

基于高斯烟羽模型的NO₂污染物扩散规律模拟分析

——以石家庄市为例

许东海¹ 米彦香^{2*} 龙丽民¹ 孙士岭¹

1 河北师范大学商学院 2 河北师范大学汇华学院

DOI:10.12238/eep.v8i3.2620

[摘要] 治理京津冀地区大范围的雾霾已成为政府部门和社会公众高度关注的社会问题。运用高斯烟羽模型构建NO₂污染物的扩散模型,选取受NO₂污染影响较为严重的河北省石家庄市作为案例,研究分析NO₂的扩散规律、扩散范围及浓度变化。首先,介绍高斯烟羽模型的使用条件与各参数设置,分析影响NO₂扩散的相关因素;其次,将污染源分类为点污染源(烟囱)和线污染源(汽车尾气),并结合石家庄市一年四季的风速、风向、大气稳定度等气象条件,在Stata13.1软件平台下仿真出其扩散的污染区域和浓度的变化。研究结论对政府环境规制的设计实施以及有效控制和降低环境污染具有一定的现实指导意义。

[关键词] 高斯烟羽模型; 城市大气污染; 模拟; 石家庄市

中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Simulation Analysis of NO₂ Pollutant Diffusion Law Based on Gaussian Plume Model: A Case Study of Shijiazhuang CityDonghai Xu¹ Yanxiang Mi^{2*} Limin Long¹ Shiling Sun¹

1 Business School, Hebei Normal University 2 Huihua College, Hebei Normal University

[Abstract] Controlling the large-scale haze in Beijing-Tianjin-Hebei Region has become a social issue of great attention to government departments and the public. This paper establishes the NO₂ diffusion model based on the Gauss plume model, by selecting Shijiazhuang city of Hebei Province as a case which is influenced seriously by NO₂ pollution, and analyses the diffusion law, diffusion range and concentration change of NO₂. Firstly, the conditions and parameters of the Gauss plume model are introduced, and the related factors affecting the NO₂ diffusion are analyzed. Secondly, the pollution sources are classified into point pollution sources (chimneys) and line pollution sources (automobile exhaust), and combines the yearly weather conditions of Shijiazhuang such as wind speed, wind direction, atmosphere stability etc. Then, simulating the diffusion area and concentration change using Stata13.1 software platform. The conclusion of the study has certain practical significance for the design and implementation of government environmental regulation and effective control and reduction of environmental pollution.

[Key words] NO₂; The Gauss Plume Model; Urban Air Pollution; Simulation; Case; Shijiazhuang City

引言

京津冀地区作为全国主要的重化工业基地,区域性大气污染问题成为各级政府和社会公众关注的焦点。NO₂作为二次颗粒物及光化学污染物的重要前体物,对人体健康造成严重威胁,导致疾病的发生,对环境所带来的影响也是多种多样。河北省NO₂污染物主要来源于工业建设、燃料燃烧和尾气排放。根据国家统计局环境统计数据,2023年河北省二氧化硫、氮氧化物和颗粒物排放量分别达14.25、100.29和25.35万吨,分别居全国第2、第

3位和5位。鉴于以上,分析河北省地区NO₂在时空尺度的污染扩散规律和污染物浓度变化情况,对于保护公众健康、防治大气污染、提高空气质量具有重要现实意义。

在国内外有关污染物的大气扩散模型研究中,从20世纪30年代开始学者们根据不同的扩散理论形成上百种大气扩散模型^[1]。从大气扩散模型的分类以及发展阶段入手,论述了拉格朗日模型、欧拉扩散模型、箱模型、高斯烟羽模型和烟团的原理和规律,并分析了大气扩散模型的优缺点^[2]。许多学者以标准的

表1 横向扩散参数和垂直扩散参数幂函数取值表(取样时间: 30分)

扩散参数	大气稳定度等级	a_1/a_2	γ_1/γ_2	下风向距离/m
$\sigma_y = \gamma_1 x^{a_1}$	A	0.901074	0.425809	0~1000
		0.850934	0.602052	>1000
	B	0.91437	0.281846	0~1000
		0.865014	0.396353	>1000
	B~C	0.919325	0.2295	0~1000
		0.875086	0.314238	>1000
	C	0.924279	0.177154	0~1000
		0.885157	0.232123	>1000
	C~D	0.926849	0.14394	0~1000
		0.88694	0.189396	>1000
	D	0.929418	0.110726	0~1000
		0.888723	0.146669	0~1000
	D~E	0.925118	0.098563	0~1000
		0.892794	0.101947	>1000
	E	0.920818	0.0864	0~1000
		0.896864	0.101947	>1000
	F	0.929418	0.055363	0~1000
		0.888723	0.073335	>1000
$\sigma_z = \gamma_1 x^{a_1}$	A	1.12154	0.07999	0~300
		1.5236	0.008548	300~500
		2.10881	0.000212	>500
	B	0.964435	0.12719	0~500
		1.09356	0.057025	>500
	B~C	0.941015	0.114682	0~500
		1.0077	0.075718	>500
	C	0.917595	0.106803	>0
	C~D	0.838628	0.126152	0~2000
		0.75641	0.235667	2000~10000
		0.815575	0.136659	>10000
	D	0.826212	0.104634	1~1000
		0.632023	0.400167	1000~10000
		0.55536	0.810763	>10000
	D~E	0.776864	0.111771	0~2000
		0.57234	0.528992	2000~1000
		0.499149	1.0381	>10000
	E	0.78837	0.092753	0~1000
0.565188		0.433384	1000~10000	
0.414743		1.73241	1000~10000	
F	0.7884	0.062077	0~1000	
	0.525969	0.370015	1000~10000	
	0.322659	2.40691	1000~10000	

高斯扩散模型为基础,考虑多种排放源、泄露方式和扩散条件等,模拟得到污染物气体扩散规律、浓度分布和泄露范围等信息^[3-8]。对京津冀地区NO₂污染进行研究的学者也较多^[9-12]。

但学者们均以基于臭氧监测仪OMI数据反演或地面监测得到京津冀地区大气NO₂污染特征,而少有基于大气扩散模型对NO₂污染源进行污染物扩散规律和浓度分布的研究。为解决这一问题,本文首先运用高斯烟羽模型构建NO₂污染物的扩散模型,然后选取受NO₂影响较为严重的河北省地区作为分析案例,研究分析NO₂的扩散规律及其扩散的污染区域范围。研究结论对分析NO₂大气扩散规律,进而完善大气污染防治工作具有一定的现实指导意义。

1 NO₂污染物大气扩散的高斯模型

早在20世纪五、六十年代高斯模型就已被应用于考察扩散质的浓度分布,分为烟羽模型(Plume Model)和烟团模型(Puff Model)两类。其中,烟羽模型适用于连续源的扩散,烟团模型适用于短时间泄漏的扩散。烟羽模型和烟团模型用正态分布来表示排放源下风向的浓度。虽然考虑了对流和扩散现象,但并未考虑化学变化和重力影响,所以只适用于轻气体或与空气密度相差不多的气体的扩散。虽然高斯模型存在许多缺点,但目前美国环境保护协会(EPA)所采用的许多标准仍以高斯模型为基础而制定,并在广泛应用着。NO₂的浓度分布,通常在排放源附近很高,伴随着对流扩散等,浓度向排放源周边逐渐降低。但是,NO₂污染物的时空分布及其浓度与污染物排放源的分布、排放量及地形、地貌、气象等条件密切相关。

1.1 有风点源正态高斯烟羽模式

有风时(距离地面10m高处的平均风速大于等于1.5m/s),设地面为全反射体,则有:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \times \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

C(x, y, z)为距离排放源下风向某点(x, y, z)处的空气污染物浓度(kg/m³); x为下风向距离(m); y为横风向距离(m); z为距地面高度(m); Q: 为污染物源强,即释放率(kg/s); u: 风速(m/s); σ_y: 横向扩散参数(m), σ_z: 垂直方向扩散参数(m); H_e: 排放源有效高度(m); 因为要预测的是污染物在地面的浓度,根据式(1),令z=0,可得:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \times \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

σ_y和σ_z是距离x的函数,随着x的增大而增大,通常可表示为如式(3)所示幂函数形式。其数值见表1。

$$\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}; \quad \sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2} \quad (3)$$

此外,污染物沿下风轴线方向的地面浓度,根据式(1),令y=0, z=0,可得:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4)$$

由于式(4)右侧第一项随着x的增大而减小,第二项随着x的增大而增大,两项共同作用的结果,必然在某一距离X_{max}出现浓度最大值C_{max}。式(4)对x求导,并令其等于零,即可求得。

$$C_{\max} = \frac{2Q}{e\pi u H_e^2 P_1} \quad (5)$$

$$X_{\max} = \left(\frac{H_e}{\gamma_2}\right)^{\frac{1}{\alpha_2}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{-\left(\frac{1}{2\alpha_2}\right)} \quad (6)$$

其中,

$$P_1 = \frac{2\gamma_1\gamma_2^{\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}}{\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)} \cdot H_e^{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}} \quad (7)$$

从式(6)和(7)可以看出,在源强和气象条件确定的条件下,污染源的最大落地浓度随着有效高度H_e的增加而增加,其对应的出现位置随有效高度H_e的增加而延长。

1.2 小风和静风点源扩散模式

气象上一般将风速u ≤ 0.5m/s的情况称为静风,风速介于0.5~1.5m/s的情况称为小风。在静风和小风情况下,由于平均风速太小,主导风向不确定,因此不能应用高斯烟羽模型来预测这种情况下的大气环境质量。

以排放源地面位置为坐标原点,下风方向为X轴,地面任一点(x, y)处的污染物浓度计算公式如式(8)所示。

$$C(x, y, 0) = \frac{2Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \gamma_{01} \eta^2} \cdot G \quad (8)$$

$$\eta^2 = x^2 + y^2 + \frac{\gamma_{01}^2}{\gamma_{02}^2} \cdot H_e^2 \quad (9)$$

$$G = \exp\left(-\frac{u^2}{2\gamma_{01}^2}\right) \left[1 + \sqrt{2\pi} \exp\left(\frac{S^2}{2}\right) s\phi(s)\right] \quad (10)$$

$$\phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (11)$$

$$S = \frac{ux}{\gamma_{01} \eta} \quad (12)$$

其中, γ_{01}, γ_{02} : 分别是横向和垂直方向扩散系数的回归系数, 其数值见表2。 $\Phi(s)$: 正态分布函数; t : 扩散时间(s)。

表2 小风和静风扩散参数的回归系数表

大气稳定度等级	γ_{01}		γ_{02}	
	$u < 0.5m/s$	$0.5m/s \leq u \leq 1.5m/s$	$u < 0.5m/s$	$0.5m/s \leq u \leq 1.5m/s$
A	0.93	0.76	1.57	1.57
B	0.76	0.56	0.47	0.47
C	0.55	0.35	0.21	0.21
D	0.47	0.27	0.12	0.12
E	0.44	0.24	0.07	0.07
F	0.44	0.24	0.05	0.05

烟羽模型和烟团模型的公式中包括了根据颗粒物直径考虑到颗粒物沉积的公式。经过尝试考虑沉积的公式, 发现其模拟计算结果与不考虑沉积的计算结果并没有太大差异。因此, 在计算 NO_2 污染物浓度时, 并没有考虑沉积作用。

2 NO_2 污染物扩散模型的模拟分析: 以河北省为例

使用上述高斯烟羽模型和烟团模型的修正公式并应用河北省各地市的气象条件进行模拟分析。因为烟羽模型和烟团模型假定排放量和浓度之间为线性关系, 所以, 可通过模拟得到的浓度除以排放量来计算“单位量 NO_2 污染物排放引起 NO_2 污染物浓度的增加量” ($\Delta C/\Delta E$)。具体计算步骤如下所示。

首先, 计算太阳高度角 H_a , 太阳高度角的计算公式如式(13)所示。

$$H_a = \arcsin(\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos T_0) \quad (13)$$

其中, H_a 是太阳高度角, ϕ 是当地纬度, δ 是太阳赤纬, T_0 是中太阳时角。计算公式如式(14)所示。

$$T_0 = (TT - 12) \times 15^\circ = (CT + LC + EQ - 12) \times 15^\circ \quad (14)$$

其中, TT 为真太阳时; CT 为地方标准时(时区时), 中国以 $120^\circ E$ 地方时为准, 称为北京时; LC 是经度订正 ($4min/度$), 如果地方子午圈在标准子午圈的东边, 则 LC 为正, 反之为负; EQ 为时差。时差 EQ 和太阳赤纬 δ 可分别查询表获得。

其次, 根据云量和太阳高度角查询表3确定太阳辐射等级;

再次, 根据地面风速和太阳辐射等级查询表4确定大气稳定度等级。最后, 按照有风点源正态高斯烟羽模式的式(2)和小风和静风点源扩散模式的式(8)分别进行模拟, 模拟计算的范围、排放量, 以及浓度的计算高度如表5所示。

表3 太阳辐射等级

云量(1/10)	太阳高度角				
	夜间	$H_a \leq 15^\circ$	$15^\circ < H_a \leq 35^\circ$	$35^\circ < H_a \leq 65^\circ$	$H_a > 65^\circ$
$\leq 4 (\leq 4)$	-2	-1	1	2	3
$5 \sim 7 (\leq 4)$	-1	0	1	2	3
$\geq 8 (\leq 4)$	-1	0	0	1	1
$> 5 (5 \sim 7)$	0	0	0	0	1
$\geq 8 (\geq 8)$	0	0	0	0	0

表4 大气稳定度等级

地面风速(m/s)	太阳辐射等级					
	3	2	1	0	-1	-2
≤ 1.9	A	A-B	B	D	E	F
$2 \sim 2.9$	A-B	B	C	D	E	F
$3 \sim 4.9$	B	B-C	C	D	D	E
$5 \sim 5.9$	C	C-D	D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D	D

表5 “单位量 NO_2 污染物排放所引起 NO_2 污染物浓度的增加量” ($\Delta C/\Delta E$) 的计算条件

条件	内容
计算范围	计算到距排放源 20 公里(半径为 10 公里)。
排放量	关于一次污染物的排放速度, 以 2016 年《河北省环境状况公报》和《河北省机动车污染防治公报》的相关 NO_2 的年排放数据估算日均值(假设烟囱和汽车排放量的日变化是固定的), 烟囱排放高度固定在 15m 和汽车排放高度为 1m 高处 ^② 。
浓度的计算高度	考虑到人类呼吸的高度, 固定在地面以上 1.5 米处。

最后, 虽然 $\Delta C/\Delta E$ 涵盖了年平均浓度, 但因为在烟羽模型和烟团模型中, 气象条件(风速等)和浓度之间是非线性关系, 所以只模拟年平均气象条件的一种情景, 可能无法准确模拟浓度变化。因此, 本研究首先将河北省各地市的风向、风速和大气稳定度分类为若干种模式, 并对每个模式的 $\Delta C/\Delta E$ 进行模拟计算。接下来, 以每年每种模式出现的频率为权重, 对 $\Delta C/\Delta E$ 进行加权计算, 得出年平均 $\Delta C/\Delta E$, 计算思路如图1所示。所使用风向、风速等数据来源于国家气象科学数据共享服务平台和国家地球系统科学数据共享平台^②。

使用上述方法以河北省内张家口、承德、秦皇岛、唐山、廊坊、保定、石家庄、沧州、邢台和衡水等10个地市为对象, 分别模拟分析了 NO_2 污染物排放源周围的浓度分布。其中, 依据石家庄的气象条件计算得到的烟囱和汽车排放源的模拟结果, 如图2和图3所示。

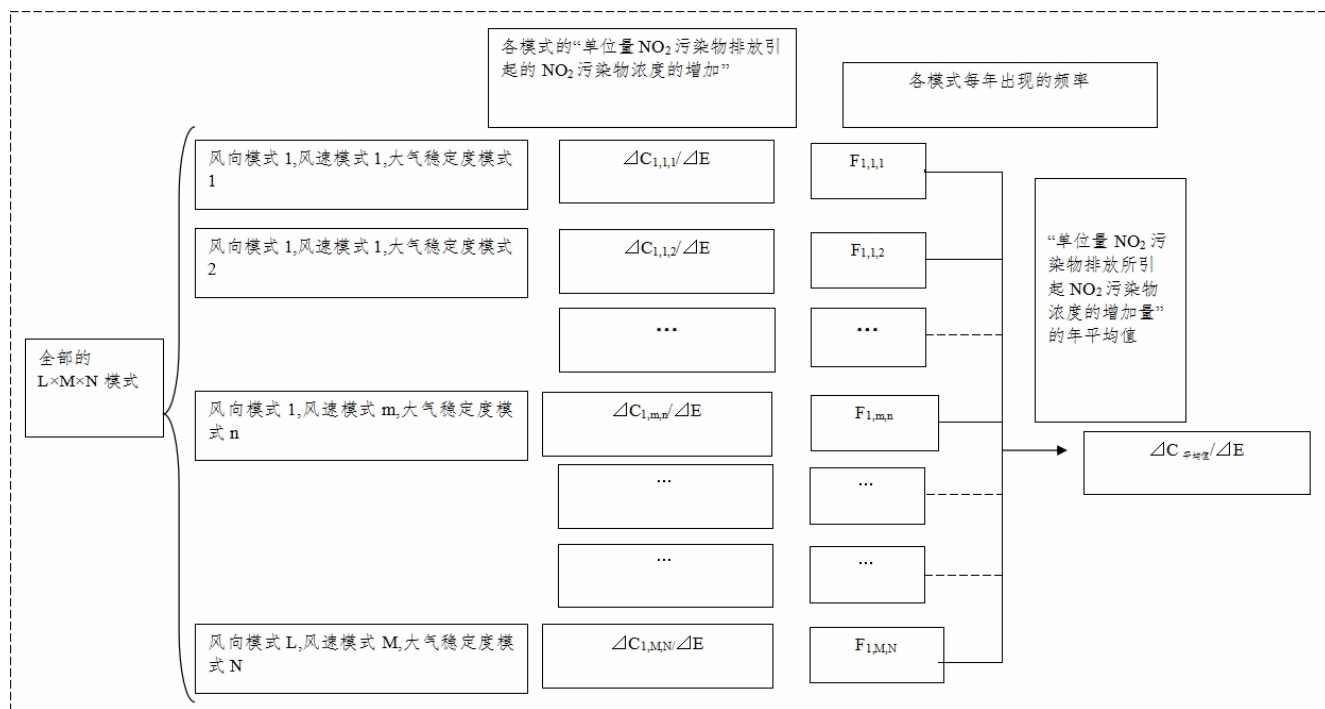


图1 年平均浓度相关的“单位量NO2污染物排放引起NO2污染物浓度的增加量” (ΔC/ΔE)的计算步骤

风向、风速和大气稳定度分别可以分为总L模式、总M模式和总N模式

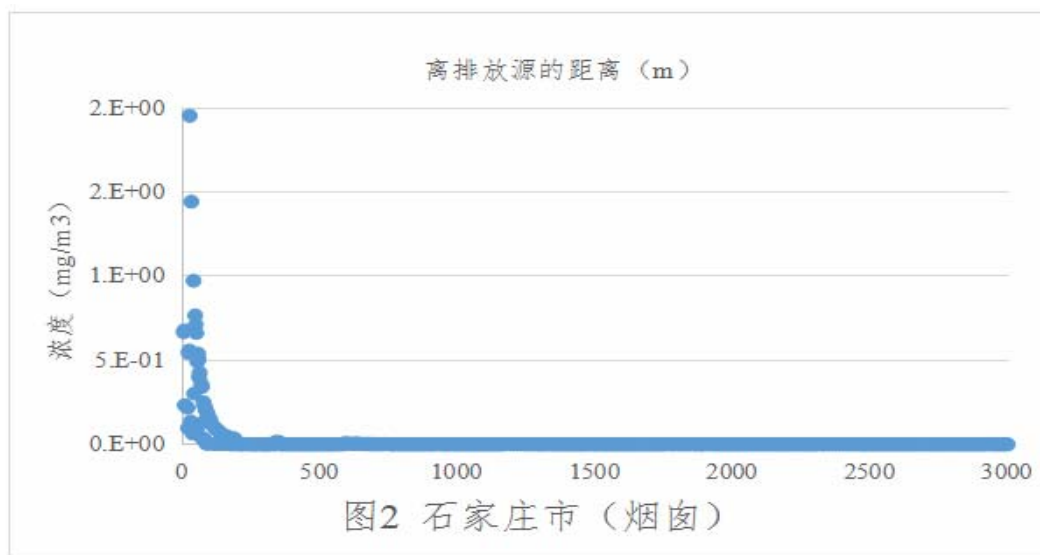


图2 石家庄市 (烟囱)

如图所示, 烟囱和汽车尾气排放的模拟结果显示, 在各地市都具有在排放源附近NO₂污染物浓度最高, 并随着距离增加浓度逐渐降低这一特征, 根据距排放源的距离, 可以从烟羽模型和烟团模型中得到浓度的模拟分布。

为实现计算“由单位量NO₂污染物排放引起NO₂污染物浓度的增加量”(ΔC/ΔE), 需要对表5中所阐述的20km(半径10km)范围内对一次污染物模拟浓度和区域面积的乘积进行汇总。

具体来说, 如式(15)所示, 以2米为间隔单位, 用模拟得到的

NO₂污染物浓度乘以2米以内的圆(环)面积进行汇总。

$$\sum_{n=1}^{500} [\pi \cdot (2n)^2 - \pi \cdot \{2(n-1)\}^2] \cdot C(n) \quad (15)$$

其中, n: 距排放源距离为2m时点为1, 每增加2米的距离, 值增加1。C(n): 第n点NO₂污染物的年平均浓度[μg/m³]。按照式(15)模拟得到的总乘积除以排放量, 来计算由单位量NO₂污染物排放引起NO₂污染物浓度的增加量(ΔC/ΔE) ΔC/ΔE, 河北省10个地市的计算结果如表6所示[®]。

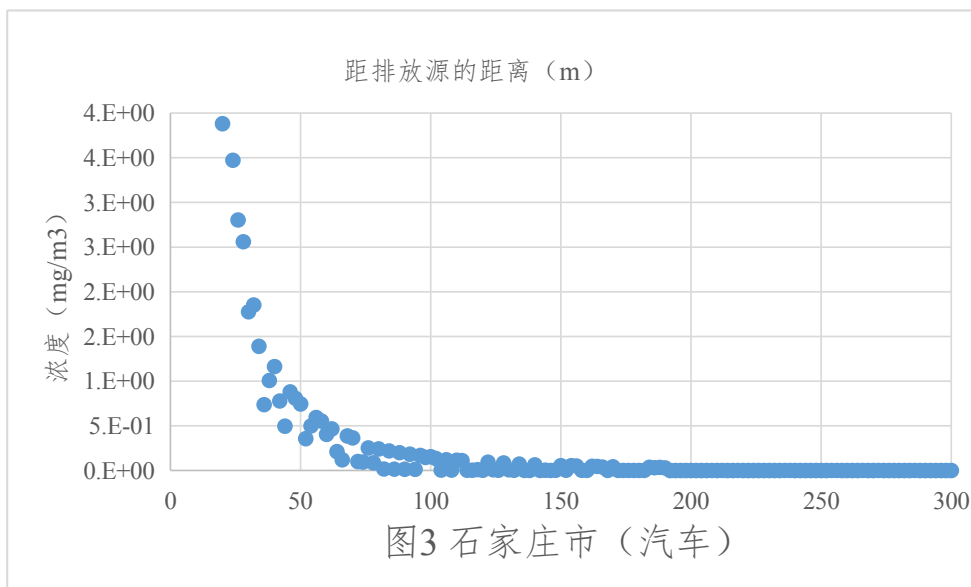


表6 单位量NO₂污染物排放所引起NO₂污染物浓度的增加量 (ΔC/ΔE) (μg/m³·m²/kg/year)

城市	烟囱	汽车
石家庄市	3.68E+03	7.22E+03
唐山市	1.04E+03	2.41E+03
保定市	2.49E+03	5.43E+03
沧州市	1.94E+03	4.42E+03
邢台市	1.74E+02	1.40E+03
廊坊市	4.62E+03	8.62E+03
承德市	4.98E+03	9.27E+03
张家口市	6.83E+02	2.54E+03
衡水市	2.63E+03	6.14E+03
秦皇岛市	4.30E+03	8.03E+03

4 结论

运用高斯烟羽模型构建了NO₂污染物的扩散模型,选取受NO₂影响较为严重的河北省地区作为分析案例,研究分析NO₂的扩散规律及其扩散的污染区域范围。首先介绍了高斯烟羽模型,分析了影响NO₂扩散的风速、风向、大气稳定性和源强参数等,然后,结合河北省地区实际气象条件等因素,模拟仿真出相同源强前提下,每单位NO₂污染源的排放导致河北省各地市区域范围内NO₂污染浓度的增加量。

研究表明,河北省区域NO₂污染的形成受到特殊地形和不利的气象条件影响较大,大气稳定性等基本上呈现秋季、冬季高于春夏两季,大体上在冬季为E,而夏季为A或B。此外,工业排

放是河北省NO₂的主要来源,近年来,一系列环境治理政策性法规的颁布和工业领域环保设备的引进措施等,NO₂污染已大大改善。但另一方面,随着机动车保有量的剧增,机动车尾气排放分担率不可小觑。

[基金项目]

河北省社会科学基金项目:《基于居民健康视角的河北省重点行业大气污染联防联控减排路径研究》(项目编号:HB23YJ033)。

[注释]

①根据大气污染物综合排放标准(GB16297-2012)、《锅炉大气污染物排放标准》(GB13271-2014)、《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484-2001)、工业炉窑大气污染物排放标准(GB9078-1996)、生活垃圾焚烧污染控制标准(GB18485-2001)和火电厂大气污染物排放标准(GB13223-2003)、恶臭污染物排放标准(GB14554-93)均对烟囱高度有明确要求,基本上最低高度为15m。

②国家气象科学数据共享服务平台,http://data.cma.cn/site/index.html;数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享平台,http://www.geodata.cn。

③国家气象科学数据共享服务平台,http://data.cma.cn/site/index.html;数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享平台,http://www.geodata.cn;

④因无法获得邯郸市的相关气象数据,所以没有模拟计算邯郸市的相关数据。

[参考文献]

[1]史宝军,聂士明,孙静.基于高斯烟羽混合模型的LPG泄漏扩散研究[J].安全与环境学报,2022,22(02):909-918.

[2]冯崧,曾祥进,黄瑜豪.改进高斯烟团模型的多气体源泄露扩散模型[J].科学技术与工程,2023,23(31):13619-13625.

[3]黄淑龙,毛亮,李洪辉.基于变风向高斯烟团混合模型的污染物扩散研究[J].科学技术与工程,2022,22(16):6767-6773.

[4]李冰晶,仝纪龙,潘峰.高斯烟团模型在石化类项目大气环境风险评价中的应用[J].环境工程,2013,31(3):139-143.

[5]付金字,李颖.基于高斯烟羽模型的船舶尾气扩散研究[J].海洋通报,2018,37(2):235-240.

[6]张莹,袁金国,王莹莹.基于OMI数据的京津冀地区对流层NO₂浓度遥感监测[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):443-452.

[7]梁俊丽,孔维华,费文华.基于复杂地形的高斯烟羽模型改进[J].环境工程学报,2016,10(6):3125-3129.

[8]周春艳,厉青,王中挺.2005年—2014年京津冀对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素[J].遥感学报,2016,(3):468-480.

[9]梅世玉,麻金继,张鑫.APEC期间京津冀地区NO₂浓度的时空变化特征研究[J].大气与环境光学学报,2016,11(4):281-287.

[10]陈静锋,柴瑞瑞,闫浩.基于高斯烟羽模型的PM_{2.5}污染

源扩散规律模拟分析[J].系统工程,2015,33(9):153-158.

[11]郑晓霞,李令军,赵文吉.京津冀地区大气NO₂污染特征研究[J].生态环境学报,2014,23(12):1938-1945.

[12]王英,李令军,刘阳.京津冀与长三角区域大气NO₂污染特征[J].环境科学,2012,33(11):3685-3692.

作者简介:

许东海(1977--),男,辽宁省抚顺市人,博士,副教授,主要从事公司金融与环境经济等研究。

米彦香(1977--),女,河北省石家庄人,硕士,讲师,主要从事产业经济学及国际贸易研究。

龙丽民(1972--),女,河北省石家庄人,硕士,讲师,主要从事现代化城市治理研究。

孙士岭(1984--),男,河北省邯郸市人,硕士,讲师,主要从事计量经济学研究。