

研究论文

化工园区土地利用安全规划优化方法

吴宗之¹, 许 铭²

(¹ 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; ² 中国地质大学 (北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 应用多目标决策理论, 以潜在死亡人数最小化、经济收益最大化为优化目标, 建立了化工园区土地利用安全规划双目标优化模型, 提出了化工园区土地利用安全规划程序。实例应用表明, 该方法能够提供完备的备选方案集, 优化出的规划方案符合风险控制原则, 可实现经济收益最大化。提出的化工园区土地利用安全规划优化方法对促进化工园区和城镇规划的科学化 and 规范化具有指导意义。

关键词: 化工园区; 安全规划; 多目标优化; 风险分析; 安全管理

中图分类号: X 937

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 01-0125-07

Optimization method of land-use safety planning for chemical industry park

WU Zongzhi¹, XU Ming²

(¹ China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China;

² School of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: A bi-objective (minimum potential loss of life (PLL) and the maximization economic benefit) model of land-use safety planning for chemical industry park was established by applying the theory of multi-objective decision-making. A procedure of land-use safety planning for chemical industry park was proposed. A case study showed that complete alternatives could be provided by using the method proposed. The optimal alternatives accorded with principles of risk control and ensured maximum economic benefit. The method of land-use safety planning for chemical industry park in this paper had guiding significance for promoting scientific and standardized land-use safety planning for chemical industry park and township development as well.

Key words: chemical industry park; safety planning; multi-objective optimization; risk analysis; safety management

引 言

我国化工园区正处于快速发展时期。化工园区内危险物质和能量高度集中, 潜在事故风险大。由于我国化工园区建设一直缺乏土地利用安全规划的科学方法, 致使已建及在建化工园区潜在事故风险巨大^[1]。2006 年 7 月国家环保总局排查了 7555 个

化工石化建设项目, 显示 81% 布设在江河水域、人口密集区等环境敏感区域, 45% 为重大风险源^[2]。化工企业搬迁, 既需要大量资金, 又影响公共安全, 对实现节约发展、安全发展的发展战略极其不利。避免类似情况重复发生的根本措施是进行科学合理的土地利用安全规划, 从源头上预防重大事故发生、减轻事故后果^[3]。

2010-03-15 收到初稿, 2010-05-06 收到修改稿。

联系人及第一作者: 吴宗之 (1963—), 男, 博士, 研究员。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAK01B02)。

Received date: 2010-03-15.

Corresponding author: WU Zongzhi, wuzongzhi@vip.sina.com

Foundation item: supported by the National High Technology R&D Program of China (2006BAK01B02).

工业发达国家于 20 世纪 90 年代中期开始了重大危险设施周边土地利用安全规划的研究,颁布了有关的法律法规、导则规范^[4]。如欧盟的《塞维索法令 II》^[5-6],国际劳工组织(ILO)的《预防重大工业事故公约》,经济合作与发展组织(OECD)《化学事故预防、准备及响应的指导原则》^[7],英国的《重大事故危害控制规划》(CMAHR1999)^[8],美国的《清净空气法修正案》和风险管理计划,法国的《2003-699 法令》^[9]等。我国土地利用安全规划的研究起步于“十五”科技攻关计划^[10],中国安全生产科学研究院提出了基于区域定量风险评价技术的土地利用安全规划方法,但该方法仅以降低事故风险为目的,没有考虑经济收益等其他目标^[10]。许铭等^[11-12]进行了土地利用安全规划无约束多目标优化方法的研究。社会经济的发展要求必须统筹兼顾,一方面使潜在事故风险降到最低,同时要最大限度地实现经济收益等目标。研究土地利用安全规划多目标优化方法具有重要理论和实用意义。

土地利用安全规划问题属于规划选址类问题,是典型的 NP 困难(nondeterministically polynomial hard)问题^[13],此类问题的猜想解可以在多项式时间内验证,但不能在多项式时间内求解。NP 困难问题的研究,就是要寻找一个有效的算法^[13]。欧盟 1996~1999 年开展的“土地利用规划和化工厂选址”(LUPACS)项目研究了化工厂周边土地利用安全规划的多目标优化方法^[14],但在公开发表的有关该项目的文章中,仅介绍了他们解决问题的思路、过程及结果,没有透露具体优化模型以及使用何种算法来求解模型。化工园区不同于化工厂,在规划前期难以准确描述具体的化工项目及其工艺和设施,这给土地利用安全规划造成困难。一些土地利用规划的多目标优选方法值得借鉴。Uday 等^[15]按照联合国粮农组织(FAO)的土地利用规划指南制定的程序,采用线性规划优选农业用地的规划方案。Raizada 等^[16]采用权重和方法将 4 个简单线性规划转变为单目标妥协规划,进行流域土地利用规划方案的优选。Jayanath 等^[17]用 AHP(层次分析法)进行多属性偏好模拟以比较方案的优劣。董品杰等^[18]采用小生境遗传算法进行柑橘用地的优选。Marchamalo 等^[19]用 AHP 方法研究了哥斯达黎加水电厂选址问题,以协调水电厂与下游农业发展的关系。多目标进化算法在处理多目标

优化问题方面显示出了很大的优势,其中 Deb 等^[20-21]提出的非劣排序遗传算法-II(NSGA-II)鲁棒性好,处理约束条件的能力强,本文将应用该算法处理化工园区土地利用安全规划的多目标优化问题。

1 化工园区土地利用安全规划优化目标及优化模型

1.1 优化目标及约束条件

土地利用安全规划涉及经济收益、事故风险、环境保护、就业等众多目标,本文仅探讨经济收益目标和事故风险目标的优化方法。双目标优化问题解决后,就可将优化目标扩展到更多目标。用工业总产值表征经济收益目标,寻找使化工园区经济收益(用 BE 表示)最大化的规划方案。定量风险评价方法(QRA)用个人风险(IR)和社会风险(SR)表征事故风险^[22],但这两个指标不便于直接比较,因此用一个规划方案总的潜在死亡人数 PLL(potential loss of life)^[14]来表征化工园区的事故风险,优化目标为 PLL 最小化。PLL 最小化会迫使个人风险高的区域人数最少,而人口密集的区域个人风险最小,这正是作者要寻找的规划方案。化工园区土地利用安全规划存在多种约束条件,包括国家法律法规的规定、全国及区域化工产业整体布局规划、当地的经济政策、社会自然条件、化工园区总体规划等,这些约束条件表现为化工园区中某些地块只能用于某种土地利用类型(land development types, LDTs)或不能用于某些土地利用类型。

1.2 建立优化模型

大多数化工园区划分为矩形地块,因此本文以矩形地块为对象建立化工园区土地利用安全规划的优化模型。首先用定量风险评价方法计算出单个地块第 q 种土地利用类型的个人风险,以它作为优化计算时风险的输入值,整个化工园区的 PLL 用每个地块的 PLL _{i} 累加计算。每个地块的 PLL 由两部分构成:自身个人风险产生的 PLL;其他地块个人风险施加的 PLL。

在规划期,很难准确描述化工设施的具体位置和数量,最大化考虑风险的影响是合理的想法。为此,提出 3 个计算风险的假设:①一个地块内部按该地块土地利用类型产生的最大个人风险计算。②计算一个地块对其他地块施加的个人风险时,从

2 化工园区土地利用安全规划程序

化工园区土地利用安全规划程序包括前期准备、确定土地利用类型、定量风险评价及经济收益分析、确定优化目标和约束条件、建立优化模型、求解优化模型、输出和选择方案等步骤,如图 2 所示。

(1) 前期准备。其任务是收集整理所有与化工园区土地利用安全规划有关的基础资料。

(2) 确定土地利用类型。如主要生产用地、辅助生产用地、公用工程用地、仓储用地、交通运输

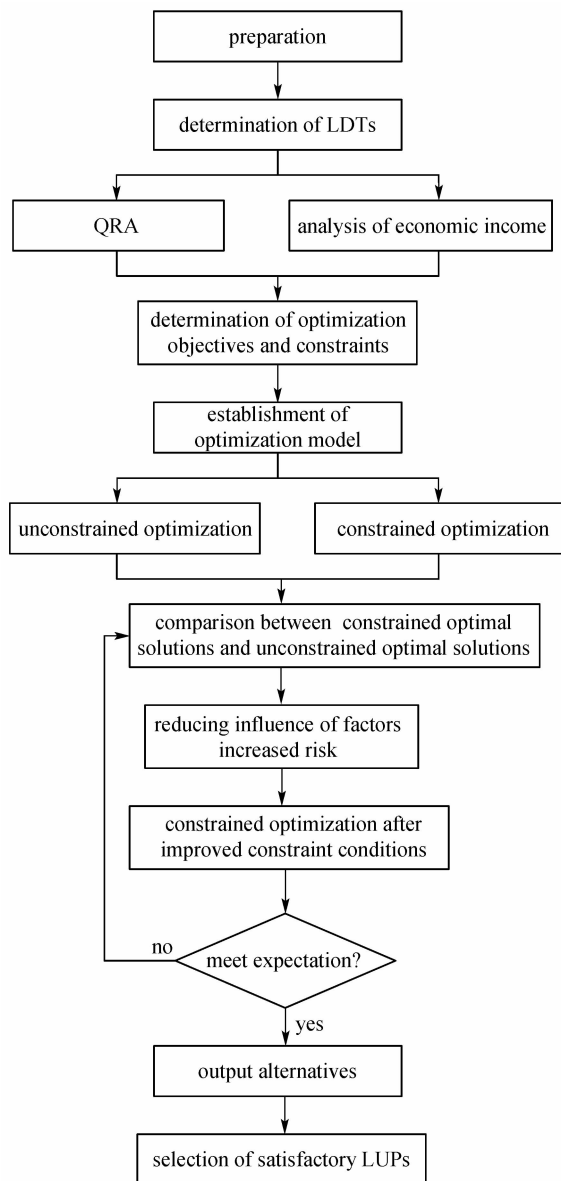


图 2 化工园区土地利用安全规划程序

Fig. 2 Procedure of land-use safety planning for chemical industry park

及交通枢纽用地、固体废物堆场、环境及卫生防护带以及居住区用地等。应依据国家产业政策、行业及区域发展规划、相关法律法规、标准规范和当地实际情况确定土地利用类型。

(3) 定量风险评价及经济收益分析。主要计算每种土地利用类型的事故风险和经济收益。经济收益可以用工业总产值来表征,也可以用税收、利润、物资的吞吐量等来表征。

(4) 确定优化目标和约束条件。确定优化目标及约束条件时应确保表达它们的属性是可理解的、可度量的。

(5) 建立优化模型。将问题表达为数学优化模型。

(6) 求解优化模型。对优化模型分 3 个步骤实施优化求解。①进行无约束优化求解;②进行有约束优化求解,将有约束最优解集和无约束最优解集进行比较,找出使潜在风险增加的因素,采取措施改进约束条件减小这些因素的影响;③改进约束条件后再进行有约束优化求解。返回步骤②直到满意为止。

(7) 输出并选择规划方案。优化计算结束,输出备选方案集。规划者可以依据期望值选择满意的规划方案(land use patterns, LUPs)。

3 示 例

用本文提出的方法对深圳某化工园区进行土地利用安全规划。化工园区规划面积 2.438 km^2 ,分为 10 个地块,南侧临江,北侧靠山,两山之间有村庄 A(11 号地块),现有村民 1817 人,该园区是一个外围为海洋的半岛(如图 3 所示)。确定每个地块的土地利用类型有 7 种:①甲类易燃液体存储用地;②乙类易燃液体存储用地;③易燃气体存储用地;④易燃气体生产、使用用地;⑤有毒气体生产、使用用地;⑥其他工业用地;⑦居住区用

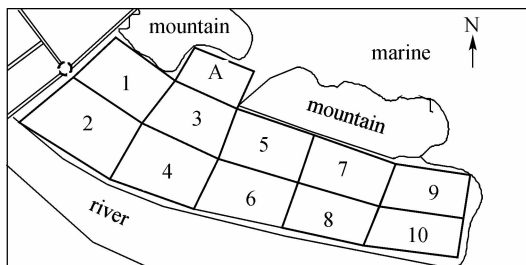


图 3 化工园区平面图

Fig. 3 Planar graph of chemical industry park

地。约束条件为 1 个规划方案中 7 种土地利用类型每一种至少有 1 个，要求找出使潜在死亡人数最小化、经济收益最大化的所有规划方案。数据取自文献[23]及现场调研资料，选取 6 种工业土地利用类型典型物质（依次为：汽油、柴油、LPG（液相）、LPG（气相）、氯气、乙二醇甲醚）常见储罐和管道数据，用 CASST-QRA（v1.0）软件计算个人风险，用 NSGA-II 算法进行优化计算，分别进行了无约束优化、有约束优化、改进约束优化 3 次优化计算，改进后的约束条件为：搬迁村庄、不布置有毒气体生产使用用地和居住区用地，其他 5 种土地利用类型每一种至少有 1 个地块。依据题意，总的规划方案有 7^{10} 个，约为 2.82 亿个。无约束优化共得到 256 个最优解，有约束优化共得到 69 个最优解，改进约束后共得到 160 个最优解。三次优化结果如图 4 所示。有约束优化最优解集的 PLL 比无约束优化最优解集的 PLL 大 1 个数量级以上，改进约束后最优解集的 PLL 比有约束优化最优解集的 PLL 减小了约 1 个数量级，同时收益明显提高。改进约束后得到的 160 个最优解可以分为 6 种类别，图 5 绘制了这 6 种类别的部分规划方案。每种类别包含的土地利用类型和相应的地块数量相同，其中，图 5(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k) 为该类别风险最小、收益最小的规划方案，图 5(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l) 为该类别风险最大、收益最大的规划方案。根据 3 次优化结果，可看出化工园区应优先布置甲类、乙类易燃液体存储企业，其他类型的企业至多布置 1 个；不布置有毒气体生产、使用企业，不在园区内建居住区，能大幅度降低整个园区的潜在风险。规划者可以结合图 4 和图 5，选择最接近期望值的规划方案。例如需要布置甲类易燃液体存储地块 3 个、乙类易燃液体存储地块 4 个、其他类型各 1 个，该情形属于图 5 的第三种类别，在备选方案中符合该条件的方案共有 35 个，图 5 中 (e) 是其中风险和收益都最小的解，(f) 是其中风险和收益最大的解。如果要求经济收益最大化，则选择 (f) 布局方案；如果要求风险最小化，则选择 (e) 的布局方案。如不能确定引进企业的类型和数量，则可以根据预期的收益和可承受风险的水平，直接查看每个解的函数值，选择最接近的解对应的规划方案。

示例表明本文提出的优化方法能够提供完备的备选方案集，规划者可以按照期望的收益水平或可

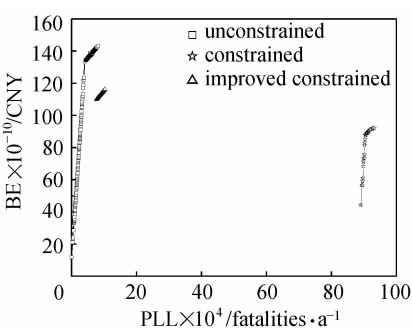


图 4 三次优化结果

Fig. 4 Results of three optimizations

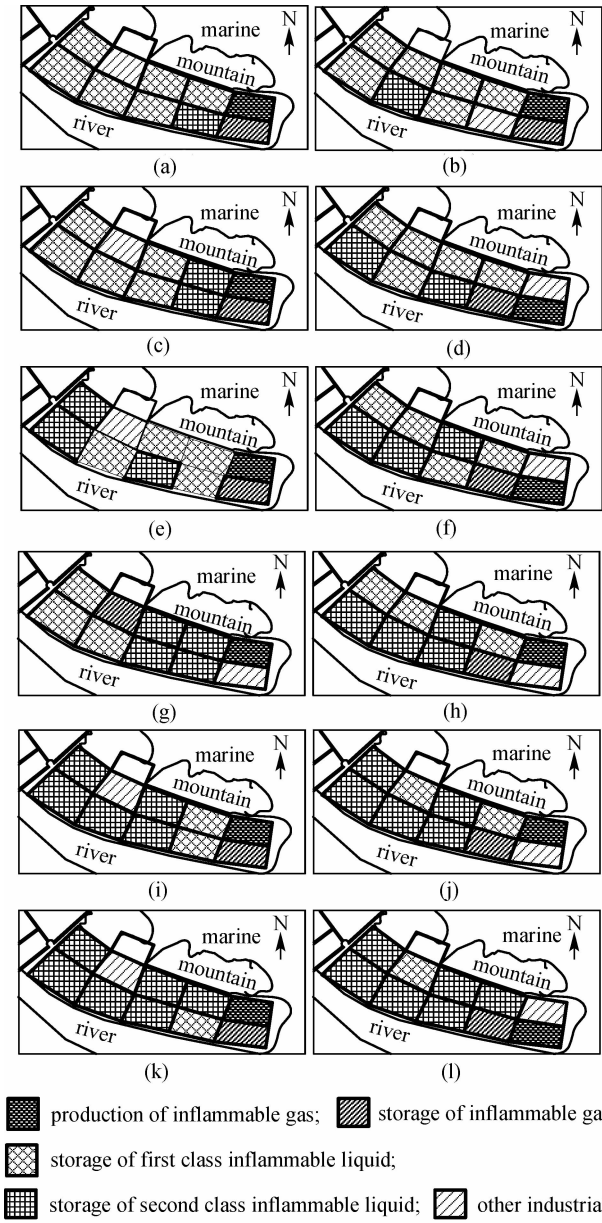


图 5 改进约束后最优解对应的部分规划方案

Fig. 5 Part of alternatives corresponding to optimal solutions improved constraint

承受的风险水平从这些备选方案中选择最接近的作为最终方案。这些规划方案符合约束条件,符合风险控制原则,可实现经济收益最大化。

4 结 论

(1) 科学合理的化工园区土地利用安全规划是预防重大工业事故发生、减轻事故后果的重要措施,工业发达国家和国际组织都在进行土地利用安全规划方法研究和应用。

(2) 本文以矩形地块为对象,应用多目标决策理论,以潜在死亡人数最小化、经济收益最大化为优化目标,建立了化工园区土地利用安全规划双目标优化模型,提出了化工园区土地利用安全规划程序。

(3) 应用本文提出的方法对某化工园区进行了土地利用安全规划,表明该方法能够提供完备的备选方案集,这些方案符合风险控制原则,可实现经济收益最大化。本文提出的优化方法对促进化工园区和城镇规划的科学化和规范化具有指导意义。

符 号 说 明

BE——一个规划方案的经济收益

B_j ——第 j 个地块的经济收益函数

$c_i(l_{ij})$ ——第 i 种地块中土地利用类型的风险衰减率,是 l_{ij} 的函数

D_j ——第 j 个地块的人口密度

F_{E_i}, F_{M_i} ——分别为第 i 个地块中土地利用类型的设备修正系数、安全管理及人员修正系数

F_{E_j}, F_{M_j} ——分别为第 j 个地块中土地利用类型的设备修正系数、安全管理及人员修正系数

$F_{t_i}^0, F_{t_j}^0$ ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的第 t 个容器设备泄漏事件发生的原始频率

$IR_i(x, y), IR_j(x, y)$ ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的在 (x, y) 处的个人风险

K_i, K_j ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的点火源的个数

L_{ij} ——相邻型地块 i 和 j 的公共边

L_j^* ——相邻型地块 j 的另一个边

L_{jc}, L_{jd} ——分别为对角型地块 j 的长边、短边

l_{maxi} ——第 i 个地块中土地利用类型的风险衰减的最大距离

Δl ——微小距离增量

N ——化工园区地块的数目

N_q, N_q^E ——一个规划方案中第 q 种土地利用类型的数目、期望数目

P_{k_i}, P_{k_j} ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的第 k 个点火源的点火概率

P_{w_i}, P_{w_j} ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的气象条件概率

PLL——一个规划方案的潜在死亡人数

S_j ——第 j 个地块的面积

S_{ij} ——第 j 个地块中距第 i 种地块 l_{ij} 至 $(l_{ij} + \Delta l)$ 之间等风险的面积

T_i, T_j ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的容器设备泄漏事件的个数

$V_{t_i}(x, y), V_{t_j}(x, y)$ ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的第 t 个事故情景在位置 (x, y) 处引起个体死亡的概率

W_i, W_j ——分别为第 i, j 个地块中土地利用类型的气象条件的个数

References

- [1] Zhao Yanbiao (赵晏彪). Chemical industry park; avoiding major environmental risk [J]. *China Petroleum and Chemical Industry* (中国石油和化工), 2007, **11**: 34-36
- [2] State Environmental Protection Administration (环保总局). The results of the investigation to environmental risk of petrochemical and chemical construction projects in China [J]. *Environmental Protection* (环境保护), 2006, **352** (14): 36
- [3] Wu Zongzhi (吴宗之). Study on methods and contents for land use safety planning [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2004, **4** (6): 86-90
- [4] Xu Ming (许铭), Duo Yingquan (多英全), Wu Zongzhi (吴宗之). Developmental review of land-use planning of chemical parks [J]. *China Safety Science Journal* (中国安全科学学报), 2008, **18** (8): 140-149
- [5] On the control of major accident hazards involving dangerous substances; European Commission Council Directive 96/82/EC of 9 December 1996 [R]. Brussels, 1997
- [6] Amending council directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances; European Commission Council Directive 2003/105/EC of 16 December 2003 [R]. Brussels, 2003
- [7] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Guiding Principles on Prevention, Preparation and Response for Chemical Accidents [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007
- [8] Health and Safety Executive. UK No. 743. The Control of Major Accident Hazards Regulation [S]. 1999
- [9] Bruno Cahen. Implementation of new legislative measures on industrial risks prevention and control in urban areas [J].

- Journal of Hazardous Materials*, 2006 (130): 293-299
- [10] Wei Lijun (魏利军), Duo Yingquan (多英全), Yu Lijian (于立见), Liu Ji (刘骥), Wu Zongzhi (吴宗之). Probe into the main content of safety planning for chemical industry park [J]. *Journal of Safety Science and Technology* (中国安全生产科学技术), 2007, 3 (5): 16-19
- [11] Xu Ming (许铭), Duo Yingquan (多英全), Wu Zongzhi (吴宗之). Review of multi-criteria decision analysis on land-use planning vicinity of chemical sites [J]. *Journal of Safety Science and Technology* (中国安全生产科学技术), 2008, 4 (6): 37-41
- [12] Xu Ming (许铭), Xie Zhenhua (谢振华), Duo Yingquan (多英全), Yu Lijian (于立见), Wu Zongzhi (吴宗之). No-constraint two-objective land-use planning of chemical industry park based-on VEGA [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, 60 (6): 1506-1512
- [13] ReVelle C S, Eiselt H A. Location analysis: a synthesis and survey [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 165: 1-19
- [14] Birgitte Rasmussen, Ib Bertelsen, Vibeke Burchard, Peter Christensen, Nijs Jan Duijm, Carsten D Grønberg, Frank Markert. Multi-objective Decisions in Land-use Planning Involving Chemical Sites [M]. Roskilde: Risø National Laboratory, 1999
- [15] Uday Bhaskar Nidumolu, CAJM de Bie, Herman van Keulen, et al. Review of a land use planning programme through the soft systems methodology [J]. *Land Use Policy*, 2006, 23 (2): 187-203
- [16] Raizada A, Pradeep Dogra, Dhyani B L. Assessment of a multi-objective decision support system generated land use plan on forest fodder dependency in a Himalayan watershed [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 23 (9): 1171-1181
- [17] Jayanath Ananda, Gamini Herath. Multi-attribute preference modelling and regional land-use planning [J]. *Ecological Economics*, 2008, 65 (2): 325-335
- [18] Dong Pinjie (董品杰), Lai Hongsong (赖红松). A method of optimization allocation for land use spatial structure based on multi-objective genetic algorithm [J]. *Geography and Geo-information Science* (地理与地理信息科学), 2003, 19 (6): 52-55
- [19] Marchamalo M, Romero C. Participatory decision-making in land use planning: an application in Costa Rica [J]. *Ecological Economics*, 2007, 63 (4): 740-748
- [20] Deb Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agrawal, Meyarivan T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (2): 182-201
- [21] Shang Xiuqin (商秀芹), Lu Jiangang (卢建刚), Sun Youxian (孙优贤), Lian Haibin (练海滨). A preference-based non-dominated sorting genetic algorithm for dynamic model parameters identification [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, 59 (7): 1620-1624
- [22] Wu Zongzhi (吴宗之), Duo Yingquan (多英全), Wei Lijun (魏利军), Guan Lei (关磊). Quantitative area risk assessment method and its application in land use safety planning for major hazard installations [J]. *Engineering Science* (中国工程科学), 2006, 8 (4): 46-49
- [23] Shenzhen Municipal Bureau of Statistics (深圳市统计局). Shenzhen Statistical Yearbook 2008 (深圳统计年鉴 2008) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008: 27, 183