

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.012 CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.012

杨新月, 郑粉莉, 王雪松, 等. 典型厚层黑土区农地土壤胞外酶季节变化对土壤侵蚀强度的响应[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 57-69.

YANG Xinyue, ZHENG Fenli, WANG Xuesong, et al. Response of seasonal variations in soil extracellular enzymes to soil erosion intensity on farmland in typical thick-layer black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 57-69.

典型厚层黑土区农地土壤胞外酶季节变化对土壤侵蚀强度的响应

杨新月¹, 郑粉莉¹, 王雪松¹, 梁瑞¹, 安小兵¹,
盛佳盈¹, 王伦¹, 张加琼¹, 付金霞²

(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), 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究黑土区农地土壤胞外酶季节变化对土壤侵蚀强度的响应, 可加深理解农地土壤侵蚀对土壤生态功能的影响机制, 也为土壤资源可持续利用提供科学依据。[方法] 选取位于黑龙江省克山县典型黑土区的坡耕地, 基于¹³⁷Cs示踪土壤侵蚀速率, 同时测定自然条件下夏季(2023年6月)及秋季(2023年9月)不同侵蚀强度等级下土壤的养分、土壤微生物量和土壤酶活性, 解析东北典型黑土区农地土壤胞外酶季节变化对土壤侵蚀强度的响应。[结果] 1) 基于¹³⁷Cs示踪的农地坡面土壤侵蚀速率变化为479.3~8041.2 t/(km²·a), 土壤侵蚀强度等级以轻度、中度和强烈侵蚀等级为主。2) 夏秋季节土壤胞外酶活性在农地坡面存在空间差异, 与夏季相比, 秋季土壤β-1,4-葡糖苷酶(BG)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸氨基肽酶(LAP)活性在农地不同坡位均有不同程度提升, 土壤胞外酶活性在农地坡面的空间分布受土壤侵蚀强度等级和季节变化的影响。3) 土壤酶活性对季节变化的响应在强烈侵蚀区最为敏感, 秋季土壤BG和NAG酶活性在强烈侵蚀区分别显著增加18.0%和24.0%, 而LAP和ACP酶活性对季节变化的响应相对较弱。4) 土壤有机碳(SOC)、全磷(TP)、水溶性有机碳(DOC)及水溶性氮(DON)含量是影响土壤胞外酶活性的关键因子。[结论] 农地坡面土壤胞外酶活性存在显著季节变化, 且强烈侵蚀区土壤胞外酶活性对季节变化的响应最显著, 此结果对加深理解东北黑土区农地土壤侵蚀对土壤生态系统功能的影响机制有重要意义。

关键词: 土壤胞外酶; 季节变化; 土壤侵蚀强度等级; 响应

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0057-13

Response of Seasonal Variations in Soil Extracellular Enzymes to Soil Erosion Intensity on Farmland in Typical Thick-Layer Black Soil Region

YANG Xinyue¹, ZHENG Fenli¹, WANG Xuesong¹, LIANG Rui¹, AN Xiaobing¹,
SHENG Jiaying¹, WANG Lun¹, ZHANG Jiaqiong¹, FU Jinxia²

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Studying the responses of seasonal variations in soil extracellular enzymes to soil erosion intensity on farmland in the black soil region can deepen the understanding of the mechanisms by which farmland soil erosion affects soil ecological functions and provides a scientific basis for the sustainable utilization of soil resources. [Methods] Slope farmland in the typical black soil region of Keshan County, Heilongjiang Province was selected. The ¹³⁷Cs tracing method was used to estimate soil erosion rate, and soil nutrients, microbial

收稿日期: 2025-09-03

修回日期: 2025-10-06

录用日期: 2025-10-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-31

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500102)

第一作者: 杨新月(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀对土壤生产力的影响研究。E-mail: xinyue000907@163.com

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

biomass, and soil enzyme activities under different erosion intensity grades were measured under natural conditions in summer (June 2023) and autumn (September 2023). The responses of seasonal variations in soil extracellular enzymes to soil erosion intensity on farmland in the typical black soil region of northeast China were analyzed. [Results] 1) Soil erosion rates on the farmland slope based on ^{137}Cs tracing ranged from 479.3 t/(km²·a) to 8 041.2 t/(km²·a). The soil erosion intensity grades were primarily classified as slight, moderate, and severe erosion levels. 2) Spatial differences in soil extracellular enzyme activities were observed on the farmland slope during summer and autumn. Compared to summer, the activities of soil β -1, 4-glucosidase (BG), β -1, 4-N-acetylglucosaminidase (NAG), and leucine aminopeptidase (LAP) increased to different degrees across different slope positions in autumn. The spatial distribution of soil extracellular enzyme activities on the farmland slopes was influenced by both soil erosion intensity grades and seasonal variations. 3) The response of soil enzyme activities to seasonal variations was most sensitive in the severe erosion zone. In autumn, soil BG and NAG enzyme activities in the severe erosion zone increased significantly by 18.0% and 24.0%, respectively, compared with summer, while LAP and acid phosphatase (ACP) enzyme activities responded relatively weakly to seasonal variations. 4) The contents of soil organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), water-soluble organic carbon (DOC), and water-soluble nitrogen (DON) were the key factors affecting soil extracellular enzyme activities. [Conclusion] Soil extracellular enzyme activities on the farmland slopes exhibit significant seasonal variations, and the response of these activities to seasonal variations is most pronounced in the severe erosion zone. These findings are of great importance for deepening the understanding of the mechanisms by which farmland soil erosion affects soil ecosystem functions in the black soil region of Northeast China.

Keywords: soil extracellular enzymes; seasonal variations; soil erosion intensity grades; response

Received: 2025-09-03

Revised: 2025-10-06

Accepted: 2025-10-13

Online(www.cnki.net): 2025-12-31

东北黑土区是我国最重要的粮食生产基地之一,粮食年产量占全国的 22.3%,被誉为国家粮食安全的“压舱石”^[1]。然而,一百多年来的过度垦殖导致黑土区农地面临着严重的土壤侵蚀问题^[2]。据调查^[3],东北黑土区侵蚀面积已超过 22 万 km²,其中强烈侵蚀强度等级以上面积占比高达 12.0%。严重的农地土壤侵蚀导致黑土变薄变瘦^[4]、土壤质量退化和粮食产量降低^[5]。已有研究^[6]表明,目前黑土层正以年平均 0.3~1.0 cm 的速度流失,导致玉米和大豆产量显著降低^[7],严重威胁国家粮食安全。因此,迫切需要开展东北农地土壤侵蚀对土壤质量退化的影响研究。

土壤胞外酶作为微生物和植物根系分泌的产物^[8-9],在土壤养分循环、有机质分解转化、植物群落相互作用等过程中发挥着“枢纽作用”^[10-12],对土壤生产力与生态功能具有敏感的指示意义^[9,13]。已有研究^[14-15]表明,东北农地土壤侵蚀是影响土壤酶活性的关键因素,土壤侵蚀通过破坏团聚体结构,减少土壤有机碳与有效养分,改变水分状态并削弱微生物群落活性,进而显著影响土壤胞外酶的分泌与活性。莫帅豪等^[16]研究表明,农地土壤酶活性在坡面极强烈侵蚀部位和轻度侵蚀部位存在显著差异,且土壤酶对侵蚀速率的敏感区间不同;安小兵等^[17]研究表

明,在东北黑土区冻融作用发生前后土壤酶活性与土壤侵蚀速率发生变化;耿华杰等^[18]研究发现,土壤侵蚀主要通过影响土壤养分进而影响土壤酶活性。土壤水分和温度也对土壤酶活性有显著影响,如相关研究^[19-22]表明,适当增加土壤水分,土壤胞外酶活性相应增加,但过高的土壤水分抑制土壤酶活性^[20];土壤温度增加导致土壤微生物活性增加,进而增加土壤胞外酶活性^[9,14]。而东北黑土区土壤水热环境在季节间的明显差异,极大改变微生物活性与底物可利用性,进而影响土壤胞外酶活性对土壤侵蚀的响应强度与方向。然而,当前在东北黑土区,基于田间条件下的土壤胞外酶活性季节变化的研究较少,尤其是田间条件下土壤胞外酶活性季节变化对土壤侵蚀强度的响应关系的研究鲜有报道,土壤胞外酶活性的季节差异及其在不同土壤侵蚀强度下的响应规律仍不明确,在一定程度上限制土壤退化的精准阻控和黑土地保护。据此,本研究以黑龙江省克山县典型厚层黑土区坡耕地为对象,基于 ^{137}Cs 估算农地侵蚀速率,分别在夏季(2023年6月)和秋季(2023年9月)采集不同土壤侵蚀强度等级下的土壤样品,同步测定土壤酶活性、养分含量和微生物生物量,揭示典型厚层黑土区农地土壤胞外酶的空间格局及其

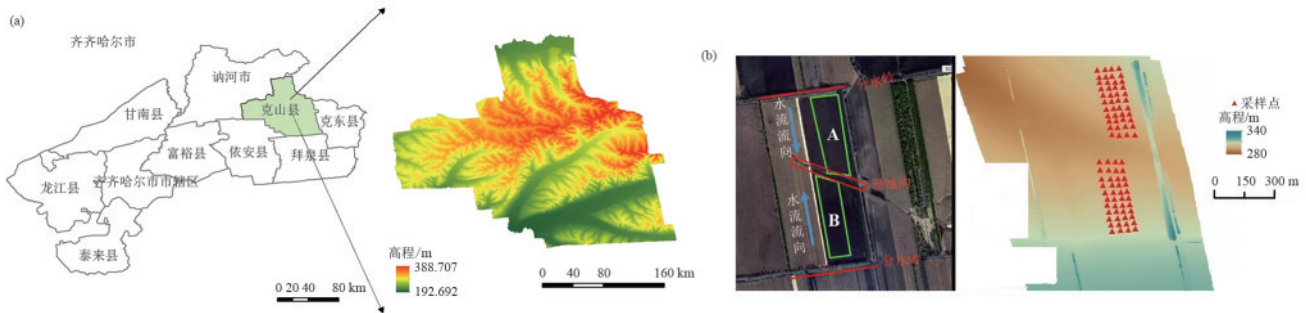
季节变化特征,明确不同类型土壤胞外酶对季节变化及侵蚀强度的敏感性差异及其关键因子,研究成果可为黑土资源保护和可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于典型厚层黑土区的黑龙江省克山县(47°50′51″N, 125°10′57″E)(图1a)。克山县位于小兴安岭的西南边缘和松嫩平原东北角,地势主要是

东北高、西南低,海拔198.7~381.7 m,农地坡度2°~7°,土壤侵蚀速率为-1 517.3~7 187.4 t/(km²·a)(-表示沉积)^[23]。该地区气候类型属于温带大陆性季风气候,年平均气温3.0℃,年平均降水量510 mm,主要集中在6—10月,且以7、8月为主,是典型的夏季多雨地区。农地土壤类型以黑土为主,平均黑土层厚度40~60 cm,土壤质地为粉壤土,当地种植模式多为玉米-大豆轮作。



注:A、B表示农地坡面。

图1 研究区位置与采样点布设

Fig. 1 Location of study area and distribution of sampling points

1.2 样地选取与土壤样品采集

通过野外调查和实地考察,选取位于黑龙江省克山县西城镇李长槐屯(48°08′19″N, 125°29′38″E)的2块典型坡耕地(图1b)为研究地。2块农地的坡度为3°,开垦时间约为80 a,种植方式为玉米-大豆轮作,耕作方式为顺坡宽垄,采样当年种植大豆,主要使用的肥料种类为尿素、磷酸二氢铵和硫酸钾,全年累积施肥量为450 kg/hm²,其中氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)施肥比例为6:4:3。田间常规农药施用按照当地常规用药,在出苗前施用乙草胺(预防性除草),在苗期联合施用高效氯氟菊酯类和吡虫啉。

本研究分别于2023年6月(夏季)和9月(秋季)按照网格法采集土壤样品,夏季(6月)平均气温约20.5℃,降水集中,土壤含水量较高;秋季(9月)平均气温约14.2℃,降水减少,土壤湿度下降(图2)。具体为在沿坡长方向35~50 m和垂直坡长方向20~25 m将坡面均匀划分为88个网格,每个网格作为一个采样点,并在每个采样点按照“品”字形采集厚度为20 cm的耕层土壤样品3个。然后,将3个重复样品充分混合均匀后,分装到2个自封袋中,一部分放到室外自然风干,另一部分则作为土壤鲜样,放置于-20℃冰箱中冷冻保存。

土壤¹³⁷Cs样品采集:结合课题组前期研究^[17]结果,确定坡面土壤¹³⁷Cs的分布深度,采集土壤¹³⁷Cs样品。由于在坡面侵蚀区和沉积区,土壤¹³⁷Cs分别分布在30~40 cm土层,故而于2022年10月,在坡面侵

蚀区设定的土壤样品采集深度为30 cm,在坡面沉积区设定的土壤样品采集深度为40 cm;然后,按照上述土壤性质样品采集方法,在每个网格内按照“品”字形取样法采集至少3个重复样,并将该网格点的重复样混合均匀装入自封袋。

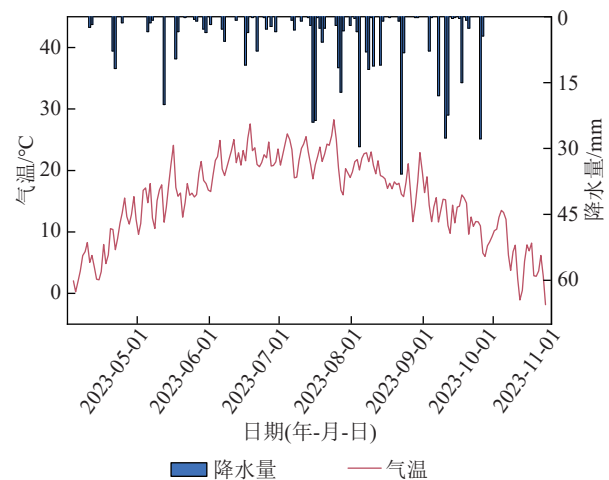


图2 研究样地2023年5月1日至11月1日温度和降水量的动态变化

Fig. 2 Dynamic variations in temperature and precipitation in sample plots from May 1 to November 1 in 2023

1.3 土壤样品处理与测定

土壤¹³⁷Cs样品的处理与测定:土壤样品经过风干、去除杂质后,过2 mm筛,称取300 g装入特制样品盒中封存30 d,之后使用γ能谱分析仪测定(误差±5%,置信度95%)。

土壤风干样品的处理:样品经自然风干、剔除杂质后,研磨过1 mm筛用于测定土壤速效磷(AP),过

0.25 mm 筛用于测定土壤全氮(TN)、全磷(TP)和土壤有机碳(SOC)^[24-25]。

土壤鲜样品的处理:将采集土壤样品除去杂质后,过2 mm 筛后保存于-20℃冰箱,用于测定水溶性有机碳(DOC)、水溶性有机氮(DON)、土壤酶活性和土壤微生物生物量。

土壤微生物生物量碳氮磷(MBC、MBN、MBP)测定使用氯仿熏蒸法,MBC、MBN、MBP回收系数分别是0.45、0.54、0.40^[26]。

土壤胞外酶活性测定方法为CH₃COONa·3H₂O缓冲液-96微孔酶标板荧光法^[27-28],本研究测定的土壤胞外酶为亮氨酸氨基肽酶(LAP)、β-1,4-葡糖苷酶(BG)、β-1,4-N-乙酰氨基葡糖苷酶(NAG)和酸性磷酸酶(ACP)。

1.4 土壤侵蚀速率计算

研究区土壤¹³⁷Cs背景值采用课题组在黑龙江省克山县的研究成果^[16-17],其值为1 974.6 Bq/m²。土壤¹³⁷Cs的面积活度和土壤侵蚀速率根据ZHANG等^[29]的耕地质量平衡模型计算。

土壤样品的质量活度计算公式为:

$$a = \frac{AMT}{S} \times \frac{s}{tm} \quad (1)$$

式中: a 为土样质量比活度,Bq/kg; A 为标准源质量比活度,Bq/kg; M 为标准源重量,kg; T 为标准源测量时间; S 为标准源测量净峰面积,m²; s 为土样测量净峰面积,m²; t 为土样测量时间; m 为每盒土样重量,kg。

采样地土壤面积活度的计算公式为:

$$A = a \frac{m}{q} \quad (2)$$

式中: A 为土壤面积活度,Bq/m; a 同公式(1); m 为土样<2 mm 重量,kg; q 为采样仪器面积,m²。

$$A = A_{\text{ref}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{n-1963} \quad (3)$$

式中: A_{ref} 为采样年份¹³⁷Cs背景值,Bq/m²; A 为土壤样品¹³⁷Cs面积活度,Bq/m²; h 为年平均土壤侵蚀厚度,cm/a; H 为耕层深度,cm; n 为采样年份。

年平均土壤侵蚀速率的计算公式为:

$$E = h\rho \times 10^4 \quad (4)$$

式中: E 为土壤侵蚀速率,t/(km²·a); h 为年平均土壤侵蚀厚度,cm/a; ρ 为土壤体积质量,g/cm³。

本研究通过酶计量矢量模型分析土壤微生物代谢限制状况^[30-31],模型表达式为:

$$\text{矢量长度(VL)} = \text{SQRT}(X^2 + Y^2)$$

$$\text{矢量角度(VA)} = \text{DEGREES}[\text{ATAN2}(X, Y)]$$

$$X = \ln(\text{BG}) : \ln(\text{BG} + \text{ACP})$$

$$Y = \ln(\text{BG}) : \ln(\text{BG} + \text{NAG} + \text{LAP}) \quad (5)$$

土壤微生物相对碳(C)限制随土壤酶矢量长度(VL)的增大而增强;VA<45°代表土壤微生物受到相对氮限制;VA>45°代表土壤微生物相对磷限制。土壤酶矢量角度(VA)越大,表示土壤微生物受到的磷限制越强;土壤酶矢量角度(VA)越小,表示土壤微生物受到的氮限制越强。

1.5 数据分析

运用Excel 2016软件处理数据,采用SPSS 20软件对季节变化前后数据进行正态性检验,并进行单因素方差分析;采用克里金插值方法绘制土壤侵蚀速率空间分布图;采用RDA与相关性分析来量化因子解释度,利用Origin 2019软件进行相关性分析作图,用Canoco 5.0软件进行RDA分析。

2 结果与分析

2.1 农地坡面土壤侵蚀速率及其强度等级的空间分布

2.1.1 农地坡面土壤侵蚀速率 由表1可知,基于¹³⁷Cs示踪的2块样地坡面土壤侵蚀速率为479.3~8 041.2 t/(km²·a),其中,坡面A和坡面B的侵蚀速率为479.3~7 802.3、537.9~8 041.2 t/(km²·a),其平均侵蚀速率分别为2 751.0、3 093.3 t/(km²·a),且2个坡面的土壤侵蚀速率变异系数也相似。2块样地相比,坡面B的土壤侵蚀速率大于坡面A,2个坡面的平均侵蚀速率为2 922.2 t/(km²·a)。

表1 2块样地坡面侵蚀速率

Table 1 Erosion rates of slopes in two sample plots

研究样地	土壤侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)				变异系数(CV)/%
	最小值	最大值	平均值	标准差(SD)	
坡面A	479.3	7 802.3	2 751.0	1 644.6	59.8
坡面B	537.9	8 041.2	3 093.3	1 850.8	59.8
样本总数	479.3	8 041.2	2 922.2	1 749.1	59.9

注:坡面A样本数为44;坡面B样本数为44;样本总数N为88。

基于水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[32]的土壤侵蚀强度等级划分标准,对样地A和B坡面的土壤侵蚀强度等级进行划分(表2)。结果表明,对于农地坡面A,轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀等级的各样点数分别占总样点数的52.3%、36.4%和11.4%,说明农地坡面A的土壤侵蚀强度主要以轻度和中度侵蚀强度等级为主;对于农地坡面B,轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀等级的样点数分别占总样点数的45.6%、40.9%和11.4%,1个样点为极强烈侵蚀等级,占总样点数的2.3%,说明农地坡面B的土壤侵蚀强度等级也主要是以轻度和中度侵蚀强度等级为主。

表 2 样地坡面土壤侵蚀强度等级
Table 2 Soil erosion intensity grades of slopes in sample plots

研究样地	土壤侵蚀强度等级	土壤侵蚀强度速率/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	样点数	土壤侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)		
				最小值	最大值	平均值±标准差
农地坡面 A	轻度侵蚀	200~2 500	23	479.3	2 464.8	1 494.9±577.9
	中度侵蚀	2 500~5 000	16	2 569.8	4 793.8	3 597.8±769.4
	强烈侵蚀	5 000~8 000	5	5 034.5	7 802.3	5 819.7±1 143.2
农地坡面 B	轻度侵蚀	200~2 500	20	537.9	2 491.8	1 514.4±585.1
	中度侵蚀	2 500~5 000	18	2 771.3	4 841.8	3 700.8±675.2
	强烈侵蚀	5 000~8 000	5	5 259.3	7 171.2	6 232.9±831.4
	极强烈侵蚀	8 000~15 000	1	8 041.2	8 041.2	8 041.2±0
合计	轻度侵蚀	200~2 500	43	479.3	2 491.8	1 503.9±574.4
	中度侵蚀	2 500~5 000	34	2 569.8	4 841.8	3 652.3±711.8
	强烈侵蚀	5 000~8 000	10	5 034.5	7 802.3	6 026.3±967.2
	极强烈侵蚀	8 000~15 000	1	8 041.2	8 041.2	8 041.2±0

2.1.2 农地坡面土壤侵蚀强度等级空间分布 由图 3 可知,农地坡面 A 和 B 土壤侵蚀速率具有相似的空间分布特征,均表现为坡下部>坡上部>坡顶和坡脚,且在坡宽方向上,中部的土壤侵蚀速率大于两侧坡面。农地坡面 A 和 B 的土壤侵蚀强度等级空间分布规律也相似,轻度侵蚀等级从坡顶至坡脚均有分布;中度侵蚀等级主要分布在坡中上部、坡中下部和坡脚,在坡顶也有少量分布;强烈侵蚀等级集中分布在坡中下部。

2.2 夏秋季节农地坡面土壤胞外酶活性的动态变化及其空间分布

2.2.1 土壤胞外酶夏秋季节的动态变化 由表 3 可知, A 坡面在夏季(2023 年 6 月)和秋季(2023 年 9 月)的土壤 BG 酶活性平均值分别为 119.8、140.8 nmol/(g·h),其值在秋季较夏季显著增加 17.6%;而 B 坡面土壤 BG 酶活性在秋季较夏季增加 8.3%,但无显著差异。A 和 B 坡面土壤 NAG 酶活性平均值在夏秋季之间均无显著差异。A 坡面土壤 LAP 酶活性平均值在秋季[9.3 nmol/(g·h)]较夏季[7.8 nmol/(g·h)]增加 19.2%;而 B 坡面土壤 LAP 酶活性平均值无显著差异。A 坡面土壤 ACP 酶活性平均值在秋季[247.5 nmol/(g·h)]较夏季

[(203.3 nmol/(g·h))]显著增加 21.7%;而 B 坡面土壤 ACP 酶活性平均值在秋季较夏季显著降低 19.6%。表明 4 种土壤胞外酶活性在夏秋季节变化存在差异,而以土壤 BG 和 ACP 酶活性的变化尤为明显。

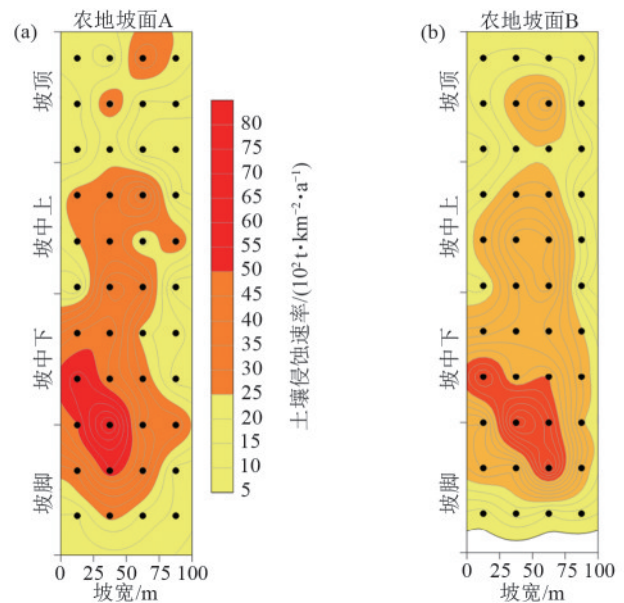


图 3 2 块样地坡面土壤侵蚀速率的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion rates of slopes in two sample plots

表 3 农地坡面土壤酶活性的季节变化

Table 3 Seasonal variations in soil enzyme activities on farmland slopes

土壤酶活性	农地坡面 A		农地坡面 B		平均	
	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季
BG	119.8±19.1b	140.8±19.4a	116.9±19.1a	115.7±15.0a	118.4±19.0b	128.2±21.4a
NAG	32.9±10.9a	36.8±8.5a	35.3±14.4a	36.4±10.1a	34.1±12.8a	36.6±9.3a
LAP	7.8±1.8b	9.3±1.7a	11.1±1.2a	10.4±1.7b	9.4±2.3a	9.9±1.7a
ACP	203.3±33.6b	247.5±39.2a	231.5±52.4a	186.2±34.4b	217.4±46.0a	216.8±47.9a

注:BG 为 β-1,4-葡糖苷酶, nmol/(g·h); NAG 为 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶, nmol/(g·h); LAP 为亮氨酸氨基肽酶, nmol/(g·h); ACP 为酸性磷酸酶, nmol/g·h; 表中数据为平均值±标准差; 不同小写字母表示夏秋季之间土壤酶活性存在显著差异(p<0.05)。

2.2.2 农地坡面土壤胞外酶活性的空间分布 受夏秋季节土壤温度和水分变化及坡面侵蚀强度空间分布的影响,农地坡面土壤胞外酶活性的空间分布也存在差异。由图 4 可知,对于 A 坡面,夏季土壤 BG 酶活性在坡中下部最高,坡顶、坡中上部和坡脚处次之,而秋季(2023 年 9 月)土壤 BG 酶活性在坡脚处最高,且从坡顶至坡脚呈逐渐降低趋势;与夏季相比,秋季土壤 BG 酶活性在坡顶有所增加,而在坡中上部、坡中下部和坡脚有所降低。夏季 A 坡面土壤 NAG 酶活性在坡顶明显高于其他坡面部位,而秋季土壤 NAG 酶活性在整个坡面仍保持较高水平,且其从坡顶到坡脚呈逐渐增加的趋势;与夏季

相比,秋季土壤 NAG 酶活性在坡顶、坡中上部、坡中下部均有不同程度的增加,而其在坡脚有所降低。夏季 A 坡面土壤 LAP 酶活性在坡顶和坡脚明显高于坡中上部和坡中下部,且其在坡脚处最大,而秋季土壤 LAP 酶活性在坡顶最高,且从坡中上部至坡脚逐渐增加;与夏季相比,秋季土壤 LAP 酶活性在坡顶有所增加,而在坡中上部、坡中下部和坡脚均有所下降。夏季土壤 ACP 酶活性在坡面分布较均匀,其在坡中上部和坡中下部略高,而秋季土壤 ACP 酶活性在坡中上部明显高于其他坡位;与夏季相比,秋季土壤 ACP 酶活性在坡顶、坡中上部和坡中下部有小幅增加,而其在坡脚处明显降低。

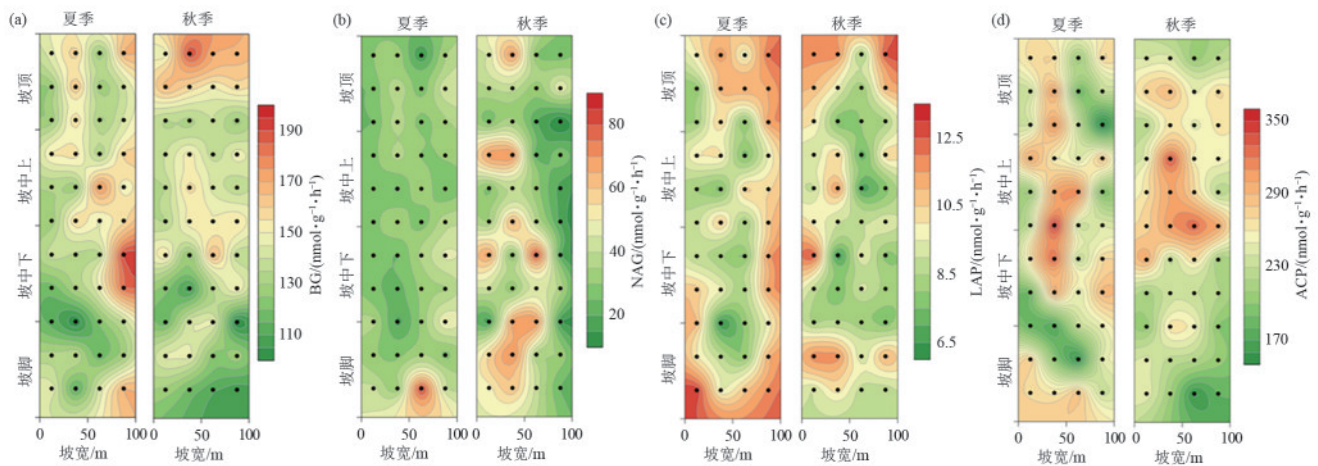


图 4 夏秋季节土壤胞外酶在坡面 A 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil extracellular enzymes on slope A during summer and autumn

从图 5 可以看出,对于 B 坡面,夏季土壤 BG 酶活性在坡中上部和坡脚处最大,坡顶和坡中下部次之;而秋季坡中下部和坡脚处土壤 BG 酶活性最大,坡顶和坡中上部次之;与夏季相比,秋季土壤 BG 酶活性在坡顶和坡中上部有所降低,而在坡中下部和坡脚处有所增加。夏季土壤 NAG 酶活性在坡中部明显高于其他坡位,而秋季土壤 NAG 酶活性在坡中上部明显高于其他坡位;与夏季相比,秋季土壤 NAG 酶活性在坡顶、坡中上部、坡中下部和坡脚均有不同程度的增加。夏季土壤 LAP 酶活性在坡顶最高,坡脚和坡中下部次之,坡中上部最低,秋季土壤 LAP 酶活性仍在坡顶最高,且从坡顶到坡脚其依次降低;与夏季相比,秋季坡顶土壤 LAP 酶活性有所增加,而在坡中上部、坡中下部和坡脚处均有所下降。夏季土壤 ACP 酶活性分布较均匀,其在坡顶和坡中上部略高于坡中下部和坡脚处,而秋季土壤 ACP 酶活性在坡中上部明显高于其他坡位;与夏季相比,秋季土壤 ACP 酶活性在坡中上部有所增加,而在坡顶、坡中下部、坡脚处均有所下降。

2.3 夏秋季节土壤胞外酶活性对土壤侵蚀强度等级的响应

2.3.1 夏秋季节土壤胞外酶活性对土壤侵蚀强度等级的响应 农地土壤胞外酶在夏秋季节的动态变化对土壤侵蚀强度等级的响应存在差异(表 4)。在夏季和秋季,土壤 BG 酶活性在轻度侵蚀区均最高,在强烈侵蚀区均最低;与轻度侵蚀区相比,中度侵蚀区的土壤 BG 酶活性在夏季和秋季分别降低 5.4% 和 3.6%,强烈侵蚀区的土壤 BG 酶活性在夏季显著降低 15.4%,在秋季降低 5.9%;与夏季相比,秋季土壤 BG 酶活性在轻度、中度、强烈侵蚀区分别增加 6.0%、8.1% 和 18.0%。在夏季和秋季,土壤 NAG 酶活性在强烈侵蚀区较轻度侵蚀区分别下降 10.4% 和增加 9.7%;与夏季相比,秋季轻度侵蚀区、中度侵蚀区和强烈侵蚀区的土壤 NAG 酶活性分别增加 1.3%、9.4% 和 24.0%。表明土壤 BG 和 NAG 酶活性在夏秋季节对侵蚀强度等级响应敏感。在夏季和秋季,土壤 LAP 酶活性在轻度侵蚀区最高,与轻度侵蚀区相比,中度侵蚀区的土壤 LAP 酶活性在夏季和秋季分别降低 3.9% 和 3.2%,在强烈侵蚀区其分别降低 10.7% 和

9.4%;与夏季相比,秋季轻度、中度和强烈侵蚀区土壤 LAP 活性分别增加 4.1%、4.9% 和 5.7%。在夏秋季节,土壤 ACP 酶活性在不同侵蚀强度区无显著变化,与轻度侵蚀区相比,中度侵蚀区和强度侵蚀区的土壤

ACP 酶活性仅增加 0.5% 或下降 4.3%;且与夏季相比,秋季土壤 ACP 酶活性在轻度侵蚀区、中度侵蚀区和强烈侵蚀区仅增加 0.6% 或降低 6.5%,说明土壤 ACP 酶活性对侵蚀强度等级的响应不敏感。

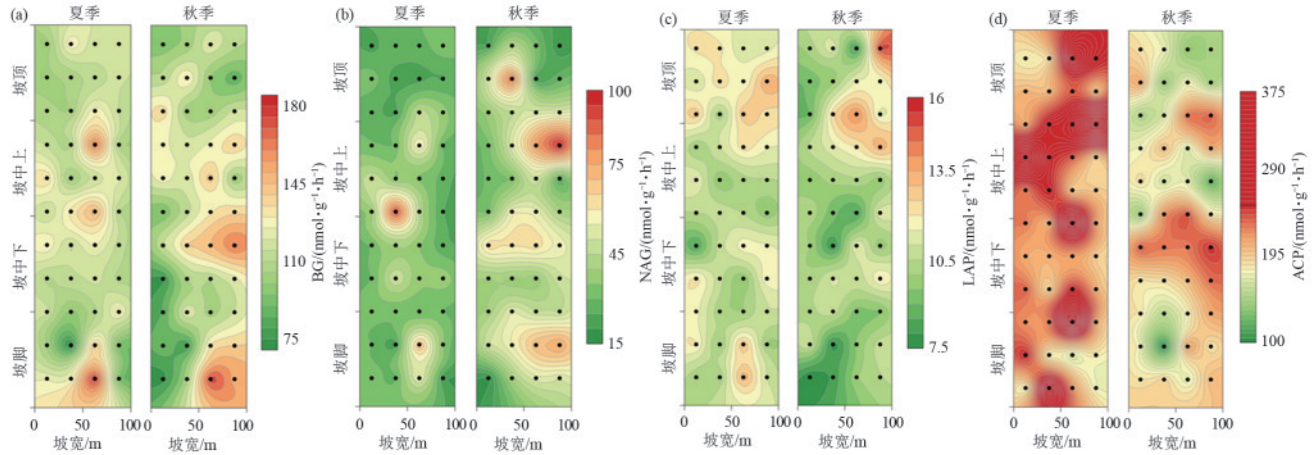


图 5 夏秋季节土壤胞外酶在坡面 B 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil extracellular enzymes on slope B during summer and autumn

表 4 不同土壤侵蚀强度等级下农地土壤酶活性的季节变化

Table 4 Seasonal variations in soil enzyme activities on farmland under different soil erosion intensity grades

处理	夏季			秋季		
	轻度	中度	强烈	轻度	中度	强烈
BG	123.6±19.3Aa	116.9±17.2Aa	104.5±18.4Bb	131.0±22.9Aa	126.3±20.5Aa	123.3±18.0Aa
NAG	34.3±11.3Aa	35.19±15.4Aa	30.7±9.3Aa	34.7±9.4Aa	38.5±9.6Aa	38.1±6.8Aa
LAP	9.7±2.2Aa	9.3±2.4Aa	8.7±2.6Aa	10.1±1.9Aa	9.8±1.5Aa	9.2±1.8Aa
ACP	218.7±39.2Aa	217.4±52.1Aa	222.7±48.2Aa	217.6±47.6Aa	218.7±45.8Aa	208.2±58.6Aa

2.3.2 夏秋季节土壤胞外酶活性与土壤侵蚀速率的关系 按照轻度、中度和强烈侵蚀强度等级,分别分析夏秋季节土壤酶活性与农地侵蚀速率的关系见图 6 和图 7。由图 6 可知,在轻度侵蚀等级[200~2 500 t/(km²·a)]条件下,夏季农地土壤 BG、NAG、LAP 和 ACP 酶活性随侵蚀速率的增加而增加,但土壤 NAG 酶活性与侵蚀速率呈显著负相关($p < 0.05$),其他 3 种酶活性与侵蚀速率均呈不显著正相关($p > 0.05$),说明在轻度侵蚀强度等级下,土壤 BG 酶活性对侵蚀速率的响应较敏感;在中度侵蚀强度等级[2 500~5 000 t/(km²·a)]条件下,夏季农地土壤 BG、LAP 和 ACP 酶活性与侵蚀速率均呈不显著负相关,但土壤 NAG 酶活性与侵蚀速率呈不显著正相关($p > 0.05$),说明中度侵蚀强度等级下,4 种土壤酶活性对侵蚀速率的响应均不敏感;在强烈及以上侵蚀强度等级[>5 000 t/(km²·a)]条件下,夏季农地土壤 BG、NAG、LAP 和 ACP 酶活性均随侵蚀速率的增加而减少,但除土壤 BG 酶外,其他 3 种酶活性与侵蚀速率呈不显著负相关($p > 0.05$),说明

在强烈及以上侵蚀强度等级下,土壤 BG 活性对侵蚀速率的响应较敏感。

与夏季类似,在轻度侵蚀强度等级[200~2 500 t/(km²·a)]下,秋季农地土壤 BG 和 LAP 酶活性均与侵蚀速率呈不显著的正相关关系($p > 0.05$),土壤 NAG 酶活性与侵蚀速率呈显著的正相关($p < 0.05$),而土壤 ACP 酶活性与侵蚀速率呈不显著的负相关($p > 0.05$)(图 7),说明在轻度侵蚀强度等级下,土壤 NAG 酶活性对侵蚀速率的响应较敏感。在中度侵蚀强度等级[2 500~5 000 t/(km²·a)]下,秋季农地土壤 BG、NAG 和 ACP 酶活性与侵蚀速率均呈不显著正相关,但土壤 LAP 酶活性与侵蚀速率呈不显著负相关($p > 0.05$),说明中度侵蚀强度等级下,4 种土壤酶活性对侵蚀速率的响应均不敏感。在强烈及以上侵蚀强度等级[>5 000 t/(km²·a)]下,土壤 NAG 酶活性与侵蚀速率呈不显著正相关($p > 0.05$),而其他 3 种酶活性与侵蚀速率呈不显著负相关($p > 0.05$),说明在强烈及以上侵蚀强度等级下,土壤酶活性对侵蚀速率的响应也甚敏感。

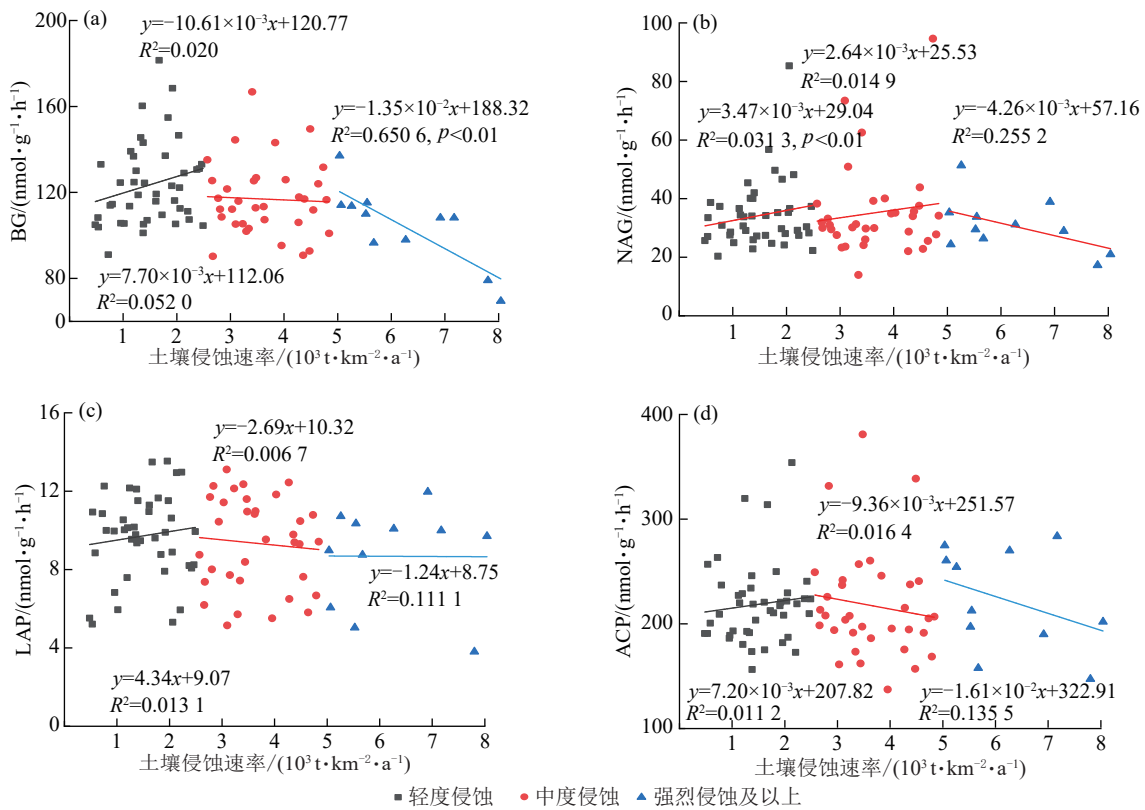


图 6 夏季土壤胞外酶与土壤侵蚀速率的关系

Fig. 6 Relationship between soil extracellular enzymes and soil erosion rates in summer

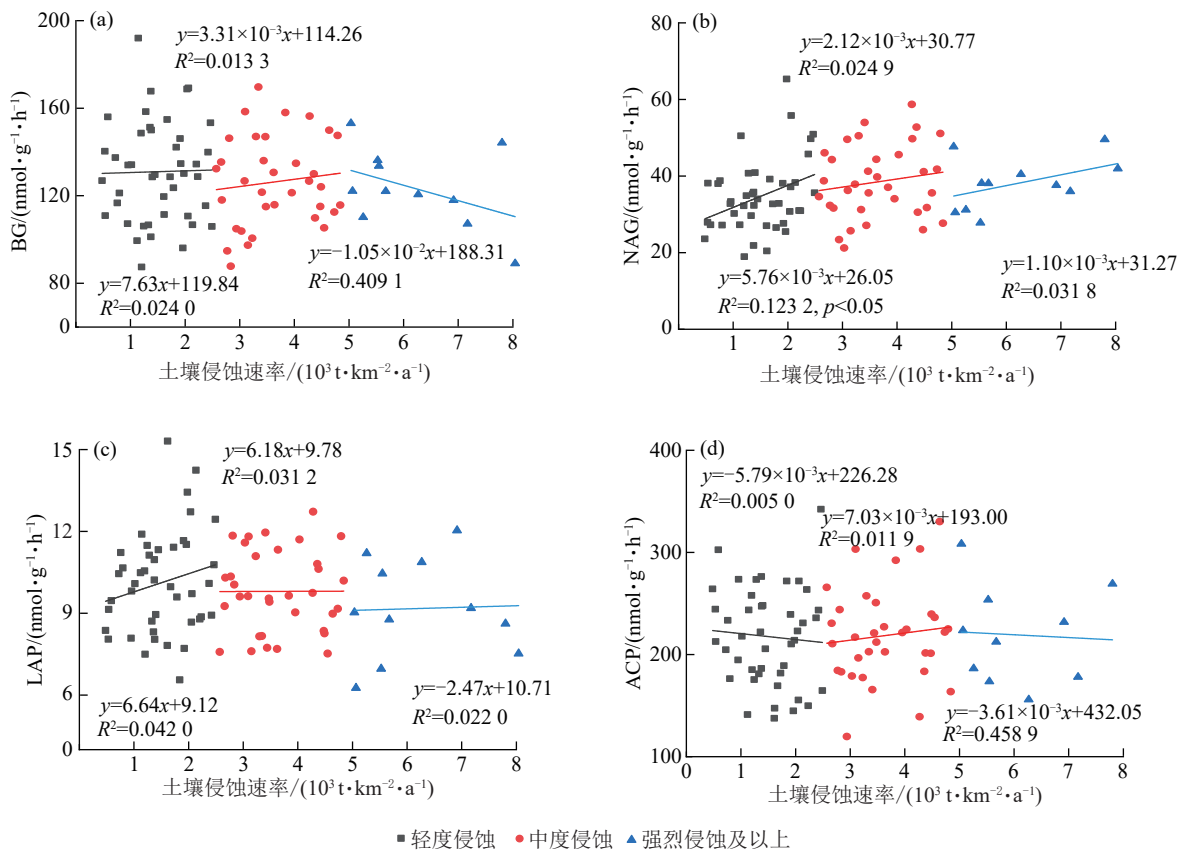


图 7 秋季土壤胞外酶与土壤侵蚀速率的关系

Fig. 7 Relationship between soil extracellular enzymes and soil erosion rates in autumn

2.4 影响土壤胞外酶活性的关键土壤养分和微生物性质分析

土壤养分和微生物生物量对土壤胞外酶活性有重要影响。冗余分析(RDA)结果(图8)表明,土壤养分和微生物生物量对土壤胞外酶的总解释度为70.99%(RDA1: 45.73%, RDA2: 25.26%),其中SOC、DOC、DON、TP显著影响土壤酶活性,解释度分别为38.0%、11.5%、12.8%和9.0%(表5),而TN、AP、MBC、MBN和MBP对4种土壤酶活性和VL和VA的解释度有限,仅占2.6%~4.3%。

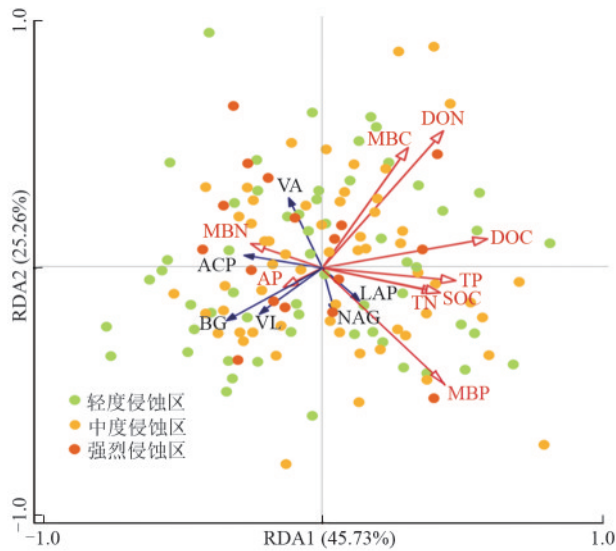


图8 土壤胞外酶与土壤养分和微生物量的冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis of soil extracellular enzymes with soil nutrients and microbial biomass

表5 土壤养分和微生物量对土壤胞外酶的解释度和显著性检验结果

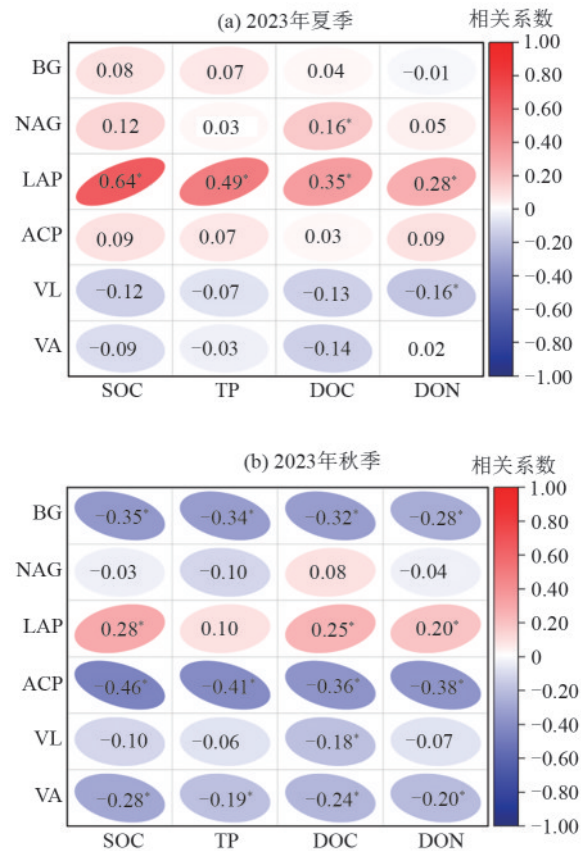
Table 5 Explanatory power and significance test results of soil nutrients and microbial biomass on soil extracellular enzymes

项目	土壤养分与土壤微生物类型	解释率/%	p
土壤养分	SOC	38.0	0.002**
	DOC	11.5	0.010*
	DON	12.8	0.002**
	TP	9.0	0.012*
	TN	3.4	0.196
土壤微生物量	AP	2.6	0.320
	MBN	4.3	0.156
	MBC	4.3	0.146
	MBP	2.6	0.340

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

从图9可以看出,土壤BG、ACP、VL与土壤SOC、TP、DOC、DON呈负相关,而土壤LAP、NAG与土壤SOC、TP、DOC均呈正相关,VA与土壤

SOC、TP呈负相关,表明影响研究区农地土壤酶活性的关键土壤性质为SOC、DOC、DON和TP。



注:*表示 $p < 0.05$ 。

图9 土壤胞外酶与土壤养分含量的相关性热图

Fig. 9 Heatmaps of correlation between soil extracellular enzymes and soil nutrient contents

3 讨论

3.1 农地土壤胞外酶在夏秋季节的动态变化及其空间分布

本研究表明,除土壤ACP酶活性外,侵蚀区土壤BG、NAG和LAP酶活性在秋季均较夏季有所上升,表明土壤胞外酶活性对季节变化具有一定响应,可能与季节性降雨改善土壤水分状况及作物生长过程密切相关^[33-34]。研究期间(2023年6—9月)累计发生39次降雨事件,有效提升土壤水分含量,与关于增雨促进土壤酶活性的研究^[19,22,35]结果一致。在7—8月份,较高的土壤温度可以增强微生物代谢活性,从而提高胞外酶的分泌水平^[9,14]。在空间分布方面,A和B坡面各类酶活性呈现明显差异,可能源于降雨引发的土壤水分和养分短期波动,进而影响微生物群落结构和植物根系活动^[9-10]。适度的土壤水分提升可加快呼吸底物扩散速率,改变养分形态,增强微生物代谢及胞外酶活性^[33-34]。坡面土壤侵蚀强度的空间异质性也是影响酶活性分布的重要因素。研究区坡面侵蚀强度呈现坡上部<坡下部的趋势,而BG和

LAP 酶活性在坡中上部较高,可能因为该区域径流分散,侵蚀力较弱,形成更适宜微生物生存的环境。A 坡面 NAG 酶活性和 B 坡面 BG 酶活性在坡脚显著升高,可能与该部位土壤沉积、有机质积累及水分保持能力增强^[36],具备更有利的微生物生存环境有关。A 农地坡面 NAG 酶活性和 B 农地坡面 BG 酶活性在坡底显著高于其他位置,可能与土壤在坡底部发生沉积,以及坡底积累的有机质和水分保持能力有关^[36-38]。综上,农地坡面土壤酶活性的季节性变化与气候因子、作物生长、坡面空间侵蚀强度及降雨引发的沉积过程密切相关,侵蚀区由于 SOC、TP、DOC、DON 及微生物生物量的下降,促使与碳、氮获取相关的 BG 与 NAG 酶活性更易受到季节性水热波动的驱动而变化,而沉积区有机质与水分的累积使酶活性维持在较高水平,但季节间差异较小。

3.2 农地土壤胞外酶季节变化对土壤侵蚀强度等级的响应

本研究表明,强烈侵蚀区土壤酶活性在夏秋季节变化更为显著,表明该区域对季节性环境变化响应更敏感,可能由于强烈侵蚀区土壤养分含量较低,降雨引发的侵蚀—沉积过程进一步加剧养分流失,从而增强酶活性的季节响应性^[14-16]。本研究与莫帅豪等^[16]的研究结果一致,均表明土壤酶活性在不同侵蚀强度等级下存在显著差异,且响应敏感性不同。耿华杰等^[18]的研究表明,土壤侵蚀通过影响养分含量间接调控酶活性,降雨侵蚀通过淋溶作用降低土壤全量养分,破坏养分稳态,限制微生物生长,造成微生物养分限制^[39]。本研究中,土壤侵蚀通过降低 SOC、TP、DOC 与 DON 并改变微生物量,直接影响与碳、氮获取相关的 BG 与 NAG 酶活性,其中,DOC 与 DON 的季节性下降尤为关键。线性回归分析显

示,季节变化未对各侵蚀区酶活性产生抑制效应,与王兴等^[40]在黄土高原增雨试验结果不一致,原因可能包括:1)本研究采样区域为垄丘,降雨期间垄沟侵蚀量较大,而垄丘因水流分散而受侵蚀影响较小^[41];2)研究时间为 6—9 月,此时作物生长改善土壤环境,提升酶活性,从而抵消降雨侵蚀的负面影响。

3.3 影响土壤酶活性季节变化的关键驱动因子分析

由表 6 可知,在夏季(2023 年 6 月),随着土壤侵蚀强度等级由轻度向强烈递增,农地土壤养分含量呈明显下降趋势。进入秋季(2023 年 9 月),各侵蚀强度等级下土壤 SOC 和 TP 含量变化不显著,而 DOC 和 DON 含量则在各侵蚀等级均显著下降,反映出可溶性养分对季节性降雨更为敏感。冗余分析结果显示,土壤 SOC、TP、DOC 和 DON 是影响土壤酶活性的主要因子。相关性分析(图 9)表明,夏季土壤 BG 酶活性与土壤养分含量无显著相关性;秋季土壤 BG 酶活性与土壤 SOC、TP、DOC 和 DON 含量均呈显著负相关。夏季土壤 NAG 酶活性与土壤养分含量均呈正相关,其中与土壤 DOC 呈显著正相关,秋季土壤 NAG 酶活性仅与土壤 TP 呈显著负相关。在夏季和秋季土壤 LAP 酶活性与土壤 SOC、TP、DOC 和 DON 含量均呈显著正相关。在夏季土壤 ACP 酶活性仅与土壤 SOC 含量呈显著正相关,而与其他土壤养分含量无显著相关性,秋季土壤 ACP 酶活性与土壤 SOC、TP、DOC 和 DON 含量均呈显著负相关。在夏季土壤 VL 与土壤 DOC、DON 含量呈显著负相关,与其他土壤养分含量无显著相关性,在秋季 VL 仅与土壤 DOC 呈显著负相关。在夏季土壤 VA 与土壤养分含量均无显著相关性;在秋季 VA 与土壤 SOC、TP、DOC 和 DON 含量均呈显著负相关。

表 6 不同土壤侵蚀强度等级下农地坡面土壤养分的季节变化

Table 6 Seasonal variations in soil nutrient content on farmland slopes under different soil erosion intensity grades

土壤养分	夏季			秋季		
	轻度	中度	强烈	轻度	中度	强烈
SOC	46.70±5.70Aa	45.10±5.60Aa	43.00±5.10Aa	45.10±4.80Aa	43.90±3.80Aa	45.60±5.70Aa
TP	0.77±0.08Aa	0.74±0.07Aa	0.71±0.05Aa	0.74±0.08Aa	0.71±0.06Aa	0.75±0.07Aa
DOC	53.60±9.50Aa	55.60±13.40Aa	50.00±6.50Aa	38.60±8.40Ba	40.00±9.00Ba	39.90±7.70Ba
DON	5.90±1.20Aa	5.60±1.00Aa	5.30±1.40Aa	3.30±1.00Ba	3.30±1.00Ba	3.20±0.80Ba

注: SOC 为土壤有机碳, g/kg; TP 为土壤全磷, g/kg; DOC 和 DON 分别表示水溶性有机碳和氮, mg/kg。不同大写字母表示相同侵蚀强度不同时期差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同时期不同侵蚀强度间差异显著($p < 0.05$)。

本研究结果表明,土壤酶活性与养分指标之间的关系具有明显的季节性差异。夏季酶活性整体与养分呈正相关,秋季则呈负相关,尤其是 BG 和 ACP 酶活性,可能源于夏季频繁降雨导致土壤养分随径流和泥沙迁移而流失,使侵蚀区养分减少,而沉积区

养分积累增加^[42-43]。土壤酶活性与养分矢量长度和角度均呈显著负相关,进一步验证土壤养分供应不足导致微生物养分限制的存在。此现象在强烈侵蚀区尤为明显,其土壤养分含量较低,对季节变化响应更敏感,季节性水热与可溶性底物的波动主导土壤

酶活性的变化;而轻度和中度侵蚀区土壤胞外酶活性无显著季节变化,可能因为降雨带来的水分提升及沉积作用,削弱养分和微生物量对酶活性的影响^[39],导致其酶活性季节变化不显著。

综上,土壤SOC、TP、DOC和DON是驱动农地土壤酶活性季节变化的关键因子,其影响机制主要通过调控微生物代谢活动和酶分泌过程,并受到土壤侵蚀强度和降雨的共同调节。

3.4 研究意义与不足

本研究揭示典型厚层黑土区坡耕地土壤侵蚀强度与季节变化共同驱动土壤胞外酶(尤其BG、NAG)时空响应规律,论证SOC、TP、DOC和DON是影响土壤胞外酶活性的关键因子,尤其在强烈侵蚀区土壤胞外酶活性对季节性变化更为敏感。一方面为将土壤胞外酶作为监测土壤生态功能退化的生物学指标提供实证支持;另一方面,提示在典型黑土区应根据坡面土壤侵蚀强度的差异,采用差异化的农田管理措施,从而实现黑土地的精准治理。当然,本研究也存在一定的局限性,如¹³⁷Cs估算的年平均土壤侵蚀速率无法很好地表征不同季节间的侵蚀差异,同时尚未对相关田间管理因素进行很好控制,如土壤温度和水分等。后续工作应采用REE、磁粉示踪等技术^[36,44]估算土壤侵蚀速率的季节变化,并精准控制田间管理变量,以便更可靠地指导黑土区的土壤保护与可持续利用实践。

4 结论

1)2块坡面样地土壤侵蚀速率空间分布一致,均呈现中下坡侵蚀最强,强烈侵蚀区集中分布的格局。

2)土壤酶活性具有显著的季节响应和空间异质性。秋季土壤BG酶活性普遍高于夏季,而NAG、LAP、ACP酶活性的季节变化总体不显著,说明BG酶活性对季节性环境变化更敏感。不同坡位与侵蚀强度区间,酶活性存在显著差异:在强烈侵蚀区,秋季BG和NAG酶活性分别较对照区显著升高(约18.0%与24.0%),而LAP与ACP酶活性对季节变化的响应较弱;BG与ACP酶活性在强烈侵蚀条件下对侵蚀速率的响应尤为敏感。

3)土壤SOC、TP、DOC和DON是影响酶活性的关键因子。BG、ACP酶活性及酶学指标VL与上述养分因子呈负相关,LAP与NAG酶活性则呈正相关。综合来看,土壤酶活性对侵蚀强度及养分状况具有良好的指示性,可作为农地侵蚀影响下土壤生态功能与养分动态的敏感生物指标。

参考文献:

- [1] 中国科学院.东北黑土地白皮书(2020)[EB/OL].[2021-07-21].<http://www.igsnr.cas.cn/publish/dbhtd/index.html>. Chinese Academy of Sciences. Northeast China black land white paper (2020) [EB/OL]. [2021-07-21]. <http://www.igsnr.cas.cn/publish/dbhtd/index.html>.
- [2] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.
ZHENG F L, ZHANG J Q, LIU G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 314-319.
- [3] 温磊磊,王教河,任明,等.东北黑土区水土流失综合治理成效[J].中国水土保持,2021(6):4-7.
WEN L L, WANG J H, REN M, et al. Effect of comprehensive control of soil and water loss in black soil area of northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(6): 4-7.
- [4] 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.
- [5] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):182-186.
ZHANG X C, ZHENG F L, AN J, et al. Effects of soil erosion on soil organic matter and nitrogen in sloping farmland in typical black soil region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 182-186.
- [6] 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.
- [7] 张珊珊,谢云,刘刚,等.中度和剧烈侵蚀黑土作物地上与地下生长发育的差异[J].中国水土保持科学,2016,14(5):29-36.
ZHANG S S, XIE Y, LIU G, et al. Difference of crop's aboveground and underground growth between moderately and severely eroded black soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(5): 29-36.
- [8] LUO L, MENG H, GU J D. Microbial extracellular enzymes in biogeochemical cycling of ecosystems [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 539-549.
- [9] 刘珊杉,周文君,况露辉,等.亚热带常绿阔叶林土壤胞外酶活性对碳输入变化及增温的响应[J].植物生态学报,2020,44(12):1262-1272.
LIU S S, ZHOU W J, KUANG L H, et al. Responses of soil extracellular enzyme activities to carbon input

- alteration and warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(12):1262-1272.
- [10] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009, 462(7274):795-798.
- [11] CUI Y X, WANG X, WANG X X, et al. Evaluation methods of heavy metal pollution in soils based on enzyme activities: A review [J]. Soil Ecology Letters, 2021, 3(3):169-177.
- [12] DE BARROS J A, DE MEDEIROS E V, DA COSTA D P, et al. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(4):458-472.
- [13] KRISHNAN A, CONVEY P, GONZALEZ M, et al. Effects of temperature on extracellular hydrolase enzymes from soil microfungi[J]. Polar Biology, 2018, 41(3):537-551.
- [14] 张瑞, 徐宗学, 王志强. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤酶活性的影响[J]. 中国水土保持, 2018(9):47-51.
ZHANG R, XU Z X, WANG Z Q. Influence of soil erosion to soil enzyme activities in the black soil area in northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(9):47-51.
- [15] 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.
- [16] 莫帅豪, 王雪松, 郑粉莉, 等. 典型黑土区坡面侵蚀-沉积对土壤微生物养分限制的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6):3023-3033.
MO S H, WANG X S, ZHENG F L, et al. Effects of slope erosion-deposition on soil microbial nutrient limitation in the typical mollisol region of northeast China [J]. China Environmental Science, 2023, 43(6):3023-3033.
- [17] 安小兵, 郑粉莉, 王雪松, 等. 冻融作用对东北黑土区坡耕地土壤微生物养分限制的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10):2744-2754.
AN X B, ZHENG F L, WANG X S, et al. Impacts of freeze-thaw process on soil microbial nutrient limitation in slope farmlands of the Chinese mollisol region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10):2744-2754.
- [18] 耿华杰, 郑粉莉, 莫帅豪, 等. 典型黑土区农业流域土壤侵蚀-沉积对土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4):47-53.
GENG H J, ZHENG F L, MO S H, et al. Effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in an agricultural watershed of Chinese mollisol region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):47-53.
- [19] 张传更, 高阳, 张立明, 等. 水分管理措施对施用有机肥麦田土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2):38-44.
ZHANG C G, GAO Y, ZHANG L M, et al. Effects of water management on soil enzyme activities and microbial community structure in wheat fields with organic fertilizer application [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2):38-44.
- [20] LI X F, ZHANG Y, DING C X, et al. Water addition promotes vegetation recovery of degraded alpine meadows by regulating soil enzyme activity and nutrients in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecological Engineering, 2020, 158:e106047.
- [21] AKINYEMI D S, ZHU Y K, ZHAO M Y, et al. Response of soil extracellular enzyme activity to experimental precipitation in a shrub-encroached grassland in Inner Mongolia [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23:e01175.
- [22] 杨昌钰, 张芮, 蒯宝军, 等. 水分胁迫对设施延迟栽培葡萄根际土壤有机氮及土壤酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5):1376-1384.
YANG C Y, ZHANG R, LIN B J, et al. Effects of water stress on rhizosphere organic nitrogen fractions and enzyme activities in the rhizosphere of delayed cultivation grape [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5):1376-1384.
- [23] HE Y X, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Insights from size fractions to interpret the erosion-driven variations in soil organic carbon on black soil sloping farmland, northeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 343:e108283.
- [24] 高雨秋, 戴晓琴, 王建雷, 等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2019, 43(3):258-272.
GAO Y Q, DAI X Q, WANG J L, et al. Characteristics of soil enzymes stoichiometry in rhizosphere of understory vegetation in subtropical forest plantations [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(3):258-272.
- [25] ZHANG G H, DING W F, PU J, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on soil detachment by overland flow in the Three Gorges Reservoir area of China [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(10):2418-2431.
- [26] 张孝存, 郑粉莉, 安娟, 等. 黑土区坡耕地土壤酶活性与土壤养分关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11):106-110.
ZHANG X C, ZHENG F L, AN J, et al. Relationship between soil enzyme activities and soil nutrient of a sloping farmland in the black soil region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(11):106-110.

- [27] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9):1309-1315.
- [28] 王雪松, 郑粉莉, 王婧, 等. 气候变化对谷子生育期土壤碳氮磷转化相关酶活性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(7):1591-1600.
- WANG X S, ZHENG F L, WANG J, et al. Effects of elevated CO₂ and warming on soil carbon, nitrogen and phosphorus transformation-linked enzymes activities at different millet growth stages [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7):1591-1600.
- [29] ZHANG X B, HIGGITT D L, WALLING D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1990, 35(3):243-252.
- [30] CHEN H, LI D J, XIAO K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests [J]. *Functional Ecology*, 2018, 32(5):1400-1409.
- [31] MOORHEAD D L, RINKES Z L, SINSABAUGH R L, et al. Dynamic relationships between microbial biomass, respiration, inorganic nutrients and enzyme activities: Informing enzyme-based decomposition models [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4:e223.
- [32] 水利部水土保持司, 水利部水土保持监测中心, 黄河水利委员会, 等. 土壤侵蚀分类分级标准 [Z]. 中华人民共和国水利部, 2008:26.
- Department of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Yellow River Conservancy Commission, et al. Standards for classification and gradation of soil erosion [Z]. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008:26.
- [33] MANZONI S, SCHIMEL J P, PORPORATO A. Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis [J]. *Ecology*, 2012, 93(4):930-938.
- [34] KAISER M, KLEBER M, BERHE A A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: An assessment to improve data interpretation and inference [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80:324-340.
- [35] 图纳热, 红梅, 闫瑾, 等. 降水变化和氮沉降对荒漠草原土壤细菌群落结构及酶活性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(2):403-413.
- TU N R, HONG M, YAN J, et al. Effects of precipitation variation and nitrogen deposition on soil bacterial community structure and enzyme activity in desert steppe [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2):403-413.
- [36] WANG L, ZHENG F L, LIU G, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3):394-404.
- [37] 王禹, 杨明义, 刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析 [J]. *核农学报*, 2010, 24(1):98-103, 87.
- WANG Y, YANG M Y, LIU P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated slope [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(1):98-103, 87.
- [38] AN J, ZHENG F L, WANG B. Using ¹³⁷Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, northeast China [J]. *Catena*, 2014, 123:243-251.
- [39] CUI Y X, FANG L C, GUO X B, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116:11-21.
- [40] 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 等. 模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 [J]. *环境科学*, 2022, 43(5):2812-2821.
- WANG X, ZHONG Z K, JIAN J N, et al. Effects of simulated warming and increased precipitation on soil extracellular enzyme activity and enzymatic stoichiometry of abandoned grassland [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5):2812-2821.
- [41] 王小康, 谷举, 刘刚, 等. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(2):430-439.
- WANG X K, GU J, LIU G, et al. The influence of transverse and longitudinal ridge tillage on soil erosion and deposition cycles for mollisol slope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2):430-439.
- [42] 冯志珍, 郑粉莉, 易祎. 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀-沉积的响应 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(6):1332-1344.
- FENG Z Z, ZHENG F L, YI Y. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to erosion and deposition in black soil thin in depth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6):1332-1344.
- [43] YANG W G, ZHENG F L, HAN Y, et al. Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese mollisol region [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(2):317-327.
- [44] SHI H Q, LIU G, AN X B, et al. Tracing soil erosion with Fe₃O₄ magnetic powder: Principle and application [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(2):419-431.