

新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略*

韩晓霞^{1,2}, 朱广伟^{1**}, 吴志旭³, 陈伟民¹, 朱梦圆¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(3: 淳安县环境保护监测站, 杭州 311700)

摘要: 为探索新安江水库(千岛湖)水质的变化规律及其影响因素, 利用 2009—2010 年的逐月水质监测数据, 结合文献资料, 对新安江水库水质时空变化进行了综合分析。结果表明: 在时间分布上, 透明度、总氮、总磷及叶绿素受水文季节变化过程、浮游生物生长及人类活动等的综合影响, 具有明显的季节变化特征, 特别是上游街口断面各指标季节差异显著。空间分布上, 上游水质明显劣于下游水质, 上游水域透明度低, 氮、磷及叶绿素含量高, 反映出外源供给和人类活动对新安江水库水质的决定性贡献, 控制外源污染是新安江水库水质提升的关键。统计分析表明, 新安江水库主要感官指标透明度主要受控于藻类生物量, 而藻类生物量变化与氮、磷营养盐的含量关系密切。严格控制入库营养盐通量, 控制浮游植物生物量的季节性异常增殖已成为解决新安江水库水环境问题的核心。另外, 新安江水库经济鱼类赋存量与捕捞量对水质有一定影响, 年度捕捞量与水体透明度具有反相关关系, 不能排除鱼类密度过高导致的生态系统失调的可能。因此, 要进一步开展渔业养殖的水质效应研究, 加强渔业管理, 确定科学合理养殖模式, 保证新安江水库水质的改善。

关键词: 新安江水库; 富营养化; 时空变化; 藻类水华; 渔业养殖

Spatial-temporal variations of water quality parameters in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) and the water protection strategy

HAN Xiaoxia^{1,2}, ZHU Guangwei¹, WU Zhixu³, CHEN Weimin¹ & ZHU Mengyuan¹

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China*)

(3: *Chun'an Environmental Monitoring Station, Hangzhou 311700, P. R. China*)

Abstract: To explore the regular pattern of reservoir water quality variation and its influenced factors of Xin'anjiang Reservoir, we comprehensively analyzed the spatial-temporal variations of water quality in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) using the water quality data monitored monthly during 2009–2010 and literature. The results showed that an obvious seasonal variation of transparency was caused by the interaction effects among hydrology, organism, and human production activities cause, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll. Especially in the upstream-Jiekou transect, its seasonal change of each indicator is significantly different. The water quality of the upstream was not same to the downstream water quality obviously with low transparency, high content of nitrogen, phosphorus and chlorophyll. This reflects that exogenous supply and human activities have a primary contribution to water pollution. Thus, the water quality could be improved by controlling the exogenous pollution. The main factor that influences transparency of sensory indicators is the algal biomass, while the factor which controls the algae biomass change is the content of nitrogen and phosphorus. Therefore, strictly controlling the quantity of phytoplankton cells is the key to solve water environmental problems of Xin'anjiang Reservoir. In addition, the economical fishing quantity and inventory of Xin'anjiang Reservoir has certain association with water quality and the inverse correlation was found between the annual fishing quantity and water transparency. Therefore, we should pay more attention to the fisheries management and make a scientific and reasonable fishery culture pattern to

* 国家自然科学基金项目(51279194)和浙江省淳安县环境保护局重点项目联合资助。2013-03-18 收稿; 2013-04-23 收修改稿。韩晓霞, 女, 1989 年生, 硕士研究生; E-mail: hxxl29@126.com.

** 通信作者; E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn.

keep development of Xin'anjiang Reservoir resources sustainable.

Keywords: Xin'anjiang Reservoir; eutrophication; temporal and spatial variation; algal bloom; commercial fishery

水库在我国水资源安全供给方面起着至关重要的作用.我国目前水库总库容达到 $4660 \times 10^8 \text{ m}^3$,为自然湖泊水量的2倍^[1-2].在饮用水供给方面,我国水库供水量为 $1355 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全国供水量的26%^[3].然而,随着经济的发展和自然资源的巨大需求,水库的水质问题变得越来越突出^[1,4],集中表现在流域开发强度增大、营养盐及有机物污染负荷增大、水体透明度低、藻类异常增殖对水质的危害大等^[5-6].

新安江水库(又名千岛湖)是华东地区的一座特大型水库,具有湖泊型水库的典型性状^[7].新安江水库兼有发电、防洪、旅游、养殖、航运、饮用水源及工农业用水等多种功能,是钱塘江的水源涵养区.由于是长三角的战略水源地^[8-9],其饮用水功能变得越来越突出.新安江水库的突出问题是藻类异常增殖引起的水体透明度下降以及异味物质问题.1998、1999年新安江水库中心湖区和威坪水域发生了大面积的季节性蓝藻水华^[10],2004、2005年威坪库湾又出现曲壳藻异常增殖,2007年在坪山水域出现水华束丝藻异常增殖,2009年安阳水域出现曲壳藻异常增殖,2010年发生较大范围的鱼腥藻异常增殖,严重影响了水体的透明度,显示了生态灾害的破坏力^[5],水环境及生态问题日趋凸现^[11-13],引起了政府和居民的极大关注^[14].

关于新安江水库水质问题成因,已有学者从长期监测、渔藻关系、统计分析等角度开展了大量研究^[6-15].然而,由于新安江水库湖汊众多、水文过程复杂、监测点离散等原因,对水质恶化的认识,特别是对藻类异常增殖原因的分析并没有定论,还必须进行长期的观测分析.本文在文献分析的基础上,通过对2009—2010年新安江水库水质监测分析,探讨了水库水质时空变化的影响因素,提出新安江水库水环境保护的策略,以期为优质水库的生态保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 新安江水库概况

新安江水库1957年4月动工建设,1959年9月21日截流蓄水形成分枝山谷型水库,流域面积10442 km²,主要包括浙江省的淳安县及安徽省黄山地区的歙县、休宁县等,入库河流33条,在设计水位108 m(黄海标高)时水面面积573 km²,蓄水库容 $178.4 \times 10^8 \text{ m}^3$.库区纵长150 km,最宽处10 km,最大水深100 m,平均水深31.13 m,岸线长度1406 km,有1078个岛屿.新安江水库属亚热带湿润季风气候,多年平均气温17.8℃,平均降水量1489.0 mm,平均蒸发量1355.1 mm,多年入库净流量 $94.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,出库水量 $90.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,换水周期2年.上游的新安江是主要入库河流,街口断面以上集雨面积6000 km²,入库径流量占总径流量的60.2%^[15-17].

1.2 采样点设置

新安江水库水质监测断面见图1,其中街口、三潭岛、大坝前3个国控断面每月采样1次,在分析中主要用于水质时间变化分析;威坪林场、小金山、航头岛、排岭水厂、茅头尖、百亩畈、姥山出口、西园、毛竹源9个省控断面每2个月采样1次,结合国控断面数据,主要进行水质空间变化分析.监测指标包括透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})及叶绿素a(Chl. a)等.

1.3 样品采集与分析

2009—2010年,每月5日前后下湖采样.样品采自表层5 m水样.现场用赛氏黑白盘测定透明度.水样带回实验室后分析总氮、总磷、叶绿素a和高锰酸盐指数.监测及分析方法分别按照《湖泊生态系统观测方法》^[18]和《水和废水监测分析方法》^[19]进行.

新安江水库2009—2010年的气象数据来自淳安县气象局.

2 结果与分析

2.1 水质的季节变化特征

时间序列分析上,选取监测频率较高的街口、三潭岛、大坝前3个国控断面数据进行分析比较,2年的时间变化特征如图2.其中,街口断面代表占新安江水库入湖水量60%的新安江来水水质,三潭岛断面代表水库中心湖区的水质,大坝断面则代表湖区出水水质.

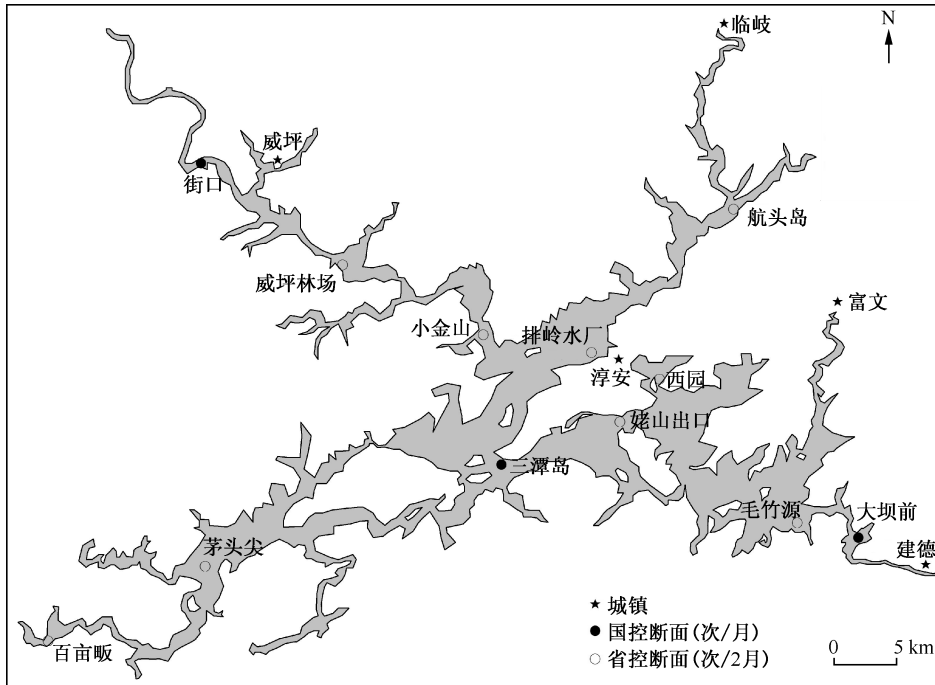


图1 新安江水库水质监测点布设

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

2.1.1 透明度季节变化 3个点透明度的季节变化很大,平均值的月变化从260 cm(2009年5月)到673 cm(2010年12月),平均值为447 cm(图2)。一般来说,冬季11月至次年2月,透明度很高,而3-5月透明度很低。夏季梅雨和暴雨之后,透明度有所增加,然而总体上不高。这一变化特征与天目湖沙河水库类似^[5],原因与浮游藻类的群落结构从硅藻向蓝藻转变有关,也与不同强度降雨引起的入流泥沙携带程度不同有关。我国东南地区水库春季水体更加适合硅藻的生长,水温超过25℃以后,硅藻生物量往往开始下降,同时蓝藻的生物量快速增加。而春耕季节的降雨容易引起大量的水土流失,入流河道较浑,短期内对透明度的影响很大。

3个点相比,上游街口断面透明度明显低于下游。街口24个月透明度的平均值为242 cm,而三潭岛断面则为513 cm,比街口断面高1倍。大坝前断面的平均值为585 cm,比三潭岛断面高14%。原因是街口断面处于水库河流域,外源带来的营养盐和泥沙含量都较高,水质波动大,而后者则处于水库湖泊区,泥沙的影响很小,对营养盐的响应也相对滞后许多。

2.1.2 总氮的季节变化 街口断面的总氮含量月变化很大,最大值为1.98 mg/L,出现在2009年2月份,最小值为0.62 mg/L,出现在2010年1月,平均值为1.13 mg/L,属Ⅳ类水质(图2)。这种高变幅的季节波动特征,反映出外源负荷对水库水质的影响,也是我国东南丘陵山区水库比较普遍的现象^[5]。

街口断面氮的含量变化与降雨有密切关系。2009年相对干旱,总降雨量为803 mm,2010年相对多雨,总降雨量为1469 mm。然而,2009年2月的降雨量很大,是该年最高的月份,相应地,街口断面水体总氮在2009年3月达到最大,是2年来最高的月份。2009年底的11和12月、2010年的1月是2年来雨量最少的月份,相应地街口断面水体总氮浓度达到低值,分别为0.65、0.66、0.62 mg/L(图3)。这一方面说明总氮受降雨量的控制,另一方面也说明春季降雨量对总氮负荷的重要性。

三潭岛和大坝前断面总氮含量总体上明显低于街口断面,平均值分别为0.78和0.74 mg/L,比街口断面低30%以上,属Ⅲ类水,但三潭岛和大坝前断面之间的差别不大。两个断面总氮含量总体上受上游街口断面的影响,如2010年2-3月的峰值及2010年8-9月的峰值吻合很好(图2),反映出对于整个水库而言,

外源供给对水体总氮含量的影响大.

2.1.3 总磷的季节变化 2009—2010 年新安江水库总磷含量的月变化剧烈(图 2),特别是上游的街口断面,总磷含量变化范围为 0.009 mg/L(2010 年 11 月)到 0.069 mg/L(2010 年 3 月),平均值为 0.031 mg/L,达到地表水Ⅲ类水标准.到了库体之后,磷浓度则大幅度下降,三潭岛断面 2 年平均值为 0.010 mg/L,大坝前断面则降至 0.008 mg/L,这均属于地表水Ⅰ类水浓度范围.

同总氮相似,上游街口断面总磷含量的波动受降雨的影响更加显著(图 3).降雨峰值之后,同月或者次月街口断面的总磷含量随之达到峰值.如 2009 年的 3 月总磷的峰值紧随 2 月的降雨峰值,不同步的原因是水质调查时间与降雨时期的不同步.而 2010 年 3 月的总磷峰值与降雨量峰值同步.三潭岛、大坝前断面的情况有所不同,是由于二者远离入库区,受颗粒物影响小.

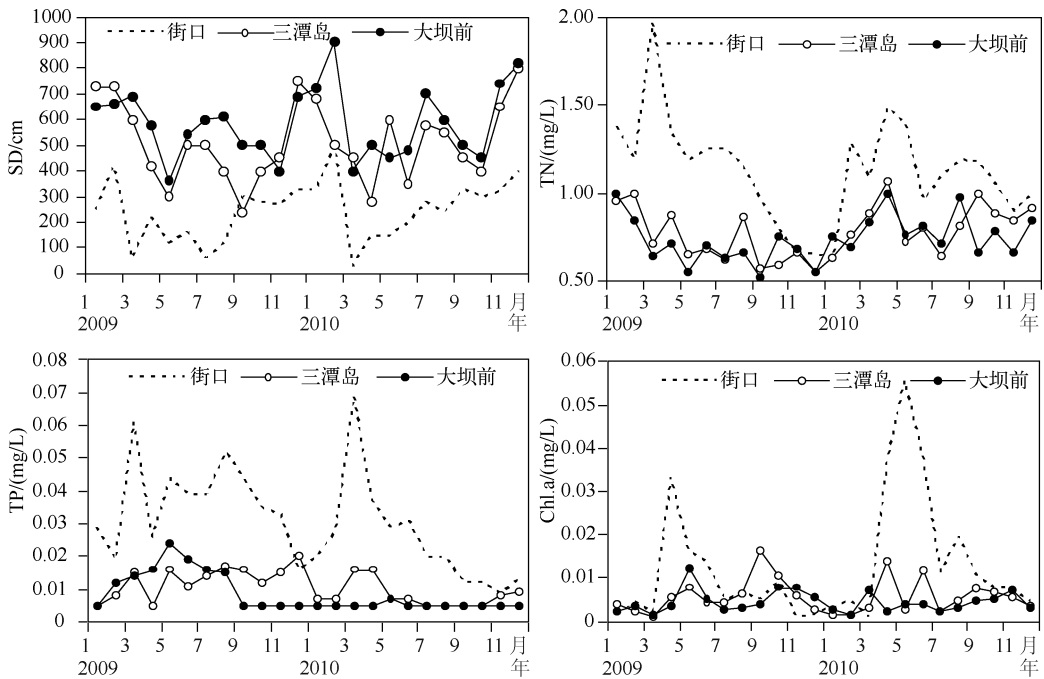


图 2 新安江水库 2009—2010 年 SD、TN、TP 和 Chl. a 含量逐月变化

Fig. 2 Monthly variation of transparency, TN, TP and Chl. a concentrations in Xin'anjiang Reservoir during 2009 - 2010

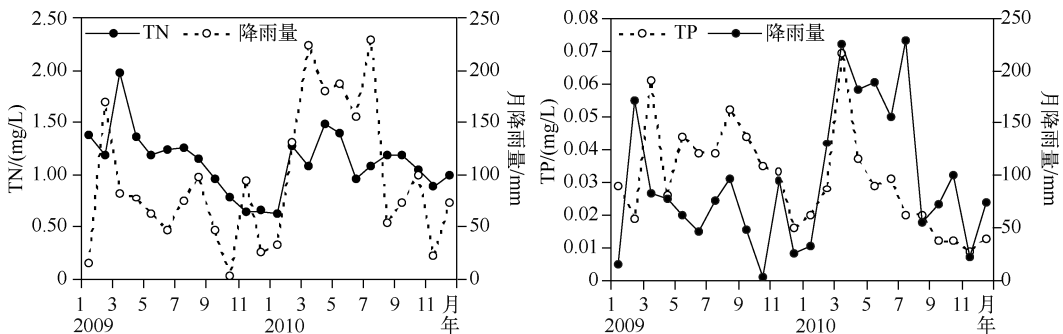


图 3 新安江水库 2009—2010 年街口断面水体总氮、总磷与月降雨量变化

Fig. 3 Comparison between monthly precipitation and concentrations of TN and TP of Jiekou monitoring site in Xin'anjiang Reservoir during 2009 - 2010

尽管总体上3个点的总磷吻合得比较好,如2009年5月的总磷浓度峰值一致,4月的低谷也基本一致,但也有较多的不一致之处.如2009年8月,街口有个明显的峰值,但后面2个点不明显,甚至相反.另外,2010年大坝前总体上总磷浓度都很低,除5月为0.007 mg/L外,其余月份都是0.005 mg/L.这说明对于上游而言,外源降雨输入对总磷的影响很明显,但对整个水库的影响不如总氮明显.这一方面是因为外源输入的磷更多以颗粒态存在,在水库中的输送距离比氮短;另一方面,也可能是由于浮游植物对磷的选择性吸收.新安江水库2009—2010年水体中氮磷比较高,以三潭岛断面为例,氮磷比介于28~199之间,平均值为96.在藻类生长旺盛的4—10月份,氮磷比最小为36.根据浮游植物生长的氮磷比限制条件^[20-21],新安江水库水体浮游植物生长主要受磷限制,藻类生长期磷的浓度受生物吸收利用的影响明显.所以,磷含量的季节变化不但受外源供给的影响,还受浮游植物吸收利用程度的影响.

2.1.4 叶绿素的季节变化 叶绿素是浮游植物现存量的重要指标.2009—2010年来,3个采样点叶绿素总体差别较大,突出表现在夏季街口断面叶绿素浓度明显高于其余2个断面(图2),这与王飞儿等报道的1999—2000年的状况^[22]、李培培等报道的2007—2009年的结果类似^[15].街口断面每年4月份出现快速的叶绿素增加,4—6月份总体上是叶绿素浓度峰值期.2009年4—6月份叶绿素含量分别为0.033、0.016和0.014 mg/L,2010年则分别为0.037、0.056和0.038 mg/L,而其他月份的平均值只有0.006 mg/L,夏季7—8月的平均值也只有0.011 mg/L,这可能与上游的河流型水库特征,即水质的波动性受水文过程影响大有关.

水库中其他两个断面的季节变化与街口断面明显不同.如果把2010年4月三潭岛点的峰值去掉(我们可以认为该点可能是受上游河道下泄的影响,因为2010年3月份降雨量很高,如图3),则水库中各点叶绿素a浓度均呈现典型的双峰型:5—6月有个峰值,9—10月出现第2个峰值.以湖心区的三潭岛断面为例,两年5—6月的平均值为0.007 mg/L,9—10月的平均值为0.010 mg/L,而其他月份的平均值为0.004 mg/L(2010年4月除外),最大值仅有0.006 mg/L(图2).水库中两点叶绿素峰值的双峰状分布反映出了水库型藻类的生长规律,与溧阳天目湖的情况相似^[5].

新安江水库2009—2010年水体透明度与叶绿素呈指数关系($y = 0.094e^{-0.0018x}$), $R^2 = 0.0745$, $\gamma = 0.91$),即随着叶绿素浓度的提高和藻类细胞数量的增加,水体透明度呈指数衰减趋势.这说明叶绿素含量或浮游植物生物量是控制新安江水库透明度的关键.目前新安江水库遇到的水环境问题,表现上是透明度下降,特别是5月份透明度较差,对旅游产生影响,其根源是浮游植物有些季节异常增殖、生物量偏高所致^[5].

氮和磷是浮游植物生长所必需的营养元素.以三潭岛断面为例,分析水库水体氮、磷浓度与藻类生物量之间的关系可以看出,氮、磷变化规律与叶绿素变化规律有较多的相似之处(图4),说明氮、磷浓度对藻类生长起到较为关键的作用.但也有较多不一致之处,大多出现在冬季、早春这些藻类生长缓慢而且面源污染排放量较高的季节,或者是9—10月水体营养盐补给匮乏、藻类生长高峰季节,藻类生物量与营养盐的关系较差.但总体上看,氮、磷的形态和浓度变化都对水体藻类生物量有着较大的影响.

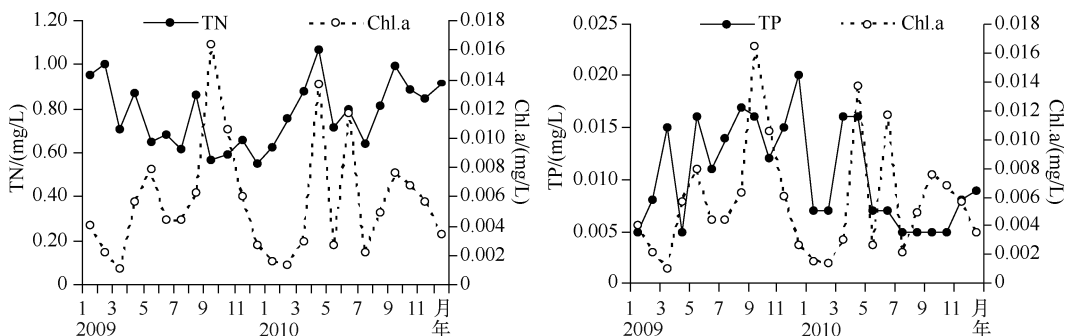


图4 新安江水库三潭岛水体总氮、总磷与叶绿素a含量对比

Fig. 4 Comparison between concentrations of chlorophyll-a and total nitrogen, total phosphorus of Santandao, Xin'anjiang Reservoir

2.2 新安江水库水质的空间变化

在以上季节变化分析的基础上,选择水库富营养化相对最严重的5、9月,对水质的空间异质性进行分析.统计上,主流方向上包括从上游的街口断面,到威坪林场、小金山、三潭岛、姥山出口、毛竹源断面,到下游的大坝前断面;西南支库包括百亩畈和茅头尖;东北支库包括航头岛和排岭水厂;淳安县城下游有西园断面.

2.2.1 透明度的空间变化 空间上看,街口断面这个河流入口处透明度最低,4个月(2009年5、9月及2010年5、9月)平均值为225 cm.靠近淳安县城周围的西园、小金山、排岭水厂3个断面其次,为289 cm(图5a),这是由于县城人类活动强度较大的缘故.淳安县城近年来城市建设发展很快,地表扰动很大,对周边水域的水质有影响.另外,随着淳安县城城市化的发展,人口增加很快,而目前城镇污水处理过程中,对氮、磷的去除还不够理想,污水处理厂尾水中营养盐的含量还比较高,对周边库体的藻类生长有贡献.

百亩畈、航头岛、威坪林场3个上游库区断面透明度平均值为299 cm,而其余的下游库区的5个断面透明度平均值为454 cm,比街口断面高1倍,与这些样点的上游流域植被保护相对较好有很大的关系.

2.2.2 总氮的空间变化 新安江水库水体12个监测点总氮含量的空间变化很大.总氮浓度平均值为0.80 mg/L,属Ⅲ类水质,最小值仅0.30 mg/L,可达Ⅱ类水质,出现于2009年9月份的百亩畈断面;最大值为1.40 mg/L,属Ⅳ类水质,出现在2010年5月的街口断面(图5b).街口是污染最重的区域,4个月的平均值为1.19 mg/L.其次是淳安县城周边的3个断面,平均值为0.88 mg/L.上游的3个断面平均值为0.80 mg/L,而下游大库区的5个点平均值为0.67 mg/L.总体处于Ⅲ类水质(图5b).这个变化趋势与透明度的情况基本一致.与透明度情况最大的不同之处,是西南库湾的百亩畈断面.从透明度看,该断面与其他上游库区断面并无太大区别,2009年5月的透明度仅有120 cm,2010年5月也只有200 cm.但是该点的总氮却非常低,4个月的平均值只有0.44 mg/L,是12个点中最低的,其次是西南库湾的茅头尖,再次是大坝前.这说明西南库湾的外源氮污染较弱,透明度偏低与该水域较强的挖砂等人类扰动行为有关.

2.2.3 总磷的空间变化 新安江水库水体总磷的情况与透明度、氮有相似之处,街口断面平均浓度最高,为0.032 mg/L,属地表水Ⅲ类水浓度,下游区的5个断面平均值最低,为0.011 mg/L,接近Ⅰ类水限定值.但也有很大的不同:其一,上游的3个断面平均值高于淳安县城周边的3个断面,前者的平均值为0.022 mg/L,后者为0.016 mg/L,而非总氮、透明度所呈现的淳安县城周边劣于上游区(图5c).这说明,对磷而言,外源河道补给的比例更高.而人类活动对氮的影响大于磷.其二,磷的上、下游的差别增大.4种类型区平均值透明度的最大差别是1倍,总氮差别不足1倍,而对总磷而言,街口断面比下游库区高2倍.不同类型之间差别拉大,这都反映出总磷更加明显的外源输入供给特征.磷的污染与流域土地利用状况关系密切.

2.2.4 叶绿素a的空间变化 叶绿素a浓度的空间变化趋势介于氮、磷之间,街口断面的平均值为0.022 mg/L,明显高于其他各点.而上游库湾区与淳安县周边点位相同,均为0.012 mg/L.下游库区则低于这些点一倍,为0.006 mg/L(图5d).

需要关注的是西南库区的茅头尖断面.该断面叶绿素a浓度平均值最低,仅为0.004 mg/L.对比透明度、氮、磷的情况看,该断面的透明度平均值最高,为560 cm,也明显高于下游库区的其他4个断面,这再次说明影响下游库区透明度的关键因素是浮游植物生物量.在下游库区5个断面当中,茅头尖断面的氮含量也是最低的,4个月平均值为0.54 mg/L,低于平均值0.67 mg/L,而总磷是最高的,平均值为0.014 mg/L,而5个断面的总磷平均值为0.011 mg/L,氮磷比为49.总氮最低而总磷最高,结果是叶绿素最低,这一方面可能是由于浮游植物生长已经受到氮供给的限制,或者是氮、磷共同限制,这与天目湖沙河水库2011年春季低氮期的情况类似^[5].另一方面可能与该区域渔业对浮游植物的牧食压力较大有关.李培培等的研究表明,在一定条件下,新安江水库水体浮游植物的确会较多地受到鱼类的影响^[15].

2.2.5 高锰酸盐指数的空间变化 新安江水库水体高锰酸盐指数的空间差异是5个指标中最小的.全湖4个月高锰酸盐指数的平均值为1.57 mg/L,为Ⅰ类水水平,最大值为2.30 mg/L,最小值为0.86 mg/L(图5e).4种类型区的大小顺序与总氮、透明度类似,这说明总氮污染往往伴随着有机质的污染.

高锰酸盐指数最高点仍是街口断面,平均值为1.88 mg/L,而最低值也是下游库区5个断面,平均值为1.44 mg/L,两者相差只有23%.与叶绿素a、总氮的情况类似,西南库区的茅头尖、百亩畈断面的高锰酸盐指数总体都不高.也验证了该断面的上游流域及水域人类活动相对较弱.

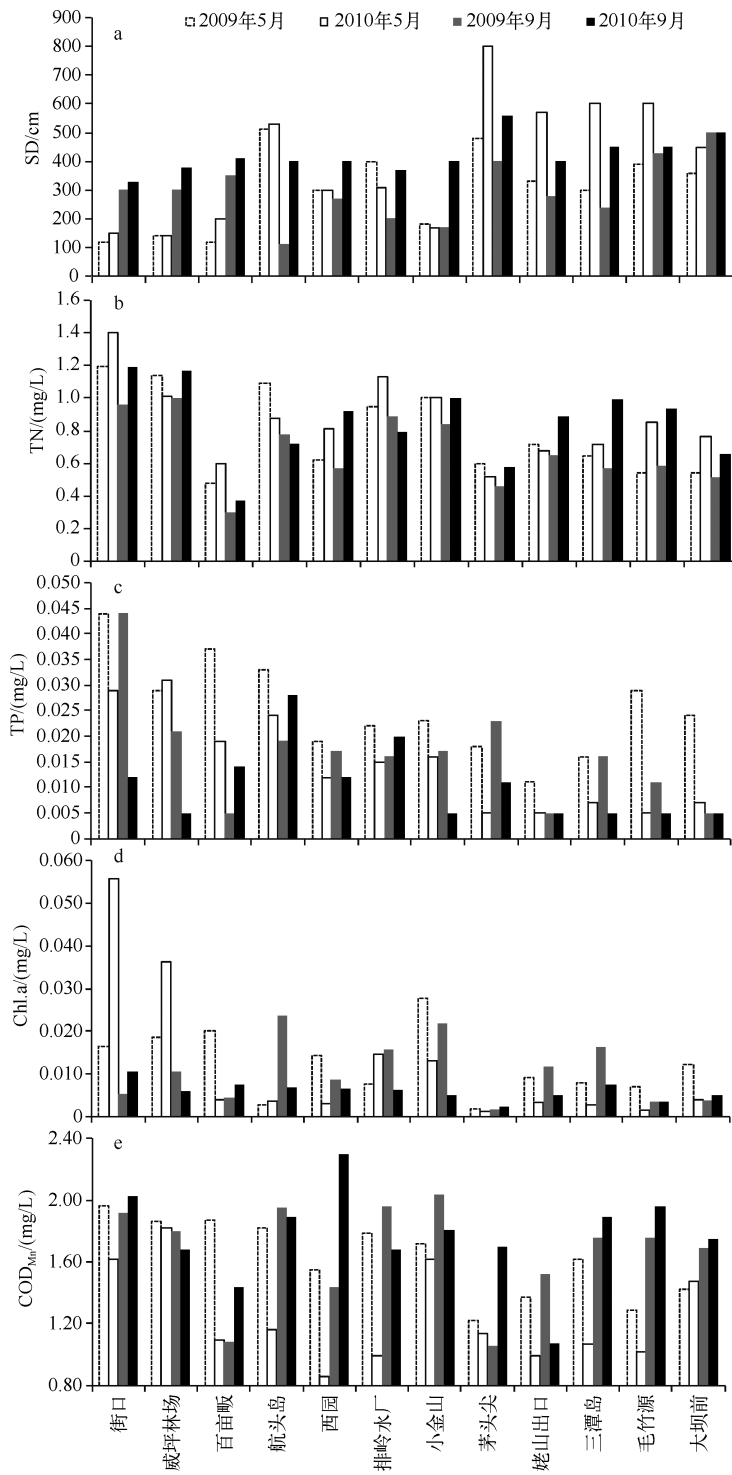


图5 新安江水库5、9月水体透明度、总氮、总磷、叶绿素a和高锰酸盐指数的空间变化
 Fig.5 Spatial distribution of transparency, total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll-a and chemical oxygen demand in May and September of Xin'anjiang Reservoir

2.3 渔业养殖与水质的关系分析

渔业养殖是新安江水库的支柱产业之一,对水库的水质也起着十分关键的作用^[23-26].发展水库渔业,必须考虑库区水质问题,要保证库区水质不受污染的前提下进行^[27],现已有很多关于水库水质因水库渔业养殖的不当发展而导致富营养化的报道^[28-31].

对年捕捞量与水体年平均透明度的对数进行相关性分析,发现二者呈极显著负相关($r=0.88, P<0.01$),说明捕捞量越大的年份,水体透明度越低.意味着渔业养殖与水库水质之间存在较密切的联系.当然,对于这种关系的解释还不确定,其中一种可能是,捕捞

量在相当程度上代表了水体当年的鱼类赋存量,这可能说明渔业赋存量越高,对生态系统的扰动越大,对浮游动物的捕食压力越大,越有利于藻类生长,透明度越低.但这一过程非常复杂,受水文过程、气候变化的影响均很大,目前的数据还不能支撑.

3 讨论

3.1 影响新安江水库水质的关键因子分析

藻类异常增殖是新安江水库面临的主要水质问题.三潭岛和大坝前断面可以代表新安江水库的中心湖区,反映水库的总体水质状况.从图2可以看出,2009—2010年这2个断面24个月的平均透明度为549 cm,按照Carlson提出的湖泊富营养化指数(TSI)计算公式^[32],此透明度对应的富营养化指数为35,属中营养水平.而透明度的最小值为240 cm,对应的 TSI 值为49,已经接近富营养水平.同样,2009—2010年2个断面TP的平均值为0.0095 mg/L,对应的 TSI 值为36,最大值为0.024 mg/L,对应的 TSI 值为50,TP的营养状态分值均略高于透明度的分值.而叶绿素a的平均值为0.0051 mg/L,对应的 TSI 值已经达到47,接近富营养化状态.叶绿素a的最大值为0.0164 mg/L,对应的 TSI 值为58.因此,从营养状态指数的主要3个指标比较看,新安江水库的富营养化问题关键是浮游植物生物量偏高,或者说藻类的异常增殖是新安江水库水质恶化的关键指标.这与吴志旭等的结论一致^[5].因此,影响新安江水库水质恶化的关键因子应当从影响水库浮游植物生物量、季节性异常增殖的因子中分析.

近10年来新安江水库发生藻类异常与 TSI 的分析完全相符.从1998年开始,新安江水库局部湖湾多次发生藻类水华.形成水华的藻类种属尽管有所不同,但大都是能产生异味的藻类.近几年更是威胁到水库的水产品品质.水华期间水库的鱼产品口感较差,有异味,主要受藻类的影响.杭州市正在考虑加大新安江水库的饮用水供给范围,要特别关注藻类水华问题对水质安全供给的影响.

3.2 新安江水库水质保护的应对策略分析

新安江水库的主要水质问题是浮游植物生物量偏高.而水库比较敏感的水质感官指标透明度也主要受藻类生物量的影响,反映在监测指标上也是叶绿素含量高导致的透明度问题,这与相关研究中的观点是一致的^[33-35].因此,新安江水库水质保护的核心是降低浮游植物生物量,特别是防范4—9月份藻类的异常增殖.

根据应用湖沼学理论,控制浮游植物生物量可以采用降低营养盐供给的上行效应策略和增加浮游动物、鱼类牧食压力的下行效应两种途径^[36].其中新安江水库的下行效应又分两种:经典生物操纵理论中的浮游动物对浮游植物的牧食压力和非经典生物操纵理论中的鲢、鳙鱼对浮游植物的牧食压力^[37-38].由于鳙鱼的巨大经济价值,加之非经典生物操纵理论中鳙鱼对蓝藻水华的控制作用^[37-38],发展鲢、鳙鱼大库养殖成为新安江水库水质富营养化防控中的一项重要措施来推广,并在一定时期起到了效果^[23-25].

然而,不能夸大非经典生物操纵在新安江水库富营养化风险防控中的作用,新安江水库藻类控制要以

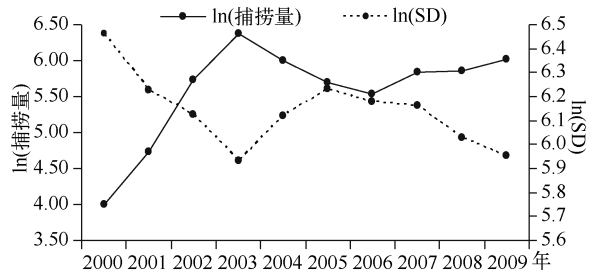


图6 2000—2009年新安江水库渔业捕捞量与水体年平均透明度的对数关系分析

Fig. 6 Relationship between the fishing catching and annual average transparency of Xin'anjiang Reservoir during 2000—2009

经典生物操纵策略为主. 鲢、鳙非经典生物操纵在不同水域环境和不同放养实施方案下的实践效果差异很大^[38]. 已有研究表明, 利用鲢、鳙控制藻类的非经典生物操纵理论相对更适用于有蓝藻水华严重的超富营养湖泊, 也就是在水体浮游植物高存量的情况下非经典理论更加有效^[39]. 而新安江水库的水质目前尚处于中营养水平, 水体浮游植物的生物量与非经典生物操纵理论成功的水体差别很大. 非经典操纵理论最大的弊端是大大降低了浮游动物对浮游植物的控制能力, 如果鲢、鳙放养密度过高, 水库鱼类赋存量过大, 其负面影响很可能超过正面作用. 尽管目前新安江水库的鲢鳙鱼放养量经过了分析论证^[40], 但当时的依据是控制“水华”, 而事实上新安江水库大部分水域水华不多, 这方面的数据还需要再次论证和调整. 本研究中捕捞量与透明度呈显著负相关(图6)就有可能是鱼类负面效应的显现. 因此, 新安江水库的浮游植物生物量控制、水质风险管理, 仍需要对大库鲢、鳙鱼的放养量、管理模式进行科学评估.

以控制营养盐浓度为基础的“上行效应”策略应当是新安江水库水质管理的主要策略. 营养盐含量高低对藻类生物量的变化起着关键作用. 现有氮、磷营养盐含量的快速增高, 进而导致浮游植物生物量急剧增加, 是水库富营养化过程中的基本规律. 从上述分析看, 新安江水库浮游植物叶绿素含量与水体氮、磷的浓度变化关系密切. 营养盐高的区域也是浮游植物细胞数量高的区域, 这种区域差异主要受外源输入和人类活动的影响. 尽管李培培等分析发现新安江水库叶绿素含量与总磷含量关系不密切^[15], 但是这种不密切的相关关系并不能表明磷对浮游植物生物量影响不大. 因为关系不密切也很可能是由于浮游植物生长期对磷的大量利用.

对照地表水水质标准, 从三潭岛、大坝前两个断面 24 个月的水质情况看, 总磷为 I 类水, 但接近限定值的上限(0.01 mg/L); 高锰酸盐指数平均值为 1.44 mg/L, 为 I 类水, 低于 I 类水上限; 总氮平均值为 0.76 mg/L, 属 III 类水(限定值为 1.0 mg/L), 最大值为 1.07 mg/L, 已属 IV 类水. 从这个角度分析, 新安江水库的氮污染比磷污染严重. 由于新安江水库水体的氮磷比总体上超过 29, 毫无疑问, 在新安江水库磷控制比氮控制对浮游植物生物量的影响更有效^[5], 应该强调以磷控制为主^[6]. 然而, 这并不意味着可以放松对氮污染的控制. 生物生长策略是非常复杂的, 氮含量增高有助于改善缺磷期浮游植物的营养盐利用策略^[41], 氮的控制同样重要. 从前面的分析看, 淳安县城区周边水域水质较差, 与氮污染偏高有一定的联系. 因此, “控磷为主, 协同控氮”应当是新安江水库水质保护的基本策略. 尽管在新安江水库将氮控制到与磷一样的水质级别非常困难^[6], 但是目前氮控制的空间还是很大的: 从前面的分析可以看出, 新安江水库的氮水平很高, 通过农业化学品的减量使用及城乡生活污水治理等措施, 新安江水库的氮含量还能有较大的下降空间, 从而使水质处于一个更加安全的状态.

综上所述, 新安江水库的水质保护策略, 应当以水体浮游植物生物量控制为目标, 以流域营养盐入库量削减为根本, 注重磷、氮的同步控制, 不能忽视氮的控制; 同时, 加强水库渔业管理, 努力削减网围养殖量, 重新评估大库鲢、鳙鱼的放养量, 在近期水质—渔业关系分析的基础上, 进一步优化渔业管理, 发挥好浮游动物和滤食性鱼类对藻类生物量控制的双重作用, 降低新安江水库水体富营养化的风险.

致谢: 淳安县环境保护局在数据、经费、野外工作中提供大量帮助, 金华市林业局的谢纯刚、南京水利科学研究所的王永平、南京信息工程大学的高永霞、安徽农业大学的刘恩生教授、金陵科技学院的刘家驹教授、杭州市环境科学研究院的虞左明、刘明亮、何剑波参加了大量野外调查, 许海、施坤协助了文章撰写, 一并表示感谢.

4 参考文献

- [1] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [2] 林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用. 生态学报, 2001, 21(6): 1034-1040.
- [3] 刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 胡传林, 万成炎, 丁庆秋等. 我国水库渔业对水质的影响及其生态控制对策. 湖泊科学, 2010, 22(2): 161-168.
- [5] 朱广伟, 陈伟民, 李恒鹏等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应. 湖泊科学, 2013, 25(6): 809-817.
- [6] 吴志旭, 兰佳. 新安江水库水环境主要问题及保护对策. 中国环境管理, 2012, (1): 54-58.
- [7] 余员龙, 任丽萍, 刘其根等. 2007—2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素. 湖泊科学, 2010, 22(5): 684-692.
- [8] 吕唤春, 陈英旭, 方志发等. 千岛湖水体营养物质的主导因子分析. 农业环境保护, 2002, 21(4): 318-321.

- [9] 吴志旭,刘明亮,兰佳等.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.湖泊科学,2012,24(3):460-465.
- [10] 余员龙.千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局及其与主要环境因子的关系[学位论文].上海:上海海洋大学,2010.
- [11] 韩伟明.千岛湖水环境调查与保护对策.湖泊科学,1996,8(4):337-344.
- [12] 吕唤春.千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响.水土保持学报,2002,16(2):91-92.
- [13] 严力蛟,俞新华,方志发.影响千岛湖水质的主要环境问题与富营养化防治对策.当代生态农业,2001,(3):94-96.
- [14] 余允乾.来自保护千岛湖水资源的调查.浙江国土资源,2006,(4):52-54.
- [15] 李培培,史文,刘其根等.千岛湖叶绿素a的时空分布及其与影响因子的相关分析.湖泊科学,2011,23(4):568-574.
- [16] 胡忠军,孙月娟,刘其根等.浙江千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局.湖泊科学,2010,22(2):265-271.
- [17] 吕唤春,陈英旭,虞左明等.千岛湖水体主要污染物动态变化及其成因分析.浙江大学学报:农业与生命科学版,2003,(1):90-95.
- [18] 陈伟民,黄祥飞,周万平.湖泊生态系统观测方法.北京:中国环境科学出版社,2005.
- [19] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法:第4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [20] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, 221: 669-671.
- [21] Schindler DW. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 1977, 195: 260-262.
- [22] 王飞儿,吕唤春,陈英旭等.千岛湖叶绿素a浓度动态变化及其影响因素分析.浙江大学学报,2001,30(1):22-26.
- [23] 刘其根.千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响[学位论文].上海:华东师范大学,2005.
- [24] 刘其根,王钰博,陈立侨等.保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响.生态学报,2010,30(10):2774-2783.
- [25] 刘其根,王钰博,陈立侨等.保水渔业对千岛湖生态系统特征影响的分析.长江流域资源与环境,2010,19(6):659-665.
- [26] 杨宝刚,吴代建,徐田祥.千岛湖环境保护与渔业发展的对策分析.水利渔业,2007,27(3):59-60.
- [27] 胡传林,万成炎,丁庆秋等.我国水库渔业对水质的影响及其生态控制对策.湖泊科学,2010,22(2):161-168.
- [28] 余国忠,赵承美,邵慧等.大型水库功能演变对水库水质的影响——以河南省某大型水库为例.水资源保护,2009,25(1):63-66.
- [29] 宁丰收,古昌红,游霞等.大洪湖水网箱养殖区污染分析.环境科学与技术,2006,29(4):47-49.
- [30] 李崇明,黄真理,常剑波等.三峡水库网箱养殖利弊分析.中国三峡建设,2005,(4):49-52.
- [31] 江林源,邓潜,黄光华等.网箱养鱼与水库水质的相互关系研究.现代农业科技,2008,(20):222-223,226.
- [32] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [33] 程新良,吴志旭,张百荣等.新安江水库透明度与叶绿素a浓度反演模式初步研究.中国环境监测,2012,28(4):114-117.
- [34] 赵新民,王军,朱淑君.千岛湖水体叶绿素a时空变化特征及其影响因子分析.浙江树人大学学报,2005,5:105-109.
- [35] 刘其根,陈立侨,陈勇等.千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析.海洋湖沼通报,2007,(1):117-124.
- [36] Horppila J, Peltonen H, Malinen T *et al.* Top-down or bottom-up effects by fish: Issues of concern in biomanipulation of lakes. *Restoration Ecology*, 1998, 6(1): 20-28.
- [37] Xie P, Liu JK, Havens KE. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: A synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake. *The Scientific World Journal*, 2001, 8(1):337-356.
- [38] 刘敏,徐敏娟,许迪亮等.鲢、鳙非经典生物操纵作用的研究进展与应用现状.水生生态学杂志,2010,3(3):99-103.
- [39] 谢平.鲢、鳙鱼与藻类水华控制.北京:科学出版社,2003.
- [40] 陈来生,洪海平,洪华生等.千岛湖网围放养鲢鳙鱼的水体净化功能和渔业合理经营的探讨.水产科技情报,2005,32(6):259-261.
- [41] Scott JT, McCarthy MJ. Response to comment: Nitrogen fixation has not offset declines in the Lake 227 nitrogen pool and shows that nitrogen control deserves consideration in aquatic ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(4): 1548-1550.