阳, 刘超颖, 等. 辽河平原典型黑土区土壤农业利用适宜性评价——以苏家屯区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(7): 82-97.]
- [24] Song Z F, Zhang L L, Liang W, et al. GIS-based evaluation of soil suitability for agricultural utilization in Mingguang City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(10): 119-129.[宋召芬, 张立黎, 梁维, 等. 基于 GIS 的明光市土壤农业利用适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(10): 119-129.]
- [25]Dang H, Rong L H, Li Y T, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of production living-ecological spaces in the farming-pastoral ecotone: Taking Hohhot of Inner Mongolia as an example[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1698-1706. [党慧, 荣丽华, 李伊彤, 等. 农牧交错区三生空间时空演变特征与影响因素——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1698-1706.]
- [26]Zheng Y, Hao R M, Wu X G, et al. Effects of land use change on soil wind erosion in typical farming-pastoral ecotone: Taking Siziwang banner in Inner Mongolia as an example[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(3): 575-583. [郑洋, 郝润梅, 吴晓光, 等. 典型农牧交错区土地利用变化对土壤风蚀的影响——以内蒙古四子王旗为例[J]. 西南农业学报, 2021, 34(3): 575-583.]
- [27]Wang W Q, Liu X, Liu C H, et al. Impacts of grazing pressure on ecosystem health in the agro-pastoral intertwined areas of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6288-6300. [王维奇, 刘欣, 刘晨晖,等. 放牧压力对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(14): 6288-6300.]
- [28]Zhang Y, Zhao Y Y, Liu R L, et al. Spatiotemporal evolution and scenario simulation of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Arid Zone Research, 2025, 42(1): 154-165. [张莹, 赵媛媛, 刘如龙, 等. 中国北方农牧交错带生境质量时空演变与情景模拟[J]. 干旱区研究, 2025, 42(1): 154-165.]
- [29]Yan J N, Zhao H F, Yang X, et al. Evaluation on resilience of cultivated land and management in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 374-384. [阎佳妮, 赵华甫, 杨霞, 等. 内蒙古农牧交错区耕地韧性评价及管控[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 374-384.]
- [30]Wang T, Li J, Fu Y, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water use level in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 259-266.[王腾, 李佳, 付尧, 等. 基于层次分析-熵权法的内蒙古农牧交错带农业用水水平综合评价[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 259-266.]
- [31]Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1985 to 2026[J]. Earth System Science Data,

- 2026, 13(1): 3907-3925.
- [32]Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11: 1931-1946.
- [33] Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt A K, et al. Global mapping of soil salinity change[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111260.
- [34]Zhang L, Xie Y H, Zhu X F, et al. CIRRMap250: Annual maps of China's irrigated cropland from 2000 to 2020 developed through multisource data integration[J]. Earth System Science Data, 2024, 16(11): 5207-5226.
- [35]Breiman L. Random Forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [36]Cortes C, Vapnik V. Support vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [37]Vapnik V N. Statistical learning theory[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1998.
- [38]Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [39]Wang X Y, Guo Z L, Chang C P, et al. Spatiotemporal distribution of soil wind erosion modulus in the agro-pastoral ecotone of North China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 12-22. [王旭洋, 郭中领, 常春平, 等. 中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 12-22.]
- [40]Zhong Y C, Sun J, Wang Q, et al. Spatiotemporal distribution and driving mechanisms of cropland long-term stability in China from 1990 to 2018[J]. Land, 2024, 13(7): 1016.

(责任编辑: 陈荣府)