

# 京津冀环境综合治理措施评价研究

吴剑, 许嘉钰, 郝吉明

(清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 经过多年环境治理, 京津冀地区逐步形成了针对大气污染、水污染、固体废弃物污染和生态环境破坏等环境综合治理措施。环境综合治理措施可概括为产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型五大类。为了区分环境综合治理措施综合效益大小, 本研究采用问卷调查的方法, 利用云模型评价法对环境综合效益进行了评价。结果表明, 五类环境综合治理措施综合效益的大小排序依次为产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型, 评价方法和结果为京津冀实施多重污染介质的综合治理措施的选用提供科学依据。

**关键词:** 环境综合治理; 大气污染; 水污染; 固体废物处置; 生态环境

**中图分类号:** X50      **文献标识码:** A

## Evaluation of Measures for Comprehensive Environmental Control in Beijing–Tianjin–Hebei Region

Wu Jian, Xu Jiayu, Hao Jiming

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Within years of environmental governance, many comprehensive environmental control measures have been taken in Beijing–Tianjin–Hebei region to cope with air pollution, water pollution, solid waste pollution, and ecological damages. These measures could be summarized as industrial restructuring, energy structure adjustment, transportation structure adjustment, land use structure adjustment, and green transformation of agriculture and rural areas. A questionnaire survey was conducted to distinguish the comprehensive benefits of these measures, and the comprehensive benefits were evaluated using a cloud model evaluation method. Result shows that these comprehensive benefits are ranked from high to low as industrial restructuring, energy structure adjustment, transportation structure adjustment, land use structure adjustment, and green transformation of agriculture and rural areas. This method and the result can provide a scientific foundation for the selection of comprehensive control measures for treating multiple pollution media in Beijing–Tianjin–Hebei region.

**Keywords:** comprehensive environmental control; air pollution; water pollution; solid waste disposal; ecological environment

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-23

通讯作者: 许嘉钰, 清华大学环境学院副教授, 主要研究方向为能源与环境; E-mail: jiayu-xu@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“生态文明建设若干战略问题研究(三期)”(2017-ZD-09); 生态环境部大气重污染成因与治理攻关项目“区域大气环境质量改善中长期路线图研究”(DQGG0302-04)

本刊网址: [www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae](http://www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae)

## 一、前言

京津冀环境综合治理难度大，面临大气、水和固体废物等多重介质污染综合治理和生态环境改善的挑战。污染来源复杂，既有像工业企业的点源污染，又有道路交通的线源污染和农业农村的面源污染。经过多年环境治理，京津冀地区逐步形成了产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型五类环境综合治理措施。

**产业结构调整措施：**着力提升地区工业智能制造水平和能力，发展中高端服务业。加严排放标准，严控钢铁、有色金属、非金属、建材、石化化工等行业的污染物末端排放，尤其对建材行业实施加严的排放标准，采取新型生产工艺取代落后生产工艺，逐步关停非民生必需的高耗水、高耗能、高污染的行业。

**能源结构调整措施：**实施煤炭总量控制，提高天然气消费比重，努力发展新能源。选用低含硫原煤，改用新型锅炉提高燃煤效率。提高原油炼化能力，提供高品质燃油。完善天然气管道网络建设，并提高港口液化天然气（LNG）接受能力，扩大地区天然气来源。提高非化石能源消费（如太阳能和风能）比重，开发当地非化石能源，扩展新能源的消纳能力。

**交通运输结构调整措施：**提高船舶和铁路货运比重，城市客运实施高标准汽车或电动车。改善并提高铁路和船舶联运能力。全面推行实施高标准燃油车辆。重点城市实施轨道交通为主，电动车为辅的运力模式。增加城市客运电动汽车比重。对非道路交通工程车辆和高排放车辆实施管控，未来在机场和码头等地将全面采用电动机车。

**土地利用结构调整措施：**严控建设性用地，持续实施土地硬化和绿化工程。合理使用土地，对土质相对疏松区域实施硬化作业，对道路区域实施绿化及洒水作业，扩大环境污染自净化消融区，对棚户区进行改造，制止自然生态破坏行为，修复森林灌木草场等生态环境。

**农业农村绿色转型措施：**因地适宜利用污染物处理方法，精准施肥节肥，管控农药施用，实施农村天然气改造。乡村居民生活的废水和固体废弃物处理方式以距离为界，距离城市较近的采取工厂化

处理，距离较远的采取生态化处理。严格控制化肥施用总量，依据节气和降雨量变化实施精准性施肥。禁止使用残留量大的农药，推广使用高效且对人无害的农药。农村秸秆实施资源化利用或者返田作业，对秸秆露天焚烧实施严格管控。对农村实施天然气改造工程，推进农村绿色用能。

鉴于京津冀环境问题已经成为区域协同发展战略实施难题，但是针对上述综合治理措施综合效益的大小，尚未有相关研究报道，为了能够发挥上述环境综合治理措施的潜力，对京津冀环境综合治理措施进行系统性评价，为环境管理部门提供精细化综合治理决策依据显得尤为重要。

## 二、研究方法

利用模糊专家评价法 [1]、层次分析法 [2] 和云模型评价法 [3] 可定量评价环境综合治理措施效果。云模型评价方法不仅能够很好地将定性评价转化为定量评价，而且对评价的层次没有限制，数据计算量相对较少，因此采用云评价模型对京津冀区域环境综合治理措施的综合效益进行评价。云模型评价法可以简要地概括为三个步骤：定性转定量、雨滴转变为低层云、低层云转变为高层云。

### （一）定性转定量

假定具有  $n$  个定性评价因素  $R$ ，第  $i$  个因素表示为  $R_i$ ，每个因素都分为  $m$  个级别，也就是说将定性评价约束为  $m$  个级别，每个级别分别对应最高值  $V_{\max}$  和最低值  $V_{\min}$ ，采用双标约束法来确定云模型定性评语期望值 ( $E_x(\text{评语})$ ) 和熵值 ( $E_e(\text{评语})$ )。用常数  $k$  来表示变量本身的模糊度阈值 [4]，即超熵 ( $H_e(\text{评语})$ )，环境措施效果视为期望值，其数学计算表达式如下

$$E_x(\text{评语}) = \frac{1}{2}(V_{\max} + V_{\min}) \quad (1)$$

$$E_e(\text{评语}) = \frac{1}{6}(V_{\max} - V_{\min}) \quad (2)$$

$$H_e(\text{评语}) = k \quad (3)$$

### （二）雨滴转变为低层云

假定调查  $t$  个专家得到的数据，需要转换为定

量指标,形成定性评测的云发生器 [5],从而获得评语对应的期望值 ( $E_x$ ) 和熵值 ( $E_n$ )。通过计算其对应的期望值,并根据期望值大小就能够获得环境治理措施效益排序,其数学计算表达式如下

$$E_x = \frac{E_{x1}E_{n1} + E_{x2}E_{n2} + \dots + E_{xi}E_{ni}}{E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{ni}} \quad (4)$$

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{ni} \quad (5)$$

$$H_e = \frac{H_{e1}E_{n1} + H_{e2}E_{n2} + \dots + H_{ei}E_{ni}}{E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{ni}} \quad (6)$$

### (三) 低层云转变为高层云

高层云模型是将多个云模型进行抽象和总结,得到更高层次的云模型。假定多种措施效果权益值相同,采用式 (4) 和式 (5) 方程式可以求出上级云的期望值和熵,重复使用云模型计算法则可以得出更高的云的期望值和熵,从而实现了多层次云模型的求解问题。通过最高层云的期望值比较,最终

实现对产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型等环境综合治理措施效果的评价结果排序。环境综合治理措施评价流程图,如图 1 所示。

## 三、环境综合治理措施效果分析

### (一) 单介质环境综合措施效果评价

环境综合治理措施效果评价是以期望值大小作为评判标准,期望值越大,表明该治理措施发挥作用越大。环境综合治理措施分为大气环境、水环境、固体废弃物、生态环境和经济效益五个大类,并将治理措施所能取得的效果分为(差、较差、一般、较好、好)五个级别,以调查问卷的形式分别咨询了相应领域的专家学者,并利用云评价模型进行数据计算和整理。由于共有五类环境综合治理措施,所以假定每类治理措施能取得相同效果,环境综合治理的介质分别是大气环境、水环境、固体废物处

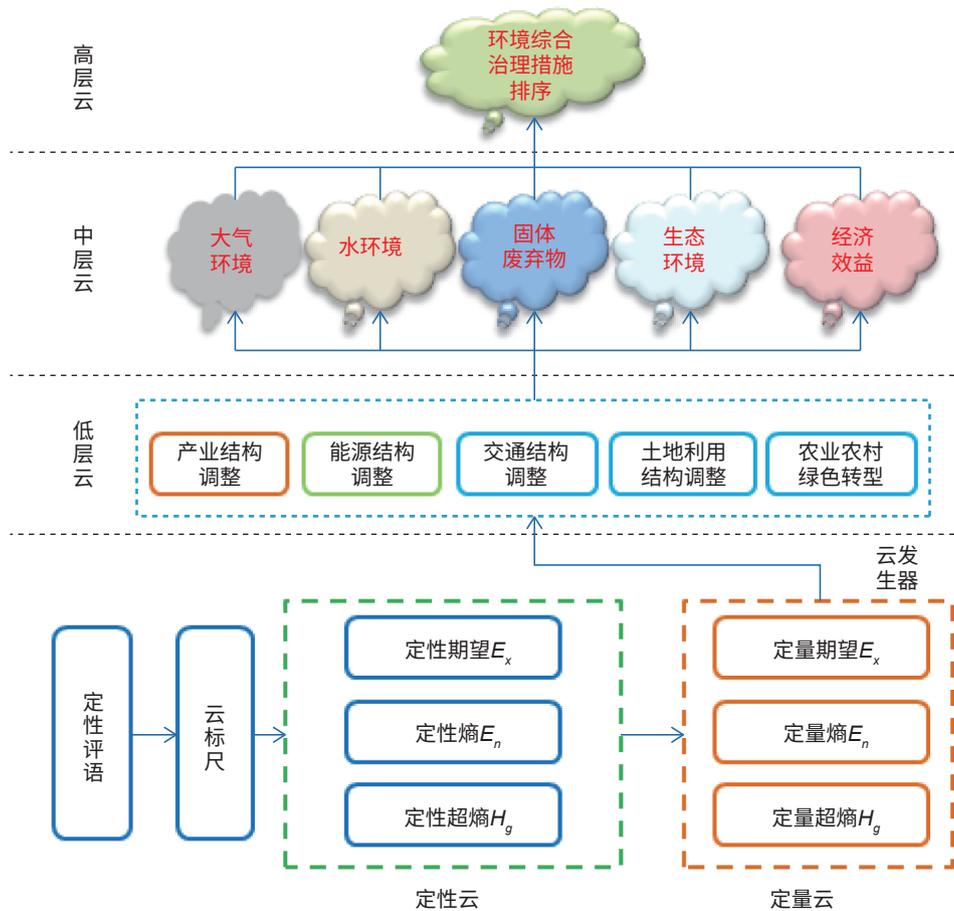


图 1 环境综合治理措施评价流程图

置、生态环境四类环境问题，针对各类介质的环境治理措施的权重值取 0.25。

云模型评价计算主要过程为：首先，根据专家咨询问卷定性评价结果，在表 1 中找到对应的期望值和熵值，或根据式（1）~式（3）计算出定量云模型的期望值和熵值；然后利用式（4）~式（6）计算出低层云和高层云的期望值和熵值。经过云模型评价模型计算与整理，并利用云模型期望值来表示产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整、农业农村绿色转型等多类措施贡献值大小，从而实现单介质环境综合治理措施评价结果，结果见表 1。

将单介质环境综合治理的期望值视为环境治理措施贡献的大小，表 1 根据云模型评价法计算得出针对大气环境综合治理效果贡献从大到小依次为能源结构调整、产业结构调整、交通运输结构调整、农业农村绿色转型和土地利用结构调整。

水环境改善效果贡献从高到低依次为产业结构调整、能源结构调整、土地利用结构调整、农业农村绿色转型和交通运输结构调整。能源结构直接降低水耗，间接减少能源开采废水排放；土地利用结构调整是改变排放标准而间接导致排放量；农业农村对水环境污染相对可控。

固体废物处置利用效果贡献从高到低依次为产业结构调整、能源结构调整、土地利用结构调整、农业农村绿色转型和交通运输结构调整。土地利用结构调整时通过改变土地利用属性，从而间接达到固体废弃物防治效果；交通运输结构调整并未产生固体废弃物，对固体废物防治效果很小。

生态环境治理效果贡献从高到低依次为土地利用结构调整、产业结构调整、农业农村绿色转型、交通运输结构调整和能源结构调整。

## （二）多介质环境环境污染综合治理措施效果分析

为了判定各类环境综合治理效果，采用专家判定权益打分，并采用云模型处理方法以确定能源结构调整、产业结构调整、交通运输方式、土地利用结构调整、农业农村绿色转型分别对大气环境、水环境、固体废物、生态环境的防治效果。利用云模型首先对单介质污染进行效果评估分析，然后将大气环境、水环境、固体废物、生态环境因素综合评估，得到基于多介质环境综合治理措施的期望值。同理，经济效益也采用云模型评价的期望值来表示。

环境治理综合效益还需考虑经济效益，环境综合治理应该建立在产业经济基础之上，环境治理的主体为企业。经统计分析，一般企业环境保护投入介于 5%~10% 之间，加上土地利用结构调整措施和生态环境改善等其他措施，通常企业年度的 15% 左右支出为环境综合治理的间接性成本，因此环境综合治理措施的权重取值为 0.15，产业经济的权重值为 0.85，从而根据云模型计算多介质环境综合治理效益，结果如表 2 所示。

表 2 表明，多污染介质的环境综合治理措施贡献值从高到低依次为产业结构调整、能源结构调整、土地利用结构调整、农业农村绿色转型和交通运输结构调整；产业经济效益的期望值从高到低依次为产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型。

为了区分五类治理措施效果的差别，以综合治理措施的期望值作为判别依据，将环境治理措施的期望值划分为主导措施 ( $E_x > 0.7$ )、重要措施 ( $0.7 > E_x > 0.5$ )、中等措施 ( $0.5 > E_x > 0.3$ )、辅助措施 ( $0.3 > E_x > 0.1$ ) 和一般措施 ( $E_x < 0.1$ ) 五个等级；经济效益对应为高、较高、中、低、差五个等级。由于环境治理综合效益跟经济具有密切的联系，所以将经济效益与环境综合治理继续采用云模型评估，获得经济环境综合效益的期望值，从而确定多

表 1 单介质环境综合治理评价表

防治措施	大气环境	水环境	固体废物处置	生态环境
产业结构调整	0.66	0.74	0.79	0.48
能源结构调整	0.78	0.66	0.58	0.29
交通运输结构调整	0.54	0.26	0.36	0.32
土地利用结构调整	0.22	0.36	0.52	0.70
农业农村绿色转型	0.33	0.33	0.37	0.48

表 2 多介质环境综合治理评价表

防治措施	综合治理	经济效益	综合效益
产业结构调整	0.67	0.78	0.76
能源结构调整	0.58	0.66	0.65
交通运输结构调整	0.37	0.66	0.62
土地利用结构调整	0.45	0.52	0.51
农业农村绿色转型	0.38	0.24	0.26

类介质的综合治理效果,并根据云模型计算的期望值将五类综合治理措施进行排序。环境综合治理效果评价分类表,如表3所示。

由表3可知,环境综合治理的重要措施为产业结构调整 and 能源结构调整,交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型属于中等措施。产业结构调整对大气、水环境、固体废物等都具有较好的环境治理效果;能源结构调整对大气、水环境、固体废物等都具有较好效果,但整体效果略低于产业结构;交通运输结构调整除对大气治理取得较好效果外,其他介质效果不大;土地利用结构调整是改变了土地使用性质,约束了水污染物排放和固体废弃物排放,改善生态环境,从而取得较好环境治理效果;农业农村绿色转型对大气、水和生态环境等都具有好的防治效果。

环境综合治理措施效益应该考虑经济效益,不同措施能够带来的经济效益存在较大差异(见表2和表3),产业结构调整属于高经济效益,能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整等措施属于较高经济效益,农业农村绿色转型属于较低经济效益。这是因为产业结构是城市发展经济基础,新生环保产业能够给当地带来较高的经济效益;能源结构调整,主要是发展绿色能源,增加绿色能源的消纳能力,会给社会带来较高经济效益;交通运输结构调整主要在城市交通客运货运效率提升,减少空载率,增加了交通运输经济效益;土地利用结构调整直接将更多的土地利用在经济建设上,能够带来高的经济效益;农业农村绿色转型直接提升农业和农民的经济收入,但是农业整体经济体量较小,农村绿色转型更多体现在社会效益,因此农业农村绿色转型带来的整体经济效益低。

综上所述,在考虑环境综合治理及经济效益的前提下,多介质环境污染综合治理措施效益从高到低排序依次为产业结构调整、能源结构调整、交通

运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型。

## 四、评价结果与技术可行性分析

### (一) 评价分析结果

论文采用调查问卷方式系统性地评价了各类措施的综合环境效益,并根据评价结果给出了京津冀地区环境综合治理的可行治理措施,环境综合治理评价成果如下。

(1) 相同措施对不同介质环境治理效果存在较大区别。不同介质环境的主导措施不同:大气环境治理的主导措施是能源结构调整,水环境治理主导措施是产业结构调整,固体废物处置的主导措施是产业结构调整,生态环境治理的主导措施是土地利用结构调整。不同介质环境治理的重要措施与辅助措施也存在较大的区别。

(2) 环境综合治理措施评价结果表明,环境综合治理贡献从大到小依次为产业结构调整、能源结构调整、土地利用结构调整、农业农村环境治理和交通运输结构调整。产业结构调整 and 能源结构调整是环境治理的重要措施。交通运输结构调整、土地利用结构调整、农业农村绿色转型是环境治理的中等措施。

(3) 若环境综合治理措施评价考虑产业经济效益,那么多重介质环境污染治理的综合效益从高到低依次为产业结构调整、能源结构调整、交通结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型。

### (二) 环境综合治理措施可行性分析

根据云模型评价法计算结果,针对当前京津冀环境治理要求和实际治理措施,提出了有关的产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型的一些具体实

表3 环境综合治理效果评价分类表

防治措施	大气环境	水环境	固体废物处置	生态环境	综合治理	经济效益	效益排序
产业结构调整	重要	主导	主导	中等	重要	高	1
能源结构调整	主导	重要	重要	辅助	重要	较高	2
交通运输结构调整	重要	辅助	中等	中等	中等	较高	3
土地利用结构调整	中等	中等	重要	主导	中等	较高	4
农业农村绿色转型	辅助	中等	中等	中等	中等	低	5

际措施，以便于判断综合治理措施的可行性，具体措施见表4。

产业结构调整、能源结构调整、交通运输结构调整、土地利用结构调整和农业农村绿色转型措施各自包含多类治理措施，推动绿色产业发展、构建绿色能源体系、加强生态循环农业建设等措施能够作用于大气环境、水环境、固体、生态环境等，土地利用结构调整直接或者间接作用多重介质环境治理。部分措施仅能作用于单类介质的污染问题，如优化城市交通出行结构和实施地膜回收利用等。因

此，在针对多重复合型污染问题时需要慎重考虑使用复合污染治理措施，提升环境综合治理效益。

因地制宜地采取适合的综合治理措施，将有利于提升京津冀环境治理水平。在京津冀环境综合治理过程中，环境综合治理已经取得较大的成效。产业结构调整措施降低了大气、水、固体等污染物的产生和水资源消耗，能源结构调整措施朝着清洁能源方向前进，综合环境治理表现为减少大气污染物和固体废物产生。由于产业结构调整措施能够影响能源需求量，因此，产业结构调整效益要高于能源

表4 技术可行的环境综合治理措施

一级分类	二级分类	环境综合治理目标				
		大气环境	水环境	固体废物	生态环境	
产业结构调整	推进产业绿色发展	√	√	√	√	
	优化产业布局	√	√	√		
	严格控制“高耗能高污染”行业	√	√	√		
	退出高污染的一般制造业	√	√	√		
	压减过剩产能和淘汰落后产能	√	√	√		
能源结构调整	构建绿色能源体系	√	√	√	√	
	削减煤炭消费总量	√	√	√		
	强化散煤市场和劣质散煤管控	√		√		
	加快燃煤锅炉综合整治	√	√			
	提高能源利用效率	√	√	√		
	加快能源清洁化基础设施建设	√		√	√	
	有效推进清洁取暖	√	√	√		
	提高外受电能力	√	√	√		
	交通运输结构调整	优化调整城市间交通运输结构	√			
		大力推进车辆电动化	√			
优化城市交通出行结构		√				
加强机动车监管和尾气治理		√				
加强船舶港口、靠港飞机排放治理		√	√			
土地利用结构调整	加强对耕地，特别是基本农田保护	√	√	√	√	
	严格控制建设用地规模	√	√	√	√	
	实施“散乱污”企业土地再利用	√	√	√	√	
	持续推进露天矿山综合整治	√	√	√	√	
	实施城市土地硬化和复绿	√	√	√	√	
农业农村绿色转型	发展节水农业		√		√	
	实施农业节肥	√	√		√	
	实施农业节药	√	√		√	
	实施粪便污染治理	√	√	√		
	实施秸秆综合利用	√		√	√	
	实施地膜回收利用			√		
	加强生态循环农业建设	√	√	√	√	

结构调整效益。交通运输结构调整措施主要针对大气污染治理,土地利用结构调整措施有利于改善大气污染物排放和固体废物的排放量,农业农村绿色转型措施有利于广大农村地区的大气、生活污水和生活固体废物治理。

综上所述,京津冀环境综合治理措施评价结果是可行的,对环境综合治理措施的准确判断有利于针对具体环境治理问题时选取更加有效的治理方法,提升环境治理效益。

## 五、结语

利用云模型评价法对环境综合治理措施进行定性评价,环境治理措施是采用自下而上的思路进行的(低层云到高层云),即首先对环境基础治理措施评价,然后对上一层治理措施评价,最终实现环境综合治理措施的等级分类和重要性评估。利用云评价方法不仅实现单介质环境治理措施评价和分级,还对大气环境、水环境、固体废物处置、生态环境等环境综合治理措施评价和分级。本研究环境综合治理评价等级为两级,根据需求可以评价更多分类级别的评价;综合环境评价方法与结果具有相对的普适性,我国其他地区同样适用。

我国环境治理由于地域性存在较大差别,通过采用云模型等系统性评价方法,针对特定的环

境问题选用准确可行的合理措施具有指导意义,正确认识环境治理的主导措施、中等措施与辅助措施,以便于国家和企业实施环境的高效治理。例如,京津冀地区同时针对大气环境、水环境、固体废物和生态环境具有效果的可行措施有:推进产业绿色发展、构建绿色能源体系、加强对耕地保护、严格控制建设用地规模、持续推进露天矿山综合整治、实施城市土地硬化和复绿、加强生态循环农业建设等。

## 参考文献

- [1] Amiria M, Ardeshirb A, Zarandi M. Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction [J]. *Safety Science*, 2017, 9(3): 16–28.
- [2] Morgan R. An investigation of constraints upon fisheries diversification using the analytic hierarchy process (AHP) [J]. *Marine Policy*, 2017, 8(6): 24–30.
- [3] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6(8): 28–34.  
Li D Y, Liu C Y. Study on the universality of the normal cloud model [J]. *Strategic Study of CAE*, 2004, 6(8): 28–34.
- [4] 杨朝晖, 李德毅. 二维云模型及其在预测中的应用 [J]. *计算机学报*, 1998, 21(11): 961–968.  
Yang C H, Li D Y. Planar model and its application in prediction [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(11): 961–968.
- [5] 杜湘瑜, 尹全军, 黄柯棣, 等. 基于云模型的定性定量转换方法及其应用 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(4): 772–776.  
Du X Y, Yin Q J, Huang K D, et al. Transformation between qualitative variables and quantity based on cloud models and its application [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(4): 772–776.