

2009—2018年太湖大气湿沉降氮磷特征对比研究

牛勇, 牛远, 王琳杰, 余辉*

中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012

摘要: 为了研究太湖2009—2018年大气湿沉降的时空变化特征,于2009年8月—2010年7月及2017年8月—2018年7月进行了两次环太湖大气湿沉降逐月调查,并从降水中 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 、湿沉降率及沉降通量三方面,对比分析了太湖大气湿沉降的时空变化特征.结果表明:①2009年8月—2010年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 平均值分别为3.170、0.077 mg/L;2017年8月—2018年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 平均值分别为3.160、0.056 mg/L;T检验结果表明,两次调查 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 污染水平差异显著,主要是由于2017年8月—2018年7月较高污染浓度降水事件的减少,全年降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 变异较小.②与2017年8月—2018年7月相比,2009年8月—2010年7月太湖TN、TP湿沉降率平均值分别下降33%和53%,且TN、TP湿沉降空间分布更均匀.③与2009年8月—2010年7月相比,2017年8月—2018年7月太湖流域大气TN、TP沉降通量分别为7641和131 t,分别下降30%、47%.研究显示,两次调查降水中 $\rho(\text{TN})$ 平均值均远高于水体富营养化阈值(0.2 mg/L),因此大气湿沉降中的营养盐对太湖富营养化的贡献不可忽视.

关键词: 太湖; 湿沉降; TN; TP

中图分类号: X524

文章编号: 1001-6929(2020)01-0122-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.07.26

Comparative Study on Nitrogen and Phosphorus Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Lake Taihu from 2009 to 2018

NIU Yong, NIU Yuan, WANG Linjie, YU Hui*

National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: In order to better show the characteristics of atmospheric wet deposition in the Lake Taihu Basin in the past ten years, based on the wet deposition investigation in Lake Taihu from August 2009 to July 2010 and from August 2017 to July 2018, variation trends of nitrogen and phosphorus in the wet deposition were analyzed from the three perspectives of precipitation TN, TP concentration, wet deposition rate and deposition flux. The results showed that: (1) The average concentration of TN and TP from August 2009 to July 2010 was 3.170 and 0.077 mg/L, and 3.160 and 0.056 mg/L from August 2017 to July 2018, respectively. The results of T test showed that the two annual TN and TP pollution levels were significantly different, mainly due to the decrease of high pollution concentration precipitation events from 2017 to 2018. The variation of annual precipitation in the TN and TP became smaller and tended to stabilize; (2) In the two wet deposition surveys, the average wet deposition rates of TN and TP from August 2017 to July 2018 decreased by 33% and 53%, respectively, compared with those from August 2009 to July 2010. The spatial distribution of TN and TP wet deposition in the Lake Taihu Basin from August 2017 to July 2018 tended to be stable. (3) From August 2017 to July 2018, the atmospheric wet deposition fluxes of TN and TP in the Lake Taihu Basin were 7641 and 131 t, respectively. Compared with the reported values from 2009 to 2010, TN deposition flux decreased by 30% and TP deposition flux decreased by 47%. In general, due to the reduction of high pollution concentration precipitation events from August 2017 to July 2018, the spatial distribution was more uniform, and the quality of precipitation water from August 2017 to July 2018 was better than that from August 2009 to July 2010. The studies show that the average concentration of TN in the two surveys was far higher than the value of eutrophication threshold (0.2 mg/L), so the nutrients from atmospheric deposition are a contributor to the eutrophication of Lake Taihu that cannot be ignored.

Keywords: Lake Taihu; wet deposition; TN; TP

收稿日期: 2018-11-08

修订日期: 2019-07-29

作者简介: 牛勇(1985-),男,山东泰安人,博士,主要从事湖泊环境研究,ny0626@outlook.com.

* 责任作者,余辉(1963-),女,湖南永州人,研究员,博士,主要从事湖泊环境研究,yuhui@craes.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41573108)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41573108)

从水体富营养化防治角度,大气沉降氮、磷相较于其他污染源,由于其相对贡献量较小而被忽视。但相关研究表明,当氮沉降通量在 $25 \times 10^2 \text{ mg/m}^2$ 以上时,生态系统就将处于氮饱和状态^[1],并加速土壤酸化和水体富营养化^[2]。根据国内外研究来看,大气沉降已经成为部分河口、海域及淡水湖泊营养盐输入的主要污染源^[3]。近年来,以雾霾为热点的大气环境问题的报道日益增多,使得大气沉降领域成为近几年研究热点之一^[4-6]。

太湖是国家确定的“三河三湖”水污染防治的重点湖泊之一,更是江苏省水污染防治的重中之重,太湖流域大气湿沉降 $\rho(\text{TN})$ 已超过太湖水体 2020 年规划目标值 (2.0 mg/L),这一不可控因素成为了科学确定太湖水质保护目标的重要问题。余辉等^[7]研究表明,太湖 TN 和 TP 的年湿沉降总量分别为同期河流入湖负荷的 18.6% 和 11.9%。TI 等^[8]研究表明,太湖流域 TN 沉降通量占湖体 TN 负荷的 33.3%。大气沉降是太湖流域氮、磷输入的重要途径,因此开展环太湖流域大气沉降特征调查是太湖流域污染源控制不可或缺的工作。

经过“十一五”“十二五”太湖流域水污染防治工作的推进,太湖水体富营养化问题得到初步遏制。但是太湖水体富营养化防治工作依然受到政府和学术界的广泛关注。其中,大气沉降作为湖体氮、磷输入的途径之一,其在太湖富营养化治理过程中的时空变化情况尚未明晰。由于监测点位、监测策略的不同,导致太湖大气沉降通量计算结果存在差异性^[9-10]。因此,为了能够更好地呈现“十一五”“十二五”期间太湖流域大气湿沉降的演变特征,该研究对比分析了 2009 年 8 月—2010 年 7 月和 2017 年 8 月—2018 年 7 月降水监测结果,以期对太湖流域大气沉降的演变提供一定的科学参考和数据积累。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

于 2009 年 8 月—2010 年 7 月和 2017 年 8 月—2018 年 7 月共开展了两次环太湖大气湿沉降调查。在环太湖周边的大浮南村、周铁镇、长兴县、湖州市、吴江市、苏州市以及西山等地布设了 9 个大气干湿沉降监测点,采样点基本上都设在太湖岸边村庄,周围没有明显的工业源污染。此外,为了提高不同区域污染控制的可比性,将 9 个点位划分为 5 个区。其中, S1、S2 为西部湖区, S3、S4 为南部湖区, S5、S6 为东部湖区, S7 为湖心区, S8、S9 为北部湖区。具体监测点位分布如图 1 所示。

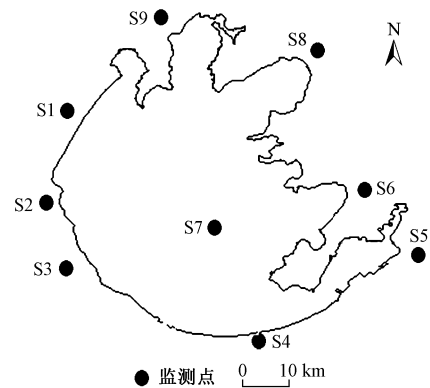


图 1 太湖流域大气湿沉降监测点位分布

Fig.1 Monitoring sites of precipitation in Lake Taihu

1.2 样品收集及分析测定方法

采用内径为 $\varphi 150 \text{ mm}$ 的标准玻璃降尘缸收集大气中的干湿沉降物。降尘缸放置在特制的高于地面 1.5 m 处的铁质采样架中。降尘缸口安设不锈钢网罩以防止鸟类等飞禽的活动干扰,每月采集降尘样品 1 次。不考虑降尘缸所收集液体可能发生的各种物理、化学、生物过程,测定液体的体积和 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$, 计算总沉降通量。降水样品收集参考 GB/T 13580.2—1992《大气降水样品的采集与保存标注》。湿沉降采样频次按实际降水周期及降水过程确定,每月不低于 1 次。 $\rho(\text{TN})$ 采用 GB 11894—1989《碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》测定; $\rho(\text{TP})$ 采用 GB 11893—1989《过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法》测定。测定分析设定 3 个平行样品,控制平行样品误差范围在 10% 以内。

1.3 湿沉降通量计算方法

降水中营养盐月、季、年平均质量浓度用雨量加权平均算得^[11], 计算公式:

$$C_{m,s,y} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (1)$$

式中: $C_{m,s,y}$ 为营养盐月、季、年均质量浓度, mg/L ; C_i 为第 i 次湿沉降中某元素的质量浓度, mg/L ; H_i 为第 i 次湿沉降的降水量, mm 。

月、季、年沉降率可用月、季、年雨量加权平均质量浓度与该月(季、年)总降水量的乘积求得, 计算公式:

$$F_{m,s,y} = K \times C_{m,s,y} \times R_{m,s,y} \quad (2)$$

式中: K 为换算系数, 该研究取值为 1, $\text{L} \cdot \text{kg}/(\text{mg} \cdot \text{mm} \cdot \text{km}^2)$; $F_{m,s,y}$ 为月、季、年沉降率, kg/km^2 ; $R_{m,s,y}$ 为月、季、年降水量, mm 。太湖年沉降通量用 9 个采样点的年沉降率平均值与太湖湖面面积(湖面面积以 2338 km^2 计)的乘积求得。

2 结果与讨论

2.1 降水量变化特征

表1为2009年8月—2010年7月和2017年8月—2018年7月降水量逐月统计结果. 由表1可见, 环太湖2009年8月—2010年7月北部湖区、南部湖区、东部湖区、西部湖区、湖心区年累积平均降水量为1 266.7 mm, 范围为1 062.1~1 551.2 mm; 2017年8

月—2018年7月北部湖区、南部湖区、东部湖区、西部湖区、湖心区年累积平均降水量为1 076.2 mm, 范围为997.5~1 138.8 mm, 降水量下降约200 mm, 相比2009年8月—2010年7月减少15%. 根据太湖健康状况报告显示^[16], 2009年、2010年和2017年太湖流域平均降水量分别为1 324、1 203和1 222 mm, 与常年基本持平.

表1 2009年8月—2010年7月和2017年8月—2018年7月太湖降水量逐月统计结果

Table 1 Monthly statistics of precipitation of the Lake Taihu from August 2009 to July 2010 and August 2017 to July 2018 mm

项目	2017年8月—2018年7月					2009年8月—2010年7月				
	北部湖区	东部湖区	湖心区	南部湖区	西部湖区	北部湖区	东部湖区	湖心区	南部湖区	西部湖区
8月	193.8	93.0	83.0	84.5	164.6	152.5	252.5	182.5	243.5	157.1
9月	202.8	164.5	125.0	109.5	165.3	88.9	100.0	55.7	71.2	91.3
10月	87.4	51.8	68.5	70.1	98.2	16.1	17.7	11.9	12.4	14.0
11月	31.0	47.5	50.5	61.5	33.6	89.3	103.8	122.4	178.6	110.8
12月	15.2	25.0	27.0	29.5	17.8	61.3	60.3	60.0	65.9	66.8
1月	88.8	85.4	97.1	113.2	103.1	32.3	45.9	42.9	45.1	32.7
2月	51.6	47.0	59.9	54.1	64.6	92.2	84.8	91.0	128.3	118.5
3月	65.7	54.8	64.3	76.2	55.2	127.8	157.4	166.4	267.6	147.1
4月	70.6	87.5	95.4	99.7	82.4	102.6	88.9	99.8	120.1	112.2
5月	96.7	131.3	115.3	125.4	119.4	57.1	63.2	76.0	68.9	65.0
6月	86.1	110.8	97.3	120.2	98.2	24.3	72.1	75.2	124.1	54.4
7月	134.7	129.5	114.2	148.5	136.4	217.7	192.9	244.8	225.5	282.3
年累计量	1 124.4	1 028.1	997.5	1 092.4	1 138.8	1 062.1	1 239.5	1 228.6	1 551.2	1 252.2

2.2 降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 变化特征

由图2可见, 2009年8月—2010年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 范围为0.10~7.90 mg/L, 平均值为3.17 mg/L, 变异系数为55%. 2017年8月—2018年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 范围为1.51~5.13 mg/L, 平均值为3.16 mg/L, 变异系数为25%. 两个年度对比发现, 降水中

$\rho(\text{TN})$ 平均值较为接近, 但 T 检验结果表明两个年度之间 $\rho(\text{TN})$ 存在显著差异性($P < 0.01$). 从降水中 $\rho(\text{TN})$ 分布上看, 2009年8月—2010年7月 $\rho(\text{TN})$ 范围波动较大, 2月全湖降水中 $\rho(\text{TN})$ 平均值高达6.8 mg/L, 3月降水中 $\rho(\text{TN})$ 平均值又低于1.0 mg/L, 表明2月存在较高强度的污染. 与2009年8

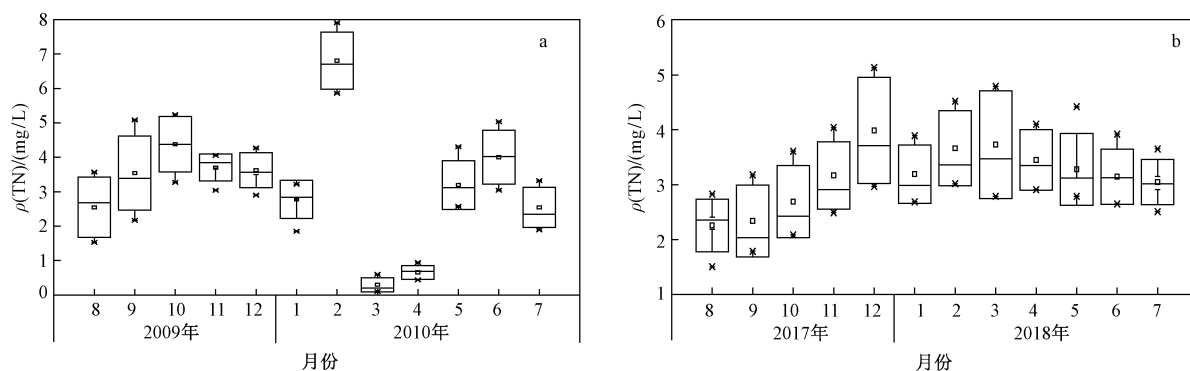


图2 太湖湿沉降中 $\rho(\text{TN})$ 逐月特征

Fig.2 Monthly characteristics of TN concentration in wet deposition of Lake Taihu

月—2010年7月相比,2017年8月—2018年7月 $\rho(\text{TN})$ 波动范围变异较小,表明全年较高强度的污染事件减少,降水中 $\rho(\text{TN})$ 趋于恒定。

由图3可见,2009年8月—2010年7月降水中 $\rho(\text{TP})$ 范围为0.009~0.480 mg/L,平均值为0.077 mg/L,变异系数为130%。2017年8月—2018年7月降水中 $\rho(\text{TP})$ 范围为0.024~0.088 mg/L,平均值为0.056 mg/L,变异系数为25%。2017年8月—2018年

7月 $\rho(\text{TP})$ 变化特征与 $\rho(\text{TN})$ 相似,2017年8月—2018年7月 $\rho(\text{TP})$ 变异较小,表明高强度污染事件的减少,全年降水中 $\rho(\text{TP})$ 趋于恒定。此外,2009年8月—2010年7月 $\rho(\text{TP})$ 范围波动较大,2月 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均出现较高的检测值。根据谢瑞加等^[12]对烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物成分分析,表明烟花爆竹的燃放可导致大气颗粒物增加^[13-15],致使降水中出现较高的营养盐浓度。

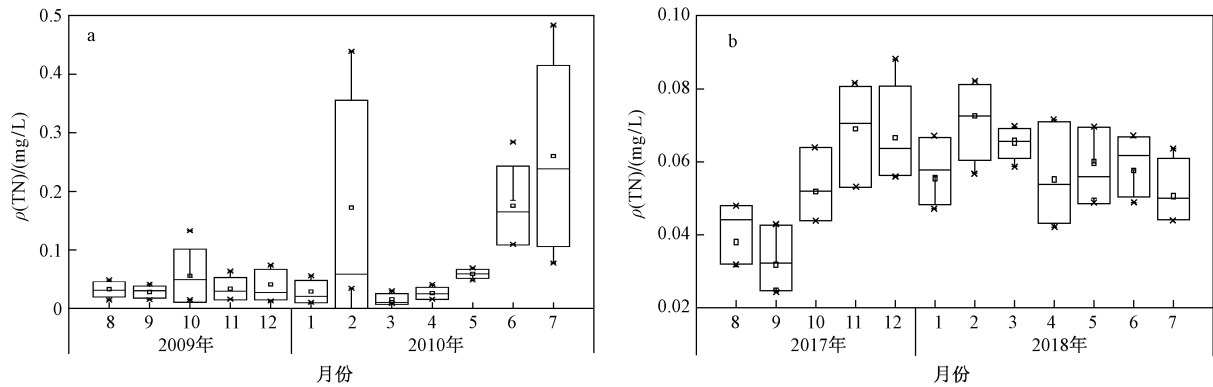


图3 环太湖湿沉降中 $\rho(\text{TP})$ 逐月特征

Fig.3 Monthly characteristics of TP concentration in wet deposition of Lake Taihu

为探讨大气降水中氮、磷对湖体水质胁迫程度,分别将2009年8月—2010年7月和2017年8月—2018年7月两次年度调查数据与2010年和2017年太湖水环境质量公报水质数据对比。2009年8月—2010年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 年均值分别为3.170和0.080 mg/L,相比于2009年湖体水质 $[\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 年均值分别为2.260、0.062 mg/L]分别高出40%和30%。2017年8月—2018年7月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 年均值分别为3.160和0.060 mg/L,其中,降水中 $\rho(\text{TP})$ 年均值低于2017年湖体水质,降水中 $\rho(\text{TN})$ 相比于2017年湖体水质 $[\rho(\text{TN})$ 为1.600 mg/L]高出98%。

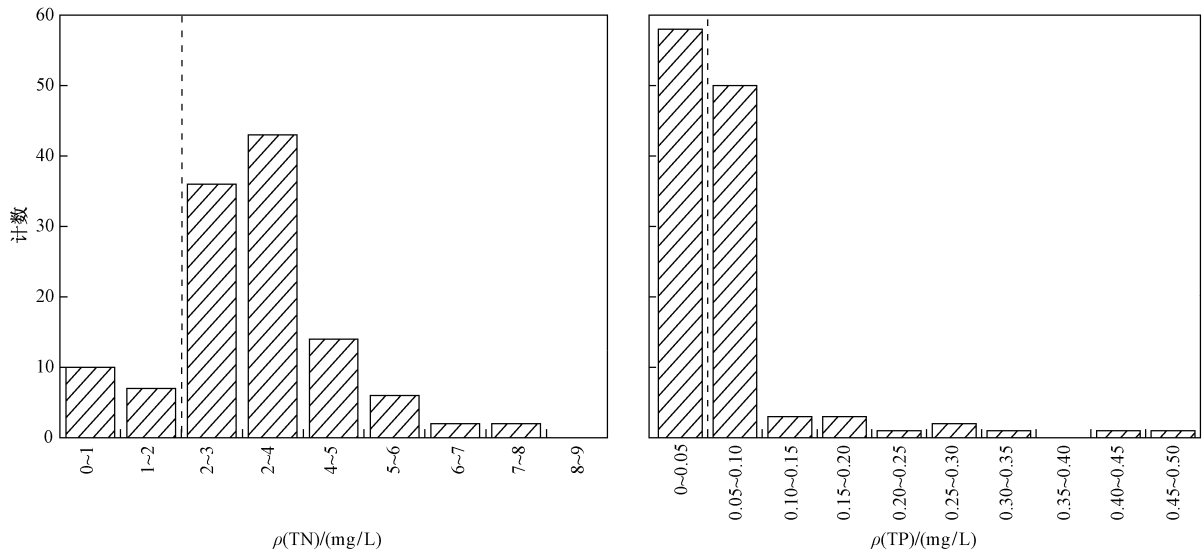
2020年太湖湖体水质 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 规划目标分别为2.00和0.05 mg/L^[16],将2009年8月—2010年7月和2017年8月—2018年7月两次降水调查数据绘制浓度频次直方图(见图4),与太湖湖体水质目标对比可知,60%降水事件中 $\rho(\text{TP})$ 高于太湖湖体水质规划目标,85%降水中 $\rho(\text{TN})$ 高于太湖湖体水质规划目标。两次调查降水中 $\rho(\text{TN})$ 平均值远高于水体富营养化阈值(0.2 mg/L)^[17],因此大气湿沉降中的营养盐对太湖富营养化的贡献不可忽视。

2.3 TN、TP湿沉降率时空演变特征

2009年8月—2010年7月TN湿沉降率范围为3 707~6 686 kg/(km²·a),平均值为4 864 kg/(km²·a);

TP湿沉降率范围为35~236 kg/(km²·a),平均值为118 kg/(km²·a)。2017年8月—2018年7月TN湿沉降率范围为2 756~3 966 kg/(km²·a),平均值为3 268 kg/(km²·a);TP湿沉降率范围为45~66 kg/(km²·a),平均值为56 kg/(km²·a)。与2009年8月—2010年7月相比,2017年8月—2018年7月TN、TP平均湿沉降率分别下降33%、53%,大气湿沉降作为太湖湖体TN、TP输入源具有改善的特征。

为了探讨太湖流域湿沉降率空间分布特征,将2009年8月—2010年7月和2017年8月—2018年7月TN、TP湿沉降率绘制空间差值图(见图5、6)。由图5、6可见,与2009年8月—2010年7月相比,2017年8月—2018年7月太湖TN、TP湿沉降率相对较低,且空间变异较小。2009年8月—2010年7月调查结果显示,TN湿沉降率峰值出现在太湖南部地区,TP湿沉降率峰值出现在太湖北部地区;2017年8月—2018年7月调查结果显示,TN湿沉降率峰值出现在太湖北部地区,TP湿沉降率峰值出现在太湖西南地区。两个年度TN、TP湿沉降率在空间分布具有一定相反趋势。由于磷循环缺少气态循环过程,而且风对颗粒物质量浓度影响大于对气体浓度的影响^[18],因此风的驱动下将改变氮、磷进入湖体的途径和区域。太湖TP以干沉降为主,TN以湿沉降为主^[7,19-24],该研究也一定程度上证实了这一推论。再



注：虚线为湖体水质规划目标.

图 4 太湖湿沉降中 $\rho(TN)$ 、 $\rho(TP)$ 累积频率特征

Fig.4 Frequency characteristics of N and P concentration in the wet deposition of Lake Taihu

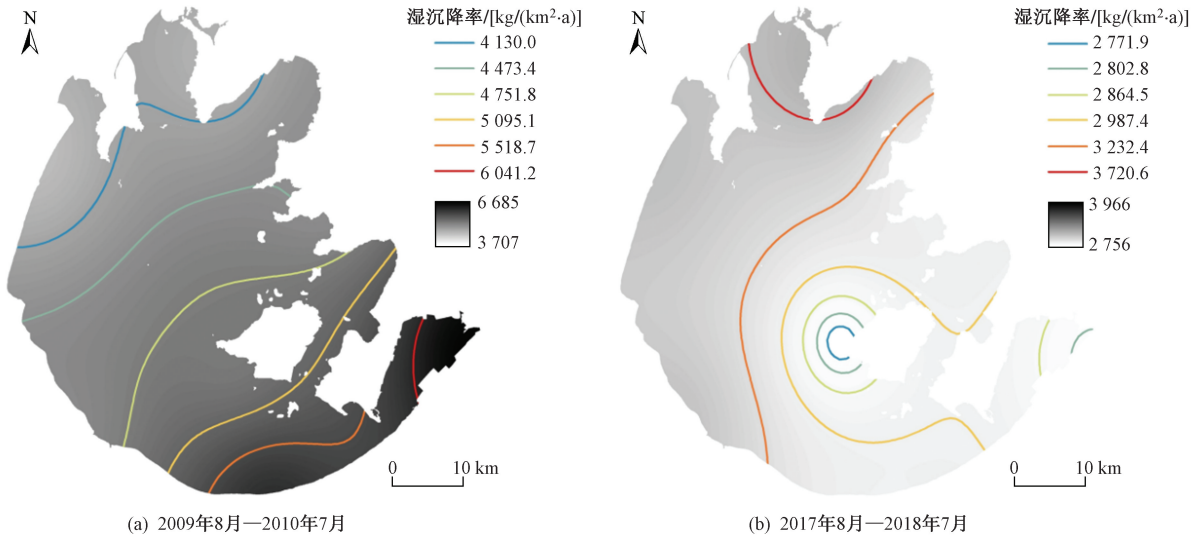


图 5 太湖 TN 湿沉降率空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of TN of wet deposition rates (WDR) in Lake Taihu

者,Janhäll 等^[25]在综述城市颗粒物污染与城市植被关系中,阐述了空气湿度的变化对于大气沉降具有显著的影响.太湖 TN、TP 湿沉率逐次降低的空间分布特征是否由于湿度导致,还需进一步规划调查方案进行论证.

2.4 TN、TP 湿沉降通量演变趋势

以太湖湖面面积 2 338 km² 计,采用 2017 年 8 月—2018 年 7 月监测的雨水中 TN、TP 沉降率平均值估算其通过降水输入太湖的负荷量,结果如表 2 所示.由表 2 可见,2017 年 8 月—2018 年 7 月太湖流域大气 TN、TP 湿沉降通量分别为 7 641 和 131 t.大气湿沉降输入太湖的 TN、TP 通量呈现下降趋势;与

2009 年 8 月—2010 年 7 月相比,大气湿沉降中 TN、TP 的年沉降总量分别为 10 868 和 247 t,分别下降 30%、47%,与 2002—2003 年研究结果接近.

根据大气湿沉降通量公式可知,沉降通量与降水量和质量浓度相关.从降水量方面分析,2009 年 8 月—2010 年 7 月研究环湖降水量,北部湖区、南部湖区、东部湖区、西部湖区以及湖心区 5 个分区累计平均降水量为 1 266.7 mm,2017 年 8 月—2018 年 7 月北部湖区、南部湖区、东部湖区、西部湖区以及湖心区 5 个分区累计降水量为 1 076 mm.降水量下降约 200 mm,相比 2009 年 8 月—2010 年 7 月减少 15%.此外,相关研究^[18]表明,不同降水类型对于 $\rho(TN)$ 、

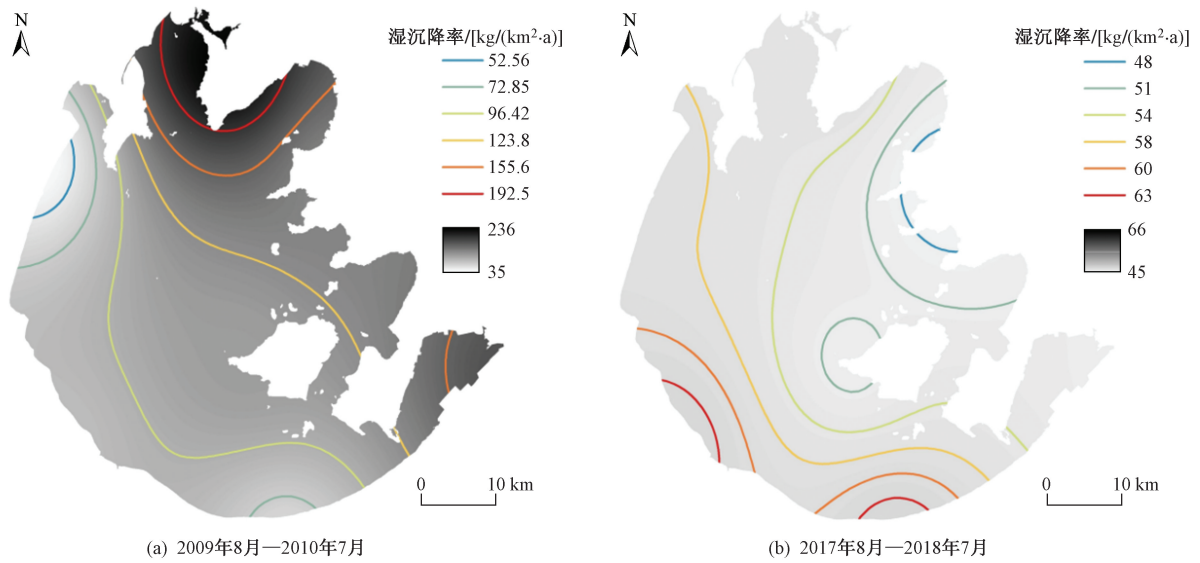


图 6 太湖 TP 湿沉降率空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution of TP of wet deposition rates (WDR) in Lake Taihu

表 2 太湖 TN 和 TP 大气湿沉降历史特征

Table 2 Historical characteristics of TN and TP of wet deposition in Lake Taihu

时间	湿沉降通量/t		数据来源
	TN	TP	
1987—1988 年	2 527	55	文献[26]
2002—2003 年	7 852	203	文献[5]
2011 年	13 150	318	文献[34]
2014 年	3 907	61.77	文献[7]
2009—2010 年	10 868	247	该研究
2017—2018 年	7 641	131	该研究

$\rho(\text{TP})$ 影响也较为显著,一般小于 10 mm 的降水以及降水初期 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 相对较高。2017 年 9 月 24 日,江苏省特大暴雨致使省内 20 多个站点降水量均超过 9 月下旬历史极值。虽然,从温度、湿度、气压、气团来源等角度开展了诸多气象要素气溶胶污染浓度和组成影响的研究^[26-30],但极端气象条件对于年度间沉降通量变化也有一定的影响作用。

从降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 分析,2009 年 8 月—2010 年 7 月与 2017 年 8 月—2018 年 7 月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 平均值比较 (T 检验),差异性显著 ($P < 0.01$)。结合两个年度 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 平均值可知,2017—2018 年降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 相比于 2009 年 8 月—2010 年 7 月显著降低。大气降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 主要受区域污染源的影响^[31-35]。自 2007 年 4 月底,太湖梅梁湖蓝藻水华大规模集中暴发,引发无锡供水危机事件后,太湖流域大力推进产业结构调整

和升级,对印染、化工、医药、电镀、制革等 6 个重点行业实行“关、停、并、转”措施,以加快流域清洁水平。朱威等^[36]调查到太湖流域累计实施工业企业提标改造 2 100 家、关闭重污染化工企业 5 300 家、关停不达标排放企业 1 000 家、实施清洁生产审核企业 4 900 家,以及取缔、关停和迁移畜禽养殖场 1 800 多处。因此,流域污染源得到有效整治,对于区域大气质量以及降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 水平均具有一定的改善作用。

3 结论

a) 2009 年 8 月—2010 年 7 月降水中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 0.10~7.90 mg/L,平均值为 3.17 mg/L,变异系数为 55%。 $\rho(\text{TP})$ 范围为 0.009~0.480 mg/L,平均值为 0.077 mg/L,变异系数为 130%。2017 年 8 月—2018 年 7 月调查降水中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 1.51~5.13 mg/L,平均值为 3.16 mg/L,变异系数为 25%。 $\rho(\text{TP})$ 范围为 0.024~0.088 mg/L,平均值为 0.056 mg/L,变异系数为 25%。2009 年 8 月—2010 年 7 月与 2017 年 8 月—2018 年 7 月降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 平均值比较 (T 检验),差异性显著 ($P < 0.01$)。结合两个年度降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 变异系数,表明较高强度的污染释放情况减少,降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 全年趋于稳定。

b) 2009 年 8 月—2010 年 7 月 TN 湿沉降率平均值为 4 864 kg/(km²·a),TP 湿沉降率平均值为 118 kg/(km²·a)。2017 年 8 月—2018 年 7 月 TN 湿沉降率平均值为 3 268 kg/(km²·a),TP 湿沉降率平均值为 56 kg/(km²·a)。与 2009 年 8 月—2010 年 7 月相比,2017 年 8 月—2018 年 7 月 TN、TP 湿沉降率平均

值分别下降33%、53%。在空间分布特征上,两次调查结果相比,2017年8月—2018年7月太湖TN、TP湿沉降率相对较低,且空间变异小,表明太湖流域TN、TP湿沉降空间分布趋于均匀。

c) 2017年8月—2018年7月太湖流域大气TN、TP湿沉降通量分别为7 641和131 t,与2009年8月—2010年7月相比,TN、TP沉积通量分别下降30%、47%。

参考文献(References):

- [1] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(4): 395-402.
FAN Houbao, HUANG Yuzi. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(4): 395-402.
- [2] HEIL J, VERECKEN H, BRUGGEMANN N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil [J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(1): 23-39.
- [3] JICKELLS T D, BUITENHUIS E, ALTIERI K, *et al.* A reevaluation of the magnitude and impacts of anthropogenic atmospheric nitrogen inputs on the ocean [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2017, 31(2): 289-305.
- [4] WANG G, ZHANG R, GOMEZ M E, *et al.* Persistent sulfate formation from London fog to Chinese haze [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(48): 13630-13635.
- [5] YU Shaocai, LI Pengfei, WANG Liqiang, *et al.* Mitigation of severe urban haze pollution by a precision air pollution control approach [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8151.
- [6] YANG Yang, WANG Hailong, SMITH S J, *et al.* Recent intensification of winter haze in China linked to foreign emissions and meteorology [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2107-2014.
- [7] 余辉, 张璐璐, 燕姝雯, 等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1210-1219.
YU Hui, ZHANG Lulu, YAN Shuwen, *et al.* Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and contributions to the lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(11): 1210-1219.
- [8] TI Chaopu, GAO Bo, LUO Yongxia, *et al.* Dry deposition of N has a major impact on surface water quality in the Taihu Lake Region in southeast China [J]. Atmospheric Environment, 2018, 190: 1-9.
- [9] 杨龙元, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究[J]. 海洋与湖沼, 2007(2): 104-110.
- [10] 王燕, 刘宁锴, 王骏飞. 太湖流域氮磷等大气沉降研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(5): 103-105.
WANG Yan, LIU Ningkai, WANG Junfei. Study on atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in Taihu Lake [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(5): 103-105.
- [11] 邢建伟, 宋金明, 袁华茂, 等. 胶州湾生源要素的大气沉降及其生态效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 353-366.
XING Jianwei, SONG Jinming, YUAN Huamao, *et al.* Atmospheric depositions of biogenic elements and their ecological effects on marine ecosystem of Jiaozhou Bay [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 353-366.
- [12] 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山. 烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1484-1492.
XIE Ruijia, HOU Hongxia, CHEN Yongshan. Analysis of the composition of atmospheric fine particles (PM_{2.5}) produced by burning fireworks [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1484-1492.
- [13] TIWARI S, CHATE D M, SRIVASTAVA M K, *et al.* Statistical evaluation of PM₁₀ and distribution of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ in ambient air due to extreme fireworks episodes (Deepawali festivals) in megacity Delhi [J]. Natural hazards, 2012, 61(2): 521-531.
- [14] TIAN Y Z, WANG J, PENG X, *et al.* Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(18): 9469-9479.
- [15] GAUTAM S, YADAV A, PILLARISSETTI A, *et al.* Short-term introduction of air pollutants from fireworks during diwali in Rural Palwal, Haryana, India: a case study [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018. doi: 10.1088/1755-1315/120/1/012009.
- [16] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告[EB/OL]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2018-07-18[2018-07-17]. <http://www.tba.gov.cn/contents/45/23627.html>.
- [17] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 苏艳, 刘端阳, 彭华青, 等. 无锡梅雨期湿沉降综合分析[J]. 气象科学, 2016, 36(4): 547-555.
SU Yan, LIU Duanyang, PENG Huaqing, *et al.* Comprehensive analysis of wet deposition during the Meiyu period in Wuxi [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(4): 547-555.
- [19] ZHU Jianxing, HE Nianpeng, WANG Qiufeng, *et al.* The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 777-785.
- [20] LIU Xuejun, XU Wen, PAN Yuepeng, *et al.* Liu et al. suspect that Zhu et al. (2015) may have underestimated dissolved organic nitrogen (N) but overestimated total particulate N in wet deposition in China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 520: 300-301.
- [21] TIPPING E, BENHAM S, BOYLE J F, *et al.* Atmospheric deposition of phosphorus to land and freshwater [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2014, 16(7): 1608-1617.
- [22] ZHAI Shuijing, YANG Longyuan, HU Weiping. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in northern Lake Taihu, China [J]. Environmental Management, 2009, 44: 542-551.
- [23] 陈瑾, 卢平, 陈中颖, 等. 惠州大亚湾春夏季大气氮磷沉降的研究[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(2): 109-114.

- CHEN Jin, LU Ping, CHEN Zhongying, *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus at Daya Bay in Huizhou during spring and summer [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(2):109-114.
- [24] WEISS L, THE J, WINTER J, *et al.* Optimizing best management practices to control anthropogenic sources of atmospheric phosphorus deposition to inland lakes [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(10), 1025-1037.
- [25] JANHÄLL S. Review on urban vegetation and particle air pollution-deposition and dispersion [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 105:130-137.
- [26] 孙娜娜. 青岛近岸大气气溶胶中溶解有机氮的分布特征研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [27] 韩静. 不同天气条件对青岛大气气溶胶中有机氮和尿素浓度分布的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [28] SHAPOSHNIKOV D, REVICH B, BELLANDER T, *et al.* Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010 [J]. *Epidemiology*, 2014, 25(3):359-364.
- [29] CHEN Z H, CHENG S Y, LI J B, *et al.* Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(24):6078-6087.
- [30] WEHNER B, BIRMILI W, DITAS F, *et al.* Relationships between submicrometer particulate air pollution and air mass history in Beijing, China, 2004-2006 [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, 8(3):6155-6168.
- [31] JIA Yanlong, YU Guirui, HE Nianpeng, *et al.* Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:3763.
- [32] 王小治, 尹微琴, 单玉华, 等. 太湖地区湿沉降中氮磷输入量: 以常熟生态站为例 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10):2487-2492.
- WANG Xiaozhi, YIN Weiqin, SHAN Yuhua, *et al.* Nitrogen and phosphorus input from wet deposition in Taihu Lake region: a case study in Changshu agroecological experimental station [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 20(10):2487-2492.
- [33] 刘涛, 杨柳燕, 胡志新, 等. 太湖氮磷大气干湿沉降时空特征 [J]. *环境监测管理与技术*, 2012, 24(6):20-24.
- LIU Tao, YANG Liuyan, HU Zhixin, *et al.* Spatial-temporal features of atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus to the Lake Taihu [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24(6):20-24.
- [34] WU Qingru, WANG Shuxiao, LI Guoliang, *et al.* Temporal trend and spatial distribution of speciated atmospheric mercury emissions in China during 1978-2014 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(24):13428-13435.
- [35] OSADA K, URA S, KAGEWA M, *et al.* Wet and dry deposition of mineral dust particles in Japan: factors related to temporal variation and spatial distribution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 13(8):1107-1121.
- [36] 朱威, 周小平, 蔡杰. 太湖流域水环境综合治理及其启示 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(3):149-152.
- ZHU Wei, ZHOU Xiaoping, CAI Jie. Lessons from comprehensive management of water environment in Taihu Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(3):149-152.

(责任编辑:张 蕊)