

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.008

丁鑫丽, 马振华, 赵慧雪, 等. 宁南山区不同植被类型土壤生态化学计量特征与碳储量[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 364-373.

DING Xinli, MA Zhenhua, ZHAO Huixue, et al. Ecological stoichiometry and carbon storage under different vegetation types in mountainous area of southern Ningxia, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 364-373.

宁南山区不同植被类型土壤生态化学计量特征与碳储量

丁鑫丽^{1,2,3}, 马振华⁴, 赵慧雪⁵, 康 龙⁵, 曹 扬^{1,2,6}

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 国家林业和草原局西北调查规划院, 西安 710048; 5. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100;

6. 西北农林科技大学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)

摘 要: [目的] 为了阐明不同植被类型的土壤养分状况与固碳能力差异。[方法] 以宁夏南部山区具有代表性的乔木纯林(山杏林和刺槐林)、乔木混交林(刺槐+山杏)、乔灌混交林(山桃+柠条)、灌木林(沙棘)、草地共 6 种植被类型为研究对象, 通过野外调查和室内分析相结合的方式, 研究各植被类型 0—100 cm 土层的生态化学计量特征与碳储量。[结果] 研究区土壤 C、N、P 变化分别为 19.74~35.11, 1.74~3.19, 1.60~1.69 g/kg, C、N 均表现为随土层深度的增加而递减, 其中刺槐+山杏林地的 C、N 在 0—80 cm 土层显著高于其他类型, P 在各类型和土层间均无显著性差异。土壤 C:N 在 0—40 cm 土层刺槐林显著较低, 40—100 cm 土层不同植被类型间无显著差异, 土壤 C:P 和 N:P 受植被类型影响较大, 表现为刺槐+山杏林地最高。各植被类型的 C:N 在不同土层间没有明显差异, C:P 和 N:P 表现为随着土层的增加而降低。土壤 0—100 cm 土层碳储量为 5.98~38.21 t/hm², 各植被类型间差异较大, 总体表现为刺槐+山杏>刺槐>山杏>沙棘>山桃+柠条>草地, 刺槐+山杏林显著高于其他植被类型。[结论] 宁南山区乔灌林地养分循环模式与固碳能力优于草地, 且刺槐+山杏混交林造林模式最佳, 营造混交林是提高土壤固碳能力的一个重要途径。

关键词: 宁南山区; 植被类型; 生态化学计量; 碳储量

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0364-10

Ecological Stoichiometry and Carbon Storage Under Different Vegetation Types in Mountainous Area of Southern Ningxia, China

DING Xinli^{1,2,3}, MA Zhenhua⁴, ZHAO Huixue⁵, KANG Long⁵, CAO Yang^{1,2,6}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China; 4. Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration,

Xi'an 710048, China; 5. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 6. State Key

Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the differences in soil nutrient status and carbon sequestration capabilities among various vegetation types. [Methods] This study focused on six representative vegetation types in the southern mountainous areas of Ningxia: pure tree plantations (*Prunus sibirica* L. and *Robinia pseudoacacia* L.), mixed tree plantations (*Robinia pseudoacacia* L. + *Prunus sibirica* L.), mixed tree and shrub plantations (*Prunus davidiana* (Carrière) Franch. + *Caragana korshinskii* Kom.), shrub plantations (*Hippophae rhamnoides* L.), and grasslands. Through a combination of field surveys and laboratory analyses, we investigated the ecological stoichiometry and carbon storage of the 0—100 cm soil layer across these vege-

收稿日期: 2024-03-27

修回日期: 2024-04-14

录用日期: 2024-05-07

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-24

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2020BCF01001); 国家自然科学基金面上项目 (41977418, 42130717)

第一作者: 丁鑫丽 (1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事流域生态研究。E-mail: dingxinli22@mailsucas.ac.cn

通信作者: 曹扬 (1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态学研究。E-mail: yang.cao@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

tation types. [Results] C, N, and P contents varied between 19.74~35.11 g/kg, 1.74~3.19 g/kg, and 1.60~1.69 g/kg, respectively, with both C and N contents decreasing with increasing soil depth. Furthermore, the C and N contents in the *Robinia pseudoacacia* L.+ *Prunus sibirica* L. were significantly higher than those in other types up to a depth of 80 cm, while P content showed no significant differences among types or soil layers. Soil C : N ratio were significantly lower in *Robinia pseudoacacia* L.+ *Prunus sibirica* L. within the 0—40 cm layer, with no significant differences observed among vegetation types from 40—100 cm. Soil C : P and N : P ratios were significantly influenced by vegetation type, showing the highest values in the mixed forest of *Robinia pseudoacacia* L. and *Prunus sibirica* L.; Soil C : N of these vegetation types showed no significant differences among layers. Soil C : P and N : P ratios were decreased with soil depth. Soil carbon storage 0—100 cm varied between 5.98~38.21 t/hm² and had significant differences among these types, with all of them showed the order: *Robinia pseudoacacia* L.+ *Prunus sibirica* L. > *Robinia pseudoacacia* L. > *Prunus sibirica* L. > *Hippophae rhamnoides* L. > *Prunus davidiana* (Carrière) Franch.+ *Caragana korshinskii* Kom. > grassland. In addition, the mixed plantation of *Robinia pseudoacacia* L. and *Prunus sibirica* L. had significantly higher carbon storage than other vegetation types. [Conclusion] Tree and shrub lands in the southern Ningxia mountainous region have superior nutrient cycling patterns and carbon sequestration capabilities compared to grasslands, with the mixed planting model of *Robinia pseudoacacia* L. and *Prunus sibirica* L. being the most effective. Therefore, creating mixed plantations is an important approach to enhance soil carbon sequestration capacity.

Keywords: mountainous area of southern Ningxia; vegetation type; ecological stoichiometry; carbon storage

Received: 2024-03-27

Revised: 2024-04-14

Accepted: 2024-05-07

Online(www.cnki.net): 2024-05-24

土壤是陆地生态系统中最大的近地表有机碳(SOC)库,超过植被和大气中储存的碳总和,在生态系统碳循环中发挥着至关重要的作用^[1-2]。因此,即使土壤有机碳库发生微小变化,也可能导致全球气候发生变化^[3]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,是影响土壤碳储量的重要因子之一^[4],特别是森林生态系统的 SOCS 占全球碳库的 70%,在减少碳排放和应对全球变暖方面发挥着重要作用^[5]。土壤 SOCS 受土壤碳输入和输出之间的平衡控制,不同植被类型通过影响生态系统碳的输入、分解和周转来影响土壤有机碳的固持和损失^[6]。有研究^[7]表明,黄土高原不同植被类型通过影响土壤 pH 和微生物活性,从而使林地和灌木较草地更有利于微生物残体碳的形成和积累。土壤 SOCS 的提升可能减缓大气中 CO₂ 浓度的上升^[8],在日益严峻的生态环境问题和气候变化威胁的双重背景下,如何最大限度地提高土壤 SOCS 已成为许多生态学者共同关切的热点议题。

生态化学计量学结合生态学和化学计量学等基本原理,是研究生态系统各组分相互作用过程中多重化学元素平衡的科学^[9]。碳(C)、氮(N)、磷(P)作为生物体重要元素组成及土壤重要的结构和养分元素,研究土壤 C、N、P 的生态化学计量学特征不仅对揭示土壤养分循环和平衡机制有着重要的意义^[10],而且在揭示生态系统中植物生长的养分利用效率及限制状况等方

面也具有的现实意义^[11]。土壤的生态化学计量可以作为衡量土壤养分状况的重要指标,土壤的 C : N 和 C : P 分别反映土壤有机质的分解速率和磷的有效性,N : P 可确定是否存在养分限制情况^[12]。土壤中各元素含量的比值影响着地上植被的生产力及养分吸收和利用效率,甚至改变植物的生态策略^[13]。近年来,不同学者对土壤生态化学计量学开展了大量研究,但结果不尽相同,如在甘南高原地区,人工林比草地明显有更好的土壤 C 调控能力^[14];姜红梅等^[15]通过分析祁连山东段 5 种植被类型发现,混交林在维持土壤养分平衡方面能力较强;也有研究^[16]表明,毛乌素沙漠 4 种植被类型的 C : N 差异不显著,C : P 和 N : P 存在差异。研究结果的不同一方面是由于土壤先天环境和气候带的差异导致^[17];另一方面,是由于不同植被类型的枯枝落叶和根系类型不同,因此,其产生的有机质及根系分泌物也不同,进而影响土壤营养元素的富集与再分配等作用^[18]。

宁夏南部山区(简称宁南山区)位于黄土高原西部的丘陵沟壑区,该区干旱少雨,年平均蒸发量大,水土流失严重,生态环境极其脆弱,合理的植被恢复建设是该区进行生态恢复的主要内容^[11]。自 20 世纪 90 年代以来,我国在该地区实施一系列大规模退耕还林还草等生态修复工程,推进脆弱生态系统的恢复,提升生态系统的服务功能^[19]。植被恢复的积极

作用在干旱和半干旱地区尤其重要,这些地区脆弱的生态系统可能遭受严重的土壤退化和侵蚀^[20]。退耕还林还草工程是优化土地利用结构和方式,促进碳达峰和碳平衡,协调人地矛盾关系的有效途径^[8]。尽管已有大量研究^[7,21-22]表明,植被恢复措施对提升土壤碳库具有显著作用,然而不同植被类型由于功能性状的差异导致的植物与微生物残体碳输入,以及土壤微生物主导的分解作用导致的碳损失之间复杂的生态过程对有机碳动态平衡的作用机制不同^[8]。因此,理清不同植被恢复类型土壤生态化学计量学特征及碳库的变化特征,对深入理解生态系统碳循环具有重要作用,同时可为中国“双碳”目标的实现提供科学数据支撑。

基于此,本研究以宁南山区不同植被恢复类型为研究对象,通过生态化学计量特征的理论和研究方法,结合野外调查与实验室内分析,探究乔、灌、草等植被类型土壤 C、N、P 生态化学计量学特征,明确不同植被类型的 C、N、P 含量、C 储量、化学计量比之间的差异性及土壤性质与养分平衡之间的关联性,揭示宁南山区不同植被类型功能和生产力维持的养分限制与养分供应情况,为宁南山区及其他生态脆弱区的植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区为宁夏回族自治区固原市彭阳县阳洼小流域(35°94′N,106°69′E),位于宁夏南部山区,流域

面积为 10.53 km²。该区属于典型黄土高原丘陵沟壑区,地势南高北低,海拔 1 500~1 800 m。气候状况表现为典型的温带大陆性季风气候特征,年平均气温 7.2 ℃,无霜期 140~170 天,年平均降水量 450 mm,多集中于夏季^[11]。典型土壤类型为黑垆土,土壤母质为黄土及黄土状物,土层深厚,土质疏松,孔隙度大,透水性、抗冲性较弱。研究区内人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)和山杏(*Prunus sibirica* L.)为主,山桃(*Prunus davidiana* (Carrière) Franch.)为小乔木;灌木主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)和柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等;草本植物有苔草(*Carex tristachya* Thunb.)、草木犀(*Melilotus officinalis* (L.) Pall.)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser.)、翻白草(*Potentilla discolor* Bunge)和黄花蒿(*Artemisia annua* L.)等。

1.2 样地调查和样品采集与处理

2020 年 8 月以立地条件相近为原则在研究区内选择具有代表性的乔木纯林(山杏纯林和刺槐纯林)、乔木混交林(刺槐+山杏混交林)、乔灌混交林(山桃+柠条)、灌木林(沙棘)和草地共 6 种植被类型,整个种植期间未施肥,每个类型随机选取 3 个且间距 100 m 以上样地作为重复,每个样地内设置 1 个 10 m×10 m 的样方,共计 18 个。调查时测定和记录样地海拔、坡度、树种的胸径、树高和林下植被组成等信息,乔木林下基本无任何灌木,仅有少量的草本植物,样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

植被类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	乔木	灌木	林下草本
山杏	1 610~1 670	17	南	山杏(<i>Prunus sibirica</i> L.)		苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)、翻白草(<i>Potentilla discolor</i> Bunge)
刺槐	1 593~1 714	10	东南	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)		苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)、翻白草(<i>Potentilla discolor</i> Bunge)
刺槐+山杏	1 691~1 728	14	南	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) 山杏(<i>Prunus sibirica</i> L.)		苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)
山桃+柠条	1 592~1 613	8	南	山桃(<i>Prunus davidiana</i> (Carrière) Franch.)	柠条(<i>Caragana korshinskii</i> Kom.)	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)、苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、翻白草(<i>Potentilla discolor</i> Bunge)
沙棘	1 615~1 676	11	北		沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)、苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、白蒿(<i>Herba Artemisiae Sieversianae</i>)
草本	1 613~1 728	2	东南			苔草(<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)、苜蓿(<i>Medicago sativa</i> L.)、虎尾草(<i>Chloris virgata</i> Sw.)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)、翻白草(<i>Potentilla discolor</i> Bunge)、香青兰(<i>Dracocephalum moldavica</i> L.)

在选定的 6 种植被类型的 18 个样方内进行土壤样品的采集,每个样方均随机选取 3 个土壤取样点,用土钻钻取 0—100 cm 土层,按土壤剖面不同层次取

原状土(分别在 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 处分层取样),将采集的每个样地相同土层新鲜土壤混合均匀后放入塑封袋运回,风干、磨碎、过筛

后用于土壤 C、N、P 测定。设置 1 m 深土壤剖面,在每层用环刀采集 3 个重复样品,通过环刀法测定土壤体积质量及计算总孔隙度,烘干法测定土壤体积分数^[23]。土壤 C 采用重铬酸钾—外加热法测定,N 采用凯氏定氮法测定,P 采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法^[9]测定。

1.3 数据分析

土壤剖面碳储量的计算公式为^[24]:

$$\text{SOCS} = C \times \text{BD} \times E \times (1 - G) \times 10$$

式中:SOCS 为土壤碳储量(t/hm²);C 为土壤有机碳含量(g/kg);E 为土层厚度(m);BD 为土壤体积质量(g/cm³);G 为该层土壤直径>2 mm 砾石体积分数(%),由于黄土丘陵沟壑区的土壤以土为主,砾石体积分数很小,计算时忽略不计,故 G=0。

利用 SPSS 20.0 软件中单因素和 Duncan 法对不同植被类型生态化学计量特征和土壤碳储量差异进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),双因素方差分析植被类型和土层深度对生态化学计量特征和碳储量的影响。相关分析采用 Corrplot 包(R 4.0.5)Pear-

son 检验确定各植被类型间化学计量特征、土壤物理性质和 SOCS 的相互关系。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型各土层 C、N、P 及其化学计量特征差异

双因素方差分析(表 2)表明,植被类型和土层深度及其二者的交互效应对土壤 C、N 均存在极显著影响($p<0.001$),对 P 不存在显著影响。不同植被类型土壤 C、N 差异显著(图 1),土壤 C 和 N 分别为 19.74~35.11,1.74~3.19 g/kg,整体表现为随着土层的增加而下降,且 0—20 cm 土层明显高于其他土层,但具体土层间各植被类型存在显著差异。C 在 0—80 cm 土层均表现为刺槐+山杏林显著高于其他林地($p<0.05$),而草地显著低于其他林地($p<0.05$)。N 在各土层均表现为刺槐+山杏林为最高值,草地在各土层均为最低值且在 0—80 cm 差异显著($p<0.05$),刺槐林在 0—20 cm 显著高于刺槐+山杏林之外的其他林地($p<0.05$)。P 为 1.60~1.69 g/kg,在土层和植被类型间均无显著差异。

表 2 植被类型和土层深度对土壤 C、N、P 生态化学计量比及碳储量的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of vegetation types and soil depth on soil C, N, P contents, ecological stoichiometric ratio and carbon storage

因素	C	N	P	C : N	C : P	N : P	SOCS
植被类型	71.98***	74.87***	0.96	3.29**	50.79***	43.79***	62.02***
土层深度	1 249.66***	968.58***	1.57	25.28***	642.37***	418.91***	1 123.20***
植被类型×土层深度	7.23***	10.29***	0.12	1.65	4.87***	5.91***	5.47***

注: * 表示 $p<0.05$ 的显著性; ** 表示 $p<0.01$ 的显著水平; *** 表示 $p<0.001$ 的显著水平。

植被类型和土层深度对 C : N、C : P 和 N : P 均形成极显著影响($p<0.01$),二者的交互作用只对 C : P 和 N : P 形成极显著影响($p<0.001$)(表 2)。C : N、C : P、N : P 在不同植被类型间表现出不一致的规律(图 1)。C : N 在垂直分布上无明显的分布规律,但 0—40 cm 土层不同植被类型存在差异,具体表现为 0—20 cm 土层刺槐林和刺槐+山杏林显著低于山杏、山桃+柠条、沙棘林($p<0.05$),20—40 cm 土层刺槐林和山杏林显著低于山桃+柠条和沙棘林($p<0.05$)。C : P 随着土层的增加而降低,在 0—80 cm 土层刺槐+山杏林均为最大值,草地为最低值,且达到显著差异($p<0.05$)。表层土 N : P 高,深层土低,刺槐+山杏林在各土层均为显著最大值($p<0.05$),但只在 20—40,60—80 cm 土层达到显著差异($p<0.05$),且刺槐林显著高于除刺槐+山杏林的其他林地($p<0.05$)。

2.2 不同植被类型各土层碳储量差异

双因素方差分析(表 2)表明,植被类型和土层深度及其交互作用均对土壤 C 储量产生极显著影响($p<$

0.001)。由表 3 可知,SOCS 整体趋势随着土层的增加而降低,表层土(0—20 cm)表现最优,且随着土层的增加各植被类型间的差异在减小。各土层的 SOCS 均表现为刺槐+山杏林为最高值,而草地为最低值。0—20 cm 土层 SOCS 为 38.21~24.90 t/hm²,刺槐+山杏林的平均值显著高于其他林地($p<0.05$),草地的平均值显著低于其他植被类型($p<0.05$);20—40 cm 土层 SOCS 为 24.98~11.45 t/hm²,趋势与 0—20 cm 土层表现相似,刺槐+山杏林为显著最高,草地为显著最低($p<0.05$);40—60 cm 土层 SOCS 为 16.17~7.69 t/hm²,显著性表现与 0—40 cm 相同;60—80 cm 土层 SOCS 为 10.37~5.98 t/hm²,刺槐+山杏林与山杏、刺槐林差异不显著,但显著高于山桃+柠条、沙棘林和草地($p<0.05$);80—100 cm 土层 SOCS 为 8.56~6.28 t/hm²,刺槐+山杏林仅与山桃+柠条林存在显著差异($p<0.05$),草地与山杏、沙棘、山桃+柠条林无显著差异。不同植被类型 0—100 cm 土层总 SOCS 为刺槐+山杏>刺槐>山杏>沙棘>山桃+柠条>草地,刺槐+山杏林显著高于其他林地

($p<0.05$),山杏、刺槐、山桃+柠条与沙棘林不存在显著差异,草地则显著低于其他林地($p<0.05$)。

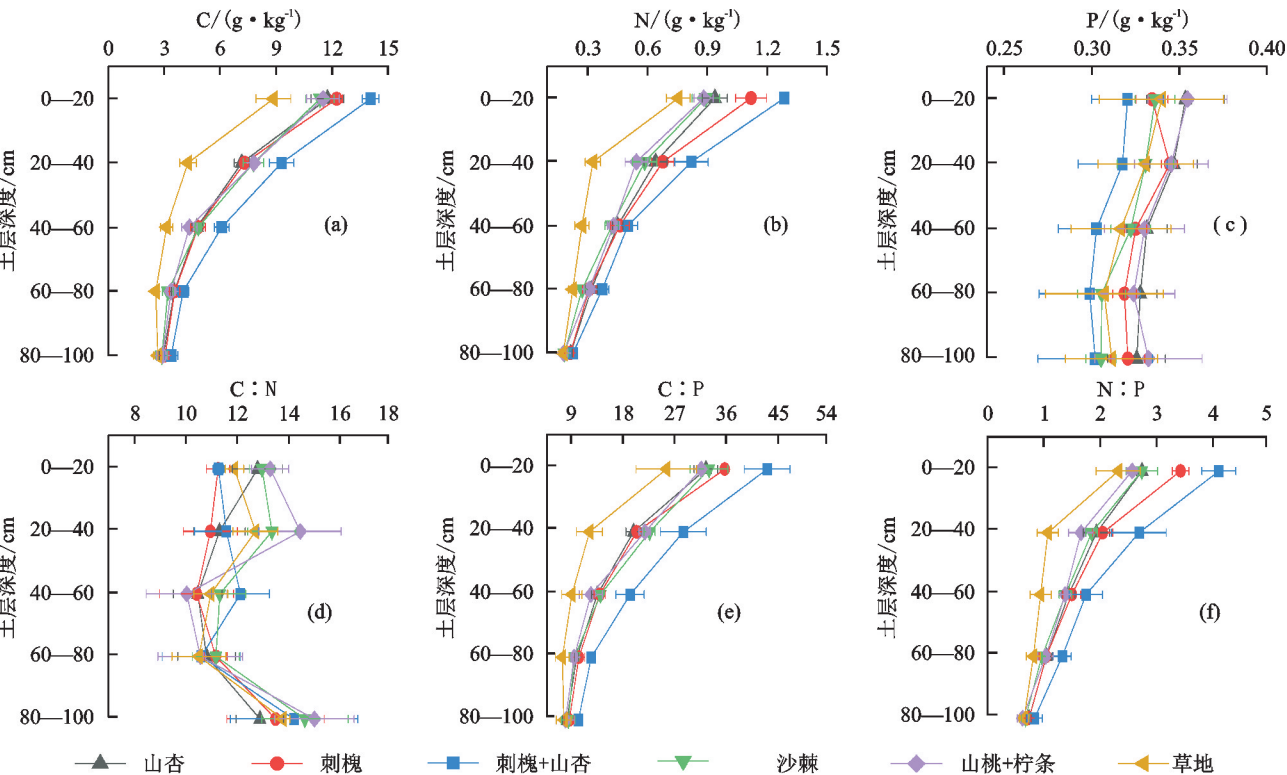


图 1 不同植被类型 C、N、P 及化学计量比

Fig.1 Soil C, N, P contents and stoichiometric characteristics under different vegetation types

表 3 不同植被类型土壤碳储量分配格局

Table 3 The distribution of soil carbon storage under different vegetation types

土层 深度/cm	土壤碳储量/(t·hm ⁻²)					
	山杏	刺槐	刺槐+山杏	山桃+柠条	沙棘	草地
0—20	32.53±2.43b	33.93±0.74b	38.21±1.40a	30.05±2.25b	31.65±2.80b	24.90±3.76c
20—40	19.55±1.04b	19.87±0.45b	24.98±1.72a	20.53±1.15b	21.30±0.44b	11.45±0.93c
40—60	12.72±0.77b	12.94±1.19b	16.17±1.25a	12.70±0.79b	11.47±1.08b	7.69±0.65c
60—80	9.21±0.45ab	9.33±0.84ab	10.37±0.81a	8.25±1.04b	8.65±0.83b	5.98±0.18c
80—100	7.50±0.70abc	7.86±0.61ab	8.56±0.87a	7.20±0.84bc	7.31±0.65abc	6.28±0.47c
0—100	82.03±3.99b	84.27±1.36b	97.32±1.79a	78.79±0.79b	79.70±2.45b	55.08±5.81c

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示相同土层不同植被类型间差异显著($p<0.05$)。

2.3 不同植被类型土壤物理性质-生态化学计量特征-碳储量的相关性分析

对各植被类型的土壤物理性质、生态化学计量比、SOCS 进行 Pearson 相关性分析(图 2)表明,各植被类型 SOCS 与 C、N、P、C:P 和 N:P 呈显著正相关($p<0.05$),且 SOCS 与土壤孔隙度(STP)和土壤含水量(SWC)呈显著正相关($p<0.05$)。不同植被类型土壤 C、N、P 与 C:P 和 N:P 均呈极显著正相关($p<0.001$),且与 STP 和 SWC 呈显著正相关($p<0.05$)。

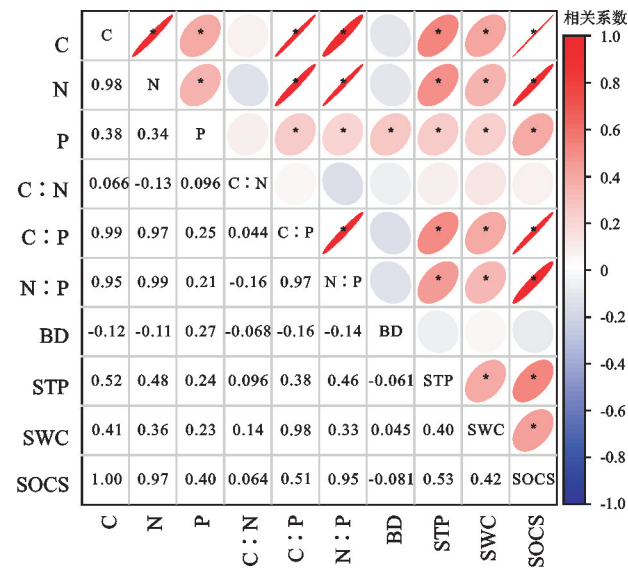
3 讨论

3.1 不同植被类型 C、N、P 及其化学计量特征的差异

土壤养分归还的主要来源是地表凋落物,植被凋

落物的归还量一定程度上决定着土壤 C、N、P,不同植被类型因凋落物量和分解速率不同而导致土壤养分存在差异^[25]。本研究发现,不同植被类型对土壤有不同程度的改良作用,乔木林地与灌木林地的 C、N 比草本表现更好,与朱秋莲等^[26]的研究结果相似,主要由于乔木林地和灌木林地相较草地拥有更大的植被覆盖度和生产力,复杂的林下组成结构有利于根系分泌物的产生,较为丰富的凋落物能为土壤补充更多的有机质,有助于土壤 C、N 的积累^[27],特别是刺槐+山杏混交林显著高于其他林地,这可能是由于不同种类的树种混交存在生态位的互补效应,有利于植物对光能、水分和养分等生存资源的充分利用,从而提高混交林的生产力和碳输入^[28]。除此之外,刺槐、

柠条和沙棘均为固氮植物,尤其刺槐和柠条作为豆科植物其根部的根瘤菌不仅能通过生物固氮增加土壤 N,而且也能为土壤增加有机质,从而使土壤富集较多的 C 和 N^[29]。土壤 P 在各植被类型间未表现出显著性差异,可能是由于 P 元素的形成具有沉积性,主要来源于岩石的风化,受土壤母质的影响较大,因而保持相对稳定^[10,30],且本研究中土壤 P 低于全球水平的 2.8 g/kg^[31],这可能是因为黄土高原水土流失严重,导致大量的 P 流失,因而 P 相对较低^[25]。土壤 C、N、P 在垂直土层分布的差异主要是由于不同植被类型因凋落物量、根系深度不同而影响土壤养分的吸收强度^[32]。本研究中各植被类型的 C 和 N 在表层显著高于其他土层,而且草地显著低于其他林地,与李鑫等^[33]对黄土高原土壤的研究结果一致。一是因为表层土壤的水热条件和透气状况较好,可以提高微生物的分解速率,进而有更多的养分进入土壤^[34];二是凋落物等有机残体富集在土壤表层,有机物输入量较大,但这种影响随着土层深度的增加而降低^[35]。土壤 P 在土层剖面变化幅度较小,主要是由于研究区域位于黄土高原干旱区,降水较少,在土壤中不易发生迁移^[30]。



注:BD 为土壤体积质量;STP 为土壤总孔隙度;SWC 为土壤体积分数。
图 2 土壤 C、N、P、生态化学计量及碳储量与物理性质的相关系数矩阵

Fig.2 Correlation coefficient matrix of soil C, N, P, ecological stoichiometric ratio, carbon storage and soil physical properties

土壤 C:N 是衡量土壤 C 和 N 平衡的一个敏感性指标,它可以通过影响微生物的代谢活动,进而影响土壤有机质的矿化过程^[36-37]。本研究中 0—40 cm

土层刺槐林和刺槐混交林土壤 C:N 显著低于其他林地,其他土层各植被下 C:N 没有显著性差异,与 TIAN 等^[38]和胡亚伟等^[23]的研究结果一致,是因为刺槐为固氮树种,可以通过固定大气中的氮气为生态系统提供额外的 N 素,增加土壤中的 N^[39-40]。研究^[41]表明,土壤 C:N 与土壤有机质分解速率呈负相关。本研究中,刺槐纯林和刺槐+山杏林中较低的 C:N,说明固氮树种提高土壤有机质的分解速率,增强土壤的活性。土壤 C:P 是 P 有效性高低的指标^[42],本研究中 0—80 cm 土层刺槐+山杏林土壤 C:P 显著高于其他林地,表明其土壤磷元素有效性较低,这是由于混交林有较高的生物量,植被生长过程中对磷需求较大^[43]。土壤 N:P 是植物生长所必需的矿质营养元素,也是生态系统中常见的限制性元素,土壤 N:P 在一定程度上间接预测群落养分的供给性水平和限制性水平^[10]。本研究中刺槐+山杏林地表层土 N:P 显著高于其他林地,表明混交林缓减土壤中氮素的限制,是因为刺槐是固氮树种,并且混交在一定程度上缓减相邻树种间对养分的竞争^[44]。土壤的 N:P 在土壤垂直土层上表现为随着土层的增加而降低的趋势,表明表层土壤相对于深层土壤氮限制状况缓减。一方面是由于表层土壤通气状况相对较好,具有固氮作用的微生物和植物根瘤菌分布在土壤表层,因而能够缓减表层土壤氮限制^[45];另一方面,可能是因为地表凋落物的分解,导致更多的养分回归到表层土壤中^[46]。

3.2 不同植被类型土壤 C 储量差异及其影响因素

本研究发现,不同的植被类型 SOCS 富集在土壤表层,具有明显的“表聚性”,即表层土壤的 C 质量分数明显高于深层土壤,主要是因为土壤表层凋落物覆盖、地上生物量较多及大量的根系生物量,凋落物分解产生有机质归还于土壤,通过养分循环进入土壤,因而大量的 SOC 在土壤表层形成和累积。本研究中,乔木林表现出最好的固碳能力,灌木林次之,草地最差,与李龙波等^[47]对乔灌草固碳能力的研究结果一致,可能是乔木林的树龄较大,根系发达,以及活性炭高等因素综合作用的结果^[48]。乔木林中刺槐+山杏的 SOCS 最高,均高于刺槐纯林和山杏纯林,混交林相较于纯林在固碳方面的优势已经在诸多研究^[3,5,11]中得到证实,原因是物种丰富度可以提高林分生产力,进而促进生态系统碳汇能力^[49]。混交林中由于树种功能性状的差异和生态位的互补效应,对阳光、养分和水分的竞争低于纯林,因而比纯林具有更高的生物量和碳输入^[28],导致刺槐+山杏混交林

的 SOCS 最高。

本研究结果表明,不同植被类型土壤 SOCS 均与 C、N、C:P 和 N:P 呈显著正相关,是因为黄土高原大部分地区受氮限制比较严重,通过植被恢复,尤其是具固氮作用的植物种植在一定程度上缓减生态系统的氮素限制,提高植被的生产力和土壤碳固持^[19,50]。土壤 SOCS 与 SWC 呈正相关,与苗蕾^[51]的研究结果相同,是因为土壤体积分数能够影响土壤通透性而导致的土壤微生物的数量与活性,使 C 的矿化与分解速率发生变化,进而影响 C 储量。另外,土壤 SOCS 与 STP 之间也存在正相关,是由于土壤团聚体的存在,凋落物和植物残体碳的输入为土壤提供更多的黏合剂,有利于土壤中小粒径的团聚体结合成更大粒径的团聚体,从而改善土壤结构,增加土壤孔隙度^[52]。与此同时,相对稳定的土壤大团聚的形成也在一定程度上保护土壤有机碳,减缓微生物的分解作用,维持碳库的增加^[53-54]。

4 结论

(1) 宁南山区不同植被类型中乔木林具有较高的 C 和 N,尤其是刺槐+山杏混交林显著增加 C、N,而 P 在各植被类型间未形成显著差异。

(2) 各植被类型的土壤 C 和 N 均随土层深度的增加而降低,但 P 在垂直土层剖面变化不大。

(3) 研究区的 6 种植被类型 C:N 在 40—100 cm 土层无明显差异,C:P 和 N:P 表现为刺槐+山杏混交林显著高于其他植被类型。

(4) 各植被类型的 SOCS 均随土层的增加而降低,与 C 相似,呈现表聚性,但刺槐+山杏混交林 SOCS 显著高于其他植被类型,在各土层均为最高值,其次是乔木纯林和灌木林及乔灌混交林,最后是草地。为了维护黄土高原脆弱的生态环境,宜优先考虑种植含有固氮树种的刺槐与山杏的混交林以最大限度提高固碳效益。

参考文献:

- [1] TANG B, ROCCI K S, LEHMANN A, et al. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(7): 1971-1983.
- [2] YE C L, HUANG W J, HALL S J, et al. Association of organic carbon with reactive iron oxides driven by soil pH at the global scale[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(1): e2021GB007128.
- [3] XIANG Y Z, LI Y, LUO X, et al. Mixed plantations enhance more soil organic carbon stocks than monocultures across China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: e153449.
- [4] 宋瑞朋,杨起帆,郑智恒,等.3 种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(12): 2283-2291.
- SONG R P, YANG Q F, ZHENG Z H, et al. Effects of three understory vegetation types on soil organic carbon and its components in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(12): 2283-2291.
- [5] YU Z J, WANG K B, LI J W, et al. Mixed plantations have more soil carbon sequestration benefits than pure plantations in China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 529: e120654.
- [6] 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: e149588.
- [7] 申继凯,黄懿梅,黄倩,等.黄土高原不同植被类型土壤微生物残体碳的积累及其对有机碳的贡献[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 124-132.
- SHEN J K, HUANG Y M, HUANG Q, et al. Accumulation of microbial necromass carbon and their contribution to soil organic carbon in different vegetation types on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 124-132.
- [8] 衣鹏慧,吴会峰,胡保安,等.黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10054-10064.
- YI P H, WU H F, HU B A, et al. Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage after returning farmland to forest on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10054-10064.
- [9] CAO Y, LI Y N, ZHANG G Q, et al. Fine root C:N:P stoichiometry and its driving factors across forest ecosystems in northwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: e140299.
- [10] 李明,秦洁,红雨,等.氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体碳、氮和磷生态化学计量学特征的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(12): 29-40.
- LI M, QIN J, HONG Y, et al. Effects of nitrogen addition on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Stipa baicalensis* grassland soil aggregates[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 29-40.
- [11] 李欣阳,张娟娟,周建云,等.宁南山区人工混交林叶片-

- 凋落物-细根生态化学计量特征[J].应用生态学报, 2023,34(11):2889-2897.
- LI X Y, ZHANG J J, ZHOU J Y, et al. Ecological stoichiometry of leaf-litter-fine roots in mixed plantations in mountainous area of Southern Ningxia, China [J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(11): 2889-2897.
- [12] 刘若莎,王冬梅.黄土高原高寒区不同人工林土壤养分及生态化学计量特征[J].北京林业大学学报,2021,43(1):88-95.
- LIU R S, WANG D M. Soil nutrients and ecostoichio-metric characteristics of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau[J].Journal of Beijing Forestry University,2021,43(1):88-95.
- [13] 田地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682-713.
- TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2021,45(7):682-713.
- [14] 吴贤忠,李毅,张世才,等.甘南高原城市面山绿化林土壤生态化学计量特征[J].甘肃农业大学学报,2023,58(6):145-154.
- WU X Z, LI Y, ZHANG S C, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics of urban green forest in Gannan Plateau [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2023,58(6):145-154.
- [15] 姜红梅,李明治,王亲,等.祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J].水土保持研究,2011,18(5): 166-170.
- JIANG H M, LI M Z, WANG Q, et al. Dynamics of soil nutrients under different vegetation types in the eastern Qilian Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(5):166-170.
- [16] 王佳璇,寇再兴.毛乌素沙地南缘不同植被类型土壤生态化学计量特征[J].农业与技术,2023,43(14): 105-108.
- WANG J X, KOU Z X. Soil eco-stoichiometric characteristics of different vegetation types in the southern margin of Mu Us Sandy Land [J]. Agriculture and Technology,2023,43(14):105-108.
- [17] TILMAN D, KNOPS J, WEDIN D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J].Science,1997,277(5330):1300-1302.
- [18] 王国梁,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持通报,2002,22(1):1-5.
- WANG G L, LIU G B, XU M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of Loess Hilly Region[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2002,22(1):1-5.
- [19] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017,32(1): 11-19.
- [20] ZHANG Q Y, JIA X X, WEI X R, et al. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China's Loess Plateau[J].Forest Ecology and Management,2020,461:e117911.
- [21] 张智勇,王瑜,艾宁,等.陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[J].北京林业大学学报, 2020,42(11):56-63.
- ZHANG Z Y, WANG Y, AI N, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in different vegetation types in loess region of northern Shaanxi Province, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020,42(11):56-63.
- [22] 于欢,魏天兴,陈宇轩,等.黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征[J].北京林业大学学报,2023, 45(12):100-107.
- YU H, WEI T X, CHEN Y X, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in Loess Hilly Region of northwestern China[J].Journal of Beijing Forestry University,2023, 45(12):100-107.
- [23] 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.
- [24] 张穗粒,盛茂银,王霖娇,等.西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J].生态学报,2023,43(20): 8476-8492.
- ZHANG S L, SHENG M Y, WANG L J, et al. Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(20):8476-8492.
- [25] 刘瑞龙,杨万勤,吴福忠,等.川西亚高山/高山森林凋落物分解过程中土壤动物群落结构及其多样性动态

- [J].应用与环境生物学报,2014,20(3):499-507.
- LIU R L, YANG W Q, WU F Z, et al. Soil fauna community structure and diversity during foliar litter decomposition in the subalpine/alpine forests of western Sichuan[J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2014,20(3):499-507.
- [26] 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 hillygully region[J].Acta Ecologica Sinica,2013,33(15):4674-4682.
- [27] XIANG T, QIANG F F, LIU G Q, et al. Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in loess hilly and gully areas[J].Forests, 2023,14(9):e1909.
- [28] FENG Y H, SCHMID B, LOREAU M, et al. Multi-species forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions [J]. Science, 2022, 376 (6595):865-868.
- [29] 罗婷,黄甫昭,李健星,等.广西漓江流域喀斯特地区植被不同恢复阶段植物优势种叶片和土壤的生态化学计量特征[J].植物资源与环境学报,2024,33(2):80-90.
- LUO T, HUANG F Z, LI J X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of plant dominant species leaf and soil at different restoration stages of vegetation in the karst area of the Lijiang River Basin in Guangxi[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2024,33 (2):80-90.
- [30] 崔高阳,曹扬,陈云明.陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J].植物生态学报,2015,39(12):1146-1155.
- CUI G Y, CAO Y, CHEN Y M. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry across components of forest ecosystem in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39 (12): 1146-1155.
- [31] 全国土壤普查办公室.中国土种志[M].1卷.北京:农业出版社,1993.
- National Land Resources Investigation Office. Chinese soil record[M].1 Roll. Beijing: Agricultural Publishing House,1993.
- [32] 魏孝荣,邵明安.黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J].生态学报,2007,27(2):603-612.
- WEI X R, SHAO M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the Gully Region watershed of the Loess Plateau[J].Acta Ecologica Sinica,2007,27 (2):603-612.
- [33] 李鑫,曾全超,安韶山,等.黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J].环境科学,2015,36(3):1084-1091.
- LI X, ZENG Q C, AN S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation types of Zhifanggou watershed on the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science, 2015, 36 (3):1084-1091.
- [34] 彭少麟,刘强.森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J].生态学报,2002,22(9):1534-1544.
- PENG S L, LIU Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(9):1534-1544.
- [35] 马寰菲,解梦怡,胡汗,等.秦岭不同海拔森林土壤-植物-凋落物化学计量特征对土壤氮组分的影响[J].生态学杂志,2020,39(3):749-757.
- MA H F, XIE M Y, HU H, et al. Effects of stoichiometric characteristics of soil-plant-litter on soil nitrogen components in different forests along an elevational gradient of Qinling Mountains[J].Chinese Journal of Ecology,2020,39(3):749-757.
- [36] 李树斌,周丽丽,陈宝英,等.亚热带树种转换对林地土壤碳氮磷计量比的影响[J].森林与环境学报,2019,39(6):575-583.
- LI S B, ZHOU L L, CHEN B Y, et al. Effects of tree species transition on stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus in subtropical areas[J].Journal of Forest and Environment,2019,39(6):575-583.
- [37] 李子阳,刘伟,李春培,等.紫色土丘陵区退耕还林对坡地土壤碳氮空间分布的影响[J].环境科学,2024,45(7):4206-4217.
- LI Z Y, LIU W, LI C P, et al. Effects of “Grain for Green” on the spatial distribution of soil carbon and nitrogen in purple hilly area of China[J].Environmental Science,2024,45(7):4206-4217.
- [38] TIAN H Q, WANG S Q, LIU J Y, et al. Patterns of soil nitrogen storage in China[J].Global Biogeochemical Cycles,2006,20(1):eGB1001.
- [39] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J].Biogeochemistry,2007,85(3):235-252.
- [40] 何博.巨桉纯林皆伐后营造混交林对土壤生态酶及化学计量特征初期的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2023.
- HE B. Effects of planting mixed forests after clear cutting of *Eucalyptus grandis* pure forests on soil ecological enzyme activities and stoichiometry in the early

- stage of afforestation [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [41] TIAN L M, ZHAO L, WU X D, et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 192-202.
- [42] 赵雅洁, 张静, 宋海燕, 等. 不同土壤厚度、水分和种植方式对喀斯特两种草本凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6549-6558.
- ZHAO Y J, ZHANG J, SONG H Y, et al. Effects of different soil thickness, water and planting patterns on the litter mass loss and stoichiometry characteristics of two herbs in the karst regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6549-6558.
- [43] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.
- ZENG Q C, LI X, DONG Y H, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [44] RAY T, DELORY B M, BEUGNON R, et al. Tree diversity increases productivity through enhancing structural complexity across mycorrhizal types [J]. Science Advances, 2023, 9(40): eadi2362.
- [45] 徐国荣, 马维伟, 宋良翠, 等. 植被不同退化状态下杂海湿地土壤氮含量及酶活性特征[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8917-8927.
- XU G R, MA W W, SONG L C, et al. Characteristics of soil nitrogen content and enzyme activity in Gahai wetland under different vegetation degradation conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8917-8927.
- [46] ZHANG J J, LI X Y, CHEN M, et al. Response of plant, litter, and soil C : N : P stoichiometry to growth stages in *Quercus* secondary forests on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Forestry Research, 2023, 34(3): 595-607.
- [47] 李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 等. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 441-449.
- LI L B, TU C L, ZHAO Z Q, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its isotopic composition for soil profiles of Loess Plateau under different vegetation conditions[J]. Earth and Environment, 2011, 39(4): 441-449.
- [48] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2253-2258.
- LIAO H K, LONG J. Variation of soil organic carbon under different vegetation types in karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2253-2258.
- [49] GONG C, TAN Q Y, LIU G B, et al. Mixed-species plantations enhance soil carbon stocks on the Loess Plateau of China[J]. Plant and Soil, 2021, 464(1): 13-28.
- [50] ZHANG W, LIU W C, XU M P, et al. Response of forest growth to C : N : P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 280-289.
- [51] 苗蕾. 太行山南麓山区典型森林类型土壤有机碳特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- MIAO L. Characteristic of soil organic carbon of typical forest in Taihang Mountains' southern foot forest [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [52] REGELINK I C, STOOF C R, ROUSSEVA S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. Geoderma, 2015, 247: 24-37.
- [53] LU X F, HOU E Q, GUO J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [54] WANG B R, ZHAO X D, LIU Y, et al. Using soil aggregate stability and erodibility to evaluate the sustainability of large-scale afforestation of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 450: e117491.