

卢萍, 杨康权, 李英. 2017. 基于加密探空资料对不同海拔高度台站边界层大气的对比分析 [J]. 大气科学, 41 (6): 1234–1245. Lu Ping, Yang Kangquan, Li Ying. 2017. A comparative analysis of atmospheric boundary layer based on intensive sounding data at different altitude stations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1234–1245, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16230.

基于加密探空资料对不同海拔高度台站 边界层大气的对比分析

卢萍¹ 杨康权² 李英¹

¹ 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

² 四川省气象台/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

摘 要 本文利用中国气象局成都高原气象研究所西南涡加密观测试验获取的探空资料及地面台站资料, 对比分析了高原东侧的四川省境内不同海拔高度台站的边界层特征, 结果表明: 高海拔地区地表大气受陆面的影响更为剧烈, 日变化幅度更大, 且极值出现时间更早。温度/比湿/风速的差异都主要体现在低层边界层大气中, 越靠近地面, 差异越显著。其中, 温度递减率在 02:00 (北京时, 下同) 最小, 14:00 最大, 高海拔测站受陆面影响的大气层厚度比低海拔测站大, 低海拔测站在近地层 300 m 以下大气中存在明显的逆温现象。14:00 近地层大气的比湿最小, 午夜 02:00 近地层大气的比湿最大, 高海拔地区低层大气的平均比湿递减率小于低海拔地区。高海拔地区风速日变化幅度大, 4 个时次的风速廓线形态差异也大; 低海拔地区风速变化幅度小, 4 个时次的风速廓线形态也比较一致。高海拔台站地表大气的日变化幅度大, 极值出现时间略早。

关键词 探空资料 日变化 垂直递减率 变幅

文章编号 1006-9895(2017)06-1234-12

中图分类号 P421.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16230

A Comparative Analysis of Atmospheric Boundary Layer Based on Intensive Sounding Data at Different Altitude Stations

LU Ping¹, YANG Kangquan², and LI Ying¹

¹ Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (CMA)/Heavy Rain and Drought–Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

² Sichuan Meteorological Observatory/Heavy Rain and Drought–Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract The atmospheric boundary layer characteristics at different altitude stations in Sichuan Province on the eastern edge of the Tibetan Plateau were analyzed and compared using southwest vortex intensive sounding data. The conclusions are as follows. The surface layer at high altitude stations is more influenced by land surface processes; its diurnal variation is also stronger. Temperature lapse rate in the surface layer is the most remarkable, and the daily minimum/maximum value appears at 0200 BT/1400 BT (Beijing time). The depth of the atmosphere layer affected by land surface processes is larger at high altitude stations than at low altitude stations. Temperature inversion obviously occurs below 300-m height at

收稿日期 2016-09-13; 网络预出版日期 2017-04-26

作者简介 卢萍, 女, 1976 年出生, 副研究员, 主要从事天气分析、数值模拟、资料分析研究。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn.

资助项目 国家自然科学基金项目 41405145, 成都高原气象研究所开放实验室基金项目 BROP201614、BROP201714

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41405145), Open Lab Foundation of Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (Grants BROP201614, BROP201714)

low altitude stations. Specific humidity in the surface layer is the smallest at 1400 BT and the biggest at 0200 BT, and its diurnal variation in the surface layer is slightly greater at high altitude stations than at low altitude stations, while the mean lapse rate in the middle and lower atmosphere is smaller at high altitude stations than at low altitude stations. Wind speed varies within a much wider range at high altitude stations and the vertical wind profiles four times a day are very different from each other, but the opposite is true at low altitude stations. The daily variation amplitude of the surface layer is larger and extreme values appear slightly earlier at high altitude stations.

Keywords Sounding data, Diurnal variation, Lapse rate, Amplitude

1 引言

地面和大气之间的相互作用是通过大气边界层来完成的,因此,充分认识大气边界层结构和边界层的各种动力和热力过程非常必要。青藏高原东侧的四川地区,地形地貌多变,海拔变化范围大,以往的试验多关注青藏高原主体,对青藏高原地区的大气边界层已有所研究(祁永强等,1996;苗曼倩等,1998;马耀明等,2000,2002;王绍令等,2002;周明煜等,2002;Liu et al.,2002;左洪超等,2004;Kumar et al.,2010;刘辉志等,2013;许鲁君等,2014;李娟等,2016),已有的研究证实高原大气边界层结构与平原地区有着明显不同。观测分析的结果表明,高原大气边界层的高度受天气、季节和位置的影响,其高度值在1006~4430 m之间变动(刘红燕和苗曼倩,2001;卓嘎等,2002;李茂善等,2004,2006;Zuo et al.,2005;李英等,2008;Li et al.,2011)。这些分析多是利用单个站点的观测资料进行研究,且大多数分析仅针对对流边界层,对青藏高原边坡及其下游地区稳定边界层的研究相对较少。本文的目的是利用中国气象局成都高原气象研究所(简称高原所)加密探空试验获取的多台站连续观测资料(李跃清等,2010;卢萍等,2012),分析青藏高原东侧边坡地带及四川盆地的大气边界层结构特征,以期对青藏高原地气相互作用、区域模式参数化方法(王蓉等,2015)的改进、以及大气污染物的散布(王颖等,2013)有所贡献。

2 资料及观测台站的分布

西南涡加密探空实验是高原所自2010年开始开展的一项大气科学实验,试验时段为6月21日至7月31日,试验期间每天进行4次(02:00、08:00、14:00和20:00;北京时,下同)探空观测,站点分布在高原东坡及四川盆地,分别是四川的7个常规探空站(甘孜、红原、温江、巴塘、宜宾、西昌和

达县)及在高原增设的4个站(九龙、名山、剑阁和金川)。鉴于篇幅和资料质量的缘故,本文主要选用2015年6个观测站(巴塘、九龙、红原、剑阁、名山和宜宾)的探空资料,进行边界层大气特征的对比分析。6个站点的位置分布如图1所示,具体经纬度和海拔高度值请见表1。

表1 6个台站的位置及海拔高度

Table 1 Locations and altitudes of six stations

台站类型	台站名称	纬度	经度	海拔高度/m
高海拔	巴塘	30°N	99.1°E	2590
台站	九龙	29°N	101.5°E	2925
	红原	32.8°N	102.55°E	3493
低海拔	剑阁站	32.28°N	105.52°E	544
台站	名山	30.08°N	103.12°E	691
	宜宾	28.8°N	104.6°E	341

3 中低层大气物理特性的对比分析

图2是探空观测的41天平均的逐个时次温度廓线。温度随高度增加而逐渐降低,不同时间次的温度差异主要体现在低层大气中,越靠近地面,差异越显著。高海拔测站4个时次的大气温度廓线在距离地面2000 m高度处方才较为一致,而低海拔地区测站的温度廓线则在地面以上几百米的高度就几乎重叠在一起了。近地层大气的日变化显著,08:00温度最低,其次是02:00,高海拔测站近地层大气温度的14:00最高,中上边界层(除九龙站)是20:00温度最高,而低海拔测站则是20:00最高。低海拔测站在02:00/08:00,低层大气存在显著的逆温现象,该逆温现象出现在日出前,日落后,乃典型的辐射逆温。由此可见,高海拔地区低层大气温度受陆面的影响更为剧烈,日变化幅度更大。

大气温度垂直递减率定义为

$$\gamma = -\frac{dT}{dz}, \quad (1)$$

其中, T 为整百米高度上的温度值, dT 为相邻两个高度上温度值之差, z 是海拔高度值, dz 是固定值100 m。这6个观测站的大气垂直递减率廓线(图3)

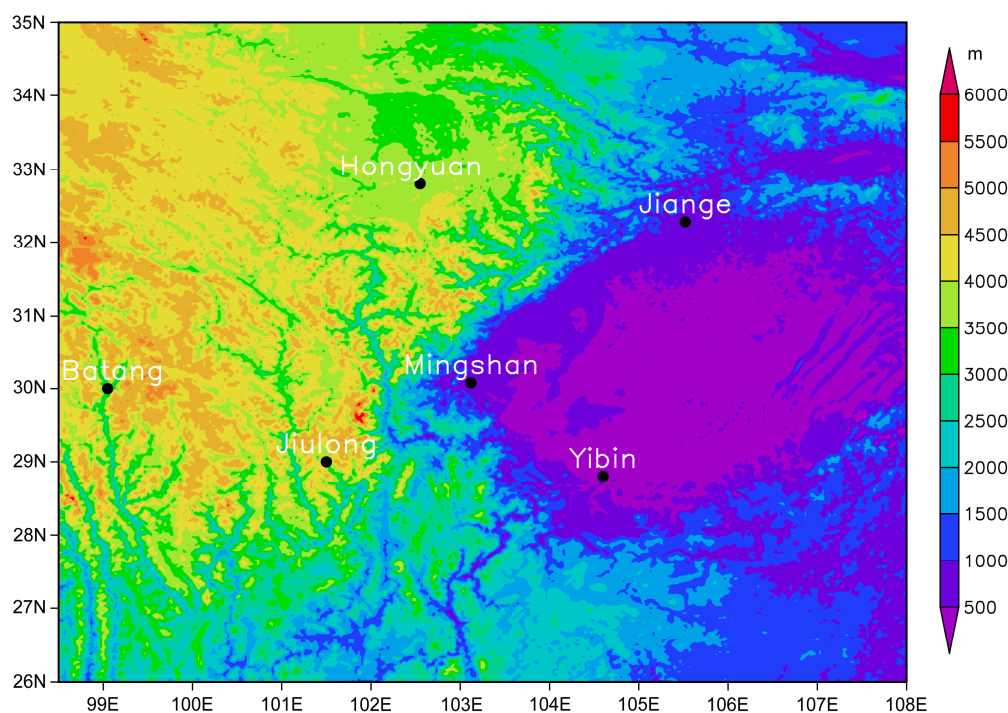


图 1 巴塘、九龙、红原、剑阁、名山、宜宾 6 个观测台站的分布

Fig. 1 Geographic distribution of the six observation stations (Batang, Jiulong, Hongyuan, Jiange, Mingshan, and Yibin)

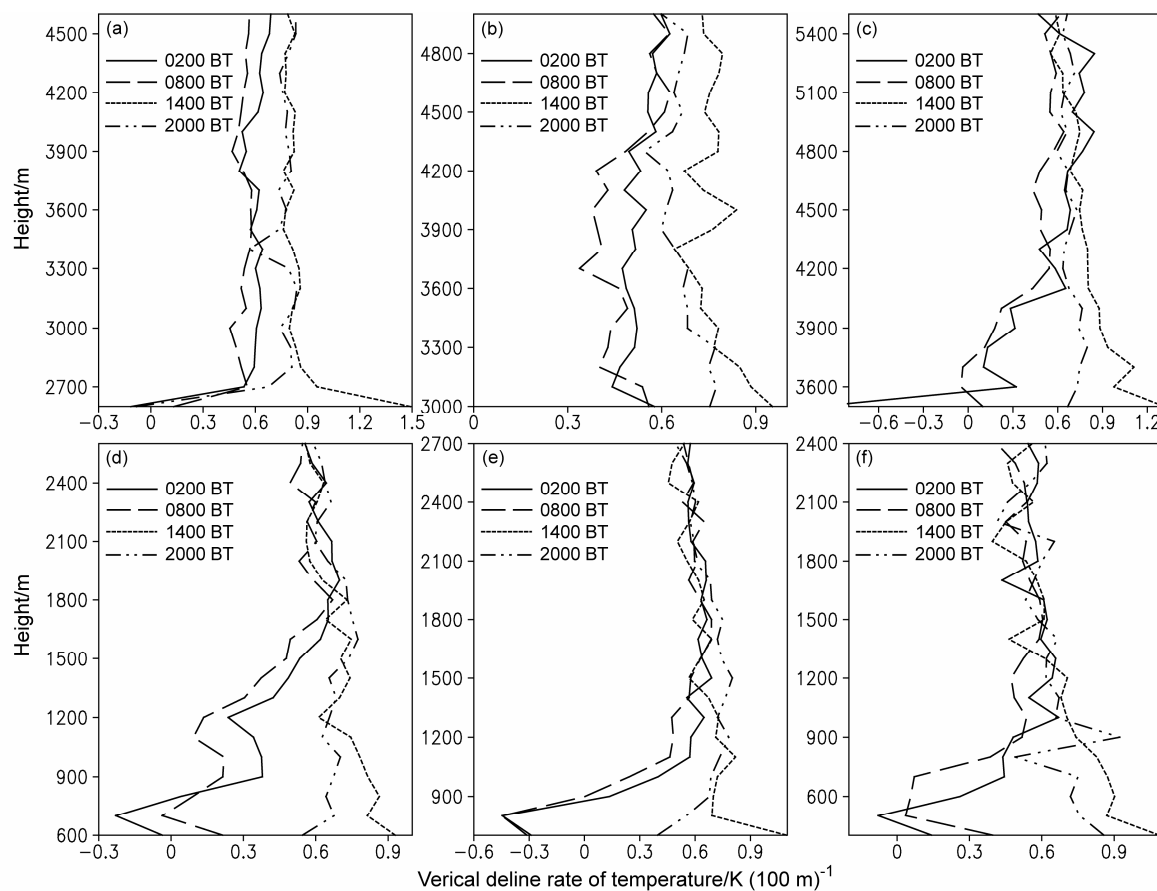
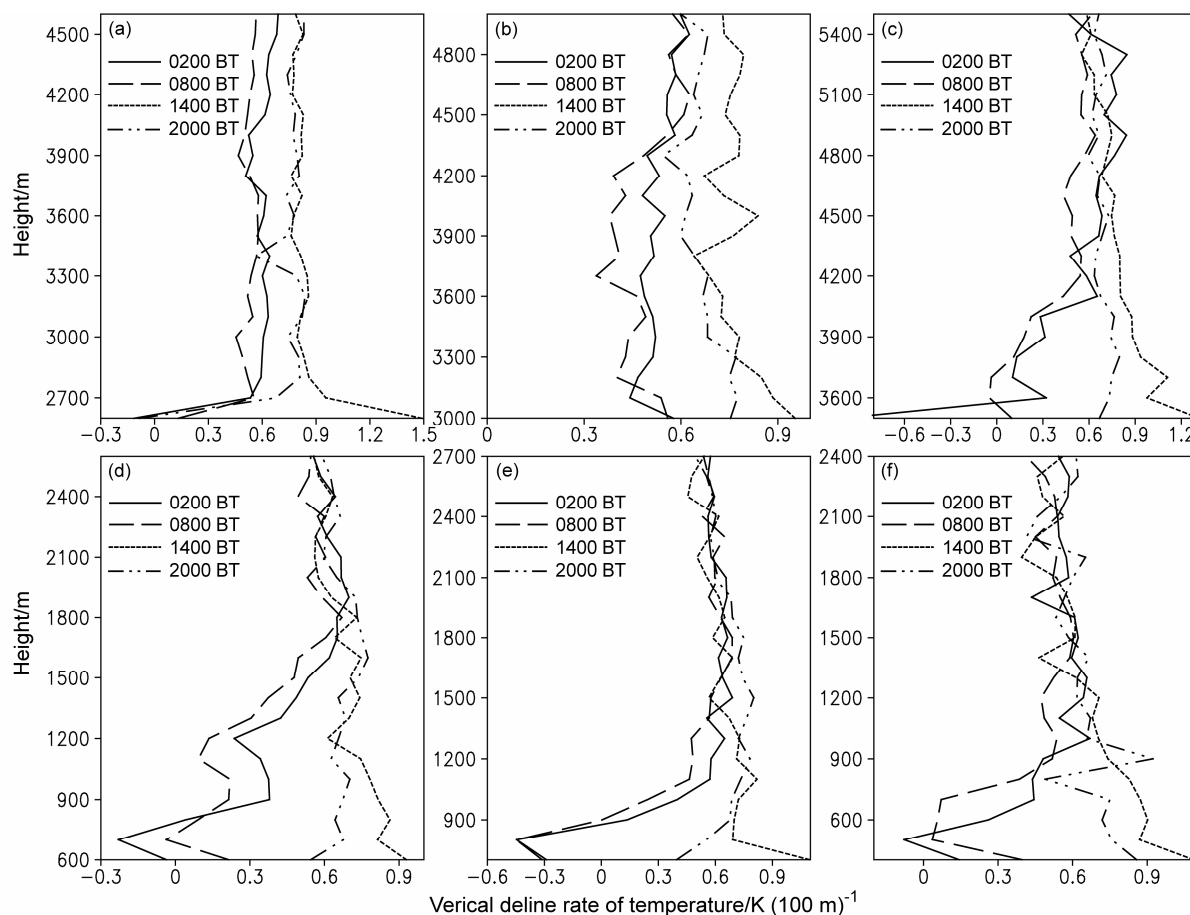


图 2 探空观测的 41 天平均的 4 个时次的温度廓线 (单位: K): (a) 巴塘; (b) 九龙; (c) 红原; (d) 剑阁; (e) 名山; (f) 宜宾

Fig. 2 Temperature profiles at four times (BT: Beijing time) a day of from sounding observations averaged over 41 days (units: K): (a) Batang, (b) Jiulong, (c) Hongyuan, (d) Jiange, (e) Mingshan, and (f) Yibin

图3 同图2, 但为温度递减率廓线, 单位: $\text{K} (100 \text{ m})^{-1}$ Fig.3 Same as Fig. 2, but for lapse rates of temperature profiles, units: $\text{K} (100 \text{ m})^{-1}$

显示, 4 个时次的大气温度垂直递减率在自由大气层中基本维持在 6 K km^{-1} 左右, 最大差异表现在中低层边界层大气中, 越靠近地面, 差异越显著。02:00/08:00 在近地层的递减率明显小于 14:00/20:00。从各个台站单独来分析: 巴塘站近地层 02:00 的温度递减率最小, 极小值甚至低于 $0 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$, 近地层以上大气的温度递减率范围在 $0.5 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右。08:00 大气温度递减率略低于 02:00 的温度递减率, 20:00 最下层大气的温度递减率略大于 08:00, 14:00 低层大气的温度递减率最大, 尤其是近地层, 极值达到 $1.5 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 。九龙站 02:00/08:00 低层大气温度递减率较小, 在 $0.4 \sim 0.5 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 之间波动, 20:00 低层大气的温度递减率在 $0.7 \sim 0.8 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 之间波动, 14:00 低层大气的温度递减率同样是最小的, 近地层超过 $0.9 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 。红原站 02:00 近地层的温度递减率最低, 为负值, 说明该时段近地层大气存在逆温现象。20:00 大气的温度递减率略高于 $0.6 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$, 14:00 近地层大气

的温度递减率超过 $1.2 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 。剑阁站 02:00 低层大气的温度递减率最小, 在 800 m 以下的大气中甚至出现温度随高度增长而增加的逆温现象。08:00 低层的温度递减率也非常小, 在 $0 \sim 0.3 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 之间。20:00 大气的温度递减率分布在 $0.6 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右, 14:00 中低层大气的温度递减率非常大, 近地层的值为 $0.9 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$, 向上层逐渐减小, 在 1200 m 处于 20:00 的廓线基本重叠。名山站 02:00/08:00 大气的温度递减率廓线相一致, 近地层 900 m 以下的大气层的递减率为负值, 存在明显的逆温层, 其上层的大气温度递减率从 0 逐渐升高到 $0.6 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右, 1400 m 高度以上基本维持该值。20:00 的温度递减率在 1000 m 以下逐渐从 $0.4 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 增长到 $0.6 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$, 其上层大气的温度递减率基本维持。而 14:00 的温度递减率在 1000 m 大气以下层较高, 从近地层的 $1.0 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 逐渐减小到 $0.6 \text{ K} (100 \text{ m})^{-1}$ 。宜宾站的同样是 02:00 近地层大气的温度递减率最小, 且存在

明显的逆温现象, 08:00 次之, 这 2 个时次的温度递减率在逆温层以上是逐渐增加的。14:00/20:00 低层大气的温度递减从地面向上是逐渐减小的, 20:00 大气最大递减率为 $0.8 \text{ K (100 m)}^{-1}$, 14:00 最大, 近地层大气温度递减率超过 $1.0 \text{ K (100 m)}^{-1}$ 。4 个时次的温度递减率廓线在 1000 m 以上高度比较一致。高海拔测站和低海拔测站相较而言: 4 个探空时次, 温度递减率差异最显著之处都位于近地层大气中, 02:00 最小, 且为负值, 揭示了该时段为逆温最常出现的时段, 14:00 最大, 直接取决于陆面受太阳辐射造成的升温影响, 高海拔测站受陆面影响的大气层厚度比低海拔测站大。低海拔测站在近地层 300 m 以下大气中存在明显的逆温现象。高海拔地区因为太阳辐射强烈, 日出后地表升温快, 日落后, 由于空气稀薄, 水汽杂质含量少, 地表容易散热等原因, 降温迅速, 所以日较差大, 符合大陆性气候特征。

观测的比湿廓线 (图 4) 显示: 比湿随高度的

增长而减少。巴塘站 08:00/14:00 低层大气的比湿较小, 02:00/20:00 近地层大气的比湿较大。九龙站近地层比湿同样是 14:00 最小, 02:00 最大。红原站近地层比湿同样是 14:00 最小, 其次是 20:00, 02:00 最小。剑阁站也是 14:00 最小, 其他 3 个时次的比湿比较一致。名山站 08:00 最小, 02:00 最大。宜宾站同样是 14:00 最小, 02:00 最大。总的来说, 低层 (尤其是近地层) 大气比湿同样具有显著的日变化: 正午 14:00 近地层大气的比湿最小, 午夜 02:00 近地层大气的比湿最大。高海拔测站地面比湿的日变化幅度 2 g kg^{-1} 左右, 低海拔测站 (剑阁、名山) 地表大气比湿的日变化幅度较小, 在 1 g kg^{-1} 左右, 宜宾站较大, 约 3 g kg^{-1} 。

大气比湿垂直递减率定义为

$$\gamma = -\frac{dQ}{dz}, \quad (2)$$

其中, Q 为整百米高度上的湿度值, dQ 为相邻两个高度上比湿值之差, dz 是固定值 100 m。6 个观

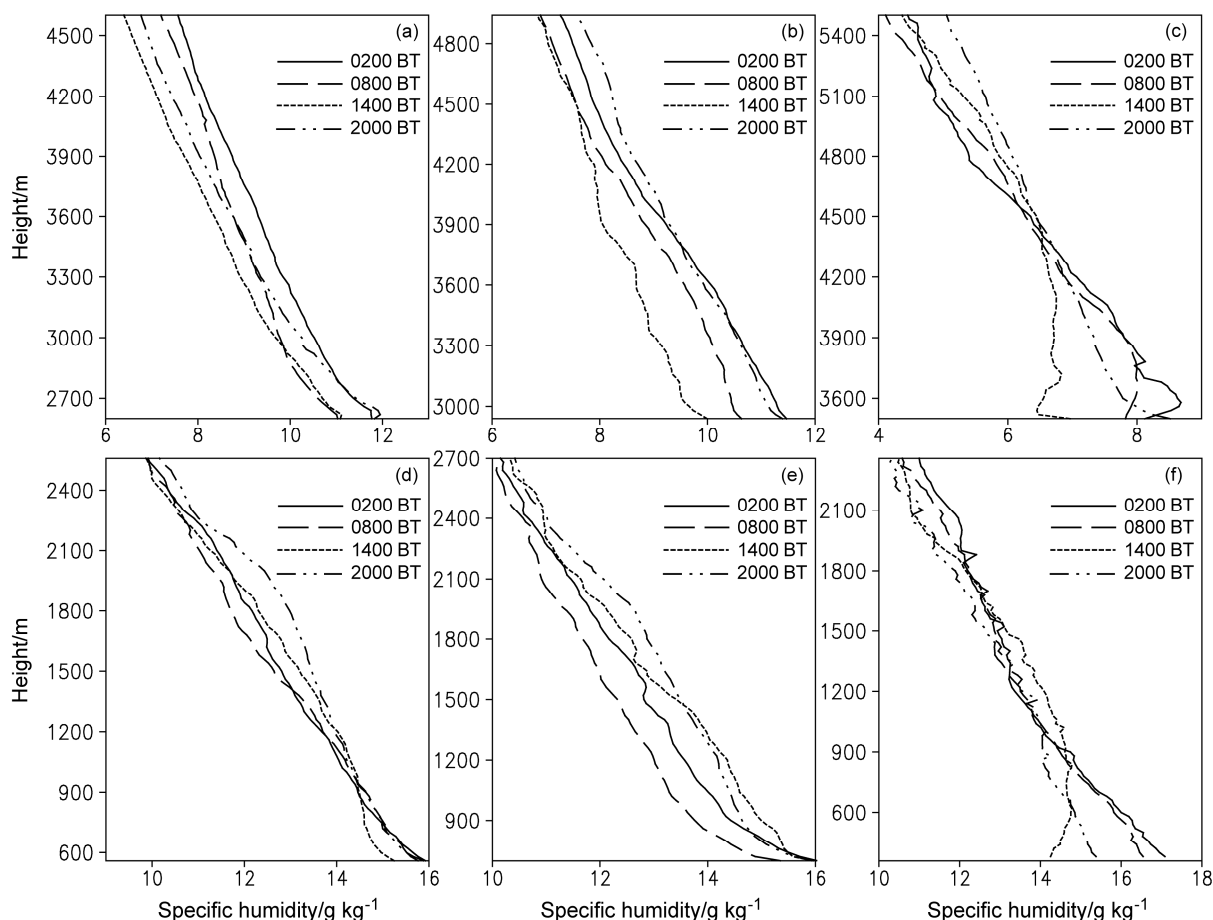


图 4 同图 2, 但为比湿廓线, 单位: g kg^{-1}

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for specific humidity profiles, units: g kg^{-1}

测台站的比湿递减率如图 5 所示：巴塘站比湿递减率在 $0.2 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右，最大递减率出现近地层大气中，其值约为 $0.4 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ (图 5a)。九龙站低层大气的比湿递减率也在 $0.2 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右，同样是 02:00 近地层大气的比湿变化最大，而 08:00 则最小 (图 5b)。红原中低层大气的比湿递减率在 $0.3 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右，20:00 和 02:00 近地层大气的比湿递减率都比较大，14:00 最小 (图 5c)。剑阁站中低层大气的比湿递减率也在 $0.2 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右，02:00 近地层大气的比湿递减率最大，极值超过 $0.4 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ ，08:00 最小 (图 5d)。名山站 4 个时次中低层大气的比湿递减率差异较小，均值约为 $0.3 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ ，但其近地层大气的比湿递减率非常大，极值超过 $0.9 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ ，衰减速度快。依然是 02:00 最大，14:00 最小 (图 5e)。宜宾站低层大气的比湿递减率在 $0.3 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右，4 个时次近地层大气比

湿递减率差异非常显著，最大值仍然出现在 02:00，其极值约为 $0.5 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ ，最小值也是出现在 14:00，其值为负，呈现逆湿现象 (图 5f)。总体来说，高海拔地区湿度小，因此其中低层大气的平均比湿递减率 [约 $0.2 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$] 小于低海拔地区 [约 $0.3 \text{ g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$]。分时次而言，02:00 近地层的比湿递减率最大，14:00 则最小。

巴塘站 4 个时刻的风速在近地层都非常小，然后随高度逐渐增加，其中 20:00 的风速最大，08:00 最小 (图 6a)。九龙站 02:00 和 08:00 的风速较小，14:00 和 20:00 的风速较大，14:00 风速在低层 3100 m 高度附近达到极值，此后在边界层内随高度逐渐减弱，20:00 风速在 3900 m 高度附近达到极值，与其他 3 个时次相比，该时次的风速最大 (图 6b)。红原站低层大气风速在 02:00/08:00 最小，其次是 14:00，20:00 风速最大，其中 14:00 和 20:00 在近地层到边界层顶之间风速稳定少变，表现出为对流边

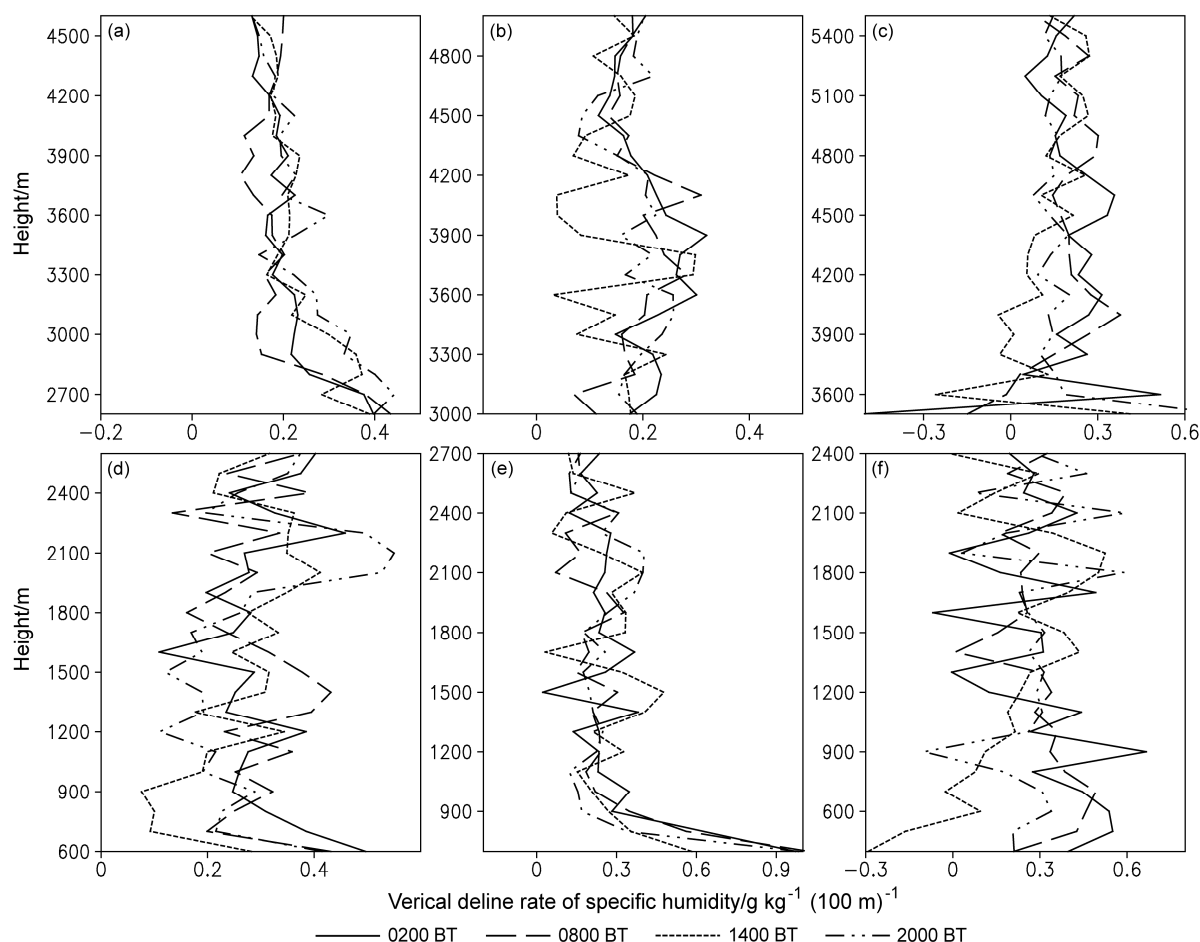
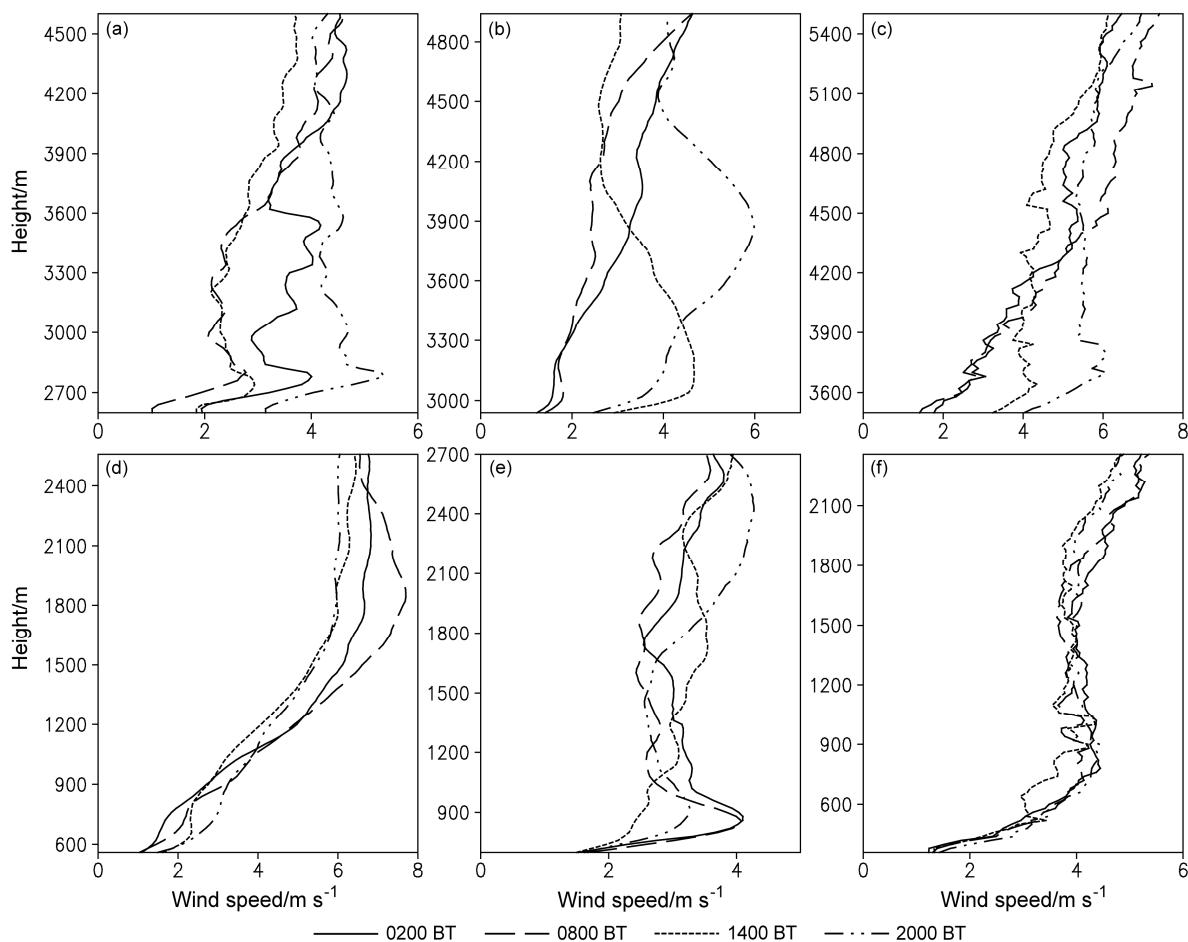


图 5 同图 2，但为比湿垂直递减率廓线，单位： $\text{g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for decreasing rate profiles of specific humidity, units: $\text{g kg}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$

图6 同图2, 但为风速廓线, 单位: m s^{-1} Fig. 6 Same as Fig. 2, but for wind speed profiles, unit: m s^{-1}

界层风速特征 (图 6c)。剑阁站边界层风速表现为典型的稳定边界层特征: 即近地层风速随高度很快地增加, 此后随高度增速减缓, 在边界层中上部达到极大值, 再向上则随高度稍微减小, 到边界层顶处趋于地转风。4 个时次的风速差异不明显, 仅在极大值处风速存在一定的差异, 该高度附近风速表现为, $08:00 > 02:00 > 14:00/20:00$ (图 6d)。名山站 02:00 和 08:00 在低层约 900 m 高度附近存在一个风速极大值, 1000~1600 m 高度之间风速稳定少变, 其值为 3 m s^{-1} 左右, 该分布特征也许与它的地理位置有一定关系, 有待更多的资料进行验证 (图 6e)。宜宾站 4 个时次的风速廓线非常一致, 皆表现为稳定边界层风场特征, 风速日变化小 (图 6f)。总体来说, 高海拔地区风速日变化幅度更大, 晚上 20:00 风速最大, 凌晨 08:00 的风速最小, 风速廓线形态差异大; 低海拔地区风速变化幅度较小, 4 个时次的风速廓线形态也比较一致。

大气风速切变定义与温度相似, 这里同样给出 100 m 高度之间的风速之差。巴塘站风速递减率在 $0 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右, 最强递减出现在近地层大气中, 其值约为 $-1 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ (图 7a)。九龙站低层大气的风速递减率也是略小于 $0 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$, 只有 14 时低层风迅速增长到一个极大值后开始减弱, 因此风速增长率为正 (图 7b)。红原中低层大气的风速递减率在 $0 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右, 只有近地层风速迅速增大, 20:00 近地层大气的风速递减率较大 (图 7c)。剑阁站中低层大气的风速递减率略小于 $0 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$, 说明其从近地层向上风速逐渐增大 (图 7d)。名山站在 900 m 以下的低层大气的风速递减率为较大的负值, 说明其风速增长很快, 近地层大气的风速递减率非常大, 达到极值后又快速减小, 衰减速度也快 (图 7e)。宜宾站低层大气的风速递减率超过 $-1 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$, 900 m 以上递减率即在 $0 \text{ m s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ 左右波动 (图 7f)。

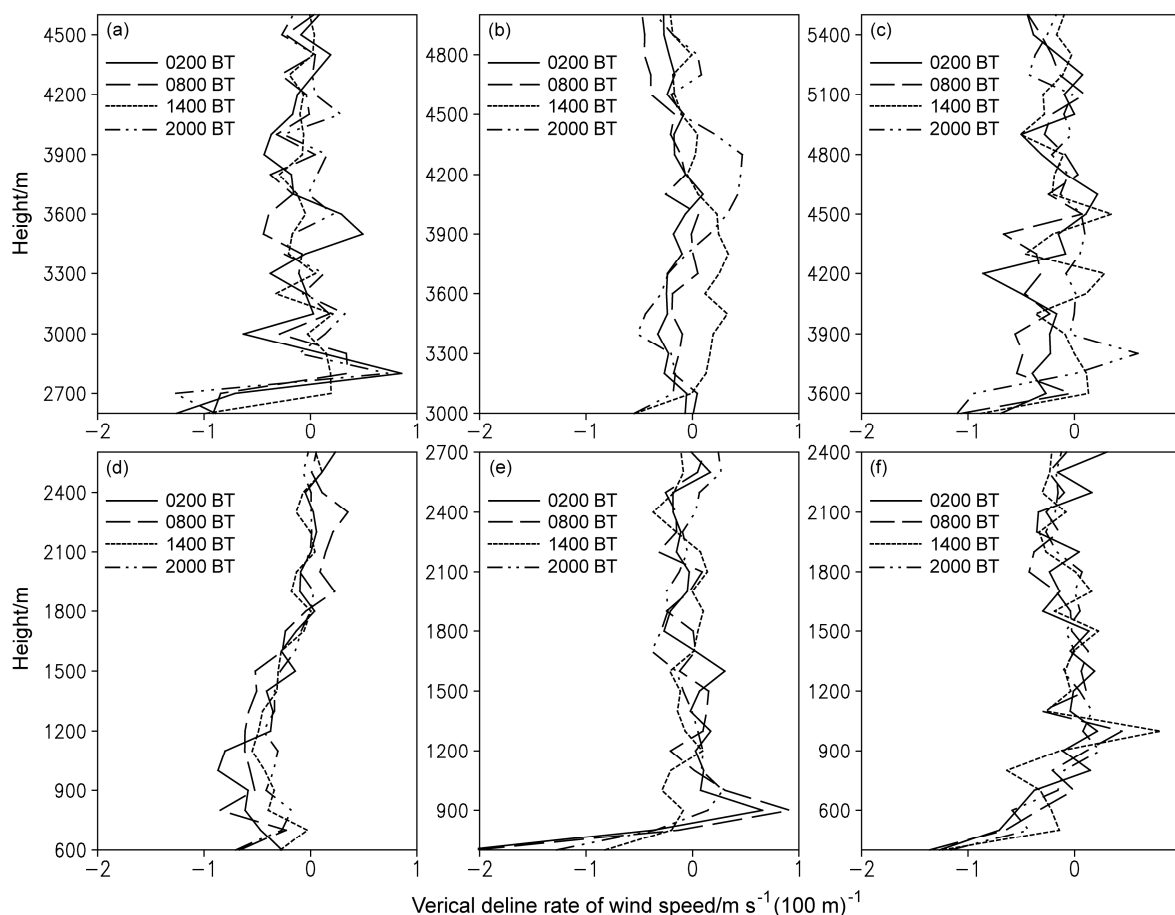


图7 同图2, 但为风速切变廓线, 单位: $\text{m s}^{-1}(100 \text{ m})^{-1}$

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for vertical wind shears, units: $\text{m s}^{-1}(100 \text{ m})^{-1}$

总体来说, 高海拔地区低层大气的风速增长率变幅大于低海拔地区。分时次而言, 在低海拔地区 02:00/20:00 近地层的风速递减率最大, 14:00 则最小。

4 不同天气背景的大气廓线

通过地面降水资料选取各个台站有雨日和无雨日, 对比这两种天气背景下的 14:00 对应的大气廓线。先分析高海拔台站大气廓线的对比图(图 8), 有雨日的边界层中下部的大气温度明显低于无雨日, 边界层上层则相反, 有雨日的气温高于无雨日(图 8a)。有雨日整个边界层的大气比湿都远远高于无雨日, 相差幅度超过 3 g kg^{-1} (图 8b)。有雨日边界层的中上部的风速较无雨日大, 低层则是无雨日风速略大(红原除外), 风速差值在 1 m s^{-1} 左右(图 8c)。再比较低海拔台站的大气廓线对比图(图 9), 大气温度廓线同样表现为无雨日边界层大气温

度高于雨天, 剑阁站边界层上部有雨日的气温高过无雨日(图 9a)。就比湿而言, 边界层下部同样是有雨日大, 无雨日小, 中部则相反(剑阁站例外), 顶部有雨日又超过了无雨日(图 9b)。有雨日整个边界层的风速都大于无雨日, 剑阁站风速差异最小, 边界层上部无雨日风速还超过了有雨日(图 9c)。高低海拔台站有雨日边界层中下部的温度都低于无雨日, 高海拔台站有雨日的大气湿度显著大于无雨日, 低海拔台站有雨日的风速则明显超过无雨日。这个现象反映了高原地区降水需要大气具有相当的水汽含量, 而低海拔地区降水则有风的输送/辐合。

5 地表大气的日变化特征

每日 4 个时次的探空对日变化的刻画略显不足, 因此再采用台站的逐时资料给出观测期间地表大气物理量的日变化形态(图 10)。首先比较地表

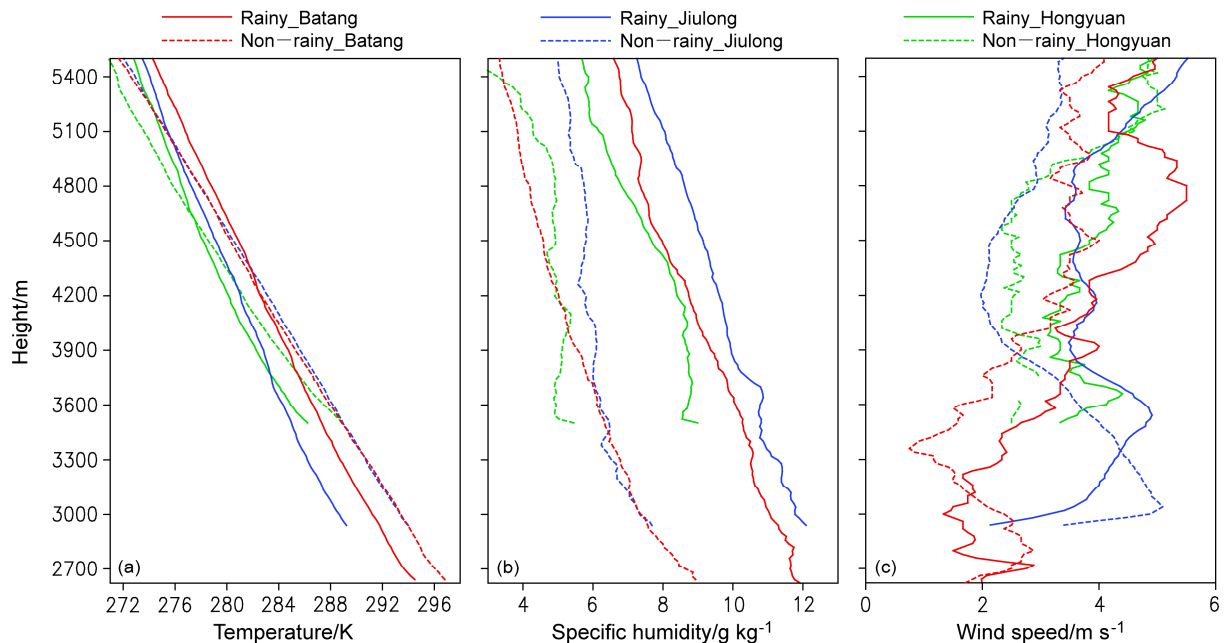


图8 高海拔台站有雨日(实线)和无雨日(虚线)14:00的大气对比廓线:(a)温度(单位: K); (b)比湿(单位: g kg^{-1}); (c)风速(单位: m s^{-1})。红色线代表巴塘, 蓝色线代表九龙, 绿色线代表红原

Fig. 8 Comparison of vertical profiles of atmospheric elements between rainy days and non-rainy days at 1400 BT at high-altitude stations: (a) Potential temperature (units: K); (b) humidity (units: g kg^{-1}); (c) wind speed (units: m s^{-1}). Red lines denote Batang, blue lines denote Jiulong, green lines denote Hongyuan

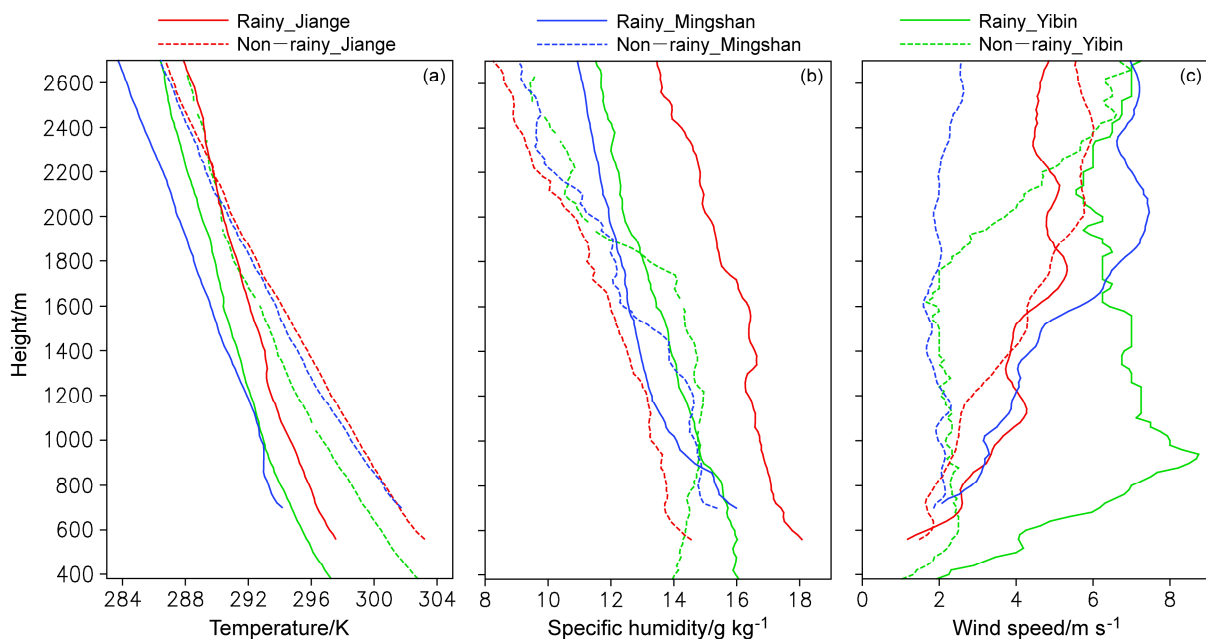


图9 低海拔台站有雨日(实线)和无雨日(虚线)14:00的大气对比廓线:(a)温度(单位: K); (b)比湿(单位: g kg^{-1}); (c)风速(单位: m s^{-1})。红色线代表剑阁, 蓝色线代表名山, 绿色线代表宜宾

Fig. 9 Comparison of vertical profiles of atmospheric elements between rainy days (solid lines) and non-rainy days (dashed lines) at 1400 BT at low-altitude stations: (a) Potential temperature (units: K); (b) humidity (units: g kg^{-1}); (c) wind speed (units: m s^{-1}). Red lines denote Jiange, blue lines denote Mingshan, green lines denote Yibin

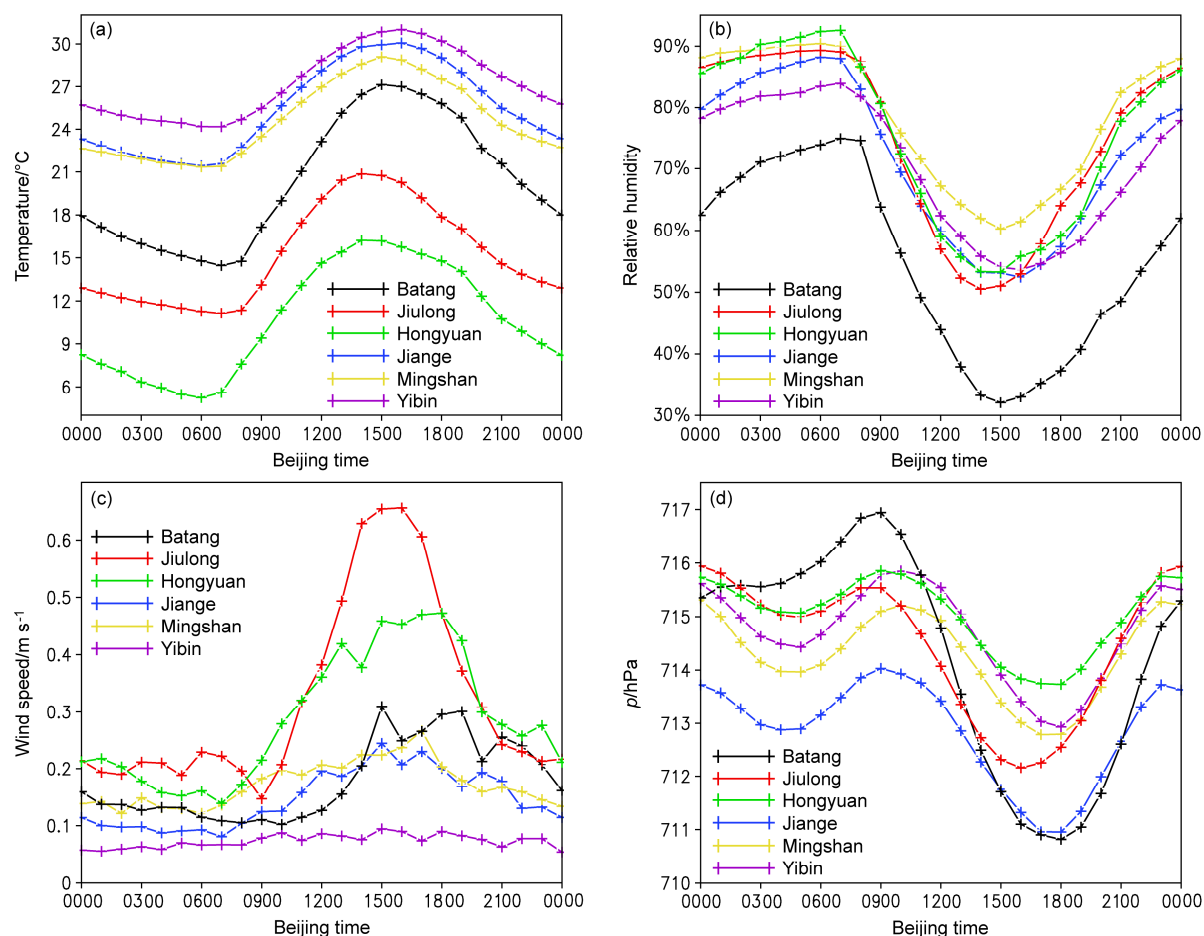


图 10 6 个台站地表物理量场的日变化特征：(a) 温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；(b) 相对湿度；(c) 风速（单位： m s^{-1} ）；(d) 气压（单位：hPa；为了绘图方便，以九龙站为标，根据海拔高度差异将其他台站的气压减去一个相应的定值）

Fig. 10 Diurnal variations of surface physical quantities at six stations: (a) Temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), (b) relative humidity, (c) wind speed (units: m s^{-1}), and (d) pressure (units: hPa, for the convenience of figure plotting, Jiulong station is taken as a reference station, and pressures at other stations are adjusted by the elevation differences between these stations and Jiulong)

大气温度（图 10a），各个台站温度皆呈现一峰一谷的日变化特征，测站海拔高度越低，地表大气温度越高，因此，宜宾站最高，红原站最低。巴塘站最高温度出现在 15:00，约为 27°C ，最低温度出现在 07:00，约 14.8°C ，变化幅度 12°C 左右。九龙站最高温度出现在 14:00，约为 21°C ，最低温度出现在 07 时，约 11°C ，变化幅度 10°C 左右。红原站最高温度出现在 14:00，约为 16°C ，最低温度出现在 06:00，约 5°C ，变化幅度 11°C 左右。剑阁站最高温度出现在 16:00，约为 30°C ，最低温度出现在 07:00，约 21.5°C ，变化幅度 8.5°C 左右。名山站最高温度出现在 15:00，约为 29°C ，最低温度出现在 07:00，约 21.5°C ，变化幅度 6.5°C 左右。宜宾站最高温度出现在 16:00，约为 31°C ，最低温度出现在

07:00，约 24°C ，变化幅度 7°C 左右。高海拔台站的温度变幅较大，温度极大值出现时间也最早。相对湿度与温度几乎是反位相的（图 10b），也是一峰一谷结构，峰值出现在 06:00~07:00，谷值出现在 15:00~16:00，九龙/红原站谷值时间出现最早，在 14:00。巴塘站的相对湿度范围在 $32\%\sim 75\%$ ，变幅约为 43% ；九龙站的相对湿度范围在 $51\%\sim 89\%$ ，变幅为 38% 左右；红原站的相对湿度范围在 $54\%\sim 93\%$ ，变幅为 39% ；剑阁站的相对湿度范围在 $53\%\sim 88\%$ ，变幅为 35% ，名山站的相对湿度范围在 $60\%\sim 90\%$ ，变幅为 30% ；宜宾站的相对湿度范围在 $54\%\sim 84\%$ ，变幅约为 30% 。高海拔台站相对湿度的变化幅度最大。6 个台站地表大气的风速都较小，最大风速出现在午后 14:00~18:00 之间，九龙站的风速

最大,接近 0.7 m s^{-1} , 宜宾站风速最小,在 0.1 m s^{-1} 左右(图 10c)。各个台站的气压随海拔高度升高而降低,气压呈现双峰双谷结构(图 10d),最大峰值出现在 09:00~10:00,次峰值出现在 23:00~00:00,最低谷值出现在 17:00~18:00,次谷值出现在 03:00~04:00。九龙站最低谷值出现时间在 16:00,巴塘/红原最低谷值出现在 17:00,相对较早。就日变幅而言,巴塘站最大,约 6 hPa。总体来说,高海拔台站的地表大气的日变化幅度大,极值出现时间略早。通过相关系数(表略)得知,高海拔台站,地表温度和湿度、气压的具有较强的相关性,即温度与湿度之间表现为正相关,气压与温度则存在负相关。低海拔台站温度与湿度没有明显的相关性,与气压的相关性较之高海拔台站也较弱。

6 小结

本文基于高原所在青藏高原东侧地区所获取的西南涡加密观测探空资料,选取不同海拔高度的 6 个台站资料,针对他们边界层大气特征进行对比分析,得到以下结论:

(1) 地表大气物理量值的日变化特征显示高海拔地区地表大气受陆面的影响更为剧烈,九龙和巴塘 2 个高海拔台站的温度/比湿/风速/气压的日变化幅度都较大,且极值出现时间早于其他几个低海拔台站。

(2) 4 个探空时次观测的大气温度/比湿/风速在边界层中都具有明显的日变化特征,越靠近地面,差别越显著。温度递减率在 02:00 最小,14:00 最大,直接取决于陆面受太阳辐射造成的升温影响,高海拔测站受陆面影响的大气层厚度比低海拔测站大。低海拔测站在近地层 300 m 以下大气中存在明显的逆温现象。14:00 近地层大气的比湿及其递减率皆最小,02:00 近地层大气的比湿和递减率都最大。高海拔地区边界层内风速日变化幅度更大,4 个时次的风速廓线形态差异也大;低海拔地区风速变化幅度较小,4 个时次的风速廓线形态也比较一致。

(3) 高海拔台站地表大气的日变化幅度大,极值出现时间略早。

另外,文中分析的台站有的位于高原东坡,有的位于四川盆地,也有的位于丘陵地带,他们除了海拔高度的差异,同时在地里位置、下垫面状况等方面也存在较大的差异,本文仅以海拔高度将其归

类进行对比分析是非常粗略的,有待下一步继续深入细化研究。

参考文献 (References)

- Kumar M, Mallik C, Kumaar A, et al. 2010. Evaluation of the boundary layer depth in semi-arid region of India [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 49 (2): 96–107, doi:10.1016/j.dynatmoce.2009.01.002.
- 李娟, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. 青藏高原东南部复杂地形区不同天气状况下陆气能量交换特征分析 [J]. *大气科学*, 40 (4): 777–791. Li Juan, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Characteristics of land-atmosphere energy exchanges over complex terrain area of southeastern Tibetan Plateau under different synoptic conditions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (4): 777–791, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15197.
- 李茂善, 马耀明, 胡泽勇, 等. 2004. 藏北那曲地区大气边界层特征分析 [J]. *高原气象*, 23 (5): 728–733. Li Maoshan, Ma Yaoming, Hu Zeyong, et al. 2004. Study on characteristics of atmospheric boundary layer over Naqu region of northern Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (5): 728–733, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.05.025.
- 李茂善, 戴有学, 马耀明, 等. 2006. 珠峰地区大气边界层结构及近地层能量交换分析 [J]. *高原气象*, 25 (5): 807–813. Li Maoshan, Dai Youxue, Ma Yaoming, et al. 2006. Analysis on structure of atmospheric boundary layer and energy exchange of surface layer over Mount Qomolangma region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (5): 807–813, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.05.006.
- Li M S, Ma Y M, Ma W Q, et al. 2011. Different characteristics of the structure of atmospheric boundary layer between dry and rainy periods over the northern Tibetan Plateau [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 3 (6): 509–516, doi:10.3724/SP.J.1226.2011.00509.
- 李英, 李跃清, 赵兴炳. 2008. 青藏高原东部与成都平原大气边界层对比分析 II——近地层湍流特征 [J]. *高原山地气象研究*, 28 (3): 8–14. Li Ying, Li Yueqing, Zhao Xingbing. 2008. The comparison and analysis of ABL observational data on the east Edge of Tibetan Plateau and in Chengdu Plain II—Characteristics of turbulence in the surface layer [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 28 (3): 8–14, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.03.002.
- 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010. 2010 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 30 (4): 80–84. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Deng Bo. 2010. Intensive observation scientific experiment of the southwest vortex in the summer of 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 30 (4): 80–84, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2010.04.014.
- 刘红燕, 苗曼倩. 2001. 青藏高原大气边界层特征初步分析 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 37 (3): 348–357. Liu Hongyan, Miao Manqian. 2001. Preliminary analysis on characteristics of boundary layer in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 37 (3): 348–357, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2001.03.013.
- Liu H Z, Zhang H S, Bian L G, et al. 2002. Characteristics of micrometeorology in the surface layer in the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (1): 73–88, doi:10.1007/s00376-002-0035-7.
- 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 467–476. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013.

- Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315.
- 卢萍, 郑伟鹏, 赵兴炳. 2012. 川西西南涡加密探空资料分析及数值模拟试验 [J]. 高原山地气象研究, 32 (1): 1–7. Lu Ping, Zheng Weipeng, Zhao Xingbing. 2012. Analysis of the sounding data of intensive observation of the southwest vortex in western Sichuan area and its application in the numerical simulations [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 32 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2012.01.001.
- 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 24 (5): 715–722. Ma Yaoming, Osamu T, Wu Xiaoming, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 715–722, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.16.
- 马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 2002. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析 [J]. 高原气象, 21 (5): 514–517. Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. 2002. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (5): 514–517, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.05.012.
- 苗曼倩, 曹鸿, 季劲钧. 1998. 青藏高原大气边界层湍流特征量分析 [J]. 高原气象, 17 (4): 356–363. Miao Manqian, Cao Hong, Ji Jingjun. 1998. Analysis of turbulent characteristics in atmospheric boundary layer over the Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (4): 356–363.
- 祁永强, 王介民, 贾立, 等. 1996. 青藏高原五道梁地区湍流输送特征的研究 [J]. 高原气象, 15 (2): 172–174. Qi Yongqiang, Wang Jiemin, Jia Li, et al. 1996. A study of turbulent transfer characteristics in Wudaoliang area of Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (2): 172–174.
- 王蓉, 黄倩, 田文寿, 等. 2015. 边界层对流对示踪物抬升和传输影响的大涡模拟研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 731–746. Wang Rong, Huang Qian, Tian Wenshou, et al. 2015. Study of a large eddy simulation of the effects of boundary layer convection tracer uplift and transmission [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(4): 731–746, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14155.
- 王绍令, 丁永建, 赵林, 等. 2002. 青藏高原局地因素对近地表地温的影响 [J]. 高原气象, 21 (1): 85–89. Wang Shaoling, Ding Yongjian, Zhao Lin, et al. 2002. The influence of local factor on surface layer ground temperature in Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (1): 85–89, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.014.
- 王颖, 隆霄, 余晔, 等. 2013. 复杂地形上气象场对空气质量数值模拟结果影响的研究 [J]. 大气科学, 37 (1): 14–22. Wang Ying, Long Xiao, Yu Ye, et al. 2013. The impacts of various meteorological conditions on air quality modeling results over complex terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 14–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11089.
- 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 2014. 大理苍山—洱海局地环流的数值模拟 [J]. 大气科学, 38 (6): 1198–1210. Xu Lujun, Liu Huizhi, Cao Jie. 2014. Numerical simulation of local circulation over the Cangshan Mountain–Erhai Lake area in Dali, Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1198–1210, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13293.
- 周明煜, 钱粉兰, 陈陟, 等. 2002. 西藏高原斜压对流边界层风、温、湿廓线特征 [J]. 地球物理学报, 45 (6): 773–783. Zhou Mingyu, Qian Fenlan, Chen Zhi, et al. 2002. The characteristics of the profiles for wind, temperature and humidity in the baroclinic convective boundary layer on Xizang Plateau [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 45 (6): 773–783, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2002.06.004.
- 卓嘎, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 青藏高原边界层高度特征对大气环流动力学效应的数值试验 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 163–169. Zhuo Ga, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2002. Dynamical effect of boundary layer characteristics of Tibetan Plateau on general circulation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (2): 163–169, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.02.004.
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵, 等. 2004. 非均匀下垫面边界层的观测和数值模拟研究 (I): 冷岛效应和逆湿现象的完整物理图像 [J]. 高原气象, 23 (2): 155–162. Zuo Hongchao, Lü Shihua, Hu Yinqiao, et al. 2004. Observation and numerical simulation of heterogenous underlying surface boundary layer (I): The whole physical picture of cold island effect and inverse humidity [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 155–162, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.02.005.
- Zuo H C, Hu Y Q, Li D L, et al. 2005. Seasonal transition and its boundary layer characteristics in Anduo area of Tibetan Plateau [J]. Progress in Natural Science, 15 (3): 239–245, doi:10.1080/10020070512331342050.