

基于投影寻踪的城市生态系统健康评价

陈广洲^{1,2}, 汪家权^{1,*}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽, 合肥 230009; 2. 安徽建筑工业学院 环境工程系, 安徽 合肥 230022)

摘要:掌握城市生态系统的健康水平,对城市实施可持续发展具有重要意义。采用一种新型的多指标数据处理方法-投影寻踪模型,选取典型指标,利用基于实数编码遗传算法优化求取最佳投影方向,对广州市 2000 年、2005 年的城市生态系统健康状况进行评价。评价结果表明:2000 年,广州市对应的等级值为 2.95,处于亚健康状态,符合其客观状况,该结果与采用模糊综合评价法所得结论一致;2005 年,广州市对应的等级值为 3.48,仍处于亚健康状态,但其等级值大于 2000 年的数值,等级值在增大,表明经过 5a 的建设,广州市的生态系统健康状况在不断好转。此外,与模糊综合评价法相比,该模型能精确地刻画出生态系统的具体健康水平,具有较高的评价精度和区分度。

关键词:城市生态系统;健康评价;投影寻踪模型

文章编号:1000-0933(2009)09-4918-06 中图分类号:Q14,X21,X24 文献标识码:A

Health assessment of urban ecosystem based on a projection pursuit model

CHEN Guang-Zhou^{1,2}, WANG Jia-Quan^{1,*}

1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, 230009, China

2 Department of Environmental Engineering, Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei, Anhui, 230022, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4918 ~ 4923.

Abstract: Assessments and understanding of urban ecosystem health status are of great importance to the sustainable urban development. A health assessment of urban ecosystem was conducted in Guangzhou City in 2000 and 2005 by using a novel multi-indicator data processing method, projection pursuit model, in which the optimal projection direction was obtained based on real-coded genetic algorithm. Results predicted that the grade value of Guangzhou City in 2000 was in a sub-health status, which was in agreement with the real world data. In addition, output from the model is consistent with that obtained from the fuzzy assessment method. The grade value of Guangzhou City in 2005 was also determined as “sub-healthy” based on the actual monitoring data; whereas the model grade value for 2005 was larger than that for 2000. The increased value indicates a continuous improvement of ecosystem health in Guangzhou city during the past five years of efforts. Compared with the fuzzy assessment method, the model was able to accurately assess and project the health status of an ecosystem with higher precision.

Key Words: urban ecosystem; health assessment; projection pursuit model

生态系统为人类提供了自然资源和生存环境的服务功能,是人类赖以生存和发展的基础。随着社会经济的快速发展,人类的诸多行为导致了生态系统的结构和功能恶化,出现不健康的状态,并且威胁到人类的生存和发展。因此,综合自然、社会、经济等各方面的因素确定生态系统的健康状态,进行生态系统健康评价研究,就显得尤为重要。生态系统健康的概念自提出以来,引起了众多学者的关注^[1~4]。他们的研究主要集中在对

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40672154)

收稿日期:2008-05-30; 修订日期:2009-04-08

致谢:感谢美国怀俄明大学金松博士、安徽建筑工业学院任静明老师对本文写作的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Jiaquanwang@163.com.

生态系统健康概念的探讨和生态系统健康评价指标体系的建立和选择方面。

1 城市生态系统健康评价

随着国内外生态城市建设的兴起,对城市生态环境问题、生态城市规划理论和城市生态系统健康的评价引起了学术界、城市管理职能部门的广泛重视。将生态系统健康的概念扩展到城市生态系统^[5]:健康的城市生态系统不仅意味着提供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,也应包括城市人群的健康和社会的健康。城市生态系统的健康是可持续发展的必要条件。因此,了解城市生态系统的健康状况,找出其主要影响因子和限制因子,提出维护和保持城市生态系统健康状态的管理措施,是实现城市可持续发展必须要解决的问题。

目前常用的生态系统健康评价方法包括指示物种法、生态风险评价法、指标体系综合评价法等。鉴于指标体系能反映出生态系统健康要求的较多方面,因此较常用的评价方法是选择适宜的、有代表性的指标体系,通过对指标体系的评价来反映生态系统健康状况。但关于指标体系的选取,目前还没有统一的标准。

在城市生态系统健康定量化的评价中,涌现出了一系列方法。常用的评价方法有模糊综合评价法^[6]、层次分析法^[7]、物元可拓模型^[8]、费用-分析法^[9]、基于熵权的模糊综合评价法^[10]、距离指数-协调指数评价法^[11]、因子分析-模糊评价^[12]、集对分析法^[13]、能值分析法^[14]、突变级数法^[15]。上述方法在实际应用中取得了一定的研究成果,但在上述文献中主要是应用某一种评价方法进行评价,缺少对不同评价方法应用于同一样本的评价效果的比较问题。此外,面对上述的复杂多指标体系,如何合理、科学地确定指标权重,也是值得进一步研究的问题。

基于此,针对在生态系统健康评价中,系统具有多变量和权重难以确定的情况,本文采用一种新型的多指标数据降维处理方法-投影寻踪模型,对城市生态系统的健康状况进行了实例研究。

2 投影寻踪模型

投影寻踪方法最早出现于 20 世纪 60 年代末,Kruscal^[16]首先使用投影寻踪方法,把高维数据投影到低维空间,通过计算,极大化一个反映数据聚集程度的指标,从而找到反映数据结构特征的最优投影方向。它是用来分析和处理高维观测数据,尤其是对于非线性、非正态高维数据的一种新型统计方法。目前已广泛地应用于评价、预测、模式识别、遥感分类、图像处理等领域^[17]。

设投影寻踪问题的多指标样本集为 $\{x(i,j) | i=1,\dots,m; j=1,\dots,n\}$,其中, m 是样本的个数, n 为指标个数。建立投影寻踪模型的步骤如下:

(1) 数据预处理

样本评价指标集的归一化处理,消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围。

对于越大越优的指标

$$x^*(i,j) = x(i,j)/x_{\max}(j) \quad (1)$$

对于越小越优的指标

$$x^*(i,j) = 1 - x(x,j)/x_{\max}(j) \quad (2)$$

式中, $x_{\max}(j)$ 为第 j 个指标的最大值。

(2) 构造投影指标函数^[17]

设 $a(j)$ 为投影方向向量,样本 i 在该方向上的投影值为:

$$Z(i) = \sum_{j=1}^n a(j) \times x^*(i,j) \quad (3)$$

即构造一个投影指标函数 $Q(a)$ 作为确定投影方向优化的依据,当指标达到极大值时,就认为是找到了最优投影方向。在优化投影值时,要求 $Z(i)$ 的分布特征应满足:投影点局部尽可能密集,在整体上尽可能散开。因此,投影指标函数为:

$$Q(a) = S_z D_z$$

式中, S_z 为类间散开度, 可用 $Z(i)$ 的标准差代替; D_z 为类内密集度, 可表示为 $Z(i)$ 的局部密度。其中:

$$S_z = \left\{ \sum_{i=1}^m [Z(i) - \bar{Z}]^2 / (m - 1) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (R - r_{ij}) \times I(R - r_{ij}) \quad (5)$$

式(4)中 $\bar{Z}$ 为序列 $\{Z(i) | i=1, \dots, m\}$ 的均值; 式(5)中 R 是由数据特征确定的局部宽度参数, 其值一般可取 $0.1 \times S_z$, 当点间距值 r_{ij} 小于或等于 R 时, 按类内计算, 否则按不同的类记; $r_{ij} = |Z(i) - Z(j)|$, 符号函数 $I(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数, 当 $R \geq r_{ij}$ 时函数值取 1, 否则取 0。

(3) 估计最佳投影方向

通过求解下面的优化模型来计算最佳投影方向:

目标函数 $\max Q(a)$; 约束条件 $\sum_{j=1}^n a_j^2 = 1$ 。

(4) 等级评价

得到近似最佳投影方向后, 计算各等级样本点的投影值, 建立等级评价方法, 并对待评价样本进行归一化处理, 计算其投影值, 按等级评价标准, 确定待评样本所属类别。

3 实例评价

3.1 城市生态系统健康评价的指标体系

由于城市生态系统是一个复杂的巨系统, 结合自然-社会-经济复合系统的特点, 据文献^[5], 选择系统活力、系统的组织结构、系统的恢复力、生态系统功能的维持、人群健康状况及受教育水平作为城市生态系统健康评价的五大要素。基尼系数因缺数据未能予以考虑, 详细的指标体系见表 1。

3.2 评价标准

城市生态系统健康评价指标确定后, 就需要明确各项指标的健康标准, 才能对城市生态系统的健康状况进行评价。针对不同的指标, 指标的标准确定的原则也不同。对于正向指标, 根据指标本身和客观物质条件的限制, 取它的极限值或目前现实状况所能达到的最高值为很健康的级别标准; 对于负向指标, 取理论和现实的最低值作为很健康的标准; 以全国最低值为病态的限定值, 在很健康和病态之间平均划分 3 个等级, 作为较健康、亚健康、不健康的标准, 其中单位 GDP 能耗指标, 考虑实际情况, 对区间范围略作了调整; 指标具体的分级标准和各标准的区间范围详见表 1^[5]。

3.3 投影寻踪评价模型的应用

3.3.1 评价模型的建立

进行投影寻踪评价分析, 实质是根据设计的投影指标, 并在相关约束条件下进行的优化问题。这是一个复杂的非线性优化问题, 用传统的优化方法难以解决, 本文采用基于实数编码的遗传算法来求解该优化问题。评价标准样本的建立: 采用上述评价标准, 对各级评价标准取区间范围的平均值, 对两端的情况取其端点值, 共构成五个评价标准样本, 样本维数为 22, 对其进行归一化处理, 采用 Matlab 语言, 编制相应的目标函数和约束条件函数^[18], 建立基于遗传算法的投影寻踪评价等级模型。经过优化计算, 得出的最佳向量为 $a = [0.2829, 0.2784, 0.2247, 0.2365, 0.2466, 0.2136, 0.2144, 0.2230, 0.2486, 0.1998, 0.1741, 0.2278, 0.2231, 0.2186, 0.1908, 0.2193, 0.1886, 0.2018, 0.1502, 0.0740, 0.1808, 0.1758]$; 对应的投影值为:

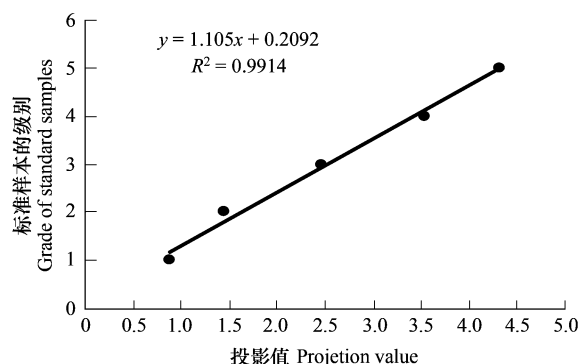


图 1 投影值与等级关系图

Fig. 1 Relationship of projection value and grade

0.8747, 1.4459, 2.4583, 3.5312, 4.3178。将病态、不健康、亚健康、较健康、很健康 5 个状态分别对应 1、2、3、4、5 级, 则得到标准样本的投影值散点图, 见图 1。根据各状态划分值及其对应的投影值 $z^*(i)$ 建立投影寻踪等级评价模型 $y=f(z)$, 然后将待评价样本进行归一化处理, 计算待评价样本的投影值, 根据此投影值计算对应的 y 值, 最后得出待评价样本的所属等级。

表 1 城市生态系统健康评价指标体系及分级标准

Table1 Indicators and classification standard of urban ecosystem health assessment

要素 Component	类别 Catalogue	原始指标 Ordinary indicators	病态 Illness	不健康 Unhealthy	亚健康 Sub-health	较健康 Healthier	很健康 Very healthy
I 活力	1 经济生产力	(1) 人均 GDP/(万元)	<0.8	0.8~1	1~5	5~15	>15
	2 物耗效率	(2) 单位 GDP 物耗(万元/万元)	>3	3~2	2~1	1~0.2	<0.2
	3 能耗效率	(3) 单位 GDP 能耗/(吨标准煤/万元)	>0.8	0.8~0.7	0.7~0.5	0.5~0.2	<0.2
II 组织结构	4 经济结构状态	(4) R&D 经费占 GDP 比重/%	<1	1~2	2~3	3~5	>5
		(5) 信息产业增加值占 GDP 比重/%	<5	5~10	10~20	20~25	>25
	5 社会结构状态	(6) 市区人口密度/(万人/km ²)	>4	4~2	2~1.5	1.5~1	<1
	6 自然结构状态	(7) 森林覆盖率(%)	<10	10~30	30~35	35~40	40~60
		(8) 建成区绿化覆盖率(%)	<10	10~20	20~30	30~40	40~60
III 恢复力		(9) 自然保护区覆盖率(%)	<1	1~4	4~6	6~8	8~12
	7 环境废物处理	(10) 城市生活污水处理率(%)	<30	30~50	50~70	70~90	90~100
	指数	(11) 机动车尾气排放达标率(%)	<40	40~60	60~80	80~95	95~100
		(12) 工业固废综合利用率(%)	<20	20~50	50~70	70~90	90~100
	8 物质循环利用率	(13) 工业用水重复利用率(%)	<20	20~40	40~60	60~80	>80
IV 服务功能	9 环保投资指数	(14) 环保投入占 GDP 比重(%)	<1	1~1.5	1.5~2	2~4	4~5
	10 环境质量状况	(15) 环境质量综合指数	20~40	40~60	60~80	80~90	90~100
		(16) 市区人均公共绿地(平方米/人)	3~5	5~8	8~12	12~16	>16
	11 生活便利程度	(17) 人均住房面积(平方米/人)	6~8	8~12	12~16	16~20	>20
		(18) 人均道路面积/(平方米/人)	5~8	8~12	12~16	16~22	>22
V 人群健康状况及教育水平	12 人群健康	(19) 恩格尔系数	>50	50~40	40~30	30~25	<25
		(20) 人均期望寿命(a)	<60	60~68	68~75	75~80	>80
		(21) 0~4 岁儿童死亡率(‰)	>20	20~15	15~10	10~8	<8
	13 文化水平	(22) 全市人口平均受教育年限(a)	<5	5~7	7~9	9~13	>13

I: energy, 1: economic productivity, (1): per capita GDP, 2: matter consumption efficiency, (2): matter consumption per 10000 GDP, 3: energy consumption efficiency, (3): energy consumption per 10000 GDP; II: organization structure, 4: status of economic structure, (4): percentage of R&D outlay in GDP; (5): proportion of added value of information industry in GDP; 5: status of social structure, (6): population density in city zone, 6: status of natural structure, (7): Coverage rate of forestry, (8): Coverage rate of urban green areas, (9): Coverage rate of natural reserves; III: recovery capacity, 7: treatment index of waster, (10): rate of Urban domestic waste water treated, (11): rate of vehicles tail air reaching the discharge standards, (12): Rate of Industrial Solid Wastes Utilized in a Comprehensive Way, 8: matter circle utilization, (13): Rate of reusing water by industry, 9: environmental protection investment index, (14): percentage of environmental protection invests to GDP; IV: service function, 10: status of environmental quality, (15): comprehensive index of environmental quality, (16): Per capita public green areas, 11: convenient degree of life, (17): Housing area per capita, (18): road area per capita; V: public health and educated level, 12: public health, (19): Engle coefficient, (20): Life Expectancy, (21): enfant death rate between 0 and 4 year, 13: cultural level, (22): average educated years

3.3.2 评价模型的应用

选取广州市 2000^① 年的上述指标, 根据最优投影向量, 计算得其投影值为 2.48, 对应的等级值为 2.95, 数值接近于等级 3, 据此判断广州市的生态健康水平处于亚健康状态, 这与文献^[6] 采用模糊综合评价法的评价

① 2000——3.45, 0.43, 0.87, 1.23, 7.24, 1.4, 41.2, 31.6, 8.29, 26.28, 82.04, 79.58, 26.5, 2.08, 80.82, 7.87, 14.83, 9.76, 42.6, 74.69, 11.82, 11.2.

结果一致,表明基于遗传算法的投影寻踪评价模型取得了较好的效果。同上,选取广州市 2005^① 年的上述指标,其中指标 GDP 物耗、市中心区人口密度、全市人口平均受教育年限由于未能采集到实际数据,采用规划值代替计算。2005 年计算的结果为 2.964,对应的等级值为 3.48,该值位于等级 3~4 之间,但略偏向于等级 3,据此判断广州市 2005 年的生态健康水平处于亚健康状态。虽然 2005 年广州市的生态健康水平仍处于亚健康状态,但与 2000 年的水平相比,投影值在逐渐增大,已十分接近较健康状态区间的下端,表明其生态健康水平经过 5a 的建设在逐步增强,比 2000 年有一个大的飞跃。与模糊综合评价法相比,该模型不仅能得出所属的评价等级,而且能精确地反映将康水平的具体数值大小,具有较高的评价精度。

此外,最佳投影方向各分量的大小实质上反映了各指标对系统健康评价分类的影响程度,绝对值越大则对应的指标对系统健康分类的影响程度越大。根据上述最佳投影方向,权重位于前五位的指标分别是:人均 GDP、单位 GDP 物耗、自然保护区覆盖率、信息产业占 GDP 比重、R&D 经费占 GDP 比重。因而,在制定城市的未来发展战略时,可以作为一定的参考依据,将上述指标作为未来重点提升的方向。

4 结论

(1) 针对城市生态系统健康评价中的指标数据呈非正态、非线性等特点,应用投影寻踪技术建立了城市生态系统健康评价等级模型。直接由样本数据驱动,求取最佳投影方向,把多维指标综合成一维指标,解决了一般综合评价方法中权重确定的难题,取得了较为满意的评价效果。

(2) 2000 年广州市的生态健康水平处于亚健康状态,与采用模糊综合评价法的结果是一致的;2005 年广州市的生态健康水平仍处于亚健康状态,但投影值不断增大,好于 2000 年的水平,且十分接近较健康状态区间的下端,表明经过 5a 的建设,广州市的生态健康水平在不断提高。此外,该投影模型具有较高的分类精度,即使对都属于亚健康状态的情况,也可以根据投影值排出它们的优劣关系。

(3) 根据各指标最佳投影分量的大小,可以明确对城市生态健康评价分类影响的重要指标,从而为未来提高城市生态功能和建设重点提供一定的参考依据。

(4) 鉴于城市生态系统健康评价的复杂性,综合指标的选取还没有统一的标准,为便于比较,本文参考已有文献中的指标体系。关于指标体系选取的全面性、科学性和典型性问题,有待深入研究。

References:

- [1] Pietro, Bertollo. Assessing ecosystem health in governed landscape: a framework for developing core indicators. *Ecosystem Health*, 1998, 4(1): 33—51.
- [2] Jerry M S, Mariano B, Annalee Y, *et al.* Developing Ecosystem Health Indicators in Centro Habana: A Community-based Approach. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 15—26.
- [3] Ma K M, Kong H M, Guan W B, *et al.* Ecosystem Health Assessment: Methods and Directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2106—2116.
- [4] Liu J J, Wang W X, Li C L. Study Evolution of Ecosystem Health. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(1): 41—44.
- [5] Yang Z F, He M C, Mao X Q, *et al.* Urban Ecological Sustainable Development Planning. Beijing: Science Press, 2004. 21—27.
- [6] Zhang G X, Yang Z F. Evaluation on the ecological sustainable development level of Guangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2101—2114.
- [7] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, 22(6): 525—529.
- [8] Dai X L, J K, L F, *et al.* Urban ecosystem health assess based on matter element model. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(2): 58—63.
- [9] Guo X R, Mao X Q, Yang J R, *et al.* Application of Cost-Ecosystem Health Effect Analysis in Eco-planning in Guangzhou City. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(5): 126—130.
- [10] Zhou W H, Wang R S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 12(25): 3244—3251.

① 2005——6.96, 0.40, 0.78, 1.65, 9, 1.3, 42, 36.38, 10.01, 40.2, 81.58, 91.23, 45, 2.5, 77.22, 11.32, 18.87, 13.49, 37.3, 77.21, 9.26, 12.5.

- [11] Hu T L, Yang Z F, He M C, *et al.* An urban ecosystem health assessment method and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25 (2):269—274.
- [12] Guan D J, Su W C. Study on evaluation method for urban ecosystem health and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26 (10): 1716—1722.
- [13] Su M R, Yang Z F, Wang H R, *et al.* A kind of method and its application for urban ecosystem health assessment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26 (12): 2072—2080.
- [14] Liu G Y, Yang Z F, He M C, *et al.* Energy-based urban ecosystem health assessment: a case study of Baotou city. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (4):1720—1728.
- [15] Wei T, Zhu X D, Li Y F. Ecosystem health assessment of Xiamen city: the catastrophe progression method. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (12): 6312—6320.
- [16] Kruscal J B. Linear transformation of multivariate data: Theory and Application in the Behavioral Sciences (I). New York and London Semimar Press, 1972.
- [17] Fu Q, Zhao X Y. Projection pursuit model-principles and its applications. Beijing: Science Press, 2006. 1—79.
- [18] Chen G Z, Xie H M, Lu X Y. Nonlinear Optimization Based on Genetic Algorithm Toolbox of Matlab. *Computer Technology and Development*, 2008, 18 (3): 246—248.

参考文献:

- [3] 马克明, 孔红梅, 关文彬. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, 21 (12): 2106~2116.
- [4] 刘建军, 王文熹, 李春来. 生态系统健康研究进展. *环境科学研究*, 2002, 15 (1): 41~44.
- [5] 杨志峰, 何孟常, 毛显强, 等. 城市生态可持续发展规划. 北京: 科学出版社, 2004. 1~27.
- [6] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, 2002, 22 (6): 525~529.
- [7] 张贵祥, 杨志峰. 广州市生态可持续发展水平对比评价. *生态学报*, 2003, 23 (10): 2101~2114.
- [8] 戴晓兰, 季奎, 吕方, 等. 基于物元模型的城市生态健康评价. *云南地理环境研究*, 2007, 19 (2): 58~63.
- [9] 郭秀锐, 毛显强, 杨居荣, 等. 生态系统健康效果——费用分析方法在广州城市生态规划中的应用. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15 (5): 126~130.
- [10] 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. *生态学报*, 2005, 12 (25): 3244~3251.
- [11] 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. *环境科学学报*, 2005, 25 (2): 270~273.
- [12] 官冬杰, 苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究. *环境科学学报*, 2006, 26 (10): 1716~1722.
- [13] 苏美蓉, 杨志峰, 王瑞红, 等. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用. *环境科学学报*, 2006, 26 (12): 2072~2080.
- [14] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等. 基于能值分析的城市生态系统健康评价——以包头市为例. *生态学报*, 2008, 28 (4): 1720~1728.
- [15] 魏婷, 朱晓东, 李杨帆. 基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价. *生态学报*, 2008, 28 (12): 6312~6320.
- [17] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用. 北京: 科学出版社, 2006. 1~79.
- [18] 陈广洲, 解华明, 鲁祥友. MATLAB 遗传算法工具箱在非线形优化中的应用. *计算机技术与发展*, 2008, 18 (3): 246~248.