

重金属和有机污染土壤植物增效修复技术研究进展

王银, 王光辉*, 胡苏杭 (东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西南昌 330013)

摘要 目前, 土壤重金属和有机物污染状况愈发严重, 受到了越来越多国内外学者的关注。植物修复技术是新近发展起来的一项用于处理土壤重金属、有机物污染的绿色技术, 也是当前研究的热点领域。该文综述了植物修复技术在重金属、有机物及重金属-有机物复合污染土壤修复治理中的应用, 包括整合诱导修复、表面活性剂增效修复等, 最后提出该技术目前存在的一些问题及发展方向。

关键词 植物修复; 土壤; 重金属; 有机污染物

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)16-05074-03

Application of Enhanced Phytoremediation in Contaminated Soil by Heavy Metals and Organic Pollutants

WANG Yin, WANG Guang-hui et al (College of Water Resource and Environmental Engineering, East-China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013)

Abstract The situation of soils contamination by heavy metals and organic pollutants is very severe, which has been currently received more and more attention of scholars at home and abroad. Phytoremediation is widely viewed as a green technology used to deal with heavy metals and organic compounds from the polluted soils, which is also the current hot research field. This paper reviews the application of phytoremediation in contaminated soil by heavy metals, organic pollutants and heavy metal-organic complex, including chelate-induced repair, surfactant enhanced remediation, and finally proposes the existing problems and the development direction.

Key words Phytoremediation; Soil; Heavy metals; Organic pollutants

近年来, 随着世界经济的不断发展, 人们生活水平日益提高, 越来越多的有毒、有害物质进入土壤中, 对土壤环境造成极大的污染与破坏。目前, 我国受重金属污染的农田约 2 000 万 hm^2 , 每年因土壤受到污染而造成的粮食减产高达 1 000 多万 t, 经济损失巨大。另外, 因多环芳烃、石油烃等主要有机污染物而造成的耕地污染近 3 600 万 hm^2 , 其中农药污染面积高达 1 600 万 hm^2 , 主要的农产品农药残留超标率高达 16% ~ 20%^[1]。这些污染物质的存在对土壤生态系统的结构、功能产生直接影响, 亦对人类健康构成巨大的威胁^[2-3]。因此, 复合污染土壤的修复是目前亟待解决的重要环境问题。

所谓土壤复合污染, 可定义为 2 种或 2 种以上污染物共存于土壤中, 同时它们的浓度超过国家土壤环境质量标准或已达到影响土壤环境质量水平的土壤污染^[4]。土壤复合污染形式多样, 包括无机复合污染、有机物复合污染以及无机-有机复合污染等。重金属(HM)和多环芳烃(PAHs)是常见的易被发现共存于土壤中的 2 种典型的污染物, 是无机-有机复合污染土壤的典型代表之一, 亦是当前国内外广泛研究的热点。

1 复合污染土壤的植物修复

复合污染是土壤污染的普遍存在形式。目前, 土壤污染的修复治理通常采用物理或化学的技术手段, 用时较短, 治理效果较理想, 但相关成本费用较高, 且易对环境造成二次污染。相比传统的治理方法, 生物修复方法中植物修复技术操作相对简单, 修复成本低, 具有良好的生态协调性, 不易产生二次污染。这是目前具有广阔的发展前景的土壤修复技

术之一^[5]。

2 植物对重金属的修复机理

2.1 植物提取 植物提取作用是指利用环境中重金属的积累或超积累植物吸收土壤中的重金属, 将其从土壤中萃取并转运到地上部分, 进而达到减少土壤中重金属含量的目标^[6-7]。土壤中的重金属通常以不同的存在形态存在, 并且各自的生物有效性不尽相同。植物提取的效率主要取决于植物对土壤中重金属有效态的吸收^[8]。

2.2 植物挥发 植物挥发即利用植物将土壤中重金属转化为气态, 进而从土壤与植物叶面挥发出来^[9]。这主要适用于一些易形成挥发态的重金属元素, 例如 Se 和 Hg^[10]。

2.3 植物过滤 植物过滤是指利于植物根系的吸附与吸收作用从重金属污染土壤中去除重金属^[11]。

2.4 植物稳定 植物稳定是利用植物将土壤中重金属转化为无毒或低毒性形态^[12](生物无效态), 减少重金属在土壤的淋滤与转移, 但并未减少土壤中重金属的含量。

3 植物对有机物的修复机理

3.1 植物吸收 植物可以直接吸收土壤中的有机污染物。有机污染物进入植物体内后, 一部分可以储存于植物组织中; 另一部分会通过植物的蒸腾作用散失到空气环境中; 大部分有机污染物在植物的生长代谢过程中被降解去除或转变为低毒性的化合物^[13-15]。影响植物吸收积累土壤中有机污染物的因素有土壤类型、有机物自身理化性质、所选植物种属等^[16]。有研究表明, 植物吸收的效果与植物的脂肪含量呈正相关^[17-19]。辛醇-水分配系数(K_{ow})是有机污染物的一个重要理化性质。戴树桂等^[20]研究指出, $\lg K_{ow}$ 为 1 ~ 4 的有机物更利于植物修复。

3.2 植物分泌物和酶的降解作用 植物分泌物是指植物根系在生长代谢过程中向外环境释放的物质总称, 包括酶在内。根系分泌物可以改善土壤生态环境, 利于土壤中土著微生物的正常生长繁殖, 进而促进微生物对有机污染物的降

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41261078); 江西省自然科学基金资助项目(20114BAB203029); 江西省教育厅科技计划资助项目(GJJ12374)。

作者简介 王银(1989-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向: 环境修复。* 通讯作者, 教授, 博士, 从事环境修复、水污染控制方面的研究。

收稿日期 2014-05-08

解。另一方面,植物特有酶也可以直接降解相关的有机污染物。

3.3 根际微生物的降解作用 根际微生物在有机污染物的降解过程中扮演极其重要的角色。鉴于植物根系的存在,土壤中的微生物数量和活性比非根际土壤明显增加,可加速土壤中有有机污染物的降解。此外,一些共生的菌根真菌和其他的共生微生物对有机物可以起矿化作用^[21-22]。

4 重金属-有机物复合污染土壤修复的强化措施

土壤中有有机物和重金属的生物有效性在很大程度上决定植物的修复效果。重金属进入土壤后会与土壤中的有机质产生络合,沉淀或吸附在土壤颗粒表面而难以被植物吸收;对于一些疏水性有机物,因其水溶性差而导致它们的生物有效性较低,不利于植物吸收代谢,限制了修复效果。鉴于此,可以采取一些强化措施来提高植物吸收积累污染物质的能力,进而改善植物修复效率。

4.1 表面活性剂 表面活性剂可以促进土壤中有有机污染物解吸而进入土壤溶液,提高生物可利用度,因而常被用作有机污染土壤植物修复的强化剂。Tween 80 对土壤中 DDTs 有较好的去除效果。在 10 000 mg/L 浓度条件下,Tween 80 对 DDTs 的去除率最高为 72%,DDTs 含量由 2 780 mg/kg 降至 778 mg/kg,且洗脱后土壤中残留的 Tween 80 易解吸去除^[23]。

目前,常用的表面活性剂多为人为合成,主要包括阴、非离子表面活性剂等。Cheng 等^[24] 研究指出,非离子表面活性剂 Tween 80 可以强化长穗偃麦草对土壤中 PAHs 的降解。吴咏琪等^[25] 则研究指出,阴离子表面活性剂(SDBS)对菲的洗脱效果优于非离子表面活性剂(TX100)。

在实际的土壤修复应用中,单一的表面活性剂因其增溶洗脱效率较低而受到限制^[26]。研究指出,阴-非离子混合表面活性剂的相关性质在一些方面要优于单一表面活性剂。Yang 等^[27] 比较研究了阴-非离子混合表面活性剂 SDBS-TX100 与相应的单一表面活性剂对污染土壤中菲的洗脱效果,结果表明质量比为 1:9 的 TX100 和 SDBS 混合表面活性剂对土壤中菲的洗脱效果最好。姜霞等^[28] 研究了 3 种表面活性剂及其不同浓度配比对 5 种柴油链烃的增溶及柴油污染土壤的洗脱作用。结果表明,复合表面活性剂的增溶效果优于单一表面活性剂,尤以阴-非离子混合表面活性剂 Tween80-SDS 最佳。

虽然表面活性剂对有机污染土壤的植物修复具有一定的增效效果,但它们本身也会带来一些问题,如表面活性剂本身易被土壤吸附且吸附后不易解吸^[29],表面活性剂还可与靶标污染物造成复合污染^[30]。因此,可以采用一些易降解、无毒性的表面活性剂作为植物修复的强化剂。刘魏魏等^[31] 研究表明,添加鼠李糖脂(RH)和接种 PAHs 专性降解菌能促进紫花苜蓿的正常生长,提高土壤中 PAHs 的降解率。

近年来,一些研究发现表面活性对重金属也有活化的作用。Yang 等^[32] 研究表明,Tween 80 可以强化龙葵对 Cd-PAHs 复合污染土壤的修复效果。这说明添加表面活性剂可用于强化重金属-有机物复合污染土壤植物修复。

4.2 螯合剂 螯合剂加入土壤后,可以与土壤溶液中的重金属离子形成螯合物,促进重金属转变为水溶态,利于植物根系吸收、积累与转运^[33]。温丽等^[34] 报道指出,向污染土壤中施加没食子酸可以提高黑麦草富集 Cd、Pb 与 Zn 的能力,加入 5.0 mmol/kg 没食子酸时黑麦草地上部 Cd、Zn 的浓度最大可达 15.81 与 2 412.85 mg/kg,与对照组相比,分别增加了 60.2% 与 212%。向同一受重金属污染土壤施加 EDTA 或 EDDS,与对照组相比,EDDS 使得俯仰臂形草地上部 Cu、Zn 和 Pb 浓度分别提高 2.54、2.74 和 4.30 倍,分别优于 EDTA 相对应提高的 1.77、1.11 和 1.87 倍,表明 EDDS 促进重金属在植物中的运输和累积强于 EDTA^[35]。Yang 等^[32] 研究指出,0.1 mmol/kg EDTA、0.9 mmol/kg 半胱氨酸、0.5 mmol/kg TW80 或 0.5 mmol/kg EDTA、0.9 mmol/kg 半胱氨酸、0.3 mmol/kg 水杨酸混合施加,不仅可以提高龙葵积累 Cd 量,而且可以促进 PAHs 的降解。此外,适宜的土壤 pH、螯合剂合适的投加时间及投加模式等因素也会对增强植物的提取效果产生影响^[36-38]。

然而,目前用于土壤重金属污染植物修复的螯合剂大都是人工合成的,具有较高的毒性,且生物降解性差。因此,一些优良的新型螯合剂的研究非常有必要。杨智宽等^[39] 盆栽试验表明,添加 SCTA-I(新型壳聚糖衍生物)能促进玉米对 Pb 的吸收,可显著增加植物体内 Pb 的含量。有研究指出,柠檬酸(小分子有机酸)可增加土壤中 PAHs 的生物可利用性^[40]。而关于化合螯合物强化有机污染土壤植物修复则鲜有报道。

4.3 环糊精及衍生物 作为第 2 代超分子主体化合物的代表 β -环糊精,它的应用和研究一直倍受关注。 β -环糊精内部空腔具有疏水性,腔外羟基具有亲水性,使得它在水中有一定的溶解度。因这种特殊的分子空洞结构, β -环糊精不仅对疏水的有机物有显著的增溶作用,而且可与一些疏水有机分子形成主客体包结物,能改变被包合物的化学和物理性质^[41-42]。

有研究指出, β -环糊精能有效地增强黑麦草对多氯联苯的生物有效性,促进多氯联苯的生物降解^[43]。Bardi 等^[44] 研究了环糊精在 PAHs 污染土壤生物修复中的作用,发现 β -环糊精可显著提高 PAHs 在土壤中的降解速率,也表明环糊精的包合作用加速了植物对土壤中多环芳烃的吸收。Wang 等^[45] 研究发现,羧甲基 β -CD 在包结蒽的同时还可与 Cd^{2+} 同时配位结合,形成 Cd^{2+} -蒽-CD 的三合一化合物。Hoffman 等^[46] 报道,在萘的生物降解过程中,由于配位作用的存在,羧甲基- β -环糊精能在重金属存在的同时有效地促进有机污染物的生物降解。Wang 等^[47] 合成了一种甘氨酸- β -环糊精,发现当甘氨酸- β -环糊精的浓度为 20 g/L 时,水溶液中铅离子的平衡浓度达 2 945 mg/L,对复合污染土壤中铅和菲的解吸去除率分别为 85.8% 和 78.8%。Shen 等^[48] 通过对随意甲基化- β -环糊精增强电子废物回收区多氯联苯污染土壤植物修复潜力的研究,发现经随意甲基化- β -环糊精处理后,4 种植物(水稻、紫花苜蓿、黑麦草、高羊毛)

的根际土壤中PCBs平均去除率从26.9%上升至37.1%。

与表面活性剂、螯合剂相比,环糊精具有无毒^[49-50]、生物降解性^[51]、不易被土壤吸附^[52]等特性,因此环糊精与其他修复技术的结合已成为土壤修复技术新的发展趋势^[53]。

4.4 其他强化措施 基因工程技术被认为是改良植物对重金属耐性和富集能力的一条有效途径,并且成为强化植物修复领域最具有潜力的发展方向之一。Eapen等^[54]报道指出,将金属螯合剂、金属转运蛋白、金属硫蛋白(MT)和植物螯合肽(PC)的基因转移到待试植物中,可以提高植物对金属的吸收和贮存。同时,一些解毒/累积镉、铅、汞、砷、硒转基因植物已被开发。Hsieh等^[55]研究发现,当革兰氏阳性的MERP蛋白(汞离子结合蛋白)在转基因植物拟南芥得以表达时,与对照植株相比,转基因拟南芥表现出对汞、镉、铅较高的耐受性和积累能力。

5 结语

植物修复技术是当前修复重金属和有机物污染土壤的重要技术,但也存在一定的问题。例如,施加的螯合剂、表面活性剂等可能具有植物毒性而对植物的正常生长产生抑制;添加螯合剂后,增加了重金属渗滤对地下水造成二次污染的可能性,也可能导致土壤中营养元素的潜在淋失等^[56-57]。因此,在日后的研究中,对于单一重金属、有机物污染土壤修复,要加强新型螯合剂、表面活性剂的开发与应用,需对螯合诱导植物修复机理、螯合剂加入土壤后土壤-植物系统的变化规律、影响阴-非离子表面活性剂强化植物吸收有机污染物的因素、土壤环境对根际有机污染物的吸附-解吸过程及根际微生物群落的影响^[58]等进行更深入的研究。

对于重金属-有机物复合污染,其理论体系得到进一步的完善,对研究方法也进行了一定的摸索。但总体看来,复合污染的研究还处于起步阶段,许多方面还有待进一步研究,如深入研究复合污染条件下污染物质的迁移、转化和累积规律以及重金属-有机物之间的交互作用、有机物对重金属的存在形态和植物吸收特性的影响等。

参考文献

- [1] 周启星,宋玉芳.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社,2004:134-189.
- [2] 崔斌,王凌,张国印,等.土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(1):373-375,447.
- [3] 刘世亮,骆永明,丁克强,等.菌根真菌对土壤中有机污染物的修复研究[J].地球科学进展,2004,19(2):197-203.
- [4] 周东美,王玉军,仓龙,等.土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2004,5(10):1-8.
- [5] 徐圣友,陈英旭,林琦,等.玉米对土壤中菲花修复作用的初步研究[J].土壤学报,2006,43(2):226-231.
- [6] 孙铁铎,周启星,李培军.污染生态学[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] 魏树和,周启星.重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J].生态学杂志,2004,23(1):65-72.
- [8] 孙约兵,周启星,郭观林.植物修复重金属污染土壤的强化措施[J].环境工程学报,2007,1(3):103-110.
- [9] HANSEN D, DUDA P J, ZAYED A, et al. Selenium removal by constructed wetlands: Role of biological volatilization[J]. Environ Sci Technol, 1998, 32(5): 591-597.
- [10] 洪竖平.土壤污染与防治[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [11] CLEMENS S. Molecular mechanisms of plant metal homeostasis and tolerance[J]. Planta, 2001, 212(4): 475-486.
- [12] 周启星,宋玉芳.植物修复的技术内涵及展望[J].安全与环境学报, 2001, 1(3): 48-53.
- [13] SCHNOOR J L, LICH L A, MCCUTCHEON S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants[J]. Environ Sci Technol, 1995, 29(7): 318-323.
- [14] RASKIN I, SMITH R D, SALT D E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants of the environment[J]. Cuernrt Opinion in Biotech, 1997, 8(2): 221-226.
- [15] NEWMAN L A, STRAND S E, CHO E N, et al. Uptake and biotransformation of trichlorethylene by hybrid poplars[J]. Environ Sci Technol, 1997, 31(4): 1062-1067.
- [16] PATERSON S, MACKYA D, TIM D, et al. Uptake of organic chemicals by plants: a review of processes, correlations and models[J]. Chemosphere, 1990, 21(3): 297-331.
- [17] MEREDITH M L, HITES R A. Polychlorinated biphenyl accumulation in tree bark and wood growth rings[J]. Environ Sci Technol, 1987, 21(7): 709-712.
- [18] HERMANSON M H, HITES R A. Polychlorinated biphenyls in tree bark[J]. Environ Sci Technol, 1990, 24(5): 666-671.
- [19] SIMONICH S L, HITES R A. Vegetation-atmosphere partition of polycyclic hydrocarbons[J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(5): 939-943.
- [20] 戴树桂,刘小琴,徐鹤.污染土壤的植物修复技术进展[J].上海环境科学,1998(9):25-27,31.
- [21] ALKORTA I, GARBISU C. Phytoremediation of organic contaminants in soils[J]. Bio-resource Technology, 2001, 79(3): 273-276.
- [22] JORDAHL J L, FOSTER L, SCHNOOR J L. Effect of hybrid polar trees on microbial populations important to hazardous waste bioremediation[J]. Env Tox Chem, 1997, 16(6): 1318-1321.
- [23] 陈伟伟,王国庆,章瑞英,等. Tween 80对DDTs污染场地土壤的增溶洗脱效果研究[J].农业环境科学,2010,29(2):276-281.
- [24] CHENG K Y, LAI K M, WONG J W C. Effects of pig manure compost and nonionic-surfactant Tween 80 on phenanthrene and pyrene removal from soil vegetated with *Agropyron elongatum*[J]. Chemosphere, 2008, 73(5): 791-797.
- [25] 吴咏琪,赵保卫,朱瑞佳,等.阴/非表面活性剂对土壤中菲的洗脱及影响因素研究[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2211-2215.
- [26] 陈宝梁.表面活性剂在有机污染土壤修复中的作用及机理[D].杭州:浙江大学,2004.
- [27] YANG K, ZHU L Z, XING B S. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solution of TX100 and SDBS[J]. Environ Sci Technology, 2006, 40(13): 4274-4280.
- [28] 姜霞,陈刚,金相灿,等.复合表面活性剂对污染土壤中柴油的增溶和洗脱作用[J].生态环境学报,2009,18(2):523-530.
- [29] DOONG R A, LEI W G. Solubilization and mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pseudomonas putida* in the presence of surfactant[J]. Hazard Mater, 2003, 96: 15-27.
- [30] 刘红玉,曾光明,鲁双庆.表面活性剂与Pb、Zn协同作用对蚕豆叶细胞的损伤[J].中国环境科学,2006,26(1):72-76.
- [31] 刘巍巍,尹睿,林先贵,等.生物表面活性剂-微生物强化紫花苜蓿修复多环芳烃污染土壤[J].环境科学,2010,30(4):1079-1084.
- [32] YANG C J, ZHOU Q X, WEI S H, et al. Chemical-assisted phytoremediation of Cd-PAHs contaminated soils using *Solarium nigrum* L. [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(8): 818-833.
- [33] 胡亚虎,魏树和,周启星,等.螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2055-2063.
- [34] 温丽,傅大放.两种强化措施辅助燕麦草修复重金属污染土壤[J].中国环境科学,2008,28(9):786-790.
- [35] SANTOS F S, HERNANDEZ-ALLICA J, BECERRIL J M, et al. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens* [J]. Chemosphere, 2006, 65(1): 43-50.
- [36] ALKORTA I, HERNÁNDEZ-ALLICA J, BECERRIL J M, et al. Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2004, 3(1): 55-70.
- [37] MEERS E, RUTTENS A, HOPGOOD M J, et al. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals[J]. Chemosphere, 2005, 58(8): 1011-1022.
- [38] NEUGSCHWANDTNER R W, TLUSTOS P, KOMÁREK M, et al. Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: Laboratory versus field scale measures of efficiency[J]. Geoderma, 2008, 144(3/4): 446-454.

有较好的拟合度,指数函数对总生物量、根生物量的拟合效果也较好。

(6) 由于杉木生长受气候、立地条件、经营措施等多因素的影响,不同地区的杉木生物量存在一定差异^[9],这对最优预测模型选择和参数估算会产生一定影响,因此在对杉木生物量估算时,应尽量保证研究对象的生境条件一致,使用同一分布区的生物量预测模型,以减少估测误差。

参考文献

- [1] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报,2001,12(1):13-16.
- [2] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292 (5525): 2320-2322.
- [3] 董利虎,李凤日,贾玮玮. 黑龙江省红松人工林立木生物量估算模型的构建[J]. 北京林业大学学报,2012(6):16-22.
- [4] 洪元程,徐伟强,叶功富,等. 东南沿海木麻黄人工林生物量估测模型研究[J]. 浙江林业科技,2010,30(4):66-69.
- [5] PAN Y, LUO T, BIRDSEY R, et al. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation [J]. Climatic Change, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [6] 田大伦,盘宏华. 第二代杉木人工林生物量的研究[J]. 中南林学院学报,1998,18(3):11-16.
- [7] 林开敏,郑郁善,黄祖清,等. 杉木和马尾松幼林生物产量模型研究[J]. 福建林学院学报,1993(4):351-356.

- [8] 李燕,张建国,段爱国,等. 杉木人工林生物量估算模型的选择[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3036-3046.
- [9] 唐坤银,唐代生. 杉木生物量优化模型研究[J]. 林业调查规划,2010(1):47-52.
- [10] 赵坤,田大伦. 会同杉木人工林成熟阶段生物量的研究[J]. 中南林学院学报,2000,20(1):7-13.
- [11] 邓秋香,赵瑛,伍禄军,等. 广西大青山12年生杉木人工林的生物生产力[J]. 广西林业科学,2009,37(4):187-190.
- [12] 康冰,刘世荣,张广军,等. 广西大青山南亚热带马尾松,杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报,2006,26(5):1320-1329.
- [13] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州:福建科学技术出版社,1966.
- [14] 王赛专. 会同不同年龄阶段第2代杉木人工林碳储量动态特征研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2013.
- [15] 傅军,蒋建屏,彭立平,等. 皖南杉木标准林分蓄积生长阶段划分探讨[J]. 浙江林学院学报,1992,9(1):24-28.
- [16] 郑勇平,朱浩,徐焕农,等. 杉木生长过程特征和生长期划分[J]. 浙江林学院学报,1991,8(2):219-226.
- [17] 张卓文. 柳杉生长过程分析及生长阶段划分[J]. 中南林学院学报,2003,23(2):46-51.
- [18] 曾子纯,刘思齐. 马尾松水保林经营模式与经营数表研究[M]. 北京:中国林业出版社,2003.
- [19] 曾慧卿,刘琪璟,马泽清,等. 干烟洲灌木生物量模型研究[J]. 浙江林业科技,2006,26(1):13-17.
- [20] 王维枫,雷渊才,王雪峰,等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):58-63.
- [21] PARRESOL B R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons [J]. Forest Science, 1999, 45(4): 573-593.

(上接第5076页)

- [39] 杨智宽,舒俊林,刘良栋. 壳聚糖螯合剂对Pb污染土壤植物修复的促进作用[J]. 农业环境科学,2006,25(1):86-89.
- [40] LING W T, REN L L, GAO Y Z. Impact of low-molecular-weight organic acids on the availability of phenanthrene and pyrene in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(10): 2187-2195.
- [41] 邓军. 表面活性剂和环糊精对土壤有机污染物的增溶作用及机理[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- [42] 廖才智. β -环糊精的应用研究进展[J]. 化工科技,2010,18(5):69-72.
- [43] CHEN Y X, TANG X J, CHEEMA S A, et al. β -cyclodextrin enhanced phytoremediation of aged PCBs-contaminated soil from e-waste recycling area [J]. Environ Monit, 2010, 12(7): 1482-1489.
- [44] BARDI L, MARTINI C, OPSI F, et al. Cyclodextrin enhanced in situ bioremediation of poly aromatic hydrocarbons-contaminated soils and plant uptake [J]. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 2007, 57(1/4): 439-444.
- [45] WANG X J, BRUSSEAU M L. Simultaneous complexation of organic compounds and heavy metals by a modified cyclodextrin [J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(10): 2632-2635.
- [46] HOFFMAN D R, ANDERSON P P, SCHUBERT C M, et al. Carboxymethyl- β -cyclodextrin mitigates toxicity of cadmium, cobalt, and copper during naphthalene biodegradation [J]. Bioresource Technol, 2010, 101(8): 2672-2677.
- [47] WANG G H, ZHOU Y M, WANG X G, et al. Simultaneous removal of phenanthrene and lead from artificially contaminated soils with glycine- β -cyclodextrin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184(1/3): 690-695.
- [48] SHEN C F, TANG X J, CHEEMA S A, et al. Enhanced phytoremediation potential of polychlorinated biphenyl contaminated soil from e-waste recycling area in the presence of randomly methylated- β -cyclodextrins [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2/3): 1671-1676.

- [49] MARTIN E M, VALLE D. Cyclodextrin and their uses: a review [J]. Process Biochem, 2004, 39(9): 1033-1046.
- [50] SARAH G, ROBERT C S. 2-Hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HP- β -CD): A toxicology review [J]. Food Chem Toxicol, 2005, 43(10): 1451-1459.
- [51] FENYVESI E, GRUIZ K, VERSTICHEL S, et al. Biodegradation of cyclodextrins in soil [J]. Chemosphere, 2005, 60(8): 1001-1008.
- [52] EHSAN S, PRASHER S O, MARSHALL W D, et al. Simultaneous mobilization of heavy metals and polychlorinated biphenyl (PCB) compounds from soil with cyclodextrin and EDTA in admixture [J]. Chemosphere, 2007, 68(1): 150-158.
- [53] LEITGIB L, GRUIZ K, FENYVESI E, et al. Development of an innovative soil remediation "Cyclodextrin-enhanced combined technology" [J]. Sci Total Environ, 2008, 392(1): 12-21.
- [54] EAPEN S, D'SOUZA S F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals [J]. Biotechnology Advances, 2005, 23(2): 97-114.
- [55] HSIEH J L, CHEN C Y, CHIU M H, et al. Expressing a bacterial mercuric ion binding protein in plant for phytoremediation of heavy metals [J]. Hazard Mater, 2009, 161(2/3): 920-925.
- [56] ROMKENS P, BOUWMAN L, JAPENGA J, et al. Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils [J]. Environmental Pollution, 2002, 116(1): 109-121.
- [57] WU L H, LUO Y, XING X R, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 102(3): 307-318.
- [58] 王志刚,徐晓燕. 有机污染土壤植物修复机理的研究现状[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 106-108.