

AERMOD 模型在土壤环境影响 预测中的应用

吴波

(南京博环环保有限公司, 南京 210037)

摘要: **目的** 分析以大气沉降为主的土壤影响预测及评价。**方法** 采用 AERMOD 模型进行有机废气干沉降量、湿沉降量、总沉降量的计算。**结果** 该区域内甲苯干沉降量占总沉降量比在 97%~99% 之间, 湿沉降对总沉降量的贡献值很小, 甲苯在该区域干沉降过程沉降速度范围为 0.0003~0.0033 m/s, 平均沉降速度为 0.0016 m/s。**结论** 以甲苯为代表的有机废气大气沉降计算主要以干沉降为主, 干沉降速度具有明显的日变化特征, 一般在中午前后出现最大值, 大气沉降对周围土壤环境影响较小。

关键词: AERMOD; 土壤预测; 大气沉积; 干沉积量; 湿沉积量

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.018

中图分类号: X820

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0117-05

Application of AERMOD Model in Soil Environmental Impact Prediction

WU Bo

(Nanjing Grand Environmental Protection Co., Ltd, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the prediction and evaluation method of soil impact mainly based on atmospheric deposition. The dry deposition, wet deposition and total settlement of organic waste gas were calculated by AERMOD model. The dry deposition of toluene accounted for 97% to 99% of the total settlement in this area, and the contribution value of wet deposition to the total settlement was very small. The settlement speed range of toluene in the dry deposition process of this area was 0.0003~0.0033 m/s and the average settlement speed was 0.0016 m/s. The calculation of atmospheric deposition of organic waste gas represented by toluene is mainly based on dry deposition. The dry deposition rate has obvious diurnal variation characteristics, and generally the maximum value appears around noon. The atmospheric deposition has little impact on the surrounding soil environment.

KEY WORDS: AERMOD; soil prediction; atmospheric deposition; dry deposition; wet deposition

我国土壤环境状况总体不容乐观, 部分地区土壤污染较重, 耕地土壤环境质量堪忧, 工矿业废弃地土壤环境问题突出。工业企业排放废气中的特征污染物, 如挥发性有机物、重金属、二噁英等会随大气扩散、迁移, 并通过大气的沉降作用进入土壤, 造成土

壤污染。工业企业造成土壤污染主要方式包括大气沉降、地面漫流、垂直入渗三种方式, 其中大气沉降已经被认为是区域土壤污染的重要来源。挥发性有机物大气沉降主要是指大气物质的自然沉降, 分为干沉降与湿沉降^[1]。干沉降是大气中污染物清除的主要过程

收稿日期: 2019-11-28; 修订日期: 2019-12-29

Received: 2019-11-28; Revised: 2019-12-29

作者简介: 吴波 (1981—), 男, 工程师, 主要研究方向为环境影响评价及环境工程设计。

Biography: WU Bo (1981—), Male, Engineer, Research focus: environmental impact assessment and environmental engineering design.

之一,直接影响空气中污染物的浓度和空气质量状况的时空分布^[2]。大气干沉降是指在没有降水的情况下,大气物质受重力、紊流、热力、惯性以及静电的作用,降落到地面或水面的过程。大气湿沉降是指大气物质随降水(雨、雪、冰雹)等降入地面或水面的过程。

《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(HJ 964—2018)^[3](以下简称“土壤导则”)已于2019年7月1日实施。该导则中提出了土壤环境影响预测的基本方法,对于以大气沉降为主的影响预测过程,需要确定并估算大气沉积量,其对于研究工业企业建设期间、运行期间、退役后对土壤影响情况有着重要的意义。土壤导则中对于沉积量的计算要求参照HJ 2.2《环境影响评价技术导则——大气环境》^[4](以下简称“大气导则”)。

AERMOD是目前国际上最成熟、最先进的空气质量模型之一。作为大气导则的推荐模型之一,AERMOD模型是一个稳态烟羽扩散模式,可基于大气边界层数据特征模拟多种排放源(点源、面源和体源)排放污染物的浓度分布情况^[5-7]。AERMOD模型系统由AERMET(气象预处理模块)、AERMAP(地形前处理器)和AERMOD(大气扩散预测模块)三部分组成^[8],集成了大气沉积量的计算过程,包括干沉积率、湿沉积率、总沉积率的计算。

文中以某市化学品生产项目为例,对化工企业生产过程中的有机废气干湿沉降对土壤环境的影响进行研究,为气体污染物扩散沉降对土壤环境影响评价、科研等提供参考和借鉴。

1 AERMOD模型中沉降算法^[9]

1.1 干沉降的计算方法

AERMOD模型沉降算法基于美国ANL实验室的研究。干沉降的计算公式为:

$$F_d = \chi_d \cdot v_d \quad (1)$$

式中: F_d 为干沉积量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; χ_d 为参照高度 Z_r ($Z_r = Z_0 + 1 \text{ m}$, Z_0 为下垫面粗糙度的长度, m) 处的浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; v_d 为沉降速度, m/s 。

对于沉降速度的计算,气态干沉积沉降速度计算公式为:

$$v_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (2)$$

式中: R_a 为空气动力学阻力, s/m ; R_b 为片流层阻力, s/m ; R_c 为近地面阻力, s/m 。

式(2)中 R_a 、 R_b 、 R_c 的计算及确定公式为:

$$R_a = \frac{1}{ku*} \left[\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} \right) + \frac{5Z_r}{L} \right] \quad (3)$$

式中: k 为卡曼常数(无量纲, 0.4); u_* 为摩擦

速率, m/s ; L 为莫宁-奥布霍夫长度。

$$R_b = \frac{2.2}{ku*} \left(\frac{v}{D_a} \right)^{2/3} \quad (4)$$

式中: D_a 为空气中的扩散系数 (m^2/s); v 为空气运动黏度, $v \approx 0.1505 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

$$R_c = \frac{1}{\frac{LAI_r}{R_s + R_m} + \frac{LAI_r}{R_{cut}} + \frac{1}{(R_{ac} + R_g)}} \quad (5)$$

式中: LAI_r 为绿叶面积指数(无量纲); R_s 为空气运动黏度, $R_s \approx 0.1505 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; R_m 为叶肉抗性; R_{cut} 为表层阻力; R_{ac} 为植被冠层的空气阻力; R_g 为地面吸收能力。

1.2 气态湿沉降的计算方法

湿沉降的计算公式为:

$$F_{wg} = 10^6 C_l M_w r \quad (6)$$

式中: F_{wg} 为气态湿沉积量; C_l 为液相污染物浓度; M_w 为污染物分子量; r 为降水量。

$$C_l = f_{sat} C_{lsat} \quad (7)$$

式中: f_{sat} 为饱和度分数(无量纲); C_{lsat} 为饱和液相中污染物浓度。

$$C_{lsat} = \frac{\rho_g RT_a}{HM_w 10^9 \left[1 + \frac{L_w RT}{\rho_w H} \right]} \quad (8)$$

式中: ρ_g 为空气中气态污染物浓度; R 为气体常数; L_w 为降雨中液态水的含量, $L_w = r^{0.889}/13.28 \text{ g}/\text{m}^3$; T_a 为环境温度; H 为亨利常数。

$$f_{sat} = \min \left(1, \frac{t_{res}}{t_{abs}} \right) \quad (9)$$

$$t_{res} = \frac{Z_p}{v_{fall}} \quad (10)$$

$$t_{abs} = \frac{\frac{a^2 RT_a}{3HD_a f_g} + \frac{4a RT_a}{3Hv\alpha_s} + \frac{3a^2 0.17}{3D_w f_l}}{1 + \frac{L_w RT_a}{\rho_w H}} \quad (11)$$

式中: f_{sat} 为饱和度分数(无量纲); t_{res} 为边界层雨滴停留时间; t_{abs} 为雨滴饱和时间; Z 为烟羽高度或混合层高度(取两者大值); v_{fall} 为降水下降速度, $v_{fall} = 3.75r^{0.111} \text{ m}/\text{s}$; a 为雨滴半径, $a = r^{0.232}/18.11 \text{ cm}$; f_g 为气侧扩散增强因子(无量纲), $f_g = 80a + 1$; v 为气体分子速度, $v = 50000 \text{ cm}/\text{s}$; α_s 为粘着系数, $\alpha_s = 0.01$; D_w 为液相分子扩散系数, cm^2/s ; f_l 为液体扩散增强因子(雨滴直径小于 0.01 cm , 取值 1.0; 雨滴直径在 $0.01 \sim 0.05 \text{ cm}$, 取值 2.6; 雨滴直径大于 0.05 cm , 取值 20.0)。

AERMOD模型中总沉积量即干沉积量与湿沉积量之和。

2 项目基本情况介绍

某企业生产多元醇及油酸甘油酯，工艺有组织废气为甲苯、甲酸。其车间设置一套冷凝+二级活性炭吸附系统处理该项目产生的废气。各工段反应釜均密闭，产生废气通过管道收集至车间尾气总管，进入尾气处理系统进行处理，达标后通过 15 m 高 1#排气筒排放。无组织废气主要为生产车间及储罐区未收集的甲苯废气，废气排放情况（见表 1）。

3 模型中各项参数选择

3.1 地面及高空气象数据

地面气象资料中（见表 2），风向、风速、温度等原始地面气象观测数据来源于国家气象局，云量数

据来源于国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室的卫星观测总云量（Cloud Total Amount Retrieved by Satellite, CTAS）。为保证模型所需输入数据的连续性，对于观测数据中存在个别小时风向、风速、温度等观测数据缺失的时段，采用线性插值方式予以补充。对于低云量的缺失（低云量主要影响气象统计分析，不参与模型计算），采用总云量代替的方式予以补充。

高空气象资料是采用大气环境影响评价数值模式 WRF 模拟生成（见表 3）。模式计算过程中，把全国共划分为 189×159 个网格，分辨率为 27 km×27 km。模式采用的原始数据有地形高度、土地利用、陆地-水体标志、植被组成等数据，数据源主要为美国的 USGS 数据。模式采用美国国家环境预报中心（NCEP）的再分析数据作为模型输入场和边界场。

表 1 某企业废气排放情况
Tab.1 Organized exhaust emission of an enterprise

产生工段	废气量/(m ³ ·h ⁻¹)	污染物名称	排放时间/h	排放状况		排放去向
				速率/(kg·h ⁻¹)	排放量/(t·a ⁻¹)	
反应釜	24 000	甲苯	4640	1.5	6.96	15 m 排气筒
		甲酸	4640	0.0045	0.021	
无组织	—	甲苯	4640	0.5	2.32	无组织排放

表 2 地面气象数据基本信息情况
Tab.2 Basic information of ground meteorological data

序号	数据年份	站点编号	站点类型	经度/(°E)	纬度/(°N)	海拔高度/m
1	2017	58252	基本站	119.48	32.1833	32

表 3 高空气象数据情况
Tab.3 High altitude meteorological data

序号	数据年份	模拟网格点编号	经度/(°E)	纬度/(°N)	海拔高度/m
1	2017	156071	119.952 00	32.406 20	9

3.2 地形数据

地形数据来自 <http://srtm.csi.cgiar.org/> 网站提供的高程数据。分辨率为 3 arc，约为 90 m。地形如图 1 所示。

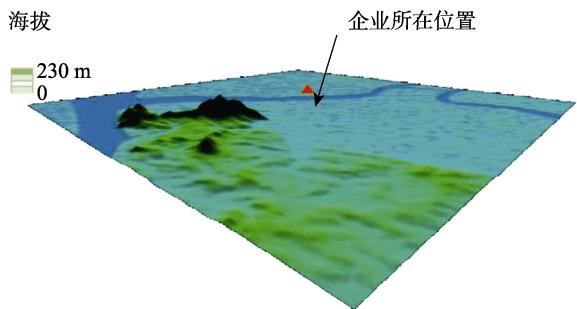


图 1 项目所在区域地形概况
Fig.1 Terrain data of project site

3.3 气态沉降的各项参数

根据 AERMOD 模型中干沉积的计算公式，主要需要确定的参数为： D_a （空气中的扩散系数（m²/s））、 LAI_r （绿叶面积指数，根据地面类型及不同季节情况确定），其他参数中 R_m 、 R_{ac} 、 R_g 均可通过地面气象文件中数据（相对湿度、温度、降水率等数据）进行计算， R_{cut} 需要提供单个叶面反弹阻力 R_{el} 进行计算。

根据 AERMOD 模型中湿沉积的计算公式，主要需要确定的参数为：分子量（ M_w ）、液相分子扩散系数（ D_w ），其余参数可通过地面气象数据中数据进行计算（降水量 r 取自地面气象数据文件）。

气体干湿沉降的各项参数参照 ANL/ER/TR-01/003^[10]中数据，具体见表 4。

3.4 预测方案

预测区域为项目排气筒中心 2 km×2 km 的矩形区域，预测网格设置为 100 m×100 m，预测气体沉降中甲苯的年均总沉积量、年均湿沉积量、年均干沉积量，其中干湿沉积量的计算均不考虑干清除及湿清除。预测甲苯沉积量并叠加本底浓度后（该区域土壤

表 4 气态沉降各项参数情况
Tab.4 Parameters of gaseous settlement

物质	秋季绿叶 面积指数	初春绿叶 面积指数	空气中扩散 系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	水体中扩散 系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	单个叶面表面反弹 阻力/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	Henry 常数
甲苯 toluene	0.5	0.25	0.08054	0.9097	17400	680

中未检出甲苯)是否满足 GB 36600—2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》^[11]表 1 中第二类用地标准筛选值的要求。预测方法采用土壤导则附录 E 中单位质量土壤中某种物质增量公式计算,不考虑经过淋溶及径流排出的量^[3]。

4 预测结果及对比情况

预测结果表明:在项目 2 km 范围内,甲苯年均最大总沉积量为 2.57 g/m^2 ,最小总沉积量为 0.009 g/m^2 ,平均总沉积量为 0.061 g/m^2 ;最大干沉积量为 2.55 g/m^2 ,最小干沉积量为 0.009 g/m^2 ,平均干沉积量为 0.059 g/m^2 ;最大湿沉积量为 0.027 g/m^2 ,最小湿沉积量为 0.0005 g/m^2 ,平均湿沉积量为 0.0016 g/m^2 。

三种沉积量随距离的分布如图 2 所示。选择项目所在位置为横向的网格作为代表,沿横向(X 轴线)三种沉积量对比分布如图 3 所示。

该区域内甲苯干沉积量占总沉积量的 97%~99%,湿沉降对总沉积量的贡献值很小。甲苯在有机物中具有一定代表性,其扩散系数、单个叶面反弹阻力、亨利常数等数据在 ANL/ER/TR-01/003^[10]中属中间偏上。AERMOD 模型确定参数中空气、水中的扩散系数与沉积量是正比关系,通过对甲苯有机废气沉积量的计算,基本可以反映挥发性有机物在该区域的沉降情况,该区域挥发性有机物质的沉降主要为干沉降(占 95%以上)。通过对干沉积计算过程的数据进行分析,预测过程(365 天)中每天计算得到的 R_a 、 R_b 、 R_c 、 v_d 的情况见表 5。

表 5 干沉降计算结果情况
Tab.5 Calculation results of dry settlement

类别	$R_a/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$R_b/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$R_c/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$v_d/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
最大值	1000.0000	379.5710	1683.1500	0.0033
最小值	1.4418	7.7005	297.8480	0.0003
平均值	501.4119	63.1574	487.7067	0.0016

由图 4 和表 5 中的数据可以看出,甲苯在该区域干沉降过程的沉降速度范围为 $0.0003 \sim 0.0033 \text{ m/s}$,平均沉降速度为 0.0016 m/s 。由图 5 可以看出,干沉降速度具有明显的日变化特征,一般在中午前后出现最大值。

选择采用 AERMOD 模型计算得出的年平均总沉积量为 0.061 g/m^2 ,评价范围内面积为 400 万平方米,5、10、20 年沉积量分别为 1220、2440、4880 kg。该区域土壤容重为 $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,评价土壤深度按照

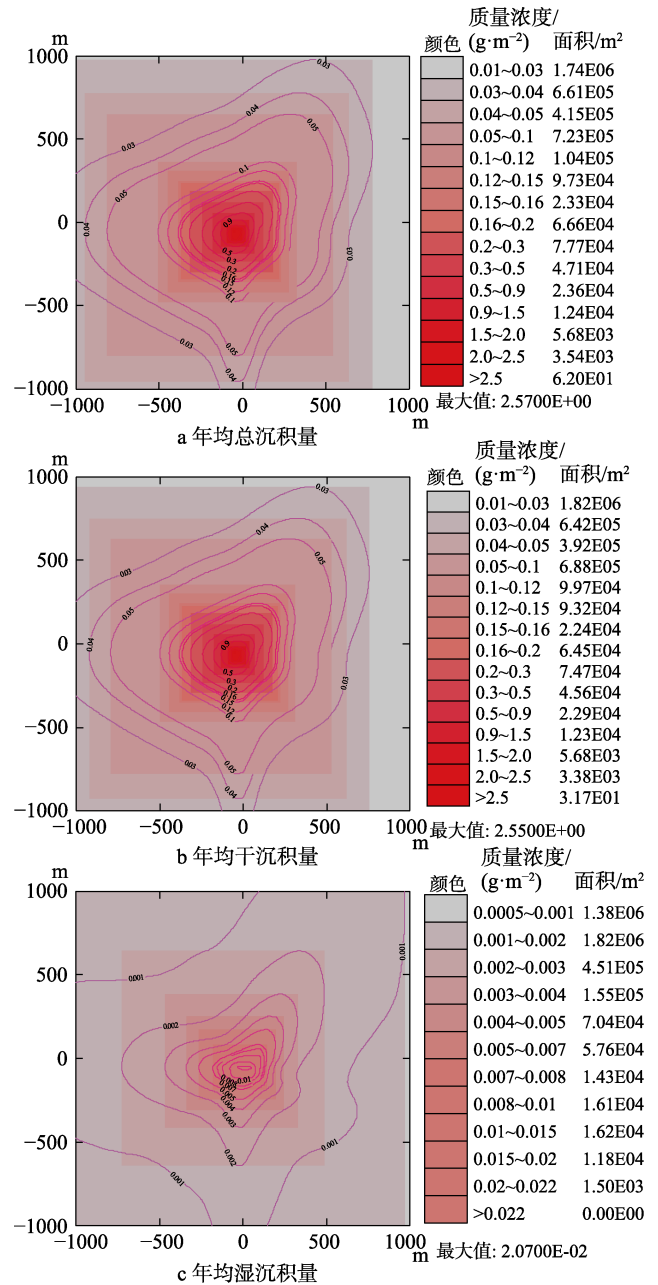


图 2 三种沉积量分布

Fig.2 Distribution of three kinds of deposition: a) total annual deposition; b) annual average dry deposition; c) annual average wet deposition

表层土 0.2 m,此区域土壤总质量为 $2.08 \times 10^9 \text{ kg}$ 。则区域 5、10、20 年单位质量土壤中甲苯预测值(现状值为未检出)为 0.000 59、0.001 17、0.002 35 g/kg,满足 GB 36600—2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》^[11]表 1 中第二类用地标准筛选值的要求(1.2 g/kg)。按此情况大气沉降约 600 年方

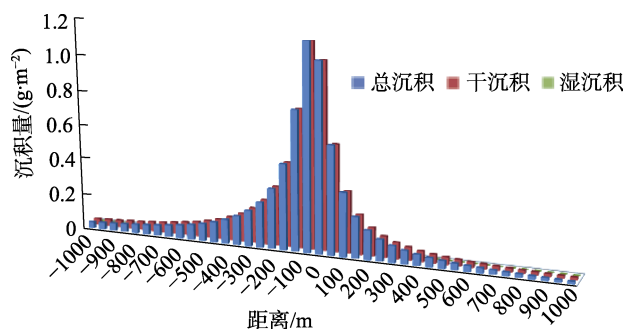


图 3 代表性网格三种沉积量对比分布

Fig.3 Comparison and distribution of three kinds of deposition in representative grid

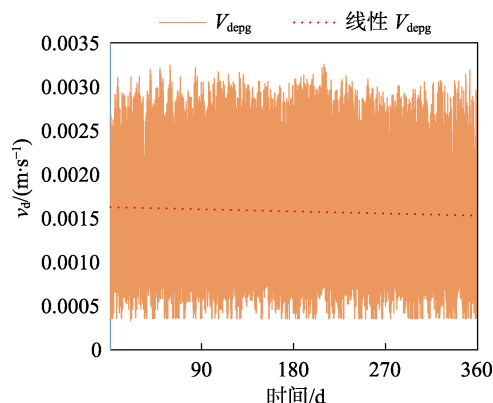


图 4 气体沉降速度年分布

Fig.4 Annual distribution of gas settlement speed

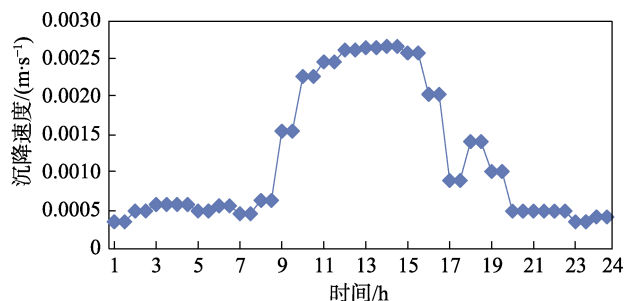


图 5 每天气体沉降速度随小时变化曲线

Fig.5 Change curve of daily gas settlement speed with hour

可达到筛选值,可见该企业甲苯大气沉降对周围土壤环境影响比较小。

5 结论

1) 使用大气导则中推荐的 AERMOD 模型对土壤中气态物质的干沉降及湿沉积量进行了计算分析,为以大气沉降为主、气态物质的土壤环境影响预测提供了参考及计算思路。

2) 选取某企业甲苯有机废气的大气沉降进行大气污染物沉积量计算,计算结果表明:该区域内甲苯干沉降量占总沉降量的 97%~99%,湿沉降对总沉降量的贡献值很小,甲苯在该区域干沉降过程沉降速度范围为 0.0003~0.0033 m/s,平均沉降速度为 0.0016 m/s。干沉降速度具有明显的日变化特征,一般在中午前后

出现最大值。根据 AERMOD 模型中干沉降及湿沉降的计算公式,选取甲苯作为挥发性有机物代表分析其大气沉降的规律,具有一定的代表性。

3) 采用 AERMOD 模型进行大气沉降的计算,地面气象数据作为预测的基础数据,尤其是湿沉降的计算涉及到逐时降雨量、相对湿度等地面气象资料,相关数据获取难度较大。通过分析可知,湿沉降在挥发性有机物大气沉降量中占比较小,可以不考虑湿沉降,以干沉降作为总沉降量的代表。

参考文献:

- [1] 国家海洋局生态环境保护司. 大气污染物沉降入海通量评估技术规程[Z]. 2015: 1-2.
Department of Ecological and Environmental Protection, State Oceanic Administration. Technical Code for Assessment of Air Pollutant Deposition into the Sea[Z]. 2015: 1-2.
- [2] 苏航, 王自发, 朱彬, 等. 北京奥运会前后静态天气条件下 SO₂ 和 NO₂ 干沉降模拟[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 636-642.
SU Hang, WANG Zi-fa, ZHU bin, et al. Simulation of SO₂ and NO₂ Dry Deposition under Static Weather Conditions Before and After Beijing Olympic Games[J]. Climate and Environment Research, 2010, 15(5): 636-642.
- [3] HJ 964—2018, 环境影响评价技术导则土壤环境(试行)[S].
HJ 964—2018, Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment Soil Environment (Trial)[S].
- [4] HJ 2.2—2018, 环境影响评价技术导则 大气环境[S].
HJ 2.2—2018, Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment Atmospheric Environment[S].
- [5] 回蕴珉. AERMOD 模式在大气环境影响评价中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2011.
HUI Yun-min. Application of AERMOD Model in Atmospheric Environmental Impact Assessment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [6] 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.
WANG Hai-chao, JIAO Wen-ling, ZOU Ping-hua. Review of AERMOD Atmospheric Diffusion Model[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33 (11): 115-119.
- [7] 王小燕. AERMOD 在区域大气环评中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
WANG Xiao-yan. Application of AERMOD in Regional Atmospheric Environmental Assessment[D]. Lanzhou, Lanzhou University, 2013.
- [8] 付鹏, 全纪龙, 潘峰. 不同地形数据对大气预测结果的影响性分析[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 170-173.
FU Peng, TONG Ji-long, PAN Feng. Impact Analysis of Different Terrain Data on Atmospheric Prediction Results[J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (3): 170-173.
- [9] EPA. AERMOD Deposition Algorithms—Science Document (Revised Draft)[Z].
- [10] ANL/ER/TR-01/003, Deposition Parameterizations for the Industrial Source Complex (ISC3) Model[S].
- [11] GB 36600—2018, 土壤环境质量建设用土地土壤污染风险管控标准[S].
GB 36600—2018, Standard for Soil Pollution Risk Management and Control of Soil Environmental Quality Construction Land[S].