

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                  |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 .....                                                    | 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)                    |
| 中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 .....                                                       | 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)                   |
| 基于长时间序列的北京 PM <sub>2.5</sub> 浓度日变化及气象条件影响分析 .....                                | 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)                      |
| 2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 .....                                                   |                                        |
| 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)                       |                                        |
| 抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 .....                                               |                                        |
| 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)                                               |                                        |
| 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 .....                                                      | 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)         |
| 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 .....                                               |                                        |
| 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)                                               |                                        |
| 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 .....                                                      | 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)         |
| 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 .....                                               | 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)                      |
| 桂林市酸雨变化特征及来源分析 .....                                                             | 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)              |
| 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH <sub>3</sub> 和N <sub>2</sub> O)减排效果比较:以夏玉米季为例 .....          | 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)                   |
| 青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O通量的观测 ..... | 吴建国,周巧富 (2914)                         |
| 三峡库区香溪河秋末至中冬CO <sub>2</sub> 和CH <sub>4</sub> 分压特征分析 .....                        | 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)        |
| 气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 .....                                                     | 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)                  |
| 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 .....                                        |                                        |
| 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)                                                        |                                        |
| 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 .....                                             | 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)            |
| 库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 .....                                                | 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)           |
| 农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 .....                                                       | 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)               |
| 农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 .....                                                    | 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)                  |
| 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 .....                                          |                                        |
| 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)                                                    |                                        |
| 重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 .....                                                     | 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)        |
| 深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 .....                                                  | 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)                   |
| 柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 .....                                                 | 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)              |
| 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 .....                                                  | 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)                 |
| 昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 .....                                                   | 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)           |
| 甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 .....                                                         | 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)              |
| 漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征 .....                                                   | 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)               |
| 雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 .....                                                     | 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)           |
| Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 .....                                                    | 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)          |
| Ce <sup>3+</sup> 与Cu <sup>2+</sup> 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 .....                    | 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)            |
| Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 .....                                                      | 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073) |
| 石墨烯-TiO <sub>2</sub> 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 .....                                  | 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)                      |
| 单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 .....                                                      | 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)     |
| 硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 .....                                                         | 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)          |
| 膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 .....                                                 | 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)            |
| ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 .....                                               | 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)           |
| 活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 .....                                                     | 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)                |
| 低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 .....                                                  | 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)        |
| 超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 .....                                                        | 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)        |
| 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 .....                                                   | 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)       |
| 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 .....                                                 |                                        |
| 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)                                                |                                        |
| 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 .....                                                     | 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)                  |
| 我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 .....                                                | 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)               |
| 流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 .....                                                       | 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)    |
| 聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu <sup>2+</sup> 、Zn <sup>2+</sup> 的吸附特性 .....                | 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)                |
| 新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 .....                                                      | 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)                  |
| 纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 .....                                                      | 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)               |
| 鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 .....                                            |                                        |
| 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)                                                 |                                        |
| 不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 .....                                                  | 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)         |
| 中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 .....                                                        | 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)         |
| 贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 .....                                                  | 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)            |
| 不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 .....                                               | 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)                    |
| 《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)                           |                                        |

# 气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析

张晨, 刘汉安, 高学平, 张文娜

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 对于桥水库 1992 ~ 2011 年 20 年间的气候要素和水质指标进行数理分析, 探求气候变化对该库总磷与溶解氧的潜在影响. 首先, 根据气温 MK 突变检验和距平分析, 将研究期划分为 1992 ~ 2001 低温低风速年和 2002 ~ 2011 高温高风速年两个时段; 其次, 在应用上改进非参数回归分析法, 图示比较两个时段各要素非线性趋势, 获取气候要素在两个时段间的季节性变化规律; 最后, 通过比较两个时段气候要素对水质指标潜在影响的可能性, 利用双  $k$  值潜在影响判别法揭示潜在影响规律. 结果表明, 气候要素在各季节的变化有可能对水库总磷和溶解氧浓度造成潜在影响. 通过探讨入库负荷和库总磷浓度的年际变化差异, 以及观测高温年、低温年水生植物春季物候和总磷浓度, 证实春季气温升高降低了水库总磷浓度. 该研究为探究气候变化对于桥水库水质的影响机制和规律提供参考依据.

**关键词:** 气候变化; 水质; 潜在影响; 非参数回归分析; 于桥水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2932-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.014

## Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir

ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, ZHANG Wen-na

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The climate indicators and water quality parameters, e. g. total phosphorus (TP) and dissolved oxygen (DO) in a period of 20 years (1992-2011) were analyzed to explore potential impacts of climate change on nutrients and DO. Firstly, the study period was divided into two decades: 1992-2001 cool decade and 2002-2011 warm decade for the Mann Kendall statistical test and the accumulative anomaly test. Secondly, the significance of climate parameters in seasonal variations was analyzed by comparing the nonlinear trends of parameters using non-parametric regression in two decades respectively. Finally, comparing the relationship between climate indicators and water quality parameters for two decades, the potential impacts were investigated by double- $k$  method. The results showed that the higher temperature potentially decreased TP concentrations in winter and spring and DO concentration in autumn. However, the increases in air temperature in winter and spring increased DO concentration. The increase in wind speed was most likely to increase TP and DO concentrations in all four seasons. A positive correlation between precipitation and TP concentration was found in all four seasons. The DO concentration declined when rainfall decreased in summer. The difference in temporal trends between inflow P loading and concentrations in reservoir indicated the potential impacts of climate change on TP concentration. The field data in TP and macrophytes biomass in spring was the evidence supporting that TP in spring was likely to decline when the air temperature increased. The study provides a reference for the impacts and mechanisms of climate change on water quality in Yuqiao reservoir.

**Key words:** climate change; water quality; potential impacts; non-parametric regression; Yuqiao Reservoir

全球气候变暖已是不争的事实, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 份评估报告 (AR5) 指出, 20 世纪初至今 (1901 ~ 2012 年) 的百余年, 地球表面气温平均上升了  $0.89^{\circ}\text{C}$  [1]. 人类活动不可避免地引起了气候变化 [2], 而湖库作为淡水生态系统的载体, 对气候变化有着指示、记录和调节作用 [3]. 国际上较早研究气候变化对水循环的影响可追溯到 1970 年初 [4], 如气候变化引起流域径流变化, 改变湖库水位和面积 [5,6]. 直到 20 世纪末, 人们对水域生态环境的关注不断提高, 学者们亦将研究气候变化的影响从水量延伸至水质 [7,8].

随着气候变化对水环境影响研究的逐渐深入,

各国学者开始探求气候变化对湖库水环境的影响机制并开展实例研究. 气候变暖影响湖库热力特性, 主要表现为延长分层期、减小混合层和温跃层深度、增加热稳定性、减弱对流混合, 如千岛湖 [9]、Lake Tanganyika [10,11] 和 Lake Zurich [12] 等; 气候变化影响溶解氧分层 [13], 滞温层更易形成厌氧条件 [14], 可能引起溶解氧浓度下降, 如 Lake Müggelsee [15] 和 Sau Reservoir [6]; 气候变化促进沉积物中营养盐释

收稿日期: 2015-12-02; 修订日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50909070); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (51321065); 天津市自然科学基金项目 (13JQNJC09200)

作者简介: 张晨 (1981 ~ ), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境水力学、生态水力学, E-mail: emil@tju.edu.cn

放<sup>[15]</sup>,表层水体营养水平提高,加速水体富营养趋势<sup>[16]</sup>,如 Lake Müggelsee、流溪河水库<sup>[17]</sup>和石头口门水库<sup>[18]</sup>等;气候变化还改变浮游植物春季物候,更易导致浮游植物繁生,如太湖<sup>[19]</sup>和 Lake of the Woods<sup>[20]</sup>。显然,气候变化已经且持续影响着湖库水环境,湖泊物理、化学和生物特性对气候变化亦能做出迅速地反应<sup>[21]</sup>。

因此,本研究针对于桥水库 20 年的气候要素和水质指标数据,利用数理统计方法尝试分析气候变化对该库总磷和溶解氧的潜在影响,以期探究气候变化对湖库水环境的影响机制和规律提供参考依据。

## 1 材料与方法

气候变化的内涵很丰富,包括气候长期缓慢的变化、极端气候事件、季节交替的年际差异等。虽然人类活动诸如土地利用、运行调度、物质负荷变化对湖库水质起主要作用,但是气候变暖、降雨和风速等气候要素变化对湖库物理、化学和生物过程产生直接和间接的影响。本研究所讨论的气候变化对水质潜在影响是指,在不分割人类活动影响的前提下,尝试通过数理分析方法探讨气候变化对水质的间接影响。本方法强调的是一种由气候因子长期缓慢变化引起的可能发生和潜在的影响。

### 1.1 研究区域

于桥水库位于天津市蓟县城东 4 km、蓟运河左支流州河上游出山口处,北纬 40°02′,东经 117°25′,库区由东向西倾斜。总库容 15.59 亿 m<sup>3</sup>,兴利库容为 3.85 亿 m<sup>3</sup>,正常蓄水位 21.16 m(大沽),正常蓄水位水面面积 86.8 km<sup>2</sup>,平均水深 4.5 m。于桥水库作为天津市水源地,从滦河水系经黎河年均调水 5.39 亿 m<sup>3</sup>(1983~2011 年),每日经放水洞向天津市区县供水,其水质状况较好,总磷浓度为(43±3) μg·L<sup>-1</sup>(1989~2011 年)且呈下降趋势<sup>[22]</sup>,营养状况处于贫-中营养水平,水生态系统处于沉水植物占优的清水稳态<sup>[23,24]</sup>,优势种为菹草 *Potamogeton crispus* Linn. 等。

### 1.2 水质监测成果与气象数据

于桥水库自 1989 年设站对水质进行常规监测,监测点从最初的 3 个(库上游、库心、放水洞)增加至 13 个,其中本研究选用最具代表性的库心监测数据作为分析数据。常规监测每半月一次,监测项目包括水温、透明度、pH、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数、生化需氧量、溶

解氧、叶绿素等基本项目 22 项。采样及监测方法均依据文献[25]及相关标准。本研究选用总磷和溶解氧作为分析指标。

气象数据采用国家气象站遵化站(水库流域内)的气象成果,包括气温、降水、风速日值数据,数据来源于中国气象数据网。沉水植物菹草生物量源于文献[24],采用刈割法收割测定。

本研究中春季为每年 3 月、4 月和 5 月,夏季为 6 月、7 月和 8 月,秋季为 9 月、10 月和 11 月,冬季为 12 月、1 月和 2 月。水质和气象数据的年均值、季均值和月均值均由日值计算而得,降水量以累积降水量计。

### 1.3 非参数回归分析

传统的水质趋势分析方法如 Mann Kendall (MK) 检验<sup>[26]</sup>和季节性 Kendall 检验<sup>[27]</sup>,这些检验只能在假定单调趋势的前提下才能实现。非参数回归分析法(non-parametric regression)是由 Hastie 等<sup>[28]</sup>提出的一种非线性回归趋势分析法,后经 Bowman 等<sup>[29]</sup>改进,并由 Ferguson 等<sup>[30]</sup>在水质及降水影响因素的趋势分析中得以实践应用。随后,该方法成功地应用于检验气候变化对水质要素的影响<sup>[31,32]</sup>。

非参数回归分析法通过扩大自由度来获得更多的信息,根据提供的数据画出一条与指定自由度相适应的非参数回归曲线和参考域。参考域表示如果非参数影响不显著(没有证据表明有变化)时,期望平均水平的范围。生成非参数回归图形时,对于水质要素,考虑到消弱模型的共线性、异方差性和使数据更加平稳,对因变量进行对数化处理。该方法在季节性趋势分析中有明显优势,可通过统计分析工具 R 软件(RStudio-0.98.501)实现。

较以往的非参数回归分析法,本研究在应用上加以改进,图示比较两个时段的非线性趋势结果,获取气候要素的在两个时段间的差异变化。

### 1.4 双 $k$ 值潜在影响判别法

基于气候要素和水质指标的季节性趋势分析,利用两个时段数据,分别建立气候要素(自变量)和水质指标(因变量)的线性相关关系,得到相关线的斜率  $k$  值;根据两组  $k$  值的差  $\Delta k = k_2 - k_1$  判别自变量对因变量的影响。若  $\Delta k > 0$  表示有增大的潜在影响, $\Delta k < 0$  则表示有减小的潜在影响。此外,需要注意自变量的先决变化,如气温是否升高,具体分析过程如图 1 所示。本研究中  $k_2$  指第二个时段(LD), $k_1$  指第一个时段(FD)。该相关关系是为了获取潜在影

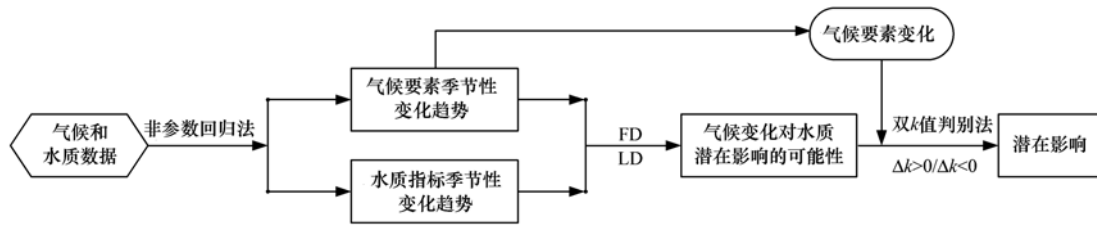


图1 气候变化对水质潜在影响的分析过程

Fig. 1 Process of analysis for potential impact of climate change on water quality

响的可能性 ( $\Delta k$  值), 并非表示因果关系 (相关系数).

## 2 结果与分析

### 2.1 气候要素和水质指标年际变化

对 1992 ~ 2011 年 20 年间气温、风速、降水、总磷、溶解氧年际变化分别进行线性回归分析, 如图 2 所示. 其中, 气温、风速和总磷表现出显著的趋势变化 ( $P < 0.05$ ), 其余 3 种指标未有显著变化.

气温呈上升趋势, 20 年间的年均气温  $11.9^{\circ}\text{C}$ , 年均最低气温  $11.0^{\circ}\text{C}$ , 最高气温  $12.7^{\circ}\text{C}$ . 值得注意的是, 1992 ~ 2001 前 10 年年均气温  $11.6^{\circ}\text{C}$ , 年均最低气温  $11.0^{\circ}\text{C}$ , 最高气温  $12.3^{\circ}\text{C}$ ; 2002 ~ 2011 后 10 年年均气温  $12.1^{\circ}\text{C}$ , 年均、最低、最高气温后 10 年较前 10 年分别上升  $0.5$ 、 $0.5$  和  $0.4^{\circ}\text{C}$ . 最低气温出现在前 10 年的 1992、1993、1996 年, 最高气温出现在 2007 年.

风速呈上升趋势, 20 年间的年均风速  $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 年均最小风速  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大风速  $1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 年均、最小、最大风速后 10 年较前 10 年分别增大  $0.4$ 、 $0.2$  和  $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

总磷浓度呈下降趋势, 20 年间的年均浓度  $39.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均最小浓度  $25.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最大浓度  $90.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 其中, 最小浓度出现在 2008 年, 最大浓度出现在 1994 年.

对 1992 ~ 2011 年的气温进行 MK 突变检验和距平分析, 如图 3 所示, 以判定气候变化的分界点. UF 曲线呈波动上升趋势, 在置信区间内与 UB 曲线有 3 个交点, 即突变点, 分别为 1997、1999 和 2001 年, 说明气温有可能在此 3 年发生了较大变化. 年均气温的累计距平分析结果表明, 1992 ~ 2001 年呈下降趋势, 2001 ~ 2011 年呈上升趋势, 说明年均气温经历了下降-上升的过程, 气温突变可能发生在 2001 年. 由此, 结合气温和风速的前后 10 年的差异变化, 将研究期划分为 1992 ~ 2001 低温低风速年 (前 10 年) 和 2002 ~ 2011 高温高风速年 (后 10 年)

两个时段. 对两时段分别进行季节性变化分析, 进一步探究气候要素变化对水质指标的潜在影响.

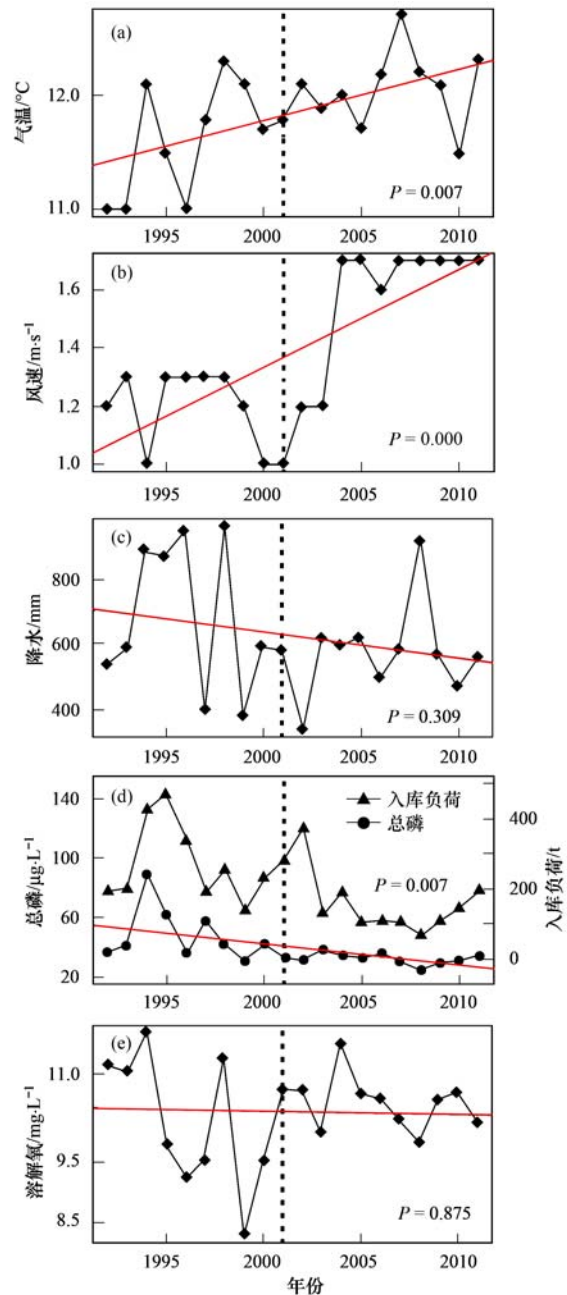


图2 各要素年均值和线性回归趋势线

Fig. 2 Annual means and linear regression trend lines of climate indicators and water quality parameters

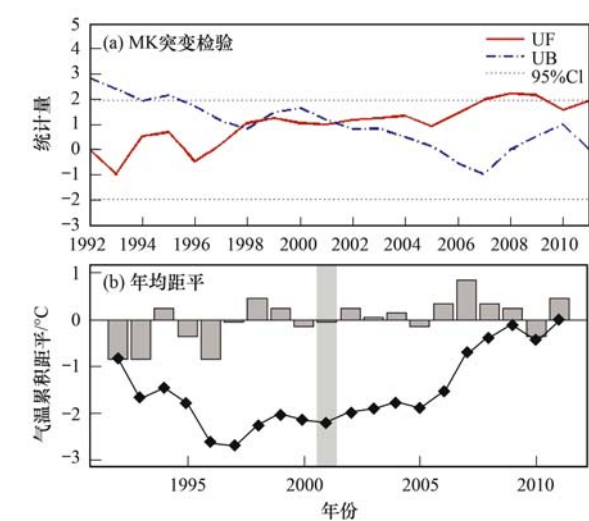


图3 气温 MK 突变检验和距平分析

Fig. 3 Air temperature for the Mann Kendall statistical test and the accumulative anomaly test

2.2 气候要素和水质指标季节性变化

采用非参数回归法分别对 1992 ~ 2001 前 10 年和 2002 ~ 2011 后 10 年的气候要素和水质指标进行季节性变化分析,如图 4 所示, $P$  值列于表 1.

气温趋势线前、后 10 年呈波动变化,其中后 10 年的秋季表现出显著的升高趋势( $P = 0.086$ ). 前

后 10 年相比,春、秋、冬三季中,气温普遍升高,平均升高 0.43、0.61、0.56℃,后 10 年的参考域均位于前 10 年之上;夏季气温未有升高趋势,后 10 年参考域较窄位于前 10 年参考域之内,表明后 10 年气温波动较小.

风速趋势线后 10 年四季风速均呈升高趋势,其中春( $P = 0.094$ )、夏( $P = 0.095$ )、冬( $P = 0.079$ )表现出显著的升高趋势. 前后 10 年相比,四季风速均提高,平均增大 0.3、0.37、0.38、0.51  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且后 10 年风速波动小.

降水趋势线四季均呈波动变化,春冬季有上升趋势,而夏季略显下降. 前后 10 年相比,春冬两季降水量有所增加,分别增加 22.0 mm 和 1.2 mm;夏季降水量较明显降低,减少 134.9 mm;秋季降水波动较大,略有增加趋势.

总磷趋势线四季呈交替式下降趋势. 前后 10 年相比,总磷浓度四季分别下降 21.0、17.0、2.0 和 12.0  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且后 10 年波动较小. 溶解氧趋势线前 10 年春季和后 10 年秋季呈下降趋势. 前后 10 年相比,春秋冬季溶解氧浓度分别升高 1.13  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和降低 0.39  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.88  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且冬季波动较大;夏季无明显变化.

表 1 季节性非参数回归分析  $P$  值<sup>1)</sup>

Table 1 Non-parametric regression test results for seasonal trends

| 变量 | 气温    |              | 风速    |              | 降水    |       | 总磷    |       | 溶解氧   |              |
|----|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
|    | FD    | LD           | FD    | LD           | FD    | LD    | FD    | LD    | FD    | LD           |
| 春  | 0.501 | 0.528        | 0.709 | <b>0.094</b> | 0.558 | 0.719 | 0.140 | 0.240 | 0.157 | 0.171        |
| 夏  | 0.582 | 0.169        | 0.134 | <b>0.095</b> | 0.593 | 0.343 | 0.679 | 0.140 | 0.615 | 0.704        |
| 秋  | 0.157 | <b>0.086</b> | 0.124 | 0.124        | 0.718 | 0.520 | 0.829 | 0.535 | 0.604 | <b>0.097</b> |
| 冬  | 0.738 | 0.503        | 0.107 | <b>0.079</b> | 0.522 | 0.319 | 0.101 | 0.116 | 0.314 | 0.798        |

1) 黑体字为  $P < 0.1$ , 表示该指标的差异显著; FD 表示前 10 年, LD 表示后 10 年

2.3 气候要素变化对总磷与溶解氧的潜在影响

采用双  $k$  值潜在影响判别法分别对总磷与溶解氧的气候要素变化潜在影响进行分析,如图 5 所示. 比较前后 10 年气候要素对各水质指标的潜在影响的可能性,统计结果可知,春季总磷受气温、风速和降水影响,气温升高有可能降低总磷浓度,其原因可能是温度升高使水生植物的春季物候提前<sup>[33]</sup>、增强了水生植物光合作用<sup>[34,35]</sup>,从而加速了对营养物的摄取;风速增大可能加强水体垂向的物质交换,一定程度上促进了底泥营养盐的释放<sup>[36]</sup>,提高总磷浓度;降水增大可能致使入库负荷增加进而提高总磷浓度. 夏季总磷受风速和降水影响,风速增大提高总磷浓度;降水减少可能致使入库负荷减少进而

降低总磷浓度. 秋季总磷主要受降水影响,后 10 年降水与总磷浓度之间存在正相关,降水增大有提高总磷浓度的趋势. 冬季与春季相似,总磷受气温、风速和降水的影响.

春季溶解氧受气温、风速和降水影响,气温升高略显提高溶解氧浓度;风速增大促进水气交换,提高溶解氧浓度<sup>[37]</sup>;降水增大提高水体流动性,从而提高溶解氧浓度. 夏季溶解氧受风速和降水的影响,风速增大提高溶解氧浓度,而降水减少降低溶解氧浓度. 秋、冬季溶解氧主要受风速的影响,风速增大提高溶解氧浓度;气温升高可能改变溶氧层厚度,进而降低秋季溶解氧浓度<sup>[13,38]</sup>;而冬季气温升高延缓了冰冻期,有可能提高溶解氧浓度.

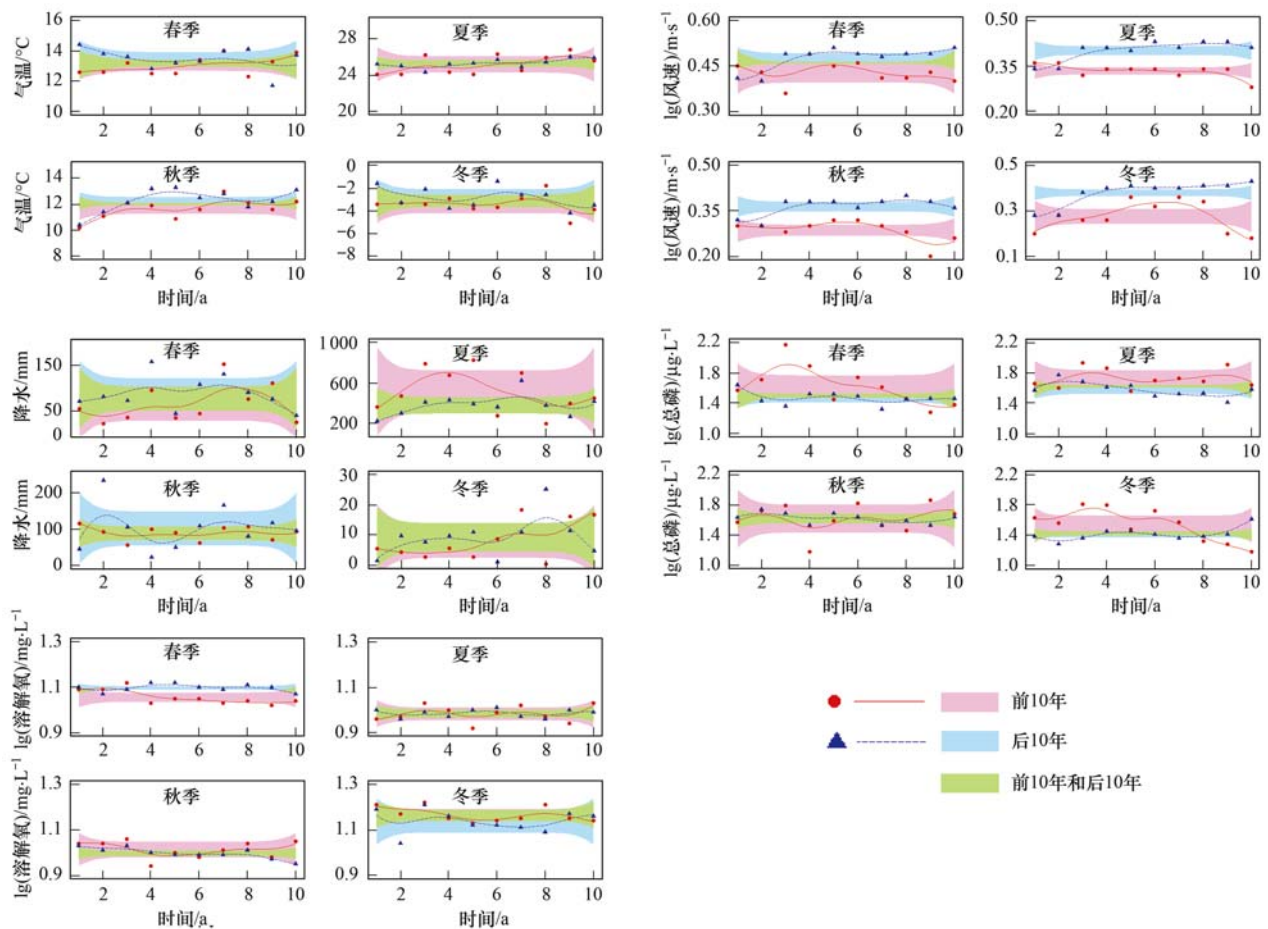


图4 各要素季节性非参数回归分析

Fig. 4 Trends in seasonal non-parametric regression analysis for two decades

综上,气温升高有可能降低冬春季总磷浓度;风速增大有可能提高四季的总磷浓度;各季节降水变化对总磷浓度呈正向影响.对于溶解氧而言,气温升高有可能提高冬春季溶解氧浓度,降低秋季浓度;风速增大有可能提高四季溶解氧浓度;夏季降水减少使溶解氧浓度降低.

### 3 讨论

#### 3.1 入库负荷和气候变化对总磷的综合影响

于桥水库入库负荷和库总磷浓度变化趋势如图2(d)所示.入库负荷在1992~1995年呈上升趋势,1995年达到最大值471.7 t;而后逐年下降,1999~2002年又出现第二次升幅,其中2002年达到次大值375.4 t.虽然库总磷浓度主要受入库负荷的影响,但存在两点显著差异.首先,出现极值年份不同.库总磷浓度1994年达到最大值 $90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,先于入库负荷极值,故有其他因素影响使得1995年库总磷浓度下降.而图2(a)中1994年气温出现极大

值 $12.1^{\circ}\text{C}$ 和1995年较高值 $11.5^{\circ}\text{C}$ ,说明气温升高可能是使总磷降低的原因之一.其次,1999~2002年,库总磷浓度未呈上升趋势,期间气温恰处于突变期(2001年突变点),亦表明气温升高对库总磷造成影响.

#### 3.2 春季总磷对气候变化的响应

于桥水库2008年和2009年春季气温、菹草生物量、总磷和溶解氧变化如图6所示.2008年3月平均气温为 $7.7^{\circ}\text{C}$ ,较2009年同期气温高 $1.9^{\circ}\text{C}$ .3月正是菹草生长关键时期返青期<sup>[23]</sup>,而气温升高使菹草春季物候提前,2008年4月1日菹草生物量(以DM计,下同)为 $109.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,较2009年4月8日的生物量为 $95.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 高,且较早监测到.菹草物候提前从而加速了对营养物的摄取,2008年春季总磷浓度均较2009年低,但溶解氧未有明显差别.由于水库生态系统处于沉水植物占优的清水稳态,春季气温升高并未引起藻类提前繁殖(叶绿素浓度均小于 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ).通过上述现象和实测数据可以

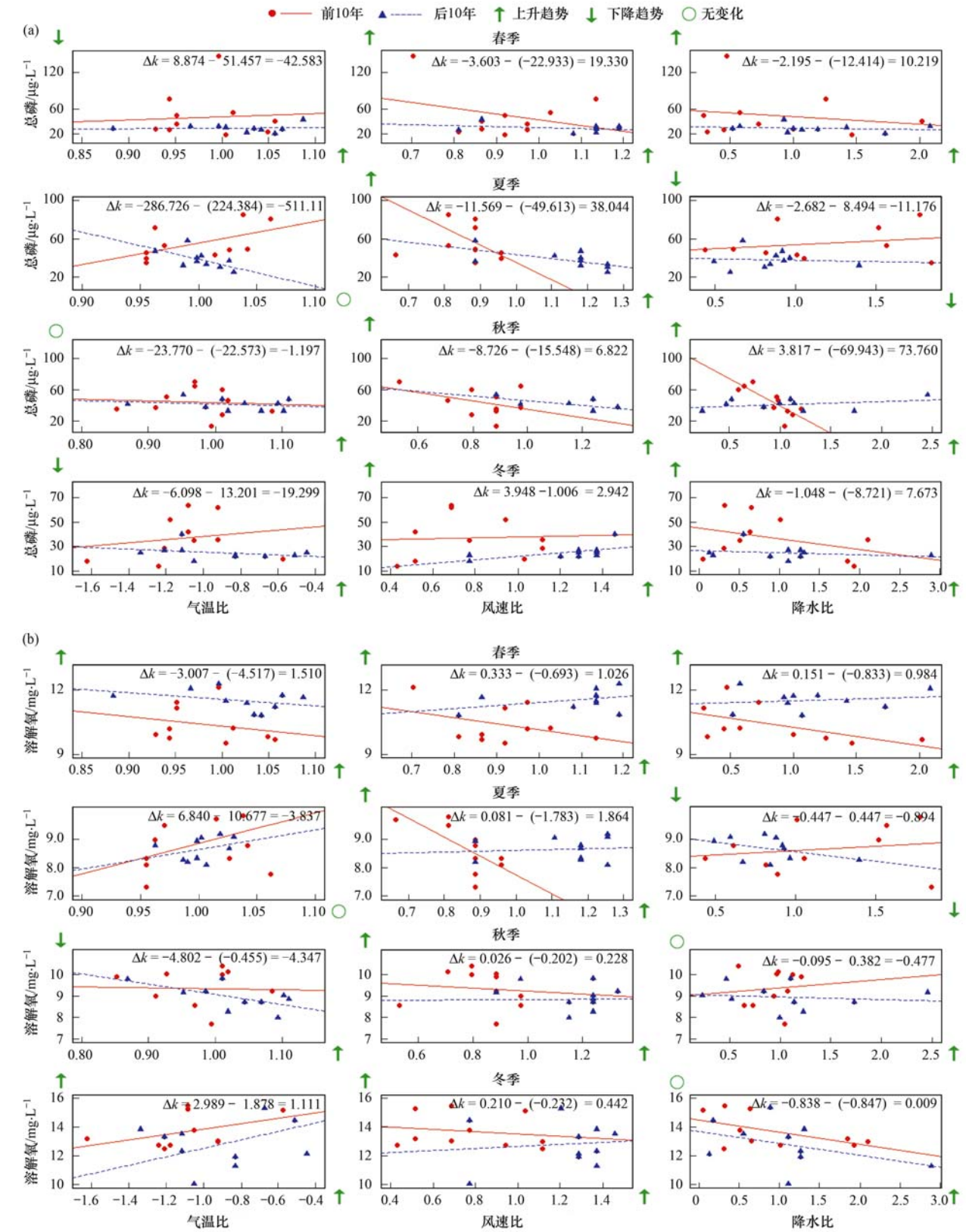


图5 前后10年气候要素对水质指标潜在影响  $\Delta k$  值

Fig. 5 Correlations between climate indicators and water quality parameters in two decades

证实气温升高有可能降低库总磷浓度. 另有研究表明,夏季气温升高和延长可能提高湖泊生产力<sup>[16]</sup>,

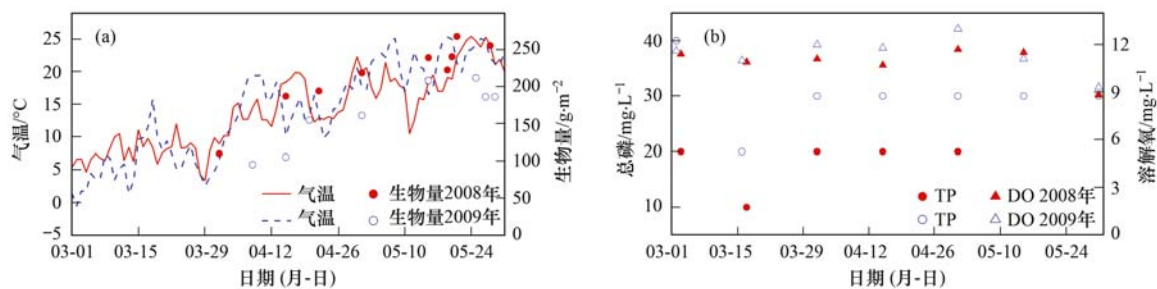


图6 于桥水库菹草生物量和磷氧浓度对气温变化的响应

Fig. 6 Responses of *P. crispus* biomass, TP and DO concentrations to air temperature increase

影响总磷浓度。

#### 4 结论

(1)根据于桥水库前后10年两个时段(1992~2001年和2002~2011年)非参数回归季节性对比分析表明,各季节气候要素和水质指标主要呈波动变化,气温和风速有升高趋势,总磷、溶解氧浓度均有下降趋势。其中,气温后10年秋季表现出显著升高趋势,风速后10年春夏秋冬表现出显著升高趋势,溶解氧后10年秋季显著下降。

(2)通过入库负荷和库总磷浓度比较表明,总磷年际变化受气候变化的影响与入库负荷不一致,如突变点2001年附近。

(3)采用双 $k$ 值潜在影响判别法揭示了气候要素在各季节的变化有可能对水库总磷和溶解氧浓度造成潜在影响。其中,通过观测现象和实测数据证实,春季气温升高降低了水库总磷浓度。其原因可能是温度升高使水生植物的春季物候提前,加速了对营养物的摄取。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis, technical summary [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Whitehead P G, Wilby R L, Battarbee R W, *et al.* A review of the potential impacts of climate change on surface water quality [J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, **54**(1): 101-123.
- [3] Adrian R, O'Reilly C M, Zagarese H, *et al.* Lakes as sentinels of climate change[J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(6part2): 2283-2297.
- [4] Landsberg H E. Man-made climatic changes: man's activities have altered the climate of urbanized areas and may affect global climate in the future[J]. Science, 1970, **170**(3964): 1265-1274.
- [5] van der Kamp G, Keir D, Evans M S. Long-term water level changes in closed-basin lakes of the Canadian prairies [J]. Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques, 2008, **33**(1): 23-38.

- [6] Marcé R, Rodríguez-Arias M À, García J C, *et al.* El Niño Southern Oscillation and climate trends impact reservoir water quality [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(10): 2857-2865.
- [7] Cooney C M. Budget: EPA's 1999 budget request highlights climate change, water quality programs [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(7): 170A.
- [8] Mimikou M A, Baltas E, Varanou E, *et al.* Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators [J]. Journal of Hydrology, 2000, **234**(1-2): 95-109.
- [9] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(4): 1193-1202.
- [10] O'Reilly C M, Alin S R, Plisnier P D, *et al.* Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa[J]. Nature, 2003, **424**(6950): 766-768.
- [11] Verburg P, Hecky R E, Kling H. Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika[J]. Science, 2003, **301**(5632): 505-507.
- [12] Livingstone D M. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake[J]. Climatic Change, 2003, **57**(1-2): 205-225.
- [13] 张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展[J]. 水科学进展, 2015, **26**(1): 130-139.
- [14] Komatsu E, Fukushima T, Harasawa H. A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality[J]. Ecological Modelling, 2007, **209**(2-4): 351-366.
- [15] Wilhelm S, Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton [J]. Freshwater Biology, 2008, **53**(2): 226-237.
- [16] Guo X C, Potito A P, Luo L, *et al.* Twentieth century human and climate impacts on a large mountain lake in southwest China [J]. Hydrobiologia, 2013, **718**(1): 189-206.
- [17] Wang S, Qian X, Han B P, *et al.* Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China [J]. Water Research, 2012, **46**(8): 2591-2604.
- [18] Zhang L, Lu W X, An Y L, *et al.* Response of non-point source pollutant loads to climate change in the Shitoukoumen reservoir

- catchment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(1): 581-594.
- [19] Deng J M, Qin B Q, Paerl H W, *et al.* Earlier and warmer springs increase cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in subtropical Lake Taihu, China[J]. Freshwater Biology, 2014, **59**(5): 1076-1085.
- [20] Rühland K, Paterson A M, Smol J P. Hemispheric-scale patterns of climate-related shifts in planktonic diatoms from North American and European lakes [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(11): 2740-2754.
- [21] Kundzewicz Z W, Krysanova V. Climate change and stream water quality in the multi-factor context[J]. Climatic Change, 2010, **103**(3-4): 353-362.
- [22] Chen Y Y, Zhang C, Gao X P, *et al.* Long-term variations of water quality in a reservoir in China [J]. Water Science & Technology, 2012, **65**(8): 1454-1460.
- [23] 张晨, 陈孝军, 王立义, 等. 于桥水库菹草过度生长对水质的影响及成因分析[J]. 天津大学学报, 2011, **44**(1): 1-6.
- [24] Zhang C, Gao X P, Wang L Y, *et al.* Modelling the role of epiphyton and water level for submerged macrophyte development with a modified submerged aquatic vegetation model in a shallow reservoir in China[J]. Ecological Engineering, 2015, **81**: 123-132.
- [25] 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.
- [26] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data[J]. Water Resources Research, 1982, **18**(1): 107-121.
- [27] Hirsch R M, Slack J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. Water Resources Research, 1984, **20**(6): 727-732.
- [28] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models [M]. London: Chapman & Hall, 1990.
- [29] Bowman A W, Azzalini A. Applied smoothing techniques for data analysis: the kernel approach with S-plus illustrations[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1997.
- [30] Ferguson C A, Carvalho L, Scott E M, *et al.* Assessing ecological responses to environmental change using statistical models[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, **45**(1): 193-203.
- [31] Carvalho L, Miller C, Spears B M, *et al.* Water quality of Loch Leven: responses to enrichment, restoration and climate change [J]. Hydrobiologia, 2012, **681**(1): 35-47.
- [32] Zhang C, Lai S Y, Gao X P, *et al.* Potential impacts of climate change on water quality in a shallow reservoir in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(19): 14971-14982.
- [33] Gerten D, Adrian R. Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(5): 1058-1066.
- [34] Patrick R. The effects of increasing light and temperature on the structure of diatom communities [J]. Limnology and Oceanography, 1971, **16**(2): 405-421.
- [35] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton [M]. London: Cambridge University Press, 2006.
- [36] James R T, Havens K, Zhu G W, *et al.* Comparative analysis of nutrients, chlorophyll and transparency in two large shallow lakes (Lake Taihu, P. R. China and Lake Okeechobee, USA) [J]. Hydrobiologia, 2009, **627**(1): 211-231.
- [37] 沙鸥, 马卫兴, 徐国想, 等. 地表水中溶解氧监测及变化规律[J]. 环境监测管理和技术, 2008, **20**(1): 48-50.
- [38] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2539-2546.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....                                                                                                              | CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)                |
| Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....                                                                             | LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)           |
| Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....                                            | MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)                       |
| Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....                                                                                                  | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)     |
| Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....                                                                   | ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)                 |
| Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....                                                                    | JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)                |
| Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....                        | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)              |
| Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....                                                                                             | ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)        |
| Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....                                                                    | LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)                         |
| Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....                                                                                                             | GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)                 |
| Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....       | FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)              |
| Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons ..... | WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)                                      |
| Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                               | ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)          |
| Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....                                                                                                    | ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)            |
| Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....                    | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)             |
| Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....                                                                                        | XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)            |
| Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....                                              | WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)           |
| Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....                                                                   | LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)          |
| Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....                                                                                | LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)          |
| Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....                                            | CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)      |
| Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....                                                                       | LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)            |
| Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....                                                                               | CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)                 |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....                        | WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)         |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....                                                                            | CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)     |
| Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....                                                                    | WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)        |
| Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....                                                                                       | LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)              |
| Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....                                                             | CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)              |
| Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....                                                                               | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)          |
| Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....                                     | ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)        |
| Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....                                                         | ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)       |
| Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....                                                                                                             | DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073) |
| Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....                                                | XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)                               |
| Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....                                                      | YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)              |
| Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....                                                                     | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)                   |
| Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....                                                                           | LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)               |
| Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....                                                                 | WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)          |
| Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....                                                                     | LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)              |
| Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....                                               | GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)                   |
| Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....                                                                                        | MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)                   |
| Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....                                                                            | HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)         |
| Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....                                                                 | WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)             |
| Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....                                                                    | ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)           |
| Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....                                                                            | FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)                |
| Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....                                                                                                      | LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)                       |
| Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....                | ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)              |
| Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....                                                               | WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)          |
| Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....                                                                                                    | ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)            |
| Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....                                                     | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)     |
| Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....                                                        | JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)        |
| Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....                                                                                              | WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)      |
| Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....                                                              | LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)               |
| Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....                                                | LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)              |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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   | 中国国际图书贸易集团有限公司<br>(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