

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	崔海, 张亚红 (1507)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征

韦虹^{1,2}, 吴锦奎^{1*}, 沈永平¹, 张伟^{1,2}, 刘世伟^{1,2}, 周嘉欣^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在 2014 年 3~4 月期间, 在连续收集了融雪期额尔齐斯河正源-卡依尔特斯河河水 and 冰雪融水水样的基础上, 综合运用描述性统计、Gibbs 分析图和 Piper 三线图等方法, 对卡依尔特斯河融雪期径流中水化学特征其控制因素等进行了分析。研究区不同水体在融雪期内, 主离子组成以及水化学类型差异显著。河水中总溶解固体(TDS)含量变化范围为 24.9~50.3 mg·L⁻¹; 河水中的优势阳离子为 Ca²⁺ 和 Na⁺, 分别占阳离子总量的 61% 和 17%, 河水中优势阴离子为 HCO₃⁻, 占阴离子总量的 95%。河水的水化学类型为 HCO₃⁻-Ca²⁺。地表水样品的水化学组成落在 Gibbs 分布模型的中部偏左下部分, 表明研究区的水化学离子组成受到岩石风化作用和大气降水作用的共同影响, 且岩石风化作用占主导。

关键词: 主离子; 水化学特征; Gibbs 模型; 额尔齐斯河; 融雪期

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1345-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.04.020

Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang

WEI Hong^{1,2}, WU Jin-kui^{1*}, SHEN Yong-ping¹, ZHANG Wei^{1,2}, LIU Shi-wei^{1,2}, ZHOU Jia-xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To analyze the hydrochemical characteristics of river water and snow meltwater during snow-melting period in the Kayiertesi River, the headwaters of the Ertis River, samples of river water and meltwater were collected every day during March and April, 2014. Furthermore, the combination of descriptive statistics, Gibbs Figure and Piper Triangular diagrams of anions and cations were used for hydrochemical analyses. The results showed that the major ion compositions and hydrochemical types were significantly different between river water and snow meltwater. The total dissolved solid (TDS) in the river water ranged from 24.9 to 50.3 mg·L⁻¹. The major cations of river water were Ca²⁺ and Na⁺, accounting for 61% and 17% of the total cation equivalent concentration, respectively. Meanwhile, HCO₃⁻ constituted about 95% of the total anions concentration. The hydrochemical type of river water was HCO₃⁻-Ca²⁺. The chemical composition of river water samples located in the middle with a deviation to left of Gibbs model, indicating that the major chemical process of river water was controlled by rock weathering and precipitation but rock weathering played a more important role.

Key words: major ion; hydrochemical characteristics; Gibbs model; Ertis River; snow-melting period

我国寒区分布较广, 面积约 417.4 × 10⁴ km², 占我国陆地面积的 43.5%, 降水量和冰雪资源丰富^[1]。冰川和积雪融水在水资源构成中占有重要的地位^[2]。全球气候变暖的大背景之下, 积雪对气候的变化十分敏感, 对全球变暖具有明显的反馈响应, 特别是季节性积雪, 在干旱区和寒冷区是最活跃的环境影响因素^[3]。季节性积雪在我国分布很广, 阿尔泰山和黑龙江北部几乎可达半年左右^[4]。由于冰冻圈较少受到人类活动的影响, 近年来国内外学者, 多以远离工业污染区的高山冰川-寒区元素含量作为环境污染地背景值^[5]。通过对区域水体中元素含量的长期监测, 能够更好地确定背景值, 从而更加准确地反映气候变化趋势, 并作为该地区环境质量、污染水平评价及污染预测的基本依据^[6]。

寒区旱区水文和冰川积雪的研究是相互促进发

展的^[7]。特别地, 在中国西北地区, 研究流域尺度气候变化对山区融雪径流水资源趋势的影响更具有实用性和针对性^[8]。研究冰雪融水水质的变化对评估区域化学侵蚀、生物地球化学循环及河水来源组成具有重要意义^[9,10]。

效存德等^[11]通过对雪冰的实测电导率值的分析, 以及与前人实测结果相比较, 发现青藏高原雪冰电导率依赖于地壳来源的碱性矿物盐类杂质(如 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻等)。董志文等^[12]对祁连山老虎沟 12 号冰川积雪的主要化学离子特征、来源及环境意义进行了分析研究, 认为来自于粉尘源区的陆

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271085, 41130638); 冰冻圈国家重点实验室开放基金项目(SKLCS OP-2013-05)

作者简介: 韦虹(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水化学, E-mail: weihong15@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: jkwu@lzb.ac.cn

月以降雪为主。

积雪持续期从 11 月至次年 4 月,高山上的积雪可持续到 6 月,11 月为积雪主要形成期,多年平均降水达 42 mm,约占全年的 12%,年内最大积雪深度可达 1 m 以上。春季融雪常形成较大的径流过程。流域内多年冻土和季节性冻土普遍存在,多年冻土和季节性冻土的临界海拔为 2 200 m^[29,30]。

研究区域地处内陆,区域冰川属于亚大陆性冰川^[31],河水的化学组成基本不受海洋输入的影响。阿勒泰地区自然资源丰富,特别是黑色金属、有色金属资源富集,农牧业、矿产业等发展态势良好,水利、交通、能源等基础设施日趋完善。研究区域所在的阿尔泰山东部地区,牧地约占土地总面积的 81.8%^[32],是重要的冬季牧场之一。随着西部大开发战略的实施,放牧、水电站的修建、采矿、航运及污染物的排放等一系列人为活动,对水化学组分的变化有着一定的影响。

2 样品采集与数据分析

2014 年 3 月 10 日至 4 月 7 日融雪期间,每日采集卡依尔特斯河河水水样。采样点位置如图 1 所示。

现场测定 pH 值、TDS; 水样现场经 GF/F 滤膜过滤后,用于离子分析的样品加 1:1 的硝酸酸化后,保存于 20 mL 塑料瓶内待测。样品的化学离子组成于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室分析,阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+)使用美国戴安公司(DX-600 型)测定,阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)使用美国戴安公司离子色谱(ICS-2500)测定,测试精度均优于 5%。水中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 间平衡关系可知,当 pH 为 6~10 间时 HCO_3^- 占据绝对优势, CO_3^{2-} 可忽略不计。根据溶液中电荷守恒原理,计算得到 HCO_3^- 含量。

同时,于 2014 年融雪期期间,基于原有观测场气象(温度、湿度、降水)、积雪(积雪深度、分层积雪温度)的长期常规观测基础之上,于 2014 年 3 月 8~23 日,在对雪层剖面特征观测后进行连续采样:雪坑(海拔 4 253 m)自积雪表面向下,在 0~10 cm 以每 5 cm 间距取 1 个样品,10~30 cm 以每 10 cm 间距取 1 个样品,30 cm 以上取一个样品。采样严格按照净化防污染要求进行,用预先在实验室净化处理过的专用采样瓶对准采样面直接将雪捅进瓶内,随后立即封闭瓶盖避免蒸发和扩散。在测试分析前

数天将样品取出让其常温下自然融化,以备分析。具体分析同河水水样。

采用 Excel 2013 软件进行基本数据的处理,图形绘制采用 Origin 7.5 和 Excel 2013 等软件完成。利用 Gw-chart 软件(USGS 开发),根据积雪融水与河水中主要离子的当量浓度,绘制出不同水体的水化学类型图(Piper 三线图),通过绘制 Piper 三线图,可以直观地表明水体主离子组成变化,从而辨别其控制单元。利用 SPSS 软件对河水水体中的主要离子来源进行相关性分析。

3 结果与讨论

3.1 积雪融水与河水中的阴、阳离子组成

实验室分析结果如表 1 所示。积雪融水水样 pH 值范围为 6.50~7.25,平均值 6.84,为中性偏弱酸性;河水水样 pH 范围 7.03~7.23,呈弱碱性。

河水水样 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是占优势的离子, Na^+ 和 SO_4^{2-} 次之。积雪融水中 HCO_3^- 是占优势的离子, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 次之。

从表 1 中可以看出,河水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的变异系数相比其他离子要小,说明在河水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量相对稳定。河水的水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} 。积雪融水中 HCO_3^- 与其他离子相比,其变异系数较小,说明在积雪融水中 HCO_3^- 的含量相对稳定,是积雪融水的主要阴离子。积雪融水的水化学类型也为 HCO_3^- - Ca^{2+} 。

河水水样的 TDS 平均值为 $38.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低于世界河流 TDS 平均值($65.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[33],这与水样来自于额尔齐斯河源区有关。通过计算,河水水样中 Cl^-/Na^+ 的比值平均值为 0.13,与世界平均海水比值($Cl^-/Na^+ = 1.15$)对比,可以得出雨水海洋输入对研究区河水溶质贡献很小的结论,这与侯浩等^[34]报道中内陆再循环水汽对研究区降水的贡献显著的结论相一致。

从图 2(a)可以看出,河水的阳离子分布在三角图的中间并偏向 Ca^{2+} -($Na^+ + K^+$),更多地靠近 Ca^{2+} 一端,阴离子主要分布在三角图 HCO_3^- 一端,可能是受碳酸盐风化影响的原因。从图 2(b)中可以看出,积雪融水的阳离子主要分布在 Ca^{2+} -($Na^+ + K^+$)线上,且 Ca^{2+} 的浓度范围变化较大,同时,阴离子集中在三角图 HCO_3^- 一端。同时,阴离子的分布与积雪融水相似,说明积雪融水与河水的水化学组成之间具有一定的联系。

表 1 河流与积雪融水的水化学特征

Table 1 Hydrochemical characteristics of river water and the snow meltwater					
项目	水体	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准偏差/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	变异系数/%
Ca^{2+}	河水	9.33	4.28	7.66 ± 1.51	20
	积雪融水	0.95	0.04	0.26 ± 0.21	82
Mg^{2+}	河水	1.57	0.57	1.08 ± 0.24	23
	积雪融水	0.13	0.00	0.01 ± 0.02	235
Na^{+}	河水	3.95	1.03	2.41 ± 0.66	28
	积雪融水	0.84	0.01	0.15 ± 0.18	118
K^{+}	河水	4.10	0.00	1.85 ± 1.09	59
	积雪融水	0.20	0.00	0.05 ± 0.05	96
HCO_3^{-}	河水	47.45	19.87	36.18 ± 6.38	18
	积雪融水	3.91	0.07	0.94 ± 0.93	98
Cl^{-}	河水	1.54	0.14	0.30 ± 0.26	86
	积雪融水	0.42	0.01	0.07 ± 0.08	101
SO_4^{2-}	河水	1.44	0.62	1.08 ± 0.26	24
	积雪融水	0.69	0.05	0.20 ± 0.12	60
NH_4^{+}	河水	0.52	0.00	0.19 ± 0.16	87
	积雪融水	0.96	0.16	0.44 ± 0.18	41
TDS	河水	50.30	24.90	38.83 ± 5.97	15
	积雪融水	18.37	2.08	6.73 ± 2.87	43
水化学类型	河水	$\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$			
	积雪融水	$\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$			

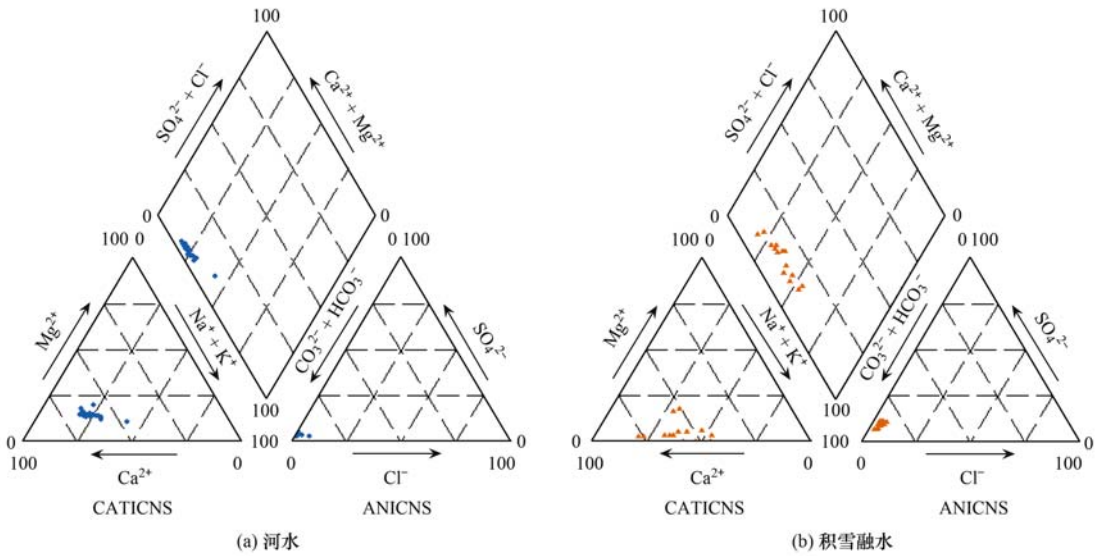


图 2 河水及积雪融水的化学离子 Piper 三线图

Fig. 2 Piper figures of chemical ions in the Kayiertesi River water and the snow meltwater

同时,需要引起注意的一点是,积雪融水水样中, NH_4^{+} 与 NO_3^{-} 含量较高,说明该地区大气中可能有 NH_3 存在,并通过降水过程在雪中富集,通过化学转换以 NH_4^{+} 或 NO_3^{-} 的形式存在. 积雪融水形成的径流汇入河水后,使得河水水样中 NO_3^{-} 浓度增大. 王鹏等^[35]研究表明,春夏温湿条件有利于 NH_4^{+} 在气-雪之间的交换,N 的来源与植物、土壤和动物

的生物排放,特别是放牧活动有关. 因此需要对该研究区域冰川积累区大气气溶胶和表层雪样品进行取样分析,进一步探究卡依尔特斯河流域积雪出现 NH_4^{+} 与 NO_3^{-} 离子浓度较高的原因,以及阿尔泰山地区 N 循环模式.

3.2 积雪电导率特征

电导率(EC)是水体中所含总离子综合性指标

的反映,电导率的大小与水样溶液中离子的性质、浓度及温度等因素密切相关。根据测得的结果,积雪融水水样中,电导率的最大值为 $74.94 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,最小值为 $4.13 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,平均值为 $15.22 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。根据3月15~22日强消融期不同雪层的积雪融水电导率平均值可以看出,表层和底部积雪的电导率较低,中间雪层的电导率较高。这种变化与强消融期内沿积雪深度的温度廓线相一致(图3)。

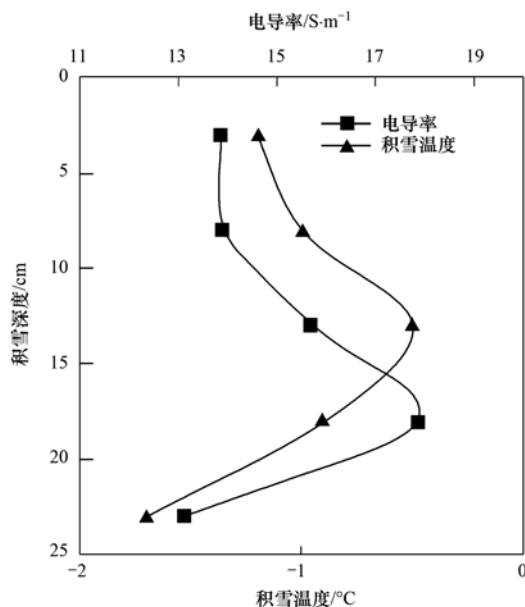


图3 强消融期积雪融水电导率与分层积雪温度沿雪深的变化

Fig. 3 Variation of snow temperature and the EC in snow meltwater with the snow depth during the melting period

积雪融水水样的电导率沿雪深变化的这种现象与雪层中的离子“淋溶作用”密切相关。离子“淋溶作用”是可溶性离子在气温、雪层温度、雪层结构、重力、离子交换等外在因素的影响下,随积雪融水向下运动的现象。结合张伟等的研究^[36],雪层液态水含量的变化趋势与雪层温度呈现相反的变化趋势,积雪表面发生强烈消融,积雪液态水含量较高,在重力作用下离子随融水向下迁移流失,电导率较低;积雪液态水含量的极小值出现在整个雪层的中间偏下处,由于可能存在污化层,可溶性离子发生富集,电导率也相应出现最大值;在积雪和下垫面接触面附近,积雪液态水含量出现极大值,电导率也出现极小值。通过分析积雪雪层电导率变化的规律能够发现,融雪径流中所携带的可溶性离子从固相向液相迁移需要一定的时间,且各离子迁移的速率不同,导致了补给河水的积雪融水呈波动性变化的趋势。

3.3 河水电导率变化

根据测得的结果,河水水样中电导率的最大值

为 $100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,最小值为 $49.2 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,平均值为 $76.8 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较河水水样电导率与气温、降水的关系,如图4所示。

从图4中可以看出,3月8日至4月7日这段时间内降水较少。3月8日至3月20日,平均气温一般低于 0°C ,河水中各主要离子变化幅度不大[图5(a)],河水电导率也基本维持不变(图4)。在此期间,积雪融水电导率总体呈波动变化趋势[图5(b)],说明离子经过淋溶在雪层富集,积雪融水没有或较少补给进入河水。3月15日河水电导率出现一个较小的峰值,可能和取样或样品分析引起的误差有关。3月21日之后,随着平均气温持续上升并高于 0°C 河水中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 呈“脉冲”式波动下降趋势[图5(a)],这与积雪融水进入河流系统有关。离子浓度较低的积雪融水进入河流,引起河流离子浓度的降低和电导率的减小。积雪开始消融时,河流径流的离子浓度“脉冲”的特征与刘风景等^[15]在乌鲁木齐河的研究相一致。

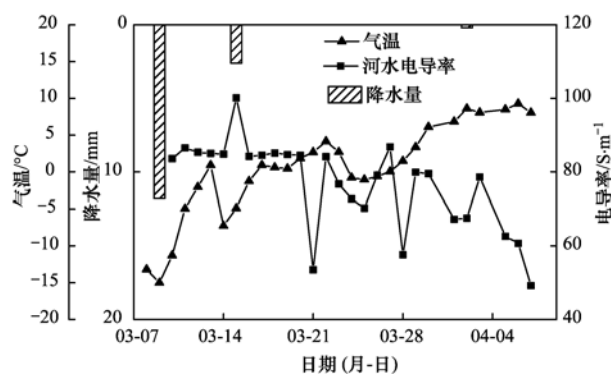


图4 河水电导率与气温、降水关系

Fig. 4 Variation of air temperature, precipitation and EC of the river water

3.4 河水化学组分的来源简析

陆地水中溶解盐主要来源于大气循环携带的盐分、可溶性岩石的风化物及人类活动产生的污染物。通过分析 Gibbs 半对数坐标图解,以河水中溶解性固体总量的对数值为纵坐标,以 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值的算术值为横坐标,可以直观地反映河水主要组分趋于“降水控制类型”、“岩石风化类型”或“蒸发-结晶类型”^[37]。

将河水的水化学数据绘制于 Gibbs 图中,如图6所示,研究区河水样品的水化学组成大部分落在 Gibbs 分布模型内,说明卡依尔特斯河河水的化学组分受到了一定的人类活动干扰。河水样品的数据

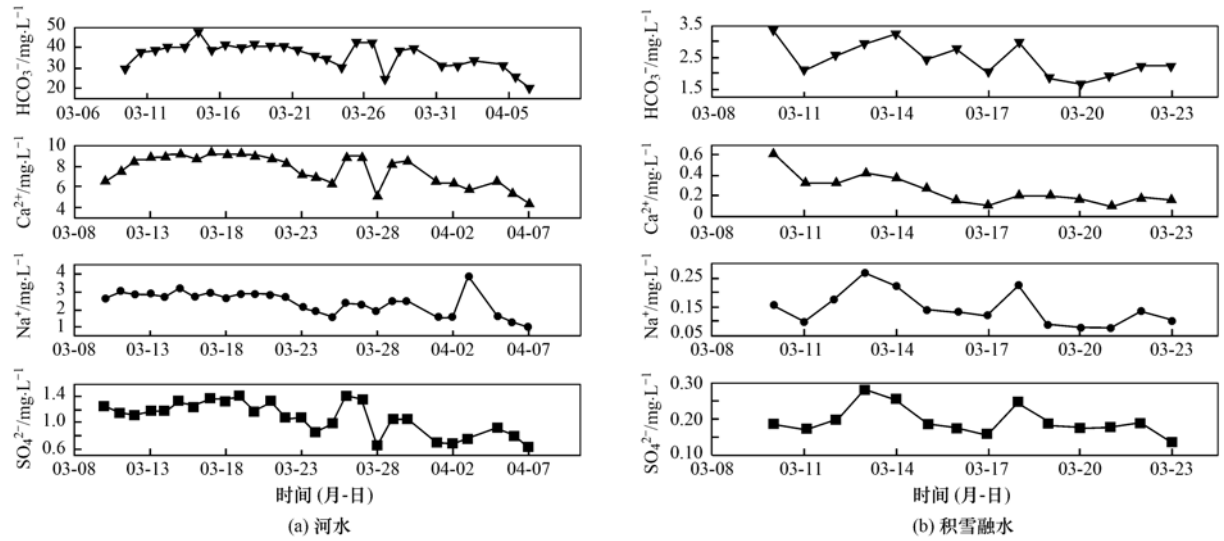


图 5 河水与积雪融水主要离子平均浓度逐日变化

Fig. 5 Daily variations of the mean concentrations of major ions in the river water and the snow meltwater

点落在分布模型的中部偏左一侧,且河水样品的 TDS 含量均小于 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值小于 0.5,处于岩石风化带,且少数河水样品的水化学数据落在大气降水作用带,说明所研究区域河水的水化学组成受到岩石风化作用和大气降水作用的共同影响,且岩石风化作用占主导.

对河水中主要阴、阳离子浓度进行相关性分析,可以大致判断不同离子的来源是否一致,得到的结果中如表 2 所示.

从表 2 中可以看出, TDS 与 HCO_3^- 之间显著相关,说明 HCO_3^- 对河水溶质贡献程度最大. 另一方面, TDS 和 Cl^- 之间呈反相关,说明研究区域 Cl^- 对河水溶质贡献很小或没有贡献. 同时, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 之间显著相关,二者可能来源于碳酸岩的风化. SO_4^{2-} 与 NO_3^- 间相关性较差,说明二者可能没有相同的来源,即能说明河水受到人类活动的干扰

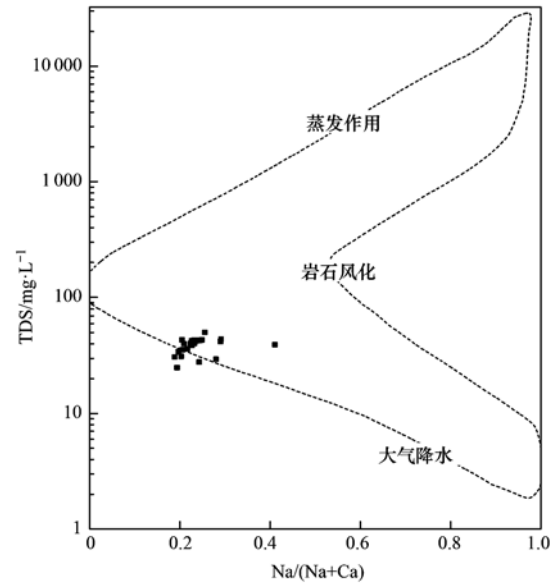


图 6 河流水样水化学成分 Gibbs 图

Fig. 6 Hydrochemical Gibb figure of the river water

表 2 河水中总溶解固体及特征离子的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of TDS and characteristic ions in the river water

	TDS	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Na^+	K^+	Mg^{2+}
TDS	1								
HCO_3^-	0.890 **	1							
SO_4^{2-}	0.660 **	0.493 **	1						
Cl^-	-0.063	-0.353	-0.275	1					
NO_3^-	0.187	-0.137	-0.070	0.947 **	1				
Ca^{2+}	0.726 **	0.539 **	0.872 **	-0.325	-0.115	1			
Na^+	0.711 **	0.440 *	0.582 **	0.358	0.579 **	0.600 **	1		
K^+	-0.147	-0.387 *	-0.285	0.515 **	0.428 *	-0.272	-0.220	1	
Mg^{2+}	0.729 **	0.608 **	0.758 **	-0.316	-0.133	0.851 **	0.563 **	-0.282	1

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

较少. 同时, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 之间显著相关, 由于淋溶择优性顺序^[14], SO_4^{2-} 较其他阴离子更易于被淋溶, SO_4^{2-} 可能来源于硫酸盐的氧化以及积雪融水径流的补充. 此外, 河流受到融雪径流补充的程度大小, 将在今后的研究中通过对稳定同位素的分析等工作, 对河水进行径流分割后确定.

4 结论

(1) 额尔齐斯河源区积雪融水中 TDS 含量较低, pH 平均值 6.84, 基本呈中性. HCO_3^- 是占优势的离子, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$. 河水水样呈弱碱性, TDS 小于世界河流 TDS 平均值, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是占优势的离子, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$.

(2) 积雪中的离子在“淋溶作用”的影响下发生迁移, 表现为表层雪和底部积雪的电导率较低, 中间雪层的电导率较高.

(3) 在融雪径流补给、气温、径流量变化等的综合结果作用下, 河水电导率变化产生类似融雪径流的“离子脉冲”现象的结果.

(4) 河水样品的数据点落在 Gibbs 分布模型的中部偏左一侧, 研究区域河水的水化学组成受到岩石风化作用和大气降水作用的共同影响, 且岩石风化作用占主导.

参考文献:

- [1] 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗, 等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(4): 469-475.
- [2] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 513-527.
- [3] 王国亚, 毛炜峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(6): 1293-1300.
- [4] 王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(2): 301-310.
- [5] 王平, 刘智. 阿尔泰山友谊峰地区冰、雪及其受冰川融水补给径流中的微量元素含量[J]. 环境科学, 1982, **3**(3): 33-35.
- [6] 袁国映, 张晓黎. 喀纳斯自然保护区土壤元素背景值及水、植物中的微量元素含量[J]. 新疆环境保护, 1989, (1): 35-48.
- [7] 康尔泗. 我国寒区和干旱区水文研究的回顾和展望[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(2): 178-188.
- [8] 王建, 沈永平, 鲁安新, 等. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 28-33.
- [9] 王建, 许君利, 张世强, 等. 天山南坡科其喀尔冰川流域水化学侵蚀及大气 CO_2 沉降量分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 903-910.
- [10] 赵爱芳, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1484-1490.
- [11] 效存德, 秦大河, 任贾文, 等. 雪冰电导率反映的南、北极和青藏高原大气环境差异[J]. 极地研究, 1999, **11**(1): 1-7.
- [12] 董志文, 任贾文, 秦大河, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪化学特征及环境意义[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(2): 327-335.
- [13] Johannessen M, Henriksen A. Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting[J]. Water Resources Research, 1978, **14**(4): 615-619.
- [14] 侯书贵. 乌鲁木齐河源冬季积雪淋溶作用的实验结果[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(4): 362-365.
- [15] 刘风景, Williams M, 杨大庆. 天山乌鲁木齐河融雪径流的“离子脉冲”现象初探[J]. 科学通报, 1997, **42**(4): 417-419.
- [16] 刘风景, Williams M, 程国栋, 等. 天山乌鲁木齐河融雪和河川径流的水文化学过程[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(3): 213-219.
- [17] 刘彦广. 基于水化学和同位素的高寒山区雨季径流过程示踪[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [18] 吴素芬, 刘志辉, 韩萍, 等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 703-706.
- [19] 李弘毅, 王建. SRM 融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(5): 769-775.
- [20] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1857-1866.
- [21] 党素珍, 刘昌明, 王中根, 等. 黑河流域上游融雪径流时间变化特征及成因分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(4): 920-926.
- [22] 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2099-2107.
- [23] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 131-142.
- [24] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 72-79.
- [25] 汤奇成, 李丽娟. 西北地区主要国际河流水资源特征与可持续发展[J]. 地理学报, 1999, **54**(S): 21-28.
- [26] 李捷, 夏自强, 郭利丹, 等. 额尔齐斯河流域气候特征及变化趋势分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, **36**(3): 311-315.
- [27] 李向应, 秦大河, 韩添丁, 等. 中国西部冰冻圈地区大气降水化学的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, **30**(1): 3-16.
- [28] 曾海鳌, 吴敬禄, 刘文, 等. 哈萨克斯坦东部水体氢、氧同位素和水化学特征[J]. 干旱区地理, 2013, **36**(4): 662-668.

- [29] 张廷军, 童伯良, 李树德. 我国阿尔泰山地区雪盖对多年冻土下界的影响[J]. 冰川冻土, 1985, **7**(1): 57-63.
- [30] 童伯良, 李树德, 张廷军. 中国阿尔泰山的冻土[J]. 冰川冻土, 1986, **8**(4): 357-364.
- [31] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 3-16.
- [32] 酆慧兰, 王和根. 新疆阿勒泰东部地区土地利用调查研究[J]. 经济地理, 1982, (3): 181-186.
- [33] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: From pristine stage to global pollution[J]. Global and Planetary Change, 1989, **1**(4): 283-309.
- [34] 侯浩, 侯书贵, 庞洪喜. 阿尔泰山蒙赫海尔汗冰川不同水体稳定同位素空间分布特征及水汽来源[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(5): 1271-1279.
- [35] 王鹏, 李忠勤, 张明军, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 NH_4^+ 沉积特征研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(25): 13921-13923, 13947.
- [36] 张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积雪特性观测与分析研究[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(3): 491-499.
- [37] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2015 年 10 月 21 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 14 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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	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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行