

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.097



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



乔木根径、含量和分布类型对根土复合体饱和渗透系数的影响

胡兵立^{1,2}, 苏立君^{1,2,3}, 谢奇峻¹

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室; 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中巴地球科学联合研究中心, 巴基斯坦伊斯兰堡)

摘要:植物根系对土体的水力特性具有重要影响,但关于乔木根系对土体饱和渗透系数的定量研究缺乏。利用自制渗透实验箱,采用定水头实验方法,针对重塑根土复合体开展不同根径($1\text{ mm} \leq d \leq 3\text{ mm}$, $3\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 和 $5\text{ mm} < d \leq 8\text{ mm}$)及含量(根体积含量 $0.4\% \sim 2.4\%$)和根的分布类型(水平和竖直)对其饱和渗透系数影响的定量研究。结果表明,相同根径条件下,根土复合体的饱和渗透系数与根体积含量呈线性正相关关系,但随着根径的增加,该线性关系斜率不断降低;根土复合体饱和渗透系数与根表面积含量也存在显著的线性正相关关系,方差分析表明,该线性关系不受根径的影响;确定了根的不同分布类型(水平和竖直)下根表面积含量与其饱和渗透系数之间的线性关系;此外,研究发现,根竖直向分布时的根土复合体饱和渗透系数随根表面积含量的变化率是水平分布的1.8倍左右。研究结果表明,根的存在可以显著提高土体的饱和渗透系数,且根土的表面接触是影响其水力特性的根本原因。

关键词:根土复合体;饱和渗透系数;含根量;根分布类型

中图分类号: TU411.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0016-10

Influence of tree root diameter, content and distribution type on saturation permeability coefficient of rooted soil

HU Bingli^{1,2}, SU Lijun^{1,2,3}, XIE Qijun¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes; Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, P. R. China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China; 3. China-Pakistan Joint Research Centre on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan)

Abstract: Root content has significant influence on the saturation permeability coefficient of soil, but there is a lack of quantitative research on the effect of coarse tree roots on soil saturation permeability coefficient. In this study, a self-developed infiltration experimental box with constant head method was used to conduct

收稿日期: 2023-06-11

基金项目: 中国科学院战略重点研究项目(XDA20030301);国家自然科学基金(41790432)

作者简介: 胡兵立(1992-),男,博士生,主要从事覆被斜坡稳定性分析, E-mail: hubl1992@126.com。

苏立君(通信作者),男,研究员,博士生导师, E-mail: sulijun1976@163.com。

Received: 2023-06-11

Foundation items: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA20030301); National Natural Science Foundation of China (No. 41790432)

Author brief: HU Bingli (1992-), PhD candidate, main research interest: vegetated slope stability analysis, E-mail: hubl1992@126.com.

SU Lijun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sulijun1976@163.com.

quantitative research on the influence of different root diameters ($1\text{ mm} \leq d \leq 3\text{ mm}$, $3\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$, and $5\text{ mm} < d \leq 8\text{ mm}$) root content (root volume content: 0.4%-2.4%), and root distribution forms (horizontal and vertical) on the saturation permeability coefficient of remold root-soil. The results indicate that, under the same root diameter conditions, the saturated permeability of the rooted soil is linearly and positively correlated with the root volume content. However, as the root diameter increases, the slope of this linear relationship continuously decreases. There is also a significant correlation between the saturated permeability coefficient and the root surface area content, and the variance analysis shows that the relationship is not affected by root diameter. Meanwhile, the linear relationship between the root surface area content and its saturation permeability coefficient was determined under different distribution types of roots (horizontal and vertical). In addition, it was found that the change rate of the saturation permeability coefficient of the rooted soil with the root surface area content in the vertical distribution was about 1.8 times that of the horizontal distribution. Based on the results above, it can be seen that the presence of roots can significantly improve the saturation permeability coefficient of soil, and the surface contact of root soil is the fundamental reason affecting its hydraulic characteristics.

Keywords: rooted soil; saturation permeability coefficient; root content; root distribution type

土体的饱和渗透系数是影响斜坡水文过程和稳定性的重要因素^[1-3]。植物根系在土体中的生长可以影响土体的渗透特性^[4-6]。因此,在降雨条件下,植物根系对斜坡浅层稳定性的影响不可忽视。

关于草灌及小乔木的实验室种植实验表明,植被根系的生长可以占据土体的孔隙,提高土体压实度,进而降低土体的渗透性^[7-9]。杨尚青^[10]通过对种植高羊茅进行双环渗透实验发现,根系的存在可以降低土体的入渗量,且其在稳定入渗时的饱和渗透系数小于裸土。Jotisankasa等^[11]通过香根草的种植实验发现,根系可以抑制土体干湿循环裂缝的产生并降低土体的饱和渗透系数。Leung等^[12]通过种植百慕大草和鹅掌柴研究根系对土体渗透特性的影响发现,植物根系对降低土体的饱和渗透系数具有显著作用。Ng等^[13]提出了一个考虑植物根系占据土体孔隙的新型根土复合体渗透系数计算模型,并通过种植实验得以验证。然而,与种植实验不同的是,大量的野外观察和实验表明,植被根系的存在可以显著地提高土体的渗透性。Qin等^[14]通过研究乔木根系对土体渗透性影响发现,乔木根系可以显著提高根土层的饱和渗透系数。王昆^[15]通过野外双环渗透实验对草灌根系的研究发现,根系对增加土体入渗率起着重要作用。徐则民^[16]和徐宗恒等^[17]通过野外调查和染色渗透实验发现,根土界面是主要的优先流通道,且根的直径越大,优先流现象越明显。

根系主要通过改变土体孔隙结构而对土体渗透性产生影响^[13,18]。研究表明,根土接触界面存在大量孔隙^[19],部分学者通过借助X射线扫描的方法也发现根系的生长的确会增加根土表面的孔隙数量^[19-20]。此外,Lu等^[18]通过总结发现,细根会阻塞土

体孔隙,而粗根会使根土表面产生大孔隙。这些沿着植物根系分布的孔隙具有明显的定向性,其可能成为优先流通道。

尽管有关根土体渗透性的研究已有很多,但仍缺乏量化植物根系对土体饱和渗透系数影响的系统性研究。尤其对于浅根乔木根系而言,其根系直径范围跨度大,且具有明显的侧向分布特征,不同直径的根系及其展布形式对土体的渗透性影响尚不明确,这严重地制约了降雨条件下乔木对斜坡稳定性影响机制的深入研究。基于植物根系对土体渗透特性影响的研究现状,以中国西南山区广泛分布的浅根乔木——杉木根系为研究对象,系统地开展了杉木根系直径、含量和分布类型对根土复合体饱和渗透系数定量影响的实验研究。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用土体和杉木根系均取自四川省都江堰市龙溪河流域龙池国家森林公园。龙溪河流域地处青藏高原与四川盆地的过渡地带海拔范围为739~3 440 m。研究区域属亚热带季风(西南)气候,年平均降水量约为1 134.8 mm,其中80%的降雨发生在雨季(5—10月)。该地区的平均温度约为16℃,海拔2 000 m以下广泛分布人工杉木林;杉木是该地区的主要人工造林树种,种植时间为20世纪80年代至90年代。取样点为一处坡度约为18°的斜坡,坡体上为一处林龄约为30 a的人工杉木林。实验需要的杉木根系和土体均取自距树干约1 m处,取样深度为地表以下约30 cm,该深度是杉木根系的主要生长区域。为了获得原位土体的干密度以及分析根系对树干周围土体干密度的影响,选取5

裸杉木,分别在其树干周围0.5~2.5 m范围内,间隔0.5 m进行环刀取样,并在实验室测定其干密度。

取回的土样在自然条件下晾晒5 d,然后使用孔径为10 mm的筛子进行筛选,以去除土体中的大颗粒,从而降低尺寸效应对实验的影响(土体中10 mm以上大颗粒的质量占比为4.83%)。将筛分后的土样和原位取回的环刀样品参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21]分别进行土体的物理性质测试。图1显示了取样深度土体的颗粒粒径分布曲线,由图1可知,实验所用土体的主要组成成分是黏质砂土,并含有少量砾石。比重瓶测得的土颗粒比重为 2.65 ± 0.01 。杉木根系取样点的土体有机碳含量为53.5 g/kg,土体干密度为 $0.93 \sim 1.02 \text{ g/cm}^3$ 。图2为树干周围土体干密度与到树干距离的关系,从图2可知,野外环境下根系的存在并没有引起树干周围土体干密度的显著变化。

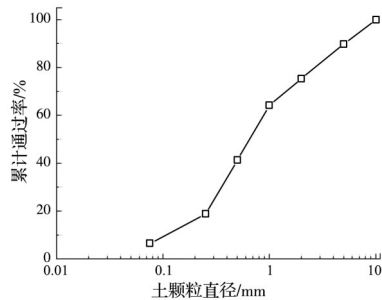


图1 取样点土颗粒级配曲线

Fig. 1 The soil particle grain size distribution at the site

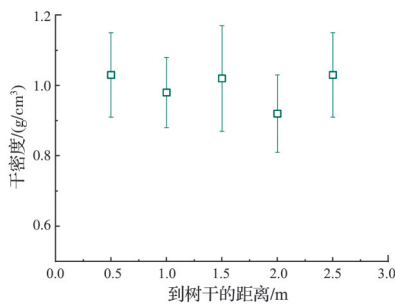


图2 到树干不同距离的土体干密度分布

Fig. 2 Soil dry density distribution away from tree stem

将取回的杉木根系用清水洗去表面泥土并晾干表面水分,然后使用剪刀将其剪成长度为25 cm的根段(根段的长度由实验装置的尺寸决定),使用电子游标卡尺在所剪根段的两头和中间分别测量根段的直径,将根段按照平均根径的不同分为3个径级,分别为 $1 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} < d \leq 8 \text{ mm}$ 。将不同径级的根段装入保鲜袋,并放置于冰箱备用,温度控制在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 实验仪器和实验设计

实验土体属于粗粒土,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],宜采用常水头渗透实验

研究含根量对根土复合体饱和和渗透系数的影响。图3为自制渗透实验装置示意图和实验设计图。实验装置主要包括水头控制箱和渗透实验箱两个部分,其均为亚克力板材质。水头控制箱尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,顶部设有进水口,箱身设有4个溢水开关,相邻控制开关相距100 mm,用于控制实验入渗水头高度。水头控制箱通过连通管给渗透实验箱供水。为保证土样充分饱和,减少实验误差,实验采用向上渗流的方式,渗透实验箱底部设有与水头控制箱连通的进水口。渗透实验箱上部设有溢出口用于收集实验过程中渗出水量。渗透实验箱尺寸为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,有效实验尺寸为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 。箱身前侧两边贴有刻度尺用于土体分层填埋时控制填埋厚度。实验所用数据测量仪器为量杯和量筒,主要用于测量渗出液体的体积。

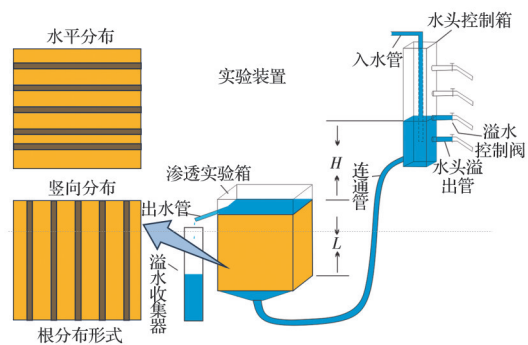


图3 根土复合体饱和和渗流实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of saturated seepage experiment of rooted soil

由于杉木根系属于水平板状根型,其侧向分布对土体孔隙的定向性具有重要影响,进而影响根土复合体饱和和渗透系数。实验中,考虑了根的水平分布和竖向分布对根土复合体饱和和渗透系数的影响。实验中以体积含量来控制根的含量,对于根水平展布工况,根体积分含量的间隔设置为0.4%。径级为 $1 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$ 的根体积分含量范围为0.4%~1.2%;径级为 $3 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 的根体积分含量范围为0.8%~2.0%;径级为 $5 \text{ mm} < d \leq 8 \text{ mm}$ 的根体积分含量范围为1.2%~2.4%。由于根系的竖向展布实验在制样阶段存在较大困难,根太多会导致无法对土体进行有效压实,因此,实验中根竖向分布的工况考虑的最大根体积分含量为1.2%,其含量间隔设置为0.2%。其中,径级为 $3 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 的根体积分含量范围为0.4%~0.8%,径级为 $5 \text{ mm} < d \leq 8 \text{ mm}$ 的根体积分含量范围为0.8%~1.2%。实验设置裸土作为对照组,对应体积分含量为0(详见表1)。每种工况进行2组实验,对于两组重复实

验结果差距超过10%的工况增加实验。由于野外调查中发现根的存在对树干周围土体的干密度没有显著影响(图2),因此,实验中控制土体的干密度

为1 g/cm³,且不受根含量的影响,制样过程中根所占土的体积需要相应扣除,以保证各个实验工况中土体的压实度相同。

表1 根土复合体饱和和渗流实验工况设计

Table 1 Experimental design of saturated seepage of rooted soil

直径	分布	R _v =0%	R _v =0.4%	R _v =0.6%	R _v =0.8%	R _v =1.0%	R _v =1.2%	R _v =1.6%	R _v =2.0%	R _v =2.4%
1 mm ≤ d ≤ 3 mm		√	√	—	√	—	√	—	—	—
3 mm < d ≤ 5 mm	水平	√	—	—	√	—	√	√	√	—
5 mm < d ≤ 8 mm		√	—	—	—	—	√	√	√	√
3 mm < d ≤ 5 mm	竖向	√	√	√	√	—	—	—	—	—
5 mm < d ≤ 8 mm		√	—	—	√	√	√	—	—	—

注:√为设计工况;—为未设计工况;R_v为根体积含量。

1.3 实验步骤

制样前使用电子游标卡尺测量所用根段的直径,根段的上、中、下3个部位各测量1次,取其平均值作为该根段代表直径,该平均值用于计算根段的体积和表面积。按照实验设计(表1)算出每组实验所需要的根段数量。根据设计工况的根系体积含量和土体干密度,计算出所需预备土体的质量。对于根的水平分布工况,将根和土体均分层填埋并压实,以控制压实度,每一层的填埋深度均控制为5 cm。每层根土填埋完成后对其表面进行刮毛处理后再进行下一层的填埋。对于根竖向分布的实验工况,不同之处是在第1层土体放入实验箱之后便将所需根系全部插入土层,然后继续分层填埋。样品填埋完成后,在水头控制箱和渗透实验箱的两个连接部位均缠上足够厚的聚四氟乙烯密封带以防止漏水;并接上渗透实验箱和水头控制箱之间的连通软水管,使用铁丝将软水管拧紧以达到防漏水效果。实验样品制作完成之后,进行隔夜静置处理,第2天进行饱和和渗透实验。

实验进行时,首先使土样缓慢饱和,待土样充分饱和后,调节水头控制箱的入渗水头使其水头差为50 cm。当出水管开始有水流出时,每5 min测量一次渗出水体的体积并记录,待流量保持相对稳定时结束实验。最后根据测得的单位时间内稳定流出水的体积,参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],使用达西定律算得不同工况条件下的根土复合体的饱和渗透系数。

1.4 统计分析

采用单因素协方差分析(ANOVA)方法分析根土复合体饱和渗透系数与根径、根系含量和根在土体中的展布方式之间的相关性和显著性。在进行显著性检验之前,为了避免数据的表现形式对分析结果的影响,对相应分析数据首先进行归一化处理。统计学显著水平设置为0.05。此外,使用线性

回归的方法分析根的含量与根土复合体饱和渗透系数之间的关系。所有的统计和分析均使用R语言进行(<https://www.r-project.org/>)。

2 实验结果

2.1 根体积分量的影响

2.1.1 根水平向分布

单因素协方差分析显示,根水平向分布影响下,根体积分量对根土复合体饱和渗透系数具有显著影响(p < 0.001,见表2)。同时,在根水平向分布条件下,根径也表现出了对根土复合体饱和渗透系数的显著影响(p < 0.05,见表2)。

表2 根径及根体积分量对根土复合体饱和和渗透系数影响的单因素协方差分析结果

Table 2 Results of the one-way covariance analysis of saturation permeability coefficient and with root diameter classes and root volume content

K _s	R _v	D _f (R _v)	R _d	D _f (R _d)
K _s ^h	p < 0.001	1	p < 0.05	2
K _s ^v	p < 0.001	1	p < 0.05	2

注:K_s^h为根水平展布时的饱和渗透系数;K_s^v为根竖直展布时的饱和渗透系数;R_v为根体积分量;R_d为根径,mm;D_f为自由度(Degree of Freedom)

图4为根水平分布条件下根径不同时根土复合体饱和渗透系数与根体积分量的关系。由图4可知,在根水平向分布条件下,随着根体积分量的增加,根土复合体饱和渗透系数不断增加,但根径对该增长趋势也产生了明显的影响。根径为1 mm ≤ d ≤ 3 mm的根土复合体饱和渗透系数由根体积分量为0.4%时的9.6 × 10⁻⁶ m/s增加到了根体积分量为1.2%时的1.53 × 10⁻⁵ m/s,增加了约59%;根径3 mm < d ≤ 5 mm的根土复合体饱和渗透系数由根体积分量为0.8%时的1.05 × 10⁻⁵ m/s增加到了根体积分量为2.0%时的1.68 × 10⁻⁵ m/s,增加了

60%;根径 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的根土复合体饱和和渗透系数由根体积含量为1.2%时的 $1.00\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根体积含量为2.4%时的 $1.61\times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了61%。

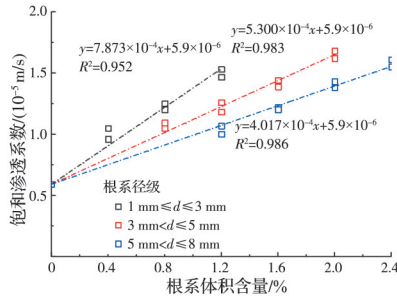


图4 根水平分布条件下根土复合体饱和和渗透系数与根体积分含量的关系

Fig. 4 Relationships between the saturation permeability coefficient of rooted soil and root volume content under root horizontal distribution conditions

此外,从图4还能看出,在根水平向分布条件下,不同直径的根土复合体饱和和渗透系数分布范围显著不同。其中,根径为 $1\text{ mm}\leq d\leq 3\text{ mm}$ 的实验数据位于最上方,其次为根径 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$ 的实验数据,最下方是 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的实验数据。这说明根径越小,根土复合体饱和和渗透系数随根体积分含量的变化越大。

从图4还可发现,根径相同时,在根水平向分布条件下,根体积分含量与根土复合体饱和和渗透系数存在明显的线性相关关系(径级 $1\text{ mm}\leq d\leq 3\text{ mm}$, $R^2=0.952$;径级 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$, $R^2=0.983$;径级 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$, $R^2=0.986$)。由于裸土的饱和和渗透系数固定,因此,该线性关系的主要区别为根土复合体饱和和渗透系数随根体积分含量变化的斜率。通过回归分析可知,该线性相关关系显著($p<0.001$,见表3)。由表3还可以看出,其拟合斜率随着根径的增加而降低,这也说明,根径越小根土复合体饱和和渗透系数随根体积分含量的变化率越大。

表3 根土复合体饱和和渗透系数与根体积分含量的线性回归分析结果

Table 3 Results of the linear regressions between rooted soil saturation permeability coefficient and root volume content

参数	R_d	拟合斜率 k	$p(k)$	R^2	$p(K_s^h-R_v$ 或 $K_s^v-R_v)$
K_s^h	$1\text{ mm}\leq d\leq 3\text{ mm}$	7.873×10^{-4}	<0.001	0.952	<0.001
	$3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$	5.300×10^{-4}	<0.01	0.983	<0.001
	$5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$	4.017×10^{-4}	<0.001	0.986	<0.001
K_s^v	$3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$	9.928×10^{-5}	<0.001	0.970	<0.001
	$5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$	6.440×10^{-4}	<0.001	0.984	<0.001

2.1.2 根竖向分布

单因素协方差分析显示,根竖向分布条件下,根体积分含量($p<0.001$,见表2)和根径($p<0.05$,见表2)同样对根土复合体的饱和和渗透系数具有显著的影响。图5为根竖向分布条件下根径不同时根土复合体饱和和渗透系数与根体积分含量的关系。由图5可知,根竖向分布条件下,随着根体积分含量的增加,根土复合体饱和和渗透系数不断增加。根径 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$ 的根土复合体饱和和渗透系数由根体积分含量为0.4%时的 $1.02\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根体积分含量为0.8%时的 $1.39\times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了36%。根径 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的根土复合体饱和和渗透系数由根体积分含量为0.8%时的 $1.07\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根体积分含量为1.2%时的 $1.41\times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了32%。

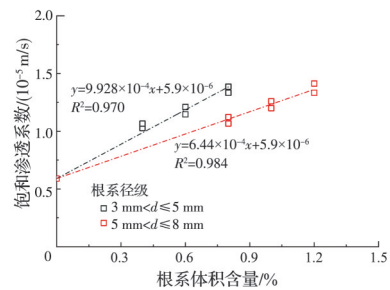


图5 根竖向分布条件下根土复合体饱和和渗透系数与根体积分含量的关系

Fig. 5 Relationships between the saturation permeability coefficient of rooted soil and root volume content under root vertical distribution conditions

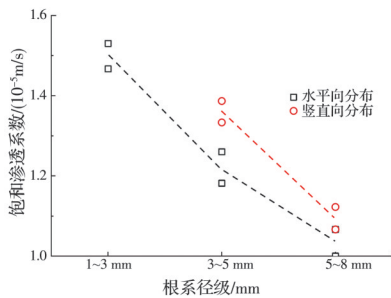
由图5还可以看出,根径 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的数据点分布于径级 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$ 的数据下方,说明直径 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的根对根土复合体饱和和渗透系数的影响小于径级 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$ 的根。根竖向分布条件下,在根径相同时,根体积分含量与根土复合体饱和和渗透系数也存在明显的线性相关关系(径级 $3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$, $R^2=0.970$;径级 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$, $R^2=0.984$),回归分析表明,在显著水平为0.05时,相应的线性相关关系显著($p<0.001$,见表3)。

2.1.3 根径的影响

单因素协方差分析表明,对于不同的根系分布类型,根径对根土复合体饱和和渗透系数具有显著影响($p<0.05$,见表2)。因此,有必要在控制根体积分含量的条件下分析根径对根土复合体饱和和渗透系数的影响。但由于相同根体积分含量下不同根径工况的实验数据较少,不足以定量确定根径和饱和和渗透系数之间的关系,只进行定性的描述性分析。

图6为相同根体积分含量下根径对根土复合体饱

和渗透系数的影响。其中,根水平向分布(H)对应的根体积含量为 1.2%,根竖向向分布(V)对应的根体积含量为 0.8%。由图 6 可知,对于不同的根的分布类型,在相同根体积含量下,根土复合体的饱和渗透系数均随着根径增加呈现下降趋势。其中,根水平分布条件下,根体积含量为 1.2% 时,其饱和渗透系数由根径 $1\text{ mm} \leq d \leq 3\text{ mm}$ 时的最大值 $1.47 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 下降到根径为 $5\text{ mm} < d \leq 8\text{ mm}$ 时的最小值 $1.00 \times 10^{-5}\text{ m/s}$,其下降率约为 32%。根竖向分布条件下,根体积含量为 0.8% 时,其饱和渗透系数由根径为 $3\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 时的最大值 $1.39 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 下降到根径为 $5\text{ mm} < d \leq 8\text{ mm}$ 时的最小值 $1.07 \times 10^{-5}\text{ m/s}$,其下降率约为 23%。但从下降趋势上来讲,根竖向分布条件下的下降率高于根水平分布时的下降率。



注:水平向对应根体积含量为 1.2%,竖向向对应根体积含量为 0.8%。

图 6 根体积含量相同条件下饱和渗透系数与根径的关系

Fig. 6 Relationships between rooted soil saturation permeability coefficient and root diameter classes under the same root volume content

2.2 根表面积含量的影响

2.2.1 根水平向分布

由单因素协方差分析可知,根水平分布条件下,根表面积含量对根土复合体饱和渗透系数具有显著影响($p < 0.001$,见表 4);而根径对根土复合体饱和渗透系数影响不显著($p > 0.05$,见表 4)。因此,从统计意义上讲,根水平分布条件下,在分析根表面积含量对根土复合体渗透系数影响的时候可以忽略根径产生的影响,从而降低分析的复杂度。

图 7 为根水平分布条件下不同根径及其表面积含量与根土复合体饱和渗透系数之间的关系。从

表 4 根径和根表面积含量对根土复合体饱和渗透系数影响的单因素协方差分析结果

Table 4 Results of the one-way covariance analysis of saturation permeability coefficient and with root diameter classes and root surface area content

饱和渗透系数	R_s	$D_f(R_s)$	R_d	$D_f(R_d)$
K_s^h	$p < 0.001$	1	$p > 0.05$	2
K_s^v	$p < 0.001$	1	$p > 0.05$	2

图 7 可知,根水平分布条件下,随着根表面积含量的增加,根土复合体饱和渗透系数不断增加。根径为 $1\text{ mm} \leq d \leq 3\text{ mm}$ 的根土复合体饱和渗透系数由根表面积含量为 6.8% 时的 $9.6 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 增加到了根表面积含量为 18.3% 时的 $1.53 \times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了约 59.4%。根径为 $3\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 的根土复合体饱和渗透系数由根表面积含量为 7.7% 时的 $1.05 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根表面积含量为 19.0% 时的 $1.68 \times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了 60%。根径为 $5\text{ mm} < d \leq 8\text{ mm}$ 的根土复合体饱和渗透系数由根表面积含量为 8.0% 时的 $1.00 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根表面积含量为 14.1% 时的 $1.61 \times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了 61%。

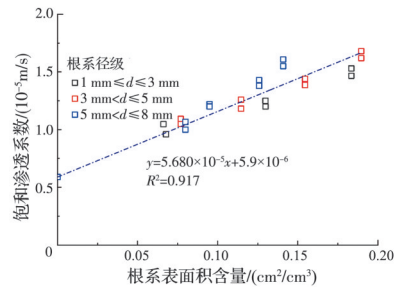


图 7 根水平向分布条件下根表面积含量与根土复合体饱和渗透系数关系

Fig. 7 Relationships between the saturation permeability coefficient of rooted soil and root surface area content under root horizontal distribution conditions

从图 7 还可以看出,根水平分布条件下,不同径级的数据点集中在一条直线附近,根土复合体饱和渗透系数随根表面积含量的变化率之间的差异性较小。整体而言,根表面积含量与根土复合体饱和渗透系数之间存在明显的线性相关关系($R^2 = 0.917$,见表 5)。通过回归分析可知,该线性相关关系显著($p < 0.001$,见表 5)。

表 5 根土复合体饱和渗透系数与根表面积含量的线性回归分析结果

Table 5 Results of the linear regressions between rooted soil saturation permeability coefficient and root surface area content

参数	斜率 k	$p(k)$	R^2	$p(K_s^h - R_v \text{ 或 } K_s^v - R_v)$
K_s^h	5.680×10^{-5}	< 0.001	0.917	< 0.001
K_s^v	1.021×10^{-4}	< 0.001	0.976	< 0.001

2.2.2 根竖向分布

单因素协方差分析显示,根竖向分布条件下,根表面积含量对根土复合体饱和渗透系数具有显著影响($p < 0.001$,见表 4)。但是,根径对根土复合

体竖直向饱和渗透系数的影响不显著($p>0.05$, 见表 4)。图 8 为根竖向分布条件下不同根径及其表面积含量与根土复合体饱和渗透系数之间的关系。由图 8 可知,随着根表面积含量的增加,根土复合体饱和渗透系数也不断增加。根径($3\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$)的根土复合体饱和渗透系数由根表面积含量为 3.92% 时的 $1.03\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根表面积含量为 7.48% 时的 $1.38\times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了约 34%。根径 $5\text{ mm}<d\leq 8\text{ mm}$ 的根土复合体饱和渗透系数由根表面积含量为 4.8% 时的 $1.07\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 增加到了根表面积含量为 7.8% 时的 $1.41\times 10^{-5}\text{ m/s}$,增加了约 31.8%。

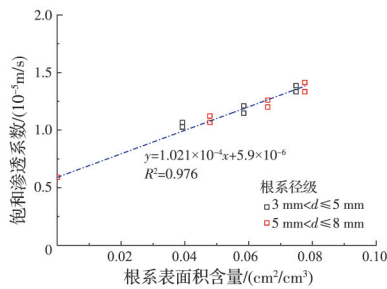


图 8 根竖向分布条件下根表面积含量与根土复合体饱和渗透系数关系

Fig. 8 Relationships between the saturation permeability coefficient of rooted soil and root surface area content under root vertical distribution conditions

由图 8 还可以看出,根竖向分布条件下,根表面积含量与根土复合体饱和渗透系数也存在明显的线性关系($R^2=0.976$, 见表 5)。回归分析可知,根竖向分布条件下,根土复合体的饱和渗透系数与根表面积含量线性相关关系显著($p<0.001$, 见表 5)。综上所述,不同根分布条件下,根土复合体饱和渗透系数与根表面积含量可以定量表述为

$$K_s^h = 5.680 \times 10^{-5} R_s + 5.9 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$K_s^v = 1.021 \times 10^{-4} R_s + 5.9 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: K_s^h 为根水平向分布时根土复合体饱和渗透系数, m/s; K_s^v 为根竖向分布时根土复合体饱和渗透系数, m/s; R_s 为根土复合体中的根表面积含量, cm^2/cm^3 。

2.3 根分布类型对的影响

表 6 列出了根的分布类型(RDT)和根表面积含量对根土复合体饱和渗透系数影响的单因素协方差分析结果。结果表明,根的分布类型对根土复合体的饱和渗透系数具有显著影响($p<0.001$)。

图 9 为不同的根分布类型条件下根表面积含量与根土复合体饱和渗透系数之间的关系。总体而

表 6 根径和根系展布形式对根土复合体饱和渗透系数的单因素协方差分析结果

Table 6 Results of the one-way covariance analysis of saturation permeability coefficient and with root diameter classes and root distribution type

R_s	$D_f(R_s)$	RDT	$D_f(\text{RDT})$
$p<0.001$	1	$p<0.001$	1

注: R_s 为根表面积含量, cm^2/cm^3 ; D_f 为自由度; RDT 为根分布类型(Root Distribution Type)。

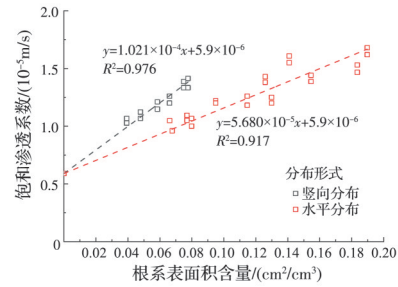


图 9 不同根分布类型下根土复合体饱和渗透系数与根表面积含量的关系

Fig. 9 Relationships between rooted soil saturation permeability coefficient and root surface area content under different root distribution type

言,根竖向分布时的根土复合体饱和渗透系数要大于根水平向分布时的饱和渗透系数。虽然竖向分布和水平分布时的饱和渗透系数均随根表面积含量增加而线性增加,但是从变化率来讲(图 9 中的曲线斜率),竖向分布时的饱和渗透系数随根表面积含量的变化率要高于水平向分布的变化率(竖向分布的变化率为 1.021×10^{-4} ; 水平向分布的变化率为 5.680×10^{-5}),其变化率比值接近 1.8 倍。由于裸土的饱和渗透系数固定,因此,随着根表面积含量的增加,根不同分布类型的根土复合体饱和渗透系数差异性会不断扩大。通过联合根竖向和水平向分布时的饱和渗透系数与根表面积含量线性回归关系式(1)和式(2),可以得到相同根表面积含量下根竖向分布与水平向分布下根土复合体饱和渗透系数之间的关系为

$$K_s^v = 1.80K_s^h - 5.31 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: K_s^h 为根水平向分布下根土复合体饱和渗透系数, m/s; K_s^v 为根竖向分布下根土复合体饱和渗透系数, m/s。

3 讨论

植物根系对土体饱和渗透系数的影响一直饱受争议,一方面,相关草灌种植实验显示,根系会占据土体孔隙进而降低渗透性^[13,22];另一方面,野外观

察和实验表明,根土界面会产生大的孔隙,进而诱导优先流的发生,最终导致渗透性的增加^[4,17]。其主要原因为,种植实验中根的生长会堵塞土体孔隙,并对土体产生挤压,使得整体的孔隙率下降;而野外环境下,经过长时间相互作用,植物根系对土体的挤压效果消散(图2),而根土体中存在的大孔隙决定了其渗透能力(根土界面孔隙、腐烂的根产生的孔隙和昆虫洞穴等等)。相关研究表明,由于根的存在,土体的入渗率会增大2~17倍^[23]。

笔者采取的方法是不考虑根对土体的挤压效应,保持各个实验工况中土体部分的干密度不变(即土体的压实度不变),且只考虑根的存在对土体渗透系数的影响。实验结果表明,根的存在会显著地提高土体的饱和渗透系数(图4和图5),这与原位观测一致^[14,24-25]。其主要原因为根会将原本的不同大小土颗粒之间的接触转变成土颗粒和根表面的接触,这会提高土体的孔隙率。Scholl等^[26]通过实验发现,根的存在会提高土体中大尺寸孔隙的含量。相关根土体CT扫描研究也发现,根土体接触面附近的孔隙含量高于其他地方^[19-20]。这也是导致根土复合体的饱和渗透系数高于裸土的主要原因。

实验还发现根的分布形式(水平分布和竖向分布)对根土复合体的渗透系数有着显著的影响(沿着根展布方向的渗透系数大于垂直于根展布方向的渗透系数)(图9)。根的分布形式对土体渗透性的影响主要来自其对根土体表面孔隙的连通性及连通方向的影响^[27]。沿着根的展布方向,根的表面会成为天然的孔隙连通器。此外,由前面的分析可知,根土界面附近孔隙含量高,受这两者的综合影响,沿着根展布方向的饱和渗透系数要高于垂直于其展布方向的渗透系数。

实验发现,以根体积含量为自变量分析根土复合体水力特性时,根的直径会产生显著的影响($p < 0.05$,见表2)。当用根的表面积含量为自变量时,可以忽略根径产生的影响($p > 0.05$,见表4)。这主要是由于根与土之间的接触范围取决于根的表面积,而体积含量不能体现根土相互作用的界面特性,因此,在使用根体积含量进行分析时需要结合根的直径进行联合分析。根径越大,其比表面积越小,使得根土的接触面积变小,这最终会导致同体积条件下随着根径的增加,根土复合体饱和渗透系数随根体含量的变化率不断降低。现有的定量分析根含量对土体水力特性影响的研究主要考虑根的长度含量、体积含量和根的生物量含量(一般使用干质量),没有考虑根径的影响也可以得到较好的效果^[22,28-29]。这主要是相关研究涉及的根径较

小,多小于2 mm,可视为一个径级,因此根径产生的影响较小。但是,当根的直径跨度很大,特别是对于成熟的乔木根系,则需要考虑根径产生的影响。因此,使用根表面积含量进行相关分析可以达到更好的效果,并且可以降低分析的复杂度。

此外,统计检验和回归分析发现,根土复合体的饱和渗透系数与根表面积含量之间存在显著的线性关系(式(1)和式(2))。并通过分析根竖向分布和水平分布对根土复合体饱和渗透系数的影响,建立了根竖向分布与水平分布时根土复合体饱和渗透系数之间的定量关系(式(3))。关系的建立明确了根的表面积含量和分布形式对土体饱和渗透系数的定量影响,并能用于根土复合体饱和渗透系数的定量计算。但是,由于土体性质和压实度的不同,该定量关系不具有普适性。由于实验中只考虑了根的存在对土体渗透性的影响,没有考虑土体中可能存在的其他类型大孔隙(如腐烂的根和虫洞)的影响,计算得到的饱和渗透系数要小于原位实验结果。但在土体性质和压实度相似条件下,实际工程中如果条件限制较大,无法进行原位实验,则可以通过该定量关系为现场根土复合体的渗透性的定量评价作为参考。

根的含量对根土复合体水力特性影响的本质是对根土复合体孔隙结构的影响。由于实验条件限制,实验中无法定量确定根的存在导致根土界面附近产生孔隙的大小和数量以及量化根的存在对根土界面孔隙定向性的影响。因此,在后续的研究中需要借助三维透视技术(如CT)开展根土界面附近孔隙的量化研究,从而更好地深入研究根的存在对根土复合体水力特性影响的机制。

4 结论

通过室内重塑根土复合体常水头饱和渗透实验研究了不同根径及其含量和分布形式对根土复合体饱和渗透系数的影响。得到如下结论:

1)在相同根径条件下,根土复合体饱和渗透系数与根体含量具有显著的线性正相关关系,但随着根径的增加其线性相关斜率不断降低(表3)。其原因为根径的增加会降低其比表面积,使得根径越大,根体积相同时,其对土体孔隙的影响越小。

2)根土复合体饱和渗透系数与根表面积也存在显著的线性正相关关系(根水平分布: $K_s^h = 5.680 \times 10^{-5} R_s + 5.9 \times 10^{-6}$, $R^2 = 0.917$, $p < 0.001$;根竖向分布: $K_s^v = 1.021 \times 10^{-4} R_s + 5.9 \times 10^{-6}$, $R^2 = 0.976$, $p < 0.001$),且该线性关系不受根径的影响,说明影响根土界面孔隙特性的主要因素

是根的表面积。因此,选取根表面积含量研究根土复合体饱和渗透系数时可以忽略根径的影响,从而降低分析的复杂度。在土体性质和压实度相近的情况下,该定量关系可以在原位实验受限的情况下用于工程中根土复合体渗透性评价。

3) 根的分布类型对根土复合体的饱和渗透系数具有显著影响($p < 0.001$),其主要原因是顺着根的展布方向,土体中孔隙的连通性更好。随着根表面积含量的增加,根竖向分布和水平分布的饱和渗透系数差异性越大,根竖向分布的饱和渗透系数随根表面积含量的变化率是根水平向分布的1.8倍左右。

参考文献

- [1] 杨世豪, 苏立君, 张崇磊, 等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 19-27.
YANG S H, SU L J, ZHANG C L, et al. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 19-27. (in Chinese)
- [2] 朱秦, 苏立君, 刘振宇, 等. 颗粒迁移作用下宽级配土渗透性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 125-134.
ZHU Q, SU L J, LIU Z Y, et al. Study of seepage in wide-grading soils with particles migration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 125-134. (in Chinese)
- [3] LIU Q, SU L J, ZHANG C L, et al. Dynamic variations of interception loss-infiltration-runoff in three land-use types and their influence on slope stability: An example from the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128218.
- [4] 陈敬业, 王钧, 宫清华, 等. 植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 115-124.
CHEN J Y, WANG J, GONG Q H, et al. Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 115-124. (in Chinese)
- [5] 侯帅. 草本植物根系复合土物理力学性能及浅层黄土边坡渗流稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
HOU S. Study on physical and mechanical properties of herb root composite soil and seepage stability of shallow loess slope [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [6] NG C W W, ZHANG Q, ZHOU C, et al. Eco-geotechnics for human sustainability[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(12): 2809-2845.
- [7] 刘俊. 香根草边坡的水文效应与稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
LIU J. Study on hydrological effect and stability of *Vetiveria zizanioides* slope [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] NI J J, LEUNG A K, NG C W W. Modelling effects of root growth and decay on soil water retention and permeability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(7): 1049-1055.
- [9] NG C W W, NI J J, LEUNG A K. Effects of plant growth and spacing on soil hydrological changes: A field study [J]. Géotechnique, 2020, 70(10): 867-881.
- [10] 杨尚青. 植被土水力特性的试验研究及其对边坡稳定性的影响[D]. 河北 张家口: 河北建筑工程学院, 2021.
YANG S Q. Experimental study on hydraulic characteristics of vegetation soil and its influence on slope stability [D]. Zhangjiakou, Hebei: Hebei University of Architecture, 2021. (in Chinese)
- [11] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1612-1622.
- [12] LEUNG A K, GARG A, COO 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] 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.
- [14] QIN M Y, CUI P, JIANG Y, et al. Occurrence of shallow landslides triggered by increased hydraulic conductivity due to tree roots [J]. Landslides, 2022, 19(11): 2593-2604.
- [15] 王昆. 植被发育斜坡地下水对降雨的响应行为及其控制机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
WANG K. Study on response behavior and control mechanism of groundwater on vegetation-developed slope to rainfall [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 徐则民. 植被与斜坡非饱和带大空隙[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 134-142.
XU Z M. Vegetation and macropores in vadose zones of hill slopes [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 134-142. (in Chinese)
- [17] 徐宗恒, 徐则民, 李凌旭. 植被发育斜坡非饱和带土体优先域及其对水分入渗的贡献: 以云南省呈贡和昭通玄武岩质斜坡为例[J]. 地理科学, 2017, 37(5): 783-791.
XU Z H, XU Z M, LI L X. Preferential domain types of basalt slope unsaturated zone soil and the contribution to water infiltration: A case study of basalt slope in

- Chenggong and Zhaotong of Yunnan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(5): 783-791. (in Chinese)
- [18] LU J R, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125203.
- [19] HELLIWELL J R, STURROCK C J, MAIRHOFER S, et al. The emergent rhizosphere: Imaging the development of the porous architecture at the root-soil interface [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14875.
- [20] HU X, LI X Y, LI Z C, et al. Linking 3-D soil macropores and root architecture to near saturated hydraulic conductivity of typical meadow soil types in the Qinghai Lake Watershed, northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *CATENA*, 2020, 185: 104287.
- [21] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020. (in Chinese)
- [22] 蒋希雁, 杨尚青, 冯峰, 等. 植被根系对土体渗透特性影响的试验研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(3): 370-375.
JIANG X Y, YANG S Q, FENG F, et al. Experimental study on the influence of vegetation roots on soil permeability [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(3): 370-375. (in Chinese)
- [23] BRAMLEY H, HUTSON J, TYERMAN S D. Floodwater infiltration through root channels on a sodic clay floodplain and the influence on a local tree species *Eucalyptus largiflorens* [J]. *Plant and Soil*, 2003, 253 (1): 275-286.
- [24] 王志良, 年玉泽, 申林方, 等. 植被发育斜坡土体大孔隙三维重构模型渗流场的LBM数值模拟[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3821-3829.
WANG Z L, NIAN Y Z, SHEN L F, et al. Numerical simulation of macropores seepage field in the 3D reconstruction model of well vegetated slope soil based on LBM [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3821-3829. (in Chinese)
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] SCHOLL P, LEITNER D, KAMMERER G, et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column [J]. *Plant and Soil*, 2014, 381 (1): 193-213.
- [27] 张文豪. 草类根系对不同土体渗透性能影响的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
ZHANG W H. Experimental study on the influence of grass roots on permeability of different soils [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [28] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 1-47.
Ng C W W. Atmosphere-plant-soil interactions: Theories and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1-47. (in Chinese)
- [29] YU Y, LOISKANDL W, KAUL H P, et al. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 667-676.

(编辑 胡英奎)