

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建峰 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区表土抗生菌污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价

刘智琦, 潘保柱*, 韩谓, 李刚, 王韬轶

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 湖泊是青藏高原地区重要的水资源和生物栖息地, 由于气候和地形等自然因素及人为因素的双重影响, 湖泊水环境面临着愈加严峻的问题与挑战。为明确青藏高原湖泊水质现状、分布规律、水质主要特征因子和影响水质的重要因素, 于2020年夏季(7~8月)和秋季(10~11月)对青藏高原12个典型湖泊水环境进行调查, 根据野外采样实测和室内实验检测数据综合分析显示: ① 青藏高原典型湖泊两个季节的多项理化参数在时空分布上均有差异, 基本呈现出夏季高于秋季, 西藏地区湖泊高于青海地区湖泊的规律; ② 盐度(salinity)为青藏高原典型湖泊水质的主要特征因子; ③ 湖泊富营养化指数时空分布差异较小, 基本分布在贫营养到中营养等级之间。湖泊水质综合指数时空分布差异较大, 湖泊水质等级随盐度分区的升高由“中等”下降至“极差”, 秋季湖泊水质优于夏季; ④ 青藏高原湖泊水质的时空差异主要受控于降雨、蒸发浓缩和人类活动等因素影响。本研究可为青藏高原水环境保护和改善高原水生态系统的相关研究提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 水质综合评价; 时空分布; 特征因子; 影响因素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5073-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202111079

Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau

LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu*, HAN Xu, LI Gang, WANG Tao-yi

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Lakes are an important water resource and biological habitat in the Tibetan Plateau. Owing to the combined influence of climate, topography, and other natural factors as well as human factors, the water environment of the lakes on the Tibetan Plateau is facing more and more severe problems and challenges. To clarify the present status, distribution pattern, main characteristic factors of water quality, and important factors affecting the water quality of lakes on the Tibetan Plateau, the water environment of 12 typical lakes on the Tibet Plateau was investigated in summer (July-August) and autumn (October-November) in 2020. The field sampling and laboratory test data comprehensive analysis showed that: ① several physical and chemical parameters of typical lakes on the Tibetan Plateau differed in spatiotemporal distribution. ② Salinity was the main characteristic of water quality in the typical lakes on the Tibetan Plateau. ③ The spatiotemporal distribution of lake eutrophication index showed little diversity and basically ranged from poor nutrition to moderate nutrition. The spatial and temporal distributions in the lake water quality index (WQI) were significantly different. The lake WQI grade decreased from “Moderate” to “Very poor” with the increase in salinity area, and the lake water quality in autumn was better than that in summer. ④ The spatiotemporal differences in lake water quality on the Tibetan Plateau were mainly controlled by precipitation, evapoconcentration, and human activities. This study will provide scientific basis for water environment protection and improvement of water ecosystems on the Tibetan Plateau.

Key words: Tibetan Plateau; water quality assessment; spatiotemporal distribution; characteristic; impact factors

湖泊水质变化是一项广受世界各国和学术界关注的湖泊环境演变的重要研究主题^[1]。作为陆地水圈的重要组成部分和自然界水循环过程的参与者^[2], 湖泊不仅是揭示气候^[3]、环境^[4]和水文^[5]变化的重要信息载体, 还是维系人类生存和发展的重要自然资源, 在维护物种和环境及生态安全等方面发挥着不可忽视的作用^[6]。

我国湖泊数量众多, 种类丰富且分布广泛, 是地表生态系统重要的淡水储备^[7~9]和社会经济发展的支持者^[10]。然而由于湖泊水循环时间尺度长, 生态系统脆弱性高, 人类经济发展对湖泊水资源依赖性等特点, 导致以酸化^[11,12]、富营养化^[13~16]和有机物污染^[17,18]为典型的湖泊水质污染问题日益加剧^[19~21]。因此湖泊的水质研究对保障经济和生态的健康发展具有重要意义^[22]。

青藏高原位于亚洲大陆中部, 自然资源丰富, 是

地球上一个独特的生态环境地区。青藏高原是世界上面积最大和湖泊分布最广的高原, 也是世界上最大的高海拔内陆湖区, 包含超过32000个湖泊系统^[23], 湖泊主要由降水、积雪和冰川融化补给, 对全球变暖非常敏感^[24]。因其独特的地理和气候条件, 青藏高原上湖泊的类型和功能丰富多样, 除了重要水资源和生物栖息地的提供外, 部分盐湖蕴含着大量的盐矿资源^[25]。同时, 分布广泛的湖泊也造就了青藏高原大面积的高寒湿地群, 仅青海和西藏两省区的湿地面积就占到了我国湿地总面积的10%^[26]。但由于高原极端的环境条件(高海拔和强太阳辐射)和湖泊营养结构的单一, 使得高原湖泊

收稿日期: 2021-11-08; 修订日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51622901)

作者简介: 刘智琦(1997~), 男, 硕士, 主要研究方向为湖泊水环境评价, E-mail: l646245587@163.com

* 通信作者, E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

生态系统对环境的变化较传统湖泊生态系统而言更加敏感^[27]. 近年来,在全球变暖和人类活动频率加剧的背景下,青藏高原出现了高原湿地退化污染、湖泊污染和冰川融化等不可忽视的生态环境保护问题^[28,29].

目前对于青藏高原湖泊的调查研究不在少数,李承鼎等^[30]于 2009 ~ 2010 年对西藏 34 个湖泊水体中离子分布进行了分析;闫露霞等^[31]于 2016 年对青藏高原 33 个湖泊水质变化和驱动因子进行了分析和探寻. 但是,目前湖泊受到湖泊类型和地理条件制约,现有的研究以多湖泊水化学类型和离子组成或是单湖泊及周边水域水质监测和分析为主^[30~34],在湖泊多项基础水体理化指标的综合评价和高原湖泊富营养化方面研究较为薄弱. 本文通过对青藏高原上湖泊海拔、面积、湖泊类型和水资源补给模式等多项指标参数的筛选后选取出 12 个典型湖泊对青藏高原不同类型湖泊水质进行多方面的检测分析以及综合评价,并分析影响湖泊水质的关键因子,以期对今后在青藏高原不同类型湖泊的相关研究提供有效参考和环境背景信息.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青藏高原平均海拔 4 000 ~ 5 000 m^[35,36],湖泊总面积约占全国湖泊总面积的 51.4%^[23],有“亚洲

水塔”^[37]和“第三极”^[38]之称. 湖泊类型以咸水湖和盐湖为主^[39]. 由于该地区受到人类活动干扰较少,并且湖泊多为内陆封闭型湖泊,因此该区的湖泊完整地记录了其实际地表水环境和水质信息.

1.2 样品采集与测试

1.2.1 样品采集

分别于 2020 年夏季(7 ~ 8 月)和秋季(10 ~ 11 月)对青海和西藏 12 个湖泊水体进行系统的野外考察和采样(图 1 和表 1). 每个湖泊样点数量及位置布设依据湖泊面积而定,所设采样点都远离河口与岸边,所采水样均为 0 ~ 5 cm 表层湖水. 样品采集时戴一次性无粉芦荟手套,采样时将预先用超纯水清洗过的聚乙烯瓶用湖泊水体冲洗 3 次后装取湖泊表层水样,为减少储存期间的污染,所有水样收集后均冷藏培养箱(4℃)中,然后快递至实验室冷藏室待分析.

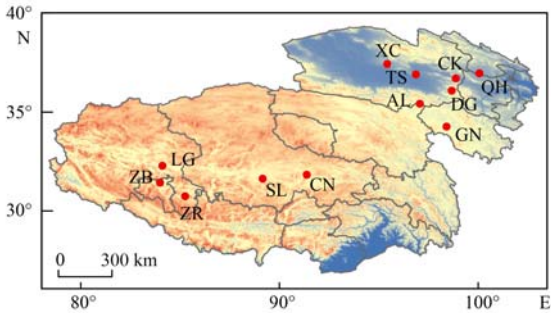


图 1 青藏高原调查湖泊分布示意

Fig. 1 Distribution of lakes in Tibetan Plateau

表 1 青藏高原调查湖泊基本信息

Table 1 Basic information of lakes in Tibetan Plateau

湖泊编号	湖泊名称	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	湖泊面积/km ²	湖泊类型	主要补水方式	样点数量
CN	措那湖	32°04'34"	91°25'43"	4 800	190.66	外流型	地表径流	10
SL	色林错	31°45'9"	89°20'27"	4 530	2 391.56	封闭型	地表径流	14
LG	拉果错	32°1'42"	84°09'11"	4 508	96.53	封闭型	冰雪融水和泉水	6
ZB	扎布耶茶卡	31°30'30"	84°03'01"	4 429	359.72	封闭型	冰雪融水和地表径流	6
ZR	扎日南木措	30°53'26"	85°22'58"	4 613	1 008.46	封闭型	湖面降水和地表径流	10
XC	小柴旦湖	37°28'55"	95°31'32"	3 216	92.35	封闭型	地表径流、泉水和地下水	5
AL	阿拉克湖	35°35'9"	97°09'20"	4 099	36.59	外流型	地表径流	5
CK	茶卡盐湖	36°42'0"	99°06'36"	3 100	108.49	封闭型	泉水补给	5
TS	托素湖	37°07'07"	96°58'07"	2 808	151.42	封闭型	地表径流	7
GN	岗纳格玛错	34°19'8"	98°37'18"	4 200	32.03	外流型	地表径流	5
DG	冬给措纳湖	36°16'57"	98°41'08"	4 082	247.44	外流型	地表径流	8
QH	青海湖	36°54'35"	100°13'17"	3 196	4 345.92	外流型	地表径流和湖面降水	18

1.2.2 指标检测

采用美国多参数水质检测仪(YSI ProPlus, YSI)对总溶解性固体(TDS)、盐度(salinity)、电导率(EC)、溶解氧(DO)和 pH 值等指标在野外进行现场实地测量,浊度(Turb)采用美国哈希便携式浊度仪(2100P, HACH)原位测量,透明度(SD)使用

常用透明度盘测量. 采集后的湖泊水样经过 NaOH-K₂S₂O₈ 消解后用比色法测定其中的总氮(TN)和总磷(TP);用孔径 0.45 μm 硝酸纤维滤膜过滤水样后测定以下指标:正磷(PO₄³⁻)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)、硅(Si)、总溶解氮(TDN)、总溶解磷(TDP)、叶绿素(Chla)、碱度

(ALK)、硬度(hardness)和化学需氧量(COD)等, 以上指标的测定方法见文献[40]. 采用离子色谱(ICS-1100, Thermo Scientific Dionex, USA)测定水样中主要阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+})浓度和主要阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})浓度, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子浓度通过酸碱滴定法测定. 由于本研究选取的12个湖泊中有部分湖泊存在硼酸盐含量较高现象, 单纯的酸碱滴定法无法去除盐度较高湖泊卤水中硼酸盐的影响^[41]. 因此本研究采用直接酸碱滴定法结合硼酸盐校正法检测硼酸盐含量较高的湖泊水体中的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子^[42]. 水样指标检测后取平均值作为该湖泊的水样数据.

1.3 水质评价方法

1.3.1 TLI 指数

为了对本研究的12个湖泊进行全面的水质分析评价, 本文采用了综合营养状态指数(TLI指数)^[43]和水质质量指数(WQI指数)^[44]两项综合性的水质标识指数对所测得的理化指标进行了计算处理, 水质评价标准参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002). 虽然TLI和WQI都是用来表示水质情况的综合性指数, 但TLI指数中生物类指标(叶绿素a)所占的比例较大, 与湖泊富营养化状况密切相关. WQI是较为均衡全面的综合性指数, 可解析水体主要污染因子, 定量评价污染程度. 两项指数相结合能够使得本研究水质评价结果更客观及全面. 根据TLI指数值将湖泊营养状态分为5个等级: $TLI(\sum) < 30$ 为贫营养, $30 \leq TLI(\sum) < 50$ 为中营养, $50 \leq TLI(\sum) < 60$ 为轻度富营养, $60 \leq TLI(\sum) < 70$ 为中度富营养, $TLI(\sum) \geq 70$ 为重度富营养. 根据WQI指数评分将水质分为5个等级: 优秀(0~20)、良好(21~40)、中等(41~60)、差(61~80)和极差(81~100), 分别对应于GB 3838-2002中的I、II、III、IV和V类水体, 本研究中的环境参数的标准浓度即为GB 3838-2002中地表水环境质量标准基本项目标准限值.

TLI指数的计算公式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

式中, m 为参与综合富营养化评价的主要参数个数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数.

各营养状态计算指数公式为:

$$TLI(Chla) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chla)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD)$$

由于该评价方法是以Chla为基准参数计算, 所以第 j 种参数归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2$$

式中, r_{ij} 为第 j 种参数与Chla的相关系数. 本研究选取的水质参数为Chla、TP、TN和SD.

1.3.2 WQI 指数

WQI指数的计算公式为:

$$WQI_i = \frac{C_i - C_{i,k}}{C_{i,k+n} - C_{i,k}} \times 20n + I_{i,k}$$

式中, WQI_i 为参加综合水质标识指数评价的第 i 项指标; C_i 为第 i 项指标的浓度; $C_{i,k}$ 为第 i 项指标第 k 级的正常浓度; $C_{i,k+n}$ 为第 i 项指标第 $k+n$ 级的正常浓度; n 为第 i 项相同标准值的个数; $I_{i,k}$ 为第 i 项指标评价的 k 个指标值.

1.4 数据分析

采用Origin 2018 绘制理化指标浓度散点图和离子Piper图; 聚类分析、相关性分析和主成分分析在IBM SPSS Statistics (SPSS 25.0) 和R-studio 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 湖泊水化学类型及离子组成

湖泊水化学类型特征在一定程度上体现了降雨量、植被覆盖率和人类活动等重要因素对湖泊的影响^[45]. 由于地理位置和气候的特殊性, 青藏高原湖泊的演化遵循着淡水湖-盐湖-干盐湖的规律^[28,46]. 从Piper图中可以得出(图2), 本研究的多数湖泊均

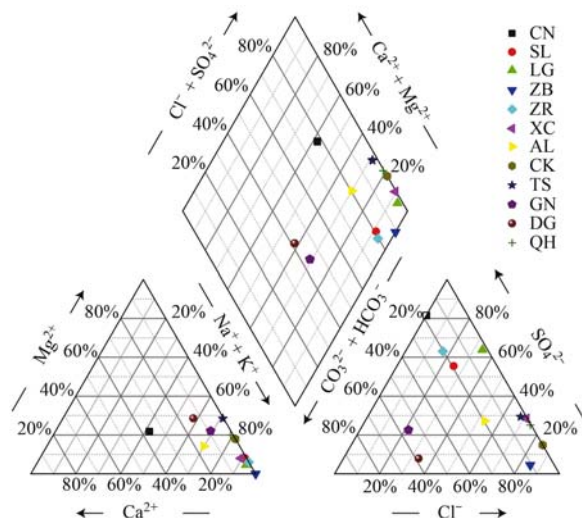


图2 青藏高原湖泊两季度平均离子浓度Piper图

Fig. 2 Piper diagram of average ion concentrations in lakes of the Tibetan Plateau

位于 Piper 图中的 C 区,表明多数湖泊水化学类型为 Na(K)-Cl(SO₄)型,属于湖泊演化的后期阶段;青海地区的岗纳格玛错和冬给措纳湖位于 Piper 图中的 D 区,湖泊水化学类型为 Na-HCO₃型,处在湖泊演化阶段的初期;西藏地区的措那湖主要位于 Piper 图中的 A 区,湖泊水化学类型属于 Ca(Mg)-Cl(SO₄)型,处于湖泊的中期演化阶段。

2.2 湖泊水体理化指标时空分布

水质参数能够精确直观地反映出水体水质的现状,不同的理化指标能体现出水体的各项水质特征的差异,同时理化指标间也存在联系.如 TP 与 Chla 虽为分别偏向表征水体水质的化学类指标和生物类指标,但磷作为水体中植物和藻类所必要的营养元素与其产生的叶绿素具有不可分割的联系.两季度各个湖泊水体理化指标如表 2,湖泊水体理化指标在时间分布上存在差异.除扎日南木错与小柴旦湖外,其余湖泊水体中 Chla 含量在夏季(7~8月)均高于秋季(10~11月),季节上盐度的差异较小.此外,TP、NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻等理化指标浓度均显示出夏季高于秋季的规律,除拉果错外其余湖泊 COD 浓度呈现相同规律且差异显著. DO 浓度变化较特殊,所有湖泊均呈现秋季含量高于夏季的规律。

同样,本研究 12 个湖泊理化指标在区域空间上的分布也存在差异,其中湖泊水体 pH 值范围为 7.19~9.76,多数湖泊水体呈碱性.湖泊水体中 DO 范围为 0.48~8.75 mg·L⁻¹,均值为 5.384 mg·L⁻¹,

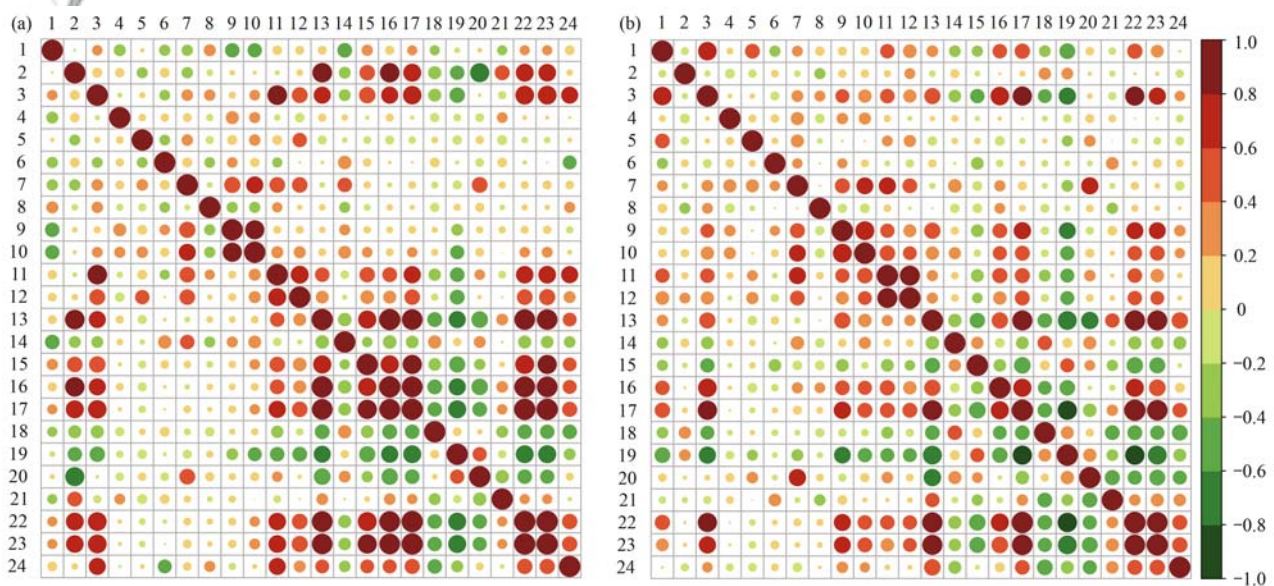
多数湖泊 DO 的含量在 4 mg·L⁻¹以上,在《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中达到Ⅳ类标准.湖泊 TDS 和盐度的波动范围较大,分别在 261~153 890 mg·L⁻¹和 0.19‰~155.83‰,均值分别为 22 436 mg·L⁻¹和 24.82‰.湖泊 ρ(TN)较高,均值达到 2.31 mg·L⁻¹,超出Ⅴ类标准.湖泊 ρ(TP)均值为 1.24 mg·L⁻¹,拉果错、扎布耶茶卡、扎日南木错、茶卡盐湖和青海湖中 TP 浓度均超出Ⅴ类标准.湖泊 COD 均值达到 666.9 mg·L⁻¹,其中扎布耶茶卡和茶卡盐湖 COD 浓度高达 2 417.3 mg·L⁻¹和 4 393.1 mg·L⁻¹,远超Ⅴ类标准。

2.3 湖泊水质理化指标相关性分析

对 12 个湖泊水体理化指标进行相关性分析(图 3),发现两季度盐度、COD、TDS 和 EC 四者相互间均存在显著正相关($P < 0.05$),DO 与盐度、TDS 及 EC 间存在显著负相关($P < 0.05$).在已检测的所有水质理化指标中,盐度与其余指标的相关性关系最强,两季度均有 5 个以上指标与其有显著相关性($P < 0.05$).

2.4 湖泊水质理化指标主成分分析

12 个湖泊两个季度所有水质理化指标进行主成分分析.根据主成分提取原则,两个季度均提取了数据解释率最高的前 6 个主成分,分别解释了 87.2% 和 78.3% 的数据(图 4).其中第一主成分(F1)方差贡献率分别达到了 36.56% 和 34.70%,明显大于第二主成分(F2)15.37% 和 15.28% 及其后



(a) 7~8 月, (b) 10~11 月; 圆圈大小表示相关性强弱; 1. PO₄³⁻, 2. NH₄⁺-N, 3. NO₃⁻-N, 4. NO₂⁻-N, 5. Si, 6. hardness, 7. ALK, 8. Chla, 9. TN, 10. TDN, 11. TP, 12. TDP, 13. COD, 14. WD, 15. WT, 16. DOC, 17. EC, 18. SD, 19. DO, 20. pH, 21. ORP, 22. 盐度, 23. TDS, 24. Turb

图 3 青藏高原湖泊两季度水体理化指标相关性热图

Fig. 3 Heat map of correlation of water physicochemical indexes in Tibetan Plateau lakes in two seasons

表 2 青藏高原两季度湖泊水体理化指标含量¹⁾
Table 2 Listing of concentration of water physicochemical indexes in Tibetan Plateau in two seasons

调查 月份	湖泊 编号	TN /mg·L ⁻¹	TDN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	TDP /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	SD /m	DO /mg·L ⁻¹	pH	Turb /NTU	Chla /μg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	盐度 /‰	TDS /g·L ⁻¹
7~8	CN	1.84±0.33	1.28±0.30	0.08±0.02	0.02±0.01	0.17±0.10	0.01±*	0.01±*	0.01±*	2.99±1.14	4.47±0.34	8.78±0.15	2.66±2.15	13.67±5.02	33.45±16.09	0.28±0.03	0.38±0.02
	SL	2.89±0.15	2.28±0.19	0.08±0.02	0.07±0.04	0.71±0.26	0.02±*	0.02±0.01	0.02±*	3.04±0.39	4.06±0.18	9.35±0.15	2.70±0.58	12.97±3.23	74.34±18.34	7.58±0.17	8.55±0.17
	LG	2.31±0.11	1.97±0.07	3.58±0.04	3.40±0.10	0.81±0.30	0.10±0.01	0.01±*	0.38±0.03	3.75±0.28	3.39±0.12	9.22±0.02	2.50±0.21	14.36±1.96	263.48±19.40	34.63±0.03	34.13±0.03
	ZB	2.35±0.01	2.09±0.10	2.83±0.36	2.28±0.16	0.85±0.16	0.72±0.31	0.01±*	0.75±0.02	0.77±0.15	1.09±0.28	9.54±0.01	14.17±0.68	23.36±8.12	2417.28±227.46	136.29±0.67	107.93±0.41
	ZR	2.78±0.41	1.89±0.17	1.86±0.16	0.25±0.02	0.80±0.38	0.04±0.01	0.02±*	0.12±0.04	2.29±0.87	6.44±2.96	9.55±0.02	5.28±1.99	19.19±8.03	71.80±22.03	9.22±0.03	10.21±0.03
	XC	1.98±0.35	0.90±0.27	0.10±0.01	0.04±0.01	0.62±0.21	0.03±0.01	0.01±*	0.03±*	2.95±0.72	3.48±1.28	8.96±*	2.26±1.00	13.79±1.26	483.67±113.60	29.31±0.17	2.94±0.15
	AL	1.34±0.42	0.62±0.46	0.07±0.01	0.03±0.01	0.17±0.02	0.02±*	0.01±*	0.02±*	2.63±1.51	6.89±0.32	9.15±0.14	4.11±2.69	30.33±3.46	74.96±28.35	0.95±0.06	1.21±0.06
	CK	2.30±0.20	1.63±0.29	1.03±0.05	0.76±0.08	0.68±0.14	0.24±0.05	0.02±0.01	0.30±0.13	0.24±0.05	0.72±0.11	7.51±0.01	5.37±1.83	14.71±7.32	4393.06±990.06	155.83±0.35	119.38±0.20
10~11	TS	2.32±0.02	1.95±0.04	0.07±0.01	0.03±0.01	1.57±0.43	0.06±0.01	0.01±*	0.01±*	4.22±1.64	5.26±0.58	9.22±0.04	2.60±1.10	12.31±3.51	154.41±36.48	14.12±1.59	15.28±1.42
	CN	1.57±0.48	0.83±0.35	0.07±0.02	0.04±0.01	0.41±0.18	0.02±0.01	0.01±*	0.03±0.02	0.68±0.16	8.75±1.16	9.76±0.41	6.49±5.49	23.67±3.95	29.51±13.55	0.19±0.04	0.26±0.06
	DG	2.03±0.43	1.11±0.42	0.06±0.03	0.02±0.01	0.11±0.07	0.01±*	0.01±*	0.02±0.01	4.16±2.17	7.23±0.23	8.97±0.01	1.32±0.32	19.68±4.54	20.18±12.88	0.33±*	0.44±*
	QH	1.94±0.06	1.43±0.15	1.44±0.16	0.75±0.22	0.68±0.41	0.03±0.01	0.01±*	0.05±0.03	2.31±0.75	6.14±0.67	9.32±0.16	3.83±1.79	14.49±1.88	131.56±54.51	10.42±0.31	11.84±1.82
	CN	1.72±0.28	0.75±0.11	0.07±0.02	0.04±0.02	0.06±0.03	0.01±*	0.01±*	0.01±*	3.43±0.45	5.34±0.29	8.92±0.02	2.61±0.27	13.44±5.95	25.94±20.88	0.28±*	0.37±0.01
	SL	2.75±0.17	1.64±0.51	0.07±0.02	0.04±0.02	0.11±0.07	0.03±0.01	0.01±*	0.01±*	4.11±0.52	5.35±0.34	9.60±0.02	3.10±1.02	12.39±3.34	11.96±7.43	7.33±0.55	8.29±0.56
	LG	2.81±0.16	1.78±0.03	3.27±0.18	3.14±0.17	1.36±0.65	0.02±*	0.01±*	0.21±0.01	4.59±0.20	4.73±0.25	9.46±0.01	2.86±0.29	12.07±2.72	328.16±140.26	35.61±0.03	35.44±0.05
	ZB	3.33±0.38	2.10±0.10	2.59±0.52	1.56±0.30	0.36±0.04	0.80±0.22	0.01±*	0.73±0.05	0.48±0.02	1.84±0.03	9.72±0.01	8.50±0.73	22.98±7.30	1892.11±753.33	139.93±0.54	98.04±37.49
	ZR	2.76±0.45	1.71±0.08	1.73±0.22	0.24±0.04	0.06±0.03	0.03±0.01	0.01±*	0.11±0.01	2.49±1.30	5.78±0.36	9.72±0.13	4.92±2.34	20.45±10.05	61.74±20.53	9.30±0.23	10.38±0.18
	XC	1.96±0.05	0.77±0.16	0.09±0.01	0.04±0.01	0.42±0.17	0.01±*	0.01±*	0.01±*	2.26±0.53	8.16±0.18	8.95±0.01	3.51±1.92	14.25±2.48	373.47±70.01	30.69±0.05	31.37±0.06
	AL	1.31±0.20	0.42±0.06	0.05±0.01	0.02±0.01	0.16±0.07	0.01±*	0.01±*	0.01±*	3.00±0.06	7.00±0.41	9.06±0.02	2.74±0.79	28.73±3.25	74.02±18.07	1.03±*	1.31±*
10~11	CK	4.16±0.43	1.99±0.76	0.93±0.08	0.68±0.09	0.06±0.02	0.20±0.02	0.01±*	0.04±0.01	0.26±0.03	0.48±0.05	7.19±0.08	25.34±3.30	12.87±5.55	3947.35±662.15	150.80±1.22	153.89±30.12
	TS	3.08±0.09	1.82±0.06	0.07±0.01	0.03±0.01	1.35±0.33	0.05±0.01	0.01±*	0.01±*	7.80±1.04	7.12±0.17	9.19±0.02	3.34±1.88	11.00±4.16	141.00±33.24	16.41±0.60	17.45±0.57
	CN	1.21±0.08	0.90±0.29	0.07±0.03	0.02±0.01	0.30±0.13	0.02±0.1	0.01±*	0.04±0.03	0.53±0.02	7.54±1.41	9.36±0.24	14.15±4.67	17.24±1.63	28.10±10.66	0.24±0.04	0.32±0.05
	DG	1.19±0.19	0.59±0.12	0.07±0.05	0.01±0.01	0.10±0.06	0.01±*	0.01±*	0.02±0.01	5.67±0.61	6.81±0.56	8.96±0.07	1.22±0.64	16.66±3.68	17.79±6.22	0.36±0.04	0.47±0.05
	QH	2.43±0.47	1.71±0.35	1.21±0.18	0.62±0.13	0.61±0.32	0.03±0.01	0.01±*	0.03±0.01	2.42±0.47	6.82±0.62	9.41±0.04	4.29±1.81	12.70±4.10	115.89±45.28	10.32±0.38	11.37±0.39

1) * 为 0~0.005 的标准偏差

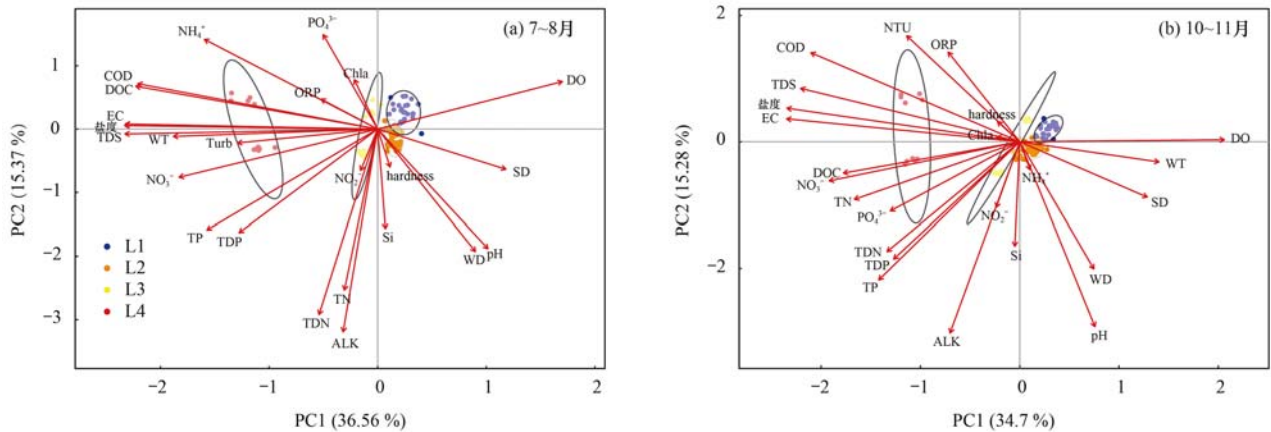


图4 青藏高原湖泊两季度水体理化指标主成分分析

Fig. 4 Scatterplot of concentration of water physicochemical indexes in Tibetan Plateau in two seasons

4个主成分的方差贡献率,是影响水质的最主要成分. 盐度、EC、COD和TDS在F1上的载荷较大, COD可表征水体中的有机物含量,而盐度、EC和TDS能表征水体中可溶性物质的含量,因此F1能够代表湖泊水质的基本情况. F2上载荷较大的指标为ALK和pH,因而F2能反映出湖泊水体的酸碱度情况. 由于盐度在F1上的载荷最大,因此盐度能作为本研究12个湖泊水质的代表性指标. 图4中不同颜色散点分布的区域是根据盐度大小的排序对本研究的12个湖泊的初步聚类,发现通过对盐度这一指标进行聚类后12个湖泊的所有样点能够较为明显地分成4类,即L1、L2、L3和L4.

2.5 湖泊聚类分析

从前文相关性分析得知盐度能作为湖泊水质的代表性指标表征两季度湖泊水质情况,根据两个季度的F1主成分中盐度指标进行SPSS聚类分析. 分析聚类谱系图可将本研究12个湖泊分为4个类群,包含L1(措那湖、阿拉克湖、岗纳格玛错、冬给措纳湖); L2(色林错、扎日南木错、托素湖、青海湖); L3(拉果错、小柴旦湖)和L4(扎布耶茶卡、茶卡盐湖)(图5).

与主成分分析中的初步聚类结果比较发现,用SPSS 25系统聚类得出的聚类结果能够与之前PCA分析得到初步聚类结果完全对应,说明盐度为不同湖泊具有代表性特征的水质指标.

2.6 湖泊水质综合评价

采用TLI指数对湖泊评价结果为:除小柴旦湖和茶卡盐湖得分在30以下,属于贫营养状态外;其余湖泊得分均在30~50,处于中营养状态;各湖泊TLI指数在季节上的差异较小. 采用WQI指数对湖泊评价结果为:L1类湖泊得分均在40~60,属于中等级别; L2类湖泊得分均在60~80, L3、L4类湖泊得分均在80~100,分别属于差和极差;其中措那

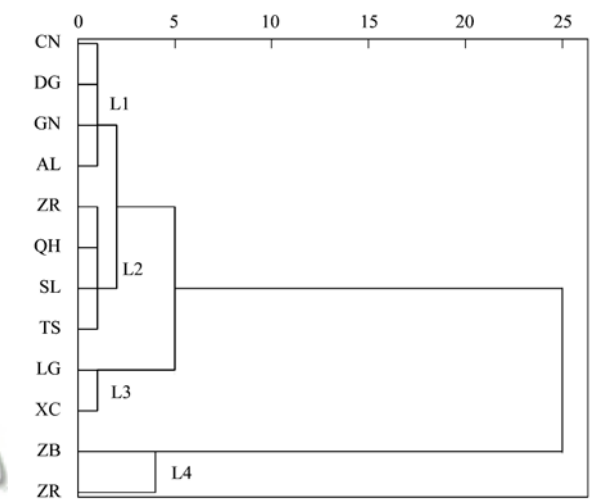


图5 青藏高原湖泊两季度聚类系谱图

Fig. 5 Cluster pedigree diagram of lake salinity in Tibetan Plateau

湖、色林错、扎日南木错、托素湖、小柴旦湖和茶卡盐湖WQI指数在季节上有明显差异.

从两项指数箱型图(图6)中能得出本研究选取的12个典型湖泊两个季度的综合水质指数呈现出时间上夏季高于秋季,青海地区湖泊水质优于西藏地区湖泊水质的规律.

3 讨论

3.1 青藏高原湖泊水质特征时空分布差异规律

本研究采样所在的两个季度分别对应青藏高原的季风期(7~8月)和季风后期(10~11月),从时间尺度上对比两段时期湖各项理化参数,除扎布耶茶卡和茶卡盐湖COD浓度变化明显外,其余湖泊两季度水体理化指标波动范围较小,其中TP、 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-} 等理化指标浓度在季风期高于季风后期. 这是因为青藏高原季风期降雨量高于季风后期,对水体外源污染物输入起促进作用导致水体理化指标偏高^[47]. 空间上本研究中青藏高原的湖泊水体理化

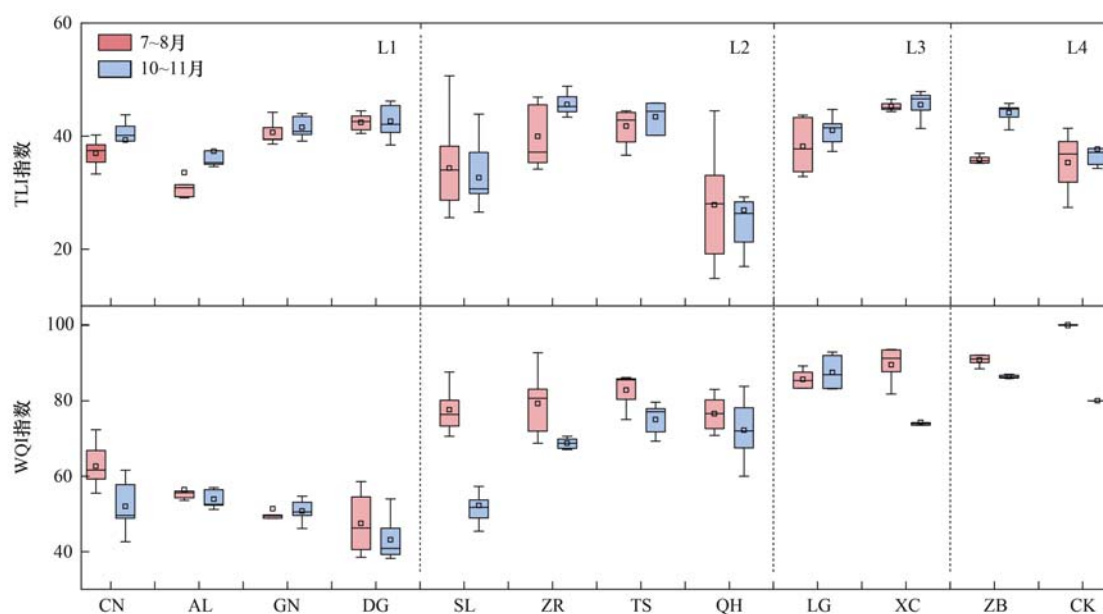


图6 青藏高原湖泊两季度综合水质指数(TLI和WQI)箱型图

Fig. 6 Box diagram of water quality indexes (TLI and WQI) of lakes in Tibetan Plateau

指标基本呈现西藏高于青海的规律,但从 Zhang 等^[48]的研究中发现本研究选取的西藏多数湖泊处于湖泊扩张分区的Ⅲ类湖泊,青海多数湖泊属于Ⅰ类湖泊,这说明本研究中湖泊扩张情况为西藏湖泊扩张较青海湖泊更快.而造成水体理化指标变化与湖泊扩张规律相悖可能是本研究选取的西藏地区湖泊多为咸水湖,而根据 Liu 等^[49]的研究发现青藏高原上盐度较高的湖泊更有利于有机碳源的富集,湖泊水体各项理化指标也会随之而变化的缘故^[48-51].扎布耶茶卡和茶卡盐湖 COD 浓度远超 V 类标准,可能原因是有部分细菌菌落适应了超高盐度的水体使得湖泊水体中菌落密度处于较高状态,同时高盐度的水体会刺激细菌对碳源的利用,加快其新陈代谢导致有机物排放量升高, COD 值随之骤升^[52-54].

3.2 青藏高原湖泊水质特征因子分析

对两个季度的水体理化参数进行相关性分析,发现两季度盐度、COD、TDS 和 EC 四者相互间均存在显著正相关($P < 0.05$),有研究显示盐度、TDS 和 EC 三者间存在正相关性^[55,56],而 Liu 等^[49]的研究中发现青藏高原上湖泊水体的盐度与有机碳源的富集有良好的正线性关系,而本研究选取的青藏高原典型湖泊多为咸水湖.这或许是导致本研究中 4 项指标相互间正相关性显著的原因.而 DO 与盐度、TDS 和 EC 间存在显著负相关($P < 0.05$),这可能是由于夏季水温较高加快了水生生物的生产代谢和水体与沉积物间的离子交换频率,导致水体 DO 含量下降,盐度、TDS 和 EC 升高;而秋季水温降低减缓了水生生物的生产代谢和水体与沉积物间的离子交换频率,导致水体 DO 含量上升,盐度、TDS 和 EC

降低.

基于前文 PCA 分析得到盐度是本研究 12 个湖泊水质特征的代表性指标且其与两项综合指数的相关性最强,说明盐度是表征青藏高原湖泊水质综合情况的主要因子.在湖泊中盐度不仅与 pH、TDS 和 EC 等理化指标有关联,还与一些生物类指标关系密切.在 Li 等^[57]的研究中盐度是影响青藏高原湖泊浮游植物群落丰富的和生物量的主导因素;在 Banda 等^[58]的研究中盐度是影响藻类和菌落分布的重要因子.而盐度的差别使得湖泊表现出不同的水化学类型^[59].因此对青藏高原湖泊水化学类型的差异性研究能在一定程度上反映湖泊水体理化参数的差异和变化.

湖泊水化学类型演变主要受自然因素(降雨量、入湖径流、蒸发量等)和人为因素的双重影响.基于已有研究结果分析得知^[33,34],本研究中大部分的湖泊位于蒸发浓缩的主控单元区域,在此影响下的这些湖泊经过长时间的演变导致湖泊水体中盐度、TDS 和 EC 等理化指标远高于一般湖泊.而有研究显示受全球气候变暖影响,近年来青藏高原湖泊降雨量与来自冰川融雪的补水量升高,湖泊存在淡化的趋势^[60].通过对比本研究与 Xu 等^[61]对青海湖的研究结果发现青海湖中 TDS 和 EC 等指标呈现出下降的趋势,与 Wang 等^[62]对托素湖的研究结果发现盐度呈现出下降的趋势,能得出与之相同的结果.

3.3 青藏高原水质综合评价指数规律及成因

对比图 6 两项综合水质指数箱型图发现, WQI 指数随季节更替和湖泊分区的变化呈现出明显的时空差异,而 TLI 指数在二者条件的变化下均未显示

出明显规律. 时间尺度上 TLI 指数无明显变化而 WQI 指数随季节推动而逐渐降低, 原因在于在计算 TLI 指数选用的水质指标为 Chla、TN、TP 和 SD 这 4 项指标, 其中 Chla 所占相关权重最大^[42]; 而计算 WQI 指数是选用的水质指标为 NH_4^+-N 、TN、TP、COD 和 DO 等 5 项指标且最终的 WQI 指数得分为该 5 项 WQI 指数得分的均值^[43]. 评价指标的差异和评价侧重方向的差别是导致两项综合评价指数分布规律迥异的主要因素.

空间上 TLI 指数无明显差异而 WQI 指数从 L1 ~ L4 (盐度逐渐升高) 逐步升高. 除此之外同一类湖泊的 TLI 和 WQI 指数间存在着一定关联. L1 类湖泊的 WQI 指数为 4 类湖泊中最低, 但 TLI 指数却处在 4 类湖泊中的较高水平, 这是由于 L1 类湖泊水体中 Chla 浓度较高所致. L1 类湖泊所包含的 4 个湖泊均为淡水湖, 低盐度的水体为大部分生物的生存提供了适宜的条件^[63,64], 且 L1 类湖泊均处于自然保护区范围内, 植被覆盖率在本研究 12 个湖泊中处于最高水平. L1 类湖泊中措那湖的 WQI 指数最高, 主要原因可能在于其是青藏铁路的所经之地且为 4 个湖泊中放牧最为频繁地区. L2 类湖泊均为咸水湖, 盐度含量的升高虽降低了湖泊生态系统的生物多样性, 但周边人类活动方式和频率较 L1 类湖泊明显增加. 以牧业为主, 同时还包含有渔业和旅游业是 L2 类湖泊周边人类活动的主要方式^[65~68]. 如图 6 中结果显示, 人类活动种类和强度的增加导致 L2 湖泊的 WQI 指数明显高于 L1 类湖泊, 不难看出人类活动是影响湖泊水质的重要因素之一. L3 和 L4 类湖泊两项综合指数均处在 4 类湖泊中的最高水平, 处于湖泊演化的后期, 湖泊均为盐湖且营养结构单一. 有研究发现 L3 和 L4 类湖泊包含的 4 个湖泊卤水中富含钾、镁和锂等重要矿产资源^[69~73], 其综合水质位列于本研究中 4 类湖泊水质的最劣段. 随着社会经济不断发展, 人类在高原活动的范围和频率始终保持逐步增长的趋势, 许多高原湖泊的水质和湖泊演化进程都因人类活动而受到不同程度的影响. 在 L4 类湖泊中发现两个季度茶卡盐湖的平均 COD 浓度是扎布耶茶卡的 1.6 倍, 同为高盐度且降水量和蒸发量均相近的湖泊水体出现这种现象, 人类在茶卡盐湖活动的时间尺度过长是其可能原因之一. 早在公元前茶卡盐湖周围就已经形成了具有规模的人类资源开采活动, 多年来不断遭受愈发频繁的人类活动影响导致湖泊演化的进程加快, 水质恶化速率超过其自然演变状态.

4 结论

(1) 本研究 12 个青藏高原典型湖泊两个季节

的多项理化参数在时空分布上均有差异, 基本呈现出夏季高于秋季, 西藏地区湖泊高于青海地区湖泊的规律.

(2) 盐度 (salinity) 为青藏高原典型湖泊水质的主要特征因子, 随着盐度的升高, 湖泊的综合水质相应下降.

(3) 湖泊富营养化指数时空分布差异较小, 基本分布在贫营养到中营养等级之间. 湖泊水质综合指数时空分布差异较大, 湖泊水质等级随盐度分区的升高由“中等”下降至“极差”, 秋季湖泊水质优于夏季.

(4) 青藏高原湖泊水质的时空差异主要受控于降雨、蒸发浓缩和人类活动等因素影响, 不同强度的人类活动会在不同程度上影响湖泊的水质及演化进程.

致谢: 感谢朱朋辉和杨子杰等同学在野外采样和室内实验检测等方面的协助.

参考文献:

- [1] 谢启蛟, 刘进华. 1987—2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7840-7850.
Xie Q J, Liu J H. Spatio-temporal dynamics of lake distribution and their impact on ecosystem service values in Wuhan urbanized area during 1987—2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7840-7850.
- [2] 闫立娟, 郑绵平, 魏乐军. 近 40 年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 310-323.
Yan L J, Zheng M P, Wei L J. Change of the lakes in Tibetan Plateau and its response to climate in the past forty years[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(4): 310-323.
- [3] 王瑞, 牛振国. 中国湖泊温度变化特征及其对气候变化的响应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 780-788.
Wang R, Niu Z G. Characteristics of changes in lake temperature in China and their response to climate change[J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 780-788.
- [4] 朱立平, 郭允. 青藏高原湖泊沉积记录与环境变化研究[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 65-70.
Zhu L P, Guo Y. Lake sediments and environmental changes on the Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(6): 65-70.
- [5] 张奇, 刘元波, 姚静, 等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1360-1379.
Zhang Q, Liu Y B, Yao J, et al. Lake hydrology in China: advances and prospects[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1360-1379.
- [6] 陈晓江, 李兴, 李佳佳. 乌梁素海浮游植物污染指示种及水质评价[J]. 生态科学, 2021, 40(3): 231-237.
Chen X J, Li X, Li J J. Pollution indicator species and evaluation of water quality in Wuliangsu Lake[J]. Ecological Science, 2021, 40(3): 231-237.
- [7] 朱泓, 王金亮, 程峰, 等. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1289-1297.
Zhu H, Wang J L, Cheng F, et al. Monitoring and evaluation of eco-environmental quality of lake basin regions in central Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,

- 31(4): 1289-1297.
- [8] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 等. 长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4030-4041.
- Ji P F, Xu H, Zhan X, *et al.* Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4030-4041.
- [9] 程国微, 陈岩, 高伟. 2016—2019 年长江流域湖库群氮磷污染源解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 207-217.
- Cheng G W, Chen Y, Gao W. Source apportionment of nitrogen and phosphorus in the lakes and reservoirs of Yangtze River Watershed from 2016 to 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 207-217.
- [10] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress[J]. Nature, 2019, 569(7758): 649-654.
- [11] 管锡东, 蒋宏忱, 姜颖, 等. 近百年来我国西南地区酸沉降背景下湖泊环境变化——来自四面山龙潭湖沉积硅藻证据[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1940-1950.
- Guan X D, Jiang H C, Jiang Y, *et al.* Lake environmental changes in response to acid deposition in Southwest China over the last century: evidence from sedimentary diatoms in Lake Longtan of the Simian Mountains[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1940-1950.
- [12] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810.
- [13] 曾华献, 王敬富, 李玉麟, 等. 贵州红枫湖近 10 年来 (2009—2018 年) 水质变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 2020, 32(3): 676-687.
- Zeng H X, Wang J F, Li Y L, *et al.* Water quality change and influencing factors in Lake Hongfeng (Guizhou Province), 2009-2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3): 676-687.
- [14] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1510-1524.
- Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1510-1524.
- [15] 全栋, 张生, 史小红, 等. 环境因子对乌梁素海水体营养状态的影响: 基于 2013—2018 年监测数据的分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1610-1619.
- Quan D, Zhang S, Shi X H, *et al.* Impact of water environment factors on eutrophication status of Lake Ulansuhai based on monitoring data in 2013 - 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(6): 1610-1619.
- [16] 刘艳萍, 肖雅倩, 张颖. 洞庭湖流域人类活动净磷输入及其空间分布[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2404-2414.
- Liu Y P, Xiao Y Q, Zhang Y. Spatial distribution of the net anthropogenic phosphorus input (NAPI) to the Dongting Lake basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2404-2414.
- [17] 陶玉强, 赵睿涵. 持久性有机污染物在中国湖库水体中的污染现状及分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 309-324.
- Tao Y Q, Zhao R H. Occurrence and distribution of persistent organic pollutants in water of Chinese lakes and reservoirs[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 309-324.
- [18] Gao X Y, Shi X R, Cui Y B, *et al.* Organic pollutants and ambient severity for the drinking water source of western Taihu Lake[J]. Ecotoxicology, 2011, 20(5): 959-967.
- [19] 李小雁, 李凤霞, 马育军, 等. 青海湖流域湿地修复与生物多样性保护[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [20] 孙恬, 叶斌, 王延华, 等. 中国湖泊 PAHs 污染现状及其源解析研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 151-160.
- Sun T, Ye B, Wang Y H, *et al.* Pollution of PAHs in China's lakes and its source apportionment: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(6): 151-160.
- [21] 王志强, 崔爱花, 缪建群, 等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6253-6264.
- Wang Z Q, Cui A H, Miu J Q, *et al.* Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6253-6264.
- [22] 范雅双, 于婉晴, 张婧, 等. 太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系——以东苕溪上游为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1478-1489.
- Fan Y S, Yu W Q, Zhang J, *et al.* Response of water quality to landscape pattern change in the water source area of upper reaches of Lake Taihu: a case study in the upper reaches of Dongtiaoxi River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1478-1489.
- [23] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 朱立平, 彭萍, 张国庆, 等. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用[J]. 湖泊科学, 2020, 32(3): 597-608.
- Zhu L P, Peng P, Zhang G Q, *et al.* The role of Tibetan Plateau lakes in surface water cycle under global changes[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3): 597-608.
- [25] 乜贞, 卜令忠, 郑绵平. 中国盐湖锂资源的产业化现状——以西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖为例[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 95-101.
- Nie Z, Bu L Z, Zheng M P. Lithium resources industrialization of salt lakes in China: a case study of the Xitaijinaier salt lake and the Zabuye salt lake[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(1): 95-101.
- [26] 罗磊. 青藏高原湿地退化的气候背景分析[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 190-199.
- Luo L. Analysis of climatic background of wetlands degradation in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Wetland Science, 2005, 3(3): 190-199.
- [27] 李明月, 孙学军, 李胜楠, 等. 青藏高原及其周边地区冰川融水径流无机水化学特征研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 562-574.
- Li M Y, Sun X J, Li S N, *et al.* Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 562-574.
- [28] 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.
- Wang P, Shang Y N, Shen L C, *et al.* Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 874-881.
- [29] Keil A, Berking J, Mügler I, *et al.* Hydrological and geomorphological basin and catchment characteristics of lake Nam Co, South-Central Tibet [J]. Quaternary International, 2010, 218(1-2): 118-130.
- [30] 李承鼎, 康世昌, 刘勇勤, 等. 西藏湖泊水体中主要离子分

- 布特征及其对区域气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 743-754.
- Li C D, Kang S C, Liu Y Q, *et al.* Distribution of major ions in waters and their response to regional climatic change in Tibetan lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(4): 743-754.
- [31] 闫露霞, 孙美平, 姚晓军, 等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 900-910.
- Yan L X, Sun M P, Yao X J, *et al.* Lake water in the Tibet Plateau: quality change and current status evaluation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 900-910.
- [32] 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.
- Gao T G, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic features and their sources in the Nam co basin over the Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- [33] 王康, 康世昌, 郭军明, 等. 青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2288-2294.
- Wang K, Kang S C, Guo J M, *et al.* Spatial and temporal distribution of total mercury (T-Hg) in different water bodies of Nam Co, Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2012, **33**(7): 2288-2294.
- [34] 余石勇, 刘孟, 赵元艺, 等. 西藏麻米错盐湖大型锂硼矿盆地水化学特征[J]. 地质学报, 2022, **96**(6): 2195-2205.
- Yu S Y, Liu M, Zhao Y Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of large-scale lithium-boron mine basin in the Mami Co Saline Lake, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, **96**(6): 2195-2205.
- [35] Yang X D, Wang S M, Kamenik C, *et al.* Diatom assemblages and quantitative reconstruction for paleosalinity from a sediment core of Chencuo Lake, southern Tibet[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, **47**(6): 522-528.
- [36] Dong H L, Jiang H C, Yu B S, *et al.* Impacts of environmental change and human activity on microbial ecosystems on the Tibetan Plateau, NW China[J]. GSA Today, 2010, **20**(6): 4-10.
- [37] Li X D, Long D, Huang Q, *et al.* High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000-2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions[J]. Earth System Science Data, 2019, **11**(4): 1603-1627.
- [38] Qiu J. China: the third pole[J]. Nature, 2008, **454**(7203): 393-396.
- [39] 姜加虎, 黄群. 青藏高原湖泊分布特征及与全国湖泊比较[J]. 水资源保护, 2004, **20**(6): 24-27.
- Jiang J H, Huang Q. Distribution and variation of lakes in Tibetan Plateau and their comparison with lakes in other part of China[J]. Water Resources Protection, 2004, **20**(6): 24-27.
- [40] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [41] 郭艳丽, 吴桐. 电感耦合等离子体发射光谱法测定氯化物型卤水中的六元素[J]. 化学工程师, 2018, **32**(7): 28-30.
- Guo Y L, Wu T. Determination of six elements in chloride type brine by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. Chemical Engineer, 2018, **32**(7): 28-30.
- [42] 霍成玉, 胡兰基, 何媛媛. 酸碱滴定结合硼酸盐校正法测定盐湖卤水中的碳酸根、碳酸氢根和氢氧根[J]. 当代化工, 2021, **50**(7): 1760-1764.
- Huo C Y, Hu L J, He Y Y. Determination of carbonate, bicarbonate and hydroxy ions in salt lake brine by acid-base titration combined with borate correction[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, **50**(7): 1760-1764.
- [43] Liu D, Du Y X, Yu S J, *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River[J]. Water Research, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [44] Hou W, Sun S H, Wang M Q, *et al.* Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: using a water quality index method[J]. Ecological Indicators, 2016, **61**: 309-316.
- [45] Markich S J, Brown P L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury-Nepean River, south-eastern Australia[J]. Science of the Total Environment, 1998, **217**(3): 201-230.
- [46] Lasaga A C, Soler J M, Ganor J, *et al.* Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, **58**(10): 2361-2386.
- [47] Liu C, Zhu L P, Wang J B, *et al.* In-situ water quality investigation of the lakes on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2021, **66**(17): 1727-1730.
- [48] Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, *et al.* Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009)[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(7): 1733-1742.
- [49] Liu G, Li S J, Song K S, *et al.* Remote sensing of CDOM and DOC in alpine lakes across the Qinghai-Tibet Plateau using Sentinel-2A imagery data[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112231.
- [50] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年来青藏高原原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 874-881.
- Wan W, Xiao P F, Feng X Z, *et al.* Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(6): 874-881.
- [51] 李均力, 盛永伟, 骆剑承, 等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 311-320.
- Li J L, Sheng Y W, Luo J C, *et al.* Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(3): 311-320.
- [52] Xu Y, Miao L, Li X C, *et al.* Antibacterial and antilarval activity of deep-sea bacteria from sediments of the west Pacific Ocean[J]. Biofouling, 2007, **23**(2): 131-137.
- [53] Alva V A, Peyton B M. Phenol and catechol biodegradation by the haloalkaliphile *Halomonas campisalis*: influence of pH and salinity[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(19): 4397-4402.
- [54] Béguin P, Aubert J P. The biological degradation of cellulose[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1994, **13**(1): 25-58.
- [55] 邵天杰, 赵景波, 董治宝. 巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征[J]. 地理学报, 2011, **66**(5): 662-672.
- Shao T J, Zhao J B, Dong Z B. Water chemistry of the lakes and groundwater in the Badain Jaran Desert[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(5): 662-672.
- [56] Şehnaz Ş, Şene E, Davraz A, *et al.* Hydrogeological and hydrochemical investigation in the Burdur Saline Lake Basin, southwest Turkey[J]. Geochemistry, 2020, **80**(S4), doi: 10.1016/j.chemer.2019.125592.
- [57] Li Z X, Gao Y, Wang S Y, *et al.* Phytoplankton community response to nutrients along lake salinity and altitude gradients on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecological Indicators, 2021,

- 128, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107848.
- [58] Banda J F, Zhang Q, Ma L Q, *et al.* Both pH and salinity shape the microbial communities of the lakes in Badain Jaran Desert, NW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148108.
- [59] 王海雷, 郑绵平. 青藏高原湖泊水化学与盐度的相关性初步研究[J]. *地质学报*, 2010, **84**(10): 1517-1522.
Wang H L, Zheng M P. Preliminary Study of the correlation between hydrochemistry and salinity of lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, **84**(10): 1517-1522.
- [60] Zhang G Q, Luo W, Chen W F, *et al.* A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau[J]. *Science Bulletin*, 2019, **64**(18): 1306-1309.
- [61] Xu H, Hou Z H, An Z S, *et al.* Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai catchments, NE Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Quaternary International*, 2010, **212**(1): 35-43.
- [62] Wang B C, Yang J, Jiang H C, *et al.* Chemical composition of *n*-alkanes and microbially mediated *n*-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity[J]. *Chemical Geology*, 2019, **524**: 37-48.
- [63] 任康, 郭坤, 郑景明, 等. 四种草本植物混播处理在西藏措那湖沙害区植被恢复中的表现[J]. *生态学报*, 2020, **40**(3): 910-920.
Ren K, Guo K, Zheng J M, *et al.* Growth of four herbaceous species in different mixing modes for restoration of desertified grassland around Cuona Lake, Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 910-920.
- [64] 荀照君, 刘峰贵. 冬给措纳湖[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2018, **2**(4): 454-455.
Gou Z J, Liu F G. Donggi Conag Lake, Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2018, **2**(4): 454-455.
- [65] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017 年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. *干旱区研究*, 2020, **37**(3): 652-662.
Wang K X, Zhang Y S, Zhang T, *et al.* Analysis of climate change in the Selin Co basin, Tibetan Plateau, from 1979 to 2017[J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(3): 652-662.
- [66] 杨定, 杨振山. 高寒地区生态贫困评价及影响因素分析——以色列错地区为例[J]. *资源科学*, 2021, **43**(2): 293-303.
Yang D, Yang Z S. Ecological poverty and its influencing factors in an alpine area: case study of the Selinco area[J]. *Resources Science*, 2021, **43**(2): 293-303.
- [67] 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.
Wang J B, Peng P, Ma Q F, *et al.* Modern limnological features of Tangra Yumco and Zhari Namco, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 629-632.
- [68] 郑伟, 董全民, 李世雄, 等. 放牧强度对环青海湖高寒草原群落物种多样性和生产力的影响[J]. *草地学报*, 2012, **20**(6): 1033-1038.
Zheng W, Dong Q M, Li S X, *et al.* Impact of grazing intensities on community biodiversity and productivity of alpine grassland in Qinghai Lake region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, **20**(6): 1033-1038.
- [69] 罗莎莎, 郑绵平. 西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J]. *地质与勘探*, 2004, **40**(3): 11-14.
Luo S S, Zheng M P. Exploitation actuality of saline lake lithium resources in Tibet[J]. *Geology and Prospecting*, 2004, **40**(3): 11-14.
- [70] 孔凡晶, 郑绵平. 盐湖生物学研究进展——第二届“盐湖生物学与嗜盐生物与油气生成学术研讨会”综述[J]. *地球学报*, 2007, **28**(6): 603-608.
Kong F J, Zheng M P. Research progress in saline lake biology: a review of the 2nd conference of “saline lake biology and its relationship with petroleum generation”[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, **28**(6): 603-608.
- [71] 马艳芳, 张志宏, 李侃社, 等. 硫酸钠亚型盐湖卤水不同温度下 Li^+ 富集、结晶行为研究——以西藏拉果错盐湖为例[J]. *地球学报*, 2016, **37**(3): 307-312.
Ma Y F, Zhang Z H, Li K S, *et al.* Li^+ enrichment behavior of sodium sulfate in the saline lake brine at different temperatures: the case of Laggor salt lake brines in Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, **37**(3): 307-312.
- [72] 陈若愚, 夏树屏, 高世扬. 小柴旦盐湖钠硼解石矿物热脱水机理的探讨[J]. *矿物学报*, 2005, **25**(4): 374-378.
Chen R Y, Xia S P, Gao S Y. Thermal dehydration mechanism of ulexite from Xiao Chaidan salt lake[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, **25**(4): 374-378.
- [73] 于升松, 刘兴起, 谭红兵, 等. 茶卡盐湖水文、水化学及资源开发研究[J]. *盐湖研究*, 2005, **13**(3): 10-16.
Yu S S, Liu X Q, Tan H B, *et al.* Hydrology, hydrochemistry and exploitation of resources in Caka Salt Lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2005, **13**(3): 10-16.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)