

# 黄土高原不同植被群落多样性与 土壤有机碳密度关系研究

廖娇娇<sup>1</sup>, 窦艳星<sup>2</sup>, 安韶山<sup>1</sup>

(1.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; 2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为了探明黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系,在黄土高原纸坊沟小流域选取几种典型的植被群落(刺槐 *Robinia pseudoacacia*、铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*、长芒草 *Stipa bungeana*、狼牙刺 *Sophora davidii* 和柠条 *Caragana korshinskii*),野外调查了植被多样性,同时室内测定 0—100 cm 土壤有机碳含量、密度以及相关土壤环境因子。结果显示:(1) 不同植被群落多样性指数(Margalef 丰富度、McIntosh 均匀度和 Shannon-Wiener 多样性)表现出相同的变化特征。柠条和刺槐群落差异不显著( $p>0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p<0.05$ ),长芒草和狼牙刺群落最高,二者之间差异不显著( $p>0.05$ ),显著高于其他植物群落( $p<0.05$ );不同植物群落 Simpson 优势度指数呈现出相反的变化趋势,刺槐>柠条>铁杆蒿>狼牙刺>长芒草。(2) 不同植物群落土壤全氮含量、微生物量碳、微生物量氮、速效养分(硝态氮、铵态氮、速效磷)大致表现为相同的变化特征,均表现为长芒草和狼牙刺群落高于其他群落,而柠条和刺槐群落土壤养分含量低于其他植物群落,不同植物群落土壤 pH 值表现出相反的变化特征。(3) 在垂直方向,土壤有机碳密度随土层深度的增加而逐渐减小,80—100 cm 土层土壤有机碳密度最低( $p<0.05$ ),0—20 cm 土层土壤有机碳密度最高,表现出明显的“表聚性”,相同土层土壤有机碳密度大致表现为长芒草和狼牙刺群落高于其他植物群落。(4) 相关性分析显示,不同植物群落多样性指数与有机碳和有机碳密度呈显著或极显著的正相关。冗余分析显示,土壤 pH 值和微生物量碳含量是主导植被多样性和土壤有机碳密度重要驱动因子;双因素分析表明植被类型和土层深度对土壤有机碳含量和密度具有显著的影响( $p<0.05$ )。

**关键词:**黄土高原;植被类型;群落多样性;土壤有机碳密度

中图分类号:S153.16

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0075-08

## Relationship Between Vegetation Community Diversity and Soil Organic Carbon Density on the Loess Plateau

LIAO Jiaojiao<sup>1</sup>, DOU Yanxing<sup>2</sup>, AN Shaoshan<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to further explore the effects of vegetation community diversity on the vertical distribution of soil organic carbon on the Loess Plateau, five main vegetation types (*Stipa bungeana*, *Sophora viciifolia*, *Artemisia sacrorum*, *Caragana korshinskii*, and *Robinia pseudoacacia*) in Zhifanggou watershed were selected to investigate the vegetation diversity, and soil organic carbon content, density in 0—100 cm soil layer and related soil environmental factors were measured. The results showed that: (1) Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and McIntosh evenness index of different vegetation types decreased in the order: *Stipa bungeana* > *Sophora viciifolia* > *Artemisia sacrorum* > *Caragana korshinskii* > *Robinia pseudoacacia*; there was no significant difference between *Stipa bungeana* and *Sophora viciifolia* ( $p<0.05$ ), which was significantly higher than that of other plant communities ( $p>0.05$ ), but there was no

收稿日期:2021-08-16

修回日期:2021-08-26

资助项目:国家自然科学基金项目(41671280);国家重点研发计划项目(2016YFA0600801);中国科学院国际伙伴计划项目(161461KYSB20170013)

第一作者:廖娇娇(1988—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事生态学和水土保持研究。E-mail:jiaojiao\_liao@163.com

通信作者:安韶山(1972—),男,宁夏固原人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤生态学及水土保持效益评价研究工作。E-mail:shan@ms.iswc.ac.cn

significant difference between *Caragana korshinskii* and *Robinia pseudoacacia* communities ( $p < 0.05$ ), which was significantly lower than that of other plant communities ( $p > 0.05$ ); the Simpson dominance index of different plant communities showed an opposite trend, and followed the order: *Stipa bungeana*  $<$  *Sophora viciifolia*  $<$  *Artemisia sacrorum*  $<$  *Caragana korshinskii*  $<$  *Robinia pseudoacacia*; (2) different plant communities of soil total nitrogen, available phosphorus, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen were consistent with the basic pattern, these indices in *Stipa bungeana* and *Sophora viciifolia* communities were greater than those of the rest of the communities, and soil nutrient contents of *Caragana korshinskii* and *Robinia pseudoacacia* were lower than other plant communities, while soil pH showed the opposite change tendency; (3) the soil organic carbon density was the highest in the 0—20 cm layer, and gradually decreased with the increase of soil depth; the soil organic carbon density in the 80—100 cm layer was significantly lower than that in other soil layers ( $p < 0.05$ ), and the soil organic carbon density in the same soil layer was generally higher in *Stipa bungeana* and *Sophora viciifolia* than other communities; (4) correlation analysis showed that Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, Cody index and Sorenson index of coniferous mixed forest, coniferous and broad-leaved mixed forest and deciduous forest had significant or extremely significant positive correlation with soil organic carbon and organic carbon density; from the absolute value of correlation coefficient, the correlation coefficient with organic carbon was higher than that of organic carbon density. The results of redundancy analysis showed that soil pH value and microbial biomass carbon content were the main driving factors of vegetation diversity and soil organic carbon density. Two-factor analysis showed that vegetation type and soil depth had significant effects on soil organic carbon content and density ( $p < 0.05$ ).

**Keywords:** Loess Plateau; vegetation type; community diversity; soil organic carbon density

土壤在陆地生态系统中发挥着重要作用,土壤有机碳(SOC)调节着陆地生态系统碳的平衡,是全球碳循环的重要组成部分<sup>[1,2]</sup>;据不完全统计,陆地生态系统土壤碳储量大约是植物碳储量的3倍,是大气碳储量的2倍<sup>[3]</sup>。在全球范围内,对于0—30 cm深度的土层范围内,土壤碳储量超过684 Pg,而在100 cm深度的土层范围内,碳储量超过1 462 Pg<sup>[4]</sup>。植被群落结构及多样性、土壤水热条件、环境因子等交互作用下,SOC得以长期积累,进而形成了SOC的垂直分布特征,因此,深层SOC在生态系统碳循环中起着重要作用<sup>[5-8]</sup>,开展深层SOC垂直分布特征研究,对于合理开发土地资源及环境的保护尤为有利,也是探究陆地生态系统深层碳循环的重点之一。

在我国生态环境脆弱的黄土高原,植被恢复状况将直接制约着生态系统服务功能,植被恢复对该区域的生态环境保护起着重要作用。近年来,随着退耕工程的实施,黄土高原植被绿度得到了极大的提高,进而植被群落结构发生了巨大的变化,土壤养分状态和土壤微生物群落结构等相应的改变,改变了深层土壤有机碳的固存<sup>[9-11]</sup>。大量学者从多个角度探究了该区域植被结构组成与土壤碳含量之间的关系,并对土壤有机碳储量开展了大量研究,得到的结果也不尽一致。比如,

李裕元等认为黄土高原林地恢复并没有显著改土壤有机碳含量<sup>[12]</sup>;张宏等以洞子沟流域为研究对象,通过对比人工林与原始林得知,人工林比原始林的土壤碳储量较小<sup>[13]</sup>;孟国欣等选取晋西黄土区退耕地,通过对植被群落结构与有机碳之间的关系对比分析可知,对于0—120 cm土层,土壤有机碳含量受到植被类型的影响<sup>[14]</sup>;徐香兰等通过实证研究后认为,如果对15°以上的坡耕地进行退耕,土壤有机碳储量将提高23%左右<sup>[15]</sup>;在黄土丘陵区而言,植被类型的差异对土壤有机碳储量的影响尤为重要,开展黄土丘陵区不同植被类型深层土壤有机碳储量的研究是合理评估陆地生态系统碳储量的关键。

当前,大量学者从植被类型、土地利用及自然环境等方面研究了黄土高原植被恢复过程中土壤碳含量的变化,尤其是空间异质性分布及其环境影响因子<sup>[12-15]</sup>。在不同的小流域,土壤有机碳分布也不尽一致,且受到植被类型的影响,然而关于这方面的研究相对较少,尤其是植被群落结构对深层土壤有机碳的作用机理。基于此,本研究在黄土高原纸坊沟小流域选取几种典型的植被群落(刺槐 *Robinia pseudoacacia*、铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*、长芒草 *Stipa bungeana*、狼牙刺 *Sophora davidii* 和柠条 *Caragana*

*korshinskii*),调查了植被多样性、测定 0—100 cm 土壤有机碳含量、密度以及相关土壤环境因子,探究不同植被类型下深层土壤有机碳储量及其环境驱动因子,为黄土高原植被恢复过程中土壤有机碳储量定量估算提供科学基础,对于科学认识黄土高原土壤碳库及其服务我国的“双碳”战略具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原纸坊沟流域是延河流域的支流之一,主要流经地形复杂的黄土丘陵沟壑区,该流域分布在纸

坊沟等 3 个自然村,位于延安市安塞县境内,该流域呈现出明显的南北狭长分布特点,最低海拔为 1 010 m,最高海拔为 1 432 m,面积约为 8.2 km<sup>2</sup>;受地理分布因素的影响,呈现出典型的半干旱季风气候,综合纸坊沟流域 20 a 的气象资料,年均温达到 8.8℃,年日照达 2 400 h。从图 1 可知,该区超过 60%的降雨量主要集中在 7—9 月,并且降雨的月份分布不均;此外,该区域以黄绵土为主。自从 20 世纪的“退耕工程”以来,该区域脆弱的生态得以有效改善。植被种类丰富和多样化,优势人工物种有:柠条、刺槐、沙棘;优势自然物种有:白羊草、铁杆蒿、长芒草、狼牙刺等<sup>[16]</sup>

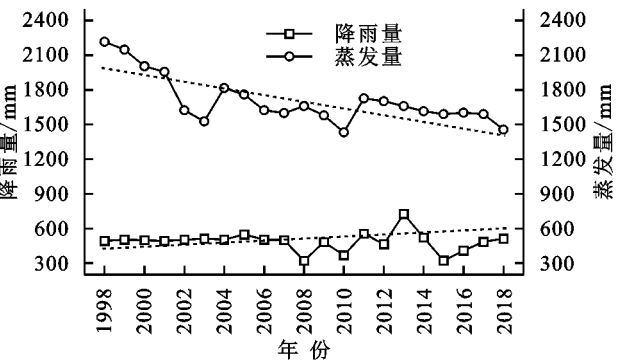
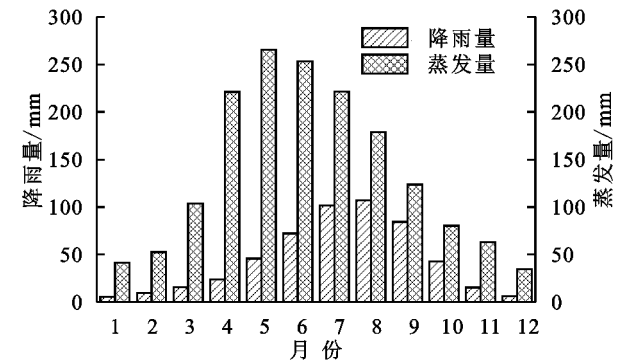


图 1 纸坊沟流域近 20 a 降雨量和蒸发量

1.2 植被群落结构调查

2016 年 7 月开始开始进行植被样地的调查和统计,在纸坊沟流域选取刺槐、铁杆蒿、长芒草、狼牙刺和柠条几种植被群落,进行了连续 3 个月的调查和采样工作。每种植被类型选取 3 个重复样地(每个样地面积为 100 m×100 m),然后在每个样地设置 5 个样

方,样方的设置结合方精云等的统计方法<sup>[17]</sup>,林地、灌丛样方的长、宽分别为 10 m,3 m,草本样方长、宽设置为 1 m,然后记录和描述植被群落的主要特征,然后统计各样方不同植被的高度、盖度和多度。不同植被群落结构统计见表 1。

表 1 坊沟流域不同植被群落样地基本描述

样地类型	植被群落	纬度 N	经度 E	海拔高度/m	优势种	其他物种
TGH	铁杆蒿	36°44'22.01"	109°15'23.56"	1124	铁杆蒿	胡枝子、长芒草
CMC	铁杆蒿	36°43'22.29"	109°14'39.67"	1348	长芒草	铁杆蒿、猪毛蒿
CH	刺槐	36°43'56.05"	109°15'18.10"	1335	刺槐	杠柳、悬钩子
NT	柠条	36°43'54.22"	109°15'29.74"	1298	柠条	铁杆蒿、阿尔泰狗娃花
LYC	狼牙刺	36°44'44.16"	109°14'40.02"	1269	狼牙刺	长芒草、胡枝子

(1) 不同植被群落 α 多样性,计算如下<sup>[17]</sup>:  
Shannon-Wiener 指数  $H = -\sum(P_i \ln P_i)$   
Margalef 指数  $S = (N - 1) / \ln N$   
Simpson 指数  $D = 1 - \sum(P_i)^2$   
重要值  $P_i = (\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对盖度}) / 3$ ,  $N$  代表样方内物种数,林地的多样性指数用林地植被表示。  
(2) 不同植被群落 β 多样性包括 Cody, Sorenson 指数<sup>[18]</sup>,计算如下:  
Cody 指数  $C = (G + L) / 2$   
Sorenson 指数  $C_s = 2j / (a + b)$

式中: $a$  代表样方 1 的物种数; $b$  代表样方 2 的物种数; $G$  和  $L$  分别代表两个样方中增加的物种数目和减少的物种数目; $j$  两个样方中共有的物种数。

1.3 土壤采集与测定

在每个样方内(合计 5×3×5=75 个样方),采用土钻取样(直径为 2.5 cm),土壤样品的采集采用“S”型随机取样的方式,采样的深度为 0—100 cm,分为 5 个土层,每 20 cm 间隔采样,然后充分混合土壤样品(合计 75×5=375 个土壤样品);将采集的土壤样品过 2 mm 筛后将其分为两部分:其中一部分置于保温箱内带回实验室,温度保持在 4℃,并及时测定微生

物量碳和氮;另一部分土壤样品带回实验室自然风干,测定土壤 pH 值、养分指标和理化性质等。

在采集土壤样品的同时,挖取 0—100 cm 的土壤剖面,用 100 cm<sup>3</sup> 的环刀采集并测定土壤容重。土壤有机碳密度计算公式如下<sup>[19]</sup>:

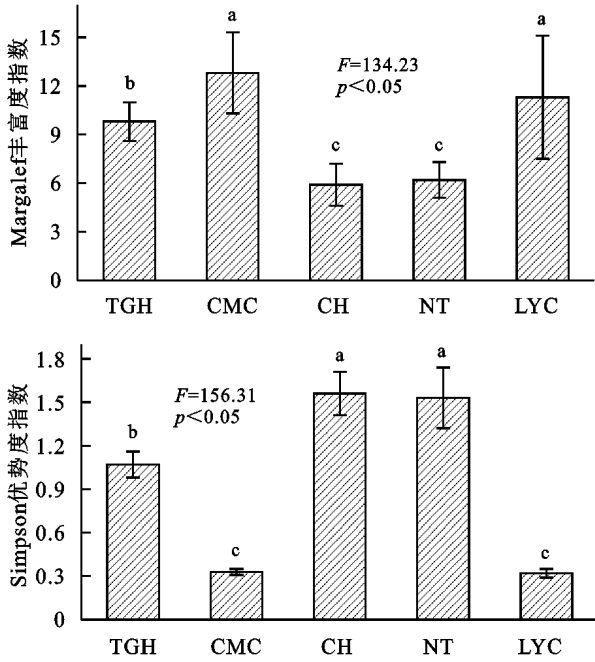
$$SOC = \sum_{i=1}^n SOC_i \times BD_i \times H_i \times (1 - R_i / 100) / 10$$

式中:BD<sub>i</sub> 和 H<sub>i</sub> 表示第 i 层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)和土层深度(cm);土壤有机碳密度的单位为 Mg C/hm<sup>2</sup>。

分别采用重铬酸钾—外加加热氧化法、钼锑抗—比色法、半微量凯氏定氮法、氯仿熏蒸浸提法测定土壤有机碳(g/kg)、有效磷(mg/kg)、硝态氮(mg/kg)/铵态氮(mg/kg)/全氮(g/kg)和微生物量碳和氮含量(mg/kg)<sup>[20]</sup>;所有指标均测定 3 次以后取平均值,以降低试验误差。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010.0 进行数据的编制,采用 SPSS 21.0 进行单因素方差检验差异显著性( $p < 0.05$ );



注:不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

2.2 不同植被群落 β 多样性

由图 3 可知,不同植物群落 Cody 指数均表现为:狼牙刺>长芒草>铁杆蒿>柠条>刺槐,其中长芒草和狼牙刺群落 Cody 指数差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著高于其他植物群落( $p < 0.05$ ),刺槐和柠条群落差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p < 0.05$ )。不同植物群落 Sorenson 指数呈相反的变化趋势,大致表现为柠条>刺槐>铁杆蒿>长芒草>狼牙刺,其中柠条和刺槐群落 Soren-

CANOCO 4.5 绘制土壤有机碳密度和环境因子的排序图。Pearson 相关系数法检验植被多样性与有机碳和有机碳密度的关系,Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被群落 α 多样性

由图 2 可知,不同植被群落多样性指数(除了 Simpson 优势度指数)表现出相似的变化特征,大致呈现出:长芒草>狼牙刺>铁杆蒿>柠条>刺槐,其中长芒草和狼牙刺群落差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著高于其他植物群落( $p < 0.05$ ),柠条和刺槐群落差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p < 0.05$ );不同植物群落 Simpson 优势度指数呈现出相反的变化趋势,其中刺槐和柠条群落差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著高于其他植物群落( $p < 0.05$ );狼牙刺和长芒草群落差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p < 0.05$ )。

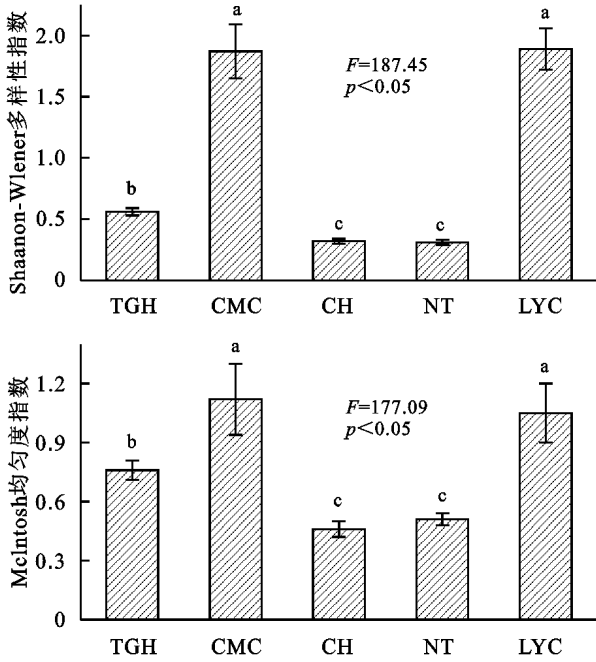


图 2 不同植被类型 α 多样性统计

son 指数差异不显著( $p > 0.05$ ),二者显著高于其他植物群落( $p < 0.05$ )。

2.3 不同植被群落土壤养分特征

表 2 显示了不同植被类型土壤养分特征,由表可知,不同植物群落土壤全量养分、有效养分和微生物量大致表现相同的变化规律,基本表现为长芒草和狼牙刺群落高于其他群落,而柠条和刺槐群落土壤养分含量低于其他植物群落;不同植物群落土壤 pH 值呈相反的变化趋势;而土壤全磷含量差异均不显著( $p > 0.05$ )。



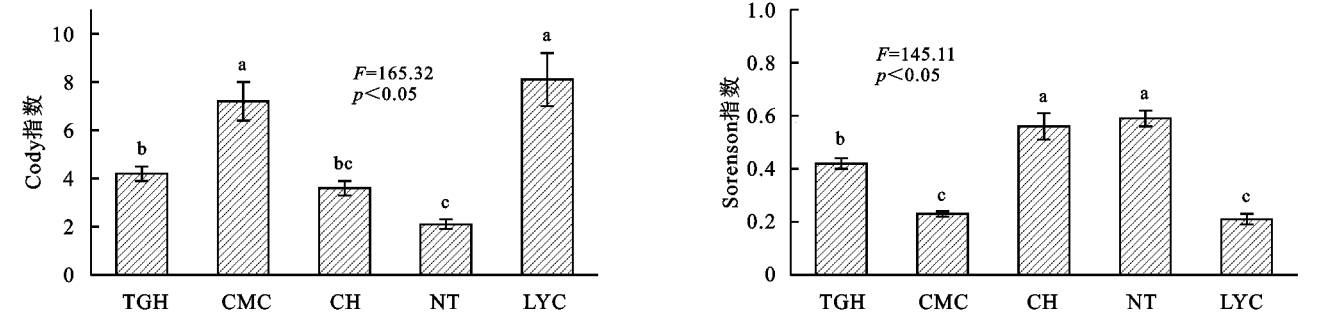


图 3 不同植被群落  $\beta$  多样性统计

表 2 不同植被群落土壤养分特征

植被群落	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	硝态氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	铵态氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量碳/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH 值
TGH	$0.83 \pm 0.05\text{a}$	$22.47 \pm 2.24\text{bc}$	$1.34 \pm 0.19\text{b}$	$33.02 \pm 3.24\text{b}$	$49.23 \pm 5.34\text{b}$	$233.01 \pm 26.98\text{b}$	$62.31 \pm 6.24\text{b}$	$6.51 \pm 0.31\text{c}$
CMC	$0.84 \pm 0.03\text{a}$	$25.36 \pm 1.58\text{a}$	$1.52 \pm 0.26\text{a}$	$35.26 \pm 2.03\text{a}$	$56.39 \pm 3.58\text{a}$	$256.98 \pm 30.25\text{a}$	$75.36 \pm 5.21\text{a}$	$6.34 \pm 0.36\text{c}$
CH	$0.79 \pm 0.06\text{a}$	$23.16 \pm 2.26\text{b}$	$1.05 \pm 0.24\text{c}$	$26.58 \pm 3.01\text{d}$	$43.02 \pm 6.35\text{c}$	$195.36 \pm 36.32\text{c}$	$56.03 \pm 3.59\text{c}$	$8.46 \pm 0.38\text{a}$
NT	$0.86 \pm 0.05\text{a}$	$16.25 \pm 1.69\text{d}$	$1.01 \pm 0.13\text{c}$	$29.54 \pm 2.16\text{c}$	$35.67 \pm 3.46\text{d}$	$184.56 \pm 26.35\text{d}$	$55.26 \pm 6.32\text{c}$	$8.67 \pm 0.45\text{a}$
LYC	$0.82 \pm 0.03\text{a}$	$20.89 \pm 2.15\text{c}$	$1.32 \pm 0.25\text{b}$	$31.59 \pm 3.16\text{bc}$	$47.35 \pm 4.02\text{b}$	$229.89 \pm 35.46\text{b}$	$63.58 \pm 5.78\text{b}$	$6.69 \pm 0.27\text{c}$

2.4 不同植被群落土壤有机碳密度垂直分布特征

由图 4 可知,在垂直方向,不同植物群落 0—20 cm 土层土壤有机碳密度最高,随着土层增加而逐渐减小,80—100 cm 土层有机碳密度最低,显著低于其他土层( $p < 0.05$ ),相同土层土壤有机碳密度大致表

现为长芒草和狼牙刺群落高于其他植物群落,而柠条和刺槐群落土壤有机碳密度低于其他植物群落。由图 5 可知,土壤有机碳密度占比最高的在 0—20 cm 土层,其中大致表现为狼牙刺和长芒草群落占比最高,铁杆蒿群落次之,刺槐和柠条群落占比较低。

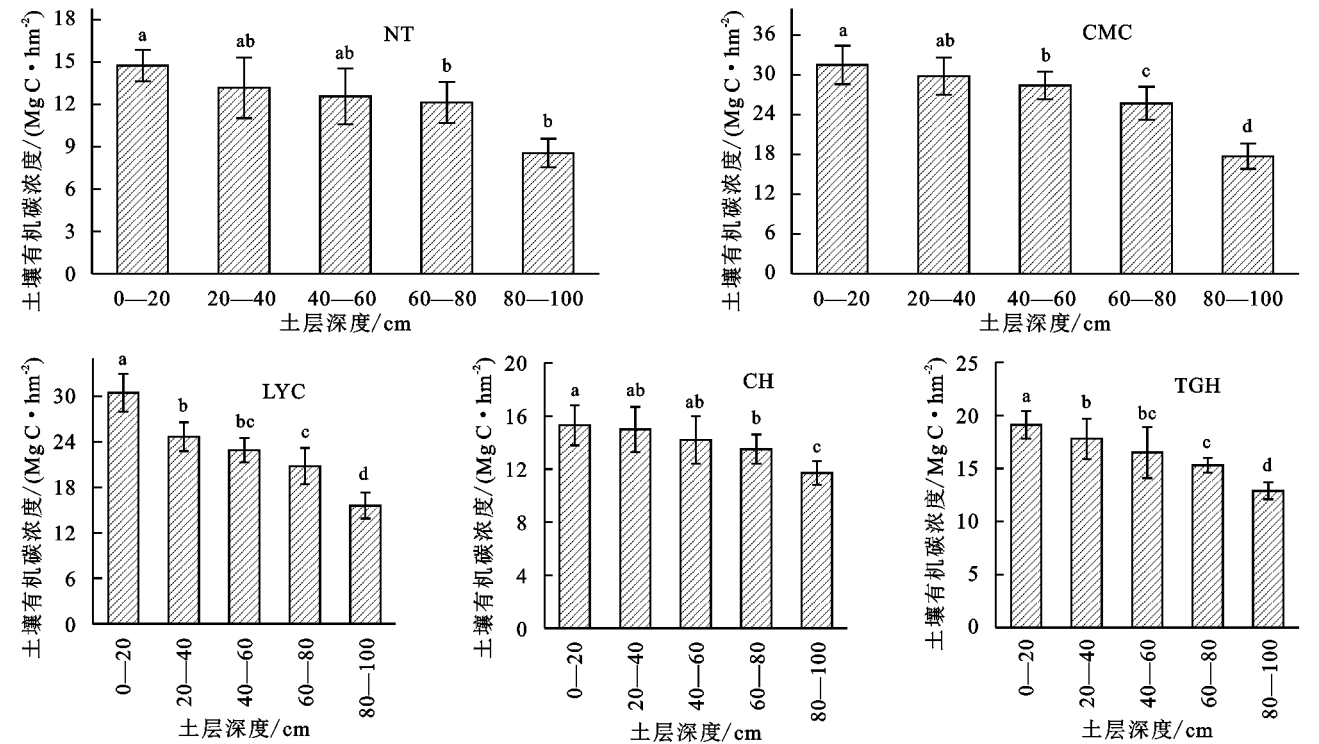


图 4 不同植被群落土壤有机碳密度垂直分布特征

2.5 植被群落多样性与有机碳和有机碳密度相关性关系

表 3 是 Pearson 相关性检验的结果,由表可知:对于  $\alpha$  多样性,不同植物群落土壤有机碳含量和密度

与多样性指数有显著/极显著的相关关系( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ),与均匀度指数和优势度指数没有显著的相关关系( $p > 0.05$ );长芒草、铁杆蒿、狼牙刺、刺槐丰富度指数与土壤有机碳含量和密度均有显著/极显著的

相关关系( $p<0.05$ ,  $p<0.01$ )。

对于  $\beta$  多样性, Sorenson 指数与土壤有机碳和有机碳密度没有显著的相关关系( $p>0.05$ ); 除了柠条群落, 不同植物群落 Cody 指数与土壤有机碳含量和密度均有显著/极显著的相关关系( $p<0.05$ ,  $p<0.01$ )。整体来看, 植物群落多样性指数与有机碳密度的相关系数高于与有机碳的相关系数, 并且长芒草和狼牙刺群落的相关系数绝对值高于刺槐和柠条群落。

## 2.6 土壤环境因子对土壤有机碳密度—植被多样性的冗余分析

土壤环境因子对土壤有机碳密度—植被多样性的冗余分析表明(表 4), 在排序的第一轴, 土壤环境因子能够很好的解释土壤有机碳密度和植被多样性, 其中解释率达到 86.34%。进一步的排序图分析可知

(图 6), 土壤有机碳密度与丰富度指数和多样性指数呈显著正相关关系, 与土壤全磷含量没有显著相关关系, 与土壤 pH 值呈显著负相关关系。这一结果支持了相关分析, 说明了土壤 pH 值和微生物量碳含量是主导植被多样性和土壤有机碳密度重要驱动因子。

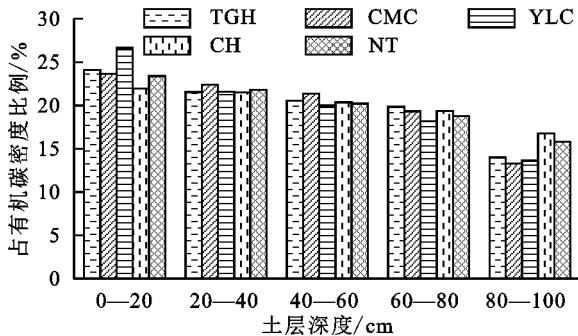


图 5 不同植被群落土壤有机碳密度在土层中的占比

表 3 植被多样性与有机碳和有机碳密度的关系

项目		$\alpha$ 多样性				$\beta$ 多样性	
		McIntosh 指数	Simposon 指数	Shannon-Wiener 指数	Margalef 指数	Sorenson 指数	Cody 指数
TGH	有机碳含量	-0.312	0.054	0.512*	0.511*	-0.322	0.612*
	有机碳密度	-0.244	0.133	0.545*	0.562*	-0.201	0.609*
CMC	有机碳含量	0.047	0.129	0.745**	0.702**	-0.345	0.727**
	有机碳密度	-0.112	0.208	0.709**	0.678*	-0.401	0.709**
CH	有机碳含量	0.034	0.154	0.532*	0.543*	-0.213	0.543*
	有机碳密度	-0.122	0.245	0.609*	0.501*	-0.078	0.552*
NT	有机碳含量	-0.256	0.321	0.578*	0.478	0.109	0.404
	有机碳密度	-0.209	0.401	0.507*	0.432	0.199	0.367
LYC	有机碳含量	-0.156	0.221	0.723**	0.655*	-0.214	0.598*
	有机碳密度	-0.209	0.118	0.701**	0.678*	-0.205	0.544*

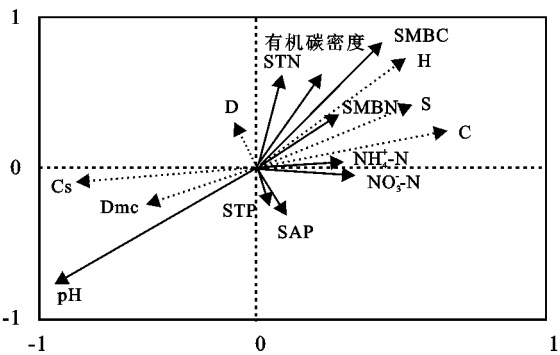
注: \*\* 相关性在 0.01 水平上显著(双尾), \* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

表 4 土壤环境因子对土壤有机碳密度—植被多样性的冗余分析

排序轴	特征值	解释率	特征值总和
1	0.765	86.34	1.00
2	0.298	92.32	—
3	0.034	98.07	—
4	0.015	100.00	—

## 2.7 植被类型和土层深度对土壤有机碳含量和密度的影响

交互作用分析显示(表 5), 植被类型和土层深度对土壤有机碳含量和密度有显著影响, 其中植被类型和土层深度对土壤有机碳含量具有显著影响( $p<0.05$ ), 植被类型 $\times$ 土层深度对土壤有机碳含量具有显著影响( $p<0.05$ ); 植被类型和土层深度对土壤有机碳密度具有极显著影响( $p<0.01$ ), 植被类型 $\times$ 土层深度对土壤有机碳含量具有极显著影响( $p<0.01$ )。总体来看, 植被类型和土层深度对土壤有机碳密度的影响大于对土壤有机碳含量的影响。



注: S 代表 Margalef 丰富度指数; H 代表 Shannon-Wiener 指数; Dmc 代表 McIntosh 均匀度指数; D 代表 Simpson 优势度指数; C 代表 Cody 指数; Cs 代表 Sorenson 指数。

图 6 土壤环境因子对植被多样性和土壤有机碳密度的冗余分析

## 3 讨论与结论

黄土高原丘陵地区生态环境较为脆弱, 过度的开发自然资源, 该区生态环境质量遭到破坏<sup>[12-15]</sup>, 并且

短期内难以恢复;再加上简单粗放的开发利用模式和自然环境的变化导致植被多样性下降、土壤有机碳储量降低、生态系统服务功能也大幅度的下降<sup>[13-14]</sup>;本研究中,不同植被群落  $\alpha$  多样性指数具表现出一定的差异性,表现出一致的变化规律:指数最高的是长芒草,其次是狼牙刺及铁杆蒿,而刺槐最低,长芒草和狼牙之间的差异并不显著( $p>0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p<0.05$ );然而,优势度指数与多样性指数呈相反的变化特征,刺槐表现的最高,长芒草最低。由此可知,长芒草和狼牙刺群落生长环境更为复杂,与其他植被群落相比,其  $\alpha$  多样性指数更高。对于  $\beta$  多样性指数,不同植物群落 Cody 指数最高的是狼牙刺,其次是长芒草和铁杆蒿,而刺槐最低,长芒草和狼牙之间的差异并不显著( $p>0.05$ ),二者显著低于其他植物群落( $p<0.05$ ),而 Sorenson 指呈相反的变化趋势;综合来看,长芒草及狼牙刺群落分布较为接近,具有更多的共有物种;而柠条和刺槐群落植被分布的异质性表现较为突出。

表 5 植被类型和土层深度对土壤有机碳含量和密度的影响

项目	植被类型		土层深度		植被类型 $\times$ 土层深度
	df	5	5	25	
有机碳含量	F	9.45	12.02	7.22	
	p	<0.05	<0.05	<0.05	
	df	5	5	25	
有机碳密度	F	11.05	16.77	11.34	
	p	<0.01	<0.01	<0.01	
	df	5	5	25	

不同植被群落土壤有机碳含量及密度垂直分布呈一致的变化规律,这不仅受制于水热及淋溶作用的制约,还与土壤环境因子及植被群落结构等相关<sup>[20-21]</sup>。受植被类型差异的影响,土壤有机碳含量存在较大的差异,对于 0—20 cm 以内的表层土壤,集聚了更多的有机碳,其“表聚性”特点尤为突出;对于 80—100 cm 土层范围内,土壤有机碳含量和密度较低,以往大多数学者也得出类似结论<sup>[15-16]</sup>。不同植被群落根系发达,在 0—20 cm 土层聚集了大量的根系和凋落物,通过养分的循环进入土壤;同时根系分泌物也形成了大量的根际碳,因此,大量的有机碳在表层形成和累积<sup>[12-14]</sup>。我们还发现,土壤有机碳含量和密度随土层深度的增加而逐渐降低,主要是由于土壤深层养分较为贫瘠,养分归还和土壤微生物活性出现明显的下降,导致其深层土壤难以形成大量的有机碳,从而导致了有机碳垂直分布逐渐降低趋势<sup>[15-16]</sup>;在 80—100 cm 土层达到最低。相同土层不同植被类

型土壤有机碳密度也表现出不一致的规律,相同土层土壤有机碳密度大致表现为:最高的是长芒草、狼牙刺,较低的是柠条和刺槐。主要是由于不同植被凋落物及腐殖质含量具有较大差异,并且微生物群落分布及活性也有一定的差异,对于土壤有机质的降解速率具有明显的差异,在加上根系分泌物的不同,最终导致不同植被土壤有机碳含量不同<sup>[22-23]</sup>。对于草地而言,植被覆盖率最高,并且根系分布广泛,根际土壤养分资源充足,导致土壤微生物的活性增强,从而加速了土壤有机碳的累积。对于刺槐和柠条(豆科植物),具有明显的深根性特点,但是基于水分供给不足,导致养分资源贫瘠,难以形成大量的凋落物,不利于土壤有机碳的累积。此外,深层土壤孔隙度较小,阻隔了水分和养分的运输<sup>[24-25]</sup>,因此,不同植被类型深层土壤有机碳的含量并不高。

土壤有机碳含量和密度往往受到多种因素的调控作用;相关性分析显示,不同植物群落多样性指数与有机碳和有机碳密度呈显著或极显著正相关关系;由此可知,黄土高原物种丰富的植物群落,其土壤有机碳含量和密度也较高。进一步的冗余分析显示,土壤有机碳密度与土壤氮素呈显著的正相关,土壤 pH 值和微生物量碳含量是主导植被多样性和土壤有机碳密度重要驱动因子,这与前人的研究结果一致<sup>[16-18]</sup>。然而,对于土壤全磷而言,土壤全磷与植被多样性和有机碳含量均没有显著的相关性( $p>0.05$ ),主要是由于土壤磷素是沉积性元素,活性和含量相对比较稳定,进一步证明了不同植被类型土壤全磷的活性低、并且转运周期慢、很难被植被吸收的特定<sup>[24]</sup>。双因素分析表明植被类型和土层深度对土壤有机碳含量和密度具有显著/极显著的影响( $p<0.05$ ;  $p<0.01$ )。此外,黄土高原地形破碎,不同植被群落土壤有机碳含量和密度还受到海拔高度、地势条件、土地结构、经纬度和气候类型等影响,因此,综合植被—大气—土壤—地形等环境因子探究土壤有机碳含量及其分布是未来研究的重点方向,也是实现黄土高原植被恢复过程中评估土壤碳汇增量的重要手段。

参考文献:

[1] Liang B C, Vanden Bygaart A J, MacDonald J D, et al. Revisiting no-till's impact on soil organic carbon storage in Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: 104529.

[2] Guenet B, Gabrielle B, Chenu C, et al. Can N<sub>2</sub>O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? [J]. Global Change Biology, 2021, 27(2): 237-256.

- [3] Berhane M, Xu M, Liang Z, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020,26(4):2686-2701.
- [4] Lehmann J, Hansel C M, Kaiser C, et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity[J]. *Nature Geoscience*, 2020,13(8):529-534.
- [5] Yang Y, Dou Y, An S, et al. Abiotic and biotic factors modulate plant biomass and root/shoot(R/S) ratios in grassland on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,636:621-631.
- [6] Chen J, Xiao W, Zheng C, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020,142:107708.
- [7] Hobbey E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia[J]. *Plant and Soil*, 2015,390(1):111-127.
- [8] Yang Y, Dou Y, An S. Testing association between soil bacterial diversity and soil carbon storage on the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626:48-58.
- [9] Yu H, Zha T, Zhang X, et al. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,693:133632.
- [10] 安韶山,张玄,张扬,等.黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J].*水土保持学报*, 2007,21(6):109-113.
- [11] 刘梦云,安韶山,常庆瑞.宁南山区不同土地利用方式土壤有机碳特征研究[J].*水土保持研究*,2005,12(3): 47-49.
- [12] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J].*生态学报*,2007,27 (6):2279-2287.
- [13] 张宏,黄懿梅,祁金花,等.温度和水分对黄土丘陵区3种典型土地利用方式下土壤释放CO<sub>2</sub>潜力的影响[J].*中国生态农业学报*,2011,19(4):731-737.
- [14] 孟国欣,查同刚,张晓霞,等.植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响[J].*生态学杂志*, 2017,36(9):2447-2454.
- [15] 徐香兰,张科利,徐宪立,等.黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J].*水土保持学报*,2003,17 (3):13-15.
- [16] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,等.黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J].*水土保持学报*,2011,25(3): 160-163.
- [17] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容,方法和技术规范[J].*生物多样性*,2009,17(6):533-548.
- [18] 董扬红,曾全超,安韶山,等.黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J].*水土保持学报*, 2015,29(1):143-148.
- [19] 李鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].*应用生态学报*,2015,26(8):2282-2290.
- [20] 侯晓瑞,薛志婧,程曼,等.黄土丘陵区纸坊沟小流域土壤有机碳储量研究[J].*水土保持通报*,2012,32(2):21-25.
- [21] 薛志婧,马露莎,安韶山,等.黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量[J].*生态学报*,2015,35(9):12-19.
- [22] Wang Y, Fu B, Lü Y, et al. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Quaternary Research*, 2010,73(1):70-76.
- [23] Zhang C, Liu G, Xue S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013,54:16-24.
- [24] Fu X, Shao M, Wei X, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010,155(1/2):31-35.
- [25] Xin Z, Qin Y, Yu X. Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 660-669.