

混养鱼塘水中磷含量及表层沉积物中磷赋存形态的初步探究

何琳¹, 江敏^{1,2*}, 戴习林¹, 施顺昌³, 李世凯¹

(1.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2.水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306; 3.上海市水产研究所/上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要:为更好地揭示养殖系统的磷收支和污染程度,以上海郊区3口团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)混养鱼塘即池塘A、B、C以及水源D为研究对象,定期测定养殖期间水体中总磷(TP)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)以及沉积物中总磷的含量,并探究沉积物中不同形态磷,包括交换态磷(Ex-P)、铝结合磷(Al-P)、铁结合磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、原生碎屑磷(De-P)、钙结合磷(Ca-P)和有机磷(Or-P)的分布变化特征。试验发现,该养殖场水源水TP(0.17 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $\text{PO}_4\text{-P}$ (0.11 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 含量一直维持在稳定的较低水平,养殖生产导致池塘A、B、C水中TP大大增加,已超过地表水Ⅲ类标准和淡水养殖池塘排放标准(Ⅱ类)。养殖池塘及水源沉积物中TP浓度分别是(0.69 ± 0.04)、(0.70 ± 0.07)、(0.68 ± 0.09)、(0.79 ± 0.13) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,池塘表层沉积物中TP含量变化不大,而水源沉积物TP变化波动性明显。池塘表层沉积物中磷主要由Fe-P(18.03 ± 6.01)%、Oc-P(22.82 ± 5.34)%、Ca-P(27.48 ± 8.15)%和Or-P(20.29 ± 6.60)%组成,Ex-P(3.07 ± 1.06)%、Al-P(7.62 ± 3.11)%,尤其是De-P(0.69 ± 0.35)%仅占很少部分。研究结果提示养殖塘内源污染相对较轻,人为投饵施肥等磷输入行为对沉积物中各形态磷的含量影响较大。研究结果有利于阐明养殖系统中磷的变动规律,从而指导养殖池塘环境调控并促进养殖技术更新。

关键词:混养池塘;水体;沉积物;磷形态

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1236-08

Examination of Phosphorus Contents and Its Forms in the Surficial Sediments of Polyculture Fish Ponds

HE Lin¹, JIANG Min^{1,2*}, DAI Xi-lin¹, SHI Shun-chang³, LI Shi-kai¹

(1.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Research and Engineering Center on Aquatic Environment Ecosystem, Shanghai 201306, China; 3.Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China)

Abstract: To reveal situations of phosphorus balance and contamination in aquatic eco-system, three *Megalobrama amblycephala* polyculture ponds marked A, B, C and their water source D(as control) were selected in the suburb of Shanghai. We routinely monitored the total phosphorus(TP) and reactive phosphorus($\text{PO}_4\text{-P}$) concentrations in the water, and contents of TP and various phosphorus forms in the surficial sediments of the fish ponds, including the easily exchangeable phosphorus(Ex-P), aluminum-bound phosphorus(Al-P), iron-bound phosphorus(Fe-P), occluded phosphorus(Oc-P), detrital phosphorus(De-P), calcium-bound phosphorus(Ca-P) and organic phosphorus(Or-P). The results showed that TP and $\text{PO}_4\text{-P}$ contents in the source water of this farm were stable at a low level[(0.17 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and (0.11 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$], while TP contents in the farming ponds water significantly increased, in excess of the limit in the 《Environmental quality standards for surface water》(GB 3838—2002 Grade Ⅲ) and the 《Requirment for Water Discharge from Freshwater Acquaculture Pond》(SC/T 9101—2007 Grade Ⅱ). TP contents in the sediments of these four sampling points were (0.69 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, (0.70 ± 0.07) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, (0.68 ± 0.09) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and (0.79 ± 0.13) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively. Although there were no significant variation about the TP contents in the sediments of the ponds, significant variation existed in the sediment of source water sediments. TP in the surficial sediments of polyculture fish ponds consisted

收稿日期:2011-12-15

基金项目:上海市农委资助(沪农科攻字(2010)第1-6号);上海市教委重点学科建设项目资助(J50701)

作者简介:何琳(1988—),女,江苏南通人,硕士研究生,专业方向为渔业环境及调控。E-mail:helin2010@163.com

* 通讯作者:江敏 E-mail:mjiang@shou.edu.cn

of Fe-P (18.03 ± 6.01)%, Oc-P (22.82 ± 5.34)%, Ca-P (27.48 ± 8.15)%, and Or-P (20.29 ± 6.60)%, and a relatively small part Ex-P (3.07 ± 1.06)%, Al-P (7.62 ± 3.11)%, and De-P (0.69 ± 0.35)%. These results suggest that phosphorus input from feed and fertilization greatly affects the phosphorus forms in sediment while the internal pollution of pond sediments is weak. This study will help us to clarify the law of phosphorus changes in aquaculture system, to promote appropriate aquaculture technology, and improve pond water quality.

Keywords: polyculture farmig pond; water; surficial sediments; phosphorus forms

在过去的几十年间,水产养殖已经成为世界上发展最快的食品生产行业之一,我国水产养殖的发展速度和取得的成就更是令人瞩目。2010 年,我国水产养殖面积高达 $7\,283.14 \times 10^3 \text{ hm}^2$,全国水产品总产量 5 116.4 万 t,渔业总产值 5 937.37 亿元,居世界首位^[1]。我国水产养殖业中池塘养殖占有重要地位。由于池塘养殖相对封闭,投饵施肥、生物排泄与死亡残骸的长期积累以及泥沙沉积等,形成了大量池底沉积物。自然和人为输入的营养元素除一部分以养殖产品输出外,至少有 50% 富集到池塘沉积物中^[2],在一个养殖周期内,沉积量可以达到 $1.85 \times 10^5 \sim 1.99 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3]。

许多学者对养殖系统中水质状况以及营养收支平衡进行了研究,以期解决养殖上以最小投入换来最大收益的问题,而对养殖沉积物中磷的赋存形态及含量的研究报道却很少见,研究也只局限在河口及浅海养殖区等。但是养殖沉积物中磷的赋存形态和含量对阐明水生态系统中磷的循环、转移和积累的过程,了解养殖对水环境的影响程度和范围,以及控制内源负荷等方面都具有十分重要的意义^[4-6]。

本研究就团头鲂混养鱼池表层沉积物中不同形态磷的含量进行了分析,就其演变规律与水中 TP 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、沉积物中 TP 的含量之间的相关性进行了探讨,旨在更好地揭示养殖系统污染程度和范围,为养殖系统中磷的收支研究提供基础数据,更好地规划和管理养殖系统,促进养殖效益的提升,为水产养殖业的发展和进步提供借鉴和参考。

1 材料与方法

1.1 团头鲂混养池塘基本情况

试验于 2011 年 1 月至 8 月,在上海松江某养殖场进行。如图 1 所示,以 A、B、C 3 口池塘作为团头鲂混养鱼塘,水源则标记为 D。

各试验塘平均水深 1.5 m,均以二龄团头鲂为主养品种,混养少量鲢、鳙、鲫、青鱼和鲈鱼,具体投放比例见表 1。2011 年 1 月 24 日投放鱼苗,同年 8 月 17 日售出。每口池塘配备 3 000 W 叶轮式增氧机和自动

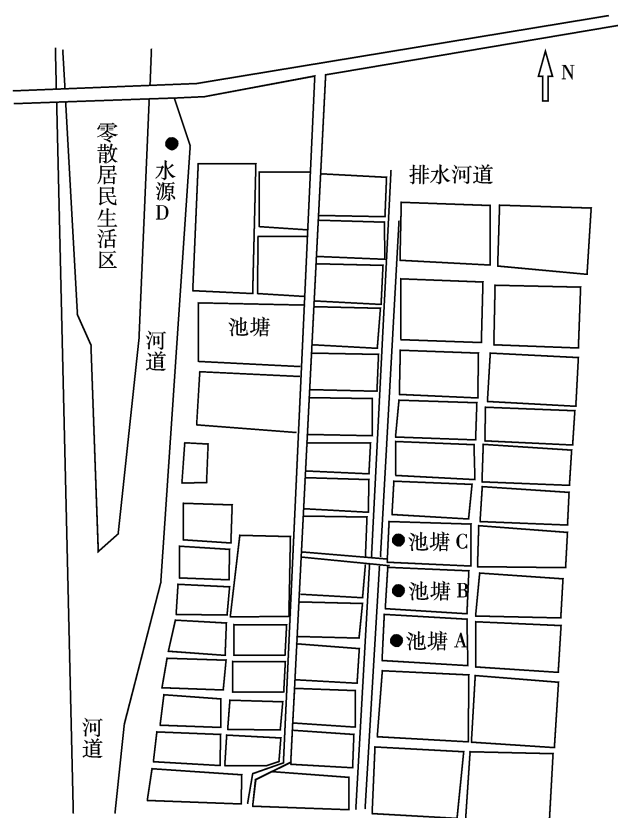


图 1 采样点布设

Figure 1 The distributions of each sampling point

投饵机各 1 台,每日 14:00 和 22:00 开启增氧机 1 h, 8:30、13:00 和 15:00 自动投饵,每月换水两次,每次换水约 50 cm。

1.2 样品采集与测定

试验期间每两周采集一次水样,每月采集一次沉积物样品。在混养鱼塘 4 个角处采集表层水样(水面下 0.5 m 处),混合后带回实验室进行分析,用钼酸铵分光光度法^[7]测定总磷(TP)及活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)指标。以 Van Veen 抓斗式采泥器采集鱼塘 4 个角处的沉积物,用塑料铲铲取未扰动的表层 2 cm 沉积物,混合后装入封口袋中。混合样备两份,一份自然风干、研磨、过 100 目的网筛,用于沉积物中 TP^[8]测定;另一份存于 4 °C 冰箱中,用于沉积物中各种形态磷^[9]含量分析。此外,定点采集水源的表层水及沉积物,测定方法同鱼塘样品。

表 1 养殖池塘混养品种及数量(2011)
Table 1 Varieties and quantities of fishes in each polyculture pond(2011)

养殖品种	混养数量/尾·667 m ²		
	池塘 A(0.373 hm ²)	池塘 B(0.335 hm ²)	池塘 C(0.318 hm ²)
鲢鱼/111 g·尾 ⁻¹	51	50	51
鳙鱼/181 g·尾 ⁻¹	30	30	29
团头鲂/99 g·尾 ⁻¹	1 465	1 465	1 466
鲫鱼/76 g·尾 ⁻¹	100	101	100
青鱼/1 675 g·尾 ⁻¹	3	3	4
鲈鱼/1 000 g·尾 ⁻¹	6	6	7

1.3 数据处理

数据用 SPSS Statistics 17.0 软件做双变量相关性分析,以 $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著水平,所得数据结果均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 水源及混养鱼塘水体中磷含量的变化

图 2 为试验期间团头鲂混养池塘及水源水中总磷的含量变化。由图可知,水源水 TP 含量总体稳定并保持在较低水平(0.17 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,符合地表水Ⅲ类养殖用水要求^[10];混养池塘 A、B 和 C 水中 TP 含量则显著高于水源水,分别为水源水 TP 的(10.88 ± 4.66)、(28.71 ± 20.93)、(29.10 ± 20.84)倍,其中池塘 B 和 C 的 TP 含量要高于池塘 A,养殖生产导致 TP 大量增加是显而易见的。3 个池塘水体 TP 均已超过地表水Ⅲ类水标准^[10]。我国淡水养殖池塘排放标准(Ⅱ类)^[11]中,对 TP 要求不超过 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,本实验期间池塘 A、B 和 C 水体中 TP 已严重超标,如果不经处理随意排放,会对周边水环境造成影响。

在磷的各种存在形式中,能被水生植物直接吸收利用的部分称为有效磷,目前一般把 $\text{PO}_4\text{-P}$ 视作有效磷^[12]。此外,鱼类所排泄的磷绝大部分都呈 $\text{PO}_4\text{-P}$ 形式,因此可将 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量近似作为鱼类磷的总排泄量^[13]。通过监测养殖水质中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量能够初步了解鱼类代谢规律、营养需求和养殖特性。由图 3 可知,与 TP 相似,养殖期间水源水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量亦一直保持稳定[(0.11 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]且显著低于各养殖池塘;而在养殖过程中,随着时间的延长,水中积累的有机物分解矿化产生 $\text{PO}_4\text{-P}$,再加上水生生物及鱼类的代谢,致使水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量不断增加,已超过鱼体摄入 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的最适需求^[14],从而导致各养殖塘水中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 呈波动性总体上升态势。此外,研究活性磷占总磷的比例,可了解水体中能被水生植物吸收的磷的状况。周艳红等^[15]发现养殖水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 占 TP 比例较大, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度可以直接影响水中 TP 的浓度。本实验中,池塘 A、B、C 与水源 D 的水体 $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$ 值分别为(49.58 ± 14.31)%、(55.05 ± 19.12)%、(54.28 ± 24.90)%和(56.74 ± 16.72)%,各组间无显著性差异($F 0.86<F_{crit}$

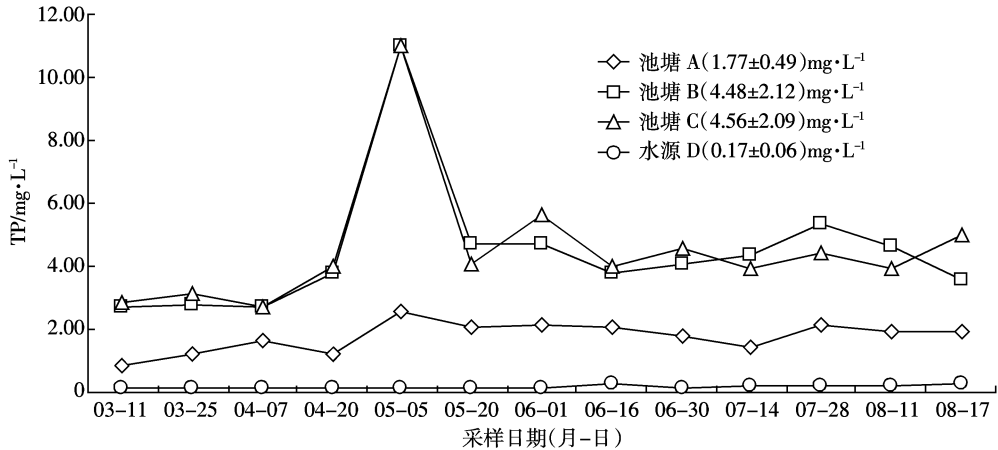


图 2 养殖期间池塘及水源水体中 TP 含量(2011)

Figure 2 TP contents in the ponds and water source during the culture time(2011)

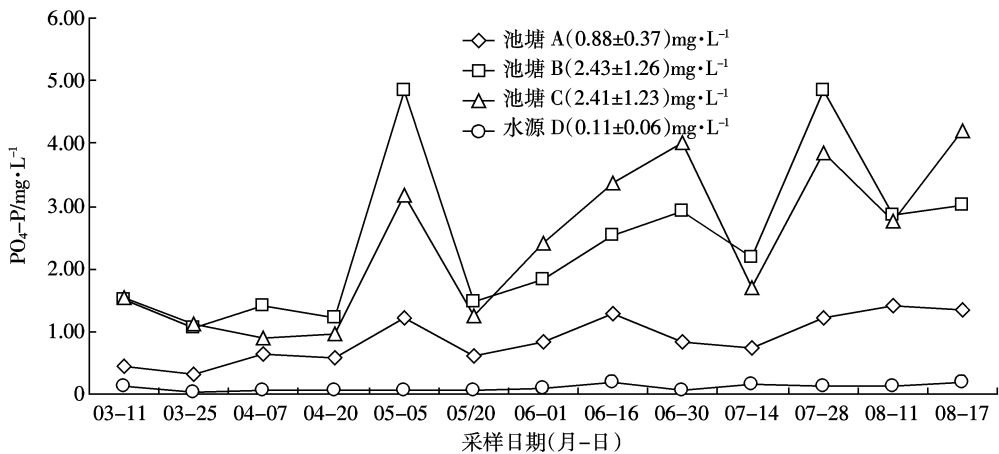


图 3 养殖期间池塘及水源水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量(2011)
Figure 3 $\text{PO}_4\text{-P}$ contents in the ponds and water source during the culture time(2011)

2.87)。

2.2 水源及混养鱼塘沉积物中磷含量的变化

相较而言，水源沉积物中 TP 含量略高于养殖池塘，且波动性较大，应该与水源本身及水体搅动状态^[16]有关。由表 2 可知，本实验中，水源为靠近居民生活区的河道，历年累积致使沉积物中 TP 含量较高。另外，水源采样点靠近水坝，频繁的开关闸蓄水排水大大增加了水源水的扰动状态，增加了沉积物中磷的释放。养殖池塘内虽然有鱼类的活动以及大功率增氧机运转，但是沉积物中磷释放并不明显，应该与水体及沉积物中磷含量有关。有研究者认为，当水体 TP 浓度大于 0.09~0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，磷总体表现为向底泥中沉积，本研究的池塘水体中 TP 远大于 0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，沉积物中 P 向水体释放会受到很大限制，因此池塘表层沉积物 TP 含量变化不大。

2.3 水源及混养鱼塘沉积物中各形态磷含量的变化

表层沉积物中的 P 形态可分为交换态磷 (Ex-P)、铝结合磷 (Al-P)、铁结合磷 (Fe-P)、闭蓄态磷 (Oc-P)、原生碎屑磷 (De-P)、钙结合磷 (Ca-P) 和有机磷 (Or-P) 7 种^[9]。就实验结果看来(图 4)，池塘表层沉积物中总磷主要由 Fe-P、Oc-P、Ca-P 和 Or-P 组成，而 Ex-P、Al-P，尤其是 De-P 仅占很少部分。养殖期

间，混养鱼塘及水源沉积物中各形态磷含量变化呈波动状态，但并未表现出明显的变化趋势。

Ex-P、Al-P、Fe-P 属于生物可利用磷，易释放进入水体而被藻类利用^[17]，养殖期间池塘 A、B、C 以及水源 D 的沉积物中可利用磷含量分别为 (0.10±0.02)、(0.12±0.05)、(0.11±0.06) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 (0.21±0.07) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，占沉积物中总磷的 (27.93±0.05)%、(25.30±0.08)%、(26.36±0.09)%和 (40.09±0.05)%。分析发现，3 口养殖池塘中生物可利用磷含量近似，无显著性差异；而水源沉积物中生物可利用磷含量低于养殖池塘，与 3 口养殖池塘均具有显著性差异 ($P<0.05$)，表明养殖生产能够影响底质环境，致使水体污染源加重。沉积物 TP 与 Ex-P、Al-P、Fe-P 都呈现极显著正相关 ($P<0.01$)，这与 Ex-P、Al-P、Fe-P 的不稳定性有关，说明 Ex-P、Al-P、Fe-P 的形成与释放都能显著影响表层沉积物中 TP 水平。李小伟等^[2]研究了广州市郊某养殖场养鱼池塘表层沉积物中磷的形态，与李小伟的结果相比，无论是养殖池塘还是水源，本试验池塘沉积物中生物可利用磷含量均较低，这也在一定程度上说明，养殖场底质环境较稳定，沉积物中内源污染相对较轻。

Oc-P 实质是 Fe_2O_3 胶膜所包蔽的还原溶性磷酸

表 2 养殖期间沉积物中 TP 含量(2011)
Table 2 TP contents in the sediments during the culture period(2011)

采样点	变化范围/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	变异系数/%	中位数/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
池塘 A	0.63~0.72	0.04	0.69	5.80	0.71
池塘 B	0.64~0.81	0.07	0.70	10.00	0.68
池塘 C	0.59~0.77	0.09	0.68	13.24	0.61
水源 D	0.67~0.97	0.13	0.79	16.46	0.73

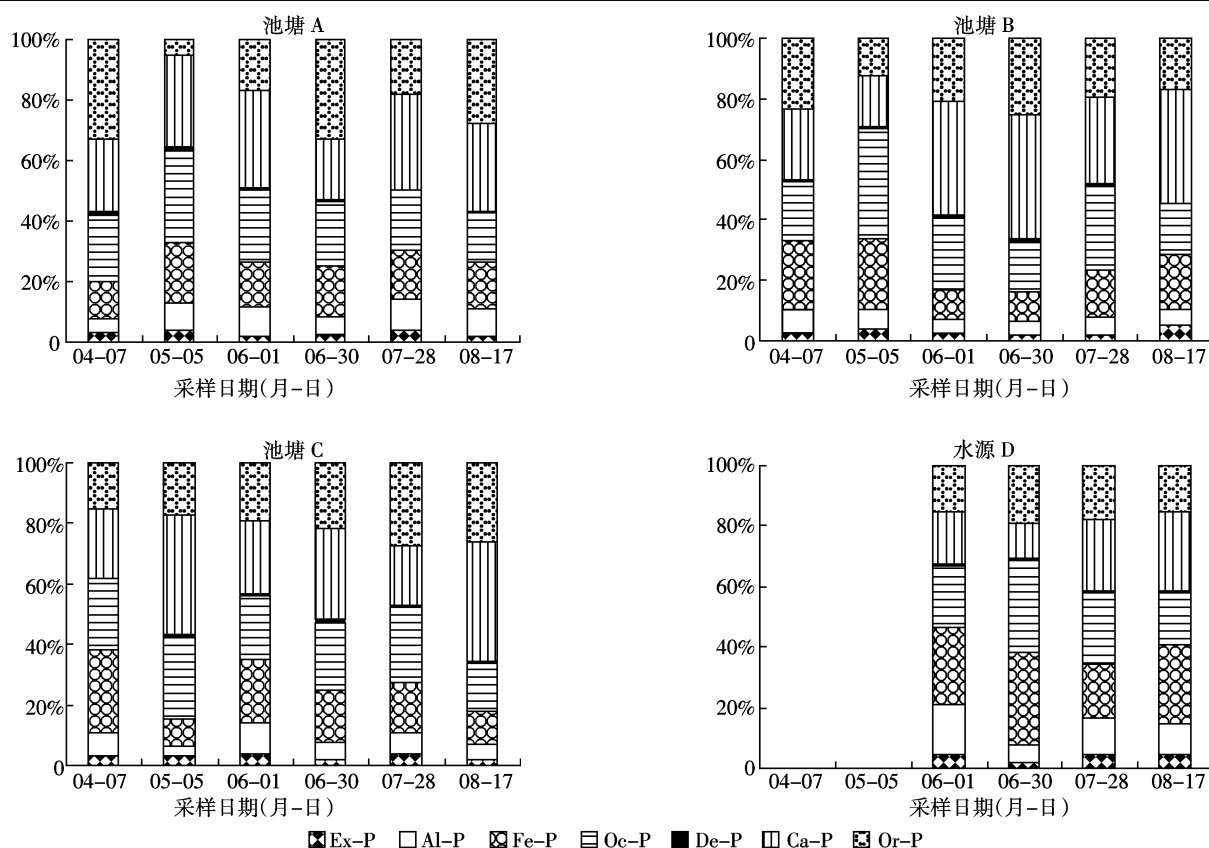


图4 混养鱼塘及水源表层沉积物中磷形态百分比组成(2011)

Figure 4 The ratio of phosphorus forms in the surficial sediments of polyculture fish ponds and water source(2011)

铁以及磷酸铝^[18],属于难以释放的磷形态。有文献指出其含量与沉积物 TP 比值的变化,既能反映风化程度的深浅,也能指示不同迁移阶段中不同环境因素对沉积物的影响变化程度^[9]。养殖期间池塘 A、B、C 以及水源 D 的沉积物中 Oc-P 含量分别为 (0.09 ± 0.01) 、 (0.11 ± 0.05) 、 (0.09 ± 0.02) 、 $(0.12 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,占沉积物中总磷的 $(22.32 \pm 0.05)\%$ 、 $(23.48 \pm 0.08)\%$ 、 $(22.60 \pm 0.04)\%$ 和 $(22.95 \pm 0.06)\%$ 。各采样点 Oc-P 含量并无显著性差异,虽然其含量并不低,但因不易溶出,所以对养殖水质影响不大。

De-P 和 Ca-P 均为钙结合态磷,其中 De-P 指以火成岩和变质岩为来源的碎屑氟磷灰石,Ca-P 指生物骨骼碎屑以及 CaCO_3 结合磷^[19]。钙结合态磷在底泥中稳定性较高,是早期成岩过程的最终产物之一,通常在弱碱性的水环境中活性很低,仅在 pH 骤降时才会溶解出一部分^[20]。养殖期间池塘 A、B、C 以及水源 D 的沉积物中钙结合态磷含量分别为 (0.11 ± 0.01) 、 (0.14 ± 0.04) 、 (0.12 ± 0.03) 、 $(0.11 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,占沉积物中总磷的 $(28.50 \pm 0.05)\%$ 、 $(31.53 \pm 0.10)\%$ 、 $(29.80 \pm$

$0.09)\%$ 和 $(20.18 \pm 0.07)\%$,其中 Ca-P 占 $(27.70 \pm 0.05)\%$ 、 $(30.85 \pm 0.09)\%$ 、 $(29.07 \pm 0.09)\%$ 和 $(19.70 \pm 0.07)\%$ 。由结果来看,钙结合态磷中以 Ca-P 为主,并且各养殖池塘钙结合态磷含量近似,均高于水源沉积物中的钙结合态磷含量。各采样点水体呈弱碱性(pH 值分别为 7.91~9.96、7.88~9.75、8.11~9.82、7.10~8.40),钙结合态磷在这种环境下相对比较稳定,表明该养殖场沉积物环境中自然来源的磷较少,主要是人为输入的磷,符合水产养殖人为投饵施肥等大量输入磷这一事实。

Or-P 是相对较难被生物利用的磷形态,包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分和由死亡的水生生物尸体组成的可降解性有机磷部分^[21]。养殖期间池塘 A、B、C 以及水源 D 的沉积物中 Or-P 含量分别为 (0.09 ± 0.05) 、 (0.09 ± 0.02) 、 (0.08 ± 0.01) 、 $(0.09 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,占沉积物中总磷的 $(22.27 \pm 0.11)\%$ 、 $(19.67 \pm 0.05)\%$ 、 $(21.25 \pm 0.05)\%$ 和 $(16.82 \pm 0.02)\%$ 。沉积物中的 Or-P 主要来自于水生生物残体等的沉降。养殖期间,水温不断上升,水中浮游生物尤其藻类大

量繁殖,水色由淡绿转变为浓绿,池塘出现一定程度的水华,而死亡的藻类沉降到池底将释放大量含磷有机质,因此沉积物中 Or-P 含量相对较高。

3 讨论

3.1 养殖生产对水中磷的影响

葛长宇^[22]发现从物质平衡角度看,养殖鱼类是水体磷酸盐的源,但又不是单纯的源,因鱼粪和残饵等微粒的吸附作用,养殖鱼类有可能成为水体磷酸盐的汇,但这种汇是暂时的,在一定条件下,比如沉积物再悬浮时,会有部分磷被重新释放到水体中。这表明养殖生产对水体中磷含量能够造成影响,既能使水体中磷含量增加,也有可能出现短时间内减少的情况,本试验水体中 TP 及 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量呈现波动性变化也很好地说明了这一点。杨世平等^[23]发现对虾高密度养殖过程中,水体中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 不断被浮游植物和微生物利用转化为 TP,致使 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量随养殖时间的延长而不断降低,TP 的含量则随养殖时间的延长不断增加,而养殖过程中投饲和施肥带入的磷,由于生物作用,迅速转化成难以被有效利用的其他形态磷,造成了某些养殖水体磷缺乏, $\text{PO}_4\text{-P/TP}$ 比值随着养殖时间的延长而不断减小。这与本试验结果不一致,应该与养殖模式不同、投喂饲料成分不同等原因有关,有待进一步试验探究。

3.2 养殖生产对沉积物中磷的影响

韦献革等^[24]试验发现养殖网箱下沉积物磷含量明显高于对照点,沉积物中总磷是对照点的 3.71~9.99 倍,养殖历史越长,沉积物中的磷含量越高。周艳红等^[15]也证实养殖沉积物中总磷含量较高,养殖中投放大量富含氮、磷等营养元素的饵料,而鱼类及藻类的生物利用率低,很大一部分磷进入沉积物环境,随时间的增加而累积。底泥总磷含量与水中总磷呈显著负相关,底泥释放会导致水中磷的增加,而底泥总磷含量相对减少。有研究表明围塘养殖区沉积物溶解态 P 的释放可以提高上覆水水体中 18% 的 P 水平^[25]。本试验发现,各采样点沉积物中的 TP 与水体中的 TP 呈负相关关系,其中水源水体与沉积物中 TP 呈显著负相关($P<0.05$),说明在自然情况下水体与沉积物中总磷能够达成一种此消彼长的稳定关系。此外,温度、盐度、pH 和微生物对沉积物中 P 释放都有影响:沉积物中 P 释放量随着水温上升而上升,随着盐度升高而增加;不同 pH 条件下 P 释放量由大到小依次为酸性、碱性、中性;微生物能够促进

沉积物中 P 的释放^[26]。

3.3 不同区域表层沉积物中各形态磷含量差异

沉积物中的磷以有机磷(Or-P)和无机磷(包括 Ex-P、Al-P、Fe-P、Oc-P、De-P 和 Ca-P)形态存在,根据各形态磷提取的特点,又可划分为 NaOH-P(包括 Ex-P、Al-P、Fe-P 和 Oc-P)、HCl-P(包括 De-P 和 Ca-P)和有机磷(Or-P)3 种。目前而言,学者们更多地采用这种分类方法来探究湖泊、水库、养殖池塘等沉积物中磷的赋存形态和分布(表 3)。

表 3 不同表层沉积物中各形态磷含量比较

Table 3 The comparison of contents of various forms phosphorus in different superficial deposits

采样地点	TP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	NaOH-P/%	HCl-P/%	Or-P/%
池塘 A(本实验)	0.69	49.23	28.50	22.27
池塘 B(本实验)	0.70	48.79	31.53	19.68
池塘 C(本实验)	0.68	48.95	29.80	21.24
水源 D(本实验)	0.79	63.02	20.18	16.80
罗非鱼养殖池塘 ^[2]	1.64	36.40	45.80	17.80
珠江水源 ^[2]	0.96	65.90	19.50	14.60
弹涂鱼养殖区 ^[27]	0.62	55.71	14.48	29.81
贝类养殖区 ^[27]	0.65	9.36	23.95	66.68
青蟹养殖区 ^[27]	0.65	5.47	17.94	76.60
对虾养殖区 ^[27]	0.62	7.67	27.40	64.93

分析发现,本养殖场池塘及水源沉积物中磷形态存在由高到低顺序为 NaOH-P>HCl-P>Or-P,尤其是水源沉积物,与珠江水源沉积物中磷赋存形态一致;但与罗非鱼养殖池塘的检测结果不一致(HCl-P>NaOH-P>Or-P),与贝类、青蟹和对虾养殖区沉积物的分析结果也不相同(Or-P>HCl-P>NaOH-P),与弹涂鱼养殖区分析结果也不一样(NaOH-P>Or-P>HCl-P)。不同水源沉积物中磷的赋存形态及含量非常相似,而不同养殖区各种形态磷的含量却相差很大,主要是不同养殖品种食性不同,饵料输入具有很大差别,同时产生的代谢废物也不同所致^[27]。

磷的赋存形态及其含量与各形态磷的特点及周边沉积环境(物理、化学、生物环境)也有很大关系,譬如:Fe-P 含量的大小受到外源输入、沉降速率、氧化还原环境、温度等条件的影响^[28];Al-P 含量的大小与水体环境地质、地球背景及水体的酸碱度有关^[29]。此外,氧化还原电位、pH^[30]、有机质^[31]、扰动、沉积物粒径^[20]等均对磷的赋存形态及其含量存在影响。

4 结论

(1)该养殖场水源水 TP(0.17 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及

$\text{PO}_4\text{-P}$ (0.11 ± 0.06) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 含量一直维持在稳定的较低水平,养殖生产导致池塘 A、B、C 水中 TP 含量大大增加,均已超过地表水Ⅲ类标准和淡水养殖池塘排放标准(Ⅱ类),如果不经处理随意排放,会对周边水环境造成影响,值得注意。此外,尽管池塘内浮游藻类生长消耗了一部分 $\text{PO}_4\text{-P}$,但其含量仍然较高,不仅造成营养盐的浪费,更易导致水质恶化,对养殖产品构成威胁,因此有必要严格控制饲料投喂量,提高饲料利用率。

(2)池塘表层沉积物中总磷主要由 Fe-P (18.03 ± 6.01)%、 Oc-P (22.82 ± 5.34)%、 Ca-P (27.48 ± 8.15)%和 Or-P (20.29 ± 6.60)%组成, Ex-P (3.07 ± 1.06)%、 Al-P (7.62 ± 3.11)%,尤其 De-P (0.69 ± 0.35)%仅占很少部分。试验结果表明:该养殖池塘内源污染相对较轻,而水产养殖中人为投饵施肥等大量输入磷对沉积物中各形态磷的含量影响较大,应当采取有效的措施严格控制养殖对环境造成的危害,切实发展“高效、健康、生态”的养殖,真正实现水产养殖业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 2010年中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2010: I-IV.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2010 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: I-IV.
- [2] 李小伟, 乔永民, 杨宇峰. 广州市郊养殖池塘表层沉积物中氮磷的初步研究[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 74-77.
LI Xiao-wei, QIAO Yong-min, YANG Yu-feng. Preliminary study on nitrogen and phosphorus in the surface sediments of culture ponds in Guangzhou's suburbs[J]. *Reservoir Fisheries*, 2008, 28(1): 74-77.
- [3] Deer W A, Howie R A, Zyssman J. An introduction to the rock-forming minerals[M]. 2nd Ed. Harlow, Essex, England: Longman Scientific and Technical, 1996: 696.
- [4] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 147-150.
HUANG Qing-hui, WANG Dong-hong, WANG Chun-xia, et al. Vertical variation of the phosphorus form in the sediments of Meiliang Bay and Wuli Lake of Tsihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 147-150.
- [5] Jiang X, Jin X C, Yao Y, et al. Effects of oxygen on the release and distribution of phosphorus in the sediments under the light condition[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 482-487.
- [6] 吴丰昌, 万国江. 泸沽湖沉积物-水界面扩散作用对上覆水体基本化学组成的影响[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 10-12.
WU Feng-chang, WAN Guo-jiang. The influence of diffusive processes on overlying waters at the sediment-water interface of Lake Lugu[J]. *Environmental Science*, 1996, 17(1): 10-12.
- [7] 国家环境保护总局. GB/T 11893—1989 水质总磷的测定: 钼酸铵分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China. GB/T 11893—1989 Water quality determination of total phosphorus: Ammonium molybdate spectrophotometric method[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1989.
- [8] Aspila K I, Haig Agemian A S Y, et al. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments[J]. *Analyst*, 1976, 101: 187-197.
- [9] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 15-20.
LI Yue, WU Da-nian, XUE Yong-xian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(1): 15-20.
- [10] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China. GB 3838—2002 Environmental quality standard for surface water[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2002.
- [11] 中华人民共和国农业部. SC/T 9101—2007 淡水池塘养殖水排放要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9101—2007 Requirement for water discharge from freshwater aquaculture pond[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2007.
- [12] 雷衍之. 养殖水环境化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 116-124.
LEI Yan-zhi. Aquatic environmental chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 116-124.
- [13] 王 莹, 吴立新, 李家庆, 等. 饥饿及再投喂对牙鲆幼鱼氮、磷排泄的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(2): 114-118.
WANG Luo, WU Li-xin, LI Jia-qing, et al. Effect of starvation and refeeding on excretion of nitrogen and phosphorus in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2011, 26(2): 114-118.
- [14] Rodehutsord M, Gregus Z, Pfeffer E. Effect of phosphorus intake on faecal and non-faecal phosphorus excretion in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and the consequences for comparative phosphorus availability studies[J]. *Aquaculture*, 2000, 188(3-4): 383-398.
- [15] 周艳红. 养殖水体磷的动态变化研究[D]. 广州: 中山大学, 2005.
ZHOU Yan-hong. Research on dynamic of phosphorus concentration in aquaculture water[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2005.
- [16] 王庭健, 苏 睿, 金相灿. 城市富营养化湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4): 2-19.
WANG Ting-jian, SU Rui, JIN Xiang-can. The effects to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban Eutrophic Lakes[J]. *Research of Environmental Science*, 1994, 7(4): 2-19.
- [17] 俞林伟, 谭 镇, 钟 萍, 等. 广州市流花湖表层底泥磷的形态与生物可利用性[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(2): 14-16.
YU Lin-wei, TAN Zhen, ZHONG Ping, et al. Characteristics and fractionation of phosphorus in the sediments of Lake Liuhuahu in Guangzhou

- [J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2006, 19(2):14-16.
- [18] 李文朝, 尹澄清, 陈开宁, 等. 关于湖泊沉积物磷释放及其测定方法的刍议[J]. *湖泊科学*, 1999, 11(4):296-303.
- LI Wen-chao, YIN cheng-qing, CHEN Kai-ning, et al. Discussion on phosphorous release from lake sediment[J]. *Journal of Lake Science*, 1999, 11(4):296-303.
- [19] Ruttenberg K C. Development of sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [20] 周来, 冯启言, 王华, 等. 南四湖表层底泥磷的化学形态及其释放规律[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(6):37-40.
- ZHOU Lai, FENG Qi-yan, WANG Hua, et al. Phosphorus speciation and phosphorus release from surface sediments in Nansi Lake[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(6):37-40.
- [21] 陈豁然, 杨梦兵, 王中伟, 等. 底泥磷形态及分布特征对水体富营养化的影响[J]. *污染防治技术*, 2009, 22(5):81-83, 123.
- CHEN Huo-ran, YANG Meng-bing, WANG Zhong-wei, et al. The effects of species and distribution characteristics of phosphorus in sediment to eutrophication[J]. *Pollution Control Technology*, 2009, 22(5):81-83, 123.
- [22] 葛长宇. 鱼类养殖对水体磷酸盐的影响:源、汇的半现场实验例证[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(7):29-32, 45.
- GE Chang-zi. Effects of pisciculture on phosphate concentration of water body: One source or one sink, a semi-field experiment example [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(7):29-32, 45.
- [23] 杨世平, 邱德全. 对虾高密度养殖过程中水质的周期变化与分析[J]. *水产科学*, 2002, 21(6):459-462.
- YANG Shi-ping, QIU De-quan. Water quality in the high density shrimp culturing ponds[J]. *Fisheries Science*, 2002, 21(6):459-462.
- [24] 韦献革, 温琰茂, 陈璟璇, 等. 哑铃湾网箱养殖海区表层沉积物磷的含量特征[J]. *水产科学*, 2005, 24(8):4-7.
- WEI Xian-ge, WEN Yan-mao, CHEN Jing-xuan, et al. Phosphorus contents in sediments from cage culture in Yaling Bay[J]. *Fisheries Science*, 2005, 24(8):4-7.
- [25] Stefanni S, Mazzoldi C. The presence of Couch's goby in the Mediterranean Sea[J]. *Journal of Fish Biology*, 1999, 54:1128-1131.
- [26] 卢光明, 乐观宗, 钟明杰, 等. 锯缘青蟹养殖池塘中沉积物磷释放的初步研究[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(5):1115-1120.
- LU Guang-ming, LE Guan-zong, ZHONG Ming-jie, et al. Phosphorus release in *Scylla serrata*(Forsk.) ponds' sediment[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(5):1115-1120.
- [27] 江锦花, 柯世省, 丁理法, 等. 围塘养殖沉积物中磷的存在形态、分布及环境效应[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2004, 23(4):311-314.
- JIANG Jin-hua, KE Shi-sheng, DING Li-fa, et al. Phosphorous states, distribution and environmental impacts in the sediments of cage aquaculture[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)*, 2004, 23(4):311-314.
- [28] 刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征[J]. *海洋通报*, 2001, 20(5):10-17.
- LIU Min, XU Shi-yuan, HOU Li-jun, et al. Phosphorous species in sediments and their distribution in the Yangtze Estuary and Coastal Areas[J]. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(5):10-17.
- [29] 苏玉萍, 郑达贤, 庄一廷, 等. 南方内陆富营养化湖泊沉积物磷形态特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2):362-365.
- SU Yu-ping, ZHENG Da-xian, ZHUANG Yi-ting, et al. Phosphorus fractionations in sediments from eutrophicated lakes in Fujian Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):362-365.
- [30] 刘峰, 高云芳, 王立欣, 等. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(4):137-144.
- LIU Feng, GAO Yun-fang, WANG Li-xin, et al. Review on nitrogen and phosphorus forms and distribution in sediments[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4):137-144.
- [31] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: II 磷的扩散[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3):792-796.
- ZHOU Jin-feng, WEN Yan-mao, LI Yao-chu, et al. Nutrients diffusion at the water-sediment inter face of farming ponds by indoor simulation experiment: II diffusion of phosphorous compounds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):792-796.