

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析

李鹤^{1,2}, 李军^{1*}, 刘小龙¹, 杨曦¹, 张伟³, 王洁^{1,2}, 牛颖权^{1,2}

(1. 天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 2. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387; 3. 贵州师范学院地理与旅游学院, 贵阳 550018)

摘要: 对青藏高原咸水湖蓬错、昂仁金错、打加错, 淡水湖打加芒错、达格架温泉及各湖入湖支流阴、阳离子组成进行了分析。咸水湖阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Na^+ 为主, 属 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水; 各湖支流及淡水湖阴离子以 HCO_3^- 或 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 为主, 属 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型水; 达格架温泉阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Na^+ 为主, 属 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水。咸水湖主要受蒸发-结晶作用控制, 各湖支流及淡水湖主要受碳酸盐岩风化控制, 达格架温泉主要受热水-花岗岩作用控制。碳酸盐矿物沉淀时 Ca^{2+} 优先 Mg^{2+} 被移除, 导致咸水湖具有较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值。在阳离子组成端元贡献中, 碳酸盐岩贡献最大(54%~79%), 硅酸盐岩(13%~29%) 和蒸发盐岩(4%~23%) 次之, 大气输入(3%~7%) 最小。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 支流; 离子; 来源

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0430-08 DOI: 10.13227/j.hjxk.2015.02.009

Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China

LI He^{1,2}, LI Jun^{1*}, LIU Xiao-long¹, YANG Xi¹, ZHANG Wei³, WANG Jie^{1,2}, NIU Ying-quan^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Urban and Environmental Science College, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China)

Abstract: To investigate the ionic compositions of small lake-watersheds on the Tibetan Plateau, water samples from the brackish lakes (Pung Co (lake), Angrenjin Co and Dajia Co), the freshwater lake (Daggyaima Co), their inflowing rivers and the hot spring (Dagejia Geothermal Field), were collected during July-August 2013. The results showed that the major anions and cations of the brackish lakes were HCO_3^- , SO_4^{2-} and Na^+ , respectively, and the hydrochemical types were $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na}$. The major anions and cations of the inflowing rivers and the freshwater lake were HCO_3^- , SO_4^{2-} and Ca^{2+} , Mg^{2+} , respectively, and the hydrochemical types were $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$. The major anions and cations of the hot spring were HCO_3^- and Na^+ , respectively, and the hydrochemical type was $\text{HCO}_3\text{-Na}$. Water chemistry in the brackish lakes was primarily dominated by evaporation-crystallization processes, while the inflowing rivers and the freshwater lake were mainly influenced by carbonate weathering, and the hot spring was mainly controlled by hot water-granite interaction. Ca^{2+} was preferentially removed over Mg^{2+} from the water when carbonate minerals precipitation occurred, which resulted in the high $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ molar ratios of the brackish lakes. In the contribution of cation compositions, the largest contribution was carbonate weathering (54%-79%), followed by silicate weathering (13%-29%) and evaporite dissolution (4%-23%), and the smallest was atmospheric input (3%-7%).

Key words: Tibetan Plateau; lakes; inflowing rivers; ions; sources

青藏高原被称作世界“第三极”, 对全球气候变化非常敏感, 有全球气候变化的“驱动器”和“放大器”之称^[1]。湖泊是青藏高原的主要组成部分之一, 面积约占全国湖泊总面积的 50%^[2]。湖泊及其支流水化学不仅是流域水-岩作用的反映, 同时也是流域环境变迁研究的重要理论依据^[3]。近年来, 对青藏高原湖泊、河流水化学的研究日益受到重视, 如对青海湖^[4]、纳木错^[5~9]、普莫雍错^[10]、色林错^[11]、当惹雍错^[12]、扎日南木错^[12]、打加芒错^[13]等的研究, 并初步探讨了湖泊及其支流水体的化学

组成、离子来源及其控制机制。然而, 这些研究主要集中在大型湖泊方面, 对小流域湖泊研究较少, 且多数湖泊的水化学资料都是些零星的初步调查结果^[8]。对青藏高原小流域湖泊的研究不仅有望充实青藏高原湖泊的水化学资料, 而且有助于更全面了

收稿日期: 2014-08-31; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956401); 国家自然科学基金项目(41172315, 41302285, 41403082)

作者简介: 李鹤(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境科学, E-mail: lihexiaozhi@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lijun5931@163.com

解青藏高原湖泊的演化过程。青藏高原中部分布着众多内陆湖泊,湖水补给主要来源于夏季降水及冰川融水形成的季节性溪流^[2]。本研究重点讨论青藏高原中部内陆湖泊蓬错、昂仁金错、打加错、打加芒错及各湖入湖支流的离子组成特征、水化学控制机制及离子来源贡献等,以期为青藏高原小流域湖泊的研究提供必要的基础资料。

1 研究区概况

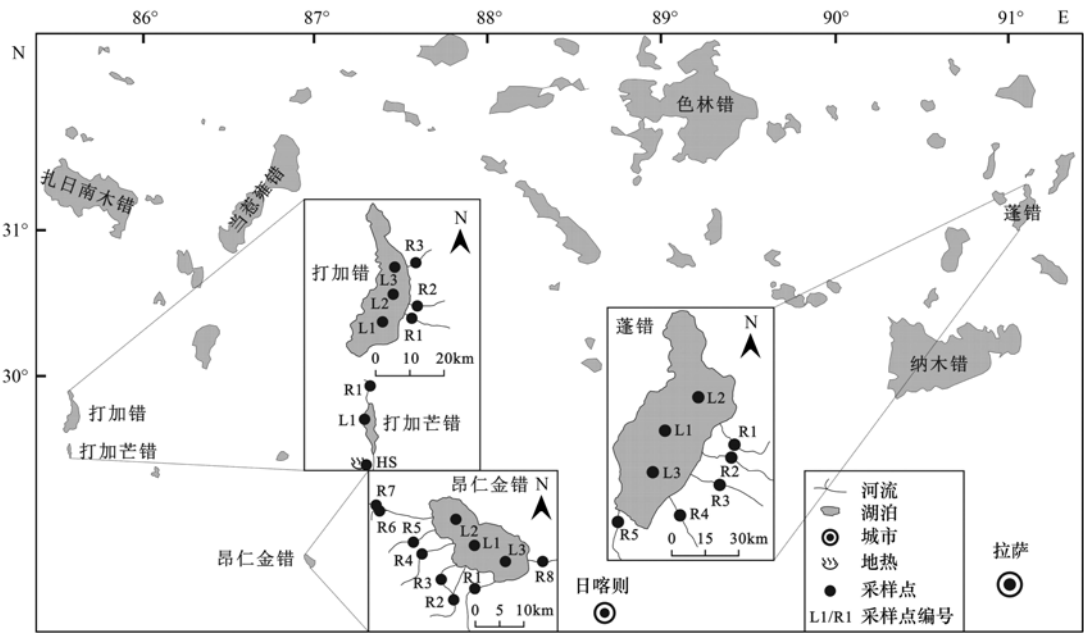
青藏高原(25°~40°N,74°~104°E)是地球上海拔最高、面积最大、年代最新、并仍在隆升的一个高原。它呈纺锤状夹持于塔里木地台、中朝地台、扬子地台和印度地台之间,长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等都发源于这里。在漫长的地质发育与自然演替过程中,青藏高原不仅形成了独特的高寒草原与草甸生态系统,还兼有沙漠、湿地及多种森林类型自然生态系统。青藏高原空气干燥、稀薄,太阳辐射强,气温低,降雨少。

蓬错(31°24′~31°38′N, 90°54′~91°02′E)位于西藏那曲地区,地处念青唐古拉山北麓,海拔4 522 m,湖泊面积135.7 km²,流域面积1 020.3 km²,流域岩性以超镁铁岩、石灰岩、砂岩、页岩和碎屑岩为主。昂仁金错(29°18′N, 87°11′E)位于西藏日喀则地区,地处昂仁县西北部,海拔4 340 m,湖泊面积24.3 km²,流域面积194 km²,流

域岩性以超镁铁岩、硅质岩、粉砂岩和碎屑岩为主。打加错(29°44′~29°58′N,84°40′~85°46′E)和打加芒错(29°38′N,85°44′E)挨在一起,均位于西藏日喀则地区,地处昂仁县西部、冈底斯山脉地区。打加错海拔5 170 m,湖泊面积114.4 km²,流域面积630.5 km²,流域岩性以硅质岩、碎屑岩、粉砂岩、页岩和石灰岩为主。打加芒错海拔5 080 m,湖泊面积约8 km²,流域面积321.09 km²,流域岩性以石灰岩、砾岩、粉砂岩、碎屑岩和页岩为主,属达格架热泉沉积叠加于古冰川与冰水沉积物之上而形成的热泉-冰川堰塞湖^[14]。蓬错、昂仁金错及打加错均为封闭湖泊,属咸水湖。打加芒错属淡水湖,为开放湖泊,其南侧出湖支流与达格架间歇喷泉群相连接。达格架温泉(29°39′N,85°43′E)是中国海拔最高的高温间歇泉,海拔5 086 m。

2 材料与方法

2013年7~8月,在青藏高原蓬错、昂仁金错、打加错、打加芒错及其入湖支流共设置27个采样点,总计36个样品。此外,还采集达格架温泉样品1个,具体采集点分布情况见图1。蓬错3个采样点共采集6个样品,其中1号点分层取样,共采集4个样品,分别为表层(距水面约0.5 m处)、3 m、6 m、10 m,2号和3号点只取表层水;昂仁金错3个采样点共采集9个样品,其中1号点分层取样,共采集7个



其中L、R、HS 分别代表湖泊、支流和温泉

图1 采样点示意

Fig. 1 Map showing the lake distributions and the sampling sites

样品,分别为表层、3 m、5 m、7 m、7.5 m、10 m、12 m,2 号和 3 号点只取表层水;打加错 3 个水样,打加芒错 1 个水样,均为表层水. 蓬错 5 个入湖支流样品,昂仁金错 8 个,打加错 3 个,打加芒错 1 个,均为表层水(距水面约 0.1 m 处).

pH、电导率(EC)、水温(T)现场用便携式水质分析仪(Orion Star A329,美国 Thermo 公司)测定. 所采水样 12 h 内经 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤分装,一部分用 0.024 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 滴定总碱度(Alk),一部分分装入离心管中,用来测定阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)和阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}). 在测定阳离子的离心管中加入 10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 0.05 mL 使 $\text{pH} < 2$,而用来测定阴离子的水样直接避光密封保存. 阴离子用离子色谱仪(Dionex ICS-2000,美国 Thermo 公司)测定,测量精度 5%. 阳离子和溶解二氧化硅(SiO_2)用电感耦合等离子体光谱仪(Vista MPS)测定,测量精度 5%. 据 Alk、pH、 T 及其他阴、阳离子浓度,利用 PHREEQC 程序^[15]计算出 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 浓度. 总溶解性固体

(TDS)浓度通过下式^[16]求得:

$$\text{TDS} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + 0.5 \times \text{Alk} + \text{NO}_3^- + 1.02 \times \text{SiO}_2 \quad (1)$$

3 结果与讨论

3.1 物理化学特征

湖泊及其支流主要水质参数和离子质量浓度见表 1. 蓬错、昂仁金错及打加错 pH 值的范围为 9.4 ~ 9.8,与纳木错(8.04 ~ 9.85)^[6]和色林错(9.19 ~ 9.66)^[11]较为接近;湖泊支流及打加芒错 pH 值的变化范围为 8.3 ~ 9.3,平均为 8.8,达格架温泉的 pH 值为 8.6,其 pH 值接近弱碱水体而略高于自然水体(6 ~ 8).

蓬错、昂仁金错及打加错的 EC 较高,变化范围为 3 910 ~ 11 583 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,高于自然水体(50 ~ 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),其中蓬错 > 昂仁金错 > 打加错;湖泊支流及打加芒错的 EC 较低,变化范围为 42 ~ 465 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均为 229 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;达格架温泉的 EC 为 1 479 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

表 1 湖泊及其支流主要水质参数和离子质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	项目	pH	EC /μS·cm ⁻¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Alk	NO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS		
湖泊	昂仁金错	最小值	9.4	6 865	2 409.20	5.01	1.40	11.10	214.55	799.09	5 307.00	0.10	9.20	6 327.88	
		平均值	9.4	7 283	2 556.41	5.94	1.87	12.27	273.08	1 010.46	5 466.25	0.64	9.55	6 603.52	
		最大值	9.4	7 469	2 754.16	10.03	3.37	14.39	397.04	1 216.06	5 614.44	1.19	10.12	7 066.67	
	蓬错	最小值	9.5	11 355	3 545.43	419.05	1.61	93.64	552.80	2 721.63	5 819.40	0.21	4.64	10 249.72	
		平均值	9.5	11 524	4 038.70	469.14	1.85	105.75	682.51	3 362.39	6 216.39	1.04	4.86	11 774.54	
		最大值	9.5	11 583	4 249.05	515.78	1.94	113.61	759.25	3 711.39	6 383.04	1.75	5.21	12 386.05	
	打加错	最小值	9.8	3 910	947.46	68.99	8.12	53.17	231.02	883.79	845.46	0.11	0.25	2 912.78	
		平均值	9.8	4 450	1 072.96	81.32	12.60	56.85	304.15	1 202.40	1 280.27	0.38	3.36	3 374.23	
		最大值	9.8	5 250	1 241.31	100.52	20.32	60.48	434.35	1 776.41	1 575.26	0.61	8.84	4 061.99	
	打加芒错	9.0	167	4.25	0.52	31.18	3.06	1.18	36.27	64.42	0.98	6.45	116.24		
	湖泊支流	昂仁金错	最小值	8.4	102	1.90	0.28	19.71	2.14	0.26	2.61	65.88	1.38	7.72	75.84
			平均值	8.6	156	3.23	0.59	31.08	4.74	0.78	10.01	108.52	2.75	9.85	117.48
最大值			8.8	260	5.59	0.96	49.31	7.62	1.74	21.91	155.18	3.76	12.62	166.10	
蓬错		最小值	9.0	281	8.61	1.42	29.87	14.17	1.91	15.78	178.61	0.64	5.03	191.12	
		平均值	9.1	370	16.59	3.21	42.94	33.53	3.82	21.49	304.51	1.61	11.81	287.50	
		最大值	9.3	465	21.06	6.67	53.66	49.39	5.25	27.62	395.28	3.07	15.77	343.84	
打加错		最小值	8.3	42	0.81	0.32	6.93	1.14	0.33	2.09	25.62	0.27	5.01	45.96	
		平均值	8.6	129	2.07	0.88	19.90	3.66	0.61	29.58	40.26	0.39	15.69	93.22	
		最大值	8.9	321	3.64	1.88	32.67	5.24	1.14	68.42	54.90	0.64	21.34	155.16	
打加芒错		8.5	241	0.82	0.56	42.63	5.99	0.81	81.87	61.49	1.43	2.49	167.39		
达格架温泉		8.6	1 479	327.05	39.26	2.23	0.29	111.72	65.28	648.55	0.87	303.47	1 180.52		

蓬错、昂仁金错及打加错 TDS 的变化趋势与 EC 一致,变化范围为 2 912.78 ~ 12 386.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,介于微咸水(1 ~ 3 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、咸水(3 ~ 10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)至

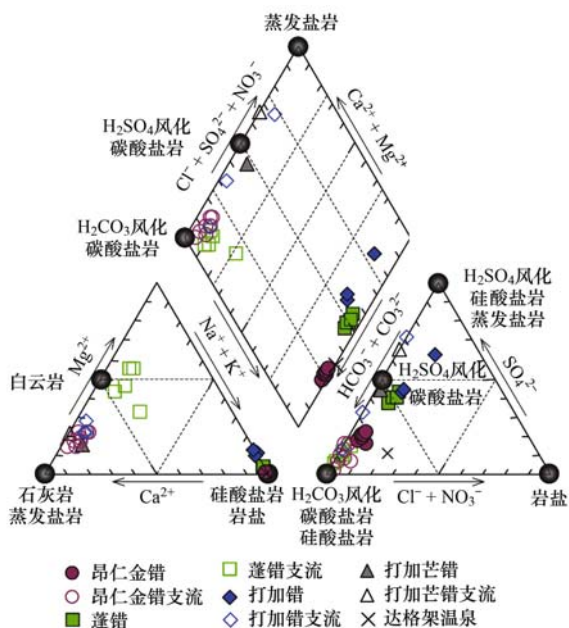
盐水(10 ~ 50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)之间. 其中,蓬错、昂仁金错及打加错分别属盐水、咸水及微咸水. 湖泊支流及打加芒错 TDS 的变化范围为 45.96 ~ 343.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

平均为 $163.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均属淡水 ($< 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). 达格架温泉的 TDS 为 $1180.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属微咸水.

蓬错、昂仁金错、打加错阳离子总当量浓度 ($\text{TZ}^+ = \text{K}^+ + \text{Na}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Mg}^{2+}$) 的变化范围为 $48.47 \sim 206.01 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$, 湖泊支流及打加芒错为 $0.49 \sim 7.43 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$, 达格架温泉为 $15.36 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$. 除打加错支流 3 ($0.49 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$) 以外, 其他样品的 TZ^+ 均高于世界河流平均值 ($0.725 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$)^[17]. 阴、阳离子电荷平衡之差 [$\text{NICB} = (\text{TZ}^+ - \text{TZ}^-) / \text{TZ}^+$, $\text{TZ}^- = \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$] 的均值为 7.6%, 说明测试分析的误差很小.

3.2 主要离子组成

以离子当量百分比计, 在 Piper 图 (图 2) 中, 蓬错、打加错阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 昂仁金错以 HCO_3^- 为主, 阳离子均以 Na^+ 为主, 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型. 打加芒错阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型. 达格架温泉阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Na^+ 为主, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型.



图中不同岩石端元引自文献[18, 19]

图2 湖泊及其支流主要离子 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram for major ion compositions of the lake water and the river water

蓬错支流阴离子均以 HCO_3^- 为主, 阳离子支流 1、2、4 以 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为主, 支流 3、5 以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ 和

$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ 型. 昂仁金错支流阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型. 打加错支流 1 阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 支流 2 以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主, 支流 3 以 HCO_3^- 为主, 阳离子均以 Ca^{2+} 为主, 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 及 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型. 打加芒错支流阴离子以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型.

3.3 主要控制机制

水-岩作用可增加水体的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值, 而随后蒸发作用导致的碳酸盐矿物沉淀却可降低 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值, 因此 Gibbs 图可直观比较水体的化学组成、形成原因 (即大气降水、岩石风化、蒸发-结晶) 以及彼此之间的关联^[20]. 在 Gibbs 图 [图 3(a)] 上, 咸水湖 TDS 浓度较高, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.99 ~ 1 之间, 落在 TDS- $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 图的右上角, 主要受蒸发-结晶作用控制; 淡水湖及湖泊支流 TDS 浓度中等, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 0.1 ~ 0.5 之间, 落在 TDS- $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 图的中部, 主要受岩石风化作用控制, 受大气输入影响较小. 然而, Gibbs 模式并不能有效反映干旱条件下水体 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值的形成原因, 这是因为土壤的 Na 盐淋溶也可降低水体的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值^[21]. 在干旱条件下, 土壤盐以 Na 盐为主, 土壤 Na 盐的淋溶会降低水体的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值, 甚至掩盖蒸发作用导致的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值降低^[22]. 另外, 水体中的 Mg^{2+} 主要是由岩石风化而来, 这是因为 Mg^{2+} 在土壤盐中的浓度很低, 且在蒸发早期并不发生沉淀^[23]. 因此, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值可以反映土壤盐的淋溶, 而 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值可以反映蒸发作用. 在 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值图 [图 3(b)] 上, 咸水湖具有较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值和较低的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值, 主要位于蒸发作用控制区 (I); 而淡水湖和湖泊支流与之相反, 具有较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值和较低的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值, 主要位于岩石作用控制区 (II).

咸水湖主要受蒸发-结晶作用控制, 而淡水湖及湖泊支流主要受岩石风化控制, 导致它们水化学组成差异较大. 另外, 从 Piper 图 (图 2) 上的岩石端元组成^[18, 19] 可以看出, 淡水湖及湖泊支流主要受碳酸盐岩风化控制, 并受硅酸盐岩风化和蒸发盐岩溶解影响^[6-8]. 青藏高原气候干燥、降水少, 封闭湖泊湖水受持续蒸发影响, 一方面导致 TDS 浓度升高、水体咸化, 另一方面导致碳酸盐岩矿物饱和和沉淀. 在

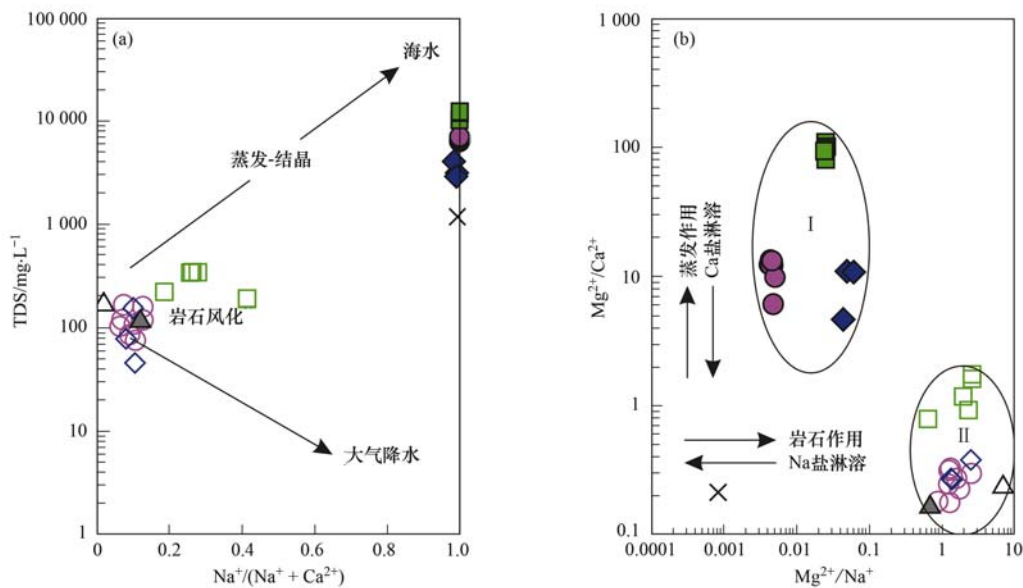


图3 湖泊及其支流 Gibbs 图和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值 (图例同图2)

Fig. 3 Gibbs plot of TDS values versus $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$ weight ratios and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ versus $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ molar ratios of the lake water and the river water

蒸发浓缩条件下,碳酸盐矿物首先达饱和状态,继而发生沉淀,导致 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 浓度降低,而易溶盐离子 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 持续浓缩、比例升高,这与前人在青藏高原不同湖泊的研究结果一致^[5, 6, 8~10]. 打加芒错虽属热泉-冰川堰塞湖,可其水化学组成与达格架温泉差异较大,说明其水体补给主要来自支流及冰川融水,而这也与达格架温泉群主要处于其出湖支流下游一致. 达格架温泉主要受强烈高温热水-花岗岩作用影响^[24],与打加芒错及其支流的差异较大,表明不同的水-岩作用对水化学组成的影响不同.

饱和度指数 (SI) 是指示矿物在水体中发生溶解或沉淀的水文地球化学参数,反映了水体化学成分的变化趋势及其内在的水化学条件^[25]. 从上面分析可知,蒸发-结晶作用对研究区水化学特征的形成具

有重要的控制作用. 为了阐明在蒸发-结晶作用下,碳酸盐矿物沉淀对水体离子组成的影响,应用 PHREEQC 程序^[15] 对水体碳酸盐矿物方解石 (SIc) 和白云石 (SID) 的饱和度指数进行了计算. 计算结果表明:方解石和白云石在湖水和主要支流河水中都处于过饱和状态,且除打加芒错以外,其他湖泊的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值均高于其支流. 同时,湖泊支流的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值与 SIc 和 SID 均呈显著正相关关系 (图4),说明在碳酸盐矿物沉淀过程中 Ca^{2+} 优先 Mg^{2+} 被从水体移除,即 CaCO_3 可能是水体碳酸盐矿物沉淀的首要形式.

3.4 离子主要来源

河水中的溶解盐主要来源于流域内的多种物理、化学和生物过程^[26]: ①大气对海洋盐的输送

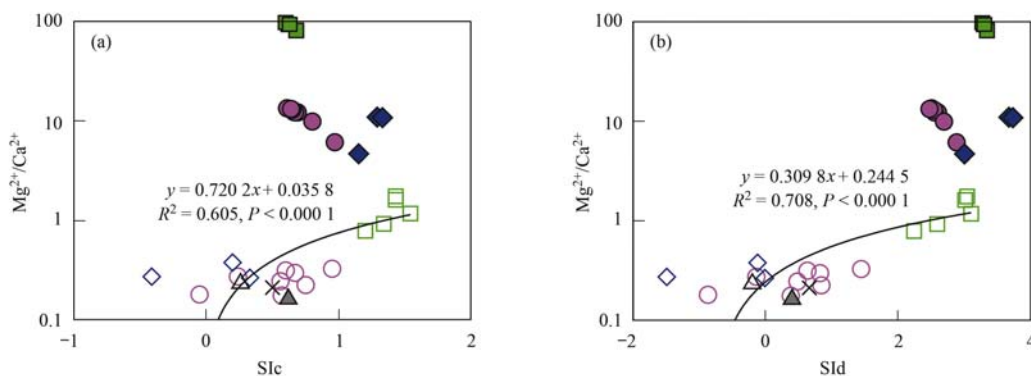


图4 湖泊及其支流方解石 (SIc)、白云石 (SID) 饱和度指数与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值 (图例同图2)

Fig. 4 Plots of the relationships between calcite (SIc) and dolomite (SID) saturation indices and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ molar ratios

(循环盐); ②碳酸盐、硅酸盐和蒸发岩的风化与溶解; ③人类活动的影响. 众多学者从全球和流域规模对循环盐进行了研究^[26, 27], 一般认为循环盐对河流溶解性负荷的贡献随着与海洋距离的增大而减小. 研究区距海洋较远, 湖水和河水的 Cl^-/Na^+ 比值平均分别为 0.16 和 0.30, 远远低于海水的典型元素比值(1.15)^[26], 表明海盐对研究区水体离子组成的贡献较小. 另外, 研究区人烟稀少, 几乎没有工业活动, 因此人类活动的影响也可忽略.

HCO_3^- 和 Ca^{2+} 是天然河水的主要阴、阳离子, 碳酸盐风化是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的主要来源, 碳酸盐风化产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的当量浓度之和应与 HCO_3^- 大体一致, 即 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ 和 $[\text{HCO}_3^-]$ 的当量比值为 1. 研究区湖泊支流水样大都位于 $[\text{Ca}^{2+}$

$+\text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ 比值为 1:1 的线上(图 5), 说明碳酸盐风化可能是水体 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的主要来源. 另外, 打加错支流、打加芒错及其支流的 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ 比值都大于 1, 说明水中多余的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 需要 SO_4^{2-} 离子加以平衡(图 5), 而 SO_4^{2-} 主要来源于蒸发盐岩溶解或硫化物氧化. 循环盐对研究区 Cl^- 影响较小, 而 Cl^- 主要来源于蒸发盐岩溶解, 在 0.01 的置信水平下, 湖水 Cl^- 与 SO_4^{2-} 显著相关(相关系数为 0.98), 河水 Cl^- 与 SO_4^{2-} 相关性不显著(相关系数为 0.26), 因此 SO_4^{2-} 可能受蒸发盐岩溶解和硫化物氧化的共同影响. NO_3^- 在研究水体中的浓度很低, 其来源可能有蒸发盐岩溶解, 人为污染如农业施用氮肥及牛粪等燃料的燃烧等^[28].

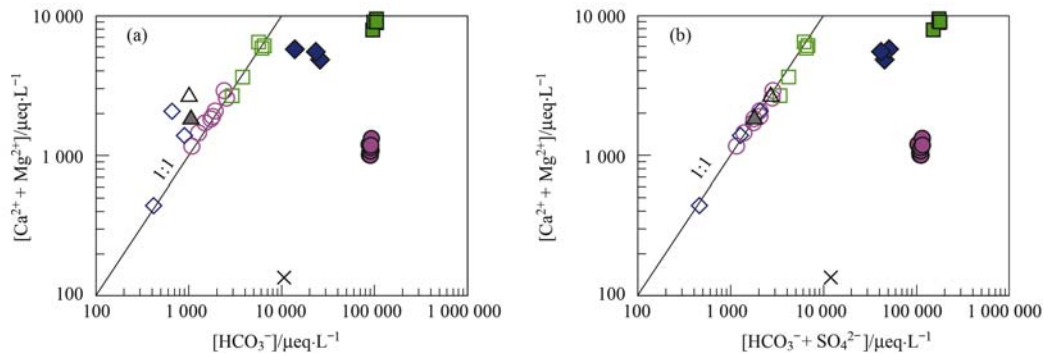


图 5 湖泊及其支流 $[\text{HCO}_3^-]$ 与 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ 及 $[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$ 与 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ 关系(图例同图 2)

Fig. 5 Plots of the relationships between $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ and $[\text{HCO}_3^-]$ and $[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$ of the lake water and the river water

3.5 主要端元贡献

忽略人为输入的影响, 研究区河水溶质元素主要来源于大气输入和岩石(碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩)风化. 河水任一溶质元素 X 的质量平衡方程^[29] 均可表示为:

$$[X]_{\text{riv}} = [X]_{\text{atm}} + [X]_{\text{carb}} + [X]_{\text{sil}} + [X]_{\text{eva}} \quad (2)$$

式中, riv 表示河水, atm 表示大气输入, carb 表示碳酸盐, sil 表示硅酸盐, eva 表示蒸发盐岩.

另外, 大气输入的离子浓度可以通过下式计算:

$$X_{\text{atm}} = (X/\text{Cl})_{\text{atm}} \times \text{Cl}_{\text{ref}} \quad (3)$$

式中, X_{atm} 表示大气输入校正过的离子浓度, $(X/\text{Cl})_{\text{atm}}$ 表示大气沉降的离子与 Cl^- 比值, Cl_{ref} 表示大气沉降的 Cl^- 浓度, 而河水的最小 Cl^- 浓度可以看作完全是由大气沉降得来的.

为了区分不同岩石端元的贡献, 假设: ① Cl^- 只来源于大气输入和盐岩溶解, NaCl 是盐岩的唯一形式; ② Na^+ 主要来源于大气输入、盐岩溶解和硅酸盐岩风化, K^+ 只来源于大气输入和硅酸盐岩风化;

③ SO_4^{2-} 只来源于大气输入和蒸发盐岩溶解, CaSO_4 是蒸发盐岩的唯一形式; ④ 硅酸盐岩风化时, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对于 Na^+ 以一定的比例进入水中. 据此可对各端元对湖泊小流域阳离子总量的贡献率进行计算, 结果见图 6.

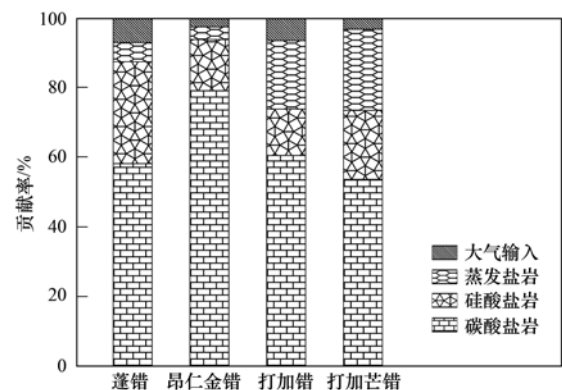


图 6 不同端元对湖泊小流域阳离子总量的贡献率

Fig. 6 Calculated contributions of different reservoirs to the total cations for the four small lake-watersheds

从图 6 可以看出,碳酸盐岩对蓬错、昂仁金错、打加错及打加芒错的贡献最大,分别为 58%、79%、60% 和 54%,说明碳酸盐岩风化对湖泊小流域的水化学组成起着绝对的控制作用. 对蓬错和昂仁金错而言,硅酸盐岩(29% 和 15%)次之,蒸发盐岩(6% 和 4%)和大气输入(7% 和 3%)均较低;而对打加错和打加芒错而言,蒸发盐岩(20% 和 23%)较高,硅酸盐岩(13% 和 20%)次之,大气输入(7% 和 4%)最低.

4 结论

(1)咸水湖阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 为主,属 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水;各湖支流及淡水湖阴离子以 HCO_3^- 或 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 为主,属 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型水;达格架温泉阴离子以 HCO_3^- 为主,阳离子以 Na^+ 为主,属 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水.

(2)咸水湖主要受蒸发-结晶作用控制,各湖支流及淡水湖主要受碳酸盐岩风化控制,达格架温泉主要受热水-花岗岩作用控制. 蒸发作用引起咸水湖离子浓度浓缩,进而发生以 CaCO_3 为主要形式的碳酸盐矿物沉淀,导致 Ca^{2+} 优先 Mg^{2+} 被移除出去, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值升高.

(3)碳酸盐岩在岩石端元贡献中对湖泊小流域贡献最大,即碳酸盐岩风化是湖泊小流域水化学组成的首要来源. 对蓬错和昂仁金错来说,硅酸盐岩次之,蒸发盐岩和大气输入均较低,而对打加错和打加芒错来说,蒸发盐岩较高,硅酸盐岩次之,大气输入最低.

参考文献:

- [1] 姚檀栋,刘晓东,王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报, 2000, **45**(1): 98-105.
- [2] 关志华,陈传友,区裕雄,等. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 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.
- [5] 郭军明,康世昌,张强弓,等. 青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2295-2302.
- [6] 王君波,朱立平,鞠建廷,等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究[J]. 地理科学, 2009, **29**(2): 288-293.
- [7] 高光坛,康世昌,张强弓,等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- [8] Wang J B, Zhu L P, Wang Y, et al. Comparisons between the chemical compositions of lake water, inflowing river water, and lake sediment in Nam Co, central Tibetan Plateau, China and their controlling mechanisms [J]. Journal of Great Lakes Research, 2010, **36**(4): 587-595.
- [9] Zhang Q G, Kang S C, Wang F Y, et al. Major ion geochemistry of Nam Co lake and its source, Tibetan Plateau [J]. Aquatic Geochemistry, 2008, **14**(4): 321-336.
- [10] 鞠建廷,朱立平,汪勇,等. 藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 591-599.
- [11] 陈毅峰,陈自明,何德奎,等. 藏北色林错流域的水文特征[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 21-28.
- [12] 王君波,彭萍,马庆峰,等. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 629-632.
- [13] 王鹏,尚英男,沈立成,等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 874-881.
- [14] 赵元艺,赵希涛,马志邦. 西藏搭格架热泉型铍矿床年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, **22**(3): 717-724.
- [15] Parkhurst D L, Appelo C A. User's guide to PHREEQC (version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations [R]. Denver, Colorado: Water-Resources Investigations Report, 1999.
- [16] Apha-Awwa-Wef. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. USA: American Public Health Association, 1995.
- [17] Meybeck M. Pathways of major elements from land to ocean through rivers [A]. In: Martin J M, Burton J D, Eisma D (Eds.). River inputs to ocean systems[M]. New York: United Nations Press, 1981. 18-30.
- [18] Spence J, Telmer K. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO_2 fluxes: evidence from major ions, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in rivers of the Canadian Cordillera [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, **69**(23): 5441-5458.
- [19] 李军,刘丛强,李龙波,等. 硫酸侵蚀碳酸盐岩对长江河水 DIC 循环的影响[J]. 地球化学, 2010, **39**(4): 305-313.
- [20] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [21] Green W J, Canfield D E. Geochemistry of the Onyx River (Wright Valley, Antarctica) and its role in the chemical evolution of Lake Vanda [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, **48**(12): 2457-2467.
- [22] Webster J G, Brown K L, Vincent W F. Geochemical processes affecting meltwater chemistry and the formation of saline ponds in the Victoria Valley and Bull Pass region, Antarctica [J]. Hydrobiologia, 1994, **281**(3): 171-186.
- [23] Hardie L A, Eugster H P. The evolution of closed-basin brines [J]. Mineralogical Society of American Special Publication, 1970, **3**: 273-290.

- [24] 王鹏. 藏南碰撞造山带典型水热区现代地球化学过程与小流域 CO_2 源、汇关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [25] 李义连, 王焰新, 周来茹, 等. 地下水矿物饱和度的水文地球化学模拟分析——以娘子关泉域岩溶水为例[J]. 地质科技情报, 2002, **21**(1): 32-36.
- [26] Berner E K, Berner R A. Global environment: water, air and geochemical cycles [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [27] Holland H D. The chemistry of the atmosphere and oceans [M]. New York: Wiley, 1978.
- [28] 李丽娟, 李海滨, 王娟. 澜沧江水文与水环境特征及其时空分异[J]. 地球科学, 2001, **22**(1): 49-56.
- [29] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 31-60.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-qing (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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