

鄱阳湖区乐安河流域营养盐负荷影响因素分析*

夏雨^{1,2}, 鄢帮有^{3**}, 方豫²

(1: 南昌大学理学院, 南昌 330031)

(2: 江西省山江湖开发治理委员会办公室, 南昌 330046)

(3: 江西省科学技术厅, 南昌 330046)

摘要: 鄱阳湖作为中国最大的淡水湖, 2000年后其水系和湖体水质总体都呈下降趋势. 以鄱阳湖流域内的典型流域——乐安河流域为例, 初步分析了流域内面源污染的主要影响因素、主要污染成分及其对污染程度的影响. 研究表明, 氮比磷对水质影响更明显, 氮的3种物质形态中硝态氮(NO_3^- -N)含量最高, 对水质影响也最大. 根据总氮和 NO_3^- -N浓度差异可将流域内的水质分为4个区域, 从上游到下游富营养化程度不断升高, 最上游为Ⅱ类水质, 而最下游的总氮浓度接近Ⅳ类水标准. 3年监测期内降雨量和强度的变化导致氮、磷浓度的巨大差异, 林地对面源污染物有较好的消减作用, 而农田的氮、磷流失是营养物产生的主要来源, 人类活动特别是农事活动对土壤氮、磷的干扰是导致氮、磷浓度年内变化的主要原因. 因此, 削减流域内营养盐的产生、减少入湖河流携带污染物总量是改善鄱阳湖水质的的重要途径.

关键词: 鄱阳湖流域; 乐安河流域; 农业面源污染; 富营养化

Nutrient loading and its controlling factors in Le'an River watershed, Lake Poyang basin

XIA Yu^{1,2}, YAN Bangyou³ & FANG Yu²

(1: *School of Science, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China*)

(2: *Office for Mountain-River-Lake Development and Management Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, P. R. China*)

(3: *Department of Science and Technology, Jiangxi Province, Nanchang 330046, P. R. China*)

Abstract: Le'an River, located in the northeast of Jiangxi Province (southeast China), is a tributary of China's largest freshwater lake, Poyang Lake, which drains directly into the Yangtze River. The watershed covers an area of app. 8000 km², with an average annual precipitation between 1687–1870 mm. There is no huge settlement in the watershed, of which forest and farmland accounts for 95% in the area. According to the historical data, the water quality is much worse in wet seasons than in dry ones, so it is believed that mainly diffuse pollution, especially caused by agriculture, influences the water quality. Based on data from 17 monitoring stations within Le'an River watershed from 2009 to 2011, major influence factors, ingredients of diffuse pollution, and the extent of pollution have been analyzed. The main conclusions of this paper are: 1) NO_3^- -N has the highest content and most important influences on water quality among the 3 physical forms of nitrogen. TP has a comparably minor influence on water quality. The whole watershed can be divided into 4 districts according to the cluster analysis. The water quality remains to be type Ⅱ in the upstream area with at least 90% forest coverage. Eutrophication increases from upstream to downstream along with an increasing share of farmland, illuminating that anthropogenic induced land use change is the major factor of diffuse pollution. 2) The amount and intensity of precipitation play a significant role on nutrient concentration. Rainfall could increase surface runoff instantly, introducing abundant pollutant into the water body and leading to rapidly increasing in nutrient concentration. 3) Except in major flood period of the year, the maximum volume of water body could dilute nutrients greatly. In a year with regular or high rainfall, water quality appears fine with ample water volume, but it turns bad in a year or season with less water. Moreover, with soaring frequen-

* 江西省科学合作计划项目(20142BDH80016)和江西省主要学科学术和技术带头人培养计划专项(20123BCB22008)联合资助. 2014-02-21 收稿; 2014-08-20 收修改稿. 夏雨(1980~), 女, 博士, 副研究员; E-mail: 416522685@qq.com.

** 通信作者; E-mail: ybangyou@sina.com.

cy of extreme meteorological events caused by global climate change and the construction of large-scale hydro-power project in the Yangzi River basin, Lake Poyang's water shortage will become regular, the water volume will decrease continuously, as well as the lake's self-purification capacity, therefore positive and effective countermeasures should be taken to improve the watershed sustainability. 4) Although the present water quantity of Lake Poyang is good, there are still pressures caused by economic development and climate change, which is threatening the watershed sustainability. Stakeholders and decision-makers shall work more effectively on environment conservation in the upstream area in particular with high attention to reasonable landuse plan, improving soil quality, and enhancing watershed environment capacity.

Keywords: Lake Poyang watershed; Le'an River watershed; diffuse pollution; eutrophication

湖泊水资源作为一种与人类生存和发展密切相关的独特资源,在国民经济和社会可持续发展中占有重要位置^[1]. 河流是连接流域与湖泊的重要纽带,与流域、湖泊之间有着重要的物质与能量交换,河流的水质特点影响着下游湖泊的水质状况^[2].

鄱阳湖是中国第一大淡水湖,是江西的母亲湖,承载着保护全球生物多样性、调蓄洪水及供给淡水的生态服务功能,为江西经济社会发展提供了重要的物质基础和生态资源. 鄱阳湖被誉为“一湖清水”,但其水环境仍面临严峻挑战. 据《1999—2009年江西省环境状况公报》等资料显示,鄱阳湖水系和湖体水质总体都呈下降趋势. 1980s 鄱阳湖水质以Ⅰ、Ⅱ类为主,平均占 85%;1990s 仍以Ⅰ、Ⅱ类为主,平均占 70%;2003 年以后,Ⅰ、Ⅱ类水只占 50%;2006 年后,鄱阳湖水全年优于Ⅲ类的不到六成,属于Ⅲ类的有两成多,劣于Ⅲ类的则逼近两成,整体上呈现出中度营养化的状态,且枯水期富营养化程度比丰水期更为严重.

湖泊的污染主要包括流域内的点源(工业污水排放、城市污水等)和面源(农业面源、流域水土流失、大气降尘等). 随着对水体点源污染的有效控制,水污染负荷结构发生了明显变化,面源污染已成为水环境的一大污染源或首要污染源^[3]. 抚仙湖^[4]、滇池^[5]、丹江口水库^[6]、三峡水库^[7]、太湖^[8]和鄱阳湖^[9]等都不同程度遭受面源污染.

面源污染中的氮、磷营养物累积是引起下游水体富营养化的主要原因^[10]. 农业面源污染影响因素复杂^[11],包括土地利用方式、农田耕作、农事活动和田间水肥管理、地形地貌、土壤植被、气候、水文特征^[12]. 研究表明我国已成为世界上藻类水华暴发最严重的国家之一^[13]. 近年来,很多湖泊都开展了营养盐调查研究^[14-16],但由于面源污染起源于分散、多样的地区,地理边界和发生位置难以识别和确定,随机性强、成因复杂、潜伏周期长^[17],在富营养化评估方面,数据获取困难,方法的集成与模型研发还较为落后^[18-19].

鄱阳湖的污染物主要由五河(赣、抚、信、饶、修)输入,五河输入的总磷(TP)和总氮(TN)分别占入湖总量的 80.5% 和 66.4%^[20],因此五河等主要入湖河道的水质对鄱阳湖水环境有重要影响. 乐安河是鄱阳湖重要的入湖水系,受沿岸工业废水、生活污水等的污染,该河的许多污染指标超标,其污染甚至波及到鄱阳湖的水质^[21-22]. 本文选择主要营养盐指标为研究对象,通过野外实测数据和数学分析对该流域水系中营养物时空分布及影响因素等特征进行定量分析,从而评估乐安河流域内水质富营养化水平的现状,为制定针对性污染控制措施提供科学依据,从而有效消减入湖营养物负荷,保护鄱阳湖“一湖清水”.

1 研究区概况

乐安河,位于江西东北部(图 1),是鄱阳湖第 4 大入湖水系饶河的最大支流,发源于江西省婺源县鄣公山南麓,自东北向西南流,石镇街以上集水面积 8367 km²,主河长 279 km,多年年平均径流量为 99.67 × 10⁸ m³. 其流域是鄱阳湖区降水最多的地区之一,年平均降水量 1687 ~ 1870 mm,但季节分配不均. 流域土壤属赣东北山地丘陵,农业土壤主要是水稻土. 近年来流域内面源污染产出量迅速增加,河道水质下降趋势加剧,已呈现中营养水平^[23].

在乐安河流域,土地利用覆盖类型多样,从图 2 可以看出,区域高程相差约 1450 m,呈东北部高和西南部低的地势,所经地区以丘陵、山地为主,林地和耕地面积之和占研究流域总面积接近 95%,无大城镇分布,仅有零散分布的居民点.

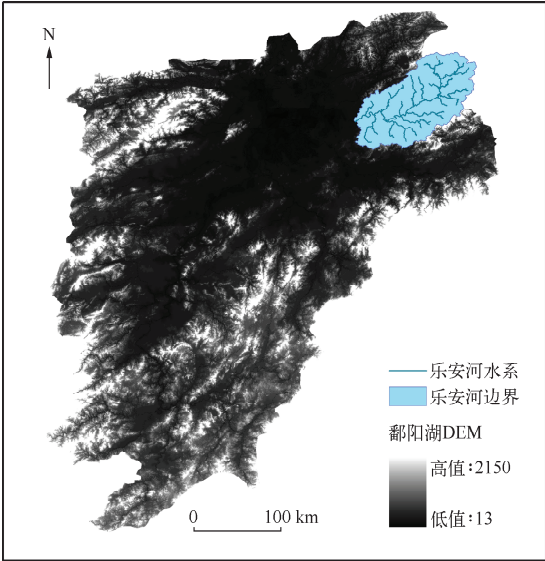


图1 乐安河流域在江西省的位置
Fig. 1 Location of Le'an River watershed
in Jiangxi Province

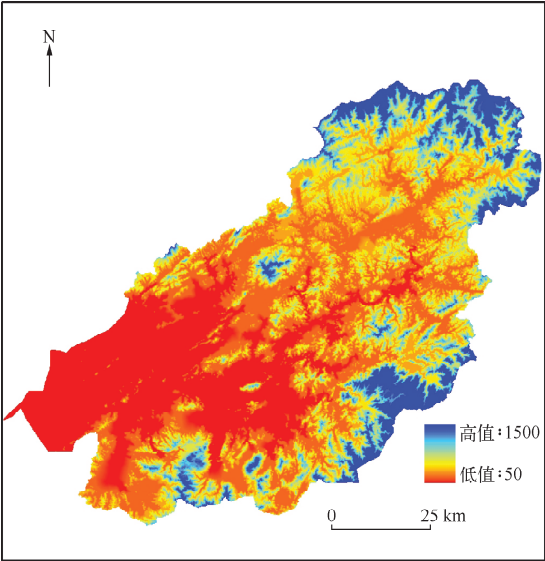


图2 乐安河流域 DEM 图
Fig. 2 Digital Elevation Model of Le'an
River watershed

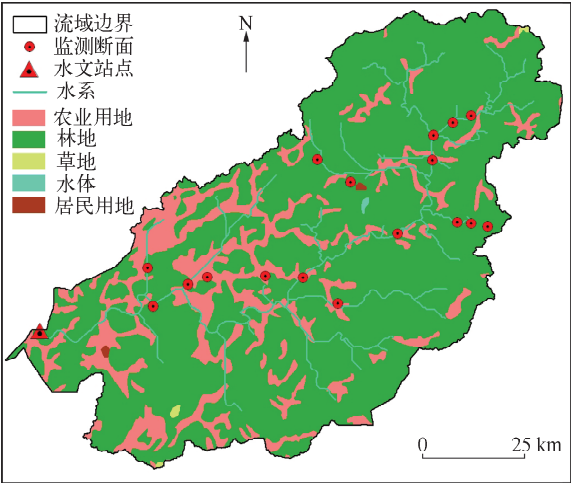


图3 乐安河流域监测点分布
Fig. 3 Distribution of monitoring stations in Le'an River watershed

2 数据与方法

2.1 实验设计

本文选择石镇街水文站以上的区域开展研究,根据研究流域的水文情势和土地利用等特征,分别在乐安河干流和主要支流设置6个和11个水质监测断面(图3),土地利用信息来自中国科学院土壤研究所资料库2005年的数据,比例尺为1:10万。其中干流上的监测点用LG表示,支流则用LZ表示。监测断面设置兼顾了流域中主要用地类型的分布,在每种主要用地类型附近布设一定数量的监测断面,如LG513、LZ5092、LZ5121主要控制林地,LZ504、LZ505监测断面主要控制耕地。部分点位(如503、510、512等)在后续采样中根据实际情况有删除和更改。2009—2011年间,针对流域的丰水期、平水期、枯水期及重要

农事活动前后在每个监测断面进行水样采集,共采样11次,所有水样密封保存送至实验室,对水样的TN、TP、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)进行检测,以监测点的水质指标代表该点上游地区地表水水质状况。

2.2 各营养盐主成分分析

首先采用主成分分析法对主要营养物质进行分析,通过相关矩阵得到各物质形态之间的相关性。从表1可以看出, NO_3^- -N与TN的相关性最高,达到0.9064,其次为 NH_4^+ -N与TN,为0.7769,说明 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N是TN的主要组成成分,并以 NO_3^- -N含量最高。根据实测数据计算可得: NO_3^- -N在TN中所占比例的平均值为50%, NH_4^+ -N浓度的平均比例为30%。这也与之前的研究结论相吻合,3态氮中 NO_3^- -N可溶性

最强,可随径流迁移,并会由降雨淋溶进入地下水^[24].而磷的各物质形态所测数值都较低,这是由于磷主要随土壤颗粒运移,又受土壤吸附作用,可迁移性远不如氮^[25].

通过协相关矩阵的特征根计算也可看出,TN 对水体富营养化水平影响最大,达到 63.31%,其次是 NO_3^- -N,为 25.33%,而 TP 的影响最小,仅为 8%.根据实测数据可知:所有监测点的 TP 值无明显差异及规律, NH_4^+ -N 的值变化微小, NO_3^- -N 和 TN 则有明显差异(表 2),因此在乐安河流域要重点控制的是氮营养盐.

2.3 各营养盐物质形态聚类分析

以 TN 、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 TP 为乐安河流域水质富营养化的评价指标,各监测点的各项指标以所有检测值的平均值表示.计算样本标准差,根据所有观测值与标准差的距离,通过聚类分析,并根据结果得出 17 个点水质的平均连接树状结构图(图 4).横坐标表示类间的平均距离,用于度量富营养化水平的相似性程度.

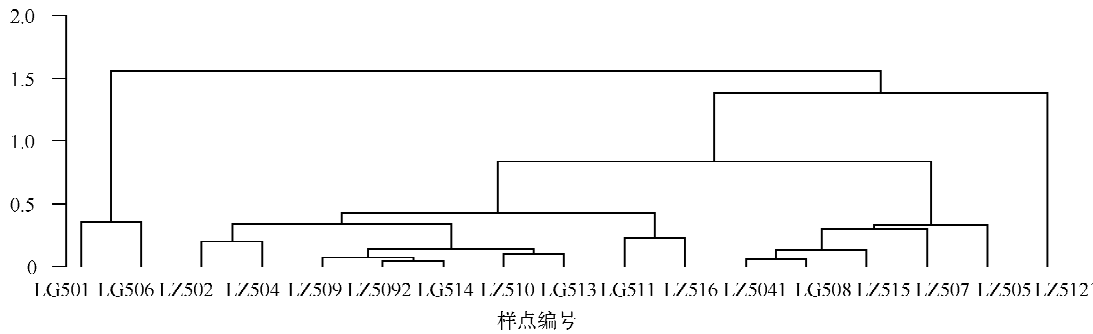


图 4 17 个监测点水质的平均连接树状结构图

Fig. 4 Tree structure chart for water quality of 17 monitoring stations

聚类结果将采样点根据富营养化程度划分为 4 类:低富营养区、较低富营养区、中富营养区和重富营养区.从图 5 可以明显看出从上游到下游富营养化程度总体呈不断升高的趋势.其中 LZ5121 位于流域的最上游,该点上游地区林地与草地面积总和占 95% 以上,营养盐产出少且被较好地截留和消减,平均水质可达到 II 类.在黄色类型中,LG511 和 LG516 上游集水域林地和草地面积总和占 80%,LG513、LG514、LZ509、LZ510 的集水域中林地和草地面积总和超过 90%,因此仍维持较好水质,TN 浓度在 0.6 mg/L 左右,略高于 II 类水.橙色类型区域位于流域中部,TN 浓度上升到 0.7~0.8 mg/L,为 III 类水,LZ5041 和 LZ505 两个子流域中耕地面积分别为 27% 和 30%,林地为 64% 和 65%,比上游地区明显下降,而耕地又是面源污染物的主要来源.LZ507 和 LZ515 子流域的林地面积均为 85%,但在采样时发现,LZ507 监测点附近有化工企业,因此该地的高污染物输出强度应该来源于点源排放;而 LZ515 位于赋春镇下游,该镇有茶园 3.33 km²,大面积的茶叶种植必然对下游水质造成影响.LG508 是干流上监测点,接受中上游地区的污染,污染浓度相应上升.同理,LG501 和 LG506 是干流上最后两个点,流域内所有污染都汇集于此,氮浓度明显提高,平均高于 0.9 mg/L,接近 IV 类水.

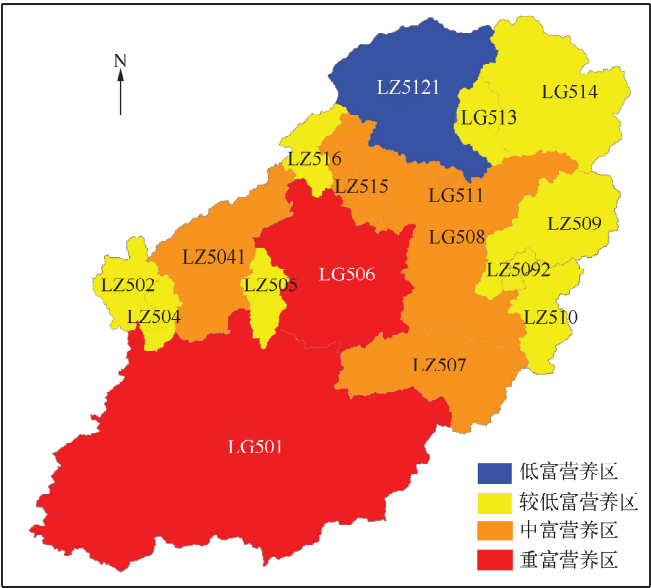


图 5 水质空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of water quality

3 主要研究结果

影响面源污染的因素众多,而降水状况和人类活动可在短期内对污染物浓度产生显著影响. 首先根据每个监测点 TN 浓度的年平均值分析乐安河流域氮浓度的年际变化,可反映降雨量及降雨强度对面源氮浓度的影响.

鄱阳湖流域在枯水期和丰水期的降雨量和径流量变化巨大,且对应不同的农事季节,对面源污染物产出及输移影响极大. 本研究将每年的 4—9 月定为丰水期,10 月至次年 3 月定为枯水期. 并根据流域内地形地貌将 17 个子流域分为两类:上游东北部低中山区(LG508、LZ509、LZ5092、LZ510、LG511、LZ5121、LG513、LG514、LZ515、LZ516),这 10 个子流域以林地为主,位于流域的上游,林地面积都超过 80%,而耕地面积只

有 10% 左右;下游西南部丘陵区(LG501、LZ502、LZ504、LZ5041、LZ505、LG506、LZ507),这些子流域耕地面积都超过 30%. 将不同类型的监测数据与径流量和时间进行对比.

从图 6 和图 7 可见,在取样监测的 3 年中, TN 浓度不断升高. 2009 年江西省平均降水量 1392.0 mm,比多年平均少 15.0%,属偏枯水年份. 流域内径流量相应减少,营养物流失较少,这一年大部分监测点的平均水质都在Ⅱ类以内,有 6 个监测点的平均水质为低水平Ⅲ类,Ⅲ类水主要出现在径流量最小的 12 月.

2010 年江西省极端天气过程频繁,暴雨强度大,主汛期全省平均降雨量比 1998 的大洪水年同期还多 14%,全年降

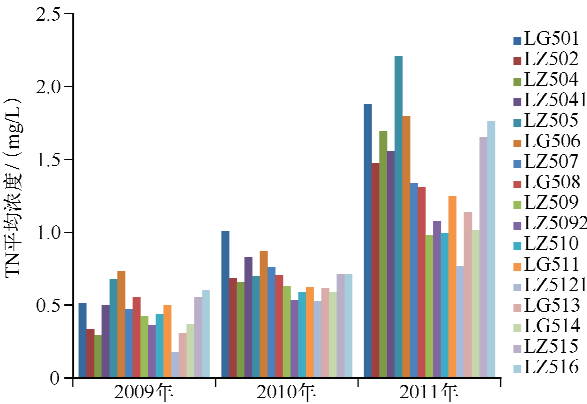


图 6 各监测点的 TN 年平均浓度
Fig. 6 Annual average concentration of TN in 17 monitoring stations

水量多年平均增加 27.3%, 属丰水年份。降雨形成地表径流携带大量营养物质进入河道, 导致水体中氮浓度增加, 所有监测点只在 8 月水量最大时平均值为 II 类水质, 全年平均为 III 类水质。

2011 年鄱阳湖流域水文条件特殊。1—5 月, 江西省降水量比常年同期均值减少 49%, 为 1950 年以来同期最少; 全省年平均降水量比年均值少 20.4%, 属枯水年份。而 6 月份, 北部出现典型的“早涝急转”现象, 平均降水量较常年同期平均偏多 183%, 瞬间增大的地表径流量, 使流域中的营养物质在短时间内带入河道水体, 所有监测点氮平均浓度在这个月急剧升高, 并在 7 月达到全年的高峰值, 导致这一年所有监测点的氮平均浓度显著升高, 仅有两个点为 III 类, 8 个点为 IV 类, 6 个点都为 V 类, 还出现一个劣 V 类水质点。

根据上、下游地区不同时期的采样值可以看出, 下游的数值明显高于上游, 说明林地对面源污染有消减和抑制作用, 而耕地是主要的面源污染产出处。在 2009 和 2010 年两个水文相对正常的年份, 上、下游氮浓度变化趋势基本一致, 都是从 4 月开始显著上升, 在 6 月后又迅速下降, 并在 8—9 月达到一年中的最低值, 之后又急剧上升, 在 12 月份达到最大值。

两类地区地表水的 TN、DTN 和 NO_3^- -N 的浓度变化规律基本相似, 都是从 4 月开始显著上升, 在 6 月后又迅速下降, 并在 8—9 月达一年中的最低值, 之后又急剧上升, 在 12 月份达到最大值。这是由于鄱阳湖流域冬季基本无农事活动, 农业面源污染也最少。4 月后, 鄱阳湖进入汛期, 降雨和地表径流明显增加, 河流水体水量增大, 降低了乐安河内氮浓度。之后随着春季农业生产的开始, 各种农作物播种及耕作活动大量开展, 面源营养物质的产出也迅速增加, 使得地表水体中氮浓度大幅升高, 并在 6 月达到较高水平。7 月底至 8 月初是鄱阳湖流域夏季农业双抢时期, 农业活动密集, 晚稻播种导致化肥农药施用量增大, 但 7 月是鄱阳湖流域的汛期, 水量为全年最大, 而长江在 8—9 月进入汛期, 在湖口产生顶托和倒灌作用, 鄱阳湖及五河继续维持高水位, 极大地稀释了污染物浓度, 使得氮污染量虽然较高但浓度持续下降, 并在 9 月农事活动减少时达到极低值, 这时的水质为一年中的最优时期。10 月后, 鄱阳湖水系开始稳定退水, 且降雨量和上游来水明显减少, 河流水位下降, 流速减慢, 而这个月是流域内晚稻收割和冬季经济作物的播种时期, 面源污染物输出量再次增大, 水体中氮含量也再度迅速升高。11 月中旬后, 农事活动基本停止, 鄱阳湖流域进入连续干旱期, 到 12 月, 水位和水量都降至一年中的最低, 水环境容量较丰水期和平水期大大减小, 同时冬季低温不利于水生生物活动, 水体稀释净化能力相对下降, 氮浓度又有大幅升高。而西南地区丘陵区因农田密集, 污染物浓度普遍高于东北山区。

TP 浓度的时空分布规律不如氮的明显。总体来说, 也是从上游到下游逐渐升高, 枯水期高于丰水期。由于磷主要以颗粒态存在, 其浓度受降雨影响程度低于氮, 而河底沉积物的释放也使其浓度分布规律性较差。

可见降雨量及降雨强度是乐安河流域营养盐浓度年际变化的主要影响因素, 而流域内的农业活动是流域营养盐浓度年内变化的主要影响因素。

4 结论

1) NO_3^- -N 在氮的 3 种物质形态中含量最高, 对水质影响也最大。而相对于 TN, TP 对水质的影响极小。通过聚类分析, 根据 TN 和 NO_3^- -N 浓度差异可将流域内的水质分为 4 个区域, 上游林地面积超过 90% 的区域水质维持在 II 类左右, 而中下游随茶园林地的增加富营养化程度不断升高, 最下游子流域耕地面积超过 30%, 且接纳流域内所有污染物, 因此出口水质接近 IV 类, 这也说明林地对面源污染物有较好的消减作用, 而土地利用变化特别是农业用地是面源污染产生的主要来源。

2) 降雨对营养物浓度有重大影响, 降雨量和降雨强度的增加都会明显促进营养物的流失, 因此偏枯水

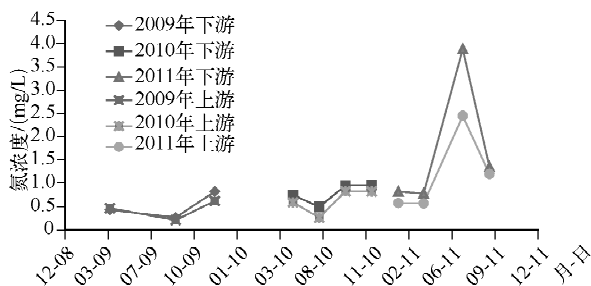


图 7 上、下游监测点氮平均浓度

Fig. 7 Average nitrogen concentration in upstream and downstream

的2009年,年平均水质维持在Ⅱ类左右;而在丰水的2010年,年平均水质则下降至Ⅲ类。但同时,长时间的降雨也会使湖泊水位升高,水体容量增大,对污染物能起到一定的稀释作用。因此在极枯的年份,由于水量大量减少,即使少量污染物也能呈现较高浓度;而短时间内的强降雨则会使地表径流瞬间增大,携带大量污染物进入水体,使污染物浓度急剧升高,这就导致2011年全年营养物浓度都偏高,并在6—7月异常增大,出现劣Ⅴ类水质。说明降雨是流域水质年际变化的主要原因。

3) 通过一年中不同月份降雨量、人类活动及氮浓度的对比分析可以看出,在主汛期,湖泊河流水量达到最大时对污染物浓度稀释作用影响较大;而其他时期,农业活动强度与氮浓度基本呈正比,是引起流域内营养盐浓度年内变化的主要原因。这也表明该流域内社会经济发展使污染物排放大量增加,在水文正常年份,充足的水量极大地稀释了污染物浓度,使流域呈现较好水质,而在枯水年甚至枯水期水质则显著下降。

综上所述,流域内产生并随水流进入鄱阳湖的污染物是影响其水质的主要原因,而随着社会经济发展,污染物排放还在大量增加;且随着全球气候波动引起的极端气候事件频发和长江流域重大水利工程建设运行,鄱阳湖及其周边湖泊缺水将呈现常态化,也将导致水环境容量下降。因此仅靠湖泊的自净能力已远远不能消耗流域内产生的污染物,因此,在五河入湖口实施污染物削减措施和工程,控制入湖污染物总量,是保护鄱阳湖“一湖清水”的重要途径。

5 参考文献

- [1] 李世杰,窦鸿身,舒金华等.我国湖泊水环境问题与水生态系统修复的探讨.中国水利,2006,13(6):14-17.
- [2] 马倩,刘俊杰,高明远.江苏省入太湖污染量分析(1998—2007年).湖泊科学,2010,22(1):29-34.
- [3] 胡斌,树庄,陈春瑜等.滇池流域土壤氮磷分布特征及关键影响因素研究.土壤学报,2012,49(6):1178-1184.
- [4] 夏天翔,潘继征,刘雪华等.抚仙湖水体NP变化及其非点源污染特征.农业环境科学学报,2008,27(4):1340-1345.
- [5] 孙治旭,王红华,严婷婷.滇池沿岸农业面源污染治理模式研究.农业环境与发展,2008,25(5):87-89.
- [6] 黄文敏,毕永红,胡征宇等.丹江口水库农业面源污染特征研究.环境科学与管理,2012,37(1):33-38.
- [7] 王丽靖,郑丙辉,李子成.三峡库区及上游流域面源污染特征与防治策略.长江流域资源与环境,2009,18(8):783-788.
- [8] 张红举,陈方.太湖流域面源污染现状及控制途径.水资源保护,2010,26(3):87-90.
- [9] 吴罗发.鄱阳湖区农业面源污染时空分布研究.江西农业学报,2012,24(9):159-163.
- [10] Wu HM, Zhang J, Li PZ *et al.* Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(4):560-568.
- [11] Sun C, Wu HJ. Pollution from animal husbandry in China: a case study of the Han River Basin. *Water Sciences and Technology*, 2012, 66(4):872-878.
- [12] 陶春,高明,徐畅等.农业面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望.土壤,2010,42(3):336-343.
- [13] 王娟.藻类水华的发生及控制技术研究现状与展望.安徽农业科学,2011,39(4):2212-2214.
- [14] 赵林林,朱广伟,顾钊等.太湖水体氮、磷赋存量的逐月变化规律研究.水文,2013,33(5):28-33,45.
- [15] 谢琳萍,蒲新明,孙霞等.荣成湾营养盐的时空分布特征及其影响因素分析.海洋通报,2013,32(1):19-27.
- [16] 黄海宁,林彩,暨卫东等.九龙江河口区营养盐分布特征及其影响因素分析.海洋通报,2012,31(3):290-296.
- [17] 王建兵,程磊.农业面源污染现状分析.江西农业大学学报:社会科学版,2008,7(3):35-39.
- [18] 胡春华,楼倩,丁文军等.鄱阳湖氮、磷营养盐的滞留效应研究.环境污染与防治,2012,34(9):1-4.
- [19] 张天锡,倪跃晓.九峰水库富营养化评价及入库营养盐总量控制研究.中国科技信息,2012,(7):52.
- [20] 闵寒.鄱阳湖水环境现状与思考.鄱湖人家网,2008.9. http://www.cnplph.com/sf_901ADCB56A864DE0947AE6F516758C8D_187_cnplph.html.
- [21] 黄学平,刘峰,万卫红.水环境容量与总量控制及其在乐安河的研究应用.西部资源,2011,(6):76-77.
- [22] 曾艳,万金保.乐安河流域管理的研究.大江周刊:论坛,2010,(2):11-12.
- [23] 高海鹰,庄霞,张奇.鄱阳湖乐安河流域非点源氮污染时空变化特征分析.长江流域资源与环境,2011,20(5):597-602.
- [24] 李正兆,高海鹰,张奇等.抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素.农业环境科学学报,2008,27(1):286-290.
- [25] Withers PJA, Sharpley AN. Preface: Characterization and apportionment of nutrient and sediment sources in catchments. *Journal of Hydrology*, 2008, 350:127-130.