

复杂河谷地形排气筒高度的设计

张有贤, 甄天珂, 杨志强

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 通过 CALPUFF 模型, 利用崆峒区气象资料、地形资料分析了废气源位于复杂河谷地形内其排气筒高度与最大地面小时、日均及年均落地浓度的关系, 为复杂地形选择设计排气筒高度提供依据。结果表明, 河谷内排气筒高度在某些范围内, 尤其是在较低的高度段, 污染物落地浓度并不会随着排气筒高度增加而减少, 可能会出现相反的规律或者上下波动; 排气筒高度到达一定高度后, 最大落地浓度呈降低趋势, 但当排气筒高度高到一定程度时, 对落地浓度的影响明显减小。谷地有组织排放源排放高度不宜低于 70 m, 对于有毒有害物质排放量较大的化工企业有组织源排放高度不宜低于 130 m, 对于电厂烟囱等特大型有组织源排放高度宜采取 300 m 集中烟囱排放。

关键词: CALPUFF 模型; 复杂地形; 河谷; 排气筒高度

中图分类号: X823

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)06-0951-06

Determination of exhaust chimney height in complex terrain valley

ZHANG Youxian, ZHEN Tianke, YANG Zhiqiang

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: The relationship between chimney heights and hourly, daily and annual ground maximum concentration of exhaust gas was analyzed using meteorological data and terrain data of Kongtong Area on the basis of CALPUFF atmospheric dispersion model in complex terrain valley, which could provide a basis for choosing chimney heights in a complex terrain. The results indicated that the ground-level concentration of pollutant did not decrease with an increase of the chimney height and an opposite rule or fluctuations were observed within a certain range in valley, especially in a lower level. When the chimney height reached a certain level, the maximum ground-level concentration of pollutant was decreasing; however, when the chimney height reached a definite extent, the effect of the ground-level concentration of pollutant was firstly significantly reduced and then tended to be stable. The emission height for the valley organized discharge source should not be lower than 70 m. For toxic and harmful substances emissions from large chemical enterprises, emission height should not be lower than 130 m. For the power plant chimney and other large sources, the emission height should be over 300 m.

Key words: CALPUFF model; complex terrain; valley; chimney height

我国地域广阔, 地理条件复杂, 尤其是在西部地区, 山谷、河谷纵横交错, 地形复杂多样, 许多城市处于河谷之中。对于山谷或河谷, 由于两侧障碍物的阻挡, 山谷中风速比谷地外小得多, 而且山顶逆温层出现概率高, 大气扩散能力差, 大气环境容量小, 恶劣天气下很容易造成大气污染物集聚谷中, 形成“污染池”现象。刘宁微等^[1]通过改变地形高度的方式利用 MODEL-3 模型研究了地形对污染物浓度分布的影响, 结果表明地形的存在会导致山谷风速降低, 逆温增强, 造成山谷污染物的积累。

姜金华等^[2]采用中尺度大气动力模式与大气扩散模式相结合的方法, 对兰州市地形与污染分布关系进行了研究, 结果表明兰州市污染物分布与河谷走势一致。杨永春等^[3]的研究表明中国西部很多河谷城市都存在一定的大气污染问题, 并将河谷封闭的地形环境作为主要原因之一, 尤以兰州、西宁、重庆、贵阳、六盘山、西宁、乌鲁木齐和铜川等河谷城市大气污染最为严重。西部河谷城市的典型代表兰州市由于地处河谷盆地, 其西北东南分别有乌鞘岭、华家岭以及兴隆山、马衔山、冷龙岭等大山, 大风被

收稿日期: 2016-04-05

作者简介: 张有贤, 博士, 教授。E-mail: zhangyx@lzu.edu.cn

阻挡和屏蔽,这种特殊的闭塞地形导致兰州市逆温强,静风频率高,是导致兰州市严重的大气污染的重要原因^[4-6]。马明亮等^[7]采用 CALPUFF 模式对西宁地区的污染扩散规律研究表明,西宁市出现高浓度污染时,受地形影响,北川河谷和湟水河谷地形风速较小,逆温层增强。

复杂河谷地形成为了项目选址、总图布置、排气筒高度及其大气环境可行性论证必须考虑的关键和不利条件,在复杂地形区域的建设项目,应比简单平坦地形区域采取更为严格的污染治理措施或更高的排放高度^[8]。目前,许多工厂的废气治理后虽然达标排放,但是由于受地形、大气扩散条件和排气筒高度的限制,随着近些年的发展,许多城市污染物排放已经接近环境容量,这些污染物的排放成为了造成低空环境污染的重要污染源,也是局部形成雾霾的重要因素。由于地面污染浓度与烟囱高度的平方成反比,因此,通常采用增加烟囱高度的方法来减轻对局部地区的污染。但烟囱的造价大体上与烟囱高度的平方成正比,而且,当烟囱高度超过一定限值后,进一步增加烟囱高度对改善近地面环境质量收效甚微,因此烟囱并非越高越好。既要保证烟囱的合理高度,能满足国家和地方规定的排放标准,又要使它的排放造成的地面最大浓度不超过环境空气质量标准(或不超过允许的污染分担率),还应使它能在满足上述要求的前提下,投资最省^[9]。因此,在复杂地形区域确定合理的排气筒高度,使之既能满足国家和地方规定的排放标准,又能尽量减小污染物的落地浓度和减少投资就成为一项非常重要的工作。本研究收集了崆峒区气象资料和地形资料,以平凉市崆峒区河谷内某一虚拟的废气源为例,通过 CALPUFF 模型对排气筒高度变化进行对比研究,分析了废气源位于复杂河谷地形内其排气筒高度与最大地面小时、日均及年均落地浓度的关系,旨在为复杂河谷地形内选择高度适合的排气筒和解决复杂地形大气污染问题提供借鉴。

1 研究区概况和预测模型

1.1 研究区概况

平凉市崆峒区地处甘肃东部,六盘山东麓,泾河上游的陇东黄土高原腹部。地理位置位于东经 $106^{\circ}25' \sim 107^{\circ}21'$ 、北纬 $35^{\circ}12' \sim 35^{\circ}45'$ 之间。崆峒区属陇东黄土高原丘陵沟壑区,地形十分复杂,境内西北高峻多山,东南丘陵起伏,中部河谷密布,平均海拔为 1540 m,整体地形趋势为西高东低,两侧高,中间低。该区地形复杂多样,气象条件、逆

温层特征明显,为典型的河谷型工业城市。

崆峒区气候属于半干旱、半湿润季风型气候,冬季寒冷干燥多风,夏秋季湿润多雨,昼夜温差大,无霜期长。年最高气温 32.5°C ,最低气温 -15.4°C ,年平均气温 9.29°C ,年均降雨量 483.26 mm,日照 2418.54 h,全年主导风向为西北偏西风,平均风速 $1.94\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,以 F 类大气稳定度为主,混合层平均高度为 349 m。

1.2 模型介绍

CALPUFF(California Puff Model)是美国国家环境保护局(USEPA)推荐的适用于长距离输送和涉及复杂流动(如复杂地形、海岸、小静风、熏烟及环流情形等)近场应用的导则模式^[10],也是我国《环境影响评价技术导则:大气环境》^[11]推荐的 3 个进一步预测模式之一,适用于大气环境一、二级评价工作的进一步预测工作,可以基于评价范围的气象特征及地形特征,模拟单个或多个污染源排放的污染物在不同时限内的浓度分布,可用于复杂地形条件下的大气扩散模拟。该模型主体包括 calmet 风场计算、calpuff 计算软件和 calpost 后处理 3 个部分。由于该模型对气象、地形、降雨等输入数据的格式要求比较严格,为了将常规数据处理成满足 calpuff 要求的格式,CALPUFF 模型包括了一系列前处理程序^[12]。在采用 CALPUFF 进行扩散模拟的过程中,经前处理程序预处理后的地面站气象数据、探空气象数据、降雨数据(可选)、海岸线数据、地面高程数据和土地利用数据等由 calmet 模块处理生成三维风场,然后 CALPUFF 计算模块利用三维风场数据和污染源数据进行浓度模拟计算,计算过程中考虑了污染物的化学转化,如光化学效应,同时也考虑了污染物的湿沉降及干沉降、熏烟效应、水面输送、垂直风切效应以及复杂地形引起的一系列效应。CALPOST 对 CALPUFF 模块生成的数据进行处理,筛选出最大小时浓度、日均浓度等浓度指标,并绘制浓度分布图。

本研究区域位于平凉市崆峒区河谷内,在河谷内会可能涉及到污染物河谷沉积效应、堵塞效应、污染物边坡流动效应、河谷逆温层等复杂气象条件。

《环境影响评价技术导则:大气环境》中推荐的 AERMOD 模型和 ADMS 模型存在无法根据地形条件对风场进行调整,同一高度不同位置气象条件完全相同,而且不适用于小风条件,不能真实反映河谷内污染物的扩散情况的缺点。而 CALPUFF 模型非稳态烟团扩散模式由于其在气象预处理时考虑了复杂地形对气象场的影响以及风向、风速随高度的

变化, 通过诊断模式处理风场后形成了最终的三维网格风流场, 在小风条件下也适用, 可更加真实的反映出河谷内气象场分布以及地形条件、气象对大气污染物迁扩散的综合影响。同时, 本研究范围也超出了 AERMOD 模型和 ADMS 模型不大于 50 km 的适用范围。而 CALPUFF 模型适用范围可以达到几百公里, 符合本研究的需要。

近年来, 很多模型研究者在不同地域对 CALPUFF 的预测结果进行了验证, 结果表明, CALPUFF 模型给出的浓度分布能较好地反映污染源分布和气象场时空变化对污染物迁移和扩散的影响, 预测结果和实际情况的符合程度较高^[13-14]。杜世明^[15]在济南地区 50 km 范围内对 CALPUFF、AERMOD 预测结果与实际监测结果进行了对比, 结果表明 CALPUFF 较 AERMOD 预测结果更接近实际监测值。

1.3 参数设置

利用 CALPUFF 扩散模型, 模拟范围为 60 km × 30 km 矩形区域, 模拟面积 1800 km², 基本包括了整个崆峒区管辖范围, 模拟时间为 2010 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日, 废气源扩散模拟过程步长设置为 60 min。CALPUFF 模式垂直层数设为 0、20、50、200、500、1500、2200、3300 和 4000 m, 网格间距设置 1 km × 1 km, 东西向 60 个格点, 南北向 30 个格点。



图 1 废气源在河谷中的位置

Figure 1 The position of gas pollution in valley

为了得到河谷地形内污染物排放高度与最大地面小时、日均及年均落地浓度的关系, 并考虑到该河谷内最大污染物源强为甲醇, 因此在河谷中心设置一个虚拟的甲醇排放废气源, 其位置见图 1。废气源强为 12.7 g·s⁻¹, 烟气流速为 10.4 m·s⁻¹, 烟囱内径为 3.3 m, 烟气温度为 20℃。为了更加全面的对比排气筒高度与落地浓度的关系, 本次研究将排气筒高度取值分别为: 15、20、25、30、40、50、60、70、90、110、130、150、170、190、210、230、250、270、290、310、330、350、370、390 和 410 m, 以

此来研究河谷内排气筒高度与最大落地浓度的关系, 在保证尽量减小污染物的落地浓度和减少投资的前提下, 为复杂河谷地形内选择高度适合的排气筒提供借鉴。

1.4 资料来源

1.4.1 气象数据 地面气象数据采用平凉市气象局提供的 2010 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日连续 3 年的逐日、逐时的地面风速、风向、干球温度和逐日定时 (每日 8:00、14:00 和 20:00) 的总云及低云数据。高空气象数据采用 NOAA/ESRL 探空气象数据网站下载的平凉气象局站点的高空数据, 包括同地面气象数据相对应 3 年的逐日定时 (0:00 和 12:00)、每时 4 层的气压、离地高度、干球温度、露点温度、风速和风向数据。

1.4.2 地形资料 从 CALPUFF 官方网站 <http://www.src.com> 下载的平凉市崆峒区范围的 90 m 分辨率的地形高程数据。

1.4.3 土地利用数据 从 CALPUFF 官方网站 <http://www.src.com> 下载, 分辨率为 1km, 包含反照率、地表粗糙度、波恩比、植被叶面积指数、土壤热通量参数等信息数据。

1.4.4 海岸线数据 从 CALPUFF 官方网站 <http://www.src.com> 下载的 CALPUFF 模型用于确定大气扩散边界层的相关数据。

2 结果与讨论

2.1 气象特征

2.1.1 逆温特征 如果在大气某一高度出现了逆温层, 那么逆温层高度内的大气就处于稳定状态, 于是从地面开始到逆温层顶部就会存在一个不连续的界面, 该界面以下的大气层高度称为混合层高度^[16]。逆温不利于大气污染物的扩散, 污染物的扩散实际上被限制在地面和逆温层之间^[17]。

根据 3 年的地面常规和探空气象资料, 利用 CALLPUF 模型数值模拟的方法计算出大气边界层的温廓线, 从而得到了混合层平均高度及逆温层的出现概率, 见表 1。

由表 1 可以看出, 研究区夜间存在逆温现象, 而且出现频率较高, 最大的时段在 20:00 至次日早晨 6:00, 此期间平均混合层高度为 349 m (相对谷底), 河谷上空逆温层与河谷两侧高地形成一个封闭扩散空间, 大大限制了河谷内污染物向外的扩散。

2.1.2 稳定度特征 A~F 所代表的稳定度级别中, A 代表为强不稳定, B 代表不稳定, C 代表弱不稳定, D 为中性, E 为较稳定, F 代表稳定。利用

CALPUFF 模型对地面气象数据进行分析, 得到河谷内大气稳定度分布情况。根据表 2 可知, 全年中, 中性以上不稳定天气比例仅为 22.2%, 中性天气为

39.71%, 较稳定及稳定天气比例达到 38.7%, 中性、较稳定、稳定天气比例高达 77.8%。可见, 河谷内大气较为稳定, 大气扩散能力较差。

表 1 混合层高度小时变化及逆温出现概率

Table 1 The change of mixed layer height along with hour changes and the probability of inversion occurrence

项目 Item	时间 Time							
	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00
混合层平均高/m	338	324	321	324	333	379	360	415
逆温出现概率/%	63.41	65.78	66.61	65.97	64.51	53.19	57.85	47.81

项目 Item	时间 Time							
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
混合层平均高/m	555	648	911	1055	1328	1408	1453	1366
逆温出现概率/%	24.82	12.32	0	0	0	0	0	0

项目 Item	时间 Time							
	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
混合层平均高/m	1282	1132	840	522	386	347	353	377
逆温出现概率/%	0	1.37	17.24	42.79	57.03	60.77	60.22	55.02

注: 混合层的平均高, average height of the mixed layer; 逆温出现概率, the probability of inversion occurrence.

表 2 稳定度分布频率统计

Table 2 Stability distribution frequency

月份 Month	A	B	B-C	C	C-D	D	E	F
1月 Jan.	0.00	12.50	2.46	8.78	0.13	26.34	23.07	26.70
2月 Feb.	0.00	10.54	2.70	8.04	0.15	39.95	19.31	19.31
3月 Mar.	0.04	11.60	3.36	7.93	0.67	44.44	14.83	17.11
4月 Apr.	0.28	10.00	3.10	8.38	0.42	49.21	14.35	14.26
5月 May	0.63	12.32	3.00	8.74	0.22	47.13	12.90	15.05
6月 Jun.	0.74	14.58	2.27	9.77	0.19	41.76	16.06	14.63
7月 Jul.	1.08	11.87	2.24	7.21	0.13	50.81	12.14	14.52
8月 Aug.	0.81	12.05	3.05	5.82	0.04	50.48	13.63	14.11
9月 Sep.	0.14	8.75	2.64	5.32	0.05	59.44	11.34	12.31
10月 Oct.	0.00	10.71	3.32	5.65	0.40	45.70	10.93	23.30
11月 Nov.	0.00	11.81	2.78	6.57	0.28	33.56	13.15	31.85
12月 Dec.	0.00	13.26	1.57	5.60	0.31	28.68	16.05	34.53
全年 Annual	0.31	11.68	2.71	7.31	0.25	39.71	17.37	20.66
春季 Spring	0.32	11.32	3.16	8.35	0.44	46.91	14.02	15.49
夏季 Summer	0.88	12.82	2.52	7.58	0.12	48.09	13.58	14.42
秋季 Autumn	0.05	10.42	2.92	5.85	0.24	46.23	11.80	22.50
冬季 Winter	0.00	12.15	2.23	7.46	0.20	32.44	19.14	26.38

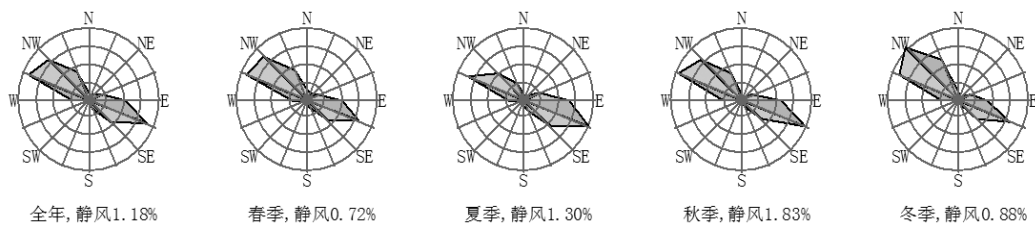


图 2 风频玫瑰图

Figure 2 Rose diagram of wind frequency

2.1.3 地面风场特征 利用 CALPUFF 模型对地面气象数据的风向、风速等进行统计, 绘制出风玫瑰图。根据风频玫瑰图 (图 2) 可知, 研究区全年主导风向为西北偏西风 (主导风向角为 16 方位角

中 WNW 与 NW 两个风向角的范围), 风频为 34.24% (WNW 风频为 18.13%, NW 风频为 16.11%)。次主导风向为东南偏东风 (E、SE 两个风向角), 风频为 28%。各季主导风向中, 只有夏

季主导风向为东南偏东风 (ESE), 春、秋、冬主导风向均为西北偏西风 (WNW)。可见研究区主导风

向及次主导风向基本与河谷走向一致, 而垂直河谷走向的东北及西南方向风频较小。

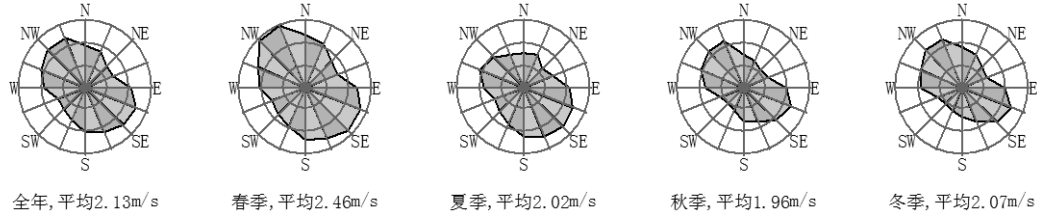


图 3 风速玫瑰图

Figure 3 Rose diagram of wind speed

风速玫瑰图 (图 3) 给出了研究区 2010-2012 年全年平均风速 $2.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 春季 $2.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 夏季 $2.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 秋季 $1.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 冬季 $2.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。全年各季风速相差不大, 风速玫瑰图形状基本与河谷走向一致, 即平行河谷方向的风速较大, 垂直河谷走向方向的风速较小。

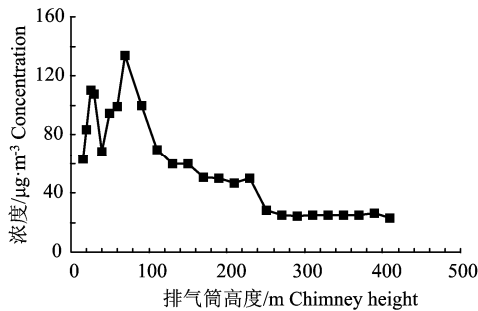


图 4 排气筒高度与最大地面小时浓度的关系

Figure 4 The relationship between chimney heights and the hourly ground maximum concentration

2.2 模拟结果与讨论

在崆峒区气象、地形条件下, 以河谷内虚拟的甲醇废气排放源为污染源, 利用 CALPUFF 模型对区域内的甲醇最大落地浓度进行预测, 在河谷废气源排气筒高度在 15~410 m 变化过程中, 排气筒高度和各落地浓度的关系见图 4~6。

排气筒高度在 90 m 内时, 随着高度增加, 最大地面小时浓度呈现出高浓度波动, 出现了 2 个拐点, 其中高度在 15~25 m 和 40~70 m 时呈上升趋势, 高度在 25~40 m 和 70~90 m 时呈下降趋势 (图 4)。排气筒高度高于 70 m 后, 随着排气筒高度增加, 最大地面小时落地浓度基本呈下降趋势, 当排气筒高度到达 270 m 后, 降低趋势明显减小, 逐渐趋于平稳。

最大地面年均浓度出现了一个拐点, 当排气筒高度 15~20 m 时呈上升趋势。排气筒高度高于 20 m 后, 随着排气筒高度的增加, 最大地面年均落地浓度基本呈下降趋势, 当排气筒高度到达 300 m 后, 降低趋势明显减小, 逐渐趋于平稳 (图 6)。

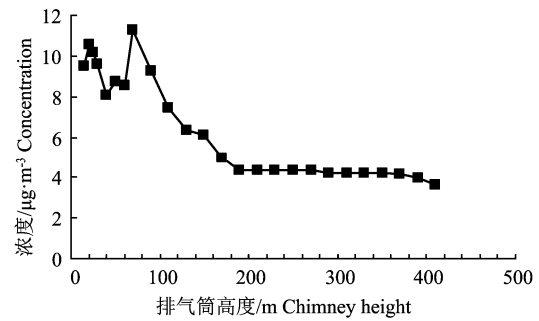


图 5 排气筒高度与最大地面日均浓度的关系

Figure 5 The relationship between chimney heights and the daily ground maximum concentration

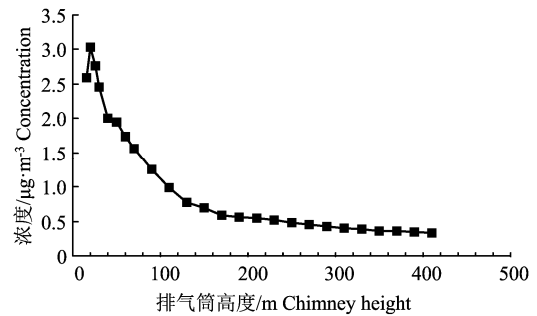


图 6 排气筒高度与最大地面年均浓度的关系

Figure 6 The relationship between chimney heights and the annual ground maximum concentration

随着排气筒高度的变化, 最大地面日均浓度与最大地面小时浓度走向基本一致, 当排气筒高度在 90 m 内时, 随着高度的增加, 最大地面日均浓度呈现出高浓度波动, 出现了 2 个拐点, 其中高度在 15~20 m 和 40~70 m 时呈上升趋势, 高度在 20~40 m 和 70~90 m 时呈下降趋势 (图 5)。排气筒高度高于 70 m 后, 随着排气筒高度的增加, 最大地面日均落地浓度基本呈下降趋势, 当排气筒高度到达 200 m 后, 降低趋势明显减小, 逐渐趋于平稳。

从图 6 可以看出, 不论是小时浓度、日均浓度还是年均浓度, 当排气筒高度大于 130 m 以后, 污染物落地浓度减少不明显, 随着排气筒高度增加, 当到达 300 m 后时, 污染物落地浓度逐渐趋于平稳。

因此根据排气筒高度与落地浓度的关系,并综合考虑经济因素,对于谷地有组织排放较小的污染源,其排放高度不宜低于70 m;对于有毒有害物质且排放量较大的化工企业有组织源,排放高度不宜低于130 m;对于电厂等特大型有组织源,宜采取300 m集中烟囱进行排放,以尽量节省投资。

由于河谷中存在两侧障碍物的阻挡,导致其具有独特的风场和湍流特征,河谷中的风速一般比谷地外小,谷内的气流常被截滞于下部,而且河谷逆温层厚且发生频率较高。对于山谷中低矮烟囱或无组织排放源,其扩散过程中撞到山坡时,会形成山体反射,从而出现山脚局部地区污染物浓度过高的现象^[18]。另外,周围山体由于烟流的撞山效应出现了污染物高浓度区,这与赵秀勇等^[19]利用AERMOD预测某电厂烟囱对周围大气环境的影响研究结果一致。

河谷中污染物由于垂直扩散受阻,稀释扩散速率受到抑制而积聚谷底,造成烟气扩散慢、停留时间长和局地浓度高。同时,过山气流尾流可能会造成烟气下沉,影响烟气扩散,导致烟气提早落地,污染物落地浓度偏高。对于河谷中低矮排气筒,其扩散过程中撞到山体时,形成下洗作用,导致局部地区污染物浓度过高,出现了上述在排气筒高度较低时随着其高度增加,落地浓度呈现增长和上下波动现象。当排气筒高度到达一定高度后,便基本不受谷地地形的影响,最大落地浓度开始呈降低趋势。

3 结论

复杂河谷地形内排气筒高度的选择需要考虑多方面的因素,不仅要满足国家环境质量标准对大气污染物落地浓度的要求,还要充分考虑地形和气象条件的影响。通过对河谷内不同排气筒高度与最大落地浓度关系的研究,得出了如下结论。

(1) 河谷内主导风向基本与河谷走向一致,而垂直河谷走向的风向风频较小。河谷内大气较为稳定,大气扩散能力较差,加上夜间存在逆温现象,而且出现频率较高,这都大大限制了河谷内污染物向外的扩散。

(2) 复杂河谷地形内排气筒高度在某些范围内,尤其是在较低的高度段,随排气筒高度增加污染物落地浓度并不会减少,反而可能会出现相反的规律或者上下波动。因此,河谷内工业企业在设计排气筒高度时,需要在当地地形、气象条件下对污染源排气筒高度与污染物落地浓度规律进行研究,

并据此确定合适的排气筒高度。

(3) 排气筒高度到达一定高度以后,最大落地浓度呈降低趋势,但当排气筒高度高到一定程度时,对落地浓度的影响明显减小,基本趋于平稳。

(4) 根据排气筒高度与落地浓度的关系,并综合考虑经济因素,谷地有组织排放较小的污染源,其排放高度不宜低于70 m;有毒有害物质且排放量较大的化工企业有组织源,排放高度不宜低于130 m;考虑到烟囱的造价大体上与烟囱高度的平方成正比,对于电厂等特大型有组织源排放高度宜采取300 m集中烟囱排放,尽量节省投资。

参考文献:

- [1] 刘宁微,王扬锋,马雁军,等.复杂地形对城市空气污染影响的数值试验研究[J].地理科学,2008,28(3):396-401.
- [2] 姜金华,彭新东.复杂地形城市冬季大气污染的数值模拟研究[J].高原气象,2002,21(1):1-7.
- [3] 杨永春,刘志国.中国西部河谷型城市环境问题及其成因研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(2):80-85.
- [4] 祁斌,王剑锋,王华,等.兰州市大气污染的特点及主要原因分析[J].陕西气象,2001(6):18-20.
- [5] 马敏劲,郭世奇,王式功.近11年兰州空气污染特征及其边界层结构影响的分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(6):69-73.
- [6] 杨永春,渠涛.兰州城市环境污染效应研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(3):48-53.
- [7] 马明亮,申红艳,张加昆,等.西宁地区污染气象条件的数值模拟研究[J].高原气象,2013,32(6):1765-1773.
- [8] 王栋成,王勃,王磊,等.复杂地形大气扩散模式在环境影响评价中的应用[J].环境工程,2010,28(6):89-93.
- [9] 李爱贞.大气环境影响评价导论[M].北京:海洋出版社,1997:64-66.
- [10] EPA. Guideline on air quality models, 40 CFR part 51, Appendix W[R]. 2005.
- [11] 环境保护部.HJ2.2-2008 环境影响评价技术导则:大气环境[S].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [12] 伯鑫,丁峰,徐鹤,等.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述[J].环境监测管理与技术,2009,21(3):9-13.
- [13] 朱好,张宏升,蔡旭晖,等. CALPUFF 在复杂地形条件下的近场大气扩散模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2013,49(3):452-462.
- [14] AMES M R, ZEMBA S G, YAMARTINO R J, et al. Comments on: using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 2263-2265.
- [15] 杜世明. AERMOD 和 CALPUFF 模型用于济南地区空气污染模拟效果的对比研究[D].济南:山东师范大学,2013.
- [16] 程水源,郝瑞霞.石家庄市垂直大气温度层结及混合层高度的研究[J].环境科学丛刊,1990(1):54-57.
- [17] 张继红,徐盛荣.逆温天气对大气污染影响分析[J].黑龙江环境通报,2008,32(2):24-25.
- [18] 李宗恺.空气污染气象学原理及应用[M].北京:气象出版社,1985.
- [19] 赵秀勇,尤一安,朱庚富,等. AERMOD 在火电大气环评中出现山地极端异常值的分析[J].电力科技与环保,2011,27(2):1-3.