

太原市城市生态系统健康评价及其趋势预测

景彩娥¹, 张福平^{1,2}

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为实现对太原市城市生态系统健康水平的评价、预测和科学调控,选取活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能、人群健康状况 5 个方面构建评价指标体系。运用模糊综合法对 2000—2009 年太原市城市生态系统健康水平动态变化进行了分析。构建了生态系统健康的灰色预测模型,实现对太原城市生态系统健康水平的前景预测。结果表明,2000—2009 年太原市生态系统健康状况整体呈上升趋势,2000—2006 年生态系统健康水平呈现由不健康向临界状态逼近的态势,2007 年进入临界状态。研究表明太原市生态系统正在向健康的方向发展。同时,基于灰色预测模型,预测太原市将在 2018 年生态系统达到较健康水平,2049 年生态系统健康达到健康水平。

关键词:城市生态系统; 健康评价; 模糊综合法; 灰色预测; 太原市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0280-07

中图分类号: X217

Health Assessment and Prediction of Taiyuan City Ecosystem

JING Cai-e¹, ZHANG Fu-ping^{1,2}

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: For evaluating, forecasting and regulating the health of Taiyuan City ecosystem, an evaluation system was established, which includes dynamics, organizational structure, resilience, ecosystem services and health status of population. Based on the evaluation system, dynamic change in the health degree of Taiyuan City ecosystem from 2000 to 2009 was analyzed using fuzzy synthetic method and its grey prediction model was established using grey system theory. Results showed that health degree of Taiyuan City ecosystem rose continuously. Its health status changed from unhealthy state in 2000—2006 to critical state in 2007, which indicates that Taiyuan City ecosystem develops to a healthy direction. Furthermore, according to the grey prediction model, the city would achieve relatively healthy status in 2018 and healthy status in 2049.

Keywords: urban ecosystem; health assessment; fuzzy comprehensive evaluation; grey prediction; Taiyuan City

“生态系统健康”源于 1941 年 Leopold^[1] 提出的“土地健康”(land health),是一个生态系统所具有的稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力^[2]。进入 20 世纪 80 年代中期,为遏制生态系统的恶化,生态系统健康研究在北美兴起^[3],近年来,伴随着可持续发展思想的推进,生态系统健康研究已成为国际生态学领域的热点问题^[4]。长期以来一些专家学者对河流^[5]、湿地^[6]、湖泊^[7]、森林^[8]等自然生态系统及人工管理程度较高的农田生态系统的健康进行了研究,而对极易受人类干扰的城市生态系统健康研究则较少,如加拿大发展研究中心(IDRC)项目“人类健康的生态系统

方法”探讨了城市生态系统健康的概念及评价指标体系建立的理论、方法^[9],Jerry 等^[10]对建立生态系统健康评价指标方法进行了研究,而这些研究大多停留在理论探索阶段,对其更深入的系统研究涉及很少。

中国正处于快速城市化阶段,这给城市生态系统健康带来了极大的冲击。因此,评价中国城市生态系统健康并合理调控是目前城市健康与可持续发展的当务之急。关于城市生态系统健康,中国部分学者进行了大量的研究,如郭秀锐等^[11]构建了完整的城市生态系统健康评价指标体系,并用模糊综合评价法比较分析了广州、上海、北京的城市总体健康状况;曾勇等^[12]采用压力—状态—响应机制建立评价指标体

收稿日期:2012-06-25

修回日期:2012-08-25

资助项目:中国博士后科学基金项目“内陆河流域水文循环要素的遥感反演与尺度效应分析”(2011M501496);陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金项目“干旱地区生态水文研究”(GK201101002)

作者简介:景彩娥(1987—),女(汉族),山西省平遥县人,硕士研究生,主要研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail:jingcaie0602@163.com。

通信作者:张福平(1973—),男(汉族),山西省柳林县人,副教授,博士后,硕士生导师,主要研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail:zhangfuping@163.com。

系,并用模糊优选模型对上海市生态系统状况进行了研究;胡廷兰等^[13]构建了整合距离指数和协调指数的城市生态系统健康评价模型,并应用于宁波市的生态系统健康评价;刘娜等^[14]建立基于熵权的模糊物元评价模型,对重庆市进行了生态系统健康时间序列评价。然而,总结前人的研究成果,现有的城市生态系统健康研究主要是单纯地进行健康评价,而对城市生态系统健康进一步的趋势预测的研究则较少。鉴于此,本研究以太原市为例,在对城市生态系统健康状况进行科学评价的基础上,通过深入分析影响太原市城市生态系统健康发展的诸多因素,利用灰色预测模型预测未来的城市生态系统发展趋势,为科学制定太原市城市生态系统健康保护措施和可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

太原市位于山西省中部(37°27′—38°25′N, 111°30′—113°09′E),晋中盆地北端,东、西、北三面环山,中、南部为河谷平原,整个地形北高南低。市区面积 1 460 km²,总人口 196.43 万。太原市矿藏丰富,交通便利,是全省的政治、经济、文化中心,又是全国重要的能源重化工城市。改革开放以来,太原市城市化迅速推进,城市人口从 1978 年的 110.29 万人增加到 2009 年的 285.16 万人,同期城市人口在总人口中的比重由 54.38% 增加到 78.09%,说明太原市已进入加速发展阶段。城市化提高了人们生活水平,促进了社会经济发展,但同时造成了一系列问题,如水资源短缺,环境污染严重,生态环境脆弱等。

2 研究方法

2.1 评价指标的选取

参考郭秀锐等^[11]提出的城市生态系统健康评价指标体系。在选取具体指标时,结合指标选取的完备性、可操作性、可获得性等原则,对于原体系中不易获得的指标选择相近的指标项进行替换处理。最终,本研究从活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能、人群健康状况 5 个方面选取 25 项具体指标进行了分析。

(1) 活力。建成区绿化覆盖率 X_1 (%),人均日生活用水量 X_2 (L/d),人均 GDP X_3 (万元),GDP 增长率 X_4 (%),实际利用外资额 X_5 (亿美元),人均可支配收入 X_6 (万元)。

(2) 组织结构。人口密度 X_7 (万人/km²),人均公共绿地面积 X_8 (m²),第三产业占 GDP 比重 X_9 (%),第三产业从业人员比重 X_{10} (%),市区人口失业率 X_{11} (%),万元 GDP 能耗 X_{12} (以标准煤计,t/万元)。

(3) 恢复力。工业固体废物综合利用率 X_{13} (%),工业废水排放达标率 X_{14} (%),生活垃圾无害化处理率 X_{15} (%),固定资产投资增长率 X_{16} (%)。

(4) 社会服务能力。人均住宅面积 X_{17} (m²),人均道路铺设面积 X_{18} (m²),医院床位数 X_{19} (张),道路交通噪声 X_{20} (分贝),区域环境噪声 X_{21} (分贝),空气质量达到及好于 2 级的天数 X_{22} (d)。

(5) 人群健康。恩格尔系数 X_{23} (%),人口自然增长率 X_{24} (%),每万人拥有高等学校在校学生数 X_{25} (人)。

2.2 数据来源

研究数据来源于 2000—2009 年《中国城市统计年鉴》,《中国统计年鉴》,《太原统计年鉴》和《太原市环境质量公报》。其中建成区绿化覆盖率、工业固体废物综合利用率等数据来源于《中国城市统计年鉴》;道路交通噪声、区域环境噪声、空气质量达到及好于 2 级的天数等数据来源于《中国统计年鉴》;人均生活日用水量、人均 GDP、人均道路铺设面积等数据来源于《太原统计年鉴》;人均公共绿地面积来源于《太原市环境质量公报》。GDP 增长率、恩格尔系数是基于 GDP 总额、城镇居民人均食品消费支出和城镇居民人均消费性支出数据计算获得。

2.3 分级标准的确定

生态系统健康评价的难点在于健康标准的不确定性,目前学术界尚没有统一的标准。本研究采用目前常用的分级标准将城市生态系统健康水平分为 5 个等级:健康(1 级)、较健康(2 级)、临界状态(3 级)、不健康(4 级)和病态(5 级)。具体分级方法是以国内外的生态城市、健康城市和国内的园林城市、环保城市作为健康的标准值,城市同类指标的最低值作为病态值,在前者基础上向下浮动 20% 作为较健康很临界状态的标准值,在后者基础上向上浮动 20% 作为不健康和临界状态的标准值,前后两次确定的临界状态标准值互相调整得到最终值^[15]。各评价指标具体的标准值如表 1 所示。

2.4 城市生态系统健康评价方法

城市生态系统是由自然、经济和社会要素组成的复合系统,这些要素形成具有内在联系的整体,很难定量确定各个要素的影响力,因此,城市生态系统是一个模糊概念。模糊数学是处理现实世界中客观存在的模糊现象的一种数学方法。用模糊数学的概念和原理,建立城市生态系统健康模糊综合评判模型,比传统的评判方法具有较好的评价效果。本研究基于模糊数学理论对城市生态系统健康水平进行评价,具体步骤如下:

表 1 太原市城市生态系统健康评价指标分级标准

1 级 指标	2 级 指标	病态	不健康	临界 状态	较健康	健康
A ₁ 活力	X ₁	20	25	30	40	50
	X ₂	120	160	210	270	320
	X ₃	0.7	3	5	10	20
	X ₄	4	6	8	10	12
	X ₅	10	25	50	75	90
	X ₆	0.4	0.8	1.2	1.6	2
A ₂ 组织力	X ₇	3	2.5	2	1.5	1.1
	X ₈	4	7	10	16	20
	X ₉	40	50	60	70	80
	X ₁₀	20	30	45	60	70
	X ₁₁	4.8	4.2	3.3	2.1	1.2
	X ₁₂	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
A ₃ 恢复力	X ₁₃	30	50	70	90	100
	X ₁₄	70	80	90	95	100
	X ₁₅	70	80	90	95	100
	X ₁₆	10	20	30	40	50
A ₄ 社会 服务能力	X ₁₇	17	20	25	27	30
	X ₁₈	6	10	15	20	25
	X ₁₉	20	40	60	80	100
	X ₂₀	100	80	65	55	50
	X ₂₁	85	70	50	45	40
	X ₂₂	230	250	270	290	310
A ₅ 人群健康	X ₂₃	50	40	35	30	25
	X ₂₄	13	11	9	7	5
	X ₂₅	50	150	300	450	600

(1) 建立隶属度函数。对于正向型指标：

当 $R_{ij} < X_1$ 时，
 $U_{i1} = 1, U_{i2} = U_{i3} = U_{i4} = U_{i5} = 0$ (1)

当 $X_j < R_{ij} < X_{j+1}$ 时，
 $U_{ij} = \frac{X_{j+1} - R_{ij}}{X_{j+1} - X_j}, U_{i(j+1)} = \frac{R_{ij} - X_j}{X_{j+1} - X_j}$ (2)

而对其他健康程度的隶属度为 0。
 当 $R_{ij} > X_5$ 时，
 $U_{i5} = 1, U_{i1} = U_{i2} = U_{i3} = U_{i4} = 0$ (3)

对于负向型指标：
 当 $R_{ij} > X_1$ 时，
 $U_{i1} = 1, U_{i2} = U_{i3} = U_{i4} = U_{i5} = 0$ (4)

当 $X_{j+1} < R_{ij} < X_j$ 时，
 $U_{ij} = \frac{X_{j+1} - R_{ij}}{X_{j+1} - X_j}, U_{i(j+1)} = \frac{R_{ij} - X_j}{X_{j+1} - X_j}$ (5)

而对其他健康程度的隶属度为 0。
 当 $R_{ij} < X_5$ 时，
 $U_{i5} = 1, U_{i1} = U_{i2} = U_{i3} = U_{i4} = 0$ (6)

式中： R_{ij} ——实际值； X_j ——第 j 等级的标准值，其中 $i=1, 2, \dots, 25, j=1, 2, \dots, 5$ ； U_{ij} ——第 i 个指标对 j 等级的隶属度值。

(2) 确定权重。确定权重的方法主要有主观赋

权法和客观赋权法。CRITIC(criteria through inter-criteria correlation)法属客观赋权法，是根据指标内的变异性和指标间的冲突性来计算客观权数的一种数学方法，指标内的变异性即同一指标在各个评价方法之间取值差距的大小，以标准差的形式表现；指标间的冲突性以各指标间的相关系数来表示，两个指标相关性越强，表示两者冲突性越强，其优点是能够客观准确地确定各指标权重，缺点是忽略了指标的实际影响程度。因此，本文用主观赋权法确定各评价要素的权重，CRITIC 法确定各评价要素内具体指标的权重，将主观法赋权与 CRITIC 法赋权结合起来，使结果更具客观性和合理性。

数据处理及权重计算公式如下：

① 对原始数据做无量纲处理：

对于正向型指标： $y_{ij} = \frac{f_{ij} - \min_i f_{ij}}{\max_i f_{ij} - \min_i f_{ij}}$ (7)

对于负向型指标： $y_{ij} = \frac{\max_i f_{ij} - f_{ij}}{\max_i f_{ij} - \min_i f_{ij}}$ (8)

式中： y_{ij} ——第 i 年的第 j 项指标的标准化值；
 f_{ij} ——第 i 年的第 j 项指标。

② 确定权重：

$W_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^n C_j}$ (9)

其中 $C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \sum_{i=1}^n W_j = 1$ 。

式中： W_j ——评价指标 j 的权重； C_j ——第 j 个评价指标所包含的信息量； σ_j ——评价指标 j 的标准差； r_{ij} ——评价指标 i 与 j 之间的相关系数。

利用主观赋权法，参考相关文献[16]，各评价要素的权重子集为： $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$ 。

(3) 矩阵复合运算。根据相对健康隶属度矩阵和各指标权重，建立各年份综合评价矩阵为：

$B = W \cdot U$ (10)

式中： B ——生态系统健康综合评价矩阵； W ——各生态系统健康评价要素对总体健康程度的权重矩阵； U ——各评价要素对各级健康标准的隶属度矩阵。

得到生态系统健康综合评价矩阵后，根据最大隶属度原则，可判断城市生态系统健康的评价等级。实际应用中，为克服最大隶属度原则的局限性，常计算级别变量的特征值 $H = \sum_{k=1}^5 k B_k$ ，由 H 可以判定城市生态系统所属健康等级。若 H 接近 k ，则判定评价结果为 k 。

2.5 城市生态系统健康预测方法

目前常用的预测方法有很多,如德尔菲法、统计趋势预测、回归分析预测、灰色预测、马尔可夫模型预测、时间序列预测、最小方差预测等。各种方法均有其优点和适用范围,在解决问题时需根据实际情况确定采用的预测方法。由于此次研究具有时间序列样本量较少,影响结果因子较多等特点,因此,需要选用一种能综合分析较少数据,且能揭示事物演化规律的方法,而灰色预测模型具有序列性、少数据性、灰因果性等特点,故本研究采用灰色预测模型^[17]对太原市生态系统健康水平进行了预测。

(1) 灰色预测模型的建立。本研究采用 GM(1,1)灰色预测模型,对原始数据序列做一次累加生成,建立灰微分方程:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (11)$$

式中: a ——发展系数; b ——灰作用量。利用最小二乘法可得:

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} (B^T B)^{-1} B^T y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(1)]/2 & 1 \\ -[X^{(1)}(3) + X^{(1)}(2)]/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ [X^{(1)}(n) + X^{(1)}(n-1)]/2 & 1 \end{bmatrix} \quad y_n = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

对灰微分方程求解,建立白化响应式:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (12)$$

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k)$$

式中: $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ ——预测值; k ——时间序列; a ——发展系数; b ——灰作用量。

(2) 灰色预测模型的检验。GM(1,1)只有通过模型检验,才能进行有效预测,一般进行模型精度检验及预测可信度检验。模型精度检验采用残差法,

即通过计算实际值与预测值之间的残差 $\epsilon(k)$ 及平均值 $\epsilon(\text{avg})$,确定 GM(1,1)的建模平均精度:

$$\epsilon(k) = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}k} \times 100\% \quad (13)$$

$$\epsilon(\text{avg}) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n |\epsilon| \quad (14)$$

$$p^0 = [1 - \epsilon(\text{avg})] \times 100\% \quad (15)$$

若 $\epsilon(k) < 10\%$, $p^0 > 90\%$,说明模型精度较好。预测可信度检验采用滚动检验法,即根据原数列建立新陈代谢子列,对其进行滚动建模及滚动预测,计算实际值与滚动预测值之间的滚动残差 $\delta(tp, i+1)$ 、平均滚动残差 $\delta(\text{tp}, \text{avg})$ 及平均滚动精度 $p^0(\text{tp})$:

$$\delta(\text{tp}, i+1) = \frac{x^{(0)}(i+1) - \hat{x}^{(0)}(i+1)}{x^{(0)}(i+1)} \times 100\% \quad (16)$$

$$\delta(\text{tp}, \text{avg}) = \frac{1}{n-4} \sum_{i=4}^{n-1} |\delta(\text{tp}, i+1)| \quad (17)$$

$$p^0(\text{tp}) = [1 - \delta(\text{tp}, \text{avg})] \times 100\% \quad (18)$$

若 $\delta(\text{tp}, i+1) < 10\%$, $p^0(\text{tp}) > 90\%$,说明模型预测结果具有较高可信度。

3 结果与分析

3.1 指标权重分析

根据 CRITIC 法确定各评价要素内具体指标的权重(表 2)可以看出,活力要素中相对重要的因子是人均日生活用水量和 GDP 增长率,组织结构要素中以市区人口失业率和万元 GDP 能耗为重要因子,恢复力要素中固定资产投资增长率的重要程度较大,社会服务能力要素中区域环境噪声和空气质量达到及好于 2 级的天数为重要影响因子,人群健康状况要素中人口自然增长率和每万人拥有高等学校在校学生数 2 指标的权重较大。

表 2 太原市城市生态系统健康评价指标权重

指标层 A ₁	权重	指标层 A ₂	权重	指标层 A ₃	权重	指标层 A ₄	权重	指标层 A ₅	权重
X ₁	0.163	X ₇	0.139	X ₁₃	0.166	X ₁₇	0.170	X ₂₃	0.263
X ₂	0.213	X ₈	0.148	X ₁₄	0.197	X ₁₈	0.165	X ₂₄	0.375
X ₃	0.150	X ₉	0.144	X ₁₅	0.229	X ₁₉	0.154	X ₂₅	0.363
X ₄	0.197	X ₁₀	0.155	X ₁₆	0.408	X ₂₀	0.101		
X ₅	0.134	X ₁₁	0.177			X ₂₁	0.239		
X ₆	0.143	X ₁₂	0.237			X ₂₂	0.171		

注:A₁₋₅指标层的权重皆为 0.200。

3.2 太原市城市生态系统健康评价结果分析

太原市生态系统健康评价结果如图 1 所示。2000—2009 年生态系统健康评价的等级特征值依次为 3.503 6, 3.376 9, 3.203 8, 3.185 4, 3.180 0, 3.082

3, 3.029 8, 2.986 5, 2.939 5, 2.993 7。太原市生态系统健康状况各年的排序结果为 2008, 2007, 2009, 2006, 2005, 2004, 2003, 2002, 2001, 2000。从评价结果看出,太原市生态系统健康除了 2009 年稍有下降

外,整体上相对稳定上升。10 a 期间,生态健康等级从不健康水平逐渐过渡到临界状态,说明经过长时期的综合调控,城市生态系统正在向健康的方向发展,但同时应看到,生态仍处于临界状态等级,说明太原市生态系数仍受到较强程度的胁迫。

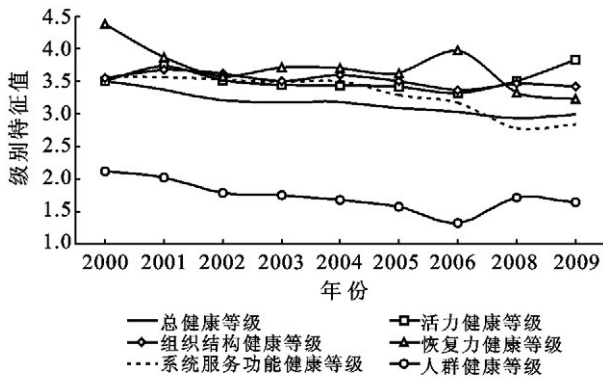


图 1 太原市生态系统健康级别变化趋势

从各要素对生态系统健康功能贡献率来看,活力、系统服务功能健康水平与总生态系统健康水平的变化基本一致,组织结构健康等级状况基本保持不变,等级特征值在 3.5 上下波动,年平均增长率仅为 -0.40%,恢复力、人群健康等级对应曲线存在波动性,但整体呈现下降趋势。说明太原市生态系统的重要影响因素是活力要素与系统服务功能要素,必须注重系统活力与服务功能的建设,组织结构处于不健康等级,系统的社会结构、经济结构及自然结构之间存在不协调,其合理性有待完善,恢复力、人群健康要素发展不稳定,但整体上呈现逐渐改善的态势。

3.3 太原市城市生态系统健康要素分析

图 2 显示太原市历年各要素的健康级别变化情况。从图 2a 可以看出,2000—2009 年太原市生态系统活力要素隶属度变化较复杂,整体上病态的隶属度较大,但也有个别年份呈现波动性,健康与较健康隶属度之和虽然较小,但整体上有增大的趋势。说明影响活力要素的限制因子作用较大,且这些因子的发展极不稳定,主要是人均生活日用水量 and 实际利用外资额的胁迫性,人均 GDP 与 GDP 增长率存在一定的波动性所致,总体上生态系统活力要素在朝着健康的方向发展。图 2b 显示太原市生态系统组织结构要素逐渐趋于健康,2000 年隶属于病态,2001—2005 年过渡到不健康,2006—2009 年为临界状态,但病态与不健康的隶属度之和仍然较大,较健康与健康的隶属度之和较小。说明太原市生态系统组织结构有所改善,但仍受到较强程度的胁迫,分析显示主要胁迫因子有万

元 GDP 能耗与市区人口失业率,表现为燃料结构不合理,消耗量大及市区就业结构不当。

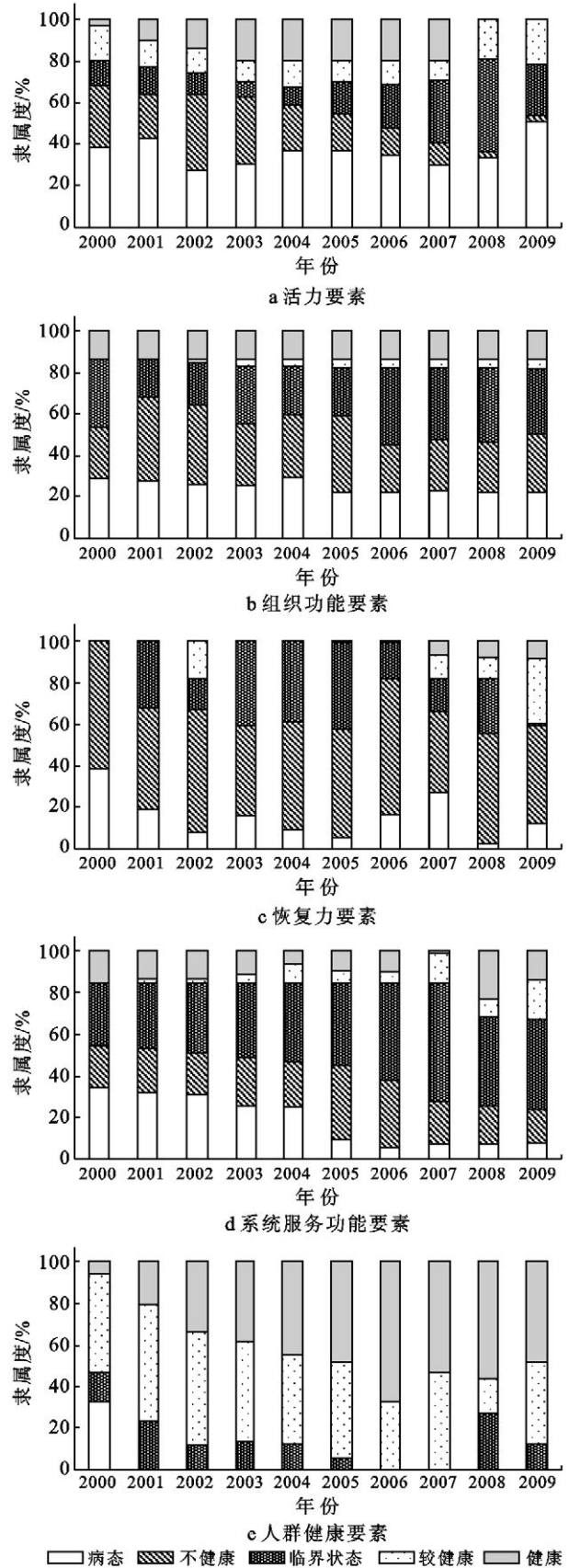


图 2 太原市各要素历年健康级别变化情况

图 2c 显示,2000—2009 年太原市生态系统恢复力水平呈现上升趋势,但一直呈现不健康状态,主要的胁迫因子是固定资产投资增长率与工业固体废物综合利用率,在今后的发展中,太原市应增大固定资产投资,提高固体废物综合利用率,建立循环经济。图 2d 显示,近 10 a 来太原市生态系统服务功能要素变化明显,由前 2 a 的病态突变到临界状态,说明太原市在系统服务功能方面投资额大,系统组织功能发展良好,调整效果显著。图 2e 显示,近 10 a 来太原市人群健康水平发展良好,2000—2003 年隶属于较健康,2004—2009 年隶属于健康,除 2000 表现出一定的病态隶属度外,其余年份病态的隶属度均为 0,说明太原市生态系统人群健康的限制因子很少,且人群健康要素状态良好,可促进太原市的发展。

3.4 太原市城市生态系统健康预测模型

根据 GM(1,1)建模方法,得:

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.015535 \\ 3.385358 \end{bmatrix},$$

代入式(12)可得太原市生态系统健康水平白化响应式为:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(1)}(k+1) &= -214.414e^{-0.015535k} + 217.918 \\ \hat{X}^{(0)}(k+1) &= \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ ——预测值; k ——时间序列。

为了确保预测结果的可靠性,对模型进行精度检验(表 3)及预测可行性检验(表 4)。从表 3 可以看出,残差 $\epsilon(k) < 10\%$,平均精度 $p^{(0)} = 98.46\% > 90\%$,说明太原市生态系统健康水平的 GM(1,1)精度较好,通过残差检验。新陈代谢子列 $x_i^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(i)), i \in I = \{7, 8, 9\}$ 的滚动残差 $\delta(tp, i+1) < 10\%$, $p^0(tp) = 98.31\% > 90\%$,说明太原市生态系统健康水平 GM(1,1)模型具有的可信度,通过预测检验。且从式(19)中看出灰发展系数 $a < 0.3$,模型可作中长期预测。

表 3 2000—2009 年太原市城市生态系统健康等级特征值残差检验

项目	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$
实际值 x	3.376 9	3.202 8	3.185 4	3.180 0	3.082 3	3.029 8	2.986 5	2.939 5	2.993 7
预测值 $\hat{x}^{(0)}$	3.254 2	3.204 1	3.154 7	3.106 1	3.058 2	3.011 0	2.964 6	2.918 9	2.893 9
残差 $\epsilon(k)/\%$	3.632 5	-0.008 5	0.964 4	2.325 4	0.782 8	0.619 5	0.732 8	0.700 3	4.001 1
建模精度 $p^{(0)}/\%$									98.46

表 4 2000—2009 年太原市城市生态系统健康等级特征值滚动残差检验

项目	$i=7$	$i=8$	$i=9$
实际值 $x^{(0)}i$	2.986 5	2.939 5	2.993 7
预测值 x_i	2.969 7	2.922 4	2.876 5
滚动残差 $\delta(tp, i+1)$	0.016 8	0.017 1	0.117 2
平均滚动残差 $\delta(tp, avg)/\%$	1.686 4		
滚动精度 $p^0(tp)/\%$	98.310 0		

3.5 太原市城市生态系统健康预测结果分析

利用本研究推算的 GM(1,1)模型预测得出,2010—2050 年太原市生态系统健康水平的级别特征值如图 3 所示。



图 3 太原市生态系统健康级别变化趋势预测

2010—2050 年城市生态系统健康水平的级别特征值逐渐变小,对应图形呈下降曲线,反映出城市生态系统健康水平逐年提高,生态健康等级由临界状态向健康方向发展,2018 年太原市生态系统将进入较健康状态,2049 年级别特征值是 1.543 8,达到健康水平。

4 结论

本研究采用模糊综合评价方法和趋势灰色预测方法对太原市城市生态系统健康水平进行评价与预测,模糊综合评价结果表明,2000—2009 年太原市城市生态系统健康程度呈逐渐递增状态,说明太原市活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能、人群健康状况 5 个要素的协调性在加强,但健康改善的程度并不明显,部分指标甚至有恶化现象,太原市城市生态系统未得到根本性缓解。灰色预测结果表明,太原市将经过 8 a 的发展,城市生态系统等级从临界状态向较健康过渡,2049 年达到健康水平。

同时,本研究中也有一些不足,本研究采用模糊数学方法动态评价了城市整体健康水平,然而难以识别城市子系统的相对健康水平;采用精度较好的灰色预测模型,预测结果较为可靠,但是基于静态发展的

外推预测,尚未考虑各具体指标的动态变化。因此,今后有必要对构建一种能清晰地辨别城市整体健康水平及各子系统相对健康水平的评价模型做进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘明华,董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价[J]. 地理研究,2006,25(5):930-938.
- [2] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. Trends Ecol. Evol., 1998,13(1):397-402.
- [3] 李春晖,郑小康,崔崑,等. 衡水湖流域生态系统健康评价[J]. 地理研究,2008,27(3):565-571.
- [4] 胡碧玉,胡昌升,郭郡郡. 基于熵权的川北城市生态系统健康综合评价[J]. 水土保持研究,2010,17(6):158-168.
- [5] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1191-1194.
- [6] 王志良,王国祥. 洪泽湖湿地生态系统健康评价指标体系探讨[J]. 中国生态农业学报,2007,15(6):152-156.
- [7] 刘永,郭怀成,戴永立,等. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报,2004,24(4):723-729.
- [8] 武巧英,陈丽华,李晓凤,等. 基于 BP 神经网络的森林生态系统健康预测[J]. 水土保持通报,2011,31(2):150-154.
- [9] Hancock T. Urban ecosystem and urban development in Latin America, Montevideo, Uruguay[EB/OL]. [2000-04-10]. Http //: www. idrc. ca/lacro/docs/conferecias/hancock. html.
- [10] Jerry M S, Mariano B, Annalee Y, et al. Developing ecosystem health indicators in Centro Habana: A community based approach[J]. Ecosystem Health, 2001, 7(1):15-26.
- [11] 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.
- [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.
- [13] 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.
- [14] 刘娜,艾南山,方艳,等. 基于熵权的模糊物元模型在城市生态系统健康评价中的应用[J]. 成都理工大学学报,2007,34(5):589-595.
- [15] 颜文涛,袁兴中,邢忠. 基于属性理论的城市生态系统健康评价:以重庆市北部新区为例[J]. 生态学杂志,2007,26(10):1679-1684.
- [16] 陈克龙,苏茂新,李双成,等. 西宁市城市生态系统健康评价[J]. 地理研究,2010,29(2):214-222.
- [17] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

(上接第 216 页)

- [8] 杨振山,蔡建明,文辉. 郑州市 2001—2007 年城市扩张过程中城市用地景观特征分析[J]. 地理科学,2010,30(4):600-605.
- [9] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,1999-2009.
- [10] 费鲜芸,张志国,高祥伟. 城市植被制图中 SPOT5 影像融合方法研究[J]. 测绘科学,2007,32(4):98-100.
- [11] 马晶,余洁,张继贤,等. 影像融合技术在土地利用动态遥感监测中的应用研究[J]. 测绘科学,2007,32(2):128-130.
- [12] Marcelino E V, Formaggio A R, Maeda E E. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009,11(3):181-191.
- [13] 吴传钧,郭焕成. 中国土地利用[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [14] 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):81-87.
- [15] 沈泽昊,张全发,岳超,等. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局[J]. 地理学报,2006,61(6):633-644.
- [16] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报,2003,58(5):643-650.
- [17] 刘纪远,布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程空间特征研究:基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究,2000,20(3):229-238.
- [18] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报,1997,12(2):106-111.
- [19] 王思远,刘纪远,张增祥,等. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报,2001,56(6):631-639.
- [20] 闫小培,毛蒋兴,普军. 巨型城市区域土地利用变化的人文因素分析:以珠江三角洲地区为例[J]. 地理学报,2006,61(6):613-623.