

水源地水库沉积物中营养盐与微生物群落的空间分布特征

刘 鹤, 孟 婷, 王 敏, 程 文

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘 要: [目的] 调查研究水源地水库沉积物中营养盐分布与微生物群落分布状况, 揭示沉积物微生物与营养盐迁移转化的相互关系。[方法] 在浙江省东部低山丘陵区汤浦水库现场采集沉积物样品, 分析其中氮、磷等营养盐与总有机碳含量, 并对沉积物中微生物群落结构特征进行克隆文库分析。[结果] (1) 沉积物中总有机碳平均含量为 14.6 g/kg, 总氮平均含量为 1.6 g/kg。总有机碳和总氮含量最高的采样点都是 H 点, 最低的都是 F 采采样; 总磷含量最高的采样点是 G(含量为 1.08 g/kg), 含量最低的采样点是 L(含量为 0.5 g/kg), 平均含量为 0.8 g/kg。速效磷和铵态氮在在河流入库段含量最高, 在库区中部和坝前位置含量较低。(2) 沉积物样品中微生物种群差异较大。鉴别出来的 10 种已知门的细菌, 只有变形菌门、酸杆菌门、绿弯菌门和疣微菌门共同存在于各样品。变形菌门在所有样品中的数量最多, 约占细菌总数 50%~70.8%。[结论] 微生物群落分布与沉积物营养盐有一定相关性。皮尔逊相关分析表明, γ 变形菌和 δ 变形菌与总磷存在显著的负相关性, 厚壁菌门却与总氮 ($p < 0.05$) 存在显著的正相关性。

关键词: 水源地水库; 沉积物; 营养盐; 微生物分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0024-06

中图分类号: X524

文献参数: 刘鹤, 孟婷, 王敏, 等. 水源地水库沉积物中营养盐与微生物群落的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 24-29. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.006

Spatial Distribution of Nutrients and Bacterial Communities in Sediments of Water Resource Reservoir

LIU Hu, MENG Ting, WANG Min, CHENG Wen

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of nutrients and bacterial communities in sediments of water resource reservoir were investigated in order to reveal the interrelation between microbes and migration and transformation of nutrient salts. [Methods] Sediment samples were collected in a Tangpu reservoir in low mountain and hilly area of Eastern Zhejiang Province, the content of total organic carbon(TOC), total nitrogen(TN), ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), total phosphorus(TP) and available phosphorous and bacterial community structure were analyzed respectively. [Results] (1) The average TOC content was 14.6 g/kg and the average TN content was 1.6 g/kg in the reservoir sediments. The maximum content of TOC and TN was found in sampling sites H, minimum value was found in sampling site F. The content of TP was in the range of 0.5~1.08 g/kg, the mean value was 0.8 g/kg. Available phosphorus and ammonium nitrogen had a highest content in the river storage section, and showed low levels in central location of the reservoir and dam. (2) In the sediments, microbial population were significantly different. A total of 10 kinds of known phylum were identified, and 4 kinds of phylum(Verru comicrobia. Proteobacteria, Acidobacteria, Chloroflexi, and Verruc omicrobia) were shared among all samples. In all the samples, Proteobacteria predominated about 50%~70.8% of the total bacteria. [Conclusion] Pearson's correlation anal-

收稿日期: 2016-04-22

修回日期: 2016-05-18

资助项目: 广东省水利科技创新项目“流溪河流域农村饮用水中环境激素的污染与控制技术研究”(2015-06); 陕西水利科技计划项目“渭河陕西段底泥中污染物沉降及释放规律研究”(2014slkj-12)

第一作者: 刘鹤(1973—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制。E-mail: 1004761354@qq.com。

通讯作者: 孟婷(1993—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制。E-mail: 1570954140@qq.com。

ysis show a significant negative correlation among Gamma proteobacteria, Delta proteobacteria and TP. While there is a significant positive correlation between Firmicutes and TN ($p < 0.05$).

Keywords: reservoir; sediment; nutrient; bacterial distribution

水源地水库一般承担着为城镇居民生产生活供水的重要职能。因此,保障水源地水库的水质安全,对维持社会稳定,促进经济发展有着重要意义。河流进入库区以后,由于过水断面增加,流速减小,水流携带的来自流域内的泥沙以及其他污染物质会在水库逐步沉积,因此会有大量沉积物存储在水库底部。这些沉积物中的污染物在不同的环境条件(温度、压力、溶解氧及氧化还原电位等)^[1]、水力条件^[2]及微生物作用下^[3]与库区水体进行着复杂的物质交换,其中的各种营养盐在一定条件下会释放进入水体,使得水质下降^[4]。因此,水库中的沉积物往往成为水库的重要内污染源^[5]。由于水库沉积物理化性质特殊,又含有丰富的营养盐,这为各种微生物提供了合适的生长环境^[5]。不同的微生物群落通过自身代谢活动,不仅影响沉积物中氮、磷等营养元素在水体和沉积物中的迁移转化^[6],进而影响水质;同时,水体中各种物质又可以通过自然沉降、吸附等方式进入水库沉积物中,并作为营养物质供各种微生物生长繁殖,进而影响到沉积物中微生物的种类和数量^[7]。因此,研究沉积物中营养盐及微生物群落的分布特点,能够帮助人们更清楚认识水体污染状况,这也是水环境研究的一个重要内容^[8]。本文以浙东低山丘陵区汤浦水库为研究对象,研究了水库沉积物中氮、磷等营养盐及其中微生物群落的分布状况,并对它们之间的相关性进行分析,以期为水源地水库内源污染的防治,以及水库的管理和维护提供科学依据。

1 研究区概况

汤浦水库位于会稽山脉东南部,属浙东低山丘陵区。坝址位于小舜江下游的上虞市汤浦镇,地理坐标为北纬 $30^{\circ}52'$,东经 $120^{\circ}47'$,离绍兴市区直线相距 23.5 km。由小舜江汤浦镇以上段截流而成,为南方典型河道型水库。流域多年平均气温 16.5°C ,多年平均降水量 1 564.4 mm,径流与降水的年际、年内变化一致,多年平均流量 $11.6\text{ m}^3/\text{s}$,多年平均径流总量 $3.66 \times 10^8\text{ m}^3$ 。年内水量逐月分配,通常呈现大中小 3 峰型。其中,大峰发生 6 月,成因为梅雨,中峰发生于 9 月,成因为台风雨,小峰发生于 3 月,成因为春雨。枯水期一般为 10 月到次年 2 月之间。有双江溪、王化溪和万宝溪 3 条河流入库,其中双江溪年入库流量占总流量的 75% 以上,王化溪约占 20%,万宝溪流量最小,只在汛期有少量水流入库,约占总流量

的 5% 左右。水库流域面积 460 km^2 ,水面面积 14 km^2 ,总库容 $2.35 \times 10^8\text{ m}^3$,设计日供水规模达 $1.00 \times 10^6\text{ t}$ 。该水库水质常年较好,多为 I—II 类水质。该水库自 2002 年运行以来,发生过 3 次较为明显的阶段性氮磷超标事件,对饮用水供应造成了一定影响。

2 材料与方法

2.1 采样点布设与样品采集

根据水库地形,水利条件等在汤浦水库从入库到坝前选取 10 个采样点,用 GPS 定位。分别是:库尾监测点 A, L 和 I,主库区监测点 C, D 和 E,水库过渡区监测点 F, G, J 和 H。此外在水库周边的竹林(ZL)和荒地(HD)分别采样,用作参照。采样时间为 2012 年 10 月,用彼得逊沉积物采样器采集沉积物样品,装入密封袋中,用干冰覆盖低温密闭保存,运回实验室冷冻干燥后研磨过 100 目筛,密封冷藏保存待分析用。

2.2 分析方法

沉积物总氮(total nitrogen, TN)用半微量凯氏法进行测定;铵态氮和硝态氮的测定采用 KCl 浸提—蒸馏法测定^[9]。沉积物中总磷(total phosphorus, TP)用硫酸—高氯酸消解,钼锑抗比色法分析^[10],沉积物速效磷(available phosphorous, AP)测定采用 NaHCO_3 浸提—钼蓝比色法(Olsen 法)^[11]。沉积物有机碳(total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[12]。微生物群落分析通过使用无菌 DNA 提取试剂盒(UltraClean DNA extraction kit, Mobio Laboratories, USA),按照生产商提供的流程对每个沉积物样品的总基因组 DNA 进行提取。3 份平行样中提取等量 DNA 一起点样进行克隆文库分析^[13]。试验中对所有样品均取 3 份平行测定,试验结果取 3 次平均值。数据分析用 SPSS 18.0 软件,原始图表绘制用 Origin 8.0 等软件。

3 结果与讨论

3.1 沉积物中营养盐分布特征

3.1.1 各形态氮分布特征 从汤浦水库沉积物各形态氮分布图可以看出(图 1),各采样点中总氮含量最高的是 H 采样点,含量为 2.32 g/kg ,含量最低的是 F 采样点,含量为 0.69 g/kg ,各采样点总氮平均含量为 1.6 g/kg 。作为参照的 ZL 和 HD 采样点总氮含量分别为 $0.17, 0.08\text{ g/kg}$,平均含量 0.13 g/kg ,远低于库区采样点的平均含量。

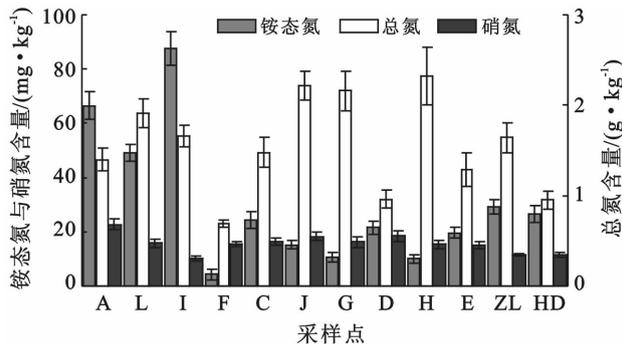


图 1 汤浦水库沉积物中各形态氮的分布

从图 1 可看出,汤浦水库各采样点沉积物中铵态氮平均含量为 30.09 mg/kg,含量最高的为 I 采样点,87.73 mg/kg;含量最低的为 F 采样点,4.28 mg/kg。作为参照的 ZL 和 HD 采样点铵态氮含量分别为 29.21,26.55 mg/kg,平均含量 27.88 mg/kg,低于库区 A, L 和 I 这 3 个采样点铵态氮含量,氮高于库区其他 7 个采样点的含量。对比采样点设置图可以发现,铵态氮含量最高的 3 个采样点都在库尾段,也就是河流入库段,而在库区中部和坝前段铵态氮的含量普遍比较低。这可能是由于入库段水深较浅,还建有湿地,因此水体含氧量高,在有氧条件下,底泥中有机氮通过氨化作用转化为铵态氮,使得该段沉积物中铵态氮含量高^[14];而在该段以后,由于水深增加,水底含氧量降低,氨化作用受到抑制,故沉积物中铵态氮含量相对稳定。

汤浦水库各采样点中硝态氮平均含量为 16.4 mg/kg,含量最低的采样点为 I,10.10 mg/kg;含量最高的为 A 采样点的 22.74 mg/kg。硝态氮含量在库区各采样点的分布比较均匀,变异程度不高。作为参照点 ZL 和 HD 的硝态氮含量比较接近,分别为 11.5,11.39 mg/kg,平均含量 11.45 mg/kg,低于除 I 采样点外的库区其他采样点硝态氮含量。硝态氮在底泥中的分布也受环境氧化还原条件和微生物作用的控制,在氧充足的情况下铵态氮又可以通过硝化作用继续转化为硝态氮^[15];在缺氧条件下,兼性厌氧细菌和厌氧细菌分解有机质对电子受体的需要,则会引起硝态氮充当替代电子受体而被还原^[16]。此外,硝态氮极易溶于水,这也可能是沉积物中硝态氮含量分布较均匀的原因。

3.1.2 磷分布特征 由图 2 可以看出,汤浦水库沉积物中总磷和速效磷在各采样点分布不均。沉积物样品中总磷含量最高的采样点是 G,含量为 1.08 g/kg,含量最低的采样点是 L,含量为 0.5 g/kg,各点的总磷平均含量为 0.8 g/kg。水库岸边的 ZL 和 HD 采样点总磷含量分别为 0.18 和 0.07 g/kg,平均含量

0.13 g/kg,这比库区各采样点的总磷含量都低很多。主要是由于对照采样点接受外来含磷物质的来源少,尤其是 HD 采样点,其表面几乎没有植被,因此总磷含量很低;ZL 采样点为长势较好的竹林地带,采样的土壤中含有大量植物残渣,因此速效磷含量较高。

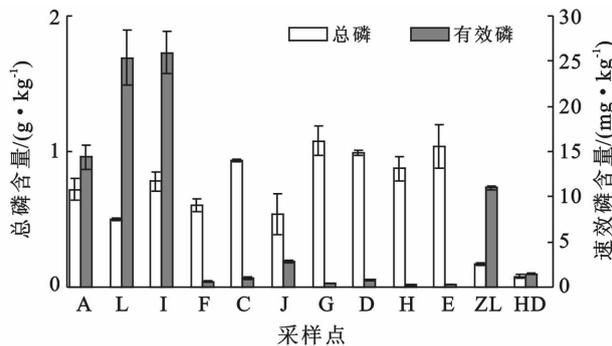


图 2 汤浦水库沉积物中总磷和速效磷分布状况

速效磷是沉积物中可被植物吸收的磷组分,包括全部水溶性磷、部分吸附态磷及有机态磷,有的沉积物还包括某些沉淀态磷^[15]。其含量是衡量沉积物磷供应水平的重要指标,其含量高低在一定程度上反映了沉积物中磷素的贮量和供应能力^[16]。汤浦水库沉积物中速效磷平均含量为 7.2 mg/kg,含量最高和最低的采样点分别是 I 采样点和 H 采样点,含量分别为 25.92 和 0.22 mg/kg。作为对照的 ZL 和 HD 采样点速效磷含量分别为 10.99,1.48 mg/kg,平均含量为 6.24 mg/kg,略低于库区各采样点速效磷平均含量。速效磷分布的特点是在河流入库位置附近,也就是库尾段(包括 A, L 和 I 这 3 个采样点),速效磷含量都很高,其中含量最低的 A 采样点也有 14.39 mg/kg;在其他 7 个采样点中,主要包括库中到坝前一段,速效磷含量都很低,其中含量最高的 J 采样点也只有 2.83 mg/kg。可见汤浦水库沉积物中速效磷的分布主要集中在库尾,即河流入库段,而在其他位置含量较低。这主要是由于河流进入库区后,由于过水断面增加,流速降低,入库水流携带的泥沙以及其他颗粒状污染物在此段迅速沉积,导致该段沉积物淤积量增加,同时沉积物中污染物含量也同步增加。

3.1.3 总有机碳分布特征 沉积物中总有机碳(total organic carbon, TOC)主要来自流域内,是由入库水流带入,以动植物残体以及其它含碳物质组成。库区底部沉积物和岸边两参照点的总有机碳含量分布如图 3 所示。沉积物平均总有机碳含量为 14.6 g/kg,含量最高为 H 点的 23.69 g/kg,最低为 F 采样点的 7.88 g/kg。作为参照点的 ZL 采样点总有机碳含量为 22.25 g/kg,HD 采样点为 9.54 g/kg,平均含量为 15.9 g/kg。可见水库周边竹林的表层土壤中有有机质

含量明显高于荒地,这是由于竹林表层有大量枯枝败叶,经逐步分解,有机质便进入表层土壤。荒地采样点为裸露地面几乎没有植被覆盖,因此表层土壤中的有机质含量比较少。水库表层沉积物总有机碳含量较高的采样点为G和H点,其有机碳含量略高于ZH采样点。主要是由于这2个采样点靠近水库岸边,周围山林的有机物容易在雨季被带入水库而就近沉积下来,因此这2个采样点的总有机碳含量较高。其他各采样点沉积物中总有机碳的平均含量在10~15 g/kg,这与其他研究中关于南方水库沉积物中有机碳含量相当。

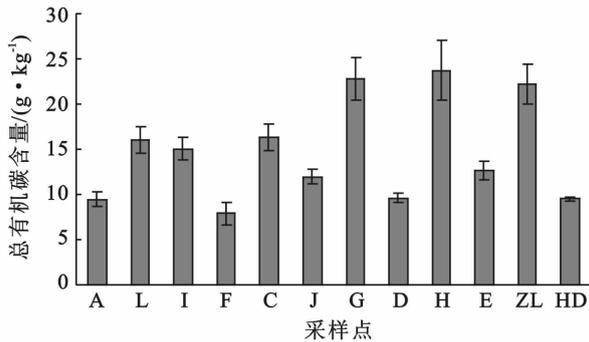


图3 汤浦水库沉积物中总有机碳的分布

3.1.4 营养盐累计分析 皮尔森相关分析表明,汤浦水库沉积物中总有机碳和总氮含量极显著正相关($p < 0.01$),总有机碳和总磷显著正相关($p < 0.01$),总磷和总氮含量之间呈不显著负相关。这说明,汤浦水库沉积物中碳源和氮源、磷源具有同源性^[17]。沉积物中碳和氮的比值(C/N)可以有效指示沉积物中营养盐的来源。研究表明:C/N值越大,说明沉积物中有机质来源于陆源的越多^[18]。通常水生无维管束植物碎屑的C/N为4~12^[19],维管束植物碎屑的C/N>20^[20],陆生禾本科或莎草科植物C/N可以高达45~50,浮游动植物的C/N较低,一般为6~14^[20]。汤浦水库C/N平均值为9.3,最低为5.4,最高为11.4,此结果与其他学者提出的淡水湖泊沉积物中C/N一般在6~14之间的结论一致。这说明汤浦水库沉积物中的有机质多来源于水库中的低等水生动植物。

汤浦水库中氮磷比平均为2.2,最低为1,最高为4.1(如图4所示),这比Redfield常数(C:N:P=106:16:1)低很多。这不仅说明,汤浦水库沉积物中磷的输入主要来自陆源物质,是地表径流在入库过程中携带大量含磷物质进入水库而沉积;同时也说明汤浦水库的沉积物中存在着比较强烈的微生物—化学—物理作用,使得大量含氮物质因为矿化降解而逐步消耗,含磷物质得以在沉积物中累积^[21-22]。作为参照的

ZL和HD采样点碳氮比与水库沉积物中碳氮比相当,但是氮磷比远高于沉积物中氮磷比。这主要是由于参照采样点土壤中含磷物质输入量少,但是由于植物生长消耗和淋溶等原因,流失量大,这导致这2个采样点中磷的含量少,氮磷比值变大,分别9.6,11.9,这说明这2个采样点植物生长同时受氮和磷的制约,且受氮的制约更明显。

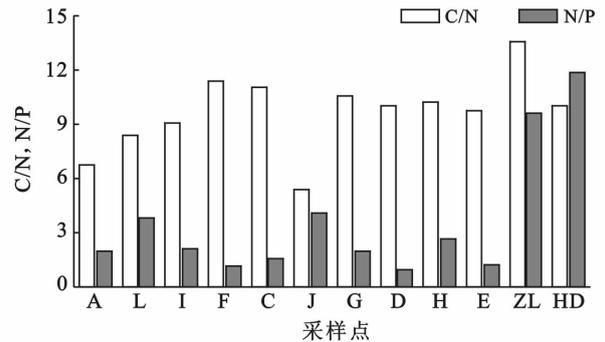


图4 汤浦水库沉积物营养盐累计分析

3.2 沉积物中微生物分布特征

底泥中的微生物以底泥和水体中含有的各种污染物为营养源进行生长代谢,同时也不断改变底泥内部的理化条件,进而影响到底泥中污染物的释放过程。底泥污染物释放的动力学主要由2个过程决定^[5,13]: ① 微生物的活动,它决定着污染物的相互转化和存在形态,是否容易释放和在什么条件下释放等; ② 水力过程,它决定着污染物在底泥孔隙内部的传质速度,底泥悬浮状态和沉积状态,以及底泥颗粒对污染物的吸附携带等。2个过程相互作用、相互影响,在很大程度上决定了底泥污染物的释放动力学特征。

本研究分析了E,J,C和D点沉积物中的微生物群落。C和J采样点分别位于主库的流入区前段,水深分别为19.2和15.4 m,D为主库的中心地带,水深约19.7 m,E采样点位于水库取水口附近,水深约21.8 m。将沉积物样品带回实验室后提取各样品中微生物的基因组DNA,从每个采样点的3个平行样品中取相同数量的DNA,用于克隆文库分析。根据文献,用引物27F(5-GAGTTTGATCMTGGCTCAG-3)和1492R(5-GGTTACCTTGTTACGACTT-3)对微生物16S rRNA进行扩增。扩增子与pGEMT载体连接,包含正确遗传信息的判断被用来测序分析^[21]。通过RDP-II(Ribosomal Database Project-II)数据库,对细菌序列进行分类鉴别,置信水平80%。

汤浦水库4个底泥样品中,鉴别出来的10种已知的门分别是:变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、蓝藻细菌门、拟杆菌门、绿弯菌门、厚壁菌门、芽单胞菌门、浮霉菌门和疣微菌门。但是,只有变形菌门、酸杆菌

门、绿弯菌门和疣微菌门共同存在于这 4 个样品中。变形菌门在所有样品中的数量都是最多的,大约占了 50%~70.8% 的比例。

由图 5 可见,各采样点沉积物中主要细菌群落(相对丰度 $\geq 10\%$)不尽相同。取水口 E 底泥样品中的主要细菌组成(相对丰度不小于 10%)是 δ 变形菌纲(25%)、 α 变形菌纲(14.6%)和 γ 变形菌纲(14.6%)。庙下村 J 底泥样品则主要由 α 变形菌纲(26%)、 β 变形菌纲(16%)、酸杆菌门(12%)、厚壁菌门(12%)、 δ 变形菌纲(10%)和放线菌门(10%)组成。托潭 C 底泥样品主要由 β 变形菌纲(26.1%)、

ϵ 变形菌纲(21.7%)和酸杆菌门(10.9%)组成。此外,酸杆菌门(29.2%)、 β 变形菌纲(22.9%)和 α 变形菌纲(10.4%)是库中心 D 底泥样品中的主要微生物。由此可知,4 个样品中细菌群落的组成的差别比较显著。变形菌门中的各亚门的组成及相对分布的差异也很大。此外,各样品中细菌的主要成分(相对丰度 $\geq 10\%$)也有很大差异。皮尔逊相关分析表明 γ 变形菌和 δ 变形菌与总磷存在显著的负相关性,厚壁菌门却与总氮($p < 0.05$)存在显著的正相关性。然而,其他主要的细菌群落与底泥的化学特性之间没有显示明显的相关性。

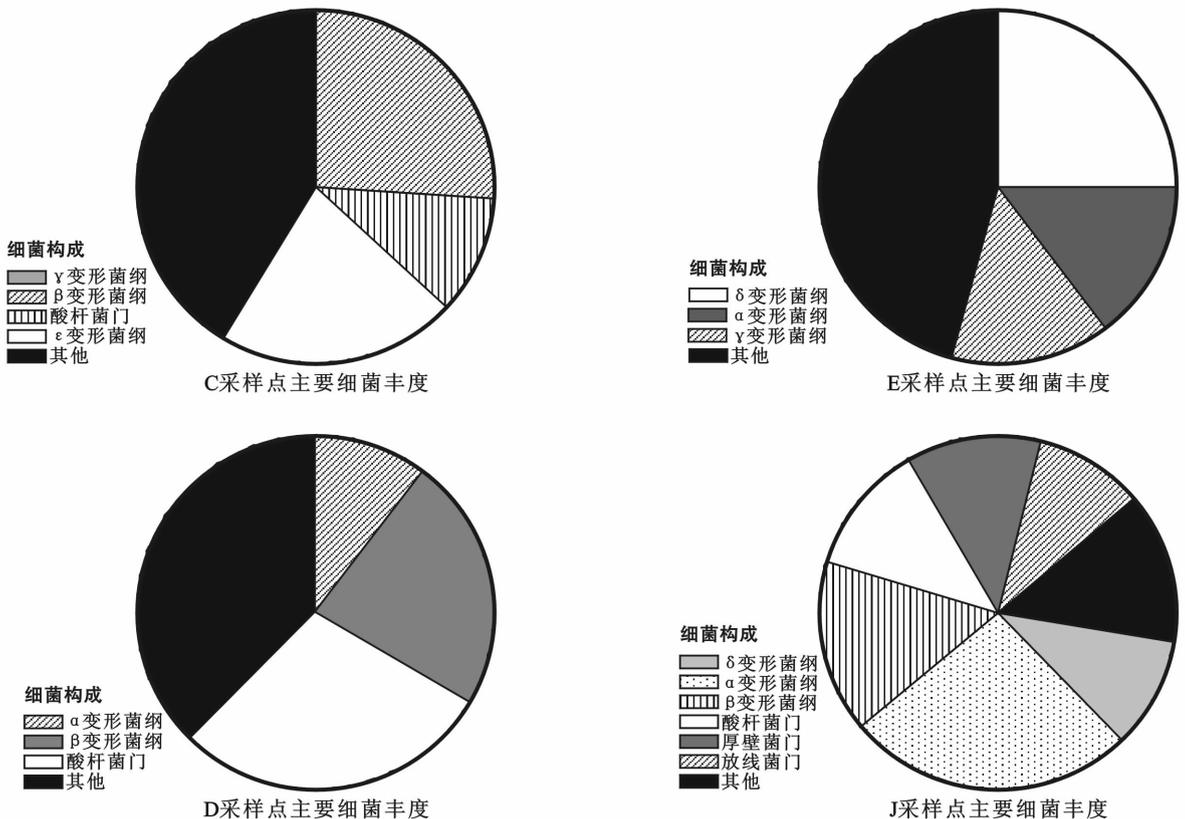


图 5 沉积物中主要细菌构成(相对丰度 $\geq 10\%$ 的细菌)

表 1 列举了 4 个样品中已知的 27 个变形菌门的属。其中很多属只含有单一序列。只有 *Sulfuricurvum* 属在 4 个样品中都有分布,而有 34 个属只在一个样品中被发现。所以,这 4 个样品的微生物群落在属水平上的分类差异更加显著。

α 变形菌纲 *Bradyrhizobium* 属、*Hyphomicrobium* 属、*Sphingomonas* 属和 *Novosphingobium* 属中的微生物可以降解多种环境中的有机污染物。 β 变形菌纲 *Hydrogenophaga* 属和 *Comamonas* 属, γ 变形菌纲 *Rhodanobacter* 属也对多种环境化学污染物有降解作用。 γ 变形菌纲 *Steroidobacter* 属与厌氧鞣降解过程有关。此外, γ 变形菌纲 *Methylocaldum*

属和 *Methylobacter* 属是甲烷氧化菌,可以同化甲烷中的碳。所以,这些变形菌门中的微生物于汤浦水库中的有机污染物降解和碳循环起着重要的作用。 β 变形菌纲 *Sulfuricella* 属、 γ 变形菌纲 *Thiovirga* 属和 ϵ 变形菌纲 *Sulfuricurvum* 属与硫氧化作用有关。而占主导地位的 *Sulfuricella* 属和 *Sulfuricella* 属、*Thiovirga* 属的存在说明了水库底泥中存在显著的硫氧化过程。 γ 变形菌纲 *Acinetobacter* 属中的微生物是一类常见的富磷微生物。所以这类微生物的出现与磷循环有关。此外, δ 变形菌纲 *Anaeromyxobacter* 属和 *Geobacter* 属中的微生物是三价铁的还原细菌,所以这 2 种 δ 变形菌纲中的细菌与铁的还原有关。

表1 各样品中常见细菌的属

细菌物名	细菌属名	取水口 E	庙下村 J	托潭 C	库中心 D
α 变形菌纲	<i>Bradyrhizobium</i>	1	0	0	0
	<i>Roseomonas</i>	1	1	0	0
	<i>Hyphomicrobium</i>	0	1	0	0
	<i>Rhodoplanes</i>	0	1	0	1
	<i>Phenylobacterium</i>	0	1	0	0
	<i>Novosphingobium</i>	0	1	0	0
	<i>Sphingomonas</i>	0	1	0	0
β 变形菌纲	<i>Defluviicoccus</i>	0	1	0	0
	<i>Sulfuricella</i>	0	1	0	0
	<i>Herminiimonas</i>	0	1	0	0
	<i>Massilia</i>	0	0	2	0
	<i>Hydrogenophaga</i>	0	0	2	0
	<i>Comamonas</i>	0	0	1	0
	<i>Leeia</i>	0	0	3	0
γ 变形菌纲	<i>Vogesella</i>	0	0	1	0
	<i>Rhizobacter</i>	1	0	0	0
	<i>Rhodanobacter</i>	1	0	0	0
	<i>Methylocaldum</i>	1	0	0	0
	<i>Acinetobacter</i>	1	0	0	0
	<i>Steroidobacter</i>	1	0	0	1
	<i>Methylobacter</i>	0	0	1	0
δ 变形菌纲	<i>Thiovirga</i>	0	0	0	1
	<i>Anaeromyxobacter</i>	1	1	0	0
	<i>Smithella</i>	2	0	0	1
	<i>Geobacter</i>	2	0	1	0
ε 变形菌纲	<i>Syntrophorhabdus</i>	0	0	1	0
	<i>Sulfuricurvum</i>	4	1	10	2
合计		16	11	22	6

总之,在汤浦水库各采样点的细菌群落结构与组成有较大差异性。变形菌门可能与底泥的各种营养盐及其生物化学过程有密切关系。其在水库沉积物生态环境甚至整个库区水环境的地位和作用还要进一步研究。

4 结论

汤浦水库沉积物中总有机碳、氮和磷等物质分布不均。各采样点沉积物中总有机碳平均含量为 14.6 g/kg,总氮平均含量为 1.6 g/kg。总有机碳和总氮含量最高的采样点都是 H 点,最低的都是 F 点;总磷含量最高的采样点是 G(1.08 g/kg),含量最低的采样点是 L(0.5 g/kg),平均含量为 0.8 g/kg。速效磷和铵态氮在水库中的分布具有明显的特点:在河流入库段含量最高,在库区中部和坝前位置含量较低。水库沉积物中总有机碳和总氮含量极显著正相关($p < 0.01$),总有机碳和总磷显著正相关($p < 0.01$),总磷和总氮含量之间呈不显著负相关。

汤浦水库沉积物中的有机质多来源于水库中的低等水生动植物。沉积物中磷的输入主要来自陆源

物质,地表径流在入库过程中携带大量含磷物质进入水库而沉积;含氮物质在沉积物中因为矿化降解而逐步消耗,含磷物质得以在沉积物中累积。汤浦水库底泥样品中,鉴别出来了 10 种已知门的细菌,只有变形菌门、酸杆菌门、绿弯菌门和疣微菌门共同存在于各样品中。变形菌门在所有样品中的数量最多,约占细菌总数 50%~70.8%。4 个样品中已知的 27 个变形菌门的属,只有 *Sulfuricurvum* 属在 4 个样品中都有分布,有 34 个属只在 1 个样品中被发现。说明沉积物中微生物群落在属水平上的分类差异非常显著。

[参 考 文 献]

- [1] 王妙,王胜,唐鹤辉,等. 粤西三座重要供水水库沉积物营养盐负荷与重金属污染特征[J]. 生态环境学报, 2014,23(5):834-841.
- [2] 魏岚,刘传平,邹献中,等. 广东省不同水库底泥理化性质对内源氮磷释放影响[J]. 生态环境学报, 2012,21(7):1304-1310.
- [3] 姚玲爱,赵学敏,周广杰,等. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨[J]. 湖泊科学, 2011,23(4):534-540.
- [4] 余辉,张文斌,卢少勇,等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010,31(4):961-968.
- [5] 毛海芳,何江,吕昌伟,等. 沉积物中微生物量与有机碳形态的相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010,29(12):2406-2412.
- [6] 屈建航,李宝珍,袁红莉. 沉积物中微生物资源的研究方法及其进展[J]. 生态学报, 2007,27(6):2636-2641.
- [7] 赵平歌,周孝德,刘睿. 西安黑河流域水体细菌群落分布调查与研究[J]. 环境保护科学, 2014,40(6):30-33.
- [8] Sharma S K, Subramanian V. Source and distribution of trace metals and nutrients in Narmada and Tapti river basins, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(7):1337-1352.
- [9] 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.
- [10] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978,125(2):95-101.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:258-395.
- [12] 姜霞,王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [13] Wang Na, Xu Delin, Guo Xuan, et al. Microbial biomass and its correlations with carbon, nitrogen, and phosphorus in the sediments of Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(7):1921-1926.
- [14] 赵兴青,杨柳燕,于振洋,等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007,19(6):698-704.

- Technology, 2012, 84(9):104-111.
- [5] 朱瑶,梁志伟,李伟,等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10):3012-3018.
- [6] 黄永刚,付玲玲,胡筱敏. 基于河流断面监测资料的非点源负荷估算输出系数法的研究和应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5):159-162.
- [7] Johns P J. Evaluation and management of the impact of land use on the Nitrogen and Phosphorus load delivered to surface water[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3):323-349.
- [8] 郝旭,张乃明,史静. 昆明市云龙水库径流区氮磷非点源污染负荷分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6):274-278.
- [9] 李艳利,徐宗学,李艳粉,等. 辽河流域水质状况及其对土地利用/覆被变化的响应[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2):72-77.
- [10] 张福平,赵沙,周正朝,等. 沔河流域土地利用格局与水质变化的关系[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):308-312.
- [11] 杜娟,李怀恩,李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沔河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):827-837.
- [12] 李怀恩,李家科. 流域非点源污染负荷量化方法研究与应用[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [13] 田平. 基于 GIS 杭嘉湖地区农田氮磷径流流失研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [14] 廖义善,卓慕宁,李定强,等. 基于“径流一地类”参数的非点源氮磷负荷估算方法[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8):2126-2132.
- [15] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):866-871.
- [16] 赵广举,田鹏,穆兴民,等. 基于 PCRaster 的流域非点源氮磷负荷估算[J]. 水科学进展, 2012, 23(1):80-86.
- [17] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12):2407-2414.
- [18] 王欢欢,陈世俭. 土地利用结构变化对非点源污染的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2):25-28.
- [19] 谭平,马太玲,赵立欣,等. 巢湖农村生活污水产排污系数测算及处理模式分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13):88-91.
- [20] 严婷婷,王红华,孙旭旭,等. 滇池流域农村生活污水产排污系数研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4):46-48.
- [21] 蔡金洲,范先鹏,黄敏,等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7):1421-1430.
- [22] 苏文幸. 生猪养殖业主要污染源产排污量核算体系研究[D]. 长沙:湖南师范大学, 2012.
- [23] 何志平,曾凯,李正确,等. 四川规模猪场产排污系数测定[J]. 中国沼气, 2010, 28(4):10-14.
- [24] 汪开英,刘健,陈小霞,等. 浙江省畜禽业产排污测算与土地承载力分析[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12):3043-3048.
- [25] 林自强,江建煌. 竹腔施肥技术[J]. 安徽林业科技, 2011, 37(5):79-80.

(上接第 29 页)

- [15] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮/磷/硅)的地球化学特征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2008.
- [16] 冯峰,王辉,方涛,等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3):342-345.
- [17] Burford M A, Green S A, Cook A J, et al. Sources and fate of nutrients in a subtropical reservoir[J]. Aquatic Sciences, 2012, 74(1):179-190.
- [18] 袁和忠,沈吉,刘恩峰. 太湖不同湖区沉积物磷形态变化分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(11):1522-1528.
- [19] Venterink H O, Davidsson T E, Kiehl K, et al. Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil[J]. Plant and Soil, 2002, 243(1):119-130.
- [20] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 北京:科学出版社, 1979.
- [21] 刘国峰,张志勇,刘海琴,等. 底泥疏浚对竺山湖底栖生物群落结构变化及水质影响[J]. 环境科学, 2010, 31(11):2645-2651.
- [22] 李强,霍守亮,王晓伟,等. 巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(2):147-154.