

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

祁连山中段降水化学的环境意义研究

李宗杰¹, 李宗省^{2*}, 田青¹, 宋玲玲¹, 贾冰², 郭瑞², 宋耀选², 苏索南³, 韩春坛²

(1. 甘肃农业大学林学院, 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; 3. 野牛沟国家气象站, 祁连 810400)

摘要: 运用相关分析、趋势分析、富集因子法、海盐示踪法和 HYSPLIT 模型, 对 2012-07-23 ~ 2013-11-12 祁连山中段葫芦沟流域降水常量离子的化学特征分析表明, 降水中离子浓度大小顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$, 其中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是高浓度离子, 阳离子总浓度显著高于阴离子总浓度; 降水电导率的变化范围为 $2.26 \sim 482 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 平均值为 $41.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 区域降水为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ 型, 上述 3 种离子的浓度占离子总浓度的 70% 以上; 就季节变化而言, 降水离子在夏季呈最低浓度, 而在冬、春季降水量小但离子浓度高, 表现出典型的“碱雨”特征; 中亚和我国西北干旱区随西风环流带来的区域陆源物质是化学离子的主要来源, 人为污染源产生的气溶胶是次要来源; 更重要的是, 不同大气环流背景下降水离子浓度也呈现不同特征, 主要表现为季风源降水、混合源降水(季风和西风的影响)和西风源降水, 主要是由于不同大气环流条件下的降水淋溶过程及其强度所致。此外, 降水离子浓度与降水量、风速之间的相关性反映了局地气候环境的影响。

关键词: 降水; 化学; 大气环流; 来源; 祁连山

中图分类号: X131; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4465-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.007

Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China

LI Zong-jie¹, LI Zong-xing², TIAN Qing¹, SONG Ling-ling¹, JIA Bing², GUO Rui², SONG Yao-xuan², SU Suo-nan³, HAN Chun-tan²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural 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; 3. Yeniuogou National Weather Stations, Qilian 810400, China)

Abstract: A total of 90 precipitation samples were collected from individual precipitation events at the Qilian Alpine Ecology & Hydrology Research Station (Hulugou Station, $30^\circ 47' \text{N}$, $90^\circ 58' \text{E}$; 3 260 m a. s. l) located in the central Qilian Mountains from August 2012 to November 2013. All samples were analyzed for major cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}), anions (Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-}) and conductivity. Precipitation EC values ranged from 2.26 to $482 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ with an average value of $41.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The precipitation was of $\text{SO}_4^{2-}-\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ type, which contributed $> 70\%$ to the total ionic concentration. The same as the precipitation alkalinity, precipitation events occurred around summer showed lower concentrations, while it had higher concentrations in winter and spring with little precipitation and larger wind speed. Enrichment factor (EF), correlation and factor analysis indicated that regional crustal aerosols and species from central Asian and northwestern China arid regions brought by the westerly circulation were the major sources for these ions, some dust from human pollution were the secondary sources, and the contribution of sea salt was the least due to the long distance transport. These characteristics could be also confirmed by the correlation between ionic concentrations and meteorological data in the study region. It is also interesting that the precipitation chemistry was different under the different atmospheric circulation: the monsoon precipitation, the interaction precipitation events (influenced both by monsoon and westerly) and the westerly precipitation.

Key words: precipitation; chemical; atmospheric circulation; source; Qilian Mountain

大气降水是清洁大气气溶胶和污染物的重要手段, 这种现象在干湿条件下均可发生, 所以降雨、降雪或积雪的化学成分强烈影响着大气环境^[1, 2]。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]。降水化学成分研究还可表征人为污染源通过沉积过程对生态系统的影响^[4]。降水化学受多种因素的影响, 如当地污染物的排放、地区间污染物

传输、气象条件、海拔高度等地理学特征和高差等^[3, 5~9]。此外, 不同的气候条件也影响降水的化学

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41201024); 中国科学院“西部之光”西部博士项目; 中国博士后科学基金项目(2012M510219, 2013T60899); 中国科学院青年创新促进会项目

作者简介: 李宗杰(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与环境过程, E-mail: 1549017594@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: Lixhhs@163.com

组成^[10]。根据降水的化学成分、分布特征及其变化趋势,可判断由于经济发展、人口膨胀、工业化程度加剧、能耗增加等导致人类赖以生存的环境系统恶化的程度。自 20 世纪 90 年代中期,国内学者关于城市地区的降水化学特征分析和研究已逐步展开,然而,目前的研究工作尚未涉及到祁连山地区降水化学的环境意义^[1~12]。因此,本研究通过在祁连山中段的葫芦沟流域从 2012 年 7 月~2013 年 11 月连续收集降水样品并测定降水离子浓度,其目标是分析葫芦沟流域的降水化学成分、辨识降水中各种成分的可能来源以及探讨降水化学浓度的时间变率,以期认识该区大气环境的背景值提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区

祁连山(92°~107°E, 36°~43°N)位于我国青藏高原东北缘,由一系列平行的山脉和峡谷组成,从西北到东南延伸 850 km,从南到北延伸 200~300 km。祁连山 30% 山脉的海拔约在 4 000 m 以上,最高峰团结峰的海拔为 5 826.8 m。共分布 2859 条冰川,面积 1 972.5 km²,冰川总储量为 954.38 × 10⁸ m³^[13]。温度变化随高度从山谷到山顶变化,年降水量从东到西由 700 mm 降为 400 mm。祁连山是河西绿洲重要的水资源区,石羊河、黑河、疏勒河等内陆河均发源于此。葫芦沟流域地处青海省祁连山中段,介于 38°12′14″~38°16′23″N 和 99°5′37″~99°53′54″(图 1),流域集水面积为 23.1 km²,作为祁连山区的代表,非常适合寒区水文研究,流域海拔为 2 960~4 820 m,该流域气温低,蒸发少,年平均降水量为 400~600 mm,地形复杂,表现出显著的垂直地

带性,依次为冰雪带、寒漠带、沼泽草甸带、高山灌木带和山地草原带。

1.2 降水样品收集和实验室分析

2012 年 7 月~2013 年 11 月期间,按降水事件在葫芦沟流域 3 260 m 气象观测站附近开展了降水样品的连续采集,所有样品采集后都立即密封并存储在 -18℃ 的实验室中。本实验使用的采样仪器是 1 个直径为 50 cm 的聚乙烯塑料桶和 1 个无色聚乙烯塑料袋,放置的相对高度为 1.5 m。降雨开始时将其取出,放置在固定位置,并套上塑料袋。降雨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,同时观测记录了降水量、温度、风速和空气湿度等气象参数。样品测试前 2 d 将样品取出在室温(约 23℃)下自然融化,然后进行主要离子浓度的测量。K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度是用 Dionex-600 型离子色谱仪测定的,Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 浓度是用 Dionex-300 型离子色谱仪测定的,其精度可达 ng·g⁻¹ 级,测试数据误差 <5%。

1.3 富集因子

根据吉布斯图陆地水中的溶质有降雨和岩石风化的两个主要来源^[14],为了评价风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 Ca²⁺ 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^[15~16],计算公式如下:

$$EF_{\text{土壤}} = [X/\text{Ca}^{2+}]_{\text{水样}} / [X/\text{Ca}^{2+}]_{\text{土壤}} \quad (1)$$

$$EF_{\text{海洋}} = [X/\text{Na}^{+}]_{\text{降水}} / [X/\text{Na}^{+}]_{\text{海洋}} \quad (2)$$

式中, X 是离子浓度,水样可以是降水、河水、地下水等。在这公式中, $[X/\text{Ca}^{2+}]_{\text{土壤}}$ 比率中 Ca²⁺ 的浓度参照了前人的研究; $[X/\text{Na}^{+}]$ 比率中 Na⁺ 的浓度参照了标准海水的研究。一般来说, $EF \leq 1$ 表明离子是由海盐稀释所致,而 $EF \geq 1$ 表明大量离子来自于土壤或风化源^[17]。

1.4 后向轨迹与水汽通量

为了追踪水汽来源,运用了美国大气实验室开发的 HYSPLIT4 模型^[18],运用 NOAA/NCEP 在分析格点数据模拟了采样期间气团的传输轨迹,以确定研究区 120 h 内气团的传输轨迹。利用 NCEP/NCAR 再分析资料 1961~2008 年 300 hPa 和 500 hPa 的月平均经向风场、纬向风场、相对湿度和位势高度等资料,计算了单位气层大气的水汽总输送通量,分析了我国西南地区气候变暖背景下的水汽

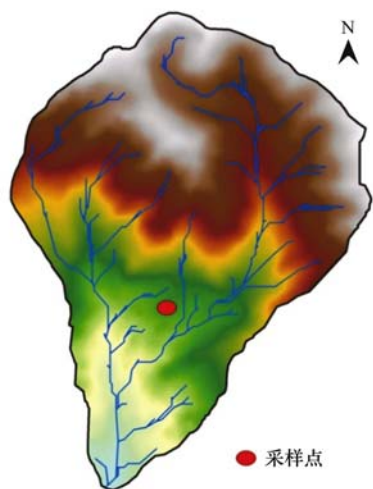


图 1 葫芦沟的地理位置示意

Fig. 1 Location of Hulusi station

通量变化及其对区域降水变化的影响^[19, 20],

具体计算公式如下:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{P_i}^{P_0} (u, v) q dP \quad (3)$$

式中, u 和 v 分别为单位面积空气柱各层大气的东西风和南北风分量, q 为该单位气柱各层大气的比湿, dP 为气压的变量, P_0 为海平面气压, P_i 为假设大气没有水汽的气压, 为简单起见, 研究中取 P_0 为 1 000 hPa 而 P_i 为 300 hPa 和 500 hPa.

2 结果与分析

2.1 降水 EC 变化

如图 2(a) 展现出了总阴离子和总阳离子之间的线性回归. R 是皮尔森相关系数, 其值为 0.93, 总阴离子浓度的平均值为 $137.2 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$, 总阳离子浓度的平均值为 $281.5 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明了阴阳离子浓度的极不平衡, 因为黑河源区土壤属性为钙质和碱性, 而未测定 HCO_3^- 离子, 所以阴离子的缺失是有可能的. 葫芦沟流域降水电导率值的变化范围为 $5.26 \sim 482 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 其平均值为 $41.9 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. 电

导率与除 NO_3^- 外的所有离子相关, 与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 显著正相关 (相关系数分别为 0.82、0.88 和 0.82), 反映出该区降水电导率受碱性元素控制, 这足以解释本研究区的降水为什么不呈现酸性. 图 2(b) 显示了 2012 年 7 月至 2013 年 11 月电导率的时间变化, 表明高碱度降水通常发生沙尘暴活动频繁时的冬、春两季, 在雨季 (5 ~ 10 月) 低频沙尘暴导致降水电导率降低, 春、夏、秋和冬季的平均电导率分别为 105、29、43 和 $130 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. 正是由于沙尘活动的影响, 所以强碱性降雨出现在 2013 年 4 月 30 日, 其电导率值为 $482 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 而 EC 最低值为 $5.26 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 出现在 2013 年 9 月 5 日.

2.2 降水化学浓度

如表 1 所示, 祁连山中段葫芦沟流域大气降水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的平均离子浓度分别为 42、67.3、27.9、32.1、13.3、44.4 和 $191.7 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中, Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度占阴离子总浓度的 79.6%, 而 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 占阳离子总浓度的 83.8% (图 3). 葫芦沟流域降水为 SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Ca^{2+} 型, 上述 3 种离子的浓度占离子总浓度的 73%, 其中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分别占离子总浓度的 16%、11% 和 46%. 降水样品阳离子的浓度大小顺序 ($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$) 与标准地壳矿物所含阳离子浓度的顺序相同, 降水样品阴离子的浓度的大小顺序 ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$) 不同于标准海水所含阴离子浓度的排序 ($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$). 降水样品的阴阳离子浓度的大小排序再次表明陆源地壳矿物控制着降水样品中的离子成分, Cl^- 和 Na^+ 的高浓度主要是由于附近的巴丹吉林沙漠和库姆塔格沙漠富含氯化钠类物质, 而海盐粒子对该区降水化学的贡献极小. 然而, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子浓度的季节变化最为显著, 在干季或低降水时期, 这两种离子的浓度 (图 4) 达到最高, 而在连续性降雨情况下达到最低值. 这种现象表明降水量变化可能会影响离子浓度, 因为强降雨可以冲刷大气气溶胶, 进而引起离子浓度升高. 就干旱区而

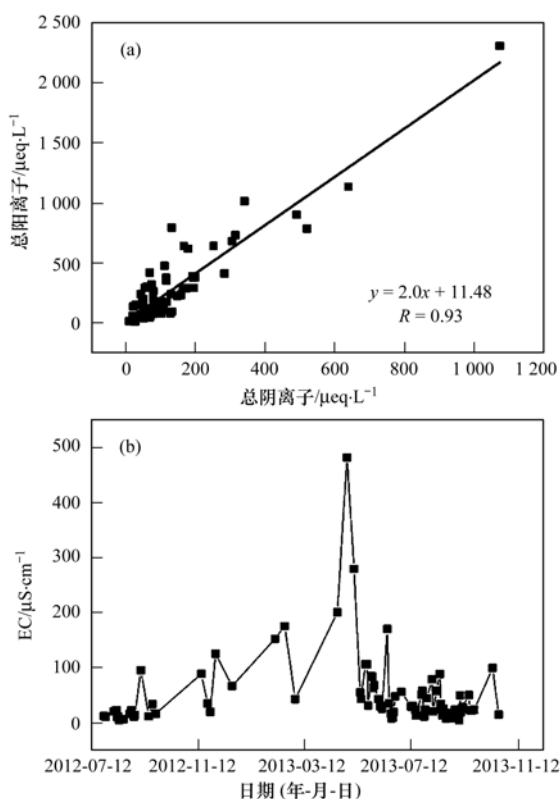


图 2 总阳离子和阴离子的线性回归和降水样品电导率 (EC) 的时间变化

Fig. 2 Linear regression of total cations and anions and the temporal variation of EC in precipitation samples

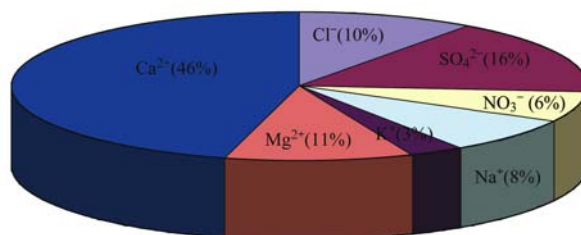


图 3 降水样品中各离子占总离子浓度的百分比

Fig. 3 Percentage of ions in total ion mass in precipitation

言,高浓度的 Ca^{2+} 主要取决于陆地尘埃中所包含的大量钙物质.除了陆源的影响外,人类活动引起

的污染物质也可能造成研究区降水中的 SO_4^{2-} 浓度的升高.

表 1 祁连山中段主要离子浓度和电导率(EC)与其他站点的比较¹⁾

Table 1 Major ion concentrations and conductivity(EC) at the central Qilian Mountains compared with other sites

地区	EC	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
祁连山中段葫芦沟(本研究)	41.9	42	27.9	67.3	32.1	13.3	44.4	191.7
玉龙雪山(本研究)	10.3	1.96	4.0	28.3	3.72	2.46	5.68	37.7
青藏高原中部 ^[21]	19.7	19.2	10	15.5	18.1	14.5	7.43	301
拉萨 ^[22]		21.7	2	2.5	89	14.8	5.72	150
Brazil ^[1]	10.8	13.8	4	23.1	15.1	5.81	8.85	21.5
天山 ^[23]	31.3	0.52	0.4	1.9	0.98	0.16	3.42	16.3
瓦里关 ^[5]	14.6	6.1	8.3	24	8.7	3.8	12.1	34
Okinawa ^[7]	34.8	188	14	25.8	180	10.6	37.4	22.2
Ru. India ^[9]		15.8	7.6	19.7	11.9	9.66	11.5	39.8
Jordan ^[2]	160	80.6	35.7	53.2	75.6	26.3	62.3	163.1
Turkey ^[14]	28.1	20.4	29.2	48	15.6	9.8	9.3	71.4
祁连山东段九条岭 ^[11]		87.6	40.6	243.9	132.7	28.3	55.8	532

1) 离子浓度单位为 $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$, EC 为 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 下同

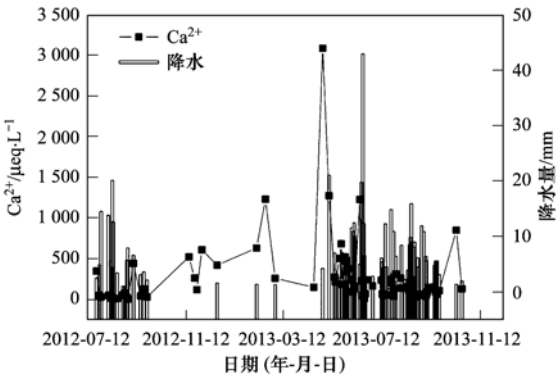


图 4 Ca^{2+} 的浓度与降水量的比较

Fig. 4 Comparison of Ca^{2+} concentrations and precipitation amount

与葫芦沟流域降水化学相似,巴西、印度农村地区、约旦、冲绳和土耳其的降水样品中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 也是高浓度离子(表 1).因此,这些地区的降水化学过程具有典型的大陆性以及部分人为源特征.降水样品中高浓度的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 可能是由于研究区 CaSO_4 的存在,这也与之前所研究的纳木错降水化学过程相似.但在某种程度上,祁连山中段的降水化学主要是由西北地区陆源的影响所致.此外,葫芦沟降水离子浓度高于拉萨和瓦里关,再次反映了干旱区沙尘物质的显著影响.然而,葫芦沟站(祁连山中段海拔 3 260 m)降水离子浓度低于九条岭站(祁连山东麓),主要原因是在葫芦沟站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,更重要的是九条岭位于腾格里沙漠南部,更接近陆源物质.另外一个原因可能是相对于九条岭而言,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.相比其他偏远地区的降水化学浓度,祁连山 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的浓度更高,这主要是由于降水量低和相对较大的陆源气溶胶和附近大气中沙漠粉尘所致.此外,海盐离子浓度(例如 Cl^- 和 Na^+) 在葫芦沟站降水中也远高于季风气候区(玉龙雪山、冲绳),再次确认内陆降水化学基本不受海盐离子的影响.

2.3 降水离子浓度的季节变化

图 5 显示的是祁连山中段大气降水中主要离子浓度随时间的变化情况,阳离子和阴离子浓度均表现出显著的波动变化.夏季降水离子出现低浓度,而在冬、春季节降水极少且伴有大风时展现高浓度(表 2 和图 5).这种现象揭示了冬、春两季频繁的沙尘暴活动造成大气陆源气溶胶浓度升高,而伴有少量降水,因此降水离子浓度也升高.此外,单个离子浓度的季节变化也证实了这一结论(图 5). Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子分别在 2013 年 2 月和 4 月达到最大值,最小值却出现在 6 月和 7 月, NO_3^- 离子浓度在 2013 年 4 月达到最高,而较高值分别出现在 2012 年 11 月和 2013 年 10 月, Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 离子的最大值出现在 2013 年 4 月, Mg^{2+} 离子的最大值出现在 2013 年 3 月和 4 月.总体上所有降水离子出现更高浓度均在 10 月以后,这就反映了降水化学浓度的季节性波动.干季时(4~10 月)大气降水化学的特点是相对于雨季离子浓度偏高和污染物的影响逐步增强.此外,在大气中悬浮的大量颗粒物通常出现在干季,这也是导致降水离子浓度升高的原因^[24].然而,也有高离子浓度出现在雨季,这主要是频繁的降水并伴有随机地沙尘活动和人类活动所致.

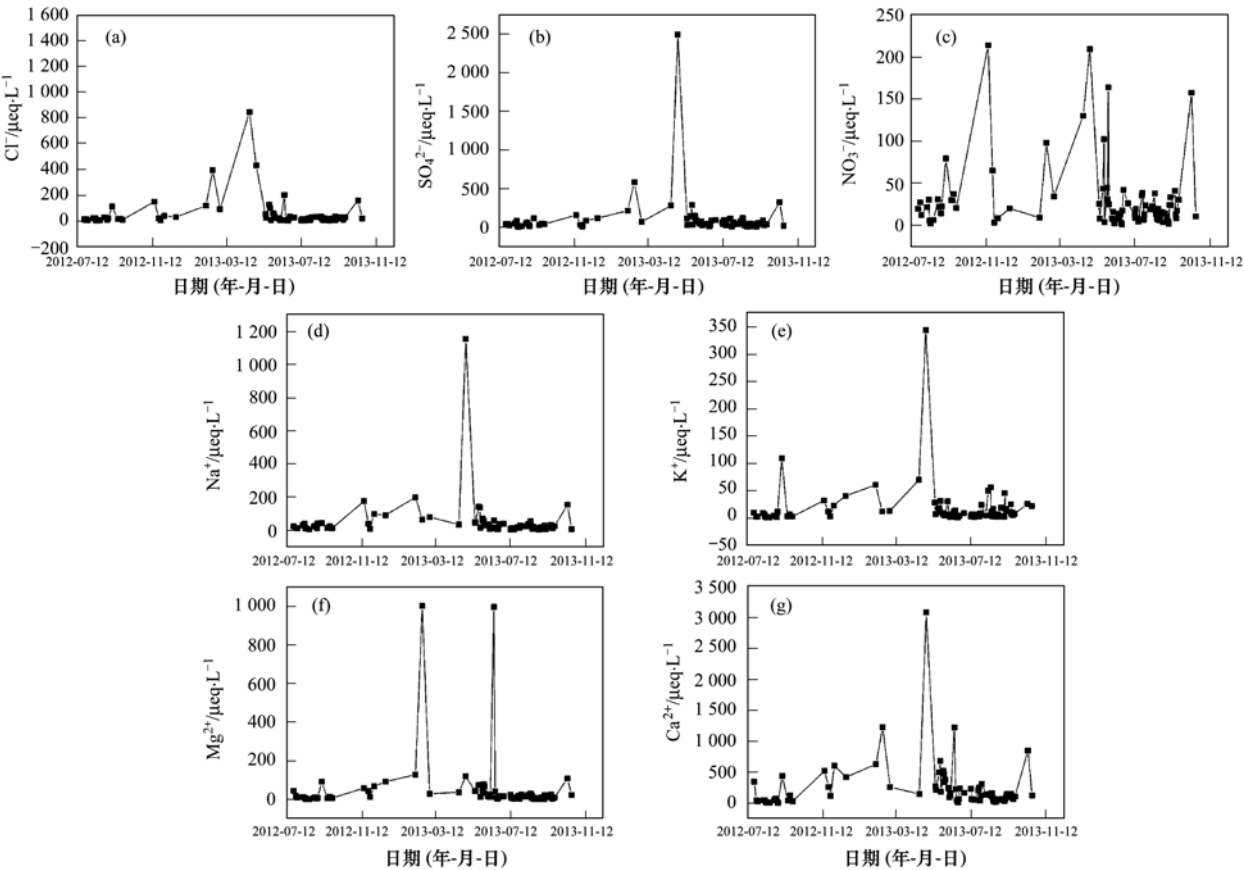


图5 祁连山中段降水样品阳离子和阴离子浓度随时间的变化

Fig. 5 Temporal variation of cation and anion concentration in atmospheric precipitation samples from the central Qilian Mountains

表2 祁连山中段主要离子的浓度和电导率的季节性变化

Table 2 Seasonal values of major ion concentrations and conductivity(EC) at the central Qilian Mountains compared with other site													
季节	气温 /℃	相对湿度 /%	降水量 /mm	风速 /m·s ⁻¹	EC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
春季	-1.83	62.86	21.98	2.12	105.23	328.87	153.58	71.50	59.14	31.73	38.44	266.80	
夏季	9.14	77.35	102.09	1.64	29.17	19.98	47.09	18.17	22.59	8.77	34.16	132.30	
秋季	-1.57	73.17	17.71	1.74	42.89	50.49	83.81	59.91	48.39	20.61	34.89	259.52	
冬季	-11.49	56.61	2.55	2.76	130.40	144.50	249.84	34.16	112.84	33.73	320.79	721.84	

依据降水量观测,干季降水(10月~次年4月)在采样周期中仅占年总降水量的3.1%,而干季Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺离子浓度分别是雨季的4.2、5.93、2.94、1.47、2.93、2.11和3.79倍,离子浓度也高于平均浓度.由于降水量变化的影响,主要离子即Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、Mg²⁺和Ca²⁺在夏季表现出较低的月均值而在冬天出现更高值.随着降水增加离子浓度反而降低(图6,以Cl⁻为例),表明降水的稀释作用会影响离子浓度,随着降水增加和降水周期加长离子浓度将减小,例如在一次连续降水事件中,总阳离子和阴离子浓度从2012年8月10日的97.41 μeq·L⁻¹和132.81 μeq·L⁻¹下降到2012年8月13日的10.0 μeq·L⁻¹

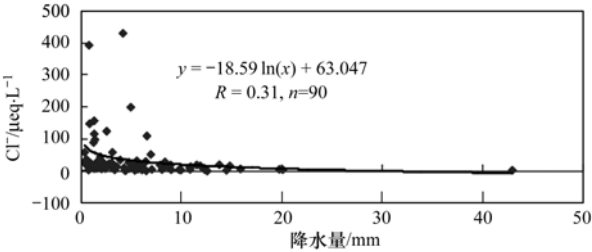


图6 Cl⁻浓度对祁连山中段降水量的影响

Fig. 6 Chloride concentration in precipitation in the central Qilian Mountains, showing the influence of the amount of precipitation

和117.08 μeq·L⁻¹.此外,类似的现象也发生在2013年的5月29~31日、2013年6月7~9日、2013年7月14~27日和2013年9月16~19日,这

就证实了降水过程对大气气溶胶的淋洗作用,使空气更为“洁净”. 由于研究区地处干旱区且接近沙漠地区的盐渍化风化物,强烈的沙尘暴活动是少雨季节 Cl^- 和 Na^+ 浓度出现反常高浓度的直接原因. 雨季离子浓度的升高在邻近地区也出现过,比如腾格里沙漠和黑河中游等地的研究结果与此类似^[25]. 在雨季,阳离子浓度展现降低趋势,而 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子在 8 月却出现相对高浓度,一般来说, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子是典型的人类活动所致,因此 8 月降水中这两种离子的高浓度就反映出祁连山中段有强烈的人类活动,比如矿产开发等.

2.4 不同离子之间的相关性

如表 3 所示,特征值大于 0.6 的 3 个主成分占总载荷的 92%. 第一因子占总载荷的 65%,包括除 NO_3^- 外的所有离子,表明陆源物质是降水离子的主要来源,这些离子之间的显著正相关性以及高浓度也证实了这一结论,因为研究区有富含大量 CaSO_4 和 MgSO_4 的陆源物质^[1]. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自自然源(土壤和粉尘),它们有助于大气降水过程发生中和反应. 第二因子(载荷 NO_3^- 离子)占方差的 23%,这主要是由于人类活动和当地放牧活动造成,

如采矿引起的污染、燃烧牲畜粪便取暖和烹饪以及牦牛和马等的排泄物等. 第三因子(包含 Na^+)只占方差的 7%. 如表 4 所示, Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 离子呈显著的正相关表明它们具有共同的来源,3 个离子可能主要受陆源物质的影响. 此外, Cl^- 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 之间的正相关性也反映出陆源物质对 Na^+ 和 Cl^- 离子的影响. 一方面,由于频繁的沙尘活动, Na^+ 和 Cl^- 主要受陆源气溶胶浓度高低的影响;另一方面,一些 Na^+ 和 Cl^- 可能源于含有岩盐的土壤尘埃气溶胶. Na^+/Cl^- 的平均比率为 0.21,远低于标准海水中的平均比率(0.86),这就表明降水中富含 Cl^- . 因此,祁连山中段降水中 Cl^- 可能有复杂的来源,包括海洋、土壤尘埃和人类活动,而 Na^+ 和 Cl^- 显著正相关则表明它们具有相同来源. K^+/Cl^- 的比率为 0.32 远高于标准海水 K^+/Cl^- 比率(0.061),这可能表明 K^+ 不可能来自海洋源. 一般来说,降水中的可溶性物质有 3 个主要来源,即海盐气溶胶、陆源气溶胶(土壤尘埃、生物排放)和人为源(如工业和农业生产、植被和化石燃料的燃烧等). 然而,人类活动对 K^+ 的影响甚微,推测 K^+ 离子主要来自于区域矿物气溶胶.

表 3 祁连山中段降水主要离子的因子分析

Table 3 Factor analysis for major ion concentrations in precipitation at the central Qilian Mountains

离子	因子值				
	1	2	3	4	5
Cl^-	0.88	-0.277	0.252	-0.072	-0.279
SO_4^{2-}	0.739	0.580	-0.297	-0.060	-0.082
NO_3^-	0.448	0.703	0.011	-0.24	0.104
Na^+	0.821	-0.511	0.541	-0.142	0.172
K^+	0.936	-0.024	-0.166	-0.267	0.070
Mg^{2+}	0.778	-0.523	0.094	0.320	0.043
Ca^{2+}	0.828	0.422	-0.207	0.286	0.023
百分比/%	62	23	7	4	2

表 4 祁连山中段降水离子浓度的相关性($n=90, P<0.05$)

Table 4 Correlation of ionic concentration in precipitation at the central Qilian Mountains

	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Cl^-	1.000						
SO_4^{2-}	0.44	1.000					
NO_3^-	0.31	0.57	1.000				
Na^+	0.83	0.31	0.04	1.000			
K^+	0.79	0.72	0.33	0.81	1.000		
Mg^{2+}	0.82	0.23	0.03	0.86	0.65	1.000	
Ca^{2+}	0.54	0.89	0.55	0.43	0.73	0.49	1.000

3 讨论

3.1 富集因子

如表 5 所示,降水中 Cl^- 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 因子值远低于

1,但 $\text{EF}_{\text{土壤}}$ 的值远高于 10,表明葫芦沟流域的 Cl^- 是受海洋和土壤物质的双重影响,而 Ca^{2+} 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 值介于 18~293 之间,这就证实了大部分的钙来自于土壤的结论. 由于 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 值和 $\text{EF}_{\text{土壤}}$ 值远高于 1,

所以 Mg^{2+} 可能是受土壤源物质控制, 而 K^+ 的 $\text{EF}_{\text{土壤}}$ 值越低, $\text{EF}_{\text{海水}}$ 值就越高, 这就说明 K^+ 可能受海洋和土壤源物质的双重影响. SO_4^{2-} 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 值在 44 ~ 336 之间, 这说明海洋源不是 SO_4^{2-} 的贡献者. 由于 Na^+ 的富集因子值介于 0.1 ~ 0.9 之间, 平均值为 0.55, 由此推断 Na^+ 可能受到了海洋源的影响. 这些富集因子值表明, 研究区降水化学主要受陆源物质贡献. 从春季到冬季, Cl^- 和 Ca^{2+} 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子值呈增加趋势, 最大值分别出现在 2013 年 2 月和 2013 年 6 月, 而 K^+ 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子值在夏季和秋季较高, 但在春季和冬季较低, 由表 5 数据还可知

Mg^{2+} 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子值冬季最大, 春季最小. 从春季到冬季 Cl^- 、 Na^+ 和 K^+ 的 $\text{EF}_{\text{土壤}}$ 富集因子值呈下降趋势, 但 Ca^{2+} 却与之相反. 这些变化规律可能主要是受降水量影响, 相关分析证实 Cl^- 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子值和 Na^+ 的富集因子值与气象要素无相关关系, 而 K^+ 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子值与相对湿度 ($R = 0.45$) 和水汽压 ($R = 0.41$) 呈现正相关. Ca^{2+} 的富集因子与风速的负相关也表明了局地源的巨大贡献 ($R = -0.35$). 此外, K^+ 的 $\text{EF}_{\text{海水}}$ 富集因子与风速 ($R = -0.3$) 关系及 $\text{EF}_{\text{土壤}}$ 富集因子与温度 ($R = 0.47$) 的相关也证实了陆地源的贡献.

表 5 祁连山中段降水的富集因子值

Table 5 EF enrichment factor values in precipitation collected from the central Qilian Mountains												
季节	相对于标准海盐的富集因子						相对于标准土壤的富集因子					
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
春季		418.76		73.63	94.35	768.55	125.12		1.03	0.23	0.52	
夏季		39.62		6.89	24.42	112.95	62.30		0.51	0.14	2.33	
秋季		71.66		18.87	30.83	257.68	63.12		0.33	0.16	1.29	
冬季		221.52		29.66	311.31	717.55	64.58		0.27	0.09	5.08	

表 6 在季风源降水、混合源降水和西风源降水条件下主要离子浓度与气象资料的比较¹⁾

Table 6 Comparison of major ions and metrological data for monsoon precipitation events, the interaction precipitation events and the westerly precipitation events

项目	时间	温度 /℃	相对湿度 /%	降水量 /mm	风速 /m·s ⁻¹	Cl^-/Na^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
季风水汽降水事件	2012-08-10	12.90	83.23	5.60	3.50	0.52	20.23	81.97	30.62	38.86	5.90	8.45	44.19
	2012-08-11	12.40	78.22	4.40	1.90	0.34	3.83	16.50	5.62	11.23	1.84	2.07	13.87
	2012-08-12	12.10	84.07	20.10	2.30	0.48	5.90	8.74	6.27	12.17	1.75	2.21	16.11
	2012-08-13	10.80	80.72	12.60	1.70	0.17	1.73	5.69	2.60	9.87	0.38	0.68	6.16
混合水汽降水事件	2013-08-15	11.06	78.20	2.35	1.58	0.75	17.00	59.53	18.39	22.70	11.02	9.40	105.71
	2013-08-16	7.07	87.88	8.55	1.30	0.85	17.94	46.52	13.90	21.13	3.79	20.55	156.68
	2013-08-17	6.52	93.34	9.81	1.07	0.77	6.02	26.30	9.61	7.87	2.21	4.56	61.40
	2013-08-18	11.47	81.05	15.91	1.06	1.07	8.21	23.95	7.25	7.70	16.52	2.84	25.11
	2013-08-19	11.19	86.13	8.95	1.27	1.06	20.57	23.24	13.50	19.38	6.67	3.70	45.31
	2013-08-20	10.38	86.50	2.77	1.00	1.38	18.42	18.68	19.75	13.35	3.67	6.80	69.56
	2013-08-21	11.57	80.73	8.10	1.21	0.64	6.33	13.34	6.20	9.95	3.07	0.00	19.60
	2013-08-22	10.71	87.96	9.01	0.96	0.81	5.71	7.64	6.34	7.05	1.87	0.00	25.34
西风水汽降水事件	2013-08-23	10.98	86.05	1.60	0.90	0.90	10.00	14.14	12.17	11.11	3.28	1.39	33.36
	2013-09-05	2.68	77.14	6.39	1.57	1.09	5.76	10.37	4.70	5.31	1.99	1.02	36.88
	2013-09-06	4.81	66.83	5.60	1.82	1.20	33.50	11.03	2.11	27.98	45.24	20.28	55.58
	2013-09-07	4.14	75.59	1.35	1.67	1.81	9.42	33.41	24.50	5.20	16.57	11.37	88.58
	2013-09-08	4.14	68.39	0.40	1.80	2.34	26.81	56.59	33.70	11.47	15.91	17.43	131.31
	2013-09-09	3.93	69.46	0.60	1.54	1.98	19.93	57.52	23.93	10.05	11.72	14.53	145.78

1) 离子浓度单位为 $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$

3.2 后向轨迹与水汽运输

如图 7 所示, 到达祁连山中段的气团轨迹均穿越亚洲干旱地区; 此外, 夏季也有来自印度洋和太

平洋的水汽通过季风环流到达研究区. 由此可知, 干冷的冬、春季气团将粉尘通常是从以下 3 个方向带到研究区: 亚洲沙尘发源地的中亚和西亚、我国

新疆和河西走廊. 更重要的是,在春、秋和冬季,水汽输送图表明降水主要来源于西风环流,所以源自干旱区的粉尘物质主导着降水化学浓度(图8). 夏季,天气尺度下季风水汽也可到达研究区,但由于水汽传输距离较远,进而对降水化学过程的影响也较小. 为了探索大尺度大气环流的影响,根据水汽传输路径把降水划分为3种类型:季风源降水、混合源降水(季风和西风的影响)和西风源降水(图8). 如表6所示,降水化学与环流背景关系密切,季风源降水类型的离子浓度随降水时段呈下降趋势,且

Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的降水结束日期和开始日期的浓度比例分别为0.09、0.07、0.09、0.25、0.06、0.08和0.14,因为季风降水时降水量和相对湿度明显增加,但温度和风速却下降,反映了降水淋洗作用的加强. 对于混合源降水而言,离子浓度在温度和相对湿度逐渐增加、风速逐渐降低的情况下表现为先减少后增加的趋势,其间降水先增加后减少. 在降水和相对湿度降低的情况下,西风源降水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在降水结束日期浓度分别是降水开始日期的3.46、5.54、5.09、1.89、5.90、14.21和3.95倍. 综上所述,不同的大气环流背景对湿沉降有一定影响.

4 结论

(1)祁连山中段降水样品的电导率变化范围为 $5.26 \sim 482 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,其均值为 $41.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子的平均离子浓度为42、67.3、27.9、32.1、13.3、44.4和 $191.7 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子的浓度占总离子浓度的70%以上.

(2)对主要离子浓度时空变化的分析表明,夏季降水中离子浓度较低,而冬、春两季浓度较高. 干季降水(从10月到次年4月)在采样期间中仅占总降水量的3.1%,而 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子浓度在却是雨季的4.2、5.93、2.94、1.47、2.93、2.11和3.79倍.

(3)研究区除 NO_3^- 外的所有离子主要受陆源物质影响,而 NO_3^- 主要由人类活动影响. 后向轨迹和水汽通量研究证实从中亚和中国西北干旱区随西风环流带来的区域陆源物质是降水离子的主要来源,由于深居内陆所以海洋源贡献极小.

(4)不同的大气环流背景下连续降水事件离子浓度呈不同特征. 季风源降水离子浓度随降水持续时间呈下降趋势;混合源降水离子浓度在温度和相对湿度逐渐增加,而风速逐渐降低的情况下表现为先减少后增加的趋势;在降水和相对湿度减少的情况下,西风源降水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的降水结束日期浓度分别是降水开始日期的3.46、5.54、5.09、1.89、5.90、14.21和3.95倍.

致谢:感谢中国科学院寒区与旱区环境与工程研究所黑河上游站提供的气象数据以及对野外采样工作的大力支持.

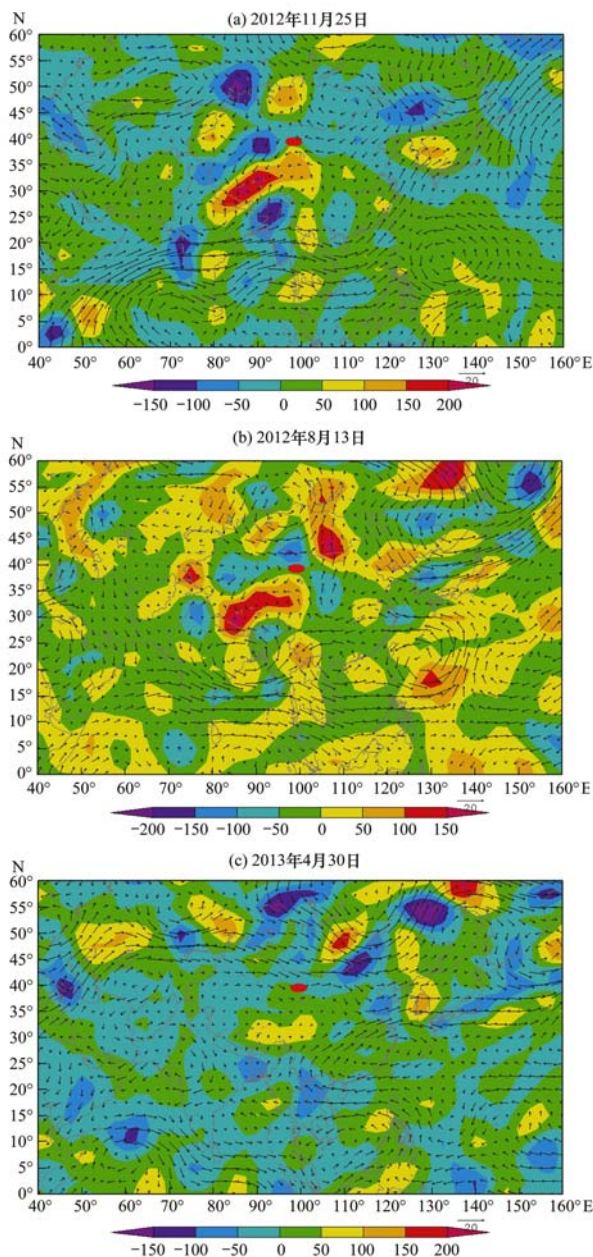


图7 2012年11月25日、2012年8月13日和2013年4月30日的气团轨迹图

Fig. 7 Back trajectories of the air masses on 25 Nov. 2012, 13 Aug., 2012 and 30 Apr., 2013

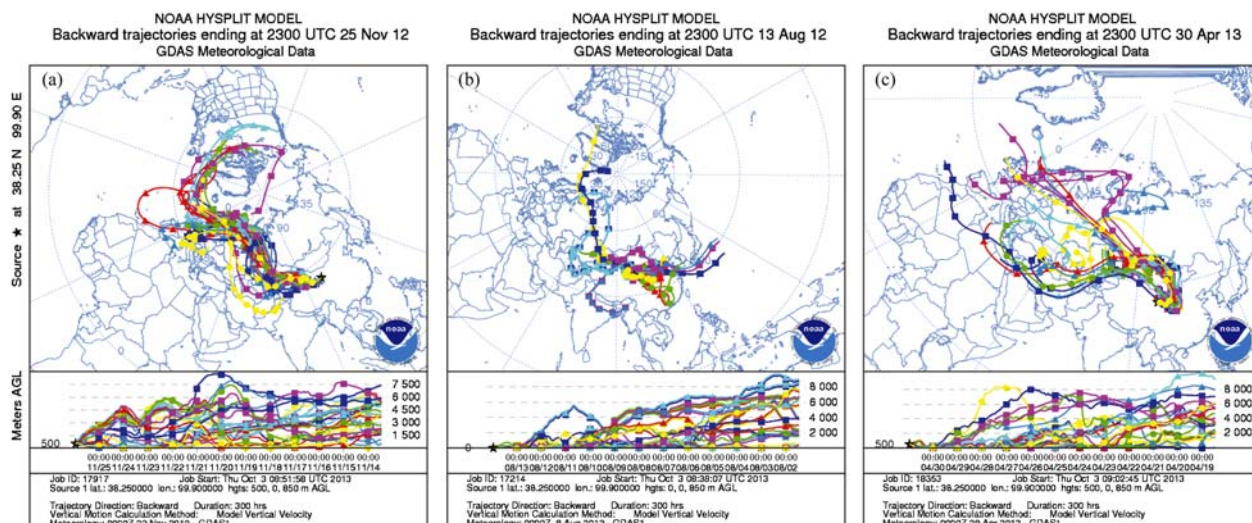


图8 2012年8月13日(季风源降水), 2013年8月19日(混合源降水)和2013年9月9日(西风源降水)

在700 hPa(葫芦沟红色四角形)水蒸气运输图

Fig. 8 Water vapor transportation vectoring on 13 Aug., 2012 (taken as an example for monsoon precipitation events), 19 Aug., 2013 (taken as an example for the interaction precipitation events) and 9 Sep., 2013 (taken as an example for the westerly precipitation events) at 700 hPa (the red tetragon is the Hulugou station)

参考文献:

- [1] Migliavacca D, Teixeira E C, Wiegand F, *et al.* Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaiba hydrographic basin, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(10): 1829-1844.
- [2] Al-Khashman O A. Ionic composition of wet precipitation in the Petra Region, Jordan [J]. *Atmospheric Research*, 2005, **78**(1-2): 1-12.
- [3] Calvo A I, Olmo F J, Alados-Arboledas L, *et al.* Chemical composition of wet precipitation at the background EMEP station in Viznar (Granada, Spain) (2001-2006) [J]. *Atmospheric Research*, 2010, **96**(2-3): 408-420.
- [4] Mphopya 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.
- [5] Sickles II J E, Grimm J W. Wet deposition from clouds and precipitation in three high-elevation regions of the Eastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(2): 277-288.
- [6] 杨复沫, 贺克斌, 雷宁, 等. 2001-2003 年间北京大气降水的化学特征[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 538-541.
- [7] 王艳, 葛福临, 刘晓环, 等. 泰山降水的离子组成特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 422-426.
- [8] 牛彧文, 何凌燕, 胡敏. 深圳大气降水的化学组成特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1014-1019.
- [9] Baron J, Denning A S. The influence of mountain meteorology on precipitation chemistry at low and high elevations of the Colorado front Range, U. S. A. [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27**(15): 2337-2349.
- [10] Ali K, Momin G A, Tiwari S, *et al.* Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4215-4222.
- [11] Basak B, Alagha O. The chemical composition of rainwater over Buyukcekmece Lake, Istanbul [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **71**(4): 275-288.
- [12] Wang P Y, Li Z Q, Gao W Y. Rapid shrinking of glaciers in the middle Qilian Mountain Region of Northwest China, during the last 50 years [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, **22**(4): 539-548.
- [13] 李宗省, 何元庆, 庞洪喜, 等. 我国典型季风海洋性冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源研究[J]. *地理学报*, 2007, **62**(9): 992-1011.
- [14] Okay C, Akkoyunlu B O, Tayanc M. Composition of wet deposition in Kaynarca, Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(3): 401-410.
- [15] 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.
- [16] Li Z X, He Y Q, Pang H X, *et al.* Source of major anions and cations of snowpacks in Hailuoguo No. 1 Glacier, Mt. Gongga and Baishui No. 1 Glacier, Mt. Yulong [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, **18**(1): 115-125.
- [17] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77**: 437-471.
- [18] Kistler R, Kalnay E, Collins W, *et al.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, **82**:

- 247-267.
- [19] Feng Q, Liu W, Su Y H, Zhang Y W, *et al.* Distribution and evolution of water chemistry in Heihe River basin [J]. *Environmental Geology*, 2004, **45**(7): 947-956.
- [20] Hitchcock D R, Spiller L L, Wilson W E. Sulfuric acid aerosols and HCl release in coastal atmospheres: evidence of rapid formation of sulfuric acid particulates [J]. *Atmospheric Environment*, 1980, **14**(2): 165-182.
- [21] Li C L, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, Central Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(3-4): 351-360.
- [22] Zhang D D, Peart M, Jim C Y, *et al.* Precipitation chemistry of Lhasa and other remote towns, Tibet [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(2): 231-240.
- [23] Dong Z W, Li Z Q, Ross E, *et al.* Temporal characteristics of mineral dust particles in precipitation of Urumqi River Valley in Tian Shan, China: A comparison of alpine site and rural site [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **101**(1-2): 294-306.
- [24] Shrestha A B, Wake C P, Dibb J E. Chemical composition of aerosol and snow in the high himalaya during the summer monsoon season[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2815-2826.
- [25] Zhang M Y, Wang S J, Wu F C, *et al.* Chemical compositions of wet precipitation and anthropogenic influences at a developing urban site in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(4): 311-322.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2014 年 9 月 26 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2013 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2013 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 76.6,排名第一,总被引频次 6 941,影响因子 1.266.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评价,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2013 年度《环境科学》综合评价总分 76.6,在被统计的 33 种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人