

郝红超,李富平,鲁明星,等.植物根系在矿区生态修复中的应用研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(5):19-22.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.006

植物根系在矿区生态修复中的应用研究进展

郝红超¹,李富平¹,鲁明星²,张博文¹

(1.华北理工大学矿业工程学院,河北唐山 063210;2.唐山学院土木工程学院,河北唐山 063000)

摘要:矿山开采在最大规模改变地形地貌的同时也严重破坏了地表的植被生境,为矿山生态环境治理带来巨大的困扰。绿色植物作为生物圈的初级生产者,是矿区生态修复的主导力量。通过分析矿区生态修复中重金属污染、干旱、高温、岩土体结构等逆境条件下植物根系的研究现状,以及根系分泌物改善根际环境,强化植物抗逆性能的特点,指出矿区生态修复应把握矿区水分、养分等限制条件,从植物根系构型、生理及结构特征等角度出发,考虑植物根系的反馈调节作用与环境因子胁迫,为未来生态修复的研究提供明确的研究方向。

关键词:矿区生态修复;植物根系;逆境胁迫;根系分泌物

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0019-04

矿山开采严重改变了矿山原有地貌形态与植被景观,其露天开采形成了大量裸露创面和凹陷采坑;地下开采造成严重的地表沉陷和地面变形;同时采选工程产生的大量废石尾砂堆积,不仅占用大量土地,而且受冻融、温变、干湿、地表径流、地下渗流、动植物扰动等众多因素的影响,还可能引发水土流失、重金属污染、局地气候异常等环境问题。因此当前矿山生态环境严重恶化,亟须对环境破坏区域进行生态修复。植物修复是矿区生态修复的重要生物措施,通过筛选适生植

物进行先锋植物定植,进而推动植物群落结构初步演替,逐步改善矿山环境,以期初步实现矿区生态修复。而植物根系是植物体与自然界物质能量交换的主要通道,将植物根系的研究成果应用于矿区生态修复具有一定的前瞻性,因此以矿山环境条件为基础,展开植物根系对矿区恶劣生境的适生性研究,对筛选优势物种,修复矿山生态环境具有重要的意义。

1 采矿污染物对植物根系的影响

矿山开采选冶过程中,矿石中的重金属元素会随废石、尾砂等进入矿区及其周边土壤中^[1],加剧土壤的重金属污染,毒害周边农作物进而危害人类健康。采矿活动是土壤重金属的主要来源,我国已经有 743 万 hm^2 土地受到破坏,并以每年 4 万 hm^2 的速度增长^[2]。我国每年约有 60 万 t 石油进入环境^[3],石油污染区别于其他固体矿产资源污染,受土壤毛细

收稿日期:2017-09-11

基金项目:河北省重点研发计划(编号:16234204D)。

作者简介:郝红超(1993—),男,硕士研究生,主要从事岩土工程与矿区生态修复方面的研究。E-mail:1361007236@qq.com。

通信作者:李富平,教授,研究方向为矿区生态恢复与重建。E-mail:tsxyhk@163.com。

[28] 聂新辉,尤春源,鲍健,等.基于关联分析的新陆早棉花品种农艺和纤维品质性状优异等位基因挖掘[J].中国农业科学,2015,48(15):2891-2910.

[29] Li C Q, Ai N J, Zhu Y J, et al. Association mapping and favourable allele exploration for plant architecture traits in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) accessions[J]. Journal of Agricultural Science, 2016, 154(4):567-583.

[30] 汤飞宇,莫旺成,王晓芳,等.陆地棉株型性状对皮棉产量的遗传贡献分析[J].中国农学通报,2010,26(23):151-156.

[31] 杨王玉,周桂生,陈源,等.高产棉花株型与产量关系的研究[J].江苏农业科学,2001(2):29-32.

[32] 陈德华,陈秀良,顾万荣,等.高产条件下泗棉3号棉铃增重与株型关系的研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2003,24(4):71-74,89.

[33] 刘继国,陈振武,包秀红.棉花不同品种株型结构对产量的影响研究[J].辽宁农业科学,2004(3):11-14.

[34] 汤飞宇,莫旺成,王晓芳,等.高品质陆地棉与转 *Bt* 基因抗虫棉杂交株型性状的遗传及与产量性状的关系[J].中国农学通报,2011,27(1):79-83.

[35] 李成奇,王清连,彭武丽,等.陆地棉杂交 F_2 代主要农艺性状与

皮棉产量的关系分析[J].贵州农业科学,2010,38(9):14-16,21.

[36] 付远志,李鹏云,王浩丽,等.陆地棉品种(系)资源株型性状与皮棉产量的关系[J].西南农业学报,2016,29(9):2063-2067.

[37] 王新坤,潘兆娥,孙君灵,等.陆地棉矮秆突变体株高和纤维品质的 QTL 定位及相关性研究[J].核农学报,2011,25(3):448-455.

[38] 杜雄明,刘国强.棉花不同果枝类型组间 F_2 代的分离及遗传分析[J].河南农业大学学报,1997,31(1):39-43,74.

[39] Wang Y H, Li J Y. Genes controlling plant architecture[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2006, 17(2):123-129.

[40] Xue W, Xing Y, Weng X, et al. Natural variation in *Ghd7* is an important regulator of heading date and yield potential in rice[J]. Nature Genetics, 2008, 40(6):761-767.

[41] 刘海静,韩赞平,库丽霞,等.玉米株型相关基因 *ZmDwarf4* 的克隆及表达分析[J].玉米科学,2014,22(2):22-27,34.

[42] Peleman J D, van der Voort J R. Breeding by design[J]. Trends in Plant Science, 2003, 8(7):330-334.

[43] 王健康,李慧慧,张学才,等.中国作物分子设计育种[J].作物学报,2011,37(2):191-201.

孔隙力和流体重力等影响,迅速阻断耕作层一定深度处土壤的通透性,损害土层结构,胁迫微生物生长并进一步破坏根际环境。邓绍云等研究表明石油会减少土壤有效氮、磷的含量,损害甚至阻断植物营养源^[4]。

利用某些耐受性强、富集能力强的植物,对土壤污染物进行提取、转移、吸收分解或固定,实现部分或全部土壤污染的去除。把土壤重金属的直接处理转为对耐性植物的处理,Chaney 首次采用能够富集土壤重金属的植物进行重金属污染修复^[5]。利用耐性植物的根系来过滤、吸收污染土壤中的重金属,将植物收获处理以达到修复土壤重金属的目的^[6]。Wong 指出植物是修复重金属污染土壤的最佳措施^[7]。要筛选适宜修复重金属污染的超富集植物,就应从植物本身的耐性指数和根系对重金属的滞留率等因素着手研究。郝希超对 24 种牧草进行铈胁迫下的种子萌发分析,再通过盆栽措施考察优势牧草在铈胁迫下的苗期生长及铈富集情况,发现有 7 种牧草种子在铈胁迫下具有较好的发芽能力,不同铈浓度条件下牧草各品种之间的生长差异显著,对比结果显示多花黑麦草转移系数较高^[8]。Giovanni 等发现植物根尖部位的根毛区对土壤 Cd^{2+} 具有较强的吸收能力^[9]。高等植物杨树、曼陀罗、茄科植物、狐尾藻等均可以从土壤和水溶液中迅速吸收 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)并在体内迅速代谢为高极性的 2-氨基-4,6-二硝基甲苯及脱氨基化合物,以至于在这些植物体内很难检测到 TNT 的母体化合物^[3]。因此促进植物根系增长,增大植物根长和根表面积,增强植物根系活性是植物根系修复污染土壤的关键问题。

在根际土壤中增加特定物质可促进植物根系对土壤污染物的吸收与修复能力。王玉红发现阴离子表面活性剂能够有效促进紫花苜蓿各部位对 DDTs 的吸收,其促进作用要显著强于阳离子表面活性剂。通过对土壤添加不同浓度的碳酸氢钠发现在植物修复有机氯类农药时,可以通过改变土壤酸碱度来提高植物对污染物的修复效率^[10]。潘声旺等发现蚯蚓活动促进了菲污染土壤中修复植物的生长,植物根冠比明显增大,蚯蚓活动可以强化土壤-植物系统对土壤菲污染的修复作用^[11]。陈英旭等研究萝卜根叶内重金属存在的化学形态、含量等,发现柠檬酸对铅,酒石酸对镉有较明显的解毒作用^[12]。

2 干旱与高温对植物根系的胁迫研究

矿山大多干旱少雨,夏季炎热高温,土壤水分匮乏,矿区植物常处于干旱和高温的双重胁迫中,研究发现植物受高温、干旱双重胁迫时,光合生理特征与单一胁迫下差异显著,高焕晔等发现高温胁迫与中度干旱胁迫下植物蒸腾速率明显升高,重度干旱胁迫下则大幅下降^[13]。干旱会干扰植物的各种生理代谢过程,进而影响植物营养生长的各个阶段。干旱胁迫会严重抑制植物根系吸水 and 吸收养分的能力,植物对干旱胁迫的反应主要体现在渗透调节、激素作用和膜系统保护酶 3 个方面^[14]。李从娟等研究 5 种植物对干旱贫瘠的环境适应机制,在降低根际 pH 值、提高有机质含量及养分利用策略上呈现出不同特征,且均表现出不同程度的根际效应^[15]。吴敏等发现轻度干旱胁迫可以促进栓皮栎幼苗细根生物量的累积,但中度重度胁迫会严重影响植物根系的生理活性^[16]。因此干旱会抑制植物

根系的新陈代谢,降低酶活性,减缓植物养分汲取从而影响植物的生长和发育。因此研究植物的抗旱性与根系的相互关系对干旱区植被的恢复意义重大。李少朋等采用 AM 真菌改良矿区土壤后,发现接种 AMF 真菌可以促进玉米对矿质养分的吸收,缓解干旱对玉米生长的不利影响,提高玉米植株根际土壤有机质的含量。Wang 等发现 AMF 可以促进植物体对于矿质养分和水分的吸收,改善根际土壤微环境^[17]。

温度是影响植物生长发育及各种生理过程的重要生态因子,也是矿区生态修复过程中植物生长与群落结构演替的重要限制因素。高温胁迫对植物细胞膜伤害、生理生化活动的影响对保护性酶、渗透调节物的抑制等已严重影响植物的分布生长和环境生产力的提升^[18-19]。韩文辉研究指出再生水对高温胁迫下高羊茅的根系生长有明显的促进作用,使其保持较强的生理优势,对多年生黑麦草及草地早熟禾具有不同程度的抑制作用^[20]。金蕊发现在高温胁迫下,狗牙根差异表达的基因数目和蛋白数目均显著大于干旱胁迫下的数目,干旱和高温双重胁迫对 2 种 C_4 植物造成的伤害都远远大于干旱或高温单一胁迫^[21]。孟令波等发现高温使黄瓜主根变长、变细,一二级侧根增多,根系趋于须根化^[22]。曲复宁等研究指出高温胁迫会严重影响仙来客植物根系活力和根吸收能力^[23],使得植物生理活动受到抑制。杜永吉等研究发现臭椿、刺槐、紫穗槐及侧柏 4 种植物的高温耐受力依次增大,不同植物受到高温胁迫的伤害程度因物种、胁迫温度、胁迫时间的不同而不同,胁迫温度与时间互为条件^[24]。高温胁迫研究主要是在人工气候室环境下进行,暂且不能说是高温引发其他环境因子变化对植物生理的综合影响^[19]。植物细胞凋亡是植物生长发育的必要阶段,也是植株抵御侵染、适应环境的重要手段。石庆华等发现高温胁迫会影响早稻根系质膜 NH_4^+ 吸收过程,抑制 ATPase 活性^[25]。陈双臣等研究发现高温胁迫诱导抗氧化酶和胁迫相关基因的表达,延缓植株根系的衰老与死亡,高温诱导番茄植株细胞程序性死亡^[26]。曾庆飞等发现在黑麦草属植物中导入高羊茅 S-腺苷甲硫氨酸脱羧酶基因后其转基因植株抗旱耐热能力明显提高^[27]。

高温和干旱胁迫会严重抑制植物根系功能的发挥,影响植物生长发育的过程,但一定胁迫温度、水分胁迫程度和胁迫时间下添加外源物质(水杨酸、脯氨酸、N-6-苄基腺嘌呤、脱落酸、茉莉酸等)可以提高根系活力,增强植物生理活动,降低植物热害指数^[28-30]。同时,通过研究耐性植物抗旱抗高温基因特性并将相关基因转录应用到耐性植物基因改良上也将是解决干旱高温区域矿山生态修复难题的创新方向^[31-32]。

3 岩土体与植物根系的互作研究

矿山恶劣岩土生境生态修复技术中高陡边坡多采用藤本植物速生遮挡、客土喷混植生、钻孔植藤、飘台飞挂等措施,缓坡多是乔灌木配植防护和鱼鳞坑植树种草美化,底平台常采用客土培肥耕地草地再生等。研究发现高陡岩壁、巨型废石山和尾矿库等岩土体结构复杂,严重影响植物的生长与根系的拓展。裸露山体的生态修复是一个系统、综合、复杂的系统工程^[33],植物发达的根系网络交错纵横可以握裹土壤,保护边坡的客土层、喷混植生层,风化岩石层等生长基质,而且植物根系还可以吸收岩石裂隙内的深层水分,维持机体生命力。

研究表明植生基质层的稳定性是边坡生态修复的关键,其稳定性主要在于客土层的抗侵蚀性和抗滑动性。刘强等通过研究有限长生态边坡,发现客土越长,客土越厚,边坡越容易失稳^[34]。杨俊杰等采用无限坡模型与直线滑动面破坏模型分析客土基质层稳定性,并对现有边坡参数计算稳定安全系数^[35]。舒安平等模拟计算抗剪型和摩擦型根系作用力,实测客土喷播工程发现根系产生的抗剪强度由抗剪型根系和摩擦型根系提供,植被恢复初期的 3~5 年内客土稳定性系数与植被恢复期成明显的正相关^[36]。根系的存在可以对土层结构产生稳定作用,植被对水土保持作用主要是植物茎叶水文效应和下部根系锚索作用构成,植被与边坡的作用力与植物的生长周期和物种类型紧密相关,护坡植物多为草本植物和木本植物,植物根系一般分为直根型和须根型,木本植物深根系锚固岩土体,草本植物浅根系(须根)加筋岩土体^[37]。肖本林等研究发现根系通过根-土界面摩擦力把土中的剪应力转换成根的拉应力^[38]。朱锦奇等发现根土复合体模型会高估根系增强土壤的抗剪强度,不同的植物根型对增强抗剪强度差异显著^[39]。

植物根系固土护坡主要通过乔灌草立体配植、深根浅根植物与冷季暖季型植物结合,对边坡实现深层锚固与浅层加筋效果。因此研究护坡植物的配置方式、根群密度与空间分布、根系构型及根系抗拉拔力学特征等是后续研究根土体互作过程,促进植物根系加固边坡岩土体的关键。

4 根系分泌物的研究

植物根系是释放植物生物信号的通道,根系分泌物中含有大量化感活性物质,可为土壤动物微生物提供能量和碳源。何冰等发现土壤钾素活化的过程通过有机配体络合和氢离子酸化溶解,替换土壤矿物晶格中的钾的持续过程^[40]。杨利宁等发现苜蓿根系分泌物可提高土壤有效磷含量,活化土壤有效钙^[41]。肖本林等发现根系在生长时分泌了大量高分子聚合物,将其表面附近的土颗粒聚集起来,从而抵抗边坡土体受水流等因素的侵蚀^[38]。Chaparro 等发现拟南芥根际微生物功能基因的表达模式与同时期拟南芥根系分泌物分泌模式显著相关^[42]。李娇等研究发现粗枝云杉根系对土壤非根际土微生物量碳和氮及功能群磷脂脂肪酸含量具有正根际效应^[43]。吴林坤等研究发现根系分泌物可以影响植物与植物生长发育相关的特异微生物的互作过程^[44]。

研究表明植物根系分泌的化感物质在土壤中迁移、吸附-解吸附、降解行为是化感物质积累的重要过程^[45]。植物通过根系分泌物种类和数量变化影响根际微环境,通过释放根系分泌物调节根际环境,促进植物生长。因此可以利用根系分泌物改善土壤质量,提升植物耐受性,修复污染的土壤^[46]。Inskeep 等发现氨基酸和有机酸主要与土壤中的铅、砷、锌、铬等重金属元素进行活化反应^[47]。有研究发现根系分泌物有机酸可改变根际 pH 值、氧化还原电位,镉迁移影响,也可与 Cd^{2+} 直接络合,抑制其跨膜运输,减少植物镉伤害^[48]。还有研究发现根际 pH 值升高有利于 Cd^{2+} 的固定,迁移减少,毒性降低,pH 值降低则相反^[49]。Huang 等研究发现芥菜分泌的有机酸含量与其吸收的铀含量正相关^[50]。

根系分泌物是植物根系释放生物信号、传输物质与能量

的主要通道,因此研究植物-土壤-微生物三者间的“对话机制”可充分了解根系分泌物的介导作用。近年来根际生物学不断发展,质谱技术、生物传感技术等推动根系分泌物的研究,由于根系分泌物的种类众多,含量微小,根际环境微妙,如何收集检测还很难。植物分泌物具有改变土壤质地,提高植物养分吸收效率,植物反馈调节信号传导,化感及保护等重要功能^[44]。根分泌物的生理层面和分子层面的研究对提高逆境植物抗性意义重大,因此可针对采用基因组学和各种宏组学技术进行植物与微生物的互作机制研究,推进根系分泌物的研究。

5 展望

矿山有诸多不利于植物生长发育的环境因素,因此矿区生态修复过程就是植物耐受性与矿山逆境的相互对抗和相互影响下的植物生长发育,改变适应矿山逆境的过程,是植物根系对土壤水分、温度、重金属及岩土体结构等恶劣条件的响应过程。矿区逆境条件胁迫下植物根系养分水分吸收部位、吸收形态、吸收途径及其吸收方式决定矿区生态修复过程中植物生长发育的过程与群落演替进程。植物单根和群根根系系统的生长发育过程、相互作用及其对矿山逆境适应与反馈调节机制是耐性植物筛选及其适应矿山逆境条件的必要过程。植物根系地下分布特征主要表现为植物根系构型,根系构型是影响植物生产,根系自身的物理结构与力学特征决定了其与周边岩土的结合方式,根群的交错分布和种间种内相互竞争关系决定着植物根系固土护坡的力学与生态学效果。研究发现丛枝菌根真菌、根瘤菌、植物根际促生菌等根际微生物可以调控植物根系构型,影响植物生理与生态过程,同时根际生物互作过程可影响岩石土壤中矿物养分的活化。根际分泌物影响根据微生物的种类及分布等根际微环境特征,植物根系与根际生物及其所处的微环境密切相关,基因组学和各种宏组学技术有助于植物与微生物的互作机制研究和了解植物-生物-根际微环境三者的动态变化过程。

因此,根系水分养分吸收与利用效率的研究,根系与根群的生长发育过程、根群的交错分布及种间种内相互竞争关系的研究,根系构型、根系物理生理特征、根群分布等与岩土体相互关系的研究,根与根际生物和微环境的互作机制等方面问题的研究将是矿区生态修复过程中植物根系研究的重要发展方向。

参考文献:

- [1]王显炜,徐友宁,杨敏,等.国内外矿山土壤重金属污染风险评估方法综述[J].中国矿业,2009,18(10):54-56.
- [2]毕亚凡,徐俊虎.矿山重金属污染土壤的植物修复技术[J].武汉工程大学学报,2012,34(10):28-31.
- [3]李兆君,马国瑞.有机污染物污染土壤环境的植物修复机理[J].土壤通报,2005,36(3):436-439.
- [4]邓绍云,徐学义,邱清华.我国石油污染土壤修复研究现状与展望[J].北方园艺,2012(14):184-190.
- [5]Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents. [J]. Land Treatment of Hazardous Wastes, 1983, 6:50-70.
- [6]林琦.重金属污染土壤植物修复的根际机理[D].杭州:浙江大学,2002.

- [7] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2003, 50 (6): 775–780.
- [8] 郝希超, 陈晓明, 罗学刚, 等. 不同牧草在铀胁迫下生长及铀富集的比较研究[J]. *核农学报*, 2016, 30(3): 548–555.
- [9] Giovanni D, Silvia F, Silvia M, et al. How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression. [J]. *Journal of integrative plant biology*, 2008, 50(10): 80–1268.
- [10] 王玉红. 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 对有机氯农药 DDT 污染土壤的修复研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [11] 潘声旺, 李玲, 袁馨. 蚯蚓对植物修复永久性有机污染物的影响[J]. *成都大学学报 (自然科学版)*, 2010, 29(3): 189–194.
- [12] 陈英旭, 林琦, 陆芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(4): 467–472.
- [13] 高焕峰, 宗学风, 吕俊, 等. 高温干旱双重胁迫下水稻灌浆结实期的光合生理变化[J]. *三峡生态环境监测*, 2018, 3(2): 68–76.
- [14] 王霞, 侯平, 尹林克. 植物对干旱胁迫的适应机理[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(2): 42–46.
- [15] 李从娟, 李彦, 马健, 等. 干旱区植物根际土壤养分状况的对比研究[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 222–228.
- [16] 吴敏, 张文辉, 周建云, 等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4223–4233.
- [17] Wang M S, Huang Q X, Fan L M, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35 (1): 7–14.
- [18] 商侃侃, 张德顺, 王铖. 高温胁迫下植物抗性生理研究进展[J]. *园林科技*, 2008, 1(1): 1–5, 42.
- [19] 张哲, 闵红梅, 夏关均, 等. 高温胁迫对植物生理影响研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(16): 8338–8339, 8342.
- [20] 韩文辉. 再生水灌溉对高温胁迫下草坪草根系生长及抗氧化系统的影响[J]. *环境工程*, 2013, 31(S1): 713–715, 738.
- [21] 金蕊. C₄ 植物马齿苋和狗牙根应答干旱高温双重胁迫机理的研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉植物园), 2016.
- [22] 孟令波, 秦智伟, 李淑敏. 高温胁迫对黄瓜幼苗根系生长的影响[J]. *园艺学报*, 2003, 30(6): 694.
- [23] 曲复宁, 王云山, 张敏, 等. 高温胁迫对仙客来根系活力和叶片生化指标的影响[J]. *华北农学报*, 2002, 17(2): 127–131.
- [24] 杜永吉, 张成梁. 煤矸石山耐高温植被恢复种筛选研究[J]. *林业科技*, 2009, 17(3): 16–18.
- [25] 石庆华, 李木英, 许锦彪, 等. 高温胁迫对早稻根系质膜 ATPase 活性及 NH₄⁺ 吸收的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(7): 1044–1048.
- [26] 陈双臣, 崔金霞, 丁建刚, 等. 高温胁迫诱导番茄根系程序性死亡和相关基因表达[C]. 中国园艺学会庆祝中国园艺学会创建 80 周年暨第 11 次全国会员代表大会论文摘要集, 2009: 113.
- [27] 曾庆飞, 韦鑫, 蔡一鸣, 等. 过表达 FaSAMDC 基因提高黑麦草属植物的抗旱性和耐热性[J]. *草业学报*, 2017, 26(12): 117–127.
- [28] 江林玲, 马永甫, 杨丙贤, 等. 水杨酸对温度胁迫下紫御谷幼苗根系活力及根系形态指标的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(1): 174–177.
- [29] 王府学, 狄红梅, 张春风, 等. 外源激素对高温胁迫下仙客来根系活力的影响[J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(3): 472–474.
- [30] 池浩. 3 种外源物质对根际高温胁迫下黄瓜幼苗生理特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [31] 吴广锡, 魏峡, 唐晓飞, 等. 大豆热激转录因子 GmHsFA1 对高温和干旱信号的表达反应[J]. *分子植物育种*, 2013, 11(1): 62–71.
- [32] 张玉秀, 徐进, 王校, 等. 植物抗旱和耐重金属基因工程研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1631–1639.
- [33] 丰瞻, 许文年, 李少丽, 等. 基于恢复生态学理论的裸露山体生态修复模式研究[J]. *中国水土保持*, 2008, 313(4): 27–30, 64.
- [34] 刘强, 杨俊杰, 刘红军, 等. 有限长生态边坡客土稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 1): 3264–3269.
- [35] 杨俊杰, 王亮, 郑建国, 等. 生态边坡客土稳定性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 414–422.
- [36] 舒安平, 高小虎, 舒晓锐. 岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性分析[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 184–188.
- [37] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(11): 2220–2225.
- [38] 肖本林, 罗寿龙, 邓友生, 等. 根系生态护坡的机理及试验研究[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2011, 38(5): 19–23.
- [39] 朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 449–458.
- [40] 何冰, 杨铁钊, 薛刚. 植物根系分泌物对土壤钾素活化的化学模拟研究[C]. 中国作物学会 2013 年学会学术论文摘要集, 2013: 129.
- [41] 杨利宁, 敖特根, 白银, 等. 苜蓿根系分泌物对土壤中难溶性磷的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(8): 1216–1221.
- [42] Chaparro J M, Badri D V, Bakker M G, et al. Root exudation of phytochemicals in arabidopsis follows specific patterns that are developmentally programmed and correlate with soil microbial functions[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e5573331.
- [43] 李娇, 蒋先敏, 尹华军, 等. 不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 325–332.
- [44] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298–310.
- [45] 王延平, 王华田. 植物根分泌的化感物质及其在土壤中的环境行为[J]. *土壤通报*, 2010(2): 501–507.
- [46] 徐杰伟, 郭佳, 赵敏, 等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(6): 1137–1148.
- [47] Inskeep W P, Comfort S D. Thermodynamic predictions for the effects of root exudates on metal speciation in the rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1986, 9(3): 567–586.
- [48] Qi T, Hou D, Yang X, et al. Oxalate secretion from the root apex of sedum alfredii contributes to hyper accumulation of Cd[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 139–152.
- [49] Pinto A P, Simoes I, Mota A M. Cadmium impact on root exudates of sorghum and maize plants a speciation study[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(10): 1746–1755.
- [50] Huang J W, Blaylock M J, Yoram K, et al. Phytoremediation of uranium-contaminated soils role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plants[J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(13): 2004–2008.