WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用

杨景朝[1,2], 蒋兴文[1,2*], 伯鑫[3,4*], 王刚[5], 冯勇[1,2]

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072; 3. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029; 4. 北京化工大学北化中国工业碳中和研究院, 北京 100029; 5. 三捷环境工程咨询(杭州)有限公司, 杭州 310012)

摘要: 精准的气象场和适用的空气质量模式是优化大气污染模拟的重要途径. 为提升四川盆地冬季大气污染模拟效果,利用 WRF 模式 25 组参数化方案组合,进行气象场模拟试验,基于最优方案数据,以四川盆地某大型钢铁厂为例,分别驱动 AERMOD 模式和 CALPUFF 模式,通过研究区域 4 个国控站数据对模拟结果进行对比验证. 结果表明,WRF 模式参数化方案选取对地面风场、高空风场和地面湿度场模拟效果影响较大,对地面温度场、高空温度场和高空湿度场模拟效果影响较小,SLAB 陆面过程方案、Dudhia 短波辐射方案分别与 YSU、ACM2、BouLac 和 MRF 边界层方案的组合,均能较好地模拟四川盆地冬季地面风场、温度场和湿度场的变化趋势,结合高空风温湿统计参数综合分析可知,第 1 组方案适用于达州气象场模拟,第 13 组和第 17 组方案分别适用于成都白天和夜间时段气象场模拟. CALPUFF 模拟结果与监测值的相关性整体优于 AERMOD,从站点角度分析,CALPUFF 在国控站 3 号的模拟效果相较 AERMOD 提升较大,在国控站 2 号的模拟效果提升较小,从大气污染物角度分析,4 个国控站 CALPUFF 对 NO_x 和 PM_{10} 的模拟效果相较 AERMOD 均有不同程度提升,由 Q-Q 图分析,CALPUFF 对 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的模拟结果相较 AERMOD,与监测值更加吻合.

关键词:WRF 模式; 参数化方案; CALPUFF 模式; AERMOD 模式; 钢铁厂

中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)01-0104-14 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202203077

Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models

YANG Jing-chao[1,2], JIANG Xing-wen[1,2*], BO Xin[3,4*], WANG Gang[5], FENG Yong[1,2]

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 4. Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 5. Trinity Consultants, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Accurate meteorological fields and applicable air quality models are important ways to optimize air pollution simulations. To improve the accuracy of winter air pollution models in the Sichuan basin, we conducted a meteorological field simulation using 25 sets of parameterized scheme combinations in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. Based on the optimal parameters, the air pollution levels were simulated using AERMOD and CALPUFF models in a local large steel plant, and the data were verified by comparing the data from four National Ambient Air Monitoring Stations (NAAMS). The results indicated that the WRF model parameters had substantial effects on the simulation of the ground wind field, high-altitude wind field, and ground humidity field. In contrast, the parameters had no significant effect on the simulation of the ground temperature field, high-altitude temperature field, and high-altitude humidity field. The combination of the SLAB land surface process scheme and Dudhia shortwave radiation scheme with four boundary layer schemes, namely YSU, ACM2, BouLac, and MRF, could well-simulate the trends of winter surface wind, temperature, and humidity fields in Sichuan basin. The simulation results were analyzed by combining the statistical parameters of high-altitude wind, temperature, and humidity. The group 1 parameter scheme was applicable to simulate the meteorological field of Dazhou. Group 13 and Group 17 parameters were applicable to simulate the meteorological fields in Chengdu during the day and night, respectively. The correlation between CALPUFF simulation and monitoring value was better than that for AERMOD. CALPUFF was more accurate than AERMOD when referring to the monitoring data from NAAMS No. 3. In addition, the simulation quality of CALPUFF was slightly better than that of AERMOD with reference to data from NAAMS No. 2. Using air pollutant monitoring data from NAAMS as a reference, the simulated results of CALPUFF on NO_x and PM_{10} were improved compared to AERMOD at all four stations. Data from the Q-Q diagram indicated that the simulated results of CALPUFF on SO_2, NO_x, and PM_{10} were closer to the monitored values compared to those of AERMOD.

Key words:WRF model; parameterization schemes; CALPUFF model; AERMOD model; steel plant

"十四五"是四川省开启社会主义现代化城市建设的新征程,也是大气污染防治攻坚战继续向更高水平推进的关键期. 四川盆地因其独特的地形特征和静风逆温等气象条件,导致盆地内部冬季大气污染物不易扩散[1,2]. 大气污染物传输与扩散主要由近地面气象要素影响,因此,近地面气象场的模拟效果直接影响空气质量模式的模拟效果[3,4]. 同时,由于四川盆地地形复杂,同一区域不同空间下的近地面气象场差异明显,如果空气质量模式不能详尽反映区域气象场特征,将有可能影响大气污染扩散模拟效果[5].

收稿日期: 2022-03-08; **修订日期**: 2022-04-29

基金项目: 四川省重点研发计划项目(22ZDYF2053); 国家自然科学基金项目(U20A2097, 72174125); 中央高校基本科研业务费专项(buctrc202133)

作者简介: 杨景朝(1988~),男,硕士,工程师,主要研究方向为大气污染模拟,E-mail:1010793055@qq.com

* 通信作者,E-mail:xingwen.jiang@yahoo.com; boxin@buct.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

WRF 模式作为新一代中尺度天气预报模式，其输出的气象场，可用于天气预报和气候变化分析[6,7]，同时也可作为 AERMOD 和 CALPUFF 等空气质量模式的气象输入场[8,9]，在空气污染预报等方面已得到广泛应用. 选取适用于研究区域的参数化方案组合可提高 WRF 模式模拟性能. 已有研究表明，WRF 模式对京津冀地区污染天气边界层垂直结构的模拟，ACM2 方案优于 YSU 和 MYJ 方案[10]. 然而，也有不同结论，在北京地区[11]和河北地区[12]分别对比分析 WRF 模式不同边界层参数化方案对近地面气象场的模拟效果，YSU 方案优于 ACM2、MYJ 和 BouLac 方案. 在四川盆地，MYJ 方案和 SLAB 方案组合对一次大气污染过程的近地面气象场模拟效果优于其他方案组合[13]. 修订湍流扩散系数阈值为 2 $m \cdot s^{-1}$的 ACM2 方案，相较于 YSU、MYJ 方案，可优化南京地区 $PM_{2.5}$浓度的模拟效果[14]. 改进 WRF-Chem 模式中基于气溶胶体积浓度建立的 Chen 等能见度参数化方案，相比基于 $PM_{2.5}$浓度建立的参数化方案和 Mie 散射计算方案，可优化京津冀地区能见度预报效果[15]. 上述研究较多探究我国不同区域一次污染过程 WRF 模式边界层参数化方案的适用性，同时，四川盆地 WRF 模式最优参数化方案配置研究多针对降水预报[16,17]，很少关注冬季大气污染频发时段气象场预报.

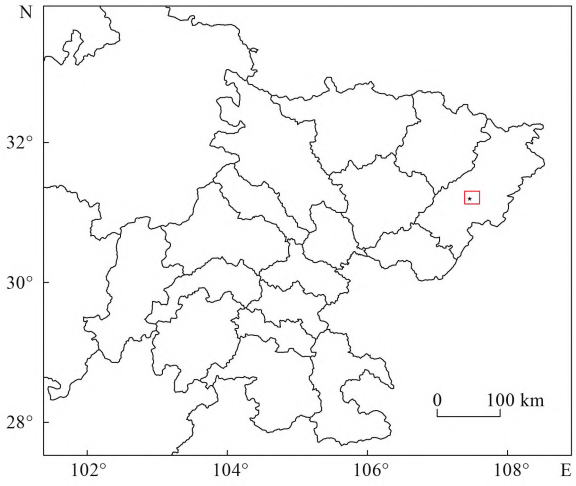
AERMOD 和 CALPUFF 模式是我国《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2-2018)[18]推荐的环境空气质量法规预测模式，已广泛应用于大气污染模拟领域. 已有研究表明，AERMOD 和 CALPUFF 模式可模拟钢铁厂排放 SO_2 等常规大气污染物[19,20]、二噁英类污染物[21]和多环芳烃类污染物[22]，以及火电企业污染物排放、工地施工扬尘排放和生物药厂含菌气溶胶扩散等[23~29]，对周边环境空气质量和人体健康的潜在影响. 除了应用单一空气质量模式分析大气污染问题，AERMOD 和 CALPUFF 模式对比研究也得到越来越多的关注. 在我国西南某山地区域，应用 AERMOD 和 CALPUFF 模式模拟医废和垃圾焚烧排放二噁英类污染物的研究表明，CALPUFF 模式模拟结果在空间分布上可信度较高[30]. AERMOD 和 CALPUFF 模式模拟山西某电厂空气质量影响的研究表明，CALPUFF 模式能较准确地模拟大气污染物的扩散分布特征[31]. 已有研究均没有基于 WRF 模式最优参数化方案数据，评估 AERMOD 和 CALPUFF 模式对大型钢铁厂空气质量影响的模拟效果.

本研究基于 WRF 模式，对 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日四川盆地气象场进行 25 组参数化数值试验，在此基础上，以四川盆地某大型钢铁厂为例，选取最优参数化方案数据，分别驱动 AERMOD 模式和 CALPUFF 模式，以探究四川盆地 WRF 模式最优气象场对不同空气质量模式模拟的影响.

1　材料与方法

1.1　研究区域与对象

本研究 WRF 模式模拟区域覆盖四川盆地(图 1). CALPUFF 和 AERMOD 模式模拟区域为四川盆地某城市及其周边区域，地势东北高西南低，海拔高度范围为 256 ~ 1 005 m，预测范围为 16 km × 16 km (图 2). 钢铁厂位于市区南部，厂区地势较为平坦，2018 年，共有排放源 14 个，其中，某排放源每年 NO_x、SO_2 和 PM_{10} 排放量分别为 1 082.41、609.46 和 178.48 t. 本研究钢铁厂排放信息来自研究团队全国高时空分辨率钢铁排放清单(HSEC)[32~34]，污染物因子包括 SO_2、NO_x 和 PM_{10}.



★钢铁厂，红色方框为 AERMOD 模式和 CALPUFF 模式模拟区域

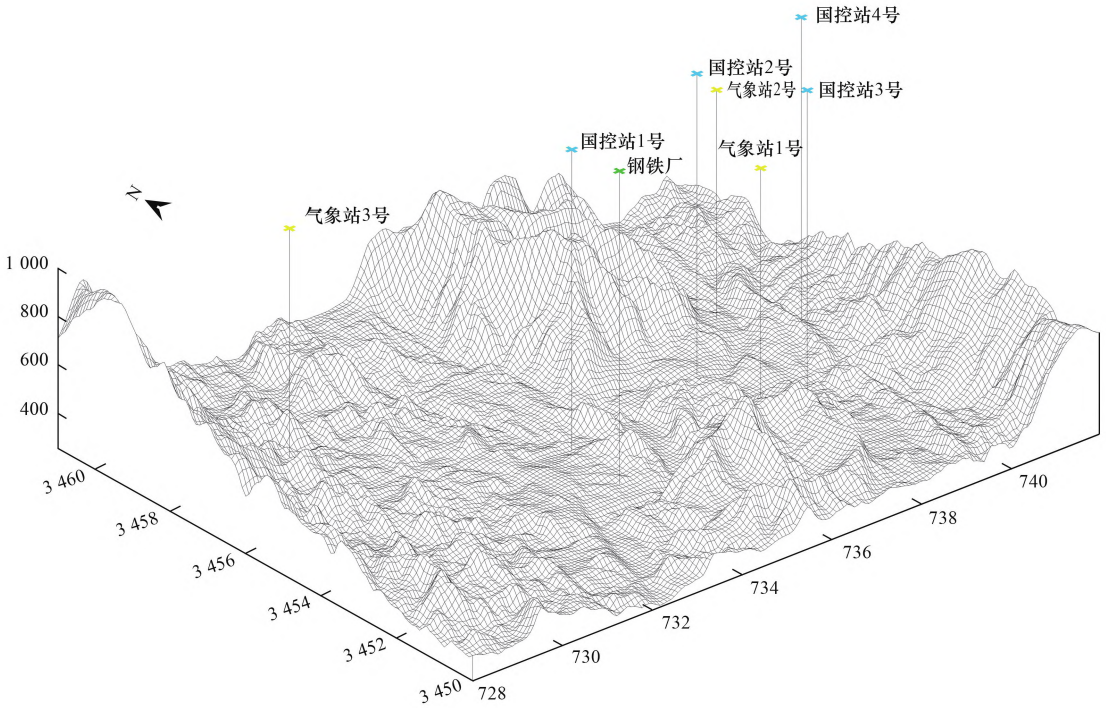
图 1　WRF 模式模拟区域

Fig. 1　Simulation area of WRF

1.2　模式参数设置

按模式预测范围适用性分类，AERMOD 模式适用于模拟局地尺度(50 km 以下)环境空气质量影响，而 CALPUFF 模式适用于模拟城市尺度(50 km 到几百 km). AERMET 作为 AERMOD 模式的气象数据预处理器，只能输入单点地面气象站和单点高空气象站数据，所有计算网格均采用该点气象数据，对于静风或数据缺失的小时，则跳过计算，不能详尽反映复杂地形区域气象特征，直接影响污染物扩散模拟. CALMET 为 CALPUFF 模式提供必要的三维气象场，可输入 WRF 数据，结合地形，能够更好地模拟烟流轨迹和地表浓度分布[35]. 当模拟城市尺度以内的长期静风和小风时的环境空气质量时，CALPUFF 模式对静风湍流速度做了处理，四川盆地

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



水平坐标为 UTM 坐标系,数值单位为 km, 垂直坐标为直角坐标系,数值单位为 m

图 2 AERMOD 模式和 CALPUFF 模式模拟区域

Fig. 2 Simulation area of AERMOD and CALPUFF

冬季污染天气过程,通常为静稳天气形势,静风和小风天气状况持续时间较长,故可选用此模式进行模拟研究.

本研究选取 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日四川盆地 104 个国家地面气象观测站和 3 个国家高空气象观测站数据,地面气象观测站数据为逐小时 2 m 温度、10 m 风向风速数据和 2 m 相对湿度数据,高空气象观测数据为逐日 08:00 和 20:00 秒级采样温度、风向风速以及相对湿度数据,用于验证 WRF 模式模拟效果. 同时,还选取 CALPUFF 和 AERMOD 模拟区域内同时段 3 个地面气象观测站数据和 4 个国控站环境空气质量监测数据(图 2),用于分析 AERMET 单点风场和 CALMET 区域风场代表性,对比验证 AERMOD 和 CALPUFF 模式模拟结果.

本研究利用中尺度气象模式 WRF4.0 对 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日四川盆地气象场进行模拟. 选取欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)官网发布的第五代再分析数据 ERA5 作为模式气象初始条件和边界条件,水平分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 6 h. 模拟区域覆盖四川盆地,中心点位于(30.5°N,105°E),网格数为 120×120,格距为 5 km(图 1),垂直方向为 30 层,采用下密上疏分布,离地1 500 m以下共有 18 层. 以每日 12UTC 为模式一次循环起始运行时间,积分 36 h,前 12 h 为预热(spin up)阶段,后 24h 模拟数据作为主要研究内容[36]. 不同的大气边界层结构、地面粗糙度和太阳短波辐射条件下,湍流运动状态和气流平均速度差不同,从而造成近地面空气污染物的输送与扩散条件存在较大差异[37~39]. WRF 模式提供了多种物理过程参数化方案,包含影响大气边界层结构的边界层方案、地面粗糙度的陆面过程方案和太阳短波辐射的短波辐射方案. 本研究将选取 5 种边界层方案、3 种陆面过程方案和 3 种短波辐射方案进行 25 组组合试验,其他物理过程方案设置如下:微物理过程选取 WSM6(WRF single-m oment 6-class);长波辐射选取 RRTM 方案;积云参数化方案选取 GD(grell-devenyi)方案;近地面过程方案需要与边界层方案相匹配,YSU、ACM2、BouLac 和 MRF 方案均使用 MM5 近地面过程方案,而 MYJ 方案使用 Eta 近地面过程方案(表 1).

CALPUFF 模式参数设置如下,气象数据为 WRF 模式提供的研究区域三维气象模拟数据;区域地形资料来自美国地质勘探局(USGS),地形数据精度为 90 m,土地利用类型数据精度为 30 m[40]. 本研究建模考虑污染源坐标、排放高度与直径、烟气温度与流速和 NO_x 排放量等信息,气象网格和计算网格分辨率均为 200 m,东西向 80 个格点,南北向 80 个格点,计算时间步长为 1 h.

AERMOD 模式参数设置如下,因模拟区域只有气象站 1 号进行高空观测,并且地面气象要素齐全,故 AERMET 输入气象数据为 WRF 模式提供的该站

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

点地面和高空气象模拟数据. 模拟排放源信息、区域地形资料、计算网格分辨率、东西南北格点数、计算时间步长与 CALPUFF 设置相同. 地表参数来自研究团队开发的 AERSURFACE 在线服务系统[40].

表 1　WRF 参数化试验设计

Table 1　Parametric experimental design of WRF

分组	边界层方案	陆面过程方案	短波辐射方案
1	YSU	Noah	Dudhia
2	YSU	Noah	Goddard
3	YSU	Noah	RRTMG
4	YSU	SLAB	Dudhia
5	YSU	RUC	Dudhia
6	MYJ	Noah	Dudhia
7	MYJ	Noah	Goddard
8	MYJ	Noah	RRTMG
9	MYJ	SLAB	Dudhia
10	MYJ	RUC	Dudhia
11	ACM2	Noah	Dudhia
12	ACM2	Noah	Goddard
13	ACM2	Noah	RRTMG
14	ACM2	SLAB	Dudhia
15	ACM2	RUC	Dudhia
16	BouLac	Noah	Dudhia
17	BouLac	Noah	Goddard
18	BouLac	Noah	RRTMG
19	BouLac	SLAB	Dudhia
20	BouLac	RUC	Dudhia
21	MRF	Noah	Dudhia
22	MRF	Noah	Goddard
23	MRF	Noah	RRTMG
24	MRF	SLAB	Dudhia
25	MRF	RUC	Dudhia

1.3　模拟效果评估方法

本研究对 WRF 三维气象场进行检验，具体所用统计量公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(P_i - \overline{P})^2}} \quad (1)$$

$$\mathrm{MB} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Phi_i \quad (2)$$

$$\mathrm{RMSE} = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\Phi_i)^2\right]^{1/2} \quad (3)$$

式中，R 为相关系数(反映模拟序列和观测序列之间的线性相关程度)，MB 为平均偏差(反映模拟序列和观测序列之间的偏差情况)，RMSE 为均方根误差(反映模拟序列和观测序列之间偏差的平均). P_i 和 O_i 分别为第 i 个气象要素模拟值和观测值，$\overline{P}$ 和 $\overline{O}$ 则分别为全部模拟值和观测值的平均值，N 为时间样本总数，Φ_i 为第 i 个模拟值和观测值之间的差值. 上述统计量中，MB 和 RMSE 越接近 0，R 越接近于 1，则说明模拟效果越好[41].

$$\Delta R = R_{\mathrm{CALPUFF}} - R_{\mathrm{AERMOD}} \quad (4)$$

CALPUFF 模式和 AERMOD 模式对比验证，利用研究区域 4 个国控站环境空气质量监测数据与 2 个模式钢铁厂大气污染物模拟数据(包括 SO_2、NO_x 和 PM_{10})，通过 2 个模式相关系数差值 ΔR，表征 2 个模式模拟效果差异[42].

2　结果与讨论

2.1　WRF 模拟结果检验

2.1.1　地面气象要素

利用四川盆地 17 市 104 个国家级地面气象观测站 10 m 风速、2 m 温度和 2 m 相对湿度对 25 组 WRF 参数化试验模拟的地面气象要素进行对比验证，并用相关系数(R)、平均偏差(MB)和均方根误差(RMSE)评估模式模拟效果. 根据区域特征和发展定位，四川盆地划分为成都平原、川南和川东北这三大经济区，本节预先将四川盆地各市所有观测站观测值和对应格点模拟值分别进行逐小时平均处理，重点分析三大经济区代表城市成都、宜宾和达州地面气象要素模拟结果.

由表 2 ~ 4 可知，综合分析地面风温湿统计参数，成都、达州和宜宾第 4、14、19 和 24 组试验结果，均与观测值较为接近，说明 SLAB 和 Dudhia 方案的组合适用于模拟四川盆地冬季地面气象要素，这可能是在地形复杂的四川盆地，只有考虑辐射、感热和潜热通量的能量计算过程，才能优化地面气象要素模拟效果. 从 5 种边界层方案平均模拟误差角度分析，YSU、ACM2、BouLac 和 MRF 方案均能较为准确地模拟地面风温湿，优于 MYJ 方案，这可能是由于 MYJ 方案湍流扩散系数较小，不利于大气和地面之间热量和动量交换所导致. 以模拟效果较好的第 4 组方案和模拟效果较差的第 7 组方案为例，成都两组 2 m 温度、10 m 风速和 2 m 相对湿度 R 差值分别为 0.02、0.22 和 0.14，达州 R 差值分别为 0.03、0.05 和 0.11，宜宾 R 差值分别为 0.02、0.19 和 0.05，由此可知，参数化方案选取对地面风场和湿度场影响较大，温度场影响较小. 综合考虑，SLAB 陆面过程方案、Dudhia 短波辐射方案分别与 YSU、ACM2、BouLac 和 MRF 边界层方案的组合，均能较好地模拟四川盆地冬季地面气象场的变化趋势.

2.1.2　高空气象要素

利用温江、达川、宜宾国家高空气象观测站 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日逐日 08:00

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 成都地面气象要素模拟结果分析

Table 2 Analysis of simulation results for surface meteorological elements in Chengdu

分组	2 m 温度/℃			10 m 风速/m·s^{-1}			2 m 相对湿度/%		
	R	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE
1	0.92	−0.79	1.64	0.60	0.41	0.73	0.72	−9.09	15.41
2	0.92	0.10	1.48	0.58	0.49	0.81	0.73	−12.31	17.26
3	0.92	0.01	1.47	0.58	0.48	0.80	0.73	−12.00	17.04
4	0.93	−0.71	1.57	0.66	0.47	0.76	0.82	−1.70	10.14
5	0.93	−0.99	1.71	0.64	0.42	0.71	0.79	−5.80	12.46
6	0.90	−0.19	1.62	0.43	1.05	1.27	0.65	−9.86	16.87
7	0.91	0.63	1.69	0.44	1.12	1.34	0.68	−12.56	18.15
8	0.91	0.55	1.66	0.43	1.11	1.33	0.67	−12.31	18.01
9	0.87	−0.26	1.93	0.51	0.98	1.19	0.64	1.34	13.44
10	0.87	−0.49	1.97	0.48	0.88	1.10	0.62	1.48	13.85
11	0.92	−0.70	1.60	0.58	0.42	0.74	0.73	−10.58	16.22
12	0.92	0.22	1.50	0.55	0.51	0.82	0.74	−13.99	18.43
13	0.92	0.14	1.48	0.55	0.51	0.82	0.74	−13.71	18.24
14	0.93	−0.65	1.53	0.65	0.47	0.75	0.83	−3.11	10.21
15	0.93	−0.92	1.66	0.63	0.43	0.71	0.80	−7.20	13.05
16	0.92	−0.47	1.52	0.58	0.37	0.71	0.71	−10.66	16.43
17	0.92	0.47	1.56	0.54	0.44	0.78	0.72	−13.89	18.52
18	0.92	0.38	1.53	0.54	0.44	0.78	0.72	−13.63	18.33
19	0.93	−0.43	1.46	0.64	0.43	0.72	0.82	−3.23	10.61
20	0.93	−0.69	1.58	0.62	0.39	0.69	0.79	−7.50	13.39
21	0.92	−0.61	1.59	0.60	0.31	0.68	0.74	−10.88	16.19
22	0.91	0.26	1.54	0.58	0.40	0.76	0.74	−14.12	18.42
23	0.92	0.18	1.52	0.58	0.39	0.76	0.74	−13.83	18.23
24	0.93	−0.56	1.54	0.65	0.38	0.71	0.83	−4.11	10.64
25	0.93	−0.84	1.66	0.65	0.32	0.65	0.80	−7.55	13.22

表 3 达州地面气象要素模拟结果分析

Table 3 Analysis of simulation results for surface meteorological elements in Dazhou

分组	2 m 温度/℃			10 m 风速/m·s^{-1}			2 m 相对湿度/%		
	R	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE
1	0.91	−0.44	1.48	0.77	0.25	0.72	0.78	−5.26	10.65
2	0.91	0.27	1.47	0.75	0.42	0.83	0.80	−7.77	11.88
3	0.91	0.20	1.45	0.75	0.40	0.82	0.80	−7.50	11.74
4	0.93	−0.42	1.37	0.78	0.35	0.76	0.83	−2.29	8.60
5	0.93	−0.53	1.36	0.78	0.31	0.71	0.83	−3.45	9.07
6	0.90	−0.11	1.48	0.73	0.88	1.15	0.69	−5.93	12.26
7	0.90	0.48	1.59	0.73	1.03	1.27	0.72	−7.75	12.88
8	0.90	0.42	1.57	0.72	1.01	1.26	0.72	−7.57	12.80
9	0.91	−0.05	1.38	0.74	0.88	1.15	0.73	−1.02	10.24
10	0.90	−0.33	1.44	0.74	0.79	1.06	0.68	1.40	11.00
11	0.91	−0.43	1.46	0.78	0.26	0.72	0.79	−6.14	11.05
12	0.92	0.31	1.45	0.75	0.44	0.83	0.80	−8.87	12.60
13	0.92	0.24	1.43	0.75	0.42	0.81	0.80	−8.61	12.41
14	0.93	−0.42	1.35	0.79	0.34	0.75	0.84	−3.03	8.89
15	0.93	−0.53	1.35	0.78	0.30	0.69	0.84	−4.35	9.50
16	0.91	−0.12	1.47	0.74	0.25	0.66	0.78	−6.86	11.53
17	0.91	0.55	1.62	0.70	0.46	0.82	0.79	−9.17	12.95
18	0.91	0.47	1.59	0.71	0.44	0.80	0.79	−8.90	12.75
19	0.92	−0.15	1.41	0.76	0.36	0.71	0.83	−3.52	9.30
20	0.92	−0.28	1.42	0.75	0.35	0.68	0.82	−4.69	10.01
21	0.91	−0.34	1.44	0.78	0.22	0.69	0.79	−6.72	11.37
22	0.92	0.37	1.46	0.75	0.40	0.80	0.80	−9.37	12.96
23	0.92	0.30	1.43	0.75	0.38	0.79	0.80	−9.11	12.76
24	0.93	−0.36	1.35	0.79	0.31	0.72	0.84	−3.98	9.24
25	0.93	−0.47	1.33	0.78	0.26	0.65	0.84	−4.76	9.75

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　宜宾地面气象要素模拟结果分析

Table 4　Analysis of simulation results for surface meteorological elements in Yibin

分组	2 m 温度/℃			10 m 风速/m·s^{-1}			2 m 相对湿度/%		
	R	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE	*R*	MB	RMSE
1	0.91	−0.06	1.31	0.57	0.26	0.60	0.80	−4.80	9.78
2	0.89	0.82	1.64	0.47	0.40	0.72	0.80	−8.15	11.87
3	0.89	0.73	1.59	0.49	0.39	0.71	0.79	−7.79	11.65
4	0.91	0.58	1.39	0.59	0.44	0.73	0.83	−4.00	8.88
5	0.91	0.47	1.39	0.54	0.18	0.52	0.84	−6.08	10.03
6	0.89	0.21	1.41	0.48	0.70	0.91	0.78	−4.45	9.94
7	0.89	1.04	1.78	0.40	0.88	1.09	0.78	−7.35	11.47
8	0.89	0.94	1.73	0.41	0.86	1.07	0.78	−7.05	11.29
9	0.89	0.46	1.50	0.56	0.78	0.98	0.75	1.77	9.51
10	0.88	0.22	1.47	0.55	0.57	0.79	0.77	2.37	9.38
11	0.91	−0.08	1.30	0.56	0.22	0.57	0.80	−5.42	10.16
12	0.89	0.83	1.64	0.45	0.37	0.70	0.79	−9.20	12.73
13	0.89	0.73	1.59	0.46	0.35	0.69	0.79	−8.82	12.48
14	0.92	0.52	1.34	0.58	0.38	0.67	0.83	−4.54	9.26
15	0.91	0.40	1.35	0.54	0.15	0.51	0.84	−6.77	10.55
16	0.90	−0.03	1.35	0.56	0.11	0.51	0.79	−5.32	10.28
17	0.89	0.92	1.71	0.48	0.22	0.59	0.79	−8.73	12.35
18	0.89	0.82	1.65	0.50	0.20	0.57	0.79	−8.36	12.12
19	0.91	0.64	1.45	0.58	0.28	0.61	0.82	−4.55	9.35
20	0.90	0.52	1.45	0.52	0.05	0.48	0.83	−6.77	10.69
21	0.90	0.04	1.34	0.56	0.22	0.59	0.79	−6.56	11.02
22	0.89	0.91	1.71	0.46	0.35	0.70	0.78	−10.12	13.54
23	0.89	0.82	1.65	0.47	0.33	0.69	0.78	−9.75	13.30
24	0.91	0.64	1.44	0.56	0.40	0.71	0.83	−6.08	10.14
25	0.90	0.54	1.44	0.50	0.15	0.53	0.83	−7.69	11.33

和 20:00 温度、相对湿度、风速秒级采样数据，对三大经济区代表城市成都、宜宾和达州边界层范围内(40～1 500 m)25 组高空气象要素模拟结果进行检验[43]. 本节重点分析达州模拟效果较好的第 1 组方案，成都模拟效果较好的第 13 组和第 17 组方案. 宜宾 25 组方案各高度层风速模拟效果较差，这可能是由于在四川盆地南部丘陵地区，各组方案对湍流运动刻画偏差较大有关，温度和相对湿度模拟效果与成都、达州一致，偏差较小，在此不展开分析讨论.

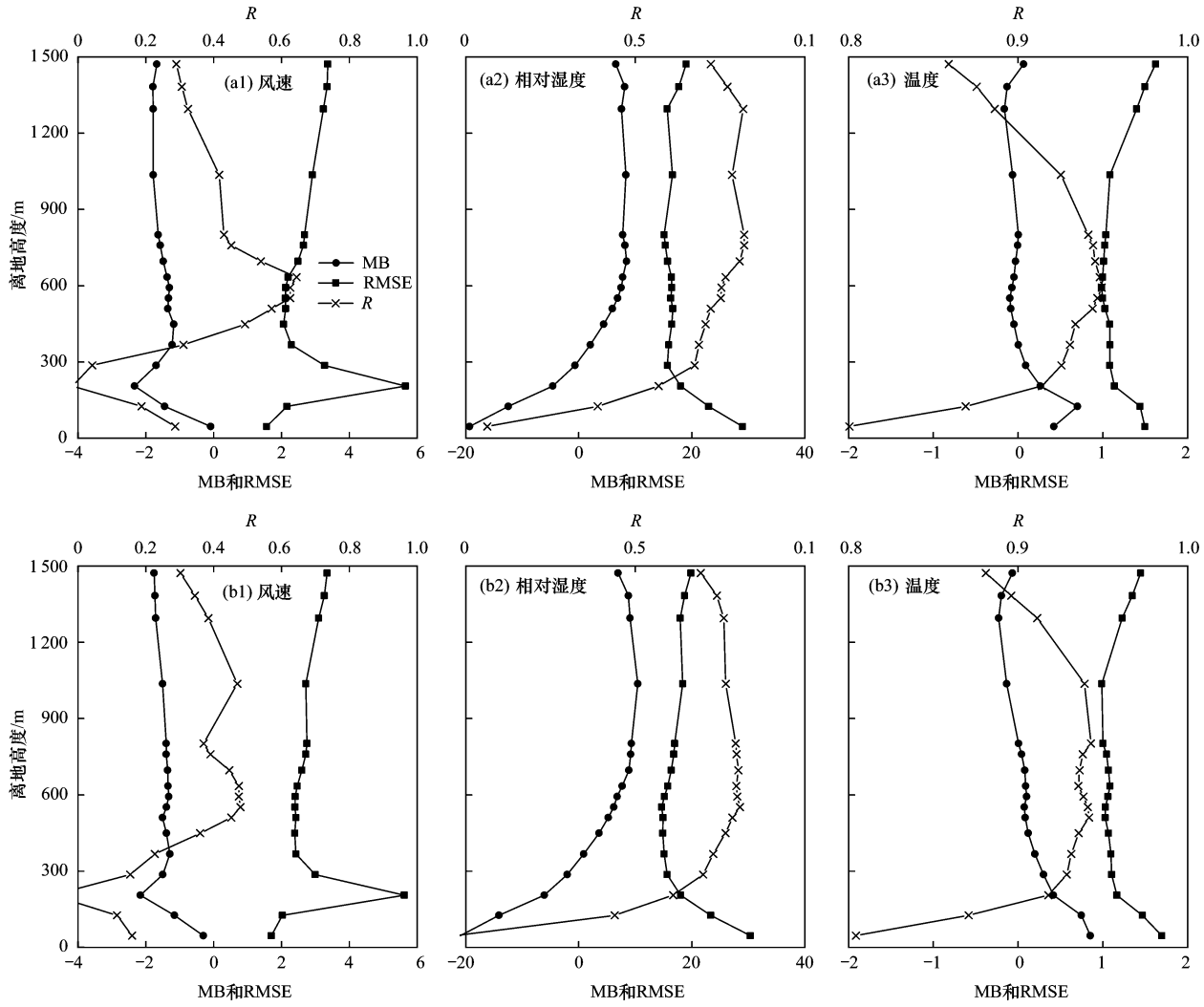
由图 3 可知，成都第 13 组方案 08:00 在 130 m 以上相对湿度模拟效果明显好转，在 500～700 m 范围内风速模拟效果明显优于其他层，各层温度模拟效果均较好，相对湿度和风速模拟效果较好层对应的 *R* 均大于 0.54，温度 *R* 均大于 0.80. 与第 13 组方案相比，第 17 组方案各层风速 *R* 均在 0.48 以下，相对湿度和温度模拟效果基本一致. 由图 4 可知，成都第 13 组方案 20:00 各层相对湿度和温度模拟效果均较好，相对湿度和温度 *R* 分别大于 0.69 和 0.77，风速在 800～1 000 m范围内模拟效果明显优于其他层，*R* 在 0.52～0.59 之间. 与 08:00 一致，20:00 两方案相对湿度和温度模拟效果基本一致，而第 17 组方案风速模拟效果较好范围增加为 600～1 000 m，*R* 在 0.53～0.63 之间. 由图 5 可知，达州第 1 组方案 08:00 风速在 200～800 m 范围内模拟效果较好，*R* 在 0.51～0.63 之间，各层相对湿度和温度模拟效果均较好，*R* 分别大于 0.59 和 0.85. 达州 20:00 各层相对湿度和温度模拟效果与 08:00 一致，而风速模拟效果较好范围缩减为 550～800 m. 综合考虑，第 13 组方案适用于成都 08:00 风速模拟，第 17 组方案适用于成都 20:00 风速模拟，第 1 组方案适用于达州 08:00 和 20:00 风速模拟，而 08:00 模拟效果整体优于 20:00，各方案对成都和达州高空相对湿度和温度模拟效果影响不显著.

由地面和高空风温湿统计参数综合分析可知，冬季四川盆地不同区域 WRF 参数化方案最优配置不同. 各边界层方案对湍流运动过程的不同描述，各陆面过程方案和短波辐射方案对能量收支过程的不同刻画，可能是造成不同参数化方案组合对地面风场、地面湿度场和高空风场模拟效果影响较大的原因. 整体而言，第 1 组方案适用于达州气象场模拟，第 13 组和第 17 组方案分别适用于成都白天和夜间时段气象场模拟，宜宾高空风场模拟效果较差，可能与观测站周边复杂地形及建筑物分布有关，本研究暂不推荐最优方案.

2.2　WRF-CALMET 和 WRF-AERMET 气象场验证

钢铁厂排放方式、研究区域地形特征与气象条

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a1)、(a2)和(a3)为第 13 组方案,(b1)、(b2)和(b3)为第 17 组方案

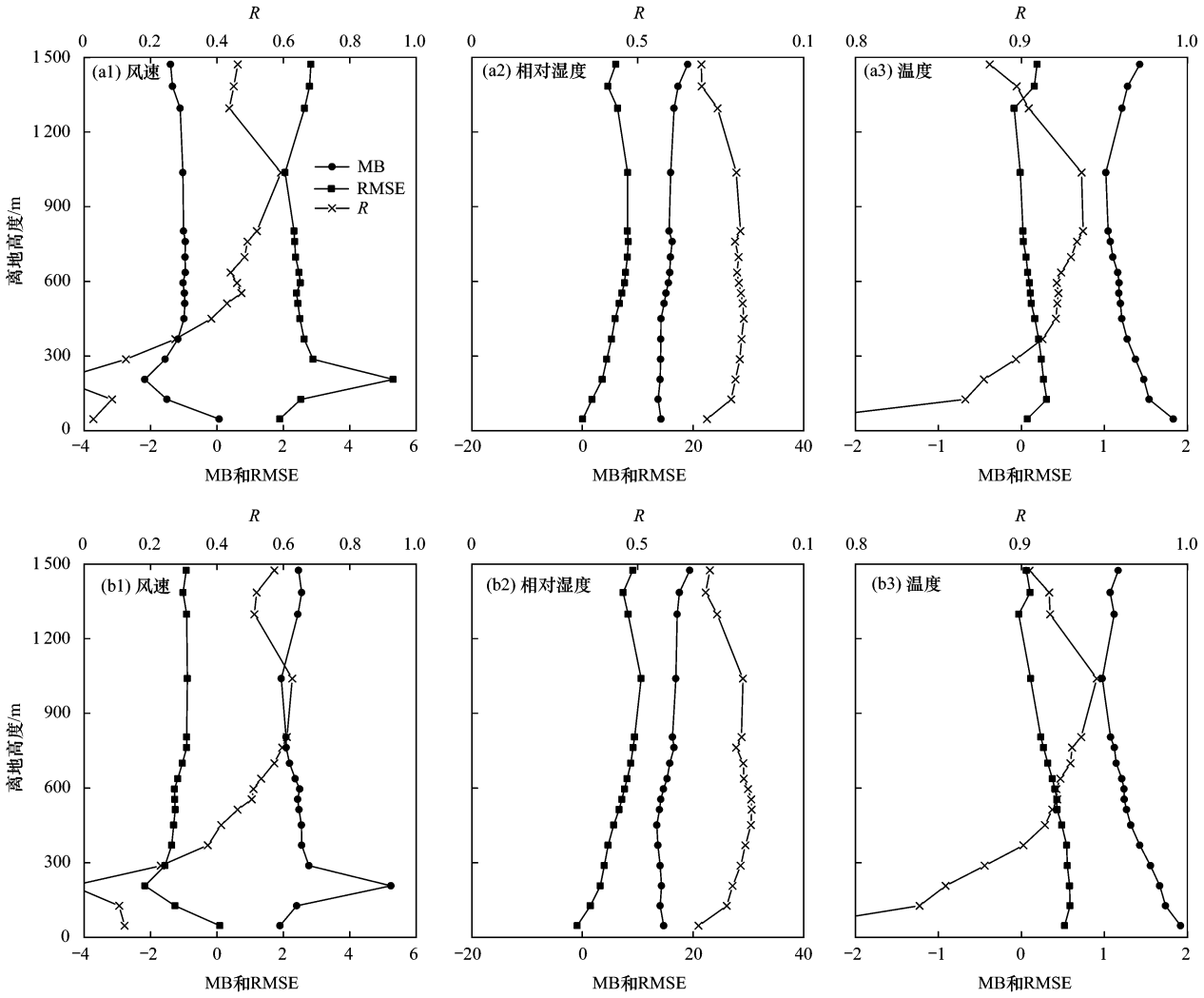
图 3 第 13 组和第 17 组方案温江站 08:00 边界层模式高空与观测高空的气象要素统计参数比较

Fig. 3 Statistical parameters of meteorological elements between the measured altitude and the boundary layer model altitude simulated by Group 13 and Group 17

件等因素对大气污染物扩散与分布具有重要影响,在其他因素不变的前提下,气象场的模拟效果将直接影响空气质量模式的模拟效果. 本研究 AERMET 和 CALMET 模式均由研究区域模拟效果较优的 WRF 第 1 组方案数据驱动,故利用模拟区域内 3 个气象站(图 2)10m 风速风向数据对 WRF、AERMET 和 CALMET 模拟风场进行验证. 图 6 ~ 8 分别给出了 3 个气象站模拟时段 WRF 第 1 组方案与观测风玫瑰对比. 根据风速对比分析,3 个气象站风速整体偏小,主要原因是模拟时段正处于冬季,且大气污染日数较多,相比气象站 1 号和 2 号,气象站 3 号位于山体中间的凹地,四周气流受地势阻隔效应影响,导致风速偏小,且气象站 3 号静风频率也明显大于气象站 1 号和 2 号,即 17.21%(气象站 3 号) > 5.35%(气象站 2 号) > 1.07%(气象站 1 号);根据风向对比分析,模拟区域研究时段主要受东北气流影响,气象站 2 号北侧与东侧山地地势较高,东北侧地势相对低矮,同时伴有夜间山谷风下坡风的影响,从而形成以东北风为主的风场;气象站 1 号位于市区,存在城市热岛效应,北侧与东侧地势平坦,从而也形成以东北风为主的风场;气象站 3 号受四周山体阻隔,主要影响风向不明显. WRF 模式对于 3 个气象站风场模拟,主要影响风向均为东北风,且风速偏大,气象站 1 号和 2 号模拟结果可信度高于 3 号,可能原因是 WRF 模式 10 m 风场模拟,对四川盆地低矮山丘(大约 500 m 以下)等下垫面不敏感,同时低估了山体下垫面的摩擦减弱作用.

图 9 给出了模拟时段 AERMET 提取的气象站 1 号 WRF 10 m 风场数据与观测风玫瑰对比. 气象站 1 号 AERMET 输出 10 m 风场与 WRF 10 m 风场各风向频率特征基本相同,模拟结果可信度较高,可代表气象站 1 号风场信息. 而 AERMET 输出气象场,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a1)、(a2)和(a3)为第 13 组方案,(b1)、(b2)和(b3)为第 17 组方案

图 4　第 13 组和第 17 组方案温江站 20:00 边界层模式高空与观测高空的气象要素统计参数比较

Fig. 4　Statistical parameters of meteorological elements between the measured altitude and the boundary layer model altitude simulated by Group 13 and Group 17

仅代表一个站点气象信息,AERMOD 模拟区域均采用该站点气象数据进行计算,模拟气象场缺乏区域代表性.

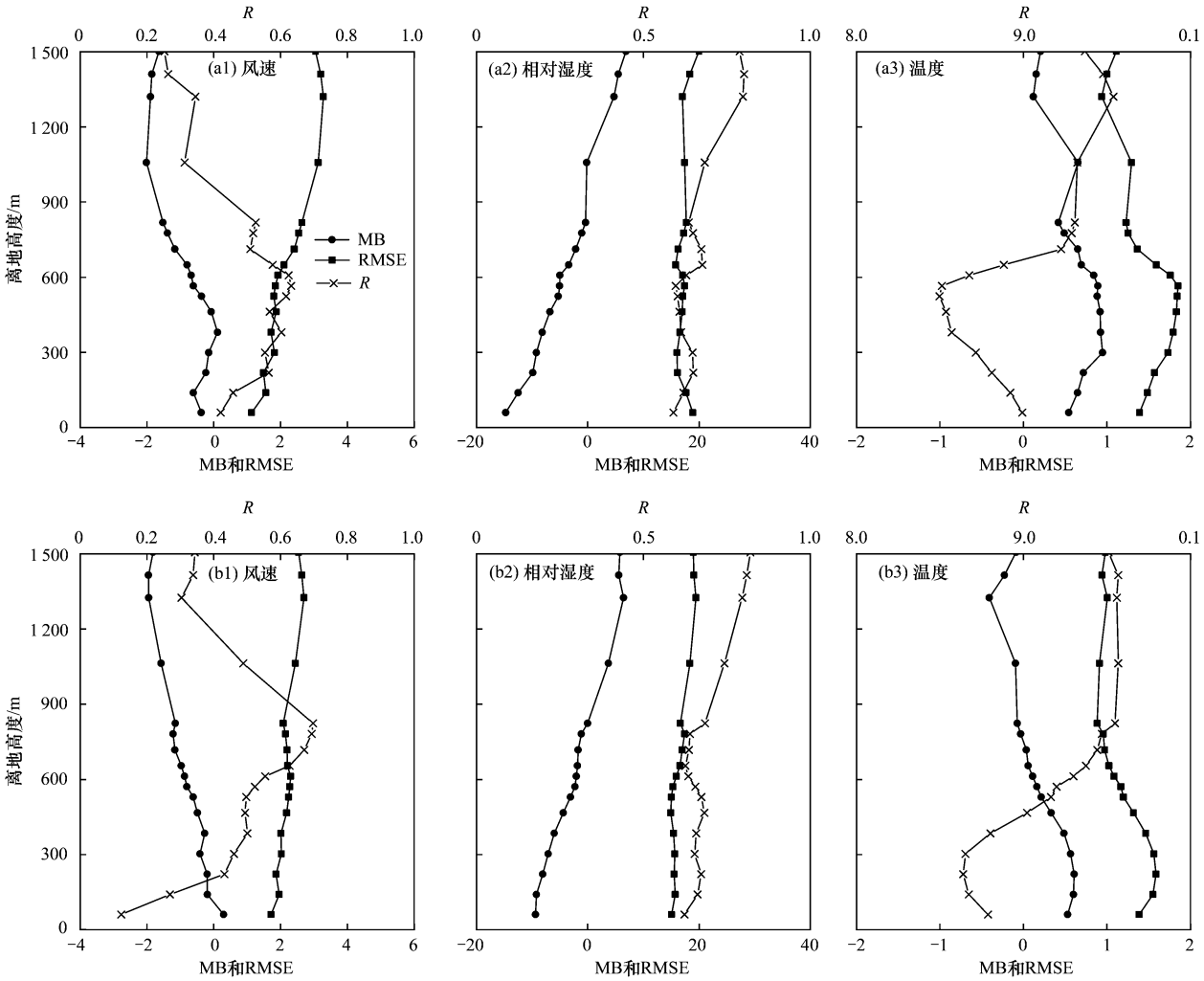
CALMET 气象模式结合地形、土地利用、三维气象数据等信息,通过地形动力学、坡面流和地形阻塞效应调整,能较为准确地反映区域复杂地形气象场特征. 本节以 2017 年 12 月 27 日 08:00 和 2018 年 1 月 14 日 08:00 模拟区域短时风场为例,验证 WRF-CALMET 区域风场的代表性. 由图 6 ~ 8 可知,模拟区域中部和东部,模拟研究时段主要以东北风影响为主,西部区域主要影响风向不明显,不同区域的风场特征不同. 由图 10 可知,气象站 1 号和 2 号周围地势较为平坦,且由东向西逐渐由开阔变为狭窄谷地风口,在热通量和地势的狭管效应影响下,2 个气象站以东北风影响为主; 气象站 3 号紧邻山体,周围地势起伏较大,受地形阻挡和山谷风影响,气象站 3 号及其周边风向差异较大. 由此可见,WRF-CALMET 区域风场与图 6(b)、图 7(b)和图 8(b)中 3 个气象站主要影响风向匹配度较高,对区域风向特征模拟效果较好,风速模拟整体偏大,模拟结果可信度较高.

2.3　AERMOD 和 CALPUFF 模拟结果比较

由 2.2 节的结论可知,研究区域 WRF-AERMET 单点风场和 WRF-CALMET 区域风场代表性较高. 本节基于两个模式模拟风场,预测钢铁厂 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日逐小时(共1 488 h) NO_x、PM_{10}和 SO_2 排放量,并利用研究区域 4 个国控站环境空气质量监测数据,计算 2 个模式小时模拟值与监测值相关系数的差值,进而评估 2 个模式模拟效果差异.

由表 5 可知,4 个国控站 NO_x 和 PM_{10}的 ΔR 均大于 0,表明 CALPUFF 模拟结果与监测值的相关性

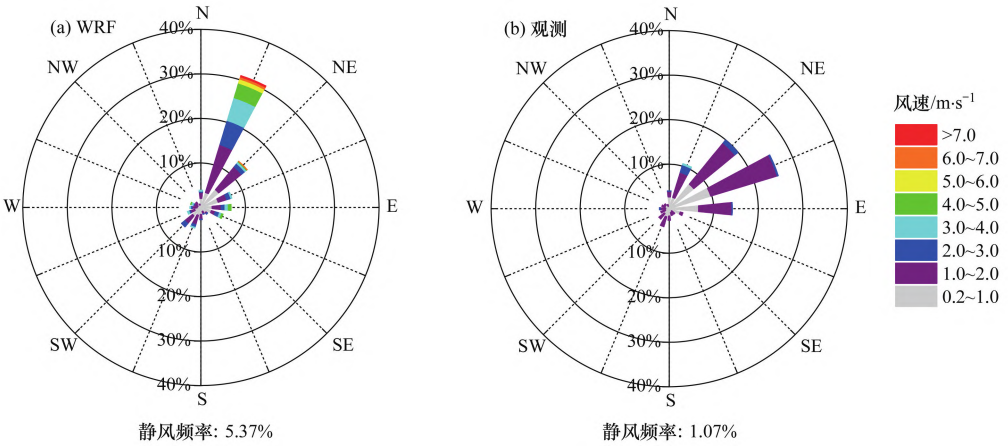
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a1)、(a2)和(a3)为第1组方案08:00,(b1)、(b2)和(b3)为第1组方案20:00

图5 达川站第1组方案08:00和20:00边界层模式高空与观测高空的气象要素统计参数比较

Fig. 5 Statistical parameters of meteorological elements between the measured altitude and the boundary layer model altitude simulated by Group 1



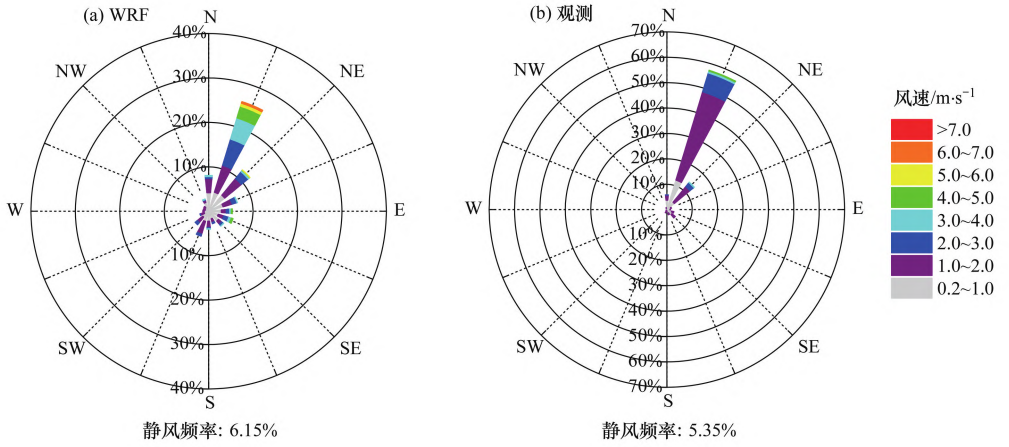
百分数表示风向频率

图6 气象站1号模拟时段WRF第1组方案与观测风玫瑰对比

Fig. 6 Comparison of WRF Group 1 scenario and observed wind roses at weather station No. 1

整体优于AERMOD. 从站点角度分析,CALPUFF在国控站3号的模拟效果相较AERMOD提升较大,NO_x和PM_{10}分别为0.12和0.14,在国控站2号的模拟效果提升较小,NO_x和PM_{10}分别为0.05和0.03. 造成各国控站点模拟效果差异的原因可能是,国控站2号和3号距气象站1号较近,参考该气象站风玫瑰图(图6),国控站3号受主导风影响相对2号较大,且两站距钢铁厂距离相对国控站1号较远,

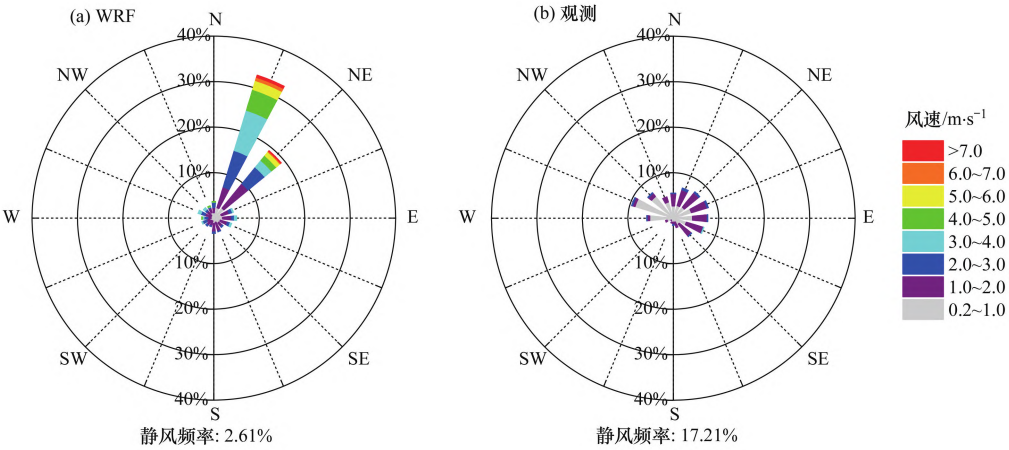
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



百分数表示风向频率

图 7　气象站 2 号模拟时段 WRF 第 1 组方案与观测风玫瑰对比

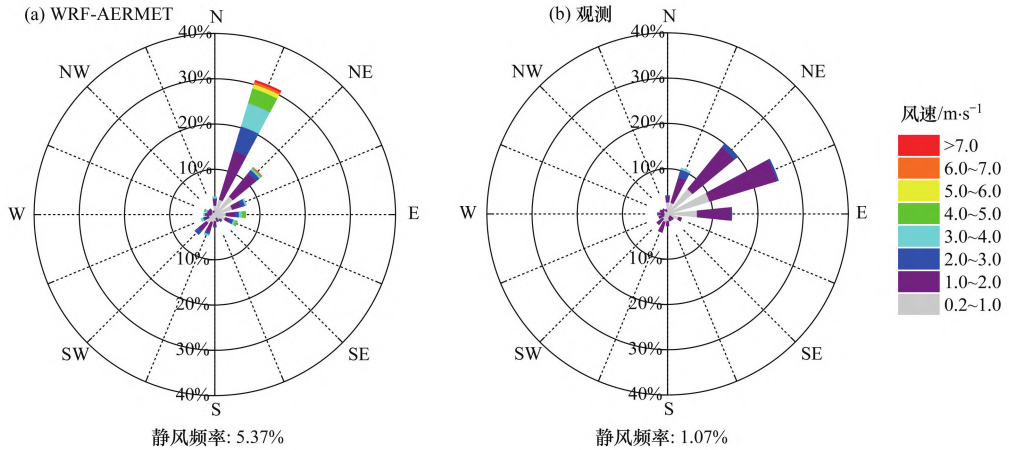
Fig. 7　Comparison of WRF Group 1 scenario and observed wind roses at weather station No. 2



百分数表示风向频率

图 8　气象站 3 号模拟时段 WRF 第 1 组方案与观测风玫瑰对比

Fig. 8　Comparison of WRF Group 1 scenario and observed wind roses at weather station No. 3



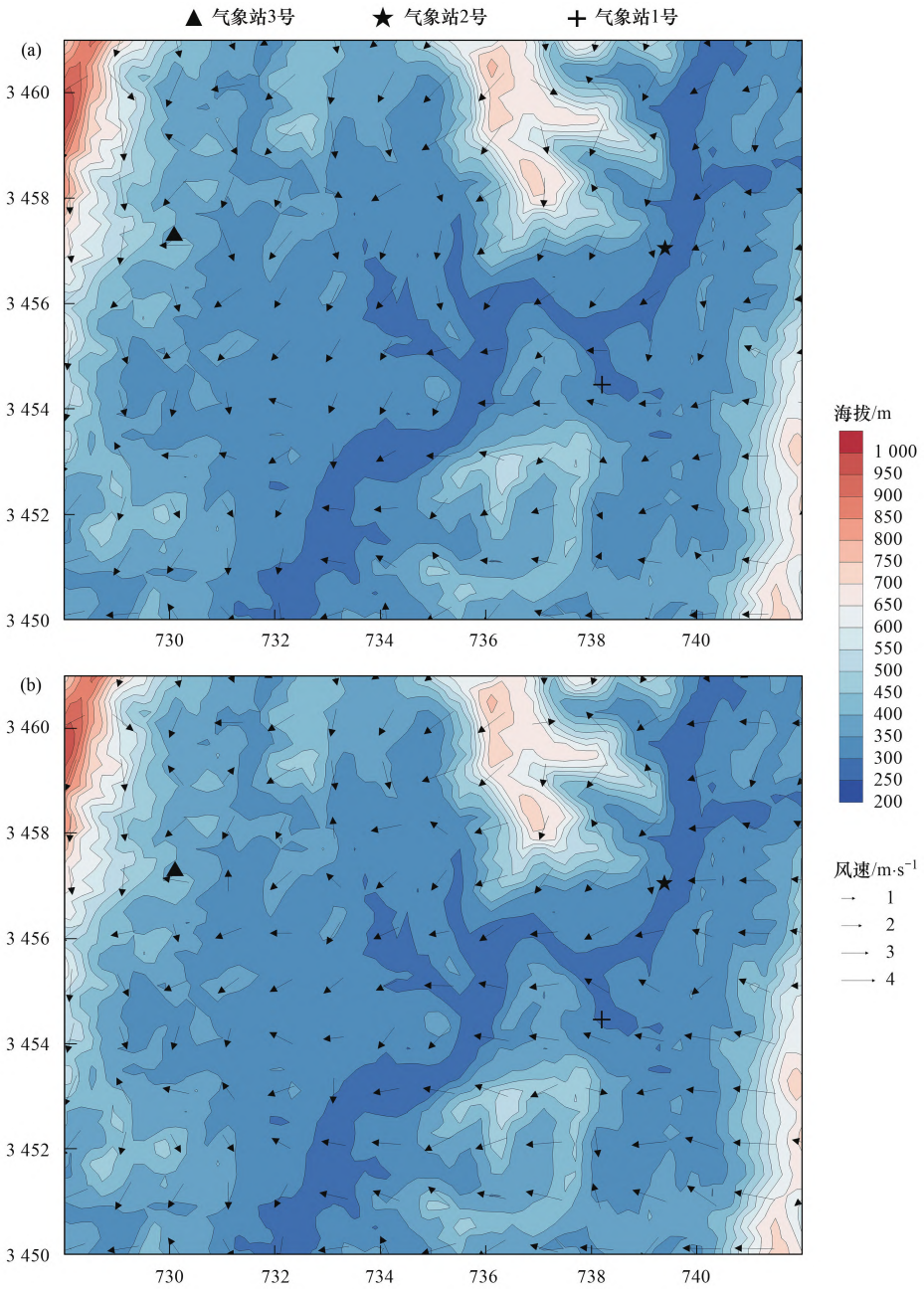
百分数表示风向频率

图 9　气象站 1 号模拟时段 AERMET 与观测风玫瑰对比

Fig. 9　Comparison of AERMET simulation and observed wind roses at weather station No. 1

测站周边相对国控站 4 号生活源和交通源等污染源排放量较大. 从大气污染物角度分析,4 个国控站 CALPUFF 对 NO_x 和 PM_{10}的模拟效果相较 AERMOD 均有不同程度提升,但 SO_2 提升不明显,可能与该区域民用燃煤量较大有关[44]. Q-Q 图可以将模拟值与监测值按照与时间和点位无关的值大小进行排序,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)2017 年 12 月 27 日 08:00,(b)2018 年 1 月 14 日 08:00; UTM 坐标系,数值单位为 km

图 10 研究区域 CALMET 短时风场

Fig. 10 CALMET short-time wind field in the research region

评估空气质量模式模拟效果[45]. 由图 11 可知,SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的落点,CALPUFF 相较于 AERMOD 都更接近于基准线,表明 CALPUFF 模拟结果与监测值更加吻合,模拟结果精确度较高.

本研究 CALPUFF 模拟效果整体优于 AERMOD,可能有以下 5 个原因: ① CALMET 区域气象场相较 AERMET 单点气象场更能充分反映研究区域气象场特征,利用更有代表性的气象背景场,可较准确预测区域污染物浓度. ② CALMET 与 AERMET 对风速、稳定度等气象参数的计算方法不同[30]. ③ CALPUFF 可模拟一些如静风和小风、地形效应的非稳态情景,而 AERMOD 只能模拟稳态情景[35]. ④ CALPUFF 模拟污染物传输和扩散情景,更加符合湍流运动的特征[35]. ⑤ AERMOD 相较 CALPUFF 模拟结果,受干沉降影响较大[30].

表 5 CALPUFF 和 AERMOD 模式小时值模拟效果相关系数检验

Table 5 Correlation coefficient tests for the simulated effects of hourly values of the CALPUFF and AERMOD models

站点名称	2 个模式相关系数差值 ΔR			有效数据
	NO_x	PM_{10}	SO_2	
国控站 1 号	0.06	0.04	-0.02	1 472
国控站 2 号	0.05	0.03	-0.02	1 468
国控站 3 号	0.12	0.14	-0.01	1 465
国控站 4 号	0.07	0.07	0.00	1 461

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

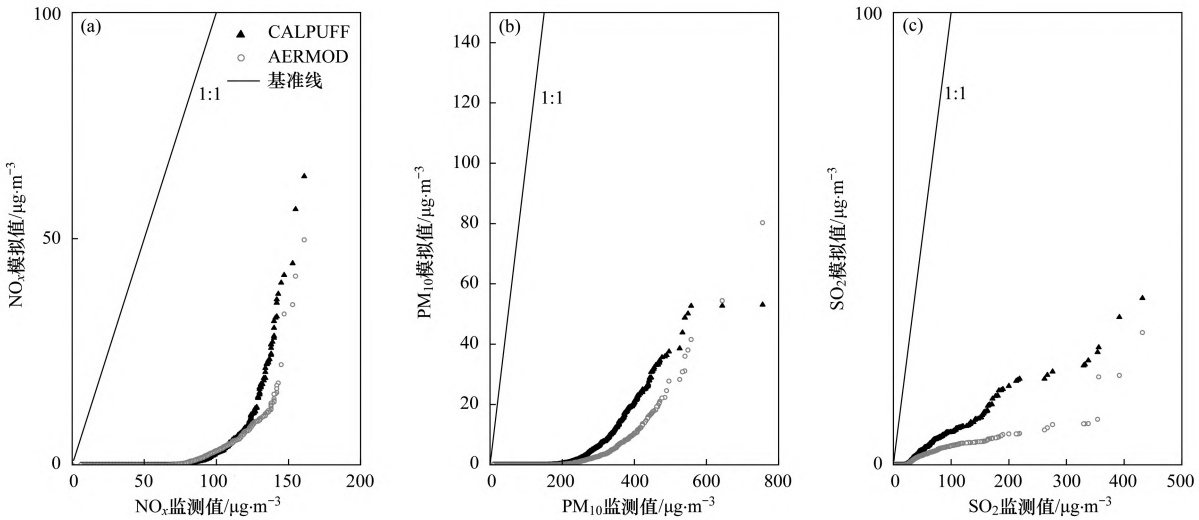


图 11　CALPUFF 模式和 AERMOD 模式小时值模拟效果的图形(Q-Q 图)对比

Fig. 11　Contrast of Q-Q plots between CALPUFF and AERMOD models

3　结论

(1)四川盆地冬季大气污染频发时段,WRF 模式参数化方案选取对地面风场、高空风场和地面湿度场模拟效果影响较大,对地面温度场、高空温度场和高空湿度场模拟效果影响较小. SLAB 陆面过程方案、Dudhia 短波辐射方案分别与 YSU、ACM2、BouLac 和 MRF 边界层方案的组合,均能较好地模拟四川盆地冬季地面风场、温度场和湿度场的变化趋势. 结合高空风温湿统计参数综合分析可知,第 1 组方案适用于达州气象场模拟,第 13 组和第 17 组方案分别适用于成都白天和夜间时段气象场模拟.

(2)利用钢铁厂研究区域模拟效果较好的 WRF 第 1 组方案数据分别驱动 AERMET 和 CALMET,AERMET 单点风场和 CALMET 区域风场模拟结果与气象站数据风向匹配度较高,对区域风向特征模拟效果较好,风速模拟整体偏大. CALPUFF 模拟结果与监测值的相关性整体优于 AERMOD. 从站点角度分析,CALPUFF 在国控站 3 号的模拟效果相较 AERMOD 提升较大,在国控站 2 号的模拟效果提升较小. 从大气污染物角度分析,4 个国控站 CALPUFF 对 NO_x 和 PM_{10}的模拟效果相较 AERMOD 均有不同程度提升. 由 Q-Q 图分析,CALPUFF 对 SO_2、NO_x 和 PM_{10}的模拟结果相较 AERMOD,与监测值更加吻合.

参考文献:

[1] 杨景朝, 陶勇, 杜云松, 等. 四川盆地冬季两次典型大气污染过程对比分析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(8): 1792-1801.
Yang J C, Tao Y, Du Y S, *et al*. Comparative analysis of two typical air pollution processes in Sichuan Basin in winter[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(8): 1792-1801.

[2] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 $PM_{2.5}$浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3136-3146.
Li M Z, Zhang T B, Yi G H, *et al*. Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of $PM_{2.5}$ concentration and its influencing factor analysis in Sichuan Basin, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3136-3146.

[3] Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, *et al*. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(4): 2459-2475.

[4] 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 等. 基于天气背景天津大气污染输送特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4855-4863.
Cai Z Y, Yang X, Han S Q, *et al*. Transport characteristics of air pollution in Tianjin based on weather background [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4855-4863.

[5] 田飞, 伯鑫, 薛晓达, 等. 基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1678-1686.
Tian F, Bo X, Xue X D, *et al*. Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1678-1686.

[6] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, **26**(11): 1191-1199.
Wang X J, Ma H. Progress of application of the weather research and forecast (WRF) model in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, **26**(11): 1191-1199.

[7] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, **30**(12): 27-31.
Zhang G C. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States[J]. Meteorological Monthly, 2004, **30**(12): 27-31.

[8] Kumar A, Patil R S, Dikshit A K, *et al*. Assessment of impact of unaccounted emission on ambient concentration using DEHM and AERMOD in combination with WRF [J]. Atmospheric Environment, 2016, **142**: 406-413.

[9] 高爽, 伯鑫, 马岩, 等. 基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1575-1584.
Gao S, Bo X, Ma Y, *et al*. CALPUFF modeling of the influence of typical industrial emissions on $PM_{2.5}$ in an urban area considering the SOA transformation mechanism [J].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Environmental Science, 2019, **40**(4): 1575-1584.

[10] 王继康, 张碧辉, 张恒德, 等. 边界层方案对华北一次污染过程模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 61-71.
Wang J K, Zhang B H, Zhang H D, *et al*. The impacts of planetary boundary layer schemes on pollutants simulations during an air pollution episode over BTH region [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 61-71.

[11] 梁甜, 陈亮, 何建军, 等. 北京边界层参数化敏感性模拟研究[J]. 高原气象, 2021, **40**(3): 656-670.
Liang T, Chen L, He J J, *et al*. Study of sensitivity simulation of planetary boundary layer parameterization schemes in Beijing [J]. Plateau Meteorology, 2021, **40**(3): 656-670.

[12] 陆正奇, 韩永翔, 夏俊荣, 等. WRF 模式对污染天气下边界层高度的模拟研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 822-829.
Lu Z Q, Han Y X, Xia J R, *et al*. Modeling study on boundary layer height in pollution weather by WRF with different boundary layer schemes[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 822-829.

[13] 张颖, 刘志红, 吕晓彤, 等. 四川盆地一次污染过程的 WRF 模式参数化方案最优配置[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2819-2826.
Zhang Y, Liu Z H, Lv X T, *et al*. Optimal configuration of parameterized schemes in WRF model during a pollution episode in Sichuan Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2819-2826.

[14] 王安庭, 李煜斌, 赵纯, 等. 边界层方案对南京地区 $PM_{2.5}$ 浓度模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 2977-2992.
Wang A T, Li Y B, Zhao C, *et al*. Influence of different boundary layer schemes on $PM_{2.5}$ concentration simulation in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 2977-2992.

[15] 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬. 霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1688-1696.
Zhao X J, Li Z M, Xu J. Modification and performance tests of visibility parameterizations for haze days [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1688-1696.

[16] 高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验[J]. 大气科学, 2016, **40**(2): 371-389.
Gao D M, Li Y Q, Jiang X W, *et al*. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan Basin using the WRF model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, **40**(2): 371-389.

[17] 吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 等. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. 大气科学, 2021, **45**(1): 58-72.
Wu Z P, Li Y Q, Li X L, *et al*. Influence of different planetary boundary layer parameterization schemes on the simulation of precipitation caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin based on the WRF model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, **45**(1): 58-72.

[18] HJ 2.2-2018, 环境影响评价技术导则 大气环境[S].

[19] 陈雷, 王鹏, 伯鑫, 等. 新冠期间河北省典型钢铁企业大气污染影响[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3927-3933.
Chen L, Wang P, Bo X, *et al*. Air quality impacts of emissions from a typical iron and steel plant in Hebei Province during the coronavirus disease (COVID-19) [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3927-3933.

[20] 伯鑫. 基于空气质量模型 AERMOD 的城市钢铁厂优化布局研究[A]. 见: 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷)[C]. 西安: 中国环境科学学会, 2019. 652-656.

[21] 孙博飞, 伯鑫, 张尚宣, 等. 钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(11): 4222-4229.
Sun B F, Bo X, Zhang S X, *et al*. Effect of exhaust gas from sintering machines on the concentration of dioxin in soil around a steel plant[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(11): 4222-4229.

[22] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2742-2747.
Bo X, Wang G, Wen R, *et al*. Health risk assessment of coke oven PAHs emissions [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2742-2747.

[23] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 京津冀地区火电企业的大气污染影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, *et al*. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 364-373.

[24] 范武波, 陈军辉, 唐斌雁, 等. 成都市施工扬尘排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3767-3775.
Fan W B, Chen J H, Tang B Y, *et al*. Dust emission characteristics of construction activities in Chengdu[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3767-3775.

[25] 袁文燕, 王鹏, 伯鑫, 等. 含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(7): 3173-3178.
Yuan W Y, Wang P, Bo X, *et al*. The potential impact of bioaerosol emissions on human health threats [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(7): 3173-3178.

[26] 李煜婷, 金宜英, 刘富强. AERMOD 模型模拟城市生活垃圾焚烧厂二噁英类物质扩散迁移[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 985-992.
Li Y T, Jin Y Y, Liu F Q. Diffusion and transformation of PCDD/Fs of municipal waste incineration plant by using AERMOD model[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(6): 985-992.

[27] 薛佳平, 田伟利, 张清宇. 杭州市机动车 NO_x 排放清单的建立及其对空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(5): 613-618.
Xue J P, Tian W L, Zhang Q Y. Development of NO_x emission inventory from motor vehicles in Hangzhou and study on its influence on air quality [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(5): 613-618.

[28] 陈强, 吴焕波. 固定源排放污染物健康风险评价方法的建立[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1646-1652.
Chen Q, Wu H B. Establishment of method for health risk assessment of pollutants from fixed sources[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1646-1652.

[29] 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 等. 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5250-5257.
Zhu T, Lv Y R, Bian W J, *et al*. VOCs emission inventory and impact range simulation of antibiotic enterprises [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5250-5257.

[30] 史梦雪, 伯鑫, 田飞, 等. 基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 24-30.
Shi M X, Bo X, Tian F, *et al*. Study on deposition effects of dioxins based on different air quality models [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 24-30.

[31] 向怡, 史学峰, 吴玉生. 大同盆地复杂地形下近场大气污染

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物扩散模型选取研究[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(1): 45-50.
Xiang Y, Shi X F, Wu Y S. Study on the selection of near-field air pollutants diffusion model in complex terrain of Datong Basin [J]. Environmental Pollution and Control, 2022, **44**(1): 45-50.

[32] Bo X, Jia M, Xue X D, *et al*. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions[J]. Nature Sustainability, 2021, **4**(9): 811-820.

[33] 伯鑫. 中国钢铁行业大气污染物排放特征及其环境影响研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.

[34] 汤铃, 贾敏, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1493-1506.
Tang L, Jia M, Bo X, *et al*. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(4): 1493-1506.

[35] 伯鑫. 空气质量模型: 技术、方法及案例研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018.

[36] 田越, 苗峻峰, 赵天良. 污染天气下成都东部山地—平原风环流结构的数值模拟[J]. 大气科学, 2020, **44**(1): 53-75.
Tian Y, Miao J F, Zhao T L. A numerical simulation of mountain-plain breeze circulation during a heavy pollution event in eastern Chengdu [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, **44**(1): 53-75.

[37] 彭妍君, 张鑫, 张强. “大气十条”实施对 2013—2017 年大气气溶胶-辐射相互作用的影响[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 311-320.
Peng Y J, Zhang X, Zhang Q. Impact of the implementation of the “Ten Statements of Atmosphere” on the atmospheric aerosol-radiation interaction during 2013- 2017 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 311-320.

[38] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 173-184.
Wang Y, Wang L L, Zhao G N, *et al*. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of $PM_{2.5}$ heavy pollutions in Beijing during winter[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 173-184.

[39] 苗世光, 蒋维楣, 王晓云, 等. 城市小区气象与污染扩散数值模式建立的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(4): 478-483.
Miao S G, Jiang W M, Wang X Y, *et al*. Numerical simulation of meteorology and pollutant diffusion in urban sub-domain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(4): 478-483.

[40] 伯鑫, 王刚, 田军, 等. AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2570-2575.
Bo X, Wang G, Tian J, *et al*. Standard systems of surface parameters in AERMOD[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2570-2575.

[41] 杨景朝, 伯鑫, 田军, 等. WRF 四维同化数据在空气质量法规模型 CALPUFF 的应用研究[J]. 环境工程, 2018, **36**(7): 165-169.
Yang J C, Bo X, Tian J, *et al*. Application of four-dimension data assimilation methods in CALPUFF [J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(7): 165-169.

[42] 王成鑫, 楚英豪, 阮建辉, 等. AERMOD 模型地表参数更新对模拟效果影响[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(5): 2070-2077.
Wang C X, Chu Y H, Ruan J H, *et al*. Research on the influence of AERMOD model surface parameter update on simulation effect[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(5): 2070-2077.

[43] 石春娥, 李耀孙, 杨军, 等. MM5 和 WRF 对中国东部地区冬季边界层模拟效果比较[J]. 高原气象, 2015, **34**(2): 389-400.
Shi C E, Li Y S, Yang J, *et al*. Comparison of simulations on winter sounding profiles in PBL in east China between WRF and MM5[J]. Plateau Meteorology, 2015, **34**(2): 389-400.

[44] 乔玉红. 达州市冬季大气细颗粒物污染成因分析[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.

[45] 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.
Yang J C, Ma Z F, Bo X, *et al*. Standardization of meteorological observation data of surface in air regulatory model [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 2950-2957.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net