

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0714

盛海燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 2015. 新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析[J]. 环境科学学报, 35(1): 118-127

Sheng H Y, Wu Z X, Liu M L, et al. 2015. Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(1): 118-127

新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析

盛海燕^{1,2}, 吴志旭³, 刘明亮², 何剑波², 虞左明², 韩轶才², 张银龙^{1,*}

1. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

2. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014

3. 淳安县环境保护监测站, 淳安 311700

收稿日期: 2014-03-31

修回日期: 2014-04-28

录用日期: 2014-04-28

摘要: 根据 2003—2012 年水质逐月监测数据和水文气象资料, 对新安江水库水质和营养状态变化进行分析, 探讨了新安江水库水质演变规律及其与水文气象因子之间的关系。结果表明, 近 10 年间新安江水库总磷、总氮、生化需氧量和 pH 存在显著的年际变化。叶绿素 a 浓度上升趋势明显。综合营养状态指数显示水库营养状态由贫营养逐步向中营养转变。营养盐和叶绿素 a 浓度存在显著空间差异性, 河流区高于过渡区和湖泊区, 且丰水期高于枯水期, 说明水库营养盐主要来自面源污染。年均气温及水温呈下降趋势, 降雨量、出入库流量则呈上升趋势, 相关分析表明水文气象因子对水质指标影响较大。

关键词: 水库; 营养状态; 水文气象因子; 气候变化

文章编号: 0253-2468(2015)01-118-10

中图分类号: X524

文献标识码: A

Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang Reservoir

SHENG Haiyan^{1,2}, WU Zhixu³, LIU Mingliang², HE Jianbo², YU Zuoming², HAN Yicai², ZHANG Yinlong^{1,*}

1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

2. Hangzhou Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014

3. Chun'an Environmental Monitoring Station, Hangzhou 311700

Received 31 March 2014;

received in revised form 28 April 2014;

accepted 28 April 2014

Abstract: Based on the monthly water quality monitoring data and hydro-meteorological data from 2003 to 2012, this study analyzed water quality and nutritional status in Xin'anjiang reservoir and investigated the relationship between water quality change and hydro-meteorological factors. The results showed that the interannual variability of total phosphorus, total nitrogen, BOD and pH value were significant in the past 10 years in Xin'anjiang Reservoir. Chlorophyll a concentration increased in recent 10 years. Comprehensive nutrition state index showed that the reservoir trophic status was improved gradually from oligotrophic to mesotrophic. Nutrient and chlorophyll a was higher in riverine zone than transitional and lacustrine zone and in flooding season than dry season, which indicated that reservoir nutrients came mainly from non-point source pollution. The mean annual air temperature and water temperature decreased, while rainfall, out flow and in flow increased. The correlation analysis showed that hydro-meteorological factors had significant impacts on water quality index.

Keywords: reservoir; nutritional status; hydro-meteorological factors; climate change

1 引言 (Introduction)

随着人类社会经济发展, 全球性水污染问题日

趋严重, 富营养化现象已成为世界性难题。近 30 年来, 中国江河湖库水体富营养化发展速度加快, 全国富营养状态湖泊(水库)比例达到 53.8% (中华人

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2009ZX07528-003); 杭州市环境保护科研计划重大项目 (No. 2010116); 杭州市重大科技创新专项 (No. 20122513A01)

Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2009ZX07528-003), the Major Environmental Research Program of Hangzhou City (No. 2010116) and the Major Science and Technology Program of Hangzhou City (No. 20122513A01)

作者简介: 盛海燕 (1978—), 女, E-mail: 21708089@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: ylzhang@njfu.edu.com

Biography: SHENG Haiyan (1978—), female, E-mail: 21708089@qq.com; * Corresponding author, E-mail: ylzhang@njfu.edu.com

民共和国环境保护部,2011).中国是水资源短缺国家,南方地区河流和湖泊严重退化(如太湖、巢湖等),水质性缺水更加突出,水库调水和蓄水对缓解城市供水矛盾将起到至关重要的作用(韩博平,2010).我国水库富营养化现象日趋普遍(韩博平等,2003;王孟等,2004;江涛等,2005;张峥,2005;刘景红等,2005;苏玉萍等,2008;韩博平等,2006;郑丙辉等,2006;吴挺峰等,2009;王丽平等,2013),如何缓解和减轻水库富营养化问题已经成为刻不容缓的任务.

新安江水库不仅是长江三角洲地区著名的风景名胜区,也是该地区重要的饮用水水源地和渔业生产基地,更是钱塘江水源涵养区(吕唤春等,2002).近年来随着当地经济的迅速发展,库区局部地区开始出现富营养化和藻类异常增殖现象,严重影响水体透明度和引发水体异味,出现生态系统健康及水生态安全异常等问题,引起各界学者的广泛关注(严力蛟等,2001;韩晓霞等,2013).目前对新安江水库水质及生态问题已经从渔业养殖(刘其根,2005;刘其根等,2010)、污染源分析(吕唤春等,2002,2003a;余员龙等,2010)、浮游植物群落(吴志旭等,2012;盛海燕等,2014)、浮游动物群落(李共和国和虞左明,2002a,2002b)、叶绿素变化(刘英等,2003;吕唤春等,2003b;高玉蓉等,2012)等多方面进行了研究.但在全球气候变化的大背景下,水文气象过程对水体理化特征和浮游植物生长的影响已

成为水生态研究的热点问题(O'Reilly *et al.*, 2003; Smol *et al.*, 2005; Winder and Sommer, 2012).本文在分析近 10 年新安江水库水质变化规律的基础上,从水文和气象因子角度对千岛湖水质的影响进行探讨,为保护水库饮用水安全和健康的生态系统提供科学依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 水库概况与采样点分布

新安江水库,位于浙江西部与安徽南部交界的淳安县境内(E118°20'~119°20',N29°11'~30°02'),是1959年新安江水电站大坝建成蓄水后形成的深水型水库,其流域总面积11850 km²,其中库(湖)区面积达573 km²,库容量为178 亿 m³,平均水深达34 m,湖中面积2.5 km²以上岛屿有1078个,又名千岛湖(吴志旭等,2012;盛海燕等,2014).该区域属亚热带季风湿润气候带,年均气温17.12℃,无霜期达260 d,年均降雨量1487 mm.该水库兼有发电、防洪、旅游、养殖、航运、饮用水源及工农业用水等多种功能,在城市饮用水安全日益紧张的趋势下,该水库饮用水源的功能将更突出.

根据新安江水库的地理形状,共设置12个采样点(图1),分别位于不同区域(Kimmel and Groeger, 1984),其中街口、威坪林场、小金山、百亩畈和航头岛属于河流区,茅头尖、三潭岛和排岭水厂属于过渡区,崂山出口、西园、毛竹源和大坝属于湖泊区.从

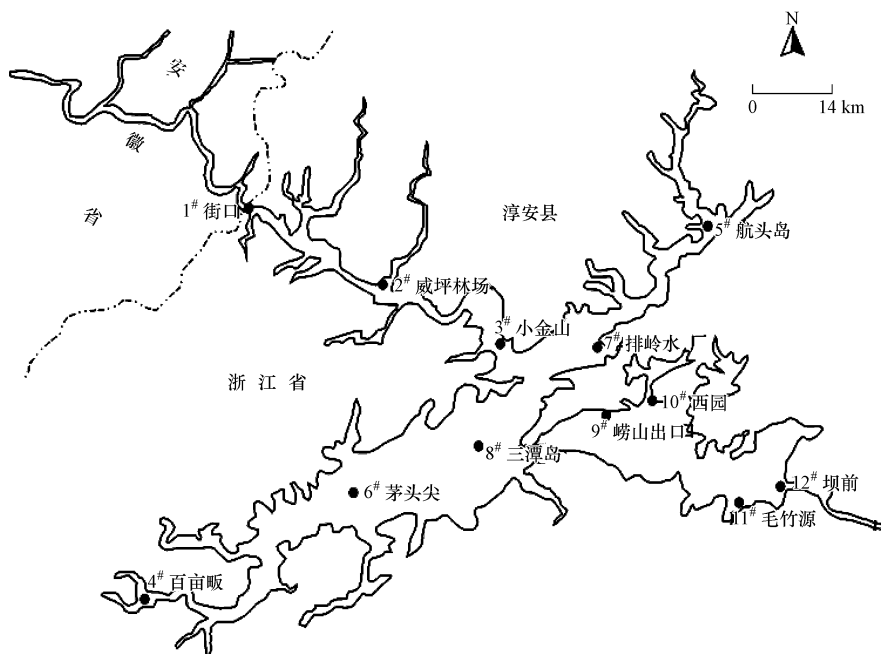


图1 新安江水库采样点示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites in Xin'anjiang Reservoir

2009年1月—2012年12月每月采样1次。2003—2008年之间的水质监测数据由淳安县环境保护监测站提供,气象和水文数据由淳安县气象局和淳安县水利局提供。

2.2 样品采集与分析

常规理化监测项目包括:水温、塞氏透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)和叶绿素a。透明度采用塞氏圆盘法现场测定,水温、溶解氧、pH采用加拿大RBR公司生产的XR-620多参数水质仪现场测定,其余理化项目采集后4h内在实验室测定。理化分析方法按照《水和废水监测分析方法》进行(国家环境保护总局,2002)。叶绿素浓度的测定采用改进的反复冻融、丙酮浸提测定(林少君等,2005)。

2.3 数据分析

采用EXCEL 2003软件对所有数据进行统计计算和分析,采用Spss 19.0软件进行聚类分析和多因子相关分析,采用单因素方差分析(one-way

ANOVA)比较不同数据组间的差异。

2.4 富营养状态指数计算

水库营养状态评价采用综合营养状态指数法,评价指标有叶绿素a(chla)、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})(中国环境监测总站,2001)。加权综合营养状态指数为:

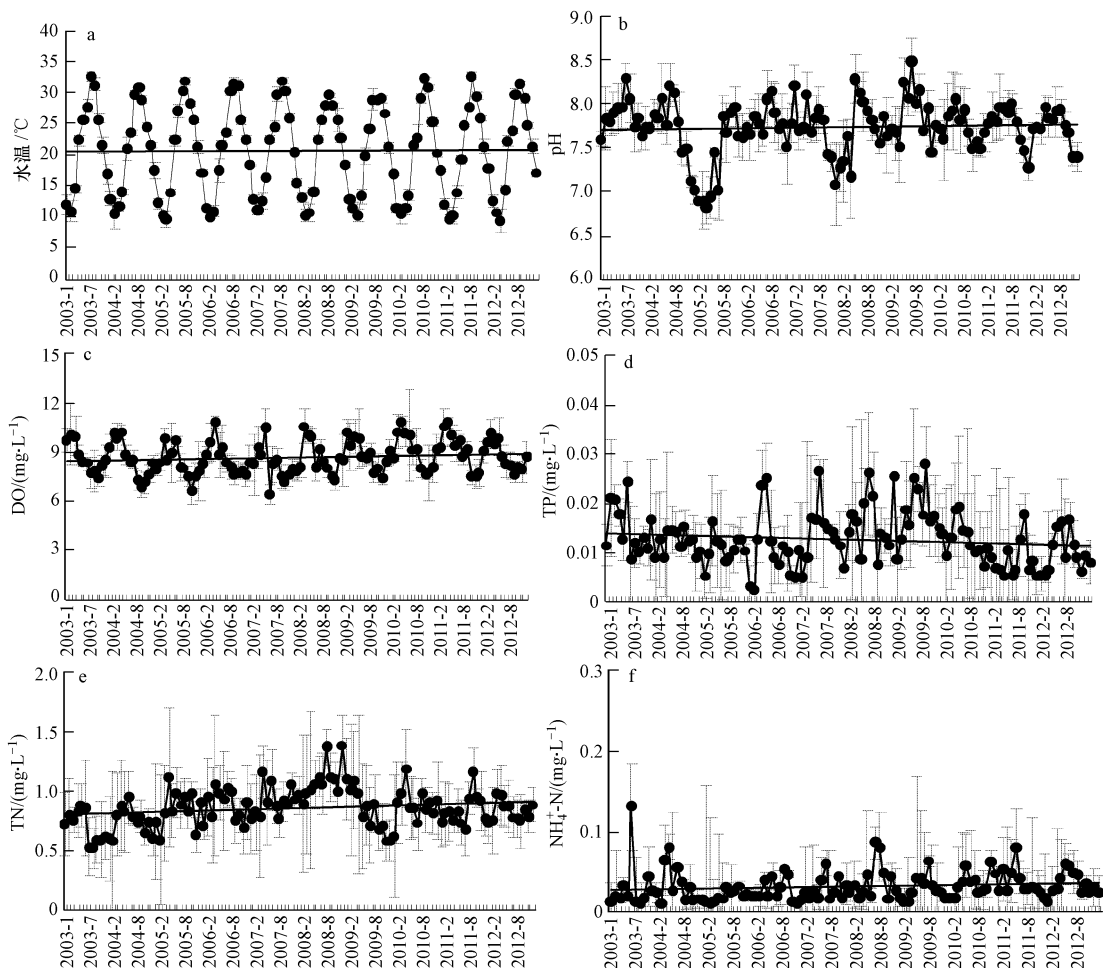
$$\sum(TLI) = \sum W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中, $\sum(TLI)$ 为综合营养状态指数, W_j 为第j种参数的营养状态指数的相关权重,TLI(j)为第j种参数的营养状态指数。

3 结果(Results)

3.1 新安江水库水质变化趋势

3.1.1 时间变化 随着水温的季节性变化(图2a),各水质指标均出现相应变化。pH值在夏秋季(5—9月)达到最高,冬季最低(11—12月)(图2b)。DO在春季(3—5月)达到最高,秋冬季最低(9—12月)(图2c)。总磷(TP)浓度较低在0.0028~



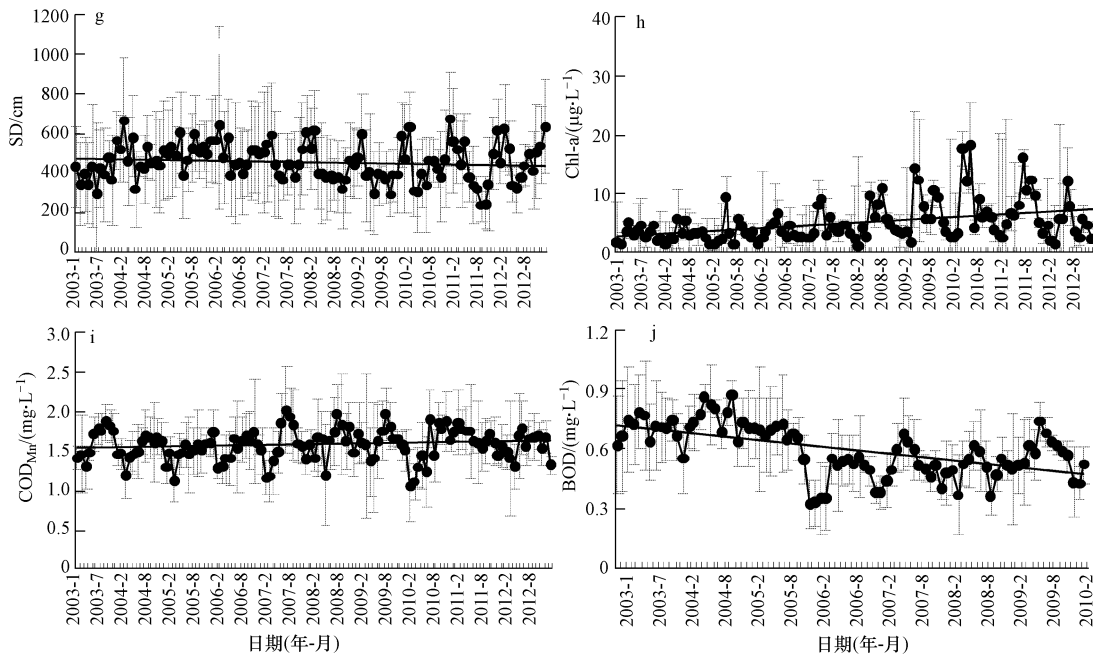


图 2 新安江水库 2003—2012 年逐月水质变化

Fig.2 Monthly variation of water quality in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

0.028 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 春季(4—6 月)明显高于冬季(12—2 月)(图 2d).总氮(TN)浓度值在 0.52~1.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高值一般出现在 4 月份,低值出现在 11 月和 2 月(图 2e).氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度值在 0.011~0.130 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,和总氮变化类似,高值出现在 4—7 月,低值出现在 12—2 月(图 2f).透明度(SD)的季节变化与其它指标相反,冬季(12—2 月)明显高于夏季(5—8 月),变化范围在 237~673 cm 之间(图 2g).叶绿素 a 浓度一般在春夏季(4—7 月)达到高值,冬季(12—2 月)最低,变化范围在 1.21~18.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2h).高锰酸盐指数(COD_{Mn})夏秋季节(5—10 月)达到最高,冬季最低(1—3 月),值在 1.06~2.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图 2i).生化需氧量(BOD)变化规律与高锰酸盐指数类似,夏秋季节高,冬季低,变化范围在 0.318~0.870 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图 2j).对每个指标不同月份进行单因素方差分析,得出水温、pH、溶解氧、总磷、氨氮、透明度、高锰酸盐指数和叶绿素 a 浓度均存在显著季节变化($p<0.01$, $df=119$),但总氮和生化需氧量季节变化不显著(TN: $p>0.05$, $df=119$;BOD: $p>0.05$, $df=85$).

新安江水库近 10 年各水质指标年际变化略有不同,叶绿素 a 浓度、总磷、总氮、生化需氧量和 pH 存在显著的年际变化(Chla , TP, TN, pH: $p<0.01$, $df=$

119;BOD: $p<0.01$, $df=85$).总氮浓度从 2003 年开始缓慢上升至 2007 年开始逐步下降,后 5 年均值比前 5 年均值高 0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;叶绿素 a 浓度一直保持上升趋势,至 2012 年略有下降,后 5 年均值比前五年增加近一倍;生化需氧量下降趋势明显.

3.1.2 空间变化 对 12 个点位 10 年各指标月均值进行空间异质性分析,发现水温的空间差异不显著, pH、SD、Chl-a、DO、 COD_{Mn} 、BOD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的空间差异均达到显著水平($p<0.01$, $df=119$)(图 3).除 pH 和 DO 未表现出上下游差异外, TP、TN、Chl-a、 COD_{Mn} 、BOD、 $\text{TNH}_4^+\text{-N}$ 均表现出从河流区至过渡区和湖泊区逐渐降低的趋势,而 SD 则表现出从河流区至过渡区和湖泊区逐渐增大的趋势.

根据各水质指标对 12 个点位进行聚类分析,结果见图 4.12 个点位可分成 3 大类,街口、百亩畈和威坪林场属河流区,水质最差;第二大类是西园和小金山,水质比第一大类稍好第三大类是过渡区和湖泊区各点位,与前面两大类相比水质最好.第二类中西园点位属于湖泊区但其水质比其它湖泊区点位差,因为其位于县城周边,受周围人类活动影响较大(韩晓霞等,2013).第三大类中航头岛属于河流区但其水质相比于其它河流区点位水质最好,说明航头岛所在的东北湖区水质优于西南和西北湖区.

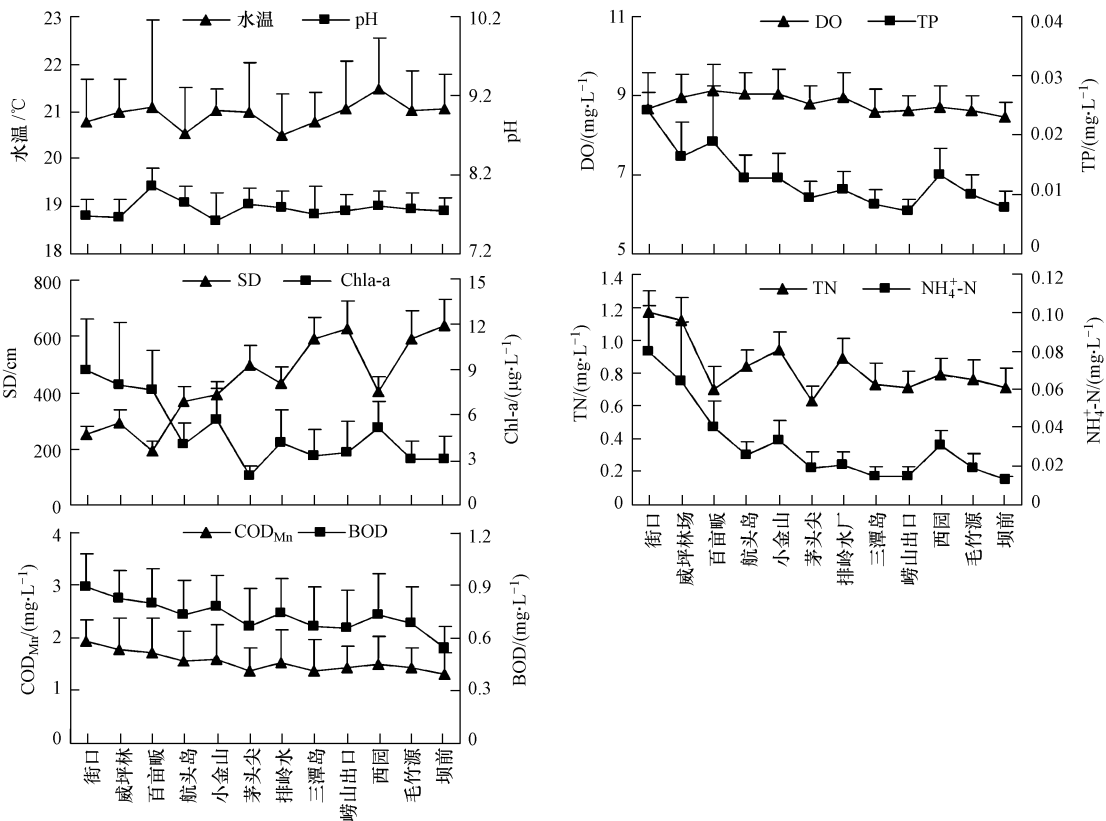


图3 新安江水库 2003—2012 年空间水质变化趋势

Fig.3 Spatial variation of water quality in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

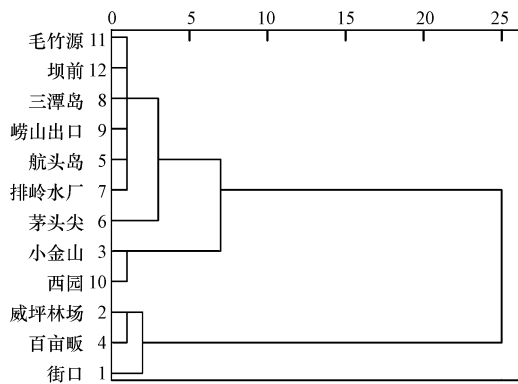


图4 新安江水库点位聚类分析图

Fig.4 Cluster analysis of sites in Xin'anjiang Reservoir

3.1.3 综合营养状态指数变化 新安江水库近 10 年综合营养状态指数略有上升(图 5a),前五年均值为 27.6,后五年均值为 29.7.根据湖泊(水库)富营养化评价等级,2003—2009,2012 年均值小于 30,新安江水库水体属于贫营养状态,2010 年和 2011 年年均值大于 30,属中营养状态.单个参数 TLI 指标中,总氮指数最高(月均指数范围在 39~68 之间),50%左右的时间属于轻度富营养状态;总磷和

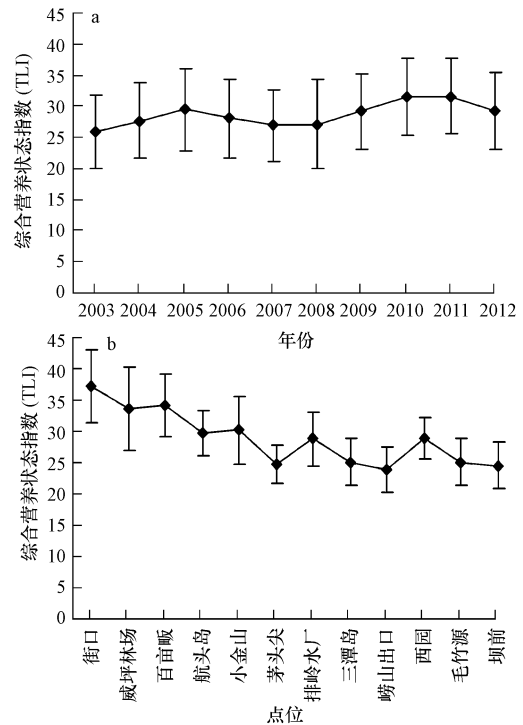


图5 新安江水库 2003—2012 年综合营养状态指数时空变化趋势

Fig.5 TLI of temporal and spatial variations in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

高锰酸盐指数较低(月均指数范围在 7~29 之间),属于贫营养状态;叶绿素 a 和透明度随季节变化较大(冬季月均指数较低:小于 30,夏季较高:在 30~50 之间),极个别月份街口叶绿素 a 和透明度指数超过 50,达到轻度富营养状态。

综合营养状态指数存在显著空间差异,多年平均综合营养状态指数呈现出河流区至湖泊区逐渐下降的趋势(图 5b)。河流区 5 个点位(街口、威坪林场、百亩畈、航头岛和小金山)的 TLI 值均大于 30,水体属中营养状态,过渡区和湖泊区则属贫营养状态。

3.2 新安江水库水文及气象动态特征

新安江水库从成库至 2012 年间,年均气温波动较大,年均气温值范围在 16.6~18.3 °C 之间,最大相差 1.7 °C。从 2003—2012 年间,年均气温处于显著下

降过程(图 6a) ($r=0.669, p<0.05, df=9$), 2007 年年均气温比 2012 年年均气温高 1.25 °C。

新安江水库近 50 年间多年平均降雨量为 1487 mm,年降雨量年际变化较大,变化范围在 1025~2111 mm 之间。从 2003—2012 年间,年均降雨量处于显著上升过程(图 6b) ($r=0.67, p<0.05, df=9$), 2004 年属枯水年,2005~2007、2009 年属偏枯年,2003 年和 2011 年属平水年,2010 年和 2012 年属偏丰年。2003—2012 年期间,年均降雨量和气温呈显著负相关($r=0.6303, p<0.05, df=9$)。

新安江水库多年月平均降雨量见图 6c,从 1 月份开始降雨量逐月增加,至 6 月份达到最大值,后逐步下降至 12 月份达最低值。4—6 月份是丰水期,10 月份至次年 1 月份是枯水期。

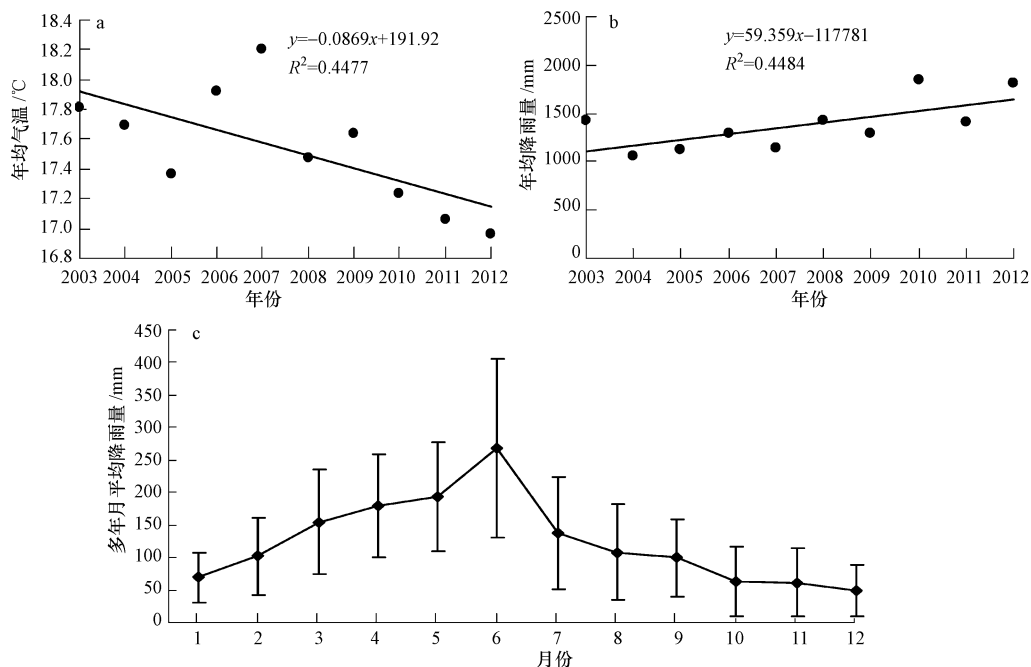


图 6 新安江水库 2003—2012 年气温和降雨量变化趋势及多年月均降雨量

Fig.6 Temperature and rainfall variation, multi-year average monthly rainfall in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

新安江水库月均入库流量和出库流量基本趋势相似,一般丰水期高于枯水期,但月均入库流量极值大于出库流量(图 7a)。月均入库流量大于 $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的 3 次高值 2 次出现在 6 月份,1 次出现在 7 月份。年均出入库流量基本持平,2004 年年均流量最低,为 $97 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。出入库流量与当时的降雨量关系密切,根据降雨量与出入库流量的关系图(图 8)可知,月均出入库流量与月降雨量之间存在显著正相关(入库流量与降雨量: $r=0.8746, p<0.01, df=119$;

出库流量与降雨量: $r=0.5073, p<0.01, df=119$)。

3.3 水文气象因子与水质指标之间的相关分析

水文气象因子对水体理化指标有直接或间接的影响。对 2003—2012 年每月的水文气象与水体理化因子进行相关性分析,结果表明降雨量与出入库流量、溶解氧、总磷、氨氮浓度呈显著正相关,与透明度呈显著负相关。气温与水温、pH、高锰酸盐指数、生化需氧量、总磷和叶绿素 a 呈显著正相关,与透明度呈显著负相关。出库流量与溶解氧、总磷和叶

绿素 a、氨氮、总氮呈显著正相关,与透明度呈显著负相关.入库流量与溶解氧、氨氮、总磷呈显著正相

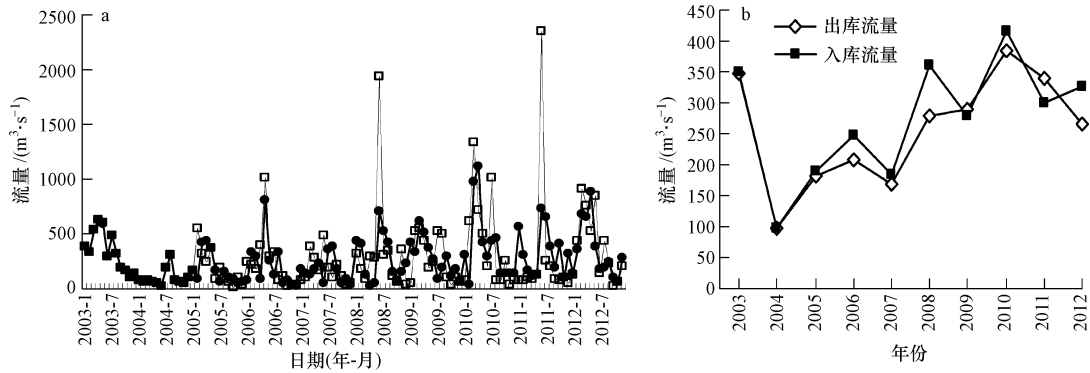


图 7 新安江水库 2003—2012 年流量变化趋势

Fig.7 Flow variation in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

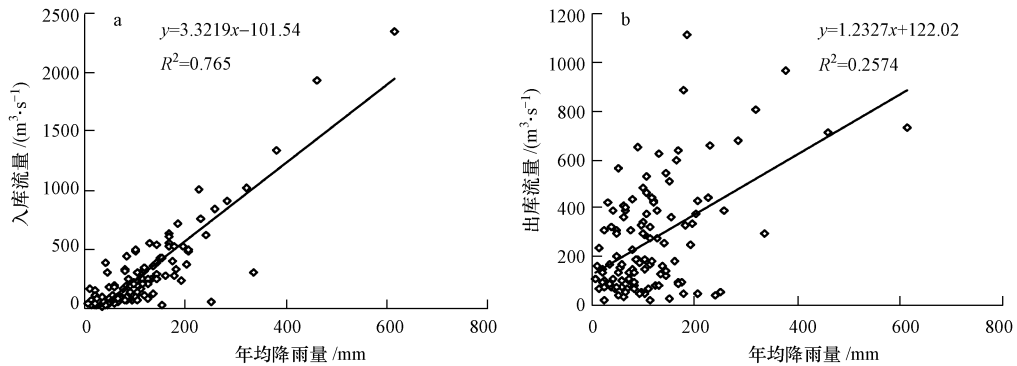


图 8 新安江水库月降雨量与月出入库流量关系

Fig.8 Flow variation in Xin'anjiang Reservoir during 2003—2012

表 1 新安江水库水文气象因子及水质指标间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between hydrological, meteorological factors and water quality indexes in Xin'anjiang Reservoir

	气温	出库流量	入库流量	水温	pH	DO	COD _{Mn}	BOD	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN	SD	Chla
降雨量	0.148	0.507 **	0.875 **	-0.033	0.146	0.248 **	-0.103	-0.005	0.203 *	0.245 **	0.133	-0.276 **	0.137
气温		0.045	0.118	0.0879 **	0.494 **	-0.146	0.520 **	0.379 **	0.298 **	0.277 **	0.139	-0.523 **	0.435 **
出库流量			0.633 **	-0.127	0.118	0.410 **	0.000	-0.007	0.225 *	0.308 **	0.226 *	-0.367 **	0.306 **
入库流量				-0.053	0.133	0.268 **	-0.091	-0.048	0.235 **	0.278 **	0.130	-0.257 **	0.118
水温					0.398 **	-0.481 **	0.583 **	0.373 **	0.130	0.122	0.029	-0.407 **	0.326 **
pH						0.120	0.373 **	0.070	0.309 **	0.298 **	-0.013	-0.408 **	0.333 **
DO							-0.235 **	-0.137	0.180 *	0.162	0.107	-0.116	0.250 **
COD _{Mn}								0.368 **	0.320 **	0.239 **	0.128	-0.342 **	0.282 **
BOD									0.116	0.174	-0.305 **	-0.237 *	0.007
NH ₄ ⁺ -N										0.289 **	0.230 *	-0.323 **	0.238 **
TP											0.264 **	-0.441 **	0.214 *
TN												-0.173	0.238 **
SD													-0.566 **

注: * p<0.05, ** p<0.01.

4 讨论 (Discussion)

4.1 新安江水库水质变化特征

根据近 10 年新安江水库水质指标的分析结果,发现除叶绿素 a 以外,各水质指标 10 年间保持基本稳定.但叶绿素 a 浓度在近 10 年间增加趋势明显(图 2h),并导致综合营养状态指数上升,是目前该水库最值得关注的问题(吴志旭等,2012;韩晓霞等,2013).氮磷是水体发生富营养化的主导因子(杨东方等,2007),氮磷的增加再加上适宜的温度和光

照、流动缓慢的水体可能会导致浮游植物的生长即叶绿素 a 浓度增加,浮游植物的增加同时又会影响到水体透明度,这是一个相互影响的复杂过程.新安江水库丰水期(4—6 月份)叶绿素 a 浓度与总氮和总磷存在极显著正相关(图 9)(TN: $r = 0.4126, p < 0.01, df = 359$; TP: $r = 0.4198, p < 0.01, df = 359$),枯水期则不相关($p > 0.05, df = 359$),说明丰水期降雨带入的营养盐对浮游植物的生长起到促进作用,符合上述规律.

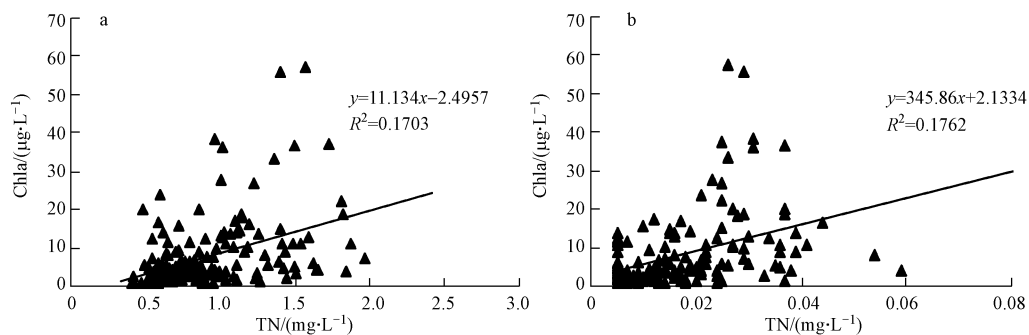


图 9 新安江水库丰水期 TP、TN 浓度与叶绿素 a 的关系

Fig.9 Relationship between TP, TN and chlorophyll a concentration in Xin'anjiang Reservoir during flooding season

新安江水库水质存在显著的空间差异性.总氮、总磷、叶绿素 a 浓度空间上分布特征均是新安江河流区高于过渡区和湖泊区,透明度也是河流区明显比过渡区和湖泊区低.街口、威坪林场和小金山皆属于新安江下游地区,新安江是水库最主要来水河流,新安江流域占整个水库流域的 60%(吴志旭等,2012),说明新安江营养盐输入对这些点位影响较大,外源输入供给特征明显,这与前人的研究一致(严力蛟等,2001;吕唤春等,2002;吕唤春等,2003a,2003b,2004;韩晓霞等,2013),即新安江水库最大的问题仍然是流域问题.因此对于近期处于中营养状态的新安江水库,如何从流域角度来保护新安江水库的生态健康与饮用水安全,是决策部门首先要思考的重要问题.同时须关注西园点位,总磷、总氮、叶绿素 a 和透明度多年均值紧次于上游点位,因其位于县城附近,周边人类生产活动对其影响较大.从新安江水库内营养盐较高区域也是叶绿素 a 浓度较高区域可以推断,外源输入和人类活动对新安江水库产生较大影响(韩晓霞等,2013).

4.2 水文气象因子对水库水质的影响

根据新安江水库水质月均指标及与水文气象因子的相关性得出,降雨量、气温和出入库流量对

水体水质指标影响较大.降雨量对水质的影响表现在丰水期的水质普遍要比枯水期差,因为降雨形成的地表径流带入大量营养盐(Merino-Ibarra *et al.*, 2008),促进浮游植物生长,同时还携带大量悬浮物导致水体透明度下降,新安江水库符合这一特点.入库流量与下月叶绿素 a 浓度呈显著正相关(图 10a)($r = 0.4922, p < 0.01, df = 109$),同样说明入库流量带入较多营养盐入库有利于浮游植物生长,即水文动力学过程对水库浮游植物生长起重要作用.

气温对水库的影响主要表现在气温对水温的影响从而影响到水体热力分层,进一步引起水库各种理化过程(溶解氧分布、底泥营养盐释放等)、上下层水流混合和对流等动力学过程发生变化(Merino-Ibarra *et al.*, 2008; Wilhelm & Adrian, 2008),进而影响到水库浮游生物和初级生产力.水温及其季节变化是决定浮游植物群落结构和水生生态系统的主导因子(O'Reilly *et al.*, 2003),同时也能影响浮游植物生长的有效营养盐.一般而言水温升高有利于浮游植物生长(杨东方等,2007),新安江水库水温与叶绿素 a 之间也存在显著正相关(图 10b)($r = 0.2742, p < 0.01, df = 119$).在全球气候变化特别是全球变暖的大背景下,水生态研究人员致力于开展气候

变化对水体及初级生产力的研究 (Rühland and Smol, 2005). 气候对浮游植物组成最显著的影响可能是通过改变热分层模式来实现的, 如气温升高延长了生长季和垂向混合进程 (Rodríguez *et al.*, 2001; Diehl *et al.*, 2002; Smol *et al.*, 2005), 垂向混合过程会改变水体中有效光和营养盐. 目前对新安江水库的热力分层进行初步研究发现春季 4 月份到冬末春初的 3 月份温跃层随着季节的变化呈现增强-稳定-

减弱-消失的周期变化, 即春、夏、秋三季分层, 冬季混合 (刘明亮等, 2014), 但是热力分层究竟是如何影响浮游植物生长这一关键问题还未进行深入研究. 近 10 年新安江水库水温年均值呈现出下降趋势, 但叶绿素 a 浓度却是上升的, 这与前人提出的温度上升导致浮游植物生物量增加的结论不一致 (Padilla-Gamiño and Carpenter, 2007).

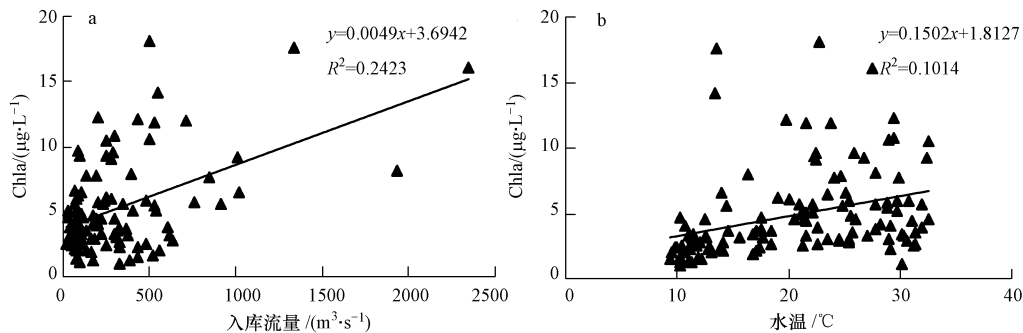


图 10 新安江水库入库流量、水温与叶绿素 a 的关系

Fig. 10 Relationship between inflow, water temperature and chlorophyll a concentration in Xin'anjiang Reservoir

5 结论 (Conclusions)

1) 2003—2012 年间, 新安江水库叶绿素 a 浓度、总磷、总氮、生化需氧量和 pH 存在显著的年际变化, 叶绿素 a 浓度上升趋势显著. 除总氮和生化需氧量外, 各指标均存在显著的季节变化, 一般丰水期水质比枯水期水质差. 新安江水库水质存在显著的空间差异性, 表现为河流区水质比过渡区和湖泊区差.

2) 综合营养状态指数表明近 10 年间新安江水库营养状态逐步上升, 由贫营养状态向中营养状态转变. 多年平均综合营养状态指数存在显著空间差异, 呈现出河流区至湖泊区逐渐下降的趋势.

3) 新安江水库近 10 年气象水文条件变化较大, 气温下降趋势显著, 降雨量上升趋势显著, 导致入库和出库流量增加. 气温、降雨量和出入库流量对水体理化指标影响较大, 气象水文因子是影响新安江水库水质的重要因素.

责任作者简介: 张银龙 (1963—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为环境生态学. E-mail: yinlongzhang@njfu.edu.cn.

参考文献 (References):

Diehl S, Berger S, Ptacnik R, *et al.* 2002. Phytoplankton, light, and

nutrients in a gradient of mixing depths: field experiments [J]. *Ecology*, 83: 399-411

高玉蓉, 刘明亮, 吴志旭, 等. 2012. 应用实测光谱估算千岛湖夏季叶绿素 a 浓度 [J]. *湖泊科学*, 24(4): 553-561

国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社

韩博平, 李铁, 林旭钿. 2003. 广东省大中型供水水库富营养化现状与防治对策研究 [M]. 北京: 科学出版社

韩博平, 林桂花, 钟秀英. 2006. 水库蓝藻和蓝藻毒素的分布与检测——广东省典型供水水库研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社

韩博平. 2010. 中国水库生态学研究回顾与展望 [J]. *湖泊科学*, 22(2): 151-160

韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2013. 新安江水库 (千岛湖) 水质时空变化特征及保护策略 [J]. *湖泊科学*, 25(6): 836-845

江涛, 刘祖发, 陈晓宏, 等. 2005. 广东省水库富营养化评价 [J]. *湖泊科学*, 17(4): 378-382

Kimmel B L, Groeger A W. 1984. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective [J]. *Lake and Reservoir Management*, 1(1): 277-281

李共国, 虞左明. 2002a. 千岛湖浮游动物的群落结构 [J]. *生态学报*, 22(2): 156-162

李共国, 虞左明. 2002b. 浙江千岛湖桡足类的群落结构 [J]. *生物多样性*, 10(3): 305-310

林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 2005. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进 [J]. *生态科学*, 24(1): 9-11

刘景红, 张晟, 陈玉成, 等. 2005. 重庆市水库富营养化调查及评价 [J]. *水土保持学报*, 19(4): 131-134

刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 2014. 新安江水库 (千岛湖) 热力学状

- 况及热力分层研究[J]. 湖泊科学, 26(3): 447-454
- 刘其根, 王钰博, 陈立侨, 等. 2010. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J]. 生态学报, 30(10): 2774-2783
- 刘其根. 2005. 千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响[D]. 上海: 华东师范大学
- 刘英, 王珂, 周斌, 等. 2003. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 29(6): 621-626
- 吕唤春, 陈英旭, 方志发, 等. 2002. 千岛湖水体营养物质的主导因子分析[J]. 农业环境保护, 21(4): 318-321
- 吕唤春, 陈英旭, 虞左明, 等. 2003a. 千岛湖水体主要污染物动态变化及其成因分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 29(1): 87-92
- 吕唤春, 王飞儿, 陈英旭, 等. 2003b. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析[J]. 应用生态学报, 14(8): 1347-1350
- 吕唤春, 薛生国, 方志发, 等. 2004. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. 中国地质, 31(S1): 112-117
- Merino-Ibarra M, Monroy-Ríos E, Vilaclara G, *et al.* 2008. Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir[J]. *Aquatic Ecology*, 42(3): 335-345
- O'Reilly C M, Alin S R, Plisnier P D, *et al.* 2003. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa [J]. *Nature*, 424(6950): 766-768
- Padilla-Gamiño J L, Carpenter R C. 2007. Seasonal acclimatization of *Asparagopsis taxiformis* (Rhodophyta) from different biogeographic regions[J]. *Limnology and Oceanography*, 52(2): 833-842
- Rodríguez J, Tintoré J, Allen J T, *et al.* 2001. Mesoscale vertical motion and the size structure of phytoplankton in the ocean[J]. *Nature*, 410(6826): 360-363
- Rühland K, Smol J P. 2005. Diatom shifts as evidence for recent Subarctic warming in a remote tundra lake, NWT, Canada [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1/2): 1-16
- 盛海燕, 虞左明, 刘明亮, 等. 2014. 千岛湖冬季浮游植物光合活性[J]. 生态学杂志, 33(2): 365-372
- Smol J P, Wolfe A P, Birks H J B, *et al.* 2005. Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(12): 4397-4402
- 苏玉萍, 林颖昕, 林佳, 等. 2008. 福建省典型饮用水源地水库富营养化状况调查与分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 3(1): 49-56
- 王丽平, 郑丙辉. 2013. 洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素[J]. 生态学报, 33(3): 1011-1017
- 王孟, 邹红娟, 马经安. 2004. 长江流域大型水库富营养化特征及成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 13(5): 478-481
- Wilhelm S, Adrian R. 2008. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 53(2): 226-237
- Winder M, Sommer U. 2012. Phytoplankton response to a changing climate[J]. *Hydrobiologia*, 698(1): 5-16
- 吴挺峰, 高光, 晁建颖, 等. 2009. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策[J]. 水利学报, 40(4): 391-397
- 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 2012. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. 湖泊科学, 24(3): 460-465
- 严力蛟, 俞新华, 方志发. 2001. 影响千岛湖水质的主要环境问题与富营养化防治对策[J]. 当代生态农业, (Z2): 94-96
- 杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 2007. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学, 26(3): 201-207
- 余员龙, 任丽萍, 刘其根, 等. 2010. 2007—2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素[J]. 湖泊科学, 22(5): 684-692
- 张峥. 2005. 辽宁省大中型水库富营养化现状分析及防治对策[J]. 辽宁城乡环境科技, 25(1): 41-42
- 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 2006. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 26(6): 1022-1030
- 中华人民共和国环境保护部. 2011. 2010 中国环境状况公报[M]. 北京: 中华人民共和国环境保护部
- 中国环境监测总站. 2001. 湖泊水库富营养化评价方法及分级技术规范[M]. 北京: 中国环境监测总站