

# 1 植被覆盖率对内蒙古沙尘天气影响的模拟研究

2 衣娜娜<sup>1,2</sup> 姜学恭<sup>3</sup> 董祝雷<sup>4</sup> 樊茹霞<sup>1,2</sup> 史金丽<sup>1,2</sup>

3 1.内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特市 010000

4 2.内蒙古自治区人工影响天气重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010000

5 3.内蒙古古自治区气象台, 呼和浩特 010000;

6 4.内蒙古自治区气候中心

7 **摘要:** 利用 WRF-chem 模式及不同植被覆盖率的敏感试验, 模拟了内蒙古地区一  
8 次典型沙尘过程, 研究了植被覆盖率对沙尘天气强度演变及远距离传输的影响。  
9 结果表明: 耦合 Shao\_04 起沙参数化方案的 WRF-chem 模式能较好地再现实际  
10 沙尘输送过程。当沙源地植被覆盖率增加 5%, 起沙总量削减 50%, 下游地区地  
11 面沙尘浓度的削减 > 80%, PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的削减接近或超过 80%, 空气质量  
12 由严重污染降低到轻度污染, 有效改善了大气环境; 当植被覆盖率增加 ≥ 15%,  
13 大粒径沙粒贡献率逐渐增加, 沙尘输送过程中沉降速率增加, 导致下游地区沙尘  
14 天气峰值浓度提前。可以初步得出结论, 植被覆盖率增加, 叶面积指数增大, 植  
15 被对细粒子的捕获作用增强。所以, 植树造林等荒漠化治理工作应该首先在细粒  
16 子为主的半荒漠化地区开展。

17 **关键词:** 植被覆盖率 WRF-chem 模式 沙尘浓度时空分布 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 沙尘粒  
18 径

19 **文章编号:** 2022017B

20 **doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22017

21  
22  
23  
24  

---

**收稿日期:** 2022.06.16 **网络预出版日期:**

**资助项目:** 国家自然科学基金 (41965003)、内蒙古自治区自然科学基金 (2021MS04026)

**作者简介:** 衣娜娜 (1989-), 女, 内蒙古人, 硕士, 工程师, 主要从事云降水物理、模式研究和人工影响  
天气, E-mail:yinnongzhl@163.com

**通讯作者:** 姜学恭, E-mail:jiangxuegong@aliyun.com

# A Study on the Influence of Vegetation Coverage on Dust

## Weather in Inner Mongolia

YI Nana<sup>1,2</sup> JIANG Xuegong<sup>3</sup> DONG Zhulei<sup>4</sup> FAN Ruxia<sup>1,2</sup> SHI Jinli<sup>1,2</sup>

1. Meteorological Research Institute of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010000
2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Weather Modification, Hohhot 010000 China;
3. Regional Meteorological Observatory of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010000
4. Inner Mongolia Autonomous Region Climate Centre, Hohhot 010000

**Key words:** vegetation coverage, WRF-chem model, temporal and spatial distribution of dust concentration, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>

**Abstract:** Using the WRF-chem model and sensitive tests of different vegetation coverage, a typical dust process in Inner Mongolia was simulated, and the influence of vegetation coverage on the evolution of dust weather intensity and long-distance transportation was studied. The results show that: the WRF-chem coupled with Shao\_04 sand parameterization scheme can better reproduce the actual dust transportation. Sensitivity experiments of different vegetation coverage found when vegetation coverage of sand source area was increased by 5%, the total amount dust was reduced by 50%; the reduction of surface dust concentration including PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in downstream area was more than 80% or close to 80%; the air quality was reduced from serious pollution to light pollution, which effectively improved the atmospheric environment. When vegetation coverage was increased by 15% or more, the contribution rate of large grain sand particles gradually increased, and the sedimentation rate increased during dust transportation leading to the advance of the peak concentration of dust weather in the downstream areas. The vegetation coverage increased, the leaf area index increased, and the capture effect of vegetation on fine particles was enhanced. It can be preliminarily concluded that desertification control projects such as afforestation should first be carried out in semi-desertification areas with fine particles.

### 1 引言

沙尘天气是指大量沙尘被强风吹起,使空气浑浊,水平能见度下降的天气现象,是在特定的地理环境、下垫面条件和大尺度环流背景下诱发的一种危害大的灾害性天气,多发生于荒漠化严重的干旱半干旱地区(姜学恭,2006;安林昌等,2015;刘筱冉,2018;石广玉等,2018;Chen et al,2021)。中国西部、北部沙漠每年

58 向大气注入的沙尘量约为 8 亿吨 (王宏等, 2007), 大量沙尘随西和西北气流不仅  
59 可以输送到华北及长江中下游地区 (曾淑玲等, 2010), 而且还可以抵达韩国、日  
60 本、太平洋地区 (Huang et al, 2008; Lee et al, 2011), 对空气质量、人类健康、生  
61 产生活和交通安全等造成严重影响 (Chan et al, 2011; Rashkia et al, 2015)。我国  
62 政府对这一问题高度重视, 于 2001 年开始相继启动了京津风沙源治理一期(2001-  
63 2005 年)和二期 (2006-2010 年) 工程。覃云斌等 (2012) 研究表明, 京津风沙  
64 源治理工程区后期 (2003-2007 年) 较前期 (2000-2002 年) 植被 NDVI 指数上升  
65 超过 10% 的区域占总面积 48.0%, 超过 30% 的区域占总面积 9.6%。

66 近 43 年, 中国北方地区的沙尘天气频数呈减少趋势 (Wei et al, 2020; 王春  
67 学等, 2018)。沙尘天气频数的减少除了与气象因子有关外 (Lee et al, 2015; Li et  
68 al, 2015; Briceno et al, 2017), 还与下垫面植被状况 (罗凤敏等, 2019)、土壤含水  
69 量等有关 (Mao et al, 2013; Li et al, 2015)。正是由于下垫面对沙尘天气直接和间  
70 接的影响, 以京津风沙源治理工程为代表的荒漠化治理得以实施并逐步取得效果。  
71 很多学者利用观测或再分析数据研究发现植被与沙尘存在明显的负相关关系 (陈  
72 亿等, 2012; 李杨等, 2010; 徐兴奎等, 2009; 张钦仁等, 2008a; 崔晓等, 2018)。我  
73 国是世界上荒漠化土地面积最大的国家之一, 以植被恢复为主的生态修复是荒漠  
74 化综合治理中最基本和最主要的措施 (张海月等, 2020), 而植被对沙源地起沙、  
75 对沙尘输送及对下游地区空气质量的影响, 目前还比较缺乏定量化的研究结果。

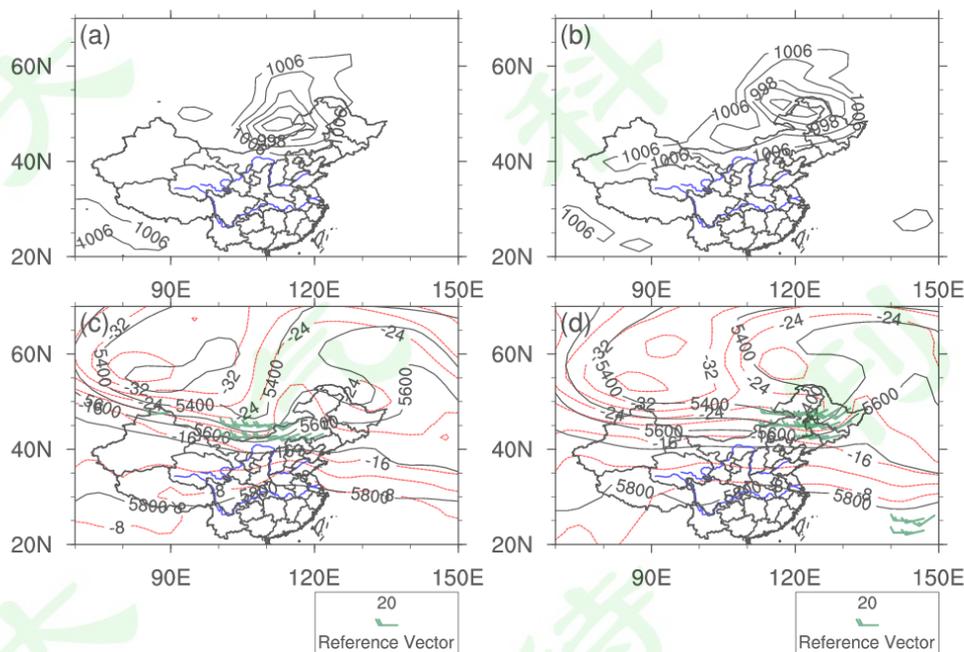
76 数值模式对大气的动力和热力过程有较好的描述, 可以弥补沙尘观测资料的  
77 不足, 又可以再现实际沙尘启动、输送的时空分布特征, 已成为研究沙尘暴的一  
78 种重要手段 (张钦仁, 2008b)。较多的学者利用模式研究了沙尘的输送及时空分  
79 布特征 (Filonchyk et al, 2018; Mehdi, 2017; Fan J, 2017; 彭璐等, 2020; 衣娜娜等,  
80 2020), 关于植被对沙尘天气定量化影响的模拟研究较少, 内蒙古地区相关研究  
81 更少。内蒙古地区是我国沙尘天气的主要沙尘源之一, 同时是京津风沙源治理工  
82 程的主要区域, 深入分析这一问题不仅关系到沙尘天气的灾害防御及气候、生态  
83 和环境影响评估, 同时也能为荒漠化治理工作提供科学依据, 因而有必要进行深  
84 入研究。

85 本文利用 WRF-chem 模式, 通过不同植被覆盖率的敏感性试验, 探讨了植被  
86 覆盖率对沙尘起沙、沙尘粒径贡献率、沙尘输送时空分布及下游地区空气质量的  
87 影响, 为后续沙尘源地治理提供科学依据。

88 2 天气背景和观测资料

89 2.1 天气背景

90 2019年5月14~16日，在蒙古国和我国北方出现一次由蒙古气旋引发的沙  
91 尘暴天气过程，内蒙古大部、甘肃、宁夏、陕西、东北三省部分地区受到影响，  
92 其中，内蒙古中部偏北地区出现沙尘暴。此次过程大气环流形势见图1，文中所  
93 用地图基于内蒙古自治区标准地图服务网站下载的审图号为蒙s(2019)33的标  
94 准地图制作，地图无修改。由图可知，500hPa欧亚大陆为一槽一脊，高脊位于贝  
95 加尔湖以东，贝加尔湖以西至欧洲西海岸维持一宽广低槽区，并有低涡形成。同  
96 时，地面存在一个发展强盛的蒙古气旋，并在蒙古国南部、内蒙古西部引发沙尘  
97 暴。气旋后部强冷平流带来的极端大风和阵风在蒙古国南部和内蒙古中北部持续  
98 时间较长，为沙尘的发生和发展提供了充足的动力条件。随着气旋中心向东缓慢  
99 移动，气旋冷锋后部及前部西南风区域沙尘区自西向东推进，导致大范围沙尘暴  
100 天气。16日08时(UTC，下同)，沙尘区移动到内蒙古东部、黑龙江、吉林一  
101 带。



102  
103 图1 2019年5月15日08:00与16日08:00海平面气压场(单位:hPa),500hPa位势高度  
104 场(黑实线,单位:gpm)与温度场(红虚线,单位:℃)、850hPa风场(绿色风羽,单

105 位: m/s, 数值 20m/s, 850hPa 风场只绘制风速大于等于 12m/s 的数值), (a)、(c) 为 15  
106 日 08:00, (b)、(d) 为 16 日 08:00

107 Fig. 1 Sea level pressure field (unit:hPa), 500hPa geopotential height field (black solid line, unit:  
108 gpm) and temperature field (red dotted line, unit: °C) and 850hPa wind field (green plume, unit:  
109 m/s, reference value :20m/s ) from May 15th to 16th, in 2019, figure (a) and (c) are 08:00 on 15th,  
110 figure (b) and (d) are 08:00 on 16th

## 111 2.2 数据资料

112 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)  
113 是结合了激光雷达探测器和红外、可见光成像器的综合卫星观测, 其携带的双偏  
114 振激光雷达 (CALIOP) 通过探测非球形粒子后向散射光的退偏振比, 能有效地  
115 监测沙尘气溶胶等非球型气溶胶, 可以在任何地形、薄云和晴空条件下观测气溶  
116 胶的垂直分布 (Omar et al, 2009; 姜学恭等, 2014; 黄悦等, 2021)。2019 年 5 月  
117 15 日 18:24 卫星过境中国东部地区, 可以检验模式模拟沙尘的垂直分布。

118 葵花 8 号卫星 (Himawari 8) 是三轴稳定静止气象卫星。相对于极轨卫星,  
119 葵花 8 号卫星具有空间分辨率高、观测频率高及观测范围广的优势。目前葵花卫  
120 星数据被广泛应用于天气、海洋、火点、气溶胶等监测 (赵垒等, 2020; 吴晓等,  
121 2018)。2019 年 5 月 15 日 02:00 葵花 8 号卫星观测到沙尘区位于甘肃省与阿拉  
122 善盟交界处、蒙古国南部、锡林郭勒盟西北部, 可以检验模式模拟沙尘的水平分  
123 布。

124 微震荡天平式大气粒子监测仪可以观测 PM<sub>10</sub> 质量浓度 (μg/m<sup>3</sup>), 仪器采  
125 样时间间隔 300s, 可以提供小时质量平均浓度和 24 小时质量平均浓度, 目前内  
126 蒙古地区共有 12 个站点能观测 PM<sub>10</sub>。利用朱日和、二连浩特和锡林浩特 2019  
127 年 5 月 14 日 00:00-16 日 22:00 PM<sub>10</sub> 质量浓度数据检验模式模拟的 PM<sub>10</sub> 质量浓  
128 度。

129 空气质量指数 (AQI, Air Quality Index), 反映和评价空气质量, 具体计算如  
130 公式(1), 空气质量分数、对应污染物浓度限值及空气质量等级参考 (HJ633-2012)。

131

$$132 \quad IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi}} (C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

133

134 式中 $IAQI_P$ 污染物项目  $P$  的质量分数,  $C_P$ 污染物项目  $P$  的 24 小时平均质量  
135 浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $BP_{Hi}$ 表示与 $C_P$ 相近的污染物浓度限值的高位值,  $BP_{Lo}$ 表示与 $C_P$ 相  
136 近的污染物浓度限值的低位值,  $IAQI_{Hi}$ 表示与 $BP_{Hi}$ 对应的空气质量分数,  $IAQI_{Lo}$   
137 表示与 $BP_{Lo}$ 对应的空气质量分数。

### 138 3 模式参数化方案和检验

#### 139 3.1 模式参数化和模拟方案

140 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是由美国国家大气研究中心  
141 (NCAR, National Center for Atmospheric Research) 和美国环境预报中心 (NCEP,  
142 National Centers for Environmental Prediction) 共同研发的中尺度数值天气预报和  
143 模拟系统。WRF-chem 模式是在 WRF 模式基础上耦合了 chem 化学模块, 实现  
144 了气象模块和化学模块完全在线耦合的大气动力-化学模式, 并且能够考虑化学  
145 对气象过程的反馈作用 (衣娜娜等, 2020; 刘杨等, 2021)。目前 WRF-chem 模式  
146 引入了 5 种沙尘起沙参数化方案, 分别是 GOCART、AFWF、Shao\_01、Shao\_04  
147 和 Shao\_11, 不同起沙参数化方案的根本区别在于垂直沙通量的计算。吴成来等  
148 (2014) 利用 GOCART 方案模拟东亚一次强沙尘过程, 发现 GOCART 方案忽略  
149 了蒙古国东南部和内蒙古东部潜在的沙尘源地, 使得模式模拟沙尘源及下游地区  
150 的沙尘浓度偏小。刘筱冉 (2018) 利用 WRF-chem 耦合 5 种不同起沙参数化方  
151 案模拟西北地区一次强沙尘过程, Shao\_11 方案对  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的模拟结果优于  
152 其他四种方案; 周旭等 (2017) 和衣娜娜等 (2020) 分别用 WRF-chem 模式耦合  
153 Shao\_04 方案研究西北地区和内蒙古地区沙尘输送和沙尘气溶胶辐射效应, 发现  
154 模式能较好再现实际沙尘输送过程。

155 本文利用 WRF-chem 模式耦合 3 种 (Shao\_01、Shao\_04、Shao\_11) 起沙参  
156 数化方案, 模拟研究了 2019 年 5 月 14~16 日, 内蒙古中东部发生的一次强沙尘  
157 过程。三种参数化方案垂直沙尘通量的计算公式如下, Shao\_01 (公式 2) (Shao,  
158 2001), Shao\_04 (公式 3-公式 7) (Shao, 2004), Shao\_11 (公式 8) (Shao, 2011),

$$159 \quad F(d_i, d_j) = c_y \left[ (1 - \gamma) + \gamma \frac{P_m(d_j)}{P_f(d_j)} \right] \frac{Qg}{u_*^2 m} (\rho_b \eta_{fj} \Omega + \eta_{cj} m) \quad (2)$$

160 式中 $c_y$ 比例系数,  $\gamma$ 为与沙尘粒径分布有关的权重因子, 表示集合沙粒被释

161 放的难易程度,  $P_m(d_j)$ 沙尘粒径的最小分布,  $P_f(d_j)$ 沙尘粒径的全分布,  $g$ 为重力  
 162 加速度,  $u_*$ 摩擦风速,  $m$ 为粒径 $d$ 的沙粒质量,  $\rho_b$ 土壤密度,  $\eta_{fj}$ 土壤排放到大气  
 163 中的沙粒质量分数,  $\eta_{cj}$ 覆盖于集合体表面沙粒的质量分数,  $\Omega$ 沙粒轰击土壤表面  
 164 所产生凹坑的体积,  $Q$ 水平沙尘通量。

$$165 \quad F(d_i, d_j) = c_y \eta_{fj} \left[ (1 - \gamma) + \gamma \frac{P_m(d_j)}{P_f(d_j)} \frac{Qg}{u_*^2} (1 + \sigma_m) \right] \quad (3)$$

$$166 \quad \gamma = \exp[-\kappa((u_* - u_{*t})^3)] \quad (4)$$

$$167 \quad \sigma_m = 12u_*^2 \frac{\rho_a}{p} \left( 1 + 14u_* \sqrt{\frac{\rho_b}{p}} \right) \quad (5)$$

$$168 \quad p(d) = \gamma p_m(d) + (1 - \gamma) p_f(d) \quad (6)$$

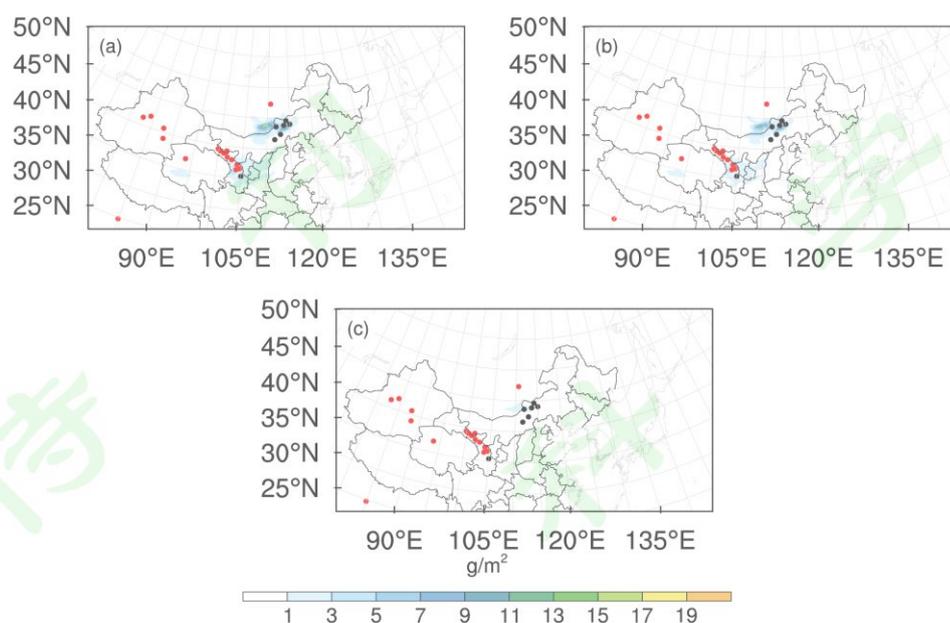
$$169 \quad \gamma = \begin{cases} 1 & u_* \rightarrow u_{*t} \\ 0 & u_* \geq u_{*t} \end{cases} \quad (7)$$

170 Shao\_04 垂直沙通量的计算公式中与 Shao\_01 符号相同的变量, 其物理意  
 171 义与 Shao\_01 相同,  $p$ 为土壤塑性压力,  $\kappa$ 表示随着摩擦速度 $u_*$ 增加,  $\gamma$ 趋近 0 的  
 172 速度,  $\gamma$ 范围 0~1, 摩擦速度越大,  $\gamma$ 越小, 风蚀起沙强度越大。

$$173 \quad F(d_i, d_j) = c_y \eta_{fj} \frac{p_m(d_j)}{p_f(d_j)} \frac{Qg}{u_*^2} (1 + \sigma_m) \quad (8)$$

174 Shao\_04 垂直沙通量计算公式中 $\gamma$ 等于 1, 即是 Shao\_11 方案计算的垂直沙  
 175 通量。

176 分别用上述三种参数化方案模拟此次沙尘过程, 如图 2, Shao\_04 和 Shao\_01  
 177 均模拟出起沙阶段锡林浩特西北部的沙尘天气, Shao\_11 的模拟较差。进一步分  
 178 析 Shao\_04 和 Shao\_01 对地面沙尘浓度的模拟 (图略), Shao\_01 模拟的沙尘浓  
 179 度时间变化与实况差异较大, 主要表现在峰值出现时间。所以下垫面因素的敏感  
 180 性试验选用 WRF-chem 模式耦合 Shao\_04 起沙参数化方案。模拟时间 2019 年 5  
 181 月 14 日 00:00 至 2019 年 5 月 17 日 00:00。模拟初始条件及边界条件使用  
 182 NCEP/NCAR 6h/1 次的 FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  全球再分析资料。模拟区域中心点 ( $112.0^\circ$   
 183 E,  $43.5^\circ$  N), 水平分辨率 30km, 格点数 220 (东西)  $\times$  120 (南北), 每 1h 输  
 184 出 1 次。



185

186 图2 三种起沙参数化方案 (a) Shao\_04、(b) Shao\_01、(c) Shao\_11 模拟的 2019 年 5 月  
 187 15 日 03:00 沙尘垂直柱总量, 黑色实心点为观测到沙尘暴的气象站, 红色实心点为观测到  
 188 浮尘的气象站

189 Fig. 2 The dust load at 03:00 on May 15, 2019. The black solid point is sandstorm weather  
 190 observed by stations, and the red solid point is floating dust weather observed by stations.

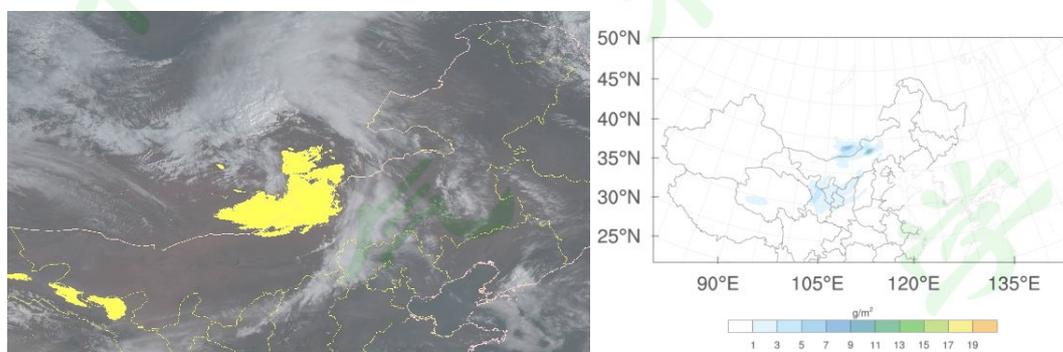
191 Shao\_04(a), Shao\_01(b), Shao\_11(c)

## 192 3.2 模式检验

### 193 3.2.1 沙尘水平分布检验

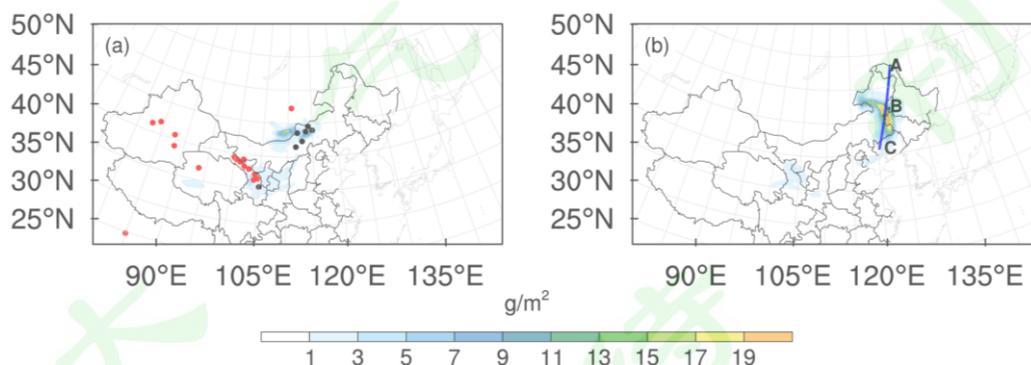
194 2019 年 5 月 15 日 00:00, 内蒙古中东部地面为一发展强盛的蒙古气旋, 高  
 195 层 850hPa~700hPa 均维持一个低涡结构。受气旋后部强冷平流带来的极端大风影  
 196 响, 蒙古国南部和内蒙古中北部出现浮尘和沙尘暴天气。随着大风区的持续和东  
 197 移, 沙尘东移过程中浓度逐渐增大。模式模拟的沙尘垂直柱总量空间分布如图 3  
 198 和图 4。5 月 15 日 02:00 (图 3), 葵花 8 号卫星观测到在甘肃省与阿拉善盟交界  
 199 处、蒙古国南部、锡林郭勒盟西北部有沙尘覆盖, 模式模拟的沙尘垂直柱总量分  
 200 布与卫星观测基本一致。5 月 15 日 03:00 (图 4), 在蒙古国南部和内蒙古中北部  
 201 沙尘垂直柱总量最大值  $16.03\text{g/m}^2$ , 在沙尘高值中心的临近及下游观测站点均观

202 测到了沙尘暴天气。甘肃省东部受前期沙尘过程影响，一直持续浮尘天气。新疆  
 203 部分观测站点出现短暂的浮尘天气，而模式并未模拟出新疆中部局地的浮尘天气，  
 204 原因可能是新疆中部少数站点出现的浮尘天气不属于此次系统性沙尘过程，所以  
 205 模式对局地短暂的沙尘天气模拟还存在一定的误差。5月15日18:00，沙尘东移  
 206 到内蒙古东部、吉林、黑龙江地区，沙尘垂直柱总量最大值  $26.07\text{g/m}^2$ 。甘肃省  
 207 中部的浮尘天气持续时间长，主要受到高空槽后下沉气流及地面高压系统的影响，  
 208 沙尘扩散缓慢。整体而言，耦合 Shao\_04 起沙参数化方案的 WRF-chem 模式能  
 209 较好的模拟此次沙尘的水平输送，同时较准确地模拟了前期沙尘天气过程后的  
 210 浮尘天气。



211  
 212 图3 2019年5月15日02:00 (a) 葵花8卫星观测的沙尘区域 (图中黄色填充区域), (b)  
 213 模式模拟的沙尘垂直柱总量

214 Fig. 3 (a) The dust observed by Himawari-8 (the yellow shaded area) and (b) the simulated dust  
 215 load at 02:00 on May 15, 2019



217  
 218 图4 2019年5月15日03:00和5月15日18:00模拟沙尘垂直柱总量, (a) 黑色实心点为  
 219 观测到沙尘暴的气象站, 红色实心点为观测到浮尘的气象站, (b) 中蓝色实线表示  
 220 CALIPSO 5月15日18:00左右过境的轨迹, A点 ( $124.99^\circ\text{E}$ ,  $53.04^\circ\text{N}$ ), B点

221

(122.44°E, 47.03°N), C 点 (120.32°E, 40.98°N)

222

Fig. 4 The simulated dust load at 03:00 and at 18:00 on May 15, 2019. (a)The black solid point is

223

sandstorm weather observed by stations, and the red solid point is floating dust weather observed

224

by stations. (b) The blue solid line represents the crossing trajectory of CALIPSO at 18:00 May

225

15, 2019. point A (124.99°E, 53.04°N), point B (122.44°E, 47.03°N), point C (120.32°E, 40.98°N)

226

### 227 3. 2. 2 沙尘垂直分布检验

228

CALIPSO 18:24 运行轨迹的 A 点 (124.99°E, 53.04°N) -B 点 (122.44°E,

229

47.03°N) 观测的气溶胶类型为零星、不成片的污染性沙尘气溶胶, 应不属于此

230

次系统性沙尘天气过程; B 点-C 点 (120.32°E, 40.98°N), 沙尘气溶胶主要分布

231

在 0.0km-4.0km (图 5b)。图 5a 为沿 CALIPSO 运行轨迹 A-C 模式模拟的沙尘垂

232

直分布, A-B 间无沙尘与图 5b 基本一致, B-C 间沙尘分布在 4.0km 以下, 也基

233

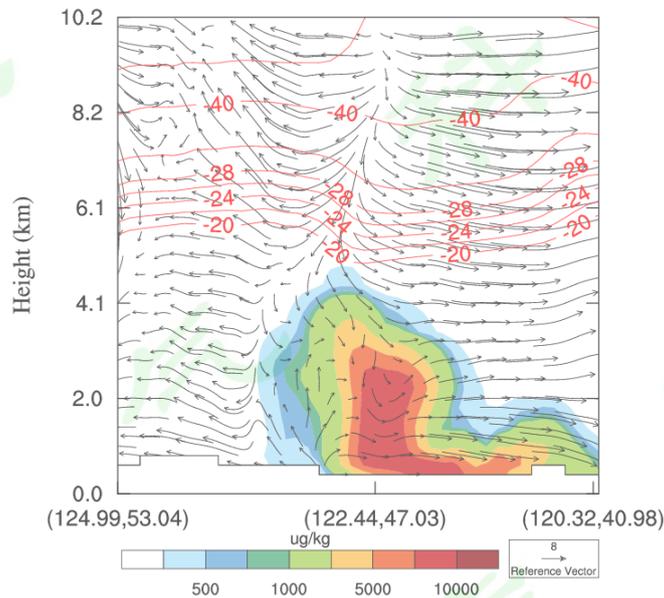
本与图 5b 实况吻合。可见, 耦合 Shao\_04 起沙参数化方案的 WRF-chem 模式较

234

好地模拟了此次沙尘的发生和远距离输送。

235

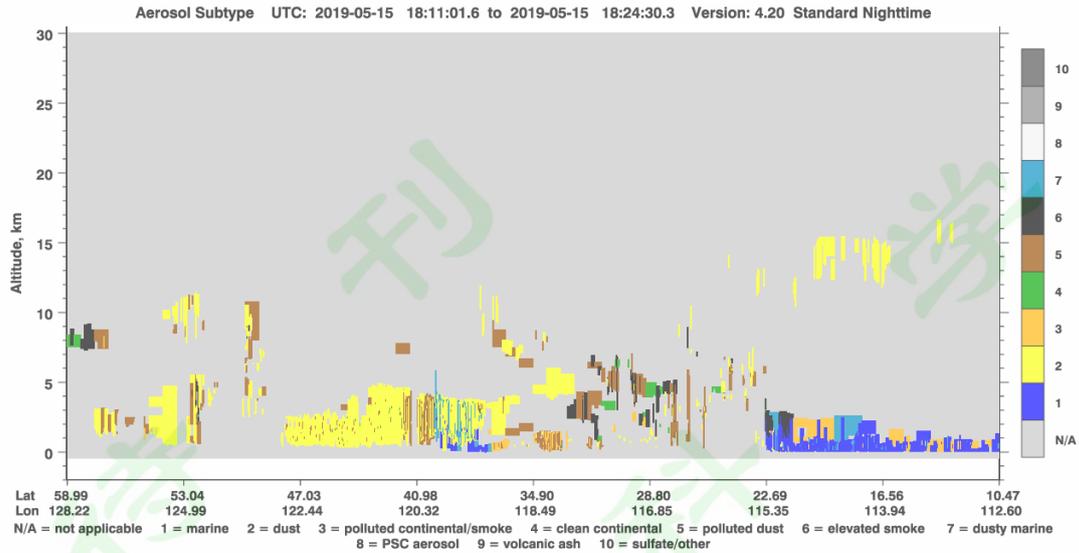
(a)



236

237

(b)



238

239 图5 (a) 2019年5月15日18:00沿卫星轨迹A(124.99°E, 53.04°N)-C(120.32°E,  
 240 40.98°N)模式模拟的沙尘浓度(单位:  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、U和W\*100合成流场  
 241 (单位:  $\text{m}/\text{s}$ )的垂直分布, (b) CALIPSO 18:24观测的气溶胶类型

242 Fig. 5 (a) The vertical distribution of dust concentration (unit:  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), and  
 243 the flow field of U and W\*100 (unit:  $\text{m}/\text{s}$ ) along the satellite transit trajectory A (124.99°E,  
 244 53.04°N) -C (120.32°E, 40.98°N) at 18:00 on May 15, 2019, (b) the aerosol type observed by  
 245 CALIPSO at 18:24

### 246 3.2.3 沙尘地面浓度检验

247 二连浩特与朱日和5月14~16日观测与模拟的 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度见图6, 误差  
 248 (误差=观测值-模拟值)见图7。二连浩特站与朱日和站模拟 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度时  
 249 间变化与实况基本一致, 5月15日02:00模拟值与观测值均达到峰值。模拟值  
 250 较观测值整体偏低(80%的误差值大于0), 误差值与观测值正相关, $\text{PM}_{10}$ 质量  
 251 浓度大, 误差值大, $\text{PM}_{10}$ 质量浓度小, 误差值小。一方面双线性插值方法存在一  
 252 定的误差, 另一方面WRF模式对随机多变的风场模拟还存在一定误差。整体上  
 253 模拟 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度的时间变化趋势与实际观测基本一致。

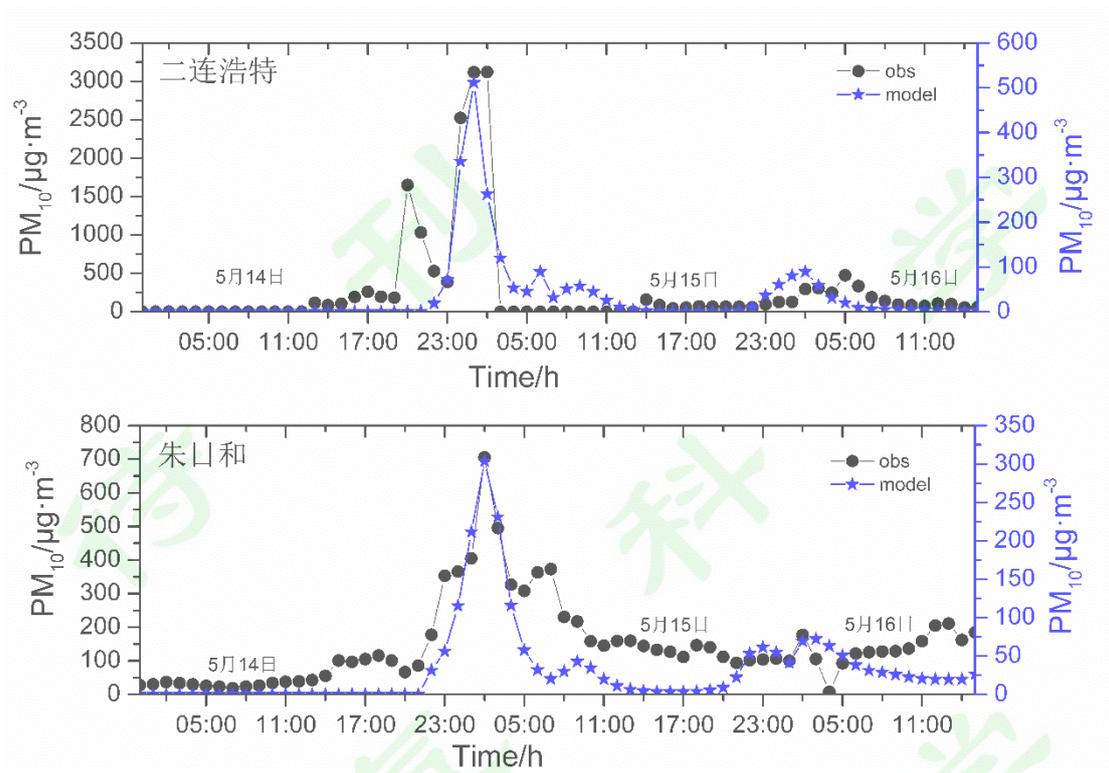


图 6 二连浩特、朱日和站模拟与观测的 PM<sub>10</sub> 质量浓度 (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig. 6 Simulated and observed mass concentration of PM<sub>10</sub> at Erlianhot and Zhurihe stations (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

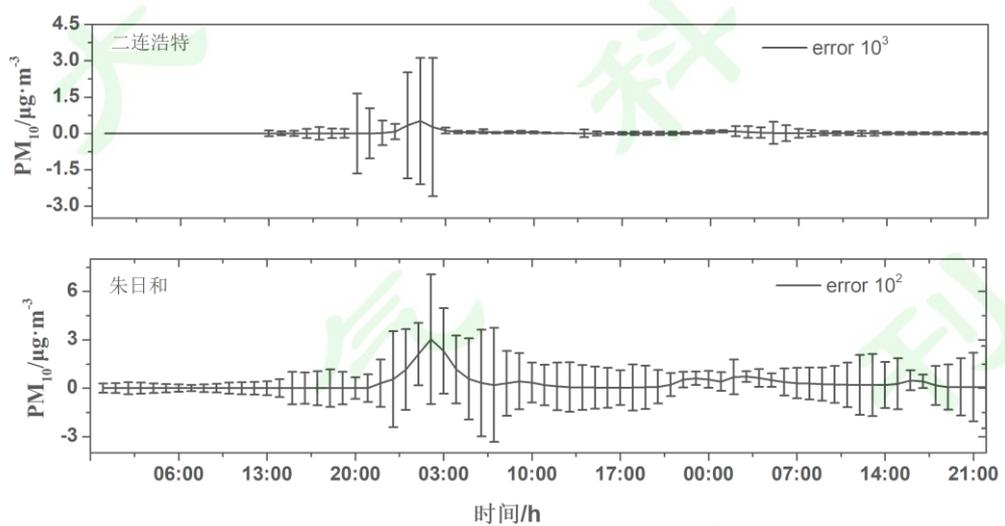


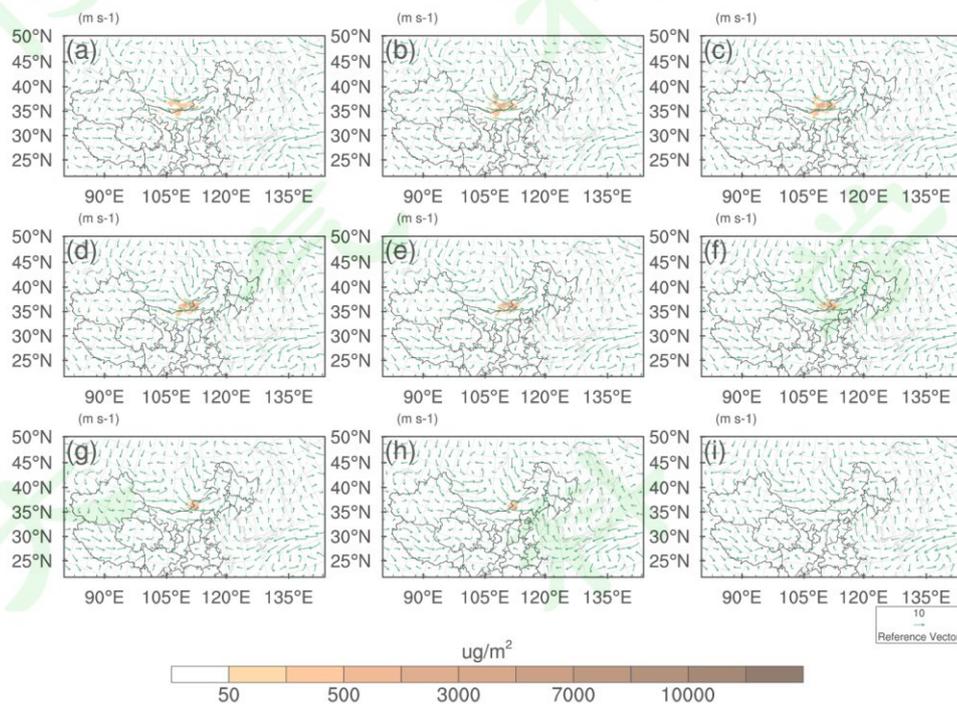
图 7 二连浩特、朱日和站 PM<sub>10</sub> 质量浓度的误差 (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig. 7 The error of PM<sub>10</sub> at Erlianhot and Zhurihe stations (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

4 下垫面因素对沙尘天气的影响

263 4.1 敏感性试验设计

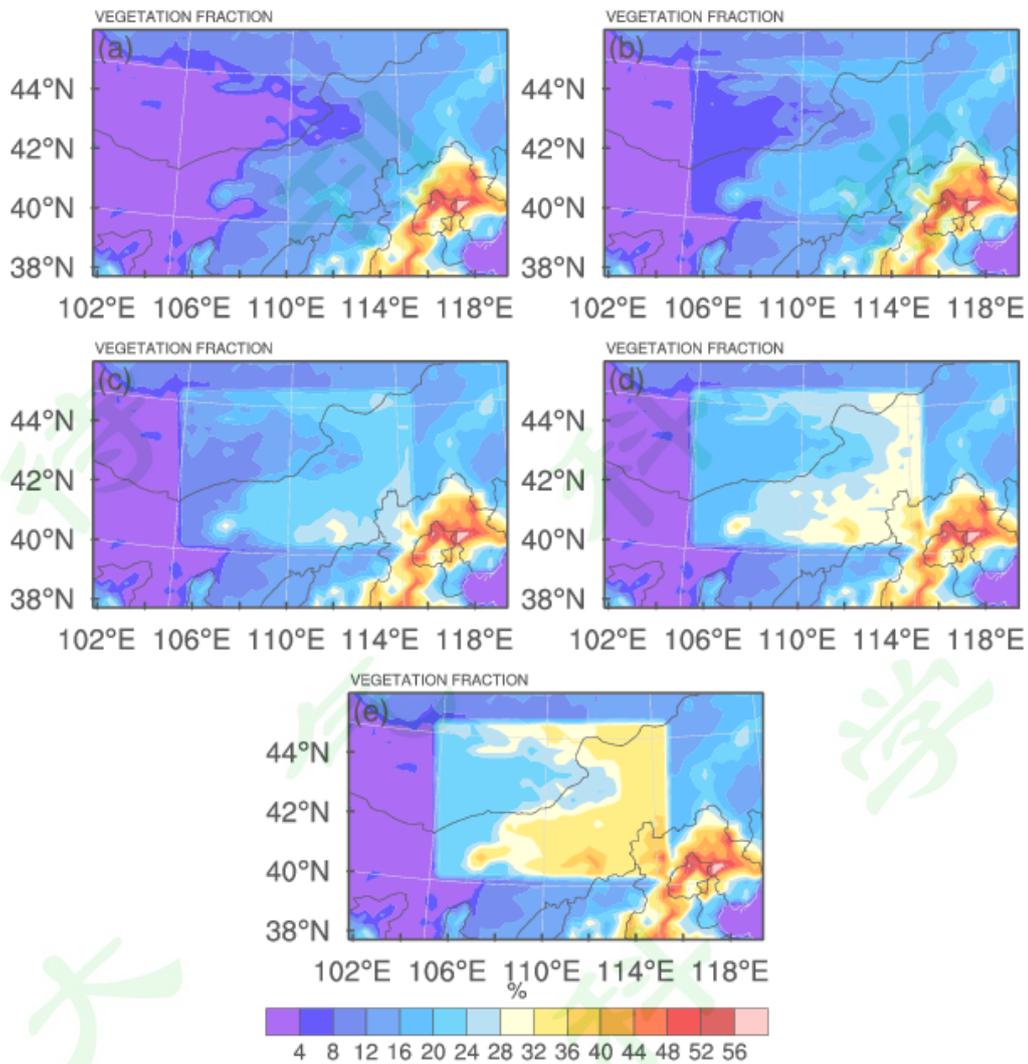
264 此次沙尘过程实际植被覆盖率下起沙通量的时空分布如图 8。2019 年 5 月  
265 15 日 00:00, 内蒙古西部和蒙古国西南部的沙源地起沙, 起沙通量  $2299.4 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 。  
266 受到鄂霍次克海阻塞高压影响, 高空槽移动缓慢, 蒙古国南部和内蒙古中北部起  
267 沙通量逐渐增大。07:00, 二连浩特地区起沙量最大值为  $19696.6 \mu\text{g}/\text{m}^2$ , 瞬时风  
268 速  $22.6\text{m}/\text{s}$ , 10:00 风速减小到  $19.5\text{m}/\text{s}$ , 起沙量减小到  $11890.7\mu\text{g}/\text{m}^2$ 。随着鄂霍  
269 次克海阻塞高压减弱东退, 大风区移动加快, 沙尘源地起沙量骤减, 12:00 起沙  
270 量减小到  $574.7 \mu\text{g}/\text{m}^2$ , 风速减小到  $17.1 \text{m}/\text{s}$ 。



271  
272 图 8 2019 年 5 月 15 日 00:00~12:00 沙尘天气过程中起沙通量 (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) 与 10m 风场  
273 (单位:  $\text{m}/\text{s}$ ) 的时空分布

274 Fig. 8 Temporal and spatial distribution of sand emission flux (unit:  $\text{g}/\text{m}^2$ ) and 10-meter wind field  
275 (unit:  $\text{m}/\text{s}$ ) during dust weather from 00:00 to 12:00 on May 15, 2019

276 由图 8 可知, 此次沙尘过程沙源地位于  $40^\circ\text{N}\sim 45^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{E}\sim 115^\circ\text{E}$ , 为研究  
277 植被对沙尘起沙影响, 针对沙源区植被覆盖率进行敏感性试验。图 9 (a) (case1)  
278 表明此次沙尘过程沙源地实际下垫面植被覆盖率小于 20%, 蒙古国南部及内蒙  
279 古中北部二连浩特地区植被覆盖率小于 10%。敏感性试验 case2、case3、case4、  
280 case5 中沙源地植被覆盖率分别增加 5%、10%、15%和 20% (图 9 (b) - (e))。



282

283 图9 下垫面植被覆盖率 (单位: %): 实际下垫面 case1 (a) 与敏感性试验 case2 (b)、

284 case3 (c)、case4 (d)、case5 (e)

285 Fig.9 Vegetation coverage of initial underlying surface of model (unit: %): Case1 (a) of actual

286 underlying surface and case2 (b), case3 (c), case4 (d), and case5 (e) of sensitivity experiment

## 287 4.2 植被覆盖对沙尘的影响

## 288 4.2.1 植被覆盖对沙源地起沙的影响

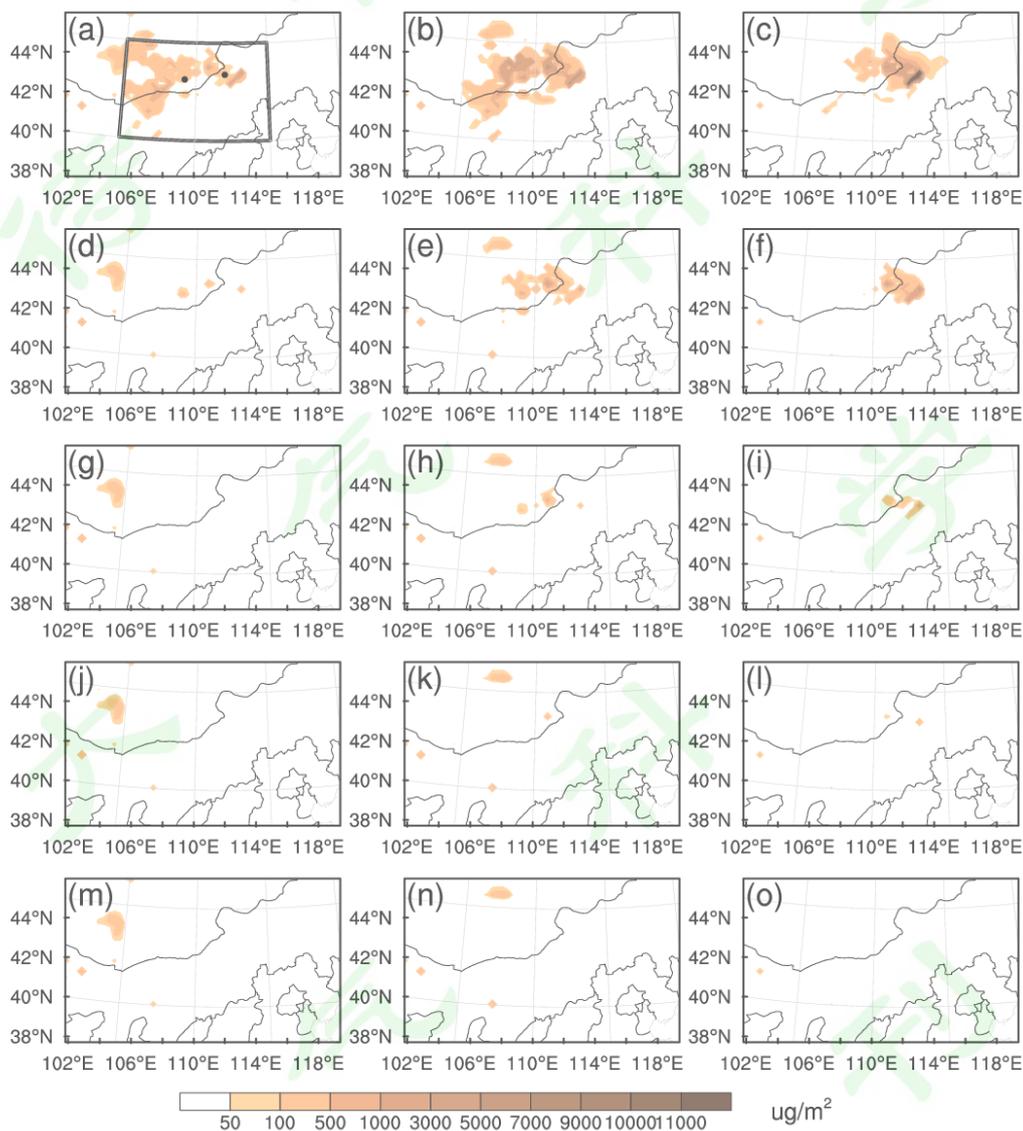
289 沙源地植被覆盖率增加 5%，起沙的空间分布与起沙量均有明显变化，如图

290 10 (d) - (f)。起沙区面积、起沙量减小，同时沙源地起沙持续时间缩短（起沙

291 开始时间晚，结束时间早），蒙古国南部与巴彦淖尔市交界区域 08:00 停止起沙。

292 植被覆盖率增加 10%（图 10 (g) - (i)），在蒙古国南部与二连浩特接壤地区存

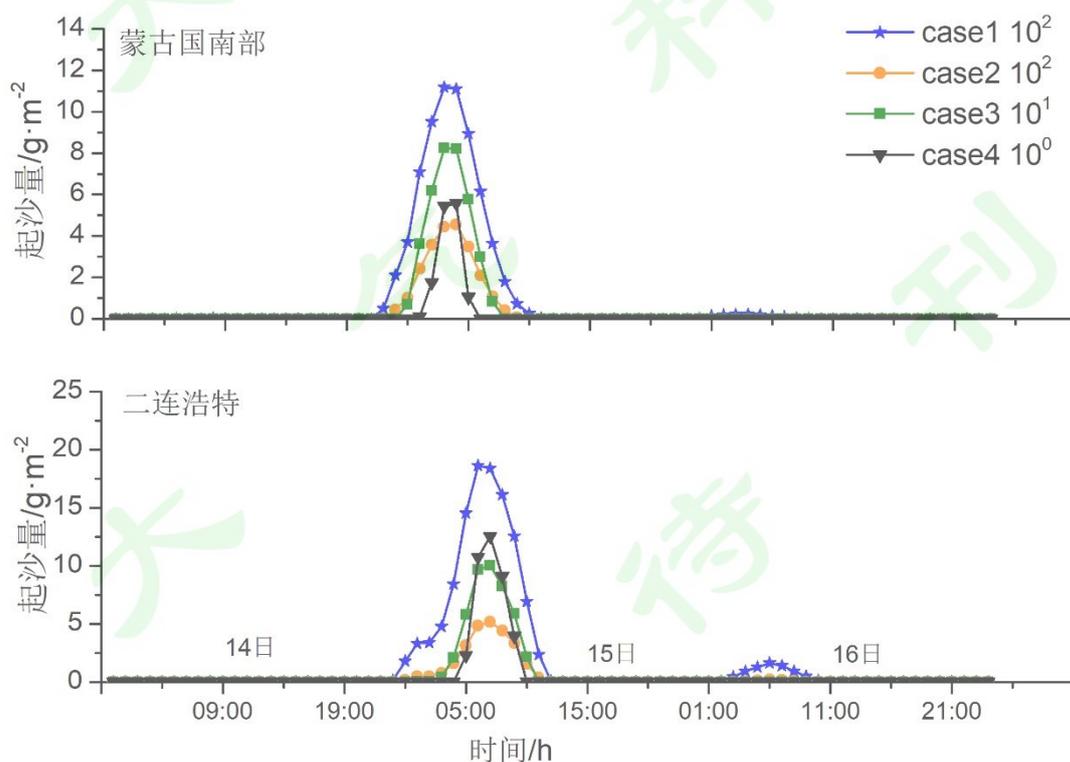
293 在少量的起沙。植被覆盖率增加 15%，蒙古国南部与二连浩特地区起沙推迟到  
 294 04:00，同时起沙面源减小成点源（图 10 (j) - (l)）。植被覆盖率增加 20%，蒙  
 295 古国南部起沙区 08:00 停止起沙，二连浩特地区起沙开始时间推迟到 08:00 且起  
 296 沙量  $50\mu\text{g}/\text{m}^2$  以下。  
 297



298  
 299 图 10 2019 年 5 月 15 日 00:00、04:00、08:00 起沙通量的空间分布，case1 ((a)、(b)、  
 300 (c)), case2 ((d)、(e)、(f)), case3 ((g)、(h)、(i)), case4 ((j)、(k)、(l))、case5  
 301 ((m)、(n)、(o)) (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )，黑色矩形框区为  $40^\circ\text{N}\sim 45^\circ\text{N}$ ， $105^\circ\text{E}\sim 115^\circ\text{E}$   
 302 Fig.10 Spatial distribution of sand flux at 00:00, 04:00 and 08:00 on May 15, 2019, case1 ((a), (b),  
 303 (c)), case2 ((d), (e), (f)), case3 ((g), (h), (I)), case4 ((J), (k), (L)), case5 ((m), (N), (O)) (unit:  
 304  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ), and the black rectangular box area is  $40^\circ\text{N}\sim 45^\circ\text{N}$ ， $105^\circ\text{E}\sim 115^\circ\text{E}$

305 植被覆盖率增加后，沙源地不同区域起沙量均有不同程度的削减。在矩形框  
 306 选取两个代表站，定量计算植被覆盖率对沙尘起沙的影响，如图 11 所示。植被  
 307 覆盖率增加会推迟沙源地起沙开始时间，提前结束时间。蒙古国南部 case1、case2、  
 308 case3 与 case4 峰值数值分别为 1118.0g/m<sup>2</sup>、455.3 g/m<sup>2</sup>、82.4 g/m<sup>2</sup> 与 5.6 g/m<sup>2</sup>，case5  
 309 整个沙尘过程中起沙量为 0，未在图 11 中表示。二连浩特 case1、case2、case3 与  
 310 case4 数值分别为 1864.4g/m<sup>2</sup>、516.9g/m<sup>2</sup>、100.3g/m<sup>2</sup> 与 12.5g/m<sup>2</sup>。蒙古国南部与二  
 311 连浩特 case1 在 16 日 00:00~09:00 还有弱的起沙，但增加植被覆盖率后，相应时  
 312 间段内 case\*均未起沙。

313 利用相对减少百分比  $((\text{case1}-\text{case}^*)/\text{case1})$  衡量不同植被覆盖率对起沙的  
 314 抑制程度，如表 1 所示。蒙古国南部在起沙峰值时刻 case2、case3、case4 与 case5  
 315 对起沙的抑制分别为 65.3%、94.6%、99.8%与 100%。二连浩特在起沙峰值时刻  
 316 case2、case3、case4 与 case5 对起沙的抑制分别为 77.3%、96.3%、99.7%与 100%。  
 317 将所有时刻起沙量之和定义为此次沙尘过程的总起沙量，计算不同植被覆盖率对  
 318 总起沙量的抑制程度：当植被覆盖率增加 5%，对起沙的抑制超过 50%，当植被  
 319 覆盖率增加 15%，对沙尘起沙的抑制接近 100%，在相同的天气背景下，沙源地  
 320 的主要贡献区将不会起沙。



322

图 11 不同敏感性试验中蒙古国南部与二连浩特起沙量的时间变化

323

Fig. 11 Temporal variation of dust emission in different sensitivity experiments of erlianhot and

324

southern Mongolia

325

表 1 不同敏感性试验中蒙古国南部与二连浩特总起沙量及植被对总起沙量的削减

326

Table 1 Total dust emission and reduction of total dust emission by vegetation in southern

327

Mongolia and Erlianhot in different sensitivity experiments

	case1	case2	case3	case4	case5
蒙古国南部	6811.4	2362.8/65.3%	365.5/94.6%	13.9/99.8%	0/100%
二连浩特	11867.2	2698.2/77.3%	444.0/96.3%	38.6/99.7%	0/100%

328

\*斜线前面表示起沙量，斜线后面表示削减率

329

#### 4. 2. 2 植被覆盖对地面沙尘浓度的影响

330

地面沙尘浓度水平分布的时间变化能够反映整个沙尘暴水平结构的形成和

331

发展过程，如图 12 (a) - (c) 所示。沙源地起沙后，大量沙尘随气旋迅速向东

332

向北输送，16 日 12:00，沙尘移动到俄罗斯境内；16 日凌晨二连浩特地区第二次

333

起沙造成锡林郭勒盟南部、赤峰市地面出现弱的沙尘浓度中心。增加植被覆盖率，

334

沙源地起沙量减小，所以 case2、case3、case4、case5 地面沙尘浓度均小于 case1，

335

且沙尘覆盖区域小于 case1。

336

16 日 00:00 case2、case3、case4、case5 的沙源地下游地区（河北省中部、辽

337

宁省）地面沙尘浓度小于  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且沙尘中心浓度数值小于 case1。16 日 12:00

338

case3、case4、case5 中黑龙江省大部及辽宁省地面沙尘浓度均小于  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。第

339

二次起沙，case3、case4、case5 中锡林郭勒盟、赤峰市地面沙尘浓度小于  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，

340

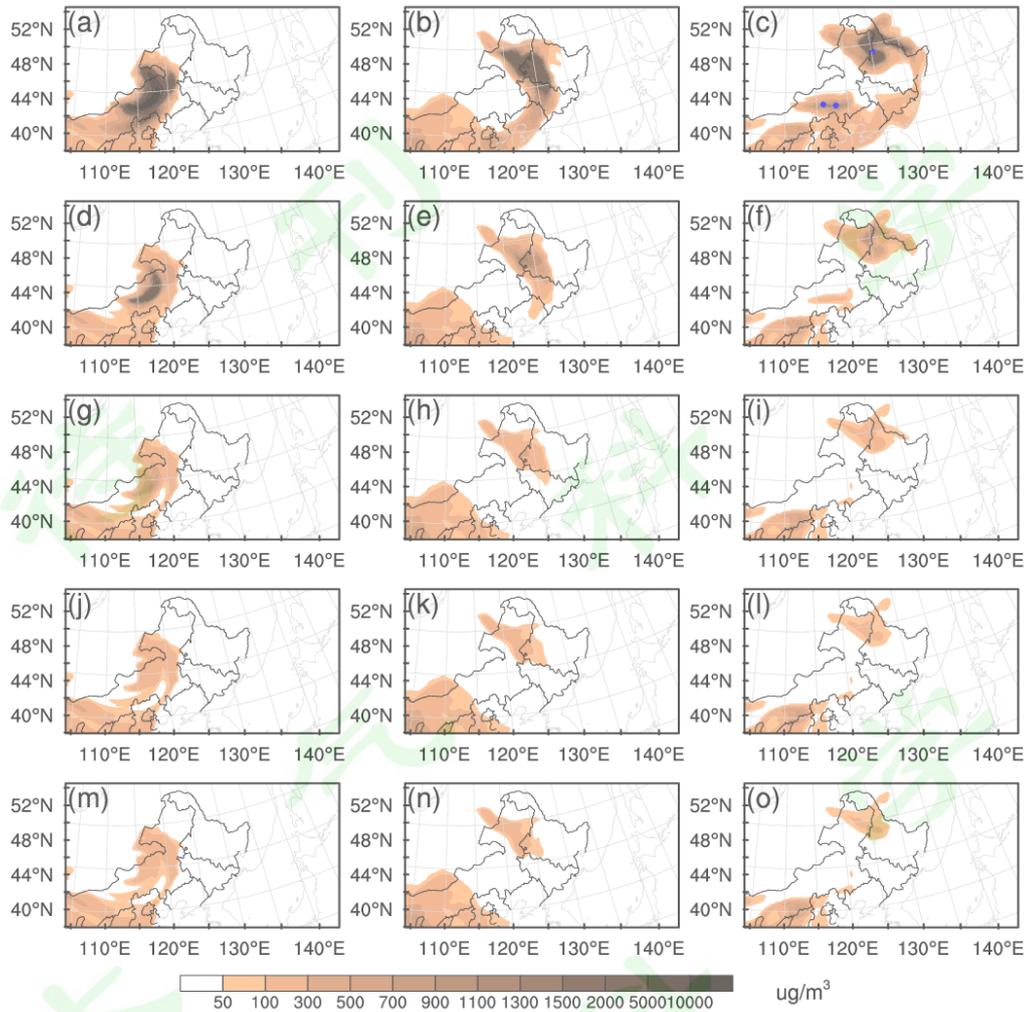
case2 中锡林郭勒盟南部存在一个弱沙尘浓度高值区。在沙尘移动路径上选取三

341

个代表站定量计算植被覆盖率对地面沙尘浓度的影响，选取的站点如图 12 (c)

342

蓝色圆点。



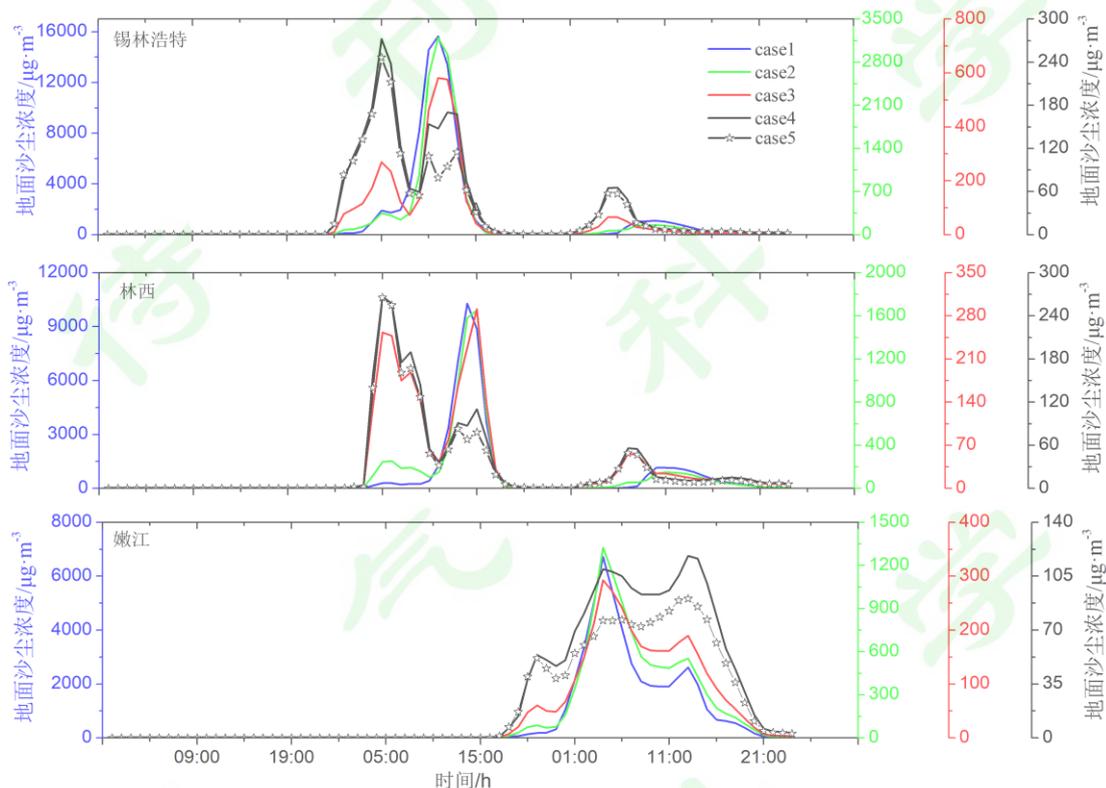
343

344 图 12 2019 年 5 月 15 日 12:00、5 月 16 日 00:00、5 月 16 日 12:00 地面沙尘浓度的空间分  
 345 布, case1 ((a)、(b)、(c)), case2 ((d)、(e)、(f)), case3 ((g)、(h)、(i)), case4  
 346 ((j)、(k)、(l)), case5 ((m)、(n)、(o)) (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 蓝色圆点从西到东依次表示  
 347 锡林浩特 ( $43.57^\circ \text{N}$ ,  $116.07^\circ \text{E}$ )、林西 ( $43.36^\circ \text{N}$ ,  $118.04^\circ \text{E}$ )、嫩江 ( $49.10^\circ \text{N}$ ,  
 348  $125.14^\circ \text{E}$ )

349 Fig. 12 Spatial distribution of surface dust concentration at 12:00 on May 15, at 00:00 and 12:00  
 350 on May 16, 2019, case1 ((a)、(b)、(c)), case2 ((d)、(e)、(f)), case3 ((g)、(h)、  
 351 (i)), case4 ((j)、(k)、(l)), case5 ((m)、(n)、(o)) (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), the blue dots  
 352 represent Xilinhot, Linxi, Nenjiang from west to east

353 锡林浩特、林西和嫩江位于沙源地的下游, 锡林浩特与林西均位于两次起沙  
 354 的传输路径上。不同植被覆盖率对地面沙尘浓度的影响见图 13。随着植被覆盖  
 355 率的增加, 不同站点的地面沙尘浓度均有不同程度的削减。当植被覆盖率增加 <

356 15%，仅影响沙尘浓度的数值，地面浓度峰值出现时间不变；当植被覆盖率增加  
357  $\geq 15\%$ ，锡林浩特与林西第一次沙尘过程地面浓度峰值的出现时间分别提前 6h 和  
358 9h，嫩江峰值时间推迟 9h。第二次沙尘过程锡林浩特与林西分别提前 5h 和 4h。



359

360 图 13 不同植被覆盖率对锡林浩特、林西、嫩江站地面沙尘浓度的影响

361 Fig. 13 Influence of dust concentration at Xilinhot, Linxi and Nenhe stations with different  
362 vegetation coverage

363 详细分析模式起沙参数化方案，起沙通量与阈值摩擦速度相关，而阈值摩擦  
364 速度与叶面积指数正相关，植被覆盖率增加，叶面积指数增加，阈值摩擦风速增  
365 大，起沙条件更苛刻，所以起沙开始时间推迟。

366 张宏生和李晓岚（2014）研究沙尘起沙特征时指出空气动力学条件会影响起  
367 沙量中沙尘粒子的初始尺度分布和沙尘通量数值。选取蒙古国南部与二连浩特两  
368 个代表性站点分析沙源地不同粒径对起沙的贡献率（图 14）。植被覆盖率增加，  
369 植被对小粒径沙尘的捕获作用增加，大粒径沙粒对起沙的贡献率增加，小粒径沙  
370 粒对起沙的贡献率减小，沙尘输送过程中沉降速度更快，导致下游地区沙尘峰值  
371 浓出现时间提前。

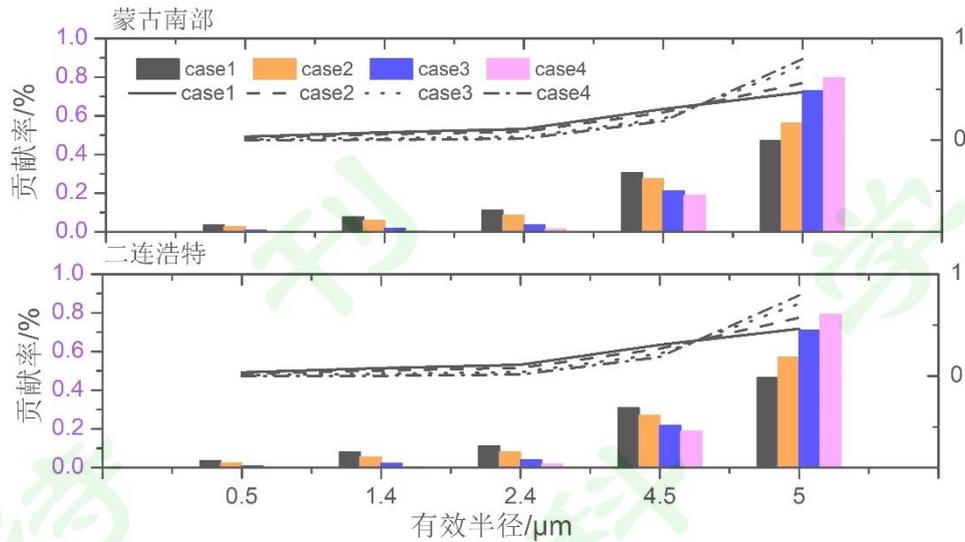


图 14 不同敏感性试验蒙古国南部与二连浩特不同粒径对起沙的贡献率

Fig 14. Contribution rate of different particle sizes to dust emission in southern Mongolia and Erlianhot in different sensitivity experiments

嫩江站地面沙尘峰值浓度出现时间推迟，主要因为植被覆盖率增加 $\geq 15\%$ ，植被覆盖调整区起沙量大幅减小，导致受西风驱动主要向东传输的该区域起沙在 case3、case4、case5 试验中不再出现并影响嫩河站，而影响嫩江站的沙尘变为源自植被覆盖调整区域以西的区域起沙，该支沙尘受气旋旋转过程中西北-偏西-东南旋转气流输送，所以相比 case1、case2 沙尘移动路径变长，所以沙尘天气开始时间推迟，峰值出现时间推迟。

为定量计算植被覆盖对下游地区地面沙尘浓度的影响，选取三个站点的沙尘过程计算平均地面沙尘浓度。锡林浩特（第一次沙尘过程：15 日 01:00~20:00，第二次沙尘过程：16 日 01:00~17 日 00:00）、林西（第一次沙尘过程：15 日 02:00~22:00，第二次沙尘过程：16 日 02:00~17 日 00:00）、嫩江（15 日 17:00~17 日 00:00），具体数值如表 2。随着植被覆盖率增加，沙尘削减率增大。当植被覆盖率增加 $> 5\%$ ，对下游地区地面沙尘浓度的削减率 $> 80\%$ ；植被覆盖率增加 $\geq 10\%$ ，削减率 $> 90\%$ ；植被覆盖率增加 $< 10\%$ ，随着植被覆盖率的增加，沙尘浓度削减率增长迅速；植被覆盖率增加 $> 10\%$ ，随着植被覆盖率的增加，沙尘浓度削减率增长缓慢。

表 2 不同敏感性试验中地面平均沙尘浓度及植被对地面平均沙尘浓度的削减

Table 2 Average surface dust concentration and the reduction of average surface dust concentration by vegetation in different sensitivity experiments

		case1	case2	case3	case4	case5
第一次	锡林浩特	3721.5	709.8/80.9%	176.0/95.3%	101.4/97.2%	84.0/97.7%
第一次	林西	1786.2	328.6/81.6%	104.5/94.1%	82.8/95.4%	74.5/95.8%
	嫩江	1555.7	346.3/77.8%	105.2/93.2%	62.1/96.0%	49.0/96.8%
第二次	锡林浩特	338.6	52.4/84.5%	15.8/95.3%	14.1/95.8%	12.4/96.3%
第二次	林西	381.2	56.1/85.3%	18.7/95.1%	16.6/95.7%	13.9/96.3%

394

### 395 4.2.3 植被覆盖对 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响

396 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 作为可吸入颗粒物，严重影响大气环境及居民健康。增加沙源  
397 区植被覆盖率可有效降低下游地区 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 浓度，改善大气环境，降低居  
398 民呼吸系统感染风险。

399 利用 AQI 计算不同植被覆盖率对空气质量的影响。锡林浩特与林西第一次  
400 沙尘过程、第二次沙尘过程C<sub>p</sub>的计算时间段分别是 15 日 00:00~16 日 00:00、16  
401 日 00:00~17 日 00:00，嫩江站的时间段 16 日 00:00~17 日 00:00，不同植被覆盖  
402 率对空气质量的影响如表 3 和表 4。利用观测数据计算的锡林浩特站第一次沙尘  
403 过程 PM<sub>10</sub> 24 小时平均浓度为 1191.6μg/m<sup>3</sup>，模拟值（1418.9μg/m<sup>3</sup>）与实际观测数  
404 值基本一致，可见模拟计算的不同植被覆盖率对空气质量的影响具有一定的可信  
405 度。

406 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 对空气质量的贡献取最高等级，第一次沙尘过程锡林浩特、林  
407 西与嫩江 case1 均是严重污染。增加植被覆盖率，空气质量明显改善。植被覆盖  
408 率增加≥10%，空气质量达到优或良；植被覆盖率增加≥15%，空气质量达到优。  
409 第二次沙尘过程，锡林浩特、林西 case1 均是轻度污染，植被覆盖率增加≥5%，  
410 空气质量达到优。

411 表 3 不同植被覆盖率下锡林浩特、林西、嫩江观测站 PM<sub>10</sub> 浓度（单位：μg/m<sup>3</sup>）、植被对  
412 PM<sub>10</sub> 浓度的削减率及 AQI

413 Table 3 The PM<sub>10</sub> concentration of Xilinhot, Linxi and Nenhe and the reduction of PM<sub>10</sub>  
414 concentration by vegetation in different sensitivity experiments

		case1	case2	case3	case4	case5
第一次	锡林浩特	1418.9/VI	255.3/82.0%/IV	62.3/95.6%/II	39.0/97.3%/I	33.3/97.7%/I
第一次	林西	709.9/VI	123.0/82.7%/II	41.8/94.1%/I	35.7/95.0%/I	32.4/95.4%/I
	嫩江	1182.2/VI	241.7/79.6%/III	66.2/94.4%/II	39.3/96.7%/I	30.5/97.4%/I
第二次	锡林浩特	187.4/III	27.4/85.4%/I	11.5/93.9%/I	10.8/94.2%/I	9.4/95.0%/I
第二次	林西	215.9/III	30.7/85.8%/I	13.4/93.8%/I	12.5/94.2%/I	10.4/95.2%/I

415 \*第一列表示浓度，第二列表示削减率，第三列表示空气质量

416

417 表 4 不同植被覆盖率下锡林浩特、林西、嫩江观测站 PM<sub>2.5</sub> 浓度、植被对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的削

418 减率及 AQI

419 Table 3 same as table 2, but for PM<sub>2.5</sub>

		case1	case2	case3	case4	case5
第一次	锡林浩特	375.0/ VI	66.1/82.4%/II	15.8/95.8%/I	10.3/97.2%/I	9.1/97.6%/I
第一次	林西	184.5/V	31.0/83.2%/ I	11.2/93.9%/ I	10.1/94.5%/ I	9.2/95.0%/ I
	嫩江	202.9/ V	39.7/80.5%/II	10.3/94.9%/I	6.3/96.9%/I	5.0/97.5%/I
第二次	锡林浩特	33.6/ I	4.5/86.7%/ I	2.4/92.9%/ I	2.4/92.9%/ I	2.0/94.0%/ I
第二次	林西	41.5/II	5.5/86.7%/ I	2.9/92.9%/ I	2.9/93.1%/ I	2.3/94.4%/ I

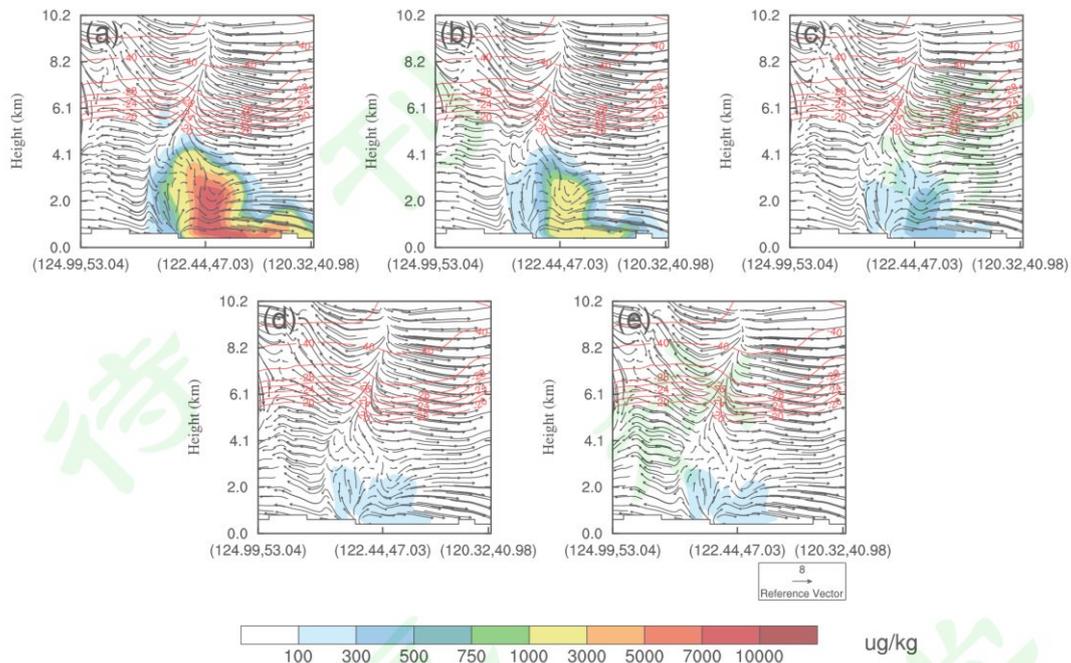
420 \*第一列表示浓度，第二列表示削减率，第三列表示空气质量

#### 421 4.2.4 植被覆盖对沙尘垂直分布的影响

422 沿 CALIPSO 卫星过境轨迹（2019 年 5 月 15 日 18:00）的沙尘垂直剖面，分  
423 析不同植被覆盖率对沙尘浓度垂直分布影响，如图 15。整体而言，不同植被覆盖  
424 率下，沙尘垂直分布规律一致，即沙尘浓度随高度递减。随着植被覆盖率的增加，  
425 各高度层沙尘浓度均明显降低；同时沙尘垂直输送高度降低，case1、case2 沙尘  
426 垂直输送高度可达 4.0km，case3 垂直输送高度 3.0km，case4、case5 垂直输送高  
427 度 2.0km。

428

429



430

431 图 15 2019 年 5 月 15 日 18:00 不同敏感性试验中沿卫星过境轨迹 A-C 垂直剖面的沙尘浓度  
 432 (单位:  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、U 和  $W*100$  的合成流场 (单位:  $\text{m}/\text{s}$ ), (a) - (e) 分  
 433 别表示 (case1) - (case5)

434 Fig. 15 The vertical distribution of dust concentration (unit:  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), and the  
 435 flow field of U and  $W*100$  (unit:  $\text{m}/\text{s}$ ) along the satellite transit trajectory in different sensitivity  
 436 experiments at 18:00 on May 15, 2019. (a) - (e) represent (case1) - (case5) respectively.

## 437 5 总结与讨论

438 植被覆盖对沙尘天气具有显著的影响, 沙源地实际植被覆盖率平均值小于  
 439 20%, 近 1/2 区域植被覆盖率小于 10%, 当沙源地植被覆盖率增加 5%, 对起沙  
 440 的抑制超过 50%, 下游地区地面沙尘浓度的削减率  $>80\%$ ,  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的  
 441 削减率接近或超过 80%, 空气质量从严重污染降到轻度污染; 当植被覆盖率增加  
 442  $\geq 15\%$ , 起沙面源减小成点源, 最大起沙量从 18486.8 减小到 260.87 (case4, 5 月  
 443 15 日 08:00), 对起沙的抑制  $\geq 99\%$ , 地面沙尘浓度的削减率、 $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  
 444 的削减率  $>90\%$ , 空气质量从严重污染降到优或良。增加植被覆盖率, 可有效改  
 445 善下游地区大气环境。

446 我国是世界上荒漠化土地面积最大的国家之一, 以植被恢复为主的生态修复  
 447 是荒漠化综合治理中最基本和最重主要的措施 (张海月等, 2020)。2022 年印发

448 的北方防沙带生态保护和修复重大工程建设规划（2021-2035 年），规划中提出到  
449 2035 年，北方防沙带区域风沙危害得到有效遏制，自然生态系统质量和稳定性  
450 显著。赵建华等（2005）研究发现沙尘粒径的大小决定沙粒启动机制，而之前的  
451 荒漠化治理工作较少着眼于下垫面粒子大小问题，本文分析揭示：植被覆盖率增  
452 加，叶面积指数增大，植被对细粒子的捕获作用增强。所以，植树造林等荒漠化  
453 治理工作应该首先在细粒子为主的半荒漠化地区开展。

#### 454 参考文献

- 455 安林昌, 张恒德, 桂海林, 等. 2018. 2015 年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析 [J].  
456 气象, 44(01):180-188. An Lingchang, Zhang Hengde, Gui Hailin, et al. 2018. Analysis of a sand  
457 and dust weather process affecting North China and Huanghuai in spring 2015 [J]. Meteorological  
458 Monthly, 44 (01) :180-188.
- 459 Briceno Z F, Castagna A, Rutllant J A, et al. 2017. Paracas dust storms: sources, trajectories and  
460 associated meteorological conditions [J]. Atmospheric Environment, 165:99 – 110.
- 461 Chan C C, Ng H C. 2011. A case-crossover analysis of Asian dust storms and mortality in the  
462 downwind areas using 14-year data in Taipei [J]. Science of the total environment, 410:47-52.
- 463 Chen S Q, Liu J B, Wang X, et al. 2021. Holocene dust storm variations over Northern China:  
464 transition from a natural forcing to an anthropogenic forcing [J]. Science Bulletin, 66(24):2516-  
465 2527.
- 466 陈亿, 尚可政, 王式功, 等. 2012. 21 世纪初中国北方沙尘天气特征及其与地面风速和植被的  
467 关系研究 [J]. 中国沙漠, 32(06):1702-1709. Chen Yi, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. 2012.  
468 Characteristics of sand-dust weather in northern China from 2002 to 2010 and its relationship with  
469 surface wind speed and NDVI [J]. Journal of desert research,32(06):1702-1709.
- 470 崔晓, 赵媛媛, 丁国栋, 等. 2018. 京津风沙源治理工程区植被对沙尘天气的时空影响 [J].  
471 农业工程学报, 34(12):171-179+310. Cui Xiao, Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, et al. 2018.  
472 Spatio- temporal pattern of impacts of vegetation on controlling sand-dust weather in beijing-tianjin  
473 sandstorm source control project area [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural  
474 engineering, 34(12):171-179+
- 475 Fan J, Yue X Y, Sun Q H, et al. 2017. Case study of dust event sources from the Gobi and  
476 Taklamakan deserts:an investigation of the horizontal evolution and topographical effect using

477 numerical modeling and remote sensing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 56(6):62-70

478 Filonchik M, Yan H W, Yang S W, et al. 2018. Detection of aerosol pollution sources during  
479 sandstorms in Northwestern China using remote sensed and model simulated data [J]. *Advances in*  
480 *Space Research*, 61(4):1035-1046.

481 Huang J P, Minnis P, Chen B, et al. 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust  
482 from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D23):2036-  
483 2044.

484 Hu Y, Winker D, Vaughan M, et al., et al. 2009. CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination  
485 algorithm [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 26(11):2293-2309

486 环境保护部. 2012. HJ633-2012 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 [S]. Ministry of  
487 Environmental Protection. 2012. HJ633-2012 Ambient Air Quality Index (AQI) technical provisions  
488 [S].

489 黄悦, 陈斌, 董莉, 等. 2021. 利用星载和地基激光雷达分析 2019 年 5 月东亚沙尘天气过程  
490 [J]. *大气科学*, 45(3): 524–538. HUANG Yue, CHEN Bin, DONG Li, et al. 2021. Analysis of a  
491 Dust Weather Process over East Asia in May 2019 Based on Satellite and Ground-Based Lidar  
492 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3): 524–538

493 姜学恭, 陈受钧, 云静波, 等. 2014. 基于 CALIPSO 资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分  
494 析 [J]. *气象*, 40(3):269-279. Jiang Xuegong, Chen Shoujun, Yun Jingbo, et al. 2014. Analysis on  
495 characteristics of vertical structure of sand and dust during dust storm process based on CALIPSO  
496 data [J]. *Meteorological Monthly*, 40 (3) :269-279

497 Lee, E H, Sohn B J. 2011. Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner  
498 Mongolia regions and its association with climate and surface condition change [J], *Atmospheric*  
499 *environment*, 45:4611-4616.

500 Lee Y G, Kim J, Ho C H, et al. 2015. The effects of ENSO under negative AO phase on spring dust  
501 activity over northern China: an observational investigation [J]. *Int. J. Climatol*, 35: 935-947.

502 Li N, Guo L, Fan B H. 2015. A New Perspective on Understanding the Reduced Spring Dust Storm  
503 Frequency in Inner Mongolia, China [J]. *Int J Disaster Risk Sci*, 6:216-225.

504 李杨, 刘艳, 张璞. 2010. 古尔班通古特沙漠植被覆盖变化及其对沙尘天气的影响 [J]. *干旱*  
505 *区资源与环境*, 24(03):141-146. Li Yang, Liu Yan, Zhang Pu. 2010. Desert vegetation cover change

506 and their impacts on sand-dust weather in GurbanTonggut [J]. *Journal of arid zone resources and*  
507 *environment*, 2010, 24 (3): 141-146.

508 刘筱冉. 2018. 西北地区沙尘天气的数值模拟及其对典型城市大气环境影响的研究 [D]. 兰  
509 州大学硕士学位论文, 8-10. Liu Xiaoran. 2018. Research on numerical simulation of dust Storms in  
510 Northwest Region and their effects on atmospheric environment in typical City [D]. Master thesis  
511 of Lanzhou University, 8-10

512 刘扬, 王颖, 刘灏, 等. 2021. 基于 WRF-Chem 模拟验证的天水市主城区大气污染源排放清  
513 单 [J]. *中国环境科学*:1-18. Liu Yang, Wang Ying, Liu Hao, et al. 2021. Air pollutants emission  
514 inventory for the main urban area of Tianshui City based on verification by WRF-Chem simulation  
515 [J]. *China Environmental Science* :1-18.

516 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 2019. 乌兰布和沙漠东北缘防护林内外沙尘暴低空结构特征  
517 [J]. *干旱区研究*, 36(04):1032-1040. Luo Fengmin, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. 2019. Low-  
518 altitude structure of sandstorms for inside and outside shelterbelt in the northeast margin zone of  
519 Ulan Buhe Desert [J]. *Arid Zone Research*, 36(04):1032-1040.

520 Mao R, Ho C H, Feng S, et al. 2013. The Influence of Vegetation Variation on Northeast Asian Dust  
521 Activity[J]. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49(1), 87-94.

522 Mehdi H, Kavlanpour M R, Shao Y P. 2017. A quantitative evaluation of the 3-8 July 2009 Shamal  
523 dust storm. *Aeolian Research*, 24:133-143.

524 彭路. 2020. 西北地区不同季节沙尘天气的数值模拟与沙尘气溶胶的输送及来源 [D]. 兰州  
525 大学硕士学位论文, 30pp. Peng Lu. 2020. Numerical simulation of dust weather and transport and  
526 source of dust aerosol in different seasons in northwest China [D]. Master thesis of Lanzhou  
527 University.

528 Rashkia A, Kaskaoutis D G, Francoisc P, et al. 2015. Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran:  
529 Seasonality, transport characteristics and affected areas [J]. *Aeolian Research*, 16: 35-48.

530 Shao Y. 2001. A model for mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,  
531 106(D17): 20239-20254.

532 Shao Y. 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data [J]. *Journal of*  
533 *Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10202):1-6

534 Shao Y, Ishizuka M, Mikami M, et al. 2011. Parameterization of size-resolved dust emission and  
535 validation with measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D08203):1-

- 537 石广玉, 檀赛春, 陈彬. 2018. 沙尘和生物气溶胶的环境和气候效应 [J]. 大气科学, 42 (3):  
538 559–569. Shi Guangyu, Tan Saichun, Chen Bin. 2018. Environmental and climatic effects of  
539 mineral dust and bioaerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (3): 559–  
540 569
- 541 覃云斌, 信忠保, 易扬, 等. 2012. 京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关  
542 系 [J]. 农业工程学报, 28(24):196-204+361. Qin Yunbin, Xin Zhongbao, Yi Yang, et al. 2012. and  
543 Spatio-temporal variation of sandstorm and its response to vegetation restoration in Beijing-Tianjin  
544 Sandstorm Source area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,  
545 28(24):196-204+361.
- 546 王宏, 石广玉, 王标. 等. 2007. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加  
547 热影响 [J]. 大气科学, 31(3):515-526. Wang Hong, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2007. The  
548 impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over Desert sources and  
549 the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31(3):515-526.
- 550 王春学, 秦宁生. 2018. 中国北方春季沙尘暴周期变化特征及其对最大风速的响应 [J]. 水土  
551 保持研 研究, 25(03):133-141. Wang Chunxue, Qin Ningsheng. 2018. Periodic Variation  
552 Characteristics of spring sandstorm in northern China cycle and the response to maximum wind  
553 speed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 25(03):133-141.
- 554 魏巍, 张稳定, 陈焕盛, 等. 2020. 库布齐沙漠治理对京津冀地区空气质量影响:2017 年 5 月  
555 3-6 日沙尘天气模拟 [J]. 中国沙漠, 40(1):77-87. Wei Wei, Zhang Wending, Chen Huansheng, et  
556 al. 2020. Influence of desertification control in Hobq Desert on air quality in Beijing-Tianjin-Hebei  
557 region: a Simulation Case of dust weather on 3-6, May, 2017 [J]. Journal of Desert Research,  
558 40(1):77-87.
- 559 吴晓, 闵敏, 董立新. 2018. 从 Himawari08 卫星估算晴空地表长波辐射及其日变化特征初  
560 探 [J]. 气候与环境研究, 23 (1): 37–46. Wu Xiao, Min Min, Dong Lixin. 2018. Estimation and  
561 diurnal variation analysis of clear-sky surface longwave radiation fluxes from Himawari08 satellite  
562 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (1): 37–46.
- 563 徐兴奎, 王小桃, 张凤. 2009. 植被覆盖对沙尘天气滞后性影响的机制分析 [J]. 环境科学,  
564 30(02):322-327. Xu Xingkui, Wang Xiaotao, Zhang Feng. 2009. Process study on Hysteresis of

565 vegetation cover influencing Sand-dust Events [J]. Environmental science, 30(02):322-327.

566 衣娜娜, 姜学恭, 董祝雷, 等. 2020. 内蒙古一次沙尘过程的数值模拟 [J]. 中国沙漠,  
567 40(3):115-126 Yi nana, Jiang Xuegong, Dong Zhulei, et al. 2020. Numeircal simulation of a dust  
568 process in Inner Mongolia of China [J]. Journal of Desert Research, 40(3):115-126

569 吴成来, 林朝晖. 2014. WRF-chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程  
570 模拟的影响 [J]. 气候与环境研究, 19(4):419-429. Wu Chenglai, Lin Zhaohui. 2014. Impact of  
571 two different dust emission schemes on the simulation of a severe dust storm in east asia using  
572 WRF-Chem model [J]. Climate and Environmental Research, 19(4):419-429.

573 曾淑玲, 程一帆, 王式功, 等. 2010. 我国西北和内蒙古地区春季沙尘暴的年代际变化及原因  
574 探析 [J]. 中国沙漠, 30(5):1200-1206. Zeng Shuling, Cheng Yifan, Wang Shigong, et al.2010.  
575 Interdecadal variation and causes of spring sandstorms in northwest China and Inner Mongolia [J].  
576 Journal of Desert Research, 30(5):1200-1206.

577 张钦仁, 宋振鑫, 王金艳, 等. 2008a. 植被参数变化对沙尘起沙影响机理的数值模拟 [J]. 高原  
578 原气象, 2008(02):392-400. Zhang Tairen, Song Zhenxin, Wang Jinyan, et al. 2008a. The impact of  
579 variations of underlying surface and vegetation index on Numerical simulation of dust emission [J].  
580 Plateau Meteorology, 2008(02):392-400.

581 张钦仁. 2008b. 中国北方沙尘暴灾害形成机理与荒漠化防治研究 [J]. 兰州大学博士论文,  
582 兰州, 10. Zhang Tairen. 2008b. The formation mechanism of dust storm in northern China and  
583 desertification cotrol studies [D]. Doctoral Dissertation of Lanzhou University, Lanzhou, 10.

584 张海月. 2020. 毛乌素沙地生态修复评价 [D]. 北京林业大学硕士学位论文, 北京. Zhang  
585 Haiyue. 2020. Evaluation of ecological restoration in Mu Us Sandy Land take Etuoke Banner as an  
586 example [D]. Master degree Dissertatation of Beijing Forestry University, Beijing

587 张宏升, 李晓岚. 2014. 沙尘天气过程起沙特征的观测试验和参数化研究进展 [J]. 气象学报,  
588 72(5):987-1000. Zhang Hongsheng, Li Xiaolan. 2014. Review of the field measurements and  
589 parameterization for dust emission during sand-dust events [J]. Acta Meteorological Sinica,  
590 72(5):987-1000.

591 赵建华, 张强, 袁铁, 等. 2005. 沙粒启动机制的理论分析 [J]. 中国沙漠, 25(06):61-70. Zhao  
592 Jianhua, Zhang Qiang, Yuan Tie, et al. 2005. Theoretical Analysis on startup mechanism of sand  
593 particles [J]. Journal of Desert Research, 25(06):61-70.

594 赵垒, 辛金元, 杨磊库, 等. 2020. Himawari-8 气溶胶光学厚度产品的验证分析 [J]. 大气科

595 学, 44(3): 455-471. ZHAO Lei, XIN Jinyuan, YANG Leiku, et al. 2020. Validation Analysis of  
596 Himawari-8 Aerosol Optical Depth Products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in  
597 Chinese), 44(3): 455-471.

598 周旭, 张镭, 郭琪, 等. 2017. 强沙尘暴的数值模拟及PM10浓度的时空分布 [J]. 中国环境科  
599 学, 37(1):1-12 Zhou Xu, Zhang Lei, Guo Qi, et al. 2017. Numerical simulation of a strong dust  
600 storm and spatial-temporal distribution of PM10 concentration [J]. China Environmental Science,  
601 37(1):1-12.

602

603

604

605

606

607