

胡洵, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 2020. 关中盆地近地面风场和大气输送特征分析 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 637–648. HU Xun, CAI Xuhui, SONG Yu, et al. 2020. Diagnostic Analysis of Wind Fields and Atmospheric Transport Pathways in the Guanzhong Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 637–648. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20019

关中盆地近地面风场和大气输送特征分析

胡洵 蔡旭晖 宋宇 康凌

北京大学环境科学与工程学院环境科学系/环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871

摘要 利用 2017 年 151 个地面气象站的逐时观测数据和相关高空资料分析关中盆地近地面风场与输送特征。首先分析盆地内代表性站点的风速和风向观测事实, 然后用 CALMET 风场诊断模式和轨迹计算模式获取当地逐小时风场和每日逐小时传输轨迹, 分析风场类型。结果表明: 关中盆地内日平均风速约 $1\sim 3\text{ m s}^{-1}$, 夏季风速高、秋冬季低; 盆地中央的主导风向以沿地形走向的东北风和西南风为主, 盆地四周测站的主导风向表现出顺着地形向盆地中央汇流的趋势。各站主导风向的季节变化不大。盆地内风场分为系统控制型、弱天气背景型和局地环流型 3 类, 全年出现日数比例分别占 8%、17.3% 和 74.7%。以山谷风日夜循环为特征的局地环流型风场最多。以西安城区为源点的大气输送轨迹显示, 系统控制型风场以偏东北方向的输送为主, 弱天气背景型和局地环流型风场的轨迹输送都大致以偏东北和偏西 (以及偏西南) 沿盆地走向以及偏东南朝向秦岭山地这三个方向为主。局地环流型的轨迹影响范围小, 集中于盆地中央和南侧山地之间, 表明这是一种不利于污染扩散的风场类型。

关键词 关中盆地 风场和输送 诊断分析

文章编号 1006-9585(2020)06-0637-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20019

Diagnostic Analysis of Wind Fields and Atmospheric Transport Pathways in the Guanzhong Basin

HU Xun, CAI Xuhui, SONG Yu, and KANG Ling

Department of Environmental Sciences, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University/ State Joint Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100871

Abstract The characteristics of wind fields and transport pathways in the Guanzhong Basin were revealed based on data from 151 surface meteorological stations in 2017. Wind speed and wind direction data from five representative stations in the basin were analyzed by calculating windy days, daily average wind speed and wind direction frequency in four seasons, and hourly wind field and transport trajectories were calculated by CALMET and trajectory model. The results show that daily average wind speed in the Guanzhong Basin is about $1\sim 3\text{ m s}^{-1}$, which is higher in summer but lower in autumn and winter. The dominant wind direction in the center of the basin mainly includes northeast and southwest winds along the terrain, while the dominant wind direction around the basin shows a converging trend along the terrain to the center of the basin. Seasonal changes in dominant wind direction at each station are not significant. The wind fields in the basin can be classified into three types, namely, systematic wind field, feeble systematic wind field, and local atmospheric circulation. The local atmospheric circulation occurs most frequently in the year (74.7%), followed by

收稿日期 2020-09-16; 网络预出版日期 2020-09-26

作者简介 胡洵, 男, 1998 年出生, 博士研究生, 从事污染气象研究。E-mail: huxun@pku.edu.cn

通讯作者 蔡旭晖, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2018YFC0213204、2017YFC0209904, 大气重污染成因与治理攻关项目 DQGG0106-01

Funded by National Key Research and Development Project (Grants 2018YFC0213204 and 2017YFC0209904), Key Project of Heavy Air Pollution Mechanism and Control (Grant DQGG0106-01)

feeblish systematic wind field (17.3%), and systematic wind field (8%). Airflows of systematic wind field are mainly transported northeasterly, while airflows of feeblish systematic wind field or local atmospheric circulation are transported northeasterly, westerly (including southwesterly), and southeasterly. Trajectories of the local atmospheric circulation are limited to a small area, concentrated between the central basin and southern mountains, which indicates that this wind field is not conducive to air pollution dispersion.

Keywords Guanzhong Basin, Wind field and transport pathway, Diagnostic analysis

1 引言

古城西安所在的关中盆地具有重要的历史、文化和经济意义。该地区人口密集,经济发展较快,且是连接我国东西部的交通要道。近些年来,该地区大气污染问题严重(孙根年等, 2006)。2018年,国家制定了改善环境空气质量的三年行动计划,把包含关中盆地的汾渭平原明确列入大气污染重点防治区域。

气象条件对环境空气质量有重要影响,特别是污染源保持基本不变的情况下,重污染事件的形成往往由气象因素决定。关中地区位于秦岭与黄土高原交界处,四周群山环抱,构成一个相当封闭的盆地。这种地形使其气象条件独具特色。近年来随着社会对大气环境问题重视程度提高,关中地区相关气象过程的研究也增多。例如,杨晓春等(2016)对污染过程与大气温度层结和边界层状况的关系进行了初步探讨;王雯燕等(2014a, 2014b)、胡琳等(2016)、周辉等(2015)以及王珊等(2014)分别对关中地区的雾、能见度、霾或雾霾等现象和过程进行研究,其结果对认识大气污染过程具有参考意义。张侠等(2019)利用数值模拟方法分析关中盆地典型污染过程的近地面风场,揭示了静稳天气条件下污染物的累积过程。Bei et al. (2016, 2017)同样使用数值模拟方法进行研究,指出天气形势和气压分布对关中盆地气流传输形态的影响和对霾天气形成的作用,也探讨了山谷风的局地环流对污染物输送扩散以及浓度的影响。

山谷盆地等复杂地形的气象条件与具体地形特征密切相关。实际地形走向、相对高差、位置错落等千差万别,使山地气象条件各有特色。即使在很小的水平范围内,气象、气候条件也会很不相同(Lutgens and Tarbuck, 2013)。复杂地形的大气边界层和污染过程更是研究的难点(Chow et al., 2013)。美国早年开展“复杂地形大气研究”(ASCOT)计划,大大增进了对山地大气输送与扩散性质的了解(Dickerson and Gudiksen, 1983; Clements et al., 1989)。其后Whiteman(2000)系统总结之前的

研究成果,全面描述山谷地形环流及其热力结构。山地边界层湍流特性、边界层与地形风的相互作用以及山地边界层大气与上层自由大气的交换作用等进一步成为关注的课题(Rotach and Zardi, 2007)。近年一些特殊气象过程与现象,如盆地地形的冷池效应(cold-air pool)对空气污染的影响也受到广泛重视(Dorning et al., 2011; Lareau et al., 2013)。我国山地分布很广,但山地气象的研究针对大地形影响(如青藏高原)较多,对其他许多富有地方特色的情况了解仍很不足。关中盆地也是这样,已有文献的结果较为零散,甚至对于污染过程最为重要的近地面风场和输送特性也缺乏系统的分析。这与当地大气污染防治的现实需求是不相适应的。本文

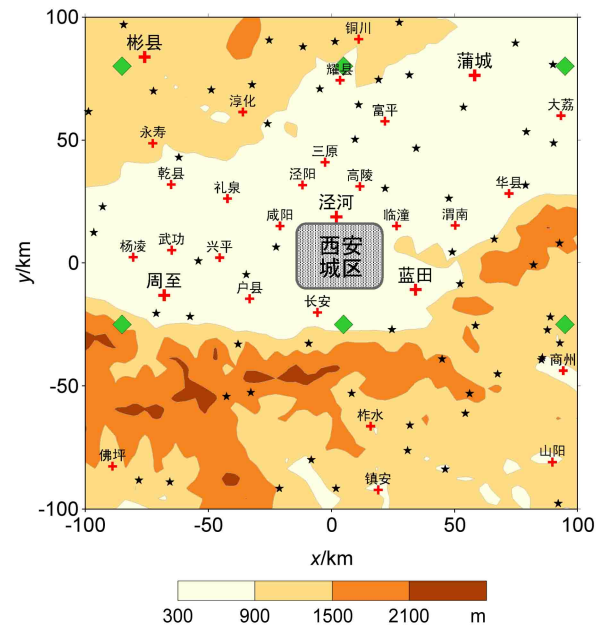


图1 模式区域和地形、气象站点,模式区域中心经纬度为(34.28°N, 108.95°E)。十字、星形和菱形符号分别为气象基准站、自动站和NCEP数据格点。彩色阴影代表海拔高度(下同)
Fig. 1 Model domain and terrain of Guanzhong Basin with meteorology stations. The coordinates of the center of the domain are (34.28°N, 108.95°E). Cross, pentagram, and diamond symbols denote benchmark climate stations, automatic stations, and NCEP grid points, respectively. The color shadings represents the altitude (the same below)

用当地实际气象观测资料，结合数值模式进行长时间的风场和轨迹分析，揭示风场类型和季节变化以及盆地内污染物的可能输送形态。

2 模式、资料与方法

2.1 研究区域概况

关中盆地西止于陇山，南临秦岭，偏东方向为华山和中条山，北面是广阔的黄土高原台塬，自西

向东分布有陇山、子午岭和黄龙山。盆地东西约 204 km，南北最宽处约 116 km。地势西高东低，渭河横贯其中。两岸台地海拔从 350 m 至 500 m 不等。盆地南侧山势峻峭，华山和秦岭海拔在 1500 m 和 2000 m 以上，北侧坡度相对和缓，海拔也在 1000~1500 m。盆地与周边山地的高差可达 1000 m 以上。值得一提的是，关中盆地东北方向与汾河盆地隔黄河相望，是大气流动的重要通道。本文关心区域主要是以西安市为中心的渭河平原地区，研究

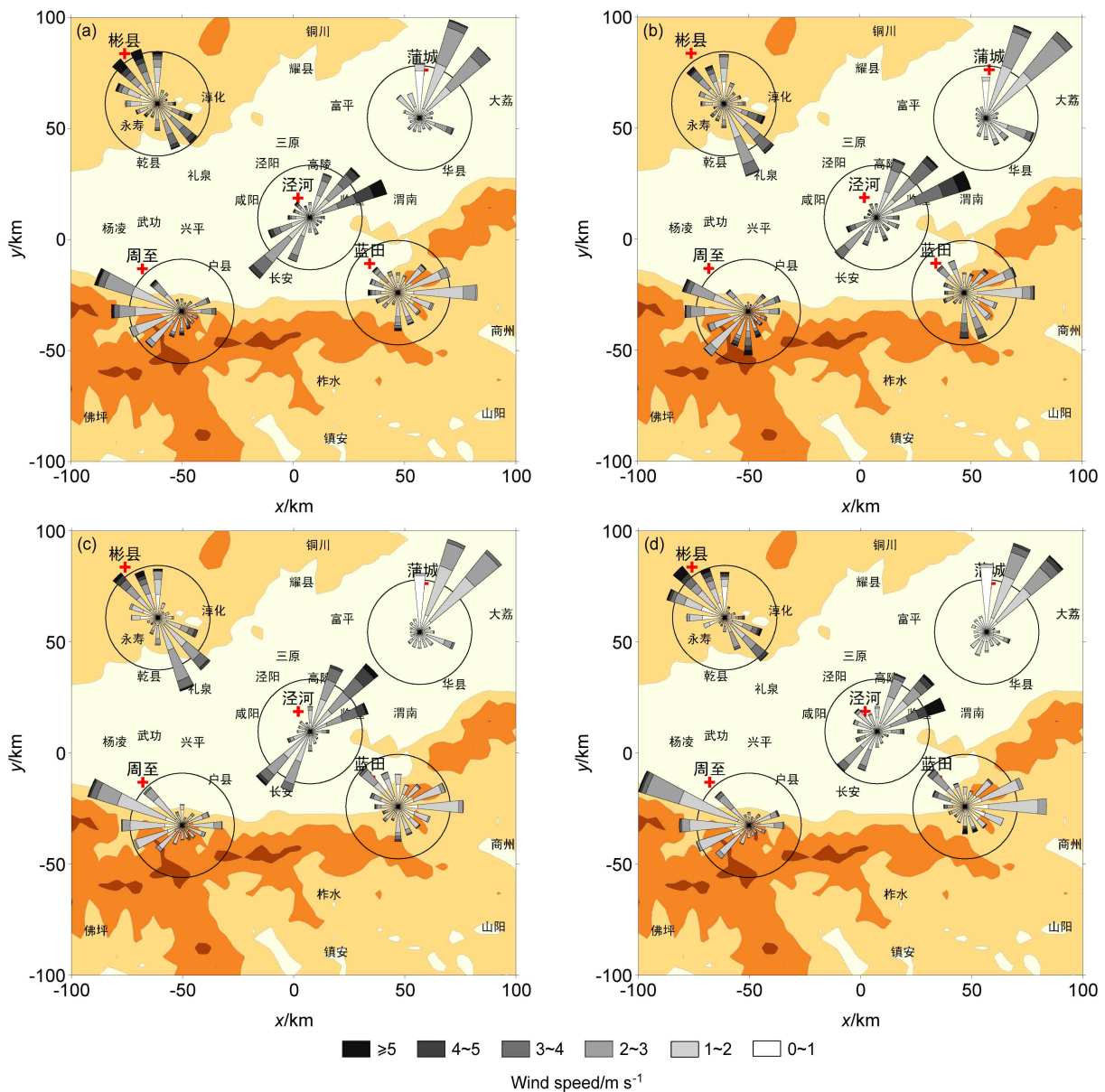


图 2 5 个代表站分别在 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季和 (d) 冬季的风玫瑰图。灰色部分为风速，风玫瑰图的圆圈范围代表风向频率是 10%

Fig. 2 Mean wind roses of five representative weather stations in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter. The gray parts represent wind speeds and the circle of the wind roses indicates the wind direction frequency of 10%

的具体范围和地形分布等见图 1。

2.2 模式简介

2.2.1 风场诊断模式

本文使用 CALMET 风场诊断模式计算关中地区的风场, 该模式是美国 Sigma Research Corporation 公司研发的污染扩散模式 CALPUFF 中的气象模块。CALMET 模式由风场诊断模块和微气象学模块两部分组成, 提供扩散模拟所需的风场和边界层湍流参数。风场诊断模块的计算分为两步: 第一步给出风场的第一猜值, 然后基于地形的动力学效应、坡面流、地形阻隔效应等因素对该猜值进行调整; 第

二步则是引入实际观测数据, 并通过在模拟区域的网格上进行插值和平滑处理等操作来生成最终风场 (Scire et al., 2000)。作为诊断模式, CALMET 给出接近观测实际的风场, 同时通过流动的质量守恒约束反映部分地形扰动的作用, 弥补观测的不足。模式与地表覆盖和地形资料有良好的衔接, 使用较方便, 而且计算量较小, 适合长时间 (如多年) 的模拟分析, 因而在复杂地形大气流动和污染扩散研究中得到广泛应用。只要测站密度合理、资料质量控制得当, 模式诊断结果可代表真实的三维风场 (Yim et al., 2007)。

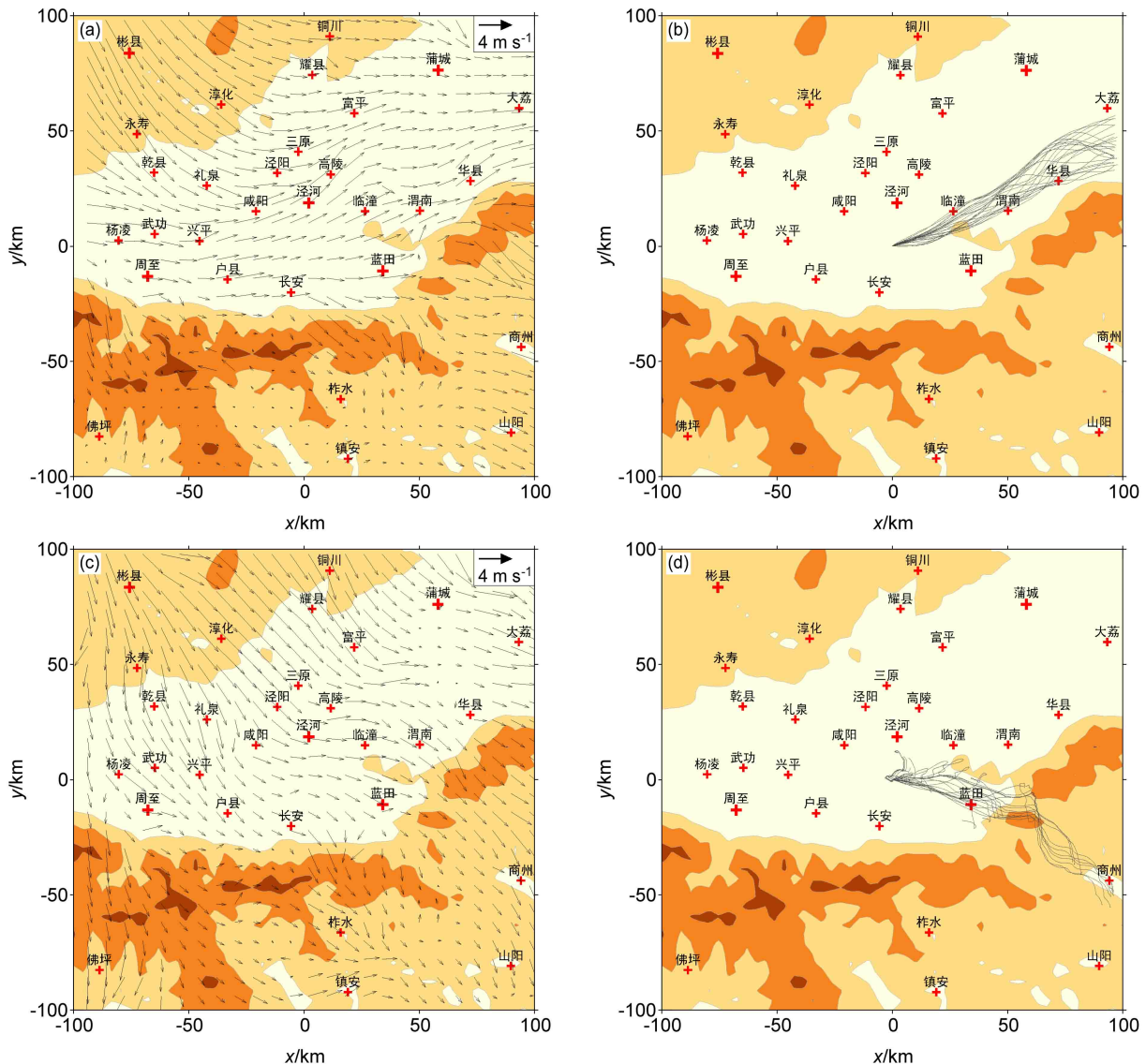


图 3 典型系统控制型风场与轨迹个例, 分别为 2017 年 (a) 1 月 11 日 13:00 和 (c) 6 月 24 日 13:00 的风场以及 2017 年 (b) 1 月 11 日和 (d) 6 月 24 日从 00:00、01:00、02:00、……、24:00 出发的轨迹

Fig. 3 Typical examples of systematic wind field at (a) 1300 LST on 11 Jan and (c) 1300 LST on 24 Jun 2017 and trajectories from each hour on (b) 11 Jan and (d) 24 Jun 2017

本文 CALMET 模式区域和部分地面测站分布见图 1。该区域面积为 200 km×200 km，大致以西安市作为区域中心，覆盖关中盆地大部以及北山和南部秦岭。对应的模式水平网格距为 4 km，垂直方向从地面至 3000 m 不等距分为 6 层，最低层为 10 m。模式区域内测站密集，可以较好反映整个区域的气象状况。

2.2.2 轨迹分析模式

轨迹分析是一种拉格朗日观点的流体运动分析方法。对模拟所得的中尺度逐时风场进行时空插值，获得轨迹计算点当前位置的速度，从而计算下一时步的轨迹位置。通过计算某一流动层面上特定出发点的一系列拉格朗日轨迹，可定性研究污染物自源点释放后的输送行为，获得当地污染物输送和影响的方向、路径以及污染物空间分散范围的信息。该方法简单、直观，早年即已用于中小尺度大气扩散特性的分析 (Pack, 1964)，后来更推广应用于大尺度气流来源分析 (Draxler and Hess, 1998)。本文使用自主研发的轨迹模式进行计算，该模式已成功应用于珠江三角洲 (何启超等, 2013) 和海南岛 (张振州等, 2014) 以及其他诸多工程应用项目的污染气象特征分析中。轨迹由 10 m 水平风场数据计算得到，此高度可大致代表近地面污染物的输送情况。每日逐时进行轨迹计算，共获得 24 条轨迹。每条轨迹延续 48 h，或在此期间越出模式模拟区域而终止。

2.3 资料及应用

CALMET 模式使用美国地质勘探局 (USGS) 的全球 1 km 分辨率地形资料和地表覆盖类型资料，可有效反映关中盆地及周边山地的情况。模式区域内有地面气象基准站 32 个，自动气象站 119 个。基准站数据质量良好，其 2017 年逐时风向、风速、气温、相对湿度、气压和降水量的数据保证率在 96% 以上。自动站全年数据保证率差异较大，最高可达 95%，最低仅 17%。我们取风向、风速数据保证率超过 80% 的站点参加模式诊断分析，共有 93 个自动站符合此条件。图 1 中显示的就是这部分气象站点。高空气象数据从 NCEP-fnl 资料集提取，每日 4 次 (协调世界时 00:00、06:00、12:00 和 20:00)，在模式区域内共 6 个格点。将高空数据按 CALMET 模式的探空资料格式存储，并与地面资料一起进行逐时风场诊断。

3 结果与分析

3.1 代表站流动特性

取图 1 中 5 个测站 (泾河、蒲城、周至、蓝田和彬县) 分别代表盆地中央、盆地东北和西南两端以及东南山前和西北山地。统计这 5 个代表站点的风频以了解整个盆地大气总体流动特征及季节变化。结果如图 2，盆地中央泾河站的风向以偏东北风和西南风为主，与盆地走向一致。盆地两端表现为流

表 1 关中地区 2017 年各月份不同风场类型日期统计

Table 1 Statistical data of three types of atmospheric flows in the Guangzhong Basin in 2017

月份	系统控制型		弱天气背景型		局地环流型	
	日期	天数	日期	天数	日期	天数
1	6, 10, 11	3	7, 9, 12, 25~26, 28~29	7	1~5, 8, 13~24, 27, 30, 31	21
2	19	1	5, 7~8, 20, 28	5	1~4, 6, 9~18, 21~27	22
3			1, 4, 16, 21~25, 30	9	2~3, 5~15, 17~20	17
4	16~17	2	8, 12, 19, 20	4	1~7, 9~11, 13~15, 18, 21~30	24
5	7, 9~11, 15~16, 24~26	9	1~3, 8, 21~22	6	4~6, 12~14, 17~20, 23, 27~31	16
6	9, 24	2	3~4, 6, 11~13	6	1~2, 5, 7~8, 10, 14~23, 25~30	22
7	7~8	2	5~6, 16~17, 24~25, 31	7	1~4, 9~15, 18~23, 26~30	22
8	8, 21~22, 26	4	7, 16~17, 23, 27	5	1~6, 9~15, 18~20, 24~25, 28~31	22
9			2, 5, 18, 26~27	5	1, 3~4, 12~17, 19~25, 28~30	19
10	8	1	9	1	1~7, 10~31	29
11	8, 20, 22, 24	4	9, 21, 25	3	1~7, 10~19, 23, 26~30	23
12			17~19	3	1~16, 20~28	25

表 2 关中地区 2017 年各季不同风场类型天数统计
Table 2 Seasonal appearance of three types of atmospheric flows in the Guanzhong Basin in 2017

类型	各季不同风场类型天数				总计
	春季	夏季	秋季	冬季	
系统控制	11	8	5	4	28 (8.0%)
弱天气背景	15	18	9	19	61 (17.3%)
局地环流	57	66	71	69	263(74.7%)

注：全年有13天数据缺测，括号内为不同风场类型天数在全年的占比。
入盆地的风向为主，蒲城主要是偏东北风，周至主要是偏西和西北偏西风。处于盆地东南侧的蓝田也有较多顺着山势汇流入盆地中央的风向，以偏东风和偏南风为多，有所不同的是蓝田同时有部分吹向山地的偏北和西北风。彬县表现出很强的沿盆地侧

壁上坡和下坡的东南风和西北风，与泾河上游河谷汇入盆地的地形有密切关系。就风速的相对大小而言，关中盆地整体的日平均风速约 $1\sim3\text{ m s}^{-1}$ ，5 站点中泾河与彬县的风速较大，周至与蓝田居其次，蒲城的风速最小。2017 年全年，泾河与彬县的逐时风速基本在 2 m s^{-1} 以上，其中超过 5 m s^{-1} 大风的出现频率约占 4%，为所有测站中最高；周至、蓝田与蒲城的逐时风速主要在 $1\sim3\text{ m s}^{-1}$ 间。超过 4 m s^{-1} 大风的出现频率，周至和蓝田约为 3%，蒲城则不到 1%。就风速与风向的关系而言，除蓝田外 4 个站点的最大风速基本出现在主导风向上，只有蓝田的最大风速出现在南风而不是最常出现的东风。盆地内各代表站点的主导风向随季节变化不

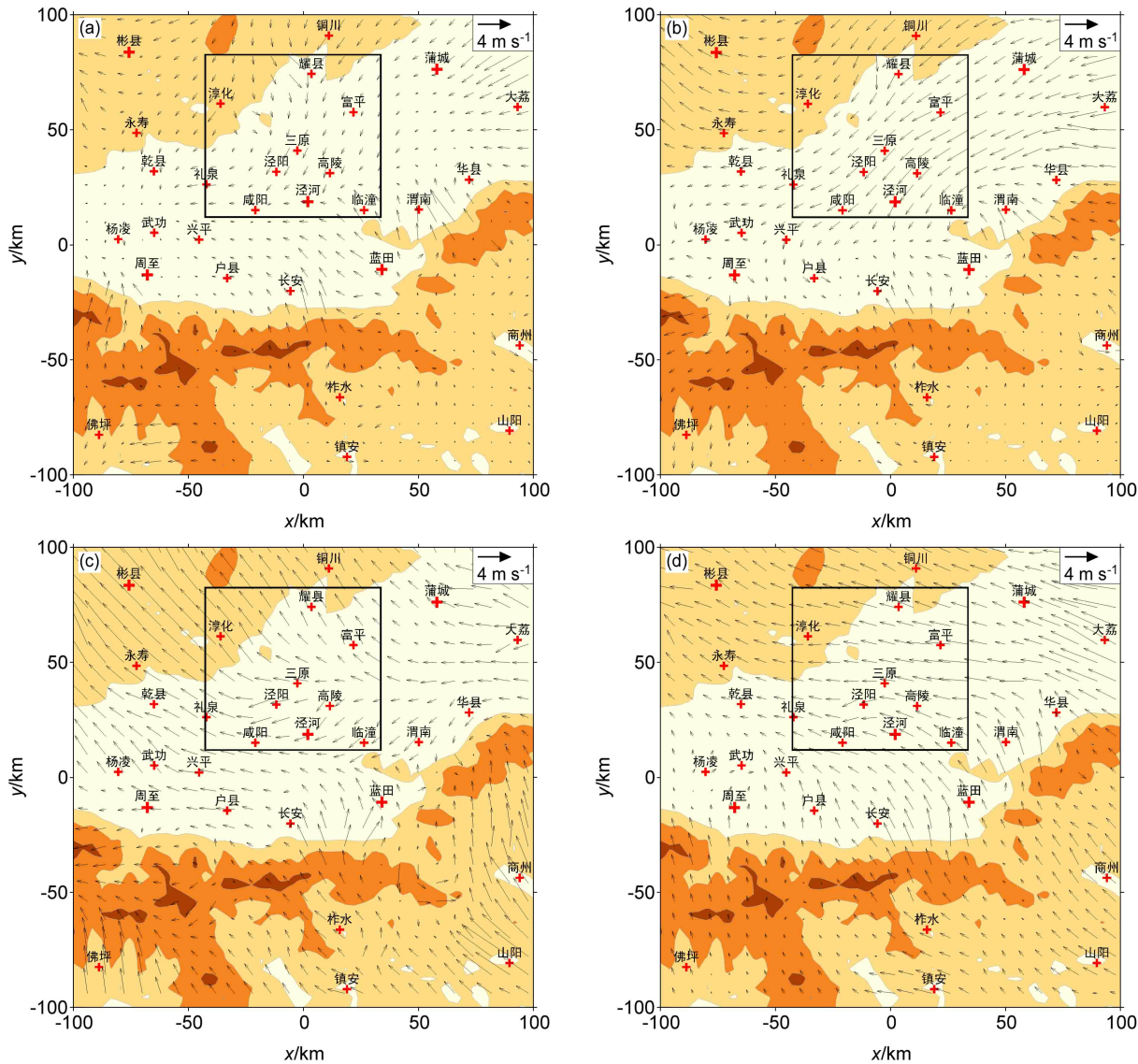


图 4 典型弱天气背景型风场个例，分别为 2017 年 6 月 13 日 (a) 01:00、(b) 07:00、(c) 13:00 和 (d) 19:00 的风场
Fig. 4 Typical example of feeblish systematic wind field at (a) 0100 LST, (b) 0700 LST, (c) 1300 LST, and (d) 1900 LST on 13 Jun 2017

大, 值得一提的是泾河站, 全年以东北风和西南风为主, 春、秋两季这两个风向的出现频率相当, 但夏季偏东南风较多、冬季偏西北风较多。季节变化对风速的影响非常明显, 5 个站点的风速都呈现出春夏季高、秋冬季低的特点。

3.2 近地面风场分类

3.2.1 分类方法与统计结果

山谷盆地近地面风场一般受天气系统和山地中尺度环流两方面因素影响 (Jackson et al., 2013)。影响关中地区风场最重要的是锋面系统, 全年各季平均约 4~6 d 就有一次锋面活动 (陕西省地方志编纂委员会, 2001)。在天气系统的间隙或系统较弱的情况下, 当地风场主要受局地和中尺度地形环

流控制。将 CALMET 模式诊断得到的 2017 年全年逐小时地面风场全部绘出, 同时绘制逐日 24 个时刻出发的轨迹图。根据这些资料进行人工判读, 可将关中地区的近地面风场分为 3 类, 即系统控制型、弱天气背景型和局地环流型。各类型划分依据是: 1) 系统控制型, 由模拟区域中心出发的轨迹在 48 h 内迅速离开整个 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$ 模式区域, 轨迹方向基本不变, 风速较大; 2) 弱天气背景型, 轨迹方向在一天内有较大变化, 但主方向基本维持, 风速在某些时刻变小, 但多数时刻维持较大; 3) 局地环流型, 轨迹在 48 h 内局限于模拟区域内, 或者往复纠缠呈团状, 风速很小, 风向有多次变化, 盆地内山谷风日夜循环的特征明显。

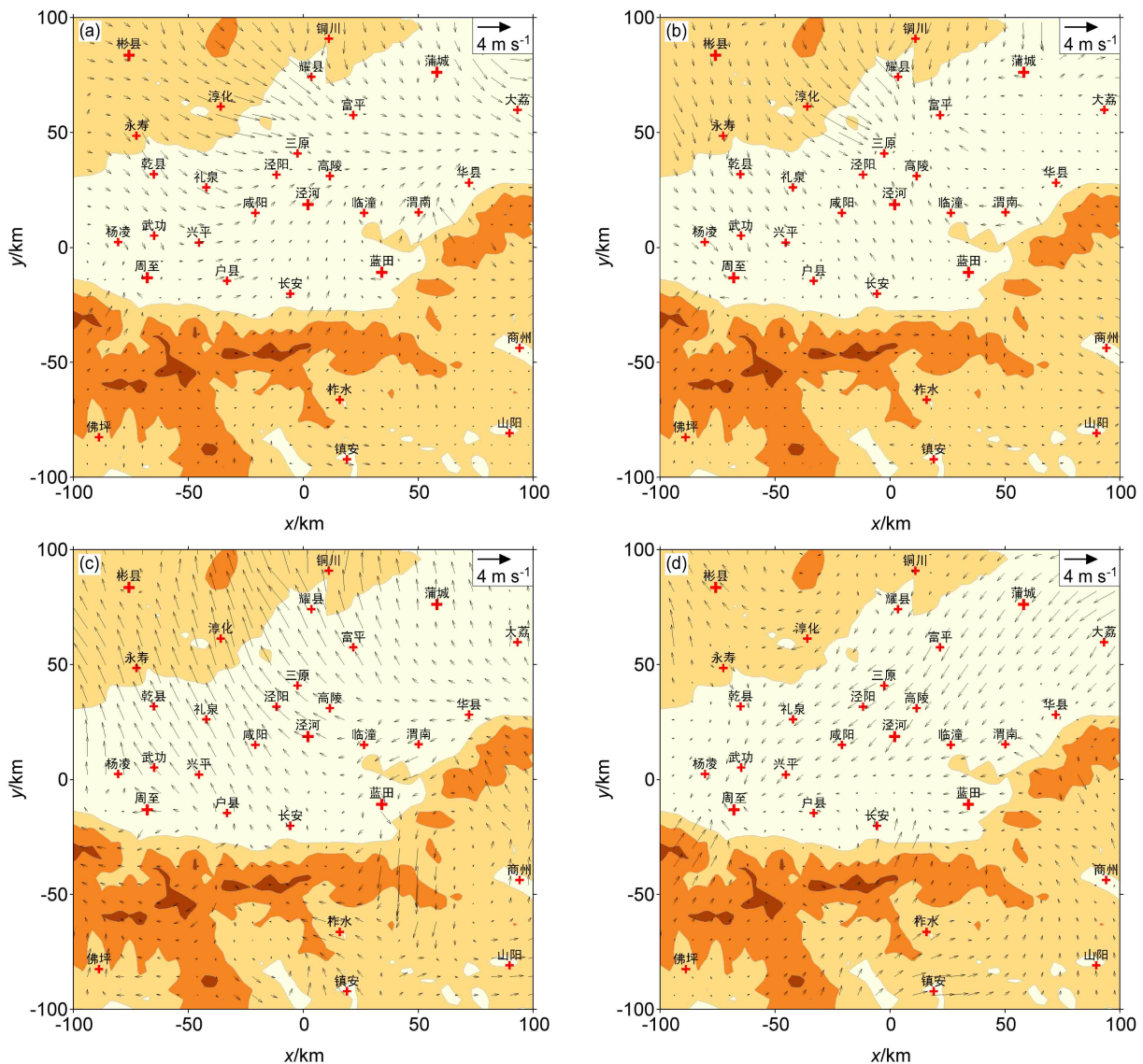


图 5 典型局地环流型风场个例, 分别为 2017 年 2 月 4 日 (a) 01:00、(b) 07:00、(c) 13:00 和 (d) 19:00 的风场

Fig. 5 Typical example of local atmospheric circulation at (a) 0100 LST, (b) 0700 LST, (c) 1300 LST, and (d) 1900 LST on 4 Feb 2017

剔除部分观测数据缺失的日期（共 13 d），表 1 和表 2 给出了关中地区各月和各季节的各类不同风场类型统计。结果显示，局地环流型是关中地区最常出现的风场类型，全年出现频率占总天数的 74.7%。其次是弱天气背景型风场，出现频率为 17.3%。系统控制型风场所占比例仅为 8.0%。

不同类型风场的出现频率随季节而变化。系统控制型风场在春季、夏季出现的次数更多，约为秋季、冬季的两倍；弱天气背景型风场在春季、夏季、冬季都出现 15 次以上，在秋季只出现 9 次；局地环流型风场在秋季、冬季出现的次数略高于春季、夏季。就风场类型出现频率的相对大小而言，四季都是“局地环流型>弱天气背景型>系统控制型”。

3.2.2 系统控制型风场特征

各季系统控制型风场均以盆地内的偏西南风最为常见。如图 3a 可见，该个例的西北来流受盆地南侧秦岭山脉阻拦，在盆地内转为系统性的偏西南气流。这一天，以模式中心（对应西安城区位置）为原点逐时出发的 24 条轨迹都沿地形的走向快速从盆地东北部出口离开（图 3b）。少数情况下系统控制型风场也会以翻越山地的形式出现（如图 3c）。这是夏季西北系统风的例子。虽然盆地南侧的秦岭山地也对流动有明显的阻拦、扰动作用，整体风场却保持着向东南的流动态势。这一天的轨迹也基本维持向东南的方向，而且有多条轨迹的确跨越了东南山地（图 3d）。

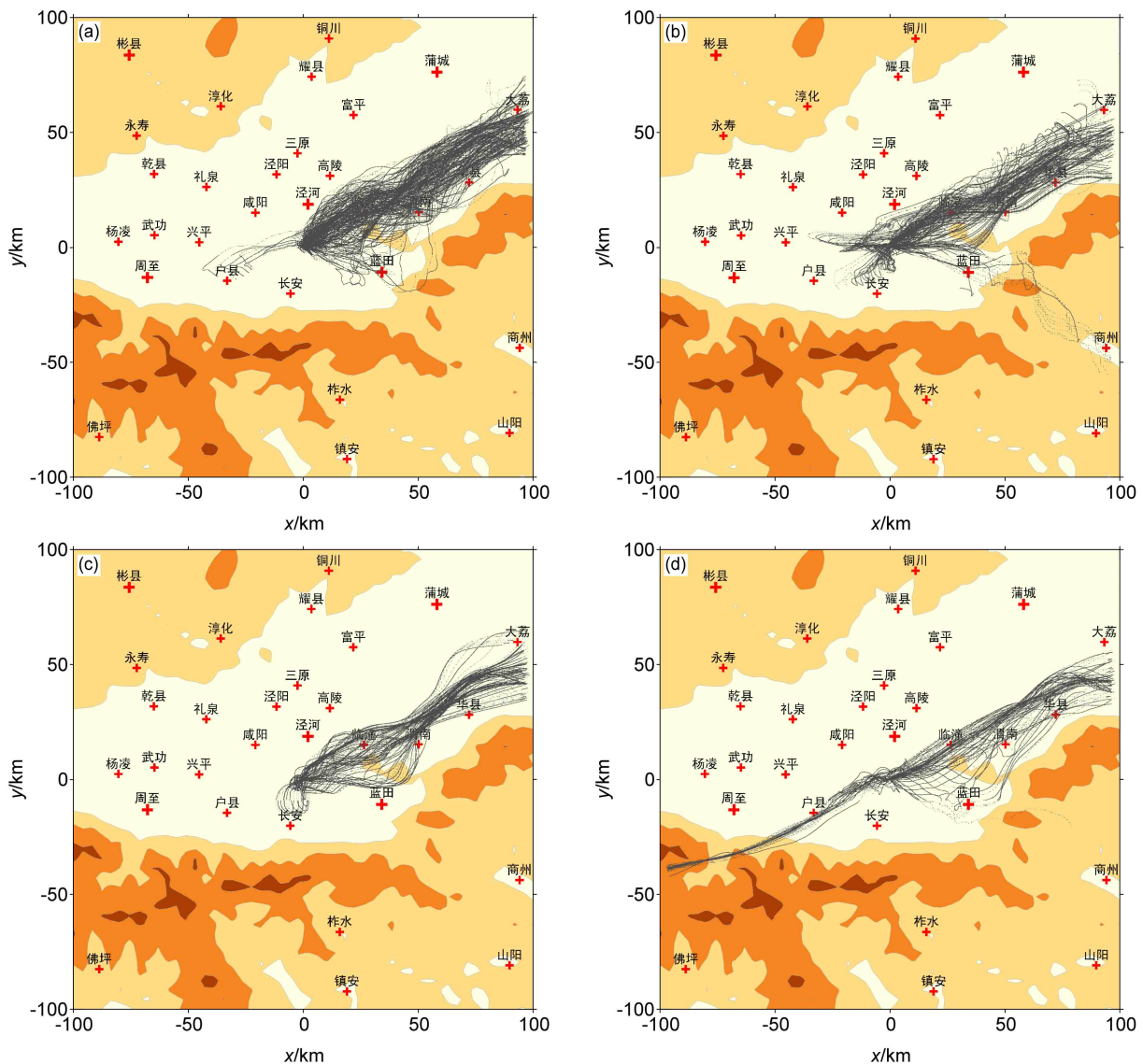


图 6 系统控制型风场在 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季和 (d) 冬季的输送轨迹

Fig. 6 Atmospheric transport pathways of systemic wind field in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

影响范围与季节变化,将所有计算的逐日逐时轨迹按风场类型与季节进行叠加(结果如图6~8)。

从图6看出,系统控制型风场最重要的输送路径是东北方向,而且四季都以该方向为主。夏季和冬季极少数情况下,也出现向东南跨越山地以及沿盆地往西南方向的输送。图中结果也直观显示,春夏季系统性输送比秋冬季多。

弱天气背景下的大气输送轨迹较为复杂多变(图7)。一个较明显的特点是,春秋冬三季,轨迹影响范围都大体分布于盆地中轴线以南的区域。只有夏季,轨迹有较多向西北偏西的输送。具体而言,春季和冬季的输送路径主要有三条:东北、东南和偏西方向。偏西方向的输送又大体分为两个分

支,一支沿着盆地西南山地,另一支沿着盆地中央轴线或略偏西北。往东南方向的输送轨迹,冬季跨过秦岭山地的情况较多,春季则多数轨迹仅停留在山脊附近或山脊北侧。夏季和秋季的输送路径主要是偏东北和偏西两个方向,夏季以偏西的轨迹较多,而秋季以偏东北的输送为主。

局地环流型风场的输送轨迹大体呈3个方向:春季、秋季和冬季东北—西南的往复输送和向东南山地的输送,大致构成一个三角形;夏季主要是偏西和偏东往复输送和向东南山地的输送。该类风场的四季大气输送轨迹都密布于盆地底部偏南一侧。相对而言,春、夏季的输送影响范围稍大一些,冬季的影响范围最小。可见这种气象条件对污染物的

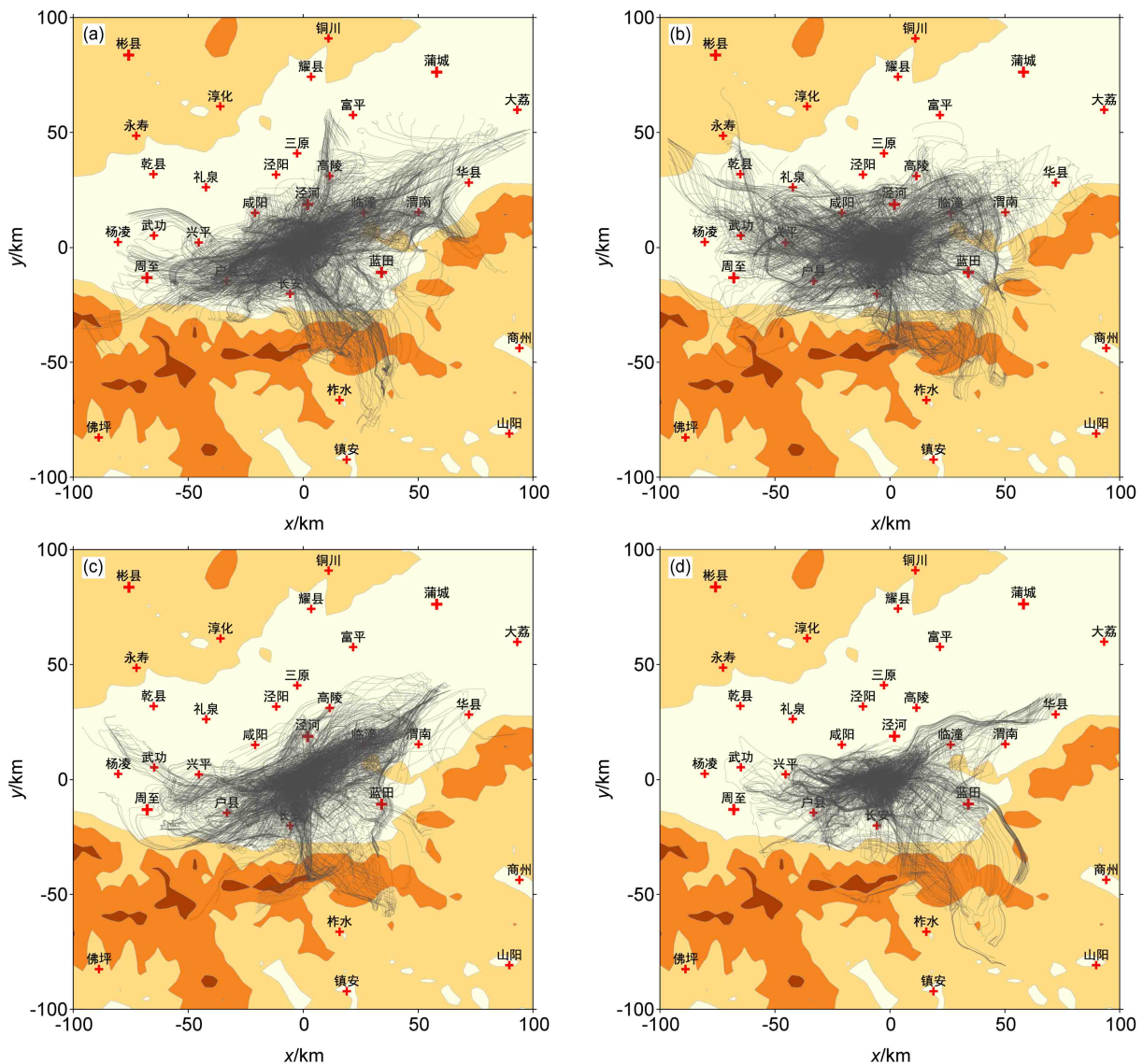


图8 局地环流型风场在(a)春季、(b)夏季、(c)秋季和(d)冬季的输送轨迹

Fig. 8 Atmospheric transport pathways of local atmospheric circulation in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

扩散稀释十分不利。

4 总结与结论

本文以关中地区 2017 年全年地面气象站逐时观测资料和其他高空资料为基础, 以 CALMET 诊断模式和轨迹计算模式对该地区的大气风场和输送特征进行了系统分析, 获得以下结果和结论:

(1) 关中盆地代表性气象站的资料显示, 盆地内风速夏季高、秋季和冬季低; 各站主导风向的季节性变化不大, 但与所处位置和地形密切相关。盆地中央的主导风向是沿着地形走向往复的东北风和西南风, 盆地四周测站的主导风向都表现出顺着盆地地形向中央汇流的趋势。

(2) 关中盆地内的大气风场可分为 3 类, 即系统控制型、弱天气背景型和局地环流型。全年约 74.7% 的天数是局地环流型风场, 对应关中盆地风速较小, 山谷风的局地环流和日夜循环特征明显。另外约 17.3% 的天数为弱天气背景型风场, 盆地内风速较大、但随时间变化也较大。系统控制型风场在关中地区最少, 仅占全年总天数的 8%。该类风场风速较大、风向较稳定, 以西南风最为常见。

(3) 四季各类型风场出现的频率都是“局地环流型>弱天气背景型>系统控制型”。但系统控制型在春季出现的频次最多而冬季最少, 局地环流型在冬季出现最多、春季最少, 弱天气背景型在春季、夏季、冬季三季分布相近而在秋季最少。

(4) 系统控制型风场条件下, 盆地内以东北方向的轨迹输送为主。弱天气背景型和局地环流型风场的轨迹输送都大致以偏东北和偏西(或偏西南)沿盆地走向以及偏东南朝向秦岭山地这三个方向为主。局地环流型的轨迹影响范围更小, 更集中于盆地中央和南侧山地之间, 表明这种出现最多的风场类型十分有利于污染物在盆地内停滞累积。

参考文献 (References)

- Bei N F, Li G H, Huang R J, et al. 2016. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong Basin, China [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 16(11): 7373–7387. doi:10.5194/acp-16-7373-2016
- Bei N F, Zhao L N, Xiao B, et al. 2017. Impacts of local circulations on the wintertime air pollution in the Guanzhong Basin, China [J]. *Sci. Total Environ.*, 592: 373–390. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.151
- Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B J. 2013. Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges [M]. Dordrecht: Springer, 750pp. doi: 10.1007/978-94-007-4098-3
- Clements W E, Archuleta J A, Gudiksen P H. 1989. Experimental design of the 1984 ASCOT field study [J]. *J. Appl. Meteor.*, 28(6): 405–413. doi:10.1175/1520-0450(1989)028<0405:EDOTAF>2.0.CO;2
- Dickerson M H, Gudiksen P H. 1983. Atmospheric studies in complex terrain, technical progress report FY-1979 through FY-1983 [R]. Rep. UCID-19851.
- Dorning M, Whiteman C D, Bica B, et al. 2011. Meteorological events affecting cold-air pools in a small basin [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50(11): 2223–2234. doi:10.1175/2011JAMC2681.1
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. *Aust. Meteor. Mag.*, 47: 295–308.
- 何启超, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 2013. 珠江三角洲区域大气扩散和输送特征诊断分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 49(6): 945–954. He Qichao, Cai Xuhui, Song Yu, et al. 2013. Diagnostic analysis of atmospheric transport and diffusion characteristics over the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 49(6): 945–954. doi:10.13209/j.0479-8023.2013.126
- 胡琳, 王琦, 张文静, 等. 2016. 关中地区低能见度事件变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 39(1): 41–46. Hu Lin, Wang Qi, Zhang Wenjing, et al. 2016. Variation of low visibility events in Guanzhong of Shaanxi [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 39(1): 41–46. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.01.005
- Jackson P L, Mayr G, Vosper S. 2013. Dynamically-driven Winds [M]//Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B J. Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges. Dordrecht: Springer, 121–218. doi: 10.1007/978-94-007-4098-3
- Lareau N P, Crosman E, Whiteman C D, et al. 2013. The persistent cold-air pool study [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94(1): 51–63. doi:10.1175/BAMS-D-11-00255.1
- Lutgens F K, Tarbuck E J. 2013. The Atmosphere: An Introduction to Meteorology (12th ed.) [M]. Boston: Pearson, 27–33.
- Pack H D. 1964. Meteorology of air pollution [J]. *Science*, 146(3648): 1119–1128. doi:10.1126/science.146.3648.1119
- Rotach M W, Zardi D. 2007. On the boundary-layer structure over highly complex terrain: Key findings from MAP [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133(625): 937–948. doi:10.1002/qj.71
- Scire J S, Robe F R, Fernau M E, et al. 2000. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model Vol. 37 [M]. Concord, USA: Earth Tech Inc., 1–15.
- 陕西省地方志编纂委员会. 2001. 陕西省志·第 6 卷 气象志 [M]. 北京: 气象出版社, 492pp. Editorial Board of the History of Shaanxi Province. 2001. History of Shaanxi Province: Documentation of Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 492pp.
- 孙根年, 吴晓娟, 周立花. 2006. 西安大气 SO₂/NO_x 污染时空变化的

- 分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 20(5): 99–103. Sun Gennian, Wu Xiaojuan, Zhou Lihua. 2006. Analysis on temporal and spatial changes of SO_2/NO_x in Xi'an city during 1991–2002 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 20(5): 99–103. doi:10.3969/j.issn.1003-7578.2006.05.020
- 王珊, 修天阳, 孙扬, 等. 2014. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析 [J]. *环境科学学报*, 34(1): 19–26. Wang Shan, Xiu Tianyang, Sun Yang, et al. 2014. The changes of mist and haze days and meteorological element during 1960–2012 in Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 34(1): 19–26. doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.01.021
- 王雯燕, 张颖梅, 曹红丽, 等. 2014a. 西安城区大雾气候特征分析 [J]. *陕西气象*, (3): 20–22. Wang Wenyan, Zhang Yingmei, Cao Hongli, et al. 2014a. Analysis of heavy fog climate characteristics in Xi'an city [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology (in Chinese)*, (3): 20–22. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2014.03.007
- 王雯燕, 曹红丽, 张颖梅, 等. 2014b. 西安雾区垂直结构气象要素特征分析 [J]. *甘肃科学学报*, 26(3): 32–34. Wang Wenyan, Cao Hongli, Zhang Yingmei, et al. 2014b. On characteristics of meteorological elements of Xi'an fog [J]. *Journal of Gansu Sciences (in Chinese)*, 26(3): 32–34. doi:10.3969/j.issn.1004-0366.2014.03.010
- Whiteman C D. 2000. Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications [M]. New York: Oxford University Press, 355pp.
- 杨晓春, 杜萌萌, 吴其重, 等. 2016. 西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析 [J]. *干旱气象*, 34(3): 547–552. Yang Xiaochun, Du Mengmeng, Wu Qizhong, et al. 2016. Analysis on meteorological condition and trajectory of a serious pollution weather in Xi'an of Shaanxi [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 34(3): 547–552. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0547
- Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H, et al. 2007. Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system [J]. *J. Geophys. Res.*, 112(D5): D05106. doi:10.1029/2006JD007752
- 张侠, 程路, 王琦, 等. 2019. 基于 WRF/CALMET 的关中盆地中部典型风场模拟 [J]. *陕西气象*, (4): 8–12. Zhang Xia, Cheng Lu, Wang Qi, et al. 2019. WRF / CALMET simulation of typical wind field in central Guanzhong Basin [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology (in Chinese)*, (4): 8–12. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2019.04.003
- 张振州, 蔡旭晖, 康凌, 等. 2014. 海南岛地区大气输送和扩散特征的数值模拟 [J]. *环境科学学报*, 34(2): 281–289. Zhang Zhenzhou, Cai Xuhui, Kang Ling, et al. 2014. Numerical simulation of atmospheric transport and diffusion over Hainan Island [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 34(2): 281–289.
- 周辉, 权文婷, 赵青兰. 2015. 陕西省关中地区霾天气时空分布特征 [J]. *陕西气象*, (4): 21–23. Zhou Hui, Quan Wenting, Zhao Qinglan. 2015. Spatial and temporal distribution of haze weather in Guanzhong Region, Shaanxi Province [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology (in Chinese)*, (4): 21–23. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2015.04.005