植物群落与土壤养分共同调控对黄土塬区沟坡土壤团聚体稳定性的影响

刘江乐[1], 王文龙[1], 朱亚男[1], 娄义宝[2], 康宏亮[3], 冯兰茜[4], 韦思瀚[1]

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 2.重庆师范大学 地理与旅游学院 三峡库区地表过程与生态恢复重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3.长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710054; 4.东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: [目的]探究黄土高塬沟壑区植物群落与土壤养分对沟坡土壤团聚体稳定性的影响,为区域生态系统修复和可持续植被重建提供理论依据。[方法]选取4种典型草本群落〔优势种分别为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)和长芒草(*Stipa bungeana*)〕为研究对象,通过野外调查采样与室内分析,研究植物多样性、根系、土壤养分特征与水稳性团聚体组成随土层深度变化的规律。[结果]①艾蒿群落物种多样性最高,Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener指数均显著高于其他群落,Simpson指数最低,Pielou均匀度指数在各群落间无显著差异。②各群落根长密度(RLD)和根重密度(RMD)随土层加深显著降低,表层(0—20 cm)的RLD和RMD是深层的2.71～10.80倍。③土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)及化学计量比(C∶N,C∶P和N∶P)随土层加深呈显著降低趋势,全磷(TP)变化不显著;艾蒿群落SOC,TN和TP含量在各土层均显著高于其他群落,其平均值分别是铁杆蒿群落的1.07～1.84倍,冷蒿群落的1.12～1.43倍和长芒草群落的1.14～2.81倍。④艾蒿群落>0.25 mm水稳性团聚体所占比例和团聚体稳定性指标(MWD和GMD)均显著最高,分别是其他群落的1.15～1.55倍和1.27～2.98倍;偏最小二乘路径模型(PLS-PM)表明,土壤养分是团聚体稳定性的最强直接驱动因子(路径系数0.850,$p<0.01$);根系分布通过显著提升土壤养分含量(路径系数0.817,$p<0.01$)间接影响团聚体稳定性(间接效应0.695)。[结论]较高物种多样性通过发达的根系促进土壤养分积累,从而通过"根系-土壤养分"途径协同增强土壤团聚体的形成与稳定性。

关键词: 物种多样性; 碳氮磷; 水稳性团聚体; 黄土塬区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0073-11 **中图分类号:** S152.4

文献参数: 刘江乐, 王文龙, 朱亚男, 等.植物群落与土壤养分共同调控对黄土塬区沟坡土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持通报,2026,46(3):73-83. Liu Jiangle, Wang Wenlong, Zhu Yanan, et al. Joint regulation of soil aggregate stability on gully slopes in loess tableland by plant communities and soil nutrients [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):73-83.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.003 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.003**

Joint regulation of soil aggregate stability on gully slopes in loess tableland by plant communities and soil nutrients

Liu Jiangle[1], Wang Wenlong[1], Zhu Yanan[1], Lou Yibao[2], Kang Hongliang[3], Feng Lanqian[4], Wei Sihan[1]

(1.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing* 401331, *China*; 3.*School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 4.*School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang* 150040, *China*)

收稿日期:2025-09-25 **修回日期:**2025-11-27 **采用日期:**2025-11-28

资助项目:国家自然科学基金项目"黄土高原长历时强降雨下植被沟坡塑液性演化的浅层滑坡孕灾机理"(42577404),"黄土塬植被对沟头溯源侵蚀过程中水力-重力作用的影响机制"(42077079)

第一作者:刘江乐(2001—),男(汉族),甘肃省酒泉市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。Email:ljl@nwafu.edu.cn。

通信作者:王文龙(1964—),男(汉族),陕西省大荔县人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究。Email:wlwang@nwsuaf.edu.cn。

Abstract: [Objective] The effects of plant communities and soil nutrients on the stability of soil aggregates on gully slopes in the gully region of the loess tableland were investigated in order to provide a theoretical basis for regional ecosystem restoration and sustainable vegetation reconstruction. [Methods] Four typical herb communities with dominant species of *Artemisia gmelinii*, *Artemisia argyi*, *Artemisia frigida*, and *Stipa bungeana* were selected as the study objects. Through field investigation and laboratory analysis, the variation of plant diversity, root system, soil nutrient properties, and water-stable aggregate composition with soil depth was investigated. [Results] ① The *A. argyi* community showed the highest species diversity. Its Patrick richness index and Shannon-Wiener index were significantly higher than those of other communities, whereas its Simpson index was the lowest. The Pielou evenness index showed no significant difference among the communities. ② The root length density (RLD) and root mass density (RMD) of all communities decreased significantly with increasing soil depth. The RLD and RMD in the surface layer (0—20 cm) were 2.71—10.80 times of those in the deep layers. ③ Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and their stoichiometric ratios (C:N, C:P, and N:P) decreased significantly with soil depth, whereas total phosphorus (TP) showed no significant change. The SOC, TN, and TP contents in the *A. argyi* community were significantly higher than those in the other communities across all soil layers, with average values being 1.07—1.84 times of those of the *A. gmelinii* community, 1.12—1.43 times of those of the *A. frigida* community, and 1.14—2.81 times of those of the *S. bungeana* community. ④ The *A. argyi* community exhibited the significantly highest proportion of > 0.25 mm water-stable aggregates and the aggregate stability indices (MWD and GMD), which were 1.15—1.55 times and 1.27—2.98 times of those of the other communities, respectively. The partial least squares path model (PLS-PM) revealed that soil nutrients were the strongest direct driving factor for aggregate stability (path coefficient 0.850, $p<0.01$). Root distribution indirectly affected aggregate stability by significantly increasing soil nutrient content (path coefficient 0.817, $p<0.01$), with an indirect effect of 0.695. [Conclusion] Higher species diversity promotes soil nutrient accumulation through well-developed roots, thereby synergistically enhancing the formation and stability of soil aggregates through the 'root-soil nutrient' pathway.

Keywords: **species diversity; carbon, nitrogen and phosphorus; water-stable aggregate; loess tableland**

植被恢复作为沟坡生态防护的核心策略,通过"植物-土壤"互馈机制影响土壤水文过程与土体力学特性[1-2]。已有研究[3]表明,植被可通过冠层截留和根系锚固显著提升坡面持水能力与抗蚀性,但在季节性降雨和地形势能耦合作用下,植被覆盖沟坡仍频发浅层滑坡等水力-重力复合侵蚀灾害。有研究表明,植被恢复可能在某些情况下加剧坡面滑坡的发生[4-5],这表明沟坡失稳的过程和机理十分复杂,受土壤性质、植被覆盖度、团聚体稳定性等多种因素的共同影响[6]。从土壤生态视角而言,植被恢复通过双重途径调控土体结构:一方面,地上生物量积累与凋落物输入显著提升土壤有机碳库,增强土壤颗粒的胶结作用,促进水稳性大团聚体形成[7];另一方面,地下根系网络则通过物理缠绕和分泌物化学键合,构建具有层级结构的根-土复合体,提升土体抗剪强度[7-8]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其稳定性是衡量土壤质量的关键指标[9]。团聚体稳定性越高,土壤固持有机碳和养分的能力就越强,越有利于减少养分流失并抑制土壤侵蚀[10]。研究[11]表明,团聚体的形成和稳定性受土壤质地、微生物活动、植被类型、根系分布及外部环境等多种因素影响。其中,土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)等关键元素通过调控微生物活性与酶促反应,深刻影响着团聚体的形成过程与稳定状态[12]。有机碳作为团聚体的重要胶结物质,在团聚体的形成和稳定过程中发挥核心作用[9]。不同粒径团聚体在土壤养分供应、保持和转化方面功能各异,同时碳氮磷元素的含量变化也直接作用于团聚体稳定性水平[13]。因此深入理解团聚体稳定性对碳氮磷养分的响应机制,对于揭示"植被-土壤"互馈过程具有重要意义。

已有研究[14]表明,植被物种多样性的提高能够有效减少地表径流和土壤侵蚀,增强土壤的结构稳定性,但关于"植物群落-土壤养分"耦合驱动团聚体稳定性的机制研究仍然不足。黄土高塬沟壑区作为中国土壤侵蚀最严重的地貌单元之一,其沟坡系统因水力-重力复合侵蚀导致的土地退化尤为显著[3]。尽管沟坡植物群落恢复能有效提升土壤养分、增强土壤团聚体稳定性,进而促进生态恢复[15],但不同植物群落特征(如群落类型、物种多样性、根系分布)如何通过影响碳、氮、磷养分循环来调控团聚体稳定

性,尚未得到系统研究。当前研究主要集中于植被演替过程中团聚体稳定性的变化趋势,如随正向演替逐渐增强的现象[11],或不同土地利用类型下团聚体组成的差异[16],但对于植物群落结构、物种多样性、根系分布等特征与土壤养分的协同机制仍缺乏深入研究。因此,亟待从群落尺度解析植物特征、土壤养分和团聚体稳定性的耦合关系,以弥补现有研究的不足。鉴于此,本文以黄土高塬沟壑区自然植被恢复小流域为研究区,选取植被沟坡4种典型群落〔铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)和长芒草(*Stipa bungeana*)〕,分析其物种多样性与根系分布差异,探讨其与土壤碳氮磷特征及团聚体稳定性的关系。旨在阐明植物群落通过调控土壤养分循环影响团聚体稳定性的作用机制,为黄土高原生态恢复提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省庆阳市黄河水利委员会西峰水土保持试验站南小河沟流域(35°41′—35°44′N,107°30′—107°37′E)(图1)。该流域面积36.3 km^2,海拔1 064～1 432 m,沟壑密度1.69 km/km^2。地貌以塬面、梁峁坡和沟谷为主。该区属大陆性季风气候,年均气温9.5 ℃,年均降水量543.5 mm,降水主要集中在7—9月。土壤类型以黑垆土和黄绵土为主,土壤质地疏松,暴雨下易发生浅层滑坡等自然灾害。经过大规模水土流失治理和退耕还林还草工程,植被恢复良好,流域内主要植被包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林以及达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿、艾蒿、冷蒿、长芒草、冰草(*Agropyron cristatum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和苔草(*Carex*)等自然恢复植被。



图1　研究区概况

Fig.1　Overview of study

1.2　样品采集与测定

野外调查与样品采集于2023年8—10月在南小河沟流域董庄沟子流域进行。董庄沟为自然恢复小流域,植被以草本为主,灌木较少。本研究选取4个具有代表性的植被类型样地(优势种分别为铁杆蒿、艾蒿、冷蒿和长芒草),每个样地面积10 m×10 m,在中坡位置分别设置3个1 m×1 m的标准草本样方,植物长势基本相似。为确保样方独立性,避免植物根系和微地形相互干扰,样方呈三角形布设,间隔2 m以上,且远离样地边缘。样地基本概况详见表1。在每个样方内,记录植物物种数量和高度,使用相机拍照+ImageJ软件测取植被盖度,将样方内植被与地面齐平刈割,采用烘干法测定各物种地上生物量。地上植被调查完成后,去除地表枯落物和杂物,采用剖面挖掘法在样方内进行S形采样,分别采集4个土层(0—20,20—40,40—60,60—80 cm)的原状土壤样品。使用500 cm^{3}的环刀采集不同土层土壤根系样品,经浸泡、反复冲洗后挑出所有的根系,采用Epson Perfection V700 Photo扫描仪进行灰度扫描,利用WinRHIZO 2013e软件分析根系长度,并测定根系生物量。每个土层采集3 kg混合土样,带回实验室自然风干,挑出根系、碎石等杂物后用以测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和水稳性团聚体含量。将处理好的风干土样过0.25 mm筛,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定土壤有机碳含量、全氮采用凯氏定氮法测定、全磷采用钼锑抗比色法测定[17]。土壤水稳性团聚体测定之前,先进行干筛,将500 g处理好的风干土样品依据干筛不同径级比例配为50 g,用TTF-100型土壤团聚体分析仪,将50 g土样放置于孔径分别为5,2,1,0.5,0.25 mm的各级套筛之上,先用水缓慢润湿10 min后,以40 r/min的频率振荡10 min。然后将各筛上的团聚体分别冲洗至铝盒中并在60 ℃下烘干,称取其质量,分别得到>5,5～2,2～1,1～0.5,0.5～0.25,<0.25 mm共6级水稳性团聚体含量[15,18]。

1.3　指标计算

物种多样性反映植物群落的自身特征及其与环境之间的相互关系[19]。本文中植物群落特征以α多样性表征,Patrick丰富度指数表示物种丰富度,代表植物群落的物种数量;Simpson指数表示群落中物种的优势度;Pielou均匀度指数反映群落内各物种数量分布的均匀性;Shannon-Wiener指数是指综合物种丰富度和多样性的评价指标。计算公式[2,19]为

$$\text{重要值}=(\text{相对高度}+\text{相对频度}+\text{相对生物量})/3 \quad (1)$$

Patrick丰富度指数：$D=S$ (2)

Simpson指数：$\lambda=1-\sum_{i=1}^{s}P_i^2$ (3)

Shannon-Wiener指数：$H=-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i$ (4)

Pielou均匀度指数：$E=\frac{-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i}{\ln S}$ (5)

式中：S为样方中物种总数；P_i为物种i的重要值或者相对优势度，$P_i=\frac{N_i}{N}$，其中N_i为i种的重要值，N为样方中全部物种的重要值之和。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

样地	优势种	主要伴生种	海拔高度/m	坡度/(°)	坡向	植被盖度/%	土壤容重/(g·cm^{-3})	土壤质地		
								砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
1	铁杆蒿	猪毛蒿、达乌里胡枝子等	1 150	49	阴坡	78.9	1.28	32.0	37.4	30.6
2	艾蒿	冷蒿、绢毛匍匐委陵菜等	1 210	43	半阴坡	81.2	1.31	38.4	33.7	27.9
3	冷蒿	达乌里胡枝子、铁杆蒿等	1 166	47	阴坡	81.0	1.34	34.8	34.4	30.8
4	长芒草	苔草、牡蒿等	1 132	42.5	阳坡	78.5	1.19	31.8	34.5	33.7

植物根系分布特征采用根长密度(RLD)和根重密度(RMD)表示。计算公式[20]为

$$RLD=\frac{RL}{V} \quad (6)$$

$$RMD=\frac{RM}{V} \quad (7)$$

式中：RLD为根长密度(cm/cm^3)；RMD为根重密度(g/cm^3)；RL为根系总长度(cm)；RM为根系总干重(g)；V为取样环刀的体积(cm^3)。

采用各级团聚体含量(W_i)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)来评价团聚体稳定性。计算公式[15,21]为

$$W_i=\frac{M_i}{M_T}\times 100\% \quad (8)$$

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_iW_i)}{\sum_{i=1}^{n}W_i} \quad (9)$$

$$GMD=\exp\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}(W_i\ln X_i)}{\sum_{i=1}^{n}W_i}\right\} \quad (10)$$

式中：W_i为i粒径团聚体百分含量(%)；M_i为i粒径团聚体质量(g)；M_T为团聚体总质量(g)；MWD为团聚体平均重量直径(mm)；X_i为团聚体i粒径的平均直径(mm)；GMD为团聚体几何平均直径(mm)。

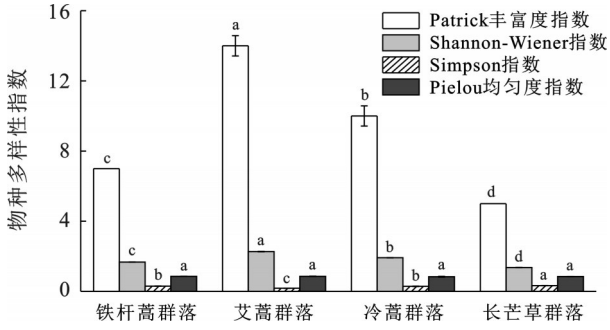
1.4 数据分析

使用Excel 2021和SPSS 27.0进行数据统计分析，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较法(LSD，$p<0.05$)分析不同植物群落物种多样性指数、根系指标及土壤有机碳、全氮、全磷和水稳性团聚体含量差异，相关性分析通过Pearson法完成，借助R 4.3.3软件中“pls-pm”包构建偏最小二乘路径模型，通过Gof指标评价偏最小二乘路径模型的拟合结果，当Gof大于0.6时，认为拟合结果可靠；使用Origin 2022绘制图表。

2 结果与分析

2.1 植被沟坡不同植物群落物种多样性特征

不同植物群落物种多样性特征如图2所示。Patrick丰富度指数和Shanno-Wiener指数均表现为：艾蒿群落>冷蒿群落>铁杆蒿群落>长芒草群落；各群落Simpson指数分别为0.33(长芒草群落)，0.30(铁杆蒿群落)，0.29(冷蒿群落)和0.18(艾蒿群落)；Pielou均匀度指数在4种群落之间无显著差异，表明各群落物种数量分布相对均匀。



注：不同小写字母表示不同群落之间差异显著($p<0.05$)。

图2 不同群落物种多样性特征

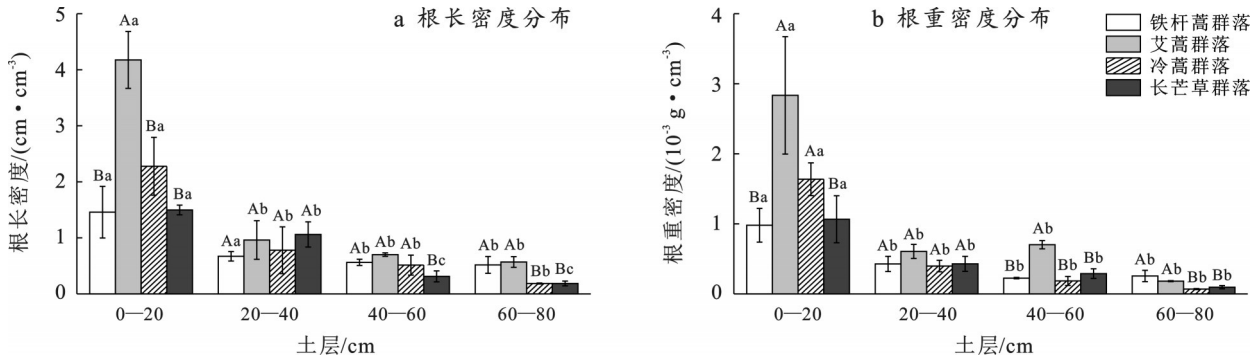
Fig.2 Species diversity characteristics of different communities

2.2 植被沟坡不同植物群落根系分布特征

不同群落植物根系垂直分布特征如图3所示。

各群落0—80 cm土层植物根系根长密度(RLD)和根重密度(RMD)整体上随土层深度增加呈逐渐减小的变化趋势。

表层(0—20 cm)RLD和RMD显著高于其他土层,分别是20—40 cm土层的2.71和3.50倍,40—60 cm土层的4.50和4.65倍,60—80 cm土层的6.44和10.80倍。就各土层平均值而言,艾蒿群落的RLD和RMD显著高于其他群落,分别是铁杆蒿群落的2.00和2.29倍,冷蒿群落的1.71和1.89倍,长芒草群落的2.10和2.30倍。



注:不同大写字母表示同一土层不同群落间差异显著,不同小写字母表示同一群落不同土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

图3　不同群落植物根系垂直分布特征

Fig.3　Vertical distribution characteristics of plant roots in different communities

2.3　植被沟坡不同植物群落土壤养分特征

不同群落土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量垂直分布特征如图4所示。各群落SOC含量随土层增加呈逐渐降低趋势,各土层SOC含量分别为4.41～15.30 g/kg(0—20 cm),2.84～9.51 g/kg(20—40 cm),2.14～3.87 g/kg(40—60 cm),1.74～2.57 g/kg(60—80 cm);各群落土壤TN含量在0—80 cm土层中也随土层深度增加呈降低趋势,0—20 cm土层TN含量显著高于其他土层,分别是其1.33～2.11倍(20—40 cm),1.70～3.31倍(40—60 cm),1.78～4.16倍(60—80 cm);TP含量在土壤中垂直分布差异不显著,各群落0—80 cm土层TP含量分布范围为0.44～0.54 g/kg。就各土层平均值而言,艾蒿群落的SOC,TN和TP含量显著高于其他3种群落,分别是其1.84,1.66,1.07倍(铁杆蒿群落),1.43,1.43,1.12倍(冷蒿群落),2.81,2.42,1.14倍(长芒草群落)。

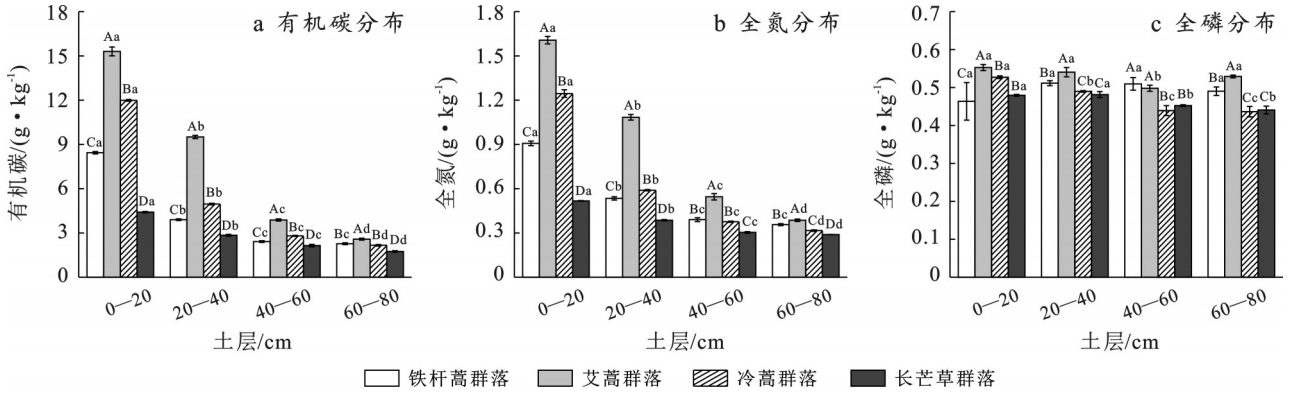


图4　不同群落土壤有机碳、全氮和全磷含量垂直分布特征

Fig.4　Vertical distribution characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in different communities

由图5可知,铁杆蒿群落、艾蒿群落、冷蒿群落和长芒草群落0—80 cm土层土壤碳氮比(C:N)分别为8.53～9.63(0—20 cm),7.36～8.78(20—40 cm),6.21～7.46(40—60 cm)和6.03～6.69(60—80 cm),土壤碳磷比(C:P)分别为9.20～18.69,4.75～17.60,4.74～7.79和3.96～4.96,土壤氮磷比(N:P)分别为1.08～2.91,0.80～2.00,0.67～1.10,0.66～0.73。就各土层平均值而言,冷蒿群落土壤C:N显著高于其他群落1.01～1.12倍;艾蒿群落土壤C:P和N:P显著高于其他群落,分别是铁杆蒿群落的1.62,1.49倍,冷蒿群落的1.31,1.31倍,长芒草群落的2.43,2.10倍。

2.4　植被沟坡不同植物群落土壤水稳性团聚体特征

由图6可知,4种植物群落不同土层各粒径水稳性团聚体比例存在显著差异。<0.25 mm,0.25～0.5 mm,

0.5～1 mm，1～2 mm，2～5 mm和＞5 mm各级水稳性团聚体比例分别为17.3%～59.8%，4.6%～9.8%，7.9%～15.7%，10.3%～19.3%，6.1%～22.5%和3.0%～38.8%。其中，＞0.25 mm水稳性团聚体比例随土层增加整体呈递减趋势。就不同群落而言，艾蒿群落＞0.25 mm水稳性团聚体比例范围为47.4%～73.4%，显著高于其他群落，分别是铁杆蒿群落、冷蒿群落和长芒草群落的1.28，1.15，1.55倍。

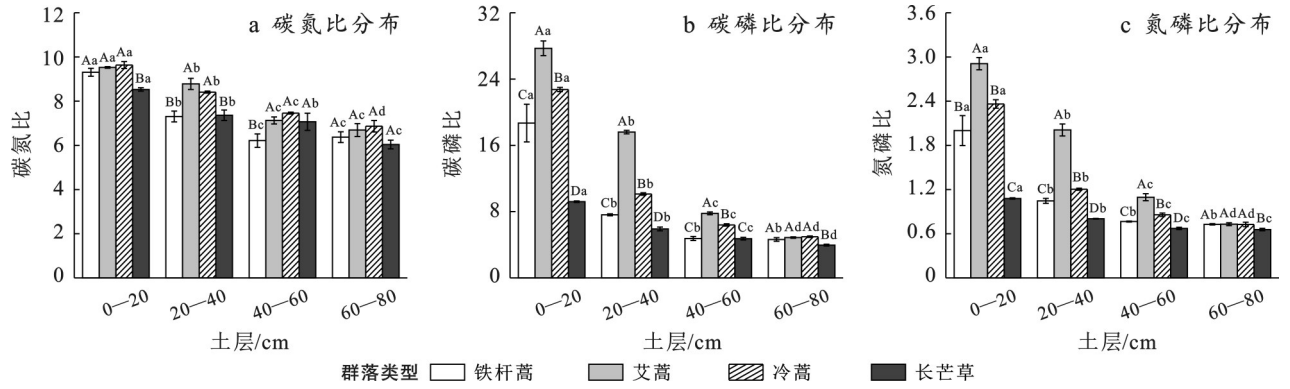


图5 不同群落土壤碳、氮、磷化学计量比垂直分布特征

Fig.5 Vertical distribution characteristics of soil stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus in different communities

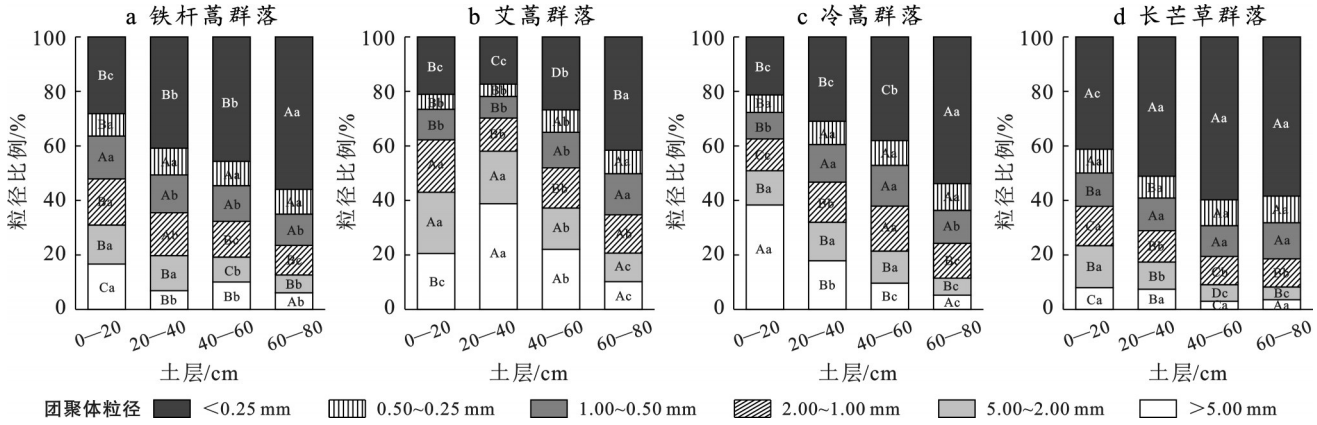


图6 不同群落土壤水稳性团聚体垂直分布特征

Fig.6 Vertical distribution characteristics of soil water-stable aggregates in different communities

不同植物群落土壤团聚体稳定性特征如图7所示，除艾蒿群落外，其他群落平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）均随土层加深呈逐渐降低趋势。各群落不同土层MWD分布范围分别为1.53～3.61 mm（0—20 cm），1.26～3.86 mm（20—40 cm），0.78～2.56 mm（40—60 cm），0.79～1.53 mm（60—80 cm），GMD分布范围分别为0.91～1.57 mm，0.43～1.96 mm，0.31～1.02 mm，0.31～0.55 mm。对于不同群落而言，0—80 cm土层团聚体稳定性（MWD和GMD）表现为艾蒿群落显著高于其他群落，分别是其1.76，2.08倍（铁杆蒿群落），1.27，1.41倍（冷蒿群落），2.45，2.98倍（长芒草群落）。

2.5 植物群落与土壤养分和团聚体稳定性特征间的关系

由表2可知，Patrick丰富度指数与土壤TN，TP间呈显著正相关（$p<0.05$），与MWD和GMD呈极显著正相关（$p<0.01$）；Simpson指数与MWD和GMD呈显著负相关（$p<0.05$），与土壤TP呈极显著负相关（$p<0.01$），与SOC，TN、碳氮磷化学计量比（C∶N，C∶P和N∶P）间呈不显著的负相关（$p>0.05$）；Shannon-Wiener指数与土壤TN和TP呈显著正相关（$p<0.05$），与MWD和GMD呈极显著正相关（$p<0.01$）；Pielou均匀度指数与土壤TP呈显著正相关（$p<0.05$），与SOC，TN，C∶N，C∶P，N∶P和团聚体稳定性指标（MWD和GMD）间无显著相关性（$p>0.05$）；植物根系特征指标RLD和RMD与SOC，TN、碳氮磷化学计量比（C∶N，C∶P和N∶P）间呈极显著正相关（$p<0.01$），与TP和团聚体稳定性指标（MWD和GMD）间呈显著正相关（$p<0.05$）。

为更清晰地反映植物群落和土壤养分对团聚体

稳定性的作用及贡献,本研究通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM),构建了物种多样性、根系分布特征、土壤养分和团聚体稳定性之间的路径模型(图 8),模型拟合优度为 0.70,拟合结果可靠。研究结果表明,土壤养分是团聚体稳定性的最强直接驱动因子(路径系数 0.850,$p<0.01$);根系分布通过显著提升土壤养分含量间接增强团聚体稳定性(路径系数 0.817, $p<0.01$),体现了根系在植物-土壤系统中的关键桥梁作用。

物种多样性对根系分布和土壤养分均表现为正向影响(路径系数分别为 0.342,0.218)。效应分解显示(表 3),物种多样性通过"根系分布→土壤养分"的链式中介路径对团聚体稳定性产生显著总效应(0.423),而根系分布对团聚体稳定性的间接效应高达 0.695,凸显其在连接地上植物群落与地下土壤功能中的核心作用。

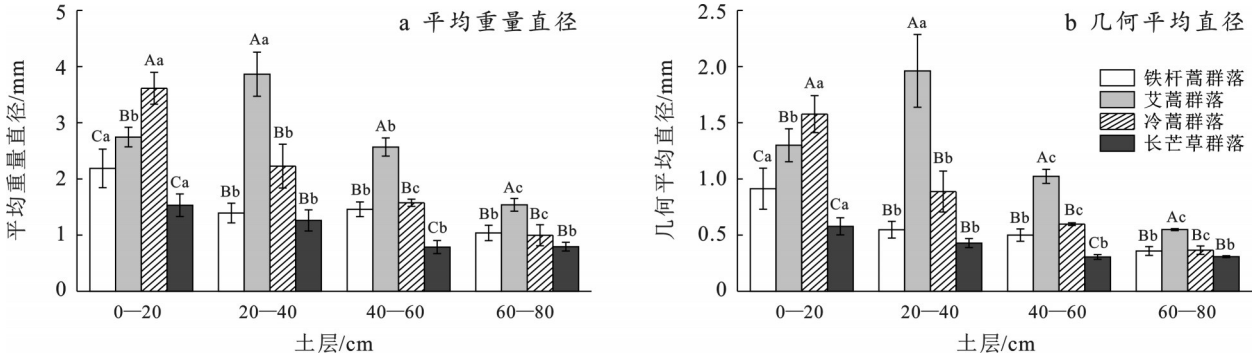


图 7　不同群落土壤团聚体稳定性特征

Fig.7　Aggregate stability characteristics of soil in different communities

表 2　土壤养分和团聚体稳定性特征指标与植物群落特征指标间的相关系数

Table 2　Correlation coefficients between soil nutrient and aggregate stability characteristics and plant community characteristics

指标	SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P	MWD	GMD
D	0.468	0.502*	0.581*	0.296	0.431	0.462	0.653**	0.643**
λ	−0.450	−0.493	−0.667**	−0.229	−0.406	−0.445	−0.602*	−0.608*
H	0.468	0.503*	0.586*	0.293	0.434	0.467	0.653**	0.638**
E	0.156	0.206	0.552*	−0.083	0.132	0.175	0.138	0.163
RLD	0.900**	0.891**	0.587*	0.768**	0.885**	0.878**	0.560*	0.561*
RMD	0.907**	0.899**	0.565*	0.779**	0.894**	0.890**	0.589*	0.589*

注:*,**分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著相关。*D* 为 Patrick 丰富度指数;*λ* 为 Simpson 指数;*H* 为 Shannon-Wiener 指数;*E* 为 Pielou 均匀度指数;RLD 为根长密度;RMD 为根重密度;SOC 为土壤有机碳;MWD 为平均重量直径;GMD 为几何平均直径;TN 为全氮;TP 为全磷;C:N 为碳氮比;C:P 为碳磷比;N:P 为氮磷比。下同。

3　讨　论

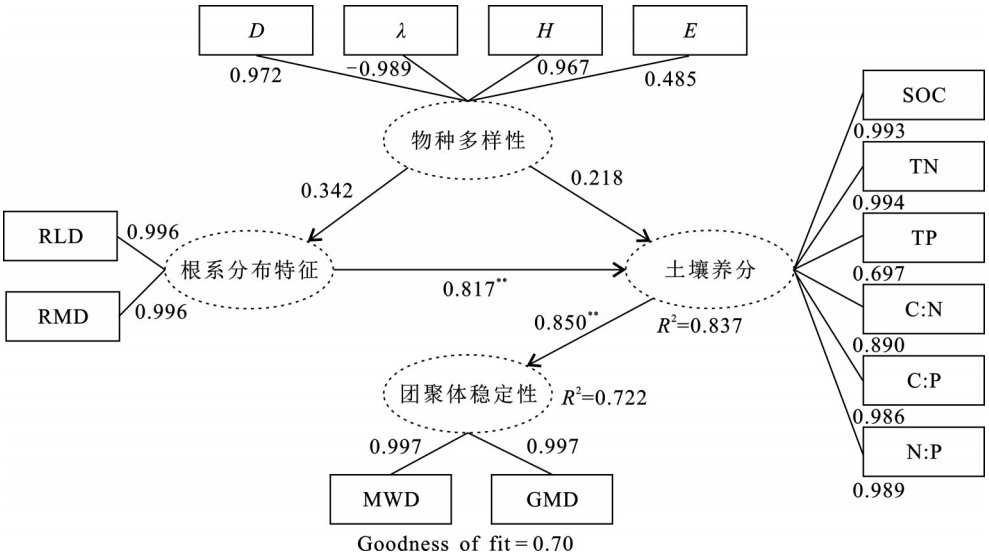
3.1　不同植物群落土壤团聚体稳定性特征

土壤团聚体稳定性是土壤结构和功能的重要指标,直接影响土壤的水分保持、养分循环和侵蚀防治等过程[21],其与植物群落类型和土壤碳氮磷特征密切相关。地上植物群落结构组成和地下土壤理化性质的变化,会对土壤团聚体组成与分布产生显著影响[22]。

本研究中,艾蒿群落>0.25 mm 水稳性团聚体含量、MWD 和 GMD 均显著高于其他群落,这与其较高的土壤 SOC 和 TN 含量直接相关,有机质通过胶结作用和微生物分泌物的黏结效应促进大团聚体的形成[21,23]。而艾蒿群落较高的 TP 含量可能通过调节微生物活性进一步强化这一过程[24]。相反,长芒草群落<0.25 mm 微团聚体比例较高,与其较低的土壤 SOC 含量有关,表明有机质不足导致胶结物质减少,团聚体更易破碎[25]。

团聚体稳定性指标(MWD 和 GMD)随土层深度增加呈递减趋势,这一结果与王平等[26]和王磊等[27]人研究一致,其主要原因在于有机质输入随土层深度增加而减少。本研究还发现,草本植物根系主要集中分布于表层(0—20 cm)土壤,随着土层加深各群落 RLD 和 RMD 均显著下降,尤其在 60—80 cm 土层根系分布已极为稀少。这表明植物群落主要通过调控根系发育影响表层土壤的养分循环,进而间接增强

深层土壤的团聚体稳定性，呈现出“自上而下”的间接影响[20,27]。值得注意的是，艾蒿群落在20—40 cm土层MWD和GMD达到峰值，可能与其在该层较为发达的侧根和凋落物垂直迁移有关，此类根系能够分泌多糖类物质，增强该层土壤的团聚作用[7]。此外，在深层土壤中，植被通过根系直接调控团聚体的作用有限，其稳定性的维持可能更多依赖于非生物因素，如土壤质地、碳酸钙的淋溶与淀积等[9,26]。因此，土壤团聚体稳定性的空间变化是生物与非生物因素共同作用的结果，其中地上植物群落与有机质水平起着关键驱动作用。未来研究需进一步量化非生物因素在深层土壤结构形成中的相对贡献。



注：①**表示$p<0.01$水平显著相关。②Goodness of fit表示拟合优度。③箭头表示因果关系，箭头上的数字表示标准化路径系数。

图8 物种多样性、根系分布特征、土壤养分和团聚体稳定性的偏最小二乘路径模型

Fig.8 Partial least squares path model of species diversity, root distribution characteristics, soil nutrients and aggregate stability

表3 物种多样性、根系分布特征和土壤养分对团聚体稳定性的效应分解

Table 3 Decomposition of effects of species diversity, root distribution characteristics, and soil nutrients on aggregate stability

影响路径	直接效应	间接效应	总效应
物种多样性→根系分布	0.342	0	0.342
物种多样性→土壤养分	0.218	0.280	0.498
物种多样性→团聚体稳定性	0	0.423	0.423
根系分布→土壤养分	0.817	0	0.817
根系分布→团聚体稳定性	0	0.695	0.695
土壤养分→团聚体稳定性	0.850	0	0.850

3.2 植物群落和土壤养分对团聚体稳定性特征的影响机制

植物群落通过调控土壤养分循环，深刻影响着团聚体的形成与稳定性[28]。本研究表明，艾蒿群落具有较高的物种多样性，其土壤SOC，TN和TP含量显著高于其他群落，尤其是表层土壤养分富集明显。这种养分积累主要源于高物种多样性群落通过多样化凋落物与细根输入，增加了有机质来源，促进了微生物活动及养分转化效率，从而显著提高了土壤胶结物质含量[29]。杨凤姣等[16]在张广才岭森林生态系统的研究也表明，物种多样性更高的云冷杉针阔混交林能有效促进凋落物分解和养分释放，显著提升土壤有机碳库，为团聚体形成提供了丰富的物质基础，这与本研究在草本群落的发现相互印证。有机碳作为团聚体的关键胶结剂，与氮、磷元素协同，通过促进微生物分泌多糖及胶结物质，直接增强了土壤颗粒的黏结力和大团聚体的稳定性[7,23,30]。相反，物种多样性较低的长芒草群落，其Simpson指数较高，表明群落中存在显著优势种，这种结构可能导致凋落物类型单一，有机物输入量减少，从而限制了土壤有机质的积累与转化，进一步导致团聚体稳定性较差[31-33]。相关性分析显示，Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener指数与TN，TP及团聚体稳定性指标（MWD和GMD）呈显著正相关，而Simpson指数与TP及团聚体稳定性指标呈显著负相关（表2），说明物种丰富度和多样性的提高有助于促进土壤养分循环和团聚体稳定[23,34]，而单一优势种则可能对土壤结构和养分状态产生抑制作用[32-33]。

本研究明确了根系在连接地上植物群落与地下土壤功能中的桥梁作用。相关性分析表明，RLD和

RMD与SOC，TN及团聚体稳定性（MWD和GMD）均呈显著正相关（表2），偏最小二乘路径模型进一步揭示，根系通过显著影响土壤养分（路径系数0.817）对团聚体稳定性产生强大的间接效应（0.695）。这一发现与刘均阳等[7]关于根系有效促进土壤团聚体形成的结论一致，深刻揭示了在黄土高塬沟壑区，植物主要通过根系发育来驱动土壤养分循环，进而塑造稳定的土壤结构。此外，本研究中受样本量与样地设置限制，未能解析坡位通过水热条件和物质运移对“植被-土壤-团聚体”系统的调控作用，未来需将坡位等地形因子作为重要协变量纳入分析框架，并增加样地数量与长期观测，以深入揭示其内在过程。

4　结　论

（1）植物物种多样性与根系分布差异显著。艾蒿群落具有最高的Patrick丰富度指数和Shannon-Wiener指数，以及最发达的根系（RLD与RMD显著最高），而Simpson指数最低，表明其物种多样性高且优势种不突出。

（2）土壤养分特征显著受植物群落影响。艾蒿群落的SOC，TN，TP含量及C∶P和N∶P均显著高于其他群落；各群落SOC，TN及化学计量比均随土层加深而显著降低，TP含量随土层深度变化差异不显著。

（3）不同植物群落下团聚体组成及稳定性具有显著差异。＞0.25 mm水稳性团聚体比例、MWD和GMD均表现为艾蒿群落显著最高，且随土层加深呈“先增后降”趋势，其余群落随土层深度增加整体呈递减趋势。

（4）植物群落通过“根系-土壤养分”途径间接调控团聚体稳定性。偏最小二乘路径模型表明，土壤养分是团聚体稳定性的直接主导因素，而根系分布则通过显著提升土壤养分对团聚体稳定性产生间接驱动效应，揭示了根系在连接植物与土壤过程中的核心桥梁作用。

参考文献（References）

[1] Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Changes in soil properties and resistance to concentrated flow across a 25-year passive restoration chronosequence of grasslands on the Chinese Loess Plateau [J]. Restoration Ecology, 2020,28(1):104-114.

[2] Zhu Yanan, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Revegetation-induced changes in vegetation diversity improve soil properties of gully heads [J]. Science of the Total Environment, 2023,889:164214.

[3] 冯兰茜.黄土塬区沟坡稳定性评估及失稳机制研究:以董志塬为例[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），2023.
Feng Lanqian. Study on stability assessment and failure mechanism of gully slope in Loess Tableland: A case study of Dongzhiyuan [D]. Yangling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2023.

[4] Gao Hang, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, et al. How effective is vegetation in reducing gravity erosion on loess gully sidewall under intense rainfalls? [J] .Land Degradation &. Development, 2020,31(17):2605-2619.

[5] Xu Yangguang, Luo Li, Guo Wenzhao, et al. Revegetation changes main erosion type on the gully-slope on the Chinese Loess Plateau under extreme rainfall: Reducing gully erosion and promoting shallow landslides [J]. Water Resources Research, 2024, 60(3): e2023WR036307.

[6] Bradford J M, Piest R F. Gully wall stability in loess-derived alluvium [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41(1):115-122.

[7] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报，2020,34(3):267-273.
Liu Junyang, Zhengchao, Su Xuemeng. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):267-273.

[8] 刘武江,赵燚柯,段青松,等.不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及对根系固土力的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):25-31.
Liu Wujiang, Zhao Yike, Duan Qingsong, et al. Effcets of different sowing patterns of herbs on soil aggregates characteristics and consolidating soil ability of roots [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(6):25-31.

[9] 史奕,陈欣,沈善敏.有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J].应用生态学报,2002,13(11):1495-1498.
Shi Yi, Chen Xin, Shen Shanmin. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(11):1495-1498.

[10] 宁晓梅,张杰铭,余锦亚南,等.晋西北黄土区不同密度油松林土壤团聚体稳定性和养分特征[J/OL].应用与环境生物学报,1-17.https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2025.04025.
Ning Xiaomei, Zhang Jieming, Yu Jinyanan, et al. Stability of soil aggregates and nutrient characteristics of

Pinus tabuliformis with different densities in the loess region of northwestern Shanxi Province, China [J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1-17. https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2025.04025..

[11] 郭正,张风宝,黄悦,等.典型黄绵土团聚体稳定性变化对植被演替的响应[J].土壤,2025,57(1):195-203.
Guo Zheng, Zhang Fengbao, Huang Yue, et al. Response of soil aggregate stability changes of typical huangmian soil to vegetation succession [J]. Soils, 2025,57(1):195-203.

[12] 苏慧清,韩晓日,杨劲峰,等.长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):924-932.
Su Huiqing, Han Xiaori, Yang Jinfeng, et al. Effect of long-term fertilization on distribution of aggregates and organic carbon and total nitrogen contents in a brown soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017,23(4):924-932.

[13] Devine S, Markewitz D, Hendrix P, et al. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades [J]. PLoS One, 2014,9(1):e84988.

[14] 陶宇,温仲明,朱朵菊,等.黄土丘陵区植物群落功能多样性/物种多样性与产流产沙响应关系[J].水土保持研究,2018,25(4):120-128.
Tao Yu, Wen Zhongming, Zhu Duoju, et al. Response relationship between functional diversity/species diversity and rainfall-runoff-sediment yield in loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4):120-128.

[15] 王文鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高塬沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J].中国农业科学,2019,52(16):2845-2857.
Wang Wenxin, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Effects of natural vegetation restoration on characteristics of soil aggregate and soil erodibility of gully heads in gully region of the Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(16):2845-2857.

[16] 杨凤姣,王亚飞,牟森先,等.张广才岭三种林型物种多样性和土壤胶结物质对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2025,45(23):11626-11637.
Yang Fengjiao, Wang Yafei, Mu Miaoxian, et al. Influence of species diversity and soil cementing substances on the stability of agglomerates in three forest types of Zhangguangcailing Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(23):11626-11637.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[18] 张二芳,郝旺林,马奇美.黄土丘陵区生物结皮覆盖对土壤团聚体分布特征及稳定性影响[J].土壤通报,2023,54(3):606-613.
Zhang Erfang, Hao Wanglin, Ma Qimei. Effect of biological crust mulching on distribution characteristics and stability of soil aggregates in loess hilly region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(3):606-613.

[19] 孙义,秦彧,魏天锋,等.草地植物物种多样性测度方法及发展趋势[J].应用生态学报,2022,33(3):655-663.
Sun Yi, Qin Yu, Wei Tianfeng, et al. Methods and development trend for the measurement of plant species diversity in grasslands [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(3):655-663.

[20] 于雯霏,王佩佩,刘俊娥,等.黄土高原典型植被根系对土壤团聚体及其有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2023,37(6):246-254.
Yu Wenfei, Wang Peipei, Liu June, et al. Effects of typical vegetation roots on soil aggregates and their organic carbon fractions on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 246-254.

[21] 付玉.黄土高原水蚀过程中土壤团聚体破碎迁移机制研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
Fu Yu. Study on the mechanism of breakdown and transportation of soil aggregates in the process of water erosion on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.

[22] 张子琦,焦菊英,陈同德,等.拉萨河流域洪积扇不同植被类型土壤化学计量特征[J].生态学报,2022,42(16):6801-6815.
Zhang Ziqi, Jiao Juying, Chen Tongde, et al. Soil stoichiometry characteristics of different vegetation types in alluvial fans of the Lhasa River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(16):6801-6815.

[23] 季波,时龙,徐金鹏,等.宁夏典型天然草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征[J].生态学报,2021,41(19):7669-7678.
Ji Bo, Shi Long, Xu Jinpeng, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in typical natural grassland of Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7669-7678.

[24] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient [J]. Plant and Soil, 2013,373(1):285-299.

[25] Zhu Guangyu, Shangguan Zhouping, Deng Lei. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and

nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau [J]. Catena, 2017, 149:253-260.

[26] 王平,丁智强,李璐杉,等.滇中主要森林类型土壤团聚体稳定性及其变化机制[J].水土保持研究,2024,31(5):232-242.
Wang Ping, Ding Zhiqiang, Li Lushan, et al. Stability and mechanisms of soil aggregates in major forest types in central Yunnan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(5):232-242.

[27] 王磊,刘晴廣,史经攀,等.平原沙土区河岸带不同植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2024,31(1):96-104.
Wang Lei, Liu Qingyi, Shi Jingpan, et al. Effects of different vegetation types on soil aggregate stability in riparian zone of plain sandy area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):96-104.

[28] 潘英杰.黄土高原次生演替过程中土壤团聚体演变特征及其影响因素[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),2022.
Pan Yingjie. Evolution characteristics and influencing factors of soil aggregates during secondary succession in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2022.

[29] 雷斯越,赵文慧,杨亚辉,等.不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J].水土保持研究,2019,26(1):86-91.
Lei Siyue, Zhao Wenhui, Yang Yahui, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and vegetation growth status in different slopes [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):86-91.

[30] 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 Xin, Zeng Quanchao, An Shaoshan, 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.

[31] 刘万弟,师斌,闫秀,等.宁夏天然草原物种多样性和生物量对环境梯度响应研究[J].中国草地学报,2022,44(10):10-19.
Liu Wandi, Shi Bin, Yan Xiu, et al. The response of species diversity and biomass to environmental gradients in Ningxia natural grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(10):10-19.

[32] 薛飞,龙翠玲,廖全兰,等.喀斯特森林凋落物对土壤养分及土壤酶的影响[J].森林与环境学报,2020,40(5):449-458.
Xue Fei, Long Cuiling, Liao Quanlan, et al. An analysis of litter, soil, stoichiometry, and soil enzymes in Karst forest [J]. Journal of Forest and Environment, 2020,40(5):449-458.

[33] 贾荣,兰登明,郭威星,等.宁夏东北部典型荒漠草原植物群落与土壤养分特征[J].生态环境学报,2020,29(3):483-488.
Jia Rong, Lan Dengming, Guo Weixing, et al. Characteristics of plant communities and soil nutrients in desert steppe of northeastern Ningxia [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(3):483-488.

[34] 孙彩丽,薛萐,刘国彬,等.黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):550-561.
Sun Caili, Xue Sha, Liu Guobin, et al. Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014,20(3):550-561.