

祝 婕, 蔺尾燕, 杨 静, 等. 乌鲁木齐夏、冬降水中溶解性有机质光谱特征及来源解析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 273–280.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.10.051

乌鲁木齐夏、冬降水中溶解性有机质 光谱特征及来源解析

祝 婕^{1,2,3}, 蔺尾燕^{1,2,3}, 杨 静^{1,2,3}, 何 静^{1,2,3}, 邓文叶^{1,2,3}, 马俊英^{1,2,3}

(1. 新疆环境保护科学研究院, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 新疆环境污染监控与风险预警重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
3. 新疆清洁生产工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:利用紫外可见光谱、三维荧光光谱研究乌鲁木齐夏季降水、冬季降雪中溶解性有机质(DOM)光谱特征, 运用后向轨迹模型对 DOM 来源进行解析。紫外可见光谱分析结果表明, 冬季降雪样品中的 DOM 分子量相对较低, 夏季降水样品中 DOM 胡敏酸的含量比富里酸含量大, 冬季降雪样品中相反; 夏季降水样品中腐殖化程度低于冬季降雪, 冬季样品中 DOM 的有机物分子缩合程度较低。三维荧光光谱分析结果表明, 样品中 DOM 主要由生物活动产生, 腐殖化程度较弱, 类腐殖质和类蛋白质贡献均有, DOM 来源既有陆源输入, 也受到微生物活动的影响, 腐殖组分发育程度较低。后向轨迹模型分析结果表明, 不同高度乌鲁木齐夏季降水来源基本相同, 主要来自西西伯利亚长距离传输和哈萨克斯坦楚河—萨雷苏盆地长距离传输。降雪 100 m 处的气流主要来自准格尔盆地短距离传输, 500、1 000 m 处的气流主要来自西西伯利亚长距离传输和天山山脉中段距离传输。

关键词:乌鲁木齐; 降水; 溶解性有机质; 紫外可见光谱; 三维荧光光谱; 后向轨迹模型

中图分类号: X832; P426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)10-0273-08

溶解性有机质(dissolved organic matter, 简称 DOM)是指能通过 0.45 μm 孔径的有机物, 它广泛存在于自然界中, 是天然水体和土壤中的一种常见

组分^[1], 作为重要的反应界面或者载体, 是生态系统的重要组成部分, 影响环境污染物的迁移转化^[2]。雨水 DOM 中易于被微生物吸收利用的活泼组分所占的比例很高^[3], 是水环境中次级生产力的重要有机质来源之一。同时 DOM 生物化学活性较强, 具有重要的生态环境效应, 也是土壤有机质中最活跃、最重要的部分^[4]。

在大气环境中, 降水中 DOM 作为大气中有机物的重要组成部分, 对全球碳循环具有显著贡献^[5]。DOM 通过对光的吸收, 能够影响云层反射率, 增加冷凝核含量, 进而影响降水 pH 值、能见度

收稿日期: 2019-05-27

基金项目: 2019 年新疆维吾尔自治区生态环境专项; 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费项目(编号: ky2018106); 国家自然科学基金地区基金(编号: 41465008)。

作者简介: 祝 婕(1987—), 女, 新疆哈密人, 硕士, 工程师, 主要从事大气污染源解析研究。E-mail: xjhkyzj@163.com。

通信作者: 马俊英, 硕士, 高级工程师, 主要从事大气污染源解析研究。E-mail: 276483768@qq.com。

12(3): 8–12.

[4] 陈立祥, 章怀云. 木质素生物降解及其应用研究进展[J]. 中南林业学院学报, 2003, 23(1): 79–85.

[5] 张晓琰, 彭 学, 政井英司. 木质素芳香族化合物降解菌 *Sphingobium* sp. SYK_6 的研究进展[J]. 微生物学报, 2014, 54(8): 854–867.

[6] Furukawa K. Engineering dioxygenases for efficient degradation of environmental pollutants[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2000, 11(3): 244–249.

[7] 赵克义, 阚方琦, 李景学. 柠檬酸杆菌的分类近况[J]. 中国卫生检验杂志, 2001, 11(2): 252–255.

[8] 何晓青. 柠檬酸杆菌属 *Citrobacter* 的分类与鉴定[J]. 中国卫生

检验杂志, 2005, 15(12): 1535–1536.

[9] Masai E, Katayama Y, Fukuda M. Genetic and biochemical investigations on bacterial catabolic pathways for lignin-derived aromatic compounds[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2007, 71(1): 1–15.

[10] Sainsbury P D, Hardiman E M, Ahmad M, et al. Breaking down lignin to high-value chemicals; the conversion of lignocellulose to vanillin in a gene deletion mutant of *Rhodococcus jostii* RHA1[J]. ACS Chemical Biology, 2013, 8(10): 2151–2156.

[11] Shin S H, Kim S, Kim J Y, et al. Complete genome sequence of *Enterobacter aerogenes* KCTC 2190[J]. Journal of Bacteriology, 2012, 194(9): 2373–2374.

以及大气光化学过程,对跨境长距离迁移污染物的干湿沉降影响明显^[6]。同时,DOM 作为一类营养物质,对生态系统的富营养化也会产生影响^[7]。已有研究表明,在沿海区域降水中的 DOM 受海洋性气候影响明显^[8]。王朝阳等对北京市部分地区降雪中溶解性有机物进行研究,结果表明,降雪样品中 DOM 的芳香性和分子量较低,含有类色氨酸、类富里酸和类蛋白质类物质,腐殖化程度较低,受生物过程影响较大^[9]。邓荀等利用三维荧光光谱研究了 pH 值改变对雨水中 DOM 荧光组分及荧光指数的影响,结果表明雨水中 DOM 光谱受 pH 值的影响较大^[10]。

本研究利用紫外可见光谱、三维荧光光谱对乌鲁木齐夏季降水、冬季降雪中溶解性有机质特征及来源差异进行分析,并运用后向轨迹模型对 DOM 来源进行解析^[11]。

1 研究方法

1.1 样品收集

2018 年 6—8 月,2018 年 12 月至 2019 年 2 月,在新疆环境保护科学研究院(地理位置 87°34'E, 43°52'N)办公楼楼顶平台,连续采集降水样品。在

采样过程中,同时观测采样点位大气的温度、压力、相对湿度、风向、风速等气象参数。

1.2 分析方法

1.2.1 紫外可见光谱 采用紫外分光光度计,以超纯水作空白,波长扫描范围为 200 ~ 800 nm,光谱斜率 S 的计算公式如下。

$$a_{\lambda} = a_{\lambda_0} e^{S(\lambda_0 - \lambda)} + K。$$

式中: λ 表示波长扫描范围为 240 ~ 400 nm 时实际的扫描波长; λ_0 表示扫描波长为 300 nm; a_{λ_0} 表示波长为 300 nm 时的吸光度; a_{λ} 表示波长为 240 ~ 400 nm 时的吸光度; K 是拟合的背景参数。以 a_{λ} 对 λ 作图,得到斜率 S 。选取 250、360 nm 处吸光度的比值 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 来表征有机物的来源^[12]。选取 300、400 nm 处吸光度的比值 $D_{300\text{ nm}}/D_{400\text{ nm}}$ 来表征有机质腐殖化程度^[13]。选取 240、420 nm 处吸光度的比值 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 表征有机物分子的缩合度^[14]。

1.2.2 三维荧光光谱 三维荧光光谱采用同步三维荧光扫描-吸收光谱仪分析。三维荧光光谱中 DOM 各荧光峰位置及命名见表 1。

表 1 三维荧光光谱中 DOM 各荧光峰位置及命名^[11]

符号	荧光组分名称	最大激发波长范围 (nm)	最大发射波长范围 (nm)	特征
A	紫外光区类腐殖酸	< 260	380 ~ 460	低芳香性,常见于农业和工业废水中
C	可见光区类腐殖酸	320 ~ 360	410 ~ 460	多芳香性
B	类络氨酸	270 ~ 280	298 ~ 319	氨基酸,可能指示更多降解的缩氨酸
T	类色氨酸(类蛋白)	< 240、270 ~ 280	280 ~ 350、304 ~ 330	氨基酸,可能指示较少降解的缩氨酸

参考水体中 DOM 荧光特征参数,分别运用腐殖化指数(HIX)、荧光指数(FI)、生化指数(BIX)、紫外光区类腐殖酸与可见光区类腐殖酸比值 $r(A/C)$,评价降水中 DOM 腐殖程度、DOM 来源、DOM 自生来源的相对贡献和 DOM 结构发育成熟度^[11]。

1.2.3 后向轨迹(HYSPLIT)分析 本研究利用 HYSPLIT 模型以及美国国家环境预报中心(NCEP)提供的地面数据采集系统(GDAS)数据,对在本研究降水采集点进行 72 h 气流轨迹后推模拟,并对其进行聚类分析,得到具有代表性的气团轨迹,以分析不同季节气团来源差异对降水中 DOM 可能造成的影响。

2 结果与分析

2.1 样品基本性质

本研究采集乌鲁木齐 2018 年 6—8 月的降水样

品,2018 年 12 月至 2019 年 2 月的降雪样品,观测降水 3 场,降雪 2 场,获取有效样品 25 个,每场降水时的基本气象条件见表 2。

2.2 紫外可见光谱分析

乌鲁木齐夏季、冬季降水样品中 DOM 的紫外可见吸收光谱曲线见图 1。不同时期降水的样品中 DOM 的紫外可见光谱吸收曲线线型没明显区别,均大表现出吸收系数随波长增长呈指数形式递减,在波长达到 500 nm 后吸收几乎为 0。DOM 样品中相关指数见表 3。

乌鲁木齐夏季、冬季 5 场典型降水中,各 DOM 样品的 S 均值范围为 10.01 ~ 20.88 μm^{-1} 。 S 均值与 DOM 分子量成反比^[15],冬季样品中 DOM 的 S 均值高于夏季样品,可见乌鲁木齐冬季降雪样品中的 DOM 分子量相对较低。这种差异原因可能同 DOM

表 2 降水时气象数据

序号	降水时间	24 h 累计降水量 (mm)	相对湿度 (%)	小型蒸发量 (mm)	气压 (Pa)	风速 (m/s)	平均气温 (℃)	平均地表气温 (℃)
1	2018-06-21	3.0	67	5.9	8 875	1.2	19.5	21.7
2	2018-07-13	3.2	64	2.3	8 014	2.1	23.7	17.7
3	2018-08-13	2.7	73	4.6	8 866	2.9	16.5	16.9
4	2018-12-02(雪)	20.5	69	0.4	8 081	1.7	-16.3	-4.2
5	2019-02-06(雪)	2.5	82	0.7	8 076	1.2	-5.9	-4.5

注:24 h 累计降水量的测定时间是 20:00。

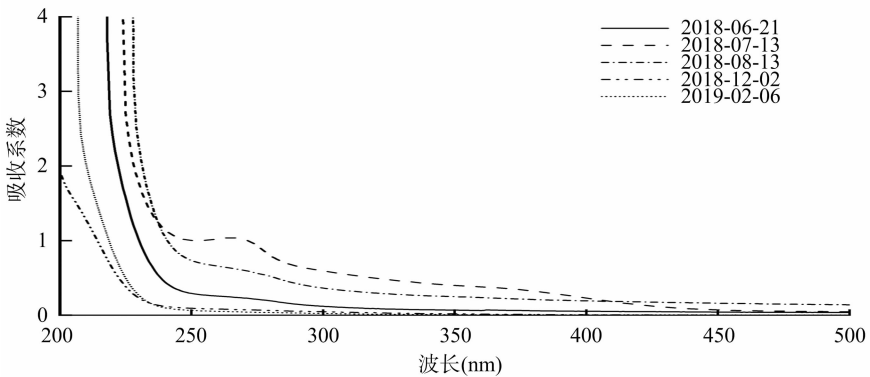


图1 降水样品中 DOM 的紫外可见吸收曲线

表 3 DOM 样品中紫外可见光谱相关指数

序号	降水时间	S 均值 (μm^{-1})	$D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$	$D_{300\text{ nm}}/D_{400\text{ nm}}$	$D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$
1	2018-06-21	15.21	4.73	2.33	9.04
2	2018-07-13	10.01	2.63	2.60	8.16
3	2018-08-13	11.05	3.09	1.89	5.84
4	2018-12-02	17.71	6.27	7.83	39.33
5	2019-02-06	20.88	8.00	4.00	24.75

的来源和形成过程有关。

夏季样品中 DOM 的 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 在 2.63 ~ 4.73 之间,表明降水样品中 DOM 胡敏酸的含量比富里酸含量大,冬季降雪样品中 DOM 的 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 均大于 5,表明降雪样品中 DOM 的富里酸含量比胡敏酸的含量大。

$D_{300\text{ nm}}/D_{400\text{ nm}}$ 表征有机质腐殖化程度。样品中 DOM 的 $D_{300\text{ nm}}/D_{400\text{ nm}}$ 取值范围在 1.89 ~ 7.83 之间,夏季雨水样品中腐殖化程度明显低于冬季降雪。这可能是由于冬季降雪中来源于北方陆源颗粒物的输入造成降雪中 DOM 中腐殖质含量较多的原因。

有机物分子缩合度与 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 成反比^[14]。夏季降水样品中 DOM 的 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 远小于冬季降雪,表明冬季样品中 DOM 的有机物分子缩合程度较低,可能是因为降雪样品中的 DOM 具有较低的芳香性结构^[16-18]。

2.3 三维荧光光谱分析

乌鲁木齐夏季、冬季 5 场降水中 DOM 的三维荧光光谱见图 2。

由图 2 可知,样品中 DOM 三维荧光光谱图中均有 4 个特征荧光峰,总体类似,但各有差异。6 月、8 月、12 月、2 月紫外光区类腐殖酸 A 和可见光区类腐殖酸 C 是样品中主要荧光峰。对于大部分溶解类腐殖质来说,峰 A 是具有低芳香性,常作为的农业和工业废水信号,峰 C 具有较多芳香性的陆源腐殖质所产生的荧光信号。类色氨酸荧光峰 T 是 7 月雨水样品荧光的主要贡献者,反映出生物源的输入是此次降水中 DOM 的主要来源。

HIX 表示腐殖化程度强弱^[18]。当 $HIX < 4$ 时,DOM 以自生源贡献为主,水体自身生产力贡献相对较低。由表 4 中数据可知,样品 HIX 均小于 4,表明样品中 DOM 主要由生物活动产生,腐殖化程度较弱。

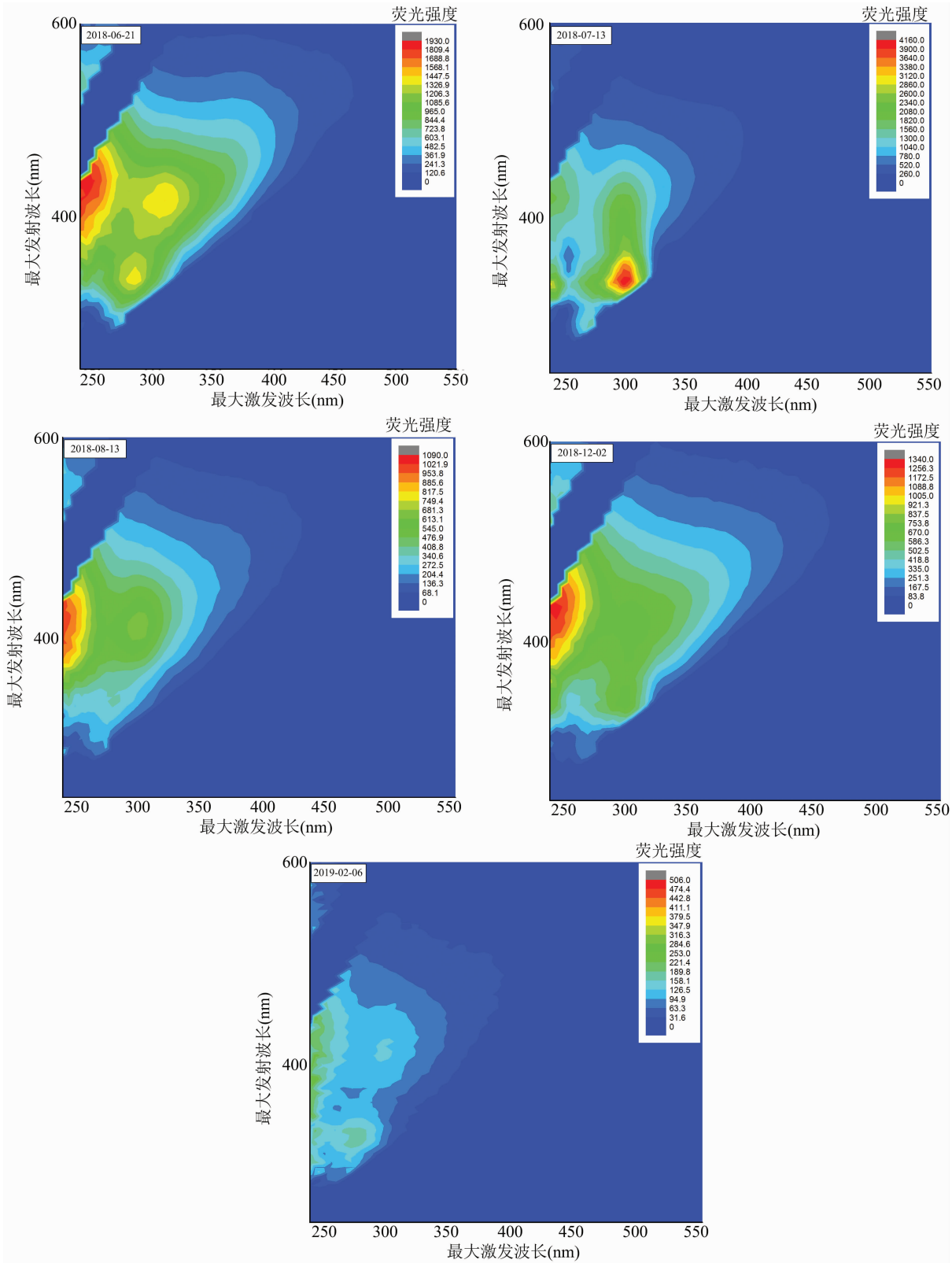


图2 降水中 DOM 三维荧光光谱

FI 作为物质的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标^[19],夏季、冬季样品的 *FI* 较为平均,差异不明显。表明在降水中 DOM 表现为内源、外源类腐

殖质和类蛋白质贡献均有。
BIX 是反映 DOM 中自生贡献比例的指标^[15],*BIX* < 1.0 表明 DOM 中含有较少的自生组分,*BIX* >

表 4 三维荧光光谱中 DOM 荧光特征参数

序号	降水时间	HIX	FI	BIX	r(A/C)
1	2018-06-21	2.31	1.87	0.81	1.43
2	2018-07-13	1.38	1.72	1.19	1.49
3	2018-08-13	2.38	1.51	0.74	2.31
4	2018-12-02(雪)	3.21	1.73	0.91	1.99
5	2019-02-06(雪)	0.92	1.47	0.71	2.86

1.0 表明 DOM 具有较强的自生源特征。样品的 BIX 平均值在 1.0 左右,夏季、冬季降水样品中 DOM 来源既有陆源输入,也受到微生物活动的影响。

$r(A/C)$ 同腐殖化组分中稳定组分含量成正比^[19],反映 DOM 中类腐殖组分的发育程度。样品的 $r(A/C)$ 在 1.43 ~ 2.86 之间,表明样品中腐殖化组分发育程度较低,稳定组分含量较小。

2.4 相关性分析

表 5 为样品中紫外可见光谱、三维荧光光谱参数的相关性特征,其中,DOM 的 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 与

$D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 呈现显著性正相关关系。主要因为 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 主要来表征有机物的中胡敏酸与富里酸含量的比值。当 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 较大时有机物中富里酸的含量大于胡敏酸,其中富里酸分子量较低,含有大量酚羟基、羰基等基团,分子缩合程度低;胡敏酸的分子量较大,芳化度高而离解度较小,分子缩合程度高。而 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 主要来表征有机物分子缩合度,有机物分子缩合度与 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 成反比。这同 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 与 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 呈现显著性正相关吻合。

表 5 DOM 参数相关性分析结果

光谱类型	参数	$D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$	$D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$	HIX	FI	BIX	r(A/C)
紫外可见光谱	$D_{300\text{ nm}}/D_{400\text{ nm}}$	0.565	0.583	0.528	-0.249	-0.225	-0.518
	$D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$		0.722 *	0.335	-0.401	-0.289	-0.271
	$D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$			0.261	-0.069	0.014	-0.344
三维荧光光谱	HIX				-0.237	-0.682 *	-0.845 **
	FI					0.548	0.023
	BIX						0.655 *

注:“*”“**”分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

HIX 与 $r(A/C)$ 呈极显著性负相关关系。HIX 反映 DOM 的腐殖化程度,而 $r(A/C)$ 反映 DOM 中类腐殖组分的发育程度,两者呈极显著性负相关表明样品腐殖化程度越弱,其腐殖化组分中稳定组分含量就越大。进一步证明样品 DOM 中低分子量腐殖质组分所占比例较高。

HIX 与 BIX 呈显著性负相关关系。HIX 小反映 DOM 以自生源贡献为主,而 BIX 正好相反,BIX 小表明 DOM 中含有较少的自生组分。HIX 与 BIX 均反映出样品中 DOM 以自生源贡献为主。BIX 和 $r(A/C)$ 呈显著性正相关关系。表明雨水样品中自生组分越少,其腐殖化组分中稳定组分含量就越少。

2.5 HYSPLIT 分析

研究以降水采集点为参考点,进行 72 h 气流轨迹后推模拟,夏季、冬季分别选取 2018 年 7 月 13 日、2018 年 12 月 2 日为典型日进行聚类分析。选

取 100、500、1 000 m 等 3 个高度层进行轨迹分型研究,初步探讨降水、降雪样品中 DOM 的气流来源特点。

由图 3 至图 10 可知,乌鲁木齐市夏季不同高度降水中 DOM 的气流来源基本相同。主要来自西西伯利亚长距离传输西北气流及来自哈萨克斯坦楚河—萨雷苏盆地长距离传输。冬季降雪 100 m 处气流主要来自准格尔盆地短距离传输(第 1 类轨迹占比 63%)、西北塔尔巴哈台山中长距离传输(第 3 类轨迹占比 21%),和哈萨克斯坦楚河—萨雷苏盆地中长距离传输(第 2 类轨迹占比 17%);500、1 000 m 处气流来源相似,主要来自西北西西伯利亚长距离传输和西南方天山山脉中段距离传输。

3 结论与讨论

紫外可见光谱分析乌鲁木齐市夏季、冬季 5 场

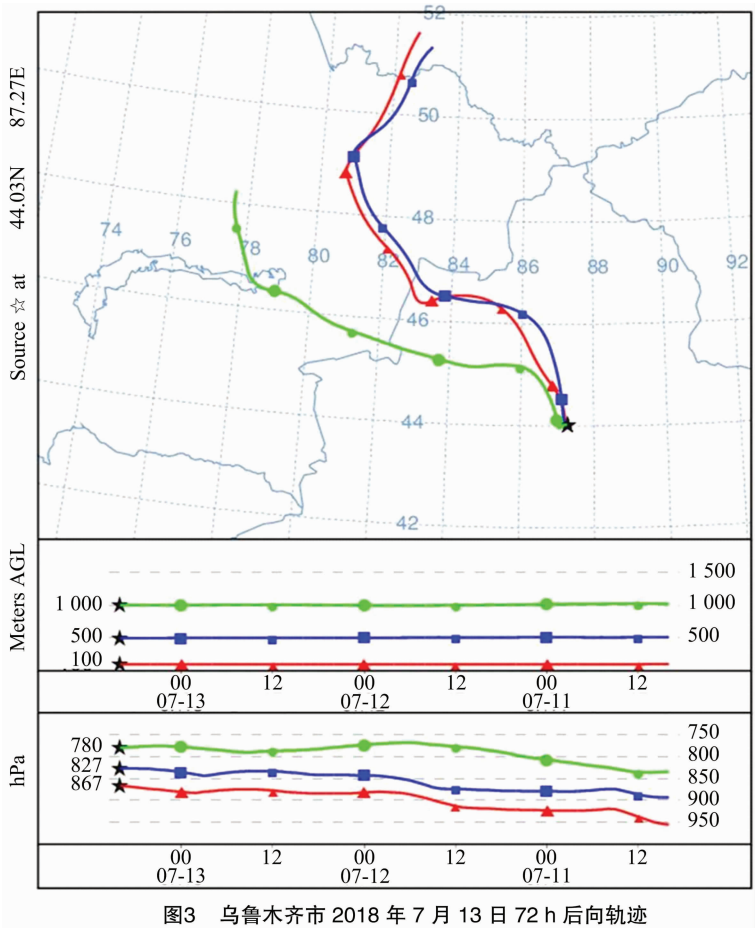


图3 乌鲁木齐市 2018 年 7 月 13 日 72 h 后向轨迹

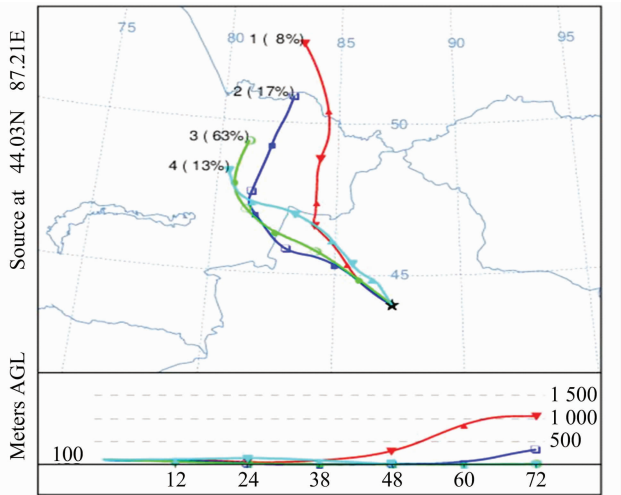


图4 乌鲁木齐市 2018 年 7 月 13 日 100 m 处 72 h 后向气流轨迹

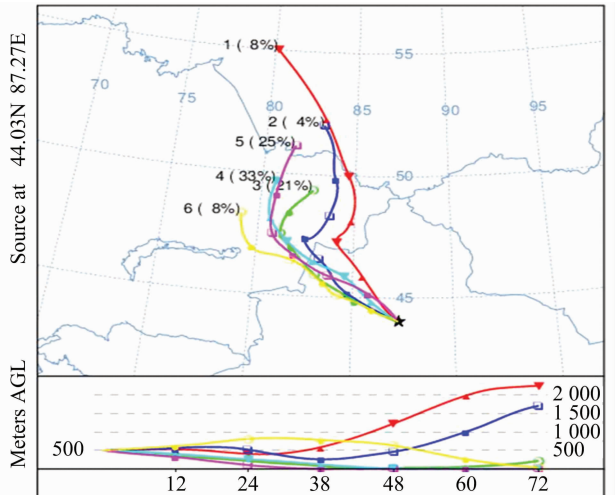


图5 乌鲁木齐市 2018 年 7 月 13 日 500 m 处 72 h 后向气流轨迹

典型降水中,各 DOM 样品的 S 范围为 $10.01 \sim 20.88 \mu\text{m}^{-1}$ 。冬季降雪样品中的 DOM 分子量相对较低。夏季降水样品中 DOM 胡敏酸的含量比富里酸含量高,降雪样品中 DOM 的富里酸含量比胡敏酸的含量高,夏季雨水样品中腐殖化程度明显低于冬季降雪,冬季样品中 DOM 的有机物分子缩合程

度较低。

样品中 DOM 的三维荧光光谱图中均有 4 个特征荧光峰,总体类似,但各有差异。样品 HIX 均小于 4,表明样品中 DOM 主要由生物活动产生,腐殖化程度较弱。夏季、冬季样品的 FI 差异不明显,表明在降水样品中 DOM 表现为内源、外源类腐殖质

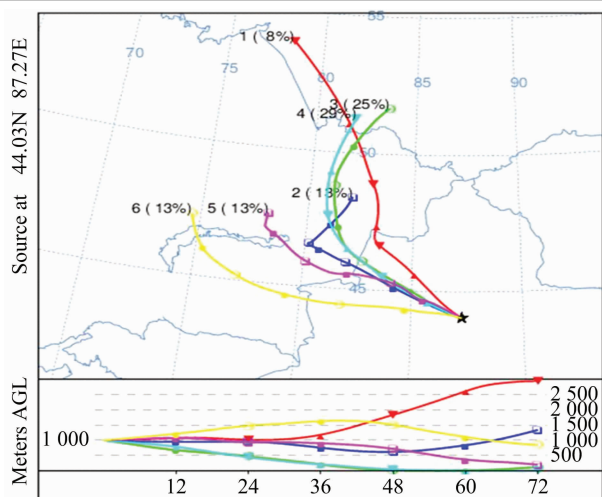


图6 乌鲁木齐市 2018 年 7 月 13 日 1 000 m 处 72 h 后向气流轨迹

和类蛋白质贡献均有。样品的 *BIX* 平均值在 1.0 左右,表明夏季、冬季降水样品中 DOM 来源既有陆源输入,也受到微生物活动的影响。样品中 $r(A/C)$ 在 1.43 ~ 2.86 之间,表明样品中腐殖组分发育程度较低。

DOM 的 $D_{250\text{ nm}}/D_{360\text{ nm}}$ 与 $D_{240\text{ nm}}/D_{420\text{ nm}}$ 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。 *HIX* 与 $r(A/C)$ 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。 *HIX* 与 *BIX* 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。

乌鲁木齐市夏季不同高度降水来源基本相同,主要来自西西伯利亚长距离传输西北气流及来自哈萨克斯坦楚河—萨雷苏盆地长距离传输。乌鲁木齐市冬季降雪 100 m 处气流主要来自准格尔盆地短距离传输、西北塔尔巴哈台山中长距离传输,和

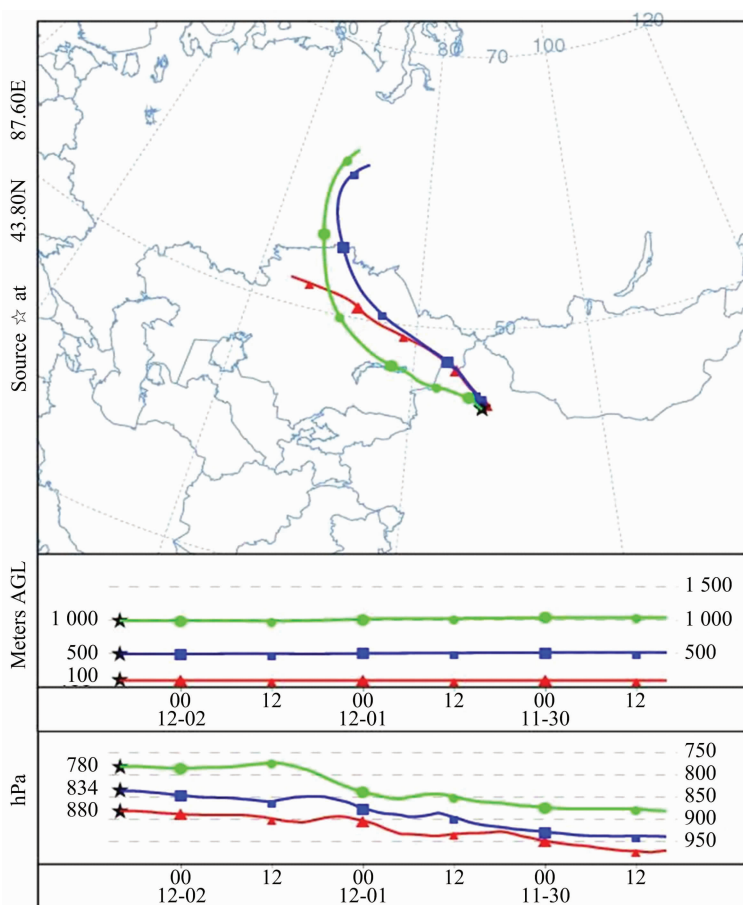


图7 乌鲁木齐市 2018 年 12 月 2 日 72 h 后向气流轨迹

哈萨克斯坦楚河—萨雷苏盆地中长距离传输。500、1 000 m 处气流来源相似,主要来自西北西西伯利亚长距离传输和西南方天山山脉中段距离传输。

参考文献:

[1] Courdouan A, Christl I, Meylan S, et al. Isolation and characterization

of dissolved organic matter from the Callovo – Oxfordian formation [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(7): 1537 – 1548.

[2] Driscoll C T, Lehtinen M D, Sullivan T J. Modeling the acid – base chemistry of organic solutes in Adirondack, New York, lakes [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(2): 297 – 306.

[3] Avery G B, Willey J D, Kieber R J, et al. Flux and bioavailability of Cape Fear River and rainwater dissolved organic carbon to Long Bay,

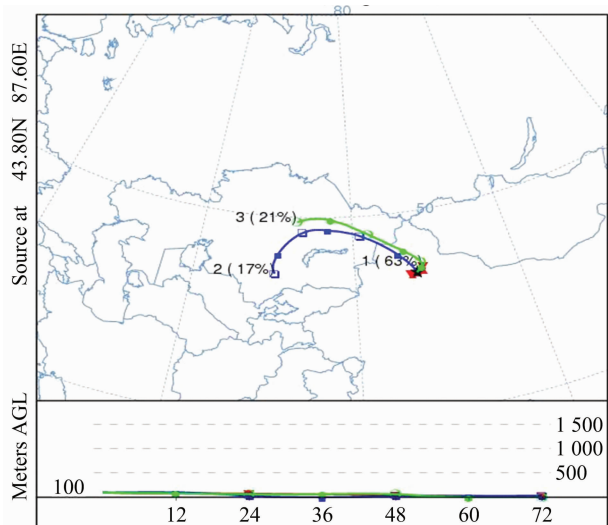


图8 乌鲁木齐市 2018 年 12 月 2 日 100 m 处 72 h 后向气流轨迹

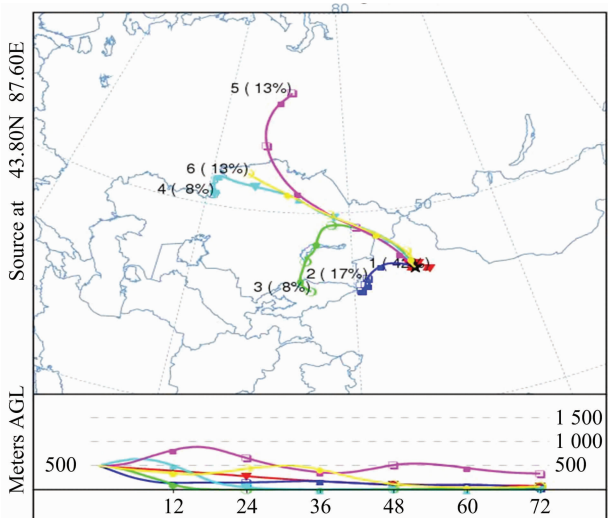


图9 乌鲁木齐市 2018 年 12 月 2 日 500 m 处 72 h 后向气流轨迹

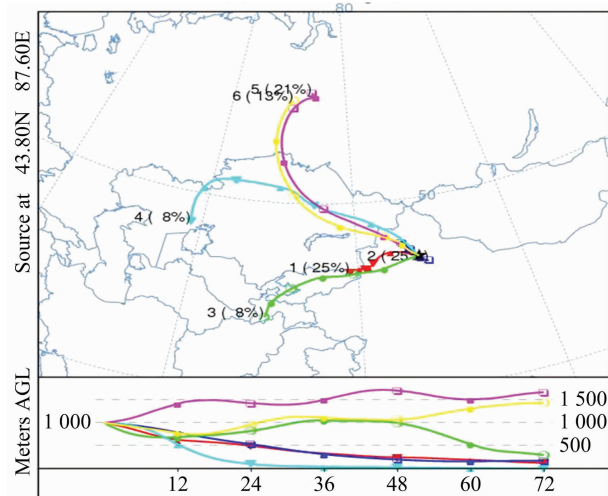


图10 乌鲁木齐市 2018 年 12 月 2 日 1000 m 处 72 h 后向轨迹平均

southeastern United States[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2):1042.

- [4] 吴东明, 邓晓, 李怡, 等. 土壤溶解性有机质的提取与特性分析研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(3):6-11.
- [5] Santos P S, Otero M, Duarte R M. Spectroscopic characterization of dissolved organic matter isolated from rainwater[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(8):1053-1061.
- [6] 梁俭, 江韬, 魏世强, 等. 夏、冬季降雨中溶解性有机质(DOM)光谱特征及来源辨析[J]. *环境科学*, 2015, 36(3):888-897.
- [7] Seitzinger S P, Styles R M, Lauck R, et al. Atmospheric pressure mass spectrometry: a new analytical chemical characterization method for dissolved organic matter in rainwater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(1):131-137.
- [8] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外-可见光谱特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(3):933-941.
- [9] 王朝阳, 赵晨, 欧佳奇, 等. 北京市部分地区降雪中溶解性有机物的光谱性能表征[J]. *环境化学*, 2016, 35(11):2269-2278.
- [10] 邓荀, 郭卫东, 卓健富. pH 值对雨水中溶解有机物荧光光谱特征的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(1):137-141.
- [11] 祝婕, 张健, 孟永霞, 等. 乌鲁木齐市 2018 年夏季降雨中溶解性有机质的光谱特征及来源解析[J]. *中国农村水利水电*, 2019(3):16-19, 23.
- [12] Barreto S R G, Nozaki J, Barreto W J. Origin of dissolved organic carbon studied by UV-vis spectroscopy[J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2003, 31(6):513-518.
- [13] 田林锋, 胡继伟, 李存雄, 等. 通过 DOM 的光谱特性对长江源头典型高原深水湖泊进行评价[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(6):80-84, 112.
- [14] 陶澍, 崔军, 张朝生. 水生腐殖酸的可见-紫外光谱特征[J]. *地理学报*, 1990, 45(4):484-489.
- [15] Zhao C, Wang C C, Li J Q, et al. Dissolved organic matter in urban stormwater runoff at three typical regions in Beijing: chemical composition, structural characterization and source identification[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(90):73490-73500.
- [16] Mcelmurry S P, David T L, Thomas C V. Stormwater dissolved organic matter: influence of land cover and environmental factors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(1):45-53.
- [17] Mattsson T, Kortelainen P, Antti R. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 76(2):373-394.
- [18] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6):706-719.
- [19] Mcknight D M, Elizabeth W B, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1):38-48.