

不同土地利用方式下水塘底泥氮磷和重金属的积累及释放特性

章明奎, 王 浩, 郑顺安

(浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029)

摘 要: 为了解不同土地利用方式下水塘底泥污染物的积累与释放特性及对水塘水质的可能影响, 采用底泥全量化学分析、间隙水水质分析、水可溶性组分分析和水柱培养试验等综合方法研究了 4 个具不同土地利用特点的小型水塘底泥中氮磷和重金属等污染物的垂直分布规律及其释放特点。结果表明, 不同土地利用方式下水塘底泥中氮、磷和重金属含量有较大的差异, 底泥中全 P 和全 N 含量: 水产养殖区 > 工业生活混杂区 > 生活区 > 农业区; 底泥中重金属含量: 工业生活混杂区 > 水产养殖区 > 生活区 > 农业区。底泥上层全磷、全氮、重金属全量一般高于下层, 表明近年来底泥中污染物的积累呈增加趋势。但底泥中对水质起关键作用的水溶性氮、磷和重金属浓度并不一定随底泥深度增加而下降, 间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度一般随深度而增加, 大部分底泥间隙水中磷和重金属浓度峰值出现在底泥中下层。水柱培养试验也表明, 清淤(移去底泥上层)不一定能有效改善水质。

关键词: 水塘; 土地利用方式; 污染物积累; 间隙水; 清淤

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1391-07

Accumulation and Release Potential of Some Pollutants in Pond's Mud Under Different Land Use

ZHANG Ming-kui, WANG Hao, ZHENG Shun-an

(College of Natural Resource and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310029, China)

Abstract: Various sources may contribute to the input of pollutants to river and lake sediments. Possible sources are domestic and industrial wastewaters, runoff from agricultural soils and dump sites, and from atmospheric deposition. The relative importance of these sources varies with land use. To evaluate accumulation and release potential of some pollutants in pond's mud as affected by land use, four complete mud cores (0~50 cm) were collected from four small ponds with different land use in Zhejiang province, southeast China. The cores were cut into 10 cm layers, and analyzed for their total and water-soluble P, N and heavy metals as well as chemical compositions of pore-water. The varying-depth mud was also tested for its releasing and adsorbing capacity to N and P by means of water column incubation. The difference in pollution extent of pond's mud with N, P and heavy metals was noted among four land uses. The concentration of N and P in the mud samples decreased in the order of aquaculture area > industry-resident mixed area > resident area > agricultural area, while those of heavy metals decreased in the order of industry-resident mixed area > aquaculture area > resident area > agricultural area. The concentrations of total pollutants in the mud decreased with increasing depths. However, concentrations of water-soluble N, P and heavy metals of the mud samples did not always follow the pattern. The concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in pore-water separated from the mud samples increased generally with increasing depths, and peak concentrations of P and heavy metals in pore-water occurred in varying depth where mud pH was low, suggesting that removal of top mud could not always decrease the release of pollutant from the bottom mud. Water column incubation experiment also indicated that removal of surface mud did not modify water quality significantly. In most cases, removal of surface mud increased the concentrations of P, N and heavy metals in overlaying waters, and thus resulted in further degradation of water quality.

Keywords: pond; land use; accumulation of pollutants; pore-water; dredging

收稿日期: 2007-06-14

基金项目: 浙江省自然科学基金(R306011); 国家自然科学基金资助项目(40771090)

作者简介: 章明奎(1964—), 男, 博士, 教授, 从事土壤地理与污染元素的土壤地球化学行为方面的研究。E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

在地表环境中,工业和农业活动及居民生活等产生的污染物可通过地球化学循环进入和积累在土壤与河流、湖泊和海洋的底泥中。研究表明^[1-6],土壤和底泥中污染物的浓度和垂直分布可反映环境污染的程度和污染历史,并与周围土地利用方式存在密切的关系。但目前报道的底泥中污染物的积累主要涉及的为大中型湖泊和浅海,对于广泛分布于陆地表面的小型水塘底泥中污染物的积累与土地利用之间关系的研究较少;而且,目前对湖泊底泥污染物的研究偏重于全量分析^[7-11],对影响水质的有效态污染物的研究相对较少^[12],这在一定程度上影响了对底泥中污染物积累与水质关系的认识。近年来,为了防止水体的富营养化,人们采取了“外控内除”的方法加以治理。“外控”主要通过建设截污工程控制外源性营养物质的输入,而“内除”主要去除湖泊系统中的营养物质。由于湖泊底泥表层全氮、全磷的浓度一般高于深层底泥,因此人们常认为疏浚(移去)上层富含养分的底层可减轻湖泊的富营养化。但许多湖泊实施疏浚工程后并没有达到预期效果,部分湖泊养分反呈增加的趋势^[13-16],这可能是移去底泥顶部反而增加了底泥中某些污染物的释放有关。为了解水塘底泥中污染物积累与土地利用的关系,了解清淤(移去底泥上层)对地表水水质的影响,本文选择了浙东4个具相同地球化学背景但土地利用方式不同的小型水塘,分析测定了不同土地利用方式下水塘底泥中N、P和重金属积累和垂直分布特征,应用试验模拟方法研究了清淤对水塘水质的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

研究选择的4个具不同土地利用特征的小型水塘分布于浙江省绍兴平原。研究区地处水网平原,4个水塘周围土壤均为由河湖相沉积物发育的水稻土,土壤和水塘的元素地球化学背景相似,有很好的可比性,目前水塘的底泥化学组成的差异主要与周围土地利用方式不同有关。研究选择的土地利用方式分别为水产养殖区、居民生活区、工业与生活混杂区和农业区,其水面面积分别约为1250、700、900和450 m²,最大平均水深(水满时)分别为1.80、1.45、1.60和2.30 m。水产养殖区的水塘为一淡水鱼养殖水塘,已有13年水产养殖历史,采用人工饲料养殖;居民生活区的水塘位于一村庄边,受到该村庄生活污水及村庄地表

径流的污染;工业与生活混杂区的水塘一边为居民生活区,另一边为一五金加工厂,受到生活污水和工厂地表排水的双重污染;农业区的水塘四周为农田,种植蔬菜和水稻,稻田主要施用化学肥料,而蔬菜地同时施用化学肥料和有机肥料。底泥样采于塘水较浅的秋季,用一特制的直径为9.5 cm、长度为110 cm的PVC管采集,每一水塘各设置3个采集点。为便于样品采集后分离样品,PVC管事先沿最大直径方向锯为两半,锯口磨光,使两半相合时密缝,采样时两半用金属片固定。底泥采样深度为0~50 cm,为了保证0~50 cm的样品能被采集,实际采集时深度约60 cm。样品采集后,封住PVC管上下端,外用塑料袋套封竖直带回实验室。采集底泥同时,采集塘水样,供试验和分析。

1.2 样品处理

底泥样带回实验室后,立即按深度分为0~10、10~20、20~30、30~40和40~50 cm样,每一层段样分为3份,一份室内风干,供氮、磷和重金属全量和pH分析;一份立即用离心机分离间隙水样,水样过滤后测定可溶性磷、NH₄-N、NO₃-N和重金属浓度;另一份用保持湿润供水柱试验和水溶性物质的提取。

1.3 水柱试验

为了了解不同土地利用下水塘的不同深度底泥N、P和重金属水体的释放潜力及不同深度底泥对进入水体中的N和P的固定(消解)能力,进行了以下2个水柱试验。释放与固定(消解)水柱试验均在直径为6.5 cm的沉降筒中进行。释放试验:取上述采集的不同土地利用方式下水塘的分层(不同深度)底泥湿样各称取150 g(底泥的基本理化性状见表1),置于沉降筒底部,小心加入相应的水塘的水样20 cm(尽量不扰动底泥,水质见表2)。沉降筒置于温度为(25±3)℃的阴凉房间内,除操作外,保持室内处于黑暗环境。试验重复3次。每天小心搅动上层水(10 cm)1次,试验2个月后,取上层水样分析N、P和重金属。释放试验结束后,在相同沉降筒中进行固定(消解)水柱试验,方法如下:根据以上试验测得的水柱中P、NH₄-N和NO₃-N的浓度,在每一水柱中补充加入适量的P、NH₄-N和NO₃-N和相应的塘水,使水层高度达到20 cm,水层中P、NH₄-N和NO₃-N的初始浓度分别为5、20和20 mg·L⁻¹(此浓度大致与文献报道的地表径流中P、NH₄-N和NO₃-N的较高浓度相当)^[17],试验重复3次。每天小心搅动上层水(10 cm)1次。试验2个月后,取上层水样观察分析上层水中N、P浓度的变化。

1.4 分析方法

采集的底泥样经室内风干、过 2 mm 土筛后,各取约 50 g 样品,进一步磨细过 0.15 mm 塑料土筛,供全量测定。底泥中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 分析采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4\text{--HF}$ 三酸消化^[18],用石墨炉-原子吸收光谱法测定。底泥 pH 全磷和全氮分别用 pH 计、钼兰比色法和硼酸滴定法测定^[19]。水溶性物质用去离子水提取(土水比为 1:10;振荡提取时间为 4 h)。水溶性 P、 $\text{NH}_4\text{--N}$ 和 $\text{NO}_3\text{--N}$ 分别用钼兰比色法、靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定^[19]。试验所用的器具均经稀酸浸泡清洗。统计分析在 SAS 软件上进行。

2 结果与讨论

2.1 底泥中污染物质的垂直分布

底泥化学分析表明,研究的 4 个水塘的底泥均有不同程度的污染(表 1)。除农业区底泥呈中性外,其他水塘的底泥已呈微酸性。底泥全 P 和全 N 含量一般是水产养殖区>工业和生活混杂区>生活区>农业区。工业生活混杂区水塘底泥重金属最为明显,其底泥中铅、铜、锌和镉浓度均达到较高的水平;水产养殖区底泥重金属污染主要为铜、锌和镉的污染为主;生

活区水塘底泥中的 4 种重金属也都有一定程度的污染,但污染程度要小于工业生活混杂区;农业区水塘底泥中重金属污染相对较轻,主要为铜、锌和镉污染。工业和生活混杂区水塘底泥中重金属污染显然与周围分布有五金加工厂、有含较高浓度重金属的地表径流和含较高重金属的粉尘排放有关,重金属可通过地表径流和粉尘沉降进入水塘有关;水产养殖区底泥中铜、锌和镉的污染可能是由饲料和每年对水塘底泥消毒的杀虫剂引入的;生活区水塘底泥中重金属的积累可能与日常生活用品包含重金属元素和居民交通污染等有关;而农业区水塘底泥的重金属污染主要与化肥、农药的施用有关,农业区水塘周围蔬菜地常施用大量的有机肥可能也是水塘底泥中重金属的来源之一。从重金属在底泥的剖面分布可知,磷、氮和重金属的积累一般呈自底部向上增加的特点,这表明近年来底泥中 P、N 和重金属随时间呈增加趋势,这与文献报道的一致^[2]。

2.2 水塘水质

水塘水样的分析也表明,4 个水塘水质已遭 P、N 和重金属不同程度的污染(表 2)。P 和 N 的污染程度:工业生活混杂区>水产养殖区>生活区>农业区;

表 1 不同水塘底泥中氮、磷和重金属全量的垂直分布特点

Table 1 Vertical distribution of N,P and heavy metals in mud from different ponds

样点号	土地利用	采样深度/ cm	pH	全 P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	水产养殖区	0~10	6.28 cd	2.13 a	5.89 a	36.4 f	153.6 c	267.1 c	1.17 e
		10~20	6.17 d	1.76 b	4.71 c	27.3 g	137.8 cd	277.3 c	1.86 d
		20~30	5.94 e	1.85 b	4.54 c	29.6 g	143.9 c	217.6 d	0.78 h
		30~40	6.23 cd	1.58 c	3.66 f	18.3 h	116.8 d	168.6 e	0.56 h
		40~50	6.46 c	1.61 c	3.21 g	14.4 h	91.6	46.3 ij	0.47 i
2	生活区	0~10	6.17 d	1.53 c	4.17 d	63.3 d	76.3 fg	94.3 f	0.78 h
		10~20	6.23 cd	1.58 c	3.86 f	71.8 d	89.8 f	83.8 f	0.96 e
		20~30	6.06 d	1.42 cd	3.14 g	46.3 e	63.8 g	93.6 f	0.71 hi
		30~40	6.36 c	1.36 d	2.68 h	79.3 d	66.7 g	80.3 f	0.78 h
		40~50	6.31 c	1.03 e	1.97 j	66.4d e	70.6 g	56.6 i	0.57 i
3	工业生活混杂区	0~10	6.08 d	1.78 b	5.11 b	463.7 a	263.6 a	397.3 b	5.68 a
		10~20	5.43 f	1.63 c	4.28 d	551.8 a	248.1 a	411.4 b	6.14 a
		20~30	4.17 f	1.66 c	4.23 d	367.4 c	203.6 b	467.8 a	3.76 b
		30~40	4.66 g	1.43 d	3.12 g	423.6 b	138.8 cd	263.4 c	3.22 c
		40~50	4.82 g	1.28 d	3.29 g	328.7 c	155.6 c	186.6 de	4.12 b
4	农业区	0~10	7.12 b	1.46 cd	2.17 j	27.3 g	56.7 h	71.3 fi	0.47 i
		10~20	7.08 b	1.27 d	1.68 k	38.6 f	49.3 hi	54.9 i	0.26 j
		20~30	7.32 a	1.08 e	1.09 l	22.4 g	51.6 hi	57.6 i	0.41 i
		30~40	7.18 b	1.13 e	1.31 l	24.6 g	40.3 i	53.3 i	0.22 j
		40~50	7.43 a	0.86 f	0.98 l	27.4 g	47.7 hi	41.4 j	0.25 j

注:表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

重金属的污染程度以工业生活混杂区最大,其次为水产养殖区和生活区,农业区的污染相对较小。水产养殖区、工业生活混杂区、生活区、农业区水塘中 P 浓度分别达到地表水Ⅳ、Ⅳ、劣Ⅴ和Ⅲ类的水质标准(GB 3838—2002);水产养殖区、工业生活混杂区、生活区、农业区水塘中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度分别达到地表水劣Ⅴ、Ⅴ、劣Ⅴ和Ⅲ类水的标准(GB 3838—2002)。

2.3 底泥间隙水中氮、磷和重金属的垂直分布

表 3 可知,底泥间隙水中氮、磷和重金属浓度均达到了较高的水平,间隙水中氮、磷和重金属浓度明显高于采集底泥相应水塘塘水中氮、磷和重金属浓度。间隙水中氮、磷和重金属浓度的大小与底泥中污染物积累、pH、氧化还原电位等因素有关,涉及吸附-解吸、溶解-沉淀、氧化-还原及络合-解离等化学过程。4 个水塘底泥间隙水中氮、磷和重金属浓度一般以工业生活混杂区最高,这可能与该水塘底泥中污染物含量较高且 pH 较低有关。较低的 pH 值可能与厌氧环境下有机质降解产生的硫(S)在一定条件下重新氧化后产生酸性物质有关^[2]。水产养殖区和生活区底泥的间隙水中氮、磷和重金属浓度也达到较高水平,而农业区的底泥间隙水中氮、磷和重金属相对较低。底泥中全镉含量虽然较其他重金属低,但间隙水中镉浓度均较高,这可能与底泥对镉的吸附较弱有关。因此,镉是较易释放的重金属,在水塘中其危害较大。与底泥中污染物的全量分布不同,除个别情况外,各水塘底泥间隙水中氮、磷和重金属的最高浓度并非出现在底泥表层,这可能与底泥表层由于与水体长期接触,大部分的水可溶性污染物已释放至水中,而残余在底泥表层中的污染物主要是一些水难溶性组分有关。而下部底泥由于远离上覆水体,水溶性物质通过扩散传输至上层水体较慢,所以有效态污染物积累较多。另外,低层底泥氧化还原电位较低,铁锰氧化物还原,也促进了与氧化物结合的磷和重金属的释放,增加了污染物的有效性,这与 He 等、张路等和范成新等^[2,20,21]的报道一致。由此可知,通过疏浚,移除底泥表

层,虽然可移去氮、磷和重金属全量较高的底泥,但即使有效态污染物较高的底泥中下层出露,反而会增加污染物向水体的释放。

2.4 不同深度底泥中污染物向水柱释放的潜力

底泥各层的水溶性污染物含量很高,最高浓度可出现在表层,也可出现在下部(表 4)。由于下层底泥常常包含较高浓度的水溶性氮、磷和重金属,表明通过疏浚,移除底泥表层,可使含较高水溶态污染物底泥的出露。

水柱试验表明,除个别情况外,与不同深度底泥平衡的水层中氮、磷和重金属浓度均达到较高水平(表 5)。水层中 P 浓度以工业生活混杂区最高,在 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,其次为生活区和水产养殖区,农业区的水层 P 浓度相对较低,这与水溶性 P 浓度的变化一致。除农业区外,水柱中水层 P 浓度的高值一般出现在与中深层底泥平衡的水层中,这进一步证明了仅去除底泥表层虽然可使污染物全量较高的底泥移去,却使水溶态氮、磷和重金属浓度较高的底泥出露,不一定能有效降低底泥 P 对水体的污染。同样,表 5 中数据也表明,与底泥平衡的水层中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的高值大多出现在一定深度的底泥中,也说明了移去表层底泥并不能有效降低向水层中释放的 N 素。

底泥向水层释放重金属以工业生活混杂区最高,与底泥平衡的水层中 4 种重金属浓度由高至低依次为:工业生活混杂区>生活区、水产养殖区>农业区。除农业区外,其他 3 个区平衡水层中重金属铅、铜和锌的最高浓度出现在较深的底泥中。除工业生活混合区较高,镉平衡浓度最高值出现在中下层底泥中外,其他 3 个区均较低。因此,在大多数情况下,去除底泥表层不一定能降低底泥向上覆水层释放重金属的通量。

水柱培养试验表明,在水层中加入 5、20 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 P、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$,培养 2 个月后,水层中 N 和 P 均有一定程度的下降(表 6)。但不同水塘和底泥深度 N 和 P 下降程度有较大的变化。表 6 中数值越高,说明下降程度越小。而高值一般出现在底泥中

表 2 不同水塘的水质
Table 2 Water quality of the tested ponds

土地利用	P/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Cu/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Zn/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Cd/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
水产养殖区	0.26b	2.65b	0.58b	3b	59a	63b	2b	7.15b
生活区	0.21bc	1.88c	0.34c	7b	21b	36c	0b	7.34b
工业生活混杂区	0.53a	3.58a	2.34a	21a	49a	117a	9a	6.54c
农业区	0.17c	0.94d	0.28c	4b	12b	14d	0b	8.13a

注:表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

表 3 不同土地利用方式下水塘底泥间隙水中可溶性氮、磷和重金属的垂直分布

Table 3 Vertical distributions of dissolved N, P and heavy metals in mud pore-water from different ponds

样点号	土地利用	采样深度/cm	pH	P/mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/mg·L ⁻¹	Fe/mg·L ⁻¹	Pb/μg·L ⁻¹	Cu/μg·L ⁻¹	Zn/μg·L ⁻¹	Cd/μg·L ⁻¹
1	水产养殖区	0~10	6.28cd	0.63f	8.3e	0.4c	10d	228c	9c	179e
		10~20	6.17d	1.13e	17.6cd	2.2bc	9d	146d	14c	276d
		20~30	5.94de	2.46ab	36.3ab	6.8a	16cd	186cd	27b	324cd
		30~40	6.23cd	1.67c	32.6b	7.6a	12d	79e	11c	127ef
		40~50	6.46c	1.32d	38.6ab	9.3a	9d	54ef	8cd	16i
2	生活区	0~10	6.17d	0.44g	6.3ef	0.2c	23c	74e	8cd	87g
		10~20	6.23cd	1.12e	12.2d	1.8bc	36c	68e	7cd	76g
		20~30	6.06d	2.76a	28.6bc	5.5a	38c	56ef	12c	136ef
		30~40	6.36c	1.34d	37.7ab	6.3a	17cd	44f	6cd	103fg
		40~50	6.31c	0.76f	41.3a	7.2a	13d	32fg	6cd	67g
3	工业生活混杂区	0~10	6.08de	1.13e	13.6d	0.5c	67c	126d	31b	413c
		10~20	5.43f	0.96ef	28.3bc	3.7ab	136b	277cd	27b	367c
		20~30	4.17h	0.78f	22.6c	6.7a	248a	382b	73a	693a
		30~40	4.66g	2.23b	31.4ab	7.6a	246a	493a	67a	546b
		40~50	4.82g	1.17e	44.8a	6.9a	76c	177cd	38b	227d
4	农业区	0~10	7.12b	0.66f	4.3f	0.2c	11d	23g	7cd	29h
		10~20	7.08b	0.74f	9.4e	1.3bc	8de	17gh	5cd	34h
		20~30	7.32a	0.58fg	8.7e	2.8b	7de	12h	4cd	13i
		30~40	7.18ab	0.46g	21.8c	4.6ab	4e	14h	6cd	17i
		40~50	7.43a	0.51g	20.3c	5.4a	6de	11h	2d	10i

注:表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

表 4 不同水塘底泥水溶性氮、磷和重金属的垂直分布

Table 4 Vertical distributions of water soluble N, P and heavy metals in mud from different ponds

样点号	土地利用	采样深度/cm	NH ₄ -N/mg·kg ⁻¹	P/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹
1	水产养殖区	0~10	11.7c	27.6a	0.13de	1.37c	3.66c	0.21c
		10~20	10.3c	22.6ab	0.10e	1.06d	5.48b	0.17cd
		20~30	19.4b	21.3b	0.08e	1.58c	5.77b	0.20c
		30~40	18.6b	16.3c	0.06e	0.76e	3.21c	0.15cd
		40~50	14.4bc	13.6cd	0.09e	0.54e	0.78e	0.12d
2	生活区	0~10	12.3c	22.4bab	0.34c	0.46ef	1.23d	0.13d
		10~20	10.4c	23.6ab	0.29c	0.42f	1.11d	0.19c
		20~30	19.3b	20.4bc	0.36c	0.69e	0.94de	0.23c
		30~40	22.4ab	11.4d	0.27c	0.36f	1.23d	0.20c
		40~50	16.2bc	9.8d	0.19d	0.32f	0.76e	0.16cd
3	工业生活混杂区	0~10	28.8a	21.3b	2.36b	4.66b	5.77b	0.58b
		10~20	24.2ab	20.6bc	3.16b	5.89ab	6.86b	0.67b
		20~30	20.6b	24.4ab	6.46a	8.96a	10.42a	0.94a
		30~40	12.3bc	22.2ab	5.77a	6.23ab	8.66ab	0.91a
		40~50	8.7cd	14.2c	4.59ab	5.76ab	7.43ab	0.77ab
4	农业区	0~10	12.2bc	15.3c	0.24cd	0.36f	0.56ef	0.08de
		10~20	6.3d	10.6d	0.21cd	0.27fg	0.43f	0.06de
		20~30	7.9cd	9.7d	0.23cd	0.21g	0.23gf	0.09de
		30~40	4.8d	12.2cd	0.16de	0.24fg	0.36f	0.04e
		40~50	5.3d	5.3e	0.09e	0.16g	0.17g	0.02e

注:表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

表 5 不同深度底泥水柱试验中水体中可溶性氮、磷和重金属的浓度

Table 5 Vertical changes of release of N, P and heavy metals to water from mud as a function of the depth

样点号	土地利用	采样深度/cm	P/mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	Pb/μg·L ⁻¹	Cu/μg·L ⁻¹	Zn/μg·L ⁻¹	Cd/μg·L ⁻¹
1	水产养殖区	0~10	0.31cd	2.44b	0.67ef	5d	53c	49de	1c
		10~20	0.39c	2.14bc	1.23d	3d	42cd	63d	0c
		20~30	0.34cd	3.67a	0.86e	4d	76c	71d	0c
		30~40	0.22d	3.44a	1.36cd	2d	43cd	42e	0c
		40~50	0.19df	2.18bc	0.76e	3d	36cd	31e	0c
2	生活区	0~10	0.25d	1.91cd	0.39f	6d	26d	41e	0c
		10~20	0.48bc	1.87cd	0.87e	5d	27d	42e	0c
		20~30	0.39c	2.34bc	1.68c	5d	53c	81d	2c
		30~40	0.20d	2.96ab	0.64ef	3d	31d	52de	2c
		40~50	0.18df	1.77d	0.27fg	2d	22d	36e	1c
3	工业生活混杂区	0~10	0.59b	3.12ab	1.94bc	18c	54c	136c	8b
		10~20	0.44bc	2.68b	3.48a	31b	76c	144c	11b
		20~30	0.86a	2.11bc	2.76b	79a	158a	267a	23a
		30~40	0.71ab	1.94cd	2.14bc	72a	123b	208b	25a
		40~50	0.64b	0.86g	1.54c	63a	81c	184b	13b
4	农业区	0~10	0.22d	1.08f	0.37f	3d	15e	17f	0c
		10~20	0.18df	0.96fg	0.54ef	4d	10e	14fg	0c
		20~30	0.14f	0.54gh	0.48f	3d	12e	13fg	2c
		30~40	0.16df	0.38h	0.27fg	2d	14e	11g	0c
		40~50	0.10f	0.46h	0.13g	2d	11e	8g	1c

注:表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

下层,表明底泥对上层水中 N 和 P 的固定(消解)能力并不低于下层的底泥,这也证明了去除表层底泥并非能有效地降低水塘水层中氮、磷浓度。因此,在某些水塘,移去底泥表层是不可取的。

3 结论

(1)水塘底泥中氮、磷和重金属的积累深受土地利用方式的影响,全 P 和全 N 含量是水产养殖区>工业生活混杂区>生活区>农业区;重金属污染程度为工业生活混杂区>水产养殖区>生活区>农业区。

(2)底泥表层全磷、全氮、重金属全量一般高于深层底泥,表明近年来底泥中污染物的积累呈增加趋势。但水溶性 N、P 和重金属的浓度并不一定随底泥深度而下降,其中,间隙水中 NH₄-N 的浓度一般随深度而增加。因此,当移去含 N、P 和重金属较高的底泥顶部时,可能会导致水溶性污染物较高土层的出露,反而会增加底泥向水体释放重金属和氮、磷。

(3)在进行水塘清淤前,应重视底泥中有效态(特别是水溶性)污染物垂直分布特点的分析,以预测清淤可能引起的对水质的影响。

参考文献:

- [1] Boszke L, Kowalski A. Spatial distribution of mercury in bottom sediments and soils from Poznan, Poland[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, 15:211-218.
- [2] He Z L, Zhang M K, Stoffella P J, et al. Vertical distribution and water solubility of phosphorus and heavy metals in sediments of the St. Lucie Estuary, South Florida, USA[J]. *Environmental Geology*, 2006, 50:250-260.
- [3] Kronvang B, Laubel A, Larsen S E, et al. Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 494:93-101.
- [4] Norville W. Spatial distribution of heavy metals in sediments from the Gulf of Paria, Trinidad[J]. *Revista De Biologia Tropical*, 2005, 53:33-40.
- [5] Venne L S, Cobb G P, Coimbatore G, et al. Influence of land use on metal concentrations in playa sediments and amphibians in the Southern High Plains[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144:112-118.
- [6] Zhang M K, He Z L, Stoffella P J, et al. Concentrations and solubility of heavy metals in muck sediments from the St. Lucie Estuary[J]. *Environmental Geology*, 2002, 44:1-7.
- [7] Christensen V G, Juracek K E. Variability of metals in reservoir sediment from two adjacent basins in the central Great Plains [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40 (4-5): 470-481.
- [8] Han F X, Hargreaves J A, Kingery W L, et al. Accumulation, distribution,

表 6 外加磷、氮培养对底泥水柱中氮、磷浓度的影响

Table 6 Effects of added N and P on N, P concentrations of water columns incubated with various depth mud

样点号	土地利用	采样深度/ cm	P/ mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/ mg·L ⁻¹	NO ₃ -N/ mg·L ⁻¹
1	水产养殖区	0~10	0.82de	4.72c	6.23bc
		10~20	1.23cd	4.78c	9.46b
		20~30	1.17d	6.17b	11.34ab
		30~40	0.63e	8.35ab	10.78ab
		40~50	0.56e	7.12b	12.23ab
2	生活区	0~10	0.77e	5.36bc	5.46c
		10~20	1.63bc	7.14b	8.44b
		20~30	1.42c	6.78b	9.60b
		30~40	0.67e	9.14ab	8.59b
		40~50	0.52e	6.35b	13.22a
3	工业生活混杂区	0~10	1.89bc	7.13b	8.18b
		10~20	1.55c	9.65a	13.22a
		20~30	2.53a	10.13a	12.76ab
		30~40	2.16b	8.66ab	13.67a
		40~50	2.23ab	8.54ab	15.34a
4	农业区	0~10	0.54e	4.36c	5.13c
		10~20	0.47e	5.79bc	7.89b
		20~30	0.51e	5.12c	11.64ab
		30~40	0.55e	5.98bc	13.22a
		40~50	0.56e	6.72bc	14.63a

注：氮磷的加入量:P 为 5 mg·L⁻¹;NH₄-N 为 20 mg·L⁻¹;NO₃-N 为 20 mg·L⁻¹;表中同一列中平均值后英文字母相同者差异不显著。

and toxicity of copper in sediments of catfish ponds receiving periodic copper sulfate applications [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30 (3): 912-919.

- [9] Gocht T, Moldenhauer K M, Puttmann W. Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and heavy metals in floodplain sediments from the Rhine River (Hessisches Ried, Germany) [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16 (15): 1707-1721.
- [10] Gillis A C, Birch G F. Investigation of anthropogenic trace metals in sediments of Lake Illawarra, New South Wales[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2006, 53 (4): 523-539.
- [11] Lavilla I, Filgueiras A V, Valverde F, et al. Depth profile of trace elements in a sediment core of a high-altitude lake deposit at the Pyrenees, Spain [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2006, 172 (1-4): 273-293.
- [12] WANG H, WANG C X, WANG Z J, et al. Fractionation of heavy met-

als in surface sediments of Taihu Lake, East China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26 (2-3): 303-309.

- [13] 朱敏, 王国祥, 王建, 等. 南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2004, 4(2): 66-69.
- ZHU Min, WANG Guo-xiang, WANG Jian, et al. Comparative analysis of changes of pollutants in sediment in nanjing Xuanwu Lake before and after sediment dredging [J]. *Journal of Nanjiang Normal University (Engineering and Technology)*, 2004, 4(2): 66-69.
- [14] 徐旌. 富营养化湖泊治理及湖泊管理昆明国际会议综述[J]. 云南地理环境研究, 2002, 14(2): 94-98.
- XU Jing. Overview of the Kunming international workshop on the restoration and management of eutrophicated lakes [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2002, 14(2): 94-98.
- [15] 陆子川. 湖泊底泥挖掘可能导致水体氮磷平衡破坏的研究[J]. 中国环境监测, 2001, 17(2): 40-43.
- LU Zi-chuan. Study on digging up the lake sediments which may lead to destroying the balance of nitrogen and phosphorus in water[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2001, 17(2): 40-43.
- [16] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗?[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 269-279.
- PU Pei-min, WANG Guo-xiang, HU Chun-hua, et al. Can we control lake eutrophication by dredging?[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12 (3): 269-279.
- [17] Zhang M K, Wang L P, He Z L. Spatial and temporal variation of nitrogen exported by runoff from sandy agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9): 1086-1092.
- [18] Hossner L R. Dissolution for total elemental analysis[A].// Sparks D L (ed.), *Methods of soil analysis, part 3: chemical methods*[C]. SSSA and ASA, Madison, Wisconsin, USA, 1996: 49-64.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978. 132-502.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, *Soil physical and chemical analysis*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1978. 132-502.
- [20] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 556-560.
- ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, WANG Jian-jun, et al. Comparison of physicochemical characters of pore water in grass/algae type zone in Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5): 556-560.
- [21] 范成新, 杨元龙, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 356-366.
- FAN Cheng-xin, YANG Yuan-long, ZHANG Lu. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(4): 356-366.