

城市生态安全评价与预测模型研究^{*}

龚建周, 夏北成, 郭 沅

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 利用深圳等 8 个城市 1992 – 2002 年间资源环境状态、资源环境压力和人文环境响应 3 个子系统共 21 个指标, 运用主成分分析法确定指标的权重, 加权求 8 个城市不同年份生态安全指数值, 再用逐步回归法构建不同显著水平的 3 个预测模型, 并验证 2002 年的实证数据。研究结果显示: 大连、深圳在不同年份内生态安全指数都较高, 基本处于生态安全水平, 上海与重庆的城市生态安全指数值最低; 三个回归模型显示出非常相似的评价结果, 并与 PSR 模型有相似的变化趋势, 表明 3 个回归模型预测城市生态安全的结果是可靠的。

关键词: 城市生态安全; 生态安全指数; 生态安全评价与预测模型

中图分类号: X 826 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529 6579 (2006) 01- 0107- 05

随着人类社会经济的高速发展, 生态环境问题直接威胁着人类的生存环境。20 世纪末, 生态安全已在世界范围内成为多学科、多领域的热门课题, 学者们围绕生态安全的概念、问题评述及评价指标取舍等方面进行了大量的研究^[1-4], 而对于生态安全预测与预警的研究较少, 建立兼备评价、预测和预警功能的生态安全模型鲜见报道。本文以我国 8 个城市生态环境系统为研究对象, 选取城市生态环境压力、环境状态和人文环境响应 3 个子系统共 21 个指标, 通过生态安全评价模型的构建, 测算不同城市生态安全综合指数, 进行城市生态安全度比较分析。运用逐步回归方法构建生态安全评价的预测模型, 目的在于研究对城市生态安全影响最大的环境因素, 探索构建生态安全预测模型的方法, 为解决城市生态环境问题、建立安全的城市生态环境提供决策参考。

1 城市生态安全评价与预测指标体系

以世界经济合作和开发组织与联合国环境规划署共同提出的 PSR 概念模型, 即压力—状态—响应模型^[5-6]为基础, 参考现有生态环境评价及生态安全评价的方法, 考虑到社会和经济活动对城市环境系统的深刻影响, 结合我国城市的实际及数据的可获得性, 选取反映城市经济发展、人们生活水平及环境状态的生态因子, 构建资源环境压力、资源环境状态和人文环境响应 3 个子系统的指标体系。

1.1 资源环境压力指标

人口自然增长率 (X_1)、市区人口密度 (X_2)、全年供水总量 (X_3)、建成区面积 (X_4)、工业废水

排放总量 (X_5)、工业废气排放总量 (X_6)、工业固体废弃物产生量 (X_7)。

1.2 资源环境状态指标

园林绿化面积 (X_8)、建成区绿化覆盖率 (X_9)、工业废水排放达标率 (X_{10})、工业废气排放达标率 (X_{11})、工业固体废物处理率 (X_{12})、全市环境噪声平均值 (X_{13})、大气污染综合指数 (X_{14})。

1.3 人文环境响应

绿色 GDP (X_{15})、第三产业占 GDP 比重 (X_{16})、教育费用占 GDP 的比重 (X_{17})、每万人拥有高等学校在校学生数 (X_{18})、每百人拥有公共图书馆藏书 (X_{19})、每 10 万人拥有医院床位数 (X_{20})、三废综合利用产品产值占 GDP 比重 (X_{21})。

2 城市生态安全预测方法

2.1 数据来源

本文资料来源于 1992 – 2002 年间 (时间步长为 2a) 的《中国城市统计年鉴》^[7] 和《中国环境年鉴》^[8], 根据年鉴按地理位置对城市的分组, 分别选取东部地区的北京、天津市、大连、上海、南京、广州、深圳等城市及西部地区的重庆市共 8 个城市为研究对象。其中, 大连、天津、上海、广州属沿海开放城市, 深圳属经济特区。

2.2 指标标准值求算

为消除指标数据量纲的影响, 用功效系数法^[9]对所有数据进行无量纲标准化处理。

(1) 正效应指标

^{*} 收稿日期: 2005 – 03 – 29

作者简介: 龚建周 (1970 年生), 女, 博士生; 通讯联系人: 夏北成; E-mail: xiabch@mail.sysu.edu.cn

设共确定评价指标 k 个, 当前 p 个指标呈正效应时, 记第 i 个评价对象第 j 项指标为 x_{ij} , 则第 i 个评价对象第 j 项指标的标准值为:

$$d(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - m \ln(x_{ij})}{m \max(x_{ij}) - m \ln(x_{ij})} \times 100\%$$
$$(i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, p)$$

(2) 负效应指标

而对于后 $(k - p)$ 个负效应指标 $x_{p+1}, \dots, x_k$, 其第 i 个评价对象第 j 项指标的标准值为

$$d(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - m \ln(x_{ij})}{m \max(x_{ij}) - m \ln(x_{ij})} \times 100\%$$
$$(i = 1, 2, \dots, n; \quad j = p + 1, \dots, k)$$

式中, 为 $d(x_{ij})$ 第 i 个评价对象第 j 项指标的功效系数, $d(x_{ij})$ 为该指标的标准值; p 为正效应评价指标个数, k 为评价指标总数; 当 $d(x_{ij}) = 1$ 指标代表的项目达到最佳状态, 相反, 当 $d(x_{ij}) = 0$ 达到最差状态。

2.3 权重的确定

运用主成分方法确定了城市生态安全指标体系中各单项指标的权重和单项指标对上一级系统的权重。过程如下:

设原始数据表中样本数为 n , 指标数为 k , 经标准化处理后, 指标数据的相关矩阵为 R ^[10]

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} \end{bmatrix}$$

r_{ij} 为城市 i 的第 j 项指标的标准值

在 SPSS 软件中运用主成分分析方法, 求 R 的特征根 $\lambda_m (m = 1, 2, \dots, k)$ 和相应向量的方差贡献率, 并按从大到小排序。选取方差累计贡献率达到 85% 的前 f 个主成分, 其方差贡献矩阵 $A = (a_1, a_2, \dots, a_f)$, 并求其特征向量 $u_g (g = 1, 2, \dots, f)$, 得各指标在前 f 个主成分的贡献矩阵 $U = (u_1, u_2, \dots, u_f)$, 则各指标对总体方差的贡献率矩阵为 $B = A^T \cdot U = (b_1, b_2, \dots, b_k)$ 矩阵 B 中元素 b_j 即指标 j 的权重。单项指标对上一级系统的权重计算方法类似。

2.4 生态安全指数值的计算

用线性加权函数求算 8 个城市在不同年份的生态安全值, 综合指数值越大, 说明城市生态安全度越高, 反之, 则越低。公式^[9]为:

$$CI_i = \sum_{j=1}^k b_j d_j(x_{ij}) \times 100$$

式中, CI_i 为评价对象 i 的生态安全综合指数值, b_j 为评价指标 j 的权重。

2.5 生态安全预测模型的构建

逐步回归分析^[11-13]是统计学上用多元自变量作预报时, 通过求其最优多元回归方程建模的方法。其选择最优回归方程的基本思路是: 从一个自变量开始, 按其对因变量作用的显著程度, 逐个地被引入回归方程中, 同时指定 F 检验的显著水平做显著性检验, 决定新引入变量后, 是否需从方程中剔除已经引入的变量, 从而保证在每引入新的变量之前方程中均为显著变量, 直到没有显著变量可引入时为止。基于已经计算的 1992 - 2000 年生态安全指数及相应的指标标准值, 分别指定 3 个不同的 F 检验显著水平, 用逐步回归法构建城市生态安全指数的预测模型, 并用此模型计算 2002 年生态安全值, 并与加权求算的指数值对比分析。

不同的 F 检验显著水平分别是: 选入变量时 $\alpha = 0.08$ 剔除变量 $\alpha = 0.1$; 选入变量时 $\alpha = 0.06$ 剔除变量时 $\alpha = 0.08$ 选入变量时 $\alpha = 0.04$ 剔除变量时 $\alpha = 0.06$

2.6 等级标准的确定

参考相关研究成果^[13-14], 根据综合评价大小, 设置城市生态安全等级评判标准 4 个安全等级: 不安全 (≤ 45)、临界安全 ($45 \sim 55$)、安全 ($55 \sim 75$) 和理想安全 (> 75)。

3 结果与讨论

3.1 指标权重分析

根据主成分分析方法确定子系统生态安全水平上各指标的权重和指标在总体生态安全水平上的权重 (表 1)。可以看出, 总生态水平下的权重排名前三位的是工业废水排放总量、市区人口密度、全年供水总量指标 (分别为 0.1021、0.0972、0.0961), 说明这些指标在城市生态安全的地位相对较重要; 其次是工业废气排放达标率、大气污染指数 (分别为 0.0947、0.0916), 权重最小的二指标是绿色 GDP 和教育费用占 GDP 的比重 (分别为 0.0030、0.0022), 表明对城市生态安全的影响力相对较小。子系统权重结构显示, 资源环境压力子系统中重要性相对较大的指标是全年供水总量和工业废水排放总量; 资源环境状态子系统中以建成区绿化覆盖率和大气污染指数的重要程度较大; 人文环境响应子系统中绿色 GDP 和每百人拥有公共图书馆藏书两指标权重较大。

3.2 城市生态安全及其动态分析

不同年份内各城市生态安全指数曲线如图 1。为寻求城市生态安全指数变化规律, 分别计算城市

表 1 城市安全水平内指标权重分配

Tab. 1 The Distribution of evaluation weights for all indices

原始变量	总体生态 水平下的权重	子系统生态 水平下的权重
X_1	0.039	0.0143
X_2	0.0972	0.1949
X_3	0.0961	0.2132
X_4	0.0172	0.0765
X_5	0.1021	0.1815
X_6	0.0687	0.1802
X_7	0.0839	0.1393
X_8	0.0058	0.1955
X_9	0.0716	0.2468
X_{10}	0.075	0.129
X_{11}	0.0947	0.1899
X_{12}	0.004	0.0343
X_{13}	0.0176	0.0031
X_{14}	0.0916	0.2014
X_{15}	0.003	0.2252
X_{16}	0.0073	0.1708
X_{17}	0.0022	0.0999
X_{18}	0.0152	0.0996
X_{19}	0.0538	0.2023
X_{20}	0.0501	0.1123
X_{21}	0.0039	0.0898

资源环境压力、资源环境状态和人文环境响应 3 子系统的生态安全指数值（见表 2）。大连、深圳在不同年份内生态安全指数都较高，城市环境处于安全或理想安全水平，主要因为两城市环境压力状态指数值较高（最高 98.69 最低 84.22）；上海与重庆生态安全指数最低，生态环境处于临界安全状态，其中，上海市资源环境压力指数值最低，其次是环境状态指数值，而重庆市生态安全内部结构正好相反，环境压力指数相对高，状态、人文反应指数较低，这一现象表明决定两城市生态安全水平相对低的内部系统结构相异；其余城市环境基本处于安全水平。

图 2 显示大连、南京、广州三个城市生态安全指数较稳定，随年代的推移，围绕某一水平波浪式变化，三城市生态安全指标子系统结构也表现为相对较稳定，呈现出从大到小依次为压力、状态、反应（偶尔有反常）的排序结果；北京市生态安全指数在 1996 - 1998 年之间有较大幅度下降，其余年份较稳定，主要因为该时期内其环境状态指数有较大幅度降低，相反，重庆市生态安全指数在 1994 - 1996 年间有大幅度升高，是其城市环境状态和人文社会响应指数先升后降的反应；天津市生态安全指数基本呈小幅度上升趋势，是其城市环境状态和人文环境响应指数持续小幅度增长的结果；而上海除 1994 - 1996 年间有小幅度地下降外，基本一直呈较大幅度地上升，表明两城市生态环境状态在不断地改善；尽管深圳市城市生态安全指数值较高，但其动态变化曲线表明，其城市环境除 1994 - 1998 年有较大改善外，其余年份，变化不大并呈小幅度地下降。由表 2 可以发现虽然其人文环境响应指数不断地升高，但是环境压力指数持续减少致使其城市生态安全水平呈下降趋势，说明深圳市经济的迅猛发展，尤其是其城市规模和人口密度地急剧增长对城市生态安全性带来不利的影响。

3.3 城市生态安全预测分析

基于已计算的城市生态安全指数值（1992—2000 年）及对应指标的标准值，在 SPSS 11.0 中选用逐步回归方法，给定 3 个不同的 F 检验显著水平，建立了 3 个回归预测模型（如表 3），再计算 2002 年各城市生态安全指数，与前面已计算的相应数据绘制成图 2

从表 3 的模型回归系数可以看出，不同显著水平下，构建城市生态安全预测模型的指标个数及其影响力极为悬殊。但是，从模型仍然能看出对城市生态安全影响最大的指标项目，如工业废水排放总量与大气污染综合指数在各模型中影响力都最大，

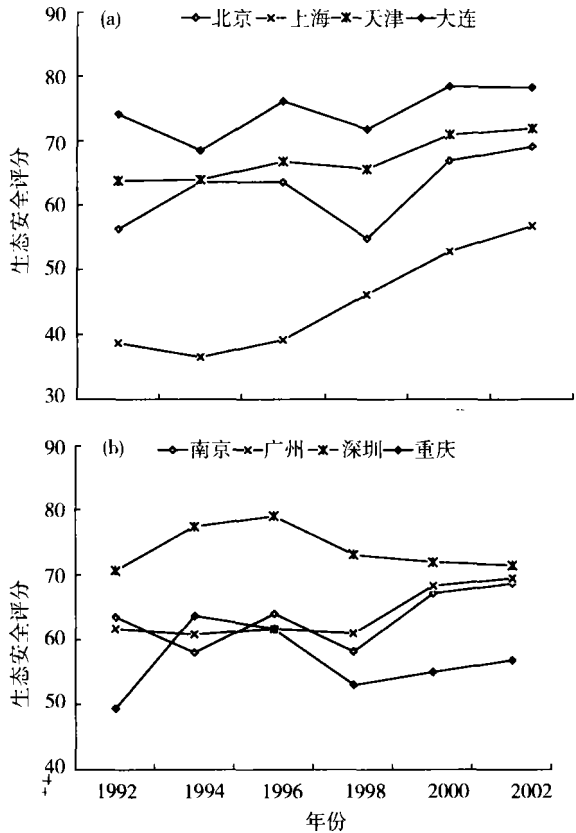


图 1 八个城市生态安全及其动态变化图

Fig 1 Dynamics of ecological security of eight cities
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 资源环境压力、状态和人文环境响应子系统水平内生态安全指数表

Tab. 2 Indices of ecological security at different subsystem of source – environmental pressure status and social environmental response

年份		北京	上海	天津	大连	南京	广州	深圳	重庆
1992	压力	54.8	28.28	82.45	87.21	66.18	73.67	98.69	63.14
	状态	41.97	38.84	35.03	51.07	51.65	48.33	49.76	23.98
	反应	44.62	28.09	28.84	29.7	31.38	31.39	13.3	33.76
1994	压力	66.29	22.87	80.88	88.5	58.12	72.36	97.96	78.15
	状态	45.4	36.32	36.47	45.59	47.06	46.04	65.09	41.91
	反应	54.38	42.26	34.04	28.32	46.87	43.4	23.45	44.72
1996	压力	64.93	24.13	79.38	88.67	64.33	71.98	96.72	83.00
	状态	46.2	40.9	42.32	52.63	51.55	41.28	74.38	33.39
	反应	56.89	46.53	37.41	41.78	49.11	46.33	27.34	29.03
1998	压力	62.37	31.78	80.02	87.23	64.24	72.33	96.16	74.83
	状态	39.11	40.8	42.57	48.67	41.88	41.56	55.51	28.62
	反应	53.54	64.02	40.71	42.87	51.66	50.09	29.73	28.76
2000	压力	66.24	33.72	81.8	86.62	62.58	72.23	87.61	68.66
	状态	55.03	48.4	49.06	60.19	57.79	65.26	64.2	37.97
	反应	57.34	71.51	40.66	44.19	56.02	49.92	31.37	27.92
2002	压力	64.88	33.62	74.29	86.49	68.63	69.95	84.22	67.08
	状态	55.15	58.41	60.23	59.32	68.86	71.9	66.02	42.9
	反应	68.09	78.93	43.51	47.55	49.57	57.06	33.23	30.79

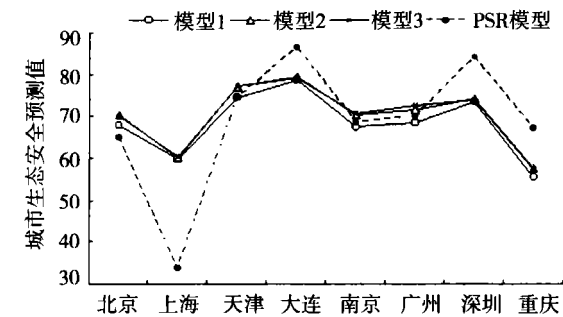


图 2 2002 年不同模型下城市生态安全指数曲线

Fig. 2 Curves of index from different models and levels for urban ecological security in 2002

除每万人拥有高等学校在校学生数 (X_{18}) 指标外, 构建模型 2、3 的指标也都在模型 1 中出现, 而模型 1 中相对不重要的 X_{19} 、 X_{16} 、 X_1 、 X_{13} 四指标都不在模型 2、3 中出现。

图 2 显示, 三种模型预测各城市 2002 年生态安全水平结果非常接近, 表明一定显著水平 (本文 $\alpha=0.04 \sim 0.1$) 下, 通过逐步回归选取适量指标构建预测模型, 估算城市生态安全的水平可行, 也是可靠的。

图 2 还显示, PSR 模型与本文的 3 模型计算城市生态安全的值差异显著, PSR 模型评价价值将各城市间的生态安全水平差距有所扩大, 对于生态安全水平较低的城市具有更好的警示作用。如曲线在波峰与波谷处的差异更加明显。尽管如此, 四个模型

表 3 不同 F 时城市生态安全回归预测模型系数表

Tab. 3 Coefficients of multiple regression at different levels for urban ecological security

预测模型 1		预测模型 2		预测模型 3	
指标	回归系数	指标	回归系数	指标	回归系数
X_5	0.12920	X_{14}	0.15898	X_{14}	0.17394
X_{14}	0.12813	X_5	0.15554	X_5	0.17175
X_3	0.12420	X_3	0.10087	X_2	0.08670
X_{11}	0.09509	X_{11}	0.08259	X_3	0.08480
X_9	0.08042	X_2	0.07812	X_9	0.07796
X_7	0.08676	X_9	0.07613	X_{10}	0.06577
X_{17}	-0.07435	X_{21}	0.06733	X_{21}	0.06454
X_2	0.06976	X_{10}	0.06447	X_{18}	0.04786
X_{10}	0.06171	X_{18}	0.05020	X_7	0.04063
X_{21}	0.06056	X_7	0.04471	X_{17}	-0.02231
X_{19}	0.04850	X_{17}	-0.02315		
X_{16}	-0.04500				
X_1	0.03706				
X_{13}	0.02462				
常量	7.48302	常量	8.95150	常量	15.23267

注: 模型 1~3 的参数依次分别是: 入选指标 $\alpha=0.08$ 剔除指标 $\alpha=0.1$ 入选指标 $\alpha=0.06$ 剔除指标 $\alpha=0.08$ 入选指标 $\alpha=0.04$ 剔除指标 $\alpha=0.08$

预测各城市的生态安全水平的变化趋势较吻合, 进一步证实运用逐步回归方法建立预测城市生态安全模型是可行的。

4 结 论

基于构建的城市生态安全评价指标体系，运用主成分的一般步骤确定指标的权重。结果表明，不同指标对城市生态安全的贡献大小不等。权重从大到小排前三位的指标是工业废水排放总量、市区人口密度、全年供水总量，排名靠后的二个指标是绿色 GDP 和教育费用占 GDP 的比重。权重的确定既是城市生态安全整体评价工作的基础，也为改善城市环境、促进城市健康稳定发展提供参考。

基于国际普遍采用的 PSR 概念模型，加权求算 8 个城市从 1992 - 2002 年间（时间步长为 2a）的生态安全指数值，结果显示大连、深圳两城市在不同年份内生态安全指数都较高，上海与重庆市的城市生态安全指数相对较低，其余城市环境基本处于安全水平。结果还显示，不同城市在资源环境压力、状态和人文环境响应子系统内的生态安全指数值不同，说明各城市在环境、城市状态与社会经济等方面并不同步发展，对环境的影响力不等。

不同显著水平的逐步回归模型对城市生态安全的实证结果差异不大，而与 PSR 模型的评价结果差异相对较大，PSR 模型预测值将各城市间的生态安全水平差距扩大，对于生态安全水平较低的城市具有更好的警示作用。但是，各模型反映城市生态安全度大小的相对变化趋势仍然相似。因此，通过选取适当的指标，建立预测指标体系，可以对城市未来环境安全变化趋势进行预测。

参考文献:

[1] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问

题[J]. 应用生态学报, 2003 14(9): 1551 - 1556

[2] Millennium project- Environmental security study[EB / OL]. (<http://www.acunu.org/millennium/es/exsum.htm>) [2005 - 3 - 20].

[3] ROBER COSTANZA, RALPH D' ARGE, RUDOLF DE GROOT et al. The value of the world' s ecosystem service and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253 - 260

[4] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002 13(3): 354 - 357.

[5] 左伟. 基于 RS GIS 的区域生态安全综合评价研究—以长江三峡库区忠县为例[M]. 测绘出版社, 2004.

[6] 谢花林, 张新时. 城郊区生态安全水平的量度及其对策研究[J]. 中国人口、资源与环境, 2004 14(3): 23 - 26

[7] 国家统计局城市社会经济调查总队. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1993 - 2003

[8] 中国环境年鉴编辑委员会. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993 - 2003.

[9] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003 13 - 14

[10] 宋之杰, 高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法[J]. 燕山大学学报, 2002 26(1): 20 - 26

[11] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 人民邮电出版社, 2004 204 - 214

[12] 杨持. 生物统计学[M]. 内蒙古大学出版社, 1996 201 - 202

[13] 刘勇, 刘友兆, 徐萍. 区域土地资源生态安全评价—以浙江嘉兴市为例[J]. 资源科学, 2004 26(3): 69 - 75

[14] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全综合评价与制图—以重庆市忠县为例[J]. 土壤科学, 2004 41(2): 203 - 209

Assessment and Prediction Models of Urban Ecological Security

GONG Jian-zhou, XIA Bei-cheng, GUO Luo

(School of Environmental Science and Engineering Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract Statutes and dynamics of ecological security of 8 important cities in China from 1992 to 2002 were simulated by multiple regression models which were established upon some resources and environmental indices. In this paper, 21 indices belonging to subsystems of environmental resource pressure, environmental status and responses of social environment were selected. Each security index and its weight in urban ecosystem were calculated. Three predication models were established with those indices and gave simulative assessment to 8 cities. Assessment results showed Dalian and Shenzhen have relatively better urban eco-environment as their high integration indices. Shanghai and Chongqing have the lowest indices of eco security. The three regressive models gave very close assessment results and had the similar tendency to the results of PSR model in ecological security for 8 cities in 2002. It means the three models are reliable to simulate and predict urban ecological security.

Key words urban ecological security; integrating index; assessment and prediction model of ecological security