

DOI: 10.20103/j.stxb.202401190161

胡宏宇, 张靖, 刘莹, 冉义国, 王小晓, 黄平. 三峡水库消落带优势植物不同配置对土壤结构稳定性的影响. 生态学报, 2025, 45(6): 2710-2722.

Hu H Y, Zhang J, Liu Y, Ran Y G, Wang X X, Huang P. Soil structure stability impacted by the different configurations of dominant plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2710-2722.

三峡水库消落带优势植物不同配置对土壤结构稳定性的影响

胡宏宇^{1,2}, 张靖^{1,2}, 刘莹^{1,2}, 冉义国^{1,2}, 王小晓^{1,2}, 黄平^{1,2,*}

1 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714

2 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714

摘要: 土壤结构稳定性是衡量退化生态系统功能恢复和维持的关键指标。探究优势植物配置对土壤结构稳定性的影响, 对于三峡水库消落带的植被恢复与岸线稳定具有重要意义。选择三峡水库消落带优势植物狗牙根(G)、香附子(X)和苍耳(C), 设置空白(CK)、单种(G、X、C)、两两混种(GX、CX、CG)三种不同处理, 利用 Yoder 湿筛法和计算机断层扫描技术(Computed Tomography, CT)对土壤团聚体粒径分布和土壤孔隙特征进行测定, 对比分析了不同植物配置对土壤团聚体粒径分布与稳定性及土壤孔隙结构的影响。结果表明: 1) 相比于 CK 处理, 不同植物配置处理下土壤团聚体(>0.25 mm)的质量百分比均有增加。植物根系的生长促进了土壤团聚体的形成与稳定, 但并未达到显著水平。2) 香附子单种及其与狗牙根的混种均抑制了土壤大孔隙的形成, 可能由于香附子根系不发达, 且其膨大的根结在生长过程中压缩了周围的土壤孔隙。然而, 对于狗牙根和苍耳, 无论是单种还是混种都会促进土壤大孔隙的发育。3) 植物根系性状与土壤团聚体稳定性和土壤孔隙结构具有显著相关性, 根长(RL)和根表面积(RSA)是影响土壤团聚体稳定性的关键根系性状, 根长(RL)、根表面积(RSA)和根体积(RV)是控制土壤孔隙结构的关键性状。因此, 为了有效提升土壤结构的稳定性, 可以基于植物的根长、根表面积等根系功能性状, 筛选出适合脆弱生态系统植被恢复的先锋或优势植物, 并进行合理配置。该结果可为三峡水库消落带及相似区域的水土保持和生态恢复中的植物遴选与群落配置提供基础数据和理论支持。

关键词: 植物配置; 根系性状; 土壤结构; 团聚体; 土壤孔隙

Soil structure stability impacted by the different configurations of dominant plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir

HU Hongyu^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, RAN Yiguo^{1,2}, WANG Xiaoxiao^{1,2}, HUANG Ping^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

2 Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract: Soil structure stability is crucial for evaluating the restoration and maintenance of degraded ecosystem functions. Plant growth has been found to exert various influences on the evolution of soil structure, through both direct and indirect mechanisms. Understanding how different configurations of dominant plant species impact soil structure stability is essential for optimizing restoration strategies in degraded ecosystems. This is particularly important in regions prone to erosion and habitat degradation, such as the riparian zones of large reservoirs. We selected three dominant plant species from the riparian zone of the Three Gorges Reservoir: *Cynodon dactylon* (G), *Cyperus rotundus* (X), and *Xanthium sibiricum* (C).

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377320, 41771266); 三峡后续工作规划项目(5000002021BF40001); 中国科学院西部青年学者项目(202082)

收稿日期: 2024-01-19; 采用日期: 2025-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangping@cigit.ac.cn

Three treatment groups were implemented: control (CK), single species (G, X, C), and two-species mixtures (GX, CX, CG). Soil aggregates were assessed using Yoder's wet sieving method, and soil pore characteristics were examined through computed tomography (CT). The aim was to compare the effects of different plant configurations on the size distribution and stability of soil aggregates and soil pore structure. The results showed that: 1) The mass percentage of soil aggregates larger than 0.25 mm increased under all plant configurations treatments compared to the CK treatment. Plant root growth facilitated the formation and stabilization of soil aggregates, although the effect was not statistically significant. 2) *Cyperus rotundus*, whether planted alone or in mixture with *Cynodon dactylon*, inhibited the formation of soil macropores. This was likely due to its underdeveloped root system and the compressive effect of its enlarged root nodules on the surrounding soil pores during growth. In contrast, *Cynodon dactylon* and *Xanthium sibiricum*, either planted individually or in mixtures, consistently promoted the development of soil macropores. 3) Plant root traits exhibited significant correlations with both soil aggregate stability and soil pore structure. Root length (RL) and root surface area (RSA) were identified as the primary traits influencing soil aggregate stability, while root length (RL), root surface area (RSA) and root volume (RV) were found to be critical in controlling soil pore structure. To effectively enhance soil structural stability, plants can be selected based on root traits such as root length and surface area to identify pioneer or dominant species suitable for vegetation restoration in fragile ecosystems. This study provides essential data and theoretical insights for optimizing plant species selection and community design to enhance soil and water conservation, as well as ecological restoration in the riparian zones of the Three Gorges Reservoir and other similar environments prone to degradation.

Key Words: plant configuration; root traits; soil structure; aggregate; soil pore

土壤结构是土壤的核心特性之一^[1],对土壤的水分运输、养分循环以及微生物生命活动等均具有重要作用。土壤结构主要包括土壤团聚体和土壤孔隙两个维度^[2]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[3],其稳定性常被用作评估土壤结构稳定性的指标^[4],包括机械稳定性、水稳定性和生物稳定性,多数情况下指水稳定性。土壤孔隙是土壤结构的重要组成部分,其形态大小、数量搭配和空间分布状况综合反映了土壤中水分的流量、流速、流态及持水性能^[5]。植物生长与土壤结构之间的相互作用显著,土壤为植物提供了生长所必需的营养和水分,同时植物根系的物理、生物和电化学反应也会对土壤结构产生影响^[6-7]。植物根系通过穿插、伸长、缠绕、萎缩等方式直接影响土壤结构,也通过释放根系分泌物、增加土壤有机质、影响土壤微生物等途径间接作用于土壤结构^[8-9]。

植物生长过程中,根系性状被认为是提高土壤结构稳定性的首要因素^[10-11]。根系性状反映了植物对生境的响应和适应,并指示植物在生态系统中的功能,以及对土壤团聚体稳定性的影响^[12]。研究表明,细根的增加有助于提高土壤团聚体稳定性,表现为比根长与土壤团聚体稳定性呈显著正相关^[13]。关于水库岸带的研究发现,须根系草本植物的根体积密度是影响土壤团聚体稳定性的关键指标^[14]。此外,草本植物根系的生长在改善土壤孔隙结构方面同样起到了积极作用,根长、根表面积和根体积的增加可提高土壤孔隙度^[15]。植被恢复在改善脆弱生态系统功能和促进生态平衡方面发挥着关键作用,研究植物根系生长对土壤结构的影响有助于深化对植被恢复机制的认识。然而,现有研究往往局限于土壤团聚体或孔隙结构的单一维度,未能全面揭示脆弱生态系统中复杂的土壤功能,如水分保持与调节、养分循环与供给以及抗侵蚀与物理稳定性等,进而限制了修复策略的效果与精准性。为此,亟需从根系性状的角度出发,系统探究植物根系生长如何同时作用于土壤团聚体与孔隙结构这两个核心维度,这对于制定更加科学有效的生态修复策略具有重要意义。

三峡水库消落带作为长期受到反季节周期性淹水影响的典型脆弱生态系统,其植被群落从原生的乔木、灌木、草本与藤本植物共存,演替为以草本植物为主^[16-17]。消落带不同的草本植物群落对土壤团聚体稳定性的作用效果,因其植物种类及根系性状的差异而不同^[18]。研究消落带优势草本植物的不同配置对土壤结构的影响,有助于深入认识每种草本植物对土壤结构的作用,并探索作用效果最优的草本植物配置模式。因此,

本文将选择狗牙根(*Cynodon dactylon*)、香附子(*Cyperus rotundus*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)这三种消落带优势植物作为研究对象,从根系性状的角度出发,通过研究它们在不同配置下土壤团聚体和孔隙特征的响应,探究消落带优势物种及其配置模式对土壤团聚体粒径分布和稳定性以及土壤孔隙结构的影响。该结果可为三峡水库消落带的土壤结构稳定与植被恢复提供理论支撑,具有重要理论价值和现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于中国科学院重庆绿色智能技术研究院光温控制培养基地(29°48′07″ N, 106°32′33″ E)进行,该区属东南亚季风环流控制的亚热带湿润气候,年平均气温 18.3℃、年平均降水量 1105.4 mm。本试验为室内盆栽试验,试验土壤为紫色土,采自三峡水库消落带白家溪观测站(31°08′00″ N, 108°33′06″ E),样地高程在 160—170 cm,采样深度为 5—30 cm,供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil

全氮 Total N/%	有机质 Organic matter/%	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	铵态氮 Ammonium N/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate-N/ (mg/kg)	pH	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%
0.75	1.16	1.89	5.37	5.16	2.32	7.60	30.7	47.3	21.9

1.2 供试材料与试验设计

根据消落带植物群落特征,供试植物选择优势物种狗牙根(*C. dactylon*)、香附子(*C. rotundus*)和苍耳(*X. sibiricum*),均采自重庆市开州区白家溪消落带(31°08′00″ N, 108°33′06″ E)。单种试验盆的规格为长 0.5 m、宽 0.5 m、高 0.35 m;混种试验盆的规格为长 1.0 m、宽 0.5 m、高 0.35 m;透明硬质聚氯乙烯管(微根管)的规格为长 0.9 m、外径 0.07 m、内径 0.063 m。

植物种植设置 7 个处理:①单种狗牙根(G)、香附子(X)和苍耳(C);②混种狗牙根和香附子(GX)、苍耳和香附子(CX)、苍耳和狗牙根(CG),两两分开种;③空白处理(CK),不种植任何植物。每个处理 4 个重复,保持田间持水量。狗牙根在种植前需将其匍匐茎剪成 3—5 cm 的小段;香附子的根结放入疏松肥沃、排水良好的砂质壤土栽培,待培育一周苗高 5 cm 左右后分栽;苍耳种子在疏松肥沃、排水良好的砂质壤土中栽培,待培育一周苗高 10 cm 左右后分栽。2021 年 7 月将筛分的土壤分层并按设定容重(1.3 g/cm³)装盆,每层厚度为 5 cm,边装填边压实,并在装填下一层土壤时打毛已装填的土壤表面,以消除两层之间的垂直纹理,装填完毕后,充分洒水后静置,待土壤潮湿而不黏结时种植植物。种植密度依据野外的植物密度确定,狗牙根和香附子的种植密度是 20 株/m²,苍耳的种植密度为 4 株/m²,植物的种植情况如图 1 所示,混种的植物配置并没有完全混合,而是将花盆一分为二来种植两种植物。采集混种植物配置的土壤样品时,是在对应植物的正下方土壤进行采样,例如采集狗牙根和香附子混种配置中的狗牙根土壤,则是在花盆右侧的狗牙根植株正下方进行取样。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系提取及根系性状量化

于 2022 年 3 月使用微根窗复合根系观测系统(AZR-300,北京澳作生态仪器有限公司,中国),伸入预埋在土壤里的微根管,选择 1200 DPI 的分辨率对根管图像进行扫描。将存储于 SD 卡中的微根窗图像导入到电脑中,为去除边缘噪声对试验结果的影响,通过索引切片法裁剪感兴趣区域(Region of Interest, ROI),大小为 400×500(pixel),通过配套软件 WinRHIZO Tron MF 2020 手动描绘,将图像调至 1:1 比例,根据图像中呈现的根系轮廓调整直径长度和方向,进而描绘根系图像,处理完毕后,根系性状参数根长(Root Length, RL)、根直径(Root Diameter, RD)、根表面积(Root Surface Area, RSA)、根体积(Root Volume, RV)等会以.txt 文本形式保

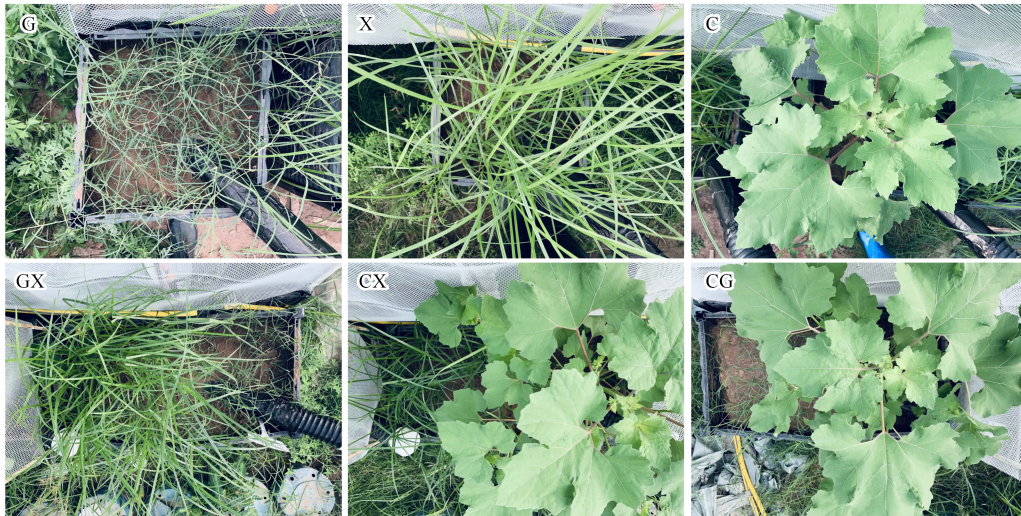


图 1 植物种植情况实拍图

Fig.1 Actual photos of planting condition

G:狗牙根单种;X:香附子单种;C:苍耳单种;GX:狗牙根香附子混种;CX:苍耳香附子混种;CG:苍耳狗牙根混种

存,导入 XLRizo.xls 即可获得根系性状值。

1.3.2 土壤孔隙结构

于 2022 年 3 月使用 PVC 环刀(内径 4.5 cm,高度 5 cm)采集 0—10 cm 土层的原状土芯。取样之前,将采样点表层的植物、砾石等清除,将 PVC 管一端用特制的铁制钢管垂直压入土层,挖开土芯周围的土壤,将 PVC 管连同管中的土壤一并取出,两端套上 PVC 盖,空隙部分用海绵填充塞实,用保鲜膜对整个样品进行包裹,为防止水分散失影响土壤结构,再将样品放入装有缓冲材料的硬质塑料盒,放入 4℃ 冰箱待测。土芯在采集和运输过程中尽量减少土体晃动,避免 CT 扫描结果产生误差。原状土芯采用上海英华检测分析测试中心的全能型 X 射线微焦点 CT 系统(Vltomelx M,phoenix,Germany)进行扫描,扫描电压设置为 155 kV,测试管电流设定为 26 μ A,扫描分辨率 26 μ A,曝光时间 334 s。扫描方式:将样品放置于样品台上,水平匀速旋转 360°,得到体素为 1908×1908×1908 的扫描图像,将得到的.raw 格式的 CT 图像保存在计算机中,采用 VG Studio Max 进行图像处理,选择图像中心区域作为感兴趣区域(Region of interest,ROI),ROI 大小 1153×1153×1908 体素,先将图像进行表面定义,选取最佳阈值,然后根据阈值进行分割,分割完毕后,即可得到孔隙 2D、3D 可视化图像和孔隙结构参数,包括孔隙直径(Pore Diameter,PD)、数目(Pore Number,PN)、表面积(Pore Surface Area,PSA)、体积(Pore Volume,PV)和孔隙度(Porosity,P)。

本研究使用的孔隙度(P)为孔隙体积与土壤样本总体积的比值(%),所使用的孔隙直径为平均直径,其计算公式如下:

$$PD = \frac{\sum_{i=1}^n D_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

式中, D_i 和 V_i 分别为单个孔隙的直径和表面积。

1.3.3 土壤团聚体筛分

样品采集前用剪刀从植物茎基部剪掉其地上部分,用铁铲采集原状土,采集的块状土需轻轻剥离与工具接触变形的部分,每种植物配置采集一个原状土壤样品,随后,将采集的土壤放入预先写了标签的 30 cm×20 cm×10 cm 的硬质塑料盒,用保鲜膜封存,用于筛分土壤不同粒级的土壤团聚体,运输过程中尽量避免扰动土壤结构。采用 Yoder 湿筛法^[19]筛分出大团聚体(>2 mm)、小团聚体(2—0.25 mm)、微团聚体(0.25—

0.053 mm) 和粉黏粒 (<0.053 mm)。

团聚体平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD) 和几何平均直径 (Geometric Mean Diameter, GMD) 的计算采用邱莉萍等^[20]推导的公式:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$\text{GMD} = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

式中, $\bar{R}_i$ 为某级团聚体的平均直径; w_i 为某级团聚体的干重。

分形维数 (Fractal Dimension, D) 的计算公式采用杨培岭等^[21]推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

式中, $M(r < \bar{R}_i)$ 为粒径小于 $\bar{R}_i$ 的团聚体重量; M_T 为团聚体总重量; $R_{\max}$ 为团聚体的最大粒径。

团聚体稳定指数 (Aggregate Stability Index, ASI) 的计算采用杜立宇等^[22]和杨培岭等^[21]推导的公式:

$$\text{ASI} = 100 \times \left(\frac{M_{\text{usa}}}{M_{\text{ta}}} \right) \quad (5)$$

式中, M_{usa} 为土壤团聚体分散后 >0.25 mm 团聚体颗粒重量 (g); M_{ta} 为分散土壤团聚体颗粒重量 (g)。

1.3.4 土壤理化性质

土壤 pH 采用水土比 5:1 浸提, 用 pH 计 (Fe 20, Mettler Toledo, USA) 测定; 土壤阳离子交换量 (Cation Exchange Capacity, CEC) 用乙酰胺交换法 (pH = 7.0) 测定; 土壤机械组成采用马尔文粒度分析仪 (Mastersizer 3000, Malvern Panalytical, UK) 测定; 土壤有机质 (Soil Organic Matter, SOM) 用重铬酸钾容量法测定; 样品过 100 目筛, 总碳 (TC) 和总氮 (TN) 用元素分析仪 (Vario EL cube, Elementer, Germany) 测定。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 对所得试验数据整理, 使用 SPSS 26.0 对不同植物配置的地下根系参数数据进行方差分析 (ANOVA), 根据结果判断不同植物配置的地下性状是否存在显著差异, 在事后比较中选择 LSD、Waller-Duncan、Tukey's-b (K) 三项和 0.05 的显著性水平, 根据齐性子集中 Waller-Duncan 的结果进行解读和字母标注。使用 SPSS 26.0 对不同植物配置的土壤团聚体粒径、团聚体稳定性及土壤孔隙结构指标进行方差分析, 最后使用 Origin 2023b 分别进行作图, 文中数据均为平均值 $\pm$ 标准误。利用 Origin 2023b 对不同植物配置的地下性状、土壤团聚体稳定性和孔隙结构特征进行 Pearson 相关性分析, 并进行作图。使用 Canoco 5 以土壤团聚体稳定性指标 (团聚体平均重量直径 (MWD)、几何平均质量 (GMD)、分形维数 (D) 和团聚体稳定指数 (ASI)) 和土壤孔隙结构指标 (孔隙数目 (PN)、孔隙直径 (PD)、孔隙体积 (PV)、孔隙表面积 (PSA) 和孔隙度 (P)) 分别作为响应变量, 以植物根系性状 (根系长度 (RL)、根系总表面积 (RSA)、根系平均直径 (RD) 和根系体积 (RV)) 作为解释变量进行 RDA 分析, 并进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同植物配置的地下根系性状特征

除 RL 外, 不同植物配置的 RSA、RD 和 RV 均存在显著性差异 ($P < 0.05$) (表 2)。不同植物配置的 RSA 和 RV 从大到小的顺序是: C > CG > G > CX > GX > X, RD 的顺序是 C > G > CG > GX > CX > X。总体而言, 单种苍耳的根系最为发达, 而单种香附子的根系长势最弱。

与单种香附子相比, 苍耳与香附子混种和狗牙根与香附子混种的主要根系性状指标均有所增加, RSA 分

别增加了 92.7%和 21.3%,*RD* 分别增加了 45.8%和 59.9%,*RV* 分别增加了 188%和 62.6%。与单种狗牙根相比,苍耳和狗牙根混种的 *RSA* 增加了 68.8%,*RD* 的变化不明显,*RV* 提高了 79.8%。将狗牙根和香附子混种与单种狗牙根对比,苍耳和香附子混种与单种苍耳对比,混种的 *RSA* 比单种分别降低了 54.1%和 58.2%,*RD* 分别降低了 6.2%和 37.8%,*RV* 分别降低了 59.2%和 71.3%,这表明与香附子混种会降低狗牙根和苍耳的根系性状指标数值。

表 2 不同植物配置下根系性状特征
Table 2 Root system traits under different plant configurations

植物配置 Plant configuration	<i>RL</i> /mm	<i>RSA</i> /mm ²	<i>RD</i> /mm	<i>RV</i> /mm ³
G	1947±578a	3011±1167abc	4.63±0.35b	554±288abc
X	1282±302a	1138±332c	2.72±0.66c	139±51c
C	2670±440a	5245±838a	6.37±0.51a	1394±275a
GX	1018±251a	1381±328bc	4.34±0.27b	226±53bc
CX	1783±245a	2193±303abc	3.96±0.41bc	400±96bc
CG	3455±1393a	5081±2144ab	4.51±0.44b	995±423ab

RL:根系长度 Root length;*RSA*:根系表面积 Root surface area;*RD*:根系直径 Root diameter;*RV*:根系体积 Root volume;同列不同字母代表显著性差异($P<0.05$);表中数据为平均值±标准误($n=4$)

2.2 不同植物配置下土壤团聚体粒径分布及其稳定性

不同植物配置下的土壤团聚体粒径分布存在差异,但并不显著($P>0.05$) (图 2)。试验土壤主要以 0.25—2 mm 粒级团聚体为主,占比达到 45.1%—50.1%;其次为 0.05—0.25 mm,占比为 26%—32%;<0.05 mm 粒级的占 16.7%—22%;>2 mm 粒级的占 4.5%—8%。相较于 CK 处理,所有的植物配置处理下>0.25 mm 粒级的土壤团聚体质量百分比均有增加。其中,植物单种处理下>2 mm 粒级的土壤团聚体比例相较于 CK 处理,单种狗牙根增加了 55.9%,单种苍耳增加了 38.4%,单种香附子减少了 3.9%。GX 混种中的狗牙根(GX-G)相比于单种狗牙根,土壤中>2 mm 粒级团聚体减少了 42.5%,0.25—2 mm 粒级团聚体增加了 2.9%,<0.05 mm 粒级团聚体增加了 11%。相比于单种苍耳,CG 混种中的苍耳(CG-C)和 CX 混种中的苍耳(CX-C),土壤中 0.25—2 mm 粒级团聚体均有所增加,分别增加了 11.1%和 8.6%。相比于单种香附子,GX 混种中的香附子(GX-X)和 CX 混种中的香附子(CX-X),土壤中>2 mm 粒级团聚体均有所增加,分别增加了 11.4%和 22.5%。

不同植物配置下土壤团聚体稳定性指标, *MWD*、*GMD*、*ASI* 和 *D* 均没有显著性差异($P>0.05$) (表 3)。与 CK 组相比,仅 GX-G 下土壤的 *MWD* 有所降低,其余植物配置下土壤的 *MWD* 均有所增加,其中 CG-G 和单种狗牙根处理分别提高了 19.3%和 16.3%。仅 GX-G、CG-C 和单种香附子下土壤的 *ASI* 略低于 CK 组,其余植物配置下土壤的 *ASI* 均有所提高,特别是 CG-G、单种狗牙根以及单种苍耳处理,分别提高了 52.4%、50.4%和 34.9%。虽然不同植物配置下土壤的 *GMD* 均低于 CK 组,但差异不显著($P>0.05$)。这表明植物根系的生长有助于土壤大粒级团聚体的形成和稳定,但这一效应并

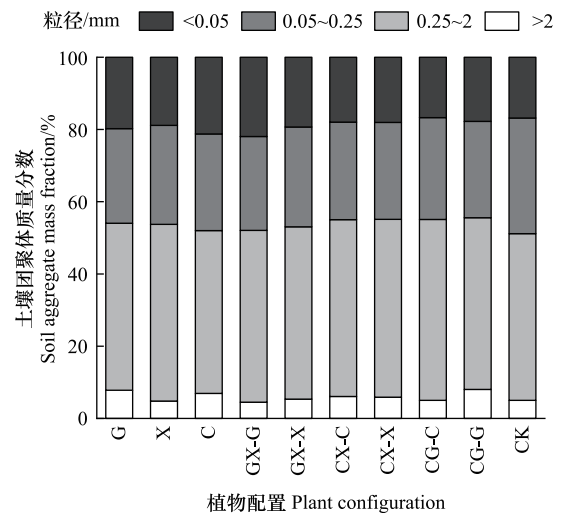


图 2 不同植物配置下土壤团聚体粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of soil aggregates under different plant configurations

GX-G:狗牙根香附子混种中的狗牙根;GX-X:狗牙根香附子混种中的香附子;CX-C:苍耳香附子混种中的苍耳;CX-X:狗苍耳香附子混种中的香附子;CG-C:苍耳狗牙根混种中的苍耳;CG-G:苍耳狗牙根混种中的狗牙根;CK:清水对照

未达到显著性水平 ($P>0.05$) (图 3)。

表 3 不同植物配置下土壤团聚体稳定性指标的单因素 ANOVA 方差分析结果

Table 3 Results of one-way ANOVA for soil aggregate stability indicators under different plant configurations

土壤团聚体稳定性指标 Soil aggregate stability indicators	平均值±标准误 Mean±SEM	<i>F</i>	<i>P</i>
MWD/mm	0.880±0.020	0.773	0.642
GMD/mm	0.407±0.047	0.914	0.526
ASI	6.167±0.410	0.932	0.512
<i>D</i>	2.358±0.009	1.483	0.199

MWD:团聚体平均重量直径 Mean weight diameter;GMD:几何平均直径 Geometric mean diameter;*D*:分形维数 Fractal dimension;ASI:团聚体稳定指数 Aggregate stability index; $P<0.05$ 为有显著性差异

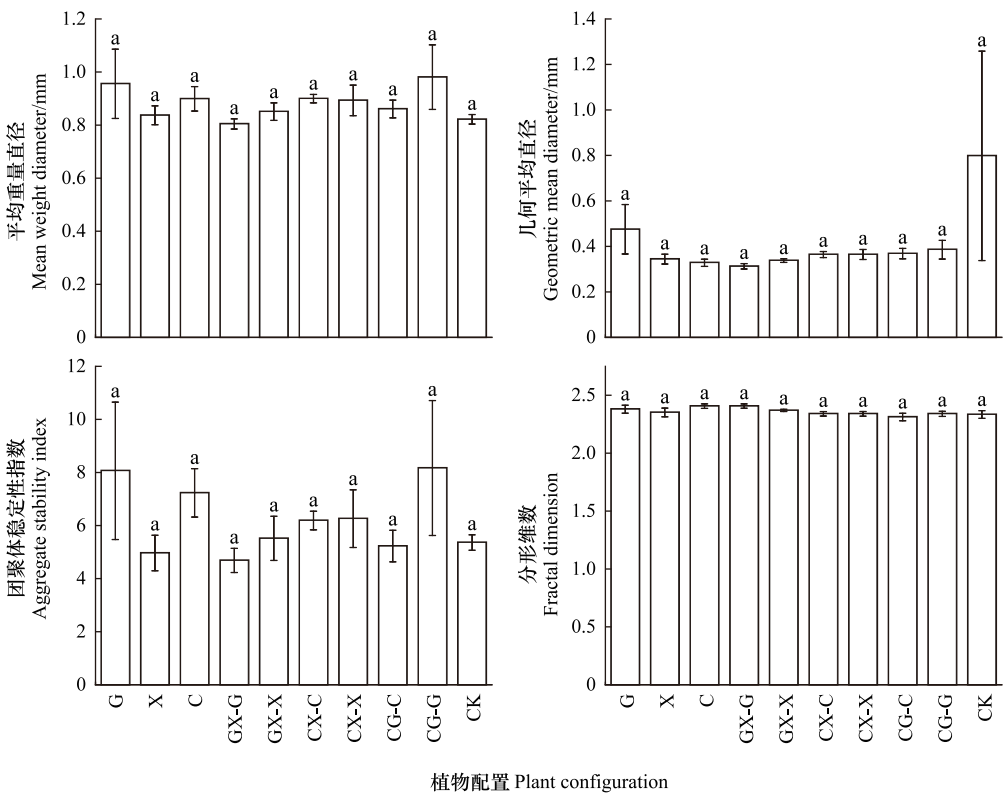


图 3 不同植物配置下土壤团聚体稳定性特征

Fig.3 Characteristics of soil aggregate stability under different plant configurations

不同字母代表显著性差异 ($P<0.05$);图中数据为平均值±标准误 ($n=4$)

2.3 不同植物配置下土壤孔隙结构

不同植物配置下土壤孔隙度存在显著差异 ($P<0.05$) (图 4)。相较于 CK 处理,CX-C 和 CX-X 下土壤总孔隙度 (P) 都有所提高,分别提高了 55.9%和 58%。而单种香附子和 GX-X 下的土壤总孔隙度,相较于 CK 处理分别降低了 14.1%和 9.4%。不同植物配置下土壤的 PN 、 PD 和 PV 差异显著 ($P<0.05$),不同植物配置下土壤的 PSA 差异极显著 ($P<0.01$)。单种狗牙根处理下土壤的 PN 和 PSA 都显著高于 CK 组,分别提高了 178%和 84.5% ($P<0.05$)。单种香附子、单种苍耳以及所有混种组的 PN 都高于 CK 组,但均低于单种狗牙根组。单种狗牙根的 PD 显著高于单种香附子 ($P<0.05$),而与别的植物配置相比无显著差异 ($P>0.05$)。

与 CK 组相比,CX-C 和 CX-X 下土壤的 PV 分别提高了 55.2%和 57.6%,但单种香附子和 GX-X 下土壤的 PV 分别降低了 23.5 和 10.7%,但差异均不显著 ($P>0.05$)。单种狗牙根、CX-C 和 CX-X 以及 CG-C 和 CG-G 下

土壤的 PSA 均显著高于 CK 组,分别提高了 84.5%、90.3%、97.4%、65%和 94.9%。单种香附子、单种苍耳、GX-G 和 GX-X 下土壤的 PSA 均高于 CK 组,但差异并不显著($P>0.05$)。综上所述,单种香附子会抑制土壤孔隙结构发育,而 GX 混种也不利于土壤孔隙结构的改善,会降低土壤的 P 、 PD 和 PV 。然而,狗牙根和苍耳无论单种还是混种都有助于促进土壤孔隙结构的发育。

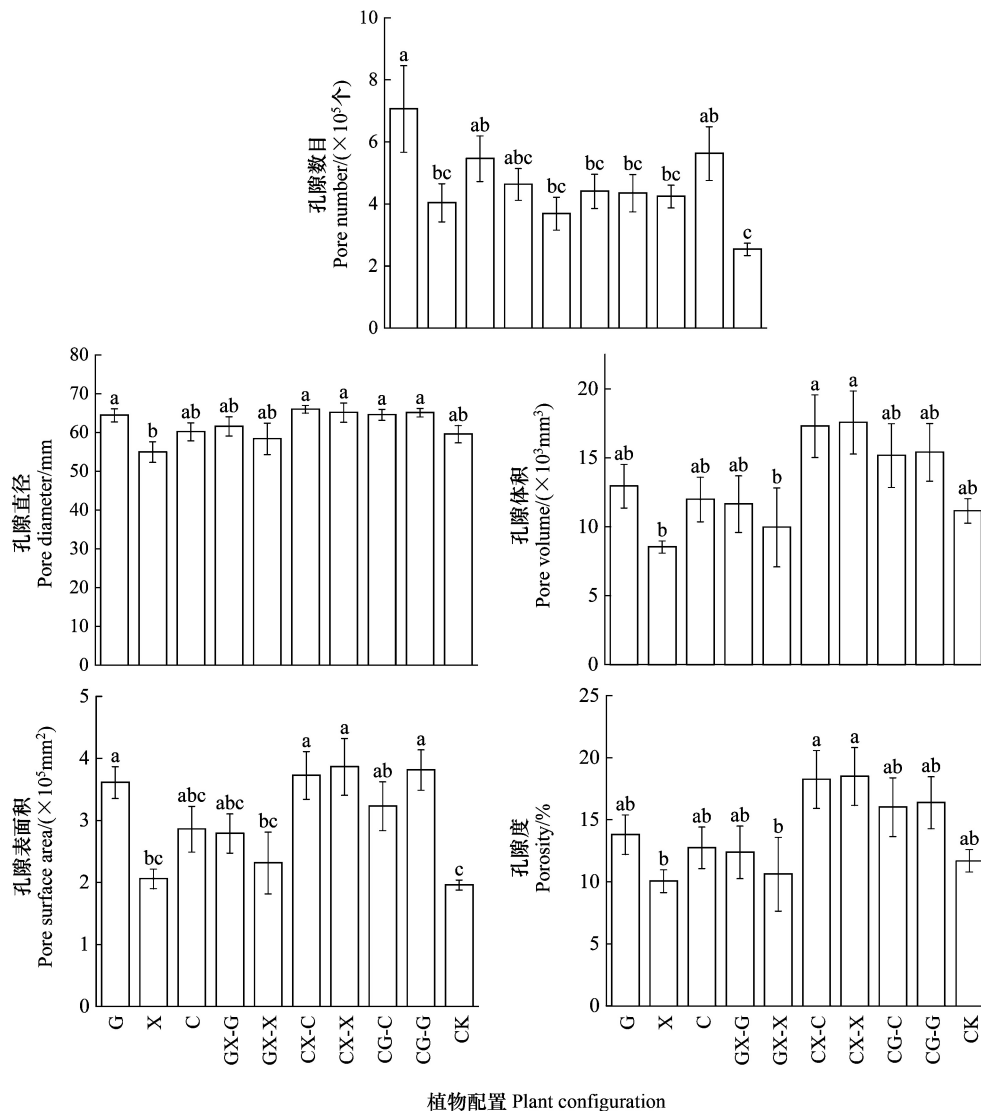


图 4 不同植物配置下土壤孔隙结构参数

Fig.4 Soil pore structure parameters under different plant configurations

不同字母代表显著性差异 ($P<0.05$); 图中数据为平均值 $\pm$ 标准误 ($n=4$)

2.4 植物根系性状与土壤结构之间的相关性

植物根系性状和土壤团聚体稳定性指标的 Pearson 相关性分析显示(图 5),单种狗牙根促进了土壤团聚体的稳定,四个根系性状指标均与 MWD 和 ASI 呈正相关,与 D 呈负相关,其中 RD 与 MWD 和 ASI 呈显著正相关($P<0.05$),说明在狗牙根单种的条件下, RD 是提高土壤团聚体稳定性的关键根系性状。相反,单种香附子整体上抑制了土壤团聚体的形成与稳定,除 RL 与 GMD 呈正相关外,四个根系性状指标与 MWD、GMD 和 ASI 均呈负相关;除 RL 与 D 呈负相关外,根系性状指标均与 D 呈正相关,但均未达到显著水平($P>0.05$)。单种苍耳对土壤大团聚体的形成有抑制作用,除 RD 外,四个根系性状指标与 MWD、GMD 和 ASI 呈负相关,与 D

呈正相关,且 RSA 与 GMD 呈显著负相关($P<0.05$),RV 与 D 呈显著正相关($P<0.05$),说明单种苍耳配置下 RSA 和 RV 是降低土壤团聚体稳定性的关键性状指标。

在狗牙根和香附子混种配置下,四个根系性状指标与 MWD、GMD 和 ASI 整体呈负相关,与 D 呈正相关,其中 RD 与 D 呈显著正相关($P<0.05$),表明 RD 在该配置下是影响土壤团聚体稳定性的关键性状。而在苍耳和香附子混种配置下,RL、RSA 和 RV 与 MWD、GMD 和 ASI 呈正相关,RD 则与这些团聚体稳定性指标呈负相关,且 RL 与 MWD、GMD 和 ASI 的正相关达到显著水平($P<0.05$),表明 RL 在提高土壤团聚体稳定性方面起关键作用。在苍耳和狗牙根混种配置下,四个根系性状指标与 MWD、GMD 和 ASI 呈正相关,与 D 呈负相关,但相关性均未达显著水平($P>0.05$)。

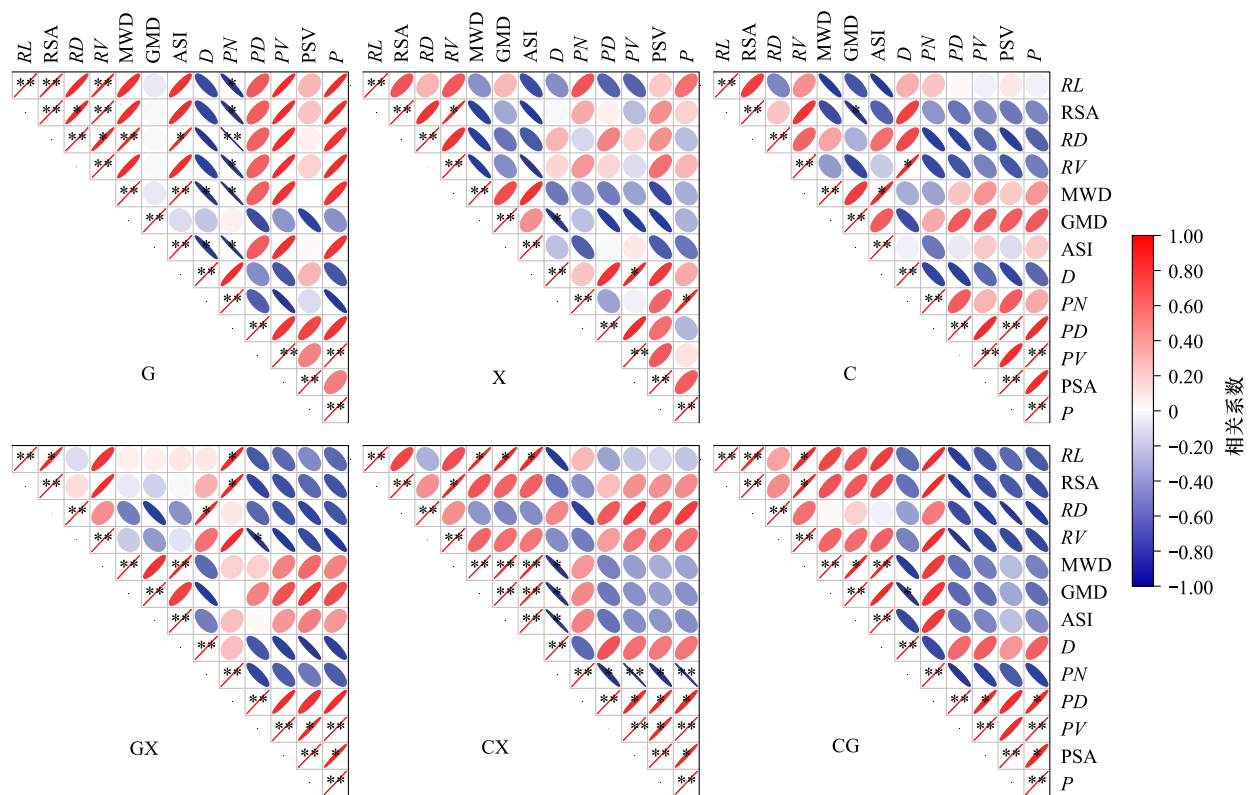


图5 不同植物配置下植物根系性状与土壤团聚体稳定性、土壤孔隙结构之间的相关性

Fig.5 Correlation between plant root traits and soil aggregate stability and soil pore structure under different plant configurations

PD:孔隙直径 Pore diameter;PN:数目 Pore number;PSA:表面积 Pore surface area;PV:孔隙体积 Pore volume;P:孔隙度 Porosity.红色为正相关,蓝色为负相关;*表示在 0.05 的水平上显著,**表示在 0.01 的水平上显著;单种配置处理: $n=4$,混种配置处理: $n=8$

植物根系性状和土壤孔隙结构的相关性分析显示(图5),单种狗牙根四个根系性状指标与 PD、PV、PSA 和 P 呈正相关,与 PN 呈显著负相关($P<0.05$),尤其是 RD 与 PN 的负相关性达到极显著水平($P<0.01$),表明 RD 是减少土壤孔隙数目的关键根系性状。单种苍耳的 RSA、RD 和 RV 与五个土壤孔隙结构指标均呈负相关,但未达到显著水平($P>0.05$)。

在狗牙根和香附子混种配置下,四个根系性状均与 PD、PV、PSA 和 P 呈负相关,与 PN 呈正相关,其中 RV 与 PD 呈显著负相关($P<0.05$),而 RL 和 RSA 与 PN 呈显著正相关($P<0.05$)。苍耳和香附子混种配置的 RL 与 PN 呈正相关,与 PD、PV、PSA 和 P 呈负相关,RSA、RD 和 RV 与土壤孔隙结构指标的相关性正好与 RL 相反,但相关性均未达到显著水平($P>0.05$)。苍耳和狗牙根混种配置的四个根系性状指标与 PN 呈正相关,与 PD、PV、PSA 和 P 呈负相关,相关性均不显著($P>0.05$)。上述结果表明控制孔隙结构的关键根系性状是 RL、RSA 和 RV。

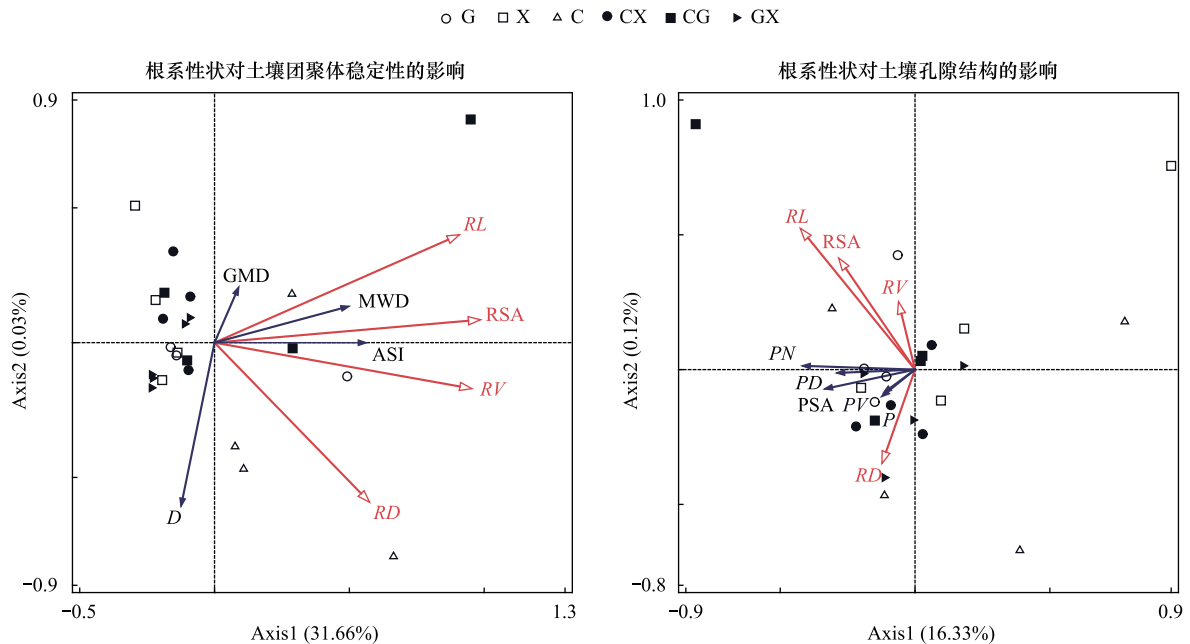


图6 植物根系性状对土壤结构的影响

Fig.6 Effect of plant root traits on soil structure

红色箭头代表不同的植物根系性状,黑色箭头代表不同的土壤结构指标,箭头越长表示该因子的解释率越大;土壤结构指标和植物根系性状的夹角代表了土壤结构与植物根系性状之间的相关关系,夹角为锐角时表示呈正相关关系,钝角时呈负相关关系

2.5 影响土壤结构的关键植物根系性状

植物根系性状影响土壤团聚体稳定性的冗余分析结果表明,四个根系性状共解释了四个土壤团聚体稳定性 31.7% 的变异,轴一解释了 31.66% 的变异,轴二解释了 0.03% 的变异,其中 RSA 对土壤团聚体稳定性变化的解释量最大,为 30.8%。植物根系性状影响土壤孔隙结构的冗余分析结果表明,四个根系性状共解释了五个土壤孔隙结构指标 16.5% 的变异,轴一解释了 16.33% 的变异,轴二解释了 0.12% 的变异, RD、RV 和 RL 对土壤孔隙结构变化的解释量最大,分别为 9.0%、4.4% 和 3.0%。RSA 是影响土壤团聚体稳定性的关键根系性状, RD 是影响土壤孔隙结构的关键根系性状(图 6)。

3 讨论

3.1 不同植物配置对土壤团聚体粒径分布及其稳定性的影响

土壤团聚体粒径的大小及其组成比例影响着土壤结构和功能的稳定,不同粒级的团聚体对改善土壤孔隙度、提高抗侵蚀能力以及促进土壤微生物活动具有不同的作用^[23],其中,粒径>0.25 mm 的水稳定性团聚体含量是影响土壤团聚体稳定性的主要因素^[24]。本研究结果显示,相较于 CK 组,所有的植物配置下土壤中>0.25 mm 团聚体质量分数都有所增加,说明植物的生长能提高土壤中>0.25 mm 团聚体的比例。这与前人的研究结果一致,唐骏等^[25]通过对裸地、草地、灌木三种植被类型研究发现,平台地形下不同植被类型各土层(0—10 cm 和 10—20 cm)的>0.25 mm 大团聚体比例均为草地>灌木>裸地,边坡地形下各土层均为灌木>草地>裸地;于雯霏等^[26]对比黄土高原地区退耕一年撂荒地发现,植被恢复后的铁杆蒿和长芒草样地的土壤团聚体稳定性显著提升;Wang 等^[27]研究发现,黄土高原丘陵地区“退耕还林”项目实施后,植被恢复使土壤大团聚体含量增加了 78%。

相较于单种配置,苍耳和香附子的混种配置以及苍耳和狗牙根的混种配置都提升了土壤中>0.25 mm 粒级大团聚体的比例。然而,狗牙根和香附子的混种配置却导致>0.25 mm 粒级大团聚体比例较其单种配置有

所下降,同时总根长也低于各自单种配置。这可能是由于混合种植时两种植物之间的资源竞争限制了根系的生长发育。根系通过物理缠绕作用和根系分泌物的黏结作用直接促进团聚体的形成^[6],而根系生长发育受限时,土壤大团聚体的形成自然也会受到影响。相比之下,单种苍耳展现出更为优越的根系特性,其根系性状指标显著高于单种狗牙根和单种香附子。因此,在苍耳和香附子的混种配置以及苍耳和狗牙根的混种配置中,苍耳凭借发达的根系系统带动了整体根系性状的提升,表现出更强的土壤固结能力,有效促进了土壤团聚体的稳定。这种固结能力弥补甚至超越了与狗牙根或香附子混种时的竞争负面影响,显示了苍耳根系在改善土壤结构中的主导作用。

尽管本研究中不同植物配置的土壤团聚体粒径分布和团聚体稳定性存在差异,但这些差异均不显著($P>0.05$)。这可能是因为植物根系生长一方面促进了土壤大团聚体的形成,另一方面在穿透大团聚体时会导致了大团聚体的破碎。同时,试验的周期较短且土壤均过筛处理,导致植物根系生长对团聚体的促进作用未显著高于破碎作用。未来研究可以尝试延长培养时间,以探究不同植物配置对土壤团聚体的影响是否会更加显著,或者通过野外的长期观测进一步研究三峡库区消落带不同植物群落的土壤团聚体粒径分布以及稳定性指标的差异。

3.2 不同植物配置对土壤孔隙结构的影响

土壤孔隙是容纳水分和空气的空间,适宜的孔隙数量和大小有助于满足植物对水分和空气等的需求,也有利于根系的伸展和活动^[28]。本研究结果表明,除了单种香附子以及狗牙根和香附子混种配置下的香附子外,其他的植物配置均促进了土壤孔隙结构的发育。植物通过根系的穿插生长、缠绕、萎缩与降解直接影响土壤孔隙结构的形成^[8],而发达的根系网络可以有助于产生更多的大孔隙^[29]。由于本试验中的香附子的根系最不发达,且具有较大的根结,根结在膨大过程中会压缩周围的土壤孔隙空间,导致香附子的土壤孔隙结构较差。狗牙根和香附子的混种配置对土壤孔隙结构发育的促进作用不如单种狗牙根,可能原因在于混种之间的物种竞争并不利于根系结构的形成,从而影响了土壤孔隙结构,同时香附子也抑制了土壤孔隙的形成。

在本研究中,混种苍耳和香附子下的土壤孔隙结构良好,其中 P 、 PV 和 PSA 表现突出。这一现象可归因于苍耳根系的高度发达,相较于香附子根系对土壤孔隙结构的抑制作用,苍耳根系展现出更为显著的正面促进作用,有效增强了土壤孔隙结构的连通性和复杂性。苍耳属于直根系植物,根系主要由主根和侧根组成,植物根系中较粗的根系能够穿透致密的土壤基质形成通道,待根系分解后形成开放的生物孔,从而促进土壤大孔隙形成^[30-31]。而须根则主要提高直径小于 $15\ \mu\text{m}$ 的微孔隙密度^[32],狗牙根和香附子都属于须根系植物,主根都不明显,因此苍耳根系对土壤孔隙结构的改善作用尤其突出。基于上述,种植狗牙根和苍耳对三峡水库消落带的土壤孔隙结构具有良好的改善作用。

3.3 植物根系性状对土壤结构的影响

对比分析不同植物配置的根系性状对土壤团聚体稳定性指标的影响,发现狗牙根的根系性状对土壤团聚体的形成与稳定具有显著的正向作用($P<0.05$),这与 Li 等^[33]在关于草本植物根系密度对土壤结构和边坡稳定性的研究结论一致,即狗牙根群落能通过改善土壤结构来稳定斜坡。本研究结果显示, RL 是提高土壤团聚体稳定性的关键根系指标。Garcia 等^[34]对法国葡萄种植园的研究也发现,根重和比根长显著影响土壤团聚体稳定性。在本研究中,单种狗牙根时 RD 是提高土壤团聚体稳定性的关键根系性状,但狗牙根和香附子混种时 RD 却成为降低土壤团聚体稳定性的关键根系性状。Kang 等^[35]在研究两种草本植物细根对土壤团聚体稳定性的影响时指出,根长密度是预测团聚体稳定性变化的合适参数,极细根($<0.25\ \text{mm}$)的密度增加可以不断提高团聚体稳定性,但其他直径的根,特别是直径 $>1\ \text{mm}$ 的根,在密度达到一定阈值后会对稳定性产生不利影响。虽然狗牙根和香附子都是须根系,但香附子具有根结,在狗牙根和香附子混种时 RD 越大,表明香附子的根结越膨大,进而导致土壤团聚体的稳定性下降。

冗余分析的结果显示, RSA 对团聚体稳定性的变异解释率最高。 RSA 反映了根系与土壤的总接触面积,植物根系生物量越大, RSA 越大;而在根系生物量一定时, RSA 越大表明细根越多,说明细根是提高团聚体稳

定性的主要驱动力,这与前人的研究结论一致^[35-36]。本研究中,单种苍耳时 *RSA* 和 *RV* 与土壤团聚体稳定性呈显著负相关,这可能是因为苍耳根系的扩展和延伸导致土壤颗粒分散,从而影响团聚体的稳定性。

对比分析不同植物配置的根系性状对土壤孔隙结构特征的影响,发现 *RD* 是降低孔隙数目的关键根系性状,而 *RL* 和 *RSA* 是增加孔隙数目的关键根系性状,*RV* 是降低孔隙直径的关键根系性状。在狗牙根和香附子混种时,*RL* 和 *RSA* 与 *PN* 呈显著正相关($P<0.05$),*RV* 与 *PD* 呈显著负相关($P<0.05$),说明狗牙根和香附子的混种配置有助于产生更多的小孔隙。这可能是因为狗牙根和香附子都是须根型植物,而粗大的根系才更有助于产生土壤大孔隙^[30]。苍耳和狗牙根混种配置的根系性状都与 *PN* 呈正相关,而单种苍耳的植物根系性状除 *RL* 外都与 *PN* 呈负相关,说明苍耳和狗牙根的混种配置比起单种苍耳更有助于增加土壤孔隙数目。苍耳单种对土壤孔隙数目的影响并不显著($P>0.05$),而单种狗牙根甚至显著抑制了土壤孔隙的形成($P<0.05$);但苍耳和狗牙根混种时,两者共同促进了土壤孔隙数目的增加。这是由于狗牙根根系分布较浅,其须根在表层土壤中交错缠绕形成庞大的根系网,而苍耳属于直根系植物,根系分布较深,其主根和侧根在土壤表层形成的根系网络弱于狗牙根^[37]。这种根系特性的互补,促成了苍耳和狗牙根在混种时对土壤孔隙结构的改善,并发挥了功能耦合作用。本研究仅从根系性状的角度探究了不同植物配置对土壤结构的影响,而植物根系除物理结构外,其根系分泌物和根际微生物也会对土壤结构产生重要影响,今后的研究可以进一步探索这些因素对土壤结构的综合影响。

4 结论

1) 相比于 CK 处理,所有植物配置下土壤 >0.25 mm 粒级团聚体质量百分比均有增加,表明植物根系生长有助于土壤团聚体的形成与稳定。尽管某些植物配置(如狗牙根和香附子混种、苍耳和狗牙根混种)下土壤的 *MWD* 和 *ASI* 略低于 CK 组,但差异均不显著($P>0.05$)。

2) 植物配置显著影响土壤孔隙结构($P<0.05$)。除香附子单种及其与狗牙根混种配置外,其余植物配置的土壤孔隙结构指标均高于 CK 组,表明香附子单独种植或者和狗牙根混种时都会抑制土壤大孔隙发育,可能是由于香附子根系较不发达,且其较大的根结在膨大过程中压缩了周围的土壤孔隙。相反,对于狗牙根和苍耳,无论是单种还是混种配置都会促进土壤大孔隙的发育。

3) 植物根系性状与土壤团聚体稳定性和土壤孔隙结构具有显著相关性($P<0.05$),其中 *RD* 和 *PN* 呈极显著负相关($P<0.01$)。影响土壤团聚体稳定性的关键根系性状是 *RL* 和 *RSA*,控制孔隙结构的关键根系性状是 *RL*、*RSA* 和 *RV*。

参考文献(References):

- [1] Jensen J L, Schjønning P, Watts C W, Christensen B T, Peltre C, Munkholm L J. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma*, 2019, 337: 834-843.
- [2] Yudina A, Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: the unity of aggregates and pores. *Geoderma*, 2023, 434: 116478.
- [3] Yan L, Jiang X X, Ji X N, Zhou L T, Li S Y, Chen C, Li P Y, Zhu Y C, Dong T H, Meng Q F. Distribution of water-stable aggregates under soil tillage practices in a black soil hillslope cropland in northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 24-31.
- [4] Ding W F, Zhang X C. An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(5): 831-843.
- [5] Fomin D S, Yudina A V, Romanenko K A, Abrosimov K N, Karsanina M V, Gerke K M. Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle. *Geoderma*, 2023, 432: 116401.
- [6] 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. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [7] Volpiano C G, Lisboa B B, José J F B D S, Beneduzi A, Granada C E, Vargas L K. Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2022, 46: e0210098.
- [8] Gregory P J. RUSSELL REVIEW Are plant roots only “in” soil or are they “of” it? Roots, soil formation and function. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13219.
- [9] Lu J R, Zhang Q, Werner A D, Li Y L, Jiang S Y, Tan Z Q. Root-induced changes of soil hydraulic properties - A review. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125203.

- [10] Schroeder-Georgi T, Wirth C, Nadrowski K, Meyer S T, Mommer L, Weigelt A. From pots to plots: hierarchical trait-based prediction of plant performance in a mesic grassland. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 206-218.
- [11] Le Bissonnais Y, Prieto I, Roumet C, Nespoulous J, Metayer J, Huon S, Villatoro M, Stokes A. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. *Plant and Soil*, 2018, 424(1): 303-317.
- [12] Ali H E, Reineking B, Münkemüller T. Effects of plant functional traits on soil stability: intraspecific variability matters. *Plant and Soil*, 2017, 411(1): 359-375.
- [13] Xiao L, Yao K H, Li P, Liu Y, Chang E H, Zhang Y, Zhu T T. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105671.
- [14] Wang X X, Shan K, Huang P, Ma M H, Wu S J. Response of soil aggregate stability to plant diversity loss along an inundation stress gradient in a reservoir riparian zone. *Catena*, 2023, 233: 107472.
- [15] Hao H X, Wei Y J, Cao D N, Guo Z L, Shi Z H. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104542.
- [16] 柯智溢, 王琴, 沈秋月, 谢梦婷, 肖衡林, 刘瑛. 三峡水库忠县至秭归县段消落带植被群落特征研究. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(9): 1975-1985.
- [17] 张乐满, 兰波, 张东升, 刘英杰, 张丽红, 许文锋, 段晨辉, 敦静怡, 刘正学. 三峡水库涪陵—奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. *生态学报*, 2022, 42(8): 3228-3240.
- [18] 王小晓. 三峡库区消落带先锋植物及其群落对土壤团聚体稳定性影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [19] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437.
- [20] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. *生态学报*, 2006, 26(2): 364-372.
- [21] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [22] 杜立宇, 李天来, 梁成华, 赵宇光, 吴岩. 长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 38-41, 76.
- [23] 丁俊男, 于少鹏, 史传奇, 王慧. 寒区湿地不同土地利用方式对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3543-3551.
- [24] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 王艳玲. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征. *土壤学报*, 2008, 45(3): 459-465.
- [25] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 文月荣, 徐娜, 吴得峰. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [26] 于雯霏, 王佩佩, 刘俊娥, 周正朝, 游犇. 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. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 246-254.
- [27] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, Shi Z H. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau. *Catena*, 2018, 167: 257-265.
- [28] 张维俊, 李双异, 徐英德, 刘旭, 安婷婷, 朱平, 彭畅, 汪景宽. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 1-9.
- [29] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, Lamandé M, Wildenschild D, de Jonge L W. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. *Geoderma*, 2015, 237: 9-20.
- [30] Han E S, Kautz T, Perkons U, Lüsebrink M, Pude R, Köpke U. Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. *Plant and Soil*, 2015, 394(1): 73-85.
- [31] Kautz T, Lüsebrink M, Pätzold S, Vetterlein D, Pude R, Athmann M, Küpper P M, Perkons U, Köpke U. Contribution of anecic earthworms to biopore formation during cultivation of perennial ley crops. *Pedobiologia*, 2014, 57(1): 47-52.
- [32] Hudek C, Putinica C, Otten W, De Baets S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13147.
- [33] Li J, Wang X, Jia H X, Liu Y, Zhao Y F, Shi C M, Zhang F R. Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area. *Natural Hazards*, 2022, 112(3): 2337-2360.
- [34] Garcia L, Damour G, Gary C, Follain S, Le Bissonnais Y, Metay A. Trait-based approach for agroecology: contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards. *Plant and Soil*, 2019, 435(1): 1-14.
- [35] Kang Z J, Lou G C, Guo Y Y, Xu P. How does fine root influence aggregates? comparing root diameter distribution of two herbaceous plants: a pot experiment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4): 6377-6391.
- [36] Zheng Y L, Wang Y Q, Zhang Y X, Zhang J L, Wang Y J, Zhu J L. Broadleaf trees increase soil aggregate stability in mixed forest stands of southwest China. *Forests*, 2023, 14(12): 2402.
- [37] 徐文秀, 鲍玉海, 韦杰, 杨玲, 贺秀斌, 李进林. 水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 65-71, 109.