

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.002 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.002

吴柯燃,李秧秧,王志强.模拟侵蚀、施肥和采样时间对东北黑土区土壤性质和质量的影响[J].水土保持学报,2026,40(2):38-47.

WU Keran, LI Yangyang, WANG Zhiqiang. Influence of simulated erosion, fertilization, and sampling time on soil properties and quality in black soil region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 39-47.

模拟侵蚀、施肥和采样时间对东北黑土区 土壤性质和质量的影响

吴柯燃¹, 李秧秧¹, 王志强^{2,3}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),陕西杨凌 712100; 2.北京师范大学地理科学学部,北京 100875; 3.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘要: [目的] 土壤侵蚀是导致东北黑土区土壤退化和土地生产力下降的主要原因之一,施肥是增加土壤肥力和生产力的主要措施。模拟侵蚀、施肥和采样时间等协同作用下对土壤性质和质量的影响尚不清楚。基于1个18 a的长期侵蚀模拟试验,研究了模拟侵蚀强度、施肥和玉米生育期不同采样时间对土壤性质和质量影响的主效应和相互作用大小。[方法] 试验设置模拟侵蚀强度和施肥2个因素,其中模拟侵蚀强度设8个梯度,分别为0、10、20、30、40、50、60、70 cm的侵蚀深度,施肥设不施肥和按当地大田方式施肥,试验采用完全随机区组设计,在玉米不同生育期采样测定13个表层土壤性质,分别为重量含水量、pH、有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物生物量碳、氮、磷及脲酶、过氧化氢酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶的活性。[结果] 随模拟侵蚀强度增加,有机碳、碱解氮、微生物生物量碳、氮、磷及脲酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性显著下降,速效钾含量显著增加,过氧化氢酶活性呈现“U”形变化。施肥导致有机碳、碱解氮、速效磷、微生物生物量磷、脲酶和纤维素酶活性显著增加,pH、速效钾和过氧化氢酶活性显著下降;采样时间显著影响12个土壤性质,不同土壤性质的季节变化模式不同。模拟侵蚀和其他因素之间不存在或很少存在交互作用,但施肥和季节对13个土壤性质中的8个存在显著的交互作用。模拟侵蚀导致土壤质量指数显著下降,且主要发生在侵蚀深度为30 cm前,施肥可使土壤质量指数提升12%,土壤质量指数在9月最高,在8月最低。[结论] 研究结果阐释了模拟侵蚀强度、施肥和采样时间对土壤性质和质量影响的主效应和交互作用,对黑土土壤退化过程的动态评估及其修复有一定指导价值。

关键词: 模拟侵蚀强度; 施肥; 采样时间; 土壤性质; 土壤质量指数

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)02-0038-10

Influence of Simulated Erosion, Fertilization, and Sampling Time on Soil Properties and Quality in Black Soil Region of Northeast China

WU Keran¹, LI Yangyang¹, WANG Zhiqiang^{2,3}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion is one of the major causes of soil degradation and land productivity deterioration in the black soil region of northeast China, and fertilization is a primary measure to improve soil fertility and productivity. The combined effects of simulated erosion, fertilization, and sampling time on soil properties and quality remain unclear. Based on an 18-year long-term simulated erosion experiment, this study investigates the main effects and interactions of simulated erosion intensity, fertilization, and different sampling

收稿日期: 2025-06-16 修回日期: 2025-07-30 录用日期: 2025-08-25 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-18

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0115300)

第一作者: 吴柯燃(2001—),女,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 3209901320@qq.com

通信作者: 李秧秧(1967—),女,博士,研究员,主要从事土壤-植物系统物质运移研究。E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

times during the maize growth stages on soil properties and quality. [Methods] The experiment included two factors: simulated erosion intensity and fertilization. Simulated erosion intensity was set at eight gradients, corresponding to erosion depths of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, and 70 cm. Fertilization treatments included no fertilization and fertilization according to local field practice. The experiment was conducted using a completely randomized block design. Thirteen surface soil properties were measured at different maize growth stages: gravimetric water content, pH, organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus, as well as the activities of urease, catalase, β -glucosidase, and cellulase. [Results] With increasing simulated erosion intensity, organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus, urease, β -glucosidase, and cellulase activities significantly decreased. The available potassium content significantly increased, and catalase activity showed a "U" shaped trend. Fertilization significantly increased organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, microbial biomass phosphorus, urease, and cellulase activities, while significantly decreasing pH, available potassium, and catalase activity. Sampling time significantly affected 12 soil properties, and seasonal variation patterns differed among soil properties. There were few or no interactions between simulated erosion and other factors, but fertilization and season exhibited significant interactions for 8 out of 13 soil properties. Simulated erosion significantly reduced the soil quality index, with most of the decline occurring before 30 cm of erosion depth. Fertilization increased the soil quality index by 12%, with the highest value observed in September and the lowest value in August. [Conclusion] The findings clarify the main effects and interaction effects of simulated erosion intensity, fertilization, and sampling time on soil properties and quality, providing guidance for dynamic assessment and remediation of black soil degradation.

Keywords: simulated erosion intensity; fertilization; sampling time; soil properties; soil quality index

Received: 2025-06-16

Revised: 2025-07-30

Accepted: 2025-08-25

Online(www.cnki.net): 2025-11-18

东北黑土区是我国最重要的商品粮基地,其粮食产量和粮食调出量分别占全国总量的1/4和1/3^[1]。目前黑土地已出现黑土层变薄、肥力下降、土壤结构变差等问题,从而对区域粮食生产构成威胁,保护黑土地刻不容缓。水土流失是黑土地土壤退化的重要原因。据统计^[2-3],面积约108.75万km²的东北黑土,水土流失面积占比达19.68%,黑土层正以每年2~3 mm的速度被剥蚀。研究土壤侵蚀对黑土土壤性质和质量的影响对土壤流失容忍度的确定、土壤退化机制的阐明及退化黑土的修复均有重要意义。

土壤侵蚀是一个渐进的过程,因而模拟侵蚀是评价侵蚀对土壤质量和作物生产力影响的重要方法。侵蚀对土壤性质影响程度与侵蚀模拟方法密切相关。目前常用的模拟方法,如剖面线法、小区比较法、人为加土法和人为削土法各有利弊,不能准确模拟自然条件下的侵蚀过程^[4-5],因而无法准确评价对土壤性质和质量的影响。尽管前人^[5-8]研究已发现,土壤侵蚀导致土壤理化性质发生变化,土壤质量降低,但这些研究中极少考虑土壤的生物性质,且侵蚀梯度设置有限,因而难以全面和定量评价土壤侵蚀对土壤性质和质量的影响程度。施肥作为提高土壤肥力和作物产量的重要措施,其应用效果决定于施

肥量和施肥历史、植物类型、土壤和气候条件等诸多因素。土壤侵蚀和施肥协同作用下对土壤性质和质量的影响较少见到报道。

土壤的理化生物学性质具有时间变异性。在测定的21种土壤性质中,15种土壤性质因采样时间不同而呈现明显波动,且无一致的变化规律^[9]。阿尔卑斯生态系统中,土壤理化性质和微生物生物量碳在生长季的变化尤为明显^[10]。土壤微生物性质,如微生物生物量碳、氮和磷及 β -葡萄糖苷酶、脲酶和蛋白酶等酶的活性均呈显著的季节变化^[11-14]。因而,研究土壤侵蚀和施肥对土壤过程的影响离不开土壤性质的时间变化。

基于土壤侵蚀和耕作对土壤剖面变化的综合影响过程,在东北黑土区布设长期模拟侵蚀-生产力关系试验^[5]中,采用削土和配置不同侵蚀程度耕层土壤相结合的方法,相比人为削土法和加土法,所模拟的不同侵蚀程度土壤剖面特性与自然侵蚀和耕作条件下的土壤剖面特性更为接近。本研究利用此试验,解析模拟侵蚀强度、施肥和采样时间对土壤性质和土壤质量的主效应及其交互作用大小,研究结果可为黑土土壤退化过程的动态评估和土壤退化修复提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省嫩江市鹤山农场,该地属温带大陆性季风气候,年平均降水量544.1 mm(2005—2022年),66.8%发生在6—8月,年平均气温0.4℃,最冷月(1月)平均气温-22.5℃,最热月(7月)平均气温20.9℃。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温2 000~2 300℃,无霜期115~120 d。自然植被为温带半湿润草甸草原,土壤为黑土。土层厚度一般为30~100 cm,主要种植作物为大豆、小麦和玉米。

1.2 试验设计

模拟侵蚀试验的基本思路为侵蚀导致农田土壤表层被剥蚀,犁耕使犁底层土壤被翻出与耕层土壤混合,这样反复导致耕层土壤被逐渐稀释,而不是一次性地被剥蚀。假设每年被剥蚀掉的土层和从犁底层翻到耕作层的土层厚度相等,由于耕层厚度随侵蚀年限的衰减符合指数变化,因而可根据耕层厚度、多年平均侵蚀厚度及侵蚀年限计算不同侵蚀年限(或侵蚀强度)后的土壤组成,继而配土来建造不同侵蚀强度的小区,详细原理和建造方法见王志强等^[5]研究。

模拟侵蚀试验建于2005年,为小区试验,布设在坡度为2°的漫岗坡中下部,其原始土壤厚度为50~60 cm。采用二因素(模拟侵蚀强度和施肥)完全随机区组设计,其中模拟侵蚀强度设8个梯度,即0、10、20、30、40、50、60、70 cm厚的土壤被侵蚀;施肥因素包括2个水平:不施肥和当地常规施肥。共16个小区,每个小区3次重复处理,共48个小区,处理面积4 m×4 m。小区种植密度、播种日期、施肥地块的施肥量及管理方法与当地田地一致,肥料作为基肥一次性施入。所有地块均未进行灌溉,试验小区建成后再无水土流失的发生。

2005—2022年所有小区都实行大豆、小麦和玉米的轮作种植,轮作顺序为大豆(2005年)-大豆(2006年)-大豆(2007年)-大豆(2008年)-春小麦(2009年)-大豆(2010年)-大豆(2011年)-大豆(2012年)-大豆(2013年)-春小麦(2014年)-大豆(2015年)-大豆(2016年)-玉米(2017年)-玉米(2018年)-大豆(2019年)-玉米(2020年)-大豆(2021年)-玉米(2022年),其中大豆、玉米和春小麦的种植密度分别为 0.4×10^6 、 6.0×10^6 、 $(0.09\sim 0.10)\times 10^6$ 株/hm²,施肥小区的施肥量(N-P₂O₅-K₂O)为60.0-81.0-15.0 kg/hm²(大豆)、69.2-80.7-25.0 kg/hm²(小麦)和82.6-

92.0-75.0 kg/hm²(玉米)。同种作物不同种植年限的密度、施肥时间和施肥小区的施肥量保持一致。2022年生长季,种植的玉米品种为“益农14号”,2022年5月7日种植,9月28日收获。

1.3 采样与分析

土壤采样分别在2022年5月5日(播种前)、7月13日(抽穗期)、8月16日(蜡熟期)和9月10日(成熟期)进行。用土钻采集0~20 cm的土壤,每小区中间玉米种植行间和行内各取3个土样,充分混合后去除杂物和石砾,然后将每混合样分为2个部分:一部分风干后用于土壤理化性质测定;另一部分过2 mm筛后,装入密封的聚乙烯袋中在4℃下保存,用于土壤微生物性质测定。

土壤重量含水量(SWC)用烘干法测定,土壤pH采用玻璃电极测量,水土比为2.5:1。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量-外加热法,碱解氮(AN)碱解扩散-硼酸滴定法测定,速效磷(AP)采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定。

土壤微生物生物量碳、氮和磷(MBC、MBN和MBP)采用VANCE等^[15]的氯仿熏蒸法进行测定。土壤酶活性测定见文献^[16],其中脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,酶活性以 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ (以NH₃-N计,37℃)表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以 $\text{mL}/(\text{g}\cdot 20\text{ min})$ (以0.1 N KMnO₄计,37℃)表示; β -葡萄糖苷酶活性采用对硝基苯酚比色法测定,酶活性以 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (以PNP计,37℃)表示;纤维素酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ (以葡萄糖计,37℃)表示。

1.4 数据处理与统计分析

将所有土壤理化生性质采用公式归一化来获得每一土壤指标的得分^[17]:

$$S_i = x_i/x_{\max} \quad (1)$$

式中: S 为0~1,为每一指标的线性得分; x_i 、 x_{\max} 分别为某一土壤指标的测定值和最大值。

土壤质量指数(SQI)计算公式^[18]为:

$$\text{SQI} = 0.5 \times \sum S_i^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \quad (2)$$

式中: n 为土壤指标数; π 为常数。选用此方法计算土壤质量指数是因为其便于不同指标计算的土壤质量指数间的比较,且计算方法简单快速。由于过氧化氢酶活性随模拟侵蚀深度呈非单调变化,故选用剩余的12种土壤性质来计算土壤质量指数。

利用三因素方差分析评价侵蚀程度、施肥和采样时间对土壤理化生物学性质影响的主效应和交互作用, Tukey法进行多重比较。使用单因素方差分析检验因素间交互作用大小, Tukey法多重比较。统计分析采用 SPSS 15.0 软件进行。图中土壤性质数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 模拟侵蚀、施肥和采样时间对土壤性质影响的主效应

模拟侵蚀深度对测定的 13 个土壤性质中的 10 个均有极显著影响($p < 0.01$) (表 1)。随着侵蚀深度的增加, SOC、AN、MBC、MBN、MBP、脲酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性均显著下降。模拟侵蚀深度

为 70 cm 时, 相对于无侵蚀处理, SOC、AN、MBC、MBN、MBP、脲酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性分别降低 41.0%、39.9%、31.4%、23.3%、35.1%、17.2%、25.3% 和 26.3%。同时, 随着侵蚀深度的增加, AK 显著增加; 侵蚀深度为 70 cm 时, AK 比无侵蚀处理增加 17.6%。过氧化氢酶活性在 0~20 cm 侵蚀深度内随侵蚀深度增加而下降, 在 20~50 cm 保持不变, 而后随着侵蚀深度增加而增加, 总体呈“U”形变化。不同土壤性质随侵蚀深度增加呈现不同变化规律。SOC 和 AN 随侵蚀深度的增加呈指数衰减, MBC 和 MBP 呈两段线性函数下降, AK、MBN 和过氧化氢酶活性呈不同的抛物线型变化, 而脲酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性呈线性下降(图 1)。

表 1 模拟侵蚀深度(ED)、施肥(F)和采样时间(S)对土壤性质影响的三因素方差分析

Table 1 Three-way ANOVA of the effects of simulated erosion depth (ED), fertilization (F), and sampling time (S) on soil properties

项目	SWC	pH	SOC	AN	AP	AK	MBC	MBN	MBP	Urease	Catalase	Glucosidase	Cellulase
ED			***	***		***	***	**	**	**	***	***	***
F		***	***	***	***	***			***	***	***		***
S	*	***	***	**		***	***	***	***	***	***	***	***
ED×F			*										*
ED×S									**				
F×S		***		**		*			**	**	*	*	**
ED×F×S													

注: SWC 为土壤重量含水量; SOC 为土壤有机碳; AN 为碱解氮; AP 为速效磷; AK 为速效钾; MBC、MBN、MBP 分别为微生物生物量碳、氮和磷; Urease 为脲酶活性; Catalase 为过氧化氢酶活性; Glucosidase 为 β -葡萄糖苷酶活性; Cellulase 为纤维素酶活性; * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; *** 表示 $p < 0.001$ 。

长期施肥极显著影响 13 个土壤性质中的 9 个 ($p < 0.001$) (表 1)。施肥显著增加 SOC、AN、AP、MBP、脲酶和纤维素酶的活性, 增幅分别为 7.2%、19.1%、1 050.1%、73.6%、44.5% 和 9.8%; 施肥导致 pH、AK 和过氧化氢酶活性显著下降, 下降幅度分别为 8.7%、5.7% 和 22.1% (图 2)。其中 AP 和 MBP 对施肥的敏感性最高, 施肥后变化幅度最大。

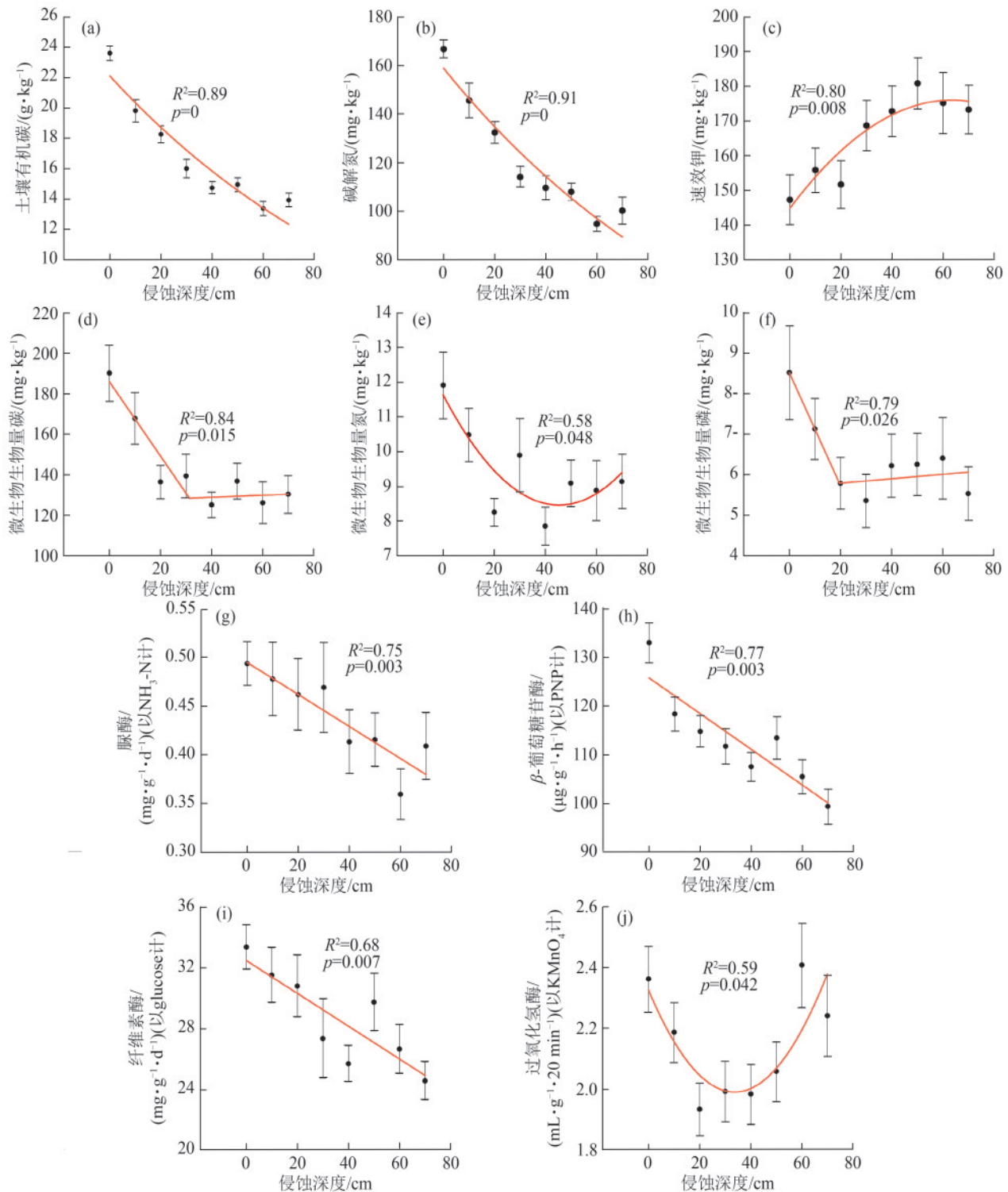
采样时间对除 AP 外的所有土壤性质均有显著影响(土壤重量含水量: $p < 0.05$; 其他土壤性质: $p < 0.01$) (表 1)。土壤性质的季节变化可分为 3 种类型: pH、SOC、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性呈单调上升趋势, 在 9 月达到最大值; AK、MBP 和过氧化氢酶活性呈“V”形变化, 最低值出现在 7 月或 8 月; SWC、AN、MBC、MBN 和脲酶呈“N”形变化模式(图 3)。土壤性质的变异系数(CV)为 3.63%~36.60%, 其中 AK、MBC、MBP 和纤维素酶活性的季节变化相对较大, CV 均 $> 20\%$ 。

2.2 模拟侵蚀、施肥和采样时间对土壤性质影响的交互作用

对大多数土壤性质而言, 模拟侵蚀深度×施肥量、模拟侵蚀深度×采样时间及模拟侵蚀深度×施肥量×采样时间之间无显著交互作用。模拟侵蚀深度×施肥量之间仅对 SOC 和纤维素酶活性存在显著交互作用; 模拟侵蚀深度×采样时间仅对 MBP 存在显著交互作用($p < 0.05$) (表 1)。13 种土壤性质中, 施肥×采样时间对 8 种土壤性质的交互作用达到显著($p < 0.05$)。施肥处理的季节变化幅度(最大值-最小值)大于未施肥处理, 且施肥处理的季节变化斜率在 8 月之前较陡; 8 月之后, 2 种处理的变化斜率几乎相同(图 4), 表明施肥×采样时间的交互作用主要发生在 8 月之前。

2.3 模拟侵蚀、施肥和采样时间对土壤质量的影响

由于土壤过氧化氢酶活性并未随模拟侵蚀深度呈单调变化, 因而采用剩余的 12 种土壤性质计算土壤质量指数(SQI)。



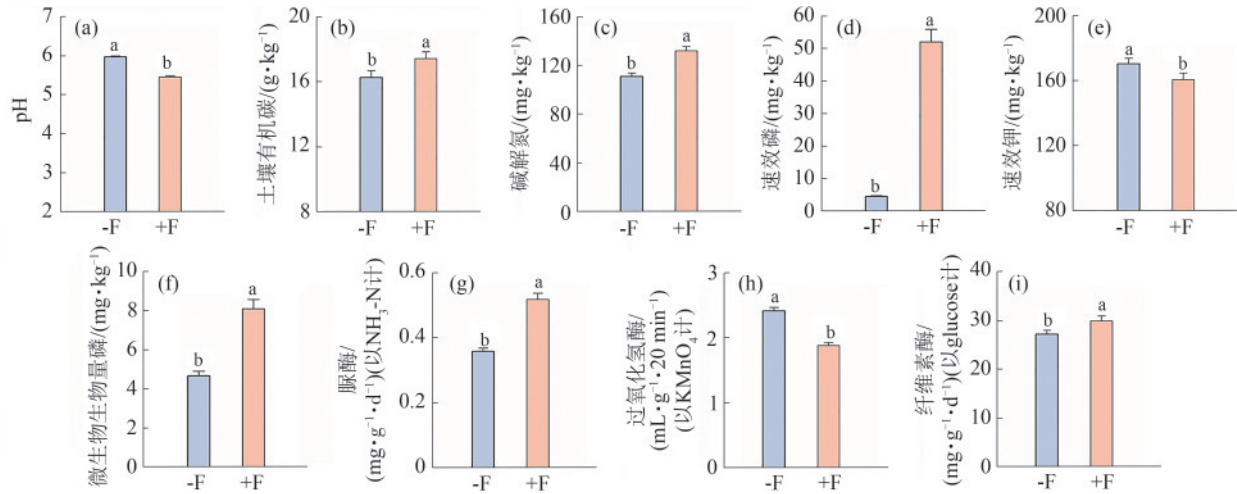
注:图中SOC和AN采用 $y=ae^{-bx}$ 进行模拟;AK、MBN和过氧化氢酶活性采用 $y=ax^2+bx+c$ 进行模拟;MBC和MBP采用两段线性函数进行模拟;脲酶、 β -葡萄糖苷酶及纤维素酶活性采用 $y=a+bx$ 模拟, a 、 b 和 c 为常数。

图1 模拟侵蚀深度影响土壤性质的主效应

Fig. 1 Main effects of simulated erosion depth on soil properties

模拟侵蚀深度、施肥量和采样时间对SQI均有显著影响($p < 0.001$),但二者之间及三者之间无显著交互作用。模拟侵蚀深度为0、10、20、30、40、50、60、70 cm时,SQI分别为1.13、1.00、0.87、0.88、0.81、0.86、0.85、0.80。SQI随模拟侵蚀深度的变化可用两段函数很好地进行模拟($R^2=0.817$, $p=0.020$)。在侵蚀深度达到

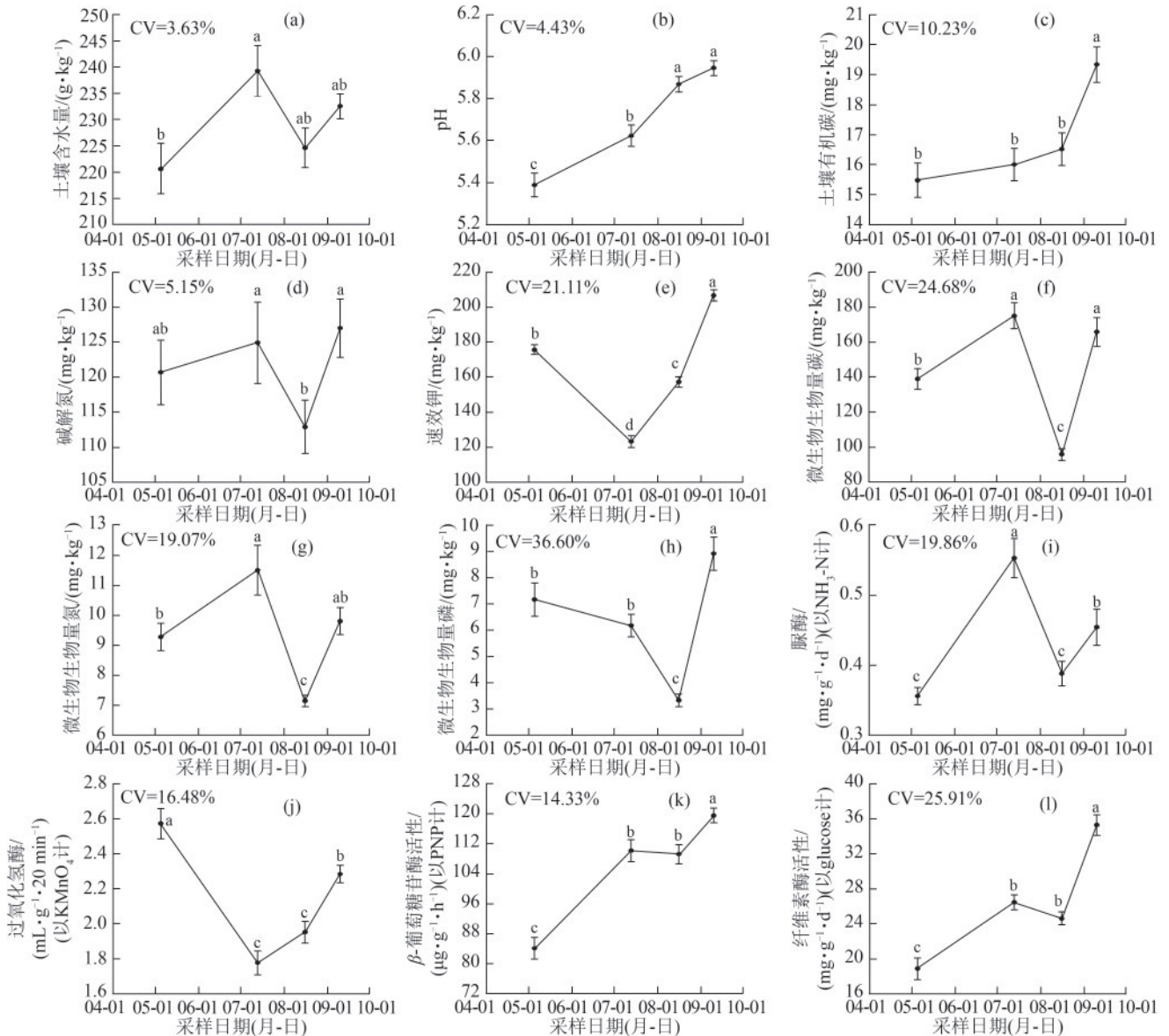
30.2 cm之前,SQI急剧下降,其降低幅度为21.6%,此后SQI变化不大。不施肥和施肥处理的SQI分别为0.89和0.91,施肥使SQI显著提升12.0%($p < 0.05$)。生长季内,SQI分别为0.84(5月)、0.88(7月)、0.79(8月)和1.09(10月),SQI的最高值出现在9月,其次是7月和5月,最低值则出现在8月,变异系数为14.31%。



注: -F 和 +F 分别表示不施肥和施肥处理; 图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 施肥对土壤性质影响的主效应

Fig. 2 Main effects of fertilization on soil properties



注: 图中不同字母表示不同采样时间之间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 3 采样时间对土壤性质影响的主效应

Fig. 3 Main effects of sampling time on soil properties

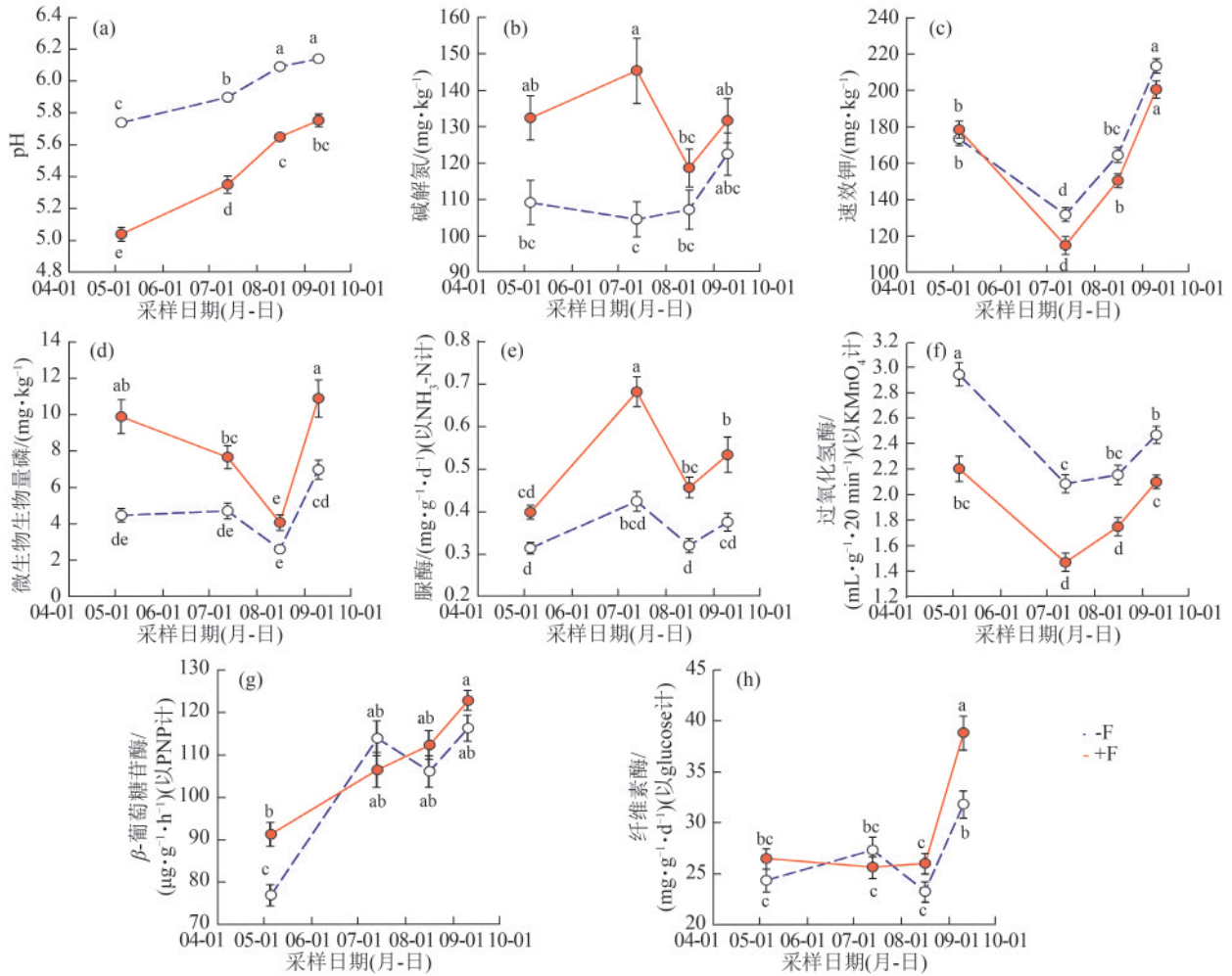


图 4 施肥与采样时间对土壤性质影响的交互作用

Fig. 4 Interactive effects of fertilization and sampling time on soil properties

3 讨论

3.1 模拟侵蚀对土壤性质和质量的影响

土壤侵蚀导致土壤有机碳和植物养分流失、有效持水量下降及土壤结构恶化^[4,6]。模拟试验建立的前3 d,随模拟侵蚀厚度的增加,土壤SOC、AN和AP质量分数显著降低,pH和AK质量分数无显著变化^[5]。在侵蚀模拟试验开始后的第18 a,土壤SOC、AN、AP和pH呈类似变化趋势,但AK质量分数随着模拟侵蚀深度的增加而显著增加(图1)。其原因可能与重度侵蚀下土壤较低的生产力降低玉米对K⁺的吸收,以及重度侵蚀下耕层土壤含母质矿物较多有关,模拟侵蚀深度70 cm时耕层土壤主要为母质矿物,长期耕种扰动促进含钾母质矿物中K⁺的释放^[19]。

前人^[20-23]研究表明,随着侵蚀程度增加,MBC和部分酶活性下降。本研究亦发现,MBC、MBN、MBP及3种水解酶脲酶、β-葡萄糖苷酶和纤维素酶活性随侵蚀深度的增加而下降。然而,过氧化氢酶活性随模拟深度增加呈现“U”形变化(图1),与本模拟试验

中发现的过氧化氢酶活性随侵蚀深度的增加呈线性下降不一致^[21]。过氧化氢酶为氧化还原酶,不同采样时期的活性均与AP呈显著负相关,与pH呈显著正相关($p < 0.05$)。过氧化氢酶活性还受其他因素,如土壤氧化还原电位、有机质、微生物群落结构及凋落物分解过程等的复杂影响^[24]。在不同程度侵蚀条件下,影响过氧化氢酶活性的主导因素可能有所不同,对此需要进一步研究。由于过氧化氢酶活性对模拟侵蚀深度呈非单调响应,因而其并不是侵蚀条件下土壤质量评价的一个良好指标。

模拟侵蚀导致土壤质量显著降低,且主要发生在土壤表层30.2 cm内,此时土壤质量指数(SQI)的下降幅度可达21.6%,表明黑土区土壤表层30 cm对于侵蚀防治至关重要。假设土壤每年流失速率为0.2~0.3 cm^[3],则这些土壤只需90~150 a被侵蚀掉,凸显保护黑土表层30 cm土壤的重要性和紧迫性。使用化肥仅使土壤质量指数提高12.0%,意味着当前单纯使用化肥的方式无法逆转严重侵蚀下黑土的退化。

3.2 长期施肥对土壤性质和质量的影响

长期施肥增加土壤SOC、AN和AP,降低土壤pH^[25-26]。本研究发现,长期施肥会降低黑土AK,原因可能在于施肥引起的土壤pH降低,促进K⁺释放,K⁺易被降雨淋失,从而导致AK降低(图2)。

关于长期施肥对土壤微生物生物量及酶活性的影响研究结果并不一致。本研究中,长期施肥对MBC和MBN无显著影响,但增加MBP、脲酶和纤维素酶活性,降低过氧化氢酶活性(图2),与前人^[11,20,26-28]研究结果部分一致,但与基于相同试验发现的施肥对微生物生物量或酶活性无影响不一致^[21]。原因可能与施肥持续时间有关,HOU等^[21]的研究中施肥年限仅为7a,而本研究中施肥已持续18a。在另一研究^[29]中,连续26a施用化肥增加黑土脲酶活性,而MBC和 β -葡萄糖苷酶活性未受影响。XIAO等^[30]的Meta分析也表明,氮磷联合施肥使脲酶活性增加32.7%,氧化酶活性降低21.6%。过氧化氢酶活性降低可能与腐生真菌减少有关,这类真菌通过分泌过氧化氢酶来分解惰性有机质^[30]。肥料类型、土壤性质、气候条件和农业管理措施等因素也可能导致不同研究中对长期施肥的影响并不一致。长期施用化肥使土壤质量提升12%,凸显其在应对土壤侵蚀导致的肥力下降中的积极作用。

3.3 采样时间对土壤性质和质量的影响

土壤性质呈现明显的季节性变化。土壤pH、SOC、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性随生长季节呈单调增加,在9月玉米成熟期达到峰值。酸性土壤的pH在1a中的8、9月较高,而在2、3月较低^[31]。pH的季节波动可能与土壤湿度、有机质分解及植物对阴阳离子的吸收不同有关。SOC在9月最高是由于较低的土壤温度促进有机质累积,微生物活动降低导致能量消耗减少及土壤扰动减少限制有机物的氧化。 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性的季节变化趋势与SOC的变化趋势一致,因为2种酶与土壤中的有机碳质量分数密切相关。所有其他土壤特性都在7月或8月达到最低水平,在9月逐渐恢复到较高水平。这种季节模式与玉米的养分吸收特性及温度、土壤湿度等环境因素的变化密切相关。7—8月,玉米进入抽穗至灌浆期,这一时期是养分吸收的高峰期^[32],因而土壤速效养分(如AN和AK)在7—8月达到最低水平。SWC、AN、MBC、MBN和脲酶呈“N”形模式,可能与播种前低温限制和生长高峰期养分高吸收因素有关。整体而言,9月的土壤质量最高,8月最低。关于热带森林土壤质量季节性变化的研究^[33]同样发现,秋季的土壤质量指数最高,主要与9

月土壤碳氮循环降低及玉米养分吸收减少有关。由于土壤性质随生育期的变化较大,因而在大规模土壤质量评价时,应尽可能在同一季节采样,以增加评价结果的可比性。

3.4 模拟侵蚀、施肥和采样时间对土壤性质和质量影响的交互作用

对大多数土壤性质而言,本研究并未发现模拟侵蚀深度 \times 采样时间、模拟侵蚀深度 \times 施肥或模拟侵蚀深度 \times 施肥 \times 采样时间之间存在显著交互作用(表1),表明模拟侵蚀对土壤性质的影响在不同施肥水平和采样时间下是一致的。这种一致性可能主要归因于模拟侵蚀、施肥及采样时间在时间上的分离,模拟侵蚀是在长期定位试验开始时完成的,在后续作物种植过程中并没有侵蚀发生,而施肥和采样分别在作物生长季和生育期进行,因而模拟侵蚀对土壤性质的效应并不受施肥水平和采样时间的影响。

在测量的13个土壤性质中,有8个“施肥 \times 季节”的交互作用达到显著,且主要发生在8月之前(图4)。施肥处理与未施肥处理相比,土壤养分质量分数和酶活性的变化速率在8月之前更为明显。不仅是由于施肥处理使玉米对养分的吸收率更高,还可能与化肥对微生物群落的长期影响有关。施肥改变微生物的组成,细菌对氮添加比真菌更为敏感^[34],施肥土壤的真菌与细菌生物量之比往往低于未施肥土壤^[11],微生物组成的变化导致施肥土壤中微生物生物量和酶活性发生更明显的变化。

4 结论

1)模拟侵蚀强度显著影响测定的13个土壤性质中的10个。随着模拟侵蚀强度增加,SOC、AN、MBC、MBN、MBP、脲酶、 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶活性显著下降,AK显著增加,过氧化氢酶活性呈现“U”形变化。

2)施肥显著影响13个土壤性质中的9个,施肥导致SOC、AN、AP、MBP、脲酶和纤维素酶活性显著增加,pH、AK和过氧化氢酶活性显著下降;采样时间显著影响12个测定的土壤性质,不同土壤性质的季节变化模式不同。

3)对大多数土壤性质而言,土壤侵蚀强度和施肥、采样时间之间不存在显著交互作用,但施肥和采样时间之间存在显著交互作用,且这种交互作用主要发生在8月前。

4)模拟侵蚀导致的土壤质量下降主要发生在侵蚀深度为30cm前,侵蚀深度30cm时土壤质量指数下降幅度为21.6%;长期施肥可使土壤质量指数提升12.0%;9月的土壤质量指数最高,8月最低。

参考文献:

- [1] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[M/OL]. (2021-07-09). https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4797913.shtml.
Chinese Academy of Sciences. Northeast China black soil white paper (2020) [M/OL]. (2021-07-09). https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4797913.shtml.
- [2] 张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405.
ZHANG X Y, HU W, LI J Y, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11): 1401-1405.
- [3] WANG H, YANG S L, WANG Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in northeast China[J]. Catena, 2022, 214: e106250.
- [4] LAL R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998, 17(4): 319-464.
- [5] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学(D辑), 2009, 39(10): 1397-1412.
WANG Z Q, LIU B Y, WANG X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in northeast China [J]. Science in China(D), 2009, 39(10): 1397-1412.
- [6] 刘慧, 魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 288-296.
LIU H, WEI Y X. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 288-296.
- [7] LARNEY F J, JANZEN H H, OLSON B M, et al. Soil quality and productivity responses to simulated erosion and restorative amendments[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(3): 515-522.
- [8] MANDAL D, CHANDRAKALA M, ALAM N M, et al. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India[J]. Catena, 2021, 204: e105440.
- [9] OMER M, IDOWU O J, ULERY A L, et al. Seasonal changes of soil quality indicators in selected arid cropping systems[J]. Agriculture, 2018, 8(8): e124.
- [10] CHEN Y, HAN M G, YUAN X, et al. Seasonal changes in soil properties, microbial biomass and enzyme activities across the soil profile in two alpine ecosystems [J]. Soil Ecology Letters, 2021, 3(4): 383-394.
- [11] BARDGETT R D, LOVELL R D, HOBBS P J, et al. Seasonal changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperate grasslands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(7): 1021-1030.
- [12] PIAO H C, HONG Y T, YUAN Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from karst areas of southwest China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(4): 294-297.
- [13] DEVI N B, YADAVA P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, north-east India [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.
- [14] KONG Y H, QU A R, FENG E P, et al. Seasonal dynamics of soil enzymatic activity under different land-use types in rocky mountainous region of north China[J]. Forests, 2023, 14(3): e536.
- [15] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-320.
GUAN S Y. Soil enzymes and its methodology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 274-320.
- [17] JIA R, ZHOU J, CHU J C, et al. Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: A case study from the north China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 362: e132265.
- [18] KUZYAKOV Y, GUNINA A, ZAMANIAN K, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(3): e282.
- [19] 丁瑞兴, 刘树桐. 黑土开垦后肥力演变的研究[J]. 土壤学报, 1980, 17(1): 20-32.
DING R X, LIU S T. A study on the fertility of black soil after reclamation[J]. Acta Pedologica Sinica, 1980, 17(1): 20-32.
- [20] MABUHAY J A, NAKAGOSHI N, ISAGI Y. Influence of erosion on soil microbial biomass, abundance and community diversity[J]. Land Degradation and Development, 2004, 15(2): 183-195.
- [21] HOU S, XIN M X, WANG L, et al. The effects of erosion on the microbial populations and enzyme activity in black soil of northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 295-301.
- [22] GARCÍA C, HERNÁNDEZ T. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(2): 171-177.
- [23] 肖海兵, 李忠武, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区土壤侵蚀-沉积作用对土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 881-890.
XIAO H B, LI Z W, NIE X D, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil enzyme activity in hilly red soil regions of south China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,

- 53(4):881-890.
- [24] BURNS R G, DICK R P. Enzymes in the environment: activity, ecology, and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [25] PERNES-DEBUYSER A, TESSIER D. Soil physical properties affected by long-term fertilization[J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55(3):505-512.
- [26] GE G F, LI Z J, FAN F L, et al. Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers [J]. Plant and Soil, 2010, 326(1):31-44.
- [27] AJWA H A, DELL C J, RICE C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(5):769-777.
- [28] MA X X, WANG L L, LI Q H, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17):5502-5511.
- [29] WEI D, ZHOU B K, MA X Z, et al. Soil microbial properties of black soil under long-term fertilisation [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B -Soil and Plant Science, 2014, 63(S2):195-199.
- [30] XIAO W, CHEN X, JING X, et al. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 123:21-32.
- [31] SLATTERY W J, RONNFELDT G R. Seasonal variation of pH, aluminium, and manganese in acid soils from north-eastern Victoria [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1992, 32(8):e1105.
- [32] WOLI K P, SAWYER J E, BOYER M J, et al. Corn era hybrid dry matter and macronutrient accumulation across development stages [J]. Agronomy Journal, 2017, 109(3):751-761.
- [33] SEMY K, SINGH M R, LEMLA W, et al. Seasonal variation of soil quality in a semi-deciduous northern tropical forest of Nagaland, India [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2023, 195(4):2359-2370.
- [34] MUELLER R C, BELNAP J, KUSKE C R. Soil bacterial and fungal community responses to nitrogen addition across soil depth and microhabitat in an arid shrubland [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6:e891.
- (上接第24页)
- [107] 陈亚宁, 王强, 李卫红, 等. 植被生理生态学数据表征的合理地下水位研究: 以塔里木河下游生态恢复过程为例 [J]. 科学通报, 2006, 51(增刊1):7-13.
- CHEN Y N, WANG Q, LI W H, et al. Study on reasonable groundwater level represented by vegetation physiological and ecological data: A case study of ecological restoration in the lower reaches of Tarim River [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S1):7-13.
- [108] 徐海量, 宋郁东, 王强, 等. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(3):400-405.
- XU H L, SONG Y D, WANG Q, et al. The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(3):400-405.
- [109] 王宏燕, 王波, 田睿, 等. 荒漠绿洲过渡带退化胡杨林地土壤水文生态特性 [J]. 塔里木大学学报, 2018, 30(4):28-35.
- WANG H Y, WANG B, TIAN R, et al. Soil hydrologic-ecological properties of degraded natural *Populus euphratica* forest in Tarim Desert-oasis ecotone [J]. Journal of Tarim University, 2018, 30(4):28-35.
- [110] 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 额济纳绿洲不同植被覆盖下土壤特性的时空变化 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(1):68-75.
- XI H Y, FENG Q, SI J H, et al. Spatio-temporal characteristics of soil in Ejina oasis [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1):68-75.
- [111] 萨如拉, 张秋良, 王伟峰, 等. 额济纳天然胡杨林土壤水分特征曲线研究 [J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(2):252-257.
- SA R L, ZHANG Q L, WANG W F, et al. A study on soil-water characteristic curve of natural *Populus euphratica* forest stand in Ejina [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(2):252-257.
- [112] 王兵, 崔向慧. 民勤绿洲-荒漠过渡区水量平衡规律研究 [J]. 生态学报, 2004, 24(2):235-240.
- WANG B, CUI X H. Researches on laws of water balance at transitional zone between oasis and desert in Minqin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(2):235-240.
- [113] 麻进, 胡广录, 陈海志, 等. 荒漠-绿洲过渡带典型混交灌木根区土壤含水率变化特征 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1):34-41.
- MA J, HU G L, CHEN H Z, et al. Variation characteristics of soil moisture content in the root-zone soil of typical mixed shrubs in the desert-oasis transition zone [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1):34-41.