

西苕溪流域非点源氮污染特征

金黎明^{1,2}, 张奇^{1*}, 李恒鹏¹, 徐力刚¹, 王晓龙¹, 聂小飞^{1,2}

(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.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 通过对西苕溪流域不同用地类型的子流域出口设置监测点并进行定期水质监测, 探讨该流域非点源氮污染特征及其区域性差异。不同月份的监测结果表明, 总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO_3^- -N)浓度在12月最高, 7月次之, 4月最低; 铵态氮(NH_4^+ -N)浓度在7月最高, 12月次之, 4月最低。典型子流域日监测数据表明, 林地子流域水质监测点测得的氮明显低于耕地, 降雨期林地子流域出口的氮浓度增加, 耕地子流域降低, 干旱期则相反。研究表明流域非点源氮污染主要受农业耕地用地类型的控制, 降雨径流是西苕溪流域非点源氮输出的主要驱动因素, 用地类型、不同形态氮的理化性质差异导致流域非点源氮呈现明显的季节、空间分布特征。

关键词 西苕溪流域; 非点源氮; 土地用地; 时空特征

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)07-1385-06

Characteristics of Non-point Source N Pollution in Xitiaoqi Catchment, China

JIN Li-ming^{1,2}, ZHANG Qi^{1*}, LI Heng-peng¹, XU Li-gang¹, WANG Xiao-long¹, NIE Xiao-fei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract With strictly controlling measures for point source pollution, non-point source pollution from the catchment is becoming an increasingly serious problem, which has caused deterioration of water quality of lake, reservoir and groundwater. Nitrogen pollution, mainly exported from forestland and arable land, for its high solubility, is playing an important role in non-point source pollution. Xitiaoqi catchment is located in the upstream of Taihu basin, where river water quality has become deteriorated heavily in recent years. To further analyze the spatiotemporal characteristics of non-point source N in Xitiaoqi catchment, water sampling points were set up at the outlet of sub-watersheds with different land use types, and monthly water samples were taken for December 2009, April 2010 and July 2010. The results indicated that the peak concentrations of total nitrogen(TN), dissolved nitrogen(DTN), nitrate nitrogen(NO_3^- -N) appeared in December, followed in July, and the lowest concentration in April, while the concentration of ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) was highest in July, followed in December, and lowest in April. Furthermore, daily observations indicated that non-point source N from sub-watershed of forestland was far lower than that of arable land. During the wet seasons, nitrogen concentrations increased at the outlet of forestland sub-watershed while that of arable land decreased and the phenomena reversed during dry seasons. The main finding of this work was that non-point source N pollution in Xitiaoqi catchment was mainly caused by agricultural activities of arable land. Rainfall and runoff were the main driving factors to cause non-point source N exported from the catchment. Moreover, different land use types and physicochemical properties of nitrogenous substance might lead to the seasonal and spatial characteristics of non-point source N in Xitiaoqi catchment.

Keywords Xitiaoqi catchment; non-point source N; land use; spatiotemporal characteristics

近年来, 湖泊、水库、地下含水层的水质恶化所带

来的环境问题日趋严重, 严重威胁湖泊、河流的安全, 进而对区域生物多样性产生负面影响^[1]。我国大部分的湖泊正遭受越来越严重的污染, 影响当地居民的饮水安全, 湖泊的污染物主要来自流域的污染物输入, 包括点源和非点源污染。在北美和西欧, 非点源污染的研究和防治受到高度重视, 而在我国, 非点源污染问题也日益严重, 尤其是太湖和滇池等重要湖泊, 非点源污染已经成为水质恶化的主要原因之一^[2-6]。

收稿日期: 2011-01-06

基金项目: 中国科学院地表过程项目群(KZCX2-YW-Q10-3) 湖泊与环境国家重点实验室自主课题“太湖流域氮、磷循环过程模拟与调控” 国家自然科学基金(40871026)

作者简介: 金黎明(1986—), 女, 江苏灌南人, 硕士研究生, 自然地理学专业, 从事流域水文过程及污染物运移研究。

E-mail: lmjin_cumt@163.com

* 通讯作者: 张奇 E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

研究表明,非点源污染中的氮、磷营养物是引起湖泊和水库污染、富营养化和水华现象的主要因素,氮营养物主要来自农田、林地,因其可剪性强,易随径流迁移至地表水体,同时在降雨作用下淋溶至地下水中造成地下水体的污染,给地表、地下水体的水质造成严重威胁。西苕溪流域位于太湖流域的上游,主要用地类型为林地和耕地,其面积占流域总面积的 90% 以上。近年来由于经济的发展和用地结构的调整,林地地区大量开垦坡耕地、耕地地区大量施用氮肥,氮营养物很容易以非点源的形式排入地表地下水体,造成流域内水质恶化,同时向下游太湖排入大量的氮污染物,增加了太湖的氮入湖负荷^[7-11]。研究西苕溪流域的非点源氮污染时空变化特征,能够针对性地对小流域进行治理。本文通过在西苕溪流域设置野外水质监测点并进行定期观测,研究西苕溪流域的非点源氮输出的变化规律,并讨论引起该分布特征的原因,为流域的综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文选择太湖西苕溪流域作为研究区域,该流域位于浙江省北部湖州市境内,流域面积约 2 200 km²。西苕溪流域属于亚热带季风性气候区,温暖湿润,雨量充沛,水热同期,多年平均降雨量 1 465.8 mm,降雨主要集中在 6—9 月。流域内的土壤类型主要有 3 大类:红壤(41.3%),黄壤(34.7%),水稻土(24%)。根据 2004 年遥感图像解译的西苕溪流域土地利用结构现状,流域内土地利用类型比例极为悬殊,林地占总面积 65.6%,为流域的主要用地类型,耕地类型次之,占总面积的 27.3%,草地、园地及城镇用地占 6.8%。

1.2 监测点设置

本文选用西苕溪流域 300 m×300 m 的 DEM,根据该流域的水系、地理、水文特征,利用 Arcgis 软件水文分析模块的 Arc Hydro Tools 9 水文分析及子流域划分工具,将全流域分为 31 个子流域,在每个子流域出口设置水质监测点,监测结果表明该子流域地表水体的氮含量情况,并指示该子流域的非点源氮输出情况,如图 1 所示。根据流域地形地貌和土地利用类型的特点将所有的子流域分为两类:第一类主要用地类型为林地(F),位于流域上游的山地地区,子流域平均坡度为 10.2°,非点源氮来源于林地氮素输出,子流域编号为 F1~F17;第二类主要用地类型为耕地(A),位于流域中下游的丘陵、平原地区,子流域平均坡度为

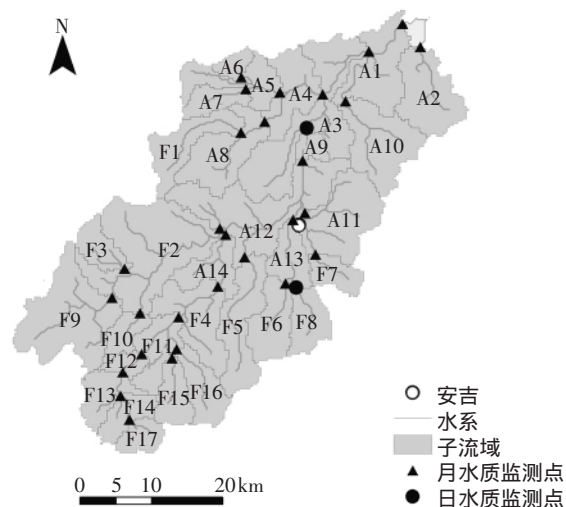


图 1 西苕溪流域子流域及水质监测点分布

Figure 1 The distribution of water quality monitoring points and sub-watersheds in Xiaoxi catchment

4.3°,非点源氮来源于农业用地氮素排放、少量城镇的生活污染氮排放,子流域编号为 A1~A14。文中子流域出口的监测点编号与子流域编号一致。

1.3 水样采集与分析

本文选择在 2009 年 12 月(枯水期)、2010 年 4 月(平水期)、2010 年 7 月(丰水期)对全流域所有监测点进行月水样采集,这 3 个月分别对应农业活动的平淡期、中等忙碌期及忙碌期,对研究以农业活动为主导的西苕溪流域非点源氮产出特征具有重要意义。在监测点 F8、A9 进行日水样采集,采样时段为 2010 年 6 月 8 日至 7 月 7 日。每次采集水样不少于 600 mL,将水样密封保存送至实验室进行水质分析,水样氮浓度测试原理见金相灿的《湖泊富营养化调查规范》^[12],监测指标信息及分析方法见表 1。

2 结果与讨论

2.1 非点源氮浓度季节变化

西苕溪流域所有水质监测点的在 3 个月的氮浓度作为分析非点源氮污染季节变化特征的原始数据,通过分析得到 12 月、4 月、7 月不同用地类型各形态氮浓度分布情况,如图 2 所示。

结果表明,在两类用地类型中,溶解态总氮占总氮的比例大于 90%,而硝态氮是总氮及可溶解态氮的主要部分,与铵态氮含量差异较大。TN、DTN、NO₃-N 浓度都是在 12 月份达到最大,7 月份次之,4 月份最低;NH₄⁺-N 则在 7 月份有最大值,12 月份次之,4 月份最低。总体上全流域监测点的水质在 12 月份最差,

表 1 西苕溪流域水样水质参数、单位及分析方法

Table 1 Water quality parameters, units and analytical methods for water samples in Xitiaoxi catchment

指标名称	符号	单位	测试方法	所用仪器
总氮	TN	mg·L ⁻¹	分光光度法	紫外分光光度计(UV2450)
溶解性总氮	DTN	mg·L ⁻¹	分光光度法	紫外分光光度计(UV2450)
铵态氮	NH ₄ ⁺ -N	mg·L ⁻¹	分光光度法	流动分析仪(荷兰 SAN+++)
硝酸盐氮	NO ₃ ⁻ -N	mg·L ⁻¹	分光光度法	流动分析仪(荷兰 SAN+++)
亚硝酸盐氮	NO ₂ ⁻ -N	μg·L ⁻¹	分光光度法	流动分析仪(荷兰 SAN+++)
硝态氮	NO ₃ ⁻ -N	mg·L ⁻¹	c(NO ₃ ⁻ -N)-c(NO ₂ ⁻ -N)	无

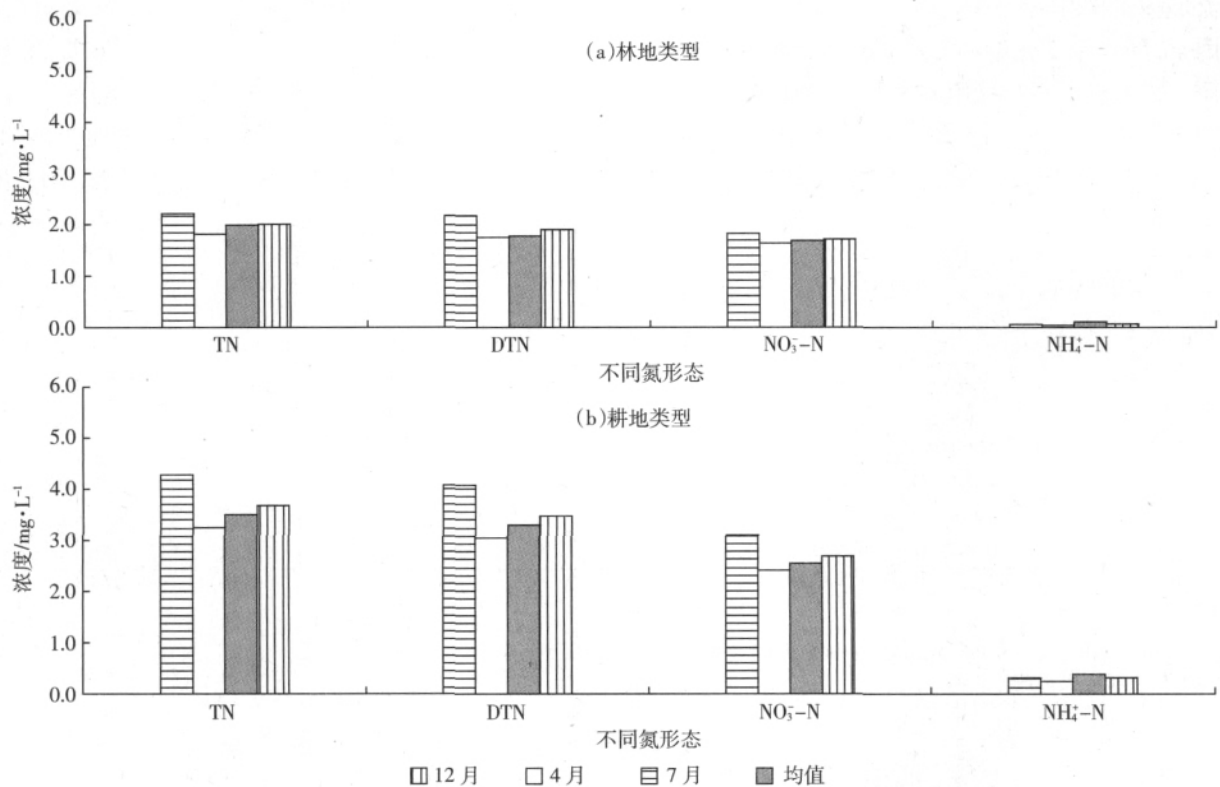


图 2 西苕溪流域非点源氮输出特征

Figure 2 Non-point source N export characteristics in Xitiaoxi catchment

7 月份次之, 4 月份最优。

流域地表水中监测到的非点源氮输出主要为无机态的可溶解氮, 由于铵态氮易于发生硝化反应生成硝态氮, 且硝态氮易于迁移, 硝态氮占地表水氮素的主要成分^[13]。研究表明, 流域非点源氮浓度受降雨径流、农业活动的季节性差异影响而呈季节性变化。12 月份降雨量少, 通过降雨径流作用从流域输出的非点源氮含量降低, 此时地表水中的氮输入来源为地下水对河道补给带入的氮^[14], 同时地表径流量降低导致水体的环境容量减弱, 对其中的氮降解作用降低, 因此 12 月份的 TN、DTN、NO₃⁻-N 浓度有最大值。

7 月份是全年雨、热量最大的月份之一, 降雨汇

流作用导致地表径流量增加, 对其中的污染物有稀释作用, 同时增加的环境容量加大对提高对污染物的降解作用, 降低其中的氮浓度。流域非点源氮浓度不仅受降雨量的影响, 同时受流域氮输入量的影响, 7 月份频繁的农业活动中施入的大量氮肥、农药以非点源的形式进入地表水体, 导致地表水体中的氮含量增加, 增大水体氮浓度, 在 7 月份 TN、DTN、NO₃⁻-N 浓度为年内的中等水平。

4 月份雨热条件适中, 少量的降雨不会形成大量的径流, 降雨入渗作用占主要地位, 总氮的主要成分硝态氮不易被土壤吸附, 在降雨入渗的作用下以淋滤方式进入土壤, 并向深层土壤迁移, 进入地表水体中

的氮含量降低,同时4月份农业活动频度处于年内的中等水平,也降低流域非点源氮的输出量,因此4月份TN、DTN、 NO_3^- -N浓度最低,地表水质最好。

NH_4^+ -N浓度的季节变化主要受铵态氮的硝化作用的影响,影响硝化作用的主要因素是土壤通气性和含氧量,在降雨量较多的7月份,土壤处于渍水状态,通气性差,含氧量低,硝化作用弱^[13],同时夏季水田耕作中施用大量的氮肥,导致 NH_4^+ -N在7月份浓度最大,12月份次之,4月份最低。

流域内的降雨径流条件是非点源氮输出的主要驱动因素,降雨量变化影响非点源氮输出的形态及迁移规律,径流量的变化影响对其中氮物质的降解、稀释作用,而季节性的农业活动影响人为氮输出总量,综上,季节性的降雨径流量、农业活动频度变化导致

西苕溪流域非点源N输出浓度呈明显的季节性特征。

2.2 非点源氮浓度空间变化

为研究西苕溪流域非点源氮的空间变化情况,选择流域中分别代表上游林地地区、中下游耕地及少量城镇用地的两个子流域F8、A9进行水质监测,两个子流域水质监测点的不同形态氮浓度的变化规律如图3所示。文中采用的降雨资料来源于国家气象信息中心浙江省杭州站(V13201)的日降雨信息,假设在两个子流域中降雨分布一致。

如图3的降雨柱状图所示,在6月8日至7月7日间降雨量分布极度不均,6月24日至6月30日的连续降雨量为101 mm,占监测期总降雨量的55%。由F8、A9子流域出口监测不同形态氮浓度曲线可知,在耕地子流域出口测得的TN、DTN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N浓

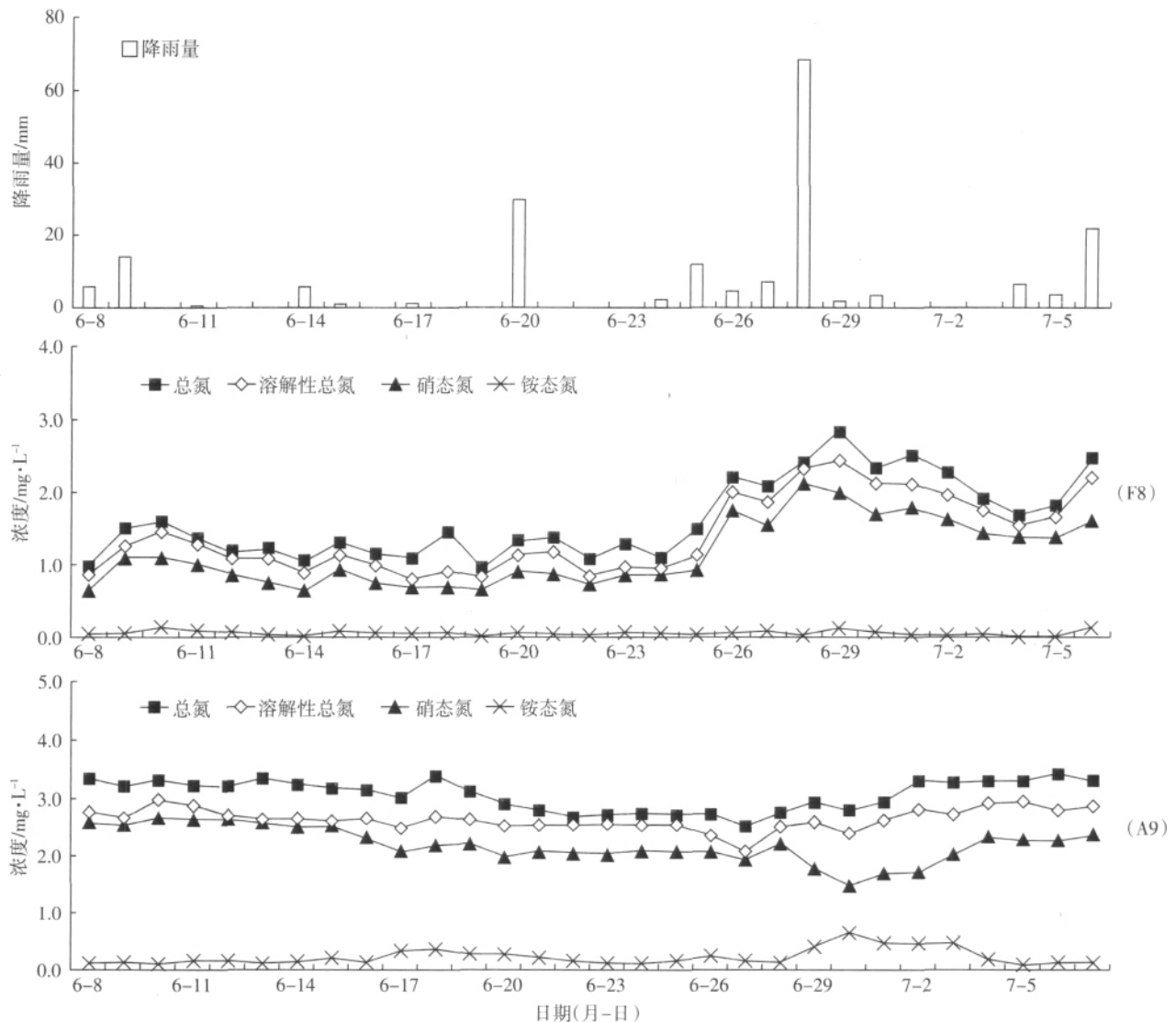


图3 典型子流域F8、A9非点源氮输出特征

Figure 3 Non-point source N export characteristics from sub-watershed of F8 and A9

度明显高于林地子流域。受降雨过程的影响,两个子流域出口的氮浓度随时间变化规律有较大差异,具体的变化规律为:F8子流域出口测得TN在监测期内随降雨变幅大,降雨发生后TN浓度小幅下降后持续上升,并在连续降雨期的后期有极大值,进入干旱期TN小幅增加后持续降低,并在干旱期的后期有极小值。对于A9子流域,情况则相反。两个子流域出口测得的DTN、 NO_3^- -N与TN的变化趋势一致,而在耕地子流域出口测得的 NH_4^+ -N与 NO_3^- -N呈此消彼长的变化规律。

已有研究表明,流域的地形、地貌、用地类型是流域非点源氮输出的主要的影响因素^[15-17]。子流域F8位于西苕溪流域上游,平均海拔为188 m,地面平均坡度 8.0° ,主要用地是林地,覆盖植被为竹类及其他人工林。在降雨发生后,导致土壤中大量的氮在坡地汇流的作用下源源不断地输出,并随着降雨时段的延长而增多,导致子流域出口的氮浓度增高,在降雨时段的后期,TN浓度达到最大值;进入连续干旱时期,林地输出的氮含量减少,同时由于山地地区产流过程快,地表径流携带其中的污染物流向中下游平原地区,上游地表水体中的氮浓度持续降低,水质得到优化,在干旱期的后期,水质达到最优。已有数据表明森林对非点源污染物有很好的滞留作用,对铵态氮的滞留率为22%~78%,而硝态氮不能被林地滞留^[18],在林地地区硝态氮是林地非点源氮中的主要部分, NH_4^+ -N浓度明显降低,监测期内F8子流域出口的 NH_4^+ -N大部分达到了地表水Ⅲ类水质标准。

子流域A9位于流域中下游,平均海拔为35 m,地面平均坡度为 2.7° ,主要用地类型为耕地,附近有村庄分布,并受到上游安吉县城的影响。在降雨时段,下游地区汇流时间长,地表水径流量在短时间内持续增加,导致地表水体容量增加,对其中的污染物有稀释作用,而附近生活区中大量的生活污水、人畜排泄物在降雨径流作用下,排入河道增加水体中的氮含量,两种作用的叠加表现为耕地子流域出口氮浓度缓慢降低,并在连续降雨时段的后期氮浓度达到最低值。在干旱期,汇入流域出口径流量减小,导致地表水含量对其中的氮营养物降解作用降低,同时干旱期强烈的蒸发作用导致水体中的氮浓度增加,在连续干旱时段的后期,氮浓度有最大值。A9子流域监测点DTN、 NO_3^- -N与TN变化趋势一致, NH_4^+ -N与 NO_3^- -N的变化规律相反,这主要是受铵态氮的硝化作用影响所致。在干旱期,硝化作用强烈,硝态氮占主要地位,

NH_4^+ -N浓度降低,降雨期,硝化作用减弱,同时在水子流域生活区内的污染物在降雨作用下排入地表水体,导致子流域出口 NH_4^+ -N浓度增大。有资料表明 NH_4^+ -N浓度标志着生活污水、人畜排泄物的污染情况^[19]。因此,硝化作用及生活区的污染排放是导致降雨期耕地子流域出口铵态氮浓度升高的原因,且在总氮中所占比例持续增加,这也与图2中 NH_4^+ -N的季节分布情况一致。

西苕溪流域已有研究中,人工降雨条件下地表径流中氮流失过程表明,施肥较多的桑林地产出的总氮远高于菜地、水田^[20],平原河网地区地表径流中氮浓度先升高后趋于平稳的变化趋势^[7],这与本文中的监测结果有所区别。其原因是以往研究中选择不同用地类型的实验样地,其地形条件一致,监测同样地的氮流失过程可反映土壤氮含量对输出氮浓度的影响;本文选择的是西苕溪流域中具有典型地形、用地类型特点的子流域,进行天然降雨情况下氮输出浓度的连续监测,反映受地形特点差异影响及附近村庄及上游城镇的生活污染排放对氮输出过程的影响。监测结果表明,耕地子流域出口氮浓度明显高于林地子流域,林地比例的增加对非点源氮输出有很好的滞留作用,生活区的生活垃圾、人畜排泄物排放对地表水质起恶化作用。

3 结论

本文选择在西苕溪流域进行定期的水质监测,结果表明西苕溪流域非点源N浓度季节性变化显著,不同形态N浓度变化有差异,TN、DTN、 NO_3^- -N浓度在12月份有最大值,7月份次之,4月份最低; NH_4^+ -N在7月份有最大值,12月份次之,4月份最低,这主要是由于季节性降雨、农业活动差异的影响,铵态氮与硝态氮之间的硝化作用也是重要的影响因素。本文与以往研究相比,增加了流域水质监测点的数量,并增加了单一用地类型子流域输出氮浓度的监测,为进行流域中各子流域的非点源N输出对西苕溪流域出口氮负荷贡献量的研究提供基础。

天然降雨情况下典型林地、耕地子流域出口氮浓度的连续监测结果表明,西苕溪流域中林地子流域产出的非点源氮浓度低于耕地,尤其是铵态氮;两类子流域监测点的氮浓度随降雨过程变化规律有差异,降雨发生后林地监测点的氮浓度增加,耕地的降低,干旱期则相反,这主要是由于不同地区产流机制差异的影响,同时流域中氮营养物来源的差异也是重要的影

响因素。西苕溪流域非点源氮输出主要受农业耕地用地类型控制,针对这一特点,需要提高耕地地区的氮肥的使用率,另外需加强当地居民的环境保护意识,推动可持续发展的观念的形成,使得当地的生态环境向更好的方向发展。

参考文献:

- [1] Withers P J A, Sharpley A N. Preface: Characterization and apportionment of nutrient and sediment sources in catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350: 127-130.
- [2] Edwards A C, Withers P J A. Linking phosphorus sources to impacts in different types of water body[J]. *Soil Use Manage*, 2007, 23(supplement): 133-143.
- [3] Stainacke P, Grimvall A, Sundblad K, et al. Estimation of riverine loads of nitrogen and phosphorus to the Baltic sea, 1970-1993[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 58: 173-200.
- [4] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理和控制[J]. *环境科学*, 1998, 19(5): 91-96.
- HE Chan-sheng, FU Bo-jie, CHEN Li-xiang. Non-point Source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, 19(5): 91-96.
- [5] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. *环境科学*, 2002, 23(3): 124-128.
- HU Xue-tao, CHEN Ji-ning, ZHANG Tian-zhu. A study on non-point source pollution models[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3): 124-128.
- [6] 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响——以太湖上游浙江西苕溪流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(3): 211-217.
- YU Xing-xiu, YANG Gui-shan. Land use/cover change of catchment and its water quality effects a case of Xitiaoxi catchment in Zhejiang province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(3): 211-217.
- [7] 李恒鹏, 金洋, 李燕. 模拟降雨条件下农田地地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 6-9.
- LI Heng-peng, JIN Yang, LI Yan. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farmland under artificial rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 6-9.
- [8] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 太湖上游地区面源污染氮素入湖量模拟研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1063-1069.
- LI Heng-peng, YANG Gui-shan, HUANG Wen-yu, et al. Simulating fluxes of non-point source nitrogen from upriver region of Taihu basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1063-1069.
- [9] 许鹏柱, 秦伯强. 2001-2002 水文年太湖河道的水量及污染物通量[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(3): 213-218.
- XU Peng-zhu, QIN Bo-qiang. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of lake Taihu during the hydrological year of 2001-2002[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(3): 213-218.
- [10] 于兴修, 杨桂山, 梁涛. 西苕溪流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 424-427.
- YU Xing-xiu, YANG Gui-shan, LIANG Tao. Effects of land use in Xitiaoxi catchment on nitrogen losses from runoff[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 424-427.
- [11] 于兴修, 杨桂山, 欧维新. 非点源污染对太湖上有西苕溪流域水环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(1): 49-55.
- YU Xing-xiu, YANG Gui-shan, OU Wei-xin. Impacts of non-point source pollution on the water environment of Xitiaoxi watershed, upper Taihu basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(1): 49-55.
- [12] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 160-178.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Investigation standard of lake eutrophication[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 160-178.
- [13] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 76-110.
- ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press, 1992: 76-110.
- [14] Zhang Q, Li L. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China[J]. *Quaternary International*, 2008, 208(2009): 102-108.
- [15] 李恒鹏, 杨桂山, 李燕. 太湖流域土地利用变化的营养盐输出响应模拟[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 179-182.
- LI Heng-peng, YANG Gui-shan, LI Yan. Simulation of nutrient fluxes response of land use change in Taihu Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 179-182.
- [16] 金洋, 李恒鹏, 李金莲. 太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1214-1218.
- JIN Yang, LI Heng-peng, LI Jin-lian. The impact of non-point pollution load of land-use changes in Taihu Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1214-1218.
- [17] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 401-408.
- LI Heng-peng, LIU Xiao-mei, HUANG Wen-yu. The non-point output of different landuse types in Zhexi hydraulic region of Taihu basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 401-408.
- [18] 雷孝章, 陈秀明, 赵文谦. 森林对非点源污染的调控研究[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(Suppl): 165-169.
- LEI Xiao-zhang, CHEN Xiu-ming, ZHAO Wen-qian. Study on the adjusting and controlling ability of forest over non-point pollution[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(Suppl): 165-169.
- [19] Xing G, Cao Y, Shi S, et al. N pollution sources and denitrification in water bodies in Taihu Lake region[J]. *Science in China(Series B)*, 2001, 44(3): 304-314.
- [20] 梁涛, 张秀梅, 张申, 等. 西苕溪流域不同土地类型氮元素输移过程[J]. *地理学报*, 2002, 57(4): 389-396.
- LIANG Tao, ZHANG Xiu-mei, ZHUANG Shen et al. Nitrogen elements transferring processes and fluxes under different land use in west Tiaoxi catchment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 389-396.