

# 宁夏南部黄土丘陵区3种典型草本根土复合体渗透性及其影响因素

万海霞<sup>1</sup>,董立国<sup>1</sup>,杨阳<sup>2</sup>,黄云鑫<sup>3</sup>,韩新生<sup>1</sup>,王月玲<sup>1</sup>,郭永忠<sup>1</sup>,韩懂懂<sup>1</sup>

(1.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,银川750002;2.中国科学院地球环境研究所

黄土科学全国重点实验室,西安710061;3.西北大学地质学系,大陆动力学国家重点实验室,西安710069)

**摘要:** [目的]明确黄土丘陵区草本根土复合体渗透性及其与根系、土壤的关系,探究不同典型草本根土复合体的渗透性差异、过程及影响因素,为区域生态恢复草种配置及水土保持功能评价提供科学依据。[方法]在宁夏南部黄土丘陵区以3种典型草本百里香、星毛委陵菜、长芒草0—20 cm土层根土复合体为研究对象,室内采用环刀法开展渗透性试验,同时测定根系、土壤特征。[结果](1)研究区不同草本根土复合体土壤理化性质存在差异。百里香土壤有机质含量高(2.48%)、土粒更细(黏粉粒64.10%),星毛委陵菜土壤团聚体发育最好( $R_{>0.25\text{mm}}$ , 70.05%),长芒草土壤容重最大(1.16 g/cm<sup>3</sup>),有机质、孔隙度及团聚体含量最低(0.74%, 55.41%, 43.06%);(2)3种草本0—20 cm土层不同径级根的根长密度、表面积密度、体积密度及比根长分别为0~10.79 cm/cm<sup>3</sup>, 0~78.71 mm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 0~7.57 mm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 19.42~84.05 m/g。各草本0~0.5 mm径级根的根长及表面积密度占比达50.5%~90.9%,百里香根细数量多且分布密集,随土层增加逐渐减少,根长密度变幅52.9%~92.9%,星毛委陵菜根粗数量相对少,长芒草根粗少但比根长最大,二者根长密度变幅34.8%~89.6%;(3)3种草本根土复合体渗透性排序为星毛委陵菜>百里香>长芒草。渗透性指标呈现出初渗速率>平均入渗速率>稳渗速率的特征。Kostiakov模型能较好地拟合3种草本根土复合体的入渗过程( $R^2>0.890$ )。 (4)3种草本根土复合体渗透性与土壤和根系密切相关。对百里香而言,土壤孔隙度、有机质含量、粉砂粒含量、根系生物量及0~2.0 mm细根显著影响根土复合体渗透性。对于星毛委陵菜,土壤孔隙度、有机质含量,根系生物量、 $\geq 2.0$  mm和0.5~1.0 mm根显著影响复合体渗透性。对于长芒草,土壤黏粒含量, $\geq 2.0$  mm及0~0.5 mm根显著影响复合体渗透性。[结论]三种草本根土复合体渗透性存在差异,土壤性质、根系特征都是影响复合体渗透性的重要因素,不同草本影响显著的指标有所不同。

**关键词:** 根土复合体; 渗透性; 土壤; 根系; 宁夏南部黄土丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0082-13

## Permeability of root-soil composites of three typical herbs and its influencing factors in loess hilly region of southern Ningxia

Wan Haixia<sup>1</sup>, Dong Ligu<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>2</sup>, Huang Yunxin<sup>3</sup>, Han Xinsheng<sup>1</sup>,

Wang Yueling<sup>1</sup>, Guo Yongzhong<sup>1</sup>, Han Dongdong<sup>1</sup>

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to clarify the permeability of herbaceous root-soil composites and its relationship with roots and soil in the loess hilly region, and to explore the differences, processes, and influencing

收稿日期: 2025-06-24

修回日期: 2025-08-10

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目“黄土丘陵区林草植被稳定性及退化人工林改造研究与示范”(NGSB-2021-14-01); 宁夏回族自治区自然科学基金项目“基于稳定同位素技术的宁南黄土区典型人工林水分利用策略研究”(2025AAC031075)

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

通信作者: 董立国(1980—),男,宁夏青铜峡人,博士,副研究员,主要从事林业生态、水土保持与土壤健康方面的研究工作。E-mail: dlgo303@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

factors of permeability among typical herbaceous root-soil composites, thereby providing a scientific basis for the configuration of herbaceous species in local ecological restoration and the evaluation of soil and water conservation functions. [Methods] In the loess hilly region of southern Ningxia, root-soil composites in the 0—20 cm soil layer of three typical herbaceous species (*Thymus mongolicus*, *Potentilla acaulis*, and *Stipa bungeana*) were studied. Laboratory permeability tests were conducted using the cutting ring method, and root and soil characteristics were simultaneously measured. [Results] (1) The soil physicochemical characteristics of the root-soil composites of different herbs in the study area differed. *Thymus mongolicus* had high soil organic matter content (2.48%) and finer soil particles (clay and silt content 64.10%). *Potentilla acaulis* exhibited the best-developed soil aggregates ( $R_{>0.25\text{ mm}}$ , 70.05%). *Stipa bungeana* had the largest soil bulk density (1.16 g/cm<sup>3</sup>), and lowest contents of organic matter (0.74%), porosity (55.41%), and aggregates (43.06%). (2) In the 0—20 cm soil layer, the root length density, root surface area density, root volume density, and specific root length of the three herbs across different diameter classes were 0~10.79 cm/cm<sup>3</sup>, 0~78.71 mm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 0~7.57 mm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, and 19.42~84.05 m/g, respectively. The root length density and root surface area density of roots with diameters of 0~0.5 mm for all herbs accounted for 50.5%~90.9% of the total root system. *Thymus mongolicus* had a large number of fine roots with dense distribution, which decreased gradually with increasing soil depth. The variation range of its root length density was 52.9%~92.9%. *Potentilla acaulis* had relatively coarse and fewer roots, while *Stipa bungeana* had few coarse roots but the largest specific root length. The variation range of root length density for both species was 34.8%~89.6%. (3) The permeability of the three herbaceous root-soil composites followed the order: *Potentilla acaulis*>*Thymus mongolicus*>*Stipa bungeana*. The permeability indicators showed the characteristics of initial infiltration rate>average infiltration rate>stable infiltration rate. The Kostiakov model accurately simulated the infiltration processes of the three root-soil composites ( $R^2>0.890$ ). (4) The permeability of the root-soil composites of the three typical herbs was closely related to soil and roots. For *Thymus mongolicus*, permeability was primarily influenced by soil porosity, organic matter content, silt content, root biomass, and fine roots with a diameter of 0~2.0 mm. For *Potentilla acaulis*, permeability was primarily influenced by soil porosity, organic matter content, root biomass, and fine roots with diameters of  $\geq 2.0$  mm and 0.5~1.0 mm. For *Stipa bungeana*, permeability was significantly influenced by soil clay content, and roots with diameters of  $\geq 2.0$  mm and 0~0.5 mm. [Conclusion] The permeability of the three herbaceous root-soil composites differs. Both soil properties and root characteristics are key factors affecting the permeability of the composites, with the influential indicators varying among different herbs.

**Keywords:** root-soil composite; permeability; soil; root; loess hilly region of southern Ningxia

黄土丘陵区作为宁夏脆弱生态的典型区域,植被恢复、发展林草是该区生态建设工作的重要内容。植被能够通过多重生态过程对水分下渗过程产生调控作用。草本作为干旱半干旱地区生态恢复的主要植被,适应性强,生长快,耗水少,根系复杂多样,大部分根集中分布于土壤浅层(0—30 cm),这些根与土壤紧密结合并常常以复合体的形式发挥生态功能。草本根土复合体不仅能够抵抗地表水流冲刷、分散,还具有渗水特性,在降雨特别是短时强降雨过程中减少地表径流的同时影响水分下渗。土壤入渗是描述水分通过地表向下的流动过程,土壤入渗率是指单位时间、单位面积土壤表面入渗的水量<sup>[1]</sup>,土壤入渗性能对调节径流、涵养水源有重要作用。因

此明确根土复合体的渗透性是了解不同类型植被水文功能的重要方面,研究不同草本根土复合体入渗性能对新时期改造及恢复植被、防治水土流失具有重要意义。

在林草生态系统中,根系与土壤相互作用,密不可分,根系影响土壤的理化性质,土壤也会通过物理、化学和生物等作用影响根系的生长、功能及分布。根土复合体作为一个“组合体”,其渗透性能就与根、土壤具有一定的联系。不同植被由于独特的生物学特性,其根系对土壤理化性质、水文生态功能的影响存在差异<sup>[2]</sup>。关于土壤渗透性及影响因素的研究成果很多,在土壤和渗透性方面:云慧雅和李平等<sup>[3-4]</sup>研究得出,黄土区不同林分类型土壤入渗性能与孔隙状况

或非毛管孔隙度、 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量以及有机质含量具有极显著正相关性,与容重、土壤含水量呈负相关性;张轩铭等<sup>[5]</sup>研究表明,三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗速率与总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度、砂粒含量呈正相关关系,与容重、黏粒含量、有机质含量呈负相关关系。苏世平等<sup>[6]</sup>研究得出,兰州市4种灌木类型土壤渗透性与总孔隙度、土壤有机质含量、土壤全氮、土壤无机氮、土壤速效磷、土壤速效钾分别呈极显著正相关,与土壤初始含水率、土壤非毛管孔隙度分别呈显著或极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关;还有研究<sup>[7]</sup>认为,土壤的机械组成和非毛管孔隙度是影响荒漠草原土壤入渗的主要因素。丁海晶等<sup>[8]</sup>研究渗透性的区域变化规律及影响因子认为,容重、有机质含量、非毛管孔隙度等是影响土壤渗透性的主导因子,但各因子对土壤渗透性的影响存在一个阈值(分别为30%, $1.0\text{ g/cm}^3$ ,30%),一旦超过这个值其对渗透性的影响减弱。可见针对不同研究区域,不同研究对象取得的研究结果有一定差异。在根系和渗透性方面:一些研究<sup>[1,9]</sup>指出,根系的根长密度、根表面积密度,及根体积密度和根生物量与土壤入渗特征指标均存在显著或极显著相关关系。根系构型也会影响土壤渗透性能,王鑫皓等<sup>[10]</sup>研究表明,在根系体积相同的情况下,各根系构型下的土壤稳渗速率为V型 $>$ M型 $>$ R型 $>$ W型 $>$ VH型 $>$ H型。根系提高了土壤的入渗性能,根长密度、根体积分数、根体积分形维数与土壤稳渗速率均呈正相关关系。有研究者<sup>[11]</sup>提出,植物根系有利于改良土壤物理性质,但也可能会堵塞、挤压孔隙进而阻碍水的下渗。Ghestem等<sup>[12]</sup>认为水平根系能够阻止水分的下渗,倾斜根和垂直根能够促进土壤水分流向深层土壤。而Hinz等<sup>[13]</sup>认为,根的粗细程度以及它在孔隙中所占的比例是决定根系如何影响水分运移的关键因素。还有研究者<sup>[14]</sup>指出,根系特征对土壤入渗能力的影响较复杂,受土壤质地以及根系直径的影响。闫东锋等<sup>[1]</sup>研究认为根系对土壤渗透能力的增强作用主要由 $0.5\sim 5$  mm径级的根系表现出来,姜义宝等<sup>[15]</sup>研究表明,细根( $d\leq 1$  mm)是植物群落改善土壤孔隙状况、提高土壤入渗和增强土壤抗冲性的有效根系,桑凯新<sup>[16]</sup>研究表明,直径介于 $0.5\sim 2$  mm的根系对土壤渗透性的改善作用最好。然而,根系、土壤往往会共同影响土体的渗透性能。一些研究<sup>[13,17-19]</sup>就表明根系特征(RLD, RSD, RVD, RB)、团聚体稳定性、土壤孔隙度/土壤大孔隙、土壤各粒径比例、饱和持水率是决定土壤入渗能力的主要因子。我们发现,很多相关研究是单独

研究根系或者土壤对渗透性的影响,将根土作为一个整体,系统研究其渗透性及影响因素的很少<sup>[1,3-6,8-9]</sup>,因此本文以宁夏南部黄土丘陵区3种典型草本的根土复合体为研究对象,探究不同根土复合体渗透性的差异、规律,弄清影响渗透性能的因素,为黄土丘陵区植被恢复建设中草种的选择配置(选择利于降雨入渗、增强土壤蓄水能力的特定植物种类)及区域水土保持功能评价提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区在彭阳县中庄流域,位于宁南山区彭阳县草庙乡和白阳镇境内,流域总面积 $128.24\text{ km}^2$ ,海拔高度在 $1470\sim 1848$  m。该区是典型的黄土丘陵区,地貌以梁状丘陵为主,部分地域梁峁交错,侵蚀沟道遍布,地形破碎,沟道间偶有小型平缓地带,土质疏松,是水土流失重点区域。气候特征为典型的温带大陆性季风气候,年均气温 $7.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,无霜期 $140\sim 160$  d。年均降水量 $420\sim 500$  mm,年平均潜在蒸发量 $1360$  mm,降雨年内和年间分布不均,主要集中在7—9月。主要土壤类型为黄绵土,土壤容重 $1.1\sim 1.3\text{ g/cm}^3$ ,有机质 $3.0\sim 35.2\text{ g/kg}$ 。试验区草本植物主要有百里香(*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 试验方法

1.2.1 样品采集 于2023年6—8月,在彭阳中庄小流域选择以百里香、星毛委陵菜、长芒草等为优势种的自然坡面(表1)进行随机取样,每种草本类型选取7个点。取样时剪去植株地上部分,露出长 $1$  m,宽 $0.3$  m的地面作为取样面,同时挖取 $30$  cm深度的土壤剖面。每个剖面按照 $0\sim 5$  cm, $5\sim 10$  cm, $10\sim 20$  cm三层分别使用 $100\text{ cm}^3$ 环刀、直径 $7$  cm的特制取样器进行取样,每层3个重复,每种草本共计取 $126$ 个样品,其中 $42$ 个环刀样用于渗透性测定,另 $42$ 个环刀样用于容重、孔隙度及水分测定, $42$ 个铝盒样用于团聚体测定,所有样品确保原状带回实验室统一测定。同时采集分析土样,将取样点的每层土壤进行多点取样并混合,每种草本共取散土样 $21$ 份,用于土壤有机质、机械组成等理化性质的测定。

表1 样地基本情况  
Table 1 Basic information of sample plots

优势种	经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	坡长/m	盖度/%
百里香	106°45'N/35°56'E	1701	半阴坡	20	150	82.0
星毛委陵菜	106°45'N/35°56'E	1694	半阴坡	20	150	84.6
长芒草	106°43'N/35°57'E	1647	半阳坡	20	200	95.1

### 1.2.2 根土复合体渗透性及根、土特征测定方法

(1) 渗透性。采用环刀法测定。将取回的环刀样品在水槽内浸泡8 h,之后取出静置30 min,去掉上盖,在上面套一个空环刀,接口处用胶布密封,防止漏水。将双环刀放于漏斗中,漏斗下承接有烧杯,向空环刀中缓缓加水,从漏斗滴下第一滴水时开始计时,以后每间隔1 min更换漏斗下的烧杯,分别记录渗出水量 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ ,直到渗出水量相等为止,同时记录水温。为便于比较,渗透总量统一取前55 min内的渗透量。测定结束后计算:初渗率 $f_0$ (mm/min),稳渗率 $f_c$ (mm/min),平均入渗速率 $f_v$ (mm/min)、渗透系数( $K_\theta$ )。

(2) 土壤团聚体及理化性质。团聚体,采用Yoder湿筛法测定。有机质,采用重铬酸钾外加热法测定;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(United States Department of Agriculture, USDA)标准划分为砂砾(0.05~2.0 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3级;容重、孔隙度、含水量,采用环刀烘干称重法测定。

(3) 根系。渗透性试验结束后,将环刀样置于网筛中用清水反复冲洗,直至洗出所有根系,洗净的根用滤纸吸干水分,展开平铺放入根盘,使用浙江万深LA-S系列根系扫描分析系统测定根系长度、表面积、体积等指标,最后将根装入纸袋后放入烘箱,在60℃下烘干至恒重,称取生物量,计算根长密度、表面积密度、体积密度、比根长。

1.2.3 土壤入渗模型 本文在借鉴前人研究成果<sup>[3-4,20]</sup>的基础上,选取常用的4个渗透性模型,分别是Philip模型,其公式为 $f(t) = \frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + A$ ,通用经验模型公式为 $f(t) = a t^{-n} + b$ ,Kostiakov模型表达式为 $f(t) = a_1 t^{-b_1}$ ,Horton模型表达式为 $f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$ 。式中: $S$ (mm/min<sup>-0.5</sup>)为吸渗率,表征土壤吸水能力的强弱; $A$ 为稳渗率(mm/min); $t$ 为入渗时间(min); $a, a_1, f_0$ 为初始入渗速率; $b, f_c$ 为稳定入渗速率; $b_1, k$ 为衰减系数和衰减指数; $n$ 为拟合参数。

1.3 数据分析  
通过Excel 2016, DPS17.0软件对土壤理化性质

和土壤入渗指标进行统计分析,在DPS17.0中使用单因素方差分析法和Duncan新复极差法分析检验处理间的差异及显著性,利用上述4种模型在Origin 2021中对不同草本类型根土复合体的入渗过程进行拟合,利用相关性分析研究土壤、根与复合体入渗的关系。采用Origin 2021软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草本样地土壤理化性质

土壤有机质含量、容重、孔隙度、团聚体组成等是影响土壤渗透性的主要因素<sup>[4,7-8,14]</sup>。对不同草本复合体的土壤理化性质进行测定,结果显示(表2),3种草本0—20 cm土层根土复合体中土壤的各理化指标存在显著差异( $p < 0.05$ )。其中百里香的有机质、含水量最大,星毛委陵菜,长芒草本较之分别低10.2%,70.1%和8.6%,25.9%,草本间差异达到显著水平( $p < 0.05$ )。百里香、星毛委陵菜土壤总孔隙度、非毛管孔隙度显著高于长芒草1.77%~3.44%,13.75%~20.11%。草本间土壤容重、毛管孔隙度排序与总孔隙度、非毛管孔隙度正好相反。土壤机械组成方面,长芒草黏粉粒最多(65.02%),星毛委陵菜砂粒最多(38.37%),草本间差异显著( $p < 0.05$ )。团聚体方面,星毛委陵菜>0.25 mm水稳性团聚体含量达70.05%,百里香、长芒草较之低7.24%,38.53%,草本间差异也显著( $p < 0.05$ )。可见,百里香相比星毛委陵菜土壤有机质含量更高、土粒更细,但星毛委陵菜土壤团聚体发育更好,长芒草土壤容重最大,有机质、孔隙度及水稳性大团聚体含量最低。

### 2.2 不同草本根系特征

3种草本0—20 cm土层各径级根的根长密度为0~10.79 cm/cm<sup>3</sup>(图1),草本间大小为百里香>星毛委陵菜>长芒草。对不同草本相同径级根的根长密度进行方差分析显示,0—5 cm土层,百里香各径级根的根长密度显著大于其他两种草本( $p < 0.05$ ),星毛委陵菜与长芒草大部分根差异不显著。5—10 cm和10—20 cm土层,除0~0.5 mm根外,百里香大部分根的根长密度与星毛委陵菜差异不显著,但显著大于长芒草。可见,百里香根数量多且分布密集,长芒草根数量最少,分布稀疏。

另外,各径级根的根长密度随根径增粗在减小,0~0.5 mm根最大,占总根长密度的78.0%~90.9%,具有显著优势。草本各径级根的根长密度垂直分布有差异,百里香各径级根的根长密度随土层深度增

加逐渐降低,变幅为52.9%~92.9%。星毛委陵菜、长芒草0~0.5 mm根的根长密度随土层加深先升后降(倒“V”型),其他径级根则随土层深度增加逐渐减小,变幅为34.8%~89.6%。

表 2 不同草本类型土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties of different herbaceous types

草本类型	有机质/ %	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/ %	非毛管 孔隙度/%	土壤 含水量/%	机械组成/%			R <sub>&gt;0.25</sub> /%
							黏粒	粉粒	砂粒	
百里香	2.48±0.25a	1.14±0.02b	56.39±0.01a	39.98±0.01b	16.42±0.01a	19.56±0.69a	5.61±0.23a	58.49±1.69b	35.90±1.91b	64.97±0.05b
星毛委陵菜	2.22±0.40b	1.13±0.03b	57.30±0.01a	39.96±0.01b	17.33±0.02a	17.89±1.45b	4.90±0.28b	56.73±1.31c	38.37±1.35a	70.05±0.07a
长芒草	0.74±0.15c	1.16±0.04a	55.41±0.01b	41.46±0.02a	14.43±0.02b	14.49±1.37c	4.66±0.23c	60.36±0.96a	34.98±0.99c	43.06±0.07c

注: 同列不同小写字母表示差异显著(p<0.05)。

3种草本0—20 cm土层各径级根的表面密度为0~78.71 mm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>(见图1),草本间排序与根长密度相同。不同草本间差异显著性结果显示,0—10 cm土层表面密度差异与根长密度相同,但到10—20 cm土层时,草本间差异均不再显著。

总体来看,百里香的根与土体接触最为密切,这从

侧面也反映出百里香根系最为丰富,之后依次是星毛委陵菜、长芒草。各草本不同直径根的表面密度随根径、土层的变化与根长密度相同,其中百里香变幅53.9%~93.7%,其他草本37.6%~90.9%。各径级根中0~0.5 mm根表面密度占比达50.5%~76.5%,具有明显优势。

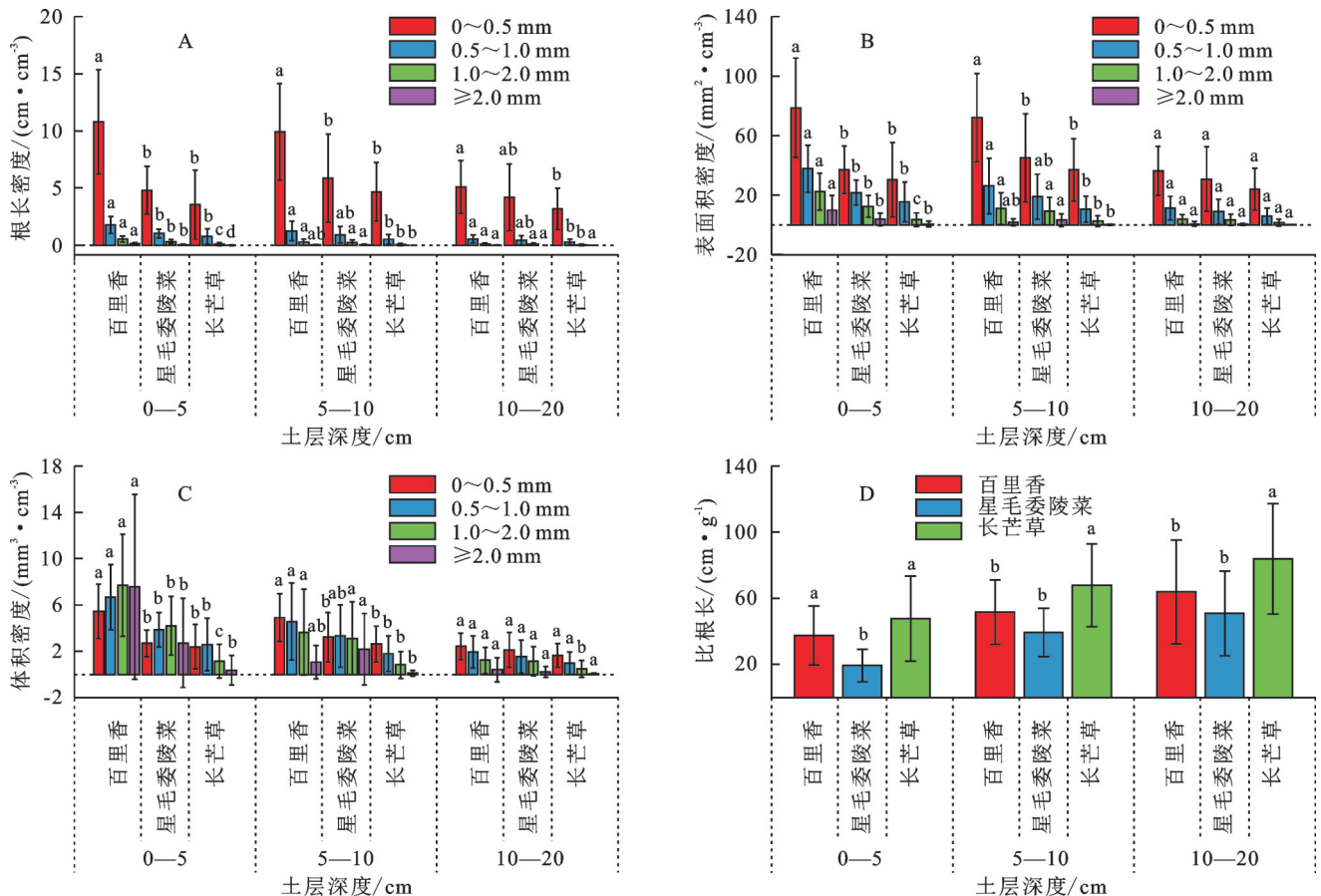


图 1 草本不同径级根系分布

Fig. 1 Root distribution across different diameter classes in herbs

结果显示(图1),3种草本0—20 cm土层各径级根的体积密度为0~7.57 mm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,百里香最大,其次是星毛委陵菜,草本间根体积密度差异同表面积一致。随土层深度增加,草本间差异在变小,尤其是百

里香与星毛委陵菜,但总体仍然是百里香最大。各草本不同直径根的体积密度随根径变化规律与表面积密度等明显不同,百里香在0—5 cm土层时,1.0~2.0 mm根的体积密度最大,其次是≥2.0 mm根,直径

0~0.5 mm根最小,粗根( $\geq 2.0$  mm)占比达27.6%。5—10 cm土层和10—20 cm土层时,体积密度随根径增粗逐渐减小,粗根仅占6.8%~7.4%。星毛委陵菜在0—5 cm土层和5—10 cm土层时,各径级根体积密度占比18.4%~31.3%,差异不大。10—20 cm土层时,体积密度随根径加粗逐渐减小, $\geq 2.0$  mm根只占4.2%。长芒草在0—5 cm土层时,0.5~1.0 mm根的体积密度最大,其次是0~0.5 mm根, $\geq 2.0$  mm根最小,其他土层根体积密度随根径的变化与百里香一致。另外,草本各径级根体积密度垂直分布有差异,百里香各径级根体积密度随土层深度增加逐渐减小,与根长密度等相同。星毛委陵菜0~1.0 mm根、长芒草0~0.5 mm根体积密度随土层加深先增大后减小,其他径级根随土层的变化与百里香相同。

3种草本0—20 cm土层根系比根长为19.42~84.05 m/g,大小为长芒草>百里香>星毛委陵菜,说明长芒草对生境内资源的利用效率及空间拓展的能力最强。随土层深度增加比根长逐渐增大,与大部分根的根长密度、表面积密度正好相反。

综上所述,3种草本根系均以直径0~0.5 mm根占绝对优势。百里香根细数量多且分布密集,星毛委陵菜根粗数量较少,长芒草几乎无粗根,比根长最大。草本大部分根的根长密度、表面积密度随根径增粗逐渐减小。百里香根系主要集中在0—10 cm土层,随土层深度增加根系减少,根长密度等变幅最大。星毛委陵菜、长芒草根长密度等随土层增加变幅较小。

### 2.3 不同草本根土复合体渗透性能

**2.3.1 根土复合体入渗过程** 3种草本根土复合体的入渗过程如图2所示,不同草本根土复合体入渗速率存在一定差异但呈现的规律基本一致,前0~6 min迅速递减,6~30 min缓慢波动,30~55 min趋于稳定。百里香根土复合体入渗率在0~6 min期间由3.70 mm/min降至3.02 mm/min,降低18.42%,降幅最大;星毛委陵菜根土复合体在0~6 min期间由4.17 mm/min降至3.68 mm/min,降低11.92%;而长芒草根土复合体由2.98 mm/min下降至2.67 mm/min,变幅为10.26%。

**2.3.2 根土复合体渗透性** 土壤初始入渗速率( $f_0$ )、稳定入渗速率( $f_c$ )和平均入渗速率( $f_v$ )是反映土壤入渗性能的重要指标<sup>[3]</sup>,比较其大小关系可以了解不同草本类型根土复合体入渗能力差异。试验结果显示(图3):3种草本0—20 cm土层根土复合体的初渗速率、稳渗速率、平均入渗速率及总渗透量大小排序均是星毛委陵菜(3.92 mm/min, 3.52 mm/min, 3.53 mm/min, 197.69 mm)>百里香(3.38 mm/min, 2.80

mm/min, 2.93 mm/min, 159.11 mm)>长芒草(2.80 mm/min, 2.02 mm/min, 2.47 mm/min, 142.50 mm)。渗透性各指标变异系数为0.17~0.29。草本根土复合体的渗透性都表现为初渗速率>平均入渗速率>稳渗速率的特征。方差分析显示,各草本间的初渗速率、平均入渗速率差异显著( $p < 0.05$ ),稳渗速率、单位面积渗透总量百里香与长芒草差异不显著。由此可见,星毛委陵菜根土复合体渗透性能最好,其次是百里香,长芒草复合体渗透性能最差。

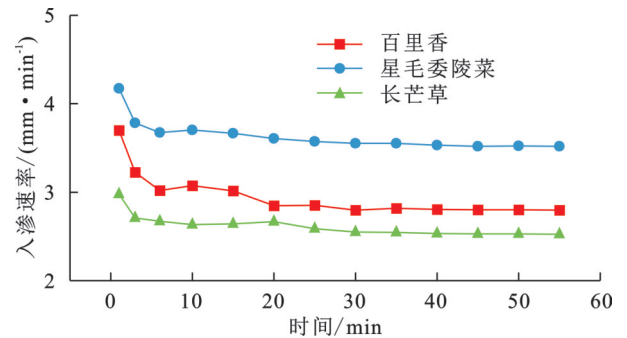


图2 不同草本根土复合体入渗速率随时间的变化  
Fig. 2 Variations in infiltration rate over time for root-soil composites of different herbs

3种草本根土复合体渗透性各指标随土层的变化有所不同。对于星毛委陵菜,渗透性各指标随土层加深呈“V”型变化,5—10 cm最小,与其他土层差异显著( $p < 0.05$ ),0—5 cm与10—20 cm差异不显著。对于百里香和长芒草,渗透性各指标随土层加深逐渐降低,百里香各指标3个土层差异均显著( $p < 0.05$ ),长芒草初渗速率、稳渗速率及渗透总量0—5 cm与其他土层差异显著( $p < 0.05$ ),5—10 cm与10—20 cm差异不显著,平均入渗速率3个土层差异均不显著。

**2.3.3 不同草本根土复合体入渗过程拟合** 将不同草本根土复合体入渗速率( $y$ )随时间( $t$ )的变化规律用不同模型进行拟合,结果如表3所示。Phillip模型中S表征土壤吸水能力的强弱,与土壤入渗能力正相关。S值表现为百里香>星毛委陵菜>长芒草,A值表现为星毛委陵菜>百里香>长芒草,模型拟合的入渗过程与实测数据呈现规律有所差异。通用经验模型中,a值表现为星毛委陵菜>百里香>长芒草,拟合结果与实测结果呈现的规律一致。b值拟合的结果百里香最大,其次是星毛委陵菜,而实际测量中星毛委陵菜大于百里香,与实际情况有一定差异。Horton模型的拟合结果与通用经验模型相似,初始入渗速率 $f_0$ 与实测结果一致,但稳定入渗速率 $f_c$ 结果与实际情况不符。Kostiakov模型拟合的 $a_1$ 值为2.900 4~4.046 6,且 $a_1$ 值表现为星毛委陵菜>百里香>长芒草,与实测数据呈现的规律一致。 $R^2$ 表示不同

草本根土复合体的入渗过程在不同模型下的拟合效果,  $R^2$  越大, 拟合效果越好<sup>[3]</sup>。Philip 模型的拟合精度为 0.886~0.943, Kostiakov 模型拟合精度为 0.891~0.919, Horton 模型的拟合精度为 0.586~0.646, 通用

经验模型拟合精度均在 0.930 以上, 综合以上认为, Kostiakov 模型对 3 种草本根土复合体入渗过程的拟合效果最好, 适合描述本研究区域草本复合体的入渗特征。

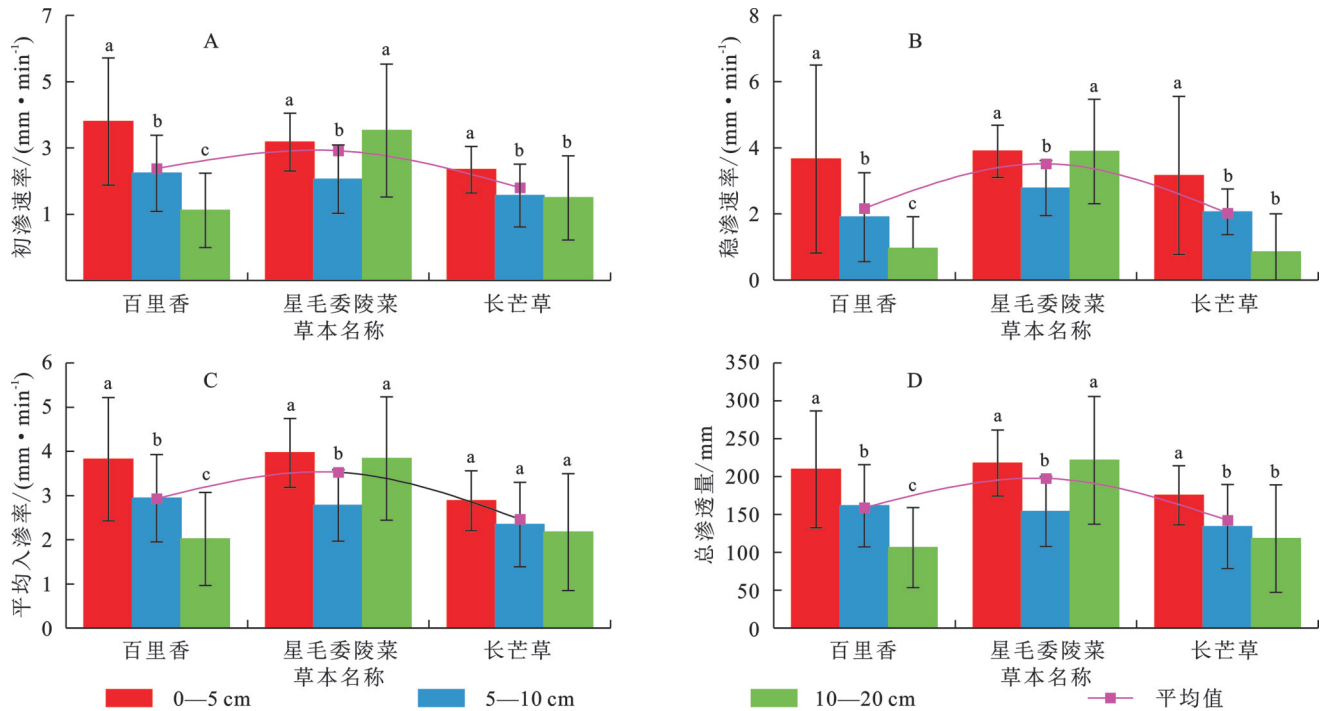


图 3 不同草本根土复合体渗透性

Fig. 3 Permeability of root-soil composites of different herbs

表 3 根土复合体入渗过程的拟合结果

Table 3 Fitting results of infiltration process for root-soil composites

草本类型	Philip 模型			通用经验模型			
	S	A	$R^2$	a	b	n	$R^2$
百里香	1.8339	2.8316	0.9190	2.6344	1.0534	0.4784	0.9686
星毛委陵菜	1.2834	3.5506	0.9434	3.4643	0.6943	0.5811	0.9702
长芒草	0.8619	2.5600	0.8862	2.4543	0.5041	0.4475	0.9306
草本类型	Kostiakov 模型			Horton 模型			
	$a_1$	$b_1$	$R^2$	$f_0$	$f_c$	k	$R^2$
百里香	3.5659	0.0668	0.9186	3.7097	0.4793	0.003	0.5991
星毛委陵菜	4.0466	0.0376	0.8946	4.1777	0.3485	0.002	0.5857
长芒草	2.9004	0.0361	0.8909	2.9855	0.2266	0.002	0.6465

## 2.4 根土复合体渗透性能影响因子分析

2.4.1 土壤理化性质与渗透性的关系 选取与土壤特性密切相关的 10 个因子与渗透指标进行相关性分析, 剔除影响不显著指标后结果显示(表 4、表 5): 0—5 cm 土层时, 百里香土壤有机质 (Soil Organic Matter, SOM) 含量与根土复合体渗透性各指标 ( $f_0$ ,  $f_c$ ,  $f_v$ ) 呈显著 ( $p < 0.05$ ) 或极显著 ( $p < 0.01$ ) 正相关, 非毛管孔隙度 (Non-Capillary Porosity, NCP) 与稳渗速率  $f_c$ 、平均入渗速率  $f_v$  呈显著正相关。10—20 cm 土层时, 土壤粉粒 (Silt)、砂粒 (Sand) 含量与渗透性各指标 ( $f_0$ ,  $f_c$ ,  $f_v$ ) 分别呈显著负相关、显著正相关, 说明当表

层土壤有机质含量越高, 非毛管孔隙度越大, 百里香根土复合体渗透性越强。到土壤下层时砂粒越多, 粉粒越少, 根土复合体渗透性越强。星毛委陵菜 0—5 cm 土层 SOM 与根土复合体渗透性各参数显著正相关, 土壤容重 (Bulk Density, BD) 与  $f_0$  显著负相关。5—10 cm 土层毛管孔隙度 (Capillary Porosity, CP) 与  $f_c$  显著正相关, 土壤含水量 (Soil Water Content, SWC) 与  $f_v$  显著负相关。10—20 cm 土层 CP, NCP 分别与复合体渗透性各指标极显著正相关、极显著负相关, 说明星毛委陵菜表层土壤有机质含量越高, 复合体渗透性越强, 容重越小, 初渗速率越大。中层

毛管孔隙度越大,稳渗速率越大,含水量越低,平均入渗速率越快,下层毛管孔隙度越大,非毛管孔隙度越小,复合体渗透性越强。长芒草5—10 cm土层土壤黏粒(Clay)含量与渗透性各参数显著正相关,意味着它的黏粒越多,根土复合体渗透性越强。由此可

见,百里香、星毛委陵菜根土复合体渗透性均受土壤孔隙状况、有机质含量显著影响,百里香、长芒草根土复合体渗透性均受土壤质地显著影响,草本种类、土层不同,影响根土复合体渗透性的土壤因素有差异。

表4 百里香、长芒草根土复合体渗透性与土壤的相关性

Table 4 Correlation between permeability of *Thymus mongolicus* and *Stipa bungeana* root-soil composites and soil properties

土层深度/cm	测定指标	百里香				长芒草
		有机质(SOM)	粉粒(Silt)	砂粒(Sand)	非毛管孔隙度(NCP)	黏粒(Clay)
0—5	初渗速率( $f_0$ )	0.59*	0.26	-0.23	0.38	0.74*
	稳渗速率( $f_c$ )	0.64**	0.39	-0.35	0.56*	0.76*
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.63*	0.36	-0.32	0.52*	0.76*
10—20	初渗速率( $f_0$ )	-0.11	-0.50*	0.49*	0.31	0.26
	稳渗速率( $f_c$ )	-0.05	-0.55*	0.54*	0.34	0.21
	平均入渗速率( $f_v$ )	-0.06	-0.53*	0.52*	0.34	0.22

注:\*表示相关系数在0.05水平上显著相关;\*\*表示相关系数在0.01水平上显著相关,下同。

表5 星毛委陵菜根土复合体渗透性与土壤的相关性

Table 5 Correlation between permeability of *Potentilla acaulis* root-soil composites and soil properties

土层深度/cm	测定指标	星毛委陵菜					
		有机质(SOM)	容重(BD)	毛管孔隙度(CP)	非毛管孔隙度(NCP)	含水量(SWC)	黏粒(Clay)
0—5	初渗速率( $f_0$ )	0.59*	-0.54*	-0.19	0.42	0.10	-0.13
	稳渗速率( $f_c$ )	0.57*	-0.43	-0.08	0.28	0.07	-0.03
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.62*	-0.42	-0.09	0.28	0.13	-0.05
5—10	稳渗速率( $f_c$ )	-0.42	0.04	0.60*	-0.41	-0.54*	-0.43
	平均入渗速率( $f_v$ )	-0.40	0.04	0.59*	-0.42	-0.53*	-0.43
10—20	初渗速率( $f_0$ )	0.34	0.43	0.72**	-0.78**	-0.12	0.11
	稳渗速率( $f_c$ )	0.33	0.41	0.72**	-0.78**	-0.12	0.10
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.32	0.42	0.72**	-0.78**	-0.11	0.10

2.4.2 根系与渗透性的关系 选取14个根系指标与渗透性参数进行相关性分析,剔除共线性强且影响不显著指标后的结果显示:0—5 cm土层时,百里草根土复合体中0~1.0 mm根的根长密度(Root Length Density, RLD)与渗透性各参数( $f_0, f_c, f_v$ )均呈显著负相关( $p < 0.05$ )。10—20 cm土层,根土复合体中0~0.5 mm根的RLD与渗透性各参数也显著负相关,5—10 cm土层,根土复合体的根生物量(Root Mass, RM)与 $f_0$ 显著负相关,比根长(Specific Root Length, SRL)与 $f_c, f_v$ 显著正相关(表6)。说明百里香的细根( $< 2.0$  mm)会阻碍水分下渗,单位体积内根系长度越大,复合体渗透性越小。中层根系生物量越大,复合体初始入渗速率越小,比根长越大,稳渗速率和平均入渗速率也越大。星毛委陵菜0—5 cm土层根土复合体中 $\geq 2.0$  mm根的RLD与 $f_0$ 显著负相关,5—10 cm土层根土复合体的RM与渗透性各参数显著正相关(表7),说明星毛委陵菜根土复合体特定根及根

生物量显著影响水分入渗速率,表层单位体积 $\geq 2.0$  mm根的长度越长,复合体初渗速率越小。长芒草0—5 cm土层根土复合体中直径 $\geq 2.0$  mm根的RLD与渗透性各参数极显著正相关( $p < 0.01$ )(表8),表明表层单位体积内 $\geq 2.0$  mm根的长度越长,其根土复合体的渗透性越强,这与星毛委陵菜表层根土复合体中 $\geq 2.0$  mm根的作用正好相反。10—20 cm土层复合体中0~0.5 mm根的RLD与 $f_0, f_c$ 显著负相关,与百里香、星毛委陵菜的细根作用相似。可见,3种草本根土复合体中的根系均会显著影响复合体的渗透性能。

综合相关性分析结果认为,3种草本根土复合体渗透性能与二元系统组成部分土壤、植被根系密切相关。对百里草根土复合体而言,土壤孔隙度、有机质含量和粉砂粒含量,根系生物量及0~2.0 mm细根显著影响其渗透性。对于星毛委陵菜,土壤孔隙度、有机质含量,根系生物量及 $\geq 2.0$  mm粗根和0.5~1.0 mm细根能显著影响复合体渗透性。对于长芒草,土

壤黏粒含量、粗根及 0~0.5 mm 细根显著影响复合体渗透性。不同草本、不同土层影响渗透性的土壤因素

有差异,不同草本,不同直径根系对渗透性的作用效果(正向或负向、影响程度)及土层也有差异。

表 6 百里香根土复合体渗透性与根系的相关性

Table 6 Correlation between permeability of *Thymus mongolicus* root-soil composites and root characteristics

土层深度/cm	测定指标	百里香				
		根长密度(RLD)			根生物量(RM)	比根长(SRL)
		0.0~0.5 mm	0.5~1.0 mm	1.0~2.0 mm		
0—5	初渗速率( $f_0$ )	-0.58*	-0.52**	-0.44	-0.43	-0.06
	稳渗速率( $f_c$ )	-0.60*	-0.59*	-0.51*	-0.41	-0.13
	平均入渗速率( $f_v$ )	-0.59*	-0.51*	-0.49	-0.42	-0.10
5—10	初渗速率( $f_0$ )	0.05	0.12	0.08	-0.46*	0.38
	稳渗速率( $f_c$ )	0.19	0.06	-0.01	-0.44	0.51*
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.13	0.08	0.03	-0.45	0.47*
10—20	初渗速率( $f_0$ )	-0.48*	-0.34	-0.18	-0.27	-0.34
	稳渗速率( $f_c$ )	-0.50*	-0.29	-0.13	-0.27	-0.33
	平均入渗速率( $f_v$ )	-0.50*	-0.13	-0.15	-0.28	-0.33

表 7 星毛委陵菜根土复合体渗透性与根系的相关性

Table 7 Correlation between permeability of *Potentilla acaulis* root-soil composites and root characteristics

土层深度/cm	测定指标	星毛委陵菜				
		根长密度(RLD)			根生物量(RM)	比根长(SRL)
		0.0~0.5 mm	0.5~1.0 mm	≥2.0 mm		
0—5	初渗速率( $f_0$ )	-0.21	-0.49	-0.50*	-0.33	-0.09
	初渗速率( $f_0$ )	0.28	0.26	-0.22	0.65**	-0.30
5—10	稳渗速率( $f_c$ )	0.15	0.11	-0.23	0.58*	-0.45
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.17	0.14	-0.22	0.60**	-0.43

表 8 长芒草根土复合体渗透性与根系的相关性

Table 8 Correlation between permeability of *Stipa bungeana* root-soil composites and root characteristics

土层深度/cm	测定指标	长芒草				
		根长密度(RLD)			根生物量(RM)	比根长(SRL)
		0.0~0.5 mm	0.5~1.0 mm	≥2.0 mm		
0—5	初渗速率( $f_0$ )	0.20	0.14	0.76**	0.16	-0.08
	稳渗速率( $f_c$ )	0.21	0.10	0.71**	0.09	-0.04
	平均入渗速率( $f_v$ )	0.20	0.07	0.76**	0.06	0.003
10—20	初渗速率( $f_0$ )	-0.46*	-0.36	-0.15	-0.37	-0.14
	稳渗速率( $f_c$ )	-0.43*	-0.34	-0.13	-0.33	-0.19

### 3 讨论

#### 3.1 3种草本根土复合体的土壤、根系特征

土壤有机质等理化性质及团聚体等土壤结构是水土保持功能评价的重要指标,对防治水土流失具有重要意义<sup>[3]</sup>。本研究中3种典型草本根土复合体土壤理化性质差异明显,百里香相比星毛委陵菜土壤有机质含量高 10.2%、土粒更细,但星毛委陵菜 >0.25 mm 水稳性大团聚体含量较百里香高 7.24%,团聚体发育更好,长芒草土壤容重最大,有机质、孔隙度及水稳性大团聚体含量显著最低,土壤养分及

结构较差,推断3种草本复合体中长芒草土壤不利于水分入渗<sup>[3,5,9]</sup>,而草本间的土壤差异可能与植被生物学特性、根系构型差异等有关<sup>[10]</sup>。

不同根系类型的草本植物具有不同的分布特征,会导致产生不同的力学效应和水文效应<sup>[21]</sup>。根长密度、表面积密度和体积密度等是衡量植物根系分布和形态特征的重要指标。根长密度反映根系的密集程度,根长密度高的区域根系网络更密集<sup>[14]</sup>。根表面积密度反映根与土体接触的紧密程度<sup>[21]</sup>。根体积密度一定程度上反映根系的粗细。比根长是根生长和吸收能力的重要指标,反映植被对特定生

境有限资源的利用策略。明确根系特征对于了解不同类型草本植物固土保水能力具有至关重要的作用。研究发现,宁南山区3种典型草本根土复合体的根系形态及分布特征有一定差异,3种草本根系均以直径0~0.5 mm根占绝对优势,根长密度、表面积密度、体积密度均为百里香>星毛委陵菜>长芒草,而比根长正好相反。各草本根系特征为,百里香根细数量多且分布密集,主要集中在0—10 cm土层,其根系接触和影响的土壤多,有助于土壤孔隙的改善<sup>[19]</sup>。星毛委陵菜根较粗,或对大孔隙及深层的土壤孔隙状况影响较大<sup>[19,21]</sup>。长芒草几乎无粗根,但比根长(SRL)最大,对资源包括水分的利用效率最高。

### 3.2 3种草本根土复合体渗透性能

3种草本根土复合体渗透性具有显著差异,星毛委陵菜根土复合体渗透性能最好,其次是百里香,长芒草最差。星毛委陵菜复合体渗透性能最好,可能是它的土壤团聚体发育最好,加之根系相对少,总孔隙丰富,有利于水分的下渗<sup>[14]</sup>。各草本根土复合体的渗透性都呈现出初渗速率>平均入渗速率>稳渗速率的特征,与李志等、白永会等<sup>[20,22]</sup>研究结果一致。3种草本根土复合体渗透性各指标随土层的变化有所不同,对于百里香和长芒草,各指标随土层加深逐渐降低,表层渗透性最好,与许多研究结果一致<sup>[1,6-7,20,22-23]</sup>,可能是表层土壤的有机质含量高、土壤疏松,利于水分下渗。对于星毛委陵菜,渗透性各指标随土层加深呈“V”型变化(与各级根的根长密度、表面积密度变化相反),5—10 cm土层最小,可能是影响渗透性的因素除土壤外,还与其中的根系有关<sup>[8,14]</sup>。4种常见的入渗模型中Kostiakov模型对3种草本根土复合体入渗过程的拟合效果最好( $R^2 \geq 0.890$ ),可用来描述本研究区域典型草本根土复合体的入渗特征,与桑凯新<sup>[16]</sup>、张志华等<sup>[24]</sup>研究结果一致。不同根系构型植物适用的模型也会不同,王鑫皓等<sup>[10]</sup>研究指出Horton公式适用于H型根系,Kostiakov公式适用于R型和W型根系,M型根系采用2种方式拟合均可。百里香、星毛委陵菜和长芒草根系构型分属于“W型”和“M型”,适用的模型与王鑫皓等的研究结果基本一致。

### 3.3 3种草本根土复合体渗透性影响因素

许多研究证实:土壤、根系都会影响渗透性,且土壤通常为直接作用,而根系并不直接影响土壤水力性质,而是通过引起土壤性质变化而产生间接影响<sup>[14]</sup>。

本研究在土壤与渗透性关系方面发现,百里香0—5 cm土层根土复合体渗透性各指标( $f_0, f_c, f_v$ )与土壤有机质含量显著或极显著正相关,与很多研

究<sup>[4,6,8,20,22-23]</sup>结果一致。稳渗速率、平均入渗速率与非毛管孔隙度显著正相关,与云慧雅等<sup>[3,8,25]</sup>研究结果一致,丁海晶等<sup>[8]</sup>认为当非毛管孔隙度在0~30%时,随着非毛管孔隙的增加,土壤稳渗速率显著提高,但超过阈值时其影响减弱。百里香10—20 cm土层根土复合体渗透性各指标与土壤粉粒、砂粒分别呈显著负相关、显著正相关关系,与许多研究<sup>[5,23]</sup>结果一致。表层土壤有机质含量越高,非毛管孔隙度越大,百里香复合体渗透性越强,可能是表层土壤含有较多的有机质,有利于胶结土粒形成团粒结构,增加土壤孔隙,进而增强复合体渗透性能。到土壤下层时砂粒越多,粉粒越少,复合体渗透性越强,原因是较多的砂粒和较少的粉粒可以提高土壤粒间孔隙(非毛管孔隙度),利于复合体的透水透气。星毛委陵菜0—5 cm土层根土复合体初渗速率与土壤容重显著负相关,与很多研究<sup>[5,20,23,25]</sup>结果一致。容重反映土壤的紧实程度和孔隙状况,容重越大土壤越紧实,孔隙度越小,土壤透气透水能力弱。有研究指出,容重与土壤渗透力呈现抛物线关系,土壤容重大于1.0 g/cm<sup>3</sup>时,土壤渗透力随着土壤容重的升高而下降。容重在0.35~1.0 g/cm<sup>3</sup>时,土壤渗透力受容重影响不大<sup>[8]</sup>。也有研究在比较不同土壤类型入渗性能时发现,容重越大土壤入渗性能最好<sup>[7]</sup>。5—10 cm土层根土复合体平均入渗速率与含水量显著负相关,与云慧雅等<sup>[3]</sup>研究结果一致,但与杨浩等<sup>[25]</sup>研究结果相反,可能是土壤含水量较大时,大量(非毛管)孔隙被水充满形成相对封闭的环境,阻碍了水分的快速渗透。10—20 cm土层根土复合体渗透性各指标与毛管孔隙度正相关,与李平等<sup>[4-5]</sup>研究结果一致,毛管孔隙具有毛细管作用,可以持水从而使水分长久留在土壤中,因此在对饱和土体施加水头压力时,毛管孔隙度越大,复合体渗透性越强。根土复合体渗透性各指标与非毛管孔隙度呈极显著负相关,通常情况下非毛管孔隙越多土壤的渗透性越好,如百里香表层二者的正相关关系及灰钙土由低非毛管孔隙度造成的低入渗速率<sup>[7]</sup>。非毛管孔隙能帮助降水下渗,影响土壤透气与渗水,本研究中二者呈负相关关系,可能是非毛管孔隙中还存在根系、动物和真菌等,在土体饱和情况下它们阻碍了水分的下渗<sup>[17]</sup>。长芒草5—10 cm土层根土复合体渗透性各参数与土壤黏粒含量显著正相关,与张轩铭等<sup>[5,14,23]</sup>研究结果一致,一般情况下,土壤细颗粒含量越高,渗透性就越低<sup>[22,26]</sup>,本结果的出现可能是研究区域土壤本身黏粒含量少,增加黏粒有助于土壤形成团聚结构,提高土壤孔隙度,进而增大根土复合体渗透性<sup>[3-4]</sup>。

在根系与渗透性关系方面发现,百里香表层(0—5 cm)及下层(10—20 cm)根土复合体中 $<2$  mm根参数与渗透性各指标显著负相关,即单位体积内根的长度越长,根土复合体渗透性越小,细根会阻碍水分的下渗,与闫东锋等<sup>[1,16,23]</sup>研究结果相反。一些研究<sup>[13,17]</sup>指出,根长密度增加不一定增加入渗能力,甚至降低土壤入渗能力,因为根系也可能会堵塞、挤压孔隙从而阻碍水的下渗。Vergani等<sup>[27]</sup>研究认为根系发育的增加对应着土壤入渗能力的增加,但可能会存在一个阈值,根系发育一旦超出阈值,土壤入渗能力反而会随着根系的增加而降低。本研究结果可能一方面百里香细根较多,随根系长度增加形成致密的根系网络,根网挤压土壤造成孔隙度减小,渗透性降低<sup>[14,28]</sup>,另一方面是土体在饱和情况下细根堵塞了孔隙。此外还发现,随根系增粗,百里香根影响渗透性的能力在减弱。闫东锋等<sup>[1]</sup>研究认为,根系对土壤渗透能力的增强作用主要由0.5~5 mm径级的根系表现出来,相对径级过大或过小的根系对土壤渗透能力的增强作用都会减弱,与本研究结果相似。百里香5—10 cm土层复合体中根生物量与初渗速率显著负相关,与许多研究<sup>[16,19]</sup>结果相反,与根长密度相似,它丰富的细根在饱和土体入渗初期堵塞孔隙导致复合体渗透性降低。星毛委陵菜根土复合体特定根及根生物量显著影响水分入渗速率,其根系特征指标与渗透性参数显著负相关,当表层(0—5 cm)单位体积 $\geq 2.0$  mm根长度越长,根土复合体初渗速率越小,与张金武等<sup>[29]</sup>研究结果一致,可能是星毛委陵菜根系为根蘖型<sup>[21]</sup>,表层为横走根分布的主要区域,这些粗根会阻碍水分下渗<sup>[10,12]</sup>。细根降低渗透性与百里香表层细根作用相似,可能是在饱和土体中细根堵塞了孔隙。中层根生物量与渗透性各指标呈显著正相关,即根系生物量越大,水分入渗速度越快,与蒋忙舟<sup>[30]</sup>、祁子寒等等<sup>[19]</sup>研究结果一致,但与百里香中层根系生物量与渗透性的关系正好相反。有研究<sup>[31]</sup>指出,根系系统功能的发挥在不同时间、不同环境条件下会有很大的差异。长芒草0—5 cm土层根土复合体中 $\geq 2.0$  mm根参数与渗透性各指标极显著正相关,这与星毛委陵菜表层中 $\geq 2.0$  mm根的作用正好相反,可能是长芒草根系为根茎型,表层分布的粗根为竖直向下的侧根而非横卧根,由其形成的大孔隙利于水分入渗<sup>[13,21,28]</sup>。

虽然本研究明确了研究区3种典型草根本土复合体的特征、入渗性能及相关影响因素,但究竟哪些因素占主导 每个因素的贡献率是多少还不清楚,下一步应对此展开分析,确定关键性指标,以期更好地为宁

夏南部山区生态质量提升提供参考。另外,除了明确复合体构成元素特征外,还可以利用CT扫描技术测定其内部结构,从微观视角直观分析渗透性差异原因,因此,未来渗透性研究还需要多手段、多尺度观测。

## 4 结论

(1) 不同草根本土复合体土壤理化特征存在明显差异,百里香相比星毛委陵菜土壤有机质含量更高、土粒更细,但星毛委陵菜土壤团聚体发育更好,长芒草土壤容重最大,有机质含量等最低,土壤养分及结构较差。

(2) 不同草本的根系形态及分布有差异。各草本均以直径0~0.5 mm根占绝对优势,百里香根细数量多且分布密集,与土壤接触程度最高,根系主要集中在0—10 cm土层,根长密度等参数随土层增加逐渐减少,变幅最大。星毛委陵菜根粗数量相对较少,长芒草几乎无粗根但比根长最大,对资源利用效率最高,星毛委陵菜、长芒草根长密度等参数随土层增加变幅较小。

(3) 3种草根本土复合体渗透性表现为星毛委陵菜 $>$ 百里香 $>$ 长芒草。随土层加深,百里香、长芒草渗透性各指标逐渐减小,星毛委陵菜呈“V”型变化。Kostiakov模型能较好地拟合3种草根本土复合体的入渗过程,拟合精度在0.890以上。

(4) 3种草根本土复合体渗透性与土壤和根系密切相关。对百里香而言,土壤孔隙度、有机质含量、粉砂粒含量、根系生物量及0~2.0 mm细根显著影响复合体渗透性。对于星毛委陵菜,土壤孔隙度、有机质含量,根系生物量、 $\geq 2.0$  mm粗根和0.5~1.0 mm细根显著影响复合体渗透性。对于长芒草,土壤黏粒含量、 $\geq 2.0$  mm粗根及0~0.5 mm细根显著影响复合体渗透性。不同草本、不同土层影响渗透性的土壤指标有差异,不同草本,不同直径根系对渗透性的作用效果(正向或负向、影响程度)也有差异。

### 参考文献(References):

- [1] 闫东锋,王德彩,杨喜田.丹江口库区不同植被类型地表根系对土壤渗透性的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(3):35-44.  
Yan D F, Wang D C, Yang X T. Effects of surface root system on soil infiltration at different vegetation types in Danjiangkou Reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(3): 35-44.
- [2] Leung A K, Garg A, Coe J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(15): 3342-3354.

- [3] 云慧雅,毕华兴,王珊珊,等.不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):183-189.  
Yun H Y, Bi H X, Wang S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):183-189.
- [4] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.  
Li P, Wang D M, Ding C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(5):1610-1620.
- [5] 张轩铭,戴翠婷,李朝霞,等.三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(4):92-98.  
Zhang X M, Dai C T, Li Z X, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of purple sandstone with different degrees of development in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(4):92-98.
- [6] 苏世平,刘小娥,李毅.兰州市南北两山不同灌丛土壤渗透特性[J].水土保持研究,2022,29(5):149-154,163.  
Su S P, Liu X E, Li Y. Soil infiltration characteristics under four shrub types in southern and northern mountains of Lanzhou City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):149-154,163.
- [7] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.  
Chen J, Chen L, Song N P, et al. Soil infiltration characteristics of different soils types in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(4):18-23.
- [8] 丁海晶,姜姜,张金池.土壤渗透性的区域变化规律及因子分析[J].水土保持学报,2019,33(1):51-56.  
Ding H J, Jiang J, Zhang J C. Regional variation and factor analysis of soil permeability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(1):51-56.
- [9] 陈永华,叶权平,张文辉,等.不同间伐强度下桥山麻栎林土壤渗透特性[J].水土保持研究,2019,26(1):113-117.  
Chen Y H, Ye Q P, Zhang W H, et al. Soil permeability characteristics of *Quercus acutissima* forest under different thinning intensities in Qiaoshan Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):113-117.
- [10] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-82.  
Wang X H, Wang Y Q, Ma C, et al. Effect of root architecture on soil permeability[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(4):73-82.
- [11] Cui Z, Wu G L, Huang Z, et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578:124023.
- [12] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. Bioscience, 2011,61(11):869-879.
- [13] Hinz C S C. Insights into the processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties [R]. Brisbane, Australia: World Congress of Soil Science, Soil Solutions for A Changing World, 2010.
- [14] 王佩佩.黄土高原典型草本植物根系对土壤入渗的影响及空间差异[D].西安:陕西师范大学,2021.  
Wang P P. Effects of typical herbaceous plant roots on soil infiltration and spatial differences in the Loess Plateau[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.
- [15] 娄义宝,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 distribution 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.
- [16] 桑凯新.黄河下游河岸带典型植物根系结构特征及对土壤渗透性的影响[D].郑州:河南农业大学,2020.  
Sang K X. Characteristics of typical plant root system structure and its effect on soil permeability in the lower Reaches of the Yellow River[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.
- [17] Liu Y, Guo L, Huang Z, et al. Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils [J]. Agricultural Water Management, 2020,235:106153.
- [18] Huang Z, Tian F P, Wu G L, et al. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than gramineous grasslands in arid regions [J]. Land Degradation & Development, 2017,28(1):309-316.
- [19] 祁子寒,王云琦,王玉杰,等.根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):94-100,107.  
Qi Z H, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Effect of root system on macropores distribution and saturated permeability of surface soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):94-100,107.
- [20] 李志,袁颖丹,胡耀文,等.海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响[J].生态学报,2018,38(2):635-645.  
Li Z, Yuan Y D, Hu Y W, et al. Effects of elevation and tourism disturbance on meadow soil infiltration on Wugong Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(2):635-645.
- [21] 张英杰,刘向峰,张强,等.不同草本植物根系对土壤渗

- 透性的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):145-152.
- Zhang Y J, Liu X F, Zhang Q, et al. Influence of different herbaceous roots on soil permeability [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 145-152.
- [22] 白永会,查轩,吴伟成,等.不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响[J].水土保持通报,2023,43(2):9-15.
- Bai Y H, Zha X, Wu W C, et al. Effects of different vegetation restoration types on permeability and water holding capacity of degraded granite red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 9-15.
- [23] 朱梦雪,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带不同演替森林群落林地土壤渗透性特征[J].东北林业大学学报,2023,51(7):128-134,161.
- Zhu M X, Wang K Q, Zhao Y Y, et al. Soil permeability characteristics of woodland in different succession forest communities in central subtropics [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(7): 128-134, 161.
- [24] 张志华,桑玉强,孔玉华,等.太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究[J].灌溉排水学报,2018,37(9):43-47,78.
- Zhang Z H, Sang Y Q, Kong Y H, et al. The variation of water infiltration rate over various slopes in Taihang Mountain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 43-47, 78.
- [25] 杨浩,王文龙,娄义宝,等.黄土塬沟壑区典型植被沟头土壤渗透性和抗剪强度特征[J].应用生态学报,2023,34(7):1862-1870.
- Yang H, Wang W L, Lou Y B, et al. Infiltration and shear strength characteristics of gully heads soil of typical vegetation on the gullied Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7): 1862-1870.
- [26] 井海梦,赵允格,刘姝延,等.黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(7):1532-1539.
- Jing H M, Zhao Y G, Liu S Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil permeability of croplands in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1532-1539.
- [27] Vergani C, Graf F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective [J]. Ecohydrology, 2016, 9(5): 830-842.
- [28] 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.
- [29] 张金武,王立.白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗和持水特征[J].西北林学院学报,2021,36(4):41-47.
- Zhang J W, Wang L. Characteristics of forest soil infiltration and water holding capacity in different succession stages in the upper reaches of the bailong river [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 41-47.
- [30] 蒋忙舟.黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):99-104,111.
- Jiang M Z. Effects of vegetation characteristics on soil infiltration process in typical abandoned grasslands on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 99-104, 111.
- [31] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and Gully Regions of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1456-1466.

(上接第81页)

- [26] Zhao Q, Yang J Z, Xiang H W, et al. Characteristics and discrepant responses of rainfall erosivity to El Niño-Southern Oscillation under varied rainfall intensity in a Karst Hilly region, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56: 102075.
- [27] He X, Miao Z M, Wang Y M, et al. Response of soil erosion to climate change and vegetation restoration in the Ganjiang River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111429.
- [28] Wu Y P, Yin X W, Zhou G Y, et al. Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin [J]. Nature Communications, 2024, 15: 823.