

# 黑土区低山丘陵坡耕地侵蚀沟浅层土壤养分特征及其影响因素

张晓莲<sup>1</sup>, 肖洋<sup>2</sup>, 张瑞豪<sup>2</sup>, 邵社刚<sup>3</sup>, 徐金忠<sup>4</sup>, 倪栋<sup>3</sup>, 贺旭杨<sup>2</sup>, 牛羽萱<sup>2</sup>

(1.黑龙江省齐齐哈尔市依安县水务局, 黑龙江 齐齐哈尔 161500; 2.黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3.交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 4.黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** [目的] 研究黑土区低山丘陵地形侵蚀沟土壤养分特征及其影响因素, 为黑土区土地资源合理运用, 土壤肥力精确化管理和退化土壤修复工作提供数据与理论支持。[方法] 以黑龙江省延寿县不同发育类型侵蚀沟表层土壤作为研究对象, 对0—40 cm层侵蚀沟各部位的土壤进行取样测定, 量化分析土壤养分特征。[结果] ①不同侵蚀沟道间有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量较CK差异显著( $p < 0.05$ ), 随侵蚀沟发育, 0—40 cm层的土壤有机质含量呈递减趋势, 土壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量总体呈下降趋势。随着土层加深, 土壤养分差异显著( $p < 0.05$ ), 呈下降趋势。受侵蚀—沉积影响, 土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮含量在沟头段降幅明显; 土壤有机质、有效磷、有效钾含量在沟尾因沉积作用下降平缓。②土壤退化指数在0—40 cm层呈 $A_2 > A_1 > A_3$ , 随侵蚀沟发育, 土壤退化程度加重。[结论] 土壤养分与容重总体呈显著负相关, 与土壤水稳性团聚体含量、黏粒含量呈显著正相关; 土壤剖面与构型差异是造成土壤养分差异的根本原因, 侵蚀沟发育是土壤养分变化的次要原因, 土壤有机质、全氮、全钾含量也受到部位差异影响。

**关键词:** 黑土区; 坡耕地; 土壤侵蚀; 土壤养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0087-07

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 张晓莲, 肖洋, 张瑞豪, 等. 黑土区低山丘陵坡耕地侵蚀沟浅层土壤养分特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 87-94. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.011; Zhang Xiaolian, Xiao Yang, Zhang Ruihao, et al. Nutrient characteristics and factors influencing surface soil with gully erosion on sloping farmland for low hilly terrain in black soil area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 87-94.

## Nutrient Characteristics and Factors Influencing Surface Soil with Gully Erosion on Sloping Farmland for Low Hilly Terrain in Black Soil Area

Zhang Xiaolian<sup>1</sup>, Xiao Yang<sup>2</sup>, Zhang Ruihao<sup>2</sup>,

Shao Shegang<sup>3</sup>, Xu Jinzhong<sup>4</sup>, Ni Dong<sup>3</sup>, He Xuyang<sup>2</sup>, Niu Yuxuan<sup>2</sup>

(1. Yian Water Affairs Bureau in Heilongjiang Province, Qiqihaer, Heilongjiang

161500, China; 2. College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University,

Haerbin, Heilongjiang 150080, China; 3. Research Institute of Highway ministry of Transport, Beijing 100088,

China; 4. Hydro-science Research Institute of Hydro-science of Heilongjiang, Haerbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** [Objective] The soil nutrient characteristics and influencing factors of surface soil gully erosion for low hilly terrain in the black soil area were studied in order to provide data and theoretical support for the rational use of land resources, accurate management of soil fertility, and restoration of degraded soil in the black soil area. [Methods] Surface soil gully erosion for different types of eroded ditches in Yanshou County, Heilongjiang Province was determined by measuring and analyzing soil samples from the 0—40 cm layer in each part of the erosion gully. [Results] ① The contents of soil organic matter, total nitrogen, total

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2023-03-03

资助项目: 国家重点研发计划项目子课题“北部低山丘陵水蚀区土壤侵蚀防治保护性利用模式”(2021YFD150080503); 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020D018); 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2017-9058)

第一作者: 张晓莲(1973—), 女(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水土保持生态建设和治理工作。Email: hljyazxl@163.com。

通信作者: 肖洋(1978—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土保持方面的研究。Email: xiaoyang@hlju.edu.cn。

phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium, and alkali hydrolyzable nitrogen were significantly different ( $p < 0.05$ ) for different erosion gully types compared with the check treatment. As an erosion gully developed, soil organic matter decreased in the 0—40 cm layer, and the contents of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium, and alkali hydrolyzable nitrogen also decreased. These nutrient contents were significantly different ( $p < 0.05$ ) in different soil layers. Soil nutrient contents decreased with increasing depth. Because of erosion deposition, the contents of soil organic matter, total nitrogen, total potassium, and alkali hydrolyzable nitrogen decreased dramatically at the head of the gully, and at the same time, the contents of soil organic matter, available phosphorus, and available potassium decreased slowly. ② The soil degradation index followed the order of  $CK > A_2 > A_1 > A_3$  in the 0—40 cm layer as erosion gullies developed, and the soil was gradually degraded. [Conclusion] Soil nutrients had an overall significant negative correlation with bulk density, and soil nutrients were positively correlated with water stable aggregates and clay content. Soil profile differences were the fundamental reason for the variation in soil nutrients. Erosion gully development was the secondary reason for nutrient changes. The contents of soil organic matter, total nitrogen, and total potassium were also affected by positional differences.

**Keywords:** black soil area; sloping farmland; soil erosion; soil nutrient

东北黑土区因其土壤肥沃、气候适宜,成为中国重要的粮食产区和商品粮基地<sup>[1]</sup>。黑土因其具有分层明显<sup>[2]</sup>的特征,养分主要集中于表层土壤,极易受到土壤侵蚀的危害<sup>[3-4]</sup>。自 19 世纪后期大规模垦荒以来,由于长期高强度开发与粗放式管理,黑土地正面临严重的退化危机,土壤侵蚀的危害已经日益突出,表层土壤流失十分严重,氮磷钾等土壤重要养分逐年流失<sup>[5-6]</sup>。有研究表明,黑土区每年土壤流失量近  $2.40 \times 10^6$  t,流失的氮磷钾养分大约等于  $5.00 \times 10^6$  t 标准化肥<sup>[7]</sup>。侵蚀沟已在适宜耕作的低山丘陵和漫山漫岗地带分布密集<sup>[8]</sup>,虽然尚以轻、中度侵蚀为主<sup>[9]</sup>,但其发展速度迅速<sup>[10]</sup>,影响机械农机作业,成为限制当前区域农业可持续发展的主要矛盾。土壤侵蚀同时使土壤养分在流域空间分布上发生变异,这主要是由于雨水溅蚀和径流冲蚀剥离富含养分的表层土壤,土壤养分随径流而下,在下游沉淀<sup>[11-13]</sup>。邢培茹等<sup>[14]</sup>认为流域尺度上有机质分布与土壤侵蚀空间部分相对应,土壤侵蚀强度主导了土壤有机质在流域耕层土壤中的分布。张孝存等<sup>[15]</sup>则认为土壤侵蚀速率与土壤全氮、碱解氮含量呈负相关,土壤侵蚀是土壤质量下降的关键因素。祁志等<sup>[16]</sup>测定得出土壤全氮、速效钾等物质受侵蚀和季节变化影响,在不同坡面汇水区中出现分化。而这一状况又会引起流域中不同部位的作物产量出现明显差异<sup>[17-18]</sup>,不利于耕作的统一管理。

自“十四五”以来,随着国家对黑土区土壤保护的重视,国内外也出现了对针对黑土侵蚀沟分布<sup>[19]</sup>、影响机制<sup>[20]</sup>、发展趋势等<sup>[21]</sup>方面的研究热潮,然而有关侵蚀沟发育对土壤养分变化的影响方面的研究还

较少。故本文选取黑土区不同发育类型的侵蚀沟作为研究对象,系统研究侵蚀作用对沟道 0—40 cm 表层土壤养分的影响,为黑土区土地资源合理运用,土壤肥力精确化管理,退化土壤修复工作提供数据与理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省延寿县双奎河双安村流域( $128^{\circ}22'47''E, 45^{\circ}39'12''N$ ),气候属温带大陆性气候,年均气温  $2.8^{\circ}C$ ,无霜期 154 d,年均降水量 512.1 mm。研究区海拔高度 145~300 m,地处小兴安岭余脉与松嫩平原的过渡带,主要为低山丘陵地形,域内表层土壤类型为典型黑土,表层 0—20 cm 土壤有机质含量约为 1%~8%。采样地为缓坡耕地,坡度在  $5^{\circ}$  左右,主要作物为玉米,耕作方式多为顺坡垄作,春季翻耕深度为 20~25 cm,底层成土母质为第四纪黄土状亚黏土。

### 1.2 研究区数据获取

通过延寿县 1:1 万比例尺地形图、土壤类型图和 Google Earth 地球影像初步筛选出“延寿县双奎河双安村流域”符合试验设计并实地考察。于 2021 年 5 月在此流域进行土样采集,研究区土壤养分背景值则参考《黑龙江省延寿县耕地地力评价》<sup>[22]</sup>。为减少不同地形因子对试验的干扰,所选沟道均分布于同一小流域级<sup>[23]</sup>( $0.13 \sim 1.3 \text{ km}^2$  内),坡度、坡向、海拔等地形因子相近。经现场勘察土地利用状况与卫星底图无误后,依照《黑龙江省侵蚀沟分级与分类》(DB23/T2-412)标准,结合历史影像和无

人机 DEM 模型计算各侵蚀沟发育年限,选取具有代表性的不同发育程度的 3 条侵蚀沟  $A_1, A_2, A_3$  作为研究对象,并在平行于  $A_1, A_3$  侵蚀沟沟头段正东方向 5 m 处的坡耕平地上设置两处空白对照 CK。

### 1.3 野外土样采集

在各沟道的坡面沿纵断面线按 3 等分分出沟头、沟中、沟尾 3 部位,每个部位中设置沟坡、沟底集水区两个采样区,采样区为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,沿一侧对角线分设 3 个采样点,其中沟坡采样点位于坡面上端,采样时垂直于坡面;沟底集水区采样前用刮刀去除 3 cm 浮土以避免样品掺杂上游冲刷下的泥沙。采样时,首先拂去表面残留枯枝和石砾,再以地表为基准,按机械分层法向下分别采集 0—20, 20—40 cm 两

个土层的土样。两处空白对照 CK 同上各层重复采集 3 次后混样处理。本次采样共计 60 个采样点(详见表 1)。

鲜土采集后用布袋分装,带回实验室后置于避光阴凉处摊开风干后用四分法取其中部分土样,分别过 1.00, 0.05 mm 网筛,所得样品重复 3 次测定。测定方法:土壤有机质含量—重铬酸钾氧化法,全氮含量—开氏消煮法,全磷含量—碳酸钠熔融法,全钾含量—碳酸钠熔融法,有效磷含量—碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾含量—乙酸铵提取法,碱解氮含量—碱解扩散法,粒径分布—吸管沉降法,容重—环刀法,水稳性团聚体—干筛和湿筛法<sup>[24-27]</sup>(见表 1)。

表 1 试验土壤基本情况  
Table 1 Basic condition of tested soil

编号	发育类型	采样点/个	坡度/ (°)	长度/ m	平均 深度/m	粒径分布/(g·kg <sup>-1</sup> )			$A_{WS}/$ %	$D_{MW}/$ mm	$D_{GM}/$ mm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤 质地
						砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量					
$A_1$	浅沟	18	5.22	17.4	0.2	355.96	301.38	241.15	54.34	1.44	1.24	1.45	黏壤土
$A_2$	小型半稳定沟	18	4.82	223.4	0.72	353.58	314.22	236.8	58.72	1.58	1.25	1.44	黏壤土
$A_3$	中型稳定切沟	18	5.57	319.8	2.03	387.43	279.64	221.23	60.71	1.26	1.13	1.45	黏壤土
CK	坡耕地	6	5.29	—	—	407.2	321	177.35	51.47	1.00	1.09	1.42	壤土

注:① $A_{WS}$ 为直径在 10~0.25 mm 之间的水稳性团聚体的含量; $D_{MW}$ 为水稳性团聚体平均重量直径; $D_{GM}$ 为水稳性团聚体几何平均直径。

②两处空白对照采集点毗邻故作混样处理。

### 1.4 数据分析

提取试验数据后,通过 SPSS 25.0 等软件对原始数据进行统计、相关性分析及回归分析。

(1) 土壤退化特征分析。土壤退化指数<sup>[28]</sup>( $I_{SD}$ )可以定量地反映土壤退化和改善程度,试样土壤退化程度可用土壤理化性质指标所反映。变异系数( $C_V$ )可反映土壤退化特征的空间变异性及敏感性,系数越大,说明评价土壤退化特征的指标差异性越敏感<sup>[29]</sup>。其计算公式为:

$$I_{SD} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij} - x_{cj}}{x_{cj}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_{SD}$ 为土壤退化指数, $n$ 为纳入计算的指标值, $x_{ij}$ 为第  $i$  个侵蚀程度第  $j$  个土壤物理指标值, $x_{cj}$ 为第  $j$  个物理指标的对照值。本研究中以 CK 的土壤理化指标值作为对照组, $A_1, A_2, A_3$  为不同侵蚀程度的试样组,若  $I_{SD} > 0$ ,则说明土壤质量有所改善,若  $I_{SD} < 0$ ,则土壤质量有所退化,数值越小,退化越严重。

norm 值是指标通过主成分分析,在其成分组成的多维空间中矢量常模的长度,长度越长,该指标的综合载荷越大,释义综合信息能力的的能力越强<sup>[29]</sup>。norm 值计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u^2 \cdot \lambda_k)} \quad (2)$$

式中: $N_{ik}$ 是第  $i$  个指标在特征值  $\geq 1$  的前  $k$  个主成分上的综合载荷; $u_{ik}$ 是第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分上的载荷; $\lambda_k$ 是第  $k$  个主成分的特征值。

(2) 土壤水稳性团聚体特征分析。WSA 为直径在 10~0.25 mm 之间的水稳性团聚体的含量。

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^n \overline{x_i} \cdot W_i \quad (3)$$

式中: $D_{MW}$ 为水稳性团聚体平均重量直径(mm); $\overline{x_i}$ 为每一粒级的平均直径(mm); $W_i$ 为每一粒级水稳性团聚体的含量(%); $i$ 为粒级; $n$ 为粒径分级的总个数; $D_{MW}$ 越大,颗粒粒径越粗,结构越好,可蚀性越低,反之则差。

$$D_{GM} = \exp\left[\left(\sum_{i=1}^n W_i \lg \overline{x_i}\right) / \left(\sum_{i=1}^n W_i\right)\right] \quad (4)$$

式中: $D_{GM}$ 为水稳性团聚体几何平均直径(mm); $W_i$ 为平土壤样品的总重量(g), $D_{MW}$ 与  $D_{GM}$ 越小,结构越差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同发育类型侵蚀沟的土壤有机质含量变化特征

由表 2 可见,土壤有机质含量在 0—20 cm 层的  $A_1$ — $A_3$  较 CK 分别下降 38.24%, 51.50% 和 60.18%, 在 20—40 cm 层分别下降 33.70%, 50.96% 和 56.64%,

均呈递减趋势,不同侵蚀沟道间土壤有机质含量差异显著( $p < 0.05$ ),且 0—20 cm 层  $A_1$ — $A_3$  变异系数  $C_V$  分别为 14.24%, 16.01% 和 45.90%, 20—40 cm 层分别为 35.94%, 52.87% 和 53.76%, 均呈  $CK > A_1 > A_2 > A_3$ 。

20—40 cm 层土壤有机质含量较 0—20 cm 层变化更大,受影响更深,土壤有机质含量随侵蚀沟发育呈递减态势,且趋势逐渐加剧。各沟道土层间土壤有机质含量总体呈 0—20 cm  $>$  20—40 cm 且差异极显著( $p < 0.01$ ),土壤有机质含量随土层加深逐渐下降。

表层黑土和下层黄土状亚黏土的剖面差异是造成土层间有机质含量差异的重要原因。

从部位尺度上可知,土壤有机质含量在 0—20 cm 层的沟头、沟中段和 20—40 cm 层均呈  $CK > A_1 > A_2 > A_3$ ; 在 0—20 cm 层中沟头、沟中、沟尾段的  $A_3$  较 CK 分别下降 64.58%, 68.27% 和 37.06%, 土壤有机质含量在被侵蚀区的沟头、沟中段降幅明显,沟尾则因沉积作用降幅放缓。在侵蚀—沉积作用下,土壤有机质含量沟道中的分布出现分化,且这种分化在侵蚀沟发育的影响下逐渐扩大。

表 2 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤有机质含量在不同尺度的变化  
Table 2 Content change of soil organic matter in erosion gullies of different development types at different scales of Yanshou County

部位	0—20 cm 土层有机质含量				20—40 cm 土层有机质含量			
	CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$	CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$
沟头		44.62±0.05	37.2±3.5	24.56±9.12		14.58±1.02	10.96±1.92	7.45±1.41
沟中	69.35±7.22	53.15±2.24	28.73±4.01	22.01±11.98	40.95±4.25	20.37±1.21	18.01±7.86	17.57±6.16
沟尾		40.16±6.03	36.09±4.27	43.65±8.07		31.5±6.30	29.48±8.75	16.52±8.03
平均值		45.98±6.55	34.01±5.44	30.07±13.80		22.15±7.96	19.48±10.30	13.85±7.44

注:  $A_1, A_2, A_3$  为侵蚀沟编号,其具体内容详见表 1。下同。

## 2.2 不同发育类型侵蚀沟的土壤全氮、全磷、全钾特征

由表 3 可见,0—20 cm 与 20—40 cm 层不同发育程度侵蚀沟中的土壤全氮含量、全磷含量、全钾含量较 CK 差异显著( $p < 0.05$ ),土壤全氮含量在 0—20 cm 层的  $A_1$ — $A_3$  较 CK 分别下降 29.91%, 44.07% 和 47.83%, 呈递减趋势; 土壤全磷含量分别下降 39.79%, 28.27% 和 40.30%, 全钾分别下降 19.08%, 15.07% 和 23.97%, 总体呈下降趋势; 在 20—40 cm 层土壤全氮含量分别下降 29.48%, 47.25% 和 47.23%,

全磷含量分别下降 42.57%, 32.64% 和 40.63%, 全磷含量分别下降 16.86%, 16.88% 和 22.18%, 全氮含量、全磷含量、全钾含量在各层随侵蚀沟发育总体呈下降趋势。各沟道土层间土壤全氮含量、全磷含量、全钾含量总体呈 0—20 cm  $>$  20—40 cm 且差异显著( $p < 0.05$ ),土壤全氮含量、全磷含量、全钾含量随土层加深逐渐下降。剖面差异是造成土层间养分差异的主要因素,同时侵蚀沟发育使得沟道不同土层裸露出不同剖面也是养分变化的重要原因。

表 3 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤全氮磷钾含量在不同尺度的变化  
Table 3 Content change of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in erosion gullies of different development types at different scales of Yanshou County

指标	部位	0—20 cm				20—40 cm			
		CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$	CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$
全氮含量	沟头		2.73±0.71	2.67±0.40	1.9±0.19		2.28±0.35	1.63±0.09	1.42±0.07
	沟中	4.76±1.21	4.32±0.40	2.01±0.59	2.45±1.27	3.58±1.07	2.64±0.77	1.96±0.86	2.55±0.70
	沟尾		3.02±0.26	2.86±0.23	3.19±0.14		2.56±0.37	2.87±0.03	1.55±0.49
	平均值		3.36±0.85	2.51±0.56	2.51±0.91		2.49±0.56	2.15±0.72	1.84±0.71
全磷含量	沟头		1.78±0.53	2.03±0.43	1.23±0.08		0.75±0.05	1.08±0.03	0.6±0.15
	沟中	2.4±0.78	1.04±0.08	1.35±0.05	1.7±0.15	1.55±0.44	1.28±0.13	1.3±0.07	1.25±0.05
	沟尾		1.33±0.03	1.48±0.08	1.35±0.10		0.98±0.48	1.28±0.08	0.95±0.10
	平均值		1.38±0.43	1.62±0.39	1.43±0.23		1.00±0.36	1.22±0.11	0.93±0.29
全钾含量	沟头		23.7±0.58	22.75±3.22	18.96±4.24		21.05±2.38	22.64±4.78	16.4±5.33
	沟中	31.34±24.88	26.52±0.40	29.45±0.80	28.07±1.21	28.29±2.78	21.88±1.55	24.05±3.39	22.74±3.03
	沟尾		27.96±0.30	25.97±1.28	26.13±2.47		23.67±0.98	27.07±0.98	23.71±2.01
	平均值		26.06±1.82	26.06±3.42	24.39±4.88		22.20±2.05	24.59±3.90	20.95±4.94

在部位尺度上,土壤全氮含量在0—20 cm层的 $A_1$ 、 $A_3$ 及20—40 cm层中的 $A_1$ — $A_3$ 沟头段的含量均为最小值,土壤全钾含量在0—20 cm与20—40 cm层的各沟头段均为最小值,沟头是侵蚀沟发育早期中溯源侵蚀的重要侵蚀区,其受侵蚀作用影响相对较深,因此全氮含量、全钾含量降幅最大。0—20 cm层的土壤全磷含量和20—40 cm层的全钾含量也均随侵蚀沟发育呈递减趋势。

### 2.3 不同发育类型侵蚀沟的土壤速效磷、速效钾、碱解氮含量特征

由表4可见,0—20 cm与20—40 cm层不同发育程度侵蚀沟中的土壤速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量较CK差异显著( $p < 0.05$ )。

土壤速效磷含量在0—20 cm层的 $A_1$ — $A_3$ 较CK分别下降38.66%、29.03%和48.98%,速效钾含量分别下降31.97%、22.35%和39.20%,碱解氮含量分别下降53.63%、31.40%和52.88%;在20—40 cm

层速效磷含量较CK分别下降45.14%、28.12%和45.53%,速效钾含量分别下降23.94%、24.42%和34.62%,碱解氮含量分别下降55.42%、29.14%和55.66%,速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量在各层均随侵蚀沟发育呈波动下降趋势。各沟道土层间速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量总体呈0—20 cm > 20—40 cm且差异显著( $p < 0.05$ ),三者含量随土层加深逐渐下降。

在部位尺度上,土壤速效磷含量在0—20 cm层的 $A_1$ 、 $A_2$ 及20—40 cm层中的 $A_1$ — $A_3$ 中均呈:沟尾 > 沟中 > 沟头,速效钾含量在0—20 cm层与20—40 cm层中的 $A_1$ 、 $A_3$ 中的沟尾段均为最大值,有效磷含量、有效钾含量随侵蚀沟发育在沟尾段总体下降平缓。这是由于沟尾在侵蚀—沉积过程中沉积由上游随径流剥离、溶解的养分,减缓了速效养分下降趋势。碱解氮含量在各层中均呈:沟中 > 沟尾 > 沟头,沟头碱解氮含量随侵蚀沟发育下降幅最大。

表4 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤速效磷、速效钾、碱解氮流域流失量变化  
Table 4 Content change of available phosphorus, available potassium and available nitrogen in erosion gullies of different development types at different scales of Yanshou County

指标	部位	0—20 cm 土层				20—40 cm 土层			
		CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$	CK	$A_1$	$A_2$	$A_3$
速效磷含量	沟头		17.95±0.01	24.95±0.01	24.98±7.70		16.64±2.78	9.51±4.88	13.21±0.64
	沟中	39.23±6.76	20.63±0.19	27.54±4.93	19.46±2.03	28.77±5.44	19.1±1.05	22.71±0.41	13.29±2.42
	沟尾		25.98±2.85	32.11±0.36	19.65±1.22		24.83±1.55	27.96±0.80	13.47±0.05
	平均值		21.52±3.72	28.2±4.11	21.36±5.30		20.19±3.94	20.06±8.27	13.32±1.45
速效钾含量	沟头		151.16±4.32	149.38±9.15	114.23±7.09		41.44±0.97	57.94±0.11	38.63±0.62
速效钾含量	沟中	195.88±44.49	118.03±3.65	125.84±19.12	127.96±0.72	90.3±27.62	47.37±1.88	86.12±2.03	47.80±3.67
	沟尾		177.76±4.69	168.89±3.69	142.03±12.11		48.32±2.48	78.46±8.89	51.35±2.12
	平均值		148.98±24.80	148.04±21.54	128.07±13.95		45.71±3.58	74.17±13.01	45.93±5.90
	碱解氮含量		沟头		122.85±64.20		198.3±52.21	122.85±64.20	
沟中		327.29±126.43	164.11±115.47	281.09±7.20	164.11±115.47	232.71±58.77	160.84±59.39	175.4±35.10	160.84±59.39
沟尾			150.74±108.54	216.33±37.57	150.74±108.54		99.59±44.08	146.67±6.42	99.59±44.08
平均值			145.9±100.20	231.91±51.58	145.9±89.20		113.78±62.33	152.23±26.87	113.78±58.33

### 2.4 不同发育类型侵蚀沟土壤退化特征

由表5可知,土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量均为中敏感指标(40%~100%),是土壤退化发生的主要指标,而在坡耕地土壤质量评价中,可定量评价土壤质量时选择中度敏感指标<sup>[28]</sup>。K-S检验表明,除全磷含量、速效钾含量外,其余均符合正态分布( $p < 0.05$ ),另全磷含量(1.16)norm值偏低不予采用。剩余5项土壤肥力指标可作为土壤退化指数的计算指标。

由图1可知,在0—40 cm土层中,不同侵蚀程度沟道土壤退化指数变化特征呈CK(-0.86%) >  $A_2$ (-34.79%) >  $A_1$ (-36.46%) >  $A_3$ (-47.43%)且差异显著( $p < 0.05$ ),在0—20 cm层中,呈CK(-2.27%) >  $A_2$ (-35.52%) >  $A_1$ (-37.97%) >  $A_3$ (-46.59%)且差异显著( $p < 0.05$ ),各层总体呈下降趋势, $A_3$ 退化最为严重。侵蚀作用对0—20 cm层影响略高于20—40 cm层但不显著,随侵蚀沟发育,土壤退化愈加严重。

表 5 供试土壤退化指标统计分析特征

Table 5 Statistical analysis characteristics of tested soil degradation indicators

评价指标	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
最大值	69.35	4.76	2.45	31.34	39.23	195.88	327.29
最小值	6.04	1.06	0.45	11.07	4.64	38.01	29.05
平均值	31.53	2.72	1.36	24.86	22.66	104.86	169.07
标准差	17.15	1.03	0.48	4.45	7.97	51.33	91.49
变异系数/%	54.41	38.00	35.14	17.88	35.18	48.95	54.11
峰度	-0.25	-0.55	0.78	1.17	-0.15	-1.24	-1.14
偏度	0.50	0.33	0.74	-0.98	0.28	0.27	0.05
K-S 检验	0.2	0.2	0.001	0.105	0.2	0.015	0.101
norm 值	2.32	2.22	1.16	1.88	1.88	2.2	2.04

## 2.5 不同发育类型侵蚀沟土壤结构、粒径分布与土壤养分的相关性分析

由表 6 可知,  $A_{ws}$  对土壤全磷、全钾、速效钾、碱解氮含量均呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 含有更多大颗粒水稳性团聚体的土壤结构更疏松, 贮存养分的能力更强。土壤容重是土壤紧实度、孔隙结构的反映, 较低的容重有助于径流更快地入渗, 减小表土土壤养分被径流冲蚀, 本文中土壤容重与土壤有机质、全氮、全磷、速效钾、碱解氮含量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 随侵蚀沟发育, 土壤容重增大而土壤养分含量下降。土壤黏粒含量对上述 7 项养分指标均呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 黏粒含量反映土壤质地“黏重化”的程度, 随侵蚀沟的发育, 沟尾土壤黏粒随径流沉积而数量增多, 各类养分在此沉积。在侵蚀沟发育过程中, 有机碳含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量相互之间均呈极显著正相关

( $p < 0.01$ ), 各类土壤养分在侵蚀沟发育过程中变化规律较为趋近。

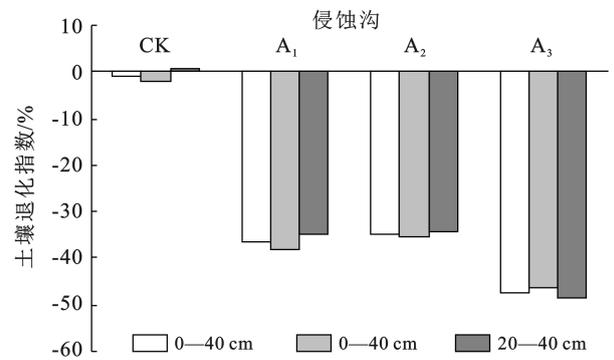


图 1 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤退化指标变化特征  
Fig.1 Characteristics of degradation index in erosion gullies of different development types at different scales of Yanshou County

表 6 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤结构、粒径分布与土壤养分的相关性分析

Table 6 Correlation analysis on soil structure, particle size distribution and soil nutrients in erosion gullies of different development types of Yanshou County

项目	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷	速效钾	碱解氮	$A_{ws}$	$D_{MW}$	$D_{GM}$	容重	砂粒	粉粒	黏粒
有机质	1													
全氮	0.794**	1												
全磷	0.587**	0.461**	1											
全钾	0.562**	0.453**	0.361**	1										
速效磷	0.636**	0.467**	0.540**	0.479**	1									
速效钾	0.740**	0.494**	0.682**	0.472**	0.615**	1								
碱解氮	0.565**	0.626**	0.495**	0.545**	0.481**	0.492**	1							
$A_{ws}$	0.160	0.176	0.258*	0.237*	0.071	0.252*	0.291*	1						
$D_{MW}$	0.124	0.058	0.137	0.134	0.263*	0.126	-0.039	0.540**	1					
$D_{GM}$	-0.044	-0.090	-0.021	-0.081	0.154	-0.098	-0.305*	0.007	0.781**	1				
容重	-0.382**	-0.317*	-0.305*	-0.104	-0.164	-0.444**	-0.284*	-0.243*	0.022	0.127	1			
砂粒	0.011	-0.055	0.080	0.130	-0.031	0.090	0.334*	-0.141	-0.119	-0.025	-0.238*	1		
粉粒	0.061	0.309	0.059	-0.148	0.115	-0.002	-0.133	0.206	0.323*	0.103	0.055	-0.758**	1	
黏粒	0.581*	0.441*	0.407*	0.344*	0.426*	0.378*	0.302*	0.122	0.026	-0.056	0.367**	-0.736**	0.194	1

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著, \* 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

## 2.6 不同发育类型侵蚀沟道养分特征分布的影响因素

据多元线性回归分析可知(表 7),土层间剖面与构层的差异对土壤有机质、全磷、全钾、速效钾、碱解氮等指标变化的 beta 值分别为  $-0.58$ ,  $-0.511$ ,  $-0.335$ ,  $-0.879$  和  $-0.302$  且差异显著( $p < 0.01$ ),是影响上述 5 类养分指标特征变化的主要影响因素,在土壤全氮含量与速效磷含量变化中,其 beta 值为  $-0.348$  和  $-0.412$  且差异显著( $p < 0.01$ ),是次要影响因素,这表明土层间的剖面差异是造成土壤养分差异的根本原因,土壤养分多保留在表层土壤(0—20 cm)。

侵蚀程度差异是造成土壤养分特征变化的重要影响因素,其对土壤有机质、全氮、全钾、速效磷、速

效钾含量变化的 beta 值分别为  $-0.481$ ,  $-0.429$ ,  $-0.309$ ,  $-0.457$  和  $-0.216$  且差异显著( $p < 0.05$ )。这种变化一方面是土壤养分不断流失的表现,另一方面是侵蚀沟发育使得不同层的土壤构层裸露所致。侵蚀沟发育对全磷含量影响不显著。这可能由于磷素在土壤中多以迟效性状态存在,可被径流溶解冲蚀的数量较小,而对碱解氮含量在土壤中状态相对不稳定,易受水、热条件影响。因此其变化对侵蚀沟发育的差的反映呈不显著。部位差异对土壤有机质、全氮、全钾变化的 beta 值分别为  $0.201$ ,  $-0.236$  和  $-0.429$  且差异显著( $p < 0.05$ ),这主要是侵蚀—沉积作用促使这 3 项指标在沟道分布中出现分化,在沟头、沟中被侵蚀区流失,在沟尾沉积区富集。

表 7 延寿县不同发育类型侵蚀沟土壤养分的回归分析

Table 7 Regression analysis of soil nutrients in erosion gullies of different development types of Yanshou County

指标	影响因子	调整后 $R^2$	DW 值	标准化系数(Beta)	显著性	VIF
有机质含量	侵蚀沟发育	0.742	1.831	$-0.481$	$<0.001$	1.459
	部位差异			$0.201$	$0.048$	1.459
	深度差异			$-0.58$	$<0.001$	1
全氮含量	侵蚀沟发育	0.635	2.024	$-0.429$	$0.001$	1.459
	部位差异			$0.236$	$0.046$	1.459
	深度差异			$-0.348$	$<0.001$	1
全磷含量	侵蚀沟发育	0.407	1.686	$-0.186$	$0.21$	1.459
	部位差异			$-0.193$	$0.193$	1.459
	深度差异			$-0.511$	$<0.001$	1
全钾含量	侵蚀沟发育	0.481	2.074	$-0.309$	$0.029$	1.459
	部位差异			$0.429$	$0.003$	1.459
	深度差异			$-0.335$	$0.005$	1
速效磷含量	侵蚀沟发育	0.446	1.191	$-0.457$	$0.002$	1.459
	部位差异			$0.173$	$0.225$	1.459
	深度差异			$-0.412$	$0.001$	1
速效钾含量	侵蚀沟发育	0.848	1.324	$-0.216$	$0.006$	1.459
	部位差异			$0.082$	$0.271$	1.459
	深度差异			$-0.879$	$<0.001$	1
碱解氮含量	侵蚀沟发育	0.643	2.011	$0.022$	$0.845$	1.459
	部位差异			$0.139$	$0.225$	1.459
	深度差异			$-0.302$	$0.003$	1

## 3 讨论

各类土壤养分中,有机质主要来源于微生物与动植物残体的腐解,而氮素来自植物的固氮作用,磷、钾素的释放则主要依赖土壤有机质含量多寡与酸碱性的平衡。因此生物活动更活跃的表层土壤汇集了更多的土壤养分,但也更易受到侵蚀沟发育的影响。刘刚等<sup>[30]</sup>认为有机质含量在空间上发生变异主要是侵蚀沟造成土壤团聚体的大量流失,因为有机质主要以有机体和无机体结合的方式存在于团聚体中。何彦星<sup>[31]</sup>则认为大颗粒团聚体随侵蚀大量流失是土壤全

氮组分下降的主要原因。刘晓光等<sup>[32]</sup>得出黑土区速效钾在水平空间出现分异格局主要受地形、侵蚀等因素影响,侵蚀量与速效钾含量呈负相关。这都表明侵蚀—沉积作用对于养分的影响,是通过改变土壤物理结构这一媒介实现的。侵蚀沟的发育正是侵蚀—沉积不断作用于空间土壤再分布的结果。侵蚀沟的发育不仅削薄了沟道表土层的厚度,造成土壤养分储量的直接损失。也促使养分迁移,使得养分在空间分布中出现分化,同时通过劣化土壤结构和水热肥条件的方式打破了表层土壤养分和土壤生物间的良性循环,使得养分补充难以为继。研究表明全磷、全钾、速效

钾、碱解氮含量与 WSA 之间存在较为显著的负相关关系,而黏粒含量随侵蚀沟发育和土层加深发生变化是造成土壤养分变化的重要原因。

## 4 结论

(1) 不同侵蚀强度沟道间土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量较 CK 差异显著( $p < 0.05$ )。随侵蚀沟发育,0—40 cm 层的土壤有机质含量呈递减趋势,土壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量总体呈下降趋势。不同深度土层间土壤养分差异显著( $p < 0.05$ ),随着土层加深,土壤养分呈下降趋势。受侵蚀—沉积影响,有机质、全氮、全钾、碱解氮含量在沟头段降幅明显;有机质、有效磷、有效钾含量在沟尾因沉积作用下降平缓。

(2) 土壤退化指数在 0—40 cm 层呈  $CK > A_2 > A_1 > A_3$ ,随侵蚀沟发育,土壤退化程度加重。

(3) 土壤养分与容重总体呈显著负相关,对 WSA、黏粒含量呈显著正相关;土壤剖面与构型差异是造成土壤养分差异的根本原因,侵蚀沟发育是养分变化的次要原因,有机质、全氮、全钾含量也受到部位差异影响。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
- [2] 徐金忠.典型黑土区切沟发育关键驱动因素及特征研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [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] 魏哈梅,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.
- [5] 张孝存,郑粉莉,王彬,等.不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(5):90-95.
- [6] 许文旭,杨献坤,崔斌,等.东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):28-36.
- [7] 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(总卷)[M].北京:科学出版社,2010.
- [8] 王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区讷谟尔河流域土地利用变化对沟蚀影响研究[J].自然资源学报,2016,31(5):833-844.
- [9] 甄怀才.典型黑土区坡耕地浅沟侵蚀特征及其影响[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [10] 李全峰,李吉程,于明鹏,等.黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征[J].地理科学进展,2021,40(7):1208-1219.
- [11] 何彦星,张凤宝,杨明义.<sup>137</sup>Cs 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.
- [12] 张发民,杜兰兰,袁瀛,等.土壤侵蚀和沉积对土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):161-167.
- [13] 翟国庆,李永江,韩明钊,等.不同开垦年限坡地黑土耕层土壤有机碳库分配特征[J].应用生态学报,2019,30(12):4127-4134.
- [14] 邢培茹,郑粉莉,王彬.典型黑土区坡耕地土壤碱性磷酸酶和有机质空间分布研究[J].水土保持研究,2014,21(1):39-42.
- [15] 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.
- [16] 祁志,丁超,韩兴,等.沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分空间异质性[J].水土保持通报,2020,40(5):79-87.
- [17] 杨维鸽.典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [18] 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.
- [19] 姜芸,王军,张莉.东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征[J].农业工程学报,2020,36(7):157-165.
- [20] 王磊.多种外力作用的黑土坡面复合土壤侵蚀过程与机理研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [21] 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.
- [22] 赵春玲.黑龙江省延寿县耕地地力评价[M].北京:中国农业出版社,2020.
- [23] Randolph J. Environmental land use planning and management [M]. Washington: Island Press,2004.
- [24] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [25] 孙嘉兴.土壤全量氮磷钾测定方法的研究[J].中国农业信息,2015(7):75-76.
- [26] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.
- [27] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1997.
- [28] Adejuwon J O, Ekanade O. A comparison of soil properties under different landuse types in a part of the Nigerian cocoa belt [J]. Catena, 1988,15(3/4):319-331.
- [29] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.
- [30] 刘刚,闫静雯,谢云,等.黑土坡耕地土壤有机质空间变异及其与土壤侵蚀的关系:以黑龙江省鹤山农场为例[J].地理科学,2016,36(11):1751-1758.
- [31] 何彦星.东北黑土区坡耕地土壤碳氮变化对侵蚀强度的响应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [32] 刘晓光,张少良,张兴义,等.典型黑土坡面速效钾空间分布特征研究[J].土壤通报,2015,46(1):133-141.