

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.024

太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响

陆昊^{1,2,3}, 杨柳燕^{2,3}, 杨明月^{2,3}, 张建华⁴, 吕学研⁵, 殷鹏⁶, 钱新^{2,3}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 2. 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023; 3. 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023; 4. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029; 5. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036; 6. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为探究环太湖河道入湖总氮和总磷通量的变化原因,分析了其与太湖流域上游降水量的相关性,并阐明了环太湖河道入湖氮磷的主要来源。结果表明:2010—2019年,太湖流域年平均降水量为1322 mm,较1986—2009年平均降水量增加15%,湖西区和浙西区年平均降水量分别为1263 mm和1552 mm;环太湖河道入湖总氮和总磷平均年通量分别为3.24万t和0.18万t,主要来源于湖西区和浙西区;太湖流域、湖西区、浙西区河道入湖总氮和总磷通量与相应区域年降水量之间均呈显著正相关关系,土地利用类型的差异使得湖西区河道入湖总氮和总磷通量随降水量增加的响应程度要强于浙西区;面广量大的城镇和农业面源污染是入湖氮磷的主要来源之一,降雨导致的部分雨污合流污水入河也是氮磷污染负荷增加的原因之一;湖西区和浙西区的降水量增加,尤其是强降水量增加,不仅会导致面源污染负荷增大,而且会导致太湖上游河网水系水力停留时间减少,降低水体自净能力,增大入湖总氮和总磷通量。

关键词:降水量;入湖通量;面源污染;氮;磷;太湖流域

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0174-08

Influence of rainfall in upper reaches of the Taihu Basin on inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake// LU Hao^{1,2,3}, YANG Liuyan^{2,3}, YANG Mingyue^{2,3}, ZHANG Jianhua⁴, LYU Xueyan⁵, YIN Peng⁶, QIAN Xin^{2,3} (1. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 5. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 6. Jiangsu Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to explore the reasons of changes in inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake, the correlations between the inflow fluxes and the rainfall in the upper reaches of the Taihu Basin were analyzed, and the main sources of total nitrogen and total phosphorus were clarified. Results showed that the average annual rainfall in the Taihu Basin was 1322 mm from 2010 to 2019, which was 15% higher than that from 1986 to 2009. From 2010 to 2019, the annual rainfall values in the Huxi and Zhexi sub-watersheds were 1263 mm and 1552 mm, respectively. From 2010 to 2019, the average annual inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake were 32400 t and 1800 t, respectively, which mainly originated from the Huxi and Zhexi sub-watersheds. Significant positive correlations were found between the inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake and the annual rainfall in the Taihu Basin, Huxi sub-watershed, and Zhexi sub-watershed. Due to the differences in land use, the responses of the inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus to the rainfall in the Huxi sub-watershed were greater than those in the Zhexi sub-watershed. The large amounts of urban and agricultural non-point source pollutants were the main sources of inflow nitrogen and phosphorus into Taihu Lake, and part of the combined rain and sewage into rivers was also one of the sources of the nitrogen and phosphorus pollution loads. The increase of rainfall, especially heavy rainfall in the Huxi and Zhexi sub-watersheds, not

基金项目:国家自然科学基金(41871082);江苏省水利厅课题(2019006);江苏省生态环境厅科研课题(2020019)

作者简介:陆昊(1992—),男,博士,主要从事水环境建模研究。E-mail:deafgreat@sina.com

通信作者:杨柳燕(1963—),男,教授,博士,主要从事湖泊生态学和生态修复研究。E-mail:yangly@nju.edu.cn

only increased the non-point source pollution loads, but also reduced the hydraulic retention time of the upper river network, leading to the decrease of the self-purification capacity of water bodies and the increase of the inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake.

Key words: rainfall; inflow flux; non-point source pollution; nitrogen; phosphorus; the Taihu Basin

太湖流域地处长江流域下游,流域面积 3.69 万 km²,地跨江苏、浙江、安徽、上海三省一市,是我国人口密度最大、经济最发达的地区之一。太湖流域属亚热带季风气候区,气候温和湿润,降雨充沛。太湖位于太湖流域的中心,是我国第三大淡水湖泊。太湖水面面积为 2 338 km²,平均水深约 1.9 m。太湖流域水网交错,河道密度高达 3.2 km/km²[1]。随着区域社会经济发展,人口密度增加,太湖流域土地开发强度增大,工农业、城镇和公共用地占比上升,导致入湖氮磷数量超过环境容量,底泥营养物质浓度升高[2],湖体总磷浓度居高不下[3],同时在盛行风向的定常风下,太湖湖区出现众多大小不一的环流,污染物容易积聚[4],为太湖蓝藻水华频繁暴发提供了条件。因此,探索环太湖河道入湖总氮和总磷通量变化及其影响因素具有重要的现实意义。

降雨对进入太湖流域河道的氮磷负荷有着重要影响。陈洁等[5]分析了不同降雨强度下大浦河流量和营养盐负荷的变化,发现入湖河道流量对降雨强度的响应具有滞后性,虽然河道水体总氮和总磷浓度无明显差异,但不同降雨强度下总氮和总磷的日负荷存在显著差异,降雨强度增加,营养盐日负荷增加。张婷等[6]研究发现,流域丰水年的非点源氮磷负荷为枯水年非点源氮磷负荷的 2 倍以上。Carpenter 等[7]通过观测与模拟估算发现,强降雨对 Mendota 湖的入湖磷通量影响显著,强降雨带入湖的总磷通量约占全年入湖磷通量的 75%。近年来,太湖流域强降雨频次不断增加[8],对河道入湖总氮和总磷通量产生了影响。然而,在太湖流域这样的复杂河网区,从降雨、径流和氮磷迁移转化等一系列生物地球化学循环过程考虑,基于现场观测模拟分析太湖流域氮磷输移转化过程比较困难。本文根据环太湖入湖河道的水质和水量计算河道入湖总氮和总磷通量,探索太湖流域年降水量与河道入湖总氮和总磷通量之间的关系,旨在帮助识别太湖入湖总氮和总磷通量的主要来源,解析与反推太湖入湖总氮和总磷的来源和输入途径,以期为区域综合治理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据收集

太湖流域根据水系特征分为 7 个片区(图 1),

出入湖河流有 228 条,主要的入湖河流位于湖西区 and 浙西区。为了分析太湖流域上游降水量与河道入湖总氮和总磷通量的关系,从中国气象数据网收集了 2010—2019 年太湖流域降水量数据,从太湖网和《太湖流域水情年报》收集了 2010—2019 年太湖入湖水量数据,从环境监测部门获取了环太湖河道入湖总氮和总磷浓度数据。

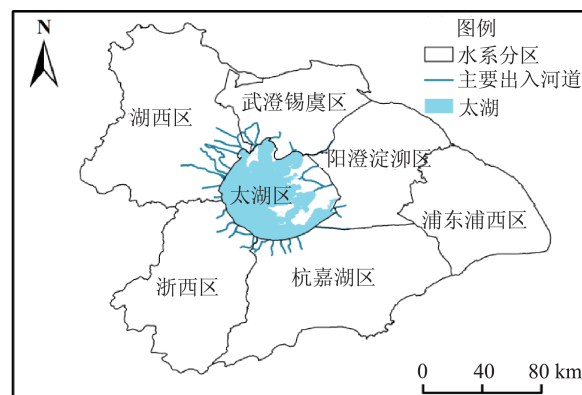


图 1 太湖流域分区

Fig. 1 Division of sub-watersheds in the Taihu Basin

1.2 环太湖河道入湖总氮和总磷通量计算

利用环太湖河道水体总氮和总磷浓度与河道月入湖水量计算环太湖河道入湖总氮和总磷通量:

$$W = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n Q_{ij} c_{ij} \quad (1)$$

式中: W 为环太湖河道年入湖总氮或总磷通量; Q_{ij} 为环太湖第 i 条入湖河道 j 月入湖水量; c_{ij} 为环太湖第 i 条入湖河道 j 月总氮或总磷浓度; n 为主要入湖河道数。逐月估算出每条主要入湖河道总氮和总磷的入湖通量后,累加可以得到环太湖河道的年入湖总氮和总磷通量。

环太湖水文测量站分为基点站和巡测站,控制了环太湖 95% 以上的进出水流量。根据基点站和巡测站流量相关性分析结果,可由基点站流量推算各个巡测站的流量[9]。在计算环太湖河道入湖氮磷通量时,无监测数据河道的水质数据由相近河道的水质数据替代。

2 结果与分析

2.1 太湖流域降水量年际变化

太湖流域降水量的大小决定了太湖入湖水量和 水位涨落[10],从而影响太湖流域水文过程、水资源

量和水生态环境质量。2010—2019 年,太湖流域年平均降水量为 1 322 mm,较 1986—2009 年增加 15%。其中,2013 年太湖流域年降水量最少,只有 1 067 mm,而 2016 年太湖流域年降水量最多,为 1 792 mm,2019 年太湖流域年降水量为 1 271 mm(图 2)。2010—2019 年,湖西区平均年降水量为 1 263 mm,较 1986—2009 年增加 3%。其中,2013 年湖西区年降水量最少,只有 928 mm,而 2016 年湖西区年降水量最多,为 2 026 mm,2019 年湖西区年降水量较少,为 952 mm。2010—2019 年,浙西区年均降水量为 1 552 mm,较 1986—2009 年增加 10%。2013 年浙西区年降水量最少,为 1 297 mm,而 2016 年浙西区降水量最多,为 2 035 mm,2019 年浙西区年降水量较多,为 1 628 mm。因此,2010—2019 年,太湖流域不同年份降水量变化较大,湖西区年降水量均小于同期浙西区年降水量,其中 2019 年差值最大,湖西区年降水量比浙西区少了 676 mm。

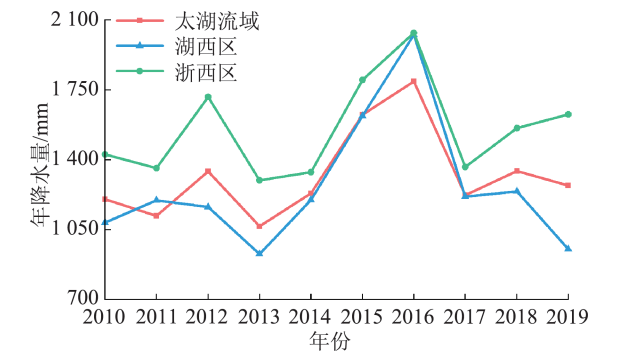


图 2 2010—2019 年太湖流域年降水量
Fig. 2 Annual rainfall in the Taihu Basin from 2010 to 2019

2.2 太湖入湖水量年际变化

太湖环湖岸线全长 393.2 km,进出河港纵横,河口众多。根据测算,环太湖河道入湖水量主要包括 3 部分:①流域天然降雨,为主要部分,占入湖水量的 70%~80%;②区域引水,包括自主引水和“引江济太”调水,占入湖水量的 20%~30%;③区域工农业生产和生活排水,主要是从长江取水后就地排水,占比较小。2010—2019 年,太湖年均入湖水量为 11.6 km³,其中,2013 年入湖水量最少,为 8.9 km³,2016 年入湖水量最多,为 16 km³,2019 年入湖水量为 12.6 km³(图 3)。

湖西区 and 浙西区为太湖上游地区。2010—2019 年,湖西区 and 浙西区入湖水量平均占太湖入湖水量的 85%(图 3)。湖西区是太湖入湖水量最多的片区,1986—2009 年湖西区入湖水量平均占太湖入湖水量的 48%,而 2010—2019 年湖西区入湖水量平均占太湖入湖水量的 65%,比例有所上升。1986—2009 年浙西区入湖水量平均占太湖入湖水量的

23%,而 2010—2019 年,浙西区入湖水量平均占太湖入湖水量的 20%,比例略有下降。2019 年,浙西区入湖水量的占比显著增加。杭嘉湖区、阳澄淀泖区和武澄锡虞区的河道以出湖为主^[11],2010—2019 年,其他片区入湖水量平均只占太湖入湖水量的 15%(图 3)。因此,太湖入湖水量主要来自湖西区和浙西区,湖西区和浙西区是入湖氮磷的主要来源。

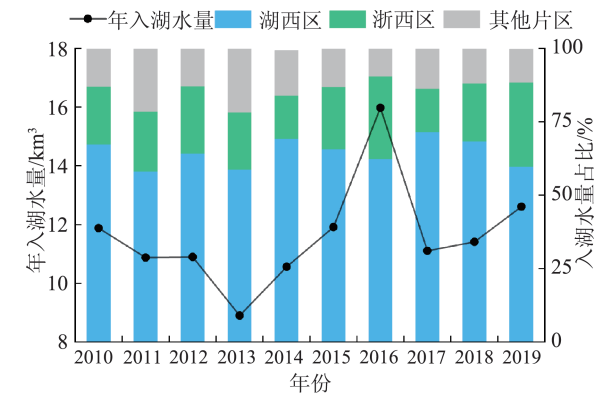


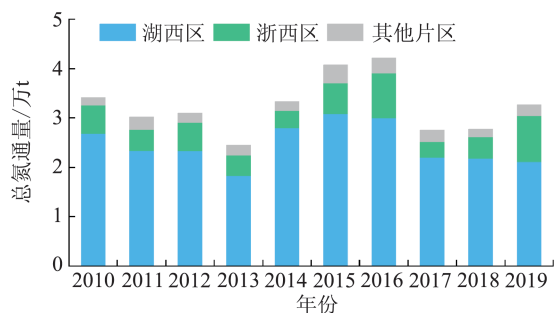
图 3 2010—2019 年太湖年入湖水量和不同
片区入湖水量占比
Fig. 3 Annual inflow into Taihu Lake and proportion
of inflow of different sub-watersheds into Taihu Lake
from 2010 to 2019

2.3 环太湖河道入湖总氮和总磷通量

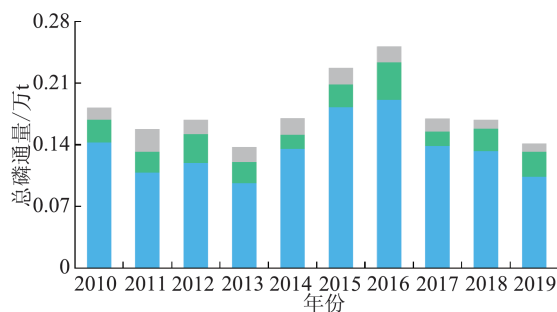
根据环太湖河道流量及水质数据,2010—2019 年,环太湖河道年均入湖总氮和总磷通量分别为 3.24 万 t 和 0.18 万 t。其中,2013 年环太湖河道入湖总氮和总磷通量最小,分别为 2.45 万 t 和 0.14 万 t;2016 年最大,分别为 4.22 万 t 和 0.25 万 t;2019 年环太湖河道入湖总氮和总磷通量分别为 3.27 万 t 和 0.14 万 t(图 4)。

2010—2019 年,环太湖河道入湖氮磷主要来源于湖西区和浙西区,两个湖区河道入湖总氮和总磷通量占全湖的 90% 以上(图 4)。湖西区是环太湖河道入湖氮磷最主要的来源区,2010—2019 年,湖西区河道年均入湖总氮和总磷通量分别为 2.45 万 t 和 0.14 万 t,分别占环太湖河道年均入湖总氮和总磷通量的 77% 和 76%。湖西区 2013 年河道入湖总氮和总磷通量最小,分别为 1.82 万 t 和 0.10 万 t;2016 年最大,分别为 3.08 万 t 和 0.19 万 t。浙西区 2017 年河道入湖总氮和总磷通量最小,分别为 0.31 万 t 和 0.02 万 t;2019 年最大,分别为 0.94 万 t 和 0.04 万 t。因此,太湖流域河道入湖总氮和总磷通量变化较大,并不随太湖流域污染治理力度增强而梯度下降。

环太湖主要出入湖河道的总磷和总氮浓度监测频次为每月 1 次,为瞬时值,忽略了河道总氮和总磷



(a) 总氮入湖通量



(b) 总磷入湖通量

图4 2010—2019年太湖不同片区河道年入湖总氮和总磷通量

Fig. 4 Annual inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus of different sub-watersheds into Taihu Lake from 2010 to 2019

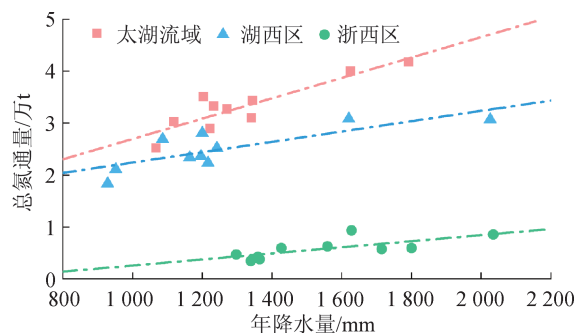
浓度在月内的变化,这会影响环太湖河道入湖氮和磷通量的估算精度^[12]。此外,环太湖河道存在往复流^[13-14],由于河道入湖与出湖时水体总氮和总磷浓度之间存在差异,使用每月1次的总氮和总磷浓度数据也会给太湖河道入湖总氮和总磷通量的计算带来系统误差。同时,环境监测部门未监测的部分出入湖河道的总氮和总磷浓度,使用邻近河道的总氮和总磷浓度作为替代,也会给环太湖河道入湖总氮和总磷通量的计算带来一定的误差。本文采用逐月累计得到的入湖总氮和总磷通量与水利部太湖流域管理局公布的《太湖健康状况报告》相比,误差较小,因此能有效反映环太湖河道入湖氮磷通量。

3 讨论

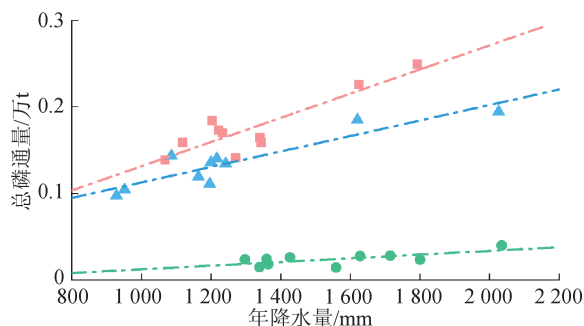
3.1 入湖总氮和总磷通量与降水量的关系

太湖流域入湖水量变化受降水量影响,降水量大的年份入湖水量也大。2015和2016年是2010—2019年间太湖流域降雨最多的两年,导致入湖水量也非常高,而2015和2016年恰好也是2010—2019年间环太湖河道入湖氮和磷通量最高的两年。2010—2019年,太湖流域、湖西区和浙西区河道入湖总氮和总磷通量均与降水量呈显著正相关关系(显著性水平 $p < 0.05$)(图5)。浙西区入湖水量主要来源于区域降雨,其入湖水量变化主要与降雨有

关^[15],因此,降水量直接影响浙西区河道入湖总氮和总磷通量的变化。湖西区入湖水量的来源除了区域降雨外,还包括谏壁闸等沿长江口门引水^[16]。虽然2010—2019年湖西区沿长江口门平均年引水量达 2.29 km^3 ,为湖西区平均年入湖水量的30%,但是湖西区入湖氮和磷通量的变化与沿江口门引长江水量之间无显著相关性($p > 0.05$,图6),因此,降雨仍是湖西区入湖总氮和总磷通量变化的主要影响因素。



(a) 年降水量与河道入湖总氮通量关系



(b) 年降水量与河道入湖总磷通量关系

图5 2010—2019年太湖流域年降水量与河道入湖总氮和总磷通量关系

Fig. 5 Relationships between annual rainfall and inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus of the Taihu Basin from 2010 to 2019

湖西区和浙西区河道入湖总氮通量随降水量增加的响应系数分别为 9.96 t/mm 和 5.86 t/mm ,总磷通量的响应系数分别为 0.895 t/mm 和 0.213 t/mm (图5),湖西区河道入湖总氮和总磷通量随降水量增加的响应系数分别为浙西区的1.7倍和4.2倍。已有研究结果显示^[17],浙西区土地利用类型以林地和耕地为主,面积占比分别为62%和22%,氮磷主要来自林地和农业面源污染。湖西区土地利用类型以城市建设用地和耕地为主,面积占比分别为22%和50%^[18]。降水量增加虽然会导致区域氮磷湿沉降量升高,但是从环湖湿沉降监测结果来看,2017年降雨中总氮、总磷平均质量浓度分别为 3.06 mg/L 和 0.08 mg/L ^[19],降雨中总氮浓度略低于河道总氮浓度多年平均值,总磷浓度显著低于河道总磷浓度

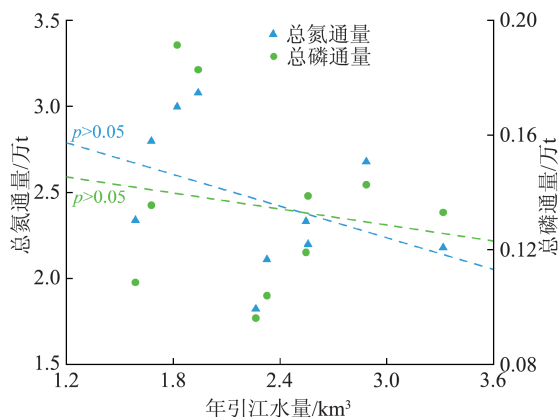


图6 2010—2019年湖西区年引江水量与入湖总氮和总磷通量关系

Fig. 6 Relationships between annual volume of water diverted from Yangtze River in Huxi sub-watershed and inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake from 2010 to 2019

多年平均值,因此,湿沉降不是造成河道入湖总氮和总磷通量与降水量之间强相关的原因。根据WorldPop公布的人口数据^[20]计算,湖西区和浙西区人口密度分别约为998人/km²和444人/km²,尽管研究表明太湖流域人口密度和城镇与流域污染负荷存在相关性^[21],但是工业和城镇点源排放的总氮和总磷通量与降水量之间不呈正相关关系,工业和城镇点源排放也不是导致入湖总氮和总磷通量与降水量之间呈显著正相关的原因。综上,湖西区城镇和农村面源高强度排放是导致河道入湖总氮和总磷通量与降水量之间强响应的主要原因。

3.2 高强度降雨对河道入湖总氮和总磷通量的影响

由于存在降雨初损^[22-23],降雨强度较低时,面源氮磷负荷增加并不明显。而在高强度降雨时,太湖平原河网地区河道各形态氮和磷浓度有急剧的升高趋势^[24-25],高强度降雨使进入太湖上游河网区的总氮和总磷负荷呈现脉冲式增加,而这种情况下的总氮和总磷进入河道后不易得到净化。与此同时,太湖流域高强度降雨导致入太湖水量大,河道入湖总氮和总磷通量也变大。以日降水量达到25 mm及以上视为高强度降雨进行统计,2010—2019年,湖西区和浙西区年高强度降水量占年降水量比例与年降水量之间呈现正相关(图7)。2010—2019年中,2016年湖西区和浙西区年降水量最大,高强度降水量占年降水量的比例分别为63.4%和54.0%,导致河道入湖总氮和总磷通量大增。此外,2010—2019年,湖西区和浙西区河道入湖总氮和总磷通量与所在片区年高强度降水量之间也呈显著正相关($p < 0.05$,图8)。2019年,由于气候气象因素导致降雨

不均,浙西区山区降水量大增,入湖水量、入湖总氮和总磷通量也显著增加,因此,太湖流域高强度降雨增加了河道入湖总氮和总磷通量。

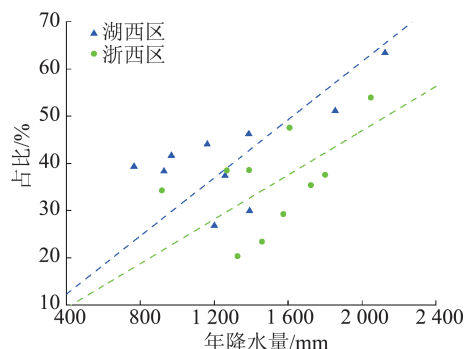
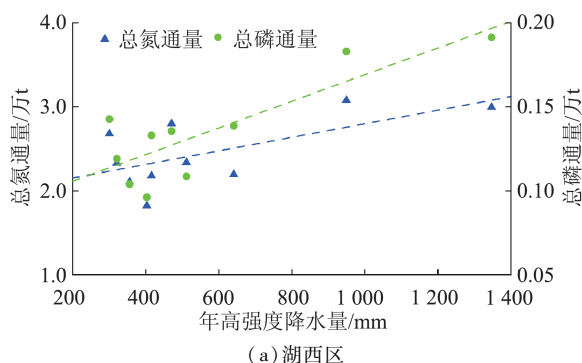
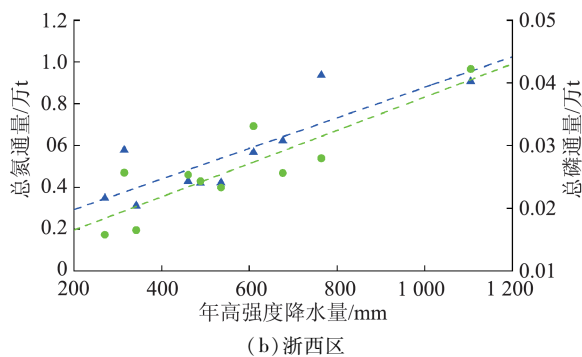


图7 2010—2019年湖西区和浙西区年高强度降水量占比与年降水量关系

Fig. 7 Relationships between ratio of annual high-intensity rainfall to annual rainfall in Huxi and Zhexi sub-watersheds from 2010 to 2019



(a) 湖西区



(b) 浙西区

图8 2010—2019年湖西区和浙西区入湖总氮和总磷通量与年高强度降水量关系

Fig. 8 Relationships between inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake and annual high-intensity rainfall in Huxi and Zhexi sub-watersheds from 2010 to 2019

3.3 降雨对入湖总氮和总磷通量的影响

太湖流域河道入湖氮磷污染来源多样,城镇生活、农业和工业等的氮磷排放是最主要的来源,同时大气沉降、长江引水也是入湖氮磷的来源。在太湖流域氮磷污染控制力度不断增大与引水调控的背景下,尽管河道水质有所改善^[26],但环太湖河道入湖

总氮和总磷通量未见明显减少。根据分析,长江引水与入湖氮磷通量变化无显著相关性。研究表明,2018 年与 2010 年相比,太湖流域降雨总氮浓度平均值相近,降雨总磷浓度平均值呈下降趋势^[27]。而 2014—2015 年太湖流域降雨中总氮和总磷质量浓度分别为 2.17 mg/L 和 0.036 mg/L,雨水总氮平均质量浓度比河道总氮平均质量浓度(3.47 mg/L)稍低,雨水总磷平均质量浓度明显低于河道总磷平均质量浓度(0.18 mg/L)^[28]。此外,多年来太湖流域城镇生活污水处理厂、工业园区污水处理厂以及工业行业重点企业污水处理设施进行了提标改造,点源污染防治成果显著,排入河道氮磷负荷明显下降^[29]。综合考虑以上因素,并结合降水量与河道入湖总氮和总磷通量的显著相关关系可以发现,太湖流域上游引水、大气干湿沉降与固定源排放不是影响环太湖河道入湖总氮和总磷通量变化的主要原因,农业、农村和城镇面源,包括部分降雨时雨污合流管的污水溢流,成为河道氮磷污染的主要来源^[29]。太湖流域降雨导致的水循环过程驱动了入湖氮磷迁移过程,由于太湖流域氮磷迁移过程复杂,除了大气沉降外,雨水携带陆源污染物进入河道,导致环太湖河道入湖总氮和总磷通量与降水量呈显著正相关。降雨主要通过以下几个方面影响环太湖河道入湖总氮和总磷通量的变化:

a. 降水量影响种植业氮磷流失量。种植业是太湖流域农业面源氮磷污染的重要来源。由于城市化进程的加剧,耕地面积虽然在不断减少,但是出于经济利益考虑,太湖流域许多稻田改为果园、菜地,茶园面积也不断扩大,2002—2017 年太湖地区果园和茶园面积分别增加了 2.852 万 hm^2 和 1.892 万 hm^2 ^[30]。由于果园、菜地和茶园单位面积氮磷施肥用量大,氮磷的地表径流流失量和地下渗漏流失量均明显高于稻田,虽然 2002—2017 年太湖流域种植业面积明显减少,但是磷流失量仅下降了 1.84%^[30]。此外,枯水期太湖流域的河流总磷浓度上升幅度较大,也表明目前农村和农业面源污染仍没有得到有效控制。一般情况下,降水量越大,氮磷径流流失量也越大,因此,发生高强度降雨时,太湖流域种植业氮磷流失量越多,农业面源输入河道的氮磷量就越多。

b. 降水量影响城镇面源污染入河量。城镇面源也是河流氮磷污染的重要来源之一。高强度降雨下,太湖流域城镇面源氮磷污染随降雨进入河道,同时由于部分雨污合流管道溢流,也会导致部分污水进入河道。孙中浩^[31]通过对宜兴市不同下垫面的降雨径流的研究发现,城区不同下垫面的降雨径流中总氮和总磷平均质量浓度分别为 1.99 ~ 10.93 mg/L 和

0.22 ~ 1.77 mg/L,降雨径流中总氮和总磷初始质量浓度分别超出《地表水环境质量标准》V 类水水质标准值的 1.0 ~ 5.5 倍和 1.1 ~ 5.9 倍。太湖流域高强度降水量越大,对城镇下垫面“清扫”作用越强,导致城镇雨水径流进入河道的氮磷负荷越高,对河道水质的不利影响越严重。

c. 降水量影响水系自净能力。太湖流域水网纵横,湖荡众多,整个流域湿地总面积约为 735 km^2 ,大于 0.5 km^2 的湖荡有 189 个,占太湖流域平原面积的 10.7%,但是,太湖流域河道以闸坝调控为主,湖西区与浙西区平原河网的连通性与其他片区相比较差^[32],因此,在降雨强度较小时,部分河水积存于圩区或断头浜中,但在降雨强度较大时,圩区与断头浜水通过闸泵或支流进入主要入湖河道,氮磷污染物也随之入湖。与此同时,高强度降雨导致太湖上游河网区水量增加,流速增大,也会使得沉积在河道中的氮磷污染物再悬浮^[33],河道两岸的侵蚀作用也更加明显,因冲刷、侵蚀进入河道的氮磷污染负荷也将增多,共同增加了河道水体中氮磷污染物的数量。有研究表明,较长水力停留时间的人工模拟河流对氮磷具有更高的去除率^[34],因此,太湖上游河网区高强度降水量的增加会导致河道和湖荡水体流速加快,水体水力停留时间变短,对氮磷自净能力下降,使得环太湖河道入湖总氮和总磷通量增加。

4 结 论

a. 2010—2019 年太湖流域年平均降水量为 1322 mm,较 1986—2009 年的年平均降水量增加 15%,其中湖西区 and 浙西区的年平均降水量分别为 1263 mm 和 1552 mm。2010—2019 年环太湖河道年均入湖总氮和总磷通量分别为 3.24 万 t 和 0.18 万 t,主要来自湖西区和浙西区。

b. 湖西区、浙西区河道入湖总氮和总磷通量与各片区年降水量之间均呈现显著正相关,年降水量越高,河道入湖总氮和总磷通量越大。由于湖西区城镇建设用地和耕地面积占比较浙西区高,湖西区河道入湖总氮和总磷通量对降水量的响应要强于浙西区。

c. 太湖流域上游湖西区和浙西区的年降水量越大,强降雨所占比例越高。降雨冲刷和携带是农业和城镇面源氮磷污染进入入湖河道的主要途径,农业和城镇面源污染是环太湖河道入湖总氮和总磷主要的来源。流域降水量的增加会缩短河道、湖荡水体水力停留时间,从而降低河网水系对氮磷的净化能力,导致环太湖河道入湖总氮和总磷通量居高不下。因此,应以农业和城镇等氮磷面源污染控制为

重点,同时加强太湖流域生态修复工程建设与汛期水利工程调度,有效降低河道入湖总氮和总磷通量。

参考文献:

- [1] ZHANG Y L, QIN B Q, ZHU G W, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4319-4331.
- [2] 毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))
- [3] 李蓓, 李勇涛, 蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(6): 506-513. (in Chinese))
- [4] 舒叶华, 高晨晨. 太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 121-127. (SHU Yehua, GAO Chenchen. Numerical simulation of wind-driven current and pollutant transport and diffusion in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 121-127. (in Chinese))
- [5] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4924-4931. (CHEN Jie, ZHU Guangwei, XU Hai, et al. Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu Catchment [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 4924-4931. (in Chinese))
- [6] 张婷, 高雅, 李建柱, 等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [7] CARPENTER S R, BOOTH E G, KUCHARIK C J, et al. Extreme daily loads: role in annual phosphorus input to a north temperate lake [J]. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(1): 71-79.
- [8] SHI K, ZHANG Y L, ZHOU Y Q, et al. Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: responses to nutrient enrichment and meteorological factors [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40326.
- [9] 许朋柱, 秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. *湖泊科学*, 2005, 4(3): 213-218. (XU Pengzhu, QIN Boqiang. 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, 4(3): 213-218. (in Chinese))
- [10] 章杭惠, 刘曙光, 季同德. 太湖流域降雨与太湖水位关系分析[J]. *水文*, 2021, 41(1): 85-89. (ZHANG Hanghui, LIU Shuguang, JI Tongde. Analysis on the relationship between rainfall of Taihu Basin and water level of Taihu Lake [J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(1): 85-89. (in Chinese))
- [11] 林鹏, 陈启慧, 李琼芳, 等. 环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 66-73. (LIN Peng, CHEN Qihui, LI Qiongfang, et al. Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 66-73. (in Chinese))
- [12] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I): 时段通量估算方法比较分析[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 1-4. (FU Guo. Analysis of the estimation methods for the river pollutant fluxes (I): comparison and analysis of the estimation methods of period fluxes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 1-4. (in Chinese))
- [13] 何锡君, 孙英军, 王贝, 等. 浙江省出入太湖河道水量水质及污染物通量变化(2007—2019年)[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1425-1435. (HE Xijun, SUN Yingjun, WANG Bei, et al. Variation of water quantity, quality and pollutant flux of inflow and outflow rivers to Lake Taihu in Zhejiang Province, 2007-2019 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1425-1435. (in Chinese))
- [14] 吕文, 杨惠, 杨金艳, 等. 环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1454-1462. (LYU Wen, YANG Hui, YANG Jinyan, et al. Relationship between water quality in Lake Taihu and pollutant fluxes of the rivers surrounding Lake Taihu in Jiangsu Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1454-1462. (in Chinese))
- [15] 闻余华, 王中雅, 董家根. 太湖入出湖水量变化情势及其原因初探[J]. *人民长江*, 2014, 45(1): 20-23. (WEN Yuhua, WANG Zhongya, DONG Jiagen. Preliminary study on changing condition for inflow and outflow of Taihu Lake [J]. *Yangtze River*, 2014, 45(1): 20-23. (in Chinese))
- [16] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰. 1990—2019 年江苏片区入太湖水量变化及原因分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 797-805. (XU Ruichen, PANG Yong, HU Zhibin. Analysis on the water quantity changes from Jiangsu

- section entering Lake Taihu from 1990 to 2019 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (3): 797-805. (in Chinese))
- [17] 田甲鸣,王延华,叶春,等.太湖流域土地利用方式演变及其对水体氮磷负荷的影响[J].南京师大学报(自然科学版),2020,43(2):63-69. (TIAN Jiaming, WANG Yanhua, YE Chun, et al. The evolution of land use types and its effects on the nitrogen and phosphorus loads in the Taihu Lake Basin [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2020, 43 (2): 63-69. (in Chinese))
- [18] LI G Y, LI L Z, KONG M. Multiple-scale analysis of water quality variations and their correlation with land use in highly urbanized Taihu Basin, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 106 (1): 218-224.
- [19] 张智渊.太湖大气湿沉降氮、磷营养盐特征及其对浮游植物的影响[D].北京:中国环境科学研究院,2018.
- [20] BONDARENKO M, KERR D, SORICHTTA A, et al. Census/projection-disaggregated Gridded Population Datasets for 189 Countries in 2020 using Built-Settlement Growth Model (BSGM) Outputs [DB/OL]. Southampton: WorldPop, University of Southampton, 2020[2022-06-23]. <https://hub.worldpop.org/geodata/listing?id=78>.
- [21] LIAN Huishua, LEI Qiuliang, ZHANG Xinyu, et al. Effects of anthropogenic activities on long-term changes of nitrogen budget in a plain river network region: a case study in the Taihu Basin [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1212-1220.
- [22] 陆隼,孔繁璠,张鸽,等.2009—2018年江苏省太湖西岸主要入湖河道水质变化趋势[J].江苏水利,2020(3):5-9. (LU Jun, KONG Fanfan, ZHANG Ge, et al. Water quality tendency of main inflow rivers entering the west bank of Taihu Lake in Jiangsu Province from 2009 to 2018 [J]. Jiangsu Water Resources, 2020 (3): 5-9. (in Chinese))
- [23] 庞琰瑾,袁增伟.平原河网区降雨径流污染负荷测算:以太湖流域望虞河西岸为例[J].湖泊科学,2021,33(2):439-448. (PANG Yanjin, YUAN Zengwei. Quantification of pollutants in rainfall-runoff in plain areas with dense river networks: a case study in the western bank of Wangyu River, Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (2): 439-448. (in Chinese))
- [24] 连心桥,朱广伟,杨文斌,等.强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J].环境科学,2020,41(11):4970-4980. (LIAN Xinqiao, ZHU Guangwei, YANG Wenbin, et al. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain [J]. Environmental Science, 2020, 41 (11): 4970-4980. (in Chinese))
- [25] GAO Y, ZHU B, YU G R, et al. Coupled effects of biogeochemical and hydrological processes on C, N, and P export during extreme rainfall events in a purple soil watershed in southwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 692-702.
- [26] 张伊佳,陈星,许钦,等.太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J].水资源保护,2020,36(5):79-86. (ZHANG Yijia, CHEN Xing, XU Qin, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (5): 79-86. (in Chinese))
- [27] 牛勇,牛远,王琳杰,等.2009—2018年太湖大气湿沉降氮磷特征对比研究[J].环境科学研究,2020,33(1):122-129. (NIU Yong, NIU Yuan, WANG Linjie, et al. Comparative study on nitrogen and phosphorus characteristics of atmospheric wet deposition in Lake Taihu from 2009 to 2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33 (1): 122-129. (in Chinese))
- [28] 邱敏.太湖氮磷大气沉降及水体自净模拟实验研究[D].广州:暨南大学,2017.
- [29] 童克难.“十年治太”成效与流域氮磷污染变化特征解析[N].中国环境报,2020-07-09(004).
- [30] 闵炬,纪荣婷,王霞,等.太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(8):1230-1238. (MIN Ju, JI Rongting, WANG Xia, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28 (8): 1230-1238. (in Chinese))
- [31] 孙中浩.太湖流域典型城市面源污染削减技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [32] 诸发文,陆志华,蔡梅,等.太湖流域平原河网区水系连通性评价[J].水利水运工程学报,2017(4):52-58. (ZHU Fawen, LU Zhihua, CAI Mei, et al. Evaluation of river network connectivity in plain area of Taihu Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017 (4): 52-58. (in Chinese))
- [33] 钟小燕,王船海,庾从蓉,等.流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究[J].环境科学学报,2017,37(8):2862-2869. (ZHONG Xiaoyan, WANG Chuanhai, YU Congrong, et al. Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (8): 2862-2869. (in Chinese))
- [34] 马小娜.狐尾藻作用下尾水深度处理的模拟河道实验[D].石家庄:河北科技大学,2016.

(收稿日期:2021-05-12 编辑:俞云利)