

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016052602

李宗杰, 宋玲玲, 陈福昌, 等. 内陆干旱区降水化学变化和对沙尘天气的指示——以民乐县为例* [J]. 环境化学, 2017, 36(2): 373-379.

Li Zongjie, Song Lingling, Chen Fuchang, et al. The indicative significance of sand-dust weather and chemical change of precipitation in the inland arid area: A case of Minle county[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 373-379.

内陆干旱区降水化学变化和对沙尘天气的指示 ——以民乐县为例*

李宗杰¹ 宋玲玲¹ 陈福昌² 田青^{1**}

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州, 730070; 2. 金昌市第一中学, 金昌, 737100)

摘 要 本文对内陆干旱区(民乐县)2013年6月—2014年5月收集的降水样品 pH 值、EC 和主要阴阳离子浓度进行了测定和分析。结果表明,民乐县降水样品的 pH 值的变化范围为 6.84—8.78, 平均值为 7.41, pH 值在四季中的大小顺序为:冬季>春季>秋季>夏季。而民乐县降水样品 EC 的平均值为 167.80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 变化范围 17.4—848 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 四季中 EC 的大小顺序与 pH 值在四季中的大小顺序一致;pH 与降水量呈正相关关系,但显著性不高,同时也与相对湿度呈正相关关系,而 pH 值与气温也呈负相关关系,显著性较降水量的高。与 pH 值不同的是,电导率与降水量、气温和相对湿度均负相关关系;通过对典型沙尘事件的分析表明,pH 值会随着沙尘事件的发生主要表现出降低的趋势,而电导率会随着沙尘事件的发生呈现增加的趋势,在沙尘事件发生后离子浓度出现最高值的离子有: Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} , 而沙尘事件前后离子浓度变化程度由大到小的顺序为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 和 Mg^{2+} 。

关键词 沙尘事件, pH 和 EC, 降水水化学, 内陆干旱区。

The indicative significance of sand-dust weather and chemical change of precipitation in the inland arid area: A case of Minle county

LI Zongjie¹ SONG Lingling¹ CHEN Fuchang² TIAN Qing^{1**}

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China;

2. Jinchang City NO.1 Middle School, Jinchang, 737100, China)

Abstract: This work determined and analyzed the pH value, EC and the concentrations of main anion and cation of precipitation samples collected from June 2013 to May 2014 in the inland arid area (Minle county). The results showed that, the range of the pH value of the precipitation ranged from 6.84 to 8.78, and the mean was 7.41. The order for season was winter > spring > autumn > summer. The average of EC was 167.80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, and the variation range was from 17.4 to 848 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The order for season was the same as pH value. The positive correlation between pH value and precipitation, but the significance was not high. Meanwhile, the positive correlation between pH value and relative humidity, but pH value and air temperature showed negative

2016年5月26日收稿(Received: May 26, 2016).

* 甘肃省杰出青年基金(1506RJDA282), 中国科学院“西部之光”西部博士项目, 中国博士后管委会博士后国际交流计划项目(20140043), 甘肃农业大学青年导师基金(GAU-QNDS-201602)资助。

Supported by Gansu Province Science Fund for Distinguished Young Scholars (1506RJDA282), West Light Program for Talent Cultivation of Chinese Academy of Sciences, Post doctoral Program of International Exchange Program for Postdoctoral Fellow of China (20140043), Youth Mentor Foundation of Gansu Agricultural University (GAU-QNDS-201602).

** 通讯联系人, E-mail: tqing@gsau.edu.cn

Corresponding author, E-mail: tqing@gsau.edu.cn

correlation and the significance was higher than precipitation. By contrast, EC and precipitation, air temperature and relative humidity showed negative correlation. Through the analysis of typical sand dust events, the pH value decreased and the electrical conductivity increased with the occurrence of sand dust events. The concentrations of Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- and SO_4^{2-} reached to the highest value after the dust events occurred. The order of ion concentration change after dust events was SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , NH_4^+ and Mg^{2+} in dust events before and after.

Keywords: sand-dust events, pH and EC, precipitation hydrochemical, inland arid area.

近年来,随着人口数量的不断增长和我国城市化进程的加快以及能源、工业、交通等需求快速增长,使得我国大气污染的状态和性质也逐渐的发生着变化^[1-3].强风导致的沙尘事件是地表沙尘进入大气的重要途径,是严重危害人类生活和生产活动的灾害性天气现象^[4].大气降水化学是研究大气降水酸碱性以及物质成分变化的有效途径之一^[5],已有研究表明^[6-9],净化大气环境最为有效的手段是大气降水^[10],但随着对大气环境的净化,大气降水的离子浓度也发生了改变,因此大气降水的离子浓度变化也在一定程度上反映了大气环境的变化状况.但是要更加科学的预报和防治沙尘事件,不是一味的研究物质源和动力源之间的作用就能解决的^[11-17].民乐县深居内陆,沙漠边缘,地形和气候条件都比较复杂,沙尘活动频繁且危害严重.而目前关于大气降水变化对沙尘事件指示作用的相关报道还很少.

本文通过分析民乐县大气降水中 pH 和电导率以及降水中主要离子浓度的变化特征,对民乐县大气降水 pH、电导率的季节变化和 pH、电导率的影响因素进行了分析,最后探讨了 pH、电导率以及大气降水主要离子浓度对内陆干旱区(民乐县)沙尘天气的指示意义,以期为进一步了解干旱内陆区大气环境状况,评估该区的沙尘事件在降水 pH、电导率和离子浓度的反映以及为今后进行更深入的研究提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

民乐县地处甘肃省河西走廊中段,祁连山分水岭以北,张掖市东南部,黑河中游,东邻山丹,西接肃南,南倚青海,北通甘州.地处 $37.93^\circ\text{--}38.80^\circ\text{N}$, $100.37^\circ\text{--}101.22^\circ\text{E}$ 之间.地势南高北低,地形分山地和倾斜高原两大类,海拔 1589—5027 m.年均降水量 351 mm,年蒸发量 1638 mm,无霜期 140 d,属温带大陆性荒漠草原气候.受地势影响,形成南部高寒、中部冷凉、北部干旱的特点.境内有洪水河、大堵麻河等 7 条较大河流和马蹄河、大泉沟等 12 条小河流,境内河流发源于祁连山走廊南山北坡,属内陆河流域的黑河水系.研究区具有典型的干旱区气候条件,也有许多内陆河流域及耐旱性的土壤植被,整体生态条件较为脆弱.该区的山地生态系统呈垂直状分布,层次间差异大.

1.2 样品的采集与分析

2013 年 6 月—2014 年 5 月期间,在民乐县 ($E38.37^\circ$, $N100.88^\circ$; 海拔 2459 m) 进行了降水样品的连续采集.采样过程均为手工操作,每次降雨开始时,用聚乙烯保鲜膜覆盖于直径为 20 cm 的铁皮桶口,置于距离地面 1.5 m 高的铁架上,降水结束时立即将保鲜膜上面的降水倒入事先用去离子水清洗干净的聚乙烯样品瓶中.积雪样品则在降雪结束后立即用聚乙烯样品瓶采集.采样过程中均采取防污染措施.所有采集到的样品立即密封冷冻,并保存在冷藏室内.样品以冷冻状态运抵中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,立即存放于 -15°C 的低温室保存,分析前 2 d 将样品在室温 (约 15°C) 下自然融化,先测量 pH 和电导率,再测量离子质量浓度.降水 pH 和电导率分别使用上海精密科学仪器有限公司生产的雷磁 PSH-3B pH 计和雷磁 DDSJ-308A 电导率仪测量和 pH 9.18 的标准缓冲溶液对仪器电极进行校正.阳离子 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Na^+ 和 K^+) 和阴离子 (Cl^- , SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 质量浓度分别用戴安中国有限公司生产的 DX-320 和 ICS1500 进行分析,其精度可达 ng/g 级,文中使用的民乐县的相关气象资料来自中国气象科学数据共享服务网^[18].

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 降水的 EC 和 pH 值变化及对沙尘天气的指示

如图 1 所示,民乐县降水样品的 pH 值的变化范围为 6.84—8.78,平均值为 7.41,偏碱性,且最小值都大于 5.6,这就表明采样期间民乐县根本不受酸雨的威胁.民乐县的 pH 值与敦煌市^[19](7.81)相比,这两个地方都不会遭受酸雨的侵蚀,但是民乐县的 pH 值明显低于敦煌市.与西安市^[20](6.60)相比,民乐县 pH 值较高.在采样期间(2013 年 6 月—2014 年 5 月),pH 值的最大值出现在 2014 年 2 月 12 日,最小值出现在 2013 年 7 月 30 日.从 pH 值在春夏秋冬四季的变化来看(图 1),pH 值在四季中的大小顺序为:冬季>春季>秋季>夏季,平均值分别为 7.54、7.51、7.44 和 7.31,冬季和春季的 pH 值最大,这可能主要是由于研究区地处河西走廊中段,距离沙漠较近,且冬春季节风大而频繁^[18],这就使得大量的沙尘物质以及局地源物质被大风带到研究区,而沙尘物质中含有大量的碱性物质,从而使 pH 值较大,夏季的 pH 值最小,这可能主要是因为夏季降水较多且雨量较大,对空气中漂浮污染物的洗脱作用显著,并且淋洗频繁,因为在采样期间的研究区总共发生 46 次降水事件,有 50%的降水事件发生在夏季,这就使得空气中漂浮的颗粒污染物较少,最终使得 pH 值较低.

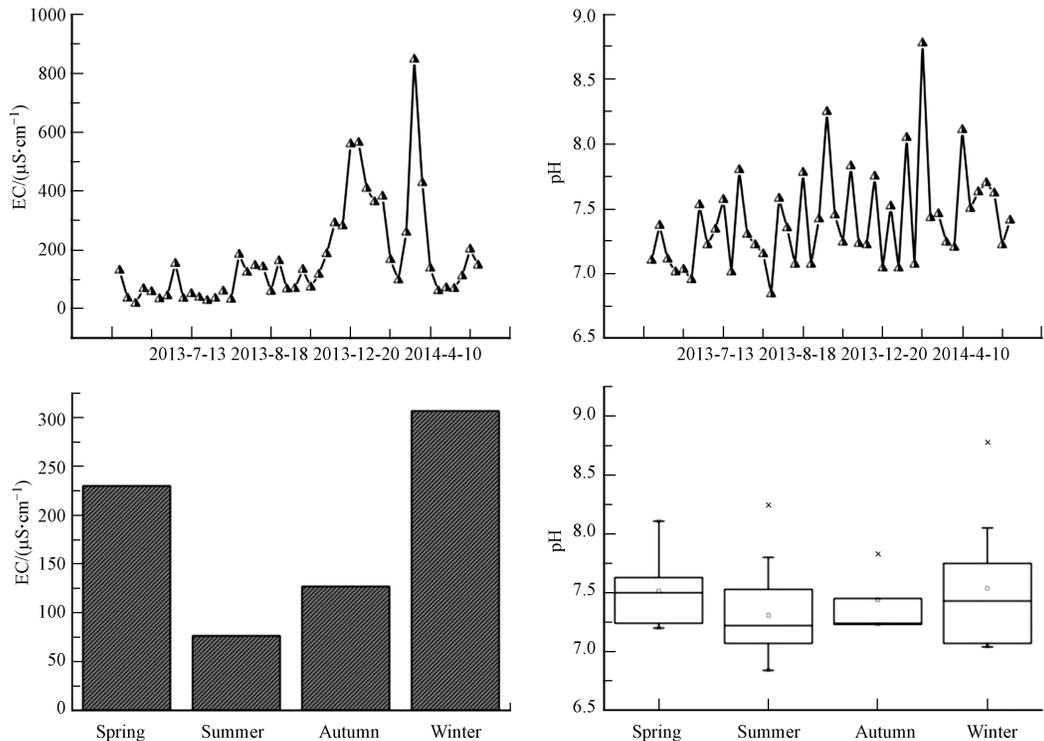


图 1 降水 pH 值和电导率(EC)变化分析

Fig.1 The variation of pH and EC in precipitation samples

本文将民乐县一个观测年发生的 9 次沙尘事件中的 6 次沙尘事件作为本研究典型的沙尘事件来讨论.典型沙尘事件的选取主要依据沙尘事件发生后就有降水发生或者近几天有降水发生的沙尘事件作为典型沙尘事件.根据沙尘事件发生的时间以及研究区降水的时间分布,本文选取了 3 次典型沙尘事件:第一次沙尘事件发生在 2013 年 11 月 13 日(浮尘);第二次沙尘事件发生在 2014 年 3 月 10 日(扬沙);第三次沙尘事件是好几次沙尘事件的组合,分别发生在 2014 年 4 月 23 日、24 日、25 日和 30 日以及 5 月 8 日(扬沙).为了探讨 pH 值对沙尘天气的指示意义,本研究就从沙尘事件发生的前后来判断 pH 值的变化,从而确定 pH 值对沙尘天气的指示作用.由表 1 可知,3 次典型沙尘事件中,每一次沙尘事件发生前的 pH 值均大于发生后的 pH 值.沙尘事件发生前第一次、第二次和第三次典型沙尘事件的 pH 值分别为 7.75、7.59 和 7.74,而沙尘事件发生后第一次、第二次和第三次典型沙尘事件的 pH 值分别为

7.23、7.24 和 7.62.这就表明 pH 值会随着沙尘事件的发生主要表现出降低的趋势.一般情况下,当有沙尘事件发生时,沙尘会带来大量的漂浮于空气中的颗粒物,并且这些颗粒物主要来源于陆地以及靠近研究区的沙漠地区,富含钙镁等碱性物质,一旦有降水发生就会进入到降水中,从而增加 pH 值.但研究区沙尘事件发生前后 pH 值呈现降低的趋势,这可能主要是由于研究区的沙尘物质中含有大量的酸性物质,最终使得 pH 值降低.

民乐县降水样品 EC 的平均值为 $167.80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,变化范围 $17.4\text{—}848 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,最大值出现在 2014 年 3 月 11 日,最小值出现在 2013 年 6 月 8 日(图 1).与葫芦沟^[21]和玉龙雪山相比,民乐县的 EC 值也远远大于葫芦沟^[21]($41.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)的和玉龙雪山^[21]($10.3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)的电导率,这就表明民乐县的大气降水可能受到了严重的影响.民乐县四季中 EC 的大小顺序为:冬季>春季>秋季>夏季,其值分别为 307.04、230.21、127.18、76.73 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.研究区 EC 在四季中的大小顺序与研究区 pH 值在四季中的大小顺序完全一致,就更进一步验证了之前的推论.研究区冬春季风大并且大风频繁^[19],还主要由于研究区附近有大量的沙尘物质和局地源物质^[20],这就为降水中的 EC 值的增加提供了充分的条件.而当这些污染物进入空中,在有降水的情况下,就会随着大气降水的淋洗而进入降水中,从而使得研究区大气降水样品中的 EC 值较高.秋季较冬春季小,这主要是由于秋季风少且风速相对较弱,还可能由于经过夏季的大量降水使得沙尘源物质较多地区有成片植物的生长,这就使得一大部分沙尘物质和局地源不能进入降水中,从而秋季的 EC 值也较小.夏季降水较多且雨量较大,对空气中漂浮污染物的洗脱作用显著,并且淋洗频繁,这就使得空气中漂浮的颗粒污染物较少,最终使得电导率较低.

由表 1 得,3 次典型沙尘事件中,电导率的值都是沙尘事件以后大于沙尘事件之前.第一次沙尘事件发生前电导率为 $94.55 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,而沙尘事件发生后电导率变为 $186.40 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,增加了 $91.85 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;第二次沙尘事件发生前电导率为 $218.16 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,发生后为 $848.00 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,增加了近 4 倍.第三次沙尘事件发生前后的电导率分别为 $93.90 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $110.80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,增加了 $16.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.第三次增加的较少,可能主要是由于沙尘事件持续的时间长,一部分沙尘物质大风吹走所致.因此,随着沙尘事件的发生,电导率呈现增加的趋势,主要是由于沙尘事件发生时会带来大量的沙尘物质和局地源物质,从而增加了空气中的污染物质,一旦有降水发生,就会有大量的污染物进入到降水中,最终使得降水中的电导率增加.

2.2 降水酸碱度与气候因子关系

气候因子在一定程度上影响着 pH 值的大小,通过对 pH 值与降水量、气温和相对湿度相关性的分析表明:如图 2 所示,pH 与降水量呈正相关关系($R^2=0.008$),但显著性不高($P=0.1482$),回归方程为 $y=1.267x-4.463$,这主要是因为降水次数不太频繁的情况下,随着降水量的增加空中漂浮的污染物被淋洗的更多所致,特别是对空中碱性物质的淋洗.pH 值与气温($P=0.0281$)也呈负相关关系($R^2=0.026$)(图 2),回归方程为: $y=-4.268x+38.811.2127$,显著性较降水量的高($P=0.1502$),但 pH 值与气温间的负相关关系就表明气温越高使得降水中氢离子浓度会升高,而 pH 值是氢离子浓度对数的负值,所以 pH 值就越小.pH 值与相对湿度呈正相关关系($R^2=0.0001$),回归方程为: $y=-0.26223x+8.8774$,但极不显著($P=0.2011$),这主要是由于相对湿度对空气中碱性污染物的转化发挥着重要的作用,相对湿度越大,转化的碱性物质就越多,从而中和的致酸离子也就越多,所以 pH 值就越大,反过来,相对湿度越小,对空气中碱性污染物的转化就会越少,所以中和的致酸离子就越少,从而致酸离子就越多,则 pH 值就越小.

2.3 电导率与气候因子关系

如图 3 所示,与 pH 值不同的是,电导率与降水量呈显著($P=0.0489$)的负相关关系,回归方程为: $y=-0.012x+6.983$ ($R^2=0.163$);这就说明降水量越大,降水样品的电导率越低,相反的降水量越小,电导率越大,降水量越大就表明对大气中的大颗粒物的清洗效果远大于对细粒子的清除效果,也就是说富集在大颗粒物中的污染物比富集在细粒子中的污染物更容易被淋洗,所以就有一大部分富集在细粒子上的污染物无法进入降水,从而减少了电导率,而小的降水量会对空气中小颗粒上富集的污染物彻底地淋洗,然后进入降水,使得电导率的值增加.电导率与气温呈显著($P=0.01935$)的负相关关系(图 3),回归方程为: $y=-0.038x+13.59$ ($R^2=0.431$),这可能主要是由于温度在加速化学反应的必备条件,当大气温

度较高时,就使得空中污染物中碱性物质和致酸离子间发生强烈的化学反应,最后生成气体或者沉淀物质,从而降低了电导率,反之亦然.与降水量和气温相同的是,电导率也与相对湿度呈显著($P=0.1539$)的负相关关系(图3),回归方程为: $y=-0.038x+71.17$ ($R^2=0.131$),这就说明相对湿度越大,研究区降水的EC值就越小.这主要是由于相对湿度越大,研究区周边的沙尘物质和局地源物质就不易被风带到空气中,从而减少了空气中的污染物,所以导致研究区降水中的电导率降低,反之亦然.

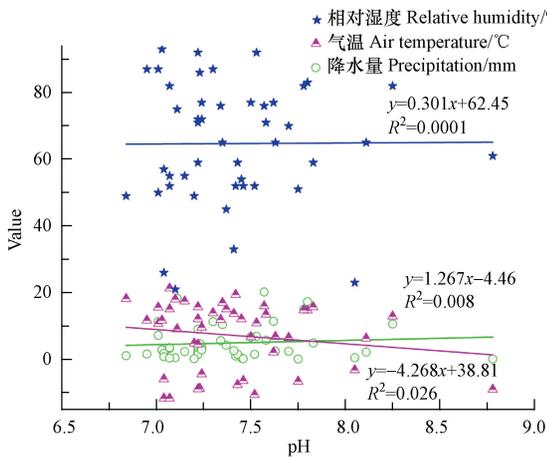


图2 pH值与气象因素的相关性

Fig.2 Correlation between pH value and meteorological factors

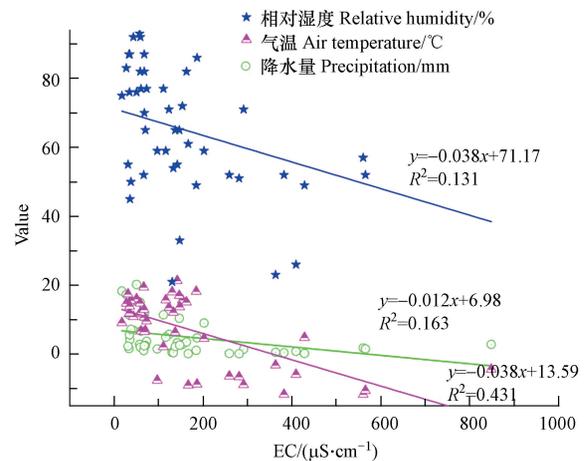


图3 电导率与气象因素的相关性

Fig.3 Correlation between electrical conductivity and meteorological factors

2.4 离子浓度对沙尘天气的指示

从3次典型的沙尘事件来看,Na⁺在第一次和第二次典型沙尘事件中均呈现增加的趋势(表1),第一次沙尘事件发生前后Na⁺的浓度分别为0.59 mg·L⁻¹和3.52 mg·L⁻¹;第二次沙尘事件发生前后Na⁺的浓度分别为5.00 mg·L⁻¹和36.31 mg·L⁻¹.而在第三次典型事件中出现了降低的趋势,由发生前的1.70 mg·L⁻¹降低到发生后的0.89 mg·L⁻¹.这可能主要是由于第三次典型沙尘事件持续时间较长所致.Cl⁻与Na⁺在三次典型沙尘事件中的变化完全一致,第一次和第二次沙尘事件发生前Cl⁻的离子浓度分别为1.68 mg·L⁻¹和11.41 mg·L⁻¹,发生后分别为12.62 mg·L⁻¹和83.93 mg·L⁻¹,而第三次沙尘事件发生前比发生后多了1.96 mg·L⁻¹.如图4所示,Na⁺浓度的最大值出现在2014年3月11日(36.31 mg·L⁻¹),而Cl⁻的最大值也同样出现在2014年3月11日(83.93 mg·L⁻¹),而第二次沙尘事件就发生在2014年3月10日,这就说明Cl⁻与Na⁺主要来源于研究区附近的沙尘源,而更进一步验证了研究区的降水化学主要受控于研究区周围的沙尘物质^[12,20],当有沙尘事件发生,降水中的离子浓度,特别是Cl⁻和Na⁺浓度就会迅速升高.

表1 典型沙尘事件发生前后内陆干旱区主要离子浓度(EC: μS·cm⁻¹;离子浓度:mg·L⁻¹)

Table 1 Comparison of main ion concentration and meteorological data in typical dust events (EC: μS·cm⁻¹; ion concentration: mg·L⁻¹)

	EC	PH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
沙尘事件发生前(2013.9.17)	94.55	7.54	0.59	0.61	0.43	8.94	4.57	1.68	4.86	6.90
第一次沙尘事件(2013年11月13日浮尘)										
沙尘事件发生后(2013.11.22)	186.40	7.23	3.52	3.09	6.07	18.53	0.01	12.62	41.70	69.74
沙尘事件发生前(2014.2.27)	218.16	7.59	5.00	4.01	3.79	19.75	4.23	11.41	20.03	40.45
第二次沙尘事件(2014年3月10日扬沙)										
沙尘事件发生后(2014.3.11)	848.00	7.24	36.31	21.88	6.88	24.17	23.07	83.93	2.95	113.39
沙尘事件发生前(2014.4.17)	83.90	7.74	1.70	0.78	2.41	9.57	3.73	3.13	3.56	12.37
第三次沙尘事件(2014年4月23日、24日和25日和30日以及5月8日扬沙)										
沙尘事件发生后(2014.5.10)	110.80	7.62	0.89	0.55	0.53	13.65	6.12	1.17	0.32	3.62

对于 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 而言,在第一次和第二次典型沙尘事件中均呈现增加的趋势,而第三次沙尘事件除 Ca^{2+} 仍然增加以外, K^+ 和 Mg^{2+} 离子浓度都呈现降低的趋势。 K^+ 和 Ca^{2+} 离子浓度的最大值均出现在 2013 年 12 月 20 日,其值分别为 $31.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $41.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。而 Mg^{2+} 浓度的最大值出现在 2014 年 5 月 15 日 ($36.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),与 Mg^{2+} 相同的是, SO_4^{2-} 浓度的最大值出现也出现在 2014 年 5 月 15 日,最大值为 $297.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。在三次典型沙尘事件中, SO_4^{2-} 也在第一次和第二次沙尘事件中呈现增加的趋势,而在第三次沙尘事件中呈现降低的趋势(表 1)。 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 主要受局地源和周围沙尘物质的控制^[12-20],当有沙尘事件发生的情况下,其离子浓度也会增加。

NH_4^+ 在第二次和第三次典型沙尘事件中呈增加的趋势,在第一次沙尘事件中呈降低的趋势(表 1),而 NO_3^- 只有在一次沙尘事件中呈增加趋势,而在第二次和第三次典型事件中均呈降低的趋势。且由图 4 可以看出, NH_4^+ 浓度的最大值出现在 2014 年 3 月 11 日 ($23.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而 NO_3^- 浓度的最大值出现在 2013 年 11 月 20 日 ($192.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。这些现象可能与 NH_4^+ 和 NO_3^- 主要受控于人为活动有很大的关系。从图 4 和表 1 整体来看,在沙尘事件发生后离子浓度出现最高值的离子有: Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,而沙尘事件前后离子浓度变化程度由大到小的顺序为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 和 Mg^{2+} 。

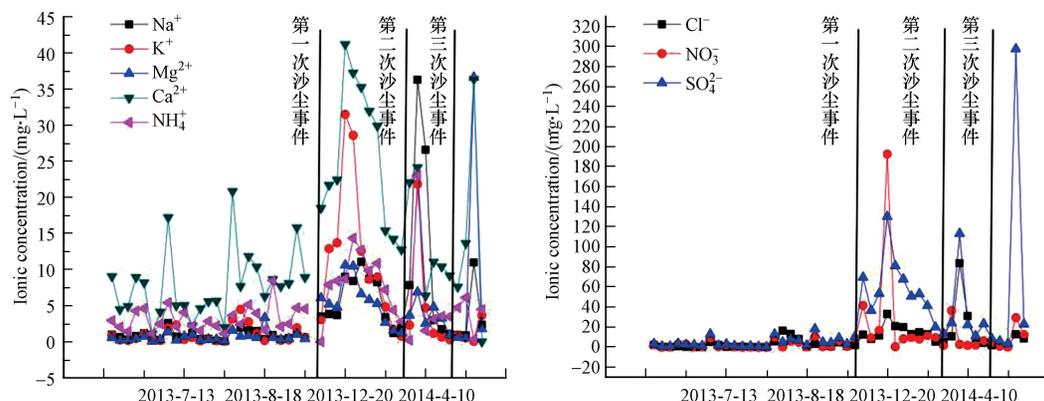


图 4 离子浓度在沙尘事件发生过程中的变化

Fig.4 Changes of ion concentration during the sand dust events

3 结论 (Conclusion)

(1) 民乐县降水样品的 pH 值的变化范围为 6.84—8.78,平均值为 7.41,偏碱性,且最小值都大于 5.6,这就表明在采样期间,民乐县根本不受酸雨的威胁。pH 值在四季中的大小顺序为:冬季>春季>秋季>夏季,平均值分别为 7.54、7.51、7.44 和 7.31,冬季和春季的 pH 值最大,夏季的 pH 值最小。而民乐县降水样品 EC 的平均值为 $167.80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,变化范围 17.4—848 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,四季中 EC 的大小顺序为:冬季>春季>秋季>夏季,其值分别为 307.04、230.21、127.18 和 76.73 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

(2) 通过对 pH 和 EC 与降水量、气温和相对湿度相关性的分析表明:pH 与降水量呈正相关关系 ($R^2=0.008$),但显著性不高,同时也与相对湿度呈正相关关系 ($R^2=0.0001$),而 pH 值与气温也呈负相关关系 ($R^2=0.026$),显著性较降水量的高。与 pH 值不同的是,电导率与降水量、气温和相对湿度均负相关关系,且相关系数分别为 0.163、0.431 和 0.131;

(3) 通过对典型沙尘事件的分析表明:从沙尘事件发生前到沙尘事件发生后,pH 值呈现出降低的趋势,而电导率会随着沙尘事件的发生呈现增加的趋势,在沙尘事件发生后离子浓度出现最高值的离子有: Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,而沙尘事件前后离子浓度变化程度由大到小的顺序为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 和 Mg^{2+} ,但从各离子浓度对沙尘事件的变化幅度来看, Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的对沙尘天气比较敏感,反映强烈。

参考文献 (References)

[1] SHOTYK W, BICALHO B, CUSS C W, et al. Dust is the dominant source of "heavy metals" to peat moss (*Sphagnum fuscum*) in the bogs

- of the Athabasca Bituminous Sands region of northern Alberta[J]. *Environment International*, 2016, 92: 494-506.
- [2] QUAN J, TIE X, ZHANG Q, et al. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 88: 83-89.
- [3] WONASCHUTZ A, DEMATTIO A, WAGNER R, et al. Seasonality of new particle formation in Vienna, Austria-Influence of air mass origin and aerosol chemical composition[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 118-126.
- [4] KONG S F,JI Y Q,LU B,et al. Characterization of PM₁₀ sourceprofiles for fugitive dust in Fushun-A city famous for coal[J].*Atmospheric Environment*,2011,45(30): 5351-5365.
- [5] WATANABE M, NOMA H, KURAI J, et al. Association between pulmonary function and daily levels of sand dust particles assessed by light detection and ranging in schoolchildren in western Japan: A panel study[J]. *Allergology International*, 2016, 65(1): 56-61.
- [6] QIN Y J,KIM E,HOPKE P K.The concentrations and sources of PM_{2.5} in metropolitan New York city [J].*Atmospheric Environment*,2006, 40(2): 312-332.
- [7] LI ZX, FENG Q, LIU W, et al.The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381.
- [8] 李宗省,何元庆,院玲玲,等.丽江市降水常量离子的化学特征[J].*环境化学*,2008,27(5):648-652.
LI Z S, HE Y Q, YUAN L L, et al. The chemical characteristics of precipitation constant ion in Lijiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2008,27 (5): 648-652(in Chinese).
- [9] 李宗杰,宋玲玲,田青.河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析[J]. *环境化学*, 2016, 35(4): 721-731.
LI Z J, SONG L L, TIAN Q. Analysis of precipitation characteristics and the water vapor source in East of Hexi Corridor [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35 (4): 721-731(in Chinese).
- [10] 余益军,程钟,李江,等.常州市2014年降水化学组成及来源浅析[J]. *环境化学*, 2015, 34(11): 2136-2138.
YU Y J, CHENG Z, LI J, et al. Analysis of chemical composition and source of precipitation in Changzhou City in 2014 [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34 (11): 2136-2138(in Chinese).
- [11] WANG X, CHOW J C, KOHL S D, et al. Wind erosion potential for fugitive dust sources in the Athabasca Oil Sands Region[J]. *Aeolian Research*, 2015, 18: 121-134.
- [12] Zongjie L, Zongxing L, Tingting W, et al. Composition of wet deposition in the central Qilian Mountains, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 7315-7328.
- [13] WANG H, JIA X, LI K, et al. External supply of dust in the Taklamakan sand sea, Northwest China, reveals the dust-forming processes of the modern sand sea surface[J]. *Catena*, 2014, 119: 104-115.
- [14] 齐冰,杜荣光,于之锋,等.杭州地区大气细颗粒物浓度变化特征分析[J]. *环境化学*, 2015, 34(1): 77-82.
QI B, DU R G, YU Z F, et al. Analysis of the characteristics of atmospheric fine particulate matter concentration change in Hangzhou area [J]. *Environmental chemistry*, 2015, 34 (1): 77-82(in Chinese).
- [15] 刘雪,迟杰.城市景观河流(津河)雨季污染特征[J]. *环境化学*, 2014, 33(11): 2003-2004.
LIU X, CHI J. Pollution characteristics of urban landscape river (Jing River) in rainy season[J]. *Environmental chemistry*,2014, 33(11): 2003-2004(in Chinese).
- [16] 张正偲,董治宝.黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 332-341.
ZHANG Z C,DONG Z B. Wind environment and aeolian geomorphology in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. *China desert*, 2014, 34 (2): 332-341(in Chinese).
- [17] OGI K, TAKABAYASHI T, SAKASHITA M, et al. Effect of Asian sand dust on Japanese cedar pollinosis[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2014, 41(6): 518-522.
- [18] 中国气象科学数据共享服务网[EB/OL].[2015-8-3]. <http://cdc.cma.gov.cn>.
- [19] GUO X, FENG Q, LIU W, et al. Stable isotopic and geochemical identification of groundwater evolution and recharge sources in the arid Shule River Basin of Northwestern China[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(22): 4703-4718.
- [20] LU X, LI L Y, LI N, et al. Chemical characteristics of spring rainwater of Xi'an city, NW China[J]. *Atmospheric environment*, 2011, 45 (28): 5058-5063.
- [21] 李宗杰,李宗省,田青,等.祁连山中段降水化学的环境意义研究[J]. *环境科学*,2014,35(12):4465-4474.
LI Z J,LI Z X,TIAN Q, et al. Environmental significance of wet deposition composition in the Central Qilian Mountains, China [J]. *Environmental Science*,2014,35(12):4465-4474(in Chinese).