

# 利用风廓线雷达资料分析哈尔滨机场低空急流特征

杨欣 王加平

(民航东北空管局黑龙江分局, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 利用2019—2021年哈尔滨太平国际机场风廓线雷达资料和观测月总薄、年总薄资料, 从低空急流月变化、日变化、风向、持续时间、中心速度、中心高度及其和降水的关系几个方面对低空急流的特征进行统计分析。结果表明: 哈尔滨机场的低空急流有明显的季节性变化特征, 春、秋季出现的概率明显高于夏、冬季; 在一天中的任何时刻均可发生, 其出现时间的日变化特征是在早晨到上午出现的次数最多, 从午后开始逐渐减少, 到午夜次数达到最低, 此后次数又逐渐增多; 以西南急流为主, 从低空急流持续时间变化来看, 持续时间为7~12 h的天数最多, 持续时间大于18 h的次之, 持续时间为4~6 h的天数最少; 中心高度主要集中在0~500 m, 中心速度集中在20 m/s; 降水与低空急流有密切关系, 除此之外, 还和逆温层的存在有关; 低空急流中心最大速度和单日最大降水量显著相关, 低空急流中心速度的增大可能导致单日降水量的增多。

**关键词:** 风廓线雷达, 哈尔滨机场, 低空急流, 特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.05.008

## Study on the Characteristics of Low-Level Jets at Harbin Airport Based on Wind Profiler Data

Yang Xin, Wang Jiaping

(Heilongjiang Branch of Northeast Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Harbin 150000)

**Abstract:** Using the wind profiler data and the monthly and annual observation information at Harbin Taiping International Airport from 2019 to 2021, the characteristics of low-level jets were statistically analyzed from the aspects of monthly changes, diurnal changes, wind direction, duration, center speed, center height, and the relationship with precipitation. The results show that the low-level jets at Harbin Airport have obvious seasonal variation characteristics, and the probability of occurrence in spring and autumn is significantly higher than that in summer and winter. Low level jets can occur at any time of the day. The daily change of the occurrence time is characterized by the largest number of occurrences from early morning till noon, gradually decreasing from noon, reaching the lowest level at midnight, and increasing again from then on. For the wind direction, the low level jets are dominated by southwest jets. From the perspective of the jet duration, the highest number of days are accompanied with the jet duration of 7~12 h, followed by the jet duration longer than 18 h, and the lowest number of days are associated with the jet duration of 4~6 h. The center height of the low level jets mainly ranges from 0~500 m and the center wind speed hovers around 20 m/s. Precipitation is closely related to low level jets. Moreover, it is linked with the inversion layer. Significant correlation is identified between the maximum center speed of the low level jets and the maximum precipitation in a single day. The strengthening of the center speed of the low level jets may lead to the enhanced maximum precipitation in a single day.

**Keywords:** wind profiler, Harbin Airport, low-level jets, characteristic

### 0 引言

低空急流是指在对流层600 hPa以下的强而窄的气流带。它与强降水时间、空气污染、风能利用、航空安全、沙尘暴、森林火灾及其他诸多天气、气候现象存在着密切的联系<sup>[1]</sup>。风廓线雷达具有很高的时空分辨率, 弥补了传统探空资料时间不连续的不足。它所提供的风场资料可以很直观地显示气流风场的垂直结构和持续时间<sup>[2]</sup>。风廓线雷达资料在个例研究中应用

广泛<sup>[3-7]</sup>。

近些年, 专家学者对低空急流的特征进行了一系列研究, 发现低空急流与强降水密切相关。赵强等<sup>[8]</sup>在进行两次陕北暴雨过程热力动力机制诊断时指出低空急流对水汽和能量的输送改变了大气的湿度、热力条件。金巍等<sup>[9]</sup>在研究一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系时指出强降水的强弱和低空急流的强度和伸展高度直接相关。赛瀚等<sup>[10]</sup>在总结中国地区低空急流研究进展时指出低空急流与暴雨、暴雪有紧密的联系, 但也存在不具备输送和累积水汽的性能的低空急流。陈楠等<sup>[11]</sup>在利用风廓线雷达资料对南京地

收稿日期: 2022年4月28日; 修回日期: 2022年12月16日

第一作者: 杨欣(1990—), Email: yangxin1990nol@126.com

区低空急流的统计分析时发现低空急流中心速度的增强有利于降水的发生。

目前,利用多年的风廓线雷达资料进行低空急流的系统性统计分析较少。本文利用2019—2021年风廓线雷达资料,揭示低空急流的年变化和日变化特征,并分别对低空急流的强度、高度、风向、持续时间特征进行统计分析,且对低空急流与降水之间的关系进行探究,为哈尔滨机场强降水的短时临近预报、保障飞行安全提供参考。

## 1 资料和方法

本研究按照低空急流定义,选取出现在3000 m高度以下,风速 $\geq 12$  m/s,且持续时间 $\geq 4$  h,各个高度层的风向一致为1个低空急流样本。为了保证统计结果的代表性和有效性,统计时对风廓线雷达数据做出如下规定:1 d中出现低空急流并且持续时间 $\geq 4$  h计为出现1个低空急流日;若出现连续4 h以上的急流,但是跨越2 d,计为2个低空急流日;低空急流中心选取最大风速所在高度,若有2个以上高度出现相同的最大风速,则取最低高度。

本文采用2019—2021年逐小时风廓线雷达资料进行统计分析。风廓线雷达是由中国航天科工集团第二研究院二十三所生产的CFL-03型边界层风廓线雷达,建设于哈尔滨太平国际机场跑道东南侧(126°23'17"E、45°54'27"N),海拔高度44.4 m,于2018年10月24日投入使用,设备运行稳定,雷达性能正常,数据可靠。雷达工作频率1320 Hz,时间分辨率 $\leq 6.0$  min,风向误差 $\leq 1.0^\circ$ ,风速误差 $\leq 10$  m/s,低模式高度分层16层,测风高度100~1500 m,高模式高度分层20层,测风高度800~4700 m。降水资料选用哈尔滨太平国际机场观测月总薄和年总薄资料。为与低空急流统计方式保持一致,规定若在同1 d中降水出现一段时间后消失,间隔一段时间后又一次出现,累计4 h以上也只计为1个降水日;若出现4 h以上连续性降水,但是跨越2 d,计为2个降水日。

统计学处理采用SPSS统计软件处理数据,相关性分析采用双变量Pearson检验。对于X和Y变量,有n个样本 $(x_1, y_1)(x_2, y_2)\cdots(x_n, y_n)$ ,则Pearson相关系数r为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

式中, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 代表样本的平均值,欲求r值的显著性,则构建t统计量:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}/\sqrt{n-2}}, \quad (2)$$

通过查阅t分布表,得知p值的大小,从而判定当前回归系数是否有意义,当 $p < 0.05$ 时,为差异有统计学意义。

## 2 低空急流的统计特征

### 2.1 月变化特征

对2019—2021年风廓线雷达资料进行统计,共筛选出646个低空急流样本。图1给出哈尔滨机场2019—2021年低空急流日数月变化。分析发现哈尔滨机场的低空急流在5月和9月出现峰值,在7月和12月出现谷值,全年低空急流次数月变化呈现出先增大,后减小,再增大的特征。同时,存在明显的季节变化特征,即春、秋季为高值,夏、冬季为低值。12月一次年2月(冬季)低空急流出现次数最少,平均每年40次左右,从3月开始低空急流次数明显增多,在3—5月(春季)是低空急流高发期,平均每年63次左右,为一年中出现低空急流最多的季节,9—11月(秋季)次之,6—8月(夏季)低空急流发生次数介于秋季和冬季之间。这与李健等<sup>[12]</sup>研究指出环渤海地区夏末、秋季低空急流出现次数相对较少,春季、夏初是急流频发时期有差异,与李佳<sup>[13]</sup>研究表明华南地区4—6月低空急流事件逐月增多,8月和9月迅速减少也有一定差异。说明低空急流的月变化特征有明显的地域差异。

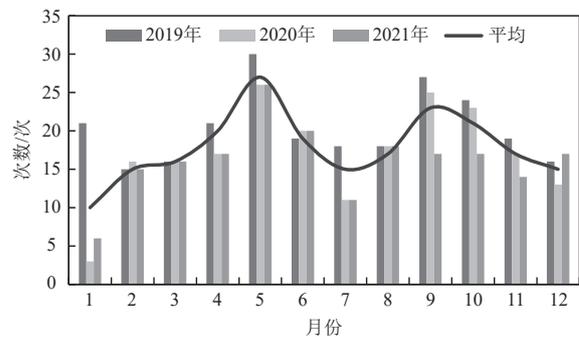


图1 2019—2021年哈尔滨机场低空急流日数月变化  
Fig. 1 Monthly changes of occurring days of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

### 2.2 日变化特征

统计低空急流出现时间日变化特征(表1)发现,低空急流在一天中的任何时刻均可发生。低空急流出现时间的日变化特征(表1)是在早晨到上午(06—12时,北京时,下同)出现的次数最多,平均每年86次,从午后开始逐渐减少,下午(12—18时)平均每年52次,到夜间(18—24时)次数达到最低,平均每年38次,此后次数又逐渐增多,次日凌晨(00—06时)平

均每年42次。这与王东阡等<sup>[14]</sup>研究发现中国东南大部分地区在夜间和早晨(18时和00时)发生频率较高,而在白天和傍晚(08时和12时)发生频率较低有一定差异。说明低空急流的日变化也有地域性特征。

表1 2019—2021年哈尔滨机场低空急流出现时间日变化  
Table 1 Daily changes of the occurrence time of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

时间	00—06时	06—12时	12—18时	18—24时
次数/次	125	257	156	115
年度平均值/次	42	86	52	38

### 3 低空急流中心特征统计分析

#### 3.1 低空急流风向和持续时间

图2为2019—2021年哈尔滨机场低空急流风向时间序列,分析可知,哈尔滨机场低空急流风向在 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 的天数最多,以西南风为主,其次为 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ,为西北风,风向在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的东北向的急流最少,东北向的低空急流在每年秋季出现的较多。因此,哈尔滨机场低空急流以西南急流为主,西南急流常常挟带着充沛的水汽,这为本研究讨论的降水与急流风速和风向的关系提供依据。

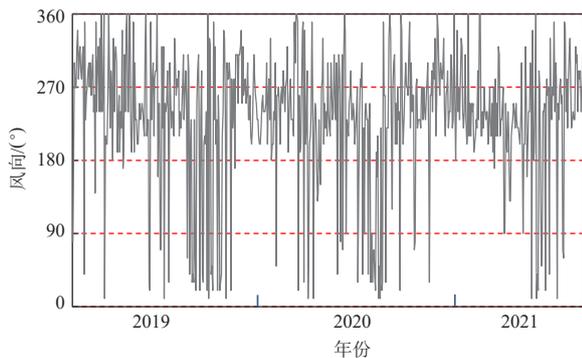


图2 2019—2021年哈尔滨机场低空急流风向时间序列  
Fig. 2 Time series of wind direction of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

从低空急流持续时间变化来看(图3),持续时间为7~12 h的天数最多,为238 d,占总天数的37%,持续时间为 $>18$  h的次之,为177 d,占总天数的27%,持续时间为12~18 h的天数为137 d,占总天数的21%,持续时间为4~6 h的天数最少,为94 d,占总天数的15%。

#### 3.2 低空急流中心高度和风速

表2为2019—2021年哈尔滨机场低空急流中心高度出现次数,分析可知哈尔滨机场低空急流出现的最低高度为100 m,最大高度为3000 m,平均高度为1120 m,出现频率最多的范围为1500~2000 m,为258次,占总数的44%,其次为2000~2500 m,为118次,占总数的20%,出现在1000~1500 m和

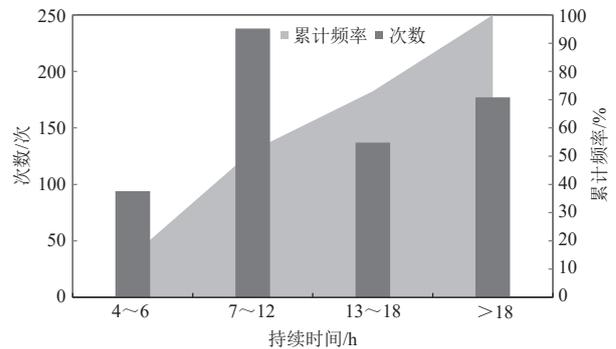


图3 2019—2021年哈尔滨机场低空急流持续时间频次统计  
Fig. 3 Frequency statistics on the duration of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

2500~3000 m的次数相近,分别为75次和76次,均占总数的13%,出现频率最少的为0~500 m,为19次,占总数的3%。可见哈尔滨机场出现超低空急流的频次较少。

表2 2019—2021年哈尔滨机场低空急流中心高度出现次数  
Table 2 Frequency statistics on the center height of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

高度/m	0~500	500~1000	1000~1500	1500~2000	2000~2500	2500~3000
次数/次	19	39	75	258	118	76
年度平均值/次	6	13	25	86	39	25

统计2019—2021年哈尔滨机场低空急流中心风速出现次数(图4)发现,哈尔滨机场出现的低空急流中,风速最大值为40 m/s,最小值为12 m/s,平均风速为21 m/s,出现概率最高的风速值为20 m/s,其次为24 m/s,出现概率最低的风速值为12 m/s。整体分布形态符合正态分布特征,这为之后研究低空急流与降水的相关性提供依据。

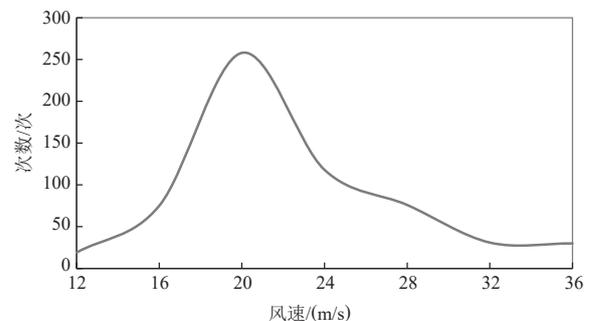


图4 2019—2021年哈尔滨机场低空急流中心风速出现次数  
Fig. 4 Frequency statistics on the central wind speed of low-level jets at Harbin Airport from 2019 to 2021

## 4 低空急流与降水的相关性分析

### 4.1 降水日数统计

利用哈尔滨机场观测月总薄和年总薄资料进行

统计, 出现在哈尔滨机场单日累计降水量超过0.1 mm 统计为1个降水日。据统计, 2019—2021年共有降水日401 d, 其中8月降水日数最多, 平均每年为18 d, 其次是6月, 平均每年16 d, 12月降水日数最少, 平均每年为1.7 d。3年中, 单日最大降水量出现在8月2次, 出现在9月1次, 单日最大降水量为139.2 mm, 出现在2021年8月21日。

#### 4.2 低空急流与降水的统计分析

为统计低空急流和降水的关系, 选取2019—2021年4—9月的低空急流和降水的样本, 将出现低空急流的日数按照有无降水进行统计(图5), 将有急流、有降水定义为有降水日, 将有急流、无降水定义为无降水日。6—8月是低空急流出现最频繁的月份, 其中8月无降水日为0, 说明8月出现的低空急流均伴随着降水出现, 6月和7月有少数天数有低空急流却无降水, 与当日风廓线雷达温廓线产品进行对比, 大部分无降水日都有逆温层存在, 且逆温层存在的时间与低空急流存在的时间吻合, 可以推测低空急流无降水日的出现跟逆温层有关。

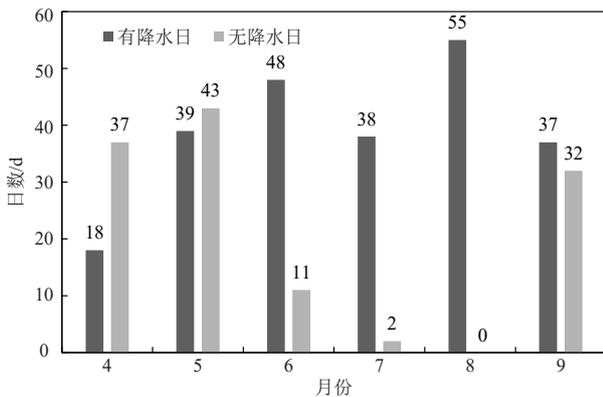


图5 2019—2021年4—9月哈尔滨机场低空急流按有无降水统计

Fig. 5 Statistics on low-level jets with or without precipitation at Harbin Airport from April to September during 2019—2021

将2019—2021年4—9月低空急流中心最大风速和单日最大降水量进行相关性检验, 采用的样本数为241个, 他们之间的相关系数为0.427, 显著性为0.013, 通过0.05的显著性水平检验, 说明两组数据显著相关, 低空急流中心最大速度的增大可能导致单日最大降水量的增多。

#### 4.3 低空急流出现时间与降水开始时间的统计分析

为进一步分析低空急流与降水之间的关系, 对2019—2021年4—9月低空急流出现时间与降水开始时间进行统计(图6), 降水开始时间发生在00—06时的

有43次, 发生在06—12时的有48次, 发生在12—18时的有94次, 发生在18—24时的有50次, 降水开始时间较低空急流出现时间有延迟, 降水一般发生在低空急流开始输送后的3~6 h, 低空急流通常挟带着充沛的水汽, 当水汽累积到一定程度后就开始形成降水。

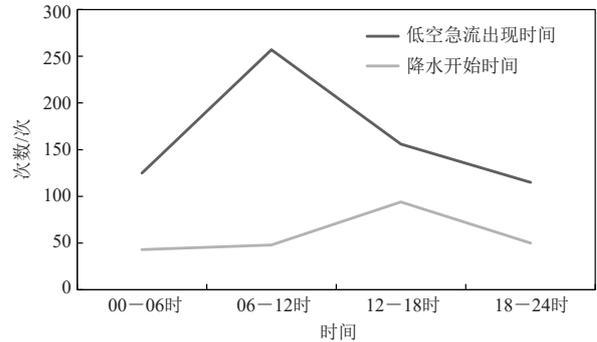


图6 2019—2021年4—9月哈尔滨机场低空急流出现时间与降水开始时间

Fig. 6 The occurrence time of low-level jets and the start time of precipitation at Harbin Airport from April to September during 2019—2021

## 5 总结与讨论

文中利用2019—2021年风廓线雷达资料对哈尔滨机场低空急流的特征进行分析, 并利用哈尔滨机场观测月总薄和年总薄资料对2019—2021年降水情况进行统计, 并对低空急流与降水进行相关性分析, 得到了以下结论。

1) 哈尔滨机场的低空急流有明显的季节性变化特征, 春、秋季出现的概率明显高于夏、冬季。低空急流在一天中的任何时刻均可发生, 其出现时间的日变化特征是在早晨到上午出现的次数最多, 从午后开始逐渐减少, 到午夜次数达到最低, 此后次数又逐渐增多。

2) 哈尔滨机场的低空急流以西南急流为主, 从低空急流持续时间变化来看, 持续时间为7~12 h的天数最多, 持续时间>18 h的次之, 持续时间为4~6 h的天数最少。

3) 哈尔滨机场的低空急流中心高度主要集中在1500~2000 m, 中心速度集中在20 m/s。

4) 哈尔滨机场夏季的低空急流与降水有密切关系, 春季的低空急流不仅跟降水有关系, 还和逆温层的存在有关, 低空急流中心最大速度和单日最大降水量显著相关, 低空急流中心速度的增大可能导致单日最大降水量的增多。

#### 参考文献

[1] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望. 气象学报, 2014, 72(2): 191-206.

- [2] 张怪怪, 胡明宝, 赵景志, 等. 用风廓线雷达资料分析一次暴雨与低空急流的关系//第27届中国气象学会年会. 北京, 2010: 390-395.
- [3] 班伟龙, 李崇, 李典, 等. 风廓线雷达资料在沈阳一次冰雹天气分析中的应用//第31届中国气象学会年会. 北京, 2014: 2078-2084.
- [4] 廖菲, 邓华, 李旭. 基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究. 大气科学, 2017, 41(5): 949-959.
- [5] 毛文茜, 王潇雅, 黄颖, 等. 风廓线雷达资料在淮河流域暴雪中的应用. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 263-269.
- [6] 苟阿宁, 吴翠红, 王玉娟, 等. 基于风廓线雷达的湖北梅雨期暴雨中小尺度特征. 干旱气象, 2022, 40(1): 84-94.
- [7] 花丛, 刘超, 张恒德. 风廓线雷达资料在北京秋季雾霾天气过程分析中的应用. 气象科技, 2017, 45(5): 870-875.
- [8] 赵强, 王楠, 李萍云, 等. 两次陕北暴雨过程热力动力机制诊断. 应用气象学报, 2017, 28(3): 340-356.
- [9] 金巍, 曲岩, 姚秀萍, 等. 一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系. 气象, 2007, 33(12): 31-38.
- [10] 赛瀚, 苗峻峰. 中国地区低空急流研究进展. 气象科技, 2012, 40(5): 766-771.
- [11] 陈楠, 胡明宝, 张怪怪, 等. 利用风廓线雷达资料对南京地区低空急流的统计分析. 热带气象学报, 2014, 30(3): 511-517.
- [12] 李健, 栗敬仁, 田军. 利用风廓线雷达研究郑州机场低空急流特征及其对飞行的影响. 热带气象学报, 2019, 35(3): 343-352.
- [13] 李佳. 初夏华南低空急流及其日变化对华南降水的影响. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [14] 王东阡, 张耀存. 中国东部西南低空急流日变化特征及其机制. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2498-2507.

(上接50页)

### 参考文献

- [1] Stöhr K. The global agenda on influenza surveillance and control. Vaccine, 2003, 21(16): 1744-1748.
- [2] Burmaa A, Kamigaki T, Darmaa B, et al. Epidemiology and impact of influenza in Mongolia, 2007 - 2012. Influenza and Other Respiratory Viruses, 2014, 8(5): 530-537.
- [3] 刘欣, 康敏, 马文军, 等. 广州市气象因素与流感样病例关系的时间序列研究. 环境卫生杂志, 2018, 8(5): 374-380.
- [4] 孙妍兰, 李伟, 吴晶, 等. 西宁市流感样病例与气象因素关系的研究. 中国病毒病杂志, 2018, 8(5): 378-383.
- [5] Annabel S, Liat H, Natasha J, et al. The influence of air quality and meteorological variations on influenza A and B virus infections in a paediatric population in Singapore. Environmental Research, 2022, 216(1): 114453.
- [6] 丁彦红, 范俊杰, 裴清, 等. 2017—2018年潍坊市流感样病例与气象因素相关性分析. 实用预防医学, 2020, 27(5): 554-557.
- [7] 李媛, 马辉, 崔壮, 等. 天津市流行性感冒与气象条件的关系研究. 环境与健康杂志, 2011, 28(3): 227-229.
- [8] 周艳丽, 张海艳, 王璐, 等. 北京市东城区流感样病例与气象因素的相关性分析. 中国公共卫生管理, 2021, 37(5): 650-653.
- [9] 孙景昊, 孙小宇, 肖征. 北京市西城区流感病毒感染与气象因素的相关关系. 职业与健康, 2018, 34(10): 2811-2814.
- [10] 李怡, 陈仲榆, 柳艳香, 等. 京津冀气象条件对学龄前儿童流感的影响及预报方法研究. 气象学报, 2022, 80(3): 375-384.
- [11] Ka C C, Tsz C L, Seweryn B, et al. Association between meteorological variations and activities of influenza A and B across different climate zones: a multi-region modelling analysis across the globe. Journal of Infection, 2022, 80(1): 84-98.
- [12] 郭倩, 陈涛, 周罗晶. 季节性流感与气象因素相关性的系统评价. 疾病监测, 2020, 35(12): 1081-1087.
- [13] Liu Z D, Zhang J, Zhang Y, et al. Effects and interaction of meteorological factors on influenza: based on the surveillance data in Shaoyang, China. Environmental Research, 2019, 172: 326-332.
- [14] Norusis M. SPSS 16.0 guide to data analysis. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 2008.
- [15] 杨亚丽, 王建英, 缙晓辉, 等. 宁夏旅游气候舒适度时空分布特征. 宁夏大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 88-94.
- [16] 黄一伟, 张红, 刘运芝, 等. 2009年甲型H1N1流感研究进展. 实用预防医学, 2009, 16(6): 2011-2014.
- [17] 沙小兰, 李燕, 刘小娟, 等. 2009—2018年银川市流行性感冒流行特征及发病趋势预测. 中华疾病控制杂志, 2020, 24(8): 881-885, 928.
- [18] 雷静, 马杰, 武振军, 等. 银川市呼吸道传染病发病与气候因素的关系初步探讨. 宁夏医学杂志, 2014, 36(4): 338-340.
- [19] Lowen A C, Mubareka S, Steel J, et al. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. PLoS Pathog, 2007, 3(10): 1470-1476.
- [20] 王伟. 2009—2014年山东省流感样病例流行特征及其与气象因素关系研究. 济南: 山东大学, 2016.
- [21] 杨冬红, 杨学祥. 流感世界大流行的气候特征. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(3): 1-8.
- [22] 周淑贞. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [23] 廖木星, 秦臻, 赵怀森. 厄尔尼诺和拉尼娜对全球、中国气候及对航海的影响. 中国航海, 1999(2): 55-59.
- [24] 徐春堂. 厄尔尼诺、拉尼娜与气候异常. 聊城师院学报(自然科学版), 2002, 15(3): 62-65.
- [25] 石帅, 李威, 赵珊珊, 等. 2021年汛期我国主要天气气候特征及成因分析. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 10-15, 35.
- [26] 杨勤, 丁永红, 林纾. 前期Nino3.4区海温变化与宁夏1、2月气温、降水的关系. 干旱区研究, 2013, 30(5): 769-775.