

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.017

谢祥荣, 陈正发, 朱贞彦, 等. 根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 13-28.

XIE Xiangrong, CHEN Zhengfa, ZHU Zhenyan, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 13-28.

根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望

谢祥荣^{1,2}, 陈正发¹, 朱贞彦³, 徐兴倩¹, 阎凯⁴,
李博⁴, 段青松^{1,2}, 李淑芳¹, 张川^{1,2,5}

(1.云南农业大学水利学院, 昆明 650201; 2.自然资源部云南山间盆地土地利用野外科学观测研究站, 昆明 650201; 3.云南水务投资股份有限公司, 昆明 650106; 4.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 5.中国矿业大学中国资源型城市转型发展与乡村振兴研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: [目的] 为探究根土复合体的力学效应机理及模型方法应用。[方法] 采用文献分析和对比分析法, 归纳分析根土复合体概念和内涵、根土复合体力学效应及力学模型原理、优缺点以及适用范围。[结果] (1) 根土复合体是根系与土体之间力学耦合效应的复合整体, 根系在土体中交叉缠绕, 起到加固作用; (2) 根系与土体力学关系实质上是根土复合体土力、水力和复合力学特性作用的结果, 土力特性、水力特性分别侧重研究根系对土体的影响和土中水分对土体和根系的影响, 复合力学特性侧重于根土复合体自身特性对植物根系特征以及结构的直接影响, 从而通过三者作用使根系与土体的力学关系处于动态平衡之中; (3) 根土复合体复合力学模型研究较土力和水力学模型略少, 土力学和水力学模型都是根据量化参数, 通过参数间对比来衡量固土效果, 但复合力学特性同时涉及土力特性和水力特性, 考虑全面, 应是未来研究的重点方向。[结论] 未来在开展冻融循环、干湿交替、干热循环对不同地区根系与土体相互作用的影响、多类型植物混种抗剪强度、化学作用和微生物作用对土水特性影响机理及复合模型构建等方面有待深入研究。研究结果可为生态脆弱区植被恢复、水土保持和可持续发展等提供重要的理论价值和工程借鉴意义。

关键词: 根土复合体; 土力学效应; 水力学效应; 力学模型; 固土保水; 生态恢复

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0013-16

Research Progress and Prospect of Mechanical Effects and Model Construction of Root-soil Complex

XIE Xiangrong^{1,2}, CHEN Zhengfa¹, ZHU Zhenyan³, XU Xingqian¹, YAN Kai⁴,

LI Bo⁴, DUAN Qingsong^{1,2}, LI Shufang¹, ZHANG Chuan^{1,2,5}

(1.College of Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2.Ministry of Natural Resources Observatory of Land Use in Yunnan Mountain Basin, Kunming 650201, China;

3.Yunnan Water Investment Co. Ltd., Kunming 650106, China; 4.College of Resources and Environment, Yunnan

Agricultural University, Kunming 650201, China; 5.Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the mechanism of mechanical effect of root-soil complex and the application of modeling method. [Methods] The concept and connotation of root-soil complex, the principle of mechanical effect and mechanical model of root-soil complex, advantages and disadvantages as well as the scope of application were summarized and analyzed by using literature analysis method and comparative analysis method. [Results] (1) The root-soil complex was a composite whole of mechanical coupling effect

收稿日期: 2023-05-06

修回日期: 2023-06-20

录用日期: 2023-07-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32160304); 自然资源部“西南多样性区域土地优化配置与生态整治科技创新团队”开放基金项目 (YNTD2018KF05); 云南省基础研究计划面上项目 (202201AT070272); 云南省农业基础研究联合专项面上项目 (202301BD070001-033, 202301BD070001-103); 云南省科技厅计划项目青年项目 (2019FD094); 云南省水利科技重大专项 (2023BG204001)

第一作者: 谢祥荣 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: 996786871@qq.com

通信作者: 张川 (1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地整治工程、水土保持工程研究。E-mail: zhangchuan0569@sina.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

between root system and soil body, and the root system was intertwined in soil playing a reinforced role. (2) The mechanical relationship between root system and soil body was essentially the result of soil mechanical, hydraulic and composite mechanical properties of root-soil complex. The soil mechanical and hydraulic properties focused on the influence of roots on the soil and the influence of water on the soil and root system respectively, and the composite mechanical properties focused on the direct influence of soil properties on the properties and structure of plant roots, so that the mechanical relationship between roots and soil was in a dynamic balance through the three. (3) The study of the composite mechanical model of the root-soil complex was slightly less than that of the soil mechanical and hydraulic model, which were based on quantitative parameters and measure the soil consolidation effect by comparing parameters. However, the composite mechanical properties involves both soil and hydraulic properties, which was a comprehensive consideration and should be the key research direction in the future. [Conclusion] In-depth research was needed in the future to investigate the effects of freeze-thaw cycle, dry-wet alternation and dry-hot cycle on root and soil interaction in different regions, the shear strength of multi-type plant mixtures, the influence mechanism of chemical and microbial effects on soil-water properties and the construction of composite models need to be further studied. This study can provide important theoretical value and engineering reference for vegetation restoration, soil and water conservation and sustainable development in ecologically fragile areas.

Keywords: root-soil complex; soil mechanics effect; hydraulic effect; mechanical model; soil consolidation and water conservation; ecological restoration

Received: 2023-05-06

Revised: 2023-06-20

Accepted: 2023-07-14

Online(www.cnki.net): 2023-07-21

植物具有防止滑坡、减缓水土流失的作用,并在生态文明建设中具有绿色低碳、成本低廉等优点。随着人类对资源不断开发和利用,以及大规模基础设施建设,资源开发和环境保护的矛盾日益凸显。城镇化建设、公路、铁路、水利等工程项目不断增多,造成大量边坡产生,边坡开挖破坏了原有坡面植被覆盖层,导致出现严重的植被破坏、水土流失、土地沙化现象,造成生态环境一定程度失衡现象。其中长江以南红壤丘陵地区水土流失面积高达 8 000 万 km^2 ^[1],高效地防治边坡失稳成为关键。近年来,随着植物护坡的应用及普及,实际护坡工程中因植物适应性强、生长周期短的优势而将其广泛应用^[2]。据统计^[3],我国由于植物护坡工程对裸露边坡修复以及其他水土保持措施开展,使得水土流失面积较 20 世纪 80 年代末下降 26.6%,且水土流失面积占国土总面积下降至 28.0%,约下降 10.0%。植被护坡技术是利用植被固土保水机理稳定边坡的同时保护生态环境的一种新技术,是涉及恢复生态学、植物学、土壤水动力学等多学科于一体的综合边坡工程技术,该技术在加固边坡、防治泥石流和水土流失等地质灾害、保护生态环境等方面具有许多优越性^[4]。边坡工程实践中,也因植物护坡技术特有的力学效应、水文效应和生态效应等,而将其广泛地应用^[5-6]。

当前,植物护坡技术研发已成为生态修复领域的

研究热点^[7-9]。植物根系的强度直接影响植物护坡效果。植物根系对土体有加筋效果,并且具有提高土体抗剪强度、锚固土体的功能^[10-11],能有效改善边坡土体结构,改变土体基质吸力,提高边坡稳定性^[12]。因此,探究根土复合体的强度特性,提高植物护坡效果已经成为大势所趋。本研究采用文献分析和对比分析法,归纳分析根土复合体的概念和内涵,对植物根系与土体的力学关系、根土复合体土力效应及水力效应进行详细分析,对根土复合体力学模型等进行归纳分析和展望,可为生态脆弱区植被恢复、水土保持和可持续发展等提供重要的理论价值和工程借鉴意义。

1 概念与基本内涵

1.1 根土复合体

由于植物根系除固土作用外还有涵养水源等其他滑坡治理工程措施所不具有的作用,因而研究根土复合体则成为生态修复的研究重心。杨亚川等^[13]首次提出根系土体复合体的概念,即将根系与土体视为一体,将其视为一种复合材料,简称复合体。

石明强^[14]和宋维峰等^[15]从复合材料角度出发,认为根土复合体就是由土体、根系及其之间的接触单元按照一定形式组合而成的复合整体,即根土复合体。周云艳等^[16]、单炜等^[17]、GRAY 等^[18]从力学角度按照加筋土理论研究根土复合材料时,视土体为基体,根系为增强相,根系与土体结合形成一种复合材

料,在荷载作用下将根系视为如同复合材料中的纤维,在土体遭到破坏时,根系分布范围决定土体稳定性,同时根系对土体起到与纤维相似的增强效果;言志信等^[19]从植物根系特性角度分析认为,植物根系有数量多且根径小的须根,根系在土体中形成盘结交错的网状结构,与土体相互作用形成根土复合体。

综上所述,大多数学者^[14-19]认为,根土复合体是将根系视为与纤维相似的加筋材料,其与土体结合形成一

种复合材料。根土复合体是根系与土体之间有着极强力学耦合关系的前提下,根系在土体中交叉缠绕,起到与纤维相似的加固作用,从而形成根系与土体相互作用的复合结构。但从不同植被角度来看,因为根系特性不同,导致根系与土体之间相互作用也不相同,所以根土复合体特点不同(表 1)。而其作为一个整体将被广泛应用于生态护坡技术中,以期为防止水土流失、泥石流、滑坡等自然灾害打下坚实的基础。

表 1 不同植物根土复合体特征对比分析

Table 1 Comparative analysis of the characteristics of different plant root soil complexes

植物类型根系特征		草本根土复合体	灌木根土复合体	乔木根土复合体	
形态结构	差异	1.数量多且根径小的细须根,根径一般<1 mm,埋深范围集中在 0—30 cm 土层内,一般为浅根 ^[20] 2.直根根长密度低,须根根长密度高 ^[20] 3.随着土体深度增加,根长和根干占比逐渐增加 ^[21]	垂直根系不发达,但水平方向侧根发达,大多为浅根,也有少部分深根 ^[22]	乔木根系长度可达 3~5 m,大部分深根,少部分浅根 ^[23]	
			随着土体深度增加,根长和根干占比逐渐下降 ^[21]		
	基本参数	差异	直根生物量高于须根 ^[20]	各径级根系生物量与径级呈正相关,即根径越大,生物量越大 ^[24]	
	相同	1.根长度密度、根重量密度、根面积比、根面积指数、根系数量、根体积比随着土壤深度和根径增加而减小 ^[25-27] 2.生物量随土层深度呈现出指数型减少 ^[28-29]			
土力特性	差异	1.增加黏聚力来提高抗剪强度,对内摩擦角影响小 ^[30] 2.主要为细根,可以对边坡浅层土体起到加筋作用 ^[31]	1.增加内摩擦角来提高抗剪强度,对黏聚力影响较小 ^[32] 2.主要为粗根,水平根及细根起加筋作用,垂直根和粗根起锚固作用 ^[33-34]		
	相同	1.抗剪强度均符合库伦定律,且抗剪强度都大于素土 ^[35-36] 2.直径越大,根系抗拉力越大,抗拉强度越小,根径与抗拉力和抗拉强度成函数或者幂指数关系 ^[37-38] 3.根系抗拉强度随根长增加而减小 ^[39] 4.根长度密度、根重量密度、根面积比、根面积指数、根系数量、根体积比越大,根系对土体抗剪强度的增加效果越好 ^[40]			
	水力特性	差异	表层土体中草本植物平均基质吸力大于木本植物,深层土体中木本植物平均基质吸力大于草本植物 ^[7]		
	相同	1.根系吸水消耗孔隙水压力、根系吸收水分增加基质吸力 ^[12,41-42] 2.根系生长提高土体入渗特性,降低基质吸力 ^[43] 3.土壤含水率越大,根长度密度、根重量密度、根面积比、根面积指数、根系数量、根体积比越大 ^[44]			
复合力学特性	差异	导致根系特征不同,根系中根径越大,根长越长,造成根系与土体接触面积越大,从而根系与土体的黏结和摩擦作用以及根系加筋、锚固等作用越强,根系吸水能力也因为根系地下生物量增多而增强,从而土体中含水量变化越大 ^[12,44]			
	相同	土体深度、孔隙度、压实度等与土体土力、水力特性相互作用,三者同时对根系特征造成影响,根系的深根和浅根呈现出不同的形态,根长、根径也因为土体深度、土壤含水率等存在差异 ^[45]			

1.2 植物根系与土体的力学关系

植物依赖根系在土体中得以存活,植物根系从土体中吸取水分和养分,从而增强土体抗剪切能力^[46]。植物根系上发生作用的力主要有植被自重对土体的压力、根表面上水的吸附力、根—土体之间的黏结力、根—土体接触面的摩擦力、相互交叉根系网络之间的张力和拉力、土体滑动面之间对根表面的剪力和拉力^[47]等。这些作用力构成植物根系固土保水的力学组成。

根土复合体由植物根系和土体组成,由图 1 可知植物根系与土体的力学关系,且将土体根据其力学特性分为土力特性、水力特性和复合力学特性,而根系则是按照几何形态特征及其参数分为形态结构和根系特征基本参数。其中,国内外学者^[48]认为,植物对

边坡土体力学效应大多体现为浅根加筋作用、深根锚固作用和侧根斜向牵引作用,故将根土复合体土力特性分为抗拉和抗剪特性、浅根和深根的加筋、锚固作用及侧根的斜向牵引作用;水力特性分为入渗特性、基质吸力及土壤含水率;复合力学特性分为孔隙度、压实度及土体深度。根土复合体根系按照分布形态分为根径、根长、浅根和深根;按照特征参数分为生物量、根面积比、根长度密度、根重量密度及根系表面积。

根土复合体中,土力特性与根系为相互作用关系。根系与土体之间的相互作用主要包括黏结作用和摩擦作用,两者同为黏合作用,但前者由根系与土体之间相互作用而产生的一种黏合剂,后者则是根系

率存在一个理论上的峰值。单根抗拉和野外原位拉拔试验作为抗拉力学特性主要的研究方法,在进行单根抗拉试验时得出,根径与抗拉力呈递增关系,与抗拉强度却呈递减关系,根径与两者呈幂函数或指数关系^[37-38]。在野外原位拉拔试验的研究发现,根系形态影响根系抗拉强度、弹性模量和垂直拉拔力,且根系抗拉强度、弹性模量与根径呈正相关^[61-63]。

综上所述,根系抗拉特性是影响根土复合体力学效应的重要因素。在植物根系抗拉特性研究中,侧重于室内单根抗拉试验,对野外原位拉拔试验研究较少。而这2种试验,根径对抗拉性能的影响较其他因素略为显著。

2.1.2 抗剪特性 抗剪强度是影响根土复合体土力学特性的主要影响因素之一,同时也是反映其抗蚀能力的重要指标之一^[64]。含水率、含根量、根系浓度和植物根系倾角等都是影响根土复合体抗剪强度的因素。

当根土复合体的体积和含水量一定时,抗剪强度与含根量呈正相关,黏聚力也与含根量呈正相关,而内摩擦角与含根量无明显关系^[13]。当含水量为变量时,含水量增加使内摩擦角和黏聚力都减小,从而在有根无根时均与抗剪强度呈负相关^[65]。在有根时,含根量增加使得根土复合体抗剪强度呈先增加后减小趋势,抗剪强度峰值对应的含根量为最优含根量^[66]。而根系浓度与抗剪强度呈线性正相关,没有最优根系浓度^[67]。植物根系倾角也对抗剪强度有影响,合适的倾角能促进根系与土体之间相互作用,从而增加抗剪强度^[68-69]。

从库仑公式角度来看,抗剪强度是由土体颗粒间所产生的内摩擦力和黏聚力构成,内摩擦角和黏聚力是决定抗剪强度大小的主要内在因素,所以对根土复合体抗剪强度的研究主要集中于对土体黏聚力和内摩擦角的研究。但黏聚力影响作用相对于内摩擦角更为显著。在对根土复合体进行抗剪强度计算时发现^[35-36],根土复合体黏聚力及内摩擦角指数会跟着植被根系的增长不断增大,黏聚力随根系生长年限增加的提升程度远大于内摩擦角,对固结土体的影响也大于内摩擦角的影响,而内摩擦角在一定程度之后基本上不变。

综上所述,抗剪力特性是影响根土复合体力学效应的重要因素,且影响抗剪力特性的因素众多,但更侧重于其机理和根系特性的研究。相对于内摩擦角而言,黏聚力的增大无疑对抗剪强度的影响更为显著。

2.1.3 加筋作用 加筋理论主要为摩擦加筋原理和准黏聚力加筋原理^[70]。前者通过与土层接触产生的摩阻力去阻碍加筋体的变形,从而使加筋土保持稳

定;后者通过摩尔库伦准则为加筋土增添附加黏聚力,从而使得加筋土强度在理论上明显提高。

植物根系的加筋作用一般发生在草本植物的浅根和木本植物的侧根^[48]。受加筋理论的影响,根土复合体可以看成为三维的复合材料,把土中的根系视为天然的加筋材料以此来分析边坡土体的应力状态^[71]。根土复合体作为根系与土体的复合结构,根系的抗拉力、土体的剪切力及根土相互作用的摩阻力使根土复合体的强度明显提升。当边坡土体受到有害荷载作用时,加筋作用能起到协同受力并协调形变效果。无根土体受到荷载作用时,由土体单独承受荷载而产生变形,直到土体被破坏;有根土体受到同样大小荷载作用时,土体和根系共同承受且共同发生变形,但根系由于变形程度远小于土体,为了平衡变形差异,根系与土体之间产生摩擦力来制约土体的变形^[16]。所以在相同荷载作用下,根土复合体变形远小于无根土变形。若要使与无根土相同性质的根土复合体产生破坏,则需要更大的荷载,从而产生附加黏聚力,增强根土复合体的抗剪强度^[9]。有研究^[72-73]表明,加筋作用使草根黏聚力显著提高,而内摩擦角变化不明显。且草根加筋土存在最优含根量,当大于最优含根量时,加筋土强度主要受摩阻力影响,小于最优含根量时,草根数量决定加筋土强度。

综上所述,植物根系的加筋作用通过加筋理论增强根土复合体的抗剪强度,对抗剪强度参数中的黏聚力影响略显著,对内摩擦角变化不明显。而附加黏聚力及根系与土体之间相互作用的摩擦力则决定加筋作用的固土效果。

2.2 根土复合体水力学效应

根土复合体水力学效应的研究相对于土力学效应来说较少,但其研究内容也包括水分运移、入渗特性、基质吸力和土水特征曲线等。根土复合体使得植物根系对土体持水能力、入渗特性、基质吸力的影响更为显著,从而加强根系固土能力^[74]。

2.2.1 水分运移 植物吸收水分后,水分从根系运输到叶片上,而后在蒸腾作用下水分被散发到空气中。PHILIP^[75]首次提出 SPAC 系统概念,为水分运移和能量转换的动态过程奠定了基础,在土体—植物—水关系的研究方向上是一次重大的突破。随后学者们^[76]将 SPAC 系统进行扩展,提出 GSPAC 系统。

水分运移是在土体水动力学基础上,通过地下水、土体水、植物水和大气水相互转换的过程^[77]。其中,土体水分状况直接与植物根系的生长、发育相互影响、相互作用。土体水分的多少可能将影响植物根

系从根系形态等宏观几何特征到微生物含量等微观因素及植物根系生长发育各阶段的水分消耗,其根系根据生长发育不同阶段去改变水分消耗,进而反过来影响土体自身的含水情况^[78]。植物在 SPAC 系统中扮演“搬运者”作用,其负责从土体中吸收水分,把除了提供自身生长发育的多余水分通过蒸腾作用转移到大气中,从而使得水分循环使用^[79]。水分循环可以确保边坡土体有充足水分,预防土体中水分过多或者过少而引发的水土流失和泥石流等自然灾害。有研究^[80]发现,土水势和叶水势的增加使得土体水分减少,随即水分运移速率减小,从而干旱程度增加,株高、植物特征参数等都受到不同程度的影响,植物生长受到负面影响。

综上所述,鉴于根系吸收水分和土体水分的运动变化是 2 个相互影响和互补的过程。因此,要想对水分运移问题有进一步的了解,需综合考虑植物、大气和土体的相互作用。虽然土体水分运移研究对根土复合体起着重要的作用,但因其研究难度高,暂时只能处于定性的描述或用理论知识解决实际过程中所遇到的困难。水分运移研究从单学科走向多学科的交叉发展体现在 GSPAC 系统的研究,在一定程度上促进根土复合体从单一学科走向多学科研究。

2.2.2 入渗特性 土体本身具有导水性,称为土体入渗特性。农田灌溉水、地表流域降水等都要依靠土体进行运输,而地表径流、土体水、地下水的相互转化也都离不开土体的入渗特性^[81]。土体入渗特性是土体抵抗侵蚀能力及固土保水的重要指标,同时也是影响根土复合体的重要因素^[82]。

土体水分入渗本质是水分在土里不断渗入的过程,土体孔隙状况及水流通道对入渗速率的影响较大^[83]。根土复合体的根系通过影响土体理化性质等因素进而影响土体入渗特性。土体入渗特性的影响因素众多,如土体理化性质、根系形态等,同样对根土复合体的固土能力有着显著的影响。相关研究^[43,84]表明,植物根系生长将改善土体的理化性质和结构,提高土体入渗性能和稳定性,减小其容重,使得土体更加疏松多孔,通透性更好,从而大大增强植物的固土能力。而土体含水率则与土体的平均入渗率呈负相关,土体含水率越高,平均入渗率越低^[85]。植物生长发育过程中的水分大部分来自于根系吸收土体的水分,而平均入渗率降低使得植物的根系处于含水量相对稳定的状态,从而促进植物根系生长。根系生长过程中,不同倾斜角度的根系作用不同。水平根抑制水分下渗,倾斜根和垂直根则使浅层土体中水分流向深层土体,从而降低孔隙水压力,加强边坡稳定性^[86]。

综上所述,植物根系通过土体入渗特性影响因子间接影响土体入渗特性。入渗特性作为土体本身具有的特性,其对土体含水率有着显著影响,从而影响植物的生长发育。土体的理化性质等土体自身的性质以及根系形态等根系自身性质对入渗特性有一定的影响,且不同区域土体结构、研究方法不同,对其研究结果也存在一定的差异性。

2.2.3 基质吸力 基质吸力通常是描述非饱和土力学性质的重要参数,土体含水率与基质吸力的关系曲线即为水土特征曲线^[87]。基质吸力作为土体水力特性指标之一,在一定程度上影响植物根系的生长发育,决定着生态护坡的成功与否及其效益高低。

非饱和土将根据水土特征曲线的含水率来确定基质吸力,且认为基质吸力主要的影响因素为含水率和土体的孔隙大小^[88]。土体中孔隙减小,土体黏聚力因为基质吸力的减小而减小,从而降低边坡稳定性^[89]。而根系与土体之间含水量的差值即为根系的吸水能力,其影响着基质吸力^[90]。基质吸力对黏聚力和内摩擦角的影响直接影响根土复合体的抗剪强度,从而间接影响根土复合体的固土效应。基质吸力可以用来表示干湿循环中含水率和结构损伤的影响,从而得出黏聚力和内摩擦角对基质吸力的拟合关系,并且提出非饱和滑带土抗剪强度预测方法^[91]。所以,从非饱和土角度来看,基质吸力引发强度的变化^[91];而从根系特性角度来看,其同样对基质吸力产生影响。已有研究^[7]表明,灌木根土复合体基质吸力与根系分布参数 RLD(根长密度)和 RSAD(根表面密度)呈正相关,且存在最优含根密度,使得土体黏聚力达到峰值,从而影响抗剪强度。

综上所述,基质吸力作为研究水土特征曲线的重要指标,同时也影响着根土复合体的抗剪强度。根土复合体强度的改变有一部分原因是基质吸力发生了改变。而根土复合体作为自然界中非饱和土的一种,将其视为含根系的非饱和土,有助于基质吸力、含水率及抗剪强度的研究。

2.2.4 土水特征曲线 土水特征曲线(soil-water characteristic curve, SWCC)是描述基质吸力的重要指标,体现非饱和土的持水特性,被广泛应用于非饱和土的强度理论、渗流理论及本构模型^[87]。非饱和土受基质吸力的影响,土体内水汽处于动态的变化中,从而使得土水特征曲线也处于动态平衡之中,且瞬时条件与平衡条件下的土水特征曲线并不重合^[92-93]。

土水特征曲线的影响因素众多,内部因素为土的孔隙结构、含水率和基质吸力等,外部因素为土的温度、应力等^[94]。但土水特征曲线最主要的影响因素

为土体本身基质吸力及孔隙分布状态,基质吸力主要受周围温度和干湿度的影响,而土体孔隙分布状态除了受干湿度影响,还受压实度的影响^[87]。基质吸力和孔隙分布状态都受干湿度的影响,其最直观的表现是干湿交替对土水特征曲线的影响^[95]。土水特征曲线中的脱湿和吸湿曲线组成滞回环。在脱湿过程中,吸力增加使得大孔隙通过排水速率差对小孔隙形成气压,达到水—气平衡交界。而吸湿过程中,水分先填满小孔隙后再流入大孔隙^[96]。脱湿过程和吸湿过程的差异性在曲线上体现为吸湿曲线处于脱湿曲线的下方,在基质吸力相同的情况下,吸湿过程的含水率低于脱湿过程^[87]。所以,干湿交替对土水特征曲线最直观的影响就是土体水分的变化,且土体自身性质的不同将导致土水特征曲线存在差异。而土体中水分及其他性质不同,则对根土复合体土力和水力特性产生影响。具体表现为水分增加导致土体结构发生变化,基

质吸力降低,土体内摩擦角和黏聚力降低^[12]。
综上所述,土水特征曲线受基质吸力和土体孔隙结构影响最为明显,而根土复合体的土水力学效应同样也受土体自身性质的影响。土水特征曲线为根土复合体土水耦合效应的研究提供了基础。

3 根土复合体力学模型构建

植物根系固土不仅可以从力学作用加固边坡,还可以从水文作用加固边坡。该研究对植物根系固土的物理学模型和水力特性模型进行阐述。目前,根系固土物理学模型主要有 WU 和 WALDRON 模型(WU 模型)、纤维束根增强模型(FBM 模型)和根束增强模型(RBM 模型);水力特性方面的模型有无限边坡模型、VG 模型、HYDRUS-1D 模型、SWAP 模型和 Logistics 模型等。复合模型有非饱和和有效应力原理模型、双应力状态变量理论模型和非饱和土抗剪强度经验模型等。其优缺点及适用范围存在一定差异(表 2)。

表 2 根土复合体力学模型对比分析
Table 2 Comparative analysis of mechanical models of root soil composite

模型类型	模型名称	优点	缺点	适用范围
土力学模型	WU 模型 ^[97-98]	1.开创了力学模型的先例,通过土体抗剪强度预测值,量化根系固土的效果 2.计算简便,参数较少	1.假设过于理想化,简化了根系与土体之间相互作用,从而高估抗剪强度,低估边坡稳定性的安全系数 2.对精度要求不高	纤维状和小尺寸的根系;累计和连续的根直径分布;植物护坡抗剪强度的计算;评估根系土体黏聚力;预测土体加固等,适用范围最广
	FBM 模型 ^[99]	1.在复合材料领域是首创 2.比 WU 模型的预测值更接近直剪试验获得的结果 3.假设摒弃了 WU 模型根系同时断裂的条件,更符合实际	1.根密度的大小会影响其对抗剪强度值的预测 2.计算繁琐,模拟过程复杂 3.预测值还是高于实际结果 4.难以得到超过荷载峰值的应力—位移曲线 5.没有考虑由于不同刚度根直径等级而导致的载荷不均匀分布	部分纤维状和小尺寸的根系;须根系统的建模;合并直径间效果等,因其计算过程的复杂性,限制了应用,适用范围不广
	RBM 模型 ^[100-102]	1.预测精度较高。更科学合理 2.弥补了 WU 和 FBM 模型未考虑相关参数对土体抗剪强度的影响 3.可以产生荷载峰值后完整的应力—位移曲线	假设根系不存在相互作用,但是在实际中又不得不考虑根系之间的相互影响。如草本植物根系细且密,根系间相互影响明显	纤维状和小尺寸的根系;累计和连续的根直径分布等,具有较广的适用范围
	无限边坡稳定模型 ^[103-104]	F_s 取决于土体吸力、内摩擦角、黏聚力,包含水文以及土体力学性质,考虑全面	无法预测安全系数随深度的急剧变化	非饱和条件下的土体、评估诱发浅层平移滑坡的可能性和降水条件
	VG 模型 ^[105]	拟合效果良好	参数较多,且参数形式复杂	非饱和和水力传导度、土水特征曲线、土体水分滞留和导水率函数
水力学模型	HYDRUS-1D 模型 ^[106-107]	1.对土体含水率的模拟准确度较高 2.边界条件、输入输出变量灵活	对水分胁迫条件下蒸发的计算考虑不全	用于室内和田间试验中水分及溶质的运移模拟等方面
复合模型	土体—水—大气—植物模型 ^[108]	1.涉及范围广,耦合性强 2.边界条件灵活	不能用于多维的土体水分运动	植物边坡土体水动态特性
	Logistics 模型 ^[109-112]	1.应用范围广 2.线性关系隐蔽	只能预测量化 S 形曲线	土水特征曲线拟合
	非饱和和有效应力原理模型 ^[113]	最先提出,奠定了理论基础	1.饱和度对应关系和有效应力相关参数的物理意义不明确,不便于工程实际 2.对摩擦强度的影响无法体现	非饱和土的抗剪强度预测
	双应力状态变量理论模型 ^[114]	单独考虑基质吸力对强度的影响,方便于工程实际	1.土体非饱和到饱和状态的过渡无法表达 2.对摩擦强度的影响无法体现	非饱和土的抗剪强度预测
	非饱和土抗剪强度经验模型 ^[115]	参数通过土水特征曲线表达,方便于工程实际	对摩擦强度的影响无法体现	非饱和土的抗剪强度预测;土水特征曲线

3.1 根土复合体土力学模型

20 世纪 70 年代, WU^[97] 和 WALDRON^[98] 等通过室内直接剪切试验, 以摩尔—库仑准则中增加的额外黏聚力为基础, 根据根系与剪切面垂直的理想情况下的假设, 提出预测土体抗剪强度值, 从而达到定量计算根系固土效果, 现在学者统称为 WU 模型。其中, WU 考虑的是单根的情况, 表明 WU 在研究前期还没应用到根系同时破坏, 虽然在研究后期也是演变成根系同时破坏。而 WALDRON 在开始就是考虑群根的破坏, 说明 WU 的公式更加通用, 更适合从根到根束的扩展。在此基础上, 对 WWM 模型修改的概念上也不统一, WU 更偏向于简化模型, 强调应力到强度的简化思想。而 WALDRON 则是偏向于使模型复杂化, 强调根系应力而不是根系强度。虽然 WWM 模型缩写经常被用来指代 WU 和 WALDRON 根增强模型, 但 2 位先驱按照不同的概念和不同的方式修改自己的模型, 所以在研究其机制时应该进行区分^[116]。WU 模型可被视为静态模型, 因为当土体基质中包含的所有根系都达到其最大抗拉强度时, 它们可及时估算单一时刻的最大根系钢筋。当根表面积已知的前提下, 用单根纤维来代替一束纤维, 会导致拉出力的低估和纤维束所能承受的位移范围的高估, 从而降低模型的精确程度, 预测值与实测值误差偏大^[117]。

MEIJER^[99] 在 WU 模型基础之上又有新的发现, 建立基于根系渐进破坏理论的纤维束模型(FBM 模型)。FBM 模型是在 WU 模型的基础上做进一步的改进, 因此, 2 个模型的特点都是针对抗拉强度和根面积比等参数对固土能力的影响进行研究。FBM 将根部视为承受载荷的纤维, 载荷随着纤维断裂而重新分布, 并且考虑在剪切过程中张力的渐进根部破坏, 而不是同时破坏。虽然, FBM 模型相对于 WU 模型有新的提升, 但根束力—位移曲线在达到最大作用力之后不可用, 排除了对剩余拉力的估计, 其预测值和计算的不足等原因制约了它的使用。

SCHWARZ 等^[101-102] 考虑根系与土体相互作用是一个动态过程, 在 WU 模型和 FBM 模型的基础上, 又提出基于侧根破坏的根束增强模型(RBM 模型)。SCHWARZ 等^[118] 发现, 实际测量的位移—荷载曲线和模拟出来的曲线误差不大, 最大拉拔力实测值比模型预测值大 16%。一般而言, RBM 模型不会低估管束的拔出力, 误差为 10%~20%, 在预测精度上高于前面 2 个模型, 同时也避免 FBM 模型中必需的荷载重分配规律。与 WU 模型和 FBM 模型相比, RBM 模型将根系拔出并同时考虑垂直根和根的弯曲

和变形。该模型的主要特点是评估根系强度沿拔出长度的累积渐进移动, 同时根束被施加连续位移, 被认为是以位移控制加载过程的纤维束模型。RBM 模型的建立, 将进一步摒绝根系的固土机理, 物理学模型的建立也因其登上新的台阶。

综上所述, 根土复合体土力学模型偏向于边坡稳定性的根系增强, 对根土体土力学问题的研究比较多。侧重于通过预测值与实际值的对比来判断模型的精准度, 模型的发展是层层递进的, 通过量化试验得出的数值和分析研究中确定的关键因素和参数, 如根长、弹性模量和根土摩擦角等, 从而预测根系固土保水的效果。

3.2 根土复合体水力学模型

目前, 植物根系固土研究中通过水力学效应对边坡进行加固的研究还较少。学者们提出一些模型来量化水力学效应对边坡的加固效果。最常见的做法是通过水力学模型与稳定性模型来达到量化土体基质吸力、土体水分的变化及边坡安全系数的目的, 从而研究植物对边坡的水力学加固效应。

无限边坡模型常被用来研究根土复合体水力学效应。无限边坡稳定模型中边坡稳定性分析通常使用极限平衡法中的“安全系数”(Fs) 指标来表示稳定性^[103-104]。无限边坡模型主要是对浅层滑坡的模拟, Fs 指标对边坡贡献值是由内摩擦角、黏聚力和吸力来决定。通过对 Fs 的量化, 可直观地对水力学加固的植物边坡稳定性进行分析, 且 Fs 与滑动面的深度无关。因此, 以平行于坡面发展的浅破坏面为特征的破坏可能发生在任何深度。

Van Genuchten 模型(VG 模型)也常用来描述非饱和土体的水力特性。VG 模型作为 HYDRUS-1D 模型的子模型, 常用于土水特征曲线的拟合及处理非饱和水力传导度^[105]。同时, HYDRUS-1D 模型也可以用于模拟土体容重对水分入渗的影响。试验和模拟^[119] 结果表明, 其构建出的一维模型能很好地表示土体水分运移规律。相对于 VG 模型来说, HYDRUS-1D 模型模拟的范围更广, 其使用有限单元法, 模拟饱和—非饱和水热和溶质运移及根系吸水等过程, 从而分析实际生活中农田灌溉和环境污染等问题^[106-107]。而 SWAP(土体、水、大气和植物)模型与 HYDRUS-1D 模型有相似之处: (1) 一维的垂直定向模型; (2) 适用于可变饱和区; (3) 通过数值模拟求解 Richards 方程和溶质运移的对流扩散方程; (4) 量化吸力; (5) 边界条件灵活。SWAP 解决土体水流、地表水管理和植被发育之间的密切相互作用, 被用来模拟可变饱和土体中的土体水分运动^[108]。该模型的特点是通用的作物生长、上限条件及土体水、地下水

和地表水之间的相互作用。Logistic 模型也用于土水特征曲线的拟合, Logistic 曲线的特点是中间段增长速度较快, 开始和结束时段较为平缓, 呈现出“S”形, SWCC 在取特殊值情况下也呈现出“S”形, 与 Logistics 模型相对应^[109]。Logistics 模型中参数 a 、 b 的差异随着干湿交替的次数增加而减小, 从而使得 SWCC 的拟合更精确^[110-112]。陈雪冬等^[120]通过 WU、SWAP、无限边坡模型对额外黏聚力、基质吸力和 F_s 进行量化, 进而对植物边坡进行稳定性分析, 其量化后的结果可以很直观地看出水文和力学效应对边坡稳定性的相对贡献。同时, 考虑水文力学加固效应的 F_s 是只考虑力学效应的 1.43 倍, 且力学加固效果大约是水文加固效果的稀泥 2.00 倍。

综上所述, 根土复合体水力学模型侧重于研究水分和基质吸力变化方面的问题。其通过量化水力特性参数来处理数值模拟的数据, 量化后的数据可以很直观地进行对比, 从而达到判断模型固土保水的效果。

3.3 根土复合体复合力学模型

根土复合体的复合模型理论同时对根土复合体的土力特性和水力特性起到影响。广义有效应力原理通常有 ZHAO 等^[113]提出的单应力变量法(非饱和和有效应力原理)以及 TRAN 等^[114]提出的双应力变量法(双应力状态变量理论), 两者都广泛应用于非饱和土的研究中。

ZHAO 等的非饱和和有效应力原理和 TRAN 等的双应力有效原理都是预测土体抗剪强度的理论。他们将基质吸力的概念代入摩尔—库伦理论中, 通过基质吸力的变化引起抗剪强度的变化, 从而通过抗剪强度与含水率来表征非饱和土的强度特性。ZHAO 等的理论中, 对基质吸力影响的理解不够全面, 且饱和度对应关系和有效应力相关参数的物理意义不明确, 所以使得其实际应用中较为困难^[121]; TRAN 等的理论中将基质吸力对强度的影响单独考虑, 以正应力和基质吸力为变量, 认为抗剪强度由有效黏聚力、基质吸力和净法向应力组成, 对基质吸力影响理解较为全面, 但对饱和度的影响在理解上较为欠缺^[122]。其原因可能是因为双应力原理和有效应力原理在没有基质吸力情况下的衔接问题^[123]。两者预测结果接近, 但后者在实际应用更容易实现。由于研究的基质吸力较小, 两者都无法体现基质吸力对摩擦强度的影响, 只能体现对黏聚强度的影响^[91]。YIN 等^[115]在对非饱和土研究的基础上, 提出非饱和土抗剪强度经验模型。其将内摩擦角和体积含水率之间的关系通过双应力理论表现出来, 以此来预测抗剪强度。而内摩擦角等参数也可以通过土水特征曲线很好地表现出

来, 方便于实际工程的应用, 但基质吸力对摩擦强度的影响依旧不能很好地体现。

综上所述, 根土复合体复合模型通过基质吸力的变化来预测抗剪强度, 其涉及土力特性和水力特性, 为水土力学耦合效应的研究提供了基础。

4 结论

(1) 根土复合体概念及根系与土体之间力学作用。该研究从力学、复合材料及根系特性角度归纳分析根土复合体的概念, 认为根土复合体是根系与土体之间有着极强力学耦合关系的前提下, 根系在土体中交叉缠绕, 起到与纤维相似的加固作用, 从而形成一个根系与土体相互作用的复合结构; 植物根系侧重于通过自身宏观几何形态及土力作用和水力作用对土体强度产生影响, 而土体则是侧重于通过复合力学特性等根土复合体自身特性对植物根系特征及结构产生直接影响, 从而间接影响根土复合体的力学特性。根系与土体之间相互作用处于动态平衡中, 它们之间的力学关系实质上是根土复合体土力、水力及复合力学特性作用的一个结果。所以, 根系与土体之间力学关系的作用机理将是今后的研究热点。

(2) 根土复合体土—水力学效应机理及影响因素。该研究从根土复合体土力学和水力学效应对根土复合体力学效应进行阐述。土力学效应中, 侧重于植物根径等植物根系本身具有特征及根系与土体之间相互作用的性质对抗拉、抗剪特性和加筋作用的机理进行研究, 且大多数都是定性研究。水力学效应中, 侧重于研究土体中水分运动和持水能力对土体结构与理化性质和根系形态的影响, 通过土体中水分的变化影响植物的根系, 从而间接对根土复合体水力学方面的固坡效应产生影响。水分是影响根土复合体水力效应的最直观因素, 所以土—水力学效应机理及影响因素的研究仍然是未来的研究热点之一。

(3) 根土复合体模型特点及原理。根土复合体土力学模型偏向于通过试验和公式来构建根系与土体特性之间的关系, 其发展是逐层递进的关系, 构建的目的是以最准确、最简便的方法量化根系的增强。水力学模型是侧重于通过数值模拟去量化基于基质吸力的参数。两者都是通过参数间的比较来判断模型的精准度和加固效果, 从而进行根系固土保水的研究。而复合模型则是通过基质吸力去预测抗剪强度, 同时涉及土力特性和水力特性, 考虑全面, 为根土复合体土水力学耦合研究奠定了基础。复合模型的研究应是未来重点研究的方向。

5 展望

该研究基于国内外关于根土复合体研究的最新

成果,归纳分析植物根系与土体的力学关系、根土复合体力学特性及其力学模型的研究进展,但有 4 个方面还有待深入研究。

(1)冻融循环、干湿交替和干热循环对不同地区根土相互作用的影响。植物根系对边坡稳定具有显著影响,不同地区土体结构不同导致根系固土的作用效果也不同。而冻融循环、干湿交替和干热循环的研究侧重于对根土复合体自身土水特性和复合力学特性的影响,对带根土体中根土相互作用的研究相对缺乏。所以,今后对不同植物根土复合体的冻融循环、干湿交替和干热循环等研究有待加强。

(2)复合植物根土体的抗剪特性及影响机理。根土复合体抗剪强度的研究大多数都是对单一植物进行研究,且抗剪强度的研究多集中于对黏聚力和内摩擦角的研究。草本植物通过提高黏聚力来进行固土,而木本植物固土则是提高内摩擦角。因此,在多类型植物混种抗剪强度规律中,黏聚力和内摩擦角的关系是否和单一植物抗剪强度规律有关联,值得进一步研究和探索。

(3)化学、微生物等力学效应及影响机理。根土复合体力学特性的研究中,土力学侧重于根系的宏观几何特性对其机理的影响;水力学特性在较少研究的情况下,侧重于研究土体理化性质中的物理性质,化学性质相对于物理性质略少。而对根系分泌物与土体接触面的矿物质产生的化学作用及土体中微生物产生的力学效应的研究还较少。由于根系与土体之间相互作用处于动态变化状态,生物化学作用对土—水力学效应影响机理、与土水特性的关系及生物化学作用自身的影响机理仍然是今后研究中的一个重要方向。

(4)根土复合体的复合力学模型的构建。根土复合体复合模型及理论相对于土力、水力方面的模型及效应研究较少,复合模型的构建对于研究根土复合体土水力学耦合效应机理的研究具有重大意义。而现有的复合模型多集中于黏聚强度的影响,对于摩擦强度的影响略小,且多为一维的数学模型。因此,往后的研究中应该加强构建新的复合力学模型,使得模型在强度和维度等方面应用更为广泛。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [2] 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 the unconfined compressive strength of root-soil composites[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 106-111, 117.

- [3] 王一峰,屈丽琴,李建明,等.基于近二十年中国水土保持公报的水土流失治理分析[J].长江科学院院报,2023,40(7):59-65.
WANG Y F, QU L Q, LI J M, et al. Analysis of soil erosion control based on China Soil and Water Conservation Bulletin in the past 20 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(7): 59-65.
- [4] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
ZHOU D P, ZHANG J Y. Vegetation slope protection engineering technology[M]. Beijing: China Communication Press, 2003.
- [5] XU H, LI T B, CHEN J N, et al. Characteristics and applications of ecological soil substrate for rocky slope vegetation in cold and high-altitude areas[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 609: 446-455.
- [6] HUANG M Y, SUN S J, FENG K J, et al. Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, southeast China[J]. Catena, 2022, 210: e105883.
- [7] 黄钢,郑明新,王庆,等.鄂州航空港通渠河岸植物根系加固土体的机理[J].水土保持通报,2021,41(1):15-21,28.
HUANG G, ZHENG M X, WANG Q, et al. Mechanism of soil reinforcement by vegetation roots in canal of Ezhou Airport[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 15-21, 28.
- [8] CAO W, OMRAN B A, LEI Y K, et al. Studying early stage slope protection effects of vegetation communities for Xinnan Highway in China[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 87-98.
- [9] 姜志强,孙树林,程龙飞.根系固土作用及植物护坡稳定性分析[J].勘察科学技术,2005(4):12-14.
JIANG Z Q, SUN S L, CHENG L F. Analysis of roots in reinforcing soil and stabilizing slope[J]. Site Investigation Science and Technology, 2005(4): 12-14.
- [10] GONZALEZ-OLLAURI A, MICKOVSKI S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J]. Geoderma, 2017, 285: 141-150.
- [11] 余芹芹,乔娜,胡夏嵩,等.植物根—土复合体固坡力学效应及模型研究现状与进展[J].中国水土保持,2011(7):51-54,69.
YU Q Q, QIAO N, HU X S, et al. Slope fixation mechanical effects of plant root-soil composite system and present status and development of its model study[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(7): 51-54, 69.
- [12] 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.

- WU H W. Atmosphere-plant-soil interactions: Theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1-47.
- [13] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31-38.
- YANG Y C, MO Y J, WANG Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31-38.
- [14] 石明强. 高速公路边坡生态防护与植物固坡的力学分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- SHI M Q. Eco-protection and plant-mechanical analysis of expressway slope[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [15] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土作用数值分析[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增2): 80-84.
- SONG W F, CHEN L H, LIU X P. Numerical analysis on the effects of forest root system on soil reinforcement[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(S2): 80-84.
- [16] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177.
- ZHOU Y Y, CHEN J P, WANG X M. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [17] 单炜, 孙玉英, 王强, 等. 高等级公路边坡植物护坡机理与深根锚固作用[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(11): 59-60, 63.
- SHAN W, SUN Y Y, WANG Q, et al. Mechanism of biotechnical slope protection for highway slope and anchorage effect of deep-rooted plants [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(11): 59-60, 63.
- [18] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 335-353.
- [19] 言志信, 闫昌明, 王后裕. 植被护坡的根和土力学作用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(4): 436-440.
- YAN Z X, YAN C M, WANG H Y. Root and soil mechanics of vegetation slope protection [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2011, 41(4): 436-440.
- [20] 郭洋楠, 宫传刚, 杨剑, 等. 草本植物对边坡稳定性影响研究进展[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 841-849.
- GUO Y N, GONG C G, YANG J, et al. Research progress on influence of herbaceous vegetation on slope stability[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 841-849.
- [21] 伍红燕. 模拟边坡条件下不同植物根构型及其单根抗拉特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- WU H Y. Characteristics of root architecture and single root tensile of different plants under simulated slope conditions [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [22] 刘甜. 植物对西安市土遗址夯土的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- LIU T. The influence of plants on the rammed earth of earthen sites in Xi'an [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [23] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(增刊1): 100-104.
- MA Q Y, CHEN X L, WANG J, et al. Carbon content rate in constructive species of main forest types in Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(S1): 100-104.
- [24] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.
- QIU Y, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Biomass estimation modeling and adaptability analysis of organ allocation in six common shrub species in Tianshan Mountains forests, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7842-7851.
- [25] 陈文乐, 杜鹃, 方迎潮, 等. 泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 32-39.
- CHEN W L, DU J, FANG Y C, et al. Soil reinforcement effect of root systems of typical plants in areas with frequent debris flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 32-39.
- [26] 罗露瑶, 宋路, 朱海丽, 等. 根系参数对根土复合体抗剪力特性的影响[J]. 人民黄河, 2020, 42(10): 42-46.
- LUO L Y, SONG L, ZHU H L, et al. Influence of root parameters to the shear resistance of soil-root composite [J]. Yellow River, 2020, 42(10): 42-46.
- [27] 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.
- [28] 韩烈保, 王琼, 王晓蓓, 等. 不同立地条件下荆条根系分布规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 231-237.
- HAN L B, WANG Q, WANG X B, et al. Researches on root distribution of *Vitex negundo* var. *Heterophylla* (franch.) Rehd. on different sites conditions [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 231-237.
- [29] 杨路, 杜峰, 秦晶晶, 等. 黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 295-300, 310.
- YANG L, DU F, QIN J J, et al. Research on shear

- strengths of root-soil complexes of three dominant shrubs in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 295-300, 310.
- [30] 郑启萍, 徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(2): 225-228.
- ZHENG Q P, XU D Q. Experimental research on the mechanism of herb ecological slope protection and the effect of roots on slope reinforcement[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(2): 225-228.
- [31] LÖBMANN M T, TONIN R, WELLSTEIN C, et al. Determination of the surface-mat effect of grassland slopes as a measure for shallow slope stability[J]. Catena, 2020, 187: e104397.
- [32] 肖宏彬, 田青青, 李珍玉, 等. 林草混交根—土复合体的抗剪强度特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 1-5.
- XIAO H B, TIAN Q Q, LI Z Y, et al. Shear strength characteristics of root and soil composite formed from mixed forest and grass[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(2): 1-5.
- [33] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 144-152.
- LI J X, HE B H, CHEN Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 144-152.
- [34] 杨苑君. 华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- YANG Y J. Study on the root tensile properties and the soil shear properties of typical tree species in North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [35] 任柯. 草本根系固土的力学机制及对土质边坡浅表层稳定性影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- REN K. Study on the mechanical mechanism of grass-root soil consolidation and its influence on the stability of soil slope surface[D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [36] 胥子凡. 植物根系固土机理及边坡稳定性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- SUI Z F. Analysis of soil reinforcement mechanism and slope stability of plant root system[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.
- [37] ZHANG C B, ZHOU X, JIANG J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019, 172: 140-147.
- [38] 叶超, 郭忠录, 蔡崇法, 等. 5 种草本植物根系理化特性及其相关性[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 598-606.
- YE C, GUO Z L, CAI C F, et al. Relationship between root tensile mechanical properties and main chemical components of five herbaceous species[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 598-606.
- [39] 王程, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 黄河源区六种草本植物根系抗拔力特征及其影响因素研究[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 157-165.
- WANG C, HU X S, LIU C Y, et al. Study on the characteristics and influence factors of root pull-out resistance of six grasses in the source region of the Yellow River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 157-165.
- [40] BURYLO M, HUDEK C, REY F M. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. Catena, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [41] TARDIEU F, DRAYE X, JAVAUX M. Root water uptake and ideotypes of the root system: Whole-plant controls matter[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(9): 1-10.
- [42] 乔文英, 安琪琪, 常小峰, 等. 黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 69-76.
- QIAO W Y, AN Q Q, CHANG X F, et al. Effects of shrub encroachment on potential vegetation interception and soil water-holding capacity of grasslands on loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 69-76.
- [43] LE BISSONNAIS Y, PRIETO I, ROUMET C, et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: Effect of plant roots and soil characteristics[J]. Plant and Soil, 2018, 424(1): 303-317.
- [44] 张良德, 徐学选, 胡伟, 等. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 31-36.
- ZHANG L D, XU X X, HU W, et al. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in yangou watershed in the hilly region of the loess plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 31-36.
- [45] 徐华, 袁海莉, 王歆宇, 等. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 926-935.
- XU H, YUAN H L, WANG X Y, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 926-935.
- [46] 曹波, 曹志东, 王黎明, 等. 植物根系固土作用研究进展[J]. 水土保持应用技术, 2009(1): 26-28.
- CAO B, CAO Z D, WANG L M, et al. Research progress on soil consolidation of plant roots[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2009(1): 26-28.
- [47] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制

- 模式与力学试验研究[J].水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- CHENG H, YAN C S, LI J Q, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system[J].Research of Soil and Water Conservation,2006,13(1):62-65.
- [48] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):403-412.
- LI Y Z, FU J T, HU X S, et al. Experimental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(2):403-412.
- [49] 周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].武汉:中国地质大学,2010.
- ZHOU Y Y. Study on mechanism of soil reinforcement by roots and slope protection technology[D].Wuhan: China University of Geosciences,2010.
- [50] LI J, WANG X, JIA H X, et al. Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area[J].Natural Hazards,2022,112(3):2337-2360.
- [51] MAHANNOPKUL K, JOTISANKASA A. Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization[J].Journal of Mountain Science,2019,16(2):275-284.
- [52] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等.西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J].农业工程学报,2018,34(15):157-166.
- LIU Y B, LI S X, YU D M, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(15):157-166.
- [53] MENG S Y, ZHAO G Q, YANG Y Y. Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing[J].Advances in Civil Engineering,2020,2020:e8825828.
- [54] SONG S S, WANG Y Q, SUN B P, et al. Effects of root properties and branching characteristics on soil reinforcement in the Jinyun Mountain, China[J].Current Science,2018,114(6):e1250.
- [55] 何伟鹏,胡夏嵩,刘昌义,等.黄河源区不同禁牧年限对垂穗披碱草单根及其根—土复合体力学强度特征的影响[J].草业学报,2023,32(5):106-117.
- HE W P, HU X S, LIU C Y, et al. Impact of the different duration years of grazing prohibition on the mechanical strength characteristics of *Elymus nutans* roots and its composite systems in the Yellow River source region[J].Acta Prataculturae Sinica,2023,32(5):106-117.
- [56] 张春涛,马建刚,丁明净,等.蔓竹单根抗拉及根—土复合体抗剪特性[J].四川农业大学学报,2022,40(6):883-892.
- ZHANG C T, MA J G, DING M J, et al. Tensile properties of single root and shear properties of root-soil complex of *Bashania qiaojiaensis* Yi et J. Y. Shi[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2022,40(6):883-892.
- [57] 赵丽兵,张宝贵.紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9):7-12.
- ZHAO L B, ZHANG B G. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(9):7-12.
- [58] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带2种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- XU W X, YANG L, BAO Y H, et al. Tensile mechanical properties single root of two typical flood-tolerant herbs in the reservoir riparian zone[J].Research of Soil and Water Conservation,2020,27(5):259-264,272.
- [59] 张玉,朱海丽,张珂,等.3种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J].干旱区研究,2022,39(2):572-583.
- ZHANG Y, ZHU H L, ZHANG K, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of single root of three riparian plants[J].Arid Zone Research,2022,39(2):572-583.
- [60] 李宏斌,张旭,姚晨,等.陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究[J].水土保持研究,2023,30(4):122-129.
- LI H B, ZHANG X, YAO C, et al. Study on root tensile mechanical properties of six typical plants in the loess area of northern Shaanxi[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(4):122-129.
- [61] 朱清科,陈丽华,张东升,等.贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.
- ZHU Q K, CHEN L H, ZHANG D S, et al. Mechanisms of soil-reinforcement by roots in forest ecological systems in Gongga Mountain[J].Journal of Beijing Forestry University,2002,24(4):64-67.
- [62] 陈丽华,余新晓,张东升.整株林木垂向抗拉试验研究[J].资源科学,2004,26(增刊1):39-43.
- CHEN L H, YU X X, ZHANG D S. Experimental study on vertically tensile strength of whole tree[J].Resources Science,2004,26(S1):39-43.
- [63] 田佳,曹兵,及金楠,等.防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.
- TIAN J, CAO B, JI J N, et al. Biomechanical characteristics of root systems of *Hedysarum scoparium* and

- Salix psammophila* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 192-198.
- [64] YE C, GUO Z L, LI Z X, et al. The effect of Bahia-grass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China[J]. Geomorphology, 2017, 285: 82-93.
- [65] LI J, WANG X, JIA H X, et al. Assessing the soil moisture effects of planted vegetation on slope stability in shallow landslide-prone areas[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(7): 2551-2565.
- [66] 李志. 黏土边坡根—土复合体的力学性能分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- LI Z. Mechanical properties of root-soil composite system of clay slope [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [67] MAHANNOPKUL K, JOTISANKASA A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2): 500-516.
- [68] 王涵, 周成, 刘伟, 等. 植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2017, 49(增刊 1): 81-88.
- WANG H, ZHOU C, LIU W, et al. Shear test for root reinforced soil samples considering the inclination of roots[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(S1): 81-88.
- [69] 丰田, 李光范, 胡伟, 等. 乔木根土复合体的抗剪强度实验研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 517-523, 686.
- FENG T, LI G F, HU W, et al. Experimental study on the influence of arborwood root on the shear strength of root-soil composite[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(3): 517-523, 686.
- [70] 杨果林, 王永和. 加筋土筋材拉拔试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 51-54.
- YANG G L, WANG Y H. Study on pullout test of geosynthetics[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 51-54.
- [71] 周跃, 徐强, 骆华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应 II 野外直测[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 10-15.
- ZHOU Y, XU Q, LUO H S, et al. Traction effect of lateral roots of trees: II In situ direct rest[J]. Journal of Mountain Research, 1999, 17(1): 10-15.
- [72] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1405-1410.
- WANG Y Z, LIU X F, ZHANG Z K, et al. Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1405-1410.
- [73] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045.
- CHEN C F, LIU H X, LI Y P. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045.
- [74] 张伟伟, 江朝华, 程星, 等. 草本植物根系对黄河故道区非饱和土特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 73-78.
- ZHANG W W, JIANG C H, CHENG X, et al. Effects of root systems of herbs on characteristics of unsaturated soil in old course of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 73-78.
- [75] PHILIP J R. Plant water relations: Some physical aspects[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17: 245-268.
- [76] 莫兴国. 土壤—植被—大气系统水分能量传输模拟和验证[J]. 气象学报, 1998, 56(3): 323-332.
- MO X G. Modeling and validating water and energy transfer in soil vegetation atmosphere system[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, 56(3): 323-332.
- [77] 宫兆宁, 宫辉力, 邓伟, 等. 浅埋条件下地下水—土壤—植物—大气连续体中水分运移研究综述[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊 1): 365-373.
- GONG Z N, GONG H L, DENG W, et al. An overview of water movement in groundwater-soil-plant-atmosphere continuum with shallow water table [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(S1): 365-373.
- [78] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259.
- LIU C M, SUN R. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 251-259.
- [79] 王锐, 章新平, 戴军杰, 等. 亚热带针阔混交林土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中水稳定同位素特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1148-1157.
- WANG R, ZHANG X P, DAI J J, et al. Characteristics of water stable isotopes in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) in the needle-leaf and broad-leaf mixed forest in subtropical region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1148-1157.
- [80] 郭克贞, 佟长福, 郝和平, 等. 毛乌素沙地紫花苜蓿人工草地的水分运移与消耗研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 44-48.
- GUO K Z, TONG C F, HAO H P, et al. Research on water consuming process in alfalfa in Maowusu desert[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(6): 44-48.
- [81] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1-5.
- WU Q X, HAN B, LI Y Y. Characteristics of soil in-

- filtration in watersheds in loess hilly region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 1-5.
- [82] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.
- LÜ G, WU X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.
- [83] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 227-231.
- WANG G L, LIU G B. Effect of *Stipa bungeana* communities on soil infiltration in soil profile in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 227-231.
- [84] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713-722.
- TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713-722.
- [85] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持, 1987(9): 27-29.
- JIA Z J, WANG G P, LI J Y, et al. Study on the effect of soil moisture on runoff and infiltration into cropland on slopes[J]. Soil and Water Conservation in China, 1987(9): 27-29.
- [86] 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.
- [87] 陈留凤, 彭华. 干湿循环对硬黏土的土水特性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2337-2344.
- CHEN L F, PENG H. Experimental study on the water retention properties of the hard clay under cyclic suction conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2337-2344.
- [88] 李涛, 刘波, 杨伟红, 等. 基质吸力对重塑红黏土抗剪强度影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 375-381.
- LI T, LIU B, YANG W H, et al. Experimental research on the influence of matric suction on the shear strength of remolded red clay[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(3): 375-381.
- [89] YANG Y, SU C, YAN M J, et al. Modeling hydromechanical reinforcement of vegetation to improve the stability of a shallow slope[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 57(5): 422-428.
- [90] NI J J, LEUNG A K, NG C W W, et al. Investigation of plant growth and transpiration-induced matric suction under mixed grass-tree conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(4): 561-573.
- [91] 江强强, 徐杨青, 王浩, 等. 干湿循环对滑带土基质吸力与抗剪强度的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 959-970.
- JIANG Q Q, XU Y Q, WANG H, et al. Effect of drying-wetting cycles on matric suction and shear strength of slip zone soil[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 959-970.
- [92] TAO G L, LEI D, LIU L S, et al. Prediction of soil water characteristic curve based on soil water evaporation[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-14.
- [93] 马学宁, 张宇钦, 张沛云, 等. 反复干湿循环对重塑非饱和黄土力学特性影响[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(1): 1-6, 12.
- MA X N, ZHANG Y Q, ZHANG P Y, et al. Experimental research on the effect of repeated drying-wetting cycles on the mechanical properties of remolded unsaturated loess[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(1): 1-6, 12.
- [94] 刘小文, 叶云雪. 不同影响因素下非饱和红土土-水特征曲线的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 97-104.
- LIU X W, YE Y X. Experimental study of the soil-water characteristic curve of unsaturated laterite under different affecting factors[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(2): 97-104.
- [95] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- ZHANG F Z, CHEN X P. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41-46.
- [96] 贾升安, 李春阳, 黄海峰, 等. 基于土-水特征曲线试验的非饱和土强度预测[J]. 水运工程, 2022(12): 225-231.
- JIA S A, LI C Y, HUANG H F, et al. Strength prediction of unsaturated soil based on SWCC test[J]. Port and Waterway Engineering, 2022(12): 225-231.
- [97] WU T H. Root reinforcement of soil: Review of analytical models, test results, and applications to design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(3): 259-274.
- [98] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [99] MEIJER G J. A generic form of fibre bundle models for root reinforcement of soil[J]. Plant and Soil, 2021, 468(1): 45-65.
- [100] LIANG T, KNAPPETT J A, LEUNG A, et al. A critical evaluation of predictive models for rooted soil strength with application to predicting the seismic deformation of rooted slopes[J]. Landslides, 2020, 17(1): 93-109.
- [101] SCHWARZ M, RIST A, COHEN D, et al. Root re-

- inforcement of soils under compression[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(10): 2103-2120.
- [102] SCHWARZ M, PRETI F, GIADROSSICH F, et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3): 285-291.
- [103] ZIEHER T, SCHNEIDER-MUNTAU B, MERGILI M. Are real-world shallow landslides reproducible by physically-based models? Four test cases in the Late-rnser valley, Vorarlberg (Austria)[J]. *Landslides*, 2017, 14(6): 2009-2023.
- [104] YAO W M, LI C D, ZHAN H B, et al. Time-dependent slope stability during intense rainfall with stratified soil water content[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4805-4819.
- [105] NGO-CONG D, ANTILLE D L, TH VAN GENUCHTEN M, et al. A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(6): 1931-1945.
- [106] YANG Y L, CHEN Y W, CHEN J Y, et al. The applicability of HYDRUS-1D to infiltration of water-repellent soil at different depths[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(5): 2020-2032.
- [107] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(7): 1-25.
- [108] ROMANO N, PALLADINO M, CHIRICO G. Parameterization of a bucket model for soil-vegetation-atmosphere modeling under seasonal climatic regimes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 3877-3893.
- [109] 陈勇,王智炜,戴明月,等.干湿循环对土-水特征曲线影响的预测模型[J]. *工业建筑*, 2017, 47(12): 21-25, 95.
- CHEN Y, WANG Z W, DAI M Y, et al. Prediction model of soil-water characteristic curve considering the influence of drying-wetting cycles [J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(12): 21-25, 95.
- [110] BORDONI M, BITTELLI M, VALENTINO R, et al. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 283-305.
- [111] 余爱华. Logistic 模型的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- YU A H. A study on Logistic Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry Univetrstity, 2003.
- [112] 张川, 张玉锴, 李淑芳, 等. 干湿交替下木纤维重构红壤的水力特性[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 103-110.
- ZHANG C, ZHANG Y K, LI S F, et al. Hydraulic properties of the red soil with wood fiber reconstruction during dry-wet alternation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 103-110.
- [113] ZHAO C G, LIU Y, GAO F P. Work and energy equations and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(9): 920-936.
- [114] TRAN T P A, FREDLUND D G. Relationship of “fredlund-xing (1994) fitting parameters” to “anchor points” on soil-water characteristic curve [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2023, 53(3): 583-592.
- [115] YIN P H, VANAPALLI S K. Model for predicting tensile strength of unsaturated cohesionless soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(9): 1313-1333.
- [116] MAO Z. Root reinforcement models: Classification, criticism and perspectives [J]. *Plant and Soil*, 2022, 472(1): 17-28.
- [117] 及金楠, 田佳, 瞿文斌. 基于连续断裂过程的根系黏聚力 Wu 氏模型修正系数的确定 [J]. *林业科学*, 2017, 53(11): 170-178.
- JI J N, TIAN J, QU W B. Determination of correction coefficients of Wu's model of root cohesion based on successive fracture process [J]. *Scientia Silvae Sini-cae*, 2017, 53(11): 170-178.
- [118] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F2): e02007.
- [119] 孙增慧, 张扬, 王欢元. 基于 HYDRUS-1D 模型的土壤容重对水分入渗影响的研究 [J]. *土地开发工程研究*, 2017, 2(7): 20-27.
- SUN Z H, ZHANG Y, WANG H Y. Effect of soil bulk density on soil infiltration in land organic reconstruction based on HYDRUS-1D model [J]. *Land Development and Engineering Research*, 2017, 2(7): 20-27.

(下转第 196 页)

- [10] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 655-660.
DUAN D Y, OUYANG H. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 655-660.
- [11] 杨晔, 张明军, 张宇, 等. 基于氢氧稳定同位素的兰州南山绿化植物种选择: 以锦鸡儿为例[J]. 生态学报, 2023, 42(1): 83-90.
YANG Y, ZHANG M J, ZHANG Y, et al. Selection of greening plant species in the South Mountains of Lanzhou based on hydrogen and oxygen stable isotopes: A case study of *Caragana*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(1): 83-90.
- [12] WU Y J, DU T S, LI F S, et al. Quantification of maize water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope[J]. Agricultural Water Management, 2016, 168: 35-44.
- [13] 高阳, 韩磊, 柳利利, 等. 宁夏河东沙地不同坡度柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1212-1223.
GAO Y, HAN L, LIU L L, et al. Differences in water use strategies of *Caragana korshinskii* at different slopes in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1212-1223.
- [14] 岳伶俐, 夏雄, 胡德勇, 等. 基于氢氧同位素的油茶果实生长高峰期水分来源量化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 154-161.
YUE L L, XIA X, HU D Y, et al. Quantifying the water sources of *Camellia oleifera* during fruit growth peak period using hydrogen and oxygen isotopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 154-161.
- [15] WU W J, TAO Z, CHEN G J, et al. Phenology deter-
mines water use strategies of three economic tree species in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 312: e108716.
- [16] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 等. 基于双稳定同位素和 MixSIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6611-6622.
DU J S, MA Y, HU X N, et al. Applying dual stable isotopes and a MixSIAR model to determine root water uptake of winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6611-6622.
- [17] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [18] 郑淑惠, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
ZHENG S H, HOU F G, NI B L. Study on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806.
- [19] 毕银丽, 田乐煊, 柯增鸣. 接菌影响模拟重构土层水分分布及水同位素分馏[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 274-283.
BI Y L, TIAN L X, KE Z M. The inoculation affected the water distribution and isotope fractionation in the simulated reconstructed soil[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 274-283.
- [20] YU W S, YAO T D, TIAN L D, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2008, 87(2): 158-169.
- [21] 邢丹, 王震洪, 申刚, 等. 丛枝菌根真菌对岩溶区植物水分吸收利用的促进作用探讨[J]. 世界林业研究, 2019, 32(3): 24-29.
XING D, WANG Z H, SHEN G, et al. Promoting mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi on plants water absorption and utilization in Karst area[J]. World Forestry Research, 2019, 32(3): 24-29.
- (上接第 28 页)
- [120] 陈雪冬, 李尤亮, 杨旸. 植物根系对浅层边坡的水文学加固研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 33-40.
CHEN X D, LI Y L, YANG Y. Study on hydro-mechanical effect of plant roots on the shallow slope[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(1): 33-40.
- [121] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for λ for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 681-687.
- [122] DUAN X M, ZENG L F, SUN X. Generalized stress framework for unsaturated soil: Demonstration and discussion [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1459-1481.
- [123] 胡小荣, 路祥, 蔡晓峰. 非饱和黏性土的广义有效应力三剪弹塑性本构模型[J/OL]. 工程力学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20230216.1729.061.html>.
HU X R, LU X, CAI X F. The triple-shear unified constitutive model for unsaturated clays based on the generalized effective stress concept [J/OL]. Engineering Mechanics. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20230216.1729.061.html>.