

通讯联系人: 贾海峰, 副教授, E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

PCSR 分析流程见图 1。

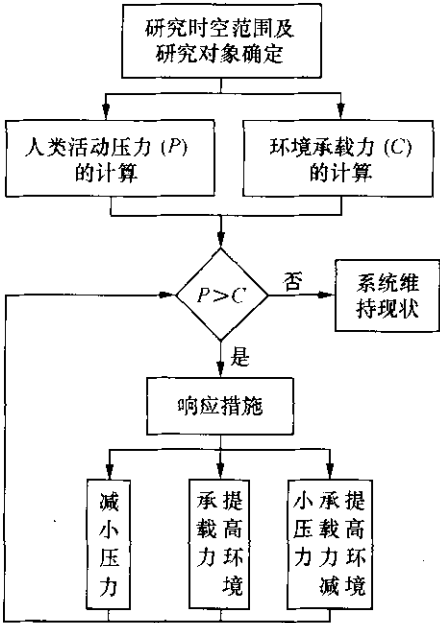


图 1 PCSR 分析流程图

1.2 关键步骤

1.2.1 人类活动压力 P 的计算

从压力成因的角度来看,人类活动压力可分为资源消耗压力和废弃物排放压力;从压力来源的角度来看,主要分为人类生活消费引起的压力和工业企业活动造成的压力两类。根据不同的研究需要,压力的计算方法包括资源消耗指数法、污染指数法、区域比较法等。在 PCSR 分析中,选择压力计算方法时必须能够使压力计算结果与承载力结果相互比较。此外,对于有许多工业企业的区域,如何计算每一个企业造成的环境压力十分重要。

1.2.2 环境承载力 C 的计算

本研究认为,环境承载力可分为天然环境承载力与环境基础设施承载力两类。其中,天然环境承载力指自然生态系统能够容纳的污染物排放量,由自然生态系统的环境容量决定,可以通过现状污染物浓度、环境功能分区及环境标准计算;环境基础设施承载力由人工投资建设决定,可以用设施处置能力来衡量。由于天然承载力利用的经济成本低,因此一般优先考虑天然承载力的利用。为了使环境管理具有操作性,将天然环境承载力合理分配到各个污染源十分必要。

2 案例研究

以中国南方某一工业镇为例进行研究。该镇地处亚热带,面积 76.7 km<sup>2</sup>,2002 年工业总产值高达

75.5 亿元。建筑陶瓷业是该镇的支柱产业,工业产值占全镇工业产值的 70% 以上。实地调研的 64 家建筑陶瓷企业总产值占全镇建筑陶瓷行业工业总产值 98% 以上。该镇的首要污染物是 SO<sub>2</sub> 和粉尘,2004 年该镇年平均 SO<sub>2</sub> 浓度超过了国家环境空气质量二级标准。由于粉尘污染主要是企业内部的局部污染,进行严格的设施管理就可以收到较好的效果。SO<sub>2</sub> 污染则需要区域联合控制才能奏效,因此采用了 PCSR 分析方法综合研究 SO<sub>2</sub> 控制措施。

2.1 各企业 SO<sub>2</sub> 排放压力计算

将各个企业的 SO<sub>2</sub> 排放量占该镇排放总量的比例作为各个企业的压力指数,计算结果见图 2,其中, P<sub>i</sub> 为各企业的 SO<sub>2</sub> 压力指数, i 为企业序号。假设该镇 SO<sub>2</sub> 排放总量为 Q,则 q<sub>i</sub> 为 SO<sub>2</sub> 实际排放量,

$$q_i = Q P_i.$$
 (1)

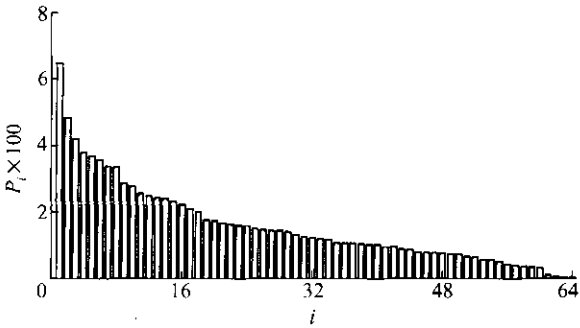


图 2 各企业的 SO<sub>2</sub> 压力指数

统计分析表明,该镇建筑陶瓷企业的 SO<sub>2</sub> 污染压力指数呈偏正态分布,参见图 3,其中, f 为 SO<sub>2</sub> 污染压力指数分布频率。由于曲线峰值出现在左侧,说明和平均排放水平相比,大多数企业的 SO<sub>2</sub> 排放水平较低。空间分析表明,横跨该镇中部的河流两岸集中分布了大量建筑陶瓷企业(图 4),占企业总数的 46.88%,但该部分企业的 SO<sub>2</sub> 排放量占到了该镇 SO<sub>2</sub> 总排放量的 56.14%,因此中部的污染排放情况较为严重。

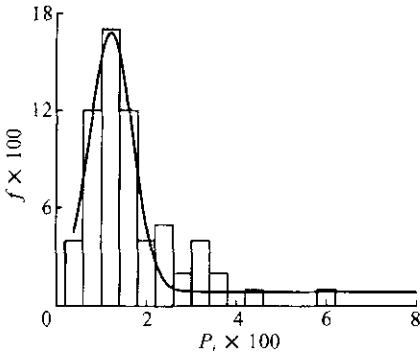


图 3 各企业 SO<sub>2</sub> 压力指数频率分布

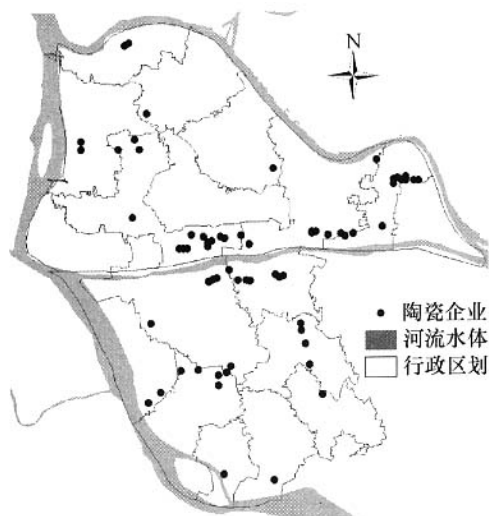


图4 各企业空间分布

## 2.2 各企业 SO<sub>2</sub> 环境承载力计算

目前,该镇的建筑陶瓷企业几乎都没有建设脱硫设施,因此环境设施承载力为零,仅需要计算天然环境承载力。大气污染物排放与环境污染浓度之间的关系较为复杂,有多种模型,例如箱式模型、Gauss 模型、Rollback 比例缩减模型等<sup>[9]</sup>。本文选择了简单实用的 Rollback 比例缩减模型进行 SO<sub>2</sub> 环境容量的预测。为了将环境容量合理公平地分配到各个污染源,采用了基于设备的分配系数算法。假设 SO<sub>2</sub> 总量控制目标为  $X$  吨,各个企业的 SO<sub>2</sub> 排放量限值为

$$q_p = Xw_i, \quad (2)$$

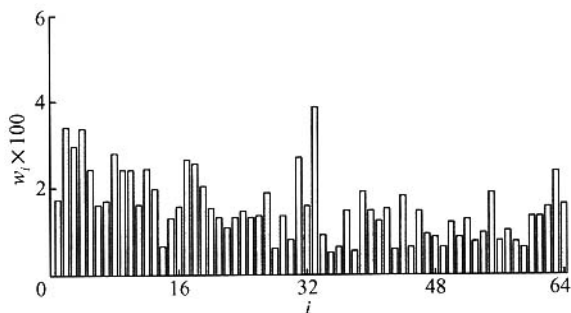
式中  $w_i$  为各个企业的分配系数。

分配系数  $w_i$  的确定非常关键。结合建筑陶瓷行业特点,根据现场调查的各企业喷雾塔和窑炉的数量及能力计算 SO<sub>2</sub> 承载力的分配系数。由于各个企业的喷雾塔型号及窑炉长度不同,以 3200 型号喷雾塔和 100 m 长的窑炉为当量进行换算,根据喷雾塔及窑炉的当量数确定分配系数,计算公式为

$$w_i = \frac{\lambda a_i + (1 - \lambda)b_i}{\sum_{i=1}^n [\lambda a_i + (1 - \lambda)b_i]}. \quad (3)$$

式中:  $a_i$  为各个企业喷雾塔当量数,  $b_i$  为各个企业窑炉当量数,  $\lambda$  为喷雾塔排放的 SO<sub>2</sub> 占 SO<sub>2</sub> 排放总量的比重。当然,这里的分配系数同样是一个相对值。各个企业的分配系数实际上就是各个企业能够分配到的天然承载力指数。计算结果见图 5。

可以看出,在满足目标总量控制要求的条件下,各个企业造成的 SO<sub>2</sub> 排放压力及其分配到的天然承载力是非常不一致的。当企业排放总量  $Q$  和 SO<sub>2</sub>

图5 各企业的 SO<sub>2</sub> 天然承载力指数(分配系数)

总量控制目标  $X$  相等时,对各企业的 SO<sub>2</sub> 压力指数和天然承载力指数进行比较可知,压力指数超过环境承载力指数的企业个数为 33 个,占企业总数的 51.56%。这与当地大气环境质量的下降有一定的相关性,因此需要采用响应措施来解决环境问题。

## 3 响应分析

利用情景分析法来构建响应方案。响应方案的生成有两种思路,一种是从减少压力的方面考虑;另一种是从增大承载力的方面考虑。由此可以得到以下两个响应方案。

**方案 1** 企业排放的 SO<sub>2</sub> 主要来源于燃料的燃烧排放。采用较为清洁的能源,能从根本上减少 SO<sub>2</sub> 生成量。由于建筑陶瓷的生产连续性强、能源需求量大,当地的天然气供应能力不能满足正常生产;而柴油和水煤浆的供应渠道和数量都比较稳定,能满足实际生产的能源需要,单位 SO<sub>2</sub> 排放量也比重油少。其中,水煤浆可替代喷雾塔的重油,柴油可替代辊道窑的重油。主要参数见表 1。

**方案 2** 传统的污染控制方式,即建设脱硫设施,提高 SO<sub>2</sub> 的去除量。根据文献调研结果,脱硫除尘设施的单位 SO<sub>2</sub> 处理费用为 1.24 万元/t<sup>[10]</sup>。

表1 方案1的参数

能源类别	价格 元·t <sup>-1</sup>	$w(\text{SO}_2)$	排放因子	热值 kJ·kg <sup>-1</sup>
重油	1 800	2.7	1.0	41 820
柴油	2 200	1.0	1.0	42 866
水煤浆	400	0.4	0.7	16 728

数据来源:文<sup>[11]</sup>及 2004 年实地调查结果

分析发现,方案 1 的成本相对较低,但受市场能源供给的影响较大;同时,随着生产规模的扩大,方案 1 的 SO<sub>2</sub> 排放总量仍然有可能增加;方案 2 的成本相对较高,且需要专业的技术人员,但可以灵活选择 SO<sub>2</sub> 的削减力度。因此,最优策略是根据各个企业的实际情况灵活组合方案 1 和方案 2,采用综合

的响应措施。

根据建筑陶瓷企业  $\text{SO}_2$  排放压力及承载力分析结果,结合该镇的生态敏感点分布情况,最终选择了 26 家建筑陶瓷企业进行  $\text{SO}_2$  污染控制,控制措施包括了清洁能源替代和脱硫设施建设两部分,形成的  $\text{SO}_2$  削减量将达到 12 kt/a。其中,由清洁能源替代形成的削减量为 6.8 kt/a;新建脱硫设施形成的削减量为 5.2 kt/a。整改企业的空间分布较为均匀,见图 6。这说明虽然大部分企业集中在中部河流两岸,但是其中仅有部分企业造成的  $\text{SO}_2$  污染较严重,需要进行整改。进一步的空间统计分析可知,该镇北部的 9 家建筑陶瓷企业中,有 7 家企业的排放  $\text{SO}_2$  量远远超过其允许排放量,均须进行整改,整改率可望达到 78%。

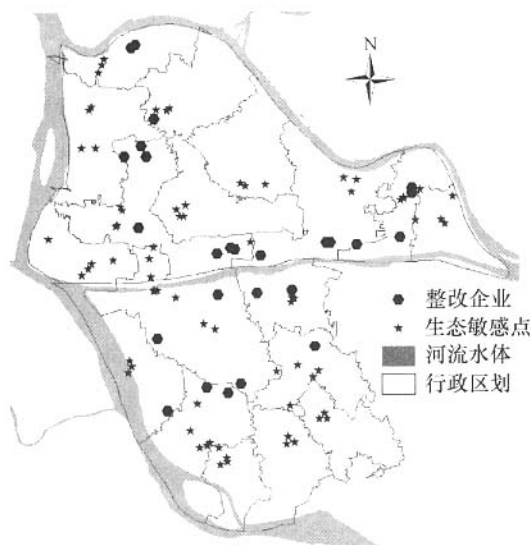


图 6 整改企业(26 家)分布图

## 4 结 论

本研究在传统的压力-状态-响应概念模型框架基础上,引入承载力因子,提出 PCSR 分析方法,并应用于工业  $\text{SO}_2$  污染控制研究。以中国南方某镇建筑陶瓷行业为例,进行了案例研究。结果表明,该镇现有建筑陶瓷行业造成的  $\text{SO}_2$  污染压力和承载力分布非常不均衡。结合该镇的生态敏感区分布情况,选择了 26 家企业综合采取清洁生产及建设脱硫设施等响应措施,  $\text{SO}_2$  总削减量将达到 12 kt/a。进一步的空间分析发现,该镇北部的 9 家建筑陶瓷企业中,有 7 家企业的排放  $\text{SO}_2$  量远远超过其允许排放量,均须进行整改,整改率可望达到 78%。

## 参考文献 (References)

- [1] Rapport D, Friend A. Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics: A Stress-Response Approach [R]. Catalogue No. 11 - 510, Ottawa: Statistics Canada, 1979.
- [2] OECD. OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews [R]. GD(93)179, Paris: OECD, 1993.
- [3] OECD. OECD Environmental Performance Reviews: A Practical Introduction [R]. GD(97)35, Paris: OECD, 1997.
- [4] 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 [J]. *J Environmental Management*, 2004, **70**(1): 85 - 93.
- [5] Prato T. Modeling carrying capacity for national parks [J]. *Ecological Economics*, 2001, **39**: 321 - 331.
- [6] Berger A, Hodge R. Natural change in the environment: A challenge to the pressure-state-response concept [J]. *Social Indicators Research*, 1998, **44**(2): 255 - 265.
- [7] 张坤民. 生态城市评估与指标体系 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.  
ZHANG Kunmin. Eco-City Assessment and Indicator Systems [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 张智慧, 申立银, 施德伟. 推进城市化的可持续发展模式 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, **40**(S1): 1 - 6.  
ZHANG Zhihui, SHEN Liyin, SHI Dewei. Promoting urbanization towards sustainable development [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2000, **40**(S1): 1 - 6. (in Chinese)
- [9] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.  
HAO Jiming, MA Guangda. Air Pollution Control Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 国家环境保护总局. 两控区酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划 [Z]. 北京: 国家环境保护总局, 2002.  
State Environmental Protection Agency. The 10th Five-year Plan for Acid Rain and  $\text{SO}_2$  Pollution Control in Two Controlled Zones [Z]. Beijing: State Environmental Protection Agency, 2002. (in Chinese)
- [11] 王晓春, 吴国光, 王共远. 水煤浆技术及在徐州的产业化前景 [J]. 能源技术与管理, 2004, (1): 11 - 14.  
WANG Xiaochun, WU Guoguang, WANG Gongyuan. Coal-water slurry technology and its industrialization prospect in Xuzhou [J]. *Energy Technology and Management*, 2004, (1): 11 - 14. (in Chinese)