

# 熵值密切值法在陆浑水库营养状况评估中的应用

张继宇<sup>1</sup>, 王国重<sup>2</sup>, 李中原<sup>3</sup>, 程焕玲<sup>4</sup>, 郝捷<sup>4</sup>

(1. 黄河养护集团有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 黄河水文水资源科学研究院, 河南 郑州 450004;  
3. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003; 4. 河南省水土保持监督监测总站, 河南 郑州 450008)

**摘要:** 为了掌握陆浑水库的富营养化情况, 采用熵值密切值法结合湖库富营养化评估标准, 对其 2009–2015 年的营养状况进行评估。结果表明: 该水库为轻度富营养化, 主要表现为总氮超标; 将该方法与线性插值评分法相比较, 两者存在差异, 线性插值法的主观性较大且没有考虑各指标对评估结果的影响, 而熵值密切值法能够减少主观性, 还能确定影响水质的主要因素, 使富营养化状况的评估结果更符合实际。因此, 熵值密切值法可以作为评估水体水质的常用方法。

**关键词:** 密切值法; 熵值; 富营养化评估; 陆浑水库

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0119-05

## Application of entropy osculation method in nutrient status assessment of Luhun Reservoir

ZHANG Jiyu<sup>1</sup>, WANG Guozhong<sup>2</sup>, LI Zhongyuan<sup>3</sup>, CHENG Huanling<sup>4</sup>, HAO Jie<sup>4</sup>

(1. Yellow River Conservation Group Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Hydrology and Water Resources of Yellow River Scientific Research Institute, Zhengzhou 450004, China; 3. Hydrology and Water Resources Bureau in Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 4. Soil and Water Conservation Supervision and Inspection Station in Henan Province, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** To monitor the eutrophication of Luhun Reservoir, the entropy osculating value method combined with the eutrophication evaluation criteria of lake and reservoir was applied to evaluate the nutrient status of Luhun Reservoir from 2009 to 2015. The results showed that the reservoir was in slightly eutrophication with total nitrogen exceeded the standard. There were differences between the entropy osculation method and the linear interpolation scoring method. There was more subjective without considering the impact of various indicators on the evaluation results for the linear interpolation scoring method, whereas the entropy osculation value method could reduce this subjectivity and can determine the main factors affecting the water quality, which made the evaluation results more consistent. Therefore, the entropy osculation value method can be used as a common method to evaluate water quality.

**Key words:** osculating value method; entropy value; eutrophication assessment; Luhun Reservoir

## 1 研究背景

陆浑水库位于黄河二级支流伊河上, 控制流域面积 3 492 km<sup>2</sup>, 总库容 13.2 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 是一座以防洪为主, 兼顾灌溉、发电、城市供水和养殖综合利用的大(I)型多年调节水库, 担负着黄河下游、洛阳市和伊河流域的防洪任务<sup>[1]</sup>。作为洛阳市重要的饮用水水源地, 其水质的优劣与当地人民的生活、健康

密不可分。随着经济社会的发展, 尤其是周边工矿企业、种植业、养殖业和旅游业的发展, 其产生的污染物在降雨径流作用下排入水体, 使水库水质一度呈恶化态势<sup>[2]</sup>。王安亭等<sup>[3]</sup>通过污染调查, 分析认为陆浑水库水质总体尚好, 但受到了轻度污染。

营养化评估可以准确地了解水体的营养状况, 为其富营养化预防与治理提供依据。国内外学者在实践基础上先后提出了许多方法, 如模糊评估<sup>[4]</sup>、

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-03-04

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(GG201604)

作者简介: 张继宇(1970-), 男, 河南方城人, 学士, 高级工程师, 从事水利工程、流域治理方面的工作。

灰色聚类评估<sup>[5]</sup>、神经网络评估<sup>[6]</sup>等方法,取得了一些有价值的成果。与这些方法相比,密切值法因其原理简单、概念清晰、计算简便、数学逻辑严谨并能全面、准确地揭示水体的水质状况,因此更受研究者的青睐<sup>[7-9]</sup>。但是,由于将评估指标作等权处理,该方法难以揭示各评估因子的影响程度,使评估结果与实际略有偏差<sup>[10]</sup>。

信息熵受主观因素的影响较小,在很大程度上可以避免人为因素的干扰<sup>[11-12]</sup>,人们将信息熵与密切值法相结合,以信息熵来计算评估指标的权重,对密切值法进行改进,如吴健华等<sup>[13]</sup>在地下水水质评估工作中,将多种密切值法进行了比较,发现基于熵值密切值法的评估效果最为合理;郑德凤等<sup>[14]</sup>用熵值法改进传统的密切值法,确定了各评估指标的权重,并将其应用于大连市地下水水质评估,得到了满意的结果;李秀花等<sup>[15]</sup>应用熵值密切值法评估博斯腾湖大湖区的水质,认为工业废水排放量的增加和不合理的氮肥施用,是导致其水质富营养化的主要原因;林华<sup>[16]</sup>分别利用熵值密切值法、传统密切值法、属性识别法及模糊数学法对山仔水库的营养类型进行评估,也发现熵值密切值法的结果更为科学、客观。

水库水质状况关系到水库功能的发挥,根据陆浑水库 2009-2015 年的水质监测数据,尝试采用熵值密切值法对其营养状况进行评估,剖析存在的问题,为其水环境的治理提供依据。

## 2 密切值法的原理与评估模型

作为系统工程学的一种优选方法,密切值法的基本思想是将影响水库水质的多个指标转化为一个能综合反映水质状况的单指标,再以这个单指标的最优或最劣值作为基准点,计算评估对象到这个基准点的欧式距离,通过密切值排序确定各评估对象的优劣顺序<sup>[7]</sup>。

### 2.1 评估矩阵的规范化处理

设  $B_1, B_2, \dots, B_n$  为影响水库水质的  $n$  个评估指标,  $S_1, S_2, \dots, S_m$  为其中的  $m$  个样本,  $S_i$  在指标  $B_j$  下的实测值为  $a_{ij}$ ,这样就形成了  $m$  个样本  $n$  个指标的评估矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} = (a_{ij})_{m \times n}$$

由于该矩阵中各指标的量纲、数量级等差异较大,需要对其中的数据做规范化处理,处理公式详见公式(1)。

$$z_{ij} = \begin{cases} a_{ij} / (\sum_{k=1}^m a_{kj}^2)^{0.5}, & B_j \text{ 为正向指标时} \\ -a_{ij} / (\sum_{k=1}^m a_{kj}^2)^{0.5}, & B_j \text{ 为负向指标时} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_{ij}$  为第  $i$  个样本中第  $j$  个指标的实测值;  $z_{ij}$  为经处理后第  $i$  个样本中第  $j$  个指标的值。正向指标即数值越大越好的指标,如产值、产量、效益等;负向指标则相反,如投资、成本等。

### 2.2 “最优点集”和“最劣点集”的确定

各评估指标规范化处理后,对各列分别进行求大、求小计算,即得到“最优点集”和“最劣点集”。求大的结果为“最优点集”  $z_j^+$ :

$$z_j^+ = \max \{z_{ij}\} = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \quad (2)$$

( $i = 1, 2, \dots, m$ )

相应地,求小的结果为“最劣点集”  $z_j^-$ :

$$z_j^- = \min \{z_{ij}\} = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \quad (3)$$

( $i = 1, 2, \dots, m$ )

### 2.3 各评估指标权重的计算

计算各指标权重之前,需对评估矩阵中各项指标做标准化处理,公式为<sup>[15]</sup>:

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij}}{(a_{ij})_{\max}}, & B_j \text{ 为正向指标时} \\ \frac{(a_{ij})_{\min}}{a_{ij}}, & B_j \text{ 为负向指标时} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{令 } x_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (5)$$

式中:  $B_j$  为正向指标时取最大值,若为负向指标则取最小值。

然后采用熵值法计算各个指标的权重,第  $j$  项指标的熵值  $E_j$  可由公式(6) 计算得到,而其效用价值则取决于该指标的熵值  $E_j$  与 1 的差值。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (x_{ij} \cdot \ln x_{ij}) \quad (6)$$

式中:常数  $k = (\ln m)^{-1}$ 。

$$h_j = 1 - E_j \quad (7)$$

则第  $j$  项指标的权重为:

$$w_j = h_j / \sum_{j=1}^n h_j \quad (8)$$

### 2.4 各评估指标密切值的计算

分别计算各评估指标与“最优点集”和“最劣点集”的欧氏距离  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ ,其公式为:

$$d_i^+ = [ \sum_{j=1}^n w_j \cdot (z_{ij} - z_j^+)^2 ]^{1/2} \tag{9}$$

$$d_i^- = [ \sum_{j=1}^n w_j \cdot (z_{ij} - z_j^-)^2 ]^{1/2} \tag{10}$$

$$d^+ = \min \{ d_i^+ \}, d^- = \max \{ d_i^- \} \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$C_i = d_i^+ / d^+ - d_i^- / d^- \tag{11}$$

按照该式计算的  $C_i$  值,可以依据大小对样本进行排序:  $C_i$  值越小说明样本的环境质量愈好,相反的话则表示环境质量愈差。

3 评估标准

线性插值评分法(简称 SOC 法)是水利部“地表水资源质量评价技术规程(SL395-2007)”推荐的水体富营养化评估方法<sup>[17]</sup>,将湖库的营养状况分作 5 个级别:贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养、重度富营养,相应的评估指标为:总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl-a)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、透明度(SD)。其营养状况分级标准如表 1 所示。

表 1 湖库营养状况评估标准

| 营养分级<br>( $E_i$ )                | 评估等级     | 评估指标<br>(赋分值 $E_n$ ) | TP/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | TN/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | Chl-a/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | SD/<br>m | COD <sub>Mn</sub> /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|----------------------------------|----------|----------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------|
| 贫营养<br>( $0 \leq E_i \leq 20$ )  | $R_1$    | 10                   | 0.001                                      | 0.02                                       | 0.0005                                        | 10.00    | 0.15                                                       |
|                                  | $R_2$    | 20                   | 0.004                                      | 0.05                                       | 0.0010                                        | 5.00     | 0.40                                                       |
|                                  | $R_3$    | 30                   | 0.010                                      | 0.10                                       | 0.0020                                        | 3.00     | 1.00                                                       |
| 中营养<br>( $20 < E_i \leq 50$ )    | $R_4$    | 40                   | 0.025                                      | 0.30                                       | 0.0040                                        | 1.50     | 2.00                                                       |
|                                  | $R_5$    | 50                   | 0.050                                      | 0.50                                       | 0.0100                                        | 1.00     | 4.00                                                       |
| 轻度富营养<br>( $50 < E_i \leq 60$ )  | $R_6$    | 60                   | 0.100                                      | 1.00                                       | 0.026                                         | 0.50     | 8.00                                                       |
| 中度富营养<br>( $60 < E_i \leq 80$ )  | $R_7$    | 70                   | 0.200                                      | 2.00                                       | 0.064                                         | 0.40     | 10.00                                                      |
|                                  | $R_8$    | 80                   | 0.600                                      | 6.00                                       | 0.160                                         | 0.30     | 25.00                                                      |
| 重度富营养<br>( $80 < E_i \leq 100$ ) | $R_9$    | 90                   | 0.900                                      | 9.00                                       | 0.400                                         | 0.20     | 40.00                                                      |
|                                  | $R_{10}$ | 100                  | 1.300                                      | 16.00                                      | 1.000                                         | 0.12     | 60.00                                                      |

4 评估模型在陆浑水库的应用

4.1 评估矩阵实测值的标准化处理

根据陆浑水库 2009-2015 年的逐月实测水质数据,分别计算 SD、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP、Chl-a 的年均值,并与表 1 中的评估等级  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  一起构成评估矩阵 A:

|       | SD        | COD <sub>Mn</sub> | TN      | TP      | Chl-a   |
|-------|-----------|-------------------|---------|---------|---------|
| 2009  | 84.91667  | 2.02250           | 2.96250 | 0.03158 | 0.00142 |
| 2010  | 111.83333 | 2.44167           | 3.22083 | 0.03317 | 0.00217 |
| 2011  | 68.16667  | 2.2600            | 3.54417 | 0.02983 | 0.00233 |
| 2012  | 75.08333  | 2.18333           | 3.64167 | 0.02817 | 0.00233 |
| 2013  | 75.41667  | 2.00833           | 2.99667 | 0.02683 | 0.00267 |
| 2014  | 64.58333  | 2.26667           | 2.55083 | 0.02350 | 0.00217 |
| 2015  | 59.25000  | 2.34167           | 3.46333 | 0.01425 | 0.00267 |
| $R_4$ | 150.00000 | 2.00000           | 0.30000 | 0.02500 | 0.00400 |
| $R_5$ | 100.00000 | 4.00000           | 0.50000 | 0.05000 | 0.01000 |
| $R_6$ | 50.00000  | 8.00000           | 1.00000 | 0.10000 | 0.02600 |

以 SD 为正向指标,其余 4 项为负向指标,由公式(1)对矩阵 A 中的评估指标进行规范化处理,得到矩阵 Z:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.30333 & -0.18577 & -0.34486 & -0.23303 & -0.04922 \\ 0.39948 & -0.22427 & -0.37494 & -0.24471 & -0.07527 \\ 0.24350 & -0.20666 & -0.41257 & -0.22012 & -0.081106 \\ 0.26820 & -0.20054 & -0.42392 & -0.20782 & -0.08106 \\ 0.26940 & -0.18446 & -0.34884 & -0.19798 & -0.09265 \\ 0.23070 & -0.20819 & -0.29694 & -0.17154 & -0.07527 \\ 0.21165 & -0.21508 & -0.40317 & -0.10514 & -0.09265 \\ 0.53581 & -0.18370 & -0.03492 & -0.18446 & -0.13897 \\ 0.35721 & -0.36740 & -0.05821 & -0.36891 & -0.34742 \\ 0.17860 & -0.73479 & -0.11641 & -0.73782 & -0.90329 \end{bmatrix}$$

4.2 “最优点集”和“最劣点集”的计算

由矩阵 Z,可得到“最优点集” $z_j^+$ 、“最劣点集” $z_j^-$ :

$$z_j^+ = (0.53581, -0.18370, -0.03492, -0.10514, -0.04922)$$

$$z_j^- = (0.17860, -0.73479, -0.42392, \\ -0.73782, -0.90329)$$

4.3 各指标密切值的计算

根据熵值法,即公式(6)~(8)可得到各指标的权重 $w_j$ :SD 为 0.0621752、COD<sub>Mn</sub> 为 0.0602833、TN 为 0.5868626、TP 为 0.1078948、Chl-a 为 0.182784。根据陆浑水库 2009-2015 年的水质监测数据,主要是 TN 超标导致其水质处于 V 类和劣 V 类,计算的指标权重也反映了这一特点,TN 的权重系数最大,表明其为陆浑水库水质的主要影响因素,说明权重计算符合实际。

再由公式(9)和(10)可得到:

$$d^+ = \min\{0.24799, 0.26707, 0.30109, 0.30757, \\ 0.25203, 0.21614, 0.29414, 0.04638, \\ 0.16762, 0.45459\}$$

$$d^- = \max\{0.42852, 0.41437, 0.411874, 0.41423, \\ 0.41670, 0.43158, 0.42415, 0.50484, \\ 0.39972, 0.23558\}$$

则 2009-2015 年的密切值详见表 2。

4.4 结果与讨论

根据表 1,结合 2009-2015 年陆浑水库上述 5 项指标的实测值,同时采用 SOC 法确定了各年份水库的营养等级,也列于表 2。

表 2 密切值法与 SOC 法的评估结果

| 年份    | 密切值法  |      | SOC 法  |      |
|-------|-------|------|--------|------|
|       | 密切值   | 评估结果 | SOC 法  | 评估结果 |
| 2009  | 4.498 | 轻 富  | 46.468 | 中营养  |
| 2010  | 4.938 | 轻 富  | 47.399 | 中营养  |
| 2011  | 5.676 | 轻 富  | 49.015 | 中营养  |
| 2012  | 5.811 | 轻 富  | 48.587 | 中营养  |
| 2013  | 4.609 | 轻 富  | 48.304 | 中营养  |
| 2014  | 3.805 | 轻 富  | 47.892 | 中营养  |
| 2015  | 5.502 | 轻 富  | 47.937 | 中营养  |
| $R_4$ | 0     | 中营养  | 40     | 中营养  |
| $R_5$ | 2.822 | 中营养  | 50     | 中营养  |
| $R_6$ | 9.335 | 轻 富  | 60     | 轻 富  |

按照表 2,以  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  作为参考,由密切值大小对陆浑水库营养状况进行排序,为: $R_4 < R_5 < 2014 < 2009 < 2013 < 2010 < 2015 < 2011 < 2012 < R_6$ ;由 SOC 值计算结果,其营养化程度排序为: $R_4 < 2009 < 2010 < 2014 < 2015 < 2013 < 2012 < 2011 < R_5 < R_6$ 。密切值法的结果表明:2009-2015

年陆浑水库的营养等级在  $R_5$  与  $R_6$  之间,属于轻度富营养化范围;由 SOC 法,水库的营养级别在  $R_4$  与  $R_5$  之间,处于中营养范围。此外,两种方法计算的各个年份的排序也不一致。

造成两种方法评估结果不一致的原因主要有:

(1)首先是基于不同的评估原理。SOC 法是将各指标的实测值转换成对应的赋分值,再对这些赋分值求和取平均,根据均值所在的范围来判断湖库的营养级别<sup>[18]</sup>;密切值法则是从决策方案集中找到各指标的最优点和最缺点,从中筛选出最接近最优点且远离最缺点的决策点,此决策点即为最佳方案,依照密切值的大小对评估指标进行排序<sup>[19]</sup>。由于评估原理上的不同,使其评估结果存在着差异。

(2)其次是处理指标权重的方式不同。SOC 法是忽略各指标的权重,不考虑各指标对评估结果的贡献<sup>[20]</sup>;熵值密切值法则考虑了各评估指标对结果的影响,使其评估结果更为客观、更符合实际<sup>[21]</sup>。

以上分析表明,熵值密切值法的评估结果更为合理,即 2009-2015 年陆浑水库处于轻度富营养化范围,主要是由于总氮浓度严重超标所致。采用信息熵理论改进密切值法,不仅可以克服 SOC 法的主观性,还能够判别出主要污染因素,因此可以作为湖库水质评估的常用方法。

5 结论与建议

本研究根据 SOC 法设置的评估标准,采用熵值密切值法,对陆浑水库 2009-2015 年的富营养化情况进行评估,结果表明:2009-2015 水库处于轻度富营养化状态,主要是由于总氮含量超标所致。熵值密切值法克服了 SOC 法的主观性,也考虑了各指标对评估结果的影响,使其评估结果较前者更为客观、合理。因此,熵值密切值法可以作为湖库水质富营养化状况评估的常用方法。

陆浑水库作为洛阳市的“水缸”,总氮超标严重影响其供水水质和饮用水安全,应采取措施予以治理,如治理水土流失和面源污染、倡导科学的水产养殖模式等。

参考文献:

- [1] 王纪军,竹磊磊,胡彩虹,等.陆浑水库控制区近 50 年夏季降水变化特征[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(3):1-5.
- [2] 李永丽.陆浑水库水质趋势分析及水环境安全状况评价[J].人民黄河,2017,39(9):60-63+69.

- [3] 王安亭,方玮,白云山. 陆浑水库污染源调查及防治措施[J]. 水电能源科学,2011,29(3):34-36+193.
- [4] 张煦,熊晶,程继雄,等. 模糊数学在丹江口水库富营养化评价中的应用[J]. 中国环境监测,2017,33(3):99-105.
- [5] 夏斌,陈碧鹏,幸福言,等. 灰色聚类法在胶州湾富营养化评价中的应用[J]. 渔业科学进展,2011,32(5):114-120.
- [6] 崔东文. 几种神经网络模型在湖库富营养化程度评价中的应用[J]. 水资源保护,2012,28(6):12-18.
- [7] 郭树宏,林志杰. 密切值法在泉州市山美水库水质综合评价中的应用[J]. 安全与环境工程,2010,17(5):44-46.
- [8] 陈新,刘晓冬,翟瑞滨. 密切值法在水环境质量综合评价中的应用[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2005,17(6):81-83.
- [9] 邹凤钗. 赤水河中段水体中重金属含量及其影响因素研究[D]. 贵阳:贵州大学,2010.
- [10] 吴旻妍,薛媛媛,吴福全. 改进密切值法在阳澄湖水质评价中的应用[J]. 环境监控与预警,2015,7(3):39-42.
- [11] 张薇,何瑞春. 基于案例推理的交通疏导辅助决策方法[J]. 计算机工程与设计,2014,35(10):3621-3625.
- [12] 马小雪,王腊春,曾春芬,等. 基于熵权的有机污染综合评价法在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学,2014,32(1):32-35.
- [13] 吴健华,李培月. 多种密切值法在水质评价应用中的对比研究[J]. 水利科技与经济,2010,16(5):481-483.
- [14] 郑德凤,李晓研,王希庆. 基于熵权的密切值法在大连市地下水水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报,2011,11(2):113-115.
- [15] 李秀花,王金山,孔伟斌,等. 基于熵权密切值法的博斯腾湖大湖区水质动态分析[J]. 黑龙江大学工程学报,2015,6(3):50-56+61.
- [16] 林华. 基于熵权的密切值法在山仔水库营养类型评价及趋势变化分析中的应用[J]. 海峡科学,2009(6):113-116.
- [17] 张成成,沈爱春,张晓晴,等. 应用支持向量机评价太湖富营养化状态[J]. 生态学报,2013,33(23):7563-7569.
- [18] 贺克雕. 滇池水质状况综合评价及变化趋势分析[J]. 人民长江,2012,43(12):37-41.
- [19] 陈明生,王旭峰,沈斐敏. 密切值法优选矿井通风优化方案[J]. 工业安全与环保,2013,39(1):50-52.
- [20] 林高松,黄晓英,李娟. 基于投影寻踪法的深圳水库富营养化评价——以深圳市铁岗水库与石岩水库为例[J]. 热带地理,2010,30(2):130-134.
- [21] 范小萍,陈盛,张江山. 基于熵权的改进密切值法在水质综合评价中的应用[J]. 环境保护与循环经济,2012(4):42-45.

(上接第118页)

- [11] 史方方. 西安建设国际化大都市的水资源承载力浅析[J]. 陕西水利,2018(1):28-30.
- [12] 刘选利,张小平,马丁. 西安市水资源状况分析[J]. 给水排水,2012,38(S2):28-29.
- [13] 何艳冰,黄晓军,翟令鑫,等. 西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J]. 地理学报,2016,71(8):1315-1328.
- [14] 任燕. 西安旅游城市化过程、格局与机制[J]. 西安财经学院学报,2017,30(3):68-75.
- [15] 吴大进,曹力. 协同学原理和应用[J]. 华中理工大学,1990:9-17.
- [16] 鲍超,方创琳. 河西走廊城市化与水资源利用关系的量化研究[J]. 自然资源学报,2006(2):301-310.
- [17] 高翔,鱼腾飞,程慧波. 西北地区水资源环境与城市化系统耦合的时空分异——以西陇海兰新经济带甘肃段为例[J]. 干旱区地理,2010,33(6):1010-1018.
- [18] 李娜,孙才志,范斐. 辽宁沿海经济带城市化与水资源耦合关系分析[J]. 地域研究与开发,2010,29(4):47-51.
- [19] 徐云锋,刘玉邦,刘勇. 新型城镇化建设的水资源支撑力评价[J]. 人民长江,2017,48(19):61-65+71.
- [20] 海霞,李伟峰,王朝,等. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系[J]. 生态学报,2018,38(12):4245-56.
- [21] 张勇,郭纯青. 广西北部湾经济区水资源支撑能力与城市化系统关系研究[J]. 节水灌溉,2018(10):54-58.
- [22] 陈晓. 南京市城市化与水源的协调发展分析[J]. 人民珠江,2017,38(7):40-44.