

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.02.010

# 基于马尔科夫模型的太湖水质综合评价

范丽丽<sup>1,2</sup>, 邱利<sup>3,4</sup>, 田威<sup>5</sup>, 李梦迪<sup>4</sup>, 许贺伟<sup>4</sup>, 章双双<sup>6</sup>, 李一平<sup>3,4</sup>

- (1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
4. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;  
5. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 6. 南京信息工程大学滨江学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:**对2000—2005年太湖整个湖区水质监测资料进行分析,得出不同湖区水质浓度均值,采用灰色聚类法对各湖区水质进行评价,并根据马尔科夫模型计算各湖区水质季节变化的相对进步度。结果表明:太湖水质的时空差异性较大,竺山湖和梅梁湾的水质最差,为V类,而东太湖和东部湖区水质相对较好,为II类;不同的水质指标中,NH<sub>3</sub>-N的空间差异性最大,TN、TP、COD<sub>Mn</sub>的空间差异性相对较小,表明城镇污水是太湖的主要外源污染;竺山湖和梅梁湾的水质季节性变化最大,在夏秋季水质相对较好,冬春季水质相对较差,其他湖区的水质季节性变化很小。

**关键词:**马尔科夫模型;水质评价;灰色聚类;时空特性;太湖

中图分类号:X824 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)02-0050-05

## Comprehensive evaluation of water quality in Taihu Lake based on Markov model

FAN Lili<sup>1,2</sup>, QIU Li<sup>3,4</sup>, TIAN Wei<sup>5</sup>, LI Mengdi<sup>4</sup>, XU Hewei<sup>4</sup>, ZHANG Shuangshuang<sup>6</sup>, LI Yiping<sup>3,4</sup>

- (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;  
2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;  
3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Nanjing 210098, China;  
4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
5. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;  
6. Binjiang College of Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The author of this paper analyzed the water quality monitoring data, of Taihu lake from 2000 to 2005, getting the average value of water quality in different areas. The grey clustering method was used to evaluate the water quality of different lake areas, and the relative progress degree of seasonal variation of water quality in different lake areas was calculated by using Markov model. The results show that spatial and temporal differences of water quality in Taihu Lake is obvious: the water quality of Zhushan Lake and Meiliang Bay is worst, the water class is V, but the water quality of east Taihu Lake and eastern of Taihu Lake is relatively better, the water class is II. Among different water quality indicators, the degree of spatial heterogeneity of ammonia nitrogen is the largest, followed by the total nitrogen and total phosphorus, while the degree of permanganate index is relatively smaller. The results indicate that sewage is the main source pollution of Taihu Lake. The seasonal variation of water quality in Zhushan Lake and Meiliang Bay is the largest, and the water quality in summer and autumn is relatively better than that in winter and spring. While the seasonal variation of water quality in the other lake areas is small.

**Key words:** Markov model; water quality evaluation; grey clustering; spatial-temporal characteristic; Taihu Lake

基金项目:国家自然科学基金(51409172);国家自然科学基金(51379061);江苏省自然科学基金(BK20131370)

作者简介:范丽丽(1981—),女,博士,工程师,主要从事水环境规划工作。E-mail: llfan@nhri.cn

太湖是我国著名的淡水湖泊,随着太湖流域社会经济的迅猛发展,太湖水环境质量逐渐恶化。20世纪70年代之前,太湖平均水质为Ⅱ类,自80年代以来太湖水质平均每十年下降一个等级,90年代末以来,太湖水质恶化趋势得到初步遏制,DO、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>等主要水质指标均有所好转,但北部湖湾水质仍较差<sup>[1]</sup>,目前太湖已经发展为重富营养化状态<sup>[2]</sup>。水质污染对太湖水环境和社会环境均造成了严重的危害。水质评价是了解水环境质量的重要途径,分析太湖水质的空间分布特性以及随时间变化规律,能够更好地了解太湖水体恶化的原因和机理,为太湖水资源综合管理提供理论依据。很多学者对太湖水质时空特征进行了研究,如李一平等<sup>[3]</sup>利用动态聚类分析法将太湖所有监测点进行了聚类分析,结果表明太湖水质存在很强的时空相关性。李森等<sup>[4]</sup>基于主成分分析方法进行克里格插值,研究了水质时空分布状况。朱广伟<sup>[2]</sup>研究指出太湖水质时空异质性既受太湖湖泊形态特征的影响,也更多受到外源污染的影响。然而目前太湖水质时空相关性研究基本上是定性分析,很少有对水质时空变化程度进行定量分析。常用的水质评价方法有很多,如单因子指数法、内梅罗指数法、灰色聚类法、模糊综合评判法以及综合水质标志指数法等<sup>[5]</sup>,其中灰色聚类法是评价水质的一种好方法,与模糊综合评判法和综合水质标志指数法相比,灰色聚类法具有更合理、更客观等优点<sup>[6]</sup>。灰色聚类法不仅注意到水质分级界线的模糊性,而且信息利用率和精度均有较大幅度提高<sup>[7]</sup>。

马尔科夫模型具有描述事物随机变化的良好特性,已大量应用于环境评价与预测等方面。如马惠群等<sup>[8]</sup>将基于Kendall的指标权重引入马尔科夫模型,并应用于大明湖的水质评价。张又等<sup>[9]</sup>根据马尔科夫模型计算了“引江济太”调水过程中望虞河水质的变化规律。笔者采用灰色聚类法对太湖8个湖区水质进行评价,定量描述太湖不同湖区水质的优劣程度,同时根据马尔科夫模型,采用进步度的方法定量计算了各湖区水质随季节的变化规律。研究结果可以定量的了解太湖水质时空变化规律,为太湖流域水资源保护和管理提供理论支持。

## 1 数据来源与评价方法

### 1.1 数据来源

本研究将太湖划分为8个子区域,分别为:竺山湖、梅梁湾、贡湖、西北湖、西南湖、湖心区、东部湖区和东太湖(图1)<sup>[10]</sup>。为了研究太湖水质的空间变化特征,选取2004年25个监测点(图1)每月1次

的水质监测资料作为研究对象,监测项目包括TP、TN、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>等重要水质指标,通过计算得到各个湖区不同水质指标的平均值。采用灰色聚类法对太湖8个湖区水质进行评价。

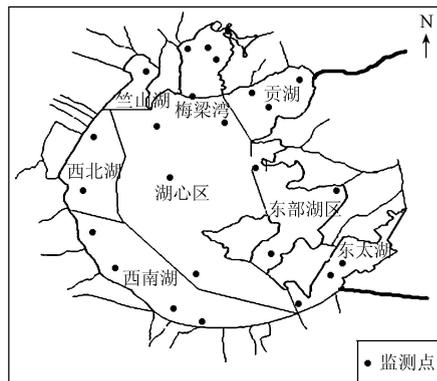


图1 太湖湖区划分及监测点位置

同时为了研究太湖水质在时间上的变化规律,根据2000—2005年水质监测数据,选择TP、TN、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>等5个水质指标,计算不同季节各湖区的水质指标平均值,根据马尔科夫模型与模糊隶属度相结合的方法计算各湖区的水质变化相对进步度,得到太湖水质随季节变化的趋势,定量地分析太湖水质的时空差异性。季节划分如下:春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12月至次年2月。

### 1.2 评价方法

采用灰色聚类法对太湖各湖区水质进行评价,水质评价标准采用GB 3838—2002《地表水环境质量标准》。灰色聚类法的计算步骤如下:①给出聚类样本,建立聚类的白化数矩阵;②无量纲化处理;③确定白化函数;④求聚类权矩阵;⑤求聚类系数,并构成聚类行向量;⑥聚类,即判断聚类对象所属灰类<sup>[11]</sup>。

马尔科夫模型具体计算步骤<sup>[9]</sup>如下:①水质划分。为了避免监测值大量集中在水环境质量标准中的同一个水质类别,因此本研究未采用水环境质量标准分类,而是重新规定了隶属范围更小、更精细的状态划分标准,将规格化后的指标值划分为11个等级。②指标规格化。③构造概率转移矩阵,得到隶属矩阵。④根据进步度计算方法,计算得到太湖各湖区的相对进步度。

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖水质空间分布特征

由图2可见,太湖水质存在明显的空间差异性,不同湖区水质相差较大。就TN而言,太湖平均质量浓度为3.36 mg/L,超出地表水环境Ⅲ类标准(≤1 mg/L)3倍多,竺山湖和梅梁湾的TN平均质量

表1 太湖各湖区水质评价结果

湖区	聚类系数					评价等级
	I	II	III	IV	V	
竺山湖	0.000	0.000	0.156	0.085	0.761	V
梅梁湾	0.000	0.000	0.195	0.166	0.602	V
贡湖	0.042	0.374	0.154	0.174	0.227	II
西北湖	0.000	0.334	0.205	0.212	0.227	II
西南湖	0.191	0.216	0.167	0.116	0.227	V
湖心区	0.165	0.173	0.221	0.131	0.227	V
东部湖区	0.165	0.346	0.182	0.094	0.145	II
东太湖	0.184	0.423	0.349	0.000	0.000	II

浓度很高,分别为 7.47 mg/L 和 6.02 mg/L,远远高于其他湖区,东太湖的 TN 平均质量浓度最小为 0.99 mg/L,其他湖区的 TN 平均质量浓度为 2 ~ 3 mg/L 之间。全湖 TP 平均质量浓度为 0.096 mg/L,超出地表水环境 III 类标准 ( $\leq 0.05$  mg/L) 约 2 倍,其中竺山湖和梅梁湾的 TP 平均质量浓度分别为 0.201 mg/L 和 0.148 mg/L,远远高于其他湖区,东太湖和东部湖区的 TP 平均质量浓度分别为 0.036 mg/L 和 0.048 mg/L,能达到地表水环境 III 类标准,其他湖区的 TP 平均质量浓度在 0.08 ~ 0.09 mg/L 之间。全湖  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度相差不大,平均为 5.3 mg/L,能达到地表水环境 III 类标准 ( $\leq 6$  mg/L),其中竺山湖和梅梁湾的质量浓度相对较大,分别为 7.39 mg/L 和 6.73 mg/L。全湖  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度分布极不均匀,竺山湖和梅梁湾的  $\text{NH}_3\text{-N}$  平均质量浓度分别为 4.31 mg/L 和 3.17 mg/L,而其他湖区  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度较小,均在 0.15 ~ 0.50 mg/L 之间,能达到地表水环境 III 类标准 ( $\leq 1$  mg/L)。

太湖各湖区水质评价等级结果如表 1 所示,竺山湖、梅梁湾、西南湖以及湖心区的评价结果为 V 类,贡湖、西北湖、东部湖区以及东太湖为 II 类。其中竺山湖和梅梁湾均以较大的聚类系数被划为 V 类,表明这两个湖区水质最差,而西南湖和湖心区虽也被划为 V 类,但不同水质类别的聚类系数相差不大。东太湖和东部湖区水质最好,均以较大的聚类系数被划分 II 类,而贡湖和西北湖虽也被划为 II 类,但也是以较小的聚类系数差别被划分为 II 类。该评价结果客观地反映了太湖水质在空间上的差异,即使被评价为同一水质类别,通过聚类系数的大小也能进一步比较出水质的优劣。

## 2.2 太湖水质季节变化特征

太湖各湖区水质变化进步度为水质变化的相对

进步度,能直接反映水质变好或变坏的情况。太湖各湖区水质季节进步度变化见图 3。图 3(a) 表明从春季到夏季转变时,竺山湾、梅梁湾以及贡湖的水质均有所改善,其中梅梁湾的水质进步度为 0.205,是水质改善幅度最大的湖区,其次是竺山湾,水质进步度为 0.08,贡湖的水质进步度为 0.04,其他湖区的水质进步度几乎为 0,表明春季至夏季水质情况几乎保持不变。同样地,图 3(b)、(c)、(d) 分别给出了从夏季至秋季、从秋季至冬季以及从冬季至春季变化时太湖各湖区水质变化情况。从夏季至秋季,竺山湖、梅梁湾、西北湖以及东部湖区的水质有所改善,其中竺山湖的进步度最大为 0.113,改善程度最好,而其他湖区的进步度几乎为 0,水质几乎没有变化。秋季至冬季转变时,梅梁湾的进步度绝对值最大,为 -0.125,表明梅梁湾水质变差的幅度最大,而其他湖区水质几乎没有改变。冬季至春季转变时,各湖区水质进步度没有正值,表明太湖整体水质有变差的趋势,其中竺山湖的进步度绝对值最大,为 -0.102,表明竺山湖水质变差的幅度最大,其次是梅梁湾,其他湖区的水质变化幅度很小。

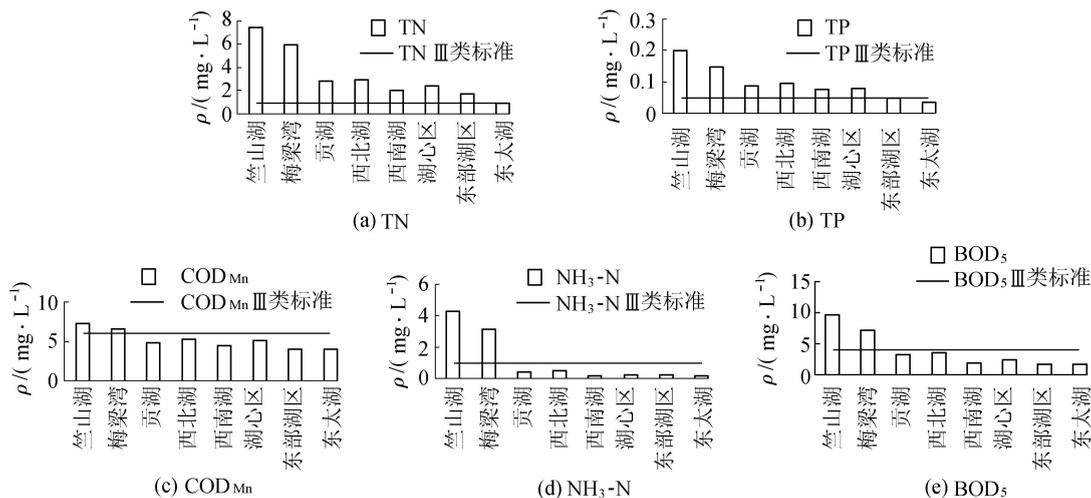


图2 太湖各湖区不同水质指标空间分布

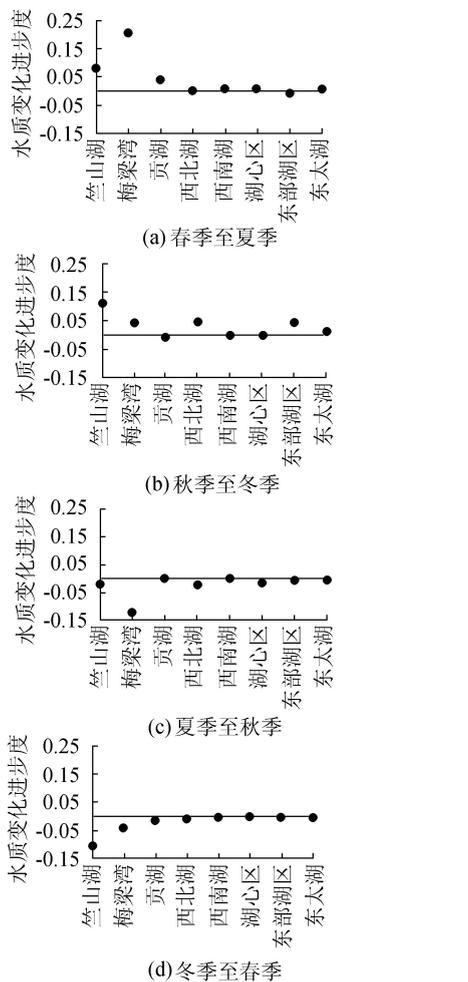


图3 太湖各湖区水质季节进步度变化

### 3 讨论

太湖水质的空间变化特征为:①竺山湖的各类水质指标浓度最高,其次是梅梁湾,东太湖和东部湖区的水质相对最好。可以认为太湖水质空间分布不均与外源污染有很大相关性,因为入湖河道主要集中在太湖西北部。②不同的水质指标空间变化的幅度也不相同,其中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度空间差异性最大。表明太湖的外源污染主要来自于城镇污染源,太湖流域居民生活水平较高,导致入湖的  $\text{NH}_3\text{-N}$  污染源较大,因此靠近入湖河道的湖区  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度较高,而其他湖区经过稀释降解等自净作用使得  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度有所减小。③竺山湖和梅梁湾  $\text{Chl-a}$  浓度最高,说明湖湾区藻类水华频发与较高的 N、P 等营养元素含量有关,因此控制并减少营养物质的浓度是减少湖湾区藻类生长、降低藻类暴发风险的有效途径,而对于其他湖区,控制 N、P 营养物质浓度的增加对于避免藻类水华的暴发有至关重要的作用。

造成竺山湖和梅梁湾水质差的原因主要是太湖西北部入湖河道众多,且入湖河道水质差,大量外源污染物进入太湖,且长期积累的外源污染会向内源

污染转化,在风浪的作用下内源不断释放,最终导致该部分湖区水质一直很差,难以得到缓解。因此控制入湖河道水质关键是改善太湖水质,其次应提高太湖水质自净能力,减少内源污染,最终才能缓解太湖污染问题。东太湖及东部湖区以出湖河道为主,外源污染较少,因此水质相对较好。

太湖水质季节变化规律为:①从春季至夏季,再至秋季,太湖水质整体有改善的趋势,而从秋季至冬季,再至春季,太湖水质整体有恶化的趋势;②太湖北部梅梁湾和竺山湖水质季节变化性最大,且冬春季水质变差,夏秋季水质好转;其他湖区水质季节变化性很小。分析其原因可能性较多,梅梁湾和竺山湖的污染物浓度较高、水质较差,这与周边入湖河道带来的外源污染有很大的相关性<sup>[1]</sup>,由于污染源废水量的脉动值很大,季节分布也不均匀,致使主要受外源污染影响的湖区水质季节性变化性较大。另外可能与降雨量的季节变化有关,太湖流域 2000—2008 年各季节降雨量如图 4 所示,太湖降雨中 TN 质量浓度大致介于 1.64 ~ 5.23 mg/L 之间,大多数情况下为 2 ~ 3 mg/L<sup>[2]</sup>,质量浓度明显低于太湖西北部湖湾的水质质量浓度,所以降雨对梅梁湾和竺山湖的稀释作用很明显,而其他水质较好的湖区受降雨的影响则不明显。因此,梅梁湾和竺山湖在降雨量偏少的冬春季节水质较差,在降雨量较多的夏秋季水质有所好转。还有学者认为太湖水质的季节性变化与微生物活动有关,冬春季节温度低,微生物活性减弱,生物化学反应速率减小,水体自净能力减弱,因此水体污染物含量较高,而在夏秋季微生物活性增强,水体自净能力增加,因此水质转好,但是这不能很好地解释除竺山湖和梅梁湾以外的其他湖区水质季节变化性很小的现象。作者认为,这可能与夏秋季藻类等浮游植物大量生长繁殖吸收了水体中的氮磷元素,导致水体营养元素含量明显降低,而冬春季节藻类处于冬眠期,对水体中营养元素的需求也相应减少,从而导致水体水质浓度增加,这就很好地解释了为什么藻类易发湖区的水质季节变化性较大,而其他湖区变化性很小的原因。

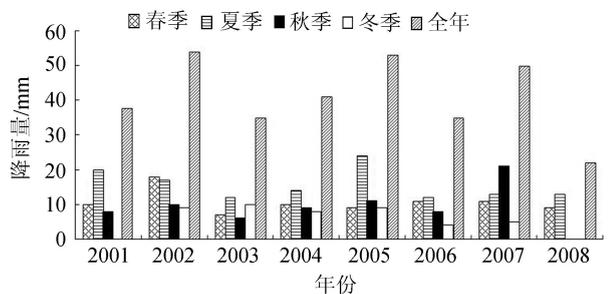


图4 2001—2008 年太湖流域不同季节降雨量

## 4 结 论

太湖水质在时间和空间上都存在差异性。竺山湖和梅梁湾水质最差(Ⅴ类),而东太湖和东部湖区水质相对最好(Ⅱ类)。这与太湖入湖河道主要分布在西北部且入湖水质较差有关,而东部湖区分布着主要的出湖河道,表明外源污染是导致太湖水质空间差异性的主要原因。对于不同的水质指标,氨氮浓度的空间差异性最大,表明城镇污水是太湖外源污染的主要成分。竺山湖和梅梁湾的水质随季节变化幅度较大,冬春季水质较差,夏秋季水质较好,其原因可能是北部湖湾区夏秋季藻类大量生长繁殖吸收了水体中的营养元素,从而降低了水体中污染物含量,而冬春季藻类等浮游植物处于冬眠期导致水体营养元素含量恢复高浓度的状态,这也很好地解释了其他湖区水质随季节变化幅度较小的原因。

### 参考文献:

- [1] 鄢回,郁建桥,徐洁,等.改进的模糊综合评价法在太湖水质类别判定中的应用[J].环境监控与预警,2012,4(2):39-44. (YAN Hui, YU Jianqiao, XU Jie, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method for water quality assessment in Taihu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2012, 4(2): 39-44. (in Chinese))
- [2] 朱广伟.太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J].长江流域资源与环境,2009,18(5):339-445. (ZHU Guangwei. Spatio temporal distribution pattern of water quality in Taihu Lake and its relation with cyanobacterial blooms[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(5): 339-445. (in Chinese))
- [3] 李一平,严莹,韩广毅.太湖水质时空相关性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):505-508. (LI Yiping, YAN Ying, HAN Guangyi. Temporal-spatial correlation analysis of water quality for Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(5): 505-508. (in Chinese))
- [4] 李森,丁贤荣,潘进,等.基于主成分分析的太湖水质时空分布特征研究[J].环境科技,2012,25(3):44-47. (LI Sen, DING Xianrong, PAN Jin, et al. The spatially

and temporally dynamic variation of water quality in Taihu Lake based on principle component analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(3): 44-47. (in Chinese))

- [5] 安乐生,赵全升,刘贯群,等.代表性水质评价方法的比较研究[J].中国环境监测,2010,26(5):47-51. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng, LIU Guanqun, et al. Comparative study on representative water quality assessment methods [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, 26(5): 47-51. (in Chinese))
- [6] 叶巧文,张新政.基于灰色聚类的水质评价方法[J].五邑大学学报:自然科学版,2003,17(4):4-7. (YE Qiaowen, ZHANG Xinzheng. Water quality evaluation based on the grey clustering method [J]. Journal of Wuyi University: Natural Science Edition, 2003, 17(4): 4-7. (in Chinese))
- [7] 郑成德.水环境质量评价的灰色聚类法[J].水文,1998(4):23-27. (ZHEN Chengde. The grey clustering method of water environmental quality evaluation [J]. Journal of China Hydrology, 1998(4): 23-27. (in Chinese))
- [8] MA Huiqun, LIU Ling, CHEN Tao. Assessment model based on Markov chain [R]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008.
- [9] 张又,刘凌,姚秀岚,等.“引江济太”调水中望虞河水水质变化的规律[J].水资源保护,2013,29(2):53-57. (ZHANG You, LIU Ling, YAO Xiulan, et al. Variation of water quality of Wangyu River during water diversion from Yangtze River to Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 53-57. (in Chinese))
- [10] 李一平,唐春燕,余钟波,等.大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J].水科学进展,2012,23(2):271-277. (LI Yiping, TANG Chunyan, YU Zhongbo, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 271-277. (in Chinese))
- [11] 庞博,李玉霞,童玲.基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J].环境科学与技术,2011,34(1):185-188. (PANG Bo, LI Yuxia, TONG Ling. Application of grey clustering method and fuzzy comprehensive assessment method to assess eutrophication level of water quality [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(1): 185-188. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-12 编辑:徐娟)

(上接第49页)

- [11] 佟伟,章铭陶,张知非,等.西藏地热[M].北京:科学出版社,1981:1-192.
- [12] 曹积飞,杨秋荣,李英杰,等.黏土矿物对重金属有害元素吸附性研究[J].环境科学与技术,2008,1(31):42-44. (CAO Jifei, YANG Qiurong, LI Yingjie, et al. Absorbability of clay minerals to harmful elements of heavy metal [J]. Environment Science & Technology, 2008, 1

(31): 42-44. (in Chinese))

- [13] 牟保磊.元素地球化学[M].北京:北京大学出版社,1999.
- [14] ROMERO L, ALONSO H, CAMPANO P, et al. Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile) [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(9):1399-1416.

(收稿日期:2014-05-04 编辑:彭桃英)