

# 重金属 - 有机物复合污染农田土壤修复策略研究

卢欢亮<sup>1</sup>, 曾祥专<sup>1</sup>, 丁劲新<sup>2</sup>, 谭允清<sup>3</sup> (1. 广东省环境科学研究院, 广东广州 510045; 2. 云安县科学技术协会, 广东云浮 527500; 3. 云浮市庆丰农家农业生态园有限公司, 广东云浮 527599)

**摘要** 介绍了我国农田土壤重金属-有机物复合污染现状, 重点分析了重金属-有机物土壤复合污染的相互作用及过程, 对适用于复合污染农田土壤联合修复技术进行了总结。在此基础上, 结合生物炭用于土壤修复的机理与实践情况, 提出了“不同种类生物炭改良+耐性植物”这一针对重金属-有机物复合污染农用土壤有效的修复策略。

**关键词** 重金属-有机复合污染; 交互作用; 生物炭; 联合修复

**中图分类号** S156 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)26-10633-04

## Remediation Strategy On Farmland Soil Polluted by Heavy Metal and Organism

LU Huan-liang et al (Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou, Guangdong 510045)

**Abstract** Farmland soil heavy metal-organic compound pollution status in China was introduced, especially on interaction effect and process. The remediation technology for compound pollution was summarized. On the basis of this, combined with mechanism and practice of biochar in soil remediation, an effective strategy of “different species biochar and resistance plant” was put forward.

**Key words** Heavy metal-organic compound pollution; Interaction effect; Biochar; Joint remediation

### 1 重金属-有机物复合污染现状

当前土壤环境中的污染物正趋于多元化和复杂化, 进入生态系统中的污染物的种类随时间呈指数增长, 环境污染不再是单一污染的理想状态, 而是以由各种污染物构成的复合污染(Combined pollution)。在土壤复合污染研究领域中, 重金属-有机复合污染问题尤为突出, 逐渐成为目前的研究重点。

据估计, 我国重金属污染的农业土地面积约 2 500 万  $\text{m}^2$ , 每年被重金属污染的粮食多达 1 200 万  $\text{t}^{[1]}$ , 而据农业部环境监测系统近年的调查, 我国 24 个省(市)的 320 个重点污染区中, 污染超标的大田农作物种植面积为 60.6 万  $\text{hm}^2$ , 占调查总面积的 20%。其中, 重金属含量超标的农作物种植面积约占污染物超标农作物种植面积的 80% 以上, 尤其是 Pb、Cd、Hg、Cu 污染最为突出<sup>[2]</sup>。广东省珠江三角洲土壤重金属污染调查情况显示, 三级和劣三级土壤已占珠江三角洲经济区面积的 22.8%, 主要超标元素为镉、汞、砷、氟<sup>[3]</sup>。

另一方面, 农田在受到重金属污染的同时, 往往也伴随着非常严重的有机物污染。农药施用后, 仅 30% ~ 40% 农药被利用, 而真正作用于靶标生物的仅有 0.1%, 绝大部分农药进入环境对土壤产生严重的污染, 直接导致粮食减产<sup>[4]</sup>。农药具有极强的难降解性, 可长期残留在土壤中。以有机氯农药为例, 尽管 1985 年起我国就已禁用, 但因早期大量使用及其难降解性, 土壤中仍有残留。20 世纪 90 年代以来, 茶叶、水果中六六六和 DDT 的检出率高达 100%<sup>[5]</sup>。同样, 对于残留在土壤中有机磷农药, 鞍山市蔬菜有机磷农药超标率达 60%, 厦门海域中则常检出敌敌畏、硫磷嗪、甲拌磷、乐果和乙拌磷等<sup>[6-7]</sup>。据 2000 年对广东珠三角地区 63 个不同利用类型的土壤样品进行调查, 发现耕地尤其是水田样品的

DDTs、HCHs 的残留量分别达到 68.5 和 16.2  $\text{ng/g}^{[8]}$ 。

由此可知, 对于农田土壤污染, 有机污染物和重金属复合污染往往是共存的, 而有机、重金属污染物不同的浓度水平和污染组合方式会产生不同的环境行为和环境效应。开展重金属-有机物复合污染治理研究, 对于解决我国土壤污染处理、处置面临的问题、完善重金属-有机物复合污染治理的技术体系具有重要意义。

### 2 重金属-有机物复合污染特点

重金属-有机物复合污染具有与单因子污染不同的污染特点。这主要是由于重金属与有机污染物之间在土壤中存在复杂的交互作用。其交互作用归纳起来分为 3 类: 第一, 有机污染物-重金属在土壤中吸附行为的交互作用; 第二, 有机污染物-重金属在土壤中化学作用过程的交互作用; 第三, 有机污染物-重金属在土壤中微生物作用过程的交互作用。

**2.1 重金属-有机物在土壤中吸附行为的交互作用** 土壤是一个由无机胶体(黏土矿物)、有机胶体(腐殖酸类)以及有机-无机胶体所组成的胶体体系, 具有较强的吸附性能。

有机污染物本身的性质可直接影响土壤对它的吸附作用。在各种有机污染物的分子结构中, 凡是带  $\text{R}_3\text{H}^+$ 、 $-\text{OH}$ 、 $\text{CONH}_2$  等功能团的有机污染物都能增强被土壤吸附的能力。有机污染物在土壤上的吸附主要与有机物的疏水性、土壤的有机碳含量、有机物的结构特征以及土壤的其他性质有关<sup>[9]</sup>。极性有机污染物的土壤吸附性能比非极性有机污染物更缓慢<sup>[10]</sup>。

重金属在土壤中吸附行为的影响因素非常多, 概括起来主要有土壤的阳离子交换容量、黏土矿物组成、有机质质量分数、重金属离子本身的电荷性质、价态、水合半径以及平衡介质的酸度等<sup>[11]</sup>。一般而言, 重金属的存在通常不会影响有机污染物(特别是分子形态存在的有机物)在土壤上的吸附, 但极性有机污染物可以通过静电作用以及在土壤中的黏土矿物上形成氢键等方式被吸附在土壤表面, 从而与重金属

**基金项目** 广东省科技计划项目(2012B030900028)。

**作者简介** 卢欢亮(1981-), 男, 广东陆丰人, 高级工程师, 博士, 从事环境污染修复治理技术研究, E-mail: luhuanliang@139.com。

**收稿日期** 2013-08-01

存在竞争吸附。对垃圾填埋降解过程中产生的乙酸、富里酸及多种重金属共存条件下黏土对重金属离子的吸附性能研究表明,溶液中己酸和重金属共存时,由于竞争吸附使得黏土对重金属吸附能力普遍有较大幅度的下降<sup>[12]</sup>。由此可知,有机污染物-重金属在土壤中可能存在对吸附点位的竞争。二者在土壤环境中的同时出现有可能导致其土壤吸附过程变得复杂。

**2.2 重金属-有机物在土壤中化学过程的交互作用** 从化学角度来考虑,重金属-有机污染物在土壤中的交互作用过程主要包括络合、氧化还原以及沉淀等。这些过程的发生对其在土壤中的交互作用有非常重要的影响。

土壤中溶解性有机质(DOM)的出现可改变土壤的pH和氧化还原电位,破坏原有的沉淀-溶解平衡,从而改变土壤溶液中的重金属浓度<sup>[13]</sup>。一般来说,土壤中溶解性有机质的出现通常使得土壤pH下降,促进土壤中重金属的溶解,但也受到土壤性质的影响。

通常,在还原条件下,氧化还原电位下降,重金属以难硫化物或氢氧化物沉淀;在氧化条件下,铁离子和锰离子则以氧化难溶物的形式沉淀。研究表明,在铜污染的水田中使用有机肥降低土壤氧化还原电位至还原性硫出现的临界电位(8 mV)以下时可减少重金属的可溶性<sup>[14]</sup>。

有研究表明,当溶液中腐殖酸和重金属共存时,黏土对重金属的吸附能力增强,主要是由于酸性条件下富里酸发生解离后与重金属络合,其络合物与黏土颗粒有一定的结合能力,增强了黏土对重金属的吸附能力<sup>[12]</sup>。

一些重金属还能与有机污染物作用,导致有机甲基化影响有机污染物的化学行为,如汞与有机污染物发生作用而生成毒性更大的金属有机化合物——甲基汞<sup>[15]</sup>。

**2.3 有机污染物-重金属在土壤中微生物过程的交互作用** 一般来说,在无人外力干扰的情况下,有机污染物进入土壤后主要是依靠微生物活动来完成降解。而在有机污染物-重金属复合污染存在的条件下,二者的交互作用将会对土壤生物学过程产生复杂的影响。

首先,重金属污染可以导致土壤中酶活性的降低,呼吸作用减小,氮的矿化速率变慢,有机污染物降解半衰期延长等<sup>[16]</sup>,直接表现在对生物量、生物活性的影响。研究表明,土壤中重金属的含量能够直接影响土壤中微生物的种群和数量<sup>[17-19]</sup>。受污染重的土壤中耐性细菌数量比轻污染的土壤要多<sup>[20]</sup>。需要注意的是,重金属浓度对微生物有机物降解性能的影响较大。在某些情况下,小剂量重金属能够刺激生物活性,某些金属包括汞、铅、镍、锡和铜在缺盐的沉积物中能够促进甲烷产生<sup>[21]</sup>。杨卫红<sup>[22]</sup>研究表明,低浓度重金属对土壤细菌、真菌有一定的刺激作用,高浓度重金属则对其有强烈的抑制作用。

其次,在重金属与难降解有机污染物的复合作用下,二者的交互作用将会对微生物活动产生拮抗、协同等更复杂的影响。Barbara等<sup>[23]</sup>研究表明,重金属与多环芳烃复合污染对土壤植物、土壤微生物的毒害作用要明显强于重金属或多

环芳烃单独作用下的情况。相同的,土壤中单一的荧蒽作用对细菌增殖无明显影响,但在重金属存在的条件下,当投加0.2 mg/L 荧蒽后,原本对细菌增殖影响较小的低浓度重金属离子的生物毒性明显增强<sup>[24]</sup>。而重金属(Cd、Zn、Pb)和多环芳烃(菲、荧蒽、苯并a 芘[或B(α)P])复合污染对土壤酶活性影响呈现2种不同作用,Zn和B(α)P相互作用对脲酶活性以及Cd和Zn交互作用对脱氢酶活性的影响均表现为拮抗作用,但Zn和菲以及Cd和菲之间的交互作用无论是对脲酶还是脱氢酶均表现为协同作用<sup>[25]</sup>。高浓度(25 mg/kg)Cd对土壤中B[α]P的降解有明显的抑制作用,而加入初始浓度为250 mg/kg的芘(Pyrene, PYR)则能显著促进B(α)P的降解,缩短其半衰期,并减缓高Cd浓度对B(α)P降解的抑制<sup>[26]</sup>。

由于受到物理、化学、微生物作用等多重因素的交互影响,土壤环境中重金属和有机物复合污染特性十分复杂,需针对不同的污染物质及其特性采取不同的治理措施。

### 3 重金属-有机物复合污染土壤联合修复技术

目前土壤修复的技术包含物理、化学、植物、微生物及其联合修复等多类<sup>[27]</sup>。在有机污染物-重金属的复合污染体系下,一种污染物的行为必然要受到其他污染物的影响,进而影响土壤修复的效率。因此,当面对一个由有机污染物-重金属组成的复合污染修复体系时,寻找高效率、生态环境友好、成本低廉的修复技术具有重大的现实意义。由于常规物理、化学修复技术成本太高,目前对于受重金属-有机物污染农业土壤的修复,通常采用以植物与微生物修复为主,以化学、物理方法为辅的方法。以植物、微生物修复为核心,成本较低且生态环境友好的重金属-有机物复合污染土壤联合修复有3种常见方式。

**3.1 “化学改良+植物”联合修复** 目前,常规的化学氧化、还原、淋洗、浸提工艺由于需要大量昂贵的药剂、复杂的施工机械等条件,即使是仅作为后续植物与微生物修复的预处理,常规化学处理成本较大,较适用于污染严重的工业用地土壤修复。在农用地土壤修复尤其是重金属-有机物复合污染修复过程中,常用的是对土壤进行化学改良辅以植物修复技术。

在常见的“化学改良+植物”联合修复工艺中,通常适当地加入一些化学改良剂如赤泥、城市污泥和熟石灰、骨炭、磷矿粉、沸石等调节土壤营养及物理化学条件,以改良植物生长环境,促进植物对重金属的吸收而去除重金属<sup>[28-31]</sup>。

某些表面活性剂、螯合剂具有润滑、增溶、分散、洗涤等特性,可改变土壤表面电荷和吸收位能,或从土壤表面将重金属置换出来,以络合、螯合物的形式存在于土壤溶液中,也加快了重金属在自然环境中的可流动性,从而加速重金属的去除<sup>[32-33]</sup>。在重金属-有机物复合污染的土壤修复试验表明,表面活性剂与化学调控剂的投加不仅能够促进重金属离子的植株吸收,而且对芘、DDT等的植物降解有促进作用<sup>[34-35]</sup>。

**3.2 “微生物+植物”联合修复** 根际微生物与植物根系

的联合作用对重金属-有机物复合污染起到非常重要的影响。一方面,植物根部表皮细胞的脱落、酶和营养物质的释放,为微生物提供更好的生长环境,增加微生物的活动和生物量。另一方面,根际微生物群落能够增强植物对营养物质的吸收,提高植物对病原的抵抗能力,合成生长因子,降解腐败物质等。这些对维持土壤肥力和植物的生长都是必不可少的<sup>[36]</sup>。

首先,某些根际微生物在土壤中独立生长的速度很慢,但是与植物共生后则快速生长。有研究表明,在田间试验条件下紫花苜蓿接种根瘤菌后对土壤 PCBs 的去除率最高,达到 42.6%,在 0.05 水平显著高于未接种及其他接种情况下 PCBs 的去除率<sup>[37]</sup>。其次,微生物与植物联合作用可以改变污染物的性质。通过释放螯合剂、酸类物质和氧化还原作用,根际微生物不仅影响土壤中重金属的流动性,而且增加植物的利用度。有报道显示,从被 Ni 污染的土壤中分离到 9 株根际微生物,可以增强植物在低浓度和高浓度污染的土壤中 Ni 的吸收<sup>[38]</sup>。

“微生物+植物”联合修复在石油-重金属复合污染土壤修复中的研究表明,在种植植物的条件下,微生物对 Ni 污染土壤降解石油烃的效率要明显高于微生物单独作用情况<sup>[39]</sup>。Cd-DDT 复合污染土壤微生物+植物联合修复研究也表明,东南景天与 DDT 降解菌联合修复技术是修复 Cd-

DDTs 复合污染土壤的有效手段<sup>[40]</sup>。

**3.3 “化学+微生物+植物”联合修复** 实际上,在化学土壤改良的过程中,土壤生物数量一般会有明显增加,而土壤中微生物的存在如硅酸盐细菌等可以将土壤中云母、长石、磷灰石等含钾、磷的矿物转化为有效钾,提高土壤中有效元素的含量,促进超富集植物的生长。由此可知,“化学改良+微生物+植物”联合修复工艺并不是单独工艺的叠加。

不同的土壤改良配方对重金属超积累植物东南景天盆栽土壤中细菌、真菌和放线菌数的影响结果表明,添加了土壤改良剂后,细菌、放线菌、真菌的数量都有不同程度的增加,并且土壤细菌、真菌和放线菌数量与土壤 Zn、Cd 的去除率、东南景天植株干量两两之间都呈现 0.01 水平显著正相关关系<sup>[41]</sup>。镉-锌/DDT 复合污染土壤植物修复的农艺强化过程研究表明,油茶籽饼处理后土壤微生物生物量碳、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性在 0.05 水平显著高于其他处理,在 0.05 水平显著增加土壤 DDTs 的降解速率,而接种降解菌急剧增加蓖麻根系 Cd 含量<sup>[35]</sup>。

在广东省大宝山矿山周边多金属污染土壤修复过程中微生物生态特征的变化表明,种植红麻前施用改良剂可以显著提高土壤微生物活性;施用有机肥+石灰石可以刺激根系分泌 L-丝氨酸等碳源,使得微生物对胺类和氨基酸类碳源的利用能力大幅提高,有助于重金属污染土壤的生态修复<sup>[42]</sup>。

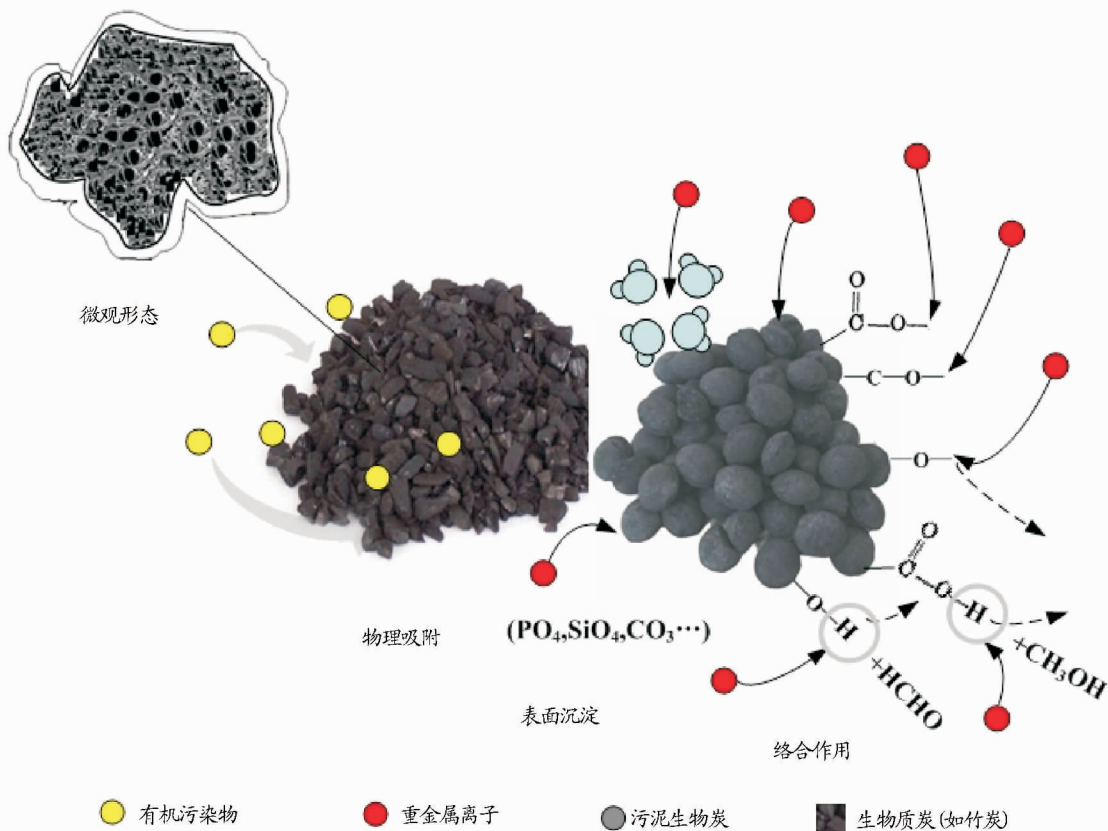


图1 不同种类生物炭组合对重金属-有机物复合污染治理示意图

#### 4 生物炭在土壤修复中的应用

寻找具有环境友好、经济合理而又具有多种功效的土壤

改良剂对联合修复来说是一项重要的工作。近年来,生物炭作为重要的土壤改良剂、污染物质吸附剂在农业和环境修复

中受到国内外学者们的普遍关注。

生物炭(Biochar)是植物生物质在完全或部分缺氧的状态下经热解炭化产生的一类高度芳香化的黑色产物<sup>[43]</sup>。人类对生物炭的认识起源于巴西亚马逊流域的“印第安人的黑土壤”。生物炭可以有效改善土壤的理化特性,表现在直接的营养供给;比表面积、孔隙大小分布、粒径大小分布、颗粒密度和容积密度发生变化,从而改变土壤的结构、孔隙度和黏度<sup>[44]</sup>;提高土壤的保水性能,可蓄留植物根部水分<sup>[45]</sup>;堆积密度减少,改善土壤的透气性;提高酸性土壤的 pH<sup>[46]</sup>;生物炭表面可被轻度氧化形成羰基、酚基和醌基等官能团,从而提高土壤的阳离子交换容量<sup>[47]</sup>;提高土壤对磷酸根阴离子的保留作用<sup>[48]</sup>。生物炭基质可以为微生物提供良好的生存空间,改善微生物的生境,增加土壤微生物活性<sup>[49-50]</sup>。

生物炭对污染物的吸附作用主要集中在有机污染物和重金属方面,如在土壤中加入麦秆衍生生物炭能有效地吸附敌草隆(一种杀虫剂)<sup>[51]</sup>,而从木屑热解得到的生物炭能有效地固定土壤中的氯多酚(Chlorpyrifos)和碳茆兰(Carbofuran)杀虫剂<sup>[52]</sup>。Cao等<sup>[53]</sup>研究表明,生物炭对重金属和有机复合污染都具有很好的吸附作用,但对2种污染物的作用机理不同:对于有机污染物,以物理吸附为主;而对于重金属Pb<sup>2+</sup>的吸附,则以表面沉淀和吸附为主,其中84%~87%的Pb<sup>2+</sup>形成沉淀,其余部分属于表面吸附机理。利用污泥生物炭对重金属Pb<sup>2+</sup>的研究表明,污泥生物炭对Pb<sup>2+</sup>的吸附主要包括不可逆的沉淀和内表面络合过程,一旦Pb<sup>2+</sup>被吸附在污泥生物炭上,就很难被解吸出来<sup>[54]</sup>。此外,不同的原料或炭化条件(如温度、时间)所制得的生物炭的性能有很大的差别<sup>[43]</sup>。

## 5 修复策略研究

对于重金属-有机物复合污染农田土壤修复,联合修复技术是最经济和环境友好的修复方法。由于不同来源和种类的生物炭性质不同,若利用不同生物炭进行组合,则可发挥各自的优势。常见的生物质炭如木炭、竹炭、秸秆炭、稻壳炭等由于比表面积高、物理吸附能力强,可以对有机物进行有效吸附;而以污泥生物炭为代表的含丰富的表面官能团的吸附材料,对重金属具有表面络合和沉淀作用<sup>[54]</sup>。若将这2种生物炭按一定比例进行混合,则可以对重金属-有机物复合污染农田土壤实现原位修复,具体原理示意图见图1。此外,由于含有丰富的氮磷钾等营养元素,污泥生物炭的添加可以增加土壤中营养元素的含量,提高其有效性,从而提高污染土壤中的有机质、有效磷和速效钾的含量,促进耐性植物(如红麻)地上部的生物量<sup>[43,55]</sup>。通过筛选抗逆性强且具有一定经济价值的耐性物种也有助于农田土壤修复的可持续性。在耐性植物种类的选择方面,除了具有一定的重金属耐性外,还具有一定的经济价值,如红麻、麻疯树<sup>[42,56]</sup>等。所以,不同种类生物炭组合改良+耐性经济植物是一种值得推广的重金属-有机物复合污染农田土壤修复模式。

## 参考文献

- [1] 骆永明,滕应.我国土壤污染退化状况及防治对策[J].土壤,2006,38(5):505-508.
- [2] 孙波.基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J].农业环境科

- 学报,2003,22(2):248-251.
- [3] 广东省地质调查院.广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查报告[R].2012.
- [4] 马国兰,柏连阳,刘占山.土壤-植物系统中农药污染的防治方法及其研究进展[J].现代化农业,2005(11):10-13.
- [5] 赵玲,马永军.有机农药残留对土壤环境的影响[J].土壤,2001,33(6):309-311.
- [6] 张一宾,孙晶.国内外有机磷农药的概况及对我国有机磷农药发展的看法[J].农药,1999,38(7):1-3.
- [7] 李永玉,洪华生,王新红,等.厦门海域有机磷农药污染现状与来源分析[J].环境科学学报,2005,25(8):1071-1077.
- [8] ZHANG G, QI S H, PARKER A, et al. Distribution of organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from the Pearl River Delta, South China[C]//Abstract on the 3rd Asia-Pacific Symposium on Environmental Geochemistry. Guangzhou, China: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2001:93.
- [9] 周东美,王慎强,陈怀满,等.土壤中有机污染物-重金属复合污染的交互作用[J].土壤与环境,2009(2):143-145.
- [10] 张冬梅.有机污染物在天然土壤上的吸附动力学研究[D].天津:南开大学,2009.
- [11] NAIDU R, KOOKANA R S, SUMNER M E, et al. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26:602-617.
- [12] 白庆中,宋燕光,王晖.有机物对重金属在粘土中吸附行为的影响[J].环境科学,2000,9(5):64-67.
- [13] TAN L C, CHOA V, TAY J H. The influence of pH on heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, 44:275-284.
- [14] 王果.三种有机肥水溶性分解产物对铜、镉吸附的影响[J].土壤学报,1999,36(2):179-188.
- [15] SCHROTH B K, SPOSITO G. Effect of landfill leachate organic acids on trace metal adsorption by kaolinite[J]. Environ Sci Technol, 1998, 32:1404-1408.
- [16] KHAN K S, HUANG C Y. Effect of acetate on lead activity to microbial biomass in a red soil[J]. Environ Sci, 1999, 11(1):40-47.
- [17] SHWETA S, ARVIND M, KAYASTHA, et al. Response of microbial organism to metal contained soil[J]. Journal of Microbiology & Biotechnology, 2001, 17:667-672.
- [18] KANDELER E, LUFTENEGGER G. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities[J]. Biology and Fertility of Soil, 1997, 23:299-306.
- [19] 杨元根.重金属铜的土壤微生物毒性研究[J].土壤通报,2002,33(2):55-60.
- [20] SUHADOLIC M, SCHROLL R. Effects of modified Pb, Zn, and Cd availability on the microbial communities and on the degradation of isoproturon in a heavy metal contaminated soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36:1943-1954.
- [21] CAPONE D G, REESE D D, KIENE R P. Effects of metals on methanogenesis, sulfate reduction, carbon dioxide evolution, and microbial biomass in anoxic salt marsh sediments[J]. Appl Environ Micros, 1983, 45:1586-1591.
- [22] 徐卫红.重金属Cd、Zn、Cu、Pb污染下土壤生物效应及机理[D].重庆:西南大学,2008.
- [23] BARBARA M K, SMRECZAK B E. Habitat function of agricultural soils as affected by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination[J]. Environment International, 2003, 28:719-728.
- [24] GOGOLEV A, WILKE B M. Combination effects of heavy metals and fluoranthene on soil bacteria[J]. Biol Fertil Soils, 1997, 25:274-278.
- [25] SHEN G Q, LU Y T, ZHOU Q X, et al. Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals on soil enzyme[J]. Chemosphere, 2005, 61:1175-1182.
- [26] 王凯.镉-多环芳烃复合污染土壤植物修复的强化作用及机理[D].杭州:浙江大学,2012.
- [27] 庄绪亮.土壤复合污染的联合修复技术研究进展[J].生态学报,2007,27(11):4781-4785.
- [28] 王秀丽,徐建民,姚槐应,等.重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J].环境科学学报,2003(1):22-27.
- [29] 王林江,谢襄漓,文小年.赤泥在环境污染修复中的应用[J].桂林工学院学报,2004,24(3):281-283.
- [30] 莫测辉,蔡全英,王江海,等.城市污泥在矿山废弃地复垦的应用探讨[J].生态学杂志,2001,20(2):44-47.

*visiae* P13 基因片段,并且 PCR 产物的量随着饲料中 *S. cerevisiae* P13 含量的增加而增加(图3)。



图3 大黄鱼喂食饲料4周后 *S. cerevisiae* P13 的 PCR 鉴定结果

### 3 小结

益生菌是一类通过改善宿主动物肠道微生态而对动物生长发育以及免疫产生有益影响的微生物饲料添加成分。研究表明,益生菌或益生菌发酵产物能够有效促进虹鳟、石斑鱼等的生长,并增强鱼类对常见病原体感染的抵抗<sup>[5]</sup>。

笔者通过测定大黄鱼的体重增长率、饲料转化率及其常

见病原菌的抗抵力,探讨了益生菌 *S. cerevisiae* P13 对大黄鱼生长的影响,结果表明喂食含 *S. cerevisiae* P13 饲料的大黄鱼体重增长率、饲料转化率及其对病原菌的低抗力都有明显提升,说明含 *S. cerevisiae* P13 的生物饲料在大黄鱼养殖中具有较大的潜在应用价值。

### 参考文献

- [1] 陈飞,吴常文.浙江省大黄鱼养殖产业现状及发展对策[J].浙江海洋学院学报:自然科学版,2011,30(3):259-263.
- [2] PAN T M, CHIU C H, GUU Y K. Characterization of Lactobacillus isolates from pickled vegetables for use as dietary or pickle adjuncts[J]. Foods Food Ingrid J Jpn, 2002, 206:45-51.
- [3] SON V M, CHANG C C, WU M, et al. Dietary administration of the probiotic, Lactobacillus plantarum, enhanced the growth, innate immune responses, and disease resistance of the grouper *Epinephelus coioides*[J]. Fish Shellfish Immunol, 2009, 26:691-698.
- [4] BALCÁZAR J L, DE BLAS I, RUIZ-ZARZUELA I, et al. Enhancement of the immune response and protection induced by probiotic lactic acid bacteria against furunculosis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. FEMS Immunol Med Microbiol, 2007, 51:185-193.
- [5] BARNES M E, DURBEN D J, REEVES S G, et al. Dietary yeast culture supplementation improves initial rearing of McCaughy strain rainbow trout[J]. Aquacult Nutr, 2006, 12:388-394.
- [6] ISABEL H, GABRIELA S W, PAUL M, et al. Influence of activated charcoal amendment to contaminated soil on dieldrin and nutrient uptake by cucumbers[J]. Environmental Pollution, 2008, 157(8/9):2224-2230.
- [7] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447:143-144.
- [8] GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, et al. The Terra Preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. Naturwissenschaften, 2001, 88:37-41.
- [9] LEHMANN J, LIANG B, SOLOMON D, et al. Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon particles[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19:1013-1025.
- [10] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35:219-230.
- [11] LEHMAN J, DA SILVA JR J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2):343-357.
- [12] YU X, YING G G, KOOKANA R S. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil[J]. Chemosphere, 2009, 76(5):665-671.
- [13] YANG Y. N, SHENG G Y, HUANG M S. Bioavailability of diuron in soil containing wheat-straw-derived char[J]. Science Total Environment, 2006, 354(2/3):170-178.
- [14] CAO X D, MA L N, GAO B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9):3285-3291.
- [15] LU H L, ZHANG W H, YANG Y X, et al. Relative distribution of Pb<sup>2+</sup> sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J]. Water Research, 2012, 46(3):854-862.
- [16] 卢欢亮. 污泥生物炭对重金属的吸附机理及其在矿山周边污染土壤修复中的应用[D]. 广州:中山大学, 2012.
- [17] 李清飞. 麻疯树对铅胁迫的生理耐性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2012(1):72-76.

(上接第 10636 页)

- [18] 陈晴空. 铬污染土壤化学-植物联合修复技术研究机污染物-重金属复合污染土壤植物修复技术研究[D]. 重庆:重庆大学硕士论文, 2008.
- [19] 陈玉成,董珊燕,熊治廷. 表面活性剂与 EDTA 对雪菜吸收铬的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6):651-656.
- [20] 王德胜, 陈兰, 敬小兵, 等. 螯合剂和表面活性剂辅助金福菇修复重金属污染土壤[J]. 应用生态环境学报, 2012, 18(1):100-107.
- [21] 杨强. 机污染物-重金属复合污染土壤植物修复技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [22] 黄化刚. 镉-锌/滴滴涕复合污染土壤植物修复的农艺强化过程及机理[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [23] WALTON B T, ANDERSON T A. Microbial degradation of trichloroethylene in the rhizosphere: potential application to biological remediation of waste sites[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56:1012-1016.
- [24] 徐莉,滕应,张雪莲,等. 多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合田间原位修复[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7):646-650.
- [25] ABOU-SHANAB R A I, ANGLE J S, CHANEY R L. Bacterial inoculants affecting nickel uptake by Alysummurale from low moderate and high Ni soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38:2882-2889.
- [26] 高宪雯. 微生物-植物在石油-重金属复合污染土壤修复中的作用研究[D]. 济南:山东师范大学, 2013.
- [27] 朱治强. Cd- DDT 复合污染土壤的植物与微生物联合修复及机理[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [28] 彭桂香,蔡婧,林初夏. 超积累植物和化学改良剂联合修复锌镉污染土壤后的微生物特征[J]. 生态环境, 2005, 14(5):654-657.
- [29] 杜瑞英. 土壤改良剂和红麻联合修复对多金属污染土壤中微生物群落功能的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1):70-75.
- [30] 刘玉学,刘微,吴伟祥,等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4):977-982.
- [31] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain[J]. Soil Soil Science, 2009, 174(2):105-112.