

解明恩,姚愚,彭启洋,等.影响云南空气质量的风场特征分析[J].中低纬山地气象,2023,47(2):1-9.

影响云南空气质量的风场特征分析

解明恩¹,姚愚²,彭启洋¹,窦小东¹,范立张²,刘平英³

(1. 云南省气象服务中心,云南 昆明 650034;2. 云南省气候中心,云南 昆明 650034;
3. 云南省气象灾害防御技术中心,云南 昆明 650034)

摘要:利用美国 NCEP/NCAR 风场再分析资料和云南高空、地面、高山风塔实测风资料,对云南地区的大气风场特征进行分析。结果表明,云南对流层中低层大气风场常年盛行偏西气流,风向稳定,尤以西南风最多,冬—春—夏—秋四季风场变化特征明显。腾冲、思茅高空盛行风向以西风为主。云南除滇东北、滇东南和局地地形影响外,大部分地区近地面全年以盛行西南风为主。山区全年盛行风向以西南风为主。云南近地面年平均风速 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,北部大于南部,东部大于西部,冬春季风大,夏秋季风小,风速日变化特征显著。昆明地区大气边界层存在逆温现象,冬季突出,夏季微弱,秋冬春季频率高,夏季频率低。云南空气污染具有干湿季分布特点,1—5 月为主要污染时段,冬春季节存在西南和东北 2 条污染传输通道。

关键词:大气风场;西南风;季节变化;逆温;空气质量

中图分类号:P425.6,X513 **文献标识码:**A

Analysis of Wind Field Characteristics Affecting Air Quality in Yunnan

XIE Ming'en¹, YAO Yu², PENG Qiyang¹, DOU Xiaodong¹, FAN Lizhang², LIU Pingying³

(1. Yunnan Meteorological Service Center, Kunming 650034, China; 2. Yunnan Climate Center, Kunming 650034, China; 3. Yunnan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Kunming 650034, China)

Abstract: Based on the NCEP/NCAR wind field reanalysis data from the United States and the measured wind data from radiosonde stations, ground weather stations and mountainous wind observation towers in Yunnan, the characteristics of the atmospheric wind field in Yunnan are analyzed. The results show that the wind field in the middle and lower troposphere of Yunnan is dominated by westerly air in ordinary year, and the wind direction is stable, especially the southwest wind, and the variation of upper wind fields in winter, spring, summer and autumn is obvious. The prevailing upper wind direction at Tengchong and Simao radiosonde station is mainly west wind. In addition to the influence of northeast and southeast Yunnan and local topography, southwest wind prevails in most areas near the surface throughout the year. The prevailing wind direction in mountainous areas is mainly southwest. The average annual wind speed near the surface in Yunnan is $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which is larger in the north than in the south, and larger in the east than in the west. The wind speed is large in winter and spring, and small in summer and autumn, and the diurnal variation of wind speed is significant. The atmospheric boundary layer temperature inversion phenomenon exists in Kunming area, which is prominent in winter, weak in summer, high frequency occurs in autumn, winter, spring and low frequency occurs in summer. Air pollution in Yunnan is distributed in wet and dry seasons, the main pollution period is from January to May. In winter and spring, there are two pollution transport channels in southwest and northeast.

Key words: atmospheric wind field; southwester; seasonal variation; thermal inversion layer; air quality

收稿日期:2023-02-02

第一作者简介:解明恩(1966—),男,正高,主要从事应用气象研究,E-mail:xmn1808@sina.com。

通讯作者简介:姚愚(1973—),男,高工,主要从事短期气候预测工作,E-mail:569187261@qq.com。

资助项目:云南省基础研究专项—重大项目(202101BC070002);《云南植物志》研编及云南植被资源可持续利用研究。

0 引言

随着社会经济的发展,城市大气污染问题越来越受到普遍关注。我国大气污染类型已从传统的煤烟型污染为主,向废气排放、尾气排放、扬尘扩散的复合型污染转化,颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)和臭氧(O_3)已成为城市环境空气质量的首要污染物^[1-3]。云南地处低纬高原,地理和气候条件优越,工业基础薄弱,属欠发达和后发展地区,大部地区生态环境和空气质量较好,是我国环境空气质量长期保持优良的省份之一^[4]。2021 年全省 16 个地级城市环境空气质量连续 5 a 达标,全省空气质量优良天数比例为 98.6%,首要污染物为细颗粒物(69.2%)和臭氧(30.8%),全省累计出现轻度及以上污染天气 78 d^[5]。

大气污染扩散是大气中的污染物在湍流的混合作用下逐渐分散稀释的过程,主要受风向、风速、温度、大气稳定度等气象因素和地形条件的影响。同一污染源在不同的气象条件下可造成近地层污染物浓度相差几倍。特定天气系统和大气边界层结构有利于污染物的传输、化学生成和累积,会形成较为明显的大气污染事件^[6-11]。在本地污染源及其排放量相对稳定的情况下,污染源浓度的高低,主要取决于外地污染源的输送影响和本地大气扩散能力,而扩散能力又与天气背景、地形地貌有

关。云南位于我国西南地区,与缅甸、老挝、越南接壤,处于南亚季风和东亚季风的交叉影响下,干湿分明,气候类型多样。云南空气质量不仅受到本地排放源和盛行气流影响,还受到南亚、东南亚污染物的传输影响^[12-17]。

为全面了解云南及周边地区高空及近地面气流对环境空气质量的影响,本文对不同高度的高空及近地面风场特征进行分析,旨在为云南区域污染传输特征研究提供气象背景参考。

1 资料和方法

高空风场资料取自美国 NCEP/NCAR 月平均等压面水平风场再分析资料(850 hPa、700 hPa、500 hPa 3 层),资料年代为 1971—2015 年,水平范围取 $75^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$,空间分辨率 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,气候平均值时段为 1981—2010 年。地面风场资料取自云南省气象信息中心整编的 125 个国家级气象站月平均值。单站高空风及温度资料取自腾冲、思茅、昆明 3 个探空站。高山风场资料取自云南省气候中心收集整编的昆明、蒙自测风塔。空气质量资料源自云南省环境监测中心站。取 1 月、4 月、7 月、10 月代表冬、春、夏、秋四季高空风场状况。分析采用制作季节平均和年平均值曲线图、风矢量图、风玫瑰图等方法进行。

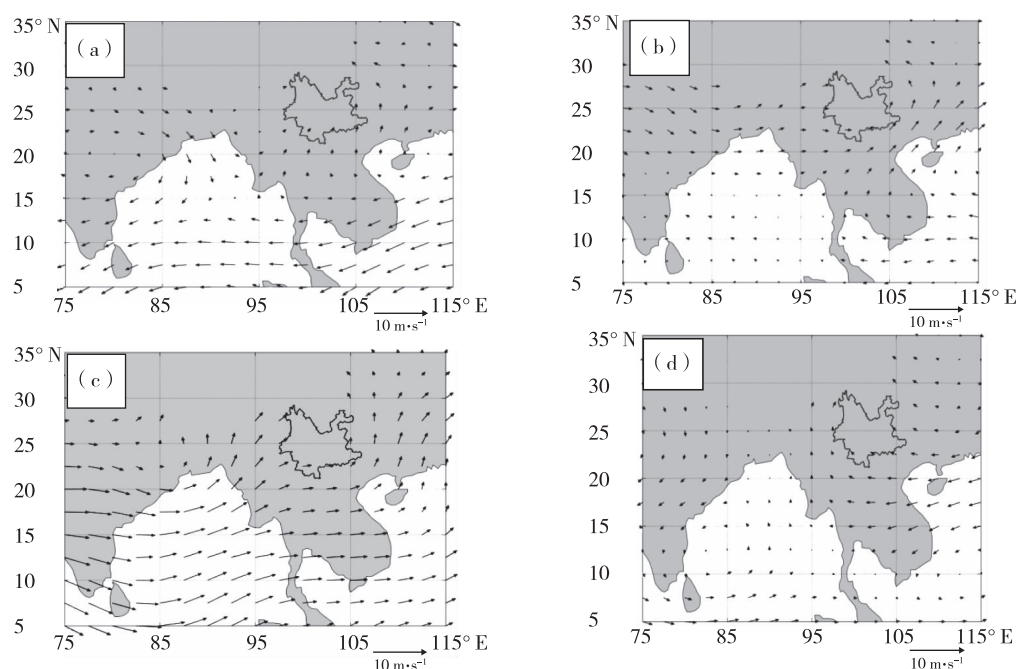


图 1 云南及周边地区 850 hPa 风场(a. 1 月, b. 4 月, c. 7 月, d. 10 月)

Fig. 1 850 hPa wind fields in Yunnan and its surrounding areas (a. January, b. April, c. July, d. October)

2 大气风场特征

2.1 对流层风场

2.1.1 850 hPa 风场 850 hPa 的平均高度为 1500 m,云南地形的平均海拔高度为 2000 m,地势呈西北高东南低。从图 1 可知,冬季 1 月,印度半岛为反气旋区控制,南海—华南南部也为反气旋区控制,中南半岛为鞍型流场区,在 94°E , 17°N 以北有南支槽,滇南及 20°N 以北地区为西南及偏南风, 15°N 以南地区为偏东风;春季 4 月, 15°N 以南的孟加拉湾及南海地区东风减弱, 20°N 以北的西风加强,南支

槽活跃,位于 90°E , 22.5°N 以北地区,滇西、滇南均为偏西气流,中南半岛为西南气流;夏季 7 月,随着西南季风的爆发,孟加拉湾及中南半岛的西南风和偏西风增强,滇西、滇南为西南气流;秋季 10 月,随着西南季风的撤退,中南半岛—印度半岛偏东风建立,滇南、滇西为东南气流控制。由冬至秋,云南南部地区 850 hPa 盛行风向经历了“西南风—西风—西南风—东南风”的演变,对应降水量则出现“少—渐多—多—渐少”的变化,反映了云南及周边地区盛行风向转变,干湿季分明的气候特点。

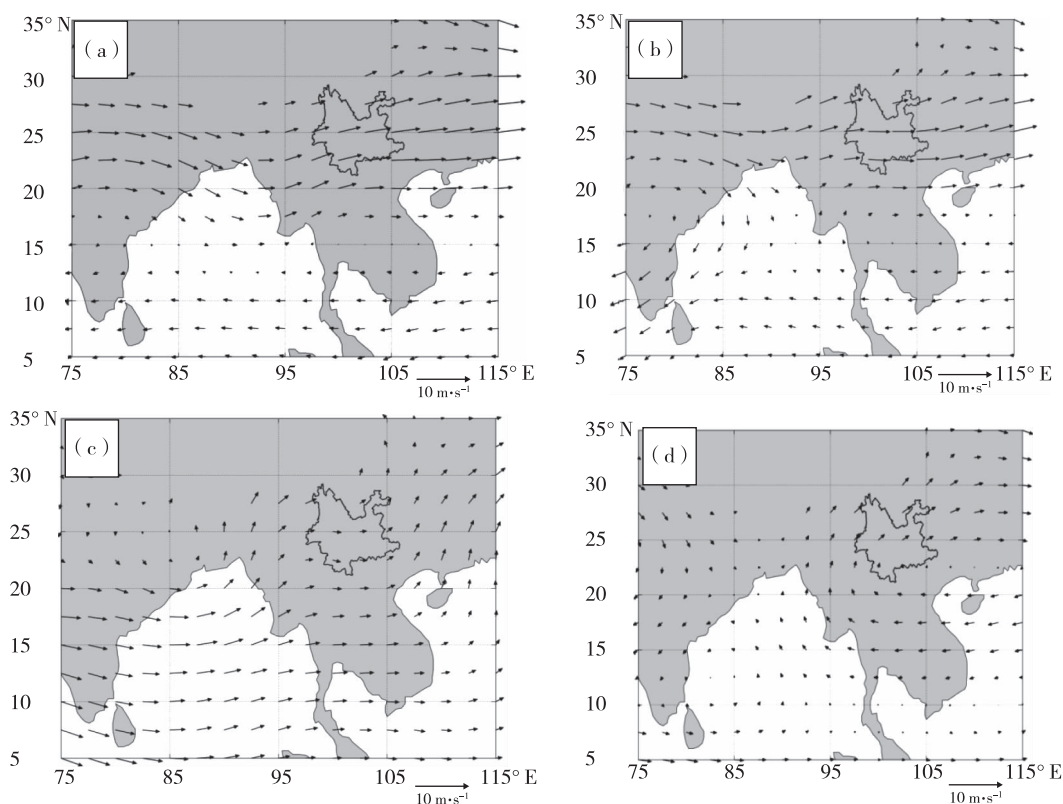


图 2 云南及周边地区 700 hPa 风场(a. 1 月, b. 4 月, c. 7 月, d. 10 月)

Fig. 2 700 hPa wind field in Yunnan and its surrounding areas (a. January, b. April, c. July, d. October)

2.1.2 700 hPa 风场 700 hPa 的平均高度为 3000 m,云南除滇西北平均海拔高于 3000 m 外,其余地区均低于该高度。从图 2 可知,冬季 1 月, $20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 纬度带为强偏西风,风速接近或超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 15°N 以南地区为偏东风,南支槽位于 92.5°E 附近,云南为西南风;春季 4 月, $20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 地区仍维持强偏西风,风速增强,南支槽维持在 92.5°E 附近并有所北缩, 15°N 以南东风带减弱,云南为强劲偏西气流;夏季 7 月,随着西南季风的爆发,孟加拉湾及中南半岛西南风和偏西风增强,云南为偏西气流,但风速小于冬季和春季;秋季 10 月,随着西南季风的撤退,中南半岛—印度半岛偏东风建立,云南

转为西太平洋副热带高压外围的西南风,风速减弱。由冬至秋,云南 700 hPa 盛行风向经历了“西南风—西风—西南风”的演变。

2.1.3 500 hPa 风场 500 hPa 的平均高度为 5500 m,云南除滇西北局部高山地区外,其余地区均低于该高度。从图 3 可知,冬季 1 月, $15^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 纬度带为强偏西风,尤其 $17.5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 为平直西风急流区,风速极大, 10°N 以南地区为偏东风,南支槽不明显,云南为强劲西风;春季 4 月, $17^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 地区仍维持强西风,强度减弱,南支槽在 92.5°E 附近, 10°N 以南东风带减弱,云南为强劲西风;夏季 7 月,随着西南季风的爆发,孟加拉湾为季风低压气流,中南半

岛为弱西南风,云南为弱的偏南气流,风场特征不明显,风速小于冬季和春季;秋季 10 月,随着西南季风的撤退,中南半岛—孟加拉湾偏东风建立,云南

转为西太平洋副热带高压外围的西南风,风速增强。由冬至秋,云南 500 hPa 盛行风向经历了“西风—西风—偏南风—西南风”的转变。

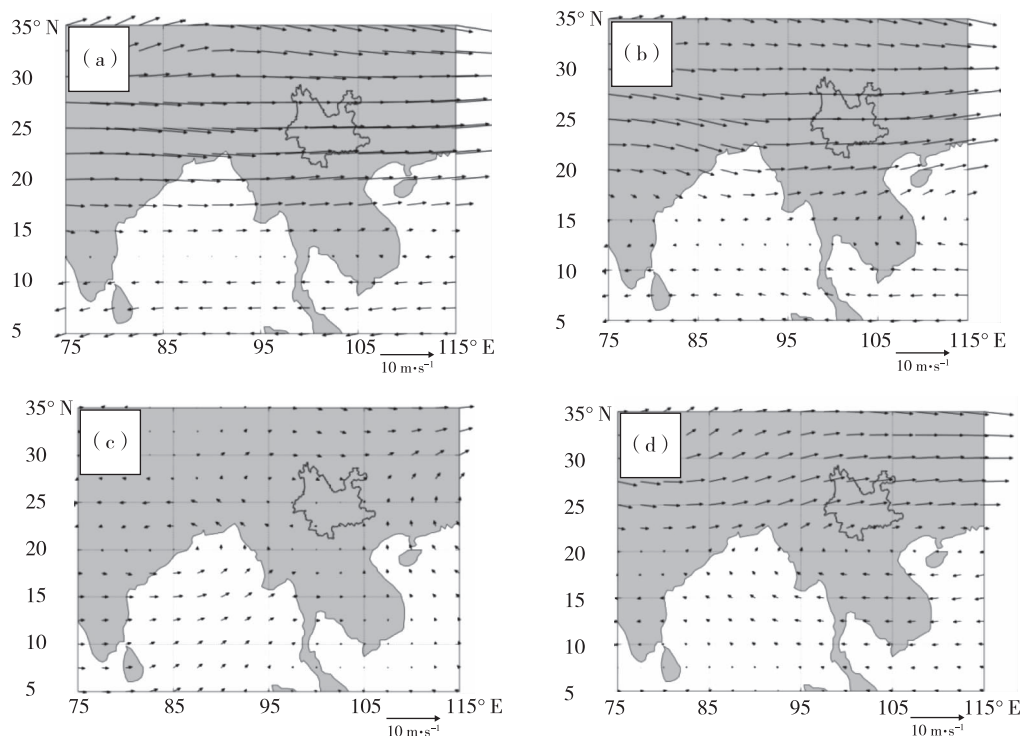


图 3 云南及周边地区 500 hPa 风场(a. 1 月, b. 4 月, c. 7 月, d. 10 月)

Fig. 3 500 hPa wind field in Yunnan and its surrounding areas (a. January, b. April, c. July, d. October)

2.2 单站高空风

选取位于滇西、滇南的腾冲、思茅探空站 2010—2019 年逐日 20 时测风资料进行单站高空风分析,10 a 逐日风资料按 16 个方位角进行统计。腾冲站位于 98°30'E, 24°59'N, 海拔 1695.9 m。思茅站位于 100°58'E, 22°47'N, 海拔 1302.1 m。由图 4 可知,腾冲站 700 hPa 年平均盛行风向以西风(W)、西西南风(WSW)、西西北风(WNW)为主,频率分别为 30.4%、18.9%、17.3%,合计占全年的 66.6%;东北风(NE)频率最小(0.5%)。腾冲站 500 hPa 年平均盛行风向以西风(W)、西西南风(WSW)、西西北风(WNW)为主,频率分别为 40.9%、16.2%、15.5%,合计占 72.6%;南东南风(SSE)频率最小(0.8%)。随着高度的上升,腾冲高空风的主导西风频率增加。

思茅站 850 hPa 年平均盛行风向以南风(S)、南东南风(SSE)、西南风(SW)、南西南风(SSW)为主,频率分别为 22.8%、13.4%、10.8%、10.4%,合计占 67.4%;东东北风(ENE)频率最小(0.7%)。思茅站 700 hPa 年平均盛行风向以西风(W)、西西南风(WSW)、西西北风(WNW)为主,频率分别为 31.3%、22.8%、17.9%,合计占 72.0%;北东北风

(NNE)频率最小(0.5%);思茅站 500 hPa 年平均盛行风向以西风(W)、西西南风(WSW)、西西北风(WNW)为主,频率分别为 34.0%、20.6%、15.4%,合计占 70.0%;东南风(SE)频率最小(0.8%)。随着高度的递增,思茅高空风的主导风频率由南风演变为西风。

2.3 单站地面风

据多年平均统计,云南近地面(距地 10 m)年最多风向多数地区以静风为主,静风频率达 30%~60%。景谷站 73% 为全省最高,景洪站 68% 为全省次高。全省静风频率以西双版纳州、普洱市、临沧市、德宏州、怒江州为最高,一般在 50%~60% 以上。省内年次多风向多数地区以西南风(SW)为主,昭通市以偏北风(N)为主,文山州以东南风(SE)为主,其频率为 10%~20%^[18]。表 1 为 1981—2010 年云南 16 个代表气象站年静风和最多风向频率。最多风向以偏南风 and 偏西风为主,静风频率在 20%~68% 之间。除滇东北(偏北风为主)、滇东南(东南风为主)和局地地形(如大理、景洪,偏东风为主)影响外,云南全年近地面以盛行西南风为主,盛行风向稳定。

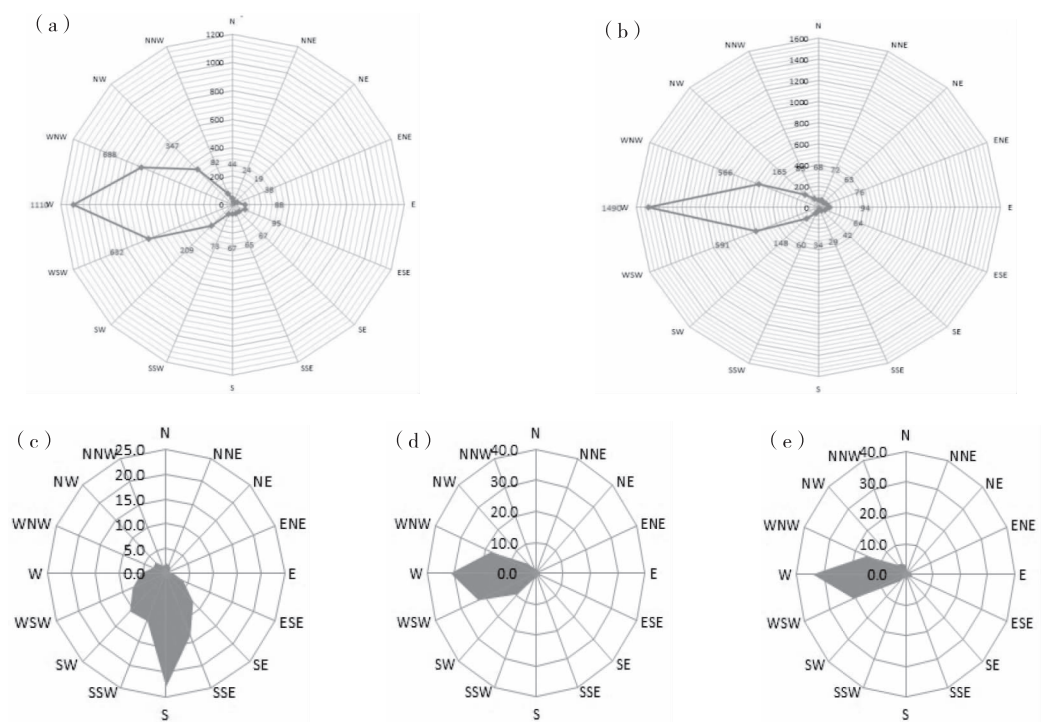


图 4 云南腾冲站(a. 700 hPa,b. 500 hPa)和思茅站(c. 850 hPa,d. 700 hPa,e. 500 hPa)高空风玫瑰图
Fig. 4 Upper wind roses at Tengchong (a. 700 hPa,b. 500 hPa) and Simao (c. 850 hPa,d. 700 hPa,e. 500 hPa) Sounding Stations in Yunnan

表 1 云南 16 个代表站年静风和最多风向频率(单位:%)

Tab. 1 Annual calm winds and maximum wind direction frequencies of 16 representative stations in Yunnan(unit:%)

站名	昆明	昭通	曲靖	文山	蒙自	玉溪	思茅	景洪	临沧	芒市	保山	楚雄	大理	六库	丽江	香格里拉
静风频率	31	36	25	28	26	45	55	68	55	46	52	40	20	50	22	36
最多风向	SW	NNE	S	SE	SSE	SW	SSW	E	N	SW	SW	SW	E	SSE	W	S
频率	16	17	18	25	23	16	7	5	4	7	8	13	8	8	15	13

2.4 高山梯度风

云南山地广袤,地形地貌复杂,气象站一般位于县城附近的坝子(盆地)中或丘陵地带。为了佐证气象站风资料演变规律的真实性,挑选昆明(省会城市)、蒙自(滇南中心城市)周边 2 个高山风电场测风塔梯度风观测资料进行验证。昆明文笔山风电场位于昆明市西山区与安宁市交界处的高山台地上,海拔 2100~2500 m。风电场设有 7 个测风塔(塔高 70 m),本文采用 0079 号塔(102°31'E,24°59'N,海拔 2393 m)观测资料,资料年限 2011 年 9 月 21 日—2012 年 9 月 20 日;蒙自朵古风电场位于红河州蒙自市区以东的高山台地边缘上,海拔 2000~2200 m。风电场设有 2 个测风塔(塔高 70 m),本文采用 1481 号塔(103°26'E,23°30'N,海拔 2205 m)观测资料,资料年限 2009 年 5 月 1 日—2010 年 4 月 30 日。

由图 5 可知,昆明文笔山风电场 0079 号测风塔

10 m 高度年最多盛行风向分别为西南(SW)、西西南(WSW)、东北(NE)、南西南(SSW),频率分别为 48.3%、21.4%、6.2%、4.2%;70 m 高度年最多盛行风向分别为西南(SW)、南西南(SSW)、西西南(WSW)、东东北(ENE),频率分别为 35.5%、17.9%、15.5%、8.6%。由图 6 可知,蒙自朵古风电场 1481 号测风塔 10 m 高度年最多盛行风向分别为南西南(SSW)、东东南(ESE)、南(S)、东南(SE),频率分别为 19.6%、13.1%、10.5%、10.1%;70 m 高度年最多盛行风向分别为西西南(WSW)、西南(SW)、南西南(SSW)、南(S),频率分别为 19.2%、14.2%、12.2%、9.0%。可见,2 个高山风电场不同高度的盛行风向以西南风为主。

由图 7 可知,昆明文笔山风电场 0079 号测风塔各高度风速月际变化明显,呈现冬春季大、夏秋季小的全年“两季”风特征,2 月最大,8 月最小,10 m、30 m、50 m、70 m 风速随高度递增,低层增加尤为显

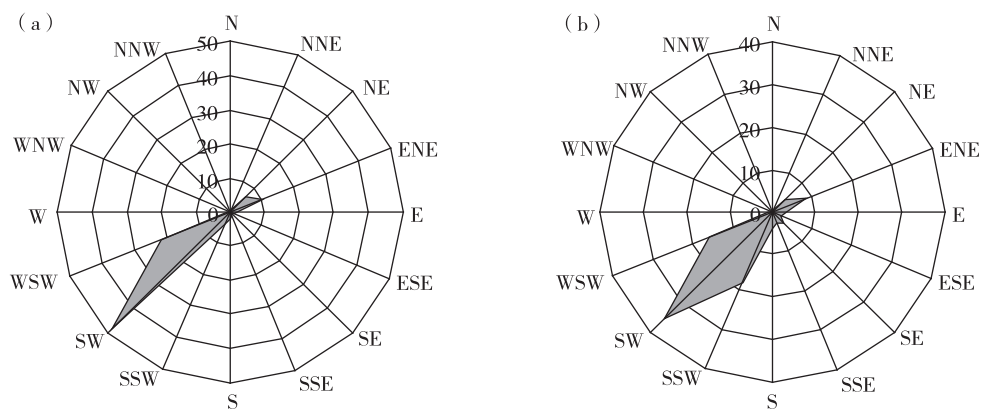


图 5 昆明文笔山风电场 0079 号测风塔风玫瑰图(a. 10 m, b. 70 m)

Fig. 5 Wind roses of No. 0079 wind tower at Wenbishi wind power plants in Kunming(a. 10 m, b. 70 m)

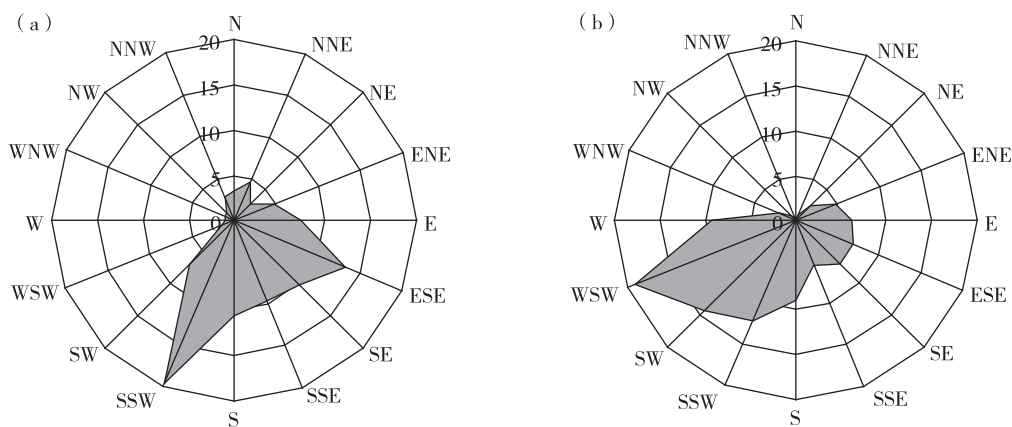


图 6 蒙自朵古风电场 1481 号测风塔风玫瑰图(a. 10 m, b. 70 m)

Fig. 6 Wind roses of No. 1481 wind tower at Duogu wind power plants in Mengzi(a. 10 m, b. 70 m)

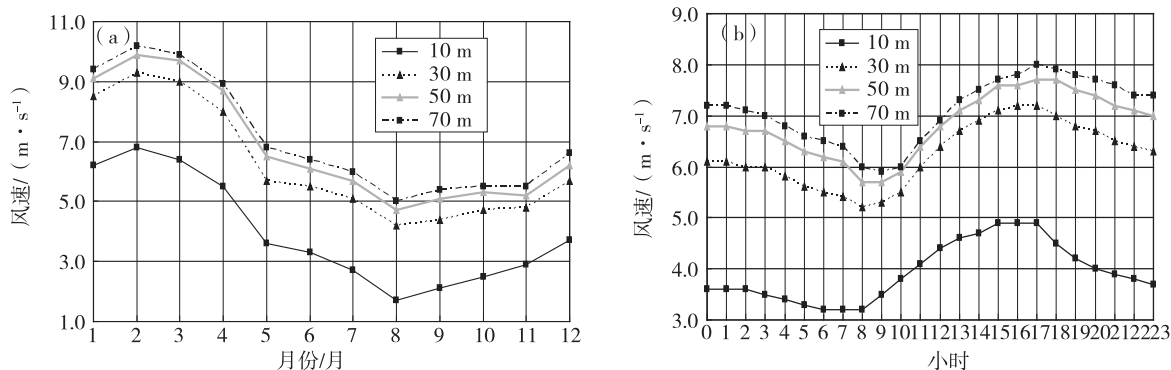


图 7 昆明文笔山风电场 0079 号测风塔各高度风速月际变化(a)及日变化(b)

Fig. 7 Monthly variation (a) and diurnal variation (b) of wind speed on different heights of No. 0079 wind tower at Wenbishi wind power plants in Kunming

著。各高度风速具有明显的日变化特征,07—08 时风速最小,15—16 时风速最大,随高度的递增,风速最小值与最大值出现时段有 1~2 h 的“滞后”现象。蒙自朵古风电场 1481 号测风塔也有类似的梯度风速变化(图略)。

2.5 近地面大气风场

云南属我国“多风”的省份,是我国长江以南除沿海地区外风速最大的省区之一^[19]。全省 125 个国家级气象站年平均风速 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,空间分布差异大^[20-21]。由图 8 可知,云南风速最大的太华山站

年均风速 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小的景洪站 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。云南年平均风速的分布特点为北部大于南部, 滇中及以北地区大于滇西南; 东部大于西部, 以哀牢山脉为界, 以东地区风速较大, 一般在 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以西地区风速较小, 除少数测站外, 一般不超过 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 海拔较高地区风速大, 海拔较低地区风速小。坝区和山谷地带风速较小, 高山顶部风速较大。

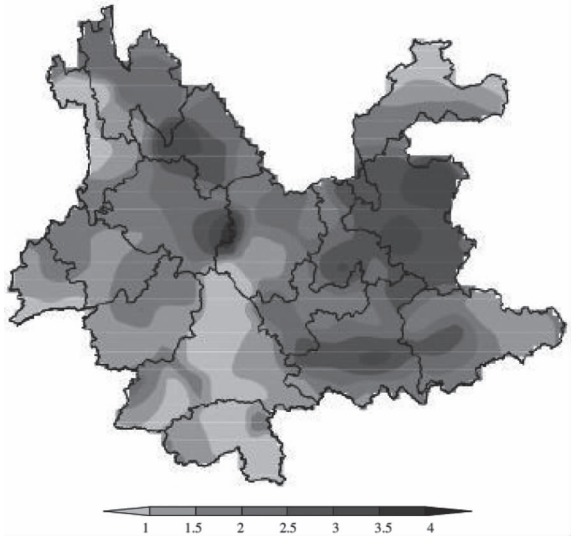


图8 云南年平均地面风速分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 8 Annual mean surface wind speed distribution in Yunnan(unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

云南较大风速区主要分布在丽江市、大理州、楚雄州、昆明市、红河州中北部、曲靖市等地, 年平均风速 $2.0 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 丽江、剑川、大姚、砚山、太华山等站年平均风速在 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。风速较小区主要集中在西双版纳州、普洱市、红河州南部、德宏州、怒江州等地及昭通市的河谷地带, 年平均风速在 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 景东、福贡、景洪、西盟、瑞丽等站年平均风速不足 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其他地区年平均风速 $1.5 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。云南风速具有明显的季节变化特征。1—5月是大风季, 全省平均风速在 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 风速最大的3月为 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 8—11月是小风季, 平均风速在 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 风速最小的8月仅为 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。云南风速有显著的日变化特征。风速午间大、夜间小, 06—08时最小, 16—17时最大, 一天中风速最大值与最小值可相差2.7倍。

3 大气稳定层结

大气污染物一般主要聚集在距地面 $1 \sim 1.5 \text{ km}$ 的边界层内。以昆明代表滇中地区, 选取 2013—

2020 年昆明探空站 ($25^{\circ}00' \text{ N}$, $102^{\circ}39' \text{ E}$, 海拔 1888.1 m) 08 时、20 时探空资料, 绘制近地面气温垂直廓线图。由图 9 可知, 昆明 08 时气温从地面到 100 m 之间存在逆温层, 气温随高度增加而上升。全年、春季、秋季气温垂直分布均表现为 60 m 附近最高, 冬季升至 70 m , 冬季逆温现象突出, 夏季偏弱。全年变化曲线从地面的 12.9°C , 上升至 60 m 的 13.6°C , 增温 0.7°C ; 冬季变化曲线最明显, 从地面的 6.3°C , 上升至 70 m 的 7.8°C , 增温 1.5°C 。20 时气温随高度的垂直分布情况(图略)与 08 时类似, 全年及各季节变化曲线均表现为从地面至 70 m 高度出现逆温。

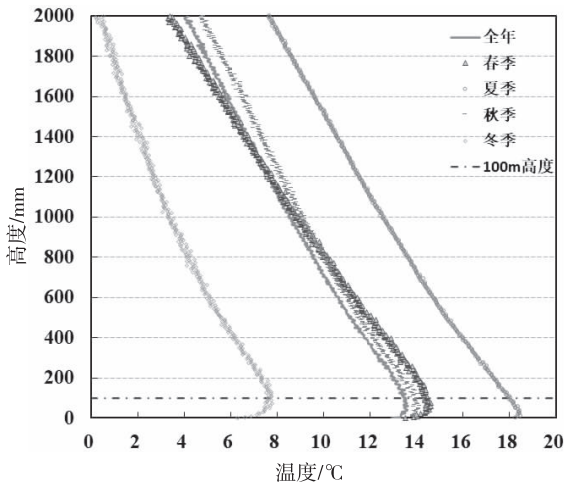


图9 昆明探空站 08 时大气温度垂直廓线
Fig. 9 Vertical profile of atmospheric temperature at 08:00 in Kunming sounding station

分析 2013—2020 年昆明探空资料发现, 08 时逆温频率为 33.6%, 20 时逆温频率为 14%, 08 时明显高于 20 时, 表明昆明清晨大气稳定层结高于傍晚, 有利于大气静稳。逆温的月际变化明显, 08 时逆温频率高峰期出现在 1—3 月, 2 月最高 (65.5%), 低谷期出现在 6—8 月, 6 月最低 (2.1%); 20 时逆温频率高峰期出现在 10—12 月, 11 月最高 (48.8%), 低谷期出现在 6—8 月, 6 月最低 (0.8%)。表明昆明秋冬春 3 季逆温频率高, 夏季逆温频率低, 冬半年静稳天气多, 夏半年静稳天气少。08 时逆温层平均厚度 214 m (在 $155 \sim 296 \text{ m}$ 之间变化), 20 时逆温层平均厚度 88 m (在 $57 \sim 157 \text{ m}$ 之间变化); 冬春季逆温层厚度大 (12 月最大为 438 m), 夏秋季逆温层厚度薄 (6 月最小为 63 m); 08 时平均逆温强度为 $2.9^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$, 20 时平均逆温强度为 $3.4^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 。这与段玮等^[22]对 2004—2006 年昆明探空资料分析得出的结论基本相似。计算表明, 昆明全年空气质量指数 (AQI) 与地面风速呈负

相关,冬春季相关系数为 -0.24 ,夏秋季为 -0.22 。

4 云南季风气候与空气质量

由图 10 看出,云南环境空气质量较好,全年优良天数比例在 98% 以上,每年 3—4 月为污染天气出现的较多时段。2015—2018 年全省出现轻度及以上污染天数分别为 158 d、101 d、107 d、63 d,超标天数主要发生在 12 月和 1—5 月,以 3—4 月最为集

中。2015 年超标天数主要集中在 1—5 月,其中 3 月最多;2016 年主要集中在 1—6 月和 12 月;2017 年主要集中在 1—5 月和 12 月;2018 年主要集中在 2—4 月。1—5 月云南环境空气污染主要出现在滇西南、滇东南、滇中地区,尤其以滇西南的景洪、普洱、临沧,滇东南的蒙自,滇中的玉溪、昆明等城市较为严重。

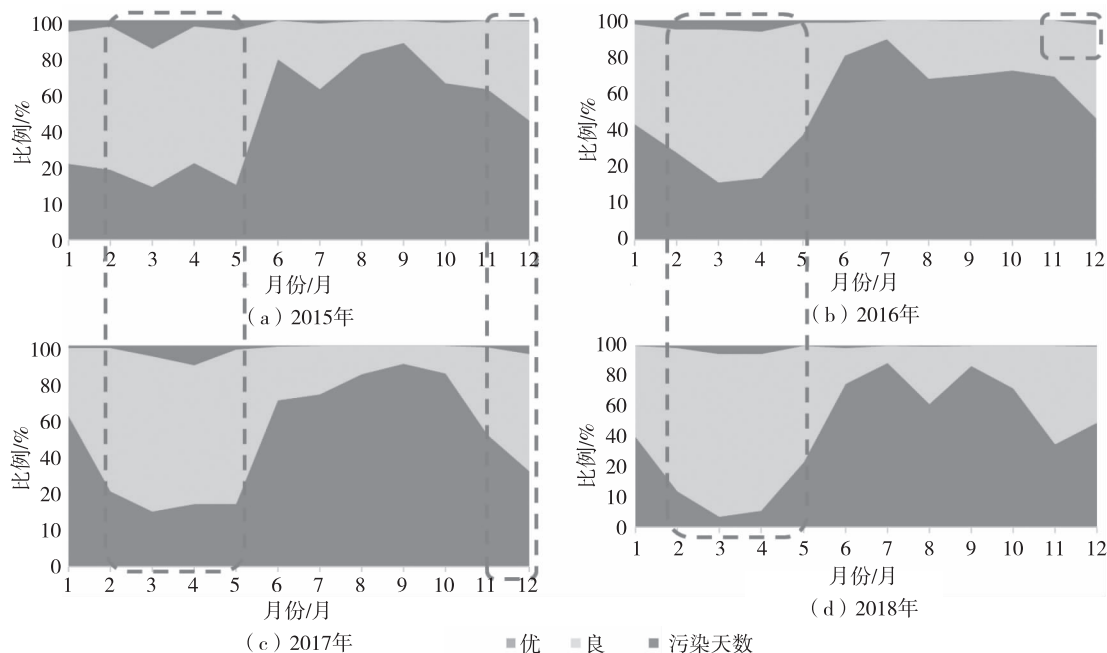


图 10 2015—2018 年云南空气质量逐月演变情况(单位:%)

Fig. 10 Monthly variability of air quality percentage in Yunnan from 2015 to 2018(unit:%)

近年来,云南空气质量呈现出以细颗粒物和臭氧为主的复合型、区域型污染态势。全省超标天数中,首要污染物以细颗粒物和臭氧为主,2015—2019 年 1—5 月首要污染物为细颗粒物的占比分别为 65.5%、80.0%、52.4%、54.7%、41.1%,臭氧的占比分别为 30.9%、18.8%、47.6%、45.3%、58.9%,臭氧污染已逐渐取代细颗粒物成为影响云南空气质量的首要污染物。

云南总体上属亚热带高原季风气候,降水丰沛,干湿分明,有明显的干季(11 月—次年 4 月)和雨季(5—10 月)。常年对流层中低空盛行偏西风,但干季和雨季的偏西风气团属性不同。干季西风频率大,主要来自西亚、南亚热带大陆地区,气团干暖,这是云南的风季和高温时段,全年风速最大和高温时段主要出现在 3—5 月;雨季西南风频率比冬半年偏多 10%~20%,气流主要来自热带印度洋和孟加拉湾,气团暖湿。冬春季节风干物燥,夏秋季节湿润多雨。随着每年西南季风的爆发,云南雨季

于 5 月中下旬开始,基本上与泰国、缅甸、老挝等东南亚国家同步或稍晚。云南高原山区广袤,冬半年昼夜温差大,夜间至清晨风小高湿,易形成静稳天气,不利于空气污染物的扩散。加之干季,尤其是春季,南亚、东南亚地区生物质燃烧多发,在西南风作用下,有利于污染物向滇西、滇西南、滇东南、滇中地区扩散。云南的季风特征造成了云南空气污染具有明显的干湿季分布特点和滞后性,6—11 月为轻污染季节,12 月—次年 5 月为污染较重季节,主要污染物浓度干季高于雨季 1.4 倍。

小风、高湿、逆温等气象条件造成污染物堆积,引发空气污染事件。云南空气质量具有夏秋季好、冬春季差的季节性演变规律。气象条件对云南空气质量的影响主要表现为 4 种类型。(1)冬春静稳型。冬春季受弱冷空气影响,昆明准静止锋易带来静稳天气,特别是滇东北和滇东地区较为明显。滇南地区的冬春季山地辐射逆温也易出现静稳天气。(2)春季传输型。春季受东南亚生物质燃烧影响,

在西南风引导下,造成境外燃烧产生的污染物对云南的外源传输污染。(3)气候影响型。云南地处亚热带地区,春季气温回升快,干暖少云,光照强,易引起臭氧浓度超标。雨季受云层遮挡和雨水冲刷,污染物浓度降低。(4)春节影响型。受传统习俗影

响,春节期间烟花爆竹集中燃放,易引起短时大气污染。作为例证,2019年3—5月云南发生数起空气质量超标污染事件,主要原因就是频繁出现静稳天气导致的(见表2)。

表2 2019年3—5月云南4个探空站08时静稳天气情况

Tab. 2 Static stable weather conditions of 4 sounding stations in Yunnan at 08:00 from March to May 2019

站点	边界层逆温		弱风(风速 $\leq 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)		高湿相对湿度($\geq 80\%$)	
	日数/d	频率/%	日数/d	频率/%	日数/d	频率/%
昆明	67	73	53	58	23	25
思茅	79	86	79	86	27	29
蒙自	69	75	32	35	36	39
腾冲	83	90	79	86	78	85

在高低空风场调制下,云南在冬春季节存在2条空气污染传输通道(图略)。第1条为西南通道(主要发生在春季,南支槽及西南气流影响),表现为2条子道,1条为自缅甸北部影响滇西南的德宏、保山、临沧、怒江等地;另1条为自缅甸东北部和老挝北部影响滇南的西双版纳、普洱,势力较强时可延伸影响至红河、玉溪、楚雄、昆明、曲靖等地。第2条为东北通道(主要发生在冬季,冷空气及东北气流影响),表现为2条子道,1条自四川盆地和贵州西北部影响滇东北的昭通、曲靖,势力较强时可延伸影响到昆明等地;另1条为东南回流通道,自广西西部和越南北部影响文山,势力较强时可在西南气流配合下,扩展影响至红河、玉溪、曲靖等地。

5 结论

(1)云南对流层中低层大气风场常年盛行偏西风气流,风向稳定,尤以西南风最多,冬—春—夏—秋四季风场变化特征明显。由冬至秋,850 hPa盛行风向演变次序为“西南风—西风—西南风—东南风”、700 hPa为“西南风—西风—西风—西南风”、500 hPa为“西风—西风—偏南风—西南风”。随高度增加,偏西风和偏南风分量增加。

(2)高空探测表明,腾冲站700 hPa、500 hPa年盛行风向以西风为主,频率为30.4%和40.9%。随着高度增加,腾冲站主导西风频率增加。思茅站850 hPa年盛行风向以南风为主,频率为22.8%,700 hPa、500 hPa以西风为主,频率为31.3%和34.0%。随高度增加,思茅站主导风频率由南风演变为西风并略有增加。

(3)云南除滇东北、滇东南和局地地形影响外,大部分地区全年近地面以盛行西南风为主,盛行风向稳定。高山风电场测风资料表明,山区全年盛行

风向以西南风为主。

(4)云南近地面年平均风速 $1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,时空分布差异大。北部大于南部、东部大于西部、高海拔大于低海拔;冬春风大,1—5月为大风季,3月最大。夏秋季风小,8—11月为小风季,8月最小;风速日变化特征显著,午间大、夜间小。

(5)昆明地区大气边界层存在逆温现象,冬季逆温突出,夏季逆温微弱。秋冬春3季逆温频率高,夏季逆温频率低。08时逆温频率33.6%,20时逆温频率14%;逆温层平均厚度88~214 m;逆温平均强度 $2.9\sim 3.4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

(6)云南空气污染具有明显的干湿季分布特点,1—5月为主要污染时段。云南冬春季节存在西南和东北2条空气污染传输通道。

参考文献

[1] 彭应登,钟良,刘翠玲. 北京PM_{2.5}污染特点及防治途径[J]. 节能与环保,2012(3):52-54.

[2] 姜润月,闫亚琛,李海蓉. 中国2013年城市大气污染现状及探索性空间数据分析[J]. 安全与环境学报,2016,16(2):352-357.

[3] 王小伟,王卫,单永娟,等. 我国经济发展与大气污染物排放的关系研究—基于全国第一次污染源普查数据的实证分析[J]. 生态经济,2016,32(5):165-169.

[4] 邹琼,白云辉,夏羽,等. 云南省大气环境保护问题和对策[J]. 资源节约与环保,2020(7):59-61.

[5] 云南省生态环境厅. 2021年云南省生态环境状况公报[EB/OL]. (2022-06-05)[2023-01-08]. https://www.yn.gov.cn/ztgg/jdbyyzzsjzydfxfqj/gcls/yw/202206/t20220605_242866.html.

[6] 郭荣芬,黎成超,邓聪,等. “2015.3.22”云南大范围空气污染事件气象成因分析[J]. 灾害学,2017,32(3):91-95.

[7] 鲁亚斌,郭荣芬,周云,等. 昆明空气污染物等级与天气背景的关系[J]. 云南环境科学,2004,23(4):34-36.

(下转第23页)

从图 4d~4f 中对 RD 分析可知:图 4d 大部分集中在 9%~16% 之间,平均值 12.856%;图 4e 集中在 1%~4%,平均值 2.646%;图 4f 集中在 11%~17% 范围,平均值 14.655%。TOZ_25km 与 OM-TO3e 的 3 次验证数据相对偏差值表明,TOZ 多项式插值与 OMI 臭氧总量较为吻合,这与钟美等^[7]的研究结果相近。

图 4 展示了 3 次验证数据在插值前后的 RD 空间分布特征的对比,从图和数据分析来看,插值前后的 RD 变化和分布较为一致,平均值接近,充分说明多元回归插值方法具有较好的可靠性。

4 总结

本文通过 FY-3B TOU 臭氧总量与短波辐射、数字高程之间的关系动态建立一元回归、多元回归模型,再通过多元回归模型对 TOU 臭氧总量进行高分辨率插值,并对插值数据开展验证。验证结果表明,多元回归插值方法具有较好的可用性。算法分步阐述,并采用实验数据逐步计算分析,使读者更加理解算法过程。同时,算法采用程序设计完成,解决了人工无法完成的计算过程。插值方法考虑了要素间的相互影响和相关性,为类似的数据插值算法提供参考和借鉴。

参考文献

[1] 秦大河. 大气臭氧层和臭氧洞[M]. 北京:气象出版社,2003.

(上接第 9 页)

- [8] 李长吉,沈鹰. 云南省污染气候区划[J]. 环境科学研究,1993,6(5):23-28.
- [9] 李浪,白慧,方获,等. 贵州省空气污染过程的大气环流特征及分型研究[J]. 中低纬山地气象,2021,45(5):34-41.
- [10] 张人禾,李强,张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学·地球科学,2014,44(1):31-40.
- [11] 蒋婉婷,谢汶静,王碧菡,等. 2014-2016 年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. 环境科学学报,2019,39(1):180-188.
- [12] 吴润,蒋维楣,陈新梅,等. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究[J]. 环境科学,2004,25(2):1-6.
- [13] 何宇凡. 红河州近年来环境空气质量状况分析[J]. 环境科学导刊,2021,40(6):42-45.
- [14] 王健,邱飞,向峰,等. 景洪市环境空气质量状况及污染特征分析[J]. 环境科学导刊,2018,37(增刊):58-62.

- [2] 江芳. 紫外散射反演臭氧总量的若干问题研究[D]. 北京:中科院空间科学与应用研究中心,2007.
- [3] 李辉. 用卫星资料反演臭氧总量的研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2003.
- [4] 周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一)[M]. 北京:气象出版社,1996.
- [5] 郭世昌,琚建华,常有礼,等. 大气臭氧变化及其气候生态效应[M]. 北京:气象出版社,2002.
- [6] 潘亮. 利用卫星资料反演臭氧含量及进行气溶胶分类[D]. 南京:南京信息工程大学,2007.
- [7] 钟美,皮波,余勇,等. FY-3B TOU 与 Aura OMI 卫星臭氧总量产品的比对分析[J]. 气象研究与应用,2021,42(2):31-32.
- [8] 杨忠东,卢乃锰,施进明,等. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述[J]. 气象科技进展,2013,3(4):6-12.
- [9] 宋佳颖,刘旻霞,孙瑞弟,等. 基于 OMI 数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究[J]. 环境科学学报,2020,40(2):438-449.
- [10] 卫佩茹,邵天杰,黄小刚,等. 2015—2018 年东北地区臭氧浓度时空变化特征及其驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(8):988-997.
- [11] 杨春燕,陈圣波,汪自军. 大气辐射在臭氧反演中的应用[J]. 安徽农业科学,2010,38(6):3306-3307.
- [12] WANG W H, FLYNN L, ZHANG X Y, et al. Cross-Calibration of the Total Ozone Unit(TOU) with the Ozone Monitoring Instrument(OMI) and SBUV/2 for environmental applications[J]. Advance in Meteorological Science and Technology,2013,3(4):97-107.
- [13] 段果,钟若媚. 2007—2014 年中国区域地表辐射特征研究[J]. 气候变化研究快报,2020,9(4):285-298.

- [15] 王占良,段燕楠,杨健. 昆明低空大气温度层结特征与空气质量的 Logistic 判别模型[J]. 环境科学导刊,2019,38(6):1-7.
- [16] 杨家康,单韬,张万诚. 云南低纬高原地区大气污染与逆温强度关系研究[J]. 灾害学,2021,36(4):27-53.
- [17] 字冉,孔震,明蕊,等. 2020 年西双版纳持续重霾天气成因和来源分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(5):10-18.
- [18] 王宇. 云南农业气候图集[M]. 北京:气象出版社,1990:117-120.
- [19] 郑国光,矫梅燕,丁一汇,等. 中国气候[M]. 北京:气象出版社,2019:46-50.
- [20] 朱勇,王学锋,范立张,等. 云南省风能资源及其开发利用[M]. 北京:气象出版社,2013:17-30.
- [21] 段长春,陶云. 1961-2008 年云南平均风速的时空变化特征[J]. 云南气象,2013,33(3):7-13.
- [22] 段玮,万石云,段旭. 昆明坝子边界层贴地逆温特征及其成因[J]. 云南地理环境研究,2014,26(4):1-6.