

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征

郭军明^{1,3}, 康世昌^{1,2}, 张强弓¹, 黄杰¹, 王康^{1,3}

(1. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为揭示青藏高原纳木错湖水化学离子的时空变化特征、来源以及主要控制因子, 于2006~2010年连续定点(30°47.27'N, 90°58.53'E, 4718 m a. s. l.)采集近岸表层湖水样品; 于2009年8月采集湖心区剖面样品; 于2010年10月采集湖心区剖面样品及表层湖水样品; 对其主要化学离子进行分析. 结果表明, 纳木错湖水中主要阳离子为 Na^+ , 主要阴离子为 HCO_3^- . 绝大多数离子浓度在季风期较高(6~9月), 而非季风期尤其是封冻期(1~4月)偏低; Ca^{2+} 浓度的变化则相反, 即封冻期较高, 而非封冻期较低且变化较小. 对垂直剖面湖水分析表明, 在湖水垂直结构稳定的非季风期(如10月), 除 Ca^{2+} 浓度随深度无显著变化外, 其他离子浓度随深度增加而增大. 纳木错湖水主要离子来源于入湖河水的贡献; 影响离子时空变化的因素包括蒸发、降水、pH值等, 其中蒸发是最主要的影响因素, 它造成湖水 Na^+ 浓度不断升高而 Ca^{2+} 浓度降低.

关键词: 青藏高原; 纳木错湖; 湖水; 化学离子; 时空变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2295-08

Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau

GUO Jun-ming^{1,3}, KANG Shi-chang^{1,2}, ZHANG Qiang-gong¹, HUANG Jie¹, WANG Kang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the temporal and spatial variations, sources, and major controlling factors of the major ions in Nam Co Lake water, inshore surface water samples were collected at a fixed site (30°47.27'N, 90°58.53'E, 4718 m a. s. l.) from 2006 to 2010, at the vertical profiles in the center of the lake in August 2009, and at both the vertical profiles in the center of the lake and at the surface layers of different sites in the Nam Co Lake in October 2010. The results indicated that Na^+ was the dominant cation and HCO_3^- was the dominant anion in the lake water. The concentrations of most ions were higher in monsoon seasons (June – September) and lower in non-monsoon seasons, especially when the lake was frozen (January – April). However, the Ca^{2+} concentration showed a reverse trend of seasonal variations, namely, higher values in the frozen period and lower in monsoon seasons. Analysis of water samples collected from the vertical profiles indicated that the concentrations of all ions except Ca^{2+} increased with the depth in non-monsoon seasons (e. g. October). The major ions in Nam Co Lake were mainly contributed by river input. There were a variety of factors that influenced the temporal and spatial variations of the major ions in the Nam Co Lake, such as evaporation, precipitation, pH values, etc., among which, evaporation was the most important controlling factor, causing the increasing Na^+ concentration and decreasing Ca^{2+} concentration in the lake water.

Key words: Tibetan Plateau; Nam Co Lake; lake water; major ions; temporal and spatial variations

青藏高原因地势高亢被称为“第三极”, 地貌和气候环境特殊, 广泛分布着冰川、河流、湖泊, 其储存的水体是亚洲地区众多著名河流的源泉, 因此被誉为“亚洲水塔”^[1]. 青藏高原有全球气候变化的“驱动器”和“放大器”之称^[2], 对全球气候变化非常敏感^[3]. 湖泊作为青藏高原重要地理单元, 其特征与演化影响到区域气候系统, 同时对区域气候环境变迁具有显著的响应^[4]. 水体化学离子是水化学研究的重点内容^[5], 青藏高原作为全球独特的地理单元之一, 对不同流域水化学特征的调查研究是青藏

高原湖泊学研究的重要内容, 有助于更深入揭示湖泊演化及其对全球气候变化响应的过程. 青藏高原地区是河流湖泊的重要分布区, 近几年河流湖泊水化学研究日益受到重视, 展开了大量研究^[6~9].

纳木错位于青藏高原中南部, 为西藏地区第一大湖. 纳木错流域湖泊、冰川、冻土、草甸等典型的自然环境要素相对于整个青藏高原极具代表性, 是

收稿日期: 2011-09-26; 修订日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830743)

作者简介: 郭军明(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为青藏高原环境地球化学, E-mail: guojm@itpcas.ac.cn

进行区域生态系统、环境变化及湖泊现代过程研究的理想地点^[10]. 研究表明, 近 30 年来随着纳木错区域气温升高, 冰川融水的增加和降水量的增大导致了纳木错湖面面积扩大, 表明纳木错流域对于全球气候变暖极具敏感性^[4]. 目前为止, 关于纳木错湖水化学已经开展少量和初步的研究^[11~14]. Zhang 等^[12]发现纳木错流域主要化学离子浓度按湖水、湿地积水、河水、降水、冰川积雪的顺序依次降低. 文献^[11, 13]对纳木错湖东部湖水及入湖河流水化学离子组成特征及来源作了初步探讨, 表明纳木错湖水化学离子主要受蒸发-结晶作用控制, 而河水化学离子则主要受岩石风化作用的影响. 高坛光等^[14]也对纳木错入湖河流水化学离子特征及来源进行初步探讨, 指出纳木错入湖河流离子总量明显低于青藏高原及我国其他河流, 且不同河流受到不同岩石风化的影响. 此外, Li 等^[15]对纳木错大气降水中化学离子进行了分析, 结果表明纳木错降水化学离子组成以陆源 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主, 且主要受陆源物质的影响. 然而, 上述研究的采样周期均较短(季风期或者一次短期考察)且在湖区的采样区间较小, 因此并不能够全面深入认识纳木错湖水化学的季节变化和空间分布特征. 本研究通过对 2006 年 1 月~2010 年 8 月连续采集的纳木错定点湖水表层样品、以及 2009 年 8 月和 2010 年 10 月 2 次考察期间采集的垂直剖面湖水样品和大范围采集的表层湖水样品分析, 以期较全面地认识纳木错湖水主要化学离子在时间尺度(不同季节)及大范围空间尺度上的主要变化特征.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

纳木错湖位于青藏高原藏北高原东南部, 念青唐古拉山脉北麓, 介于北纬 $30^{\circ}30' \sim 30^{\circ}55'$, 东经 $90^{\circ}16' \sim 91^{\circ}03'$ 之间. 湖面海拔为 $4\,718\text{ m}$ ^[16], 总面积为 $2\,000.8\text{ km}^2$ ^[17], 是西藏地区最大湖泊和我国第二大咸水湖, 亦是世界上海拔最高的大湖. 纳木错地处高寒半湿润向高寒半干旱气候的过渡地带, 年平均气温为 0°C , 最热月出现在 7 月而最冷月出现在 12 月^[18], 年降水量在 $300 \sim 500\text{ mm}$ 之间, 主要集中在 5~10 月, 雨季和干季分明^[10]. 已有研究估算出纳木错湖水蒸发量分别在 2007 年为 935 mm , 2008 年为 $1\,015\text{ mm}$ ^[10], 表明纳木错湖作为完全封闭性质的湖泊, 其水量损失主要是由于蒸发因素所造成. 总计 60 多条河流注入纳木错湖, 这些河

流大部分分布在湖泊的西部和南部, 其中最大的几条补给河流(如昂曲和侧曲)发源于念青唐古拉山脉, 从湖泊的西部地区注入纳木错湖, 而在湖泊南部地区主要是呈辫梳状排列的小河流^[16].

1.2 采样地点

建立于 2005 年的中国科学院青藏高原研究所纳木错多圈层综合观测站(纳木错站, $30^{\circ}46.44'\text{N}$, $90^{\circ}59.31'\text{E}$, $4\,730\text{ m a. s. l.}$), 位于西藏当雄县纳木错乡纳木错湖东南岸^[10]. 依托纳木错站, 观测人员于 2006 年 1 月~2010 年 8 月对纳木错湖岸边的表层湖水持续定点采样($30^{\circ}47.27'\text{N}$, $90^{\circ}58.53'\text{E}$, $4\,718\text{ m a. s. l.}$ 冬季 10 d 采集 1 次样品, 其它季节每周 1 次), 共采集 122 个样品(均采集平行样品), 采样同时在现场测定湖水 pH 值、温度等参数. 此外, 依托纳木错站“纳木错号”科考船, 于 2009 年 8 月在纳木错湖采集了 5 个垂直剖面的湖水样(样品总数 70 个), 以及 2010 年 10 月采集了 3 个垂直剖面的湖水样(样品总数 53 个)和 15 个表层湖水样, 各采样点具体位置如图 1 所示.

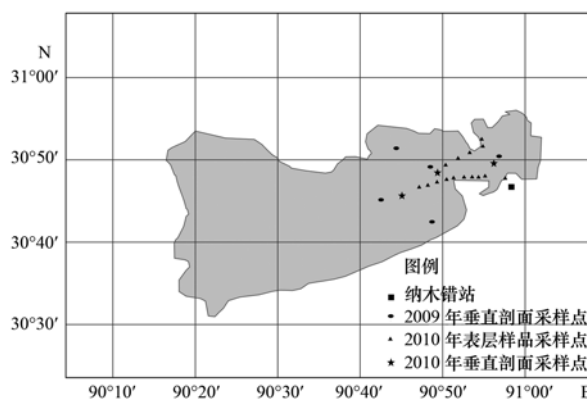


图 1 纳木错及其湖水采样点示意

Fig. 1 Locations of Nam Co Lake and the sampling sites

1.3 样品实验分析

湖水样品主要化学离子实验分析在中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室完成. 其中, 阳离子用美国戴安公司的 ICS-2000 离子色谱仪完成, 主要测定 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 这 5 种离子; 阴离子用 ICS-2500 离子色谱仪完成, 主要测定 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 这 4 种离子, 仪器误差范围 $< 3\%$ ^[13]. 由于纳木错湖水离子浓度较高^[12, 13], 因此在上机测试前, 对样品进行了 20 或 40 倍的稀释. 湖水温度和 pH 值均利用 HANNA® HI98128 笔试酸度计测定. 降水量和蒸发量观测方法见文献^[14].

纳木错湖水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度均低于仪器检测限^[13]，故在本研究中没有讨论。由于 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 并未测试，以阴阳离子平衡关系估算得到二者的总和，以碱度表示^[12]。此外前人研究结果^[11~13]和本研究中为期 1 a 的连续观测表明，纳木错湖水呈碱性（pH 值在 8.3 ~ 9.5 之间变化，平均值为 9.3，样本数 122）。根据如下的公式：

$$\text{HCO}_3^- = \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \\ \lg K_{a2} = -10.33$$

代入本研究实测的 pH 值，估算出 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 分别平均占总碳酸盐的 90.6% (86.3% ~ 99.1%) 和 9.4% (0.9% ~ 13.7%)^[19]，这与 Zhang 等^[12]的研究结果相一致。总溶解性固体物质 (total dissolved solids, TDS) 利用各离子含量总和计算。

2 结果与讨论

2.1 主要化学离子组成分析

从表 1 中可以看出，纳木错湖水主要离子组

成中的阳离子浓度大小顺序依次为： $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$ ，阴离子浓度大小依次为： $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ； Na^+ 和 HCO_3^- 分别为湖水中的主导阳离子和阴离子，因而，纳木错湖水属于重碳酸盐-纳型^[12,13]。总体上，定点表层样品的离子浓度普遍低于不同区域表层和垂直剖面样品的离子浓度，这可能与表层水和剖面样品的采样季节为雨季有关。由于季风期间纳木错流域降水量较大且冰川消融非常强烈，造成河流的径流量达到年最大值^[20]，从而使大量化学离子输入到纳木错湖。同时季风期间随着气温显著升高，纳木错湖面的蒸发量达到最大值，从而亦可能造成在季风期采集的湖水表层样品及剖面样品化学离子浓度偏高且变化很小。由于定点采集的样品分布在季风期和非季风期，因此定点样品中化学离子平均浓度偏低且变化较大（表 1）。关于纳木错湖水化学离子浓度的季节变化特征将在 3.2.1 节中进行重点讨论。

表 1 纳木错湖水主要离子浓度平均值/ $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of the major ions in Nam Co Lake water/ $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$							
项目	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	碱度
定点表层样品 ($n=122$)	8 650	581	5 284	393	1 009	2 598	11 134
标准偏差	3 915	257	1 624	257	451	1 367	4 087
2010 年表层样品 ($n=15$)	14 052	933	7 028	475	1 659	4 055	16 519
标准偏差	275	19	138	19	33	101	314
2009 年剖面样品 ($n=70$)	9 804	656	4 739	329	1 137	2 625	11 606
标准偏差	2 133	140	1 123	71	250	643	2 463
2010 年剖面样品 ($n=51$)	14 017	932	6 958	445	1 681	4 106	16 300
标准偏差	190	14	136	32	68	74	259

2.2 离子浓度时空变化特征

2.2.1 季节变化特征

纳木错定点采集湖水的主要离子浓度、湖水温度、pH 值、纳木错站降水量及蒸发量变化如图 2 所示。纳木错湖水主要离子浓度的季节变化显著，除 Ca^{2+} 外， Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等离子浓度总体季节变化表现为：非季风期低（其中 3 ~ 4 月最低），而季风期高（其中 7 ~ 8 月最高）。纳木错地区在 1 ~ 4 月平均气温低于 0°C ^[18]，整个纳木错湖处于封冻状态，湖面蒸发较小；同时冬季河流径流急剧减小^[20]，其输入的离子远远少于季风期；此外，封冻期大气中离子的干、湿沉降由于湖冰的阻隔而无法进入湖水。这些因素可能是造成湖水离子在封冻期浓度较低的原因。此外，季风后期（10 ~ 12 月），随着纳木错湖大气降水的急剧减少，湖水温

度不断降低和湖面蒸发的显著减少，各种化学离子浓度亦呈现出不断降低的趋势（图 2）。从 5 月开始进入纳木错地区非季风期与季风期转换的阶段，随着湖水温度开始不断回升和纳木错湖开始全面解冻，湖冰的消融释放出大量化学离子使湖水化学离子的浓度不断升高。从 6 月中、下旬开始，纳木错地区进入季风期，气温和湖水温度升高，湖面蒸发量增大；同时每年绝大部分降水和冰川消融亦在这期间发生，导致径流量增大^[18, 21]。因此，降水和径流输入的离子总量的增大及蒸发作用增强使得季风期纳木错湖水除 Ca^{2+} 之外的其它主要化学离子的浓度明显增加。

图 2 所示，纳木错湖水中 Ca^{2+} 表现出区别于其它化学离子的季节变化特征。 Ca^{2+} 浓度从 1 月开始不断升高，在 3 月达到最高值后开始不断降低且浓

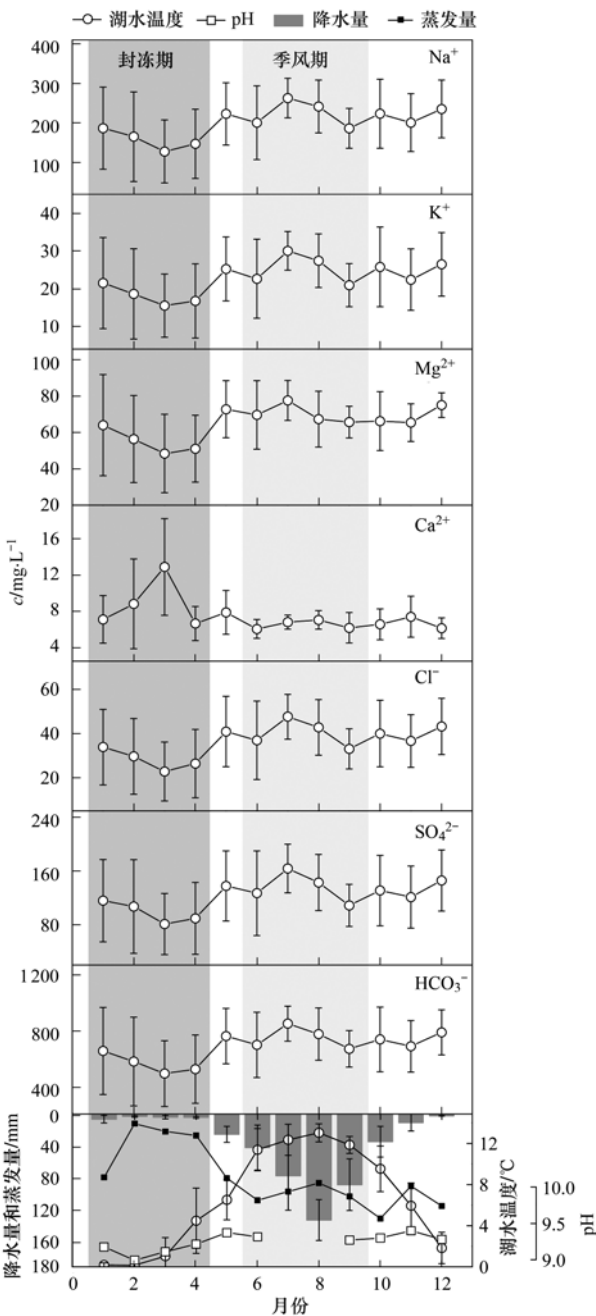


图2 2006年1~2010年1月纳木错表层湖水月平均离子浓度、pH值、水温及纳木错站降水量和蒸发量的变化

Fig. 2 Monthly variations of ion concentrations, pH values and water temperature in the surface water of Nam Co Lake, and the precipitation and evaporation at the Nam Co station

度变化较小. Thompson 等^[22]研究发现,蓝藻对水体中方解石(如 CaCO_3)的沉降起重要作用,而环境光是影响蓝藻对方解石沉降作用的最主要因素. 由于处于封冻期的纳木错湖水环境光较弱,同时较低的湖水温度亦使纳木错湖水中微生物活动降低(表现为自养微型藻类数量在非封冻期较高)^[10]. 因此,湖水封冻期较弱的环境光和较少的微生物数量可能减弱了湖水中方解石的沉降,从而使湖水中 Ca^{2+} 浓度在封冻期(非季风期)较高,而季风期的状况与此相反. 此外,研究表明,当湖水中方解石的沉降作用较强时,湖水中的 pH 值将会升高,反之亦然^[22]. 图2表明,纳木错湖水 pH 值在封冻期出现低值,说明封冻期间方解石沉降的减弱造成湖水的 pH 值较低;而在季风期方解石沉降较为强烈,从而造成湖水的 pH 值较高,较好地对应着湖水中 Ca^{2+} 浓度的季节变化. 此外,利用 SPSS 16 统计软件对 2007 年每月降水量、蒸发量和各化学离子月平均浓度进行相关性分析发现,各离子浓度与降水量之间没有显著的相关性,但是除 Ca^{2+} 浓度与蒸发量有显著的负相关外,其他离子浓度与蒸发量有显著的正相关,进一步说明蒸发可能是影响湖水离子浓度变化的主要因素(表2).

2.2.2 空间变化特征

2010 年 10 月在纳木错东部湖面采集的 15 个表层湖水样品分析表明(图3),湖水中离子与定点样品和垂直剖面样品的离子组成一致,阳离子浓度大小依次是: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$; 阴离子浓度大小依次是: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; 但表层湖水中离子浓度的变化较小,这可能由于表层湖水采样点离湖岸较远,受入湖径流变化的影响较小,表层湖水混合较为均匀有关^[10].

2009 年 8 月采集的纳木错湖不同地点垂直方向上湖水离子浓度的变化特征,与前人对纳木错垂直剖面上的湖水离子的研究结论一致^[11], 5 个垂直剖面上的离子浓度并没有明显变化规律(图4). 但是,从 2010 年 10 月采集的 3 个垂直剖面可以看出,除 Ca^{2+} 之外其它主要离子的浓度从表面到湖底

表2 纳木错表层湖水离子与纳木错站降水量及蒸发量的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of the concentrations of major ions in the surface water of Nam Co Lake, the monthly precipitation and monthly evaporation at the Nam Co Station

项目	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
月降水量	0.54	0.54	0.40	-0.32	0.49	0.46	0.52
月蒸发量	0.76 **	0.75 **	0.81 **	-0.67 *	0.76 **	0.70 *	0.79 **

1) * 表示 $P=0.05$, ** 表示 $P=0.01$; $n=12$

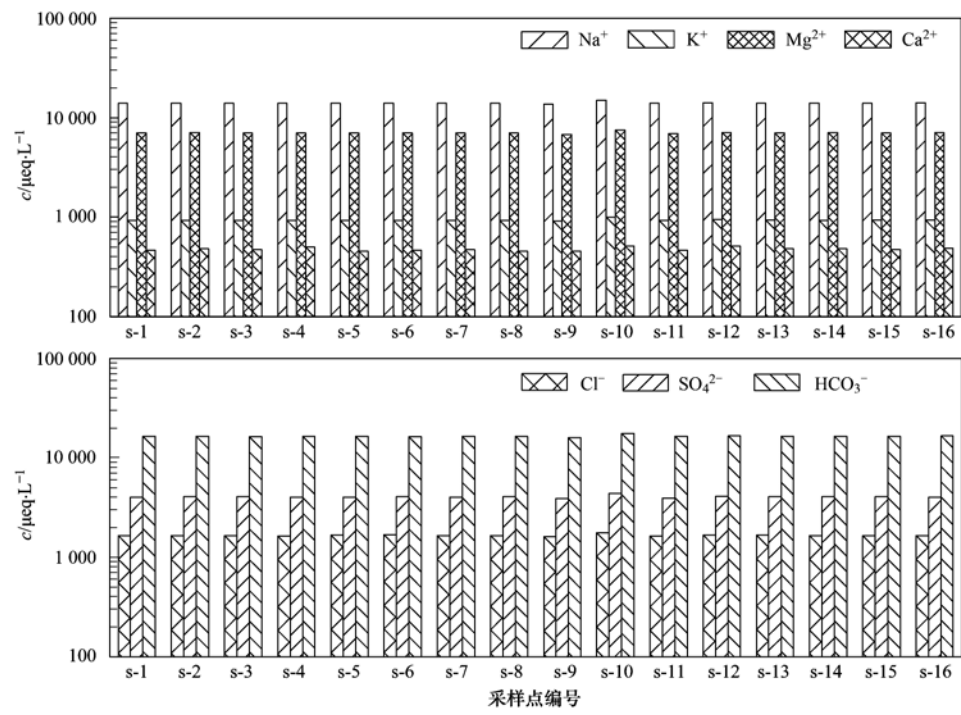


图3 纳木错表层湖水样品离子浓度

Fig. 3 Concentrations of major ions in the surface water samples of Nam Co Lake

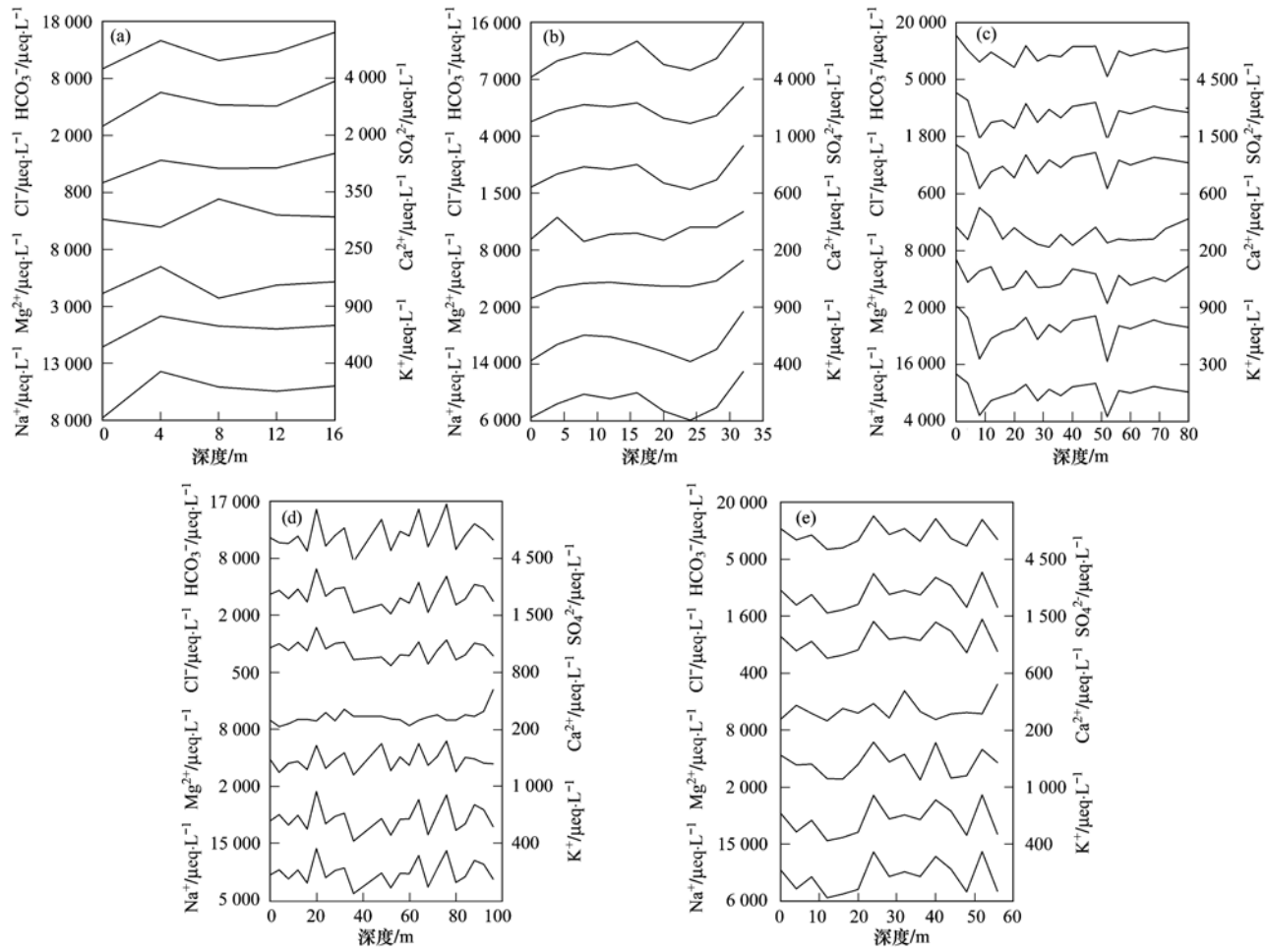


图4 2009年纳木错垂直剖面湖水主要离子浓度变化

Fig. 4 Vertical variations of the concentrations of major ions in water samples collected from Nam Co Lake in 2009

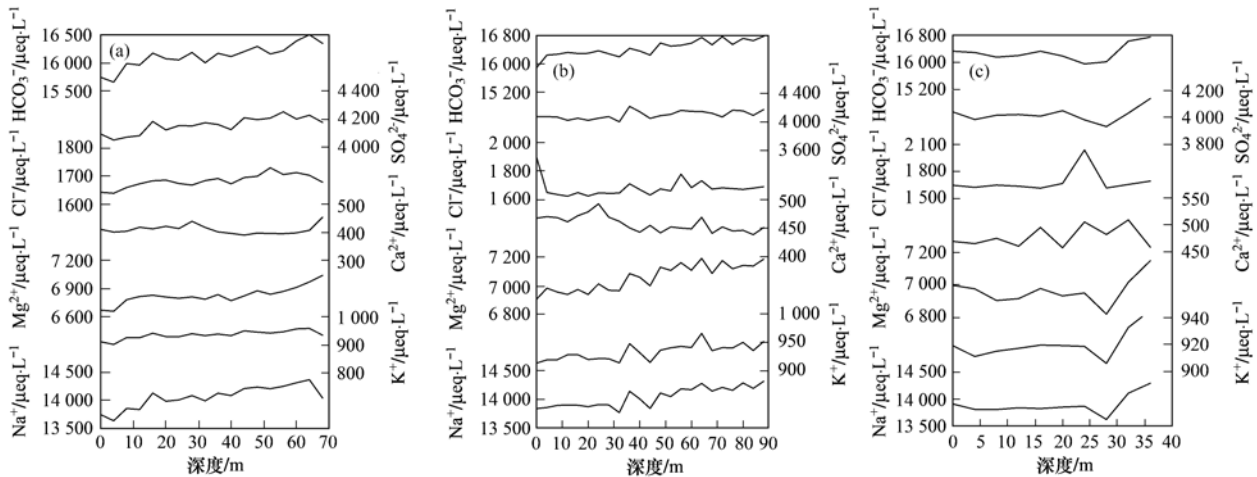


图5 2010年纳木错垂直剖面湖水主要离子浓度变化

Fig. 5 Vertical variations of the concentrations of major ions in water samples collected from Nam Co Lake in 2010

却都表现出升高的趋势(图5)。2次采集的垂直剖面上离子表现出不同的分布特征,可能与不同季节纳木错湖水在垂直方向上发生重大的变化密切相关。每年8月纳木错流域发生大量的降水,气温快速升高亦使入湖冰川融水贡献量增大^[20,21],因此受到强烈扰动的深部湖水可能处于每年最不稳定的状态,垂直剖面上的离子浓度随深度并没有明显的变化规律。而10月纳木错流域降水量和入湖河流径流均明显减少,深部湖水受扰动较小而逐渐趋于稳定,从而使纳木错湖水化学离子在垂直剖面上呈现出一定的分布规律。

2.3 离子来源分析

Gibbs图是一种用半对数坐标进行图解和分析水体化学的研究方法,其纵坐标为对数坐标,代表地表水总溶解性固体(TDS)值;横坐标为普通坐标,代表阳离子 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值^[23]。图6表明,本研究中纳木错定点、表层和垂直剖面的湖水中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 值的散点分布范围比较集中,从离散点所处的位置可以看出,湖水的离子主要受蒸发-结晶因素所控制。

Berner等^[24]研究表明,陆地水溶解盐存在3种主要的来源:大气环流所携带的海盐成分、陆地基岩释放的可溶性成分(例如硅酸盐和碳酸盐矿物)以及人类活动所释放的盐类。纳木错湖水 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 比值近似为7,远高于海水中 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 比值(0.86),表明气团经长距离传输所携带的海盐对纳木错湖水中离子组份贡献非常小(图7)。此外,湖水中亦没有检测出与人类污染物释放有关的 NH_4^+

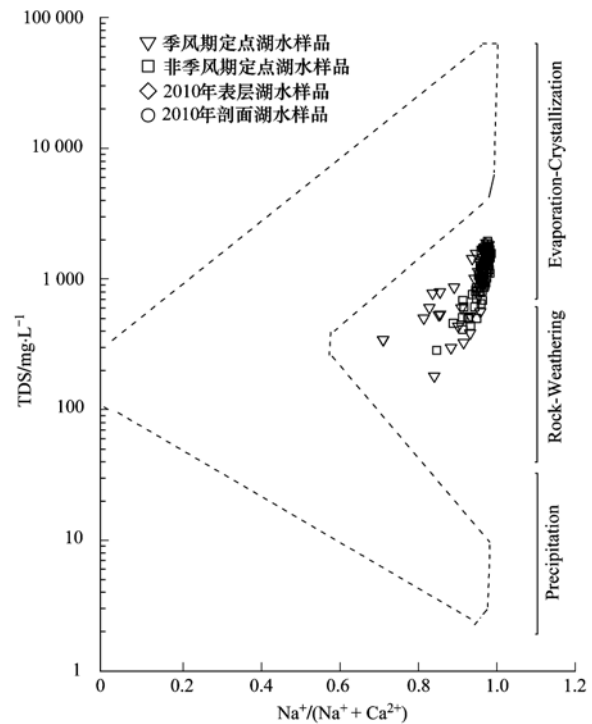


图6 纳木错湖水 Gibbs 图

Fig. 6 Plot of TDS versus $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ ratio in Nam Co Lake water

和 NO_3^- ;同时对纳木错地区大气降水和气溶胶的研究表明其主要成分都来自于区域岩石风化的产物^[15,25,26];说明人类活动所释放的盐类对纳木错湖水离子影响亦可以忽略不计。

由表3看见,除 Ca^{2+} 之外,其它主要离子之间存在显著的相关性,表明纳木错湖水离子的来源可能较为单一(以入湖河水贡献为主)。已有研究结果表明,纳木错入湖河水中 Na^+ 和 K^+ 主要源自硅酸

盐风化, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源自碳酸盐风化, 而 SO_4^{2-} 则主要来源于 CaSO_4 和 MgSO_4 等蒸发性盐类矿物的溶解释放^[13, 14]; 纳木错入湖河水中 Cl^- 主要来源包括 NaCl 、 MgCl_2 等岩盐的溶解释放, 同时大气降水中 Cl^- 也可能是河水中 Cl^- 重要来源之一^[13].

纳木错流域作为一个封闭系统, 纳木错湖的地球化学演化过程主要受入湖河水化学组成、溶解物质的选择性去除以及湖水蒸发浓缩所控制. 如图 7

所示, 纳木错湖水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的浓度比值 < 1 , 且 Ca^{2+} 与其它主要离子之间不存在显著的相关性, 说明湖水化学离子可能受到溶解质的选择性去除作用(如 CaCO_3 沉降)的显著影响. 前人研究表明^[27, 28], 纳木错湖芯中 CaCO_3 含量占到 35%, 而且在湖底沉积物中发现存在单水方解石, 进一步表明 CaCO_3 沉降是纳木错湖水中重要的选择性去除过程, 这一过程使纳木错湖水中 Ca^{2+} 浓度不断降低.

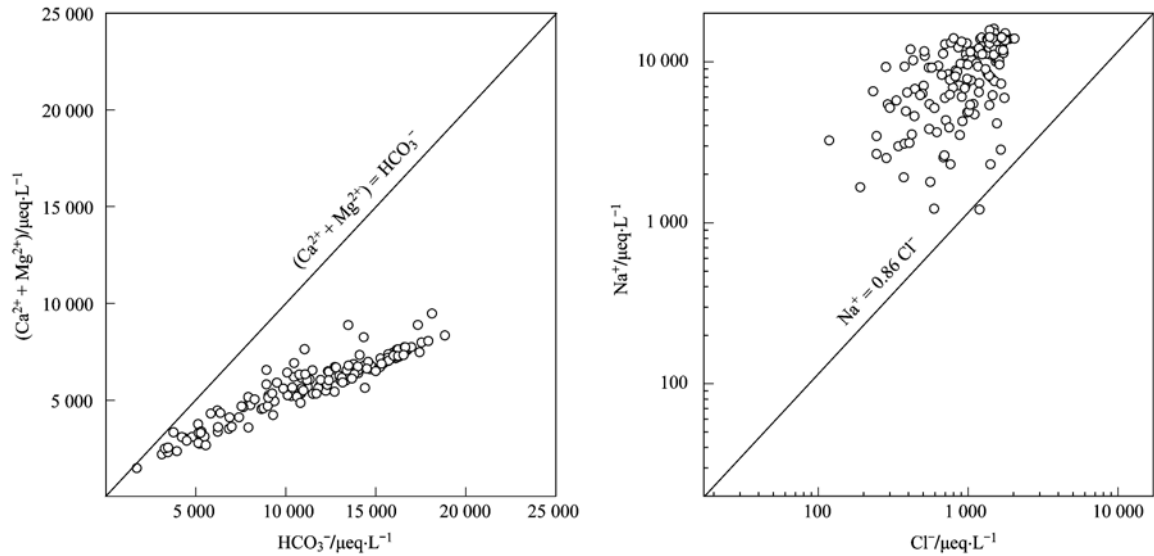


图 7 纳木错湖水离子散点关系图

Fig. 7 Scatter diagrams of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ versus HCO_3^- and Na^+ versus Cl^-

表 3 纳木错湖水离子浓度相关分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of the concentrations of major ions in Nam Co Lake water

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Na^+	1						
K^+	0.99 **	1					
Mg^{2+}	0.88 **	0.87 **	1				
Ca^{2+}	0.08	0.07	-0.09	1			
Cl^-	0.99 **	0.99 **	0.87 **	0.04	1		
SO_4^{2-}	0.87 **	0.85 **	0.73 **	0.44 **	0.85 **	1	
HCO_3^-	0.97 **	0.97 **	0.95 **	-0.04	0.96 **	0.78 **	1

1) ** 表示 $P=0.01$; $n=210$

3 结论

(1) 2006 年 1 月 ~ 2010 年 8 月纳木错湖连续观测的定点表层湖水中主要离子浓度受蒸发、降水、入湖径流因素的影响, 呈现出显著的季节变化, 离子浓度在季风期高而非季风期(特别是封冻期)低. 而湖水中方解石的沉降受封冻期湖水环境光较弱和纳木错湖水中微生物活动降低影响, Ca^{2+} 浓度在封冻期出现高值, 而在其它季节变化较小.

(2) 对 2009 年 8 月和 2010 年 10 月两次采集的纳木错垂直剖面湖水离子浓度的分析表明, 在湖水垂直结构比较稳定的非季风期(10 月), 绝大部分化学离子随着湖水深度的增加其浓度呈现升高的趋势. 在湖水垂直结构不稳定的季风最盛期(8 月), 纳木错湖垂直剖面上湖水离子的变化规律不明显.

(3) 纳木错湖水中主要化学离子来源为入湖径流的输入, 大气降水和人类活动释放的盐类对湖水

化学离子的贡献很小. 蒸发浓缩作用是控制纳木错湖水化学离子组成的主要物理化学过程.

致谢:感谢所有参加 2009 和 2010 年纳木错科学考察的人员及为长期采样工作付出辛勤劳作的王小强和次仁多杰. 朱志勇工程师进行了所有样品离子浓度的实验室分析工作,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 汤懋苍. 青藏高原对西部环境演变的作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, **32**(1): 108-115.
- [3] 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.
- [4] Wu Y H, Zhu L P. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co catchment, central Tibetan Plateau, during 1970 – 2000 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, **18**(2): 177-189.
- [5] 王苏明, 窦鸿身, 陈克造, 等. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1-580.
- [6] 任东兴, 王根绪, 胡宏昌, 等. 青藏高原多年冻土区典型小流域径流水化学特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(1): 7-13.
- [7] 王建, 丁永健, 许君利, 等. 西天山科其喀尔冰川消融径流的水化学分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1305-1316.
- [8] 朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 夏季玉龙雪山地区不同水体常规阴离子特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 626-631.
- [9] 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.
- [10] 康世昌, 杨永平, 朱立平, 等. 青藏高原纳木错流域现代环境过程及其变化[M]. 北京: 气象出版社, 2011. 1-427.
- [11] 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.
- [12] Zhang Q G, Kang S C, Wang F Y, *et al.* Major ion geochemistry of Nam Co lake and its sources, Tibetan Plateau [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2008, **14**(4): 321-336.
- [13] 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): 287-293.
- [14] 高坛光, 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.
- [15] Li C L, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, central Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(3-4): 351-360.
- [16] 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. 1-328.
- [17] 陈锋, 康世昌, 张拥军, 等. 纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2009, **27**(6): 642-647.
- [18] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. 青藏高原纳木错气象要素变化特征[J]. 气象, 2007, **33**(3): 54-60.
- [19] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [20] 高坛光, 康世昌, 周石研, 等. 纳木错曲嘎切流域夏季冰川水文特征初步研究[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(4): 725-731.
- [21] 周广鹏, 姚檀栋, 康世昌, 等. 青藏高原中部扎当冰川物质平衡研究[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(3): 360-365.
- [22] Thompson J B, Ferris F G. Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water [J]. *Geology*, 1990, **18**(10): 995-998.
- [23] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [24] Berner E K, Berner R A. Global environment: water, air, and geochemical cycles[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [25] Cong Z Y, Kang S C, Dong S P, *et al.* Individual particle analysis of atmospheric aerosols at Nam Co, Tibetan Plateau [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**(3): 323-331.
- [26] Cong Z Y, Kang S C, Liu X D, *et al.* Elemental composition of aerosol in the Nam Co region, Tibetan Plateau, during summer monsoon season [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(6): 1180-1187.
- [27] Li M H, Kang S C, Zhu L P, *et al.* Mineralogy and geochemistry of the Holocene lacustrine sediments in Nam Co, Tibet [J]. *Quaternary International*, 2008, **187**(1): 105-116.
- [28] 朱立平, 王君波, 林晓, 等. 西藏纳木错深水湖芯反映的 8.4 ka 以来气候环境变化[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(4): 588-579.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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

国内外公开发行人