

广东省不同水库底泥理化性质对内源氮磷释放影响

魏岚¹, 刘传平², 邹献中^{1*}, 杨少海¹, 陈勇¹, 孙丽丽¹, 巫金龙¹, 宁建凤¹

1. 广东省农业科学院土壤肥料研究所, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州510650

摘要: 采用分级浸取分离方法, 分析了广东省 10 个典型水库底泥的氮磷营养形态分布和污染状况; 并通过模拟覆水试验, 研究了不同水库底泥氮磷形态及理化性质对内源氮磷释放的影响。结果表明: 广东省 10 个水库底泥氮磷污染较为严重, 全氮含量为 0.33~3.31 g·kg⁻¹, 平均值为 1.70 g·kg⁻¹; 全磷含量为 0.14~2.63 g·kg⁻¹, 平均值为 1.31 g·kg⁻¹。底泥氮磷主要以可转化态形式存在, 可转化态氮磷含量占总氮磷含量百分比分别为 41.2%~71.4% 和 53.6%~93.2%。底泥内源氮磷的释放主要受氮磷的赋存形态和含量的影响, 水库底泥总氮的释放量与离子交换态氮 (IEF-N)、碳酸盐结合态氮 (WAEF-N)、铁锰氧化物结合态氮 (SAEF-N) 呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.931、0.814、0.807; 总磷的释放量与碳酸盐结合态磷 (WAEF-P)、铁锰氧化物结合态磷 (SAEF-P) 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.960、0.957; 这几种氮磷形态是上覆水体中氮磷的重要来源。同时底泥内源氮磷释放还与底泥机械组成有关, 其中总氮和总磷释放量与底泥黏粒质量分数呈显著正相关, 相关系数分别为 0.738、0.638; 而总氮的释放量与底泥砂粒质量分数呈显著负相关, 相关系数为-0.685。这可能与可转化态氮磷更多的分布在细粒级底泥中有关, 细颗粒底泥氮磷释放是上覆水体氮磷的主要来源。

关键词: 水库底泥; 内源氮磷释放; 底泥理化性质; 氮磷形态

中图分类号: X131.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 07-1304-07

水体富营养化是目前世界范围内面临的主要水环境问题, 在控制外源输入情况下, 底泥的内源氮磷释放与水体富营养化之间的关系已引起人们广泛关注^[1-3]。底泥是有机物质的重要蓄积库和营养盐再生的主要场所, 对水体中的各类污染物质都具有较强的释放和吸附作用, 其对上覆水中营养元素的“汇/源”效应, 对水体富营养化有着重要的影响^[3-5]。

广东省共有大中型水库 321 宗, 全省有 1/3 的用水量由水库供给, 特别是在近些年来需水迅速增加、而干旱趋势加重的情况下, 水库调蓄供水更显得尤为重要。但目前广东省水库水质日趋下降, 并有明显的富营养化倾向, 水库富营养化直接影响到水库的正常功能。2000 年, 对广东省 19 座水库进行了营养现状和浮游植物种群的调查研究, 发现多数水库属于中富营养水平^[6]。随着富营养化问题的日益突出, 水库外源污染的控制不断得到加强, 但是内源污染的释放依旧阻碍着水质恢复的进程, 而且水库内源污染物的释出, 类似于非点源污染, 释放面积大, 释放时间、途径和释放量具有不确定性^[3-4]。

内源营养盐释放由国外学者首先提出来, 而其研究也是多在浅水湖泊或者深水湖中开展^[5]。同时

国内外的研究主要集中在影响内源营养盐释放的多种外界因素, 如底泥-水界面浓度梯度、溶解氧含量、温度、pH 值、以及水体扰动等^[7]。但是对于不同水库其底泥自身性质与氮磷释放的关系的研究较少。研究不同水库底泥氮磷的静态释放, 了解其在沉积物-水的迁移规律, 以及底泥本身性质与氮磷释放的相关关系, 对于控制沉积物中氮磷向水体释放有着重要意义^[3-5]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据我们前期初步研究结果^[8]筛选了广东省 10 个大中型水库为研究对象: 惠来石榴潭水库 (S1), 揭西龙颈上水库 (S2), 陆丰三溪水库 (S3), 河源赤竹径水库 (S4), 东莞东城同沙水库 (S5), 肇庆德庆黄铜降水库 (S6), 肇庆高要市金龙高水库 (S7), 清远英德空子水库 (S8), 韶关西牛潭水库 (S9), 增城增塘水库 (S10)。用抓斗式采样器采集表层 0~10 cm 底泥备用。

1.2 试验设计

将 10 个水库底泥样品晾干后混匀过筛 (60 目)。分别往模拟容器中装入水库的风干过筛底泥 100 g, 加入不含氮、磷的蒸馏水 2 000 mL, 每组试验设计 3 个平行。试验开始时对底泥和上覆水进行了充分

基金项目: 广东省科技计划项目 (2010B030900011); 广东省科技计划项目 (2011B030800001)

作者简介: 魏岚 (1981 年生), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事环境改良与修复研究。E-mail: weilangp@yahoo.com.cn

*通信作者: 邹献中。E-mail: patroonkiller@sina.com

收稿日期: 2012-06-12

搅拌和混合，然后静置（本实验选取 18 cm×18 cm×27 cm 规格玻璃缸作为模拟容器）。取水样时，每次取上清液 160 mL，取样后将上述原溶液补充至 2 000 mL，取样前对上覆水体进行搅拌均匀，静置后取上清液。第 1 次取样在试验开始 12 h 后进行，第 2 次取样在 24 h 后进行，以后每 24 h 取样 1 次，一共采集 11 次。

1.3 分析测试

1.3.1 水样的测定

其中总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，总磷采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法^[7]。

1.3.2 水库底泥基本理化性质测定

水库底泥的理化性质参照鲁如坤^[9]的方法。底泥 pH 测定采用 pH 计^{[9]12-14}；有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法^{[9]106-108}；土壤颗粒组成(机械组成)的测定采用比重计法^{[9]272-282}；阳离子交换量（CEC）测定用乙酸铵法^{[9]22-28}。其理化性质见表 1。

1.3.3 氮磷形态分析

准确称取 1 g 左右底泥样品，用改进的沉积物中氮磷^[10-11]分级浸取分离方法分析底泥中氮磷形态，分析程序见图1。提取液均为 60 mL，每步所得残渣都以去离子水清洗 2 次；分别得到离子交换态氮/磷（IEF-N/IEF-P）、碳酸盐结合态氮 / 磷（WAEF-N/WAEF-P）、铁 锰 氧 化 态 氮 氮 / 磷（SAEF-N/SAEF-P）、有机态氮/磷(SOEF-N/SOEF-P)。将沉积物全分解得到总氮/磷(TN/TP)，将总氮/磷减去前 4 种形态氮/磷得到残渣态氮/磷（R-N/R-P）。浸取液中 NO₂⁻-N 采用重氮偶氮分光光度法测定，其中 NH₄⁺-N 用次溴酸钠氧化法氧化后测定，NO₃⁻-N 用 Zn-Cd 法还原后测定；PO₄³⁺-P 采用钼锑抗分光光度法测定；TN 采用过硫酸盐消化法测定；TP 采用 SMT 标准程序测定。

1.3.4 底泥向上覆水释放氮磷累积释放量的估算

采样前对水体进行了搅拌和混匀，因此假定水体氮磷浓度是一致的，而且假定水体对氮磷没有自

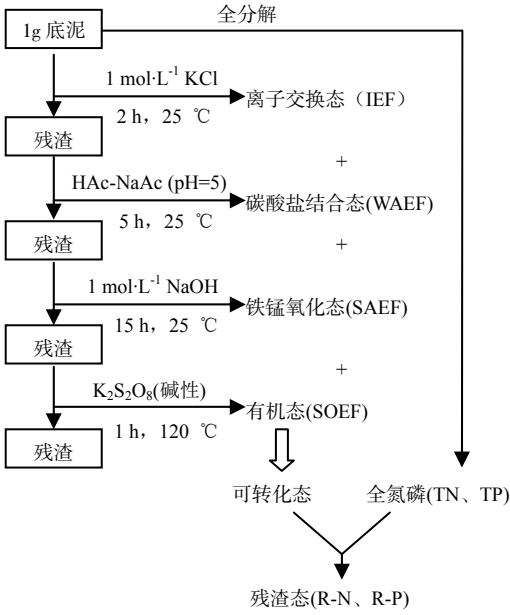


图 1 各形态氮磷分级浸提示意图

Fig.1 Sequential extraction process of nitrogen or phosphorus

净作用。其氮磷累积释放量计算公式如下：

$$S_i = \frac{V \cdot \sum_{i=1}^{n-1} C_i + V_i \cdot C_i}{W_s}$$

其中：S_i-第 i 次采样时底泥养分累积释放量，V-每次采样体积，C_i-第 i 次采样时上覆水体养分浓度，V_i-上覆水体总体积，W_s-底泥干质量。

2 结果与分析

2.1 水库底泥氮磷营养盐污染状况及形态分布

全氮、全磷含量是反应水体底泥营养盐污染状况的 2 个重要指标^[7,12]。由表 1 可知，在广东省 10 个水库采集的底泥 TN 质量分数在 0.33~3.31 g·kg⁻¹，平均值为 1.70 g·kg⁻¹，各水库底泥 TN 质量分数从大到小顺序依次为 S10>S5>S7>S4>S8>S3>S9>S1>S2>S6；TP 质量分数在 0.14~2.63 g·kg⁻¹，平均值为 1.31 g·kg⁻¹，各水库底泥全磷质量分数从大到小顺序

表 1 水库底泥性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the sediment

水库编号	pH	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	w(全磷)/(g·kg ⁻¹)	w(黏粒)/%	w(粉黏粒)/%	w(砂粒)/%	b(CEC)/(cmol·kg ⁻¹)
S1	5.28	25.0	1.50	0.14	17.0	53.0	30.0	10.1
S2	5.83	14.2	0.86	0.72	10.0	40.0	50.0	8.06
S3	5.44	12.8	1.61	0.27	13.0	58.0	31.0	8.84
S4	5.61	26.7	1.73	1.32	20.0	52.0	28.0	12.9
S5	6.04	42.4	2.71	2.63	74.0	14.0	10.0	8.84
S6	5.93	11.0	0.33	0.15	16.0	32.0	52.0	8.45
S7	5.29	13.3	1.75	1.84	30.0	40.0	30.0	8.58
S8	6.62	29.5	1.64	1.77	29.0	17.0	54.0	8.58
S9	6.24	58.0	1.52	2.05	38.0	29.0	33.0	18.1
S10	6.18	49.4	3.31	2.16	40.0	42.0	18.0	14.6

依次为 S5>S10>S9>S7>S8>S4>S2>S3>S6>S1。根据 EPA 5 大湖港口底泥分类指引^[13], 广东省 10 个水库底泥营养盐含量水平较高, 其中 S10 和 S5 水库底泥 TN、TP 质量分数均超出重污染水平 ($TN > 2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $TP > 0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); S2、S4、S7、S8、S9 水库底泥 TP 质量分数均超出重度污染水平 ($TP > 0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), S1、S3、S4、S7、S8、S9 水库底泥 TN 质量分数达到中度污染水平 ($TN > 2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} > TN > 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 只有 S6 水库底泥 TN、TP 质量分数均属于未污染水平 ($TN < 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $TP < 0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。增城增塘水库 (S10) 氮磷污染较为严重可能与近年来水库养鱼投喂大量饵料有关^[14]; 而东莞东城同沙水库 (S5) 靠近市区, 其氮磷污染可能与生活污水排放等人为活动有关^[15]。

广东省 10 个水库底泥氮磷形态分布如图 2 所示, 各形态氮的平均百分含量依次为 R-N (28.6%~58.8%, 平均为 40.3%) > SOEF-N (13.8%~41.5%, 平均为 32.9%) > IEF-P (5.3%~21.2%, 平均为 12.9%) > SAEF-N (5.3%~18.0%, 平均为 9.8%) > WAEF-N (1.2%~9.1%, 平均为 4.2%); 各形态磷的平均百分含量依次为 R-P (22.2%~39.4%, 平均为 35.3%) >

SAEF-P (16.6%~43.3%, 平均为 29.5%) > WAEF-P (13.8%~27.0%, 平均为 21.0%) > SOEF-P (2.1%~25.9%, 平均为 13.5%) > IEF-P (0.19%~1.12%, 平均为 0.61%)。沉积物中氮磷的形态是影响氮磷营养要素迁移、转化以及生态效应的重要参数。马红波等^[10]认为各形态氮磷从 IEF-到 R-与沉积物结合的牢固程度依次增加, 其中 IEF-、WAEF-、SAEF-、SOEF-态的氮磷为可转化态, 而 R-态的氮磷为不可转化态。10 个水库底泥可转化态氮含量占总氮含量百分比为 41.2%~71.4%, 平均为 59.7%; 其中以东莞东城同沙水库 (S5) 底泥可转化态氮含量最高, 为 $1935 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而肇庆德庆黄铜降水库 (S6) 底泥转化态氮含量最低, 为 $184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。10 个水库中转化态磷含量占总磷含量百分比为 53.6%~93.2%, 平均为 66.2%; 其中以增城增塘水库 (S10) 底泥可转化态磷含量最高, 为 $1594 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而惠来石榴潭水库 (S1) 底泥可转化态磷含量最低, 为 $88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 底泥中氮磷累积释放量

10 个水库底泥总氮累积释放量 (SN) 和总磷累积释放量 (SP) 的如图 3 所示, 试验初期由于底泥-水界面浓度梯度较大, 故有一个明显的释放

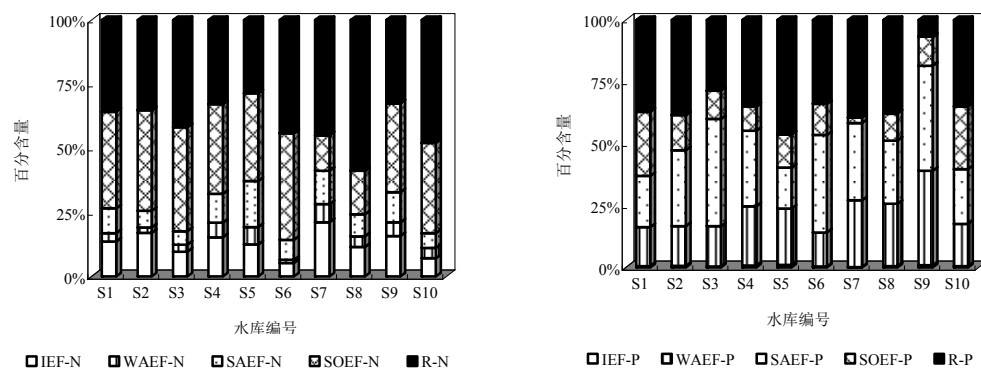


图 2 各水库底泥氮磷形态分布

Fig.2 The distribution of nitrogen and phosphorus in different reservoir sediments

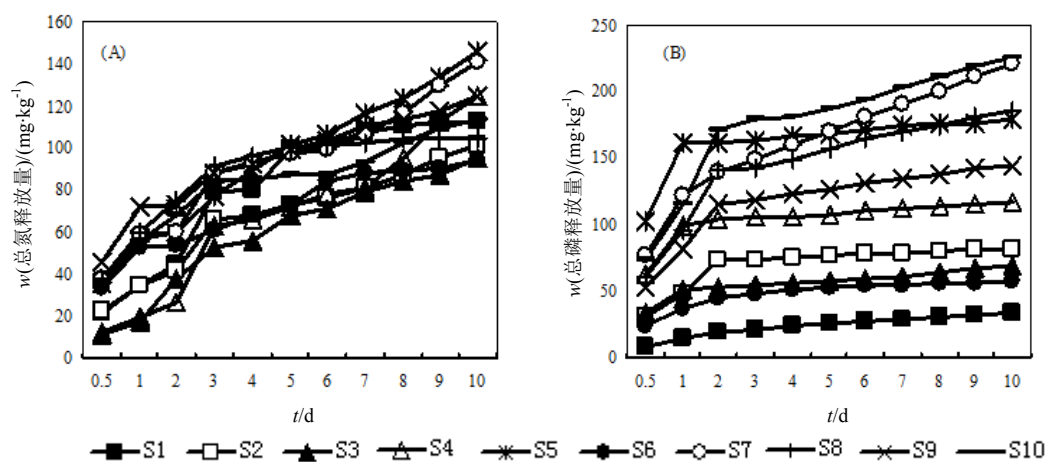


图 3 各水库底泥氮磷累积释放量

Fig.3 The amount of nitrogen and phosphorus release from different reservoir sediments

过程，随着时间的延续，底泥-水界面之间的浓度梯度变小，释放与吸附逐渐趋于动态平衡，其表现变现为3 d后上覆水中总氮和总磷的累积释放量增加速度趋于缓和。10 d时，10个水库底泥中以东莞东城同沙水库（S5）底泥总氮释放量最高，达到145.71 mg·kg⁻¹；而肇庆德庆黄铜降水库（S6）底泥总氮释放量最小，为93.75 mg·kg⁻¹。10 d时，以S增城增塘水库（10）底泥总磷释放量最高，达到226.09 mg·kg⁻¹；而惠来石榴潭水库（S1）总磷释放量最小，仅为33.13 mg·kg⁻¹。这与10个水库底泥污染情况基本一致，这说明底泥内源氮磷是水体营养盐重要来源。

2.3 底泥氮磷形态分布对内源氮磷释放量的影响

氮磷的赋存形态和含量是影响底泥内源氮磷释放的主要因素^[7,10-11]。由表2可以看出，广东省10个水库底泥SN与IEF-N、WAEF-N、SAEF-N呈极显著正相关关系（ $P<0.01$ ），相关系数分别为0.921、0.851、0.874。总磷的释放量与WAEF-P、SAEF-P

呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），相关系数分别为0.810、0.819。与总氮释放不同，IEF-P与总磷释放量并没有显著相关性（ $P>0.05$ ）（表3）。这可能是由于广东省10个水库底泥IEF-P占可转化磷百分比过小（平均为0.96%），从而对总磷释放贡献有限^[16]；而IEF-N占可转化态氮的比例较大（平均为21.8%），IEF-N是底泥中弱结合态的氮磷，易于释放，在底泥-水界面迁移转化的速率最快^[17]。无扰动和还原性条件有利于IEF-N的产生释放^[18]，因此本试验条件下IEF-N对上覆水体总氮释放量有较大的贡献，表现出极显著正相关关系。碳酸盐结合态氮磷也是易于释放的氮磷形态，其产生和分布与底泥碳酸盐含量及pH密切相关^[19]；缺氧环境下促进了底泥有机物的微生物水解产氨基酸等有机酸类，引起pH降低^[18]，进而引起底泥中碳酸盐的溶解，使吸附在碳酸盐表面氮磷释放^[16,20]。而铁锰氧化态氮磷的环境化学行为主要由底泥的氧化还原环境控制，在厌氧环境中底泥中的铁氧化物会被还原释放出Fe²⁺，不利于Fe(OOH)

表2 底泥总氮释放量与底泥氮形态及理化性质相关性

Table 2 The relationship between the total nitrogen release and nitrogen forms and basic phys-chemical properties of the sediments

	SN	IEF-N	WAEF-N	SAEF-N	SOEF-N	R-N	pH	黏粒	粉粒	砂粒	CEC	有机质
SN	1	0.921**	0.851**	0.874**	0.294	0.233	-0.103	0.738*	-0.318	-0.685*	0.217	0.426
IEF-N		1	0.860**	0.796**	0.380	0.451	-0.161	0.620	-0.136	-0.701*	0.199	0.384
WAEF-N			1	0.918**	0.651*	0.642*	0.134	0.870**	-0.346	-0.824**	0.247	0.576
SAEF-N				1	0.536	0.359	0.095	0.921**	-0.466	-0.777**	0.088	0.504
SOEF-N					1	0.684*	0.107	0.554	0.090	-0.830**	0.428	0.632
R-N						1	0.304	0.438	-0.078	-0.497	0.263	0.486
pH							1	0.398	-0.757*	0.233	0.282	0.572
黏粒								1	-0.672*	-0.671*	0.207	0.671*
粉粒									1	-0.097	-0.333	-0.501
砂粒										1	0.060	-0.395
CEC											1	0.805**
有机质												1

*显著水平 $P<0.05$ ，**显著水平 $P<0.01$ ； $n=10$

表3 底泥总磷释放量与底泥磷形态及理化性质相关性

Table 3 The relationship between the total phosphorus release and phosphorus forms and basic phys-chemical properties of the sediments

	SP	IEF-P	WAEF-P	SAEF-P	SOEF-P	R-P	pH	黏粒	粉粒	砂粒	CEC	有机质
SP	1	0.522	0.810**	0.819**	0.567	0.598	0.420	0.638*	-0.374	-0.474	0.236	0.482
IEF-P		1	0.778(**)	0.590	0.664*	0.720*	0.511	0.919**	-0.564	-0.672*	0.305	0.726*
WAEF-P			1	0.945**	0.530	0.658*	0.477	0.770**	-0.399	-0.629	0.458	0.703*
SAEF-P				1	0.491	0.504	0.434	0.656*	-0.296	-0.447	0.586	0.666*
SOEF-P					1	0.645*	0.582	0.685*	-0.545	-0.372	0.455	0.770**
R-P						1	0.305	0.605	-0.525	-0.560	-0.123	0.335
pH							1	0.398	0.233	-0.757*	0.282	0.572
黏粒								1	-0.671*	-0.672*	0.207	0.671*
粉粒									1	-0.097	-0.333	-0.501
砂粒										1	0.060	-0.395
CEC											1	0.805**
有机质												1

*显著水平 $P<0.05$ ，**显著水平 $P<0.01$ ； $n=10$

絮体的形成和吸附氮磷,从而导致内源氮磷大量释放^[4,7,10-11]。有机态氮磷是四种可转化态中释放能力最弱的。有机态氮包括蛋白质、肽、氨基酸、氨基糖、核酸、叶绿素、腐殖质等,是有效态氮的主要组成部分;主要通过物理化学过程和微生物活动等分解释放于水体^[21]。沉积物中SOEF-N主要来自水生植物的腐败分解,在缺氧条件下易于保存,氧充足及微生物活动较为活跃的沉积环境可使其矿化分解释放于水体或转化为其他形态氮是上覆水体氮的重要来源^[10,16]。SOEF-P主要为有机磷,主要包括核酸类、植素类、磷脂类,普遍存在于动植物残体内或微生物体内,有机磷必须通过微生物分解作用才能释放到水体中^[21]。本试验条件下,总氮释放量与有机态氮含量以及总量释放量与SOEF-P相关性不显著,可能主要是由于本试验条件下,微生物对底泥有机氮磷的分解作用有限,从而导致SOEF-N、SOEF-P对上覆水体氮磷释放贡献有限。

2.4 底泥理化性质对内源氮磷释放量的影响

底泥的理化性质是影响底泥内源氮磷释放的另一个主要因素^[7,10,16]。底泥pH、有机质和CEC等性质也是影响底泥氮磷释放的重要因素。由表2、表3可以看出,底泥有机质、CEC与总氮、总磷的释放量也存在一定的正相关关系,底泥pH与总氮释放量有一定的负相关关系而与总磷释放量呈正相关;但相关性均没有达到显著水平。而底泥的颗粒组成对底泥氮磷释放有重要的影响,其中总氮和总磷释放量与底泥黏粒质量分数呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.738、0.638;而总氮的释放量与底泥砂粒质量分数呈显著负相关($P<0.05$),相关系数为-0.685。这可能与不同粒级底泥中氮磷形态分布特征有关。进一步分析发现细粒级底泥组分与可转化态氮磷含量呈正相关,而粗粒级底泥组分与可转化态氮磷含量呈负相关关系。如底泥粘粒质量分数与WAEF-N、SAEF-N、IEF-P、WAEF-P呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.870、0.921、0.919、0.770,与SAEF-P、SOEF-P呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.656、0.685;而底泥砂粒质量分数与WAEF-N、SAEF-N、SOEF-N呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数分别为-0.824、-0.777、-0.830,而与IEF-N、IEF-P呈显著负相关($P<0.05$),相关系数分别为-0.701、-0.672。这与吕晓霞等^[22]的研究结果是一致的:黄海表层3种粒级沉积物中,随着沉积物粒级的由粗到细,其可转化态氮含量也越来越高,细粒级沉积物中可转化态氮含量占总可转化态氮的60%以上;因此,细粒级沉积物氮释放对上覆水体氮贡献最大^[22]。韩璐等^[23]研究表明,粒径组成与各形态磷含量均存在相

关性,细粒径与形态磷含量存在显著的正相关关系,粗粒径与形态磷存在显著的负相关关系。王圣瑞^[24]在研究五里湖沉积物时也发现各形态磷中85%以上分布在细颗粒中。因此细颗粒底泥氮磷释放是上覆水体氮磷的主要来源。

3 结论

(1)在广东省采集的10个水库底泥氮磷污染情况已较为严重,全氮质量分数为0.33~3.31g·kg⁻¹,平均值为1.70g·kg⁻¹,全磷质量分数为0.14~2.63g·kg⁻¹,平均值为1.31g·kg⁻¹;其中以增城增塘水库(S10)和东莞东城同沙水库(S5)底泥氮磷污染最为严重,TN、TP质量分数均超出重污染水平。

(2)在10d时,以东莞东城同沙水库(S5)底泥总氮累积释放量和增城增塘水库(S10)总磷累积释放量最高,分别达到145.71和226.09mg·kg⁻¹;而肇庆德庆黄铜降水库(S6)底泥总氮累积释放量和惠来石榴潭水库(S1)底泥总磷累积释放量最小,分别为93.75和33.13mg·kg⁻¹。

(3)底泥内源氮磷的释放主要受氮磷的赋存形态和含量的影响。水库底泥各形态氮磷百分含量分布分别为R-N>SOEF-N>IEF-N>SAEF-N>WAEF-N;R-P>SAEF-P>WAEF-P>SOEF-P>IEF-P。水库底泥总氮的释放量与离子交换态氮(IEF-N)、碳酸盐结合态氮(WAEF-N)、铁锰氧化物态氮(SAEF-N)呈极显著正相关关系;总磷的释放量与碳酸盐结合态磷(WAEF-P)、铁锰氧化物态(SAEF-P)呈极显著正相关;这几种氮磷是上覆水体中氮的重要来源。

(4)底泥理化性质中以粒径组成对底泥氮磷释放影响最大,其中总氮和总量释放量与底泥黏粒质量分数呈显著正相关,而总氮的释放量与底泥砂粒质量分数呈显著负相关。这可能与不同粒级底泥中氮磷形态分布特征有关,底泥粒径组成与各形态氮磷含量均存在相关性,细粒级底泥组分与可转化态氮磷含量呈正相关,而粗粒级底泥组分与可转化态氮磷含量呈负相关关系。因此细颗粒底泥氮磷释放是上覆水体氮磷的主要来源。

参考文献:

- [1] 曲久辉. 我国水体复合污染与控制[J]. 科学对社会的影响, 2000(1): 36-40.
QU Jiuhui. Chinese Water Pollution and Control[J]. Impact of Science on Society, 2000(1): 36-40.
- [2] FRIK C R. Nutrient Budget: Rational analysis of Eutrophication in a Connecticut Lake[J]. Environmental Science Technology, 1967(1): 425-428.
- [3] 金相灿, 徐南妮, 张雨田, 等. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 234-256.

- JIN Xiangcan, XU Nanni, ZHANG Yutian, et al. Sediment pollution chemical[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 234-256.
- [4] 胡雪峰, 高效江, 陈振楼. 上海市郊河流底泥氮磷释放规律的初步研究[J]. 上海环境科学, 2001, 20(2): 66-70.
- HU Xuefeng, GAO Xiaojiao, CHEN Zhenlou. Preliminary study on nitrogen and phosphorus release from the creek sediments, outskirts of Shanghai[J]. Shanghai Environmental Science, 2001, 20(2): 66-70.
- [5] MORTIMER C H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes[J]. International Journal of Ecology, 1941, 29: 280-329.
- [6] 林秋奇, 胡韧, 段舜山. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
- LIN Qiuqi, HU Ren, DUAN Shunshan. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [7] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43-46.
- JIANG Jinglong, WU Yunhai. The Factors on Release of Phosphorus from the Sediment[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(6): 43-46.
- [8] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6059-6067.
- NING Jianfeng, ZOU Xianzhong, YANG Shaohai, et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium -scaled reservoirs in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6059-6067.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- LU Rukun. Soil agriculture chemistry analysis method[M]. Beijing: Agriculture Science Press of China, 2000.
- [10] 马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 48-54.
- MA Hongbo, SONG Jinming, LÜ Xiaoxia, et al. Nitrogen forms and their functions in recycling of the Bohai Sea sediments[J]. Geochemical, 2003, 32(1): 48-54.
- [11] 李如忠, 李峰. 巢湖十五里河沉积物生物有效性氮磷分布及相关性[J]. 环境科学研究, 2011, 24(8): 873-881.
- LI Ruzhong, LI Feng. Distribution and Correlation Analysis of Bio-Available Nitrogen and Phosphorus in Sediments of Shiwuli River, Chaohu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(8): 873-881.
- [12] 聂祥, 林彰文, 顾继光, 等. 南亚热带中小型水库沉积物中磷的形态与释放特征[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 903-908.
- NIE Xiang, LIN Zhangwen, GU Jiguang, et al. Phosphorus fractions and their release from sediments of middle and small sized reservoirs for drinking water in the south of China[J]. Ecological Environment, 2008, 17(3): 903-908.
- [13] U.S. EPA. Selecting remediation techniques for contaminated sediment, EPA-823-B93-001. 1993.
- [14] 刘源烽, 秦建桥, 梁秋葵. 广州增城市增塘水库从水生生态良性循环趋向富营养化原因分析[J]. 广东化工, 2011, 38(7): 99-101.
- LIU Yuanfeng, QIN Jianqiao, LIANG Zhishen. Analysis of Aquatic Ecosystem of Zeng Tang Reservoir from Virtuous Cycle to Eutrophication[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(7): 99-101.
- [15] 黄奂彦, 曾睿, 黎晓薇, 等. 同沙水库水环境质量的模糊数学综合评价[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(1): 42-44.
- HUANG Huanyan, ZENG Rui, LI Xiaowei, et al. Fuzzy mathematics—based comprehensive evaluation of water environmental quality of Tongsha reservoir[J]. Industrial Water & Wastewater, 2011, 42(1): 42-44.
- [16] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 978-983.
- ZHU Yuanrong, ZHANG Runyu, WU Fengchang. Geochemical characteristics and influence to overlying water of nitrogen in the sediments from Dianchi Lake[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 978-983.
- [17] WANG P F, ZHAO L, WANG C, et al. Nitrogen distribution and potential mobility in sediments of three typical shallow urban lakes in China [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(10): 1511-1521.
- [18] 刘晓伟, 谢丹平, 李开明, 等. 曝气复氧对底泥氮素生物地球化学循环影响的作用机制研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1713-1719.
- LIU Xiaowei, XIE Danping, LI Kaiming, et al. Research on the impact mechanism of different aeration level on biogeochemical cycling of nitrogen in sediments[J]. Ecology and Environment, 2011, 20(11): 1713-1719.
- [19] WANG S, JIN X, JIAO L, et al. Nitrogen fractions and release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River Area, China[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 187(1): 5-14.
- [20] 李磊, 王慧, 张锡辉, 等. 不同底泥系统的湖泊内源释磷规律研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 76-79, 83.
- LI Lei, WANG Hui, ZHANG Xihui, et al. Research on Internal Phosphorus Release of Lakes with Different Sediment System[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(17): 76-79, 83.
- [21] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.
- WU Fengchang, JIN Xiangcan, ZHANG Runyu, et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 1-7.
- [22] 吕晓霞, 宋金明, 袁华茂, 等. 南黄海表层不同粒级沉积物中氮的地球化学特征[J]. 海洋学报: 中文版, 2005, 27(1): 64-69.
- LV Xiaoxia, SONG Jinming, YUAN Huamao, et al. Geochemical characteristics of nitrogen in different grain size sediment from the southern Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(1): 64-69.
- [23] 韩璐, 黄岁梁, 王乙震. 海河干流柱芯不同粒径沉积物中有机质和磷形态分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 955-962.
- HAN Lu, HUANG Suiliang, WANG Yizhen. Organic Matter, Different Sized Phosphorus Fractions in the Core Sediments in the Mainstream of Haihe River, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 955-962.
- [24] 王圣瑞, 赵海超, 周小宁, 等. 五里湖与贡湖不同粒径沉积物中有机质、总氮和磷形态分布研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 11-14.
- WANG Shengrui, ZHAO Haichao, ZHOU Xiaoning, et al. Study on the Organic Matter, Total Nitrogen and Phosphorus Form Distribution of Different Particle Size Fractions in the Sediments from Wuli Lake and Gonghu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(Suppl): 11-14.

Release of nitrogen and phosphorus from the sediments of ten reservoirs in Guangdong province

WEI Lan¹, LIU Chuanping², ZOU Xianzhong^{1*}, YANG Shaohai¹,
CHEN Yong¹, SUN Lili¹, WU Jinglong¹, NING Jianfeng¹

1. Soil and Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Institute of Eco- Environment and Soil Science, Guangzhou 510650, China

Abstract: Sequential extraction was used to study concentrations and forms of nitrogen and phosphorus in sediments collected at ten reservoirs in Guangdong province. Release of nitrogen and phosphorus as well as their relation with sediment properties were also investigated using simulation experiments. The results showed that the sediments of ten reservoirs were heavily contaminated with nitrogen and phosphorus. The total nitrogen concentrations in sediments ranged from 0.33 to 3.31 g·kg⁻¹ with an average of 1.70 g·kg⁻¹, and the total phosphorus concentrations were in the range of 0.14-2.63 g·kg⁻¹ with an averaged of 1.31 g·kg⁻¹. The main forms of nitrogen and phosphorus were transferable, and their percentages in total nitrogen and phosphorus accounted for 41.2%-71.4% and 53.6%-93.2%, respectively. The release of internal nitrogen and phosphorus from sediment was mainly affected by their forms and concentrations. There was a significantly positive correlation between nitrogen release with its concentrations of ion-exchangeable (IEF-N), carbonate bound (WAEF-N) or iron-manganese oxides bound form (SAEF-N). Similarly, there was a significantly positive correlation between phosphorus release with its concentrations of carbonate bound (WAEF-P) or iron-manganese oxides bound form (SAEF-P). These forms of nitrogen or phosphorus were the main source of water eutrophication. The release of internal nitrogen and phosphorus from sediment was also affected by the particle size of the sediments. The release of nitrogen and phosphorus was significantly positively correlated with sediment clay proportion. It was suggested that the fine-grained sediment was possibility the main source of nitrogen and phosphorus release to the overlying water.

Key words: reservoir sediment; internal nitrogen and phosphorus release; characters of sediment; nitrogen and phosphorus forms