

人类活动对北京空气质量影响的综合生态评价

周文华¹, 王如松^{1*}, 张克锋²

(1. 中国科学院生态环境研究中心 系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:为给北京未来的空气污染控制政策的制定提供科学依据,采用基于压力-状态-响应模型框架构建的指标体系、生态服务功能估算和历史分析相结合的方法,探讨了人类活动、人工调节措施(1983~2003年)和生命支持系统生态服务功能(北京建城初~2003年)对北京城市生态系统空气质量影响的综合评价方法,结果表明:(1)人类活动对北京城市空气质量综合影响的排序结果前3位排名为2003年(0.619)、2001年(0.598)和2002年(0.578),后3位排名为1983年(0.392)、1984年(0.395)和1985年(0.495),综合影响总体趋向积极且稳步上升;(2)1983~2003年北京市的人类活动对北京城市空气质量消极与积极影响同时增强,城市空气质量自1998年后有所改善;(3)压力指数 p 与响应指数 r 呈极显著负相关关系,相关系数 $-0.995(p < 0.001)$;(4)不同响应指数下的状态指数变化表明随着响应指数的增加,北京空气质量改善,但是在响应力度不强时其消极影响占主位;(5)1900年以前北京市人类活动对空气环境的影响很小,北京市生命支持系统的生态服务功能可以调节其影响;1975年后,北京市生命支持系统的生态服务功能显著下降,城市空气质量恶化,但随着人工调节能力的增强城市空气质量自1998年后趋于改善。

关键词:空气污染;人类活动;生态系统服务;综合评价;北京

文章编号:1000-0933(2005)09-2214-07 中图分类号:Q14,X24,X51 文献标识码:A

Comprehensive ecological assessments of human impacts on air quality in Beijing, China

ZHOU Wen-Hua, WANG Ru-Song, ZHANG Ke-Feng (Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2214~2220.

Abstract: Aiming at providing scientific foundations for the policymakers to control urban air emissions, this paper explored two methodologies for evaluating the impacts of human activity (from 1983 to 2003), human and natural regulation (from the early days of Beijing city to 2003) on the air quality of Beijing's urban ecosystem through the Pressure-State-Response indicator system, ecosystem services estimating, and historical literature review. The results show that: (1) The three top ones are 2003 (0.619), 2001 (0.598), and 2002 (0.578); the three last ones are 1983 (0.392), 1984 (0.395), and 1985 (0.495). The total human impacts have an active tendency and increase with steady steps. (2) The active and negative impacts increased simultaneity from 1983 to 2003. Urban air quality improved since 1998. (3) The correlation coefficient between pressure index and response index is $-0.995 (p < 0.001)$. (4) The state index increased with the response index. As a result, the air quality improved, but the negative impacts dominated the active ones when the response index is not robust enough. (5) There are little human impacts on urban air quality before 1900. Bio-support services of Beijing city can regulate the impacts. However, after 1975, because bio-support services remarkably decreased, air quality became very severe. With the increase of human regulation ability, air quality of Beijing has been improved since 1998.

Key words: air pollution; human activity; ecosystem services; integrative assessment; Beijing

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX3-SW-424)

收稿日期:2005-04-08; **修订日期:**2005-06-18

作者简介:周文华(1974~),女,辽宁丹东人,博士生,主要从事城市生态系统健康研究. E-mail: zwh3429@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangrs@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (No. KZCX3-SW-424)

Received date: 2005-04-08; **Accepted date:** 2005-06-18

Biography: ZHOU Wen-Hua, Ph. D. Candidate, mainly engaged in urban ecosystem health. E-mail: zwh3429@yahoo.com.cn

北京是全国的政治和文化中心,是世界著名的古都和现代国际城市。在全国经济社会发展和城市建设方面处于领先地位,随着国家整体的现代化进程,北京经济发展处于快速、稳定的增长时期,经济增长连续 5a 保持在 10% 以上,但是在快速发展中面临着严峻的空气污染问题,因此本文旨在综合评价人类活动、人工调节措施(1983~2003 年)和生命支持系统生态服务功能(北京建城初~2003 年)对北京城市空气质量的影响,以期为北京未来的空气污染控制政策的制定提供科学依据。

国内外有关研究通常只注重人类活动对城市空气质量的消极影响,如城市燃料燃烧^[1]、工业生产^[2,3]、交通过程中产生的废弃物^[4~6],而忽视了人是城市生态系统中的主导成分和调节者,人对大气环境的负面影响最后反作用于人,当自然生态系统受到外界干扰时,可以借助于自我调节和自我维持能力以维持生态平衡,而城市生态系统受到干扰时,其生态平衡只有通过人们的正确参与才能维持^[7]。人类积极采取响应措施一方面调整自身的行为,另一方面净化污染的大气环境,保护和恢复其生命支持系统的生态服务功能,因而本文采用综合评价的方法评估北京市人类活动对城市空气质量影响。

1 研究区概况

北京市位于华北平原西北隅,地势西北高,东南低,属温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季高温多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷晴燥。多年平均气温 12.3℃,全年以偏北风为主,多年平均风速 2.5m/s。综上所述可以看出北京独特的地理环境及气候条件并不利于污染物扩散,尤其在冬季多逆温天气,使采暖期大气污染更加严重。

北京市有 16 个市辖区,2 个县,2003 年底,北京常住人口 1456.4 万人,国内生产总值 3663.93 亿元人民币,人均国内生产总值为 3.2 万元。

2 研究方法

本文采用基于主成分分析赋权的综合指数法、基于土地利用结构的生态服务功能估算和历史分析相结合的方法评价人类活动对城市空气质量的综合影响,其主要程序分为 7 步:确定评价模型框架,构建指标体系,数据标准化处理,确定各指标权重,确定综合评价模型,生态服务功能估算和历史分析,结果分析。

2.1 确定评价模型框架和构建指标体系

本文的研究思路与 OECD(Organization for Economic Co-operation and Development,经济合作发展组织)1994 年提出的用于环境指标评价的 PSR 模型(Pressure-State-Response;压力-状态-响应)可以很好的拟合。PSR 模型框架起初由 Tony 和 David Rapport 在分析环境压力、状态和响应的相互关系时提出。20 世纪 70 年代以来,OECD 已经应用这个模型框架用于国家环境的报告中。OECD 的国家一致认为在开发环境指标时此模型非常实用可信,应该继续在 OECD 的环境数据和指标工作中使用^[8]。PSR 框架基于因果关系的概念,其指标类型包括(1)压力指标:描述人类活动对人类环境施加的压力;(2)状态指标:描述了与环境和自然资源数量和质量有关的环境状态指标;(3)响应指标:社会对环境变化做出的响应措施。

因此本文借用了此模型框架并参照了北京空气污染的来源分析(图 1),构建评价模型框架和指标体系(如表 1)。其中

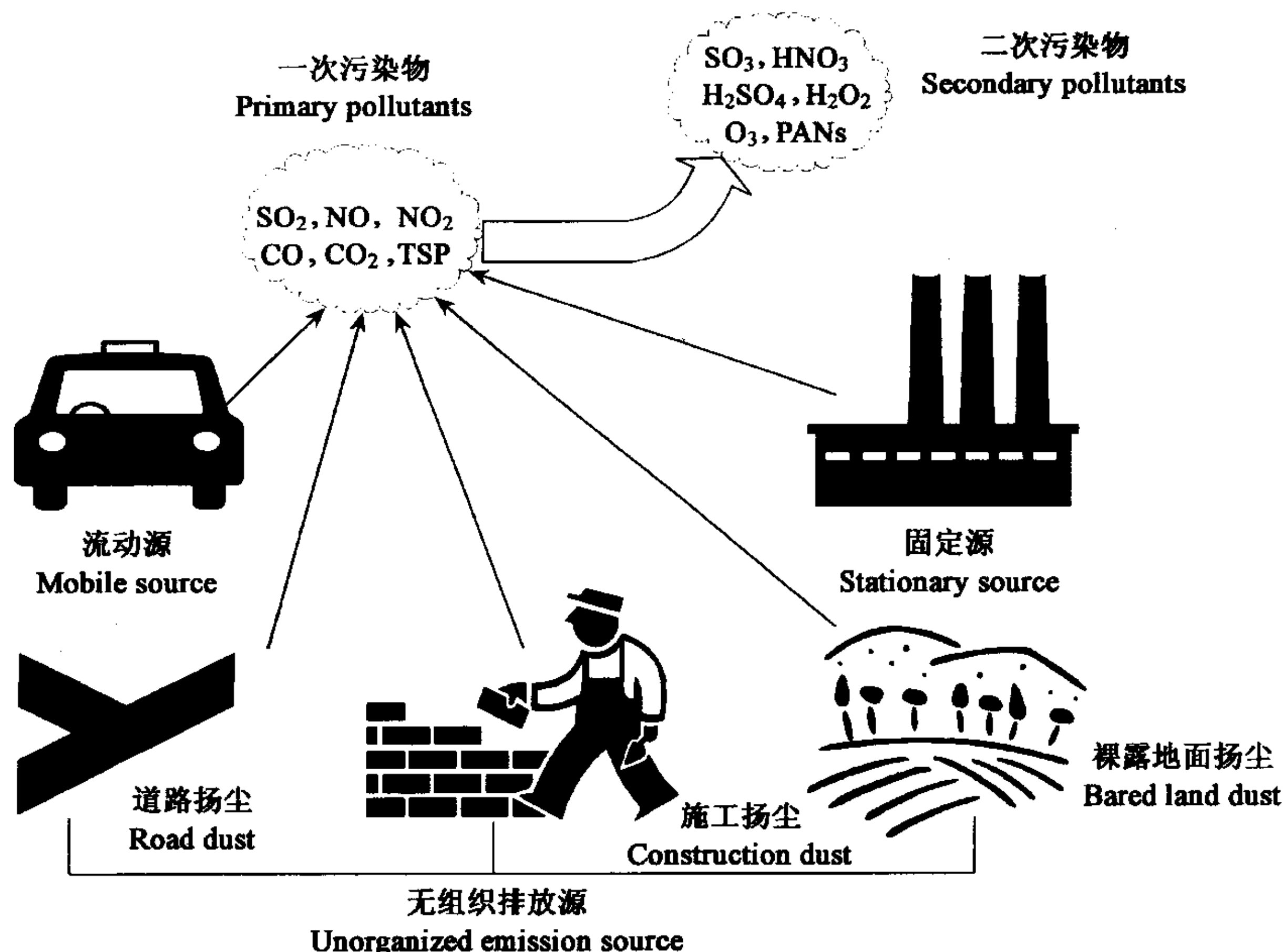


图 1 北京空气污染来源分析图

Fig. 1 The air pollution source analyzing map of Beijing city

Pressure 代表人类活动对城市大气环境的消极影响,主要指标有人口、能源、交通、经济、扬尘(此处由于数据的不可获得性,仅选择了施工面积作为建筑施工扬尘的指标)等;State 代表城市大气环境的状态,主要指标有 3 种主要污染物 SO₂、NO_x 和 TSP 的现状指标;Response 代表人类活动对城市大气环境的积极影响,主要指标有投资、产业结构、能耗效率、绿地建设和城市居民的燃气普及率等。

表 1 人类活动对城市大气环境的影响综合评价指标

Table 1 The comprehensive assessment indicators of human impacts on the air quality of Beijing				
类别 Catalogue	指标 Indicators	属性 Types	标准值 Standard	权重 Weight
P	P1 人口密度 Population density	—		0.073
	P2 能源消费量 Total consumption of energy	—		0.073
	P3 GDP Gross domestic product	+		0.073
	P4 单位道路机动车辆数 Motor vehicles per road length	—		0.074
	P5 房屋施工面积 Floor space of buildings under construction	—		0.072
S	S1 SO ₂ 年平均浓度 Annual SO ₂ average concentration	—	* 0.02	0.046
	S2 氮氧化物年平均浓度 Annual NO _x average concentration	—	* 0.05	0.069
	S3 总悬浮颗粒物年平均浓度 Annual TSP average concentration	—	* 0.08	0.028
R	R1 第三产业产值占 GDP 的比值 Percentage of tertiary industry in GDP	+		0.073
	R2 环境投资占 GDP 的比值 Environment investment in GDP proportion	+		0.069
	R3 绿化覆盖率 Coverage of city green areas	+		0.074
	R4 道路绿化总长度 Total length of green roads	+		0.068
	R5 城市热化率 Percentage of central heat supply	+		0.072
	R6 城市居民炊事气化率 Percentage of population using gas	+		0.065
	R7 单位 GDP 能耗 Energy consumption per GDP	—		0.071

数据来源于北京市统计年鉴(1984~2002 年);北京市环境质量报告(1984~2002 年);* 环境空气质量标准(GB 3095-1996)一级标准;其中“+”代表效益型指标,“—”代表成本型指标 Data source: Beijing Statistic Year Books(1984~2002); Beijing Environment Quality Reports (1984~2002); * First level of Environment Air Quality Standard (GB 3095-1996); “+” represents benefit-criteria indicators, and “—” represents cost-criteria indicators

指标体系确定后需要进行检验,以判断其是否符合 PSR 框架,因为 PSR 模型的指标体系是基于因果关系构建的,因此需要进行各指标的相关分析,当其值大于 0.5 时可以认为符合此模型框架^[9~10],研究结果表明在 105 个可能的指标对的相互关系中只有 20% 小于 0.5 不符合要求,因此通过检验,指标体系符合要求。

2.2 数据标准化—极差法

评价城市 $j=1,2,\cdots,n$ 年的人类活动对城市大气环境的影响状况,评价指标体系包括 $i=1,2,\cdots,m$ 个指标。
原始指标数据矩阵为:

$$x = \{x_{ij}\}_{m \times n}$$

(1)

效益型指标(数值越大越好的指标,如城市气化率、城市热化率等)标准化方法:

$$Y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(2)

式中, $x_{\max}$ 为该项指标的最大值, $x_{\min}$ 为该项指标的最小值;
成本型指标(数值越小越好的指标,如单位 GDP 能耗)标准化方法:

$$Y = 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(3)

式中, $x_{\max}$ 为该项指标的最大值, $x_{\min}$ 为该项指标的最小值,其中在状态 S 指标中 $x_{\min}$ 为中国环境空气质量标准(GB3095-1996)中的一级标准。

标准化后的数据矩阵为:

$$y = \{y_{ij}\}_{m \times n}$$

(4)

2.3 指标权重

权重用来表示各指标变量或要素对于上一层次等级要素的相对重要程度的信息,通常权重的确定方法有主观赋权和客观赋权两种。主观赋权法如综合指数法,德尔菲法等是依据研究者的实践经验和主观判断来确定,客观赋权法如主成分分析法、因子分析法、熵权法等是依据指标反映的客观信息来反映其相对重要程度。为尽量减少主观因素对各指标相对重要程度的影响,本文采用主成分分析法计算。

主成分分析法以其理论的简洁性,赋权的客观性等特点,广泛用于经济、环境、社会等领域中,其机理可以简要陈述如下:借助于一个正交变换 T ,将其分量相关的原随机向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$,转化成其分量不相关的新随机向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_p)^T$,这在代数上表现为将 X 的协方差阵变换成对角形阵,在几何上表现将原坐标系变换成新的正交坐标系,使之指向样本点散布最开的 p 个正交方向,然后对多维变量系统进行降维处理,使之能以一个较高的精度转化成低维变量系统,再通过构造适当的价值函数,进一步把低维系统转化成一维系统^[11]。根据此原理求取各指标的权重,首先根据特征值的贡献率(累积方差贡献率 $\geq 85\%$)获得 2 个主成分的相应权重(表 2),然后计算主成分载荷矩阵中各指标对各主成分分量的贡献率,二者相乘计算各指标对各主成分的贡献值,并归一化处理,得到各指标的最后权重(表 1)。

表 2 主成分特征值及贡献率

Table 2 Component total value and their contribution			
主成分 Component	特征值 Total	占方差 % % of Variance	累积 % Cumulative %
1	12.108	80.719	80.719
2	1.296	8.639	89.358

2.4 综合评价模型的确定

$$\text{人类活动对北京城市空气质量综合影响指数 } T_j: T_j = \sum_{i=1}^a w_i y_{ij} \quad (5)$$

$$\text{压力指数 } P_j: P_j = \sum_{i=1}^a w_{pi} y_{ij} \quad (6)$$

$$\text{状态指数 } S_j: S_j = \sum_{i=1}^a w_{si} y_{ij} \quad (7)$$

$$\text{响应指数 } R_j: R_j = \sum_{i=1}^a w_{ri} y_{ij} \quad (8)$$

式中, w_j 为各指标的权重(表 1), w_{pi} 为各压力指标对压力指数的权重(各压力指标的权重再归一化处理,下同), w_{si} 为各状态指标对状态指标的权重, w_{ri} 为各响应指标对响应指数的权重, $i = 1, 2, \dots, 15$ 个指标, $j = 1, 2, \dots, 21a$ 。指数结果位于 $[0, 1]$, 0 代表人类活动对北京城市空气质量的综合影响趋向消极(压力大,响应弱),空气质量很差,1 代表人类活动对北京城市空气质量的综合影响趋向积极(响应强,压力弱),空气质量达到国家一级环境空气质量标准。

2.5 生态服务功能估算和历史分析

该方法主要通过基于土地利用结构的生命支持系统的生态服务功能估算和历史文献的查阅,分析城市人类活动对生命支持系统的生态服务功能的影响。估算方法参考 Costanza 全球生态服务功能估算参数^[12],并采用相对参数的方法,即设湿地参数为 1,其余地类参数由此得出并对河流/湖泊参数加以调整,因为北京水资源紧张,许多主要河流季节性干枯,有水的河流环境污染较重,因此其生态服务功能相应降低,调整为 0.288,结果如表 3。然后根据 1996 年正式开始的北京市土地利用现状变更调查数据估算 1996~2003 年的生态服务功能,再根据无人影响的北京原始景观数据面积(林地、草地和湿地)估算原始状态的生态服务功能,并将此值设为 1,1996~2003 的数据除此最大值得出各年份生态服务功能的相对值。

历史分析主要是根据历史文献的查阅分析北京市大气污染的历史。

3 结果

(1) 如图 2 所示,人类活动对北京城市空气质量综合影响的排序结果前 3 位排名为 2003 年(0.619)、2001 年(0.598)和 2002 年(0.578),后 3 位排名为 1983 年(0.392)、1984 年(0.395)和 1985 年(0.495)。该结果揭示了在综合考虑人类活动对北京城市空气质量的积极影响和消极影响后 21a 的总体趋势趋向积极且稳步上升,说明了北京市政府在控制空气污染方面采取的一系列人工调节措施如产业结构调整、城市绿化、环境投资、提供能源效率方面取得了显著的成效。

(2) 图 2 中压力指数呈线性下降趋势,表明 21a 来北京对空气污染的消极影响如人口、能源、交通和经济等胁迫因素在逐渐增强;而响应指数与此相反,呈上升趋势,表明 21a 来北京对空气污染的人工调节措施在逐渐加强;状态指数是北京空气质量的表征,21a 来一直呈下降趋势,直至 1998 年空气质量才逐渐好转,这与 1998 年 12 月起北京市政府采取一系列紧急措施控制大气污染密切相关。截至到 2004 年底,北京市政府共实施了 10 个阶段控制大气污染的措施,这些阶段控制措施不仅包括降低主要污染物如 SO_2 、 NO_x 和颗粒物的排放,而且还考虑了二次污染的严重态势,使不断加剧的城市空气质量问题得到缓解。

(3) 图 3 表明压力指数 p 与响应指数 r 呈极显著负相关关系,pearson 相关系数 $-0.995 (p < 0.001)$,揭示了北京的人类活

表 3 北京生命支持系统的生态服务功能估算相对参数

Table 3 Relative coefficients of ecosystem services of Beijing		
土地覆盖类型 Land cover categories	全球生态服务参数 Global ecosystem service coefficient ($\$/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	北京生态服务相对参数 Beijing ecosystem service relative coefficient
林地 Forest	302	0.02
草地 Grassland	232	0.016
河流/湖泊 River/lake	8498	0.288
湿地 Wetland	14785	1
耕地 cropland	92	0.006

动消极和积极影响同时同步在增强;压力指数 p 与状态指数 s 呈正相关关系,相关系数 $0.424(p = 0.056)$ (此结果与主成分分析的权重中 s 较小有关),压力越小即越趋向 1,空气质量愈好;响应指数 R 与状态指数 S 呈显著负相关关系,相关系数 $-0.456(p = 0.038)$,响应越强即越趋向 1,空气质量愈好。

(4)图 4 中,不同压力指数下的状态指数变化情况表明随着消极影响的减小(压力指数趋向 1),北京空气质量逐渐改善,但是消极影响较大时,改善效果并不明显,反而呈下降趋势,因为目前北京市人工调节能力虽然在增加,但能力尚弱并不足以抵消人类活动的消极影响;另外,图 4 中不同响应指数下的状态指数变化表明随着响应指数的增加,北京空气质量改善,但是在响应力度不强时其消极影响占主位,因为大多数国内外城市发展的历程证明城市的发展必然经历了污染-治理-保护的道路,北京也是如此。因此如果要改善城市的环境需要持续减小人类活动的消极影响,并持续增加其响应措施,但是这通常与持续的经济投入和公众参与密切相关。

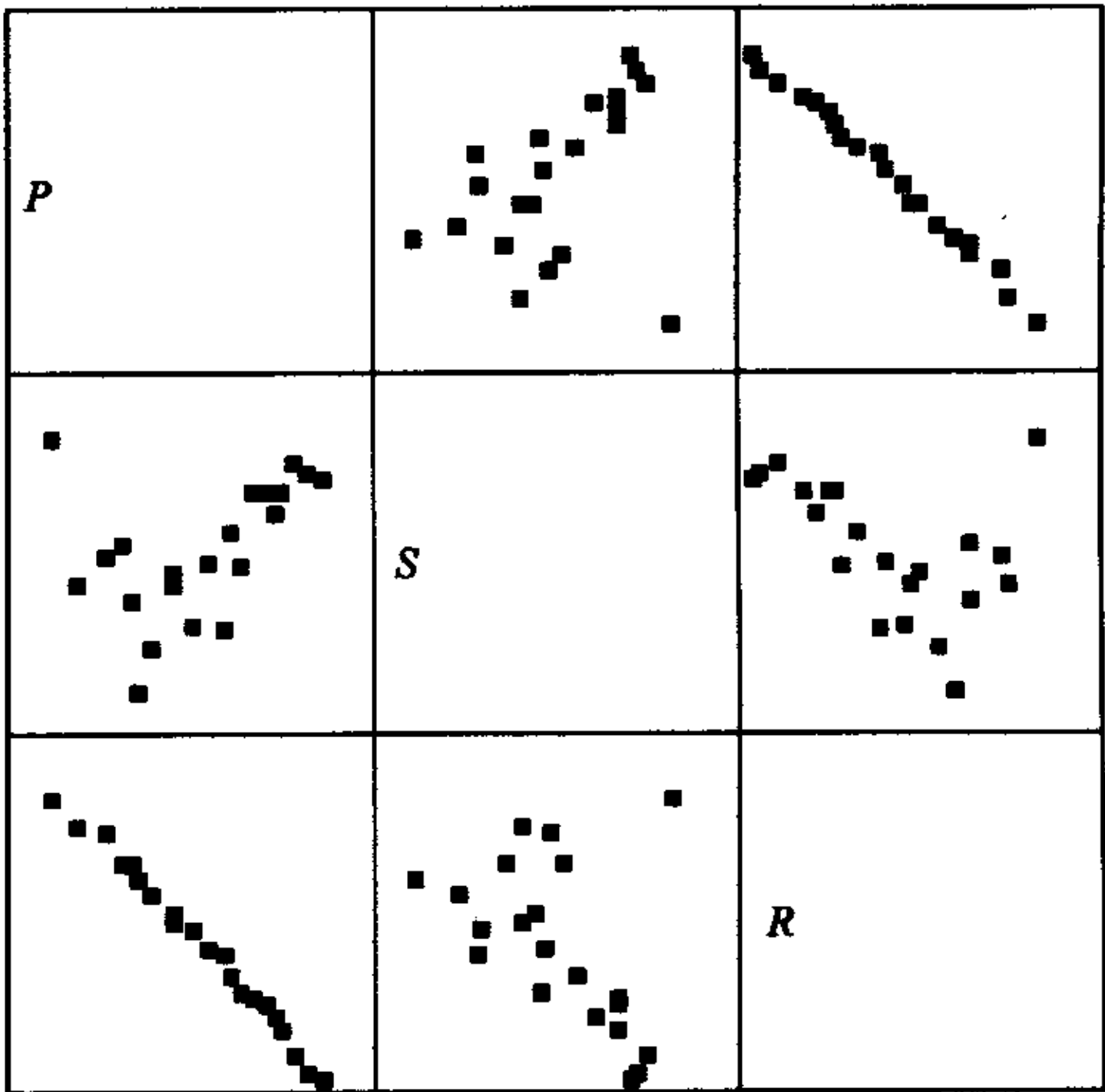
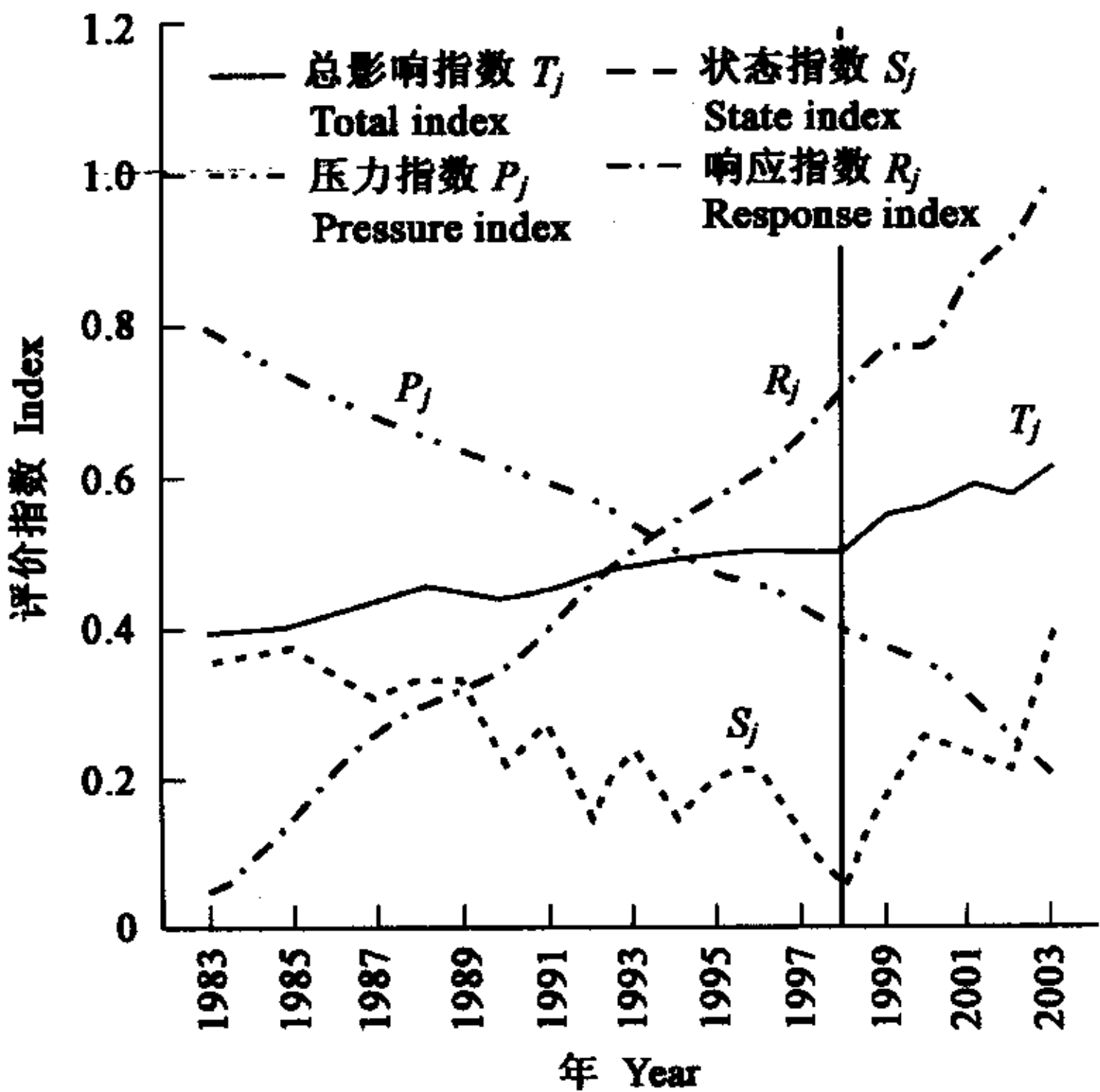


图 2 人类活动对北京城市空气质量综合影响评价结果

Fig. 2 The integrative assessment results of human impacts on the air quality in Beijing, China

图 3 压力、状态和响应指数矩阵散点图

Fig. 3 The matrix scatter map of pressure index, state index, and response index

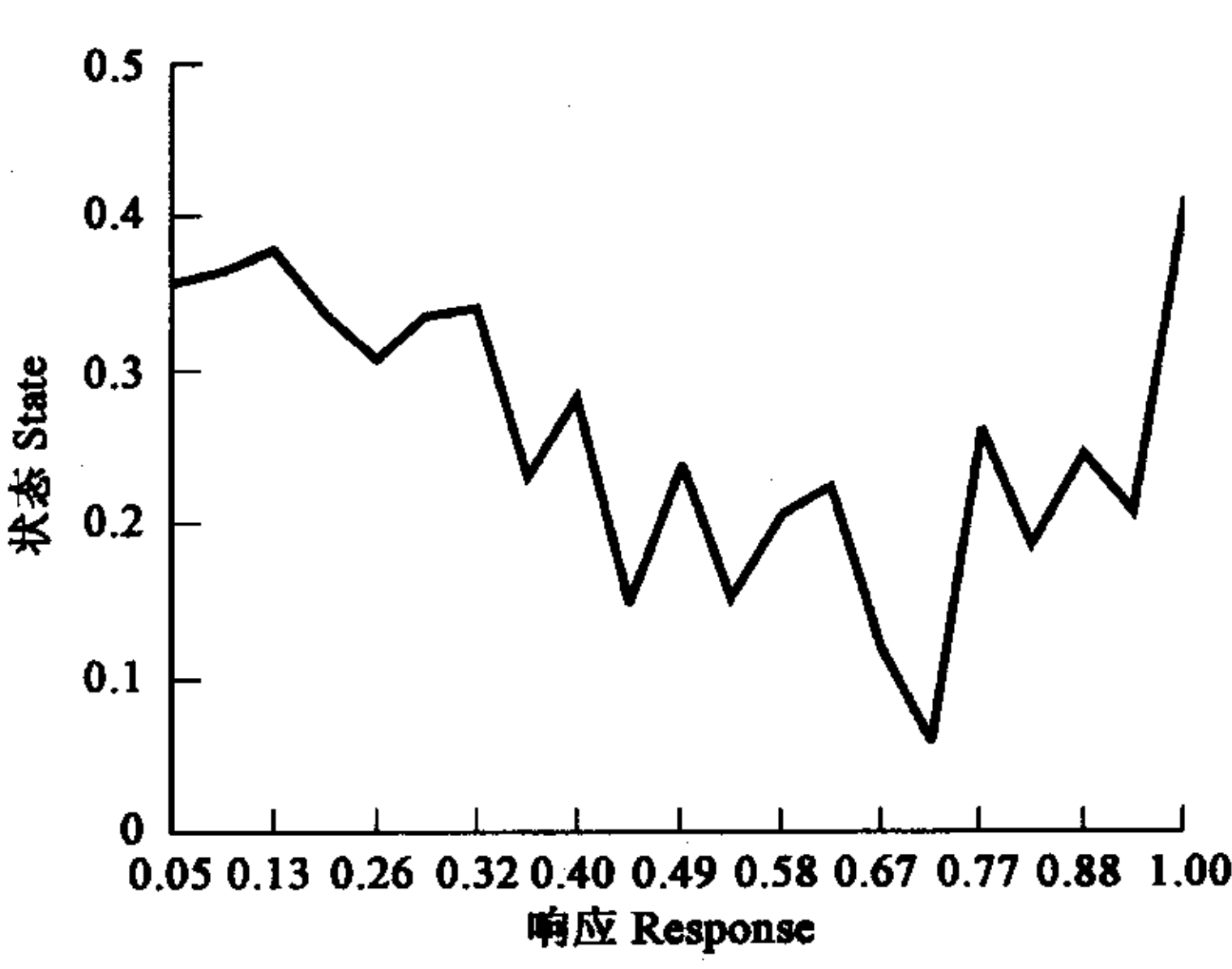
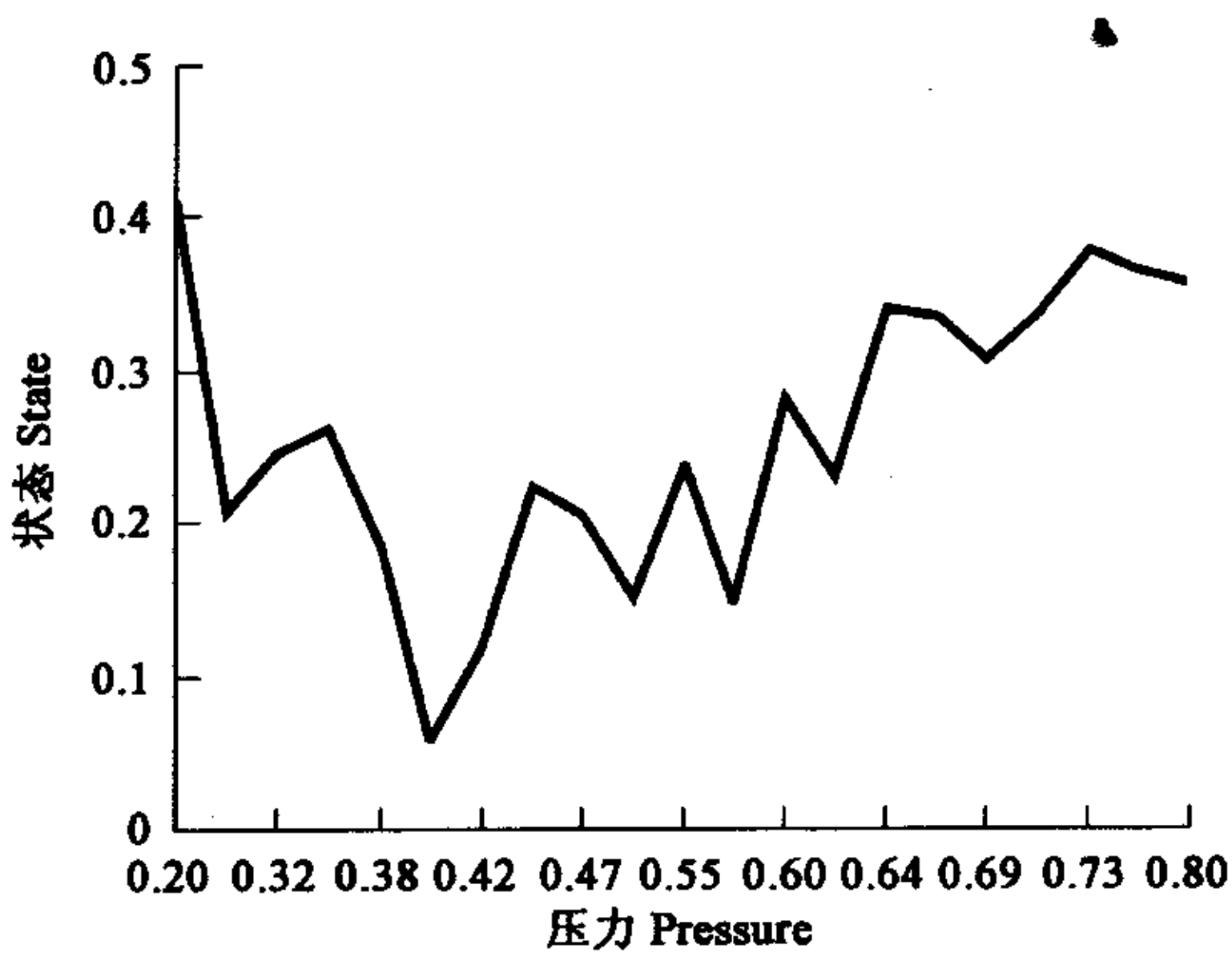


图 4 不同压力指数下的状态指数变化图

图 5 不同响应指数下的状态指数变化图

Fig. 4 The state index change in different pressure index

Fig. 5 The state index change in different response index

(5)北京平原地区未遭人类活动影响以前的原始景观原为森林与草原相互交错的地带,是个“河流纵横,池沼广布的水泽之乡”。有麋鹿优游其间,还有麋子和梅花鹿生息在山地草原和森林边缘^[13]。殷商时代,在北京原始聚落上建立的蓟国被认为是北京建城的开始,后历经燕国,……,唐幽州城、辽南京城、金中都城、元大都城和明清北平城和北京城(1403 年~)而繁荣至今。根据聂瑞丽等^[14]通过对树木年轮分析而恢复的北京市近两百年大气污染历史的结论,可以看出 1900 年以前北京市大气污染程度很轻,大气较清洁,表明人类活动对空气环境的影响很小,北京市生命支持系统的生态服务功能相对值为 1 左右,可以调节其影响;1900~1975 年,北京市大气污染程度持续增强,主要表现在燃煤的影响,而人工调节能力不强,表明人类活动对空气环境

的影响持续增加,生命支持系统的生态服务功能开始下降而导致大气状况恶化;1975年后,北京市空气污染进入严重阶段,表明北京市生命支持系统的净化空气的生态服务功能显著下降,到2003年其相对值已经降为0.2(图6),并且已经超过了生命支持系统能够调节的域值,也就是说自然调节能力已不足以使空气质量恢复到自然状态下。与此同时,人工调节能力自1998年实施的连续阶段控制大气污染的措施后在不断增强,因此北京市空气质量自1998年后开始好转。由于湿地的生态服务功能相对值最大,而北京市湿地面积的下降导致1999年后生态服务功能下降。

4 结论与讨论

根据上述分析,得出以下结论:

(1)1983~2003年北京市的人类活动消极与积极影响同时增强,城市空气质量自1998年后有所改善,总体趋势趋向积极且稳步上升。

(2)随着北京城市的快速发展,城市人口密度、GDP、能源消耗量、交通车辆的增加等因素都导致了生活和生产过程中大量的污染物排放,增加了城市中人类活动对空气质量的消极影响,在这种情景中只有加大人类活动的积极影响才能弥补由于人类活动消极影响给城市空气质量带来的压力。尤其是北京市是2008年奥运会的主办城市,这也同时为北京市的空气质量提出了更高的要求,因此为了实现北京市在申办2008年奥运会时提出了“绿色奥运”的目标,目前应采取的主要措施应为:控制人口数量,使用清洁能源,调整能源结构,控制机动车污染,加强控制房屋施工扬尘污染,调整产业结构减少工业污染的排放,加强绿地建设等。

(3)在压力因素中能源消耗和机动车保有量是重要的影响因子:①能源消耗:2003年,第二产业的能源消耗占各产业能源消耗的64.9%,GDP的贡献率仅为40.8%,而第三产业能源消耗占各产业的能源消耗的32.6%,GDP的贡献率却为61.6%,因此北京市有必要进行产业结构调整,大力发展第三产业。另外,北京市能源结构中煤炭的比重过大,2003年占56.8%,因此应积极引进优质能源,削弱煤炭在能源结构中的比例,以保证 SO_2 在空气中的浓度达到国家2级标准。2003年北京市GDP产值单耗1.29 t标煤/万元,与OECD国家0.437 t标煤/万元有巨大的差距(日本只有0.257 t标煤/万元),因此北京在未来的人类活动积极影响下还有很大的提升潜力,以减少由于能耗高而导致的污染物的高排放量问题。②机动车保有量:北京市的大气污染正由煤烟型污染向机动车尾气污染转化,近十多年机动车保有量增长率达到16.4%,到2003年机动车199.1万辆,单位道路机动车137.76辆/km,其中国家科技专项“北京市大气污染控制对策研究”的成果,轻型汽油车、中型汽油车和重型汽油车为HC和CO排放最主要的贡献者,中型汽油车、重型汽油车和重型柴油车是 NO_x 和 PM_{10} 排放量最主要的贡献者,因此中型汽油车、重型汽油车和重型柴油车是北京市控制的重点,应加强使用清洁能源以及安装排放控制设备控制其污染排放,另外倡导使用以清洁能源为驱动的替代燃料车,降低出行的能耗。

(4)保持城市的空气质量短期内必须减少人类对大气环境的影响,同时,增加人工调节能力以弥补自然调节能力的不足,但是从长远来看,人工调节不能替代自然调节,只有在减小压力的同时恢复城市生命支持系统的生态服务功能,才能保证北京的蓝天。

(5)标准化方法和指标赋权是该综合评价的核心,但是由于目前国内外尚无权威的赋权方法,主观和客观赋权法均有其有缺点,而常用的标准化方法如极差法、极值法、Z-score法、比重法、百分比法等都有其优缺点,本文采取的极差法的缺陷在于很难判断该指标是正指标或是逆指标,因为事实上大多数指标是相对最优值的正(逆)指标,而最优值的确定非常困难,国内外尚无更好的方法,因此标准化方法和赋权问题仍是需要进一步研究的问题。

(6)本文的生态服务功能计算是基于土地利用结构计算的结果,其前提假设一为全球参数与北京参数相同,二为每种土地利用的质同量异,这在实际上是不可能的,但是由于目前国内外尚无较好的研究方法,北京地区也没有详细的生态系统监测数据的支持,因此本文采用基于土地利用结构的估算方法简易,但是生态服务功能量化估算仍需深入研究。

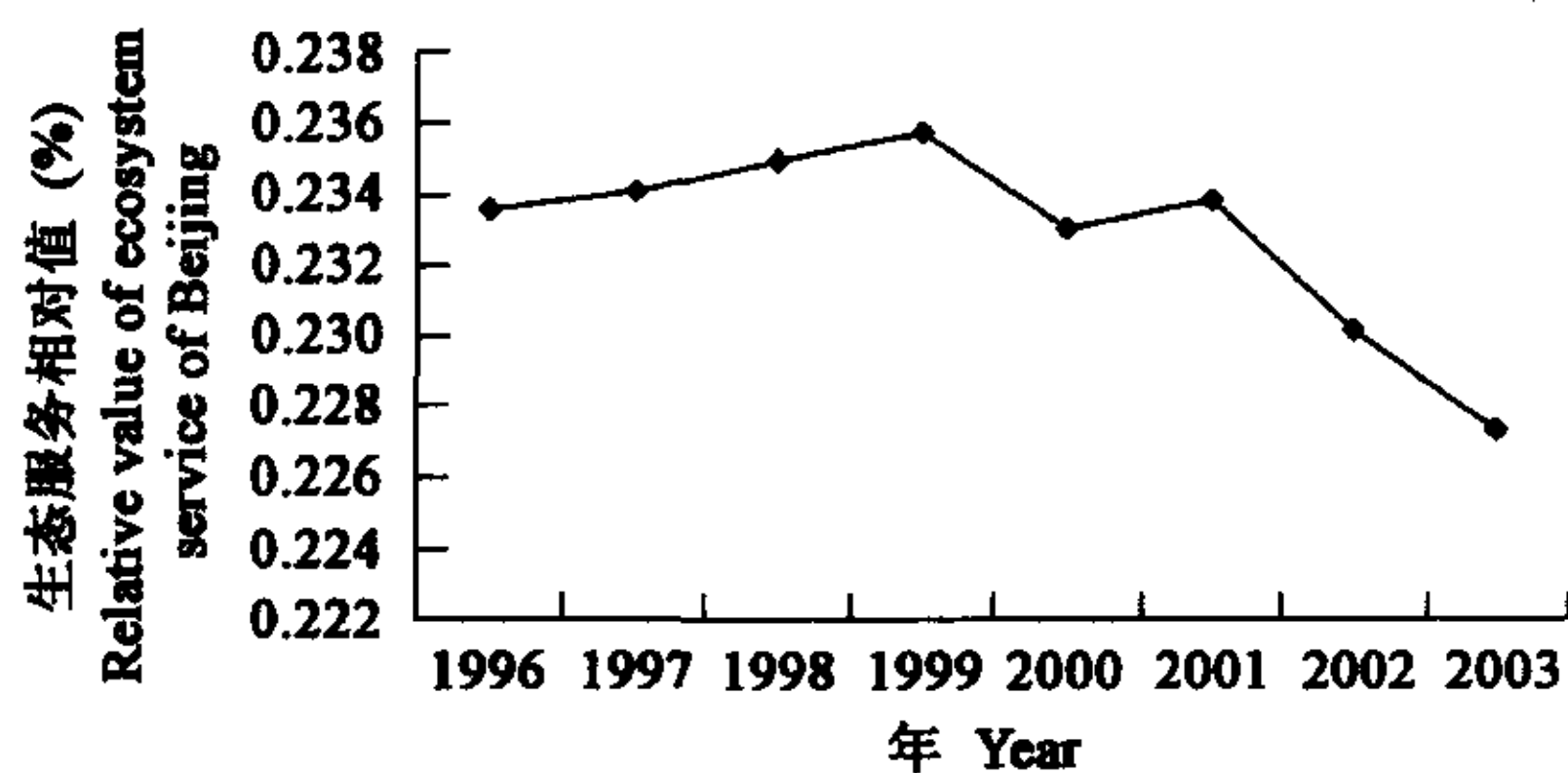


图6 1996~2003年北京生命支持系统的生态系统服务功能相对值

Fig. 6 Relative value of ecosystem services of Beijing from 1996 to 2003

References:

- [1] Duan F K, Liu X D, Yu T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing. *Atmospheric environment*, 2004, (38):1275~1282.
- [2] Lucon O, Santos E M. The HORUS model-inventory of atmospheric pollutant emissions from industrial combustion in Sao Paulo, Brazil.

Environmental Impact Assessment Review, 2005, **25**(2):197~214.

- [3] Wang S X, Hao J M, Ho M S, *et al.* Intake fractions of industrial air pollutants in China: Estimation and application. *Science of The Total Environment*, 2005.
- [4] Johansson B. Will new technology be sufficient to solve the problem of air pollution caused by Swedish road transport? *Transport Policy*, 1998, **5**(4):213~221.
- [5] Lee B K, Jun N Y, Lee H K. Analysis of impacts on urban air quality by restricting the operation of passenger vehicles during Asian Game events in Busan, Korea. *Atmospheric Environment*, 2005.
- [6] Ghose M K, Paul R, Banerjee S K. Assessment of the impacts of vehicular emissions on urban air quality and its management in Indian context; the case of Kolkata. *Environmental Science & Policy*, 2004, **7**(4):345~351.
- [7] Song Y C. Urban ecosystem and urban ecology. In: Song Y C, You W H, Wang X R, eds. *Urban ecology*. Shanghai: Huadong Normal University Press, 2000. 42~54.
- [8] OECD. Using the Pressure-State-Response Model to develop indicators of Sustainability——OECD Framework for Environmental Indicators, 1999.
- [9] Nunnally J C. *Psychometric Theory*. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [10] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, *et al.* Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment. *Journal of Environmental Management*, 2004, **70**: 85~93.
- [11] Qin S K, *et al.* *Integrative assessment theory and application*. Beijing: Electronics Industry Press, 2003. 46~62.
- [12] Costanza R, Arge R, Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 1997, **387**:253~260.
- [13] Hou R Z. The theory and practice of historical geography. In: Hou R Z ed. *Hou renzhi corpus*. Beijing: Peking University Press, 1998. 11~18.
- [14] Nie R L, Luo H J, Zhao C Y, *et al.* Tree ring analysis of the dynamic variation of air pollution in Beijing. *Environmental Monitoring in China*, 2001, **17**(4):20~23.

参考文献:

- [7] 宋永昌. 城市生态系统与城市生态学. 见宋永昌, 由文辉, 王祥荣主编. 城市生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2000. 42~54.
- [11] 秦寿康, 等. 综合评价原理与应用, 北京: 电子工业出版社, 2003. 46~62.
- [13] 侯仁之. 历史地理学的理论与实践. 见: 侯仁之编著. 侯仁之文集. 北京: 北京大学出版社, 1998. 11~18.
- [14] 聂瑞丽, 罗海江, 赵承义, 等. 北京市大气污染动态变化的树木年轮分析. 中国环境监测, 2001, **17**(4):20~23.