

· 中日防灾减灾研究院专家特约稿 ·

植物修复技术在污染土壤修复中的应用

王效举

(日本埼玉环境科学国际中心, 日本 埼玉 347-0115)

摘要:土壤是人类赖以生活和生产的最重要自然资源,但人类活动或自然作用能导致土壤污染。如何将污染的土壤作为宝贵的自然资源进行修复是一个世界性的难题。近年来利用绿色植物修复污染土壤被视为一项新兴的绿色技术而迅速发展。本文就污染土壤的植物修复技术原理、研究现状、实用化促进等方面作一些介绍和讨论。植物修复技术是利用植物吸收、固定、挥发、降解的机能去除或分解转化污染物质,使土壤系统的功能得到恢复或改善,属于一种低成本、非破坏型的原位污染土壤修复与土壤资源保护方式。根据其作用过程和原理,可以分为植物萃取、根际过滤、植物固定、植物挥发、植物降解等类型。植物修复技术的研究在80年代之后逐渐展开,目前在重金属超富集型植物的发现和富集机理、各种无机污染物和有机污染物的植物修复与机理、修复效率促进、污染场地的试验性修复等方面得到广泛研究,但还没有达到广泛普及应用的程度。本文指出,对于范围大面积大的土壤污染,建立有效的收益型植物修复模式,将污染土壤作为可再生资源边利用边修复是非常必要的。

关键词:土壤污染;植物修复;资源植物;重金属;有机污染物

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-159X(2019)01-0065-06

doi:10.3969/j.issn.1673-159X.2019.01.008

Practical Application of Phytoremediation Technology of Contaminated Soils

OH Kokyo

(Center for Environmental Science in Saitama Japan, Saitama 347-0115 Japan)

Abstract: Soil is one of the most important natural resources supporting human life and social development. However, soil contamination by various inorganic and organic compounds has been a worldwide concern, and phytoremediation has received increasing attention in recent decades as a cost-effective and eco-friendly approach for remediation of these contaminants. Phytoremediation is the use of living plants to remove pollutants from the environment or to render them harmless. Phytoremediation to date indicates that it is applicable to a wide range of organic and inorganic pollutants. However, its practical utilization has not been carried out extensively. This paper, involving our studies in recent years, described and discussed the phytoremediation on its working processes, research progress, and practical utilization.

Keywords: soil contamination; phytoremediation; resourceful plant; heavy metal; organic pollutant

土壤是陆地生态系统中处于水圈、生物圈、岩石圈与大气圈的独立圈层,是农业、林业、生态环境、经

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 日本学术振兴会科研课题(23405049;16H05633)。

作者简介: 王效举(1967—),男,理学博士,日本埼玉环境科学国际中心首席研究员,主要研究方向为环境修复、自然环境保护、土壤修复改良、生态农业和水质环保技术等。

ORCID:0000-0003-2592-0316 E-mail:o.kokyo@pref.saitama.lg.jp

引用格式: 王效举. 植物修复技术在污染土壤修复中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 65-70.

OH Kokyo. Practical application of phytoremediation technology of contaminated soils[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2019, 38(1): 65-70.

济、文明的最基本的自然资源。多年来,随着经济以及工业化、城市化的快速发展,土壤污染问题日益突出。根据资料,中国的农用地近 20% 被重金属等有害物质污染,正潜在地威胁着农业生产、地下水和生态环境的安全。在日本,被查明的污染土壤年年增加,尤其是 2003 年日本实施了土壤污染对策法之后,被查出来的土壤污染每年都居高不下。现在,重金属类、残留农药、挥发性有机物、二恶英类、石油类等各类有害物质引起的土壤污染正受到日益广泛的关注。土壤组成复杂,存在场所固定,受到污染后其影响一般是长期性和蓄积性的。污染物在土壤中积累到一定程度后,土壤的健康与生物生产等机能将受到损害,进而导致粮食减产和污染,而且可以通过水环境和生物等媒体形成二次污染,最终影响人体健康。土壤资源非常有限,因此如何将这些广泛存在的污染土壤作为自然资源进行有效利用和修复,是世界各国面临的重要课题,属于一个亟待解决的国际性难题。

目前,常用的污染土壤修复或净化技术主要有封固、药剂固定、搬出填埋、热分解、洗净和焚烧等物理或化学的方法。这些方法一般都是将土壤作为固体废弃物处理,需要巨大的费用,而且处理后的土壤一般丧失其植物生产等诸多生态功能,因此难以应对大面积的污染土壤,尤其是大面积污染农田的修复治理。

污染土壤的植物修复技术近年来受到广泛关注。该技术是利用绿色植物体系修复污染土壤的一项较为新兴的手段,一般被称为低成本、环境友好的非破坏型原位污染土壤修复技术,操作简单,容易被公众和政府机构接受^[1-2]。污染土壤的植物修复,虽然近年来得到广泛研究,取得了很大的进展,

但其大范围的实际应用还没有展开。本文就污染土壤的植物修复原理、技术发展、研究现状、实用化促进以及笔者近年来的研究等作简要介绍和讨论。

1 污染土壤的植物修复技术及其基本原理

植物修复(Phytoremediation)是指利用植物对有机或无机污染物的吸收、蓄积、固定、分解等机能,修复污染环境媒体(土壤、底泥、水质、大气等)的技术总称^[3-4]。将植物修复技术用于修复污染土壤时,一般是通过种植优选的植物及其根际微生物直接或间接吸收、挥发、分离、降解、固定土壤中的污染物,使土壤生态系统的功能得到恢复或改善。如图 1 所示,根据其作用过程和原理,植物修复技术可以分为植物萃取(phytoextraction)、根际过滤(rhizofiltration)、植物固定(phytostabilization)、植物降解(phytodegradation)、植物挥发(phytovolatilization)等类型^[2,5-6],其修复机理与对应的有害物质见表 1。

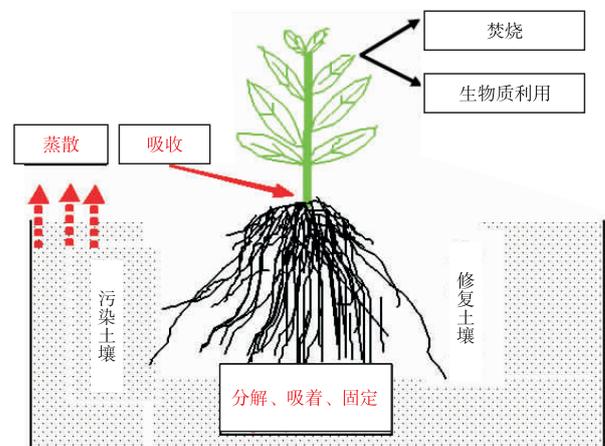


图 1 植物修复的概念图

表 1 污染土壤的植物修复技术机理

植物修复	修复机理	对应物质
植物萃取 (Phytoextraction)	植物将土壤中的污染物质吸收提取到根部可收获的部位和植物地上茎叶部位,一般利用超富集植物	重金属、放射性核素、非金属(B, F 等)、部分有机污染物质
植物固定 (Phytostabilization)	植物在土表形成绿色覆盖层,植物根系及其分泌物通过吸附、积累、沉淀等过程减少污染物因淋洗、地表侵蚀等作用导致的污染物质向地下水等其他地方扩散	重金属、放射性核素、非金属、有机污染物
植物降解 (Phytodegradation)	植物通过体内或分泌的植物酶将有机物质降解的过程	有机污染物
根域降解 (Rhizodegradation)	植物根系环境以及根圈微生物的作用,使污染物质得到分解	有机污染物质
根际过滤 (Rhizofiltration)	植物根系吸收、吸附、沉淀污染物,形成一个根系过滤系统,一般利用根系发达的植物	重金属、有机污染物
植物挥发 (Phytovolatilization)	植物将污染物质吸收到植物体内,通过植物蒸腾作用将挥发性化合物或其代谢产物释放到大气的过程	挥发性无机或有机物质(Hg, Se, VOC 类物质等)

从表 1 可以看出,对重金属(Cd、Pb、Cr 等)与放射性物质(Cs、Sr 等)以及其他一些无机污染物

(As 等),其最有效的方法是植物萃取。植物修复技术的基本原理是通过植物的光合作用,将分散在土壤中的污染物提取出来,转移到植物地上茎叶部位或可以收获的根部,最后通过收获与处理用于修复的植物,从而实现修复治理土壤的目的。

对农药等有机污染物而言,虽然植物萃取、植物降解以及植物挥发等都可能有一些贡献,但主要的还是根域分解。通过根系分泌物的作用,促进根圈微生物的生长与繁殖,而且植物种植还可以改善根域土壤的氧气供给,这些都可以促进有机污染物的分解,土壤植物修复的关键是选择合适的植物。

一般具有以下特征的植物较为理想:土壤中污染物浓度较低的情况下也可以多量吸收和积累;对污染物具有较高的耐性、富集能力或促进分解的能力;对多种污染物同时具有较好的修复能力;生长快、生物量大、耐病虫害、容易栽培种植与管理;收获后通过有效利用(如制造生物燃料、作为观赏花卉等)产生高附加值的经济效益。

2 植物修复技术的特点及其发展

目前修复与净化污染土壤有多种可以应用的技术,包括掘削除去、填埋、焚烧、热解、洗净、药剂固化、生物修复等。污染场地修复中,具体需要什么技术需要根据污染土壤的规模、污染程度、污染类型、修复后土壤的用途等决定。表2就各类技术进行了大概比较。一般而言,物理/化学的处理方法在短时间内可以处理污染土壤,但成本高耗能大,并破坏土壤机能,尤其会严重破坏土壤的植物生产机能,而且容易造成二次污染等。通过物理/化学方法处理后的土壤,一般会丧失其生物生产机能,也就是会丧失作为农林业生产的土壤资源。这些方法主要适用于面积小污染严重的情况。

植物修复技术的最大优点是利用自然条件下植物的生长修复污染土壤,成本低,可以维持和改善土壤性能,对应的污染物十分广泛,同时有利于对周围水质、大气、环境绿化的改善,具有良好的社会、生态、综合效益,很容易被公众接受。缺点是修复周期长,对深层污染的修复有困难,容易受气候等因素影响。植物修复一般适用于污染浓度不高,污染范围较大的农林业土壤。

人类利用植物净化环境早已存在,如20世纪20年代土壤化学研究者和探矿者就利用植物抽取土壤中的金属^[7],芦苇等也早已用于水质净化^[8]。但是,植物修复技术概念的形成、发展、系统研发以

及一些示范性试验是从20世纪70年代才渐渐发展起来的,特别是对在海湾战争中大量原油及其中的重金属的修复,该技术受到一定程度的重视并推动其发展^[9]。此后,出现了通过植物栽培收获超重金属积累型植物,从而对重金属污染土壤进行系统修复的提案^[10],而对利用植物修复有机污染物的系统研究展开就更晚一些^[11]。笔者对含有 phyto remediation 关键词的论文通过 JST 和 PubMed 的科学论文检索系统进行了统计,发现20世纪90年代以后发表的论文数量显著增加,这也说明了植物修复技术研究开发的进展情况^[2]。

表2 土壤污染处理性能的比较

比较项目	植物修复	微生物修复	物理化学的修复方法
修复对象物质	无机污染物 有机污染物	有机污染物	无机污染物 有机污染物
费用	低	低	高
外部能源	不必要	不必要	必要
修复效率	低	稍高	高
低浓度大面积污染的处理效果	有效	有效	困难
土壤机能的维持	容易	容易	困难
受外部环境的影响	大	中等	小

3 植物修复技术成果

植物修复技术的系统研发在很多国家的政府、大学、研究所以及民间企业的参与下,在对各种污染物的修复以及促进修复效率等方面取得了大量研究成果。现在,植物修复技术研究开发在美国、加拿大、欧洲、中国等很多国家和地区都非常活跃,已经成为环境修复技术中的热点而备受关注。中国大概从2000年前后开始,在国家“863”计划、“973”计划和一些自然科学基金项目支持下,植物修复领域的研发工作不断推进,现在产官学研各类机构给予重视,研发工作活跃,取得了值得瞩目的成果。

在植物修复中,对无机污染物尤其是重金属类的研究较为广泛。20世纪80年代以来,关于利用超积累植物清除重金属污染土壤的设想提出以来,超积累植物的研究逐渐展开,并成为植物修复研究的热点^[12],对其吸收、转运和积累重金属的生理和生化机理有了清楚的认识。目前,国内外在此方面有大量研究,已发展到分子水平^[13-14],并克隆和鉴定出相应的重金属转运体基因 ZTP1、ZNT1 和 ZNT2,为进一步运用基因工程改良植物的修复潜能提供了一条有效的途径^[13]。重金属超量积累植物

(hyperaccumulator)是指其组织内能够超量吸收和积累重金属的植物,超积累植物体内的重金属含量为一般植物的100倍以上。一般的标准是,Hg为10 mg/kg,Cd为100 mg/kg,Pb、Cu、Ni、Co、As、Cr为1000 mg/kg,Zn、Mn为10 000 mg/kg以上^[2]。现在至少已经发现了45科约400多种的重金属超积累植物,其中很多已经产业化^[14]。表3是几种超积累植物及其积累能力。我国目前发现的超积累植物有砷-蜈蚣草(*Pteris vittata*)、锌-东南景天(*Sedum alfredii* Hanc)、锰-商陆(*Phytolacca acinosa*)、镉-龙葵(*Solanum nigrum*)等。

表3 重金属高浓度浓缩植物种及其蓄积能力

植物种	积累元素	积累浓度/(mg/kg)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn, Cd	51600, 18000 ^[6]
<i>Ipomea alpina</i>	Cu	12300 ^[6]
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10200 ^[6]
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	14900 ^[15]
<i>macadamia neurophylla</i>	Mn	51800 ^[6]
<i>Psychotria douarrei</i>	Ni	47500 ^[6]
<i>Thlaspi rotundifolium</i>	Pb	8200 ^[6]
<i>Pteris vittata</i>	As	20000 ^[16]

关于利用植物根系分泌的酵素以及利用根圈微生物的活性修复有机污染物的研究相当广泛。现在对各类农药杀虫剂、木材防腐剂、石油类化合物、DNT等炸药类、TCE等氯素类有机污染物等各种物质的植物修复均有报道,其产业化也得到推进^[2]。即使对于一些难分解的化学物质如二恶英类等,研究发现有些植物(如栗、苹果等)根系可以分泌一些促进其分解的酵素^[17]。

但是,植物修复最大的瓶颈问题是其修复效率低,所以如何促进植物修复效率的提高是研究的重点。在尽量选择高修复能力植物的基础上,促进植物修复效率的研究主要有以下几个方面。

1) 化学促进法。这种方法是通过化学处理促进土壤中金属的可移动性,使金属更容易被植物吸收。多种表面活性剂如EDTA, CDTA, DTPA, ED-DHA, NTA等被广泛研究和利用,并证明对重金属的积累有一定的促进作用,但这种方式也可能增加重金属被淋洗到地表深层,对地下水造成污染的风险。此外,发现尽管EDTA增加了重金属的可移动性以及植物根部的浓度,但可能对植物地面部位的积累量影响不大^[12]。

2) 转基因工程技术。通过基因转换技术提高超积累植物的生物量,或克隆出超积累植物以及分泌生物降解酶的植物,用于促进植物修复的效

率^[18]。这一技术也许在将来具有发展前景,但因为可能存在的一些未知风险以及一些禁止在野外使用这类植物的有关法律^[19],目前其应用受到限制。

3) 植物-微生物联合修复体系。在植物生长的同时,其根系及其分泌物为微生物的繁殖提供了良好场所。研究表明,植物根际区域的微生物具有丰富的多样性,其数量一般明显高于非根际区域,这在很大程度上提高了对土壤中有有机污染物的降解率。微生物的旺盛生长,不仅可以促进有机污染物的分解,也能促进植物生长。现在研究主要着重于植物和菌根菌的共生方面^[20]。向土壤中添加外部有用微生物的方式也得到关注,但如何解决有效微生物在土壤中的旺盛增殖是一个关键性难题。笔者的研究组通过向植物添加白色腐朽菌,促进了白色腐朽菌在土壤中大量存活和植物根际的旺盛生长,进而促进了植物生物量的显著提高。通过建立多年生黑麦草、大麦等与白色腐朽菌联合修复体系,接种区植物根系的重量与微生物数量显著增加,4个月后土壤中的二恶英减低率达15%~45%^[21-22]。

4) 耕作技术。通过改进农业耕作技术也可以促进植物修复效率。通过合理施肥与有机碳源的添加等可以促进植物生长和微生物活性,由此可以提高植物净化的效率。例如, HUANG等^[23]设计了多过程植物净化方式(Multi-process phytoremediation)以强化有机污染土壤的修复。该方式包括土壤耕作通气暴露、微生物接种、植物修复等过程,其修复时间可以比单纯的植物修复缩短一半。

4 植物修复的实用化问题

植物修复虽然被广泛研究,但作为绿色环保工程技术还没有得到广泛的认识和实际应用。在促进植物修复技术的实际应用方面,修复效率的提高、修复用植物种类的扩大、复合污染土壤的应对,以及技术的系统化和稳定化等很多问题亟待解决。除此之外,植物修复技术的关键问题是经济成本问题。植物修复技术一般被称为低成本的环境友好型技术,但实际上低成本必然导致土地所有者在多年的修复期间没有收入。所以单纯依赖利用超积累植物修复土壤的传统植物修复方式,在实际应用中将受到很大限制,这也是植物修复技术难以得到广泛应用的最重要的原因。

为了促进植物修复技术的实用化,近年来我们改变了一般的利用超富集植物的修复模式,重视可以用作生物能源或观赏植物的有用植物,建立了收

益型的植物修复模式。其理念如图 2 所示^[24],用生物燃料资源植物代替植物修复专用植物,收获后的植物用于制造生物燃料。这样,每年就像农业耕作一样,将污染土壤作为资源同时进行利用和修复。这样的模式还可以促进生物燃料产业以及花卉产业的发展。笔者的研究组通过向日葵、玉米等资源植物与植物修复专用植物的比较试验,发现这些资源植物比专用植物生长快,生物量大,最终从土壤中吸取的重金属的量也不比专用植物低^[24]。以玉米为

例,如图 3 所示,污染土壤修复后收获的玉米,其籽粒供给生物酒精厂,其余部分可以做成生物炭、生物气与木醋液。生物炭可以用于工业除臭剂,生物气用于能源,木醋液用于生物防虫剂等。通过这样的方式可以增加玉米的附加值。所以,利用生物燃料型资源植物修复污染土壤,从土地资源的利用与修复以及收益性来看,可能是一个有效的模式。现在,我们正在利用高性能花卉类植物作一些代表性的农田修复试验,取得了一定效果。

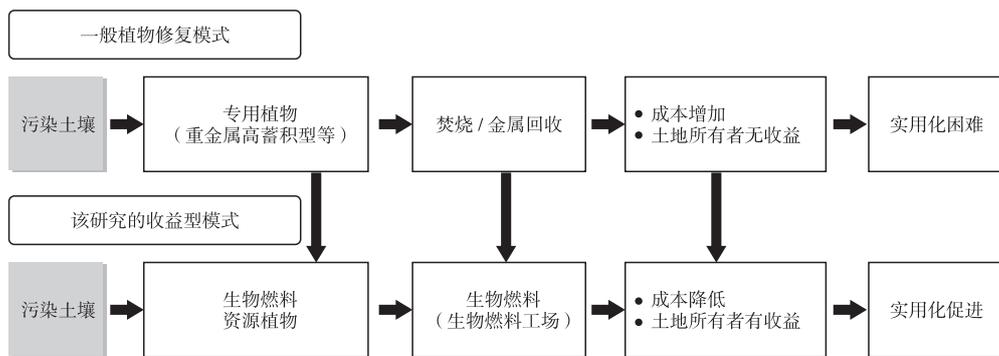


图 2 一般植物修复与收益型修复模式的比较

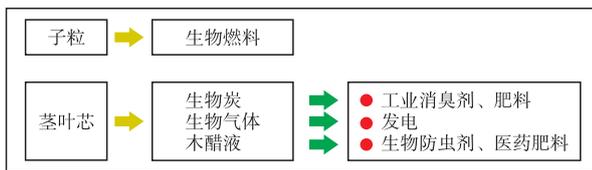


图 3 污染土壤修复后玉米的有效利用

5 今后展望

如何通过合理的方式修复广泛存在的污染土壤是一项重要的课题,也具有重要的社会意义和国际意义。笔者认为通过促进植物修复技术的实际应用解决这一难题十分必要。资料表明美国有 21.7 万个污染区域^[2]。日本在 2003 年实施污染土壤对策法后被查明的污染土壤的件数年年增加。根据报道,中国受镉、砷、铬、铅等重金属污染耕地面积近 2 000 万公顷,约占耕地总面积的 20%,每年造成的粮食产量损失高达 1 000 万吨,直接经济损失达 200 多亿元^[25]。要解决这样大范围存在的土壤污染问题,光靠一般的物理化学方法显然很难实现。调查资料表明,修复一个污染点平均需要 1 600 ~ 2 500 万美元的巨额费用^[2]。美国从 20 世纪 80 年代实施包含污染土壤修复义务的 CERCLA 法已经过了 30 多年,其污染土壤的修复治理进展不太明显。日本在 2003 年实施了污染土壤特别对策法之后,很多被查明的污染土壤的修复工作也进展艰难。关键原因是物理化学技术需要巨额的费用以及对土壤机能的

破坏。

目前,污染土壤的修复在产业方面也是一个迅速成长的领域。现在欧美日等国家有很多公司参与土壤修复业务。在日本有包括日立、松下、三菱等大公司在内的很多公司参与土壤与地下水的净化业务, DOWA 集团于 2010 年与中国公司合作进入了中国土壤净化市场。植物修复作为一个绿色环保型工程技术,也会有良好的发展前景。美国的植物修复市场在 2000 年时约为 1 亿美元,到 2005 年增长了 5 倍^[2]。日本在 1999 年的市场规模为 100 万美元,2005 年增加了 8 倍,预计到 2020 年将增加到 3 亿美元^[2]。随着中国有关土壤污染治理法规的加强,中国土壤修复的需求量正在迅速增加。

植物修复以天然的太阳能为能源,适用于大面积中低程度污染区域的治理,尤其是农业污染土壤的治理。其成本较低,而且具有良好的社会、生态、土壤资源保护等综合效益。基于植物修复的研究现状与将来的需求,植物修复的主要课题有以下几个方面。

1) 发现和筛选出富有应用价值的超富集性植物和具有较高富集能力的经济型植物资源。研究其分布、特性、修复机理、修复效率、应用价值、管理方式、适合栽培的地域,建立数据库,为各地区污染土壤的植物修复工作提供依据和基础。

2) 建立适合复合土壤污染的修复体系,提高修

复效率。可以考虑通过利用植物与微生物以及与物理化学方法相结合的联合修复体系。

3) 建立高附加值的收益型修复体系。将污染土壤作为可再生资源在有效利用的同时进行修复,让污染场地的所有者在修复期间也可以继续获得良好的收益。比如,种植的玉米或向日葵等资源性作物直接贩卖给生物燃料公司而不是作为粮食流通到市场,从而降低对人们健康的危害。因为污染物一般在花卉部位积累浓度较低,所以生产的花卉在符合安全标准的范围内也可以考虑利用。

4) 植物修复技术的实际应用和长期监测研究。现在,利用植物修复技术修复实际污染场地并将土壤修复完好的事例,以及对修复效果、投入成本和效益产出进行长期监测等方面的数据仍然非常缺乏,这方面的研究非常必要。

5) 修复后植物资源的有效处理技术体系。将收获后的植物进行焚烧的方式不是最佳方式,如何将其作为生物资源进行高附加值的有效利用,并对其中的重金属予以回收等方面的低成本实用性技术体系亟须解决。

参 考 文 献

- [1] SALT D E, SMITH R D, RASKIN I. Phytoremediation [J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Bio*, 1998, 49: 643-68.
- [2] 王効举,米持真一,磯部友護,等. 植物を用いた土壤修復法の実用化に向けた研究の推進[J]. 埼玉県環境科学国際センター報, 2016, 16: 78-84.
- [3] FIORENZA S, OUBRE C L, WARD C H. Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soil [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2000.
- [4] ADAM G, DUNCAN H. Influence of diesel fuel on seed germination [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120: 363-370.
- [5] GLASS D J. U. S. and international markets for phytoremediation 1999-2000 [M]. Needham MA: D. Glass Assoc, 1999.
- [6] 高野博幸,丸田俊久. Phytoremediation: 植物利用による環境修復技術[J]. 太平洋セメント研究報告, 2000, 138: 73-80.
- [7] REVUELTA M B. Mineral resources: from exploration to sustainability assessment [M]. New York: Springer, 2018: 663.
- [8] 森川弘道. ファイトレメディエーションによる環境保全・修復の新展開[J]. 環境科学情報, 2002, 31: 30-36.
- [9] KUMAR P B, DUSHENKOV A N, MOTTO H. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils [J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(5): 1232-1238.
- [10] 王効举. ファイトレメディエーションによる汚染土壤の改善技術の現状と課題[J]. 都市緑化技術, 2007, 63: 31-34.
- [11] CAMPOS V M, MERINO I, CASADO R, et al. Review phytoremediation of organic pollutants [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2008, 6(Special issue): 38-47.
- [12] LOMBI E, TEARLL K L, HOWARTH J R, et al. Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Physiol*, 2002, 128: 1359-1367.
- [13] 孙琴,王晓蓉,丁士明. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 30-36.
- [14] 王効举,李法雲,杉崎三男. ファイトレメディエーションによる汚染土壤修復の現状と展望[J]. 全国環境研会誌, 2004, 29(2): 13-22.
- [15] LASAT M M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms [J]. *J Environ Qual*, 2002, 31: 109-120.
- [16] MA L Q, KOMAR K M, TU C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic [J]. *Nature*, 2001, 409: 579.
- [17] ALKORTA I, GARBISU C. Phytoremediation of organic contaminants in soils [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79: 273-276.
- [18] ROBINSON B, GREEN S, MILLS T, et al. Phytoremediation: using plants as biopumps to improve degraded environments [J]. *Aust J Soil Res*, 2004, 41: 599-611.
- [19] SINGH O V, JAIN R K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2003, 63: 128-135.
- [20] CHEN X, WU C, TANG J, et al. Arbuscular mycorrhizae enhance metal lead uptake and growth of host plants under a sand culture experiment [J]. *Chemosphere*, 2005, 60: 665-671.
- [21] OH K, SUGISAKI M, HOSONO S, et al. Study on remediation of dioxin-contaminated soil by plant-microbial combinations [J]. *Organohalogen Compounds*, 2007, 69: 2536-2539.
- [22] OH K, HOSONO S, LIN Q, et al. Remediation of dioxin-contaminated soil with combination of biofuel crops and white rot fungus [J]. *Organohalogen Compounds*, 2009, 71: 1177-1182.
- [23] HUANG X D, CLICK B R, GREENBERG B M, et al. Combining remediation techniques increases kinetics for removal of persistent organic contaminants from soil [J]. *ASTM Special Technical Publication*, 2001, 1403: 271-280.
- [24] 王効举. 環境にやさしい修復: 土壤汚染対策で新技術 [N]. 埼玉新聞, 2010年5月10日.
- [25] 赵晓军,陆泗进,魏复盛. 土壤重金属污染对食品安全的影响及对策建议[J]. 食品科学, 2012, 33(增刊1): 8-11.

特约专家介绍



王効举(1967—),男,理学博士,日本埼玉环境科学国际中心首席研究员。1995年获中国科学院南京土壤研究所博士学位,1999年日本国立蔬菜茶叶研究所博士后出站。主要从事环境修复、自然环境保护、土壤修复改良、生态农业、水质环保技术等有关领域的研究与开发工作。在

《Chemosphere》《Pedosphere》《International Journal of Phytoremediation》《Waste management》《土壤学报》《都市绿化》等国内外学术刊物上发表日英中论文150余篇。先后承担和参加日本文部省、日本国际振兴机构、中国国家自然科学基金等科研项目80余项。多次应邀担任国际学术大会学术委员会主席主持国际学术会议。

(编校:夏书林)