

新安江对千岛湖外源输入总量的贡献分析(2006—2016年)*

张倚铭^{1,2}, 兰佳³, 李慧贇⁴, 刘凤龙⁵, 罗激葱^{2**}, 吴志旭³, 虞左明⁶, 刘明亮⁶

(1: 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637002)

(2: 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650000)

(3: 杭州市生态环境局淳安分局, 杭州 311700)

(4: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(5: 湖南人文科技学院, 娄底 417000)

(6: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 运用新安江模型, 计算了千岛湖 25 条主要入湖河流在 2006—2016 年间的入湖流量, 结合同时期入湖河道的逐月水质监测数据, 分析了最大入流新安江的营养盐——总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}) 总量输入在该时段内的年际变化和季节变化规律, 研究了新安江营养盐输入总量变化与新安江水质水量、黄山市人口、GDP 和土地利用的关系, 探讨了影响新安江营养盐总量的关键影响因素及其对千岛湖水质的影响。结果表明, 研究时段内新安江多年平均年入湖水量占千岛湖多年平均年入湖水量的 51.4%, 占 25 条主要河流年总入流量的 67.3%, 新安江 COD_{Mn}、TP、TN、NH₃-N 多年平均的输入总量分别为 11458.4、214.9、7649.2 和 756.5 t/a, 分别占千岛湖年总负荷的 50.7%、34.3%、63.7% 和 48.4%。各指标的年入湖总量在统计期间均呈上升趋势, 且春、夏两季高于秋、冬两季。相关性分析表明, 黄山市 GDP 与新安江 COD_{Mn}、TN 和 TP 入湖总量呈显著正相关关系, 农业面源污染对新安江 TN 输入总量有显著影响。作为千岛湖最大的入湖河流, 新安江营养盐(TP、TN、NH₃-N)的输入能显著影响千岛湖的生态系统健康。

关键词: 新安江模型; 千岛湖; 外源负荷; 季节变化

Estimation of external nutrient loadings from the main tributary (Xin'anjiang) into Lake Qiandao, 2006–2016

ZHANG Yiming^{1,2}, LAN Jia³, LI Huiyun⁴, LIU Fenglong⁵, LUO Liancong^{2**}, WU Zhixu³, YU Zuoming⁶ & LIU Mingliang⁶

(1: *College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, P.R.China*)

(2: *School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650000, P.R.China*)

(3: *Chun'an Branch of Hangzhou Bureau of Ecology and Environment, Hangzhou 311700, P.R.China*)

(4: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(5: *Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, P.R.China*)

(6: *Hangzhou Institute of Environment Science, Hangzhou 310014, P.R.China*)

Abstract: There are 25 tributaries carrying significant water and nutrients into Lake Qiandao. As the largest tributary, Xin'anjiang has remarkable impacts on water capacity and water quality of Lake Qiandao. In order to provide substantial information for the exact annual amount of water and nutrients from Xin'anjiang, the inflow volumes during 2006–2016 were calculated based on a catchment model—Xin'anjiang Model. The annual external loadings including total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia (NH₃-N) and chemical oxygen demand (COD_{Mn}) were further calculated with monthly-monitored TN, TP, NH₃-N and COD_{Mn} at Xin'anjiang in the same period. For investigating the impact factors of external loading from Xin'anjiang, statistical analysis was

* 国家自然科学基金项目(41671205, 41661134036, 91747103)、淳安县环境保护局水质水华预测预警系统开发项目(CAZFCGGK2016-111)和中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署项目(NIGLAS2017GH04)联合资助。2018-12-17 收稿; 2019-04-23 收修改稿。张倚铭(1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: zym_in@163.com.

** 通信作者; E-mail: billuo@ynu.edu.cn.

conducted with the external loadings correlating the water quality parameters, inflow volume at Xin'anjiang, the population, GDP, economic development and land use at the catchment. The results show that Xin'anjiang is carrying about 51.4% of the total inputted lake water including surface water, ground water and precipitation, accounting for 67.3% of the total water input by the main 25 tributaries. The annual loadings of COD_{Mn} , TP, TN and $\text{NH}_3\text{-N}$ from Xin'anjiang are 11458.4 t, 214.9 t, 7649.2 t and 756.5 t which account for 50.7%, 34.3%, 63.7% and 48.4% of the total annual loading from catchment respectively. During 2006–2016, there was an increasing trend of loading COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP by Xin'anjiang. The external loadings from Xin'anjiang in spring and summer were higher than those in autumn and winter for all parameters. Statistical analysis shows that the COD_{Mn} , TN and TP loadings are positively correlated with the catchment GDP. The non-point sources from agriculture in Huangshan City have a significant impact on the Xin'anjiang TN loading. The riverine inputs of TP, TN and $\text{NH}_3\text{-N}$ from Xin'anjiang are having remarkable influence on water quality and ecosystem health at Lake Qiandao.

Keywords: Xin'anjiang Model; Lake Qiandao; external loading; seasonal variation

湖泊富营养化污染已经成为全球范围内广泛存在的环境问题^[1-3]。水体营养盐的来源通常分为外源和内源两个部分,外源主要通过地表(下)径流、降雨、大气沉降和人为输入等途径进入水体,内源则是通过较浅水体的沉积物再悬浮和较深水体中底泥释放导致营养盐进入水体而形成^[1]。对大多数湖泊而言,入湖河道输入是湖泊营养盐的重要来源,是外来点源和非点源经过汇聚后进入湖泊水体的主要通道之一,在一定程度上对湖泊水质起着决定性作用^[2-3]。

千岛湖又称新安江水库,位于浙江省西部与安徽省南部交界的淳安县境内(29°22'~29°50'N, 118°34'~119°15'E),是新安江大坝建成蓄水后形成的大型深水水库^[4-5]。千岛湖不仅是我国长江三角洲地区非常重要的风景名胜,也是重要的淡水水资源地和渔业生产基地,其巨大的水资源量对本地区以及长三角的经济和社会发展具有极其重要的影响^[4,6]。近年来,随着社会经济的快速发展,人类活动强度持续增加以及资源的不合理利用等,千岛湖水体的污染负荷逐渐增加,局部水域已经逐渐出现富营养化现象,水环境质量逐渐下降^[7]。

千岛湖坝址以上流域面积达 10442 km²,其中 60%的流域面积(汇水区)在安徽省境内(图 1)。在正常蓄水位海拔 108 m 时(黄海基面),水库库容 178.4×10⁸ m³。库区水面纵长 150 km,平均水深 34 m,最大水深 100 m,水面蒸发量约 5.3×10⁸ m³^[1-3]。千岛湖流域位于亚热带北缘、东南沿海季风区,年平均气温 16.90℃^[5],年平均降雨量为 1617.6 mm,大多集中在 4—9 月。

千岛湖出流量主要通过东南方向的新安江电站人为调控,入流量主要通过水库周边大小溪流、河川汇集。千岛湖周边主要入湖支流 30 余条,其中新安江是最主要的入库地表径流^[4,7]。新安江发源于安徽省黄山市休宁县,地跨黄山市屯溪区、徽州区、歙县全部,休宁县、黟县、祁门县和宣城市绩溪县部分,通过街口断面流入千岛湖,干流全长约 359 km,水量约占千岛湖总入湖水量的 51.4%(据 2006—2016 年统计结果)。千岛湖外源营养盐主要来源于地表径流输入。新安江丰富的来水有效补给了千岛湖,但其所带来的大量污染物也为千岛湖的生态环境带来了巨大影响。

为了弄清新安江对千岛湖营养盐输入的情况,本文基于 2006—2016 年千岛湖逐月监测的入湖河道水质数据,利用新安江模型计算了新安江的逐月入流流量,对新安江入湖营养盐总量进行计算,并探讨了影响新安江营养盐输入总量的关键因素,为千岛湖和新安江的环境管理提供科学依据和数据支持,并为类似大型水库的外源估算提供借鉴方法。

1 研究材料和方法

1.1 监测点位及数据来源

为进行新安江入湖营养盐总量的研究,所收集的千岛湖流域数据如表 1 所示,包括了千岛湖湖体和河流入湖口的水质数据,千岛湖上游屯溪站和渔梁站的流量数据,流域上 31 个雨量站(图 1)的降雨数据,以及黄山市的社会经济和土地利用数据。选取的千岛湖 25 条入湖河流是支流流域面积 15 km² 以上的主要入湖支流,水质监测点设置在其入湖河段上或入湖口(图 1)。新安江入湖监测点位为街口断面,其水质数据监测频率为每月 1 次,其他入湖河流监测点位采样频率一般为每 2 个月 1 次,水质监测指标包括 COD_{Mn} 、TN、TP

和 NH₃-N.

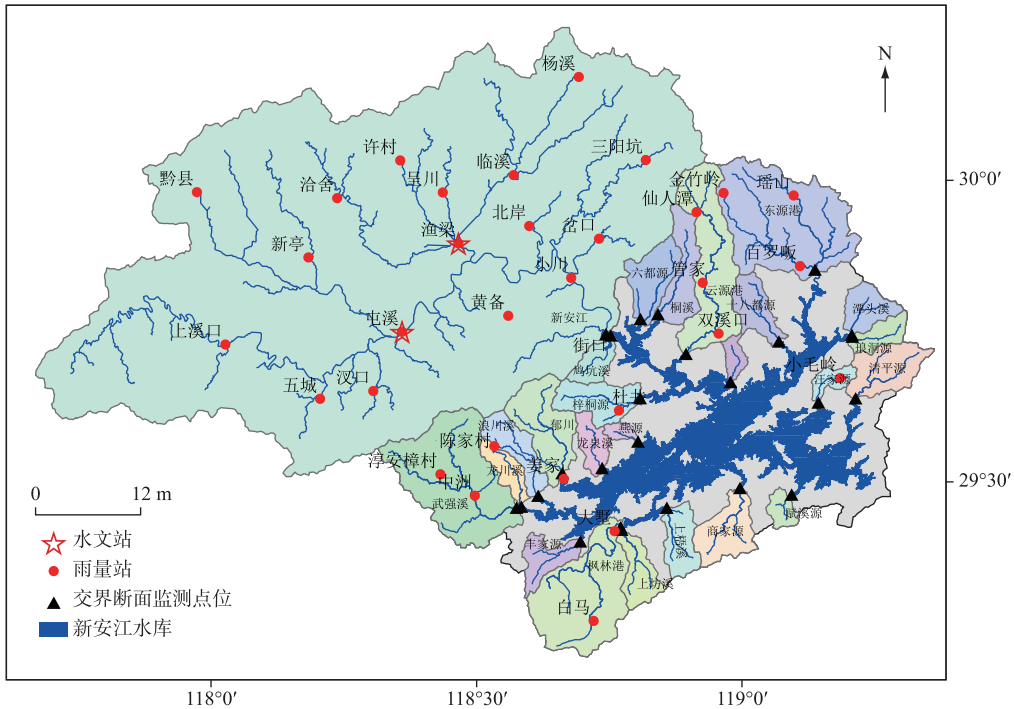


图 1 千岛湖流域雨量站和入湖河流水质监测站点分布

Fig.1 Map of Lake Qiandao catchment, precipitation monitoring stations and water quality sampling sites of main tributaries

表 1 千岛湖水文水质数据汇总

Tab.1 Collected hydrological and water quality data of Lake Qiandao

数据类型	数据内容	数据时段	数据说明	数据来源
水质数据	街口断面及千岛湖湖区水质监测断面逐月监测数据(COD _{Mn} 、TN、TP、NH ₃ -N)	2006—2016年	用以统计新安江入湖营养盐总量, 及其与湖体水质的相关性	淳安县环境保护局
	武强溪等 24 条河入湖断面水质(COD _{Mn} 、TN、TP、NH ₃ -N)	2011—2016年	用以统计新安江入湖营养盐总量占 25 条河流的比例	淳安县环境保护局
水文数据	千岛湖入库逐月流量	2006—2016年	用以计算新安江流量占入库流量的比例	淳安县环境保护局
	屯溪站、渔梁站的逐日流量数据	2006—2014年	用以新安江模型计算新安江入湖流量	《水文年鉴》
	屯溪等 31 个雨量站逐日降雨数据	2006—2014年	用以新安江模型计算新安江入湖流量	《水文年鉴》
气象数据	屯溪站、淳安站逐日降雨数据	2006—2016年	用以新安江模型计算新安江入湖流量	中国气象局 (http://data.cma.cn/)
统计年鉴	黄山市人口数量、GDP 和土地利用数据	2006—2016年	用以说明新安江营养盐总量变化的人文因子	安徽省统计局 (www.ahtj.gov.cn/)

1.2 分析方法

1.2.1 河道流量计算 新安江模型是河海大学赵人俊等^[8]于1973年研究开发的降雨径流模型.该模型的特点是考虑到产流面积内各蓄水点的不均匀性,采用了流域蓄水容量分布曲线来进行产流计算,在国内外湿润地区与半湿润地区得到了广泛应用^[9-11].本文采用的是三水源新安江模型,该模型包含产流计算、蒸散发计算、水源划分和汇流计算4个计算子模块,共14个参数,模型结构划分如图2.新安江模型采用蓄满产流模型计算产流,模型把流域内各点的蓄水容量概化成一条抛物曲线,作产流计算时,模型的输入为PE(降水量与蒸发量之差),当PE>0,则产流,否则不产流^[8,12].参数包括流域平均蓄水容量WM和抛物线指数B;输出为流域产流量R及流域时段末平均含水量W.模型按照三层蒸散发模式计算流域蒸散发,按土壤垂向分布的不均匀性将土层分为上、下、深三层,各层之间土壤张力水容量、土壤含水量和蒸散发量之间的关系为^[12]:

$$WM = WUM + WLM + WDM \tag{1}$$

$$E = EU + EL + ED \tag{2}$$

$$W = WU + WL + WD \tag{3}$$

式中,WM、E、W分别表示总的土壤蓄水容量、蒸散发量和土壤含水量(mm);WUM、WLM、WDM分别表示上层、下层和深层的蓄水容量(mm);EU、EL、ED分别为上、下、深各层的流域蒸散发量(mm);WU、WL、WD分别为上、下、深各层土壤含水量.模型总径流利用自由水蓄水水库结构分为地面径流(RS)、壤中流(RSS)和地下径流(RG)3种,三水源均按线型水库结构计算河网总入流,河网汇流采用延迟滞时法^[8,12].

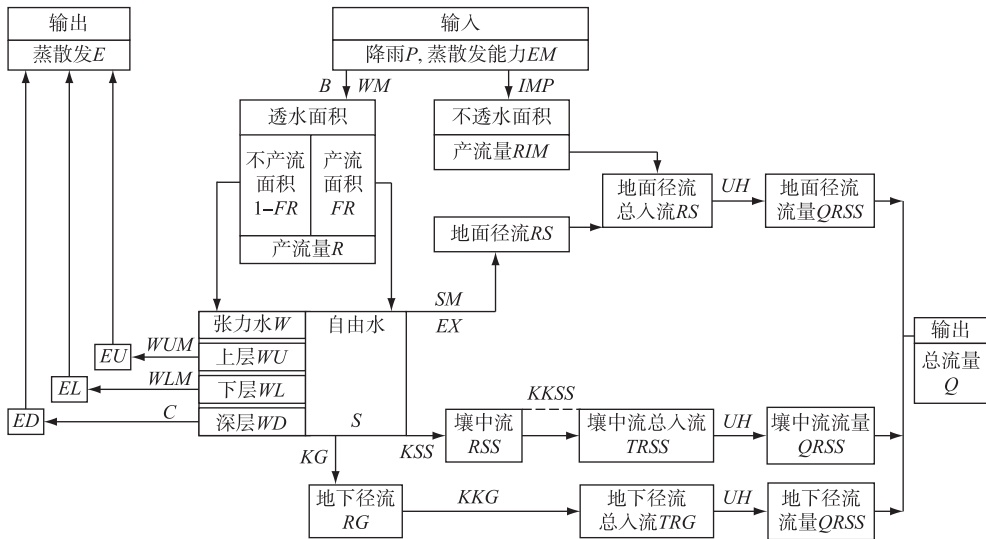


图2 新安江模型结构示意图

Fig.2 Structure of Xin'anjiang Model

模型采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) 最大化和水量平衡误差百分比 (Water Balance Error, WBE) 作为线性约束条件^[13-14]. NSE 系数和 WBE 的表达式分别为^[15]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \tag{4}$$

$$WBE = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim,i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right) \tag{5}$$

式中, Q_{sim} 为模拟径流; Q_{obs} 为实测径流; $\overline{Q_{obs}}$ 为实测径流的算术平均值. NSE 越大说明模拟径流与实测径流越接近, 模拟效果越好. 参数率定过程中, 应确保模拟径流与实测径流差值的绝对值不大于实测径流的 5%, 即满足 $|WBE| \leq 5\%$.

由于缺乏千岛湖入湖河流的实测流量数据, 故选择上游渔梁站和屯溪站的流量数据对新安江模型进行率定, 将率定后的参数移植到其他子流域. 采用 2006—2012 年渔梁站逐日实测流量数据进行率定, 2013 年该站数据进行验证, 率定及验证结果如图 3 所示. 率定期和验证期的实测值和模拟值散点均能较均匀地分布于 1:1 直线两侧. 计算可知, 率定期 NSE 为 0.97, WBE 为 -2%, 验证期 NSE 为 0.92, WBE 为 6%, 说明新安江模型能在渔梁站及以上流域得到很好地应用, 模型精度符合要求. 采用 2006—2012 年屯溪站实测流量数据进行率定, 2013 年该站数据进行验证, 率定期和验证期的实测值和模拟值散点分布与渔梁站相似, 亦能较均匀地分布于 1:1 直线两侧 (图 3). 计算可知, 率定期 NSE 为 0.98, WBE 为 1%, 验证期 NSE 为 0.95, WBE 为 1%, 说明新安江模型在屯溪及以上流域模型精度符合要求.

分别将渔梁站和屯溪站率定的模型参数移植到千岛湖各子流域, 利用气象数据作为输入, 计算出新安江及其他 24 条主要入湖河道 2006—2016 年的逐日流量, 将计算的结果与用水量平衡原理计算的入库流量相比, 屯溪站参数计算的流量较大, 渔梁站参数计算结果更为合理. 其次, 渔梁站以上子流域的坡度、土地利用情况、气候条件等与千岛湖其他子流域较为相似. 因此, 最终选择利用渔梁站数据率定得到的参数作为模型的最佳参数.

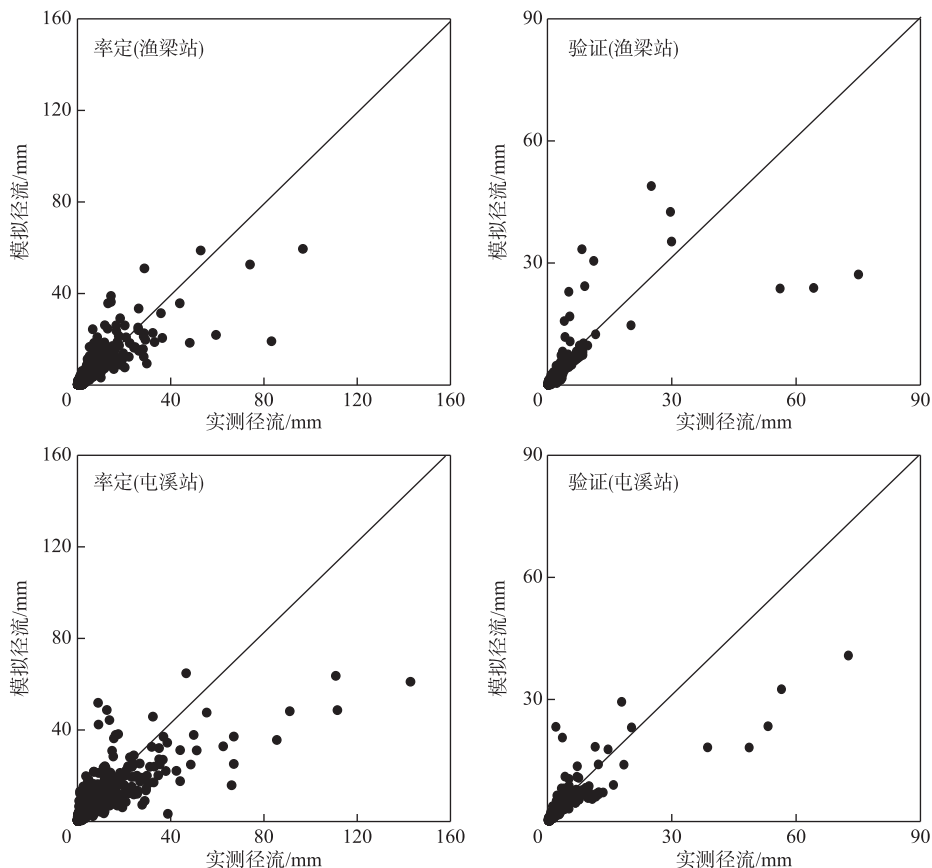


图 3 率定期和验证期实测径流与模拟径流

Fig.3 Observed and simulated streamflows in the model calibration and validation

1.2.2 营养盐入湖总量计算 营养盐入湖总量用公式(6)进行估算^[16]:

$$W = 86400 \times 10^{-6} C \cdot Q \cdot t \quad (6)$$

式中, W 为营养盐总量(t), C 为营养盐浓度(mg/L), Q 为河道流量(m^3/s), t 为时间(d).

1.2.3 相关性分析 运用 IBM SPSS 23.0 软件进行皮尔逊相关性分析. 相关系数(r)计算公式为^[17]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

2 结果分析

2.1 新安江入湖流量

运用新安江模型模拟得到的千岛湖流域 25 条主要入湖河道的逐日流量, 和淳安县环保局提供的千岛湖总入湖逐月流量, 对比了计算期间逐月的新安江入湖流量、25 条主要入湖河道的总入湖流量和整个千岛湖的总入湖流量, 如图 4 所示, 进一步分析了新安江入湖流量占 25 条入湖流量和千岛湖总入湖流量的比例. 结果表明, 2006—2016 年新安江多年平均流量为 $175.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 占 25 条河流的 67.3%, 占总入湖的 51.4%; 25 条入湖河流多年平均流量为 $259.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 占千岛湖总入湖的 76.3%.

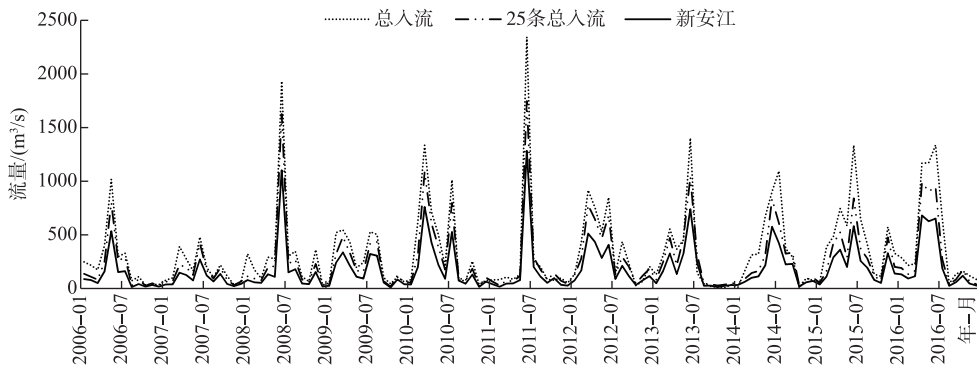


图 4 2006—2016 年逐月新安江入湖流量、25 条主要入流总流量和千岛湖总入湖流量

Fig.4 Monthly inflow volumes of Xin'anjiang and the main 25 tributaries and the total water input of Lake Qiandao during 2006—2016

2.2 新安江营养盐输入总量的年际变化规律

运用新安江模型模拟的 25 条主要入湖河流的流量数据和收集的各河流水质监测数据, 分析了新安江营养盐(COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP) 多年平均输入总量占 25 条河流的比例, 以及新安江 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP 浓度和入湖总量的年际变化.

因除新安江以外的其他 24 条河流的水质监测数据时段为 2011—2016 年, 而新安江街口断面水质监测数据时段为 2006—2016 年, 因此进行统计和对比分析的时段为 2011—2016 年, 每条河流多年平均入湖营养盐总量见表 2 所示. 可以看出, 新安江每年输入的 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别占 25 条河流总入湖量的 76.1%、78.8%、72.2% 和 87.5%, 分别占总入湖的 50.7%、34.3%、63.7% 和 48.4%. 由此可见, 新安江为千岛湖带来大量水量补给的同时, 也带来了大量的外源营养盐.

新安江 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP 的浓度和入湖总量在 2006—2016 年间的年际变化如图 5 所示. 由图 5a 可见, 2006—2016 年街口断面 COD_{Mn} 浓度年际波动较大, COD_{Mn} 最高浓度出现在 2014 年 (2.12 mg/L), 最低出现在 2015 年 (1.88 mg/L). 新安江 COD_{Mn} 多年平均输入总量为 11458.44 t/a , 最高出现在 2016 年 (15707.17 t/a), 最低出现在 2007 年 (6546.53 t/a), 整体呈上升趋势. 2010、2012 和 2016 年 COD_{Mn} 浓度虽然低于 2007 和 2014 年, 但由于上述年份入流量值较大, 其外源输入总量均高于 2007 和 2014 年. 图 5b 表明,

2006—2016年街口断面 TN 浓度除 2008 年和 2015 年较平常年份略高以外, 总体年际变化不大, 浓度在 1.11~1.53 mg/L 之间. 新安江 TN 多年平均输入总量为 7649.16 t/a, 呈波动上升趋势, 最高出现在 2015 年 (11246.91 t/a), 最低出现在 2007 年 (4127.26 t/a), 相差近 3 倍. 由图 5c 可知, 街口断面 NH₃-N 平均浓度在 2006—2014 年呈上升趋势, 2015 年 NH₃-N 浓度有所下降, 2016 年再次上升. NH₃-N 多年平均输入总量为 756.50 t/a, 在 2006—2012 年间呈波动变化. 与 2006 年相比, 2016 年 NH₃-N 浓度增加了 0.097 mg/L, 输入总量增加了 1907.41 t/a. 新安江街口断面 TP 平均浓度在 2006—2009 年呈上升趋势, 2009—2011 年逐年下降, 2011 年 TP 浓度为 2006—2016 历年最低, 尔后有所上升. TP 多年平均输入总量为 214.91 t/a, 与 TP 年平均浓度变化基本一致, 2016 年与 2006 年相比, TP 年输入总量增加了 309.13 t/a (图 5d).

表 2 2011—2016 年新安江年均营养盐输入量、
千岛湖 25 条主要入湖河流的年均营养盐输入量以及千岛湖年均总外源量
Tab.2 Total annual nutrient loadings of Xin'anjiang and the main 25 tributaries,
the total annual external loading of Lake Qiandao during 2011–2016

河流	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
新安江/(t/a)	12172.66	686.18	190.25	8030.78
25 条河流共计/(t/a)	15994.25	784.63	241.51	11117.49
千岛湖周边面源污染共计/(t/a) ¹⁾	7998	634	312.55	1481
河流和面源总入湖/(t/a)	23992.25	1418.63	554.06	12598.49
新安江占 25 条河流的比例/%	76.1	87.5	78.8	72.2
新安江占总入湖的比例/%	50.7	48.4	34.3	63.7

1) 千岛湖周边面源污染数据来源于文献[18].

2.3 不同水文年新安江营养盐入湖总量的季节变化特征

根据屯溪站和淳安站 1961—2016 年和流域内其他雨量站 2006—2014 年的降雨数据, 插补得到千岛湖流域 31 个雨量站 1961—2016 年间的逐年降雨量, 求出历年降水量频率, 分别取 25%、50%、75% 为丰、平、枯水年的分界点^[19]. 2006—2016 年中, 丰水年有 2008、2010、2012、2014、2015 和 2016 年, 枯水年有 2007 年, 其余年份均为平水年. 使用 2006—2016 年千岛湖街口断面逐月水质监测数据和新安江入湖流量, 分别计算了丰水年、平水年和枯水年各水质指标入湖总量 (图 6) 和入湖浓度的四季平均值 (表 3).

表 3 2006—2016 年不同水文年新安江入湖水量和水质的季节变化
Tab.3 Seasonal variation of inflow volumes and water quality (TN, TP, NH₃-N, COD_{Mn}) of Xin'anjiang
at wet, dry and normal years during 2006–2016

水平年	季节	新安江水量/ (亿 m ³)	COD _{Mn} 浓度/ (mg/L)	TN 浓度/ (mg/L)	NH ₃ -N 浓度/ (mg/L)	TP 浓度/ (mg/L)
丰水年	春季	24.8	2.16	1.59	0.175	0.050
	夏季	26.0	2.16	1.37	0.125	0.035
	秋季	7.1	1.87	1.17	0.075	0.019
	冬季	6.5	1.68	1.19	0.055	0.017
枯水年	春季	9.2	2.17	1.54	0.062	0.026
	夏季	12.0	2.50	1.27	0.077	0.038
	秋季	5.2	2.09	1.21	0.081	0.016
	冬季	3.0	1.61	0.93	0.038	0.009
平水年	春季	15.7	2.05	1.46	0.133	0.040
	夏季	23.9	2.21	1.25	0.105	0.039
	秋季	3.2	1.91	0.96	0.050	0.021
	冬季	5.1	1.78	1.05	0.043	0.011

丰水年街口 COD_{Mn} 浓度和入湖总量平均值分别为 1.97 mg/L 和 13204.7 t/a, COD_{Mn} 浓度呈夏季 = 春季 >

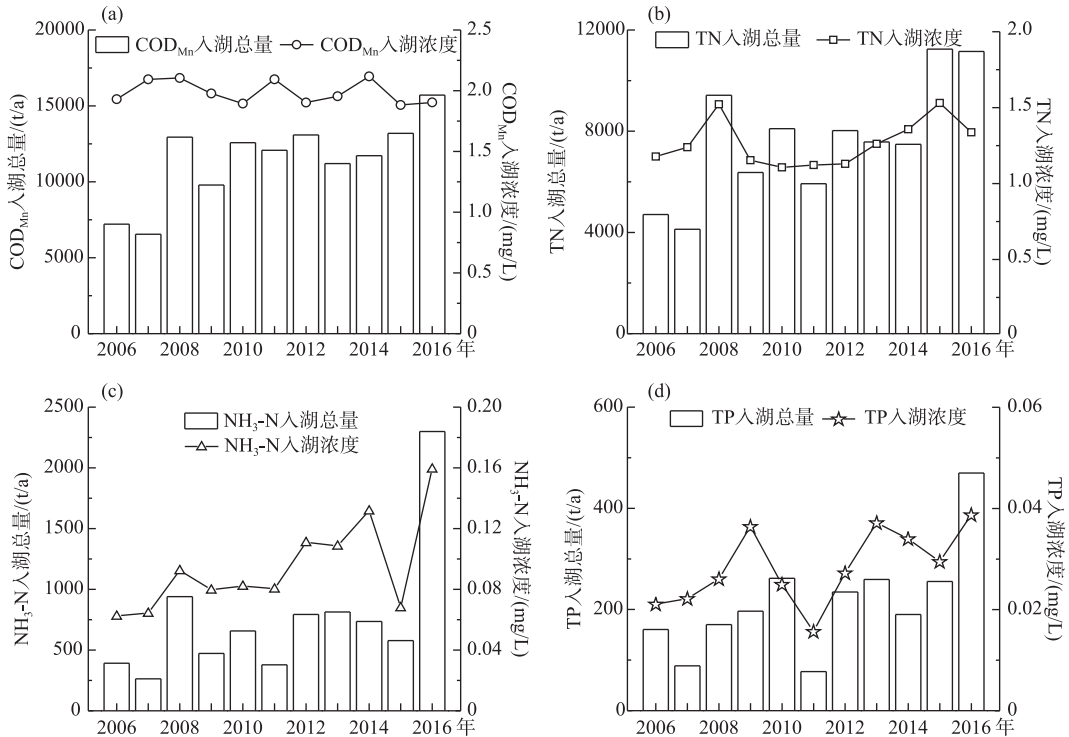


图5 2006—2016年新安江 COD_{Mn}(a)、TN(b)、NH₃-N(c)和TP(d)入湖浓度和总量的逐年变化

Fig.5 Annual concentrations and external loadings of COD_{Mn}(a), TN (b), NH₃-N (c) and TP (d) in Xin'anjiang during 2006-2016

秋季>冬季的季节分布特征, COD_{Mn}入湖总量呈夏季>春季>秋季>冬季的季节分布特征; TN 平均浓度为 1.33 mg/L, 呈春季>夏季>冬季>秋季的季节分布特征, 而 TN 平均入湖总量为 9238.9 t/a, 呈夏季最高、春季其次、冬季最低分布, 可见丰水年 TN 入湖总量主要受流量影响; NH₃-N 浓度和 TP 浓度分别为 0.11 和 0.03 mg/L, 分布均为春季>夏季>秋季>冬季, NH₃-N 输入总量为 1000.4 t/a, TP 输入总量为 263.6 t/a, 均呈春季最高, 冬季最低, 且秋、冬两季均相差不大。

平水年街口断面 TP 浓度和 NH₃-N 浓度均呈春季>夏季>秋季>冬季的季节分布特征, 而 TP 输入总量为夏季最高, 冬季最低, NH₃-N 输入总量为夏季最高, 秋季最低; COD_{Mn} 浓度为夏季最高、冬季最低, TN 浓度为春季最高、秋季最低, COD_{Mn} 和 TN 输入总量则为夏季最高, 秋季最低。平水年营养盐输入总量均为夏季最高, 其次是春季, 秋冬季节最低。平水年新安江夏季入流流量显著高于其他季节, 因此平水年新安江营养盐入湖总量主要受流量的影响。

枯水年街口断面 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 入湖总量分别为 6546.5、263.2、88.8 和 4127.3 t/a, 均呈夏季>春季>秋季>冬季的变化特征。

2.4 新安江营养盐入湖总量与全湖水质的相关性分析

使用 2006—2016 年新安江入湖水量、街口断面的水质数据及全湖水水质数据, 运用 SPSS 软件进行皮尔逊相关性分析, 分析了全湖营养盐各指标的平均浓度与新安江营养盐入湖总量及来水量、街口断面营养盐各指标浓度的相关性, 结果如表 4 所示。

由表 4 可见, COD_{Mn} 全湖平均浓度与街口断面浓度呈极显著相关 ($n=132, P<0.01$), 相关系数为 0.571, 而全湖平均浓度与新安江入湖水量和营养盐入湖总量相关性不显著, 相关系数低。

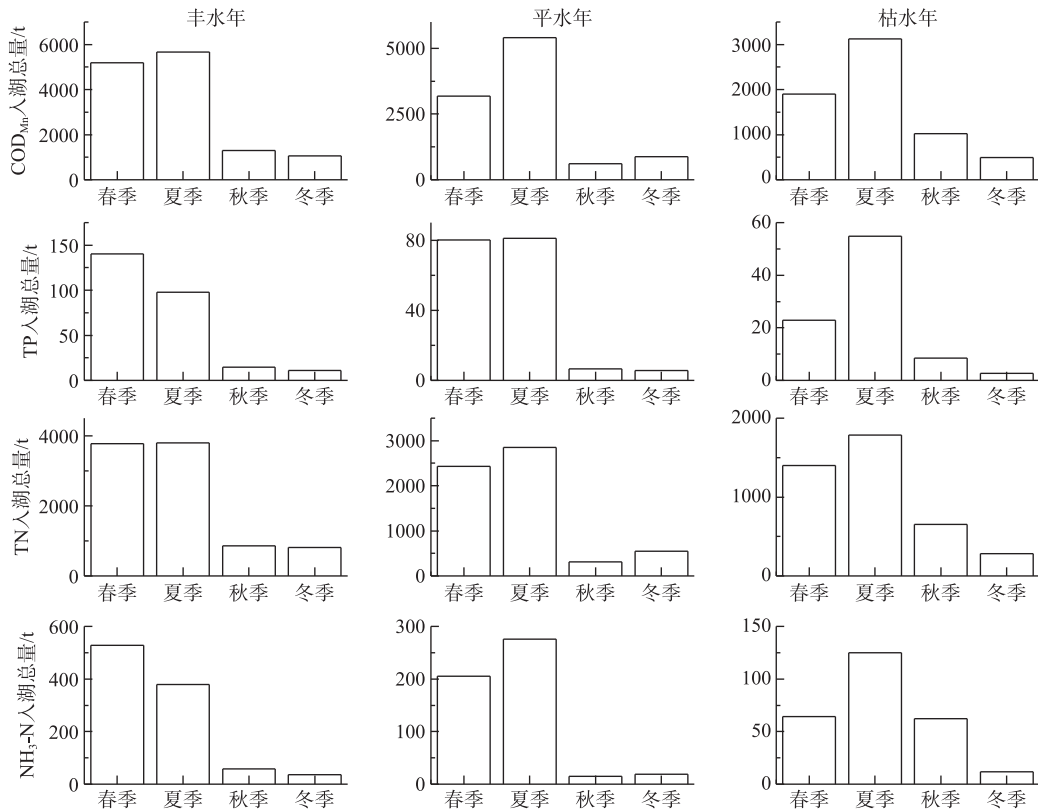


图 6 2006—2016 年不同水文年新安江营养盐入湖总量的季节变化特征

Fig.6 Seasonal variation of external loadings (TN,TP,NH₃-N,COD_{Mn}) from Xin'anjiang at wet,dry and normal years during 2006-2016

表 4 2006—2016 年全湖营养盐平均浓度与新安江营养盐入湖总量、新安江入湖水量和新安江入湖水质的相关关系

Tab.4 Correlations of average nutrient concentrations at Lake Qiandao with external loadings, inflow volumes and water quality of Xin'anjiang during 2006-2016

全湖营养盐平均浓度	新安江营养盐入湖总量	新安江入湖水量	街口断面浓度
COD _{Mn}	0.128	0.062	0.571 **
TN	0.359 **	0.239 **	0.721 **
NH ₃ -N	0.729 **	0.413 **	0.848 **
TP	0.547 **	0.365 **	0.688 **

** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著. 下同.

TN 全湖平均浓度与新安江入湖水量、街口断面水质和营养盐入湖总量均具有极显著相关性 ($n = 132, P < 0.01$), 相关系数分别为 0.239、0.721 和 0.359 (表 4). 可见全湖 TN 平均浓度与街口断面 TN 浓度表现出更好的相关性, 与新安江 TN 入湖总量和入湖水量相关关系相对较差.

NH₃-N 全湖平均浓度与新安江入湖水量、街口断面水质和入湖总量均具有极显著相关性 ($n = 132, P < 0.01$), 并且与新安江 NH₃-N 入湖总量、街口断面水质的相关系数均高于 0.7, 说明全湖 NH₃-N 浓度与新安江 NH₃-N 入湖总量、街口断面 NH₃-N 浓度相关性强于入湖水量.

TP 全湖平均浓度与新安江入湖水量、街口断面水质和 TP 入湖总量均具有极显著相关性 ($n = 132, P < 0.01$), 相关系数分别为 0.365、0.688 和 0.547.

由以上分析可知, 街口断面各指标浓度与千岛湖水体相应指标浓度相关性很好, 因此街口水质是影响千岛湖水质的主要原因.

2.5 新安江营养盐输入总量与社会经济的相关性分析

以黄山市为例,分析了新安江营养盐输入总量与社会经济和土地利用的相关性.黄山市土地利用在2010年前农用地面积低于建设用地,2010年后农用地面积高于建设用地,且农用地面积在逐渐增加(图7a).2006—2016年黄山市人口数量变化如图7b所示,2016年黄山市人口数量为148.4万人,比2006年增长了0.9万人;旅游业快速发展,黄山市2006—2016年接待国内外游客数持续增长,2006年接待国内外游客1186.5万人次,到2016年接待游客5187.1万人次(图7b);经济迅猛发展,GDP由2006年181.5亿元增长到2016年576.8亿元,增长了2.2倍(图7c).

利用2006—2016年安徽统计年鉴中黄山市人口、接待游客数、GDP数据、农用地面积和建设用地面积,计算出的2006—2016新安江营养盐入湖总量,运用皮尔逊相关分析方法,分析了新安江营养盐入湖总量与黄山市社会经济和土地利用的相关性,结果如表5所示.

由表5可见,2006—2016年新安江营养盐入湖总量与人口数量具有正相关关系,但相关性并不显著;2006—2016年新安江营养盐入湖总量与接待游客数均具有显著的正相关关系,且相关系数均大于0.60;COD_{mn}、TN、TP入湖总量与黄山市GDP呈显著正相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为0.742、0.708和0.651.农用地面积与TN入湖总量呈显著的相关关系,相关系数为0.603,新安江TN入湖总量随着农用地的增加而增加;建设用地面积与营养盐入湖总量呈负相关关系,这可能是因为2010年后建设用地面积逐步降低,产生的污染物总量减少.

3 讨论

3.1 新安江营养盐入湖总量变化分析

运用降雨径流模型——三水源新安江模型,计算了千岛湖环湖河流的入湖流量.分别采用渔梁站和屯溪站的实测流量数据对模型进行率定,对比率定期和验证期的NSE和WBE,结合水量平衡原理计算得到的总入库流量和流域属性,最终选择了渔梁站率定的参数,计算了含新安江在内的25条主要入湖河流的流量,模拟结果较为可信.

新安江营养盐入湖总量在2006—2016年的变化特征不同(图5),但各指标入湖总量总体均呈上升趋势.2014—2016年虽然COD_{mn}和TN浓度略有降低,但由于2014、2015、2016这3年降水丰富,新安江入湖水量大,所以COD_{mn}和TN入湖总量依然呈上升趋势.因此,在河流水质相对稳定的状态下,营养盐入湖总量会随着河流水量的增加而增大.

之前研究已发现,受人类活动影响较大的流域内,河流氮磷营养盐的总量与社会经济和农业用地具有显著的正相关关系,流域污染负荷主要来源于生活污染、工业污染的点源来源与大气沉降、畜禽养殖、建设用

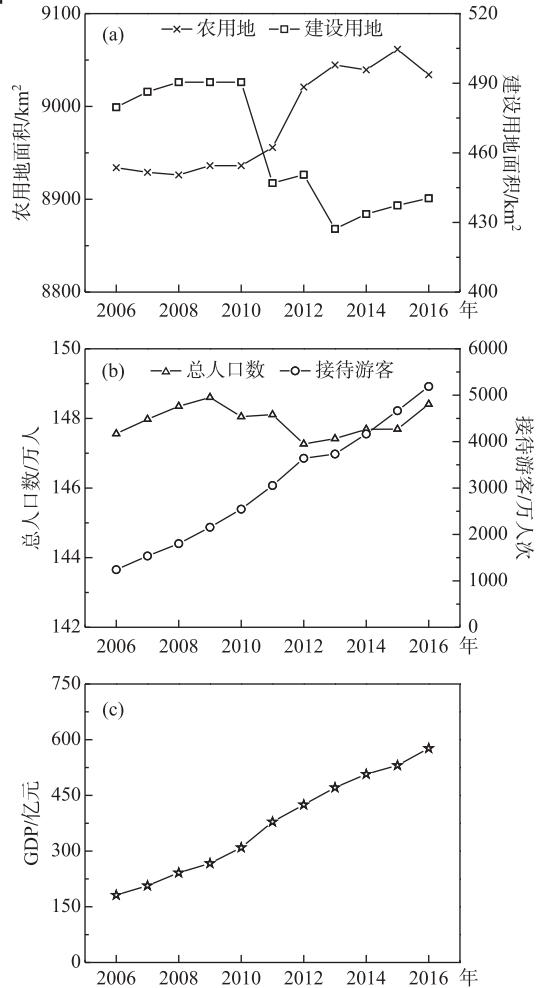


图7 2006—2016年黄山市社会经济和土地利用变化特征(a:农用地和建设用地面积,b:总人口数和接待游客数,c:GDP)

Fig.7 Annual variation of socio-economic and land use in Huangshan City during 2006–2016 (a-agricultural land and construction land area, b-total population and number of visitors, c-GDP)

表 5 2006—2016 年新安江营养盐入湖总量与黄山市社会经济和土地利用的相关性

Tab.5 Correlations of external loadings from Xin'anjiang with socio-economic and land-use in Huangshan City during 2006–2016

	COD _{Mn} 入湖总量	TN 入湖总量	NH ₃ -N 入湖总量	TP 入湖总量
总人口数	0.145	0.119	0.272	0.102
接待游客数	0.764 **	0.735 **	0.620 *	0.689 *
GDP	0.742 **	0.708 *	0.593	0.651 *
农用地面积	0.542	0.603 *	0.426	0.557
建设用地面积	-0.202	-0.165	-0.248	-0.229

地和农用地径流的面源污染^[20-21]. 生活污染负荷上升主要为人口剧增和人均污染负荷加大. 根据《黄山市统计年鉴》, 2006—2016 年间, 黄山市的人口数量在 147.5 万~148.6 万之间波动变化, 人口变化中, 城镇人口持续上升, 农村人口持续下降, 其中以流动人口增长最快. 新安江营养盐入湖总量与人口密度没有显著的相关性, 与接待游客数具有显著的正相关关系, 旅游业的发展使黄山市流动人口迅猛上升, 对新安江各指标营养盐入湖总量有显著影响. 根据《黄山市统计年鉴》, 2006 年黄山市人均生活污染负荷为 2.66 kg/(a·人), 2016 年为 2.95 kg/(a·人), 人均生活污染最大负荷是 2012 年和 2013 年, 均为 3.37 kg/(a·人). 黄山市 GDP 在 181.5 亿~576.8 亿之间呈逐步上升趋势. COD_{Mn}、TN 和 TP 入湖总量与 GDP 具有显著的正相关关系, 且相关系数均大于 0.5(表 5). 社会经济活动对新安江 COD_{Mn}、TN 和 TP 入湖总量有显著影响. 工业污染负荷下降主要产业结构调整 and 治理监督力度加大. 根据《黄山市统计年鉴》, 2006—2014 年黄山市工业生产总产值占 GDP 不断上升, 2014—2016 年工业生产总产值占比下降, 工业废水排放量持续降低, 2006 年工业废水排放为 6319 万 t, 而 2016 年仅排放了 706.66 万 t. 畜禽养殖污染主要为养殖的畜禽数量增加, 带来了大量的固体废物和废水. 与 2006 年相比, 2016 年养殖的家禽增加了 191.2 万只, 猪、羊期末存栏数分别增加了 23.6 万头和 1.3 万只, 牛期末存栏数减少了 1.3 万头. 对新安江土地利用进行相关性分析发现, TN 入湖总量与农用地呈显著正相关关系. 农用地包括耕地、园地、林地、牧草地和水面, 其中在耕地上进行耕作是产生污染的主要原因^[19, 21-22]. 农业活动包括农用机械耕作、化肥农药的施用、塑料薄膜的使用等产生的各种污染, 通过降雨冲刷、地表径流等不同方式进入水体, 从而对河流造成不同程度的污染^[22-25]. 根据《黄山市统计年鉴》, 黄山市 2016 年与 2006 年相比, 农用塑料薄膜(2134 t)和农用柴油使用量(7516 t)分别增加了 70 t 和 656 t, 地膜使用量(1440 t)和地膜覆盖面积(6488 公顷)分别增加了 430 t 和 96 公顷, 农药使用量(3088 t)减少了 18 t, 农用化肥施用量折纯(36794 t)增加了 869 t, 其中氮肥和钾肥分别减少了 1024 t 和 184 t, 复合肥和磷肥分别增加了 1975 t 和 102 t. 过量化肥施用、地膜使用和农用机械耕作增加了面源污染. 建设用地与各指标营养盐总量没有显著的相关关系, 这可能与土地利用的空间结构有关. 曹芳芳等^[20]研究表明, 建筑用地多分布在离新安江流域较远的地方. 对于流域较广的河流, 污染物的来源除了工业和市政排污外, 还有降雨径流导致的水土流失和农业污染, 主要污染物为 COD 和氮、磷等^[26]. 因此, 为了提高新安江水质, 不仅应加强水质水量联合管理与调度, 还应注意污染物排放和面源输入的控制.

3.2 新安江营养盐入湖总量对千岛湖水质的影响

2006—2016 年千岛湖 COD_{Mn}全湖平均浓度与街口断面 COD_{Mn}浓度具有显著的正相关关系, 但是与新安江 COD_{Mn}入湖总量的相关性不显著. 新安江携带的 COD_{Mn}浓度对千岛湖 COD_{Mn}全湖平均浓度有显著影响. 新安江 TN、NH₃-N 和 TP 入湖总量与千岛湖各水质因子浓度呈显著的正相关关系(表 4), 进一步证明了新安江营养盐入湖总量对千岛湖水质有显著影响. 各指标全湖平均浓度与街口断面浓度的相关系数均高于全湖平均浓度与新安江营养盐入湖总量和入湖水量的相关系数, 这可能是由于街口断面的水质监测与全湖湖体水质监测是同一时期监测且为逐月监测, 而入湖水量没有实测数据, 由新安江模型计算得到所致, 虽然对新安江模型进行了率定和验证, 模拟数据较为可信, 但难免存在一定误差, 导致污染物入湖总量与实际情况间有少许出入.

河流营养盐总量持续输入, 最终会导致湖泊生态环境变动及恶化^[23-26]. 千岛湖 Chl.a 浓度容易受到上游

新安江来水水质和人类活动的影响. 千岛湖浮游植物年平均生物量和生物密度存在自上游到下游逐渐降低的趋势^[6,27]. 新安江营养盐入湖总量总体呈上升趋势,导致千岛湖氮磷等营养盐浓度的增加,有利于浮游植物的繁殖. 2003—2013年千岛湖西北湖区的Chl.a浓度均比其他湖区高,且一直处于中营养状态^[27]. 由此可见,新安江携带的营养盐入湖总量的持续增加,对千岛湖的TN、TP和NH₃-N浓度产生较大影响,从而导致浮游植物多样性和群落结构的变化^[6,27],影响了西北湖区生态系统的健康,有可能增加水华发生的风险. 除新安江外源输入的营养盐外,千岛湖其他河流输入和面源带来的污染也不可忽视. 千岛湖周边乡镇畜禽养殖产生的COD_{Mn}、NH₃-N、TP和TN入湖量分别为7693、578、283和786 t/a,网箱养殖带来的COD_{Mn}、NH₃-N、TP和TN入湖量分别为112.00、2.32、1.32和14.00 t/a^[18]. 因此,不仅需要加大对新安江营养盐入湖总量控制的力度,也需要加大对千岛湖周边面源污染的控制力度.

4 结论

通过对2006—2016年新安江入湖水质、水量及入湖营养盐总量的计算分析,得出以下结论:

1)通过对千岛湖营养输入总量的统计发现,新安江COD_{Mn}、TP、TN、NH₃-N多年平均年输入量分别占千岛湖25条主要入湖河流外源年输入总量的76.1%、78.8%、72.2%和87.5%,分别占千岛湖年总外源负荷的50.7%、34.3%、63.7%和48.4%.

2)2006—2016年新安江COD_{Mn}、NH₃-N、TN和TP多年平均入湖总量分别为11458.4、756.5、7649.2、214.9 t/a. 统计期间,各指标年入湖总量均呈上升趋势,丰水年、平水年和枯水年均是春夏两季营养盐入湖总量高于秋冬季节.

3)通过新安江营养盐入湖总量与社会经济和土地利用的相关分析发现,黄山市接待游客人数对新安江各指标营养盐入湖总量有显著影响,社会经济活动对新安江COD_{Mn}、TN和TP入湖总量有显著影响,新安江TN入湖总量还受农业活动的影响.

4)相关性分析结果表明,千岛湖COD_{Mn}、NH₃-N、TN和TP全湖平均浓度受新安江入湖营养盐浓度和入湖外源总量的影响显著.

5 参考文献

- [1] Yang Z, Zhong XH, Ci XB *et al.* Research on pollutant loads from Tiaoxi to Taihu. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2013, **40**(2): 196-200. [杨哲, 钟晓辉, 次新波等. 苕溪污染物入湖总量研究. 浙江大学学报(理学版), 2013, **40**(2): 196-200.]
- [2] Zhu J, Dong H, Wang SB *et al.* Sources and quantities of main water pollution loads released into Three-Gorge Reservoir of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 709-713. [朱俊, 董辉, 王寿兵等. 长江三峡库区干流水体主要污染负荷来源及贡献. 水科学进展, 2006, **17**(5): 709-713.]
- [3] Yang S, Luo LC, Zhai HT *et al.* Analysis on inputs of nitrogen and phosphorous from the main inflow rivers of Dashahe Reservoir. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 158-164. [杨尚, 罗激葱, 翟海涛等. 大沙河水库主要入湖河流氮磷营养输入分析. 生态科学, 2013, **32**(2): 158-164.]
- [4] Tang FL, Zhang M, Xu JF *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of Lake Qiandao and its major input rivers. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1735-1741. DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.014. [唐访良, 张明, 徐建芬等. 千岛湖库区及其主要入湖河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价. 环境科学, 2014, **35**(5): 1735-1741.]
- [5] Yin Y, Wu ZX, Liu ML *et al.* Dynamic distributions of dissolved oxygen in Lake Qiandao and its environmental influence factors. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2539-2546. DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.015. [殷燕, 吴志旭, 刘明亮等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析. 环境科学, 2014, **35**(7): 2539-2546.]
- [6] Li PP, Shi W, Liu QG *et al.* Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 568-574. DOI: 10.18307/2011.0412. [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.]
- [7] Dong CY, Yu ZM, Wu ZX *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2574-2581. DOI: 10.13227/j.hjxx.2013.07.028. [董春颖, 虞左明, 吴志旭等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究. 环境科学, 2013, **34**(7): 2574-2581.]
- [8] Zhao RJ, Wang PL. Study on parameters of Xinanjiang model. *Journal of China Hydrology*, 1988, **8**(6): 2-9. [赵人俊,

- 王佩兰. 新安江模型参数的分析. 水文, 1988, 8(6): 2-9.]
- [9] Li HX, Zhang YQ, Chiew FHS *et al.* Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of Hydrology*, 2009, 370(1): 155-162. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.03.003.
- [10] Yuan F, Ren LL, Yu ZB *et al.* Computation of potential evapotranspiration using a two-source method for the Xin'anjiang Hydrological Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(5): 305-316. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2008)13:5(305).
- [11] Zhu QA, Zhang WC. The applicability study of Xinanjiang model on simulation of rainfall-runoff and flooding hydrographs in Jiangkou Basin. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004, 15(3): 19-23. [朱求安, 张万昌. 新安江模型在汉江江口流域的应用及适应性分析. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3): 19-23.]
- [12] Zhan DJ, Ye SZ eds. Engineering hydrology. Beijing: China Water & Power Press, 2000. [詹道江, 叶守泽. 工程水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.]
- [13] Hooke R, Jeeves TA. "Direct search" solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*, 1961, 8: 212-229. DOI: 10.1145/321062.321069.
- [14] Torczon V. On the convergence of pattern search algorithms. *Siam Journal on Optimization*, 1997, 7(1): 1-25. DOI: 10.1137/s1052623493250780.
- [15] Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models part i—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [16] Hao CL, Deng YX, Wang YH *et al.* Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7): 1670-1676. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2012.07.032. [郝晨林, 邓义祥, 汪永辉等. 河流污染物总量估算方法筛选及误差分析. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1670-1676.]
- [17] Benesty J, Chen J, Huang Y *et al.* Pearson correlation coefficient. In: Noise Reduction in Speech Processing. *Springer Topics in Signal Processing*, 2009, (2): 1-4.
- [18] Zhang HJ, Peng SH, Zhou Y *et al.* Analysis of current pollutant loads and investigation of total pollutant discharge limits in Qiandao Lake. *Water Resources Protection*, 2014, 30(4): 53-56, 96. [张红举, 彭树恒, 周娅等. 千岛湖现状污染负荷分析与限制排污总量研究. 水资源保护, 2014, 30(4): 53-56, 96.]
- [19] Zhou XD. Study on the spatial and temporal of vegetation ecological water requirement in Xiaojiang Basin Yunnan Province based on GIS [Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2017. [周晓东. 基于GIS的云南小江流域植被生态需水量时空分布规律[学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2017.]
- [20] Cao FF, Li X, Wang D *et al.* Effects of land use structure on water quality in Xin'anjiang River. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2582-2587. DOI: 10.13227/j.hjkx.2013.07.009. [曹芳芳, 李雪, 王东等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响. 环境科学, 2013, 34(7): 2582-2587.]
- [21] Stedmon CA, Markager S, Søndergaard M *et al.* Dissolved organic matter (DOM) export to a temperate estuary: seasonal variations and implications of land use. *Estuaries & Coasts*, 2006, 29(3): 388-400. DOI: 10.1007/BF02784988.
- [22] Yuan HZ, Yang DB, Yan XJ *et al.* Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application. *Plant Protection*, 2011, 37(5): 14-20. [袁会珠, 杨代斌, 闫晓静等. 农药有效利用率与喷雾技术优化. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.]
- [23] Fu L, Zhao K, Wang GX *et al.* Temporal and spatial variation of water nutrient level after exogenous nutrient input. *Environmental Science*, 2014, 35(4): 1278-1284. DOI: 10.13227/j.hjkx.2014.04.010. [傅玲, 赵凯, 王国祥等. 外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化. 环境科学, 2014, 35(4): 1278-1284.]
- [24] Chen SW, Yuan XY, Jin J *et al.* Characteristics and pollution source analysis of nutrients in tributary outlets of Xitiaoqi Watershed. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4179-4186. DOI: 10.13227/j.hjkx.201605168. [陈诗文, 袁旭音, 金晶等. 西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析. 环境科学, 2016, 37(11): 4179-4186.]
- [25] Yue WZ, Huang XP. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River estuary. *Environmental Science*, 2005, 26(2): 195-199. [岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨. 环境科学, 2005, 26(2): 195-199.]
- [26] Lan WL, Yang SM, Su W. Variation of river pollutant fluxes around Qinzhou Bay and their environmental impacts. *Guanxi Sciences*, 2012, 19(3): 257-262. [蓝文陆, 杨绍美, 苏伟. 环钦州湾河流入海污染物总量及其对海水生态环境的影响. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.]
- [27] Sheng HY, Wu ZX, Liu ML *et al.* Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 118-127. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0714. [盛海燕, 吴志旭, 刘明亮等. 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. 环境科学学报, 2015, 35(1): 118-127.]