

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素

申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 吴金水

引用本文:

申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 等. 亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2420–2428.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1257>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

亚热带小流域浅层地下水不同形态氮含量的时空变异特征

焦军霞, 周脚根, 杨文, 冯青郁, 张满意, 李裕元

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1573–1582 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0170>

降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响

郭泽慧, 刘洋, 黄懿梅, 晏江涛, 腾飞, 王永斌

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 158–166 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0893>

香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响

崔超, 刘申, 翟丽梅, 张富林, 刘宏斌, 雷秋良, 武淑霞, 华玲玲, 周继文

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 129–138 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.018>

池塘养殖污染负荷核算方法研究及比较分析

李丽芬, 徐云强, 苏保林, 乔飞, 雷坤, 何璟嫒

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2174–2183 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0393>

喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 安艳玲, 付宇文, 刘瑞禄, 吕婕梅

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1486>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 等. 亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2420–2428.

SHEN Ya-li, ZHOU Jiao-gen, PENG Pei-qin, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen and phosphorus contents in cascade ponds in subtropical headstream watershed and its influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2420–2428.



开放科学 OSID

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素

申雅莉^{1,2,3}, 周脚根^{2,3*}, 彭佩钦¹, 吴金水³

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 淮阴师范学院城市与环境学院, 江苏 淮安 223300; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要: 研究亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的变异机制, 有利于理解农业小流域池塘水体氮磷面源污染的发生机制。本研究以亚热带红壤丘陵区典型农业小流域——金井小流域为研究区, 选择18组典型梯级池塘(每组上、下游池塘各1个, 共36个池塘)进行长期定位观测, 采用2017年6月到2018年5月期间共12个月梯级池塘水体氮磷的定位观测数据, 分析总氮(TN)和总磷(TP)含量的时空变异及其影响因素。结果表明: 梯级池塘水体TN含量呈现上游($1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)低于下游($2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TP含量上游与下游接近, 且上下游池塘TN和TP含量趋势在旱季偏高; 梯级池塘水体TN和TP指标超标严重, 超标率72.8%以上; 周边土地利用类型和养鱼影响了梯级池塘水体TN和TP含量, 相对不养鱼池塘, 养鱼池塘水体TN和TP含量分别增加了60%、34%。研究结果表明, 农业土地利用和养鱼加剧了研究区梯级池塘水质恶化, 加强农田面源污染和水产养殖管理有助于梯级池塘水质提升。

关键词: 梯级池塘; 氮; 磷; 时空变异; 土地利用; 养鱼

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2420-09 doi:10.11654/jaes.2019-1257

Spatio-temporal variation of nitrogen and phosphorus contents in cascade ponds in subtropical headstream watershed and its influencing factors

SHEN Ya-li^{1,2,3}, ZHOU Jiao-gen^{2,3*}, PENG Pei-qin¹, WU Jin-shui³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. School of Urban and Environmental Sciences, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: The study of spatial-temporal variability of nitrogen and phosphorus in cascade pond systems helps to understand the mechanism of occurrence of non-source N and P pollution in ponds of agricultural watersheds. The typically subtropical hilly watershed of Jinjing was used as the study region. The total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations were measured in 18 groups of cascade ponds (36 ponds in total) from June 2017 to May 2018. The spatial-temporal variability and its drivers of TN and TP contents were explored using the observations of the consecutive 12 months. The averaged TN concentrations were lower in the upstream ponds ($1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) than those in the downstream ponds ($2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and the upstream TP contents were close to the downstream ones. Generally, high TN and TP contents occurred in upstream and downstream ponds during the dry seasons. The pollution of TN and TP was serious in the

收稿日期: 2019-11-15 录用日期: 2020-07-03

作者简介: 申雅莉(1995—), 女, 湖南邵东人, 硕士研究生, 从事水体富营养化研究。E-mail: SYL_melody@163.com

*通信作者: 周脚根 E-mail: zhoujg@hytc.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800504); 国家自然科学基金项目(41877009)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0800504); The National Natural Science Foundation of China(41877009)

observed ponds. According to the national surface water quality standard, the water quality of more than 72.8% of observations in upstream and downstream ponds worse than the Class III of surface water standard. The TN and TP contents in the cascade ponds were affected by the surrounding land use types and fish farming. Compared to non-fish farmed ponds, fish farming increased the TN and TP contents by 60% and 34%, respectively. The study suggests that agricultural land use and fish farming exacerbate the deterioration of the water quality of TN and TP in cascade pond systems. Strengthening the prevention and control of non-source pollution from farmland and aquaculture management will help the improvement of the water quality of TN and TP in ponds of the subtropical agricultural watershed.

Keywords: cascade ponds; nitrogen; phosphorus; spatial-temporal variation; land use; fish farming

世界范围内水体面积小于 0.1 km^2 的内陆水体约占全球地表水面积30%,是全球内陆水体生物地球化学过程的热区^[1-2]。作为地表小水体的类型之一,池塘是内陆水体的重要组成部分,在社会经济发展和生态系统服务中发挥了重要作用^[3]。池塘是农业供水和保障农业生产的重要水利节点,也是水产养殖场所^[4]、水生生物的栖息地^[5],更是发挥小气候调节以及娱乐观光等生态功能、控制面源污染的重要小型湿地生态系统^[6-8]。

多塘系统(Multi-pond system)是指多个池塘通过沟渠、地表径流或是地下水径流相连形成的湿地系统,广泛分布于我国农村地区^[9]。多塘系统具有拦截地表径流、泥沙以及养分的重要生态功能,是目前农业面源污染控制与治理研究的热点。现有研究表明,多塘系统对流域非点源污染中氮磷截留效果显著。例如,江苏省邵伯湖流域多塘系统对不同氮素组分的平均截留率约为50%^[10],而安徽六叉河地区池塘对总氮的截留比例高达98%^[11]。此外,多塘系统对污染物的截留效应与池塘自身特征(库容、面积、水深、形状等)有关,也与连通池塘的水系网络结构(沟渠密度、长度及沟渠条数、节点数等)有关^[10]。不过,在全球气候变化和快速城市化背景下,池塘数量和面积不断减少,其蓄洪抗旱、截污去垢等生态功能退化,水质恶化严重^[8,12]。因此,有必要系统开展池塘水质监测,加强塘库生态管控,提升池塘生态功能^[3]。

梯级池塘(Cascade ponds)是多塘系统中具有海拔地势差异从而形成上、下游关系的多个池塘组合,多见于我国亚热带丘陵区。梯级池塘是地表径流过程中物质沉积与水体停留的汇点,充当流域面源污染物消纳的“汇”和污染物输出的“源”^[13],但有关亚热带丘陵区梯级塘库水质变化特征及其影响因素的研究报道还不多见。本文拟选择亚热带丘陵区典型农业小流域为研究区,研究小流域梯级塘库氮磷含量的时空变异及其影响因素,为亚热带小流域梯级池塘水库污染防控提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究以亚热带洞庭湖上游源头流域——金井小流域为研究区。该流域位于湖南省长沙县金井镇,地处东经 $112^{\circ}56'$ ~ $113^{\circ}30'$ 、北纬 $27^{\circ}55'$ ~ $28^{\circ}40'$,流域面积 105 km^2 。该流域属亚热带湿润季风气候,年降水量 $1\ 200\sim 1\ 500\text{ mm}$,年均气温 $17.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;海拔 $56.0\sim 434.8\text{ m}$,为亚热带典型红壤丘陵地貌。研究区属于典型农业小流域,土地利用方式以林地、农田、旱地、居民地以及水域为主^[8],农业种植及养殖是引发研究区地表水氮磷污染的重要因素。

1.2 梯级池塘样点布设

采用研究区近期高分辨率彩色影像(2016年12月, 0.5 m 分辨率),借助ArcGIS软件完成研究区内森林、农田、居民区、池塘、水库及道路等土地利用要素的目视解译与矢量图层输出。按影像解译结果,该小流域池塘数量有2 012个,密度高达 $19\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$ 。此外,借助野外实地调查,获取池塘周边景观类型、池塘经营管理(是否养鱼)、池塘周边污染物输入以及池塘与沟渠的连通状况等数据资料。

梯级池塘样点布设主要依据如下原则:(1)每组梯级池塘处于一个相对独立的集水区,且上下游池塘之间有可运行的沟渠连通;(2)池塘存在年限 $>10\text{ a}$,以保障池塘发育相对完善;(3)所选池塘样点的周边景观类型涵盖研究区森林、农田和居民区3种主要土地利用类型。依据上述布点原则,并权衡池塘观测成本,本研究选择18组典型梯级池塘。每组梯级池塘由分别处于集水区上游和下游的两口池塘组成,共36口池塘(图1)。所选梯级池塘上下游的周边景观与养殖活动存在差异较大(表1),上游池塘周围景观主要为林地(78%),约有一半池塘有鱼类养殖(56%),下游池塘周围景观中,林地仅占33%,其余为农田(39%)和居民区(28%),养鱼池塘占比较高(78%)。

1.3 水样采集及测定

池塘水体氮磷监测于2017年6月开始,于每月20日前后采集池塘水样。使用1 L广口瓶采集池塘上层0~50 cm水样,每次池塘采样点固定。采集回来的样品于48 h内进行总氮(TN)、总磷(TP)浓度测定。

TN与TP浓度皆采用国家标准方法测定。TN测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,利用流动注射分析仪(AA3)进行测定;TP的测定采用过硫酸钾消解钼锑抗显色紫外分光光度法,利用可见光紫外分光光度计(UV2450)进行测定。测定时每一个样品均设定两个平行样,取其平均值作为最终测

表1 金井小流域梯级池塘统计信息

Table 1 Statistical information of the cascades in the small watershed of Jinjing

组别 Group	池塘编号 Pond number	位置 Location	总氮 Total nitrogen/(mg·L ⁻¹)	总磷 Total phosphorus/(mg·L ⁻¹)	土地利用类型 Landuse type	是否养鱼 Fish farming or not
1	P6	上游	1.84±1.02	0.40±0.34	林地	是
	P10	下游	3.10±1.91	0.35±0.17	农田	是
2	P20	上游	3.61±1.77	0.34±0.13	居民区	是
	P17	下游	2.58±0.63	0.31±0.06	居民区	是
3	P29	上游	4.48±2.89	0.40±0.29	林地	是
	P24	下游	7.23±3.54	0.40±0.20	农田	是
4	P30	上游	1.46±0.49	0.24±0.06	林地	否
	P27	下游	1.86±1.76	0.17±0.07	林地	是
5	P45	上游	2.91±1.30	0.31±0.21	林地	是
	P44	下游	2.47±0.69	0.38±0.26	林地	是
6	P49	上游	0.69±0.42	0.12±0.11	林地	否
	P48	下游	2.54±1.44	0.32±0.23	居民区	是
7	P54	上游	2.09±1.76	0.21±0.16	林地	否
	P56	下游	1.68±0.80	0.17±0.09	农田	否
8	P60	上游	1.16±0.41	0.22±0.29	林地	是
	P58	下游	1.38±0.65	0.19±0.18	农田	是
9	P61	上游	1.39±0.77	0.12±0.06	林地	否
	P62	下游	1.37±0.37	0.11±0.04	居民区	是
10	P68	上游	0.94±0.25	0.11±0.03	林地	否
	P70	下游	1.64±0.51	0.18±0.07	农田	是
11	P75	上游	0.55±0.25	0.11±0.08	林地	否
	P74	下游	1.28±0.88	0.25±0.31	林地	否
12	P80	上游	2.53±0.52	0.25±0.12	林地	是
	P73	下游	3.99±1.07	0.38±0.19	农田	是
13	P84	上游	1.06±0.85	0.25±0.21	林地	是
	P82	下游	0.47±0.17	0.07±0.02	林地	是
14	P86	上游	1.97±0.45	0.41±0.28	农田	否
	P117	下游	3.29±1.51	0.32±0.12	居民区	否
15	P88	上游	2.04±0.34	0.19±0.17	林地	否
	P116	下游	1.81±0.64	0.19±0.08	林地	是
16	P97	上游	2.42±3.47	0.23±0.27	林地	是
	P95	下游	1.29±0.69	0.20±0.19	林地	是
17	P100	上游	1.39±0.38	0.24±0.14	居民区	是
	P99	下游	6.54±5.91	0.45±0.43	居民区	是
18	P114	上游	0.90±0.40	0.09±0.04	林地	是
	P112	下游	1.54±0.67	0.14±0.05	农田	是



图1 金井小流域梯级池塘观测样点

Figure 1 The spatial distribution of the sampled cascade ponds in the small watershed of Jinjing

定结果。

2 结果与分析

2.1 梯级池塘上下游水质状况

根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 18组梯级池塘TN和TP含量指标分类结果见图2。上游、下游池塘水体TN含量指标在Ⅲ类水质及以下的分别占95.7%和96.8%, 其中V类水质的分别占58.4%、61.4%。全年上下游池塘水体样品中, 99%以上的TP含量指标未达到Ⅱ类水质, 其中V类水质标准的上下游池塘样本分别为78.4%、83.5%。这表明研究区梯级池塘水质氮磷指标超标严重, 特别是池塘水体TP污染程度超过水体TN。

2.2 上下游池塘TN和TP含量的年变化

研究区梯级池塘水体TN和TP含量的时空变化较大。梯级池塘中上游池塘TN含量年平均值的变幅为0.55~4.48 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下游池塘TN含量年平均值的变幅为0.47~7.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 上游池塘TP含量的年平均值的变幅为0.09~0.41 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下游池塘TP含量的年平均值的变幅为0.07~0.45 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表1)。总体上, 上游池塘TN的年均值为1.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于下游池塘的2.56 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图3A); 而上下游池塘水体TP含量的年

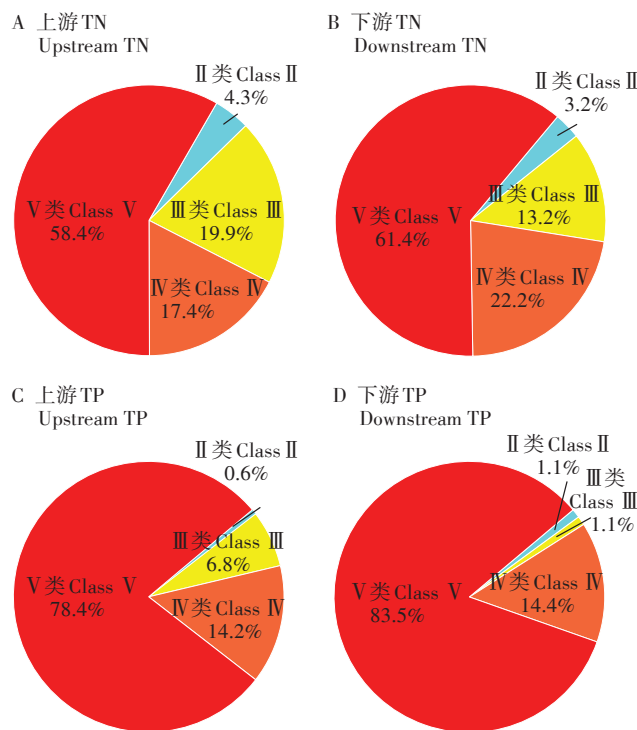
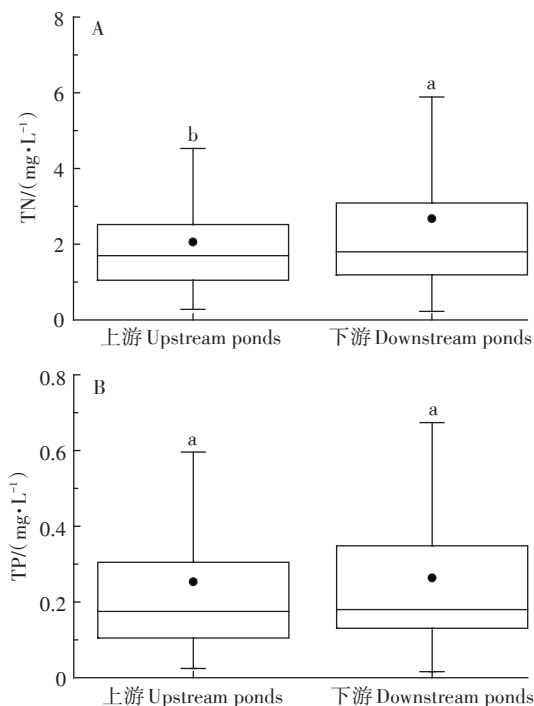


图2 梯级池塘TN和TP水质分类

Figure 2 Water quality levels of cascade ponds



不同小写字母代表在0.05水平上差异显著。下同
Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level. The same below

图3 上、下游池塘TN和TP含量年均值

Figure 3 The annual mean contents of TN and TP in upstream and downstream ponds

均值接近,上游为 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下游为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图3B)。进一步比较梯级池塘TN和TP含量的中位数与平均值,可见上游和下游池塘TN和TP含量的平均值都偏离中位数而接近上四分位数。这表明上游或下游均有TN和TP含量特别高的池塘样点,造成样本平均值的偏离。综合上下游池塘TN和TP含量数据,发现TN和TP含量最高的前25%池塘样点,皆存在鱼类养殖,这引发了池塘水体TN和TP含量的偏高,且上下游池塘的TN含量具有显著差异($P < 0.05$),而TP含量差异则并不显著($P > 0.05$)。

2.3 上下游池塘TN、TP的季节变化及其空间分布特征

在2017年6月至2018年5月,研究区梯级池塘中上游与下游池塘TN含量的季节变化呈现相似的变化趋势:5—8月,池塘TN含量相对低,上游为 $0.28 \sim 6.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下游为 $0.23 \sim 5.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;9月—次年2月,池塘TN含量相对高,上游为 $0.48 \sim 13.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下游为 $0.48 \sim 17.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图4)。上下游TN含量的最高值

出现的月份有所差异,上游在3月份达到最高值 $11.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而下游在4月达到最高值 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与TN含量的季节变化相比,研究区TP含量的季节变化也有一定的相似性,但季节波动更大(图5)。上下游池塘皆在11月出现全年的最高值(上游为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下游为 $1.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和最大的波动,同时整体上3—5月上游池塘TP的平均含量($0.37 \pm 0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和下游池塘TP的平均含量($0.43 \pm 0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)比其他月份高。

进一步用Heatmap图表征研究区所有池塘TN和TP逐月含量的空间分布特征(图6)。由图可知,研究区上下游池塘TN和TP逐月含量具有较大的空间变异性,TN含量变程为 $0.20 \sim 17.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6C、图6D)、TP含量变程为 $0.015 \sim 1.300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6A、图6B)。整体上,研究区观测池塘TN和TP含量趋向于在冬季和春季偏高,这与上文所述研究区池塘水体TN和TP的月均值变化特征相吻合。

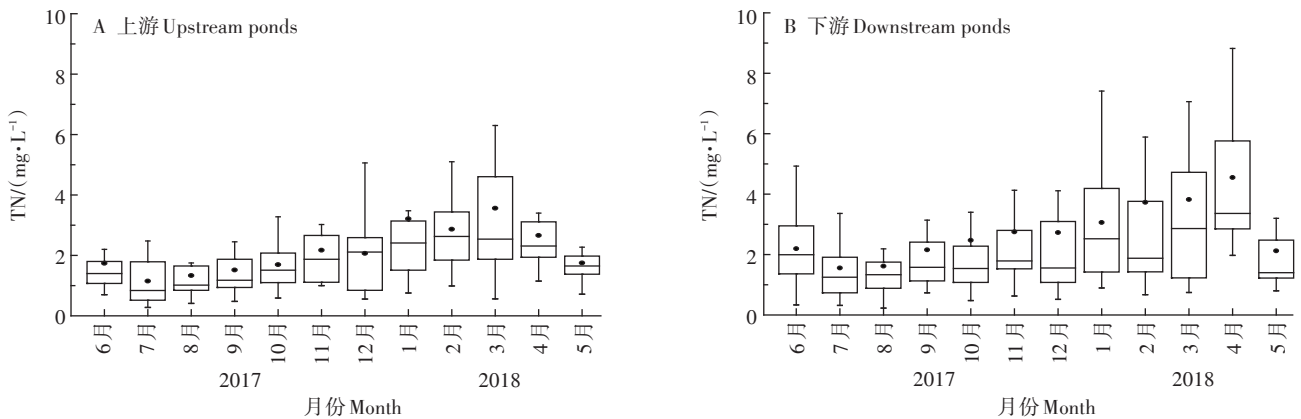


图4 梯级池塘水体TN含量月均值变化

Figure 4 The monthly variation of TN mean contents in the cascade ponds

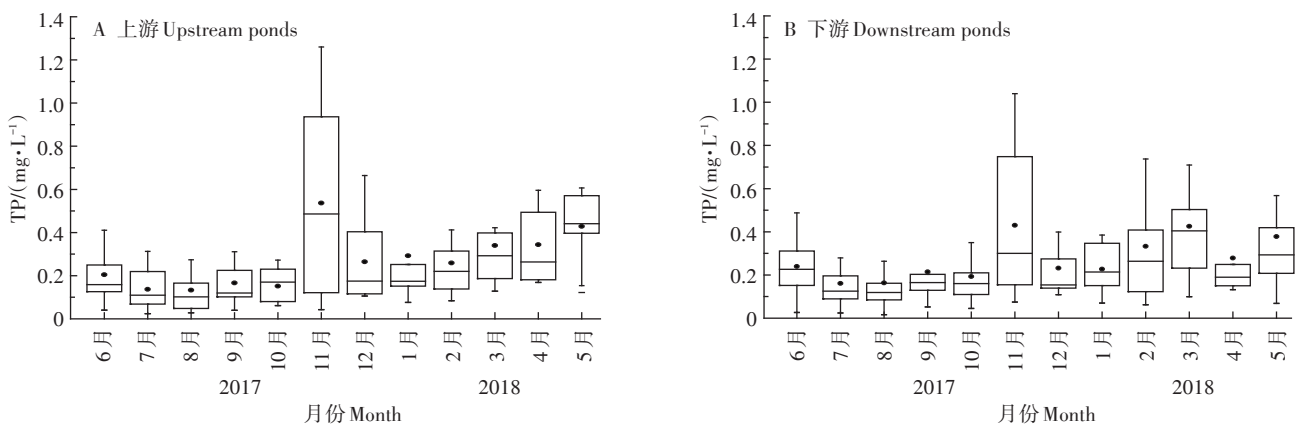


图5 梯级池塘水体TP含量月均值变化

Figure 5 The monthly variation of TP mean contents in the cascade ponds

2.4 梯级池塘水体 TN、TP 含量对周边景观类型和池塘利用方式的响应

鱼类养殖是研究区内池塘的主要经营利用方式,也是影响池塘水体氮磷含量的重要因素。与不养鱼

池塘相比,养鱼池塘 TN 与 TP 含量增加明显($P < 0.05$)。相对不养鱼的池塘,养鱼池塘水体 TN 含量显著增加了 60%(图 7A),TP 含量也增加了 34%(图 7B)。

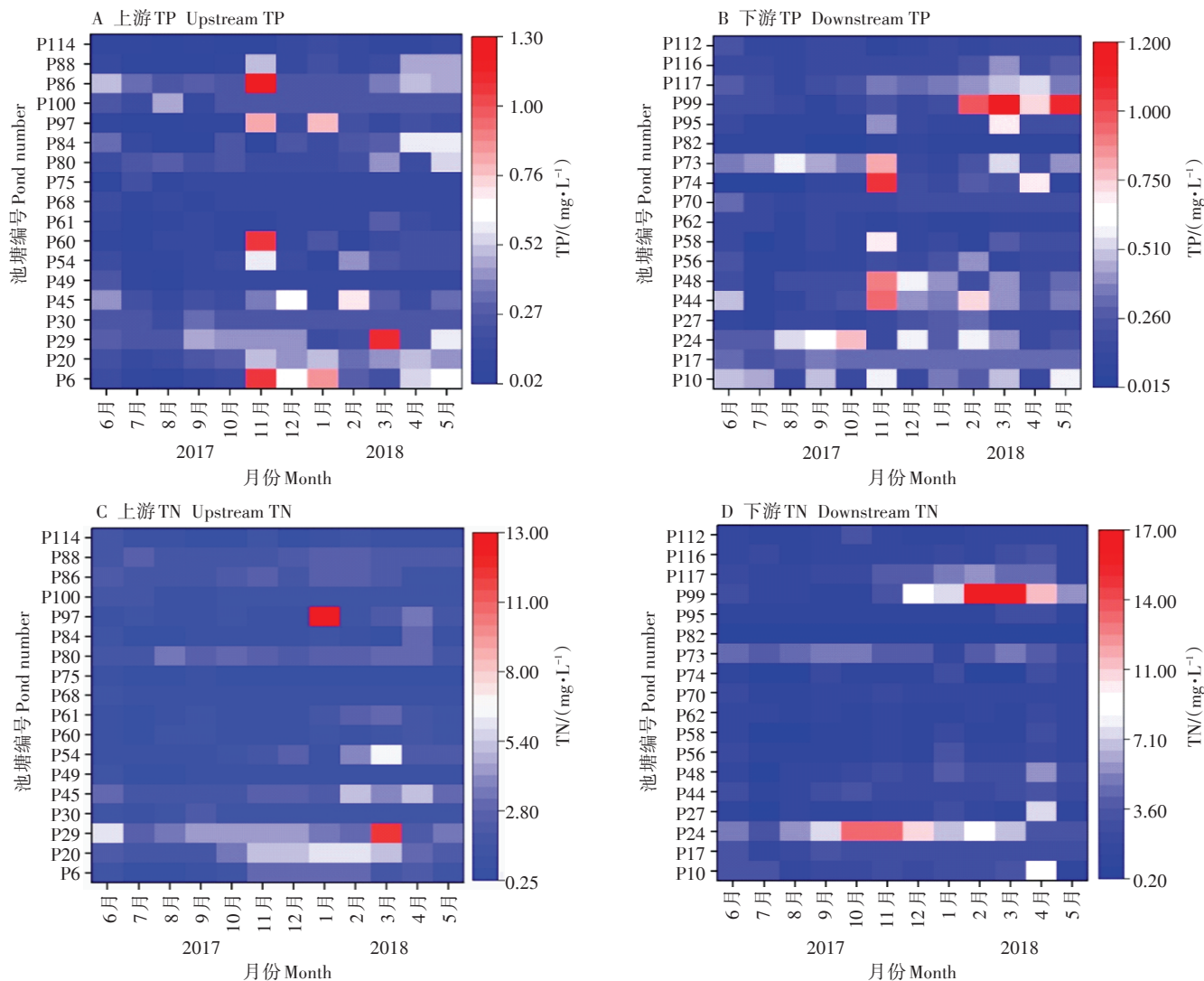


图6 梯级池塘 TN 和 TP 逐月含量的空间分布

Figure 6 Spatial distribution of the monthly contents of TN and TP in cascade ponds

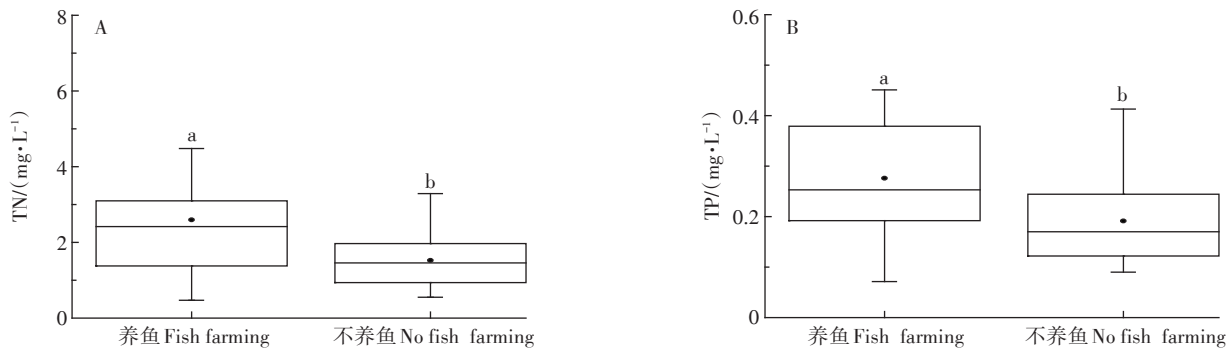


图7 养鱼对梯级池塘水体 TN 和 TP 含量的影响

Figure 7 Effects of fish farming on TN and TP contents of water bodies in cascade ponds

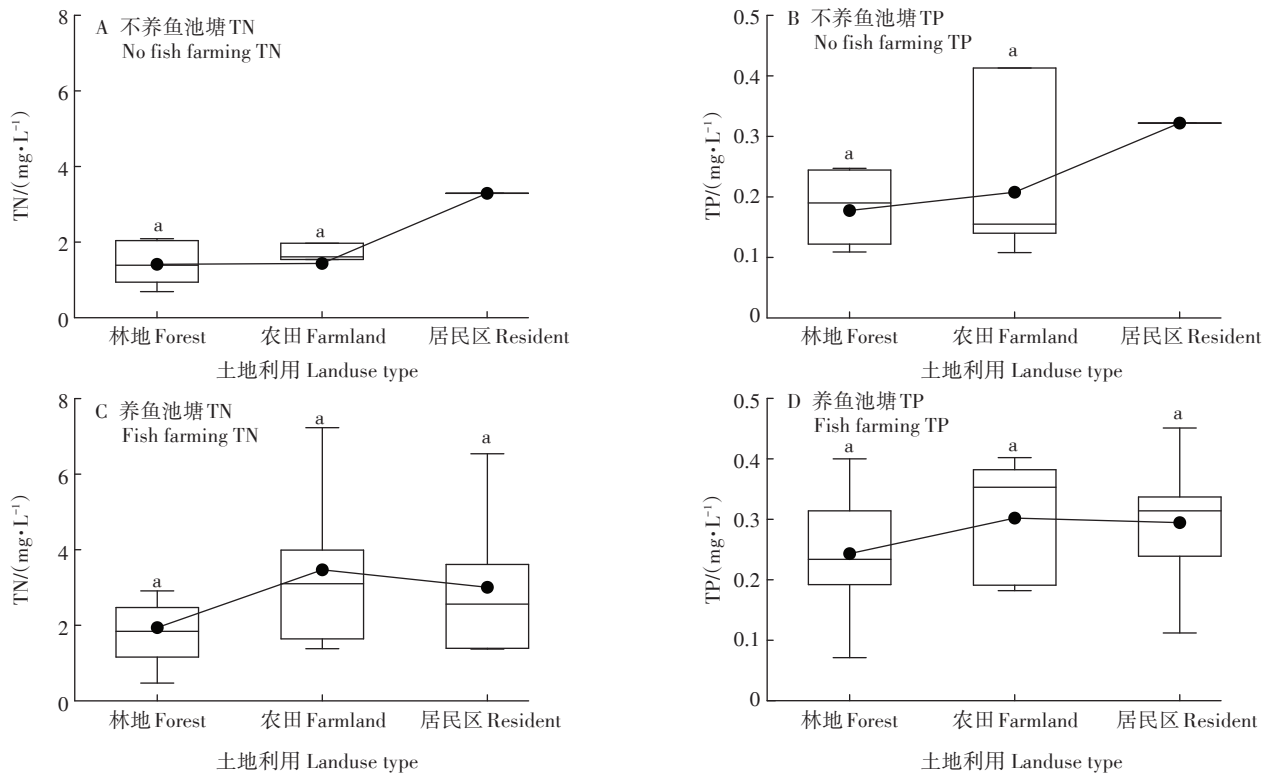


图8 土地利用对梯级池塘TN和TP含量年均值的影响

Figure 8 Effects of land use on annual mean value of TN and TP contents in cascade ponds

为了探究周边景观类型对池塘TN与TP含量的影响,进一步按景观类型对养鱼池塘和不养鱼池塘进行细分。整体上,无论池塘养鱼还是不养鱼,周边景观类型不同的池塘水体TN和TP含量的年均值皆无显著差异($P>0.05$)(图8)。在相同池塘经营管理模式下,农业土地利用改变了梯级池塘水体TN与TP含量的分布特征。在农田和居民景观类型池塘中,TN与TP含量的中位数整体上都高于林地景观类型池塘。这表明,相对自然池塘(林地景观类型),农田氮磷污染物和居民污水的输入引发了梯级池塘水体TN和TP的积累。

3 讨论

本研究选择亚热带丘陵区金井小流域,开展梯级池塘水体氮磷含量时空变化研究。研究结果显示,在梯级池塘中上游池塘TN和TP含量总体上低于下游池塘。这与上下游池塘对地表径流和污染物接纳差异有关。本研究区的梯级池塘皆是沿坡地势挖掘的人工池塘,上游池塘周围景观多为林地(78%),下游池塘景观多为农田与居民区(67%),上下游池塘的连接主要通过降雨时的径流、干沟渠与植草水道。这

些池塘承接流经林地、农田或村落的地表径流,成为面源污染暂时性的“汇”^[14-15]。当降雨时,上游池塘水溢出,流入下游池塘,上游池塘即成为下游池塘污染物的“源”。下游池塘除了接收降雨径流带来的上游污染物外,还存在鱼类养殖^[16],造成梯级池塘中下游池塘的TN、TP含量相对高于上游。

研究区梯级池塘水体TN与TP含量皆呈现雨季含量低而旱季含量高的季节性变化,该变化趋势符合中国南方湖泊典型营养盐季节变化,也与研究区下游的洞庭湖氮磷含量变化相似^[17]。金井流域年降水量为1 200~1 500 mm,其中3—6月为雨季,9月—次年2月为旱季,池塘水量主要受天然降水的影响^[18](图9)。池塘水体TN和TP含量的月变化整体上与研究区月均降雨量变化保持一致。池塘水量变化可能是导致池塘水体氮磷含量变化的重要原因。雨季时雨水径流进入池塘,在扩大池塘水量的同时稀释了池塘水体TN和TP浓度;旱季时池塘水蒸发或农业用水取水很大程度地减少了池塘水量,导致池塘水体氮磷含量浓缩。研究区旱季池塘水深显著低于雨季(图10),这间接佐证了上述推论。

研究区域梯级池塘氮磷水质富营养化严重,

72.8% 以上的观测池塘水质未达到地表水Ⅲ类标准。研究区池塘 TN 与 TP 含量与国内外受人为活动影响的池塘水体 TN、TP 含量位于同一数量级^[19],且接近下游洞庭湖水体氮磷含量(表 2)。相对于大型湖泊水体,池塘的水体体积小、滞留时间长,且承接大量鱼类养殖或周边环境输入的氮磷污染物,可能累积更高含量的 TN 与 TP^[20]。然而研究区梯级池塘 TN 含量接近下游洞庭湖,这可能是由于池塘具有较强的氮磷生态消纳功能。有研究显示,池塘对径流氮磷的移除率分

别高达 74% 和 52%^[21],对农田排水中 TN 和 TP 去除率分别为 22.% 和 9.6%^[22]。梯级池塘可视为陆域水体的生态过渡带,能降低水流速度、增加水体滞留时间,具备氮磷等污染物质的储存、过滤与移除等潜在生态功能^[13,23]。此外,池塘建造与维护费用低廉,亦具备水产养殖等经济价值,可以作为一个治理农村地区面源污染的长期可持续性策略^[24]。因此,加强研究区梯级池塘水体富营养化的生态管控,不仅利于改善梯级池塘水体氮磷污染,而且利于该地区下游氮磷面源污染防控。鉴于研究区梯级池塘水体 TP 污染重于 TN 污染,需重点关注该地区梯级池塘水体的磷素污染防控。

4 结论

- (1)梯级池塘中,上游池塘水体 TN 和 TP 的含量相对高于下游池塘,整体上 TN 和 TP 含量呈现相似的季节性变化趋势,即雨季含量降低,旱季含量升高。
- (2)研究区梯级池塘水质 TN 和 TP 指标超标率 72.8% 以上,且水体 TP 污染比 TN 污染严重;农业土地利用和池塘养鱼是引发研究区梯级池塘水体 TN 与 TP 污染的重要因素。
- (3)加强农田面源污染、居民污水及水产养殖的生态管控是减少研究区池塘水体氮磷污染的有效举措,特别是要加强研究区水体磷素污染的管控。

参考文献:

[1] Bennion H, Smith M A. Variability in the water chemistry of shallow ponds in southeast England, with special reference to the seasonality of nutrients and implications for modeling trophic status[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 436(1/2/3): 145–158.

[2] Cai C F, Gu X H, Ye Y T, et al. Assessment of pollutant loads discharged from aquaculture ponds around Taihu Lake, China[J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44(5): 795–806.

[3] Chen W J, He B, Nover D, et al. Farm ponds in southern China: Challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1322–1334.

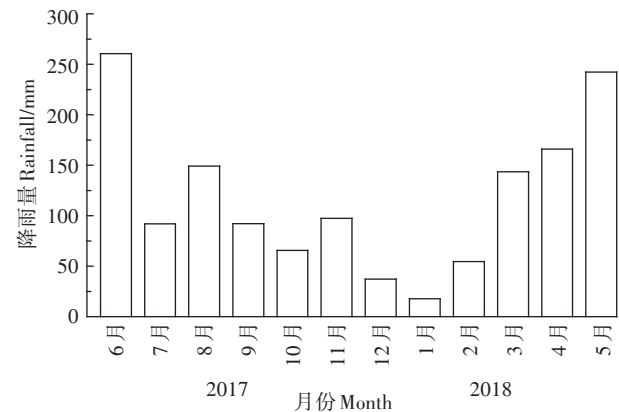


图9 金井流域累积降雨量
Figure 9 Cumulative rainfall of Jinjing watershed

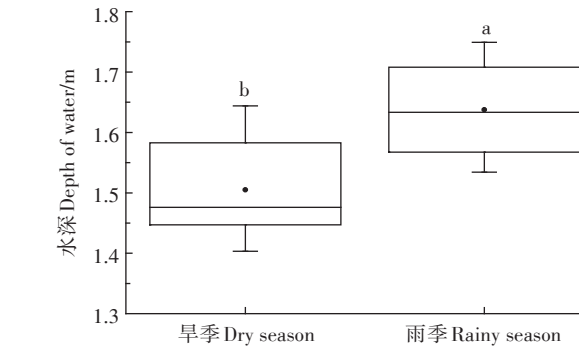


图10 池塘旱季与雨季水深
Figure 10 Water depth of ponds in dry and rainy seasons

表2 国内外池塘/湖泊水体TN与TP含量比较					
Table 2 Comparison of TN and TP contents in ponds/lakes in China and abroad					
地区 Region	水体类型 Water body types	土地利用类型 Landuse types	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	来源 Source
美国宾夕法尼亚州	池塘	居民区、农田	2.62±0.63	0.03±0.02	[7]
英国伦敦	池塘	林地、居民区、农田	1.75±1.36	0.19±0.17	[1]
安徽巢湖	池塘	林地、居民区、农田	2.53±0.18	0.97±0.37	[20]
江苏太湖	池塘	居民区、农田	2.84±0.86	0.33±0.10	[2]
湖南洞庭湖	湖泊	林地、居民区、农田	2.25± 0.78	无数据	[10]
湖南长沙	池塘	林地、居民区、农田	2.20±1.49	0.24±0.11	本研究

- [4] Dougherty M, Randel L, Dymond, et al. Empirical modeling of hydrologic and pollutant flux in an urbanizing basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(5): 1405–1419.
- [5] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 2388–2397.
- [6] Downing J A. Emerging global role of small lakes and ponds: Little things mean a lot[J]. *Limnetica*, 2010, 29(1): 9–24.
- [7] Fairchild G W, Velinsky D J. Effects of small ponds on stream water chemistry[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2006, 22(4): 321–330.
- [8] Li Y, Jiao J, Wang Y, et al. Characteristics of nitrogen loading and its influencing factors in several typical agricultural watersheds of subtropical China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(3): 1831–1840.
- [9] Myrstener M, Jonsson A, Bergström A K. The effects of temperature and resource availability on denitrification and relative N_2O production in boreal lake sediments[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 47(9): 82–90.
- [10] Tian Z, Zheng B, Wang L, et al. Long term (1997–2014) spatial and temporal variations in nitrogen in Dongting Lake, China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0170993.
- [11] Yin C, Shan B. Multipond systems: A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *AMBIO*, 2001, 30(6): 369–376.
- [12] Yin C, Zhao M, Jin W, et al. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China[M]//Nutrient dynamics and retention in land/water ecotones of lowland, temperate lakes and rivers. Dordrecht: Springer, 1993: 321–329.
- [13] 何军, 崔远来, 吕露, 等. 沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1872–1879.
- HE Jun, CUI Yuan-lai, LÜ Lu, et al. Experiments on removal effects of ditch-pond wetland system on N and P pollutants from paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1872–1879.
- [14] 李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2482–2489.
- LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Peng-fei, et al. Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2482–2489.
- [15] 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 等. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4999–5006.
- LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, et al. Effect of different multi-pond network landscape structures on nitrogen retention over agricultural watersheds[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 4999–5006.
- [16] 刘洋, 付强, 陆海明, 等. 农业流域中不同类型水塘沉积物磷素状态及其环境意义[J]. 环境化学, 2013, 32(12): 2307–2314.
- LIU Yang, FU Qiang, LU Hai-ming, et al. The status of phosphorus and its environmental significance in various pond sediments in an agriculture watershed[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(12): 2307–2314.
- [17] 聂小飞, 李恒鹏, 李新艳. 巢湖典型子流域上下游水塘对暴雨径流氮磷去除效率比较[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1): 89–95.
- NIE Xiao-fei, LI Heng-peng, LI Xin-yan. Comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiencies by storm runoffs for the ponds in the upper and lower reaches of a typical sub-catchment in Lake Chao-hu drainage basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2012, 24(1): 89–95.
- [18] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地系统对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 406–411.
- PENG Shi-zhang, GAO Huan-zhi, ZHANG Zheng-liang. Effect of pond wetland on N and P removal in drainage water from paddy field and its mechanism[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 406–411.
- [19] 孙璞. 农村水塘对地块氮磷流失的截留作用研究[J]. 水资源保护, 1998(1): 1–6.
- SUN Pu. Study on the interception effect of rural reservoirs on soil nitrogen and phosphorus loss[J]. *Water Resources Protection*, 1998(1): 1–6.
- [20] 孙庆业, 马秀玲, 阳贵德, 等. 巢湖周围池塘氮、磷和有机质研究[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1510–1515.
- SUN Qing-ye, MA Xiu-ling, YANG Gui-de, et al. Studies on nitrogen, phosphorus and organic matter in ponds around Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1510–1515.
- [21] 涂安国, 尹炜, 陈德强, 等. 多水塘系统调控农业非点源污染研究综述[J]. 人民长江, 2009, 40(21): 71–73.
- TU An-guo, YIN Wei, CHEN De-qiang, et al. A review on the regulation of agricultural non-point source pollution by multi-reservoir system[J]. *Yangtze River*, 2009, 40(21): 71–73.
- [22] 尹澄清, 毛战坡. 用生态工程技术控制农村非点源水污染[J]. 应用生态学报, 2002, 1(2): 229–232.
- YIN Cheng-qing, MAO Zhan-po. Nonpoint pollution control for rural areas of China with ecological engineering technologies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 1(2): 229–232.
- [23] 张好琳, 刘晓南, 赵宇, 等. 快速城市化地区塘的消减过程研究——以广州市天河区为例[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 244–251.
- ZHANG Shu-lin, LIU Xiao-nan, ZHAO Yu, et al. The disappearance and reduction process of ponds in rapid urbanization area: Tianhe District, Guangzhou City as a case[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 244–251.
- [24] 孟岑, 李裕元, 吴金水, 等. 亚热带典型小流域总氮最大日负荷(TMDL)及影响因子研究——以金井河流域为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 700–709.
- MENG Cen, LI Yu-yuan, WU Jin-shui, et al. Study on total nitrogen TMDL and its contributing factors in typical subtropical watersheds: A case study of Jinjinhe watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 700–709.