doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.02.016

# 柘林水库污染物来源及水体分层对水质的影响

# 周子振1,黄廷林1,章武首2,马卫星1

(1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,710055 西安; 2.中国市政工程西北设计研究院有限公司,710075 西安)

摘 要:为探究水源水库污染物来源及水质变化规律,以九江市水源地柘林水库为研究对象,于2013年4月—2014年4月逐 月对柘林水库进行水质监测.现场测定水温、溶解氧等指标,分层取样测定水体 COD<sub>Mn</sub>、TOC、TN、TP、Fe、Mn 等水质指标.结果 表明,柘林水库主要污染物来源为上游来水,其对 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 贡献率分别达 88.3%、76.2%和 67.6%.在水体稳定分层期,底 部水体 COD<sub>Mn</sub>、TOC、TN、TP、Fe、Mn 质量浓度分别升高至 3.8、2.4、1.12、0.14、0.42 和 0.34 mg/L;藻类计数及藻种鉴定结果表 明,此时期主库区最大藻密度达 2.25×10<sup>6</sup> L<sup>-1</sup>,以绿藻为主.水体混合后出现 Mn 质量浓度超标问题,达 0.16 mg/L. 关键词: 柘林水库;污染物来源;水体分层;水质变化;藻类

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)02-0093-07

# Pollution sources and the stratification effects on water quality of Zhelin Reservoir

ZHOU Zizhen<sup>1</sup>, HUANG Tinglin<sup>1</sup>, ZHANG Wushou<sup>2</sup>, MA Weixing<sup>1</sup>

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China;
 2.Chinese Northwest Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., 710075 Xi'an, China)

Abstract: To explore the pollutants sources and the water quality variation rules of the water source reservoirs, monthly monitoring of water quality from April 2013 to April 2014 was carried out in Zhelin Reservoir, which is the main water source of Jiujiang City. The dynamic variations of water temperature and DO concentrations were measured in situ, while  $\text{COD}_{Mn}$ , TOC, TN, TP, Fe and Mn were determined in the laboratory. The results showed that the main pollution source of Zhelin Reservoir was the upstream runoff, and its percentage contribution to the bulk pollutants was 88.3% for  $\text{COD}_{Mn}$ , 76.2% for TN and 67.6% for TP, respectively. During the stable stratification period, the maximum concentrations of  $\text{COD}_{Mn}$ , TOC, TN, TP, Fe and Mn in the bottom water reached 3.8, 2.4, 1.12, 0.14, 0.42 and 0.34 mg/L, respectively. The algae population and algal species identification results demonstrated that the maximum density of algae was  $2.25 \times 10^6$  cells/L, in which green algae was predominated. However, during the mixing period, Mn concentration exceeded the drinking water standard. Keywords: Zhelin Reservoir; pollutants source; stratification; water quality variations; algae

近年来,湖泊、水库逐步成为大多数城市的饮用 水水源地,随着国民经济的发展,湖泊水库的水质问 题也越来越突出,如水体富营养化,水质季节性恶化 等<sup>[1-4]</sup>.一种观点认为过量的氮、磷输入是造成水体 富营养化的主要原因<sup>[5-8]</sup>;也有人认为湖泊、水库的 内源释放是造成水体富营养化的主要原因<sup>[9-10]</sup>.研 究湖泊、水库的污染物来源,有助于摸清水质变化规 律.湖泊、水库的季节性分层会导致底部水体缺氧,

- 基金项目:国家自然科学基金(51478378); 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02). 作者简介:周子振(1989—),男,博士研究生; 黄廷林(1962—),男,教授,博士生导师.
- 通信作者: 黄廷林, huangtinglin @ xauat.edu.cn.

而长期的厌氧环境会使沉积物向上覆水释放有机 质、氮、磷、铁、锰等污染物,造成上覆水体水质恶 化<sup>[11]</sup>.因此,准确分析湖泊、水库的污染物来源以及 水体分层对水质的影响有助于解决水体富营养化、 水质季节性恶化等问题.本文研究了柘林水库污染 物来源以及水体分层对水质的影响,以期为柘林水 库水资源的合理利用提供理论支撑.

1 实 验

#### 1.1 研究区域

柘林水库(又称"柘林湖")位于江西省九江市 境内,其地理坐标为东经115°04′~115°40′,北纬 29°03′~29°18′(如图1所示),是江西省最大的蓄

收稿日期: 2014-10-12.

水工程,控制柘林大坝及以上流域面积9340 km<sup>2</sup>, 占修河流域面积的63.5%,多年平均入库流量 255 m<sup>3</sup>/s.柘林大坝坝顶设计高程75 m(吴淞),设计 洪水位和死水位分别为71.3和50 m.柘林水库正常 蓄水位65 m,相应库容50.2亿m<sup>3</sup>,水域面积 308.2 km<sup>2</sup>;校核洪水位73.01 m,相应库容 79.2亿m<sup>3</sup>,水域面积415.7 km<sup>2</sup>.平均水深45 m.



图1 柘林水库位置及采样点布置

## 1.2 监测断面及检测方法

于 2013 年 4 月—2014 年 4 月逐月对柘林水库进 行了水质监测.选取 9 个监测点(如图 1 所示),涵盖 入库口、库区以及坝前出水口等区域.表层水样在水 面以下 0.2~0.5 m 处采集,垂向采用深层采样器每隔 5 m 取样.水温、溶解氧等指标使用 HACH Hydrolab DS-5 型多功能水质分析仪现场测定;COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 等采用《水与废水监测分析方法(第 4 版)》中规定的 国家标准方法测定;TOC 采用岛津总有机碳分析仪 TOC-L 测定;Fe、Mn 使用优级纯硝酸酸化后经 0.22 μm的膜过滤,用 ICP-MS 测定.将 15 mL 鲁哥试 剂预先加入 1 L 的玻璃瓶中,采集水样后在实验室使 用抽滤机经 0.22 μm 的膜抽滤.使用磁力搅拌器在低 转速条件下将滤膜上藻类转移至25 mL比色管.使用 0.1 mL 计数框,在显微镜下进行计数及藻种鉴定.

2 污染物来源计算

#### 2.1 上游来水

柘林水库为河道型水库,最主要来水水源为修 河.修河多年平均来水量为80.6×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,丰水期、平水 期、枯水期约占全年来水量的74%、16.8%、9.2%,根 据2013—2014年逐月水质监测数据计算各时期修河 来水 COD<sub>Ma</sub>、TN、TP质量浓度,结果如表1所示.

# 表1 柘林水库各期 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 质量浓度

			$mg \cdot L^{-}$
时期	$\mathrm{COD}_{\mathrm{Mn}}$	TN	TP
丰水期	3.140	1.000	0.047
平水期	2.720	0.695	0.039
枯水期	2.480	0.620	0.024

不同时期来流污染物质量浓度 $\rho_i$ 与此时期入库 径流量 $Q_i$ 的乘积即此时期入库污染物总量 $W_i$ ,则根 据<sup>[12]</sup> $W = (\rho_1 \times 0.74 + \rho_2 \times 0.168 + \rho_3 \times 0.092) \times Q$ 可计算上游来水 COD<sub>Mn</sub>、N、P 负荷以及各时期入库 污染物所占比例,式中:W 为入库污染物总量, $\rho_i$ 为 不同时期入库污染物质量浓度,Q 为年入库流量.结 果如表 2 所示.

表 2 柘林水库入库 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 总量及各时期所占比例 10<sup>3</sup> t · a<sup>-1</sup>

时期	$\mathrm{COD}_{\mathrm{Mn}}$	TN	TP
丰水期	18.728(77.2%)	5.964 (81%)	0.280(79.8%)
平水期	3.683(15.2%)	0.941(12.8%)	0.053(15.1%)
枯水期	1.839(7.6%)	0.457(6.2%)	0.018(5.1%)

## 2.2 地表径流

地表径流所携带的污染物与土地利用方式、农药化肥使用量、土壤坡度及类型、降雨强度等因素密切相关<sup>[13-15]</sup>.柘林水库周边产生地表径流并直接汇入库区的区域有13个乡镇,共有土地106.47 km<sup>2</sup>. 根据当地统计资料,化肥使用强度为47 097.6 kg/(km<sup>2</sup>·a),且氮肥约占60%,磷肥约占40%; 农药使用强度为4859.8 kg/(km<sup>2</sup>·a),以有机磷类为主; 标准农田 COD<sub>Mn</sub>产生系数为14999.3 kg/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[16]</sup>. 氮肥流失率取6%,磷肥流失率取0.45%,农药磷流 失率取8.48%<sup>[17-18]</sup>.

综合修正系数 K 的计算<sup>[16]</sup>如下:1) 坡度修正. 土地坡度在 25°以下, 流失系数为 1.0~1.2; 25°以 上,流失系数为1.2~1.5.柘林水库周边地势起伏较 大,以山地为主,各流失系数按上限选取.周边25°以 上坡耕地面积约占总耕地面积的75%,综合坡度修 正系数为1.5×0.75+1.2×(1-0.75)=1.425.2)农作 物类型修正.由于目前研究区域内没有此方面的研 究和经验数据,农作物类型取1.0.3)土壤类型修正. 柘林水库周边的土壤类型以红壤和黄壤为主,研究 区域土壤修正系数取 1.0.4) 化肥施用量修正. 化肥 亩施用量在 25 kg 以下,修正系数取 0.8~1.0;在25~ 35 kg,修正系数取 1.0~1.2;在 35 kg 以上,修正系数取 1.2~1.5. 区域内的施肥水平较高,为 47 097.6 kg/(km<sup>2</sup>·a),故化肥施用量修正系数取1.0.5) 降水量修正.柘林水库常年平均降雨量为1506 mm,雨 水充沛,且主要作物的施肥季节与降雨季节重合,故化 肥、农药的流失率较高,本研究降水系数取1.4.

综合修正系数

$$K = 1.425 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.4 = 1.995,$$

$$W = S \times P \times c \times K$$

式中:W为污染物排放总量,S为总土地面积,P为

• 95 •

农药化肥使用强度或标准农田 COD<sub>Mn</sub>产生系数, c 为流失率, K 为综合修正系数.

计算得

$$\begin{split} W_{\rm CODMn} &= 159\ 705 \times 10 \times 1 \times 1.995 = 3.190 \times 10^3 \ {\rm t/a} \,, \\ W_{\rm TN} &= 159\ 705 \times 31.4 \times 60\% \times 0.06 \times 1.995 = \end{split}$$

 $0.360 \times 10^3 \text{ t/a}$ ,

 $W_{\text{TP}} = 159\ 705 \times (31.4 \times 40\% \times 0.004\ 5 + 3.24 \times 0.084\ 8) \times 1.995 = 0.106 \times 10^3 \text{ t/a}.$ 

#### 2.3 内源释放

研究表明<sup>[19-20]</sup>,国内部分湖、库内源污染严重, 内源污染物释放比重逐步升高.从4月份水体分层 逐步开始,到8月份已经有个别监测点底部水体 DO 质量浓度低于 0.5 mg/L. 柘林水库水面面积 308 km<sup>2</sup>,武宁县水域水深较浅约15 m,永修县水域 水深较大,坝前水深达45 m;柘林水库存在较大区 域的水体稳定分层,深水水域自9月份开始底部水 体进入厌氧状态,DO 质量浓度小于 0.5 mg/L,直到 次年1月份水体开始混合之后才结束厌氧状态,沉 积物厌氧释放结束.

采用实验室模拟方法计算柘林水库沉积物最大 释放量.沉积物取自柘林水库坝前区域,上覆水即柘 林水库原水;泥水按1:3的比例放入10L标色玻 璃反应器(沉积物厚度约15 cm,上覆水厚度约 45 cm,直径16 cm);反应器密封,下部留有取水口, 置于8℃恒温培养箱中.在此状态下隔天测定上覆 水中 DO、ORP、TN、TP、NH<sub>4</sub>-N等指标,COD<sub>Mn</sub>每周 测定一次.结果表明:反应进行至20d左右DO开始 小于1 mg/L,进行至60d左右各污染物质量浓度释 放量达到最大.使用网格法计算柘林水库深水区域 面积约138.6 km<sup>2</sup>,释放时间按60d计算.

则模拟实验平均释放通量

 $J = (\rho_1 - \rho_0) / (s_0 \times d_0),$ 水库污染物释放估算量

 $W = J \times s \times d.$ 

式中: $\rho_0$ 为污染物初始质量浓度, $\rho_1$ 为最大释放质量浓度, $s_0$ 为反应器截面积, $d_0$ 为实验进行时间,s为柘林水库释放区域面积,d为释放时间.计算结果如表 3所示.

表 3	柘林水库沉积物实验室模拟计算结果
-----	------------------

指标	$ ho_{初始}/$ $(mg\cdot L^{-1})$	释放极值/ (mg·L <sup>-1</sup> )	释放通量/ (mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	释放量/ (10 <sup>3</sup> t·a <sup>-1</sup> )
$\mathrm{COD}_{\mathrm{Mn}}$	2.150	5.850	3.083	0.026
TN	0.680	1.910	1.025	0.009
TP	0.019	0.150	0.109	0.001

2.4 大气沉降

气溶胶及酸性物质在重力作用下直接沉降到地

面的干沉降和大气中的各种粒子在降雨过程中降到 地面的湿沉降共同构成大气沉降<sup>[21]</sup>.江西地区大气 氮沉降总量取 6.26 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[22]</sup>,大气磷沉降总量 取 0.198 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[23]</sup>,则

 $W_{\rm TN} = 6.26 \times 308 = 1.928 \times 10^3 \, \text{t/a},$ 

 $W_{\rm TP} = 0.198 \times 308 = 0.061 \times 10^3 \, \text{t/a}.$ 

# 2.5 生物固氮作用

根据孙寓娇等<sup>[24]</sup>的研究,结合柘林水库富营养 化水平,生物固氮速率取 0.172 nmol/(m<sup>3</sup>·d),生物 固氮产生的总氮量

 $W_{\rm TN} = 0.172 \times 50 \times 10^8 \text{m}^3 \times 365 = 8.8 \text{ kg/a}.$ 

生物固氮作用增加的氮仅为 8.8 kg /a,远低于 其他来源,本文忽略不计.

对柘林水库污染物年入库量进行统计,结果如 表4所示.柘林水库COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 输入负荷分别为 27.520×10<sup>3</sup>、9.659×10<sup>3</sup>和 0.519×10<sup>3</sup> t/a;COD<sub>Mn</sub>输入 负荷顺序为:上游来水>地表径流>内源释放;TN 输 入负荷顺序为:上游来水>大气沉降>地表径流>内 源释放;TP 输入负荷顺序为:上游来水>地表径流> 大气沉降>内源释放.3 种污染物的主要来源为上游 来水,其贡献率均在 65%以上,上游来水对 COD<sub>Mn</sub> 的贡献率甚至达 88.3%.

表 4 柘林水库污染物负荷及其所占比例

	$\mathrm{COD}_{\mathrm{Mn}}$		TN		TP	
项目	污染负	百分	污染负	百分	污染负	百分
	荷/10 <sup>3</sup> t	比/%	荷/10 <sup>3</sup> t	比/%	荷/10 <sup>3</sup> t	比/%
上游来水	24.304	88.313	7.362	76.219	0.351	67.630
地表径流	3.190	11.592	0.360	3.727	0.106	20.423
内源释放	0.026	0.095	0.009	0.093	0.001	0.194
大气沉降	0	0	1.928	19.961	0.061	11.753

3 水体分层对水质的影响

判断水库水温分层类型一般采用 α 指标法,即 α = 入库总流量 / 总库容.

当α<10时,为稳定分层型;当α>20时,为完全混合型[5].

柘林水库多年平均流量 255 m<sup>3</sup>/s,正常蓄水库 容为 50.2 亿 m<sup>3</sup>,所以,柘林水库的 α=1.6<10,属于 稳定分层型水库.

#### 3.1 水温、溶解氧变化特征

柘林水库坝前水深 42 m,水深较大.图 2(a)、 (b)表明:在水体分层时期(4—12 月份),水体表层 与底层温差较大(最大达 22 ℃),且随着水深的增 加水体 DO 质量浓度逐步降低.而表层水体在大气 复氧和藻类光合作用下,DO 质量浓度一直维持在 9 mg/L左右.水体分层形成期(4—7 月份),底部水 体 DO 质量浓度不断被沉积物、水中有机质降解等 消耗而又缺乏相应的复氧机制, DO 质量浓度逐步 降低;水体分层稳定期(8—11月份),温差进一步扩 大,底部水体进入厌氧状态,9月份底部水体 DO 降 至0 mg/L,沉积物开始释放,上覆水开始恶化<sup>[26]</sup>.水 体分层消亡期(12月份),水体底部仍处于厌氧状 态,但温差已小于8℃.

水体混合期(1—3月份),水体各水质指标垂向 趋于一致;1月份垂向 DO 质量浓度达到当地气温 条件下的饱和水平 8.6 mg/L,随着气温的进一步降 低以及光照强度的减弱,水温进一步降低,2月份氧 在水中的溶解度进一步变大,水体垂向 DO 质量浓 度进一步升高至 10.6 mg/L.



#### 3.2 有机物变化特征

有机物反映的是水体的综合污染特征, 柘林水库 COD<sub>Mn</sub>和 TOC 监测结果如图 3 所示, COD<sub>Mn</sub>和

TOC 均表现出在分层期质量浓度较大而混合期质量浓度较小的特征.分层稳定期 COD<sub>Mn</sub>和 TOC 的最大质量浓度分别达 3.8 和 2.4 mg/L;混合时期, COD<sub>Mn</sub>和 TOC 的最小质量浓度分别为 1.9 和 1.5 mg/L.

分层形成期伴随着底部水体 COD<sub>Mn</sub>和 TOC 逐步升高.在分层稳定期,进入9月份柘林水库底部 DO 已衰减至0 mg/L,沉积物向水体释放有机物导致底部水体 COD<sub>Mn</sub>和 TOC 升高,COD<sub>Mn</sub>最高值达 3.8 mg/L.在夏、秋季节藻类繁殖旺盛,表层水体有机物含量也处于较高水平,尤其是9月份柘林水库 表层水体 TOC 质量浓度要高于中部和底部水体 0.6 mg/L左右.





## 3.3 氮、磷营养盐变化特征

如图 4(a)、(b)所示,全年 TN、TP 质量浓度最 大值分别为 1.30 和 0.14 mg/L;TN 最大质量浓度出 现在柘林水库汛期 6 月份,大量径流携带污染物进 入水体,导致水体污染负荷升高;在汛期 TP 质量浓 度也升高至 0.053 mg/L.

但在分层稳定期,随着水库底部厌氧区域的出现以及厌氧时间的延长,沉积物中不同形态氮、磷污

• 97 •

染物向上覆水体释放,直至水体混合之前,TN、TP 才达到最大质量浓度1.12和0.14 mg/L.TN释放强 度较小,这是由于坝前深水区域氮素污染程度较轻 的缘故,实验室模拟实验TN释放极值也仅达 1.50 mg/L.次年1月份水体发生混合之后,TN、TP 质量浓度降至最低,分别在0.40和0.01 mg/L 左右. 可见,在雨水较少、寒冷的冬季水库水质较好<sup>[27]</sup>.

## 3.4 金属变化特征

Fe、Mn属于较活泼的金属元素,水体底部氧化还原环境的改变极易造成沉积物、水界面的Fe、Mn迁移转化<sup>[28]</sup>.如图4(c)、(d)所示,全年Fe、Mn最大质量浓度分别达0.42和0.34 mg/L,均发生在分层



稳定期底部水体;水体混合之后 Fe、Mn 质量浓度降至 0.1 和 0.16 mg/L 左右.

8月份之前,水体 Fe、Mn 一直处于较低水平 (Fe、Mn 质量浓度均小于 0.1 mg/L),水体处于富氧 状态,此时 Fe、Mn 不断沉淀、富集在沉积物表面;进 入水体分层稳定期之后,底部水体进入厌氧状态, Fe、Mn 质量浓度开始升高,且分别出现超标现象.此 时局部对流开始削弱温跃层的传质阻碍,中部水体 Fe、Mn 也有所升高;1月份水体混合之后,Fe 处于较 低水平,Mn 则处于超标状态(《地表水环境质量标 准(GB3838—2002)》规定,集中式生活饮用水地表 水源铁、锰标准限值分别为 0.3 和 0.1 mg/L).





藻类的生长与光照强度、水温以及营养盐关系 密切<sup>[29-30]</sup>, 藻类的大量繁殖对水质恶化影响显 著<sup>[31-33]</sup>.柘林水库主库区表层水体藻类鉴定结果如 图 5 所示.水体分层形成期,藻类繁殖速率较慢,其 密度维持在 0.5×10<sup>6</sup> L<sup>-1</sup>左右;硅藻所占比例逐步降 低,由 6 月份的 42%降至 11 月份的 14.8%.水体分 层稳定期藻密度较高,最大达 2.25×10<sup>6</sup> L<sup>-1</sup>,这一时 期优势藻种为绿藻,比例达 78%.进入 12 月份,表层 水温降低,藻密度明显减少.在混合期,藻密度已不足 0.3×10<sup>6</sup> L<sup>-1</sup>, 硅藻所占比例开始逐步升高, 达42.3%.

稳定分层期是藻类数目全年最高时期.文献 [34]表明,当水体 TN 达 0.2 mg/L、TP 达 0.02 mg/L 时,水体可能发生藻类过量繁殖;而稳定分层期也是 水体 TN、TP 质量浓度最高的时期.柘林湖 TN、TP 均 值分别为 0.79 和 0.048 mg/L,属于中营养型,TN 与 TP 比适中,氮磷比是藻类生长高峰的主导因素<sup>[35]</sup>.



图 5 柘林水库藻密度及藻种动态变化

# 4 结论与建议

1) 柘林水库的主要污染来源为上游来水,其中 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 对污染物总量的贡献率分别达 88.3%、76.2%和67.6%.

2) 柘林水库为大水深分层型水库, 深水区域底 部水体在 8 月份即进入厌氧状态. 稳定分层期, COD<sub>Mn</sub>、TOC、TN 和 TP 最大释放强度分别达 3.80、 2.35、1.12 和 0.14 mg/L; Fe、Mn 最大释放强度分别 为 0.44 和 0.34 mg/L; 最大藻密度达 2.25×10<sup>6</sup>L<sup>-1</sup>, 以 绿藻为主.

3) 柘林水库在 1 月份开始混合, COD<sub>Mn</sub>、TOC、 TN、TP、Fe 质量浓度有所降低,水质较好,但 Mn 出 现了超标现象,质量浓度为 0.16 mg/L.

4)针对柘林水库内源污染状况,建议采用新型 水源水质原位改善技术——扬水曝气技术<sup>[35]</sup>,对柘 林水库底部水体进行充氧并破坏水体分层,抑制水 库内源污染释放.

# 参考文献

- PALMA P, LEDO L, SOARES S, et al. Spatial and temporal variability of the water and sediments quality in the Alqueva Reservoir (Guadiana Basin; Southern Portugal) [J]. Science of the Total Environment, 2014, 470(471):780-790.
- [2] VUKOVIC D, VUKOVIC Z, STANKOVIC S. The impact of the Danube Iron Gate Dam on heavy metal storage and sediment flux within the reservoir [J]. CATENA, 2013, 113: 18-23.
- [3] 邓焕广,张菊.东昌湖水体富营养化评价及 N、P 平衡研 究[J].环境科学与管理,2008,33(8):178-180.
- [4] 孟蝶,葛曦.密云水库水体富营养化评价与防治[J].河 北省科学院学报,2011,28(2):53-57.
- [5] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [6] VERA P P P, ROSA M F C, ISABEL R B A. Evaluation

of surface water quality using an ecotoxicological approach: a case study of the Alqueva Reservoir (Portugal) [J]. Environment Science and Pollution Research, 2010, 17: 703-716.

- [7] MA Jinzhu, DING Zhenyu, WEI Guoxiao, et al. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei basin of Shiyang River, Northwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1168-1177.
- [8] MA Xiao, LI Ye, ZHANG Meng, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China [J].Science of The Total Environment, 2011, 412 (413): 154-161.
- [9] LI Ying, CAO Wenzhi, SU Caixia. Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 63(5): 249-254.
- [10]黄廷林,章武首,柴蓓蓓.大水深水库内源污染特征及控制技术[J].环境污染与防治,2010,32(3):1-4.
- [11] WANG Haixia, YANG Hua. Vertical distribution and reason of Fe and Mn in drinking water source Reservoir
   [J]. Reservoir Development & Market, 2005, 21(2): 83-85.
- [12] HUANG Tinglin, QIN Changhai, LI Xuan. Studies on the seasonal variation and budget of nitrogen, phosphorus of the shibianyu reservoir [J]. J Xi' an Univ of Arch & Tech (Natural Science Edition), 2013, 45(1): 111-116.
- [13]周林飞,郝利朋,孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型 地表径流和壤中流氮、磷流失特征[J].生态环境学报, 2011,20(4):737-742.
- [14] WU Yiping, LIU Shuquang. Modeling of land use and reservoir effects on nonpoint source pollution in a highly agricultural basin [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(9):2350-2361.
- [15] QIN Huapeng, KHU S, YU Xiangying. Spatial variations of storm runoff pollution and their correlation with land-use in a rapidly urbanizing catchment in China[J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(20): 4613-4623.

- [16]全国水环境容量核定技术指南[S].北京:中国环境规 划院, 2003: 37-38.
- [17] WANG Guiling, MA Youhua, SUN Xingwang, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in wheat-rice rotation farmland in Chao Lake Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 6-11.
- [18] 唐浩. 水稻田农药、氮素流失特性及其控制技术研究 [D]. 上海:上海交通大学,2003.
- [19]夏品华,林陶,李存雄,等.贵州高原红枫湖水库季节 性分层的水环境质量相[J].中国环境科学,2011,31 (9):1477-1485.
- [20] JUNAKOVA N, BALINTOVA M. Assessment of nutrient concentration in reservoir bottom sediments [J]. Procedia Engineering, 2012, 42: 165–170.
- [21]GU Dongmei, DENG Kaiyu, LI Taiqian, et al. Study on the atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in Beili Lake of Hangzhou [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(1): 36-40.
- [22] 王体健, 刘倩, 赵恒,等. 江西红壤地区农田生态系统 大气氮沉降通量的研究[J].土壤学报, 2008, 45(2): 280-287.
- [23]张峰. 长乐江流域大气氮、磷沉降及其在区域营养物质 循环中的贡献[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [24]孙寓娇,陈程,丁爱中,等.官厅水库生物固氮作用对水体富营养化的响应[J].吉林大学学报,2011,41
   (4):1179-1185.
- [25] 王煜, 戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J].三峡大学学报(自然科学版), 2009,31(6): 11-14.
- [26] FENG Lingyan, LI Lixin, YUAN Yixing. Study on the reservoir water quality change rule in Northern China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 20(4): 26-30.
- [27] LI Siyue, CHENG Xiaoli, XU Zhifang, et al. Spatial and temporal patterns of the water quality in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. Hydrological Sciences Journal,

2009, 54(1):124-134.

- [28] XU Yurong, XU Zhongji, XU Wei, et al. Characteristics of Fe, Mn vertical distribution in a thermal stratified reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(2): 117-122.
- [29] CHEN Shanna, CHEN Xiaolan, PENG Yan, et al. A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(2): 1097-1106.
- [30] MCQUEEN D J, LEAN D R S. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratios on the dominance of blue-green algae in Lake St. George, Ontario
  [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 1987, 44(3): 598-604.
- [31]SMITH V H, JONATHAN S D, JR F D, et al. Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir[J]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18 (4): 319-323.
- [32] YANG Jun, YU Xiaoqing, LIU Lemian, et al. Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China [J]. Environ Sci Pollut Res, 2012, 19: 1432-1442.
- [33] NGUYEN M L, WESTERHOFF P, BAKER L, et al. Characteristics and reactivity of algae-produced dissolved organic carbon[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(11): 1574-1582.
- [34] HUANG Tinglin, ZHANG Wushou. Study on the characteristics and control of endogenous pollution in source water reservoir with great depth [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(3): 1-4.
- [35]黄廷林. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京:中国建 筑工业出版社, 2009: 11-16.

(编辑 刘 形)