

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.007

康晓祺, 何彦星, 张风宝, 等. 东北黑土坡耕地土壤化学计量特征变化对侵蚀的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 20-28.

KANG Xiaoqi, HE Yanxing, ZHANG Fengbao, et al. Response of soil stoichiometric to soil erosion on slope farmland in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 20-28.

东北黑土坡耕地土壤化学计量特征变化对侵蚀的响应

康晓祺¹, 何彦星¹, 张风宝^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 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: [目的] 探究土壤侵蚀对土壤养分含量及其化学计量比的影响, 对于加深认识黑土区坡耕地质量退化过程及防控具有重要意义。[方法] 选择典型黑土区克山县开垦 100 多年的直形坡和开垦 50 多年的凸形坡为研究对象, 根据¹³⁷Cs 示踪技术估算坡耕地土壤侵蚀速率, 定量分析土壤侵蚀与土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 含量及生态化学计量比的关系。[结果] (1) 利用¹³⁷Cs 示踪法得到坡面整体的年平均侵蚀速率为 4 428.56 t/(km² · a), 直形坡和凸形坡侵蚀速率平均值分别为 3 284.53, 5 884.59 t/(km² · a), 侵蚀总量分别为 3.21 × 10⁵, 2.94 × 10⁵ t/km²。(2) 坡面整体碳氮比 (C/N) 与 SOC 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 碳磷比 (C/P) 与 SOC 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 氮磷比 (N/P) 与 TP 呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。直形坡 SOC、TN、C/N、C/P 和 N/P 均极显著小于凸形坡养分含量和化学计量比值 ($p < 0.01$), TP 含量大于凸形坡 TP 含量 ($p < 0.01$)。(3) 坡面土壤侵蚀空间分布特征与土壤有机碳、全氮及全磷的空间分布具有一致性。坡面土壤侵蚀量与 SOC、TN、TP、C/P 均呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与 C/N 呈显著负相关 ($p < 0.05$), 与 N/P 呈负相关但相关性不显著 ($p > 0.05$)。[结论] 土壤侵蚀导致坡面土壤 SOC、TN 和 TP 在坡面再分布, 影响土壤养分化学计量比, 造成坡面养分流失严重。

关键词: 土壤侵蚀; ¹³⁷Cs; 土壤养分; 化学计量特征; 黑土; 坡耕地

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0020-09

Response of Soil Stoichiometric to Soil Erosion on Slope Farmland in Black Soil Region of Northeast China

KANG Xiaoqi¹, HE Yanxing¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The impact of soil erosion on nutrient content and stoichiometric ratios in soil is crucial for further comprehending and effective control of quality degradation in the sloping farmlands of black soil regions. [Methods] Selecting straight slopes cultivated for over a century and a convex slope cultivated for more than five decades in the typical black soil area of Keshan County as the research objects, utilizing ¹³⁷Cs tracing method to estimate soil erosion rates on the slopes. Quantitative analysis was conducted on the relationship between soil erosion and key parameters such as soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents, along with the stoichiometric ratio in the ecological chemistry. [Results] (1) Using ¹³⁷Cs tracing technique, the average annual erosion rate of the whole slope was 4 428.56 t/(km² · a), the average erosion rates of the linear and convex slopes were 3 284.53, 5 884.59 t/(km² · a), and the total erosion volumes were calculated at 3.21 × 10⁵, 2.94 × 10⁵ t/km², respectively. (2) The overall carbon/nitrogen ratio (C/N) on the slopes showed a highly significant positive correlation with SOC ($p <$

收稿日期: 2023-12-15

修回日期: 2024-01-23

录用日期: 2024-02-02

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42177340, 41877080); 国家重点研发计划项目 (2018YFC0507001)

第一作者: 康晓祺 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: kangxiaochi7@163.com

通信作者: 杨明义 (1970—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事坡面土壤侵蚀过程及其环境效应研究。E-mail: ymyzly@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

0.01), and the carbon/phosphorus ratio (C/P) correlated positively and significantly with SOC ($p < 0.01$). Conversely, the nitrogen/phosphorus ratio (N/P) demonstrated a highly significant negative correlation with TP ($p < 0.01$). On linear slopes, SOC, TN, C/N, C/P and N/P were significantly lower than those on convex slopes ($p < 0.01$), while TP content was higher than that on convex slopes ($p < 0.01$). (3) The spatial distribution characteristics of soil erosion on the slopes align with the distribution of SOC, TN and TP. The amount of soil erosion on the slopes exhibited a highly significant negative correlation with SOC, TN, TP and C/P ($p < 0.01$), and a significant negative correlation with C/N ($p < 0.05$). The correlation with N/P is negative, though not statistically significant ($p > 0.05$). [Conclusion] Ultimately, soil erosion redistributed SOC, TN and TP on the slopes, affecting the stoichiometric ratios of soil nutrients and leading to substantial nutrient loss on the slopes.

Keywords: soil erosion; ^{137}Cs ; soil nutrients; stoichiometric characteristics; black soil; sloping arable land

Received: 2023-12-15

Revised: 2024-01-23

Accepted: 2024-02-02

Online(www.cnki.net): 2024-04-25

土壤碳氮磷是土壤养分的重要组成部分,其含量变化影响土壤养分的积累和供应平衡,进一步影响土地生产力,关系到全球生态系统碳循环过程^[1-2]。土壤碳氮磷之间存在着一定的耦合关系,因此分析土壤中各元素之间的关系及比例可更好地判断土壤养分情况^[3]。土壤碳氮磷的化学计量比长期以来被认为是反映陆地生态系统平衡机制的重要因素^[4],亦可作为反映土壤质量和组成的关键性能指标^[2]。从已有研究^[5]结果中可知,土壤侵蚀在影响土壤碳氮磷含量及其化学计量比方面起到关键作用。土壤侵蚀是一个复杂的过程,其中侵蚀和沉积交替发生,侵蚀过程的复杂性增加养分循环的不确定性^[6]。因此,探究土壤碳氮磷含量及其生态化学计量比特征与土壤侵蚀直接的响应关系,对揭示土壤退化过程及土地生产力具有重要意义。

魏晗梅等^[7]将研究区确定在黑土区流域尺度内,探究土壤 SOC 和 TN 与土壤侵蚀的关系研究发现,2 种养分含量在侵蚀区和沉积区存在极显著差异;赵鹏志^[8]通过地统计学方法发现,土壤侵蚀速率与 SOC 含量显著相关,但由于当地过度施肥,从而掩盖土壤侵蚀与土壤 TN 和 TP 的相关性,导致土壤侵蚀与土壤 TN 和 TP 相关性并不显著;张宁宁等^[9]研究发现,在黄土高原小流域,土壤侵蚀速率与 SOC、TN、TP、C/P 和 N/P 比之间均呈现显著负相关关系。目前,这些研究大多聚焦坡面尺度或流域尺度内,或研究侵蚀区和沉积区土壤养分的对比,缺乏在点位尺度内定量探究土壤碳氮磷含量及其化学计量比特征对侵蚀强度响应情况的研究。

作为我国商品粮生产基地的东北黑土区,虽然具有土壤理化性质良好、表土养分含量丰富等得天独厚的自然优势,适合农业耕作^[10-11],但近几十年来,在黑土区的开垦过程中,由于其作为典型的漫川漫岗地

貌^[12-13],加之过度开发和不合理的耕作方式,使黑土区土壤侵蚀较为严重,土壤表层的养分大量流失,耕地资源被严重破坏,造成土地粮食减产。据统计^[14],土壤侵蚀可导致黑土区全年粮食减产达 14.7%。因此,定量探究东北黑土区土壤侵蚀和土壤碳氮磷及其化学计量比之间的关系对缓解黑土区粮食减产问题具有重要意义。核素 ^{137}Cs 是 20 世纪 50—70 年代大气核试验的产物,半衰期为 30.2 年,沉降到地面后与土壤颗粒紧密吸附,其再分布只随土粒的迁移而产生,在量化土壤侵蚀和沉积速率方面优势明显^[15-16]。

鉴于此,本文选取东北黑土区开垦 100 多年的直形坡和开垦 50 多年的凸形坡为研究对象,通过野外采样和室内测量得到坡面 SOC、TN、TP 含量,利用 ^{137}Cs 示踪技术估算得到采样地土壤侵蚀速率,从而定量分析土壤侵蚀与土壤养分及生态化学计量比的关系,揭示土壤侵蚀对土壤养分的影响,为研究土壤退化过程提供数据支撑,对于保护黑土区坡耕地质量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

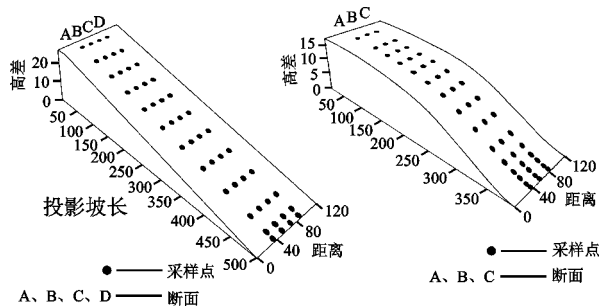
克山县 ($47^{\circ}50'51''$ — $48^{\circ}33'47''\text{N}$, $125^{\circ}10'57''$ — $126^{\circ}08'18''\text{E}$) 隶属于黑龙江省西北部齐齐哈尔市内,是小兴安岭伸向松嫩平原的过渡地带,森林覆盖率 11.3%,县内地势波状起伏,侵蚀沟纵横,漫川漫岗,海拔自东北方向向西南方向降低,平均海拔 236.9 m,年平均气温 2.4°C ,降雨主要集中在 6—8 月,年降水量 499 mm,素有“黑土明珠”之称,截至 2021 年,耕地面积 $2\,443\text{ km}^2$,属典型黑土区。本研究选取 2 块开垦年限不同的黑土区典型坡耕地作为采样区域。研究区中选取的直形坡耕地 ($48^{\circ}12'06''\text{N}$, $125^{\circ}12'42''\text{E}$),自有记录以来有 100 多年的开垦历史,地理位置位于发展乡,一直以农业种植为主,耕作

方式为顺坡起垄耕作,种植作物以大豆为主,耕作层深度约为 20 cm,坡向自北向南延伸,坡长约 500 m,坡面整体的坡度较为稳定,约为 3°。研究区中所选取的凸形坡耕地在黑龙江农垦总局克山农场附近(48°12′42″N,125°24′24″E),与直形坡约相距 8 km,其耕作方式及种植作物与直形坡相同,坡向自北向南,与直形坡方向相反,其耕作深度约为 30 cm,略深于直形坡,坡长及开垦年限都较直形坡略短,其坡长为 350 m 左右,开垦历史约 50 年。该坡面坡度变化相比于直形坡较大,自坡顶向下约 170 m 的坡度为 0~2.0°,是整个坡面最平缓的部分,而自坡顶 170~290 m 处是整个坡面最为陡峭的部分,坡度为 3.0°~5.5°,坡面最底部 60 m 的地方恢复平坦,坡度为 2.5°~4.0°。

1.2 土壤样品采集

土壤样品用直径 6 cm、高 15 cm 的土钻沿径流和耕作的方向垂直打入坡面采集,每个采样点在周围 1 m 范围内打 3 钻,混合为 1 个土壤样品。在采样点选取方面(图 1),采样深度及个数是根据 2 个坡面耕作深度、长度和宽度确定,采样点在坡脚处加密。直形坡共选取 48 个采样点,从坡顶至坡底部平均采 10 个土壤样点,采样深度为 30 cm,坡脚处加密采集 2 个土壤样点,采样深度为 45 cm,整体坡面自东向西共采集 4 个纵断面,每个断面相距 20 m。凸形坡共选取 45 个采样点,从坡顶至坡底部平均采集 10 个土壤样点,采样深度为 40 cm,坡脚处加密采集 5 个土壤样点,采样深度为 50 cm,整体坡面自东向西共采集 3 个纵断面,每个断面相距 15 m。

根据调查可知,坡耕地附近存在 1 处原始次生林保护区,该保护区自 1952 年之后一直未被扰动,符合作为背景值采样点的条件,因此将其选为 ¹³⁷Cs 背景值采样地。在保护区内选择较为平坦的空地,随机采集相距大于 1 m 的 10 个样点,采样深度为 40 cm。



注:图中数据单位为 m。

图 1 土壤样品采集区域

Fig. 1 Soil samples collection area

1.3 分析方法

本研究所需试验均在黄土高原土壤侵蚀与旱地

农业国家重点实验室开展,将土壤样品经过风干、研磨、过筛等处理后进行指标测定。土壤 ¹³⁷Cs 面积活度通过 8192 道低本底 γ 能谱分析仪测定,测定时间为 28 800 s,在检测谱 661.6 keV 处测定 ¹³⁷Cs 全峰面积,计算样品的面积活度。SOC 含量通过重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤 TN 含量通过半微量凯氏法测定;土壤 TP 含量通过氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法^[17]测定。

1.4 数据处理

基于张信宝等^[18]提出的质量平衡模型估算土壤侵蚀速率,模型表达式为:

$$A_{(t)} = A_{ref} (1 - h/H)^{N-1963} \tag{1}$$

式中: $A_{(t)}$ 为 ¹³⁷Cs 面积活度(Bq/m²); A_{ref} 为采样年份的 ¹³⁷Cs 背景值(Bq/m²); H 为年平均耕作深度(cm); h 为年平均土壤侵蚀厚度(cm/a); N 为取样年份。根据测量结果可知,本研究区背景值为 2 500 Bq/m²。

土壤侵蚀速率计算公式为:

$$E = 10^4 \rho h \tag{2}$$

式中: E 为土壤侵蚀速率 t/(km²·a); ρ 为土壤容重(g/cm³)。

本研究使用 Excel 2016 软件对数据进行整理计算,通过 t 检验对 2 个坡面养分含量进行显著性分析,用 Pearson 相关分析和一级动力学方程定量探究土壤侵蚀速率与土壤有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比的关系,以上统计分析均通过 SPSS 25.0 软件完成。用 Origin 2022 软件中 Correlation Plot 探究土壤有机碳、全氮、全磷含量和其化学计量比的关系。文中图像均采用 Origin 2022 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤养分特征

由表 1 可知,坡面 SOC 含量为 14.70~41.28 g/kg,平均值为 24.74 g/kg,TN 含量为 1.42~3.14 g/kg,平均值为 2.22 g/kg,TP 的含量为 0.54~1.27 g/kg,平均值为 0.86 g/kg,变异系数分别为 0.24,0.15,0.31,属于中等变异。坡面 SOC 与 TN、TP 呈显著正相关($r=0.90,r=0.91,p<0.01$),TN 与 TP 呈极显著正相关($r=0.81,p<0.01$)。

表 1 坡面有机碳和土壤养分含量

Table 1 Slope organic carbon and soil nutrient content

有机碳和土壤养分	样本量	最小值/(g·kg ⁻¹)	最大值/(g·kg ⁻¹)	平均值/(g·kg ⁻¹)	变异系数
SOC	93	14.70	41.28	24.74	0.24
TN	93	1.42	3.14	2.22	0.15
TP	81	0.54	1.27	0.86	0.31

由图2可知,开垦年限不同的2个坡面之间养分含量存在显著差异,直形坡中土壤SOC和TN含量极显著小于凸形坡中养分含量($p < 0.01$),分别降低25.00%和12.23%;而TP含量极显著大于凸形坡TP含量($p < 0.01$),增加42.40%。直形坡土壤碳氮磷含量在侵蚀和坡形的影响下,自东向西含量逐渐降低,直形坡面土壤碳氮磷含量从斜坡底部到顶部逐渐

降低,直形坡面SOC、TN、TP含量的最小值(14.70, 1.42, 0.92 g/kg)和最大值(25.28, 2.54, 1.27 g/kg)均出现在坡脚,且坡脚变异系数大于坡顶和坡中。凸形坡SOC、TN、TP含量的最小值均出现在坡顶(19.21, 1.57, 0.54 g/kg),最大值(41.28, 3.14, 0.91 g/kg)均出现在坡脚,坡中的变异系数大于坡顶及坡脚。

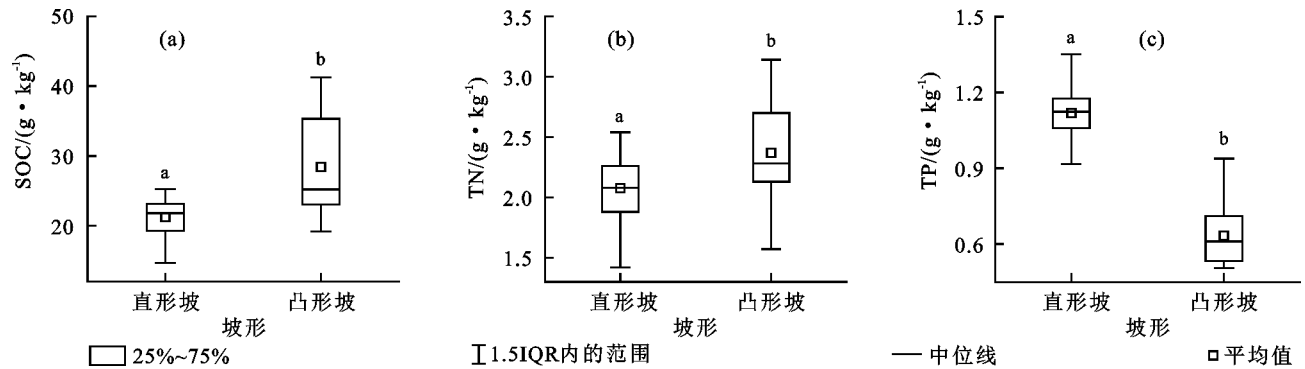


图2 直形坡与凸形坡有机碳及土壤养分含量差异

Fig. 2 Difference of organic carbon and soil nutrient content between straight slope and the convex shape

2.2 坡面土壤化学计量特征

由表2可知,坡面土壤C/N、C/P和N/P的平均值分别为 11.07 ± 0.13 , 32.83 ± 0.43 , 2.86 ± 0.04 ,变异系数分别为0.11, 0.40, 0.35。由图3可知,直形坡C/N、C/P和N/P均极显著小于凸形坡养分含量及化学计量比值($p < 0.01$)。由图4可知,坡面土壤C/N与SOC呈极显著正相关($r = 0.80$, $p < 0.01$);C/P与SOC呈极显著正相关($r = 0.60$, $p < 0.01$);N/P与TP呈极

显著负相关($r = -0.45$, $p < 0.01$)。

表2 坡面土壤养分化学计量特征

Table 2 Stoichiometric characteristics of soil nutrient on slope

化学计量特征	样本量	最小值	最大值	平均值	变异系数
C/N	93	8.38	14.07	11.07	0.11
C/P	81	14.19	52.29	32.83	0.40
N/P	81	1.34	4.11	2.86	0.35

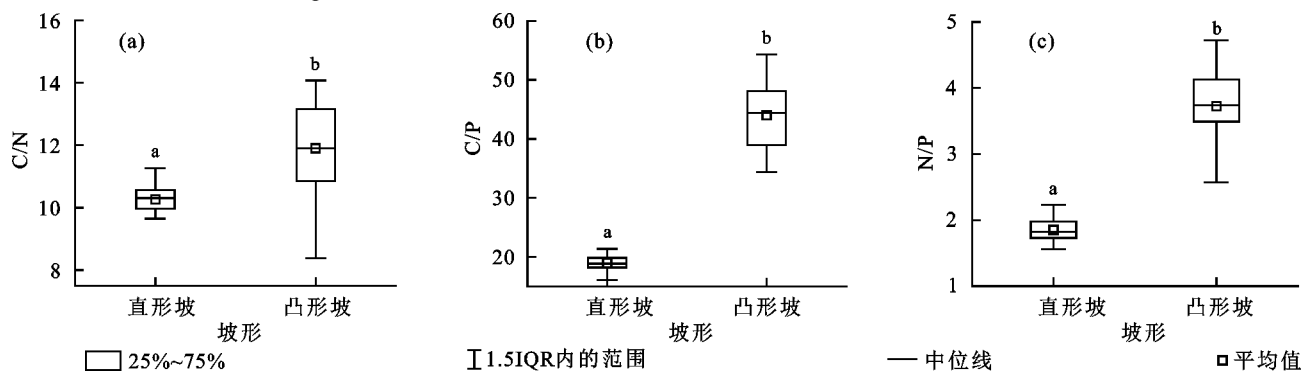


图3 直形坡与凸形坡土壤化学计量比差异

Fig. 3 Difference of soil stoichiometric ratio between straight slope and the convex slope ratio difference

2.3 土壤养分因子及化学计量比对土壤侵蚀的响应

通过 ^{137}Cs 示踪法估算侵蚀速率可知,在2个坡面93个采样点中,共有75个侵蚀点(直形坡42个,凸形坡33个),17个沉积点(直形坡5个,凸形坡12个),1个侵蚀点无明显侵蚀,侵蚀速率为 $197.39 \sim 17131.99 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均值为 $4428.56 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,变异系数为0.71,属于中等变异。2个坡面沉积点主要分布在坡脚处,沉积速率为 $75.18 \sim 3960.04 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均值为 $1543.89 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,变异系

数为0.86,属于中等变异。开垦100多年的直形坡土壤侵蚀速率的平均值为 $3284.53 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀总量为 $3.21 \times 10^5 \text{ t}/\text{km}^2$,沉积速率的平均值为 $626.31 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。开垦50多年的凸形坡侵蚀速率的平均值为 $5884.59 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均侵蚀速率为直形坡侵蚀速率的1.35倍,侵蚀总量为 $2.94 \times 10^5 \text{ t}/\text{km}^2$,沉积速率的平均值为 $1926.21 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。整个坡面59.14%的采样点处于中度侵蚀及以上,依据《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[19],2个坡面整体上属于中度侵蚀。

将坡面土壤 SOC、TN、TP 含量与土壤侵蚀速率进行相关性分析(图 4)发现,坡面土壤 SOC、TN、TP 含量与土壤侵蚀速率呈现极显著负相关,决定系数分别为 -0.53 , -0.60 , -0.47 ($p<0.01$)。对 2 个坡面土壤养分含量与土壤侵蚀量进行回归分析(图 5)发现,土壤养分与土壤侵蚀量呈非线性关系,决定系数分别为 0.45 , 0.53 , 0.05 ,土壤中 SOC 和 TN 对土壤侵蚀量的响应更为密切,而土壤 TP 含量对土壤侵蚀量的响应程度较低。对比 2 个坡面,不同坡面中的 SOC、TN 对于土壤侵蚀量的响应程度较为接近,而 TP 含量对于土壤侵蚀量的响应程度差异较大。

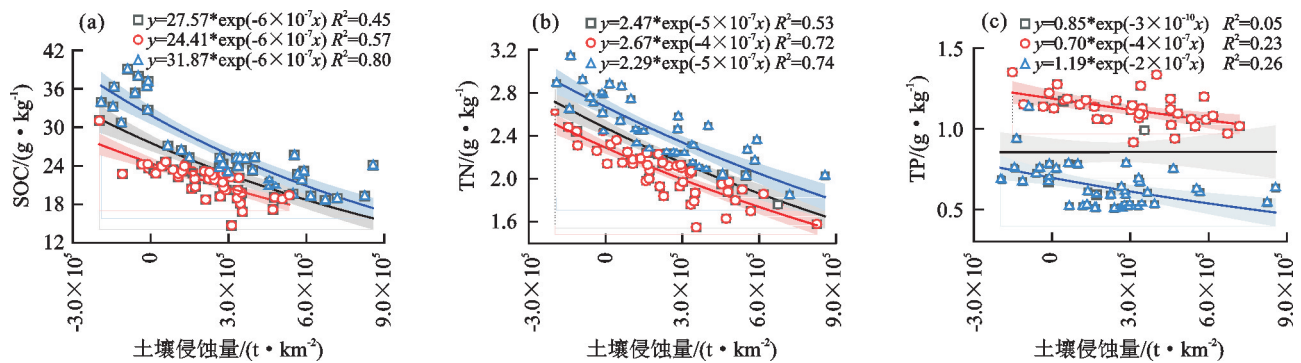


图 4 Correlation between SOC, TN, TP and ecological stoichiometric ratio of slope soil

注:黑色曲线为 2 个坡面整体养分与侵蚀速率的拟合曲线;红色曲线为直形坡养分与侵蚀速率的拟合曲线;蓝色曲线为凸形坡养分与侵蚀速率的拟合曲线。下同。

图 5 坡面土壤侵蚀量与养分因子回归分析

Fig. 5 Regression analysis of slope soil erosion amount and nutrient factors

根据土壤养分化学计量比和土壤侵蚀的相关性可知,土壤侵蚀量与 C/P 呈极显著负相关($r = -0.34$, $p<0.01$),与 C/N 呈显著负相关($r = -0.27$, $p<0.05$),与 N/P 存负相关但相关性不显著($r = -0.25$, $p>0.05$)。由图 6 可知,坡面土壤养分化学计

量比对土壤侵蚀响应程度较低,决定系数分别为 0.07 , 0.10 , 0.07 。开垦年限不同的直形坡和凸形坡的土壤化学计量特征与土壤侵蚀速率的非线性回归分析的 R^2 存在显著差异,直形坡中养分化学计量比对土壤侵蚀量的敏感程度明显低于凸形坡中养分化学计量比。

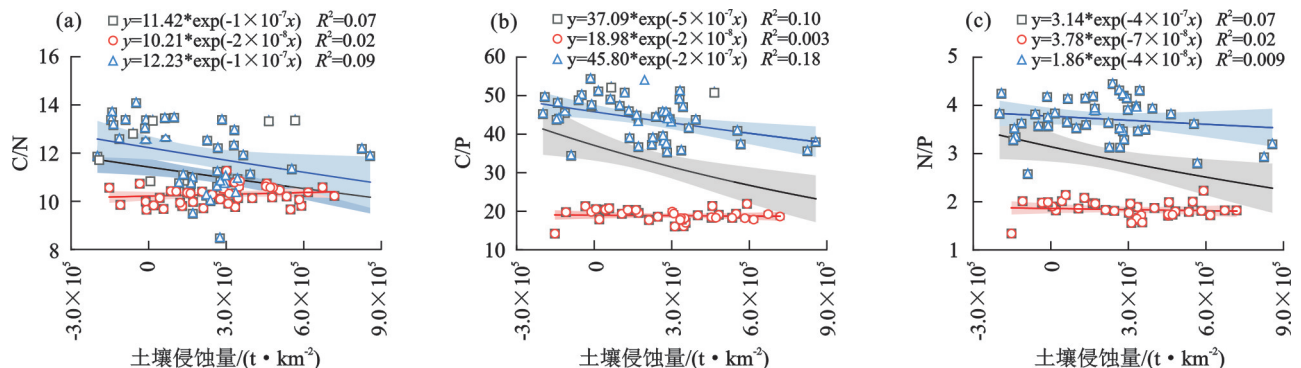


Fig. 6 Regression analysis of slope soil erosion amount and C/N, C/P, N/P

3 讨论

本研究坡面土壤有机质平均含量为 42.65 g/kg (将坡面有机碳含量乘以 1.724),坡面全磷平均含量为 0.86 g/kg ,与韩秉进等^[20]、杜可等^[21]测得的黑土区土壤养分含量接近,坡面全氮含量(2.22 g/kg)略

高于已有研究^[22]测得结果,分析可知是因为本研究区人为耕作过程中氮肥的施用在一定程度上提高 2 个坡面的氮储量,造成坡面土壤 TN 含量丰富^[23-25]。土壤 C/N 可影响土壤中碳和氮的循环,是反映土壤质量的重要指标^[26]。本研究中坡面土壤有机碳与全

氮呈极显著正相关($r=0.90$), C/N 比较稳定, 说明土壤中碳、氮含量对地表作物类型及环境因子的响应是一致的, 平均值为 11.07, 与卓志清等^[24]的研究结果比较接近, 略低于中国陆地平均值(12.30)^[20], 说明土壤中氮素含量较高, 存在一定的氮富集情况, 这与本研究中所测得土壤 SOC 和 TN 含量特征相同。坡面土壤 C/P 的平均值(32.83)和 N/P 的平均值(2.86)均低于中国陆地平均值(52.70, 3.90)^[22], 可见研究区土壤生物固氮量和土壤磷有效性可能较高^[24, 27]。

回归分析结果表明, 土壤侵蚀是造成坡面养分流失的主要原因, 坡面 SOC、TN 及 TP 含量与土壤侵蚀速率存在相关性, SOC 及 TN 含量对土壤侵蚀量的响应程度较高, 但 TP 含量对土壤侵蚀量的响应程度较低, 磷元素与土壤碳、氮元素不同, 磷元素主要来源于土壤母质, 不参与大气循环^[28], 而东北地区磷肥的施用在一定程度上补充耕地因侵蚀而流失 TP 含量, 这可能部分掩盖侵蚀对 TP 流失的作用, 土壤 TP 含量依旧主要受土壤侵蚀的影响。这是因为土壤 SOC、TN、TP 等养分皆主要以有机无机体紧密结合在土壤团粒结构中^[7, 29], 土壤侵蚀破坏团聚体的同时, 吸附在土壤颗粒上的土壤养分也随径流发生迁移, 导致坡面土壤养分含量减少。土壤颗粒在迁移过程中也影响着坡面土壤养分的空间分布情况, 具体表现为 2 个坡面土壤侵蚀速率较大的位置对应的土壤养分含量较低, 反之亦然, 反映坡面土壤侵蚀强度空间分布对土壤养分分布的直接影响, 这与魏晗梅等^[7]和赵鹏志^[8]的研究结果一致。坡面土壤 C/N、C/P、N/P 与土壤侵蚀速率存在一定相关性, 但其非线性关系并不显著, 分析认为, 土壤中养分含量的变化直接影响其化学计量比的比值, 而土壤养分对土壤侵蚀的响应程度不同, 对化学计量比的影响系数也不同, 间接导致土壤养分化学计量比与土壤侵蚀的非线性关系并不显著。

根据显著性分析和回归分析结果可知, 2 个坡面间的土壤养分含量及化学计量比存在一定差异, 对土壤侵蚀的响应关系存在差异, 造成这种差异主要是由于 2 个坡面的坡形和开垦年限存在差异。东北黑土区耕地在开垦过程中, 通常随着开垦年限的延长, 耕地土壤侵蚀速率逐渐增加, 但不同耕地之间存在的坡形差异影响土壤侵蚀对开垦年限的响应程度^[30]。坡形是坡长和坡度的组合形态^[31], 根据金平华等^[32]、杨维鸽等^[33]的研究结果可知, 在一定范围内, 土壤侵蚀强度与坡度及坡长呈现较好的正相关关系, 且坡度对黑土区土壤侵蚀的影响程度更加显著。根据¹³⁷Cs 示

踪法估算结果可知, 开垦 50 多年的凸形坡的坡面土壤侵蚀速率大于开垦 100 多年的直形坡的坡面土壤侵蚀速率, 说明在较短的开垦年限内, 坡形是影响土壤侵蚀速率的主要因素^[30]。在坡形的作用下, 凸形坡的 TP 含量极显著小于直形坡的 TP 含量。坡面 N/P 主要受土壤 TP 的控制, 造成凸形坡的 N/P 极显著高于直形坡的 N/P。本研究发现, 直形坡的 SOC 和 TN 含量极显著小于凸形坡, 不符合上述分析, 这与 2 个坡面之间开垦年限差异过大有关系。原始自然土地利用形式被开垦为耕地后, 由于不合理的利用方式改变土壤环境状态, 改变微生物生存的湿度和温度条件, 造成土壤 SOC 和 TN 随着开垦年限的增加而流失^[23, 34]。

开垦年限一方面通过加速土壤侵蚀导致土壤养分流失及化学计量特征的变化, 另一方面开垦造成土壤养分矿化。开垦过程导致土壤中团聚体暴露, 提高土壤有机碳和氮被矿化风险, 同时东北地区连年耕作时普遍采用的重型液压翻转铧式犁, 作业深度大、速度快, 扰乱团聚体有机碳的稳定过程, 破坏土壤理化性质, 加剧有机碳和氮的矿化, 造成土壤养分随着开垦年限的增加而流失^[23, 34-35]。于君宝等^[34]研究发现, 随着开垦年限的增长, 黑土区 0—40 cm 土层的总有机碳含量随开垦年限增长降低, 且土壤有机质含量在开始耕作的前 50 年下降速度较快。根据段兴武等^[23]研究可知, 土壤中全氮含量的变化趋势与有机碳含量的变化趋势相似。因此, 开垦年限造成直形坡坡面 SOC 和 TN 含量极显著低于凸形坡坡面上 SOC 和 TN 的含量, 又因为土壤 C/N、C/P 更加受土壤 SOC 含量的影响, 造成直形坡的 C/N、C/P 极显著低于凸形坡的 C/N 和 C/P。经过分析可知, 土壤开垦年限和坡形对土壤养分含量存在影响, 造成 2 个坡面之间养分含量及化学计量比的差异, 但土壤养分含量及分布对土壤开垦年限和坡形的具体响应情况还需进一步探究。本研究定量分析土壤养分及化学计量比对土壤侵蚀的响应关系, 但土壤养分及其化学计量比的变化与地形、开垦年限、微生物分解、管理方式等因素也密切相关, 还需进一步探究。综上所述, 东北地区典型坡耕地由于其特有的地形特点及人为长时间的开垦利用, 极易造成土壤侵蚀, 导致土壤 SOC、TN 和 TP 含量显著降低, 进而影响土壤养分化学计量比, 对东北黑土区土地质量造成严重威胁。为缓解坡面养分流失, 需改良当地耕作方式, 继续在东北地区实施保护性耕作、休耕免耕及秸秆还田等措施, 并科学施用肥料, 提高肥料当季利用效率, 从而减缓黑土区耕作土壤表面养分流失, 维持当地土壤可持续发展。

4 结论

本研究以典型黑土区克山县直形坡和凸形坡为研究对象,基于 ^{137}Cs 示踪技术,定量分析土壤侵蚀与土壤有机碳、全氮和全磷含量及生态化学计量比的关系。研究结果显示,坡面土壤养分间的相关性较高,SOC与TN、TP呈极显著正相关($p < 0.01$),TN与TP呈极显著正相关($p < 0.01$)。坡面整体C/N与SOC呈极显著正相关($p < 0.01$),C/P与SOC呈极显著正相关($p < 0.01$)。N/P与TP呈极显著负相关($p < 0.01$)。直形坡SOC、TN、C/N、C/P和N/P均极显著小于凸形坡养分含量和化学计量比值($p < 0.01$),TP含量大于凸形坡TP含量($p < 0.01$)。土壤侵蚀是影响土壤养分含量和空间分布的主要原因,坡面土壤侵蚀空间分布特征与土壤有机碳、全氮、全磷含量的空间分布具有一致性。坡面土壤侵蚀量与SOC、TN、TP、C/P均呈极显著负相关($p < 0.01$),与C/N呈显著负相关($p < 0.05$),与N/P呈负相关但相关性不显著($p > 0.05$)。土壤侵蚀导致坡面土壤SOC、TN和TP在坡面再分布,影响土壤养分化学计量比的变化。相对于土壤养分,土壤养分化学计量比对土壤侵蚀的敏感程度较低,开垦年限和坡形通过影响土壤侵蚀间接影响土壤养分含量及化学计量比值。本研究尽管定量分析土壤养分及化学计量比对土壤侵蚀的响应关系,但土壤养分及其化学计量比的变化与地形、开垦年限、微生物分解、管理方式等因素也密切相关,今后还需进一步深入探究其变化机制。

参考文献:

- [1] XU H W, QU Q, LI P, et al. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the Loess Hilly Region, China[J]. *Forests*, 2019, 10(1): e27.
- [2] 候宁, 黑杰, 金强, 等. 福州滨海地区菜地和果园土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 954-964.
HOU N, HEI J, JIN Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus, and ecological stoichiometry in vegetable fields and orchard in the coastal area of Fuzhou[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 954-964.
- [3] 夏光辉, 郭青霞, 卢庆民, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤养分及生态化学计量特征[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 140-147, 153.
XIA G H, GUO Q X, LU Q M, et al. Soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics under different land use patterns in loess hilly area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 140-147, 153.
- [4] LI G, ZHANG Z, SHI L L, et al. Effects of different grazing intensities on soil C, N, and P in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): e2584.
- [5] SUN J M, HUANG C H, HAN G N, et al. Effects of cover on soil particle and associated soil nutrient redistribution on slopes under rainfall simulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 729-740.
- [6] KUHN N J, HOFFMANN T, SCHWANGHART W, et al. Agricultural soil erosion and global carbon cycle: Controversy over? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(7): 1033-1038.
- [7] 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.
WEI H M, ZHENG F L, FENG Z Z, et al. Responses of soil nutrients to soil erosion and deposition at watershed scale in the thin layer mollisol area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 49-54.
- [8] 赵鹏志. 黑土区耕作侵蚀及其与碳氮磷分布格局的关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
ZHAO P Z. Tillage erosion and its relationship with spatial patterns of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus in black soil region[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [9] 张宁宁, 黄诗浩, 雷衡, 等. 基于 ^{137}Cs 示踪技术的土壤侵蚀及养分流失特征评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9274-9283.
ZHANG N N, HUANG S H, LEI H, et al. Assessment of soil erosion and nutrient loss characteristics based on ^{137}Cs tracer technique[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9274-9283.
- [10] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 1-12.
- [11] MAI J J, WANG Z J, HU F N, et al. Study on soil hydraulic properties of slope farmlands with different degrees of erosion degradation in a typical black soil region[J]. *Peer J*, 2023, 11: e15930.
- [12] 张兴义, 刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 320-326.
ZHANG X Y, LIU X B. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 320-326.
- [13] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. *中国水土保持*, 2008(12): 26-30.

- YAN B X, YANG Y H, LIU X T, et al. Present situation and evolution trend of soil erosion in northeast black soil region[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12):26-30.
- [14] 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.
- [15] 王禹,杨明义,刘普灵.东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J].核农学报,2010,24(4):790-795.
- WANG Y, YANG M Y, LIU P L. Contribution partition of water and wind erosion on cultivated slopes in northeast black soil region of China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010,24(4):790-795.
- [16] 何彦星,张凤宝,杨明义.¹³⁷Cs 示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J].农业工程学报,2021,37(14):60-68.
- HE Y X, ZHANG F B, YANG M Y. Effects of soil erosion on organic carbon fractions in black soils in sloping farmland of Northeast China by using ¹³⁷Cs tracer measurements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(14):60-68.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis.[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等.侵蚀泥沙研究的¹³⁷Cs 核示踪技术[J].水土保持研究,2007,14(2):152-154,157.
- ZHANG X B, HE X B, WEN A B, et al. The ¹³⁷Cs nuclear tracing technique for soil erosion and sedimentation studies[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(2):152-154,157.
- [19] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- Ministry of Water Resources of the People's of China. Soil erosion classification and classification standard SL 190—2007[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [20] 韩秉进,隋跃宇,赵军,等.黑龙江省黑土农田养分时空演变分析[J].农业系统科学与综合研究,2005,21(4):288-291.
- HAN B J, SUI Y Y, ZHAO J, et al. Analysis for spatial variability of soil fertility on black soil in Heilongjiang Province[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2005,21(4):288-291.
- [21] 杜可,王乐,张淑香,等.黑土区县域土壤养分空间分布特征及其影响因子[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1465-1474.
- DU K, WANG L, ZHANG S X, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil nutrients in black soil region counties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018,24(6):1465-1474.
- [22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010,98(1):139-151.
- [23] 段兴武,赵振,刘刚.东北典型黑土区土壤理化性质的变化特征[J].土壤通报,2012,43(3):529-534.
- DUAN X W, ZHAO Z, LIU G. The variations of soil-physico-chemical properties since the second national soil survey in the northeast typical black soil regions[J]. Chinese Journal of Soil Science 2012,43(3):529-534.
- [24] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J].农业机械学报,2019,50(10):259-268,336.
- ZHUO Z Q, LI Y, XING A, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):259-268,336.
- [25] 张少良,张兴义,崔战利.哈尔滨市辖区黑土有机质、全氮的空间异质性分析[J].农业系统科学与综合研究,2007,23(3):333-337.
- ZHANG S L, ZHANG X Y, CUI Z L. The spatial variability of organic matter and total nitrogen contents in black soil region of Harbin[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007,23(3):333-337.
- [26] 赵玮,王新兴,杨昊天,等.土壤碳氮特征沿干旱梯度时空格局及对气候变化的响应:基于中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据[J].生态学报,2023,43(9):3582-3591.
- ZHAO W, WANG X X, YANG H T, et al. Spatio-temporal patterns of soil carbon and nitrogen characteristics along aridity gradients and their responses to climate change: Based on long-term field observation data of Chinese Ecosystem Research Network[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3582-3591.
- [27] SMITH V H. Effects of nitrogen; Phosphorus supply ratios on nitrogen fixation in agricultural and pastoral ecosystems[J]. Biogeochemistry, 1992,18(1):19-35.
- [28] 刘双凤,杨德志,王凤,等.施肥对我国农田土壤磷素形态影响的 Meta 分析[J/OL].中国土壤与肥料,2023.https://link.cnki.net/urlid/11.5498.S.20231219.1018.004.
- LIU S F, YANG D Z, WANG F, et al. Meta-analysis of the effect of fertilizer application on phosphorus forms in agricultural soils in China[J/OL]. Soil and Fertilizer

- Sciences in China, 2023. <https://link.cnki.net/urlid/11.5498.S.20231219.1018.004>.
- [29] 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.
- [30] 刘竞.百年开垦对东北黑土碳氮演变的影响及其驱动机制[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- LIU J. Evolution characteristics and driving mechanism of black soil organic carbon and nitrogen during the post 113 years of reclamation in northeastern China[D].Yangling, Shaanxi: University of Chinese Academy of Sciences(Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment),2021.
- [31] 刘华征,贾燕锋,范昊明,等.东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J].自然资源学报,2022,37(9):2292-2305.
- LIU H Z, JIA Y F, FAN H M, et al. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical mollisol region, Songnen Plain, Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2292-2305.
- (上接第 19 页)
- [31] DUAN L X, HUANG M B, ZHANG L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J].Journal of Hydrology,2016,537:356-366.
- [32] 陈波,剪文灏,吕发,等.冀北山地蒙古栎天然林土壤物理性质及水源涵养功能研究[J].水土保持通报,2013,33(2):83-86,92.
- CHEN B, JIAN W H, LÜ F, et al. Soil physical properties and water conservation function of natural quercus mongolica forest in mountainous area of northern Hebei Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2013,33(2):83-86,92.
- [33] 孟晨,牛健植,骆紫藤,等.华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J].水土保持学报,2019,33(3):94-100.
- MENG C, NIU J Z, LUO Z T, et al. Response of soil macropore to soil phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of North China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(3):94-100.
- [34] 伊怀虎,艾力夏提·库尔班,韦自强,等.不同结构落叶松人工林枯落物和土壤的持水特性[J].森林与环境学报,2023,43(5):481-490.
- YI H H, KUERBAN A, WEI Z Q, et al. Litter and soil water-holding capacity of *Larix gmelinii* plantations with different plantation structures[J].Journal of Forestry and Environment,2023,43(5):481-490.
- [35] 师仁增,邓霞,田琳,等.植物根系分泌物对解磷微生物的影响研究进展[J].山东农业科学,2023,55(8):174-180.
- SHI R Z, DENG X, TIAN L, et al. Research progress of influences of plant root exudates on phosphorus solubilizing microorganisms [J]. Shandong Agricultural Sciences,2023,55(8):174-180.
- [32] 金平华,濮励杰,王金磊,等.¹³⁷Cs 法用于典型流域土壤侵蚀的初步研究:以太湖流域上游西苕溪流域为例[J].自然资源学报,2004,19(1):47-54.
- JIN P H, PU L J, WANG J L, et al. Preliminary study on using ¹³⁷Cs tracer method to estimate soil erosion of typical area: A case study on Xitiaoxi drainage area at up stream of Taihu Lake Basin[J].Journal of Natural Resources,2004,19(1):47-54.
- [33] 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.
- YANG W G, ZHENG F L, WANG Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region [J].Acta Pedologica Sinica, 2016,53(3):572-581.
- [34] 于君宝,刘景双,王金达,等.不同开垦年限黑土有机碳变化规律[J].水土保持学报,2004,18(1):27-30.
- YU J B, LIU J S, WANG J D, et al. Organic carbon variation law of black soil during different tillage period [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1):27-30.
- [35] 李平,郎漫.开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率的影响[J].土壤学报,2020,57(1):165-173.
- LI P, LANG M. Effect of cultivation on gross and net N transformation rates in black soil relative to duration[J].Acta Pedologica Sinica,2020,57(1):165-173.