

基于投影寻踪和粒子群优化算法的南宁市内河水水质综合评价研究

刘延明, 陆克芬, 方崇* (广西水利电力职业技术学院, 广西南宁 530023)

摘要 针对目前我国城市内河普遍遭到污染的问题, 在分析影响内河水水质因素的基础上, 选取 BOD₅ (五日生化需氧量)、COD_{cr} (化学需氧量)、石油类、挥发酚、NH₃-N (氨氮) 和总磷等 6 个主要因素作为评价因子, 建立了城市内河水水质评价的投影寻踪分析模型, 采用粒子群算法对该评价模型进行优化, 并将其应用于南宁市 10 条内河水质的评价与排序。研究表明: 用投影寻踪回归分析法进行水质评价, 避免了传统评价方法由于主观原因造成的误差, 方法简单、评价结果合理可信, 为我国城市内河水质的评价提供了新途径。

关键词 投影寻踪; 粒子群算法; 南宁市; 内河; 水质评价

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)26-12670-03

Study on Water Quality Evaluation of Nanning Inland River Based on Projection Pursuit and Particle Swarm Optimization

LIU Yan-ming et al (Guangxi Hydraulic and Electric Polytechnic, Nanning, Guangxi 530023)

Abstract Pollution problem is getting worse in China's urban river at present. BOD₅, COD_{cr}, petroleum, volatile phenol, NH₃-N and total phosphorus for the evaluation factor were selected by analyzing inland river water quality affecting factors, a water quality evaluation method was established, optimized its project direction used Particle Swarm Optimization, and the model was applied to Nanning inland river. The evaluation results were accurate, and some errors were eliminated because of the subjective factors for traditional methods. Projection Pursuit was a new evaluation method of urban inland river water quality, it was simple, reasonable, credible and has a wide application prospect.

Key words Projection pursuit; Particle Swarm Optimization; Nanning; Inland river; Water quality assessment

目前, 我国城市内河普遍遭到严重污染, 生态功能衰退并逐渐恶化^[1], 广西壮族自治区首府南宁市也不例外。南宁市主城区共有竹排冲、朝阳溪、心圩江和可利江等 13 条内河, 河道总长约 409 km, 并与流经市区的邕江构成南宁市主要生态水系, 涉及区域人口约 70 万人^[2]。近年来, 随着城市的发展和人口的不断增加, 内河沿岸的工业废水、生活污水及其他污染源通过人工排水系统和天然径流汇入城市内河, 造成河道环境每况愈下, 河床淤积严重, 防洪能力削弱, 严重恶化了城市内河水环境, 破坏了城市内河水体生态系统, 甚至使水生生物灭绝, 危害了整个城市的生活环境。因此, 整治内河是人民群众的迫切要求和愿望。而要制定城市内河综合整治方案, 实施“清水河道”工程, 首先必须分析城市内河水体污染成因, 对内河水水质进行综合评价。

我国城市内河水水质评价标准是以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 作为参考的^[3]。具体评价方法是: 通过对某内河水水质单项指标的计算后, 再同规范给出的单项指标分类界限相比较, 即可确定水质的类别归属。但是, 此种方法应用时经常会出现某个单项指标值接近或等于某个界限值, 或按不同的单项指标值判定, 则分属于不同的水质类别, 这使得该水源的水质类别难以确定。尽管国内外水质的评价指标和方法很多, 如模糊综合评价法^[4]、主成分分析法^[5]、层次分析法^[6]、灰色聚类法^[7]和神经网络评价法^[8]等多种综合评价模型。但由于城市内河受多种环境因素的影响, 因而正确评价内河水水质较为困难。目前还没有一种完全令人满意的综合评价方法, 探讨一种新的有效评价方法是很有必要的。笔者尝试将粒子群算法引入到投影方向优化计算中, 建立城市内河水水质的投影寻踪评价数学模型, 并在此基础上, 用 MATLAB 语言编制相应的计算程序。

1 投影寻踪回归分析的基本原理与实现步骤

投影寻踪 (Projection Pursuit, PP) 是国际统计界于 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种新的、有价值的高新技术, 是统计学、应用数学和计算机技术的交叉学科。投影寻踪回归是用来处理和分析高维数据的一种探索性数据分析方法, 其基本思想是: 利用计算机技术, 把高维数据通过某种组合投影到低维子空间上, 并通过极小化某个投影指标, 寻找出能反映原高维数据结构或特征的投影, 在低维空间上对数据结构进行分析, 以达到研究和分析高维数据的目的。该方法具有稳健性、抗干扰性和准确度高优点, 因而在许多领域得到广泛应用^[9]。

用投影寻踪探索高维数据的结构或特征时, 一般采用迭代模式。首先, 根据经验或猜想给定一个初始模型; 其次, 把数据投影到低维空间上, 找出数据与现有模型相差最大的投影, 表明在这个投影中含有现有模型中没有反映的结构; 最后, 把上述投影中所包含的结构, 在现有模型上得到改进了的新模型。从这个新模型出发, 重复以上步骤, 直到数据与模型在任何投影空间都没有明显的差别为止。根据给定的判别标准, 利用投影特征值对评价样本进行等级水平评价, 称为投影寻踪等级评价模型 (Projection Pursuit Grade Evaluation Model, PPE)。建立分析模型的步骤如下^[17, 18]:

设等级评价表中各指标值的样本集为 $\{x_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$, 其中 x_{ij} 是第 i 个样本的第 j 个指标值。

(1) 数据预处理。即对数据进行归一化处理, 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:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

对于越小越优的指标:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式中, $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值, x_{ij}^* 为指标值归一化处理后的序列。

基金项目 广西壮族自治区水利厅科技专项基金 (桂水科 No. 200806)。

作者简介 刘延明 (1962-), 男, 广西恭城人, 高级工程师, 从事农田水利工程、计算智能方面的研究。

致谢 在程序在编写和调试过程中, 得到程爱华博士的大力支持, 在此谨表感谢!

收稿日期 2009-06-30

(2)构造投影指标函数。把 m 维数据综合成某一方向的一维投影值,并要求投影值散布特征为:局部投影点尽可能密集,整体上各个点团之间尽可能散开。

用 m 维的单位向量 $a(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 表示某一投影方向,样本 i 在该方向上的投影值可表示为

$$z_j = \sum_{i=1}^m a_j x_{ij}^*, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

设 $S(a)$ 为投影值的标准差, $D(a)$ 为投影值的局部密度,则投影指标函数可以表示为

$$Q(a) = S(a)gD(a) \quad (4)$$

其中

$$S(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (5)$$

\bar{z} 为投影方向上投影值的平均值;

$$D(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik}) f(R - r_{ik}), r_{ik} = |z_i - z_k| \quad (6)$$

R 为局部密度的窗口半径,可取 $r_{\max} + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m$, 函数 f 为单位跃阶函数, $R - r_{ik} \geq 0$ 时,其值为 1, $R - r_{ik} \leq 0$ 时,其值为 0。

(3)估计最佳投影方向。 $Q(a)$ 值与投影方向 a 有关,当 $Q(a)$ 取最大值时, a 方向最能反映数据结构特征的方向。所以,可以通过求解投影指标函数优化问题来估计最佳投影方向 a^* , 即求解:

$$\begin{cases} \max Q(a) = S(a)gD(a) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a(j) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

可以利用粒子群算法来解决该优化问题。

(4)分类(优序排列)。把求得的最佳投影方向 a^* 代入公式(3),可得各样本点的投影值 $z^*(i)$ 。将 $z^*(i)$ 与 $z^*(j)$ 进行比较,二者越接近,表示样本 i 与 j 越倾向于分为同一类。若按 $z^*(i)$ 值从大到小排序,则可以将样本从优到劣进行排序。

投影寻踪评价分析法,其实质是根据设计的投影指标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,在优化该最佳投影方向时,传统的优化方法容易陷入局部最优、早熟或提前收敛,在收敛速度和计算精度等方面尚显不足,为此,必须寻求更高效的优化算法。

2 粒子群算法的基本原理与实现步骤

随着计算智能技术的发展,涌现了各种新的仿生智能算法^[10-12],另辟了求解优化问题的新途径,粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)便是其中之一。粒子群优化算法是一种基于集群智能的优化算法。该算法最早是由美国学者 Eberhart 和 Kennedy 博士于 1995 年提出的一种基于种群搜索的自适应进化计算技术,该算法最初受到飞鸟和鱼类集群活动的规律性启发,用组织社会行为代替了进化算法的自然选择机制^[13]。该算法可用于解决大量非线性、不可微和多峰值的复杂优化问题,并已广泛应用于科学和工程领域^[14-16]。

粒子群算法是基于进化计算和群智能的一种新兴算法,每个优化问题的解可看作搜索空间中的 1 个粒子,粒子的位置代表优化问题在搜索空间中的潜在解,粒子的速度决定他

们飞行的方向和距离,所有的粒子都有 1 个被优化的函数决定的适应值。

在粒子群算法中,优化问题的每个潜在解都是搜索空间中的 1 只“鸟”,称之为“粒子”。所有的粒子都有 1 个由优化目标函数决定的适应值,每个粒子还有 1 个速度,用以决定它们飞行的方向和距离。该算法初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己:第 1 个是粒子本身目前找到的最优位置,这个位置称为个体极值(pbest);另一个是整个粒子群目前找到的最优位置,这个位置称为全局极值(gbest)。粒子群算法寻找最优方向的实现步骤如下^[19-20]:

设 1 个 D 维搜索空间,其中有 1 个由 m 个粒子组成的粒子群。该粒子群中,第 i 个粒子的位置可用 1 个 D 维向量表示: $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 该粒子的速度用另一个维向量表示为: $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。记第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; 整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置 $G = (G_1, G_2, \dots, G_D)$ 。

粒子的飞行方向和移动距离由其速度决定,每个粒子在 n 维搜索空间飞行时,通过公式(8)更新自己的移动速度。

$$V_i^{n+1} = \omega V_i^n + c_1 \times r_1 \times (P_i^n - X_i^n) + c_2 \times r_2 \times (G^n - X_i^n) \quad (8)$$

式中, n 代表迭代的次数; V_i^{n+1} 为粒子的当前速度向量; V_i^n 为粒子的历史速度向量; X_i^n 为迭代 n 次时粒子 i 的空间位置; P_i^n, G^n 分别为微粒从初始到当前迭代次数搜索产生的个体极值和全局极值; r_1, r_2 是 $(0, 1)$ 区间服从均匀分布的随机数; ω 为惯性权重,一般在 $[0, 1]$ 之间取值,用于调节算法的全局与局部搜索能力之间的平衡。 c_1 和 c_2 为学习因子,常取相同的常数值,一般为 $c_1 = c_2 = 2$ 。粒子位置的更新由移动速度决定,更新公式如公式(9)所示。

$$X_i^{n+1} = X_i^n + V_i^{n+1} \quad (9)$$

式中, X_i^{n+1} 为粒子的当前位置向量。

通常情况下,粒子群体的规模取 20 ~ 40 个,并随问题规模的增大而增加。为了保证粒子群优化算法的收敛性,对每次迭代过程中粒子的速度做了限制, $V_i^n \in [-V_{\max}, V_{\max}]$ 。粒子群空间寻优过程见图 1。

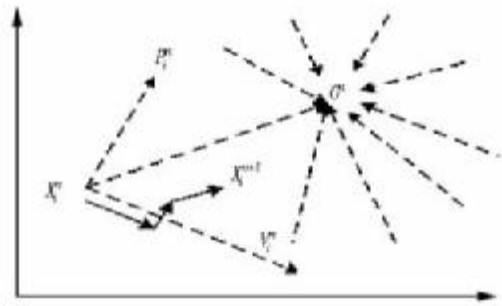


图 1 粒子群空间寻优过程

Fig. 1 The diagram of three-dimensional optimization process of particle swarm

3 南宁市内河水水质综合评价

笔者选取南宁市朝阳溪、二坑溪、亭子冲、水塘江、八尺江、马巢河、可利江、凤凰江、心圩江和竹排冲等 10 条内河 2006 年所测定的水质监测数据为基础资料^[2](表 1)。为了综合评价南宁市内河水水质污染程度,以《地表水环境质量标

准》(GB3838-2002)为水质评价的参考标准^[3],选取6个评价指标: BOD₅(五日生化需氧量)、COD_{cr}(化学需氧量)、石油类、挥发酚、NH₃-N(氨氮)和总磷作为此次评价的指标因子,为了使得公式(7)中的投影函数 $Q(a)$ 为最大,必须对以上6个参数同时进行优化,实质上属于多维参数寻优的问题。采用粒子群算法进行参数优化选,利用 Matlab 语言进行编程,在 PSO 优化过程中选定参数:迭代次数 $K=30$,粒子个数 $N=50$,惯性因子(惯性权重) $\omega=0.5$,针对历史最优状态的加速因子(学习因子) $c_1=2$,针对全局最优状态的加速因子 $c_2=2$,粒子群算法的迭代过程见图2。

在回归分析过程中,首先,用公式(1)、(2)对样本数据进行归一化处理,然后,使用粒子群算法求最优投影方向,在 MATLAB 环境下进行优化计算,求得近似最佳一维投影方向为: $a^* = (-0.170, -0.452, -0.398, -0.717, -0.841, -0.587)$;最后,把最佳投影方向代入公式(3)即可求得10条内河水质的投影特征值,结果见表1。从样本投影特征值的大小来看,投影特征值越大,说明该内河的水质受污染程度越严重,水质越差。从表1可以看出,2006年南宁市10条内河的水质污染程度排序为:亭子冲>二坑溪>凤凰江>竹排冲>朝阳溪>水塘江>心圩江>马巢河>可利江>八尺江。从各内河水质的投影特征值来看,亭子冲和二坑溪的投

影特征值相对较高,分别达2.217和2.175,说明这两个内河的水质因子:BOD₅、COD_{cr}、石油类和挥发酚污染相对严重,各项水质评价指标均严重超标;从水质监测数据来看,二坑溪的NH₃-N和总磷最高,说明其NH₃-N或总磷超标严重,因此氨氮和总磷污染最为严重;其他样本的水质评价结果见表1。从表中可以看出,各样本的评价等级与实际情况比较吻合,且与文献[2]中主成分分析方法的结果基本相符,这说明投影寻踪评价模型能较真实地反映实际情况。

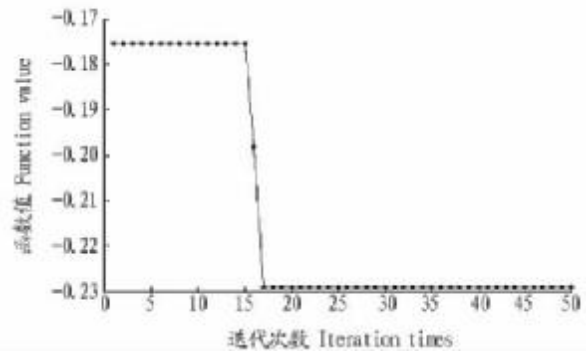


图2 粒子群算法的迭代过程

Fig.2 A iterative process diagram of particle swarm optimization

表1 2006年南宁市内河水水质监测数据与等级分析

Table 1 Water quality monitoring data and grade analysis of Nanning inland river in 2006

序号 Serial No.	断面名称 Section name	BOD ₅	COD _{cr}	石油类 Petroleum	挥发酚 Volatile phenol	NH ₃ -N	总磷 Total P	投影值 Projection value	排序 Order	主成分分析 Principal component analysis
1	朝阳溪 Chaoyang brook	31	85	0.40	0.00	16.26	1.43	1.043	5	4
2	二坑溪 Erkeng brook	37	118	0.78	0.01	31.87	2.68	2.175	2	2
3	亭子冲 Tingzi River	129	279	0.90	0.03	8.61	1.29	2.217	1	1
4	水塘江 Shuitang River	13	90	0.53	0.02	6.32	1.00	1.034	6	6
5	八尺江 Bachi River	5	31	0.03	0.00	0.22	0.20	0.045	10	10
6	马巢河 Machao River	12	42	0.06	0.00	2.19	0.33	0.194	8	8
7	可利江 Keli River	12	58	0.03	0.00	1.47	0.27	0.109	9	9
8	凤凰江 Fenghuang River	42	90	0.23	0.01	17.44	1.64	1.138	3	3
9	心圩江 Xinwei River	28	68	0.15	0.01	11.73	1.78	0.968	7	7
10	竹排冲 Zhupaichong	16	73	0.11	0.00	16.68	2.10	1.082	4	5

4 结论

(1)采用投影寻踪评价模型对南宁市内河水水质进行综合评价,并采用粒子群算法对评价模型进行优化。结果表明:利用投影寻踪进行城市内河水水质评价是可行的。

(2)将指标体系的高维数据投影到一维子空间上,借助粒子群优化算法,建立投影寻踪评价模型,经多次运算,寻找最佳投影方向,形成评价指标值,并按大小进行排序。该方法综合了模糊数学与层次分析法的优点,在多目标分析决策时避免人为因素的干扰,方法简便,易于推广应用。

(3)粒子群优化算法有较强的全局搜索能力,与其他进化算法相比,具有方法简单、计算效率较高和收敛速度较快等优点。将粒子群算法应用于投影寻踪评价模型中的优化问题,可以有效地找到最佳投影方向,获得最佳投影值,为投影寻踪优化问题的解决提供了一条新的思路。然而,该算法在求解过程中容易陷入局部极值,导致收敛精度低和不易收敛到全局最优的缺点。进一步改进算法以增强其全局寻优

能力和收敛性,还有待深入研究。

参考文献

- [1] 刘德明. 浅谈城市内河治理的方法[J]. 福建建筑, 2005, 93(3): 101-102.
- [2] 何志云. SPSS 软件在南宁市内河水水质综合评价中的应用[J]. 硅谷, 2008(14): 14.
- [3] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准(GB3838-2002)[S]. 2002.
- [4] 马平, 朱珊. 模糊综合评判方法在灌溉用水水质评价中的应用[J]. 世界地质, 2002, 21(4): 353-357.
- [5] 王晓鹏. 河流水质综合评价之主成分分析方法[J]. 数理统计与管理, 2001, 20(4): 49-52.
- [6] 苏德林, 武斌. 水环境质量评价中的层次分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(5): 105-107.
- [7] 贺北方, 王效宇. 基于灰色聚类决策的水质评价方法[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(1): 10-13.
- [8] 倪深海, 白玉慧. BP 神经网络模型在地下水水质评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(8): 124-127.
- [9] 李祚泳, 汪嘉杨, 金相灿, 等. 基于进化算法的湖泊富营养化投影寻踪回归预测模型[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(2): 1-8.
- [10] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

表 3 尾巨桉人工幼林对营养元素的生物循环
Table 3 Biological cycling of nutrient elements in young *E. urophylla* × *E. grandis* plantation

营养元素 Nutrient elements	贮存量//kg/hm ² Storage amount	吸收量//kg/(hm ² ·年) Absorption amount	存留量//kg/(hm ² ·年) Retention amount	归还量//kg/(hm ² ·年) Return amount	利用系数 Utilization coefficient	循环系数 Cycling coefficient	周转时间//年 Recycling period
N	80.54	60.04	40.27	19.77	0.75	0.33	4.07
P	12.66	7.56	6.33	1.23	0.60	0.16	10.28
K	110.22	64.33	55.11	9.22	0.58	0.14	11.95
Ca	100.96	82.76	50.48	32.28	0.82	0.39	3.13
Mg	13.97	13.31	6.99	6.33	0.95	0.48	2.21
Fe	1.76	1.11	0.88	0.23	0.63	0.21	7.68
Mn	6.68	4.53	3.34	1.19	0.68	0.26	5.64
Zn	0.28	0.16	0.14	0.02	0.59	0.15	11.66
Cu	0.13	0.08	0.07	0.02	0.63	0.20	7.89
合计 Total	327.20	233.88	163.60	70.28	0.71	0.30	4.66

3 结论

尾巨桉不同器官营养元素的含量差别较大,树叶的营养元素含量最高,树干营养元素含量最低,营养元素在各器官的含量大致表现为树叶 > 干皮 > 树枝 > 树根 > 树干。各器官中大量营养元素均以 N、Ca 和 K 含量最高,其次为 Mg, P 含量最低;微量元素以 Mn、Fe 含量最高,其次为 B 和 Zn、Cu 含量最低。

尾巨桉人工幼林营养元素积累量为 327.20 kg/hm²,不同器官中营养元素积累量依次为干材 > 干皮 > 树叶 > 树根 > 树枝,其中,树干(干材和干皮)营养元素的积累量占林分营养元素积累总量的 49.05%。尾巨桉幼林对不同营养元素的积累量依次为 K > Ca > N > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Cu,说明尾巨桉人工幼林对 K、Ca、N 具有较强的吸收与富集能力。

尾巨桉人工幼林对营养元素的吸收量、归还量、存留量分别为 233.88、720.28 和 163.60 kg/(hm²·年),营养元素的利用系数为 0.71,循环系数为 0.30,周转期为 4.66 年。受试验条件限制,该研究未对降水淋洗和树干茎流及死根归还的营养元素量等进行估算,所以养分实际归量较计算结果稍大。总体而言,尾巨桉人工幼林生长旺盛,对营养元素积累速率快,利用率高,林木生长过程中大量消耗林地养分,但其通过凋落物形式归还养分的速率较慢,养分周转期较长,不利于林地的地力恢复和维持。同时,2 年生尾巨桉主要以生长树干为主,树干生物量占林分总生物量的比例在一定时间内随林龄的增长而增大,树干营养元素积累量所占比例和林分生长所需要的养分量也随之增大。因此,根据尾巨桉的生

长特点,结合林地土壤养分状况,合理施肥对保证和促进尾巨桉林木快速和持续生长具有极其重要的作用。

参考文献

- [1] SHARMA J C, SHARMA Y. Nutrient cycling in forest ecosystems - a review[J]. *Agricultural Reviews*, 2004, 25(3): 157 - 172.
- [2] 何斌, 秦武明, 余浩光, 等. 不同年龄阶段马占相思人工林营养元素生物循环的研究[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5158 - 5167.
- [3] 张慧, 高峰. 基于 GIS 技术的福建省主要桉树树种用地适宜性评价[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(20): 8840 - 8842, 8859.
- [4] 袁姗姗, 胡进波, 刘元. 尾巨桉木材物理力学性质的主成分分析[J]. *林业科技开发*, 2006, 20(2): 39 - 41.
- [5] 刘奕清, 王大平, 熊运海. 尾巨桉的离体培养和快速繁殖[J]. *园艺学报*, 2005, 32(4): 672.
- [6] 朱宇林, 温远光, 谭萍, 等. 短周期尾巨桉连栽林分生产力的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2006, 28(1): 90 - 94.
- [7] 陈少雄, 周国福, 林义辉. 尾巨桉纸浆材人工林轮伐期研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(4): 394 - 398.
- [8] 黄承标, 温远光, 莫炯松. 尾巨桉不同连栽代数林地土壤水文 - 物理性质的研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 538 - 543.
- [9] 何斌, 余浩光, 刘运华, 等. 不同年龄阶段马占相思人工林营养元素生物循环的研究[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5158 - 5167.
- [10] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 112 - 129.
- [11] 何斌, 温远光, 梁宏温, 等. 英罗港红树植物群落不同演替阶段植物元素分布及其与土壤肥力的关系[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 518 - 524.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 317 - 322.
- [13] 徐大平, 曾育田, 李伟雄. 尾叶桉幼林地上部分生物量及养分循环的研究[J]. *林业科学研究*, 1994, 7(6): 600 - 605.
- [14] 李跃林, 李志辉, 谢耀坚. 尾巨桉人工林养分循环研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1734 - 1740.
- [15] 秦武明, 何斌, 覃世赢, 等. 厚荚相思人工林营养元素生物循环的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 103 - 108.

(上接第 12672 页)

- [11] 王颖, 谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2002(1): 31 - 33.
- [12] 周永华, 毛宗源. 一种新的全局优化搜索算法——人口迁移算法(I)[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(3): 1 - 5.
- [13] 赫然, 王永吉, 王青, 等. 一种改进的自适应逃逸微粒群算法及实验分析[J]. *软件学报*, 2005, 16(12): 2036 - 2044.
- [14] 杨维, 李岐强. 粒子群优化算法综述[J]. *中国工程科学*, 2004, 6(5): 87 - 94.
- [15] 李亮, 迟世春, 林泉, 等. 混合粒子群算法搜索土坡危险滑动面[J]. *工业建筑*, 2007, 37(2): 55 - 59.

- [16] 林泉, 朱沉海, 叶吉祥. 基于粒子群算法的投影寻踪分类模型研究[J]. *长沙交通学院学报*, 2008, 24(2): 90 - 95.
- [17] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] COLLINS K, MCGOWN A. The form and function of microfabric features in a variety of nature soils[J]. *Geotechnique*, 1974, 24(2): 223 - 254.
- [19] 张显. 基于粒子群算法的滑坡强度参数反演分析[J]. *盐城工学院学报: 自然科学版*, 2008(1).
- [20] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 95 - 100.