

# 全国污染物排放总量减排与水环境质量改善的响应关系及其分区研究

白辉<sup>1</sup> 陈岩<sup>1,†</sup> 王东<sup>1</sup> 吴舜泽<sup>2</sup> 高伟<sup>3</sup> 郭怀成<sup>4</sup>

1. 生态环境部环境规划院, 长江经济带生态环境联合研究中心, 北京 100012; 2. 生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029; 3. 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091; 4. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: chenyan@caep.org.cn

**摘要** 以2011—2015年全国污染物排放总量和水环境质量数据为基础, 通过数据包络分析模型, 分析全国污染物排放总量减排与水环境质量改善的响应关系, 发现这种响应关系在时空上呈现差异化特点。进一步对二者的响应关系进行分区, 提出不同分区模式下的污染物总量控制与水污染防治对策建议, 使污染物总量控制更好地服务于水环境质量改善, 为流域水环境质量目标要求下的精准治污提供科学依据。

**关键词** 污染总量减排; 水环境质量改善; 响应关系

## Study on the Classification of Response Relationship between Total Pollutant Emission Reduction and Water Quality Improvement in China

BAI Hui<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1,†</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, WU Shunze<sup>2</sup>, GAO Wei<sup>3</sup>, GUO Huaicheng<sup>4</sup>

1. United Center for Eco-Environment in Yangtze River Economic Belt, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012; 2. Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing 100029; 3. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091; 4. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: chenyan@caep.org.cn

**Abstract** The response relationship between total pollution emission reduction and water quality improvement from 2011 to 2015 was analyzed by data envelopment analysis (DEA). The results show that the response relationship is different in time and space. The response relationship was further divided into four different models, and suggestions about total pollution emission controlling and water environment prevention were made under different models, in order to make total pollution emission controlling play a better role in water quality improvement. The result should provide scientific basis for precise pollution control in accordance with the water environment quality objectives of the basin.

**Key words** total pollution emission reduction; water quality improvement; response relationship

经过近20年的努力,我国水环境污染物排放总量控制卓有成效,在经济高速发展、污染物产生量不断增加的同时,有效地遏制住污染排放量快速增长的势头。然而,我国水环境质量尚未得到根本性的改善,老百姓对环境质量的主观感受也没有变好,某些方面甚至还在变糟。在某种程度上,污染物排放总量考核数据与人们感受到的现实环境质量是脱

节的<sup>[1-2]</sup>。由于多年来采用“一刀切”的目标总量控制,没有兼顾不同地区自然条件差异化的特点,导致流域污染控制总量减排与水质改善目标脱节、区域限排量与水环境容量不衔接等问题普遍存在<sup>[3]</sup>。在新时期以提高环境质量为核心、总量与质量双目标控制的水环境保护需求下,正确地处理总量与质量的关系已成为当前环保工作的迫切要求<sup>[4]</sup>。

目前,对环境质量改善与污染排放总量减排关系的研究还不多。国外的研究往往将污染物作为一个变量来分析经济增长与环境质量的联系,或者将污染排放作为环境质量的变量来表征环境质量,国内学者则关注经济增长与环境质量变化的关系。随着污染物总量控制的实行,对两者变化关系的研究逐渐受到重视,但研究成果报道较少。林宏等<sup>[5]</sup>采用综合污染指数法和断面污染物通量计算方法,对浑河水质综合污染指数、断面污染物通量和城市污水入河污染物总量进行相关性分析,表明这些指标之间关联性较强。张浩<sup>[6]</sup>对常州市“十一五”期间水环境质量变化、社会经济发展以及水资源量等指标进行相关性分析,结果表明地表水中化学需氧量(COD)和氨氮的平均浓度与其排放量显著相关。彭跃<sup>[7]</sup>分析铁岭市“十一五”期间COD减排量与综合污染指数等的关联程度,建立学习曲线回归模型进行回归分析,结果表明随着COD减排量增加,水环境质量稳步改善,两者呈现同向变化的趋势。李名升等<sup>[8]</sup>考察“十一五”期间中国COD减排趋势和水环境质量变化之间的关系,发现无论是全国尺度还是流域尺度,随着COD排放量的减少,地表水的水质均出现不同程度的改善,两者表现出一定程度的正相关关系,但部分流域存在污染物排放总量与环境质量变化不完全协同的现象。李名升等<sup>[9]</sup>进一步分析污染排放与环境质量的相互影响,构建环境质量与污染排放关系模型,将二者的关系划分为低污染-高质量、高污染-高质量、高污染-低质量、低污染-低质量4种类型,指出2005和2010年中国大部分省区属于高污染-低质量类型,污染物排放量超过环境容量。

本研究对全国污染物排放总量控制与水环境质量改善的响应关系进行分析,并对这种关系进行分区,提出不同分区模式下污染物总量控制与水污染防治对策的建议,以期使污染物排放总量控制这一重要手段更好地服务于水环境质量改善,为污染物总量减排以及水环境质量改善政策的制定提供科学支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 指标选取

考虑到数据的可靠性和可获得性,以全国31个省(市、自治区)数据<sup>[10]</sup>为基础,选取与污染源排放和水环境质量相关的指标进行分析。结合现有污

染物总量控制指标,以COD和氨氮排放量为主要指标来表征污染物排放总量。目前,常用的地表水环境质量状况表征指标主要有各水质类别断面比例、指标污染物平均浓度等。为了与污染物排放总量指标形成直接的对应关系,同时减少水质类别比例等二次统计评价指标对统计结果的影响,直接采用水体中COD和氨氮平均浓度表征水环境质量。

污染源排放数据来自2011—2015年全国环境统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/>),水环境质量数据来自国家地表水监测断面数据(<http://www.mee.gov.cn/hjzl/shj/dbsszyb/index.shtml>)。以上述数据为依据,分别计算全国31个省级行政区的污染物年排放总量和各行政区内所有国家地表水监测断面的COD和氨氮年平均浓度。

### 1.2 模型构建

#### 1.2.1 Daniel 趋势检验

Daniel趋势检验是评价水环境质量变化趋势的重要方法,通过计算Spearman秩相关系数 $r_s$ 来判断变化趋势与显著性, $r_s$ 值的正、负分别表示上升和下降趋势,当 $r_s$ 的绝对值高于临界值(可查表获得)时,表明变化趋势显著。计算公式为

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_i (CR_i - TR_i)^2}{NY^3 - NY}, \quad (1)$$

式中,CR为观测值从小到大排列的位置序号,TR为观测值对应的时间位置序号,NY为观测的时间周期, $i$ 为观测的时间序号。

#### 1.2.2 聚类分析

聚类分析采用系统聚类法,在SPSS 18.0软件平台上开展计算。

#### 1.2.3 数据包络分析

选取以投入产出原理为基础的数据包络分析模型,构建污染物总量减排与水环境质量改善关系模型。数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)由Charnes等<sup>[11]</sup>于1978年提出,是一种非参数技术效率分析法,在环境、金融以及农业等领域应用广泛<sup>[12-14]</sup>。DEA模型最初应用于投入-产出效率的评价,以投入类变量的综合值作为分母,以产出类变量的综合值作为分子,通过比较产出与投入的比值来判断产出效率。随着资源与环境问题日益突出,该方法在环境效率评价领域得到重视和应用<sup>[15]</sup>。DEA的核心概念是技术效率,可以从投入和产出两个角度来度量。在投入既定的情况下,技术效率由

产出最大化的程度来衡量;在产出既定的情况下,技术效率由投入最小化的程度来衡量<sup>[14]</sup>。DEA模型的适用条件是输入变量具有投入和产出的响应关系,可以对多要素投入产出系统进行评价,并且不需要建模者确定指标权重,由DEA优化算法计算出最优权重。水环境质量与污染物总量控制系统包括多种表征指标,属于典型的多要素投入产出系统,适用于DEA模型。DEA模型分为基于规模收益不变的CCR(Charnes-Cooper-Rhodes)模型和基于规模收益可变的BCC(Banker-Charnes-Cooper)模型两大类;根据效率的测度方式,又分为投入导向、产出导向和非导向等模型。本研究以经典的CCR模型(投入导向)为基础,采用投入既定(污染物总量减排量)、产出最大化(水环境质量改善)来构建污染物排放总量减排与水环境质量改善关系模型。通过模型得出的效率值来衡量两者之间的关系:效率值越大,关系越强;效率值越小,关系越弱。

污染物排放总量与水环境质量响应关系模型方程如下:

$$\max = \frac{\sum_{r=1}^q u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}, \quad (2)$$

s.t.

$$\frac{\sum_{r=1}^q u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad (3)$$

式中, $x$ 为投入项(污染物COD或氨氮减排量), $v(\geq 0)$ 为投入项权重, $y$ 为产出项(水体中COD或氨氮污染物平均浓度改善值), $u(\geq 0)$ 为产出项权重, $n$ 为决策单元(省级行政区)的数量( $j=1, 2, \dots, n$ ), $m$ 为投入项数量( $i=1, 2, \dots, m$ ), $q$ 为产出项数量( $r=1, 2, \dots, q$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物排放总量时空变化特征

根据2011—2015年全国31个省(市、自治区)主要污染源(工业、生活、农业和集中式)排放量统计数据,采用Daniel趋势检验法,得到全国31个地区的COD、氨氮排放总量变化趋势(图1)。结果表明,除西藏和青海外,全国其他地区的COD排放量呈现显著下降趋势;除西藏、青海和海南外,全国其他地区的氨氮排放量呈现显著下降趋势。其中,导致青海省污染物排放总量升高的主要原因是生活

污染排放量上升较快。

为了定量地评估各个地区的污染物排放总量变化,本文计算全国31个地区的污染物排放总量年变化量(图2)。结果表明,全国污染物排放量总体上呈下降趋势,下降幅度呈现从东部、中部到西部逐渐递减的规律。山东、广东、河北和江苏等地区是污染物总量下降幅度最大的区域;西藏、青海、新疆、贵州和宁夏等地区是污染物总量下降幅度最小的区域。

### 2.2 水环境质量时空变化特征

根据2006—2015年全国31个省(市、自治区)地表水水质断面COD和氨氮年平均浓度的统计数据,采用Daniel趋势检验法,得到全国31地区地表水的COD和氨氮浓度变化趋势(图3)。结果表明,10年间,东部地区的水质有所改善,中部和西部地区维持不变或有退化。其中,西藏、重庆和海南的COD浓度有升高趋势。与COD相比,氨氮浓度呈现下降趋势的区域更多。

为了定量地评估各个地区地表水水环境质量变化,计算全国31个地区地表水COD和氨氮平均浓度年变化量(图4)。结果表明,全国地表水COD和氨氮浓度呈现下降趋势,下降幅度也呈现从东部、中部到西部逐渐递减的规律。山西、河北、陕西等地区是COD和氨氮浓度下降幅度最大的区域;西藏、海南的COD浓度和内蒙古、北京的氨氮浓度有升高趋势。

### 2.3 总量减排与环境质量改善响应关系特征

#### 2.3.1 特征分析

使用构建的DEA模型,计算2012—2015年全国31个地区污染物排放总量减排与水环境质量的改善关系。结果表明,西部地区二者关系最好,中部地区次之,华北地区和沿海地区稍差,东北地区最差(图5),说明中西部地区总量减排对水环境质量改善的影响较大,东北地区总量减排对水环境质量改善的影响较小。因此,西部地区的总量控制对水环境质量改善的意义非常突出,单位污染负荷的减少会带来更程度的水环境质量改善,总量控制对水质改善的效果可能优于其他地区。

通过分析近5年全国各地区的总量减排与质量改善关系随时间变化的情况,发现这种关系在各地区具有时空差异性特征,2012—2015年,大部分地区总量减排与水环境质量改善的响应关系增强,说明全国总量减排对水环境质量改善起到重要的促进

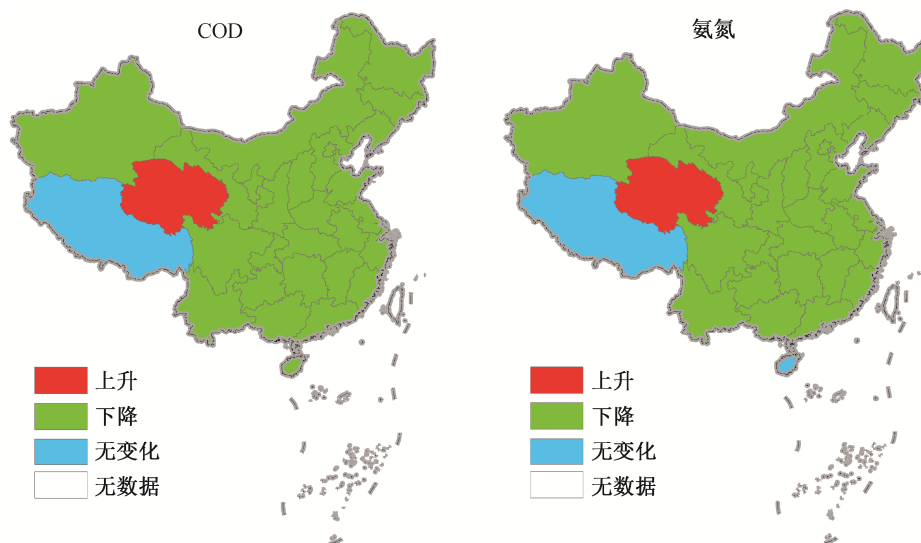


图 1 2011—2015 年全国 31 个省级行政区水污染物排放总量变化趋势  
Fig. 1 Change trend of total water pollutant emission in 31 provinces of China from 2011 to 2015

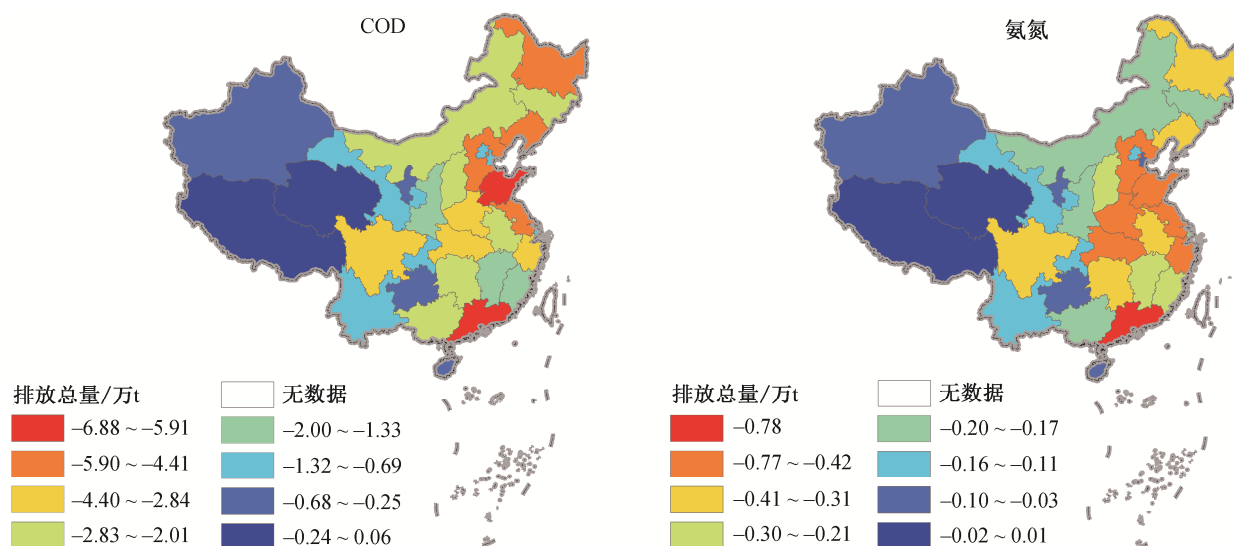


图 2 2011—2015 年全国 31 个省级行政区水污染物排放总量年均变化  
Fig. 2 Average annual change of total water pollutant emission in 31 provinces of China from 2011 to 2015

作用,只有河北、山西、上海、湖北、广西和云南等少部分地区总量减排与水环境质量改善的响应关系有所减弱。东部地区的响应关系比西部地区弱,可能存在以下原因:西部地区位于我国江河的上游,随着水量向下游输送,污染物也随之向下游输送,从而提高下游环境本底;由于江河的输送主要发生在大江大河的干流,对中小型河流影响较小,因此上游对下游的影响集中于干流区,影响范围有限;其次,由于我国的西部江河水质(特别是大型江河)远优于中东部地区,产生污染叠加的影响较小。

### 2.3.2 差异性分类

为进一步分析总量减排与环境质量改善关系的差异性,使用聚类分析,将 2012—2015 年全国 31 个地区的二者关系划分成 4 类(图 6)。海南、西藏、青海和新疆为一类区域,关系最强;北京、天津、上海、山西、云南、贵州、重庆、宁夏和甘肃为二类区域,关系较强;四川、陕西、内蒙古、吉林、安徽、江西、湖南、福建和广西为三类区域,关系中等;江苏、浙江、山东、河南、河北、广东、湖北、辽宁和黑龙江为四类区域,关系最弱。

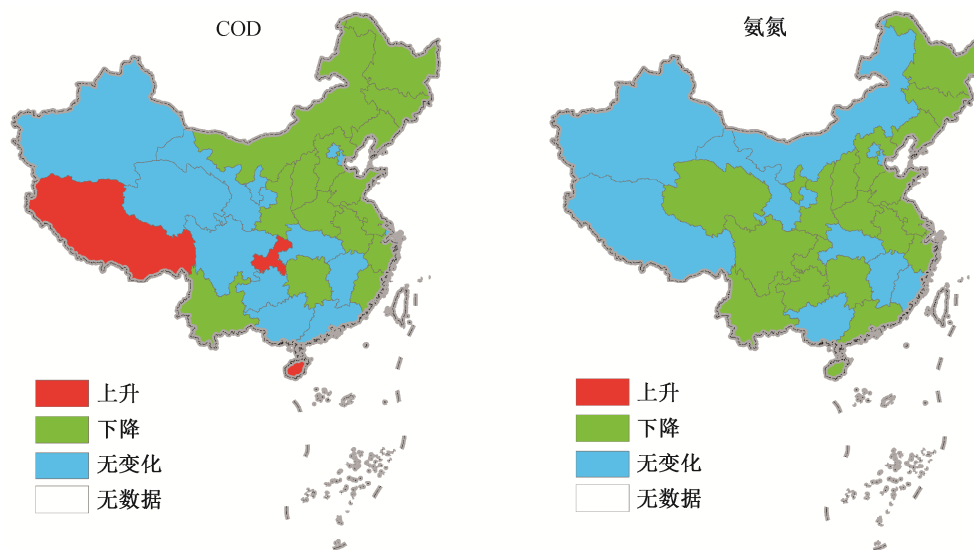


图3 2006—2015年全国31个省级行政区水污染物浓度变化趋势

Fig. 3 Change trend of water pollutant concentration in 31 Provinces of China from 2006 to 2015

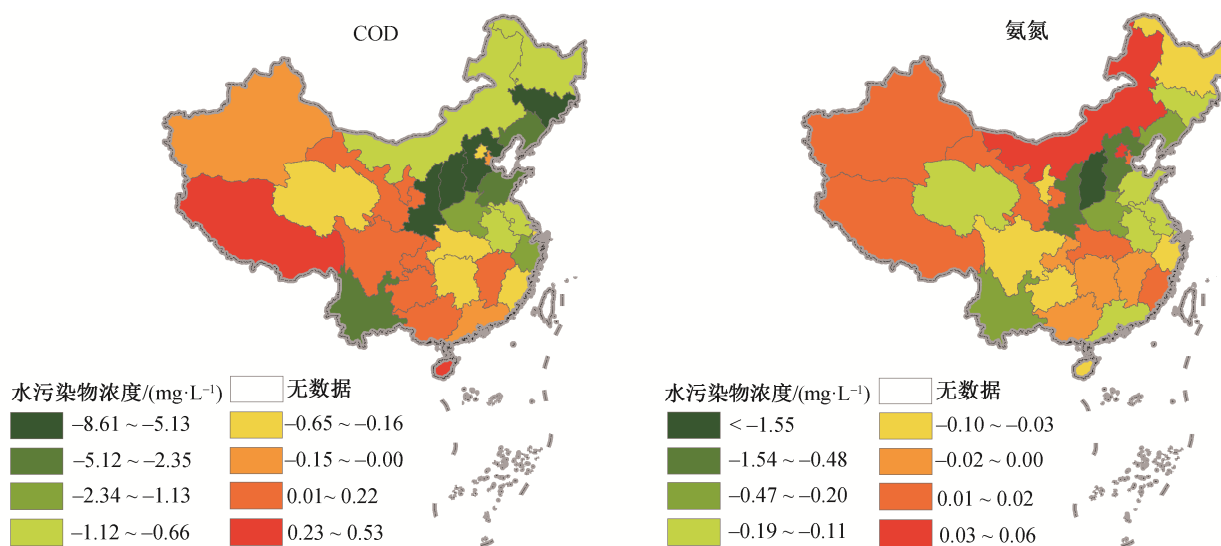


图4 2006—2015年全国31个省级行政区水污染物浓度年均变化

Fig. 4 Average annual change of water pollutant concentration in 31 Provinces of China from 2006 to 2015

## 2.4 总量减排与水质改善响应关系分区管控措施

1) 一类区域(海南、西藏、青海和新疆)的总量减排与水质改善关系最强, 近几年总量减排量较少, 甚至部分年份的总量有所增加。与其他区域相比, 该区域总量减排的水环境质量改善效益最大。该区域总量控制与水环境质量的改善压力都较小, 可以在保证水环境质量不退化的前提下, 采取差异化的总量控制目标和对策, 部分地区可以适当保持总量不变或给予总量增量, 同时保证污染源治理能力和达标排放。

2) 二类区域(北京、天津、上海、山西、云南、贵州、重庆、宁夏和甘肃)的总量减排与水质改善关系较强, 近几年总量减排量相对较小, 水环境质量在部分年份变差, 部分年份有所改善。该地区总量减排的水环境质量改善效益相对其他地区较高。该地区总量控制压力低于水环境质量改善的压力, 在保证现有总量控制力度的基础上, 需从影响水环境质量的多方面采取综合型措施来提高水环境质量。针对北京、天津和上海等水资源量少、水环境质量较差的地区, 需增加生态水量以提高水环境容量, 强化产业结构转型, 减少重污染排放。针对

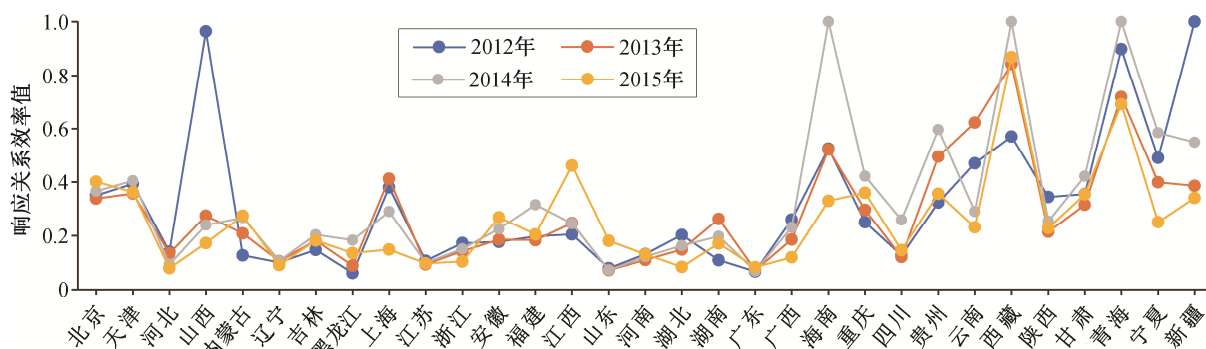


图5 31个省级行政区2012—2015年总量减排与质量改善响应关系变化情况

Fig. 5 Change of response relationship between total pollution emission reduction and water quality improvement in 31 provinces from 2012 to 2015

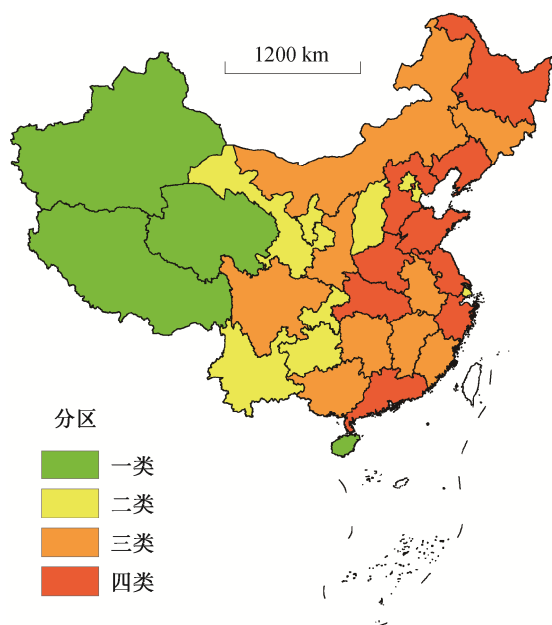


图6 全国总量减排与质量改善关系分区

Fig. 6 Partition map of the relationship between total pollution emission reduction and water quality improvement in China

云南、贵州、重庆、宁夏和甘肃等治污水平和监管水平低的地区,需加强治污能力建设和强化污染源监管。

3) 三类区域(四川、陕西、内蒙古、吉林、安徽、江西、湖南、福建和广西)的总量减排与质量改善关系中等。近几年该区域总量减排在全国处于中等水平,水环境质量改善幅度大,总量减排的水环境质量改善效益一般。该区域需进一步加大总量控制力度,提高区域总量控制目标,通过提高区域环境管理水平、保障区域生态流量来增强区域水环境容量,促进水质改善效益提高。

4) 四类区域(江苏、浙江、山东、河南、河北、广东、湖北、辽宁和黑龙江)的总量减排与质量改善关系弱。近几年该区域的大部分地区经济总量较大,水资源量较丰富,污染物排放总量和总量减排量在全国均处于前列,水环境质量总体上有一定程度的改善,但与其他区域相比,总量减排的水环境质量改善效益最低。该区域总量控制压力大,需进一步加大总量削减力度,提高区域总量控制目标,促进水环境质量改善。

### 3 结论

本研究通过构建全国污染物排放总量与水环境质量响应关系模型,分析全国31个省(直辖市、自治区)近几年总量减排与质量改善的关系。从空间上看,总量与质量关系表现出明显的地区差异性,关系的强弱排序为西部地区>中部地区>华北地区>沿海地区>东北地区,说明与东北地区相比,中西部地区总量减排对水环境质量的改善作用更大,也间接地说明在西部地区进行总量控制,单位负荷量的减少能带来更大程度的水环境质量改善。从时间上看,总量减排对水环境质量改善起促进作用,随着时间的推移,大部分地区的总量与质量关系在增强(河北、山西、上海、湖北、广西和云南等部分地区除外)。

通过聚类分析,将全国31个地区总量与质量耦合关系按强弱分成4种模式。不同模式下污染物排放总量与水环境质量关系差异大,特征明显。在水环境质量改善工作中,应分别采取差异化的污染物总量控制对策与污染防治要求。

本文结果可为以环境质量为核心的总量控制及差异化的总量控制目标制定提供一定的科学支撑,



但由于数据和资料的可获得性等因素影响, 只在全国层面对省级尺度进行分析, 部分地区的结论可能与实际情况有所偏差。未来可以从省级层面按地市级尺度来开展更详细的深入研究, 进一步验证本文结论以及方法的科学性和适用性。

### 参考文献

- [1] 新华网. 从“总量”到“质量”, 改善环境不止一词之变[EB/OL]. (2016-02-22) [2020-03-23]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2016-02/22/c\\_128737617.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2016-02/22/c_128737617.htm)
- [2] 吴舜泽, 王倩, 叶帆. 从节能和减排指标的关系看污染减排问题. 环境保护, 2007(6): 26-29
- [3] 王金南, 田仁生, 吴舜泽, 等. “十二五”时期污染物排放总量控制路线图分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 70-74
- [4] 王东, 秦昌波, 马乐宽, 等. 新时期国家水质量管理体系重构研究. 环境保护, 2017, 45(8): 49-56
- [5] 林宏, 高军, 李建熹. 城市污水排放与浑河(沈阳段)水质相关性分析. 环境科学与管理, 2006, 31(9): 168-170
- [6] 张浩. “十一五”期间常州市水环境质量变化关联分析. 四川环境, 2012, 31(1): 70-75
- [7] 彭跃. COD减排现状与水环境改善的响应关系研究. 现代农业科技, 2014(5): 241-242
- [8] 李名升, 张建辉, 罗海江, 等. “十一五”期间中国化学需氧量减排与水环境质量变化关联分析. 生态环境学报, 2011, 20(3): 463-467
- [9] 李名升, 孙媛, 陈远航, 等. 污染排放与环境质量关系模型构建与应用. 环境科学, 2014, 35(3): 1198-1204
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境统计年报(2011—2015年) [EB/OL]. (2017-02-23) [2020-01-18]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/>
- [11] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444
- [12] 孙露, 耿涌, 刘祚希, 等. 基于能值和数据包络分析的城市复合生态系统生态效率评估. 生态学杂志, 2014, 33(2): 462-468
- [13] 谢曼曼, 李秀霞. 基于数据包络分析法的吉林省土地利用生态效率时空演化规律研究. 水土保持通报, 2015, 35(3): 225-230
- [14] 苏晓红, 王世威, 罗晨阳. 河南省常规能源投入产出效率的数据包络分析. 资源与产业, 2014, 12(4): 95-99
- [15] 周群英, 陈光玖. 节能减排环境效率的统计测度. 统计与决策, 2016(16): 78-81