

模拟池塘底泥无机磷形态与上覆水体可溶性活性磷含量的关系及其控制

卢显芝, 李文波, 郝建朝, 田秀平

(天津农学院农学系, 天津 300384)

摘要:取两个池塘底泥和上覆水进行室内模拟水体小环境试验,设对照组及5个处理组,进行4个月培养,采用连续分组法测定底泥中无机磷形态及其含量,分析底泥潜在无机磷变化及其与上覆水体可溶性活性磷(DRP)含量的关系。结果表明,池塘底泥中无机磷各形态含量依次为钙10结合磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>闭蓄态磷(O-P)>铝结合磷(Al-P)>铁结合磷(Fe-P)>钙8结合磷($\text{Ca}_8\text{-P}$)>钙2结合磷($\text{Ca}_2\text{-P}$);4个月后两池塘底泥中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Fe-P 增加, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 、 Al-P 减少;上覆水体中DRP含量与 O-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间呈显著正相关;底泥中无机磷各形态对上覆水体中DRP含量的直接影响大小依次为 $\text{O-P}>\text{Ca}_8\text{-P}>\text{Ca}_2\text{-P}>\text{Ca}_{10}\text{-P}>\text{Fe-P}>\text{Al-P}$;5个处理组上覆水体中DRP含量都低于对照组;沸石与芽孢杆菌组合处理的上覆水体中DRP含量最低,表明采用沸石与芽孢杆菌组合进行底泥处理是控制上覆水中DRP含量的有效方法。

关键词:无机磷形态;养殖池塘;池塘底泥;上覆水体;可溶性活性磷

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)05-0993-06

The Relationship Between Inorganic Phosphorus Fractionation of Sediment and Contents of Dissolved Reactive Phosphorus(DRP) of Overlying Water and Dissolved Reactive Phosphorus Control in Simulated Pond

LU Xian-zhi, LI Wen-bo, HAO Jian-chao, TIAN Xiu-ping

(Department of Agronomy, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The sediments and overlying water sampled from two different ponds A and B were placed in glass aquaria and cultured for 4 months under indoor environment to simulate pond environment, and six treatments were designed in the experiment to compare their effects on the forms of P and the content of dissolved reactive phosphorus (DRP). The amounts and forms of inorganic phosphorus (IP) in sediments were evaluated using a sequential chemical extraction, the relationship of potentially mobile P in sediments and contents of DRP in overlying water were analyzed. The results indicated that the order of IP forms in two sediments was $\text{Ca}_{10}\text{-P}>\text{O-P}>\text{Al-P}>\text{Fe-P}>\text{Ca}_8\text{-P}>\text{Ca}_2\text{-P}$. $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Fe-P increased, but $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, O-P and Al-P decreased after 4 months. Correlation and path analysis showed that there were significantly positive correlation between DRP in overlying water with O-P , $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$. The order of direct effect was $\text{O-P}(0.317)>\text{Ca}_8\text{-P}(0.257)>\text{Ca}_2\text{-P}(0.244)>\text{Ca}_{10}\text{-P}(0.197)>\text{Fe-P}(0.046)>\text{Al-P}(-0.05)$. DRP contents in overlying water under five treatments were lower than those under the control, which was the lowest in the treatment with zeolite and bacilli, implying that treating pond sediment with zeolite and bacilli was the effective way to control DRP contents of overlying water.

Keywords: inorganic phosphorus fractionation; pond; sediment; overlying water; dissolved reactive phosphorus

水体富营养化是当今世界所面临的严重环境问题,已引起国内外学者们的高度重视。在富营养化形

成过程中,磷是最主要的限制因子,而沉积物(底泥)中的磷素循环对上覆水体可溶性磷含量有深刻的影响,决定着富营养化的进程。

底泥间隙水中磷酸盐可溶性受到磷酸盐化学组成和其他矿化物质或非结晶性物质的控制^[1]。与Fe、Al和Ca结合的磷酸盐和碳酸盐、泥土的吸附特性尤为值得关注^[2]。由于底泥释放的磷可成为内源磷,加重

收稿日期:2009-03-23

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(07JCZDJC04600);天津市教委基金项目(20060708)

作者简介:卢显芝(1961—),女,硕士,主要从事生物技术的教学与研究工作。E-mail:nxylxz@163.com

湖泊的富营养化程度,因此分析底泥的磷形态有助于了解磷在水域生态系统中的循环。磷的释放取决于底泥磷形态的含量和分布、可交换磷的饱和程度以及水环境条件等^[3-6]。

底泥释放磷的机制大致可概括为:生物释放、化学释放和物理释放。生物释放大致有 3 条途径:细菌释放、大型水生植物的释放和底栖生物的消化道释放^[7-8]。化学释放主要是在厌氧条件下发生,如当铁还原为二价铁时,磷可自沉积物中释出。被底泥吸附的磷也可通过解吸作用进入上覆水中。沉积物中磷的物理释放主要有扩散和搅拌作用等途径^[9-10]。

因此,控制底泥磷素释放主要有物理、化学和生物的方法。沸石是一种架状结构的多孔穴和通道的硅铝酸盐,是一种较为廉价的水体净化材料。刘远金等^[11]在对鱼塘上覆水及生活污水的氮磷去除效应研究中,发现沸石有降低总氮、氨氮、总磷、无机磷的作用,其降低程度随沸石用量的增多而加大。国内外有关研究表明,脲酶抑制剂本身是还原剂,可以改变土壤中微生物的氧化还原条件,降低土壤脲酶的活性^[12]。底泥细菌是养殖池塘生态系统的重要组成部分,在促进池底有机物分解、减少有机物积累、保持良好水质环境方面具有重要作用。李卓佳等^[13]的研究表明,施用了芽孢杆菌制剂后的池塘,在养殖后期大都可以保持相对好的水质和藻相。

本试验采取了分别向底泥中添加沸石、酶抑制剂、沸石与芽孢杆菌制剂、沸石与酶抑制剂和芽孢杆菌制剂等的不同处理方式,研究在不同处理下底泥无机磷形态的变化及各形态对上覆水体中可溶性磷含量的影响,以期为控制养殖池塘底泥磷素释放提供理论参考。

1 材料及方法

1.1 试验样品采集

2007 年 5 月 11 日对天津市东丽区虾池 A(连续 11 a 没有清池)和西青区鱼池 B(连续 9 a 没有清池)的上覆水(水面下 40 cm)及底泥(0~20 cm)进行多点

取样,混合均匀后迅速装入塑料袋中,放入冰箱 4 ℃ 下保存。A、B 两池塘上覆水体和底泥的基本理化性质见表 1。

1.2 试验处理

取 40 cm(长)×30 cm(宽)×35 cm(高)玻璃缸各 24 个,分别装入 A、B 两池塘的样品,每缸底部平铺底泥 24 kg,约 4 cm 厚,缓慢注入上覆水至 20 cm 处。试验共设 6 个处理,分别为:处理 1(对照组)、处理 2(沸石处理,取 10 g 沸石均匀撒在底泥表面)、处理 3(酶抑制剂处理,取脲酶抑制剂 4 g 均匀撒在底泥表面)、处理 4(沸石与芽孢杆菌制剂处理,取 10 g 沸石均匀撒在底泥表面,将芽孢杆菌 20 μL(10⁸·mL⁻¹)稀释 100 倍注入上覆水中)、处理 5(沸石与酶抑制剂处理,将沸石 10 g 和脲酶抑制剂 4 g 均匀撒在底泥表面)、处理 6(芽孢杆菌制剂处理,将芽孢杆菌 20 μL(10⁸·mL⁻¹)稀释 100 倍注入上覆水中)。每个处理 2 次重复,玻璃缸四周用黑布包裹以使光线只从容器上方进入水体,沿房间窗口随机排列,在自然光照和室内常温下培养。试验期为 4 个月,从 5 月 12 日至 9 月 12 日。

1.3 样品采集与分析

采用 5 点法取上覆水和底泥样品,每月采样 1 次,为了补充蒸发的水分,取水样前加蒸馏水至上次取样后的水面高度。

采用顾益初^[14]提出的土壤磷分组方法对无机磷连续分组,上覆水体中可溶性磷含量采用钼蓝比色法,底泥中可溶性磷含量测定采用 Olsen 法,其他分析项目均采用常规法^[15]。试验中各种磷含量均为纯磷。

1.4 试验数据处理方法

无机磷各形态的变化量(A)用最后一次测定值与初始值的差异来表示;变化率 $R(\%) = A / \text{初始值} \times 100$ 。用 DPSv3.01 软件进行相关分析和通径分析。

2 结果与分析

2.1 池塘底泥中无机磷形态分布特征

根据顾益初提出的磷的连续分组方法,将底泥中

表 1 A、B 两池塘底泥及上覆水的基本理化性质

Table 1 Chemical and physical characteristics of sediment and overlying water in pond A and B

样 品		TP	TN	DRP	NH ₄ ⁺ -N	pH	EC
池塘 A	上覆水	0.360 mg·L ⁻¹	0.210 g·L ⁻¹	0.036 0 mg·L ⁻¹	6.630 mg·L ⁻¹	9.09	98.2 μs·cm ⁻¹
	底泥	0.847 g·kg ⁻¹	5.900 g·kg ⁻¹	31.430 mg·kg ⁻¹	59.970 mg·kg ⁻¹	8.10	121.5 μs·cm ⁻¹
池塘 B	上覆水	0.490 mg·L ⁻¹	0.180 g·L ⁻¹	0.036 2 mg·L ⁻¹	1.130 mg·L ⁻¹	8.56	110.2 μs·cm ⁻¹
	底泥	0.758 g·kg ⁻¹	5.960 g·kg ⁻¹	23.460 mg·kg ⁻¹	60.070 mg·kg ⁻¹	8.50	137.2 μs·cm ⁻¹

的无机磷分成磷酸钙盐(Ca-P)、磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)和闭蓄态磷酸盐(O-P),其中磷酸钙盐(Ca-P)又分成 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。A、B 两池塘底泥各形态无机磷含量见表 2。本试验测得各形态无机磷含量在 A、B 两池塘底泥中的分布基本一致,即 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 最高,A、B 池塘平均值分别为 149.22 和 167.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占无机磷总量(TIP)的 34.22%和 33.42%。O-P 其次,两池塘平均值分别为 113.73 和 161.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TIP 总量的 26.08%和 32.18%。排在第 3 位的是 Fe-P,两池塘平均值分别为 90.03 和 94.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TIP 的 20.65%的 18.28%。Al-P 两池塘平均值分别为 33.25 和 31.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TIP 的 7.63%和 6.26%。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$

在两池塘中平均含量分别为 15.95、33.85 和 21.32、25.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TIP 的 3.66%、7.77%和 4.25%、5.08%。

2.2 不同处理池塘底泥中无机磷形态含量变化

A、B 两池塘底泥不同处理无机磷各形态的变化量见表 3 和表 4。

从表 3、表 4 可以看出,A、B 池塘的不同处理组底泥中无机磷各形态含量,在 4 个月后就发生了变化,且变化规律相同:Fe-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量增加, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、Al-P 和 O-P 的含量降低。其中,A、B 两池塘 Fe-P 含量平均增加 24.19 和 42.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加率分别为 38.69%和 73.74%; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量平均增加 2.87 和 6.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加率分别为 19.58%和 31.54%。其他

表 2 A、B 两池塘底泥各形态无机磷的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Contents of IP fractionation in sediment from pond A and B($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

无机磷形态		$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Fe-P	Al-P	O-P	TIP
A 池塘初始含量		14.11	38.42	149.36	70.99	39.09	176.91	488.88
试验结束含量	A1	16.84	31.71	135.92	83.53	34.34	112.26	414.60
	A2	19.58	31.32	124.49	90.33	26.02	102.01	393.75
	A3	15.59	34.77	192.89	86.15	34.34	106.11	469.85
	A4	15.35	31.89	179.22	99.74	26.25	96.87	449.32
	A5	15.35	32.66	138.17	113.85	33.87	75.32	409.22
	A6	14.85	36.31	124.49	85.62	38.86	126.63	426.76
	平均值	15.95	33.87	149.22	90.03	33.25	113.73	436.05
B 池塘初始含量		20.07	26.91	182.95	57.92	32.44	195.85	516.14
试验结束含量	B1	21.57	22.11	136.93	148.35	28.63	178.39	535.98
	B2	19.33	28.82	182.95	76.21	33.87	144.08	485.26
	B3	26.29	30.74	143.14	114.37	33.63	154.91	503.08
	B4	19.83	22.49	182.95	87.71	37.91	164.61	515.5
	B5	21.82	21.72	160.56	91.89	21.97	113.86	431.82
	B6	20.32	25.94	185.44	85.11	31.49	179.53	527.83
	平均值	21.32	25.53	167.85	94.51	31.42	161.60	502.23

表 3 A 池塘底泥不同处理无机磷各形态的变化量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Variation of IP fractionation in sediment from pond A($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	$\text{Ca}_2\text{-P}$		$\text{Ca}_8\text{-P}$		$\text{Ca}_{10}\text{-P}$		Al-P		Fe-P		O-P	
	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%
A1	2.73	19.35	-6.71	-9.00	-13.44	-17.46	-4.75	-12.15	12.54	17.66	-64.65	-36.54
A2	5.47	38.77	-7.1	-9.96	-14.87	-18.48	-13.07	-33.44	19.34	27.24	-74.9	-42.34
A3	1.48	10.49	-3.65	-11.03	-16.47	-9.50	-4.75	-12.15	15.16	21.36	-70.8	-40.02
A4	1.24	8.79	-6.53	-7.41	-12.86	-17.00	-12.84	-32.85	28.75	40.50	-80.04	-45.24
A5	1.24	8.79	-5.76	-7.49	-11.19	-14.99	-5.22	-13.35	42.86	50.37	-18.47	-12.26
A6	0.74	5.24	-2.11	-9.96	-14.87	-5.49	-0.23	-0.59	14.63	20.61	-50.28	-10.44

注:A 为变化量,R 为变化率。下同。

Note: A indicates the amount of change, and R is the percentage of change. The same as below.

表 4 B 池塘底泥中无机磷各形态的变化量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 Variation of IP fractionation in sediment from pond B($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Ca ₁₀ -P		Al-P		Fe-P		O-P	
	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%	A	R/%
B1	1.5	0.07	-4.8	-17.84	-46.02	-25.15	-8.57	-26.42	18.29	31.58	-17.46	-18.22
B2	1.74	0.09	-1.91	-7.10	-0	-0.00	-20.47	-63.10	56.45	97.46	-51.77	-54.01
B3	6.22	0.31	-3.83	-14.23	-39.81	-21.76	-8.81	-27.16	29.79	51.43	-40.94	-42.71
B4	1.24	0.06	-4.42	-16.43	0	0	-4.35	-13.96	33.97	58.65	-31.24	-32.59
B5	1.75	0.09	-5.19	-19.29	-22.39	-12.24	-13.81	-42.57	27.19	46.94	-21.99	-22.94
B6	0.25	0.01	-0.97	-3.60	-2.49	-1.36	-10.95	-33.75	42.86	74.00	-16.32	-17.03

无机磷形态均呈下降趋势,A、B 两池塘都为:O-P>Ca₁₀-P>Al-P>Ca₈-P。以上分析表明,O-P 含量呈显著下降趋势,这与闭蓄态磷的形成有关,该种磷素闭蓄机制主要是底泥中无定型的 Fe(OH)₃ 胶膜对可溶性活性磷产生的掩蔽作用。随着培养时间的延长,池塘底泥的厌氧环境逐渐加强,使 Fe(OH)₃ 胶膜打破,磷素释放出来,因此两个池塘底泥中 O-P 含量大量减少。池塘底泥中 Fe-P 增加的原因可能是,由于 O-P 包被的 Fe(OH)₃ 胶膜被打破,导致底泥中游离铁离子增加,与泥中的磷结合生成了 Fe-P,故两个池塘的 Fe-P 呈增加的趋势。Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 减少可能与底泥 pH 值下降有关,因为培养 4 个月后,pH 值平均下降 0.6。

2.3 池塘底泥无机磷形态与上覆水体中可溶性活性磷含量的关系

上覆水体中的可溶性活性磷含量与池塘底泥中无机磷各形态的相关分析表明,上覆水体中可溶性活性磷与池塘底泥中的 Ca₈-P、O-P 呈极显著正相关($n=12, r$ 分别为 0.826 和 0.708),与 Ca₁₀-P、Ca₂-P 呈显著正相关(r 分别为 0.667 和 0.600),而与 Fe-P 和 Al-P 相关不显著。

为了进一步分析各形态磷之间以及各形态磷与上覆水 DRP 之间的关系,本研究采用通径分析方法,分析结果见表 5。底泥中各形态无机磷对上覆水体可溶性活性磷直接通径系数大小依次为 O-P (0.317)>Ca₈-P (0.257)>Ca₂-P (0.244)>Ca₁₀-P (0.197)>Fe-P (0.046)>Al-P (-0.05)。说明 O-P 对上覆水体中可溶性活性磷含量直接影响最大,其次为各种 Ca-P,而 Fe-P 和 Al-P 的直接影响较小;O-P 对 Fe-P 的间接通径系数较大,说明 Fe-P 对上覆水体的影响受控于 O-P。Ca₁₀-P 和 Ca₈-P 对 Ca₂-P 间接影响也很大,说明 Ca₂-P 对上覆水体可溶性活性磷影响,同样受控于 Ca₁₀-P 和 Ca₈-P。

表 5 底泥中无机磷各形态与上覆水体可溶性活性磷的通径系数

Table 5 Path coefficient of the IP forms to DRP in overlying water

形态	通径系数	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	O-P
Ca ₂ -P	0.244■						
Ca ₈ -P	0.257■	0.208					
Ca ₁₀ -P	0.197■	0.276	0.159				
Fe-P	0.046■	-0.156	0.021	0.012			
Al-P	-0.051■	-0.160	0.108	0.014	0.100		
O-P	0.317■	-0.005	0.114	0.012	0.303	0.003	1

注: $R^2=0.863\ 17$ ■表示直接通径系数,其余为间接通径系数。

Note:■ denotes direct path coefficient, the others are indirect path coefficients.

以上分析表明,O-P 与上覆水可溶性活性磷含量之间呈显著正相关,O-P 对 DRP 直接影响也最大,又因其在底泥中含量高,占总磷的 17.92%,所以 O-P 可影响上覆水中 DRP 含量。通常认为,在好氧条件下,上覆水 DRP 可进入底泥被 Fe³⁺的氧化物包被形成 O-P;在厌氧时,Fe³⁺被还原,胶膜打破使 O-P 释放出可溶性活性磷,进入上覆水,使上覆水中 DRP 含量上升,因此该形态磷对水体富营养化发生影响较大。所以,养殖池塘,适当充氧和补充水分可减少该形态磷的释放,以控制水体富营养化的发生。钙结合磷中,Ca₁₀-P 含量虽然较高,但因其结构较复杂,虽然其与上覆水中 DRP 之间相关显著,但通径系数较低,所以 Ca₁₀-P 对上覆水 DRP 的直接影响很小。Ca₈-P 和 Ca₂-P 虽与上覆水中 DRP 之间相关显著,通径系数也高于 Ca₁₀-P,但因其其在底泥中含量较低,所以对上覆水中 DRP 影响也远不及 O-P。

2.4 不同处理上覆水中可溶性活性磷含量变化

各处理上覆水中可溶性活性磷含量变化见图 1 和图 2。与对照组相比,池塘 A 和 B 各处理上覆水体中可溶性活性磷含量均有所下降。池塘 A 上覆水体

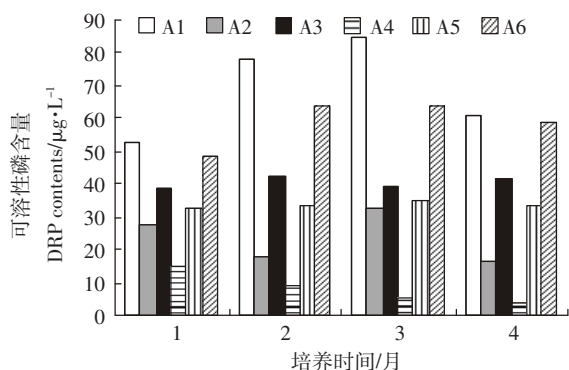


图1 A组不同处理上覆水体可溶性活性磷含量变化

Figure 1 DRP variation of overlying water in different treatments of A

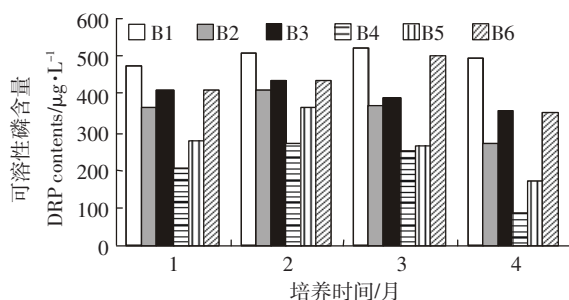


图2 B组不同处理上覆水体可溶性活性磷含量变化

Figure 2 DRP variation of overlying water in different treatments of B

中可溶性活性磷含量下降比例及排序为: A₄ (87.43%) > A₂ (63.22%) > A₅ (47.73%) > A₃ (36.86%) > A₆ (8.5%); 试验组 B 上覆水体中可溶性活性磷含量下降比例及排序为: B₄ (59.28%) > B₅ (46.18%) > B₂ (29.42%) > B₃ (20.34%) > B₆ (15.13%)。

以上结果表明,沸石与芽孢杆菌制剂处理效果最佳,其上覆水体中可溶性活性磷含量降低明显,可能是由于天然沸石具有很强的吸附能力,能与可溶性活性磷发生物理和专性吸附,而细菌可调节池塘底泥和上覆水之间磷素的循环^[6]。沸石与芽孢杆菌同时使用,沸石还可以作为芽孢杆菌载体,更有利于调节可溶性活性磷的含量。

酶抑制剂处理及沸石与酶抑制剂混合处理也降低了上覆水体中可溶性活性磷含量,且沸石与酶抑制剂混合处理效果好于酶抑制剂处理。除了沸石的吸附作用外,可能是加入的酶抑制剂抑制了底泥中脲酶的活性,直接影响到底泥中氨态氮的释放,减少了池塘底栖生物的营养,使得分解难溶性磷的底栖生物活性降低,从而使底泥中的磷向上覆水体中释放减少。

3 结论

(1)两池塘底泥中的各无机磷形态含量依次为 Ca₁₀-P > O-P > Al-P > Fe-P > Ca₈-P > Ca₂-P。

(2)经过4个月的培养, A、B 两池塘底泥中的无机磷各形态的含量都发生了变化,变化规律基本一致。其中 Ca₁₀-P、Ca₈-P、Al-P 和 O-P 的含量都相对降低,而 Fe-P 和 Ca₂-P 的含量相对增加,表明底泥中磷素形态向 Fe-P 和 Ca₂-P 转化。

(3)相关和通径分析表明,上覆水体可溶性活性磷含量与 O-P、Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 之间呈显著正相关,与 Fe-P 和 Al-P 之间相关不显著;底泥中各形态无机磷对上覆水体可溶性活性磷含量直接通径系数大小依次为 O-P > Ca₈-P > Ca₂-P > Ca₁₀-P > Fe-P > Al-P。Fe-P 对上覆水体可溶性活性磷含量的影响受控于 O-P, Ca₂-P 对上覆水体可溶性活性磷含量的影响受控于 Ca₁₀-P 和 Ca₈-P。

(4)各处理上覆水体中可溶性活性磷含量与对照组相比均有不同程度的下降,其中沸石与芽孢杆菌处理池塘底泥效果最好,可作为控制养殖水体可溶性活性磷含量的一种有效手段。

参考文献:

- [1] Maine M, Hammerly J, Leguizamon M, et al. Influence of the pH and redox potential on phosphate activity in the Parana Medial system [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228: 83-90.
- [2] Jensen H, Kristensen P, Jeppesen E, et al. Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 235/236: 731-743.
- [3] Fu Y, Zhou Y, Li J. Sequential fractionation of reactive phosphorus in the sediment of a shallow eutrophic lake Donghu lake [J]. *Environ Sci*, 2000, 12(1): 57-62.
- [4] Psenner R, Boström B, Dinka M, et al. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment[J]. *Arch Hydrobiol Beih*, 1998, 30: 98-110.
- [5] De Groot C, Golterman H. Sequential fractionation of sediment phosphate[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 192: 143-148.
- [6] Pardo P, López-Sánchez J, Rauret G. Characterization, validation and comparison of three methods for the extraction of phosphate from sediments[J]. *Anal Chim Acta*, 1998, 376: 183-195.
- [7] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in lake Hiidenvesi (northern Finland)[J]. *Water Research*, 2003, 37: 4468-4474.
- [8] Faber A, Dauta A Q A, Baldy V. Relation between algal available phosphate in the sediments of the river Garonne and chemically determined phosphate fraction[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 335: 43-48.
- [9] 朱广伟, 秦伯强, 高 光. 浅水湖泊沉积释放的重要因子——铁和

- 水动力[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):762-764.
- ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Hydrodynamics and iron: the key factors affecting resuspension of phosphorus from shallow lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):762-764.
- [10] Perkins R G, G J C. Underwood. The potential for phosphorus release across the sediment-water interface in an eutrophic reservoir dosed with ferric sulphate[J]. *Water Research*, 2001, 35: 1399-1406.
- [11] 丁升艳, 陈安国, 阎祥洲. 沸石净化养殖水体的研究进展[J]. 家畜生态, 2004, 25(4): 183-186.
- DING Sheng-yan, CHEN An-guo, YAN Xiang-zhou. Progress of applying zeolite in purifying culture water body [J]. *Ecology of Domestic Animal*, 2004, 25(4): 183-186.
- [12] 王天元, 宋雅君, 滕鹏起. 土壤脲酶及脲酶抑制剂[J]. 化学工程师, 2004, 107 (8):22-23.
- WANG Tian-yuan, SONG Ya-jun, TENG Peng-qi. The urease of the soil and the inhibitor of urease[J]. *Chemical Engineer*, 2004, 107 (8): 22-23.
- [13] 李卓佳, 张 庆, 陈康德. 复合微生物在水产池塘养殖中的应用[J]. 饲料研究, 1999(1):5-8.
- LI Zhuo-jia, ZHANG Qing, CHEN Kang-de. The application of complex microorganisms in aquaculture[J]. *Feed Research*, 1999(1):5-8.
- [14] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法 [J]. 土壤, 1990, 22(2):101-103.
- GU Yi-chu, JIANG Bo-fan. Inorganic phosphorus classification method of calcareous soil[J]. *Soil*, 1990, 22(2):101-103.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 175-179.
- LU Ru-kun. Soil agriculture chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 1999: 420-450.
- [16] Rent Gachter, Joseph S. Meyer. The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253: 103-121.