

# 生态修复过程中的若干问题 ——以 POPs 污染土壤为例

殷培杰<sup>1,2</sup>, 李培军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 南开大学环境科学与工程学院城市生态环境修复与  
污染防治(天津市)重点实验室, 天津经济技术开发区, 天津 300457)

**摘要:**生态修复是在受污染土壤所在的区域环境条件下,以土壤生态系统自净能力为基础耦合其它修复技术,达到修复高效、安全和可靠的目的。以 POPs 污染土壤为例,总结了污染土壤生态修复的 4 个原则,分析了生态修复过程,对修复目标确立,修复过程控制,修复结果评估做了探讨。在分析耦合概念和生态修复过程的基础上,认为修复技术的耦合过程是生态修复的关键,总结了生态修复中的耦合原则、耦合策略和耦合方式。展望了生态修复的发展趋势和研究方向。

**关键词:**持久性有机污染物;生态修复;耦合

文章编号: 1000-0933(2007)02-0784-09 中图分类号: Q142, X171 文献标识码: A

## The several key problems in ecological remediation process of soil with POPs

YN Pei-Jie<sup>1,2</sup>, LI Pei-Jun<sup>1</sup>

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016

2 Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Teda, Tianjin 300457, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 0784 ~ 0792

**Abstract:** Because of the risk of POPs pollution, it is necessary to apply effectiveness, low-cost and safe remediation methods. Neither bio-remediation nor combined remediation is enough to achieve such goals; therefore concept of eco-remediation emerged. Eco-remediation couples self-decontamination by ecosystem within the pollution area as well as enhanced remediation. Taking POPs-polluted soil as an example, this paper summarizes four principles of eco-remediation: (1) self-decontamination by ecosystem within pollution area is the basis of eco-remediation; (2) a combination of bio-metabolism process, environmental factor and physical-chemical processes is the key mechanism of eco-remediation; (3) remediation process and remediation result must be eco-safe; (4) the objective of eco-remediation's aim should be restoration of the original functions of ecosystem. This paper also discusses the establishment of goals of remediation, controlling remediation process and assessing remediation results. Based on the basic meanings of the coupling concept and the analysis of eco-remediation processes, the authors believe that coupling process is the key of eco-remediation. The basis of effective remediation is applying right coupling principle, coupling strategy and coupling methods. Coupling principle had four parts that transforming POPs into easily degradable materials or reducing its toxicity, establishing proper conditions for biological factors, enhancing bioavailability in soil, and creating super microorganisms that have new metabolism. Coupling

**基金项目:**国家重点基础研究计划 973 资助项目(2004CB418506);国家自然科学基金资助项目(20407013);南开大学青年教师启动基金资助项目(J02020)

**收稿日期:** 2005-12-01; **修订日期:** 2006-12-13

**作者简介:**殷培杰(1972~),男,甘肃张掖人,博士,主要从事污染生态学研究。E-mail: yinpeijie@126.com

**Foundation item:** The project was financially supported by Major State Basic Research Development Program (No. 2004BC418506), National Science Foundation of China (No. 20407013), and Young Teacher Startup Program of Nankai University (No. J02020)

**Received date:** 2005-12-01; **Accepted date:** 2006-12-13

**Biography:** YN Pei-Jie, Ph. D., mainly engaged in pollution ecology. E-mail: yinpeijie@126.com

mechanisms include: coupling of non-biological factors and biological factors, coupling of biological factors, and coupling of cell and gene engineering. Coupling methods included simultaneous coupling and stage coupling. In the end, the authors forecast the research trends and directions of eco-remediation.

**Key Words:** POPs; ecological remediation; coupling

## 1 POPs污染土壤生态修复问题的提出

持久性有机污染物 POPs(persistent organic pollutants)是指通过各种环境介质(大气、水、土壤等)能够长距离迁移并长期存在于环境,进而对人类健康和环境有严重危害的天然或人工合成的有机污染物质,它具有以下特征:长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性。POPs现在几乎已遍及地球的每个角落,日益严峻地威胁着人类安全和全球生态系统健康,是人类面临的一个紧迫的环境问题<sup>[1,2]</sup>。

2004年6月25日,中国全国人大正式批准于2001年5月22日在斯特哥尔摩通过、同年5月23日中国政府签署的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》,这意味着中国将全面履行公约所规定的各项基本义务和常规义务,根据公约规定,缔约方须在公约对缔约方生效当日起计的两年内制订国家实施方案并尽快组织实施<sup>[3]</sup>。目前对于 POPs问题的解决侧重于 POPs废物的处理与处置,对于 POPs造成的环境介质污染重视不够,缺乏相应的处理技术和解决办法。

解决 POPs问题的手段大体可分为两类:第一类为 POPs废物的处置与处理,第二类为 POPs污染介质(主要土壤、水体和沉积物)的处置与处理,前一类主要是针对浓度较高的废物,以物理、化学手段为主,强调以破坏其分子结构或以隔离的方式使其不与外界接触;第二类针对浓度较低的污染介质,主张运用多种手段,以降低污染物浓度和消减毒性为目标。本文生态修复所指的对象为第二类,即探讨受到较低浓度 POPs污染土壤的修复问题。

### 1.1 生态修复概述

生物修复、联合修复等概念的提出反应了人类解决土壤环境问题策略的不断进步。POPs污染问题,仅依靠单一手段进行修复存在诸多问题(如达不到修复要求,费用过高,修复后土壤的使用价值降低或丧失等),因而综合多种手段使得整个修复达到有效、低耗和安全是十分必要的。在此要求下,生物修复和联合修复的内涵就显得过于简单,因此提出了生态修复问题。

生态修复的提法主要集中于两大领域,一为环境保护领域,二为自然保护领域。自然保护领域提出的生态修复概念主要针对受干扰或受损生态系统的恢复,如水土保持和矿山的生态修复等<sup>[4,5]</sup>。环境保护领域提出的生态修复概念以孙铁珩的观点为代表:污染生态修复不同于生物修复,生物修复是利用具有净化功能的生物和微生物对污染物消减和净化,是单纯的生物修复,而生态修复则强调通过调节诸如土壤水分、土壤养分、土壤 pH 值和土壤氧化还原状况和气温、湿度等生态因子,实现对污染物所处环境介质(水、气、土、生等)的调控,发挥生物净化功能<sup>[6]</sup>。本文探讨的生态修复问题主要针对环境保护领域,重点讨论受到 POPs污染土壤的修复问题。

由于 POPs为难降解污染物,自然降解所需时间较长或者根本无法降解,因而外加修复手段是必须的,外加修复手段之间、外加修复手段与污染土壤自净能力如何结合以发挥最佳效率是这类问题的核心。POPs自身特点决定了它对人类的巨大危害性,因此在修复过程中应当确保对于人类和生态系统的安全。综上所述,对 POPs污染土壤进行生态修复,应考虑在如下原则的基础上进行:

- (1)污染土壤生态系统的自净功能是生态修复的基础;
- (2)生物代谢过程、理化技术和环境因素的耦合是生态修复得以发挥作用的关键所在;
- (3)修复过程和结果必须是生态安全的;
- (4)以恢复污染土壤生态系统的原有服务功能为宗旨。

污染土壤生态系统自净能力的基础在于其环境容量,但当前对于环境容量的研究都集中于重金属。陈怀满认为:有关有机污染物土壤环境容量的研究甚少,其一是因为有机污染物进入土壤后能较为迅速的降解,其容量值的研究在实践意义上不大;其二是技术上的原因。由于土壤中有机污染物定量测定的复杂性,给土壤中有机污染物的背景值研究带来了很大的困难<sup>[7]</sup>。由于环境分析化学的进展,土壤中有机污染物的前处理技术和各种痕量分析的仪器手段日益成熟,为分析土壤中有机污染物的环境背景值提供了基础。当前土壤中有机污染物不可逆解吸部分的生物可利用性研究是环境有机化学领域的一大热点,对于这一问题理解的不断深入,也为受到 POPs 污染土壤的自净能力研究提供了背景知识。

### 1.2 生态修复过程

应首先对污染土壤生态系统进行全面分析,评估 POPs 的生态风险和污染土壤的自净能力,根据国际公约、国家法律、法规和政策制定若干个备选方案,然后从技术可行性、经济性和修复安全三个角度进行综合考虑,确定实施方案。在实施过程中应对修复过程进行监控,修复完毕后,采用生态毒理与化学分析手段对修复的安全性进行评价,以确保修复安全。

生态修复的实施过程见图 1。

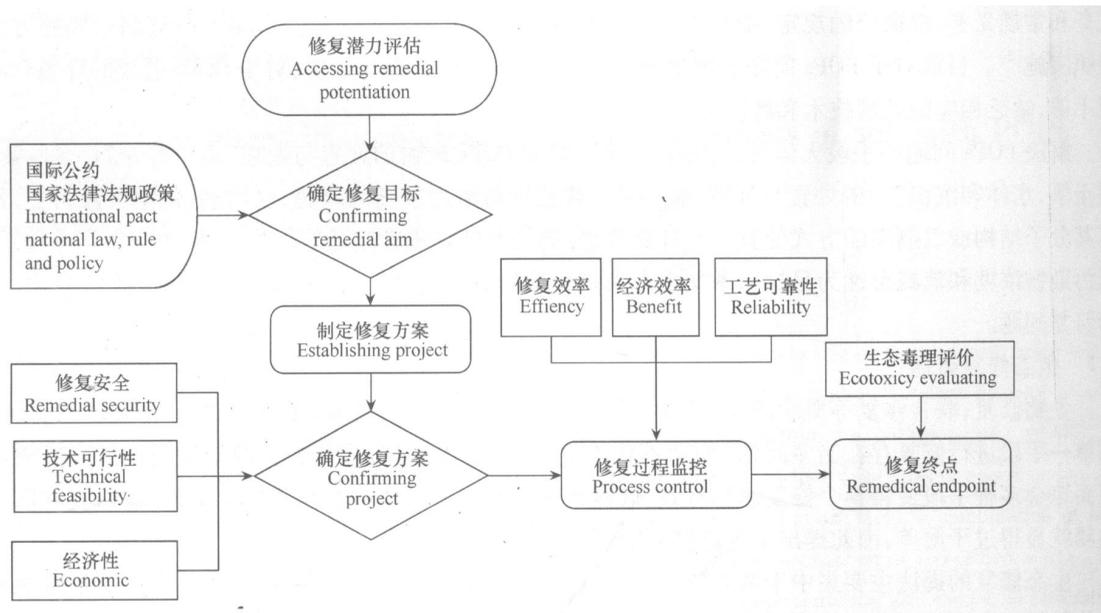


图 1 生态修复的实施过程

Fig 1 Worksheet of eco-remediation

修复措施不当,会使污染物产生扩散,带来新的风险,特别是对于 POPs 物质导致的土壤污染的修复就更应该慎重,应将修复目标和修复安全紧密结合,避免因为修复产生新的环境风险。

#### 1.2.1 确立修复目标

进行修复前应对污染区域进行调查和分析,首先确定是否存在环境风险以及危险程度,其次对 POPs 的种类、污染程度和存在方式,污染土壤和各种环境因子进行研究。前者可通过污染土壤诊断的方法体系进行,后者以化学分析和生态学研究相关方法进行。通过调查掌握了 POPs 污染土壤生态系统的背景条件,这是确定修复目标的前提。

确立修复目标对修复工艺的选择、修复消耗的资源和时间都有重要的影响,确立依据主要是污染修复标准。由于我国还未建立起各种土壤污染物的修复标准,一般所指的修复标准是指土壤环境质量标准,但欧洲和美国的一些地方已建立了部分污染物的土壤修复标准。污染土壤修复标准是指被技术和法规所确立、确认的土壤清洁水平,通过土壤修复或利用各种清洁技术手段,使土壤环境中污染物的浓度降低到对人体健康和

生态系统不构成威胁的技术和法规可接受的水平<sup>[8]</sup>。

我国于 1995年颁布的 GB 15618-1995标准,仅规定了 DDT、HCH两项有机污染物指标,对当前影响人类和生态系统健康的许多“新型”有机污染物并未涉及,如 PCBs、PAHs等。中国各地气候类型多样,土壤性质差异甚大,因而 POPs进入土壤后的行为和生态环境效应也有较大不同,故以同一种标准来判定修复后的土壤是否达到修复目标并不合理。所以应尽快将对人类和生态系统健康有严重危害的 POPs污染物列入土壤环境质量标准之中,且根据行政区划或土壤类型建立相应的地方标准或子标准,或者以 POPs污染物在土壤中的生物可利用部分而不是总量作为标准。

### 1.2.2 生态修复过程控制

生态修复是建立在生物对土壤污染物产生有效作用的基础上,因此外界条件如低温、厌氧条件、营养物质等对生物发挥这种有效作用有重要影响。此外,在修复过程中有机污染物的不完全降解和次生污染是客观存在,并可能产生更加有毒的物质,因此也对这种作用产生影响<sup>[9,10]</sup>。所以对修复过程的控制可分为两个方面:一是对修复过程中有效生物作用因子变化的监控;二是对修复过程中 POPs及中间产物的监控。

分子生物学的发展对修复过程中生物作用因子的变化提供了新的工具和视野。早期利用 DNA 探针,现在普遍将多种分子生物学手段 16S rDNA (扩增片断核苷酸序列分析)、16S rRNA (间隔翻译区核苷酸序列分析)技术、ARDRA (扩增性 DNA 限制性酶切片段多态性分析技术)、TREL P (末端限制性片段长度多态性技术)和 DGGE (变性梯度电泳技术)单独或结合使用,用于修复过程污染区域微生物分类鉴定和多样性分析,有毒有机污染物作用下的微生物分子变异、微生物种群变异等方面的研究<sup>[11,12]</sup>。

新型色谱和质谱技术、核磁共振技术、手性环境化学以及碳和氮稳定同位素技术等分析手段的不断进步,使得对修复过程中 POPs及其中间产物的监控变得更加精确和易于操作,能够及时发现其存在的问题以便调整。通过以上化学和生物手段的综合使用可生态修复过程处于安全、有效和可控的范围之内。

### 1.2.3 修复结果评估

目前土壤污染的修复终点通常以目标污染物的减少为判断标准,但这种以化学分析为主的判定方式往往不能全面科学的表征土壤环境质量,且由于 POPs及其代谢产物的危害性和复杂性,使得这种简单的修复终点判定方式存在较多缺陷。将化学分析手段与土壤生态毒理诊断相结合可能是今后修复终点判定的主要方法。

(1)修复效果的评估——项目分析 效果分析主要是对修复效率、经济效率和工艺可靠性进行评价,可利用一些管理工程的方法进行评估。在西方发达国家对 POPs污染土壤修复逐渐形成一定规模商业市场,如在 2000年,加拿大的 PCBs处理的市场规模约为 3~6亿加拿大元。西方的一些环境工程公司在实施此类项目时,通常都有严格的项目分析和实施流程,并且背后都体现了严格的质量控制体系,这些都值得我国开展 POPs污染土壤修复时进行借鉴。

(2)修复的安全评估——生态毒理诊断 生态毒理诊断主要是针对修复结果的安全评价,通常采用有代表意义的生物,如河流湖泊中采用鱼和微型动物,近海采用贝类,土壤中采用蚯蚓和植物等。生态毒理分析可在修复结束后一段时间内多点、多次进行,也有结合多种生态毒理技术进行综合评价,亦有将生态毒理实验与化学分析结合起来<sup>[13~15]</sup>。

需要注意的是即使修复达到目标,修复结果可能仍然是不安全的。Meier报道了一个受到重度 PCBs污染的区域,使用溶剂萃取技术将土壤中的 PCBs含量降低了 99%,达到了修复目标,使用蚯蚓和植物进行生态毒理评价发现:修复前后对于蚯蚓的生殖毒性变化不大,修复后植物毒性和遗传毒性则更大,原因可能是残余的有机溶剂、重金属和原有污染物一起造成的,作者认为在危险废物修复评估中进行生态毒理诊断是必需的,因为它能够说明修复过程带来改变的潜在的不利影响<sup>[16]</sup>。

## 2 生态修复过程中的关键问题——耦合

沈德中认为生物修复必须遵循 3个原则:适合的微生物、适合地点和适合的环境条件<sup>[17]</sup>。这 3个原则既

表明了生物修复的要素又表明了生物修复的局限性,适合地点和适合的环境条件是生物修复发挥其作用的前提。生态修复从方法论角度而言反映的是一种系统修复观,因而必须从土壤生态系统的角度分析和考虑修复问题,强调将以土壤生态系统的自净能力为基础,理化技术和生物技术之间或生物技术之间进行“组装”,并在污染区域的环境条件下,将这种“组装”效益发挥的最大。本文提出了以耦合概念表征这种“组装”,并对生态修复中的耦合过程和耦合策略进行了分析。

## 2.1 耦合概述

耦合(couple)本是物理学的一个概念,指两个或两上以上的系统或运动方式之间通过各种相互作用而彼此影响以至联合起来的现象,是在各子系统间的良性互动下,相互依赖、相互协调、相互促进的动态关联关系。目前耦合概念的应用已不局限于物理学科,在恢复生态学、景观生态学和农业生态学等领域,耦合常用来表示生态系统之间,生态系统各子系统之间,生态系统某些组分之间以及生态系统某些组分与环境要素之间的相互作用机制<sup>[18,19-21]</sup>。

国外对受到卤代芳烃类化合物污染的土壤和地下水研究中发现,经过化学处理后,这些污染物减轻了毒性,增加了生物可处理性,因而在化学处理后增加了生物处理部分。在英文文献中通常使用 couple 和 combine 两个词表示两种工艺的有机结合, couple 英文直译即为耦合。对于 PCBs 污染土壤,采用堆腐技术能够去除 1~3 氯原子取代的 PCBs,对于大于 4 个氯取代的 PCBs,作者认为应 coupling 其它修复技术才能有效去除<sup>[22]</sup>。国内废水处理、土壤污染修复方面的论文中也有明确的耦合提法<sup>[23-25]</sup>。

生态修复过程中,土壤中的有机质、粘土矿物本身参与土壤生态系统的各种物理、化学和生物过程,这些过程之间也存在相互作用,且这些作用影响着生态修复的诸多环节。因此在修复中必须加以考虑,甚至利用这样一些作用达到修复目的。所以在生态修复中,使用耦合比联合更能反映生态修复的内涵。

## 2.2 耦合原则

POPs 的理化性质和在土壤中的存在状态对生态修复策略的选择有重要影响。POPs 为憎水性难生物降解物质,通常对生物有毒,在土壤中易被有机质所吸附,处于吸附态的 POPs 随着吸附时间的增加,不可逆解吸部分增加,因而生物可利用性降低,成为所谓的“老化态”<sup>[26]</sup>。这也就增加了修复的难度,因此,耦合多种手段解决问题十分必要。如何使耦合技术发挥作用,可考虑如下原则: 首先将 POPs 转变为较易生物降解的物质或者降低其毒性,然后进行生物降解; 在修复区域中创造有利于生物因子发挥作用的条件; 提高其在土壤介质中 POPs 的生物可利用性; 利用基因工程和细胞工程技术创造出具备新的代谢途径途径的“超级微生物”。

## 2.3 耦合策略

一些研究证明,采用正确的修复策略能够有效修复 POPs 污染土壤。对一个由降解菌、植物和蚯蚓组成的 PCBs 污染土壤修复系统的研究表明:与对照组相比加蚯蚓组的 PCBs 去除率有一定提高,蚯蚓的一些作用如均匀分布降解菌,提高土壤供氧,增加土壤中的碳、氮成分,改善土壤中微生物的群落结构都被认为是有助于 PCBs 降解, PCBs 的去除是多种因素共同作用的结果<sup>[27]</sup>。在实验室条件下,用取自美国纽约、新泽西等地的 PCBs 污染沉积物进行模拟自然降解研究,5 个月后有 40% 的 PCBs 消失,结果显示定期耕作能够产生明显的效果,但导致 PCBs 去除的原因无法确定,作者推测是光解、挥发、生物降解共同作用的结果,而非单一因素<sup>[28]</sup>。

### 2.3.1 非生物因子-生物因子之间的耦合

Shimura 的研究表明 UV 辐射结合微生物处理能够完全降解 PCBs,首先通过 UV 辐射将在甲醇中的绝大多数高氯代的 PCBs 降解为平均低于 3 个氯取代的 PCBs,然后用一种 PCBs 降解菌在一周内可将 PCBs 几乎完全降解<sup>[29]</sup>。用表面活性剂 POL 淋洗 PCBs 污染土壤,添加 1% 的 POL 可去除 70% 的 PCBs,在淋洗液中加入两种能以 POL 为共代谢基质 PCBs 的降解菌,经过 12d 的降解,可去除 90% 表面活性剂和 35% 的 PCBs,剩余的 PCBs 用硅藻土等吸附材料可去除 90%<sup>[30]</sup>。

一些学者在运用 PRB 进行难降解有机物修复中发现,一些土著菌能够在 PRB 修复系统的铁表面定居形成 Microbial-Fe<sub>0</sub>系统,该系统在处理一些难降解污染物 RDX、氯有机溶剂、硝酸盐和铬污染方面表现出巨大潜力<sup>[31,32~35]</sup>。

### 2.3.2 生物因子之间的耦合

(1)厌氧-好氧微生物 起始浓度为 59 mg/g 的高氯代 PCBs 混合物 Aroclor 1260 污染的土壤,经过 4 个月厌氧处理,然后再经过 28d 的好氧处理,PCBs 的浓度降为 20 μg/g<sup>[36]</sup>。用过氧化氢加入沉积物创造的有氧环境诱导产生 PCBs 的好氧降解菌,在 96d 的实验期间,好氧降解菌的量逐渐增加,PCBs 的浓度由 135 mg/g 下降至 20 mg/g,这表明具有脱氯现象的厌氧沉积物似乎拥有土著的厌氧脱氯和好氧降解 PCBs 两种能力的菌<sup>[37]</sup>。上述两项研究都支持了通过厌氧-好氧方式原位修复 PCBs 污染点的可能性。使用一个可限制供氧的颗粒生物膜反应器,通过供氧方式形成偶联的厌氧-好氧环境,并与特定厌氧还原和好氧降解微生物相结合,该反应器能够将 Aroclor 1242 几乎完全矿化<sup>[38]</sup>。

(2)植物-微生物 将降解菌导入植物根区是一种非常有前景的原位修复策略。由于根区空间、温度的不均匀性,一些降解菌处于“饥饿”状态,只有一部分保持活力,所以这种策略应用的前提是在根区形成有竞争力的稳定降解菌群,这样才能有效降解污染物<sup>[39]</sup>。Dutta 研究了一种豆科植物苜蓿与混合降解菌系对于 PCBs 污染土壤的修复,在较高浓度 PCBs 条件下,存在豆科植物的修复效果更好,混合降解菌的修复效果要好于单一降解菌,所以豆科植物耦合土著混合降解菌是修复 PCBs 污染土壤的有效策略<sup>[40]</sup>。

Leigh 等研究了一种桑 (*Morus sp.*) 根部的酚类分泌物在植物生长过程中的变化情况,并证实其中的 3 种黄酮类物质可作为一种 PCBs 降解菌的生长基质<sup>[41]</sup>。使用一种可分泌类黄酮的植物与 PCBs 降解耦合的修复效果优于两者单独使用,植物的存在增加了供氧,提高了降解菌的有效分布,改变了土壤微生物的原有构成<sup>[42]</sup>。

(3)动物-微生物 Luepromchai 研究了 PCBs 污染土壤修复过程中的蚯蚓和降解菌的相互作用,降解菌或蚯蚓单独作用只能去除 3cm 土层的 PCBs,两者共同作用可去除 9cm 土层的 PCBs;添加蚯蚓组还观察到降解菌和土著降解菌数量以及降解基因 *bphA* 和 *bphC* 含量的增加,可能的原因在于蚯蚓通过改善土壤环境条件促进了降解微生物的生长和有效分布<sup>[43]</sup>。

### 2.3.3 细胞及基因工程耦合技术

把萘高效降解菌和生物表面活性剂产生菌绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 分别与增强型绿色荧光蛋白 (EGFP) 标记的黄麻根际优势菌进行原生质体电融合,再将得到的融合子定殖回黄麻根际土壤,形成产表面活性剂和对萘具有高效降解能力且在根际旺盛生长的耦合系统,绿假单胞菌产生的生物表面活性剂进一步提高了降解菌对萘的降解<sup>[44]</sup>。

## 2.4 耦合方式

### 2.4.1 阶段耦合

Hess 研究了改性 Fenton 试剂和微生物耦合处理水溶液中的 TNT,在暗处反应时,优化条件后添加降解菌可使 TNT 的矿化率从 47% 提高至 80%,酸性条件下,耦合微生物可获得完全的矿化率<sup>[45]</sup>。在添加 TNT 的沙土和砂壤土上,尽量少使用改性 Fenton 试剂前提下,耦合微生物降解在两种土壤条件下都获得了有效的降解,且生物降解部分占的份额超过 40%<sup>[46]</sup>。Nadarajah 等的研究也表明先通过 Fenton 试剂进行氧化后,然后进行生物降解两种多环芳烃,其矿化效率要远高于两种技术单独使用<sup>[47]</sup>。

### 2.4.2 同时耦合

Buyuksommez 以 PCE 浓度、过氧化氢、铁离子和微生物数量为参数研究了改性 Fenton 试剂同时耦合降解菌对 PCE 的降解,结果表明,过氧化氢、铁离子浓度和微生物数量对 PCE 矿化有明显影响,耦合降解比单独化学降解提高了 10% 的矿化率<sup>[48]</sup>。

## 3 研究展望

由于 POPs 的理化特征和环境行为,使得 POPs 污染土壤的所涉及的修复问题,成为环境修复领域面临的

新课题,并且还有相当多有机化学物质具备 POPs物质的特点,但还没有为人类社会所知,因此对于这一类修复问题所涉及的理论、原理和方法的探讨具有重大意义。

### 3.1 POPs污染土壤的环境容量研究

对于受到 POPs污染的土壤而言,修复的起点和终点是什么?实际上要回答的问题是在污染区域的某种类型土壤中,存在多少浓度的 POPs,以什么形式存在的 POPs是安全的(经过修复后也不可能将 POPs完全从土壤中清除),这就需要知道该区域这种类型土壤对于某种 POPs污染物的环境容量。对于这一问题,国内外尚无系统研究的报道,因此加强对这一领域的研究十分必要。

### 3.2 多种修复技术耦合的微观过程研究

微生物、植物和动物的代谢活动是去除 POPs的主要手段,如何协调环境因素加强这种针对 POPs的代谢活动,以及如何耦合其他手段去除 POPs是生态修复难点所在。因此应加强非生物技术与生物技术耦合、生物技术之间耦合以及它们之间与环境因素的有效结合的微观研究,以弄清有效诱导手段,从而为有效去除 POPs提供理论依据。

### 3.3 修复过程控制

由于 POPs污染的特殊性,修复过程监控就显得尤为重要,但目前对于这一问题的重要性尚缺乏认识。研究修复过程中有效生物因子(降解微生物、根系分泌物等)的变化,特别是在耦合过程中的变化是反应修复过程有效的重要因子。当前的分子生物学和色谱技术能在一定程度上表征这种变化,用现有的技术手段建立相应的监控程序和指标,或者利用更新的技术手段来表征这一变化都将是这一领域的研究方向。

### 3.4 修复安全研究

由于 POPs在环境介质中通常浓度较低,生物代谢产物众多,其中多数不是急毒性化合物,因此常规的生态毒理学指标用于表征和监控存在敏感性差、昂贵、操作繁琐等缺点,分子生态毒理学的发展,将有助于产生更加敏感、方便、有效和经济的指标来表征修复的生态毒理效应。

## References:

- [1] Yu G, Huang J, Zhang P Y. Persistent organic pollutants: One of the important global environmental problems. *Environmental Protection*, 2001, (4): 37 - 39.
- [2] Jones K C, de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution*, 1999, 100 (1-3): 209 - 221.
- [3] Liu J G, Hu J X, and Tang X Y. Primary identification on duties and obstacles of china to implement Stockholm convention. *Environmental Protection*, 2002, (8): 6 - 9.
- [4] Wang Z G. Approach to Concepts and Issues on Ecological Renovation (Continued). *Soil and Water Conservation in China*, 2003, (11): 20 - 21.
- [5] He C G. Approach to problems about natural eco-restoration project of soil and water conservation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(3): 99 - 102.
- [6] Sun T H and Zhou Q X. Retrospect and prospect of pollution ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 221 - 223.
- [7] Chen H M. Behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality. Beijing: Science Press, 2002. 23 - 46.
- [8] Zhou Q X. Methodology of enacting standards for remediation of contaminated soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 316 - 320.
- [9] Romantschuk M, Sarand I, Petanen T, *et al*. Means to improve the effect of in situ bioremediation of contaminated soil: an overview of novel approaches. *Environ Pollut*, 2000, 107(2): 179 - 185.
- [10] Song Y F, Song X Y, Zhang W, *et al*. Issues concerned with the bioremediation of contaminated soils. *Environmental Science*, 2004, 25(2): 129 - 133.
- [11] Nogales B, Moore E R, Llobet-Brossa E, *et al*. Combined use of 16S ribosomal DNA and 16S rRNA to study the bacterial community of polychlorinated biphenyl-polluted soil. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(4): 1874 - 1884.
- [12] Watts J E, Wu Q, Schreier S B, *et al*. Comparative analysis of polychlorinated biphenyl-dechlorinating communities in enrichment cultures using three different molecular screening techniques. *Environ Microbiol*, 2001, 3(11): 710 - 719.
- [13] Bremle G, Larsson P. PCB concentration in fish in a river system after remediation of contaminated sediment. *Environmental Science and*

- Technology, 1998, 32(22): 3491 - 3495.
- [14] Shen Y F, Xu T, Feng W S, *et al* Organochlorines(OCs) and polychlorinated biphenyls(PCBs) in microbial community of Hong Kong Maipo  
*Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(5): 543 - 550.
- [15] Xu T, Kong F X, Sun C, *et al* The Application of the gene recombinated cell in the detection of PCBs compounds in environmental samples  
*Environmental Science*, 2004, 25(1): 45 - 48.
- [16] Meier J R, Chang L W, Jacobs S, *et al* Use of plant and earthworm bioassays to evaluate remediation of soil from a site contaminated with polychlorinated biphenyls  
*Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16(5): 928 - 938.
- [17] Shen D Z. *Bioremediation of contaminated environment* Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 10 - 20.
- [18] Zhang H H, Fu D Z, Sun G C. Theoretical fundamentals of restoration and reconstruction of degraded forest vegetation  
*Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(1): 97 - 99.
- [19] Li M Y. Theory and application of hierarchical patch dynamics paradigm in urban ecological succession  
*Journal of Nanjing Forestry University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 2004, 4(3): 80 - 84.
- [20] Liang Y J, Yi Y L, Xu G B, *et al* Coupling effects of water and fertilizers on translocation of nitrate nitrogen in protected land  
*Rural Eco-Environment*, 2004, 20(3): 32 - 36.
- [21] Dong X B, Gao W S, Yan M C. Energy analysis of agroecosystem productivity of typical valley in less hilly-gully region of the loess plateau: A case study in Zhifanggou valley of Ansai country  
*Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 223 - 229.
- [22] Michel F C Jr, Quensen J, Reddy C A. Bioremediation of a PCB-contaminated soil via composting  
*Compost Science and Utilization*, 2001, 9(4): 274 - 284.
- [23] Li P, Wei C H, Wu C F, *et al* Study on the treatment of landfill leachate by combining anaerobic/aerobic biological fluidized bed  
*Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2002, 16(3): 345 - 350.
- [24] Wei C H, Wu J H, Shen Y Y, *et al* To treat wastewater of gas from petroleum manufactory by predominance inoculum's coupling with internal loop three-phase fluidized bed  
*Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(2): 171 - 176.
- [25] Zhang J Y, Ji M, Fang C X, *et al* Electrofusion of building coupling system for degrading anthracene and Fusants'choices  
*Environmental Science*, 2004, 25(1): 49 - 52.
- [26] Alexander M. Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants  
*Environ Sci Technol*, 2000, 34(20): 4259 - 4265.
- [27] Singer A C, Jury W, Luepromchai E, *et al* Contribution of earthworms to PCB bioremediation  
*Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 765 - 776.
- [28] Tang N H, Myers T E. PCB removal from contaminated dredged material  
*Chemosphere*, 2002, 46(3): 477 - 484.
- [29] Shimura M, Koana T, Fukuda M, *et al* Complete degradation of polychlorinated biphenyls by a combination of ultraviolet and biological treatments  
*Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1996, 81(6): 573 - 576.
- [30] Layton A C, Lapje C A, Easter J P, *et al* An integrated surfactant solubilization and PCB bioremediation process for soils  
*Bioremediation Journal*, 1998, 2(1): 43 - 56.
- [31] Gu B, Watson D B, Wu L, *et al* Microbiological characteristics in a zero-valent iron reactive barrier  
*Environ Monit Assess*, 2002, 77(3): 293 - 309.
- [32] Lampron K J, Chiu P C, Cha D K. Reductive dehalogenation of chlorinated ethane with elemental iron: the role of microorganisms  
*Water Research*, 2001, 35(13): 3077 - 3083.
- [33] Lee T, Tokunaga T, Suyama A, *et al* Efficient dechlorination of tetrachloroethylene in soil slurry by combined use of an anaerobic *Desulfotobacterium* sp. strain Y-51 and zero-valent iron  
*Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, 92(5): 453 - 458.
- [34] Rosenthal H, Adrian L, Steif M. Dechlorination of PCE in the presence of FeO enhanced by a mixed culture containing two Dehalococcoides strains  
*Chemosphere*, 2004, 55(5): 661 - 669.
- [35] Gandhi S, Oh B T, Schnoor J L, *et al* Degradation of TCE, Cr(VI), sulfate, and nitrate mixtures by granular iron in flow-through columns under different microbial conditions  
*Water Res*, 2002, 36(8): 1973 - 1982.
- [36] Master E R, Lai V W, Kuipers B, *et al* Sequential anaerobic-aerobic treatment of soil contaminated with weathered Aroclor 1260  
*Environ Sci Technol*, 2002, 36(1): 100 - 103.
- [37] Anid P, Ravest-Webster B, Vogel T. Effect of hydrogen peroxide on the biodegradation of PCBs in anaerobically dechlorinated river sediments  
*Biodegradation*, 1993, 4(4): 241 - 248.
- [38] Tartakovsky B, Michott A, Cadieux J, *et al* Degradation of aroclor 1242 in a single-stage coupled anaerobic/aerobic bioreactor  
*Water Res*, 2001, 35(18): 4323 - 4330.
- [39] Boldt T S, Sorensen J, Karlson U, *et al* Combined use of different Gfp reporters for monitoring single-cell activities of a genetically modified PCB

- degrader in the rhizosphere of alfalfa FEMS Microbiology Ecology, 2004, 48(2): 139 - 148.
- [40] Dutta S K, Adam A, Toure O, *et al* Indigenous mixed soil bacteria in presence of compatible plants are more efficient in PCB degradation Fresenius Environmental Bulletin, 2003, 12(3): 314 - 319.
- [41] Leigh M B, Fletcher J S, Fu X O, *et al* Root turnover: An important source of microbial substrates in rhizosphere remediation of recalcitrant contaminants Environ Sci Technol, 2002, 36(7): 1579 - 1583.
- [42] Singer A C, Smith D, Jury W A, *et al* Impact of the plant rhizosphere and augmentation on remediation of polychlorinated biphenyl contaminated soil Environmental Toxicology and Chemistry, 2003, 22(9): 1998 - 2004.
- [43] Luepromchai E, Singer A C, Yang C H, *et al* Interactions of earthworms with indigenous and bioaugmented PCB-degrading bacteria FEMS Microbiology Ecology, 2002, 41(3): 191 - 197.
- [44] Chen L, Zhang J Y, Fang C X, *et al* Construction of microbial coupling degrading system in jute rhizosphere and its bioremediation of anthracene contaminated soil Chin J Appl Environ Biol, 2004, 10(3): 340 - 344.
- [45] Hess T F, Schrader P S Coupled abiotic-biotic mineralization of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT). J Environ Qual, 2002, 31(3): 736 - 744.
- [46] Schrader P S, Hess T F Coupled abiotic-biotic mineralization of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in soil slurry J Environ Qual, 2004, 33(4): 1202 - 1209.
- [47] Nadarajah N, Hamme J V, Pannu J, *et al* Enhanced transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons using a combined Fenton's reagent, microbial treatment and surfactants Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 59(4-5): 540 - 544.
- [48] Buyuksomez F, Hess T F, Crawford R L, *et al* Optimization of simultaneous chemical and biological mineralization of perchloroethylene Appl Environ Microbiol, 1999, 65(6): 2784 - 2788.

#### 参考文献:

- [1] 余刚, 黄俊, 张彭义. 持久性有机污染物: 倍受关注的全球性环境问题. 环境保护, 2001, (4): 37 ~ 39.
- [3] 刘建国, 胡建信, 唐孝炎. 中国履行斯德哥尔摩公约基本义务和障碍的初步识别. 环境保护, 2002, (8): 6 ~ 9.
- [4] 何长高. 关于水土保持生态修复工程中几个问题的思考. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 99 ~ 102.
- [5] 王治国. 关于生态修复若干概念与问题的讨论(续). 中国水土保持, 2003, (11): 20 ~ 21.
- [6] 孙铁珩, 周启星. 污染生态学研究的回顾与展望. 应用生态学报, 2002, 13(2): 221 ~ 223.
- [7] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 1994, 2002. 23 ~ 46.
- [8] 周启星. 污染土壤修复标准建立的方法体系研究. 应用生态学报, 2004, 15(2): 316 ~ 320.
- [10] 宋玉芳, 宋雪英, 张薇, 等. 污染土壤生物修复中存在问题的探讨. 环境科学, 2004, 25(2): 129 ~ 133.
- [14] 沈韞芬, 徐盈, 冯伟松, 等. 香港米埔基围塘中有机氯农药和多氯联苯在微生物群落中的积累. 应用与环境生物学报, 2004, 10(5): 543 ~ 550.
- [15] 徐挺, 孔繁翔, 孙成, 等. 基因重组细胞在环境样品多氯联苯检测中的应用. 环境科学, 2004, 25(1): 45 ~ 48.
- [17] 沈德中. 污染环境的生物修复. 北京: 化学工业出版社, 2002, 10 ~ 20.
- [18] 张厚华, 傅德志, 孙谷畴. 森林植被恢复重建的理论基础. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 97 ~ 99.
- [19] 李明阳. 城市生态演替的等级模块动态范式理论与应用. 南京林业大学学报(人文社会科学版), 2004, 4(3): 80 ~ 84.
- [20] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地土壤硝态氮运移的影响. 农村生态环境, 2004, 20(3): 32 ~ 36.
- [21] 董孝斌, 高旺盛, 严茂超. 黄土高原典型流域农业生态系统生产力的能值分析——以安塞县纸坊沟流域为例. 地理学报, 2004, 59(2): 223 ~ 229.
- [23] 李平, 韦朝海, 吴超飞, 等. 厌氧好氧生物流化床处理垃圾渗滤液的新工艺研究. 高等化学工程学报, 2002, 16(3): 345 ~ 350.
- [24] 韦朝海, 吴锦华, 慎义勇, 等. 优势菌种与三重环流三相流化床耦合处理油制气厂废水. 环境科学学报, 2002, 22(2): 171 ~ 176.
- [25] 张甲耀, 季森, 方呈祥, 等. 选育降解微生物耦合系统菌株的电融和及融和子的筛选. 环境科学, 2004, 25(1): 49 ~ 52.
- [44] 陈玲, 张甲耀, 方呈祥, 等. 根际微生物耦合降解系统的构建及其对葱污染土壤的修复. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3): 340 ~ 344.