Eco-Environmental Knowledge Web
环境保护科学
Environmental Protection Science
第 46 卷 第 1 期 2020 年 2 月
Vol.46 No.1 Feb. 2020

云量数据对点源污染物大气扩散预测结果的影响分析

马丹阳[1]，潘 峰[1]，范建峰[1,2]，王鹏波[1]
（1. 兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000；
2. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司页岩油项目组，甘肃 庆阳 744100）

摘 要：以距离污染源 38.3 km 的基本站地面气象观测资料作为标准情景，对比了卫星反演总云量方案和距污染源 53.46 km 的基准站云量方案 2 种方案情景，研究使用替代云量数据进行污染源大气扩散预测的可行性。研究发现，距离污染源 53.46 km 的基准站云量方案与标准情景的相关性和符合度优于卫星反演总云量方案，原因在于低云量是影响地面接收太阳辐射的关键性参数，不稳定条件下影响总入射太阳辐射、净辐射等边界层参数的估算结果，稳定条件下影响温度尺度、地表摩擦速度等边界层参数估算结果。卫星反演只能得到总云量数据，同时数据反演过程中存在算法精度的影响，导致卫星反演云量数据预测结果的相关性和符合度较差。

关键词：云量；卫星反演数据；AERMOD；地面气象观测资料；相关性分析
中图分类号：X51 **文献标志码：**A DOI：10.16803/j.cnki.issn.1004－6216.2020.01.020

Influence Analysis of Cloud Cover Information on the Atmospheric Diffusion Predictions of Point Source Pollutants

MA Danyang[1]，PAN Feng[1]，FAN Jianfeng[1,2]，WANG Pengbo[1]
（1. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China；2. Shale Oil Project Team of Changqing Oilfield Company of China National Petroleum Corporation, Qingyang 744100, China）

Abstract： Taking the ground meteorological observation data from the basic station as the standard values, which was 38.3 km away from the pollution source, the total cloud cover retrieved by satellite were compared with the cloud cover from the base station 53.46 km away from the pollution source. Accordingly, the feasibility to predict the atmospheric diffusion of pollution source by using alternative cloud cover data was studied. The results showed that cloud cover from station 53.46 km away had a better correlation and consistence with that from the standard station, compared with the total cloud cover retrieved by satellite. The reason was that the low cloud cover was the key parameter affecting the surface receiving solar radiation, which could affect the estimation results of boundary layer parameters such as total incoming solar radiation and net radiation under unstable conditions, and boundary layer parameters such as temperature scale and surface friction velocity under stable conditions. Satellite retrieval only got the total cloud cover data, and there was the influence of algorithm accuracy in the process of data inversion, which led to the poor correlation and consistency of the prediction results of satellite retrieval cloud cover data.

Keywords： Cloud Cover；Satellite Retrieval Data；AERMOD；Ground Meteorological Observation Data；Correlation Analysis
CLC number： X51

《环境影响评价技术导则 大气环境：HJ 2.2—2018》(以下简称“导则”)[1] 要求 AERMOD、ADMS 等模型的地面气象数据选择距离项目最近或气象特征基本一致的气象站逐时地面气象数据。在导则推荐的 AERMOD 模式中，AERMET 气象预处理程序对于不稳定大气的模拟需要计算显热通量，而显热通量是由净辐射量和地表波文率确定，其中，净辐射量通常是由气温、云量、地表波文率和地表正午反射率共同求得。可见，云量观测资料在大气预测模式中不可缺少[2－3]。

收稿日期：2019－05－28
作者简介：马丹阳(1994－)，男，硕士研究生。研究方向：应用气象学。E-mail：mady17@lzu.edu.cn
通信作者：潘 峰(1977－)，男，教授。研究方向：空气污染与环境评价。E-mail：742061752@qq.com
引用格式：马丹阳，潘 峰，范建峰，等. 云量数据对点源污染物大气扩散预测结果的影响分析[J]. 环境保护科学，2020，46(1)：113－118.

根据《中国气象局综合观测司关于做好全国地面气象观测业务调整工作的通知》(气测函〔2013〕321 号)精神制定的《地面气象观测业务调整技术规定》中规定[4]: 自 2014 年 1 月 1 日起, 全国基准站、基本站保留云量、云高观测, 取消云状观测; 云高记录前不再加计云状; 一般站取消全部云的观测。我国基准站之间相隔较远, 平原地区相距 300~400 km, 丘陵、山区、沿海和海岛相距 100~300 km, 在我国西部地区, 气象观测站点分布更为稀疏, 云量数据更加难以获取, 且距离项目位置较远[5]。可见, 地面气象观测业务的调整使得一般站云量这一关键气象参数缺失, 对环评工作影响较大。

目前, 我国云量观测资料的获取主要有以下 2 种途径: ①利用基准站、基本站的人工观测资料; ②利用卫星遥感技术, 即利用总云量估算算法进行云量反演。以不同云量数据为研究对象, 结合导则推荐的 AERMOD 模式, 以某固定点源为例, 选用相关系数 r、符合度指数 d 作为检验各方案替代标准情景进行污染物地面质量浓度预测的可行性指标, 以期为使用替代云量数据进行污染源大气扩散预测提供技术依据[6]。

1 云量数据来源

1.1 气象站人工观测资料

目前, 我国有 143 个国家基准气候站和 577 个基本气象站进行总云量、低云量的人工观测。气象站人工观测资料为全年每日 8 次总云量、低云量资料[7]。

1.2 卫星遥感数据反演

环境保护部环境工程评估中心已通过卫星遥感技术获取到总云量数据。卫星观测总云量(cloud total amount retrieved by satellite, CTAS)以多颗卫星反演结果为基础, 基于大气辐射传输理论, 在平行大气、单一云层的假设下, 利用卫星的可见光及红外通道, 进行总云量估算。总云量估算算法由晴空像元辐射值、全云像元辐射值获取以及总云量估算 3 部分组成。经过数据校核、多星数据融合、地面视角云量模拟和时序空缺插值等处理, 生成全国 189×159 个网格(分辨率 27 km×27 km)的逐小时数据。卫星遥感数据反演结果为全年每日逐时总云量资料[8]。

2 试验方法

采用导则推荐的 AERMOD 模式对不同云量数据进行研究, 即运用 AERMOD 模式, 针对不同云量数据, 计算受污染源影响的评价区域内各敏感点的小时、日均和年均最大浓度值, 并对预测结果进行统计学分析检验[9-11]。

2.1 参数选取

2.1.1 *污染源数据* 点源排放的大气污染物主要为 SO_2, 源强参数见表 1。根据《环境空气质量标准: GB 3095—2012》[12] 确定 SO_2 的 1 h 平均浓度限值为 0.5 mg/m^3。

表 1 大气污染点源排放参数及标准值

污染源类型	污染物	污染物排放速率/kg·h^{-1}	烟囱高度/m	烟囱内径/m	出口流速/m^3·h^{-1}	出口温度/K	标准值/mg·m^{-3}
点源	SO_2	17.18	60	1	22 000	353.15	0.5

2.1.2 *气象数据* 定义距离点源所在地 38.30 km 的基本站全部气象数据为标准情景, 标准情景地面气象数据包括基本站观测得到的风向、风速、总云量、低云量和干球温度, 共计 5 项。

为研究不同云量数据对点源污染物大气扩散预测结果的影响, 控制地面气象数据中的风向、风速和干球温度 3 项数据不变, 用不同云量数据替换标准情景云量数据, 共设置 2 种对比方案, 参考文献 [13-14] 具体方案设置如下。

(1)方案 1: 地面数据包括距点源所在地 21.80 km 的卫星反演总云量 1 项, 基本站的风向、风速、干球温度 3 项, 低云量数据缺失;

(2)方案 2: 地面数据包括距点源所在地 53.46 km 的基准站的总云量、低云量 2 项, 基本站的风向、风速、干球温度 3 项。

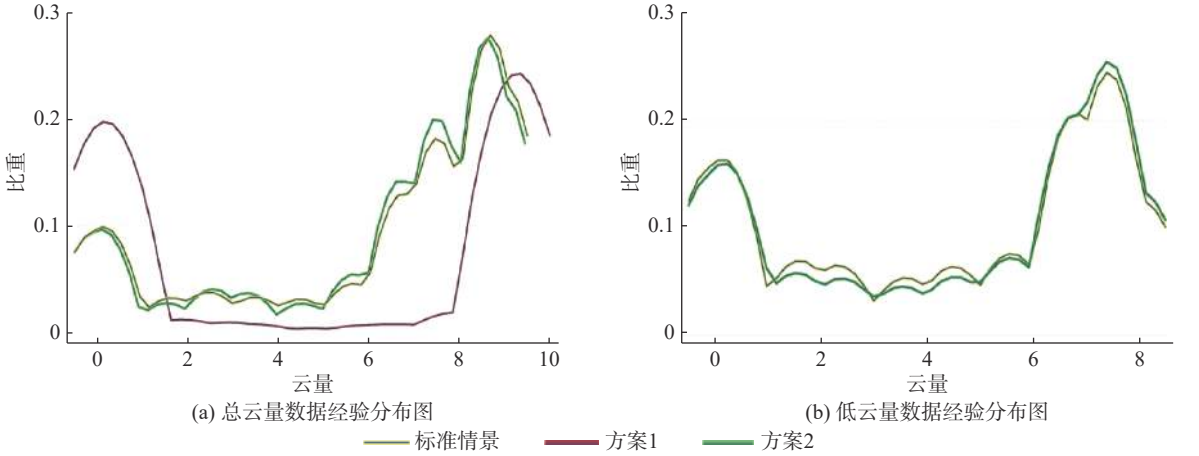
标准情景与 2 个对比方案的总云量、低云量数据分布情况见图 1 和图 2。

图 1 和 2 可见, 方案 2 的总云量、低云量数据分布情况与标准情景较为符合, 方案 1 总云量数据与标准情景符合度较差。

2.2 预测内容

预测区域以点源所在位置为基准点, 预测范围为 10 km×6.6 km。为分析各方案替代标准情景的可行性, 需对同一点位的浓度预测值与标准情景值

进行比较，并进行差异性分析。因此，拟在区域下风向选取 8 个关心点，距离点源分别 0.5 km(P1)、1.0 km(P2)、1.5 km(P3)、2.0 km(P4)、2.5 km(P5)、3.0 km(P6)、3.5 km(P7)和 4.0 km(P8)。考虑点源所在地全年主导风向为东北风，点源所在地西南部地形高差明显，确定 8 个关心点呈西南-东北方向布设。各关心点与大气污染点源位置关系见图 2。



(a) 总云量数据经验分布图　　(b) 低云量数据经验分布图

图 1　各情景下总云量、低云量数据经验分布

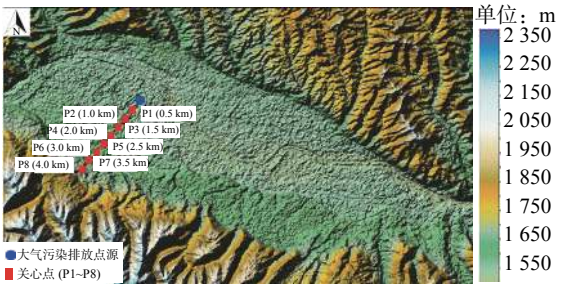


图 2　各关心点与大气污染点源位置关系

利用 AERMOD 模式预测污染物浓度时不考虑建筑物下洗、化学衰变、化学转化及干湿沉降作用。预测内容为：在 SO_2 排放源强、地形数据和高空气象数据不变的情况下，预测各关心点 SO_2 最大地面小时浓度、最大地面日均浓度和最大地面年均浓度。

2.3　预测数据的统计学分析

利用误差和相对误差、相关性分析法等统计方法进行两对比方案与标准情景的 SO_2 地面浓度预测结果比较分析。

2.3.1　*误差与相对误差*　误差是对比方案预测值与标准情景预测值之间的差，见式(1)。

$$e = P - O \tag{1}$$

式(1)中，e 为对比方案与标准情景间 SO_2 地面预测浓度值的误差；P 为对比方案 SO_2 地面预测浓度值；O 为标准情景 SO_2 地面预测浓度值。

相对误差是各对比方案预测值的绝对误差与标准情景预测值的比率，常用百分数表示。相对误差在一定程度上比误差能更好地反映出各对比方案与标准情景地面浓度预测值的接近程度。参考国世友[15]对相对误差的相关规定，规定中各方案情景 SO_2 最大地面浓度预测值的相对误差 e_r 在 25% 以内，认为预测结果接近实际情况，见式(2)。

$$e_r = \frac{|P - O|}{O} \times 100\% \tag{2}$$

2.3.2　*相关性分析法*　利用 SPSS19.0 对预测结果进行处理，计算得出相关系数 r 进行相关性分析。$r>0$ 代表两变量正相关，$r<0$ 代表两变量负相关；$|r|\geqslant 0.8$ 时，可以认为两变量间高度相关；$0.8<|r|\geqslant 0.5$ 时，可以认为两变量中度相关；$0.5<|r|\geqslant 0.3$ 时，可以认为两变量低度相关；$|r|<0.3$ 说明相关程度弱，基本不相关[16]。

2.3.3　*符合度指数法*　参考文献 [15] 的研究方法，用符合度 d 结合均方差 MSE 来检验对比情景的浓度预测值与标准情景值的一致性。d 值在 0.0 与 1.0 之间，越接近于 1，均方误差 MSE 越小，说明预测的对比气象情景值与标准情景值越符合，d=1 表明对比情景值与标准情景值完全吻合。

符合度指数 d 由下式定义：

$$\mathrm{d} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P'_i| + |O'_i|)^2} \tag{3}$$

$$P'_i = P_i - \bar{O} \tag{4}$$

$$O'_i = O_i - \bar{O} \tag{5}$$

均方误差 *MSE* 由式(6)描述。

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2 \quad (6)$$

式(6)中，n 为实测点总数；P_i 为对比情景点的预测浓度；O_i 为标准情景点的浓度；$\bar{O}$为标准情景点的浓度平均值。

通过一系列点的预测值分析符合度，对比情景值与标准情景值的相符程度在 80% 以上为优秀，符合程度在 60% 以上为良好，在 40% 以上认为是基本可信。

3 结果分析

3.1 数据验证

运用 AERMOD 模式分别计算点源在标准情景和两对比方案下 SO_2 的小时值、日均值、年均值落地浓度，参考 [17] 的分析方法，统计分析两对比方案预测值与标准情景值的误差、相对误差、相关性和符合性。具体试验结果，统计见表 2 和图 3 ~ 5。

表 2 标准情景与各对比方案 SO_2 预测浓度的结果误差比较

方案	浓度值	最大误差/mg·m^{-3}	最大相对误差	相关系数r	*MSE*	d
方案1	小时平均浓度	0.005 5	18.91	0.996	7.77E-6	0.979 211
	日均浓度	0.002 2	134.00	0.985	1.22E-06	0.918 425
	年均浓度	0.000 44	231.25	0.821	5.37E-08	0.948 155
方案2	小时平均浓度	−0.002 46	13.74	0.994	9.44E-07	0.997 021
	日均浓度	0.000 14	2.15	1.000	2.57E-09	0.999 764
	年均浓度	0.000 03	8.70	1.000	4.75E-10	0.999 428

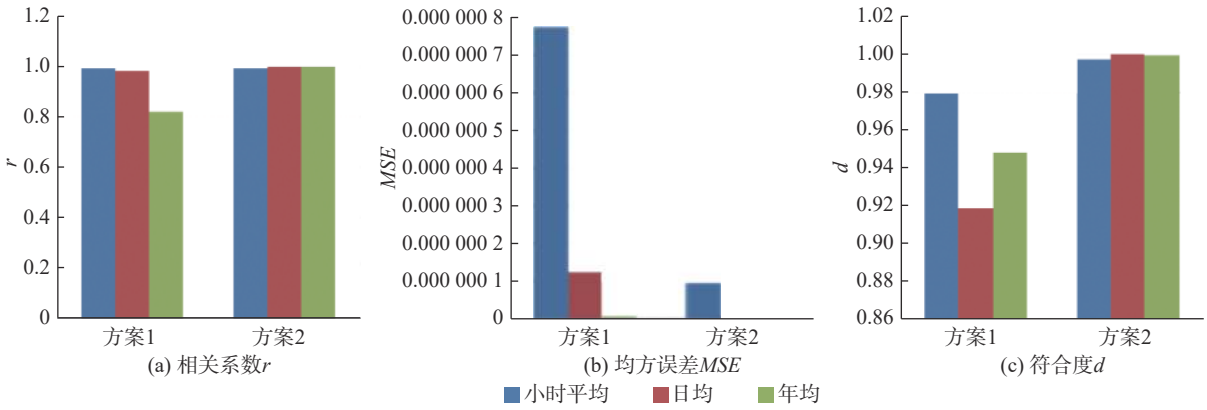


图 3 对比方案预测值与标准情景值的误差分析示意图

3.2 结果讨论

表 2 和图 3 分析可知，与方案 1 相比，方案 2 预测值和标准情景值之间的相关系数 r 和符合度 d 更接近 1，均方误差 *MSE* 更接近 0.0。图 4 和图 5 分析可知，方案 1 以正偏差为主，方案 2 以负偏差为主，两方案与标准情景的小时均值浓度偏差较接近，方案 1 的日均值浓度、年均值浓度偏差量大于方案 2。

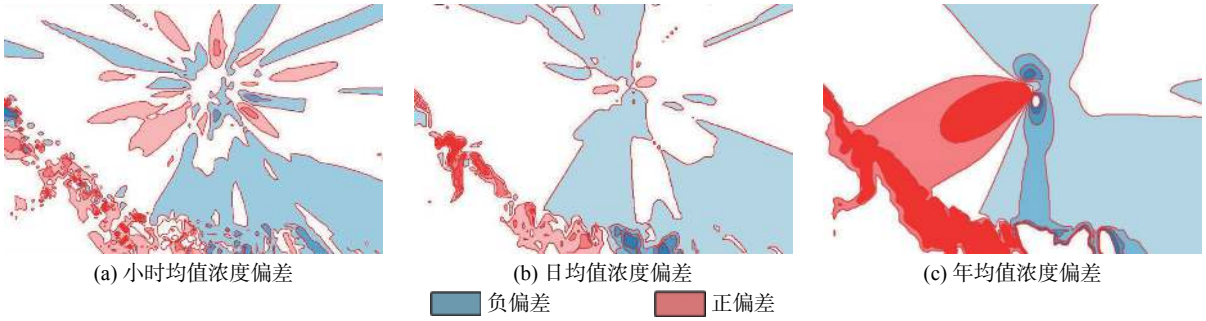


图 4 方案 1 与标准情景下预测结果偏差区域示意图

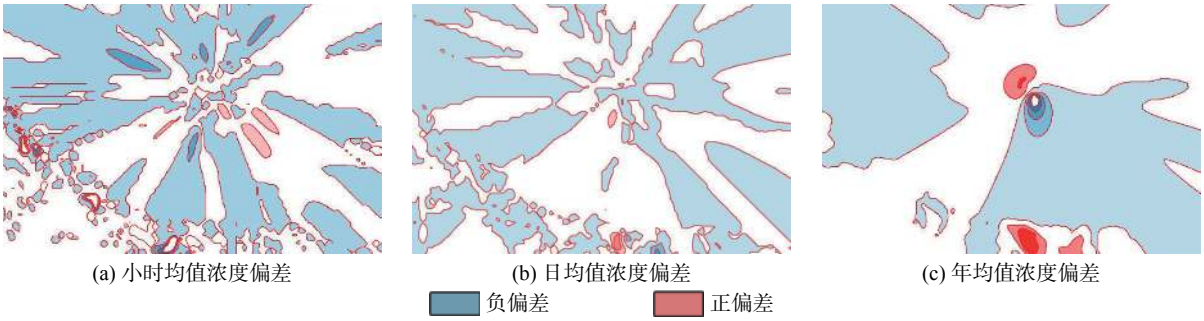


图 5　方案 2 与标准情景下预测结果偏差区域示意图

图 4 和图 5 可见，方案 2 与标准情景的云量数据符合度和预测结果符合度均更好，即利用距离污染源大于 50 km 的基准站云量代替基本站云量数据进行点源污染物大气扩散预测，预测结果优于利用卫星反演总云量数据的预测结果。

李传丰等[18] 的研究成果表明，在不考虑沉降的时候，众多地表气象参数中，只有低云量、干球温度、站点压力以及风速影响边界层参数影响模型运算结果，其他参数并不影响模型运算结果。其中，AERMOD 模型在考虑低云量对边界层参数的影响时，不稳定条件和稳定条件下影响机制不同，具体估算机制如下。

1）不稳定条件下边界层参数的估算[19]。从地表能量平衡开始，显热通量可用每一小时的净辐射和波文率来计算。净辐射通过太阳辐射、气温和不透明云量（低云）进行计算。如果没有太阳辐射实测值，则用云量、地表温度、波文率和正午反照率来计算。通常有云量时，总入射的太阳辐射 R 可用 Kasten 和 Czeplak（1980）方法估算见式（7）。

$$R = R_0\left(1 + b_1 n^{b_2}\right) \tag{7}$$

式（7）中，R_0 为晴天地面总太阳辐射；n 为低云量；b_1、b_2 为经验系数，设为−0.75 和 3.4（Holtslag 和 van Ulden, 1983）。

则净辐射 R_n 可参数化为温度和云量的函数：

$$R_n = (1 - r(\emptyset)R - I_N) \tag{8}$$

即：

$$R_n = \frac{(1 - r(\emptyset))R + c_1 T^6 - \sigma_{SB} T^4 + c_2 n}{1 + c_3} \tag{9}$$

式中，σ_{SB} 为 Stefan-Boltzmann 常数，σ_{SB}=5.67×10^{-8}W/（m^2·K^4）；c_1、c_2、c_3 为经验系数，分别为：c_1=5.31×10^{-13}W/（m^2·K^6），c_2=60 W/m^2，c_3=0.12；$r(\varphi)$ 为地表反照率与太阳高度角（φ）的函数；I_N 为地表的净长波辐射；T 为环境温度；N 为低云量。

计算出热通量以后，即可采用迭代法计算出对流边界层（CBL）的地表摩擦速度 u^*、莫尼霍夫长度 L 等其余边界层参数。

2）稳定条件下边界层参数的估算。地表摩擦速度 u^*和温度尺度 θ_*，可用云量、风速和气温来计算，反过来计算结果可用来计算热通量。其中，温度尺度 θ_*（K）的计算公式为：

$$\theta_* = 0.09\left(1 - 0.5n^2\right) \tag{10}$$

式（10）中，n 为低云量。

因此，低云量是影响地面接收太阳辐射的关键性参数，对于区域污染物的扩散有很大的影响，尤其是在小静风条件下影响更为突出。同时，刘瑞霞等[20] 的研究成果表明：在由卫星接收的辐射值到总云量的计算过程中，受定标、定位和云检测等很多算法精度的影响，引入误差是难以避免的。由于卫星反演的云量数据仅为总云量数据，无法区分总云量和低云量，同时卫星反演总云量数据过程中存在算法精度的影响，导致方案 1 预测值和标准情景值间的相关性和符合度较差。

4　结论

1）设置了 1 种标准情景，同时设置 2 种对比方案进行对比，分别利用卫星反演总云量代替标准情景云量、50 km 外基准站云量代替标准情景云量进行点源污染物大气扩散预测。在 SO_2 排放源强、地形数据和高空气象数据不变的情况下，利用 AERMOD 模式预测不同情景下 SO_2 地面浓度，进而对不同对比方案代替标准情景的可能性进行分析研究。研究发现，方案 2 预测值和标准情景值之间相关系数 r 和符合度 d 更接近 1，均方误差 MSE 更接近 0.0。因此，利用距离污染源较近的基准站云量代替基本站云量数据进行点源污染物大气扩散预测，预测结果优于利用卫星反演总云量数据的

预测结果。

2)卫星反演的云量数据仅为区域总云量数据,无法区分总云量和低云量,而低云量在小静风条件下对地面接收太阳辐射的影响较为突出。因此,利用卫星反演总云量数据代替标准情景云量数据,预测结果的相关性和符合度较差。

3)通过研究可知,当距离项目较近的地面一般气象观测站缺少云量数据时,利用距离项目较近的气象站(基准站或基本站)云量数据或卫星反演总云量数据能填补云量数据缺失的空白,且大气环境影响预测的结果可信。同时,相比于卫星反演的云量数据,利用气象站(基准站或基本站)云量数据预测出的结果的相关性和符合度更好。

参 考 文 献

[1] 国家环境保护部. 环境影响评价技术导则大气环境: HJ 2.2-2018[S/OL]. (2016-05-22)[2019-05-10].http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/kjbz/hjyxpjbz/hjyxpjjsdz/201605/t20160522_342884.shtml.

[2] 孙雪. 大气环境影响预测模式中参数的敏感性分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.

[3] 姚小英, 蒲金涌, 尤志刚, 等. 近 60a 天水市云量变化特征及与其它气候因子的关系[J]. 干旱气象, 2010, 28(4): 391 − 395.

[4] 孙卓, 李颜彪, 陈洪利, 等. 适用于地面观测新规的供电网络设计技巧[J]. 甘肃农业, 2014 (14): 39 − 40.

[5] 王宗海, 陆剑红, 刘晋生. 目测云的几点认识[J]. 气象, 2003, 29(2): 56 − 57.

[6] 师莉红. 大气环境影响评价中常规气象观测资料调查与分析[C].//中国气象学会. 第 27 届中国气象学会年会论文集. 2010: 1 − 4.

[7] 中国气象局. 地面气象观测资料质量控制: QX/T118—2010[S]. 2010.

[8] 赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(3): 241 − 254.

[9] 王海超, 焦文玲, 邹平华. AERMOD 大气扩散模型研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11): 115 − 119.

[10] 张威, 郭玉刚, 王建中, 等. AERMOD 模型在大气环境影响评价点源预测中的应用研究-某城市集中供热点源预测为例[J]. 北方环境, 2010, 22(3): 23 − 27.

[11] 张旭. AERMOD 模式在大气环境影响评价中的规范使用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010.

[12] 国家环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012 [S/OL]. (2012-04-10)[2019-05-10]. http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqhjzlbz/201203/W020120410330232398521.pdf.

[13] 孟宪林, 国世友. NCEP 再分析资料在大气环境预测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 61 − 65.

[14] 杨景朝, 马振峰, 伯鑫, 等. 地面气象观测资料在空气法规模型的标准化研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2950 − 2957.

[15] 国世友. 基于 AERMOD 模式不同气象情景下 SO_2 地面浓度的预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[16] 张文斌, 春伟. SPSS 统计分析基础教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.

[17] 张智锋, 刘雪锦, 贾佳, 等. 地形数据输入范围对 AERMOD 预测结果的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(5): 182 − 186.

[18] 李传丰. AERMOD 模型参数敏感性分析[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2012.

[19] CIMORELLI A J, PERRY S G, VENKATRAM A, et al. AERMOD –Description of model formulation[R].US: AMSP EPA Regulatory Model Improvement Committee, 1998.

[20] 刘瑞霞, 陈洪滨, 郑照军, 等. 总云量产品在中国区域的分析检验[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 571 − 578.