

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放 何吉成(1)

北京上甸子站气相色谱法大气 CH₄ 和 CO 在线观测方法研究 汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)

2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子 朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)

广东东江流域多氯萘的大气沉降研究 王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)

塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征 段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)

紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究 王灿,席劲瑛,胡洪管,姚远(32)

春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征 丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)

春季胶州湾海水汞的形态研究 许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)

丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)

塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化 陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)

某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)

北京市城市降雨径流水质评价研究 侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)

重庆市路面降雨径流特征及污染源解析 张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)

沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)

Pd/TiO₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究 张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)

pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响 冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)

给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究 陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)

安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价 宋大平,庄大方,陈巍(110)

染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析 曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)

间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究 谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)

pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)

硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)

农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用 徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)

高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究 廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)

活性污泥对四环素的吸附性能研究 陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)

加油站油类污染物自然衰减现场试验研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)

生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法 宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)

利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 王晓玲,尹军,高尚(175)

数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 董峰,张捍民,杨凤林(181)

不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响 刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)

间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究 曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)

鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究 陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)

北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估 陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)

外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究 杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)

赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建 朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究 别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)

纳米 TiO₂ 对短裸甲藻的毒性效应 李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)

苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)

电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析 王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)

洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险 刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)

湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)

广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律 项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)

缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究 吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)

可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复 付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)

胡敏酸对汞还原能力的测定和表征 江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)

Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响 黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)

油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究 张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)

利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)

黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究 封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)

鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析 张健,关连珠,颜丽(323)

杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响 赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)

《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)

丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素

蒲焘¹, 何元庆^{1,2}, 朱国锋², 张蔚², 曹伟宏², 常丽^{1,2}, 王春风¹

(1. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 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)

摘要: 2008年11月~2009年10月在丽江盆地-玉龙雪山地区采集白水河、三束河、哥吉河、束河河水及流域内地下水样品, 使用离子色谱法分析了样品主要阴阳离子含量, 研究了岩溶地区地表及地下水体的水化学特征、季节变化及其控制因素。结果表明, 研究区水体均呈现弱碱性, 主要离子组成以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主, 分别占阳离子和阴离子总量的 54.8% 和 92.4%; 不同季节河水的离子浓度差别较大, 季风期离子浓度仅为西风期离子浓度的 80% 左右, 表明季风期丰沛的大气降水输入对河水离子特征有较为显著的影响; 河水离子浓度普遍低于盆地地下水主要阴阳离子浓度; 河水和地下水的无机离子浓度都呈现出从高海拔到低海拔离子含量递增的规律。碳酸盐的风化溶解作用是水体离子的主要来源, 季风期降水对水体的离子特征也有一定的影响, 人类活动对人类聚居区部分天然水体已造成轻度污染。

关键词: 玉龙雪山; 丽江盆地; 水化学; 河水; 地下水

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0048-07

Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan

PU Tao¹, HE Yuan-qing^{1,2}, ZHU Guo-feng², ZHANG Wei², CAO Wei-hong², CHANG Li^{1,2}, WANG Chun-feng¹

(1. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The study focused on the chemical element compositions of river water and groundwater in Lijiang Basin. Water samples were collected in Baishui, Sanshu, Geji and Shuhe rivers in Lijiang Basin to analyze pH, conductivity and ion concentration, in order to understand the contributions of anthropogenic activities and rock weathering to river solutes. The results show that all water samples are mildly alkaline and are rich in Ca^{2+} and HCO_3^- , which account for 54.8 and 92.4 percentage of total ion concentration respectively. Obvious variations have been perceived during monsoon and westward wind season. The ion concentration of river water is lower than that of groundwater. With decreasing elevation, the ion concentrations are found to increase considerably in the study region. According to source study of major ions, water chemistry is mainly influenced by precipitation rock weathering and dissolving processes. In addition, precipitation is an important factor in monsoon seasons whereas the anthropogenic inputs have lead to light pollution on water in residential district.

Key words: Mt. Yulong; Lijiang Basin; geochemistry characteristics; river water; groundwater

河水的地球化学组成是区域和全球生态环境问题研究领域极具代表性的研究点^[1,2]。水体主离子组成是其所经地区岩石岩性、气候、生态环境等的指示器, 被广泛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。对河水离子化学特征及空间分布的研究可以用来确定河流溶质的地球化学来源与区域自然条件的关系^[3]。

我国学者对长江、黄河等较大流域的河水地球化学特征开展了较为深入的研究^[4~7], 对于喀斯特流域河水地球化学也有较系统的研究^[8~11], 但对一些较小流域岩溶盆地, 特别是冰川分布区河流的水

文地球化学的系统研究较少。就丽江盆地地球化学研究的重要性和意义而言, 其地处我国第一二阶梯交汇处, 区内分布有玉龙雪山-欧亚大陆距赤道最近的季风温冰川区, 是海-陆-气相互作用的典型海洋性冰川区岩溶盆地。区内河水离子不同程度的受到气候、冰雪融水和人类活动等环境因子的影响, 且受岩溶地质地貌和生态的约束而表征出一系列独特的

收稿日期: 2011-02-22; 修订日期: 2011-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971019); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(O828A11001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501); 冰冻圈科学国家重点实验室自主项目

作者简介: 蒲焘(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: tao_pu@yahoo.com.cn

特征,该地区的水化学组成及其控制机制对于人们理解流域的地质状况、岩石和土壤的自然化学风化特征、区域环境演化趋势以及人类对水质影响程度等方面具有极其重要的意义. 已有研究主要集中在玉龙雪山冰川区水体的离子、同位素特征及其影响因素、丽江盆地大气降水同位素研究等方面^[12~15], 水文地球化学和主要离子的资料积累较少.

本研究拟在对玉龙雪山-丽江盆地几条河流不同季节河水和地下水的主要阴阳离子测试的基础上,对该区天然水体主要地球化学离子进行系统分析,以期在冰雪-季风-岩溶交互作用条件下区域地球化学的研究积累数据和资料.

1 区域概况

丽江盆地总体呈 SN 走向展布,北高南低,内部平均海拔 2 300 ~ 2 700 m,总面积约 225 km²,以湖相和河湖相沉积物为主. 区内古生界地层发育不全,下部缺失较多. 上古生界二迭系玄武岩主要沿丽江盆地周边以及拉市盆地西侧分布; 中生界三迭系的灰岩、泥灰岩、页岩等在全区内广泛分布; 盆地东北侧、东侧主要以第三系的泥岩、灰岩以及砂岩、页岩和玄武岩等为主; 以砂砾石层灰岩、玄武岩及冰碛层等为主的第四系发育于丽江盆地,为研区内的主要出露地层^[16,17].

丽江盆地地处青藏高原东南缘和东西部气候环境的交界带,受季风和西风等多种环流系统影响. 区内干湿季分明,年均温为 10 ~ 12℃,年平均降水量约 900 mm^[18],属南亚季风气候. 非季风期(11 月 ~ 次年 4 月),南支西风急流把印度半岛北部大陆干

暖气带入境内,形成干旱少雨的气候环境. 季风期(5 ~ 10 月),湿热的西南季风途经孟加拉湾带来充沛的降水.

北部的玉龙雪山是盆地内水系的主要发源地. 部分东北缘河流(如白水河)向北汇入金沙江,发源于玉龙雪山的三束河、哥吉河等雪山东南缘的河流,以及地下水系,由北至南注入丽江盆地,最终汇入丽江盆地出水口漾弓江(图 1 和表 1). 所选小流域内泉眼大多为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类岩溶水. 此外,丽江地区独特的生态地质环境形成了旅游资源的基础,至 2008 年底,丽江市有固定人口 119.50 万人,年游客量达 625.49 万人. 活跃的人类活动如农业活动、旅游交通工具等对当地大气、水文等生态环境产生一定的影响^[19,20].



图 1 丽江盆地地表水与地下水采样示意

Fig. 1 Map of sampling sites in the Lijiang Basin

表 1 采样点描述

Table 1 Description of sampling sites

采样点	海拔/m	控制流域面积/km ²	流域内冰川/%	流域代表性泉眼	采样点描述
白水河	2 960	29.38	11.61	双胞胎泉	冰川流域,基本不受人类活动影响
三束河	2 720	28.69	2.09	三束河源头	流域内冰川面积相对较小
哥吉河	2 638	18.46	0	哥吉泉	受人类农业活动和旅游活动影响
束河	2 434	—	—	束河泉	居民区,受人类农业活动和旅游活动影响

2 分析方法

2008 年 11 月 ~ 2009 年 10 月笔者在丽江盆地玉龙雪山的东北缘、雪山东南缘以及盆地腹地采集了河水和地下水样品,采样点信息如表 1 所示. 河水采样点为玉龙雪山冰川与环境观测研究站水文断面,地下水采集于小流域内河水采样点附近的泉眼.

样品采集时,先用天然水冲洗预先去离子水清洗的聚乙烯塑料样品瓶 3 次后装样,密封放入 -15℃ 的冰箱低温冷藏,运回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈国家重点实验室后在 -15℃ 冷库中保存. 测试分析前 1 d,放于室内让其自然融化,用 PHS-3B 和 DDS-308A 电导率仪分别测试 pH 及电导率. 用 DX 320 型离子色谱仪分析了主要阳离子

(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+), ISC 1500 型离子色谱仪分析了主要阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^-). 精度达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 级, 分析结果的相对误差 $< \pm 5\%$. 水样的 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量, 采用离子平衡方法计算得出^[21,22].

3 分析结果

3.1 河水的化学成分

丽江盆地水体主要离子组成见表 2. 其中总溶解固体(TDS)含量利用各离子含量总和减去 1/2 的 HCO_3^- 含量计算^[23]. 在弱碱性条件下, CO_3^{2-} 含量较少, 不到二者总量的 5%, 因此在分析中忽略不计^[22]. 分析发现, 丽江盆地河水 pH 值平均值为 8.23, 变化范围 7.14~9.16, 电导率平均值为 $54.37 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 变化范围 $36.40\sim 81.10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (表 2). 在所分析的河水样中, 阳离子质量浓度由大到小依次为: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ , 平均质量浓度分别为 8.62 、 5.19 、 1.62 、 $0.27 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而阴离子的质量浓度由大到小依次为: HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- , 其平均质量浓度分别为 52.18 、 2.54 、 1.31 、 $0.39 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水体中检测到微量的 NH_4^+ 和 F^- , 但含量

均低于 $0.1 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水体主要离子组成中, 以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 占绝对优势, 分别占阳离子和阴离子总量的 54.8% 和 92.4%; 其次是 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} , 分别占阳离子和阴离子总量的 34.0% 和 4.5%.

从玉龙雪山周边高海拔区河流白水河、三束河、哥吉河到丽江盆地腹地束河, 河水离子浓度呈一定的空间变化规律: 随着海拔的降低, 从白水河、三束河-哥吉河-束河, 河水总离子浓度呈增多的趋势, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的优势性呈下降趋势, 碱金属离子尤其是 Na^+ 以及 Cl^- 、 NO_3^- 的含量则有所增多. 从河水的季节变化来看, pH 值没有大的规律性波动变化, 但河水阴阳离子含量西风期普遍高于季风期. 以溶液中所含离子综合性指标电导率为例, 西风期白水河、三束河、哥吉河和束河的电导率分别为 58.40 、 50.18 、 63.63 和 $73.28 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 季风期则下降为 48.93 、 43.23 、 63.62 和 $59.11 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 据统计, 西风期河水总离子浓度平均值为 $84.52 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 季风期为 $69.03 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 季风期离子浓度仅为西风期离子浓度的 80% 左右, 表明季风期丰沛的大气降水输入对河水离子特征有较为显著的影响.

表 2 不同季节丽江盆地河水-地下水主要阴阳离子含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Major ionic composition of river water and groundwater in Lijiang Basin/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

类型	采样点	采样时间	EC	pH	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
河水	白水河	西风期(12月)	58.40	8.85	0.06	0.42	1.93	62.02	0.10	0.06	8.01	7.84
		季风期(5~10月)	48.93	8.24	0.07	0.46	1.16	47.40	0.07	0.05	5.35	7.21
	三束河	西风期(1~4月)	50.18	8.32	0.07	0.30	0.77	53.91	0.34	0.09	2.77	13.17
		季风期(5~10月)	43.23	8.00	0.05	0.25	0.58	33.56	0.33	0.09	2.41	7.01
	哥吉河	西风期(1~2月)	63.63	8.36	0.56	0.30	5.80	66.57	3.61	0.45	5.25	12.54
		季风期(5~10月)	63.62	8.31	0.69	0.40	6.20	56.92	4.03	0.52	5.49	8.84
	束河	西风期(1~2月)	73.28	8.33	0.70	3.19	2.13	81.82	3.44	0.75	7.40	13.43
		季风期(5~10月)	59.11	8.11	1.06	5.25	2.93	58.64	2.89	0.54	6.75	8.71
地下水	黑龙潭	5~10月	71.89	8.50	0.57	0.66	1.24	80.45	2.90	0.50	9.05	9.56
	双胞胎泉	5~10月	74.05	8.63	0.77	0.20	0.22	69.95	0.83	0.14	10.08	5.94
	束河泉	5~10月	71.86	8.46	1.60	8.99	4.30	64.36	3.05	0.59	6.59	12.75
	哥吉泉	9月	—	—	0.81	0.43	7.63	62.37	3.99	0.52	4.65	12.74
	三束泉	9月	—	—	0.06	0.32	0.89	43.38	0.59	0.15	2.38	10.17

3.2 地下水的化学成分

丽江盆地腹地地下水的离子含量普遍高于盆地北缘玉龙雪山周边地下水, 其电导率变化范围为 $53.20\sim 98.00 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; pH 值平均值为 8.6, 介于 8.16~9.11 之间. 总体来看, 丽江盆地最大的泉眼群黑龙潭地下水离子质量浓度最高, 束河泉、哥吉河泉次之, 三束河源头泉水离子浓度最小. 除双胞胎泉水以 Mg^{2+} 含量最高外, 其它地下水阳离子质量浓度由大到小依次为: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ . 阴离子均以 HCO_3^- 为主, 其它阴离子含量则差别较大. 在所

分析的地下水样中, 三束河源头地下水离子含量最低, 平均值为 $57.95 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 占绝对优势, 其次为 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} ; 位于白水河流域的双胞胎泉水 Mg^{2+} 占阳离子总量的 59.44%, 阴离子以 HCO_3^- 和 Cl^- 为主; 哥吉河泉和束河泉离子组成较为相似, 相对其它样品束河泉 NO_3^- 较高, 且 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 显著高于其它样品; 黑龙潭地下水离子含量最高, 阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 分别占阳离子总量的 43.6%、41.0%, 阴离子以 HCO_3^- 为主, SO_4^{2-} 次之. 分析发现, 地下水离子浓度也表现出从高海拔

到低海拔增加的趋势,位于高海拔区玉龙雪山周边的地下水离子总质量浓度相对较低,低海拔区地下水离子含量浓度增大,在人类聚居比较密集的地区如束河泉、黑龙潭离子含量最高。

3.3 河水和地下水的相互作用

丽江盆地地下水主要阴阳离子浓度普遍高于河水,体现了与可溶解矿物接触时间越长的水,其 TDS 越高的规律^[24]。如图 2 所示,以典型冰川补给性河流白水河和流域内无冰川分布的哥吉河为例,白水河河水与流域内地下水的离子差别较大,哥吉河则差别相对较小。这也进一步说明玉龙雪山冰雪融水对河流水化学特征有较大的影响。白水河河水受大气降水、冰雪融水和地下水的多源补给,大气降水和冰雪融水离子总浓度远小于地下水,因此所补给的河水离子总浓度也较小。泉水是哥吉河的主要补给,二者的离子含量差别相比白水河较小。

4 水化学成分来源的讨论

4.1 河水离子来源的自然因素

地表水体的溶解质主要来源有大气输入(干湿沉降)、岩石和矿物的风化作用以及人为活动输入,包括工业和农业活动等输入^[25]。Gibbs^[26]和 Feth 等^[27]通过对世界地表水化学组成的分析,将控制地表水元素组成的因素划分为 3 个端元,即岩石风化主控端元、大气降水主控端元和蒸发/结晶主控端元,并利用 $TDS-Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 图和 $TDS-Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 图划分出 3 种主要控制因素下天然水体的特征区域。将本研究所述的丽江盆地地表水和地下水的水化学数据投绘于 Gibbs 图中(图 3),主要得出如下结论:① 所有水样处于大气降水和岩石风化作用的过渡带,化学组成靠近岩石控制端元,并远离和蒸发结晶作用带,表明研究区水体的水化学组成受岩石风化影响显著;② 地下水较河水具有稍高 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 、 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值及 TDS 含量,其化学组成亦主要受控于岩石风化端元;③ 非季风期河水更接近于岩石风化作用控制区,季风期河水则接近于大气降水作用控制区,表现出雨季大气降水对河水离子组成的重要影响,这也表明雨季雨量大,岩溶作用时间短导致季风期离子浓度低;④ 就各条河流而言,落在虚框边缘或外面的河流白水河和三束河 TDS 含量较低,这可能归因于二者均位于玉龙雪山的脚下,分别受雪山白水河流域冰川和漾弓江流域冰川的冰雪融水补给。综上所述,该流域离子自然起源的优势机制是岩石的风

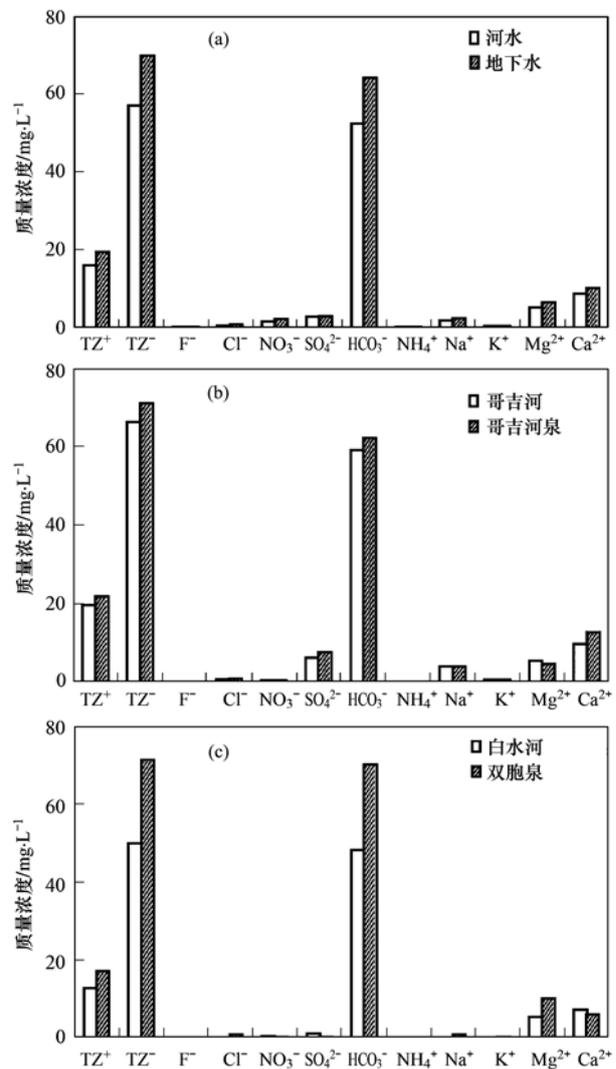


图 2 丽江盆地河水-地下水主要离子含量比较

Fig. 2 Comparison of major ionic composition of river water and groundwater in Lijiang Basin

化作用,大气降水的输入在雨季较为显著,而蒸发-结晶作用十分微弱。

为了进一步探讨岩性对水体的主离子组成特征和变化的影响,辨别水体的控制端元,选取三角图进行研究。一般地,在阴离子组成三角图中,流经碳酸盐岩地区的河流以 HCO_3^- 为主导,因此数据点均落在 HCO_3^- 组分一端;流经蒸发盐岩地区的河流 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 含量较高,其组分点落在 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 线上,远离 HCO_3^- 一端。在阳离子组成的三角图上,主要受碳酸盐岩影响的河流,其组分点会落在 $Ca^{2+} - Mg^{2+}$ 线上,靠近 Ca^{2+} 端元;蒸发盐矿物风化产物则应偏向 $Na^+ + K^+$ 端元^[28]。

图 4 指示了丽江盆地不同季节河水、地下水的

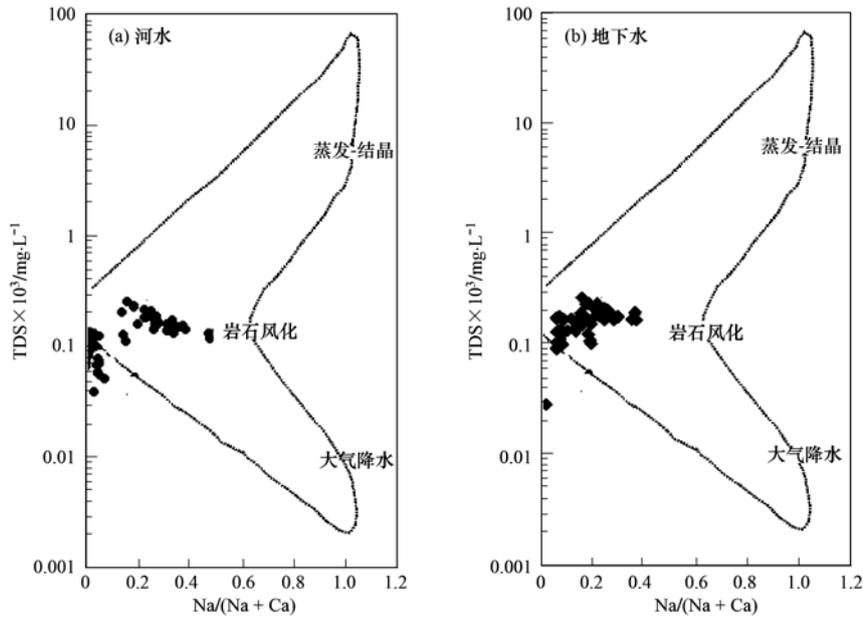


图3 丽江盆地天然水体水化学的吉布斯分布模式

Fig. 3 Plots of the major ions within the Gibbs boomerang envelope for waters in Lijiang Basin

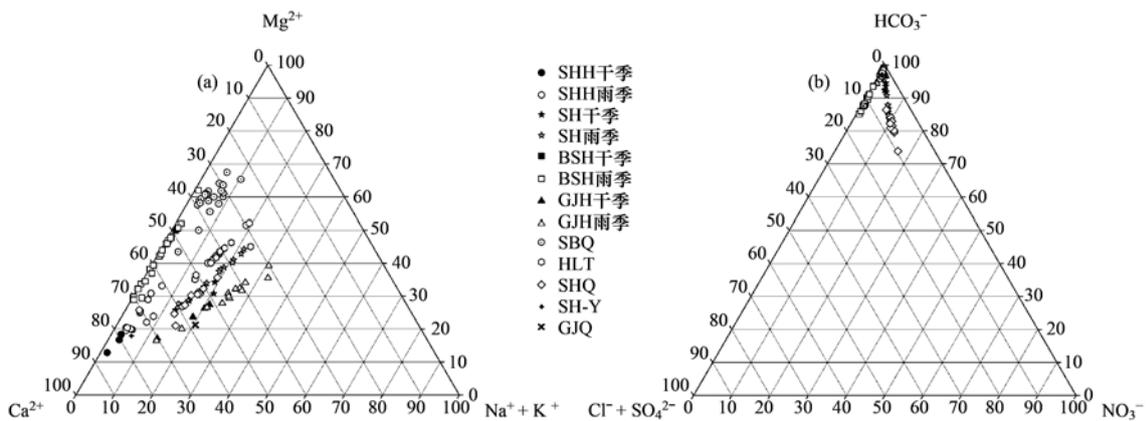


图4 丽江盆地不同水体的主要离子组成三角图

Fig. 4 Ternary plots of major ions for waters in Lijiang Basin

主要阴阳离子组成. 阴离子中大部分点落在 HCO_3^- 组分一端, 并沿着 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 一边成串密集排列, 表征了碳酸盐岩地区的河流的低 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 、高 HCO_3^- 的特征; 阳离子组成明显富集 Ca^{2+} , 其次为 Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量最低. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之和平均占阳离子总量的 90% 左右, 表明当地碳酸盐溶解风化为其提供来源.

分析发现, 不同水体、季节, 阴离子含量较为稳定, 而阳离子组分则相对波动较大. 地下水的阳离子大部分点落在 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 线上, 且靠近 Ca^{2+} 端, 黑龙潭、双胞胎则更靠近 Mg^{2+} 端, 表现出碳酸盐的风化作用对丽江盆地地下水离子组分控制的特征; 西风

期与季风期河水水化学特征表现出显著的差异. 西风期河水的阳离子分布在 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 线上靠近 Ca^{2+} 端元, 阴离子中大部分点落在 HCO_3^- 组分一端. 与西风期相比, 季风期河水的阳离子向 Mg^{2+} 端元靠拢, 三束河和白水河阴离子向 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 靠拢, 人类活动相对活跃的哥吉河和束河则向 NO_3^- 靠近.

4.2 人类活动因素的影响

人为活动产物可以通过 2 种途径输入水体: 废物直接排放和大气输入. 其中, 以农业活动和工业活动的影响最为显著. 河水中的 NO_3^- 主要源于农业活动施用的氮肥, 而 SO_4^{2-} 主要源于工业活动和大气沉降等, 因此河水中的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度的变化主

要反映了农业活动和工业活动的影响^[29,30]。用钠离子浓度归一化了的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 呈现出正相关关系, 表明研究区 2 种离子的共源性^[31]。河水 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 的比值大多小于 1, 其中位于人类聚居区的束河、束河泉 2 个点 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 稍高, 由此可以看出河水受农业和工业污染状况较轻。分析发现, 河水样中, 位于玉龙雪山脚下的河水、地下水(白水河、三束河和哥吉河) NO_3^- 平均含量均维持在 $0.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 而位于人类聚居区的束河 NO_3^- 平均含量为 $4.8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 束河泉含量则高达 $8.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于亚洲河水平均值 ($0.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和世界河水平均值 ($1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)^[32], 同样表明丽江盆地人类聚居区部分河水、泉水 NO_3^- 含量受到了一定程度人为活动(施肥等)的影响。此外, 研究区河水和地下水化学分析均检测到微量的 NH_4^+ 成分, 表明天然水中生物或人类活动对水化学成分有一定的影响。

5 结论

(1) 丽江盆地河水和地下水均呈现弱碱性, 阳离子质量浓度由大到小依次为: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ , 阴离子的质量浓度由大到小依次为: HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- , Ca^{2+} 和 HCO_3^- 占绝对优势。

(2) 不同季节河水的离子浓度差别较大, 季风期离子浓度仅为西风期离子浓度的 80% 左右, 且河水离子浓度普遍低于盆地地下水主要阴阳离子浓度; 河水和地下水的无机离子浓度都呈现出从高海拔到低海拔离子含量递增的规律。

(3) 碳酸盐的风化溶解作用是水体离子的主要来源。地下水和非季风期河水主要受岩石风化的影响, 季风期大气降水对河水离子组成具有重要影响, 人类活动对人类聚居区部分天然水体已造成轻度污染。

参考文献:

- [1] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon: 2. Influence of geology and weathering environment on the dissolved load [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**(C14): 9671-9688.
- [2] Gaillardet J, Dupre B, Allegre C J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(23-24): 4037-4051.
- [3] 陈静生, 夏星辉. 我国河流水化学研究进展 [J]. *地理科学*, 1999, **19**(4): 290-294.
- [4] Chetelat B, Liu C, Zhao Z, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [5] Wu L L, Huh Y S, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(22): 5279-5294.
- [6] 陈静生, 夏星辉, 蔡绪贻. 川贵地区长江干支流水主要离子含量变化趋势及分析 [J]. *中国环境科学*, 1998, **18**(2): 131-135.
- [7] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. *Nature*, 1982, **298**(5874): 550-553.
- [8] Liu F, Liu C Q, Zhao Y, *et al.* Changes of hydrochemical composition and heavy metals concentration in shallow groundwater from karst hilly areas in Guiyang region, China [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, **17**(6): 1216-1222.
- [9] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 等. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势 [J]. *地学前缘*, 2009, **16**(6): 1-12.
- [10] 李干蓉, 刘丛强, 陈椽, 等. 丰水期乌江上游干流水库——河流体系硫同位素组成 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 350-355.
- [11] 郎赞超, 刘丛强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征 [J]. *水科学进展*, 2005, **16**(6): 826-832.
- [12] He Y Q, Theakstone W H, Yao T D, *et al.* The irregular pattern of isotopic and ionic signals in the typical monsoon temperate-glacier area, Yulong Mountain, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, **35**(1): 167-174.
- [13] Li Z X, He Y Q, Pang H X, *et al.* The chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui No. 1 Glacier, Mt Yulong, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, **55**(190): 221-228.
- [14] Pang H X, He Y Q, Lu A G, *et al.* Synoptic-scale variation of $\delta^{18}\text{O}$ in summer monsoon rainfall at Lijiang, China [J]. *China Science Bulletin*, 2006, **51**(23): 2897-2904.
- [15] 朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 玉龙雪山地区不同海拔高度降水中常量无机离子特征分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 963-970.
- [16] 范弢, 杨世瑜. 云南丽江盆地地下水脆弱性评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(3): 551-556.
- [17] 范弢. 云南丽江生态地质环境演化过程与趋势研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [18] He Y Q, Pu T, Li Z X, *et al.* Climate change and its effect on annual runoff in Lijiang basin-Mt. Yulong region, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2010, **21**(2): 137-147.
- [19] He Y Q, Zhang Z L, Theakstone W H, *et al.* Recent variability of the climate and glaciers in China's monsoon region [J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 2003, (280): 104-114.
- [20] 宁宝英, 何元庆. 丽江古城的旅游发展与水污染研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, **17**(5): 123-127.

- [21] Mitamura O, Seike Y, Kondo K, *et al.* First investigation of ultraoligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre-Himalayas, China [J]. *Limnology*, 2003, **4**(3): 167-175.
- [22] 陈静生, 陶澍, 邓宝山, 等. 水环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 48-60.
- [23] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 7-89.
- [24] 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.
- [25] 武小波, 李全莲, 贺建桥, 等. 黑河上游夏半年河水化学组成及年内过程 [J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(6): 1190-1195.
- [26] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [27] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. *Science*, 1971, **172**(3985): 871-872.
- [28] 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.
- [29] 李思悦, 谭香, 徐志方, 等. 湖北丹江口水库主要离子化学季节变化及离子来源分析 [J]. *环境科学*, 2008, **19**(12): 3353-3359.
- [30] 韩贵琳. 喀斯特环境质量变化的自然与人文过程特征—贵州喀斯特河流的地球化学研究 [D]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所, 2002.
- [31] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源 [J]. *地理学报*, 2007, **62**(7): 764-775.
- [32] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. 439-441.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊