

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0666

周业晶,周敬宣,肖人彬,等.2016.以 GDP-PM<sub>2.5</sub>达标为约束的东莞大气环境容量及承载力研究[J].环境科学学报,36(6):2231-2241

Zhou Y J, Zhou J X, Xiao R B, et al. 2016. Atmospheric environment capacity and its carrying capacity constrained by GDP-PM<sub>2.5</sub> attainment in Dongguan City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(6): 2231-2241

# 以 GDP-PM<sub>2.5</sub> 达标为约束的东莞大气环境容量及承载力研究

周业晶<sup>1</sup>, 周敬宣<sup>1,\*</sup>, 肖人彬<sup>2</sup>, 张国斐<sup>1</sup>

1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074

2. 华中科技大学系统工程研究所, 武汉 430074

收稿日期: 2015-07-13

修回日期: 2015-09-06

录用日期: 2015-09-19

**摘要:** 东莞市计划到 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度达到国家二级标准 (35 μg·m<sup>-3</sup>), GDP 年均增长率至少不低于 7%。面对复合型为特征的 PM<sub>2.5</sub> 大气污染, 传统的环境容量和承载力计算方法具有局限性。因此, 本文基于经济、气象、能源、环境等关键信息, 利用系统动力学 (SD) 建立了 GDP-PM<sub>2.5</sub> 宏观动态统计模型。考虑到 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度等统计值本身就是污染物不断生成又不断扩散、沉降达到动态平衡的综合结果。因此, SD 模型可不从理化角度去模拟复杂的大气传输和扩散过程, 而是通过引入各污染物的比例系数 μ, 构建转化率 η, 建立 GDP、PM<sub>2.5</sub> 年均浓度、五大污染物 (VOCs、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、一次 PM<sub>2.5</sub>) 排放量等变量之间的逻辑联系, 为分析和预测工作奠定基础。同时, 本文梳理了大气环境压力、承载力和容量的定义, 强调了三者之间的相互作用、密不可分的动态关系, 建设性地提出了度量承载力的 11 项指标 (5 个显性、6 个隐性)。最后, 利用模型模拟预测了“综合治理”模式下 2012—2020 年间以 GDP-PM<sub>2.5</sub> 达标为约束的五大污染物的大气环境压力、容量和承载力。结果表明, 预计 PM<sub>2.5</sub> 浓度达标约在 2017 年上半年, 对应的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、NH<sub>3</sub>、一次 PM<sub>2.5</sub> 容量分别为 84987、138849、100875、7751、17402 t; 承载力隐性部分各项阈值分别为 GDP 总量 7074 亿元、新增绿色 GDP 737 亿元、煤炭 2120 万 t (以标煤计)、石油 552 万 t (以标煤计)、天然气 663 万 t (以标煤计)、新能源 630 万 t (以标煤计); 承载力显性部分各阈值 (相对于 2012 年 5 年累积减排量) 分别为 SO<sub>2</sub> 64271 t、NO<sub>x</sub> 128831 t、VOCs 108337 t、NH<sub>3</sub> 4070 t、一次 PM<sub>2.5</sub> 35863 t。本研究为东莞市大气减排提供了具体目标和参考数值。

**关键词:** 大气环境容量; 大气环境压力; 大气环境承载力; 阈值; 系统动力学; 东莞市

文章编号: 0253-2468(2016)06-2231-11

中图分类号: X26

文献标识码: A

## Atmospheric environment capacity and its carrying capacity constrained by GDP-PM<sub>2.5</sub> attainment in Dongguan City

ZHOU Yejing<sup>1</sup>, ZHOU Jingxuan<sup>1,\*</sup>, XIAO Renbin<sup>2</sup>, ZHANG Guofei<sup>1</sup>

1. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

2. Institute of System Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received 13 July 2015;

received in revised form 6 September 2015;

accepted 19 September 2015

**Abstract:** The Government of Dongguan city plans to achieve national air quality standard II of PM<sub>2.5</sub> of 35 μg·m<sup>-3</sup> in 2017 while maintaining the GDP growth rate no less than 7%. In dealing with air pollution complex characterized by PM<sub>2.5</sub> pollution, conventional methods are not capable of calculating atmospheric environment capacity (AEC) and atmospheric environment carrying capacity (AECC). Based on information about economy, meteorology, energy, PM<sub>2.5</sub> sources, etc., we have built up a macro-dynamic statistical model for the GDP-PM<sub>2.5</sub> relationship by System Dynamic (SD). The annual average statistical value of PM<sub>2.5</sub> concentration is a comprehensive output and a dynamic balance of air pollutants re-producing and diffusing. This SD model does not need to simulate the complicated physicochemical process of atmospheric transmission and diffusion. It uses the pollutants' proportionality factors and conversion rates to build connection between different variables, such as GDP, PM<sub>2.5</sub> and five air pollutants emissions (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs, NH<sub>3</sub> and Primary PM<sub>2.5</sub>), etc., in a logical manner. This provides the foundation for future analyses and predictions. SD method has the advantages of simplicity in dealing with complex problems. We then described the definitions of AEC, AES and AECC and underlined their quantitative dynamic

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.71171089); 东莞市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与防治对策研究项目 (No.东采单[2013]222 号)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No.71171089) and the Research Project of PM<sub>2.5</sub> Pollution Characteristics and Prevention Measures in Dongguan City (No. [2013]222)

**作者简介:** 周业晶 (1987—), 男, 博士研究生, E-mail: 476402115@qq.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: zjxlypyj@163.com

**Biography:** ZHOU Yejing (1987—), male, Ph.D.candidate, E-mail: 476402115@qq.com; \* **Corresponding author**, E-mail: zjxlypyj@163.com

relationships. We proposed 11 indicators that are constrained by GDP-PM<sub>2.5</sub> targets, including 5 expressive and 6 recessive indicators. We used this SD model to simulate and predict the dynamic trend and quantitative results of AEC, AES and AECC in Comprehensive Management Pattern between 2012 and 2020 when the PM<sub>2.5</sub> concentration reaches the standard. The research outcomes indicate that the capacity of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs, NH<sub>3</sub> and primary PM<sub>2.5</sub> is 84987 t, 138849 t, 100875 t, 7751 t, and 17402 t, respectively; the recessive indicators of AECC including GDP, new green GDP and consumption of coal, oil, gas and new energy are 707.4 billion Yuan, 73.7 billion Yuan, 21.2 million t, 5.52 million t, 6.63 million t and 6.3 million t; respectively; the expressive ones including 5 pollutants' accumulated volume of emission reduction compared to in 2012 are 64271 t, 128831 t, 108337 t, 4070 t and 35863 t, respectively. The thresholds of all indicators representing AEC and AECC can then be set as emission reduction targets to optimize Dongguan city's air quality.

**Keywords:** atmospheric environment capacity; atmospheric environment stress; atmospheric environment carrying capacity; thresholds; system dynamic; Dongguan City

## 1 引言 (Introduction)

2014年,中央全面深化改革工作中的一项重要任务就是“多规合一”试点全面启动,以期解决不同部门之间“规划打架”的顽疾.各种区域规划,如城乡总体规划、国民经济和社会发展规划、土地利用规划、环境保护规划均应受到该域的环境容量、环境承载力的约束,必须抑制过大的环境压力.

面对复合型为特征的PM<sub>2.5</sub>大气污染(赖以坚, 2012),传统的单一污染物容量计算方法有较大的局限性(李韧等, 2005;徐盛荣, 2005;李丽, 2007).通常对环境承载力建立的指标体系及阈值量化结果是静态的,表达也比较模糊(毛洪章等, 2006;钱跃东, 2011;刘龙华, 2013);而且,环境承载力和容量研究成果直接用于指导人类社会经济发展的实例还很少(王俭等, 2005).

当前各地都在制定“十三五”规划,以求经济-环境双赢,但尚未看到用理化模型从问题机理研究角度把经济和环境两类问题放在一起讨论的案例;也未看到以GDP-PM<sub>2.5</sub>达标为约束条件下,大气环境承载力如何分解落实到区域社会、经济、环境等各方面的文献,而各方面阈值的计算是十分必要的(薛文博等, 2014).

因此,本文从数据分析的角度建立东莞市的经济-环境宏观动力学统计模型,以GDP-PM<sub>2.5</sub>达标为约束条件,阐述大气环境容量、压力、承载力的内涵及其动态辩证关系.PM<sub>2.5</sub>年均浓度值等统计数据可反映污染物不断生成、不断扩散、沉降,达到动态平衡的综合结果.因此,SD模型以统计值为基础,引入各污染物的比例系数 $\mu$ 、转化率 $\eta$ ,建立“GDP-污染物排放量-PM<sub>2.5</sub>”之间的逻辑联系,以避免从理化角度去模拟复杂的大气传输和扩散过程.同时,在未来5~10年东莞市气象变化稳定的前提下,设置两种发展模式,通过一系列的调控参数,直接从研究的

目标出发,预测2013—2020年东莞市GDP、污染物排放量、PM<sub>2.5</sub>年均浓度的变化趋势,并计算出大气环境容量和承载力的阈值.

## 2 相关概念及研究思路 (Concepts and research philosophy)

### 2.1 以GDP-PM<sub>2.5</sub>达标为约束的大气环境容量、压力和承载力的内涵

2.1.1 “以GDP-PM<sub>2.5</sub>达标为约束”的含义 第一,根据《东莞市大气污染防治行动实施方案(2014—2017年)》,2017年东莞市PM<sub>2.5</sub>年均浓度要在2013年基础上下降20%或者达到国家二级标准(35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );第二,GDP年均增长率至少不低于7%(东莞“十二五”规划要求经济平均增速达到8%,而在经济新常态的背景下,至少不低于7%).以期实现经济中高速发展和控制雾霾的双目标.

2.1.2 大气环境容量 (Atmospheric Environment Capacity (AEC)) AEC是通常某大气污染物不超出环境目标值时的区域大气环境能容许的该污染物最大允许排放量(宁佳等, 2014).当某污染物总排放量超出了它的环境容量时,就造成了环境污染.根据《东莞市PM<sub>2.5</sub>污染特征与防治对策研究》中期报告(以下简称“中期报告”),PM<sub>2.5</sub>成分复杂,但主要来自五大污染排放物,分别是VOCs、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、一次PM<sub>2.5</sub>.故本文AEC指标为:五大污染物排放导致的PM<sub>2.5</sub>年均浓度为35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时最大允许排放量.从年均统计角度,该容量可认为在今后一段时期基本不变.

2.1.3 大气环境压力 (Atmospheric Environment Stress (AES)) AES是人类为发展经济,消耗资源而导致的各种大气污染物的产生量,其中,产生量包括排放量和减排量(牛子宁等, 2014).本文具体指:以东莞市2012年各种大气污染物总排放量(源解析结果)为基准,假定经济结构、能源结构、环保

水平基本不变,GDP 年均增速 7%的情况下,将五大污染物各年预测的排放量及对应的 PM<sub>2.5</sub>年均浓度值定义为大气环境压力 AES.

2.1.4 大气环境承载力 (Atmospheric Environment Carrying Capacity (AECC)) AECC 是消纳各种污染气体与减少其产生的能力 (Santoso *et al.*, 2014). 该能力的大小取决于一个地区不同时期的经济发展状况、产业结构、能源结构、技术水平、人口、资源、地理、气象条件、环保投入等众多因素所形成的综合协调状态 (周敬宣, 2010). 这些因素形成的协调状态构成承载力“隐性”的一面,而承载力“显性”的一面是这种综合协调状态表现出的削减量. 本文 AECC 的指标体系包含:显性 5 项,即五大污染物累积减排量;隐性 6 项:GDP、绿色 GDP、煤炭、石油、天然气和新能源消费量,前后共 11 项.

AEC、AES、AECC 彼此之间是相互作用、相互影响、随时间变化的. 动态关系有:①在以消耗化石能源为基础的传统 GDP 增长模式下,AECC 始终小于 AES,大气污染量 (复合曲线) 超过 AEC,环境质量变坏 (图 1a);②新常态下,当 AECC 逐渐超越 AES,大气污染量 (复合曲线) 逐渐收敛于 AEC 内,环境质量得到改善 (图 1b). 复合曲线是环境压力与环境承载力“显性”部分合成的结果. 现实中 PM<sub>2.5</sub>浓度的监测数据就是一种综合状态,PM<sub>2.5</sub>浓度曲线就代表了大气环境压力和承载力的复合结果.

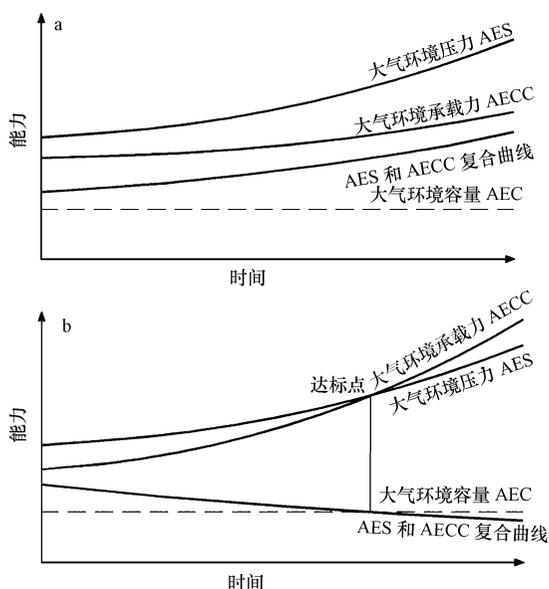


图 1 大气环境压力、承载力、容量动态关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of dynamic relationship of AES, AECC and AEC

例如,2011 年东莞市沙田虎门港的工业大气排放污染物包括粉尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和 VOCs 等,其中,SO<sub>2</sub>年产生量为 4366.737 t (即环境压力),处理率为 83.07% (即减排量为 3627.45 t,表示环境承载力),年排放量为 739.237 t (压力与承载力的复合结果).

2.1.5 选取 GDP、能源和减排量作为承载力指标的原因 第一,调整经济结构、能源结构对改善环境意义重大,本文设定的 6 项隐性指标反映了这一变化.实际上,隐性指标还可以有多种,不可能一一列举.不同的研究者还可以设置其他的“隐性”指标,比如,涉及人口、科技的指标等.第二,本文没有设置其他“隐性”指标的原因是为避免模型组织庞大,增加建模难度,重点不突出;增加的变量要能够与 GDP、PM<sub>2.5</sub>等核心变量建立能够量化的动态关系,通过适当的因子来反映,前提是要能获得它们的统计数据;模型预测时间跨度是 2012—2020 年,时间较短,其他“隐性”因素影响较小.第三,突出研究重点 (GDP 和 PM<sub>2.5</sub>),抓住政府最关心、最主要的两类隐性指标和减排量的显性指标作为考察对象,具有较大的概括性和代表性.

## 2.2 数据来源

SD 模型的输入数据包括:①东莞环境监测站提供的 2010—2013 年全市各监测站的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO、O<sub>3</sub> 日均浓度值;②从网站 (www.worldweatheronline.com) 搜集的这 4 年内每天平均温度、雨量、风速、风向、相对湿度、气压、云量信息;③ 2008—2013 年各年的环境统计公报和社会经济发展公报所提供的 PM<sub>2.5</sub>和 GDP 年均数据;④《东莞市 PM<sub>2.5</sub>污染特征与防治对策研究项目》中期报告中得到的东莞地区大气边界层结构 (范绍佳课题组)、2013—2014 年冬、春、夏三季的 PM<sub>2.5</sub>加权平均的化学组成结果 (黄晓锋课题组) 及 2012 年为基准的大气排放源清单 (郑君瑜课题组).

## 2.3 研究思路

本文用 SD 来描述 GDP-大气污染物-PM<sub>2.5</sub>随时间变化的因果动态关系,设置了两种减排模式来模拟不同承载力的影响,即“末端治理”和“综合治理” (图 2).

模式一“末端治理”是保持现有的以消耗化石能源为基础的产业和能源结构基本不变,在经济保持中高增速的同时,通过加强污染源头的控制,减少排放,从而降低 PM<sub>2.5</sub>浓度.“末端治理”措施主要包括:①燃煤电厂、工业锅炉加强脱硫脱硝除尘;②

提高机动车排放标准;③有机溶剂使用、石油产品运输、表面涂装印刷等行业所产生的 VOCs 需安装废气收集净化设施,生产企业采用密闭一体化生产

技术;④对易产生扬尘的沙石土方、建筑垃圾、废气渣土需进行覆盖、喷淋,施工道路围挡,增加绿化等.

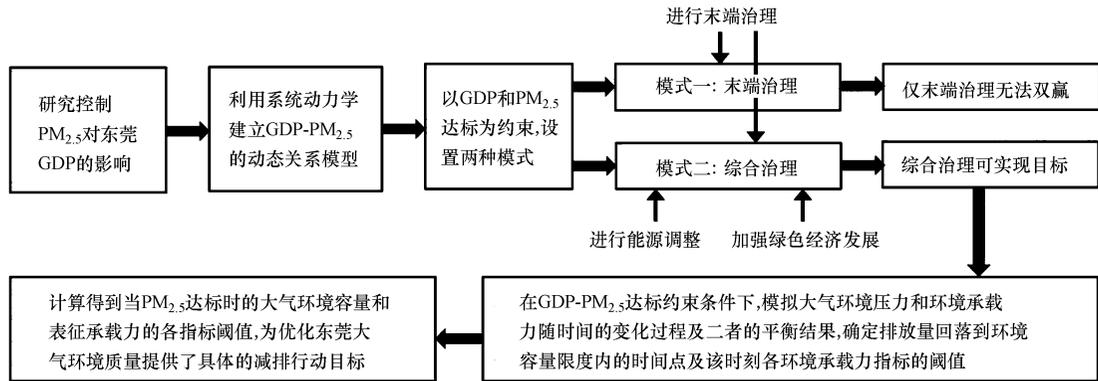


图2 研究思路流程

Fig.2 Flowchart of research philosophy

模式二“综合治理”是不仅要末端治理,还要调整产业和能源结构,同样要保证经济中高速发展,且实现 PM<sub>2.5</sub>浓度的控制目标。“综合治理”措施主要包括:①“末端治理”的所有内容;②转变能源结构,增加新能源(太阳能、风能、生物质能等)、天然气的使用比例,减少对石化能源依赖;③转变产业结构,新增高新科技、教育、文娱、绿色金融等第三产业份额,提升绿色 GDP 的比重.

3种措施在SD模型中分别通过调整减排调控因子、能源调整因子、GDP和绿色GDP增长率3类因子来实现.最终目的是:在东莞市GDP-PM<sub>2.5</sub>达标约束条件下,模拟大气环境压力和环境承载力随时

间的变化过程及二者的平衡结果,确定实际的排放量回落到环境容量限度内的时间点及该时刻各环境承载力指标的阈值.

### 3 建立SD模型(Building SD model)

#### 3.1 系统边界和指标体系

根据之前叙述,在未来5~10年东莞市气象变化稳定的前提下建立SD模型.模型模拟的地域边界为东莞市全区域,时间范围为2012—2020年,系统研究的对象包括GDP、PM<sub>2.5</sub>和五大污染物排放量及对这些内容产生重要影响的众多因素.系统指标体系具体如表1所示.

表1 SD模型指标体系

Table 1 Indicator system of SD model

子系统	状态变量	速率变量	辅助变量(包括常量)	调控变量
环境	PM <sub>2.5</sub> 年均浓度、VOC排放量、SO <sub>2</sub> 排放量、NO <sub>x</sub> 排放量、NH <sub>3</sub> 排放量、一次PM <sub>2.5</sub> 排放量	PM <sub>2.5</sub> 增量、PM <sub>2.5</sub> 减量、VOC增量、VOC减量、SO <sub>2</sub> 增量、SO <sub>2</sub> 减量、NO <sub>x</sub> 增量、NO <sub>x</sub> 减量、NH <sub>3</sub> 增量、NH <sub>3</sub> 减量、一次增量、一次减量	SO <sub>2</sub> 比例系数、NO <sub>x</sub> 比例系数、VOC比例系数、NH <sub>3</sub> 比例系数、一次比例系数、SO <sub>2</sub> 转化率、NO <sub>x</sub> 转化率、VOC转化率、NH <sub>3</sub> 转化率、一次转化率、PM <sub>2.5</sub> 总量、SO <sub>2</sub> 贡献率、NO <sub>x</sub> 贡献率、VOC贡献率、NH <sub>3</sub> 贡献率、一次贡献率、市域面积、边界层高度、市域体积	SO <sub>2</sub> 减排因子、NO <sub>x</sub> 减排因子、VOC减排因子、NH <sub>3</sub> 减排因子、一次减排因子、SO <sub>2</sub> 能源因子、NO <sub>x</sub> 能源因子、VOC能源因子、NH <sub>3</sub> 能源因子、一次能源因子
经济	GDP、绿色GDP	GDP增量、绿色增量	总GDP	GDP增长率、绿色增长率

#### 3.2 模型因果回路

系统的因果关系如图3所示(“+”表示促进,“-”表示抑制).第一个循环:当传统的GDP增长,必将引起污染物排放总量增加,引起PM<sub>2.5</sub>浓度增

加,进而污染程度加剧;如果进行“末端治理”,则污染物排量减少,形成局部的负反馈回路(这对应模式一).第二个循环:如果进行“综合治理”,不仅有第一个循环,污染程度加剧还促进能源产业结构转

变,污染排放减少,形成局部负反馈回路.第三个循环:转变能源产业结构,新增绿色 GDP 促进了经济增长点,形成局部正反馈回路(以上 2 个循环对应模式二).

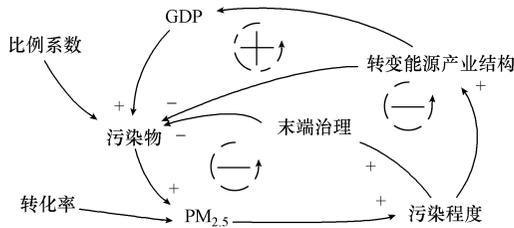


图 3 两种模式的因果关系图

Fig.3 Diagram of causal relationship between two patterns

### 3.3 系统流图

就像某时刻汽车的速度描述的是汽车在这一时刻的运动状态一样,SD 流图(图 4)描述了某一个时刻各变量之间的因果关系,构成了系统某时刻的一个状态.SD 模拟的基本逻辑是:各变量的初始值

(常量和调控参量除外)都以 2012 年年均统计数据为基准,这就确定了各变量的初始状态,随时间动态变化,实质上是求积分运算(蔡林,2008;周敬宣,2009),积分时间段为 2012—2020 年,模拟的时间步长为 0.25 年,由此推演出的各变量任一时刻的值都是年均统计值.SD 这一逻辑的基本数学描述如式(1)所示.SD 流图是编写模型方程的基础,用 Vensim 软件实现(王其藩,2009;Vafa-Arani *et al.*, 2014).

$$LV.S(t) = S(t_0) + \int_{t_0}^t rate.S(t) dt = S(t_0) + \int_{t_0}^t [inflow.S(t) - outflow.S(t)] dt \quad (1)$$

式中, LV.S(t) 的 LV (level variable) 表示状态变量,形容某变量 t 时刻的状态; S(t<sub>0</sub>) 是某变量 t<sub>0</sub> 时刻的值,即初始值;  $\int_{t_0}^t rate.S(t) dt$  的 rate 表示速率变量,描述的是 t<sub>0</sub> 到 t 时刻某变量速率的累积.

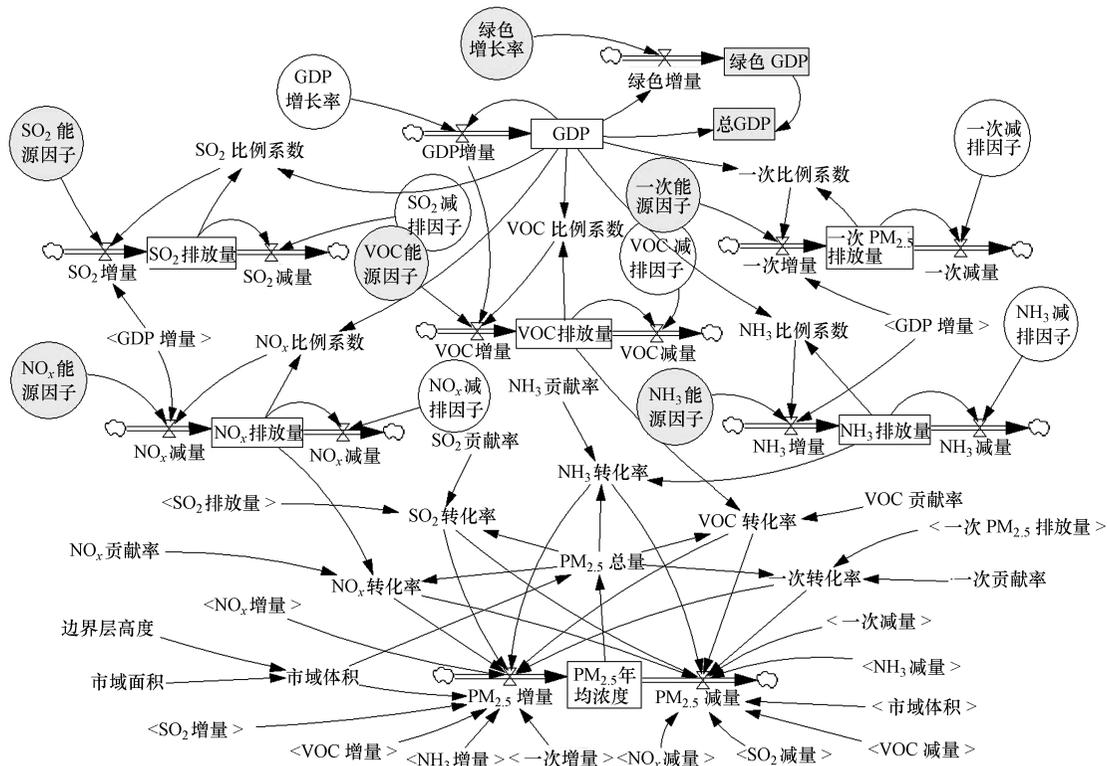


图 4 SD 模型流图

Fig.4 Flowchart of SD Model

模型内部的运行过程描述如下:以 SO<sub>2</sub> 为例, GDP 的状态是以年均 7% 的增速不断增长,单位时间内的 GDP 增量通过 SO<sub>2</sub> 比例系数的转化,折合成

对应单位时间里 SO<sub>2</sub> 增量,使 SO<sub>2</sub> 排放量增加;同时,单位时间内的 SO<sub>2</sub> 增量通过 SO<sub>2</sub> 转化率 η 转化成单位时间内一部分的 PM<sub>2.5</sub> 浓度增量.在 SO<sub>2</sub> 调控因子

的作用下,能源因子使这个过程中  $\text{SO}_2$  增量减少,减排因子使  $\text{SO}_2$  减量增加,这都减少了  $\text{SO}_2$  排放量.另外,绿色 GDP 增长率的加入使以消耗化石能源为基础的传统 GDP 增长率下降,该 GDP 增量减少,对应的  $\text{SO}_2$  增量和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度增量也减少.最终,保证总 GDP 增长的同时,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度能下降.

“末端治理”需利用 5 个减排调控因子,排放量的削减也会反馈到  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的减少上.“综合治理”是在模式一的基础上,还增加了 5 个能源调整因子和绿色 GDP 的组成部分(图 4 中灰色填充的变量).图 4 中“○”代表可调控变量.

### 3.4 主要变量说明

3.4.1 比例系数  $\mu$  比例系数  $\mu$  ( $\text{t} \cdot \text{亿元}^{-1}$ ) 是指每亿元 GDP 的某种大气污染物排放量,它的作用是在模型动态模拟过程中,把产生的 GDP 折算成排放的污染物的量,其计算表达式如式(2)所示.比例系数模拟中是动态变化的,其初值是由中期报告里源清单提供的 2012 年污染物排放量和该年 GDP 确定.另外,它的物理意义还可作为企业单位 GDP 污染物排放量的参考限值.

$$\mu = E_m / \text{GDP} \quad (2)$$

式中,  $E_m$  为某种大气污染物某年的排放量 ( $\text{t}$ ); GDP 为地区年生产总值(亿元).

3.4.2 边界层年平均高度  $h$  大气边界层是气象学术语,是对流层中贴地部分,厚度一般为 1.0~1.5 km,是受下垫面影响而湍流化了的大气层.边界层如同城市的“帽子”一样罩住城市,而  $\text{PM}_{2.5}$  基本都分布在边界层的范围内.根据气象数据得知,东莞 4 年中以  $\text{PM}_{2.5}$  浓度划分的优、良、轻度污染、中度污染天气所占比例分别为 34.2%、52.8%、11.3%、1.7%,即可确定不同边界层高度的权重.又根据中期报告,在不同的气象扩散条件下,东莞边界层高度是变化的,白天最大混合层高度为 1200 m,而夜间稳定边界层高度仅 100 m.因此,估算了东莞 4 类气象扩散条件(优、良、轻度污染、中度污染)的平均边界层高度分别为 1200、900、600、300 m,东莞平均边界层高度计算如下:  $h = 958 \text{ m} (1200 \times 34.2\% + 900 \times 52.8\% + 600 \times 11.3\% + 300 \times 1.7\%)$ .

3.4.3  $\text{PM}_{2.5}$  总量 东莞市域面积为 2465  $\text{km}^2$ ,则某一时刻市域范围内  $\text{PM}_{2.5}$  总量 ( $V_{\text{PM}_{2.5}}$ ) 可通过式(3)计算得到.该总量模拟中是动态变化的,初值由 2012 年  $\text{PM}_{2.5}$  浓度决定,此处  $\text{PM}_{2.5}$  浓度值反映某时刻的年平均状态.其中,  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度为前一刻

的年均浓度与该时段产生的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度增量之和.

$$V_{\text{PM}_{2.5}} = C_{\text{PM}_{2.5}} \times S \times h \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{PM}_{2.5}}$  为某一时刻市域范围内  $\text{PM}_{2.5}$  总量 ( $\text{t}$ );  $S$  为市域面积 ( $\text{km}^2$ );  $h$  为边界层高度 ( $\text{m}$ );  $C_{\text{PM}_{2.5}}$  为某时刻  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

3.4.4 某污染物对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献率  $\theta$   $\text{PM}_{2.5}$  化学组成:有机物 (OM) 36.6%、硫酸盐 20.9%、硝酸盐 8.5%、铵盐 10.7%、元素碳 (EC) 7.5%、金属离子 3.7%、矿物质 2.9%、痕量元素 1% 及 8.1% 的其他物质.在目前掌握的源解析材料当中,并没有直接说明  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、VOCs 等污染源对  $\text{PM}_{2.5}$  的分担率是多少,只有  $\text{PM}_{2.5}$  化学组成.根据污染物对  $\text{PM}_{2.5}$  贡献的一般特征,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  主要是来自  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$  的贡献;而有机物虽然来源复杂,但大部分来自 VOC 的排放及转化,保守起见, VOC 的贡献率就取有机物的化学组成比例;一次  $\text{PM}_{2.5}$  成分也十分复杂,主要包括元素碳、金属离子、矿物质等,所以取了它们的化学组成比例之和作为贡献率.因此,硫酸盐来自  $\text{SO}_2$ ,故  $\text{SO}_2$  贡献率为 0.209.同理,  $\text{NO}_x$ 、VOC、 $\text{NH}_3$  及一次贡献率分别为 0.085、0.366、0.107、0.151.

3.4.5 某污染物对  $\text{PM}_{2.5}$  转化率  $\eta$  转化率  $\eta$  是某种污染物年排放量与其贡献的  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度所对应的  $\text{PM}_{2.5}$  总量的数量关系比例,计算表达式见式(4).转化率  $\eta$  在模拟中是动态变化的,初值由 2012 年污染物排放量、 $\text{PM}_{2.5}$  总量和某污染物对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献率确定.

$$\eta = V_{\text{PM}_{2.5}} \times \theta / E_m \quad (4)$$

转化率  $\eta$  的导出十分重要,是污染物排放量与  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度在数量关系上联系的桥梁,是本研究进行的关键因素 ( $\eta$  基于统计值折算得到,不具有实际的物理化学意义,仅服务于本模型).

### 3.5 模型调控因子确定

SD 模型中影响承载力的 3 类因子,共 12 个(5 个减排因子、5 个能源因子、GDP 和绿色 GDP 增长率),取值会有多种组合方式,为了使承载力分析具有可行性,需要通过估算东莞现有污染源头减排能力、能源结构调整能力和绿色经济发展能力来确定 3 种因子的合理取值.

3.5.1 末端治理减排能力估算及减排调控因子的确定 末端治理是减排措施中最主要的手段.估算到 2017 年东莞五大污染物末端治理的最大减排能力,需分析治污设备和技术的投运率和去污率.

①火电行业的大型燃煤锅炉是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和粉尘

排放的主要来源.根据《我国脱硫脱硝行业 2012 年发展综述》,截止到 2012 年全国脱硫装机容量为 87%,而脱硝装机容量仅为 17%.假设到 2017 年发电机组脱硫和除尘设备投运率达 100%,脱硝设备投运率达 50%;而脱硫效率和除尘效率达到 95% (曹辰雨等,2013),脱硝效率达到 85%.②工业燃烧产生的污染主要由企业级的工业锅炉产生,工业企业规模参差不齐,设备较难全面覆盖,工业锅炉脱硫脱硝除尘设备及效率也都无法和火电的大型设备相比,估计投运率能达到 30%,脱硫效率设为 60%,除尘效率 70% (余洁,2013),脱硝效率 70%.③道路移动源由各类汽油车、柴油车贡献,产生的主要污染物有 NO<sub>x</sub>、VOCs、PM 等.珠三角地区在 2015 年内将全面启动机动车国五排放标准,到 2017 年估计 80%的汽、柴油车从国三排放升级为国五排放,那么,NO<sub>x</sub>将减少 63%,VOCs 减少 50%,PM 减少 99% (马骏等,2014).④有机溶剂使用、石油产品的运输存储及工业生产加工过程中都会产生大量 VOCs.按照实施方案,若能全面深化印刷、表面涂装、集装箱制造、电子设备制造等行业 VOCs 排放达标治理工作,所有排放 VOCs 的车间必须安装废气收集、回收净化装置,生产企业应采用密闭一体化

生产技术,统一收集挥发性有机物废气并净化处理,则收集净化效率至少为 90%,而投运率设为 50%.另外,石化企业全面推广“泄漏监测与修复”技术(若 80%实行),预计可降低 90%的 VOCs 排放.⑤ NH<sub>3</sub>源大部分来自人体活动、垃圾填埋、污水处理和农牧源等,由于大面积的面源污染较难以管理,假设可减少 20%,而道路移动源削减 50%.⑥扬尘源包括建筑扬尘和道路扬尘等,对易产生扬尘的沙石土方、建筑垃圾、废气渣土需进行覆盖、喷淋,施工道路围挡,增加绿化等,扬尘污染控制区应达到市区和镇街中心区面积的 80%以上,并设控制效率也为 80%.

根据以上分析,东莞 2017 年每种污染物最大减排量的计算式(5)总结如下,具体计算见表 2.

$$C_i = \sum_{j=1}^n EM_i \times SR_{ij} \times U_{ij} \times W_{ij} \quad (5)$$

式中, $C_i$ 是某种污染物的最大减排量(t); $EM_i$ 是当经济增速 7%,某种污染物 2017 年的排放量(t) (不减排情况的预测值); $SR_{ij}$ 是源清单中某污染物的行业分担率; $U_{ij}$ 是某污染物的行业投运率; $W_{ij}$ 是某污染物的行业去除效率; $n$ 是某污染物主要涉及的行业数量.

表 2 东莞大气污染物减排潜力估算

Table 2 Estimated capacity of air pollutants emission reduction in Dongguan city

污染物	2017 年排放量/t	主要行业分担率及其排放量	减排能力估算过程	最大减排量/t
SO <sub>2</sub>	146691	火力发电 21.8%, 31979 t 工业燃烧 68.8%, 100923 t	火力发电削减 = 31979 × 100% × 95% = 30380 t 工业燃烧削减 = 100923 × 30% × 60% = 18166 t	48546
NO <sub>x</sub>	263077	火力发电 25.5%, 67085 t 工业燃烧 20.5%, 53931 t 道路移动 46.8%, 122988 t	火力发电削减 = 67085 × 50% × 85% = 28511 t 工业燃烧削减 = 53931 × 30% × 70% = 11325 t 道路移动削减 = 122988 × 80% × 63% = 61986 t	101822
VOCs	205614	道路移动 40.5%, 83274 t 有机溶剂 43.5%, 89545 t 运输存储 3%, 6168 t 工业过程 9%, 18505 t	道路移动削减 = 83274 × 80% × 50% = 33310 t 有机溶剂削减 = 89545 × 50% × 90% = 40295 t 运输存储削减 = 6168 × 80% × 90% = 4441 t 工业过程削减 = 18505 × 50% × 90% = 8327 t	86373
NH <sub>3</sub>	11618	道路移动 21.4%, 2480 t 其他 78.6%, 9132 t	道路移动削减 = 2486 × 80% × 50% = 994 t 其他源削减 = 9132 × 20% = 1826 t	2820
一次 PM <sub>2.5</sub>	52349	道路移动 33.1%, 17275 t 工业燃烧 22.8%, 11935 t 火力发电 20.8%, 10888 t 扬尘 14.9%, 7800 t	道路移动削减 = 17275 × 80% × 99% = 13682 t 工业燃烧削减 = 11935 × 30% × 70% = 2506 t 火力发电削减 = 10888 × 100% × 95% = 10344 t 扬尘削减 = 7800 × 80% × 80% = 4992 t	31524

注:各污染物所涉及的主要污染行业分担率之和大于 90%.

以 SO<sub>2</sub>减排因子为例,从源清单的数据可知,SO<sub>2</sub>排放主要来自火力发电(21.8%)和工业燃烧(68.8%).模型是以 2012 年的数据为基准开始模拟的,如果不调控,那么按 7%的 GDP 增速,SO<sub>2</sub>排放量

会从 2012 年的 103685 t 增长到 2017 年的 146691 t,其中,火力发电贡献 31979 t,工业燃烧贡献 100923 t.经查阅文献及污染防治行动计划等资料,对涉及 SO<sub>2</sub>排放的火力行业和工业燃烧的减排潜力做了估

算,到2017年火力行业SO<sub>2</sub>削减30380 t,工业燃烧削减18166 t,共减48546 t.然后对模型的SO<sub>2</sub>因子的取值进行试算,先初步设定一个因子值(取到小数点后3位),带入SD模型试算,若得到的SO<sub>2</sub>削减量偏离估算值(48546 t)过大或过小,都舍弃.削减量直到最为接近估算值时的那个因子值,就是合理的SO<sub>2</sub>减排因子值,SO<sub>2</sub>减排因子为0.08.以此类推,NO<sub>x</sub>、VOC、NH<sub>3</sub>及一次PM<sub>2.5</sub>减排因子分别为0.098、0.109、0.056、0.183.

3.5.2 能源结构调整能力分析 & 能源调整因子的确定 按照《东莞市能源保障“十二五”规划》,GDP增长率8%,能源消费弹性系数0.5,即能源消费增长率为4%.东莞2011年能源消费达2930万t标准煤,可计算到2017年能源消费达3707万t标准煤.另外,2011年的煤炭、石油、天然气及其它(包括太阳能、生物质能等新能源)能源消费结构比例分别为67%、25%、5%、3%,按规划到2015年该比例分别达到64%、17%、13%、6%.据此到2017年,假设进一步降低化石能源的消费比例,提高清洁能源利用率,比例变成57%、15%、15%、13%.

经以上分析,“综合治理”模式中使用的各污染物能源调整因子,其意义是转变能源结构相对于不调整能源结构的能源消费的缩减程度,计算过程如式(6).

$$EF_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n SC_{ij}^{(0)} / \sum_{j=1}^n SC_{ij}^{(1)}}{GrRGDP}}}{GrRGDP} \quad (6)$$

式中,EF<sub>i</sub>是某污染物的能源调整因子;SC<sub>ij</sub>是某种污染物*i*所涉及的某能源*j*消耗标准煤量(t),右上角标(0)、(1)分别指2011和2017年;*n*是某污染物所涉及的能源种类数;*m*是从初始年到预测年的年数,本文为6;GrRGDP是能源产业结构不变时GDP增长率,本文为1.07.

以煤炭为例,通过查阅能源规划等资料,得知2011年煤炭消费1963万t标煤,按规划的增长速度,到2017年为2113万t标煤,平均每年增长1.2%.如果不做任何调控,基于2012年数据,那么煤炭增速与GDP同步为7%,则采取能源调控以后,每年煤炭增速仅为不调控情况下的1.012/1.07=0.94.换句话说,煤炭能源进行调控后的年增幅为不调控情况下的0.94倍.因为SO<sub>2</sub>基本来自煤炭的燃烧,所以SO<sub>2</sub>的能源因子为0.94,以此类推,NO<sub>x</sub>、VOC、NH<sub>3</sub>及一次PM<sub>2.5</sub>能源因子分别为0.95、0.89、1、0.93.

相关计算结果见表3和表4.

表3 东莞能源结构调整能力分析

能源类型	2011年占比	2011年消费量/万t	2017年占比	2017年消费量/万t	能源年增长率
煤炭	67%	1963	57%	2113	1.2%
石油	25%	733	15%	556	-4.5%
天然气	5%	146	15%	556	25%
其它	3%	88	13%	482	32.7%
全部	100%	2930	100%	3707	4%

注:能源消费量以标准煤计.

表4 模型能源因子确定

污染物	污染物年均增长倍数	能源因子	备注
SO <sub>2</sub>	1.01	0.94	来自煤炭的燃烧
NO <sub>x</sub>	1.02	0.95	来自煤炭、石油和天然气
VOCs	0.95	0.89	主要来自石油制品
NH <sub>3</sub>	1.07	1.00	不考虑
一次PM <sub>2.5</sub>	1.00	0.93	来自煤炭和石油

3.5.3 绿色经济发展能力分析 & GDP和绿色GDP增长率的确定 新增的绿色经济诸如绿色金融、高新技术、文化娱乐等属无显著环境污染的第三产业.在模式二中,GDP和绿色GDP增长率之和为7%,都是基于2012年GDP存量(5010亿元)进行推演的.根据东莞统计年鉴,发现东莞近3年第三产业增速比较快,平均每年提升1%以上,结合马骏等(2014)的研究,从2012年起中国未来18年,每年第三产业比重提升0.5%.因此,设定东莞未来5年内第三产业每年递增1%,可得5年中第三产业净增加约350亿元,第二产业也相应减少,东莞5年内新增绿色GDP700亿元.简言之,就是从产业比重来推绿色GDP要增加的量.据此带入模型试算,在2017年的时间点,绿色GDP存量达到700亿元左右时,绿色GDP增长率为2.5%,那么GDP增长率为4.5%.

### 3.6 模型调试与检验

第一,模型进行了的语法检验(Check Syntax)、模型检验(Model Check)、单位检验(Units Check).

第二,模拟值与真实值进行对比验证.SD模型中GDP和PM<sub>2.5</sub>初始值以2008年的数据为基准(2008年的PM<sub>2.5</sub>浓度由该年PM<sub>10</sub>浓度的70%估算得到),能源调整因子和绿色GDP增长率不参与计

算,减排调控因子按 3.5.1 节结果代入计算,GDP 增速设定为 8.2%(历史数据表明,东莞 2008—2013 年 GDP 平均增速约 8.2%),模拟检验 2009—2013 年的 GDP 和 PM<sub>2.5</sub> 变化趋势,再与真实值进行对比(图 5).

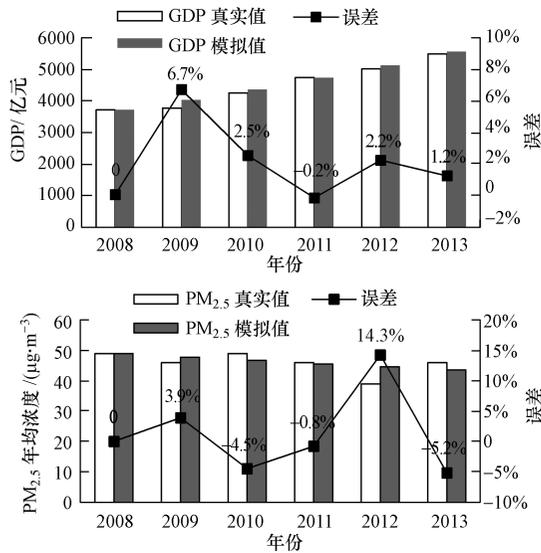


图 5 GDP 和 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度真实性检验

Fig.5 Model validation of GDP and PM<sub>2.5</sub> concentration

检验结果显示,GDP 的真实值与模拟值的最大误差为 6.7%,最小误差为 -0.2%,平均误差率为 2.5%,相关系数  $r = 0.9931$ ,抽样误差概率  $p = 0.0007$ ;PM<sub>2.5</sub> 最大误差为 14.3%,最小误差为 -0.8%,平均误差率为 +1.5%,相关系数  $r = 0.5729$ ,抽样误差概率  $p = 0.2347$ .GDP 预测准确性和相关性都非常好;PM<sub>2.5</sub> 预测准确性很好,相关性尚可.说明模型检验结果合理.

### 4 模拟结果与讨论 (Modeling results and discussion)

模拟结果表明,若按模式一“末端治理”发展,到 2020 年 GDP 总量达到 8728 亿元,PM<sub>2.5</sub> 浓度为  $36.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,无法达到国家二级标准,环境压力依然大于环境承载力,无法实现“双赢”,也就不必计算双约束条件下的大气环境容量和承载力.以下只讨论“综合治理”模式下的结果.

#### 4.1 “综合治理”模式下以 GDP-PM<sub>2.5</sub> 达标为约束的东莞大气环境压力、容量和承载力结果

4.1.1 大气环境压力 以 GDP-PM<sub>2.5</sub> 为达标约束的大气环境压力值是以 2012 年的数据为基准,假定经济结构、能源结构、环保水平基本不变,GDP 年均增

速 7% 的情况下,预测出来的五大污染物排放量和对应的 PM<sub>2.5</sub> 浓度的数值见图 6 (具体数值从略).

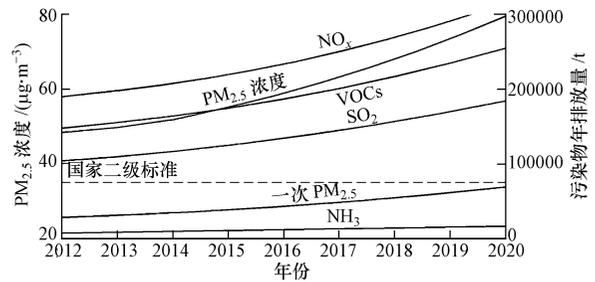


图 6 东莞大气环境压力指标数值变化图

Fig.6 Variations of AES indicators in Dongguan city

4.1.2 大气环境承载力及阈值 按照“综合治理”模式发展,在 GDP-PM<sub>2.5</sub> 双重约束下,总 GDP (包括传统 GDP 和绿色 GDP)、能源消费 (包括煤炭、石油、天然气和新能源) 及五大污染物 5 年累积减排量构成了动态变化的大气环境承载力的一种发展组合 (非唯一组合).依照模型的预测,在 2017 年一

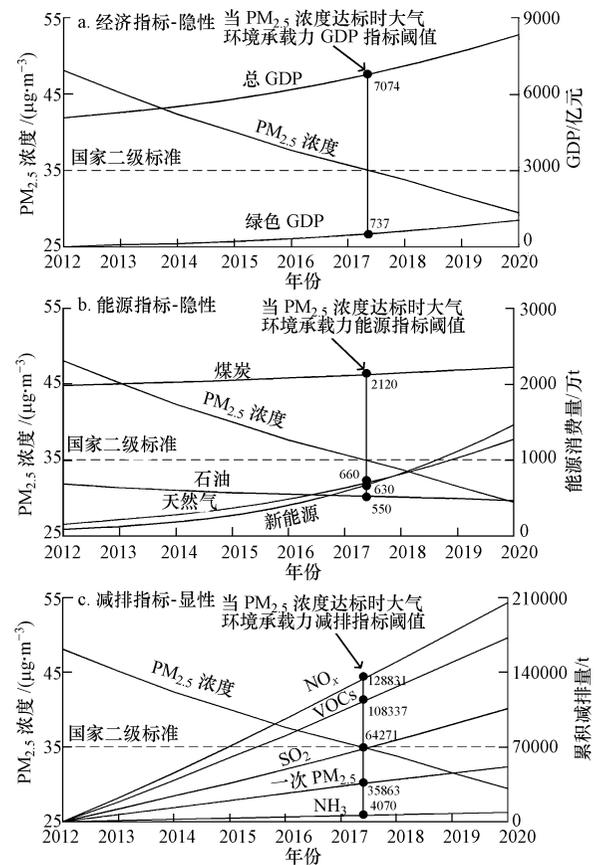


图 7 东莞大气环境承载力 GDP、能源、减排指标数值变化及阈值

Fig.7 GDP, energy and reduction indicators' values and threshold of AECC in Dongguan city

季度,东莞市大气环境压力与承载力的复合值将小于大气环境容量阈值。 $PM_{2.5}$ 曲线实际代表了大气环境压力和承载力的合成结果。

大气环境承载力指标是一个动态变化的值,当 $PM_{2.5}$ 浓度达标时,与之对应的此刻大气环境承载力的隐性指标阈值有:GDP总量7074亿元,其中,新增绿色GDP737亿元(图7a);煤炭消费2120万t标准煤、石油550万t标准煤、天然气660万t标准煤、新能源消费630万t标准煤(图7b);承载力显性部分各阈值(相对于2012年5年累积减排量) $SO_2$ 、 $NO_x$ 、VOCs、 $NH_3$ 、一次 $PM_{2.5}$ 分别为64271、128831、108337、4070、35863 t(图7c)。图7中所有其他的具体数值从略,其中,5年累积减排量是经济结构、能源结构、环保水平基本不变,GDP年均增速7%的情况下的排放量,即4.1.1节中的环境压力结果与“综合发展”模式下的排放量对应时间节点的差值,或与图6和图8对应曲线相减的值。

4.1.3 大气环境容量及阈值 在“综合治理”模式下,随着大气环境承载力的不断提高, $PM_{2.5}$ 曲线不断下降,当 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,与之对应的五大污染物的排放量就是环境容量, $SO_2$ 、 $NO_x$ 、VOCs、 $NH_3$ 、一次 $PM_{2.5}$ 分别为84987、138849、100875、7751、17402 t,其数值应长期相对稳定。它们随时间变化的预测数值变化见图8(详细数值从略)。

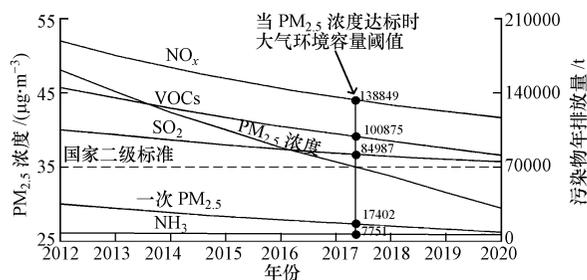


图8 五大污染物排放量、 $PM_{2.5}$ 数值变化及环境容量阈值

Fig.8 Values of discharged volume of 5 air pollutants and  $PM_{2.5}$  and their AEC thresholds

## 4.2 讨论

4.2.1 预测数据的可信度 宏观的经济环境政策性研究不同于理化研究,难以通过具体实验证实,而是建立计算机模型进行模拟,用历史数据检验模拟结果以确定模型是否可靠,或对不同方法模拟结果做相互验证。东莞 $PM_{2.5}$ 的监测从2009年才开始实行,本文对近5年的GDP和 $PM_{2.5}$ 数据进行了真

实性检验。

按A值法测算东莞 $SO_2$ 环境容量为105000~147000 t,明显高于本模型对 $SO_2$ 容量的预测值(2017年允许排放量为84987 t),这说明以GDP- $PM_{2.5}$ 达标为约束的容量预测结果要比单污染物容量计算的结果更加严格。面对复合型污染时传统容量计算方法具有一定的局限性。将GDP和 $PM_{2.5}$ 的约束,以及大气环境压力、容量、承载力等重要概念一起纳入到SD模型中讨论,抓住了问题的主要矛盾,预测曲线较好地反映了发展趋势,不会出现大的偏离,故真实数据与预测数据的有限误差是可以接受的。实际上,其他容量测算方法(如线性规划法)比较复杂,较难操作。

4.2.2 模型调控参数的选取 参数的选取不会有非常多种组合,大的发展趋势是一致的。从东莞市现实减排条件出发,“综合治理”这一大的发展趋势是不会变的。本文对源头治理、能源调整、产业调整能力做了客观定量的分析,挑选了一种可能性大的情况设定了特定的12个模型调控因子,对承载力的阈值进行有效的预测,得到了11个承载力阈值和5个 $PM_{2.5}$ 浓度达标时的环境容量阈值。当然,各调控因子的取值组合也可以发生变化,但这种参数调整是有限的,是要在发展趋势范围内的。因此,承载力的预测结果不会产生过大的偏离。决策者只会根据需要,适当枚举,预测几种结果,从中择优。

4.2.3 建模工作优化的空间 第一,模型预测 $PM_{2.5}$ 浓度可能略微偏小,因为 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、VOCs、 $NH_3$ 、一次 $PM_{2.5}$ 这5种主要污染源占东莞 $PM_{2.5}$ 化学组成的91.8%,未能涵盖所有污染物对东莞 $PM_{2.5}$ 的贡献;其他8.2%的污染物质成分复杂,甚至未知,也缺少对应的排放量数据代入模型。如何更准确地预测 $PM_{2.5}$ 浓度值,又不造成新的不确定性,值得研究。第二,随着监测能力的加强,不断获得每年的源解析、源清单及化学成分比例,就可以不断修正比例系数、转化率等变量,会使该SD模型中关键参数更加合理,更好地与实际吻合。第三,边界层高度准确性有待完善,这需气象部门或研究单位加强分析和统计。第四,若源解析资料中直接就有污染源的分担率,就不必根据化学组成来推算模型中污染物贡献率。

## 5 结论(Conclusions)

研究结果表明,“综合治理”模式下,东莞市

PM<sub>2.5</sub>年均浓度在 2017 年达标,对应的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、NH<sub>3</sub>、一次 PM<sub>2.5</sub>容量分别为 84987t、138849t、100875t、7751t、17402 t;隐性承载力阈值分别为 GDP 总量 7074 亿元、新增绿色 GDP 737 亿元、煤炭 2120 万 t(以标煤计)、石油 552 万 t(以标煤计)、天然气 663 万 t(以标煤计)、新能源 630 万 t(以标煤计);显性承载力阈值(相对于 2012 年 5 年累积减排量)分别为 SO<sub>2</sub> 64271 t、NO<sub>x</sub> 128831 t、VOCs 108337 t、NH<sub>3</sub> 4070 t、一次 PM<sub>2.5</sub> 35863 t.该容量结果为政府制定环境保护规划提供了参考,承载力阈值为环境友好的社会经济发展确定了量化的方向.

**责任作者简介:**周敬宣(1950—),男,教授,博导,主要从事战略环境评价、环境规划与管理、环境系统建模、环保设备等方面的研究,已发表论文和专著共 100 多篇.

#### 参考文献(References):

- 蔡林.2008.系统动力学在可持续发展研究中的应用[M].北京:中国环境科学出版社.33-34
- 曹辰雨,李贞,任建兴,等.2013.燃煤电厂除尘设备除尘性能的分析与比较[J].上海电力学院学报,29(4):351-354
- 赖以坚.2012.东莞市环境空气 PM<sub>2.5</sub>污染现状及防治对策浅析[J].东莞理工学院学报,19(5):83-88
- 李丽.2007.铁岭市大气环境容量测算中几种运用方法的比较[J].环境研究与监测,20(2):58-60
- 李韧,程水源,郭秀锐,等.2005.唐山市区大气环境容量研究[J].安全与环境学报,5(3):46-50
- 刘龙华,汤小华,陈加兵.2013.福建省大气环境承载力研究[J].亚热带资源与环境学报,8(4):31-39
- 马骏,李治国.2014.PM<sub>2.5</sub>减排的经济政策[M].北京:中国经济出版社.22-23
- 毛洪章,陈军.2006.武汉市环境承载力研究[J].理论与实践,(1):72-77
- 宁佳,刘纪远,邵全琴,等.2014.中国西部地区环境承载力多情景模拟分析[J].中国人口·资源与环境,24(11):136-146
- 牛子宁,王卫,成贺玺,等.2014.河北省人类活动环境压力的定量分析[J].环境科学学报,34(10):2693-2700
- 钱跃东.2011.区域大气环境承载力评估方法研究[D].南京:南京大学
- Santoso E B, Erlib H D M, Auliac B U, *et al.* 2014. Concept of carrying capacity: Challenges in spatial planning (Case study of East Java Province, Indonesia) [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 135(14): 130-135
- Vafa-Arani H, Jahani S, Dashti H, *et al.* 2014. A System Dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31: 21-36
- 王俭,孙铁珩,李培军,等.2005.环境承载力研究进展[J].应用生态学报,16(4):768-772
- 王其藩.2009.系统动力学[M].上海:上海财经大学出版社.55-56
- 徐盛荣.2005.哈尔滨市大气环境容量测算方法[J].北方环境,30(1):81-83
- 薛文博,付飞,王金南,等.2014.基于全国城市 PM<sub>2.5</sub>达标约束的大气环境容量模拟[J].中国环境科学,34(10):2490-2496
- 余洁.2013.中国燃煤工业锅炉现状[J].节能减排,(3):89-92
- 周敬宣.2009.环境与可持续发展(第2版)[M].武汉:华中科技大学出版社.156-157
- 周敬宣.2010.环境规划新编教程[M].武汉:华中科技大学出版社.111-114