

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

耿华杰¹, 郑粉莉^{1,2}, 莫帅豪¹, 王雪松¹, 张加琼^{1,2}, 王彬³, 付金霞⁴

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;

3.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;4.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 研究农业流域土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性的影响可为土壤侵蚀退化评价提供重要科学依据。选择典型薄层黑土区的宾州河流域为研究区,在流域上游、中游和下游各选取 2 个代表性坡面,基于¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀—沉积速率,分析流域和坡面尺度土壤侵蚀—沉积对土壤养分(有机质、全氮和速效磷)和土壤酶活性(转化酶、脲酶和碱性磷酸酶)的影响。结果表明:(1)土壤侵蚀速率在流域上游最大,分别是流域中游和下游的 1.9,11.2 倍;坡面尺度上土壤侵蚀速率在坡中部最大,分别是坡上部和坡下部的 1.3~2.6,2.8~12.2 倍。(2)在流域尺度上,土壤有机质空间分布与土壤侵蚀速率空间分布呈相反的变化趋势,土壤全氮和速效磷含量在流域下游皆大于流域中游;坡面尺度上土壤有机质、速效磷含量、转化酶、脲酶和碱性磷酸酶活性均表现为坡下部>坡中部,说明农地土壤侵蚀降低土壤养分含量和酶活性。(3)流域沉积区土壤沉积速率对土壤有机质、速效磷含量、脲酶和碱性磷酸酶活性有显著影响。(4)土壤有机质和速效磷含量对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性有显著影响,表明土壤侵蚀—沉积引起的土壤养分再分布是造成土壤酶活性空间分异的重要原因。

关键词: 土壤侵蚀—沉积; 土壤养分; 土壤酶活性; 空间分布; 东北黑土区

中图分类号: S158.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0047-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.007

Effects of Soil Erosion-deposition on Soil Nutrients and Enzyme Activities in An Agricultural Watershed of Chinese Mollisol Region

GENG Huajie¹, ZHENG Fenli^{1,2}, MO Shuaihao¹, WANG Xuesong¹,

ZHANG Jiaqiong^{1,2}, WANG Bin³, FU Jinxia⁴

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Identifying the effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in agricultural watersheds can provide an important scientific basis for soil erosion evaluation. Binzhou River Basin, a typical thin-layer Mollisol area, was selected as the study area, and two representative slopes were selected in the upstream, midstream and downstream of the basin. ¹³⁷Cs tracer technique was used to estimate soil erosion-deposition rates and impacts of soil erosion-deposition on soil nutrients (organic matter, total nitrogen and available phosphorus) and soil enzyme activities (invertase, urease and alkaline phosphatase) at both watershed and sloping scales were analyzed. The results showed as follows: (1) The soil erosion rates were the highest in the upstream of the Binzhou River Basin, which were 1.9 and 11.2 times of those in the midstream and downstream, respectively; at the sloping scale, the soil erosion rates were the highest in the middle slope locations, which were 1.3~2.6 and 2.8~12.2 times of those in the upper and lower slope locations, respectively. (2) At the watershed scale, the spatial distribution of soil organic matter and soil erosion rates showed an opposite trend and the contents of total nitrogen and available phosphorus in the

收稿日期:2022-12-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1500102);中国科学院战略性先导科技项目(A类)(XDA28010201)

第一作者:耿华杰(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:664420423@qq.com

通信作者:郑粉莉(1960—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究工作。E-mail:flzh@ms.iswc.ac.cn

downstream were both greater than those in the midstream; on the sloping scale, the contents of soil organic matter and available phosphorus as well as the activities of soil invertase, urease and alkaline phosphatase in the lower slope locations were all greater than those in the middle slope locations, indicating that soil erosion in farmland declined soil nutrient contents and enzyme activities. (3) The soil deposition rates in the deposition areas of the watershed had significant impacts on the contents of soil organic matter and available phosphorus as well as the activities of soil urease and alkaline phosphatase. (4) The contents of soil organic matter and available phosphorus had significant impacts on the activities of urease and alkaline phosphatase, indicating that the redistribution of soil nutrients caused by soil erosion-deposition was an important reason for the spatial differentiation of soil enzyme activities.

Keywords: soil erosion-deposition; soil nutrients; soil enzyme activities; spatial distribution; Chinese Mollisol region

东北黑土区粮食产量占全国总产量的 1/4,粮食调出量占全国的 1/3,其在保障国家粮食安全中具有“压舱石”的作用^[1]。然而,黑土开垦百余年以来,长期高强度利用和严重的土壤侵蚀导致黑土耕地质量退化,严重威胁国家粮食安全^[2]。已有研究^[1-2]表明,坡耕地黑土层厚度以每年 2~3 mm 的速率递减,其已由开垦前的 80~100 cm 下降到当前的 30~40 cm。严重的土壤侵蚀导致黑土层变薄的同时,也引起土壤有机质和土壤养分随径流和泥沙流失,从而致使土壤变瘦、土壤生物活性降低和土壤质量下降^[3-4]。

土壤酶参与土壤中几乎所有的生物化学反应,土壤酶活性是土壤生物活性的综合表征,其是土壤质量评价的重要指标之一^[5-6]。土壤酶活性对外界环境的变化具有高度敏感性,且不同种类土壤酶活性对侵蚀—沉积和土壤养分也表现出不同的响应特征。因此,土壤侵蚀—沉积可能改变土壤酶活性与土壤养分之间的互馈关系^[7-8],开展坡耕地土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性的影响研究将深化对土壤侵蚀退化机理的认识。已有研究^[4,9-12]表明,在东北黑土区、黄土丘陵区 and 红壤区,土壤侵蚀是影响土壤养分含量和酶活性空间分布的关键因素,土壤养分含量以及土壤酶活性均随土壤侵蚀强度的增加呈降低趋势,而土壤沉积作用则提高了土壤养分含量及酶活性。然而,目前土壤侵蚀—沉积对土壤养分和土壤酶活性的影响研究大多集中在地块尺度^[9,13-14],而从坡面和流域尺度综合分析土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性的影响研究相对较少,其结果不足以科学评价农地侵蚀对土壤质量的影响;再者,在研究方法上目前较多采用削土模拟试验分析农地侵蚀程度对土壤养分和酶活性的影响^[4,15],其研究结果不能全面反映坡面和流域尺度农地侵蚀强度对土壤养分和酶活性的影响。据此,本研究选取典型薄层黑土区的哈尔滨市域内宾州河流域为研究区,采用¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀量,研究流域和坡面尺度土壤侵蚀—沉

积对土壤养分(有机质、全氮和速效磷)和土壤酶活性(转化酶、脲酶和碱性磷酸酶)的影响,其研究结果可为黑土区侵蚀退化阻控和黑土资源可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宾州河流域位于黑龙江省哈尔滨市宾县境内,属于松花江右岸的一级支流,流域地理坐标 127°26′04″—127°32′02″E,45°43′13″—45°51′37″N,总面积 375 km²,土壤侵蚀—沉积速率为-2 510.4~6 121.6 t/(km²·a)(+为侵蚀,-为沉积)^[11]。地貌类型以漫岗丘陵为主。流域地势平缓,坡度 1°~7°,坡长 500~1 000 m。气候类型属温带大陆性季风气候,气温年较差大,年平均气温 3.9℃,无霜期 148 天,年均降水量 548.5 mm,年内分布不均,夏秋季占全年降水量的 75%以上。流域土壤类型以黑土为主,占流域总面积的 2/3 以上,黑土层厚度 10—50 cm,土壤母质为第四纪中更新世黄土状亚黏土。流域内土地利用类型以旱田为主(占比 60%),耕种历史已有 60 余年,耕种方式多为顺坡垄作。研究流域主要农作物为玉米,为一年一熟制。研究流域玉米地很少施用有机肥,化肥施用量多为 525 kg/hm²,其施用比例为尿素:磷酸二氢铵:硫酸钾为 6:4:3。

1.2 样品采集

以宾州河流域 1:1 万比例尺地形图和土壤类型图 as 底图,结合野外调查,在流域上、中、下游分别选取 2 个典型坡面(图 1、表 1)。所选研究坡面的坡度变化为 1°~5°。对于选定的 6 个典型坡面,基于已有¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀速率的研究结果^[7],分别在坡上部、坡中部和坡下部各布设 1 个采样点。每个采样点设置 2 次重复,共采集土壤样品 36 份。

土壤¹³⁷Cs 样品采集方法:在每个采样点设置边长为 1 m 的等边三角形,在其 3 个顶点上使用内径为 7 cm 的土钻垂直于水平面钻入地面采集土壤样

品,将 3 份土壤样品混合均匀后用四分法取 500 g 土壤装入样品袋带回实验室。根据背景值样地的选取原则^[16],在流域内选取 1 块处于自然状态、恢复年限为 100 多年的次生林地作为¹³⁷Cs 背景值样地,按 5 cm 间距分层采集土壤样品,采样深度为 40 cm。¹³⁷Cs 背景值土壤样品的具体采集方法为:每个采样点按三角形法布点,在三角形的 3 个顶点垂直钻入地面采集,按 5 cm 间距将同一土层的 3 点混合均匀装入自封袋带回实验室。

土壤养分和酶活性样品采集:于 2021 年 10 月采集 0—20 cm 耕层土壤样品。在紧邻¹³⁷Cs 采样点位置,采用“S”形取样法采集 4~6 个耕层(0—20 cm)土壤样品并均匀混合后,按四分法取适量土样装入已编号的土壤采集袋,带回实验室后剔除杂质,用于测定土壤养分含量以及土壤酶活性。

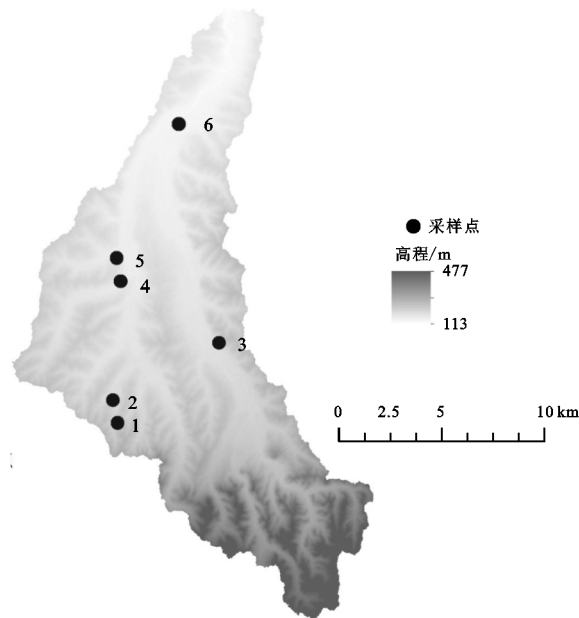


图 1 宾州河流域采样坡面位置
表 1 宾州河流域采样坡面信息

流域位置	采样坡面编号	地理位置			
		经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)
上游	1	45°43'47"	127°28'12"	189~210	4.6
	2	45°44'22"	127°28'01"	169~195	2.5
中游	3	45°45'52"	127°32'01"	158~177	3.9
	4	45°47'29"	127°28'18"	136~155	1.2
下游	5	45°48'05"	127°28'10"	138~158	2.0
	6	45°51'36"	127°28'35"	125~147	1.0

1.3 测定方法

土壤中¹³⁷Cs 测定:土壤样品带回实验室后在室内自然风干,清除杂物后经研磨粉碎过 1 mm 筛。将土壤样品放于干燥通风处自然风干,去除根系、枯落物和石块等杂物,最后进行过筛处理后,使用 γ 能谱仪进行¹³⁷Cs 活度测定^[16]。

土壤养分测定:土壤有机质含量采用硫酸重铬酸钾外加热法^[17]测定;土壤全氮含量采用凯氏蒸馏法^[17]测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[17]测定。

土壤酶活性测定:土壤转化酶活性测定采用 3,5—二硝基水杨酸比色法^[18]测定;土壤脲酶活性测定采用靛酚蓝比色法^[18]测定;土壤碱性磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[18]测定。

1.4 数据处理

土壤侵蚀速率采用张信宝等^[19]质量平衡模型估算,模型表达式为:

$$A=A_{\text{ref}}(1-\frac{h}{H})^{N-1963} \tag{1}$$

式中: A 为土样中¹³⁷Cs 的活度(Bq/m^2); A_{ref} 为采样年¹³⁷Cs 的背景值(Bq/m^2),根据杨维鸽等^[20]与 An 等^[7]在该研究区的测定结果,其值为 $2\,378.9\,\text{Bq}/\text{m}^2$; h 为年均土壤侵蚀深度(m/a); H 为耕作层厚度(cm); N 为采样年份。

土壤侵蚀模数计算公式为:

$$E=h\rho \tag{2}$$

式中: E 为土壤侵蚀模数 $[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$,+ 为侵蚀,— 为沉积; ρ 为土壤容重(kg/m^3)。

使用 Excel 2019 软件整理数据后,采用 SPSS 24 软件进行方差分析、多重比较(LSD 法)和 Pearson 相关性分析,采用 Excel 2019 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀强度空间分布特征

¹³⁷Cs 示踪结果(表 2)表明,在流域尺度上土壤侵蚀—沉积速率为 $-2\,720.4\sim5\,549.8\,\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,呈现由流域上游至下游逐渐减小的变化趋势($p<0.05$)。流域上、中和下游的平均土壤侵蚀速率分别为 $2\,913.0,1\,518.4,259.5\,\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,流域上游土壤侵蚀速率分别是流域中游和下游的 1.9,11.2 倍。此外,流域不同位置土壤侵蚀速率皆大于容许土壤流失量 $[200\,\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$ ^[21],尤其是流域中游和上游的土壤侵蚀速率分别是容许土壤流失量的 7.6,14.6 倍。

坡面尺度上,土壤侵蚀速率在流域上游、中游和下游均呈现从坡上部至坡下部先增加后减小的变化趋势($p<0.05$),坡中部土壤侵蚀最严重,是容许土壤流失量的 8.7~22.6 倍;土壤沉积主要发生在流域下游的坡下部(表 2),平均值为 $-2\,172.5\,\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。流域上游坡面土壤侵蚀—沉积速率变化为 $-517.6\sim5\,549.8\,\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,在侵蚀严重的坡中部分别是坡上部和坡下部的 1.3,5.8 倍;流域中游坡面土壤侵蚀—沉积速率变化为

—428.1~4 408.0 t/(km²·a),侵蚀严重的坡中部分别是坡上部和坡下部的 2.6,12.2 倍;流域下游坡面土壤中部土壤侵蚀速率是坡上部的 1.4 倍。

表 2 流域和坡面土壤侵蚀—沉积速率分布特征

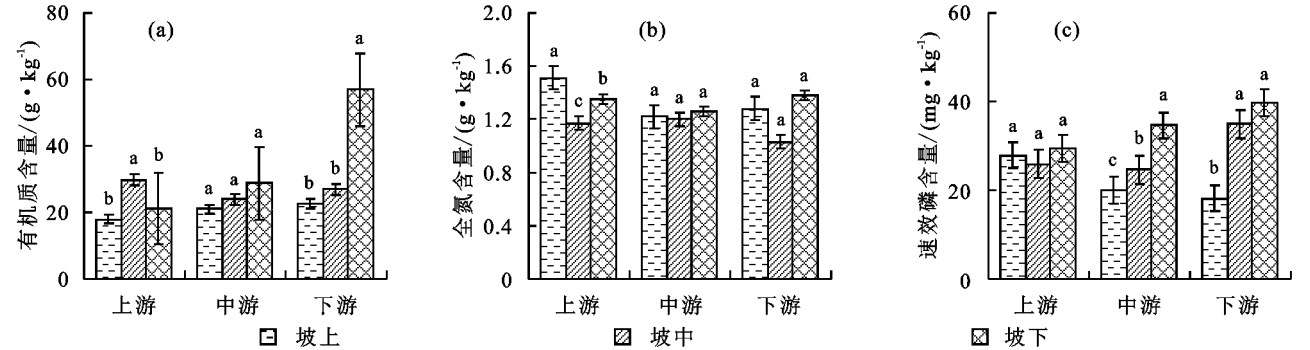
流域位置	坡面位置	土壤侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)				
		最大值	最小值	平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差
上游	坡上	5422.8	1252.7	3430.2±1802.1b	52.5	2913.0±501.4a
	坡中	5549.8	3608.5	4524.5±849.8a	18.8	
	坡下	1568.3	—517.6	784.2±1594.8c	203.4	
中游	坡上	2844.3	—126.6	1204.4±1166.5b	96.9	1518.4±364.1b
	坡中	4408.0	1913.0	3097.1±1130.9a	36.5	
	坡下	1018.4	—428.1	253.7±666.9c	262.9	
下游	坡上	3499.2	—150.3	1207.2±1520.7b	126.0	259.5±473.7c
	坡中	2308.6	1255.5	1743.7±480.5a	27.6	
	坡下	—1298.5	—2720.4	—2172.5±608.3c	28.0	

注:正值(+)表示侵蚀,负值(—)表示沉积;同列不同小写字母表示不同坡面间差异显著($p<0.05$)。

2.2 土壤养分含量和酶活性空间分布

2.2.1 土壤养分含量空间分布 由图 2 可知,流域尺度上,土壤有机质和速效磷含量在侵蚀强度最小的流域下游最高,平均值分别为 35.5 g/kg 和 30.9 mg/kg;二者在流域下游较流域上游(侵蚀强度最大)和中游(侵蚀强度次之)分别增加 55.0%,44.7%和 11.4%,17.1%,反映流域土壤侵蚀对土壤有机质和速效磷含量的影响。而土壤全氮含量在流域上游最高,平均值为 1.34 g/kg,流域上游分别是流域中游和下游的 1.1,1.1 倍。

土壤养分含量在流域不同位置的坡面分布存在明显差异。土壤有机质和速效磷含量呈坡上部<坡中部<坡下部的分布特征,二者在坡下部平均值分别为 35.6 g/kg 和 34.6 mg/kg,坡下部较坡中部和坡上部分别增加 32.7%,73.4%和 21.4%,57.4%。土壤全氮含量在侵蚀最严重的坡中部含量最低,平均值为 1.13 g/kg,坡上部分别是坡中部和坡下部的 1.2,1.0 倍。土壤养分含量在坡面上的分布特征在一定程度上也反映土壤侵蚀对土壤养分的影响。



注:图柱上方不同小写字母表示流域不同坡面位置差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 宾州河流域坡面土壤养分变化特征

2.2.2 土壤酶活性空间分布 由图 3 可知,流域尺度上,土壤转化酶活性呈下游<上游<中游的变化特征,在流域下游平均值为 16.9 mg/g;土壤转化酶活性在流域上游和中游分别是下游的 1.1,1.3 倍。土壤脲酶和碱性磷酸酶活性在流域下游最高,平均值分别为 973.8,2 401.8 mg/kg;二者在流域下游较上游和中游分别增加 11.5%,12.7%和 19.8%,4.4%。土壤转化酶、脲酶和碱性磷酸酶活性在流域不同位置的坡面变化均表现为坡下部>坡中部>坡上部,3 种土壤酶活性在坡下部的平均值分别为 20.2,984.6,2 503.2 mg/kg,在坡下部较坡中部和坡上部分别增加 10.9%,16.0%、11.8%,16.3%和 9.7%,23.8%。

2.3 土壤侵蚀—沉积对土壤养分含量和酶活性的影响

2.3.1 土壤侵蚀—沉积对土壤养分含量的影响 由表 3 表可知,土壤有机质、全氮和速效磷含量在沉积区较侵蚀区分别增加 63.2%,8.3%,25.1%。回归分析(图 4)表明,流域侵蚀区土壤有机质、全氮和速效磷含量对土壤侵蚀速率的响应不敏感($p>0.05$)。而在流域沉积区,土壤有机质和速效磷含量与土壤沉积速率呈显著正相关关系($p<0.01$),决定系数分别为 0.926 8 和 0.527 4,但土壤沉积速率对土壤全氮含量无显著影响。

2.3.2 土壤侵蚀—沉积对土壤酶活性的影响 由表 4 可知,土壤转化酶、脲酶和碱性磷酸酶活性在沉积区较侵蚀区分别增加 5.8%,12.0%,16.0%。从图 5 可以看出,流域侵蚀区 3 种土壤酶活性对土壤侵蚀速率的响应

不明显($p>0.05$)。而在流域沉积区,土壤脲酶和土壤碱性磷酸酶活性与土壤沉积速率呈显著正相关关系($p<0.01$),决定系数分别为 0.723 5 和 0.555 6;但土壤沉积速率对土壤转化酶活性无显著影响($p>0.05$)。

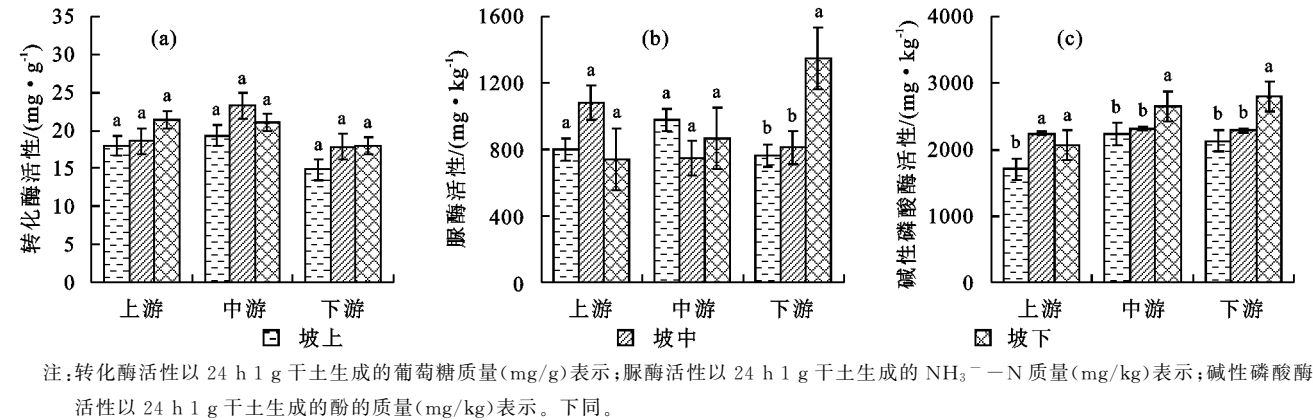


图 3 宾州河流域坡面土壤酶活性变化特征

表 3 土壤养分与土壤侵蚀—沉积的关系			
区域	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
侵蚀区	$23.9 \pm 5.2\text{a}$	$1.2 \pm 0.2\text{b}$	$26.7 \pm 7.0\text{a}$
沉积区	$39.0 \pm 19.6\text{a}$	$1.3 \pm 0.3\text{a}$	$33.4 \pm 11.1\text{a}$

表 4 土壤酶活性与土壤侵蚀—沉积的关系			
区域	土壤转化酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	土壤脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤碱性磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
侵蚀区	$18.9 \pm 4.0\text{a}$	$877.6 \pm 271.9\text{a}$	$2182.0 \pm 288.8\text{a}$
沉积区	$20.0 \pm 4.1\text{a}$	$983.0 \pm 445.2\text{a}$	$2530.4 \pm 456.6\text{a}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示侵蚀区和沉积区差异显著($p<0.05$)。下同。

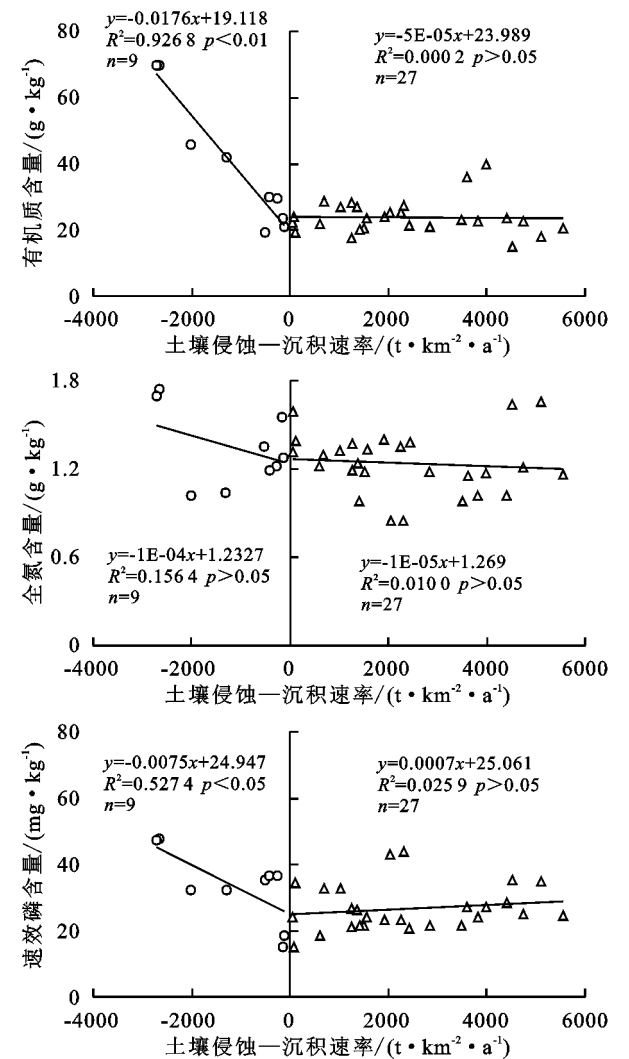


图 4 土壤养分与土壤侵蚀—沉积速率的关系

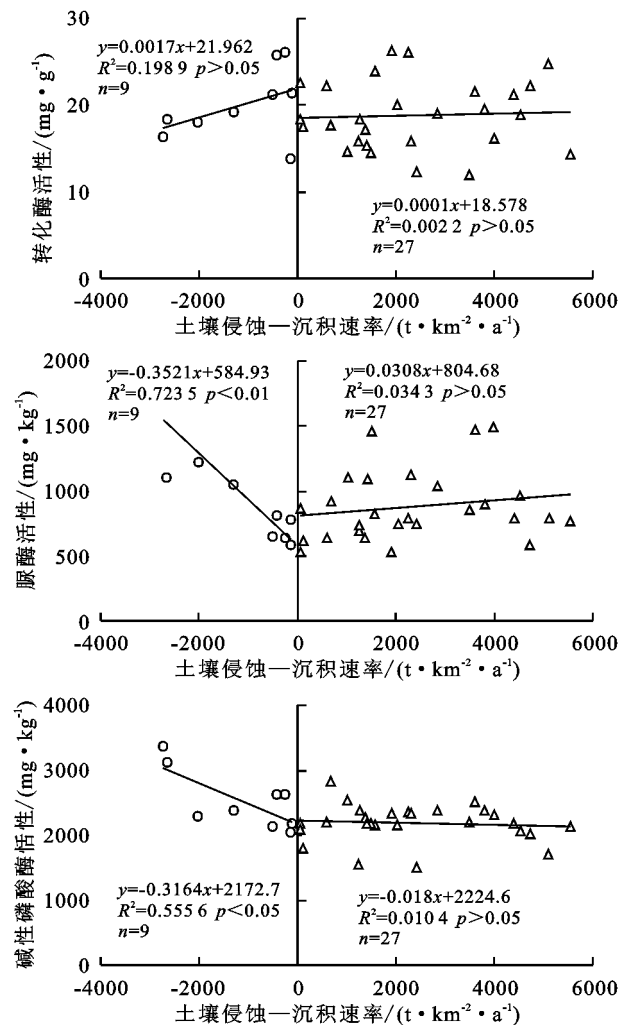


图 5 土壤酶活性与土壤侵蚀—沉积速率的关系

3 讨论

3.1 土壤酶活性与土壤养分的关系

土壤转化酶通过催化蔗糖水解成葡萄糖和果糖参与

土壤碳素循环,土壤脲酶通过催化尿素水解成 NH_3 —N 参与土壤氮素循环,土壤磷酸酶通过催化有机磷酸酯或磷酸酐水解成无机磷参与土壤磷素循环^[22]。

本研究的相关性分析结果(表 5)显示,土壤转化酶活性与土壤有机质、全氮和速效磷含量均无显著相关关系。肖海兵等^[12]在红壤区研究发现,土壤转化酶活性与有机质含量呈不显著正相关关系,而张孝存等^[10]研究表明,土壤转化酶活性与有机质含量呈显著正相关关系;因此,有关土壤转化酶活性的变化特征在今后还需进一步探究。土壤脲酶和碱性磷酸酶活性与土壤有机质含量均呈极显著正相关关系,其原因是较高的土壤有机质含量有利于土壤微生物的生长代谢,从而导致土壤脲酶和碱性磷酸酶活性增加。随着土壤酶活性的增加,土壤物质与能量转化过程加快,有利于土壤良性循环的形成^[23]。土壤脲酶和碱性磷酸酶活性与土壤速效磷之间均表现为正相关关系,这与刘建等^[24]研究结果一致,说明土壤速效养分对土壤酶活性具有重要影响。本研究中,3 种土壤酶活性与全氮含量之间均无显著相关关系,这与前人^[10,25]的研究结果不一致,其原因有待进一步探讨。综上所述,土壤有机质和速效磷含量对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性有显著影响。

表 5 土壤养分与土壤酶活性相关性分析

指标	有机质	全氮	速效磷
土壤转化酶	-0.070	0.096	0.114
土壤脲酶	0.628 **	-0.023	0.381 *
土壤碱性磷酸酶	0.764 **	0.080	0.526 **

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

3.2 土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性空间分布的影响

3.2.1 土壤侵蚀—沉积对土壤养分空间分布的影响
坡面土壤侵蚀速率呈坡中部最大、坡上部次之、坡下部最小的分布特征,其原因可能是坡上部主要受雨滴溅蚀作用;而坡中部不仅受雨滴溅蚀,还受径流冲刷影响,且坡中部坡度较大,平均坡度为 5.0° 。杨维鸽等^[20]和 An 等^[27]研究表明,随着坡度的增加,径流流速增大,水流侵蚀力增大,导致坡面侵蚀量增加;且当坡度 $< 2^\circ$ 时,侵蚀速率随坡度增加增幅缓慢,而当坡度 $> 2^\circ$ 时,侵蚀速率随坡度增加而增加的幅度增大;尤其是当坡度 $> 4^\circ$ 时,侵蚀速率增加幅度更为明显。阎百兴等^[26]研究表明,坡度和雨滴落地的入射角呈反比。坡度越大,雨滴分散土壤颗粒的分力相应增大,加之上方来水的汇集,径流挟沙力增强,导致水蚀作用加强。在水力侵蚀的作用下,坡上部和坡中部土壤颗粒随降雨径流一同迁移至坡底,且坡下部地势较低缓,易发生沉积。

土壤养分含量可以直观地表征土壤质量状况,其在土壤生态系统中发挥着重要作用。土壤养分随径流和

泥沙迁移发生流失,造成侵蚀区土壤养分含量减少;而泥沙沉积使土壤养分有效累积,沉积区土壤养分含量增加^[27-28]。张孝存等^[11]研究表明,流域土壤侵蚀强度差异是造成土壤养分再分布的重要因素。本研究中土壤有机质和速效磷含量从流域上游至下游总体呈由侵蚀区迁移至沉积区的变化趋势,说明土壤侵蚀对土壤养分的空间变异性有重要影响,其致使土壤养分在坡上部相对贫瘠,而在坡下部相对富集。这与葛方龙等^[14]和魏晗梅等^[29]的研究结果基本一致。本研究中土壤有机质、全氮和速效磷含量在坡面的分布均为沉积部位高于侵蚀部位,尤其是土壤有机质和速效磷含量在坡下沉积部位明显高于侵蚀部位,二者在坡下部表现出明显的积累效应。土壤养分含量在流域和坡面侵蚀区和沉积区的空间变异性是由于土壤中密度较小、粒径较细和富含养分的黏粒容易被水流挟带发生搬运作用,使沉积部位土壤养分受到来自侵蚀部位流失土壤养分的补给^[28],造成土壤养分含量在流域不同位置和坡面不同部位的再分布,进而引起土壤酶活性在流域和坡面尺度的空间变异。

3.2.2 土壤侵蚀—沉积对土壤酶活性空间分布的影响
土壤酶被认为是土壤微生物活性的重要指标,在生态系统物质循环和能量流动中扮演着重要角色^[6]。土壤侵蚀通过增加土壤容重、降低孔隙度以及导致土壤养分流失等途径改变土壤微环境,从而对土壤酶活性产生重要影响^[12]。本研究中,土壤转化酶、脲酶和碱性磷酸酶活性在流域呈不同的空间分布特征,其中土壤脲酶和碱性磷酸酶活性均在侵蚀最弱的流域下游最高,这与张孝存等^[30]研究结果相一致。3 种土壤酶活性均在坡下沉积部位最高,分析原因可能是土壤侵蚀较弱的流域下游和坡下部土壤养分含量较高,尤其是土壤有机质作为土壤微生物的碳库,为土壤微生物提供了生命活动所需的营养物质,促使其代谢旺盛和分泌释放土壤酶,进而表现为土壤酶活性增加^[10]。此外,3 种土壤酶活性中土壤碱性磷酸酶活性最高,这可能与玉米根系活动密切相关^[31],导致本研究样地土壤碱性磷酸酶含量最高。综合分析,土壤侵蚀—沉积是造成土壤转化酶、脲酶和碱性磷酸酶空间分布差异的重要因素。

4 结论

(1)土壤侵蚀速率在流域尺度表现为由上游至下游逐渐减小的变化特征,流域上游土壤侵蚀速率分别是中游和下游的 1.9, 11.2 倍;流域不同位置坡面侵蚀速率在坡中部最大,其分别是坡上部和坡下部的 1.3~2.6, 2.8~12.2 倍。

(2)在流域和坡面尺度,土壤侵蚀减少了土壤有机质、速效磷含量、脲酶和碱性磷酸酶活性;而土壤沉积增加了土壤有机质、速效磷含量、脲酶和碱性磷酸酶活性。土壤有机质、速效磷含量、脲酶和碱性磷酸

酶活性在土壤侵蚀较轻的流域下游和坡下部最高,而土壤全氮含量在流域上游和坡上部最高,土壤转化酶活性在流域中游和坡下部最高。

(3)在土壤沉积区,土壤有机质、速效磷含量、脲酶和碱性磷酸酶活性均随土壤沉积速率的降低而显著减小,其决定系数分别为 0.926 8,0.527 4,0.723 5,0.555 6。在土壤侵蚀区,土壤有机质和全氮含量以及土壤碱性磷酸酶活性整体随土壤侵蚀速率增加呈降低趋势,而土壤速效磷含量、土壤转化酶和脲酶活性整体随土壤侵蚀速率增加呈增加趋势,但土壤侵蚀速率对土壤养分含量和酶活性的影响尚未达到显著水平,其内在作用机制还需在今后的研究中进一步探讨。

(4)土壤酶活性与土壤养分含量相关性分析显示,土壤有机质和速效磷含量对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性有显著影响,其相关系数分别为 0.628,0.764 和 0.381,0.526。

参考文献:

- [1] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010.
- [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.
- [3] 莫帅豪,郑粉莉,冯志珍,等.典型黑土区侵蚀—沉积对土壤微生物数量空间分布的影响[J].应用生态学报,2022,33(3):685-693.
- [4] 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.
- [5] 张振佳,曹银贵,王舒菲,等.平朔黄土露天矿区复垦地表层土壤微生物与酶活性分析[J].生态学报,2021,41(1):110-123.
- [6] 陈美军,段增强,林先贵.中国土壤质量标准研究现状及展望[J].土壤学报,2011,48(5):1059-1071.
- [7] An J, Zheng F L, Wang B. Using ^{137}Cs 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.
- [8] Hou S, Xin M X, Wang L, et al. The effects of erosion on the microbial populations and enzyme activity in black soil of north-eastern China[J].Acta Ecologica Sinica,2014,34(6):295-301.
- [9] 胡婵娟,刘国华,郭雷,等.土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响[J].干旱区研究,2014,31(4):702-708.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区 ^{137}Cs 示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):62-67.
- [14] 葛方龙,张建辉,苏正安,等.坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J].生态学报,2007,27(2):459-464.
- [15] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [16] 方华军,杨学明,张晓平,等.利用 ^{137}Cs 技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J].应用生态学报,2005,16(3):464-468.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [18] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [19] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等.侵蚀泥沙研究的 ^{137}Cs 核示踪技术[J].水土保持研究,2007,14(2):152-154.
- [20] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J].土壤学报,2016,53(3):572-581.
- [21] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [22] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等.土壤酶的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(21):1-7.
- [23] Wang B, Xue S, Liu G B, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China[J].Catena,2012,92:186-195.
- [24] 刘建,邱莉萍,程积民,等.黄土高原水蚀风蚀交错区 5 种典型草地群落土壤酶活性的研究[J].草地学报,2017,25(1):32-37.
- [25] Bai X J, Zeng Q C, Fakher A, et al. Characteristics of soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen under different vegetation zones on the Loess Plateau, China[J].Arid Land Research and Management,2018,32(4):438-454.
- [26] 阎百兴,汤洁.黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J].地理研究,2005,24(4):499-506.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 魏晗梅,郑粉莉,冯志珍,等.薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀—沉积的响应[J].水土保持学报,2021,35(4):49-54.
- [30] 张孝存,郑粉莉,王彬,等.黑土区典型坡耕地土壤酶活性空间分布特征研究[J].水土保持通报,2013,33(2):58-61.
- [31] Medeiros E V, Notaro K D, Barros J A, et al. Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas[J].Soil and Tillage Research,2015,145:208-215.