

基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟

薛文博^{1,2}, 付飞¹, 王金南^{1*}, 贺克斌³, 雷宇¹, 杨金田¹, 王书肖³, 韩宝平² (1.环境保护部环境规划院, 国家环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012; 2.中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008; 3.清华大学环境学院, 国家环境保护大气复合污染源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于第3代空气质量模型 WRF-CAMx 和全国大气污染物排放清单, 开发了以环境质量为约束的大气环境容量迭代算法, 并以我国 333 个地级城市 PM_{2.5} 年均浓度达到环境空气质量标准(GB3095-2012)为目标, 模拟计算了全国 31 个省市区 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 及 NH₃ 的最大允许排放量。分析结果表明, 以城市 PM_{2.5} 年均浓度达标为约束, 全国 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 的环境容量分别为 1363.26×10⁴t, 1258.48×10⁴t, 619.04×10⁴t, 627.71×10⁴t。2010 年全国实际 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 排放量分别超过环境容量的 66%、81%、96%、52%。空气污染较严重的河南、河北、天津、安徽、山东及北京 6 省市 4 项污染物排放量均超过环境容量 1 倍以上, 环境容量严重超载区域与 PM_{2.5} 高污染地区具有显著的空间一致性。

关键词: CAMx; PM_{2.5}; 空气质量达标; 环境容量

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)10-2490-07

Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities. XUE Wen-bo^{1,2}, FU Fei¹, WANG Jin-nan^{1*}, HE Ke-bin³, LEI Yu¹, YANG Jin-tian¹, WANG Shu-xiao³, HANG Bao-ping² (1.State Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy For Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2.School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3.State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2014,34(10): 2490~2496

Abstract: An iterative algorithm was developed to assess the atmospheric environmental capacity governed by air quality targets, based on the third generation air quality model WRF-CAMx and national emission inventory of major air pollutants. The atmospheric environmental capacity of SO₂, NO_x, primary PM_{2.5} and NH₃ emissions by provinces were calculated with the constrain of annual average ambient PM_{2.5} concentration standard (GB3095-2012). The results indicated that the national carrying capacity of SO₂, NO_x, primary PM_{2.5} and NH₃ emissions was 1363.26×10⁴t, 1258.48×10⁴t, 619.04×10⁴t, and 627.71×10⁴t. The actual emissions of SO₂, NO_x, primary PM_{2.5} and NH₃ in year 2010 were 66%, 81%, 96%, and 52% higher than the carrying capacity. The emissions of these four types of air pollutants came from provinces that were severely polluted, such as Henan, Hebei, Tianjin, Anhui, Shandong, and Beijing, were exceeded 100% over its carrying capacity.

Key words: CAMx; PM_{2.5}; ambient air quality compliance; environmental capacity

大气环境容量是指一个区域在某种环境目标(如空气质量达标或酸沉降临界负荷)约束下的大气污染物最大允许排放量。大气环境容量在我国一直被作为支撑国家大气污染物总量控制和空气质量管理的依据。围绕不同环境目标下的大气环境容量,我国学者已开展了许多研究工作。任阵海等^[1]模拟了全国城市 SO₂ 年均浓度达标下的 SO₂ 最大允许排放量约为 1200 万 t;基

于郝吉明课题组^[2-4]酸沉降临界负荷研究成果,柴发合等^[5]计算了硫沉降临界负荷约束下的全国 SO₂ 环境容量约为 1700 万 t。在区域和城市层面也有诸多大气环境容量的研究案例,如李云生

收稿日期: 2014-08-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209001);国家自然科学基金(713401154)

* 责任作者, 研究员, wangjin@caep.org.cn

等^[6]核算了 113 个环保重点城市 SO₂ 年均浓度达标下的 SO₂ 最大允许排放量;王金南等^[7]根据主体功能区划类型核算了 SO₂ 年均浓度达标下的 SO₂ 最大允许排放量;李莉等^[8]通过 CAMQ 空气质量模型计算了河北省滦县 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 在不同达标率下的大气环境容量,并分析了环境容量的季节性变化特征.这些研究主要以 SO₂、NO₂、PM₁₀ 环境浓度达标或不超酸沉降临界负荷为约束条件,采用的方法主要包括 A-P 值法、线性优化法及模型模拟法等线性分析方法^[9-14].

由于我国 2012 年对《环境空气质量标准》^[15] 进行修订,PM_{2.5} 成为影响我国城市空气质量达标的首要污染物,环境空气中的 PM_{2.5} 标准限值相比 SO₂、NO₂、PM₁₀ 成为更严格的约束,因此从我国空气质量管理的需要出发,亟需以 PM_{2.5} 达标为约束核算大气环境容量,为大气污染物减排提供科学依据.而由于 PM_{2.5} 是由污染源排放的 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、NH₃、VOC_s 等多种污染物经化学转化形成,并可随大气的流动进行长距离传输.薛文博等^[16]的研究表明我国 31 个省、市、自治区 PM_{2.5} 年均浓度受外来源贡献最高可达 70% 以上,且 PM_{2.5} 中各化学组份的跨区域输送特征存在显著差异,因此传统的基于线性分析的环境容量核算方法不适用于计算以 PM_{2.5} 达标为目标的多污染物环境容量.本研究在第 3 代空气质量模型 WRF-CAMx 基础上建立了环境容量迭代计算方法,开发了以 PM_{2.5} 达标为约束的多污染物环境容量计算系统,以我国 333 个地级城市 PM_{2.5} 年均浓度达标为约束目标,计算了全国 31 个省市区 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 及 NH₃ 的最大允许排放量,并分析了全国、重点区域及各省市 2010 年大气环境容量超载率,定量描述了我国 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 及 NH₃ 环境容量及超载率的空间分布特征.

1 方法与数据

为计算 PM_{2.5} 年均浓度约束下的环境容量,本研究针对 PM_{2.5} 中关键组分(硫酸盐、硝酸盐、一次 PM_{2.5} 和铵盐)分别进行分析.在 WRF-CAMx 模型的基础上,设计了迭代算法,分别对

PM_{2.5} 中关键组分进行迭代计算.

1.1 算法设计

本研究以全国地级城市 PM_{2.5} 年均浓度达标为目标,采用数值模型迭代法计算全国各省市大气环境容量,技术路线如图 1 所示,迭代循环过程如下:

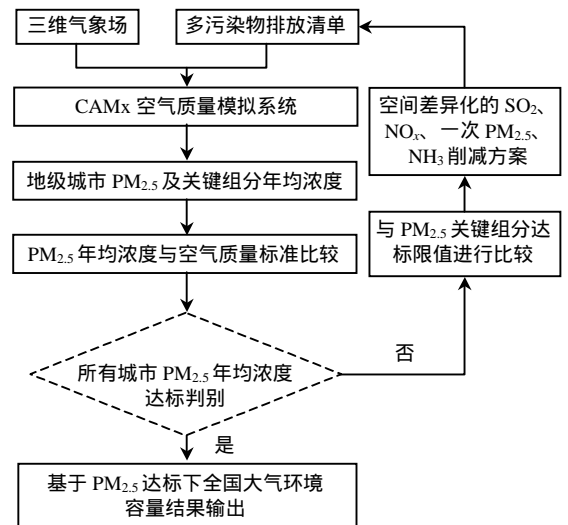


图 1 环境容量模拟技术路线

Fig.1 Technology roadmap of environmental capacity modeling

(1) 基准情景 PM_{2.5} 年均浓度模拟.基于 CAMx 模型搭建适用于全国尺度的空气质量模拟系统,模拟 2010 年全国 PM_{2.5} 及关键组分年均浓度.

(2) PM_{2.5} 及关键组分达标限值设定.依据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)^[15] 规定的 PM_{2.5} 年均二级标准及 2010 年 333 个城市硫酸盐、硝酸盐、一次 PM_{2.5}、铵盐占 PM_{2.5} 平均比例,设置 PM_{2.5}、硫酸盐、硝酸盐、一次 PM_{2.5}、铵盐年均达标限值分别为 35、5.34、5.34、20.76、3.56μg/m³.

(3) PM_{2.5} 年均浓度达标判别.对于 2010 年基准情景 PM_{2.5} 年均浓度已达标城市,基于空气质量反退化原则,其环境容量即现状排放量;对于 2010 年基准情景未达标城市制定削减方案,迭代计算,直至 PM_{2.5} 年均浓度介于 32~35μg/m³ 之间.

(4) 削减方案制定. SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈非线性关系. 对于未达标城市, 基于曲线是由一系列直线段构成的原理, 假定污染物在一定减排范围内, 其排放量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈线性关系, 根据硫酸盐、硝酸盐、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及铵盐年均浓度与达标限值之间的比值, 分别制定 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 的减排方案;

(5) 排放清单生成. 基于空间差异化的 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 削减方案, 迭代创建新的多污染物排放清单;

(6) 数值模型迭代. 利用新生成的多污染物排放清单, 模拟新的削减方案下全国 $\text{PM}_{2.5}$ 及关键组分年均浓度, 然后重复(3)(4)(5)过程, 直至所有城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达标, 得到 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 环境容量.

1.2 模型设置

本研究大气环境容量迭代计算方法建立在 WRF-CAMx 模型的基础上, WRF、CAMx 模型设置如下:

(1) 模拟时段: 模拟时段为 2010 年 1、4、7、10 四个月份, 模拟时间间隔为 1h.

(2) 模拟区域: CAMx 模拟区域采用 Lambert 投影坐标系, 中心经度为 103°E , 中心纬度为 37°N , 两条平行标准纬度为 25°N 和 40°N . 水平模拟范围为 X 方向 ($-2682\sim 2682\text{km}$)、Y 方向 ($-2142\sim 2142\text{km}$), 网格间距 36km, 共将模拟区域划分为 150×120 个网格, 研究区域包括中国全部陆域范围. 模拟区域垂直方向共设置 9 个气压层, 层间距自下而上逐渐增大.

(3) 气象模拟: CAMx 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供^[17], WRF 模型与 CAMx 模型采用相同的空间投影坐标系, 但模拟范围大于 CAMx 模拟范围, 其水平模拟范围为 X 方向 ($-3582\text{km}\sim 3582\text{km}$)、Y 方向 ($-2502\text{km}\sim 2502\text{km}$), 网格间距 36km, 共将研究区域划分为 200×140 个网格. 垂直方向共设置 28 个气压层, 层间距自下而上逐渐增大. WRF 模型的初始输入数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 6h 一次、 1° 分辨率的 FNL 全球分析资料^[18]. WRF 模型模拟结果通过 WRFCAMx 程序转换为

CAMx 模型输入格式.

(4) 模型参数: WRF 模型、CAMx 模型参数设置及模型模拟结果的可靠性验证见前期研究成果^[16,19-20].

(5) 排放清单: CAMx 模型所需排放清单的化学物种主要包括 SO_2 、 NO_x 、颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组份)、 NH_3 和 VOC_s (含多种化学组份) 等多种污染物. SO_2 、 NO_x 数据来源于 2010 年全国污染源普查数据^[21-22], 人为源颗粒物(含 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、OC 等)、 NH_3 、 VOC_s (含主要组份) 等排放数据采用 2010 年清华大学 MEIC 排放清单^[23], 生物源 VOC_s 排放数据源于全球排放清单 GEIA^[24], 具体处理过程见前期研究成果^[16,19-20].

2 结果与讨论

2.1 全国环境容量

模拟结果表明, 全国所有地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达标下 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 环境容量分别为 $1363.26\times 10^4\text{t}$ 、 $1258.48\times 10^4\text{t}$ 、 $619.04\times 10^4\text{t}$ 和 $627.71\times 10^4\text{t}$. 以 2010 年为例, SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 排放量超载率分别为 66%、81%、96%、52%, 超载率计算方法见公式 1.

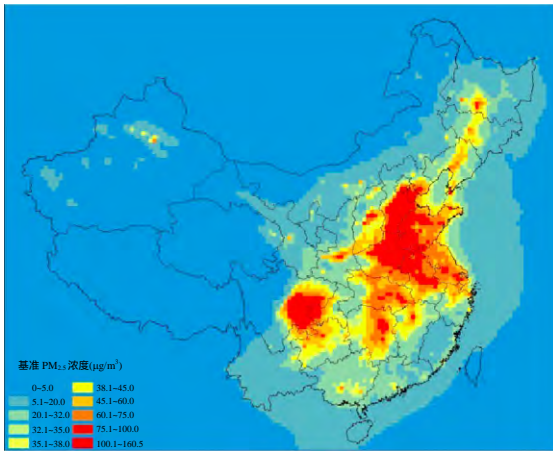
$$\eta = (E/Q - 1) \times 100 \quad (1)$$

式中: η 为环境容量超载率, %; E 为某年各种大气污染物实际排放量, $\times 10^4\text{t}$; Q 为各种大气污染物环境容量, $\times 10^4\text{t}$.

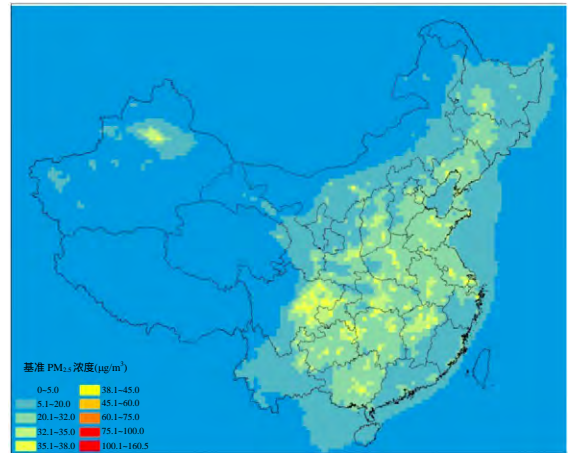
以 2010 年大气污染物排放量为基础, 使用 WRF-CAMx 模型对全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度进行了模拟, 结果表明 333 个地级城市中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度超标率约为 70%. 333 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈双峰分布特征, 其中超标城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度集中在 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 达标城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度集中在 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近. 以临界于环境容量的排放量为基准, 使用 WRF-CAMx 模型对全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度进行模拟表明, 全国 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 排放量达到环境容量时, 依然有部分网格 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度超过 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高达到 $38\mu\text{g}/\text{m}^3$, 但各地级城市所处网格 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均小于 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$. 相比 2010 年情景, 333 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈单峰分布特征, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度集中

在 32μg/m³ 附近,其中中东部大部分区域 PM_{2.5} 年均浓度介于 20~35μg/m³ 之间,PM_{2.5} 浓度空间分

布的差异性显著降低.PM_{2.5} 年均浓度空间分布特征及地级城市分布频率见图 2、图 3 所示.



(a) 2010 年情景



(b) 环境容量情景

图 2 全国 PM_{2.5} 年均浓度分布

Fig.2 Distribution of annual average PM_{2.5} concentration

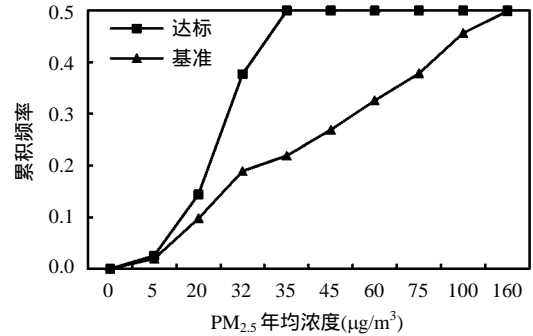
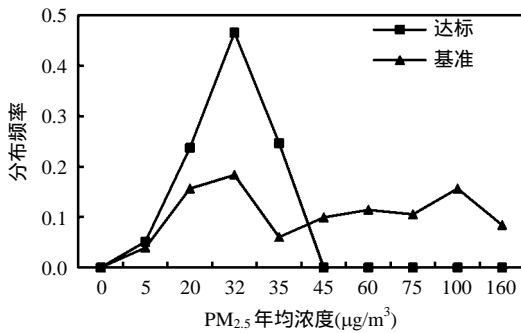


图 3 333 个地级城市 PM_{2.5} 年均浓度分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of annual average PM_{2.5} concentration of 333 cities

2.2 各省环境容量

大气环境容量主要取决于环境对污染物的自净能力与自净空间.模拟结果表明各省市间 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 及 NH₃ 环境容量存在较大差异,其中 SO₂ 环境容量较大的省份有内蒙古、山西、辽宁、山东,其环境容量均超过 70×10⁴t,西藏、海南、北京及天津市 SO₂ 环境容量较小,均低于 10×10⁴t;NO_x 环境容量大于 60×10⁴t 的省份依次为内蒙古、广东、山西及江苏省,西藏、北京、海南、青海 NO_x 环境容量均小于 10×10⁴t;一次 PM_{2.5} 环境容量高值区主要集中在内蒙古、

广西及广东等省市,低值区主要包括西藏、北京、海南及天津等省市;NH₃ 环境容量高值省市依次为云南、内蒙古、四川等,而北京、天津、上海等省市 NH₃ 环境容量相对较小.全国各省市大气环境容量见表 1.

按照各省市 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 及 NH₃ 超载率大小将超载程度分为五个等级,分类结果见表 2 所示.重点区域中,京津冀地区为严重超载区域,北京、天津、河北 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 超载率均大于 150%,NH₃ 超载率均大于 100%;长江三角洲地区为一般超载区域,上海、江苏、浙

江 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 超载率均介于 50% 到 150% 之间, NH_3 超载率介于 50% 到 100% 之间; 珠江三角洲地区为轻度超载区, 广东省 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 超载率均小于 50%; 31 个省市中, 空气污染较严重的河南、河北、天津、安徽、山东及北京 6 省市 4 项污染物排放量均超过环境容量 1 倍以上, 空气污染较轻的省市环境容量超载率明显偏小, 其中海南和西藏所辖地市空气质量达标, SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NH_3 均未超载. 上述结果表明, 不同省份、不同污染物环境容量超载程度均存在显著差异, 因此, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 达标为目标控制多种大气污染物排放, 需要进一步强调不同区域减排目标的差异化管理, 确保污染减排与环境质量紧密挂钩. 各省市环境容量超载程度分级见表 2, 超载率空间分布见图 4.

2.3 不确定性分析

由于多种污染物的化学反应和长距离物理输送, 污染物排放量和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度间存在很强的非线性关系. 因此, 气象条件、排放清单、 $\text{PM}_{2.5}$ 组分平衡的假设等因素均会对模拟结果造成影响. 本次研究的不确定性主要来源于 3 个方面:

(1) 气象条件. 本研究在 2010 年的气象场基础上进行 WRF-CAMx 模型迭代计算, 结果仅能代表 2010 年气象条件下全国及各省的大气环境容量; 在极端气象条件下(如 2013 年), 大气容量可能大幅降低. 因此, 在进一步研究中, 有必要对典型和极端气象条件进行筛选, 并在此基础上研究大气环境容量. 此外, 在计算过程中选取了 2010 年 1 月、4 月、7 月、10 月 4 个月份, 分别代表一年四季进行模拟, 并通过 4 个月的模拟结果取平均值, 得到全年平均浓度. 虽然对 4 个月份的模拟结果进行平均是空气质量模拟研究中常见的方法, 但是 1 月、4 月、7 月和 10 月并非在全国所有地区都能代表四季, 这种平均的方法可能对部分省市的大气环境容量计算结果造成一定的影响.

(2) VOCs 排放及其影响的大气化学反应. VOCs 在大气中经光化学反应可转化为二次有机气溶胶(SOA), 但现有的第 3 代空气质量模型对于 SOA 生成及转化过程的模拟表现均不如

无机气溶胶, 表现在模型模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SOA 的质量浓度低于实验观测结果. 由于模型模拟中, SOA 的质量浓度对 VOCs 的排放不够敏感, 本研究未把 VOCs 纳入迭代计算中, 仅考虑了 $\text{PM}_{2.5}$ 达标对 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 排放量的约束, 未考虑对 VOCs 排放量的约束. 除此之外, VOCs 排放对大气氧化性会造成影响, 从而影响 SO_2 、 NO_x 等气体向无机气溶胶的转换速率, 由于模型的因素, 这个影响在本研究中也未考虑. 这些都在客观上将导致 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 环境容量被高估.

表 1 4 种污染物大气环境容量($\times 10^4 \text{t}$)

Table 1 Atmospheric environmental capacity of 4 pollutants ($\times 10^4 \text{t}$)

省份	SO_2	NO_x	一次 $\text{PM}_{2.5}$	NH_3
北京	4.11	6.79	2.79	1.35
天津	8.68	10.70	3.57	1.57
河北	48.58	51.19	23.19	19.55
山西	85.37	66.08	34.78	10.90
内蒙古	130.96	118.77	42.67	39.52
辽宁	72.81	59.05	29.12	20.48
吉林	32.53	42.98	21.81	17.72
黑龙江	39.19	55.01	24.34	24.08
上海	14.40	22.78	5.40	1.70
江苏	52.38	63.37	24.57	28.40
浙江	39.74	45.36	14.15	11.59
安徽	20.78	30.71	16.80	17.52
福建	39.05	43.71	18.73	18.91
江西	41.86	39.00	16.10	16.48
山东	70.92	57.17	33.85	27.61
河南	47.39	44.27	21.92	35.32
湖北	31.37	24.21	21.67	29.09
湖南	34.09	25.59	18.03	29.07
广东	68.95	105.72	37.21	35.16
广西	50.50	38.40	41.15	32.16
海南	3.11	8.03	3.18	6.84
重庆	35.07	20.78	14.32	15.55
四川	37.90	23.88	27.72	39.09
贵州	63.81	23.20	19.04	16.92
云南	65.47	46.52	31.76	47.26
西藏	0.42	3.83	0.57	9.59
陕西	60.43	47.06	21.50	19.15
甘肃	52.06	35.24	18.51	17.64
青海	14.37	9.89	5.98	6.85
宁夏	34.61	35.85	6.85	5.91
新疆	62.33	53.33	17.75	24.73
合计	1363.26	1258.48	619.04	627.71

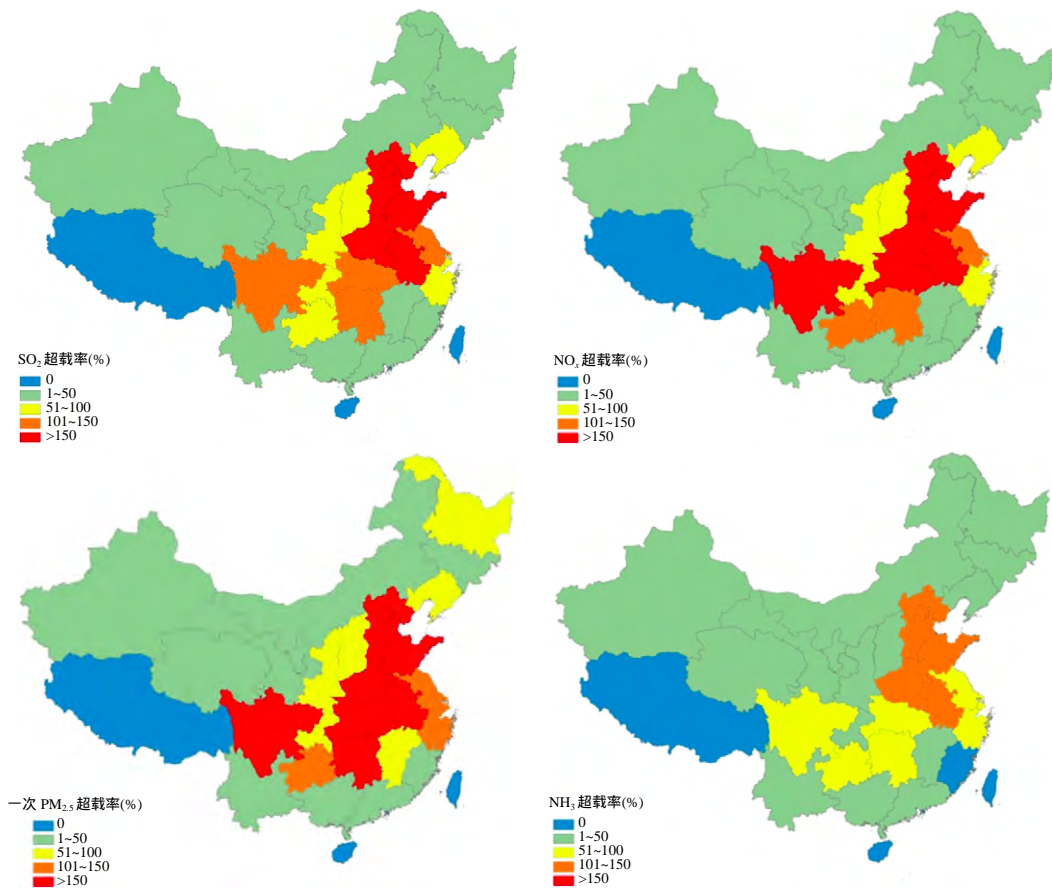


图 4 2010 年排放量超载率空间分布

Table 4 Spatial distribution of overload rate of 2010 emission

(3) PM_{2.5} 中化学组份的平衡.2013 年我国仅有 74 个城市开展 PM_{2.5} 监测,且 74 个城市中大多数城市未进行 PM_{2.5} 化学组分观测,无法准确掌握全国 PM_{2.5} 的化学组分构成,因此在本研究中,难以根据各城市 PM_{2.5} 中组分的差异,设置 PM_{2.5} 达标时其硫酸盐、硝酸盐、一次 PM_{2.5} 及铵盐等关键组分的浓度阈值,而是根据我国已有少量观测结果,结合 PM_{2.5} 达标要求,人为设置了硫酸盐、硝酸盐、一次 PM_{2.5} 及铵盐的浓度约束条件.这对部分省市的环境容量计算结果可能造成影响,但是对全国的 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 环境容量计算结果影响相对较小.

3 结论

3.1 全国所有地级城市 PM_{2.5} 年均浓度达标下

SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 的环境容量分别为 1363.26×10⁴t、1258.48×10⁴t、619.04×10⁴t 和 627.71×10⁴t,2010 年我国 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 排放量分别超过环境容量 66%、81%、96%、52%.

3.2 重点区域环境容量超载率由大到小依次为京津冀、长江三角洲、珠江三角洲,各省市市中河南、河北、天津、安徽、山东及北京 6 省市 4 项污染物排放量均超过环境容量 1 倍以上.

3.3 全国 31 个省市区 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 NH₃ 排放量如全部控制在环境容量以内,依然有部分网格 PM_{2.5} 年均浓度超过 35μg/m³,最高达到 38μg/m³,但所有地级城市所在网格 PM_{2.5} 年均浓度均小于 35μg/m³.

参考文献:

- [1] 任阵海,俞学曾,杨新兴,等.我国大气污染物总量控制方法研究 [C]//第八届全国大气环境学术会议,昆明,2000,10.
- [2] 段雷,郝吉明,谢绍东,等.用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷 [J]. 环境科学,2002,23(2):7-12.
- [3] 叶雪梅,郝吉明,段雷,等.应用动态模型确定酸沉降临界负荷的探讨 [J]. 环境科学,2002,23(4):18-23.
- [4] 段雷,郝吉明,周中平,等.确定不同保证率下的中国酸沉降临界负荷 [J]. 环境科学,2002,23(5):25-28.
- [5] 柴发合,段宁,孙绳武,等.区域大气污染物总量控制技术与示范研究 [R]. 2006.
- [6] 李云生,冯银厂,谷清,等.城市区域大气环境容量总量控制技术指南 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [7] 王金南,蒋洪强.主体功能区环境容量约束类指标内涵及地区分解方案研究 [R]. 2013.
- [8] 李莉,程水源,陈东升,等.基于 CMAQ 的大气环境容量计算方法及控制策略 [J]. 环境科学与技术,2010,8:162-166.
- [9] 薛文博,王金南,杨金田,等.淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 [J]. 环境科学,2013,34(4):1264-1269.
- [10] 王金南,潘向忠.线性规划方法在环境容量资源分配中的应用 [J]. 环境科学,2005,26(6):195-198.
- [11] 徐鹤,丁洁,冯晓飞.基于 ADMS-Urban 的城市区域大气环境容量测算与规划 [J]. 南开大学学报(自然科学版),2010,43(4):67-72.
- [12] 肖杨,毛显强,马根慧,等.基于 ADMS 和线性规划的区域大气环境容量测算 [J]. 环境科学研究,2008,21(3):13-16.
- [13] 范绍佳,黄志兴,刘嘉玲.大气污染物排放总量控制 A-P 值法及其应用 [J]. 中国环境科学,1994,14(6):407-410.
- [14] 王勤耕,吴跃明,李宗恺.一种改进的 P 值控制法 [J]. 环境科学,1997,17(3):278-283.
- [15] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [16] 薛文博,付飞,王金南,等.中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究 [J]. 中国环境科学,2014,34(6):1361-1368.
- [17] National Center for Atmospheric Research. WRF USERS PAGE [EB/OL]. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.
- [18] National Center for Atmospheric Research. CISL Research Data Archive [EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- [19] Xue W B, Wang J N, Niu H, et al. Assessment of air quality improvement effect under the national total emission control program during the twelfth national five-year plan in China [J]. Atmospheric Environment, 2013,68:74-81.
- [20] 薛文博,王金南,杨金田,等.电力行业多污染物协同控制的环境效益模拟 [J]. 环境科学研究,2012,25(11):1304-1310.
- [21] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会.污染源普查技术报告 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [22] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会.污染源普查数据集 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [23] Multi-resolution emission inventory for China. [Z/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.
- [24] Emissions of Atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data (ECCAD). Emissions of atmospheric compounds and compilation of ancillary data [EB/OL]. URL: <http://www.geiacenter.org>, 2009.

作者简介:薛文博(1981-),男,陕西宝鸡人,副研究员,博士研究生,研究方向为空气质量模型、排放清单、环境卫星遥感及大气污染控制对策等.发表论文 30 余篇.

《中国环境科学》获评“百种中国杰出学术期刊”

《中国环境科学》2012 年被中国科学技术信息研究所评为“2011 年度百种中国杰出学术期刊”。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定的,包含总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标.

《中国环境科学》编辑部