

土壤中汞的来源及土壤汞污染修复技术概述

王立辉^{1,2}, 邹正禹², 张翔宇², 赵盛开^{1,2}, 潘利祥^{2*}

(1. 中国石油大学(北京)化学工程学院, 北京 102249;

2. 中节能六合天融环保科技有限公司, 北京 100082)

摘要:介绍了土壤中汞的来源,综述了土壤汞污染修复技术,包括2种常用修复技术——固化稳定化技术、热解析修复技术,3种新兴修复技术——植物修复技术、基因工程技术、纳米修复技术。最后对土壤汞污染及其修复技术发展前景进行了展望。

关键词:汞污染;土壤;来源;修复技术

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)05-0043-05

Review of sources of mercury in soil and remediation techniques for mercury contaminated soil

WANG Li-hui^{1,2}, ZOU Zheng-yu², ZHANG Xiang-yu², ZHAO Sheng-kai^{1,2}, PAN Li-xiang^{2*}

(1. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. CECEP Liuhe Talroad Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The origins of mercury in soil are described. Two types of general remediation techniques (solidification/stabilization and thermal desorption) and three newly-developing remediation techniques (phytoremediation, nanotechnology and genetic engineering) are reviewed. The development of mercury-contaminated soil and remediation techniques are also prospected.

Key words: mercury contaminated; soil; sources; remediation techniques

汞,尤其是有机汞,由于具有极强的毒性和高度的生物富集性,会对人类健康和生态环境造成很大危害。与其他重金属不同,汞能够在大气中长期滞留,并进行远距离迁移,最终通过干湿沉降等方式进入水陆生态系统。汞进入土壤之后,在硫酸盐还原菌(SRB)、铁还原菌等 δ -变形菌纲作用下, Hg^{2+} 能被转化成毒性更强的甲基汞,并通过迁移等方式,最终通过食物链放大进入人体^[1]。土壤中汞的来源十分广泛,包括土壤母质、大气汞的干湿沉降、含汞废水排放、含汞固体废弃物堆积等。土壤通过物理净化、化学净化、生物净化等方式,对进入土壤中的汞污染物有一定自净能力,但在很多情况下,土壤净化能力十分有限,要想去除土壤中的汞污染,必须依靠相应的修复技术。本文中简介了土壤中汞的来源,并对目前国内外土壤汞污染修复技术进行概述,以期为后续进行该类研究提供参考与借鉴。

1 土壤汞污染的来源

1.1 土壤母质

汞在地壳中自然形成。汞具有亲硫性、易形成

络合离子等特性,常以硫化物等形式存在于岩石中。地表岩石经过风化作用,形成土壤母质,岩石中的汞部分残留在土壤母质中,构成了土壤中汞最基本来源。研究表明,全球不同类型土壤中汞的背景含量有所不同,一般介于0.58~1.8 mg/kg,平均值估计为1.1 mg/kg,并且,有机质土和新成土中汞含量偏高^[2]。土壤母质中汞的来源复杂多样,形成周期长,且容易受到自然环境的影响,因此目前很难精确估算出此来源汞的释放量。

1.2 工农业生产及含汞废弃物排放

随着科学技术的发展,人类在创造自身文明的同时,也对自然环境造成破坏。汞在自然界中分布广泛,几乎所有的矿物都含有汞,大规模的矿山开采和金属冶炼必然产生大量含汞废矿渣和冶炼炉渣,侵占周边耕地,进而对矿区土壤产生污染^[3]。随着人类城市化进程的加剧,城市产生了大量的含汞固体废弃物,包括温度计、血压计、电池、荧光灯泡以及一些废弃电子产品,这些废弃物大多进入垃圾填埋场进行处理,从而导致填埋场周围土壤遭受汞的污

染。Li 等^[4]对贵阳等城市垃圾填埋场废弃物含汞浓度进行研究。研究发现,废弃物中汞浓度为 0.17~46.22 mg/kg,平均值为 0.57 mg/kg。Cheng 等^[5]对我国 31 个大城市土壤汞含量进行分析研究。研究发现,中国北部和西北部城市表层土壤汞含量较低,东部和东南沿海地区城市土壤汞含量偏高,一些城市表层土汞含量高于深层土汞含量,这说明人类在进行工农业生产时,的确造成了周围土壤汞的污染。

目前,针对工农业生产及固废堆积土壤汞污染问题,欧美等西方发达国家已经采取措施控制人为因素对土壤汞的排放,但广大发展中国家由于资金、技术缺失等因素,在控制汞排放源方面落后于发达国家。2014 年中央发布《国家新型城镇化规划(2014—2020)》指出,我国到 2020 年城镇化率将达到 60%,届时城市必将产生大量含汞垃圾,势必给我国汞污染控制带来巨大压力。

1.3 大气干湿沉降

自工业革命以来,随着人类活动的加剧,大气中的汞含量已经增加了 3 倍左右^[1],当前,人为源每年约向大气中排放 1 960 t 汞^[2]。大气中的汞通过干湿沉降进入地表土壤,可以被有机质吸附,从而在土壤表层富集^[6]。目前,已经有许多学者对大气汞干

表 1 不同地区大气汞的干湿沉降量

地点	时间	干沉降/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)		湿沉降/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	
		总汞	甲基汞	总汞	甲基汞
加拿大多伦多市 ^[9]	2003—2008	7.66~26.06		18.60	
美国伊利诺伊州 ^[7]	2011.6—2011.7	0.7~1.6		3.1~5.4	
日本 ^[10]	2002.12—2003.11	8.0±2.7		12.8±3.9	0.05±0.02
重庆 ^[11]	2010.6—2011.7			28.7±5.1	0.28±0.09
台湾彭佳屿 ^[8]	2009—2012			10.18	

表 2 水泥基固化、CBPC、SPSS 技术概述

技术分类	描述	优点	缺点	提高与改进
水泥基固化 ^[12,15-16]	主要是将土壤中的汞转化成氧化汞沉淀后固定于水泥压块中,压块可用于建筑材料	工艺简单、材料来源广泛、处理费用低,固化后水泥产品性能好	土壤水泥固化体增容率大,长期稳定性不好,原污染土壤不能恢复土壤以前本身的功能	添加硫单质与含硫化物、活性炭等稳定剂
CBPC ^[12-13,16]	MgO、CaO 等与 H_2PO_4^- 反应生成 $\text{MgK}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CNP}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ 等而被固化	化学稳定性好,能处理高浓度汞污染物;CBPC 产生的陶瓷可用于建筑材料	需 K_2S 等进行预处理,过量硫会增加汞浸出性	加入 Na_2S 、 Fe_2S_3 、 K_2S 等硫化物
SPSS ^[14,16]	元素汞与硫反应生成难溶硫化汞并被密封,最终产品为一密封石块	费用低,所需反应温度低,抗环境腐蚀性,机械强度高	产生汞蒸气,可能引起火灾和爆炸	加入多硫化钙等降低 TCLP 值

湿沉降进行研究(见表 1)。研究表明,与气态单质汞相比,活性气态汞与颗粒汞具有更高的水溶性和沉降速率,它们往往是大气汞干沉降主要来源。Lynam 等^[7]对美国伊利诺伊州中部大气汞沉降进行研究,发现大气汞湿沉降量是干沉降量的 3.4 倍,说明湿沉降占大气汞沉降的主体部分;汞的湿沉降在夏天表现更为显著,这是因为夏天大气中的 Hg^0 更易被氧化成 Hg^{2+} ,加上夏天雨量较大,汞更易于进入地表部分,这些发现与 Sheu 等^[8]在台湾彭佳屿研究结果具有一致性。

2 土壤汞污染修复技术

2.1 固化稳定化修复技术(Solidification/Stabilization)

固化技术指将固化剂添加到土壤中,进而形成石块状固体的过程。稳定化技术指将化学药剂加入到土壤中,通过降低汞的有效性从而实现土壤修复的一种技术。目前,固化稳定化技术在土壤汞污染修复上应用十分广泛,许多材料也被应用到固化修复技术中,比较常用的包括水泥基固化、低温化学键磷酸盐陶瓷(CBPC)、硫聚合物固化/稳定化(SPSS)。此外,沥青、聚乙烯、合成橡胶、硅酸钠、碱性矿渣、聚脂和环氧树脂等材料也被应用到土壤汞污染固化修复技术中^[12]。Cho 等^[13]利用 CBPC 技术对韩国一家工业废物焚烧炉飞灰中的汞进行固化稳定化研究,实验分别选用 MKP 陶瓷与 CNP 陶瓷作为凝固剂,且选用 Na_2S 和 Fe_2S_3 作为固化剂。研究发现,处理前含汞污染废物毒性浸出实验值(TCLP 值)为 231.3 $\mu\text{g}/\text{L}$,经过处理后样品的 TCLP 值低于 25 $\mu\text{g}/\text{L}$,即低于美国国家环境保护局(EPA)规定的限定标准。Lee 等^[14]利用 SPSS 技术对元素汞进行固化研究。实验中先将元素汞与过量元素硫单质混合,并在 60℃ 条件下加热 30 min,直至所有元素汞都转化成 HgS 。再添加多余元素硫与

HgS 混合并注入液态石蜡中,最后将混合物加热至 140℃,使其融化。待其冷却后,含汞物质即被固定在液态石蜡底部,固化体 TCLP 值检测为 6.72 μg/L,满足 EPA 规定的填埋标准。表 2 所示为 3 种常用固化技术的概述。

在当前各种土壤汞污染修复技术中,固化稳定化方法是使用频率最高的技术之一,这种修复技术已经达到商业化水平。实际土壤修复过程中,常常将固化技术与稳定化技术联合使用,先选用合适的稳定化剂对污染物进行预处理,再将土壤进行固化,从而提高土壤修复效率。

2.2 热解析修复技术(Thermal desorption)

汞具有低沸点(356.73℃)、高挥发性等特性,可通过加热促使汞从土壤中蒸发出来。通常汞在土壤中以 Hg⁰ 或化合态形式 [HgO、HgS、HgCO₃、HgCl₂、Hg(OH)₂ 等] 存在。当温度达到 600 ~ 800℃ 时,这些化合态汞就会转化成气态汞,进而被回收利用。研究发现,温度和时间是影响土壤汞去除率的主要因素,当温度介于 460 ~ 700℃ 时,温度越高,热解析修复效果越好^[6];处理时间越长,汞去除率越高^[17]。但热解温度过高时,土壤有机质和结构水会遭到破坏,修复成本也会提高。

针对高温热解析方法具有的缺点,许多学者研究利用低温热解系方法修复土壤汞污染。邱蓉等^[17]利用低温热解析法对贵州清镇地区农田污染土壤进行修复,当污染土壤在 350℃ 下加热 90 min 后,土壤中汞去除率高达 90%,且此时土样中水溶态汞与交换态汞全部被去除,主要为残渣态汞,环境风险小。此外,通过加入氯化物添加剂的方式也可降低热解析温度与时间。Ma 等^[18]通过加入添加剂 FeCl₃ 来强化汞污染土壤热解析修复。实验发现,当热解温度达到 400℃,热解时间为 60 min,摩尔比 $c(\text{FeCl}_3):c(\text{Hg}) = 100:1$,汞污染土壤浓度由处理前的 69 mg/kg 降到 0.8 mg/kg,达到 GB 15618—1995 三级标准限值以下,且处理后的土壤理化性质没有大的改变。针对热解析法耗能较高的缺点,有学者提出使用太阳能来代替传统不可再生能源作为热源。Navarro 等^[19]使用这一技术修复西班牙 Valle del Azogue 矿区汞污染土壤。当实验中使用的回转炉加热温度大于 400℃ 时,土壤中汞的浓度从 2 070 mg/kg 减少到 15 mg/kg 以下,汞的去除率大于 99%。

热解析修复技术通常用于修复含汞工业和医疗废物,一般不适用于修复高黏土和高有机质含量的

土壤。与其他修复方法相比较,热解析技术能够快速去除污染土壤中的汞,且去除率高,也可实现对汞的回收再利用。但其主要的局限性在于其能耗高,且只有当汞浓度较高时,其去除效果才会明显,低温热解析修复技术还不成熟,这些因素都制约着热解析技术在工程中的应用。

2.3 纳米技术(Nanotechnology)

随着复合材料工程与环境分子科学的发展,人们发现纳米尺度的物质会表现出特殊的物化特性,具体表现为小尺寸效应、表面效应、量子效应等。由于纳米颗粒具有高的比表面积,其对土壤中 Hg²⁺ 具有强吸附性,所以可以利用纳米技术来修复土壤汞污染^[20]。

许多研究证实纳米颗粒对污染水体中的汞离子具有极强的吸附能力,但由于纳米粒子在土壤中往往以聚合物形式存在,在土壤中流动性差,所以目前纳米技术在土壤汞污染修复方面应用不多。Wang 等^[21]研究了壳聚糖-聚乙烯醇/膨润土纳米复合材料(CTS-PVA/BT)对 Hg²⁺ 的吸附作用。研究发现,CTS-PVA/BT 对 Hg²⁺ 具有极强的吸附性,且膨润土的加入能在一定程度上提高材料热稳定性。Gong 等^[22]应用 CMC-FeS 纳米粒子对美国新泽西州汞污染土壤进行修复实验。实验采用羧甲基纤维素(CMC)钠作为稳定剂,修复前土壤汞含量为 193.04 mg/kg,当污染土样中 FeS 与 Hg 摩尔比为 $c(\text{FeS}):c(\text{Hg}) = 118:1$ 时,样品渗滤液中汞减少了 90%,TCLP 实验中渗滤出的汞减少了 76%。

目前纳米技术在修复土壤汞污染方面的应用还处于刚刚起步阶段,且往往注重降低汞生物有效性效果的研究,相关吸附机理研究比较薄弱。但纳米修复技术作为一种新兴土壤修复技术,本身具有很多优势,发展前景十分广阔。

2.4 植物修复技术(Phytoremediation)

植物修复技术指利用某种特定植物及其根部微生物对土壤中特定污染物通过吸收、固定、转化、挥发、降解等作用,进而去除土壤中污染物的一种新型修复技术。植物修复技术按其作用机理分为植物提取(Phytoextraction)、植物稳定化(phytostabilization)和植物挥发(Phytovolatilization),其中,植物提取技术研究最为广泛,也最具发展前景。

20 世纪 80 年代开始,国内外学者已经开始在汞的植物提取技术方面进行研究。研究表明,虽然许多植物对汞都具有富集作用,但由于汞在土壤中生物有效性很低,一般需要通过施加螯合剂和植物

激素来提高汞污染土壤植物修复效率。目前已报道使用的螯合剂包括 KI、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 NH_4SCN 、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{SCN} + \text{H}_2\text{O}_2$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、EDTA、脲酶^[6]。王建旭等^[23]报道了在土壤中添加 2 g/kg 硫代硫酸铵后,印度芥菜根系、茎、叶片总汞含量均增加,分别是对照组的 8 倍、4 倍、2 倍。Cassina 等^[24]使用细胞分裂素和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 对植物汞提取情况进行研究。研究发现,联合使用细胞分裂素和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 比单独分别使用细胞分裂素、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 更能提高印度芥菜和向日葵对汞的富集能力。

植物提取修复技术发展前景十分诱人,而这项技术发展的关键在于寻找一种对汞有超富集作用的植物。虽然各国学者已经经过 30 多年的找寻和筛选,但有关汞超富集植物成功筛选的报道并不多见。2010 年,王明勇等^[25]在我国首次发现一种汞富集植物——乳浆大戟,这种植物对汞富集量为 25.3 ~ 35.1 mg/kg,运转系数为 1.2 ~ 2.5,大于 1,具有明显的富集植物特征。2014 年,Liu 等^[26]报道了一种对汞有强烈富集作用的植物——白三叶草。在 HgCl_2 含量为 10 $\mu\text{g/L}$ 的 Hoagland 营养液中培养白三叶草,7 d 后对这种植物根、茎、叶汞含量进行测定,检测结果表明,白三叶草根、茎、叶汞含量分别为 22.63、53.98、22.98 mg/g,运转系数为 3.4,目前发现的所有对汞有富集能力的植物中,本次报道的白三叶草富集能力最强。

植物修复技术是一种原位修复技术,在修复土壤污染的同时中,也能起到美化周围环境的功能。在我国西南一些土壤汞污染严重的地区,当地人均收入偏低,土壤汞污染面积大,地方政府不可能投入大量资金修复土壤污染,因此植物修复技术作为一种低投入修复技术,在修复当地土壤汞污染方面潜力巨大。

2.5 基因工程技术 (Genetic engineering)

近年来,随着分子生物学和分子遗传学的发展,研究人员将金属硫蛋白 (MTs)、金属螯合剂、重金属转运蛋白基因等导入到特定植物体内后,发现植物对重金属的耐受性和提取能力增加,即提高了植物修复效率^[27]。因此,基因工程技术为土壤修复提供了一条新的方法,具有十分广阔的发展前景。

革兰阴性菌等细菌体内的 mer 操纵子对汞化合物有着特殊的抗性和转变能力,mer 操纵子的结构基因包括 merA、merB、merC、merD、merF、merT、merP,其中有关 merA、merB 基因的研究最为广泛。2000 年,Bizily 等^[28]首次将 merA 和 merB 基因在植

物体内同时表达,转基因拟南芥对甲基汞的耐性明显提高(是野生型拟南芥的 40 倍,是转 merB 基因拟南芥的 5 倍)。Kiyono 等^[29]研究认为,表达 merC-SYP121 蛋白的转基因植物对汞有更高的抗性,也能比野生型植株富集更多的汞。另有研究表明,MTs 基因可以显著提高水花生对汞的抗性和富集能力^[30]。

基因工程技术虽然可以提高植物修复效率,但这种技术目前还仅仅处于实验室研究阶段,而且转基因技术在我国一直是一个极具争议性的话题,这种修复方法在实际工程应用中应特别小心。

3 研究展望

20 世纪 80 年代开始,西方发达国家开始采取措施限制汞的使用、出口和转让,促使西方国家土壤汞污染问题得到遏制。但发展中国家由于自身发展的需要,依然在使用大量化石燃料等含汞原料,导致局部地区土壤汞污染加重。当前,中国已经在采取行动遏制汞的排放,2014 年 11 月在北京签订的《中美气候变化联合声明》中,中国做出控制化石燃料使用的承诺,这一举措在一定程度上会降低我国汞的排放量。

当前,围绕土壤汞污染的修复已经形成多种修复技术,其中,固化稳定化技术和热解析技术属于常用技术,植物修复技术、纳米技术、基因工程技术属于新兴修复技术。目前,单一修复技术逐渐被多种修复技术联合使用所代替,纳米技术等新兴技术得到越来越多的重视。在国外,固化稳定化技术已经得到工程实际应用,热解析技术也逐渐成熟,在工程应用中逐渐发挥作用。但我国由于起点低、投入少、政府重视程度不高等因素,我国的修复技术明显落后于西方发达国家,具体表现为修复技术单一、修复设备落后、修复工艺简单、成功修复案例较少等,这些不足已经严重制约着我国土壤汞污染修复技术的发展。因此,开发一种修复周期短、稳定性好、费用低廉的修复技术,加大修复设备的研究,成为我国修复领域的两件亟需完成的工作。

参考文献

- [1] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2013,32(5):503-530.
- [2] Xu J Y, Bravo A G, Lagerkvist A, et al. Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil[J]. Environment International, 2015, 74:42-53.
- [3] 张超,仇广乐,冯新斌. 汞矿山环境汞污染研究进展[J]. 生态

学杂志,2011,30(5):865-873.

- [4] Li Z G, Feng X B, Tang S L, *et al.* Distribution characteres of mercury in the waste, soil and plant at municipal solid waste landfills [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(4):11-18.
- [5] Cheng H X, Li M, Zhao C D, *et al.* Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139:31-52.
- [6] Wang J X, Feng X B, Anderson C W N, *et al.* Remediation of mercury contaminated sites: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 221:1-18.
- [7] Lynam M M, Dvonch J T, Hall N L, *et al.* Spatial patterns in wet and dry deposition of atmospheric mercury and trace elements in central Illinois, USA [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(6):4032-4043.
- [8] Sheu G R, Lin N H. Characterizations of wet mercury deposition to a remote islet (Pengjiayu) in the subtropical Northwest Pacific Ocean [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77:474-481.
- [9] Zhang X T, Siddiqi Z, Song X J, *et al.* Atmospheric dry and wet deposition of mercury in Toronto [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 50:60-65.
- [10] Sakata M, Marumoto K. Wet and dry deposition fluxes of mercury in Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:3139-3146.
- [11] Wang Y, Peng Y, Wang D, *et al.* Wet deposition fluxes of total mercury and methylmercury in core urban areas, Chongqing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 92:87-96.
- [12] 张新艳, 王起超. 含汞有害固体废弃物的固化/稳定化技术研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(9):110-115.
- [13] Cho J H, Eom Y J, Lee T G. Stabilization/solidification of mercury-contaminated waste ash using calcium phosphate (CNP) and magnesium potassium phosphate (MKP) processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 279:474-482.
- [14] Lee T G, Eom Y J, Lee C H, *et al.* Stabilization and solidification of elemental mercury for safe disposal and/or long-term storage [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2011, 61:1057-1062.
- [15] Piao H S, Bishop P L. Stabilization of mercury-containing wastes using sulfide [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139:498-506.
- [16] Rodriguez O, Padilla I, Tayibi H, *et al.* Concerns on liquid mercury and mercury-containing wastes: A review of the treatment technologies for the safe storage [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 101:197-205.
- [17] 邱蓉, 张军方, 董泽琴, 等. 汞污染农田土壤低温热解析处理性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(1):48-52.
- [18] Ma F J, Zhang Q, Xu D P, *et al.* Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl₃ at reduced temperature [J]. *Chemosphere*, 2014, 117:388-393.
- [19] Navarro A, Canadas I, Rodriguez J. Thermal treatment of mercury mine wastes using a rotary solar kiln [J]. *Minerals*, 2014, 4(1):37-51.
- [20] 王萌, 陈世宝, 李娜, 等. 纳米材料在污染土壤修复及污水净化中应用前景探讨 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2):434-439.
- [21] Wang X H, Yang L, Zhang J P, *et al.* Preparation and characterization of chitosan-poly(vinylalcohol)/bentonite nanocomposites for adsorption of Hg(II) ions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251:404-412.
- [22] Gong Y Y, Liu Y Y, Xiong Z, *et al.* Immobilization of mercury in field soil and sediment using carboxymethyl cellulose stabilized iron sulfide nanoparticles [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(29):1-13.
- [23] 王建旭, 冯新斌, 商立海, 等. 添加硫代硫酸铵对植物修复汞污染土壤的影响 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(10):1998-2002.
- [24] Cassina L, Tassi E, Pedron F, *et al.* Using a plant hormone and a thioligand to improve phytoremediation of Hg-contaminated soil from a petrochemical plant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 231:36-42.
- [25] 王明勇, 乙引. 一种新发型的汞富集植物——乳浆大戟 [J]. *江苏农业科学*, 2010, (2):354-356.
- [26] Liu Z C, Wang L. A plant species (*Trifolium repens*) with strong enrichment ability for mercury [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70:349-350.
- [27] 熊璇, 唐浩, 黄沈发, 等. 重金属污染土壤植物修复强化技术研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(61):185-208.
- [28] Bizily S P, Rugh C L, Meagher R B. Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants [J]. *Nature Biotechnology*, 2000, 18(2):213-217.
- [29] Kiyono M, Oka Y, Sone Y, *et al.* Bacterial heavy metal transporter MerC increases mercury accumulation in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, 71:19-24.
- [30] 贺绍君. 转 MT 基因水生重金属富集能力研究 [D]. 扬州:扬州大学, 2008. ■

阿克苏诺贝尔 Awlgrip 游艇涂料为 2015 极限帆船赛添彩

2015年5月4日阿克苏诺贝尔宣布该公司已为2015极限帆船系列赛提供高性能船体涂料,助力参赛船队于5月1—3日期间在青岛,为中国观众上演了一场精彩的海上竞赛。极限帆船系列赛是一项类场馆风格的国际近海帆船比赛。阿克苏诺贝尔于2014年与该赛事

签订了合作协议,其中包括为参赛的极限40高性能双体船提供 Awlgrip 游艇涂料。该创新型涂料方案不但技术性能优越,且色彩极具美感。这一创新涂料为青岛国际帆船中心提供了更亮丽的颜色和光泽持久性,令其钢结构表面历久常新。(齐球)