第56卷第2期　　土壤学报　　Vol. 56，No. 2
2019年3月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Mar.，2019

DOI：10.11766/trxb201806070306

土壤—水环境中二苯砷酸污染及其修复研究进展*

朱　濛[1，4]　骆永明[2，3†]　杨如意[1，4]　周守标[1，4]

（1 安徽师范大学环境科学与工程学院，安徽芜湖　241002）
（2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室（南京土壤研究所），南京　210008）
（3 中国科学院环境过程与生态修复重点实验室（烟台海岸带研究所），山东烟台　264003）
（4 安徽省水土污染治理与修复工程实验室，安徽芜湖　241002）

摘　要　化学武器残留的二苯砷酸（Diphenylarsinic acid，DPAA）引起的土壤—水环境砷污染事件近年来受到广泛关注。国内外学者对土壤—水环境中DPAA的分析方法、污染状况、迁移转化和修复技术等的研究已取得一定进展。鉴于DPAA污染问题的严峻性和污染修复的迫切性，本文通过系统调研并结合笔者的研究工作，综述了土壤-水环境中DPAA分析方法、来源及污染状况的研究进展，探讨了DPAA吸附/解吸、迁移、转化过程及其关键影响因素和作用机制，阐述了对其污染的物理/化学、生物学修复机理研究；认为建立DPAA污染数据库，开展宏观及微观尺度上DPAA环境行为特征的研究，并系统构建DPAA污染的修复技术方法体系将是该领域今后研究的重点。同时，展望了未来的研究方向，旨在为促进土壤-水环境中DPAA污染及其修复的深入研究、有效降低DPAA的环境健康风险提供理论参考。

关键词　二苯砷酸；土壤—水环境污染；提取检测；吸附/解吸；迁移转化；物化/生物修复
中图分类号　X53　　**文献标识码**　A

在20世纪一战和二战期间，二苯氰砷（Diphenylcyanoarsine，DA）和二苯氯砷（Diphenylchloroarsine，DC）等含砷化学武器被大量生产，并在战争中作为呕吐剂和糜烂剂使用。战后，这些遗弃的化学武器通常仅采用土地填埋和海洋倾倒的方式进行处置，因而填埋和倾倒场所周边的土壤-水环境很容易受到化学武器中砷的污染。目前，已在日本[1]、德国[2]和中国[3]多处化学武器埋藏区检测到DA、DC、二苯砷酸（Diphenylarsinic acid，DPAA）和苯砷酸（Phenylarsonic acid，PAA）等苯砷酸类化合物。其中，DPAA是DA和DC在环境中经水解、氧化后生成的一种结构稳定的化合物[4]。由于DPAA检出率高、存留时间长，且具有很大的细胞毒性与基因毒性[5]，目前有关化学武器残留的苯砷酸类化合物污染的研究大多聚焦于DPAA。尤其是2002年日本发生一起生活饮用水DPAA中毒事件，更促使研究人员将目光转向这种化合物。

如何消除化学武器残留的DA、DC及其降解产物已经引起了政府机构、国际组织和学术界的高度

---

* 国家自然科学基金项目（41230858）、安徽高校省级自然科学研究重点项目（KJ2018A0315）和安徽师范大学博士科研启动基金项目（2018XJJ50）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 41230858），the Key Projects of Natural Science Research of Universities in Anhui Province (No. KJ2018A0315) and the Doctoral Research Start-up Funds Project of Anhui University（No. 2018XJJ50）

† 通讯作者 Corresponding author：E-mail：ymluo@yic.ac.cn

作者简介：朱　濛（1991—），女，安徽桐城人，博士研究生，讲师，主要从事土壤有机金属的生物化学行为与修复研究工作。E-mail: mzhu@ahnu.edu.cn

收稿日期：2018-06-07，收到修改稿日期：2018-07-27；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2018-10-08

关注。1993年，DA和DC作为必须销毁的化学填料列入《关于禁止发展、生产、储存和使用化学武器及销毁此种武器的公约》附件。2003年，DA和DC作为限制性污染物列入《销毁日本遗弃在华化学武器土壤污染控制标准》（GB19062-2003）[6]，并被纳入我国强制的环保标准目录。自2005年起，由欧盟框架计划资助的“化学武器在海洋环境中的风险评估模型（MERCW）”和“化学武器搜查与评估（CHEMSEA）”项目陆续启动，旨在呼吁公众关注化学武器污染问题。因此，全面了解DPAA在土壤-水环境中的污染状况，深入认识其环境行为，同时加强研究DPAA污染的修复机理与技术，对有效降低DPAA的环境健康风险非常必要。

目前，日本已经对其境内DPAA的分析方法、污染状况、迁移转化和修复技术等开展了较多研究。近年来，欧洲国家针对DPAA的研究逐渐增多，研究内容主要集中于DPAA的污染调查与修复，我国的情况基本相同。鉴于土壤-水环境中DPAA污染问题的严峻性与解决的迫切性，本文将就其分析方法、污染现状、环境行为和修复技术等最新研究进展进行综述，并展望其发展趋势。

1　土壤—水环境中二苯砷酸的分析方法

目前，DPAA检测的研究主要集中在样品前处理和检测方法上。已报道的前处理方法有固相萃取[7]、固相微萃取[8]、超声提取[9]、振荡提取[10]和加热提取[11]。其中，固相萃取和固相微萃取主要用于富集井水和海水中的低浓度DPAA。随着检测方法的改进，DPAA的检出限已达$\mu g \cdot L^{-1}$级别，大大降低了对水样中DPAA预富集效率的要求。与水样相比，土壤样品中DPAA的提取就显得更为重要，相关研究主要集中在高效提取剂的筛选。

1.1　土壤中二苯砷酸高效提取剂的筛选

分析DPAA常用的有机提取剂有丙酮[12]、正己烷[13]和乙腈[9]。上述有机提取剂在同时提取多种化学毒剂及其降解产物方面具有一定优势，但也存在明显的缺陷，包括需要进行多次提取，提取过程较为复杂；所需土壤样品量较多；有机试剂价格高且毒性强等，因而很难进行大规模推广应用。

与有机提取剂相比，无机提取剂在DPAA检测中的应用更为广泛。其中，NaOH常用于土壤中DPAA的提取[14-15]，且已被证实对不同类型土壤中DPAA的回收率均超过80%[16]。Baba等[17]对比了NaOH和NaOH-CH_3OH对土壤中DPAA的回收率，发现两者并无显著差异。考虑到添加CH_3OH有助于样品过滤，部分学者仍采用NaOH-CH_3OH作为提取剂[18]。还有研究采用HCl[19]和HNO_3[17]提取土壤中的DPAA。其中，HNO_3对土壤中DPAA等苯砷酸类化合物的回收率高达98.3%，但HNO_3提取会导致As(III)的氧化，因而需同时分析无机砷形态时不宜采用[17]。李士杏等[20]进一步结合我国化学武器埋藏区的土壤类型，考察了Na_2HPO_4对红壤、水稻土、黄棕壤和黑土中DPAA的回收率，结果显示回收率均在90%以上，说明Na_2HPO_4提取可广泛应用于我国化学武器埋藏区土壤DPAA污染的研究。

1.2　二苯砷酸的测定方法

已报道的DPAA测定方法有石墨炉原子吸收光谱法[7]、气相色谱法（GC）、液相色谱法（HPLC）、气质联用法（GC-MS）和液质联用法（HPLC-MS/MS）[21]。其中，石墨炉原子吸收光谱法由于定性能力差，因而目前在DPAA检测中的应用较少，而GC和HPLC方法能够通过色谱柱实现复杂环境样品中DPAA的高效分离，基本可以满足常规的检测要求。

GC方法最早被用于化学武器残留的苯砷酸类化合物的定量分析。对于DPAA，目前主要采用衍生化GC-MS方法[22]。由于需要进行复杂的衍生化前处理，且衍生化效率的降低直接影响测定的准确度[13]，这可能导致了GC未成为DPAA测定的主流方法。

与GC相比，HPLC方法在DPAA检测中的应用更为广泛。Witkiewicz等[23]综述过化学武器残留的苯砷酸类化合物的HPLC检测方法。本文仅列出针对DPAA等常见苯砷酸类化合物的HPLC分析方法及其测定参数（表1）。其中，HPLC-ICP-MS是目前检测土壤[13]、地下水[24-26]中DPAA最常用的方法。与HPLC-ICP-MS相比，HPLC-MS/MS还能同时对DPAA的降解产物进行定性分析，因而近年来在DPAA相关研究中的应用逐渐增多。但HPLC-MS/MS方法普遍存在基质效应，严重降低了测定的准确度。最近，笔者首次通过提取剂的

筛选降低了土壤DPAA在HPLC-MS/MS分析中的基质效应[16]，填补了已报道的DPAA分析方法未对基质效应进行系统评估的不足之处。总体而言，目前土壤-水环境中DPAA的检测尚无统一、规范性的方法，这给科学研究和实际工作带来了诸多不便。

表1　化学武器残留的苯砷酸类化合物的HPLC-MS/MS分析方法及其测定参数

Table 1　HPLC-MS/MS analytical method and determined parameters of phenylarsinic compounds hung over from chemical weapons

化合物 Compound	基质 Matrix	检测器 Detector	线性范围 Linear range	检出限 Detection limit	参考文献 References
PAA/PAO/DPAA/ BDPAO/TPA	地下水 Groundwater	PDA	8 ~ 30/5 ~ 40/20 ~ 4 000/ 120 ~ 8 000/1 ~ 60 mg·L^{-1}	0.1/0.1/0.2/10/ 0.1 mg·L^{-1}	[9]
DPAA	土壤 Soil	PDA	0.1 ~ 20 mg·L^{-1}	53 μg·L^{-1}	[20]
DPAA/PAA/PAO	地下水 Groundwater	ICP-MS	0 ~ 120 μg·L^{-1}	2.8/2.5/2.5 pg	[26]
PAA/PAO	地下水 Groundwater	ICP-MS	0 ~ 1000 mg·L^{-1}	0.2 ~ 0.8 μg·L^{-1}	[25]
MPAA/DMPAO/ MDPAO/DPAA	土壤 Soil	ICP-MS	0 ~ 100 μg·L^{-1}	0.1 ~ 0.2 μg·L^{-1}	[17]
DA/DC/BDPAO/TPA	土壤/地下水 Soil/groundwater	MS			[13]
PAA/PAO/DPAA/ BDPAO	地下水 Groundwater	MS/MS	0 ~ 1 mg·L	0.0001 ~ 0.01 mg·L^{-1}	[24]
DPAA/PAA	土壤 Soil	MS/MS	0.01 ~ 1 mg·L	0.01/1 μg·L^{-1}	[16]

注：PAA，苯砷酸；PAO，氧化苯胂；DPAA，二苯砷酸；BDPAO，联二苯砷氧化物；TPA，三苯胂；MPAA，甲基苯砷酸；DMPAO，二甲基苯砷酸；MDPAO，甲基二苯砷酸；DA，二苯氰砷；DC，二苯氯砷；PDA，二极管阵列检测器

Note: PAA, phenylarsonic acid; PAO, phenylarsinic oxide; DPAA, diphenylarsinic acid; BDPAO, bis(diphenylarsine) oxide; TPA, triphenylarsinic; MPAA, methylphenylarsinicacid ;DMPAO, dimethylphenylarsine oxide; MDPAO,methyldiphenylarsine oxide; DA, diphenylchloroarsine; DC, diphenylcyanoarsine; PDA, photo-diode array

2　土壤—水环境中二苯砷酸的来源及污染现状

2.1　二苯砷酸污染的来源

DPAA尚未发现有天然形成的例子，其在环境中的出现均归结为人类活动。在一战和二战期间，大量化学武器被生产、制造和使用。资料显示，仅日本在侵华战争时期就曾生产过746万发毒气弹，且几乎研制了世界各国所装备的所有毒气[27]。我国是化学武器的最大受害者之一，目前已在19个省市近100个地点发现了日遗化学武器[28]，其中大部分集中在东北区域[29]。这些埋藏在土壤中的化学武器由于长期腐蚀，内部毒剂继而发生泄漏，导致埋藏区土壤和地下水受到不同程度的苯砷酸类化合物污染，其中以DPAA、PAA和三苯胂（Triphenylarsinic，TPA）污染为主[30]。自20世纪90年代以来，我国政府高度重视日遗化学武器砷污染问题，多家研究机构（包括防化指挥工程学院、防化学院履约事务部、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、沈阳军区处理遗弃化学武器事务办公室和吉林省敦化市环境保护局总工办等）陆续开展了化学武器埋藏区砷污染的调查工作。

2.2　二苯砷酸污染的浓度水平

DPAA污染的研究区域主要集中在我国东北、日本南部及东南部地区。表2归纳了化学武器埋藏区土壤[2-3, 9, 13, 17, 19, 31-32]、地下水[1, 13-14, 25, 28,33-35]和沉积物[36-37]中DPAA及总砷的浓度范围。总体上，与化学武器接触的土壤总砷含量往往严重超

标，达到几十甚至上千mg·kg^{-1}。在土壤DPAA污染浓度的调研上，目前相关数据较少，这在很大程度上是由于化学武器掩埋点位于地下，增加了污染调查的难度。在地下水DPAA污染浓度的调研上，日本在2002年后陆续开展了较多工作，但至今仍未查到国内有相关方面的报道。此外，化学武器经海洋倾倒处理后造成的沉积物砷污染问题逐渐引起了广泛关注[38]。目前相关的调查工作主要关注总砷浓度，仅少数文献报道了DPAA的污染浓度。

表2　化学武器埋藏区环境样品中DPAA及总砷的浓度范围

Table 2　Range of concentrations of diphenylarsinic acid and total arsenic in environmental samples taken from chemical weapon dumping areas

调查区域 Investigation area	基质 Matrix	DPAA浓度 DPAA concentration	总砷浓度 Total arsenic concentration	参考文献 References
中国东北 Northeast China	土壤 Soil	0.14% ~ 12.87%		[9]
中国东北 Northeast China	土壤 Soil	—	62.9 ~ 1 321 mg·kg^{-1}	[31]
中国东北 Northeast China	土壤 Soil	—	22.66 ~ 2 967 mg·kg^{-1}	[19]
中国东北 Northeast China	土壤 Soil	—	30 ~ 1 372 mg·kg^{-1}	[32]
中国吉林 Jilin,China	土壤 Soil	—	0.09 ~ 758.4 mg·kg^{-1}	[3]
日本茨城县 IbarakiCounty, Japan	地下水 Groundwater	<15 mg·L^{-1}	—	[35]
日本平冢市 HiratsukaCity, Japan	土壤 Soil	<0.53 mg·kg^{-1}	—	[13]
日本平冢市 HiratsukaCity, Japan	地下水 Groundwater	<10 mg·L^{-1}	—	[14]
日本茨城县 IbarakiCounty, Japan	地下水 Groundwater	0.162 ~ 7.98 mg·L^{-1}	—	[28]
日本筑波市 TsukubaCity, Japan	地下水 Groundwater	<15 mg·L^{-1}	—	[1]
日本卡米苏 Kamisu Town, Japan	土壤 Soil	1.18 mg·kg^{-1}	9.80 mg·kg^{-1}	[17]
日本茨城县 IbarakiCounty, Japan	地下水 Groundwater	<0.56 mg·L^{-1}	<0.85 mg·L^{-1}	[33]
德国-波兰边境 German-Polish border	土壤 Soil	—	250 000 mg·kg^{-1}	[2]
德国 Germany	地下水 Groundwater	2.1 mg·L^{-1}	—	[25]
德国 Germany	地下水 Groundwater	—	<16 mg·L^{-1}	[34]
波罗的海 Baltic Sea	沉积物 Sediment	—	5.1 ~ 17.0 mg·kg^{-1}	[36]
波罗的海 Baltic Sea	沉积物 Sediment	<9 583 mg·kg^{-1}	—	[37]

3 土壤—水环境中二苯砷酸的环境行为

3.1 二苯砷酸在土壤中的吸附/解吸及其影响因素

pH是影响DPAA吸附的关键因素。Wang等[39]的研究表明，DPAA在土壤中的吸附量随pH增加显著降低，这与pH对DPAA存在形式及土壤矿物表面电荷的影响有关。背景溶液的离子强度对DPAA吸附的影响较小，但PO_4^{3-}对DPAA吸附能够产生强烈的竞争作用[40]。上述结果说明DPAA在土壤中的吸附主要受离子交换和专性吸附作用控制，且专性吸附的作用更加明显。

氧化物和有机质也是影响土壤中DPAA吸附的重要因素。Maejima[41]和Wang[39]等的研究均表明，铁/铝氧化物含量高的土壤对DPAA的吸附能力更强。去除有机质反而增强了土壤对DPAA的吸附，这可能与去除有机质暴露了氧化物和硅酸盐矿物的吸附位点有关[41]。此外，Zhu等[42]发现外源添加乳酸钠显著促进了土壤中DPAA的解吸，推测可能与乳酸钠的竞争吸附或掩蔽氧化物表面的吸附位点有关。以上研究表明，DPAA在土壤中的吸附主要受氧化物的配位交换作用而非有机质的疏水作用控制，这与无机砷[43]、洛克沙胂[44]和阿散酸[45]的吸附机制类似。最近，Tanaka等[46]采用扩展X射线吸收精细结构光谱（Extended X-ray absorption fine structure，EXAFS）技术鉴定出DPAA在水铁矿上的吸附结构为内圈层双齿双核和单齿单核。虽然DPAA在土壤中的吸附主要以牢固的专性吸附为主，但与前人报道的无机砷的吸附量[47]相比，DPAA的吸附量明显降低。这很可能与苯环取代基增加了DPAA分子的疏水性和空间位阻，进而影响了砷酸根与羟基基团的配位交换作用有关。类似现象也发生在甲基砷的吸附过程中[48]。

氧化还原电位对无机砷吸附/解吸的影响主要体现在碳、铁和硫的价态变化上，其中，有机质作为电子供体促进铁还原通常被认为是导致土壤中无机砷释放的重要原因[49]，相关研究已经成为环境地学的热点。然而，碳/铁循环对DPAA吸附/解吸的影响罕见报道，目前仅有笔者结果显示，淹水土壤中添加的乳酸钠通过促进铁还原进而促进了DPAA的释放[42]。虽然这方面的研究刚起步，很多问题有待进一步研究，但上述结果足以说明碳/铁循环是驱动土壤中DPAA释放的重要因素。总体而言，目前对DPAA吸附/解吸的研究涉及的土壤类型有限，对氧化还原电位等条件变化引起的DPAA结合/释放等关键问题缺乏认识，对其吸附机制的研究缺乏分子水平的依据。

3.2 二苯砷酸在土壤中的迁移及其影响因素

DPAA在土壤中的迁移一方面与吸附作用密切相关，另一方面与DPAA本身的吸附特性有关。目前，仅查到Maejima等[41]采用柱试验开展了相关研究，发现DPAA在对其吸附能力弱的冲积土中容易发生迁移，而在对其吸附能力强的火山灰土中的迁移距离明显降低。Maejima等[41]的研究还发现，与DPAA、PAA和MPAA相比，DMPAO和MDPAO的迁移能力明显增强，说明苯砷酸类化合物的迁移能力随分子结构疏水性的增加而增强。

3.3 二苯砷酸在土壤中的转化及其影响因素

土壤中DPAA的有效转化发生在淹水厌氧条件下，且与厌氧微生物的作用密切相关。Maejima等[18]研究发现，淹水条件下火山灰土和新成土中的DPAA在24周时的转化率分别为31.4%和79.5%，其中，火山灰土中高含量的氧化物很可能通过降低DPAA的生物有效性进而降低其转化率。Maejima等[18]研究还发现，DPAA在淹水土壤中主要发生脱苯环反应，加入葡萄糖后则主要发生甲基化反应。另有研究从污染稻田土壤中同时检测到DPAA的甲基化和脱苯环产物[50]，说明碳源也是影响DPAA转化的重要因素。

硫化是淹水土壤中DPAA的另一个重要转化途径。Nakamiya等[33]在污染地下水中检测到DPAA的硫化产物，包括二苯基硫代砷酸（Diphenylthioarsinic acid，DPTAA）和甲基化二苯基硫代砷酸（Methylphenyldithioarsinic acid，MPDTAA）。近来，日本Naoki Harada课题组开展了一系列有关DPAA硫化的研究。Guan等[14]的研究发现，向淹水土壤中添加碳源和硫酸盐显著促进了DPAA转化。Hisatomi等[15]进一步鉴定出DPAA的转化产物为DPTAA。从上述土壤中分离得到的硫酸盐还原菌*Desulfovibrio aerotolerans* JCM 12613在溶液中能够直接介导DPAA的硫化[51]。Zhu等[42]还考察了DPAA释放对其硫化的影响，发现碳/铁循环通过促进黑土中DPAA的释放进而促进其硫化。该研究首次揭示了碳铁硫耦合作用下土

壤中DPAA的结合/释放与硫化过程，说明碳铁硫循环是影响土壤-水环境中DPAA转化的关键因素，具体可能产生的影响见图1。总体而言，虽然厌氧微生物显著促进了DPAA发生脱苯环、甲基化或硫化，但仅依靠土著微生物破坏DPAA的As-C键并释放出无机砷仍比较困难。

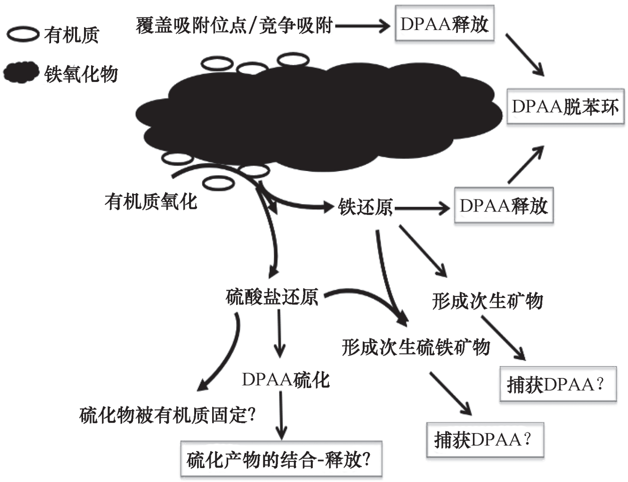

图1　碳-铁-硫耦合作用下土壤中DPAA形态转化与分配过程的示意图

Fig. 1　Schematic diagram for morphological transformation and partitioningof DPAA under the coupling effects of carbon, iron and sulfur

4　土壤—水环境中二苯砷酸污染的修复

有机污染土壤的修复技术主要分为物理/化学修复和生物修复。其中，物理/化学修复尤其适用于高浓度有机物污染场地土壤。由于我国化学武器埋藏区土壤总砷含量往往严重超标[31]，采用物理/化学修复技术处理其中的高浓度有机砷很可能卓有成效。与物理/化学修复相比，生物修复具有成本低和绿色环保等优点。我国已发现的化学武器有不少直接埋于农田土壤[52]，而生物修复尤其适用于中、低浓度有机物污染农田土壤。因此，本文将重点综述物理/化学和生物修复技术在DPAA污染修复中的修复机制与技术发展。

4.1　物理/化学修复

物理/化学方法能有效钝化或消除土壤中的DPAA。Arao等[11]在化学武器污染土壤上施用0.04%活性炭并种植一季水稻后，在水稻秸秆中未检测到DPAA。这说明活性炭吸附降低了DPAA的生物有效性，但由于活性炭吸附并未破坏苯环结构，因而不能消除环境中的DPAA。化学氧化则能够实现将DPAA降解为小分子有机物，甚至是无机砷。周廷等[32]提出利用芬顿试剂的强氧化性去除土壤中DPAA的思路。最近，笔者进一步开展了试验研究，结果表明，芬顿和类芬顿氧化法均能够有效去除土壤中的DPAA，去除率在65%以上，且DPAA通过逐步脱苯环最终降解为无机砷[53]。

光化学氧化也能达到消除DPAA的目的，这方面的研究近年来开展的较多。Wang等[54]的研究表明，纯水中的DPAA经紫外光照射全部发生了光降解，最终生成小分子有机物、砷酸盐和亚砷酸盐，加入纳米TiO_2光催化剂还能避免生成毒性较高的亚砷酸盐[55]。TiO_2光催化同样能有效去除土壤中的DPAA。王阿楠和骆永明[10]的研究显示，原位施用TiO_2光催化剂时，对DPAA的光催化能力受限于土层厚度和土壤含水量，采用异位泥浆法则显著提高了DPAA降解率（>57.0%），且降解终产物为无机砷[56]。上述结果提示，利用（光）化学氧化法将DPAA降解为无机砷和植物超富集无机砷同时进行，理论上能够彻底去除土壤-水环境中的DPAA，这为DPAA污染的（光）化学-植物联合修复提供了新思路。

4.2　生物修复

至今已报道的DPAA降解菌有不动盖球菌NK0508[57]、附着剑菌L2406和L2413[58]。其中，NK0508在溶液体系中对DPAA的降解率最高，3d的降解率可达80%，且DPAA转化为无机砷

的效率约为50%。上述降解菌为DPAA污染土壤的微生物修复提供了菌种资源，但尚未应用到土壤中，降解菌在土壤中的存活率及对DPAA的降解效果仍然未知。Köhler等[59]从污染土壤中分离出嗜麦芽寡养单胞菌、假单胞菌和节细菌属，上述菌株显著促进了土壤中DPAA等苯砷酸类化合物降解为无机砷，但具体降解过程与机理未知。这是国际上有关微生物降解土壤中DPAA的首次报道。最近，宋芳等[60]对根际促生菌RC6b进行了化学诱变，并进一步考察了诱变后的菌株对土壤中DPAA的去除效果，结果显示90d的去除率超过了50%。这是国内有关DPAA降解菌的首次报道。总体而言，当今对DPAA微生物降解的研究主要集中在降解菌的分离、降解条件及降解率等前期研究上，对降解机理、降解基因和降解酶等关键问题仍缺乏清晰的认识。

近年来，利用植物去除DPAA的研究也取得了一定进展。冯仕江等[61]采用水培试验考察了蜈蚣草对DPAA的植物提取作用，发现培养2周后叶子部分的生物富集系数达到140。但蜈蚣草对土壤中DPAA的去除效果非常有限[40]，同时接种根际促生菌RC6b提高了DPAA去除率，90d时可达24.5%；经蜈蚣草吸收的DPAA大部分被转运至地上部分[62]，因而通过移除蜈蚣草地上部分，能够彻底去除土壤中的DPAA。但从目前的结果看，蜈蚣草对土壤中DPAA的植物提取效率还有待提高。此外，鲁胜利等[63]认为在化学武器污染土壤上接种能将有机砷无机化的高效菌株，再种植蜈蚣草、大叶井边草等无机砷的超积累植物，使有机砷的无机化和植物提取无机砷同时进行，理论上能够彻底去除DPAA等苯砷酸类化合物。但选育能使DPAA向无机砷高效转化的菌株，同时保证该菌株在土壤中的存活仍然是当前面临的难题。

5 研究展望

化学武器残留的DPAA造成的土壤-水环境污染问题已经受到政府机构、国际组织和学术研究机构的高度关注。中国一直致力于解决遗留化学武器污染问题，目前日本遗弃在华化学武器销毁工作已经全面展开，但加强化学武器在长期掩埋过程中的泄露、在销毁过程中产生的弹药污水以及销毁后产生的固体残渣等引起的土壤—水环境DPAA污染的研究与治理仍然刻不容缓。未来应加强以下几个方面的研究：

1）土壤-水环境中DPAA分析方法的标准化。注重标准替代物、净化内标和标准参照物的研制，加强不同实验室之间分析结果的比对，完善质量保证与质量控制体系，建立土壤、水体与沉积物样品中DPAA的标准分析方法，为科学研究和污染监控服务。

2）DPAA的土壤—水环境调研与数据库建立。结合我国化学武器埋藏区的地理位置、土壤类型和土地利用方式等特点，开展区域性的环境介质中DPAA污染范围与浓度水平的调研，建立土壤—水环境DPAA污染数据库。

3）土壤—水环境中DPAA赋存形态和多介质、多界面环境行为。结合化学武器埋藏区的分布特点，研究DPAA在土壤、土壤胶体、黏土矿物、氧化物上的结合形态与分子结合机制，阐明DPAA在多介质环境内部和微观界面的结合/释放、迁移、转化过程及机制，服务于风险评估与污染修复。

4）土壤—水环境中DPAA污染的修复技术。化学武器的销毁与残留的苯砷酸类化合物的污染治理具有同样的重要性。需要开展新型修复材料的研发，加强物理/化学—植物联合修复的研究；继续筛选DPAA高效降解菌，在分子和基因水平上探明其机制，并融合基因工程、分子生物学与植物修复技术，建立适合不同污染介质类型、性质及条件的生物修复技术方法体系。

参考文献

[1] Ishi K，Tamaoka A. Ten-years records of organic arsenic（diphenylarsinic acid）poisoning：Epidemiology，clinical feature，metabolism，and toxicity. Brain and Nerve，2015，67（1）：5—18

[2] Pitten F A，Müller G，König P，et al. Risk assessment of a former military base contaminated with organoarsenic-based warfare agents：Uptake of arsenic by terrestrial plants. Science of the Total Environment，1999，226（2/3）：237—245

[3] 周廷，尤立娟，谭大伟，等. 某省高危含砷爆炸物污染农田评价及分布研究. 环境科学与管理，2014，39（6）：177—179
Zhou T，You L J，Tan D W，et al. Contamination evaluation and distribution of As-contaminated soil

by high-risk bombs in the Province（In Chinese）. Environmental Science and Management，2014，39（6）：177—179

［4］ Radke B，Jewell L，Piketh S，et al. Arsenic-based warfare agents：Production，use，and destruction. Critical Reviews in Environmental Science and Technology，2014，44（14）：1525—1576

［5］ Yamaguchi T，Gi M，Yamano S，et al. A chronic toxicity study of diphenylarsinic acid in F344 rats in drinking water for 52 weeks. Experimental and Toxicologic Pathology，2017，69（1）：1—7

［6］ 中国环境科学研究院. 销毁日本遗弃在华化学武器土壤污染控制标准（GB19062-2003）. 北京：中国环境科学出版社，2007

Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Control standard of soil pollutants for the destruction of chemical weapons abandoned by Japan in China（GB19062-2003）（In Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，2007

［7］ Hagiwara K，Inui T，Koike Y，et al. Determination of diphenylarsinic acid，phenylarsonic acid and inorganic arsenic in drinking water by graphite-furnace atomic-absorption spectrometry after simultaneous separation and preconcentration with solid-phase extraction disks. Analytical Sciences，2013，29（12）：1153—1158

［8］ Nawała J，Czupryński K，Popiel S，et al. Development of the HS-SPME-GC-MS/MS method for analysis of chemical warfare agent and their degradation products in environmental samples. Analytica Chimica Acta，2016，933：103—116

［9］ 李善茂，李伟，岳丽君，等. 高效液相色谱法分析环境样品中的苯基胂化合物. 色谱，2005，23（5）：545—547.

Li S M，Li W，Yue L J，et al. Determination of phenylarsenic compounds in environmental samples by high performance liquid chromatography（In Chinese）. Chinese Journal of Chromatography，2005，23（5）：545—547

［10］ 王阿楠，骆永明. 纳米二氧化钛光催化修复二苯砷酸污染土壤的研究. 土壤，2015，47（1）：107—112

Wang A N，Luo Y M. Application of nano TiO_2 in remediation of DPAA-contaminated soils（In Chinese）. Soils，2015，47（1）：107—112

［11］ Arao T，Maejima Y，Baba K. Reduction in uptake by rice and soybean of aromatic arsenicals from diphenylarsinic acid contaminated soil amended with activated charcoal. Environmental Pollution，2011，159（10）：2449—2453

［12］ Gupta R C. Handbook of toxicology of chemical warfare agents. New York：Academic Press，2015

［13］ Hanaoka S，Nagasawa E，Nomura K，et al. Determination of diphenylarsenic compounds related to abandoned chemical warfare agents in environmental samples. Applied Organometallic Chemistry，2005，19（2）：265—275

［14］ Guan L，Hisatomi S，Fujii K，et al. Enhanced transformation of diphenylarsinic acid in soil under sulfate-reducing conditions. Journal of Hazardous Materials，2012，241/242：355—362

［15］ Hisatomi S，Guan L，Nakajima M，et al. Formation of diphenylthioarsinic acid from diphenylarsinic acid under anaerobic sulfate-reducing soil conditions. Journal of Hazardous Materials，2013，262：25—30

［16］ Zhu M，Tu C，Zhang H B，et al. Simultaneous determination of diphenylarsinic and phenylarsinic acids in amended soils by optimized solvent extraction coupled to HPLC-MS/MS. Geoderma，2016，270：109—116

［17］ Baba K，Arao T，Maejima Y，et al. Arsenic speciation in rice and soil containing related compounds of chemical warfare agents. Analytical Chemistry，2008，80（15）：5768—5775

［18］ Maejima Y，Arao T，Baba K. Transformation of diphenylarsinic acid in agricultural soils. Journal of Environmental Quality，2011，40（1）：76—82

［19］ 周黎明，鲁胜利，周建梅，等. 日本遗弃化学武器污染土壤中砷的形态分析方法研究. 分析试验室，2008，27（B12）：84—88

Zhou L M，Lu S L，Zhou J M，et al. Study on morphological analysis method for arsenic derived from chemical warfare agents abandoned by Japan（In Chinese）. Chinese Journal of Analysis Laboratory，2008，27（B12）：84—88

［20］ 李士杏，刘五星，黄玉娟，等. 高效液相色谱法测定土壤中化学武器降解产物二苯砷酸. 土壤学报，2012，49（2）：394—397

Li S X，Liu W X，Huang Y J，et al. High performance liquid chromatography analyzing diphenylarsinic acid，a degradation product of chemical warfare agentin soil（ In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2012，49（2）：394—397

［21］ Liu Q，Lu X，Peng H，et al. Speciation of arsenic—A review of phenylarsenicals and related arsenic metabolites. Trends in Analytical Chemistry，2017，DOI： 10. 1016/j. trac. 2017. 10. 006

［22］ Söderström M，Östin A，Qvarnström J，et al. Chemical analysis of dumped chemical warfare agents during the MODUM project//Jacek B, Robert B, Eyup Kuntay T. Towards the monitoring of dumped munitions threat（MODUM）. Dordrecht：Springer-Verlag，2018：71—103

［23］ Witkiewicz Z，Sliwka E，Neffe S. Chromatographic analysis of chemical compounds related to the chemical weapons convention. Trends in Analytical Chemistry，2016，85：21—33

［24］ Wada T，Nagasawa E，Hanaoka S. Simultaneous determination of degradation products related to chemical warfare agents by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry. Applied Organometallic Chemistry，2006，20（9）：573—579

［25］ Daus B，Mattusch J，Wennrich R，et al. Analytical investigations of phenyl arsenicals in groundwater. Talanta，2008，75（2）：376—379

［26］ Kinoshita K，Shida Y，Sakuma C，et al. Determination of diphenylarsinic acid and phenylarsonic acid，the degradation products of organoarsenic chemical warfare agents，in well water by HPLC-ICP-MS. Applied Organometallic Chemistry，2005，19（2）：287—293

［27］ 何跃忠，丁日高. 日本遗弃在华化学武器造成人员伤害的有关问题（1）—化学武器与日本遗弃在华化学武器情况介绍. 中国危重病急救医学，2005，17（1）：452—453

He Y Z，Ding R G. Problems relevant to personnel injuries caused by chemical weapon warfare abandoned by Japan in China—Introduction of chemical weapons and chemical weapon warfare abandoned by Japan in China（In Chinese）. Chinese Critical Care Medicine，2005，17（1）：452—453

［28］ 纪学仁. 侵华日军毒气战事例集：日军用毒1800例. 北京：社会科学文献出版社，2008

Ji X R. Cases of poisonous gas warfare for Japanese invaders：1800 cases of drug use（In Chinese）. Beijing：Social Sciences Academic Press，2008

［29］ 张福存，王雨山，石奉华，等. 日本在华遗弃化学武器埋藏地调查及其污染处置方法研究. 地球与环境，2011，39（4）：567—570

Zhang F C，Wang Y S，Shi F H，et al. Study on the abandoned chemical weapons by Japanese in China with an attempt to explore the burying location and pollution disposal（In Chinese）. Earth and Environment，2011，39（4）：567—570

［30］ Zhou T，Zhou J M，Zhou L M，et al. Conversion and species distribution characteristics of arsenical chemical agent in the soil contaminated by chemical weapons abandoned by Japan. Advanced Materials Research，2014，955/959：1194—1203

［31］ 周黎明，聂志勇，周建梅，等. 微波消解日本遗弃化学武器污染土壤中总砷的测定方法研究. 分析试验室，2007，26：238—241

Zhou L M，Nie Z Y，Zhou J M，et al. Study on microwave digestion method for the determination of total arsenic in soil contaminated with abandoned chemical weapons（In Chinese）. Chinese Journal of Analysis Laboratory，2007，26：238—241

［32］ 周廷，朱宝霞，王新明，等. 蜈蚣草修复东北某地日本遗弃化学武器砷污染土壤的可行性分析//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集（第二卷）. 北京：中国环境出版社，2011：1708—1713

Zhou T，Zhu B X，Wang X M，et al. Feasibility analysis for the remediation of arsenic in soil contaminated by chemical weapons abandoned by Japan in Northeast China//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of academic conference of Chinese Society of Environmental Sciences（Volume 2）（In Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，2011：1708—1713

［33］ Nakamiya K，Yoshikane M，Tomoko H，et al. Transformation of diphenylarsinic acid and related compounds in groundwater：Production of thiol-containing arsenicals. Environmental Chemistry，2013，10（1）：17—21

［34］ Daus B，Hempel M，Wennrich R，et al. Concentrations and speciation of arsenic in groundwater polluted by warfare agents. Environmental Pollution，2010，158（11）：3439—3444

［35］ Ishizaki M，Yanaoka T，Nakamura M，et al. Detection of bis（diphenylarsine）oxide，diphenylarsinic acid and phenylarsonic acid，compounds probably derived from chemical warfare agents，in drinking well water. Journal of Health Science，2005，51：130—137

［36］ Bełdowski J，Szubska M，Emelyanov E，et al. Arsenic concentrations in Baltic Sea sediments close to chemical munitions dumpsites. Deep Sea Research Part II：Topical Studies in Oceanography，2016，128：114—122

［37］ Christensen IM A，Storgaard MS，Fauser P，et al. Acute toxicity of sea-dumped chemical munitions：Luminating the environmental toxicity of legacy compounds. Global Security：Health，Science and Policy，2016，1（1）：39—50

［38］ Storgaard M S，Christensen I，Sanderson H. Environmental toxicity of CWAs and their metabolites//

Jacek B，Robert B，Eyup Kuntay T. Towards the monitoring of dumped munitions threat（MODUM）. Dordrecht：Springer-Verlag，2018：105—128

[39] Wang A N，Li S Y，Teng Y，et al. Adsorption and desorption characteristics of diphenylarsenicals in two contrasting soils. Journal of Environmental Sciences，2013，25（6）：1172—1179

[40] 李士杏. 无机砷和二苯砷酸在土壤中吸附机制及蜈蚣草修复效果研究. 南京：中国科学院南京土壤研究所，2011

Li S X. Mechanisms of arsenic and diphenylarsinic acid adsorption on soil and phytoremediation by *Pteris vittata*（In Chinese）. Nanjing：Institute of Soil Science，Chinese Academy of Sciences，2011

[41] Maejima Y，Murano H，Iwafune T，et al. Adsorption and mobility of aromatic arsenicals in Japanese agricultural soils. Soil Science and Plant Nutrition，2011，57（3）：429—435

[42] Zhu M，Tu C，Hu X F，et al. Solid-solution partitioning and thionation of diphenylarsinic acid in a flooded soil under the impact of sulfate and iron reduction. Science of the Total Environment，2016，569/570：1579—1586

[43] Jiang X，Peng C，Fu D，et al. Removal of arsenate by ferrihydrite via surface complexation and surface precipitation. Applied Surface Science，2015，353：1087—1094

[44] Fu Q L，Liu C，Achal V，et al. Aromatic arsenical additives（AAAs）in the soil environment：Detection，environmental behaviors，toxicities，and remediation. Advances in Agronomy，2016，140：1—41

[45] 蒋成爱，翟晓峰，王玉，等. 不同土壤对阿散酸和洛克沙胂添加剂的吸附研究. 华南农业大学学报，2013，34（2）：272—276

Jiang C A，Zhai X F，Wang Y，et al. Study on absorption of *p*-Arsanilic acid and roxarsone bydifferent soils in China（In Chinese）. Journal of South China Agricultural University，2013，34（2）：272—276

[46] Tanaka M，Togo Y S，Yamaguchi N，et al. An EXAFS study on the adsorption structure of phenyl-substituted organoarsenic compounds on ferrihydrite. Journal of Colloid and Interface Science，2014，415：13—17

[47] Arco-Lázaro E，Agudo I，Clemente R，et al. Arsenic（V）adsorption-desorption in agricultural and mine soils：Effects of organic matter addition and phosphate competition. Environmental Pollution，2016，216：71—79

[48] Lafferty B J，Loeppert R H. Methyl arsenic adsorption and desorption behavior on iron oxides. Environmental Science and Technology，2005，39（7）：2120—2127

[49] 钟松雄，何宏飞，陈志良，等. 水淹条件下水稻土中砷的生物化学行为研究进展. 土壤学报，2018，55（1）：1—17

Zhong S X，He H F，Chen Z L，et al. Advancement in study on behavior of arsenic in flooded paddy soil（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2018，55（1）：1—17

[50] Arao T，Maejima Y，Baba K. Uptake of aromatic arsenicals from soil contaminated with diphenylarsinic acid by rice. Environmental Science and Technology，2009，43（4）：1097—1101

[51] Guan L，Shiiya A，Hisatomi S，et al. Sulfate-reducing bacteria mediate thionation of diphenylarsinic acid under anaerobic conditions. Biodegradation，2015，26（1）：29—38

[52] 朱宝霞，周廷，王宁，等. 东北某地日本遗弃在华化学武器污染土壤调查//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集. 北京：中国环境科学出版社，2008：2129—2132

Zhu B X，Zhou T，Wang N，et al. Investigation of soil contaminated by chemical weapons abandoned by Japan in Northeast China//Chinese Society of Environmental Sciences. Excellent proceedings of academic conference of Chinese Society of Environmental Sciences（In Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，2008：2129—2132

[53] 朱濛，涂晨，胡学锋，等. Fenton法和类Fenton法降解土壤中的二苯砷酸. 环境化学，2015，34（6）：1078—1085

Zhu M，Tu C，Hu X F，et al. Degradation of diphenylarsinic acid in soil byFenton and Fenton-like reactions（In Chinese）. Environmental Chemistry，2015，34（6）：1078—1085

[54] Wang A N，Teng Y，Hu X F，et al. Photodegradation of diphenylarsinic acid by UV-C light：Implication for its remediation. Journal of Hazardous Materials，2016，308：199—207

[55] 王阿楠，滕应，骆永明. 二氧化钛（P25）光催化降解二苯砷酸的研究. 环境科学，2014，35（10）：3800—3806

Wang A N，Teng Y，Luo Y M. Photo-catacytical degradation of diphenylarsinic acid by TiO_2（P25）（In Chinese）. Environmental Science，2014，35

（10）：3800—3806

［56］ Wang A N，Teng Y，Hu X F，et al. Diphenylarsinic acid contaminated soil remediation by titanium dioxide （P25）photocatalysis：Degradation pathway，optimization of operating parameters and effects of soil properties. Science of the Total Environment，2016，541：348—355

［57］ Nakamiya K，Nakayama T，Ito H，et al. Degradation of arylarsenic compounds by microorganisms. FEMS Microbiology Letters，2007，274（2）：184—188

［58］ Harada N，Takagi K，Baba K，et al. Biodegradation of diphenylarsinic acid to arsenic acid by novel soil bacteria isolated from contaminated soil. Biodegradation，2010，21（3）：491—499

［59］ Köhler M，Hofmann K，Völsgen F，et al. Bacterial release of arsenic ions and organoarsenic compounds from soil contaminated by chemical warfare agents. Chemosphere，2001，42（4）：425—429

［60］ 宋芳，涂晨，朱濛，等. 紫金牛叶杆菌RC6b及其诱变菌株对二苯砷酸的降解特征. 微生物学通报，2017，44（11）：2557—2566
Song F，Tu C，Zhu M，et al. Diphenylarsinic acid degradation by *Phyllobacterium myrsinacearum* RC6b and its mutants（In Chinese）. Microbiology China，2017，44（11）：2557—2566

［61］ 冯仕江，骆永明，任文杰，等. 高效液相色谱法测定蜈蚣草中二苯砷酸. 理化检验-化学分册，2015，51（3）：321—324
Feng S J，Luo Y M，Ren W J，et al. Determination of diphenylarsinic acid in *Pteris vittata* L. by high-performance liquid chromatography（In Chinese）. Physical Testing and Chemical Analysis Part B：Chemical Analysis，2015，51（3）：321—324

［62］ Teng Y，Feng S J，Ren W J，et al. Phytoremediation of diphenylarsinic-acid-contaminated soil by *Pteris vittata* associated with *Phyllobacterium myrsinacearum* RC6b. International Journal of Phytoremediation，2017，19（5）：463—469

［63］ 鲁胜利，周黎明，刘波，等. 日本遗弃化武砷污染土壤的生物修复技术展望//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集. 北京：中国环境出版社，2008：1068—1070
Lu S L，Zhou L M，Liu B，et al. Prospect of bioremediation technology for the remediation of arsenic in soil contaminated by chemical weapons abandoned by Japan in China//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of academic conference of Chinese Society of Environmental Sciences（In Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，2008：1068—1070

Progress in Researches on Diphenylarsinic Acid Pollution of Soil-water Environment and Its Remediation

ZHU Meng[1,4] LUO Yongming[2,3†] YANG Ruyi[1,4] ZHOU Shoubiao[1,4]

（1 *College of Environmental Science and Engineering*，*Anhui Normal University*，*Wuhu*，*Anhui* 241002，*China*）

（2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation*，*Institute of Soil Science*，*Chinese Academy of Sciences*，*Nanjing* 210008，*China*）

（3 *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation*，*Yantai Institute of Coastal Zone Research*，*Chinese Academy of Sciences*，*Yantai*，*Shandong* 264003，*China*）

（4 *Anhui Provincial Engineering Laboratory of Water and Soil Pollution Control and Remediation*，*Anhui Normal University*，*Wuhu*，*Anhui* 241002，*China*）

Abstract Chemical warfare agents containing organoarsenic compounds such as Clark I (diphenylcyanoarsine) and Clark II (diphenylchloroarsine)were widely produced and used during World Wars I and II. After the wars, remains of these agentswere simply dumped into the sea or buried underground, thus inevitably polluting the soil-water environments of the sits where they were disposed with the arsenic contained in the chemical weapons. In the environment, these abandoned chemical agents are easily hydrolyzed and oxidized into diphenylarsinic acid (DPAA), rather stable in structure, and other organoarsenic compounds. So far, DPAA has been detected in quite a number of the areas where these chemical weapons were dumped. The detection has aroused extensive concerns because the presence of DPAA may bring about environmental and health risks. Scholars both at home and abroad have already begun doing some researches, trying to find ways to analyze DPAA in the soil and water environments, determine their status and behaviors and remedy the polluted environments. However, few have done any to summarize systematically progresses in the research. In this paper, a review is presented to introduce some high-effect inorganic and organic extractants and GC as well as LC analytical methods for DPAA in the soil, and sources and status of the pollutant in the soil-water environments. Generally speaking, the DPAA contaminated areas are located mainly in Northeast China, and South and Southeast Japan. Especially in the chemical weapons dumping sites, the concentration of total arsenicis far beyond the criteria for safety. At the same time, the paper also discusses how DPAA is adsorbed/desorbed, translocated and transformed in the soil-water environment, what are the factors affecting the processes and what are the mechanisms. Studies in the past reported that the adsorption/desorption of DPAA in soil was controlled by a variety of factors, including pH, inorganic ions, Fe/Al oxides, organic matter, redox potential (Eh), etc. and adsorption of the substance was completed via ligand exchange reactions between hydroxyl groups of Fe/Al oxides and arsenate of DPAA, rather than the hydrophilic effect of organic matter; the effective transformation of DPAA in the soil occurred under flooded anaerobic conditions, and under sulfate-reducing conditions, in particular; and iron reduction and sulfate reduction were the two key factors controlling desorption and transformation of DPAA. In the end, the paper elaborates the physical, chemical and biological technologies available for remediation of DPAA contaminated soil-water environments, and their remediation efficiency, controlling factors and mechanisms as well. In terms of physic-chemical remediation, application of activated carbon, Fenton and Fenton-like oxidation and photochemical degradation has been demonstrated to be able to effectively remove DPAA in soil-water environments. In terms of bioremediation, certain progresses have been made, like screening of highly efficient DPAA degrading bacteria, unfolding microbial remediation and combined microbial-phyto remediationand previewing directions of the future researches. The paper holds that all the relevant research findings will serve as the oretical reference for future in-depth studies on DPAA pollution of soil-water environments, remediation of DPAA polluted environments, and protection of environmental quality and human health from DPAA pollution. For further researches, emphases should be laid on the following aspects: (1) To perfect quality assurance and quality control system for DPAA analytical methods, with focus on development of standard alternatives, purgation of internal standards and markers; (2) To launch investigations on scope and extent of DPAA contamination, while taking into the consideration of geographical locations, soil types and land-use patterns of the chemical weapon burial sites; (3) To explore forms of DPAA bonding with soil colloids, clay minerals and oxides in the soil and molecular binding mechanisms, and elucidate the mechanisms responsible for adsorption/desorption, translocation and transformation of DPAA inmulti-media environment and at microscopic interfaces; (4) To explore for developing new remediation materials, intensify researches on physic-chemical-phyto combined remediation and continue to screen out highly efficient DPAA degrading bacteria and probe mechanisms of their effectiveness at molecular as well as genetic levels, while integrating genetic engineering, molecular biology with phytoremediation technologies, so as to eventually establish a bioremediation technical system applicable to DPAA contaminated media different in type and condition.

Key words　Diphenylarsinic acid (DPAA); Soil-water environmental pollution; Extraction and determination; Adsorption/desorption; Translocation and transformation; Physico-chemico/bio-remediation

（责任编辑：卢　萍）