

# 贵阳地区近40年近地空间逆温层特征及成因初探

罗浩\*, 张亚男#

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年4月6日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月18日

## 摘要

本文利用1980~2019年探空数据对贵阳地区近地空间近40年逆温层特征进行了统计分析并初步探讨了其成因, 研究表明: 贵阳地区逆温现象发生频率为66%, 主要以悬浮逆温为主, 占比超过了85%; 悬浮逆温发生时次存在着三次明显的突变时刻, 1980~1990年代呈上升趋势, 1990年至2000年代呈下降趋势, 2000年中期以后又呈上升趋势, 贴地逆温发生时次则整体呈下降态势; 冬春季逆温现象发生频率高于夏秋季, 其中秋冬季发生时次整体处于上升趋势, 而春夏季则明显呈下降趋势; 贴地逆温存在着2~年及4~8年的周期性变化特征, 在2010年之前较为显著, 悬浮逆温同样存在着2年左右及4~8年的年际变化周期, 并在2010年之前较为显著, 另外还存在着8~16年的年代际变化周期; 贴地逆温层平均厚度比悬浮逆温小, 但平均逆温强度则比悬浮逆温大, 贴地逆温的厚度、强度以及顶高均呈下降趋势, 悬浮逆温厚度下降强度却有所上升, 底高上升顶高却处于下降趋势; 贵阳地区近地空间逆温层的成因主要源于辐射逆温和准静止锋锋面逆温, 辐射逆温多导致贴地逆温, 而准静止锋锋面逆温多导致悬浮逆温。

## 关键词

贴地逆温, 悬浮逆温, M-K检验, 小波分析

# Characteristics and Causes of Low-Level Temperature Inversion Layer in Guiyang in the Past 40 Years

Hao Luo\*, Ya'nan Zhang#

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 3<sup>rd</sup>, 2022; published: May 18<sup>th</sup>, 2022

\*第一作者。

#通讯作者。

## Abstract

This paper uses the sounding data from 1980~2019 to analyze the characteristics of the inversion layer in Guiyang in the past 40 years and preliminarily discusses the causes. The study shows that the frequency of temperature inversion in Guiyang is 66%, temperature inversion above surface has the largest proportion, which is more than 85%. There are three obvious mutations when the temperature inversion above surface occurs, 1980~1990 s on an upward trend, 1990~2000 s on a downward trend, after mid-2000s the upward trend back again, meanwhile, when the temperature inversion from surface occurs, it has a downward trend in the whole time. The frequency of temperature inversion in winter and spring is higher than that in summer and autumn, meanwhile, in winter and autumn, the inversion times has an upward trend, and the spring and summer showed a significant downward trend. Due to the temperature inversion from surface, there are periodic change characteristics of 2~4 years and 4~8 years, most significant in time before 2010, while temperature inversion above surface also has an inter-year change cycle of about 2 years and 4~8 years, and they were more significant before 2010 yet, in addition, there is an 8~16 year Interera change cycle. The average thickness of the temperature inversion layer from surface is smaller than the temperature inversion above surface, however, the average intensity of temperature inversion from surface is greater than that of the temperature inversion above surface, the thickness, intensity and top height of the temperature inversion from surface all show a downward trend, the intensity of the temperature inversion above surface has increased while the thickness has decreased, the bottom height has increased but the top height has decreased. The causes of low-level inversion layer in Guiyang mainly originate from radiation inversion and quasi-stationary front inversion, the radiation inversion mostly leads to temperature inversion from surface, and the quasi-static front inversion mostly leads to temperature inversion above surface.

## Keywords

Temperature Inversion from Surface, Temperature Inversion above Surface, M-K Test, Wavelet Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

逆温通常而言是指发生对流层内气温随高度变化而增加的现象[1], 业内对大气逆温层的研究主要集中在近地空间或大气边界层以内, 逆温层阻碍了近地空间污染物的向上扩散, 会极大地影响当地空气质量。胡义成等利用 L 波段雷达探空资料对乌鲁木齐近地逆温层特征进行研究发现逆温现象在乌鲁木齐季节变化特征明显[1], 于文立等对临江市 2011~2017 年低空逆温层特征进行了分析, 研究表明临江市逆温主要以贴地逆温和低悬逆温为主[2], 张雪玲等对南阳地区边界层逆温特征研究发现逆温与 PM10 浓度存在必然联系, 是影响南阳地区空气质量的重要因子[3], 业内有不少学者对各地近地空间的逆温层特征进行了大量研究[4]-[10], 重点强调了逆温层与污染物扩散之间的关系[11] [12], 张峻和王海军通过南方地区多个探空站点数据研究了 1960~1999 年冰冻天气过程中的低空逆温层特征, 研究表明西南地区逆温强度明显强于其余地区[13], 孙建华和赵思雄对 2008 年南方地区持续雨雪冰冻灾害天气的层结结构研究发现, 准静止锋和逆温层是此次冰冻天气的重要影响因素[14]。

云贵高原独特的地理位置使得其在冬半年长时间受昆明准静止锋控制, 贵阳市地处云贵高原东麓,

域内海拔普遍在 1000 米以上, 是来自偏北方向和偏东方向冷空气入侵云贵高原的前沿阵地, 而来自印度洋的西南季风则经云贵高原西部到达贵州中部地区, 冷暖空气层的特殊结构使得逆温层得以形成并维持, 本文通过对近 40 年贵阳市探空数据进行气候分析和逆温层特征研究, 总结了贵阳市近地空间逆温层厚度、强度以及逆温层底高和顶高的分布特征, 并揭示了其周期性的变化规律, 研究将有助于理解准静止锋的温廓结构, 探究逆温层在贵阳地区不同灾害天气中的影响和作用。

## 2. 资料和方法

本文选取的资料包括: 1) 贵阳市东山站(编号 57816) 1980~2019 年高空探测资料; 2) 地面常规观测资料; 3) 欧洲中心 ERA5  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  逐小时高空再分资料; 4) 全球数字高程模型 DEM 地形数据。

探空观测每日进行两次, 分别为北京时 08 时及 20 时, 本文统计 1980~2019 年贵阳市东山探空站共计得 28561 时次探空数据, 缺测率为 2.2%, 用 Mann-kendall 非参数检验方法[15] [16]对逆温时次随时间变化进行突变检验分析, 用 Morlet 小波[17]分析了逆温发生的周期变化特征, 本文在研究分析时已对时间序列进行统一标准化处理。

本文关注的逆温层为地面至地面以上 5 km 高度区间(即本文所指近地空间, 下同)发生的任意逆温情况, 逆温底高是指逆温层底的海拔高度, 逆温顶高是指逆温层顶的海拔高度, 逆温厚度是指逆温层的厚度(单位: m), 逆温类型分为两类: 贴地逆温是指逆温起始高度为地面海拔高度的逆温层; 悬浮逆温是指逆温起始高度大于地面海拔高度逆温层, 逆温强度:  $\Delta T/(\Delta H \times 100)$  (单位:  $^\circ\text{C}/100\text{m}$ ), 其中  $\Delta T = T_2 - T_1$  ( $T_2$  为逆温层顶气温,  $T_1$  为逆温层底气温);  $\Delta H = H_2 - H_1$  ( $H_2$  为逆温层顶海拔高度,  $H_1$  为逆温层底海拔高度), 逆温强度表征为在逆温层中每升高 100 米增加的温度。

本文所涉及的时间均为北京时, 涉及的高度均为海拔高度。

## 3. 逆温时次变化特征

### 3.1. 年际变化

统计 1980 年至 2019 年贵阳市东山站探空数据发现, 近 40 年贵阳地区近地空间逆温出现的总时次为 18,790 次, 出现频率为 66%, 其中 08 时占比 53%, 20 时占比 47%, 如图 1 所示, 贵阳地区平均每年发生逆温时次 474.25 次, 其中 08 时逐年平均 251.425 次, 20 时 222.825 次, 08 时在所有年份的逆温时次均要高于 20 时, 从年代变化来看, 1997 年在所有年份中逆温时次出现最少, 总时次仅 324 次, 其中 08 时 197 次, 20 时 127 次, 均大幅低于整体平均值, 1992 年在所有年份中逆温时次出现则最多, 总时次为 545 次, 其中 08 时 284 次, 20 时 261 次, 由此可见从 1992 年到 1997 年总逆温时次有陡然下降的趋势。

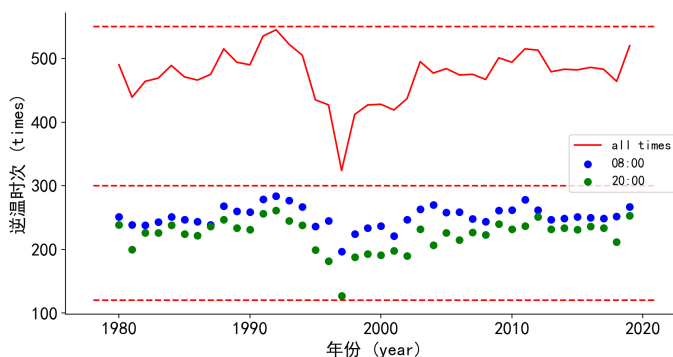
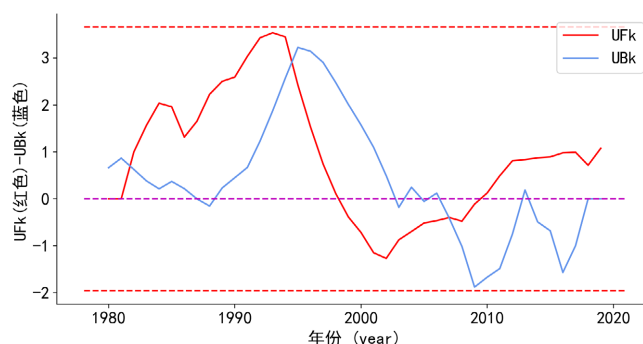


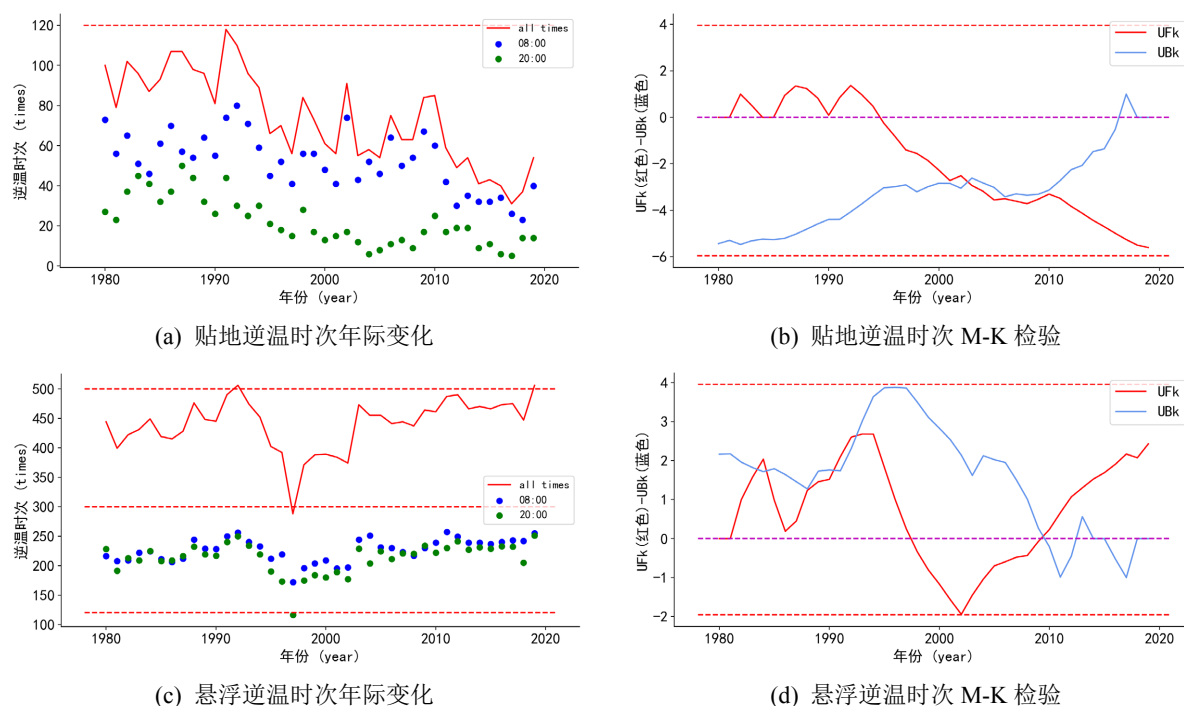
Figure 1. Time distribution of low-level temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019  
图 1. 1980 年至 2019 年贵阳近地空间逆温时次分布

Mann-kendall 法是一种非参数的检验方法, 样本不必遵从某一特定的分布, 同时也不受个别异常值的干扰, 能够客观地表征样本序列的整体变化趋势[17]。如图 2 所示为贵阳地区近地空间逆温时次年变化序列的 M-K 突变检验, 由图可见, UFk 曲线和 UBk 曲线在近 40 年中总共有三次相交, 意味着逆温时次有三个明显的突变时刻, 分别是 1980 年代初、1990 年代初以及 2000 年代末, 具体而言, 从 1980~1990 年代逆温时次呈现出上升趋势, 而从 1990 年至 2000 年代则呈显著的下降趋势, 2000 年代以后则又呈缓慢上升趋势。



**Figure 2.** Mann-kendall mutation test of low-level temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019  
**图 2.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间逆温时次 Mann-kendall 突变检验

根据逆温层的起始位置将逆温分为贴地逆温和悬浮逆温, 在统计时若贴地逆温与悬浮逆温同时出现, 则单独计数, 但若同一时次有多层悬浮逆温, 则悬浮逆温时次合计为一次, 统计结果表明, 近 40 年贵阳地区贴地逆温总发生时次为 2961 次, 悬浮逆温总发生时次为 17,596 次, 其中贴地逆温与悬浮逆温一起出现的情况共有 1767 次, 由此可见对于贵阳地区而言, 悬浮逆温是主要的逆温现象, 占比超过了 85%。如图 3 所示,



**Figure 3.** Annual variation and Mann-kendall mutation test in different temperature inversion types of low-level temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019

**图 3.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同逆温类型逆温时次年际变化及 Mann-kendall 突变检验

贴地逆温时次在近 40 年里整体呈下降趋势, 08 时占比 70%, 20 时占比 30%, 二者相差十分显著, M-K 检验显示在 2000 年至 2010 年期间有明显突变, 突变以后下降趋势更加显著; 悬浮逆温的情况与贴地逆温有所不同, 其年际变化趋势与逆温总时次变化相一致, M-K 检验则显示自 2000 年代中后期以后上升趋势显著增加, 另外对于悬浮逆温而言, 08 时和 20 时逆温出现的频率相差不大, 08 时占比 51%, 20 时占比 49%。

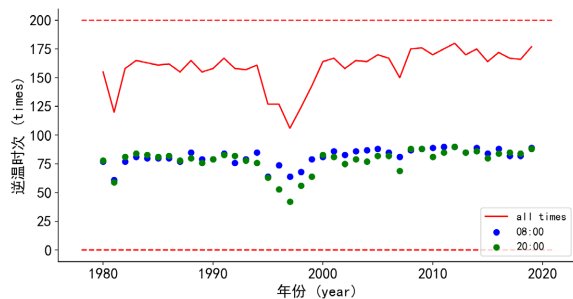
### 3.2. 季节变化

表 1 显示了 1980 年至 2019 年贵阳地区不同季节逆温发生的总时次分布, 冬春季发生频率高于夏秋季, 图 4 是各季节逆温时次的年际变化及 M-K 突变检验, 一个比较明显的特征是, 冬季逆温时次在 2000 年代中期出现明显的突变, 突变之后呈显著上升趋势, 秋季逆温时次在 2000 年代中期同样有突变, 突变

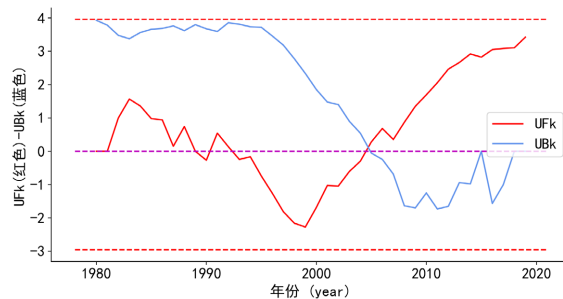
Table 1. Distribution of temperature inversion in different seasons from 1980 to 2019

表 1. 1980 年至 2019 年不同季节逆温时次分布

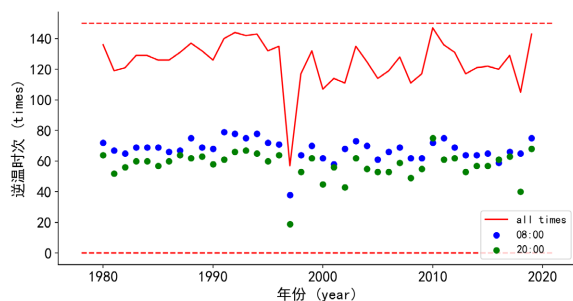
时间	冬季(12月~2月)	春季(3月~5月)	夏季(6月~8月)	秋季(9月~11月)
08 时	3249 次	2706 次	1575 次	2527 次
20 时	3110 次	2300 次	1123 次	2380 次



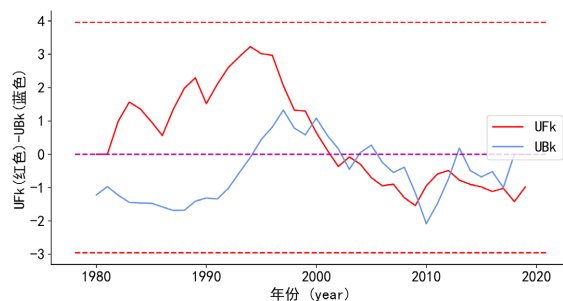
(a) 冬季逆温时次年际变化



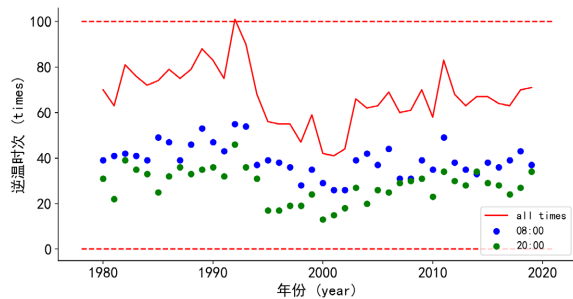
(b) 冬季逆温时次 M-K 检验



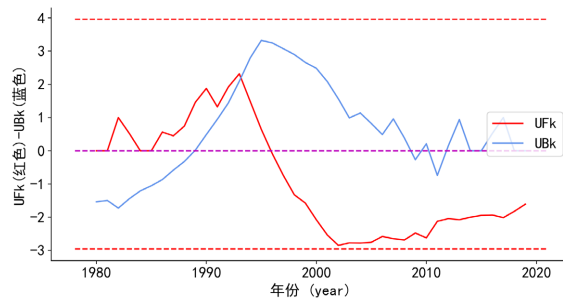
(c) 春季逆温时次年际变化



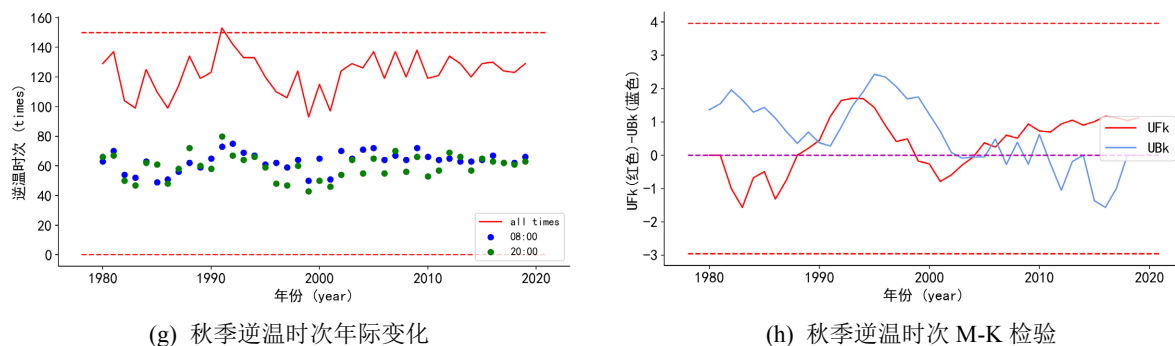
(d) 春季逆温时次 M-K 检验



(e) 夏季逆温时次年际变化



(f) 夏季逆温时次 M-K 检验

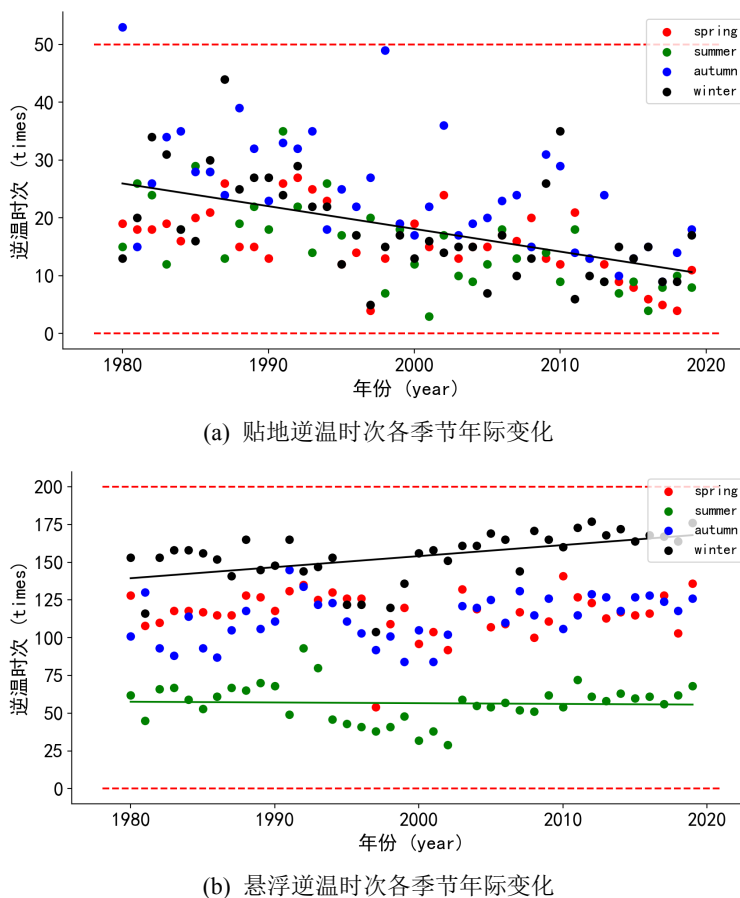


**Figure 4.** Annual variation of inversion times of different season and Mann-kendall mutation test of low-level temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019

**图 4.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同季节逆温时次年际变化及 Mann-kendall 突变检验

后呈缓慢上升趋势, 春夏季则表现出了和秋冬季相反的特征, 自 1990 年中后期以后, 春夏季的逆温时次均呈现出波动的下降态势。

前文提到贴地逆温在近 40 年里整体呈下降趋势, 悬浮逆温则经历了 1990 年代的下降后转为上升趋势, **图 5** 为贴地逆温及悬浮逆温不同季节的年际变化特征, 可见对于贴地逆温而言, 四季均呈现出相同的下降趋势, 而对于悬浮逆温来说, 如前文所叙与总体逆温时次一样, 秋冬季呈上升态势, 春夏季则呈下降态势。



**Figure 5.** Annual variation of different types and different seasons of temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019

**图 5.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同类型逆温各季节时次年际变化



### 3.3. 月变化

图 6 显示了近 40 年贵阳地区近地空间不同类型逆温时次的月分布情况, 为有效对比, 将逆温时次数值进行了标准化处理, 由图可见, 悬浮逆温与总逆温时次呈现出高度一致的状态, 整体呈 U 型分布, 11 月至 2 月是逆温发生的高频月份, 6~8 月为逆温发生的波谷月份, 而贴地逆温则表现出了不同的分布特征, 从 1 月至 7 月波动幅度较小, 从 8 月至 12 月则表现出了显著的上升趋势, 并同样在 12 月达到峰值。

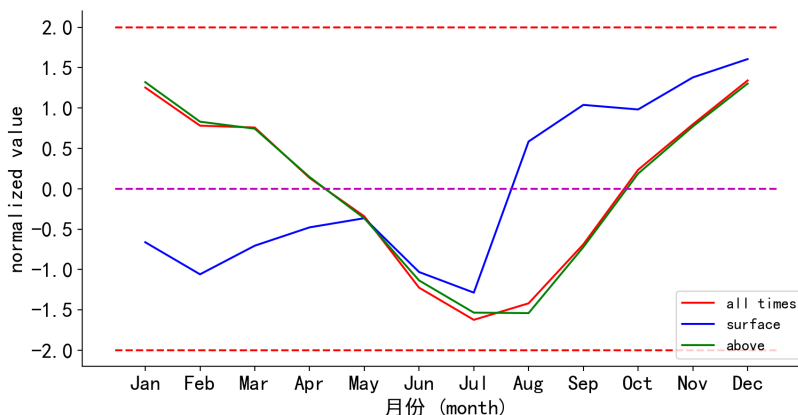


Figure 6. Monthly distribution of different types of low-level temperature inversion in Guiyang from 1980 to 2019 (normalized value)

图 6. 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同类型逆温时次月分布(标准化值)

### 3.4. 逆温时次的周期变化

小波分析是应用广泛的时频分析工具[17] [18], 其数学表达式见式(1):

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式 1 中:  $W_f(a,b)$  为小波系数;  $a$  为伸缩因子;  $b$  为平移因子;  $t$  是时间;  $f(t)$  为任意平方可积函数, 即研究对象的时间序列;  $\varphi(t)$  为一个基本小波函数,  $\varphi^*(t)$  为共轭函数, 本文采用 Morlet 为母小波, 对近 40 年贵阳地区逆温时次数据进行周期性分析。

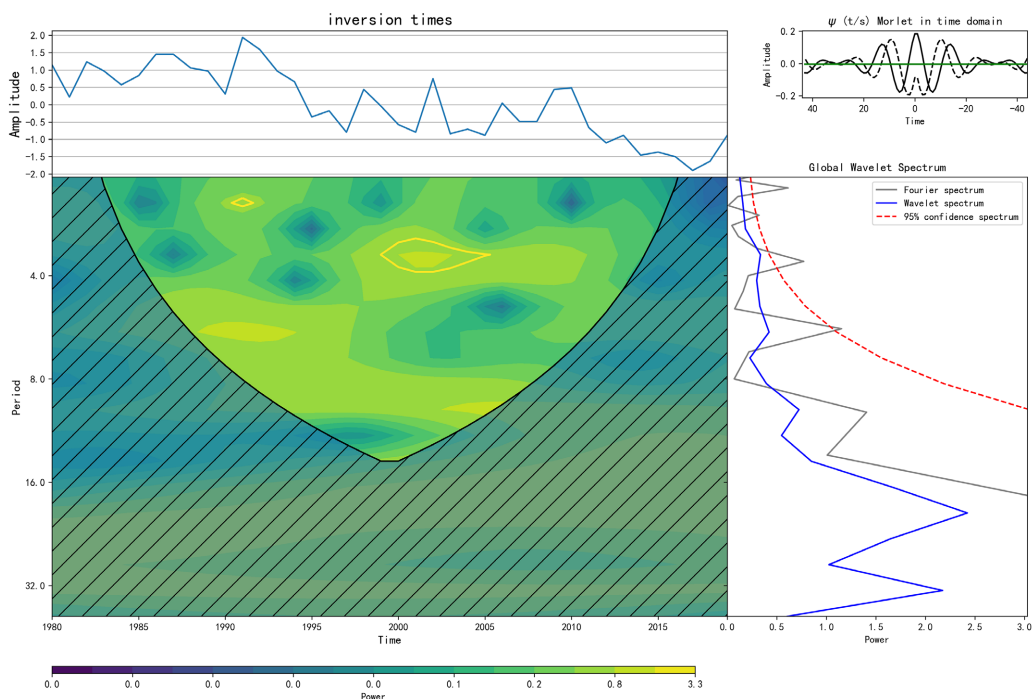
图 7 和图 8 分别是近 40 年贵阳地区贴地逆温和悬浮逆温发生时次的小波分析综合图, 两者表现出了不同的周期性特征。对贴地逆温层而言, 能量图在周期 2~4 年, 4~8 年均出现了大值区, 预示着贴地逆温层存在着 2~4 年的年际变化周期和 4~8 年的年际变化周期, 特别是在 2010 年之前周期性特征较为明显, 但 2010 年以后周期性特征不再显著; 对于悬浮逆温层而言则存在着 2 年左右以及 4~8 年的年际变化周期和 8~16 年的年代际变化周期, 其中 2 年左右及 4~8 年的年际变化周期在 2010 年之前较为显著, 2010 年之后不再显著, 而 8~16 年的年代际变化周期则仍然较为显著。

## 4. 逆温指数统计

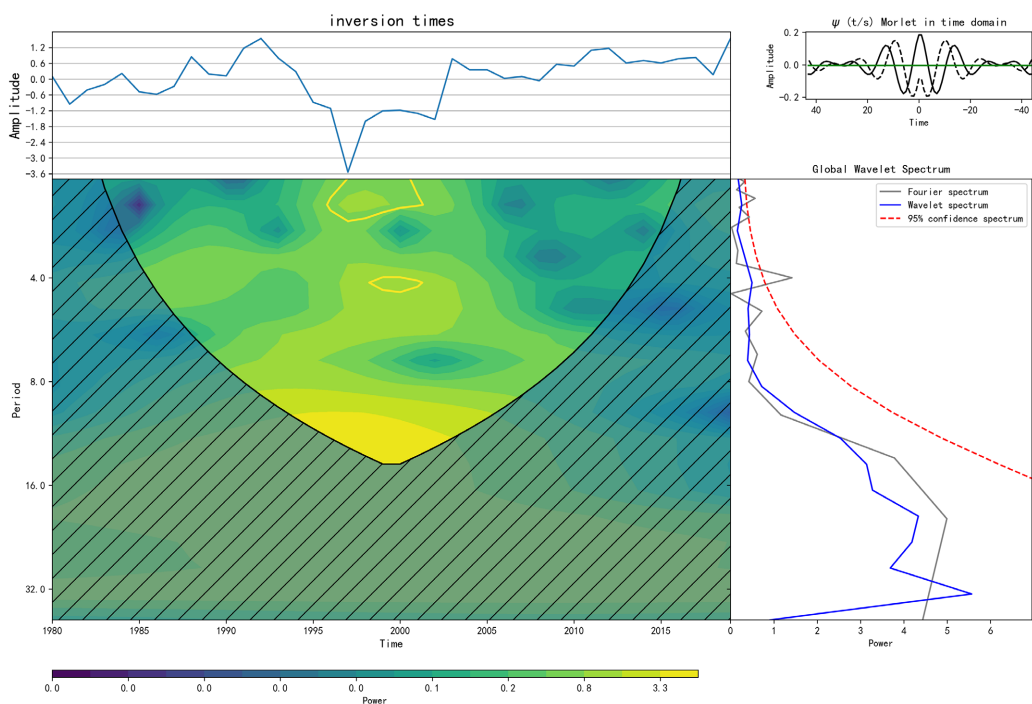
### 4.1. 逆温厚度

统计近 40 年贵阳地区近地空间逆温层厚度的分布发现, 贴地逆温层平均厚度为 345.7 米, 中位数为 199 米, 悬浮逆温层平均厚度为 471 米, 中位数为 334 米, 从年代变化来看(图 9), 贴地逆温层的厚度在 1990 年至 2000 年代呈现出上升趋势, 从 2000 年代以后则呈显著的下降趋势, 对于悬浮逆温层而言, 2000 年代以前逆温层厚度波动振幅不大, 但从 2000 年以后则呈显著下降趋势, M-K 检验显示其在 2000 年代中后期

存在着明显的突变特征。结合前文可知, 贴地逆温层从 2000 年以后不仅发生时次开始减少, 逆温厚度也显著降低, 而悬浮逆温层从 2000 年代以后发生时次呈缓慢波动上升趋势, 但逆温厚度却下降趋势明显。

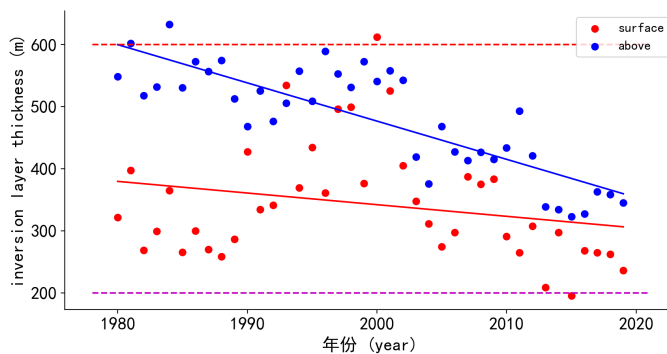


**Figure 7.** Wavelet analysis of low-level temperature inversion from surface in Guiyang from 1980 to 2019  
**图 7.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间贴地逆温时次小波分析

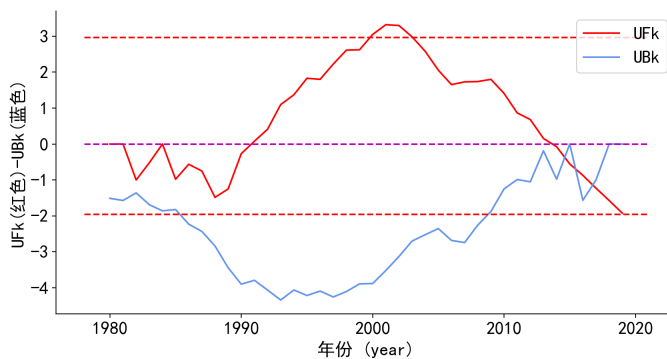


**Figure 8.** Wavelet analysis of low-level temperature inversion above surface in Guiyang from 1980 to 2019  
**图 8.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间悬浮逆温时次小波分析

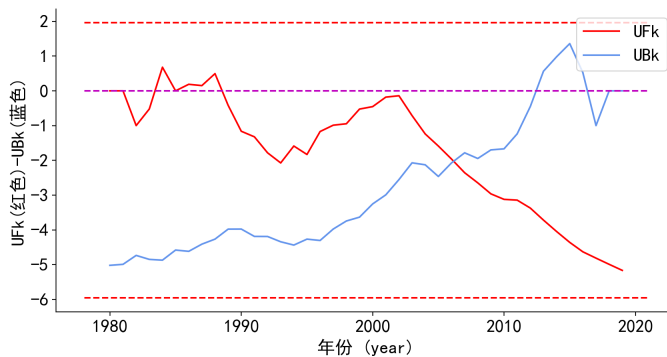




(a) 不同类型逆温厚度年际变化



(b) 贴地逆温厚度 M-K 检验



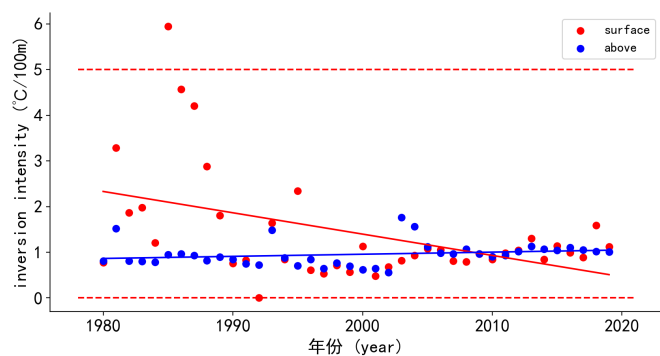
(c) 悬浮逆温厚度 M-K 检验

**Figure 9.** Annual variation of low-level temperature inversion thickness and Mann-kendall mutation test in Guiyang from 1980 to 2019

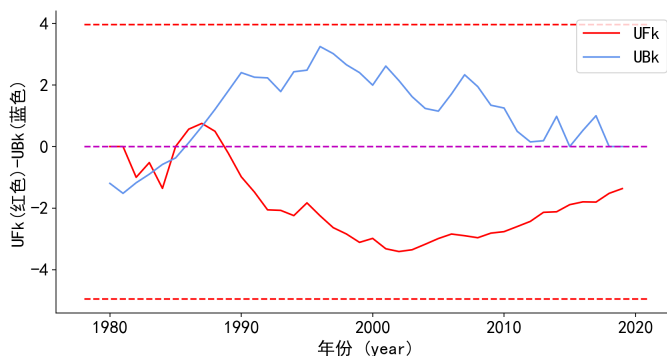
**图 9.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不类型逆温厚度年际变化及 Mann-kendall 突变检验

## 4.2. 逆温强度

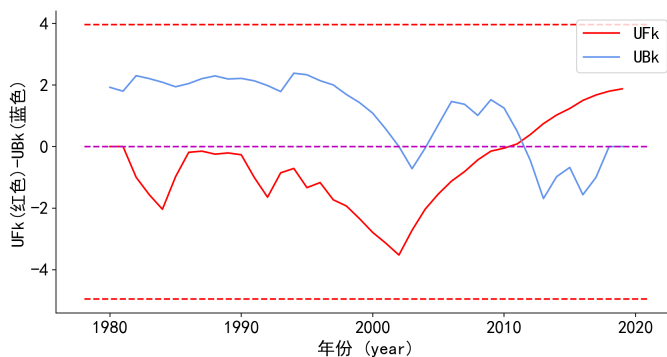
统计结果表明, 贵阳地区近地空间近 40 年贴地逆温层的平均逆温强度为  $1.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 中位数为  $0.62^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 悬浮逆温层的平均逆温强度为  $0.97^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 中位数  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 图 10 显示了逆温强度的年际变化及 M-K 检验, 由此可以看到和逆温厚度特征一样, 贴地逆温层整体逆温强度呈下降趋势, 特别是在 1990 年代至 2000 年代下降趋势显著, 2000 年代以后则有缓慢上升的态势, 对于悬浮逆温层而言, 2010 年代存在较为明显的突变, 在此之前逆温强度波动幅度不大, 在此之后则上升趋势较为明显, 另外值得注意的是在 1990 年代以前, 贴地逆温强度明显大于悬浮逆温, 1990 年代以后两者差距逐渐减小, 并趋于一致。



(a) 不同类型逆温厚度年际变化



(b) 贴地逆温厚度 M-K 检验



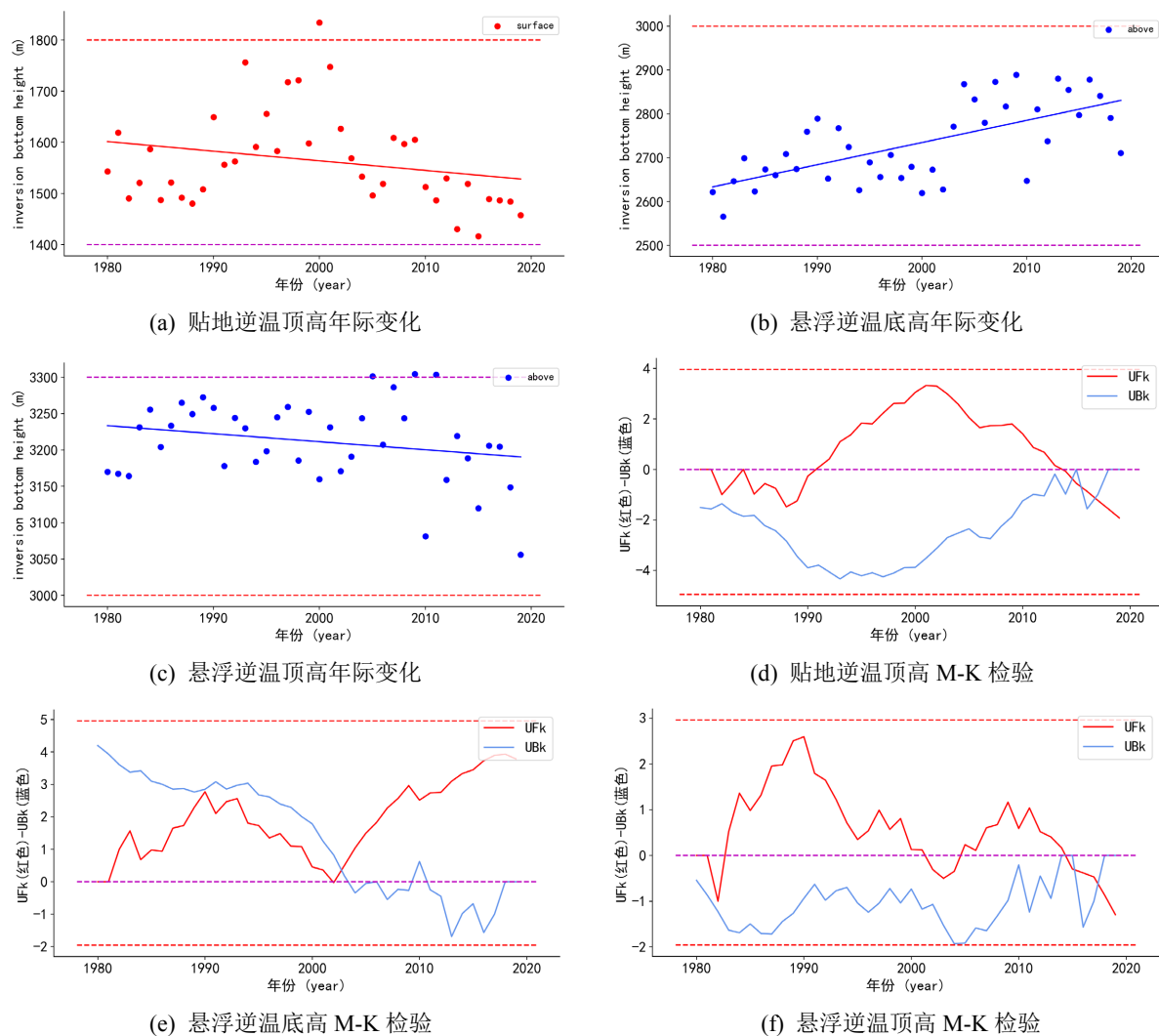
(c) 悬浮逆温厚度 M-K 检验

**Figure 10.** Annual variation of different types of temperature inversion intensity and Mann-kendall mutation test in Guiyang from 1980 to 2019

**图 10.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同类型逆温强度年际变化及 Mann-kendall 突变检验

### 4.3. 逆温底高和逆温顶高

对于贴地逆温而言, 逆温层底高即探空站海拔高度, 统计近 40 年贵阳地区贴地逆温层顶高发现, 其平均值为 1557.7 米, 中位数为 1421 米, 悬浮逆温层底高的平均值为 2739.7 米, 中位数 2569 米, 悬浮逆温顶高平均值 3210.7 米, 中位数 3075 米, 从图 11 的年际变化及 M-K 检验可以看到, 贴地逆温层顶高在 1990 年代至 2000 年代呈上升趋势, 2000 年代以后下降趋势显著, 对于悬浮逆温而言, 逆温层底高整体呈上升趋势, 而逆温层顶高却呈下降趋势, 结合前文可知, 这也是悬浮逆温层逆温厚度在近 40 年整体呈下降趋势的原因。

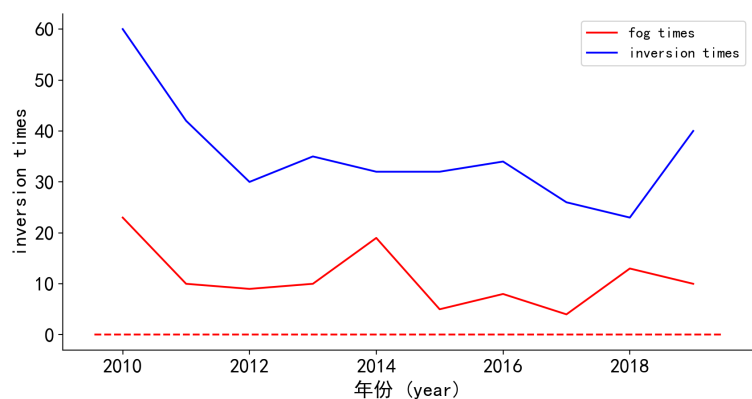


**Figure 11.** Annual variation of different types of low-level temperature inversion bottom height and top height and Mann-kendall mutation test in Guiyang from 1980 to 2019

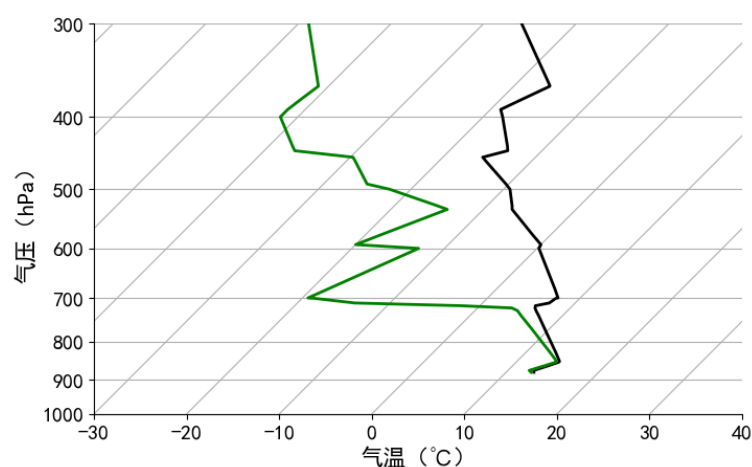
**图 11.** 1980 年至 2019 年贵阳近地空间不同类型逆温底高/顶高年际变化及 Mann-kendall 突变检验

### 5. 逆温层成因初探

前文总结了贵阳机场近 40 年近地空间逆温时次及逆温指数的变化特征, 形成逆温层有多种原因, 包括辐射逆温、平流逆温、地形逆温、下沉逆温、锋面逆温和湍流逆温。辐射逆温是因地面的强烈辐射而失去热量, 使紧贴其上的气层比上层空气有较大的降温, 而形成温度随高度递增的现象, 因此辐射逆温通常是造成贴地逆温的最主要原因。前文已经提到, 贵阳地区贴地逆温层平均厚度为 334 米, 中位数为 199 米, 统计 2010 年至 2019 年贵阳地区辐射雾当日贵阳东山站 08 时探空数据发现, 起雾日贴地层均出现了逆温现象, 如图 12(a)所示, 辐射雾次数与总的逆温时数有着很好的相关性, 两者相关系数计算所得为 0.61, 表现为显著性正相关, 考虑到非辐射雾日近地面仍然存在辐射逆温现象, 可以推论出贵阳地区贴地逆温现象主要以辐射逆温为主。图 12(b)所示的 2015 年 10 月 20 日 08 时贵阳站探空图可作为贵阳地区贴地逆温层的温廓结构模型, 表现出了浅薄逆温层的特点, 此类逆温层通常在日出后随着太阳辐射增强而消散, 具有明显的日变化特征, 不易长时间维持。



(a) 2010~2019 年

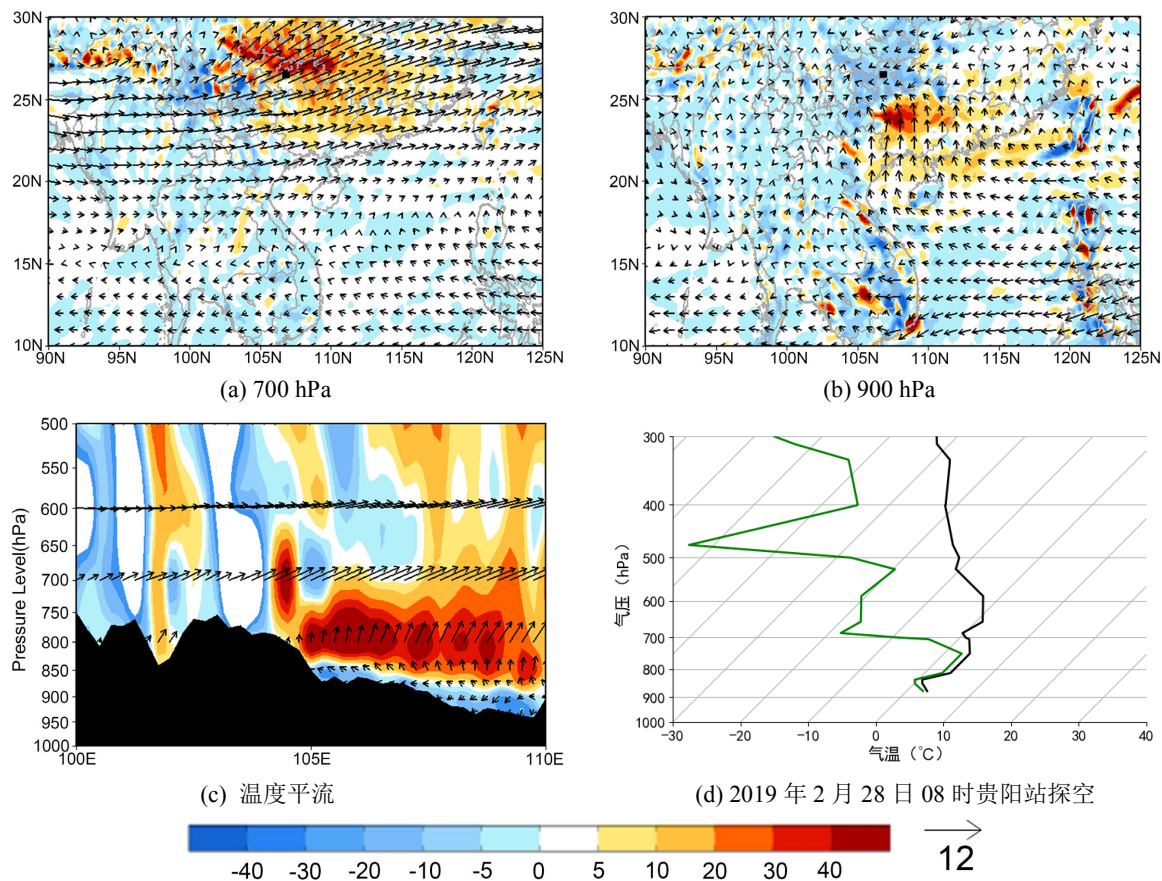


(b) 2015 年 10 月 20 日 08 时 贵阳站探空

**Figure 12.** (a) Comparison of radiation fog times and temperature inversion from surface times in Guiyang from 2010~2019; (b) Sounding map of Guiyang Station at 08:00:00 on October 20, 2015 (curve, black: temperature, green: dew point)

**图 12.** (a) 2010 年至 2019 年 贵阳地区辐射雾次数与贴地逆温次数对比; (b) 2015 年 10 月 20 日 08 时 贵阳站探空 (曲线, 黑色: 气温, 绿色: 露点)

由前文可知, 对于贵阳地区而言, 悬浮逆温是最主要的逆温现象, 其发生频率超过了 85%, 张峻和王海军通过研究 1960~1999 年南方多个探空站数据发现, 西南地区逆温强度较大, 且多与低温雨雪冰冻天气相配合[11], 对于贵州地区而言, 昆明准静止锋尤其活跃, 特别是在冬季, 2019 年 2 月, 贵州地区仅 3 日无准静止锋存在, 选取准静止锋日 ERA5 高空要素场进行合成, 如图 13(a)所示, 700 hPa 贵州地区为一致的西南气流控制, 风速达到了 16 m/s 及以上的急流强度, 也是暖平流中心最大值集中区域所在, 图 13(b)显示了 900 hPa 的情况, 贵州地区主要受来自偏东方向的冷平流所控制, 这种底层冷上层暖的温廓结构在贵阳地区近地空间长时间维持, 从图 13(c)可以更加清晰看到冷暖平流在垂直方向上的配置, 冷平流主要控制 850 hPa 及其以下区域, 850 hPa 至 700 hPa 则是暖平流集中的区域, 图 13(d)是 2019 年 2 月 28 日 08 时 贵阳站探空图, 可以看到逆温层从近地面的 850 hPa 附近一直延展到了 800 hPa 以上, 结合前文所叙, 这种特殊的冷暖结构冬季在贵州地区往往能长时间维持, 一方面来自印度洋和西太平洋上的偏南暖湿气流持续从西部和南部进入贵州山区, 另一方面冬季冷空气入侵频繁, 但受地形阻挡主要以偏东北、偏东方向的回流形式进入贵州省, 主要集中在近地层, 且由于山区地形阻塞常常滞留不前, 因此使得上暖下冷的底层结构稳定, 有利于逆温层维持。



**Figure 13.** (a) 700 hPa composed field (colorfilled: temperature advection,  $10^{-5} \cdot K \cdot s^{-1}$ , wind field: wind vector); (b) 900 hPa composed field; (c) along  $26^{\circ}N$ ,  $100^{\circ}E \sim 110^{\circ}E$  vertical cross section profile (colorfilled: temperature advection, wind field: wind vector); (d) sounding map of Guiyang Station at 08:00 on February 28, 2019 (curve, black: temperature, green: dew point), the black square is the location of Guiyang Airport

**图 13.** (a) 700 hPa 合成场(填色: 温度平流, 单位:  $10^{-5} \cdot K \cdot s^{-1}$ ; 风场: 风矢量, 后同); (b) 900 hPa 合成场; (c) 合成场沿  $26^{\circ}N$ ,  $100^{\circ}E \sim 110^{\circ}E$  垂直剖面分布(填色: 温度平流, 风场: 风矢量); (d) 2019 年 2 月 28 日 08 时贵阳站探空(曲线, 黑色: 气温, 绿色: 露点), 黑色正方形为贵阳机场所在位置

本文统计了贵阳地区近 40 年近地空间逆温层的年际变化和月变化, 分析了其周期性特征和各项逆温指数的变化特征, 就贵阳地区逆温层形成的原因进行了初步探讨, 强调了辐射逆温在贴地逆温层和准静止锋锋面逆温在悬浮逆温中的贡献作用, 但贵阳地区逆温层在气候尺度上的影响因子和变化原因则还有待于更进一步的研究。

## 6. 结论

本文利用 1980~2019 近 40 年探空数据对贵阳近地空间逆温层特征进行了统计分析, 并对逆温层形成的原因进行了初步的探讨, 得出以下结论:

- 1) 贵阳地区近地空间内逆温现象发生较为频繁, 其全年发生频率为 66%, 08 时出现频率高于 20 时, M-K 检验显示近 40 年存在三个明显的突变时刻, 1980 至 1990 年代逆温发生时次处于上升趋势, 1990 年代至 2000 年代呈下降趋势, 2000 年以后又呈上升趋势。
- 2) 贵阳地区近地空间以悬浮逆温为主, 占比超过了 85%, 贴地逆温多发生在 08 时, 悬浮逆温在 08 时和 20 时发生时次相当, 贴地逆温发生时次在近 40 年里整体呈下降态势, 而悬浮逆温在 1990 年以前波动缓和, 1990~2000 年代处于下降趋势, 2000 年代以后有着明显的突变, 突变以后呈上升趋势。



3) 贵阳地区逆温现象在冬春季的发生频率高于夏秋季, 其中秋冬季发生时次在 2000 年代以后呈上升趋势, 而春夏季在 1990 年中后期以后就呈下降趋势。

4) 贵阳地区贴地逆温时次在 1~7 月波动幅度不大, 8~12 月呈线性上升趋势; 悬浮逆温全年则呈 U 型分布特征, 11 月至 2 月为发生逆温现象的高频月份, 6~8 月为发生逆温现象的波谷月份。

5) Morlet 小波分析表明, 贵阳地区贴地逆温时次存在着 2~4 年以及 4~8 年的年际变化周期, 周期性特征在 2010 年之前较为显著, 2010 年之后不再显著; 悬浮逆温时次则存在着 2 年左右和 4~8 年的年际变化周期以及 8~16 年的年代际变化周期, 其中年际变化周期在 2010 年之前较为显著, 2010 年之后不再显著, 年代际变化周期则始终较为显著。

6) 贵阳地区贴地逆温层的平均厚度为 345.7 米, 平均逆温强度为  $1.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 平均逆温顶高为 1557.7 米, 悬浮逆温层的平均厚度为 471 米, 平均逆温强度为  $0.97^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 平均逆温底高为 2739.7 米, 平均顶高为 3210.7 米; 贴地逆温层在厚度、强度以及顶高均呈现出了整体下降的年变化趋势, 悬浮逆温则厚度处于下降趋势, 强度稳定并波动上升, 底高整体处于上升趋势但顶高却处于下降趋势。

7) 贵阳地区近地空间的逆温现象以辐射逆温和准静止锋锋面逆温为主, 辐射逆温多导致贴地逆温, 而准静止锋锋面逆温多导致悬浮逆温。

## 参考文献

- [1] 胡义成, 伊里哈木, 王秋香, 等. 乌鲁木齐大气边界层风温垂直结构特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(3): 44-49.
- [2] 于文立, 郭淑芳, 刘洋. 临江市低空逆温层特征分析[J]. 气象灾害防御, 2018, 25(4): 26-29.
- [3] 危诗敏, 冯鑫媛, 王式功, 等. 四川盆地多层逆温特征及其对大气污染的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1005-1013.
- [4] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东. 2008/2009 乌鲁木齐近地空间逆温层特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(3): 29-32.
- [5] 周书华, 倪长健, 刘培川. 成都地区大气边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 108-111.
- [6] 张雪玲, 陈润浩. 南阳边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(z1): 116-119.
- [7] 刘金青, 聂永喜, 周措毛. 黄河源地区近地面逆温层特征及形成原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(2): 78-82.
- [8] 张佃国, 王洪, 崔雅琴, 等. 山东济南地区 2015 年大气边界层逆温特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(1): 43-50.
- [9] 卢萍, 杨康权, 李英. 温江站夏季大气边界层垂直结构特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 70-76.
- [10] 马明量, 祁栋林, 申红艳, 等. 西宁地区大气边界层风、温场特征研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1196-1206.
- [11] 张峻, 王海军. 我国南方冰冻天气过程低空逆温层特征[J]. 气象科技, 2013, 41(1): 103-107+145.
- [12] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [13] 李思盟, 蔺诗颖, 陈南西, 等. 逆温层对成都地区雾霾影响的研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(1): 79-86.
- [14] 都占良, 韩廷芳, 张德琴, 等. 格尔木地区近地面逆温层特征及其影响因子分析[J]. 青海环境, 2019, 29(2): 67-76.
- [15] 蒋军新, 刘新华, 宋亮. 基于小波分析的阿克苏河下游气候特征研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(5): 105-108.
- [16] 张欣欣. 基于小波分析的吉林西部平原区降雨演变周期分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(1): 28-33.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 69-72+106-113.
- [18] 张允, 赵景波. 西安市近 55 年来降水的多时间尺度分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 406-410.