

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.027

基于马尔科夫模型下的水质评价

龙珂良, 陈星, 崔广柏, 林松, 王依依, 范云柱

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要: 基于马尔科夫模型原理, 对常熟市原型调水试验后水质改善情况进行动态评价。选定水质评价指标进行无量纲处理、隶属度划分、权重分配, 构建概率转移矩阵, 求出进步度, 并对引水过程中污染物浓度的变化进行分析, 从而进行水质评价。结果表明: 调水试验后各断面水质均有相应变化, 并且大部分断面水质在改善, 离引水口最近的两个断面改善效果最为明显, 部分断面因为引水不足以及沿程陆域污染等而导致水质有所恶化。

关键词: 原型调水; 马尔科夫模型; 离差最大化赋权法; 进步度

中图分类号: X522; X132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2016)02-0133-06

Water quality evaluation based on Markov model

LONG Keliang, CHEN Xing, CUI Guangbo, LIN Song, WANG Yiyi, FAN Yunzhu

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the principles of the Markov model dynamic evaluation was conducted to investigate the improvement of water quality after an experiment on prototype water diversion in Changshu City. The water quality evaluation indices were selected for the dimensionless analysis, the division of the degree of membership, and the allocation of weights. The probability transfer matrix was established to obtain the degree of progress, and the change of concentrations of pollutants in the process of water diversion was analyzed, in order to evaluate the water quality. The results show that the water quality of all the sections have changed after the water diversion. The water quality of most of the sections improved, with the most significant improvement seen in the two sections nearest the water inlet. Meanwhile, the water quality of some sections deteriorated due to insufficient water diversion and pollution in the land area along the water diversion route.

Key words: prototype water diversion; Markov model; method of maximizing deviations to weighting; progress degree

随着经济迅速发展,水污染已成为长江三角洲主要水环境问题,严重危害到人们的日常生活。大量含重金属的工业废水、生活污水、农业排水使得水质日益恶化,因此必须对水质进行改善,采用水质评价方法来判断水环境改善的效果。水质评价是指通过客观定量的方式描述水体状态,从而给水环境整治提供依据。水质评价方法多以静态评价为主,大多数未将污染物的时空分布与水质综合评价动态地进行结合。国内外常用水质评价方法有层次分析

法^[1]、相对差距和法^[2]、主成分分析法^[3]、TOPSIS法^[4]、RSR值综合评价法^[5]、人工神经网络法^[6]和全概率评分法^[7]等。实际上,江河湖库连通的过程中,污染物浓度的变化是一个随机的过程,具有很大的不确定性,因此一般的水质预测模型很难考虑这些随机因素,但是基于马尔科夫过程构建的马尔科夫模型是一种无后效性的随机过程,时间和状态都是离散的,可通过构建转移矩阵,确定水质变化进步度,进行水质评价。马尔科夫模型有数学基础作为

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2011697)

作者简介:龙珂良(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 309811672@qq.com

通信作者:陈星,讲师。E-mail: Chenxing@hhu.edu.cn

支撑,具有其他评价方法不具有的优势,是目前国内外研究的热点。

常熟市位于长江三角洲经济发达区域,东北濒临长江,位于太湖流域下游的平原水网区,地势较低,河网分布密集,其经济发展与水环境之间存在矛盾。笔者选取常熟市常浒河以东、白茆塘以北地区为研究对象,在传统污染源治理的基础上,加强水系连通,加快水体流动,增加水环境容量,促进水环境改善。基于马尔科夫模型,对常熟市原型调水试验后水质情况进行动态评价,克服了一般水质模型的缺点,将各项污染物评价指标的时空分布与水质综合评价动态结合^[8]。

1 研究方法介绍

数学家马尔科夫根据切比雪夫在概率论中的研究,进行了独立随机变量和古典极值理论的研究,改进并完善了概率论中的中心极限定理及大数定律。马尔科夫对随机变量序列进行了深入研究,得到了马尔科夫随机过程,即“马尔科夫过程”。在此基础上,马尔科夫链和马尔科夫模型应运而生。随着“马尔科夫过程”的提出,它已经成为现代概率论与数理统计中随机过程分支理论的一个重要组成部分。

1.1 马尔科夫模型原理

已知一个系统或一个转换过程处于 t 时刻的状态,当它处于 $t+1$ 时刻的状态只与 t 时刻的状态有关,而与 t 时刻之前的所有状态都无关。这种性质被称为无后效性^[9]。

将上述性质用概率分布函数来表示,假设随机过程 t 时刻系统所处的状态为 x_n , $t+1$ 时刻所处的状态为 x_{n+1} ,则 $t+1$ 时刻系统所处状态 x_{n+1} 下的条件概率可表示为

$$p_{ij} = P(X(t+1) = x_{n+1} | X(t) = x_n) \quad (1)$$

其中, p_{ij} 为马尔科夫链的一步转移概率。

推广到一般的情况下,则 $p_{ij}^{(h)} = P(X(t+h) = j | X(t) = i)$,表示系统在 t 时刻所处状态 i 条件下,经过了 h 步转移到 $t+h$ 时刻下状态 j 的条件概率,被称为马尔科夫链的 h 步转移概率^[10]。

相应的,由 $p_{ij}^{(h)}$ 组成一个矩阵成为 h 步转移矩阵:

$$P^{(h)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(h)} & \cdots & p_{1n}^{(h)} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1}^{(h)} & \cdots & p_{nn}^{(h)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

特别地,当 $h=1$ 时,此时称为一步转移矩阵。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 进步度

a. 划分质量状态。常见的水质划分是将原始数据直接分类,大约有 3~6 个状态,但是这种方法会导致大量数据集中在一个类别中,区别度不大,达不到划分水质的目的。因此,要重新规划隶属度更精细的划分标准,将上述每个指标、每个状态无量纲规范化的数据进行划分,一般划分为 11 个状态,如下表 1。

表 1 马尔科夫无量纲规格化后的水质状态划分

状态	指标值区间	状态	指标值区间
1	[0.00, 0.05)	7	[0.55, 0.65)
2	[0.05, 0.15)	8	[0.65, 0.75)
3	[0.15, 0.25)	9	[0.75, 0.85)
4	[0.25, 0.35)	10	[0.85, 0.95)
5	[0.35, 0.45)	11	[0.95, 1.00]
6	[0.45, 0.55)		

b. 进步度。其实,一步转移矩阵已经能够大致判断水质的变化情况,但是为了避免马尔科夫概率矩阵发生多步转移,在求得一步转移矩阵后进行进步度求解,这样能更直观、更精确地判断水质改善情况。求解进步度公式如下:

$$s_{ij} = (j-i)^3 p_{ij} \quad (4)$$

式中: $i, j=1, 2, \dots, 11$, 进步度矩阵 $S(i, j) = s_{ij}$ 。当进步度为正数时,表示水质得到了改善;当进步度为负值时,表示水质得到了恶化。进步度的绝对值越大,表示水质改善(或恶化)的程度越大。 $p_k = \sum s_{ij}$ 为第 k 个断面的进步度,根据 p_k 来动态评价常熟市水循环调控后各断面水质改善情况。

2 实例应用

2.1 马尔科夫模型计算

常熟市原型调水监测时间为 12:00~24:00,引水期徐六泾、金泾最大引水流量分别达 55.1 m³/s 和 43.3 m³/s,平均流量分别为 31 m³/s 和 24.2 m³/s。沿程各河道由于所处位置和河道规模的差异,分流情况差别较大,在引水期间,盐铁塘断面水流运移速度缓慢,汇入常浒河和白茆塘,而东环河由于离排水河道近,受到监测前河道排水的影响,引水期河道仍然处于排水阶段,且流量很大,东环河平均流量为 20.5 m³/s。选取常熟市常浒河以东、白茆塘以北地区为研究区,该区位于常熟市的滨江地带,地势比较低洼,河网分布密集,具有代表性。对区内 7 个水质监测断面进行马尔科夫模型求解,选取 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 4 个指标作为评价指标体系,动态地对各断面进行对比评价。研究区各断面具体位置见图 1。通过对各个断面引水后水质的变化情况来评

价该区在原型调水试验后的水质情况。

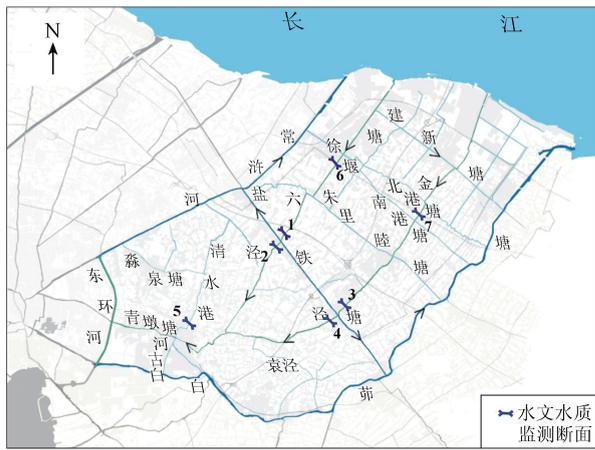


图1 研究区各断面具体位置

根据指标无量纲化处理和质量划分状态,这4个指标都属于越小越优型,求出各断面的隶属度矩阵(由于篇幅问题,下面仅列出两个断面计算过程)如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 4 & 7 & 9 & 4 \\ 4 & 7 & 8 & 5 \\ 6 & 6 & 7 & 5 \\ 7 & 6 & 5 & 5 \\ 6 & 6 & 7 & 5 \\ 7 & 5 & 4 & 5 \\ 7 & 5 & 3 & 5 \\ 7 & 6 & 8 & 7 \\ 8 & 5 & 9 & 8 \\ 7 & 6 & 8 & 8 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 8 & 6 \\ 4 & 7 & 8 & 6 \\ 4 & 7 & 9 & 6 \\ 4 & 5 & 3 & 5 \\ 7 & 5 & 4 & 6 \\ 7 & 5 & 5 & 6 \\ 8 & 5 & 5 & 7 \\ 7 & 5 & 5 & 6 \\ 5 & 7 & 7 & 6 \\ 4 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix}$$

得到隶属度矩阵后,由VB编写程序,通过最大化离差权重分析法公式,得到各指标权重。指标权重为 $\omega_1 = (0.411, 0.227, 0.738, 0.485)$; $\omega_2 = (0.134, 0.648, 0.376, 0.648)$ 。

各断面初始矩阵如下:

$$E_1 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 7 & 3 \\ 2 & 2 & 6 & 3 \\ 3 & 2 & 6 & 3 \\ 3 & 2 & 4 & 3 \\ 3 & 2 & 5 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 3 \\ 4 & 2 & 3 & 3 \\ 4 & 2 & 6 & 4 \\ 4 & 2 & 7 & 4 \\ 3 & 2 & 6 & 4 \end{bmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 & 4 \\ 1 & 5 & 4 & 4 \\ 1 & 5 & 4 & 4 \\ 1 & 3 & 2 & 4 \\ 2 & 3 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 2 & 4 \\ 2 & 5 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

统计隶属度矩阵中相邻两次监测值由*i*级变到*j*级的个数,从而求得概率转移矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.28 & 0.06 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0.11 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 & 0.03 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.03 & 0.14 & 0.06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0.08 & 0.03 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0.31 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & -0.06 & 0.06 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由概率转移矩阵,根据式(4)求得进步度矩阵为

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & -0.03 & 0 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.22 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.22 & 0 & 0 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.06 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.03 & 0 & 0.06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.03 & 0 & 0.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.22 & 0 & 0 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.22 & -0.06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 结果分析

2.2.1 进步度分析

由上述进步度矩阵可以求出相应断面的进步度: $s_1 = 0.36$; $s_2 = -0.39$; $s_3 = 0.22$; $s_4 = -0.06$; $s_5 = 0.08$; $s_6 = 0.89$; $s_7 = 1.89$ 。

$s_2 < s_4 < 0, 0 < s_5 < s_3 < s_1 < s_6 < s_7$,由此可以说明:

a. 断面7,6,1,3,5水质都有所改善,而断面2,4水质相对有所恶化,断面7,6,1,3,5改善程度依次呈递减趋势。

b. 由于断面2引水阶段流向改变为盐铁塘至徐六泾时,各项水质指标浓度普遍呈上升趋势,而且断面2水质浓度较断面1上升很大,这是因为引水的中途盐铁塘水流携大量污染物质汇入徐六泾断面2。断面4与2情况一致,引水的中途盐铁塘水流携大量污染物质汇入金泾断面4。

c. 断面6,7距离徐六泾、金泾入河处比较近,

所以引水对其水质状况改善比较大,而断面1、3相对较远,且要途经里睦塘,因此这两个断面相对于断面6、7水质改善较小。断面5位于清水港上,距离引水口比较远,所以水质改善不明显。

d. 徐六泾断面6到断面1、金泾断面7到断面3水质改善程度明显下降,主要是因为徐六泾、金泾沿程工厂较多,周边水质较差小水系汇入这两条河流。同时由于断面6到1沿程距离要比断面7到3沿程距离要短,因而断面1相比断面3水质改善明显。

7个断面水质指标监测数值直接反映此次调水对常熟市水质的改善状况。调水期间各水质指标(TP、TN、COD_{Mn}、NH₃-N)质量进步度曲线随断面变化如图2所示。

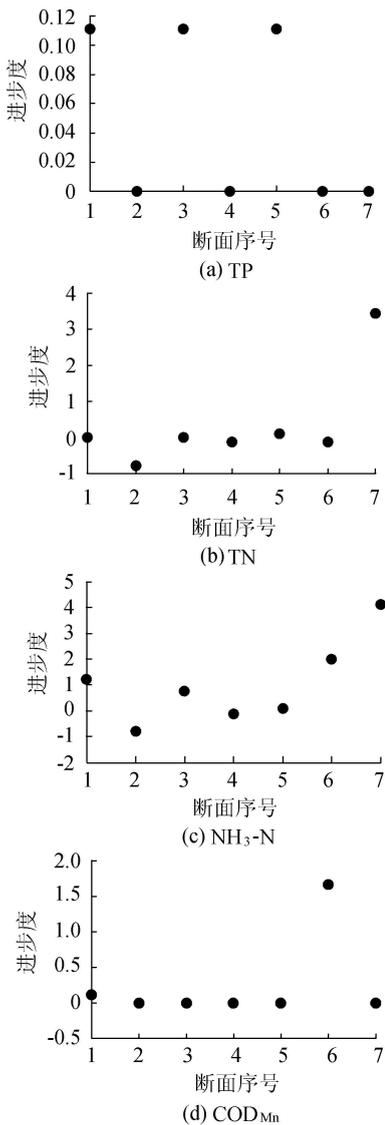


图2 各污染物指标不同断面下质量进步度变化

分析图2可得到以下结论:

a. 在调水过程中,常浒河以东、白茆塘以北地区各断面各污染物指标浓度的进步度总体呈现正值,表明污染物指标浓度随着调水过程的持续、水体

连通性的改善,总体趋势是下降的,因此,江河湖连通调水过程对研究区各断面污染物指标质量的改善效果显著。

b. 进步度特征明显不同的是TP和COD_{Mn},由图2可见,两者的进步度在水质改善最好的断面7处反而减小,分析其原因,主要是受调水日天气影响,导致河底底泥扰动剧烈,致使该断面TP和COD_{Mn}浓度增大,水质变差,但后期TP和COD_{Mn}进步度为正,表明改善水体连通性的调水过程对降低调水区河流TP和COD_{Mn}浓度的效果还是显著的。

c. 在实际引水过程中,徐六泾比金泾引水流量略大一点,但是断面7相比断面6水质改善更明显,主要原因是建新塘位于徐六泾引水口位置很近,引水期间分流作用明显;并且徐六泾区域内河道本底水质较差,因而断面6相比7水质改善差。徐六泾断面2、金泾断面4、清水港断面5在调水不同阶段均存在时段流量减小、水质指标浓度增大现象。表明现有方案引排流量不足以改善区域水环境,引水流量有待加大、引水时段尚需加长。

2.2.2 污染物浓度分析

调水期各断面污染物质量浓度变化过程线如下图3所示。

根据图3可以得出以下规律:

a. 在调水期间,各断面污染物指标浓度随调水流量和时间的变化总体呈现下降趋势。断面2、3、4污染物指标浓度呈现锯齿形波动,变化相对不明显,主要是由于离引水口距离较远。

b. 各断面污染物指标浓度基本随着调水流量的增加而减小,到了后期,随着调水流量的减少而略微回升。

c. 调水河流断面离调水路线的源头起点越远,断面污染物指标浓度变化越小,表明该断面水环境综合质量改善程度越差。

3 结论

a. 通过马尔科夫模型计算转移矩阵,从而得出进步度,对水质进行动态评价。事实证明,通过马尔科夫模型计算出来的结果与评价得出的结论和实际情况一致,具有一定的科学性。马尔科夫模型在水质评价方面引入了状态的概念,给定了状态空间,从而得出水质变化的趋势,但是在指标权重的计算精度方面仍需要考虑,并加以改进。

b. 在常熟市原型调水试验过程中,常浒河以东、白茆塘以北地区各条河流断面污染物指标浓度的进步度绝大部分为正,表明本次调水试验对改善常浒河以东、白茆塘以北地区河流水质效果显著。

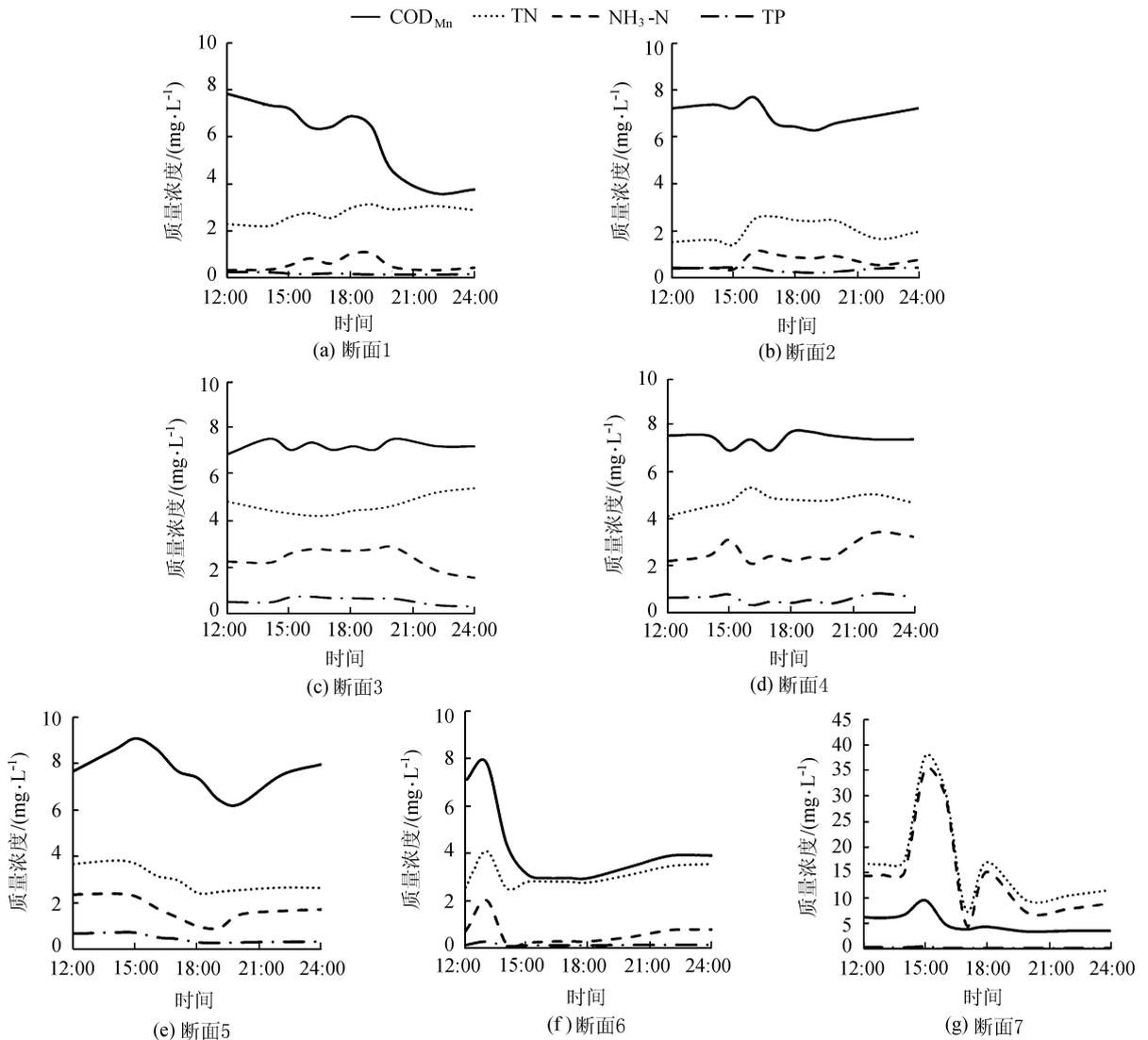


图3 调水期间各断面污染物质量浓度变化过程线

总体而言,在调水试验过程中,在江河湖连通性改善的情况下,断面水环境综合质量虽然小幅度震荡性变化,但总体呈现上升趋势,表明随着调水过程的进行、调水水量的增加、水体连通性的改善,各断面水环境综合质量有一定程度的改善。

c. 马尔科夫模型的状态矩阵随机性较强,应综合应用其他水质模型,将其结果与该模型结果进行对比分析,从而更好地预测水质变化。

参考文献:

[1] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-99. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. The weights calculation method and application of analytic hierarchy process [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-99. (in Chinese))

[2] 王晖,陈丽,陈昱,等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择[J]. 广东药学院学报, 2007, 23(5): 583-589. (WANG Hui, CHEN Li, CHEN Ken, et al. Choose

for multiple index comprehensive evaluation method and weighting coefficients [J]. Journal of Guangdong College of Pharmacy, 2007, 23(5): 583-589. (in Chinese))

[3] 何成刚. 马尔科夫模型预测方法的研究及其应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2011: 7-13.

[4] 张又,刘凌,姚秀岚,等. 引江济太调水中望虞河水质变化的规律[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 52-57. (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): 52-57. (in Chinese))

[5] 李学法,王守峰,李超,等. 基于马尔科夫模型的区域水环境安全评价[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(28): 13903-13906. (LI Xuefa, WANG Shoufeng, LI Chao, et al. Water environment assessment based on Markov model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(28): 13903-13906. (in Chinese))

[6] 陈华友. 多属性决策中基于离差最大化的组合赋权方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 194-197. (CHEN Huayou. Combination determining weights

method for multiple attribute decision making based on maximizing deviations [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(2):194-197. (in Chinese)

- [7] 马惠群,刘凌,陈涛.改进的多指标水质动态评价模型及应用[J].武汉大学学报:工学版,2008,41(5):54-57. (MA Huiqun, LIU Ling, CHEN Tao. Improved dynamic evaluation model of multifactorial water quality and its application [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(5):54-57. (in Chinese))
- [8] 周鹏飞.湖泊健康综合评价指标体系研究[J].安徽农业科学,2012,40(21):11005-11007. (ZHOU Pengfei. Research on the synthesis appraisal index system of lake health [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012,

40(21):11005-11007. (in Chinese))

- [9] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153. (GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Research and application of analytic hierarchy process (AHP) [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 18(5):148-153. (in Chinese))
- [10] 覃春乔,陈星,张其成,等.基于马尔科夫模型的污染物质量浓度变化规律[J].水资源保护,2014,30(3):56-60. (QIN Chunqiao, CHEN Xing, ZHANG Qicheng, et al. The pollutant concentration variation based on Markov model [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3):56-60. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-28 编辑:徐娟)

(上接第132页) DO和TP变化趋势不明显。说明有机污染物比例上升,各项水治理措施对城市污水和生活污水治理取得了一定效果。近几年,阳澄湖主要入湖河道水质无恶化趋势,较2010年之前水质^[7]有了很大提高。

b. 直接入湖的总污染物通量大于外围入准保护区的总污染物通量。4项指标的污染物通量平均增长率为42.34%,NH₃-N的年均增长率最大。外围入准保护区的污染物量在准保护区的范围内增加了将近一半,这与准保护区的范围较小、内部降解作用有限,以及准保护区内不可避免进一步产生污染物都有很大的关系。

c. NH₃-N、TP和COD_{Mn}3个指标的入湖通量的变化趋势一致,从2010年到2011年间有所下降,2011年开始到2014年逐步上升,这与入湖河道水质时空分布情况一致。COD 2010—2013年的变化趋势与其他3个指标相同,但2013—2014年间其入湖通量有所回落。入湖污染物通量2010年与2014年变化比较大的原因是同步水量变化比较大。

d. 阳澄湖西湖的6条主要入湖河道中,污染物通量主要来自蠡塘河,其次是界泾和北河泾和渭泾塘的。究其原因,主要是因为阳澄湖二级保护区范围内有畜禽养殖点,经营者环境保护意识淡薄,对多数污染源都未采取治理措施,污染物直接排入附近河道,对阳澄湖水质影响严重。建议在阳澄湖入湖河道上游准保护区范围设定畜禽养殖、内塘养殖的限养区,其他区域可设置集中养殖区。污染源的集中分布有利于管理工作的开展,也有利于强化清洁生产,推广循环经济^[8]。此外,强化对蠡塘河、界泾河、渭泾塘和北河泾等主要入湖河道的整治,以建设健康河湖。

参考文献:

- [1] 宋菲菲,胡小贞,金相灿,等.国外不同类型湖泊治理思

路分析与启示[J].环境工程技术学报,2013,3(2):156-162. (SONG Feifei, HU Xiaozhen, JIN Xiangcan, et al. Analysis of lake management strategies of different types of lakes abroad and enlightenments for China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(2):156-162. (in Chinese))

- [2] 吕忠梅,熊晓青.环境法视野下的“良好湖泊优先保护”[J].环境保护,2012(14):16-20. (LYU Zhongmei, XIONG Xiaoqing. “Good lakes priority protection” under the vision of environmental law [J]. Environmental Protection, 2012(14):16-20. (in Chinese))
- [3] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S]
- [4] 袁宏任,魏开涓,吴国平.水资源保护管理基础[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [5] 罗缙,逢勇,林颖,等.太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(2):132-135. (LUO Jin, PANG Yong, LING Yin, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(2):132-135. (in Chinese))
- [6] 苏州市阳澄湖水源水质保护委员会办公室.苏州市阳澄湖生态优化行动实施方案[R].苏州:苏州市阳澄湖水源水质保护委员会办公室,2013.
- [7] 沈国华,张仁泉,高晓平.阳澄湖水质变化趋势分析[J].水资源研究,2014,35(3):41-43. (SHEN Guohua, ZHANG Renquan, GAO Xiaoping. Trend analysis of water quality change in the Yangcheng Lake [J]. Water Resources Research, 2014, 35(3):41-43. (in Chinese))
- [8] 杨积德,沈桢,陈美丹,等.阳澄湖水环境综合整治对策研究与分析[J].中国给水排水,2010,26(6):6-9. (YANG Jide, SHEN Zhen, CHEN Meidan, et al. Research and analysis of comprehensive improvement countermeasures of water environment of Yangcheng Lake [J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(6):6-9. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-28 编辑:彭桃英)