

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.035

河南省水生态文明建设试点城市生态系统健康评价

宋梦林¹, 左其亭^{1,2}, 赵钟楠³, 邱冰³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学 水科学研究中心, 郑州 450001; 3. 水利部 水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 在总结城市生态系统的属性并分析其健康内涵的基础上, 通过频度统计法, 建立评价指标体系。采用海明贴度, 建立模糊物元模型, 对河南省第一批水生态文明城市建设试点郑州、洛阳、许昌 2000 年- 2013 年间城市生态系统的健康水平进行评价, 分析影响城市生态系统健康发展的各要素, 结果表明: 郑州、洛阳和许昌整体的城市生态系统健康水平呈上升趋势, 但健康改善程度并不显著, 且部分指标有恶化趋势; 相同时期内, 城市生态系统的健康水平排序由高到低依次为郑州、洛阳、许昌, 但其增长速率则为许昌最快、郑州最慢; 各城市不同要素之间的健康程度差别较大, 且不同城市各要素之间的协调性较低。因此, 未来应针对健康程度较差的要素重点发展, 提高各要素之间的协调性, 进一步提高城市生态系统整体的健康水平。

关键词: 城市生态系统健康; 模糊物元; 海明贴度; 熵权; 水生态文明建设

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1185-06

Assessment of urban ecosystem health in experimental units of water eco civilization construction in Henan

SONG Meng lin¹, ZU O Qi ting^{1,2}, ZHAO Zhong nan³, QIU Bing³

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: On the basis of summarizing the attributes of urban ecosystem and analyzing its content of health, an evaluation indicator system was established using the frequency statistics. A fuzzy matter model was then developed using the Hamming approach degree to estimate the urban ecosystem health in Zhengzhou, Luoyang, and Xuchang (the first batch of the experimental units of water eco civilization construction in Henan Province) from 2000 to 2013 and analyze the impact factors of urban ecosystem health. The results showed that (1) the level of urban ecosystem health in Zhengzhou, Luoyang, and Xuchang is improving slightly, but some indexes tend towards worse; (2) the level of urban ecosystem health from high to low is Zhengzhou, Luoyang, and Xuchang, but the improving rate in Xuchang is the highest while the lowest in Zhengzhou; and (3) the health degree differs in different cities and the harmony between each index is low. Consequently, we should focus on the development of indexes with low health degree, improve the harmony between each index, and increase the health level of urban ecosystem.

Key words: urban ecosystem health; fuzzy matter; Hamming approach degree; entropy method; water eco civilization construction

现阶段全球很多区域的城市生态系统都面临着机能失调所带来的压力, 城市生态系统的再生能力与恢复能力也正面临着资源耗竭和污染排放的考验^[1]。随之而来, 人们开始担心巨大人口压力下城市生态系统的承载能力, 并思考居住在什么样的城市才可获得高品质的生活^[2-3]。城市生态系统是由自然、经济、社会三个子系统构成的三维复合系统^[4]。

为满足其自身的健康情况应包含三方面的内涵^[5-6]: (1) 满足社会发展合理需求的能力, 以维持城市结构(组织结构)、功能(活力); (2) 生态系统本身维持与恢复的能力(恢复力); (3) 受人类活动影响显著, 保证城市人群健康(人群健康)以及生活质量(服务功能)。另外, Spiegel 等^[7]采用“驱动力-压力-状态-暴漏-影响”机制探讨城市生态系统健康水

收稿日期: 2015-03-03 修回日期: 2015-10-21 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2015.024.html>

基金项目: 2014 年水利部重大课题(2014-1); 河南省科技攻关计划项目(132102310528); 河南省高校科技创新团队支持计划(13IRTSTHN030)

作者简介: 宋梦林(1992-), 女, 河南焦作人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: songmenglin1992@163.com

通讯作者: 左其亭(1967-), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

平, 评估中心城市社区改善人类生活质量和健康的一系列干预措施的效率和效果。还有很多学者采用不同的方法构建评价模型, 分析具体城市生态系统健康的水平。因此, 在水生态文明理念发展的今天, 评价城市生态系统健康水平, 能够为未来城市健康发展, 尤其是水生态文明城市建设的方向与重点提供一定的参考和支撑。

鉴于城市的本底特征以及发展情况, 本文选取河南省第一批水生态文明城市建设试点郑州、洛阳、许昌三个城市为研究区, 首先根据频度统计法构建城市生态系统健康评价指标体系, 其次利用熵权法计算各城市具体指标的权重, 然后构建基于海明贴近度的模糊物元模型, 分别计算三个城市 2000 年-2013 年的健康指数, 最后根据评价结果分析城市

生态系统健康水平的发展趋势及不同要素的健康程度, 对城市未来发展具有一定的指导意义。

1 评价指标体系与数据来源

1.1 指标体系构建

采取频度统计法构建评价指标体系^[8]。在中国学术期刊中搜索论文题目中包含“城市生态系统健康”的论文, 选择引用率最高的 5 篇文献^[9-13] (依次编号为 B1、B2、……、B5) 和发表日期最新的 5 篇文献^[14-18] (依次编号为 R1、R2、……、R5), 共 10 篇。统计出文献中选择的评价城市生态系统健康的具体指标共 124 个, 其中 5 篇以上文献共同使用的指标个数为 18 个, 见表 1。

表 1 城市生态系统健康评价体系

Tab. 1 The evaluation index system of urban ecosystem health

编号	评价指标	要素		权重		
		三分法	五分法	郑州	洛阳	许昌
A1	工业固体废物综合利用率 (%)	自然系统	恢复力	0.034	0.034	0.031
A2	第三产业占 GDP 比例 (%)	经济系统	组织结构	0.048	0.085	0.043
A3	城市生活污水处理率 (%)	自然系统	恢复力	0.028	0.063	0.030
A4	城镇家庭人均恩格尔系数 (%)	社会系统	人群健康	0.027	0.073	0.028
A5	人均 GDP/元	经济系统	活力	0.084	0.080	0.104
A6	GDP 年均增长率 (%)	经济系统	活力	0.047	0.051	0.052
A7	R & D 费用占 GDP 比重 (%)	经济系统	组织结构	0.047	0.076	0.061
A8	人均住房建筑面积/m ²	社会系统	服务功能	0.022	0.025	0.026
A9	市区人口密度/(人·km ²)	社会系统	组织结构	0.070	0.047	0.031
A10	单位 GDP 能耗/(t 标准煤·万元 ⁻¹)	经济系统	活力	0.086	0.060	0.069
A11	建成区绿化覆盖率 (%)	自然系统	组织结构	0.047	0.051	0.064
A12	每万人拥有医院床位数/张	社会系统	服务功能	0.096	0.099	0.194
A13	人均公共绿地面积/m ²	自然系统	组织结构	0.062	0.029	0.049
A14	每万人拥有在校大学生/人	社会系统	人群健康	0.042	0.045	0.057
A15	城镇登记失业率 (%)	社会系统	组织结构	0.074	0.071	0.041
A16	城市生活垃圾无害化处理率 (%)	自然系统	恢复力	0.043	0.029	0.020
A17	人均城市道路面积/m ²	社会系统	服务功能	0.114	0.054	0.055
A18	人口自然增长率 (‰)	社会系统	人群健康	0.032	0.031	0.048

文献中的指标, 都是学者们凭借各自的经验判断, 遵循若干原则, 采取一定的方法并对指标设计合理性进行相关检测和解释后选取的。因此, 这 18 个指标是有意义的、合理的。按照文献 B3、B5、R1、R4, 将城市生态系统分为三个子系统(三分法), 即: 自然子系统、社会子系统、经济子系统。按照文献 B1、R2、R3、R5, 将影响城市生态系统健康的主要要素分为 5 类(五分法), 即: 活力、组织结构、恢复力、服务功能、人群健康。

1.2 数据来源

评价指标 A1、A3、A16 的原始数据来源于 2000 年-2013 年《河南省环境统计年报》、《郑州市环境质量状况公报》、《洛阳市环境质量状况公报》、《许昌市环境质量状况公报》; 其余评价指标的原始数据来源于 2001 年-2014 年《河南省统计年鉴》, 但《河南省统计年鉴》中缺少指标 A8 的 2006 年-2010 年原始数据和指标 A10 的 2000 年-2004 年原始数据, 其依靠已有数据趋势分析估算得到。

2 评价方法

2.1 权重计算

本文选取河南省第一批水生态文明城市建设试点郑州、洛阳和许昌(分别用 α 、 β 、 γ 表示)为研究区, 根据各自指标体系的数据序列, 采用熵权法分别计算各城市的指标权重。具体步骤如下。

(1) 构建具体指标原始数据判断矩阵。

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 评价的具体指标 $m = 18$, 待评价样本 $n = 14$; x_j 为第 i 个指标第 j 个样本的原始数值。分别列出郑州、洛阳和许昌的判断矩阵 x^α 、 x^β 、 x^γ 。

(2) 指标原始数值标准化。

由于各指标间量纲不同,对原始数值进行标准化处理。具体指标分为正向指标和逆向指标。指标体系中,除指标A4、A9、A10、A15、A18为逆向指标外,其余13个指标均为正向指标。针对每一个城市,采取下列标准化公式分别计算。

$$\text{正向指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (2)$$

$$\text{逆向指标: } y_{ij} = \frac{x_{i\max} - x_{ij}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (3)$$

式中: $x_{i\max}$ 、 $x_{i\min}$ 分别为同一个指标下14个样本中的最大值和最小值; y_{ij} 表示指标标准化后的值。

(3)按照熵权法的计算公式^[19],进行归一化,并求出具体指标的熵值和权重。

$$\text{归一化: } z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_{ij}} \quad (4)$$

$$\text{熵值: } e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^m z_{ij} \ln z_{ij} \quad (5)$$

$$\text{权重: } \omega_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{j=1}^m e_i} \quad (6)$$

2.2 健康指数计算

2.2.1 模糊物元和复合物元

以城市生态系统健康评价为目标,构建物元 $R = (N, c, v)$ 。其中, N 为待评价事物,本文研究区为郑州、洛阳、许昌,取3; c 为评价指标, m 个; v 为指标值,因具有模糊性,得到 m 维模糊物元。在此,选取2000年-2013年共14个样本的数据,与 m 维模糊物元组合,得到复合物元 R_{mn} 如下。

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ c_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ c_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: R_{mn} 表示 n 个样本的 m 维复合物元; c_i 为第 i 个评价指标; M_j 为第 j 个样本。

2.2.2 从优隶属度

根据从优隶属度原则,计算从优隶属度矩阵:

$$\text{正向指标: } u_{ij} = x_{ij} / \max x_{ij} \quad (8)$$

$$\text{逆向指标: } u_{ij} = \min x_{ij} / x_{ij} \quad (9)$$

式中: u_{ij} 为第 i 个指标第 j 个样本对应的模糊量值; $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为所有给定的事物 N 中,每一个指标所有量值 x_{ij} 中的最优值,表示各指标的理想物元 x_{m0} ,其对应的模糊理想值为 u_{m0} 。

将 R_{mn} 的量值改写为模糊量值形式,得到 n 个样本的 m 维复合模糊物元 R_{mn}' ,即:

$$R_{mn}' = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ c_1 & u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ c_2 & u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_m & u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据 R_{mn}' 中各指标从优隶属度中的最优值,确定标准物元 R_{m0} 和标准模糊物元 R_{m0}' 。

$$R_{m0} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_m \\ M_0 & x_{10} & x_{20} & \dots & x_{m0} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

$$R_{m0}' = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_m \\ M_0 & u_{10} & u_{20} & \dots & u_{m0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_m \\ M_0 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

2.2.3 贴近度和综合评价

采用贴近度来表示被评价样本与标准样本之间的接近程度,贴近度数值越大表示被评价样本与标准样本越接近^[20]。考虑到城市生态系统健康评价的综合性以及各贴近度的分辨能力,在此采用海明贴近度进行计算,以此作为城市生态系统的健康指数,其值越大,表明城市生态系统健康水平越高。计算公式如下:

$$\rho H_j = 1 - \left(\sum_{i=1}^m \omega_i |u_{i0} - u_{ij}| \right) \quad (13)$$

式中: ρH_j 为被评价样本与标准样本之间的接近程度,即海明贴近度。

以此构造基于海明贴近度的复合模糊物元 R_H :

$$R_H = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ \rho H_j & \rho H_1 & \rho H_2 & \dots & \rho H_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

对应给定的3个待评价事物(郑州、洛阳和许昌),将得到3个复合模糊物元,分别表示为 R_H^a 、 R_H^b 、 R_H^c ,组合成一个矩阵,得到综合复合模糊物元 R_H' :

$$R_H' = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ \rho H_j^a & \rho H_1^a & \rho H_2^a & \dots & \rho H_n^a \\ \rho H_j^b & \rho H_1^b & \rho H_2^b & \dots & \rho H_n^b \\ \rho H_j^c & \rho H_1^c & \rho H_2^c & \dots & \rho H_n^c \end{bmatrix} \quad (15)$$

由此,得到各城市各年份城市生态系统健康指数,表示各城市生态系统的健康水平。

3 结果与讨论

3.1 计算过程与结果

根据上述评价方法,计算各城市各年份城市生态系统健康指数,具体计算步骤如下。

(1)权重计算,计算结果见表1。

a.根据公式(1),结合各指标的原始数据,针对郑州、洛阳、许昌3个待评价对象,分别构建其判断矩阵 x^a 、 x^b 、 x^c 。

b.针对每一个判断矩阵分别计算。根据式(2)、式(3),作各指标的标准化处理;再根据式(4),作各指标的归一化处理;将计算结果代入式(5)、式(6),计算各指标的熵值和权重,得到不同评价对象指标体系的权重值。

(2)健康指数计算,计算结果见表2。

a.根据公式(7),分别对3个待评价对象各自的14个待评价样本建立相应的复合物元 R_{mn} 。

b.根据式(8)、式(9),计算各指标的从优隶属度,将 R_{mn} 改写为模糊量值形式,得到复合模糊物元 R_{mn}' 。

c.根据上述从优隶属度计算过程中确定的各指标最优值,构建标准模糊物元,见公式(11)。同样方法计算得到其标准模糊物元 R_{m0}' 。

d.根据公式(13),计算各样本的海明贴近度,以此构造基于海明贴近度的复合模糊物元 R_H 和综合复合模糊物元 R_H' ,即得到基于海明贴近度的生态系统健康评价(健康指数)。

表 2 城市生态系统健康指数计算结果

Tab. 2 The health index of urban ecosystem

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
郑州	0.5161	0.5568	0.5564	0.6158	0.6364	0.6185	0.6439
洛阳	0.4324	0.4592	0.4774	0.4731	0.4714	0.4620	0.5333
许昌	0.3827	0.4016	0.4109	0.4222	0.4678	0.4331	0.5148
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
郑州	0.6447	0.6335	0.6470	0.6611	0.7142	0.7202	0.7519
洛阳	0.5244	0.5668	0.5541	0.5720	0.5889	0.6101	0.6305
许昌	0.5093	0.5550	0.5199	0.5437	0.5641	0.5849	0.6001

(3) 各要素贡献值计算。将各要素所包含指标的权重相加,得到不同要素的权重值,以此计算得到不同要素对城市生态系统健康水平的贡献值,结果见表 3。

3.2 逐年总体健康水平评价结果及分析

根据各城市生态系统健康指数的计算结果,绘制时间变

化趋势图,见图 1。结合表 2 和图 1,分析结果如下。

(1) 郑州、洛阳和许昌整体的城市生态系统健康水平呈上升趋势,表明生态状况与经济、社会发展的协调性在不断加强。但是该变化趋势并不明显,主要因为部分指标(第三产业占 GDP 比例、单位 GDP 能耗、城市生活垃圾无公害化处理率等)有恶化趋势。其中三个城市共 42 个评价样本中,2013 年郑州市城市生态系统健康水平最好,健康指数为 0.7519;2000 年许昌市城市生态系统健康水平最差,健康指数仅为 0.3827。

(2) 相同时期内,城市生态系统的健康水平由高到低依次为郑州、洛阳、许昌,但健康水平的增长速率则为许昌最快、郑州最慢。对于 2013 年和 2000 年,郑州市的健康指数分别为 0.7519 和 0.5161,洛阳市分别为 0.6305 和 0.4324,许昌市分别为 0.6001 和 0.3827;从 2000 年-2013 年,上述三个城市健康指数增长倍数分别为 1.457、1.458、1.568。

表 3 城市生态系统健康水平各要素贡献值

Tab. 3 The contribution value of each component to overall health index

方法	要素	郑州			洛阳			许昌		
		2000	2007	2013	2000	2007	2013	2000	2007	2013
三分法	自然系统	0.1102	0.1377	0.1606	0.0891	0.1080	0.1299	0.0742	0.0987	0.1164
	经济系统	0.1605	0.2006	0.2339	0.1520	0.1843	0.2216	0.1254	0.1669	0.1967
	社会系统	0.2453	0.3065	0.3575	0.1914	0.2321	0.2791	0.1831	0.2437	0.2871
五分法	活力	0.1118	0.1396	0.1629	0.0825	0.1000	0.1202	0.0859	0.1143	0.1347
	组织结构	0.1791	0.2238	0.2610	0.1548	0.1877	0.2257	0.1102	0.1467	0.1728
	恢复力	0.0539	0.0673	0.0785	0.0547	0.0663	0.0797	0.0310	0.0412	0.0485
	人群健康	0.0518	0.0647	0.0755	0.0641	0.0777	0.0934	0.0508	0.0676	0.0796
	服务功能	0.1195	0.1493	0.1742	0.0765	0.0928	0.1116	0.1049	0.1396	0.1645

注:因数据时间序列较长,篇幅限制,表中仅列举部分年份结果。

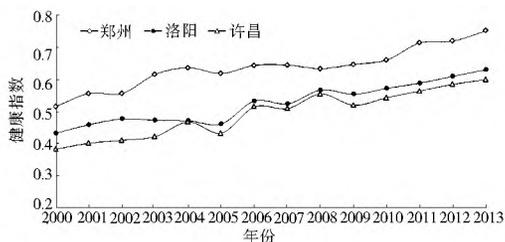


图 1 郑州、洛阳、许昌城市生态系统健康评价

Fig. 1 Assessment of urban ecosystem health in Zhengzhou, Luoyang, and Xuchang

3.3 逐年各要素评价结果及分析

(1) 以城市为分析对象,结合计算结果(表 3)和各要素变化趋势图(图 2),分析结果如下。

a. 基于三分法,对于自然子系统,郑州的健康水平明显优于洛阳,洛阳也明显优于许昌;对于社会子系统,郑州的健康水平明显优于其余两市,而洛阳和许昌的健康水平几乎相同;对于经济子系统,郑州的健康水平略高于洛阳,而两者又明显高于许昌。根据上述对城市三个子系统健康水平的阐述,分析未来各城市针对三个系统的发展方向和重点。以许昌市为例,许昌的城市生态系统健康水平未来还需要在自然系统和经济系统上加大努力,社会系统需保持稳步提升。

b. 基于五分法,对于城市活力情况,郑州的健康水平明显优于其余两市,洛阳和许昌的健康水平几乎相同,但许昌的健康水平要略高于洛阳;对于城市组织结构情况,郑州的

健康水平明显优于洛阳,洛阳也明显优于许昌;对于城市恢复力情况,郑州和洛阳的健康水平几乎相同,且明显高于许昌,另外其中有 8 年的评价结果都为洛阳城市最高;对于城市人群健康情况,洛阳的健康水平明显高于其余 2 市,而郑州和许昌的健康水平几乎相同,且其中有 8 年的评价结果都为郑州城市最低;对于城市服务功能情况,郑州和许昌的健康水平几乎相同,且都明显优于洛阳。根据上述对城市五个主要要素健康水平的阐述,分析未来各城市针对五个要素的发展方向和重点。以许昌市为例,许昌的城市生态系统健康水平在服务功能方面需要继续保持,活力、人群健康方面需要稳步提升,而组织结构、恢复力方面则需要加大努力。

(2) 以各要素为分析对象,结合城市生态系统各要素健康指数雷达图(图 3),分析结果如下。

a. 基于三分法,从雷达图显示的三角形形状可以看出,各城市社会系统的健康水平要高于经济系统的健康水平,进而高于自然系统的健康水平。其中,洛阳城市生态系统的三个子系统最为协调,郑州最不协调。说明未来城市发展要更加注重经济、社会、自然三者的协调发展,在保持社会系统健康发展的前提下,促进经济系统的稳步提升,并加大保护自然系统,确保自然系统的完整性。

b. 基于五分法,从雷达图显示的五边形形状可以看出,各城市组织结构情况的健康水平最高,服务功能、活力情况次之,人群健康、恢复力情况最差。其中,许昌五个要素之间

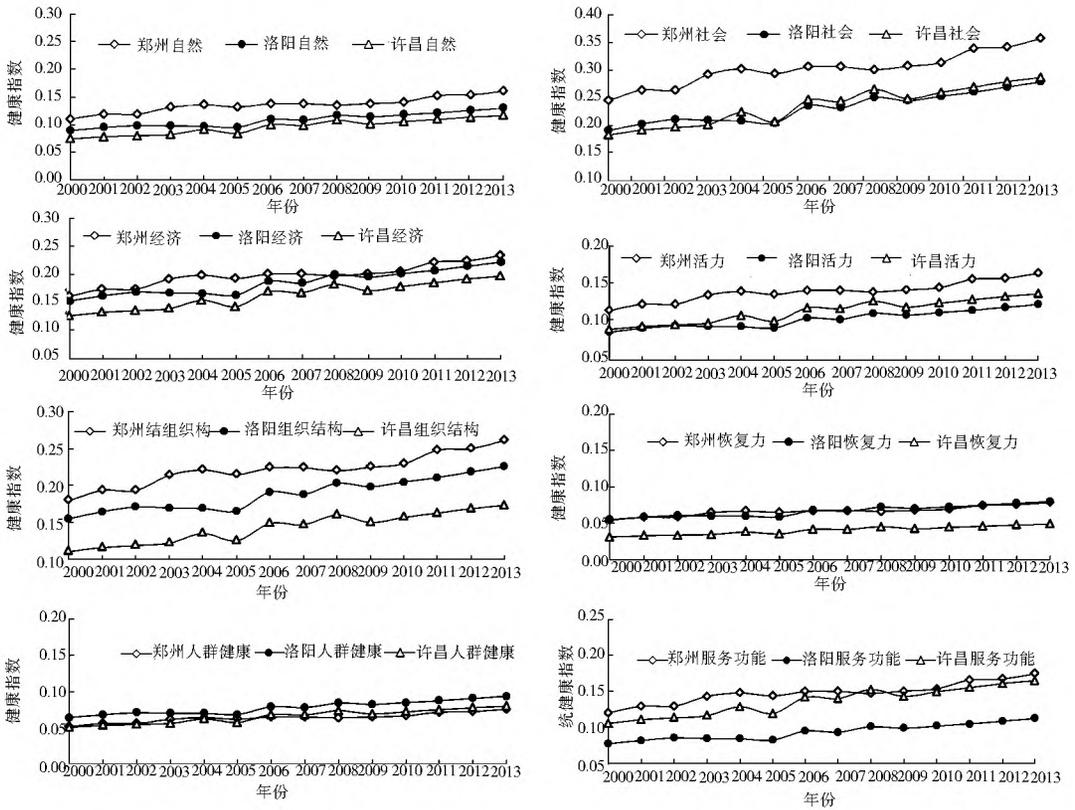


图 2 城市生态系统各要素健康指数变化趋势

Fig. 2 The health index of each component to urban ecosystem

的关系最为协调,洛阳最不协调。说明未来城市发展要更加注重五个要素的协调发展,在保证组织结构合理的前提下,

促进服务功能、活力方面的稳步提升,提高人群健康,加大自然环境的恢复程度。

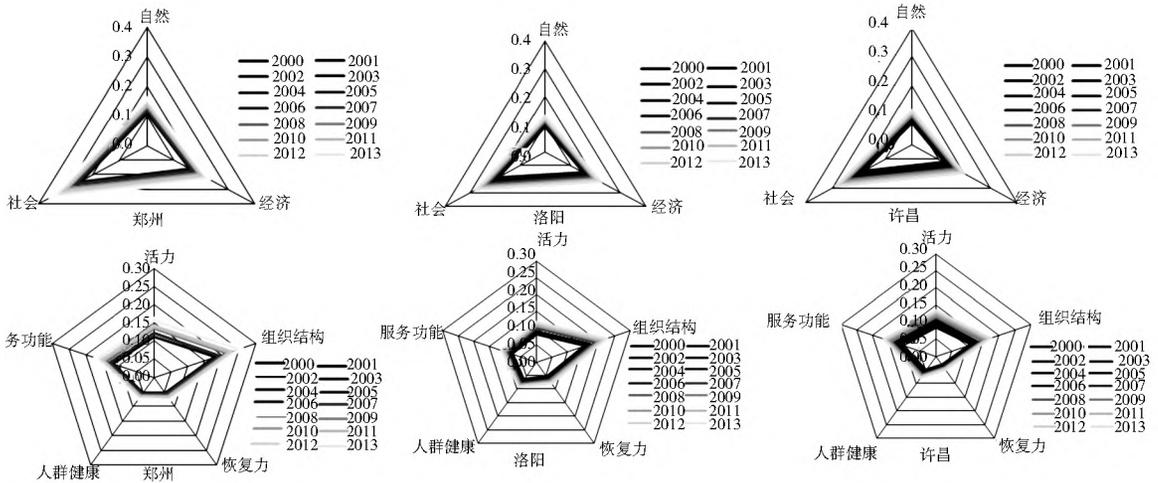


图 3 城市生态系统各要素健康指数雷达图

Fig. 3 Radar chart of health index of each component to urban ecosystem

4 结论

采用频率统计法构建城市生态系统健康评价指标体系,并科学地量化各城市具体指标的权重,选择基于海明贴近度的模糊物元模型进行评价,有效避免指标体系构建的主观性以及评价标准难以确定的问题,增加了研究结果的客观准确程度。通过对河南省第一批水生态文明城市建设试点各个时期的城市生态系统健康水平进行评价,发现在评价期内郑州、洛阳、许昌三市的生态系统健康水平平均呈上升状态,但改善的程度并不足够明显,且部分指标有恶化趋势,说明

影响城市生态系统健康水平的威胁并未得到根本性缓解。另外,各评价要素之间的健康程度差别较大,且不同城市各要素之间的协调程度不够好,表明未来应针对健康程度较差的要素重点发展,提高城市生态系统健康各要素之间的协调性。

参考文献(References):

[1] Rapport DJ, McMichael AJ, Costanza R. Assessing Ecosystem Health [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10):397-402.
 [2] SU Mei rong, YANG Zhi feng, CHEN Bin. Urban Ecosystem

- Health Assessment and Its Application in Management: A Multi Scale Perspective[J]. *Entropy*, 2013, 15(1): F9.
- [3]]SU Meirong, YANG Zhirong, CHEN Bin. Urban Ecosystem Health Assessment Based on Energy and Set Pair Analysis A Comparative Study of Typical Chinese Cities[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(18): 2341-2348.
- [4] 米凯, 彭羽. 国外生态城市指标体系及其应用现状分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(11): 129-134. (MI Kai, PENG Yu. Assessment indicators of eco city and its practical status in foreign countries[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11): 129-134. (in Chinese))
- [5] Patil G, Brooks R, Myers W L, et al. Ecosystem Health and Its Measurement at Landscape Scale: Towards the Next Generation of Quantitative Assessments[J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(4): 307-316.
- [6] Costanza R. Ecosystem Health and Ecological Engineering[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29.
- [7] Spiegel J, Bonet M, Yassi A, et al. Developing Ecosystem Health Indicators in Centro Habana: A Community-based Approach[J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 15-26.
- [8] LI Yongfa, LI Dong. Assessment and Forecast of Beijing and Shanghai's Urban Ecosystem Health[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487(4): 154-163.
- [9] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 525-529. (GUO Xiurui, YANG Jurong, MAO Xiarqiang. Primary studies on urban ecosystem health assessment[J]. *China Environment Science*, 2002, 22(6): 525-529. (in Chinese))
- [10] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3244-3251. (ZHOU Weirhua, WANG Rurong. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3244-3251. (in Chinese))
- [11] 胡廷兰, 杨志峰, 何孟常, 等. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(2): 269-274. (HU Tinglan, YANG Zhifeng, HE Mengchang, et al. An urban ecosystem health assessment method and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 269-274. (in Chinese))
- [12] 曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 等. 上海城市生态系统健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 208-212. (ZENG Yong, SHEN Gerxiang, HUANG Shenfa, et al. Assessment of urban ecosystem health in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 208-212. (in Chinese))
- [13] 桑燕鸿, 陈新庚, 吴仁海, 等. 城市生态系统健康综合评价[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1280-1285. (SANG Yarrhong, CHEN Xirong, WU Rerhai, et al. Comprehensive assessment of urban ecosystem health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1280-1285. (in Chinese))
- [14] 秦趣, 朱士鹏, 代稳. 六盘水市城市生态系统健康动态评价研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(9): 185-191. (QIN Qu, ZHU Shipeng, DAI Wen. A dynamic approach to the assessment of urban ecosystem health in Liupanshui City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(9): 185-191. (in Chinese))
- [15] 秦趣, 崔小平, 代稳. 基于未确知测度的城市生态系统健康评价[J]. *环境工程*, 2014, (8): 114-117. (QIN Qu, CUI Xiaoping, DAI Wen. Urban ecosystem health evaluation based on unascertained measure[J]. *Environmental Engineering*, 2014, (8): 114-117. (in Chinese))
- [16] 李梦婕, 申双和, 李雨鸿, 等. 模糊数学方法评价南京城市生态系统健康形势[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(22): 107-115. (LI Mengjie, SHEN Shuanghe, LI Yurong, et al. Evaluation of urban ecosystem health in Nanjing via fuzzy mathematics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(22): 107-115. (in Chinese))
- [17] 秦趣, 杨洪. 矿业城市生态系统健康评价指标体系研究[J]. *农村经济与科技*, 2014, 25(7): 33-35. (QIN Qu, YANG Hong. An index system research to the assessment of urban ecosystem health in Mining City[J]. *Journal of Rural Economy and Science and Technology*, 2014, 25(7): 33-35. (in Chinese))
- [18] 田秀华, 李永发. 基于熵值 TOPSIS 法分析 2006 至 2011 年北京与上海城市生态系统健康[J]. *西昌学院学报: 自然科学版*, 2014, 28(2): 44-48. (TIAN Xiuhua, LI Yongfa. Assessment of Beijing and Shanghai's urban ecosystem health from 2006 to 2011 based on entropy-topsis method[J]. *Journal of Xichang College: Natural Science Edition*, 2014, 28(2): 44-48. (in Chinese))
- [19] 孙学颖, 唐德善, 张新娇. 改进物元分析模型在北之江流域水质评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(03): 55-58. (SUN Xueying, TANG Deshan, ZHANG Xiurjiao. Application of improved matter element model in water quality assessment of beizhijiang drainage basin[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(03): 55-58. (in Chinese))
- [20] 张斌, 雍歧文, 肖芳淳. 模糊物元分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 7-8. (ZHANG Bin, YONG Qiwen, XIAO Fangchun. *Analysis of Fuzzy Matter element*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 7-8. (in Chinese))