

东北黑土区硅粉富集层的空间分异与影响因素——以辽宁省为例*

刘思玮¹, 孙仲秀^{1†}, 郭 龙², 段斯译¹, 王秋兵¹

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要: 在中国东北黑土区, 硅粉富集层显著影响土壤物理特性, 阻碍植物根系穿透和水分运移, 加剧坡地侵蚀。以辽宁省为典型区域, 整合野外调查采样与全国第二次土壤普查数据共 333 个土壤剖面样本, 运用机器学习量化硅粉富集层空间分布及特性。结果表明, 硅粉富集层主要分布于辽宁省的沈阳、铁岭、抚顺、本溪、丹东及朝阳等地, 总面积约 4 261 km², 模型预测精度达 0.42。其特性表现为: 辽宁中部阶地丘陵区硅粉积累深厚, 东部山区较浅。二氧化硅新生体丰度和密度中部高四周低 (丰度为 6.66%~27.35%、密度为 132.7~611.9 g·dm⁻³), 硅粉富集层的出现深度在辽宁中部和北部较深 (21.06~74.06 cm), 厚度在辽宁东部较薄 (31.78~97.71 cm)。年均地温、相对湿度和降水量显著影响硅粉富集层分布。沈阳东部因地下水活动频繁、气候相对温暖湿润, 硅粉富集层深厚; 抚顺等山地地区地势较高, 受地下水影响有限, 而生物富集作用和降水量影响较大, 硅的淋溶量小, 且淋溶和沉积的深度浅, 因而硅粉富集层浅薄。本研究为理解硅粉富集层的空间分布及其影响因素提供了科学依据, 并为制定有效的土壤改良策略提供了指导。

关键词: 硅粉富集层; 分布特征; 障碍层; 地下水

中图分类号: S159 文献标志码: A

Spatial Differentiation Characteristics and Driving Factors of the Silica Neoformation Accumulation Layer in Northeast Black Soil Region: A Case Study of Liaoning Province

LIU Siwei¹, SUN Zhongxiu^{1†}, GUO Long², DUAN Siyi¹, WANG Qiubing¹

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to systematically investigate the spatial distribution and driving factors of silica neoformation accumulation layers in the Northeast Black Soil Region, which significantly affect soil physical properties, impede plant root penetration and water transport, and exacerbate slope erosion. 【Method】 Taking Liaoning Province as a representative region, a total of 333 soil profile samples were integrated, and advanced machine learning techniques were used to quantitatively analyze the spatial distribution and characteristics of silica neoformation accumulation layers. 【Result】 The results indicated that silica neoformation accumulation layers were predominantly distributed across Shenyang, Tieling, Fushun,

*国家自然科学基金项目(42277285)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2203085)和国家重点研发计划课题(2023YFD1500101)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42277285), the Revitalization Talents Program of Liaoning Province, China (No. XLYC2203085), and the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500101)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: sun19871001@126.com

作者简介: 刘思玮(1998—), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要研究领域为土壤发生与分类。E-mail: 1321892066@qq.com

收稿日期: 2025-03-21; 收到修改稿日期: 2025-07-13; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Benxi, Dandong, and Chaoyang, encompassing a total area of approximately 4 261 km² with a model prediction accuracy of 0.42. Notably, the layers exhibited deep accumulation in the central terrace and hilly regions, whereas they were relatively shallower in the eastern mountainous areas. Specifically, the abundance of silica neoformation peaks in the central region (6.66% to 27.35%), with higher densities observed in the central and western regions (132.7–611.9 g·dm⁻³). The depth of occurrence was greater in the central and northern regions (21.06–74.06 cm), whereas the thickness was thinner in the eastern region (31.78–97.71 cm). Furthermore, the distribution of silica neoformation accumulation layers was significantly influenced by annual mean ground temperature, relative humidity, and precipitation. In the eastern part of Shenyang, frequent groundwater activities and favorable climatic conditions contributed to the formation of profound silica neoformation accumulation layers. Conversely, in mountainous areas such as Fushun, limited groundwater influence, higher terrain, affected by biological enrichment processes and precipitation patterns, resulted in limited silicon leaching. Furthermore, the depths of leaching and deposition were shallow, and the silica neoformation accumulation layer remained superficial. 【Conclusion】 This study provides an important solid scientific basis for understanding the spatial distribution and influencing factors of silica neoformation accumulation layers. It also offers practical guidance for developing effective soil improvement strategies, highlighting the importance of addressing the issues related to enhancing soil health and sustainability in the Northeast China Black Soil Region.

Key words: Silica neoformation accumulation layer; Distribution characteristics; Barrier layer; Groundwater

中国东北黑土区以其富含有机质的黑色表土层著称^[1], 分布于东北三省及内蒙古东北部的平原与丘陵地带^[2]。该区域涵盖黑土、黑钙土、白浆土、棕壤、暗棕壤及草甸土等多种土壤类型, 是全球四大黑土区之一, 是我国重要的战略资源宝库和粮食生产基地^[1, 3-4]。东北黑土区年粮食产量占全国四分之一, 商品化率超过 60%, 对国家粮食安全至关重要。

然而, 黑土退化问题尤其是土壤障碍层增厚日益严重。学者们已对冻土层、黏化层等障碍层次的形成机理与改良进行了深入研究^[5-6]。近期土壤调查发现, 东北黑土区普遍存在二氧化硅新生体(硅粉)富集的层次(简称为硅粉富集层), 尤其在古老沉积物发育土壤中更为明显。该层在不同地区和土壤类型中出现深度及其硅粉含量各异, 二氧化硅新生体通常为棱块状结构, 多分布于结构体表面, 常呈现灰白色粉末状, 在《野外土壤描述与采样手册》^[7]发生层特性描述中硅粉富集层用小写字母“q”表示, 该层次伴有黏粒淀积, 形成硅粉-黏化复合层^[5]。野外调查过程中通常通过观察结构体表面附着的灰白色物质, 速测非碳酸钙的前提下, 将该层次鉴别为硅粉富集层。硅粉富集达到一定程度后, 该层紧实, 根系穿透困难, 水分运移受阻, 易导致上层滞水, 诱发和加剧坡地侵蚀。其形成机制复杂, 化学风化与生物富集作用之争尚存^[6]。目前对硅粉富集层的空间分布及成因认识不足。

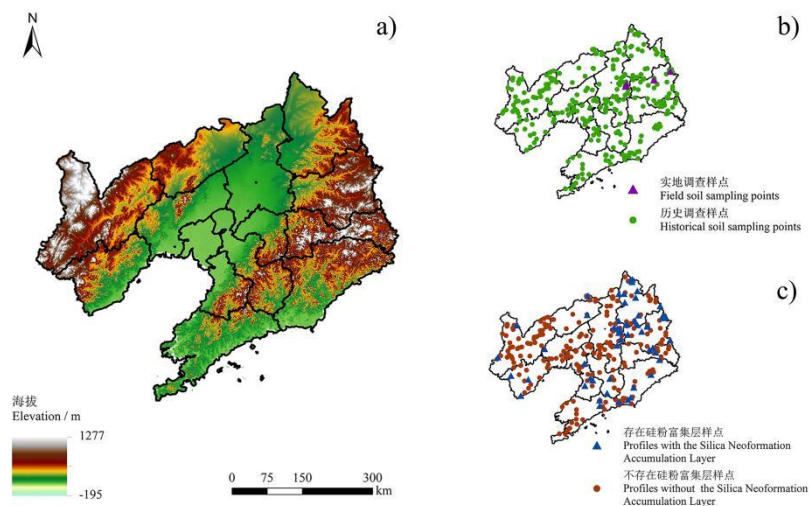
传统土层空间分布研究方法多局限于特定土壤类型区域^[8-9], 但硅粉富集层广泛存在于多种土壤中, 亟需更灵活的模型来准确识别和分类其分布区域。以往研究多集中于表土层空间分布预测^[10], 对心土层关注较少。现有心土层研究多聚焦于土壤剖面尺度的垂直分布特征, 如厚度和埋深预测^[8-9], 而对其含量及密度的评估不足。参照《野外土壤描述与采样手册》^[7], 二氧化硅新生体丰度可作为评估硅粉富集层的重要指标, 但其密度计算公式尚未确立。参照《野外土壤描述与采样手册》^[7]中关于二氧化硅新生体丰度的描述, 可将其作为评估硅粉富集层的重要指标。数字土壤制图技术以定量土壤景观模型和栅格数据表达为特色, 突破了传统制图的最小图斑限制, 能精准描绘土层空间变异。该技术通过引入环境变量, 降低了对调查样点数量和分布的要求, 提升了制图效率。在土层厚度空间预测方面, 学者们探索了经典统计学^[11]、地统计学^[12-13]及机器学习^[14-16]等方法。在小尺度研究中, “土壤—景观”关系简单, 线性模型预测效果良好, 但随着尺度扩大, 土壤与环境变量的非线性关系增强, 线性模型解释力减弱。在辽宁省等景观复杂、区域差异显著的地区, 线性模型大尺度预测偏差较大^[11]。地统计学模型需大量均匀分布的样本以估计半方差函数, 不适用于地形复杂、样本稀缺且分布不均的区域。随机森林模型凭借其强大的分类与回归能力, 为硅粉富集层分布区域的识别与预测提供了新途径^[17]。

本研究基于近年土壤调查与实地采样数据,运用分类随机森林模型划定辽宁省硅粉富集层分布区域,并利用回归随机森林模型预测二氧化硅新生体丰度、密度及硅粉富集层出现深度和厚度,分析其影响因素,旨在揭示辽宁省黑土区硅粉富集层的形成与演变机制,为黑土地改良与地力提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省位于中国东北地区的南端(图 1a),其地理坐标界定于 118°53'E 至 125°46'E 与 38°43'N 至 43°26'N,西南与河北省交界,西北与内蒙古自治区为邻,东北与吉林省毗连,东南则以鸭绿江为界与朝鲜民主主义人民共和国依水相连,南与山东省隔渤海湾相望。全省东西端最长直线距离达 574 km,南北向直线距离为 550 km^[5]。气候上,辽宁省属于温带大陆性季风气候区,年平均气温为 10.2 °C,年均降水量为 625.2 mm。地形上,辽东与辽西以山地丘陵为主,中部为辽阔的辽河平原,区域内主要分布着棕壤、褐土和草甸土等土壤类型。



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: The map is made based on the standard map with the approval number GS (2024) 0650 downloaded from the standard map service website of the National Administration of Surveying, Mapping, and Geographic Information, and the base map is not modified. The same below.

图 1 研究区位置示意图 (a)、样点分布图 (b) 及含硅粉的样点分布图 (c)

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the study area (a), the distribution maps of sample points (b) and the sample points containing silica neoformation accumulation layer (c)

1.2 土壤剖面数据集来源

本研究共采集了 333 个土壤剖面样本,样本来源分为两个渠道:一是课题组实地调查获取的 17 个土壤剖面;二是整合历史土壤普查资料^[5, 18]获得的 316 个剖面(图 1b)。其中有 61 个土壤剖面出现了硅粉富集的层次(图 1c)。

在剖面调查过程中,本研究严格遵循《野外土壤描述与采样手册》^[7]的规范,对每个样点的野外景观特征和土壤形态进行了全面、详尽的描述。将土壤剖面中含有二氧化硅新生体的土壤层次定义为硅粉富集层。对于历史土壤普查资料中的土壤剖面,系统整理了采样地点的景观描述、土壤形态特征,并结合地理位置信息及地形地貌图等辅助资料,准确确定了每个样点的经纬度坐标。

在土壤特性分析方面,本研究特别关注了硅粉富集层的存在情况。详细记录了其中二氧化硅新

生体的丰度、硅粉富集层的起始深度及其厚度，并依据上述数据计算了二氧化硅新生体的密度。二氧化硅新生体丰度的分类标准遵循《野外土壤描述与采样手册》^[7]的指导原则。

在土壤剖面调查中，根据《野外土壤描述与采样手册》^[7]的规范，采用体积百分比定量表征二氧化硅新生体的丰度，即特定土体单元内二氧化硅新生体所占的体积比例。二氧化硅新生体的体积计算公式如下：

$$V_{\text{SiO}_2} = f \times V_s \quad (1)$$

式中， V_{SiO_2} 为二氧化硅新生体在 1 dm^3 土体中的体积， dm^3 ； f 为二氧化硅新生体的丰度，%； V_s 为单位体积 1 dm^3 的土体， dm^3 。

基于上述体积计算公式，结合二氧化硅真实密度 (ρ_{SiO_2} 为 $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)，可进一步推导出单位土体中二氧化硅新生体的质量估算公式：

$$m_{\text{SiO}_2} = \rho_{\text{SiO}_2} \times V_{\text{SiO}_2} \times 10^3 \quad (2)$$

式中， m_{SiO_2} 为 1 dm^3 土体内二氧化硅新生体的质量，g； ρ_{SiO_2} 为 $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ； 10^3 是单位转换系数。

基于上述体积与质量的计算公式，可进一步推导出二氧化硅新生体的密度公式：

$$\rho_{\text{新生体}} = \frac{m_{\text{SiO}_2}}{V_s} = \frac{\rho_{\text{SiO}_2} \times f \times V_s \times 10^3}{V_s} = \rho_{\text{SiO}_2} \times f \times 10^3 \quad (3)$$

式中， $\rho_{\text{新生体}}$ 为二氧化硅新生体密度， $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ； 10^3 是单位转换系数。

当在土壤剖面中存在多个厚度不同、丰度（体积比）不同的硅粉富集层时，计算二氧化硅新生体的密度需要分层处理，可进一步求得硅粉富集层中二氧化硅新生体的平均密度，具体计算公式为：

$$\bar{\rho}_{\text{新生体}} = \frac{\sum (f_i \times \rho_{\text{SiO}_2} \times 10^3 \times H_i)}{\sum H_i} \quad (4)$$

式中， $\bar{\rho}_{\text{新生体}}$ 为土壤剖面中硅粉富集层平均二氧化硅新生体密度， $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ； f_i 为第 i 层土壤的二氧化硅新生体丰度，%； H_i 为第 i 层的土层厚度，cm； 10^3 是单位转换系数。

1.3 环境变量数据来源

本研究还整合了多种辅助数据源，具体如下：

(1) 数字高程模型 (DEM) 数据：来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 提供的航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 数字高程模型的数据产品，分辨率为 90 m 。

(2) 地形参数：坡度、坡向及距水流距离 (WTD) 等参数，均通过高程数据的表面分析获得。

(3) 气象数据：年均温、年均降水量、年均蒸发量、年均地温及年均相对湿度等指标，均从中国科学院资源环境科学数据平台 (<http://www.resdc.cn>) 下载获取。

(4) 土地利用与自然环境数据：包括土地利用现状、地貌类型、植被指数、植被类型、人口数量、土壤类型、土壤属性（砂粒、粉粒、黏粒含量）以及农田生产潜力等数据，同样来源于中国科学院资源环境科学数据平台。

(5) 地质图数据：采用中国地质调查局发布的中华人民共和国数字地质图，比例为 $1:50 \text{ 万}$ 。

在深入分析前，对二氧化硅新生体丰度、硅粉富集层的出现深度及厚度数据进行了严格的异常值筛查，并实施了描述性统计分析以及正态分布验证，以确保数据的准确性和可靠性。环境变量的选择是基于土壤发生学原理及 clorpt 模型，综合考虑了气候、地形、地质和生物等自然成土要素，同时引入人口数据以反映人为活动的影响。

具体栅格数据处理工作在 ArcMap 10.7 软件环境中完成，包括但不限于以下步骤：影像数据的格式转换，以确保数据的兼容性；按掩膜提取，以聚焦于研究区域；投影变换，确保所有数据集处于统一的地理坐标系统；以及重采样，以优化数据的空间分辨率。通过上述处理，获得了以下关键

变量: 距水流距离 (WTD)、坡向 (Asp)、坡度 (Slp)、土壤质地 (细分为粉粒 (Si)、砂粒 (Sa)、黏粒 (Cl) 含量)、海拔 (DEM)、地貌类型 (Lf)、地质构造 (Geo)、年均温度 (MAT)、年均蒸发量 (MAE)、年均地温 (MAG)、年均降水量 (MAP)、年均相对湿度 (MARH)、人口密度 (POP)、土壤类型 (ST)、农田生产潜力评估 (ALPP)、土地利用类型分类 (LUT)、归一化植被指数 (NDVI) 以及植被类型 (Veg) 分布。为了确保分析的一致性和精确性, 所有环境变量的栅格数据层均统一重采样至 1 km 像元大小, 该步骤对于后续的空间分析和模型构建至关重要, 它保证了不同来源、不同分辨率的数据能够在同一空间尺度上进行有效整合和比较分析。

1.4 建模与制图方法

本研究采用随机森林算法构建土壤属性与成土环境因子的定量关系模型, 通过优化节点分裂变量数 (mtry) 和决策树总数 (ntree) 参数, 以提升模型对复杂土壤-环境关系的模拟能力和变量重要性评估精度。为深入理解各环境因子在模型中的贡献, 本研究采用了两个关键指标: 在分类模型中, 平均减少基尼系数 (Mean decrease Gini) 衡量了排除某个特征后模型预测样本分布基尼系数的平均下降程度, 反映了该特征的重要性; 在回归模型中, 节点纯度增加值 (Inc node purity) 则量化了每个变量对节点观测值异质性的影响, 其值越大, 表明该变量对预测结果的贡献越高。本研究中的随机森林建模过程是在 R 语言环境下, 通过调用 Random Forest 包实现。该方法不仅提高了模型预测的准确性和稳定性, 还为深入理解土壤属性与环境因素之间的复杂关系提供了有力支持。

1.5 模型验证及评价指标

为确保模型的有效性和准确性, 本研究采用了严格的模型验证方法。具体地, 将总样本量的 80 % 用作训练集, 以构建和优化模型; 剩余的 20 % 则作为验证集, 用于评估模型的预测性能。这种划分方式有助于全面、客观地评价模型的泛化能力。对于随机森林分类模型, 本研究采用了混淆矩阵直观展示模型的分类效果, 并通过计算 Kappa 系数量化模型的一致性和准确性。Kappa 系数作为衡量分类模型性能的重要指标, 其值越接近 1, 表明模型预测结果与实际观测结果的一致性越高。

在随机森林回归模型的评估中, 引入了三个关键指标: 决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE), 以全面评估模型的预测精度和拟合效果^[8-9]。 R^2 取值范围为[0,1], 其值越大, 表明模型对数据的拟合效果越好。RMSE 衡量了模型预测值与实际观测值之间差异的平方和的平均值的平方根, 其值越小, 表明模型的预测精度越高。MAE 反映了模型预测值与实际观测值之间绝对差值的平均值, 同样地, 其值越小, 表明模型的预测效果越佳。

1.6 土壤制图的不确定性分析

鉴于土壤剖面采样点的数据有限性, 以及土壤属性在空间尺度上展现出的强随机性和高度变异性, 土壤制图过程中不可避免地会面临诸多不确定性因素。这些不确定性可能源于采样点的稀疏分布、土壤属性的自然变异, 以及数字土壤制图技术本身的局限性, 导致所制作的地图可能包含一定误差。同时, 基于各种模型算法进行的预测也会引入额外的不确定性。因此, 在利用评价指标对模型准确性进行验证的同时, 对空间不确定性的定量评估显得尤为重要, 它是评价地图实用性和准确性的关键一环。为了有效量化并可视化这种不确定性, 本研究采用了分位数回归森林方法。在构建模型时, 选取了最优参数配置, 并分别计算了制图区域在 5%、50%、95% 分位数下的预测结果。随后, 通过以下公式来计算不确定性值:

$$Q = \frac{P_{95} - P_5}{P_{50}} \quad (5)$$

式中, P_{95} 、 P_{50} 和 P_5 分别代表在 95%、50% 和 5% 分位数下的预测结果, 而 Q 表示量化的不确定性值。该指标能够直观反映预测结果的不确定性范围, 其值越低, 意味着模型的预测结果越为稳定可靠, 反之, 则表明预测结果存在较大的不确定性。通过这种方法, 不仅能够获得土壤属性的预测值, 还能同时获取这些预测值的不确定性范围, 从而为后续的分析 and 决策提供更加全面、准确的信息支持。

2 结果

2.1 硅粉富集层的丰度、密度、出现深度和厚度特征

本研究有 61 个土壤剖面出现了硅粉富集的层次,但因部分历史调查样点缺少容重数据,二氧化硅新生体密度的样点为 50 个(表 1)。研究区域内,二氧化硅新生体的丰度为 2%~40%,其平均值 13.05%。同时,二氧化硅新生体的密度为 132.8~611.9 g·dm⁻³,平均密度 297.4 g·dm⁻³。硅粉富集层的出现深度 5~103 cm,平均出现深度为 41.14 cm。此外,硅粉富集层的厚度变化显著,为 18~146 cm,平均厚度 55.4 cm。标准差和变异系数均呈现出较高的数值,这揭示了硅粉富集层的空间分布极易受周围环境因素的影响,且存在显著的空间差异。

表 1 硅粉富集层的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of the silica neoformation accumulation layer

	丰度 Content	密度 Density/(g·dm ⁻³)	出现深度 Occurrence depth/cm	厚度 Thickness/cm
数量 Number	61	61	61	61
最小值 Minimum	2%	132.7	5	18
最大值 Maximum	40%	611.9	103	146
平均值 Mean	13.05%	297.4	41.14	55.4
标准差 Standard deviation	11.67%	259.2	23.16	28.44
方差 Variance	1.362×10^{-2}	6.719×10^4	536.6	809.1
偏度 Skewness	1.08	1.01	0.76	0.88
峰度 Kurtosis	-0.09	-0.25	-0.36	0.81
变异系数 Coefficient of variation	0.89	0.87	1.78	1.95

2.2 硅粉富集层出现的区域特征

本研究将土壤剖面形态中含有二氧化硅新生体的土壤层次称为硅粉富集层(图 2),利用分类随机森林模型,对辽宁省 333 个样点进行硅粉富集层的潜在分布区域预测制图,具体结果见图 3。该模型的预测性能通过 kappa 系数进行评估,其值为 0.42,表明模型在预测硅粉富集层分布方面具有一定的准确性和可靠性。就预测制图结果而言,硅粉富集层主要集中分布在辽宁省的沈阳市、铁岭市、抚顺市、本溪市、丹东市以及朝阳市。这些区域由于气候条件和地质构造的综合作用,形成了有利于硅粉富集的地质环境。相比之下,在大连市、鞍山市、营口市、辽阳市、阜新市以及葫芦岛市等地,硅粉富集层的存在相对较少,但仍有一定的分布。通过对预测结果的进一步量化分析,得出硅粉富集层存在的区域面积约为 4 261 km²。可见,辽宁省硅粉富集层的分布特征呈现出明显的地域性差异,主要分布在特定的地质构造带和气候条件下。

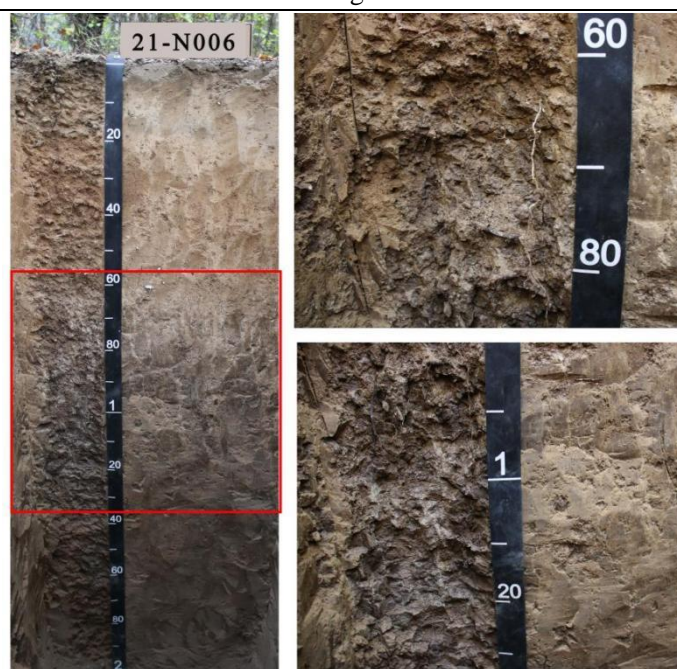


图 2 典型硅粉富集层

Fig. 2 Typical silica neoformation accumulation layer

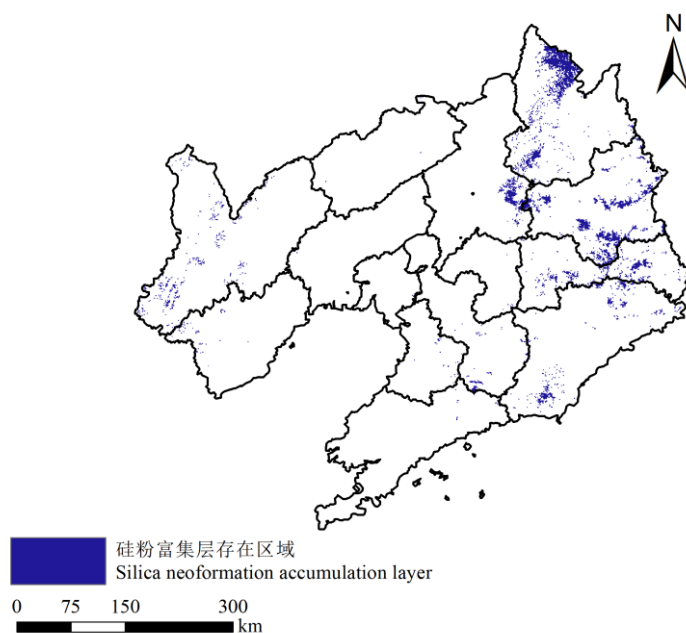


图 3 硅粉富集层存在区域预测图

Fig. 3 Prediction map of regions where the silica neoformation accumulation layer exists

2.3 硅粉富集层的空间分布特征

辽宁省二氧化硅新生体丰度的预测结果见图 4a, 其中 R^2 为 0.60, RMSE 为 11.07, MAE 为 9.08。预测结果表明, 丰度值介于 6.66%~27.35%, 整体表现为中部地区较高, 而四周相对较低。具体而言, 高丰度区域主要集中在铁岭市南部和沈阳市东部, 而低丰度区主要分布在铁岭市北部、抚顺市东部及南部。其中, 辽宁西部和中部地区的不确定性值相对较低, 且分布均匀连续; 而东部地区存在部分高值区域, 北部地区的不确定性值最高 (图 4b)。

辽宁省二氧化硅新生体密度的预测结果见图 4c, R^2 值为 0.56, RMSE 为 296.6, MAE 为 243.2。

预测值介于 $132.7\sim 611.9\text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$, 整体呈现出中部地区密度较高, 而四周相对较低的趋势。高密度区域主要分布在铁岭市南部和沈阳市东部, 而低密度区出现在铁岭市北部、抚顺市东部及南部。辽宁省二氧化硅新生体密度不确定性值介于 $0.93\sim 12.67$ (图 4d)。其中, 辽宁西部和中部地区的不确定性值相对较低, 均匀连续分布; 东部地区存在部分高值区域, 北部地区的不确定性值最高。

辽宁省硅粉富集层出现深度的预测结果见图 4e, R^2 值为 0.74, RMSE 为 24.23, MAE 为 21.88。预测值 $21.06\sim 74.06\text{ cm}$, 整体表现为中部和北部地区较深、东西部地区较浅的趋势。深值区域主要集中在铁岭北部和南部、沈阳市东部及抚顺市西部, 而浅值区域分布在抚顺市东部和南部、本溪市中部、丹东市北部和南部。辽宁省硅粉富集层出现深度的不确定性值介于 $0.77\sim 5.44$ (图 4f)。东部地区的不确定性值相对较低, 但存在部分高值区域; 西部地区的不确定性值相对较高, 北部地区的不确定性值最高。

辽宁省硅粉富集层厚度的预测结果见图 4g, R^2 值为 0.57, RMSE 为 18.95, MAE 为 16.67。预测值的变化范围为 $31.78\sim 97.71\text{ cm}$, 整体呈现出东部较薄、中部和北部较厚的趋势。薄值区域主要位于抚顺市、本溪市和丹东市, 而厚值区域分布在铁岭市、沈阳市和朝阳市。辽宁省硅粉富集层厚度的不确定性值介于 $0.76\sim 5.29$ (图 4h)。北部地区的不确定性值相对较低且分布均匀连续; 西部地区的不确定性值相对很低, 但存在部分高值区域; 而东部地区的不确定性值最高。

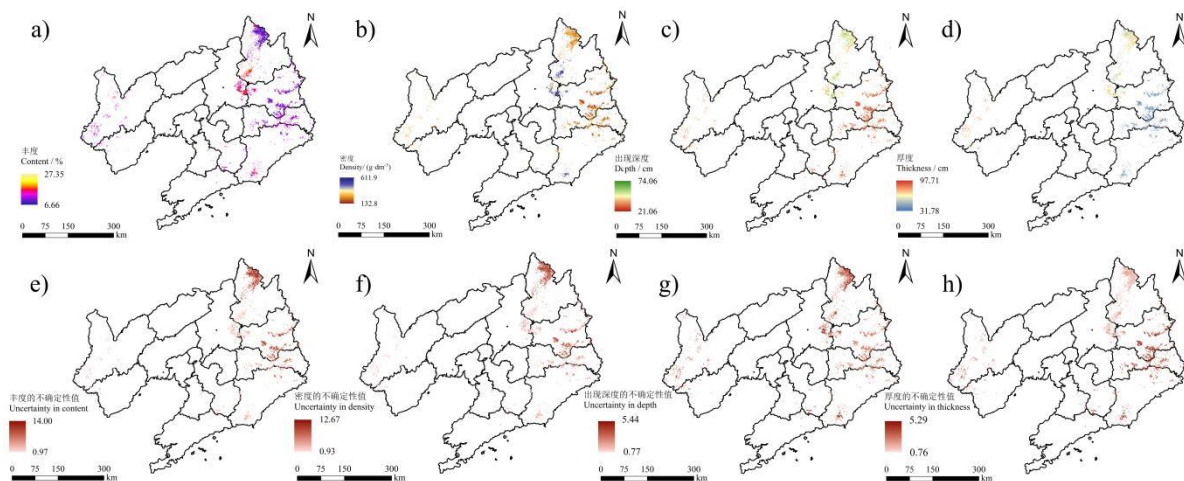


图 4 硅粉富集层的特性及其不确定性预测的分布 (a. 二氧化硅新生体丰度, b. 二氧化硅新生体的密度, c. 硅粉富集层的出现深度, d. 硅粉富集层的厚度, e. 二氧化硅新生体丰度的不确定性, f. 二氧化硅新生体密度的不确定性, g. 硅粉富集层出现深度的不确定性, h. 硅粉富集层厚度的不确定性)

Fig. 4 Characteristics and uncertainty distribution of the silica powder enrichment layer (a. abundance of silica neoforms, b. density of silica neoforms, c. occurrence depth of the silica neoformation accumulation layer, d. thickness of the silica neoformation accumulation layer, e. uncertainty of the abundance of silica neoforms, f. uncertainty of the density of silica neoforms, g. uncertainty of the occurrence depth of the silica neoformation accumulation layer, h. uncertainty of the thickness of the silica neoformation accumulation layer)

总体而言, 随机森林对辽宁省硅粉富集层的预测, 既能反映整体分布的空间变化趋势, 也能表现局部空间变异。二氧化硅新生体丰度、密度和硅粉富集层出现深度和厚度的预测结果的决定系数 (R^2) 分别达到 0.60、0.56、0.74 和 0.57, 模型对这四种特性的解释率均达到 50% 以上。其中, 硅粉富集层出现深度的预测精度最高 ($R^2=0.74$, RMSE=24.23, MAE=21.88), 而二氧化硅新生体密度的预测误差最大 (RMSE=296.60, MAE=243.23)。二氧化硅新生体丰度和硅粉富集层厚度的预测精度相近, R^2 分别为 0.60 和 0.57, 但前者的 RMSE 和 MAE 均低于后者。四种硅粉富集层特征预测结果中, 硅粉富集层出现深度取得了最好的预测效果, 二氧化硅新生体丰度和硅粉富集层厚度次之, 二氧化硅新生体密度预测结果的效果较低 (表 2)。

表 2 硅粉富集层特征的精度汇总

Table 2 Summary of the accuracy of characteristics of silica neoformation accumulation layer

硅粉富集层特征 ^①	R^2	RMSE	MAE
二氧化硅新生体丰度 ^②	0.60	11.07	11.07
二氧化硅新生体密度 ^③	0.56	296.6	243.2
硅粉富集层出现深度 ^④	0.74	24.23	21.88
硅粉富集层厚度 ^⑤	0.57	18.95	16.67

注: R^2 , 决定系数; RMSE, 均方根误差; MAE, 平均绝对误差。Note: R^2 , Coefficient of determination; RMSE, Root mean square error; MAE, Mean absolute error. ① Characteristics of silica neoformation accumulation layer, ② Abundance of silica neoforms, ③ Density of silica neoforms, ④ Occurrence depth of the silica neoformation accumulation layer, ⑤ Thickness of the silica neoformation accumulation layer.

2.4 硅粉富集层的影响因素

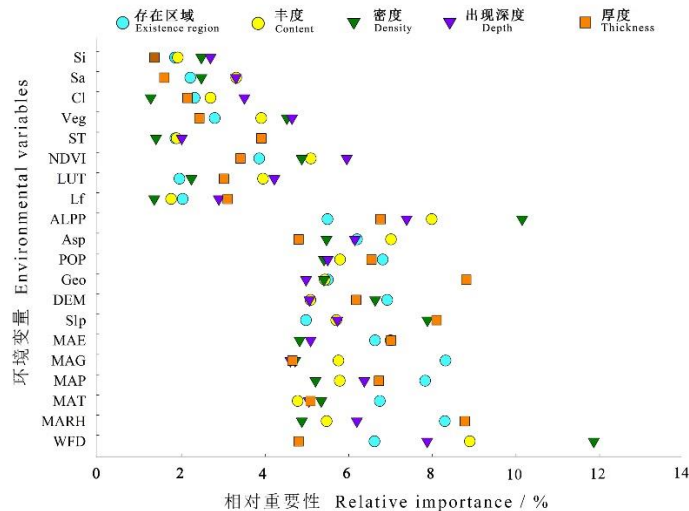
基于随机森林模型,对硅粉富集层出现及其特性(包括硅粉富集层存在区域、二氧化硅新生体丰度、二氧化硅新生体密度、硅粉富集层出现深度及硅粉富集层厚度)的多种影响因素进行了系统分析。图 5 直观展示了各影响因素的相对重要性排序,该排序依据平均减少基尼系数(Mean decrease Gini)和节点纯度增加值(Inc node purity)测量并综合计算得出。硅粉富集层存在区域模型的分析结果显示,年均地温以 8.36%的相对重要性高居榜首,与其余 11 个关键因素的相对重要性占比之和超过了 80%。这 11 个因素包括年均相对湿度(8.34%)、年均降水量(7.87%)、高程(6.92%)、人口数量(6.85%)、年均温(6.78%)、年均蒸发量(6.67%)、距水流距离(6.66%)、坡向(6.24%)、地质(5.54%)、农田生产潜力(5.53%)和坡度(5.02%)。而剩余 8 个指标的相对重要性均不足 4%。

二氧化硅新生体的丰度模型分析结果表明,距水流距离以 8.94%的相对重要性占居首位,与其他 11 个关键因素共同构成了超过 75%的重要性。这 11 个因素包括农田生产潜力(8.03%)、坡向(7.05%)、年均蒸发量(7.04%)、人口数量(5.83%)、年均降水量(5.82%)、年均地温(5.80%)、坡度(5.74%)、相对湿度(5.51%)、地质(5.47%)、归一化植被指数(5.13%)和高程(5.13%),而剩余 7 个指标的相对重要性均低于 5%。其中,二氧化硅新生体丰度与坡度($r=-0.26^*$, $P<0.05$, $n=61$)呈显著负相关。

二氧化硅新生体密度模型的分析结果表明,距水流距离以 11.90%的相对重要性位居首位,与其他 8 个关键因素共同占据了超过 63%的重要性比例。这 8 个因素包括农田生产潜力(10.19%)、坡度(7.92%)、高程(6.67%)、坡向(5.51%)、人口数量(5.45%)、地质(5.45%)、年均温度(5.38%)和年均降水量(5.24%)。而剩余 11 个指标的相对重要性均低于 5%。其中,二氧化硅新生体密度与坡度($r=-0.26^*$, $P<0.05$, $n=61$)呈显著负相关。

硅粉富集层出现深度模型的分析表明,距水流距离以 7.92%的相对重要性位居首位,与其他 11 个关键因素的相对重要性占比之和超过了 71%。这 11 个因素包括农田生产潜力(7.42%)、年均降水量(6.41%)、年均相对湿度(6.24%)、坡向(6.19%)、归一化植被指数(5.99%)、坡度(5.77%)、人口数(5.54%)、年均蒸发量(5.13%)、高程(5.10%)、年均温(5.09%)和地质(5.02%)。而剩余 9 个指标的相对重要性均低于 5%。

硅粉富集层厚度模型的分析结果显示,地质以 8.85%的相对重要性高居首位,与其他 11 个关键因素的相对重要性占比之和超过了 78%。这 11 个因素包括年均相对湿度(8.82%)、坡度(8.14%)、年均蒸发量(7.05%)、农田生产潜力(6.80%)、年均降水量(6.77%)、人口数量(6.58%)、高程(6.22%)、年均温(5.12%)、坡向(4.84%)、距水流距离(4.84%)和年均地温(4.69%)。而剩余 9 个指标的相对重要性均低于 4%。可见,各模型均揭示了不同因素在硅粉富集层出现及其特性形成中的关键作用。



注: WTD, 距水流距离; Asp, 坡向; Slp, 坡度; Si, 粉粒; Sa, 砂粒; Cl, 黏粒; DEM, 海拔; Lf, 地貌类型; Geo, 地质构造; MAT, 年均温度; MAE, 年均蒸发量; MAG, 年均地温; MAP, 年均降水量; MARH, 年均相对湿度; POP, 人口密度; ST, 土壤类型; ALPP, 农田生产潜力评估; LUT, 土地利用类型分类; NDVI, 归一化植被指数; Veg, 植被类型。
Note: WTD, Distance to waterbody; Asp, Aspect; Slp, Slope; Si, Silt; Sa, Sand; Cl, Clay; DEM, Elevation; Lf, Landforms; Geo, Geology; MAT, Mean annual temperature; MAE, Mean annual evaporation; MAG, Mean annual ground temperature; MAP, Mean annual precipitation; MARH, Mean annual relative humidity; POP, Population density; ST, Soil type; ALPP, Agricultural land potential productivity; LUT, Land use type classification; NDVI, Normalized difference vegetation index; Veg, Vegetation type.

图 5 硅粉富集层分布影响因素的相对重要性排序

Fig. 5 Ranking of the relative importance of influencing factors for the distribution of the silica neoformation accumulation layer

3 讨论

3.1 硅粉富集层的形成

在辽宁省, 硅粉富集层的形成是一个多因素交织、多因素相互作用的复杂地质过程, 其分布特征在阶地丘陵与山地地区展现出显著差异, 这主要归因于地下水动力学、气候条件、地形因素、母质类型、生物活动以及人为因素等多元条件的协同影响。地下水在此过程中扮演了至关重要的角色。本研究表明, 二氧化硅新生体的密度与距水流的距离呈现出显著的线性负相关关系($r=-0.35^*$, $P<0.05$, $n=50$), 这有力地证明了地下水动力学对硅粉富集层特征的深刻影响。具体地呈现出距水流距离小于 4.70 km 的区域因受地下水活动直接影响更显著, 易形成硅粉富集层。以沈阳东部为例 (图 6a), 其紧邻浑河, 地下水活动频繁且活跃^[19], 不仅携带大量溶解的硅酸盐在土壤中迁移, 还显著地促进了硅粉富集层的深厚发育, 使得二氧化硅新生体在此区域呈现出高丰度与高密度聚集的特征。该现象与杨岫青和孙杉^[20]的研究成果相吻合, 进一步证实了地下水作为硅质物质迁移重要媒介的关键作用。同时, 随着阶地的抬升, 土壤中的可溶性硅在地下水的作用下经历脱水重结晶过程, 逐步转化为二氧化硅粉末新生体。相比之下, 抚顺地区 (图 6b) 因地势高耸, 地下水的影响相对有限, 其硅粉富集层特征表现为浅薄且二氧化硅新生体的丰度与密度均较低, 该差异符合 Абрамович^[21]地下水学说的预测。

气候条件对硅粉富集层的分布同样具有深远影响, 且其影响方式复杂多变^[22], 呈现出复杂的非线性关系, 体现了气候在多元因素系统中的重要性。辽宁省位于温带季风气候区, 四季分明, 东部湿润的气候条件为硅粉富集层的形成提供了有利条件。研究表明, 年均地温 (5.08~12.61 °C)、年

均相对湿度(52.49%~74.61%)、年均降水量(412.1~1 522 mm)、年均温度(2.25~10.56 °C)、年均蒸发量(1 036~1 260 mm)等气候参数共同构成了硅粉富集层形成的适宜环境阈值范围。沈阳东部较高的年均蒸发量、气温和地温加速了硅酸盐矿物的风化,释放出更多硅质物质进入水体。特别是在冬季,土壤温度降至冰点以下,冻层逐渐形成并增厚。而到了春季融化期,随着气温的回升,冻土层成为阻碍水分下渗的天然屏障,导致融化层与冻土层界面处土壤水分达到饱和状态,进而促进了可溶性硅的向上迁移并重结晶为二氧化硅粉末新生体。

地形因素,尤其是坡度,与硅粉富集层的特征之间存在着紧密的关联。二氧化硅新生体的丰度与坡度呈现出显著的线性相关关系($r=-0.26^*$, $P<0.05$, $n=61$),这充分说明了坡度变化对硅粉迁移和沉积过程的直接影响。研究显示,坡度在 $0^{\circ}\sim 37.68^{\circ}$ 范围内的区域最有利于硅粉富集层的形成。硅粉富集层更倾向于分布在坡中下部区域,坡度的增加促进了横向径流和干湿循环的加速,从而加速了硅粉向低处迁移并沉积的过程。而平缓的坡度则有利于硅粉在土壤中均匀分散和积累,该发现与Somerville等^[23]关于高程和坡度与富集硅粉的脆磐层关系的研究结果高度一致。此外,坡向通过影响太阳辐射的接收量,间接调控着土壤的温湿度及植被覆盖状况,进而对硅粉的迁移和积累产生深远影响。

母质作为土壤形成的基础物质,其矿物组成直接决定了硅的释放潜力。富含硅酸盐矿物(如长石、云母)的母质在风化过程中易释放硅元素,从而增加土壤中的硅含量。沈阳地区以玄武岩为主,其风化速率显著高于抚顺地区的花岗岩和片麻岩,这为硅粉富集层的形成提供了极为有利的条件。而母质中难风化的硅质矿物(如石英)对土壤硅的贡献则相对有限。在此基础上,本研究中关注的黄土或黄土状物质母质,因其富含易风化的硅酸盐矿物、疏松多孔的结构以及强烈的侵蚀作用,展现出更强的硅元素释放能力。这些特性共同促进了土壤中硅含量的显著提升,为硅粉富集层的形成创造了极为有利的条件,进一步揭示了母质类型在土壤硅循环及硅粉富集层发育中的关键作用。

生物因素对硅粉富集层的影响同样不容忽视。植物通过吸收土壤中的硅元素,在其死亡后,植物残体中的硅元素会归还给土壤并淀积在土壤表层^[24-25]。抚顺地区NDVI指数较高,植被覆盖度相对较好,随着季节的更替,大量植物残体残留在土体内并发生矿化作用,该过程不仅补偿了土壤矿质成分的淋溶损失,还促进了硅元素的累积^[26-27]。其中,植物残体矿化产生的可溶性硅在干湿交替和氧化还原过程中发生淋溶淀积作用,逐步形成二氧化硅粉末新生体。该发现与唐耀先等^[28]关于辽宁省浑河以东地区受生物富集作用形成二氧化硅粉末新生体的结论相吻合。



图 6 沈阳地区实地调查照片(a)、抚顺地区实地调查照片(b)和抚顺市草市镇粘泥岭村实地调查照片(c)

Fig. 6 Photographs of on-site investigations in Shenyang area (a), in Fushun area (b) and in Nianniling Village, Caoshi Town, Fushun City (c)

人为因素通过多种途径对硅粉在环境中的分布产生深远的影响。在农业生产中广泛使用的氮、磷、钾肥料可显著提高土壤的营养水平,进而刺激初级生物生产活动,导致植物中总硅储量增加。此外,土地利用方式的变化,如湿地排干以及农田灌溉方式的改变等,均会对硅的溶解、迁移和积累过程产生显著影响。实地调查结果显示,抚顺市草市镇粘泥岭村耕地由水田转变为旱田后,尽管转变时间较短,但由于该地区降水量丰富且地下水位相对较浅,土壤剖面中呈现出明显的潜育特征并伴有硅粉的出现。该发现充分凸显了人为活动对硅粉富集层形成的潜在影响(图6c)。因此,在探

讨硅粉富集层的形成机制时, 必须综合考虑各种人为活动的潜在影响。

可见, 在辽宁省的不同区域, 硅粉富集层的分布呈现出显著的区域特征规律。在具备适宜水热条件且富含硅酸盐矿物的母质区, 硅质迁移-富集过程显著增强。典型表现为浑河阶地丘陵区(如沈阳东部), 由于地下水周期性波动、适中的地形坡度及良好的排水条件, 形成了较厚的硅粉富集层, 其二氧化硅新生体丰度高、密度大(图3)。相反, 在辽东山地抬升区(如抚顺), 受限于较高的地势和坡度、弱地下水影响及较低的气温, 硅的淋溶量小, 且淋溶和沉积的深度浅薄, 硅粉富集层较浅薄, 二氧化硅新生体丰度低、密度小(图3)。同时, 母质矿物组成、生物循环以及人为活动也在不同程度上加剧了这种区域差异, 共同塑造了辽宁省硅粉富集层复杂而多样的区域分布特征。

3.2 硅粉富集层对区域发展的影响与应对策略

硅粉富集层通常较紧实, 若出现的深度较浅, 对作物根系的深入穿透与扩展构成了显著障碍。其存在对农业和土地管理有重大影响, 对农业生产构成严峻挑战。此外, 硅粉富集层还削弱了土壤的水分保持性能, 导致土壤易于干燥, 进一步加剧了作物吸收水分的难度。在易受干旱影响的气候条件下, 长期的水分不足会严重抑制作物生长, 降低产量; 而水分过多时, 又可能导致土壤养分与硅元素的大量淋失, 因此, 维持土壤水分的适度平衡显得尤为重要。针对硅粉富集层带来的上述挑战, 必须依据当地的具体特征, 包括硅粉富集层的厚度、气候条件以及土壤类型, 精心设计并实施相应的应对策略。对于硅粉富集层较为浅薄的区域, 建议采取深翻土壤等物理措施, 以有效降低表层土壤的紧实度, 为作物根系创造更为有利的生长环境。而在硅粉富集层深厚、难以直接改良的地区, 则应着重于构建科学合理的灌溉与排水系统, 通过精准调控土壤水分, 避免土壤出现过湿或过干的极端状态, 保障作物的健康生长。除此之外, 调整作物种植模式也是一项有效的改良措施。通过优化作物布局, 引入耐逆境、适应性强的作物品种, 以及实施轮作、间作等多样化种植策略, 不仅可改善土壤生态环境, 还能促进土壤养分的循环与平衡, 从而在一定程度上缓解硅粉富集层对农业生产的不利影响。综上所述, 建议通过综合运用以上物理改良、水利调控与农业管理措施, 有效应对硅粉富集层带来的挑战, 促进辽宁省农业的可持续发展。

考虑到土壤这一自然历史综合体, 区域空间变异的复杂性, 现有的模型预测精度能够满足研究中对硅粉富集层空间分布的探索需求。若要进一步提高精度, 需要考虑成土过程的复杂性, 并解决样点分布密度、环境变量分辨率的局限性问题。未来可引入其他机器学习模型进行对比分析, 验证模型结果的稳健性, 并结合遥感技术和地面观测, 开展硅粉富集层形成的长期动态监测, 进一步提升结果的预测精度。

4 结 论

本研究系统地探究了辽宁省硅粉富集层的地理分布、特性预测及形成机制, 并提出了针对性的改良措施。具体结论如下: (1) 界定了硅粉富集层在辽宁省的地理分布范围, 主要集中在沈阳市、铁岭市、抚顺市、本溪市、丹东市及朝阳市, 总面积约达 4 261 km²。不同区域的硅粉富集层的形成与分布呈现出显著的区域特征。(2) 揭示了硅粉富集层特性受多种因素共同影响, 通过系统分析, 确定了硅粉富集层形成的多参数阈值: 气候条件方面包括年均地温 5.08~12.61 °C、年均相对湿度 52.49%~74.61%、年均降水量 412.1~1 522 mm、年均气温 2.25~10.56 °C 以及年均蒸发量 1 036~1 260 mm; 地质水文条件方面包括距水流距离小于 4.70 km、坡度 0°~37.68°; 母质条件需富含硅酸盐矿物。当这些参数组合满足上述区间时, 区域内就更易出现硅粉富集层。这体现了硅粉富集层形成机制的复杂性和多元性。(3) 针对硅粉富集层的改良问题, 提出了深耕翻土、构建科学灌溉与排水系统、推广轮作间作等切实可行的措施。这些措施为辽宁省硅粉富集层的合理利用与改良提供了科学依据和实践指导, 有助于全面提升土地质量。

参考文献 (References)

- [1] Zhang X Y, Liu X B. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 340-344. [张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 340-344.]
- [2] Zhang Z Y. The Mollisols of Northeast China [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011, 23(6): 1-4. [张之一. 中国东北地区的暗沃土[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 23(6): 1-4.]
- [3] Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 96-106. [刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96-106.]
- [4] Song X W, Zhang B C, Bai Y, et al. Application and review of biotechnology in promoting protective utilization of black soil [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(12): 1488-1496. [宋显伟, 张保才, 白洋, 等. 生物技术助力黑土地保护性利用的应用与思考[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(12): 1488-1496.]
- [5] Wang Q B, Han C L, Sun F J, et al. Soil series of China: Liaoning volume [M]. Beijing: Science Press, 2020. [王秋兵, 韩春兰, 孙福军, 等. 中国土系志·辽宁卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [6] Lü Z S, Xu Q. Several key issues in the research on the process of soil albic horizon formation [J]. Progress in Soil Science, 1991(6): 11-16, 43. [律兆松, 徐琪. 关于土壤白浆化过程研究的若干问题[J]. 土壤学进展, 1991(6): 11-16, 43.]
- [7] Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling [M]. Beijing: Science Press, 2022. [张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2022.]
- [8] Dong F J, Zhang Z B, Jiang F H, et al. Spatial distribution of the buried depth and thickness of albic soil albic layer in Sanjiang Plain and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 362-374. [董芳瑾, 张中彬, 蒋发辉, 等. 三江平原白浆土白浆层埋深与厚度空间分布格局及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 362-374.]
- [9] Bai L M, Li Y Y, Wang M Z, et al. Spatial distribution characteristics and impact factors of cumelic epipedon thickness in Lou soil of Guanzhong Region in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 757-766. [白丽敏, 李媛媛, 王铭铕, 等. 关中壤土堆垫层厚度空间分布特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 757-766.]
- [10] Pang L H, Liu F, Zhao X, et al. Digital mapping of topsoil attributes in Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 505-513. [庞龙辉, 刘峰, 赵霞, 等. 青海省表层土壤属性数字制图[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 505-513.]
- [11] Liu K, Dai H M, Liu G D, et al. Organic carbon content-baesd prediction and influencing factors of black soil layer thicknesses [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1368-1376. [刘凯, 戴慧敏, 刘国栋, 等. 基于土壤有机碳含量的黑土层厚度预测及影响因素分析[J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1368-1376.]
- [12] Zhang S, Liu G, Chen S L, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in Northeast China using random forest and field observations [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 49-57.
- [13] Jiang Y Y, Tang J Y, Sun Z X. Study on the factors affecting the humus horizon thickness in the black soil region of Liaoning Province, China [J]. Agronomy, 2024, 14(9): 2106.
- [14] Luo B, Mao D H, Zhang J P, et al. Fine classification of urban wetlands based on Sentinel-1/2 images and random forest classification in the built-up area of Haikou [J]. Scientia Geographica Sinica, 2025, 45(2): 389-402. [罗滨, 毛德华, 张金萍, 等. 基于 Sentinel-1/2 影像和随机森林的海口市建成区城市湿地精细分类[J]. 地理科学, 2025, 45(2): 389-402.]
- [15] Du Q, Wang Y, Wan Z L, et al. The spatial distribution characteristics of soil carbon in typical frozen soil areas of Huzhong based on random forest model [J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 100-107. [杜倩, 王岩, 万祖梁, 等. 基于随机森林模型的呼中冻土区土壤碳空间分布特征[J]. 森林工程, 2025, 41(1): 100-107.]
- [16] Wang X P, Wang C K, Sun H J, et al. Construction of pedotransfer function for predicting soil bulk density in cultivated land of Northeast China using random forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 970-982. [王晓盼, 王昌昆, 孙海

- 军, 等. 基于随机森林的黑土地尺度耕地土壤容重传递函数构建[J]. 土壤学报, 2025, 62(4): 970-982.]
- [17] Li H X, Shi Y, Shen A H, et al. Research on the classification of micro-terrain in the alluvial fan of Helan Mountains east foot based on random forest algorithm [J]. Quaternary Sciences, 2025, 45(1): 178-190. [李红霞, 石云, 沈爱红, 等. 基于随机森林算法的贺兰山东麓洪积扇微地形分类研究[J]. 第四纪研究, 2025, 45(1): 178-190.]
- [18] National Soil Survey Office. Chinese soil species. Volume 2.[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994. [全国土壤普查办公室. 中国土种志-第二卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.]
- [19] Jiang Y Y, Sun Z X, Liu S, et al. Construction and application of the phaeozem health evaluation system in Liaoning Province, China[J]. Agronomy, 2024, 14(8): 1754.
- [20] Yang X Q, Sun S. The distribution of siliceous hydrogen carbonate type water in Cenozoic basalt of China and its mechanism of formation [J]. Journal of Hebei GEO University, 1988, 11(1): 45-58. [杨岫青, 孙杉. 中国新生代玄武岩含硅酸重碳酸型水的分布及形成机制[J]. 河北地质学院学报, 1988, 11(1): 45-58.]
- [21] Абрамович К В ed. Chen E J, et al. trans. Introduction to soil and natural conditions in China [M]. Beijing: Science Press, 1960. [B.A.柯夫达 著. 陈恩健, 等 译. 中国之土壤与自然条件概论[M]. 北京: 科学出版社, 1960.]
- [22] Sun Z X, Zhang C C, Dong J L, et al. Climate change and agriculture—Sustainable plant production [J]. Agronomy, 2024, 14(6): 1236.
- [23] Somerville H, Ramsey R C, McCauley M, et al. Topography and drainage effects on loess-derived fragipan horizon morphology, physical and chemical properties in western Kentucky and USA [J]. Catena, 2024, 245: 108274.
- [24] Jiang Y Y, Sun Z X, Zheng Y B, et al. Establishing a soil health assessment system for quaternary red soils (luvisols) under different land use patterns [J]. Agronomy, 2023, 13(8): 2026.
- [25] Jiang Y Y, Sun Z X, Wang R M, et al. A quantitative reconstruction of nutrient changes of quaternary red soils (luvisols) affected by land-use patterns [J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2386.
- [26] Zhang C C, Sun Z X, Jiang Y Y, et al. Accelerated iron evolution in quaternary red soils through anthropogenic land use activities [J]. Agronomy, 2024, 14(8): 1669.
- [27] Duan S Y, Sun Z X, Wang Q B, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution of quaternary red soils under different land use patterns [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1078-1084. [段斯译, 孙仲秀, 王秋兵, 等. 不同土地利用方式下第四纪古红土有机碳分布特征研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1078-1084.]
- [28] Tang Y X, Xu X C, Jiang Y C, et al. Study on the basic properties and water-heat dynamics of brown soil in Shenyang area [J]. Journal of Shenyang Agricultural College, 1979(2): 1-9. [唐耀先, 须相成, 蒋玉超, 等. 沈阳地区棕壤的基本性质和水、热动态的研究[J]. 沈阳农学院学报, 1979(2): 1-9.]

(责任编辑: 陈荣府)