

文章编号: 1004-4574(2008)06-0129-05

# 马来西亚雪兰莪州生态环境脆弱度评价 ——基于逐次投影寻踪模型的研究

史晓霞<sup>1,2</sup>, 李京<sup>1,2</sup>, 刘家福<sup>1,2</sup>, 王静<sup>3,4</sup>

(1. 北京师范大学资源学院 北京 100875; 2 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875 3 东北师范大学城市与环境科学学院 吉林 长春 130024 4. 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024)

**摘要:** 以马来西亚雪兰莪州为例, 利用逐次投影寻踪模型进行了生态环境脆弱度评价。在评价过程中, 评价指标中加入了基于遥感的表征指标, 并且通过逐次投影寻踪模型确定指标权重。结果表明, 该地区的生态环境脆弱度不断加重, 生态环境逐渐恶化; 加入遥感表征指标, 并基于逐次投影寻踪模型进行的生态环境脆弱度评价能, 更好地反映研究区的生态环境脆弱度态势。

**关键词:** 逐次投影寻踪; 生态环境; 脆弱度

**中图分类号:** X171.1      **文献标识码:** A

## Eco-environment vulnerability evaluation based on successive projection pursuit model: a case study of Selangor, Malaysia

SHI Xiaoxia<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, LIU Jiafu<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>3,4</sup>

(1. College of Resources Science and Technology Beijing Normal University, Beijing 100875, China 2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875, China 3 College of Urban and Environmental Sciences Northeast Normal University, Changchun 130024, China 4 Key Laboratory for Wetland Ecology and Vegetation Restoration of National Environmental Protection (Northeast Normal University), Changchun 130024, China)

**Abstract** In this paper, remote sensing image and statistical data were used to evaluate eco-environment. In this process, some indexes of remote sensing which can reflect ecology environment well were added to evaluation index system and successive projection pursuit method was used to determine index weight. Through the evaluation of eco-environment vulnerability in Selangor, Malaysia, it indicates that the eco-environment vulnerability in this region is aggravating and the ecology environment is worse than before. The eco-environment evaluation method of adding remote sensing indexes and using successive projection pursuit to get the weight is valid.

**Key words** successive projection pursuit; eco-environment; vulnerability

生态环境脆弱性是生态系统在特定时空尺度相对于外界干扰所具有的敏感反应和自恢复能力, 是自然属性和人类经济行为共同作用的结果。无论其成因、内部环境结构、外在表现形式和脆弱度如何, 只要它在外界的干扰下易于向环境恶化的方向发展, 就都应该视为脆弱生态环境<sup>[1]</sup>。脆弱生态环境的研究属于宏观范畴, 在生态环境脆弱度评价中, 建立合理的评价指标体系成为国内外的研究重点。在众多研究中, 其所选用的指标涉及脆弱生态环境成因和表现特征的各个方面, 如地质、地貌、气候、水文、植被、土壤、灌溉、垦殖、

收稿日期: 2008-05-15 修订日期: 2008-08-16

基金项目: 国际科技合作计划项目 (2007DFA20640); 国家科技支撑计划项目 (2006B1J09B03, 2006BAJ09B06, 2006BAJ05A01); 国家科技与对发展中国家援助项目。

作者简介: 史晓霞 (1978-), 女, 博士研究生, 主要从事遥感与GIS地学应用模型研究; 通讯作者: 李京, E-mail: lijing@ires.cn

资源、工农业现代化水平、人均 GNP、恩格尔系数、人口素质等,多的可达几十个<sup>[2-4]</sup>。综合来看,关于目前的评价指标存在两方面问题:一是为追求评价指标体系的完备性而不断提出新的指标,使指标种类和数目过多,导致实际评价工作困难;二是缺乏科学有效的定量筛选方法<sup>[5-7]</sup>。

生态环境的脆弱度评价是一种基于宏观环境数据的研究,传统方法获取宏观数据较为困难,遥感技术的宏观数据获取特性为生态环境的脆弱度评价提供了强大的数据保证,可适时更新脆弱性指标,实现对环境脆弱因子的实时变化分析。因此,在现有的评价指标中加入遥感指数指标成为必要的研究手段,而通过更加科学有效的方法筛选出起主导作用的评价指标,并确定其权重,是目前生态环境脆弱度评价研究的主要方向。

## 1 研究区概况及评价指标的选取

### 1.1 研究区概况及数据

研究区包括马来西亚雪兰莪州及所包含的首都吉隆坡、行政首都 Putrajaya。该研究区位于赤道附近的马来半岛西南沿海,西北、正北、东北三面为丘陵和山脉,巴生河及其支流鹅麦河在市内汇合后,从西南流入马六甲海峡。气候属赤道热带雨林气候,终年高温多雨,年平均气温 25~30℃;降雨量丰富,年平均降雨量为 2000~2500mm;其中降雨较集中的月份在 3-4 月份和 9-11 月份。研究区域昼间日照充足,气温较高,但傍晚和夜间相对凉爽,也时常会遭到突如其来的暴风雨的袭击。该区的经济作物以油棕树、橡胶树等为主<sup>[5-7]</sup>。

随着经济的发展,研究区建城区不断扩展。首都吉隆坡与其周围属于雪兰莪州的居民地连成一体,作为一个建城区整体发展。雪兰莪州的州政府所在地 Shah Alam 也在经济刺激下不断发展,与吉隆坡充分连接。同时,位于吉隆坡与 Shah Alam 之间的重要县政府所在地 Pataing 的经济吸引力也日益突出。1994 年后,吉隆坡飞机场 (KL Air) 投入使用带动了吉隆坡南部的城市发展;1996 年后,由政策决定的行政首都 Putrajaya 开始修建,Putrajaya 的修建与发展,进一步带动了吉隆坡南部的城市发展,并与飞机场一起促进了整个研究区的中部扩展。

本研究所使用数据包括了空间数据和社会经济数据。空间数据包括 1990, 1991, 1994 和 1998 年的 Landsat TM /ETM 影像;社会经济数据主要来自马来西亚统计局做出的“大马计划”,包括基本的社会经济指标。

### 1.2 评价指标的选取

脆弱生态环境的成因及表现特征多种多样,主导因子有所不同,因此不同学者针对不同研究区采用不同的指标体系。本研究为了精简指标体系,更好的反映出研究区的生态环境脆弱度,克服地区间缺乏可比性,选取了具有表现特征的主要传统指标和遥感表征指标。其中,传统指标包括了空间数据指标和社会经济指标。具体包括:

(1)空间数据指标:水域比率、建城区面积、城市绿化率、道路建成长度;

(2)社会经济指标:人均 GDP、人均 GDP 年增长率、平均每月买房支出、买房支出增长率、自来水覆盖率、固体废物、人口数量、人口增长率、城市人口当年增长率、接受过教育率、婴儿死亡率、失业率、贫穷率;

(3)遥感表征指标:城市亮温、地表植被覆盖度、光学植被盖度、叶面积指数、生物量、多样性指数。

根据研究区统计资料及遥感影像所得到的研究区各期指标数据见表 1。

## 2 基于逐次投影寻踪模型的指标权重的确定

### 2.1 投影寻踪模型

投影是从不同的角度去观测高维数据特性,寻踪就是寻找最能反映高维数据特性的最佳观察方向,即最优投影方向。投影降维是处理高维数据常用的有效手段,如陈晓剑等以评价样本与理想样本的夹角余弦作为样本综合评价的投影值,并以此值进行区域环境质量评价<sup>[8]</sup>。本文应用的投影寻踪 PP (projection pursuit) 是 Friedman 等提出的一种处理多因素复杂问题的统计方法,将高维数据向低维空间进行投影,通过投影数据在低维空间的散布结构来研究高维数据的特征<sup>[9]</sup>。投影寻踪模型就是通过构建投影指标寻找最优投影

方向向量, 然后再通过最优投影方向向量计算样本投影特征值, 从而依据投影特征值进行样本综合评价。投影寻踪模型是处理多因素综合评价的有效方法, 并得到广泛应用。

表 1 研究区生态环境脆弱度评价指标

Table 1 Assessment indices of eco-environment vulnerability in study area

指 标	年 份			
	1990	1991	1994	1998
水域比率 %	0.38	0.33	0.37	0.40
城市亮温	308.54	309.78	306.16	273.31
建成区面积 /km <sup>2</sup>	9392400	11843100	12624300	13029600
城市绿化率 %	0.35	0.38	0.33	0.31
植被盖度	0.56	0.60	0.57	0.67
光学植被盖度	0.11	0.12	0.12	0.11
叶面积指数	0.53	0.62	0.60	0.82
生物量	112.88	135.97	132.72	208.32
多样性	1.12	1.12	1.09	0.99
人口数 /人	2331400	2485272	3210000	4175000
人口增长率 %	6.60	6.00	5.40	5.00
城市人口当年增长率 %	5.50	6.00	6.10	7.00
自来水覆盖率 %	93.00	93.50	96.00	98.00
人均 GDP	6341.00	6810.00	8007.00	11093.00
人均 GDP 年增长率 %	7.70	7.40	6.50	5.00
失业率 %	2.90	2.50	1.90	1.90
平均每月买房支出 /元	1659.00	1854.00	3035.00	3702.00
买房支出增长率 %	12.10	11.75	11.20	4.00
贫穷率 %	2.50	2.20	2.00	1.00
婴儿死亡率 %	11.90	9.70	7.10	5.50
接受过教育率 %	90.60	92.10	96.80	98.20
道路建成长度 /km	7512.20	7749.50	8048.00	7871.30
固体废物 /t	778.00	806.00	909.00	1169.00

设第  $i$  个样本的第  $j$  个指标为  $r_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ),  $n$  为样本个数,  $m$  为指标个数, 建立生态环境脆弱度评价的投影寻踪模型步骤如下<sup>[9-12]</sup>:

### (1) 消除各指标值的量纲效应

如果评价指标与生态脆弱度成正相关:  $r_{ij} = r_{ij}^0 / r_{jmax}^0$ , 否则  $r_{ij} = 1 - r_{ij}^0 / r_{jmax}^0$ 。其中,  $r_{ij}^0$  为数据无量纲化处理前  $j$  指标值;  $r_{jmax}^0$  为数据无量纲化处理前  $j$  指标样本最大值。

### (2) 线性投影

设  $p$  为  $m$  为单位投影方向向量, 则  $r_{ij}^0$  在一维线性空间的投影特征值  $z_i$  可描述为

$$z_i = \sum_{j=1}^m p_j r_{ij}^0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

### (3) 构造投影指标

依据分类指标构造投影指标  $Q$  为

$$Q = s(p) \cdot d(p) \quad (2)$$

其中, 类间距离用样本序列的投影特征值方差来计算。即,

$$s(p) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 / n} \quad (3)$$

式中,  $\bar{z}$  为投影特征值均值,  $s(p)$  越大则类间散布越开。

类内密度用投影特征值的两两距离  $d_{ij} = |z_i - z_k| (k = 1, 2, \dots, n)$ 来定义, 即

$$d(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (D - d_{ij})f(D - d_{ik}) \tag{4}$$

式中,  $D$  为估计局部散点密度的宽度指标;  $f(D - d_{ik})$ 为阶跃函数。

#### (4) 优化投影方向

以投影指标  $Q$  作为优化投影方向的依据, 当其取得最大值时, 所对应的投影方向向量  $\mathbf{p}$  即为最优投影方向:

$$\begin{cases} \max Q \\ \|\mathbf{p}\| = 1 \end{cases} \tag{5}$$

对于该研究区, 使用常用的投影寻踪法对指标数据进行分析, 得到各变量的权分别为

$\mathbf{P} = \{ 0.0000, 0.0000, 1.4627E-9, 5.1849E-9, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.8395E-9, 0.0641, 0.0003, 0.1540, 0.0002, 0.0423, 0.0002, 0.2819, 0.2451, 0.0002, 0.6205, 0.5182, 0.4078, 0.0980, 0.0383, 0.0002 \}$ ;

投影值标准差为 0.5100, 目标函数  $Q = 0.1040$ 。

### 2.2 逐次投影寻踪模型

经典的投影寻踪 PP方法是通过寻求最佳投影矩阵对指标集数据进行投影变换。为了更大的承载指标集信息, 应用逐次投影寻踪 SPP (successive projection pursuit) 方法确定指标权重。

$R_n$  是  $n$  维欧氏空间, 数据点集和  $X = \{ X_i; X_i \in R_n, 1 \leq i \leq Q \}$ ,  $Q$  为数据点个数 (下文中数据点的列矩阵形式也记为  $X$ ), 向量  $a$  为投影方向 ( $a \in R_n$ )。  $Y_i = a^T X_i$  为沿  $a$  方向的投影变换, 集合  $Y = \{ Y_i; i \leq Q \}$ 。  $J = H(Y)$  为投影指标 PI (projection index),  $H(Y)$  根据具体应用进行定义, 用来评估  $Y$  结构性能的指标。投影寻踪的过程就是依据投影指标, 找到最优的投影变换  $a_0$ 。对于  $m (m < n)$  个投影方向, 则存在投影变换矩阵  $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ , 利用  $Y = a^T X$  可以实现从  $n$  维空间到  $m$  维空间的降维变换。相应的投影变换指标可写为

$$J = H(Y) = H(A^T X) \tag{6}$$

由于矩阵  $A$  的显式比较困难, 常见的投影寻踪算法是围绕着式 (6) 的最优化问题, 在大量指标数据点集  $X$  中, 寻求一组正交  $n$  维向量, 构成一个最佳投影矩阵  $A_k$ :

$$K = \arg \max_k H(A_k^T X) \tag{7}$$

通过对指标数据的多次一维投影, 逐步选取各指标的权重, 逐步筛选出有效成分, 以构建一个承载更多信息的正交空间。采用正交方案的设计, 即确保要选出的投影方向与当前已产生的方向是正交的; 再对 PI 指标定义, 依据其选出最利于各处区分的投影方向, 对于是否终止投影具有判据作用。

对标准化后的数据集  $\bar{X}$ , 逐次投影寻踪算法首先选择出初始的第一投影方向  $A_1$ ; 然后在所有与  $A_1$  垂直的方向中, 选择出第二投影方向  $A_2$ ; 随后, 固定  $A_1$  与  $A_2$ , 在与  $A_1$  和  $A_2$  都正交的方向中去选择  $A_3$ ; 依次类推, 直到选出足够的投影方向。

运用逐次投影寻踪法对试验区的数据进行了分析, 并设局部密度控制参数为 0.2。得到如下各变量的权结果:

$\mathbf{P} = \{ 0.0649, 0.0000, 0.1507, 0.0002, 0.1320, 0.0164, 0.1050, 0.5550, 0.0002, 0.4190, 0.0002, 0.0537, 0.1610, 0.3569, 0.0002, 0.0003, 0.2677, 0.0002, 0.0002, 0.0002, 0.0243, 0.0221, 0.4815 \}$ ;

投影值标准差为 0.4453, 目标函数  $Q = 0.7586$ 。

通过比较可以看出, 常用的投影寻踪方法目标函数  $Q$  值明显小于逐次投影寻踪法的目标函数  $Q$  值, 且常用的投影寻踪法出现很多 0 值, 使得很多的指标对最后的评价结果不起作用。因此, 逐次投影寻踪法明显比传统的投影寻踪方法效果好。

### 3 生态环境脆弱度评价

建立了指标体系, 并给各指标赋权重后, 可根据如下公式求得生态环境脆弱度<sup>[13]</sup>:

$$G = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n r_i \cdot p_i}{(\max \sum_{i=1}^n r_i \cdot p_i + \min \sum_{i=1}^n r_i \cdot p_i)} \quad (8)$$

式中,  $r_i$  为各指标初值化之值,  $p_i$  为各指标权重。

采用式(8)计算出试验区内 1990、1991、1994年和 1998年的城市扩展下生态环境脆弱度(表 2)。

表 2 研究区各期生态环境脆弱度

Table 2 Eco-environment vulnerability in different periods in study area

年份	1990	1991	1994	1998
脆弱度	0.3918	0.46279	0.53184	0.6082

根据中国科学院地理研究所专家的研究结果, 生态环境脆弱度划分标准见表 3。

表 3 生态环境脆弱度分级标准

Table 3 Standard of eco-environment vulnerability in different classes

类别	极强度	强度	中度	轻度
标准	$G > 0.65$	$0.65 \geq G > 0.5$	$0.5 \geq G > 0.4$	$G < 0.4$

生态环境脆弱度数据以及生态环境脆弱度划分等级表明, 雪兰莪州的生态环境脆弱度随时间推进不断增大, 由 1990年的轻度脆弱(0.3918)发展到 1998年的强度脆弱(0.6082)。这表明, 随着该州城市化的不断发展, 经济的不断提高, 特别是城市区域的不断扩展, 城市周围的生态环境不断恶化, 造成了生态环境脆弱度的不断增大。

### 4 结论

加入遥感指数的评价指标体系, 能更好的反映出研究区的生态环境脆弱度状况, 而基于逐次投影寻踪模型的评价指标的权重确定, 则能更好的体现出主导影响指标对生态环境脆弱度的影响。基于逐次投影寻踪模型的雪兰莪州生态环境脆弱度评价表明, 该区的生态环境呈现不断恶化趋势。

### 参考文献:

- [1] 蔡海生, 陈美球, 赵小敏. 脆弱生态环境脆弱度评价研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2003, 2(25): 270-275.
- [2] 张超, 杨秉庚. 计量地理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 145-159.
- [3] Diaochengtai. A synthetic evaluation about the catastrophe-bility of urban geomorphic environment in Chongqing[J]. Journal of southwest China Normal University(natural Science), 1995, 20(4): 440-444.
- [4] 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 92-110.
- [5] 冷疏影, 刘燕华. 中国脆弱生态区可持续发展指标体系框架设计[J]. 中国人口资源环境, 1992(2): 40-45.
- [6] 袁兴中, 刘红. 生态系统健康评价——概念构架与指标选择[J]. 应用生态学报, 2001(4): 627-629.
- [7] 朱德明, 梁音. 我国脆弱生态环境的评估与保护[J]. 水土保持, 2002(1): 6-10.
- [8] 陈晓剑, 吴亚开. 区域生态环境的评价方法及应用[J]. 运筹与管理, 2002, 6(11): 83-88.
- [9] Friedman JH, Tukey JW. A projection pursuit regression algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Trans Computers C-23, 1974: 881-889.
- [10] 王顺久, 李跃清. 投影寻踪模型在区域生态环境质量评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 869-872.
- [11] 王顺久, 张欣莉, 侯玉, 等. 洪水灾情投影寻踪评估模型[J]. 水文, 2002, 22(4): 1-4.
- [12] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 104-110.
- [13] 蔡海生, 陈美球, 赵小敏. 脆弱生态环境脆弱度研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2003, 2(25): 270-275.