

李英, 卢萍, 赵兴炳. 青藏高原及周边地区近地层气候要素特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 81–90.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



青藏高原及周边地区近地层气候要素特征分析

李 英^{1,2}, 卢 萍^{1,2*}, 赵兴炳^{1,2}

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

摘 要: 利用中国气象局成都高原气象研究所建立的 5 个边界层站(涪潭、巴中、什邡、曲麻莱、狮泉河)2019 年的观测资料, 对比分析青藏高原及周边地区近地层大气要素变化和陆—气能量交换特征及异同点, 探讨其原因。结果表明: (1) 青藏高原及周边地区近地层大气温度、相对湿度、风速、感热通量、潜热通量、动量通量均符合一峰一谷的常规日变化特征, 气压具有双峰双谷的日变化特征。(2) 高海拔台站近地层温度日变幅(12 ℃)高于周边低海拔地区(4~6 ℃), 季变幅与海拔高度的关系不显著。(3) 相对湿度与温度关系密切, 相对湿度的垂直结构和日变化都具有明显的区域差异, 其垂直梯度夜间显著高于白天, 峰值出现时间随夏、秋、春、冬季呈现季节性滞后, 而谷值超前。(4) 风速春季较大, 夏、秋季次之, 冬季小, 季变幅略小于日变幅; 低海拔区域的风速及其日变幅均显著低于高海拔区域。(5) 低海拔区域气压季变幅(>13 hPa)远高于日变幅(2.5 hPa 左右), 而高海拔区域气压季变幅(>3 hPa)略低于日变幅(2 hPa 左右)。(6) 感热通量春季大、冬季小; 感热通量和动量通量在高海拔区域均较高, 二者具有较一致的日、季变化特征, 表明大气动力因子对于陆—气过程感热交换起着重要的作用; 潜热通量夏季高、冬季低, 与海拔高度关系不明显, 主要由测站所在位置、温度、湿度、地形、地貌等因素共同决定。

关键词: 青藏高原; 近地层; 日变化; 梯度; 湍流输送

中图分类号: P482.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2023)02-0081-10

大气边界层最贴近地球表面, 是地球与大气间物质和能量交换的纽带。大气观测是认识天气、气候变化的首要基础^[1], 通过观测资料揭示大气边界层特征是边界层气象学研究的热点之一^[2-16]。已有相关工作大多是基于短期资料开展的 analysis 研究, 如奥银焕等^[17]基于 1991 年 10 月 8—12 日 HEIFE 实验的系留气球梯度探测资料分析了河西地区边界层特征; 钱泽雨等^[18]采用 2002 年 5 月 30 日—6 月 24 日

青藏高原北麓河冻土综合试验站观测资料研究了该地区近地层能量输送与微气象特征; 王新平等^[19]使用 2003 年 8 月 13—26 日中国科学院大气物理研究所大气边界层气象塔的观测资料分析了夏季北京大气边界层湍流通量; 杨丽薇等^[20]通过 2014 年 7 月 18 日—8 月 31 日青藏高原中部聂荣观测站的近地层湍流观测资料得到该地区近地层湍流特征; 张懿等^[21]利用 2015 年 7 月 4—13 日玛曲高寒草甸观测资料研究了其夏季近地层微气象特征, 这些研究主要基于短期观测资料揭示了特定地区边界层特征量的日变化特征。也有一些研究基于单一地区较长时段资料, 揭示该区域边界层特征量的季节变化特征, 如李英等^[22]分析了青藏高原东侧理塘站 2006 年 1 月和 7 月湍流通量输送特征。徐安伦等^[23]利用 2008 年 1 月—2010 年 2 月青藏高原东南缘大理站的观测资料, 分析了该地区近地层基本气象要素、辐射通量和

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-03-30

基金项目: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJYJXMS202216); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0103, 2019QZKK0105)

作者简介: 李英(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事大气边界层研究。E-mail: liyong8117@qq.com

通信作者: 卢萍(1976—), 女, 研究员, 主要从事资料分析和西南地区暴雨研究。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn

湍流通量的日变化和季节变化特征。杨智等^[24]利用大理国家气候观象台 2007 年 3—12 月观测资料,研究该地区湍流特征量的日变化和干湿季变化特征。顾军明等^[25]利用塔克拉玛干沙漠北缘哈德自动气象站 2011 年 1—12 月近地面层气象要素梯度观测资料,分析了该地区近地层风速、气温和相对湿度的日变化规律及四季廓线特征。以上研究表明基于边界层观测资料认识近地层气象要素特征和湍流通量是大气边界层研究的重点方向之一,然而基于长期观测资料开展多测站大气边界层特征的对比研究较少,有待加强。

青藏高原及周边地区地形复杂、环境恶劣、测站稀少,一直是气象观测的薄弱区。为此,中国气象局成都高原气象研究所(以下简称“高原所”)先后在青藏高原和周边地区建立了大气边界层观测站网,开展了近地层基本气象要素和湍流通量等观测。本文利用高原所在青藏高原及周边地区建立的 5 个边界层观测站 2019 年全年观测资料,对比分析青藏高原及周边地区近地层特征量变化特征,并初步探讨造成差异的原因,一方面进一步丰富资料匮乏区的大气边界层观测事实,另一方面不断加深对不同下垫面近地层大气特征的认识,为陆—气过程资料分析与应用、数值模拟验证和改进等提供观测基础和评估依据。

1 观测站网及其观测资料

1.1 边界层观测站

高原所在青藏高原及周边地区建立了狮泉河、曲麻莱、什邡、巴中、涪潭、温江、理塘和稻城 8 个边界层观测站,针对 2019 年全年原始观测资料,在剔除不连续的奇异点等质量控制基础上,经筛选发现仅有 5 个测站的资料相对完整和可用,故应用青藏

高原西部的狮泉河(4 270 m)、东北部的曲麻莱(4 176 m)、青藏高原东侧边坡的什邡(536 m)、四川盆地东北部的巴中(558 m)和云贵高原东北部的涪潭(793 m)5 个边界层观测站(图 1)的资料开展分析研究。将曲麻莱、狮泉河视为青藏高原的高海拔台站,涪潭、巴中、什邡则视为青藏高原周边地区的低海拔台站。

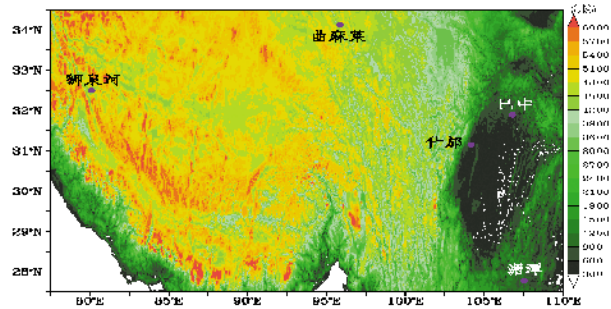


图 1 青藏高原及周边地区边界层观测站分布

1.2 观测数据资料

边界层塔共有 5 层梯度观测,主要观测风速和风向(WindObserve 二维风速风向传感器)、气温和相对湿度(HMP155 空气温湿度传感器),架设高度分别为 1、2、4、8 和 16 m,涪潭站在 20 m 高度增设了一层梯度观测,共计 6 层。除了进行基本物理量的梯度观测外,同时还开展地表湍流通量(IRGASON 一体式湍度传感器)、气压(PTB330 大气压力传感器)等近地层特征量观测。边界层塔常年连续观测,文中采用存储间隔为 30 min 的观测数据。由于仪器故障等缘故,各个测站都存在一定的缺测(表 1)。另外,狮泉河站 16 m 高度观测的风速紊乱,故该站的风速分析仅采用 1~4 层的观测资料。由于不同测站的经度差异造成一定的时差,因此,曲麻莱站采用滞后 1 h 的资料,狮泉河站采用滞后 2 h 的资料。

表 1 边界层站观测资料缺测情况(北京时,下同)

站名	通量观测缺测时段	梯度观测缺测时段
涪潭		1 月 17 日 10:00—1 月 17 日 15:30
巴中	3 月 3 日 16:00—3 月 5 日 09:00	1 月 29 日 00:30—2 月 28 日 00:00 3 月 12 日 10:30—7 月 14 日 08:00
什邡	1 月 1 日 00:00—3 月 30 日 00:00 7 月 12 日 09:30—8 月 24 日 10:00	1 月 29 日 00:30—3 月 1 日 12:30
曲麻莱	1 月 1 日 00:00—5 月 29 日 00:00 6 月 12 日 19:30—6 月 26 日 09:00 9 月 26 日 00:30—10 月 28 日 11:00	6 月 12 日 19:30—6 月 26 日 09:00
狮泉河	1 月 1 日 00:00—4 月 17 日 21:30 4 月 24 日 12:30—4 月 25 日 12:00	11 月 15 日 13:30—12 月 31 日 23:30

2 梯度观测量的日变化和梯度变化特征

2.1 近地层温度特征

温度垂直分布廓线显示 5 个测站近地层大气温度具有相似的垂直结构特征。近地层温度日变化主要受太阳辐射与地面长波辐射的影响,夜间时段(21:00—次日 06:00)气温随高度的增加而增大,呈逆温状态,00:00 左右逆温最显著,随后逐渐变弱;昼间时段(09:00—18:00)气温随高度的增加而减小。涪潭近地层温度为 13~18.7 °C,日变幅为 5.7 °C;巴中为 11.4~15.6 °C;什邡站为 15.2~21 °C;曲麻莱站为 -6.5~5 °C;狮泉河站为 -3~8.5 °C,日变幅为 11.5 °C。

5 个测站近地层大气温度具有相似的日变化和季变化特征(图 2)。温度日变化符合常规的一峰一谷特征,低海拔台站的温度日变幅(约 4~6 °C)远远低于高海拔台站(约 12 °C)。夏季温度最高,秋春季次之,冬季最低,温度季变幅在 20 °C 左右,季变幅与海拔高度的关系不显著。涪潭、什邡、曲麻莱站春秋季节温度相当,而巴中和狮泉河站春季温度显著低于秋季。

2.2 近地层相对湿度特征

5 个测站近地层相对湿度垂直结构具有相似特征。21:00—次日 09:00 相对湿度呈现随高度增加而递减的特征,21:00 垂直梯度最大;15:00 左右相对湿度最小。各站的垂直结构差异主要体现在午后时段,涪潭和什邡站在 4 m 高度附近存在一个大值拐点(该时段地面蒸发最大,贴地层的风速小、摩擦强,故湍流输送弱,使得水汽在这个高度层下有所滞留,向上混合不充分,其上层由于风速增大、摩擦作用减

小,水汽被充分发展的湍流带到较高大气中)。巴中站相对湿度在 8 m 高度附近出现一个小值拐点(这是因为白天山谷风从湿度较大的山谷吹向山坡,进一步增加了近地面层水汽含量),高海拔青藏高原主体的 2 个台站风速大,混合均匀,没有出现显著拐点。曲麻莱站夜间温度低,下垫面较湿润,造成靠近地面的相对湿度垂直梯度较大。狮泉河站下垫面为干燥戈壁,陆面蒸发的水汽贡献小,综合风速和气温因素,造成相对湿度随高度增加略有增加的现象。

青藏高原周边 5 个观测站近地层相对湿度除了垂直结构差异,日变化和季节变化也存在一定的差异。涪潭站近地层相对湿度日变化为 68%~96%;巴中站为 71%~89%,日变幅最小,约为 18%;什邡站为 64%~91%;曲麻莱站为 39%~80%,日变幅最大为 41%;狮泉河站为 19%~48%。涪潭白天相对湿度表现为冬季最大,春秋次之,夏季最小,季变幅在 12% 左右;巴中与什邡站相似,秋季最大,夏、冬季次之,春季最小;曲麻莱站夏季最大,接近低海拔地区的相对湿度(约 90%),秋季次之,冬季最小,季节变幅在 17% 左右;狮泉河站冬、夏相对湿度较大,春、秋较小,季节变幅在 14% 左右(图 3)。

温度是影响相对湿度日变化的主要因子之一,故近地层相对湿度的日变化特征与温度呈现明显的反相位关系。午后,低海拔测站的相对湿度常常会在摩擦层顶附近出现一个拐点,夜间相对湿度垂直梯度明显高于白天。相对湿度峰值出现时间随夏、秋、春、冬季呈现季节性滞后,而谷值超前。

2.3 近地层风场特征

5 个测站均以偏南风为主。涪潭站主要是东南

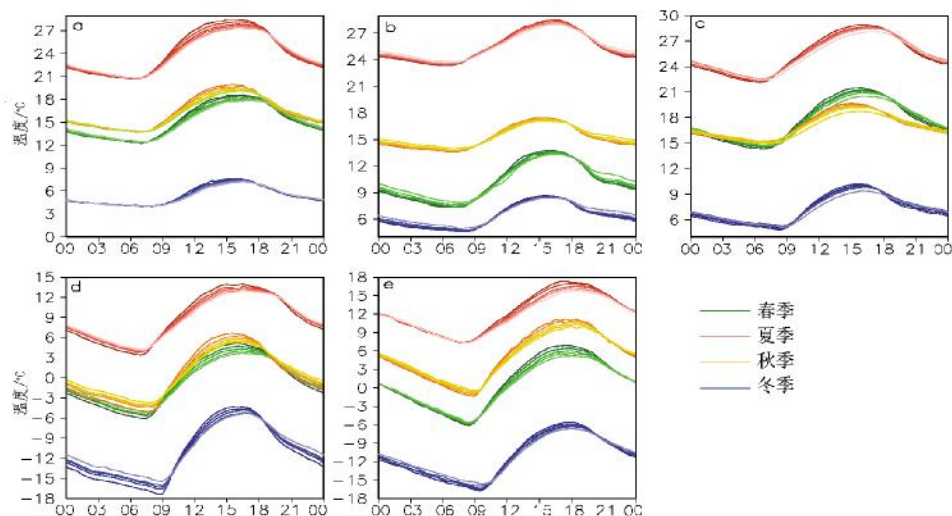


图 2 2019 年四季平均的近地层逐层梯度观测层温度日变化

(a 为涪潭站, b 为巴中站, c 为什邡站, d 为曲麻莱站, e 为狮泉河站;同一色系由深入浅代表由低到高的梯度观测,单位:°C)

偏东风,风向日幅度最小;巴中站 09:00—12:00 主要是东南风,风向随高度变化不大,18:00 后 4 m 以下转为西南风,4 m 以上依然以东南风为主;什邡站夜间以偏西南风为主,09:00—18:00 则以东南风为主,越靠近地面风向越偏西,风向垂直梯度越大;曲麻莱站 21:00—次日 06:00 盛行东南风,09:00—18:00 以西南风为主,风向随高度变化不大;狮泉河站全天盛行西南风,午后风向偏西,风向随高度变化不大。涪潭站四季风向差异显著,夏季盛行东南风,春、秋则以偏东风为主,冬季为东北风;巴中站四季无确定风向,不同高度层风向具有显著的日变化和季变化差异;什邡、曲麻莱、狮泉河站相似,风向季节

差异不显著,各季节风向具有相似的日变化特征(图4)。总之,风向日变化和季节变化主要与台站地理位置和环境相关。

由于高层动量下传,风速值随着高度增加而增大,风切变随着高度增加而减小。5个测站近地层风速存在显著的日变化特征,近地层风速表现为一峰一谷的日变化特征,极大值出现在 15:00 左右,极小值出现在 06:00 左右(位于山坡上的巴中站例外,受山谷风环流影响,风速日变化存在午后和夜间 2 个峰值,夜间峰值略大于午后峰值)。4 m 以下,风速梯度较大,4 m 以上则趋缓,风速梯度午间大、夜间小。低海拔台站的风速显著低于高海拔台站,青藏高原

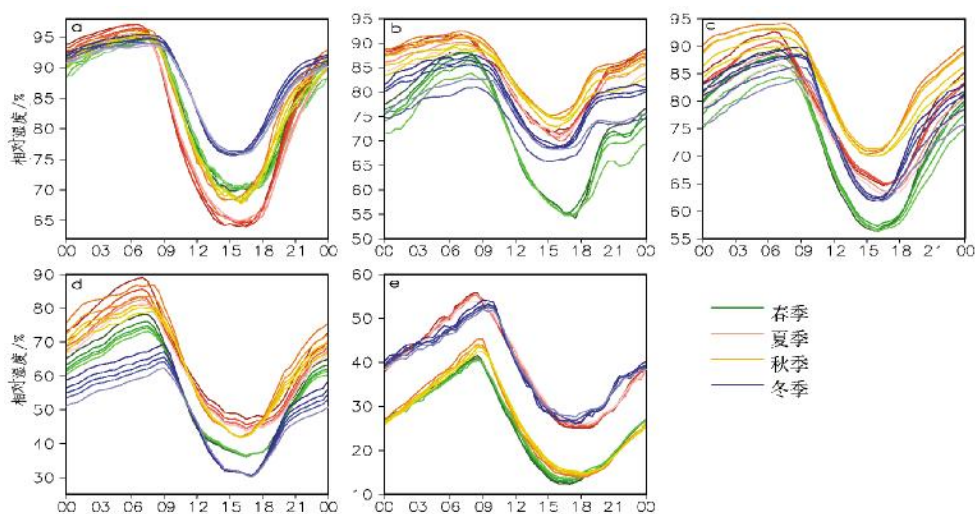


图3 2019年四季平均的近地层逐个梯度观测层相对湿度日变化

(a为涪潭站,b为巴中站,c为什邡站,d为曲麻莱站,e为狮泉河站;

同一色系由深入浅代表由低到高的梯度观测,单位:%)

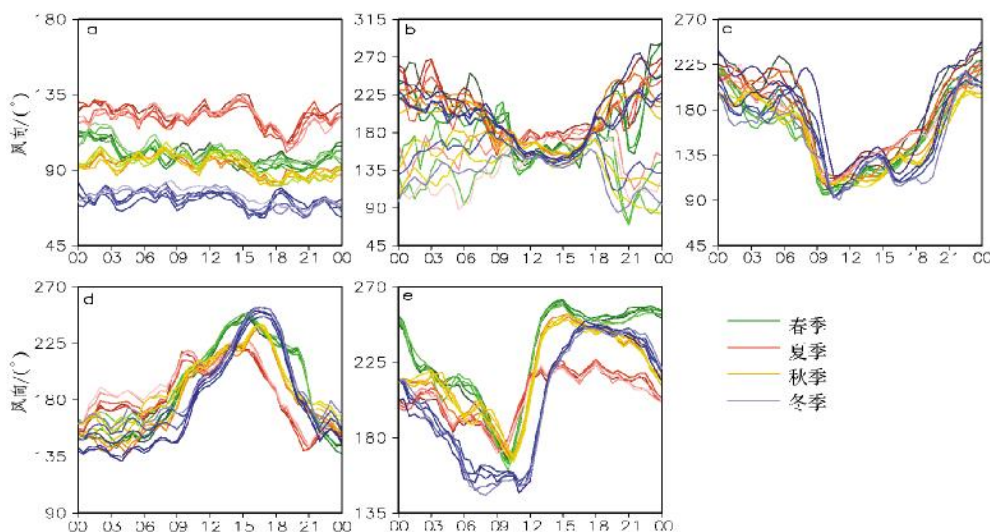


图4 2019年四季平均的近地层逐个梯度观测层风向日变化

(a为涪潭站,b为巴中站,c为什邡站,d为曲麻莱站,e为狮泉河站;

同一色系由深入浅代表由低到高的梯度观测,单位:°)

西部狮泉河站的近地层风速值最大(图5)。

5站风速季节变化特征为春季风速较大,夏、秋季次之,冬季最小(曲麻莱站冬季风速偏大,可能与冬季西北强冷空气有关),季节变幅略小于日变幅。低海拔台站近地层风速($<3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和日变幅($1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右)都显著低于高海拔台站,狮泉河站近地层风速值(约 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和日变幅($>2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)最大。

3 近地层气压变化特征

5个测站近地层气压呈现双峰双谷的日变化特征。湄潭站近地层年平均气压极大值出现在10:00和23:00,极小值出现在17:00和05:00,近地层气压值为921~923.5 hPa,日变幅为2.5 hPa。季节变化为冬季最大,秋季次之,夏季显著低于其它3个季节,冬、夏季变幅约为13 hPa,远大于日变幅。巴中、什邡站近地层年平均气压与湄潭站有相似的日变化和季节变化特征。2个西部测站的日峰值出现时间都明显滞后于东部测站,越往西时间滞后越多。曲麻莱夏季平均气压值最大,秋季次之,冬季最小(春季缺测),冬、夏季变幅约为4 hPa。狮泉河站近地层秋季平均气压值最大,春季次之,冬季最小且日变化不明显,秋、冬季变幅约为3 hPa(图6)。

青藏高原的低海拔台站夏季气压低,冬季气压高,日变幅为2.5 hPa左右,季节变幅14 hPa左右。青藏高原的高海拔台站冬季气压低,其它季节高,这一现象与低海拔台站基本相反。这可能与低海拔台站夏季为热低压、冬季为冷高压,而青藏高原高海拔台站夏季为弱热低压、冬季为强冷低压控制相关联,

值得深入分析。由于气压随高度升高按指数律递减,气压均值和季节变幅与海拔高度的关系最为密切,空气稀薄的高海拔台站的气压季变幅低于低海拔台站,日变幅与季节相关度更高,春季的日变幅最大,而气压日峰值出现时间主要取决于站点经度。高海拔的狮泉河站与曲麻莱站的季节变化差异可能与区域环流等有关。

4 感热、潜热和动量通量特征

由图7可知,5个测站感热通量呈现一峰一谷的日变化特征,峰值出现在13:00—15:00,谷值多在夜间。湄潭站年平均感热通量极大值出现在14:00,极小值出现在07:00,日均值为 $43\sim84\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。平均感热通量夏季最大,秋季次之,冬季最小,季变幅约为 $60\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,季变幅高于日变幅。巴中站与什邡站春季平均感热通量最大,夏季次之,冬季最小,但与秋季很接近,季变幅低于日变幅。曲麻莱站冬季平均感热通量极大值最大,夏季略小,秋季最小,季变幅显著低于日变幅。狮泉河站年平均感热通量极大值出现在15:30,显著滞后于其它4个台站,春季最大,夏季次之,冬季最小,季变幅低于日变幅(图7)。

感热通量受太阳辐射的影响在午后达到极大值,测站位置越靠西则极大值出现时间会相应滞后,日变幅大于季节变幅。春季平均感热通量极大值最高(湄潭站是相对湿度最低的夏季),冬季最低(曲麻莱站冬季近地层风速大,最低值出现在秋季),感热通量季节变化与相对湿度存在显著反相关(如什邡、巴中和曲麻莱站秋季相对湿度较高,感热通量却较

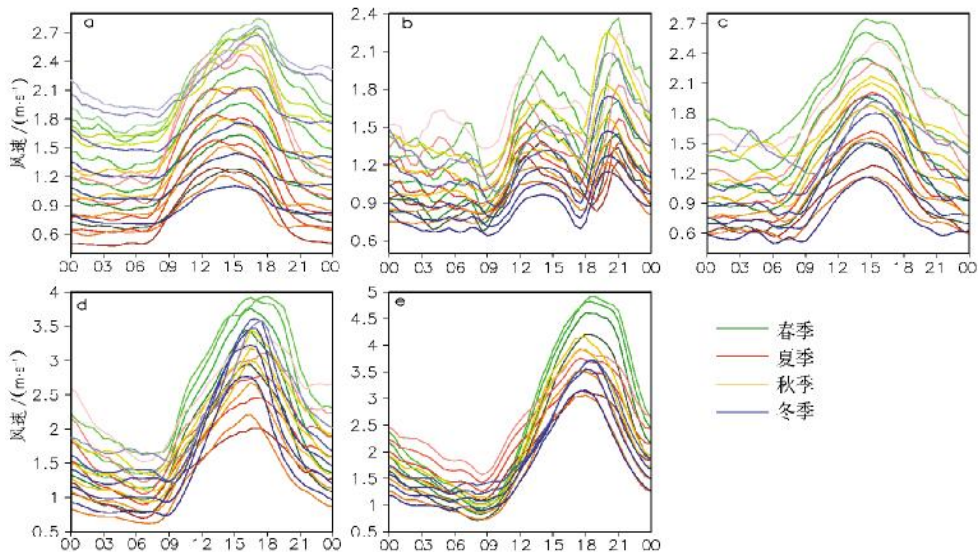


图5 2019年四季平均的近地层逐个梯度观测层风速日变化曲线

(a为湄潭站,b为巴中站,c为什邡站,d为曲麻莱站,e为狮泉河站;

同一色系由深入浅代表由低到高的梯度观测,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

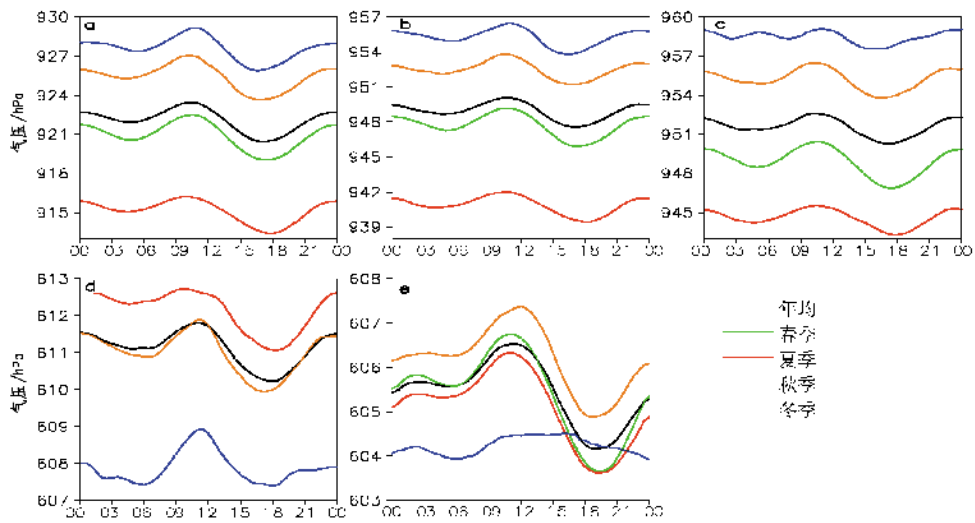


图6 2019年全年和各季平均的近地层气压日变化曲线
(a为涪潭站,b为巴中站,c为什邡站,d为曲麻莱站,e为狮泉河站;单位:hPa)

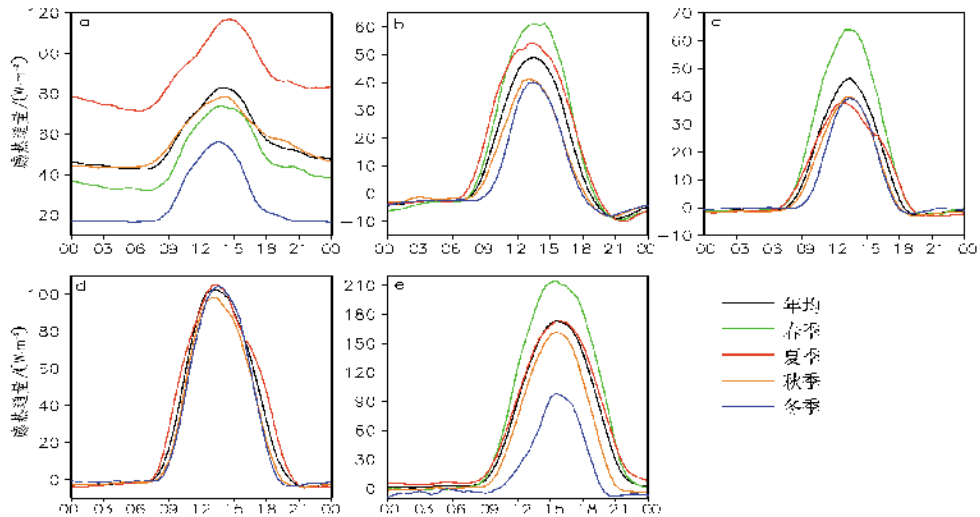


图7 2019年全年和各季平均的近地层感热通量日变化曲线
(a为涪潭站,b为巴中站,c为什邡站,d为曲麻莱站,e为狮泉河站;单位: $W \cdot m^{-2}$)

小)。感热通量的主要影响因子是近地层温差、湿度、风速和太阳辐射等,因此地—气温差、风速、净辐射都较大而相对湿度偏小的青藏高原高海拔台站的感热通量较高;涪潭站位置靠南且海拔略高于其它2个低海拔台站,故其感热通量也较大。感热通量的大值区间随四季日照时长增加而增大。

5个测站的潜热通量均呈现一峰一谷的日变化特征,日变化和季节变化特征相似。年平均潜热通量极大值出现在14:00左右,极小值出现在06:00左右,夏季最大,春季次之,冬季最小;狮泉河站年平均潜热通量极值出现时间略有滞后。低海拔地区潜热通量的极大值相当,但涪潭的日变幅明显偏小;高海拔地区曲麻莱站的潜热通量极大值非常大,日变幅

也最大,狮泉河站的潜热通量最小(图8)。

潜热通量的日变化符合午后大、夜间小(峰值出现时间滞后感热通量约0.5 h),夏季高、冬季低的日、季节变化特征。潜热通量与海拔高度没有直接的关系,主要由测站所在位置和下垫面特征(下垫面表面温度、下垫面饱和水汽压、参考高度空气水汽压、空气动力学阻抗等)共同决定。如:涪潭夜间依然具有相当大的潜热通量,究其原因,应是涪潭夜间的动量通量、风速等都较大,空气动力学阻抗小造成的。夏季,曲麻莱陆—气间潜热通量非常大,则是由于其临近三江源,草甸下垫面非常湿润,地—气温差大,风速大这几个有利因素共同作用的结果。而海拔高度相当的狮泉河为戈壁下垫面,水汽稀少,陆—气潜

热通量很小。

动量通量同样呈现一峰一谷的日变化特征。年平均动量通量极大值出现在 14:30 左右,极小值出现在 05:00 左右,春季最大,秋、春季次之,冬季最小(湄潭例外,夏季最大)。低海拔地区动量通量总体较小,其中湄潭站的动量通量最大;高海拔地区动量通量较大,尤其是狮泉河站,动量通量的极大值是低海拔台站的 2~3 倍(图 9)。对比感热通量可发现,各站动量通量和感热通量的日变化和季节变化趋势相一致,从另一个侧面证实了动力因子在陆—气感热交换中的重要作用。

5 结论和讨论

本文利用 2019 年 5 个边界层站的观测资料,分析了青藏高原及周边地区近地层大气要素变化特征和陆—气能量交换特征,并对比讨论了各测站近地层大气特征的异同点,得到以下主要结论:

(1) 近地层温度具有相似且符合常规认识的日变化、季节变化特征和垂直结构,近地层温度随海拔增加而降低,高海拔台站近地层温度日变幅($12\text{ }^{\circ}\text{C}$)远远高于周边低海拔台站($4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$),季变幅与海拔高度的关系不显著。

(2) 近地层大气相对湿度的变化受温度和风速的双重影响,与温度的日变化呈现明显的反相位关

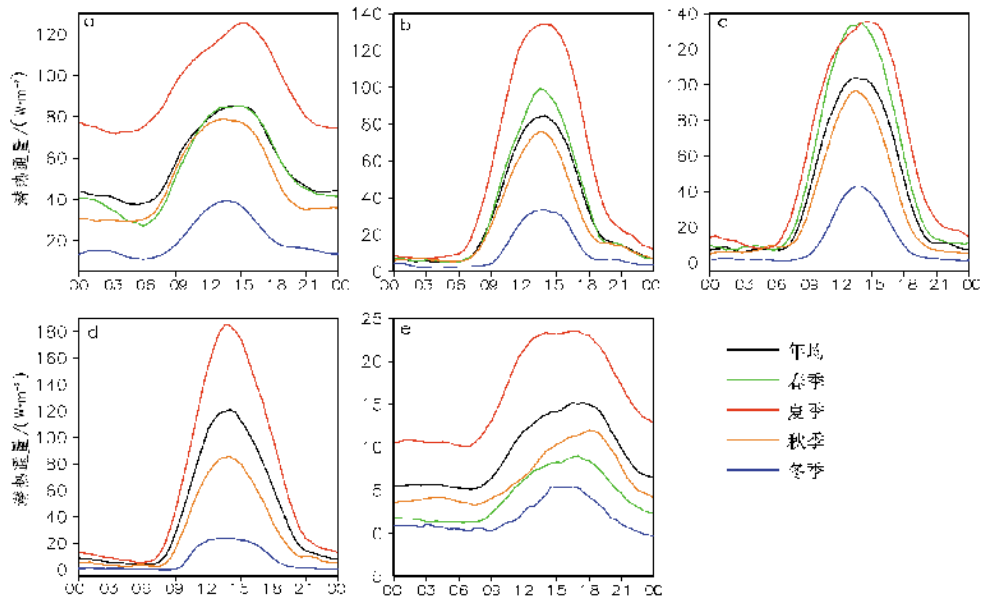


图 8 2019 年全年和各季平均的近地层潜热通量日变化

(a 为湄潭站, b 为巴中站, c 为什邡站, d 为曲麻莱站, e 为狮泉河站; 单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

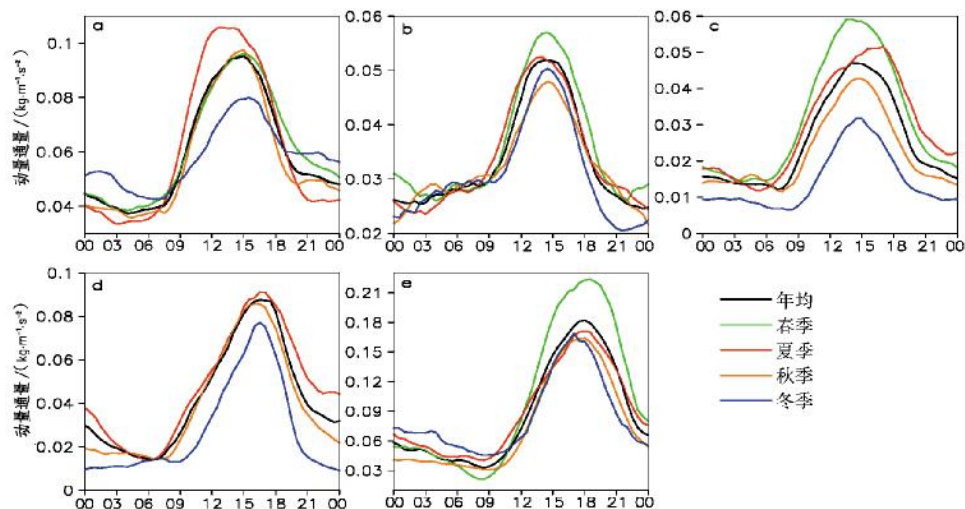


图 9 2019 年全年和各季平均的近地层动量通量日变化

(a 为湄潭站, b 为巴中站, c 为什邡站, d 为曲麻莱站, e 为狮泉河站; 单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

系,具有一峰一谷的日变化特征,夜间相对湿度垂直梯度较白天显著,相对湿度峰值出现时间随夏、秋、春、冬季呈现季节性滞后,而谷值超前。不同区域相对湿度垂直结构和日变化特征存在明显的差异,其中,高海拔地区的曲麻莱站夏季的相对湿度(接近90%)和日变幅(41%)都较高。

(3)近地层风向主要受地理位置和环境的影响,垂直变化不明显,日变化幅度小;风速表现为一峰一谷的日变化特征(位于山坡上的巴中站例外),风速值随高度增高而增大,风切变则随高度增高而减小,低海拔区域的风速和日变幅都显著低于高海拔区域;春季风速较大,夏、秋季次之,冬季最小,季节变幅略小于日变幅。

(4)年均气压与海拔成反比关系,低海拔区域夏季气压低,冬季气压高,日变化呈现显著的双峰双谷结构,季节变幅远高于日变幅;而高海拔区域冬季气压低,其它季节高,与低海拔区域基本相反;高海拔地区季节变幅明显低于低海拔地区。日变幅与季节相关度更高,春季的日变幅最大,而气压日峰值出现时间主要取决于站点经度。

(5)近地层温差、风速、相对湿度和净辐射是感热通量的主要影响因子,感热通量呈现一峰一谷的日变化特征,感热通量通常在春季最大,冬季最小。青藏高原高海拔区域感热通量较高(狮泉河站春季平均值高达 $218 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),低海拔区域较低;其大值区间随日照时长增加而增大。

(6)潜热通量与海拔高度直接关系不明显,主要由区域所在位置和下垫面(温度、湿度、气压、地形、地貌等)特征共同决定,潜热通量呈现午后大、夜间小的一峰一谷日变化和夏季高、冬季低的季节变化特征。

(7)青藏高原及周边地区动量通量呈现一峰一谷的日变化特征,动量通量春季大、冬季小;风速较大高海拔区域动量通量较高(狮泉河站最大,达 $0.228 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$),周边低海拔区域较小。动量通量和感热通量具有较一致的日、季变化特征,表明大气动力因子对于感热交换起着重要的作用。

本文仅对青藏高原及周边地区近地层气象要素特征及其陆—气能量交换特征进行了对比分析,并浅析了其差异原因,可为陆—气相关资料评估和数值模式改进等提供可靠的数据。还需要随着台站数量的增加和观测时段的增长(目前观测资料缺测较多,台站分布稀疏等),基于更丰富的资料,进一步深入地研究边界层大气的日、季和年等多尺度变化特

征及其原因。

参考文献:

- [1] 张宏升,刘艳华,李富余,等.大气边界层探测的意义与作用[J].气象水文海洋仪器,2002(2):20-23.
- [2] 岳平,牛生杰,张强,等.春季晴日蒙古高原半干旱荒漠草原地边界层结构的一次观测研究[J].高原气象,2008,27(4):757-763.
- [3] MAHRT L.Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer[J].Boundary Layer Meteorology,2009,130(1):1-14.
- [4] MESSENGER C,PARKER D J,REITEBUCH O,et al. Structure and dynamics of the Saharan atmospheric boundary layer during the west African monsoon onset: observations and analyses from the research flights of 14 and 17 July 2006[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2010,136(S1):107-124.
- [5] 徐祥德,王寅钧,赵天良,等.高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J].气象,2014,40(10):1165-1173.
- [6] 崔洋,常倬林,桑建人,等.河套干旱地区夏季边界层结构特征观测分析[J].冰川冻土,2015,37(5):1257-1267.
- [7] 王寅钧,徐祥德,赵天良,等.青藏高原东南缘边界层对流与湍能结构特征[J].中国科学:地球科学,2015,45(6):843-855.
- [8] WANG M Z,WEI W S,HE Q,et al.Summer atmospheric boundary layer structure in the hinterland of Taklimakan Desert,China[J].Journal of Arid Land,2016,8(6):846-860.
- [9] 张芬,刘绍民,徐自为,等.张掖绿洲—荒漠区域近地层微气象与水热交换特征[J].高原气象,2016,35(5):1233-1247.
- [10] 张强,王蓉,岳平,等.复杂条件陆—气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J].气象学报,2017,75(1):39-56.
- [11] 高世仰,张杰,罗琦.青藏高原非均匀下垫面热力输送系数的估算[J].高原气象,2017,36(3):596-609.
- [12] 苏彦入,吕世华,范广洲.青藏高原夏季大气边界层高度与地表能量输送变化特征分[J].高原气象,2018,37(6):1470-1485.
- [13] 杜一博,张强,王凯嘉,等.西北干旱区夏季晴天、阴天边界层结构及其陆面过程对比分析[J].高原气象,2018,37(1):148-157.
- [14] MENG X N,LIU H Z,DU Q,et al.Factors controlling the latent and sensible heat fluxes over Erhai Lake under different atmospheric surface layer stability conditions[J].Atmospheric and Oceanic Science Letters,2020,13(5):400-406.
- [15] CHEN J L, WEN J, KANG S C, et al. The evapotranspiration and environmental controls of typical

- underlying surfaces on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 13(1): 53-61.
- [16] 任雪塬, 张强, 岳平, 等. 中国北方四类典型下垫面能量分配特征及其环境影响因子研究[J]. *高原气象*, 2021, 40(1): 109-122.
- [17] 奥银焕, 吕世华, 陈玉春. 河西地区不同下垫面边界层特征分析[J]. *高原气象*, 2004, 23(2): 215-219.
- [18] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征[J]. *高原气象*, 2005, 24(1): 43-48.
- [19] 王新平, 王琳琳, 高志球, 等. 夏季北京城市大气边界层湍流通量的塔层观测[J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(5): 629-638.
- [20] 杨丽薇, 高晓清, 惠小英, 等. 青藏高原中部聂荣亚寒带半干旱草地近地层湍流特征研究[J]. *高原气象*, 2017, 36(4): 875-885.
- [21] 张懿, 文小航, 王少影, 等. 玛曲高寒草甸夏季近地层微气象和 CO₂ 通量特征分析[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 54-63.
- [22] 李英, 李跃清, 赵兴炳. 青藏高原东坡理塘地区近地层湍流通量与微气象特征研究[J]. *气象学报*, 2009, 67(3): 417-425.
- [23] 徐安伦, 李建, 孙绩华, 等. 青藏高原东南缘大理地区近地层微气象特征及能量交换分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(1): 9-22.
- [24] 杨智, 刘劲松, 朱以维, 等. 云贵高原西部大理地区近地层湍流特征分析[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 117-124.
- [25] 顾军明, 霍文, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘近地层气象要素变化特征[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2): 239-247.

Analysis of Climate Characteristics of Near-surface Layer over Tibetan Plateau and Its Surrounding Areas

LI Ying^{1,2}, LU Ping^{1,2}, ZHAO Xingbing^{1,2}

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China;

2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory
of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract Based on the observational data of five boundary layer stations (Meitan, Bazhong, Shifang, Qumalai and Shiquanhe) established by Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration in 2019, the characteristics and differences of atmospheric elements and energy exchange between land-air in this area are compared and analyzed, and the reasons are discussed. The results show that: (1) The diurnal variation of air temperature, relative humidity, wind speed, sensible heat flux, latent heat flux and momentum flux in the surface layer of the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding area shows the conventional characteristics of single peak and single valley, but atmospheric pressure appears the characteristics of double peaks and double valleys. (2) The daily variation amplitude of surface temperature in the high altitude stations (12 °C) is much higher than that in the surrounding low altitude area (4–6 °C), and the relationship between the seasonal variation and the altitude is not significant. (3) Relative humidity is closely related to temperature, and the vertical structure and daily variation characteristic of relative humidity have obvious regional differences. The vertical gradient at night is significantly higher than that during the day, and the time of peak value of relative humidity is seasonally delayed with summer, autumn, spring and winter, while the valley value is ahead. (4) The wind speed is higher in spring, followed by summer and autumn, smaller in winter, and its seasonal variation is slightly smaller than the daily variation. The wind speed and amplitude in low altitude area are significantly lower than those in the high altitude area. (5) The seasonal variation of pressure in low altitude area (more than 13 hPa) is much higher than the diurnal variation (about 2.5 hPa), while the seasonal variation of pressure in high altitude area (more than 3 hPa) is slightly lower than the diurnal variation (about 2 hPa). (6) The sensible heat flux is affected by surface temperature difference, wind speed, relative humidity and net radiation, which is greater in spring than in winter; The sensible heat flux and momentum flux have the same diurnal and seasonal variation, and the atmospheric dynamic factor plays an important role in the sensible heat exchange between land and atmosphere, and both of them are higher at high altitude. The latent heat flux is higher in summer and lower in winter, and has no obvious relationship with the altitude. It is mainly determined by the location of the station, temperature, humidity, topography, geomorphology and other factors.

Key words Tibetan Plateau; surface layer; diurnal variation; gradient; turbulent transport