

陈辉, 全利红, 徐大海. 2014. 几种先进大气环境影响评价的技术方法概述. 气象, 40(8): 1000-1005.

几种先进大气环境影响评价的技术方法概述^{* 1}

陈 辉 全利红 徐大海

中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 近年来, 我国大气污染问题凸显, 大气环境越来越受到重视, 对大气环境影响评价的要求也越来越高, 因而, 引入一些新的方法能更全面和细致地评价大气环境影响。本文基于法规模式体系, 介绍在实际环评工作中用到的四种方法, 包括足迹 (footprint) 函数法、四维通量法、源解析法和动画演示法, 对其原理和适用范围进行了描述。这些方法以大气导则推荐的模式系统为基础, 从不同视角深入地描述大气污染物的运动和分布特征, 在大气环评工作中可根据实际问题的需要选择合适的方法进行大气环境影响的分析与评估研究。

关键词: 大气环评, 技术方法, 大气污染

中图分类号: P404, X16

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 08. 010

Introduction to Advanced Technique of Atmospheric Environment Assessment

CHEN Hui QUAN Lihong XU Dahai

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: In recent years, air pollution in China has become a serious problem, so atmospheric environment is attached more and more attention to and atmospheric environment impact assessment is requested to be in good quality. Therefore, it is significant to introduce new, more comprehensive, finer technique into atmospheric environment impact assessment according to recent scientific progresses in sciences. We introduce a few methods including footprint function method, 4-dimensional flux method, source apportionment method and animation demo that have been used in our work in this paper according to the guideline on environment impact assessment technique, and describe the theory and application. With the models recommended in the guideline of atmospheric environment impact assessment, these methods can be used to study deeply the movement and distribution of the air pollutants from different aspects. We can choose reasonable methods to carry out the study and evaluation on atmospheric environment considering the real problem during atmospheric environment impact assessment.

Key words: atmospheric environment assessment, technique, air pollution

引 言

我国大气污染的区域性特征日趋明显, 一些地区酸雨、灰霾和光化学烟雾等大气污染问题频繁发生(胡亚旦等, 2009; 魏文秀, 2010; 伍红雨等, 2011;

齐冰等, 2012; 过宇飞等, 2013), 严重威胁人民群众身体健康; 而城市间大气污染又相互影响, 仅从行政区划的角度考虑单个城市大气污染防治措施已难以解决大气污染问题。另一方面, 北京奥运会空气质量保障工作的成功实践, 以及美国、欧洲和日本空气质量改善历程的经验表明, 实施区域联防联控战略

* 国家自然科学基金项目(2010CB955802)资助

2014年1月14日收稿; 2014年3月14日收修定稿

第一作者: 陈辉, 主要从事大气环境影响评价. Email: chenhui@cams.cma.gov.cn

是防治大气污染的根本途径。因此,无论是在研究大气污染状况还是防治战略上都要求在大气环评工作中能反映污染物的区域影响特征。

然而,到目前为止,在大气环境影响评价方面,通常只关注近地面污染物特征。在建设项目的环评报告中,也只考虑污染源对少数敏感点的影响以及污染物的最大落地浓度,范围主要是在污染源附近。规划环评报告中通常只计算所关注的区域内的环境容量,在大气环境容量的计算上,各种方法得到的结果差异很大。这些环评报告没有分析污染物在空中的分布和运动规律,也很少考虑污染源对区域大气环境影响的一些具体信息,比如污染源排放的某种污染物对某一区域大气产生影响的条件、影响的时间、路径和范围等,往往不能满足实际评估和减排决策的需要。

国内外关于污染物的输送和区域间大气相互影响的研究已经很多,各种模拟和分析方法也应运而生(黄美元等,1996;Lu等,1997;王自发等,2008;Rao et al, 2011;Herwehe et al, 2011)。这些研究方法可以应用于大气环评工作中。本文以实际案例为例,针对不同的评价目的,介绍 4 种方法从不同的角度反映污染物对区域大气影响的规律。这 4 种方法分别为足迹(footprint)函数法、四维通量法、源解析法和动画演示法,均是建立在大气导则推荐的数值模式基础上的。

1 方法介绍

1.1 足迹函数(footprint)法

足迹函数方法(徐大海等,2013)主要是用来确定区域的大气承载力和大气容量。大气环境承载力是反映一定时期给定区域内大气环境容量能够支持允许排放总量的能力。如果区域内大气环境容量大于允许排放量,则该区域有承载力,否则,称该区域承载力不足。这里的大气环境容量是从质量平衡方程(排放量=平流输送量+扩散量+沉降量+化学转化量)中得到的,用来反映排放量与清除量之间的平衡关系;而允许排放量关注的是污染物浓度达标的情况,是从扩散方程得到的。

图 1 直观地体现了大气环境承载力与大气环境容量的意义。在区域 A 产生的污染物在尾流区受风、湍流等的作用向下风向输送扩散。由于污染物浓度差异,在区域 B 与区域 C 之间产生了一个次生

边界层。次生边界层内是未经 A 区域的污染物影响的大气,而在次生边界层之外的尾流区存在 A 区域排放的污染物。这些污染物在运动过程中一部分降落到地面,被植被、水体等吸收,一部分由于化学反应、降水等被转化清除。经过一定距离后,在 a 处污染物基本被清除。如果在 B 区域布设的监测点监测浓度达标,则 A 区域排放的污染物满足允许排放总量的要求;而要消纳这些污染物,则需要直到 a 处的整个区域,这整个区域具有对 A 区域排放污染物的承载力,而这些污染物的量被称为这整个区域的大气容量。如果只有 A、B 两个区域,则两个区域的大气容量不能消纳这些污染物,这两个区域对这些污染物的承载力不足。

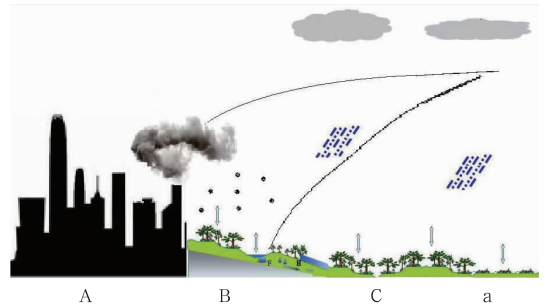


图 1 大气环境承载力示意图

Fig. 1 Sketch map of atmospheric environment carrying capacity

目前,关于大气环境承载力的计算,没有统一的方法。徐大海等(2013)借鉴生态承载力的计算方法,引入足迹函数计算大气环境承载力和大气容量。

足迹函数 F 最初是为了确定实际观测到的浓度(或通量)的来源而定义的一个将源 Q 与观测浓度(或通量) C 联系起来的传递函数: $Q = \sum_i C_i \cdot F_i^{-1}$ 。在大气扩散领域,此函数与大气边界层的特征有关。

根据生态承载力足迹函数评估方法,大气环境承载力分析中需要定义两个承载力函数。其中一个为供给承载力,反映区域可提供的承载力,另外一个为需求承载力,反映烟云消失所需要的承载力。当供给承载力比需求承载力大时,称该区域有承载力,否则,称该区域承载力不足,需要另行提供承载力。不同的是,供给承载力中 C 为区域内污染物的清除量,而需求承载力中 C 为区域允许排放总量。用于度量承载力的量为土地面积(单位: km^2)。供给承载力可以用区域面积表示,而需求承载力则需要通过足迹函数计算得出。

气块体积内的大气污染物平衡方程可以描述为:排放=平流+扩散+清除+化学转化。从平衡方程推导得出足迹函数的表达式: $F_i^{-1} = \sqrt{S}/(AC_{s,i})$, 大气容量的表达式为: $q = AC_s \sqrt{S}$ 。式中, $C_{s,i} = C_{\text{标准}} - C_{\text{本底}} - C_{\text{预留}}$, 为污染物平均浓度阈值(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); S 为区域面积(单位: km^2); A 值反映了不同区域尺度中的清除能力, $A = 0.0031536 \frac{\sqrt{\pi UH}}{2} \cdot \left[1 + \frac{2\sqrt{S}(u_d + w_r R)}{\sqrt{\pi UH}} \times 10^3 \right]$ 。

在城市尺度中 A 值函数中通风量为主要因子, A 值取决于通风量的大小。对全球尺度而言, A 值函数中降水清除为主要因子, 通风量可略去。而在区域尺度中, A 值函数中通风、干沉降和湿沉降三因子同样重要。如果考虑到大气中的化学过程对大气污染物的清除作用, A 值函数中还应加入相应的过程参数因子。实际计算中 A 值和 q 均由模式模拟得到。

已知足迹函数和允许排放量, 便可以计算得出需求承载力。通过图表比较各区域需求承载力和供给承载力(区域实际面积), 便可以得出各区域承载力的情况。对于承载力不足, 需要借助其他区域的承载力的部分, 可以与其他区域签订排污协议。

足迹函数法考虑了区域整个边界层对污染物的消纳能力, 而不只是地面浓度是否达标。与只考虑大气环境容量的情景相比, 此方法更全面地反映了评价区域的大气环境承载能力, 适用于规划和战略环评。

足迹函数方法已经用于环保部组织的 5 大区域战略环评之一“黄河上游能源化工区重点产业发展战略环评研究报告”, 分析 3 种发展情景方案中各城市和整个区域 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 的承载能力(周能福, 2013)。更多案例可参见文献(徐大海等, 2013)。

1.2 四维通量法

通量是用来描述通过某一界面的污染物的量。因此, 通量方法通常用来研究区域间污染物的输送问题, 包括大气污染物在区域之间的输送途径、输送量和输送的环境效应等。相关的研究已经很多(王威等, 2010; 杨柳林等, 2012; 安俊岭等, 2012)。但是, 在环评中很少应用。本节介绍四维通量法(杨柳林等, 2012)在环评中的应用。

四维通量法的原理是当污染物排放后, 污染物质量在整个边界层是不变的, 但是, 受地形、风场等因素的影响, 向各个方向扩散的量不同, 通过统计整个边界层各个方向的质量通量, 可以确定污染物扩

散到某一区域的概率, 从而确定污染物对此区域的影响程度。

四维通量法中“通量”定义为特定时间内, 通过特定界面输送污染物的量, 其计算公式为:

$$M = C \cdot W_s \cdot S \cdot T \quad (1)$$

式中, M 为输送通量(单位: μg), C 为污染物浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), W_s 为垂直于特定界面的风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), S 为特定界面的面积(单位: m^2), T 为时间(单位: s)。

在本案例中, 模拟区域的地形比较复杂(图 2), 导致近地面风场变化比较大, 盛行风向在 NE-E 与 SW-W 之间转换, 出现明显的对倒风。而从多年统计结果来看, 关心区域(图 2 中梯形区域)在项目位置的下风向。为弄清项目排放的污染物对关心区域的影响, 用四维通量法进行了模拟分析。

首先用 MM5 和法规模式 CALMET 以及项目区周围气象站观测资料计算 2012 年的气象场。然后, 设置模拟区域和网格, 如图 2 所示。以排污项目区为中心自地面至边界层顶部(1400 m)设置一封闭区域, 模拟计算污染物从排放区通过封闭区域各个截面上的通量。通量计算截面上离散点共布置 1662 个点。图中封闭区域蓝色和绿色点为通量计算垂直截面上离散点位置, 其中绿色点为关心区域(西南方的梯形区域)东北边界处通量计算截面上离散点位置, 封闭区域中间较稀疏的蓝色点为边界层顶部平行于地面的通量计算截面上离散点位置。利用 CALPUFF 模拟计算各网格点的污染物浓度。根据式(1)计算通过绿色区域的污染物通量值。

表 1 列出了 1、4、7 和 10 月模拟区域和关心区域的 SO_2 月通量。从表 1 可以看出, 不同月影响关心区域的 SO_2 通量差异较大。这与当地各月风向分布差异有关。但从全年来看, 关心区域的 SO_2 通量只占总通量的很少部分, 即项目排放的 SO_2 能够影响到关心区域整个大气边界层的量非常有限。

图 3 给出了以排放区为中心, 16 个方位的通量玫瑰图。从图中可见, 各月最大通量出现在 WSW 方位或 ENE 方位, 其他方位的通量比较小。关心区域在 SSW-SW 方位。1 月这两个方位的通量比较大, 关心区域的通量也比较大(表 1)。其他月这两个方位的通量都较小, 10 月时 SSW 方位出现了负通量(即在这个方位有 SO_2 输送出模拟区域), 从表 1 中也可知这几个月关心区域的通量比较小, 10 月通量为负。

从本例可以看出, 通量方法考虑了整个边界层

污染物的输送特征,能够详细地反映污染物的输送过程,明确给出污染物的输送量和输送条件,与气象

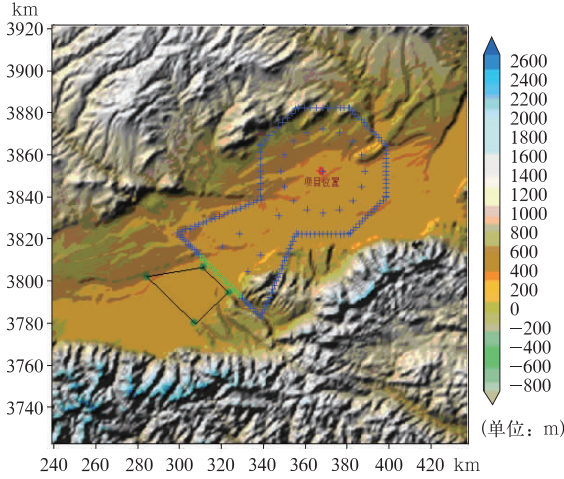


图 2 评价区域范围、地形及通量计算截面上离散点分布图
(横纵坐标为 UTM 坐标系)

Fig. 2 The domain and terrain of evaluated region and the discrete points on the cross-section of flux calculation

表 1 2012 年模拟区域和关心区域月通量

Table 1 The yearly and monthly fluxes in the simulated area in 2012

月份	模拟区域		关心区域	
	总污染物通量/t	总污染物通量/t	比例/%	
1 月	360.912	38.737	10.73	
4 月	318.938	13.622	4.27	
7 月	304.414	2.345	0.77	
10 月	362.632	-1.915	-0.53	
合计	1346.896	52.790	3.92	

条件结合分析,能够总结出污染物的输送规律。在风场和地形复杂的情况下其优势更显著。

1.3 源解析法

源解析法(Thurston et al,1985;Paatero,1997;朱坦等,1998;Chow et al, 2002;易慧等,2007;朱坦等,2010)是根据受体(某一区域大气)与源(污染源)的化学组分之间的关系来确定各源对受体的贡献的方法。在一些模拟研究中已有应用(王自发等,2008)。源解析方法很多,如化学质量平衡法(CMB)(Chow et al,2002;朱坦等,2010)、人工神

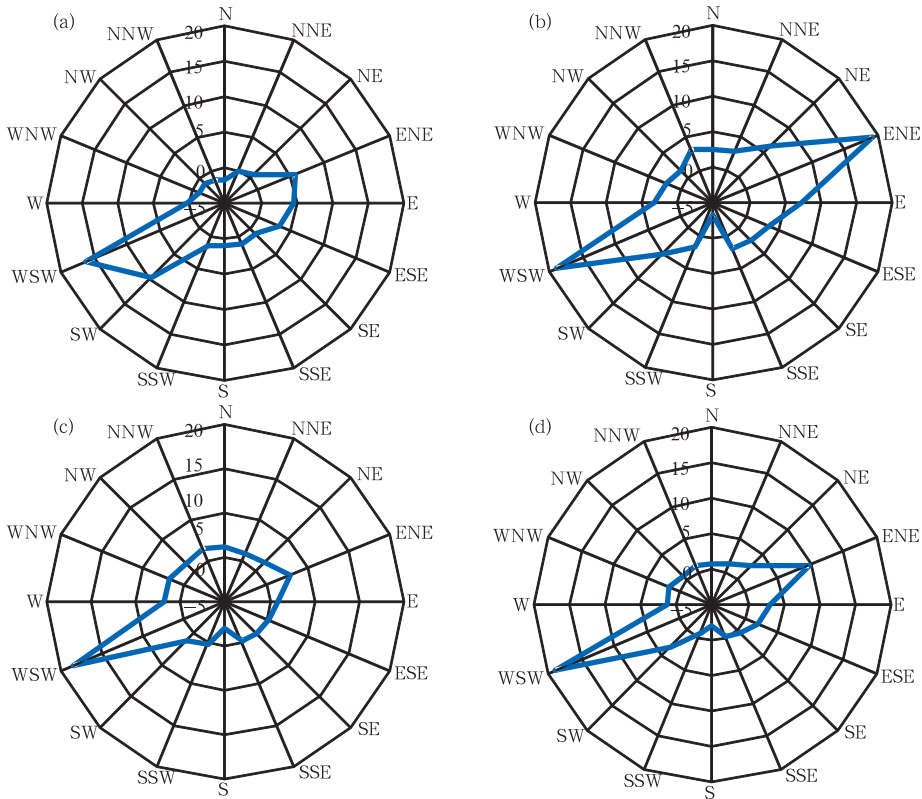


图 3 不同月 SO₂ 通量玫瑰图 (单位: %)

(a)1 月, (b)4 月, (c)7 月, (d)10 月

Fig. 3 The SO₂ flux diagram (unit: %) in different months

(a)January, (b)April, (c)July, (d)October

经网络(Hopke, 2003)、主成分分析-多元线性回归法(PCA-MLR)(Thurston et al, 1985)、正定矩阵分解法(Paatero, 1997)等。其中,化学质量平衡法解析的源类物理意义明确,在国内外应用广泛。其基本方程为:

$$C_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} \cdot S_j \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

式中, C_i (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 是受体大气中化学组分 i 的浓度值, F_{ij} (单位: %) 是第 j 类源中化学组分 i 的含量百分比, S_j (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 是第 j 类源贡献的浓度计算值, J 表示源类的数目, I 表示化学组分的数目。

源解析法从污染物入手,追踪污染物的来源,确定污染物的来源以及污染源的贡献量。因此,可以利用源解析法判断某一区域大气污染物的来源及其组成,从而为实施总量控制和排污许可等措施提供参考。

在本例中,已知 2011 和 2012 年冬季某一区域的 SO_2 浓度差异非常显著。为了解出现差异的原因,结合气象条件分析和数值模拟,对污染物来源进行了分析。其中,在数值模拟方面,利用法规模式 AERMOD 中源分组方法,将区域内的污染源各自分为一组,模拟 2011 和 2012 年冬季区域内各源排放的 SO_2 的扩散分布特征,得到了各源对 SO_2 浓度

最大值处的贡献以及贡献的最大值,如表 2 所示。从表中可以看出两年冬季各源对本区域 SO_2 的浓度贡献差异并不大。结合气象条件与监测资料分析的结果,判断污染物的来源主要是区域外的源。

1.4 动画演示法

顾名思义,动画演示方法就是通过动画的方式将模拟的逐时的污染物浓度分布情况显示出来。此方法没有复杂的模拟过程设计,也不需要模拟结果做任何数学处理,只需要将逐时的浓度分布变化结果做成动画过程。

动画演示方法可以直观地反映预测评估时段内污染物浓度分布和影响范围的变化情况,能够针对周围任何需要关注的敏感区。而且,动画的制作可以借助于专门的工具,便于实现。但是,动画演示方法要求演示的时间和空间范围具有代表性,最好具有遍历性,能够包括可能发生的各种情况,因此,动画演示方法需要大量的时间和空间。通常可以作为环评报告的补充材料,针对具体问题设计。

在大型炼油项目环评进行过程中,为了了解项目排放的污染物对处于项目所在地的下风向的城市区域的环境影响,排除城区居民的顾虑,在已有环评报告的基础上,用动画演示的方法对项目的大气污染物排放及区域大气污染物削减后的环境影响进行了进一步的说明。

表 2 各源对 SO_2 浓度最大值处的贡献和贡献最大值

Table 2 The concentrations of every source to SO_2 maximum concentration

	日均落地浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$				日均落地浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$				
	对最大值处各源贡献		各源贡献最大值		对最大值处各源贡献		各源贡献最大值		
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012	
P1	1.33	3.18	5.52	5.48	P19	0.25	0.17	2.61	3.31
P2	0.26	0.39	3.77	3.49	P20	0.55	0.52	2.18	2.17
P3	0.15	0.21	1.57	1.31	P21	0.08	0.13	0.71	0.68
P4	0.43	0.17	2.67	3.34	P22	0.62	0.65	6.02	6.8
P5	0.14	0.06	0.72	0.79	P23	0.32	0.37	2.45	3.03
P6	0.1	0.08	0.69	1.07	P24	0.33	0.44	3.16	3.48
P7	0.09	0.07	0.62	0.97	P25	0.06	0.06	0.43	0.43
P8	14.91	12.54	15.26	14.85	P26	0.48	1.23	7.07	6.19
P9	0.79	0.74	6.2	5.24	P27	0.11	0.48	1.91	1.81
P10	0.22	0.29	2.13	1.83	P28	0.07	0.46	3.27	3.72
P11	0.36	0.13	4.88	4.41	P29	0.12	0.85	6.8	6.98
P12	0.49	0.67	2.66	2.33	P30	0.47	0.62	2.03	2.13
P13	0.33	0.56	8.77	7.26	P31	0.36	0.7	1.53	1.57
P14	0.36	0.35	1.79	1.72	P32	0.15	0.1	4.6	4.35
P15	0.19	0.1	2.84	2.54	P33	0.21	0.27	1.73	1.81
P16	0.51	0.35	3.46	3.36	P34	0.26	0.27	7.85	11.19
P17	0.3	0.27	2.67	2.74	P35	0.14	0.15	1.8	1.97
P18	0.23	0.27	2.71	2.57	P36	0.05	0.05	1.51	1.58

首先,利用中尺度气象模式 MM5 模拟的 2012 年全年的气象资料和项目区 23 个气象观测站的数据,分析了 2012 年全年的流场特征,得出厂址处于城区的上风向,冬春季节流经厂址的气流可能通过此城区。然后,利用 CALPUFF 模式模拟了 1、4、7 和 10 月(分别代表冬、春、夏、秋)项目排放的 SO_2 、 NO_2 、二甲苯、非甲烷总烃和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度分布以及区域大气污染物削减后这 5 种污染物的浓度分布,并对污染物烟云逐时漂移过程制作成动画。动画演示结果表明,受地形起伏和山体阻挡的影响,项目排放的污染物扩散分布在项目所在地附近,得出对该城区影响较小的结论。

2 结 论

对区域间大气污染物输送特征的模拟研究已经有很多,但是,在大气环评中的实际应用还很有限。根据我们近几年来承担国家重大工程与规划项目的实际工作经验,本文介绍了 4 种描述大气污染物输送特征的方法。这些方法以大气环评导则推荐的模式为基础,各有侧重。

足迹函数法描述的是污染物被稀释清除需要运行的距离。利用足迹函数法计算得到的大气环境承载力从整个大气边界层考虑了区域大气对污染物的消纳能力,与大气容量方法描述的大气环境承载力相比,此方法更全面地考虑了区域的大气环境质量。

四维通量法能够回答污染物输送到某一区域的量和输送条件等。在复杂地形或复杂风场条件下,通过风场本身可能难以判断建设项目对某一区域的影响情况,而通量方法则能定量地反映在整个边界层污染物的输送情况,从而可以判断建设项目排放的污染物对某一区域的影响程度。

源解析法是从污染物入手追踪其来源的一种方法,能够描述各源对某一区域的污染物的贡献量,可以作为实施总量控制和排污许可措施的参考。

动画演示法直观地反映了污染物浓度分布的时空演变特征,能够针对任何所关注的区域。但是,由于动画演示需要大量的时间和空间,通常可以作为环评报告的补充材料。

随着对环评工作的要求越来越高,大气环评技术也应该不断发展。在将来的大气环评工作中,应该根据不同的问题选择合适的方法来深入评价。

参考文献

- 安俊岭,李健,张伟,等. 2012. 京津冀污染物跨界输送通量模拟. 环境科学学报, 32(11): 2684-2692.
- 胡亚旦,周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 35(7): 73-78.
- 黄美元,王自发,何向东,等. 1996. 我国和东亚地区硫化物跨界输送态势研究. 气候与环境研究, 1(1): 55-62.
- 过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象, 39(10): 1314-1324.
- 齐冰,刘寿光,杜荣光,等. 2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析. 气象, 38(10): 1225-1231.
- 王威,王自发,吴其重,等. 2010. 奥运会开幕前后北京 PM_{10} 输送通量变化及情景分析. 气候与环境研究, 15(5): 652-661.
- 王自发,李丽娜,吴其重,等. 2008. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究. 自然杂志, 30(4): 194-200.
- 魏文秀. 2010. 河北省霾时空分布特征分析. 气象, 36(3): 77-82.
- 伍红雨,杜尧东,何健,等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象, 37(5): 607-614.
- 徐大海,王郁. 2013. 确定大气环境承载力的烟云足迹法. 环境科学学报, 33(6): 1734-1740.
- 杨柳林,王雪梅,陈巧俊. 2012. 区域间大气污染物相互影响研究的新方法探讨. 环境科学学报, 32(3): 528-536.
- 易慧,叶代启,付名利. 2007. 大气可吸入颗粒物源解析方法研究进展. 环境保护科学, 33(1): 8-11.
- 周能福. 2013. 黄河中上游能源化工区重点产业发展战略环境影响评价研究. 北京: 中国环境科学出版社.
- 朱坦,孙韧,张林,等. 1998. 大港地区大气颗粒物中多环芳烃分布及污染源识别的研究. 中国环境科学, 18(4): 289-292.
- 朱坦,吴琳,毕晓辉,等. 2010. 大气颗粒物源解析受体模型优化技术研究. 中国环境科学, 30(7): 865-870.
- Chow J C, Engelbrecht J P, Freeman N C G, et al. 2002. Chapter on: Exposure measurements. Chemosphere, 49: 873-901.
- Herwehe J A, Otte T L, Mathur R, et al. 2011. Diagnostic analysis of ozone concentrations simulated by two regional-scale air quality models. Atmos Environ, 45: 5957-5969.
- Hopke P K. 2003. Recent developments in receptor modeling. J. Chemometrics, 17: 255-265.
- Lu R, Turco R P. 1997. An integrated air pollution modeling system for urban and regional scales: 1. Structure and performance. J Geo Res, 102(D5): 6063-6079.
- Paatero P. 1997. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis. Chemom Intell Lab Syst, 37: 23-35.
- Rao S T, Galmarini S, Puchett K. 2011. Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII): Advancing the state of the science in regional photochemical modeling and its applications. Bull Atmos Meteor Soc, 92: 23-30.
- Thurston G D, Spengler J D. 1985. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in Metropolitan Boston. Atmos Environ, 19: 9-25.