

李志波,宋超,袁丽萍,等. 渔业养殖水域沉积物指标分析技术及其应用综述[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):6-9.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.002

# 渔业养殖水域沉积物指标分析技术及其应用综述

李志波<sup>1</sup>, 宋超<sup>2</sup>, 袁丽萍<sup>2</sup>, 陈家长<sup>1,2</sup>

(1. 南京农业大学无锡渔业学院,江苏无锡 214081;2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/  
中国水产科学研究院内陆渔业生态环境和资源重点开放实验室,江苏无锡 214081)

**摘要:**随着工业化发展,我国渔业养殖水平日益提高,但渔业养殖水域污染情况也较严重。养殖水体的沉积物是各种污染物的最终归趋,因此沉积物的指标分析技术能被用于评估污染物对养殖水体产生的影响。本研究从理化指标、酶指标、污染物指标方面介绍了目前沉积物指标的分析技术,并阐述其应用做了展望。

**关键词:**沉积物;理化指标;酶;污染物;应用

**中图分类号:** X524;X714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0006-04

改革开放以来,我国水产养殖业发展十分迅速,成为世界上最大的水产养殖国家。水产品产量的不断增高不仅为我国农业经济发展提供了持续推力,更为满足世界动物性蛋白需求贡献巨大来源<sup>[1]</sup>。但是,近年来我国频频出现的水产品质量安全问题在很大程度上制约我国水产养殖业的进一步发展,主要表现在水产品中含有过量的有害物质如农药、有机类物质、鱼类禁用药物等,致使水产品质量下降或不合格而难以上市<sup>[2]</sup>。这一问题的出现客观上是源于我国渔业养殖水域环境的日益恶化,渔用水源的严重污染是其主要因素,但近年

来集约化模式和高密度技术在池塘养殖上推广和应用,使养殖水体受到外部水源污染和内部水质营养失衡的双重胁迫。在这种背景下,对我国渔业养殖水域环境进行研究十分有意义<sup>[3]</sup>。

渔业养殖水域系统分为 2 部分,即上层的水体部分和下层的沉积物部分。目前国内外对于上层水体水质已有大量研究,但对下层沉积质部分的研究则较为匮乏。在渔业养殖水域环境问题的研究中,沉积物应当被作为一个重要研究对象,因为它是各类污染形式或污染物的一个最终的汇。首先,底层沉积物是由上层水体中过量的养殖投入品、鱼类排泄物沉积物、生物尸体等共同沉积而构成,间接反映了上层水体的营养状况。再者,来自外部水源的有机物、重金属等具有一定毒性而又难分解的污染物沉降蓄积于底泥,直接影响沉积物的理化性质及微生物群落结构,并对上层水质及养殖动物健康产生潜在威胁<sup>[4]</sup>。沉积物的研究指标多种多样,具体可分为理化指标、酶指标和各类污染物指标。这几类指标基本涵盖

收稿日期:2014-03-28

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-49)。

作者简介:李志波(1989—),男,湖南湘乡人,硕士研究生,主要从事渔业生态环境研究。Tel:(0510)85559936;E-mail:495110900@qq.com。

通信作者:陈家长,硕士,研究员,主要从事渔业生态环境研究。Tel:(0510)85559936;E-mail:chenjz@ffrc.cn。

研究方面作如下政策性调整:(1)应用性农业研究政府项目一律在企业立项;(2)应用性农业研究成果的申报一律以产品的市场效益为主要指标;(3)出台与新产品市场效益挂钩的企业科研成果奖励政策。

4.2.2 基础性研究从分散到集中的调整 在推进应用性研究从事业到企业转变的同时,仍然要保留并强化国家级事业性的基础研究项目,如种质资源库、转基因研究等项目。国家级事业性研究项目分为 2 种情况,一种是国家资源性项目,如种质资源研究等,涉及国家(对外)利益、社会公众(对内)利益,不可为企业行为,以免失控于企业垄断而损害国家及公众利益;二是涉及重大生物学安全性的项目,如转基因研究等。农业研究的生物学安全性有 2 层含义,一是研究过程及产物是否构成生物学环境污染;二是研究产品是否危及食品安全。从生物学安全性上理解转基因研究,其转基因食品是安全的,但其研究过程中的中间材料在田间试验时有发生异源基因外逸、构成生物学污染(可能产生无法估量的危害)的风险。因此先进国家,如美国对农作物转基因研究有近乎苛刻的条件限制(如小麦转基因材料田间试验隔离标准为 30 km),只有

像孟山都那样的极少数大公司能从事作物转基因研究。反观我国的农作物转基因研究,存在政府立项过多、过散的问题。如在杂交水稻育种方面,国家发展后改革委员会、农业部、科学技术部分别有转基因立项。立项过多过散的转基因研究,难以形成高质量的成果,就连基本的生物学安全也难以保证,所以像水稻转基因这样涉及重大生物学安全风险的研究项目,国家应集中人、财资源,支持 1~2 个重点实验室(田间试验点)。

## 参考文献:

- [1] 沈琦,胡资骏. 我国农业现代化指标体系改进的新思路[J]. 统计与决策,2012(15):25-27.
- [2] 辛峻. 我国农业现代化发展水平评价体系的构建和测算[J]. 农业现代化研究,2010(6):646-650.
- [3] 缪炳良,卜连生. 水稻种子生产流程管理[J]. 江苏农业科学,2007(6):1-9.
- [4] 缪炳良. 企业育种计划的编制与执行[J]. 江苏农业科学,2013,41(5):401-406.

了沉积物须要的分析内容。其中理化指标可以细分为粒径分析、总有机碳(TOC)、总氮、磷及其形态分析;酶指标主要分为蛋白酶、磷酸酶、脲酶以及微生物活性等;各类污染物指标不尽相同,大致有重金属类、农药类、多环芳烃类以及其他有机污染物及持续性有机污染物等。研究渔业养殖水域沉积物指标分析技术及其应用,对于监测并改善水产养殖水体环境很有帮助<sup>[5]</sup>。但是由于我国养殖水域的地域性强以及有关沉积物的研究起步较晚,目前国内有关沉积物的一些指标分析技术尚不完善,并且有些指标的分析方法还处于建立过程中。本研究综述了目前有关渔业养殖水域沉积物指标分析技术及其应用现状,以期对促进沉积物相关研究有所帮助。

## 1 关于理化指标的分析

### 1.1 TOC 测定

沉积物中的碳主要有 2 种,一种是有机质含有的碳,称为有机碳,另一种是无机碳。利用烧失量的方法,在温度达到 900 ℃ 甚至 1 000 ℃ 时,可以将有机碳、无机碳均燃烧成 CO<sub>2</sub>, 这样获得的是总碳(TC)。获得总碳数据的关键是一定要保证沉积物得到充分燃烧。总无机碳(TIC)数据的获取方式是对另一份样品用酸处理,使无机碳转变为 CO<sub>2</sub>。利用仪器测得 CO<sub>2</sub> 的量,TC 与 TIC 之间的差值即为 TOC,这是英国标准的间接法测定 TOC<sup>[6]</sup>。

通过测定 CO<sub>2</sub> 量来计算样品中 TOC 含量是比较准确的,然而烧失量方法还有一定的局限性。因为烧失量包括有机碳、碳酸盐(钙盐、镁盐)、硫化物,以及在烘干不完全下少量的结合态水。Walter 用如下方法测定 TOC 含量:取预先处理好的样品 10 g,用 HCl、HF 去除矿物质,得出样品中间质量,然后放入陶瓷坩埚,加热至 435 ℃,过夜;移至干燥器中冷却,称质量;有机质含量 = (样品中间质量 - 样品最终质量)/样本初始质量<sup>[7]</sup>。该方法不科学,因为这只是一个折中的 TOC 测定方法。加酸去除的是 TIC,435 ℃ 燃烧的是有机质、碳酸盐和水合水的总量的大部分,即非完全燃烧。样品中间质量减去最终质量得出的是大部分 TOC,该结果或许刚好会与真实的 TOC 值接近,但其很难与真实的 TOC 值呈很好的正相关。有些测定 TOC 的方法是将温度控制在 550 ℃,测定值与真实值很接近,可能是因为在该温度下,TIC 还没有烧出来,温度须要达到更高;在 105 ℃ 温度下烘 12 h,水合水基本被烘干。所以相对来说,后者应该是最接近 TOC 仪器的手工方法<sup>[8-9]</sup>。

重铬酸钾法测定 TOC 的原理是用一定浓度的过量重铬酸钾 - 硫酸溶液,在加热条件下氧化有机质中的碳,用已知浓度的硫酸亚铁溶液滴定剩余的重铬酸钾,用消耗的重铬酸钾量计算所氧化的有机碳含量。该方法氧化沉积物中的有机质,氧化程度为 90%,因此测定结果应乘以氧化校正系数 1.1 或 1.3<sup>[10]</sup>。

### 1.2 总氮测定

水体富营养化是由于水质中氮磷负荷增加所致。沉积物中的氮磷在水体环境条件发生改变时会大量侵入上腹水,这也是造成养殖水富营养化的重要原因。水体底质变化趋势大致与自然土壤情况一致,但是由于人为污染造成污染地区明显反常,尤其在湖泊底质中有大量氮、磷营养盐存在。因此掌

握底质中的氮磷分布和含量意义重大<sup>[11]</sup>。

沉积物中的氮一般可以分为有机氮、无机氮,以有机氮为主。有机氮包括蛋白质、核酸、氨基酸、腐殖质,以腐殖质为主。有机氮必须经过沉积物中的微生物转化才变为无机氮,为水生生物所利用。各种含氮有机物的分解与其分子结构和环境条件有很大相关性。无机氮主要是铵态氮和硝态氮,还有一小部分氮被固定在矿物晶格,称之为固定态氮,这种氮须要用 HF - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液破坏矿物晶格,才能释放出来。凯氏定氮法测定的是土壤全氮含量<sup>[12]</sup>。

### 1.3 磷及其形态分析

沉积物中磷的含量及其形态分布是影响水体富营养化进程的极重要因素,尤其对城市湖泊和水生植物大量繁殖的湖泊的影响尤为深刻。底质中的磷一般来源于土壤颗粒物、悬浮污染物的絮凝沉降、水生生物残骸的堆积,同时颗粒物吸附溶解性的磷,随后转入底质,也是底质磷的重要来源。这些存在于底质中的磷在一定条件下又会逐步地释放出来,成为导致水体富营养化的磷的来源,称之为水体磷的内负荷。

总磷同样包括无机磷、有机磷两大部分。无机磷又可以分为与钙、镁、铁、铝等结合的磷酸盐;有机磷往往以核酸、植素以及磷脂等为主,不同形态的磷在释放特征、生物有效性以及对水体富营养化的影响等方面都存在很大差别。

高氯酸 - 硫酸消化法的原理是,用强酸、强氧化剂的高氯酸分解样品,使有机质、矿物质完全分解而全部转化为正磷酸盐进入溶液,然后用钼锑抗比色法测定。高氯酸的脱水作用很强,有助于胶状硅的脱水,并能与 Fe<sup>3+</sup> 络合,在磷的比色中抑制了硅和铁的干扰。硫酸的存在可以提高消化液的温度,同时防止消化过程中溶液蒸干,以利于消化作用的顺利进行。用钼锑抗法测定磷的原理是,在一定酸度和锑离子存在的情况下,磷酸根与钼酸铵形成钼磷混合杂多酸,它在常温下可迅速被抗坏血酸还原为钼蓝,在 700 nm 波长下比色测定<sup>[13-16]</sup>。

沉积物的磷形态分析主要是利用蒸馏水、酸、碱等依次提取的方式获得可溶性磷、铝磷、铁磷、钙磷。沉积物中的磷可以分为有机磷、无机磷,无机磷可分为铝磷、铁磷、钙磷、闭蓄磷等,以这种方式划分的意义是磷酸铝、磷酸铁、磷酸钙都是有利于生物吸收的有效成分,它们在不同水体环境中的释放速率也不尽相同。磷的形态分析一直是沉积物指标分析的难点。很多研究者采取不同方式解决这个问题,例如利用各种酸碱形式的配比以及在提取步骤上的细化与合并。还有研究利用磷酸酶等酶促方法对磷形态进行分级处理。多种尝试并未对此研究形成标准性的操作步骤,主要原因是基于不同沉积物基质的磷类型的差异<sup>[17]</sup>。

## 2 关于酶指标的分析

### 2.1 磷酸酶的测定

沉积物中磷酸酶可以分为酸性、中性、碱性 3 种。一般各类沉积物中都有最活跃的一种磷酸酶活性。但有些沉积物对酸碱度的适应性大,在较大的 pH 值范围(4~9)均能测得酸性、中性、碱性磷酸酶的活性。在测定磷酸酶活性时,目前常见方法是以苯磷酸酯等水溶性钠盐作为基质,当它们受磷酸酶酶促反应水解时,能析出无机磷和有机基团(苯酚),用苯酚生成量可表示土壤中的磷酸酶活性<sup>[18-21]</sup>。

## 2.2 脲酶的测定

脲酶存在于大多数细菌、真菌、高等植物里。它是一种酰胺酶,作用极为专性,仅能水解尿素,水解的最终产物是氨、二氧化碳、水。沉积物中的脲酶活性与微生物数量和有机物质、全氮、速效磷含量等呈正相关。目前常用土壤脲酶活性表征氮素状况。沉积物中脲酶活性的测定是以尿素为基质,利用氨能与苯酚-次氯酸钠等物质作用生成蓝色靛酚类物质的原理,测定酶促产物生成氨的量,或通过测定未水解的尿素量计算<sup>[22]</sup>。

## 2.3 蛋白酶的测定

在进入沉积物的各类有机物中含有一定数量的蛋白质。沉积物蛋白酶对这类物质进行酶促反应的分解,从而对沉积物的氮素转化及水体环境的氮素营养起重要作用。因此蛋白酶活性也可以从另一个角度来表征沉积物氮素状况及转化进程。测定蛋白酶活性时可以用白明胶、酪朊等蛋白类或某些肽类物质作为基质,加入蛋白酶进行水解,然后测定分解产物的量或根据其物理特性的变化度来计算酶活性大小<sup>[23-25]</sup>。

## 2.4 过氧化氢酶的测定

沉积物中过氧化氢酶的活性与底质的生物呼吸强度及微生物存在状态有很大相关性,在一定程度上能表征沉积物中微生物活动过程的强弱。底质过氧化氢酶活性的大小与水生植物根系的分布及底质有机质含量呈正相关,因而测定底质中过氧化物酶的活性可以反映底质肥力状况。可以采用滴定法测定过氧化氢酶活性,即先以过氧化氢为基质进行酶促反应,再定量滴定反应后剩余的过氧化氢量<sup>[26-27]</sup>。

## 3 关于污染物指标的测定

### 3.1 石油烃与多环芳烃

利用 GC-MS 法测定沉积物中多环芳烃各组分的分布水平已经不是难点,其主要操作过程有冷冻干燥、索氏提取、仪器分析等<sup>[28]</sup>。涵盖多环芳烃、直链烷烃在内的石油烃等污染是我国主要湖泊及河流的主要污染类型,特别是近年来渔业生态环境的调查数据显示,石油类污染已成为渔业水域有机污染的主要类型,主要表现形式是水产品食用过程中有很浓重的柴油味,在太湖流域养殖池塘的南美白对虾中表现尤为明显。鱼类的柴油味和土腥味已经成为水产品质量改进中亟待解决的环节。对沉积物中石油烃进行测定的皂化方法的原理是,用石油醚萃取经过氢氧化钠-乙醇皂化处理后的非皂化物,旋转蒸发,减压蒸干,用石油醚溶解并定容,萃取物在紫外线照射下产生荧光,在一定浓度范围内,荧光强度与石油烃含量呈正比。通过测量荧光强度来测定水产品中石油烃含量<sup>[29]</sup>。

### 3.2 重金属的测定

沉积物中重金属较难迁移,具有残留时间长、隐蔽性强、毒性大等特点,并且可经食物链的形式进入鱼体内,或通过某些迁移方式进入水中,从而威胁人类健康与其它动物繁衍生息。因此治理重金属污染的沉积层一直是国内外瞩目的热点和难点。重金属的生物毒性不仅与其总量有关,更大程度上由其形态分布所决定<sup>[30]</sup>。不同的重金属形态产生不同的环境效应,直接影响到重金属的毒性、迁移及其在自然界的循

环。在测定沉积物介质的重金属含量时,主要采用 ICP-MS 的仪器分析方法,因为利用原子吸收或原子荧光光谱的方法已经不能满足样品大批量和高精度分析的需求,这在沉积物基质、生物组织基质等分析上是一致的。前处理过程的样品消化方法因基质不同而不同,基于硝酸和双氧水的消化方法可以使组织样品能够被完全消化,但沉积物样品无法获得全部溶解,但可溶性重金属可以被较完全提取出来,如想使沉积物样品得到完全的消解,必须使用氢氟酸的消解方法<sup>[31]</sup>。

## 4 沉积物指标分析技术的应用

沉积物指标分析技术应用很广泛,如可以应用该技术进行水域底质成分检测,探究重金属迁移和转化过程,建立健康水产养殖模式等,最为重要的是可以为渔业养殖水域的底泥环境进行有效监测提供手段。随着国内整个水体环境污染形势日益严峻,以及高密度和集约化水产养殖模式不断发展,我国以池塘养殖为主的水产养殖环境遭到较为严重的破坏。为了提高水产品质量,保证水产行业的可持续发展,迫切须要建立一个比较有效且统一的沉积物指标质量水平标准,协助控制和改善水产养殖环境。沉积物指标分析技术的发展就是这一标准建立的基础,利用沉积物指标分析技术试图寻找各指标间的相互关系,并发展 1 个或几个较为灵敏的沉积物指标作为环境检测的标记物,可以降低沉积物监测的复杂度。

沉积物中微生物含量十分丰富,其对水体生态系统的稳定与否起着很大作用。尤其对于渔业养殖水体而言,底泥中微生物产生的生物效应更不容忽视。一方面,微生物对高饲料量投入的渔业养殖水体中各类剩余的营养因子进行分解,促进了物质循环,并减少了沉积量;另一方面,微生物群体对伴随养殖投入品进入养殖水体的一些有害物质可能起到一定程度降解作用,从而降低了这些物质的蓄积量。微生物分泌的磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶等胞外酶就是其产生作用的直接体现,这些酶再通过催化沉积物中氮磷化合物和有机物等的分解,对沉积物理化性质产生影响<sup>[32]</sup>。所以笔者认为,对渔业养殖水域沉积物指标分析技术的研究以微生物研究作为重点,然后以此为中心扩展到其他沉积物指标的分析,可能是一条很有效的研究途径。现今可以利用高通量的测序技术对沉积物微生物群落结构特征进行分析,比以往的方法(如 DGGE)更加简单、快速、准确。利用高通量技术分析微生物群落的多样性,再以此为基础试图推断化学污染物的生态保护质量基准,可作为今后的研究方向之一<sup>[33-36]</sup>。另外,在生物多样性和群落敏感性的基础上推导沉积物质量基准,能除去地域差异因素,有利于建立国内统一的沉积物指标分析监测标准。如能在这一研究上取得突破,不仅可以通过测定微生物群落状况来分析沉积物的其他指标,更重要的是可以通过人为引导微生物的群落结构来改善养殖水域的环境条件提供理论基础。

## 参考文献:

- [1] 戈贤平. 我国大宗淡水鱼养殖现状及产业技术体系建设[J]. 中国水产, 2010(5): 5-9.
- [2] 刘欢, 马兵, 宋怿, 等. 完善我国水产品质量安全检验检测体系建设的研究与思考[J]. 中国渔业经济, 2010(5): 74-78.

- [3] 胡庚东, 宋超, 陈家长, 等. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 82 – 86.
- [4] 孟顺龙, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 单养模式下罗非鱼亲本培育塘的沉积物产污系数初探[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1795 – 1800.
- [5] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [6] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 34 – 38.
- [7] Walter E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1974, 44(1): 242 – 248.
- [8] Penny K, Hilary K, Philip P N, et al. Analysis of total and organic carbon and total nitrogen in settling oceanic particles and marine sediment; an interlaboratory comparison[J]. Marine Chemistry, 1998, 60(3/4): 203 – 216.
- [9] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments; reproducibility and comparability of results[J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25: 101 – 110.
- [10] 邵则瑶, 黄业海, 李西开. 水合热法测定土壤有机质的研究[J]. 土壤通报, 1980(3): 29 – 32.
- [11] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(2): 111 – 117.
- [12] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1831 – 1837.
- [13] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15 – 19.
- [14] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707 – 711.
- [15] 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 五里湖和贡湖不同粒径沉积物吸附磷实验研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 6 – 10.
- [16] Liu E F, Shen J, Yuan H Z, et al. The spatio-temporal variations of sedimentary phosphorus in Taihu Lake and the implications for internal loading change and recent eutrophication[J]. Hydrobiologia, 2013, 711(1): 87 – 98.
- [17] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, et al. Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(14): 7679 – 7687.
- [18] Zhou Y Y, Li J Q, Zhang M. Temporal and spatial variations in kinetics of alkaline phosphatase in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake(Lake Donghu)[J]. Water Research, 2002, 36(8): 2084 – 2090.
- [19] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu)[J]. Environmental Pollution, 2007, 150(2): 288 – 294.
- [20] Sayler G S, Puziss M, Silver M. Alkaline – phosphatase assay for freshwater sediments – application to perturbed sediment systems[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1979, 38(5): 922 – 927.
- [21] Zhou Y Y, Song C L, Cao X Y, et al. Phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sediments of a large eutrophic Chinese lake(Lake Taihu)[J]. Hydrobiologia, 2008, 599(1): 119 – 125.
- [22] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium[J]. Biology and Fertility of Soils, 1988, 6(1): 68 – 72.
- [23] Hakulinen R, Kahkonen M A, Salkinoja – Salonen M. Vertical distribution of sediment enzyme activities involved in the cycling of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur in three boreal rural lakes[J]. Water Research, 2005, 39(11): 2319 – 2326.
- [24] Nosrati K, Govers G, Ahmadi H, et al. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers; biochemical fingerprints? [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(2): 136 – 151.
- [25] Acosta – Martinez V, Zobeck T M. Enzyme activities and arylsulfatase protein content of dust and the soil source; biochemical fingerprints? [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(5): 1653 – 1661.
- [26] Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review[J]. Pedobiologia, 2005, 49(6): 637 – 644.
- [27] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(11): 1471 – 1479.
- [28] Zhou P, Lin K F, Zhou X Y, et al. Distribution of polybrominated diphenyl ethers in the surface sediments of the Taihu Lake, China[J]. Chemosphere, 2012, 88(11): 1375 – 1382.
- [29] 王静芳, 孙茜. 沉积物干样石油烃类总量测定中几种前处理方法的比较[J]. 海洋环境科学, 1989, 8(3): 93 – 99.
- [30] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, et al. Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(1): 67 – 81.
- [31] Qu W C, Dickman M, Wang S M. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. Hydrobiologia, 2001, 450(1/2/3): 83 – 89.
- [32] Zhang H H, Huang T L, Liu T T. Sediment enzyme activities and microbial community diversity in an oligotrophic drinking water reservoir, eastern China[J]. PLoS One, 2013, 8(10): e78571.
- [33] 李鲜鲜, 何文辉, 董占营, 等. 上海沿海岸海域微生物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 286 – 291.
- [34] Brian H H, Colleen M E, Terri M J, et al. Sediment microbial enzyme activity as an indicator of nutrient limitation in the great rivers of the Upper Mississippi River basin[J]. Biogeochemistry, 2010, 97(2/3): 195 – 209.
- [35] 邓如莹, 崔兆杰, 殷永泉, 等. 石油胁迫对盐渍土壤微生物呼吸作用强度和酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 326 – 329.
- [36] Menon R, Jackson C R, Marjorie M H. The influence of vegetation on microbial enzyme activity and bacterial community structure in freshwater constructed wetland sediments[J]. Wetlands, 2013, 33(2): 365 – 378.