

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.04.017

沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 等. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 11-19, 28.

SHA Xiaowei, WU Yuxin, JIA Guodong, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in northern Hebei Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 11-19, 28.

冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响

沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 余新晓

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 了解不同坡位和不同土地利用引起的土壤可蚀性和养分差异, 讨论各因素对土壤可蚀性和养分情况的影响状况。[方法] 通过土壤和根系取样, 使用加权求和法计算不同坡位和不同土地利用下的综合土壤可蚀性指数(CSEI)和综合土壤养分指数(CSNI)。[结果] (1) 不同坡位下的 CSEI 和 CSNI 均存在差异, 其中 CSEI 的最大、最小值分别出现在坡上(0.653)和坡下(0.275), CSNI 的最大、最小值分别出现在坡顶(0.715)和坡上(0.341); (2) 不同土地利用下的 CSEI 和 CSNI 均存在差异, 其中 CSEI 的最大、最小值分别出现在撂荒地(0.617)和林地(0.252), CSNI 的最大、最小值分别出现在林地(0.793)和撂荒地(0.322); (3) CSEI 与黏粒含量、砂粒含量、根长密度和地上生物量呈显著负相关, 与粉粒含量和土壤容重呈显著正相关, 其中容重的直接影响最大(0.26); CSNI 与黏粒含量、砂粒含量、根长密度和地上生物量呈显著正相关, 与粉粒含量和土壤容重呈显著负相关, 其中黏粒含量的直接影响最大(0.45); CSEI、CSNI 二者间呈显著负相关。[结论] 坡位对 CSEI 和 CSNI 均有显著影响, 在植被恢复中应注重坡上和坡中; 各地貌部位植被恢复均有效降低 CSEI 并提升 CSNI, 其中乔木对水土流失的控制更为有效。

关键词: 土壤可蚀性; 土壤养分; 坡位; 土地利用

中图分类号: X825; S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0011-09

Effects of Vegetation Restoration on Soil Erodibility and Nutrients at Different Slope Sites in Northern Hebei Mountains

SHA Xiaowei, WU Yuxin, JIA Guodong, YU Xinxiao

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To understand the variations in soil erodibility and nutrient content caused by different slope positions and land uses, and to discuss the influence of various factors on soil erodibility and nutrient status. [Methods] Soil and root samples were collected, and the Comprehensive Soil Erodibility Index (CSEI) and Comprehensive Soil Nutrient Index (CSNI) were calculated using a weighted sum method under different slope positions and land uses. [Results] (1) There were differences in both CSEI and CSNI among different slope positions. The highest value of CSEI was recorded on the slope crest (0.653) and the lowest value was at the bottom of the slope (0.275), while the highest value of CSNI was found on the slope crest (0.715) and the lowest value was at the top of the slope (0.341). (2) Differences in both CSEI and CSNI were observed among different land uses. The highest value of CSEI was observed in fallow land (0.617) and the lowest value was in forests (0.252), while the highest value of CSNI was found in forests (0.793) and the lowest value was in fallow land (0.322). (3) CSEI was significantly negatively correlated with clay content, sand content, root length density and aboveground biomass. It was also significantly positively correlated with silt content and soil bulk density. Soil bulk density had the greatest direct impact (0.26). CSNI was significantly positively correlated with clay content, sand content, root length density and aboveground biomass. It was also significantly negatively correlated with silt content and soil bulk density. Clay content had the greatest

收稿日期: 2024-01-26

修回日期: 2024-03-08

录用日期: 2024-03-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302502-03)

第一作者: 沙晓玮 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事同位素生态水文研究。E-mail: 1239809609@qq.com

通信作者: 余新晓 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事森林水文过程及机理研究。E-mail: yuxinxiao111@126.com

http://stbcxb.alljournal.com.cn

direct impact (0.45). There was a significant negative correlation between CSEI and CSNI. [Conclusion] Slope position significantly influences both CSEI and CSNI, emphasizing the importance of focusing on slope crests and mid-slopes in vegetation restoration efforts. Vegetation restoration in various geomorphic positions effectively reduces CSEI and enhances CSNI, with trees being more effective in controlling soil erosion.

Keywords: soil erodibility; soil nutrients; slope position; land use

Received: 2024-01-26

Revised: 2024-03-08

Accepted: 2024-03-14

Online(www.cnki.net): 2024-05-09

随着我国工业化进程的推进,土壤侵蚀的危害逐渐加剧,其导致土壤养分流失和结构退化,也制约土地肥力提升、农业生产发展和环境质量改善^[1]。植被恢复可以改良土壤质量、修复土壤功能并优化土壤结构^[2-3],其引发的土地利用变化对改善生态环境和生态系统功能具有重要作用。植被恢复效益反映在土壤可蚀性和养分 2 个方面,因此综合各类参数定量评价土壤可蚀性和养分对保持水土和防治侵蚀具有重要意义^[4]。

在冀北山地,坡面上各位置的地貌特征有所差异,坡顶土地平整,地势较高,坡上和坡中坡度相对较大且地形错落起伏,而坡下则多为缓坡。有研究^[5]表明,坡位对土壤水分分布、土体结构和植被光照条件均有较大影响。在土壤水分分布方面,与上端相对平缓的坡面相比,陡峭起伏的斜坡可能产生更恶劣的水分利用环境^[6],且土壤水分的变化程度随着地形异质性的增加而增加^[7]。已有研究^[8-9]表明,降雨后水分受重力影响,以地表径流和壤中流的形式向地势较低的坡下运移,加之坡下受风的影响小,土壤水分蒸发量低,这使坡下含水量高于坡面其他部位。水分分布的异质性影响土壤性质和植被状况,因此,坡位的差异必然对土壤的抗侵蚀能力和养分情况产生影响^[10]。在土体结构方面,张宏芝等^[11]认为,坡面是影响土壤可蚀性和养分的基础模块,不同坡位间的土壤结构差异引发土壤容重、饱和导水率和崩解速率的差异,进而改变土壤抗蚀能力和肥力。在植被光照条件方面,田迅等^[12]研究表明,坡位是影响植物分布和生长状况的因子之一,坡顶和坡下的植被接受光照更充足,生长良好,根系对土壤的固结能力更强,物质循环更快,能有效地提高土体的稳定性和养分含量。

不同坡位上的土地利用方式存在明显差异,植被恢复带来的土地利用变化亦将改良土壤性质和植被发育状况,进而影响土壤可蚀性和养分含量^[13]。已有研究^[14-15]表明,植被恢复可以有效改良土体结构并降低土壤可蚀性,在撂荒地转变为草地、灌丛和林地过程中,土壤有机质含量提升,团聚体结构更加稳定,进而导致土壤可蚀性的降低和养分含量的提升。

在不同土地利用下,CHEN 等^[16]研究指出,对比撂荒农田、草地和灌丛都有效地降低土壤可蚀性,同时提升土壤中有机质和氮元素的含量。植被对土壤可蚀性和养分的影响大小取决于土壤自身性质和根系特征。聂春等^[17]研究发现,土壤抗侵蚀能力与容重呈负相关;ZHANG 等^[18]分析华北地区沟头溯源侵蚀过程指出,土壤可蚀性和养分情况具有空间异质性,黏粒占比是决定土壤可蚀性和养分情况的重要因素。此外,一些研究^[3,19]也表明,土壤可蚀性随着土壤有机碳含量、饱和导水率和微团聚体数量的提升而降低,而土壤养分则表现出相反的特性。基于植物根系的物理固结和化学吸附作用,土壤稳定性得以提升^[20],枯枝落叶分解产生的腐殖质可以增加土壤养分^[21]。在冀北山地,不同坡位上的植被类型和发育情况不同,这种差异进一步对土壤可蚀性和养分情况造成影响,开展坡位和植被恢复引起的土壤可蚀性与养分变化的研究对于合理布设植被恢复格局至关重要。然而目前已有的研究多集中于黄土丘陵沟壑区,缺乏对冀北地区典型山坡的考察与分析。

鉴于此,本研究通过对冀北山地不同坡位(坡顶、坡上、坡中和坡下)下不同土地利用(撂荒地、草地、灌丛和林地)的坡面进行实地取样,测得土壤及根系各类指标后,基于加权法得出每个样方的土壤可蚀性指数及养分指数,从而阐述由于坡位和土地利用差异引发的土壤可蚀性和养分变化,明确植被类型对土壤可蚀性及养分的影响,并探讨二者与各影响因子之间的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为河北省张家口市羊草沟流域(41°04′—41°08′N,114°58′—115°02′E)。流域位于冀北高原外缘沿线,是内蒙古高原和燕山丘陵山地过渡带,也是中国北方典型农牧交错带。流域面积 10.6 km²,海拔 1 084~1 575 m,地处温带大陆性气候区,气温年较差大;年平均降水量为 401.6 mm 且时间分布不均匀,雨季 6—9 月的降雨量占全年 80%,多暴雨。土壤类型以棕壤和褐土为主。由于不合理的人为开垦和放

牧,该区域水土流失和沟壑侵蚀非常严重。10 多年来,随着京津风沙源治理工程的逐步开展,水土流失和沙漠化得到有效控制。目前当地的天然植被减少,取而代之的是人工种植的乔木、灌木和次生草本植物,主要植物种为油松、刺槐、胡枝子和细柄草等^[22]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 本研究于 2021 年 7—9 月生长季进行。基于高度变化划分坡顶、坡上、坡中和坡下 4 个坡位,其中坡顶是坡面上方较为平缓的区域,坡度<5°;坡上、坡中和坡下分别是坡面三等分的上、中、下部位;每个坡位垂直高度相差约 10 m,地形起伏程度略有差异;各坡位植被盖度相近,坡向一致(半阳坡)。通过对羊草沟流域撂荒地、草地、灌丛和林地 4 种土地利用类型和植被恢复情况的综合调查,确定研究区内植被分布特征和土地利用结构。本研究选取该流域内典型植被群落,基于不同植被类型设置不同尺寸(撂荒地、草地 1 m×1 m,灌丛 5 m×5 m,林地 10 m×10 m)的标准样地,累计 28 块。其中坡顶、坡上、坡中和坡下各有 7 块,以此来反映不同坡位对土壤可蚀性和土壤养分情况的影响;在 4 个坡位选取草地、灌丛和林地各 2 个,由于多数退化土地已经被人工林和草本植物取代,导致各坡位仅找到 1 个撂荒地作为对照点,以此来反映同一坡位下不同土地利用对土壤可蚀性和土壤养分情况的影响。此外对各样地进行野外调查,记录海拔、坡度、优势种及植被盖度等信息。各样地的土地和植被特征见表 1。

1.2.2 植被样品处理 在地上生物量的获取与计算方面,在各样地内选取 50 cm×50 cm 的小样方,平齐地面剪取小样方内各草本植物的地上部分,称量鲜重后于 75 °C 下烘干至恒重,记录此干重作为各样方的地上生物量。

在根系样品的采集与处理方面,采用土柱法进行根系取样。对于灌丛和林地,在样地内选取 1 株长势良好的典型植株,按距离植株基部 0~0.1,0.1~0.2,0.2~0.3 m 共 3 个水平距离,在 0—10,10—20,20—30 cm 共 3 个深度取 10 cm×10 cm×10 cm 的土体样本;对于草地,在样地内选取 3 个 10 cm×10 cm 的小样方,在 0—10,10—20,20—30 cm 共 3 个深度取 10 cm×10 cm×10 cm 的土体样本。将样本带回室内,完全浸没于带 2 mm 孔径筛网的桶中 1 天以分散根系,随后用缓水流多次冲洗样品,除去土壤和杂质,累计获取活根样品 288 个。为获得植株总根长、根部表面积、根部平均直径及根总体积等一系列根系形态指标,本文分别用 Epson V700 扫描仪对植物根系进

行扫描,并用 WinRHIZ 图像分析软件对其扫描结果进行分析,并在完成扫描和分析后,将根部放置于 65 °C 环境中进行 24 h 烘干并称重以获取生物量。基于形态指标和生物量,计算根长密度、比根长和根重密度等指标。

表 1 取样点地形、植被和土地利用的基本信息

Table 1 Basic information on topography, vegetation and land use at the sampling site

坡位	土地 利用	坡度/ (°)	优势种	盖度/ %
坡顶	撂荒地	2	—	—
	草地	4	细柄草(<i>Capillipedium parviflorum</i>)	75
	草地	2	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	86
	灌丛	3	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz)	85
	灌丛	3	山杏(<i>Armeniaca sibirica</i>)	82
	林地	2	油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)	75
	林地	5	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	69
坡上	撂荒地	34	—	—
	草地	35	黄芪(<i>Astragalus melilotoides</i>)	60
	草地	37	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	55
	灌丛	34	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz)	74
	灌丛	34	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz)	69
	林地	35	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	54
	林地	36	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	46
坡中	撂荒地	21	—	—
	草地	25	黄芪(<i>Astragalus melilotoides</i>)	62
	草地	26	细柄草(<i>Capillipedium parviflorum</i>)	72
	灌丛	24	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	71
	灌丛	23	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz)	81
	林地	22	油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)	69
	林地	24	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	65
坡下	撂荒地	8	—	—
	草地	9	细柄草(<i>Capillipedium parviflorum</i>)	81
	草地	8	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	83
	灌丛	7	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	80
	灌丛	7	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz)	77
	林地	11	油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)	75
	林地	9	油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)	71

1.2.3 土壤样品处理 在土样采集与处理方面,去除地上生物后,用体积 100 cm³ 的标准环刀沿各样地的对角线采集 3 个 0—10 cm 的表层土样并称重,累计获取样品 84 个,用以测定并计算土壤容重和含水量指标;在各样地内另取 1 kg 复合土样,去除石块、根系等杂质后装袋,累计获取样品 28 个,风干后用以测定土壤粒径组成和化学性质等指标。使用激光粒度仪测定样品中黏粒、粉粒和砂粒的百分比;采用恒水头渗透性试验测定土壤的饱和导水率;土壤有机碳、全氮和全磷分别采用重铬酸钾外加热法、重铬酸盐氧化法和高氯酸—硫酸法测定;水稳性团聚体采用

湿筛法:经干筛风干后,将 50 g 土样置于土壤团聚体分析仪的网筛上,完全浸泡入水并摇匀 1 min。摇匀后,将样品从沉降筒中取出,每个筛上剩余的集料放入铝盒中干燥。最后,对样品进行称重记录以计算平均重量直径,进而评价水稳性团聚体的稳定性^[23]。

1.2.4 分析计算 本文采用 WILLIAMS 等^[24]提出的 EPIC 模型对土壤可蚀性因子进行计算,由于其计算过程立足于土壤粒径级配和有机碳含量,因此能够有效地表征 K 值,其计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \cdot 6 \text{Sand} \left(1 - \frac{\text{Silt}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{Silt}}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)} \right] \quad (1)$$

式中:Sand 为砂粒含量(%);Silt 为粉粒含量(%);Clay 为黏粒含量(%); C 为有机碳含量(%), $C = 0.583 \times$ 有机质含量(OMC); $SN1 = (1 - \text{Sand})/100$; K 为土壤可蚀性因子,表征降雨条件下单位面积地块上的水土流失率 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)]$ 。

加权求和法能够较为全面地评价土壤可蚀性,因此本研究采用该方法求得土壤可蚀性指数(comprehensive soil erodibility index,CSEI)和综合土壤养分指数(comprehensive soil nutrient index,CSNI)^[25]:

$$\text{CSEI} = \sum_i^n E_i \cdot C_i \quad (2)$$

$$\text{CSNI} = \sum_i^n N_i \cdot C_i \quad (3)$$

式中: E_i 和 N_i 为第 i 个评价指标的隶属度值; i 为指标个数; C_i 为第 i 个评价指标的权重,能够表示该指标在土壤可蚀性及土壤养分指数中的贡献; n 为评价指标的数量。

本研究使用主成分分析法计算 CSEI 和 CSNI,其中 CSEI 的计算参数为土壤可蚀性因子(K)、水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、饱和导水率(K_s)和有机碳含量(SOC);CSNI 的计算参数为全氮(TN)、全磷(TP)和有机碳含量(SOC)。基于每个参数公因子方差所占百分比计算权重(C_i)值(表 2)。在隶属度的计算方面,选取各参数的最大值(b)和最小值(a),若该参数在一定范围内与土壤可蚀性或养分情况呈正相关时,选正 S 函数[公式(4)],呈负相关时则选反 S 函数[公式(5)];本次选取的土壤可蚀性指标中 K 值

由正 S 函数计算,MWD、 K_s 和 SOC 由反 S 函数计算;对于土壤养分指标,TP、TN 和 SOC 均由正 S 函数描述。

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases} \quad (4)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b} & a > x > b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

表 2 综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数的指标体系及权重

Table 2 Index system and weight of CSEI and CSNI

指标	CSEI				CSNI		
	K	MWD	K_s	SOC	TN	TP	SOC
公因子方差	0.78	0.45	0.81	0.89	0.61	0.83	0.89
因子权重	0.27	0.15	0.28	0.30	0.26	0.36	0.38

1.2.5 数据处理 本研究利用 Excel 2022 软件对数据进行处理,利用 SPSS 19.0 及 Amos 28 软件进行正态分布检验(经检验数据满足正态分布)和统计分析,并利用 Amos 28 及 Origin 2020 软件绘图。采用单因素方差分析比较不同坡位和不同土地利用类型的土壤养分和可蚀性指标,对比组间差异性并采用 LSD 法进行检验;采用 Pearson 相关性分析确定土壤养分和可蚀性指标及其影响因素之间的相关性;采用多元线性回归分析模拟预测土壤养分和可蚀性指标;采用路径分析判断各指标对二者的影响。

2 结果与分析

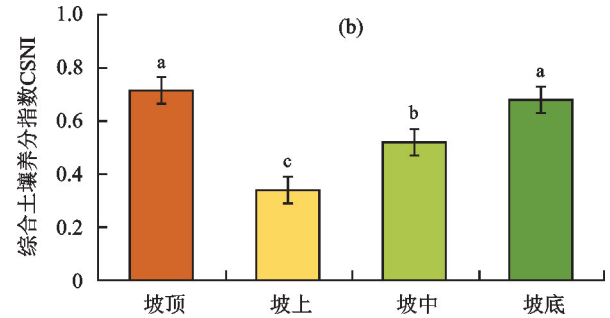
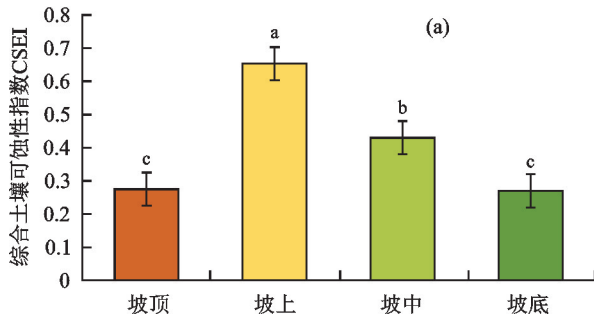
2.1 坡位对土壤可蚀性和养分的影响

由图 1 可知,不同坡位土壤的综合土壤可蚀性指数差异较为显著,4 个不同坡位的平均 CSEI 在 0.275~0.653 上下浮动,坡上的 CSEI 显著高于坡顶及其他部位($p < 0.05$),但两两对比下,坡顶与坡下之间没有显著性差异($p > 0.05$)。在坡顶和坡下,坡度相对较缓(表 1),降雨对土壤表面有机质的冲刷作用较小,导致土壤有机质含量高,植被在富含有机质的土壤中生长状况良好,根系发达,从而能够有效地固结土壤,降低土壤的可蚀性。坡上、坡中的 CSEI 分别是坡下的 2.41、1.52 倍,坡度的增加导致土壤水分产生空间变异性。受重力分力影响,降雨产生的地表径流在坡上和坡中的流速更快,侵蚀能力加强^[26],其汇集后带走土壤表层的有效养分,影响土壤储水量和植被对水分的吸收利用效率,增加可蚀性。植被恢复的差异和土壤水分的差异使不同坡位的抗侵蚀能力

产生差异。

不同坡位的综合土壤养分指数差异显著,在4个坡位中,平均CSNI最大的是坡顶,为0.715;最小的是坡上,为0.341。坡顶、坡下的CSNI显著高于其他部位($p < 0.05$),但二者之间没有显著性差异($p > 0.05$)。CSNI可以有效反映土壤养分状况,坡位的不同导致不同土地利用类型下植被和土壤特征的

差异。坡顶的CSNI分别是坡上、坡中的2.11,1.36倍,坡地土壤养分以坡顶和坡下较高,坡面较低。这主要是由于降雨条件下坡面径流冲刷表层土壤,侵蚀坡面的同时将土粒堆积到坡下,使坡面土壤养分降低而坡下养分提高。坡顶开阔平缓,径流受重力的作用较小,侵蚀较弱,较坡面而言,得以有效地积累养分。



注:图柱上方不同小写字母表示不同坡位间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图1 不同坡位综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数

Fig. 1 Variation in CSEI and CSNI at different slope locations

2.2 土地利用对土壤可蚀性和养分的影响

由图2可知,相同坡位下不同土地利用的综合土壤可蚀性指数差异显著。在坡顶,撂荒地的CSEI最大,草地、灌丛和林地CSEI较撂荒地分别减少22.2%,51.1%,62.3%,林地土壤可蚀性最小,但与灌丛没有显著性差异($p > 0.05$)。在坡上,CSEI由大到小依次为撂荒地、草地、灌丛和林地,撂荒地的CSEI分别是其他土地利用的1.09,1.97,2.34倍。随着植被逐渐恢复,灌丛和林地的CSEI显著低于撂荒地和草地,但二者之间差异不显著($p > 0.05$),草地和撂荒

地在坡上的抗蚀性更差。在坡中,撂荒地土壤的可蚀性最大,为0.65;林地的土壤可蚀性最小,为0.27;草地和灌丛的CSEI显著高于林地而二者间差异不显著($p > 0.05$),这一现象的主要成因是人类耕种对土壤结构造成破坏,从而降低土壤的抗蚀性。根据坡下数据可得,撂荒地的CSEI显著高于草地、灌丛和林地,但横向对比后三者之间发现没有显著性差异($p > 0.05$)。整体上,可蚀性最大的是撂荒地(0.617),最小的是林地(0.252),各坡位植被恢复都有效降低土壤的可蚀性。

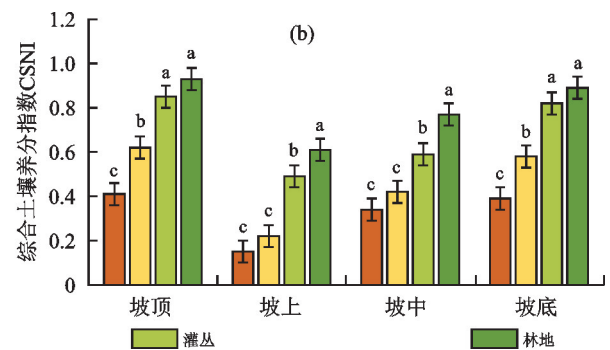
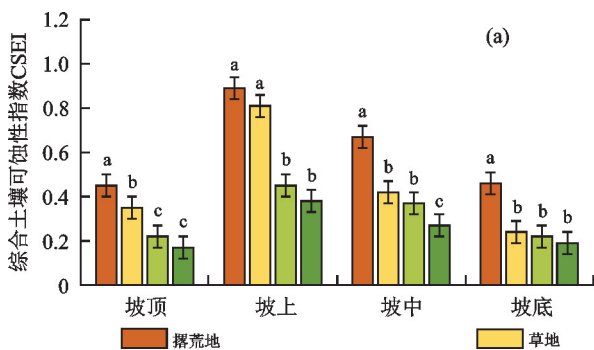


图2 各坡位不同土地利用下综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数

Fig. 2 CSEI and CSNI in different land use at different slope sites

相同坡位下不同土地利用的综合土壤养分指数差异显著。在坡顶,林地的CSNI最大,分别高于撂荒地、草地55.9%,33.3%,林地的土壤养分最好,但与灌丛没有显著性差异($p > 0.05$)。在坡上,撂荒地和草地的CSNI显著低于林地和灌丛,而林地和灌丛之间没有显著性差异($p > 0.05$)。在坡中,CSNI由大到小依次为林地、灌丛、草地和撂荒地,林地的CSNI分别是其他土地利用的1.31,1.83,2.26倍;草

地和撂荒地的CSNI较低且差异不显著,土壤养分情况较林地和灌丛较差。在坡下,林地的CSNI最大,为0.89;撂荒地的CSNI最小,为0.41。林地、灌丛的CSNI同草地、撂荒地差异显著,但林地和灌丛之间差异不显著。不同土地利用下CSNI最大的是林地(0.793),最小的是撂荒地(0.322),各坡位的林地和灌丛均有较大的CSNI,这是因为植被的良好发育依赖于速效氮和磷元素,且其生长必需的养分多源自于

土壤中有机质的分解与转化^[27],乔木和灌木生长速率快,根系发达,增加土壤孔隙度,加快土壤中各类物质的交换速率,促进水碳循环,使土壤养分整体较好^[28]。各坡位植被恢复都有效地改良土壤养分。

2.3 土壤可蚀性和养分与影响因子间的关系

由图 3 可知,基于相关性分析发现,CSEI 与黏粒含量(Clay)、砂粒含量(Sand)、根长密度(RLD)、地上生物量(AGB)呈显著负相关(其中 RLD 为 0.01 水平显著,AGB、Clay 和 Sand 为 0.05 水平显著),与粉粒含量和土壤容重呈显著正相关($p < 0.05$)。而 CSNI 与黏粒含量(Clay)、砂粒含量(Sand)、根长密度(RLD)、地上生物量(AGB)呈显著正相关(其中 RLD、Clay 为 0.01 水平显著,AGB 和 Sand 为 0.05 水平显著),与粉粒含量和土壤容重呈显著负相关($p < 0.05$)。此外,CSEI 与 CSNI 间呈显著负相关($p < 0.05$)。

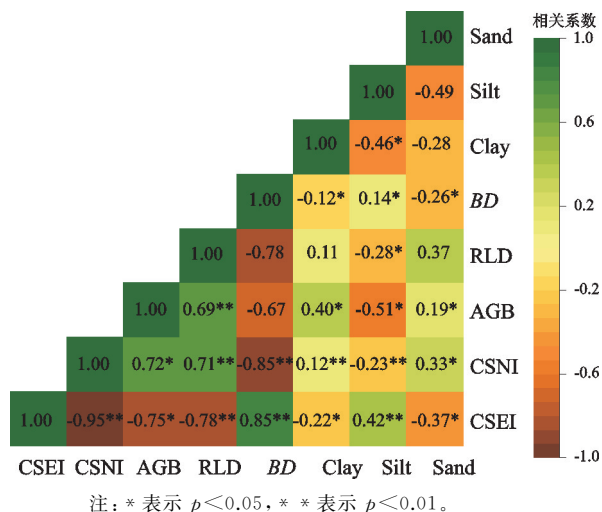


图 3 综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数与影响因素的相关性

Fig. 3 Correlation between CSEI and CSNI and influencing factors

拟合 CSEI、CENI 实测值与 Silt、BD、RLD 和 Clay 的回归方程为: $CSEI = 0.05 \times Silt + 0.46 \times BD - 0.027 \times RLD - 0.06 \times Clay$ —

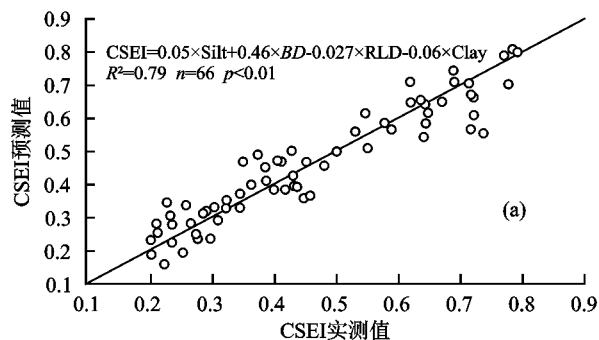


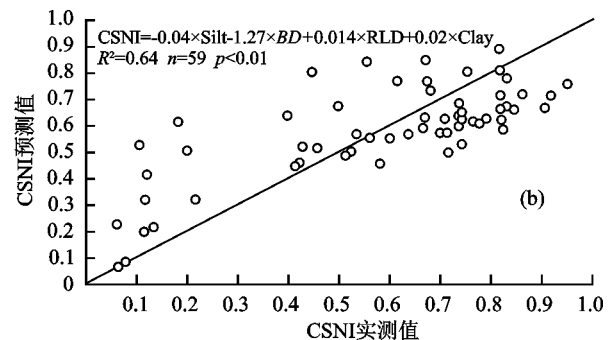
图 4 综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数的观测值和预测值关系

Fig. 4 Relationship between observed and predicted values of CSEI and CSNI

$0.027 \times RLD - 0.06 \times Clay$ ($R^2 = 0.79, n = 66, p < 0.01$); $CSNI = -0.04 \times Silt - 1.27 \times BD + 0.014 \times RLD + 0.02 \times Clay$ ($R^2 = 0.64, n = 59, p < 0.01$)。图 4a 为 CSEI 实测值与预测值关系图,可以看出 CSEI 预测值和实测值关系点均匀分布于 1:1 线附近,二者拟合程度较高。观察图 4b 发现,CSNI 预测值存在偏离 1:1 线并高于实测值的现象,当实测值 < 0.5 时这一现象更明显,而 > 0.5 时关系点更贴近 1:1 线。

相关性分析反映 CSEI 和 CSNI 与各变量之间的直接作用,但是变量间的关系往往错综复杂,仅基于相关性分析很难明确所有因素对 CSEI 和 CSNI 的影响情况,因此本文采用路径分析来量化各指标对 CSEI 和 CSNI 的直接或间接影响。由图 5 可知,通过 Amos 软件进行路径分析来度量 Silt、Clay、BD 和 AGB 对 CSEI 的影响大小。路径系数越大,该因子对 CSEI 的影响程度越大,其中 BD 对 CSEI 的直接影响最大(0.26),其次为 AGB(-0.24)和 Silt(0.18),最小的是 Clay(-0.13)。Silt 和 Clay 的变化与 AGB 和 BD 的变化之间具有相关性,进而对 CSEI 造成间接性影响,其中 Clay 对 AGB 的直接影响(0.25)最大,即对 CSEI 的间接影响最大;而 Silt 通过影响 BD 和 AGB 进而对 CSEI 造成的间接效应为分别 0.02, 0.17 均小于其直接效应。Silt 和 Clay 之间有强烈的相互作用(-0.51),这主要是土壤性质导致的。

通过路径分析来度量 Silt、Clay、BD 和 RLD 对 CSNI 的影响大小。其中 Clay 的直接影响最大(0.45),其次为 Silt(-0.42)和 BD(-0.15),而 RLD 最小(0.05)。由于 Silt、Clay 和 RLD 的变化会引起 BD 的变化,进而间接影响 CSNI,其中 RLD 的间接效应最大(0.17),Silt(0.02)和 Clay(0.07)的差距不大。RLD 的间接效应大于直接效应,且 RLD 与 Silt 和 Clay 均有强烈的相互作用,这表明土壤性质和植被特征共同引起 CSNI 的变化。



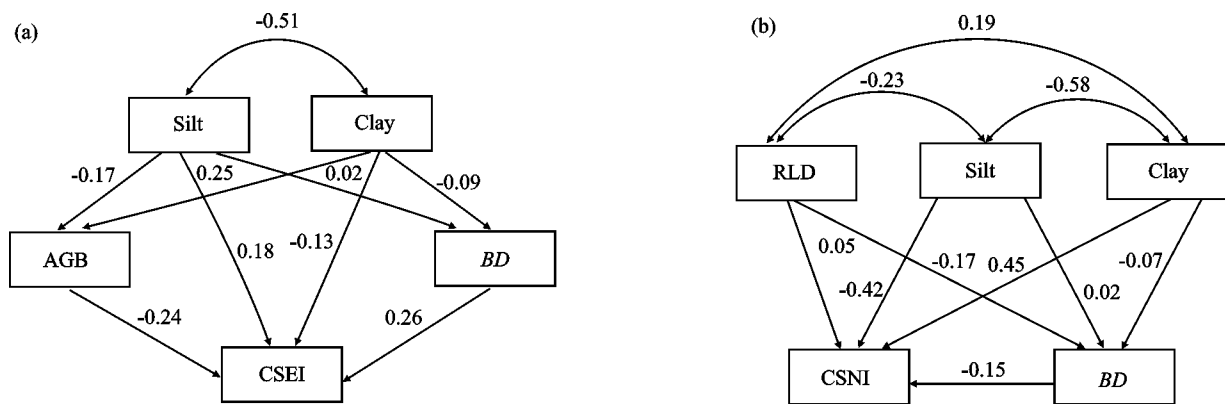


图5 各因子对综合土壤可蚀性指数和综合土壤养分指数的影响程度

Fig. 5 The influence degree of each factor on CSEI and CSNI

3 讨论

本研究表明,不同坡位的 CSEI 和 CSNI 具有显著差异(图 1),这与陈卓鑫等^[23]的研究结果一致。各坡位上土壤可蚀性和养分情况的差异主要是由褐土自身性质和径流对表土的冲刷堆积等再分配作用造成的^[29]。在研究区域内,坡上部位的坡度较大,植被覆盖少,加之华北地区土壤砂石多、黏性差和土层比较浅的特点^[30],降雨时水分排干快,地表径流及水分重力的淋洗作用更强^[26],更容易产生冲刷侵蚀,导致土壤可蚀性增加;而磷、氮元素和有机碳则随水流向下流失,导致土壤养分降低。坡下的堆积作用最强,重力作用和淋洗作用将养分冲到坡下,使磷、氮元素和有机碳含量较高;另一方面,研究区植被盖度高,土壤发育较好且黏性较坡中和坡上更强,抗侵蚀能力较强,因此坡下的 CSEI 较低而 CSNI 较高。对坡顶而言,坡度相对较小,径流侵蚀作用较弱,土壤抗蚀性较强。

本研究表明,不同土地利用下的 CSEI 和 CSNI 具有显著差异(图 2),整体上各坡位的植被恢复都能够有效地降低土壤可蚀性并提高土壤养分。姚颖等^[15]研究发现,在坡下,不同土地利用类型较撂荒地均降低该区域的土壤可蚀性,与本研究结果一致。DUAN 等^[31]在黄土区的研究发现,对比撂荒农田,坡面上部和中部的不同土地利用类型均提升土壤抗蚀性,其中草地的影响更大。与这一结果不同的是,本研究发现,以乔木为主要植被类型的林地对土壤可蚀性和土壤养分的影响更大,这可能是由于林地人为干扰强度小,树木种类并不单一,土壤表层根系发育较其他植被类型更好,纵横交错的根系有效地固结土壤,改良土壤孔隙结构,使土壤容重减小孔隙度提升^[32],降雨能更快地渗透,削弱降雨对土壤的侵蚀,进而使 CSEI 降低;而林地吸收水分和养分的能力强,加快土壤中的物质和能量循环,使土壤中水分和有机质的含量提升,进而提高 CSNI。由于不同植被

类型存在根系特征及生长发育的差异,土壤机械组成和土体结构必然受其影响,复杂根系对土体的固结效果更好,也更能降低土壤可蚀性^[33]。与此同时,林下枯落物组成和分解状况在一定程度上也取决于植被类型,这种差异带来土壤有机质和养分状况的改变^[34],最终使 CSNI 的大小为林地>灌丛>草地。总结起来,植被恢复是治理华北地区水土流失的措施中的重中之重,在不同坡位上,应合理设置各类植被的比例来进行生态恢复。

本研究表明,CSEI 与黏粒含量、砂粒含量、根长密度、地上生物量呈显著负相关,与粉粒含量和土壤容重呈显著正相关,而 CSNI 与各指标之间的相关性和 CSEI 相反(图 3),且 CSEI 和 CSNI 呈显著负相关,这与李奕等^[27]的研究结果一致。GUO 等^[4]研究表明,更低的 BD 可以表明该地区土壤结构较好,土壤可蚀性较低。这些特征可以显著减少径流冲刷带来的坡面侵蚀,从而减轻土壤侵蚀程度。黏粒和粉粒在土壤团聚体形成过程中可以起到一定程度的胶结作用,促进团聚体的形成,团聚体可以提高土体结构稳定性,进而降低土壤可蚀性。而黏粒、粉粒含量高的土壤具有更多的中小孔隙,能够保持更多的水分,有助于根系的生长发育。植物根系发育良好,根长密度随之增加,可以有效地固结土壤,进一步使 CSEI 降低,CSNI 提高。此外,在一定范围内根长密度增加,根系产生的分泌物亦随之增加,通过酸化、离子交换等途径将土体中部分无机物转化为可被吸收的有效养分,改善根际区土壤养分情况,疏松土壤,提升土壤渗透性能;而分泌物中的有机胶体可通过对根系附近土壤颗粒的黏结作用形成根土复合体来提高土体稳定性^[35]。在植被恢复过程中,土壤与根系之间的耦合作用对土壤可蚀性和养分有很大影响。本研究分析认为,BD 对 CSEI 的直接影响最大,与陈卓鑫等^[23]的结论不同。这种差异可能是区域、树种生物学特性等差异的影响所导致。

4 结论

(1)不同坡位的 CSEI 和 CSNI 具有显著差异, CSEI 数值在 0.275~0.653 变化,坡顶和坡下的 CSEI 显著低于坡上和坡中,可蚀性最大的是坡上,最小的是坡下;CSNI 数值在 0.341~0.715 变化,坡顶和坡下的 CSNI 显著高于坡上和坡中,养分最好的是坡顶,最差的是坡上;本研究建议在植被恢复过程中应更着重于坡上和坡中 2 个位置。

(2)不同土地利用下 CSEI 和 CSNI 均存在差异,其中可蚀性最大的是撂荒地(CSEI 值为 0.617),最小的是林地(CSEI 值为 0.252);养分最好的是林地(CSNI 值为 0.793),最差的是撂荒地(CSNI 值为 0.322)。总结起来,各坡位植被恢复均能够有效降低土壤的可蚀性并在此同时提高土壤养分,在众多林地类型中,灌木和乔木在保持水土方面效果更卓越。本研究建议在坡上、坡中 2 个部位的生态恢复过程中多栽植灌木,而坡顶、坡下 2 个部位则选取乔木为主要植被类型以保持水土。

(3)CSEI 与黏粒含量、砂粒含量根长密度、地上生物量呈显著负相关,与粉粒含量和土壤容重呈显著正相关,其中容重的直接影响最大(0.26);CSNI 与黏粒含量、砂粒含量根长密度、地上生物量呈显著正相关,与粉粒含量和土壤容重呈显著负相关,其中黏粒含量的直接影响最大(0.45);CSEI 与 CSNI 间呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].自然资源学报,2016,31(2):287-298.
LI Y Y, LIU L, AN S S, et al. Research on the effect of vegetation and slope aspect on the stability and erodibility of soil aggregate in Loess Hilly Region based on Le Bissonnais method[J].Journal of Natural Resources, 2016,31(2):287-298.
- [2] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J].Earth Surface Processes and Landforms,2013,38(14):1725-1734.
- [3] ZHANG B J, ZHANG G H, YANG H Y, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J].Catena,2019,173:375-383.
- [4] GUO M M, WANG W L, KANG H L, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J].Journal of Arid Land,2018,10(5):712-725.
- [5] 王慧琴.华北北部区域土壤侵蚀时空演变与驱动力分析[D].北京:北京林业大学,2020.
WANG H Q. Temporal and spatial evolution and driving forces of soil erosion in northern North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020.
- [6] 沈泽昊,张新时,金义兴.地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J].植物生态学报,2000,24(4):430-435.
SHEN Z H, ZHANG X S, JIN Y X. Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern [J]. Acta Phytoecologica Sinica,2000,24(4):430-435.
- [7] 路保昌,薛智德,朱清科,等.干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J].水土保持通报,2009,29(1):62-65.
LU B C, XUE Z D, ZHU Q K, et al. Soil water in micro-terrain on sunny and semi-sunny slopes[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2009,29(1):62-65.
- [8] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5-9.
PAN C Z, SHANGGUAN Z P. Spatial variability of soil moisture on steep slopeland in loess hill region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2003,19(6):5-9.
- [9] 林维,崔晓阳.地形因子对大兴安岭北端寒温带针叶林土壤有机碳储量的影响[J].森林工程,2017,33(3):1-6.
LIN W, CUI X Y. The influences of topographic factors on soil organic carbon storage in cool conifer forest in the north of Great Xing'an Mountain[J].Forest Engineering,2017,33(3):1-6.
- [10] 赵荟,朱清科,秦伟,等.黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J].水土保持通报,2010,30(3):64-68.
ZHAO H, ZHU Q K, QIN W, et al. Soil moisture characteristics on microrelief of dry south-slope on the Loess Plateau[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2010,30(3):64-68.
- [11] 张宏芝,朱清科,王晶,等.陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J].水土保持通报,2011,31(6):55-58.
ZHANG H Z, ZHU Q K, WANG J, et al. Soil physical properties of micro-topography on loess slope in North Shaanxi Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(6):55-58.
- [12] 田迅,高凯,张丽娟,等.坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J].水土保持通报,2015,35(5):12-16.
TIAN X, GAO K, ZHANG L J, et al. Effects of slope position on spatial distribution of soil water and vegetation in sandy land[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(5):12-16.
- [13] AN S S, DARBOUX F, CHENG M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J].Geoderma, 2013,209/210:75-85.

- [14] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):191-197.
SUN L, ZHANG G H, WANG B, et al. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10):191-197.
- [15] 姚颖,刘建明,刘忠玲,等.不同坡位山杏天然林生长和土壤理化性质比较[J].森林工程,2019,35(6):36-41,54.
YAO Y, LIU J M, LIU Z L, et al. Comparison on *Armeniaca sibirica* natural forest growth and soil physico-chemical properties in different slope position[J]. Forest Engineering, 2019, 35(6):36-41, 54.
- [16] CHEN X Y, ZHOU J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4):1735-1746.
- [17] 聂春,秦富仓,岳永杰,等.坡位对沟道土壤性质空间异质性的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4):113-117.
NIE C, QIN F C, YUE Y J, et al. The influence of slope position on the spatial heterogeneity of soil properties of channel[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2012, 33(4): 113-117.
- [18] ZHANG K, LI S, PENG W, et al. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 76(2):157-165.
- [19] PARSAKHOO A, LOTFALIAN M, KAVIAN A, et al. Assessment of soil erodibility and aggregate stability for different parts of a forest road[J]. Journal of Forestry Research, 2014, 25(1):193-200.
- [20] DE BAETS S, POESEN J, GYSSELS G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2):54-67.
- [21] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响:以河北省遵化市为例[J].地理学报, 2001, 56(4):447-455.
GUO X D, FU B J, CHEN L D, et al. Effects of land use on soil quality in a hilly area: A case study in Zunhua County of Hebei Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4):447-455.
- [22] 曲安然. 华北石质山区不同人工林下土壤性质差异特征及土壤质量评价[D]. 郑州:河南农业大学, 2023.
QU A R. Different characteristics of soil properties and soil quality evaluation under different artificial forests in rocky mountainous areas of North China [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [23] 陈卓鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J].自然资源学报, 2020, 35(2):387-398.
CHEN Z X, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility on different geomorphological locations in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2):387-398.
- [24] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion: Sediment yield models[J]. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [25] 武昱鑫,余新晓,彭修文,等.冬奥会崇礼赛区5种人工林枯落物及土壤水文特征[J].北京林业大学学报, 2022, 44(4):66-75.
WU Y X, YU X X, PENG X W, et al. Hydrological characteristics of litter and soil of five types of plantation configuration patterns in the Chongli Competition District of Winter Olympic Games[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(4):66-75.
- [26] 姜淑兰,刘目兴,易军,等.三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J].生态学报, 2019, 39(13): 4844-4854.
LOU S L, LIU M X, YI J, et al. Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the Three Gorges area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13):4844-4854.
- [27] 李奕,满秀玲,蔡体久,等.大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究[J].水土保持学报, 2011, 25(2):87-91, 96.
LI Y, MAN X L, CAI T J, et al. Research on physical properties of soil moisture and water conservation of Scotch pine forest in Da Xing'an Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2):87-91, 96.
- [28] 南雅芳,郭胜利,张彦军,等.坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J].植物营养与肥料学报, 2012, 18(3):595-601.
NAN Y F, GUO S L, ZHANG Y J, et al. Effects of slope aspect and position on soil organic carbon and nitrogen of terraces in small watershed[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3):595-601.
- [29] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2011, 87(3):357-367.
- [30] 王延军.华北落叶松不同类型林分内植物多样性及土壤持水能力比较[J].内蒙古林业调查设计, 2023, 46(1): 93-98.
WANG Y J. Comparison of plant diversity and soil water holding capacity in different stand types of *Principis-rupprechtii* L. [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2023, 46(1):93-98.

(下转第28页)

- 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 physicochemical 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. ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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.