

基于可拓物元-马尔科夫模型的省域生态环境 质量动态评价与预测* ——以江西省为例

刘耀彬^{1,2} 朱淑芬²

(1. 南昌大学中国中部经济发展研究中心 南昌 330047; 2. 南昌大学旅游规划与研究中心 南昌 330047)

摘 要 在构建生态环境质量物元的特征指标体系基础上, 基于可拓物元-马尔科夫模型提出了省域生态环境质量动态评价与预测的方法, 并以江西省为例进行了应用研究。研究显示: 可拓物元模型揭示 2000~2005 年间江西省生态环境质量整体上转好, 但 11 个地区生态环境质量演化状况存在一定差异; 而马尔科夫预测表明, 按照现有的治理模式, 5~10 年后江西省生态环境质量整体上向“较好”方向演进。基于可拓物元法基础上的马尔科夫预测方法, 可一定程度上对省域生态环境质量进行动态评价和趋势预测, 但由于两模型本身假设的限制, 在其具体应用中还需改进。

关键词 生态环境质量 可拓物元模型 马尔科夫模型 评价与预测 江西省

中图分类号: F290; X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2009)02-0364-05

Dynamic assessment and forecasting of provincial eco-environmental quality from matter element model and Markov chain — A case study of Jiangxi Province

LIU Yao-Bin^{1,2}, ZHU Shu-Fen²

(1. Center for China Economic Development Research, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. Center for Tourism Planning & Development Research, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract By developing a characteristics indicator system of eco-environmental matter elements, this paper advanced an assessment and forecasting method of provincial eco-environmental quality based on the matter element model and Markov chain. The system was applied to Jiangxi Province as case study. The results show that eco-environmental quality in Jiangxi Province as simulated by matter element model has been, on the overall, improved from 2000 to 2005. The degree of improvement is, however, different for the 11 districts in the province. On the other hand, Markov chain forecast shows that the eco-environmental quality seems heading in a better evolutionary direction in the next 5~10 years, provided current eco-environment governance is sustained. The application effects imply that the assessment and forecast of the models, to a certain extent, reflect actual conditions and development trends of the provincial eco-environmental quality. However, because of limitations in the model assumptions, improvements are needed in application of the model to different regions in different phases of economic development.

Key words Eco-environmental quality, Matter element model, Markov chain, Assessment and forecast, Jiangxi Province

(Received June 22, 2008; accepted Sept. 28, 2008)

区域生态环境质量综合评价与预测, 是进行区域生态环境综合规划、制定生态环境综合决策、实施生态环境综合治理的基础。在国内, 目前对省域生态环境质量的评价与预测在 RS 和 GIS 技术的支

持下已形成了多种常用方法, 如层次分析法^[1]、综合指数法^[2]、模糊评判法^[3]、灰色系统评价法^[4]、投影寻踪法^[5]、人工神经网络评价法^[6]、物元分析法等^[7]。这些方法在我国东、中、西部省份的生态环境质量

* 国家社会科学基金项目(07CJL031)、中国博士后基金项目(20060400249)和江西省教育厅科技项目(GJJ08014)资助

刘耀彬(1970~), 副教授, 博士(后), 主要从事城市经济与城市管理方面研究工作。E-mail: liuyaobin2003@163.com

收稿日期: 2008-06-22 接受日期: 2008-09-28

评价与规划中均有零星应用。但相对于省域生态环境规划的实践而言, 这些方法基本上是基于静态的评价或规划, 缺乏相应的动态评价与预测, 特别将生态环境评价的结果作为依据而展开动态预测的文献更为少见。本文以江西省为例, 利用物元模型在对其生态环境综合质量进行动态评价的基础上, 借助马尔科夫链对其发展趋势进行预测, 从而保证全省生态环境战略规划科学可行。

1 建模原理

可拓物元法是对研究对象从可行性和优化的角度进行评价, 是定性与定量的结合。利用物元的可拓性确定定性分析, 而通过关联函数实现定量计算是可拓物元法的基础。该方法是一种新的评价方法, 它可以将各个评价指标转化为一种相容的问题, 通过建立物元模型, 得出与实际相符合的结论^[8]。利用可拓物元法评价省域生态环境质量, 可通过建立省域多指标性能参数的生态环境质量评定模型, 并以定量的数值表示评定结果, 从而较完整地反映生态环境质量的综合水平与等级。

马尔科夫理论指出: 系统达到每一状态的概率仅与近期状态有关, 在一定时期后马尔科夫过程逐渐趋于稳定状态而与原始条件无关。这一特性称为“无后效性”^[9]。即: 事物的第 n 次试验结果仅取决于第 $(n-1)$ 次试验结果, 第 $(n-1)$ 次试验结果仅取决于第 $(n-2)$ 次试验结果, 依此类推。这一系列转移过程的集合叫做“马尔科夫链”或称为“时间和状态均离散的马尔科夫过程”。对马尔科夫过程和马尔科夫链进行分析, 并对未来的发展进行预测称为“马尔科夫分析”。

马尔科夫过程实际上是一个将系统的“状态”和“状态转移”定量化的系统状态转换的数学模型, 而可拓物元法则是对事物状态的一种评价方法。因此, 可以利用可拓物元法对省域生态环境质量评价的等级作为马尔科夫“状态”和“状态转移”分析的依据, 将 2 个模型进行有效衔接, 从而实现对省域生态环境质量的动态评价与预测。

2 江西省生态环境质量动态评价与预测

2.1 研究区概况及数据来源

江西省地处中亚热带, 地貌兼山地、丘陵、岗地、阶地、平原和湖泊水系等, 全省土地总面积为 16.69 万 km^2 。该省生态系统较齐全, 生物资源较丰富, 全省分布 5 000 余种高等植物, 有脊椎动物 845 种, 昆虫 4 500 余种, 林地面积 8.898 万 km^2 , 森林覆盖率 53.7%。江西省总体自然环境状况较好, 但仍存

在如下生态环境问题: 一是生态环境退化, 自然灾害加剧; 二是生态环境恶化; 三是工业“三废”对环境污染较大; 四是生活污水对环境污染较大^[10]。

本研究所用数据来源于《江西统计年鉴》、《江西五十年》、《江西省水利公报》和《江西省环境公报》。其中, 环境污染指标来自于环境公报, 水资源数据来自水利公报, 而人口和面积数据来自统计年鉴。

2.2 建立物元模型动态评价生态环境综合等级

2.2.1 描述物元

将所评价的省域生态环境质量记作 M , M 的特征记作 C , M 关于 C 的量值记作 V , 则称有序三元组 $R = (M, C, V)$ 为生态环境质量物元。若 M 有多个特征, 并以 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 R 称为 n 维生态环境质量物元:

$$R = \begin{bmatrix} M & c_1 & \cdots & v_1 \\ & c_2 & \cdots & v_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & c_n & \cdots & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(x) & c_1 & <a_1(x) & b_1(x)> \\ & c_2 & <a_2(x) & b_2(x)> \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & c_n & <a_n(x) & b_n(x)> \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, 关于特征 c_i 量值范围 $v_i = <a_i(x), b_i(x)>$, x 为 c_i 特征指标。为简便地描述生态环境质量物元, 这里依据生态环境概念和内涵, 根据系统分解协调原理, 从水、土、大气、生物、资源与能源等 5 方面对生态环境质量特征 c_i 进行刻画与细化, 同时考虑到生态环境众特征对整个系统的正负功效的差异, 本文借鉴中国科学院可持续发展研究组的研究成果^[11], 将生态环境综合质量划分为状态、压力和保护 3 个子集。由于生态环境质量物元评价涉及面很宽, 数据收集比较困难, 为简单起见, 本研究中分别选取:

生态环境状态, 通常由资源条件(包括人均水资源拥有量 Y_1 、人均耕地面积 Y_2 、单位面积粮食产量 Y_3)和生态条件(包括人均公共绿地面积 Y_4 、建成区绿化覆盖率 Y_5)构成; ②生态环境压力, 通常由排放强度来表示(包括单位面积工业废水排放量 Y_6 、单位面积工业废气排放量 Y_7 、单位面积工业固体废物产生量 Y_8); ③生态环境保护, 可由环境治理(包括工业废水排放达标率 Y_9 、工业固体废物综合利用率 Y_{10})、环保投入(含万元工业产值能耗量 Y_{11} 、万元工业废水排放量 Y_{12} 、万元工业废气排放量 Y_{13} 、万元工业固体废物产生量 Y_{14})构成。通过合成, 生态环境质量物元就可以由 14 个特征指标集来衡量。

2.2.2 确定经典域与节域

由生态环境质量的特征及其标准量值范围组成的物元矩阵称为生态环境质量经典域, 记为 R_0 。由经典物元加上可以转化为经典物元的生态环境质量特征和此特征相应拓广了的量值范围组成的物元矩阵, 称为生态环境质量节域 R_c 。本文运用可拓集合

概念, 将生态环境质量物元{良好 较好 一般 差}中的渐变分类关系由定性描述扩展为定量描述, 从而辨识该经典域的层次关系。首先, 将问题概述为: 设特征状态 $N=\{\text{良好 较好 一般 差}\}$, $N_{01}=\{\text{良好}\}$, $N_{02}=\{\text{较好}\}$, $N_{03}=\{\text{一般}\}$, $N_{04}=\{\text{差}\}$, 则 N_{01} 、 N_{02} 、 N_{03} 、 N_{04} R_P , 对任何 $R_i < R_c$, 判断 R_i 属于 N_{01} 或 N_{02} 、 N_{03} 、 N_{04} , 并计算隶属程度。本文对生态环境质量等级标准的确定, 是根据国家、行业及国

际相关标准、省域生态环境背景值、类比标准及生态效应程度等; 社会经济方面的等级标准参照全国平均水平、全省平均水平、发达地区水平、国际通行标准等^[12]。据此建立生态环境质量评价的经典域物元的评价标准(表 1)。

2.2.3 计算矩与关联函数

若矩 $\rho(x_j, X_{ij})$ 和 $\rho(x_j, X_{pj})$ 分别指实数轴上点 x_j 与区间 $X_{ij}=[a_{ij}, b_{ij}]$ 和 $X_{pj}=[a_{pj}, b_{pj}]$ 之间的距离, 则其计

表 1 生态环境质量经典物元分级标准
Tab. 1 Classified standards of matter elements

项目 Item	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}
良好 N_{01}	10 000	1.20	10 000	10	60	1 000	10	20	90	90	0.5	10	1	1
较好 N_{02}	5 000	0.08	8 000	6	45	2 500	100	100	80	80	1.0	30	2	2
一般 N_{03}	3 500	0.05	4 500	4	30	5 000	500	500	60	60	3.0	50	3	5
差 N_{04}	1 000	0.03	3 000	2	15	15 000	1 000	1 000	50	50	8.0	100	5	20

算公式可表达为:

$$\begin{cases} \rho(x_j, X_{ij}) = \left| x_j - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \\ \rho(x_j, X_{pj}) = \left| x_j - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\rho(x_j, X_{ij})$ 和 $\rho(x_j, X_{pj})$ 分别为距离; a_{ij} 和 b_{ij} 为区间 X_{ij} 的上下限值; a_{pj} 和 b_{pj} 为区间 X_{pj} 的上下限值。

关联函数 $k(x)$ 表示被评价单元与某标准的隶属程度的函数, 关联函数的数值代表关联度。关联函数的选取应当根据生态环境的特征, 由可拓集合的方法确定, 关联度可用关联函数 $k_i(x_j)$ 表示:

$$k_i(x_j) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_j, X_{ij})}{|X_{ij}|} & (x_j \in X_{ij}) \\ \frac{\rho(x_j, X_{ij})}{\rho(x_j, X_{pi}) - \rho(x_j, X_{ij})} & (x_j \notin X_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

2.2.4 计算权系数

在生态环境质量物元评价中, 考虑到各特征指标对整体物元的贡献程度不同, 应根据其作用大小分别赋予不同的权值。权值的计算方法可根据实际情况选取, 不同的评价目的及评价因子按不同的公式进行计算。为计算简便, 这里采用门限法进行计算^[13]。如果对于评价等级 $N_i(i=1, 2, \dots, m)$ 的门限值为 $X_{ji}(j=1, 2, \dots, n)$, 则权系数 w_{ij} 可采用下式计算:

$$w_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

由于各评价指标的量化值所在的区间不完全相同, 有的评价指标是以数值越小级别越高, 而有的则相反, 故对各评价指标和评价标准分别按照下式进行归一化处理:

$$\begin{cases} d_i = x_i / \max(x_i) & (\text{对于越大越优型}) \\ d_i = \min(x_i) / x_i & (\text{对于越小越优型}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, d_i 、 x_i 、 $\max(x_i)$ 、 $\min(x_i)$ 分别为归一化后的标准值、未归一化的标准值、各分级的最大门限值和最小门限值。根据式(4)得到江西省生态环境质量特征指标的各个权系数矩阵(表 2)。

2.2.5 计算综合关联度及质量评价等级评定

综合关联度 $K_j(p)$ 是关联度与权系数的乘积, 即:

$$K_j(p) = \sum_{j=1}^n w_j k_j(x_j) \quad (6)$$

式中, $K_j(p)$ 为待评价单元 p 关于 j 等级的综合关联度。综合关联度以等级来充分考虑隶属关系以及某因子对整个生态环境质量物元评价时的影响程度, 因此其评价更客观、准确。若 $k_j = \max[k_j(p)]$, 则待评价单元 p 属于等级 j , 即可确定被评价对象的生态环境质量物元的最终等级。

收集 2000~2005 年间江西省 11 个地区的上述 14 个特征指标数据, 利用建立的生态环境质量物元评价模型, 分别计算近 6 年来各地区的生态环境质量物元的综合关联度得分并进行等级划分(表 3)。由表 3 可知, 各地区生态环境综合质量演化状况存在持续好转、保持不变和呈波动态势 3 种情况: 生态环境趋向更好的地区有南昌、景德镇和抚州, 这 3 个地区滨临鄱阳湖, 其生态环境本底条件较好, 再加上环境投入力度较大, 其生态环境质量由“较好”变为“良好”; 基本保持不变的地区有萍乡、九江、赣州、宜春和上饶, 尽管这些地区生态环境本底条件不够理想, 但在经济发展中注意了环境保护与技术进步, 故生态环境状况无太大改变; 生态环境综

江西省各个地区生态环境质量状态变化看成是一个平稳的马尔科夫过程。同时,为减少随机误差,增加一步转移矩阵计算的可信度和准确性,将这 5 个年段的状态转移概率矩阵求平均,得到状态转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.40 & 0 & 0 \\ 0.224 & 0.743 & 0.033 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.60 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3.3 进行马尔科夫预测

根据马尔科夫随机过程理论,可利用初始状态概率矩阵模拟某一初始年后若干年乃至稳定时期的各种生态环境质量类型所占面积比重。设第 k 年各种生态环境质量类型所占面积比重的状态为 $\lambda^k = (\lambda^{k_1}, \lambda^{k_2}, \lambda^{k_3}, \lambda^{k_4})$, 那么 $\lambda^0 = (\lambda^{0_1}, \lambda^{0_2}, \lambda^{0_3}, \lambda^{0_4}) = (0.387, 0.568, 0.003, 0.021)$ (2000~2005 年 6 年平均的各种生态环境质量类型所占面积比重), 则第 k 年各种生态环境质量类型所占面积比重的状态, 可根据 k 步转移矩阵得到^[14]:

$$\lambda^k = \lambda^0 \cdot P^k \quad (8)$$

在 Matlab 软件支持下, 模拟 5 年和 10 年后江西省各种生态环境质量类型所占面积比重分别是 $\lambda^5 = (0.345, 0.583, 0.034, 0.013)$ 和 $\lambda^{10} = (0.334, 0.588, 0.048, 0.009)$ 。可见, 按目前变化, 江西省 5 年后各种生态质量类型所占面积比重的状态为 0.345 : 0.583 : 0.034 : 0.013, 而 10 年后为 0.334 : 0.588 : 0.048 : 0.009。可以推测, 江西省经 5~10 年的发展, 其大多数地区的生态环境质量将从“良好”、“差”两个等级向“较好”、“一般”转移, 特别是生态环境质量“较好”的地区所占面积的增长比重较大。可见, 按现有的治理模式, 江西省生态环境综合质量整体上还是向“较好”方向演进。

3 结论与讨论

可拓物元模型动态评价表明, 2000~2005 年间江西省生态环境质量整体上转好, 但 11 个地区生态环境质量演化状况存在一定差异, 生态环境质量趋向更好的地区有南昌、景德镇和抚州, 基本保持不变的地区有萍乡、九江、赣州、宜春和上饶, 生态环境质量呈现波动的地区有新余和吉安, 而生态环境质量持续改善的是鹰潭市。可见, 生态环境质量不仅与地区环境本底质量有关, 还与地区的产业结构和环境保护方式等因素有关。马尔科夫预测表明, 江西省经 5~10 年的发展, 其大多数地区的生态环境质量将从“良好”、“差”两个等级向“较好”和“一般”两个等级转移, 特别是生态环境质量“较好”

的地区所占面积比重的增长较快。可见, 江西省生态环境质量在整体上还是向“较好”方向演进。

基于可拓物元法的马尔科夫预测方法, 可一定程度上对省域生态环境质量进行动态评价和趋势预测。但由于可拓物元方法和马尔科夫概率模型本身的限制, 使本文的研究存在进一步改进的方向: 一是利用可拓物元法对生态环境经典域确定时缺乏统一标准, 这影响到该方法的普遍推广性; 二是利用马尔科夫链预测省域生态环境质量演变趋势时, 其转移概率计算是马尔科夫过程的“无后效性”和“平稳性”的假设, 这是模型应用的基础。当然, 由于生态环境系统本身的复杂性和动态性, 实际的省域生态环境质量的演变会受到更多因素的作用, “无后效性”和“平稳性”的假设只能是相对而言的, 具体应用中还有待识别。

参考文献

- [1] 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1031-1034
- [2] 万本太, 张建辉, 董贵华, 等. 中国生态环境质量评价研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 22-24
- [3] 付哲, 周云轩, 刘殿伟, 等. 生态环境质量的空间模糊综合评价研究——以吉林省西部为例[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 97-102
- [4] 李茜, 任志远. 区域土地生态环境安全评价——以宁夏回族自治区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(5): 75-79
- [5] 段沛霞, 倪长健. 投影寻踪动态聚类方法及其在四川省生态环境质量评价中的应用[J]. 成都信息工程学院学报, 2007, 22(1): 113-115
- [6] 刘耀彬, 李仁东. 江苏省未来城市化进程中资源环境效应的多情景模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 61-64
- [7] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 163-188
- [8] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 21-30, 161-202
- [9] 王明全, 王金达, 刘景双, 等. 基于物元模型的吉林省西部生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 291-295
- [10] 段显明, 林萍, 周凌, 等. 江西省生态环境现状浅析[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 175-176
- [11] 中国科学院可持续发展研究组. 2002 中国可持续发展战略报告[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 235-236
- [12] 李凡修, 梅平, 陈武. 区域生态环境质量的集对评价模型及应用[J]. 环境工程, 2006, 24(3): 77-78, 89
- [13] 门宝辉, 梁川. 城市环境质量综合评价物元模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003 (3): 134-139
- [14] 肖振宇, 王焯. 中国各地区人均 GDP 的马尔可夫预测及变动分析[J]. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2004, 4(4): 70-74