

DOI: 10.11766/trxb202509040439

CSTR: 32215.14.trxb202509040439

林子宜, 吴华勇, 宋效东, 赵玉国, 张甘霖. 松嫩平原北部典型黑土区耕地土壤酸度特征及其主控因素[J]. 土壤学报, 2026,
LIN Ziyi, WU Huayong, SONG Xiaodong, ZHAO Yuguo, ZHANG Ganlin, . Characteristics of Cultivated Land Soil Acidity and Main
Controlling Factors in the Typical Black Soil Region of Northern Songnen Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

松嫩平原北部典型黑土区耕地土壤酸度特征及其主控因素*

林子宜^{1,2}, 吴华勇^{1,2,3†}, 宋效东^{1,2}, 赵玉国^{1,2}, 张甘霖^{1,2}

(1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 松嫩平原北部典型黑土区土壤酸化问题突出, 制约区域农业可持续发展。探究松嫩平原北部典型黑土区耕地土壤 pH 和交换性酸度特征及其影响因素, 为土壤酸化分区分类调控施策提供科学依据。本研究以黑龙江省北安市和五大连池市耕地表层土壤(0~20 cm)为对象, 采集了 119 个样点的土壤样品, 测定了土壤酸度及其相关土壤性质, 收集整理了相关环境和人为因素数据, 运用皮尔逊相关性分析和随机森林模型, 结合土壤酸碱缓冲理论, 探究了影响土壤 pH 和土壤交换性酸(土壤交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+}) 含量空间变异的主控因素。研究发现, 该研究区耕地表层土壤以强酸性和酸性土壤为主, 土壤 pH 空间变异性低, 而土壤交换性酸含量空间变异性高。暗棕壤、黑土、沼泽土和草甸土土壤 pH 和交换性酸含量均无显著差异。皮尔逊相关性分析表明, 土壤 pH 与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量、黏粒含量和年均温呈极显著正相关, 与土壤有机质含量、粉粒含量、铝饱和度、年均降水量和高程呈极显著负相关; 土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 含量均与土壤有机质含量、粉粒含量、铝饱和度、年均降水量和高程呈极显著正相关, 与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量、黏粒含量和年均温呈极显著负相关。随机森林模型显示, 15 种影响因素对土壤 pH 和交换性酸空间变异的解释度分别为 83.69% 和 70.51%, 其中土壤因素对土壤 pH 和交换性酸的空间变异贡献最大(65.67%、55.10%), 年均降水量等环境因素次之(17.90%、13.87%), 人为因素对土壤 pH 和交换性酸的空间变异贡献微弱(0.12%、1.55%)。松嫩平原北部典型黑土区土壤高盐基饱和度和较多的长石矿物使土壤具有较高的酸缓冲能力, 这与典型红壤区土壤存在明显差异, 土壤酸度空间变异的主控因素为土壤交换性盐基离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 含量、铝饱和度和年均降水量。

关键词: 黑土; 土壤 pH; 土壤交换性酸; 土壤酸化; 随机森林模型

中图分类号: S153.4

文献标志码: A

Characteristics of Cultivated Land Soil Acidity and Main Controlling Factors in the Typical Black Soil Region of Northern Songnen Plain

LIN Ziyi^{1,2}, WU Huayong^{1,2,3†}, SONG Xiaodong^{1,2}, ZHAO Yuguo^{1,2}, ZHANG Ganlin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】 Soil acidification is a prominent issue in the typical black soil region of the northern Songnen Plain, which hinders the sustainable development of regional agriculture. Thus, exploring the characteristics of soil pH,

* 国家重点研发计划项目(2023YFD1501001)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010100)和中国科学院南京土壤研究所自主部署项目(ISSASIP2209)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1501001), the Strategic Pioneering Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (No. XDA28010100) and the Self Deployment Project of the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No. ISSASIP2209)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hywu@issas.ac.cn

作者简介: 林子宜(2001-), 女, 黑龙江黑河人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理学和土壤地球化学研究。E-mail: linziyi@issas.ac.cn

收稿日期: 2025-09-04; 收到修改稿日期: 2025-12-19; 网络首发日期(www.cnki.net):

exchangeable acidity, and their influencing factors in the cultivated soils of the typical black soil region can provide a scientific basis for the zoning and classification of soil acidification improvement measures. 【Method】 In this study, surface soils of cultivated land in Bei'an City and Wudalianchi City, Heilongjiang Province, were taken as the research object. Soil samples from 119 soil sites were collected to determine soil acidity and related soil properties, while data on relevant environmental and anthropogenic factors were collected. Pearson correlation analysis and random forest model were used, combined with the theory of soil acid-base buffering, to explore the main controlling factors affecting the spatial variation of soil pH, exchangeable H^+ , and exchangeable Al^{3+} contents. 【Result】 The results showed that the surface soils of cultivated land in the study area were dominated by strongly acidic and acidic soils. The spatial variability of soil pH was low, while the spatial variability of soil exchangeable acid content was high. There were no significant differences in soil pH and exchangeable acidity contents between dark brown soils, black soils, marsh soils, and meadow soils. Pearson correlation analysis indicated that soil pH was extremely significantly and positively correlated with the contents of exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} , clay fractions, and mean annual temperature, and significantly negatively correlated with soil organic matter content, silt content, aluminum saturation, mean annual precipitation, and elevation. Soil exchangeable H^+ and Al^{3+} contents were extremely significantly and positively correlated with soil organic matter content, silt content, aluminum saturation, mean annual precipitation, and elevation, and extremely significantly and negatively correlated with the contents of exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} , clay fractions, and mean annual temperature. The random forest model showed that the 15 influencing factors explained 84.38% and 71.61% of the variations in soil pH and exchangeable acids, respectively. Among these factors, soil factors contributed the most (65.67% and 56.19%), followed by environmental factors such as annual average precipitation (18.57% and 13.87%), whereas the contribution of anthropogenic factors was negligible with respect to the spatial variation of soil pH and exchangeable acid (0.14% and 1.55%). 【Conclusion】 The typical black soil region in northern Songnen Plain has a high acid buffering capacity due to its high base saturation and abundant feldspar minerals, which is significantly different from the soil in typical red soil regions. The main controlling factors for the spatial variation of soil acidity are soil exchangeable base ions (Ca^{2+} and Mg^{2+}) contents, aluminum saturation, and annual average precipitation.

Key words: Black soil; Soil pH; Soil exchangeable acid; Soil acidification; Random forest model

我国东北黑土地总面积 109 万 km^2 , 其中典型黑土地耕地面积 2.78 亿亩, 是我国最重要的商品粮基地^[1]。东北黑土地经过半个多世纪的大规模垦殖后, 出现了变薄、变瘦、变硬、变酸等多种土壤退化问题。近年来, 黑土层变薄、变瘦、变硬的问题受到了广泛关注, 而黑土层变酸的问题较少引起关注。土壤酸化会伴随土壤盐基离子和无机碳损耗, 活化土壤铝离子和有毒重金属元素, 造成植物毒害、作物减产以及生态环境破坏^[2-6]。因此, 深入开展土壤酸化成因研究对于防控黑土区土壤酸化具有重要意义。

近 20 年来, 有零星研究从区域和田块尺度报道了东北黑土区土壤酸化问题。在区域尺度上, 基于机器学习模型和调查数据研究发现, 整个东北黑土地耕地表层 (0~30 cm) 土壤 pH 均值从 1980 年的 6.83, 下降至 2023 年的 6.43, 43 年来下降 0.40 个单位^[7]。基于卫星遥感综合反演技术研究发现, 吉林省德惠市黑钙土耕层 (0~20 cm) 土壤 pH 在 2005—2016 年间下降约 0.50 个单位^[8]。基于 2005 年与 2014 年两期数据 (各 80 个样本) 对比研究发现, 松嫩平原北部黑土耕层 (0~20 cm) 土壤 pH 降低量在不同作物种植系统间存在显著差异, 其中玉米连作系统降低量为 0.30 个单位, 大豆与玉米轮作系统降低量为 0.25 个单位, 大豆连作系统降低量为 0.16 个单位^[9]。在田块尺度上, 黑龙江省哈尔滨市黑土长期定位试验研究发现, 长期大量施用氮肥 (尿素) 导致黑土耕层 (0~20 cm) 土壤 pH 从 1979 年的 7.22 下降至 2006 年的 5.70, 27 年来下降 1.52 个单位^[10]。基于黑龙江省海伦市黑土长期定位试验研究发现, 长期施用化肥导致玉米连作、大豆连作、玉米与大豆轮作系统黑土耕层 (0~20 cm) 土壤初始 pH (6.80) 在 2013—2022 年间下降 0.19~0.97 个单位^[11]。相比于我国东北黑

土区,近 40 年来,南方红壤区土壤酸化问题的相关研究较为充分^[12-14]。例如,在区域尺度上,红壤和黄壤区经济作物系统和谷物作物系统的表层土壤 pH 均值自 1980s 至 2000s 分别下降 0.23 和 0.30 个单位,氮肥的施用和作物的移除是主要驱动因素,酸沉降的作用相对较小^[2]。典型赤红壤区表层土壤 pH 均值在 2005—2020 年间下降了 0.68 个单位,土地利用变化和土壤母质差异起到了关键作用^[15]。在田块尺度,湖南祁阳红壤长期定位试验发现,与长期不施肥对照相比,氮磷钾配施处理使表层土壤 pH 从 1990 年的初始 pH 5.7,下降至 2008 年的 4.5,18 年来下降 1.2 个单位^[16]。

尽管已有研究初步查明了黑土区土壤的酸化特征,将酸化成因主要归结于人为因素,包括过量氮肥施用、作物盐基离子移除等因素,但很少关注气候、地形等成土环境因素,以及土壤有机质、交换性盐基、机械组成、矿物组成等具有缓冲酸碱能力的土壤因素。目前,鲜有研究量化人为因素、环境因素、土壤因素对土壤酸度特征变化的相对贡献,而量化三者的相对贡献,有助于区分自然和人为因素对质子产生和消耗的影响,可为深入理解黑土区土壤酸化原理、分区分类研发土壤酸化改良技术和制定土壤酸化管理措施提供科学支撑。

松嫩平原纵跨黑龙江省、吉林省和内蒙古自治区^[17],本研究中松嫩平原北部是指松嫩平原位于黑龙江省的区域,包括北安市、五大连池市等 46 个县(市、区),主要的土壤类型包括暗棕壤、黑土、草甸土、沼泽土等。本研究以松嫩平原北部典型黑土区北安市和五大连池市为研究区,系统采集了 119 个样点的耕地表层土壤样品,样点覆盖了研究区主要土壤类型,以及大豆、玉米等主要种植作物类型,测定了土壤酸度及相关理化性质,收集整理了气候、地形等成土环境因素数据,以及作物种植类型和年限、累计氮肥施用量等人为因素数据。通过线性和非线性相关分析方法,结合土壤酸碱缓冲理论,明确了典型黑土区耕地表层土壤酸度特征,量化了土壤酸度空间变化的关键驱动因素及其相对贡献率。研究成果可为制定黑土区耕地土壤酸化防控策略提供关键科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为松嫩平原北部的北安市和五大连池市,其位于黑龙江省中北部、小兴安岭西南麓,地理坐标介于 47°35'~49°12'N、125°42'~127°53'E 之间(图 1)。以山地、丘陵为主,属于中温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷漫长,夏季温暖短促。无霜期较短,年平均气温较低,年平均降水量丰富,且降水主要集中在夏季,冬季以降雪为主。两市是世界四大珍贵黑土带之一的松嫩平原向兴安山地过渡的中间地带,土壤类型以暗棕壤、黑土、草甸土、沼泽土为主。研究区耕地类型主要为旱地,为了维持土壤肥力、提高作物产量,大部分耕地采用轮作制,一年一熟,主要种植的作物为玉米、大豆等。

1.2 土壤样品采集与室内分析

本研究利用网格法布设北安市和五大连池市耕地样点共 119 个(图 1),样点密度约为每 10 万亩耕地 1 个样点。于 2024 年 4 月在每个耕地样点所处地块,利用不锈钢土钻,按梅花法采集 5 个点混合的表层土壤样品(0~20 cm)。土壤样品于室温下风干,去除根茬等杂物后,研磨后过 2 mm 和 0.25 mm 筛,测定土壤 pH、有机质、交换性酸、交换性 H⁺、交换性盐基离子、机械组成、矿物组成等指标,并计算土壤交换性 Al³⁺、交换性盐基总量、有效阳离子交换量、盐基饱和度、铝饱和度。

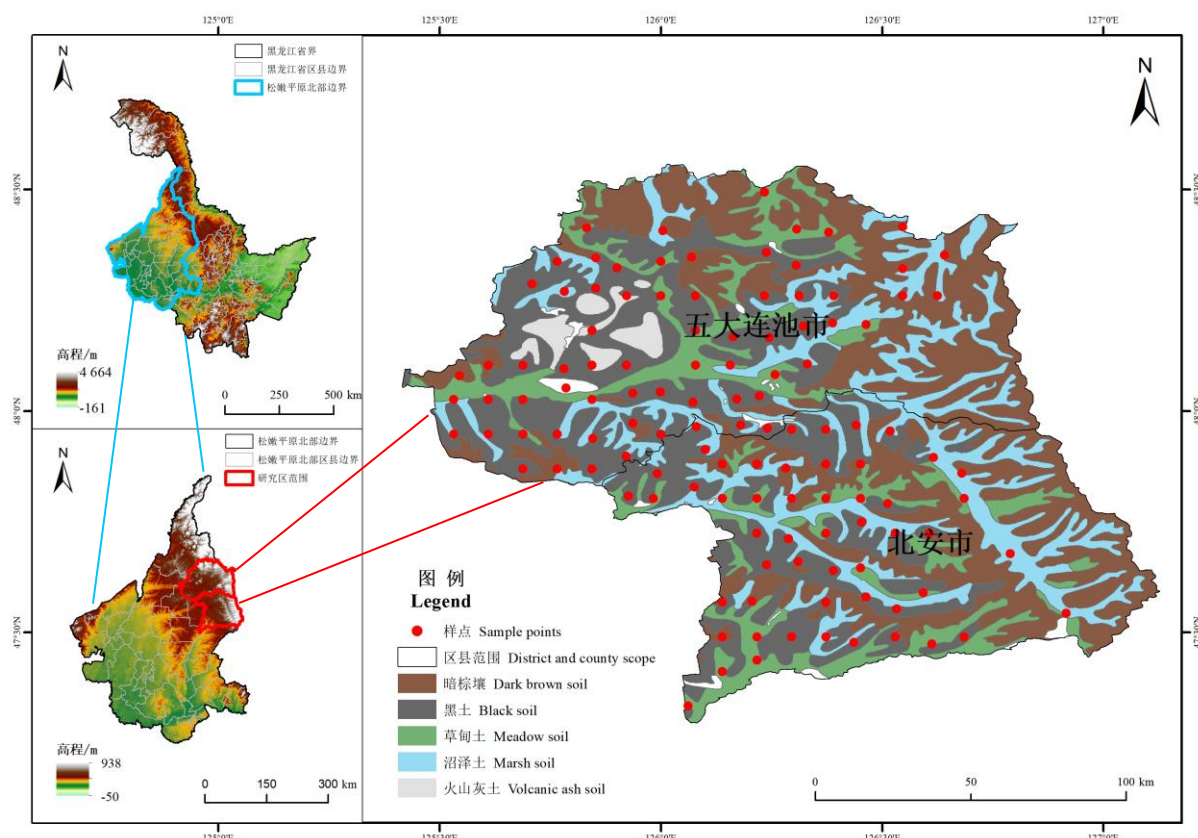


图 1 研究区地理位置及样点分布图

Fig. 1 Map of study area and sampling points distribution

土壤样品常规理化分析参照《土壤调查实验室分析方法》^[18], 土壤 pH 测定采用水浸提电位计法 (土水比 1:2.5); 土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定; 机械组成采用吸管法测定; 土壤交换性 K^+ 、 Na^+ 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵交换-火焰光度法测定; 土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法测定; 土壤交换性酸、交换性 H^+ 采用氯化钾交换-中和滴定法测定。基于土壤类型的代表性, 从 119 个土壤样点中, 选取 4 种土壤类型, 包括暗棕壤、黑土、草甸土、沼泽土, 每种土壤类型 3 个样点, 共选择 12 个样点的土壤样品, 采用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku, Ultima IV) 进行土壤矿物组成鉴定。利用沉降法将黏粒、粉粒、砂粒分开, 采用粉末衍射方法分别测定砂粒、粉粒的矿物组成, 采用定向片方法测定黏粒的矿物组成, 针对不同粒级组分, XRD 扫描范围均为 $0 \sim 60^\circ$ (2θ)。基于加权平均法, 半定量分析全土的矿物组成。

交换性盐基总量 (TEB)、有效阳离子交换量 (ECEC)、盐基饱和度 (BS) 和铝饱和度 (Al_{sat}), 按以下公式计算:

$$TEB(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) = K^+ + Na^+ + 1/2Ca^{2+} + 1/2Mg^{2+} \quad (1)$$

$$ECEC(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) = K^+ + Na^+ + 1/2Ca^{2+} + 1/2Mg^{2+} + H^+ + 1/3Al^{3+} \quad (2)$$

$$BS(\%) = TEB(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) / ECEC(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 100 \quad (3)$$

$$Al_{sat}(\%) = Al_{KCl}(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) / ECEC(\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 100 \quad (4)$$

1.3 数据来源与处理

本研究将影响土壤酸度 (土壤 pH、交换性酸) 特征的因素数据源分为三类。一是成土环境因素, 基于五大成土要素理论, 结合本研究区的实际, 即地形以山地和丘陵为主, 气候存在梯度变化, 而成土母质主要为黄土母质, 且成土时间难以量化, 故选择了气候和地形因素。二是人为因素, 根据前人研究, 结合研究区实际, 选择了累计氮肥施用量、种植作物类型及年限。三是土壤因素, 根据

土壤酸碱缓冲理论,从土壤机械组成、矿物组成及表面化学性质的角度选择了土壤相关因素。具体而言,环境因素的气候数据选择了年均降水量(1980—2023年)和年均温(1980—2023年),分辨率为1 km,数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)^[19];地形数据选择了高程和坡度,高程数据为全球数字高程模型(ASTER GDEM)数据,分辨率为30 m,基于高程数据在软件ArcGIS10.8中计算得到研究区的坡度(表1)。人为因素的作物种植年限数据(2013—2022年)来源于GEE遥感数据平台(<https://developers.google.cn>)^[20-22]。2013—2016年、2017—2019年、2020—2022年的数据分辨率分别为30 m、10 m、30 m,2023年的作物种植数据来源于采样点实地调查结果。根据不同类作物(玉米、大豆)种植年限和本研究野外调查的2023年玉米地和大豆地氮肥施用量数据,计算得到2013—2023年的大豆地和玉米地年均氮肥施用量以及累计氮肥施用量(表1)。土壤因素是本研究测定所得,包括土壤机械组成(砂粒、粉粒、黏粒含量)、矿物组成(原生和次生矿物类型和含量)和表面化学性质(交换性盐基、铝饱和度)。

表1 研究区环境因素和人为因素的特征

Table 1 Characteristics of environmental and anthropogenic factors in the study area

参数 Parameter	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
年均降水量 ^① /mm	420	493	449.21	13.28
年均温 ^② /°C	-0.2	2.5	0.96	0.63
高程 ^③ /m	186	437	300.08	48.40
坡度 ^④ /°	0.33	25.59	5.31	3.87
大豆种植年限 ^⑤ /a	0	11	8	2
年均氮肥施用量 ^⑥ / (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	123	192	149.09	33.60

①Mean annual precipitation (MAP), ②Mean annual temperature (MAT), ③Elevation, ④Slope, ⑤Soybean planting years, ⑥Annual average nitrogen fertilizer application rate

1.4 数据统计与分析

利用Excel 2021进行数据汇总整理;利用IBM SPSS Statistics 27进行描述性统计和线性相关分析,显著性水平设为 $P<0.05$;利用R软件Random Forest包进行随机森林模型运算,分析土壤、环境和人为因素变量对土壤pH和交换性酸变异的相对重要性;利用Origin 2024进行图表绘制。

2 结果

2.1 耕地表层土壤酸度特征

根据《中国土壤》^[23]中的土壤pH分级方法进行分类,研究区内耕地表层土壤pH分布在4.91~5.81之间,平均值为 5.43 ± 0.19 ,强酸性土壤($4.5<pH\leq5.5$)占比为68.9%,酸性土壤($5.5<pH\leq6.5$)占比为31.1%。土壤pH变异系数为3.43%,分布较为均匀,离散程度较小。

研究区内耕地表层土壤交换性 H^+ 含量为0.00~0.54 cmol·kg⁻¹,平均含量为0.09 cmol·kg⁻¹,24.37%的样点土壤交换性 H^+ 低于检测限;交换性 Al^{3+} 含量为0.00~5.19 cmol·kg⁻¹,平均含量为0.32 cmol·kg⁻¹,35.29%的样点土壤交换性 Al^{3+} 低于检测限。土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 变异系数分别为115.1%和220.2%,均表现为高强度变异。

将样点按土壤类型分组比较发现,黑土($n=67$)、草甸土($n=20$)、沼泽土($n=13$)和暗棕壤($n=16$)土壤pH均值分别为5.46、5.41、5.36和5.35(图2a),土壤交换性 H^+ 含量分别为0.080、0.083、0.14和0.09 cmol·kg⁻¹(图2b),土壤交换性 Al^{3+} 含量分别为0.20、0.38、0.93和0.33 cmol·kg⁻¹(图2c)。

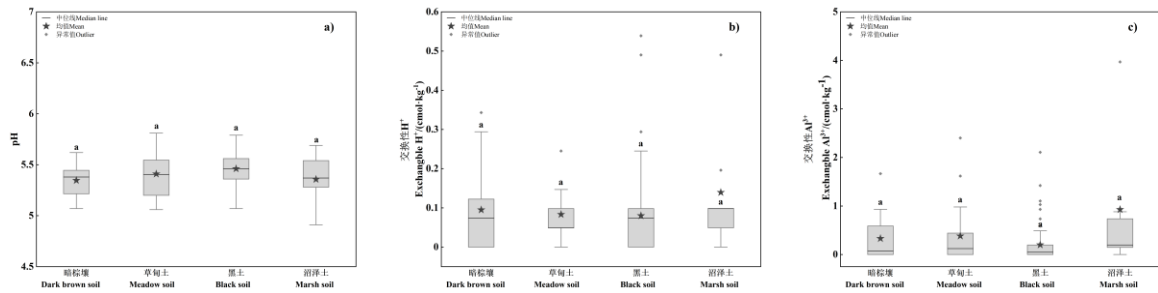


图 2 研究区不同土壤类型下耕地表层土壤酸度特征

Fig. 2 Acidity characteristics of surface soil under cultivated land with different soil types in the study area

将样点按主要种植作物类型（即在 2013—2023 年这 11 年内，种植大豆年限不低于 6 年的，定义为大豆地；种植大豆年限低于 6 年的，定义为玉米地）分组比较发现（图 3），大豆地（ $n=109$ ）土壤 pH 均值（5.43）与玉米地（ $n=10$ ）土壤 pH 均值（5.45）无显著差异；大豆地土壤交换性 H^+ 含量（ $0.09 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）与玉米地土壤交换性 H^+ 含量（ $0.07 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）无显著差异；大豆地土壤交换性 Al^{3+} 含量（ $0.33 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）与玉米地土壤交换性 Al^{3+} 含量（ $0.21 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）无显著差异。

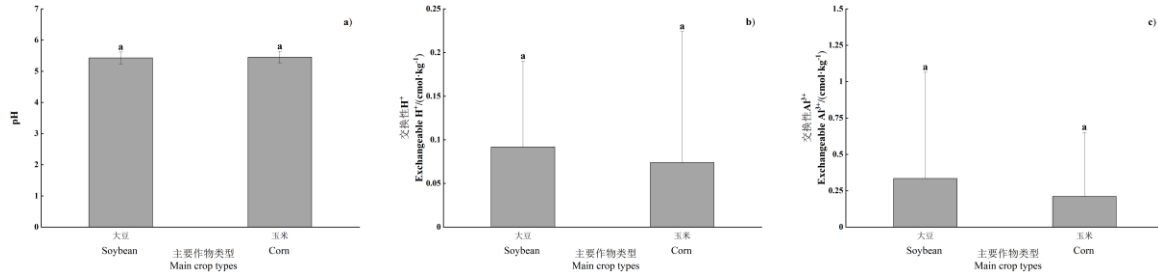


图 3 研究区大豆和玉米耕地表层土壤酸度特征

Fig. 3 Acidity characteristics of surface soil under soybean and corn in the study area

2.2 耕地表层土壤酸度影响因素的特征

由表 2 可知，土壤有机质含量范围为 $27.78 \sim 257.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $66.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据《全国九大农区及省级耕地质量监测指标分级标准（试行）》，土壤有机质含量高，等级为一级（ $>40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），变异系数为 36.55%，在空间分布上存在较大的差异，区域内分布不均匀。

耕地表层土壤机械组成以粉粒和黏粒为主，粉粒、黏粒和砂粒含量的平均值分别为 54.75%、35.44% 和 9.91%。其中砂粒的变异系数最高，为 65.08%，在研究区内的分布最不均匀；粉粒和黏粒变异系数相对较小，分布相对较为均匀。

耕地表层土壤交换性盐基离子含量由高到低的顺序为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ ，4 种离子含量分别占盐基总量的 76.8%、20.0%、2.2% 和 1.0%。土壤交换性盐基离子总量的范围为 $15.23 \sim 33.37 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；土壤有效阳离子交换量的范围为 $16.74 \sim 33.37 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均含量为 $24.70 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；土壤盐基饱和度和铝饱和度的范围分别为 72.82%~100% 和 0.00~24.83%，平均值分别为 98.10% 和 1.50%，铝饱和度和变异系数为 230.75%，表现为高等强度变异。

表 2 耕地表层土壤理化性质特征

Table 2 Characteristics of the physical and chemical properties of surface soil under cultivated land

参数 Parameter	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 CV/%
土壤有机质 ^① /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	27.78	257.32	66.12 ± 24.16	36.55
砂粒 ^② /%	1.56	45.10	9.91 ± 6.45	65.08

粉粒 ^③ /%	31.74	71.47	54.75±6.05	11.04
黏粒 ^④ /%	19.93	46.50	35.44±4.40	12.43
交换性 K ⁺ ^⑤ /(cmol·kg ⁻¹)	0.35	1.21	0.53±0.14	25.88
交换性 Na ⁺ ^⑥ /(cmol·kg ⁻¹)	0.16	0.62	0.25±0.07	27.97
交换性 Ca ²⁺ ^⑦ /(cmol·kg ⁻¹)	11.77	27.20	18.64±2.68	14.38
交换性 Mg ²⁺ ^⑧ /(cmol·kg ⁻¹)	2.66	7.09	4.87±0.88	18.04
盐基离子总量 ^⑨ /(cmol·kg ⁻¹)	15.23	33.37	24.29±3.37	13.86
有效阳离子交换量 ^⑩ /(cmol·kg ⁻¹)	16.74	33.37	24.70±2.90	11.75
盐基饱和度 ^⑪ /%	72.82	100.00	98.10±3.89	3.97
铝饱和度 ^⑫ /%	0	24.83	1.50±3.47	230.75

①Soil organic matter, ②Sand, ③Silt, ④Clay, ⑤Exchangeable K⁺, ⑥Exchangeable Na⁺, ⑦Exchangeable Ca²⁺, ⑧Exchangeable Mg²⁺, ⑨Total amount of base cations, ⑩Effective cation exchange capacity, ⑪Base cation saturation, ⑫Al saturation

按土壤类型分组比较显示, 除黑土黏粒含量显著高于暗棕壤外, 不同土壤类型间土壤有机质含量、机械组成均无显著差异(表 3)。除黑土交换性 Mg²⁺含量显著高于暗棕壤外, 不同土壤类型间土壤交换性盐基的单一离子含量、总量和饱和度均无显著差异(表 4)。

表 3 不同土壤类型下耕地表层土壤有机质和机械组成特征

Table 3 Characteristics of surface soil organic matter and soil texture under cultivated land with different soil types

土壤类型 Soil types	土壤有机质 SOM /(g·kg ⁻¹)	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	黏粒 Clay /%
暗棕壤 ^①	65.51±16.93a	11.67±11.22a	54.48±8.90a	33.85±5.33b
黑土 ^②	66.08±27.36a	8.80±3.90a	54.79±4.74a	36.41±3.76a
沼泽土 ^③	68.04±24.65a	10.02±4.43a	55.81±7.37a	34.17±5.52ab
草甸土 ^④	67.44±19.55a	10.72±6.84a	55.05±5.69a	34.83±4.00ab

①Dark brown soil, ②Black soil, ③Marsh soil, ④Meadow soil

表 4 不同土壤类型下耕地表层土壤交换性盐基离子特征

Table 4 Characteristics of surface soil exchangeable base cations under cultivated land with different soil types

土壤类型 Soil types	交换性 K ⁺ Exchangeable K ⁺	交换性 Na ⁺ Exchangeable Na ⁺	交换性 Ca ²⁺ Exchangeable Ca ²⁺	交换性 Mg ²⁺ Exchangeable Mg ²⁺	盐基离子总量 Total amount of base cations	盐基饱和度 Base cation saturation
	/(cmol·kg ⁻¹)					/%
暗棕壤 ^①	0.55±0.20a	0.23±0.03a	17.60±2.61a	4.44±0.78b	22.81±3.29a	98.05±2.70a
黑土 ^②	0.53±0.14a	0.25±0.08a	18.85±2.20a	5.05±0.78a	24.68±2.77a	98.74±2.26a
沼泽土 ^③	0.53±0.08a	0.25±0.07a	18.15±3.96a	4.63±1.09ab	23.56±4.89a	95.00±8.80a
草甸土 ^④	0.51±0.10a	0.24±0.05a	19.28±3.15a	4.70±0.98ab	24.73±3.96a	97.80±3.65a

①Dark brown soil, ②Black soil, ③Marsh soil, ④Meadow soil

全土矿物组成半定量分析结果显示(图 4), 土壤原生矿物主要为石英(36.40%±5.32%)、微斜长石(12.57%±1.87%)、钙长石和钠长石(10.19%±3.44%), 次生矿物主要为绿泥石(12.20%±3.08%)、高岭石(11.41%±3.16%)、水云母(8.59%±2.05%)、蛭石(3.99%±1.73%)和蒙脱石(3.96%±4.73%)。

按土壤类型分组比较显示, 除暗棕壤的石英含量显著高于草甸土、蒙脱石含量显著高于黑土外, 不同土壤类型间的土壤矿物组成均无显著差异(表 5 和表 6)。

表 5 耕地表层土壤原生矿物类型及含量

Table 5 The types and contents of primary minerals in the surface soil of cultivated land

土壤类型	石英	微斜长石	钙长石和钠长石	总量
Soil types	Quartz	Microcline	Anorthite and Albite	Total quantity
暗棕壤 ^①	40.58 ± 6.73a	12.31 ± 1.45a	10.45 ± 2.76a	63.33 ± 10.64a
黑土 ^②	36.73 ± 2.68ab	13.52 ± 2.39a	11.05 ± 4.83a	61.31 ± 9.85a
沼泽土 ^③	37.67 ± 4.52ab	11.61 ± 1.30a	7.35 ± 2.83a	56.63 ± 1.42a
草甸土 ^④	30.63 ± 2.10b	12.83 ± 2.62a	11.92 ± 2.86a	55.38 ± 3.94a

①Dark brown soil, ②Black soil, ③Marsh soil, ④Meadow soil

表 6 耕地表层土壤次生黏土矿物类型及含量

Table 6 The types and contents of secondary clay minerals in the surface soil of cultivated land

土壤类型	绿泥石	高岭石	水云母	蛭石	蒙脱石	总量
Soil types	Chlorite	Kaolinite	Hydromica	Vermiculite	Montmorillonite	Total quantity
暗棕壤 ^①	10.40 ± 3.76a	9.76 ± 3.89a	7.81 ± 2.02a	2.31 ± 0.07a	5.50 ± 1.04a	35.78 ± 10.58a
黑土 ^②	12.54 ± 3.21a	12.28 ± 3.47a	7.63 ± 2.65a	5.06 ± 1.63a	0.41 ± 0.71b	37.91 ± 9.95a
沼泽土 ^③	12.17 ± 3.01a	11.04 ± 2.84a	9.48 ± 1.04a	4.02 ± 1.83a	6.34 ± 8.21ab	43.06 ± 1.66a
草甸土 ^④	13.69 ± 3.21a	12.56 ± 3.51a	9.43 ± 2.53a	4.57 ± 1.98a	3.58 ± 4.81ab	43.84 ± 4.41a

①Dark brown soil, ②Black soil, ③Marsh soil, ④Meadow soil

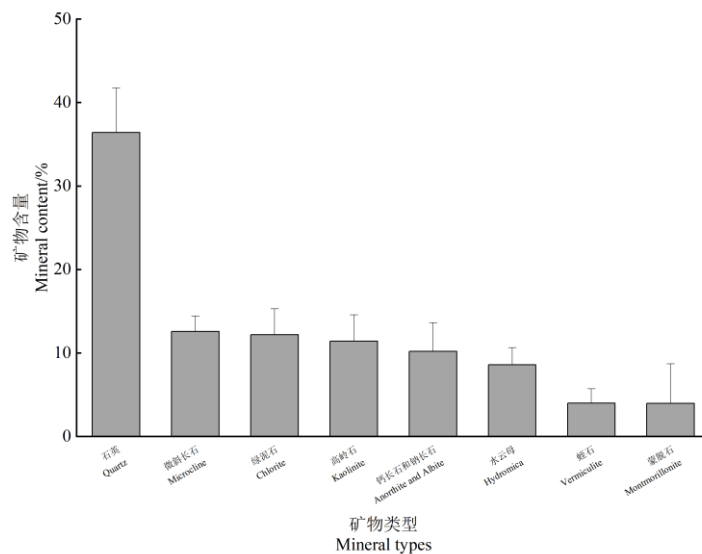


图 4 研究区内耕地表层土壤矿物组成

Fig. 4 Mineral compositions of surface soil under cultivated land in the study area

2.3 耕地表层土壤酸度与影响因素的关系

土壤 pH 与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量和黏粒含量呈极显著线性正相关，与土壤有机质含量、粉粒含量和铝饱和度呈极显著线性负相关（表 7）；土壤交换性 H^{+} 含量与土壤有机质含量、粉粒含量和铝饱和度呈极显著线性正相关，与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量和黏粒含量呈极显著线性负相关；土壤交换性 Al^{3+} 含量与土壤有机质含量、粉粒含量和铝饱和度呈极显著正相关，与交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量和黏粒含量呈极显著线性负相关。

土壤 pH 与年均温呈极显著线性正相关，与年均降水量和高程呈极显著线性负相关（表 8）；土壤交换性 H^{+} 含量与年均降水量和高程呈极显著线性正相关，与年均温呈极显著线性负相关；土壤交换性 Al^{3+} 含量与年均降水量和高程呈极显著线性正相关，与年均温呈极显著线性负相关。

土壤 pH、交换性 H^+ 含量和 Al^{3+} 含量与大豆种植年限及累计氮肥施用量间均无显著线性关系。

表 7 土壤酸度与土壤其他理化性质的相关系数

Table 7 Linear relationships between soil acidity and other soil physical and chemical properties

土壤酸度 Soil acidity	土壤有机质 SOM	交换性盐基离子 Exchangeable base cations				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	铝饱和度 Al saturation
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}				
pH	-0.35**	-0.05	0.18	0.55**	0.52**	0.07	-0.24**	0.24**	-0.60**
交换性 H^+	0.54**	-0.06	-0.05	-0.60**	-0.52**	-0.13	0.35**	-0.30**	0.80**
交换性 Al^{3+}	0.45**	-0.14	-0.10	-0.63**	-0.56**	-0.08	0.38**	-0.41**	1.00**

注: “**”表示 $P < 0.01$ 。Note: “**” indicates $P < 0.01$.

表 8 土壤酸度与环境因素的相关系数

Table 8 Linear relationships between soil acidity and environmental factors

土壤酸度 Soil acidity	年均温 MAT	年均降水量 MAP	高程 Elevation	坡度 Slope
pH	0.27**	-0.50**	-0.39**	0.16
交换性 H^+	-0.36**	0.59**	0.48**	-0.13
交换性 Al^{3+}	-0.26**	0.54**	0.45**	-0.18

注: “**”表示 $P < 0.01$ 。Note: “**” indicates $P < 0.01$.

2.4 不同影响因素对土壤酸度变异的相对贡献

随机森林模型拟合结果表明(图 5), 土壤有机质、机械组成、交换性盐基离子、年均降水量、年均温、高程、坡度、大豆种植年限、累计氮肥施用量等 15 种驱动因素, 对土壤 pH 和交换性酸含量空间变异的解释度分别为 83.69% 和 70.51%。土壤因素、环境因素和人为因素对土壤 pH 空间变异的解释度分别为 65.67%、17.90% 和 0.12%, 对交换性酸含量空间变异的解释度分别为 55.10%、13.87% 和 1.55%。其中, 铝饱和度、交换性 Mg^{2+} 含量、粉粒含量、交换性 Ca^{2+} 含量、年均降水量对土壤 pH 的空间变异有极显著贡献, 土壤有机质含量和交换性 K^+ 含量对土壤 pH 的空间变异有显著贡献(图 5a); 铝饱和度、交换性 Ca^{2+} 含量、交换性 Mg^{2+} 含量对交换性酸含量的空间变异有极显著贡献, 年均降水量对交换性酸含量的空间变异有显著贡献(图 5b)。

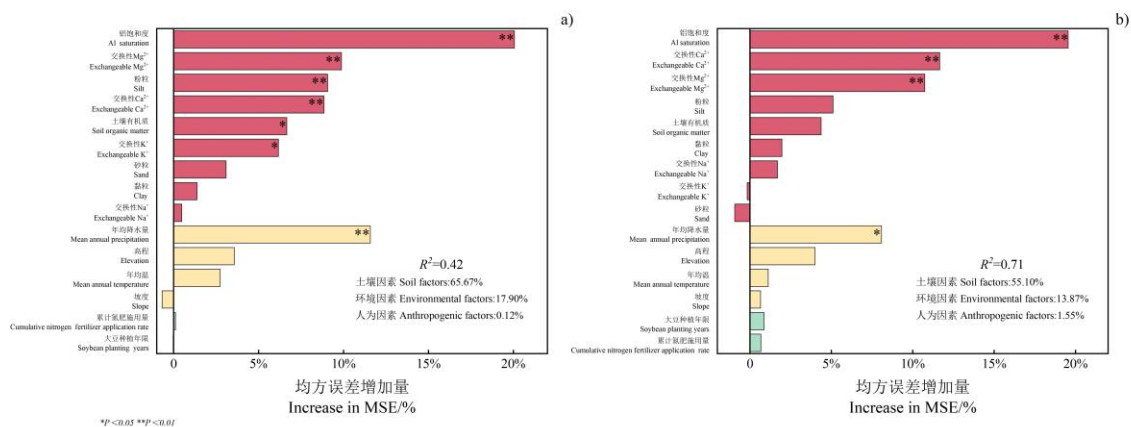


图 5 随机森林模型拟合的不同驱动因素对土壤 pH (a) 和交换性酸 (b) 变异的相对贡献

Fig. 5 The relative contributions of different driving factors to the changes of soil pH (a) and exchangeable acidity (b) based on random forest model fitting

3 讨论

3.1 土壤因素对土壤酸度的影响

基于线性和随机森林模拟结果, 与环境因素和人为因素相比, 土壤因素是影响土壤 pH 和交换性酸度空间变异的主导因素。基于土壤酸碱缓冲理论, 土壤交换性盐基、铝饱和度、机械组成、矿物组成、有机质等可能是影响土壤酸度的主要因素。本研究区耕地表层土壤盐基饱和度较高, 且土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 作为土壤中主要的交换性盐基离子与土壤 pH 呈极显著正相关, 与交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量呈极显著负相关, 表明土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的离子交换反应是控制土壤 pH 和交换性酸的重要过程。本研究区耕地表层土壤以粉粒和黏粒为主, 其中石英、长石和 2:1 型层状硅酸盐黏土矿物占主导地位。在酸性条件下, 长石溶解会消耗 H^+ , 并释放 K^+ 、 Ca^{2+} 等盐基离子^[24], 这些盐基离子可占据土壤胶体负电荷位点, 降低土壤交换性 H^+ 、 Al^{3+} 的饱和度, 减缓土壤酸化的进程^[25]。典型黑土区土壤中丰富的易风化原生矿物, 通过溶解反应可持续为土壤提供盐基离子, 维持土壤的酸缓冲能力, 使土壤虽处于强酸性和酸性状态, 但具备较高的盐基饱和度。本研究耕地表层土壤含有丰富的土壤有机质, 土壤有机质含量与土壤 pH 呈极显著线性负相关, 与土壤交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量呈极显著线性正相关。黑土中较高浓度的低分子量有机酸可能会促进土壤酸化^[26-27], 但是, 我们的研究也发现土壤有机质含量与年均降水量呈极显著线性正相关 ($r=0.61$, $P<0.01$), 土壤 pH 与年均降水量呈极显著线性负相关, 土壤有机质含量与 pH 的极显著线性负相关关系也可能是通过年均降水量建立的, 典型黑土区土壤有机质对土壤酸度的影响仍待深入研究。因此, 土壤交换性 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的离子交换反应和长石溶解反应是控制土壤酸度的主要机制。

相较之下, 典型红壤与典型黑土的酸缓冲机制存在显著差异, 这种差异与土壤盐基饱和度、矿物组成、有机质含量等有关。典型红壤发育于高温多雨的亚热带和热带湿润气候区, 在高强度的降水淋溶和高温风化作用下, 土壤有机质含量相对较低, 交换性盐基离子大量淋失, 盐基饱和度较低, 铝饱和度较高^[14-15, 28-29]。红壤中原生矿物 (如长石、云母等) 大量分解, 其中易溶的硅、钙、镁等元素随雨水淋失, 而铁、铝等难溶元素则相对富集, 形成以次生矿物 (如高岭石、氧化铁、氧化铝) 为主的土壤矿物组成特征^[30]。因此, 典型红壤通过盐基离子交换和矿物风化持续消耗质子的能力弱于典型黑土。

按土壤类型分组研究发现, 不同土壤类型间土壤 pH 和交换性酸均无显著差异。不同土壤类型间土壤交换性盐基、有机质、机械组成和矿物组成特征的对比结果表明, 在大多数情况下土壤的这些属性均无显著差异, 仅发现暗棕壤的石英含量显著高于草甸土; 蒙脱石含量显著高于黑土; 交换性 Mg^{2+} 含量显著低于黑土; 黏粒含量显著低于黑土。总体而言, 土壤酸度和其他有关理化性质在不同土壤类型间的差异较小。

3.2 环境因素和人为因素对土壤酸度的影响

相比于土壤因素, 环境因素对土壤酸度的空间变异起次要作用, 而人为因素的影响相对较弱。本研究发现海拔越高, 年均降水量越高, 年均温越低, 土壤 pH 越低, 土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 含量越高。随机森林模型显示, 年均降水量对黑土区耕地土壤酸化具有显著贡献, 其对土壤 pH 和交换性酸的贡献率分别为 11.58% 和 8.09%。年均降水量较多容易导致土壤盐基离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 随水向下移动或淋失, 使土壤酸缓冲能力降低, 进而导致土壤酸化^[31]。同时, 酸沉降会将 H^+ 、S 和 N 等酸性或致酸物质带入土壤中, 并导致土壤 H^+ 浓度升高、固相铝活化及盐基离子淋失^[32-34]。除环境因素外, 人为因素通常被视为驱动耕地土壤酸化的关键因素。研究表明, 耕地土壤酸化的主要人为因素是氮肥过量施用和作物移除^[2, 35-37]。本研究发现, 研究区耕地以种植大豆、玉米为主, 不同种植作物系统对土壤 pH、交换性酸的空间变异均无显著影响。虽然前人研究发现黑土地玉米连作系统 pH 降低量 (2005—2014 年) 高于大豆连作系统^[9], 但本研究区由于以种植大豆为主, 以大豆与

玉米轮作系统为辅,氮肥施用量具有趋同性,空间变异较小,而且相关性分析是基于变量的变化进行分析,因此作物种植类型和累计氮肥施入量对土壤酸化的影响难以通过相关性分析体现,这也使得人为因素对土壤酸度在空间分布上的影响表现较小。但从时间上看,根据测土配方施肥土壤基础养分数据集(2005—2014年)^[38],五大连池市和北安市耕层土壤 pH 均值分别为 6.4 ± 0.4 和 6.1 ± 0.4 ,与本研究 2024 年调查的两市表层土壤 pH 均值(5.45 ± 0.17 和 5.41 ± 0.20)相比,分别下降 0.95 和 0.69 个单位,说明这两类人为因素仍是加速黑土酸化的重要驱动力^[9-11],因此土壤 pH 在空间上整体下降,而在一个时间段上呈现为无显著影响。

4 结 论

松嫩平原北部典型黑土区耕地表层土壤以强酸性和酸性为主,土壤 pH 呈现较强的空间均一性,土壤交换性酸度呈现高度的空间变异性。高海拔区域土壤 pH 更低,土壤交换性酸度更高。土壤交换性钙和交换性镁含量、铝饱和度、年均降水量是土壤 pH 和交换性酸度空间变异的主控因素,由于研究区较为均质的施肥和作物种植管理模式,人为因素对土壤 pH 和交换性酸度空间变异的影响并不显著。典型黑土区土壤的高盐基饱和度和较多的长石矿物使土壤具有较高的酸缓冲能力,这与典型红壤区土壤存在明显差异。本研究从自然和人为视角阐明了松嫩平原北部典型黑土区耕地表层土壤酸度特征及其空间变异主控因素,可为我国东北典型黑土区耕地土壤酸化调控提供关键科学依据。未来需要深入研究黑土区土壤有机质转化对土壤酸度的影响,自然和人为因素对土壤酸度时间变化的影响,以及盐基离子交换与原生矿物溶解对土壤酸缓冲性能的相对贡献等。

致 谢 感谢中国科学院南京土壤研究所崔子霄、钱睿、周振宇同学在样品采集过程中给予的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Shen C L. CAS releases China's first white paper on black soil in Northeast China[N]. China Science Daily, 2021-07-12(1). [沈春蕾. 中科院发布国内首部东北黑土地白皮书[N]. 中国科学报, 2021-07-12(1).]
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(11): 767-770.
- [4] Chen C, Xiao W Y, Chen H Y H. Mapping global soil acidification under N deposition[J]. Global Change Biology, 2023, 29(16): 4652-4661.
- [5] Huang Y Y, Song X D, Wang Y P, et al. Size, distribution, and vulnerability of the global soil inorganic carbon[J]. Science, 2024, 384(6692): 233-239.
- [6] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. National Science Review, 2021, 9(2): nwab120.
- [7] Chen J, Xie E Z, Peng Y X, et al. Four-dimensional modelling reveals decline in cropland soil pH during last four decades in China's Mollisols region[J]. Geoderma, 2025, 453: 117135.
- [8] Zhang Y, Sui B, Shen H O, et al. Estimating temporal changes in soil pH in the black soil region of Northeast China using remote sensing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 204-212.
- [9] Tong Y X. Effect of crop conversion on SOC, soil pH and soil erosion in mollisols region of Songnen Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. [佟玉欣. 松嫩平原黑土区种植结构调整对 SOC、土壤 pH 和侵蚀的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.]

- [10] Zhang X L, Zhou B K, Sun L, et al. Black soil acidity as affected by applying fertilizer and manure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1221-1223. [张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1221-1223.]
- [11] Xu Y, Li Y S, Liu X B, et al. Long-term fertilizer application alters acidification rate and acid-neutralizing capacity in corn and soybean rotational/continuous cropping systems of mollisol field[J]. Soils, 2024, 56(4): 750-759. [徐影, 李彦生, 刘晓冰, 等. 长期施肥改变玉米大豆轮作/连作黑土农田酸化速率和酸中和容量[J]. 土壤, 2024, 56(4): 750-759.]
- [12] Yu T R. Acidity characteristics and acidification issues of Chinese soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1988, 19(2): 49-51. [于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题[J]. 土壤通报, 1988, 19(2): 49-51.]
- [13] Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control[J]. Soils, 2015, 47(2): 238-244. [徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.]
- [14] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 160-167. [徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167.]
- [15] Wen H Y, Wu H Y, Dong Y, et al. Differential soil acidification caused by parent materials and land-use changes in the Pearl River Delta region[J]. Soil Use and Management, 2023, 39(1): 329-341.
- [16] Cai Z J, Sun N, Wang B R, et al. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 71-78. [蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78.]
- [17] Xu Y D, Pei J B, Li S Y, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 495-504. [徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.]
- [18] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [19] Peng S Z. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2024)[DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center. [彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2024)[DB]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心.]
- [20] Xuan F, Dong Y, Li J Y, et al. Mapping crop type in Northeast China during 2013–2021 using automatic sampling and tile-based image classification[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 117: 103178.
- [21] You N S, Dong J W, Huang J X, et al. The 10-m crop type maps in Northeast China during 2017–2019[J]. Scientific Data, 2021, 8: 41.
- [22] Peng Q Y, Shen R Q, Li X Q, et al. China Maize Planting Spatial Distribution Dataset (2001-2024) [DS/OL]. National Ecological Science Data Center, 2023. [彭琼艳, 沈若缺, 李向前, 等. 2001-2024 年中国玉米种植分布数据集 [DS/OL]. 国家生态科学数据中心, 2023.]
- [23] Xiong Y, Li Q K. China Soils[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987. [熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [24] Yang J L, Zhang G L, Huang L M, et al. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations[J]. Chemical Geology, 2013, 337/338: 30-37.
- [25] Zhou Y F, Lu X C, Wang R C, et al. Recent progress in the study of microbiomineralogy of feldspar[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(1): 17-23. [周跃飞, 陆现彩, 王汝成, 等. 长石微生物风化作用的研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2008, 23(1): 17-23.]
- [26] Li K W, Lu H L, Nkoh J N, et al. Aluminum mobilization as influenced by soil organic matter during soil and mineral acidification: A constant pH study[J]. Geoderma, 2022, 418: 115853.

- [27] Xu Y, Li Y S, Yu Z H, et al. Roles of soil organic acids and base cations in Mollisol acidification during the peak growth stage of crops[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 254: 106726.
- [28] Cui Z X, Wu H Y, Song X D, et al. Vertical differentiation characteristics and main controlling factors of acid buffering capacity in the strongly acidic red soil regoliths[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, DOI: 10.11766/trxb202503090107. [崔子霄, 吴华勇, 宋效东, 等. 强酸性红壤风化壳酸缓冲容量的垂直分异特征及主控因素[J/OL]. 土壤学报, DOI: 10.11766/trxb202503090107.]
- [29] Wen H Y, Wu H Y, Dong Y, et al. Acidification characteristics of lateritic red soil under different land use types in typical subtropical region[J]. Soils, 2023, 55(2): 372-378. [文慧颖, 吴华勇, 董岳, 等. 不同土地利用方式下南亚热带赤红壤酸化特征[J]. 土壤, 2023, 55(2): 372-378.]
- [30] Zhao Q G. A study on recent pedogenic process and its developing age of red soils in China[J]. Quaternary Sciences, 1992, 12(4): 341-351. [赵其国. 我国红壤现代成土过程和发育年龄的初步研究[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 341-351.]
- [31] Su Y F, Bao W B, Li Y S, et al. A review of soil acidification: Principles, risk and mitigation measures in farmland[J]. Soils and Crops, 2025, 14(1): 1-14. [苏亚飞, 包文彬, 李彦生, 等. 农田土壤酸化: 原理、危害及缓解措施[J]. 土壤与作物, 2025, 14(1): 1-14.]
- [32] Lu H F, Qiao D M, Qi X B, et al. Effects of exogenous organic acids on soil pH, enzyme activity, and cadmium migration and transformation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3): 542-553. [陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤 pH 值、酶活性和 Cd 迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 542-553.]
- [33] Zhang X, Chen S T, Chen G F, et al. Effects of simulated acid rain and straw amendment on microbial respiration and enzyme activities of farmland soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(4): 823-832. [张旭, 陈书涛, 陈桂发, 等. 模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 823-832.]
- [34] Hong G S. Analysis of soil acidification causes, resistance control techniques and improvement strategies[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2025, 31(3): 80-84. [洪国胜. 土壤酸化原因、阻控技术及改良策略分析[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(3): 80-84.]
- [35] Li J Y, Cheng H, Liang X M, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7871-7884. [李金业, 程昊, 梁晓敏, 等. 酸化土壤改良与固碳研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7871-7884.]
- [36] van Breemen N, Mulder J, Driscoll C T. Acidification and alkalinization of soils[J]. Plant and Soil, 1983, 75(3): 283-308.
- [37] Dong Y, Yang J L, Zhao X R, et al. Contribution of different proton sources to the acidification of red soil with maize cropping in subtropical China[J]. Geoderma, 2021, 392: 114995.
- [38] National Agro-Tech Extension and Service Center. Data set of soil basic nutrients for formula fertilization by soil testing— 2005-2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集——2005-2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]

(责任编辑: 檀满枝)