

# 我国土壤污染修复技术研究进展

张安, 官昭瑛, 徐国钢, 陈晓蓉, 朱兆华, 迟国梁 (深圳市万信达生态环境股份有限公司, 广东深圳 518049)

**摘要** 阐述了我国土壤污染现状及土壤污染源, 从 DDT、六六六及挥发性氯代脂肪烃污染土壤、油类污染土壤、金属类污染土壤几个方面, 综述了国内外土壤污染修复技术的研究进展, 最后分析了我国土壤污染修复技术中亟待解决的问题。

**关键词** 土壤污染; 修复技术; 治理措施; 行业发展

**中图分类号** X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)21-082-04

## Research Advances of Soil Pollution Remediation Technology in China

ZHANG An, GUAN Zhao-ying, XU Guo-gang et al (Shenzhen Master Ecology & Environment Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518049)

**Abstract** Soil pollution status and origins in China were elaborated, the research advances of soil pollution remediation technology at home and abroad were summarized from aspects of DDT, benzene and volatile chlorinated hydrocarbon contaminated soil, oil contaminated soil, metal contaminated soil, finally, problems need to be solved in soil pollution remediation technology in China were analyzed.

**Key words** Soil pollution; Remediation technology; Control measures; Industry development

随着工业化的快速发展及矿产资源的不合理开采、冶炼排放、污水灌溉、大气沉降及施用农药等, 使我国的土壤环境遭到了严重破坏。近年来, 这种以牺牲环境为代价换取经济发展的观念正逐渐被转变, 我国的环保发展方向也开始由控制污染源转向环境质量恢复。土壤污染修复作为下一个“五年规划”的重点, 已经启动。但是由于土壤环境的多介质、多界面、多组分和非均一性的特点, 以及土壤污染来源广泛、污染性质特殊等, 为土壤污染治理加大了难度。目前我国土壤污染修复技术研究尚处于发展阶段, 多为借鉴国外成熟技术。按其性质修复技术包括客土法、固化/稳定化、氧化剂法、化学淋洗、电动修复等化学、物理修复法、生物修复、植物修复、铁反应墙等<sup>[1-2]</sup>。

针对不同土壤条件选择相应的污染修复技术, 如采用物理手段修复, 需要了解土壤中是否含有铁、钙及土壤的酸度、缓冲能力等; 采用生物法修复, 需要了解土壤是否具备生物降解条件, 如酸度、氧气、硝酸盐、硫酸盐、铁元素浓度等; 采用化学修复, 需确定土壤中的有机物质、泥炭、钙、铁等含量及酸度<sup>[3]</sup>。此外, 与污染土地是否闲置、地下有无密集的基础建设、污染物的种类、浓度及修复时污染物的扩散和对周围环境的影响等有关。目前, 修复行业急需发掘一种(或一套)经济、节能、无二次污染、后期维护少的污染修复方法。笔者分析了我国土壤污染现状与污染源, 综述了土壤修复技术的应用, 以期为我国土壤污染治理提供借鉴。

## 1 我国土壤污染现状

2006 年国家环保部的调查显示: 我国 81% 的化工石化企业布设在环境敏感区, 全国受污染耕地地面积占总耕地面积的 8.3%<sup>[4]</sup>, 2014 年 4 月 17 日环保部发布的全国土壤污染状况调查公报中显示: 我国土壤环境状况总体不容乐观, 部分地区污染较重, 耕地土壤环境质量堪忧。全国土壤总超标

率为 16.1%, 无机污染物超标点数占全部超标点位的 82.8%, 其中镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍 8 种无机污染物点位的超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%<sup>[5]</sup>。全国受有机物污染的农田面积积达 3 600 万  $\text{hm}^2$ , 受重金属污染土地面积积达 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 且其中严重污染土地超过 70 万  $\text{hm}^2$ , 而 13 万  $\text{hm}^2$  土地因镉含量超标而被迫弃耕<sup>[6]</sup>。面对土壤污染的严峻形势, 如何有效治理受污染的土壤是目前面临的难题。

## 2 我国土壤污染源

我国土壤污染的主要来源主要有: ①工业污染源, 如金属冶炼、皮革厂、油田、矿山开采等; ②农业污染源, 如农药、污水灌溉等; ③城市生活、交通污染等(表 1)。土壤污染途径多, 原因复杂, 控制难度大。此外, 我国土壤污染类型多样, 呈现出新老污染物并存、无机有机复合污染的局面。既有重金属、农药、抗生素和持久性有机物等污染, 又有放射性、病原菌等污染类型(表 1), 为我国土壤污染修复带来困难。

表 1 我国土壤污染物的主要类别

Table 1 The categories of soil pollutants in China

序号 Serial No.	类型 Types	污染物 Pollutants
1	无机污染物	铬、镉、汞、铜、锌、镍、砷、铅等
2	有机污染物	农药、石油烃类、挥发性脂肪烃类等
3	放射性污染物	放射性物质: 铀、钍、铯等
4	病原性污染物	病原微生物: 肠道细菌、炭疽杆菌、肠寄生虫、结核杆菌等

目前, 工业污染是我国土壤污染的最主要污染源。因此, 近年来各大城市出台了許多相关政策, 包括勒令污染严重企业搬迁等(表 2), 但遗留的污染场地处置成为亟待解决的新问题。现阶段缺乏完善的法律和政策机制对企业搬迁后的污染土壤治理的有效规范, “谁污染, 谁治理”并未完全落实。

## 3 我国污染土壤修复技术及其应用

**3.1 DDT、六六六及挥发性氯代脂肪烃污染土壤的修复** 我国是一个有机氯农药的生产和使用大国。20 世纪 50 ~ 80 年代, 我国使用六六六 490 万 t、滴滴涕 40 万 t, 分别占

**基金项目** 深圳市战略新兴产业发展专项项目 (GCZX2015051514435234、CXZZ20150527171538718); 深圳市科技研发项目 (CXZZ201404221428 33835)。

**作者简介** 张安(1988 - ), 男, 甘肃白银人, 中级工程师, 硕士, 从事生态污染修复研究。

**收稿日期** 2016-06-17

全球总用量的 33% 和 20%<sup>[7]</sup>。虽然我国从 1983 年开始禁止使用农药,但由于 DDT 及六六六自身的性质(理化性质稳定、自然降解速率缓慢等)及土壤污染特殊性(隐蔽性、滞后性、累积性等),目前检出率及超标率仍较高。

表 2 我国一些城市污染企业的搬迁情况

Table 2 Relocation of polluting enterprises in some cities in China

城市 City	搬迁情况 Relocation	数据来源 Data origin
北京 Beijing	2015 年完成 1 200 家高污染企业退出	北京市工业大气污染治理行动计划(2012~2020 年)的通知
南京 Nanjing	2015 年底完成 20 家中小企业的关停搬迁;2025 年完成重点企业搬迁关停工作	<a href="http://jiangsu.sina.com.cn/news/s/2014-02-19/080292031.html">http://jiangsu.sina.com.cn/news/s/2014-02-19/080292031.html</a>
上海 Shanghai	实施高污染企业整体搬迁改造,2015 年增加到 1 000 家	解放日报
重庆 Chongqing	2013 年前环保搬迁 206 家,关闭取缔 56 家重污染企业 2013~2017 年关停及搬迁污染企业 118 家	重庆市“蓝天行动”实施方案
广州 Guangzhou	303 家企业于 2015 年前分 3 批迁出市区	广州“退二进三”企业名单
杭州 Hangzhou	2013~2016 年关停搬迁重污染企业 33 家	市政府办公厅关于印发杭州市半山和北大桥地区新一轮环境污染综合整治方案的通知
沈阳 Shenyang	2008 年数十家污染企业搬迁,2009 年搬迁改造城区内所有重污染企业	世界银行中国污染场地的修复与再开发的现状分析

鉴于 DDT 和六六六在土壤中迁移转化的性质,可采用化学或者生物方式对这类土壤进行修复。如 pH 为 3.2、亚铁/过硫化钠为 1:20 的条件下,0.16 mol/L 活化过硫化钠对 DDT 的降解率可达 90%<sup>[8]</sup>;可使用降解菌株的复合试剂降解六六六和 DDT<sup>[9]</sup>;用芬顿试剂处理长期污染的泥浆,64 h 后可降解 75% 的 DDT 和六六六<sup>[10]</sup>。

挥发性脂肪烃是造成我国土壤污染的一种主要污染源,其来源于化工原料、制冷剂及萃取剂、制药行业等<sup>[11]</sup>,含有四氯乙烯(PER)、三氯乙烯(TRI)、1,1,1-三氯乙烷(1,1,1-TCA)、1,2-二氯乙烷(1,2-DCA)、二氯甲烷(DCM)和四氯甲烷(TETRA)等。这类物质的污染常以重非水相液体(DNAPL)的方式进入土壤,在重力作用下形成下沉层,而大部分该类物质蒸气压较高,沸点较低,因此它又能以气态污染物的形态在非饱和层中扩散,也可进入到细微空隙中,从而降低生物可及性。以上这些特性都增大了污染修复的难度。

挥发性氯代脂肪烃污染土壤的修复方法较多(表 3),对于可溶解性、挥发性的脂肪烃满足如下条件则可采用生物降解<sup>[3]</sup>:①氧气、硝酸盐和硫酸盐含量低于一定含量,即氧气含量小于 1 mg/L,硝酸盐含量小于 1 mg/L,硫酸盐含量小于 10 mg/L,甲烷含量大于 1 mg/L;②可溶性有机碳含量大于 10 mg/L;③地下水存在还原脱氯的产物,包括乙烯或者乙烷等;④地下水样品中含有产乙烯脱卤拟球菌(为 PER 完全降解的重要辅助性标志)。

上述污染物在土壤中以不同的物理化学方式与土壤物质键合,以及受当地土壤的物理特性、地下水位、腐殖质含量及污染物在土壤中的非均质分布等的影响<sup>[12]</sup>,致使土壤修复难度大大增加。因此,需根据污染物特征、土壤特征、场地状况、法规要求、投入资金等确定其修复方法。其他一些方法,如提取处理法(适用于重非水相液体, < 5 000 mg/L)、蒸汽注入法(适用于重非水相液体, > 5 000 mg/L)、挖掘法(适用于重非水相液体, > 5 000 mg/L)等的应用也较为

广泛<sup>[3]</sup>。

**3.2 油类污染土壤的修复** 土壤中的油类物质主要包括矿物油、一些苯系物和多环芳烃类(PAHs)物质,其中以矿物油为主,其碳原子数为 4~40,主要由石油的开采、冶炼、使用和运输过程的污染和泄露事故,一些含油废水的排放,污水灌溉污染以及一些油类或其制品的挥发等造成<sup>[13]</sup>。大量石油泄露于土壤,重力作用下在非饱和区移动,而在该过程中,油类物质会进入土壤的非饱和层,进而渗透到地下水中,在地下水水面形成浮油层,由于地下水的上浮、下降及水平流动而使污染区域扩大。

目前,常用的油类污染物修复技术有挖掘法、提取法和生物法等。在修复前应充分了解油类污染物的性质、范围和分类以及在土壤和地下水中的状况,确定污染物是属于 C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>(可分解为 C<sub>10</sub>~C<sub>12</sub>油类)、苯系物还是 PAHs,确定采用何种修复方法。如 C<sub>10</sub>(最长不能超过 C<sub>16</sub>)以下的油类物质,由于具有较强的挥发性、流动性和水溶性,可采用原位的生物或物理法去除;采用生物处理时,如果修复地域气温较低(生物降解最适温度为 30~40 ℃),则需要通过辅助电加热提高土壤温度,从而促进生物修复的进行。对于 PAHs 污染,可利用活化过硫酸盐降解污染土壤中的 PAHs<sup>[14]</sup>;对于煤气厂下含水层苯、甲苯、二甲苯混合物的污染,可在好氧条件下进行生物降解,去除率可达到 80%~100%<sup>[15]</sup>等。具体修复方法见表 3。

**3.3 重金属类污染土壤的修复** 重金属污染来源广泛,包括矿山开采、冶炼、发电、污水灌溉、农药、施肥以及城市生活垃圾的丢弃堆积等,都会使重金属直接进入土壤或通过大气沉降、水土交换的形式进入土壤。重金属进入土壤,其在土壤中的形态、含量受土壤 pH、有机质、黏粒、粉粒、砂粒及阳离子交换量、氧化铁(二价、三价)含量和氧化锰(二价、四价)含量等因素的共同影响<sup>[17]</sup>。交换态和碳酸盐结合态重金属与土壤结合较弱,最易被释放,有较大的可移动性;铁锰

氧化态重金属在还原条件下易溶解释放,有机结合态重金属在氧化状态下易分解释放<sup>[18]</sup>。土壤中重金属的环境风险会随着土壤 pH 的降低而升高,因此须在加大土壤污染修复治

理时,注重采取农艺调控措施,增加土壤的 pH,降低土壤重金属的污染风险。另外,我国的酸雨危害也会直接导致重金属污染的加重。

表3 土壤污染修复技术<sup>[3,16]</sup>  
Table 3 Soil pollution remediation technology

修复方法 Remediation method	具体方法 Specific methods	主要适合区域 Major suitable region	适合的污染物类型 Suitable pollutant types	修复时间 Remediation time	修复费用 Remediation costs	备注 Note
生物修复法 Biological remediation method	生物通气法	污染源区或羽流区	苯系物和 C <sub>16</sub> 以下的矿物油馏分	长,几个月到几年	低	
	压缩空气注入法	污染源区或羽流区	BTEX 苯系物和 C <sub>16</sub> 以下的矿物油馏分	长,几个月到几年	低	较为广泛
	地下水抽取和营养物质注入法	污染源区或羽流区	苯系物和 C <sub>16</sub> 以下的矿物油馏分	长,几个月到几年	低	较为广泛
	定时或持续注入硝酸盐/硫酸盐或者营养物质	污染源区或羽流区	苯系物	长,几个月到几年	低	
化学修复法 Chemical remediation method	以芬顿试剂为氧化剂的化学氧化	污染源区	苯系物和 C <sub>16</sub> 以下的矿物油馏分	短,3~6个月	高	
	注入高锰酸盐	羽流区	苯系物和 C <sub>16</sub> 以下的矿物油馏分	短,3~6个月	中等	
物理法 Physical method	挖掘法	污染源区	所有	短	低	广泛
	电加热法	污染源区	苯系物、轻质油或重质油馏分	长,几个月到几年	高	应用有限
	压缩空气注入法	污染源区	苯系物和 C <sub>12</sub> ~C <sub>14</sub> 以下的轻质油馏分	长,几个月到几年	低	较为广泛
	多相抽取法	污染源区	所有类型	长,几个月到几年	高	
	反应墙法 Reaction wall method	污染源	烃类、重金属类及其他阴离子类	长	高	
	植物修复法 Plant remediation method	羽流区	重金属类	长	低	应用广泛

我国采用固化/稳定化技术修复土壤重金属污染的案例较多,常采用水泥、石灰、粉煤等无机材料或沥青、聚乙烯等热塑性有机材料和脲甲醛、聚酯等热固性有机材料进行固化,还有玻璃化技术和硫酸亚铁、磷酸盐、氢氧化钠、高分子有机物等药剂稳定化<sup>[19]</sup>。近年来,利用植物修复重金属的研究发展较快,发现了较多超富集植物,或者在螯合剂的作用下增大富集植物的富集系数而加大重金属吸收量。如通过种植超富集植物蜈蚣草和东南景天,将重金属砷和镉从土壤中提取出来<sup>[20-23]</sup>;芝麻可作为目前重金属铅污染修复较理想的植物<sup>[24-25]</sup>;当 EDTA/EDDS = 2/1 时可以增强玉米对铅的吸收<sup>[26]</sup>等。因此,针对我国重金属污染的特点,以固化/稳定化技术为基础,在大力发展植物修复的基础上,研发生物修复,发明一种经济、环保、修复时间短的修复方案尤为重要。

#### 4 我国土壤污染修复技术应用中亟待解决的问题

首先我国土壤污染与国外的区别是我国农田污染严重,而我国修复技术大多以场地污染修复为主。对比国外土壤

修复案例(表4)发现,国外以物理、生物修复较多,避免了化学药剂修复可能带来的二次污染的隐患,但国内场地污染修复,由于其污染特殊性及技术手段的局限性,目前化学药剂修复占主要位置。对于重金属污染土壤修复,尤以固化/稳定化与化学氧化技术应用最为广泛。

由于目前“短、平、快”成为国内很多修复行业的投资目标,在实施标准尚不成熟的前提下,大量化学药剂进入土壤,重金属成分却并未被分离去除。随着时间的推移和环境条件的变化,化学药剂带入和重金属状态改变带来的二次污染隐患极大;我国有机无机交叉污染严重,修复技术不成熟,因此修复应用有很大的局限性;针对 VOCs 污染的土壤,修复的同时往往会产生二次污染。具体来说,我国土壤污染修复还存在如下问题:①对具体污染的状况了解不足;②土壤污染修复的法规、技术标准不健全(或没有);③修复工程设备、技术、产业化相对滞后;④修复模式不明确,修复技术单一,二次污染隐患较大。

表 4 土壤污染修复案例<sup>[27-30]</sup>

Table 4 Soil pollution remediation case

序号 Serial No.	污染物 Pollutants	应用技术 Application technology	污染源 Pollutant source	修复时间 Remediation time	治理规模 Management scale	费用 Cost 美元
1	PCE 5.0 μg/kg, DCE 及 TCE 5.0 μg/kg, 氯乙烯 0.2 μg/kg	原位生物修复	干洗操作	约 20 个月	—	13 860
2	PAH 77 ~ 161 mg/kg, PCB 2.0 ~ 3.6 mg/kg, DRO 24 ~ 440 mg/kg	植物修复	航空、工业泄露及城市迁移的废弃材料	持续	4 043 m <sup>2</sup>	47 227
3	土壤中总 Cr 7 500 mg/kg; 地下水 Cr 浓度 300 000 g/L	ISRM	镀铬操作枯井的水的释放	技术研究 10 个月, 修复 9 个月	—	3 449 500
4	苯 48 000 mg/kg, 甲苯 210 000 mg/kg, 乙苯 180 000 mg/kg, 乙烯 500 000 mg/kg, TPH 17 500 mg/kg	原位 SVE	JP-4 燃料的缓慢沉积, 地上柴油储罐的泄露	大于 36 个月	—	610 000
5	土壤中平均总浓度为 500 mg/kg; 地下水中柴油浓度为 0.085 ~ 18.600 mg/L	空气吹扫、原位生物修复及 SVE	管线的泄露	24 个月	7 875 m <sup>3</sup>	295 760
6	土壤中总石油烃 320 000 × 10 <sup>-6</sup> ; 苯: 110 × 10 <sup>-6</sup> ; 地下水中苯: 510 × 10 <sup>-9</sup> ; 漂浮有 1 ~ 3 英寸石油烃	SVE	石油泄漏	22 个月	48 167 m <sup>3</sup>	162 000
7	Cd 364 × 10 <sup>-6</sup> ~ 1 300 × 10 <sup>-6</sup> , Pb 1 200 × 10 <sup>-6</sup> ~ 6 475 × 10 <sup>-6</sup> , Zn 13 000 × 10 <sup>-6</sup> ~ 35 000 × 10 <sup>-6</sup>	植物修复	锌矿冶炼开采	持续	3 439 830 m <sup>2</sup>	9 000 000
8	地下水中 Pb 20.0 mg/L	反应墙	铅冶炼	超过 24 个月	—	325 000
9	Fe 7.0 mg/L, Mn 1.2 mg/L, Cu 0.6 mg/L, Zn 1.7 mg/L, Al 4.2 mg/L	人工湿地	铜和硫采矿	持续	90.6 km <sup>2</sup>	1 300 000
10	Cd、Cu、Pb、Mn、Zn	固化/稳定化技术 (原位添加生物固体及石灰)	尾矿及酸性矿山排水	14 个月	—	3 477 697

注: 序号“4”中的费用为 28 个月的花费; 序号“6”中操作维护费用为 45 000 美元。

Note: The cost in serial No. 4 is total costs of 28 months; operation and maintenance cost in serial No. 6 is 45 000 dollars.

## 5 结语

目前我国土壤污染形势不容乐观, 对土壤污染修复技术的研究虽有一定成果, 但大多仍停留在理论或者初级应用阶段, 对于修复设备及工程化应用方面的研究与发达国家还有较大差距。因此, 未来可将研究重点放在以下几个方面: ① 虽然我国目前对全国土壤污染展开过几次调查, 但仍缺乏全面的基础数据, 尚未进行针对性的防治, 因此需展开全面的调查; ② 针对我国土壤污染的实际情况, 出台土壤污染修复的配套法规及条文; ③ 研发先进的污染修复设备与技术, 使其产业化; ④ 大力发展高效、节能、可操作性高的生物修复 (植物修复) 技术, 避免二次污染的隐患。

## 参考文献

- [1] 张譞, 李晔, 胡进, 等. 三种螯合剂对土壤重金属 Cd 和 Zn 形态变化的研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6184 - 6188.
- [2] 谢剑, 李发生. 中国污染场地的修复与再开发的现状分析[R]. 世界银行, 2010.
- [3] 环境保护司. 土壤修复与技术方法应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [4] 何昌垂. 粮食安全: 世纪挑战与应对[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013: 78 - 85.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014 - 04 - 17.
- [6] 薛祖源. 国内土壤污染现状、特点和一些修复浅见[J]. 现代化工, 2014, 34(10): 1 - 6.
- [7] 徐鹏, 封跃鹏, 范洁, 等. 有机氯农药在我国典型地区土壤中的污染现状及研究进展[J]. 农药, 2014, 53(3): 164 - 166.
- [8] 魏海江, 杨兴伦, 叶茂, 等. 活化过硫酸钠氧化法修复 DDTs 污染场地土

壤研究[J]. 土壤, 2014, 46(3): 504 - 511.

- [9] VILLA R D, NOGUEIRA R F P. Oxidation of *p,p'*-DDT and *p,p'*-DDE in highly and long-term contaminated soil using Fenton reaction in a slurry system[J]. Science of total environment, 2006, 371(1/2/3): 11 - 18.
- [10] DING K Q, LUO Y M, SUN T H, et al. Bioremediation of soil contaminated with petroleum using forced-aeration compostion [J]. Pedosphere, 2002, 12(2): 145 - 150.
- [11] AMRO M M. Factors affecting chemical remediation of oil contaminated water-wetted soil[J]. Chemical engineering and technology, 2001, 27(8): 890 - 894.
- [12] 刘锐, 孟凡勇, 文晓刚, 等. 挥发性氯代烃在土壤中的吸附行为研究进展[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 165 - 170.
- [13] 张学佳, 纪巍, 康志军. 土壤中石油类污染物的自然降解[J]. 石化技术与应用, 2008, 26(3): 273 - 278.
- [14] FERRARESE E, ANDREOTTOLA G, OPREA I A. Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation[J]. Journal of hazardous materials, 2008, 152: 128 - 139.
- [15] CHIANG C Y. Aerobic biodegradation of benzene toluene and xylene in a sandy aquifer data analysis and computer modeling[J]. Ground water, 1989, 27(26): 823 - 834.
- [16] BHANDARI A, SURAMPALLI R Y. Remediation technologies for soils and groundwater[M]. American Society of Civil Engineers, 2007.
- [17] 杨元根, PATERSON E, CAMPBELL C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2010, 29(6): 989 - 996.
- [18] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266 - 1273.
- [19] 赵述华, 陈志良, 张太平, 等. 重金属污染土壤的固化/稳定化处理技术研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1531 - 1536.
- [20] CHEN T B, WEI C Y. Arsenic Hyperaccumulator in some plant species in south china[C]//Proceedings of international conference of soil remediation. Huangzhou, China, 2000, 194 - 195.

(下转第 133 页)

大多数都是研究正常细菌对细胞的黏附。

#### 4 小结

由于益生菌定植于人体肠道发挥益生作用前,会受到胃液的酸性环境和小肠胆盐、消化酶、渗透压等多重环境因素的影响,这些环境因素一方面对益生菌的存活造成一定的影响,另一方面通过影响菌体表面的疏水性、物理性质和自动聚集能力以及菌体表面蛋白的表达,从而改变菌体在肠道的黏附定植能力,可能会进一步影响益生菌在人体内益生作用的发挥。

#### 参考文献

- [1] BEZKOROVAINY A. Probiotics: Determinants of survival and growth in the gut [J]. The American journal of clinical nutrition, 2001, 73(S2): 399S-405S.
- [2] CANDELA M, PERNA F, CARNEVALI P, et al. Interaction of probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains with human intestinal epithelial cells: Adhesion properties, competition against enteropathogens and modulation of IL-8 production [J]. International journal of food microbiology, 2008, 125(3): 286-292.
- [3] GUGLIELMETTI S, TAMAGNINI I, MORA D, et al. Implication of an outer surface lipoprotein in adhesion of *Bifidobacterium bifidum* to Caco-2 cells [J]. Applied and environmental microbiology, 2008, 74(15): 4695-4702.
- [4] COLLADO M C, GUEIMONDE M, HERNANDEZ M, et al. Adhesion of selected *Bifidobacterium* strains to human intestinal mucus and the role of adhesion in enteropathogen exclusion [J]. J Food Prot, 2005, 68(12): 2672-2678.
- [5] WANG L Q, ZHAO F, LIU F, et al. Live/dead state is not the factor influencing adhesion ability of *Bifidobacterium animalis* KLD52.0603 [J]. Journal of microbiology (Seoul, Korea), 2013, 51(5): 584-589.
- [6] TAKAHASHI N, XIAO J Z, MIYAJI K, et al. Selection of acid tolerant bifidobacteria and evidence for a low-pH-inducible acid tolerance response in *Bifidobacterium longum* [J]. The journal of dairy research, 2004, 71(3): 340-345.
- [7] MAINVILLE I, ARCAND Y, FARNWORTH E R. A dynamic model that simulates the human upper gastrointestinal tract for the study of probiotics [J]. International journal of food microbiology, 2005, 99(3): 287-296.
- [8] SAARELA M, RANTALA M, HALLAMAA K, et al. Stationary-phase acid and heat treatments for improvement of the viability of probiotic lactobacilli and bifidobacteria [J]. Journal of applied microbiology, 2004, 96(6): 1205-1214.
- [9] MAUS J E, INGHAM S C. Employment of stressful conditions during culture production to enhance subsequent cold-and acid-tolerance of bifidobacteria [J]. Journal of applied microbiology, 2003, 95(1): 146-154.
- [10] 李平兰, 杨华, 篔张. 乳酸菌体外粘附人结肠腺癌细胞系 HT-29 细胞的研究 [J]. 中国农业大学学报, 2002(1): 19-22.

- [11] DEL RE B, SGORBATI B, MIGLIOLI M, et al. Adhesion, autoaggregation and hydrophobicity of 13 strains of *Bifidobacterium longum* [J]. Letters in applied microbiology, 2000, 31(6): 438-442.
- [12] HE F, OUWEHAND A C, ISOLAURI E, et al. Differences in composition and mucosal adhesion of bifidobacteria isolated from healthy adults and healthy seniors [J]. Current microbiology, 2001, 43(5): 351-354.
- [13] HE F, OUWEHAND A C, HASHIMOTO H, et al. Adhesion of *Bifidobacterium* spp. to human intestinal mucus [J]. Microbiology and immunology, 2001, 45(3): 259-262.
- [14] FOURNIAT J, COLOMBAN C, LINXE C, et al. Heat-killed *Lactobacillus acidophilus* inhibits adhesion of *Escherichia coli* B41 to HeLa cells [J]. Annales de recherches veterinaires annals of veterinary research, 1992, 23(4): 361-370.
- [15] 伦永志, 黄敏, 袁杰利, 等. 灭活的双歧杆菌对肠上皮细胞粘附及其影响因素的研究 [J]. 中国微生物生态学杂志, 2000(6): 4-6.
- [16] 王彦, 孟祥晨, 王丽群, 等. 低 pH 处理对两歧双歧杆菌 KLD52.0603 黏附能力的影响 [J]. 微生物学通报, 2012(6): 797-803.
- [17] OUWEHAND A, TÖLKK S, SALMINEN S. The effect of digestive enzymes on the adhesion of probiotic bacteria *in vitro* [J]. Journal of food science, 2001, 66(6): 856-859.
- [18] GUGLIELMETTI S, TAMAGNINI I, MINUZZO M, et al. Study of the adhesion of *Bifidobacterium bifidum* MIMB75 to human intestinal cell lines [J]. Current microbiology, 2009, 59(2): 167-172.
- [19] GOMEZ ZAVAGLIA A, KOCIUBINSKI G, PEREZ P, et al. Effect of bile on the lipid composition and surface properties of bifidobacteria [J]. Journal of applied microbiology, 2002, 93(5): 794-799.
- [20] CANDELA M, CENTANNI M, FIORI J, et al. DnaK from *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis is a surface-exposed human plasminogen receptor upregulated in response to bile salts [J]. Microbiology, 2010, 156(Pt 6): 1609-1618.
- [21] PÉREZ P F, MINNAARD Y, DISALVO E A, et al. Surface properties of bifidobacterial strains of human origin [J]. Applied and environmental microbiology, 1998, 64(1): 21-26.
- [22] CANZI E, GUGLIELMETTI S, MORA D, et al. Conditions affecting cell surface properties of human intestinal bifidobacteria [J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 2005, 88(3/4): 207-219.
- [23] COLLADO M C, MERILUOTO J, SALMINEN S. Adhesion and aggregation properties of probiotic and pathogen strains [J]. European food research and technology, 2008, 226(5): 1065-1073.
- [24] RUIZ L, COUTE Y, SANCHEZ B, et al. The cell-envelope proteome of *Bifidobacterium longum* in an in vitro bile environment [J]. Microbiology, 2009, 155(Pt 3): 957-967.
- [25] WEISS G, JESPERSEN L. Transcriptional analysis of genes associated with stress and adhesion in *Lactobacillus acidophilus* NCFM during the passage through an in vitro gastrointestinal tract model [J]. Journal of molecular microbiology and biotechnology, 2010, 18(4): 206-214.
- [26] JIN J, LIU S, ZHAO L, et al. Changes in *flh*, *uvrA*, *groES* and *dnaK* mRNA abundance as a function of acid-adaptation and growth phase in *Bifidobacterium longum* BFMN68 isolated from healthy centenarians [J]. Current microbiology, 2011, 62(2): 612-617.

(上接第 85 页)

- [21] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- [22] 景干, 雷梅, 陈同斌, 等. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 165-171.
- [23] 杨肖娥, 龙新究, 倪吾钟, 等. 东南景 (*Sedum alfredii* H): 一种新的锌超累积植物 [J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [24] 黄闰, 孟桂元, 陈跃进, 等. 苎麻对重金属铅耐受性及其修复铅污染土壤潜力研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 148-152.
- [25] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 881-893.
- [26] SHEN Z G, LI X D, WANG C C, et al. Lead phytoextraction from contami-

nated soil with high-biomass plant species [J]. Journal of environmental quality, 2002, 31(6): 1893-1990.

- [27] Environment Protection Agency Department of defense. Remediation case studies: In situ soil treatment technologies (Soil vapor extraction, thermal processes) [M]. Biblio Gov, 2013.
- [28] Environment Protection Agency Department of Defense. Abstracts of remediation case studies [Z]. 2002.
- [29] Environment Protection Agency Department of Defense. Abstracts of remediation case studies [Z]. 2005.
- [30] Environment Protection Agency Department of Defense. Abstracts of remediation case studies [Z]. 2007.