

飞来峡水库氮磷营养盐形态及分布特征*

谢林环¹, 江涛¹, 李锐², 唐常源^{1,2}, 陈建耀¹, 曹英杰², 刘小波¹, 曾红平¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

(2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 以飞来峡水库为研究对象, 于2015年6月(丰水期)和12月(枯水期)对库区内9个采样点进行水样采集。通过测定各形态氮、磷浓度, 结合 Spearman 相关性检验结果和氮磷比, 分析水库氮、磷营养盐分布特征、结构以及来源。结果表明: ① 硝酸盐氮是氮营养盐的主要存在形态, 磷营养盐的主要存在形态为颗粒磷和溶解态磷; ② 总氮、总磷浓度总体表现分别为丰水期 < 枯水期和丰水期 > 枯水期, 氮浓度受生活污染影响较大, 磷浓度变化具备面源污染特征; ③ 氮、磷元素在丰水期具有同源性, 枯水期输入源不完全一致; ④ 对比3条主要入库河流(北江干流及滃江、连江等支流)的入库通量, 枯水期北江总氮通量最大, 为1 036.0 g/s, 丰水期滃江总氮通量最大, 为1 128.4 g/s, 丰、枯水期北江总磷通量均最大, 分别为85.4和70.3 g/s; ⑤ DIN/TP 介于4.0~47.1, 水库属于磷营养限制类型。

关键词: 氮和磷形态; Spearman 相关性检验; 氮磷比; 飞来峡水库

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)05-0112-07

Forms and distribution of nitrogen and phosphorus in Feilaixia Reservoir

XIE Linhuan¹, JIANG Tao¹, LI Rui², TANG Changyuan^{1,2}, CHEN Jianyao¹,
CAO Yingjie², LIU Xiaobo¹, ZENG Hongping¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

(2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Samples collected from 9 sites in the Feilaixia Reservoir in June and December of 2015 are used to analyze the forms and distribution of nitrogen and phosphorus by measuring their concentrations and combining Spearman correlation test results and N/P ratio. The results show that: ① NO_3^- -N, PP and DP are the main forms. ② TN concentrations during wet season are lower than those during dry season, while TP concentrations are higher during the wet season. The nitrogen concentration is mainly influenced by domestic sewage and phosphorus is influenced by non-point source pollution. ③ Nitrogen and phosphorus may be originated from the same sources during wet season. ④ The TN flux in wet season in the Wengjiang River is 1 128.4 g/s, which is the highest among the three main rivers in the Feilaixia reservoir. The TN flux of the Beijiang River is 1 036.0 g/s, which is the highest in dry season. TP fluxes of the Beijiang River are the highest, with 85.4 and 70.3 g/s in wet and dry season, respectively. ⑤ The ratios of DIN/TP range from 4.0 to 47.1, suggesting that the Feilaixia reservoir is in the state of phosphorus limitation.

Key words: forms of nitrogen and phosphorus; spearman correlation test; N/P ratio; Feilaixia Reservoir

* 收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(41371055, 41471020); 2015年广东省水资源节约与保护专项基金

作者简介: 谢林环(1993年生), 女; 研究方向: 水文与水环境; E-mail: xielh8@mail2.sysu.edu.cn;

通信作者: 江涛(1965年生), 女; 研究方向: 水文与水环境; E-mail: eesjt@mail.sysu.edu.cn

氮、磷是构成水体初级生产力重要的生源要素，也是造成湖泊、水库富营养化的关键限制因子^[1-2]，其赋存形态和含量制约着水中浮游植物的生长繁殖^[3-7]。亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨氮简称“三氮”，其在水体中的含量及分布特征一直是研究的重点^[8-12]。磷元素同样作为水体富营养化的关键因子，其质量浓度的变化也会影响藻类的生长^[13]。蔡龙炎等^[14]通过分析 32 篇已公开发表的学术论文的湖泊富营养化有效监测数据，结果表明我国湖泊富营养化空间分布特征与我国磷素和氮磷比的空间变化趋势存在密切关系。传统观点认为氮磷比以 TN/TP 表示^[15]，但是不同研究水体得出的比值有很大差异^[16-17]。近年来，文献 [18-19] 提出以 DIN/TP 作为营养限制类型的指标，当 DIN/TP 从 1.5~3.4 变化时，湖泊、水库生态系统从氮营养限制类型转变为磷营养限制类型。

随着人口的增加和社会、经济的发展，我国水资源供需矛盾逐年加剧，水库供水成为缓解城市供水压力的主要途径^[20]。飞来峡水库作为广东省北江干流上一座具有可调控性能的大型水库，是珠江三角洲地区重要的后备水源，承担着保障北江下游广州、佛山、清远等城市供水安全的战略地位，是区域水资源安全和经济社会可持续发展的重要保障^[21]。随着珠江三角洲地区产业向东西两翼和粤北地区转移，飞来峡水库流域经济和社会得到快速发展，人口不断增加，库区流域污染也随之加大，水库水质明显恶化，部分库湾出现季节性蓝藻、甲藻水华现象^[22-23]，水库水质保护显得尤为迫切。而目前关于飞来峡水库氮、磷营养盐的研究较少，为此，本研究拟通过丰水期和枯水期对水库水体的采样分析，探讨水库氮、磷营养盐赋存形态、分布特征、结构及来源，为水库的富营养化控制及水资源保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

飞来峡水库地处北江中游，属典型的河道型水库，主要由北江干流及滙江、连江等支流汇入组成。滙江于英德市江头咀汇入北江，连江于连江口汇入北江。水库总库容 19.04 亿 m^3 ，库区北江干流全长 73 km，坝址位于北江干流清远市飞来峡镇，控制流域面积 34 097 km^2 ，占北江流域面积的 73%。水库上游回水与白石窑水利枢纽水电站尾水衔接，白石窑水电站是北江干流梯级开发中的第三级，地处英德市望埠镇奖家洲。

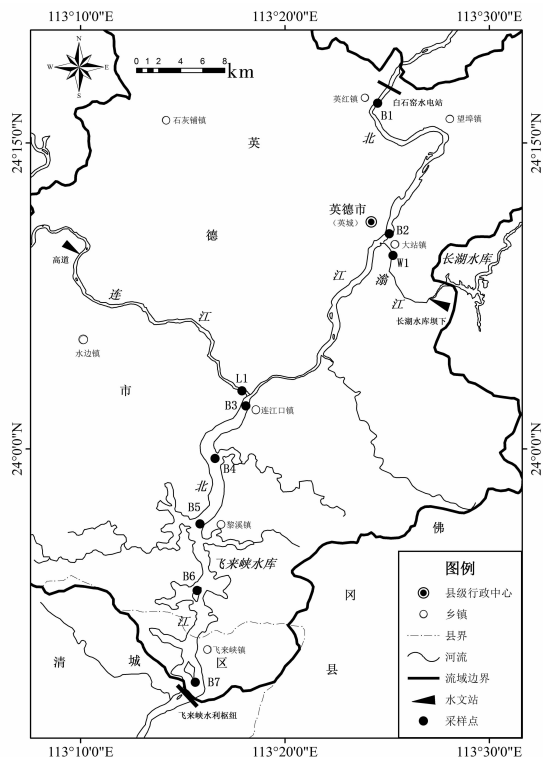


图1 采样点分布

Fig. 1 Location of sampling sites

飞来峡水库流域横跨清远市清城区以及英德市两个县级区，包括飞来峡镇、黎溪镇、连江口镇、大站镇、英红区、英城街道、望埠镇、石灰铺镇、西牛镇以及水边镇等十个镇级行政区划，总面积为 2 450 km^2 ，2015 年总人口约 44 万。库区流域内除了少量洗矿工业外，生产活动基本以种植、畜禽养殖、水产养殖等农业生产为主。

1.2 样品采集

以北江干流白石窑奖家洲-飞来峡水利枢纽河段为主要研究对象，共设 9 个采样点（图 1），其中：B1（白石窑奖家洲）、B2（英德大桥）、B3（连江口）、B4（大樟库弯）、B5（黎溪）、B6（大湖库弯）和 B7（飞来峡坝前）采样点位于北江干流；L1、W1 分别为北江干流的一级支流——连江和滙江的入河口。于 2015 年丰水期（6 月份）和枯水期（12 月份）进行 2 次采样，每个点位只采集表层 0.5 m 深的水样。

1.3 样品分析与数据处理

采集的水样置于 4 $^{\circ}C$ 环境下冷藏，后用于总氮（TN）、溶解态氮（DN）、亚硝酸盐氮（ $NO_2^- - N$ ）、硝酸盐氮（ $NO_3^- - N$ ）、氨氮（ $NH_4^+ - N$ ）、总磷（TP）、溶解态磷（DP）和磷酸盐（ $PO_4^{3-} - P$ ）等的测定。TN 和 DN 用碱性过硫酸钾消解紫外

分光光度法测定, 检出限均为 0.05 mg/L; NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 用离子色谱法测定, 检出限分别为 6.5、11.8、20 和 35.4 $\mu\text{g/L}$, 并将测定结果分别转化为以氮计和以磷计的质量浓度; TP 和 DP 用钼酸铵分光光度法测定, 检出限均为 0.01 mg/L; 利用差减法得到颗粒氮 ($\text{PN} = \text{TN} - \text{DN}$) 和颗粒磷 ($\text{PP} = \text{TP} - \text{DP}$) 的质量浓度。

利用 SPSS22.0 软件对同一水期各形态营养盐质量浓度进行 Spearman 相关性分析, 并进行双侧显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 氮、磷营养盐质量浓度基本特征

所有水样 TN 质量浓度介于 1.07 ~ 6.14 mg/L, 均值为 1.81 mg/L, 是我国《地表水环境质量标准》^[24] III 类水质量标准限值 (1 mg/L) 的 1.81 倍; 22.22% 的水样 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度低于检出限, 且均为丰水期采集所得, 余下的水样质量浓度介于 0.02 ~ 0.13 mg/L, 均值为 0.08 mg/L; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度介于 0.84 ~ 3.32 mg/L, 均值为 1.38 mg/L; 38.89% 的水样 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度低于检出限, 其中 27.78% 是丰水期采集所得, 其余 61.11% 水样质量浓度介于 0.02 ~ 2.02 mg/L, 均值为 0.20 mg/L。

水样 TP 质量浓度介于 0.04 ~ 0.34 mg/L, 均值为 0.12 mg/L, 是 III 类水质量标准限值 (0.05 mg/L) 的 2.40 倍; 除了 B1 丰水期 DP 质量浓度低于检出限外, 其余采样点 DP 质量浓度均低于 0.14 mg/L, 均值为 0.07 mg/L; PP 质量浓度低于 0.24 mg/L, 均值为 0.05 mg/L; 除了 W1 枯水期的水样 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 质量浓度为 0.027 mg/L 外, 其余采样点 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 含量均低于检出限。

从形态分布上, 丰水期水样 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占 TN 的比例为 78.79% ~ 98.55%, 枯水期所占比例为 54.07% ~ 87.97%, 丰、枯水期平均值为 80.10%, 表明 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 TN 的主要存在形态。这说明水库水体处于氧化程度较高的环境, 硝化作用较强。

丰水期水样 DP 占 TP 的比例为 0 ~ 99.25%, 枯水期所占比例为 18.33% ~ 97.62%, 丰、枯水期 DP 占 TP 比例的平均值为 55.43%; 丰水期水样 PP 占 TP 的比例为 0.75% ~ 100%, 枯水期所占比例为 2.38% ~ 81.67%, 丰、枯水期 PP 占 TP 比例的平均值为 44.57%。枯水期超过 50% 的水样 DP 占 TP 的比例大于 50%, 丰水期超过 50% 的水样

PP 占 TP 的比例大于 50%, 即枯水期 DP 为 TP 的主要存在形态, 丰水期 PP 为 TP 的主要存在形态。

2.2 丰、枯水期氮、磷营养盐质量浓度变化

从丰水期和枯水期各形态氮、磷质量浓度分布 (图 2) 可以得知: 除了中游 B3、B5 采样点, 其他采样点 TN 质量浓度表现为丰水期 < 枯水期。丰水期、枯水期 TN 平均质量浓度分别为 1.59 和 2.03 mg/L, TN 质量浓度随着汛期来水量增加而降低, 枯水期总体水质较差。TP 总体含量较低, 除了 L1 采样点, 其余采样点 TP 质量浓度均表现为丰水期 > 枯水期, 丰水期、枯水期 TP 平均质量浓度分别为 0.14 和 0.10 mg/L。

TP 和 TN 质量浓度在丰、枯水期的不同特征表明水库氮、磷元素来源不完全一致。TN 在枯水期有较高的质量浓度, 说明其来源输入较稳定, 揭示了 TN 受生活污染的影响可能更大。TP 质量浓度变化具有面源污染的特征, 受降雨径流污染影响较大。研究河段干流下游 B5 采样点丰水期 TP 质量浓度最高, 其主要原因是 PP 质量浓度较高, PP 质量浓度与水体中悬浮泥沙含量关系密切^[25], 丰水期在暴雨径流的作用下, 流域地表泥沙颗粒被径流挟带进入库区水体, 从而使 PP 质量浓度增加。

2.3 主要入库河流氮、磷营养盐通量

外源输入是水库氮、磷营养盐的主要来源, 控制入库污染物总量, 是目前防治库区水体富营养化的重要手段之一, 而入库污染物通量是外来点源、非点源污染的综合表现^[26]。利用 B1、W1 和 L1 等 3 个采样点氮、磷质量浓度测定值, 结合北江干流白石窑水电站下泄流量及滙江长湖水库坝下、连江高道水文站对应月份流量数据, 估算飞来峡水库主要入库河流 TN、TP 及其主要营养盐存在形态的物质通量, 见表 1。

丰水期 TN 通量呈现滙江 > 北江 > 连江, 最高值 1 128.4 g/s 出现在滙江, 占主要入库河流总入库量的 36.8%, 这主要与滙江氮营养盐浓度较高有关。滙江下游长湖水库库区内有大量的水产养殖和餐饮服务, 造成采样点 W1 的氮营养盐浓度较高。枯水期 TN 通量呈现北江 > 滙江 > 连江, 最高值 1 036.0 g/s 出现在北江, 占主要入库河流总入库量的 42.2%, 这主要与白石窑下泄流量大有关。

丰水期和枯水期 TP 通量最高值均出现在北江, 分别为 85.4 和 70.3 g/s, 占主要入库河流总入库量的 52.9% 和 52.2%, 这主要与白石窑水电站下泄流量较大有关。

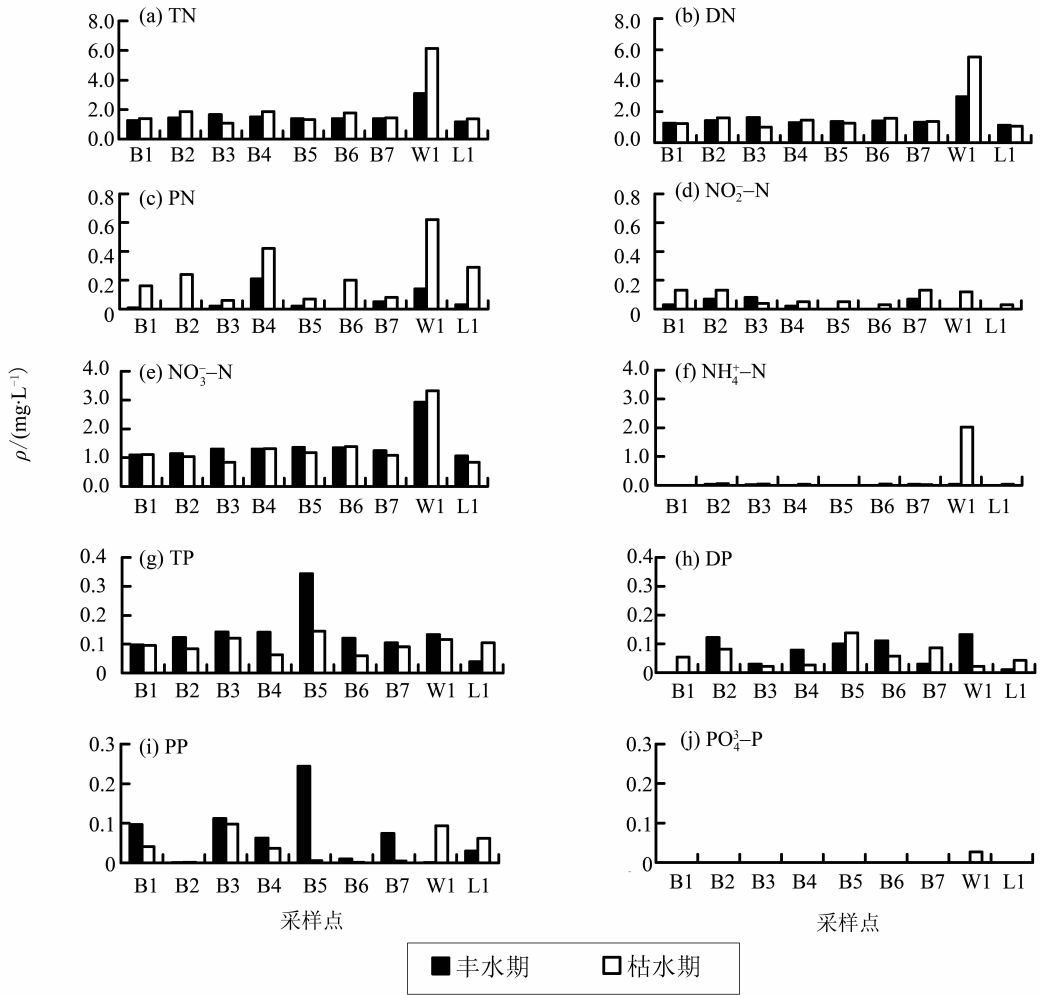


图 2 丰水期、枯水期氮、磷营养盐质量浓度分布

Fig. 2 The nitrogen and phosphorus concentration distribution in different water seasons

表 1 主要入库河流营养盐平均通量

Table 1 The average flux of nutrients in main rivers

(g · s⁻¹)

入库河流	水期	TN	NO ₃ ⁻ - N	TP	DP
北江	丰水期	1 100.0	959.2	85.4	0.1
	枯水期	1 036.0	96.2	70.3	40.0
潯江	丰水期	1 128.4	1 066.5	48.4	48.0
	枯水期	767.5	415.0	14.5	2.8
连江	丰水期	836.6	757.9	27.7	3.7
	枯水期	654.2	404.0	50.0	20.2

2.4 氮、磷营养盐间的相关性

基于 SPSS22.0 软件，采用 Spearman 方法对不同水期不同采样点各形态氮磷质量浓度数据进行两两相关分析，由分析结果（表 2）可知，① 丰水期、枯水期 TN 与 DN 相关系数分别为 0.828、0.900，DN 与 NO₃⁻ - N 相关系数为 0.678、0.695，同一采样时期 TN 与 DN，DN 与 NO₃⁻ - N 均呈显著

正相关，说明水体中 TN 以溶解性 NO₃⁻ - N 为主，NO₃⁻ - N 的变化可以体现 TN 的变化趋势；② 同一采样时期 PP 和 DP 呈显著负相关，丰水期、枯水期相关系数为 -0.854、-0.790，说明水体中 DP 和 PP 之间存在吸附 - 解吸的平衡状态，当有磷溶液输入到水库中时，溶解态磷酸盐和颗粒磷立即向平衡状态进行再分配^[27]；③ 丰水期 NO₃⁻ - N 和

TP 呈显著正相关, 相关系数为 0.728, 说明氮、磷元素在丰水期具有同源性, 受生活污水排放影响的同时可能也受到农业面源污染的影响。目前库区流域内只建有西城和大站 2 个污水处理厂, 日处理能力分别为 6 万 m^3 和 1 万 m^3 , 污水处理率较低, 沿岸农村生活污水多为直排; 库区内生产活动多以农业为主, 降雨径流的冲刷会给库区带来大量氮磷营养物质; 枯水期并无显著相关关系, 由此推测氮、磷元素输入源不完全一致。氮元素受生活点源污染的影响可能更大, 磷元素可能主要受农业面源污染

的影响。

2.5 氮、磷营养盐结构

本研究 DIN 取 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之和, 表 3 为不同采样点的氮磷比: 丰水期水样 DIN/TP 在 4.0 ~ 27.2 之间, 枯水期水样 DIN/TP 在 7.7 ~ 47.1 之间; 除了下游 (B3、L1) 两个采样点, 其余采样点在枯水期的 DIN/TP 高于丰水期; 所有水样在丰、枯水期 DIN/TP 均大于 3.4, 即飞来峡水库属于磷营养限制类型。

表 2 丰水期和枯水期各项因子相关关系¹⁾

Table 2 Correlation between nutrients in different seasons

水期	项目	TN	DN	PN	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TP	PP	DP
丰水期	TN	1	0.828**	0.249	0.202	0.647	0.415	0.653	-0.326	0.517
	DN		1	-0.134	0.157	0.678*	0.550	0.583	-0.300	0.485
	PN			1	-0.137	0.207	0.153	0.151	-0.017	0.055
	$\text{NO}_2^- - \text{N}$				1	-0.369	0.520	0.070	0.289	-0.443
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$					1	0.083	0.728*	-0.059	0.416
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$						1	0.028	-0.303	0.166
	TP							1	0.317	0.159
	PP								1	-0.854**
	DP									1
枯水期	TN	1	0.900**	0.817**	0.316	0.653	0.479	-0.583	-0.276	-0.184
	DN		1	0.617	0.316	0.695*	0.529	-0.467	-0.477	0.084
	PN			1	-0.017	0.435	0.471	-0.383	0.042	-0.402
	$\text{NO}_2^- - \text{N}$				1	0.039	-0.164	-0.051	-0.219	0.300
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$					1	0.097	-0.251	-0.193	-0.038
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$						1	-0.143	0.105	-0.502
	TP							1	-0.653	-0.126
	PP								1	-0.790*
	DP									1

1) ** 相关性非常显著 ($P < 0.01$); * 相关性显著 ($P < 0.05$)

表 3 采样点氮磷相对丰度 DIN/TP

Table 3 DIN/TP ratio of different sampling sites

采样点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	W1	L1
丰水期	11.5	10.1	9.9	9.4	4.0	11.3	13.0	22.3	27.2
枯水期	13.0	14.6	7.7	22.1	8.5	24.3	13.5	47.1	8.7

3 结 论

通过对飞来峡水库 2015 年 6 月 (丰水期) 和 12 月 (枯水期) 水体氮、磷营养盐的采样监测, 结合 Spearman 相关性检验和氮磷比分析, 得到以下结论:

1) 飞来峡水库氮营养盐的主要存在形态为

$\text{NO}_3^- - \text{N}$, 丰、枯水期磷营养盐的主要存在形态分别为 PP 和 DP。

2) TN 浓度总体表现为丰水期 < 枯水期; TP 浓度总体表现为丰水期 > 枯水期。TN 浓度主要受生活污水排放的影响, 磷浓度变化情况具备面源污染特征。

3) 三个主要入库河流中, 丰水期滙江 TN 入

库通量最大, 为 1 128.4 g/s, 占主要入库河流总入库量的 36.8%; 枯水期北江干流 TN 入库通量大, 为 1 036.0 g/s, 占主要入库河流总入库量的 42.2%; 丰水期和枯水期 TP 入库通量最大值均为北江干流, 分别为 85.4 和 70.3 g/s, 占主要入库河流总入库量的 52.9% 和 52.2%。

4) 丰水期氮、磷元素具有同源性, 受生活污水排放影响的同时可能也受到农业面源污染的影响; 枯水期氮、磷元素输入源不完全一致, 揭示了氮元素受点源生活污水排放影响可能更大, 磷元素可能主要受农业面源污染影响。

5) 丰水期、枯水期水样的 DIN/TP 在 4.0 ~ 47.1 之间, 均大于 3.4, 即飞来峡水库营养盐结构为磷营养限制类型。

参考文献:

[1] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮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 F C, JIN X C, ZHANG R Y, et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment[J]. J Lake Sci, 2010, 22(1): 1-7.

[2] 江涛, 刘祖发, 陈晓宏, 等. 广东省水库富营养化评价[J]. 湖泊科学, 2005(4): 378-382.
JIANG T, LIU Z F, CHEN X H, et al. Assessment of reservoir eutrophication in Guangdong Province [J]. J Lake Sci, 2005, 17(4): 378-382.

[3] LI M T, XU K Q, WATANABE M, et al. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(1/2): 3-12.

[4] WIEGNER T N, SEITZINGER S P, GLIBERT P M, et al. Bioavailability of dissolved organic Nitrogen and Carbon from nine rivers in the eastern United States[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2006, 43(3): 277-287.

[5] BERMAN T, BRONK D A. Dissolved organic nitrogen: a dynamic participant in aquatic ecosystems. Aquatic Microbial Ecology, 2003, 31(3): 279-305.

[6] 叶琳琳, 吴晓东, 赵冬悦, 等. 崇明岛河网浮游植物和无机、有机氮的时空分布特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 528-536.
YE L L, WU X D, ZHAO D Y, et al. Temporal and spatial distributions of phytoplankton and inorganic and organic nitrogen in Chongming Island [J]. J Lake Sci, 2016(3): 528-536.

[7] 杨柳, 章铭, 刘正文. 太湖春季浮游植物群落对不同形

态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 605-611.
YANG L, ZHANG M, LIU Z W. Uptake of various forms of nitrogen by phytoplankton community in spring in Lake Taihu[J]. J Lake Sci, 2011, 23(4): 605-611.

[8] 杨骥, 姜树春. 松花江氮转化规律与氮污染容量研究[J]. 地理科学, 1989(3): 232-241.
YANG J, JIANG S C. The study on transformation principle of nitrogen and the capacity of nitrogen pollution in the Songhua River [J]. Scientia Geographica Sinica, 1989(3): 232-241.

[9] 刘敏, 林莉, 董磊, 等. 长江下游干流水体中氮的空间分布特征[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(06): 65-69.
LIU M, LIN L, DONG L, et al. Spatial distribution characteristics of nitrogen in mainstream lower Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(06): 65-69.

[10] 陈晓玲, 张媛, 张琨, 等. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征[J]. 湖泊科学, 2013, 25(5): 643-648.
CHEN X L, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Distribution characteristic of nitrogen and phosphorus in Lake Poyang during high water period[J]. J Lake Sci, 2013, 25(5): 643-648.

[11] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1268-1276.
WANG S H, WANG W W, JIANG X, et al. Spatial-temporal dynamic change of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1268-1276.

[12] 朱爱萍, 陈建耀, 江涛, 等. 深圳茅洲河口营养盐的时空分布特征[J]. 热带地理, 2015, 35(3): 298-305.
ZHU A P, CHEN J Y, JIANG T, et al. Spatial and seasonal variation of nutrients transportation in the Maozhou Estuary of Shenzhen, Guangdong[J]. Tropical Geography, 2015, 35(3): 298-305.

[13] 丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 不同氮磷比对藻类生长的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1759-1763.
FENG M W, WU Y H, FENG S X, et al. Effect of different N/P ratio on algal growth[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1759-1763.

[14] 蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究[J]. 地球与环境, 2010, 38(2): 235-241.
CAI L Y, LI Y, ZHENG Z H. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication[J]. Earth and Environment, 2010, 38(2): 235-241.

- [15] DOWNING J A, McCAULEY E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes[J]. *Limnol & Oceanogr*, 1992, 37(5):936-945.
- [16] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. *湖泊科学*, 2009(4):509-517.
LI Z, GUO J S, FANG F, et al. Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, three Gorges Reservoir[J]. *J Lake Sci*, 2009(4):509-517.
- [17] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J]. *生态学报*, 2012, 32(1):48-55.
NIE Z Y, LIANG X Q, XING B, et al. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1):48-55.
- [18] ANN-KRISTIN B. The use of TN:TP and DIN:TP ratios as indicators for phytoplankton nutrient limitation in oligotrophic lakes affected by N deposition[J]. *Aquatic Sciences*, 2010, 72(3):277-281.
- [19] PTACNIK R, ANDERSEN T, TAMMINEN T. Performance of the redfield ratio and a family of nutrient limitation indicators as thresholds for phytoplankton N vs. P limitation[J]. *Ecosystems*, 2010, 13(8):1201-1214.
- [20] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2):151-160.
HAN B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. *J Lake Sci*, 2010, 22(2):151-160.
- [21] 宋涛, 黄焕坤. 飞来峡水库为珠三角压咸补淡调度有关问题的分析[J]. *广东水利水电*, 2007(3):39-41.
SONG T, HUANG H K. The study on scheduling of Feilaixia Reservoir for estuarine fresh water providing on Pearl River Delta[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2007(3):39-41.
- [22] 谭超, 黄本胜, 邱静, 等. 飞来峡水利枢纽库区纳污能力及限制排污总量研究[J]. *水利水电技术*, 2015(12):81-84, 89.
TAN C, HUANG B S, QIU J, et al. Study on pollutant bearing capacity and limitation of pollutant discharge gross quantity reservoir area of Feilaixia Water Control Project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015(12):81-84, 89.
- [23] 谭超, 黄本胜, 洪昌宏, 等. 飞来峡水利枢纽库区动态纳污能力计算研究[J]. *水文*, 2014, 34(5):51-56.
TAN C, HUANG B S, HONG C H, et al. Analysis and calculation of dynamic water environmental capacity in Feilaixia Reservoir[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(5):51-56.
- [24] GB3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] 陈野. 长江中游水体颗粒磷与悬沙定量关系及其通量变化研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2014.
- [26] 杨尚, 罗淑葱, 翟海涛, 等. 大沙河水库主要入库河流氮磷营养输入分析[J]. *生态科学*, 2013(2):158-164.
YANG S, LUO L C, ZHAI H T, et al. Analysis on inputs of nitrogen and phosphorus from the main inflow rivers of Dashahe Reservoir[J]. *Ecological Science*, 2013(2):158-164.
- [27] 李健, 金中武, 杨文俊. 颗粒态和溶解态磷浓度计算公式的推导与验证[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(1):33-38.
LI J, JIN Z W, YANG W J. Calculation formulas for particulate and dissolved phosphorus concentrations[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(1):33-38.