

快速城市化进程中石家庄城市生态系统健康评价

李双江¹, 罗晓¹, 胡亚妮²

(1. 河北科技大学 环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北科技大学 图书馆, 石家庄 050018)

摘要:城市生态系统健康评价是制定城市规划、建设、管理政策的依据。结合石家庄实际情况,选取活力、组织力、恢复力、生态系统服务功能和人群健康状况构建城市生态系统健康评价指标体系。基于均方差法确定指标权重,运用模糊数学评价方法对 2005—2009 年石家庄城市生态系统健康进行了评价分析。结果表明:石家庄城市生态系统健康状况由 2005—2007 年的亚健康水平提升到 2008—2009 年的较健康水平。其中有利因素为组织结构、恢复力、生态系统服务功能,不利因素为活力与人群健康。主要胁迫因子为人均生活用水量、实际利用外资、万元 GDP 能耗、R&D 经费比重、环保投资占 GDP 比重、居民人均收入、高层次人才比重。最后,提出了提升城市生态系统健康水平的建议。

关键词:模糊评价;城市生态系统;健康评价;石家庄市

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0245-05

Ecological Health Assessment of Shijiazhang Urban Ecosystem in Fast Urbanizing City

LI Shuang-jiang¹, LUO Xiao¹, HU Ya-ni²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Library of Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Urban ecosystem health assessment is the basis of making city planning, construction and management policy. According to the actual status of Shijiazhuang City, five indices were selected to build up an evaluation system, including dynamics, organizational structure, resilience, ecosystem service function and population health. Fuzzy mathematical models were employed to analyze and evaluate the healthy state of Shijiazhuang urban ecosystem from 2005 to 2009 based on the method of mean-squared deviation to determine index weight. Results showed that the healthy state of Shijiazhuang ecosystem was changed from sub-healthy level on 2005—2007 to healthy level on 2008—2009. The favorable factors affecting urban ecosystem healthy state of Shijiazhuang included organizational structure, resilience and ecosystem service function, while unfavorable factors included dynamics and population health. Main stress factors to healthy development were per capita water consumption, foreign capital actually utilized, 10 thousands Yuan GDP energy consumptions, proportion of R&D funding, proportion of environmental protection investment in GDP, per capita income and proportion of high-education people. Finally, some suggestions were proposed to improve urban ecosystem healthy level.

Key words: fuzzy evaluation model; urban ecosystem; assessment of health; Shijiazhuang City

随着全球经济和科学技术的发展,人类正在以前所未有的规模和强度影响着生态环境,环境污染、物种灭绝、水土流失、温室效应等生态问题日益威胁着区域健康发展,由此,生态系统健康研究于 20 世纪 80 年代中期在北美开始兴起^[1]。生态系统健康指一个生态系统是稳定的和可持续的,即该系统在时间上

能够维持其组织结构、能够进行自我调节和具有对胁迫的恢复能力^[2]。相比于其它生态系统,城市生态系统更为脆弱。尤其是近年来,我国城镇化率由 2005 年的 43.0% 增长到 2009 年的 46.6%,由此引起一系列的生态环境问题,城市生态系统健康日益受到重视。石家庄市生态系统健康研究,旨在为科学评价快

收稿日期:2012-01-19

修回日期:2012-03-13

资助项目:河北省自然科学基金资助(D2010000867);河北科技大学博士科研启动基金(QD200929)

作者简介:李双江(1978—),男,河北献县人,博士,讲师,研究方向为城市生态系统恢复、碳通量。E-mail:ajiaer@163.com

速城市化下城市生态系统健康提供一种有效的方法和理论支持,为政府制定城市规划、建设、管理政策提供依据,促进城市生态系统健康发展。

1 研究区概况

石家庄位于河北省中南部,省会城市,也是全省政治、经济、科技、金融、文化和信息中心。石家庄市包括五区和一个飞地矿区,面积 455.8 km²,人口 286.2 万人(2010 年人口普查),属暖温带半湿润半干旱季风型大陆性气候,四季分明,年均降水量 534.4 mm,集中于夏秋两季。石家庄水资源缺乏,年人均水资源量仅为 311 m³。作为京津冀都市圈南部的重要城市,石家庄正处于经济高速增长和城市化快速提升阶段,2005—2009 年间年均城市化增长率为 1.82%。未来的城市人口和面积将不断增加,由此对城市生态系统健康的压力增强。

2 评价思路与方法

2.1 方法和步骤

城市生态系统健康评价方法一般为综合评价法^[3]和指标体系法,后者常通过层次分析法、主成分分析法、模糊综合评价法等确定指标权重^[4-5]。由于城市生态系统健康具有内涵明确、外延模糊的特点,应用模糊数学的概念和方法建立评价模型比传统评价方法更符合实际情况^[6],因此采用模糊综合评价的原理和方法对石家庄市 2005—2009 年生态系统健康进行研究。具体步骤:(1)构建健康评价指标体系;(2)设计隶属函数;(3)用客观的均方差法确定各健康指标对所属函数的权重;(4)模糊矩阵复合运算得出健康评价结果,分析城市生态健康的态势。

2.2 评价指标体系构建

选择学术界普遍认可^[5,7-10]的活力、组织力、恢复力、生态系统服务功能和人群健康状况作为评价的 5 个主要要素,对每个要素提出相应的具体评价指标,构建城市生态系统评价指标体系。将反映城市生态系统健康状况各指标分为病态、不健康、亚健康、较健康、很健康 5 个等级。参考国内外生态城市、健康城市、园林城市、环保城市的建议值^[11-13]作为很健康的标准值,将《中国城市年鉴》中城市同类指标的全国最低值作为病态的限定值,在前者的基础上向下浮动 20%作为健康和亚健康的标准值,在后者的基础上向上浮动 20%作为不健康和亚健康的标准值,前后两次确定的亚健康标准值相互调整,并参考相关文献^[7-10,14]得到最终值,结果见表 1。

2.3 隶属函数的设计

设 r_{kj} 为第 k 个指标对第 j 级标准的相对隶属度; s_{ij} 为第 i 项指标的第 j 级健康标准,其中 $j=1,2,\dots,5$; x_i 为第 i 项指标的实际值;

(1) 对于正向指标(效益性指标,即指标值越大,健康程度越高), r_{kj} 计算公式如下:

当 $x_i < s_{i,1}$ 时, $r_{i1} = 1, r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = r_{i5} = 0$;

当 $s_{i,j} \leq x_i \leq s_{i,j+1}$ 时, $r_{i,j+1} = \frac{x_i - s_{i,j}}{s_{i,j+1} - s_{i,j}}$,

$r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1}, (j=1,2,3,4)$;

当 $x_i > s_{i,5}$ 时, $r_{i5} = 1, r_{i1} = r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = 0$ 。

(2) 对于负向指标(成本性指标,即指标值越小,健康程度越高),其计算公式如下:

当 $x_i > s_{i,1}$ 时, $r_{i1} = 1, r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = r_{i5} = 0$;

当 $s_{i,j} \geq x_i \geq s_{i,j+1}$ 时, $r_{i,j+1} = \frac{x_i - s_{i,j}}{s_{i,j+1} - s_{i,j}}$,

$r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1}, (j=1,2,3,4)$;

当 $x_i < s_{i,5}$ 时, $r_{i5} = 1, r_{i1} = r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = 0$ 。

将各指标统计值代入隶属函数,得到相应的隶属矩阵。

2.4 评价指标权重确定

通过查阅《石家庄市统计年鉴》(2006—2010)、《石家庄市环境质量公告》(2005—2009)、《河北省科学技术厅关于近几年各设区市 R&D 经费投入情况的通报》等,获得 2005—2009 年城市生态系统健康评价的指标数据。各评价要素的权重参考相关文献^[7-11],采用主观赋权的方法获得。一级评价指标权重子集为:

$$W = [W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4 \ W_5] = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]$$

运用均方差法计算各评价指标对于所属评价要素的权重。步骤为:

(1) 运用极差标准化法对原始数据无量纲化处理,公式为:

$$\text{对正向指标: } X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad X_{ij} \in [0, 1];$$

$$\text{对负向指标: } X_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad X_{ij} \in [0, 1]$$

式中: x_{ij} , $x_{j\max}$, $x_{j\min}$, X_{ij} ——第 i 年第 j 个指标的原始值、最大值、最小值和标准化后的数值。

(2) 计算第 j 指标的均方差 σ_j , 公式为: $\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1}}$; 其中 \bar{X}_j 为随机变量的均值, 计算公

$$\text{式为: } \bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$$

式中: n ——评价年份数,本文中 $n=1,2,\dots,5$ 。

(3) 计算各指标权重系数 w_j , 公式为: $w_j = \sigma_j / \sum_{j=1}^m \sigma_j$
式中: m ——各评价要素的指标个数。

表 1 城市生态系统健康评价指标体系、分级标准和权重

要素	具体指标	单位	病态	不健康	亚健康	较健康	很健康	指标权重
活力(V)	市区人均 GDP	万元	0.7	3	5	10	20	0.1612
	城市居民人均可支配收入	万元	0.4	0.8	1.2	1.6	2	0.1628
	实际利用外资	亿美元	10	25	50	70	90	0.1427
	人口自然增长率	‰	13	11	9	7	5	0.1965
	人均生活用水量	L/d	120	160	210	270	320	0.1763
	万元 GDP 能耗	吨标准煤	2	1.5	1	0.7	0.5	0.1605
组织结构(O)	第三产业占 GDP 比重	%	30	40	50	60	80	0.1530
	R&D 经费占 GDP 比重	%	1	2	3	4	5	0.1637
	市区人口密度	万人/km ²	3	2.5	2	1.5	1	0.1506
	每公顷耕地农药施用量	kg/hm ²	50	40	30	20	10	0.1952
	农民人均纯收入	元/a	2500	3500	4500	5500	6000	0.1719
	建成区绿化覆盖率	%	20	25	30	40	50	0.1657
恢复力(R)	城市生活污水处理率	%	30	50	70	95	100	0.1541
	生活垃圾无害化处理率	%	40	50	70	90	100	0.1780
	工业固体废物综合利用率	%	30	50	70	90	100	0.1766
	工业用水重复利用率	%	10	30	50	70	90	0.1712
	工业废水排放达标率	%	70	75	85	95	100	0.1447
	环保投资占 GDP 的比重	%	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	0.1753
生态系统服务功能(S)	人均公共绿地	m ² /人	4	7	10	16	20	0.0978
	人均住房面积	m ² /人	7	10	15	17	20	0.1197
	人均道路面积	m ² /人	6	10	15	20	28	0.0994
	万人拥有公共汽车	辆	5	10	20	30	40	0.1037
	空气质量 II 级以上天数比例	%	20	40	60	80	100	0.1118
	城区空气综合污染指数	—	5	4	2.5	2	1.5	0.1037
人群健康(P)	城市区域环境噪声	dB(A)	85	70	50	45	40	0.1324
	城市交通噪声年均值	dB(A)	100	80	65	55	50	0.1099
	万人拥有病床数	床	10	30	50	70	90	0.1217
	恩格尔系数	%	50	45	35	30	25	0.3047
	万人在校大学生人数	人	50	150	300	450	600	0.3447
	百万人拥有图书馆个数	个	1.5	1.8	2	2.5	3	0.3506

2.5 模糊矩阵的复合运算

城市生态系统健康评价模型为:

$$H=W \cdot R$$

式中:H——城市生态系统健康评价结果;W——5 个健康评价要素对总体健康程度的权矩阵;R——各生态系统健康评价要素对各级健康标准的隶属度矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{15} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{51} & R_{52} & \dots & R_{55} \end{bmatrix}$$

式中:R_{ij}——第 i 个要素对第 j 级标准的隶属度。

$$R_{ij} = [W_{i1} \quad W_{i2} \quad \dots \quad W_{ik}] \times \begin{bmatrix} r_{1j} \\ r_{2j} \\ \vdots \\ r_{kj} \end{bmatrix}$$

式中:k——各评价要素所包含的指标个数;W_{ik}——第 i 要素中第 k 个指标对本要素的权重;r_{kj}——第 k 个指标对第 j 标准的隶属度。

3 结果与分析

3.1 综合评价结果

石家庄市 2005 年各评价要素的隶属度分析结果如下:

$$R_{2005} = \begin{bmatrix} 0.2486 & 0.4493 & 0.1057 & 0 & 0.1965 \\ 0.1375 & 0.0918 & 0.2888 & 0.4518 & 0.0301 \\ 0.1233 & 0.0308 & 0.0614 & 0.2842 & 0.5003 \\ 0.0763 & 0.2885 & 0.3703 & 0.1453 & 0.1197 \\ 0 & 0.0817 & 0.7079 & 0.2103 & 0 \end{bmatrix}$$

R₂₀₀₅—R₂₀₀₉ 略。计算得 2005—2009 年石家庄市生态系统总体健康状况(表 2)。

表 2 2005—2009 年石家庄市城市生态系统健康综合评价结果

年份	病态	不健康	亚健康	较健康	很健康
2005	0.1171	0.1884	0.3068	0.2183	0.1693
2006	0.0771	0.1504	0.3921	0.1870	0.1934
2007	0.0948	0.1187	0.3179	0.2997	0.1688
2008	0.0955	0.0734	0.2585	0.3846	0.1880
2009	0.0850	0.0691	0.2783	0.2989	0.2687

按照最大隶属度原则,石家庄市城市生态系统 2005—2007 年总体健康水平为亚健康状态(隶属度分别为 0.31,0.39,0.32),2008 年、2009 年为较健康水平(隶属度分别为 0.38,0.30)。

3.2 城市生态系统健康趋势分析

根据评价结果可以看出,2005—2009 年石家庄市城市生态系统健康状态处于总体递增状态,综合状况处于亚健康、较健康水平。对于病态、不健康水平的隶属度总体呈较明显的下降趋势,尽管病态水平 2007 年略有上升(图 1)。同时,很健康水平的隶属度总体是上升的。特别是 2009 年,对于病态、不健康、亚健康、健康和很健康 5 种状态的隶属度分别为 0.085 0,0.069 1,0.278 3,0.298 9,0.268 7,很健康状况较以往明显得到加强。这些表明城市生态、经济与社会发展的协调性在不断加强,城市发展过程中生态系统健康的限制因子在减少,整体状况逐渐改善,发展潜力逐渐增强。

3.3 影响要素分析

(1) 活力要素。2005—2009 年石家庄城市生态系

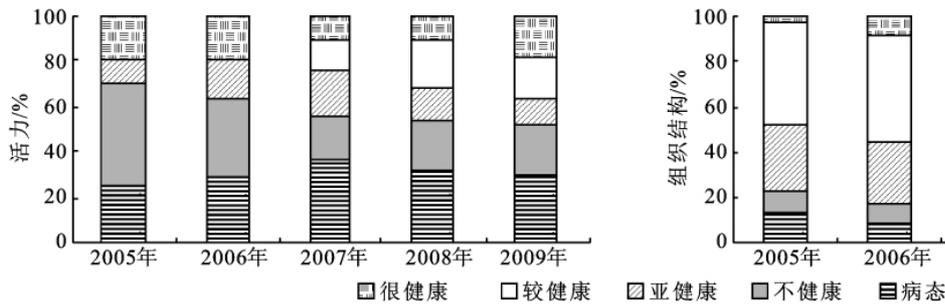


图 2 2005—2009 年石家庄市活力、组织结构要素评价结果

(2) 组织结构要素。2005—2009 年石家庄城市生态系统健康的组织结构要素皆隶属于较健康水平(图 2),较健康和很健康之和逐年递增,由 2005 年的 48.2% 上升至 2009 年的 76.4%。各具体评价指标中,R&D 经费占 GDP 比重虽略有上升,但一直处于病态以下水平,是结构要素中的胁迫因子。每公顷耕地农药施用量虽处于亚健康以上水平,但有变差的趋势,由 2005 年的 22.25 kg/hm² 上升至 2009 年的 23.71 g/hm²。其他指标都在较高水平上逐年优化。在今后发展中,应努力提高 R&D 经费的比重和降低农药单位面积的施用量。

(3) 恢复力要素。2005—2009 年石家庄城市生态系统健康的恢复力要素都隶属于很健康水平(图 3),但波动较大。很健康和较健康等级标准的隶属度之和在 80% 左右波动,但病态和不健康标准的隶属度之和由 2005 年的 15.4% 下降至后两年的 0%,可见恢复力要素的健康状况正在向着健康的方向发展。这是由于

统健康的活力要素呈波动状态(图 2),虽然一直以不健康和病态水平为主,但二者之和由 2005 年的 69.8% 下降到 2009 年的 52.0%。各具体评价指标中,人均 GDP、居民人均可支配收入和万元 GDP 能耗明显优化;实际利用外资虽有所增加,但一直处于病态水平;另一方面由于人口自然增长率、人均生活用水量指标逐年变差,导致活力总体评价处于较低水平。今后发展中,石家庄应努力增加用水来源途径、提高实际利用外资的量,同时降低万元 GDP 能耗、发展经济、提高居民人均收入。

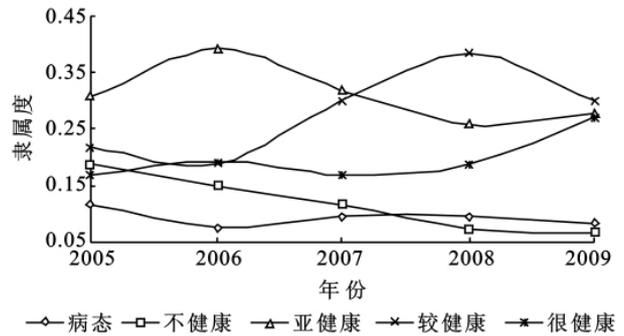


图 1 2005—2009 年石家庄市城市生态系统健康评价结果

石家庄市注重节能减排和发展循环经济,努力提高工业废水排放达标率、工业用水重复利用率使环境得到了很大改善。但城市生活污水处理率、工业固体废物综合利用率和环保投资占 GDP 比重波动较大,尤其是环保投资比重水平较低(2.24%~2.78%),使得生态系统健康的恢复力出现了波动。在今后发展中,应努力提高环保投资占 GDP 比重、稳定增加城市生活污水处理率、工业固体废物综合利用率。

(4) 生态系统服务功能要素。2005—2009 年石家庄城市生态系统健康的恢复力要素都隶属亚健康水平(图 3),同时对于较健康和很健康隶属度之和由 2005 年的 26.5% 逐年上升至 2009 年的 43.4%,说明生态系统服务功能要素总体呈逐年改善的趋势。其原因主要是 2008 年实施“三年大变样”工程以来,万人拥有病床数、人均道路面积显著提高,城市环境质量(人均公共绿地、空气质量Ⅱ级以上天数、城区空气综合污染指数)明显改善。

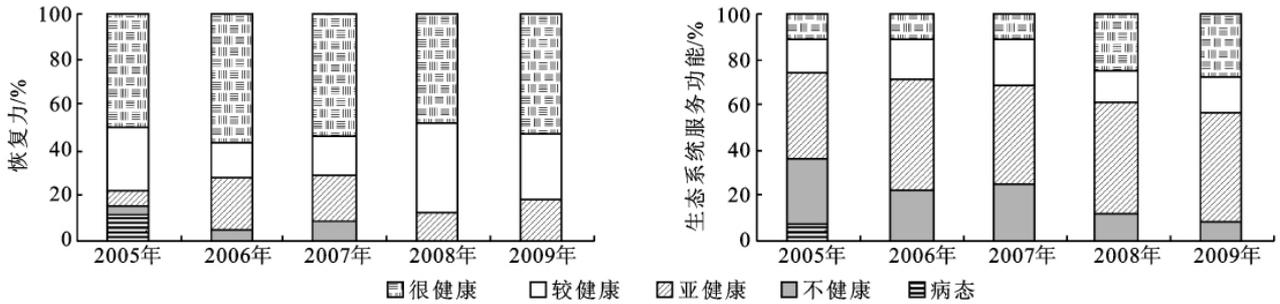


图 3 2005—2009 年石家庄市恢复力、生态系统服务功能要素评价结果

(5) 人群健康要素。2005—2009 年石家庄城市生态系统健康的人群健康要素呈波动状态(图 4),除 2008 年为较健康外其余各年均均为亚健康水平。但总体上看有微弱的上升趋势,表现为亚健康和较健康隶属度之和由 2005 年 91.8% 逐年上升至 2009 年的 99.7%。究其原因,主要是因为石家庄市整体经济实力仍偏弱,由于毗邻京津致使其难以吸引高层次人才,人口文化素质整体较低。

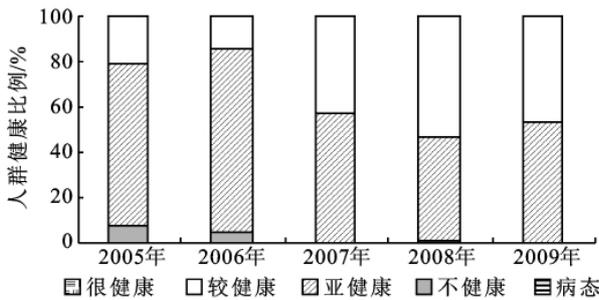


图 4 2005—2009 年石家庄市人群健康要素评价结果

4 结论与讨论

本研究根据石家庄实际情况以及对城市生态系统健康认识的基础上,选取活力、组织力、恢复力、生态服务功能和人群健康状况 5 个要素的 30 个指标,构建了城市生态系统健康评价指标体系,然后基于均方差法确定指标权重,并应用模糊数学评价方法对 2005—2009 年石家庄城市生态系统健康进行了评价,其结果能够基本反映生态系统健康状况的发展趋势。

(1) 2005—2009 年石家庄城市生态系统健康状况发生了明显的变化,由 2005—2007 年的亚健康状态提升到 2008—2009 年的较健康水平。

(2) 影响石家庄城市生态系统健康状况的有利因素为组织结构、恢复力、系统服务功能;不利因素为活力与人群健康。未来提升城市生态系统健康水平的途径是继续重视城市生态工程建设,进一步加强城市生态系统健康管理能力的建设,重点是改善人均生活用水状况、提高实际利用外资的量、降低万元 GDP 能耗、提高 R&D 经费的比重、增加环保投资占 GDP 比重、提高居民人均收入、加大力度吸引高层次人才。

(3) 模糊综合评价避免了主观判断系统健康标准的不确定性,应用其评价城市生态健康状况可行。但城市生态系统健康评价的理论体系还不够完善,如何更好的构建评价指标体系以确定生态系统健康的范围、合理确定指标权重,特别是准确预测未来城市生态的发展有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem [J]. Aquatic Ecology,1999,33(1):105-115.
- [3] 桑燕鸿,陈新庚,吴仁海.城市生态系统健康综合评价[J].应用生态学报,2006,17(7):1280-1285.
- [4] 杨斌,隋鹏,陈源泉,等.生态系统健康评价研究进展[J].中国农学通报,2010,26(21):291-296.
- [5] 孙燕,周杨明,张秋文,等.生态系统健康:理论/概念与评价方法[J].地球科学进展,2011,26(8):887-896.
- [6] 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.
- [7] 孟伟庆,李洪远.基于模糊综合评价模型的天津滨海新区城市生态系统健康评估[J].生态经济,2011(9):174-177.
- [8] 陈克龙,苏茂新,李双成,等.西宁市生态系统健康评价[J].地理研究,2010,29(2):214-222.
- [9] 谷雨,刘昕,邓红兵.基于层次分析法的重庆市城乡结合部生态系统健康评价[J].中国环境科学,2010,30(11):1573-1578.
- [10] 陈淑莽,王满.台儿庄区城市生态系统健康评价初探[J].安徽农业科学,2011,39(6):3512-3514.
- [11] 郭秀锐,杨居荣,毛显强,等.生态城市建设及其指标体系[J].城市发展研究,2001,8(6):54-58.
- [12] 谢花林,李波.城市生态安全评价指标体系与评价方法研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(5):705-710.
- [13] 李建龙.现代城市生态与环境学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 崔艳君,杨华,邓伟.重庆城市生态系统健康动态评价研究[J].广东农业科学,2010(7):182-188.