

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.021

北京地区场次降雨氮、磷湿沉降特征

陈艾婷^{1,2}, 王培京², 于妍¹, 战楠², 于磊², 王鑫³,
马宁², 孟庆义², 李其军²

(1. 中国矿业大学<北京> 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院
流域水环境与生态技术北京市重点实验室, 北京 100048; 3. 北京市密云水库管理处,
北京 101512)

摘要: 针对大气湿沉降会对城市水环境造成污染的现状,在北京地区设置了5个大气湿沉降采样点:莲石湖公园(A)、沙河闸(B)、北关闸(C)、怀柔水库(D)、密云水库(E),在2020年汛期进行了4个月的监测。根据监测数据,以降雨量超过20 mm的场次降雨为研究对象,分析TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TP浓度及其变化规律。结果表明,暴雨的氮组分浓度要高于大雨的氮组分浓度;各指标的沉降通量与降雨量均呈正相关, R^2 分别为0.923 6、0.916 7、0.591 7、0.844 1。在空间上,5个站点场次降雨的TN平均浓度分别为5.39、4.70、3.86、3.35、3.18 mg/L,表现为 $A>B>C>D>E$,并且降雨中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占无机氮的比例亦为 $A>B>C>D>E$,表现出城区污染比远郊区污染严重的规律。5个站点的暴雨等级降雨过程中,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度总体呈下降趋势。与前一小时降雨中的氮浓度相比,当后一小时降雨量达到5 mm以上时,氮浓度通常会下降;当后一小时降雨量不足2 mm时,氮浓度多数会上升,上升幅度最高达到63%。

关键词: 场次降雨; 氮; 磷; 湿沉降

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0132-07

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Wet Deposition in Rainfall Events in Beijing

CHEN Ai-ting^{1,2}, WANG Pei-jing², YU Yan¹, ZHAN Nan², YU Lei²,
WANG Xin³, MA Ning², MENG Qing-yi², LI Qi-jun²

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Water Environmental and Ecological Technology for River Basins, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. Beijing Administration Office of Miyun Reservoir, Beijing 101512, China)

Abstract: To identify the effect of atmospheric wet deposition on urban water environment, five atmospheric wet deposition sampling sites were set up in Beijing: Lianshi Lake Park (A), Shahe Gate (B), Beiguan Gate (C), Huairou Reservoir (D) and Miyun Reservoir (E), and monitored for four months during the wet season in 2020. Based on the monitoring data, the concentrations of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TP

基金项目: 北京市财政项目

通信作者: 马宁 E-mail: ningmabwa@foxmail.com

and their variation law in rainfall with intensity more than 20 mm were analyzed. The concentration of nitrogen in hard rain was higher than that in heavy rain. The atmospheric wet deposition flux of each index was positively correlated with rainfall, and R^2 was 0.923 6, 0.916 7, 0.591 7 and 0.844 1, respectively. In terms of spatial distribution, the TN average concentration in rainfall events at five stations were 5.39 mg/L, 4.70 mg/L, 3.86 mg/L, 3.35 mg/L and 3.18 mg/L, respectively, and its descending order was A, B, C, D and E. In addition, the proportion of NO_3^- -N to inorganic nitrogen in rainfall had a descending order of A, B, C, D and E, indicating that the pollution in urban area was more serious than that in suburban area. The concentrations of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N in rainfall events at the five stations showed a decreasing trend during the process of a rainstorm. Compared with the nitrogen concentration in the previous hour, nitrogen concentration usually decreased when the rainfall in the next hour was more than 5 mm. However, nitrogen concentration mostly increased when the rainfall was less than 2 mm in the next hour, and the increase was as high as 63%.

Key words: rainfall event; nitrogen; phosphorus; wet deposition

自19世纪工业革命以来,人类活动的增加,如化石燃料的燃烧以及农业氮肥、磷肥的施用,导致氮、磷类污染物向大气中的排放量增加,大气湿沉降中氮、磷等营养盐浓度过高会影响水、土及植物健康^[1-3]。一方面,降雨会对地表水环境产生直接影响^[4];另一方面,当雨量和雨强增大时,降雨形成的地表径流冲刷地面后进入受纳水体,间接影响地表水水质^[5]。尽管有研究表明^[6-7]降雨中氮、磷浓度随降雨量的增加而逐渐减少,但大多数此类研究中主要是针对小雨、中雨和大雨,对不同等级降雨强度下氮、磷沉降研究的系统性不足,尤其是缺少对暴雨等级中氮、磷沉降的对比研究。已有相当一部分研究^[8-10]表明,降雨量和氮、磷湿沉降通量呈线性正相关关系。由于较大雨量的降雨对受纳水体水质存在的影响更为显著,因此重点对大雨和暴雨等级的降雨进行监测研究显得十分必要。

同一地区的不同类型区域可能由于地形、城市化水平、区域发展特性等影响,大气氮、磷沉降会有所差别。已有一些研究^[11-12]表明,市区、近郊区、远郊区等区域降雨中氮、磷浓度和沉降存在明显的差异。识别从城区到远郊区的氮、磷沉降分布规律是了解地区氮、磷沉降特征的重要途径^[13]。污染物沉降成分和含量的变化是解析污染物来源及其强度的重要信息,有利于城市面源污染防治工作的开展。

为识别北京地区场次降雨氮、磷湿沉降特征,笔者通过对北京地区城区至郊区梯度带上的5个地

点进行为期4个月的监测,获得了逐时降雨资料,系统分析降雨量对氮、磷湿沉降的影响,氮、磷湿沉降空间变化特征以及暴雨过程中氮、磷浓度变化规律,旨在为指导北京市水环境精细化治理提供基础数据和科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况与监测站点

北京市属于暖温带半湿润半干旱的季风型大陆性气候,年平均降雨量约为600 mm,独特的气候条件和地理条件使得北京市的降雨多集中在汛期(6月—9月),7月和8月常有暴雨,汛期降雨对全年雨量的贡献率达到83%^[12]。并且北京地区降雨分布不均匀,高降雨量较大的区域主要位于怀柔、平谷等中部山区^[14]。从北京城区至远郊区选取了5个代表性的采样点,构成城—郊样带,在各地开展降雨监测取样。参考已有文献中北京市区域的划分,采样点分别选取城区的莲石湖公园(A),近郊区的沙河闸(B)、北关闸(C),以及远郊区的怀柔水库(D)、密云水库(E)。

1.2 样品采集及分析方法

采样时间为2020年6月—9月,采样设备为APS-2B型干湿沉降自动采样器,采样器通过降雨感应器自动感应降雨事件,在降雨开始10 s内自动打开集水器盖板收集降雨,当降雨结束后10 s内自动关闭集水器挡板,以防止干沉降对降雨水质的影响。该仪器配备自动雨量计,通过显示面板可读取降雨量、降雨起止时间、降雨时长等信息。仪器配

有12个聚乙烯塑料瓶,设置为每隔1 h自动取一次样,及时收集小时累计降雨量大于0.1 mm的雨水样品并带回实验室,存放于4℃冰箱中冷藏。对雨水样品中的TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度进行分析,所有指标均采用哈希DR3900可见分光光度计进行检测,以确保检测数据的连贯性,分析误差范围为 $\pm 5\%$ 。因所测的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度水平过低,最大值仅约为TN的5%,本研究中的无机氮主要包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

1.3 氮、磷沉降通量和浓度变异系数计算方法

① 沉降通量

参照文献[8]中的计算方法,氮、磷沉降通量计算公式如下:

$$F_i = C_i \times H_i \quad (1)$$

式中: F_i 为第*i*次降雨中某种营养盐的湿沉降通量, kg/km^2 ; C_i 为第*i*次降雨中某种营养盐的质量浓度, mg/L ; H_i 为第*i*次降雨量, mm 。

② 浓度变异系数

氮、磷浓度变异系数计算公式如下:

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中:CV为变异系数; σ 为标准差, mg/L ; μ 为平均值, mg/L 。

1.4 重要场次降雨

以降雨量>20 mm的场次降雨作为研究对象,称为重要场次降雨。当两场降雨事件的时间间隔不超过3 h时记为一场降雨。

2 结果与讨论

2.1 降雨量及氮、磷浓度分析

采样期间5个监测站点共监测到18场重要场次降雨,降雨量及氮、磷浓度如图1所示。可以看出,A~E站点的重要场次降雨分别为4、4、3、5、2场,降雨量范围为21.5~161.2 mm,平均降雨量为58.1 mm。参照《降水量等级》(GB/T 28592—2012)中的12 h降雨量,所研究的18场降雨中,大雨(15.0~29.9 mm)有5场,暴雨(30.0~69.9 mm)有8场,大暴雨(70.0~139.9 mm)有4场,特大暴雨(≥ 140.0 mm)有1场,暴雨类型场次数占比为65%。

18场降雨样品中TN浓度为1.50~7.00 mg/L , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为0.70~4.39 mg/L , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为0.35~2.48 mg/L , TP浓度为0.03~0.47 mg/L 。其中,有17场降雨的TN浓度、11场降雨的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓

度和14场降雨的TP浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类水质标准(湖库类)。由此可见,相对于较高水环境质量的受纳水体,降雨的氮、磷浓度偏高,通过大气湿沉降直接进入地表水体,会对城市水环境产生极大的影响。

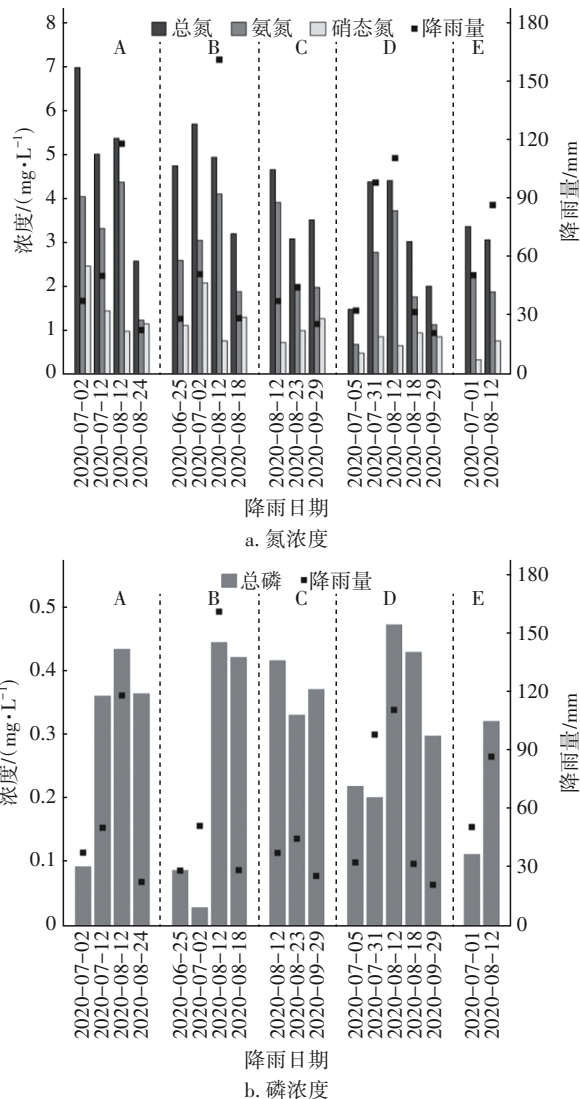


图1 各站点场次降雨中的氮、磷浓度

Fig.1 Nitrogen and phosphorus concentrations in rainfall at five sites

2.2 降雨量对氮、磷湿沉降的影响

表1为A~D四个监测站点大雨和暴雨等级降雨的氮、磷浓度。根据已有文献的研究结果^[6-13],降雨的氮、磷浓度随降雨量的增加而逐渐减少,暴雨的氮浓度低于大雨的氮浓度,但本研究结果与之相反,4个站点暴雨的TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均比大雨的要高。

表1 大雨、暴雨等级降雨中的氮、磷浓度

Tab.1 Concentrations of nitrogen and phosphorus in heavy rain and hard rain

站点	降雨量/ mm	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
A	23.00	2.60	1.25	1.67	0.37
	44.40	6.79	3.89	2.38	0.19
B	28.95	3.99	2.26	1.23	0.26
	51.70	5.72	3.07	2.10	0.03
C	26.10	3.53	2.00	0.77	0.37
	41.50	3.99	3.06	1.06	0.38
D	21.50	2.03	1.15	0.87	0.30
	32.65	2.78	1.60	0.88	0.39

18 场降雨的 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 湿沉降通量分别为 43.54~801.04、23.10~649.23、16.50~125.97 kg/km², TP 湿沉降通量为 1.55~71.87 kg/km²。分析 18 场降雨的降雨量与各指标湿沉降通量之间的关系,如图 2 所示。

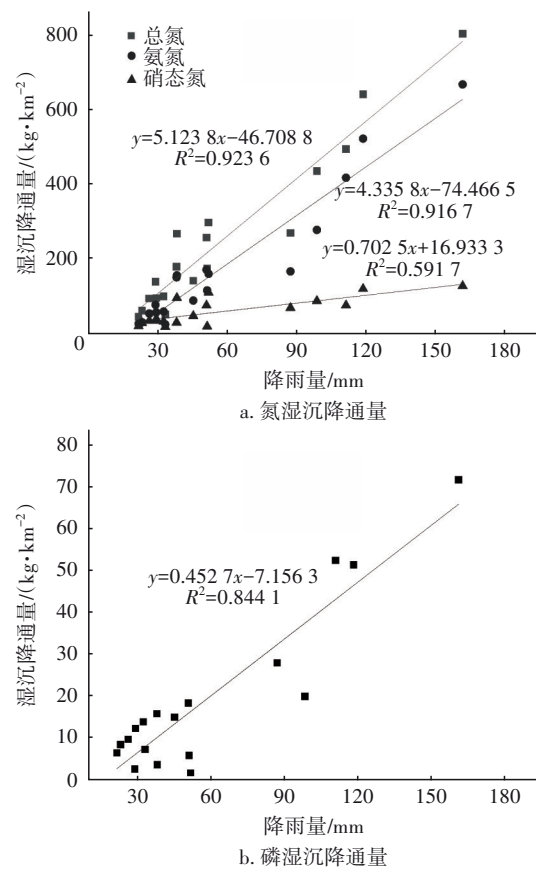


图2 氮、磷湿沉降通量与降雨量的相关关系

Fig.2 Relationship between rainfall and wet deposition flux of nitrogen and phosphorus

由图 2 可知, TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 湿沉降通

量与降雨量均呈正相关, R^2 分别为 0.923 6、0.916 7、0.591 7、0.844 1, 其中 TN 和 NH₄⁺-N 湿沉降通量与降雨量的相关性较为显著。

2.3 氮、磷湿沉降的空间变化特征

图 3 为各个站点 18 场降雨的氮、磷浓度及其在各个站点之间的空间差异(采用单因素方差分析方法, “*”表示在 0.05 水平差异性显著; “**”表示在 0.01 水平差异性显著, “***”表示在 0.001 水平差异性显著)。可以看出, A~E 站点场次降雨的 TN 平均浓度分别为 5.39、4.70、3.86、3.35、3.18 mg/L, 表现为 A>B>C>D>E, 其中, A 站点的 TN 平均浓度显著高于 D、E 站点 ($p < 0.01$); NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 平均浓度也均表现为 A>B>C>D>E, 其中, A 站点的 NH₄⁺-N 平均浓度显著高于 E 站点, NO₃⁻-N 平均浓度显著高于 C、D、E 站点 ($p < 0.05$), B 站点的 NO₃⁻-N 平均浓度显著高于 E 站点 ($p < 0.05$), 这从一定程度上反映了城区污染比远郊区污染严重。在城市生态系统中, 大气中氮沉降和主要区域内的氮排放密切相关, 交通工具尾气中具有大量含氮化合物, 交通量大的地方为氮沉降的主要区域^[15], A 站点距离市中心最近, 车流量相比其余站点要大, 因此氮浓度水平要高。各监测站点场次降雨中 TP 平均浓度为 C>D>A>B>E, 并没有呈现出与氮类似的规律, 这可能与降雨中磷的来源不同有关。

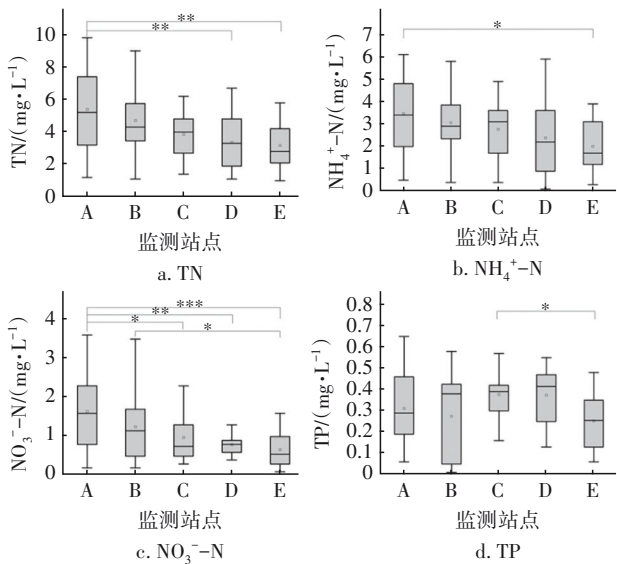


图3 各站点降雨中氮、磷浓度的空间变化

Fig.3 Comparison of nitrogen and phosphorus concentrations among five sites

另外发现, A~E 站点降雨的无机氮中 NH₄⁺-N 浓

度都高于 NO_3^- -N浓度, NH_4^+ -N占无机氮的比例分别为68%、71%、74%、75%、76%。对于城区而言,农业影响相对很小,交通及生活和工业活动影响更多,氮氧化物的排放量要高,城区降雨中 NO_3^- -N浓度应该高于 NH_4^+ -N浓度。杨文琴等^[13]通过对已有文献中有关城市与郊区降雨氮浓度的相关数据进行整理分析发现,除了工业区,绝大多数研究区降雨中的 NH_4^+ -N浓度高于 NO_3^- -N浓度。本研究与文献报道基本一致,但鉴于未能同步对站点位置的大气进行垂向尺度分层采样,尚不能深入解析市区降雨中 NH_4^+ -N浓度高于 NO_3^- -N的原因。5个采样点降雨中 NO_3^- -N占无机氮的比例表现为 $A>B>C>D>E$,表明从城区到远郊区 NO_3^- -N占比下降,与城区交通活动多于郊区的实际情况相符。

2.4 暴雨过程中氮、磷浓度的变化规律

图4为各站点暴雨等级降雨过程中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN浓度的变化。5场暴雨都呈现出降雨时程分配不均匀性和随机性,小时降雨量最小仅有0.8 mm,最大能达到39.1 mm,不同小时降雨量下的氮浓度也不尽相同。

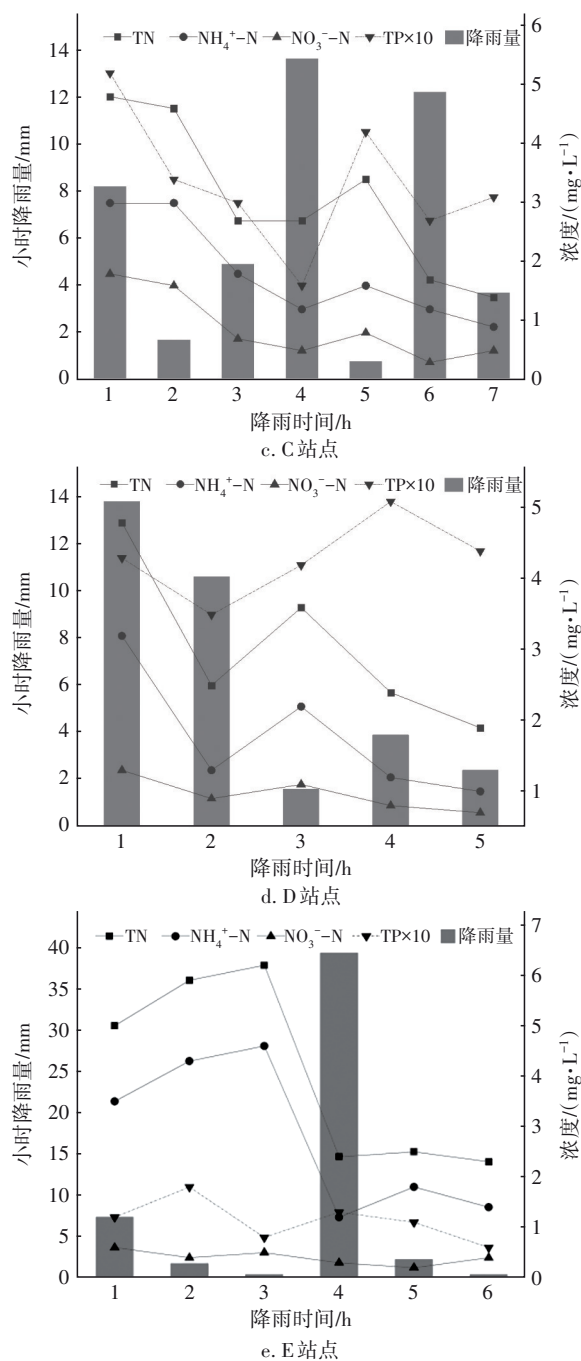
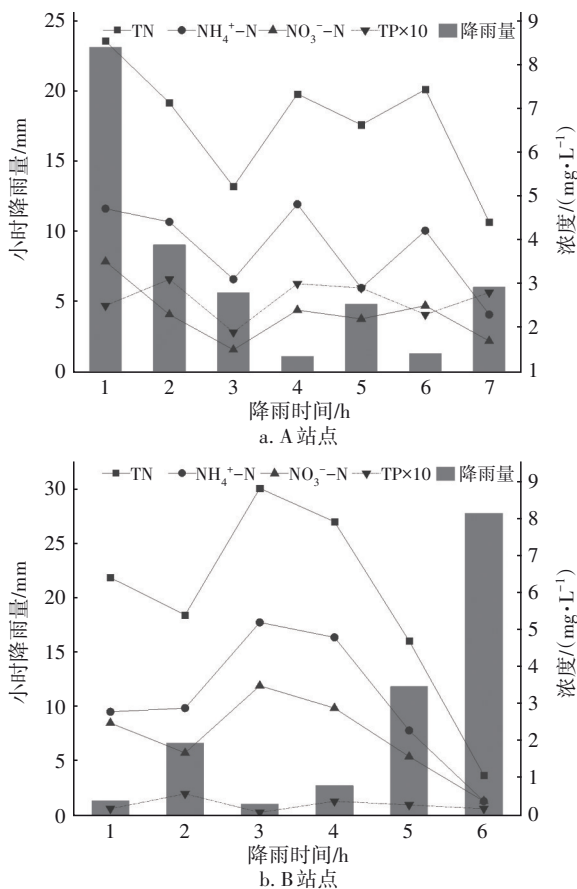


图4 暴雨等级降雨过程中氮、磷浓度的变化

Fig.4 Change of nitrogen and phosphorus concentrations during hard rain

总体来说,在暴雨等级降雨过程中, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN浓度呈下降趋势,与前一小时降雨中的氮浓度相比,当后一小时降雨量达到5 mm以上时,氮浓度通常会下降,可能雨水对污染物存在稀释作用,使得污染物浓度降低。当后一小时降雨量不足2 mm时,氮浓度多数会上升,上升幅度最大可达到63%,Ouyang等人^[16]的研究中提到,湿热条件会加

速氮的二次污染发生,增加空气中的氮浓度。前期降雨增加了空气的湿度,加上夏季温度高的原因,使得空气中的氮浓度进一步增加,随后小雨雨水中的氮浓度升高。

从图4还可以看出,暴雨过程中TP浓度的变化情况与氮不同,没有呈现出类似氮浓度的变化规律。由表2可知,A、C、D、E站点暴雨过程中TP浓度的变异系数分别为16%、34%、13%、37%,基本都小于本站点氮浓度的变异系数,从一定程度上反映出暴雨过程中TP浓度的变异小于氮浓度。B站点中出现相反的情况,这与其暴雨过程中TP浓度过低有关,因为变异系数的大小不仅受变量值离散程度的影响,还受变量值平均水平的影响。

表2 暴雨过程中氮、磷浓度的变异系数

Tab.2 Coefficient of variation of nitrogen and phosphorus concentrations during hard rain %

站点	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP
A	21	26	28	16
B	48	57	52	60
C	43	47	66	34
D	38	52	25	13
E	46	54	35	37

3 结论

① 在本研究的18场重要场次降雨中,TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和TP浓度分别为1.50~7.00、0.70~4.39、0.35~2.48、0.03~0.47 mg/L,其中有17场降雨的TN浓度和14场降雨的TP浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准(湖库类)。

② 暴雨的TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度均比大雨的高。TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP沉降通量与降雨量呈正相关, R^2 分别为0.923 6、0.916 7、0.591 7、0.844 1,其中TN和NH₄⁺-N的沉降通量与降雨量的相关性较为显著。

③ 在空间上,5个站点场次降雨中的TN平均浓度分别为5.39、4.70、3.86、3.35、3.18 mg/L,呈现为A>B>C>D>E,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N平均浓度也呈现为A>B>C>D>E,表明城区污染比远郊区污染严重;另外,降雨中NO₃⁻-N占无机氮的比例表现为A>B>C>D>E,表明从城区到远郊区NO₃⁻-N占比下降,这与城区交通活动多于郊区的实际情况相符。

④ 在暴雨过程中,TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度

随降雨时间总体呈下降趋势。与前一小时降雨中的氮浓度相比,当后一小时降雨量达到5 mm以上时,氮浓度通常会有所下降;当后一小时降雨量不足2 mm时,氮浓度多数会上升,上升幅度最大可达63%,推测湿热条件可能会加速氮的二次污染发生,增加空气中的氮浓度。

参考文献:

- [1] 张晓晶,卢俊平,马太玲,等. 大气氮磷湿沉降特征及对沙源区水库水环境的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2093-2101.
ZHANG Xiaojing, LU Junping, MA Tailing, *et al.* Wet deposition of atmospheric nitrogen and phosphorus and its impact on water environment of reservoir in sand source area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12): 2093-2101 (in Chinese).
- [2] CHEN Z, HUANG T, HUANG X, *et al.* Characteristics, sources and environmental implications of atmospheric wet nitrogen and sulfur deposition in Yangtze River Delta [J]. Atmospheric Environment, 2019, 219: 116904.
- [3] 朱彤,赵杨,车伍,等. 杭州市雨水径流污染分析及控制对策[J]. 中国给水排水, 2015, 31(17): 119-123.
ZHU Tong, ZHAO Yang, CHE Wu, *et al.* Analysis of stormwater runoff pollution in Hangzhou City and its control measures [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(17): 119-123 (in Chinese).
- [4] 郝晓地,罗玉琪,曹达敏,等. 雾霾亦可诱发水体富营养化[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 12-15, 21.
HAO Xiaodi, LUO Yuqi, CAO Daqi, *et al.* Induction of haze to eutrophication of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 12-15, 21 (in Chinese).
- [5] 陈韬,曹凯琳,李业伟,等. 城市降雨径流N、P营养物及其LID措施控制效果[J]. 中国给水排水, 2015, 31(24): 11-16.
CHEN Tao, CAO Kailin, LI Yewei, *et al.* Nutrients in urban stormwater runoff and their LID control practices [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(24): 11-16 (in Chinese).
- [6] 王焕晓,庞树江,王晓燕,等. 小流域大气氮干湿沉降特征[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5365-5374.
WANG Huanxiao, PANG Shujiang, WANG Xiaoyan, *et al.* Dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in small catchments [J]. Environmental Science, 2018, 39

- (12): 5365-5374 (in Chinese).
- [7] 王江飞, 周柯锦, 汪小泉, 等. 杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2754-2763.
- WANG Jiangfei, ZHOU Kejin, WANG Xiaoquan, *et al.* Atmospheric nitrogen and phosphorous deposition in Hangjiahua area [J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2754-2763 (in Chinese).
- [8] 高蓉, 韩焕豪, 崔远来, 等. 降雨量对洱海流域稻季氮磷湿沉降通量及浓度的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 191-198.
- GAO Rong, HAN Huanhao, CUI Yuanlai, *et al.* Effect of precipitation on wet deposition flux and content of nitrogen and phosphorus in Erhai Lake basin in rice season [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 191-198 (in Chinese).
- [9] 刘思言, 陈瑾, 卢平, 等. 广东韶关地区大气氮干湿沉降特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1445-1450.
- LIU Siyan, CHEN Jin, LU Ping, *et al.* Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen into Shaoguan, Guangdong Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1445-1450 (in Chinese).
- [10] 王金丽, 尚巍, 郑兴灿, 等. 中新天津生态城区域沉降物特征及对水环境的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 109-113.
- WANG Jinli, SHANG Wei, ZHENG Xingcan, *et al.* Characteristics of regional deposition in Sino-Singapore Tianjin Eco-city and its influence on water environment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21): 109-113 (in Chinese).
- [11] 梁亚宇, 李丽君, 宋志辉, 等. 太原地区大气氮湿沉降变化特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(4): 405-411.
- LIANG Yayu, LI Lijun, SONG Zhihui, *et al.* Characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition variations in the Taiyuan area [J]. Earth and Environment, 2019, 47(4): 405-411 (in Chinese).
- [12] GAO B, OUYANG W, CHENG H, *et al.* Interactions between rainfall and fine particulate matter investigated by simultaneous chemical composition measurements in downtown Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2019, 218: 117000.
- [13] 杨文琴, 刘思慧, 苗淼, 等. 北京市内到郊区氮沉降时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1530-1538.
- YANG Wenqin, LIU Sihui, MIAO Miao, *et al.* Spatial and temporal variation of dissolved inorganic nitrogen deposition along an urban to rural transect in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1530-1538 (in Chinese).
- [14] SONG X, ZHANG J, ZHANG C, *et al.* A comprehensive analysis of the changes in precipitation patterns over Beijing during 1960-2012 [J]. Advances in Meteorology, 2019(2): 1-22.
- [15] 贺成武, 任玉芬, 王效科, 等. 北京城区大气氮湿沉降特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 490-494.
- HE Chengwu, REN Yufen, WANG Xiaoke, *et al.* Characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition in Beijing urban area [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 490-494 (in Chinese).
- [16] OUYANG W, GUO B, CAI G, *et al.* The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 306-314.

作者简介: 陈艾婷(1997-), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 研究方向为城市水环境保护与治理。

E-mail: 310521433@qq.com

收稿日期: 2021-01-12

修回日期: 2021-04-05

(编辑: 刘贵春)