

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.012.

万海霞, 许浩, 王月玲, 等. 宁夏南部黄土丘陵区 3 种草本根土复合体抗冲性及其与影响因素的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 115-127.

Wan Haixia, Xu Hao, Wang Yueling, et al. Anti-scourability of Three Herbaceous Root-Soil System and Its Relationship with Influencing Factors in Loess Hilly Region of Southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 115-127.

宁夏南部黄土丘陵区 3 种草本根土复合体 抗冲性及其与影响因素的关系

万海霞¹, 许浩¹, 王月玲¹, 韩新生¹, 董立国¹, 郭永忠¹, 安钰¹, 贾廷民²

(1. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002; 2. 宁夏金鸡坪生态休闲农业开发有限公司, 宁夏 彭阳 756500)

摘要: [目的]明确宁夏南部黄土丘陵区 3 种草本根土复合体抗冲性差异及其与相关影响因素的关系, 为研究区生态建设质量提升及植被优化配置提供理论依据。[方法]以研究区常见草本百里香、星毛委陵菜、长芒草根土复合体为研究对象, 采用室内原状土水槽冲刷法, 并利用 LA-S 根系扫描分析系统, 研究不同草本 0—15 cm 土层根土复合体抗冲性能及其与根、土的关系。[结果](1) 3 种草本 0—15 cm 土层根土复合体抗冲性大小为星毛委陵菜(53.7 L·h/g) > 百里香(36.5 L·h/g) > 长芒草(14.2 L·h/g), 星毛委陵菜根土复合体抗冲性最强。(2) 3 种草本根系根长密度、表面积密度、体积密度和比根长分别为 4.25~10.56 cm/cm³, 42.95~111.51 mm²/cm³, 5.04~17.94 mm³/cm³, 35.06~67.96 m/g, 根长密度等参数百里香明显大于其他草本。(3) 各草本根系分布土壤的有机碳含量百里香(1.437%) > 星毛委陵菜(1.290%) > 长芒草(0.430%)。根系土壤黏粒含量百里香是星毛委陵菜、长芒草的 1.14 倍、1.20 倍。3 种草本土壤团聚体参数 MWD, GMD, $R_{>0.25}$ 分别为 13.80~18.23 mm, 7.15~11.11 mm, 43.06%~70.05%, 各指标星毛委陵菜最大。(4) 根系、土壤均能直接或间接、单独或共同影响根土复合体抗冲性。百里香土壤黏粒、粉粒、砂粒及团聚体直接影响土体抗冲性, 其大部分根系还通过影响土壤机械组成和有机碳含量间接影响抗冲性。星毛委陵菜土壤粉粒和大部分细根直接影响土体抗冲性, 其 0~0.5 mm 根、土壤黏粒、砂粒还通过影响土壤团聚体等间接影响抗冲性。长芒草土壤砂粒、0~1.0 mm 根直接影响土体抗冲性, 其特定细根还通过影响土壤团聚体和有机碳含量间接影响抗冲性。[结论] 3 种草本根土复合体抗冲性大小有明显差异, 根系、土壤均能影响其抗冲性能, 在宁夏南部黄土丘陵区进行生态建设应考虑不同草本(植被)的抗冲性能, 并在改善相关影响因素的基础上加以科学配置。

关键词: 土壤; 侵蚀; 草本根土复合体; 抗冲性; 根系

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0115-13

Anti-scourability of Three Herbaceous Root-Soil System and Its Relationship with Influencing Factors in Loess Hilly Region of Southern Ningxia

Wan Haixia¹, Xu Hao¹, Wang Yueling¹, Han Xinsheng¹,

Dong Ligu¹, Guo Yongzhong¹, An Yu¹, Jia Tingmin²

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Jinjiping Ecological Leisure Agriculture Development Co., Ltd., Pengyang, Ningxia 756500, china)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clarify the anti-scourability difference of three herbaceous root-soil system and its relationship with influencing factors in the loess hilly region of southern Ningxia, and to provide a theoretical basis for improving the quality of ecological construction and optimizing the allocation of vegetation in the study area. [Methods] The common herbaceous root-soil system of *Thymus mongolicus*,

收稿日期: 2023-05-06

修回日期: 2023-07-11

资助项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC03425); 宁夏农林科学院科技创新引导项目(2022AAC03425); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BCF01001); 宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-14-01)

第一作者: 万海霞(1982—), 女, 宁夏平罗人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植被恢复与水土保持研究。E-mail: whx3802@126.com

通信作者: 许浩(1979—), 男, 宁夏隆德人, 博士, 副研究员, 主要从事生态修复研究工作。E-mail: hz92@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Potentilla acaulis and *Stipa bungeana* were taken as research objects of the study area. The indoor undamaged soil trench scouring tests was carried out. LA-S root sanning analysis system was used to study the anti-scourability of different herbs root-soil system in 0—15 cm soil layer and their relationship with root and soil. [Results] (1) The anti-scourability of three herbaceous root-soil system in 0—15 cm soil layer decreased in the order: *Potentilla acaulis* ($53.7 \text{ L} \cdot \text{h/g}$) > *Thymus mongolicus* ($36.5 \text{ L} \cdot \text{h/g}$) > *Stipa bungeana* ($14.2 \text{ L} \cdot \text{h/g}$). *Potentilla acaulis* root-soil system anti-scourability was the strongest. (2) The average root length density, surface area density, volume density and specific root length of three herbaceous root-soil system in 0—15 cm soil layer were $4.25 \sim 10.56 \text{ cm/cm}^3$, $42.95 \sim 111.51 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$, $5.04 \sim 17.94 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$, $35.06 \sim 67.96 \text{ m/g}$, respectively. The root length density and other parameters of *Thyme mongolicus* were significantly larger than other herbs. (3) The organic carbon contents of three herbaceous root soils in 0—15 cm soil layer decreased in the order: *Thyme mongolicus* (1.437%) > *Potentilla acaulis* (1.290%) > *Stipa bungeana* (0.430%). The root soil clay content of *Thyme mongolicus* was 1.14 times and 1.20 times that of *Potentilla acaulis* and *Stipa bungeana*. The soil aggregate parameters MWD, GMD, and $R_{>0.25}$ of three herbaceous were $13.80 \sim 18.23 \text{ mm}$, $7.15 \sim 11.11 \text{ mm}$, and $43.06\% \sim 70.05\%$, respectively. All above indicators of *Potentilla acaulis* was the largest. (4) Root and soil could directly or indirectly, individually or jointly affect anti-scourability of three herbaceous root-soil system. Clay, silt, sand and aggregates of *Thyme mongolicus* soil directly affected soil anti-scourability, and most of its roots indirectly affected soil anti-scourability by affecting soil mechanical composition and organic carbon content. Soil silt and most fine roots of *Potentilla acaulis* directly affected soil anti-scourability, and 0~0.5 mm roots, soil clay and sand also indirectly affected anti-scourability by affecting soil aggregates. Soil sand and 0~1.0 mm roots of *Stipa bungeana* directly affected soil anti-scourability, and its specific fine roots also indirectly affected anti-scourability by affecting soil aggregates and organic carbon content. [Conclusion] There are obvious differences in the anti-scourability of the three kinds of herbaceous root-soil system. Roots and soil can affect their anti-scourability. The anti-scourability of different herbaceous (vegetation) should be considered in the ecological construction in the loess hilly area of southern Ningxia, and the scientific configuration should be carried out on the basis of improving the relevant influencing factors.

Keywords: soil; erosion; herbaceous root-soil system; anti-scourability; root

宁夏南部黄土丘陵区面积 2.06 万 km^2 , 占全区总面积的 31.04%, 是宁夏旱作耕地的集中分布区, 由于自然地理、气候和社会经济限制, 区域生态“先天不足”、环境脆弱, 自 2000 年开始, 各地陆续实施了退耕还林(草)工程、天然林保护工程、水土流失综合治理等生态工程, 山逐渐变绿, 森林覆盖率全区由 2000 年的 8.4% 增加到 2022 年的 18%, 植被覆盖(NDVI)在 2000—2016 年由 0.15 增加到 0.40^[1], 区域土壤侵蚀明显减弱, 生态环境显著改善, 但在“黄河流域生态保护和高质量发展”背景下研究区生态文明建设仍然存在很多问题, 如植被选择、配置不合理导致的水土保持效果偏低, 植被单一造成的生态系统不稳定, 轻中度水土流失仍然存在等。宁夏南部黄土丘陵区降雨年际分配极为不均, 主要集中在 7—9 月, 区域内短时集中强降雨导致的坡面、道路冲沟、切沟普遍发生且数量较多, 造成的水土流失不容忽视。黄土在自重及

水的作用下极易松散, 而草本根系大多分布于浅层土壤, 它与周围土壤结合形成的根土复合系统在生态系统中普遍存在, 复合体中的根系可以网络粘结土壤并改善土壤结构和质量, 土壤可以促进根系生长进而更好固定并改善土壤, 二者相互促进、合二为一, 起到抵抗径流冲刷和保持水土的作用。土壤抗冲性是指土壤抵抗降雨径流对其机械破坏和推动下移的性能, 朱显谟院士在提出“土壤抗冲性”的概念的时候认为它是揭示黄土高原土壤侵蚀规律的关键^[2], 故抗冲性指标经常被用来表征土壤抗侵蚀性能, 本文通过研究抗冲性来探究不同草本根土复合体抗侵蚀性能差异及规律, 对提升研究区生态建设质量和丰富黄土丘陵区土壤抗侵蚀研究成果具有重要意义。

关于土壤抗冲性的研究, 内容丰富多彩, 包括了抗冲性时空变化及地域分异规律^[3-5], 抗冲性影响因素^[6-10]、抗冲性过程及机制^[7,11]、评价指标^[12-13]、测试

方法等^[14-15]多个方面。土壤抗冲性的大小主要取决于土壤颗粒间和微结构间的胶结力,以及土壤结构体间抵抗径流离散的能力^[16]。而影响抗冲性大小的因素复杂,通常包括土壤性质和结构(容重、孔隙度、机械组成、水稳性团聚体数量、有机质含量、土壤微生物等)、地表植被覆盖和地下植被根系、生物结皮等^[13,17]。研究表明,植物根系的物理固结效应、网络串连效应、根土黏结效应和生物化学效应在建造抗冲性土体基础上,提高土壤抗冲力,增进土壤渗透性,从而提高土壤的抗冲性^[7]。土壤理化性质是影响土壤抗冲性的重要内在因素,它受气候条件、成土母质、植被覆盖、土地利用方式等多方面的影响^[18]。关于土壤抗冲性影响因素的相关研究很多,如李勇等^[7]对抗冲性与13种土壤物理性质参数关系进行估算,得出决定抗冲性的主导因素依次是粗粉粒、砂粒、水稳性团粒含量、土壤容重及土壤总孔隙度等。 ≤ 1 mm 须根密度(100 cm^2 截面上须根个数)可有效提高土壤抗冲性。草本有效根密度和根量会导致不同土层抗冲性差异。周维等^[19]研究认为不同土地利用条件下土壤有机质、粗粒径(3~5 mm, 5~10 mm 和 >10 mm)的水稳性团聚体与土壤抗冲性正相关,植物根系(密度与根量)减沙效果显著。周利军等^[20]认为三峡库区林地土壤抗冲性是土壤厚度、土壤容重、毛管孔隙度、有机质含量, <1 mm, 1~3 mm 根长和根重等因子综合作用的结果,而影响最大的是土壤厚度、容重、毛管孔隙度和有机质含量。资如毅等^[9]研究得出土壤抗冲性与土壤容重、砂粒含量、水稳性团聚(>0.25 mm)体含量呈极显著正相关,与黏粒含量呈显著负相关。史冬梅等^[16]研究紫色丘陵区农林混作模式土壤抗冲性影响因素,发现土壤容重、细砂粒(0.25~0.05 mm)含量、 >5 mm 和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,不同径级根系生物量、根密度与土壤抗冲指数显著或极显著正相关,土壤容重、细砂粒含量、 >5 mm 水稳性团聚体含量、 <1 mm 根系生物量可用于预测研究区土壤抗冲性。王雅琼等^[8]研究祁连山草地土壤抗冲性影响因子,发现土壤抗冲性与根系密度、土壤砂粒体积分数呈极显著正相关,与坡度和土壤粉粒体积分数呈极显著负相关,土壤抗冲刷能力随植被盖度和根系密度的增加显著增强。李强等^[2]研究黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性发现,撂荒地不同土层土壤抗冲性与土壤物理性质及根系密度关系密切,但不同土层影响土壤抗冲性的指标有差异,团聚体和根系密度是影响3个土层土壤抗冲性的共同关键因子。张珂等^[10]分析黄河源3种高寒草甸根土体抗冲系数的影响因素,得出根面积比(表面积密度)和土体黏聚力对根—土复合体试样的抗冲系数具有较大的影响。

总之,植物根系和土壤性质对提高土壤抗冲性具有重要作用,然而不同研究对象、不同研究区域得出的结论有差异。本文以研究区常见典型草本根土复合体为研究对象,采用水槽冲刷法对3种草本根土复合体抗冲性能进行研究,同时测定(不同径级)根系的根长密度、表面积密度、体积密度,土壤团聚体、机械组成和有机质等指标,分析根系、土壤与根土复合体抗冲性的关系,将根土复合体作为一个整体系统去研究的报道较少,将有助于丰富区域抗冲性研究成果。另外,草本根土复合体主要分布于0—15 cm 土层,本文针对性分析这一部分的抗冲性能,并以5 cm 为间隔比较其差异,研究更加细致深入,研究成果对评价不同草本根土复合体的水土保持效果,揭示草本根土复合抗冲性作用机理具有重要意义,还将为宁夏南部黄土丘陵区生态建设植被优化配置和水土流失治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国黄土高原西部的宁夏半干旱黄土丘陵区,地貌类型为黄土高原腹地梁峁丘陵地,海拔大多处于1 400~1 800 m,气候类型属典型的温带大陆性季风气候,年均气温 7.6°C ,无霜期140~160 d。年均降水量420~500 mm,年平均潜在蒸发量1 360 mm,降雨年内和年间分布不均,主要集中在7—9月。研究区土壤类型主要为黄绵土,土层深厚但结构疏松,稳定性差,土壤容重在 $1.1\sim 1.3\text{ g/cm}^3$,有机质为 $3.0\sim 35.2\text{ g/kg}$ 。

研究区草本植被主要有百里香(*Thymus mongolicus* Ronn)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis* L.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* Linn.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 于2022年6月中旬,在宁夏农林科学院林草所林业生态研究试验基点—彭阳中庄流域选择以百里香、星毛委陵菜、长芒草为优势种的天然坡面(坡长150~200 m)做为研究样地(表1),每个样地随机选择7个取样点。取样时剪去植株地上部,露出长约1 m的剖面作为取样面,按照0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm 分层采集土壤抗冲性样品和土壤团聚体样品,抗冲性样品采用 200 cm^3 的大环

刀取样,团聚体样品使用直径 7 cm 的特制取样器取样,所有指标样品按照土层均设 3 个重复(共计 21 个重复),试验样品确保原状性带回并统一处理后

测定。同时采集分析土样,方法是将取样点的每层土壤进行多点取样后混合带回,室内风干过筛用于土壤理化性质测定。

表 1 草本群落样地信息

Table 1 Plot information of herbaceous community

草本类型	总盖度/%	经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)
百里香、星毛委陵菜、点地梅	82.0	106°45'N/35°56'E	1701	半阴坡	20
星毛委陵菜、糙隐子、百里香、胡枝子	84.6	106°45'N/35°56'E	1694	半阴坡	20
长芒草、猪毛蒿、赖草	95.1	106°43'N/35°57'E	1647	半阳坡	20

1.2.2 测定方法

(1) 抗冲性。借助抗冲性测定水槽,以蒋定生采用的水槽冲刷法为基础,采用课题组总结的原状土水槽冲刷法^[21]进行测定。试验冲刷水槽长 1 m,宽 0.08 m,土样室环刀规格 200 cm³。进行冲刷试验前先将土样进行预湿润处理,即浸泡 12 h 达到饱和后再取出静置 24 h。之后将样品连同环刀一起放入装样室,测定土样在坡度 20°,单宽流量 4 000 L/(h·m),3 min 内产生的径流泥沙量。产生的径流泥沙用塑料桶收集,静置澄清后抽掉上层清水,最后将桶内泥沙收集过滤,105℃烘干称重。根据公式计算各个样品的抗冲系数 K_c 。

$$K_c = Qt/\omega \quad (1)$$

式中: K_c 为抗冲系数(L·min/g); Q 为冲刷水量(L); t 为冲刷时间(min); ω 为冲刷掉的土壤质量(g)。

(2) 团聚体。采用湿筛法测定,样品室内自然风干并称重,之后将样品缓慢放于团粒分析仪(包含 5 mm,2 mm,1 mm,0.5 mm,0.25 mm 5 个筛套)最上层筛子中,先用水缓湿润,再放入水中;当整个套筛处于下端时,保持最顶层筛上边缘低于水面,然后竖直上下振荡 30 min(频率 30 次/min);振荡结束后将各级筛子上的团聚体冲洗收集并过滤,然后将团聚体连同滤纸一起烘干,空气中平衡 2 h 后称重,计算土壤团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、水稳性大团聚体含量($R_{>0.25}$)及分形维数(D)。

(3) 根系。土壤抗冲性样品在抗冲性测定结束后,将其置于 0.05 mm 的网筛中清水反复冲洗,直至洗出所有的根系,洗净的根系用滤纸吸干水分放入自封袋中备用。将各处理根系在根盘中平铺整理后用浙江万深 LA-S 系列根系扫描分析系统在 300 dpi 下扫描并测定根系的长度、表面积、体积等指标,最后将根装入纸袋内放入烘箱,在 60℃ 下烘干至恒重,称取生物量。计算比根长、根长密度、根表面积密度、体积密度等根系指标。

(4) 土壤机械组成和有机碳含量。土壤机械组成使用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪测定,土壤粒

径按照美国制(USDA)标准^[22]划分为砂砾(0.05~2.0 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3 级。有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定。

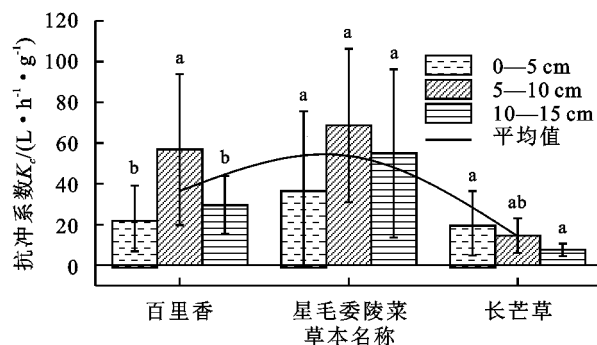
1.3 数据统计分析

数据分析采用 DPS17.0 统计软件,差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法,使用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 3 种草本根土复合体抗冲性

3 种草本 0—15 cm 土层根土复合体抗冲系数(图 1)依次为星毛委陵菜(53.7 L·h/g)>百里香(36.5 L·h/g)>长芒草(14.2 L·h/g),百里香、星毛委陵菜 K_c 值分别是长芒草的 1.47 倍、3.78 倍。各草本抗冲性在垂直深度上有波动,随土层加深,百里香、星毛委陵菜 K_c 呈倒“V”型,5—10 cm 土层最大,而长芒草 K_c 呈线性下降,0—5 cm 土层最大。同一草本不同土层 K_c 比较发现,百里香 5—10 cm 土层 K_c 与其他土层差异显著,星毛委陵菜 3 个土层 K_c 差异均不显著,长芒草 0—5 cm 土层 K_c 显著大于 10—15 cm 土层,但与 5—10 cm 土层差异不显著。3 种草本 K_c 变异系数(CV)为 0.58~0.77,可见草本根土复合体抗冲性变异较大。



注:柱图上方不同小写字母表示差异性显著($p < 0.05$), $n = 21$,下同。

图 1 3 种草本根土复合体抗冲性

Fig. 1 Anti-scourability of three herbaceous root-soil system

对同一土层不同草本根土复合体抗冲系数比较可知,0—5 cm 土层,3 种草本 K_c 没有显著差异,5—

10 cm 土层,星毛委陵菜、百里香 K_c 显著大于长芒草,分别是长芒草的 4.72 倍,3.91 倍,星毛委陵菜与百里香差异不显著。10—15 cm 土层,3 种草本之间差异均显著,星毛委陵菜、百里香 K_c 值分别是长芒草的 7.27 倍,3.91 倍。由此可见,相比表层,3 种草本根土复合体中、下层抗冲性差异逐渐增大。

2.2 3 种草本根土复合体根系特征

根系形态结果显示(图 2),3 种草本 0—15 cm 土层比根长 SRL 为 35.06~67.96 m/g,长芒草最大,百里香、星毛委陵菜较之低 26.7%,48.4%。各草本的 SRL 土层间差异不同,百里香 0—5 cm 土层显著小于其他土层,星毛委陵菜 3 个土层差异均显著,长芒草 0—5 cm 土层仅显著小于 10—15 cm 土层。3 种草本 0—15 cm 土层根长密度 RLD、表面积密度 RSD

和体积密度 RVD 分别为 4.25~10.56 cm/cm³, 42.95~111.51 mm²/cm³, 5.04~17.94 mm³/cm³, RLD, RSD, RVD 百里香明显最大,星毛委陵菜,长芒草较之分别低 46.7%, 45.4%, 47.6% 和 59.7%, 61.5%, 71.9%。根系分布结果显示,百里香 0—5 cm, 5—10 cm 土层 RLD, RSD 显著大于 10—15 cm 土层,其他两种草本 3 个土层 RLD, RSD 差异均不显著。百里香 3 个土层 RVD 差异均显著,星毛委陵菜 0—5 cm 和 5—10 cm 土层 RVD 差异不显著,但显著大于 10—15 cm 土层,长芒草 3 个土层差异均不显著。可以看出,3 种草本 SRL 随土层加深逐渐增大,百里香变幅最小。百里香 RLD, RSD 及 RVD 随土层加深逐渐减小,变幅较大,星毛委陵菜、长芒草 RLD, RSD 有波动但变幅较小。

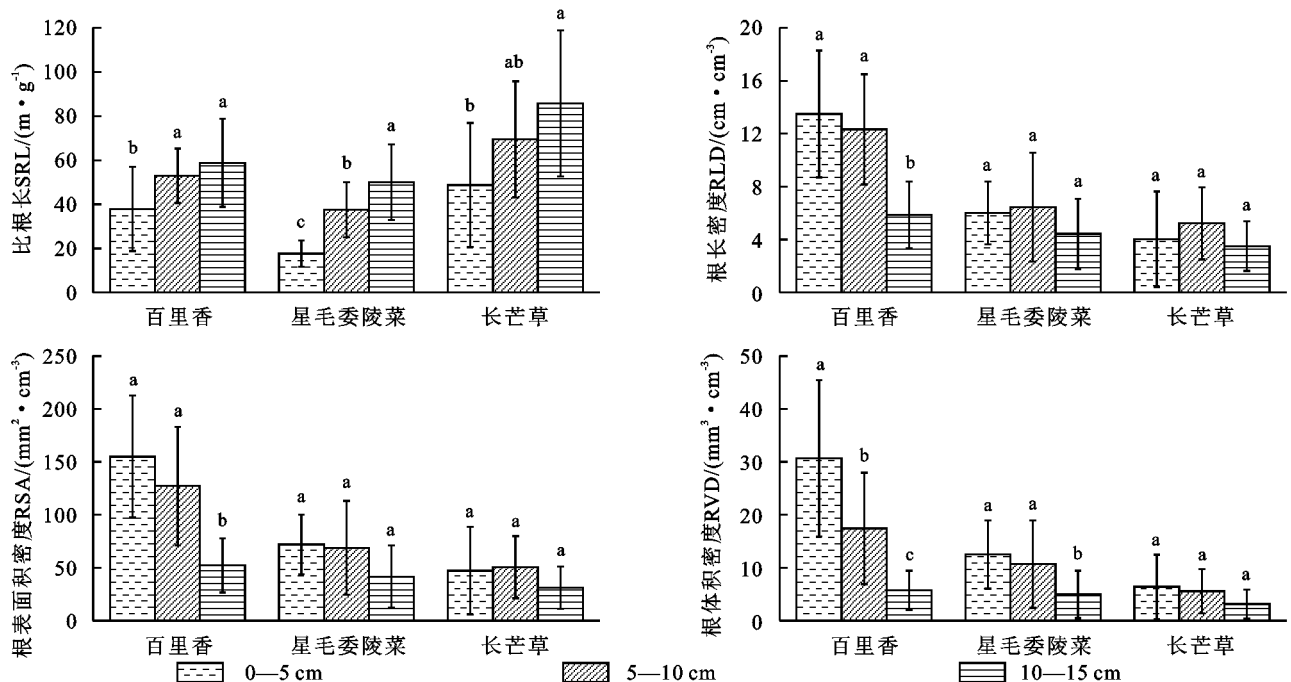


图 2 不同草本根土复合体根系参数变化

Fig. 2 Changes of root parameters of different herbaceous root-soil system

对比同一土层不同草本间根系差异,结果显示,长芒草 SRL 除 0—5 cm 土层,其他两个土层显著大于百里香和星毛委陵菜,百里香、星毛委陵菜 SRL 在 0—10 cm 二者差异显著,到 10—15 cm 时差异不显著。RLD, RSD 及 RVD 在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层百里香显著大于其他两种草本,星毛委陵菜与长芒草差异不显著。10—15 cm 土层百里香 RLD 仍然最大,仅与长芒草差异显著。3 种草本 RSD, RVD 在 10—15 cm 土层差异均不显著。可以看出,长芒草与百里香、星毛委陵菜比根长差异位于中下层,百里香与星毛委陵菜、长芒草 RLD, RSD 及 RVD 差异位于表层和上层,3 种草本 RSD, RVD 在下层时差异变很小。

2.3 3 种草本根土复合体土壤理化性质

2.3.1 土壤有机碳 由图 3 可知,3 种草本 0—15 cm 土层土壤有机碳为百里香(1.430%)>星毛委陵菜(1.290%)>长芒草(0.430%),百里香、星毛委陵菜土壤有机碳含量显著大于长芒草,分别是长芒草的 3.3 倍、3.0 倍,而百里香与星毛委陵菜土壤有机碳只在 5—10 cm 土层差异显著。同一草本各土层有机碳含量不同,差异显著性比较显示:百里香、星毛委陵菜 3 个土层有机碳含量有一定变化但差异不显著,长芒草有机碳含量 0—5 cm 土层显著大于其他土层,但 5—10 cm 土层与 10—15 cm 土层差异不显著。

2.3.2 土壤机械组成 土壤机械组成测定结果显示(图 3):3 种草本 0—15 cm 土壤的黏粒、粉粒、砂粒含

量百里香为 5.61%, 58.49%, 35.90%, 星毛委陵菜为 4.90%, 56.73%, 38.37%, 长芒草为 4.66%, 60.36%, 34.98%, 可以看出, 当地土壤颗粒分布主要集中在 >0.002 mm 范围内, 土壤黏粒含量普遍在 6% 以下, 土壤质地属于粉(砂)壤土。黏粒含量百里香明显高于星毛委陵菜(1.14 倍)和长芒草(1.20 倍), 粉、砂粒含量 3 种草本差异不大($p < 0.05$)。

同一土层不同草本土壤粒径组成有差异, 分析显示: 0—5 cm 和 5—10 cm 土层, 百里香土壤黏粒含量显著大于星毛委陵菜、长芒草, 星毛委陵菜与长芒草差异

不显著, 到 10—15 cm 土层时, 百里香仍然最大, 3 种草本间差异均显著。0—5 cm 和 5—10 cm 土层, 长芒草粉粒含量最多, 显著大于其他两种草本, 随土层加深, 百里香、星毛委陵菜土壤粉粒含量由差异不显著到差异显著, 到 10—15 cm 土层时, 百里香粉粒含量增多并与长芒草差异不显著。0—5 cm 土层百里香、星毛委陵菜砂粒含量显著大于长芒草, 5—10 cm 土层星毛委陵菜砂粒含量显著大于百里香和长芒草, 百里香与长芒草差异不显著, 10—15 cm 土层时星毛委陵菜土壤砂粒仍显著大于百里香, 但与长芒草差异不再显著。

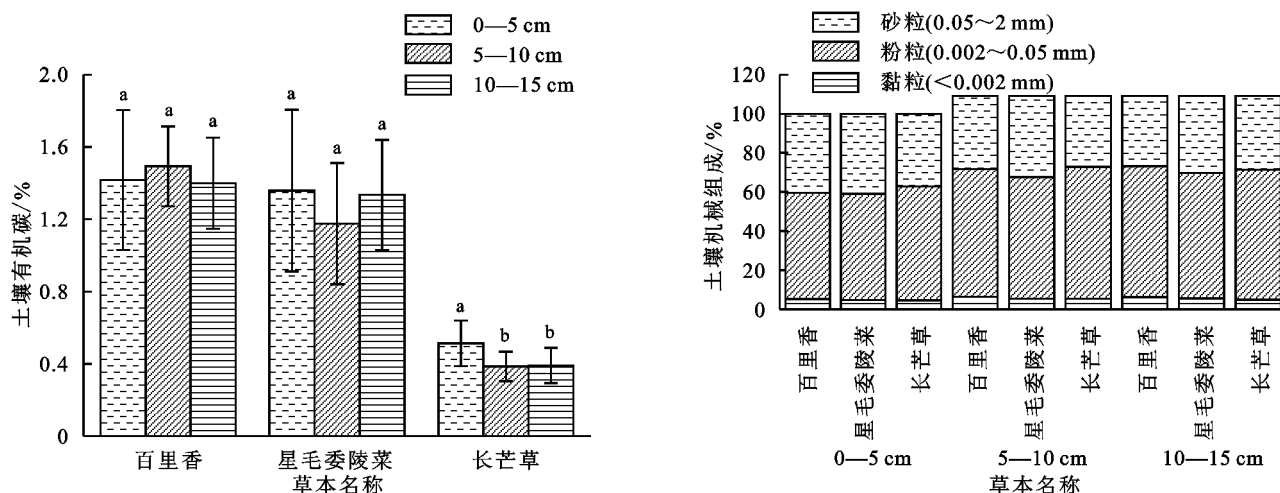


图3 不同草本土壤有机碳含量及机械组成

Fig. 3 Organic carbon content and mechanical composition of different herbaceous soils

2.3.3 土壤团聚体 土壤团聚体测定结果显示(图4), 3种草本 0—15 cm 土层土壤团聚体平均重量直径(MWD), 几何平均直径(GMD), >0.25 mm 水稳性大团聚体含量($R_{>0.25}$)分别是 13.80~18.23 mm, 7.15~11.11 mm, 43.06%~70.05%, 团聚体分形维数(D)为 2.26~2.64。3种草本土壤团聚体指标 MWD, GMD 和 $R_{>0.25}$ 均是星毛委陵菜最大, 百里香、长芒草 3 个指标较它分别低 23.47 mm, 24.28 mm, 33.34 mm, 35.71 mm 和 7.24%, 38.53%。分形维数 3 种草本间差异很小, 变异系数仅为 1.94%~4.33%。由此可见, 星毛委陵菜土壤团聚体发育最好, 土壤结构最稳定, 其次是百里香。随土层加深, 3 种草本土壤团聚体各指标(MWD, GMD, $R_{>0.25}$)均先增加后降低, 相比百里香和星毛委陵菜, 长芒草降幅更大。

对同一草本不同土层土壤团聚体指标进行差异性比较发现, 0—5 cm 土层时, MWD, GMD 和 $R_{>0.25}$ 星毛委陵菜显著最大, 百里香与长芒草差异不显著, 5—10 cm 土层时, 星毛委陵菜 MWD, GMD 值显著大于百里香, 但与长芒草差异不显著, 而 $R_{>0.25}$ 星毛委陵菜、百里香显著大于长芒草。10—15 cm 土层时, MWD 3 种草本间差异均显著, GMD 百里香与长

芒草差异不显著, $R_{>0.25}$ 3 种草本差异性与 5—10 cm 土层相同。D 在 5—10 cm 土层到 10—15 cm 土层变化时, 3 种草本间差异性由不显著变为显著。可以看出, 随土层加深 3 种草本间土壤团聚体各指标的差异逐渐在变大。

2.4 草本根土复合体抗冲性影响因素分析

2.4.1 土壤理化性质与抗冲性的相关性 对 3 种草本土壤理化性质与抗冲系数 K_c 进行相关性分析发现(表2), 百里香 5—10 cm 土壤的黏粒、粉粒与 K_c 显著正相关, 砂粒与 K_c 显著负相关, 说明土壤中含有的黏粒、粉粒以及砂粒数量对复合体抗冲性有影响, 黏粒和粉粒含量越高, 砂粒越少, 复合体抗冲性越强。土壤团聚体特征参数与 K_c 的相关性结果显示, 百里香 5—10 cm 土层土壤团聚体参数 MWD, GMD 与 K_c 显著正相关, D 与 K_c 负相关但不显著, 说明百里香土壤团聚体特征对所在土体的抗侵蚀能力有重要影响, 土壤团聚体发育越好, 稳定性越强, 土体抗冲性能越优秀。另外发现, 百里香 5—10 cm 土壤中的粉粒、砂粒含量与团聚体指标 GMD 呈显著正相关和负相关, 说明土壤机械组成可以通过影响团聚体进而影响土壤抗冲性能。

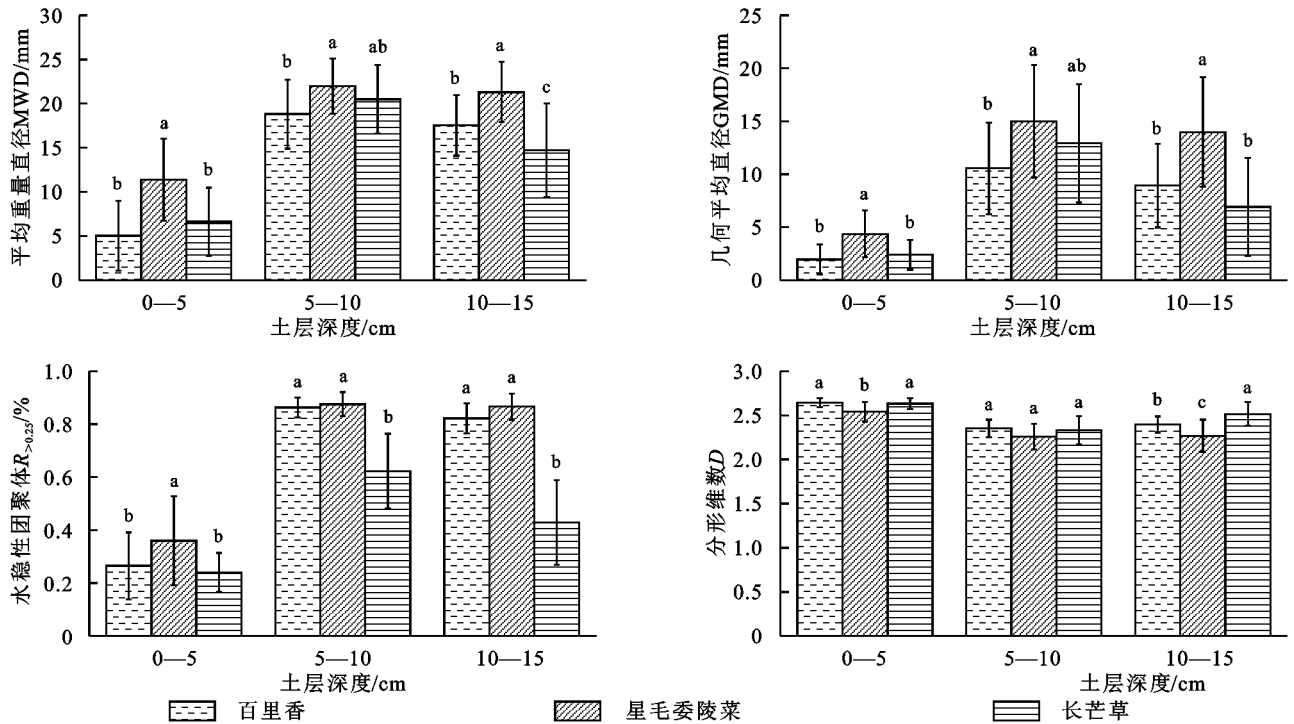


图4 不同草本根土复合体土壤团聚体特征

Fig. 4 Characteristics of soil aggregates in different herbaceous root-soil system

星毛委陵菜仅0—5 cm土壤的粉粒含量与 K_c 显著正相关,土壤团聚体各指标与 K_c 相关性不显著。但我们发现,土壤中的黏粒含量与团聚体指标MWD,GMD和 $R_{>0.25}$ 呈极显著或显著负相关,砂粒含量与MWD,GMD和 $R_{>0.25}$ 呈极显著或显著正相关,说明表层土壤含较少的黏粒和较多的砂粒有助于土体结构的稳定,从而间接影响土体抗冲性。

长芒草10—15 cm土壤中的砂粒含量与 K_c 显著负相关,说明长芒草下层土壤砂粒影响根土复合体的抗冲性,砂粒越少抗冲性越强。长芒草土壤机械组成与团聚体相关性不显著。

综上所述,土壤理化性质对根土复合体抗冲性有显著影响,不同草本这种作用出现在土体的不同深度,百里香为5—10 cm土层,通过土壤机械组成和团聚体发育直接影响土体抗冲性。星毛委陵菜为0—5 cm土层,通过机械组成和团聚体结构直接和间接影响土体抗冲性,长芒草为10—15 cm土层,仅通过机械组成影响抗冲性。

2.4.2 根系与抗冲性的相关性 对3种草本根系指标与 K_c 进行相关性分析(表3),结果发现,星毛委陵菜和长芒草根系与 K_c 都具有显著相关性。星毛委陵菜0—5 cm土层中 ≥ 2.0 mm根的RLD,RSD和RVD与 K_c 显著正相关,10—15 cm土层中0.5~2.0 mm根的RLD,RSD和RVD与 K_c 显著正相关,说明星毛委陵菜土壤表层中的粗根,土壤下层中的大部分细根影响根土复合体抗冲性能,单位体积的根系长

度、表面积和体积越大,土体抗冲性越强。5—10 cm土层中各径级根系指标与 K_c 相关性不显著,可能是该土层根系对土体抗冲性影响很微弱。长芒草5—10 cm土层中0~1.0 mm根的RLD,RSD和RVD与 K_c 显著正相关,说明长芒草土壤中层一部分细根影响土体抗冲性。百里香根系各指标与 K_c 相关性均不显著。可见,植物根系对土体抗冲性的作用与根系特征及分布有关,根系与抗冲性也会不显著相关,因为影响土体抗冲性的因素是多方面的。

2.4.3 根系与土壤的关系 由表4可知,百里香0—5 cm土层中 ≥ 2.0 mm根的RLD,RSD,RVD与土壤TOC显著正相关,0~0.5 mm根RLD,0.5~1 mm根RLD,RSD,RVD,1~2.0 mm根的RSD,RVD与粉粒、砂粒分别呈极显著负相关和显著或极显著正相关。5—10 cm土层除0~0.5 mm外其他根的RLD,所有根的RSD,RVD与TOC极显著或显著负相关。10—15 cm土层仅0~0.5 mm根的RLD与TOC显著正相关。可以看出,百里香表层土壤中的大部分根系影响土壤粒径组成,粗根对土壤有机碳积累有正向作用。中层土壤几乎所有根系均对土壤有机碳形成有影响,根系生长越旺盛越不利于土壤TOC积累,下层土壤根系对土壤影响较小。

星毛委陵菜0—5 cm土层1~2.0 mm根的RLD,RSD,RVD与土壤TOC极显著负相关,10—15 cm土层 ≥ 2.0 mm根的RLD,RSD,RVD与土壤TOC极显著或显著正相关,与土壤粉粒、砂粒含量呈

极显著或显著负相关和正相关,0~0.5 mm 根的 RLD,RSD 和 RVD 与 D 极显著负相关。说明星毛委陵菜表层中的部分细根不利于土壤 TOC 累积,而深

层土壤中的 ≥ 2.0 mm 粗根有助于土壤 TOC 的积累但不利于土壤细化,0~0.5 mm 细根对土壤团聚体的形成具有积极作用。

表 2 土壤理化性质与土壤抗冲性相关性分析

Table 2 Correlative analysis of soil physical and chemical properties and soil anti-scourability

参数	K_c	TOC	黏粒	粉粒	砂粒	MWD	GMD	D
百里香 5—10 cm	TOC	-0.16						
	黏粒	0.56 *	0.45					
	粉粒	0.57 *	0.30	0.95 **				
	砂粒	-0.58 *	-0.31	-0.96 **	-0.99 **			
	MWD	0.47 *	-0.20	0.32	0.41	-0.40		
	GMD	0.56 *	-0.09	0.41	0.48 *	-0.47 *	0.94 **	
	D	-0.37	0.21	-0.07	-0.15	0.14	-0.94 **	-0.87 **
	$R_{>0.25}$	0.08	-0.06	-0.13	-0.25	0.24	0.54 *	0.56 *
星毛委陵菜 0—5 cm	TOC	0.01						
	黏粒	0.17	-0.30					
	粉粒	0.52 *	0.11	0.76 **				
	砂粒	-0.49	-0.05	-0.82 **	-1.00			
	MWD	-0.35	0.09	-0.67 **	-0.67 **	0.69 **		
	GMD	-0.30	0.03	-0.60 *	-0.54 *	0.56 *	0.95 **	
	D	0.02	0.01	0.14	0.05	-0.06	-0.42	-0.47
	$R_{>0.25}$	-0.40	0.25	-0.66 **	-0.78	0.78 **	0.80 **	0.67 **
长芒草 10—15 cm	TOC	-0.40						
	黏粒	0.32	-0.11					
	粉粒	0.48	-0.59 *	0.40				
	砂粒	-0.49 *	0.56 *	-0.55 *	-0.98 **			
	MWD	-0.32	-0.09	-0.16	0.19	-0.14		
	GMD	-0.26	-0.18	-0.08	0.27	-0.23	0.96 **	
	D	0.21	0.21	0.07	-0.44	0.38	-0.92 **	-0.92 **
	$R_{>0.25}$	-0.40	0.18	-0.21	-0.04	0.07	0.76 **	0.68 **

注: * 表示在 0.05 水平上(双侧)显著相关; ** 表示在 0.01 水平上(双侧)显著相关;下同。

表 3 不同径级根系指标与土壤抗冲性相关性分析

Table 3 Correlative analysis between root indexes of different diameter classes and soil anti-scourability

类别	土层深度/cm	RLD				RSD				RVD				SRL
		0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥ 2.0 mm	0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥ 2.0 mm	0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥ 2.0 mm	
星毛委陵菜 K_c	0—5	0.45	0.39	0.32	0.54 *	0.43	0.39	0.33	0.56 *	0.40	0.39	0.34	0.56 *	0.12
	5—10	0.08	-0.09	-0.11	0.05	0.03	-0.09	-0.11	0.09	-0.01	-0.08	-0.11	0.11	0.25
	10—15	0.23	0.49 *	0.48 *	0.38	0.30	0.49 *	0.47 *	0.40	0.35	0.49 *	0.46 *	0.43	-0.13
长芒草 K_c	0—5	-0.25	-0.07	0.12	0.41	-0.22	-0.05	0.12	0.40	-0.20	-0.04	0.13	0.40	-0.60
	5—10	0.49 *	0.56 *	0.38	0.40	0.50 *	0.56 *	0.39	0.36	0.50 *	0.56 *	0.38	0.35	0.22
	10—15	0.47	0.22	-0.03	-0.15	0.46	0.20	-0.02	-0.03	0.46	0.18	-0.02	-0.06	0.18

长芒草 0—5 cm 土层 0.5~1 mm 根的 RLD, RSD 和 RVD 与 TOC 显著负相关,0~0.5 mm 根系各指标与团聚体参数 MWD 显著正相关,除 ≥ 2.0 mm 粗根外,其他所有根的根系指标与团聚体参数 D 显著或极显著负相关。5—10 cm 土层和 10—15 cm 土层长芒草仅极个别根系与土壤表现出显著相关性。

综上所述,根系影响土壤的理化性质,不同草本的影响方式不同,百里香绝大部分根系影响土壤粒径组成和土壤 TOC 累积,星毛委陵菜、长芒草一部分细根影响土壤 TOC 含量,部分(0.5~1.0 mm)或全部细根影响土壤团聚体形成。粗根对土壤 TOC 也有一定影响,但粗细根作用不同,细根对土壤团聚体形成有促进作用。

表 4 根系指标与土壤理化性质相关性分析

Table 4 Correlative analysis between root index and soil physical and chemical properties

参数	RLD				RSD				RVD			
	0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥2.0 mm	0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥2.0 mm	0~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	≥2.0 mm
百里香	TOC			0.53 *				0.53 *				0.54 *
	黏粒	-0.52 *		-0.44 *			-0.51 *		-0.43 *	-0.49 *		
	粉粒	-0.56 * *	-0.55 * *		-0.56 * *	-0.53 *			-0.57 * *	-0.51 *		
	砂粒	0.54 *	0.55 *		0.54 *	0.53 *			0.55 * *	0.51 *		
	5—10 cm	TOC	-0.58 * *	-0.66 * *	-0.64 * *	-0.45 *	-0.58 * *	-0.66 * *	-0.63 * *	-0.49 *	-0.59 * *	-0.67 * *
	10—15 cm	TOC	0.45 *									
	0—5 cm	TOC		-0.68 * *			-0.66 * *				-0.65 * *	
	10—15 cm	TOC			0.58 * *			0.56 *				0.56 *
星毛委陵菜	粉粒			-0.56 * *				-0.53 *				-0.52 *
	砂粒			0.57 * *				0.55 *				0.54 *
	D	-0.71 * *			-0.66 * *				-0.61 * *			
	TOC		-0.55 *			-0.54 *				-0.54 *		
长芒草	0—5 cm	MWD	0.45 *		0.45 *				0.45 *			
	D	-0.48 *	-0.62 * *	-0.55 *	-0.51 *	-0.62 * *	-0.52 *		-0.54 *	-0.62 * *	-0.51 *	
	5—10 cm	R>0.25		-0.47 *								
	10—15 cm	粉粒							0.49 *			

3 讨论

3.1 草本根土复合体抗冲性

土壤抗冲性是衡量土壤抗侵蚀能力的重要指标,反映特定状态下土壤在水蚀环境中的流失情况^[17]。本研究发现 3 种草本 0—15 cm 土层根土复合体抗冲系数星毛委陵菜最大,是百里香、长芒草的 1.47 倍和 3.78 倍。根土复合体抗冲性大小与它的两个构成部分—根系及土壤性质有关。不同草本根系构型有差异,已有研究发现:百里香具强健的侧根,侧根上萌发有大量密集的毛根^[23];星毛委陵菜根为“阔腰倒锥体”形^[24],侧根发达,二级侧根以毛细根居多;长芒草为须根型草本,须根上分布一些柔弱细根^[23]。土壤性质为土壤内在属性,我们取样时发现长芒草所在土体最为松散,这从侧面反映出其稳定性较差。研究结果还显示,草本根土复合体抗冲性在垂直深度上有变化,百里香、星毛委陵菜随土层加深先增后降,长芒草随土层加深逐渐减小。张珂等^[10]研究高寒草甸河岸带根—土复合体抗冲特性发现,相同冲刷流速下样地(B75 和 P+B90)上层土体抗冲系数明显大于下层土体,沙小燕等^[5]研究发现草地沟头土壤抗冲系数随土层加深先增加后减小,这些结果中抗冲性增加与土体内根系增加密切相关,本研究中百里香等根土复合体抗冲性出现小幅增加,可能是表层根土样品因外部干扰导致抗冲性变化较大,地表浮土增加,受径流裹挟泥沙量上升,抗冲性减弱。李强等^[2]研究发现黄土丘陵区撂荒大部分时期土壤抗冲性随土层加深逐渐减小,姜义宝

等^[25]研究发现黄土沟壑区沟头农地和铁杆蒿地土壤抗冲系数随土层加深呈波动式降低,与长芒草抗冲性变化一致,这与下层土体中根系参数较小有关。

3.2 草本根土复合体根系特征

根系能增强土体抵抗径流冲刷的能力在许多报道中被证明^[5,7,16,26],增强效应大小与根系构型及分布,根系生物量,根长密度等指标以及根系力学特性有关^[26-27]。本研究中 3 种草本根系从生长形态来看,0—15 cm 土层根密度指标(RLD,RSD 和 RVD)百里香明显大于其他两种草本,其根生物量也最大,说明百里香的根系在形态特征和生态功能方面都具有明显优势,根系密集且功能强大。根系分布状况反映植被对生长资源的获取能力和对生存环境的适应策略^[28],3 种草本比根长(SRL)长芒草最大,它是须根系草本,根系数量少,根密度指标最小,为获取资源提高生存力,其单位重量根形成的根系最长,因此这是长芒草适应环境的一种生存策略。从根系分布来看,百里香各根密度指标随土层加深逐渐减小且差异显著,与姜义宝等^[25]研究农地土壤根系分布结果一致。3 种草本比根长(SRL)随土层加深逐渐增大,百里香的 SRL 受土层影响最小,可以发现百里香大部分根系分布于土壤上层,其他草本根系分布相对均匀。比较草本各指标差异发现,百里香与星毛委陵菜、长芒草根密度指标差异位于 0—10 cm 土层,长芒草与百里香、星毛委陵菜比根长差异位于 5—15 cm 土层,这是因为百里香 0—10 cm 土层根系分布密集,强健侧根和大量的毛根使其在单位体积内根系长度、表面

积及体积最大。星毛委陵菜、长芒草根数量少且分布相对均匀,因此百里香根系与它们的形态差异在中上层。植物表层根系连接地上部,无论是何种根系构型,其最上层根系通常相对较粗,因为它首先要起固定效果,长芒草根纤细,为适应环境它与其他草本 SRL 差异出现在中下层。

3.3 草本根土复合体土壤属性

抗冲性大小受土壤理化性质影响。团聚体团聚作用的强弱影响土壤颗粒间黏聚力、微团聚体间凝聚力的作用,也影响土壤抵抗径流对其冲刷破坏能力,因此团聚体稳定性是评价土壤抗冲性能的一个重要指标。有机质作为一种土壤胶结剂,可以增加土壤粘结性,还可以包裹土粒、团粒等形成大的结构体,增强土壤抵抗径流冲刷破坏的能力^[3],对土壤抗冲性有重要影响。土壤机械组成指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例,它是土壤的一个基本自然属性,也是土壤结构的基础,与土壤的水分运动、肥力状况及孔隙状况等密切相关^[29-30],在地表侵蚀过程中起着重要作用。

本研究选取土壤团聚体、机械组成和有机质 3 个相关因素进行分析。研究土壤团聚体时通常使用 MWD, GMD, $R_{>0.25}$ 来表征土壤结构的稳定性,我们发现 3 种草本星毛委陵菜土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体数量最多,团聚体发育最好,结构最稳定,其次是百里香土壤。百里香、星毛委陵菜土壤团聚体各指标值随土层加深先增加后缓慢下降,中下层差异不大。表层土壤团聚体数量少可能首先是因为测定土壤团聚体时没有剔除样品中的根系,表层土壤与根系紧密结合的数量多,故湿筛震荡后所得团聚体数量很少。其次是因为上层土壤与外部环境直接接触,外部干扰大,不利于团聚体的形成。百里香根密度参数中、下层差异显著,但团聚体各指标两个土层差异很小,说明土壤团聚体发育不仅与根系有关,还可能受其他因素如地上覆被情况、土壤性质、土壤微生物等的影响^[7]。星毛委陵菜土壤团聚体各指标值中层与下层差异不显著,这与其根系分布具有一致性。长芒草土壤团聚体各指标值随土层变化同百里香等相同,但变幅更大,中层明显大于其他土层,这可能与根系和土壤属性都有关系。土壤有机碳结果显示,百里香、星毛委陵菜之间 TOC 含量差异不大并明显高于长芒草,长芒草表层有机碳含量明显大于其他土层。土壤有机碳含量与植被根系,尤其是细根的分泌周转、枝叶枯落物有关^[31]。土壤颗粒大小也会影响土壤抵抗径流冲刷的能力,本研究中研究区土壤粒径以粉砂粒为主,土壤黏粒在 6% 以下,与王月玲等^[32]研究不同植被恢复方式土壤粒度组成结果一致,这主要与黄

土的风成沉积过程有关。3 种草本土壤黏粒含量百里香最大,星毛委陵菜与长芒草差异不大,可能是因为百里香根系数量多且分布密集,对土壤的细化作用强于其他草本,另外众多根系的粘结也会阻止细粒流失^[17]。土壤机械组成不仅影响土壤的理化性质和生物学特性,而且与植物生长所需的环境条件及养分供给关系密切^[30],星毛委陵菜土壤砂粒含量最高,土壤土粒相对粗化,可能是它的根系构型阻碍了土壤颗粒转化^[33]。另外,星毛委陵菜粒径组成还可能与土壤养分供应水平有关^[24]。

3.4 影响草本根土复合体抗冲性的因素

根系能通过自身结构和分布格局以及根系凋落物和分泌物影响土壤理化性质和结构^[31]。如根系能够将粘重的土壤分割成为细小的颗粒,也可以将分散的土壤粘结成土粒形成团粒结构,同时促进土壤中有有机质和腐殖质的积聚而形成土壤胶体,影响土壤的容重和孔隙度等,改善土壤机械组成和土壤物理环境^[31,34]。另外,根系分泌物和根际微生物代谢产生的分泌物对土壤的胶结促进土壤团聚体数量的增加,同时根系的归还、分解改变土壤有机碳储量,影响土壤结构及稳定性。

我们对根系及土壤与根土复合体抗冲性进行相关性分析发现,百里香 5—10 cm 土壤的黏粒、粉粒含量与 K_d 显著正相关,砂粒与 K_d 显著负相关,土壤团聚体参数 MWD, GMD 与 K_d 显著正相关。与伏耀龙^[35]、李勇^[7]等研究结果相似,但与王雅琼^[8]、史冬梅^[16]及资如毅^[9]等的结论相反。百里香根系在 5—10 cm 土层分布密集且数量较多,黏粒含量高,土粒间黏结力强,土壤结构稳定,因此抵抗径流冲刷能力较强。抗冲性与粉粒正相关可能是黏粒的胶体特性和大的比表面积将粉粒粘附于其周围形成大土粒,大土粒间孔隙大,透水性增加,因此抗冲性增强。而砂粒结构松散,土粒间黏结力弱,容易被径流冲刷带走,故砂粒含量多的土壤抗冲性弱,与张素^[17]、陈安强^[36]等研究结论相似。百里香土壤抗冲性与团聚体参数 MWD, GMD 正相关,与郭明明^[4]、张素^[17]等研究结果一致,说明土壤团聚体发育越好,土体抵抗径流冲刷破坏的能力越强。

百里香根系指标与 K_d 相关性不显著,但其特定径级根各指标与土壤 TOC 显著或极显著正相关或负相关,大部分细根特征参数与粉粒、砂粒分别呈极显著负相关和显著或极显著正相关。植被根系的有机碳含量显著高于土壤,与土壤碳储量密切相关,根系与土壤有机碳的关系通常为正相关,即土壤根系越丰富,根系通过分解向土壤中提供的养分和有机质就

多。对百里香来说,二者的关系还受根系直径和分布土层影响。土壤表层的粗根通常通过自身分解向土壤提供有机质,5—10 cm 土层大部分根系尤其是细根,代谢旺盛,周转强度大,它们通过从土壤获取有机质维持其生理活动,与罗永清等^[37]得出的根系表面积和根系长度与 SOC 含量呈极显著线性关系的结果相似。根系通过穿插和根际效应破坏土壤大颗粒,根系分泌物通过有机质等影响土壤颗粒的胶结,它们都影响土壤的机械组成^[38]。本研究中百里香根系与土壤粉粒、砂粒的关系与吕渡^[39]研究结果相似,但与樊子豪等^[38]得出的结论相反,可能是因为土体表层细根根系表面积和体积越大,对土壤的细化程度越小,小粒径的粉粒就少,大粒径砂粒就多。

星毛委陵菜土壤表层的粗根(≥ 2.0 mm 根),土壤下层的大部分细根(0.5~2.0 mm 根),长芒草土壤中层一部分细根(0~1.0 mm 根)影响土体抗冲性能,单位体积的根系长度、根系表面积和体积越大,土体抗冲性越强,与杨瑞杰^[-26]、沙小燕^[5]等研究结果一致。可以看出,根系与抗冲性是否显著相关与根径大小和土层深度都有关系。另外,星毛委陵菜、长芒草一部分细根影响土壤 TOC 含量,星毛委陵菜部分细根,长芒草全部细根影响土壤团聚体形成,说明两种草本根系不仅直径影响土体抗冲性,还通过对土壤性质和结构的改变影响土体抗冲性。粗、细根对土壤有机碳作用不同,这与不同径级根在植被生命活动中的生理作用密切相关,细根对土壤团聚体形成具有积极作用。

4 结论

土壤理化性质(粒径和团聚体)是影响百里香根土复合体抗冲性的直接显著因子,其细根还通过影响土壤机械组成和 TOC 含量间接影响土体抗冲性。土壤粉粒和根系均能直接显著影响星毛委陵菜根土复合体的抗冲性,土壤黏粒、砂粒还通过影响团聚体发育间接影响土体抗冲性。与星毛委陵菜相似,土壤砂粒和一部分细根能直接显著影响长芒草土体抗冲性,但根系、土壤的间接作用并不显著。因此在宁夏南部黄土丘陵区生态恢复建设中优先选择星毛委陵菜和百里香进行水土流失治理和土壤质量提升,实际工作中应将两种草本搭配使用,提高研究区土壤抗侵蚀性能和生态恢复质量。另外,还应加强不同草本根土复合体根系对土壤抗冲性增强效应以及数学模型的研究,提高成果的应用性。

研究区3种常见草本百里香、星毛委陵菜、长芒草根土复合体抗冲性大小有明显差异,其中星毛委陵菜、百里香根土复合体抗冲性较强。3种草本根土复

合结构中根系特征、土壤属性均能影响它的抗冲性能,在宁夏南部黄土丘陵区进行生态建设时应考虑不同草本(植被)的抗冲性能,并在改善相关影响因素的基础上加以优化配置。

参考文献(References):

- [1] 黄悦悦,杨东,冯磊.2000—2016年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力[J].生态学杂志,2019,38(8):2515-2523.
Huang Y Y, Yang D, Feng L. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its driving forces in Ningxia during 2000-2016 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(8):2515-2523.
- [2] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013,29(10):153-159.
Li Q, Liu G B, Xu M X, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):153-159.
- [3] 郭明明,王文龙,史倩华,等.黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].农业工程学报,2016,32(10):129-136.
Guo M M, Wang W L, Shi Q H, et al. Soil anti-scourability of abandoned land and its relationship with influencing factors in Loess Plateau Gully region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(10):129-136.
- [4] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.
Guo M M, Wang W L, Kang H L, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in Gully Region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(22):138-146.
- [5] 沙小燕,李魁,王文龙,等.黄土高原沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征[J].应用生态学报,2022,33(1):133-140.
Sha X Y, Li K, Wang W L, et al. Characteristics of soil anti-scourability in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):133-140.
- [6] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2005,29(2):189-217.
- [7] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.植物根系与土壤抗冲性[J].水土保持学报,1993,7(3):11-18.
Li Y, Xu X Q, Zhu X M, et al. Plant roots and soil anti-scourability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993,7(3):11-18.

- [8] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
Wang Y Q, Zhang J J, Li L, et al. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(1):122-131.
- [9] 资如毅,赵龙山,钱晓鹤,等.喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系[J].水土保持学报,2022,36(3):23-29.
Zi R Y, Zhao L S, Qian X H, et al. Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in Karst Mountain areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):23-29
- [10] 张珂,李可,朱海丽,等.黄河源高寒草甸河岸带根-土复合体抗冲特性[J].泥沙研究,2022,47(2):43-50.
Zhang K, Li K, Zhu H L, et al. Impact on the resistance of soil-root composite of riparian alpine meadow in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(2):43-50.
- [11] 李勇,朱显谟,田积莹,等.黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J].科学通报,1990,35(5):390-393.
Li Y, Zhu X M, Tian J Y, et al. Preliminary study on the mechanism of soil anti-scourability in Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1990,35(5):390-393.
- [12] 景可,王万忠,郑粉莉.中国土壤侵蚀与环境[M].北京:科学出版社,2005.
Jing K, Wang W Z, Zheng F L. Soil Erosion and Environment in China[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [13] 张爱国,张平仓,杨勤科.区域水土流失土壤因子研究[M].北京:地质出版社,2003.
Zhang A G, Zhang P C, Yang Q K. Study on Soil Factors of Regional Soil Erosion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [14] 王峰,石辉,周立江,等.土壤抗冲性研究进展[J].山地农业生物学报,2010,29(6):528-537.
Wang F, Shi H, Zhou L J, et al. Research progress in soil anti-scourability[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2010,29(6):528-537.
- [15] 周佩华,武春龙.黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J].水土保持学报,1993,7(1):29-34.
Zhou P H, Wu C L. The research method of soil anti-scourability experiment in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993,7(1):29-34.
- [16] 史东梅,陈晏.紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J].中国农业科学,2008,41(5):1400-1409.
Shi D M, Chen Y. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in purple soil hilly region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(5):1400-1409
- [17] 张素,熊东红,苏正安,等.土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J].世界科技研究与发展,2014,36(6):721-725.
Zhang S, Xiong D H, Su Z A, et al. Research progress of influence factors in soil anti-scourability[J]. World Sci-tech R & D, 2014,36(6):721-725.
- [18] 邱莉萍,张兴昌.子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J].自然资源学报,2006,21(6):965-972.
Qiu L P, Zhang X C. Effects of land use on soil properties in Ziowuling region [J]. Journal of Natural Resources, 2006,21(6):965-972.
- [19] 周维,张建辉,李勇,等.金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J].水土保持通报,2006,26(5):26-30,42.
Zhou W, Zhang J H, Li Y, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):26-30,42.
- [20] 周利军,齐实,王云琦.三峡库区典型林分林地土壤抗蚀抗冲性研究[J].水土保持研究,2006,13(1):186-188,216.
Zhou L J, Qi S, Wang Y Q. Research on forest soil anti-erosion and anti-scour of typical forests in Three Gorges Reservoir areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006,13(1):186-188,216.
- [21] 马璠.黄土丘陵区土壤抗冲性研究思考[M].银川:宁夏人民教育出版社,2019.
Ma F. Study on Soil Anti-Scourability in Loess Hilly Region [M]. Yinchuan: Ningxia People's Education Press, 2019.
- [22] 耿增超,戴伟.土壤学[M].北京:科学出版社,2011.
Geng Z C, Dai W. Agrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [23] 万海霞,蔡进军,郭永忠,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本根系分布特征[J].水土保持研究,2020,27(4):149-156,163.
Wan H X, Cai J J, Guo Y Z, et al. Characteristics of root distributions of typical herbs in Loess Hilly Region of southern ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):149-156,163.
- [24] 周艳松,王立群.星毛委陵菜根系构型对草原退化的生态适应[J].植物生态学报,2011,35(5):490-499.
Zhou Y S, Wang L Q. Ecological adaptation of root architecture to grassland degradation in *Potentilla acaulis*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011,35(5):490-499.
- [25] 姜义宝,康宏亮,王文龙,等.黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J].中国农业科学,2023,56(1):90-103.
Lou Y B, Kang H L, Wang W L, et al. Vertical distribu-

- tion of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(1):90-103.
- [26] 杨瑞杰,何淑勤,周树峰,等.杂交梁草生长期土壤抗冲性变化特征及其根系调控效应[J].*草业学报*,2023,32(7):149-159.
- Yang R J, He S Q, Zhou S F, et al. Root regulation of soil scourability in hybrid sorghum grass during the growing period[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023,32(7):149-159.
- [27] 刘泉宏,谌芸,颜哲豪,等.紫色土区草篱根系对其根-土复合体抗剪和抗冲性能的影响[J].*草业学报*,2021,30(11):98-107.
- Liu X H, Chen Y, Yan Z H, et al. The effects of grass hedgerow roots on shear strength and scouring resistance of root-soil complexes in the purple soil region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021,30(11):98-107.
- [28] 毕建琦,杜峰,梁宗锁,等.黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J].*林业科学研究*,2006,19(2):225-230.
- Bi J Q, Du F, Liang Z S, et al. Research on root system of *Caragana korshinskii* at different site conditions in the hilly regions of Loess Plateau[J]. *Forest Research*, 2006,19(2):225-230.
- [29] 沙国良,魏天兴,陈宇轩,等.黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征[J].*干旱区地理*,2022,45(4):1224-1234.
- Sha G L, Wei T X, Chen Y X, et al. Characteristics of soil particle size distribution of typical plant communities on the hilly areas of Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2022,45(4):1224-1234.
- [30] 王长庭,王根绪,刘伟,等.高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J].*干旱区资源与环境*,2013,27(9):160-165.
- Wang C T, Wang G X, Liu W, et al. Comparison of soil mechanical composition and soil fertility at different grassland types in alpine meadow[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013,27(9):160-165.
- [31] 张立恒,李清雪,王学全,等.高寒沙地中间锦鸡儿人工林根系分布及林下土壤特性研究[J].*土壤通报*,2019,50(4):840-846.
- Zhang L H, Li Q X, Wang X Q, et al. Root distribution and soil properties under *Caragana* intermedia plantations in alpine sandy land[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019,50(4):840-846.
- [32] 王月玲,许浩,马璐,等.宁南黄土区典型林地土壤抗冲性及相关物理性质[J].*水土保持研究*,2021,28(1):37-43.
- Wang Y L, Xu H, Ma F, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on typical forestlands in Loess Hilly Region of southern Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(1):37-43.
- [33] Wang J, Zhao W W, Wang G, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China)[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021,770:144833.
- [34] 吴彩霞,傅华.根系分泌物的作用及影响因素[J].*草业科学*,2009,26(9):24-29.
- Wu C X, Fu H. Effects and roles of root exudates[J]. *Pratacultural Science*, 2009,26(9):24-29.
- [35] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].*农业机械学报*,2012,43(7):50-55.
- Fu Y L, Zhang X C. Anti-scourability of soil under different land use types in dry valley of Minjiang River [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(7):50-55.
- [36] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].*农业工程学报*,2012,28(5):108-113.
- Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(5):108-113.
- [37] 罗永清,赵学勇,王涛,等.沙地植物根系特征及其与土壤有机碳和总氮的关系[J].*草业学报*,2017,26(8):200-206.
- Luo Y Q, Zhao X Y, Wang T, et al. Characteristics of the plant-root system and its relationships with soil organic carbon and total nitrogen in a degraded sandy grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017,26(8):200-206.
- [38] 樊子豪,张瑞香,冯雪琦,等.河滨湿地不同植物群落根系分布特征与土壤理化性状的关系:以黄河中游荥阳段为例[J].*生态学报*,2023,43(11):4772-4781.
- Fan Z H, Zhang R X, Feng X Q, et al. Characteristics of root distribution and soil physical and chemical properties of different vegetation communities in tidal flat wetland: A case study of Xingyang section of Zhengzhou in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(11):4772-4781.
- [39] 吕渡.不同恢复类型植被细根分布特征及其与土壤理化性质耦合关系[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- Lü D. Distribution Characteristics of Fine Roots of Different Restoration Types of Vegetation and Their Coupling Relationship with Soil Physical and Chemical Properties [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.