

# 天津市不同功能区融雪径流的污染特性

王婧淑, 黄津辉, 储修如

(南开大学环境科学与工程学院 中加水与环境安全联合研发中心, 天津 300071)

**摘要:** 在经历长达 108 d 无有效降水的干燥期后, 2018 年 1 月 21 日天津市迎来入冬以来的第一场大雪, 在降雪当天对不同功能区进行采样, 研究了污染物组分的特征和微生物群落的多样性。结果表明, 不同功能区融雪径流中的污染组分不尽相同, 不同深度雪样中的污染物也有很大差别。距离地面 2 cm 以内的下层雪样中 COD 和 TSS 浓度分别是距离地面 2 cm 以上上层雪样的 5 ~ 48 倍和 2 ~ 39 倍, 浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的 V 类水质标准限值。利用 16S rDNA 扩增子测序方法对样品中的微生物进行测序分析, 并与环境因子进行典型关联分析, 结果表明, 细菌主要吸附在颗粒物表面, 其群落结构受到不同环境因子的影响。

**关键词:** 融雪径流; 细菌群落; 环境因子; 天津市

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0114-05

## Snowmelt Runoff Pollution of Different Functional Areas in Tianjin

WANG Jing-shu, HUANG Jin-hui, CHU Xiu-ru

(Sino-Canadian Joint R & D Centre for Water and Environmental Safety, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** After 108 days without effective precipitation, the first heavy snow event in winter occurred on January 21, 2018 in Tianjin. Snow samples were collected in different functional areas of Tianjin, and characteristics of pollutions composition and the diversity of microbial communities were investigated. The results showed that the pollutants composition of snowmelt runoff was varied in different functional areas, and pollutants in snow samples at different depths were also varied substantially. The concentrations of COD and TSS in snow samples less than 2 cm above ground were 5-48 times and 2-39 times higher than those more than 2 cm above ground, and the concentrations exceeded the limits of V class standard of *Surface Water Environment Quality Standard* (GB 3838-2002). The 16S rDNA amplification sequencing method was used to analyze microbial community of the snow samples, and a typical correlation analysis (CCA) was performed with the environmental factors. The results showed that the bacteria were mainly adsorbed on the surface of the particles, and the community structure was affected by different environmental factors.

**Key words:** snowmelt runoff; bacterial community; environmental factor; Tianjin City

中国的城市化在 2000 年后呈加剧的趋势, 城市化不仅仅带来了人口聚集, 同时也带来了城市面源

污染造成的受纳水体严重污染问题。Gilbert 等<sup>[1]</sup>认为,径流中的污染物通常有固体物质、营养物质、重金属、油脂、细菌等。以往研究大部分集中在雨季的降雨径流上,对融雪径流的研究相对不足。但研究表明,除了夏季降雨引起的径流外,早春的融雪径流可能带来降雨径流污染 5 ~ 8 倍的污染负荷<sup>[2]</sup>。天津地处半湿润半干旱地区,受气候影响,冬季河流水位较低,水环境容量较小,融雪径流对受纳水体产生的污染更为严重。笔者以天津市为研究区域,通过对 5 个功能区的积雪进行采样分析,确定不同功能区融雪径流的污染特性,并分析其污染分布特征与细菌群落结构特征的相关性,以期为天津市融雪径流的污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点设置

采样点的具体信息见表 1。

表 1 功能区分类及采样点周边情况

Tab. 1 Classification of functional area and sampling conditions

项 目	采样点名称	采样点周围情况
学校	E1、E2	新校区车流量比较少,绿化多
医院	H1、H2	停车较多,人流量大
医院外车行道	M	人流量大,车流量大
高速公路	R1、R2	车流量大
居民商业混用地	S1、S2	人流量大,商业活动多
注: 1 为上层雪样,2 为下层雪样。		

在经历了长达 108 d 无有效降水的干燥期,2018 年 1 月 21 日天津市迎来了入冬以来的第一场大雪,据天津气象局统计,降雪厚度最大有 9.1 mm。本研究在此次降雪后的 6 h 内,分别选取文教区、医院、居民商业混用地、高速公路和城市道路 5 个功能

区进行雪样采集。在各功能区分别各设两个采样点,每个采样点分别取距离地面 2 cm 以上的上层雪样和距离地面 2 cm 以下的下层雪样,每层雪样各取 3 个平行样混合。每个功能区两个采样点的平均值作为此功能区的检测值,有效样品共计 18 个。

1.2 样品采集

采集雪样时,用干净的铲子剥除表面可能受到污染的雪,取表面以下距离地面 2 cm 以上雪样,装入聚乙烯袋中密封,作为与大气来源相关的污染物分析;在同一采样点取距离地面 2 cm 以下雪样装入聚乙烯袋中密封,作为与道路来源相关的污染物分析。样品均于降雪后 6 h 内采集。雪样置于室内自然融化后进行水质分析,分析指标包括 pH 值、COD、NH<sub>3</sub> - N、TP、TN、TOC、铜、锌、六价铬、铅、铁、锰和细菌等。样品在 24 h 内分析完毕。

金属含量采用 ICP - MS 法测定;pH 值采用玻璃电极法测定;TSS 采用重量法测定;COD 采用快速密闭消解法测定;TN 采用过硫酸钾氧化 - 紫外分光光度法测定;NH<sub>3</sub> - N 采用纳氏试剂分光光度法测定;TP 采用钼酸铵分光光度法测定;TOC 采用有机碳分析仪测定;微生物菌群采用 16S rDNA 扩增分析鉴定。

1.3 数据分析

本研究基于 Anosim 组间群落结构差异显著性检验,衡量不同功能区样本间微生物的丰度和多样性差异,并应用 CANOCO 软件进行典型关联分析(CCA),解释环境因子与微生物的相关性。

2 结果与讨论

2.1 不同功能区融雪径流污染特征分析

不同功能区雪样中的污染物含量见表 2。

表 2 不同功能区的融雪径流污染组分特征

Tab. 2 Characteristics of pollution components of snowmelt runoff in different areas

mg · L<sup>-1</sup>

项 目	COD	TOC	NH <sub>3</sub> - N	TP	TN	TSS	Cu	Pb	Zn	Cr	Fe	Mn
R1	10	0	0.88	0.01	3.32	50	0.028	0.021	0.177	0.188	0.545	0.034
R2	476	57.84	2.53	0.49	9.22	1 960	0.072	0.081	0.131	0.155	0.607	0.091
S1	17	0	0.80	0.01	3.12	30	0.020	0.048	0.127	0.181	0.578	0.029
S2	449	165.2	8.89	2.46	18.38	580	0.076	0.045	0.159	0.147	0.595	0.091
E1	10	0	1.23	0.01	2.32	20	0.020	0.054	0.146	0.147	0.353	0.026
E2	225	35.15	4.41	0.20	8.17	620	0.035	0.081	0.194	0.156	0.805	0.118
H1	11	0	0.65	0.01	3.88	20	0.016	0.040	0.110	0.172	0.387	0.027
H2	56	26.69	1.96	0.26	6.91	40	0.028	0.047	0.202	0.156	0.530	0.050
M	1 090	85.89	3.92	0.61	11.43	2 100	0.094	0.008	0.107	0.148	0.864	0.099

由表 2 可知,在同一次降雪事件中,不同深度雪样中的污染物浓度存在很大差异。下层雪样与地面

接触,可以代表大部分路面上沉积的污染组分,而上层雪样在一定程度上可以代表大气环境中存在的污染组分。显然,下层雪中的 TSS、COD 和 TOC 含量相比上层雪要高。例如,高速公路下层融雪中的 COD 含量约为上层融雪的 40 倍,超过了地表水 V 类标准限值。上层雪样中的 TOC 含量几乎低于检测限,而下层雪样中的 TOC 含量非常高,尤其是居民商业混用区高达 165.2 mg/L。下层雪样中的 TSS 浓度也远高于上层雪样。张娜等人<sup>[3]</sup>对天津市降雨径流中的污染物进行了综合分析,将融雪中的 COD、TOC 和 TSS 含量与降雨径流中的含量进行比较发现,除商业区降雨径流中的 COD 和 TOC 含量略高外,其他功能区融雪中的 COD 和 TOC 含量均大于降雨径流中的含量。

另外,居民商业区下层雪样中的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 含量分别是上层雪样的 8、200 和 6 倍,超过了地表水 V 类标准限值,表明融雪中  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 的来源主要是地表灰尘中污染物的累积。这一结果与 Chen 等人<sup>[4]</sup>在北京师范大学内的雪样调查结果不尽相同,该研究发现上层雪中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量高于下层雪,认为积雪静置使得上层雪样更容易从空气中吸收  $\text{NH}_3\text{-N}$ 。本研究采样时间是在雪停后的 6 h 内,而 Chen 等人是在雪停后 24 h 内采样,积雪的静置时间较长,可能积雪对空气中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  有再吸收作用;本研究中积雪的静置时间较短,对空气中  $\text{NH}_3\text{-N}$  的再吸收作用较弱,上层雪样基本上代表了下雪时  $\text{NH}_3\text{-N}$  的空气沉降部分。与张娜等<sup>[3]</sup>对天津市降雨径流污染物的分析结果相比,文教区下层雪样中的 TP 含量稍低于降雨径流中的,而其他功能区下层雪样中的 TP 含量,以及所有雪样中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN 含量均高于降雨径流中的含量。

对融雪中重金属含量的分析结果表明,在大部分地区下层融雪中的重金属含量要高于上层融雪中的;但是高速公路、混合用地和医院上层雪样中的 Cr 含量均大于下层雪样中的,这些区域都是交通繁忙区域,空气中的 Cr 含量可能高于地面。Fe 和 Mn 是造成水体黑臭的关键因素,本研究发现上层和下层雪样中的 Zn、Cr 和 Fe 含量均较高,说明大气环境中 Zn、Cr 和 Fe 等重金属含量对融雪径流污染物的贡献很大,同时融雪中 Zn、Cr 和 Fe 的含量比 Cu、Pb 和 Mn 的含量高一个数量级。与天津市降雨径流中的重金属含量相比,商业区降雨径流中的 Pb、Zn、

Fe、Mn 含量比融雪中的要高,而文教区融雪中 Cu、Zn、Cr、Fe、Mn 含量比降雨径流中的要高。这与李怀恩等<sup>[5]</sup>在西安的调查结果一致。本研究各功能区融雪中的重金属含量均高于荷兰<sup>[6]</sup>融雪中的重金属含量,但是低于兰州<sup>[7]</sup>融雪中的重金属含量。

## 2.2 细菌群落多样性特征

将上层雪样和下层雪样分为两个组,通过 Anosim 分析进行组内和组间群落结构差异显著性检验,Anosim 分析是一种非参数检验方法,用来检验组间差异是否显著大于组内差异,从而判断分组是否有意义。结果显示,  $R = 0.45 > 0$ ,说明组间差异大于组内差异,上层雪样与下层雪样之间的群落多样性差异大于不同功能区之间的群落多样性差异。  $P = 0.017 < 0.1$ ,说明差异显著。

分别在门和目水平对不同功能区 and 不同深度雪样中的细菌相对丰度进行对比分析,结果见图 1。

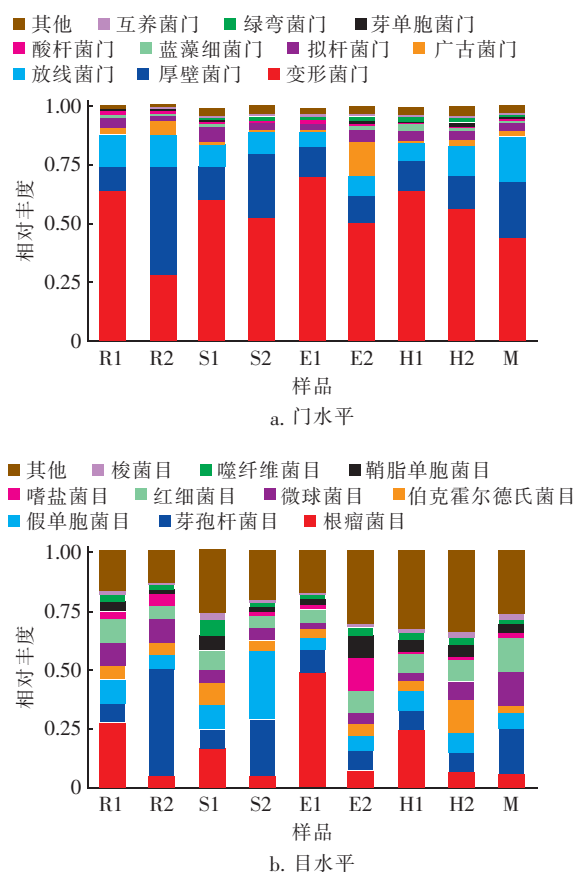


图1 16S rDNA 与 Meta 分析结果中门水平和目水平上前 10 种共有类群的相对百分比

Fig. 1 Relative percentage of bacterial community based on 16S rDNA and Meta analysis (top 10 phylum and order)

在门水平上,各功能区样品中的优势菌门主要

是变形菌门(*Proteobacteria*),这是天津市道路融雪样品中细菌的主要优势菌群(28.1%~70.2%)。变形菌在各个功能区所占的比例都比较大,在上层雪样中的占比大于下层雪样,可见大气环境中变形菌的分布比较广,变形菌门中的致病菌非常多,它们可在恶劣的环境中形成悬浮于空气中的孢子来保护自己,这大大提升了其生存范围及抗逆潜质。厚壁菌门在下层雪样中的占比大于上层雪样,说明厚壁菌门主要存在于地表沉积物中;拟杆菌门中有很多种类生活在人体或者动物的肠道中,拟杆菌门在商业居民区和文教区这些人流量较大的区域占较大比例,说明人类活动明显影响环境中拟杆菌门的多样性。

从目水平上看,各功能区融雪中的优势菌目有根瘤菌目(*Rhizobiales*)、芽孢杆菌目(*Bacillales*)、假单胞菌目(*Pseudomonadales*)、伯克霍尔氏菌目(*Burkholderiales*)、微球菌目(*Micrococcales*)、红细菌目(*Rhodobacterales*)、嗜盐菌目(*Halobacteriales*)、鞘脂单胞菌目(*Sphingomonadales*)、噬纤维菌目(*Cytophagales*)、梭菌目(*Clostridiales*),相对百分比之和达到97%以上。不同功能区之间细菌群落结构差异非常大。根瘤菌目在上层雪样中的占比大于下层雪样,在文教区的占比最大,分析原因可能是根瘤菌目主要生存在土壤和植物根际中,校园绿化率比较高,因此根瘤菌目在文教区大气中的相对丰度较大,也说明样品的来源与土壤和植物有关。芽孢杆菌目在高速公路、居民商业区和医院外车行道这些车流量较大功能区的下层雪样中占比较大。假单胞菌目在居民商业区下层雪样中的占比最大。假单胞菌目中的铜绿假单胞菌是最常见的病原菌之一,近年来对人的致病作用明显增加,因而存在一定的健康风险。伯克氏菌目在医院下层雪样中的相对丰度最大,伯克氏菌是动植物及人类的重要病原菌,而且由于伯克氏菌类对抗生素的抗药性以及高运动性等特点,该菌被认为是针对家畜及人类健康的病菌潜在媒介。医院中伯克氏菌目的相对丰度比较高,这与医院中病人较多有关。

为了能清晰了解样品间相似性聚类情况,通过UPGMA聚类树对样品进行等级聚类,如图2所示。可知,具有较高相似性的样品R1、S1、H1、E1分别代表高速公路、居民商业区、医院和文教区的上层雪样,说明一定区域内大气中细菌群落的多样性是相

似的。H2是医院下层雪样,而M是医院外车行道的下层雪样,这两者在一个分支上,说明医院和其外车行道路面沉积物中的细菌群落结构具有相似性。S2、R2、E2代表居民商业区、高速公路和文教区下层融雪,三者与H2、M分别在不同分支上,说明不同功能区道路沉积物中的细菌群落结构多样性明显不同。

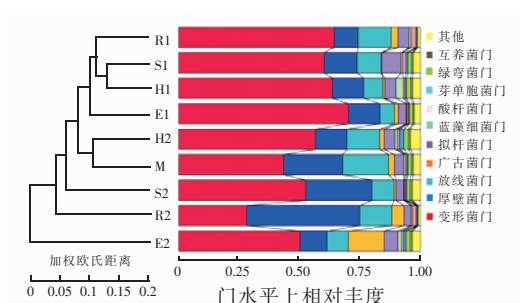


图2 基于加权欧氏距离法在门水平上的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis based on weighted UniFrac distance method at phylum level

### 2.3 细菌与环境因子的相关性分析

对细菌优势菌属与环境因子之间进行典型关联分析(CCA),CCA使用的方法是将多维的 $X$ 和 $Y$ 都用线性变换为一维的 $X$ 和 $Y$ ,然后再使用相关系数来看 $X$ 和 $Y$ 的相关性, $X$ 轴和 $Y$ 轴的解釋率可以达到37%(见图3)。

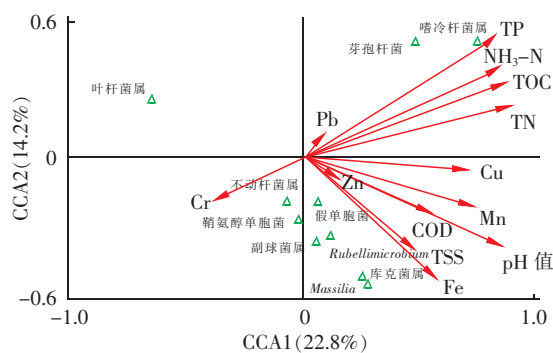


图3 环境因子与融雪微生物优势菌种的典型关联分析

Fig. 3 CCA for environmental factors and dominant bacteria in snowmelt sample

对于因素比较复杂的环境来说,解释具有可信度。结果表明,在属水平上,Fe、Zn、Cr、Mn、COD、TSS与优势菌种的群落结构有很强的正相关性。Cr主要影响不动杆菌属的菌群分布,Fe、Zn和TSS主要影响假单胞菌属和库克菌属的菌群分布,也说明了细菌主要吸附在颗粒物表面而存在。NH<sub>3</sub>-N和TP主要影响芽孢菌属和嗜冷杆菌属的菌群分布。



不同功能区环境因素不同,从而影响微生物群落结构的特征。Fe、Mn、Zn、Cu、COD 与 TSS 有较强的相关性,说明这些环境因子主要依附在颗粒物表面而存在。

### 3 结论

① 不同功能区融雪中的污染组分含量不同;下层雪样中的污染物含量高于上层雪样,其中下层雪样中的 COD 和 TSS 含量分别是上层雪样的 5~48 倍和 2~39 倍,下层雪样的污染来源主要是地表污染物累积,上层雪样基本上代表了下雪时空气中的污染物含量;融雪径流中大部分污染物组分的含量大于降雨径流中的含量。

② 各个功能区之间的细菌优势菌群类似,但细菌群落的多样性和丰度存在明显差异。上层雪样与下层雪样之间的群落多样性差异大于不同功能区之间的群落多样性差异。

③ 细菌群落结构受到环境中不同环境因子的影响,假单胞菌属和库克菌属主要吸附在颗粒物表面而存在。

### 参考文献:

- [1] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut[J]. *Water Res*, 2006, 40(4): 826-832.
- [2] Westerlund C, Viklander M. Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall[J]. *Sci Total Environ*, 2006, 362(1/3): 143-156.
- [3] 张娜, 赵乐军, 李铁龙, 等. 天津城区道路雨水径流水质监测及污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2127-2131.
- Zhang Na, Zhao Lejun, Li Tielong, *et al.* Characteristics of pollution and monitoring of water quality in Tianjin[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(6): 2127-2131 (in Chinese).
- [4] Chen L, Zhi X, Shen Z, *et al.* Comparison between snowmelt-runoff and rainfall-runoff nonpoint source pollution in a typical urban catchment in Beijing, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25(3): 2377-2388.
- [5] 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.
- Li Huaen, Liu Zengchao, Qin Yaomin, *et al.* Characteristics of snowmelt runoff pollution and comparison with rainfall runoff pollution in Xi'an City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(11): 2795-2802 (in Chinese).
- [6] Kuoppamäki K, Setälä H, Rantalainen A L, *et al.* Urban snow indicates pollution originating from road traffic[J]. *Environ Pollut*, 2014, 195: 56-63.
- [7] 逮娟. 兰州市大气降雪中重金属污染的研究及来源分析[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(4): 650-653.
- Lu Juan. Research and source analysis of heavy metal elements pollution with atmospheric snowfall in Lanzhou City[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(4): 650-653 (in Chinese).



作者简介:王婧淑(1993-),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为生态水文与海绵城市。

E-mail: shirleyjingshu@126.com

收稿日期:2018-02-27