

太湖上游大溪水库流域营养盐输移时空特征分析

邬明伟¹, 李兆富¹, 李恒鹏², 聂小飞², 王晓旭¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 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)

摘 要:大溪水库位于太湖上游地区,是溧阳市的重要饮用水源地之一,近年来流域内湖(库)体水质有下降趋势。基于2008—2009年对入湖主要支流水质营养盐浓度监测数据,实地考察流域内的主要污染源以及耕作制度等因素,并以2009年航空遥感影像解译获得的土地利用数据为基础,结合季节气候变化以及农业活动等环境影响因子,分析流域内营养盐时空分异特征及原因,为改善和治理饮用水源地水质工作提供科学依据和保障。结果表明,大溪水库流域不同支流水质营养盐浓度空间差异显著,表现为临湖东岸的氮磷营养盐浓度普遍高于西岸及上游的洙漕河流域,是大溪水库流域氮磷营养盐主要的源;各流域的TN、DTN、NO₃-N浓度逐月变化趋势基本一致,TP、DTP季节间浓度变化趋势不明显。进入大溪水库流域的氮素主要以可溶性氮素为主,TN平均浓度为1.82 mg·L⁻¹;磷素主要以非溶解态磷素的形式输移,TP平均浓度为0.116 mg·L⁻¹;总体水质属于Ⅳ水质。营养盐输移时空差异的原因与各小流域土地利用状况、农业活动及降雨季节变化关系密切。

关键词:饮用水源地;营养盐;时空特征;大溪水库流域;非点源污染

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)12-2375-08

Analysis on Temporal and Spatial Characteristics of Nutrient Export in Daxi Reservoir Watershed in the Upstream of Taihu Lake Area, China

WU Ming-wei¹, LI Zhao-fu¹, LI Heng-peng², NIE Xiao-fei², WANG Xiao-xu¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Water quality is gradually declining in recent years in Daxi reservoir, which is located at the upstream of Taihu Lake area, and it is one of the important drinking water sources in Liyang City. Nutrient export concentrations of main tributary were monitored in 2008—2009. Main pollution sources and farming system were investigated on the spot. Land use data were interpreted from 2009 aviation images. Combined with the season climate change, land use and land cover and agricultural activities within the watershed, the characteristics and reasons temporal and spatial distribution of nutrients export in Daxi reservoir watershed were analyzed. Results show, the spatial difference of nutrient concentration in different branches of Daxi watershed was significant, and the nutrient concentration in the east coast of the lake was generally higher than that in the west coast and Zhucuo River watershed; the various forms of nutrient concentrations in different sub-watersheds almost had the similar change by month. The concentrations of TP and DTP had no significant difference among the four seasons. DTN was the main part of TN of Daxi reservoir watershed, the average concentration of TN was 1.82 mg·L⁻¹. P mainly was in the form of non-dissolved phosphorus, the average concentration of TP was 0.116 mg·L⁻¹; the overall water quality water quality were level Ⅳ. The reasons of spatial and temporal differences of nutrients were closely related to the situation of land use in the watershed, agricultural activities and seasonal variation of rain-fall.

Keywords: drinking water sources; nutrient; temporal and spatial characteristics; Daxi reservoir watershed; non-point source pollution

收稿日期:2010-05-19

基金项目:国家自然科学基金(40701174);江苏省自然科学基金(SBK200920953);湖泊与环境国家重点实验室开放基金(2008SKL009)

作者简介:邬明伟(1986—),男,山东临沂人,硕士,主要研究方向为流域非点源污染。E-mail:wumingweik@njau.edu.cn

通讯作者:李兆富 E-mail:lizhaofu@njau.edu.cn

随着经济发展,人类活动日益剧烈,非点源污染对区域水环境的影响逐渐突出^[1]。湖泊水环境日趋恶化,不少湖泊富营养化形势严峻^[2],饮用水源地的水质健康面临着巨大挑战,在很多地区水质性缺水已经严重制约了地方经济的可持续发展。保护饮用水源地的工作意义重大,这关系到人们的身体健康和社会的稳定,而营养盐的输入和富集是湖库发生富营养化最主要的原因^[3-4]。减少进入湖泊的营养盐,控制非点源污染的恶化,是治理湖泊富营养化最有效最直接的途径^[5-6]。开展流域水质监测,探明水源地水质现状及其实时空变化特点,有利于开展湖泊富营养化治理工作^[7-8]。

长江中下游地区是我国淡水湖泊最集中的区域,很多湖库是重要的饮用水源地。大溪水库位于太湖上游的溧阳市天目湖旅游度假区行政管理区域内,是供应周边近20万群众的重要饮用水源地。近年来,非点源污染对水环境恶化的影响日益严重,总体水质呈下降趋势^[9]。已有的研究主要集中在对营养输移过程的模拟和营养盐输出负荷的估算等方面^[10-12],也有研究者对营养盐输出特征的影响因素进行分析,主要侧重于土地利用和不同种植管理方式对营养盐输出特征影响的研究^[13-14]。然而,基于小流域尺度的营养盐输出时空特征分析方面的研究工作开展不多,有必要对太湖流域尤其是饮用水源地的营养盐随地表径流的输出特征加大研究力度,进一步明确饮用水源地富营养化的治理方向和目标。

本研究于2008—2009年度逐月监测了大溪水库流域主要入湖支流的水质数据,实地调查流域内的主要污染源以及农业活动等环境影响因子,并以2009年高分辨航空遥感影像为数据源,解译获得了流域大比例尺的土地利用数据。分析大溪水库流域氮磷营养盐的时空特征,探索水质时空分异的原因,为大溪水库流域及同类饮用水源地保护区域的生态环境保护和防治水库富营养化提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大溪水库位于江苏省常州市所辖天目湖镇境内,是一个集饮用水源为主,农业灌溉、旅游和渔业生产等多功能于一体的水库型湖泊。水库集水面积为90 km²,总库容1.13×10⁸ m³,为大(Ⅱ)型水库。属北亚热带季风气候区,冬夏历时长,春秋季短,年平均降水量1 160.9 mm。流域内土地利用类型以水稻田、农田、茶

园、果园和城镇占地等为主。土壤类型多为红黄壤和水稻土,地形较为复杂,系半低山丘陵半圩乡地区,历来以种植稻、麦为主,实行水稻、小麦、油菜、红花草轮作换茬制,流域内的稻田采用水旱轮作制度,夏季种植水稻,秋季种植油菜和小麦^[15]。

以往调查研究表明,大溪水库水质下降极为明显,2007—2008年的水质调查表明大溪水库总体水质属于Ⅲ类水^[6],而2008—2009年的水质调查表明属于Ⅳ类水。分析大溪水库流域营养盐时空分布特征,探明水质恶化原因,已迫在眉睫。

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集

大溪水库流域的采样共设了9个点,根据河流位置分布以及地貌地形等因素将其划分为3个集水流域,包括洙漕河流域、临湖东岸流域和临湖西岸流域。具体监测点位置如图1所示。从2008年7月至2009年9月(2008年11月、2009年1月未采样)每月中旬采样1次,通常在距水面约0.25 m处采集水样,水样采集后立即送往实验室分析。

1.2.2 测定指标与方法

测定营养盐输移的有关指标:总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨态氮(NH₄⁺-N)、溶解态氮(DTN)、总磷(TP)、溶解态磷(DTP)等,各指标分析方法依据《湖泊富营养化调查规范》。TN、TP采用碱性过硫酸钾氧化法测定;氨氮采用蒸馏法预处理消除干扰,纳氏比色法测定;硝态氮采用酚二磺酸法;DTP采用钼锑抗分光光度法,水样经0.45 μm的滤膜过滤,不经消解处理,直接显色;DTN为硝态氮、氨态氮和亚硝态氮之和,亚硝态氮采用重氮-偶联比色法测定。

1.2.3 空间与时间变化分析

通过实验测得各河流水质变化相关数据,利用SPSS 15.0对流域水质数据进行方差分析以及各流域的营养盐浓度显著性检验等相关处理;解译2009年0.5 m分辨率的航空遥感影像,获得大溪水库流域土地利用数据;实地考察流域内耕作制度以及主要污染源的来源等。时间特征分析以2008—2009年1个观测年度为基础,以月份为时间周期分析氮磷营养盐时间变化特征,并结合季节气候变化以及当地农业活动等分析其原因;空间特征分析结合2009年高分辨航空遥感影像解译的土地利用数据,对洙漕河流域、临湖东岸流域和临湖西岸流域的营养盐特征进行比较分析,研究大溪水库流域营养盐在空间上的差异及其原因。

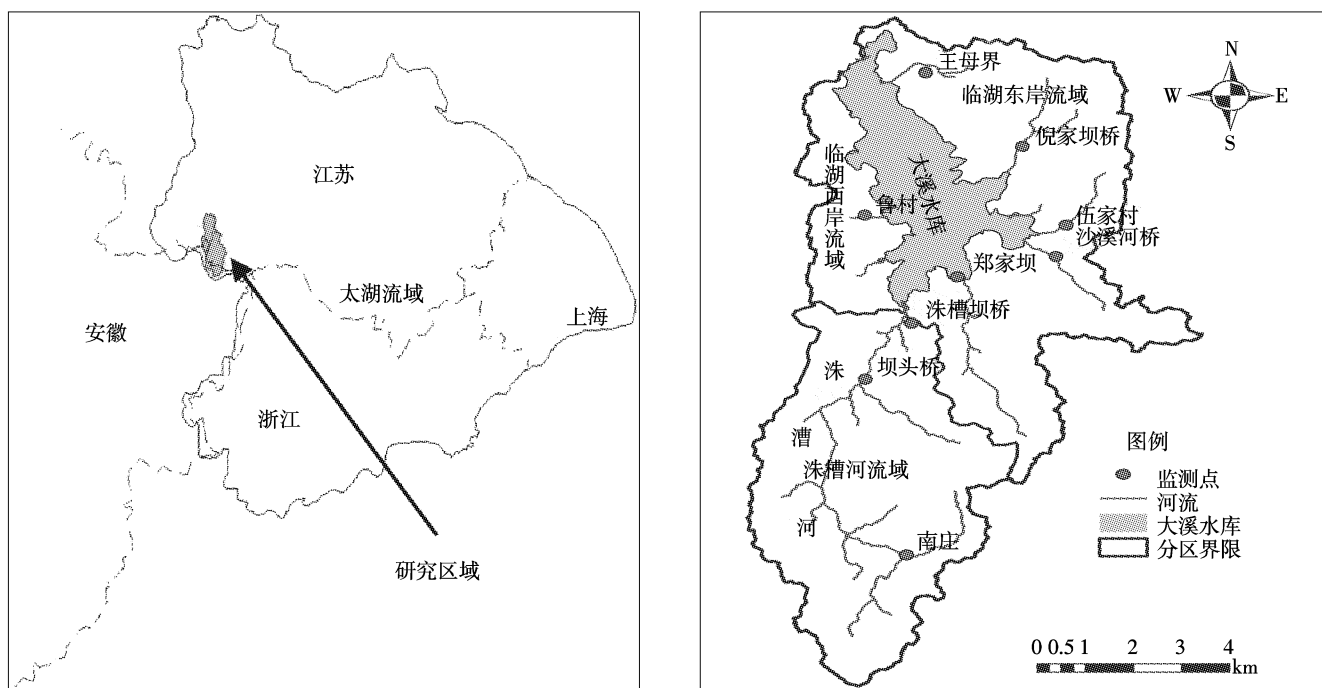


图1 大溪水库流域各采样点空间分布图

Figure 1 Map of sampling sites in Daxi reservoir watershed

2 结果与分析

2.1 大溪水库流域氮磷营养盐输移季节变化特征分析

2.1.1 TN、DTN 浓度随时间变化特征

大溪水库流域 TN 及 DTN 浓度随时间变化趋势非常显著,且流域的 TN 和 DTN 四季的变化趋势较为一致(图2),基本表现为:由夏季开始,平缓降低至秋季的最低点,在冬季,TN 及 DTN 浓度较为缓慢的增加,至次年春季,其浓度迅速增加到最高值,然后向夏季过渡时,又迅速降低至较低点,一般出现在5月份,再缓慢升至夏季的最高值。从整体来看,每个季节

都有一个从低到高再回落的过程,春季变化剧烈,冬季变化平缓,全年的最高值一般出现在3月份,最低值出现在10月份。监测的12个月份中,各集水流域 TN 平均浓度大部分低于V类水质标准 ($2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),只在2008年7月及2009年3月和7月较高,劣于V类水质标准,2009年3月 TN 平均浓度已达到 $3.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.1.2 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 浓度随时间变化的迁移特征

就随时间变化的特征而言, NO_3^- -N 与 TN、DTN 的变化特征相似; NH_4^+ -N 浓度季节变化与 NO_3^- -N 变化特征稍有不同, NH_4^+ -N 变化幅度不够剧烈,从夏季到秋末,逐渐降低,在冬季保持着较低的浓度,初春浓度

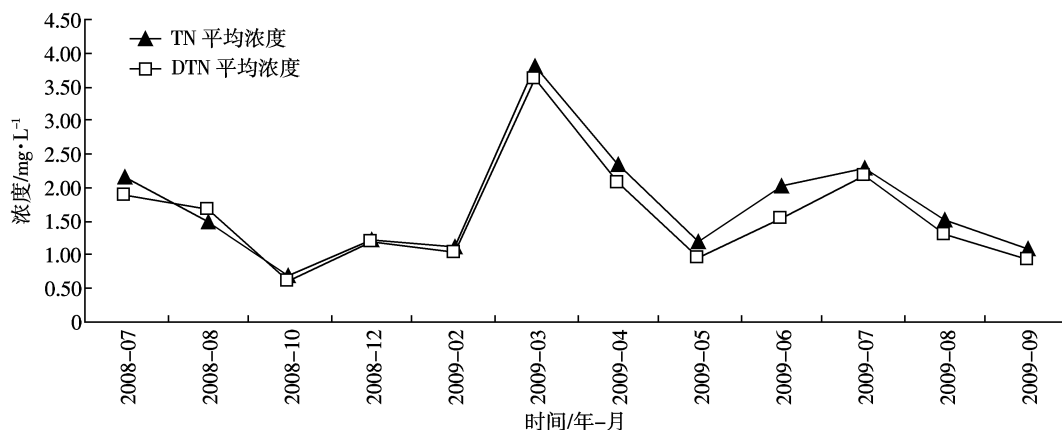


图2 大溪水库流域 TN、DTN 浓度时间变化

Figure 2 TN and DTN concentration change from 2008—2009 in Daxi reservoir watershed

上升趋势明显,持续到夏末,并且春夏季节平均浓度高于秋冬季节(图3)。流域内 NO_3^- -N 浓度的平均水平在 2009 年 4、5、6 月份相对较低,而同时段的 NH_4^+ -N 浓度却相对较高。在 2009 年 3 月流域内 NO_3^- -N 浓度达到最高点,平均水平为 $3.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;而流域内 NH_4^+ -N 浓度很低,平均水平为 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2009 年 4 月至 6 月流域 NO_3^- -N 浓度维持较低水平,其 NH_4^+ -N 浓度相对 NO_3^- -N 浓度较高。

2.1.3 磷素输移季节变化特征

TP 作为一种重要的面源污染物,其产出及流失过程十分复杂,影响因素多样。从图 4 可见,大溪水库各集水流域 TP、DTP 浓度全年表现均较低,季节差异变化趋势不明显,全年大部分时间优于 II 类水质标准 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),只在 2009 年 3 月至 6 月时 TP 浓度增高趋势明显并达到全年最高值。从流域 DTP 的整体变化趋势来看,全年 DTP 浓度变化幅度比较轻缓,只

在 2009 年的 3、4 月份 DTP 浓度上升,这一点与氨态氮的变化特征有点相似。

2.2 大溪水库流域氮磷营养盐输出空间特征分析

流域是通过水循环自然连接的整体,生态水文和人类开发活动制约着流域内地表水的水质变化,在不同地域内人类开发活动的强度以及生态水文环境的变化,导致流域内地表水的水质具有一定的空间格局^[2]。由于入库河道流域内地质、地貌不同,经济发展水平差距,导致各子流域的营养盐特征不同。

综合流域面积、地理和人为活动等因素将大溪水库流域划分为 3 个集水区域,分别为临湖东岸流域、临湖西岸流域和洙漕河流域。通过分析研究发现,各子流域的 TN 输出水平差异明显(表 1),临湖东岸 TN 浓度>洙漕河 TN 浓度>临湖西岸 TN 浓度,其各形态氮素指标浓度变化幅度较大。各子流域的氮素输出以 DTN 为主,占 TN 的 90%左右,DTN 中以硝态氮的浓

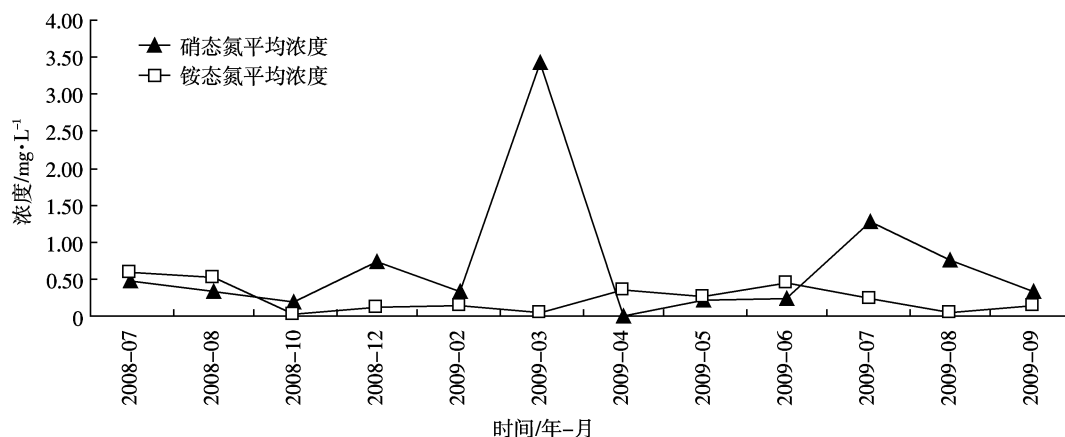


图3 大溪水库流域 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 浓度时间变化

Figure 3 NO_3^- -N and NH_4^+ -N concentration change from 2008—2009 in Daxi reservoir watershed

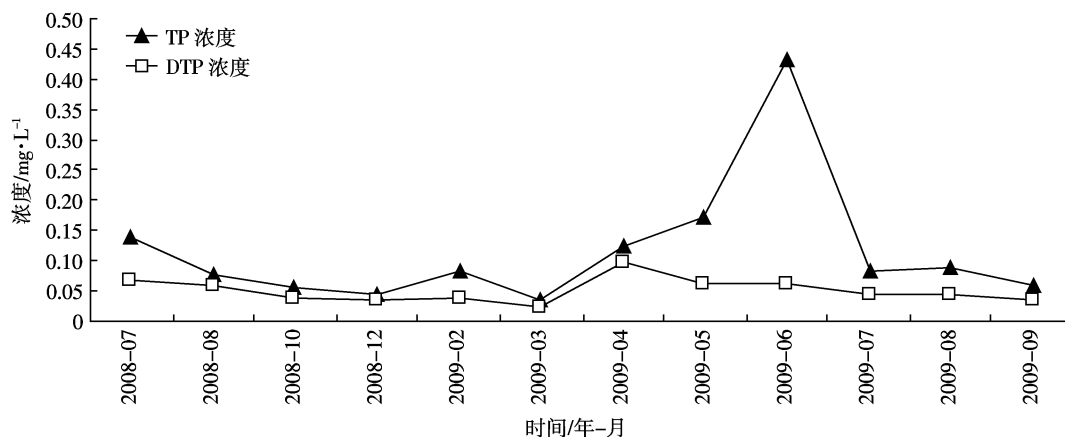


图4 大溪水库流域 TP、DTP 浓度时间变化

Figure 4 TP and DTP concentration change from 2008—2009 in Daxi reservoir watershed

表 1 大溪水库流域氮磷营养盐浓度空间差异

Table 1 Spatial difference of nutrients concentrations in Daxi reservoir watershed

营养盐	临湖东岸流域		临湖西岸流域		洙漕河流域	
	浓度/mg·L ⁻¹	占 TN 或 TP 比例/%	浓度/mg·L ⁻¹	占 TN 或 TP 比例/%	浓度/mg·L ⁻¹	占 TN 或 TP 比例/%
TN	2±0.78	100	0.96±0.27	100	1.60±0.74	100
DTN	1.79±0.74	89.7	0.87±0.18	90.1	1.475±0.68	92.2
NO ₃ -N	0.73±0.88	36.5	0.25±0.20	26.3	0.78±0.97	48.9
NH ₄ ⁺ -N	0.33±0.07	16.5	0.07±0.00	7.7	0.15±0.04	9.6
TP	0.16±0.02	100	0.06±0.00	100	0.06±0.00	100
DTP	0.07±0.00	43.8	0.03±0.00	44.6	0.03±0.00	45.2

度最高；大溪水库各子流域 TP 输出水平差异不明显,临湖东岸流域 TP 稍高于其他两个流域,总体输出浓度不高,且颗粒态磷素输出略大于可溶态磷素的输出。洙漕河流域的硝态氮输出水平最高,占 TN 的 48.9%,而其氨态氮仅为 9.6%;临湖西岸水质相对较好,硝态氮和氨态氮输出水平都是最低的;临湖东岸的氨态氮输出浓度最高,占 TN 输出浓度比例也相对较大。

3 讨论

3.1 大溪水库流域营养盐输出季节变化特征原因分析

为了更好地分析季节性变化,结合区域气候特征,采用 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季的划分原则。大溪水库流域 TN、DTN、NO₃-N 浓度随季节变化特征明显,并且各集水流域变化特征趋于一致,基本表现为由 2008 年夏季开始先降低至秋季最低,然后到冬季及 2009 年春季持续增加到最高值,然后到夏季又有所降低;而 NH₄⁺-N 浓度季节变化特征稍有不同,表现为从夏季到秋末,逐渐降低,在冬季变化比较轻缓,初春浓度急剧上升之后,浓度变化减缓,持续到夏末;在 4、5、6 月份,TN、DTN 浓度变化幅度不大,且 NO₃-N 浓度保持相对较低状态,而 NH₄⁺-N 浓度则呈现出相对较高的输出水平。大溪水库各子流域 TP、DTP 浓度季节差异不显著,TP 浓度只在 2009 年 6 月份时增高明显,DTP 浓度在 2009 年的 3、4 月份上升幅度较大。

大溪水库作为重要的饮用水源地,流域内的非点源污染突出,污染主要来自农业、养殖业、农村生活污

染及大气干湿沉降等,工业排放较少。一般来说,在年内,枯水期河流自净能力最小,水质最差;平水期居中;丰水期则自净能力最大,相应水质较好^[17-18]。根据江苏省常州市历年统计年鉴中的降水数据可知,冬春季为一般枯水期,夏季一般为丰水期(表 2)。枯水期,水流量小、流速低,水体自净能力比较弱,生活污水、养殖业排放的污水通过沟渠直接进入河道,导致各营养盐浓度升高;此外,春季是水稻田、菜地、竹林、板栗林追肥的时节,施肥(以氮肥为主)后的降雨过程也使大量营养盐随地表径流流失,也是造成营养盐浓度偏高的原因。丰水期期间,土壤侵蚀和雨水的冲刷加快了各形态营养盐的流失,尤其是氮素的流失较为严重,铵和硝酸盐在水中溶度都很大,铵离子因带正电荷,易被带负电的土壤胶体表面所吸附,硝酸盐带负电荷,是最易被淋洗的氮形态,大量 NO₃-N 随地表径流或下渗到地下水较为迅速地进入水体。

在春、夏季,由于流域内人类活动(休闲娱乐和农业生产)的加剧,水体无机氮浓度比秋、冬季明显升高^[19]。NH₄⁺-N 的浓度季节变化相对滞后一些,这可能是由于秋冬季节的低温对氨挥发和硝化反应的抑制,使 NH₄⁺-N 的浓度高于春夏。白晓华在太湖山地强降雨事件研究中也提出:强暴雨期,地面水体中的氨氮均维持在一个较小的浓度,而硝态氮浓度要相对高出一个量级^[20]。非点源无机氮的径流负荷主要是硝态氮,且流失量随施肥量的增加而增加^[21]。土壤磷素向径流中的扩散速率较慢,磷素进入土壤后,易被固定,受降水径流影响较小;在酸性土壤中可溶性磷与铁、铝氧化物和水化氧化物、层状铝硅酸盐、碳酸钙以及

表 2 近 9 年(2000—2008 年)常州市月平均降水量

Table 2 The monthly mean rainfall of Changzhou in recent years(2000—2008)

月 份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
降雨量/mm	74.8	50.7	55.5	86.6	102.8	145.8	193.4	149.9	60.8	42.1	56.4	37.6

钙、铁、铝等发生沉淀反应和吸附反应。在 6 月上旬流域内出现暴雨冲刷事件,地表径流中颗粒态磷素浓度迅速增加时,出现了滞后的 TP 浓度峰。磷随地表径流的流失主要发生在 6—9 月降雨集中分布的梅雨和台风季节,降雨时间和施肥等农事活动的间隔长短在很大程度上决定了磷的年流失量,且暴雨冲刷事件流失的磷素占大部分^[22]。11、12 月份是冬油菜施用基肥和腊肥的时期,以土杂肥、人畜粪肥等有机肥为主,由于冬季温度较低,降水较少,气候干燥,各形态营养盐输移特征不剧烈。

3.2 大溪水库流域水质空间分异原因分析

流域是不同斑块构成的复杂的景观结构,营养盐在流域环境的迁移过程中,会受到环境介质(土壤、植被、水体、空气等)的稀释、吸附、吸收和转化等作用,使得随地表径流迁移的营养盐有所变化。景观布局是否合理,严重影响着营养盐的输出。傅伯杰等^[24]研究指出,从梁底到梁顶,坡耕地—草地—林地格局可以有效地保持水土和减少营养盐的输出。

大溪水库流域内的土地利用结构主要以林地、茶园、耕地和城镇占用地为主,通过解译的高分辨率遥感影像获得的该流域各种土地利用类型面积百分比(表 3),按照从坡面到河流的顺序,可以将大溪水库流域各子流域的土地利用结构大致划为林地—茶园—耕地—城镇用地—水体和林地—茶园—耕地—城镇用地—荒地—水体两种类型。城镇用地大多沿河湖分布,这种景观布局加重了营养盐的输出强度,尤其是农村生活污水排放的营养盐的输出。随着农家有机肥还田比例越来越低,加上农村生活污水处理设施相对滞后,农村生活污水不经处理直接排入水体中的比例越来越高。

表 3 大溪水库流域各子流域土地利用类型百分比(%)

Table 3 The percentage of land use types in the different sub-watershed of Daxi reservoir watershed(%)

流域	耕地	茶园	林地	草地	城镇用地	水体	荒地
洙漕河	33.1	11.2	34.5	7.7	2.8	5.1	5.1
临湖西	23.3	7.6	28.9	8.2	4.9	4.8	22.3
临湖东	28.4	7.2	38.3	4.0	5.0	5.9	11.3

通过对各形态营养盐输出水平的不同子流域之间显著性差异多重比较(表 4),发现临湖东岸流域,除 $\text{NO}_3\text{-N}$ 外,其他形态营养盐与另外两个流域均存在显著性差异,洙漕河流域和临湖西岸流域基本不存在显著性差异。临湖东岸的 TN、TP 的输出水平大多

表 4 不同子流域各形态营养盐浓度的显著性差异水平($\alpha=0.05$)

Table 4 The significant difference of various forms of nutrient concentrations between different sub-basins($\alpha=0.05$)

子流域	TN	DTN	TP	DTP	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
临湖东岸流域	a	a	a	a	a	a
洙漕河流域	b	a	b	b	b	a
临湖西岸流域	c	b	b	b	b	a

都高于临湖西岸和洙漕河流域,是大溪水库流域氮磷营养盐最主要的源,洙漕河流域水质有恶化趋势,临湖西岸环境污染较轻,水质相对较好。由表 3 可见,不同子流域的耕地、林地和水体等比例相近,荒地面积比例差异较大,这可能是营养盐输移空间特征差异的主要影响因素之一。临湖西岸的大部分撂荒地分布在沿湖岸,由于面积比例相对较大,且受人为活动影响较小,在取样点与农业用地之间若有植被缓冲带分隔开,能够有效地减少农田排水和地下水径流带来的非点源污染^[25-26];洙漕河流域的硝态氮输出水平最高,这可能是由于洙漕河集水流域空间跨度比较大,植被覆盖程度较好,氨态氮可在河流中转化为硝态氮造成的,这也证明了氨氮随径流流失浓度与植被覆盖度成反比的关系^[27];洙漕河流域植被覆盖面积较大,城镇用地比例相对较小,生活污水排放的营养盐相对较少。

4 结论

大溪水库流域的非点源污染突出,进入大溪水库流域的氮素主要以可溶性氮素为主,其中 DTN 占 TN 的 90.3%,硝态氮和氨态氮占 TN 比例分别为 30.4%和 13.7%;TP 的平均浓度为 $0.116 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中可溶性磷占 TP 的 44%,说明磷素主要以非溶解态磷素的形式输移。总体水质属于 IV 类,仍有恶化的趋势。

大溪水库流域的氮磷营养盐输移特征明显,流域内各形态营养盐随季节变化规律明显,TN、DTN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度随时间变化趋势基本一致, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 和 DTP 随时间变化轻缓且相对滞后。表现为由 2008 年夏季开始先降低至秋季最低,然后到冬季及 2009 年春季持续增加到最高值,然后到夏季又有所降低。而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度表现为从夏季到秋末,逐渐降低,在冬季变化比较轻缓,初春浓度急剧上升之后,浓度变化减缓,持续到夏末。这主要与当地的气候变化、农业活动以及各形态营养盐的物理化学性质密切联系。

大溪流域营养盐输移特征在不同子流域上差异显著,临湖东岸的污染程度明显大于临湖西岸和洙漕河流域,是流入大溪水库的各形态营养盐主要的源,

这与不同子流域的土地利用布局不同以及不同土地利用类型的面积比例有关,尤其是植被缓冲带和城镇用地的作用对营养盐输移特征影响较大。临湖东岸氮磷营养盐在6月份左右输出水平较高,应采取措施控制氮磷营养盐的流入湖泊,防止水体严重富营养化,出现大量藻类繁殖。

参考文献:

- [1] Maxted J T, Diebel M W, Zanden M J Vander. Landscape planning for agricultural non-point source pollution reduction II. Balancing watershed size, number of watersheds, and implementation effort[J]. *Environmental Management*, 2009, 43(1):60-68.
- [2] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3):193-202.
- QIN Bo-qiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3):193-202.
- [3] 杨桂山, 王德建. 太湖流域经济发展·水环境·水灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- YANG Gui-shan, WANG De-jian. Taihu Lake basin water environment·economic development·water hazards[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):559-568.
- [5] 屈冉. 土地利用和沉积物对富营养化的影响及控制对策[J]. 土壤通报, 2009, 40(4):968-971.
- QU Ran. The influence of land use and sediment on eutrophication and controlling countermeasures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):968-971.
- [6] 卜红梅, 王岑, 张全发, 等. 汉江上游金水河流域非点源污染及控制[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):33-43.
- BU Hong-mei, WANG Cen, ZHANG Quan-fa. Non-point source pollution and control in the Jinshui River basin of the upper Hanjiang River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):33-43.
- [7] Kunwar P S, Amrita M, Dinesh M. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River[J]. *Water Research*, 2004, 38(18):3980-3992.
- [8] Robert C F, Anthony C E, David H, et al. Water quality of Scottish Rivers: Spatial and temporal trends[J]. *The Science of The Total Environment*, 2001, 265(1-3):327-342.
- [9] 黄群芳, 张运林, 陈伟民, 等. 天目湖水文特征变化及其对上游湿地和湖泊生态环境的影响[J]. 湿地科学, 2007, 5(1):51-57.
- HUANG Qun-fang, ZHANG Yun-lin, CHEN Wei-min, et al. Variation of hydrological characteristics of Tianmu Lake and its effect on the Tianmu Lake wetland and ecological environment of the Tianmu Lake[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(1):51-57.
- [10] 赵新峰, 陈利顶, 杨丽荣, 等. 基于水流路径与景观单元相互作用的非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3):621-630.
- ZHAO Xin-feng, CHEN Li-ding, YANG Li-rong, et al. Modeling non-point pollution based on interactions between flow path and landscape units[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3):621-630.
- [11] Philippe Maillard, Nadia Antonia Pinheiro Santos. A spatial-statistical approach for modeling the effect of non-point source pollution on different water quality parameters in the Velhas River watershed-Brazil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86:158-170.
- [12] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学, 2009, 30(3):668-672.
- LI Zhao-fu, YANG Gui-shan, LI Heng-peng. Estimated nutrient export loads based on improved export coefficient model in Xitaoxi Watershed[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3):668-672.
- [13] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):534-540.
- JIAO Ping-jin, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):534-540.
- [14] 罗璇, 史志华, 尹炜, 等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(1):58-62.
- LUO Xuan, SHI Zhi-hua, YIN Wei, et al. Effects of land use structure on nitrogen export in Hujiashan watershed of Danjiangkou reservoir area, China[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(1):58-62.
- [15] 谢再稚. 油菜秸秆还田增肥改土效应的探讨[J]. 土壤, 1985(2):88-96.
- XIE Zai-zhi. The study on the effect of yield increase by returning rape straw to the fields for soil betterment[J]. *Soils*, 1985(2):88-96.
- [16] 王晓杰, 贾锁宝. 氮类指标对湖库水质评价结果的影响分析[J]. 江苏水利, 2009(5):35-38.
- WANG Xiao-jie, JIA Suo-bao. An analysis of nitrogen indicators effect on the results of the lake and reservoir water quality evaluation[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2009(5):35-38.
- [17] 贾海峰, 程声通, 丁建华, 等. 水库调度和营养物消减关系的探讨[J]. 环境科学, 2001, 22(4):104-107.
- JIA Hai-feng, CHENG Sheng-tong, DING Jian-hua, et al. Relationship between eutrophication control and reservoir operation[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(4):104-107.
- [18] Dhia Al Bakri, Sadequr Rahman, Lee Bowling. Sources and management of urban stormwater pollution in rural catchments, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356:299-311.
- [19] 李军, 刘丛强, 王仕禄, 等. 太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬、夏二季变化特征及其与富营养化的关系[J]. 地球与环境, 2005, 33(1):63-67.
- LI Jun, LIU Cong-qiang, WANG Shi-lu, et al. Seasonal variations in composition and distribution of nutrients in the water column of Taihu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(1):63-67.
- [20] 白晓华. 太湖山地强降雨事件中不同水体的氮磷负荷分析[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(4):71-74.
- BAI Xiao-hua. Nitrogen and phosphorus load analysis in different water bodies in intensive rainfall events in mountain areas of Taihu basin[J]. *Environmental Science Survey*, 2009, 28(4):71-74.
- [21] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1):16-18.

- WANG De-jian, LIN Jing-hui, XIA Li-zhong. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(01): 16-18.
- [22] 高 超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征 [J]. 环境科学学报, 2005, 25 (11): 1543-1549.
- GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1543-1549.
- [23] 王 孟, 邬红娟, 马经安, 等. 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, 2004, 13(5): 477-481.
- WANG Meng, WU Hong-juan, MA Jing-an, et al. Causes and characteristics of the eutrophication in large reservoirs in the Yangtze basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13 (5): 477-481.
- [24] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响: 以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 241-246.
- FU Bo-jie, CHEN Li-ding, MA Ke-ming. The effect of landuse change on the regional environment in the Yangjuan Gou catchment in the loess plateau of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 241-246.
- [25] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506-510.
- LI Jun-ran, CHEN Li-ding, GUO Xu-dong, et al. Effects of land use structure on non-point source pollution [J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 506-510.
- [26] Duchemin Marc, Hogue Richard. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in Southern Quebec[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(2): 85-97.
- [27] 宋泽芬, 王克勤, 杨云华, 等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 98-101.
- SONG Ze-fen, WANG Ke-qin, YANG Yun-hua, et al. Characteristics of non-point source pollution output of different lands utilization pattern in small watersheds in Jianshan River, Chengjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 98-101.