

不同草本植物根系对土壤渗透性的影响

张英杰, 刘向峰, 张 强, 王来贵, 郝国亮

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: [目的]揭示当地排土场不同草本植物根系对土壤渗透性的影响, 阐明预测草本植物根系提升土壤渗透性的最优指标, 并得出草本植物根系提升土壤渗透性的最佳径级, 为排土场生态修复植物选择提供重要依据。[方法]以海州露天矿排土场为研究地点, 以轴根型紫花地丁、根蘖型苦荬菜和根茎型小麦冬为研究对象, 采用图片像素换算法量化 3 种根系在不同土层深度范围内的根系分布特征; 并结合渗透试验获取 3 种草本植物原状根土复合体的渗透参数, 进而探究了根土复合体根系分布参数与渗透参数的关系。[结果]3 种草本植物均能提升土壤的渗透性能, 轴根型、根茎型和根蘖型根土复合体的初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率、渗透总量相较于素土分别提升 82.23%~254.99%, 85.59%~307.63%, 72.02%~325.91%, 62.93%~246.98%。3 种草本植物根系的根长密度和根表面积密度与根土复合体的渗透参数均呈现线性相关, 根表面积密度的相关性强于根长密度。3 种根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于 $0.5\text{ mm} < D \leq 1.5\text{ mm}$ 径级, 它们均存在提升土壤渗透性的最佳径级。[结论]草本植物根系能够提升土壤渗透性, 根表面积密度是最佳预测指标, 且不同根系均存在最佳径级。

关键词: 根系类型; 根长密度; 根表面积密度; 土壤渗透性; 根土复合体

中图分类号: U416.14

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0145-08

Influence of Different Herbaceous Roots on Soil Permeability

Zhang Yingjie, Liu Xiangfeng, Zhang Qiang, Wang Laigui, Hao Guoliang

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the effects of different herb roots on soil permeability in local dump sites, to clarify the optimal index for predicting the improvement of soil permeability by herbaceous plant roots, to obtain the optimal diameter grade of herbaceous plant roots to improve soil permeability, so as to provide an important basis for the selection of ecological restoration plants in the dump. [Methods] Haizhou open pit dump was taken as the study site. The axial root type of *Viola philippica*, the tiller root type of *Ixeris polycephala* and the rhizome root type of *Triglochin palustris* were the objects of the study. The root distribution characteristics of three kinds of roots in different soil depths were quantified by image pixel conversion method. Combined with the penetration test, the permeability parameters of the undisturbed root-soil complex of three herbaceous plants were obtained. The relationship between root distribution parameters and permeability parameters of the root-soil complex was explored. [Results] All three herbs can improve soil permeability. Compared with plain soil, the initial infiltration rate, steady infiltration rate, average infiltration rate and total infiltration rate of axial, rhizoid and tillering root soil composites increase by 82.23%~254.99%, 85.59%~307.63%, 72.02%~325.91% and 62.93%~246.98%, respectively. The root length density and root surface area density of the three herbaceous roots are linearly correlated with the permeability parameters of the root soil complex, and the correlation of root surface area density is stronger than that of root length density. The enhancement effect of three kinds of

收稿日期: 2023-09-04

修回日期: 2023-09-18

资助项目: 国家重点研发计划项目“抚顺西露天矿区环境地质灾害与时空演化规律”(2017YFC1503101)

第一作者: 张英杰(2001—), 男, 河北泊头人, 硕士研究生, 研究方向为软岩崩解、边坡失稳防治。E-mail: 16630837129@163.com

通信作者: 刘向峰(1974—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 主要从事矿山环境与灾害力学研究。E-mail: liuxiangfeng.lntu@outlook.com

<http://stbcj.paperonice.org>

roots on soil permeability is mainly attributed to the diameter class of $0.5\text{ mm} < D \leq 1.5\text{ mm}$, and they all have the best diameter class to enhance soil permeability. [Conclusion] Herbaceous roots can improve soil permeability, and root surface area density is the best predictor, and different roots have the best diameter class.

Keywords: root type; root length density; root surface area density; soil permeability; root-soil complex

排土场边坡作为力学特性较差的边坡,在降雨时容易产生水土流失,甚至引发浅层滑坡等自然灾害。传统的治理措施不仅耗费巨大资金,还严重影响生态环境。近些年植物出现在技术人员的视野中,植物根系由于其自身独特的分布方式和力学特性对边坡浅层加固具有不可忽略的作用^[1]。因此,生态护坡逐步应用在实际工程中。当前研究表明^[2-3],草本植物边坡浅层加固作用显著,加固能力优于灌木植物和乔木植物。

草本植物根系作为吸收营养物质和水分的重要介质,充当着植物与土壤之间的桥梁,在土壤中的分布也十分复杂。我国学者陈世瑛^[4]通过研究内蒙古草地的植物根系将其详细划分为轴根型、根蘖型、丛生型和根茎型。严小龙^[5]通过大量研究草本植物总结出了轴根型、根茎型、地下茎型和攀缘根型 4 种类型。两位学者均以根系在二维构型的分布进行区分,不同根系类型的草本植物具有不同的分布特征,进而导致不同的力学效应和水文效应。植物的水文效应主要表现在根系降雨入渗、茎叶雨水截留和茎叶蒸腾作用等方面^[6],针对植物根系对土壤渗透性的影响国内外学者做了大量研究,夏旖琪^[7]通过对不同类型植物根系开展渗透试验,发现土壤的渗透参数与根系的根长密度和根表面积密度显著相关,土壤入渗特征值随着根系结构参数增大而增大;杨闻达等^[8]通过现场原位渗透试验,发现草本植物根系的存在能显著增加水分下渗速率,提高土壤的渗透性。刘小燕^[9]通过对水平、竖直和混合 3 种布根方式的根土复合体进行室内变水头渗透试验,发现根系的存在能提高土壤的渗透性,竖直布根方式提升量最大。蒋希雁等^[10]通过研究根土复合体在不同压实度下的持水能力,发现草本植物根系的存在增强了土壤持水能力,但在压实度为 80%~95%时会降低土壤的渗透性;

Ng 等^[11]利用自主推导的根系渗透模型,发现草本植物根系可以降低土壤孔隙直径,进而降低了土壤的渗透性。Leung 等^[12]发现植物根系的存在能显著性减少土壤的雨水渗入量。陈晋龙等^[13]通过现场监测试验,发现不同根系的水分运移不同,香根草根系的存在对土壤的渗透性起到了增加的作用,而狗牙根则起到了抑制作用。

由此可见,植物根系一方面通过穿插作用改善土壤的孔隙度,增加土壤渗透性。另一方面,它又会通过释放化学物质实现土壤固结进而减少表层雨水入渗。因此,根系的存在对土体渗透特性的影响程度有待进一步研究。故本文以当地露天矿排土场为研究区域,轴根型、根茎型和根蘖型 3 种草本植物为研究对象,主要解决以下问题:(1) 3 种根系类型草本植物对土壤渗透参数的影响;(2) 不同土层深度根系分布特征与土壤渗透性之间关系;(3) 不同径级根系分布特征与土壤渗透性之间关系。本研究可为当地排土场生态护坡草本植物的选择提供依据。

1 试验与方法

1.1 研究区域

本次研究地点位于辽宁省阜新市太平区海州露天矿南部排土场,地理坐标为 $121^{\circ}40'E, 41^{\circ}57'N$,占地面积 10 km^2 。研究区域为排土场附近的荒草地($121^{\circ}40'12"E, 41^{\circ}57'36"N$),该区域属于温带大陆性季风气候,年平均气温为 7.3°C 。年均降雨量为 511.4 mm ,降水主要集在 7 月、8 月份。综合考虑当地植物的生长特征和覆盖度(表 1),最终选择了轴根型的紫花地丁(*Viola philippica*)、根蘖型的苦苣菜(*Ixeris polycephala*)、根茎型的水麦冬(*Triglochin palustris*)作为主要研究对象,其生长形态见图 1。

表 1 草本植物筛选依据

Table 1 Screening basis of the herbaceous plants

| 根系类型及植物名称 | 根系分布特征 | 研究区域覆盖度/% |
|-----------|--------------------------------|-----------|
| 根茎型水麦冬 | 无明显主根,由众多的侧根竖直向下生长组成,容易形成密集的根网 | 26.4 |
| 轴根型紫花地丁 | 有明显主根及主根表面由上到下产生的各级细小的侧根组成 | 35.2 |
| 根蘖型苦苣菜 | 无主根优势,由短小的主根和根颈或根颈附近发出的横卧枝条组成 | 15.6 |

1.2 根土复合体采集

3 种草本植物根土复合体均于 2022 年 9 月现场采集。采集前,确保取样条件相同。采集时,优先选

择健壮成熟的植株,随后去除地上部分,使用根钻($\varphi 80 \times 150\text{ mm}$)进行整株挖掘。根系挖掘时以草本植物主茎为中心点,将根钻的圆心与中心点重合,

沿着主茎进行竖直向下取样,3种草本植物及素土各3个重复,共12个根土复合体试件。按照剪切盒环刀($\phi 61.8 \times 40$ mm)尺寸进行自上而下依次分段切割,去除无根系分布的12~15 cm尾部。切割成0~4,4~8,8~12三段,保证每段长度为4 cm,随后用滤纸、上下端盖及保鲜膜密封试件,具体操作流程如图2所示。

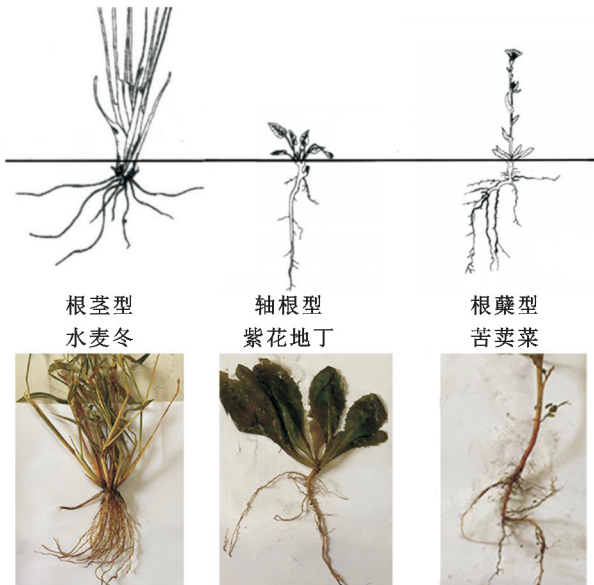


图1 3种草本植物根系生长形态

Fig. 1 Morphological map of three kinds of herb roots



图2 根土复合体采集流程

Fig. 2 Collection process of root soil complex

1.3 渗透试验

渗透试验采用同心环法^[14-16],并于采集根土复合体后两个小时内进行,防止其他因素对试验产生干扰,具体试验步骤如下:

(1) 组装环刀。返回实验室后,第一时间将环刀取出,去掉上下端盖和滤纸。在装有根土复合体的环刀上部即环刀的非刃面连接另一个注水环刀。为了避免两个环刀接口漏水,先利用医用胶布紧固,后采用保鲜膜密封,同时将下端环刀也密封然后扎孔处理。将扎好孔洞的环刀放置下端具有小量筒的悬空架上。

(2) 注水入渗。用流量瓶向上端带有刻度的注水环刀加水,维持水面高度在4 cm,使水正常入渗。

(3) 计时读数。用计时器按照特定的时间间隔记录注水量。由于初始入渗较快,故从下端环刀内土壤向外漏出第一滴水即开始计时,试验开始的前3次

记录,先每隔5 min进行1次读数,之后逐渐延长每3次测读时间,每隔10,15,20 min进行测读。其中3次所测流量的差值小于5%时可以视为到达稳定状态,即可停止试验。若试验若超过90 min根土复合体仍未达到稳渗状态,将此试验视为无效试验。

1.4 参数计算

利用初始入渗率、平均渗透速率、稳渗率(渗透量趋于稳定时单位时间的渗透速度)和渗透总量(前60 min的渗透总量)来描述根土复合体的渗透特性。

$$f_0 = \frac{Q_0}{t_0} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{Q_c}{t_c} \quad (2)$$

式中: f_0 为初始入渗率; Q_0 为最初入渗时段内渗透量; t_0 为入渗时间(最初入渗时间取前5 min); f_c 为平均渗透速率; Q_c 为达稳渗时的渗透总量; t_c 为达稳渗时的时间。

渗透试验结束后,在不破坏根系的前提下,用清水冲洗出各个根土复合体试件内的根系并擦拭干净。随后利用6400万像素照相机进行拍照,拍照距地面12 cm。根据图片像素转换法^[17],采集不同土层深度剖面上根系的直径及数量,计算3种根系的分布特征。根系分布参数采用根长密度、根表面积密度和根面积比,计算公式为:

$$RAR = \frac{\sum_{i=1}^N \pi d_i^2}{4A} \quad (3)$$

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (4)$$

$$RASD = \frac{RSA}{V} \quad (5)$$

式中: RAR 为根面积比; N 为根的数量; d_i 为第*i*个根的直径; A 为土壤剖面的面积; RL 为根系长度; RLD 为根长密度; RSA 为根系表面积; $RASD$ 为根表面积密度; V 为环刀体积。

1.5 统计分析

为了表征不同根土复合体对渗透性影响的显著差异规律,分别对不同根土复合体在土层深度为0—4, 4—8, 8—12 cm时的初始入渗率、平均渗透速率、稳渗率和前60 min渗透总量进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 渗透试验结果

根土复合体的渗透性是评价根土复合体提升土壤抗侵蚀能力的重要因素^[18]。素土、紫花地丁、苦苣菜和水麦冬在不同土层深度的初始入渗率、平均渗透速率、稳渗率和前60 min渗透总量及方差分析结果

如图3所示,图中相同土层深度下,标注小写字母不同的根土复合体之间存在显著性差异。

由图3可知,除在8—12 cm土层深度时,苦苣菜和紫花地丁之间无显著差异,在0—12 cm土层深度其他各根土复合体之间均存在显著性差异。其中在0—4 cm土层深度,初始入渗率表现为水麦冬>紫花地丁>苦苣菜>素土,而其他渗透参数表现为水麦冬>紫花地丁>素土>苦苣菜,在4—8 cm土层深度,各渗透参数均表现为水麦冬>苦苣菜>紫花地丁>素土;在8—12 cm土层深度,各渗透参数均表现为水麦冬>苦

苣菜=紫花地丁>素土。总体来看,在0—12 cm土层深度,素土的初始入渗率、平均渗透速率、稳渗率、渗透总量的平均值最小,其平均大小为1.37 ml/min, 0.79 ml/min, 0.64 ml/min, 77.33 ml。相对于素土而言,3种根土复合体均不同程度地提升了土壤的渗透性能。轴根型、根茎型和根蘖型根土复合体的初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率、渗透总量相较于素土提升范围分别处于82.23%~254.99%, 85.59%~307.63%, 72.02%~325.91%, 62.93%~246.98%, 提升效果表现为根茎型根系>轴根型根系>根蘖型根系。

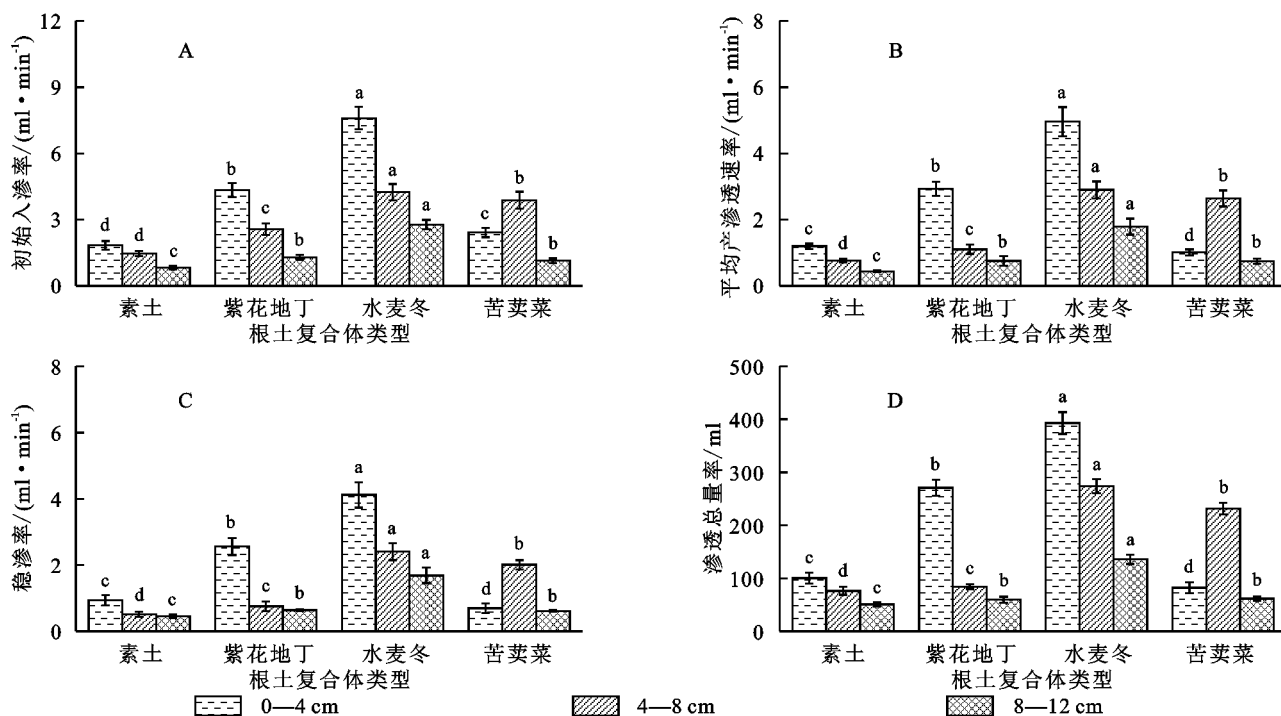


图3 不同类型根土复合体入渗特性

Fig. 3 Infiltration characteristics of different types of root-soil complex

从不同土层深度来看,素土及3种草本植物渗透参数在不同土层深度均表现出初始入渗率>平均入渗速率>稳渗率的规律。随着土层深度的增加,根茎型水麦冬和轴根型紫花地丁的根土复合体各项入渗特征参数逐渐减小,而根蘖型苦苣菜的根土复合体各项入渗特征参数呈现出先增大后减小的趋势,根蘖型苦苣菜在4—8 cm土层深度的初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率、渗透总量是0—4 cm土层深度的1.57, 2.59, 2.93, 2.76倍,是8—12 cm土层深度的3.44, 3.49, 3.31, 3.74倍。根茎型水麦冬和轴根型紫花地丁在0—4 cm土层深度的初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率、渗透总量是4—8 cm土层深度的1.67, 2.7, 3.29, 3.16倍,是8—12 cm土层深度的3.4, 3.96, 4.02, 4.39倍。这是因为根系纵横交错的空间结构增大了土壤的孔隙和土壤内部的渗流通道,从而促使水分更快地渗入土壤中。但随着土壤表面注水量的增加,初始饱

和度较低的根土复合体吸水量逐渐饱和,渗流通道的横断面积也随着缩小,进而使入渗速率也表现出逐渐下降的趋势。

由此可见,草本植物根系的存在有利于促进地表径流的入渗,尤其是对于突发的降雨作用更加明显。草本植物根土复合体渗透参数在不同土层深度的变化趋势与赵宽耀^[19]和李建兴^[20]等通过渗透试验得出的结论一致。

2.2 根土复合体的根系分布特征

3种草本植物在不同土层深度的分布特征如图4所示。由图可知,3种草本植物根土复合体的总根长密度为10.31~47.75 mm/cm³,总根表面积密度为23.01~85.99 mm²/cm³,总根面积比为17.36~42.68。其中,根蘖型苦苣菜在4—8 cm土层深度存在最大RLD和RASD分别为5.64, 13.05 mm²/cm³,而轴根型紫花地丁和根茎型水麦冬在0—4 cm土层深度存

在最大 RLD 和 RASD 分别为 12.91, 32.45, 26.05, 51.29 mm^2/cm^3 。根茎型水麦冬和轴根型紫花地丁的 RLD 和 RASD 均随土层深度的增加而减小, 而根蘖型苦苣菜的 RLD 和 RASD 随土层深度的增加呈

现出先增加后减少的趋势。随土层深度增加, 3 种草本植物根表面积比均逐渐减少。3 种草本植物根系均在 0—4 cm 深度范围存在最大根面积比, 大小顺序分别为紫花地丁(29.2)>水麦冬(18.5)>苦苣菜(8.64)。

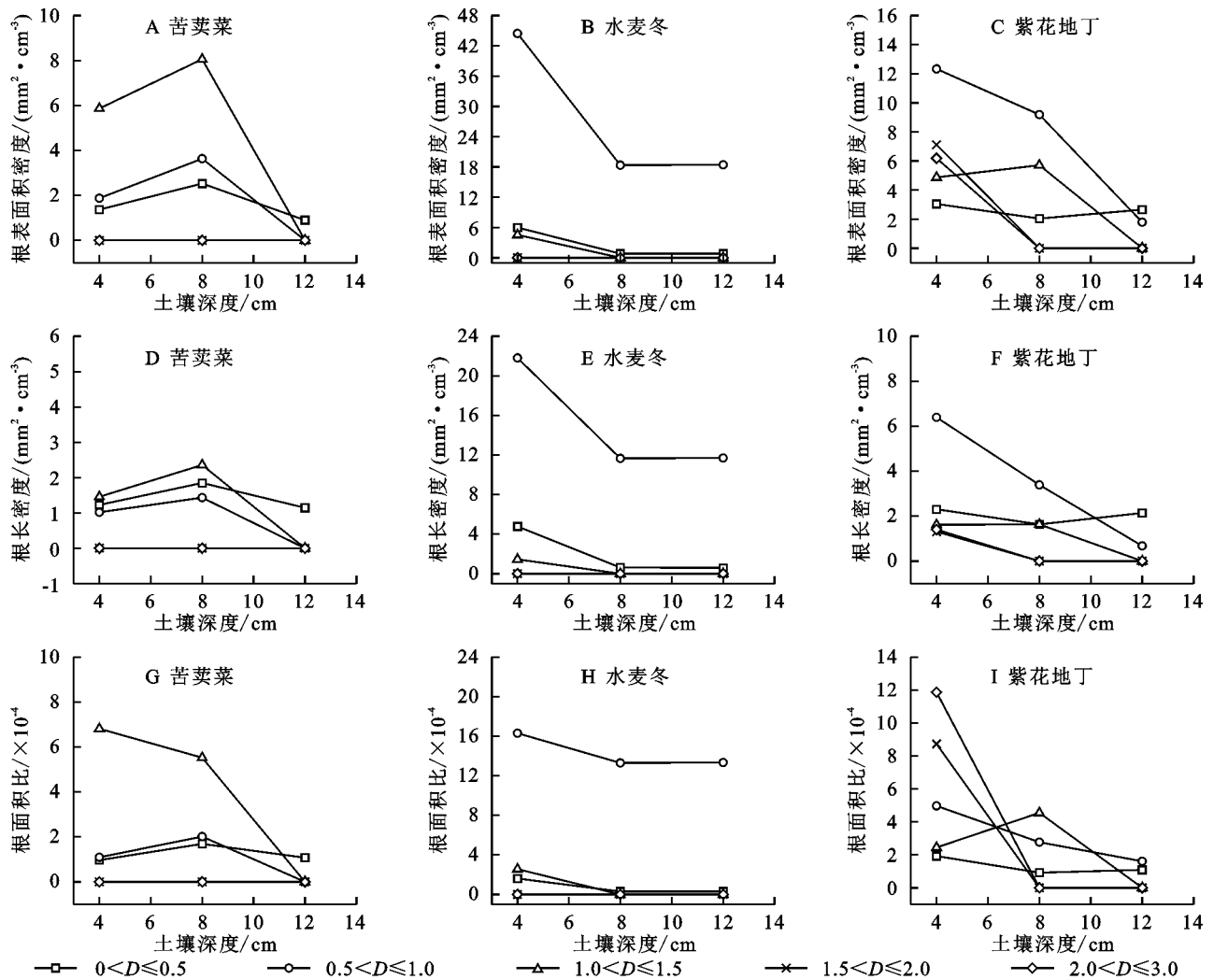


图4 不同类型根土复合体入渗特性

Fig. 4 Infiltration characteristics of different types of root-soil complex

在相同土层深度, 不同径级的根系参数存在显著差异。试验过程中发现, 只有紫花地丁存在 $1.5 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 径级根系。水麦冬和苦苣菜根系径级均处于 $0 \sim 1.5 \text{ mm}$, 其中水麦冬在 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级根系的 RLD, RASD 和 RAR 显著大于其他径级, 其他径级间差异不显著。苦苣菜在 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 土层深度各径级根系 RLD 不存在差异, RASD 和 RAR 均表现为 $1 \text{ mm} < D \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级最优, 显著性大于其他径级。紫花地丁根系径级处于 $0 \sim 3 \text{ mm}$ 。在 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 土层深度, 各径级的 RLD 和 RASD 均表现为 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级显著性大于其他径级。而根面积比在 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 和 $4 \sim 8 \text{ cm}$ 土层深度分别为 $1.5 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 和 $1 \text{ mm} < D \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级最优。

根系的分布特征可以直观展示出 3 种根系类型

在土壤内的分布情况, 对于了解不同根系类型的草本植物固土持水能力起到了至关重要的作用^[11]。在草本植物根系的研究中, 常把直径 $\leq 2 \text{ mm}$ 的根称为细根, 直径 $> 2 \text{ mm}$ 的根称为粗根^[21]。从不同径级根系的分布特征来看, 3 种草本植物均以径级 $D \leq 2 \text{ mm}$ 根系的 RLD, RASD 和 RAR 占比最大, 根蘖型根系和根茎型根系占比更是达到了 100%。由此可知, 3 种草本植物细根占比较大, 大量的细根通过网络固结提升土壤的抗侵蚀能力起到了良好的浅层加固效果, 这也是 3 种草本植物在排土场相对覆盖度较高的原因。3 种草本植物的最大根系表面积密度分布于不同径级, 这说明了不同径级根对根表面积密度的贡献率不同。轴根型根系和根茎型根系以 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级的 RASD 最大, 根茎型水麦冬这一径级根

表面积密度的贡献度最大达到了 85.83%,说明根茎型草本植物侧根发达,加固效果相对较好,这与实际分布情况相符。3 种草本植物只有轴根型根系在径级 $D > 2$ mm 时存在根系分布,这说明了轴根型草本植物能更好地适应客土的环境,根系生长能力较强。3 种草本植物根系的分布特征与高英旭^[22]和葛芳红等^[23]所研究的不同土层深度内根系分布特征结果一致。

2.3 根系分布特征与根土复合体渗透参数之间关系

3 种草本植物在 0—12 cm 的土层深度内根系分布参数与渗透参数的回归方程见表 2。由表可知,根系分布参数 RASD,RLD 和 RAR 与根土复合体的渗透参数均呈现出线性相关。随着草本植物的 RASD,RLD 和 RAR 的增大,土壤渗透参数也逐渐增大。

从拟合优度来看,3 种草本植物根系的 RASD 与

根土复合体的初始入渗率、稳渗率、平均渗透率和渗透总量的拟合优度明显高于 RLD 与 RAR。3 种草本植物根系的 RASD 与根土复合体渗透参数拟合优度较高的原因,一方面是它影响着土壤内营养物质向植物体的输送和运移,间接决定着根系生长范围,另一方面是它反映根系与土体接触的紧密程度,密集程度越大说明根系增加土壤孔隙和降低土壤容重的能力越强,从而形成较好的导水通道,使水分沿根孔充分入渗^[24]。草本植物根系的密稠度和分布情况与土壤的渗透性能密切相关,可以利用根系分布参数预测土壤的渗透性和抗水蚀的能力^[25-26]。综合对比,发现在 RASD,RLD,RAR3 个根系特征指标中,RASD 是预测 3 种根系类型草本植物根系提升土壤渗透性的最优指标。

表 2 土壤渗透参数与根系分布参数的回归方程

Table 2 Regression equation between soil permeability parameters and root distribution parameters

| 根土复合体 | 渗透参数 | RLD/ (mm · cm ⁻³) | R ² | RASD/ (mm ² · cm ⁻³) | R ² | RAR/ 10 ⁻⁴ | R ² |
|---------|--------|----------------------------------|----------------|--|----------------|--------------------------|----------------|
| 轴根型紫花地丁 | 初始入渗率 | $y = 8.16x - 44.66$ | 0.86 | $y = 11.04x - 37.59$ | 0.94 | $y = 29.82x - 199.9$ | 0.62 |
| | 稳渗率 | $y = 2.34x + 12.62$ | 0.87 | $y = 3.07x + 40.29$ | 0.92 | $y = 8.69x + 8.8$ | 0.66 |
| | 平均渗透速率 | $y = 3.17x + 6.97$ | 0.87 | $y = 4.27x + 32.35$ | 0.93 | $y = 11.59x - 11.36$ | 0.63 |
| | 渗透总量 | $y = 0.05x + 0.26$ | 0.86 | $y = 0.09x + 15.24$ | 0.92 | $y = 0.25x - 60.66$ | 0.65 |
| 根茎型小麦冬 | 初始入渗率 | $y = 2.81x + 8.84$ | 0.88 | $y = 1.25x + 68.29$ | 0.93 | $y = 2.33x + 12.48$ | 0.55 |
| | 稳渗率 | $y = 15.18x - 75.07$ | 0.86 | $y = 6.75x + 31.02$ | 0.94 | $y = 12.73x - 58.24$ | 0.57 |
| | 平均渗透速率 | $y = 2.8x + 22.98$ | 0.88 | $y = 1.25x + 74.59$ | 0.93 | $y = 2.31x + 24.29$ | 0.54 |
| | 渗透总量 | $y = 0.25x + 147.5$ | 0.87 | $y = 0.11x - 1.14$ | 0.94 | $y = 0.21x - 119.3$ | 0.57 |
| 根蘖型苦苣菜 | 初始入渗率 | $y = 11.04x - 70.85$ | 0.86 | $y = 5.32x - 16.33$ | 0.93 | $y = 20.74x - 133.7$ | 0.63 |
| | 稳渗率 | $y = 20.77x - 57.17$ | 0.87 | $y = 9.99x - 9.69$ | 0.92 | $y = 39.2x - 108.6$ | 0.64 |
| | 平均渗透速率 | $y = 1.63x + 33.26$ | 0.87 | $y = 1.25x + 74.59$ | 0.92 | $y = 1.89x + 26.79$ | 0.67 |
| | 渗透总量 | $y = 0.12x - 33.67$ | 0.86 | $y = 0.06x + 1.58$ | 0.93 | $y = 0.23x - 63.77$ | 0.63 |

由于根系分布参数中的 RAR 与根土复合体渗透参数拟合优度较低,因此,分析 3 种草本植物不同径级根系分布参数与根土复合体渗透参数的相关性时,只分析 3 种草本植物不同径级的 RASD,RLD 与根系渗透参数之间关系,结果见表 3。由表可知,轴根型紫花地丁和根茎型小麦冬均以 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级根系的 RASD 和 RLD 与渗透参数显著相关,其余 3 个径级相关性较低。根蘖型苦苣菜以 $1 \text{ mm} < D \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级根系与渗透参数显著性相关。

草本植物不同径级根系提高土壤渗透特性的能力不同。通过对不同径级根系参数与渗透性参数进行对比,发现轴根型、根茎型和根蘖型草本植物根系均存在提升土壤渗透性存在最佳径级,分别为 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级、 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1 \text{ mm}$ 径级和 $1 \text{ mm} < D \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级。

同时,本文研究发现,3 种草本植物根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级,

原因是一方面是草本植物在该径级具有根系数量、根系直径或者根系长度的相对优势。另一方面是根系通过自身的光合作用和呼吸作用分泌类似于有机胶的物质,增加土壤颗粒密度,促进土壤颗粒黏结。除此径级之外的根系由于数量、直径和长度三方面均不占优势,进而导致它们对土壤渗透性的增强作用也较弱。

3 结 论

(1) 3 种根系类型草本植物均能增强土壤的渗透性。增渗能力表现为根茎型小麦冬 $>$ 轴根型紫花地丁 $>$ 根蘖型苦苣菜。随土层深度增加,轴根型和根茎型根系的渗能力逐渐下降,而根蘖型根系的增渗能力先上升后下降。

(2) 综合比较根长密度、根表面积密度和根面积比 3 个根系分布特征指标,发现根表面积密度是预测 3 种根系类型草本植物根系提升土壤渗透性的最优指标。

表 3 不同径级根系分布参数与土壤渗透参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis between root distribution parameters of different diameter classes and soil permeability

| 根系 类型 | 径级 | 分布参数 | 初始入渗率/ (ml·min ⁻¹) | 平均渗透速率/ (ml·min ⁻¹) | 渗透总 体积/mm | 稳渗率/ (ml·min ⁻¹) |
|----------|---------------|------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| 轴根型紫花地丁 | 0 mm<D≤0.5 mm | RLD | 0.082 | 0.035 | 0.026 | 0.075 |
| | | RSAD | 0.132 | 0.086 | 0.026 | 0.125 |
| | 0.5 mm<D≤1 mm | RLD | 0.897** | 0.896** | 0.878** | 0.897** |
| | | RSAD | 0.897** | 0.900** | 0.885** | 0.899** |
| | 1 mm<D≤1.5 mm | RLD | 0.261 | 0.183 | 0.194 | 0.232 |
| | | RSAD | 0.321 | 0.303 | 0.314 | 0.308 |
| | 1.5mm<D≤2 mm | RLD | 0.215 | 0.168 | 0.172 | 0.231 |
| | | RSAD | 0.288 | 0.254 | 0.243 | 0.279 |
| | 2 mm<D≤3 mm | RLD | 0.238 | 0.154 | 0.188 | 0.221 |
| | | RSAD | 0.298 | 0.268 | 0.285 | 0.269 |
| | 0 mm<D≤0.5 mm | RLD | 0.357 | 0.244 | 0.358 | 0.233 |
| | | RSAD | 0.402 | 0.258 | 0.365 | 0.246 |
| 根茎型小麦冬 | 0.5 mm<D≤1 mm | RLD | 0.944* | 0.876** | 0.956** | 0.894** |
| | | RSAD | 0.956** | 0.887** | 0.957** | 0.897** |
| | 1 mm<D≤1.5 mm | RLD | 0.152 | 0.122 | 0.168 | 0.145 |
| | | RSAD | 0.185 | 0.126 | 0.175 | 0.156 |
| 根蘖型苦苣菜 | 0 mm<D≤0.5 mm | RLD | 0.102 | 0.178 | 0.270 | 0.114 |
| | | RSAD | 0.278 | 0.373 | 0.486 | 0.294 |
| | 0.5 mm<D≤1 mm | RLD | 0.554 | 0.543 | 0.572 | 0.574 |
| | | RSAD | 0.664 | 0.673 | 0.678 | 0.686 |
| | 1 mm<D≤1.5 mm | RLD | 0.768* | 0.766* | 0.778* | 0.776* |
| | | RSAD | 0.788* | 0.798* | 0.789* | 0.788* |

注:**代表 $p<0.05,n=6$ 。

(3) 轴根型、根茎型和根蘖型草本植物根系均存在提升土壤渗透性的最佳径级,分别为 0.5 mm<D≤1 mm 径级、0.5 mm<D≤1 mm 径级和 1 mm<D≤1.5 mm 径级。

参考文献 (References):

[1] Löbmann M T, Geitner C, Wellstein C, et al. The influence of herbaceous vegetation on slope stability: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2020,209:103328.

[2] 刘向峰,郝国亮,于冰.两种植物根分布特征及其对露天矿边坡表层的加固效果[J].长江科学院院报,2022,39(9):96-101.

Liu X F, Hao G L, Yu B. Distribution characteristics of two kinds of plant roots and their effects on surface reinforcement of open-pit mine slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022,39(9):96-101.

[3] Yamase K, Tanikawa T, Dannoura M, et al. Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of *Cryptomeria japonica* using ground-penetrating radar[J]. Catena, 2019,183:104227.

[4] 陈世瑛.中国北方草地植物根系[M].长春:吉林大学出版社,2001.

Chen S H. Roots of Grassland Plants in Northern China

[M]. Changchun: Jilin University Press, 2001.

[5] 严小龙.根系生物学:原理与应用[M].北京:科学出版社,2007.

Yan X L. Root Biology: Principles and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2007.

[6] 周倩倩,苏炯恒,任毅,等.华南地区典型土壤渗透性的改良配置研究[J].水利水电技术,2020,51(6):185-192.

Zhou Q Q, Su J H, Ren Y, et al. Study on mixture for improving typical soil permeability in South China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(6):185-192.

[7] 夏旂琪.草类根系根土复合体的强度和渗透特性及对边坡稳定性的影响[D].长沙:长沙理工大学,2017.

Xia Y Q. Study on the Strength and Permeability Characteristics of Grass Root-Soil Composite and the Influence on Slope Stability[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.

[8] 杨闻达,王桂尧,张永杰,等.主直根系植物对边坡土壤渗透性影响的原位试验研究[J].中外公路,2018,38(2): 35-39.

Yang W D, Wang G Y, Zhang Y J, et al. In-situ experimental study on the effect of main straight root system plants on soil permeability of slope soil[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(2):35-39.

- [9] 刘小燕.根系土的工程性状研究及其在生态边坡稳定分析中的应用[D].江西赣州:江西理工大学,2014.
Liu X Y. Study on Engineering Properties of Root Soil and Its Application in Stability Analysis of Ecological Slope [D]. Ganzhou, Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [10] 蒋希雁,王皓宇,董捷,等.压实度对植被土持水能力及基质吸力的影响[J].人民黄河,2020,42(1):86-90.
Jiang X Y, Wang H Y, Dong J, et al. Study on the effect of compaction degree on hydrological effect of vegetation soil[J]. Yellow River, 2020,42(1):86-90.
- [11] Ng C W W, Ni J J, Leung A K, et al. A new and simple water retention model for root-permeated soils[J]. Géotechnique Letters, 2016,6(1):106-111.
- [12] 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.
- [13] 陈晋龙,李锦辉,程鹏,等.植被作用下土质覆盖层渗透特性的现场试验[J].岩土力学,2018,39(1):222-228.
Chen J L, Li J H, Cheng P, et al. Field test on seepage performance of soil cover with different types of vegetation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(1):222-228.
- [14] 胡海波,张金池.平原粉沙淤泥质海岸防护林土壤渗透特性的研究[J].水土保持学报,2001(1):39-42.
Hu H B, Zhang J C. Study on soil permeability of shelter-forest in silting coastal plain[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001(1):39-42.
- [15] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability: Soil water and root profiles [J]. Ecological Engineering, 2006,28(1):90-95.
- [16] 张万儒,许本彤.森林土壤定位研究方法[M].北京:中国林业出版社,1986.
Zhang W R, Xu B T. Research Method of Forest Soil Location [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986.
- [17] 刘向峰,张强,郝国亮,等.草本植物根系类型和分布对根土复合体无侧限抗压强度的影响[J].长江科学院院报,2023,40(9):106-111,117.
Liu X F, Zhang Q, Hao G L, et al. Effects of herb root type and distribution on unconfined compressive strength of root-soil composites[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(9):106-111,117.
- [18] 马晓刚.缙云山不同植物群落类型土壤入渗性能研究[D].重庆:西南大学,2008.
Ma X G. Research on Soil Permeability of Different Plant Communities Types in Jinyun Mountain [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [19] 赵宽耀,许强,张先林,等.黑方台浅层黄土渗透特性对比试验研究[J].工程地质学报,2018,26(2):459-466.
Zhao K Y, Xu Q, Zhang X L, et al. Infiltration characteristics of topsoil at Heifangtai in Gansu Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(2):459-466.
- [20] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
Li J X, He B H, Chen Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(5):1535-1544.
- [21] 单立山,李毅,张正中,等.2种典型荒漠植物细根序级结构及功能特征分析[J].草地学报,2017,25(5):1014-1019.
Shan L S, Li Y, Zhang Z Z, et al. Analysis of architecture and functions of fine roots of two dominant desert plants among different branch orders in arid and semi-arid areas in northwest, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017,25(5):1014-1019.
- [22] 高英旭.海州露天煤矿排土场复垦区植物根系分布特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):124-128.
Gao Y X. Plant roots distribution characteristics in the dump reclamation area of Haizhou open pit coal mining [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(4):124-128.
- [23] 葛芳红,周正朝,刘俊娥,等.黄土丘陵区4种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):164-169.
Ge F H, Zhou Z C, Liu J E, et al. Distribution characteristics of root and their effect on soil separation rate of four typical plants in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):164-169.
- [24] 艾钊,陈志成,杨菲,等.文冠果柿树花椒幼树对不同土壤水分的生理响应[J].中国水土保持科学,2014,12(6):68-74.
Ai Z, Chen Z C, Yang F, et al. Physiological responses to different soil water contents in *Xanthoceras sorbifolia* Bunge., *Diospyros kaki* Linn. and *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. seedlings[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014,12(6):68-74.
- [25] Zhou Z C, Gan Z T, Shanguan Z P, et al. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China) [J]. Catena, 2010,82(2):87-91.
- [26] 桑凯新,胡淦林,黄超,等.黄河河岸带5种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):1-8.
Sang K X, Hu G L, Huang C, et al. Effects of root structure characteristics of 5 plant types on soil infiltration in the Yellow River riparian[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(5):1-8.