

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0121

李萌萌, 练继建, 郭祺忠, 等. 天津某校园全年雨雪水质监测及污染成因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 110-115. LI M M, LIAN J J, GUO Q Z, et al. One-year monitoring of rain and snow water quality and its pollution causes in a campus in Tianjin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 110-115. (in Chinese)

天津某校园全年雨雪水质监测及污染成因

李萌萌^{1,2}, 练继建^{1,2,3}, 郭祺忠⁴, 陈亮^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 3. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University-New Brunswick, Piscataway, NJ 08554, USA)

摘要:为降低雨水资源化利用成本, 保证可利用雨水水质, 弃流水质较差的初期降雨及特殊场次降雨成为目前雨水资源化利用的重要途径。因此需要通过长期连续监测降雨和降雪中氮、磷和化学需氧量等关键指标的变化, 确定合理的雨水弃流方式。以天津大学北洋园校区为研究区, 对该区域 2018 年 1—12 月的降雨和降雪水质进行连续监测。结果表明: 2018 年 3 月和 4 月降雨中氨氮(6.75 mg/L)、总氮(9.36 mg/L)的平均质量浓度分别是全年降雨和降雪中氨氮和总氮平均质量浓度的 1.5 和 2.1 倍; 春季首场降雨中污染物平均质量浓度远超冬季首场降雪, 冬季空气污染是导致春季首场降雨水质差的主要原因; 空气中各污染物质量浓度对降雨和降雪水质的影响由大到小依次为 $PM_{2.5} > PM_{10} > NO_2 > SO_2 > CO > O_{3,sh}$ 。与其他季节相比, 春季前两场降雨污染物平均质量浓度高、降水量小, 雨水利用处理成本高, 建议将春季前两场降雨(降水量 < 10 mm)直接弃流至污水处理厂, 不宜直接进入雨水资源化利用设施。

关键词:海绵城市; 雨水资源化利用; 初期降雨; 弃流; 空气污染

中图分类号: X522 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



One-year monitoring of rain and snow water quality and its pollution causes in a campus in Tianjin

LI Mengmeng^{1,2}, LIAN Jijian^{1,2,3}, GUO Qizhong⁴, CHEN Liang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Water Conservancy & Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University-New Brunswick, Piscataway, NJ 08554, USA)

Abstract: In order to reduce the cost of rainwater utilization and ensure the quality of rainwater that can be used, discharge first-flush and special rainwater with poor water quality has become an important way in rainwater utilization. Therefore, it is necessary to determine the reasonable rainwater discharge method through long-term continuous monitoring of key water quality indicators such as nitrogen, phosphorus, and chemical oxygen demand in rain or snow water. One-year continuous monitoring of rain and snow water was conducted in the Peiyang Campus of Tianjin University in 2018. Results show that: the average mass concentration of ammonia nitrogen (6.75 mg/L) and total nitrogen (9.36 mg/L) in rain and snow water in March and April was about 1.5 and 2.1-folds times the annual average mass concentration of ammonia nitrogen and total nitrogen in rain and snow water; the mass concentration of contaminants in the first rainwater in spring is much higher than that of the first snow in

收稿日期: 2019-10-11 修回日期: 2020-04-23 网络出版时间: 2020-05-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200514.1728.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41772245); 京津冀非常规水安全利用技术研发示范(2016YFC0401405)

作者简介: 李萌萌(1995—), 女, 河南驻马店人, 主要从事海绵城市研究。E-mail: 13512938672@sina.cn

通信作者: 陈亮(1985—), 男, 甘肃张掖人, 副教授, 博士。主要从事海绵城市、水环境治理研究。E-mail: liangchen@tju.edu.cn

winter, and air pollution in winter is the key factor for poor rainwater quality of the first rainfall in spring; in addition, the influence sequence of the air contaminants to the rainwater and snow water quality was $PM_{2.5} > PM_{10} > NO_2 > SO_2 > CO > O_{3_{sh}}$. The mass concentration of contaminants in the first two rainwater in spring was higher than the other rain and snow water, but the quantity of precipitation was very small. Therefore, the first two rainfall in spring (precipitation less than 10 mm) may be directly discharged to the wastewater treatment plant rather than directly flow into the rainwater recycling facilities.

Key words: sponge city; rainwater resource utilization; first-flush; abandon flow; air pollution

近年来,随着政府对点源污染控制力度加大,城市非点源污染已然成为影响地表水体水环境质量的重要因素,特别是降雨和降雪及其径流污染导致的水环境问题。李怀恩等^[1]对西安市降雨、降雪及其径流中的污染物监测结果显示,降水中氨氮、总氮、总磷以及化学需氧量质量浓度在其所形成道路径流各污染物质量浓度中占比分别为 33.3%~40.8%、46.7%~68.1%、35.0%~44.9% 和 22.1%~24.1%。可以看出,降雨和降雪中的污染物是城市径流污染的主要来源之一。

而且,降雨水质是决定雨水资源化利用的关键。降雨中的高污染物质量浓度不仅影响雨水资源化利用方式,还会降低雨水资源化利用效率,增加雨水资源化利用成本,甚至可能出现雨水资源化利用设施中雨水水质不满足排放或使用标准的问题。为保证进入雨水资源化利用设施的雨水水质,降低雨水利用成本,弃流水质较差的初期降雨及特殊场次雨水成为目前雨水资源化利用的重要途径^[2]。如:隋涛等^[3]分析研究山东滨州不同下垫面雨水水质后提出,滨城区屋面雨水初期弃流量为 4 mm,小区路面为 5 mm,主干道为 7 mm;Chow 等^[4]分析马来西亚柔佛州不同下垫面的径流水质发现,控制一场降雨前 10 mm 径流可以捕获雨水径流中约一半的污染物。但是,在我国,不同季节、不同场次的降雨或降雪,其降水量和污染物质量浓度均存在明显差异^[5-6]。

因此,有必要针对不同区域,在系统连续监测全年降雨和降雪污染物指标的基础上,提出相应的雨水弃流方式。为此,中国^[7]、美国^[8]、日本^[9]、新加坡^[10]、法国^[11]和乌拉圭^[12]等国家纷纷开展针对降雨和降雪污染物的长期连续监测。监测指标主要包括无机污染物^[13-15](pH、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)和有机污染物^[8,16],其中以无机污染物为主。如:Xing 等^[17]对胶州湾降雨和降雪化学成分进行连续监测发现, NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 NO_3^- 是雨、雪水中的主要化学成分,占雨、雪水总化学成分中 80%以上,海

洋、地壳活动和人类活动对降雨和降雪总离子的综合贡献分别为 28.7%、14.5%和 56.8%;孙韧等^[18]对 2001 年至 2012 年天津市酸雨监测资料整理发现,对天津市降水起主导中和作用的阳离子为 Ca^{2+} ,贡献率在 56.4%~77.9%,贡献率春季最高、夏季最低,而 NH_4^+ 的贡献率在 28.4%~44.0%,夏季最高、冬季最低。另外,依据《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》、《地下水质量标准(GB 14848—2017)》、《城市污水再生利用 城市杂用水水质(GB 18920—2002)》和《城市污水再生利用 景观环境用水水质(GB 18921—2002)》,总氮和化学需氧量是衡量地表水、地下水、城市景观用水和杂用水水质的重要指标,降雨和降雪及其径流中总氮及化学需氧量的质量浓度直接影响着城市地表及地下水体和城市景观用水及杂用水水质,也决定着雨水资源化利用工程中水质较差的初期雨水及特殊场次雨水的弃流量。因此,有必要在对降雨和降雪的长期连续监测中重点关注总氮和化学需氧量质量浓度的变化。

为此,本文以天津大学北洋园校区为研究对象,通过对降雨和降雪水质进行为期 1 年的连续监测,研究降雨和降雪中总氮、总磷、氨氮以及化学需氧量等污染物质量浓度的年内变化,对比分析春季首场降雨和冬季首场降雪中污染物质量浓度的差异,并结合全年降雨和降雪中污染物质量浓度的连续监测结果以及降水量数据,提出雨水资源化利用中水质较差雨水的弃流方式,为天津市雨水资源利用的规划与设计提供参考。同时,还将结合空气污染数据,分析降雨和降雪水质与空气污染物之间的相关性,探究空气污染对降雨和降雪水质的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天津大学北洋园校区于 2015 年建成启用,位于天津市津南区,占地面积约 250 hm^2 ($2.5 \times 10^6 m^2$),总建筑面积 155 万 m^2 ,现有师生 3 万余人。北洋园校区在景观工程建设方面采用了海绵城市的理念

和方法,应用大量 LID 低影响开发技术(如植草沟、下凹绿地等),建立可实现校园雨水收集利用的生态技术体系,实现降水的原位收集、自然净化、就近利用及回补地下水功能(图 1)^[19-20]。天津大学北洋园校区年平均降水量 534.6 mm,2018 年降水量 590.3 mm,全年降水量呈单峰分布,降水主要集中在夏季,占全年降水总量 87%左右,易造成局部的洪涝灾害。

1.2 研究方法

根据《大气降水样品的采集与保存 GB 13580.2—1992》,降雨和降雪通过定制聚乙烯塑料容器作为收集装置,在固定监测点进行样品收集,装置距地表 2 m。为避免收集的样品受到污染,监测点(见图 1)设在车辆较少且距机动车道一定距离(>5 m)的草坪上,周围无遮挡。每次使用收集装置前后均使用去离子水对其进行彻底清洗并干燥。实验中测得样品质量浓度为整场降雨的平均质量浓度,对于持续时间较长的降雨和降雪,采用分时段取样的方式进行水样的收集测定,将各时段测得的污染物质量浓

度平均后作为本场降雨或降雪的平均质量浓度。对于小雨和中雨,自降雨开始进行收集,降雨结束后将样品混匀测定,所有样品均在采集后 24 h 内完成检测。降雨和降雪水质监测指标包括氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD_{Cr})。各指标分析方法及所用仪器见表 1,水质评价所依据的评价标准为《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》。



图 1 天津大学北洋园校区平面图

Fig. 1 Tianjin University Peiyang Campus plan

表 1 分析方法及仪器

Tab. 1 Analytical methods and instruments

指标	参考标准	测定范围/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最低检出浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	仪器
NH_4^+-N	《水质 凯氏氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(GB 11891—89)	0.10~2.00	0.010	紫外可见分光光度计 UV-1800
TN	《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)	0.20~7.00	0.050	紫外可见分光光度计 UV-1800
TP	《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)	0.01~1.20	0.025	紫外可见分光光度计 UV-1800
COD_{Cr}	《化学需氧量(COD)在线自动监测仪检定规程》(JJG 1012—2006)	0~100.00	1.000	COD_{Cr} 水质在线自动监测仪(苏制)09000025

1.3 质量控制

TN、TP、 NH_4^+-N 的方法检出限分别为 0.05、0.025 和 0.01 mg/L。为保证测试分析质量,在每次测试过程中加入空白样、空白加标样、平行样以对测试结果的可靠性进行评价。其中,TN 的相对平均偏差为 5%, NH_4^+-N 相对平均偏差为 1.5%,TP 相对平均偏差为 13%。分析 TP 相对平均偏差较大的原因是降雨和降雪中 TP 质量浓度及空白加标样中 TP 质量浓度(0.08 mg/L)低,均位于校准曲线最低质量浓度附近(0.01~1.20 mg/L),因此测试结果的相对平均偏差较大。

2 结果与讨论

2.1 降雨和降雪水质连续监测分析

为分析年度内降雨和降雪水质变化规律,对降

雨和降雪水质进行 1 年的连续监测,每场降雨和降雪中各监测指标平均质量浓度随时间的变化见图 2。可以看出:(1)降雨和降雪中 NH_4^+-N 的平均质量浓度超出地表水 IV 类水标准 0.2~6.5 倍(1 月 23 日、7 月 13 日、7 月 24 日和 9 月 19 日除外),TN 的平均质量浓度超出 IV 类水标准 0.3~10.4 倍(5 月 22 日、7 月 5 日、7 月 13 日以及 9 月、11 月和 12 月共 7 场降雨除外)。其中,2018 年 3 月 17 日降雪中 NH_4^+-N 、TN 的平均质量浓度最高,分别为 11.29、17.16 mg/L。(2)与 TN、 NH_4^+-N 质量浓度相比,降雨和降雪中 TP 质量浓度最低,全年降雨和降雪中 TP 平均质量浓度的最大值为 0.67 mg/L,除 3 月 17 日、4 月 3 日和 12 月 6 日降雨和降雪中 TP 平均质量浓度分别超出 IV 类水标准 0.20、0.37 和 0.13 mg/L 外,其余均在 0.1 mg/L 左右,满足 IV 类

水标准。7月至11月降雨中TP质量浓度满足Ⅱ类水标准。(3)除3月17日、4月3日、5月12日和12月6日降雨和降雪中 COD_{Cr} 平均质量浓度超出Ⅳ类水标准外,其余皆满足Ⅳ类水标准,雨季(6—8月)降雨的 COD_{Cr} 质量浓度满足Ⅲ类水标准(7月5日除外)。

综合分析发现,2018年3、4月期间降雨和降雪 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的平均质量浓度(6.75、9.36 mg/L)分别是全年每场降雨和降雪平均质量浓度的1.5和2.1倍。随着降雨频率增加,雨水中污染物质量浓度逐渐降低,2018年6月至8月降雨频率高,降水量大,TP、 COD_{Cr} 平均质量浓度低,但TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

的平均质量浓度依旧超出Ⅳ类水标准,需要采取相应措施控制降雨及其径流中TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度。此外,根据中国气象数据网提供的天津市2013年至2018年日降水数据,发现近6年每年3、4月总降水量的均值为19.2 mm,平均降水4场,平均每场降水3.9 mm。结合降雨和降雪污染物质量浓度监测结果发现,春季前两场降雨污染物质量浓度高、降水量少、历时长、强度低、雨水利用价值低。考虑到雨水净化处理成本,保证收集利用的雨水质量符合要求,建议弃流春季前两场降雨(降水量 < 10 mm)至污水处理厂进行净化处理,不宜直接进入雨水资源化利用设施。

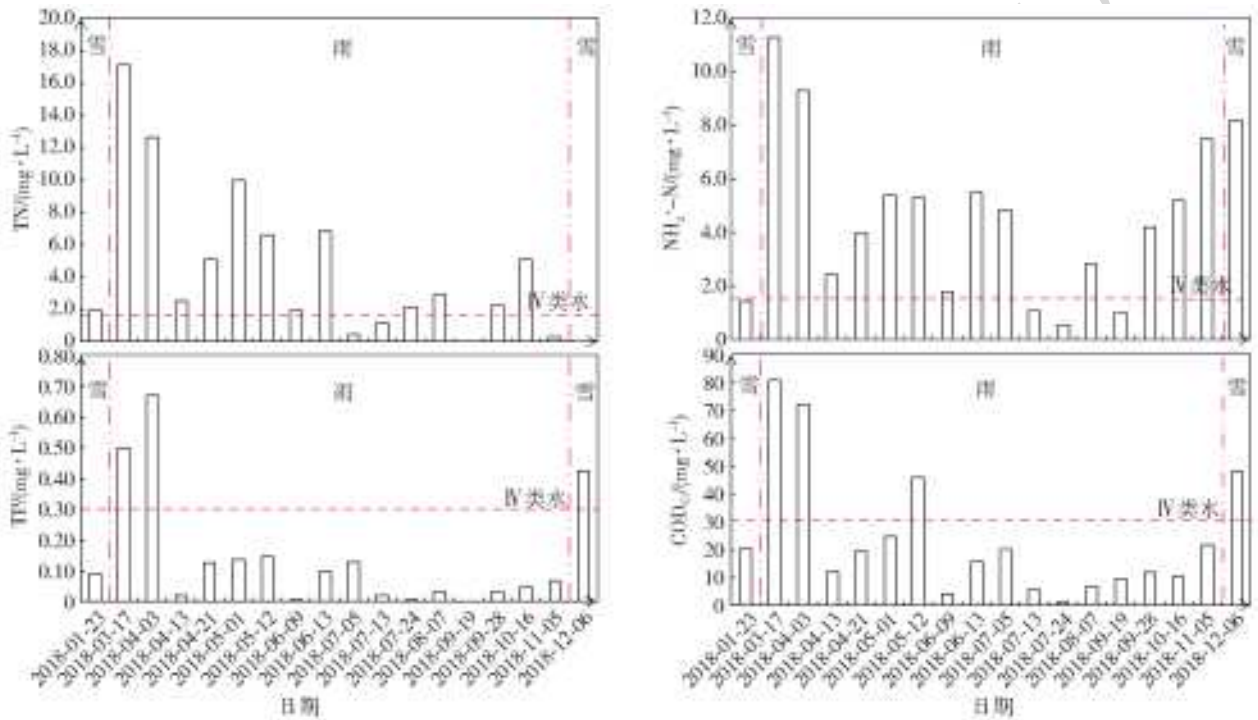


图2 天然降水中各污染物质量浓度随时间的变化

Fig. 2 Time dependent changes in the mass concentration of pollutants in natural precipitation

2.2 降雨和降雪污染成因分析

2.2.1 冬季首场降雪与春季首场降雨水质对比分析

冬季首场降雪(2017年1月23日)与春季首场降雨中各污染物平均质量浓度见图3,分析两者各污染物平均质量浓度的差异发现,首场降雨中TN的平均质量浓度是首场降雪的9倍, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均质量浓度是其7.8倍,TP的平均质量浓度是其5.3倍, COD_{Cr} 的平均质量浓度是其4倍。与地表水Ⅳ类水标准相比,首场降雨所有指标均超出Ⅳ类水标准0.7~10.4倍,而首场降雪除TN超出Ⅳ类水标准0.45 mg/L,其余各项指标均满足Ⅳ类水标准。

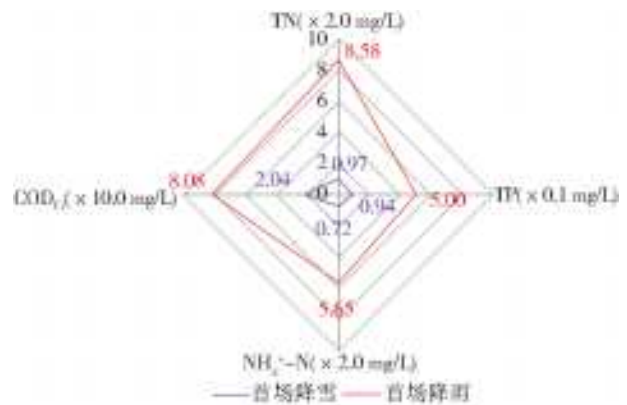


图3 首场降雪、首场降雨不同污染物质量浓度对比

Fig. 3 Comparison of pollutant mass concentrations in the first snow and the first rainfall

导致这一现象的原因可能有以下几点:(1)首场

降雨距前一场降雪间隔时间长。天津地处华北平原北部,冬春季节降水少,降水间隔时间较长,2018 年首场降雪距前一场降水间隔 38 d,而首场降雨距前一场降水间隔 52 d。唐文峰等^[21]发现,降雨前晴天天数越多,初期降雨污染越严重。(2)天津地区冬季空气质量差。天津冬季气温较低,集中供暖所用燃料燃烧会产生大量的氮氧化物、二氧化硫等,形成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 并积存于大气中,大气中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 是降雨和降雪中氨氮的主要来源^[22]。此外,天津绿化树木多为杨柳科落叶乔木,冬季光合作用较弱,对空气的净化能力相对较差。肖悦等^[23]、马文超等^[24]分析研究我国近 10 年空气质量发现,空气质量与主要污染物均呈现“夏优

冬劣”的季节性变化规律,并且由表 2 结果可以看出,降雨和降雪的水质好坏与大气污染物质量浓度相关。(3)降雪比降雨对空气的淋洗作用低。徐艳嫻^[25]基于断点回归并构建固定效应模型探究冬季供暖对空气质量的影响,模拟结果显示降雨对污染物的影响比降雪对污染物的影响更显著,降雪对大气的淋洗作用低于降雨,因此首场降雪的污染物质量浓度低于首场降雨的污染物质量浓度。(4)冬季大气稳定度高,污染物不易扩散。姚青等^[26]对天津市大气稳定度与逆温的研究发现,冬季大气稳定度与逆温频率均较高,不利于污染物的扩散与转移。同时,由于冬季降水频率低,大气污染物的累积使得首场降雨污染物质量浓度较高。

表 2 降水污染物质量浓度与大气污染物质量浓度相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix between precipitation pollutant mass concentration and atmospheric pollutant mass concentration

	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO ₂	O _{3_8h}	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	COD _{Cr}
PM _{2.5}	1.000									
PM ₁₀	0.833**	1.000								
SO ₂	0.680*	0.659*	1.000							
CO	0.701*	0.456	0.772**	1.000						
NO ₂	0.790**	0.791**	0.928**	0.650*	1.000					
O _{3_8h}	-0.551	-0.520	-0.889**	-0.624*	-0.863**	1.000				
TN	0.359	0.282	0.093	-0.021	0.217	0.146	1.000			
TP	0.537	0.647*	0.473	0.246	0.514	-0.372	0.576	1.000		
NH ₄ ⁺ -N	0.762**	0.722*	0.476	0.332	0.669*	-0.413	0.579	0.806**	1.000	
COD _{Cr}	0.618	0.652*	0.485	0.267	0.560	-0.346	0.716*	0.932**	0.833**	1.000

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2.2 2018 年降雨和降雪中各污染物质量浓度变化分析

为进一步探究空气质量对降雨和降雪污染物质量浓度的影响,收集整理天津市 2018 年空气质量数据(数据来源:中国空气质量在线监测分析平台 <http://www.aqistudy.cn>),并利用 SPSS 17.0 软件计算降雨和降雪中各污染物质量浓度(月均值)与当月空气各污染物体积浓度间的皮尔逊相关系数 r ,进行单因子相关性分析,相关矩阵见表 2。

由表 2 可以看出:空气中 PM_{2.5} 质量浓度与降雨和降雪中 NH₄⁺-N 质量浓度相关系数为 0.762,孙韧等^[27]、张雯^[28]对天津市 PM_{2.5} 中离子成分的监测分析结果表明,SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 和 Cl⁻ 是 PM_{2.5} 的主要离子。由于降雨降雪对大气污染物具有冲刷作用,因此,降雨和降雪中 NH₄⁺-N 质量浓度同 PM_{2.5} 质量浓度具有显著相关性;PM₁₀ 质量浓度与降雨和降雪中 NH₄⁺-N、TP 和 COD_{Cr} 质量浓度相关系数分别为 0.722、0.647 和 0.652,NO₂ 质量浓度与降雨和降

雪中 NH₄⁺-N 质量浓度相关系数为 0.669。综合分析可知,空气中 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度对降雨和降雪的水质影响最大,其次为 NO₂、SO₂、CO、O_{3_8h} 对降雨和降雪的水质影响小。

3 结论

本文通过对天津大学北洋园校区 2018 年降雨和降雪关键水质指标进行一年的连续性监测,综合分析得出以下结论:

(1)与降雨和降雪中 COD_{Cr} 和 TP 质量浓度相比,TN 和 NH₄⁺-N 质量浓度较高。因此,对降雨和降雪收集利用时,需重点考虑 TN、NH₄⁺-N 的净化处理。除此以外,春季前两场降雨污染物质量浓度高,降水量小,综合利用价值低,考虑到雨水净化处理成本,建议弃流春季前两场降雨(降水量 < 10 mm)至污水处理厂进行净化处理,不宜直接进入雨水资源化利用设施。

(2)冬季首场降雪的各项指标均优于春季首场降

雨,除 TN 外,其余指标均满足地表水Ⅳ类水标准,冬季空气污染是导致春季首场降雨水质差的主要原因。

(3)大气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度对降雨和降雪水质影响最大, SO_2 、 CO 、 O_3 质量浓度对降雨和降雪水质的影响较小。

参考文献:

- [1] 李怀恩,刘增超,秦耀民,等.西安市融雪径流污染特性及其与降雨径流污染的比较[J].环境科学学报,2012,32(11):2795-2802. DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2012. 11. 023.
- [2] 刘鹏,傅文华.初期雨水要不要弃流的思考[J].给水排水,2004,30(12):78-79. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2004. 12. 023.
- [3] 隋涛,魏敏.滨城区初期雨水弃流问题的探讨[J].中国农村水利水电,2012(8):43-47.
- [4] CHOW M F, YUSOP Z. Sizing first flush pollutant loading of stormwater runoff in tropical urban catchments [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(10):4047-4058. DOI:10.1007/s12665-014-3294-6.
- [5] 肖致美,李鹏,陈魁,等.天津市大气降水化学组成特征及来源分析[J].环境科学研究,2015,28(7):1025-1030. DOI:10.13198/j. issn. 1001-6929. 2015. 07. 02.
- [6] 肖红伟,肖化云,王燕丽.贵阳大气降水化学特征及来源分析[J].中国环境科学,2010,30(12):1590-1596.
- [7] HUANG X F, LI X, HE L Y, et al. 5-year study of rainwater chemistry in a coastal mega-city in south China[J]. Atmospheric Research, 2010, 97(1/2):185-193. DOI:10.1016/j. atmosres. 2010. 03. 027.
- [8] SONG F, GAO Y. Chemical characteristics of precipitation at metropolitan Newark in the US East Coast [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32):4903-4913. DOI:10.1016/j. atmosenv. 2009. 07. 024.
- [9] OKUDA T, IWASE T, UEDA H, et al. Long-term trend of chemical constituents in precipitation in Tokyo metropolitan area, Japan, from 1990 to 2002[J]. Science of the Total Environment, 2005, 339(1/2/3):127-141. DOI:10.1016/j. scitotenv. 2004. 07. 024.
- [10] HU G P, BALASUBRAMANIAN R, WU C D. Chemical characterization of rainwater at Singapore[J]. Chemosphere, 2003, 51(8):747-755. DOI: 10. 1016/ S0045-6535(03)00028-6.
- [11] PASCAUD A, SAUVAGE S, CODDEVILLE P, et al. Contrasted spatial and long-term trends in precipitation chemistry and deposition fluxes at rural stations in France[J]. Atmospheric Environment, 2016(146):28-43.
- [12] ZUNCKEL M, SAIZAR C, ZARAUZ J. Rainwater composition in northeast Uruguay[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(12):1601-1611. DOI: 10. 1016/ s1352-2310(03)00007-4.
- [13] XU Z F, TANG Y, JI J P. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing during the 2008 Olympic year[J]. Atmospheric Research, 2012, 107:115-125. DOI:10.1016/j. atmosres. 2012. 01. 002.
- [14] RAO W B, HAN G L, TAN H B, et al. Chemical and Sr isotopic characteristics of rainwater on the Alxa Desert Plateau, north China: Implication for air quality and ion sources[J]. Atmospheric Research, 2017, 193:163-172. DOI:10.1016/j. atmosres. 2017. 04. 007.
- [15] SOPAUSKIENE D, JASINEVICIENE D. Changes in precipitation chemistry in Lithuania for 1981-2004 [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2006, 8(3):347-352. DOI:10.1039/b516877e.
- [16] PAN Y P, WANG Y S, XIN J Y, et al. Study on dissolved organic carbon in precipitation in northern China[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(19):2350-2357. DOI:10.1016/j. atmosenv. 2010. 03. 033.
- [17] XING J W, SONG J M, YUAN H M, et al. Chemical characteristics, deposition fluxes and source apportionment of precipitation components in the Jiaozhou Bay, north China[J]. Atmospheric Research, 2017, 190:10-20. DOI:10.1016/j. atmosres. 2017. 02. 001.
- [18] 孙韧,张文具,董海燕,等.2001—2012年天津市大气降水特征及化学成分分析[J].环境污染与防治,2014,36(8):53-58. DOI:10.3969/j. issn. 1001-3865. 2014. 08. 009.
- [19] 康宏志.海绵校园人工水系水量水质变化规律研究[D].天津:天津大学.2017.
- [20] 魏巍.国家示范性绿色校园建设策略研究:以天津大学北洋园校区为例[J].建设科技,2017(12):25-29. DOI:10.16116/j. cnki. jskj. 2017. 12. 008.
- [21] 唐文锋,胡友彪,何晓文,等.淮南城区传统开发模式下雨水径流水质污染特征研究[J].环境工程,2017,35(2):53-58. DOI:10.13205/ j. hjgc. 201702012.
- [22] 张静,周玉文,王中正,等.北方城市天然降水中氨氮污染特征研究[J].环境科学与技术,2016,39(6):129-134. DOI:10.3969/j. issn. 1003-6504. 2016. 06. 024.
- [23] 肖悦,田永中,许文轩,等.近10年中国空气质量时空分布特征[J].生态环境学报,2017,26(2):243-252. DOI:10.16258/j. cnki. 1674-5906. 2017. 02. 009.
- [24] 马文超,台凌宇,陈冠益,等.天津地区典型家用生物质颗粒采暖炉污染物排放分析[J].中国环境科学,2018,38(3):845-851. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2018. 03. 006.
- [25] 徐艳娟.冬季供暖对中国北方空气质量的影响[D].济南:山东大学.2015.
- [26] 姚青,刘敬乐,蔡子颖,等.天津大气稳定性和逆温特征对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J].中国环境科学,2018,38(8):2865-2872.
- [27] 孙韧,张文具,董海燕,等.天津市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子化学特征及来源分析[J].中国环境监测,2014,30(2):150-155.
- [28] 张雯.天津市室内外 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素分析[D].天津:天津大学.2014.