

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.026; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.026.

高连伟, 张红丽, 查同刚. 晋西黄土区不同植被恢复阶段土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 30-38, 47.

Gao Lianwei, Zhang Hongli, Zha Tonggang. Ecological stoichiometric characteristics of soil in different vegetation restoration stages in loess region of western Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 30-38, 47.

晋西黄土区不同植被恢复阶段土壤生态化学计量特征

高连伟¹, 张红丽², 查同刚¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100000)

摘要: [目的]开展土壤生态化学计量特征随植被恢复进程的变化研究,探究植被恢复引起土壤养分变化规律及其作用机制,对认识植被恢复与土壤养分的关系,指导植被恢复实践具有重要意义。[方法]以晋西黄土区不同植被恢复阶段(撂荒地、草地、灌木林、先锋阔叶林、针叶林)的 5 种林(草)地为研究对象,通过调查采样和室内分析,探究土壤生态化学计量特征随植被恢复的进程变化及其影响因素。[结果](1)随着植被的恢复,先锋阔叶林和针叶林阶段的 SOC 含量较上一阶段增加 19.8%,土壤 TN 含量较上一阶段增加 17.6%,而土壤 TP 含量较上一阶段减少 12.4%;(2)随着植被恢复的发展,土壤 C:P 和 N:P 显著增加,C:N 的变化无明显规律,在先锋阔叶林和针叶林阶段的土壤 C:P 较上一阶段增加 26.6%;先锋阔叶林和针叶林阶段在 0—40 cm 土层的土壤 N:P 较上一阶段增加 40.2%,40—100 cm 土层的土壤 N:P 较上一阶段增加 35.7%;土壤 C:N 在不同植被恢复阶段间的变化未见明显规律,研究区土壤逐渐由 C,N 的限制转变为 P 的限制;(3)各植被恢复阶段土壤 C:P 和 N:P 主要与砂粒含量呈显著负相关,与孔隙度呈显著正相关,土壤 C:N 与其他因子的相关性不明显。[结论]植被恢复有利于土壤 C,N 含量增加,改善土壤理化性质,在植被恢复过程应同时注重 P 元素的调控,以提高晋西黄土区植被生态恢复水平。

关键词: 植被恢复; 土壤养分; 生态化学计量特征

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0030-09

Ecological stoichiometric characteristics of soil in different vegetation restoration stages in loess region of western Shanxi Province

Gao Lianwei¹, Zhang Hongli², Zha Tonggang¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100000, China)

Abstract: [Objective] Vegetation restoration can change the ecological stoichiometric characteristics of soil in a certain degree. Investigating soil stoichiometry changes during vegetation restoration is crucial for understanding the dynamics of soil nutrients and their underlying mechanisms. The aims of this research were to help elucidate the relationship between vegetation restoration and soil nutrient levels, and to provide valuable insights for practical applications in ecosystem restoration. [Methods] Five types of forest (grass) land at different stages of vegetation restoration in the loess region of western Shanxi Province: abandoned farmland, grassland, shrubland, pioneer arbor forest, and coniferous forest were examined. Through field surveys, sampling and laboratory analysis, the changes of soil ecological stoichiometric characteristics with the process of vegetation restoration and its influencing factors were investigated. [Results] (1) With vegetation restoration, the SOC content of pioneer arbor forest and coniferous forest stage increased by 19.8%, soil TN content increased by 17.6% and soil TP content decreased by 12.4% compared with the

收稿日期: 2024-04-19

修回日期: 2024-05-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(32271967); “十四五”重点研发项目(2022YFF1302501)

第一作者: 高连伟(1999—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤退化与生态修复。E-mail: gaolw@bjfu.edu.cn

通信作者: 查同刚(1972—), 男, 安徽六安人, 博士, 教授, 主要研究方向: 土壤退化与生态修复。E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

previous stages. (2) With the development of vegetation restoration, the soil C : P and N : P increased significantly, and there was no obvious regularity of the changes of C : N in pioneer arbor forest and coniferous forest stage. Soil C : P increased by 26.6% compared with the previous stages, Soil N : P in the 0—40 cm soil layer in the pioneer arbor forest and coniferous forest stage increased by 40.2% compared with the previous stages. Soil N : P in the 40—100 cm soil layer increased by 35.7% compared with the previous stages. No obvious pattern was seen in the changes of soil C : N among different vegetation restoration stages. The soil in the study area gradually changed from C and N limitation to P limitation. (3) Soil C : P and N : P in each vegetation restoration stage mainly showed significant negative correlation with sand content and significant positive correlation with porosity, and the correlation between soil C : N and other factors was not obvious. [Conclusion] Vegetation restoration is conducive to the increase of soil C and N content, as well as the improvement of soil physicochemical properties. At the same time, during the process of vegetation restoration, attention should be given to the regulation of P element to improve the level of ecological restoration of vegetation in the loess area of western Shanxi.

Keywords: vegetation restoration; soil nutrient; ecological stoichiometric characteristics

黄土高原是我国最主要的水土流失地区之一^[1], 由于气候干旱, 降雨年内分布不均以及土地的不合理开发利用, 生态环境极其脆弱。恢复森林植被群落是解决生态环境问题最有效的方法之一^[2], 因此该地区开展了大规模退耕还林(草)工程等生态治理工作^[3], 随着黄土高原的土地利用类型和植被类型的明显改变, 土壤结构及养分特征等理化性质发生了相应的变化^[4]。土壤物理性质是土壤保持肥力的基础, 影响着植被吸收土壤养分。土壤的养分对植物生长和土壤物质循环有着重要作用, 土壤的营养元素含量会受到土壤物理性质、林草植被根系分泌物和枯落物分解产物的影响, 在植被恢复过程中土壤营养元素的含量和分布也已与先前明显不同。碳、氮、磷是植被生长发育的重要营养元素, 三者在土壤中的含量和生态化学计量比反映土壤质量及肥力^[5]。碳元素在森林土壤中的储存量占全球土壤总碳储量的 73% 左右^[6], 对森林生态系统碳循环过程起到重要作用。土壤氮、磷元素会影响植物叶绿素水平, 进而影响光合能力, 是植物生长所必需的营养元素, 和土壤有机碳均是评价土壤肥力的重要营养元素^[7]。同时, 碳、氮、磷之间的土壤生态化学计量比又反映 3 种元素的耦合关系, 揭示了生态系统碳、氮、磷循环和平衡机制, 对陆地生态系统的可持续发展有重要指示作用^[8-9], 土壤中 C : N 可影响土壤微生物活性和土壤腐殖质的转化速率, 土壤 C : P 可反映土壤微生物对有机质矿化释放磷元素和吸收固化磷元素的关系^[10], 土壤 N : P 可反映土壤氮和磷元素对植物生长的限制情况^[11]。因此, 对土壤的生态化学计量特征随着植被恢复的变化进行研究, 并分析其与土壤物理性质的作用机制,

有利于明晰不同植被恢复类型和土壤理化性质的关系和变化趋势, 是理解森林养分循环, 甚至整个生态系统物质循环的起点。

随着植被恢复, 不同恢复阶段间存在植被类型的差异, 由于不同植被对土壤碳、氮、磷的吸收和通过枯落物归还土壤的养分并不相同^[12], 植被恢复过程中的土壤养分含量会发生显著变化^[13]。如许小明等^[14]的研究发现, 黄土高原的植被演替过程提高了土壤层的固碳功能, 且植被恢复初期与中期的土壤固碳作用明显, 张羽涵等^[15]的研究表明, 植被恢复能有效改善土壤质量, 但土壤 TP 含量随着植被恢复年限的增加而减少, 还有在黄土区的研究发现, 退耕后草本和灌木等先锋植被更有利于促进该地区土壤养分含量和土壤质量的提高^[16]。目前关于黄土高原土壤生态化学计量的研究多集中于不同土地利用类型、植被类型间的对比, 但对植被恢复过程中土壤养分及生态化学计量比阶段性变化趋势的研究仍相对较少, 因此, 对黄土高原地区不同植被恢复阶段的土壤养分差异进行研究, 有助于进一步理解植被恢复对当地土壤改良的作用机制。

晋西黄土高原地区现存不同植被恢复阶段, 主要包括农地、撂荒地、荒草地、天然灌木林、天然次生林、针叶林等^[17]。植被恢复的动态进程对土壤生态化学计量特征的影响仍需进一步分析, 以探讨植被恢复对土壤养分变化的连续性作用机制, 增加对植被恢复与土壤理化性质的认识, 更好地指导当地植被和土地的管理。鉴于此, 本研究选择晋西黄土高原撂荒地、草地、灌木林、先锋阔叶林、针叶林 5 种不同植被恢复阶段的土壤养分作为研究对象, 分析植被恢复对 0—

100 cm 土层土壤养分含量变化的作用和土壤生态化学计量的影响因素,以探究植被恢复经历不同阶段土壤养分的变化规律,加深对晋西黄土高原植被恢复下土壤生态化学计量特征变化过程的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在山西省吉县蔡家川流域(36°14'27"—36°18'23"N,110°39'45"—110°47'45"E),属于黄土梁峁残塬沟壑区,流域面积约 40.10 km²,海拔 904~1 592 m,暖温带大陆性气候,年均气温 10.2 ℃,年平均降水量 576 mm,平均蒸发量 1 729 mm。土壤类型以褐土和黄绵土为主,还包括少量分布的淋溶褐土、石灰性褐土、草甸栗钙土以及冲积土等^[18-19]。土壤养分含量低,保水性较差,易发生水土流失。流域内乔木种主要为山杨(*Populus davidiana*)、油松

(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,灌木种有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、白刺花(*Sophora davidii*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、丁香(*Syringa oblata*)等;草本植物有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白毛羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)等。

1.2 样点布设

蔡家川流域中柳沟流域自 20 世纪 80 年代以来陆续实施封山措施恢复自然植被,按照撂荒后自然植被恢复顺序可分为撂荒地(撂荒 5 a)、草地(撂荒 15~20 a)、灌木(撂荒 20~30 a)、先锋阔叶林(撂荒 30~35 a)和针叶林(撂荒 50 a)共 5 个阶段^[20](表 1),在每个植被恢复阶段随机布设 3 个样地,每个样地大小为撂荒地 2 m×2 m、草地 2 m×2 m、灌木林 5 m×5 m、先锋阔叶林 20 m×20 m、针叶林 20 m×20 m,样地距离大于 100 m。

表 1 植被恢复阶段的基本特征

Table1 Basic information of different vegetation restoration stages					
植被恢复阶段	海拔/m	坡度/(°)	坡向	盖度/%	主要植物
撂荒地	1025	21	阴坡	62	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)、白毛羊胡子草(<i>Eriophorum vaginatum</i>)
草地	1033	22	阴坡	76	艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)、白毛羊胡子草(<i>Eriophorum vaginatum</i>)、长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)
灌木林	1047	24	阴坡	80	黄刺玫(<i>Rosa xanthina</i>)、连翘(<i>Forsythia suspensa</i>)、艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)
先锋阔叶林	1087	20	半阴坡	88	山杨(<i>Populus davidiana</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)
针叶林	1063	21	阴坡	85	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)、白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)、毛莲蒿(<i>Artemisia vestita</i>)

1.3 样品采集与测定

采样于 2023 年 7—8 月进行,在每个样地内以梅花形布设 5 个样点采集土壤样品(图 1)在选定样点挖取 1 m 土壤剖面,按照 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 分层采集土样,并分层用环刀(100 cm³)采集原状土样,共采集 750 个土壤样品。将土壤分析样带回实验室风干过筛,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量—外加加热法测定、土壤全氮(TN)采用半微量凯式法测定、土壤全磷(TP)采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定,用环刀所取原状土测定土壤物理性质,土壤容重、土壤孔隙度采用环刀法测定,土壤机械组成采用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000,英国)测定^[10]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 Origin 2018 软件整理数据并制图,采用 SPSS 24 软件的 ANOVA 单因素方差分析检验同一土层不同植被恢复阶段和同一植被恢复阶段不同土层间土壤生态化学计量的显著性($p<0.05$),采用 R4.1.2 软件对土壤生态化学计量和其他因子进行 Pearson 相关分析并制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复阶段土壤 SOC,TN,TP 含量变化

随撂荒地—草地—灌木林—先锋阔叶林—针叶林这一植被恢复进程的发展,土壤 SOC 和 TN 含量呈现增加的趋势,而土壤 TP 含量表现出降低的趋势(图

2)。撂荒地阶段的 SOC 含量显著低于草地阶段,草地阶段的 SOC 含量除在 0—20 cm 土层低于灌木林外,均与灌木林阶段无显著差异,灌木林阶段的 SOC 含量在各土层均显著低于先锋阔叶林和针叶林阶段。土壤的 SOC 含量在不同植被恢复阶段存在 3 个阶梯式阶段,第一阶段为撂荒地阶段,即初始状态,然后是草地和灌木林阶段的积累状态,较第一阶段 SOC 含量增加 18.6%,最后是先锋阔叶林和针叶林阶段,即相对稳定状态,较上一阶段 SOC 含量增加 19.8%。撂荒地阶段的土壤 TN 含量除在 20—40 cm 土层低于草地外,均与草地阶段无显著差异,草地阶段的土壤 TN 含量除在 60—100 cm 土层与灌木林无显著差异外,均显著低于灌木林阶段,灌木林阶段的土壤 TN 含量在各土

层均显著低于先锋阔叶林和针叶林阶段。各土层的土壤 TN 含量的初始状态为撂荒地和草地阶段,然后是灌木林阶段的积累状态,较第一阶段土壤 TN 含量增加 21.4%,最后是先锋阔叶林和针叶林阶段的相对稳定状态,较上一阶段土壤 TN 含量增加 17.6%。除先锋阔叶林阶段在 0—20 cm, 60—80 cm 土层和针叶林在 0—20 cm 土壤 TP 含量和前 3 个植被恢复无显著差异外,先锋阔叶林和针叶林阶段的土壤 TP 含量均低于撂荒地、草地和灌木林阶段,各土层的土壤 TP 含量在不同植被恢复阶段存在 2 个阶梯式阶段,第一阶段为撂荒地、草地和灌木林阶段,即初始状态,第 2 个阶段为先锋阔叶林和针叶林阶段,为消耗状态,较上一阶段土壤 TP 含量减少 12.4%。

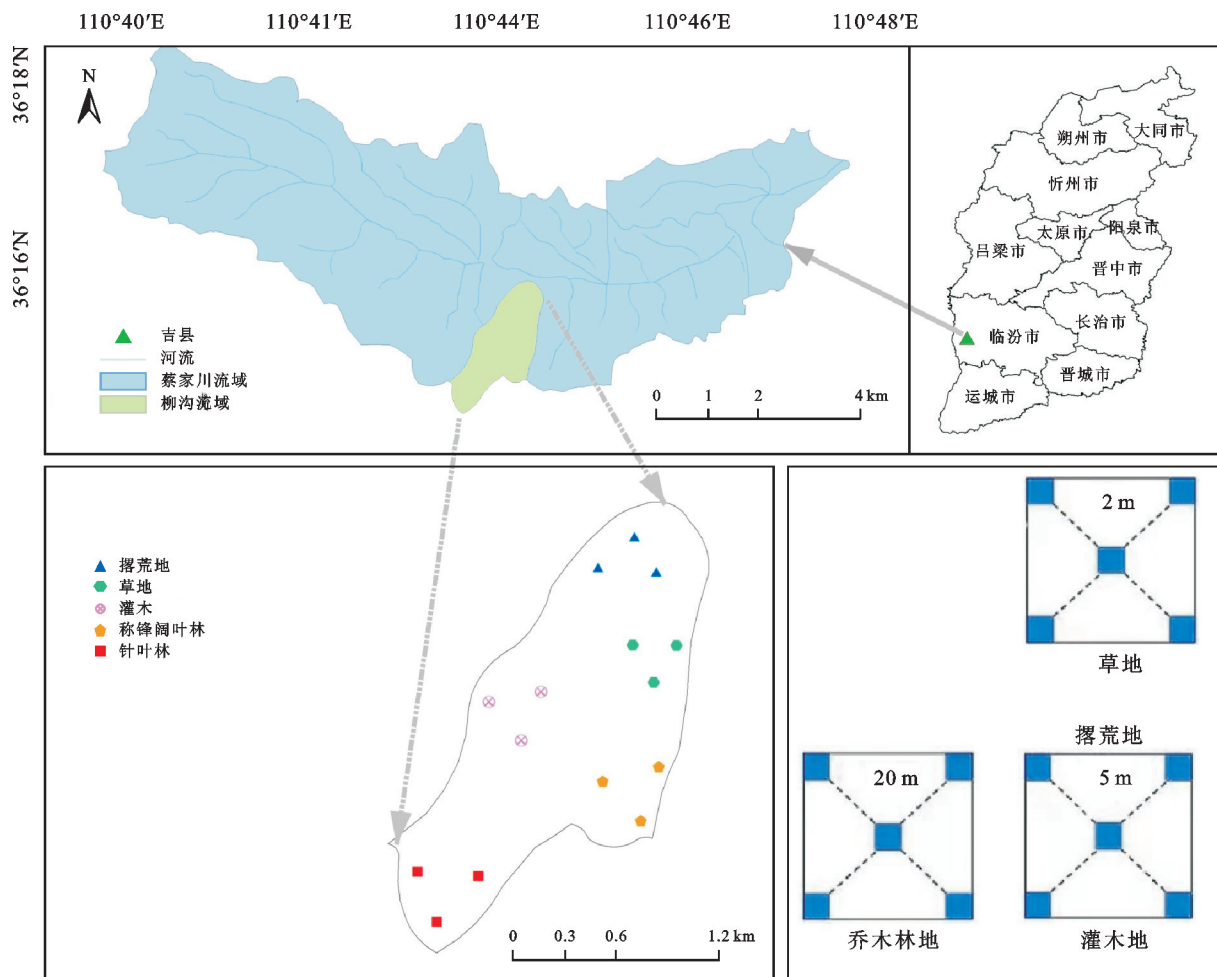


图 1 植被恢复阶段和采样点分布

Fig. 1 Distribution of vegetation restoration stages and sampling points

各植被恢复阶段间 SOC 含量和土壤 TN 含量的差异随土层深度增加而减小,并且土层间 SOC 含量和土壤 TN 含量的差异也会随土层深度增加而减小,各植被恢复阶段间土壤 TP 含量在 20—60 cm 土层的差异大于其他土层,各植被恢复阶段内,土层间土壤 TP 含量未形成一致规律。

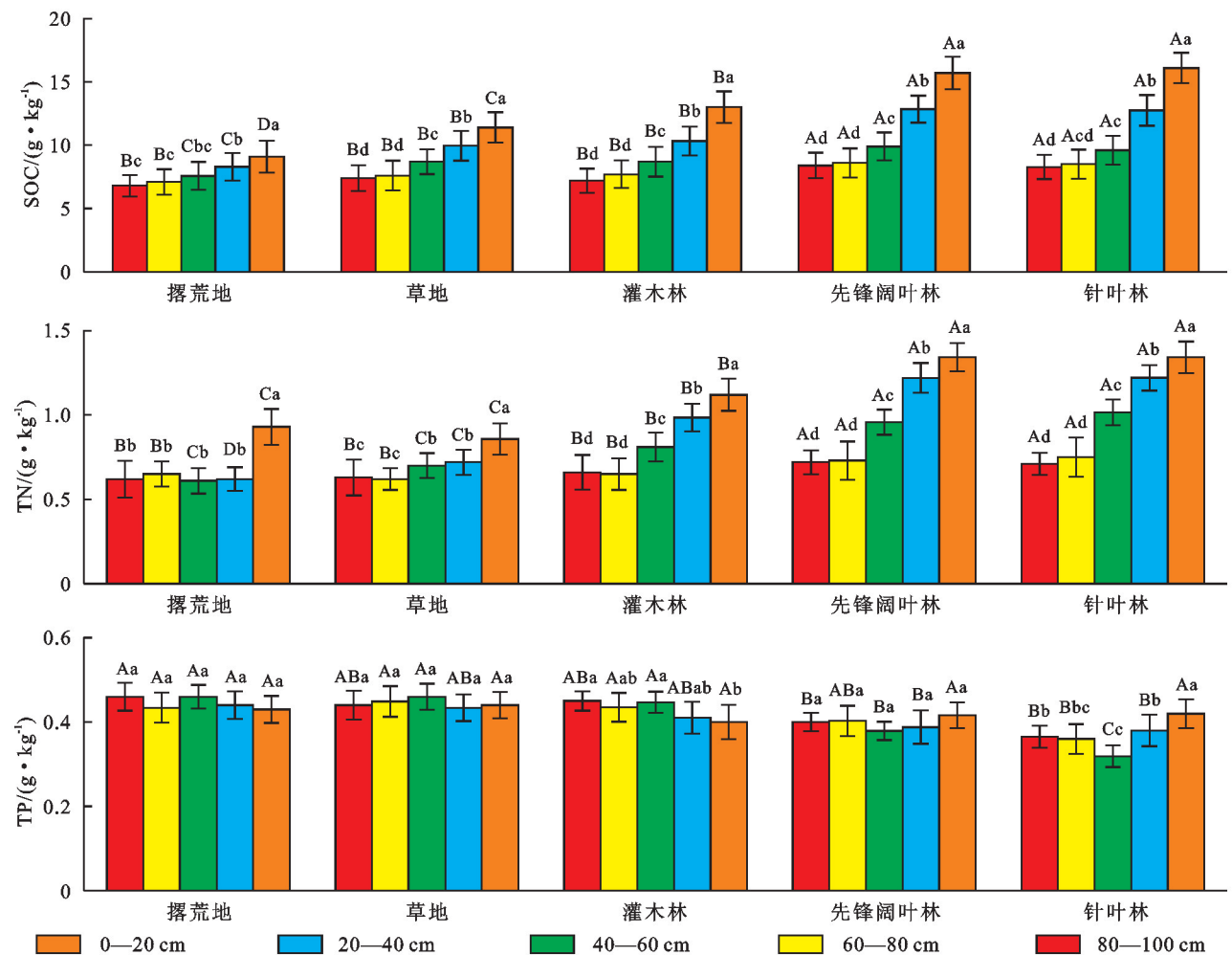
2.2 不同植被恢复阶段的土壤生态化学计量比

随植被恢复进程的发展,土壤 C : P 和 N : P 呈现增加趋势,C : N 未呈现明显规律(表 2)。0—100 cm 土层的土壤 C : P 均值分别为撂荒地 17.57,草地 21.65,灌木林 22.46,先锋阔叶林 27.41,针叶林 27.39,土壤 C : P 在不同植被恢复阶段存在 3 个阶梯

式阶段,第一阶段为撂荒地阶段,为初始状态,然后是草地和灌木林阶段的积累状态,较上一阶段增加 23.2%,最后是先锋阔叶林和针叶林阶段,为相对稳定状态,较上一阶段增加 26.6%。0—100 cm 土层的土壤 N : P 分别为撂荒地 1.57,草地 1.62,灌木林 2.01,先锋阔叶林 2.52,针叶林 2.57,在不同土层土壤 N : P 随着植被恢复的变化有所差异,0—40 cm 土层土壤 N : P 在不同植被恢复阶段存在 2 个阶梯式阶段,第一阶段为撂荒地、草地和灌木林阶段,为初始状态,第二阶段为先锋阔叶林和针叶林阶段,为增加状态,较上一阶段增加 40.2%,40—100 cm 土层土壤 N : P 在不同植被恢复阶段存在 3 个阶梯式阶段,第

一阶段为撂荒地阶段,为初始状态,然后是草地和灌木林阶段,为增加状态,较上一阶段增加 12.3%,最后是先锋阔叶林和针叶林阶段,为相对稳定状态,较上一阶段增加 35.7%。0—100 cm 土层的土壤 C : N 分别为撂荒地 11.45,草地 12.50,灌木林 11.12,先锋阔叶林 11.20,针叶林 10.91,C : N 随植被恢复阶段的变化规律不明显。

不同植被恢复阶段 C : P 呈现随土层深度加深而减小的趋势,按照 N : P 随深度的变化可将土层划分为 0—40 cm 土层和 40—100 cm 土层,0—40 cm 土层 N : P 显著高于 40—100 cm 土层,但 C : N 随土层深度的变化在不同植被恢复阶段间未形成一致规律。



注:不同大写字母表示不同植被恢复阶段同一土层间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同植被恢复阶段土壤养分含量

Fig. 2 Soil nutrient content in different vegetation restoration stages

2.3 土壤生态化学计量比与其他因子的关系

相关性分析表明(图 3),撂荒地阶段土壤 C : P 与土壤容重、土壤砂粒含量极显著负相关,与土壤粉粒含量、非毛管孔隙度极显著正相关;土壤 N : P 与土壤容重、土壤黏粒含量、土壤砂粒含量极显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤粉粒含量极显著

正相关;土壤 C : N 与总孔隙度、非毛管孔隙度极显著正相关。

草地阶段土壤 C : P 与土壤容重、土壤砂粒含量极显著负相关,与土壤黏粒含量显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度极显著正相关,与土壤粉粒含量显著正相关;土壤 N : P 与土壤容重、土壤砂粒含量

极显著负相关,与土壤黏粒含量显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤粉粒含量极显著正相关;土壤 C : N 与土壤黏粒含量极显著负相关,与土壤粉粒含量显著正相关。

表 2 不同植被恢复阶段土壤生态化学计量比

Table 2 Ecological stoichiometric ratio of soil in different vegetation restoration stages

土壤生态 化学计量比	土层/cm	撂荒地	草地	灌木林	先锋阔叶林	针叶林
C : P	0—20	21.16±2.14Da	26.19±3.10Ca	32.53±3.06Ba	37.74±4.12Aa	36.14±4.31Aa
	20—40	18.86±1.43Cb	23.39±2.33Bb	25.42±3.23Bb	32.95±3.61Ab	32.69±3.79Ab
	40—60	16.67±2.38Cc	19.22±2.94Bc	20.23±2.11Bc	25.38±3.25Ac	26.67±2.76Ac
	60—80	16.59±2.04Cc	17.83±2.10Bd	18.12±2.06Bd	21.34±3.18Ad	21.96±3.38Ad
	80—100	14.57±1.52Cd	17.62±2.03Bd	16.00±1.46Be	19.62±2.42Ae	19.51±2.13Ae
N : P	0—20	2.16±0.11Ca	1.95±0.20Da	2.80±0.24Ba	3.23±0.23Aa	3.05±0.32Aa
	20—40	1.54±0.13Cb	1.70±0.12Cb	2.40±0.26Bb	3.13±0.42Aa	3.14±0.11Aa
	40—60	1.36±0.08Cc	1.52±0.07Bbc	1.88±0.21Bc	2.66±0.13Ab	2.78±0.05Ab
	60—80	1.44±0.04Bbc	1.41±0.09Bc	1.53±0.12Bd	1.81±0.19Ac	1.94±0.07Ac
	80—100	1.35±0.12Cc	1.50±0.04Bbc	1.47±0.20Bd	1.80±0.09Ac	1.93±0.14Ac
C : N	0—20	10.28±1.29Bd	13.29±1.74Aa	11.61±1.19Ba	11.69±1.21Ba	11.84±1.09Ba
	20—40	12.93±1.21Aa	13.24±1.11Aa	10.48±1.18Bb	10.53±0.93Bb	10.44±1.06Bc
	40—60	12.30±1.68Ab	12.44±1.93Ab	10.74±1.27Bb	10.34±1.71Bb	9.45±1.21Bd
	60—80	11.08±1.23Bc	12.26±1.07Ab	11.85±0.95ABa	11.78±0.87Ba	11.33±1.28Bb
	80—100	11.02±1.03Bc	11.25±1.84ABc	10.91±1.18Bab	11.67±1.45Aa	11.27±2.01Ab

注:不同大写字母表示不同植被恢复阶段同一土层间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异显著($p<0.05$)。

灌木林阶段土壤 C : P 与土壤容重、土壤黏粒含量、土壤砂粒含量极显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度极显著正相关;土壤 N : P 与土壤容重、土壤砂粒含量、土壤黏粒含量极显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤粉粒含量极显著正相关;土壤 C : N 与非毛管孔隙度显著负相关。

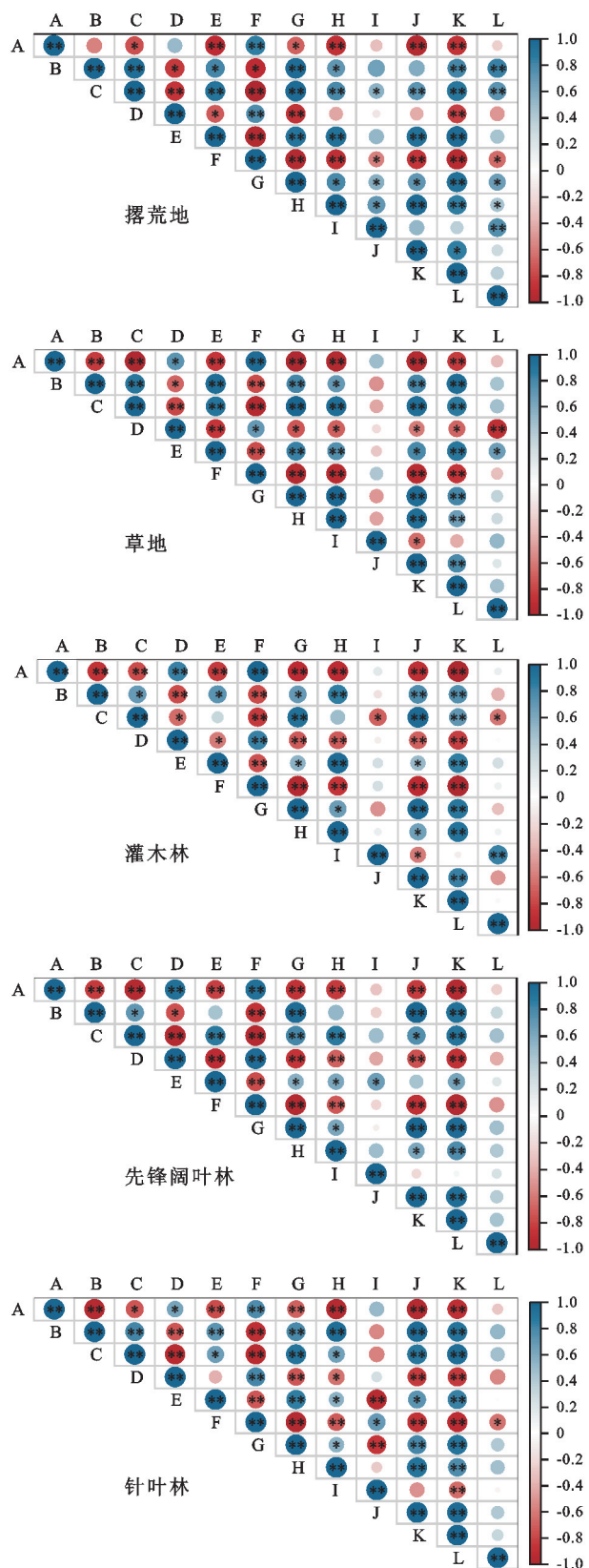
先锋阔叶林和针叶林阶段土壤 C : P 与土壤容重、土壤黏粒含量、土壤砂粒含量极显著负相关,与总孔隙度极显著正相关,针叶林阶段土壤 C : P 还与非毛管孔隙度极显著正相关,与土壤粉粒含量显著正相关;土壤 N : P 与土壤容重、土壤黏粒含量、土壤砂粒含量极显著负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度极显著正相关,而针叶林阶段土壤 N : P 还与土壤粉粒含量极显著正相关;先锋阔叶林土壤 C : N 与各因子相关性均不显著,针叶林阶段土壤 C : N 与土壤砂粒含量显著负相关。

3 讨论

3.1 不同植被恢复阶段对土壤养分的影响

土壤为植物生长发育提供养分保障,植物生长发育吸收土壤养分的同时,又通过枯落物的形式,在微生物的作用下将部分养分归还土壤,实现生态系统的物质循环^[21]。随着植被恢复,土壤主要养分含量变化较为明显^[22],本研究发现,0—100 cm 土层的 SOC 含量随植被恢复可分为 3 个阶梯式增加阶段,即撂荒

地阶段、草地和灌木林阶段、先锋阔叶林和针叶林阶段,0—100 cm 土层的土壤 TN 含量随植被恢复也可分为 3 个阶梯式增加阶段,即撂荒地和草地阶段、灌木林阶段、先锋阔叶林和针叶林阶段,随着植被恢复, SOC 含量和土壤 TN 含量均高于上一植被恢复阶段。撂荒地的 SOC 含量、土壤 TN 含量始终处于最初阶段,先锋阔叶林和针叶林阶段的 SOC 含量、土壤 TN 含量也处于稳定阶段,也有在晋西黄土区的研究有相似结论,相较于农田,林地更有利于增加土壤养分,提升土壤质量^[13]。与林地类似,本研究中植被恢复后期阶段为先锋阔叶林和针叶林,属异龄复层林,相比于撂荒地、草地和灌木林,林木生长空间状态合理,植被郁闭度高,林下土壤受光照强度弱,枯落物保水性强,茂盛植被的枯落物与根系为微生物提供了更适宜的生长环境,提供了丰富的有机质来源,微生物活性增强,使得微生物分泌更多的胞外酶分解有机物^[23],有利于改善土壤养分条件^[24],并且丰富的植被能为更多动物提供活动场所,而更多的动物残体及粪便同样可增加土壤中的 C 和 N,因此先锋阔叶林和针叶林土壤中有有机质积累量大,经分解返还给土壤的养分更多,同样,由于土壤 C、N 来源的差异会在一定程度上影响 SOC 和 TN 含量^[9],植被盖度相似的草地和灌木林,的 SOC 含量、TN 含量也会高于上一植被恢复阶段,低于先锋阔叶林和针叶林阶段。



注:A 为土壤容重; B 为总孔隙度; C 为非毛管孔隙; D 为土壤黏粒含量; E 为土壤粉粒含量; F 为土壤砂粒含量; G 为 SOC; H 为 TN; I 为 TP; J 为 C:P; K 为 N:P; L 为 C:N; * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

图 3 土壤化学计量与其他因子的相关分析

Fig. 3 Pearson correlation analysis between soil ecological stoichiometry and other factors

本研究发现土壤 TP 含量随植被恢复的变化规律与 SOC 含量、土壤 TN 含量的变化不同,土壤 TP 含量整体水平随植被恢复呈下降趋势,且可分为 2 个阶段,第一阶段为撿荒地、草地和灌木林阶段,第 2 个阶段为先锋阔叶林和针叶林阶段,土壤 TP 含量显著低于第一阶段,但各阶段内不同植被恢复的差异不显著。这与海旭莹等^[11]对土壤 TP 含量的研究结论不一致,其认为由于植被恢复后期植物多样性和生物量的增加,随枯落物归还到土壤中的 P 元素增多,导致土壤 TP 含量随植被恢复年限的增加有所提高。而有相关研究表明土壤 P 元素主要来源于岩石的风化,土壤 TP 含量变化主要受土壤母质的影响^[22],在本研究中土壤 TP 含量同时会受植被吸收固定和土壤环境的影响,随着植被恢复的进行,生态系统对 P 的需求不断增加,根系分布更深更广的先锋阔叶林、针叶林对土壤中 P 元素吸收量更多,植被根系及微生物对土壤环境的改善虽然一定程度上促进了 P 的矿化和有效磷的积累^[25],但土壤中的 P 元素被植物吸收利用后得不到及时补充,使得土壤 TP 含量随植被恢复而呈现下降趋势,这与于宗恺等^[26]对黄土高原退耕草地演替对土壤养分影响的研究结果相似。

本研究发现 SOC 含量、土壤 TN 含量均随土层深度的增加而降低,而土壤 TP 含量除在先锋阔叶林和针叶林阶段 20—60 cm 土层较少外,在各植被恢复阶段随深度变化不大。土壤表层有机碳含量受地表覆盖度和微生物分解作用的影响较下层土壤大^[27],表层枯落物分解产生的有机质较多,有机碳输入量较下层土壤多;土壤表层的 N 元素同样受到枯落物分解的影响,同时还受到大气氮沉降影响^[13],降雨补给表层土壤的氮元素量也更多,因此 SOC 含量、土壤 TN 含量在表层较高,而随土层深度增加而降低。土壤中 P 元素是一种沉积性的矿物元素,不易从土壤表层移动到深层^[11],含量主要受土壤母质影响,所以植物恢复初始状态的土壤 TP 在土层中的分布受深度影响较小,而在先锋阔叶林和针叶林阶段,由于根系大多分布在 20—60 cm 土层^[28],因此在先锋阔叶林和针叶林阶段的 20—60 cm 土层中 TP 含量较低,形成了土壤 TP 含量在土层间的差异。

3.2 不同植被恢复阶段对土壤生态化学计量比的影响

由于土壤 C、N 元素受到微生物分解枯落物归还土壤养分的影响,所以随着植被的恢复,枯落物量的增加,土壤 C:P、N:P 明显增加^[21]。本研究发现,先锋阔叶林和针叶林阶段的土壤 C:P 和 N:P 均大于灌木林、草地和撿荒地阶段,这表明植被恢复过程中 P 是生态系统主要的限制因素^[23],这一方面是由于先锋阔叶林和针叶林阶段的枯枝落叶较灌木林、草地和撿荒地多,土壤 C、N 元素积累更多,另一

方面是由于先锋阔叶林和针叶林阶段的根系在 20—60 cm 土层的分布较集中,植被生长将本来不富足的 P 消耗,20—60 cm 土层的土壤 TP 含量较少。土壤 C:P, N:P 在 17.57~27.41, 1.57~2.57 波动,均低于全国平均水平的 52.70, 9.30^[29],表明研究区土壤整体受到 C, N 的限制,但随着植被的恢复,相对稳定的 C:N 与逐渐增加的 C:P 和 N:P 表明研究区土壤逐渐由 C, N 的限制转变为 P 的限制。

本研究发现,土壤 C:P 和 N:P 均呈现随土层深度增加而减小的趋势,主要原因在于 SOC 含量和土壤 TN 含量随土层深度增加而降低,土壤 TP 含量在 0—100 cm 土层中虽有波动,但对土壤 C:P 和 N:P 的影响较小。本研究同时发现,不同植被恢复阶段和不同土层深度的 C:N 差异均较小,这可能是由于 C 和 N 作为结构性成分,二者的积累和消耗存在固定比值因而对环境变化的响应较一致^[30],所以使得二者比值在植被恢复间的差异性较小。土壤 C:P 和 N:P 与土壤容重呈显著负相关,其原因在于植物的枯落物经分解增加了土壤 C, N 含量,又促进了土壤团聚体形成,增加了土壤总孔隙度,使得土壤容重下降,这与熊瑛楠等^[4]的研究结果一致。

4 结论

本研究表明,随着植被恢复阶段的变化,土壤养分和化学计量比发生显著阶段性变化。尤其是先锋阔叶林和针叶林阶段的 SOC、土壤 TN 含量、土壤 C:P 和 N:P 均显著高于其他植被恢复阶段,而先锋阔叶林和针叶林阶段的土壤 TP 含量,显著低于其他植被恢复阶段,土壤 C:N 在不同植被恢复阶段间的变化未见明显规律,表明研究区土壤逐渐由 C, N 的限制转变为 P 限制;随土层深度的增加, SOC、土壤 TN 含量、土壤 C:P 和 N:P 均呈现下降趋势,而土壤 TP 含量则在植被恢复后期的 20—60 cm 土层中出现明显低值, C:N 随土层深度的变化未形成一致规律。

各植被恢复阶段土壤 C:P 和 N:P 主要与砂粒含量呈显著负相关,与孔隙度呈显著正相关,土壤 C:N 与其他因子的相关性不明显。植被恢复尤其是乔木林有利于增加晋西黄土高原土壤养分含量,提高土壤生态化学计量比,改善土壤理化性质。因此应提高晋西黄土高原土壤的 P 元素水平,细化森林抚育管理,促进植被恢复可以更好地发挥森林在改善土壤质量和水土流失防治方面的作用。

参考文献(References):

- [1] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293, 400.
Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982—2009[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 287-293, 400.
- [2] Wang R, Dong Z B, Zhou Z C, et al. Effect of vegetation patchiness on the subsurface water distribution in abandoned farmland of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 141416.
- [3] Mu X M, Zhang X Q, Shao H B, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(3): 303-309.
- [4] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228-237, 246.
Xiong Y N, Feng T J, Wang P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the loess area of western Shanxi Province, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 228-237, 246.
- [5] Luo X Z, Hou E Q, Chen J Q, et al. Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China[J]. Catena, 2020, 193: 104606.
- [6] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [7] 于洋, 王海燕, 雷相东, 等. 东北过伐林区蒙古栎天然林土壤有机碳研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 57-62.
Yu Y, Wang H Y, Lei X D, et al. Soil organic carbon in over-logged forest stands of *Quercus mongolica* in northeastern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 57-62.
- [8] Finzi A C, Moore D J P, DeLucia E H, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem processes under elevated CO₂ in a warm-temperate forest[J]. Ecology, 2006, 87(1): 15-25.
- [9] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 等. 中国亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.
Wang W H, Yu Y N, Xie J Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [10] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1899-1907.
Guo X, Wei T X, Chen Y X, et al. Characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow-restored

- vegetation in the loess hilly areas[J]. *Arid Land Geography*, 2022,45(6):1899-1907.
- [11] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020,40(23):8570-8581.
- Hai X Y, Dong L B, Wang X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(23):8570-8581.
- [12] 尹秋龙,寇萌,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征[J]. *水土保持通报*, 2017,37(1):62-66.
- Yin Q L, Kou M, Jiao J Y, et al. Characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in hilly-gullied region of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017,37(1):62-66.
- [13] 胡亚伟,孙若修,申明爽,等.晋西黄土区土地利用方式对土壤 C:N:P 化学计量特征及土壤理化性质的影响[J]. *干旱区研究*, 2021,38(4):990-999.
- Hu Y W, Sun R X, Shen M S, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C:N:P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi loess region[J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(4):990-999.
- [14] 许小明,张晓萍,王浩嘉,等.黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征[J]. *环境科学*, 2023,44(5):2756-2766.
- Xu X M, Zhang X P, Wang H J, et al. Carbon sequestration characteristics under natural vegetation restoration in Ziwuling area of the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2023,44(5):2756-2766.
- [15] 张羽涵,李瑶,周玥,等.宁南山区不同恢复年限柠条林土壤养分及有机碳组分变化特征[J]. *应用生态学报*, 2024,35(3):639-647.
- Zhang Y H, Li Y, Zhou Y, et al. Changes of soil nutrients and organic carbon fractions in *Caragana korshinskii* forests with different restoration years in mountainous areas of southern Ningxia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(3):639-647.
- [16] 吴丹,温晨,卫伟,等.黄土高原小流域不同植物群落土壤生态化学计量的垂直变化特征[J]. *广西植物*, 2023,43(5):923-935.
- Wu D, Wen C, Wei W, et al. Vertical variation characteristics of soil ecological stoichiometry of different plant communities in small watershed on the Loess Plateau[J]. *Guihaia*, 2023,43(5):923-935.
- [17] 逯金鑫,周荣磊,刘洋洋,等.黄土高原植被覆盖时空动态及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023,30(2):211-219.
- Lu J X, Zhou R L, Liu Y Y, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation cover on the Loess Plateau and its influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):211-219.
- [18] 杨帆,潘成忠,鞠洪秀.晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响[J]. *水土保持研究*, 2016,23(4):318-324.
- Yang F, Pan C Z, Ju H X. Effects of different land use types on storage of soil organic carbon and total nitrogen in western Shanxi hilly Loess Plateau Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(4):318-324.
- [19] 张蕾,张凤荣,李超,等.土壤侵蚀作用对黄土高原黏化层鉴定和淋溶土分类的影响[J]. *土壤通报*, 2021,52(2):261-268.
- Zhang L, Zhang F R, Li C, et al. Impact of soil erosion on argic horizon identification and luvisols classification in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021,52(2):261-268.
- [20] Wang A N, Zha T G, Zhang Z Q. Variations in soil organic carbon storage and stability with vegetation restoration stages on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2023,228:107142.
- [21] 何文强,陈林,庞丹波,等.枯落物输入改变对森林生态系统土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2024,44(4):1755-1763.
- He W Q, Chen L, Pang D B, et al. Effects of altered litter inputs on soil physicochemical properties in forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(4):1755-1763.
- [22] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2013,33(15):4674-4682.
- Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(15):4674-4682.
- [23] 薛悦,康海斌,杨航,等.秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征[J]. *环境科学*, 2022,43(1):550-559.
- Xue Y, Kang H B, Yang H, et al. Extracellular enzyme stoichiometry and microbial metabolism limitation during vegetation restoration process in the middle of the Qinling Mountains, China[J]. *Environmental Science*, 2022,43(1):550-559.
- [24] 张明辉,尹昀洲,王珂,等.水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2023,45(9):73-82.
- Zhang M H, Yin Y Z, Wang K, et al. Effects of spatial structure characteristics of *Fraxinus mandshurica* plantation on soil nutrient content[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023,45(9):73-82.
- [25] 张勇,杜华栋,张振国,等.黄土丘陵区自然植被恢复下土壤微生物学质量演变特征[J]. *水土保持研究*, 2014,21(1):6-11,17.
- Zhang Y, Du H D, Zhang Z G, et al. Evolution characteristics of soil biological property in loess hilly region under natural vegetation restoration[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(1):6-11,17.

- 36(6):189-194,205.
- [19] Zhang G H, Wang L L, Tang K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(7):1289-1299.
- [20] Xiao L M, Zhang W, Hu P L, et al. The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical Karst area[J]. Science of the Total Environment, 2021,801:149588.
- [21] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
- Yang C X, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Distribution of shear stress and the relationship between soil detachment rate and shear stress under experiments[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010,8(6):53-57.
- [22] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):105-112.
- Li Q, Liu G B, Xu M X, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(17):105-112.
- [23] Wang X S, Guo M M, Liu J L, et al. Soil anti-scourabilities of four typical herbaceous plants and their responses to soil properties, root traits and slope position in Northeast China [J]. Sustainability, 2022,14(24):16807-16819.
- [24] 周维,张建辉,李勇,等.金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J].水土保持通报,2006,26(5):26-30,42.
- Zhou W, Zhang J H, Li Y, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):26-30,42.
- [25] 吕猛,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施土壤抗冲性及其与物理性质的关系[J].灌溉排水学报,2019,38(S1):90-93.
- Lyu M, Lyu G, Zhai J X, et al. Soil anti-scourability and its relationship with physical properties of different forest and grass measures in the southern margin of horqin sandy land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(S1):90-93.
- [26] 杨瑞杰,何淑勤,周树峰,等.杂交梁草生长期土壤抗冲性变化特征及其根系调控效应[J].草业学报,2023,32(7):149-159.
- Yang R J, He S Q, Zhou S F, et al. Root regulation of soil scourability in hybrid sorghum grass during the growing period[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(7):149-159.
- [27] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- Wang Y Q, Zhang J J, Li L, et al. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(1):122-131.
- [28] 刘泉宏,湛芸,颜哲豪,等.紫色土区草篱根系对其根-土复合体抗剪和抗冲性能的影响[J].草业学报,2021,30(11):98-107.
- Liu X H, Chen Y, Yan Z H, et al. The effects of grass hedgerow roots on shear strength and scouring resistance of root-soil complexes in the purple soil region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021,30(11):98-107.

~~~~~

(上接第38页)

- [26] 于宗恺,刘小伟,朵莹,等.黄土高原退耕草地演替过程中土壤及微生物碳氮磷化学计量关系时空变化[J].中国草地学报,2023,45(8):118-128.
- Yu Z K, Liu X W, Duo Y, et al. Temporal and spatial variations of soil and microbial carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric relationships during the succession of rehabilitated grassland on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(8):118-128.
- [27] Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2007,71:163-174.
- [28] 郭钰,姚佳峰,董媛,等.油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征[J].应用生态学报,2023,34(11):2881-2888.
- Guo Y, Yao J F, Dong Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(11):2881-2888.
- [29] 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, 2010,98:139-151.
- [30] 由政,张鹏,薛蕊,等.退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J].草地学报,2017,25(3):657-661.
- You Z, Zhang P, Xue S, et al. Effect of vegetation succession on abandoned cropland on soil stoichiometry characteristics[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017,25(3):657-661.