

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.

Yang Zhi, Liu Jing-song, Zhu Yi-wei, et al. Analyses of turbulence characteristics in the surface layer at Dali of the western Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(1): 117-124.

云贵高原西部大理地区近地层湍流特征分析

杨智^{1,2}, 刘劲松¹, 朱以维¹, 董保举¹

(1. 大理国家气候气象台, 云南 大理 671003; 2. 云南省气象局, 云南 昆明 650034)

摘要:利用大理国家气候气象台 2007 年 3—12 月观测资料,采用涡动相关法等计算方法分析了该地区湍流强度、湍流方差、湍流通量等特征量的日变化和干湿季变化特征。结果表明,湍流强度干季大于湿季;湍流方差与稳定度满足 1/3 次方定律,风速方差在稳定条件下比不稳定条件下离散,水平方向比垂直方向离散;湍流通量有明显日变化特征,感热、动量通量干季大于湿季,潜热通量湿季大于干季,干湿季热量交换以潜热为主;干季能量闭合率大于湿季;不同风向条件下平均水汽密度存在差异。

关键词:大理;涡动相关法;近地层;湍流特征

中图分类号: P452.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2010)01-0117-08

Analyses of Turbulence Characteristics in the Surface Layer at Dali of the Western Yunnan-Guizhou Plateau

YANG Zhi^{1,2}, LU Jing-song¹, ZHU Yi-wei¹, DONG Bao-ju¹

(1. Dali National Climatic Observatory, Dali 671003, China;

2. Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650034, China)

Abstract: Based on the planetary boundary layer data measured by an observation system fixed on an observation tower in Dali from March to December 2007, the characteristics of turbulence intensity, standard deviation, turbulence flux and drag coefficient were analyzed by using the eddy correlation method. The results show that turbulence intensity in the dry season was much higher than that in the wet season. The dimensionless standard deviations of 3D winds followed a z/L power law with an exponent of 1/3. The dependence of the deviations on z/L in the case of stable stratification or horizontal direction was more disperse than in the case of unstable stratification or vertical direction, respectively. Turbulence fluxes displayed obvious diurnal variations both in the dry and wet seasons. The values of sensible heat flux and momentum flux were larger in the dry season; however the value of latent heat flux was larger in the wet season; and the latent heat flux always dominated over the whole period. The energy balance had obvious differences between dry and wet season, with the loss of energy much less in the dry season than in the wet season. Vapor density was different at various wind directions.

Key words: Dali; eddy correlation; surface layer; turbulent characteristic

0 引言

下垫面与大气相互作用主要发生在近地层,并以湍流方式进行物质和能量交换。大气中的湍流交

换结果造成了动量、热量、水汽等的重新分布,因而也决定了风、温、湿等诸要素的分布^[1]。因此,对近地层湍流特征的分析尤为重要,分析确定动量、热量和水汽等湍流参数的变化特征,将有助于改进西南

收稿日期: 2008-04-08; 改回日期: 2008-07-06

基金项目: 云南省气象局青年研究基金项目(Q200610); 云南省气象局短平快项目(D200807)

作者简介: 杨智(1983—),男,工程师,研究方向为边界层气象, yeyuanyangzhi@163.com.

地区的边界层参数化方案^[2]。

大理位于云贵高原西部,受东亚季风和西南季风交替影响,具有明显的干湿季^[3],该特征与云贵高原大部分地区相似,有较好的代表性,因此,研究大理地区干湿季近地层湍流特征既可以了解山谷盆地这一特殊边界层的湍流输送过程,又有助于揭示云贵高原山地地形的地气物理过程。自 20 世纪 70 年代以来,国内外气象学家就开始不断致力于这方面的研究,到目前为止,有关青藏高原近地层湍流特征的研究已经取得了重大的进展^[4-5],缪国军等^[6]、安兴琴和吕世华等^[7]对西北干旱地区大气边界层结构特征做过观测和数值模拟研究,郭建侠等^[8]对华北平原湍流特征也作了较深入的研究。但是关于云贵高原山谷盆地地形农田下垫面湍流特征的研究还鲜见报道。

大理国家气候气象台新安装的近地层通量观测系统于 2007 年 3 月正式投入使用,该仪器采用国内外先进的边界层探测仪器,可实现对风速、声学虚温、CO₂ 和水汽脉动值的直接测定,从而将人们对地气相互作用的定量认识提高到一个新的水平,也使精确描述地气物质和能量交换成为可能^[8]。本文利用 2007 年 3—12 月的观测资料,采用涡动相关法^[5],计算分析了动量、感热和潜热通量及有关的湍流特征参数,并与青藏高原^[4-5]、西北干旱^[6-7]以及华北平原^[8]地区作了比较,以便深入认识云贵高原的湍流输送特征。

1 观测站环境

大理地处金沙江、元江和澜沧江三大水系分水岭地段,是孟加拉湾西南季风带的迎风区,属亚热带高原季风气候类型。大理近地层通量观测系统位于大理国家气候气象台内(100°11'E, 25°42'N),海拔 1 990.5 m,距西南面的点苍山脉(绵延 50 km 多、海拔 3 500 m 以上)约 4 km,距东面的高原湖泊洱海(容积约为 30.0 亿 m³,面积 250 km²多)约 2 km。观测场下垫面较为平坦,观测场内外植被 11 月至次年 4 月(干季)种植蚕豆,5—10 月(湿季)种植水稻,因而构成了大范围均一的下垫面,满足了试验要求盛行风向的风浪区长度^[9]。观测场四周环境基本可代表云贵高原西部山谷盆地地形地貌和植被特征(图 1)。

2 观测仪器

观测仪器安装在 20 m 高的铁塔上,分别在铁塔 2、4、10、20 m 高度处安装风向风速传感器(MET ONE 034B)和温、湿度传感器(VAISALA HMP45C-GM),在 5.08 m 处安装超声风速温度仪(CSAT3)和 CO₂/H₂O 红外气体分析仪(Li-Cor, LI7500)。三维超声风速仪用于测量 3 个方向脉动风速和声学虚温,采样频率 10 Hz,水平、垂直风速分辨率分别为 1.0×10^{-3} m/s 和 0.5×10^{-3} m/s,测量精度分别为 ± 4.0 cm/s 和 ± 2.0 cm/s, CO₂/H₂O 红外气体分



图 1 大理地形与铁塔位置示意图

Fig 1 Observation tower site and the landform of Dali

析仪用于测量大气中 CO₂ 和水汽密度,采样频率 10 Hz,分辨率分别为 10⁻³ mg/m³ 和 10⁻⁴ g/m³,测量精度分别为 ±0.01 mmol/mol 和 ±0.15 mmol/mol。铁塔西面约 2 m 处安装高 1.5 m 的辐射架,其上分别安装太阳总辐射、大气逆辐射、地面反射短波辐射、地表长波辐射传感器(Kipp&Zonen, CNR1)。

3 资料和方法

分析大理 2007 年 3—12 月降水量发现,3、4、11、12 月降水量较小,而 5—10 月逐月降水量都在 100 mm 以上,并且 3、4、11、12 月正好是蚕豆生长季,下垫面植被为蚕豆,因此,本文选取以上 4 个月代表干季(蚕豆下垫面)。5—10 月由于观象台建设,观测场内未种植作物,下垫面为野草,因此本文选取 5—10 月代表湿季(野草下垫面),并将干湿季资料作了日平均,对近地层湍流特征作了一些比较和分析。但是本文由于缺少 1、2 月数据,对干季风向、风速和湍流特征分析结果有一定影响。

在湍流资料处理中,平均时间尺度采用 30 min。计算前首先进行噪声剔除^[10],噪声剔除判

据为 $|x_i - x_n| > 4$,其中 x_i 为测量值, x_n 为半小时均值,是标准差。噪声剔除后进行坐标系旋转修正^[11],从而避免气流的分离,减小地形倾斜对垂直速度的影响^[5,12]。

资料经以上处理后,总样本数 $n = 12\ 811$,其中干季样本数 $n = 5\ 328$,湿季样本数 $n = 7\ 483$ 。

由处理后的湍流脉动量序列,用涡动相关法直接计算湍流强度(I)、动量通量()、感热通量(H_s)、潜热通量(L_E)、莫宁—奥布霍夫长度(L)等参数。它们的表达式如下:

$$I = \frac{\sqrt{U}}{U} \tag{1}$$

$$= \frac{w}{u} \tag{2}$$

$$H_s = c_p \frac{w}{T} \tag{3}$$

$$L_E = L_v \frac{w}{q} \tag{4}$$

$$L = \frac{z}{u_*^3 / kgw} \tag{5}$$

式中:I 为风速分量的湍流强度($=u, v, w$); 为相应风速分量的标准差;U 为平均风速;和 分别为位温和空气密度,由同步实测气压和温度求取;k 为 Kaman 常数($k = 0.4$);g 为重力加速度; c_p 为定压比热; L_v 为水气的汽化热系数; u_* 为摩擦速度。

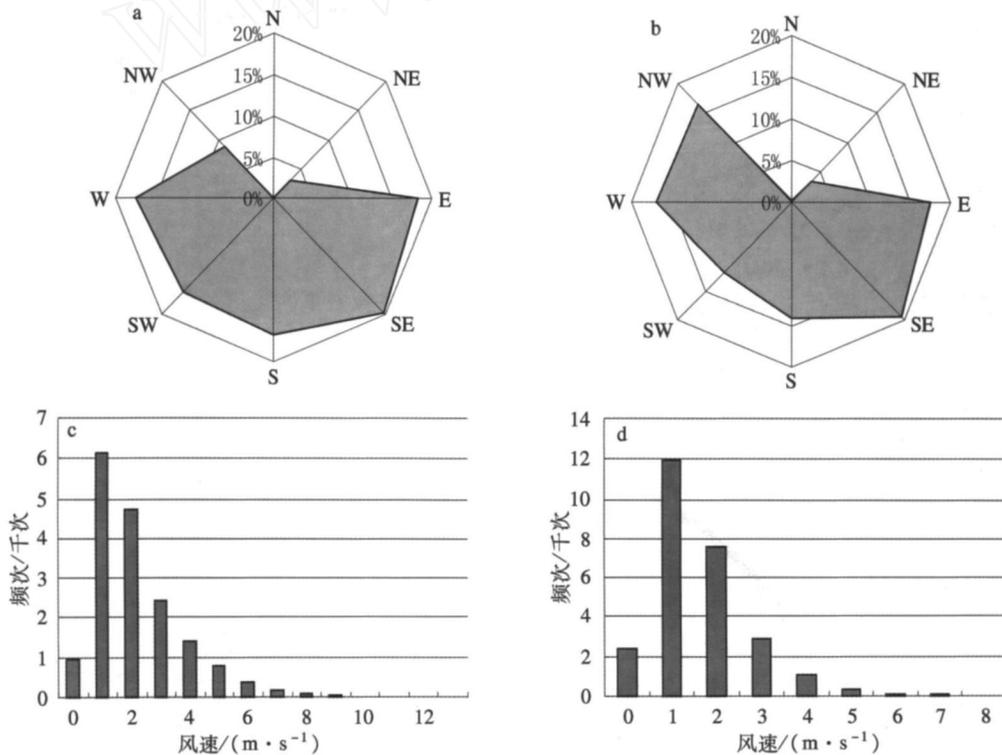


图 2 干季(a, c)和湿季(b, d)风向(a, b)和风速(c, d)频次

Fig 2 Frequencies of (a/b) wind direction and (c/d) wind speed in the dry (November to next April) / wet(May to October) season in Dali

4 计算结果分析

4.1 风向、风速特征

了解风向风速特征是正确认识湍流和湍流量特征的基础和前提。图 2 显示了整个观测期间干湿季风向和风速频次。由图 2 可知,干季和湿季主导风向都为东南风,其次为东风。北风和东北风的频率很小。从风速频次看,无论干季还是湿季,都以 1 m/s 附近的风速最多,其次为 2 m/s 和 3 m/s,表明测量期间大部分时间为小风环境,强风环境很少,但是平均风速干季大于湿季。

4.2 湍流强度

湍流强度指被平均风速标准化后的标准差,如(1)式所示。图 3 为干季和湿季湍流强度 (I) 及稳定度 (z/L) 的平均日变化。由图 3 可知,湍流强度干季大于湿季, I_u 与 I_v 强度相差不大。 I_w 明显比 I_u 和 I_v 小,在 0.1~0.2 左右,满足泰勒假设。湍流强度日变化特征干季比湿季明显,垂直方向比水平方向明显,湿季水平方向湍流发展比较平缓,没有明显的峰值。该规律和青藏高原昌都地区^[13]及华北平

原^[8]相似,但湍流强度比华北平原^[8]强,与青藏高原昌都地区^[13]相近。从图 3 还可以看出,无论干季还是湿季,日出后太阳辐射对下垫面加热,近地层大气获得能量增多,层结趋于不稳定,湍流开始发展;不稳定层结维持到日落时分后,变成中性或稳定层结,湍流发展受到抑制,湍流强度也随之减弱,由此可知,湍流强度和大气稳定性有关,且该地区湍流发展热力作用是主要因素。

风速对湍流发展的影响比较明显。从干湿季 3 个方向湍流强度随风速的变化规律可知,湍流在小风速背景下发展旺盛。在平均风速为 1 m/s 左右时,湍流强度最大,有时可以达到自由对流状态。随着风速的增大湍流强度迅速减弱。干湿季湍流强度随风速变化特征一致。

4.3 湍流方差

根据莫宁—奥布霍夫相似理论,任何一个量的标准差被特征尺度参数标准化后就成为 z/L 的普适函数^[14],即

$$\sigma/u_* = \phi(z/L), \quad \sigma = u, v, w. \quad (6)$$

表 1 给出了大理地区干湿季三维风速归一化方差与

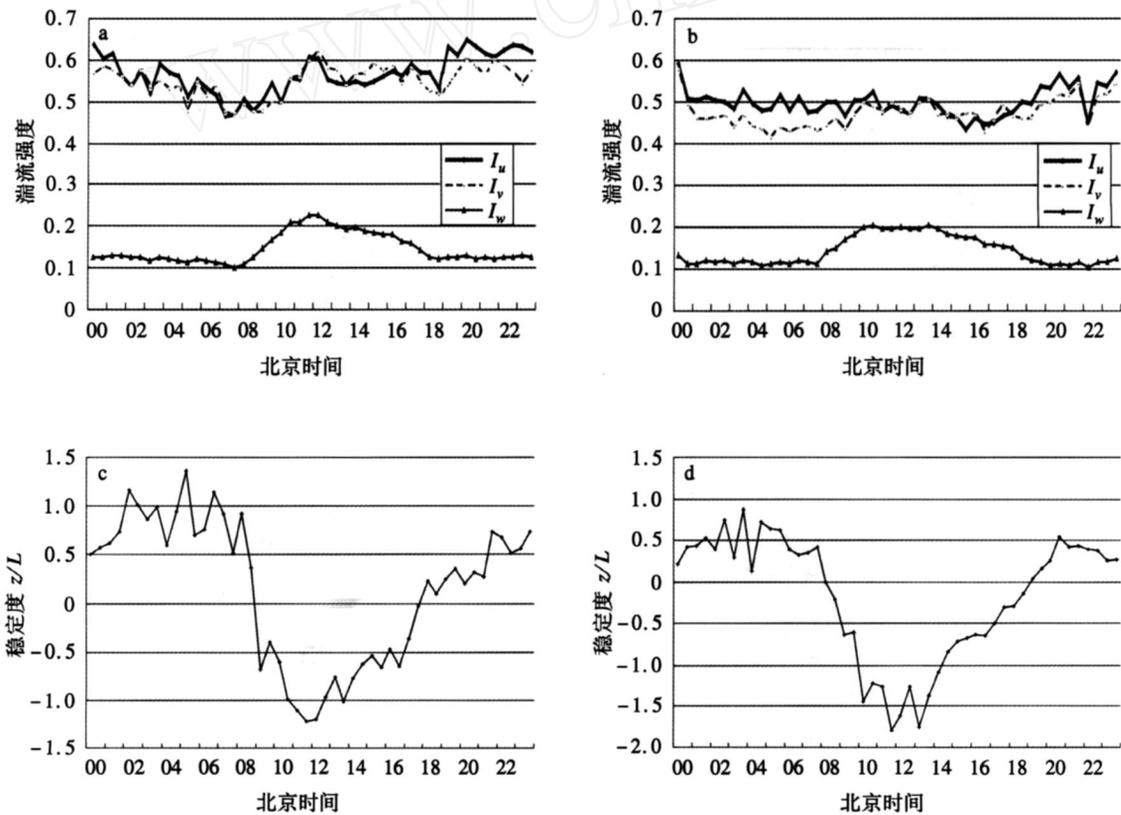


图 3 干季 (a, c)和湿季 (b, d)湍流强度 (a, b)和稳定度 (c, d)的平均日变化

Fig 3 Average diurnal variations of (a/b) turbulent intensity and (c/d) stability parameter (z/L) over the dry/wet season

z/L 之间关系的拟合曲线方程。无因次风速分量的方差与 z/L 关系满足 $1/3$ 次方规律,各方向拟合系数的关系是 $u/u_* > v/u_* > w/u_*$,拟合系数接近文献 [15] 中 Rock spring PA 起伏地形区和山区,但明显高于平原地区 [8-15] 和西北干旱地区 [16]。

图 4 给出了湍流方差与稳定度的关系 (u, v 方向略)。从图 4 可以看出,干湿季无因次风速方差与 z/L 之间满足 $1/3$ 次方规律,干季和湿季相差不大,但 $z/L > 0$ 时的离散比 $z/L < 0$ 时大,水平方向的

离散比垂直方向大得多 [17] (表 1)。垂直方向离散小,说明垂直方向的湍流与热力作用更为密切,更多是由热力因子引起的,而水平方向的湍流则与热力作用不十分密切 [8],水平方向湍流标准化方差分布离散是因为水平湍流容易受地形以及较大尺度水平风场影响的缘故。

4.4 湍流量特征

用方程 (2)、(3)、(4) 计算的干湿季动量、感热和潜热通量的平均日变化如图 5 所示,对潜热通量

表 1 干湿季三维风速无因次方差与稳定度拟合相似函数

Table 1 Fitted dimensionless turbulence parameters for dry/wet season

	$z/L > 0$		$z/L < 0$	
	拟合方程	R	拟合方程	R
干季	$u/u_* = 4.46(1 + 2.35z/L)^{1/3}$	0.601	$u/u_* = 3.83(1 - 1.20z/L)^{1/3}$	0.483
	$v/u_* = 4.09(1 + 2.92z/L)^{1/3}$	0.587	$v/u_* = 3.73(1 - 1.20z/L)^{1/3}$	0.509
	$w/u_* = 1.04(1 + 1.86z/L)^{1/3}$	0.718	$w/u_* = 0.98(1 - 4.01z/L)^{1/3}$	0.841
湿季	$u/u_* = 3.75(1 + 5.74z/L)^{1/3}$	0.632	$u/u_* = 3.23(1 - 1.70z/L)^{1/3}$	0.608
	$v/u_* = 3.20(1 + 7.80z/L)^{1/3}$	0.611	$v/u_* = 3.08(1 - 1.91z/L)^{1/3}$	0.629
	$w/u_* = 0.99(1 + 2.51z/L)^{1/3}$	0.672	$w/u_* = 0.93(1 - 4.64z/L)^{1/3}$	0.897

注:相关系数 R 通过 0.01 的显著性水平检验。

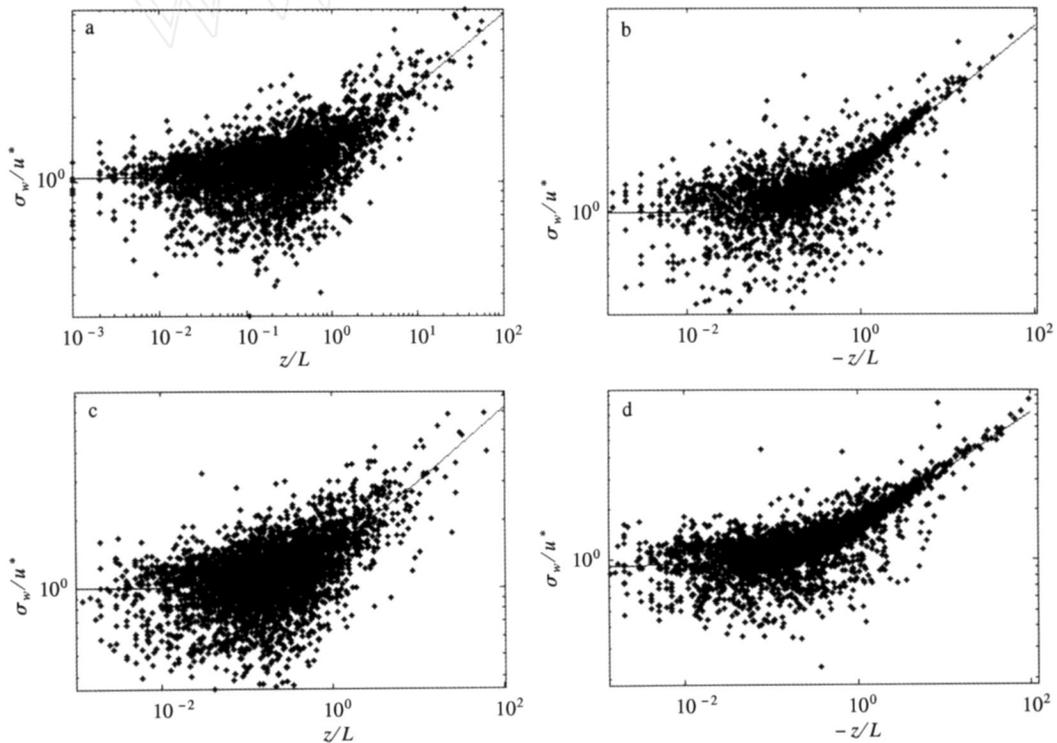


图 4 干季 (a, b) 和湿季 (c, d) 无因次风速方差与稳定度 z/L (a, c) 和 $-z/L$ (b, d) 的关系

Fig 4 Dimensionless standard deviations of vertical velocity component as a function of (a/c) z/L and (b/d) $-z/L$ for the dry/wet season, respectively

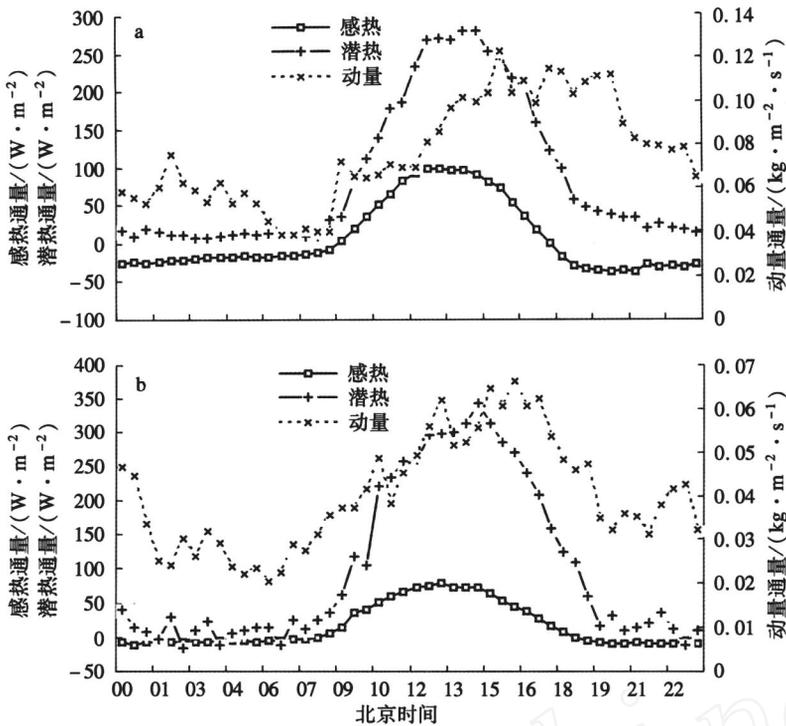


图 5 干季 (a) 和湿季 (b) 感热、潜热、动量通量平均日变化

Fig 5 The diurnal variations of sensible heat flux, latent heat flux and momentum flux in (a) dry and (b) wet seasons

还作了 Web 修正^[18]。感热通量干季大于湿季,干季日峰值接近 100 W/m^2 ,湿季日峰值只有 80 W/m^2 左右。感热通量白天大于零,夜间小于零,说明地表白天通过感热向大气输送热量,夜间通过感热从大气获得热量^[19]。湿季潜热通量明显大于干季,湿季潜热通量日峰值达 340 W/m^2 以上,干季日峰值只有 280 W/m^2 左右。由于湿季土壤湿度大,蒸发量也大,因此湿季潜热明显大于干季。干湿季潜热通量始终大于零,说明无论白天还是夜间,地表始终通过潜热的形式向大气输送热量和水汽。综上所述,大理地区无论干季还是湿季, Bowen 比都比较小,能量交换形式以潜热为主,而青藏高原^[4-5, 20]和西北干旱地区^[7, 16, 21]能量交换以感热为主,华北平原^[8]感热、潜热差异不大。

动量通量的平均日变化特征与感热和潜热相似,但是干季明显大于湿季。动量通量一般随着风速的增大而加强,大理地区干季多大风天气,平均风速干季大于湿季(图 2),因此,动量通量干季明显大于湿季。另外,动量通量也有明显的日变化特征,峰值一般出现在 15:00 以后,这是因为午后随着风速的增加,动量输送随之加强。

地面对大气的加热作用可通过辐射过程和湍流

过程获得,其中辐射过程是指地表辐射能的收支,湍流过程是指地表吸收太阳辐射能后通过湍流输送的方式向大气输送热量和水汽通量的过程。研究云贵高原地面对大气的热效应对西南地区的天气气候以及大气环流场都有重要意义。根据下垫面的能量平衡原理,有:

$$H_s + L_E = R_n - Q_s \quad (7)$$

式中: R_n 为实测净辐射; Q_s 为土壤热通量。方程左边项和右边项都可以称之为热源强度,当左边项或右边项为正时地面相对于大气为热源,反之为冷源^[20]。本文利用方程 (7) 进行农田下垫面能量平衡闭合分析发现 $H_s + L_E < R_n - Q_s$,表明涡动相关技术测定的 H_s 与 L_E 之和小于可供能量,如图 6 所示,干季 ($H_s + L_E$) 占可供能量 ($R_n - Q_s$) 的 86% 左右,湿季 ($H_s + L_E$) 占可供能量 ($R_n - Q_s$) 的 74% 左右,可见湿季能量闭合程度较干季差。这可能是因为大理雨热同期,湿季植被生长茂盛,从地表到冠层顶部空间范围内植被的能量存储量比干季大。湿季冠层内空气水汽潜能、空气内能变化、植被茎叶储热以及光合作用能量消耗都比干季大,而这部分能量都未被观测和计算,从而造成了湿季能量闭合程度比干季差的现象。

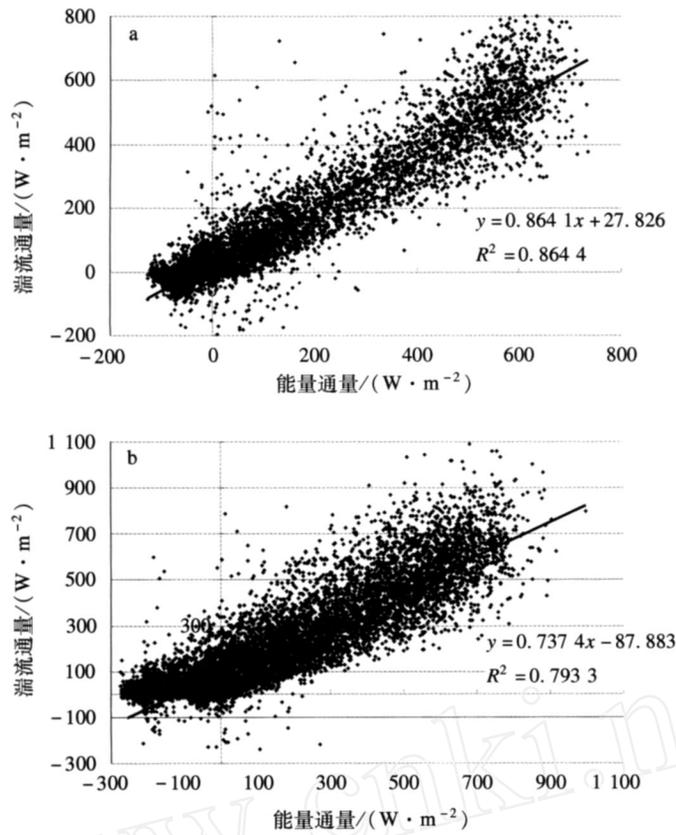


图 6 干季 (a)和湿季 (b)能量闭合情况

Fig 6 Energy balance for (a) dry and (b) wet seasons

4.5 不同风向湿度特征

观测点西南面是高山,东面是洱海,且面积较大(图 1)。故风向从 0°(北风)到 135°(东南风)范围内,测点处于洱海水体的下风方,其余风向范围内,测定处于高山下风方。因此,不同风向条件下湿度数据有一定差异^[22-24],不同高度湿度特征基本相同,故表 2 仅给出 10 m 高度。从表 2 可以看出,风向从 0 到 135 左右时,平均水汽密度比其他风向时

偏大,且干季较湿季明显,降水量较少的 3 月和 12 月,该特征尤为明显。这是因为干季风向从 0 到 135 左右时,水汽来源主要是测点上风方向的洱海,其余风向时水汽来源主要是苍山,而湿季受天气系统影响,水汽来源比较复杂,故水汽密度差异干季比湿季明显。

此外,吹西风、西南风时,观测点仍处在上游山体的尾流、涡流区,其湍流特征与东风条件应有不

表 2 不同风向条件下 10 m 高度逐月平均水汽密度

Table 2 A average vapour densities at 10 meters under different wind directions								g/m ³
月份	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3		4.7	5.0	4.9	4.5	4.1	4.1	4.5
4	8.4	7.7	7.8	7.6	7.4	7.3	7.4	7.9
5	11.9	10.6	10.6	9.8	9.2	9.3	10.3	10.5
6	12.5	11.9	11.9	12.0	11.8	11.9	12.2	12.5
7	13.8	13.8	13.5	13.5	13.6	13.4	13.4	13.5
8	13.3	13.2	13.2	13.2	13.3	13.1	13.1	13.0
9	10.4	11.4	11.6	11.8	10.7	11.1	11.7	12.1
10	10.8	9.9	9.7	10.5	10.7	10.0	10.2	10.6
11	7.7	7.5	7.4	7.6	7.7	7.0	7.2	7.9
12	5.8	5.1	5.2	5.1	4.9	4.8	5.1	5.6

同。但是大理地区一般夜间吹西风、西南风,白天吹东风,昼夜湍流特征差异较不同风向造成的湍流特征差异大,故不同风向条件下湍流特征差异的影响因素较多,今后会进一步研究。

5 结论

(1)湍流强度干季大于湿季,湍流强度日变化特征干季较湿季明显,垂直方向较水平方向明显,且有 $I_z > I_y > I_x$ 。湍流强度的影响因素是大气稳定性和风速等。

(2)三维风速方差与 z/L 之间满足 $1/3$ 次方规律,干湿季差异不明显。拟合系数比平原地区大,与起伏地形区较接近。 $z/L > 0$ 时的离散比 $z/L < 0$ 时大,水平方向的离散比垂直方向大。

(3)干湿季感热、潜热、动量通量都有明显的日变化特征。感热通量白天大于零,夜间小于零;潜热通量昼夜都大于零。感热通量干季大于湿季,潜热通量湿季大于干季。大理地区 Bowen 比小,能量交换形式干湿季都以潜热为主。动量通量随着风速的增大而增大,并且干季明显大于湿季。

(4)干湿季地面加热场都具有显著的日变化特征,白天为热源,夜间为冷源。湿季总热源强度大于干季,干季能量闭合率大于湿季。

(5)不同风向条件下平均水汽密度存在一定差异,差异干季较湿季明显。

致谢:本文得到中国气象科学研究院卞林根研究员和郭建侠博士的指导和帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 赵鸣. 大气边界层动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 20-37.
- [2] 胡艳冰, 高志球, 沙文钰, 等. 六种近地层湍流输送系数计算方案对比分析 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(3): 407-411.
- [3] 张云瑾, 张天圣. 亚洲热带近海海温与云南夏季降水的关系 [J]. 气象科技, 2008, 36(1): 31-34.
- [4] 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(1): 1-13.
- [5] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 38-46.
- [6] 缪国军, 张镭, 舒红. 利用 WRF 对兰州冬季大气边界层的数值模拟 [J]. 气象科学, 2007, 27(2): 169-175.
- [7] 安兴琴, 吕世华. 兰州市冬季大气边界层结构特征的观测和数

- 值模拟研究 [J]. 气象科学, 2007, 27(4): 374-380.
- [8] 郭建侠. 华北玉米下垫面湍流输送特征及参数化方案比较研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学应用气象学院, 2006: 26-44.
- [9] 李熠君, 许振柱, 王云龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [10] Kamal J C, Businger J A. A continuous wave sonic anemometer-the anemometer [J]. J Appl Meteor, 1963, 2(1): 156-164.
- [11] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析 [J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 233-240.
- [12] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 189-229.
- [13] Bian L ingen, Xu Xiangde, Lu Longhua, et al Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qando of the southeastem Tibetan Plateau [J]. Adv Atmos Sci, 2003, 20(3): 369-378.
- [14] Andreas E, Hill R J, Gosz J R, et al Statistics of surfacelayer turbulence over terrain with metre-scale heterogeneity [J]. Bound Layer Meteor, 1998, 86(1): 379-408.
- [15] Panafsky H A, Tenekes H, Lenschow D H, et al The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions [J]. Bound Layer Meteor, 1977, 11(2): 355-361.
- [16] 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(3): 389-398.
- [17] Choi T, Hong J, Kim J, et al Turbulent exchange of heat, water vapor, and momentum over a Tibetan prairie by eddy covariance and flux variance measurements [J]. J Geophys Res, 2004, 109, D21106, doi: 10.1029/2004JD004767.
- [18] Webb E K, Peaman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1980, 106(1): 85-100.
- [19] 刘学刚, 罗哲贤, 滕代高, 等. 不同发展阶段台风大气边界层暖区变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 320-327.
- [20] 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.
- [21] 涂钢, 刘辉志, 董文杰, 等. 半干旱区退化草地地表能量收支 [J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 723-732.
- [22] 姜金华, 胡非, 刘照明, 等. 水、陆不均匀条件下大气边界层结构的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 162-169.
- [23] 徐文明, 孙照渤, 曾刚, 等. 长江中下游夏季降水及其与全球热通量的关系 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 26-33.
- [24] 赵鸣, 陈潜. 边界层过程对暴雨影响的敏感性试验 [J]. 气象科学, 2007, 27(1): 1-10.

(责任编辑: 刘菲)