

# 区域工业污染源评价方法及其应用

王裕东, 倪晋仁, 罗华铭

(北京大学 环境工程系 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 协调区域经济发展和环境保护是当前中国许多地区面临的重要问题, 而工业发展与污染控制是其中之关键。笔者以深圳市为研究区域, 采用等标污染负荷法确定主要污染行业, 在此基础上应用层次分析法研究了对区域环境经济系统起主要影响作用的行业, 并结合投入产出法分析了区域的环境敏感行业。将这3种方法有机地结合起来, 避免了以往研究中单纯考虑环境因素或笼统考虑经济因素而忽视经济系统内部运行规律的缺陷, 对今后区域工业污染源研究和管理具有一定借鉴意义。

**关键词:** 污染源评价; 等标污染负荷; 层次分析法; 投入产出分析

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2003)04-0053-05

## Method of Regional Industrial Pollution Source Assessment and Its Application

WANG Yu-dong, NI Jin-ren, LUO Hua-ming

(Department of Environmental Engineering of Peking University, the Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The harmonization of economic development and environmental protection is of significance to regional sustainable development, and the industrial development and pollution control are the key issues we must consider. Focusing on the industrial pollution sources in Shenzhen, the primary pollution sectors are investigated in terms of the equal-standard waste load method, followed by analytical hierarchy process (AHP) method for the main sectors that have dominant effect on regional economic development and environmental protection. The input-output analysis is made for environmentally sensitive sectors. The integrated consideration with these methods makes it possible to avoid some limitations in previous researches, and thus is good for consideration of the interaction between environmental and economic issues at the same time.

**Key words:** pollution source assessment; equal-standard waste load; AHP; input-output analysis

工业是区域经济发展的重要支柱, 但同时也是区域污染的主要来源。因此, 工业污染源管理对区域环境与经济协调发展具有重要意义, 而客观地认识区域工业污染源是做出正确决策的基本前提。

国内外学者的相关工作已经为区域工业污染源研究提供了一定的方法, 如等标污染负荷法、层次分析法等。由于社会、经济和环境之间的复杂相互作用, 单一的评价方法难以全面反映区域工业污染源的状况, 在一定程度上甚至会导致错误的决策。基于这一原因, 笔者以深圳市的工业行业为对象, 旨在对现有的评价方法进行改进, 并对评价结果进行对比与分析。

### 1 评价方法

工业行业是该研究的具体对象。笔者首先根据污染源调查资料和国家或当地的排放标准, 计算不同行业的等标污染负荷比, 确定区域的主要污染行业; 在此基础上结合没有排放标

准的其他环境因素并充分考虑行业对区域社会经济的贡献, 运用层次分析法研究对区域环境经济系统起主导作用的行业, 并结合投入产出法分析区域的环境敏感行业, 从而可以从不同角度不同层次评价区域工业污染源。研究的总体思路见图1。

评价工业污染源首先需考虑的是污染源排放污染物数量的多少, 笔者对工业污染源的评价也是从计算污染源的污染负荷开始的。

#### 1.1 等标污染负荷分析

等标污染负荷法将不同行业排放的不同污染物(浓度或总量)经过标准化处理转化成同一尺度上可以相互比较的量, 由值的大小确定区域的重点污染物、重点污染行业、重点污染区域等, 被广泛应用于全国<sup>[1]</sup>或地方<sup>[2-3]</sup>污染源调查评价中。等标污染负荷的基本计算公式可以表示为:

$$P_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{C_{0ik}} Q_{ijk} = \frac{q_{ijk}}{C_{0ik}} \quad (1)$$

式中,  $P_{ijk}$  为分区  $j$  中行业  $i$  排放的污染物  $k$  的等标污染负荷;  $C_{ijk}$  为分区  $j$  中行业  $i$  排放的污染物  $k$  的平均浓度;  $C_{0ik}$  为污染物

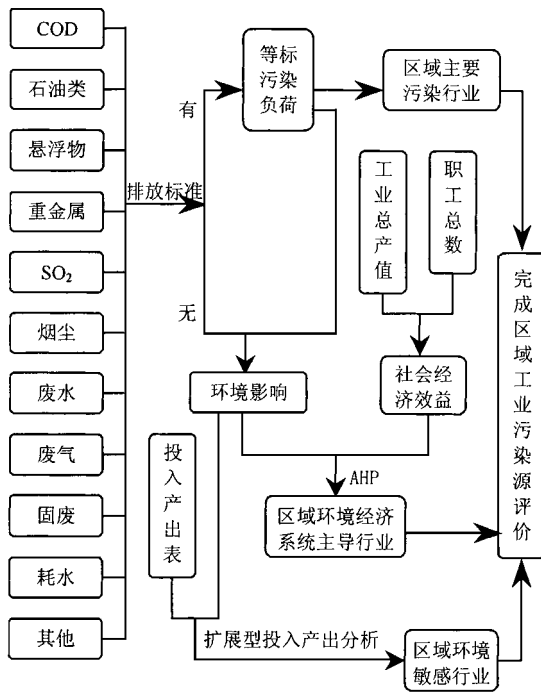


图1 区域工业污染源评价总体框图

Fig.1 Flow chart for regional industrial pollution source assessment

$k$  在行业  $i$  的排放标准;  $Q_{ijk}$  为分区  $j$  中行业  $i$  的废水或废气排放量;  $q_{ijk}$  为分区  $j$  中行业  $i$  排放的污染物  $k$  的总量。

单纯的等标污染负荷数值难以直观地比较不同分区、行业或污染物对研究区的污染贡献,这时需要进一步计算等标污染负荷比:

$$K_{ij} = \frac{\sum_k P_{ijk}}{\sum_i \sum_k P_{ijk}} \quad (2)$$

式中,  $K_{ij}$  为分区  $j$  中行业  $i$  的等标污染负荷比。将分区内不同行业的等标污染负荷比按从大到小的原则排列,并计算累积百分比,可以确定该分区的主要污染行业。

## 1.2 层次分析法应用

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 能够将定性的问题进行定量化分析。由于环境问题往往与自然资源和社会经济问题相互联系相互制约,而且许多关系通常只能定性描述,因此层次分析法的运用能够帮助解决其中的许多难题<sup>[4-6]</sup>。层次分析法具体理论可参见文献<sup>[7]</sup>。等标污染负荷分析只能片面反映工业行业的污染属性而不能反映工业行业对区域社会经济的贡献,所以笔者在具体建立层次结构模型时,将目标层 A 确定为污染行业对区域环境经济系统的影响作用,因此在 AHP 排序中处于前列的是对区域环境与经济能否协调发展起主导作用的行业,它们既应该为区域环境污染承担主要责任,但同时也是区域社会经济发展的主要贡献者。

污染行业对区域环境经济系统的影响需要由行业的环境属性和经济属性来反映,这具体表现在层次结构模型的约束层

B 上。约束层 B 包括环境影响因子  $B_1$  和社会经济效益因子  $B_2$ , 它们分别代表工业行业的环境属性和社会经济属性。

指标层 C 是约束层 B 的具体展开,它包括反映污染行业对区域环境经济系统起影响作用的各个具体指标。其中,环境影响因子  $B_1$  除了包括各行业的等标污染负荷外,还考虑了无排放标准的废水排放量、废气排放量以及固体废物排放量,此外从资源消耗角度考虑还包括了行业的新鲜耗水量;而社会经济效益因子  $B_2$  则包括了工业总产值和企业职工总数 2 个评价因子。由于约束层 B 相对于目标层 A 的权向量矩阵以及指标层 C 相对于约束层 B 的权向量矩阵难以完全客观地确定,在此采用专家打分的方式获取。

对于指标层 C 中的每一个指标,待评价的深圳市 17 个工业行业都可以通过两两比较构成一个  $17 \times 17$  阶的判断矩阵。构造各个指标的两两比较判断矩阵是 AHP 评价的关键,设  $x_i$  为第  $i$  个工业行业的某项指标值,令 17 个行业相对于该指标的两两比较判断矩阵的元素  $C_{ij} = x_i / x_j$ , 根据公式可知,  $C_{ij} = 1 / C_{ji}$ , 且当  $i = j$  时,  $C_{ij} = C_{ji} = 1$ , 即判断矩阵为正负反矩阵。确定出各个判断矩阵后,可根据 AHP 理论进行层次单排序和总排序计算以及一致性检验,并最终获取不同行业相对于目标层的权重向量,在此不再详述。

## 1.3 投入产出分析

等标污染负荷分析及在此基础上的 AHP 应用确定了区域的主要污染行业及区域环境经济系统的主导行业,但此时的工业污染源评价是将不同行业孤立起来进行分析的。现实中的不同行业间存在着密切联系,一个行业的扩大再生产会导致其他行业的连锁反映,从而导致行业排污也随之变化,而且不同行业排污对生产变化的反应的灵敏程度可能差别很大,据此笔者采用了投入产出分析对污染行业的环境敏感性进行研究。

投入产出分析是由 Leontief 在 20 世纪 30 年代提出的<sup>[8]</sup>。当前在环境科学中常见的应用是扩展型投入产出分析,利用它可以对污染物产生<sup>[9]</sup>、资源消耗<sup>[10-11]</sup>以及废物回收利用<sup>[12]</sup>等环境问题进行分析和预测。与纯经济部门投入产出表的部门-部门矩阵不同,通常的扩展型投入产出表的污染物产生栏目是一个物品-部门矩阵,它虽然反映了不同经济部门在生产活动中产生的各种废物数量,却丧失了投入产出表反映部门之间相互关系的基本特点。笔者在前人工作的基础上,对扩展型投入产出表进行改进,在表 1 中只引入一种污染物,并排列成对角矩阵,从而使污染物产生栏目也是一个部门-部门矩阵,以反映不同经济部门之间相互的环境影响和联系(如表 1 所示)。

表 1 中,  $X_{ij}$  为部门  $j$  在生产过程中所消耗的部门  $i$  产品的数量;  $Y_i$  为部门  $i$  为社会提供的最终产品数量;  $F_j$  为部门  $j$  的最初投入;  $X_i$  为部门  $i$  的总产出;  $X_j$  为部门  $j$  的总投入,当  $i = j$  时,  $X_i = X_j$ ;  $R_{ij}$  为部门  $i$  (或部门  $j$ ) 在生产过程中产生的某种污染物数量(当  $i \neq j$  时,  $R_{ij} = 0$ , 即由此构成的矩阵  $R$  为对角矩阵);  $G_i$  为部门  $i$  在最终需求领域产生的某种污染物数量;  $Q$  为部门  $i$  某种污染物的总产生量。

从表 1 可以推导出其基本平衡关系:

表 1 引入污染物产生栏目的部门  
- 部门投入产出表

Table 1 Extended input-output table with sectors  
related to pollutant discharge

	中间消耗				最终产品/最 终需求领域 产生的污染物	总产出/污染 物总产生量
	部门 1	部门 2	...	部门 n		
中 间 投 入	部门 1					
	部门 2					
	⋮					
	部门 n	$X_{ij}$			$Y_i$	$X_i$
初 始 投 入			$F_j$			
总 投 入			$X_j$			
污 染 物 产 生	部门 1					
	部门 2					
	⋮					
	部门 n	$R_{ij}$			$G_i$	$Q_i$

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (3)$$

式中,  $I$  为单位矩阵向量;  $A$  为直接消耗系数矩阵。设  $p_{ij}$  为污染物直接产生系数, 它代表部门  $j$  的单位产出所产生的污染物的数量, 即  $p_{ij} = \frac{R_{ij}}{X_j}$  ( $i \neq j$  时,  $p_{ij} = 0$ ), 则污染物产生栏目存在如式(4)所示平衡:

$$PX + G = Q \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得到:

$$P(I - A)^{-1} Y + G = Q \quad (5)$$

令  $W = P(I - A)^{-1}$ , 即矩阵  $W$  是部门的污染物直接产生系数矩阵  $P$  与列昂捷夫逆阵  $(I - A)^{-1}$  的乘积, 它是一个  $n \times n$  阶的矩阵, 设其元素为  $w_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )。

由式(5)可知,  $w_{ij}$  表示部门  $j$  增加单位最终产出而消耗更多部门  $i$  的产品, 从而导致部门  $i$  在生产过程中污染物产生的增加量。因此, 若代表部门  $i$  所在行的元素明显大于其他部门所在行的元素, 说明部门  $i$  的排污更容易受到其他行业扩大再生产的影响; 而若代表部门  $j$  所在列的元素明显大于其他部门所在列的元素, 说明部门  $j$  的扩大再生产更容易导致其他行业排污的增加。根据以上分析可知, 由于国民经济各经济部门的生产存在复杂的相互联系, 各部门产生的污染物也随着部门间生产状况的变化而变化, 而矩阵  $w$  具体反映了不同经济部门提供给社会的最终产品的变化导致的整个经济社会某种污染物产生量的变化情况, 即矩阵  $w$  是经济部门之间的相互作用在环境系统的具体表现。

因篇幅所限, 在进行扩展型投入产出分析时仅选取 COD 作为污染因子代表, 对其他污染或资源因子可以采用类似方法进行分

## 2 数据来源

等标污染负荷的计算将参照深圳当地的规划<sup>[13]</sup>, 采用的标准包括《地表水环境质量标准》(GHZB1 - 1999)、《环境空气质量标准》(GB3095 - 1996)、《污水综合排放标准》(GB8978 - 1996)、

《大气污染物综合排放标准》(GB16297 - 1996)、《纺织染整工业水污染排放标准》(GB4287 - 1992) 以及《造纸工业水污染物排放标准》(GWBP2 - 1999)。当不同年度建成的企业有不同标准时, 为更好地保护深圳环境, 一律采用最严格的标准值; 因造纸工业对不同生产工艺有不同标准, 在此采用不同工艺标准的平均值。

研究采用的污染源调查资料来自深圳市最近一期的工业污染源调查, 即 1996—1997 年进行的工业污染源调查。与污染源调查大致对应, 投入产出分析采用深圳市 1995 年度投入产出表。

## 3 结果与讨论

根据前面所叙述的方法和数据, 首先可以计算不同行业排放污染物的等标污染负荷及等标污染负荷百分比, 将计算结果按从大到小的顺序排列, 并计算累积百分比, 从而确定主要污染行业。在此基础上, 结合其他无排放标准而未能在等标污染负荷计算中考虑的环境因素, 构造出深圳市 17 个工业行业对于指标层中各个指标的两两判断矩阵, 并根据 AHP 原理最终计算出各个工业污染行业对区域环境经济系统的影响程度大小; 在 AHP 计算过程中, 任一判断矩阵的最大特征值均为 17, 与矩阵阶数相等, 因此所有的判断矩阵都具有完全一致性, 可通过一致性检验。

为便于分析比较等标污染负荷分析和 AHP 的异同及其优劣, 在此将两者的排序结果放在同一张表上, 如表 2 所示。假定双方均将累积比重达 80% 的行业定为主要行业, 由表 2 可知两者确定的主要行业大体相同, 只是 AHP 确定的主要行业多了一个木材加工及家具制造业, 这是固体废物还没有健全的行业排放标准从而限制等标污染负荷法应用范围的具体表现。进一步比较两者确定的主要行业, 可以发现双方的排列顺序有较大差异, 这是因为等标污染负荷法只考虑了污染物排放量和排放标准的比值, 排列顺序体现的只是行业排污多少的次序; 而 AHP 不仅考虑了行业的排污多少, 还考虑了行业在社会和经济中的地位和作用, 其排列顺序体现的是行业在整个区域的环境经济系统中所起的作用。

采用投入产出法计算直接或完全排污系数可以获得与等标污染负荷法或 AHP 类似的行业排序结果, 在此不再赘述。根据深圳市投入产出表和各行业的 COD 排放资料, 可以计算得到反映各行业间 COD 排放相互关系的矩阵  $w$ 。令矩阵  $w$  的对角线元素等于 0, 这样构成的新矩阵去除了部门扩大再生产对自身排污的影响, 可以单独考虑部门扩大再生产而对其他部门产生的环境影响。为直观表示工业部门之间的环境影响, 令坐标的横轴和纵轴分别代表工业部门(工业部门按前面叙述的顺序以 1~17 代替), 垂直轴代表部门扩大再生产导致其他部门的间接排污, 如图 2 所示。

图 2 中有几个相对隆起的行或列, 回顾前面的投入产出理论可知, 横向隆起较高的行说明该行业的 COD 排放容易受到别的行业扩大再生产的影响, 可以说是区域被动的环境敏感行业, 而纵向隆起较高的列说明该行业的扩大再生产容易导致其他行业的 COD 排放增加(受图的角度限制, 图 2 对横向隆起的

表2 等标污染负荷分析与 AHP 行业评价结果对比

Table 2 Comparison of the results from the equal-standard waste-load method and AHP

行业	等标污染负荷分析		行业	AHP 行业评价	
	等标污染负荷比	累计百分比		AHP 权重	累计权重
化学加工业	0.150 04	0.150 04	电子及通讯设备制造业	0.147 20	0.147 20
电力工业	0.135 40	0.285 44	化学加工业	0.138 09	0.285 29
电子及通讯设备制造业	0.118 32	0.403 76	电力工业	0.136 98	0.422 27
纺织业	0.109 31	0.513 08	造纸及文教用品制造业	0.090 69	0.512 96
金属制品业	0.094 37	0.607 45	缝纫及皮革工业	0.078 64	0.591 60
缝纫及皮革工业	0.090 95	0.698 39	纺织业	0.072 56	0.664 16
电气机械及器材制造业	0.075 70	0.774 10	金属制品业	0.068 54	0.732 71
造纸及文教用品制造业	0.059 01	0.833 11	木材加工及家具制造业	0.065 21	0.797 92
机械工业	0.047 67	0.880 78	电气机械及器材制造业	0.062 27	0.860 19
食品制造业	0.034 66	0.915 43	机械工业	0.042 17	0.902 36
建材制品业	0.029 42	0.944 85	食品制造业	0.035 43	0.937 79
木材加工及家具制造业	0.022 07	0.966 92	建材制品业	0.029 85	0.967 63
其他工业	0.017 23	0.984 16	交通运输设备制造业	0.018 44	0.986 08
交通运输设备制造业	0.014 11	0.998 26	其他工业	0.011 31	0.997 39
采选业	0.001 27	0.999 53	采选业	0.001 75	0.999 14
石油加工业	0.000 46	0.999 99	建筑业	0.000 45	0.999 59
建筑业	0.000 01	1	石油加工业	0.000 42	1

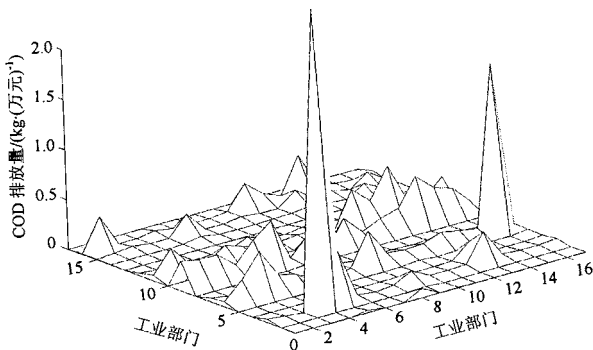


图2 工业部门之间的 COD 排放相互影响

Fig. 2 Interrelationship of COD discharge among industrial sectors

行反映更清楚),可以说是区域主动的环境敏感行业。因此,图2具体反映了区域的环境敏感行业,例如第9行(建材制品业)的数值普遍比其他行业数值大,这说明了建材行业对其他行业扩大再生产的环境敏感性很强,其他行业的扩大再生产消耗了更多的建材行业产品,同时也导致建材行业的间接 COD 排放更大;观察图2中的最大值,缝纫及皮革工业的发展需要消耗更多来自纺织业的原材料,从而引发纺织业的扩大再生产,且相应增加的间接 COD 排放量在深圳市各行业是最大的。所有这些行业之间的环境联系都可以找到经济学意义上的解释,投入产出分析的意义也就在于揭示行业之间相互环境影响内在的经济本质,从而为协调区域经济发展和环境保护提供更多的决策支持。

将3种评价方法有机结合的工作流程,既可以全面考虑那些因无排放标准而无法在等标污染负荷法中体现的污染物,又避免了 AHP 评价笼统考虑经济因素而无法揭示污染现象的经

济实质的缺陷,从而从多角度获取污染行业的有关信息。以电子及通讯设备制造业为例,等标污染负荷法考察了该行业的排污现状,其排序位置为第3位;而 AHP 法在全面考虑该行业的排污的基础上,还考虑了该行业的经济实力,因此它反映了该行业对区域可持续发展的影响力大小,从而高排污高产值的电子及通讯设备制造业超过了等标污染负荷中排行前两位的化学工业和电力工业,成为区域环境经济系统中最举足轻重的行业;而图2说明了该行业(第14行)的扩大再生产不会造成其他行业排污的显著增加,根据投入产出表计算该行业的万元产值直接或完全排污系数,可发现其排序值位居末端,这又从另一个角度反映了它虽然是个高排污高产值的行业,但单位产值的排污量并不高。通过这样的分析流程全面考察工业行业的特性对区域产业结构调整具有重要的指导意义,如对于产值高、排污低的行业,若主动的环境敏感性不强,应鼓励其发展;对于产值低、排污高的行业,则应予以限制;而对于那些在 AHP 评价中位居前列的行业,区域社会经济发展与资源环境保护在此存在尖锐的矛盾,应积极鼓励这些行业开发和应用清洁生产工艺或先进的污染物处理技术,以促进区域的可持续发展。

区域主要污染行业、环境经济系统主导行业以及环境敏感行业的获得完成了区域工业污染源评价。根据以上的结果分析可知,由等标污染负荷分析得出的区域主要污染行业评价简单易行而且具有一定的准确性,适合在资料不足且要求不高时操作,但这样不可避免地漏掉还没有排放标准的污染物,而且忽略了评价对象的经济属性,这就需要在等标污染负荷分析的基础上运用层次分析法来纠正结果的片面性,为区域环境管理确定工作的主要针对行业,即对区域环境与经济协调发展起主导作用的行业。而投入产出分析的应用进一步揭示了区域各行业在表面排污之间存在的本质经济联系,这为环境管理工作提供了另一种思路,即控制某一行业的排污并不一定需要从该

行业着手,而可以利用经济规律从整个宏观经济系统层次上对区域工业污染进行调控。

## 4 结论

综上所述,采用单一的工业污染源评价方法会受到各种客观因素的限制,因而难以获取对行业污染源的全面认识。如果采用笔者提出和改进的工业污染源评价方法,可以合理地分析区域的主要污染行业、区域环境经济系统主导行业和环境敏感行业。这样,不仅能够客观地考虑工业的污染物排放,而且能够对行业的社会效益给予一定程度的反映,从而可以深入认识行业之间的经济联系以及由此导致的环境影响。

## 参考文献:

- [ 1 ] 国家工业污染源调查办公室.全国工业污染源调查评价与研究(总论)[M].北京:中国环境科学出版社,1990.20-23.
- [ 2 ] 赵喜梅.天津市工业污染源结构分析与产业政策建议[J].城市环境与城市生态,2000,13(5):33-35.
- [ 3 ] 陈晓如,陈永祥,方正,等.武汉东湖西南区外源污染调查与评价[J].环境科学与技术,2001,(4):40-42.
- [ 4 ] 汪家权,薛联青.改进层次分析法评价区域工业污染源[J].中国环境科学,1999,19(3):230-233.
- [ 5 ] 金菊良,魏一鸣,付强,等.改进的层次分析法及其在自然灾害风险识别中的应用[J].自然灾害学报,2002,11(2):20-24.
- [ 6 ] 秦华鹏,倪晋仁.确定海湾填海优化岸线的综合方法[J].水利学报,2002,(8):35-42.
- [ 7 ] Saaty T L.The analytical hierarchy process[M].New York:McGraw-Hill Inc,1980.
- [ 8 ] Leontief W.Input-output economics[M].New York:Oxford University Press,1966.
- [ 9 ] 李立.使用投入产出法分析中国的能源消费和环境问题[J].统计研究,1994,(5):56-61.
- [ 10 ] 于冷,戴有忠.吉林省水资源投入产出分析[J].系统工程理论与实践,2000,(2):136-140.
- [ 11 ] Fischer G,Sun Laixiang.Model based analysis of future land use development in China[J].Agriculture Ecosystem & Environment,2001,85:163-176.
- [ 12 ] Shinichiro Nakamura.An inter-industry approach to analyzing economic and environmental effects of the recycling of waste[J].Ecological Economics,1999,28,133-145.
- [ 13 ] 深圳市人民政府.深圳市城市总体规划(1996—2010)文本说明[R].深圳:深圳市人民政府,1997.