

京津冀地区无人机低空航路气象环境模拟研究

钟若喟¹ 廖小罕^{2,3,4} 徐晨晨^{2,3,4} 文小航¹

(1 成都信息工程大学 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610200;

2 中国科学院地理科学与资源研究所 资源环境与地理信息国家重点实验室, 北京 100101;

3 中国科学院无人机应用与管控研究中心, 北京 100101; 4 天津中科无人机应用研究院, 天津 301800)

摘要: 随着我国低空空域的陆续开放, 低空飞行安全气象保障体系正被越来越多的研究学者所重视。京津冀地区无人机产业的发展在国内处于领军地位。基于WRF (Weather Research and Forecasting Model) 中尺度数值模式, 对2015—2019年京津冀地区气象要素进行模拟, 模拟结果与气象站观测数据进行误差对比分析, 可为该地区无人机低空航路的飞行安全提供建议。结合无人机飞行限制因素, 对京津冀地区无人机航路气象要素平均分布和平均垂直分布进行分析, 结论如下: 1) 冬季、春季以及秋季白石山至东灵山出现风速5.5 m/s以上区域, 可使无人机飞行产生剧烈晃动甚至炸机, 在此区域内飞行应时刻注意风速变化。2) 冬季京津冀全区为0 °C及以下所控制, 由于温度条件限制不适合无人机飞行, 其余季节温度范围均在无人机电池正常工作范围之内。3) 夏季京津冀地区降雨量大, 应注意强降雨对无人机飞行造成的影响。4) 垂直方向上低空空域内, 冬季、春季以及秋季风速会对无人机飞行造成影响, 冬季温度低于0 °C不适合无人机进行低空作业。

关键词: 无人机, 航路, 风速, 温度, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.021

Simulation Research on Meteorological Environment of UAV Low-Altitude Route in Beijing-Tianjin-Hebei

Zhong Ruomei¹, Liao Xiaohan^{2,3,4}, Xu Chenchen^{2,3,4}, Wen Xiaohang¹

(1 Chengdu University of Information Technology Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610200 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101

3 The Research Centre for UAV Application and Regulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 4 Institute of UAV Application Research, Tianjin and CAS, Tianjin 301800)

Abstract: With the continuous opening of my country's low-altitude airspace, the low-altitude flight safety and weather protection system is being valued by more and more researchers. The development of the UAV industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region is in a leading position in China. Based on the WRF (Weather Research and Forecasting Model) mesoscale numerical model, this paper simulates the meteorological elements in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2015 to 2019, and the error comparison analysis between the simulation results and the observation data of the weather station, can provide suggestions for the flight safety of UAV low-altitude routes in the region. Combining the UAV flight restriction factors, analyze the average distribution and vertical average distribution of meteorological elements on UAV routes in the Beijing-Tianjin-Hebei region, the conclusions are as follows: (1) The wind speed above 5.5 m/s appears in the Baishi Mountain to Dongling Mountain in winter, spring and autumn, which can cause violent shaking or even blow up the drone during the flight. You should always pay attention to flying in this area. Wind speed changes. (2) In winter, the entire Beijing-Tianjin-Hebei region is controlled at 0 °C and below 0 °C, due to temperature conditions, it is not suitable for drones to fly, and the temperature range in other seasons is within the normal operating range of drone batteries. (3) In summer, the Beijing-Tianjin-Hebei region receives heavy rainfall, and attention should be paid to the impact of heavy rainfall on UAV flight. (4) Vertically, in the low-altitude airspace, wind speeds in winter, spring and autumn will affect the flight of UAVs. Winter temperatures below 0 °C are not suitable for low-altitude operations.

Keywords: UAV, route, wind speed, temperature, precipitation

收稿日期: 2020年8月30日; 修回日期: 2021年4月21日

第一作者: 钟若喟 (1996—), Email: 352708752@qq.com

通信作者: 文小航 (1981—), Email: wenzerg@163.com

资助信息: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0503005)

0 引言

近年来, 民用无人机产业持续高速发展, 据统计, 截至2019年底, 获得民用无人机经营许可的企业达7149家, 全行业实名登记无人机共39.2万架^[1], 2020

年产值将达到600亿元^[2]。一般情况下低空空域指高度1000 m以下的空域，是无人机活动的主要区域。随着我国低空空域范围的陆续开放以及军民融合上升至国家战略层面，低空飞行安全气象保障体系是目前一个重要的研究方向^[3]。我国低空环境复杂多变，低空飞行气象保障体系和无人机飞行安全的气象保障工作越来越被重视。随着无人机商业化应用的飞速发展，无人机运输、航拍、救援等飞行活动呈现爆发式增长，使得原本低空空域无人机数量庞大、航路复杂、易受环境和地形影响等问题变得更加棘手。与这些问题对应的却是我国的低空飞行安全气象保障技术发展呈现出一定的滞后性，低空飞行的安全性无法得到保障，飞行事故出现的概率较高^[4]。为缓解或解决此类情况，进行高质量的低空航路安全气象保障的研究是非常有必要的。

影响无人机飞行的气象因素主要有大风、雷暴、能见度、气温、气压和湿度等^[5]。飞行过程中，无人机会受到风的干扰。当静风或者风速较小时，无人机自身飞行控制系统能够抵抗风的干扰，保证其相对平稳的飞行。但当风速或者风力较大时，特别是风速超过无人机最大飞行速度、产生低空风切变时^[6]，会导致其无法正常飞行，甚至炸机。目前国内的民用无人机，以大疆（DJ-Innovations，简称DJI）为例，Phantom 3、Spark、M600、Mavic Mini系列的抗风等级为四级风（风速5.5~7.9 m/s），Phantom 4、Mavic Pro、Mavic Air、Mavic 2、Inspire、M200、M100、S1000系列的抗风等级为五级风（风速8.0~10.7 m/s），少数抗风等级为六级风（风速10.8~13.8 m/s），如FPV系列，极少数甚至达到七级风（风速13.9~17.1 m/s）。因此在风速的研究中将风速5.5 m/s作为无人机可否飞行的判断标准。无人机是以锂电池为动力，无人机飞行过程中，气温过高或者过低都可能影响无人机的一些功能组件，导致降低飞行效率，影响飞行稳定。目前国内无人机工作的环境温度大多数在0~40 °C，个别高性能无人机工作温度可低至-10 °C，原则上超过这个范围就会对无人机电池的寿命和容量产生影响。在高温环境中飞行，无人机的电机在运转产生升力的时候，也会连带产生大量的热量，电机非常容易过热^[7]，在一些极端情况下甚至可能会融化一些零部件和线缆。在低温环境中工作，无人机锂离子电池低温放电容量会降低，虽经过常温充放电后可以恢复，是可逆的容量损失，但是低温充电会造成析锂，是永久性的容量损失^[8]。空气湿度也是一项能影响无人机正常工作的气象因子，湿

度较高时（相对湿度90%以上）极有可能产生雾天雨天，造成能见度降低，影响无人机飞行。当空气湿度的数值接近100%时，即使不下雨，无人机的表面也会凝结非常多的水汽。对于无人机这类精密的电子产品，水汽一旦侵入内部，非常可能腐蚀内部电子元器件。

如今数值模拟研究是科学研究的热门领域，精细化高分辨率的数值天气预报，如MM5、WRF、SWAN、WW3、POM等^[9]也被越来越多的科研人员应用到科研与业务应用中。Passner等^[10]通过WRF模式研究小尺度晴空颠簸，为无人机提供晴空颠簸的预报服务。Chen等^[11-12]为了构建数字化船舶导航系统，使用WRF和NCEP-FNL资料模拟了日本大阪湾和东海的天气和海洋，实验表明高分辨率WRF模式可提供风的分布，从而使船舶导航具有更高的精确度。Lu等^[13]利用GPV数据集和WRF模式重点研究了南半球的三种海面航行，以试图选择用于船舶航行的适当天气。Vladimir Zalesny等^[14]利用海洋环流数值模型为船舶提供最优航路。Evans等^[15]利用WRF模式模拟了南北半球的风场，并通过船上观测评估了模拟的结果，提供了船舶天气路线的建议。Chen等^[16]从最优航路角度看WRF模型仿真的结果。匈牙利政府为规避复杂的天气带来的损失，研制了综合航空气象预报系统（IAWPS），针对九种典型的天气情况，对模型系统的不同参数化进行了研究，从天气危害角度分析了它们对航空安全的影响^[17]。我国对于航路的安全气象保障研究多以飞机航路和船舶航路为主，飞机航路主要针对晴空颠簸进行研究，船舶航路主要针对大风。针对低空空域航路的研究目前最新技术手段为基于地面气象探测，低空雷达监测，风云系列气象卫星和北斗导航卫星的陆一空一天一体化低空飞行安全气象保障系统，且以统计预报^[18]和经验预报^[19]居多，对于数值模拟研究应用较少。此外，现有技术对于航路气象安全保障也存在一些短板：无人机航路附近的自动气象站数量稀少，自动气象站只能对无人机航路上的气象信息进行实时监测，不能够进行预报预警；风云系列气象卫星检测范围大，分辨率较高，但卫星过境时间不连续，有云的影响时，对地监测效果很差等。

无人机航路作为一种新兴航路，目前没有无人机航路上的历史气象状况，而自动气象站由于站点稀少，远远达不到无人机飞行所需的覆盖密度，由此，本文基于高分辨率的WRF模式，对京津冀航路上过去5年的气象场进行模拟，以期得到京津冀地区无人机航路上的气象要素年平均分布场和空间区域内气象要

素的垂直分布,通过分析低空850 hPa (1500 m) 以下和北部山区各个季节的气象要素,得到无人机航路上温度、湿度、和风速的分布情况和时间变化规律,对该地区无人机低空航路的飞行安全提供建议。

1 资料和方法

本文采用二重嵌套网格,试验参数见表1,模拟时间段为2015年1月1日 08:00—2020年1月1日 08:00 (北京时,下同),每隔1 h输出一次结果。模式使用的FNL再分析资料为初始场数据,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。WRF模式采用地形追随质量 η 坐标,垂直层面采用35层,模式顶大气压为50 hPa。模拟试验参数化方案选择如下:选用Lin等的微物理方案^[20],长波辐射方案选用RRTM方案^[21],短波辐射方案选用Dudhi方案^[22],陆面过程方案选用Noah Land Surface Model^[23],行星边界层方案选用Mellor-Yamada Janjic scheme^[24],积云参数化方案选用Kain-Fritsch方案^[25]。将模拟出的风速、温度、湿度、降雨等气象要素结合无人机飞行条件限制因素进行分析比较,从而筛选出无人机最佳的飞行季节和月份。

表 1 模拟区域嵌套网格参数
Table 1 Simulation area nested grid parameters

网格域	中心经纬度	格点数	水平格距/km	积分步长/s	地形分辨率
2	39.06°N, 116.08°E	125×125	3	24	30 s

对于模式模拟结果的可靠性分析,实况资料选用从中国气象局国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 获取,取自其中国地面气候资料日值数据集 (V3.0),在研究区域选取六个气象台站 (2个山地地区,4个平原地区),采用标准化平均偏差 (NMB)、均方根误差 (RMSE) 与IOA (一致性指数) 评估模拟结果。

$$NMB = \frac{\sum_1^N (C_m - C_0)}{\sum_1^N C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (C_m - C_0)^2}{N}}, \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_1^N (C_m - C_0)^2}{\sum_1^N (|C_m - \bar{C}_0| + |C_0 - \bar{C}_0|)^2}, \quad (3)$$

其中: C_m 为模拟值, C_0 为实况值, \bar{C}_0 为实况值平均值, NMB 、 $RMSE$ 越接近于0, IOA 越接近于1,模式性能越好。

2 研究区域概况

京津冀地区是中国自主创新、高端服务、现代制造的核心区域,在加快中国工业化、信息化进程中担负着科技引领、产业支撑的重要使命^[26]。近些年随着无人机产业兴起和关键技术突破,无人机商业应用飞速发展,而京津冀地区对于无人机产业发展的政策环境友好,具备良好的无人机临场飞行试验和空域条件,其无人机行业发展也在国内领先^[27],根据廖小罕等^[28]基于蚁群算法,考虑地形、城市建筑群等要素,对无人机低空公共航路的定义和四级架构划分,将航路划分为全国骨干、区域主干、支线和末端航路四个级别,如图1所示。但此航路划分没有考虑到气象要素对无人机飞行的影响,因此本文以京津冀地区航路网为例,对无人机低空航路气象要素进行分析。

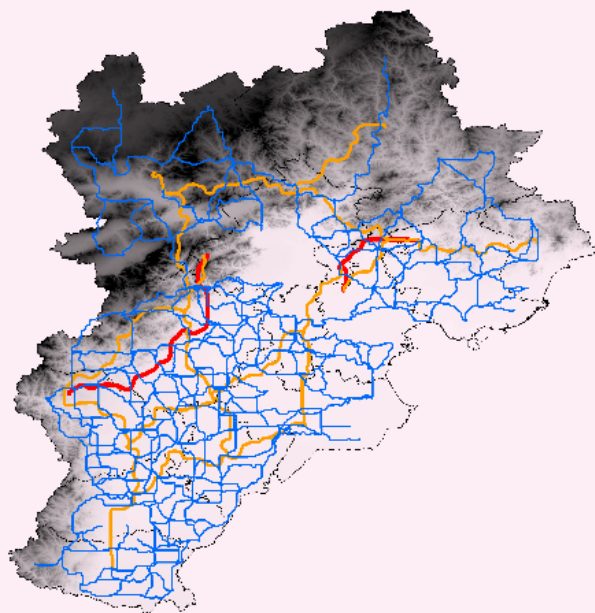


图1 京津冀地区航路网 (红色: 骨干航路; 黄色: 主干航路; 蓝色: 支线航路)

Fig. 1 The route network of the Beijing-Tianjin-Hebei region (red: backbone route, yellow: main route, blue: branch route)

3 结果分析

3.1 模拟结果可靠性分析

选取研究区域六个气象台站,其中北京、天津、石家庄、保定为平原地区台站,蔚县、怀来为山地地区台站,采用标准化平均偏差 (NMB)、均方根误差 (RMSE) 与IOA (一致性指数) 评估模拟结果。

3.1.1 风速

据表2分析,无论是位于山地地区台站还是平原的台站,风速的模拟结果好坏与季节无关,具有不稳

表2 10 m风速模拟结果可靠性分析

Table 2 Reliability analysis of 10 m wind speed simulation results

		北京	天津	石家庄	保定	蔚县	怀来
NMB/%	春季	61	12	128	56	92	96
	夏季	61	22	95	61	293	107
	秋季	64	18	66	65	126	115
	冬季	44	3	98	47	198	84
	全年	57	13	95	58	177	101
RMSE/(m/s)	春季	1.62	0.44	2.09	1.45	2.09	2.5
	夏季	1.26	0.57	1.31	1.28	1.67	2.05
	秋季	1.2	0.49	1.62	1.2	1.93	2.31
	冬季	0.99	0.13	2.06	0.9	2.92	1.83
	全年	1.29	0.44	1.8	1.22	2.21	2.19
IOA	春季	0.59	0.93	0.46	0.64	0.55	0.49
	夏季	0.05	0.23	0.42	0.41	0.28	0
	秋季	0	0.19	0.13	0.01	0.02	0.11
	冬季	0.47	0.96	0.16	0.1	0	0.54
	全年	0.42	0.82	0.32	0.45	0.25	0.28

注：黑体字为模拟效果最好部分。

定性。此外，NMB指数均大于零，表明模拟值相较于实况值偏大。但总体显示平原地区台站风速模拟结果的NMB、RMSE指数比山地地区台站小，IOA指数比山地地区台站更接近于1，模拟结果明显优于山地地区台站。

3.1.2 温度

据表3分析，无论山区还是平原地区，温度模拟结果的NMB指数大小可忽略不计，IOA指数均在0.9以上，都显示出较好的效果，与季节关系不大。与风速模拟结果类似，平原地区台站温度模拟效果略优于山区台站。

表3 2 m温度模拟结果可靠性分析

Table 3 Reliability analysis of 2 m temperature simulation results

		北京	天津	石家庄	保定	蔚县	怀来
NMB/%	春季	-0.11	0.22	-0.13	-0.15	-0.96	-0.98
	夏季	0.16	0.56	-0.06	0.35	-0.57	-0.55
	秋季	-0.52	0.13	-0.10	0.52	-1.09	-0.72
	冬季	-0.67	-0.02	-0.38	-0.16	-0.46	-1.47
	全年	-0.27	0.23	-0.41	0.14	-7.76	-0.92
RMSE/℃	春季	0.66	0.86	0.65	1.29	2.82	2.84
	夏季	0.95	1.72	0.51	1.73	1.74	1.67
	秋季	1.54	0.77	1.85	0.93	3.63	2.12
	冬季	1.93	0.64	1.43	0.83	1.77	4.14
	全年	1.36	1.08	1.24	1.25	2.61	2.85
IOA	春季	0.99	0.99	0.99	0.98	0.93	0.93
	夏季	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	秋季	0.98	0.99	0.98	0.99	0.93	0.97
	冬季	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
	全年	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98

注：黑体字为模拟效果最好部分。

地地区台站。

结合表2、表3分析，温度模拟结果的可靠性明显优于风速模拟结果，前者模拟效果的准确性比后者更具有稳定性。

3.2 风速的分布特征

如图2a所示，年平均风速5.5 m/s以上主要集中在39.5°—40.5°N，114.3°—116°E太行山最北端白石山至东灵山狭长的山区地带中，这个区域带对无人机飞行尤为重要，区域内涉及到的航路应该尤为关注，以到达安全飞行的目的。华北平原地区被3~4 m/s的风速所覆盖，成西南—东北走向，处于西北方向的山区除白石山至东灵山则被4~5 m/s的风速所覆盖。因此，京津冀地区内平原地带和绝大部分山区均适合无人机进行低空作业。

从季节平均风速的分布来看，月均风速5.5 m/s及以上主要出现在冬季（图2b）、春季（图2c）以及秋季（图2e）的山地区域，覆盖范围秋季最小，春季次之，冬季最广。随着冬季风的到来，月均风速5.5 m/s及以上的区域逐渐扩大，影响范围可达研究区域最北侧，8 m/s以上的大风区域全季均存在，面积范围也相应增加，但还是集中在白石山至东灵山西南—东北向的狭长区域带内。在春季，京津冀地区风速在3.5~5.5 m/s，北京中部，河北省中部风速在3.5~4 m/s。在夏季，由于夏季风的到来，风力逐渐减小，京津冀地区风速主要在3~4 m/s，风速最大的地方仍是白石山至东灵山一带。秋季，夏季风减退，冬季风加强，山区风速明显开始加强，并出现风速5.5 m/s的区域。因此，在冬季、春季以及秋季，特别是山区应加强对无人机飞行的安全监测。

3.3 温度的分布特征

如图3a所示，为2015—2019年年均温度分布。39°—41°N，114°—116°E范围内的山区年均温度明显低于华北平原地区，山区年均温度绝大部分为6~9℃，其中白石山至灵山一带年均温度在-2~4℃，平原地区年均温度12~14℃，北京市、天津市中部以及石家庄年均温度可达16℃。无人机由平原进入山区作业时，需特别注意温度变化，防止无人机电池受损。

从季节平均温度的分布来看，低温天气主要出现在冬季（图3b）、春季（图3c）以及秋季（图3e），冬季低温影响范围最广，强度最大，秋末次之，春初最小。冬季全区月均温度均在0℃及0℃以下，华北平原地区-4~0℃，山区地区-4℃以下，白石山至东灵山一带达-10℃以下，且随着冬季风的加强，

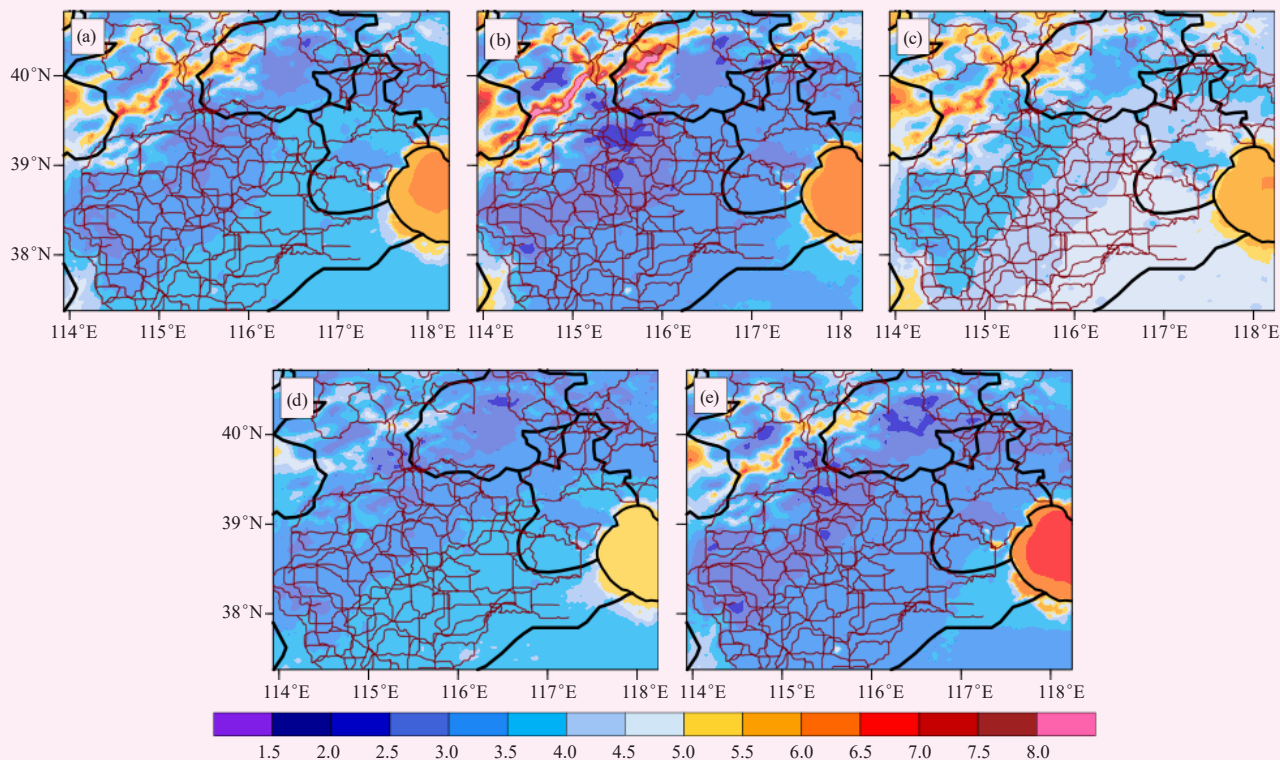


图2 2015—2019年10 m风速分布特征 (单位: m/s)

(a) 年均; (b) 冬季; (c) 春季; (d) 夏季; (e) 秋季

Fig. 2 The distribution of 10 m average wind speed from 2015 to 2019 (unit: m/s)

(a) average, (b) winter, (c) spring, (d) summer, (e) autumn

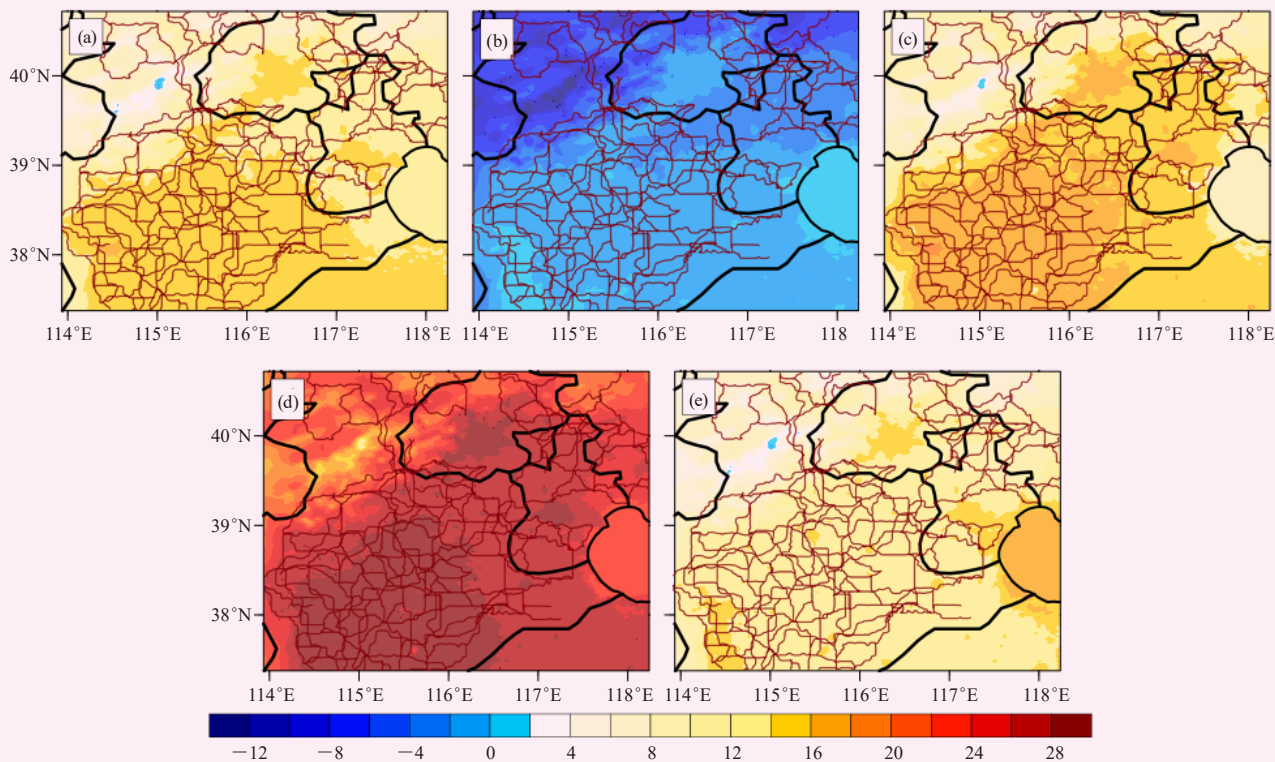


图3 2015—2019年2 m温度分布特征 (单位: °C)

(a) 年均; (b) 冬季; (c) 春季; (d) 夏季; (e) 秋季

Fig. 3 The Distribution characteristics of 2 m temperature from 2015 to 2019 (Unit: °C)

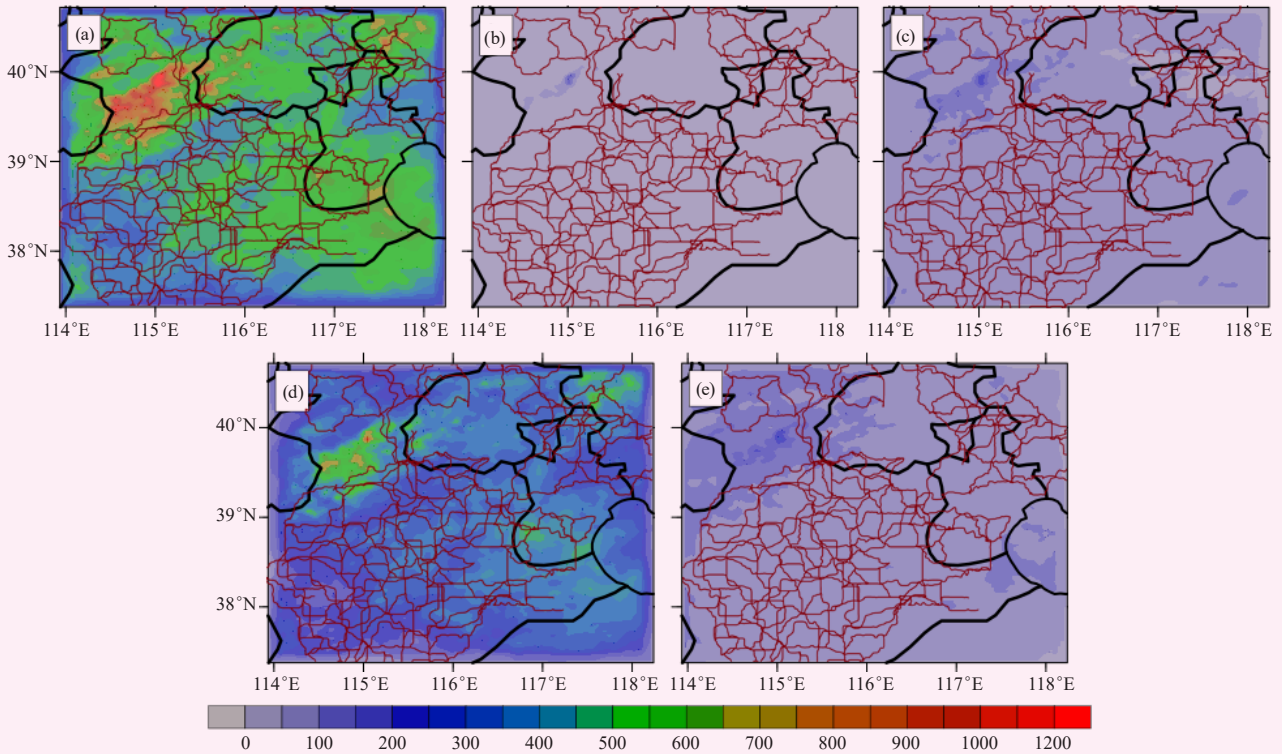


图4 2015—2019年降水量分布特征(单位: mm)

(a) 年降水量; (b) 冬季; (c) 春季; (d) 夏季; (e) 秋季

Fig. 4 Distribution characteristics of precipitation from 2015 to 2019 (unit: mm)

(a) annual precipitation , (b) Winter, (c) Spring, (d) Summer, (e) Autumn

0℃以下区域逐渐扩大,由此京津冀地区整个冬季期间内不适合进行无人机进行低空作业。春季,随着时间推移,月均温度逐渐上升,平原地区为11~16℃,北京中部、石家庄市上升至17℃,白石山至东灵山一带也由0℃以下上升至9℃以上。夏季(图3d),温度上升进一步加强,平原地区稳定在23~28℃,除白石山至灵山一带,山区地区也在20℃以上。秋季期间,随着副高南退,夏季风减弱,冬季风加强,月均温度逐渐下降,平原地区下降至11~14℃,山区地区为5~8℃,秋季从山区开始出现低温天气,全区范围内温度条件逐渐对无人机作业产生影响。

3.4 降水的分布特征

如图4a所示,年降水量山区高于平原地区,降水量最高的地方为白石山至东灵山,年降雨量在800 mm以上,可达1000 mm以上,平原地区年降雨量为300~500 mm,年降雨量最低的地区为天津市中部和石家庄,年降雨量在300 mm以下。

季节降水量最低值出现在冬季(图4b),可达10 mm以下,最高值出现在夏季(图4d),可达800 mm。冬季期间,京津冀地区受干冷空气影响,除白石山至东灵山可达110 mm,全区季节累计降水

在10~20 mm,降水量极为稀少。春季(图4c)降水量增加,平原地区为50~70 mm,山区在80 mm以上,白石山至东灵山可达140 mm以上。夏季,由于温度升高,夏季风带来海洋充沛水汽等因素,降水量在全区范围内显著增加,白石山至东灵山一带可达到600 mm,其余山区降水量在450 mm以上;华北平原内陆地区为200~400 mm,石家庄夏季降雨量最低。秋季(图4e),受冬季风影响,降雨量逐渐减小,山区降雨量高于华北平原,山区降雨量在95 mm以上,华北平原降雨量在50~85 mm。由于夏季降水量大,无人机在夏季飞行时应注意强降水等恶劣天气。

3.5 气象要素垂直分布特征

根据图1京津冀地区航路网显示,39°N既是研究区域的中心纬度,每一级航路也均涉及此,因此沿39°N纬线方向做垂直剖面图,分析气象要素平均垂直分布特征。由于无人机活动的主要区域为1000 m以下的低空空域,且按照常识1000 hPa平均海拔高度为地面0 m,850 hPa平均海拔高度约为1500 m,以此为依据进行分析。

3.5.1 风速垂直分布特征

如图5所示,在冬季、春季以及秋季,由于亚欧

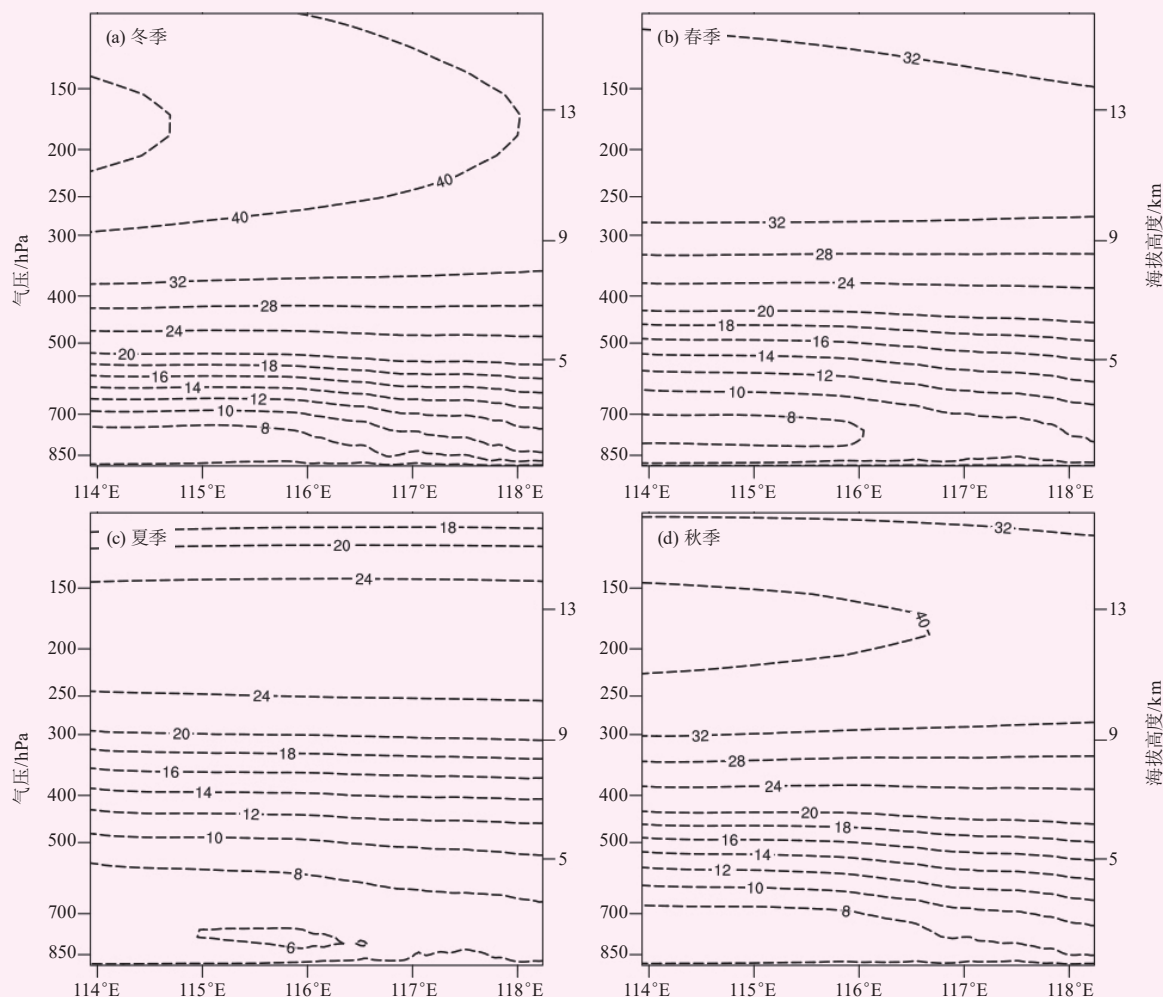


图5 风速垂直分布 (单位: m/s)
(a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季
Fig. 5 Vertical distribution of wind speed (unit: m/s)
(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

大陆冷高压和阿留申低压的共同作用, 海陆热力性质差异大, 京津冀地区受冬季风控制, 风向由大陆吹向海洋, 低空空域的风速均在6 m/s。夏季京津冀地区由夏季风影响, 但由于夏季海陆热力性质差异低于冬季, 因此夏季低空空域的风速小于冬季, 维持在4 m/s。抗风等级在四级风(风速5.5~7.9 m/s)的无人机在冬季、春季以及秋季飞行时应当注意风速大小, 谨慎飞行; 夏季低空空域风速对无人机安全飞行不产生影响。

3.5.2 温度垂直分布特征

如图6所示, 冬季受来自亚欧大陆北方冷空气影响, 且京津冀地区纬度较高, 太阳辐射较弱, 使得低空空域温度均在0 °C以下, 在此温度下飞行会对无人机电池造成伤害, 因此冬季不适合无人机飞行。春季、夏季盛行风由冬季风转变为夏季风, 地面接收的

太阳辐射值增加, 低空空域温度增至10~20 °C, 秋季低空空域温度虽较春、夏两季下降, 但依然维持在均在5 °C以上, 在春、夏、秋三季期间温度不是限制无人机飞行的因素。

3.6 骨干航路气象要素对比

骨干航路是京津冀航路网中连接首都与各省、自治区、直辖市首府的航路, 连接各大经济中心、港站枢纽、商品生产基地和战略要地的航路^[24], 是航路网中最重要, 宽度最宽, 飞行流量最大的航路, 因此骨干航路途径区域气象因子需着重考虑。对航路途经的格点气象要素进行平均(图7), 两条骨干航路除冬季气温低于0 °C不适合飞行、夏季降雨量多应注意强降雨天气以外, 其余气象要素均符合无人机飞行条件。

4 结论

对京津冀地区无人机航路气象要素平均分布和平

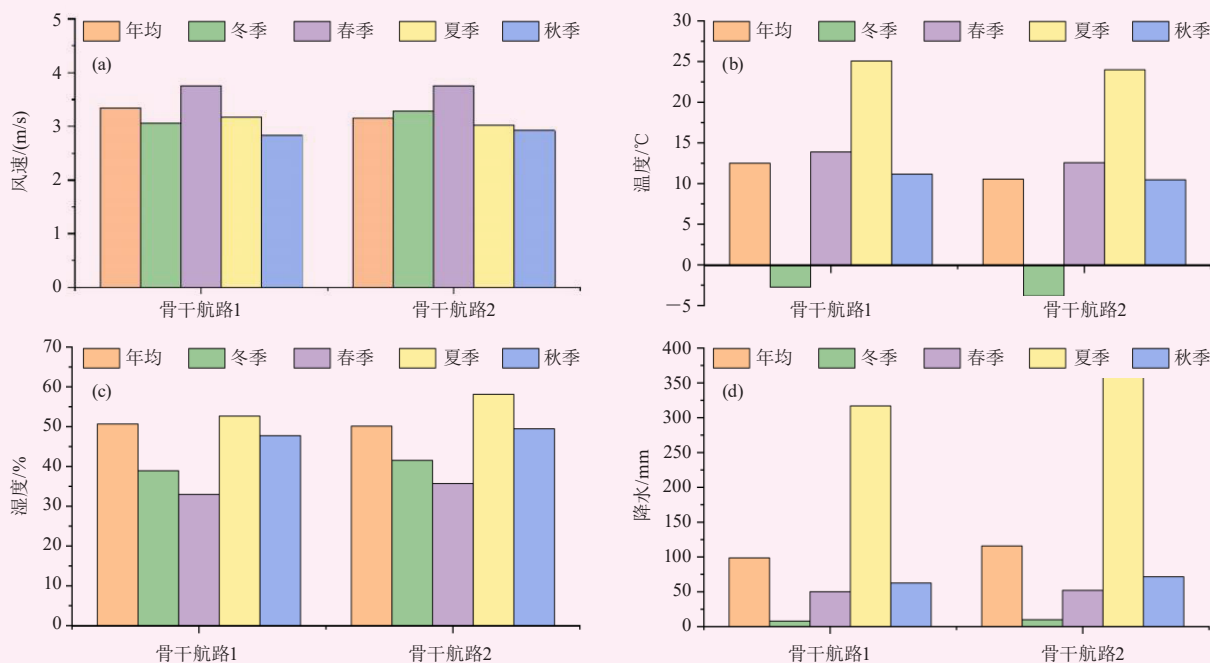


图7 骨干航线气象要素

(a) 风速, (b) 温度, (c) 湿度, (d) 降水

Fig. 7 Meteorological elements of backbone routes

(a) wind speed, (b) temperature, (c) humidity, (d) precipitation

n4388791/c5976311/content.html.

- [3] 吴红军, 行鸿彦, 张金玉. 低空飞行安全气象保障技术. 电子测量技术, 2018, 41(9): 10-15.
- [4] 张华, 李晶. 浅析低空飞行安全气象保障技术. 科技风, 2020(15): 8.
- [5] 陈婷, 杨泓, 李亚玲. 气象要素对多旋翼无人机飞行的影响. 中国设备工程, 2018, (1): 170-171.
- [6] 黄冠. 低空风切变的形成过程以及影响飞行安全的因素. 科技展望, 2015, 15: 150-150.
- [7] 无人机之家. 无人机起飞需要特别注意的六种天气. (2019-11-19). <http://www.wrjzj.com/v-14-19537.aspx>.
- [8] 付庆茂, 文钟晟, 赖春艳, 等. 锂离子电池低温性能研究. 第十二届中国固态离子学学术会议, 2004.
- [9] Cai Y, Wen Y Q, Wu L. Ship route design for avoiding heavy weather and sea conditions. *TransNav*, 2014, 8(4): 551-556.
- [10] Passner J E, Knapp D I. Using WRF-ARW data to forecast turbulence at small scales. In: 13th Conf on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. New Orleans: American Meteorological Society, 2008: 3.
- [11] Chen C, Shiotani S, Sasa K. Numerical ship navigation based on weather and ocean simulation. *Ocean Engineering*, 2013, 69(9): 44-53.
- [12] Chen C, Shigeaki S, Kenji S. Study on a numerical navigation system in the East China Sea. *Applied Ocean Research*, 2015, 53: 257-266.
- [13] Lu L F, Sasa K, Sasaki W, et al. Rough wave simulation and validation using onboard ship motion data in the Southern Hemisphere to enhance ship weather routing. *Ocean Engineering*, 2017, 144(1): 61-77.
- [14] Vladimir Z, Valeriy A, Robert A, et al. Numerical modeling of marine circulation, pollution assessment and optimal ship routes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2017, 5(3): 27.
- [15] Evans J P, Ekstroem M, Ji F. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. *Climate Dynamics*, 2012, 39(6): 1241-1258.
- [16] Chen C, Sasa K, Ohsawa T, et al. Comparative study on WRF model simulations from the viewpoint of optimum ship routing. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 107379.
- [17] Zeno Gyongyosi A, Kurunczi R, Kardos P, et al. Unmanned aerial observation of the planetary boundary layer for model evaluation and weather prediction purposes in support of UAV operation. *Optimization Letters*, 2010, 4(2): 173-183.
- [18] 尹尽勇, 黄彬. 北太平洋冬季船舶西行航路的对比分析. *气象科技*, 1999, (2): 59-64.
- [19] 赵金霞, 曲平, 何志强, 等. 渤海湾大风的特征及其预报. *气象科技*, 2014, 42(5): 847-851.
- [20] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [21] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(14): 16663-16682.
- [22] Dudhia, Jimy. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [23] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 569-585.
- [24] Janji Z I. Nonsingular Implementation of the Mellor- Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso Model. NCEP office note, 2002.
- [25] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. *Meteorological Monographs*, 1993, 24: 165-170.
- [26] 经济日报. 扎实推进京津冀协同发展. *经济日报*, (2014-04-01). http://paper.ce.cn/jjrb/html/2014-04/01/content_195049.htm
- [27] 徐晨晨, 廖小罕, 岳焕印, 等. 基于改进蚁群算法的无人机低空公共航路构建方法. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 570-579.
- [28] 廖小罕, 徐晨晨, 岳焕印. 基于地理信息的无人机低空公共航路. *无人机*, 2018, (2): 45-49.
- [29] 曾智. 我国低空飞行气象服务需求分析与思考. *科研*, 2016, (7): 00279-00279.
- [30] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.