

骆马湖沉积物重金属及营养盐污染研究

王永平, 洪大林, 申霞, 于剑, 姬昌辉, 谢瑞

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: 利用¹³⁷Cs定年技术对骆马湖沉积物柱状样进行了定年, 同时测定了沉积物中重金属和营养盐含量的垂直剖面与水平分布。结果显示: 骆马湖沉积物的平均沉积速率为3.5 mm/a; 在垂向上, 随着沉积物深度变浅, 营养盐含量逐渐升高, 而大部分金属元素含量保持稳定或减少, 只有Cd和Pb含量明显升高; 在平面上, 大部分金属元素的含量峰值出现在湖心区域, 而营养盐的含量峰值出现在西部和南部湖区。可见骆马湖受人为污染影响严重的主要是重金属中的Cd与Pb和营养盐, 且湖心区域污染较重。

关键词: 沉积物计年; 沉积速率; 重金属; 营养盐; 垂直剖面; 水平分布; 骆马湖

中图分类号: X141; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0045-04

Heavy Metals and Nutrients Pollution in Sediments of Luoma Lake

WANG Yong ping, HONG Da lin, SHEN Xia, YU Jian, JI Chang hui, XIE Rui

(State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The ¹³⁷Cs isotope dating method was used to determine the dating of sediment cores in the Luoma Lake, and the vertical profile and horizontal distribution of heavy metals and nutrients were investigated. The results showed that (1) the average sedimentation rate of Luoma Lake is 3.5 mm/a; (2) the nutrient contents increase gradually and the contents of most heavy metals decrease or stay stable with the decreasing in depth, while the contents of Cd and Pb increase; and (3) the peak values of most heavy metals occur in the center of the lake, whereas the peak values of nutrients occur in the west and south of the lake. Therefore, the main pollution in the Luoma Lake was caused by Cd, Pb, and nutrients, and it occurred mainly in the center of the lake.

Key words: sediment dating; deposition rate; heavy metals; nutrients; vertical profile; horizontal distribution; Luoma Lake

湖泊沉积物是水环境中重金属和营养盐等污染物质的“汇”^[1,2], 因此, 湖泊沉积物是流域环境变化及人类对环境影响的档案记录^[3], 是记载环境污染物最好的储存器和信息库^[4]。

骆马湖位于江苏省北部, 跨徐州和宿迁两市, 地形开阔, 地势低平, 正常蓄水位高程22.83 m, 水面面积287 km², 容积9.18亿m³, 汇水面积约1300 km², 是淮河流域第三大湖泊、江苏省第四大湖泊^[5]。该湖泊上接山东南四湖, 下接江苏洪泽湖, 具有防洪、排涝、灌溉、供水、养殖、航运及旅游等多种功能, 对南水北调东线工程具有重要的调蓄作用, 其水质好坏关系调水的成败^[6]。近年来, 随着经济发展、城市化水平的提高和滨湖开发, 氮磷等营养物质不断汇入水体, 使骆马湖水体逐渐呈现出富营养化的趋势。已

有不少学者对骆马湖水环境变化趋势及水体富营养化的发生机制^[7,9]、沉积物中的氮磷营养盐含量及多环芳烃的分布等^[10-11]问题进行过研究, 但是有关骆马湖的环境演化和重金属元素分布的研究较少。本文通过分析湖泊沉积物中重金属元素及营养盐的分布规律和变化特征, 旨在弄清骆马湖沉积物主要污染元素及其污染历史, 为骆马湖生态修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

本研究于2011年11月份在骆马湖主要河道入湖口、养殖区、采砂区和湖心区等具有不同代表性的区域, 共设置7个采样点, 具体分布见图1。

收稿日期: 2013-03-21 修回日期: 2013-09-22 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1028.019.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010); 江苏省水利科技项目(2011041)

作者简介: 王永平(1982-), 男, 江苏宜兴人, 工程师, 博士, 主要从事湖泊生态研究。E-mail: ypwang@nhri.cn

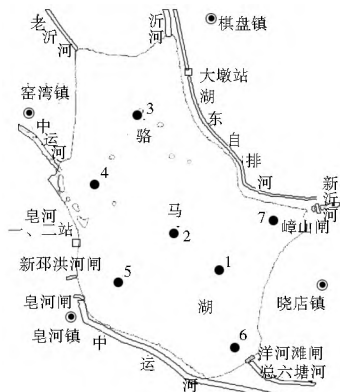


图 1 骆马湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Luoma Lake

在各采样点用柱状采泥器采集沉积物样, 尽量保持沉积物柱芯顶部悬浮层不受扰动, 界面清晰。其中, 在最深的湖心 1 号点采集柱状样深度约 40 cm, 现场以 0.5 cm 间隔分层; 其余 6 个点采集的柱状样深度约 20 cm, 现场以 2 cm 间隔分层。所有样品装入密封的塑料袋后带回实验室, 在 4 °C 冰箱中冷藏待测。

1.2 沉积物年代测定

将 1 号点所有进行 ¹³⁷Cs 定年样品装盒、烘干、称重后, 求出质量深度。测量仪器是美国 OTEC 公司生产的高纯锗井型探测器与 OTEC919 型谱控制器构成的高纯锗低本底 γ 谱仪(外加 α 探头)。

1.3 沉积物重金属测定

将 1 号点所有样品和其余点表层 2 cm 样品在实验室自然风干后, 在 55 °C 的温度下烘干, 经研磨(过 100 目筛)后在 Berghofmws 3 微波消解系统中反应, 最后将溶液定容至 25 mL。在中国科学院南京地理与湖泊所湖泊沉积与环境开放实验室用 ICP-AES 方法测定^[12]。

1.4 沉积物营养盐测定

将 7 个点所有样品在实验室自然风干后, 经研磨(过 100 目筛)后由重铬酸钾-硫酸消化-凯氏定氮法测定总氮(TN), 高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法测定总磷(TP), 重铬酸钾-硫酸(油浴)氧化-硫酸亚铁滴定法测定总有机碳(TOC)。

2 结果与分析

2.1 沉积物年代分析

环境中存在的放射性核素是研究湖泊现代沉积过程的理想示踪剂^[13,14]。¹³⁷Cs 作为放射性核素在人为活动(核试验)释放后通过大气扩散而沉降到地表, 有 50 年左右的时间意义^[15]。参照国际上 ¹³⁷Cs 时标, 北半球沉积物中, 仅 1954 年和 1964 年两个时间标志可作为沉积计年^[16]。而 1954 年时标的 ¹³⁷Cs 比活度低, 经过衰变, 至今已较难辨识。1964 年沉积层的 ¹³⁷Cs 仍具有较强的实际意义。

对 1 号点柱状沉积物进行的 ¹³⁷Cs 比率测定结果见图 2。以开始出现 ¹³⁷Cs 富集的深度为 1954 年, 第一个蓄积峰标识出现的深度为 1964 年, 由这两个绝对年龄时标推算出骆马湖沉积物的沉积速率为 3.5 mm/a。根据平均沉积速率和分样间隔, 每

个样品 0.5 cm 厚度可以代表约 1.43 年的时间分辨率。

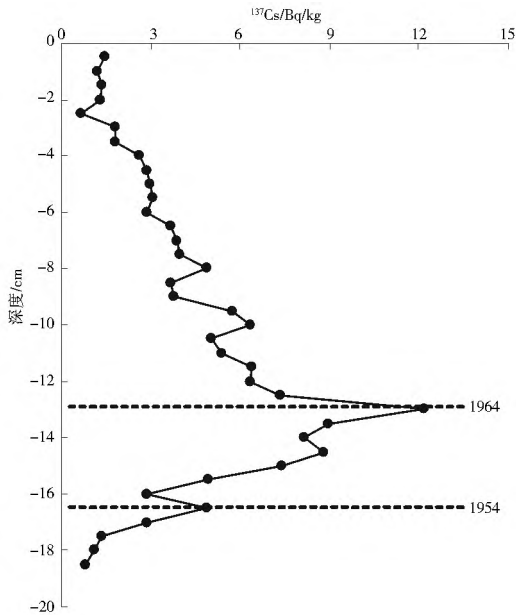


图 2 ¹³⁷Cs 测年结果

Fig. 2 Vertical profile of ¹³⁷Cs dating for the sediments

2.2 沉积物重金属分析

湖泊沉积物记录着湖区环境变化的丰富信息, 其中重金属成分反映了流域工农业生产对湖泊环境的影响。因而通过对湖泊沉积物的研究, 可以评价人类活动产生的污染物对湖泊环境的影响^[17]。

骆马湖 1 号点柱状沉积物中重金属含量的垂直分布见图 3。根据重金属含量随时间变化趋势, 可大致分为三类: 第一类包含 Fe、Cu 和 Cr, 其含量先是升高, 在 40 年前左右达到峰值, 随后呈现出含量逐渐降低的趋势; 第二类是 Cd 和 Pb, 其含量在 25 年以前基本保持稳定, 而在 25 年内含量逐步升高, 最近 5 年内含量略有波动; 第三类是 Ag, 含量较为稳定, 保持较小幅度缓慢升高。

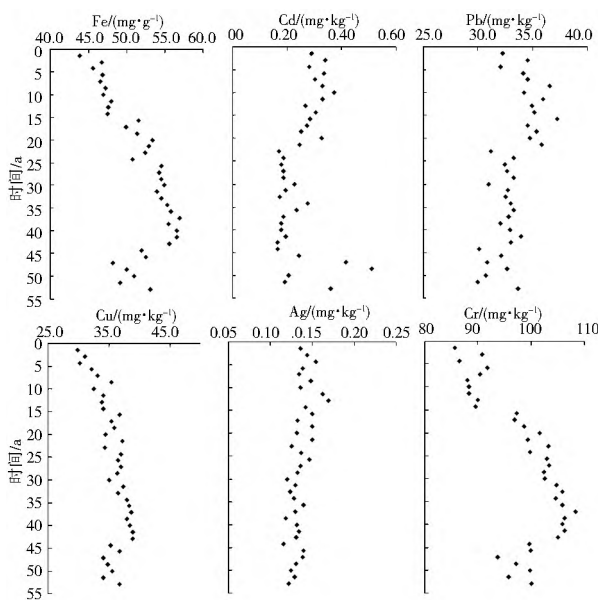


图 3 重金属元素垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of heavy metal elements

不难发现, 测试结果中几乎所有重金属含量曲线都较为

平缓,反映其累积速率都比较平稳,可见 50 年来骆马湖流域人类活动总体比较缓和;第一和三类元素反映出主要受陆源风化侵蚀产物的影响,人类活动引起的污染较小;第二类元素都是在 20 世纪 80 年代以后逐步升高,这与流域经济发展一致。骆马湖周边地区在 80 年代末,乡镇工业快速发展^[18],大量的工业废水以及煤、石油等燃料的燃烧废气、粉尘通过河道及降水进入骆马湖,导致沉积物中部分重金属污染加重。最近几年中,铅含量有所降低和波动,可能与无铅汽油的使用及工业采取的废水、废气处理措施有关。

骆马湖沉积物中重金属的水平分布见图 4。沉积物中

Fe、Cu、Ag 和 Cr 含量较低的区域出现在中运河河口, Cd 和 Pb 则在骆马湖北部含量较低。Cd、Cu、Ag 和 Pb 的含量峰值都出现在水深较深的湖心区域附近, Fe 和 Cr 的含量峰值则出现在皂河闸和嶂山闸附近。自然源重金属的水平分布一方面受沉积物背景特征的影响,另一方面也与湖泊中水动力与泥沙运动相关。如河口区沉积了大量的粗颗粒物,而 Fe 和 Cu 则与细颗粒物如黏土矿物有较高的相关性^[12],因此这两种重金属在河口区的含量较低。受外源输入影响较大的 Cd 和 Pb 的水平分布特征反映影响其分布的外源性输入主要以西南湖区为主。

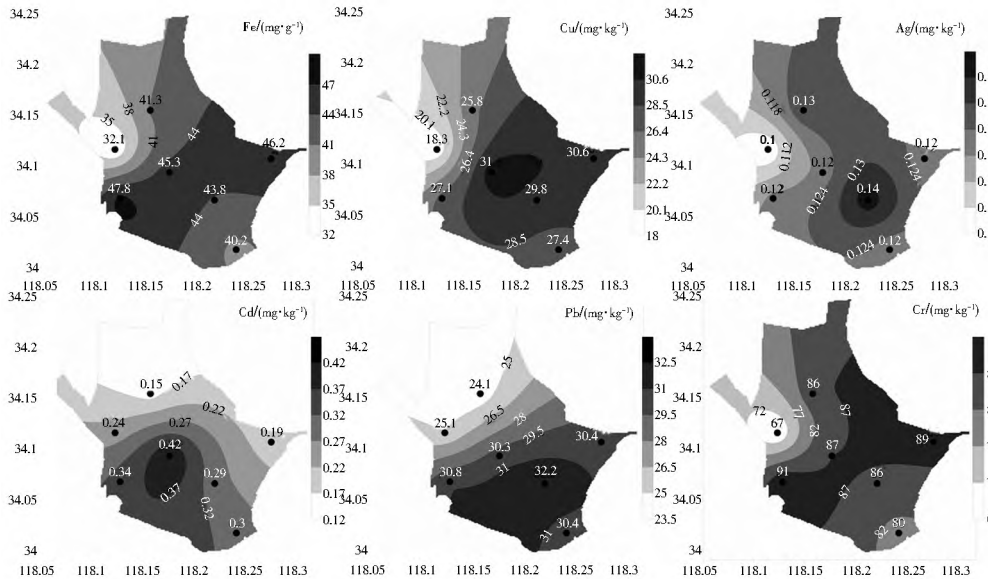


图 4 重金属元素水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of heavy metal elements

2.3 沉积物营养盐分析

从 1 号点沉积物中营养盐垂直分布图可以看出(图 5), TN、TP 和 TOC 在 50 年左右的时间内呈现出含量逐渐升高的总体趋势。其中, TN 含量在 50 年前稳定增长,在距今 25 年时迅速升高并延续了 5 年左右的时间,随后含量波动较大。在最近的 7、8 年内,含量的增速又明显加快。TP 含量在 10 年以前波动较大,原因可能与外源输入不稳定和水生植物的吸收利用有关;而最近 10 年内含量迅速增加的趋势明显。TN 和 TP 在近几年的迅速增加,说明近年来外源污染输入不断增加,这与骆马湖水质逐年恶化、总氮和总磷含量上升明显的监测结果一致^[19]。TOC 含量在 50 年前开始持续稳定增加至 15 年前,随后含量基本保持稳定,可能与有

机质的分解有关。1 号点沉积物有机质的 C/N 比值在 4~8 之间,平均值 6,反映湖泊有机质来源于水生植物或藻类、硅藻^[20-21]。

湖区 7 个点位沉积物中营养盐垂直分布见图 6,各点位沉积物中营养盐含量差异较为明显,体现沉积物背景特征差异较大。1、2、6 和 7 号点位的 TN 和 TOC 含量随深度变浅逐渐增加的趋势类似,且含量较高,反映湖心区域营养盐污染较重。3 号点的 TN、TP 和 TOC 含量都相对偏低,反映中运河河口含量较低,这与大部分金属元素的分布规律一致。3 号点的 TN 和 TOC 含量保持稳定增长,说明外源输入逐渐增多。4 和 5 号点的 TN 和 TOC 含量都呈现出随深度变浅先增加后降低再增加的趋势。沉积物中的 TP 含量波动较大。受外源输入的影响,除 3 和 6 号点沉积物 TP 含量有降低的趋势外,近年来其它点位的 TP 都呈增加的趋势。

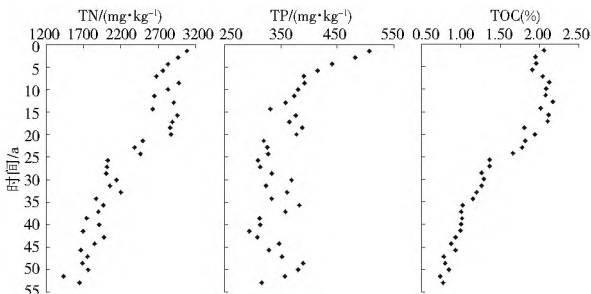


图 5 营养盐垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of nutrients

3 结论

(1) 利用¹³⁷Cs 在 1954 年和 1964 年两个蓄积峰位置作为计年时标,骆马湖沉积物的平均沉积速率为 3.5 mm/a。

(2) 沉积物中重金属在 50 年左右时间段内的累积速率较为平稳,可见该时段人类活动比较缓和。大部分金属元素受陆源风化侵蚀产物的影响,随深度变浅含量保持稳定或减少;Cd 和 Pb 受人为污染影响明显,与流域经济发展相对应。Fe、Cu、Ag 和 Cr 在中运河河口含量较低, Cd 和 Pb 则在北部

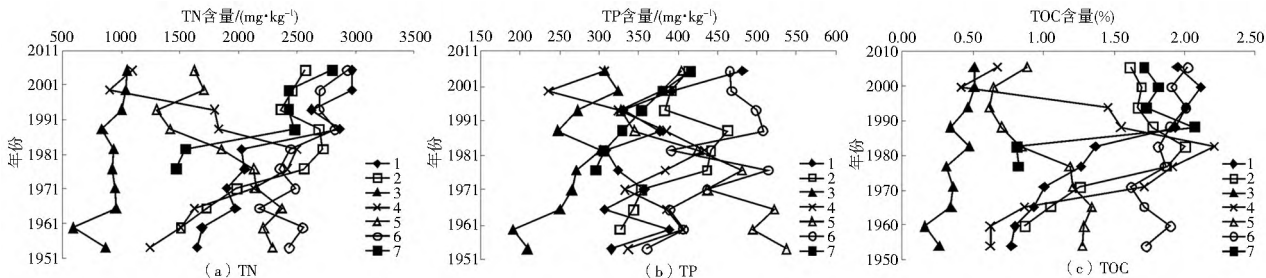


图 6 营养盐水平分布

Fig. 6 Horizontal distribution of nutrients

湖区含量较低。大部分金属元素的含量峰值都出现在水深较深的湖心区域附近。

(3) 受外源输入的影响, 沉积物中营养盐在 50 年左右的时间内都呈现出含量逐渐升高的总体趋势。沉积物中营养盐含量水平分布差异较为明显, 体现沉积物背景特征差异较大。湖心区域营养盐污染较重, 中运河河口污染较轻。

参考文献 (References):

[1] XIE Li qiang, XIE Ping, TANG Hu rjuan. Enhancement of Dissolved Phosphorus Release from Sediment to Lake Water by Microcystis Blooms an Enclosure Experiment in a Hyper eutrophic, Subtropical Chinese Lake[J]. Environmental Pollution, 2003, 122: 391-399.

[2] Eggleton J, Thomas K V. A Review of Factors Affecting the Release and Bioavailability of Contaminants during Sediment Disturbance Events[J]. Environment International, 2004, 30: 973-980.

[3] Von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200 year Record of Metals in Lake Sediments and Nature Background Concentrations[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31: 2193-2197.

[4] 黎秉铭, 万国江, 江成忠, 等. 滇池、洱海水及沉积物中重金属的行为[J]. 环境科学, 1995, 16(2): 50-53. (LI Bing min, WAN Guo jiang, JIANG Cheng zhong, et al. Concentration Levels, Change Records and Enrichment Patterns of Heavy Metals in Waters and Sediments in Both Lake Dianchi and Lake Erhai, Yunnan Province[J]. Environmental Science, 1995, 16(2): 50-53. (in Chinese))

[5] 黄文钰, 许朋柱. 骆马湖营养盐收支[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 240-246. (HU ANG Wei yu, XU Peng zhu. Nutrient Balance in Luomahu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(3): 240-246. (in Chinese))

[6] 杨士建. 南水北调东线工程骆马湖生态建设[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(1): 92-93. (YANG Shi jian. Ecological Rehabilitation of Luoma Lake in the Water Transfer Project[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(1): 92-93. (in Chinese))

[7] 王飞, 翟鹏飞. 骆马湖水环境变化趋势及对策研究[J]. 水环境治理, 2007, (23): 48-49. (WANG Fei, ZHAI Peng fei. Trend of Environment Change in Luoma Lake and Measure Study[J]. China Water Resources, 2007, (23): 48-49. (in Chinese))

[8] 杨士建. 骆马湖富营养化发生机制与防治途径初探[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 59-62. (YANG Shi jian. Approaches to

Mechanisms and Control of Eutrophication of the Luoma Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(3): 59-62. (in Chinese)

[9] 陈秀珍, 黄维民. 骆马湖富营养化因子分析及防治技术[J]. 污染防治技术, 2008, 21(5): 74-77. (CHEN Xi r zhen, HU ANG Wei min. Control Techniques and Eutrophication Analysis of Luoma Lake[J]. Pollution Control Technology, 2008, 21(5): 74-77. (in Chinese))

[10] 郑曦, 姚俊华, 蒋欢, 等. 骆马湖表层沉积物中多环芳烃的分布及风险评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10858-10861. (ZHEN Xi, YAO Jun hua, JIANG Huan, et al. Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments from Luoma Lake[J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2010, 38(20): 10858-10861. (in Chinese))

[11] 徐德兰, 王蕾, 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. (XU De lan, WAN Lei, GAO Ming xia, et al. Seasonal Variations of Nitrogen and Phosphorus Content and Alkaline Phosphatase Activity in Sediment in Eastern Shore of Luoma Lake, China[J]. Journal of Agricultural Environment Science, 2012, 31(7): 1387-1392. (in Chinese))

[12] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖沉积物重金属及营养盐污染研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 507-512. (LIU En feng, SHEN Ji, ZHU Yu xin, et al. Heavy Metals and Nutrients Pollution in Sediments of Taihu Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 507-512. (in Chinese))

[13] 万国江. 现代沉积年分辨的¹³⁷Cs 计年—以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 73-80. (WAN Guo jiang. ¹³⁷Cs Dating by Annual Distinguish for Recent Sedimentation: Samples from Erhai Lake and Hongfeng Lake[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(1): 73-80. (in Chinese))

[14] 白占国, 万国江, 刘东生, 等. 散落核素⁷Be 和¹³⁷Cs 在洱海和红枫湖沉积物中蓄积对比[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 113-118. (BAI Zhan guo, WAN Guo jiang, LIU Dong sheng, et al. A Comparative Study on Accumulation Characteristics of ⁷Be and ¹³⁷Cs in Sediments of Lake Erhai and Lake Hongfeng, China[J]. Geochimica, 2002, 31(2): 113-118. (in Chinese))

[15] ZHU Li ping, CHEN Ling, LI Bing yuan. Environmental Changes Reflected by the Lake Sediments of the South Hongshan Lake, Northwest Tibet[J]. Science China (D), 2002, 45(5): 430-439.

[16] Pennington W, Cambray R S, Fisher E M. Observation on Lake Sediments using Fallout ¹³⁷Cs as a Tracer[J]. Nature, 1973, 242: 324-326.

(下转第 143 页)

- ter Resources Optimizing Allocation [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008, 30(1): 35-37. (in Chinese)
- [36] 张俊, 张荣. 博弈论在治理河流水污染中的应用[J]. 生态经济, 2006, (1): 53-55. (ZHANG Jun, ZHANG Rong. The Application of Game Theory in the Control of River Pollution [J]. Ecological Economy, 2006, (1): 53-55. (in Chinese))
- [37] Lee CS. Multi-Objective Game Theory Models for Conflict Analysis in Reservoir Watershed Management [J]. Chemosphere, 2012, 87(6): 608-613.
- [38] 张建肖, 安树伟, 刘世伟. 博弈论与流域间跨区污染问题研究——以陕南秦巴山区南水北调工程为例[J]. 西安财经学院学报, 2008, 21(6): 76-79. (ZHANG Jian xiao, AN Shu wei, LIU Shi wei. Game Theory and Research about Cross-Region Pollution between Hanshui and Danjiang: Taking Qinba Mountain Area South to North Water Diversion Project in South Shaanxi as an Example [J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2008, 21(6): 76-79. (in Chinese))
- [39] 张勃, 吕永清, 张耀宗, 等. 博弈理论在水资源管理中的应用——以黑河流域为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 461-466. (ZHANG Bo, LV Yong qing, ZHANG Yao zong, et al. Game Theory in the Management of Water Resources: A Case Study of the Heihe River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 461-466. (in Chinese))
- [40] Wei Shouke, Yang Hong. Using Game Theory Based Approaches to Simulate Stakeholder Conflicts Concerning Domestic Water Allocation and Pollution Reduction in Inter-basin Water Transfer in China [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 254-267.
- [41] Cai Ximing, Lasdon L, Michelsen AM. Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis [J]. Water Resour. Plann. Manage, 2004, 130(1): 4-14.
- [42] 向传三, 房俊民. 从博弈论谈南水北调西线工程的四川对策[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(4): 72-75, 22. (XIANG Chuan San, FANG Jun min. The Strategy of South to North Water Transfer Project in Sichuan Province According to Game Theory [J]. World Sci Tech R & D, 2007, 29(4): 72-75, 22. (in Chinese))
- [43] 顾浩. 中国水利现代化研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(1): 26-29, 38. (GU Hao. Water Conservancy Modernization in China [J]. Journal of Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(1): 26-29, 38. (in Chinese))
- [44] 郭永金. 简述实施最严格水资源管理制度的战略意义[A]. 实行最严格水资源管理制度高层论坛优秀论文集[C]. 2010: 62-66. (GUO Yong-jin. Brief Description of Strategic Significance of the Strictest Water Resources Management System Implementation [A]. Excellent Forum Proceedings of the Strictest Water Resources Management System Implementation [C]. 2010: 62-66. (in Chinese))
- [45] 胡四一. 最严格水资源管理制度的提出背景及其内涵解读? 引自胡四一副部长解读《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》[A]. 中国水利学会水资源专业委员会 2012 年年会暨学术研讨会论文集[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013: 8-13. (HU Si yi. The background and Connotations of the Strictest Water Resources Management System: Citing Hushiyi Minister's Interpretation on the "State Council's View on the Implementation of the Most Strictest Water Management System" [A]. Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society Professional Resources Committee Annual Meeting and Symposium in 2012 [C]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2013: 8-13. (in Chinese))
- [46] 左其亭. 水生态文明建设: 践行生态文明的“水利”体现[N]. 中国水利报, 2013-02-07(56). (ZUO Qi ting. Water Ecological Civilization Construction: "Water Conservancy" Reflections of Ecological Civilization Practice [N]. China Water Resources News, 2013-02-07(56). (in Chinese))
- [17] Swain E B, Engstrom D R, Brigham M E. Increasing Rates of Atmospheric Mercury Deposition in Mid-continental North America [J]. Science, 1992, 257: 784-784.
- [18] 张学恕. 中国长江下游经济发展史[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990. (ZHANG Xue shu. History of Economic Development in the Lower Reaches of the Yangtze River [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990. (in Chinese))
- [19] 陆桂华. 关于骆马湖水生态环境保护的调研与建议[J]. 江苏水利, 2008, (9): 12-16. (LU Gui hua. Investigation and Suggestions on the Protection of the Ecological Environment of Luoma Lake [J]. Jiangsu Water Resources, 2008, (9): 12-16. (in Chinese))
- [20] SHEN Ji, Ryo M, WANG Su min. A 3600 Years Paleoclimatic Change Inferred from Organic 13C and TOC/TN of the Gucheng Lake Sediments, Southeast China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1997, 15(3): 279-284.
- [21] Meyers P A. Preservation of Source Identification of Sedimentary Organic Matter during and after Deposition [J]. Chemical Geology, 1994, 144(3/4): 289-302.

(上接第 48 页)