

生态防护技术对稀土矿山边坡的固坡效果

陈飞^{1,2}, 钟连祥¹, 郭顺¹, 李小双¹

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: [目的] 探讨以狗牙根系和竹格为主要材料组成的生态护坡模式对离子型稀土矿山原地浸矿采场边坡的固坡效果及加筋效应, 为赣南地区稀土矿山采场边坡防治技术提供新的思路。[方法] 使用狗牙根与稀土矿砂质黏土构成的根—土复合体为研究对象, 通过直剪试验分析土壤含根量和含水率对抗剪强度的影响, 采用二维有限元法分析“竹格+狗牙根”的生态护坡模式对边坡稳定性的增强作用, 利用正交试验的直观分析法对竹桩间距、长度和直径支护参数进行优化。[结果] 植物根系可以显著提升土壤的黏聚力, 但对内摩擦角的影响较小。当含根量达到 0.5% 及以上时, 根—土复合体的抗剪强度增幅呈下降趋势, 即存在最优含根量。根系对 25% 含水率条件下的土体加筋效应最显著。该生态护坡模式能够显著增强边坡的稳定性, 当竹桩长度取 3 m, 间距 2.5 m, 直径 8 cm 时, 其防护效果最佳。[结论] 狗牙根根系在不同含水率、不同含根量条件下其加筋效果存在差异, “竹格+狗牙根”的生态护坡模式能够有效防止边坡浅层土的滑移。

关键词: 离子型稀土矿; 生态护坡结构; 直剪试验; 含根量; 含水率; 抗剪强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0132-05

中图分类号: X37

文献参数: 陈飞, 钟连祥, 郭顺, 等. 生态防护技术对稀土矿山边坡的固坡效果[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3):132-136. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.022; Chen Fei, Zhong Lianxiang, Guo Shun, et al. Effects of ecological protection technology on slope reinforcement of rare earth mine[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3):132-136.

Effects of Ecological Protection Technology on Slope Reinforcement of Rare Earth Mine

Chen Fei^{1,2}, Zhong Lianxiang¹, Guo Shun¹, Li Xiaoshuang¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: [Objective] The slope protection and reinforcement effect of ecological slope protection model consisting of *Cynodon dactylon* and bamboo lattice as the main material on the slope of ion-absorbed rare earth mines by in-situ leaching were explored in order to provide a new idea for the slope control technology of rare earth mines in Southern Jiangxi Province. [Methods] Root-soil composite systems of *C. dactylon* and rare earth mineral sandy clay were used as the research object. The influences of root amount and water content on shearing strength were analyzed by direct shear tests. The effect of ecological slope protection mode of “bamboo lattice+*C. dactylon*” slope stability was analyzed by two-dimensional finite element method. The support parameters of spacing, length and diameter of bamboo piles were optimized by visual analysis method of orthogonal experiment. [Results] Plant roots could significantly enhance soil cohesion, but had little effect on internal friction angle. When root weight reached 0.5% or more, the shear strength of root-soil composite decreased, there was an optima root content. Root system had the most significant effect on soil reinforcement under 25% water content. The ecological slope protection model could significantly enhance the stability of slope. When the length of the bamboo pile was 3 m, the spacing was 2.5 m and the

收稿日期: 2018-11-15

修回日期: 2019-01-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“边坡与地下开采耦合作用下岩体响应的演化特征及其动态效应研究”(41702327); 江西省教育厅科学技术研究项目“稀土矿山原地浸矿诱发滑坡滑带土力学性质变化规律研究”(GJJ16064); 赣州市专利技术实施转化项目“离子型稀土原地浸矿矿山滑坡防治技术”(2017019128)

第一作者: 陈飞(1969—), 男(汉族), 湖南省邵东县人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 180125110@qq.com。

diameter was 8 cm, the protection effect was the best. [Conclusion] The reinforcement effect of *C. dactylon* root systems is different under different water content and root amount. The ecological slope protection mode of “bamboo lattice+*C. dactylon*” can effectively prevent the slippage of shallow soil of slope.

Keywords: ion-absorbed rare earth ore; ecological slope protection structure; direct shear test; root amount; water content; shear strength

生态护坡是通过在坡面种植植物或配合工程措施,利用植物根系的加筋、锚固等作用对边坡浅层进行防护加固,使之既能满足对边坡浅层稳定的要求,又能恢复被破坏的自然生态环境的护坡方式^[1]。近几十年来,国内外学者通过不同的试验方法及数值模拟等手段对植物固土护坡的力学效应进行了大量的研究,研究表明:植物根系的加筋、锚固作用能够有效提高边坡的整体稳定性,其根—土复合体的抗剪强度在一定程度上与根系特征、根系含量和土体性质等因素有关^[2-9]。

原地浸矿法是通过浸矿剂(硫酸铵溶液)将吸附在天然埋藏条件下的风化矿体的稀土离子置换出来并回收稀土元素的新型采矿方法,是目前被人们普遍认可的开采技术^[10]。针对离子型稀土矿原地浸矿后边坡的破坏特征及边坡的稳定性分析已有较为广泛的研究,而植物对稀土矿山边坡的加固效应研究还较少。另外,离子型稀土矿山边坡经原地浸矿开采后,其土壤具有表层疏松、土层浅薄、土壤涵蓄水能力低和植被难以生长等特点^[11],在实际工程应用中,若单纯依靠植物护坡,由于植物生长初期根系尚未成型,边坡在经历一次又一次的雨水侵蚀后,不仅草籽容易被冲刷掉且边坡也易发生滑坡、水土流失及垮塌等地质灾害。因此,本文开展狗牙根根系与稀土矿山边坡砂质黏土的复合体抗剪强度试验研究,并探讨土壤含水率和含根量对抗剪强度的影响,在此基础上,构建一种以竹格为工程措施材料,狗牙根为生态护坡手段的“竹格+狗牙根”的生态护坡模式,分析原地浸矿采场边坡在该生态护坡模式防护下的稳定性状况,深入研究竹格中的竹桩长度、间距及直径对边坡整体稳定性的具体影响。本研究将生态环境和边坡防护能力有效结合起来,形成一个既能提高边坡整体稳定性,防治水土流失,又能维持生态平衡的生态护坡模式,以期对离子型稀土矿山的生态防护提供理论依据和新方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样取自江西省龙南县足洞河流域某废弃稀土矿山边坡表层的砂质黏土,取样深度为0.2~0.4 m,土样取回后,立即按照《公路土工试验方法标

准》对原状土进行物理性质指标的测定。经土工试验分析得出其天然含水率 ω 为25.39%(重量百分数),天然密度 ρ 为1.73 g/cm³,土粒比重 G_s 为2.69,液限 ω_l 为45.1%,塑限 ω_p 为28.6%,塑性指数为16.5。

试验选用的植物为离子型稀土矿山边坡常用的护坡植物狗牙根(*Cynodon dactylon*)。狗牙根为禾本科多年生地被植物,极耐热和抗旱,能够适应具有一定酸性的土壤,目前常被作为离子型稀土矿山边坡的防护植物。在研究区选取一块场地进行狗牙根的种植,待狗牙根生长5个月后采用整株挖掘法对狗牙根根系进行采集,将采集回来的根—土复合体中的根系取出,洗净根系表面其它杂质后,称其质量并用游标卡尺测其直径。本文定义整株挖掘法采集回来的狗牙根根系质量与土的质量的比值为根系质量分数,通过统计得出狗牙根根系质量分数为0.1%~1.5%,根系直径主要分布在0.5~1 mm。

1.2 试验方法

为探究在不同含根量和含水率条件下狗牙根根系对土体抗剪强度的影响,本次试验使用重塑土掺根制样进行直剪试验。试验处理因素有土壤含水率和掺根量,其中土壤含水率设3个水平:25%,28%,31%;掺根量设5个水平:0.0%,0.2%,0.5%,0.8%,1.1%。分15组(其中3组为不掺入根系的素土组),每组4个试样。这15组试样分别为在上述含水率梯度下分别掺入上述质量分数狗牙根根系的试样。采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的ZJ型应变控制式直剪仪对这15组试样分别在100,200,300,400 kPa的垂直压力下进行室内直剪试验,求得破坏时的剪应力,绘制剪应力和垂直压力的关系曲线,利用库仑定律 $\tau=c+\tan\varphi$ 求得试样的抗剪强度指标(黏聚力和内摩擦角)。

通过前期大量的试算,发现竹格中的竹桩长度、间距和直径这3个因素的变化对“竹格+狗牙根”生态护坡模式的固坡效果影响较为显著,因此通过在有限元边坡模型中改变竹桩长度、间距和直径这3个参数来探讨它们对支护效果的影响,并利用正交试验设计方法来寻找各个因素间的内在变化规律,因素水平的取值范围应能够反映实际的工程情况,这样正交试验出来的结果才具有实际意义,根据毛竹圆竹实际生长过程中所能达到的最大直径和毛竹圆竹在竹龄、竹

秆部位的力学性能变异规律并结合锚杆在边坡中的实际工程应用,综合确定竹桩长度的取值为 1, 2, 3 m, 竹桩水平间距的取值为 2, 2.5, 3 m, 竖直间距均为 2 m, 最下一排竹桩距坡底均为 1 m, 竹桩直径的取值为 8, 12, 16 cm。本文正交试验根据影响因素及其水平个数采用 4 因素 3 水平正交试验表, 多出的 1 个因素轮空不计。因素、因子取值及水平次序见表 1。

表 1 正交试验分析因素水平表

水平	竹桩长度/m	竹桩间距/m	竹桩直径/cm
1	1	2.0	8
2	2	2.5	12
3	3	3.0	16

1.3 试样制备

由于试验所用土样较松散,采集根—土复合体原状土相对困难,本次试验采用重塑土来制备试验所需的根—土复合体试样,为保证试验数据的可靠性,重塑土样的基本物理性质指标与原状土一致。

将风干后的狗牙根根系统一剪成 2 cm 的小段,然后按照原状土的天然密度、天然含水率和各试验组不同含根量要求称量土样与根系,试验所用的环刀尺寸高度 2 cm,直径 6.1 cm。为相对准确的模拟狗牙

根根系在土体中的随机生长状态,本试验采用一次性成样的方法制备根—土复合体试样,即将狗牙根根系均匀的拌入土中,然后用环刀制样,放入压样器中压实。

2 结果与分析

2.1 黏聚力、内摩擦角与含根量关系分析

图 1 为不同含水率条件下试样的黏聚力和內摩擦角随含根量不同的变化特征。由图 1 可知,同一含水率条件下,狗牙根根系加筋土的黏聚力 c 和內摩擦角 φ 随根系含量的增加而呈增大的趋势,当含根量从 0 增加到 1.1% 时,25% 含水率条件下,根系土的黏聚力从 11.52 kPa 增加到 25.37 kPa,黏聚力增量(用 Δc 表示)为 13.85 kPa,而內摩擦角的增量(用 $\Delta\varphi$ 表示)仅为 2.7° ;28% 含水率条件下,根系土的黏聚力从 8.27 kPa 增加到 20.1 kPa,增量 Δc 为 11.83 kPa,增量 $\Delta\varphi$ 为 2.2° ;31% 含水率条件下,根系土的黏聚力从 6.2 kPa 增加到 12.7 kPa,增量 Δc 为 6.5 kPa,增量 $\Delta\varphi$ 为 1.9° 。由上述分析可知,不论是根系土的黏聚力增量还是內摩擦角增量均随根系土含水率的增大而减小,在本试验设定的含水率梯度下,狗牙根根系对含水率为 25% 的土体加筋效果最显著。

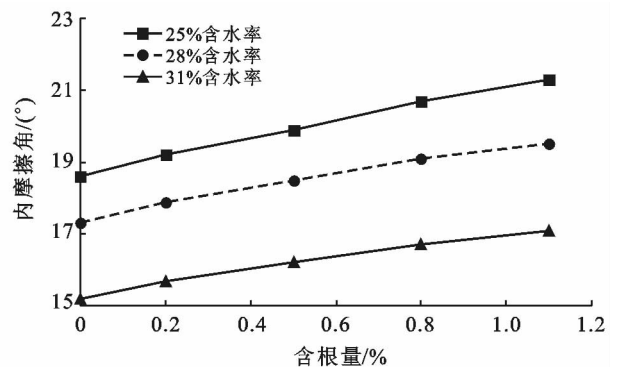
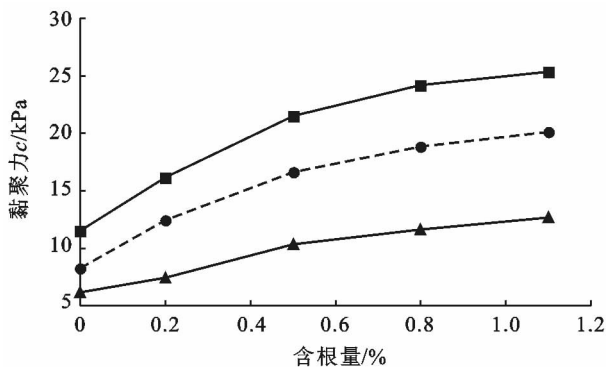


图 1 黏聚力、內摩擦角与含根量关系

另外从以上数据可以看出,在不同含水率条件下,随着根系含量的提高,土体黏聚力的提升作用均要显著强于內摩擦角,因此,根系对土体抗剪强度的提升主要是黏聚力增加的结果,这和张兴玲等^[12]、郑启萍等^[13]的研究结果是相一致的。分析其原因是因为试样中存在垂直根系,在剪切过程中剪切面必须通过根系,故根系对试样具有一定的约束作用,此外,根系的弹性模量和抗拉强度都要远远高于素土,当试样发生剪切破坏时,根系可以增加土体抵抗变形的能力,而对于內摩擦角 φ 来说,根系与土粒之间的接触

面积并不会因为根系含量的增加而显著增大,所以 φ 值受根系含量变化的影响较小。由图 1 还可以看出,在不同含水率条件下,根系土黏聚力在含根量达到 0.5% 时其增加幅度呈下降趋势,此时再增加根系含量并不能显著增强根系土的黏聚力,即存在一最优含根量。

由图 1 可知,试样的黏聚力和含水率呈负相关关系,即黏聚力随含水率的增大而降低,这是因为土粒与根系、土粒与土粒之间的胶结物质会随含水率的增大而被溶解,进而导致黏结力降低^[7]。当含水率由

25%增加到28%时,素土组的黏聚力从11.52 kPa下降到8.27 kPa,下降率为28%,当含水率由28%增加到31%时,试样黏聚力的下降率由素土组的25.03%增加到0.2%含根量的40.22%,表明当含水率增加到一定程度时,根系对土体的加筋效果显著减小。在有掺根时,如1.1%含根量的根系土黏聚力从25.37 kPa下降到20.10 kPa,下降率为20.7%,表明根系不仅具有显著的加筋作用而且可以减缓试验土体的水敏性。

2.2 “竹格+狗牙根”的生态护坡模式数值模拟分析

2.2.1 “竹格”式生态防护结构简介

本文在考虑原地浸矿采场边坡立地条件的基础上,构建一种适合植物生长和能够增强边坡稳定性的“竹格”式生态防护结构,提出了“狗牙根+竹格”的生态护坡模式,在发挥狗牙根的加筋作用及生态环境效应的同时,“竹格”既能够保证狗牙根的正常生长,又可以增强边坡的整体稳定性。

“竹格”式生态防护结构由竹子格构框架、竹桩和竹子排水管3部分组成。其具有以下特点:

(1) 竹子格构框架和竹桩、竹子排水管连接后可在边坡表层形成一柔性支护结构,不仅能够有效防止边坡表层土的滑移,在一定程度还可以降低雨水对坡面的冲刷作用。

(2) 竹桩和竹子排水管打入土层后,起到一定的挤土效应,对于表层土壤松散的稀土矿边坡具有积极的作用,能够提高其土体的抗剪强度,进而提高边坡的整体稳定性,另外,草籽基材置于竹桩内能够避免雨水对草籽的直接冲刷,竹桩内的基材满足植物生长所需的养分,克服了稀土矿边坡土壤呈酸性,土层浅

薄,保水能力差,植物难以生长的特点,同时待植物成功长成后,根系可以通过竹桩开的孔洞深入土层内,进而与护坡结构及土层形成一牢固的柔性保护层,具有较强的抗拉和抗剪能力,起到显著的加筋作用,并能够抑制地表径流及减缓雨水对坡面的冲刷,进而防止水土流失和提高边坡的整体稳定性。

2.2.2 计算模型

以江西省龙南县足洞河流域某废弃稀土矿山边坡为研究对象,采用二维平面应变模型分析“竹格+狗牙根”的生态护坡模式对边坡稳定性的影响。

土体采用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型和Mohr-Coulomb破坏准则,将狗牙根根土复合体视为均质材料进行模拟分析^[14],厚度为30 cm。已有研究表明不论是竹片还是圆竹均有较强的抗压、抗剪和抗弯能力^[15],因此采用梁单元模拟竹桩。

拟研究边坡坡高8 m,坡比1:1.5,通过对该区域地勘资料的分析,该边坡岩土层自上而下依次可分为砂质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和基岩,其中砂质黏土厚约0.5~2.6 m,全风化层厚约5~11 m,强风化层厚约1.8~3.2 m。根据郑颖人等^[16]对有限元法中边坡计算范围的建议,本文边坡有限元模型坡脚距离右端边界的距离为坡高的1.5倍,坡顶距离左端边界的距离为坡高的2.5倍,上下边界总高为2倍坡高。

2.2.3 计算参数

根据前期素土和狗牙根根土复合体室内直剪试验结果,本文选取25%含水率和1.1%含根量情况下的抗剪强度力学指标,竹桩力学参数的选取采用张丹等^[15]的研究成果。具体物理力学参数见表2。

表2 物理力学计算参数

序号	名称	重度	泊松比 μ	弹性模量 mPa	黏聚力 kp	内摩擦角/(°)
1	砂质黏土	17.3	0.20	6.5	11.52	18.6
2	全风化花岗岩	18.8	0.25	35.8	18.80	19.0
3	强风化花岗岩	29.0	0.28	54.2	43.50	48.0
4	基岩	32.0	0.30	73.6	55.00	51.0
5	竹桩	7.9	0.38	5 000.0	—	—
6	根土复合体	19.0	0.25	602.5	25.37	21.3

2.2.4 模拟结果分析

在进行正交试验之前,本文依托理正岩土6.5和Midas软件分别采用极限平衡法和强度折减法对上述计算模型在无支护情况下的安全系数进行了计算,极限平衡法计算出的安全系数 F_s 为1.461,采用强度折减法计算出的安全系数 F_s 为1.525,两者安全系数的差值仅为0.064,说明采用强度折减法对本计算模型进行分析其结果是可靠的,

当仅采用狗牙根根系护坡时,利用强度折减法计算出的安全系数 F_s 为1.532,表明狗牙根根系对边坡虽能起到一定的加固作用,但效果不是很明显,这是因为其根系主要分布在边坡浅层,所能影响的区域主要为坡面以下30 cm范围内。

本文依据上述计算模型和 $L_9(3^4)$ 正交试验方案,采用Midas GTS NX软件中的强度折减法对该边

坡进行数值模拟分析,选取稳定性安全系数 F_s 作为本次正交试验的评价指标,并利用正交试验方法的直观分析法对数值模拟结果进行分析,直观分析结果见表 3。

表 3 正交试验与极差分析结果

试验序列	竹桩长度/m	竹桩间距/m	竹桩直径/cm	安全系数 F_s
1	1	2.0	8	1.557 8
2	1	2.5	12	1.556 2
3	1	3.0	16	1.550 0
4	2	2.0	12	1.618 7
5	2	2.5	16	1.624 2
6	2	3.0	8	1.624 2
7	3	2.0	16	1.680 1
8	3	2.5	8	1.682 4
9	3	3.0	12	1.685 5
均值 1	1.555	1.619	1.621	
均值 2	1.622	1.621	1.620	
均值 3	1.683	1.620	1.618	
极差	0.128	0.002	0.003	
因子主次	竹桩长度 > 竹桩直径 > 竹桩间距			

由表 3 可知,竹桩长度、竹桩直径和竹桩间距对边坡稳定的敏感性依次减小,当竹桩长度取值 3.0 m,竹桩间距取值 2.5 m,竹桩直径取值 8 cm 时,安全系数为较优取值水平,由此可以得出,竹桩间距并不是越小越好,当间距取得过密时可能引起群桩效应,反而不利于边坡的稳定,其可能存在一最优间距,本文经直观分析得出竹桩间距最优值在 2.5 m 附近。由于竹桩取材于圆竹,当直径越大时,空心直径越大,反而影响其力学性质,因此竹桩直径不宜取得过大,当然也不是越小越好。

有限元分析结果表明,素土边坡的塑性滑移主要出现在砂质黏土和全风化花岗岩的交界处,而对于“竹格+狗牙根”(竹桩长 3 m,间距 2.5 m,直径 8 cm)防护下的边坡,其塑性滑移带则出现在更深的土层中,表明“竹格+狗牙根”的生态护坡模式能够限制边坡坡面的剪切变形及有效防止边坡表层土的滑移。

3 结论

(1) 狗牙根根系在一定程度上能够显著提高离子型稀土矿边坡表层砂质黏土的黏聚力 c 值,而对内摩擦角 φ 值影响较小,且黏聚力 c 值随着含根量的增加而增大,但其增加幅度在含根量达到 0.5% 时呈下降趋势,此时再增加根系含量并不能显著增强根系土的黏聚力,即存在一最优含根量。

(2) 根系土的黏聚力随含水率的增加而降低,即黏聚力 c 与含水率呈负相关关系,本文通过对不同含水率条件下根系土直剪试验分析,得出狗牙根根系对含水率为 25% 的土体加筋效果最好,在实际工程应用中,应建立有效的排水系统,避免边坡在降雨条件下受到雨水长时间的浸泡。

(3) 由于狗牙根根系主要分布在边坡浅层,所能影响的区域主要为坡面以下 30 cm 范围内,其对边坡整体稳定性的影响较小,当仅采用狗牙根根系防护边坡时,其安全系数相对于素土边坡仅提高了 2.6%,因此,对于自稳能力不好的边坡不能仅依靠草本植物来提高边坡的稳定性。

(4) 数值模拟和正交实验分析结果表明“竹格+狗牙根”的生态护坡模式能够显著提高边坡的稳定性安全系数,从而有效防止边坡表层土的滑移。针对本文选取的典型边坡,“竹格”式生态护坡结构中竹桩的合理参数为:竹桩长度 3.0 m,竹桩间距 2.5 m,竹桩直径 8 cm。

(5) 本文提出的“竹格”式生态护坡结构具有提高边坡整体稳定性,减缓坡面冲刷,利于植物生长,施工简单及造价低廉的特点,拥有一定的推广应用价值。

直剪试验研究表明,在不同含根量和含水率条件下,植物根系的存在均能够显著提高土体的黏聚力,初步总结出了不同含水率、不同含根量对土体黏聚力和内摩擦角的影响规律,针对离子型稀土矿边坡土壤具有表层疏松、土层浅薄、土壤涵蓄水能力低和植被难以生长等特点,构建了一种新型的“竹格”式生态防护结构,提出了“竹格+狗牙根”的生态护坡模式,利用数值模拟分析法对该生态护坡模式的防护效果进行了评价并通过正交试验对“竹格”式生态护坡结构中的竹桩参数进行了优化,能够为试验区及相似地区浅层边坡的生态防护提供理论依据和技术方法。本文没有对不同含水率条件下的边坡进行稳定性分析,今后应对该方面进行深入的研究,为边坡的生态防护提供更加科学的理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 方诗圣,姚鑫,谭张琴,等. 草本植物根系对高液限土的加固效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 43-47.
- [2] 廖晶晶,罗绪强,罗光杰,等. 三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 118-122.
- [3] 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.

- logical response of *Cyperus alternifolius* exposed to PhACs in microcosm constructed wetlands[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016,301:566-575.
- [8] Xian Qiming, Hu Lixia, Chen Hancheng, et al. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system [J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(12):2657-2661.
- [9] Nye P. Changes of pH across the rhizosphere induced by roots[J]. Plant and Soil, 1981,61(1/2):7-26.
- [10] Troelstra S R, Van Dijk K, Blacquièrre T. Effects of N source on proton excretion, ionic balance and growth of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertner: Comparison of N₂ fixation with single and mixed sources of NO₃ and NH₄ [J]. Plant and Soil, 1985,84(3):361-385.
- [11] 狄廷均,朱毅勇,仇美华,等.水稻根系细胞膜 H⁺-ATPase 对铵硝营养的响应差异[J].中国水稻科学,2007,21(4):360-366.
- [12] 高大文,彭永臻,王淑莹. SBR 法处理豆制品废水过程中 ORP 与 COD 的相关性[J]. 给水排水,2002,28(9):40-43.
- [13] 尹连庆,谷瑞华.人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J].环境工程,2008,26(S1):151-155.
- [14] 李欢,吴蔚,罗芳丽,等.4种挺水植物、4种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较[J].湿地科学,2016,14(2):163-172.
- [15] Chen Jinfeng, Xu Huilian, Sun Yingbo, et al. Inter-specific differences in growth response and tolerance to the antibiotic sulfadiazine in ten clonal wetland plants in South China [J]. Science of the Total Environment, 2016,543(PartA):197-205.
- [16] Michelini L, Reichel R, Werner W, et al. Sulfadiazine uptake and effects on *Salix fragilis* L. and *Zea mays* L. plants [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012,223(8):5243-5257.
- [17] 金彩霞,朱雯斐,郭桦,等.毫米级根际微域磺胺嘧啶的降解动态研究[J].环境科学学报,2014,34(8):2085-2093.

(上接第 136 页)

- [4] Lin Derguey, Huang Borshun, Lin Shinwei. 3-D numerical investigation into the shear strength of the soil-root system of Malcino bamboo and its effect on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2010,36(8):992-1006.
- [5] 赵玉娇,胡夏嵩,刘昌义,等.寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度试验研究[J].水土保持研究,2016,23(4):212-220.
- [6] 万娟,肖衡林,何俊.多花木兰根系抗拉特性及边坡稳定性分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):109-113.
- [7] 陈航,张慧莉,田堪良,等.紫穗槐根系对黄土边坡加固作用的试验研究[J].人民黄河,2017,39(10):84-88.
- [8] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [9] 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.
- [10] 陈飞,吴亚星,高阳,等.复合挡土结构在稀土矿山滑坡防治中的应用研究[J].中国稀土学报,2015,33(6):761-768.
- [11] 彭冬水.赣南稀土矿水土流失特点及防治技术[J].亚热带水土保持,2005,17(3):14-15.
- [12] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- [13] 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.
- [14] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
- [15] 张丹,王戈,张文福,等.毛竹圆竹力学性能的研究[J].中南林业科技大学学报,2012,32(7):119-123.
- [16] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.