

南京市小型水库水质评价和富营养化分析

陈美军¹, 陈非洲^{2,3}

- (1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 小型水库数量众多, 在防洪、灌溉、供水、养殖和生态环境方面发挥了重要的作用。2018 年 7 月 (丰水期) 和 2019 年 4 月 (枯水期) 对南京市 37 个小型水库水质进行了调查。丰水期总氮平均浓度 1.01 mg/L, 显著低于枯水期的 1.49 mg/L。丰水期总磷平均浓度 0.057 mg/L, 枯水期 0.055 mg/L, 两个时期无显著差异。高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 丰水期平均浓度 4.92 mg/L, 不显著高于枯水期的 4.58 mg/L。南京市小型水库丰水期以 III 类水为主 (48.7%), V 和劣 V 类占 27.0%, 影响指标为总氮和总磷; 枯水期 V 类水比例较高 (41.7%), 其次是 IV 类水 (30.5%), 影响指标为总氮。两个时期富营养和中营养水库分别占比约 55.0% 和 45.0%。平原型水库水质劣于丘陵型水库。结果表明, 与大中型水库相比, 小型水库水质更易受氮磷的影响, 应重视小型水库的富营养化问题。

关键词: 总氮; 总磷; 富营养化; 面源污染; 小型水库

中图分类号: X824

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.04.015

Water Quality Evaluation and Eutrophication Analysis of Small Reservoirs in Nanjing

CHEN Meijun¹, CHEN Feizhou^{2,3}

- (1. Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is a great amount of the small reservoirs, and they play an important role in the flood control, irrigation, water supply, aquaculture and ecological environment. Thirty-seven small reservoirs in Nanjing were investigated for the water quality in July 2018 (wet season) and April 2019 (dry season). The average concentration of the total nitrogen (TN) in the wet season was 1.01 mg/L, which was significantly lower than that in the dry season (1.49 mg/L). There was no significant difference in the average concentration for the total phosphorus (TP) in the wet season (0.057 mg/L) or in the dry season (0.055 mg/L). The average concentration of COD_{Mn} in the wet season was 4.92 mg/L. It was a little higher than that in the dry season (4.58 mg/L). In the wet season, the water of Category III (48.7%) dominated the small reservoirs, and the water of both category V and inferior category V were 27.0% of the total. The influence indexes were TN and TP. In the dry season, there was a great percentage of the category V water (41.7%), followed by the category IV water (30.5%). The TN was the influence index. As for the two seasons, the ratios of the eutrophic and the mesotrophic reservoirs were 55.0% and 45.0%, respectively. The water quality of the plain-typed reservoirs was inferior to that of the hill-typed reservoirs. The results indicated that the water quality of the small reservoirs was easily impacted by the nitrogen and phosphorus compared with the large and middle reservoirs. The eutrophication of the small reservoir needed to be paid more attention.

Keywords: Total Nitrogen; Total Phosphorus; Eutrophication; Non-point Source Pollution; Small Reservoir

CLC number: X824

我国水库众多, 目前库容 10 万 m^3 以上水库约 10 万座, 其中小型水库 (库容小于 1 000 万 m^3) 占比超过 96%^[1]。国内小型水库分布不均, 主要分布在湖南省、广东省、四川省、山东省、湖北省和云南

省, 合计占全国小型水库超过 60%。江苏省共有注册登记水库 921 座, 其中小型水库 872 座, 占 95%^[2]。小型水库在防洪、灌溉、供水、养殖和生态环境方面发挥了重要的作用。但由于资金和管理

收稿日期: 2020-01-08

作者简介: 陈美军 (1977-), 女, 博士、高级工程师。研究方向: 土壤与水环境质量。E-mail: mjchen@issas.ac.cn

引用格式: 陈美军, 陈非洲. 南京市小型水库水质评价和富营养化分析 [J]. 环境保护科学, 2020, 46(4): 87-91.

方面原因,农村小型水库功能退化,如淤积渗漏严重、蓄水能力下降以及富营养化加剧等^[3]。

南京市水库众多,有中小型水库 250 座,其中小型水库占 95%。目前小型水库的水质状况尚不清楚,本研究针对南京市小型水库水质现状进行了两个时期(丰水期和枯水期)的调查和评价,为小型水库的水质管理提供基础资料。

1 材料与方法

本研究调查南京 37 座小型水库,具体分布在:六合区(三星、解放、平山、山曹、黄山水库),浦口区(大堰、百子岭、唐冲、大鱼塘、蒋山口、三五、前赵、戴塘水库),江宁区(谷里、高庄、高山、龙山、直山、牌坊、杨库、红星、明镜寺、小景庵、大岷、溧塘水库),溧水区(无想寺、老虎山、盛村、上塘湫、汤家、爱国、龙王庙、岔路口水库),高淳区(龙激河、苗圃、尚仪三号、跃进水库)。这些水库按照流域地貌特征分为平原型水库和丘陵型水库,分别有 21 座和 16 座。

于 2018 年 7 月(丰水期)和 2019 年 4 月(枯水期)对水库进行调查,枯水期大堰水库由于工程原因干涸,实际调查水库 36 个。每座水库在离大坝中间 200 m 处设置采样点位。现场指标在水深 1 m 处用 YSI 水质分析仪测定水温、溶解氧、电导率和 pH,透明度(SD)用黑白盘测定。

化学指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl-a)。现场用 5 L 采水器采集上、中、下 3 层混合水样,即离水面 0.5 m(上层)、离湖底 0.5 m(下层)和中层底 0.5 m(下层)和中层^[4],然后取 10 L 带回实验室处理分析。指标分析参考《湖泊富营养化调查规范》^[5]。

水库水环境质量分别根据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》和综合营养状态指数评价^[5-6],其中地表水环境质量标准用于水质类别评价,综合营养状态指数用于水库富营养程度评价见式(1)。

$$TLI = \sum_{i=1}^n W_i TLI(i) \quad (1)$$

式(1)中,TLI为综合营养状态指数, W_i 为第*i*种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(i)$ 为第*i*种参数的营养状态指数,见式(2~6)。

$$TLI(\text{Chl-a}) = 10 \times (2.5 + 1.086 \times \ln \text{Chl-a}) \quad (2)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln \text{TP}) \quad (3)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln \text{TN}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10 \times (5.118 - 1.94 \times \ln \text{SD}) \quad (5)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 \times 0.109 + 2.661 \times \ln \text{COD}_{\text{Mn}} \quad (6)$$

式(2, 5)中,Chl-a、SD 单位分别为 $\mu\text{g/L}$ 和 m,其它指标单位为 mg/L 。

TLI 计算结果为 0~100 间的数值,该方法的评价标准为:TLI<30 时为贫营养型;30≤TLI≤50 时为中营养型;TLI>50 为富营养型,其中≤60 为轻度富营养型,60<TLI≤70 为中度富营养型,TLI>70 为重度富营养型。

丰水期和枯水期及平原型水库和丘陵型水库理化指标的比较采用独立样本 *t* 检验,利用 SPSS18.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 丰水期和枯水期水库理化指标比较

南京市小型水库丰水期和枯水期平均水温分别为 32.3 和 17.4 $^{\circ}\text{C}$ 。丰水期和枯水期透明度平均值分别为 0.98 和 0.82 m,两个时期无显著差异。丰水期 pH、电导率和溶解氧平均值分别为 8.42、0.24 ms/cm 和 6.29 mg/L ,枯水期分别为 8.75、0.23 ms/cm 和 10.62 mg/L 。两个时期溶解氧差异显著($p<0.001$),而 pH 和电导率差异不显著见表 1。

表 1 南京市小型水库丰水期和枯水期理化指标平均值

理化指标	丰水期	枯水期
水温/ $^{\circ}\text{C}$	32.3	17.4
透明度/m	0.98	0.82
pH	8.42	8.75
溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.29	10.62
电导率/ $\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$	0.24	0.23
总氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.01	1.49
总磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.06	0.06
叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	31.80	21.18
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.92	4.58

丰水期总氮平均浓度 1.01 mg/L ,显著低于枯水期的 1.49 mg/L 。丰水期和枯水期总氮浓度最低的水库分别为红星和山曹水库,总氮浓度最高的水

库分别为高庄和唐冲水库,两个时期低于 III 类水总氮标准(1 mg/L)的水库分别占 59.5% 和 19.4%,高于 V 类水总氮标准的水库分别占比 2.7% 和 13.9%。铵氮浓度总体较低,丰水期平均浓度 0.09 mg/L,不显著低于枯水期的(0.11 mg/L)。丰水期和枯水期铵氮浓度最低的水库分别为明镜寺和大岷水库,铵氮浓度最高的水库分别为大鱼塘和岔路口水库。

丰水期总磷平均浓度 0.06 mg/L,枯水期 0.06 mg/L,两个时期无显著差异。丰水期和枯水期总磷浓度最低的水库均为小景庵水库,总磷浓度最高的水库均为戴塘水库,两个时期低于 III 类水总磷标准的水库分别占 56.8% 和 58.3%,高于 V 类水总磷标准的只在丰水期的戴塘水库。

叶绿素 a 丰水期平均浓度 31.80 $\mu\text{g/L}$,高于枯

水期平均浓度 21.18 $\mu\text{g/L}$ (2.3~104.1 $\mu\text{g/L}$),但无显著差异。丰水期和枯水期叶绿素 a 浓度最低的水库分别为小景庵和明镜寺水库,叶绿素 a 浓度最高的水库分别为解放和高山水库。

高锰酸盐指数(COD_{Mn})丰水期(平均 4.92 mg/L)不显著高于枯水期的(平均 4.58 mg/L)。丰水期和枯水期高锰酸盐指数最低的水库分别为小景庵和明镜寺水库,高锰酸盐指数最高的水库分别为高庄和高山水库。两个时期低于 III 类水高锰酸盐指数标准的水库分别占 81.1% 和 80.6%,无高于 IV 类水高锰酸盐指数标准(10 mg/L)的水库。南京市平原型水库和丘陵型水库丰水期和枯水期理化指标和综合营养状态指数见表 2。

表 2 南京市平原型水库和丘陵型水库丰水期和枯水期理化指标和综合营养状态指数 (TLI)

指标	平原型水库		丘陵型水库	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
总氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.09±0.10	1.53±0.13	0.91±0.09	1.45±0.10
总磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.08±0.01	0.07±0.01	0.03±0.00	0.04±0.01
叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	47.27±5.52	28.71±5.24	11.50±2.73	11.77±2.83
透明度/m	0.55±0.05	0.64±0.07	1.54±0.18	1.03±0.14
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.71±0.27	5.30±0.31	3.88±0.26	3.69±0.32
TLI	56.95±1.38	55.08±1.46	42.58±1.95	46.83±1.89

2.2 丰水期和枯水期不同类型水库理化指标比较

丰水期和枯水期平原型水库总氮浓度均不显著高于丘陵型水库($p>0.1$),总磷、叶绿素 a、高锰酸盐指数均显著高于丘陵型水库($p<0.05$),透明度显著低于丘陵型水库($p<0.05$)。平原型水库和丘陵型水库丰水期总氮浓度均显著低于枯水期的($p<0.05$),平原型水库丰水期叶绿素 a 浓度显著高于枯水期的($p=0.02$),丘陵型水库丰水期透明度显著高于枯水期的($p=0.045$),两个类型水库其他指标在丰水期和枯水期间无显著差异($p>0.05$),见表 2。

2.3 丰水期和枯水期水库水环境质量比较

根据《地表水环境质量标准 (GB 3838—2002)》^[6],丰水期水库 III、IV、V 和劣 V 类水分别占比 48.7%、24.3%、21.6% 和 5.4%,影响指标为总氮和总磷;枯水期分别占比 13.9%、30.5%、41.7% 和 13.9%,影响指标主要为总氮。

根据综合营养状态指数,丰水期水库贫营养、中营养和富营养分别占比 2.7%、43.2% 和 54.1%,

富营养水库中轻度富营养和中度富营养分别占比 55.0% 和 45.0%。枯水期中营养和富营养分别占比 44.4% 和 55.6%,富营养水库中轻度富营养和中度富营养分别占比 70.0% 和 30.0% 见图 1(图中实线和虚线分别表示中营养和富营养标准)。丰水期和枯水期平原型水库 TLI 值均显著高于丘陵型水库($p<0.05$)。平原型水库和丘陵型水库在丰水期和枯水期 TLI 值均无显著差异($p>0.05$)。

3 讨论

富营养化是世界范围内湖泊和水库面临的主要问题之一^[7]。对全国 138 个湖泊的调查表明,有 85.4% 的湖泊超过了富营养标准^[8]。相比较而言,水库富营养程度低于湖泊。据《2018 年中国水资源公报》显示,全国 1097 座水库中,中营养和富营养水库分别占比 69.6% 和 30.4%。与 2001 年相比,几乎无贫营养水库,富营养水库比例提高近 1 倍,在最近几年稳定在 30% 左右,主要污染指标为总磷

和高锰酸盐指数^[9]。本次调查的小型水库与全国大中型水库评价相比,超过 50% 以上的水库处于富营养状态,主要污染指标为总氮和总磷,高锰酸盐指

数多数不超过 III 类水标准,说明有机污染程度低,与南京市中型水库的污染状况类似^[10-12]。

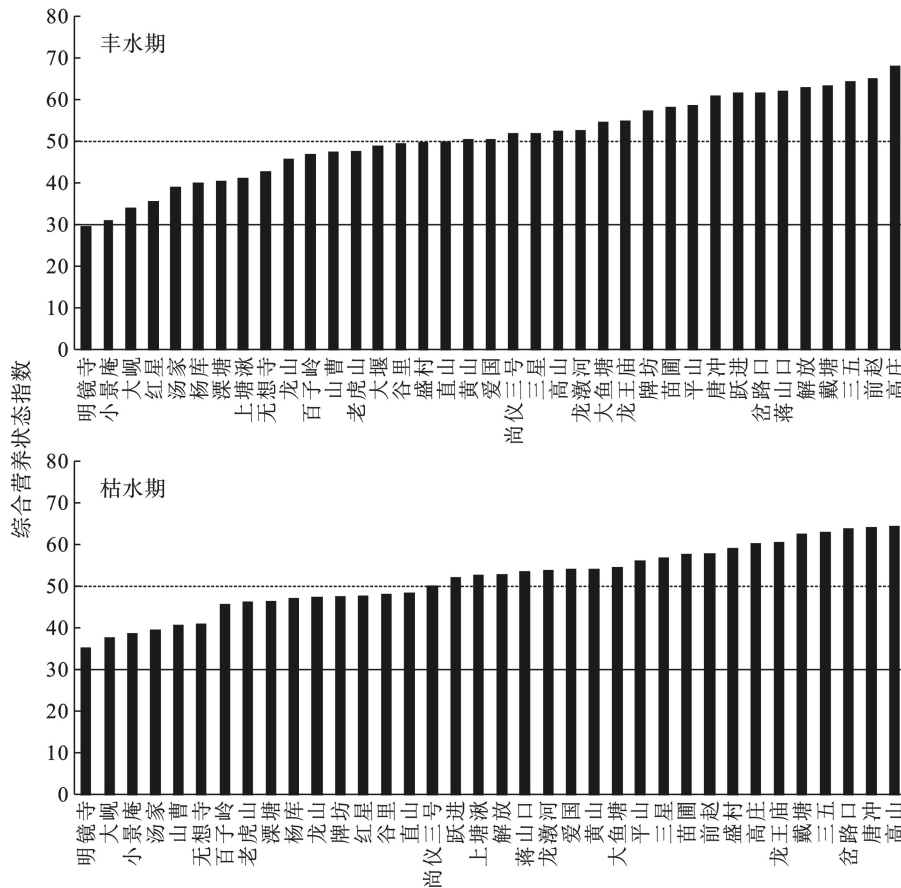


图 1 南京市小型水库综合营养状态指数 (TLI)

与大中型水库不同,小型水库蓄水量低,水体交换周期长,水环境容量小,使得水库水环境恶化后较难恢复。本次调查水库平均深度均低于 6 m,属浅水湖泊范畴。这些水库较少或不受工业污染的影响,造成富营养化的原因主要是由于农田不合理的化肥施用造成的面源污染和水产养殖。此外,小型水库淤积速度快,沉积物磷释放造成的内源污染会促进水库富营养化^[3,13]。

面源污染是引起南京市小型水库富营养化的关键原因。对江苏沙河水库、新安江水库(千岛湖)和三峡库区面源污染的研究表明,面源污染是影响这三个水库富营养化的重要原因^[14-16]。小型水库一般换水周期长,来自面源的污染物易在水库中滞留。姜峰等^[17]估算了江苏省 2009 年农业面源排放总量,其中南京市总氮、总磷和 COD_{Mn} 年排放量分别为 2.41、0.33 和 4.88 万 t,其中 COD_{Mn} 排放总量以畜禽养殖和水产养殖占比最高,分别为 52.3% 和

21.7%,总氮和总磷排放总量分别以农用化肥和畜禽养殖占比最高,分别为 61.8% 和 72.7%,而农村生活污水对总氮、总磷和 COD_{Mn} 的贡献均较小。本次调查水库 COD_{Mn} 对水质的影响较小,这与南京市畜禽养殖综合整治有关^[18],尽管水产养殖也能促进水库富营养化^[19-20],但本次调查只在富营养化程度比较高的水库(如解放水库)有不同程度的渔业活动,因此,总体来看畜禽养殖和水产养殖对南京市小型水库 COD_{Mn} 的影响较小。

南京市小型水库丰水期和枯水期总氮均是影响水质的主要指标,这主要归因于流域内农用化肥的影响^[17]。总磷是丰水期影响水质的主要指标,尽管畜禽养殖可能对水库总磷增加有影响,但经过综合整治^[17-18],其影响程度会削弱。研究表明,枯水期水体总磷较高主要受面源污染影响,而丰水期总磷较高主要受内源控制^[21]。沉积物磷释放是浅水湖泊总磷升高的重要途径^[22]。小型水库较浅,淤积

速度快,来自面源的污染物沉降在水库底部,沉积物磷释放引起水中磷浓度的升高,促进藻类生长和叶绿素 a 浓度提高。本次调查虽然跨年度,但从春季和夏季总磷浓度来看,夏季水质类别低于 IV 类水库的总磷浓度均高于春季的,而优于 IV 类水库的夏季总磷浓度多数低于春季的,说明沉积物磷释放对南京市小型水库的富营养化起着重要的作用。

面源污染也与流域土地利用类型有关。尽管本研究没有详细分析水库流域的土地利用状况,但由于流域面积小,根据流域地貌将水库划分为平原型和丘陵型水库。丘陵型水库流域内多以林地为主,林地对水库氮磷的输入小于耕地和裸地^[14],当林地面积较高(>71%),意味着作物耕地面积较少,水库富营养化程度较低^[23]。本次调查丘陵型水库的营养水平显著小于平原型水库,说明流域土地利用差异会影响水库的富营养化程度。

4 结论

对南京市 37 座小型水库水质调查表明,丰水期总氮平均浓度显著低于枯水期,丰水期总磷和高锰酸盐指数平均浓度和枯水期无显著差异。丰水期小型水库水质主要影响指标为总氮和总磷;枯水期水库水质主要影响指标为总氮。平原型水库水质劣于丘陵型水库。与全国以大中型水库为主的营养水平评价结果相比,南京市小型水库富营养程度高于大中型水库富营养比例,主要受面源污染、内源污染和流域土地类型影响,不合理的化肥施用和沉积物磷释放是水库富营养化的主要原因。因此,对于小型水库,除了要考虑水库本身的安全运行以外,其富营养化趋势值得关注。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 周贵宝, 葛忆, 陆范彪. 江苏水库管理的经验与思考[J]. 中国水利, 2018(20): 63–65.
- [3] 汤显强, 郭伟杰, 吴敏, 等. 农村小型水库功能退化分析及恢复对策[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 13–17.
- [4] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [5] 金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [6] 国家环境保护总局, 中国国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] WAGNER T, ERICKSON L E. Sustainable management of eutrophic lakes and reservoirs[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2017, 8(4): 436–463.
- [8] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799–810.
- [9] 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水资源公报[EB/OL]. (2019-07-12)[2019-11-08]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201907/t20190712_1349118.html.
- [10] 于忠华, 黄文钰, 舒金华. 南京市主要湖库水环境现状与演变趋势分析[J]. 国土与自然资源研究, 2005(4): 37–39.
- [11] 陈文权, 沈来保, 芮同顺. 溧水县主要供水水库水质现状及富营养化分析[J]. 江苏水利, 2008(5): 40–41.
- [12] 王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 216–223.
- [13] 钱洪汶. 雅安市中小型水库水质现状及污染防治对策[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(11): 141–142.
- [14] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, 等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 785–798.
- [15] 文军, 骆东奇, 罗献宝, 等. 千岛湖区域农业面源污染及其控制对策[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 126–129.
- [16] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1197–1209.
- [17] 姜峰. 江苏省农业面源污染时空特征及削减方案研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [18] 王润之, 杜娟, 张振岚, 等. 南京地区猪场粪污处理方式调查分析[J]. 养猪, 2018(1): 81–83.
- [19] 陈花. 东莞中小型水库水污染现状与治理[J]. 广东水利水电, 2012(10): 15–17.
- [20] 蒋艾青. 山区小型水库富营养化调查与评价[J]. 饲料研究, 2007(3): 55–57.
- [21] CHEN F Z, SHU T T, JEPPESEN E, et al. Restoration of a subtropical eutrophic shallow lake in China: effects on nutrient concentrations and biological communities[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 718(1): 59–71.
- [22] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化-2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207–217.
- [23] KNOLL L B, HAGENBUCH E J, STEVENS M H, et al. Predicting eutrophication status in reservoirs at large spatial scales using landscape and morphometric variables[J]. *Inland Waters*, 2017, 5(3): 203–214.