

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化	符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)
太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)
石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征	刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258)
南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析	吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)
南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析	肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)
上海崇明地区大气分形态汞污染特征	李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)
三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量	王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)
长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析	吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)
铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征	刘大钧,汪家权 (3315)
祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究	贾文雄,李宗省 (3322)
三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价	郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)
太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素	车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)
太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险	张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)
岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)
西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例	詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)
不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析	李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)
滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献	李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)
荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)
富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析	张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)
基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例	安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)
于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系	王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)
人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响	刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)
共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响	许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)
模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响	王兵,温奋翔,肖波 (3447)
对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为	周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲锋,张振国,展惠英 (3453)
多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究	尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)
某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究	吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)
Fe ⁰ -PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制	卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)
EDTA-nSiO ₂ 纳米颗粒对 Cd ²⁺ 的吸附	蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)
硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征	沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)
人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能	崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)
生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能	牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)
甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系	刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)
光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制	胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)
宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响	王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)
北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价	董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)
红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应	贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)
外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应	辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)
改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应	杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)
生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果	周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)
长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响	赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)
应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响	曾清苹,何丙辉 (3590)
三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化	隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)
外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH ₄ 、CO ₂ 排放的短期影响	胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)
模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO ₂ 通量变化及其影响因素	杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)
太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性	严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)
生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响	王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)
氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响	辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)
冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响	李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)
堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究	李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)
酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响	刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)
《环境科学》征订启事 (3517)	《环境科学》征稿简则 (3561)
信息 (3289,3321,3422)	

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究

贾文雄¹, 李宗省²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 我国西北地区深处内陆, 水汽经过长距离输送才可以到达, 降水量少且变率大, 与季风区降水有很大不同。运用因子分析法、富集因子法、后向轨迹分析法, 对 2013-05-01 ~ 2014-07-11 连续收集的降水主要离子进行分析, 研究了祁连山东段降水的水化学特征及离子来源。结果表明, 祁连山东段降水电导率值的变化范围在 29.20 ~ 892.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间, pH 值在 7.02 ~ 8.89 之间, 降水电导率受碱性元素控制, 为弱碱性水; 降水中阳离子浓度大小排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$, 阴离子浓度大小排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, 降水为 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 型; 降水中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度在秋季最高, Na^+ 浓度在冬季最高; 降水中的 Na^+ 和 Cl^- 主要是海源贡献, 但 Na^+ 在冬季也有陆源贡献, Cl^- 在秋季有人为源的影响, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 主要是陆源贡献, Mg^{2+} 在冬季有人为源的影响, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要是人为源的贡献; 降水中离子来源的水汽输送有西北、北方、北方 + 东南、西北 + 东南、西北 + 西南、西北 + 北方 + 东南路径, 其中西北路径是最主要来源。祁连山降水中海源离子通过西风环流和季风环流长距离输送, 陆源离子主要由中亚、新疆、蒙古高原的沙漠和戈壁提供, 人为源离子主要与各路径上的城市污染和绿洲工、农业生产有关, 而降水中离子含量多少受各天气系统的强弱变化影响。

关键词: 降水; 离子浓度; 离子来源; 水汽运输; 祁连山

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3322-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.010

Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains

JIA Wen-xiong¹, LI Zong-xing²

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Precipitation of the northwest China is different from that in other regions of China. The vapor reaches this region after long distance transportation with little precipitation, and the ratio of precipitation variation is large. Wushaoling at the east Qilian Mountains is an important divided line of climate in China. The east region of it is affected by South Asia and East Asia monsoon, while the west region of it is influenced by Westerly circulation. So ion combinations in precipitation are complex for the trajectories of water vapor transportation, the natural environments and the development levels of social and economy in different regions. Precipitation samples were collected at Heisongyi located at the east Qilian Mountains. Hydrochemical characteristics and sources of ions were analyzed by factor analysis, Enrichment factor analysis and back trajectory analysis. EC values in precipitation ranged from 29.20 to 892.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, which were controlled by alkaline element. The precipitation was weak alkaline with pH values ranging from 7.02 to 8.89. EC values in precipitation were higher in autumn and winter than in spring and summer, opposite to pH values. The type of precipitation was SO_4^{2-} - Ca^{2+} for the cation concentrations following the order of $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ and the anion concentrations following the order of $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. The concentrations of K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} were the highest in autumn, but the peak value of Na^+ concentration appeared in winter. As a whole, ion concentrations were higher in autumn and winter than in spring and summer. Enrichment factor indicated that Na^+ and Cl^- mainly came from marine source but Na^+ partly originated from crust source in winter and Cl^- partly originated from anthropogenic source in winter, and that K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} mainly came from crust source except that Mg^{2+} partly originated from anthropogenic source in winter, and that NO_3^- and SO_4^{2-} mainly came from anthropogenic source. The trajectories of water vapor transportation from directions of northwest, north, north with southeast, northwest with southeast, northwest with southwest, northwest with north and southeast were ion original sources in precipitation, and the major trajectory came from northwest direction. Among these trajectories of water vapor transportation, that from northwest, north and north with southeast appeared in each season, but that from northwest with southeast appeared in spring and summer, that from northwest with southwest and northwest and north with southeast appeared in summer. Though ions originated from marine transport by Westerly and monsoon, from crust provided by desert and Gobi in central Asia, Xingjiang and Mongolian plateau,

收稿日期: 2016-01-28; 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 甘肃省杰出青年基金项目(1506RJDA282); 中国科学院西部之光西部博士项目(201303); 中国博士后国际交流计划项目(20140043)

作者简介: 贾文雄(1974 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为气候变化与生态水文, E-mail: wxjiaxy@163.com

and from humanity activity related to cities pollution and industrial and agriculture production of oasis at all trajectories, the concentrations of ions in precipitation were effected by the strong and weak variations of different weather systems.

Key words:precipitation; ion concentration; ion source; water vapor transportation; Qilian Mountains

地表化学物质的干湿沉降是个重要的过程,它影响着大气中的气体和气溶胶的浓度^[1].降水对大气中气溶胶具有清洁作用,云和降水通过布朗扩散和冲刷会清除大气中的气溶胶^[2].人为排放量和气候变化会影响大气过程^[1],进而影响降水的化学成分.降水化学研究对评估空气质量和解释人类活动对大气环境的影响非常重要,是一个特别敏感的污染排放指标^[3].降水化学成分受释放源强度、大气中化学反应、气团的扩散途径等影响^[4],研究降水化学成分有助于了解大气的污染状况^[5].国内外学者对不同区域的降水化学特征及水汽来源进行了广泛研究,不同区域降水的化学组成反映了研究区的大气环境特征及其污染状况,如海洋降水中 Na^+ 和 Cl^- 浓度较高^[6~8],内陆地区降水中 Ca^{2+} 浓度较高^[9,10],城市降水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度较高^[11~16];降水的化学组成具有明显的季节变化,如降水离子在夏、秋季浓度较低,而在冬、春季离子浓度较高^[17~19];离子来源分析表明, Na^+ 和 Cl^- 主要来自于海洋, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 主要来自于陆地, NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 主要来自于人类活动^[9,13~15,18,19];降水气团来源和锋面天气对降水化学成分会产生重要影响^[20].

国内降水化学的研究较多是对城市酸雨^[13,15,16,18,20]、降水本底化学成分^[21,22]、冰川区

降水的研究^[23~25],而对于西北干旱地区的研究相对较少.西北干旱区是指贺兰山以西的西北地区,包括内蒙古西部、宁夏、河西走廊、北疆、南疆、柴达木盆地等^[26],年降水量在 200 mm 以下,植被覆盖度低,形成面积广大的荒漠地区.祁连山东段的乌鞘岭是我国重要的气候分界线,以东是季风气候,受南亚和东亚季风影响,气流所经区域从森林过渡到草原再到干草原,从东部沿海经济带到中部经济带再到西部经济带,以西是内陆干旱气候,主要受西风带的影响,气流所经区域为荒漠戈壁和人工绿洲,沙尘活动频繁,由于气流方向、下垫面自然环境条件和社会经济发展水平的不同造成水汽来源中离子成分复杂.本研究利用 2013-05-01~2014-07-11 在祁连山东段的乌鞘岭连续收集降水样品,通过测定降水的离子浓度,旨在分析降水化学成分的组成、各成分的时间变化及可能来源,以期为了解该区域大气环境背景值和污染状况提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山($92^\circ \sim 107^\circ \text{E}$, $36^\circ \sim 43^\circ \text{N}$)位于青藏高原的东北边缘,东起乌鞘岭,西至当金山口,长约 850 km,宽约 200~300 km,由多条西北-东南走向的平行山脉和宽谷组成,地势西北高,东南低,30%的

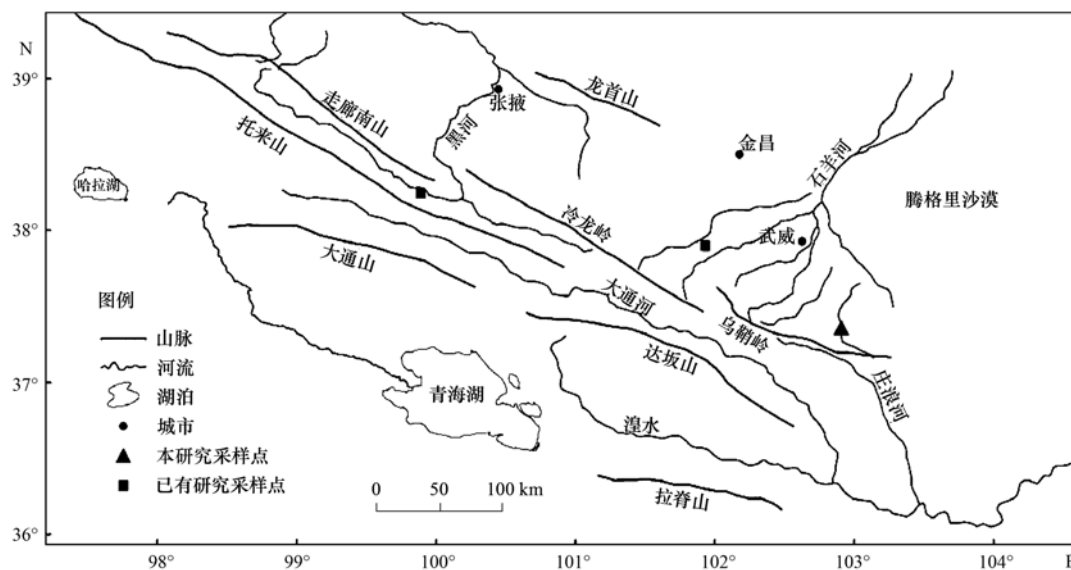


图1 本研究及文献[17,33]在祁连山采样点的位置

Fig. 1 Location of precipitation sampling site in this study and literatures [17,33] in Qilian Mountains

山脉在海拔4 000 m以上,最高峰为疏勒南山的团结峰,海拔5 828.6 m. 祁连山的气候具有垂直地带性,山前低山属荒漠气候,年降水量约150 mm,年均温6℃左右;中山下部属半干旱草原气候,年降水量250~300 mm,年均温2~5℃;中山上部为半湿润森林草原气候,年降水量400~500 mm,年均温0~1℃;亚高山和高山属寒冷湿润气候,年降水量约800 mm,年均温-5℃左右. 植被也表现出明显的垂直地带性,从低到高依次为荒漠、山地草原、山地森林草原、亚高山灌丛草甸、高山草甸、高山垫状植被. 采样点为祁连山东段的黑松驿(102°54'45"E,37°24'18"N,图1),地处乌鞘岭北坡的古浪河峡谷,海拔2 313.2 m,年均温为9.24℃,年降水量为289 mm左右,植被类型为山地草原.

1.2 降水样品的采集及实验室分析

2013-05-01~2014-07-11按降水事件在采样点开展了降水样品的连续采集,所有样品都采集后立即密封并存储在-18℃的实验室中. 本实验使用的采样仪器是1个直径50 cm的聚乙烯塑料桶和1个无色聚乙烯塑料袋,放置的高度为1.5 m. 降水开始时将其取出,放置在固定位置,并套上塑料袋,降水结束后立刻取回样品放置在低温室内(约-10℃). 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后立即存放于-15℃的低温室保存. 采样期间,同步采集了空白样品,经实验室测试空白样品未受到任何污染,确认采样过程科学有效,同时记录了降水量、最高气温、最低气温、平均气温等气象参数. 样品测试前2 d将样品取出在室温下(约23℃)自然融化,然后进行pH值、电导率、主要离子浓度的测量. pH值和电导率是利用梅特勒-托利多SevenExcellence台式电导率仪(上海联祥环保科技有限公司)测定,精度分别为0.01 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.001 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度是用Dionex-600型离子色谱仪(美国戴安公司)测定,

Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 用Dionex-300型离子色谱仪(美国戴安公司)测定,其精度可达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,测试数据误差<5%. 各季节、雨季、干季的pH值、电导率和各离子浓度的平均值是雨量加权平均值,其计算公式如下:

$$\overline{\text{pH}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{pH}_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

$$\overline{\text{EC}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{EC}_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

式中, $\overline{\text{pH}}$ 、 $\overline{\text{EC}}$ 、 $\bar{c}$ 分别为pH值、电导率和离子浓度的平均值; pH_i 、 EC_i 、 c_i 分别为第*i*次降水的pH值、电导率和离子浓度; P_i 为第*i*次降水量; $n=53$.

1.3 数据质量检测与控制

一般而言,降水中阴离子当量浓度之和应该与阳离子当量浓度之和基本相等,为了检验所测数据质量,是否漏测重要离子,有必要对样品的阴、阳离子浓度平衡和电导率平衡进行检验. 图2(a)为降水阴、阳离子线性回归图,从中可以看出,降水中阴、阳离子浓度跨度非常大,回归方程系数为0.678 4,表明阴、阳离子浓度不平衡. 由于81.13%降水样品中总阳离子浓度高于总阴离子浓度,总阴、阳离子浓度比值平均为0.722 5,可见降水样品中缺测了重要的阴离子. 一般而言,阳离子过剩是由于降水中缺测了 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和有机酸根^[27]. 图2(b)为实测电导率与计算电导率分布(计算方法见文献[28]),从中可以看出,实测电导率与计算电导

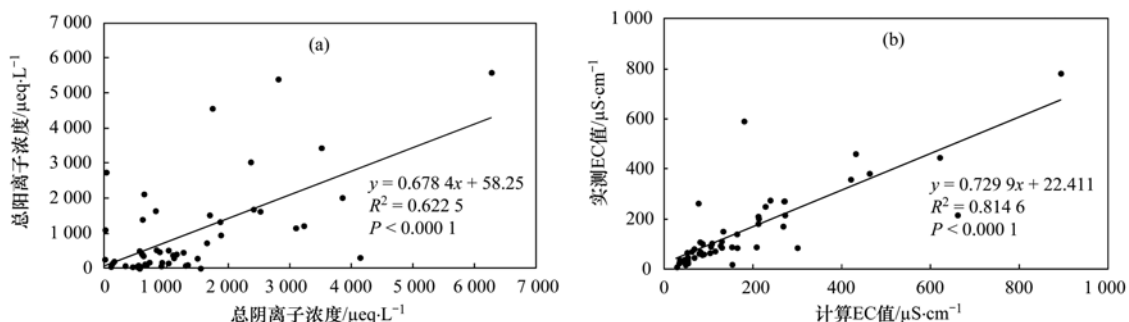


图2 降水阴阳离子线性回归及实测电导率与计算电导率分布

Fig. 2 Linear regression of total ionic concentration and the distribution of measured EC with calculated EC in precipitation

率之间有偏差,回归方程的系数为0.729 9, 73.58%的降水样品计算电导率小于实测电导率,表明降水样品中缺测了重要离子。可见,在降水的水化学研究中测定 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和有机酸根是必要的。本研究降水中阴、阳离子虽不平衡,但阴、阳离子浓度的相关系数为0.622 5,计算电导率与实测电导率的相关系数为0.814 6,均通过了0.000 1的置信度检验,表明降水中大部分离子得到检测,数据质量有一定的可靠性。

1.4 富集因子及不同离子来源贡献

根据吉布斯图陆地水中的溶质有降雨和岩石风化两个主要来源,为了评价分化源是否为降水离子的主要来源,便提出了富集因子的概念。富集因子(EF)的计算使用 Ca^{2+} 作为土壤源的参考元素和 Na^+ 作为海洋源的参考元素来计算^[17]。如果忽略火山及其它天然源的贡献,大气降水中离子组分的主要来源包括海水溅射、岩石、土壤风化和人为活动。为了进一步了解各种离子不同源的组成,计算海相输入(SSF)、岩石/土壤风化(CF)、人为活动输入(ASF)的相对贡献^[18]。计算公式如下:

$$\text{EF}_{\text{海洋}} = \left[\frac{X/\text{Na}^+}{\text{水样}} \right] / \left[\frac{X/\text{Na}^+}{\text{海洋}} \right] \quad (1)$$

$$\text{EF}_{\text{土壤}} = \left[\frac{X/\text{Ca}^{2+}}{\text{水样}} \right] / \left[\frac{X/\text{Ca}^{2+}}{\text{土壤}} \right] \quad (2)$$

$$\text{SSF}(\%) = \frac{\left[\frac{X/\text{Na}^+}{\text{海洋}} \right]}{\left[\frac{X/\text{Na}^+}{\text{水样}} \right]} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{CF}(\%) = \frac{\left[\frac{X/\text{Ca}^{2+}}{\text{土壤}} \right]}{\left[\frac{X/\text{Ca}^{2+}}{\text{水样}} \right]} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{ASF}(\%) = 100\% - \text{SSF}(\%) - \text{CF}(\%) \quad (5)$$

式中, X 是降水离子浓度; $\left[\frac{X/\text{Na}^+}{\text{海洋}} \right]$ 比率参照了文献[29],该比率是利用全球降水化学计划和大西洋西部实验测得的数据计算而来; $\left[\frac{X/\text{Ca}^{2+}}{\text{土壤}} \right]$ 比率是利用文献[30]中的数据计算的,该数据是利用前人的研究成果得出了陆壳化学元素的丰度。一般来说, $\text{EF} \leq 1$ 表明离子是海盐稀释所致, $\text{EF} \geq 1$ 表明大量离子来自土壤和风化源。

1.5 水汽后向轨迹追踪

运用了美国大气实验室开发的 HYSPLIT4 模型 (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) 来追踪水汽来源,为了研究不同高度气流的走向,高度选择了 500、1 000、1 500 m,选用后向轨迹追踪,时间为 240 h,对采样期间 53 次降水分别进行水汽后向追踪。

此外,为了研究降水中离子成分的季节变化,将四季划分为:夏季(2013-06 ~ 2013-08)、秋季

(2013-09 ~ 2013-11)、冬季(2013-12 ~ 2014-02)、春季(2014-03 ~ 2014-05)。为了研究雨季和干季降水中离子成分的变化,将干湿季节划分为:雨季(2013-07 ~ 2013-09 和 2014-04 ~ 2014-06),干季为(2013-10 ~ 2014-03)。

2 结果与分析

2.1 降水中 EC 与 pH 的变化

祁连山东段黑松驿降水电导率值的变化范围在 $29.20 \sim 892.00 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,其雨量加权平均值为 $110.23 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,最大值出现在 2013-08-05,最小值出现在 2014-07-08。降水 pH 值的变化范围在 7.02 ~ 8.89 之间,其雨量加权平均值为 7.94,最大值出现在 2014-04-16,最小值出现在 2013-07-27。从图 3(a)看出,雨季电导率值较低,雨量加权平均值为 $119.66 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,而干季电导率值较高,雨量加权平均值为 $203.55 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。从图 3(b)看出,雨季 pH 值较高,雨量加权平均值为 7.87,而干季 pH 值较低,雨量加权平均值为 7.36。春、夏、秋、冬季降水电导率的雨量加权平均值分别为 110.78、82.99、194.33、 $250.76 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,pH 值的雨量加权平均值分别为 7.90、7.69、7.11、7.47,可见秋、冬季节降水的电导率较高,pH 值较低,而春、夏季节降水的电导率较低,pH 值较高。从图 3 看出,降水中电导率与 pH 值的变化相反,即降水较多的季节电导率低,pH 值高,而降水较少的季节电导率高,pH 值低。这是因为降水量较多对离子浓度的稀释作用较强,进而电导率值较低,pH 值较高,降水量较少时的情况与此相反。此外,降水电导率与 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 显著正相关(相关系数分别为 0.66、0.66、0.63、0.82、0.73、0.77),反映出该区降水电导率受碱性元素控制,降水的 pH 值均高于 7,为弱碱性水。

2.2 降水中各离子的浓度

祁连山东段黑松驿大气降水中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 雨量加权的平均浓度分别为 146.79、25.38、178.60、599.32、79.21、123.38、60.52、307.44 $\mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1),分别占雨量加权离子总浓度的 9.65%、1.67%、11.75%、39.41%、5.21%、8.11%、3.98%、20.22%,其中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度较高,这两种离子雨量加权的平均浓度占雨量加权离子总浓度的 59.63%,表明研究区的降水为 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 型。降水样品中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 雨量加权的平均

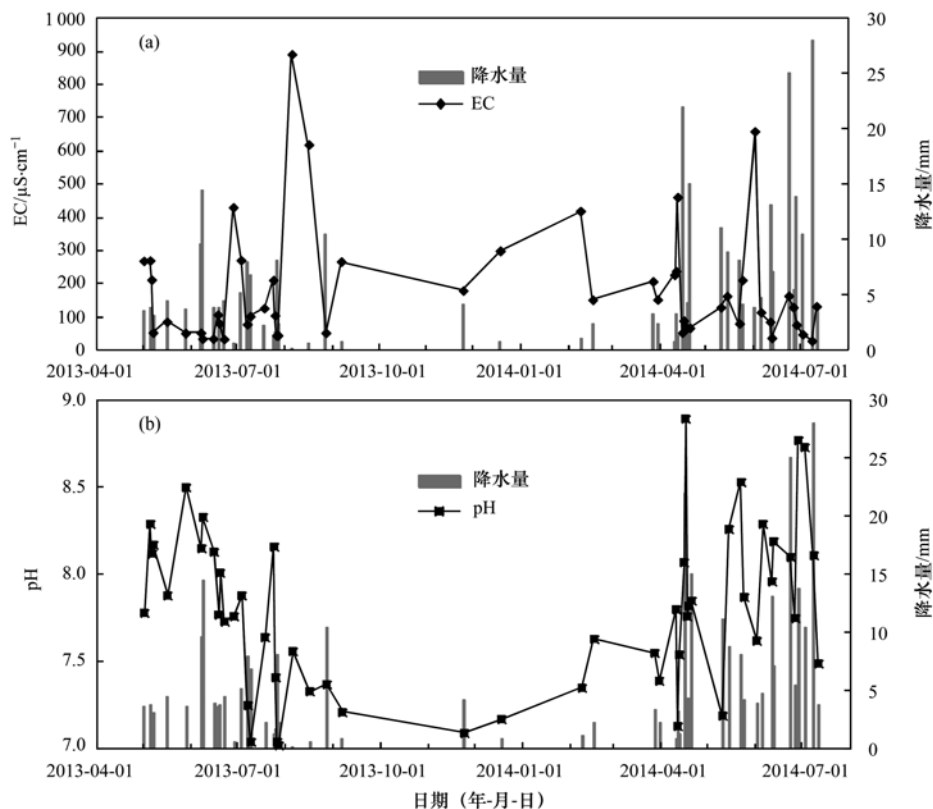


图3 祁连山东段降水电导率(EC)、pH值和降水量变化

Fig. 3 Variations of EC, PH and precipitation amounts during sampling period at the east Qilian Mountains

浓度分别占雨量加权阳离子总浓度的 14.26%、2.47%、17.35%、58.23%、7.69%,阳离子浓度大小排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{K}^{+}$,与标准地壳矿物所含阳离子浓度的顺序($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{2+}$)不同, Mg^{2+} 的浓度高于 Na^{+} 、 K^{+} 的浓度.降水样品中 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 雨量加权的平均浓度分别占雨量加权阴离子总浓度的 25.11%、12.32%、62.57%,阴离子浓度大小排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{NO}_3^{-}$,与标准海水所含阴离子浓度的顺序($\text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^{-}$)也不同, SO_4^{2-} 的浓度高于 Cl^{-} 浓度.

与祁连山东段降水中离子成分相似,贝宁朱古^[1]、印度布巴内斯瓦尔^[31]、加拿大落基山^[32]和我国天津^[13]、上海^[15]、太原^[19]、贵阳^[18]、瓦里关^[10]降水样品中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子浓度含量较高(表1),降水中离子成分受陆源和人为源影响,而日本冲绳^[7]、巴西里约热内卢^[8]和我国聂拉木^[9]降水中 Na^{+} 和 Cl^{-} 离子浓度较高,降水中的离子成分受海源影响.位于祁连山中部的葫芦沟,降水样品中各离子浓度均低于祁连山东部的九条岭^[33]和黑松驿,这是由于葫芦沟采样点在较高的海拔条件下大陆尘埃浓度较低,而且大气气溶胶在海拔抬升过程

中又经历了进一步的沉降损耗,另外葫芦沟采样点植被为高山草甸,且生长状况良好,局地源的影响较小^[17].祁连山东部降水中各离子浓度远高于其它研究区,这是由于九条岭和黑松驿位于腾格里沙漠的西南部,受沙尘物质影响显著,再加上降水较少,降水中各离子成分浓度较高.与九条岭相比,黑松驿降水中各离子浓度更高,这主要是由于黑松驿距离腾格里沙漠更近,因而受沙尘物质影响更为显著.

2.3 降水中各离子浓度的变化

图4显示了祁连山东段黑松驿降水中各离子浓度随时间的变化,阳离子和阴离子均有显著的波动变化.除 NH_4^{+} 外,干季其它各阳离子雨量加权的平均浓度均高于雨季(表2),干季 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 雨量加权的平均浓度分别是雨季的 1.57、1.98、1.16、1.32 倍,这是由于干季地表较为干燥,大气中悬浮的地表颗粒物较多,进而造成降水中离子浓度较高.与阳离子浓度变化相似,干季所有阴离子雨量加权的平均浓度也高于雨季,干季 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 雨量加权的平均浓度分别是雨季的 4.79、2.28、5.23 倍,这是因为干季主要是秋、冬季节,采暖需要燃烧大量煤炭,因而排放到空气中的大

气污染物 NO、NO₂、SO₂ 等增加,进而导致降水中 NO₃⁻、SO₄²⁻ 浓度增加. 用 *t* 检验成组检验表明, NH₄⁺ 在干季、雨季的雨量加权平均浓度差异不显著,其它各离子的差异显著,在祁连山中部的葫芦沟干季降水相对于雨季离子浓度偏高^[17],这与本研究的结果是一致的.

表 1 祁连山东段与其它各站降水中主要离子雨量加权平均浓度的比较/μeq·L⁻¹

Table 1 Mean weighted concentrations of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains compared with other researches/μeq·L ⁻¹									
地区	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	文献
Djougou	3.80	2.00	2.10	13.30	14.30	3.40	8.20	6.20	[1]
Typhoon	725.00	24.00	142.00	83.30	5.44	811.00	5.95	104.00	[7]
Botanical Garden	10.50	1.90	3.80	11.90	17.50	10.70	9.10	16.60	[31]
Metropolitan	62.20	11.10	19.50	30.20	18.80	66.60	15.80	41.30	[8]
Robertson	1.56	0.36	1.81	23.59	1.23	0.73	2.62	1.99	[32]
天津	35.00	14.00	41.00	306.00	174.00	50.00	105.00	344.00	[13]
上海	11.85	4.10	8.95	45.00	82.15	46.05	37.10	92.85	[15]
太原	22.40	10.50	42.20	264.90	140.90	31.00	99.20	299.20	[19]
贵阳	13.90	9.61	10.50	182.90	112.79	20.72	7.31	265.63	[18]
聂拉木	50.00	24.70	6.60	71.00	12.30	59.00	1.30	13.90	[9]
瓦里关	23.77	2.59	17.77	112.82	38.65	26.65	15.30	46.69	[10]
九条岭	132.71	28.25	55.80	532.02	197.69	87.62	40.62	243.86	[33]
黑松驿	146.79	25.38	178.60	599.32	79.21	123.38	60.52	307.44	本研究

但是,高离子浓度也出现在雨季(图 4). 如 Na⁺ 浓度在 2013-08-05 最高,在 2014-04-10 浓度也很高; K⁺ 浓度在 2013-08-05 出现最大值,在 2013-09-06、2014-04-12 浓度也较高; Mg²⁺ 浓度在 2013-08-16 最高,在 2014-04-10、2014-04-11、2013-08-05 浓度也很高; Ca²⁺ 浓度在 2014-06-28 出现最大值,在 2014-04-12、2014-04-11 浓度也较高; NH₄⁺ 浓度在 2014-06-11、2014-04-12、2014-04-20、2014-04-16 浓度也较高; Cl⁻ 浓度在 2013-08-05 最高,在 2013-08-16、2013-06-01 浓度也较高; NO₃⁻ 浓度在 2014-08-05 最高,在 2013-08-16、2013-09-06 浓度也较高; SO₄²⁻ 浓度在 2013-08-05、2013-08-16、2014-04-12 也较高,这主要是由于雨季降水过程中伴随着沙尘天气,降水量较多对空气的淋洗作用较强,溶解到降水中的离子较多,进而导致各离子的浓度较高.

从各季节来看,除 Na⁺ 的雨量加权平均浓度在冬季最高外,其它各离子的浓度在秋季最高,并且 Na⁺ 的浓度在秋季也较高, K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 的浓度在冬季也较高,可见降水中离子浓度在秋、冬季节较高,春、夏季节较低. 用 Duncan 多重检验表明,秋季各离子的雨量加权平均浓度与其它季节差异显著,春、夏、冬季离子浓度差异不显著,但 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、NO₃⁻ 在冬季离子浓度与春、夏季差异显著. 由于秋、冬季节降水较少,所以离子浓度相对较高,而春、夏季节降水较多,对离子浓度有一定的稀释作用,因而离子浓度相对较低. 此外, Ca²⁺ 浓度在春季也较高,这是春季多沙尘天气,粉尘中含有大量的矿物盐类 CaSO₄^[25],因而降水中 Ca²⁺ 浓度也相对较高; NH₄⁺ 浓度在夏季也较高,这是夏季农业生产中大量使用化肥造成大气中 NH₄⁺ 浓度增加,进而导致降水中 NH₄⁺ 浓度增加.

表 2 祁连山东段降水中主要离子雨量加权平均浓度的季节性变化(平均值±标准差, *n* = 53)¹⁾/μeq·L⁻¹

Table 2 Seasonal variations of mean weighted concentrations of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains(mean value ± standard deviation, <i>n</i> = 53)/μeq·L ⁻¹										
季节	气温 /℃	降水量 /mm	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
春季	6.28	89.30	191.08 ± 13.98 ^A	27.80 ± 1.78 ^A	202.58 ± 13.63 ^{AB}	652.81 ± 43.36 ^A	60.21 ± 7.51 ^A	90.80 ± 10.28 ^A	42.50 ± 3.61 ^A	267.09 ± 24.14 ^A
夏季	15.41	115.50	65.76 ± 4.45 ^A	12.80 ± 0.73 ^A	104.07 ± 4.75 ^A	481.66 ± 20.04 ^A	80.59 ± 5.10 ^A	72.85 ± 6.25 ^A	59.01 ± 3.23 ^A	179.85 ± 12.43 ^A
秋季	3.80	18.70	294.20 ± 149.92 ^B	111.19 ± 22.22 ^C	327.32 ± 193.69 ^C	1541.40 ± 1088.08 ^B	172.95 ± 122.12 ^B	1296.92 ± 871.68 ^B	188.13 ± 28.89 ^B	3312.86 ± 2178.24 ^B
冬季	-10.17	4.20	368.19 ± 166.82 ^B	59.92 ± 24.86 ^B	307.07 ± 136.23 ^{BC}	339.31 ± 195.19 ^A	4.01 ± 1.17 ^A	283.03 ± 60.05 ^A	252.57 ± 103.18 ^A	757.16 ± 154.71 ^A
雨季	12.03	203.40	164.08 ± 8.68	28.79 ± 1.40	225.94 ± 11.60	678.11 ± 39.31	74.38 ± 3.92	112.74 ± 5.30	48.26 ± 1.58	267.70 ± 10.73
干季	-3.82	24.30	257.64 ± 43.35 ^{**}	57.10 ± 10.10 ^{**}	261.41 ± 46.90 ^{**}	892.11 ± 218.14 ^{**}	64.17 ± 25.00	540.11 ± 178.05 ^{**}	109.91 ± 22.66 ^{**}	1400.10 ± 447.03 ^{**}

1) 用 Duncan 法进行多重检验,同列标有不同大写字母表示组间差异极显著(*P* < 0.01); 用 *t* 检验法进行成组检验,同一列中干季与雨季对比, ** 表示差异极显著(*P* < 0.01); 不标表示差异不显著(*P* > 0.05)

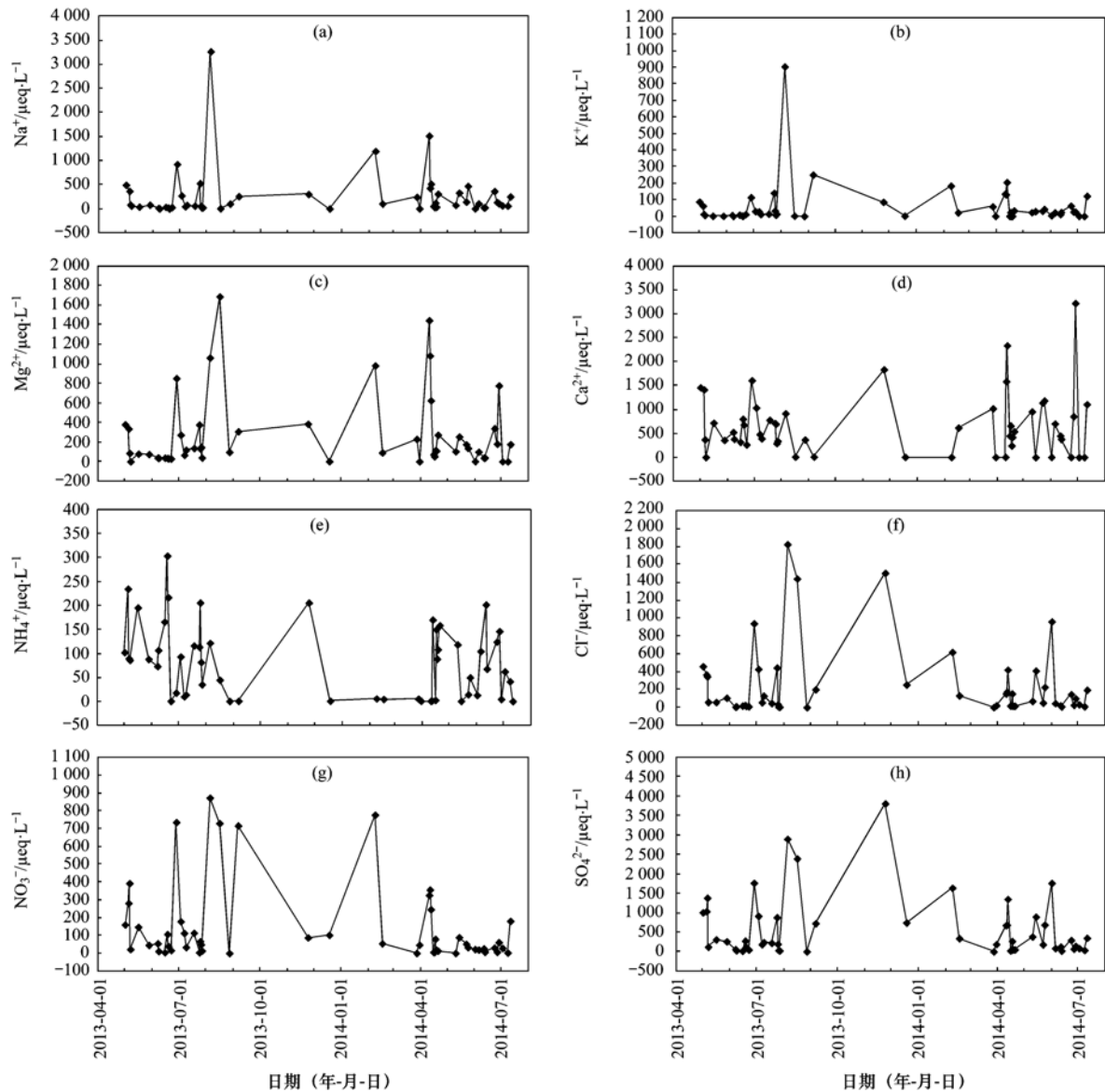


图4 祁连山东段降水阳离子和阴离子浓度时间变化

Fig. 4 Temporal variations of cation and anion concentrations in precipitation at the east Qilian Mountains

3 讨论

3.1 降水中不同离子之间的相关性

表3为祁连山东段黑松驿降水中主要离子的因子分析,特征值大于1的2个主成分占总载荷的69.355%。第一因子占总载荷的53.784%,包括 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ,表明它们在来源上有一定的相关。 Na^+ 主要来自于海源,也会受陆源的影响,而 K^+ 、 Mg^{2+} 主要来自于陆源,也会受海源的影响, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来自陆源和人为源, Cl^- 既会来自于海源,也会来自于陆源和人为源,如果它们在来源上相关,最有可能是有陆源物质的贡献。第二因子占总载荷的15.607%,包括

Ca^{2+} 和 NH_4^+ ,表明它们在来源上与其它离子有所不同。

表4为祁连山东段黑松驿降水中主要离子的相关性,也证明了以上因子分析的结果。 Na^+ 和 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 NO_3^- 具有很高的相关性,而且 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 相互之间显著正相关,表明它们在来源上具有一定相关。除与 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 明显正相关外, Ca^{2+} 与其它离子的相关性很小,表明 Ca^{2+} 来源与其它离子有所不同。在距采样点约15km的地方有一水泥厂,石灰石的开采和水泥加工导致大气中有 CaCO_3 粉尘,进而导致降水中 Ca^{2+} 浓度较高,可见人为源也是研究区降水中 Ca^{2+} 的来源。 NH_4^+ 与其它阳离子和阴离子均不

表 3 祁连山东段降水中主要离子的因子分析

Table 3 Factor analysis of concentrations of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains

主成分	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	贡献率/%
1	0.850	0.826	0.791	0.253	-0.052	0.876	0.851	0.843	53.748
2	-0.082	-0.006	-0.135	0.669	0.827	0.104	-0.221	0.181	15.607

表 4 祁连山东段降水中主要离子的相关性¹⁾

Table 4 Correlations of concentrations of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	1.000							
K ⁺	0.913 **	1.000						
Mg ²⁺	0.610 **	0.480 **	1.000					
Ca ²⁺	0.132	0.174	0.246 *	1.000				
NH ₄ ⁺	-0.045	0.008	-0.177	0.197	1.000			
Cl ⁻	0.600 **	0.605 **	0.594 **	0.174	0.018	1.000		
NO ₃ ⁻	0.651 **	0.648 **	0.735 **	0.054	-0.144	0.657 **	1.000	
SO ₄ ²⁻	0.538 **	0.529 **	0.567 **	0.231 *	0.069	0.957 **	0.641 **	1.000

1) ** 表示通过 0.01 的置信度检验 ($P < 0.01$), * 表示通过 0.05 的置信度检验 ($P < 0.05$), $n = 53$

相关,表明它不可能来自陆源或海源,而来自于人为源,其中农业生产和采暖是其主要来源.

3.2 降水中离子的富集因子

尽管不同离子具有较高的相关性,但在来源上会有所不同. 表 5 为根据公式(1)、(2)计算得出祁连山东段黑松驿降水中离子组分相对于海水和土壤的富集因子值. K^+ 和 Mg^{2+} 的 $EF_{\text{海洋}}$ 远大于 1, $EF_{\text{土壤}}$ 小于 1,表明它们相对于海水富集而相对土壤亏损,其来源主要为陆源. 除秋季和干季外, Cl^- 的 $EF_{\text{海洋}}$ 小于 1, $EF_{\text{土壤}}$ 远大于 1,表明 Cl^- 来源主要为海源. 除冬季外, Na^+ 的 $EF_{\text{土壤}}$ 略小于 1,表明 Na^+ 主要是海源的贡献,而 Ca^{2+} 的 $EF_{\text{海洋}}$ 远大于 1,表明 Ca^{2+} 主要是陆源的贡献. NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的 $EF_{\text{海洋}}$ 和 $EF_{\text{土壤}}$ 均远大于 1,表明相对于土壤和海水均相对富集,而来源于海水和土壤的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 均很少,其主要是人为源的贡献.

表 6 为根据公式(3)~(5)计算得出祁连山东段黑松驿降水中各离子来源的贡献率. 研究区降水中的 Na^+ 主要是海源输入,不过冬季也有 52.41% 的陆源输入,因为周边丰富的盐矿资源为 Na^+ 提供了充足来源^[25]. Mg^{2+} 主要是陆源输入,其输入比例平均为 77.09%,但也有海源输入,其输入比例平均为 20.19%,此外 Mg^{2+} 在冬季有 10.75% 的人类活动输入,这可能与冬季大量燃烧煤炭有关,因为煤炭矿物质含有 Mg 元素^[34]. K^+ 、 Ca^{2+} 主要是陆源输入,其输入比例平均分别为 88.67%、98.13%,而海源输入比例相对较低. 除秋季和干季外, Cl^- 主要是海源输入,其输入比例平均为 98.45%,陆源输入的

比例非常低,而秋季有 73.32% 的人类活动输入的影响,这可能与来自含氟有机物(如聚氟乙烯)和秸秆燃烧有关^[35, 36],因为在秋季焚烧大田秸秆时大量地膜也被点燃. NO_3^- 主要是人类活动输入为主,其输入比例平均为 98.27%,而陆源输入的比例非常低,其主要来自于汽车尾气排放和燃烧有机物燃料所致^[18]. SO_4^{2-} 海源输入和陆源输入的比例均较低,而人类活动输入比例平均为 92.16%,其主要来自于有机燃料燃烧和工业排放^[37].

从春、夏、秋、冬季对比来看, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 在冬、春季海源输入比例高于夏、秋季,而 Cl^- 海源输入在冬季最高; Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在夏、秋季陆源输入比例高于冬、春季,而 Cl^- 和 SO_4^{2-} 在春、夏季陆源输入比例高于秋、冬季, K^+ 在秋季陆源输入比例最高, NO_3^- 在春季陆源输入比例最高; NO_3^- 在冬季人为源输入比例最高, SO_4^{2-} 在秋季人为源输入比例最高. 从雨季和干季对比来看, K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在雨季海源输入高于干季,而 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在干季海源输入高于雨季; Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在雨季陆源输入高于干季,而 K^+ 在干季陆源输入高于雨季; Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在干季人为源输入高于雨季.

3.3 降水中离子的后向轨迹追踪

局地源对降水离子贡献较为明显^[37],但对于内陆地区来说,海源离子是通过水汽长距离运输而来,并且在运输途中会不断加入陆源离子和人为源离子. 图 5 显示,祁连山东段降水中离子来源的水汽运输有西北、北方、北方+东南、西北+东南、西

表 5 祁连山东段降水中主要离子的富集因子值

Table 5 Enrichment factor values of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains

季节	EF _{海洋}						EF _{土壤}					
	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
春季	6.67	4.67	77.82	0.41	11 119.90	11.55	0.51	0.08	0.55	44.87	31.00	21.76
夏季	8.93	6.97	166.85	0.96	44 871.31	22.60	0.24	0.05	0.38	48.79	58.34	19.86
秋季	17.34	5.58	119.35	3.80	31 974.01	93.06	0.34	0.14	0.43	271.42	58.12	114.32
冬季	7.47	3.67	20.99	0.66	34 299.00	16.99	1.91	0.35	1.16	269.08	354.46	118.70
雨季	8.05	6.07	94.14	0.59	14 705.10	13.48	0.43	0.08	0.59	53.63	33.89	21.00
干季	10.17	4.47	78.88	1.81	21 329.96	44.91	0.51	0.13	0.52	195.30	58.67	83.48

表 6 祁连山东段降水中各离子不同来源的贡献/%

Table 6 Different source contributions for ion concentrations in precipitation at the east Qilian Mountains/%

季节	海源输入 (SSF)						陆源输入 (CF)						人类活动输入 (ASF)				
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
春季	100.00	14.98	21.41	1.29	97.77	8.66	0.00	85.02	78.59	98.71	2.23	3.23	4.59	0.00	0.00	96.77	86.75
夏季	100.00	11.20	14.34	0.60	97.95	4.42	0.00	88.80	85.66	99.40	2.05	1.71	5.03	0.00	0.00	98.29	90.55
秋季	100.00	5.77	17.94	0.84	26.31	1.07	0.00	94.23	82.06	99.16	0.37	1.72	0.87	0.00	73.32	98.28	98.06
冬季	47.59	13.39	27.22	4.76	99.63	5.88	52.41	86.61	62.03	95.24	0.37	0.28	0.84	10.75	0.00	99.72	93.28
雨季	100.00	12.42	16.49	1.06	98.14	7.42	0.00	87.58	83.51	98.94	1.86	2.95	4.76	0.00	0.00	97.05	87.82
干季	100.00	9.84	22.37	1.27	55.33	2.23	0.00	90.16	77.63	98.73	0.51	1.70	1.20	0.00	44.16	98.30	96.57

北 + 西南、西北 + 北方 + 东南路径,分别占总降水次数的 58.49%、16.98%、9.43%、9.43%、3.77%、1.89%(表 7)。西北路径是祁连山东部降水的最主要来源,在各个季节都会出现(表 8),水汽通过西风环流输送,从欧洲经中亚进入新疆,再沿河西走廊到达研究区[图 5(a)];北方路径也是祁连山东部降水的主要来源,它也会在各个季节出现,水汽通过冷性反气旋输送,从西伯利亚经蒙古高原南下进入研究区[图 5(b)];北方 + 东南路径也出现在各个季节,水汽通过冷性反气旋和东亚季风输送

[图 5(c)];西北 + 东南路径主要出现在夏季和春季,水汽通过西风环流和东亚季风输送[图 5(d)];西北 + 西南路径出现在夏季,水汽通过西风环流和南亚季风输送[图 5(e)];西北 + 北方 + 东南路径也出现在夏季,水汽由西风环流、冷性反气旋和东亚季风共同输送[图 5(f)]。用 Duncan 多重检验表明,Na⁺、K⁺在各水汽来源中雨量加权平均浓度差异不显著,Mg²⁺、Cl⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻除西北 + 西南路径外,其它各水汽来源中离子浓度差异也不显著,但 Ca²⁺在西北路径与西北 + 西南路径中离子浓度

表 7 祁连山东段降水不同来源路径百分比及各离子雨量加权的平均浓度(平均值 ± 标准差, n = 53)¹⁾

Table 7 Percentage of different source trajectories and mean weighted concentrations of major ions in precipitation at the east Qilian Mountains(mean value ± standard deviation, n = 53)

水汽来源	路径 百分比/%	降水 百分比/%	雨量加权的平均浓度/μeq·L ⁻¹			
			Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
西北路径	58.49	67.05	158.08 ± 8.21 ^A	25.76 ± 1.37 ^A	184.77 ± 11.01 ^A	620.14 ± 36.91 ^A
北方路径	16.98	12.01	160.93 ± 23.45 ^A	27.80 ± 2.58 ^A	155.54 ± 17.89 ^A	501.86 ± 49.25 ^{AB}
北方 + 东南路径	9.43	9.82	110.38 ± 15.98 ^A	24.37 ± 5.20 ^A	175.66 ± 42.12 ^A	530.02 ± 69.88 ^{AB}
西北 + 东南路径	9.43	7.73	129.35 ± 22.95 ^A	27.07 ± 4.28 ^A	151.52 ± 23.69 ^A	796.13 ± 138.96 ^B
西北 + 西南路径	3.77	0.89	20.51 ± 13.56 ^A	10.82 ± 7.24 ^A	379.96 ± 224.71 ^B	268.99 ± 187.70 ^{AB}
西北 + 北方 + 东南路径	1.89	2.49	17.99 ± 2.54 ^A	7.52 ± 1.06 ^A	147.10 ± 20.80 ^A	290.29 ± 41.05 ^{AB}
水汽来源	路径 百分比/%	降水 百分比/%	雨量加权的平均浓度/μeq·L ⁻¹			
			NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
西北路径	58.49	67.05	76.59 ± 3.40 ^A	124.13 ± 6.57 ^A	47.00 ± 2.02 ^A	296.74 ± 14.84 ^A
北方路径	16.98	12.01	92.47 ± 9.57 ^A	185.56 ± 29.22 ^A	115.64 ± 10.75 ^A	507.60 ± 65.38 ^A
北方 + 东南路径	9.43	9.82	108.14 ± 35.30 ^{AB}	45.29 ± 8.38 ^A	47.43 ± 15.39 ^A	158.68 ± 30.35 ^A
西北 + 东南路径	9.43	7.73	48.64 ± 6.64 ^A	137.19 ± 33.97 ^A	100.46 ± 15.18 ^A	342.51 ± 68.75 ^A
西北 + 西南路径	3.77	0.89	37.06 ± 13.17 ^{AB}	301.55 ± 208.93 ^B	162.13 ± 98.54 ^B	514.45 ± 336.04 ^B
西北 + 北方 + 东南路径	1.89	2.49	81.54 ± 11.53 ^B	4.73 ± 0.67 ^A	49.71 ± 7.03 ^A	34.27 ± 4.85 ^A

1) 用 Duncan 法进行多重检验,同列标有不同大写字母表示组间差异极显著(P < 0.01)

表 8 祁连山东段不同来源路径降水的月降雨量/mm

水汽来源	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
西北路径	0.0	1.1	5.6	46.0	11.0	43.3	25.7	0.1	0.0	0.0	4.2	0.8
北方路径	0.0	2.3	0.0	0.0	11.7	12.5	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
北方 + 东南路径	0.0	2.3	0.0	0.0	14.6	12.5	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
西北 + 东南路径	0.0	0.0	0.0	2.3	8.1	0.0	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
西北 + 西南路径	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
西北 + 北方 + 东南路径	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

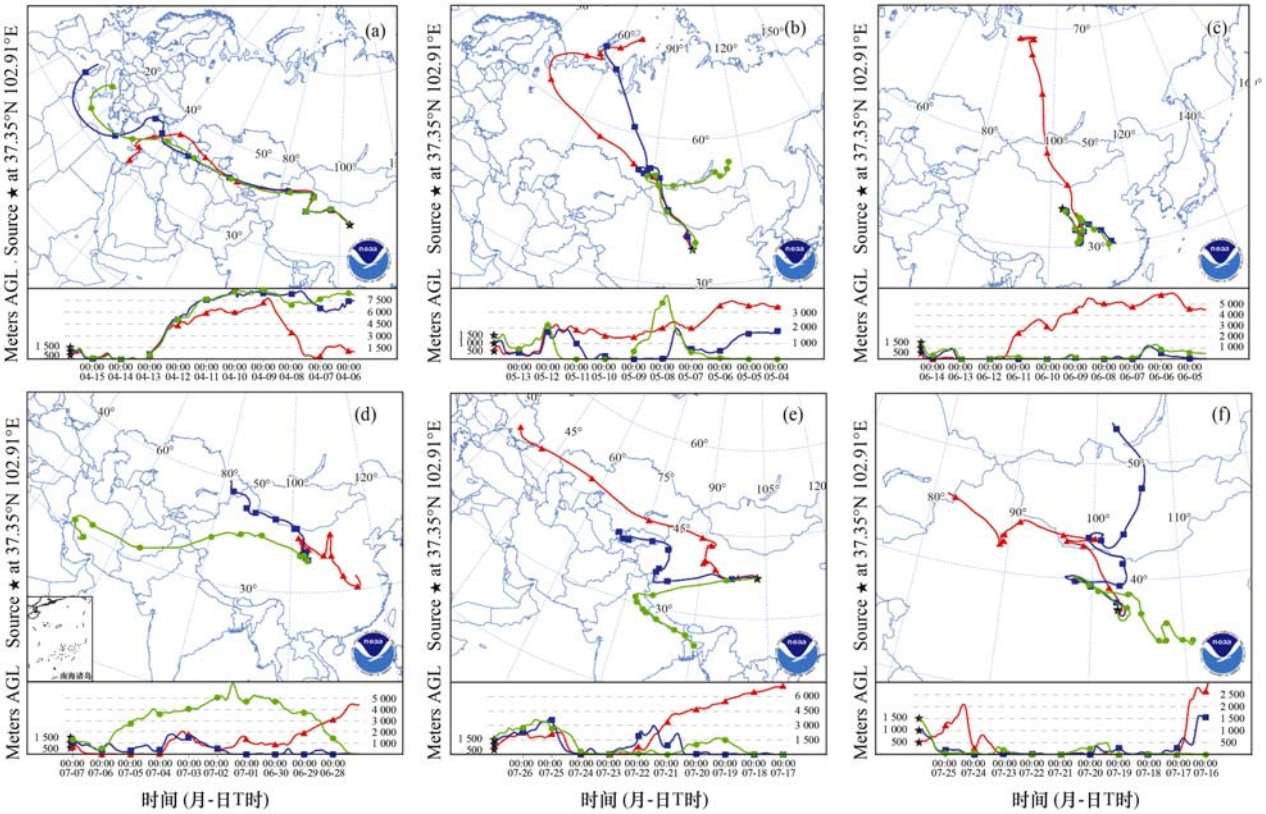


图 5 祁连山东段降水中离子来源的后向水汽追踪

Fig. 5 Black trajectories of water vapor transportation of ion original sources in precipitation at the east Qilian Mountains

差异显著, NH_4^+ 在西北 + 北方 + 东南路径与其它各水汽来源中离子浓度差异显著. 总体来看, 祁连山东段深居内陆, 海洋性离子通过西风环流和季风环流长距离输送, 陆源性离子主要由中亚、新疆、蒙古高原的沙漠和戈壁提供, 人为源离子主要与各路径上的城市污染和工、农业生产有关, 而降水中离子含量多少受各天气系统的强弱变化影响.

4 结论

(1) 祁连山东段雨季降水电导率值较低, 干季较高, 秋、冬季节降水电导率较高, 春、夏季节较低, pH 值的变化与此相反. 降水电导率受碱性元素控制, pH 值均高于 7, 为弱碱性水. 祁连山东段降水为 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 型, 阳离子浓度大小排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$, 阴离子浓度大小排序为

$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. 降水中各离子浓度含量均较高, 这与距腾格里沙漠较近有一定关系.

(2) 除 NH_4^+ 外, 祁连山东段降水中其它各离子干季雨量加权的平均浓度均高于雨季, 但高离子浓度也会出现在雨季. 除 Na^+ 的雨量加权平均浓度在冬季最高外, 其它各离子的浓度在秋季最高, 不过 Na^+ 的浓度在秋季也较高, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的浓度在冬季也较高, 总体上降水中离子浓度在秋、冬季节较高, 春、夏季节较低.

(3) 祁连山东段降水中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在来源上有一定的相关, 它们最有可能共同受陆源物质的影响. Ca^{2+} 和 NH_4^+ 在来源上与其它离子有所不同, 受附近水泥厂的影响, 人为源也是 Ca^{2+} 的来源之一, 而 NH_4^+ 来源于人为源, 其中农

业生产和采暖是其主要来源。

(4) 祁连山东段降水中离子来源的水汽运输有西北、北方、北方+东南、西北+东南、西北+西南、西北+北方+东南路径,其中西北路径是最主要来源,各路径会出现在不同季节。祁连山东段海洋性离子通过西风环流和季风环流长距离输送,而陆源性离子主要由中亚、新疆、蒙古高原的沙漠和戈壁提供,人为源离子主要与各路径上的城市和绿洲工、农业有关,而降水中离子含量多少受各天气系统的强弱变化影响。

参考文献:

- [1] Akpo A B, Galy-Lacaux C, Laouali D, *et al.* Precipitation chemistry and wet deposition in a remote wet savanna site in West Africa: Djougou (Benin) [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 110-123.
- [2] Praveen P S, Rao P S P, Safai P D, *et al.* Study of aerosol transport through precipitation chemistry over Arabian Sea during winter and summer monsoons [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(4): 825-836.
- [3] Mphepya J N, Pienaar J J, Galy-Lacaux C, *et al.* Precipitation chemistry in semi-arid areas of Southern Africa: a case study of a rural and an industrial site [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2004, **47**(1): 1-24.
- [4] Avila A, Alarcón M. Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(11): 1663-1677.
- [5] Arsene C, Olariu R I, Mihalopoulos N. Chemical composition of rainwater in the northeastern Romania, Iasi region (2003-2006) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(40): 9452-9467.
- [6] 肖红伟, 龙爱民, 谢露华, 等. 中国南海大气降水化学特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 475-480.
- [7] Mkadam K M, Ali S M, Tokuyama A. A comparison of bulk precipitation chemistry during normal and typhoon events on subtropical Okinawa Island (Japan) [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **88**(2): 108-115.
- [8] de Mello W Z. Precipitation chemistry in the coast of the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brazil [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(2): 235-242.
- [9] 杨勇杰, 刘俊卿, 狄一安, 等. 青藏高原大气降水化学组分特征及来源 [J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2011, **40**(6): 586-590.
- [10] 张占峰, 王红磊, 德力格尔, 等. 瓦里关大气降水的化学特征 [J]. *大气科学学报*, 2014, **37**(4): 502-508.
- [11] Okay C, Akkoyunlu B O, Tayanç M. Composition of wet deposition in Kaynarca, Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(3): 401-410.
- [12] Kulshrestha U C, Sarkar A K, Srivastava S S, *et al.* Investigation into atmospheric deposition through precipitation studies at New Delhi (India) [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(24): 4149-4154.
- [13] 陈魁, 肖致美, 李鹏, 等. 天津市大气降水化学组分变化趋势及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 956-964.
- [14] 王芳, 陈强, 张文煜, 等. 沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2477-2482.
- [15] 艾东升, 郑祥民, 周立旻, 等. 近 2 年上海市夏季降水地球化学特征研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2002-2009.
- [16] 程佳惠, 李金娟, 孙广权, 等. 典型酸雨城市降水、降尘中阴阳离子分布特征及其相关性 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1676-1682.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [20] 郭晓方, 崔阳, 王开扬, 等. 近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 388-395.
- [21] 徐宏辉, 刘洁, 王跃思, 等. 临安本底站大气气溶胶水溶性离子浓度变化特征 [J]. *环境化学*, 2012, **31**(6): 796-802.
- [22] 柴发合, 高健, 王淑兰, 等. 辽宁省背景地区降水化学特征及其与大气传输的关系 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(4): 387-393.
- [23] 王春风, 何元庆, 张宁宁, 等. 丽江-玉龙雪山不同区域大气降水化学特征 [J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(1): 18-23.
- [24] 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 希夏邦马峰北坡地区夏末降水化学特征探讨 [J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(5): 574-578.
- [25] 岳晓英, 李忠勤, 樊晋, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子观测与分析研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2723-2731.
- [26] 程国栋, 王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策 [J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 3-14.
- [27] 张林静, 张秀英, 江洪, 等. 沈阳市降水化学成分及来源分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2081-2088.
- [28] 唐蓉, 王体健, 石春娥, 等. 合肥市降水化学组成成分分析 [J]. *气象科学*, 2012, **32**(4): 459-465.
- [29] Keene W C, Pszenny A A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(D6): 6647-6658.
- [30] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, **28**(8): 1273-1285.
- [31] Das R, Das S N, Misra V N. Chemical composition of rainwater and dustfall at Bhubaneswar in the east coast of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5908-5916.
- [32] Lafrenière M J, Sinclair K E. Snowpack and precipitation chemistry at a high altitude site in the Canadian Rocky Mountains [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(3-4): 737-748.
- [33] Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, *et al.* The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **436-437**: 92-101.
- [34] 景晓霞, 常丽萍. 矿物质对煤中硫氮在热解气化过程中迁移变化的催化作用 [J]. *工业催化*, 2004, **12**(10): 13-17.
- [35] Sigg L, Stumm W, Zobrist J, *et al.* The chemistry of fog: factors regulating its composition [J]. *Chimia*, 1987, **41**(5): 159-165.
- [36] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [37] 张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 南京市降水化学特征及其来源研究 [J]. *大气科学学报*, 2015, **38**(4): 473-482.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行