

· 监测技术 ·

骆马湖现代沉积物¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的测定分析与环境指示意义

李文博¹, 林建宇², 周强¹, 王兆德², 许伟伟¹, 许迪², 任静华^{1*}

(1. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210007)

摘要:选取骆马湖进湖口、湖中心和出湖口3个位置的沉积物柱芯样品,采用放射性核素¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}纪年技术定年,对其垂向分布特征及沉积速率指标变化对比分析,并测定沉积物中重金属垂直剖面分布。结果表明:¹³⁷Cs数值较低,不足以建立¹³⁷Cs计年时标;²¹⁰Pb_{ex}比活度随深度增加大致呈指数降低,采用²¹⁰Pb_{ex} CIC模式计算获得3个采样点的平均沉积速率及对应的沉积年代区间,进湖口相比湖中心和出湖口沉积速率较低,这与人为活动和水流因素有关;近50年来,骆马湖重金属污染物蓄积峰值总体出现在1975—1977年及1989—1994年两个时期,在2008年之后重金属的蓄积特征呈现逐渐增加趋势。

关键词: ¹³⁷Cs; ²¹⁰Pb_{ex}; 重金属; 沉积速率; 现代沉积物; 骆马湖

中图分类号: P597.3; X524 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2021)05-0041-05

Determination and Environmental Implications of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} in Modern Sediment from Luoma Lake

LI Wen-bo¹, LIN Jian-yu², ZHOU Qiang¹, WANG Zhao-de², XU Wei-wei¹, XU Di², REN Jing-hua^{1*}

(1. *Technology Innovation Center of Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), MNR Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China*; 2. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract: The sediment core samples from 3 positions of Luoma lake inlet, center and outlet were dated by radionuclide ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} dating method, the vertical distribution characteristics and the change of sedimentation rate index were compared and analyzed, the vertical profile distribution of heavy metals in the sediment were measured. The results showed that the value of ¹³⁷Cs was too low to be as dating marker. The specific activity of ²¹⁰Pb_{ex} decreased approximately exponentially with the increase in depth. The average deposition rate and the corresponding deposition age interval in the 3 positions were calculated by ²¹⁰Pb_{ex} CIC model. The sedimentation rate in the lake inlet was lower than that in the center or outlet. This was related with human activities and water erosion. In the past 50 years, the peak accumulation of heavy metal pollutants in Luoma Lake occurred generally in the two periods of 1975—1977 and 1989—1994, and the accumulation has been increasing since 2008.

Key words: ¹³⁷Cs; ²¹⁰Pb_{ex}; Heavy metals; Deposition rate; Modern sediments; Luoma Lake

湖泊沉积物被认为是流域环境变化的自然档案馆^[1],已被公认为研究全球湖泊环境演变的重要指示器。自然放射性核素²¹⁰Pb(半衰期22.3 a)及人工放射性核素¹³⁷Cs(半衰期30.2 a)定年法具有时间尺度短、计年精度高等优势,被广泛应用于各类湖泊沉积定年研究中^[1-4]。骆马湖是江苏省

收稿日期:2020-08-10;修订日期:2021-07-14

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20171075);省级地质勘查专项基金资助项目(苏财建[2017]160号)

作者简介:李文博(1988—),男,江西宜春人,工程师,硕士,从事生态地球化学调查与评价研究。

*通信作者:任静华 E-mail: renjinghuahua@163.com.

4 大淡水湖泊之一,是一个大型综合性水库型湖泊^[5-7],近百年来人类活动对湖泊的干预强度不断增加,与邵伯湖、洪泽湖、太湖和溧湖相比,骆马湖水体重金属污染程度最大^[8]。也有不少学者对骆马湖沉积物中的氮磷营养盐含量及多环芳烃、邻苯二甲酸酯类的分布^[9-11]、水质时空变化及水体富营养化等问题做过研究^[12-13],而关于骆马湖环境演变和沉积物中重金属的研究相对较少^[14]。

今选取骆马湖不同地理位置的沉积物柱芯样品,对其放射性核素¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}指标变化进行对比分析,建立高精度湖泊沉积序列,提取该流域自然环境变化及人类活动相关信息,以期为骆马湖生态修复提供基础支撑。

1 试验

1.1 主要仪器与试剂

沉积物样品中的²¹⁰Pb_{ex}和¹³⁷Cs分析由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室完成。 γ 谱分析系统由OrtecHPGe GWL高纯锗井型探测器、Ortec 919型谱控制器和IBM微机构成的16k道多道分析器组成,美国EG & G Ortec公司。重金属元素分析采用SOLAAR-M6型石墨炉原子吸收分光光度计,美国Thermo公司;PW2440型X射线荧光光谱仪,荷兰Philips公司;AFS-820型原子荧光光度计,北京吉天仪器公司。

¹³⁷Cs标准样品,中国原子能研究院;²¹⁰Pb标准样品由英国利物浦大学做比标准,并用模拟土样做校正。其余试剂均为优级纯,南京化学试剂公司。

1.2 研究区域概况与样品采集

骆马湖(E118°06'~E118°18',N34°00'~N34°11'),位于江苏省北部,京杭大运河中段,总长约27 km,最大宽约为20 km,平均宽9.63 km,湖底高程18 m~21 m。当蓄水位23.0 m时(古黄河基地),平均水深3.32 m,最深等深线东南部水深5.5 m,年水位涨幅为1.90 m~5.73 m,水域面积达375 km²,容积约9.18 m³。年换水次数在10次左右,是典型过水性湖泊^[9]。入湖河流主要有沂河水系、南四湖水系和邳苍地区共40多条支流。出湖河流主要有3处,一经嶂山闸入新沂河,一经皂河闸入中运河,一经洋河滩闸入六塘河。骆马湖是国家南水北调东线输水工程的主要调节水库之一,此外也是沂河、中运河洪水的主要调蓄湖泊,同时也是宿迁、新沂两市的重要水源地^[11]。

由于骆马湖平均水深较浅,历史上采砂、养殖、通航等外界干扰因素较多,故在采样点选择方面参考了其他学者的研究成果^[14],避开采砂、围网养殖等受人为扰动较大的区域,再综合考虑骆马湖的地理地貌、入湖、出湖河流等实际情况,于2019年4月,选晴天浪小天气,用重力式柱状采泥器在入湖的新沂河附近(A),湖心(B)及靠近出湖口六塘河附近(C)分别采集柱状沉积物,采样点位见图1。各点位分别采集柱样深度约30 cm~50 cm,立即现场以2 cm间隔分层。采样过程中尽量保持沉积物柱芯顶部悬浮层不受扰动,无损失且界面清晰。分层后的样品自上而下连续编号,分装入密封的塑料袋后当天带回实验室,在冰箱中4℃下冷藏储存。将分层沉积物90℃烘干至恒重,研磨过100目筛,取10 g左右研磨后的样品放入统一规格的塑料盒中,蜡封后放置3周以待放射性元素处于衰变平衡体系,再进行放射性核素的测定。

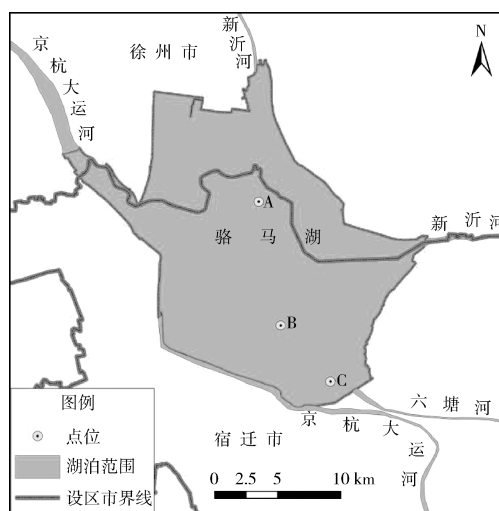


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Sketch map of sampling sites in Luoma Lake

1.3 沉积物年代划分原理与测定

自然环境中的¹³⁷Cs主要来源于核爆炸的裂变产物及核反应堆泄漏。核试验或泄漏所产生的¹³⁷Cs随大气参与全球环流,并随降水进入水体,吸附在悬浮微粒上,随悬浮物沉降到水底沉积物上,并逐年积累在湖底。虽然¹³⁷Cs沉积物中存在一定的扩散迁移,但是有研究表明其峰值位置不会发生改变^[15]。¹³⁷Cs定年根据沉积物垂直深度¹³⁷Cs蓄积峰值层进行测算标定,主要依据全球特殊核事件的

¹³⁷Cs 时标来进行。

沉积物蓄积的²¹⁰Pb 由天然²³⁸U 系列产物²²⁶Ra 衰变子体(平衡部分, 标记为²¹⁰Pb_{eq})和大气沉降的²²²Rn 衰变子体(非平衡部分, 也称过剩²¹⁰Pb, 标记为²¹⁰Pb_{ex})两部分组成。²¹⁰Pb 纪年的基本原理是外源²¹⁰Pb_{ex}持续沉降, 其浓度虽有明显的短时间尺度变化, 但年际变化并不显著^[2]。在环境条件相似的区域中, 可认为²¹⁰Pb_{ex}的沉降通量是一致的^[16], 其通过干、湿沉降进入湖泊、海湾及海洋, 与其中的沉积物颗粒紧密结合并一起沉积。通常认为基础²¹⁰Pb 与其母体²²⁶Ra 处于平衡状态^[17], 沉积物各层中²¹⁰Pb_{ex}的计算可用²¹⁰Pb 的总量减去²²⁶Ra 的含量得到, 由此可计算沉积物的堆积速率或沉积物的堆积年龄。

2 结果与讨论

2.1 放射性核素¹³⁷Cs 的垂向分布特征及沉积速率变化分析

在沉积物沉积速率研究中,¹³⁷Cs 计年法虽有独特优势, 但也存在一些限制因素。对人为活动比较频繁的浅水湖泊而言, 人为活动、强风等恶劣气候及上层水体和底层水体的交互对流等因素引起的沉积物再悬浮作用加剧了¹³⁷Cs 扩散迁移作用, 造成水体寄宿时间短的浅水湖泊中¹³⁷Cs 的不同步损失, 导致¹³⁷Cs 峰型的无序化, 故计年数据的可靠性在人为活动扰动因素较多的浅水湖泊相对较差。

骆马湖 3 个不同监测点位的柱状沉积物中¹³⁷Cs 的比活度垂直分布特征表明, 整体上骆马湖¹³⁷Cs 数值较低, 比活度变化为 0 Bq/kg ~

5.76 Bq/kg, 该结果与我国南方湖泊沉积物和北半球¹³⁷Cs 沉降量变化范围基本一致^[16, 18-20]。其中, 骆马湖入湖口和湖心地区沉积物¹³⁷Cs 比活度接近 0 Bq/kg, 表明核试验产生的¹³⁷Cs 沉降在该骆马湖流域影响较小。入湖口(A)和湖心(B)柱芯中¹³⁷Cs 蓄积特征不明显, 并未发现公认的¹³⁷Cs 计年时标, 故无法对两个点位采用¹³⁷Cs 进行年序定位。这可能是由河流冲刷扰动和后期人类活动的干扰导致, 近代以来, 骆马湖的沉积作用主要受沂河的影响, 入湖口有大量优质黄沙资源^[21]。因此, 在该区域水流扰动和采砂活动较强使得密度较小的有机质或细颗粒物难以得到有效沉积, 有机质和较小颗粒的黏土矿物对¹³⁷Cs 有较强的吸附能力^[3], 并且入湖口区域沉积物中的 TN、TP 和 TOC 含量确实较其他湖区低^[5, 13], 这可能是导致该区域沉积物中¹³⁷Cs 比活度较低的重要原因。

2.2 放射性核素²¹⁰Pb_{ex}的垂向分布特征及沉积速率变化分析

3 处柱状沉积物中的²¹⁰Pb_{ex}的比活度垂直分布特征结果见图 2(a)(b)(c)。由图 2 可见, 骆马湖入湖口(A)、湖心(B)、出湖口(C)处沉积物柱芯²¹⁰Pb_{ex}的比活度范围分别为 2.45 Bq/kg ~ 133.75 Bq/kg、25.58 Bq/kg ~ 129.51 Bq/kg、35.91 Bq/kg ~ 157.38 Bq/kg, ²¹⁰Pb_{ex}比活度值分布趋势较类似, 即均具有不规则的锯齿状分布且大致呈指数下降的特点, 表明研究区域内沉积速率随时间推移而发生变化。相比湖心和出湖点位, 入湖处表层沉积物(0 cm ~ 20 cm)中,²¹⁰Pb_{ex}蓄积分布模式比较紊乱, 这可能与近年来骆马湖北部区域强烈的人为活动对²¹⁰Pb_{ex}在沉积物中的蓄积干扰有关。

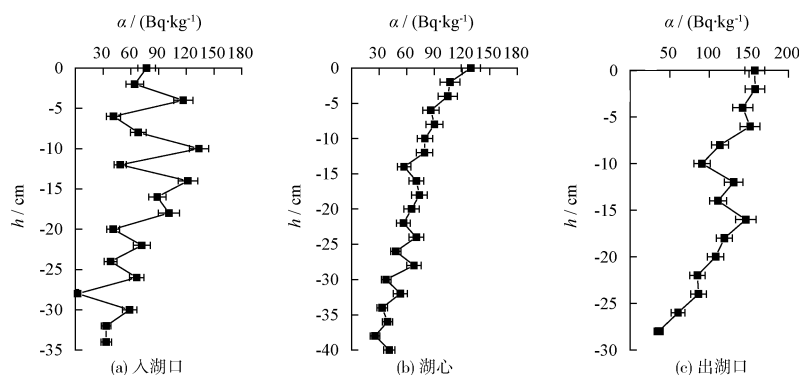


图 2 3 个点位沉积物柱样中²¹⁰Pb_{ex}垂向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of ²¹⁰Pb_{ex} in sediment column samples from three positions

根据环境放射性核素²¹⁰Pb_{ex}计年原理,监测区域受水流侵蚀和人为活动影响,使得该区域沉积物更容易满足CIC计算模式所要求的前提条件,即沉积物中²¹⁰Pb_{ex}的初始比活度是恒定的^[2,19]。故²¹⁰Pb_{ex}定年法采用常量初始浓度(CIC)模式计算,假定沉积物的初始比活度恒定,根据公式 $S = E \times (-\lambda)$ 直接获得被测样柱的平均沉积速率 S ,其中 E 为²¹⁰Pb_{ex}的比活度-深度拟合曲线斜率, λ 为²¹⁰Pb_{ex}衰变常数($\lambda = 0.031 \text{ a}^{-1}$)。²¹⁰Pb_{ex} CIC模式计算得到骆马湖入湖、湖心和出湖处平均沉积速率分别为2.85 mm/a、8.45 mm/a和5.51 mm/a,所对应的沉积年代区间分别为1903—2015年、1970—2018年、1966—2017年。入湖口处的²¹⁰Pb_{ex}蓄积分布模式与湖心和出湖口相比较为紊乱,沉积速率相比也较低,这种现象可能是由于骆马湖入湖口处更容易受强烈的人为活动及较大的湖流冲刷,导致²¹⁰Pb_{ex}在沉积物中蓄积^[19];而湖心和出湖口处较高的²¹⁰Pb_{ex}蓄积量表明可能与再搬运加积有关^[22-24]。

2.3 近50年骆马湖变化与沉积物垂向重金属蓄积特征分析

以干扰较小的湖心区域为研究对象,通过拟合沉积物重金属剖面分布特征及沉积年代得到近50年骆马湖不同年代沉积物重金属蓄积量变化特征。

结果表明,近50年来,骆马湖重金属污染物蓄积峰值总体出现在1975—1977年和1989—1994年两个时期,并且在2008年以后重金属的蓄积特征呈现逐渐增加趋势。造成该现象的主要原因是骆马湖流域内不同阶段人为活动的影响。两个蓄积峰值阶段出现在我国20世纪80年代改革开放前后10年期间,1975—1977年对应的是“五五计划”期间,1977—1978年间社会总产值、工农业总产值连续两年大幅增长,主要工农业产品产量恢复或者超过历史最好水平。1989—1994年基本对应“八五计划”期间,是中国改革开放推进最快的时期。此时骆马湖周边工业企业快速发展,“三废”排放导致沉积物中重金属元素含量增加。其后,随着环保政策逐步完善并实施,工农业产生的污染物排放得到有效控制,骆马湖沉积物蓄积也逐渐降低。然而,在2008年后,由于骆马湖水利改造和输入河道疏浚管理等工程活动,使得外部沉积物中重金属逐渐释放,导致湖泊表层重金属污染物浓度逐年增加,以上3个峰值的时间推断也基本可以印证²¹⁰Pb_{ex}定年较为准确。

从空间尺度分析,调查结果显示,虽然骆马湖北部区域主要重金属污染物浓度较高^[13],但²¹⁰Pb_{ex}蓄积浓度较低,这与骆马湖北部区域内相对较集中的人类活动如渔业、养殖业、旅游业、制造业等对湖泊环境影响较为突出有关,这些较强的人为活动及水文因素等条件进一步影响了骆马湖北部区域现代沉积物的缓慢堆积。相比而言,骆马湖中部和南部湖区现代沉积物受外源污染和人为活动干扰较低,沉积物中²¹⁰Pb_{ex}蓄积明显,现代沉积物堆积速率较快。

3 结语

骆马湖沉积物重金属不同年代蓄积特征显示,近50年来不同强度的人类工农业生产等活动对现代沉积物环境质量演变有显著影响。构建较为明晰的湖泊沉积环境重金属分布情况,可为湖泊生态修复和生态监测提供基础对比数据和支撑依据。我国南方湖泊受全球核试验影响较小,骆马湖径流量及泥沙输移强度等因素导致沉积物剖面中¹³⁷Cs蓄积并不明显,所获数据无法建立区域性的参考剖面,故¹³⁷Cs与²¹⁰Pb_{ex}定年未能在上述研究中相互验证。虽然定年测序的方法是否适合在人为活动较频繁的浅水湖泊中应用还需要进一步探讨,但是该研究结果丰富了我国东部地区浅湖沉积速率数据。

[参考文献]

- [1] 丁兆运,杨浩,王小雷,等. 基于¹³⁷Cs、²⁴¹Am和²¹⁰Pb计年的上级湖沉积速率研究[J]. 地理与地理信息科学,2012,28(5):90-94.
- [2] 王晓燕,田均良. 环境演变研究时间序列的建立方法评述[J]. 海洋地质动态,2002,18(12):22-27.
- [3] 颜耕,周磊,陈玲. 同位素技术在环境科学研究中的应用进展[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(2):1-4,10.
- [4] 姚书春,李世杰,刘吉峰,等. 太湖THS孔现代沉积物¹³⁷Cs和²¹⁰Pb的分布及计年[J]. 海洋地质与第四纪地质,2006,26(2):79-83.
- [5] 孙博,葛兆帅. 近500年来骆马湖演变的驱动力探究[J]. 水土保持通报,2017,37(4):327-332.
- [6] 申霞,洪大林,谈永锋,等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施[J]. 水资源保护,2013,29(3):39-43,50.
- [7] 曹毅,王辉. 基于NDVI指数的骆马湖水生植被分级研究[J]. 环境监测管理与技术,2014,26(2):30-32.
- [8] 王伟,樊祥科,黄春贵,等. 江苏省五大湖泊水体重金属的监测与比较分析[J]. 湖泊科学,2016,28(3):494-501.
- [9] 徐德兰,万蕾,高明侠,等. 骆马湖东部沉积物中氮磷含量和

- 碱性磷酸酶活性季节变化[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1387-1392.
- [10] 刘抗, 郑曦, 韩宝平. 骆马湖表层沉积物中多环芳烃的源解析[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(2): 65-68.
- [11] 徐怀洲, 宋宁慧, 张圣虎, 等. 骆马湖邻苯二甲酸酯分布特征及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 928-934.
- [12] 胡婷婷, 刘劲松, 戴小琳, 等. 骆马湖水质时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5): 794-801.
- [13] 钱奎梅, 高明侠, 孙玲. 骆马湖浮游植物群落结构的区域差异研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018, 33(4): 45-48.
- [14] 王永平, 洪大林, 申霞, 等. 骆马湖沉积物重金属及营养盐污染研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 45-48, 143.
- [15] HE Q, WALLING D E, OWENS P N. Interpreting the ¹³⁷Cs profiles observed in several small lakes and reservoirs in southern England[J]. Chemical Geology, 1996, 129(1): 115-131.
- [16] 孙立广, 谢周清, 赵俊琳, 等. 南极阿德雷岛湖泊沉积²¹⁰Pb、¹³⁷Cs定年及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 93-96.
- [17] TSUNOGAI S, KURATA T, SUZUKI T, et al. Seasonal variation of atmospheric ²¹⁰Pb and Al in the western North Pacific region [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1988, 7(4): 389-407.
- [18] 刘恩峰, 薛滨, 羊向东, 等. 基于²¹⁰Pb与¹³⁷Cs分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 89-94.
- [19] 吴艳宏, 刘恩峰, 邴海健, 等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(6): 751-757.
- [20] 王小雷, 杨浩, 丁兆运, 等. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1551-1561.
- [21] 姚书春, 薛滨, 李世杰, 等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2006(5): 569-573.
- [22] NOZAKI Y, DEMASTER D J, LEWIS D M, et al. Atmospheric ²¹⁰Pb fluxes determined from soil profiles [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978, 83(C8): 4047-4051.
- [23] 李建芬, 王宏, 夏威夷, 等. 渤海湾西岸²¹⁰Pb_{ex}、¹³⁷Cs测年与现代沉积速率[J]. 地质调查与研究, 2003(2): 114-128.
- [24] 左书华, 韩志远, 谢华亮, 等. 连云港田湾海域表层沉积物中放射性核素含量水平[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(6): 42-45.

(上接第40页)

明显改善趋势。流域中上游水体耗氧有机物相对稳定且水平较低, 须重点关注下游剑潭—桥头区间存在的较大量耗氧有机物排放。

(3) 河源临江段上游集雨区汇水过程加剧了DO、NH₃-N和TN的污染趋势, 有机污染物和TP的主要来源为点面源污染。惠州剑潭段上游集雨区汇水过程对BOD₅有稀释缓解作用, 而对TP和TN起阻碍改善作用, 有机污染物和NH₃-N的主要来源是点面源污染。

[参考文献]

- [1] 林海, 李阳, 李冰, 等. 北京市妫水河水水质现状评价[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2): 40-43.
- [2] 孙忠, 沈俏会, 董萍, 等. 近十年浙江省地表水环境质量变化趋势及影响因素研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(4): 23-26.
- [3] KISI O, AY M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 362-375.
- [4] 黄萌, 黄志霖, 肖文发, 等. 基于Mann-Kendall法的三峡库区长江干流入库断面水质变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 950-961.
- [5] 陈水蓉, 吴光红, 苏睿先. 天津市于桥水库水质变化特点及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 27-30, 34.
- [6] 吴佳宁, 陈明, 袁润权, 等. 季节性Kendall检验法在东江下游水质趋势分析中的应用[J]. 广西水利水电, 2017(3): 14-18.
- [7] 贾俊杰, 逢勇, 罗缙, 等. 肯达尔检验法在江阴市河流水质趋势分析中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 83-89.
- [8] 梁中耀, 刘永, 盛虎, 等. 滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 754-762.
- [9] LAMON E C, QIAN S S, RICHTER D D. Temporal changes in the Yadkin River flow versus suspended sediment concentration relationship [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(5): 1219-1229.
- [10] JOHNSON H O, GUPTA S C, VECCHIA A V, et al. Assessment of water quality trends in the Minnesota River using non-parametric and parametric methods [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(4): 1018-1030.
- [11] 董旭, 梅琨, 商栩, 等. 基于Mann-Kendall检验和重标极差分析的水质变化趋势[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 277-282.
- [12] 陈杰. 基于季节性肯达尔检验法的牡丹江流域(黑龙江省段)水质变化趋势研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [13] RENWICK W H, VANNI M J, ZHANG Q Y, et al. Water quality trends and changing agricultural practices in a midwest U. S. watershed, 1994-2006 [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(5): 1862-1874.
- [14] HELSEL D R, MUELLER D K, SLACK J R. Computer program for the Kendall family of trend tests [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2006.
- [15] 范宁江, 刘玉虹, 安树青, 等. 电导率作为流域水文变化指标初探[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2127-2131.

本栏目编辑 谢咏梅