ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第1期
2013年1月15日

目　次

基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究

田金平[1],陈吕军[1,2],杜鹏飞[1],钱易[1]
(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所,浙江省水质科学与技术重点实验室,嘉兴 314006)

摘要:运用情景分析方法研究了浙江沿海地区经济发展方式对环境产生的压力. 首先以 COD、氨氮、二氧化硫和氮氧化物这 4 种污染物的排放量为基准,筛选了某典型城市的 18 个重污染工业行业. 其次以重污染工业行业为对象,设计了情景分析模型和辅助程序,以 2008 年为基准年,目标年 2015 年重污染工业行业 4 种污染物的排放量须在基准年基础上下降一定比例作为约束条件,分析在基准情景、产业结构调整情景、工业结构调整情景、清洁生产技术情景、综合情景、可持续发展 6 种情景下,目标年该市 18 个重污染行业 4 种主要污染物的排放量. 目的是明确人均 GDP 已突破70 000元的沿海经济发达城市如何转变发展方式,使经济发展的同时,污染物排放量有所减少,以期为优化工业行业发展结构提供决策参考. 基于情景分析结论,提出了进一步发展建议,包括经济适度增长(GDP 增长 7% 左右),加大力度调整产业结构,控制重污染行业发展速度,加强重污染行业的结构调整,加强源头控制,加大力度推进清洁生产技术,大幅削减污染物产生量,同时加强治污设施运营监管,提高污染物去除效率. 通过上述措施在目标年可控制重污染行业的 COD、氨氮、二氧化硫和氮氧化物分别在基准年基础上下降 10% 、10% 、5% 和 15% .

关键词:区域环境规划与管理; 污染防治; 沿海城市; 情景分析; 可持续发展
中图分类号: X323 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)01-0336-11

Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis

TIAN Jin-ping[1], CHEN Lü-jun[1,2], DU Peng-fei[1], QIAN Yi[1]
(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhejiang Key Laboratory for Water Science and Technology of Zhejiang Province, Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Scenario analysis was used to study the environmental burden in a coastal city of Zhejiang province under different patterns of economic development. The aim of this research is to propose advices on decision making by illustrating how to make emissions reduced by transforming the pattern of economic development in a developed coastal area, which had acquired the level of 70 000 yuan GDP per cap. At first, 18 heavy pollution industries were screened out, by referencing total emissions of chemical oxygen demand, ammonia-nitrogen, sulfur dioxide, and nitrogen oxide. Then, a model of scenario analysis and the back-up calculation program were designed to study the sustainable development of the heavy pollution industries. With 2008 and 2015 as the reference year and the target year respectively, emissions of four pollutants mentioned above in the 18 heavy pollution industries in the city were analyzed under six scenarios. The total emissions of 4 pollutants should be reduced to an expectant degree, which is set as the constraint prerequisite of the scenario analysis. At last, some suggestions for decision-making are put forward, which include maintaining a moderate increase rate of GDP around 7% , strengthening the adjustment of economic structure, controlling the increasing rate of industrial added value of the industries with heavy pollution, optimizing the structure of industries with heavy pollution, decreasing the intensity of waste emission by implementing cleaner production to reduce emission produce at the source, and strengthening regulations on the operation of waste treatment plants to further promote the efficiency of waste treatment. Only by implementing such measures mentioned above, can the total emissions of chemical oxygen demand, ammonia-nitrogen, sulfur dioxide, and nitrogen oxide of the 18 industries with heavy pollution in the city be reduced by a 10% , 10% , 5% , and 15% respectively based on the reference year.

Key words: environmental planning and management; pollution prevention; coastal city; scenario analysis; sustainable development

东南沿海城市是中国经济发展最为活跃的地区. 以浙江省为例,其沿海七市 1999 ~ 2008 年间地区生产总值(GDP)总量由4 764. 11亿元增长到17 815. 57亿元,10 年间 GDP 增长了 3. 7 倍,年均增长率为 14% . 但经济的发展也付出了沉重的环境代价,突出表现为大气环境酸雨问题突出,灰霾影响呈逐步增大趋势,近岸海域水质富营养化十分严重,平原河网及主要河段水污染严重等. “十一五”期间,

收稿日期: 2012-04-08; **修订日期**: 2012-08-31
基金项目: 中国工程院咨询研究项目
作者简介: 田金平(1974 ~),男,博士,助理研究员,主要研究方向为工业污染防治与产业生态学,E-mail: tianjp@ tsinghua. edu. cn
* 通讯联系人,E-mail:Chenlj@ tsinghua. edu. cn

在节能减排政策推动下,沿海城市环境保护取得阶段性成效,但环境保护和环境质量改善任重道远,尤其是工业污染问题依然严重.

经济结构和发展方式仍是沿海经济发达地区环境问题的深层次原因. 在目前一些沿海城市及海岛经济发展规划中,很多重化工业仍是海洋经济开发的重点,在新一轮的海洋经济开发中处于优先发展的地位,这将使沿海城市的环境污染更加严重,势必为已很脆弱的环境加重负荷. 沿海经济发达城市如何转变发展方式,使经济发展的同时,污染物排放量有所减少,海洋环境状况可以有所改善,符合可持续发展战略,是本研究的重点.

情景分析是战略研究和规划领域重要的研究工具之一. 国内已在能源领域[1~6]、交通领域[7]、城市发展[8,9]、水资源承载力[10]、流域规划[11,12]、流域污染控制[13~16]、地区资源保护[17]、生态系统研究[18]、节能减排潜力[19]、经济发展对二氧化碳排放影响[20~27]等方面开展了情景分析研究. 针对不同的领域、对象和目的,情景分析方法的应用及体现方式虽存在较大差异. 但情景分析的基本流程是一致的,即包括情景分析对象与边界定义、情景分析目标及约束条件设定、模型建立、情景设置、计算分析、对策建议等步骤.

本研究运用情景分析的方法对沿海城市经济发展可能对环境产生的压力进行分析. 以浙江沿海某市为例进行了分析,该市人均 GDP 达到 70 000元,工业化水平达到工业化后期后半阶段,转变经济发展方式尤为重要. 以该市工业部门重污染行业为对象,以 2008 年为基准年,设计了情景分析模型,编制了运算程序,研究不同发展情境下目标年 2015 年该市重污染行业的 COD、氨氮、二氧化硫、氮氧化物这 4 种主要污染物的排放量,以期为如何转变发展方式,优化工业行业发展结构提供决策参考,使经济发展的同时,污染物排放量有所减少.

1　情景分析方法

1.1　情景分析对象与边界

情景分析的对象为浙江省沿海某市的重污染工业行业,边界为该市的行政区划边界. 重污染行业以所在地市工业行业的 COD、氨氮、二氧化硫和氮氧化物 4 种污染因子的排放量为依据筛选. 即分别按 4 种污染物的排放总量由大到小排序,按污染物排放量由大到小加和,筛选出污染物排放量加和占工业行业污染物排放总量的 95% 所对应的几个行业,并将其定义为该地市该种污染物相应的重污染行业. 将 4 种污染物各自对应的重污染行业取并集,其定义为该地市的重污染行业. 表 1 为按上述方法筛选出的该市 18 个重污染工业行业.

表 1　浙江沿海某市重污染工业行业

Table 1　Heavy pollution industries in the coastal city

行业	工业增加值		污染物排放量/t			
	数值/亿元	占比/%	COD	氨氮	SO_2	NO_x
医药制造业	27 738.2	0.6	57.4	7.5	70.3	61.1
饮料制造业	28 888.0	0.6	204.0	13.3	222.8	226.9
食品制造业	54 621.2	1.1	1 480.4	102.0	412.1	273.0
非金属矿物制品业	63 303.3	1.3	32.9	0.5	1 513.4	2 133.2
专用设备制造业	133 145.3	2.7	21.8	0.4	254.6	342.4
农副食品加工业	135 728.4	2.7	2 003.1	360.9	385.1	182.4
化学纤维制造业	136 639.0	2.7	303.7	40.3	1 554.2	1 387.0
塑料制品业	155 433.8	3.1	304.5	1.3	172.2	128.2
有色金属冶炼及压延加工业	159 954.2	3.2	58.9	3.0	1 067.2	824.4
造纸及纸制品业	183 338.8	3.7	1 920.0	45.2	3 002.0	8 324.2
通用设备制造业	248 258.5	5.0	68.0	3.1	704.6	435.4
金属制品业	268 145.8	5.4	236.4	10.9	723.4	524.9
黑色金属冶炼及压延加工业	271 050.2	5.4	419.0	35.5	4 379.7	1 591.2
交通运输设备制造业	308 423.4	6.2	123.1	4.5	110.2	67.9
纺织业	453 156.5	9.1	5 794.9	329.5	5 662.8	4 279.8
电力、热力的生产和供应业	568 571.2	11.4	265.1	1.0	93 205.9	119 472.4
化学原料及化学制品制造业	656 374.5	13.2	1 028.7	46.2	1 045.2	1 021.4
石油加工、炼焦及核燃料加工业	1 120 837.5	22.5	90.5	5.2	9 874.3	3 182.4
18 个行业总和	4 973 607.8	100.0	14 412.2	1 010.3	124 360.1	144 458.0
全部工业行业总和	7 344 481.3		14 767.1	1 024.0	124 750.8	144 977.2
18 个行业所占比例/%	67.7		97.6	98.7	99.7	99.6

表 1 中 18 个重污染行业 2008 年工业增加值占当年该市规模以上工业企业工业增加值总和的比例为 67.7%,4 种污染物排放量占工业行业污染物排放量分别为 97.6%、98.7%、99.7%、99.6%. 重污染行业的排污量比重远高于其经济贡献.

1.2 重污染行业污染物排放量分析方法

1.2.1 主要参数定义

表 2 定义了本研究情景分析程序编制涉及的关键参数.

1.2.2 重污染工业行业污染物排放量计算

表 2 情景分析关键参数定义

Table 2 Definition of the parameters in scenario analysis

参数	定义
GDP^{year}	某一年的 GDP(万元)
IAV^{year}	某一年工业行业的工业增加值(industrial added value, IAV)(万元)
$IAV_{Pollut}^{n,year}$, $IAV_{non\text{-}P}^{n',year}$	某一年第 n 个重污染工业行业、第 n' 个非重污染工业行业的 IAV(万元)
r_{GDP}^{year}	某一年 GDP 相对于基准年可比价格的平均增长率1)(%)
η_1^{year}, η_2^{year}, η_3^{year}	分别指某一年第一、二、三类产业增加值占 GDP 的比例(%)
η_{21}^{year}	某一年第二产业中工业行业的 IAV 占第二产业增加值的比例(%)
ρ_{Pollut}^{year}	某一年重污染工业行业的 IAV 相对于基准年 IAV 的平均增长率(%)
λ^{year}	某一年工业行业 IAV 相对于基准年的平均增长率(%)
σ_{Pollut}^{year}	重污染行业 IAV 在基准年至目标年期间的增长率与工业行业 IAV 增长率之比(%)
$E_{COD/NH_4^+\text{-}N/SO_2/NO_x\text{-}P}^{year}$	重污染工业行业某一年 COD、氨氮、SO_2、NO_x 各自的排放总量(t)
$\alpha_{COD/NH_4^+\text{-}N/SO_2/NO_x\text{-}P}^{n,year}$	第 n 个重污染工业行业某一年单位工业增加值 COD、氨氮、SO_2、NO_x 各自的排放量[$kg\cdot(万元)^{-1}$]
$\theta_{COD/NH_4^+\text{-}N/SO_2/NO_x\text{-}P}^{n,2015}$	第 n 个重污染工业行业基准年至目标年单位工业增加值 COD、氨氮、二氧化硫、NO_x 排放量各自的下降比例(%)
$\xi_{COD/NH_4^+\text{-}N/SO_2/NO_x\text{-}P}$	分别指目标年重污染工业行业 COD、氨氮、SO_2、NO_x 排放总量预期在下一个五年计划内分别的下降比例(%)
$K_{Pollut}^{n,2008}$	第 n 个重污染工业行业 2008 年工业增加值所占的比例(%)
$A_{Pollut}^{n,year}$	第 n 个重污染工业行业 2015 年工业增加值所占比例的动态调整系数,无量纲;赋值区间为[0.8,1.2],变化步长为 0.1.

1)国家统计部门发布 GDP 数据是现价总量,GDP 增长率是基于可比价格的增长率

(1)重污染工业行业污染物排放量计算通式

工业污染物排放量可用式(1)表达:

$$E = IAV \times \alpha \tag{1}$$

式中,E 表示工业污染物排放量;IAV 表示工业增加值;α 表示工业污染物排放强度,即单位工业增加值的工业污染物排放量,为工业污染物排放量与工业增加值的比值.

污染物排放量由生产过程中污染物产生量及治污设施对所产生的污染物的去除能力 2 个方面决定,如式(2)所示:

$$E = E_0 \times (1 - k) \tag{2}$$

式中,E 为工业污染物排放量;E_0 为工业污染物产生量;k 为污染物去除率.

工业污染物产生量与生产过程的技术水平密切相关,治污设施污染物去除率除与治污工艺技术有关外,运行监管也是重要影响因素.

(2)目标年重污染工业行业 IAV 计算方法

分析目标年重污染工业行业污染物排放量的一个重要前提是计算目标年重污染工业行业的 IAV 及 18 个重污染工业行业 IAV 各自所占比例.

现有的国民经济统计系统中,国内生产总值(GDP)包括第一产业、第二产业和第三产业的增加值. 第二产业由工业和建筑业构成. 工业增加值通常由统计部门核算. 工业增加值可用式(3)表示:

$$IAV = GDP \times \eta_2 \times \eta_{21} \tag{3}$$

本研究 2015 年工业行业的 IAV 可用式(4)表示:

$$\begin{aligned} IAV^{2015} &= GDP^{2015} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015} \\ &= GDP^{2008} \times (1 + 1.23 r_{GDP}^{2015})^{(2015-2008)} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015} \end{aligned} \tag{4}$$

本研究假设基准年与目标年之间价格指数平均值与 2003 ~ 2008 年间的平均值一致,式(4)中 1.23 为该市 2003 ~ 2008 年 GDP 现价增长率与可比价增长率比值的平均值. 重污染工业行业限于数据可得性,也用 IAV 现价总量和现价增长率进行分析.

根据历史数据,2003 ~ 2008 年该市工业行业与建筑业的比例稳定在 65∶35,即 η_{21} 保持在 65% 左右. 将工业行业的 IAV 分为重污染工业行业的 IAV 与非重污染工业行业的 IAV,即式(5)所示:

$$IAV^{2015} = IAV_{Pollut}^{2015} + IAV_{non\text{-}P}^{2015} = \sum_{n=1}^{n} IAV_{Pollut}^{n,2015} + \sum_{n'=1}^{39-n} IAV_{non\text{-}P}^{n',2015} \tag{5}$$

式(5)中目标年重污染工业行业 IAV 的总量确定是情景分析的重要前提之一. 重污染工业行业目标年

的 IAV 可以表达为式(6)：

$$\mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} = \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2008} \times (1 + \rho_{\mathrm{Pollut}}^{2015})^{(2015-2008)} \quad (6)$$

式中，$\rho_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 为重污染工业行业 IAV 在(2008 ~ 2015 年)期间的平均增长率. 进一步，将目标年的 $\rho_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 用式(7)表达.

$$\rho_{\mathrm{Pollut}}^{2015} = \rho^{2015} \times \sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \quad (7)$$

即重污染工业行业 IAV 在 2008 ~ 2015 年期间的平均增长率 $\rho_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 用工业行业 IAV 的平均增长率 λ^{2015} 与重污染行业 IAV 在(2008 ~ 2015 年)期间的增长率系数 $\sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 的乘积表达，由此可反映重污染工业行业与非重污染工业行业的发展速度. λ^{2015} 可按式(8)计算得到：

$$\lambda^{2015} = \sqrt[(2015-2008)]{\frac{\mathrm{GDP}^{2015} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015}}{\mathrm{GDP}^{2008} \times \eta_2^{2008} \times \eta_{21}^{2008}}} - 1 = \sqrt[(2015-2008)]{\frac{\mathrm{GDP}^{2008} \times (1 + 1.23r^{2015})^{2015-2008} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015}}{\mathrm{GDP}^{2008} \times \eta_2^{2008} \times \eta_{21}^{2008}}} - 1$$

$$= \sqrt[(2015-2008)]{\frac{(1 + 1.23r^{2015})^{2015-2008} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015}}{\eta_2^{2008} \times \eta_{21}^{2008}}} - 1 \quad (8)$$

式中，$\sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 为情景分析设定的可变参数. 根据 2003 ~2008 年的历史数据判断，该市重污染工业行业 IAV 的平均增长率(25%)快于工业行业平均增长率(24%). 本研究在 $\sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 参数设定时，将其设定为保持基准年的系数(即 2003 ~ 2008 年间的平均值)，或将其设定为 1，即重污染行业与非重污染行业的 IAV 保持相同的增长率. 本研究未设定 $\sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015}$ 小于 1 的情景，是考虑到在大部分情景中第二产业的比例下降已意味着工业行业的总体增长率下降.

(3) 目标年重污染行业污染物排放量

情景分析的约束条件重点针对重污染行业 4 种污染物的排放量. 综合上述式(1) ~ (8)，提出式(9)所示的重污染行业污染物排放量表达式：

$$E_{\mathrm{P}}^{2015} = \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \times \alpha_{\mathrm{P}}^{2015} = \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2008} \times$$

$$\left\{1 + \left[\sqrt[(2015-2008)]{\frac{(1 + 1.23r^{2015})^{(2015-2008)} \times \eta_2^{2015} \times \eta_{21}^{2015}}{\eta_2^{2008} \times \eta_{21}^{2008}}} - 1\right] \times \sigma_{\mathrm{Pollut}}^{2015}\right\}^{(2015-2008)} \times \alpha_{Pollut}^{2008} \times (1 - \theta_{\mathrm{P}}^{2015}) \quad (9)$$

式(9)得出的是目标年重污染工业行业的 IAV 总量. 因重污染行业由 18 个子行业组成，各子行业单位工业增加值污染物排放量差异很大，各子行业的 IAV 所占比例差异对总的污染物排放量具有较大影响. 因此确定目标年 18 个重污染工业行业的 IAV 成为进一步分析的关键.

(4) 目标年重污染工业行业 18 个子行业 IAV 及污染物排放量计算

重污染工业行业工业增加值为 18 个子行业 IAV 的总和，如式(10)所示：

$$\mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} = \sum_{n=1}^{18} \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} = \sum_{n=1}^{18} A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} \times \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \quad (10)$$

式中，$K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008}$ 为第 n 个重污染工业行业 2008 年工业增加值所占的比例，其计算方法如式(11)所示：

$$K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} = \frac{\mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008}}{\sum_{n=1}^{n} \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008}} \quad (11)$$

式中，$A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015}$ 为第 n 个重污染工业行业 2015 年工业增加值的基准权重的动态调整系数，无量纲，$A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015}$ 赋值区间为[0.8, 1.2]，不等于 1，变化步长为 0.1，即设定 18 个子行业在目标年 IAV 所占比例在基准年比例基础上波动范围在 80% ~120%. $A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015}$ 的计算成为进一步分析的关键，需要计算机程序辅助.

重污染工业行业的污染物排放总量计算公式为式(12) ~ (15)：

$$E_{\mathrm{COD\text{-}P}}^{2015} = \sum_{n=1}^{18} A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} \times \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\mathrm{COD\text{-}P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\mathrm{COD\text{-}P}}^{n,2015})] \quad (12)$$

$$E_{\mathrm{NH_4^+\text{-}N\text{-}P}}^{2015} = \sum_{n=1}^{18} A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} \times \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\mathrm{NH_4^+\text{-}N\text{-}P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\mathrm{NH_4^+\text{-}N\text{-}P}}^{n,2015})] \quad (13)$$

$$E_{\mathrm{SO_2\text{-}P}}^{2015} = \sum_{n=1}^{18} A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} \times \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\mathrm{SO_2\text{-}P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\mathrm{SO_2\text{-}P}}^{n,2015})] \quad (14)$$

$$E_{\mathrm{NO_x\text{-}P}}^{2015} = \sum_{n=1}^{18} A_{\mathrm{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\mathrm{Pollut}}^{n,2008} \times \mathrm{IAV}_{\mathrm{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\mathrm{NO_x\text{-}P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\mathrm{NO_x\text{-}P}}^{n,2015})] \quad (15)$$

1.3 情景分析约束条件

目标年重污染工业行业 4 种污染物的排放量须在基准年基础上下降一定比例. 本研究结合国家“十二五”总量减排预期目标，提出其中该市重污染行业 4 种污染物排放量下降目标为 COD 下降 10%，氨氮下降 10%，SO_2 下降 5%，氮氧化物下降 15%. 这将是情景分析提出的各种情景的约束条件，也是

分析各种情景优劣的主要依据. 该市"十一五"期间在 COD 总量减排及 SO_2 减排方面进展很快,火电厂已全部实现脱硫,"十二五"期间进一步削减的空间已较小. COD 减排方面,其城市污水处理厂建设完善,但工业行业 COD 排放量却进一步增长. 分析历史数据发现,该市 2005 ~2009 年期间 18 个重污染工业行业污染物排放量 COD 上升 9.7%,氨氮下降 38.5%,SO_2 下降 12.1%,NO_x 上升 18.9%. 工业行业污染物总量减排,尤其是重污染行业 COD 和 NO_x 减排方面压力仍然很大.

具体而言,污染物排放总量的约束条件用式(16) ~(19)表达:

$$E_{\text{COD-P}}^{2015} \leqslant E_{\text{COD-P}}^{2008} \times (1 - \xi_{\text{COD-P}}) \tag{16}$$

$$E_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{2015} \leqslant E_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{2008} \times (1 - \xi_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}) \tag{17}$$

$$E_{\text{SO}_2\text{-P}}^{2015} \leqslant E_{\text{SO}_2\text{-P}}^{2008} \times (1 - \xi_{\text{SO}_2\text{-P}}) \tag{18}$$

$$E_{\text{NO}_x\text{-P}}^{2015} \leqslant E_{\text{NO}_x\text{-P}}^{2008} \times (1 - \xi_{\text{NO}_x\text{-P}}) \tag{19}$$

在实际程序运行中,按照式(12) ~(15)计算目标年各重污染工业行业的工业增加精确值往往导致程序无解,为此对目标年重污染工业行业的工业增加值及污染物排放量程序运行计算结果设定一个区间,即满足式(20) ~(23)所示:

$$90\% \times E_{\text{COD-P}}^{2015} \leqslant \sum_{n=1}^{n} A_{\text{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\text{Pollut}}^{n,2008} \times \text{IAV}_{\text{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\text{COD-P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\text{COD-P}}^{n,2015})] \leqslant E_{\text{COD-P}}^{2015} \tag{20}$$

$$90\% \times E_{\text{SO}_2\text{-P}}^{2015} \leqslant \sum_{n=1}^{n} A_{\text{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\text{Pollut}}^{n,2008} \times \text{IAV}_{\text{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\text{SO}_2\text{-P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\text{SO}_2\text{-P}}^{n,2015})] \leqslant E_{\text{SO}_2\text{-P}}^{2015} \tag{21}$$

$$90\% \times E_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{2015} \leqslant \sum_{n=1}^{n} A_{\text{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\text{Pollut}}^{n,2008} \times \text{IAV}_{\text{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{2008} \times (1 - \theta_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{n,2015})] \leqslant E_{\text{NH}_4^+\text{-N-P}}^{2015} \tag{22}$$

$$90\% \times E_{\text{NO}_x\text{-P}}^{2015} \leqslant \sum_{n=1}^{n} A_{\text{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\text{Pollut}}^{n,2008} \times \text{IAV}_{\text{Pollut}}^{2015} \times [\alpha_{\text{NO}_x\text{-P}}^{n,2008} \times (1 - \theta_{\text{NO}_x\text{-P}}^{n,2015})] \leqslant E_{\text{NO}_x\text{-P}}^{2015} \tag{23}$$

其他约束条件:

$$\sum_{n=1}^{18} K_{\text{Pollut}}^{n,2008} = 1, \quad \sum_{n=1}^{18} A_{\text{Pollut}}^{n,2015} \times K_{\text{Pollut}}^{n,2008} = 1,$$

$$\text{且} \min \sum_{n=1}^{18} |A_{\text{Pollut}}^{n,2015} - 1| \tag{24}$$

1.4 情景分析模型

根据上述思路,设计图 1 所示情景分析程序框架,用 Visual Basic 语言编制情景分析程序,采用枚举算法,程序嵌入 Excel 基础数据表,建立"原始数据-情景分析干预参数-情景分析计算程序-情景分析计算结果输出-情景分析结果图形表达"这 5 个环节的动态链接.

1.5 情景设置

情景设置以基准情景为基础,调整相关参数,设置产业结构调整情景、工业结构调整情景、清洁生产技术情景、综合情景、可持续发展情景这 6 种不同情景. 情景设置演变、设置目的和侧重点分析如下.

①基准情景:即采用参考该市"十一五"经济发展速度和产业结构,揭示保持现状发展所面临的环境压力.

②产业结构调整情景(简称调二进三):即减少第二产业比重,增加第三产业比重,考察什么样的三类产业比重方能使重污染行业的污染物排放量达到目标值.

③工业结构调整情景(简称工业调控):即在第二产业预期总量不变前提下,考察能否通过降低重污染工业的比重,使重污染行业的污染物排放量达到目标值.

④推行清洁生产技术情景(简称清洁生产情景):即通过技术进步减少排污强度,以达到减少污染物排放总量的目的,分析能否或者需要达到什么样的技术进步要求,方可使重污染行业的污染物排放量达到目标值.

⑤综合情景:同时采取适当的产业结构调整、工业结构调控和清洁生产技术,考察重污染行业的污染物排放量能否达到目标值.

⑥可持续发展情景(简称可持续情景):即根据浙江沿海经济综合发展规划,适当控制发展速度,同时采用产业结构调整、工业结构调整、推行清洁生产技术三项措施,使三类产业结构更趋合理,重污染行业控制在适度规模内并加大力度进行产业升级,加强技术进步,大幅降低排污强度,达到既发展经济又保护改善环境的目的,符合科学发展观和可持续发展战略.

基准情景是后续情景的基础,调二进三情景、工业调控情景和清洁生产情景属并列关系,以研究采用单独一种措施下污染物的排放情况. 综合情景是在基准情景基础上,同时采取适当的产业结构调整、工业结构调控和清洁生产技术; 可持续情景是综合考虑各种参数后提出的优化结果.

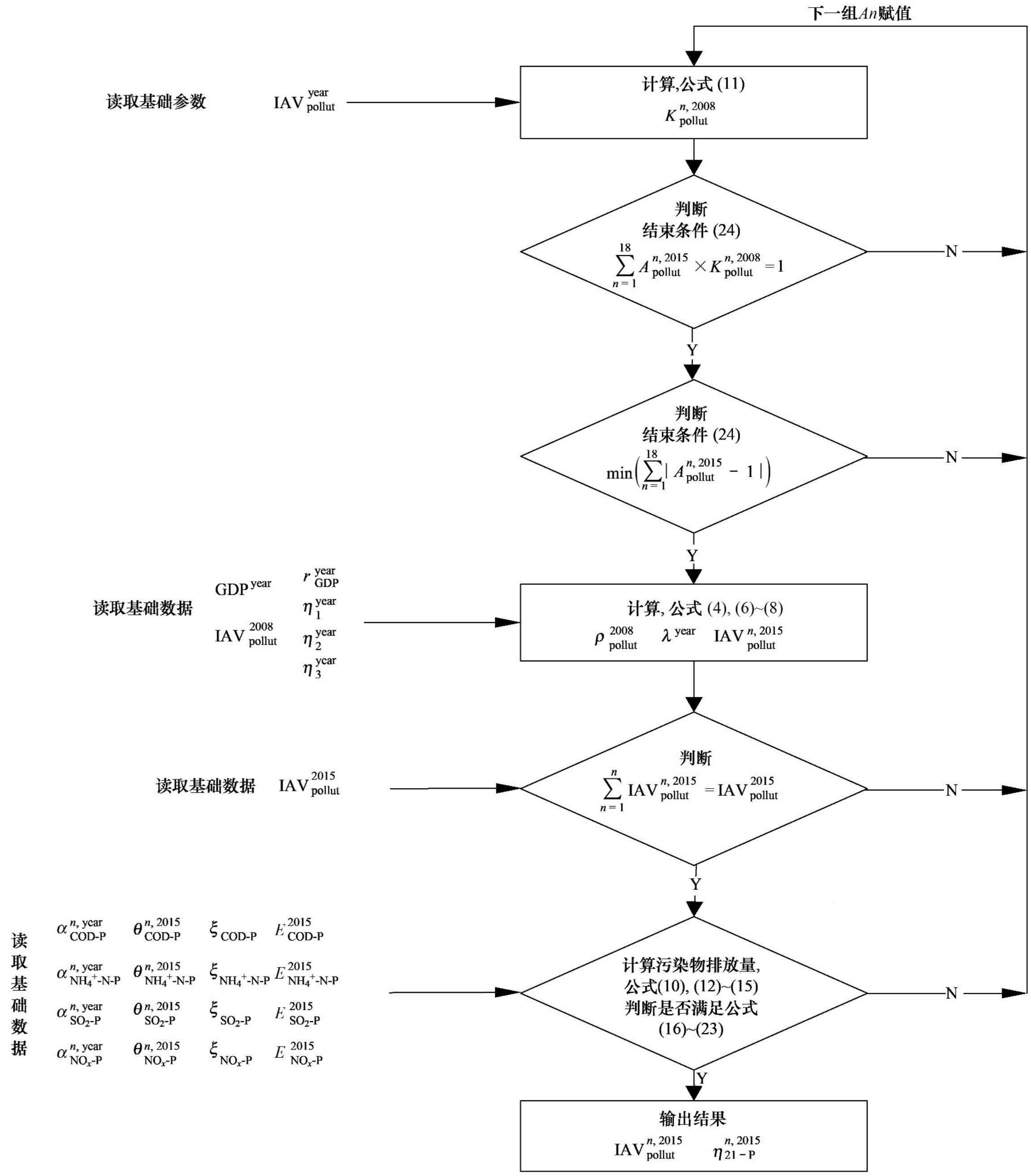

图 1　情景分析计算机程序框架

Fig. 1　Schematic diagram of scenario analysis program

情景分析流程如图 2 所示.

2　结果与分析

6 种情景对应的基础参数设置见表 3. 基准情景、调二进三情景、工业调控情景、清洁生产情景和综合情景中 GDP 的可比价增长率均设置为 9%，一方面是沿用 2009 年该市的 GDP 增长率，另一方面是揭示高 GDP 增长率对污染物排放量的影响.

基于表 3 中 6 种情景的重污染行业 COD、氨氮、二氧化硫、氮氧化物这 4 种污染物的排放总量分析结果见图 3 ~ 6. 其中 2 条横线分别代表基准年和目标年 4 种污染物的排放量基线和目标线.

根据图 3 ~ 6，可对这 6 种情景的分析结果归纳如下.

（1）基准情景，GDP 保持 9% 的增长率（现价增长率 11%），重污染行业增长率 10.8%，略快于工业行业增长率（10.3%），3 类产业比例为 4.4∶53∶42.6，第二产业中工业的比重为 65%，重污染行业 4 种污染物的排污强度下降 10%. 设置减排目标为：COD、氨氮、SO_2、氮氧化物排放量分别在基准年基

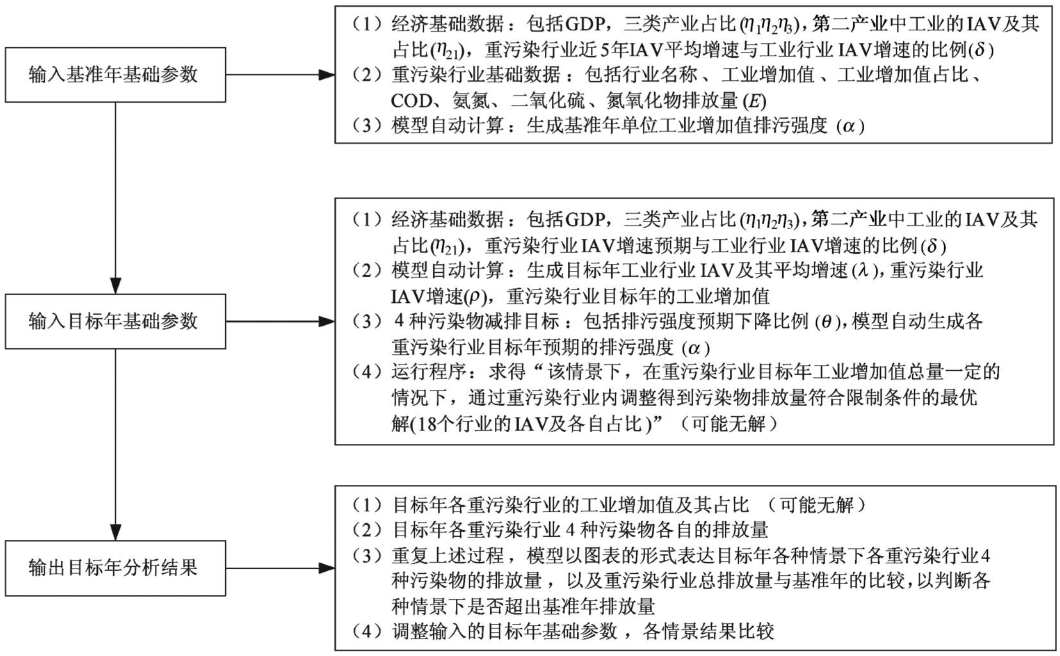

图 2　情景分析流程

Fig. 2　Process of scenario analysis

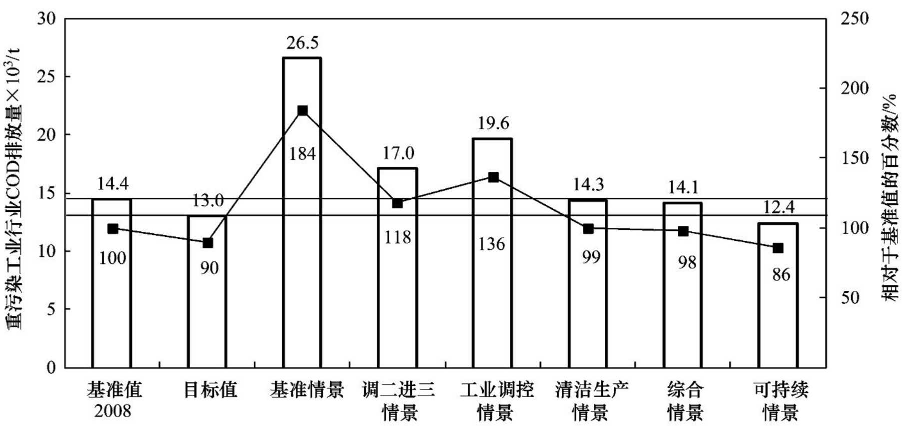

图 3　不同发展情景下 COD 排放量

Fig. 3　COD emission in different scenarios

础上下降 10%、10%、5% 和 15%. 结果表明,重污染行业目标年 IAV 与基准年相比增长 104%,4 种污染物排放量均将达到基准年的 1.84 倍,远远超出基准年排放量,显然是不能接受的.

(2)调整产业结构情景,在基准情景基础上,严格控制第二产业的比例,大力发展第三产业. 若第二产业比例在基准年基础上下降 1/3,即一二三产业比例达到 4∶35∶61,重污染行业 4 种污染物排污强度仅下降 10%. 计算结果表明,污染物排放量仍将达到基准年的 1.2 倍,也是不可行的.

(3)工业结构调整情景,即在基准情景基础上,控制重污染行业的经济总量,加强重污染行业结构优化. 计算结果表明,若目标年重污染行业的经济规模控制为基准情景的 2/3, 4 种污染物排放量为基准年的 1.3 倍. 若其经济规模在基准情景基础上降低 50%,4 种污染物排放量仅能与基准年保持一致. 也不能达到目标.

(4)推行清洁生产情景,即在基准情景基础上,依靠推行清洁生产技术,加快技术进步,大幅度降低排污强度. 结果表明,如目标年排污强度在基准年基础上下降 50%,4 种污染物的排放总量为基准年的 99%,不能达到减排目标. 即单纯依靠技术进步,以大幅度降低污染物产生量带动排污强度下降难度较大.

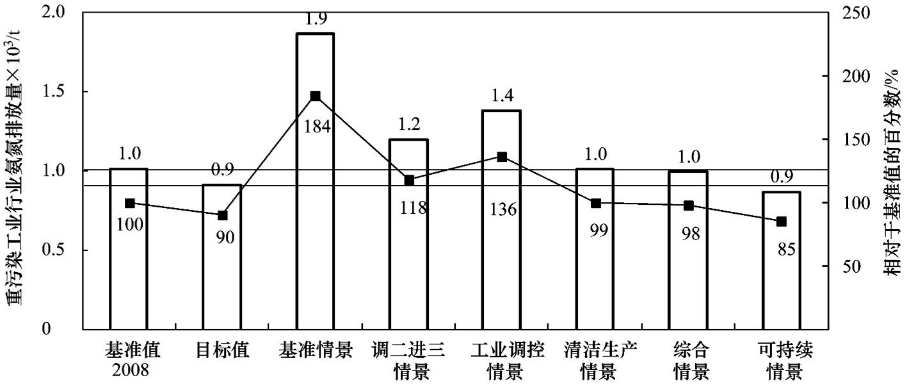

图 4　不同发展情景下氨氮放量

Fig. 4　Amino-nitrogen emission in different scenarios

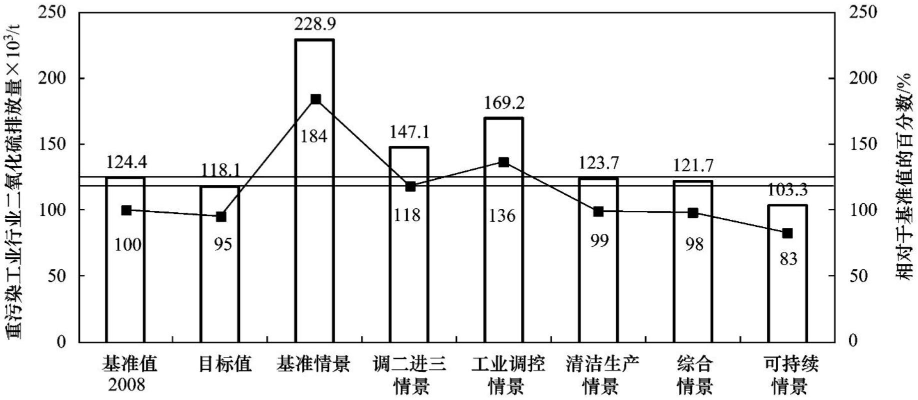

图 5　不同发展情景下二氧化硫排放量

Fig. 5　Sulfur dioxide emission in different scenarios

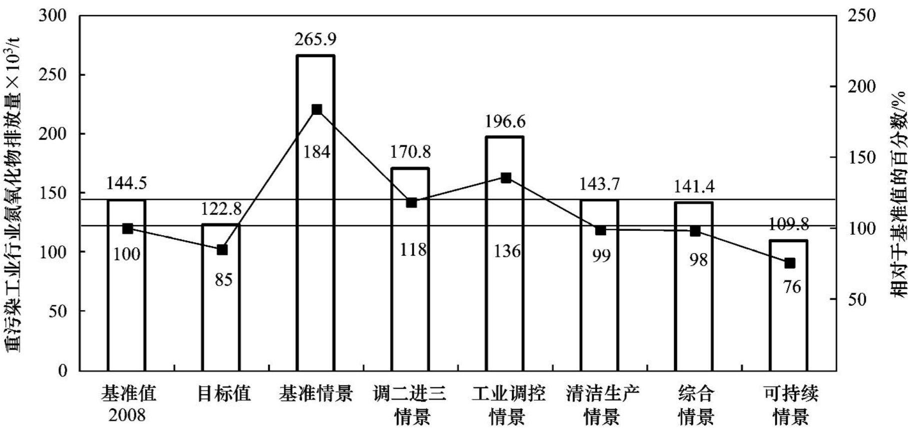

图 6　不同发展情景下氮氧化物排放量

Fig. 6　NO_x emission in different scenarios

（5）综合情景，在基准情景基础上，即 GDP 保持 9% 的快速增长（现价增长率 11%），第二产业比重由 53.3% 降至 40%，重污染行业工业增加值增长率控制在 6% 左右，与工业行业工业增加值增长率一致，单位工业增加值 COD、氨氮、SO_2、NO_x 排放量均下降 35%. 计算结果表明，4 种污染物的排放量较前面几种情景有明显降低，为基准年的 98%，仍不能达到预期目标.

（6）可持续情景，即在基准情景基础上，综合考虑经济发展速度、产业结构调整、重污染行业调控和清洁生产技术推进. GDP 保持 7% 适度较快增长（现价增幅 8.6%），第二产业结构由 53.3% 降至

40%,重污染行业的工业增加值增长率与工业行业保持一致,控制增长速度在 3.7% 左右,同时要求 4 种污染物排污强度均下降 30%. 计算结果表明,重污染行业的排污总量为基准年的 82% ~86%,达到目标值.

表 3 中可持续情景与综合情景相比重要区别是 GDP 增长率从 9% 降至 7%,GDP 增长率明显放缓. 本研究认为放缓 GDP 增长的预期实质是控制重污染工业行业过快增长. 根据 2006 ~2008 年统计数据,该市重污染工业行业工业增加值平均增长率为 30%,同期 GDP 现价平均增长率为 17%,可见经济发展过度依赖重污染工业行业. 本研究提出的可持续情景下,重污染工业行业工业增加值增长率近 3.7%,远低于 GDP 增长率 7%,抑制重污染行业的过快发展是污染减排关键. 如前所述,该市人均 GDP 已达70 000元,进入工业化后期,经济发展不能仍依赖传统重污染行业,应加大力度调整产业结构,限制重污染行业的发展,大力发展高新技术产业和第三产业.

目标年重污染行业各子行业的工业增加值及其比例、污染物排放量与基准年对比见表 4. 可持续情景中基准年污染物排放量及排污强度较大的行业在目标年的经济比重有所下降. 18 个重污染行业中,有 12 个行业其经济贡献下降,如电力、热力的生产和供应业、纺织业、黑色金属冶炼及压延加工业、造纸及纸制品业、有色金属冶炼及压延加工业等,其工业增加值总和占 18 个行业总和的比例由 50% 降至 45%. 其余 6 个因其排污强度与其他 12 个行业相比相对较低,在目标年其经济贡献有所增加,工业增加值总和占 18 个行业总和的比例由 50% 升至 55%.

纺织业及造纸及纸制品业这 2 个行业的 COD、二氧化硫、氮氧化物排放量及排放强度在 18 个重污染行业中综合评价排在前两位,根据情景分析结果,在目标年这 2 个行业的工业增加值增长幅度在 18 个行业中的比例分别由 9.1% 和 3.7% 下降到 8.2% 和 3.3%. 这 2 个行业进一步发展中应立足已有的产业集群,加强对中小规模企业和技术水平低的企业进行改造提升,果断淘汰落后产能,实现产业集群的升级,向价值链两端延伸,提高附加值.

该市火力发电装机容量在全省居首,二氧化硫、氮氧化物排放量大,300 MW 以上火电厂脱硫设施全部建成,脱硝设施建设处于全省领先水平,应加强监管监测,严格执行排放标准,在进一步降低二氧化硫和氮氧化物排放量的同时,加强汞、$PM_{2.5}$ 等的控制,并充分发挥能源基础设施在解决区域环境问题中的作用. 在目标情景中电力热力的生产和供应业的工业增加值比重由 11.4% 降至 10.3%.

石油加工、炼焦及核燃料加工业和化学原料及化学品制造业的工业增加值在重污染行业中占有较大比重,但其单位工业增加值污染物排放量相对较小. 情景分析程序计算时,这 2 个行业工业增加值所占比重有所增加,分别由 22.5% 和 13.2% 增加至 24.75% 和 14.52%. 这 2 个行业以石油化工为主导,是重要的基础性支柱行业,其在规模化及技术水平方面已有很好的发展基础,污染物排放强度相对较低. 进一步发展中除加强 4 种污染物的控制外,应重点从源头提高原子利用率,降低 VOC、恶臭等排放造成的环境影响.

3 结论

(1) 本研究以浙江沿海某市为例,以 2008 年为基准年,运用情景分析方法,建立情景分析模型,以转变经济发展方式为目的,以 COD、氨氮、二氧化硫、氮氧化物 4 种主要污染物的排放量较基准年分别下降 10%、10%、5% 和 15% 为约束性条件,研究了 6 种发展情景下该市 18 个重污染行业的发展方式对环境产生的压力.

(2) 基于情景分析的发展建议如下:经济适度增长(GDP 可比价增长率 7% 左右),加大力度调整产业结构,努力使 3 类产业的比例由基准年的 4.4∶53∶42.6 调整至 4∶40∶56,并控制重污染行业 IAV 增长率在 3.7% 以下; 加强重污染行业的结构调整,控制电力、热力的生产和供应业、纺织业、黑色金属冶炼及压延加工业、造纸及纸制品业、有色金属冶炼及压延加工业的发展规模. 电力行业加强监管监测,提高排放标准,降低排放量; 石油加工、炼焦及核燃料加工业和化学原料及化学品制造业加强源头控制,加大力度推进清洁生产技术,大幅削减污染物产生量,使污染物排放强度下降 30% 以上; 加强治污设施运营监管,维持污染物去除效率. 通过上述措施可控制重污染行业的排污总量达到目标值.

(3) 沿海城市发展若仍然采取过快、过大、倚重传统产业的发展模式与增长方式,污染物排放量仍将大幅增加,资源环境难以为继,发展不可持续. 因此必须动态地、持续地、系统地进行改进和逐步优化,以实现可持续发展.

(4) 本研究情景分析程序采用的枚举算法在运

表 3　情景分析基础参数

Table 3　Parameters of scenario analysis

情景		GDP 可比价增长率 (r)/%	GDP 现价增长率 ($1.23 \times r$)/%	一二三产业比例 $\eta_1:\eta_2:\eta_3$	工业行业 IAV 增长率 (λ^{2015})/%	重污染行业 IAV 平均增长率 ($\rho^{2015}_{\text{Pollut}}$)/%	减排目标 $\zeta_{\text{COD/NH}_4^+\text{-N/SO}_2\text{/NO}_x}$	单位工业增加值污染物排放量降幅/% COD ($\theta^{2015}_{\text{P-COD}}$)	氨氮 ($\theta^{2015}_{\text{P-NH}_4^+\text{-N}}$)	SO_2 ($\theta^{2015}_{\text{P-SO}_2}$)	NO_x ($\theta^{2015}_{\text{P-NO}_x}$)	重污染行业 IAV 平均增长率与工业行业 IAV 增长率之比 ($\sigma^{2015}_{\text{Pollut}}$)/%
“十一五”	2006	13.4	17.36	4.8∶55.1∶40.1	13.9	2003～2008 年现价平均增长率为 25%	COD：↓10% SO_2：↓10%					104.2
	2007	14.8	19.5	4.4∶55.3∶40.3	15.8							
	2008	10.1	15.4	4.2∶55.4∶40.4	10.4							
	2009	8.6	6.32	4.4∶53.3∶42.3	4.1							
基准情景		9	11.0	4.4　53.0　42.6	10.3	10.8		10	10	10	10	104.2
调二进三情景		9	11.0	4.0　35.0　61.0	4.0	4.0	COD：↓10%	10	10	10	10	100
工业调控情景		9	11.0	4.0　53.0　43.0	10.3	4.5	氨氮：↓10%	10	10	10	10	44
清洁生产情景		9	11.0	4.4　53.0　42.6	10.3	10.3	SO_2：↓5%	50	50	50	50	100
综合情景		9	11.0	4.0　40.0　56.0	6.0	6.0	NO_x：↓15%	35	35	35	35	100
可持续情景		7	8.6	4.0　40.0　56.0	3.7	3.7		30	30	30	35	100

表 4　可持续情景下重污染行业基准年与目标年比较

Table 4　Comparison of heavy pollution industries development between the base year and the target year

行业	基准年 IAV 数值/万元	占比/%	基准年污染物排放量/t COD	氨氮	SO_2	NO_x	目标年 IAV 数值/万元	占比/%	增幅/%	目标年污染物排放量/t COD	氨氮	SO_2	NO_x	目标年强度/kg·(万元)$^{-1}$ COD	氨氮	SO_2	NO_x
电力、热力的生产和供应业	568 571	11.4	265	1	93 206	119 472	657 601	10.26	2.10	215	0.8	75 460	89 817	0.33	0.00	114.75	136.58
纺织业	453 156	9.1	5 795	330	5 663	4 280	524 927	8.19	2.12	4 699	267.1	4 592	3 222.5	8.95	0.51	8.75	6.14
非金属矿物制品业	63 303	1.3	33	0.5	1 513	2 133	74 990	1.17	2.45	27	0.4	1 255	1 642.6	0.36	0.01	16.74	21.90
黑色金属冶炼及压延加工业	271 050	5.4	419	35.5	4 380	1 591	311 495	4.86	2.01	337	28.6	3 523	1 188.6	1.08	0.09	11.31	3.82
化学纤维制造业	136 639	2.7	304	40.3	1 554	1 387	190 358	2.97	4.85	296	39.3	1 516	1 255.9	1.56	0.21	7.96	6.60
化学原料及化学制品制造业	656 374	13.2	1 029	46.2	1 045	1 021	930 640	14.52	5.11	1 021	45.8	1 037	941.3	1.10	0.05	1.11	1.01
交通运输设备制造业	308 423	6.2	123	4.5	110	68	357 643	5.58	2.14	100	3.6	89.5	51.2	0.28	0.01	0.25	0.14
金属制品业	268 146	5.4	236	10.9	723	525	380 716	5.94	5.13	235	10.9	719	484.4	0.62	0.03	1.89	1.27
农副食品加工业	135 728	2.7	2 003	360.9	385	182	155 748	2.43	1.98	1 609	289.9	309	136.0	10.3	1.86	1.99	0.87
石油加工、炼焦及核燃料加工业	1 120 837	22.5	91	5.2	9 874	3 182	1 586 318	24.75	5.09	89.6	5.2	9 783	2 927.6	0.06	0.00	6.17	1.85
食品制造业	54 621	1.1	1 480	102	412	273	84 604	1.32	6.45	1 605	110.6	446.8	274.8	19.0	1.31	5.28	3.25
塑料制品业	155 434	3.1	305	1.3	172	128	178 821	2.79	2.02	245.2	1.1	138.6	95.9	1.37	0.01	0.78	0.54
通用设备制造业	248 258	5.0	68	3.1	705	435	352 515	5.5	5.14	67.6	3.0	700.3	401.8	0.19	0.01	1.99	1.14
医药制造业	27 738	0.6	57	7.5	70	61	34 611	0.54	3.21	50.1	6.5	61.4	49.5	1.45	0.19	1.77	1.43
饮料制造业	28 888	0.6	204	13.3	223	227	34 611	0.54	2.62	171.1	11.1	186.9	176.7	4.94	0.32	5.40	5.11
有色金属冶炼及压延加工业	159 954	3.2	59	3.0	1 067	824	184 590	2.88	2.07	47.6	2.4	862.1	618.4	0.26	0.01	4.67	3.35
造纸及纸制品业	183 339	3.7	1 920	45.2	3 002	8 324	213 432	3.33	2.19	1 564.6	36.8	2 446	6 298.8	7.33	0.17	11.46	29.51
专用设备制造业	133 145	2.7	22	0.4	255	342	155 748	2.43	2.27	17.8	0.3	208.5	260.4	0.11	0.00	1.34	1.67
重污染行业总合	4 973 608	100	14 412	1 010	124 360	144 458	6 409 367	100	3.70	12 398	863.7	103 334	109 843				

算效率方面还有待进一步改进,目前参数 A 的赋值区间在[0.8,1.2],18 个重污染行业情况下,计算次数为 4^{18} 次,当参数 A 的赋值区间扩大到[0.7,1.3]时,运算量增加到 6^{18} 但次,计算量呈指数上升,运算时间极大增加.进一步研究拟应用深度优先搜索算法,以提高运算效率.

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所博士生石伟在情景分析程序编写方面给予的支持.

参考文献:

[1] 梁巧梅, 魏一鸣, 范英, 等. 中国能源需求和能源强度预测的情景分析模型及其应用[J]. 管理学报, 2004, **1**(1): 62-66.

[2] 张颖, 王灿, 王克, 等. 基于LEAP的中国电力行业 CO_2 排放情景分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, **47**(3): 365-368.

[3] Cai W J, Wang C, Chen J N, *et al*. Green economy and green jobs: Myth or reality? The case of China's power generation sector [J]. Energy, 2011, **36**(10): 5994-6003.

[4] Li J C, Dong X C, Shangguan J X, *et al*. Forecasting the growth of China's natural gas consumption[J]. Energy, 2011, **36**(3): 1380-1385.

[5] 刘立涛, 沈镭. 中国能源分区情景分析及可持续发展功能定位[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(9): 1484-1495.

[6] 刘俊杰, 李树林, 范浩杰, 等. 情景分析法应用于能源需求与碳排放预测[J]. 节能技术, 2012, **30**(1): 70-75.

[7] 朱跃中. 未来中国交通运输部门能源发展与碳排放情景分析[J]. 中国工业经济, 2001, (12): 30-35.

[8] 代明, 刘俊杰, 韩启钰. 深圳未来经济增长的情景分析[J]. 城市观察, 2011, (4): 94-101.

[9] 罗绍荣, 甄峰, 魏宗财. 城市发展战略规划中情景分析方法的运用——以临汾市为例[J]. 城市问题, 2008, (9): 29-34.

[10] 朱一中, 夏军, 王纲胜. 西北地区水资源承载力宏观多目标情景分析与评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(3): 103-106.

[11] 刘永, 郭怀成, 王丽婧, 等. 环境规划中情景分析方法及应用研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(3): 82-90.

[12] 盛虎, 刘慧, 王翠榆, 等. 滇池流域社会经济环境系统优化与情景分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, **48**(4): 647-656.

[13] 欧志丹, 程声通, 贾海峰. 情景分析法在赣江流域水污染控制规划中的应用[J]. 上海环境科学, 2003, **22**(8): 568-572.

[14] 王少平, 程声通, 贾海峰, 等. GIS 和情景分析辅助的流域水污染控制规划[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 32-37.

[15] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的情景分析研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1544-1548.

[16] Shiratani E, Munakata Y, Yoshinaga I, *et al*. Scenario analysis for reduction of pollutant load discharged from a watershed by recycling of treated water for irrigation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 878-884.

[17] Bai Y, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al*. Modeling soil conservation, water conservation and their tradeoffs: a case study in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(3): 419-426.

[18] 张向龙, 王俊, 杨新军, 等. 情景分析及其在生态系统研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(10): 1763-1770.

[19] 田立新, 刘雅婷. 长三角地区节能减排演化情景分析及预测[J]. 管理学报, 2012, **9**(4): 611-614.

[20] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析[J]. 地理研究, 2006, **25**(2): 268-275.

[21] Jiang B, Sun Z Q, Liu M Q. China's energy development strategy under the low-carbon economy [J]. Energy, 2010, **35**(11): 4257-4264.

[22] 王金南, 蔡博峰, 严刚, 等. 排放强度承诺下的 CO_2 排放总量控制研究[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(11): 1568-1572.

[23] 张维阳, 段学军. 经济增长、产业结构与碳排放相互关系研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, **31**(4): 442-450.

[24] 冯悦怡, 张力小. 城市节能与碳减排政策情景分析——以北京市为例[J]. 资源科学, 2012, **34**(3): 541-550.

[25] 姜克隽, 庄幸, 贺晨旻. 全球升温控制在2℃以内目标下中国能源与排放情景研究[J]. 中国能源, 2012, **34**(2): 14-18.

HUANJING KEXUE Vol. 34 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2013

CONTENTS

环境科学

(HUANJING KEXUE)

(月刊　1976 年 8 月创刊)

2013 年 1 月 15 日　34 卷　第 1 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly　Started in 1976)

Vol. 34　No. 1　Jan. 15, 2013

主　　管	中国科学院
主　　办	中国科学院生态环境研究中心
协　　办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院
主　　编	欧阳自远
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号,邮政编码:100085) 电话:010-62941102,010-62849343 传真:010-62849343 E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)

Superintended by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief	OUYANG Zi-yuan
Edited by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
Published by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@ mail. sciencep. com
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90. 00 元　　国外发行代号: M 205

国内外公开发行