

工业废水排放变化的因素分解与减排效果

李名升^{1,3}, 佟连军^{1*}, 仇方道²

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 徐州师范大学城市与环境学院, 徐州 221116; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在描述中国工业废水排放量、经济增长、经济空间结构和工业废水排放强度的基础上, 运用无残差的完全分解模型进行量化分析, 分解出 1981~2006 年间经济增长、空间结构和排放强度对工业废水排放量变化的影响效果, 并进一步利用 H-P 滤波方法对这一时期工业废水减排效果进行了估计. 结果表明: ① 工业废水排放量年均增长 0.25×10^8 t, 其中由经济增长、排放强度、空间结构引起的变化分别为 25.9×10^8 t、 -25.5×10^8 t、 -0.16×10^8 t; ② 1981~2006 年中国工业废水累计减少排放 641.8×10^8 t, 同时受国家宏观经济政策的影响, 减排缺口处于波动之中, 但总减排缺口大于 0, 说明实际减排量高于潜在减排量; ③ H-P 滤波分析所得到的潜在减排率在研究期内呈先上升后下降的趋势; ④ 综合来看, 我国在 1982~1990 年及 1997~2006 年工业发展表现为高污染型, 1991~1996 年表现为低污染型.

关键词:工业废水; 完全分解模型; 经济规模; 排放强度; 空间结构; 减排

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0707-06

Factor Decomposition and Reduction Effect on the Changes of Industrial Wastewater Discharge

LI Ming-sheng^{1,3}, TONG Lian-jun¹, QIU Fang-dao²

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: After describing the volume of industrial wastewater discharge, economic growth, economic space structure and industrial wastewater discharge intensity, the non-residue complete decomposition model was applied to analyze the effects of three economically factors, which were economic scale, discharge intensity and space structure, on the changes of industrial wastewater discharge quantitatively from 1981 to 2006 in China. Then industrial wastewater reduction effect was computed by use of H-P filter method. The main results could be summarized as follows: ① The average annual growth of industrial wastewater discharge is 0.25×10^8 t, and the scale of economic development, the space structure and the industrial wastewater discharge intensity have different contributions to the change, being 25.9×10^8 t, -25.5×10^8 t, -0.16×10^8 t respectively. ② Accumulative quantity of industrial wastewater discharge reduction is 641.8×10^8 t from 1981 to 2006 in China. During this period, with the impact of macroeconomic policies, reduction gap has been fluctuating; however, total reduction gap is a positive number. It is to say that actual reduction volume is more than potential reduction one. ③ With the shift of time, potential reduction efficiency tends to increase firstly and then decline. ④ During 1982-1990 and 1997-2006, industry is high-pollution, while during 1991-1996, industry is low-pollution correspondingly.

Key words: industrial wastewater; complete decomposition model; economic scale; discharge intensity; space structure; reduction

随着经济的快速增长和城市化、工业化进程的深入推进, 生态环境退化的趋势也在加剧, 正确处理经济发展与生态环境之间的关系, 促进其协调发展, 已成为世界各国共同关注的焦点. 目前, 国外学者对经济与环境关系的研究主要侧重于环境库兹涅茨曲线理论^[1,2]及对包含资源、环境、社会、经济等多要素在内的可持续性定量评价^[3,4]等方面. 近年来, 对环境质量变化的机制研究已引起众多学者的关注, 众多学者认为影响环境质量的因素主要存在于生产、贸易、消费 3 个环节^[1,5~8], 尤其是生产环节, 并通过市场机制和公共管理来进行调节^[9], 但多为主观的定性解释, 定量研究的手段不多^[1,10]. 国内学者在这

方面的研究多是对环境库兹涅茨曲线理论的验证^[11~13], 从机制方面揭示经济发展与环境质量关系的成果还比较少, 而从环境污染的影响因素入手定量考察各因素对污染物排放量的影响程度是一个有益的尝试.

本研究以工业废水为例, 通过构建无残差的完全分解模型, 考察经济规模、技术进步、经济空间结

收稿日期: 2008-04-17; 修订日期: 2008-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571041); 国家自然科学基金重点项目(40635030)

作者简介: 李名升(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为经济-环境协调发展, E-mail: lmsxml@neigae.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: tonglj@neigae.ac.cn

构 3 个因素对工业废水排放量的增量或减量效应,揭示 20 世纪 80 年代以来影响中国工业废水排放量动态变化的主要因素,进而运用工业废水减排模型和 H-P 滤波方法,定量分析了中国工业废水减排效果的演化趋势,以期为我国工业废水减排措施的制定、经济与环境协调发展提供有益的科学依据。

1 研究方法

无残差的完全分解模型自 Sum 于 1996 年提出以来,在能源分解领域得到迅速应用^[14,15]。本研究借鉴完全分解模型,构建工业废水排放量的分解模型,在此模型基础上求解工业废水减排量及减排率。

将工业废水排放量(W)的变化看作经济规模(以工业产值 Q 表示)、经济空间结构(三大地区中地区 i 的工业产值占全国工业总产值的比重,以 S_i 表示)和地区工业废水排放强度(三大地区中地区 i 单位工业产值对应的工业废水排放量,以 I_i 表示)

$$W_Q = \Delta Q \sum_{i=1}^3 I_i^0 S_i^0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \Delta Q (I_i^0 \Delta S_i + S_i^0 \Delta I_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_{i=1}^3 \Delta S_i \Delta I_i \tag{3}$$

$$W_I = Q^0 \sum_{i=1}^3 S_i^0 \Delta I_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \Delta I_i (S_i^0 \Delta Q + Q^0 \Delta S_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_{i=1}^3 \Delta S_i \Delta I_i \tag{4}$$

$$W_S = Q^0 \sum_{i=1}^3 I_i^0 \Delta S_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \Delta S_i (I_i^0 \Delta Q + Q^0 \Delta I_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_{i=1}^3 \Delta S_i \Delta I_i \tag{5}$$

工业废水排放总变化量 ΔW 也即等于各种分解效应之和:

$$\Delta W = W_Q + W_S + W_I \tag{6}$$

按照上述模型,第 t 年工业生产过程中的废水减排过程,即减排量估计公式为:

$$WR_t = - (W_I + W_S) \tag{7}$$

减排率公式为:

$$WRR_t = \frac{WR_t}{W_{t-1} + W_{Q,t}} \times 100\% \tag{8}$$

如果三要素变化相应引起的工业废水排放量变化效应 W_Q 、 W_S 、 W_I 为正值,分别表示由于工业经济规模、经济空间结构和废水排放强度的变化对工业废水排放量施加正向影响,增加工业废水排放量,其变化值称之为工业废水排放量的增量效应;反之,负值表示各自的减量效应。利用上述分解模型,可以初步考察经济规模、经济空间结构、工业废水排放强度分别在不同时期对工业废水排放总量影响的程度、特点及规律。

2 结果与分析

2.1 工业废水排放量变化趋势分析

这 3 种因素共同作用的结果,即工业废水排放量的变化分解为 3 种不同的变化效应:规模效应 W_Q (经济总量增加所引致的工业废水排放量的变动)、结构效应 W_S (指经济总量在三大地区的比重变动对工业废水排放量的影响)和技术效应 W_I (主要是指技术进步导致地区工业废水排放强度降低,进而影响工业废水排放量的变动)。

工业废水排放量完全分解模型可用式(1)表达:

$$W = Q \times \sum_{i=1}^3 S_i I_i \tag{1}$$

假设基期指标(第 0 年)用上标 0 表示,第 t 年指标用上标 t 表示,则基期和第 t 年工业废水排放量可分别用 W^0 和 W^t 表示, t 年间工业废水排放变化量 ΔW (ΔQ 、 ΔS 、 ΔI 同理可得)为:

$$\Delta W = W^t - W^0 \tag{2}$$

根据完全分解模型^[14],因子 Q 、 I 、 S 的变化对 ΔW 的贡献分别为:

全国工业废水排放总量在 26 a 间出现先上升后下降然后再次上升的 3 次曲线趋势(图 1)。1981 年,工业废水排放总量 223.6×10^8 t,此后 7 a 间年均增长 4.4×10^8 t,在 1987 年达到研究期间的最高峰值 260.3×10^8 t;自 1987 年以后,工业废水排放总量出现了下降趋势,且下降幅度较大,年均减少排放 7.6×10^8 t,在 1997 年达到研究期间的最低峰值 184.5×10^8 t;此后 10 a,尽管我国经济发展出现波折,但工业废水排放总量却又出现反弹态势,且增幅较大,年均增长 6.19×10^8 t,排放量在 2006 年反弹至 240.2×10^8 t。

从三大地区废水排放总量看,东部地区变化趋势与全国类似,也呈现先上升后下降然后再次上升的过程,所不同的其最高峰值出现在 2005 年;中部地区排放总量则呈现较为简单的先上升后下降趋势,尤其是近年来在全国总量有所上升的总体背景下其排放量基本保持不变,对稳定全国废水排放形势起到了积极的作用;西部地区排放量相对较少,其波动在研究期间也最小,稳定在 $40 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ t,但应注意的是,最近几年西部地区与中部地区排

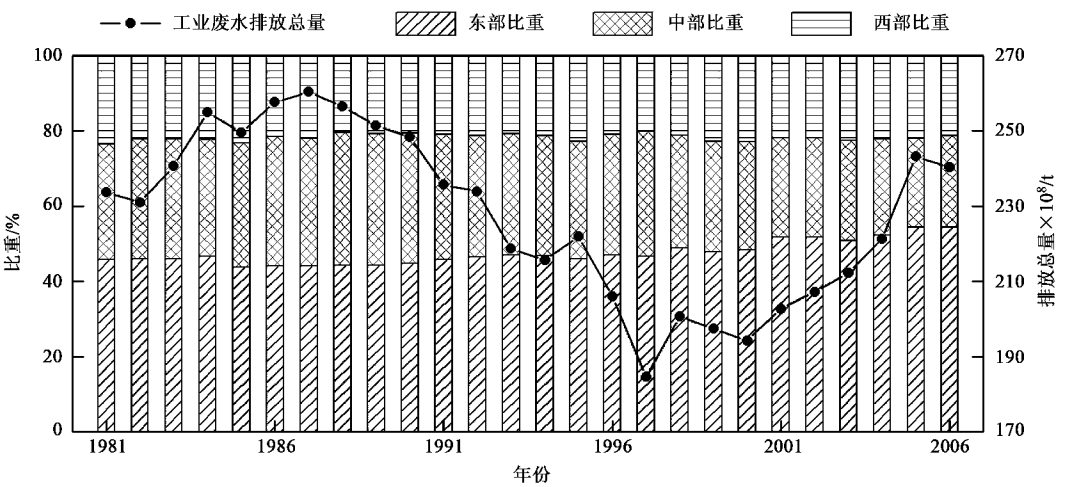


图1 全国工业废水排放总量及三大地区比重

Fig.1 Total volume of industrial wastewater discharge in China and proportion of three zones

放量的差距在逐年缩小,绝对差距由最高时的 $38.2 \times 10^8 \text{ t}$ (1988 年)缩小到 $3.87 \times 10^8 \text{ t}$ (2005 年),但相应的工业产值绝对差距却由 486 亿元增加到2559 亿元.

从各地区废水排放量占总排放量比重看,东部地区是全国废水排放的主体,废水排放量占全国的多年平均比重达 47.5%,尤其是最近几年稳定在 50%以上;中部其次,多年平均比重为 30.7%;西部最少,多年平均比重为 21.8%.从各地区废水排放量占总排放量比重变化看,东部地区的比重在此期间有较大增长,由 1981 年的 45.7%增长到 2006 年的 54.4%,增长近 8.7 个百分点;中部地区比重减少 6.5 个百分点;而西部在此期间基本稳定,略降 2.2 个百分点.

2.2 工业废水排放量变化效应的分解分析

2.2.1 经济发展与工业废水排放

工业废水是工业经济发展的产物,因此,经济发展(工业产值的增加)对工业废水排放具有驱动效果.我国工业产值由 1981 年的2 034.9 亿元增加到 2006 年的34 586.75 亿元(为剔除价格因素影响,文中所有涉及工业产值的数据均按 1981 年价格进行重新计算),增长近 17 倍,年均增长 10.3%,由此带来的废水排放量是工业废水排放的主要因素.

废水排放强度的降低对控制工业废水排放具有重要的积极影响.1981~2006 年全国及三大地区工业废水排放强度结果如表 1 所示.该表显示工业废水总体排放强度及各地区排放强度均呈明显下降趋势,总体年均下降 10.25%,东、中、西部年均分别下降 9.91%、10.43%、10.36%.

表 1 工业废水排放强度动态变化/ $\text{t} \cdot (\text{万元})^{-1}$

Table 1 Dynamic changes of industrial wastewater discharge intensity

区域	1981	1986	1991	1996	2001	2006
全国	1 148	732	413	163	102	69
东部	906	569	327	130	86	60
中部	1 334	934	530	199	108	76
西部	1 737	966	539	228	164	101

不同地区工业废水排放强度不同,因此经济总量在地区之间的分配对废水排放也有影响.由表 1 可看出,东、中、西部地区工业废水排放强度依次递增,西部地区排放强度是东部地区的近 2 倍.因此,当工业向排放强度较低的中、东部地区尤其是东部地区集中时有利于污染物的控制.由表 2 可知,在研究期间,东部地区工业产值占全国的比重上升 5.13 个百分点,中部地区下降 4.23 个百分点,西部地区下降 0.9 个百分点.如果从降低污染物排放的角度看,经济上的这种向东部集中趋势是具有积极意义的.但总体而言,各地区工业产值占全国的比重变化不大.

表 2 三大地区工业产值比重动态变化/%

Table 2 Dynamic changes of proportion of industrial output in three zones/%

区域	1981	1986	1991	1996	2001	2006
东部	57.98	56.68	58.01	58.77	61.41	63.11
中部	26.50	26.97	25.86	26.29	25.02	22.27
西部	15.52	16.35	16.13	14.95	13.57	14.62

2.2.2 工业废水排放变动的分解结果

根据以上结果和工业废水排放量的分解模型对中国 1981~2006 年工业废水排放量动态变化作效

应分解,结果见表 3 及图 2.

表 3 主要时段工业废水排放量变化的效应分解 $\times 10^8/t$

Table 3 Decomposition of changing effect for industrial wastewater in major periods $\times 10^8/t$

年份	ΔW	W_Q	W_I	W_S
1981 ~ 2006	6.56	2 008.44	- 1 944.08	- 57.80
1981 ~ 1986	23.92	139.12	- 117.37	2.17
1986 ~ 1991	- 21.90	125.28	- 145.21	- 1.97
1991 ~ 1996	- 29.77	200.51	- 228.91	- 1.38
1996 ~ 2001	- 3.29	95.59	- 95.71	- 3.17
2001 ~ 2006	37.59	126.12	- 88.95	0.43

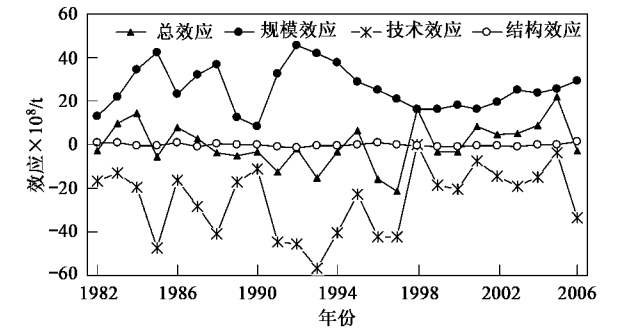


图 2 中国工业废水排放变动的因素分解

Fig.2 Decomposition of the changing effect for industrial wastewater

从研究初、末期变化结果看,工业废水排放量增加 $6.56 \times 10^8 t$,但经济增长对废水排放量的增量效应为 $2\,008 \times 10^8 t$,是 2006 年工业废水排放总量的 8.4 倍;而排放强度因素的抑制作用抵消了由经济增长所带来的大部分废水排放量,其对废水排放量的减量效应为 $1\,944 \times 10^8 t$,极大地减轻了经济增长对环境的压力;由于东部地区单位产值废水排放量低于中、西部地区,且在研究期间东部地区经济占全国比重升高 5 个百分点,因此研究末期与初期相比,经济空间结构的变化对抑制工业废水排放也有一定的积极作用,但是与排放强度因素相比,作用并不明显,仅为其作用强度的 3%.

从时间序列变化看,经济增长对工业废水排放施加正向影响,是导致排放量增加的主要因素,年度间变化效应均值为 $25.9 \times 10^8 t$,而工业废水排放强度和经济空间结构表现为抑制废水排放量增加的因素,年度间变化效应均值分别为 $- 25.5 \times 10^8 t$ 和 $- 0.16 \times 10^8 t$,各种因素变化产生的效应叠加使工业废水排放量变化总效应呈现一定的波动态势.

1981 ~ 1987 年间,虽然废水排放强度效应较大,在一定程度上遏制了废水排放量的增加,但由于经济增长效应逐年增加且幅度较大,年度间变化效应

均值为 $29.0 \times 10^8 t$ (在 3 个时段中本阶段经济增长效应最为明显,1987 ~ 1997 与 1997 ~ 2006 时段年度间变化效应均值分别为 $27.9 \times 10^8 t$ 和 $21.2 \times 10^8 t$),对废水排放量变化有更大影响,且经济空间结构效应多数年份表现为正向驱动效应,结果导致这一阶段工业废水排放量出现一定的增长趋势.

1987 ~ 1997 年间,经济增长效应趋缓,尤其是 1992 年以后,经济增长效应持续降低,而空间结构效应在此阶段表现为负向驱动,更主要的是强度效应在此阶段表现为强减量效应(强度效应在此阶段的抑制作用最为明显,年度间变化效应均值为 $- 36.4 \times 10^8 t$,减量效应绝对值远大于第 1 阶段的 $23.6 \times 10^8 t$ 和第 3 阶段的 $14.7 \times 10^8 t$),两者共同抵消了经济增长带来的废水排放量的增量效应,各种效应叠加的结果表现为此时期大部分年份工业废水排放量逐年减少.

1997 ~ 2006 年间,经济增长效应有小幅上升并趋于稳定,并且经济的空间结构效应表现为相对较强的负向驱动,但由于单位产值废水排放量的降低越来越困难(3 个阶段单位产值工业废水排放强度的年均下降率分别为 9%、14.9%、6.8%),强度效应的抑制作用在 3 个阶段中最弱,因此,这一时期工业废水排放量变化表现为较快增长.

2.3 工业废水减排效果分析

将 2.2 节计算结果及原始数据代入减排公式及减排率公式可以得到中国 1982 ~ 2006 年的工业废水减排量(图 3)及减排率.自 1981 年以来,中国历年工业废水减排量均大于 0,大部分年份减排量在 $10 \times 10^8 \sim 50 \times 10^8 t$ 之间,25 a 共减少排放 $641.8 \times 10^8 t$,相当于期间工业废水排放总量的 11.3%.这说明虽然我国工业废水排放量在较长时间内有上升趋势,但在工业快速发展过程中对工业废水污染的控制还是较为有效.

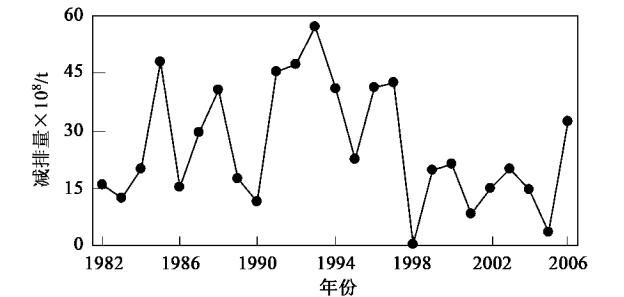


图 3 1982 ~ 2006 年中国工业废水减排量

Fig.3 Reduction volume of industrial wastewater in China from 1982 to 2006

将图3与图1进行对比可以看出,工业废水排放总量与减排效果密切相关,减排效果较好的时间段废水排放总量呈下降趋势,反之则有上升趋势.具体来说,1982~1987年,工业废水年均减排量为 23.47×10^8 t,同时期废水排放总量上升11.9%;1987~1997年间是废水减排效果最好的阶段,年均减排 36.62×10^8 t,同时期废水排放总量下降27.6%;1997年以后,减排效果极不理想,年均减排量仅 14.99×10^8 t,致使这一时期工业废水排放量上升27.5%.污染物减排对降低环境压力的作用由此可见一斑.

为了说明中国经济发展中工业废水减排率变化的潜在趋势,有必要对该变量序列中长期变动趋势和短期波动成分加以分离.H-P滤波是经常使用的经济变量趋势分解方法,其基本思想是将时间序列分解为趋势成分和波动成分.设 Y_t 是包含趋势成分(Y_t^T)和波动成分(Y_t^C)的经济时间序列,则有:

$$Y_t = Y_t^T + Y_t^C \tag{9}$$

利用H-P滤波可得到减排率的趋势成分(即潜在减排率).减排缺口表示为实际减排量与潜在减排量之间的差额,它可以反映我国经济发展中工业废水减排效果周期波动的变化轨迹,也可以反映现有减排潜力的实现程度:

$$WAP_t = (Y_t - Y_t^T) \cdot (W_{t-1} + W_{G,t}) \tag{10}$$

如果 $WAP > 0$,表明实际减排率大于潜在减排率,经济发展中的废水控制强度大,减排效果较好,经济增长表现为低污染型;反之,如果 $WAP < 0$,说明实际减排率小于潜在减排率,经济增长表现为高污染型.从中长期来说,估计减排缺口有助于政策制定者确定污染物排放的潜在空间,制定更为合理的污染物控制目标,从短期来说,主要是为了评估废弃物排放的压力.1982~2006年中国工业废水排放的潜在减排率、减排缺口如图4所示.

由图4可以看出,利用H-P滤波所得到的潜在减排率变化趋势呈先上升后下降的二次曲线,在1993年达到极值.这与单位产值工业废水排放量降低的趋势是一致的.目前,单位产值工业废水排放量已经降至 $69.5 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ (按1981年价格计算.按当年价格计算为 $26.3 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$),今后进一步降低的速率已经不可能太大.因此,从中长期来看,我国工业废水减排率的变化将有可能趋于平稳甚至降低.

1982~2006年的25 a,中国工业废水排放缺口小于0的年份有14 a,但这并没有影响研究时期内工业废水总减排效果,25年间减排总量大于0,为 12.53×10^8 t.由此可以看出,虽然多数年份经济增

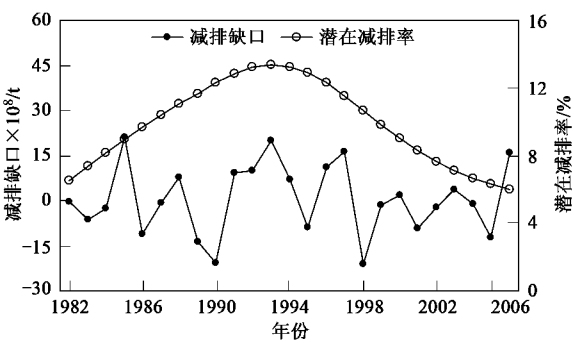


图4 1982~2006年中国工业废水潜在减排率和减排缺口

Fig.4 Potential reduction efficiency and reduction gap of industrial wastewater in China from 1982 to 2006

长表现为高污染型,但总体减排量却大于潜在减排量,工业废水减排效果较为理想.但中国工业废水减排缺口存在较大波动,数据标准化以后表征离散程度的变异系数达0.546,表明各年份废水减排缺口离散程度较高,但大体可以分为3个阶段:1982~1990年、1991~1996年、1997~2006年.

1982~1990年间多数年份减排缺口小于0,年均减排缺口 -2.92×10^8 t,实际减排效果低于理想值,其原因大致可归结为:①经济的快速增长,此时期单位产值废水排放量较高,强度效应对减排的效果不明显,经济增长对废弃物排放的促进作用至关重要;②外资的涌入.这一时期适逢我国改革开放之初,大量外资急剧涌入,促进了我国经济的快速发展,但外商投资领域多集中于规模小、污染重的轻工行业,如化纤、纺织、皮革、食品加工等,不仅不利于污染物减排,反而增加了废水的排放量;③环境意识薄弱.这一时期环境问题在我国尚未凸显,无论是国家还是企业、个人,都没有将环境保护提到应有的高度.1991~1997年间多数年份减排缺口大于0,年均减排缺口 9.20×10^8 t,实际减排量高于理想值.这一时期国家所采取的紧缩性宏观调控政策是减排效果较为理想的主要原因.而随着亚洲金融危机的爆发,旨在拉动经济增长的扩张性宏观调控政策及随后的重化工业、有色金属冶炼等污染较重产业的过快发展对1998年以后工业废水减排造成了极大压力,致使1998~2006年间年均减排缺口达到 -5.20×10^8 t.

3 讨论

(1) 本研究仅在时间序列上对中国1981~2006年工业废水排放动态变化进行因素分解与减排效果分析,如果能够分别对3大地区内部工业废水排放

量的动态变化和减排效果进行分析并探讨 3 大地区之间的区域差异,对制定工业污染物减排措施、促进区域可持续发展的参考价值将更大。

(2) 从降低污染物排放的角度看,经济向东部转移和集中对于减少污水排放具有积极意义,但是目前我国地区经济差距已经较大,减小区域经济差距成为我国区域政策的主导.如何在政策制定过程中兼顾公平与效率,达到一个合适的平衡点是一个值得讨论的问题。

(3) 本研究所定义的减排潜力是实际减排量的趋势项,是中国当前经济发展阶段和技术水平下的减排潜力,对政策制定具有现实意义.如果对国际先进地区与我国的实际情况进行对比则可以得到中国工业废水最大减排潜力.当然由于经济发展水平与技术水平方面的巨大差距,这一潜力的实现尚需较长时间。

4 结论

(1) 经济增长是导致工业废水排放量增加的主要因素,年度间变化效应均值为 25.9×10^8 t,而工业废水排放强度和经济空间结构表现为抑制废水排放量增加的因素,年度间变化效应均值分别为 -25.5×10^8 t 和 -0.16×10^8 t.各种因素变化产生的效应叠加使工业废水排放量变化总效应呈现一定的波动态势。

(2) 自 20 世纪 80 年代以来,中国历年工业废水减排量均大于 0,26 年间共减少排放 641.8×10^8 t,相当于期间工业废水排放总量的 11.3%.工业快速发展过程中对工业废水污染的控制还是较为有效.分析发现,工业废水排放总量与减排效果密切相关,减排效果较好的时期废水排放总量呈下降趋势,反之则有上升趋势。

(3) 运用 H-P 滤波分析计算所得的 1982 ~ 2006 年间工业废水潜在减排率变化趋势表明:1993 年以来,虽然部分年份实际减排率有较大波动,但总体趋势是下降的;减排缺口显示虽然有较多年份工业发展表现为高污染型,但实际减排量高于减排潜力 12.53×10^8 t,总体而言我国废水减排效果尚算理想。

(4) 根据减排缺口计算结果,结合同时期工业废水排放的变动,我国在 1982 ~ 1990 年及 1997 ~ 2006 年工业发展表现为高污染型,1991 ~ 1996 年表现为低污染型,这与我国所实行的宏观经济政策密切相关。

参考文献:

- [1] Grossman G M, Krueger A B. Economic Growth and the Environment [J]. *Q J Econ*, 1995, **110**(2):353-377.
- [2] Dinda S. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey [J]. *Ecol Econ*, 2004, **49**(4):431-455.
- [3] Lopez-Ridaura S, Masera O, Astier M. Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems [J]. *Ecol Indic*, 2002, **2**(1):135-148.
- [4] Munda G. "Measuring Sustainability": A Multi-Criterion Framework [J]. *Environ Dev Sustain*, 2005, **7**(1):117-134.
- [5] Lieb C M. The Environmental Kuznets Curve and Flow versus Stock Pollution: The Neglect of Future Damages [J]. *Environ Resour Econ*, 2004, **29**(4):483-506.
- [6] De Bruyn S M. Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing sulphur emissions [J]. *Environ Dev Econ*, 2001, **2**(4):485-503.
- [7] Pasche M. Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve [J]. *Ecol Econ*, 2002, **42**(3):381-389.
- [8] Stern D I. Explaining changes in global sulfur emissions: an econometric decomposition approach [J]. *Ecol Econ*, 2002, **42**(2):201-220.
- [9] Kaufmann R K, Davidsdottir B, Garnham S, *et al.* The determinants of atmospheric SO₂ concentrations [J]. *Ecol Econ*, 1998, **25**(2):209-220.
- [10] Hamilton C, Turtton H. Determinants of emissions growth in OECD countries [J]. *Energ Policy*, 2002, **30**(1):63-71.
- [11] 彭水军,包群.经济增长与环境污染 [J]. *财经问题研究*, 2006, (8):3-17.
- [12] 王志华,温宗国,闫芳,等.北京环境库兹涅茨曲线假设的验证 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, **17**(2):40-47.
- [13] 袁雯,杨凯.上海城市环境经济系统发展过程的数量分析 [J]. *地理研究*, 2002, **21**(1):97-106.
- [14] Sun J W. Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model [J]. *Energ Econ*, 1998, **20**(1):85-100.
- [15] Soytas U, Sari R. Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets [J]. *Energ Econ*, 2003, **25**(1):33-37.