

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中 OC 和 EC 的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中 VOCs 组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分 VOCs 的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质 (DOM) 光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质 (DOM) 浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA 可见光催化剂的制备及其降解 2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙 7 的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解 2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统 (MSL) 与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对 ABR-MBR 复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2 厌氧腐殖质/Fe(III) 还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量 (KH₂PO₄) 作用对 Cu、Zn 在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片 δ¹³C 值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附 PM_{2.5} 能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对 Cd 迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费 CO₂ 排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素

周嘉欣^{1,2}, 丁永建^{1,2}, 曾国雄³, 吴锦奎^{1,2}, 秦甲^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000; 2. 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; 3. 甘肃省疏勒河流域管理局, 玉门 735200)

摘要: 在系统收集了疏勒河流域上游河水、地下水、降水和冰雪融水水样的基础上, 综合运用描述性统计、Gibbs图和Piper阴阳离子三角图等方法, 对疏勒河上游地表水中主离子组成特征及其控制因素进行了分析。结果表明, 流域内不同水体(大气降水、河水和地下水)之间的主离子组成以及水化学类型差异显著。河水TDS的变化范围为51.7~432.3 mg·L⁻¹, 平均值为177.7 mg·L⁻¹; 河水中阳离子Ca²⁺、Mg²⁺的百分比为45%和31%, 优势阴离子为HCO₃⁻, 占阴离子总量的75%, 河水的水化学类型主要为HCO₃⁻-Ca²⁺-Mg²⁺型; 河水中主离子浓度值介于大气降水和地下水之间, 并且十分接近地下水浓度, 说明地表水同时受大气降水和地下水补给并主要依靠地下水补给; 地表水样品的水化学组成落在Gibbs分布模型的中翼偏左端, 表明研究区的水化学离子组成受到岩石风化作用和蒸发结晶作用的共同影响, 且岩石风化作用对水化学离子组成的影响更加显著。

关键词: 地表水; 主离子; 水化学类型; 疏勒河上游; 补给

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3315-10 DOI: 10.13227/j.hjck.2014.09.011

Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls

ZHOU Jia-xin^{1,2}, DING Yong-jian^{1,2}, ZENG Guo-xiong³, WU Jin-kui^{1,2}, QIN Jia^{1,2}

(1. Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Shule River Basin Water Resources Administration of Gansu Province, Yumen 735200, China)

Abstract: To analyze the major ion chemistry of water in the upper reach of the Shule River Basin and possible controls, samples of river water, groundwater, precipitation, melt water were collected and methods including descriptive statistics, Gibbs Figure, Piper Triangular diagrams of anions and cations were comprehensive used. Results showed that the major ion compositions and hydrochemical types were significantly different in different waters such as stream water, groundwater and precipitation. The total dissolved solid (TDS) in the river water ranges between 51.7 to 432.3 mg·L⁻¹ with an average of 177.7 mg·L⁻¹. The major cations of river water are Ca²⁺ and Mg²⁺, accounting for 45% and 31% of the cations respectively. Meanwhile, HCO₃⁻ constituted about 75% of the anions. The hydrochemical type of river water is HCO₃⁻-Ca²⁺-Mg²⁺. Owing to the interaction between the river and layer, the concentration of SO₄²⁻ is relatively higher. Comparing major ion concentrations of the river water with local groundwater and precipitation, concentrations of the river water ranged between precipitation and groundwater but were much closer to the concentration of groundwater, indicating that the surface water was recharged by a mixture of precipitation and groundwater while groundwater is dominant. The chemical composition of surface water samples located in the middle and a bit upper of Gibbs model, which indicates that the major chemical process of river water is controlled by rock weathering and evaporation-crystallization but rock weathering plays a much more important role.

Key words: surface water; major ion; hydrochemical type; the upper reach of Shule River; recharge

河流水体的化学成分是流域的一个重要特征, 对气候以及河流所经地区的环境具有指示作用^[1]。由于区域地理、地质和水文地质条件决定地区地表水与地下水的补给、径流和排泄等水文过程, 而地表水与地下水又与其周围环境发生各种水文地球化学作用, 因此天然水水化学成分从一定程度上记录着水分运移和转化的历史^[2~4]。通过对水体主离子组成的分析, 识别控制该水体水化学特征的基本过程, 可以在一定程度上了解区域的地表水与地下水

的水化学演化特征^[5]。地表水与地下水是两个相互依存、相互制约且又相互独立的水文循环子系统, 深入认识两者之间的作用和联系, 对水资源评价、充分合理利用水资源及其生态保护有重要意义, 并

收稿日期: 2014-01-18; 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01806); 国家自然科学基金项目(41130638, 41271085); 冰冻圈国家重点实验室开放研究项目(SKLCOS-OP-2013-05)

作者简介: 周嘉欣(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区水文, E-mail: zhoujiaxin@lzb.ac.cn

为进一步开发和保护水资源提供条件^[2]。

水体中的化学离子被视为天然的“示踪剂”，对水体主离子组成的分析研究可用于识别控制该水体化学组成的基本过程，如流域岩石风化、水体的蒸发-结晶作用以及大气降水物质输入等^[6]。Gibbs 基于对全球大量降水、河水、湖水和海洋水化学组成的分析，认为大气降水输入、岩石风化和蒸发-结晶过程是全球地表水化学组成的三大控制因素^[1]。随后不少学者对世界主要水体中主离子含量与流域的气候条件和区域地质岩性的关系进行了研究，如亚马逊河^[3]、Ganga-Brahmaputra 水系^[7]、欧洲的莱茵河^[8]、刚果盆地流域的河流^[9]、印度喜马拉雅地区的 Alaknanda 河^[10]、法国的塞纳河等^[11]。在我国，Hu 等^[12]对我国长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江及鸭绿江等的水化学研究指出，中国河流水的离子组成主要受碳酸盐岩和蒸发岩溶蚀作用的影响，受铝硅酸盐岩风化作用的影响不如前两者明显。张利田等^[13]对我国一些河流，如长江、黄河、松花江和珠江的水化学特征做了较系统地分析。学者们近年来对内陆河流域河水化学特征也进行了研究：聂振龙等^[14]对黑河干流不同地带地下水与地表水的相互转化关系研究表明，祁连山区地下水与地表水的转化以地下水向河流排泄为主；高业新等^[15]通过分析石羊河流域地表水与地下水的水化学特征，研究表明：在武威盆地的山前地带出山河水入渗转化为地下水，在溢出带地下水以泉的形式转化为地表水，进入细土平原后河水又补给地下水，农灌区引河水通过田间入渗反补地下水；在民勤盆地，地下水主要通过引水灌溉和河水补给。对塔里木河干流水体水环境研究表明，河水中阳离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ，阴离子浓度 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ^[16]。

疏勒河出山水资源的数量和质量，制约着玉门、瓜州乃至敦煌等中下游地区社会经济的发展规模和水平，进而影响着与地表水、地下水密切相关的生态环境条件的变化^[17]。近年来，疏勒河流域面临天然植被退缩、河湖萎缩与消亡、湿地面积缩小、盐碱地、灌区次生盐渍化、土地沙化、水土流失、水体污染等问题^[18]。对疏勒河流域的生态环境和景观格局的研究多集中在中游，因此，对疏勒河上游水量、水化学特征及地下水与地表水的相互转化等方面的研究就显得十分必要。

我国西北干旱区内陆河流域受大气降水、冰雪融水双重补给，山区径流过程中又出现地表水与地下水的多重转化，水化学组成有其自身特点，并能反

映不同水体的组成与转化过程，是认识山区流域径流组成及相互转化和补给关系的重要手段。本研究主要通过疏勒河流域地表水中主离子含量的变化，结合大气降水和地下水资料，确定区域地表水和地下水中主离子水文学特征，揭示降水、地下水和地表水之间潜在的水力联系。本研究从水化学的角度出发，通过对疏勒河流域地表水的水文过程的了解，运用水化学及统计学方法，系统分析疏勒河河水主离子水化学特征及其时空分布规律，并试图对水化学成因进行探讨，以期对流域水资源评价、管理和生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

疏勒河位于祁连山西部，是我国第三大内陆河，整个流域面积约为 $14.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其上游地处青藏高原东北缘的青海省天峻县与甘肃省肃北县和玉门市内，地理位置为 $96.6^\circ \text{E} \sim 99.0^\circ \text{E}$ ， $38.2^\circ \text{N} \sim 40.0^\circ \text{N}$ ，平均海拔 3 885 m，面积约 $1.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ （图 1）。疏勒河源区年平均气温为 -4.0°C ，最热月（7 月）和最冷月（1 月）气温平均值分别为 7.5°C 和 -17.5°C 。年平均降水量为 388.2 mm，降水主要集中在生长季的 5~9 月，占全年降水量的 90%^[19]。昌马地区多年平均气温 6.9°C ，年均降水量 63.2 mm。

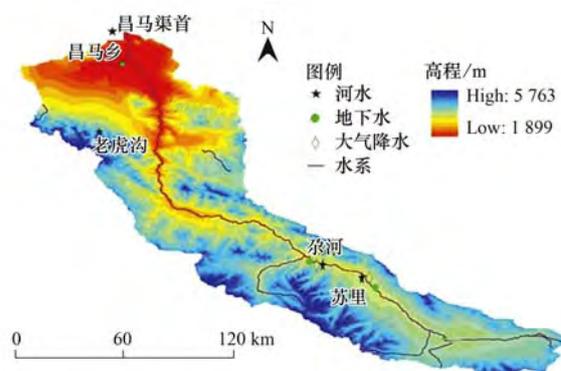


图 1 疏勒河流域及采样点布置示意

Fig. 1 Sketch map of the Shule River Basin and the sampling sites

疏勒河上游属于大陆性干旱气候，年日照时间为 $3\ 033 \sim 3\ 246 \text{ h}$ ^[20]，干流多年平均径流量为 $10.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，流量年季分配不均，全年径流总量的 53% 集中在 7~9 月，冬春两季径流量只占全年径流量的 8.5% 和 10%，且总径流量年际间变化也很大，根据近 40 a 的水文资料（昌马堡水文站）显示，枯水年径流量为 $5.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，丰水年来水量为 $15.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

研究区主要由疏勒南山、托来南山和疏勒河谷地组成,山区地势高峻、地形陡峭,谷地地形相对低缓,形成以高山纵谷与山间盆地相间分布的地貌特征. 区域地势总体上东南高,西北低,决定了疏勒河从 SE 流向 NW. 研究区内各时代地层出露较全,从元古界到新生界的第四纪均有分布;东南部奥陶系和志留系分布广泛,上覆海湾相石炭系、二叠系和三叠系以及陆相上第三系. 中部以元古界变质岩为主体,零星分布有稳定沉积型中寒武统和下奥陶统,以砾岩、砂岩、夹煤线及油页岩为主. 西北部以下古生界海相火山岩为主体,上覆晚泥盆世以来的陆相或海陆交互相地层,上部以碳酸盐岩为主. 区域岩石以砾岩、砂岩、粉砂岩、黏土岩、煤层为主. 研

究区矿产资源丰富,有煤、硫磺、石灰岩、云母、石膏、砷硝、岩盐等,与水体水化学的形成均有一定联系.

2 样品采集与分析方法

系统采集了 2009 年 4 ~ 10 月疏勒河流域上游的河水、地下水、降水和冰雪融水样品,共采集了 168 个样品. 降水样品为每次降水后立即收集. 样品的采集间隔时间为一周,样品编号 SH、SQ、SP、GH、GQ、GP、CMQS、CMJ 和 LHG 分别代表苏里河水、苏里泉水、苏里降水、尕河河水、尕河泉水、尕河降水、昌马渠首河水、昌马井水和老虎沟冰雪融水样品. 采样及样品相关情况见表 1.

表 1 采样点和样品相关情况

Table 1 Sampling location and sample-related cases

采样点	地理坐标	海拔/m	采样类型	样品个数
苏里	N38°27.35' E98°18.55'	3 841	河水	20
			泉水	22
			降水	20
尕河	N38°48.40' E97°47.2'	3 521	河水	27
			泉水	24
			降水	11
昌马渠首	N39°49.27' E96°85.34'	2 112	河水	15
			井水	12
老虎沟	N39°26.4' E96°32.5'	4 180	冰雪融水	17

本研究取样所用的取样瓶分两种. 阴离子用 50 mL 聚乙烯瓶,采样前用去离子水清洗,清洗干净的瓶子密封在清洁的聚丙烯袋中待用. 阳离子用 120 mL 聚乙烯瓶,使用前经硝酸酸化处理,采样前用去离子水清洗,清洗干净的瓶子密封在清洁的聚丙烯袋中直至使用. 样品野外采集后首先放置在温度尽可能低的地方,转运到实验室后放在 -15℃ 冷库中,测试分析前放在室内让其自然融化. 阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 AAS 方法测试,阴离子 SO_4^{2-} 和 Cl^- 采用离子色谱法, HCO_3^- 采用滴定法测试. 由水中溶解 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的平衡关系可知, CO_3^{2-} 离子含量很小,占二者总量的不足 5%,因而在本研究中 CO_3^{2-} 忽略不计. 所有的实验数值都经过阴阳离子电荷平衡计算, HCO_3^- 浓度采用滴定法计算得到,总溶解固体(TDS)含量利用各离子含量总和减去 1/2 的 HCO_3^- 含量计算.

3 结果与讨论

3.1 疏勒河上游水化学组成及水化学类型

河水 TDS 含量变化范围为 51.7 ~ 432.32

$mg \cdot L^{-1}$,平均值为 177.68 $mg \cdot L^{-1}$,高于世界河流 TDS 平均值(115 $mg \cdot L^{-1}$). 但其 TDS 小于 1 $g \cdot L^{-1}$,仍属于淡水河^[19]. 阳离子质量浓度大小依次为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$,平均浓度分别为 28.77、19.24、11.91、2.01 $mg \cdot L^{-1}$,河水优势阳离子为 Ca^{2+} ,其次为 Mg^{2+} ,分别占其阳离子总量的 46% 和 31%; 而阴离子质量浓度大小依次为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-}$,平均浓度分别为 139.54、34.81、11.09、0.08 $mg \cdot L^{-1}$,河水中优势阴离子为 HCO_3^- ,占其阴离子总量的 75%. 河水的水化学类型为 $HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+}$.

地下水 TDS 含量变化范围为 172.97 ~ 727.14 $mg \cdot L^{-1}$,平均值为 453.67 $mg \cdot L^{-1}$. 其阳离子质量浓度大小依次为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$,平均浓度分别为 80.91、53.86、39.62、3.53 $mg \cdot L^{-1}$; 地下水中的优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,分别占其阳离子总量的 45% 和 30%; 而阴离子质量浓度大小依次为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > CO_3^{2-}$,平均质量浓度分别为 222.00、134.79、28.97、0.99 $mg \cdot L^{-1}$,地下水中优势阴离子为 HCO_3^- ,其次是 SO_4^{2-} ,分别占其阴

离子总量的 57% 和 35%。研究区内地层与河流间的作用使得 SO_4^{2-} 浓度较高。地下水的水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 。

降水 TDS 含量变化范围为 11.30 ~ 156.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 56.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。阳离子质量浓度大小依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, 平均质量浓度分别为 6.53、3.65、1.55、0.96 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 降水中的优势阳离子为 Ca^{2+} , 其次为 Mg^{2+} , 分别占其阳离子总量的 51% 和 29%; 而阴离子质量浓度大小依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 平均质量浓度分别为 75.62、3.26、1.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 降水中绝对优势阴离子为 HCO_3^- , 占其阴离子总量的 94%。降水的水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 。

为了进一步说明疏勒河干流河水中主离子浓度

表 2 疏勒河干流主离子浓度特征与其他河流主离子浓度对比分析/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Comparison of major ion concentrations in the Shule River with other rivers/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

河流	离子浓度						TDS
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	
疏勒河	28.8	19.3	13.9	139.5	11.1	34.8	177.7
黑河(祁连山区) ^[14]	57.6	21.5	18.1	204.4	10.0	86.1	412.7
石羊河 ^[15]	65.7	29.3	4.9	64.9	1.8	30.9	243.4
塔里木河 ^[16]	56.7	145.3	302.4	—	769.3	295.1	441.5
松花江 ^[22]	16.6	4.4	15.9	87.4	7.6	8.3	105.3
全球河流均值(MCNC) ^[22]	8.0	3.3	6.5	51.8	5.8	8.4	99.0

3.2 河水中不同离子的时间变化特征

从图 2 中看出, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 的主离子浓度随时间变化的趋势基本一致。总体大致趋势为减小-增加-减小, 4~7 月之间, 4 月的浓度稍高, 是由于 4 月气温逐渐升高, 积雪融化, 积雪中有大量富集主离子的粉尘存在, 积雪融水汇入河流, 使得河水中各主离子浓度迅速增加; 另外, 积雪融水引起的春汛对土壤的侵蚀作用也使得土壤中的化学离子进入河流, 使得离子浓度增加^[23]; 4~7 月之间, 各离子有不同程度的减小(除 Ca^{2+} 在 7 月是略有增加), 主要原因为此段时间内, 冰雪融水增加, 干流的径流量一直呈现出不同程度的增加, 随着径流量的增加, 对河流中离子的稀释作用也增加, 虽然有地下水的补给, 但径流量增加所带来的稀释作用大于地下水的补给作用, 另外, 4~7 月时间段内, 降雨量增加, 雨水的冲刷作用也会对各离子的浓度产生一定的作用, 因此, 离子浓度的减小是径流量的增加、地下水的补给和雨水的冲刷等综合作用的结果; K^+ 的浓度变化趋势可能是由于个别值的变化引起的。7~9 月之间, Ca^{2+} 、 Na^+ 的浓度小幅度地先增加后减小, Ca^{2+} 的变化幅度大于

水平, 将研究区河水主离子与其他内陆河流域和全球河流主离子浓度进行了对比(表 2)。从表 2 可看出, 疏勒河干流中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度高于全球河流中这些离子浓度均值 1.9~5.8 倍不等, 而远远低于塔里木河中这些离子的浓度; 疏勒河干流中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度均比石羊河和黑河中的低, Cl^- 的浓度高于石羊河和黑河 1.1~6.1 倍不等, HCO_3^- 的浓度低于黑河而高于石羊河。其中 HCO_3^- 的浓度与黑河浓度相差不大, 高于石羊河 2.1 倍。疏勒河和黑河的离子化学特征较为接近, 主要原因为研究区和黑河同为河西走廊内陆河, 水汽来源一致, 二者在气候、水文地质环境等各方面都十分相近, 因此使得河水离子化学组成具有共同特征。

Na^+ 的; Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的浓度呈现小幅度的增加, 原因是这段时间内的径流量有增有减, 各离子的变化趋势是径流稀释作用的变化、地下水的补给和雨水冲刷综合作用的结果; K^+ 的浓度呈减小趋势, 主要原因是同期地下水中 K^+ 的浓度有所减小, 使得 K^+ 的浓度减小。在 9~10 月之间, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 等 5 种离子的浓度均呈现出不同幅度地减小, 此段时间内, 径流量大幅度地减小, 离子浓度由于稀释作用减弱本应增大, 但呈现出与之相反的变化趋势, 说明地下水的补给作用大于径流的稀释作用, 更进一步说明了地表水主要是由地下水补给这一结论。

研究区内的河水样品中 SO_4^{2-} 离子的浓度持续增加, 4 月浓度略高, 是由于积雪中富集 SO_4^{2-} 离子的粉尘随着积雪融化汇入到河流中, 使其浓度增大。河水样品中的 SO_4^{2-} 离子浓度较高, 主要原因是 SO_4^{2-} 离子受到研究区内地层与河流的相互作用, 因而地下水中的浓度较高, 地下水对地表水的补给使得河水样品中的 SO_4^{2-} 离子浓度高; 另一方面可能是雨水对土壤的冲刷将 SO_4^{2-} 离子带入到河流中^[24], 因此 SO_4^{2-} 离子浓度相对较高。

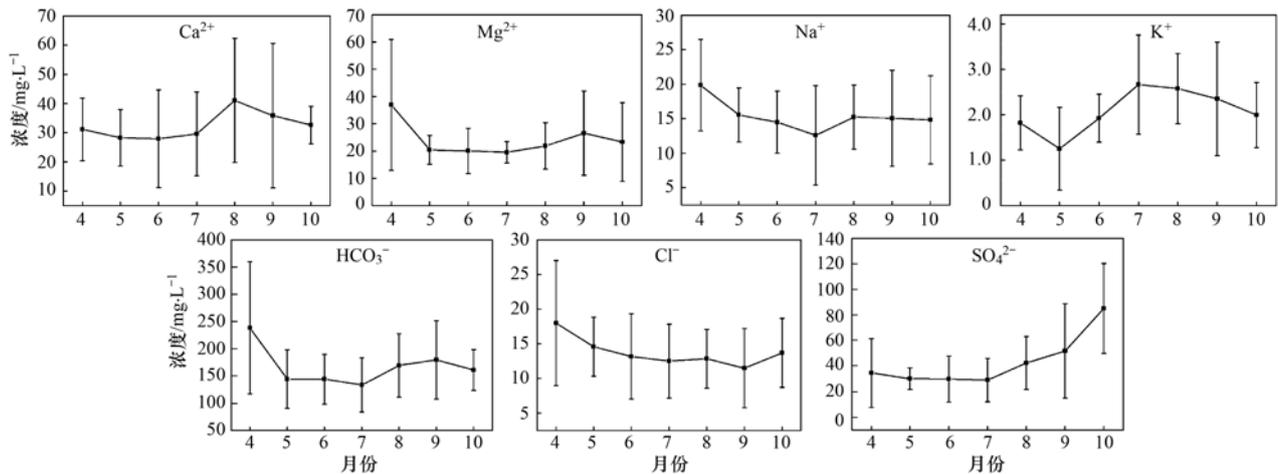


图2 疏勒河干流主离子浓度月变化

Fig. 2 Monthly variation of major ions concentrations in the Shule River Basin

3.3 疏勒河上游河水 TDS 与径流量的年内变化

根据 2009 年昌马水文站的径流资料与计算所得的 TDS 数据绘制图 3, 从中可看出, 疏勒河上游河水离子总量的年内变化很规则, 在 4 月和 10 月最高, 7 月最低, 与径流量的季节变化正好相反. 这表明雨季时河水被冲淡、离子受到稀释作用, 离子总量降低. 河水中各离子含量的年内变化趋势同于离子总量.

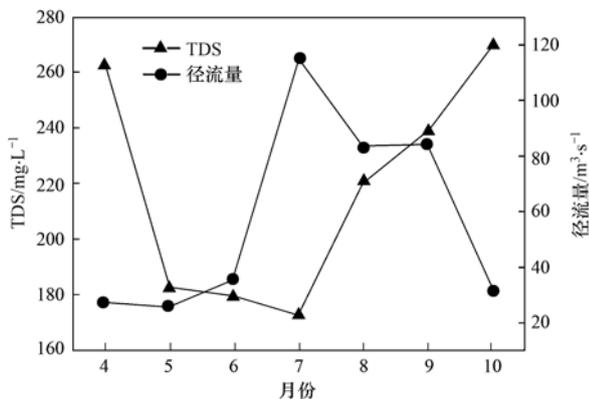


图3 疏勒河上游干流河水 TDS 与径流量的年内变化

Fig. 3 Yearly variation of TDS and runoff in main stream of Shule River Basin

3.4 不同水体主离子组成变化

本研究采用国际上通用的水化学分类方法, 首先计算主要阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+}) 和阴离子 (Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-}) 的毫克当量百分数, 使毫克当量百分数大于 25% 的离子参与水化学类型的分类. 利用 Gw-chart 软件 (USGS 开发) 绘出不同地貌单元的水化学类型图利用阳离子 Ca^{2+} - Mg^{2+} - $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 组成的三角图和阴离子 SO_4^{2-} - Cl^{-} -

($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{-}$) 组成的三角图可以表明不同水体的化学组成特征, 从而辨别其控制端元.

阴阳离子三角形图可表示河水溶质载荷主要离子的相对丰度和分布特征, 从而揭示不同岩石风化对河水总溶质成分的相对贡献率^[25]. 主要受碳酸盐岩风化影响时, 阴离子组分点多落在 HCO_3^{-} 一端, 而阳离子组分多落在 Ca^{2+} 一端; 主要受蒸发岩盐影响的河流, 阴离子多落在 SO_4^{2-} - Cl^{-} 线上, 远离 HCO_3^{-} 一端, 阳离子组分则偏向 ($\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$) 端元^[1]. 利用阴、阳离子三角图, 可以在已知为岩石风化控制疏勒河流域水体离子组分的基础上, 进一步确定是哪类岩石的风化控制其组成^[26].

图 4(a) 为苏里河水、泉水、大气降水的主要阴阳离子组成三角图, 从中可以看出苏里河水的阳离子分布在三角图的中央并偏向 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上, 阴离子分布在 ($\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{2-}$)- Cl^{-} 线上, 更多的靠近 HCO_3^{-} 一端. 从表 4 可知苏里河水中主要阴阳离子 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} 的变异系数相对较小, 反映它们在水中的含量相对稳定, 其中 HCO_3^{-} 的平均值与标准差都较大, 且变异系数小, 说明在河水中绝对含量较大且相对稳定, 为河水的主要阴离子. 苏里河水的阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 分别占阳离子总量的 44%、29%、24%、3%, 阴离子 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 分别占阴离子总量的 78%、6%、16%. 苏里河水的水化学类型为 HCO_3^{-} - Ca^{2+} - Mg^{2+} ; 苏里泉水的阳离子分布在三角图中央, 稍偏向 ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$)- Ca^{2+} 线上, 阴离子分布在 ($\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{2-}$)- Cl^{-} 线上, 稍偏向 HCO_3^{-} 一端. 据表 3, 苏里泉水的阳离子中 Ca^{2+} 的变异系数相对于 Mg^{2+} 和 Na^{+} 较小, 说明它在水中含

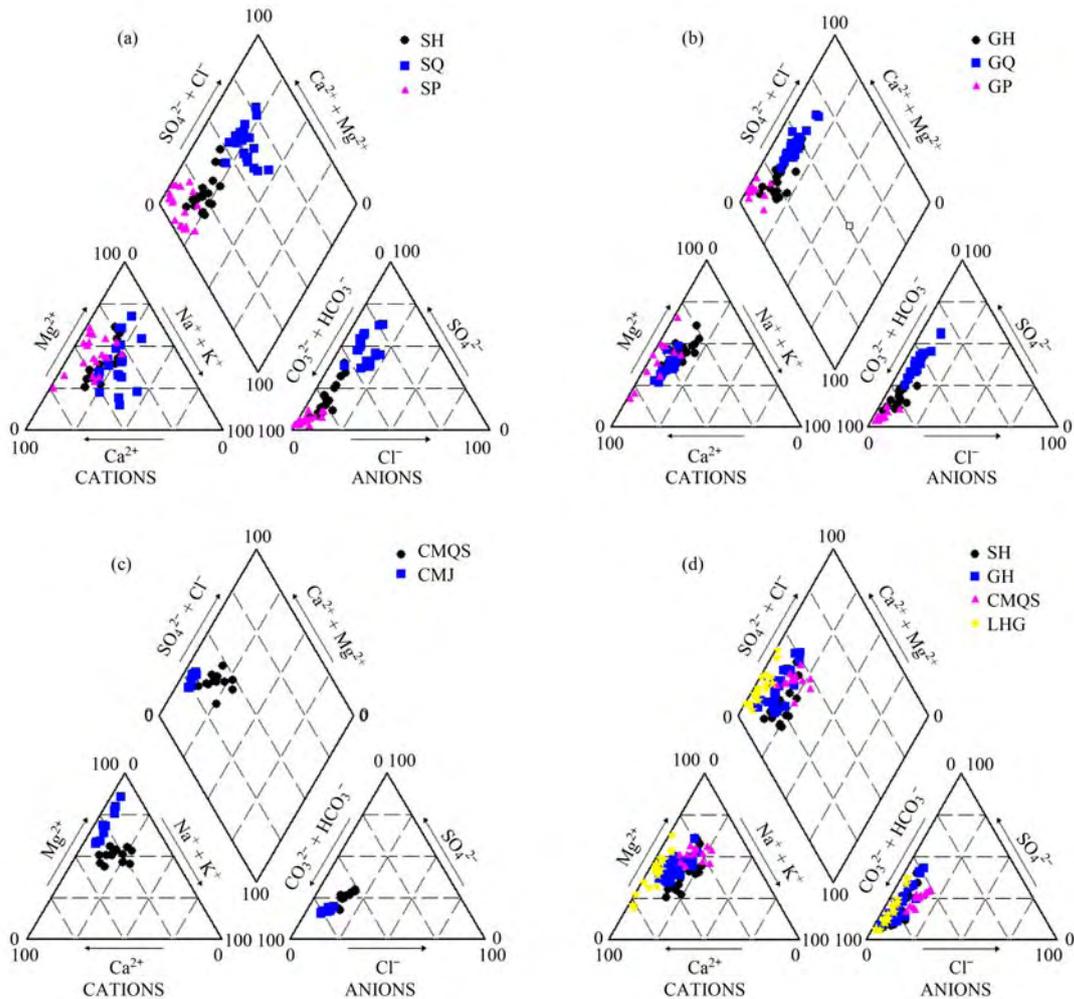


图4 疏勒河干流水样 Piper 三角图

Fig. 4 Piper figures of the main stream of the Shule River

量相对稳定, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的变异系数相对于其它阴离子的小, 说明其含量相对稳定. Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 分别占泉水阳离子总量的 38%、34%、27%、1%, 阴离子 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 分别占阴离子总量的 46%、43%、10%. 苏里泉水的水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Na^+ - Mg^{2+} ; 苏里降水的阳离子分布在三角图的中央且大多数点偏向 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且位于三角图的左下角, 据表 3, 苏里降水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的变异系数较其它离子的小, 表明其在降水中的含量相对稳定. 降水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的比例分别为 46%、30%、9%、15%, 阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的比例分别为 94%、2%、4%. 苏里降水的水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} .

图 4(a) 中河水的离子分布在地下水与大气降水之间, 且与大气降水相关性更大, 说明其同时受到

地下水与大气降水的补给, 并且大气降水的补给作用大于地下水的补给作用, 主要原因是苏里距离河源较近, 大气降水的输入对地表水中主离子浓度有一定的影响.

图 4(b) 为尕河河水、泉水、大气降水的主要阴阳离子组成三角图, 从中看出尕河河水的阳离子分布在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Ca^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且偏向三角图的左下角, 由表 3 中可知尕河河水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的变异系数相对于其他离子的小, 说明其在河水中的含量相对稳定, 其中 HCO_3^- 的平均值与标准差都较大, 且变异系数小, 说明在河水中绝对含量较大且相对稳定, 为河水的主要阴离子. 尕河河水的阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 分别占阳离子总量的 49%、31%、17%、3%, 阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 分别占阴离子总量的 75%、5%、20%. 尕河河水的水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} . 尕河泉水的阳离子分布

在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Ca^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且多数点偏向 HCO_3^- 一端. 据表 3, 尕河泉水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的变异系数相对较小, 说明这 3 种离子在泉水中的含量相对稳定. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 分别占泉水阳离子总量的 59%、24%、14%、3%, 阴离子 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 分别占阴离子总量的 63%、32%、5%. 尕河泉水的水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+} . 尕河降水的阳离子分布在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Ca^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且位于三角图的左下角, 据表 3, 尕河降水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的变异系数较其它离子的小, 表明其在降水中的含量相对稳定. 降水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的比例分别为 62%、26%、5%、6%, 阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的比例分别为 91%、3%、5%. 尕河降水的水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} .

图 4(b) 中尕河河水的离子分布在地下水与大气降水之间, 明显地看出与地下水的相关性更大, 说明其同时受到地下水与大气降水的补给, 并且地下水的补给作用大于大气降水的补给作用.

图 4(c) 为昌马渠首河水、井水的主要阴阳离子组成三角图, 从中看出昌马渠首河水的阳离子分布在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Mg^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且稍偏向三角图的左下角, 由表 3 中可知昌马渠首河水中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的变异系数相对于其他离子的小, 说明其在河水中的含量相对稳定, 其中 HCO_3^- 的平均值与标准差都较大, 且变异系数小, 说明在河水中绝对含量较大且相对稳定, 为河水的主要阴离子. 昌马渠首河水的阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 分别占阳离子总量的 35%、37%、25%、3%, 阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 分别占阴离子总量的 67%、11%、22%. 昌马渠首河水的水化学类型为 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} - Na^+ . 昌马井水的阳离子分布在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Mg^{2+} 一端, 阴离子分布在 SO_4^{2-} - HCO_3^- 线上且偏向三角图的左下角, 昌马井水的阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 分别占阳离子总量的 32%、57%、9%、2%, 阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 分别占阴离子总量的 76%、7%、15%. 昌马渠首井水的水化学类型为 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} .

图 4(d) 为疏勒河上游 4 个站点采集的河水样品的主要阴阳离子组成图, 从中看出, 河水样品的离

子分布较为集中, 河水阳离子分布在 Ca^{2+} - Mg^{2+} 线上且多数点偏向 Ca^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ - Cl^- 线上且偏向三角图的左下角. 苏里、尕河、老虎沟这 3 个站点水化学类型均为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} , 除昌马渠首河水的水化学类型为 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} - Na^+ , 昌马河水中的 Mg^{2+} 浓度较高, 原因可能为强烈的蒸发作用使 Ca^{2+} 沉积, 从而使得河水中 Mg^{2+} 浓度相对较高.

综上, 不同水体的主要阴阳离子组成及水化学类型存在显著差别, 同一水体在不同采样点的主要阴阳离子组成及水化学类型也存在差异, 说明离子组成与水化学类型呈显著的区域性规律.

3.5 河水中主离子的来源及控制因素

陆地水溶解盐的可能来源包括大气携带的海盐(循环盐)成分、可溶性岩石(蒸发岩、硅酸盐、碳酸盐、硫化物)的风化物和人类活动产生的污染物^[27]. 疏勒河流域上游人口较少并且人类活动简单, 且研究区年降雨量少, 人类活动和降水对本地区地表水离子的影响不大. 据此, 可溶性岩石的风化产物是研究区水化学离子的主要可能来源, 这与 Gibbs 图中河水的点均落在岩石风化控制区, 并且远离大气降水控制区相一致^[28]. 在天然条件下, 水体 HCO_3^- 的主要来源于碳酸盐的溶解; Cl^- 、 SO_4^{2-} 主要来源于蒸发岩的溶解; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐、蒸发岩和硅酸盐; Na^+ 、 K^+ 则主要来源于蒸发岩和硅酸盐的风化产物^[29,30].

为了解河水的离子特征及成因, 通常使用 Gibbs 的半对数坐标图解, 纵坐标以对数值表示河水中溶解性固体总量, 横坐标以算数值表示 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值^[31]. Gibbs 图可以直观地反映出河水主要组分趋于“降水控制类型”、“岩石风化类型”或“蒸发-浓缩类型”, 是定性判断区域岩石、大气降水、蒸发-浓缩作用等对河流水化学影响的一种重要手段^[1]. 在 Gibbs 图中, 一些溶解性固体含量低, 而 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值很高(接近 1), 说明河流主要受海洋起源的大气降水补给^[32], 且此种河水的点分布在图的右下角, 其离子组成和含量决定于大气中“纯水”对海洋气溶胶的稀释作用. 溶解性固体含量中等而 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.5 左右或者小于 0.5 的, 说明河流的离子主要来源于岩石的风化释放, 且此种河流的点分布在图的中部偏左侧.

表3 疏勒河上游河水、地下水、降水的水化学特征

Table 3 Chemical characteristics of waters in Shule River Basin

类型	项目	SH	SQ	SP	GH	GQ	GP	CMQS	CMJ	LHC
Ca ²⁺	最大值	58.7	119.5	9.6	80.4	143.4	21.7	28.2	62.6	23.8
	最小值	13.0	28.2	2.7	21.7	32.6	2.2	12.1	17.5	10.4
	平均值±标准差	27.8±13.8	82.8±27.9	6.2±2.2	42.6±17.3	99.7±34.4	7.1±5.8	20.5±5.1	39.7±14.6	15.3±4.4
	变异系数/%	50	34	36	41	34	82	25	37	29
Mg ²⁺	最大值	47.5	167.4	6.6	64.6	73.8	13.2	30.3	106.4	14.8
	最小值	6.6	21.1	1.1	13.2	14.5	1.3	13.7	47.9	2.1
	平均值±标准差	18.5±11.1	58.2±37.2	4.0±1.9	26.4±12.0	41.1±12.9	3.0±3.5	21.5±4.1	71.4±17.8	6.9±2.8
	变异系数/%	60	64	47	46	31	117	19	25	41
Na ⁺	最大值	27.8	142.6	4.4	27.4	37.0	6.2	23.5	15.4	2.2
	最小值	4.7	26.2	0.0	4.1	11.3	0.0	7.7	5.5	0.0
	平均值±标准差	15.5±5.8	72.6±29.4	1.2±1.6	15.0±6.3	23.4±7.1	0.6±1.9	14.7±4.3	11.6±2.7	0.3±0.6
	变异系数/%	38	40	13	42	30	332	29	24	169
K ⁺	最大值	3.5	4.5	6.0	4.7	6.2	1.6	4.3	3.1	3.9
	最小值	0.9	1.1	0.4	1.0	1.4	0.2	0.4	1.6	0.4
	平均值±标准差	2.0±0.7	3.0±1.0	2.0±1.5	2.2±0.9	4.6±1.4	0.7±0.5	2.0±1.4	2.4±0.5	1.6±0.9
	变异系数/%	34	32	74	40	32	68	67	21	55
HCO ₃ ⁻	最大值	233.8	378.2	185.5	378.3	405.7	116.9	137.3	199.4	89.7
	最小值	96.3	110.0	27.5	103.2	79.1	13.8	89.4	110.0	41.3
	平均值±标准差	154.0±45.5	202.9±60.4	98.7±55.2	191.8±63.9	270.0±103.4	33.8±29.4	108.2±14.1	157.0±31.0	67.2±13.0
	变异系数/%	30	30	56	33	38	87	13	20	19
Cl ⁻	最大值	18.9	67.5	7.9	28.3	31.7	5.2	29.1	17.3	3.2
	最小值	4.2	18.7	0.3	4.3	11.8	0.4	11.0	10.0	1.0
	平均值±标准差	11.3±4.1	45.5±18.1	2.1±1.8	13.4±6.2	21.4±5.9	1.3±1.4	16.9±4.4	13.8±2.5	2.1±0.6
	变异系数/%	0.4	0.4	0.8	0.5	0.3	1.1	0.3	0.2	0.3
SO ₄ ²⁻	最大值	93.8	289.5	7.6	119.3	166.9	9.4	58.9	36.3	30.6
	最小值	7.9	68.5	1.1	14.3	97.9	0.4	19.1	21.1	3.3
	平均值±标准差	31.7±24.5	188.4±46.8	3.9±1.5	51.4±32.8	137.4±21.1	2.0±2.5	35.3±10.5	31.4±4.7	11.7±7.5
	变异系数/%	77	25	38	64	15	126	30	15	65
TDS	183.9	552.5	114.1	252.8	471.2	31.5	165.0	252.7	71.5	
水化学类型	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺ -Ca ²⁺ -Na ⁺	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -SO ₄ ²⁻ -Ca ²⁺ -Na ⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -SO ₄ ²⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -SO ₄ ²⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺ -Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ -Mg ²⁺

溶解性固体含量很高, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值亦高(接近于 1), 说明河流分布在蒸发作用很强的干旱区域, 此种河水的点分布在图的右上角。

将本研究所述的疏勒河上游干流河水的水化学数据绘于 Gibbs 图中, 如图 5 所示, 研究区的河水样品的水化学组成全部落在 Gibbs 分布模型内, 说明疏勒河上游河水受到人类活动的影响很小, 从中看出, 疏勒河干流河水样品的数据点落在分布模型的中部并偏向左侧, 大多数河水样品的溶解性固体含量在 $100 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 只有少量河水样品的 TDS

小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.5 或者在 0.5 左右, 处于岩石风化作用带, 只有极少数的河水样品的水化学数据落于蒸发结晶作用带, 并且都远离大气降水作用带, 说明研究区的水化学离子组成受到岩石风化作用和蒸发结晶作用的共同影响, 且岩石风化作用对水化学离子组成的影响更大更显著。河水 $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ 值平均为 1.12, 略小于世界平均海水比值 ($\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 1.15$), 这表明大气环流所携带的海盐对疏勒河上游河水离子组成有一定的影响, 这也是疏勒河上游干流河水样品中 Na^+ 和 Cl^- 含量稍高的原因。

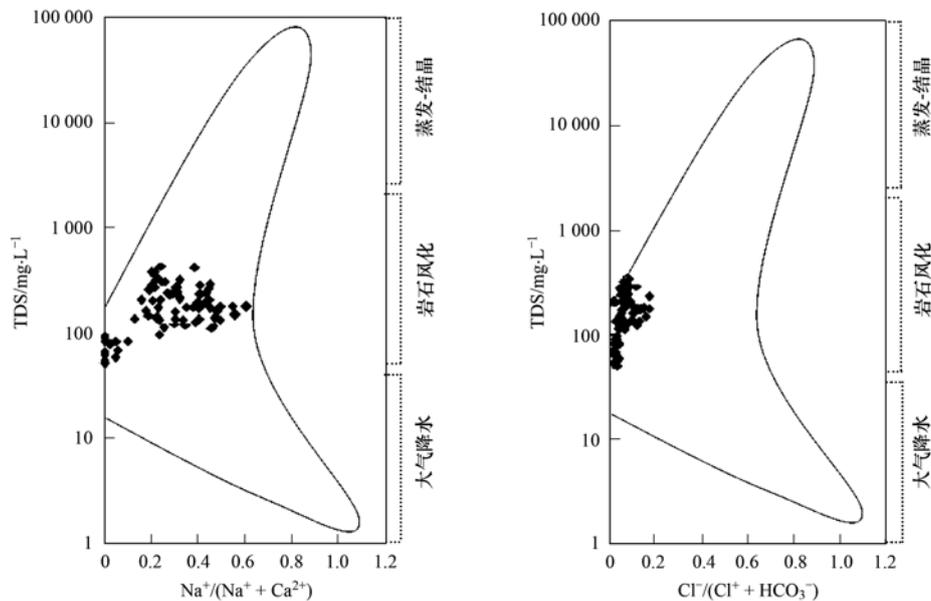


图 5 疏勒河上游地表水水化学的 Gibbs 图

Fig. 5 Hydrochemical Gibbs figures of the Shule River

4 结论

(1) 疏勒河上游干流河水的 TDS 总体较低, 变化范围为 $51.7 \sim 432.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $177.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为低矿化度河水; 河水的 TDS 在 4 月和 10 月最高, 7 月最低, 与径流量的季节变化正好相反。河水主离子化学组成以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 为主, 水化学类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 为主。

(2) 不同离子的浓度随时间变化趋势有差异, 4~5 月之间各离子浓度均有所减小, 4 月的浓度较高, 主要原因是气温的逐渐升高使得积雪融水汇入河流, 富集在积雪中的离子补给河水。各离子浓度的时间变化特征是径流量的增加或减小、地下水的补给、雨水的冲刷等综合作用的结果。 SO_4^{2-} 离子浓度较高的原因为研究区地层与河流之间的作用使得

地下水中的 SO_4^{2-} 的离子浓度增大。

(3) 疏勒河上游河水水化学组成均落在 Piper 三线图三角形的左侧, 河水中阳离子分布在 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 线上且并偏向 Ca^{2+} 一端, 阴离子分布在 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) - \text{Cl}^-$ 线上且稍偏向 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 一端, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是占绝对优势的离子, 流域碳酸盐溶解是控制河水水化学的主要因素, 流域有一定量的蒸发岩存在, 但蒸发岩对水化学的贡献小于碳酸盐岩。河水中主离子浓度值介于大气降水和地下水之间, 并且十分接近地下水浓度, 说明地表水同时受大气降水和地下水补给并主要依靠地下水补给。

(4) 研究区河水样品的水化学组成落于 Gibbs 模型中翼偏左端, 既有中等的 TDS 含量和低的 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值,

Gibbs 图分析表明研究区的水化学离子组成受到岩石风化作用和蒸发结晶作用的共同影响,且岩石风化作用对水化学离子组成的影响更大更显著. 流域碳酸盐溶解是控制河水水化学的主要因素,流域有一定的蒸发岩存在,但蒸发岩对水化学的贡献弱于碳酸盐岩.

参考文献:

- [1] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [2] 潘国营, 刘永林, 甘容, 等. 大沙河流域地表地下水化学特征与演变规律 [J]. 水资源与水工程学报, 2009, **20**(3): 58-61.
- [3] 武小波, 李全莲, 宋高举, 等. 祁连山七一冰川融水化学组成及演化特征 [J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 613-618.
- [4] 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.
- [5] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, **36**(9): 1061-1066.
- [6] Han G, Liu C. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution; a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. Chemical Geology, 2004, **204**(1-2): 1-21.
- [7] Sarin M M, Krishnaswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems, India [J]. Nature, 1984, **312**(5994): 538-541.
- [8] Van der Weijden C H, Middelburg J J. Hydrogeochemistry of the River Rhine: Long term and seasonal variability, elemental budgets, base levels and pollution [J]. Water Research, 1989, **23**(10): 1247-1266.
- [9] Négrel P, Allègre C J, Dupré B, *et al.* Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: The Congo Basin case [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, **120**(1-2): 59-76.
- [10] Singh A K, Hasnain S I. Major ion chemistry and weathering control in a high altitude basin: Alaknanda River, Garhwal Himalaya, India [J]. Hydrological Sciences/Journal des Sciences Hydrologiques, 1998, **43**(6): 825-844.
- [11] Roy S, Gaillardet J, Allègre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, **63**(9): 1277-1292.
- [12] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. Nature, 1982, **298**(5874): 550-553.
- [13] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系 [J]. 地理科学, 2000, **20**(3): 236-240.
- [14] 聂振龙, 陈宗宇, 程旭学, 等. 黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征 [J]. 吉林大学学报, 2005, **35**(1): 48-53.
- [15] 高业新, 王贵玲, 刘花台, 等. 石羊河流域的水化学特征及其地表水与地下水的相互转化 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(6): 84-88.
- [16] 王建, 韩海东, 赵求东, 等. 塔里木河流域水化学组成分布特征 [J]. 干旱区研究, 2013, **30**(1): 10-15.
- [17] 丁宏伟, 魏余广, 李爱军, 等. 疏勒河出山径流量变化特征及趋势分析 [J]. 干旱区研究, 2001, **18**(3): 48-53.
- [18] 张永明, 翟禄新, 宋孝玉, 等. 疏勒河流域生态环境现状评价研究 [J]. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 1055-1056.
- [19] 吴锦奎, 陈军武, 吴灏, 等. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究 [J]. 地理科学, 2013, **33**(1): 97-103.
- [20] 吴灏, 叶柏生, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游高寒草甸生态系统 CO₂ 通量观测研究 [J]. 草业学报, 2013, **22**(4): 18-26.
- [21] 侯昭华, 徐海, 安芷生. 青海湖流域水化学主离子特征及控制因素初探 [J]. 地球与环境, 2009, **37**(1): 11-19.
- [22] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 1-178.
- [23] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征: 沙尘与非沙尘活动季节的比较 [J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1818-1825.
- [24] 董志文, 秦大河, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 [J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 504-512.
- [25] Huh Y, Tsoi M Y, Zaitsev A, *et al.* The fluvial geochemistry of the rivers of eastern Siberia; I. Tributaries of the Lena river draining the sedimentary platform of the Siberian Craton [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, **62**(10): 1657-1676.
- [26] 周俊, 吴艳宏. 贡嘎山海螺沟水化学主离子特征及其控制因素 [J]. 山地学报, 2012, **30**(3): 378-384.
- [27] Berner E K, Berner R A. The global water cycle [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
- [28] 孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素 [J]. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 600-608.
- [29] 朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因 [J]. 科学通报, 2007, **52**(13): 1561-1566.
- [30] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. American Journal of Science, 1987, **287**: 401-428.
- [31] 陈静生, 陈梅. 海南岛河流主要离子化学特征和起源 [J]. 热带地理, 1992, **12**(3): 272-281.
- [32] 胡春华, 周文斌, 夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析 [J]. 环境化学, 2011, **30**(9): 1620-1626.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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@reces. 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@reces. 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