

# 薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀—沉积的响应

魏晗梅<sup>1</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 冯志珍<sup>1</sup>, 赵苗苗<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 分析薄层黑土区流域尺度土壤养分与土壤侵蚀速率之间的空间分布关系,可为土壤侵蚀退化评价提供重要的科学依据。基于土壤样品采集与分析测定,结合<sup>137</sup>Cs示踪技术,对比了典型薄层黑土区流域侵蚀区和沉积区的土壤养分含量,明确了流域尺度土壤养分含量及其空间分布对侵蚀—沉积速率的响应。结果表明:(1)在流域尺度土壤侵蚀对土壤养分含量有重要影响,侵蚀部位土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)和速效磷(AP)含量较之沉积部位分别降低27.4%,21.1%,29.2%和54.1%,SOC和TN含量在侵蚀部位和沉积部位存在极显著差异,AP含量在侵蚀部位和沉积部位存在显著差异,而NO<sub>3</sub>-N含量在侵蚀部位和沉积部位无显著差异。(2)土壤SOC、TN和AP含量与土壤侵蚀速率呈极显著负相关关系。(3)流域尺度土壤SOC和TN含量空间分布与土壤侵蚀—沉积速率的空间分布呈相反的变化趋势,表明在研究流域土壤侵蚀是造成土壤质量退化的关键驱动因子。

**关键词:** 侵蚀—沉积速率;土壤养分;空间分布;流域尺度;东北黑土区

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0049-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.008

## Responses of Soil Nutrients to Soil Erosion and Deposition at Watershed Scale in the Thin Layer Mollisol Area of Northeast China

WEI Hanmei<sup>1</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2</sup>, FENG Zhizhen<sup>1</sup>, ZHAO Miaomiao<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** Studies on soil nutrient responses to soil erosion and deposition at watershed scale can provide important scientific basis for soil erosion risk assessment. The Binzhou watershed, a typical thin layer Mollisol region in Northeast China, was selected as the study area. Based on soil sample collection and laboratory analysis, and combined with <sup>137</sup>Cs tracer method, the soil nutrient contents between erosion-dominant sites and deposition-dominant sites were compared, and the spatial distribution of soil nutrients at watershed scale and their responses to soil erosion and deposition rates were explicated. The results showed that soil erosion-deposition processes obviously affected soil nutrient contents at watershed scale. Comparing with soil deposition-dominant sites, the contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), NO<sub>3</sub>-N and available phosphorus (AP) at the soil erosion-dominant sites were reduced by 27.4%, 21.1%, 29.2% and 54.1%, respectively. Meanwhile, the SOC and TN contents between both in soil deposition and erosion sites had extremely significant differences, and the AP contents at both sites had significant difference; while there was no significant difference in NO<sub>3</sub>-N contents at the both sites. The contents of SOC, TN and AP had significant negative correlations with soil erosion rates. Moreover, the spatial distributions of SOC and TN contents at the watershed scale were opposite to the spatial distribution of soil erosion rate, which indicated that soil erosion was the key driving factor for soil quality degradation in the study area.

**Keywords:** erosion and deposition rates; soil nutrients; spatial distribution; watershed scale; Northeast Mollisol region

收稿日期:2020-12-24

资助项目:国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900);美丽中国生态文明建设科技工程专项子课题“黑土侵蚀风险评估及坡耕地保土提质技术集成”(XDA23060502)

第一作者:魏晗梅(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: weihanmei@nwfu.edu.cn

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。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

第三次全国土壤侵蚀遥感调查<sup>[1]</sup>表明,东北黑土区坡耕地是土壤侵蚀发生的主要部位。东北黑土区除其特有的气候条件以及地形地貌特征外,长期不合理经营使得该区坡耕地黑土层厚度每年以 0.3~1.0 cm 的速度递减<sup>[2]</sup>。有关研究<sup>[3]</sup>表明,黑土区土壤养分主要集中在表层黑土,而严重的坡耕地土壤侵蚀导致表层黑土流失,进而使土壤肥力和生产力下降。刘兴土等<sup>[4]</sup>研究表明,每年因土壤侵蚀减少的粮食产量约占区域总产量的 14.8%。薄层黑土区(黑土层厚度<30 cm)大部分位于黑土区的中东部以及南部<sup>[5]</sup>,其土壤有机碳等养分含量近些年来明显降低,如何保持黑土区土壤肥力是现阶段农业生产中面临的重大问题<sup>[6]</sup>。因此,揭示黑土区流域尺度土壤侵蚀—沉积对土壤养分空间分布的影响,将为保障黑土不减少、不退化的国家宏观战略制定提供重要科学依据。

已有研究<sup>[7-8]</sup>表明,土壤侵蚀是造成土壤养分含量降低的关键驱动因子,随着土壤侵蚀强度的增加,土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷含量随之降低,且土壤养分减少幅度与侵蚀方式和侵蚀强度相对应<sup>[9]</sup>。目前国内土壤侵蚀对土壤养分影响的研究主要集中在黄土高原区和南方地区,大多采用模拟试验的研究手段,且在研究尺度上多为坡面尺度,而从流域尺度上定量分析侵蚀和沉积对土壤养分的影响研究鲜有报道<sup>[10-12]</sup>。因此,本文以典型薄层黑土区松花江流域一级支流——宾州河流域为研究区,基于成熟的<sup>137</sup>Cs 示踪技术,估算流域尺度土壤侵蚀—沉积速率,分析侵蚀区和沉积区土壤养分含量的差异,明确流域尺度土壤养分空间分布与侵蚀速率空间分布的响应关系,可为土壤侵蚀退化评价提供重要的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选取典型薄层黑土区松花江流域一级支流——宾县宾州河流域(127°26′04″—127°32′02″E, 45°43′13″—45°51′37″N)为研究流域(图 1)。该流域属于典型薄层黑土区,面积约为 375 km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。流域内海拔 160~220 m,地形地貌特征主要为漫岗漫川,坡度较缓,其变化为 1°~8°,坡长可达数百米以上。气候属于中温带大陆性季风气候,年平均气温 3.9℃,年平均降水量 548.5 mm,降雨主要集中在 6—9 月,期间降雨量约占全年降水量的 80%。流域内以黑土为主,土地利用方式主要为耕地,土壤质地为粉壤土<sup>[13]</sup>。

### 1.2 野外土壤样品采集与室内处理

采样点布设:以宾县宾州河流域 1:1 万比例尺地形图和土壤类型图为基础,采用 2 km×2 km 网格法在流域布设采样点,并在流域内地形变化较明显的区域采用 1 km×1 km 网格法加密采样。各采样点

的耕作方式均为顺坡垄作,种植作物均为玉米。由于施肥水平与管理方式对土壤养分有重要影响,因而选取施肥水平与管理方式基本相同的样点采集土壤样品,共设计采样点 52 个(图 1)。

土壤养分样品的采集:于 2017 年 7 月采集土壤样品,每个采样点设置 3 个重复,共计采集土壤样品 156 个。具体采样时在每个采样网格随机布设 3 个“S”形样方,每个“S”形样方布设 5 个采样点,采集 0—20 cm 表层土壤,并将 5 个采样点的土壤样品均匀混合,再用四分法取 1 kg 左右土壤,装入样品袋。土壤样品带回实验室后在室内自然风干,清除碎石块、枯枝落叶和植物根系等杂物,经研磨粉碎后过 0.25 mm 筛,用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)和速效磷(AP)。

<sup>137</sup>Cs 土壤样品的采集:基于前人<sup>[1,14-15]</sup>的研究结果,并结合薄层黑土区播种和整地时的翻耕深度(17—23 cm),本试验将<sup>137</sup>Cs 土壤样品采集深度设为 30 cm。具体采样时,在样点设置边长为 1 m 的等边三角形,在其 3 个顶点上利用内径 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 左右土壤装入样品袋。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。

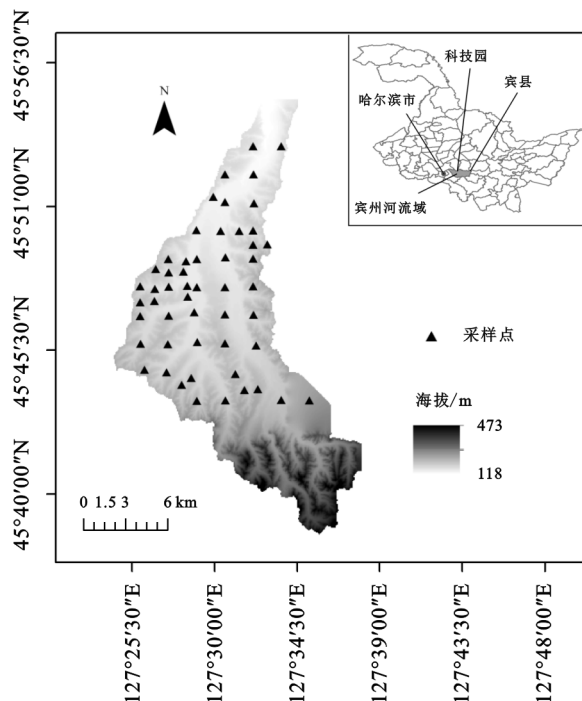


图 1 流域位置与采样点分布

### 1.3 样品分析

土壤养分测定:采用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤 SOC;采用半微量凯氏法测定土壤 TN(凯氏定氮仪测量精度为 0.000 1 g);NO<sub>3</sub>-N 利用流动性连续分析仪测定;AP 采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提比色法测定<sup>[16]</sup>,环

刀法测定土壤容重,用于计算土壤侵蚀速率。

土壤<sup>137</sup>Cs 含量测定:采用能量为 661 keV 的  $\gamma$  射线测定土壤中的<sup>137</sup>Cs 能量,测量时间为 43 152~45 346 s,供测土样质量为 250 g。测量完成后,解谱并分析数据得到<sup>137</sup>Cs 的比活度和不确定度<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 数据处理

基于张信宝等<sup>[18]</sup>质量平衡模型,估算流域土壤侵蚀速率,其模型表达为:

$$A = A_0 \varphi_1 (1 - \varphi_2 \frac{h}{D})^{n-1963} \quad (1)$$

式中: $A$  为<sup>137</sup>Cs 活度( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ); $A_0$  为采样年份<sup>137</sup>Cs 背景值( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ); $\varphi_1$  为混入耕层中的<sup>137</sup>Cs 与总沉降量的比值; $\varphi_2$  为侵蚀分选颗粒校正因子; $h$  为年平均土壤侵蚀深度( $\text{m}/\text{a}$ ); $D$  为年均犁地深度( $\text{cm}$ ); $n$  为采样年份。土壤<sup>137</sup>Cs 含量背景值参考 An 等<sup>[1]</sup>和杨维鸽等<sup>[14]</sup>在该流域确定的背景值,其值为 2 378.9  $\text{Bq}/\text{m}^2$ 。

土壤侵蚀速率计算公式为:

$$E = h\rho \quad (2)$$

式中: $E$  为土壤侵蚀速率( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ); $h$  为年平均土壤侵蚀深度( $\text{m}/\text{a}$ ); $\rho$  为土壤容重( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

在本研究中,侵蚀部位和沉积部位土壤养分的独立样本  $t$  检验、全流域范围土壤养分与土壤侵蚀速率的回归分析均通过 SPSS 20.0 软件完成。土壤各养分元素及土壤侵蚀速率空间分布图通过 ArcGIS 10.2 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域尺度土壤养分基本特征

由表 1 可知,宾州河流域 SOC 含量的变化范围为 7.5~28.5  $\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 16.2  $\text{g}/\text{kg}$ ,根据黑龙江省土壤有机质分级标准<sup>[19]</sup>,该流域 SOC 含量处于四级,其变异系数为 23.3%,属于中等变异。TN 含量变化于 1.0~2.5  $\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 1.5  $\text{g}/\text{kg}$ ,根据黑龙江省 TN 分级标准<sup>[19]</sup>,该流域 TN 含量处于二级,其变异系数为 20.8%,属于中等变异。 $\text{NO}_3\text{—N}$  含量变

化范围为 2.6~271.2  $\text{mg}/\text{kg}$ ,平均值为 53.5  $\text{mg}/\text{kg}$ ,其变异系数为 116.1%,属于强变异。AP 含量变化范围为 2.2~222.3  $\text{mg}/\text{kg}$ ,平均值为 32.7  $\text{mg}/\text{kg}$ ,根据黑龙江省 AP 分级标准<sup>[19]</sup>,该流域 AP 含量处于二级,其变异系数为 112.5%,属于强变异。各土壤养分含量的变异系数介于 20.8%~116.1%,其中 SOC 和 TN 含量属中等变异, $\text{NO}_3\text{—N}$  和 AP 含量属强变异。相较于第二次全国土壤普查结果<sup>[20]</sup>,该流域内 SOC 含量和 TN 含量明显降低,这可能与长期高强度利用和轻保护有关。该流域内 AP 含量相较于黑土区自然土壤的 AP 含量明显增加,其原因可能是长期大量施用磷肥<sup>[21]</sup>所致。

表 1 流域土壤养分基本特征

项目	SOC/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{NO}_3\text{—N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	AP/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
最大值	28.5	2.5	217.2	222.3
最小值	7.5	1.0	2.6	2.2
平均值	16.2	1.5	53.5	32.7
标准差	3.8	0.3	62.1	36.8
变异系数/%	23.3	20.8	116.1	112.5

### 2.2 流域尺度土壤侵蚀—沉积速率基本特征

<sup>137</sup>Cs 估算结果表明,流域土壤侵蚀速率介于 -4 420.7~11 988.1  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (+表示侵蚀,-表示沉积),平均值为 2 614.0  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,变异系数为 115.0%,属强变异。流域侵蚀部位(发生侵蚀的部位)土壤侵蚀速率介于 623.9~11 988.1  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,变异系数为 66.7%,属中等变异。流域沉积部位(发生沉积的部位)土壤侵蚀速率介于 -102.8~-4 420.7  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,变异系数为 91.4%,属强变异(表 2)。在全流域 52 个采样点中,42 个样点为侵蚀样点,10 个样点为沉积样点,这表明该流域以侵蚀为主。依据《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[22]</sup>,研究流域侵蚀强度以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,这与东北黑土区土壤总体侵蚀强度相近<sup>[3]</sup>。

表 2 流域土壤侵蚀/沉积速率

流域部位	最大值/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	最小值/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	标准差	变异系数/%	样点数
全流域	11988.1	-4420.7	2614.0	3005.0	115.0	52
侵蚀部位	11988.1	623.9	3611.3	2407.4	66.7	42
沉积部位	-102.8	-4420.7	-1466.0	1339.7	91.4	10

注:侵蚀部位为土壤侵蚀/沉积速率为正值(+),沉积部位为土壤侵蚀/沉积速率为负值(-)的采样点。

### 2.3 流域侵蚀部位与沉积部位土壤养分的对比分析

由表 3 和表 4 可知,该流域侵蚀部位的 SOC 含量变化范围为 7.5~22.2  $\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 15.1  $\text{g}/\text{kg}$ ,变异系数为 17.0%;沉积部位的 SOC 含量变化范围为 8.0~28.5  $\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 20.8  $\text{g}/\text{kg}$ ,变异系数为

21.7%。与沉积部位相比,侵蚀部位 SOC 含量降低 27.4%,且  $t$  检验结果表明,侵蚀部位和沉积部位之间 SOC 含量差异呈极显著( $P=0$ )。侵蚀部位的 TN 含量变化为 1.0~2.3  $\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 1.5  $\text{g}/\text{kg}$ ,变异系数为 17.6%;沉积部位的 TN 含量为 1.4~2.5  $\text{g}/$

kg,平均值为 1.9 g/kg,变异系数为 16.9%。与沉积部位相比,侵蚀部位 TN 含量降低 21.1%,且  $t$  检验结果表明,侵蚀部位和沉积部位之间 TN 含量差异呈极显著( $P=0$ )。侵蚀部位的  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量变化范围为 2.6~217.2 mg/kg,平均值为 49.5 mg/kg,变异系数为 123.3%,属强变异;沉积部位的  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量变化范围为 12.2~210.4 mg/kg,平均值为 69.9 mg/kg,变异系数为 91.1%。与沉积部位相比,侵蚀部位  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量降低 29.2%, $t$  检验结果表明,侵蚀部位和沉积部位之间  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量差异不显著( $P=0.109$ )。侵蚀部位的 AP 含量变化为 2.2~165.5 mg/kg,平均值为 26.6 mg/kg,变异系数为 91.2%;沉积部位的 AP 含量变化为 2.2~222.3 mg/kg,平均值为 58.0 mg/kg,变异系数为 106.2%;与沉积部位相比,侵蚀部位 AP 含量降低 54.1%, $t$  检验结果表明,侵蚀部位和沉积部位之

间 AP 含量呈显著差异( $P=0.012$ )。

沉积部位的 SOC、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 AP 含量均高于侵蚀部位,这说明 SOC、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 AP 的流失对侵蚀—沉积有较大的响应,Papiemik 等<sup>[23]</sup> 研究结果同样表明,土壤养分存在从侵蚀部位迁移至沉积部位的趋势,且沉积部位各养分元素富集程度不同,其中 AP 富集程度最高,这与 Zheng 等<sup>[24]</sup> 在黄土高原的研究结果一致。本研究结果还表明,SOC 和 TN 含量在侵蚀部位和沉积部位存在极显著差异,AP 含量在侵蚀部位和沉积部位存在显著差异,而  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量在侵蚀部位和沉积部位差异不显著,这说明沉积区土壤 SOC 和 TN 含量部分来自侵蚀部位流失的土壤养分积累,而  $\text{NO}_3\text{-N}$  等可溶性养分流失除受降雨径流侵蚀作用外,还与其垂直淋溶有关,因此在沉积部位并没有表现出明显的养分富集现象。

表 3 侵蚀部位和沉积部位土壤养分对比

项目	SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )		TN/(g·kg <sup>-1</sup> )		NO <sub>3</sub> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )		AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	侵蚀部位	沉积部位	侵蚀部位	沉积部位	侵蚀部位	沉积部位	侵蚀部位	沉积部位
最大值	22.2	28.5	2.3	2.5	217.2	210.4	165.5	222.3
最小值	7.5	8.0	1.0	1.4	2.6	12.2	2.2	2.2
平均值	15.1	20.8	1.5	1.9	49.5	69.9	26.6	58.0
变异系数/%	17.0	21.7	17.6	16.9	123.3	91.1	91.2	106.2

表 4 侵蚀部位和沉积部位土壤养分  $t$  检验结果

土壤养分	$t$	$df$	Sig.(双尾)	平均值差值
SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	-6.584	33.389	0	-5.720
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	-7.946	154.000	0	-0.440
NO <sub>3</sub> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	-1.610	154.000	0.109	-20.273
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	-2.685	31.123	0.012	-31.245

## 2.4 流域尺度土壤养分含量与土壤侵蚀速率的关系

土壤养分是影响作物产量的重要因素,研究其与土壤侵蚀的关系可为土壤质量的综合评价和农田科学管理提供依据。分别将全流域 SOC、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 AP 含量与土壤侵蚀速率进行回归分析(图 2),结果显示,SOC、TN 和 AP 含量和与土壤侵蚀速率呈极显著线性关系,相关系数分别为 0.716,0.688 和 0.361( $P<0.01$ )。其原因可能在于 SOC 和 N、P 等养分主要是以有机无机体紧密结合的方式存在于土壤团聚体中,由于土壤养分随土壤颗粒和径流发生迁移,导致土壤养分“贫化”。Lu 等<sup>[25]</sup> 研究表明,黑土区土壤团聚体破碎的主要机制是雨滴打击,其对  $>1$  mm 土壤团聚体损失的贡献高达 90%;同时,雨滴打击和径流分离还影响沉积物中团聚体的粒径分布,相较于侵蚀部位,沉积部位泥沙中的土壤团聚体粒径较小,造成养分富集。

不同土壤养分与土壤侵蚀速率的相关性不同。其中,土壤 SOC 和 TN 含量与土壤侵蚀速率存在较

强的相关性,其原因可能是 SOC 和 TN 在土壤表面富集,容易随着表层土壤的迁移而流失<sup>[26]</sup>。土壤 AP 含量与土壤侵蚀速率的相关性较弱,是因为 AP 在随径流迁移过程中容易被土壤黏粒和有机质等吸附,但由于东北地区特殊的气候条件,导致干湿交替和冻融交替现象明显,改变了土壤结构以及无机 P 与阳离子的结合形态,影响土壤对磷素的吸附和解吸,以及 AP 含量<sup>[27]</sup>,进而降低土壤 AP 与侵蚀之间的相关性。 $\text{NO}_3\text{-N}$  含量与土壤侵蚀速率相关性较差,其原因可能有 2 点:(1)在坡面侵蚀过程中, $\text{NO}_3\text{-N}$  主要随径流流失,安娟等<sup>[28]</sup> 研究发现, $\text{NO}_3\text{-N}$  随径流流失量占总流失量的 78% 以上;(2) $\text{NO}_3\text{-N}$  含量不仅与土壤矿化能力和硝化作用相关,还与其随水分向深层土壤的淋溶过程有关。该流域在春季融雪和夏秋降雨过程中土壤淋溶现象普遍发生,而本研究仅采集了 0—20 cm 耕层的土壤,因此造成  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量与侵蚀速率无显著相关关系。

## 2.5 流域尺度 SOC 和 TN 空间分布对土壤侵蚀速率空间分布的响应

由上文分析可知,流域尺度 SOC 含量和 TN 含量与土壤侵蚀速率具有显著的负相关关系( $r>0.6$ ),因此这里仅分析流域尺度 SOC 和 TN 空间分布对土壤侵蚀速率的响应关系。由图 3 可知,流域东部侵蚀速率较大,而中部以及西南部主要以沉积为主。与流

域侵蚀速率分布相反, SOC 和 TN 在流域东部含量较低,而在流域中部及西南部含量较高。此结果说明在流域尺度上 SOC 和 TN 含量空间分布与土壤侵蚀

速率空间分布呈相反的变化趋势。由于 SOC 的积累、分解与氮素的存贮、转化具有密切的关联<sup>[29]</sup>,因此, TN 与 SOC 含量的空间分布格局存在相似性。

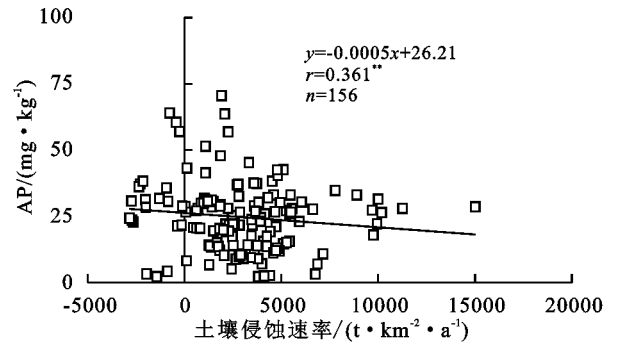
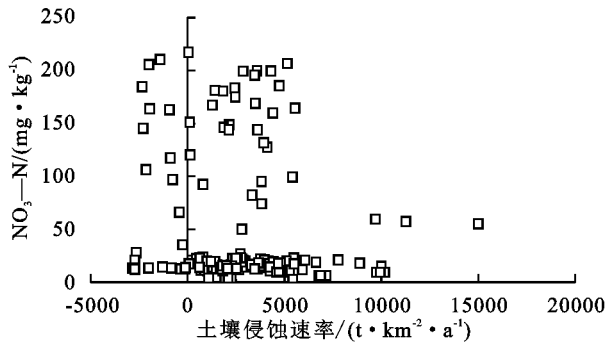
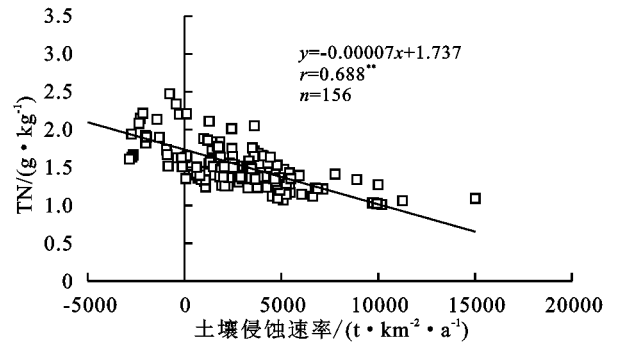
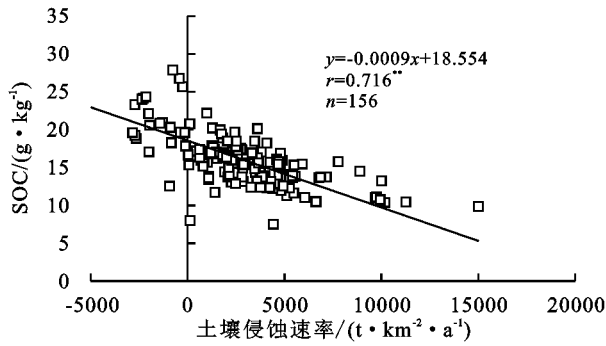


图 2 土壤养分与土壤侵蚀速率间的回归分析

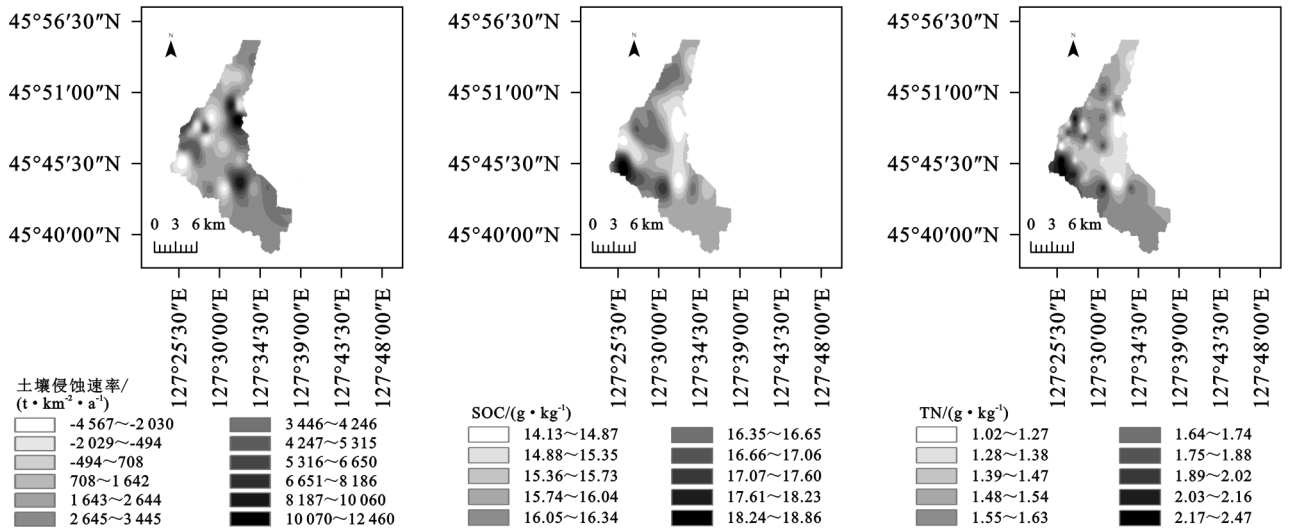


图 3 土壤 SOC、TN 含量与土壤侵蚀速率空间分布

### 3 结论

(1) 研究流域土壤侵蚀强度以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,但流域内侵蚀速率变异较大,存在强度和极强度侵蚀。

(2) 土壤侵蚀—沉积过程对流域土壤养分含量有明显影响,沉积部位土壤 SOC、TN、NO<sub>3</sub>-N 以及 AP 含量均高于侵蚀部位,且在沉积部位和侵蚀部位之间, SOC 和 TN 含量呈极显著性差异 ( $P < 0.01$ ), AP 含量呈显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

(3) 流域尺度土壤 SOC、TN 和 AP 含量与土壤侵蚀速率呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),而 NO<sub>3</sub>-N 含

量与土壤侵蚀速率相关性不显著。

(4) 流域东部侵蚀速率较大,侵蚀较为严重,中部以及西南部主要以沉积为主;而土壤 SOC 和 TN 含量在流域尺度的空间分布与侵蚀速率空间分布总体上呈相反的变化趋势。

#### 参考文献:

[1] An J, Zheng F L, Wang B, et al. Using <sup>137</sup>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, 23: 243-251.

[2] 中国水土流失与生态安全综合科学考察·东北组. 中国

- 水土流失防治与生态安全[M].东北黑土卷.北京:科学出版社,2010:52-55.
- [3] 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.
- [4] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.
- [5] 马强,宇万太,赵少华,等.黑土农田土壤肥力质量综合评价[J].应用生态学报,2004,15(10):1916-1920.
- [6] 赵其国,骆永明.论我国土壤保护宏观战略[J].中国科学院院刊,2015,30(4):452-458.
- [7] 牛晓音,王延华,杨浩,等.滇池双龙流域不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分分异[J].环境科学研究,2014,27(9):1043-1050.
- [8] 张明礼,杨浩,邹军,等.北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):218-221.
- [9] 郑粉莉,张锋,王彬.近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J].应用生态学报,2010,30(22):6044-6051.
- [10] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区<sup>137</sup>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.
- [11] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
- [12] 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.
- [13] 王彬,郑粉莉,王玉玺.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J].农业工程学报,2012,28(6):126-131.
- [14] 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.
- [15] 方华军,杨学明,张晓平,等.<sup>137</sup>Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J].生态学报,2005,25(6):1376-1382.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [17] 李勇,耿肖臣.样品厚度对实验室无源效率刻度技术测定<sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb 的影响[J].原子能科学技术,2010,44(1):80-83.
- [18] 张信宝,文安邦,奎因 TA,等.黄土崩坡农地侵蚀与坡长的关系[J].中国水土保持,1998(1):3-5.
- [19] 黑龙江省土地管理局,黑龙江省土壤普查办公室.黑龙江土壤[M].北京:中国农业出版社,1992:501-526.
- [20] 全国土壤普查办公室.中国土种志 [M].2 卷.北京:中国农业出版社,1995.
- [21] 冯志珍.东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [22] 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,2008:3-8.
- [23] Papiemik S K, Lindstrom M J, Schumacher J A, et al. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape[J].Journal of Soil and Water Conservation,2005,60(6):388-395.
- [24] Zheng F L, He X B, Gao X T, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2005,108(1):85-97.
- [25] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J].Soil and Tillage Research,2016,161:79-85.
- [26] 郭二辉,方晓,马丽,等.河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响:以温榆河为例[J].生态学报,2020,40(11):3785-3794.
- [27] 张少良,马泉来,周军,等.东北黑土区小流域“林—旱—水”格局土壤磷空间分布特征研究[J].水利学报,2016,47(10):1227-1236.
- [28] 安娟,郑粉莉,李桂芳,等.不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J].生态学报,2011,31(24):7579-7590.
- [29] 陈碧华,孙丽,李新峥,等.新乡市大棚菜田土壤养分及盐分的演变[J].农业工程学报,2013,29(15):83-90.

(上接第 48 页)

- [21] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J].Plant and Soil,2014,377(1/2):43-61.
- [22] Comino E, Druetta A. The effect of *Poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment [J].Soil and Tillage Research,2010,106(2):194-201.
- [23] Mickovski S B, Hallett P D, Bransby M F, et al. Mechanical reinforcement of soil by willow roots: Impacts of root properties and root failure mechanism[J].Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1276-1285.
- [24] 赵丽兵,张宝贵,苏志珠.草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J].中国生态农业学报,2008,16(3):718-722.
- [25] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):198-206.
- [26] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J].Geoderma,2017,285:141-150.