

乌鲁木齐市生态系统健康模糊综合评价*

钱翌¹, 王灵², 陈敬锋³

(1. 青岛科技大学 环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 乌鲁木齐市环境监测中心站, 乌鲁木齐 830000;
3. 新疆农业大学 数理学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:城市生态系统健康是城市生态系统的综合特征,是城市可持续发展的重要保障。根据城市生态系统的特点和城市生态系统健康的内涵,从自然环境、人工环境、社会状况、经济水平、人群健康、生物群落健康和区域发展可持续性 7 个方面选取 45 个指标构建了城市生态系统健康指标体系框架;采用熵值法确定其权重,以模糊数学理论建立隶属度矩阵,并建立评价模型,对乌鲁木齐市生态系统健康进行模糊综合评价。结果表明:(1)1995 - 2004 年,乌鲁木齐市生态系统健康综合指数为{0.421, 0.475, 0.359, 0.312, 0.375, 0.406, 0.415, 0.377, 0.447, 0.457};(2)1998 年以来健康状态有一定程度的改善,但和 2010 年城市规划目标(0.681)相比,还有很大的差距;(3)区域发展可持续性健康指数有所下降,自然环境健康状况并未得到明显改善,生态环境建设形势严峻;(4)城市生态系统各要素发展不平衡,健康质量较低;(5)实证分析的结果表明评价模型具有很强的科学性和实用性。

关键词:城市生态系统健康;模糊综合评价;健康质量;乌鲁木齐

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)06-0128-05

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Urban Ecosystem Health in Urumqi

QIAN Yi¹, WANG Ling², CHEN Jing-feng³

(1. School of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042, China; 2. Environmental Monitoring Central Station of Urumqi, Urumqi 830000, China; 3. College of Mathematics & Physics, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Urban ecosystem health is a comprehensive characteristic of urban ecosystem and is very important for urban sustainable development. According to the meaning of urban ecosystem health and the characteristics of urban ecosystem, an assessment index system of 45 factors from 7 aspects (including natural environment, built-up environment, social, economic, human health, biotic community health, sustainability of regional development), has been established for evaluation on urban ecosystem health. Applying the method of Entropy value to confirm the index weight, subjective degree matrix was established by fuzzy mathematical theory, and finally based on all these study, evaluation model was established. The results indicated: (1) From 1995 to 2004, Urumqi urban ecosystem health index are as follow: {0.421, 0.475, 0.359, 0.312, 0.375, 0.406, 0.415, 0.377, 0.447, 0.457}. (2) Since 1998, health status has been improved, but a gap still existed between the current status and the expectation (0.681) in 2010. (3) Sustainability index of regional development has declined; the natural environment has not been well improved. The ecological and environmental protection is still caused the great concern. (4) Basic factors of urban ecosystem are imbalance between each other and health quality level is still low. (5) Empirical analysis of the urban ecosystem healthy assessment showed that the evaluation model is scientific and practical.

Key words: urban ecosystem health; fuzzy comprehensive evaluation; health quality; Urumqi

生态系统健康源于 20 世纪 40 年代 Leopold 提出“土地健康”的概念,到 80 年代后期,经过学者们的努力和探索,生态系统健康学正在成为自然科学、社会科学以及人类健康学相互交叉和整合的一门学科。自从 Schaeffer 等提出生态系统健康的度量问题^[16]以来,引发了众多学者的广泛关注,他们对不同的生态系统(水生生态系统、荒漠生态系统、草原生态系统、森林生态系统、矿区生态系统、农业生态系统、城市生态系统等)健康问题进行探索和研究^[1-5,7,9-11,14,17-20,22,26]。城市生态系统健康是城市生态系统的综合特征,是城市可持续发展

的重要保障。目前,对城市生态系统健康评价的研究较多,但多侧重于对一般城市生态系统健康的内涵和指标体系的探索^[1,3,9-11,22,26],对于干旱区绿洲城市的研究报道较少。

乌鲁木齐市是新疆维吾尔自治区的首府,位于欧亚大陆腹地,地处天山北麓,准噶尔盆地南缘,是典型的干旱区绿洲城市。城市原本自然环境比较脆弱,20 世纪 80 年代以来,随着工业化和城市化进程的加快,城市生态系统的压力不断增大,加之城市建设之初缺乏系统的综合规划,尤其是缺乏生态环境规划,致使城市生态系统的健康水平日趋恶化,主要表现在

* 收稿日期:2008-04-03

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科学研究计划重点项目(XJEDU2005108)资助

作者简介:钱翌(1962-)男,浙江建德人,教授,硕士,主要从事区域可持续发展研究。E-mail:qianyi@qust.edu.cn

在天然森林、草地资源严重退化,加之城市绿地覆盖率低,致使系统的自我调节能力急剧降低。即使已完成的绿地建设,由于过分依靠外来物种和绿地系统的生物多样性较低,致使绿化物种的生态适应性差,病虫害易于暴发,已经影响到城市的景观和生物安全。乌鲁木齐市由于特殊的盆地地形,工业布局不合理、重污染企业多位于上风,加之冬季多逆温天气,无风静风频率高、采暖期长,最主要的能源消费结构以煤炭为主和大量原煤非清洁燃烧,致使城市空气质量长期达不到国家二级标准,造成严重的空气污染。乌鲁木齐市的水环境质量也存在很多问题,流经城市的两条河流——和平渠和水磨河,由于高污染企业密布和人口密度较大,工业废水、生活污水和生活垃圾的排放不达标,河水受有机物及氮的污染严重,目前水磨河已达不到灌溉水质的要求。由于长期的环境污染,致使城市居民的健康水平受到严重影响,城市居民与环境污染有关的疾病如呼吸系统疾病和乙肝发病率等均高于全国平均水平^[12,15]。因此,对乌鲁木齐市城市生态系统健康进行评价,寻找其存在问题,确定调控方向,为干旱区城市的可持续发展提供决策服务,具有重要的理论和现实意义。本研究拟在对城市生态系统特征分析的基础上,构建城市生态系统健康评价指标体系,并以乌鲁木齐市为例进行实证分析。

1 城市生态系统健康及评价

城市是一个以人为核心的社会-经济-自然复合生态系统,它不同于自然系统,是城市空间范围内的居民与自然环境和人工建造的社会环境系统相互作用而成的复合体^[21]。一个健康的城市生态系统应该是没有发生“生态系统胁迫综合症”的生态系统。一般认为自然生态系统的胁迫综合症包括初级生产力、物种多样性、R选择种所占比重、病虫害暴发程度、病虫害等级及其流行的可能性、种群波动状况等^[25]。城市生态系统是人类占主导的生态系统,其胁迫综合症主要表现在人类生存状况以及城市发展的持续性上。Colin认为城市生态系统健康不仅意味着提供人类服务的自然环境和人工环境组成的生态系统的健康和完整,也包括城市居住者(包括人群和其它生物)的健康和社会健康^[3]。生态系统健康评价是将功能完好与病态的生态系统区分开并对系统进行分析,从而诊断产生病态的原因,制定预防及恢复生态系统的方法。因此,从自然环境、人工环境、人类健康、生物群落健康、社会健康、经济健康、区域发展可持续性7个方面构建城市生态系统健康评价指标体系,便于全面衡量城市生态系统的健康状况。由于城市生态系统是一个高度开放的、集中化的人工复杂生态系统,支持系统复杂多变,区域生态环境对其影响较大,有必要对不同生态环境条件下的城市生态系统健康进行定量研究,找出城市发展的制约因素,为未来的决策提供科学依据。

2 城市生态系统健康评价指标体系的建立

2.1 评价指标体系的建立原则

城市生态系统健康的指标涉及多领域、多学科,因而种类繁多。建立指标体系应遵循以下原则:(1)完整性原则,应完整、正确地反映城市生态系统的健康状况;(2)独立性原则,评价指标必须概念明确并具有一定的独立内涵;(3)重要性原则,指标体系应包括影响生态系统健康的主要指标;(4)可评价性原则,评价指标必须可比可量可行,数据来源科学;(5)综合性原则,能体现城市生态系统在整体功能上的高效

性和结构关系上的和谐;(6)适用性原则,能体现生态系统区域特色和指标选取的敏感性;(7)动态性原则,考虑城市生态系统的动态发展规律,注重各指标因子之间的动态变化;(8)前瞻性原则,体现对生态系统健康要求的前瞻性与超前性。

2.2 评价指标体系框架的构造

根据城市生态系统的特点和城市生态系统健康及其评价的内涵,以Colin的城市生态系统健康理论^[3]为基础,结合目前有关生态系统健康评价的各种方法,用层次分析的方法建立城市生态系统健康评价指标体系。第1层次是目标层,即评价目标,即城市生态系统健康综合指数;第2层次是要素层:包括自然环境、人工环境、社会状况、经济状况、人类健康、生物种群健康和区域发展可持续性;第3层次是因素层,即每一个评价准则具体有哪些因素决定;第4层次是指标层,即每一个评价因素有哪些具体指标来表达。具体结果见表1。以上生态系统健康指标体系涵盖了各个方面,但不能确保这些指标之间的独立性,需要对这些指标之间的相关关系进行研究,找出主要矛盾,剔除指标的重复部分,把握影响城市生态系统健康的主要因素。主成分分析法在这方面显示了其独特的作用。采用SPSS11.5的“Factor Analysis”对城市生态系统健康中各要素层的变量进行分析,选择主成分使累计贡献率达到90%以上,然后在旋转后的主成分因子负荷矩阵中选取所有负荷系数>8.5的指标^[23]。

2.3 评价方法

2.3.1 确定指标权重

在多指标综合评价中,确定指标权重的方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是一类根据评价者主观上对各指标的重视程度来决定权重的方法;客观赋权法所依据的赋权原始信息来源于客观环境,它根据各指标的联系程度或各指标所提供的信息量来决定指标的权重。客观赋权法有熵值法、主成分分析法、因子分析法、复相关系数法等^[8]。本研究采用熵值法计算各指标的权重。

在综合评价中,应用信息熵评价所获系统信息的有序程度和信息的效用值是可行的。一般认为,熵值法能够深刻地反映出指标信息熵值的效用价值,其给出的指标权重值比德尔菲法和层次分析法有较高的可信度,但它缺乏各指标之间的横向比较,又需要完整的样本数据,在应用上受到限制^[24]。对于城市生态系统健康评价来说,根据统计资料可以满足样本数据的要求。在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量,信息熵越大,信息的无序度越高,其信息的效用值越小;反之,信息的熵越小,信息的无序度越低,其信息的效用值越大。利用熵值法估算各指标的权重,其本质是利用该指标信息的价值系数来计算的,其价值系数越高,对评价结果的贡献越大。如果对*n*个评价指标*m*个年份进行评价, x_{ij} 为原始指标的归一化值,指标的信息熵如式(1)。

$$E_j = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}}{x_j} \ln \frac{x_{ij}}{x_j} \quad (1)$$

式中: $x_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, n$)。权重公式可记为: $w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}$ ($j = 1, 2, \dots, n$), $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

2.3.2 建立隶属度矩阵

城市生态系统健康是一个内涵明确、外延模糊的概念,大与小、优与劣没有明确的分界,存在着中间过渡^[11]。因此是典型的模糊概念。在模糊集合中,通常用隶属度来表达其

本质。在设立指标的健康理想值^[3,9-12,21,23] (见表 2) 的基础上,建立了城市生态系统健康隶属度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,当指标为正向指标时, $r_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j}$; 当指标为负向指标时, $r_{ij} = \frac{M_j - x_{ij}}{M_j - m_j}$ ($m_j = \min\{x_{ij}\}$, $M_j = \max\{x_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$)

表 1 城市生态系统健康评价指标体系框架

目标层	要素层	因素层	指标层
城市生态系统健康综合评价指数	自然环境	空气 地表水	城市空气质量好于或等于二级标准的天数/d
			集中式饮用水源水质达标率/%
			城市地面水水质达标率/%
			地下水水质达标率/%
		地下水 土壤	每公顷耕地地膜使用量/kg
			每公顷耕地使用化肥量/t
			每公顷耕地农药施用量/kg
			交通干线噪声平均值/dB(A)
		噪声	建成区区域噪声平均值/dB(A)
			城市污水处理率/%
	环境管理	工业用水重复利用率/%	
		生活垃圾无害化处理率/%	
		工业固废综合利用率/%	
		环境保护投资占 GDP 的比值/%	
	人工环境	住房	人均住房面积/m ²
		公共交通	每万人拥有公共车辆数/辆
		供热设施	城市集中供热率/%
		供气设施	城市气化率/%
道路		城市人均铺装道路面积/m ²	
公园		人均公园面积/m ²	
社会状况	生活质量	人均能值量 ^[13] /10 ¹⁵ cej	
	社会公平	城乡收入水平比率/%	
	城镇居民失业率/%		
	社会安定	每万人刑事犯罪案件受理数/件	
政府管理能力	非正常死亡率/%		
经济状况	经济活力	人均 GDP/元	
		GDP 年均增长率/%	
	经济结构	第三产业比重/%	
		科技三项费占 GDP 比值/%	
经济效率	万元 GDP 能耗/t 标煤		
	万元 GDP 水耗/m ³		
人群健康	人类健康	人均期望寿命/岁	
		婴儿死亡率/%	
	文化教育	每万人拥有在校大学生人数/人	
		每一教师负担的学生数/人	
		教育投入占 GDP 比值/%	
		每人每年拥有图书杂志出版量/册	
	健康服务	每百人每年拥有报纸出版量/份	
		科学研究和综合技术服务从业人员占从业人员比值/%	
		万人拥有医院床位/床	
		生物种群健康	自然保护区覆盖率/%
区域发展可持续性	自然保护 区 绿地	建成区绿化覆盖率/%	
		建成区人均公共绿地面积/m ²	
生态足迹与生态承载力的比值 ^[6]			

2.3.3 综合评价矩阵

根据城市生态系统健康隶属度矩阵与各指标的权重,建立综合评价向量: $B = W \cdot R$, 向量 B 的各分量表示相应年份生态系统健康指数。

3 乌鲁木齐市城市生态系统健康评价

3.1 数据来源

选择乌鲁木齐市进行城市生态系统健康实证研究,根据上述指标体系收集了乌鲁木齐市 1995 - 2004 年的数据。数据获取途径主要基于以下方面:《乌鲁木齐市统计年鉴》、《乌鲁木齐市环境质量公报》、《中国城市年鉴》和《中国环境年鉴》以及乌鲁木齐市统计局、乌鲁木齐市环保局等相关单位提供的基础数据,一些指标数据直接查得,另一些指标数据通过必要的计算获取。采用 SPSS11.5 进行数据计算。

3.2 城市生态系统健康评价指标理想值的确定

本研究中指标理想值的确定依据以下几项原则:(1)已有国家标准的或国际标准的指标尽量采用规定的标准值。(2)参考发达国家或发达地区的现状值作为参考值。(3)参考国内城市的现状值作趋势外推,确定参考值。(4)依据现有的环境与社会、经济协调发展的理论,力求将参考值量化。(5)对目前统计数据不十分完整,但在指标体系中又十分重要的指标,在缺乏有关指标统计前,暂用类似指标替代。

根据以上原则,拟定了乌鲁木齐市城市生态系统健康评价指标理想值表(见表 2)

3.3 结果分析

根据上述构建的城市生态系统健康评价的指标体系和评价方法,选取了 25 个指标进行评价,并运用信息熵确定各指标的权重(表 2),得到以下评价结果:

(1)1995 - 2004 年乌鲁木齐市城市生态系统健康总评价结果为: {0.421, 0.475, 0.359, 0.312, 0.375, 0.406, 0.415, 0.377, 0.447, 0.457}, 根据最大隶属度原则,乌鲁木齐市生态系统健康优劣排序结果为 1996 年、2004 年、2003 年、1995 年、2001 年、2000 年、2002 年、1999 年、1997 年、1998 年。根据评价结果(图 1),1995 - 2004 年乌鲁木齐市生态系统健康隶属度为 0.312 ~ 0.475,系统的健康状况总体上并未得到明显改善,1996 年最好,1998 年最差,2004 年系统的健康隶属度为 0.457,与 1996 年相比差了 0.018。

(2)1995 - 2004 年乌鲁木齐市生态系统各评价要素按最大隶属度原则排序结果如图 1 所示:自然环境要素的最大隶属度 0.579(1996),即 1996 年为 10 a 中的此要素的最健康状态,同理,人工环境的最大隶属度 0.611(2004),社会的最大隶属度 0.898(1995),经济的最大隶属度 0.713(2004),人类健康最大隶属度 0.768(2004),生物群落健康最大隶属度 0.141(2002),区域可持续性最大隶属度 0.505(1995)。各要素的最大隶属度主要集中于 2004 年,其概率为 42.9%。这些要素中人工环境(0.110 ~ 0.611)和人类健康(0.090 ~ 0.768)呈逐渐上升趋势,社会状况呈下降趋势(0.898 ~ 0.151),自然环境(0.456 ~ 0.378)年波动较大,说明城市生态环境建设是一种被动模式。

表 2 乌鲁木齐市城市生态系统健康评价指标体系及权重

要素	因素	评价指标	权重	理想值 ^[3,9-12,21,23]
自然环境	空气	城市空气质量好于或等于二级标准的天数/ d	0.1235	310
		城市地面水质达标率/ %	0.0871	100
	地表水	地下水水质达标率/ %	0.0014	100
		地下水	每公顷耕地使用化肥量/ t	0.0481
	土壤	每公顷耕地农药施用量/ kg	0.1526	1
		建成区区域噪声平均值/ dB(A)	0.0001	45
	噪声	生活垃圾无害化处理率/ %	0.0640	100
	环境管理	环境保护投资占 GDP 的比值/ %	0.0171	4
人工环境	住房	人均住房面积/ m ²	0.0435	25
	公共交通	每万人拥有公共车辆数/ 辆	0.0192	25
	供热设施	城市集中供热率/ %	0.045	90
	道路	城市人均铺装道路面积/ m ²	0.0051	10
社会状况	生活质量	人均能值量 ^[13] 10 ¹⁵ cej	0.0006	35
	社会公平	城镇居民失业率/ %	0.0560	3
	社会安定	每万人刑事犯罪案件受理数/ 件	0.1162	10
经济状况	经济活力	人均 GDP/ 元	0.0192	140000
		GDP 年均增长率/ %	0.0128	13
	经济效率	万元 GDP 水耗/ %	0.0550	20
人类健康	人群健康	人均期望寿命/ 岁	0.0013	80
	文化教育	每万人口拥有在校大学生/ 人	0.0670	500
		每一教师负担的学生数/ 人	0.0045	10
		教育投入占 GDP 比值/ %	0.0150	2
		每人每年拥有图书杂志出版量/ 册	0.0193	50
		科学研究和综合服务从业人员占从业人员比值/ %	0.0039	3
健康服务	万人拥有医院床位/ 床	0.0051	100	
生物种群健康	绿地	建成区绿化覆盖率/ %	0.0034	50
		建成区人均公共绿地面积/ m ²	0.0090	18
区域发展可持续性	环境可持续性	生态足迹与生态承载力的比值 ^[6]	0.0050	1

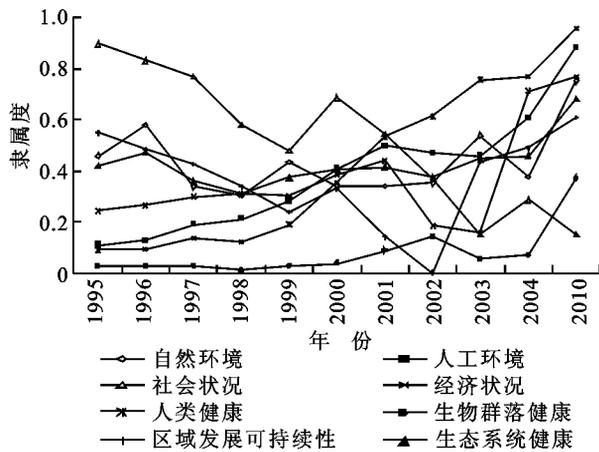


图 1 1995 - 2004 年乌鲁木齐市生态系统整体及各要素健康评价排序

(3) 2004 年乌鲁木齐市城市生态系统健康状况 (0.457) 与《乌鲁木齐市建设规划(2006 年 - 2010 年)》和《2010 年乌鲁木齐市十一五环境保护规划》完成后的健康水平 (0.681) 相比,可知现阶段乌鲁木齐市生态系统离社会期望值还有相当的距离 (0.224)。从图 1 可以看出 1998 - 2004 年,乌鲁木齐市生态系统健康水平呈逐渐递增状态 (0.312 ~ 0.457), 平

均每年上升 0.021。按此速度发展,要达到社会期望值需要 10 a 的时间。因此,要在 2010 年完成此目标任务艰巨。

(4) 由上述分析结果可以看出:乌鲁木齐市 1998 年以来的总体建设取得了一定的成绩,城市生态系统的健康程度正在逐步上升,但是也不容否认尽管某些要素的整体趋势较好如:人类健康、人工环境要素,仍有某些要素的健康状况令人担忧,主要是社会状况和区域可持续性要素;分析 1995 - 1998 年健康水平下降的原因,主要是自然环境健康状况下降较快,而其他要素的健康水平并没有得到相应的提升或者提升较慢;乌鲁木齐市城市生态系统健康的各要素发展不平衡,协调性呈下降趋势。

4 结论与讨论

(1) 根据城市生态系统的特点和城市生态系统健康内涵,从自然环境、人工环境、社会经济、人类健康、生物群落健康和区域可持续性 7 个方面选取 45 个指标,构建了城市生态系统健康评价的指标体系。运用多种数学方法进行数据处理,运用于城市生态系统健康评价和城市发展的演化分析。

(2) 研究的是干旱区的城市生态系统,部分健康理想值与一般区域城市生态系统健康的理想值有所不同,如表征区

域发展可持续性的生态足迹与生态承载力的比值、表征生活质量的人均能值量、生物种群健康的建成区绿化覆盖率等。

(3) 1995 - 2004 年 10 a 中,乌鲁木齐市相对健康状态为 1996 年,相对不健康状态为 1998 年,总体上城市生态系统的健康状况并未得到明显改善;1998 年以来,城市生态系统健康状况呈上升趋势,城市建设取得了一定成绩,但是离社会期望值仍有较大距离,实现城市发展目标任务艰巨;10 a 来,人类健康、人工环境要素整体趋势较好,社会状况和区域可持续性要素整体发展趋势较差,自然环境并未有得到较大改善。此结果表明城市的发展度和协调性较差,城市的健康水平较低。

(4) 由于城市生态系统健康水平是个综合指数,并未考虑决定系统健康状况的各子系统之间的协调性,同样的健康水平存在着质量差异,因此,生态系统健康质量问题也应该引起人们的重视。生态系统健康质量应由子系统的健康水平和子系统之间的协调性决定。乌鲁木齐城市生态系统的综合健康指数在 2004 年达到了 0.457,但是各要素的健康指数中最小值为 0.069,最大值 0.768,要素间的协调性很差,健康状况很不稳定,整体的健康质量较低。

(5) 本文仅在时间尺度上对乌鲁木齐市城市生态系统的健康状况进行评价,受多方面因素的影响,所建立的指标体系还存在一定的局限,有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 陈亮,王如松,周文华,等.城市生态学与生态健康[J].科技导报,2005,23(3):12-15.
- [2] 陈高,邓红兵,代力民,等.综合构成指数在森林生态系统健康评估中的应用[J].2005,25(7):1725-1733.
- [3] McMulltan C. Indicators of Urban Ecosystems Health [EB/OL]. International Development Research Centre (IDRC), Ottawa <http://www.idrc.ca/ecohealth/indicators.html>. 1997.
- [4] 崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康评价指标体系理论[J].生态学报,2002,22(7):1005-1011.
- [5] David W T, Cynthia N, Joshi D D, et al. Tamang. Agro-urban Ecosystem Health Assessment in Kathmandu, Nepal: Epidemiology, Systems, Narratives [J]. Eco-Health, 2005, 2:1-10.
- [6] 杜斌,张坤民,温宗国,等.城市生态足迹计算方法的设计与案例[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(9):1171-1175.
- [7] Francis J P, William C D. Quantifying and Evaluating Ecosystem Health: A Case Study from Moreton Bay, Australia [J]. Environmental Manggement, 2005, 36(5):757-771.
- [8] 郭显光.改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J].系统工程理论与实践,1998(12):98-102.
- [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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李锋,王如松.中国西部城市复合生态系统特点与生态调控对策研究[J].中国人口·资源与环境,2003,13(6):72-75.
- [13] 陆宏芳,蓝盛芳,俞新华,等.城市复合生态系统能值整合分析研究方法[J].城市环境与城市生态,2005,18(4):34-37.
- [14] 陆庆轩,何兴元,魏玉良,等.沈阳城市森林生态系统健康评价研究[J].沈阳农业大学学报,2005,36(5):580-584.
- [15] 钱翌,朱建雯.乌鲁木齐市建设生态城市现状的比较分析及发展对策研究[J].干旱区地理,2007,30(2):274-282.
- [16] Schaeffer D J, Henricks E E, Kerster H W. Ecosystemhealth:1. Measuring ecosystem health [J]. Environmental Management, 1988, 12:445-455.
- [17] 王广成,闫旭骞.矿区生态系统健康评价指标体系研究[J].煤炭学报,2005,30(4):534-538.
- [18] 吴建国,常学向.荒漠生态系统健康评价的探索[J].中国沙漠,2005,25(4):60-611.
- [19] 武兰芳,欧阳竹,唐登银.区域农业生态系统健康定量评价[J].生态学报,2004,24(12):2740-2748.
- [20] 杨位飞,李铁松,叶兴东.邛海水生生态系统健康评价[J].水土保持研究,2006,13(2):162-164.
- [21] 杨小播,吴庆书.城市生态学[M].北京:科学出版社,2001:43-45.
- [22] 张凤玲,刘静玲,杨志峰.城市河湖生态系统健康评价:以北京市“六海”为例[J].生态学报,2005,25(11):3020-3027.
- [23] 张坤民,温宗国,杜斌,等.生态城市评价指标体系[M].北京:化学工业出版社,2003:341-346.
- [24] 张卫民.基于熵值法的城市可持续发展评价模型[J].厦门大学学报:哲学社会科学版,2004(2):109-115.
- [25] 张志诚,欧阳,肖风劲.生态系统健康研究现状及其定量研究初探[J].中国生态农业学报,2004,12(3):184-187.
- [26] 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):1344-1351.