

康定机场近地层航空气象特征分析*

吴俊杰, 段 炼, 黄仪芳

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

摘 要: 通过分析康定机场 2010 年 3 月, 5-7 月及 9 月的自动观测站资料, 初步了解了康定机场气象要素的月及日变化特征。结果表明: 3 月机场高空受强劲的西风气流控制, 场区干冷。5 月中下旬起, 随着高空西风迅速减弱, 场区进入雨季, 日降水峰值出现在 17-23 时。2010 年 5-9 月间的日降水量存在明显地 30-50 天周期振荡, 其与孟加拉湾低空纬向风的低频振荡同步。受雨季云量的影响, 5-7 月温度和气压的日较差小于 3 月。机场偏西侧风主要发生于 3-5 月的 14 时左右, 此时气温达到一天中的最大值, 地面乱流加强导致高空强西风动量下传引起近地面出现局地大风。偏东侧风多发生于夏季晴天, 在日气温由峰值开始下降时即开始出现, 至日落前后达到最强盛。机场仅在 3 月的 15 时左右会受强偏北顺风的影响。

关键词: 康定机场; 近地层; 航空气象特征; 风场

1 引言

青藏高原可以通过动力和热力作用对我国乃至全球气候产生影响。如冬季北半球中高纬度西风带受青藏高原大地形的作用分为南北两支^[1], 其在下游汇合形成了强大的东亚急流^[2], 能够对亚洲冬季气候产生直接影响; 高原抬升的加热导致对流层上层大气增暖以及季风区经向温度梯度的反转, 是高原地区行星西风带强烈变化和位移^[3]以及亚洲夏季风爆发的重要原因^[4-7]。而高原的动力和热力作用则是通过近地层和边界层逐渐影响自由大气的, 因此, 对高原大气近地层的观测研究显得尤为重要^[8,9]。

高原地区大气透明度好^[10], 总辐射远大于平原地区^[11], 加之高原复杂地形地貌所引起的非均匀强迫使高原边界层结构非常复杂, 盛行多种局地环流。邹捍等^[12]的研究揭示了喜马拉雅山地区绒布河谷中局地环流系统是强烈的太阳辐射在复杂下垫面上形成的热动力复合环流, 是由“山谷风”、“冰川风”和“坡风”相互耦合的产物。同为高原河谷地形, 鲁朗河谷存在较为显著的山谷风环流, 但年平均风速仅 1.7m/s ^[13]。对高原东南部纳木错湖地区的模拟研究表明, 湖风在昼间和夜间分别与谷风和山风叠加以及边界层特征的昼夜差异是导致该地中小尺度天气剧烈变化的重要原因^[14]。研究还表明, 随着高原地区干湿季节的转换, 亚

作者简介: 吴俊杰 (1981 年—), 男, 甘肃, 讲师, 高原山地气象

洲季风活动也可以通过改变太阳辐射和地表状况影响到高原地区的局地环流^[15-16]。由此可见，高原不同地区受大尺度环流差异和非均匀复杂下垫面的共同影响，其近地层微气象特征差异显著。这也使得高原机场易出现风切变^[17]、大侧风等危及飞行安全的复杂天气，目前国内尚无对高原机场航空气象特点的系统研究，了解高原机场近地层气象要素变化特点有助于高原机场航空气象保障水平的提升，对提高航空公司的安全水平和经济效益都有重要意义。

2 康定机场及数据介绍

康定机场海拔 4280m，为世界第二高海拔机场，地处青藏高原东部地理分界线的折多山西北侧，机场跑道与区内山脉平行，为西北—东南走向（图 1），其北、西、南侧被冲沟深切切割，高差在 30m 以上，场区总体地势为东高西低，北缓南陡^[18]。机场东北部有大雪山山脉的第二高峰亚拉神山，海拔在 5820 米以上，终年为积雪覆盖，跑道南端延长线正对折多山山口。

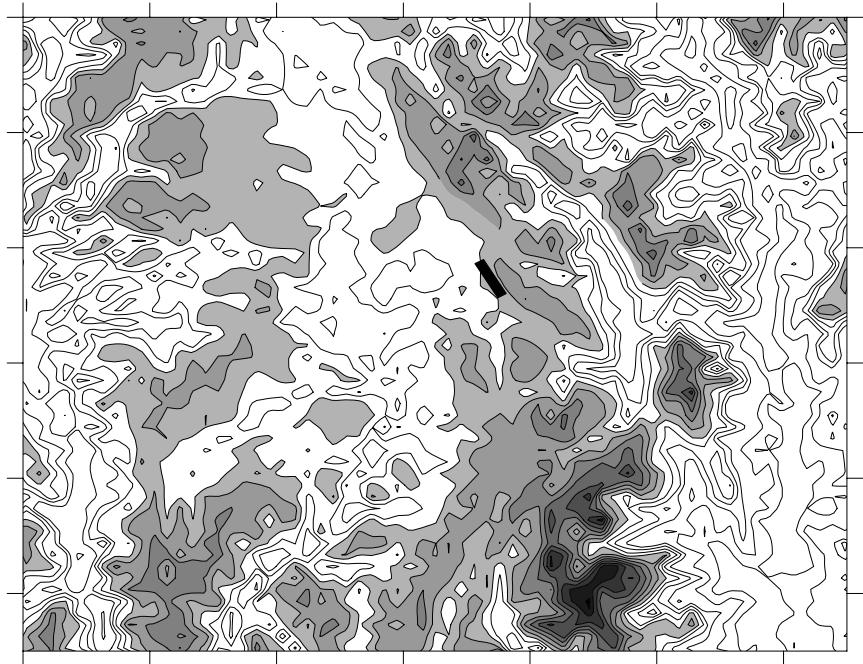


图 1 康定机场周边地形，机场用黑色方框标出，33 和 15 为跑道两端的编号

机场在跑道两端布设有两部自动气象观测站，观测内容包括本站气压、温度、露点温度、相对湿度、10m 高度处风及（3 小时和 24 小时累积）降水量，采样频率为每分钟一次。由于机场开航时间较短及仪器故障原因，目前仅获得机场 2010 年 3 月、5-7 月及 9 月较为完整的观测资料。由高原地区大尺度环流调整的时间来看^[3,19]，这些月份能够代表机场干季、湿季及过渡季节的变化特征。根据机场气象及净空条件，飞机由北向南方向为主降方向（15 号跑道，另外一个起降方向称为 33 号跑道）。由于飞机起降阶段遇到侧风和顺风会使飞机出

现偏航、滚转、升力下降、滑跑距离增大等现象^[20]，按照机场运行规定，机场（垂直于跑道的）侧风和（平行于跑道的）顺风分别超过 8m/s 和 4m/s 时飞机不能起降，为了讨论方便，文中将垂直于跑道的风分别称为偏西侧风和偏东侧风，平行于跑道的风分别称为偏南顺风和偏北顺风。为了反映大尺度环流场的季节调整，文章还用到了 NCEP/NCAR 提供的逐日三维风场及比湿资料。

3 近地层气象要素的月变化特征

从大尺度环流特征来看（图 2a），2010 年 1-4 月机场上空受强劲南支急流控制，月平均纬向风速在 10m/s 以上，1 月平均风速更高达 17.5m/s。从 5 月起，南支急流迅速减弱北退标志着中高纬大气环流系统减弱，机场上空纬向风也随之迅速减弱。与之对应的是高原夏季季风爆发并向北推进，机场比湿迅速增大。至 7 月，机场上空纬向风为一年中最低值，仅为 1m/s，湿度却达到了一年最大值，约为 1 月的 8 倍（各层积分结果类似）。10 月以后，随着南支急流再度加强，机场上空纬向风再次增大，空气湿度则迅速减小。与纬向风变化类似，6-10 月间机场上空为上升运动区，配合有利的水热条件，场区多降水，5 月和 11 月为过渡月份，垂直运动接近零值，其余月份为下沉运动，均不利于降水的发生。由以上分析可以看出 2010 年高原地区大尺度环流的调整体现出典型高原季风特征^[3]。

近地层各气象要素的季节变化与大尺度环流调整相一致，3 月机场平均气温和露点温度分别为 -1.6°C 和 -8.9°C ，相对湿度为 62.3%（表 1），为有记录月份最低值，场区天气干冷。由春至夏，青藏高原逐渐由冷源转变为热源，高原季风爆发，机场开始受到低纬偏南暖湿空气影响，5 月起，机场平均温度和露点温度迅速上升。随着暖湿气流的增强，露点温度升高的速率要高于温度的增长率，温度露点差有减小的趋势，6 月的相对湿度达到了有记录月份的最高值，为 81.1%。随着高原季风的减弱南撤，9 月的温度和露点温度均开始回落。结合以上温湿变化特征来看，康定机场 3 月仅有零星降水（图 2b），从 5 月中下旬开始，降水明显增多，6-7 月的降水量强度大且降水时间密集，9 月降水略有减少。观测时段内最大日降水量达 27.4mm，其中达到大雨量级的有 4 日，均集中于 6 月和 7 月；有 25 日达到中雨量级，其中有 19 日发生于 6 月和 7 月。此外，图 2b 可以清楚的看到，5-7 月及 9 月机场日累积降水量存在明显的周期振荡特征，功率谱分析表明 30-50 天的振荡周期通过了信度检验，滤波后的降水量方差能够解释原始降水量方差的 25%左右。这与人研究发现的夏季青藏高原东部地区是低频振荡最为活跃地区，存在明显的季节内振荡的结论相一致^[21]。相关分析表明该地的低频振荡与孟加拉湾低空风场低频活动联系紧密，图 2b 可以看到，当孟加拉湾东北部 850 hPa 纬向西风加强（或减弱）对应康定机场降水增强（或减弱），二者相关系数达 0.31

左右，通过了 99%的信度检验。由水汽通量分析可以看到（图略），来自于阿拉伯海和孟加拉湾的水汽沿孟加拉湾东北部的西南水汽通道被地形抬升后由喜马拉雅山东段的山口涌入该地，为该地提供了充沛的水汽^[22]，该西风水汽通量的低频变化对康定机场降水低频活动有重要调制作用。

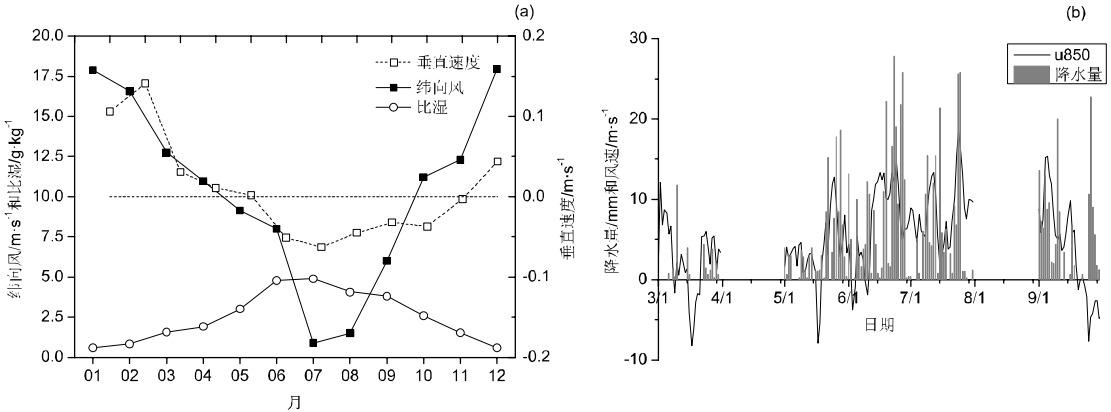


图2 （a）2010年机场上空 600hPa 逐月的垂直速度（空心框）、纬向风（实心框）及比湿（空心圆）。（b）康定机场观测时段内的日降水量（柱状）及同时期孟加拉湾（90°E，15°N）的 850hPa 纬向风的演变情况

表 1 2010 年月平均的气温、露点温度、相对湿度、风速及本站气压

月份	温度/℃	露点温度/℃	相对湿度/%	风速/m · s ⁻¹	本站气压/hPa
3 月	-1.6	-8.9	62.3	2.7	606.4
5 月	5.6	-0.3	69.3	3.0	608.1
6 月	6.8	3.6	81.1	3.0	609.4
7 月	9.6	5.9	79.5	2.8	611.5
9 月	6.7	3.1	79.0	2.3	612.4

从月平均风速来看（表 1），近地层风与高空风的季节变化特征不一致，5-6 月近地层风速反而最大，为 3m/s，9 月最小，为 2.3m/s，反映出康定机场近地层风更多受局地热力环流影响。机场月平均气压的最高值和次高值分别出现在 9 月（612.4hPa）和 7 月（611.5hPa），最低值则出现在 3 月（606.4hPa），符合高山型测站地面气压的年变化特征。康定机场近地层增温（降温），使高原低层被低（高）压控制，但康定机场近地层位于对流层中层，行星加热引起的增温（降温）可使对流层中上层气压升高（降低），两种效应相互叠加，会使机场出现由春到夏，温度升高，气压也随之升高的现象。由于行星加热场和地面加热场的变化不是同步的，因此最高气温与最高气压的月份并不是一一对应的^[3]。

4 近地层气象要素的日变化特征

4.1 温度

康定机场各月气温逐时的变化趋势一致，呈单峰结构（图 3a）。除 9 月平均日最高气温出现时间推后至 15 时外，其它各月平均日最高气温均于 14 时出现。各月最低气温出现时间则有明显差异，3 月和 9 月平均的日最低气温出现在 7 时。随着日出时间的提前，5 月和 7 月日最低气温提前至 6 时出现。6 月的最低气温的出现时间进一步提前至 5 时。观测月份中的最高气温和最低气温分别为 7 月的 18.9℃ 和 3 月的 -14.6℃（表 2）。总体来看，机场具有升温快，降温慢的特点。各月平均的日较差最大值出现于 3 月（10.5℃），最小值为 7 月（8.4℃），这是由于 3 月场区天气干冷，多为晴天，白天日照充足，升温较快，而夜间由于地面强烈长波辐射，导致气温迅速降低，使昼夜温差增大。进入夏季后，高原地区云量增多，白天地面接收到的太阳辐射减少，不利于气温的迅速升高，夜间由于大气逆辐射增强，减缓了降温速率，从而减小了该地昼夜温差。

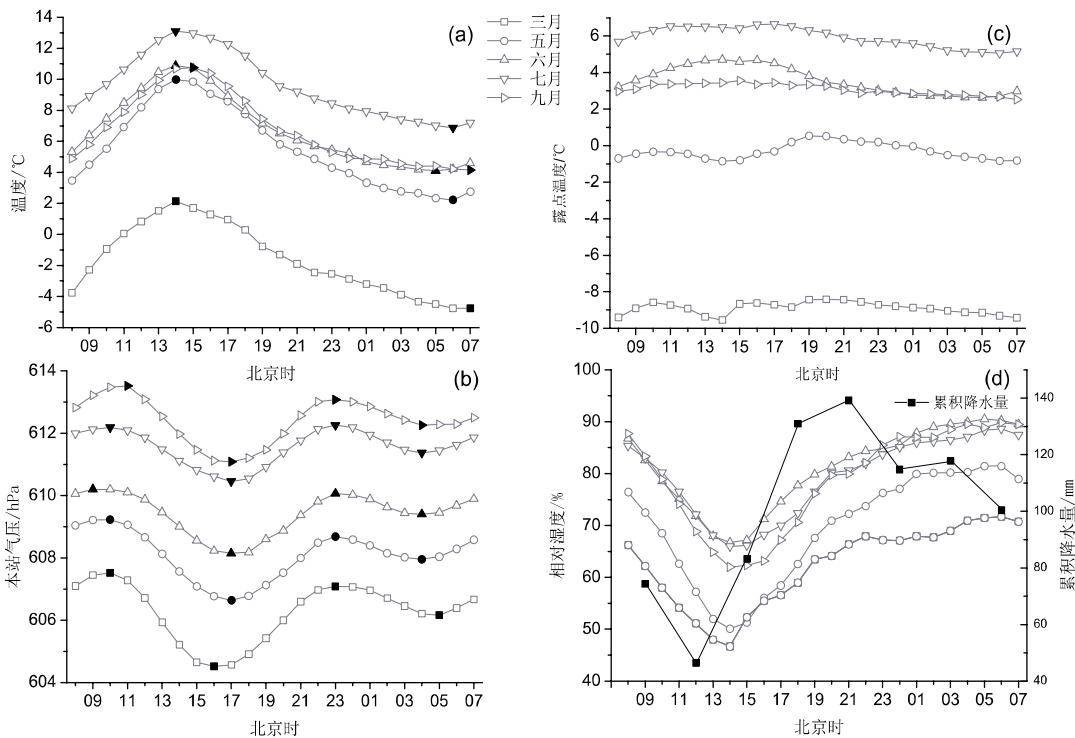


图 3 康定机场各月气象要素的日变化特征：(a) 温度，(b) 本站气压，(c) 露点温度及相对湿度和 5-9 月期间累积的 3 小时降水量 (d)。(a) 和 (b) 图中的实心点标出了高值和低值点。

表 2 2010 年各月最高、最低气温、月平均的气温及气压日较差

月份	最高气温/℃	最低气温/℃	月平均气温日 较差/℃	月平均气压日 较差/hPa
3 月	12.5	-14.6	10.5	3.0
5 月	16.2	-2.9	10.1	2.6
6 月	18.2	-2.3	9.6	2.1
7 月	18.9	3	8.4	1.7
9 月	16.1	-0.5	9.7	2.5

4.2 气压

康定机场地面气压日变化存在明显的双峰型结构，各月的气压变化趋势具有明显的同步性（图 3b），两次气压峰值分别出现在 9-10 时和 22-23 时，两次气压谷值则出现在 4-5 时和 16-17 时。比较可以看到昼间气压振幅要明显大于夜间，白天气压峰值至谷值与气温呈反相变化，气压变化滞后气温变化约 3 小时；逐月来看，3 月的气压日较差最大（3.0 hPa），7 月最小（1.7hPa），与温度日较差变化吻合（表 2），以上事实反映出昼间的气压振荡与白天温度的剧烈变化密切相关，而夜间气压峰值与谷值的出现可能是由于山谷风或大气潮汐在气压场上的反映^[3]。

4.3 相对湿度及降水量

康定机场各月露点温度的逐时变化并不大（图 3c），最大的露点温度日较差仅为 2.1℃（6 月），其变化量远小于气温的日变化量（表 2），因此，相对湿度（或露点温度差）日变化主要受温度日变化的影响。图 3d 可以看到，相对湿度与露点温度呈反相变化，日出前后空气相对湿度达到一天中最大值，6 月的平均值可达 90%左右。3 月和 9 月的相对湿度最低值出现在 14 时，其它月份则推后约 1 个小时。从降水来看，由于康定机场降水期集中于 5-9 月且各月 3 小时降水量的日变化趋势基本一致，因此图 3d 给出了 5-9 月 3 小时累计降水量日变化情况。由图可见，康定机场雨季降水主要发生于夜间，最高值出现在 20-22 时，这一时间段内，空气相对湿度较大，日落后云顶辐射冷却迅速，而地面降温缓慢，大气趋于不稳定状态，易诱发对流性降水。这与文献 22 分析得到的高原地区多雨期降水在晚上达到峰值，最大值在 21 时前后的结论一致，由此也能看出机场自动观测站得到的降水量能够反映出机场区域的降水变化特征。日出至 13 时左右降水较少，这是由于经过夜间长时间辐射冷却，近地面处于逆温状态，大气相对稳定，不易出现对流性降水，但由于该时段较高的相对湿度

值、较低的温度及大气低层的稳定层结可知机场易受低云及雾等天气的影响。

4.4 风速和风向

由于 33 和 15 跑道的风场日变化特征类似，且 33 号测站的资料更为完整。因此，这里只给出 33 号跑道风场的演变特征。从主导风向来看，各月在日出至 14 时的主导风向均为垂直跑道的西南-西风（图 4a-e），5 月发生频率最高，可达 30%，3 月略低于 5 月，7 月发生频率最低，为 20%左右。除 3 月外，其它月份的 16 时-22 时主导风向与 13 时相反，为东东北风，其中，7 月的发生频率高达 45%。日落至早上 4 时左右，机场另外一个主导风向为近似平行于跑道的东南风，这一风向在 5-9 月尤为明显。

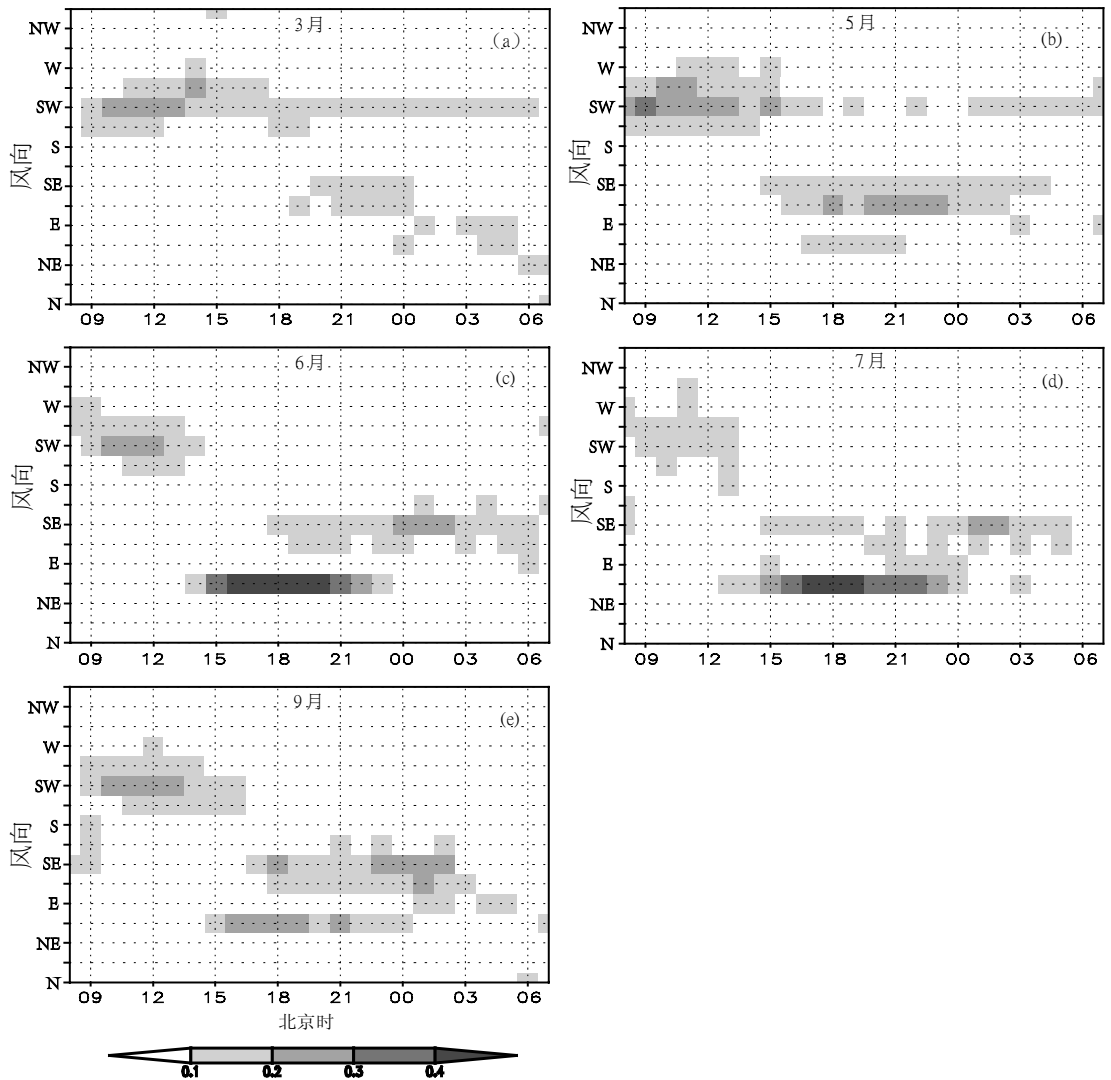


图 4 风向频率（阴影）的日变化特征：(a) 3 月，(b) 5 月，(c) 6 月，(d) 7 月，(e) 9 月

从平均风速来看，侧风风速的变化量为顺风风速的两倍（图 5），结合该地山脉的走向可知该地侧风与上下坡风有关。冬季代表月份的 3 月在日出后偏西侧风迅速增大，在日最高气温的 14 时左右达峰值的 4m/s，而后缓慢降低，19 时以后风向转为偏东侧风，但风速小于

1m/s, 趋于静风。进入夏季, 日出后的偏西侧风强度急剧减弱, 7 月平均风速不到 1m/s, 而午后偏东侧风风速却显著增强, 日落后达到峰值的 5m/s。造成侧风强度随季节变化的主要原因是, 3 月机场周边为积雪覆盖, 山顶和山谷热力对比不明显, 但高空西风强盛, 日出后随着场区迅速升温, 大气乱流加强, 高空下传的西风与弱的上坡风相叠加使得近地面偏西侧风迅速增强并于日最高温时达到最大值, 入夜后随着大气趋于稳定及下坡风的建立, 近地面才表现出弱的偏东侧风。夏季高空西风减弱, 其对近地面风场的影响也明显弱化, 随着太阳高度角的增大以及机场周边地貌的变化(场区积雪融化, 东侧山脉的山顶岩石裸露而山下多植被覆盖), 场区热力对比增强, 机场侧风主要受局地热力环流影响, 机场日落后的偏东侧风显著增大, 而由于高空西风动量下传减弱, 偏西侧风也明显减弱, 由此也能看出机场上坡风和下坡风强度存在明显的不对称。另外, 6 月偏西侧风转为偏东侧风和最大偏东侧风出现时间均较 3 月提前 2-3 个小时, 偏西侧风持续时间缩短而偏东侧风持续时间增长, 反映出该地日出和日落时间的季节变化对局地热力环流的影响。值得注意的是, 康定机场夏季下坡风在日落之前就已达到一定强度, 与经典下坡风所指出的下坡风于日落以后出现不同^[23], 其可能与康定机场处于山腰位置以及高海拔地区的辐射收支状况不同于一般山地有关。

从平行于跑道方向风速变化来看(图 5b), 3 月全天风速都很低, 仅在下午 15 时左右会出现大于 1m/s 的偏北顺风, 参照图 4a 可以看出此时机场存在较为明显的北西北风, 从发生时间及发生时较强的降温情况来看, 这支风系具有冰川风特征^[24], 可能与北侧山峰积雪导致的空气冷却下沉有关。5-9 月, 随着高原季风的推进, 深厚的偏南暖湿气流完全掩盖了偏北气流, 机场全天为偏南风。详细比较可以发现, 5 月偏南风在 16 时已达到峰值的 2m/s 左右, 而 6-9 月偏南风峰值推后至 18 时开始出现, 并可持续至 22 时, 与图 4d 中降水量最大的时段相对应。对比图 3 可知, 5-9 月的日落前后机场盛行风向有两支, 分别为东东北风和东南风。不同之处在于, 受加强的热力环流影响, 6-9 月东东北下坡风的发生频率远高于 5 月, 较强的偏北风分量使得 6-9 月偏南风风速达到峰值时间较 5 月推后约 2 个小时。由此可知, 6-9 月 18-22 时较强的(下坡风的)偏北风分量和强盛的偏南暖湿气流的在机场辐合, 致使暖湿气流抬升是夏季机场夜雨高发的重要原因之一。

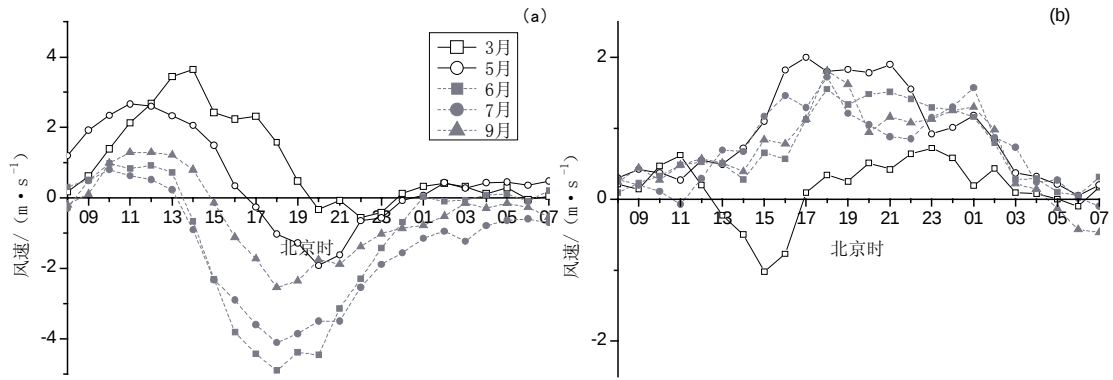


图5 月平均的侧风 (a) 和顺风 (b) 的日变化特征。(a) 图中的正值代表西侧风, 负值代表东侧风, (b) 图中的正值代表南顺风, 负值代表北顺风。

Fig. 5 Diurnal variation of monthly mean cross-wind (a) and tail/head-wind (b). The positive and negative value represent westerly and easterly in (a), southerly and northerly in (b)

机场强侧风和顺风的发生会严重影响飞机起降安全, 因此机场大侧风及顺风的发生及持续时间是机场预报的一个重点。依第一节中给出的顺风和侧风标准, 图6给出了3月及(5-9月代表月份的)6月期间每天侧风和顺风超标时的全风速及风向。与统计结果相似, 持续性偏西侧风超标均出现在一天气温最高的时段, 反映出高空动量下传使地面强偏西侧风得以维持, 一旦温度开始降低后, 地面偏西强侧风也随之消失。比较还可以看到, 偏西强侧风主要发生在3月和5月, 5月偏西强侧风甚至可从早上9时持续至晚20时左右, 而7月和9月几乎没有出现偏西强侧风。比较600hPa逐日风场可以看到(图6b和c), 机场附近高空日平均西风加强与近地面正午偏西强侧风对应, 如在6月6日和7日尽管全天气温并不是6月中的最高值, 但随着高空西风明显加大, 地面在15时左右也出现了强偏西侧风。由此可见, 春夏过渡季节高空纬向风强度对地面偏西大侧风的预报有重要的指示意义; 偏东强侧风均出现在气温由峰值开始降低之时, 7月和9月的偏东侧风可从15时一直持续至0时, 高于其它三三月份, 此外, 偏东侧风发生日的气温偏高, 这反映出偏东强侧风发生时天空云量较少, 导致了地面升温 and 降温都更为剧烈, 加强的热力对比造成了强烈的下坡风。值得注意的是, 3月份在个别日期的21时以后仍会出现偏东强侧风, 最长可持续至0时, 但仅发生在高空西风较弱且地面气温较高的日子(图6b); 持续偏北强顺风仅在3月可见, 且集中于15-18这一时段, 持续时间多在2个小时左右。当近地面出现偏西强侧风日, 下午则会发生偏北顺风超标现象(图略)。从图6a的温度来看, 偏西强侧风日最高气温普遍偏高, 加强的热力对比也有利于下午冰川风的加强。

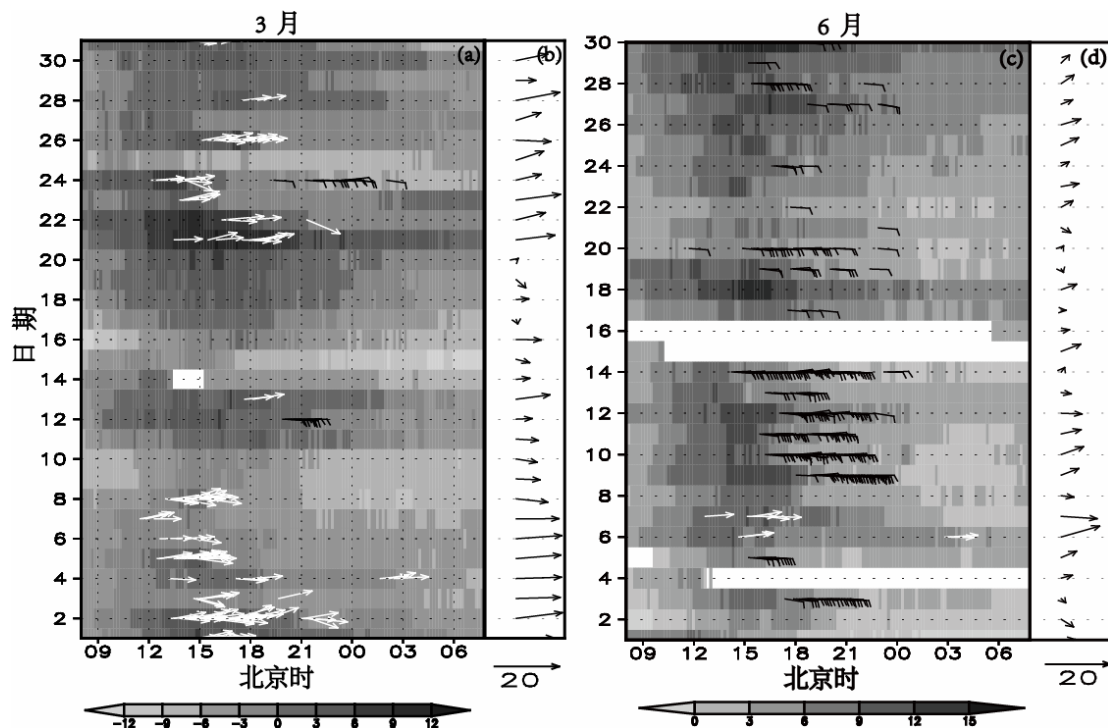


图6 33站在3月(a)和6月(c)偏西侧风(白色箭头)、偏东侧风(黑色风杆)及温度的逐日演变特征，
(b)和(d)为3月和6月机场上空600hPa风的逐日演变特征。图中空白区为数据缺测造成

5 结论

利用康定机场2010年3月、5-7月及9月的自动观测站资料，分析了康定机场近地面航空气象要素场的季节及日变化特征，得到了以下结论：

(1) 康定机场3月低温少雨，5月中下旬起机场温度迅速升高，降水明显增加。其中，5-9月的降水存在30-50天振荡特征，与孟加拉湾北部的850 hPa纬向西风强度有很好的同步性。康定机场3月平均气压最低，9月最高，具有典型的高山型气压场特征。风速则是6月最大，9月最小。根据以上特征，在执飞高原机场时应注意夏季高温高湿环境对飞机发动机推力的影响，此外，气压所具有的半日波特征也需要地面管制人员注意给飞行人员及时通报气压的变化情况。

(2) 机场各要素的日变化幅度远大于季节变化，反映出机场低层受局地环流影响强烈。机场温度日变化呈单峰结构，最高温度出现在14时左右。由于3月多为少云天气，温度日较差最大。5-9月，受气温日变化影响，机场相对湿度在日落后迅速增大，由于入夜后的大气不稳定层结以及冷的下坡风对偏南暖湿气流的抬升作用，机场降水多集中于17-23时。日出前则由于低层处于稳定状态，空气接近饱和，机场易出现低云和雾。康定机场气压场则表现出双峰型结构，属典型高山型气压。

(3) 康定机场各月从日出至 14 时左右的主导风向为偏西上坡风, 16-20 时则转为相反的下坡风。上坡风和下坡风发生频率和强度分别在 3 月和 6 月达到最大, 其中, 5-9 月的下坡风强度和频率明显大于 3 月的上坡风, 这反映出 5-9 月的局地热力环流要强于 3 月。当机场上空西风加强, 机场气温升至一天最高值时, 近地面易出现 8m/s 以上的偏西强侧风。在 6-9 月, 当机场湿度较小, 云量较少时, 机场东侧山脉与机场热力对比明显, 机场易发生偏东强侧风。机场仅在 3 月出现了偏北强顺风, 它可能与东北侧雪山的下泄冰川风有关, 发生时段集中于 15-18 时, 当 3 月偏北顺风出现时, 机场降温幅度明显增大。

以上分析表明, 执飞康定机场的航班冬季应当注意气压的变化对高度表的影响, 上午应当留意偏西大侧风, 下午则需注意冰川所造成的持续性顺风。夏季则需多注意偏东侧风及夜雨对飞机起降的影响。

由于所选分析资料仅为一年中的代表月份, 缺乏统计意义。今后将通过更多的资料累积进一步验证以上结果。

参考文献:

- [1] Yeh T C. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-1946[J]. Tellus, 1950, 2 (3): 173-183.
- [2] 顾震潮. 青藏高原对东亚大气环流的动力影响和它的重要性[J]. 中国科学, 1951, 2:283-303.
- [3] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 62-73.
- [4] Luo Huibang, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979 Part I: Precipitation and kinematic analyses[J]. Mon Wea Rev, 1983, 111: 922-944.
- [5] Luo Huibang, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the

- Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979 Part II: Heat and moisture budgets[J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 966–989.
- [6] He Haiyan. MCGINIS J W. Song Z, et al. Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1966–1996.
- [7] 江宁波, 罗会邦. 青藏高原加热与南海季风爆发[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 1996, 35: 194–199.
- [8] 张佳华, 姚凤梅, 郑凌云. 中国藏北高寒生态遥感植被变化及成因分析[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2009, 48: 143–147.
- [9] 丁张巍, 温之平, 黎伟标, 等. 广东龙门地区草地下垫面地表辐射和能量平衡观测和分析[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2011, 50 (3): 123–129.
- [10] 季国良, 青藏高原主体的大气透明度特征[J]. *高原气象*, 1985 (4): 122–129.
- [11] 沈志宝等, 青藏高原热源观测试验概况, 青藏高原气象科学实验文集 (一) (M), 北京: 科学出版社, 1984, 1–9.
- [12] 邹捍, 周立波, 马舒坡, 等. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究[J]. *高原气象*, 2007, 26 (6): 1124–1140.
- [13] 王永杰, 马耀明, 朱志鹏, 等. 藏东南地区鲁朗河谷近地层气象要素变化特征[J]. *高原气象*, 2010, 29 (1): 63–69.
- [14] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 纳木错湖夏季典型大气边界层特征的数值模拟[J]. *高原气象*, 2008, 27 (4): 733–740.
- [15] Zou han, Ma Shupo, Zhou Libo, et al. Measured turbulent heat transfer on the northern slope of Mt. Everest and its relation to the south Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 36: L09810, doi: 10.1029/2008GL036984.
- [16] 陈学龙, 马耀明, 胡泽勇, 等. 季风爆发前后青藏高原西部改则地区大气结构的初步分析[J]. *大气科学*, 2010, 34 (1): 83–94.
- [17] 孙磊. 机场附近低空风切变的数值模拟预测[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2003, 42 (2): 150–153.
- [18] 黄润秋, 徐则民, 许强, 赵建军, 吴礼舟. 康定机场地基土特征及其形成机制[J]. *工程地质学报*, 2005, 13 (1): 1–11.
- [19] 汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞. 高原季风的平均气候特征[J]. *地理学报*, 1979, 34 (1): 33–41.

- [20] 黄仪芳, 朱志愚. 航空气象[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002:10.
- [21] 贺懿华, 李才媛, 金琪, 王晓玲. 夏季青藏高原 TBB 低频振荡及其与华中地区旱涝的关系[J]. 高原气象, 2006, 25 (4): 658-664.
- [22] 巩远发, 纪立人, 段廷扬. 青藏高原雨季的降水特征与东亚夏季风爆发[J]. 高原气象, 2004, 23 (3): 313-322.
- [23] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[B].
- [24] 高登义. 珠穆朗玛峰绒布河谷的冰川风[J]. 冰川冻土, 1985, 7 (3): 249-256.