

# 高黎贡山复杂地形下局地环流的数值模拟研究

邢雯雯<sup>1</sup> 孙绩华<sup>3</sup> 刘辉志<sup>2,4</sup> 许鲁君<sup>2</sup>

1 广东省气象台, 广州 510080

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3 云南省气象台, 昆明 650034

4 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 本文利用中尺度模式 WRF 模拟了 2016 年干季和湿季高黎贡山南段(腾冲-保山地区)山谷风环流, 分析不同边界层参数化方案在高黎贡山复杂下垫面的适用性。研究结果表明 YSU 方案对温度模拟的效果最好; ACM2 模拟的风速平均绝对误差最小; MYNN3 方案模拟的风向绝对误差最小, YSU 和 MYJ 方案模拟的风向日变化趋势与观测更加一致。高黎贡山南段地区上午 9 时出现谷风环流, 夜间 19 时转为山风环流。白天多为偏南风, 夜间为偏北风和偏西风。白天山顶气流辐合而山谷气流辐散, 夜间相反。白天风速大于夜间。干季西风风力较弱, 有利于低层局地环流的发展; 而湿季受较强的偏东背景风影响时, 局地环流的发展受到抑制, 边界层高度也就低于干季。干季西风遇到高黎贡山, 在西坡下沉并形成涡旋, 西侧湍流混合充分, 边界层高度高; 湿季偏东风使高黎贡山西侧谷风减弱, 腾冲与保山的边界层高度相差不大。

**关键词** WRF 模式 高黎贡山 边界层参数化方案 山谷风 局地环流

**文章编号**

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20112

## Numerical Simulation of Local Circulation of Complex Topography on the Gaoligong Mountain

**收稿日期** 2020-12-11; **网络预出版日期**

**作者简介** 邢雯雯, 女, 1994年5月生, 硕士研究生, 研究方向为大气边界层物理. E-mail: 1004617414@qq.com

**通讯作者** 孙绩华 E-mail: sunjh@vip.sina.com

**资助项目** 国家自然科学基金项目 91537212, 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 2019QZKK0105

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 91537212), The Second Comprehensive Scientific Investigation Project of Qinghai Tibet Plateau (Grant 2019QZKK0105)

XING Wenwen<sup>1</sup>, SUN Jihua<sup>3</sup>, LIU Huizhi<sup>2,4</sup>, XU Lujun<sup>2</sup>

1 *Guangdong meteorological bureau, Guangzhou 510080*

2 *National key laboratory of atmospheric boundary layer physics and atmospheric chemistry, institute of atmospheric physics, Chinese academy of sciences, Beijing 100029*

3 *Meteorological observatory of Yunnan Province, Kunming 650034*

4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

**Abstract** In this paper, the mesoscale model WRF is used to simulated mountain-valley wind circulation in the region of south Gaoligong mountain in the dry season and wet season, in 2016, respectively. Applicability of five layer parameterization schemes under complex underlying surface of the Gaoligong mountain are compared. The results show that YSU scheme performs best in temperature simulation. The mean absolute error of wind speed in simulation is the smallest using ACM2. The absolute error of wind direction simulated by MYNN3 scheme is the smallest. The diurnal variation of wind direction simulated by the YSU and MYJ schemes is more consistent with the observation. In the southern Gaoligong mountain, valley wind circulation appears at 9:00 am and turns to mountain wind circulation at 7:00 pm. It is mostly southerly wind in the daytime, and northerly and westerly wind at night. During the day, the air flow converges at the top of the mountain while it diverges in the valley. At night, it is opposite. The wind speed in daytime is greater than that at night. In the dry season, the west wind is weak, which is conducive to the development of local circulation in the lower troposphere. In the wet season, the eastward background wind is strong, which suppresses the development of local circulation, thus, the height of the boundary layer is lower than that in the dry season. In the dry season, the westerly wind encounters the Gaoligong Mountain, sinks on the west slope, forms vortices, and then the turbulence on the west side is well mixed, leading to a deep boundary layer. In the wet season, the easterly wind weakens the valley wind on the west side of Gaoligong Mountain, and the height of the boundary layer between Tengchong and Baoshan is similar.

**Keywords** WRF model, Gaoligong mountain, boundary layer parameterization scheme, mountain-valley wind, local circulation

## 1 引言

局地环流的形成与演变不仅受到热力和动力作用的影响，还与下垫面的植被、环境风等有关 (Arritt and Pielke, 1986; Gross, 1987; Barr and Orgill, 1989; Clements et al., 1989; Doran, 1991)。局地环流系统对有组织的对流系统的生成、局地气候、空气污染的传输与扩散、雾的形成与消散、低云的形成等有重要作用。研究局地环流和相关大气边界层的特性对于气象预报和空气质量的评估是很重要的 (Prasad et al., 2017)。

山脉对气流不仅有显而易见的阻挡作用，还会在背风坡产生涡旋气流、重力内波、波破碎等动力强迫现象，还会形成山谷风、坡风、下泄流、焚风等等。早在上世纪 50 年代，叶笃正先生 (1956) 在小地形对于气流的影响的综合报告中总结到山地流场因风速不同会形成四种结构：无扰动的气流、涡旋气流、波状气流和转子气流。比起平原的山谷，高原山谷的山谷风环流更加强盛 (Schmidli and Rotunno, 2011)；还有封闭型山谷比开放型山谷的山谷风环流发展厚度大且特征显著 (王瑾等, 2012)。这些研究多利用数值模拟或观测分析揭示地形对气流的影响。然而，局地风的发展演变还会受到环境风场的影响。众所周知，在弱背景天气条件下，更有利于局地环流的发展。在阿尔卑斯山脉的因河河谷，在偏南风背景下山谷风会抵抗环境风，且气流在阿尔卑斯山南面上升，北面下沉 (Zängl, 2009)。由背景风和山谷风的风向关系还可以了解山谷风的驱动机制 (Cogliata and Mazzeo, 2006)。

WRF 模式被广泛运用于研究山谷地形中大气边界层的风和湍流特征以及大气边界层垂直结构。在这些研究中，由于地域、气候、地形等差异，效果较好的参数化方案也各不相同 (刘振鑫等, 2012; 屠妮妮等, 2012; 张小培和银燕, 2013; 尹相玉, 2014; 李斐等, 2017)。我国地形西高东低，横断山脉位于青藏高原东南缘，平均海拔 4000 米以上，不仅地表粗糙度大，在动力上对大尺度环流有阻挡作用，而且热力上随季节变化和日变化差异都很大，这就导致了山脉东西部的气候差异以及山区气候明显的垂直变化。高黎贡山这种位于西南季风和东南季风交汇区的南北走向的狭长型山脉，其附近的局地环流特征研究目前开展得不多。

高黎贡山是横断山脉最西部的山脉，北至西藏自治区，南达云南保山市境内，南北长约 135 千米，平均海拔 3500 米，南段海拔稍低，东西仅 9 千米。其西侧的深切型怒江大峡谷最低海拔 700 米，相对高差大。该区域位于亚洲季风前沿，地处东亚水汽通道上游，受高空西风环流、印度洋和太平洋季风环流的影响。西南季风对该区的影响占主导地位。已有研究指出，湿季除西南季风外，东南季风也会影响云南部分地区。而影响云南的太平洋东南季风也基本分为三支：西太平洋副热带高压南侧的东南气流、南海 ITCZ 北侧的东南风以及台风外围气流。但只有西太平洋副热带高压伸过  $105^{\circ}$  E 时，东南季风和携带的水汽才由副高南部外围从西太平洋和南海进入云南 (徐嘉行等, 1984)。腾冲站和保山站被分割于高黎贡山

东西两侧，受背景风和地形的影响，保山与腾冲两地的气温、相对湿度、降水、局地环流都存在差异，形成了不同的局地气候。

本文利用腾冲气象站的地面观测资料、探空资料和保山气象站的地面观测资料，分析两站的气候条件差异；结合中尺度数值模式，对比不同边界层参数化方案（YSU、MYJ、MYNN3、ACM2、BouLac）的模拟效果，研究 WRF 模式在腾冲保山地区复杂地形下的适用性，并选出最佳方案对干季和湿季的局地环流进行数值模拟，分析不同环流背景下的局地环流特征。

## 2 数据来源、实验设计及边界层参数化方案简介

### 2.1 数据来源

本文采用高黎贡山两侧的腾冲国家基准气候站（下称腾冲站）及保山市气象站（下称保山站）2016 年的资料进行分析及模式结果验证。腾冲站（98.5 E，24.983 N）位于云南保山市。腾冲站海拔 1697 m，东距高黎贡山脉约 20km，场地四周为腾冲市郊区农田，所测资料基本代表了高黎贡山以西的边界层特征。保山站（99.183 E，25.117 N）位于高黎贡山以东，海拔 1652.2 m，西距高黎贡山约 32km。两个站主要是常规气象要素观测。腾冲站与保山站的位置如图 1b 所示。

### 2.2 试验设计

本文利用 WRF3.7 (Weather Research and Forecasting Model v3.7) 模式，对比分析 YSU、MYJ、MYNN3、ACM2、BouLac 五种边界层参数化方案在高黎贡山的适用性，模拟时段为 2016.12.03\_00:00~2016.12.08\_00:00；并采用最优边界层参数化方案对 2016 年高黎贡山干季和湿季局地环流特征进行模拟分析。干季模拟时段同上，湿季模拟时段为 2016.09.23\_00:00~2016.09.28\_00:00。模式采用四层嵌套，最内层 100km×100km，分辨率 1km，中心点位于高黎贡山南段山顶。垂直分层 35 层，2km 以下 10 层。模式输入的初始场采用 ECMWF ERA-interim 的 0.75° ×0.75° 再分析资料，地形资料为 Modis 资料。模式的四层模拟中采用的物理方案是一致的，短波辐射方案均采用 Dudhia 方案 (Dudhia, 1989)，长波辐射方案采用 RRTM 方案 (Mlawer et al., 1997)，微物理方案采用 WDM6 方案 (Lim and Hong, 2010)，积云对流方案为 Kain-Fritsch 方案 (Kain and Fritsch, 1993)，陆面过程采用 Noah 方案 (Chen and Dudhia, 2001)。图 1 (a) 为模拟区域。图 1 (b) 为最内层模拟区域的地形高度，包括了高黎贡山的南段。中间海拔 3200 米以上的山脉是高黎贡山，其东侧怒江大峡谷最低海拔低于 800 米，峡谷东侧是碧罗雪山。地势呈现北高南低，山谷相间分布。图 1 (c) 是地表利用类型分布图。在中西部的山脉地区主要是阔叶林、针叶林和混合森林，

其中也混有一部分草地和灌木。东部主要是草地和灌木，城市周边分布着农田，西北地区也有农田分布。植被会影响地表能量通量的变化以及大气边界层内的其他变量。

分析时段内的天气形势如图 2 所示，12 月 4 日 850hPa 等高线稀疏，云南地区没有明显的影响系统。海平面气压场显示四川，贵州东部地区存在地面高压。从 9 月 28 日的环流形势来看，850hPa 我国北方地区受高压控制，华南沿海有热带气旋正在登陆，低压中心将逐渐向西移动。

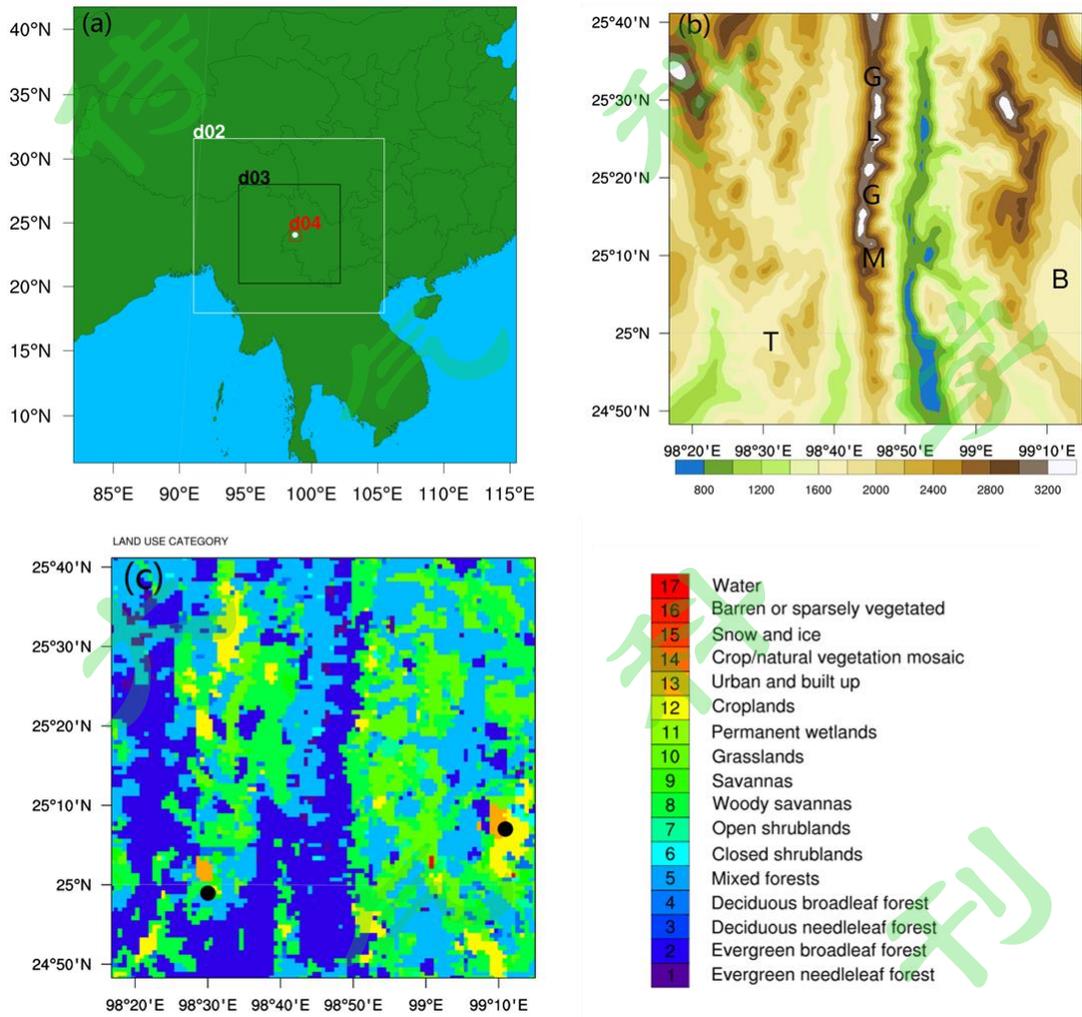


图 1 (a) 四重嵌套区域示意；(b) d04 区域模拟地形高度及站点分布；(c) d04 区域 MODIS 20 类土地利用情况

Fig.1 (a) Model domains (d01, d02, d03, d04); (b) terrain height of d04, locations of two stations; (c) land use type of d04 from MODIS 20-class dataset

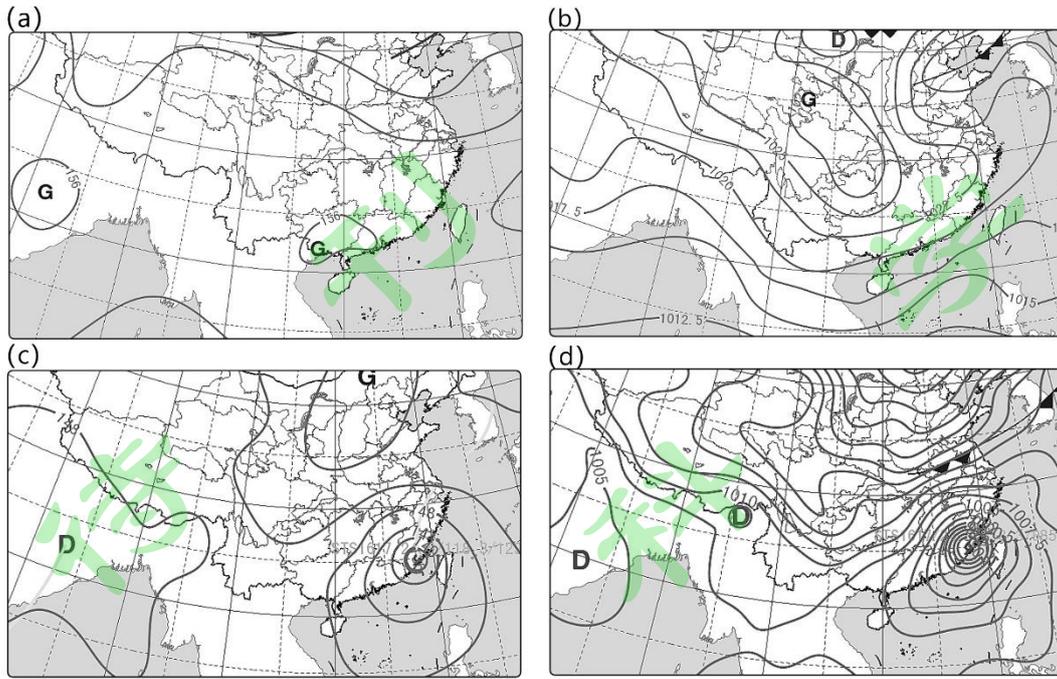


图2 (a) 2016年12月4日08:00的850hPa的位势高度场(单位: dagpm)和(b)海平面气压场(单位: hPa) (c) 2016年9月28日08:00的850hPa的位势高度场(单位: dagpm)和(d)海平面气压场(单位: hPa)

Fig. 2 (a) December 4, 2016 08:00 LST 850hPa geopotential height field (units: dagpm) and (b) sea level pressure field (units: hPa) (c) September 28, 2016 08:00 LST 850hPa geopotential height field (units: dagpm) and (d) sea level pressure field (units: hPa)

### 2.3 边界层参数化方案简介

不同的边界层参数化方案会导致边界层内的温度、湿度以及降水模拟结果存在明显差异(Xie et al., 2012)。本文选用常用的YSU、MYJ、MYNN3、ACM2、BouLac五种方案进行对比,分析模拟效果,选出最佳方案。

YSU方案(Hong et al., 2006)是基于K理论的一阶非局地闭合方案。YSU方案解决了MRF方案中大气层结过于稳定的问题。该方案显式处理夹卷过程,降低了动力强迫的湍流混合而增加了热力强迫诱导的湍流混合。ACM2方案(Pleim, 2007)是一阶闭合非局地方案,在ACM1方案的基础上增加了局地湍流输送,可以模拟由浮力作用引起的非局地向上传送和局地湍流交换。MYJ、MYNN3、BouLac方案是基于湍流动能TKE的方案,其中MYJ方案(Mellor and Yamada, 1982)通过迭代求解TKE产生和损耗微分方差计算边界层高度。MYNN3方案(Nakanishi and Niino, 2006)加入了凝结物理过程,改进了湍流动能和混合

层高度偏低的问题。BouLac 方案 (Bougeault and Lacarrere, 1989) 根据湍流动能的垂直分布计算边界层高度。

### 3 结果分析

#### 3.1 高黎贡山东、西两侧气象特征

对比分析 2016 年高黎贡山东、西两侧腾冲和保山站地面气象观测资料,发现全年气温 8 月最高, 1 月最低; 最高温度出现在 14 时, 最低气温出现在 7 时; 两站的气温年变化和日变化趋势相似, 但保山站的日平均气温明显高于腾冲站, 平均高出 1.9℃, 年平均的气温日变化保山也明显高于腾冲 (图 3b)。两站的相对湿度全年 50%~100%, 其中 3 月相对湿度最小; 并且保山站的相对湿度低于腾冲站, 平均低了约 14%, 相对湿度日变化保山也低于腾冲。

表 1 腾冲站和保山站全年、干季和湿季的日平均气温 (单位: °C) 和相对湿度 (单位: %)

Table 1 Daily average air temperature(units:°C) and relative humidity(units:%) of Tengchong station and Baoshan station throughout the year, dry and wet season

	站点	全年	干季	湿季
温度 (°C)	腾冲	15.77	12.09	19.40
	保山	17.67	14.00	21.30
相对湿度 (%)	腾冲	81.45	76.72	86.16
	保山	67.78	62.54	72.96

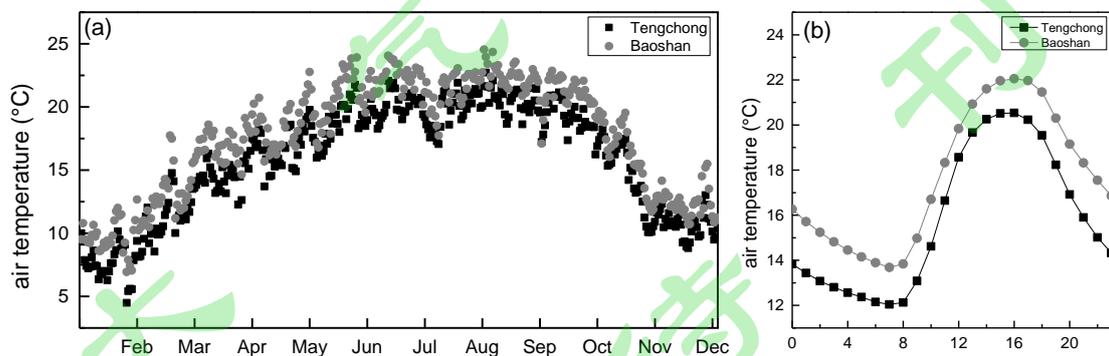


图 3 腾冲站 (黑色) 和保山站 (灰色) 气温 (单位: °C) 年变化 (a) 和日变化 (b)

Fig.3 Annual variation (a) and daily variation (b) of air temperature(units:°C) at Tengchong station (black) and Baoshan station (gray)

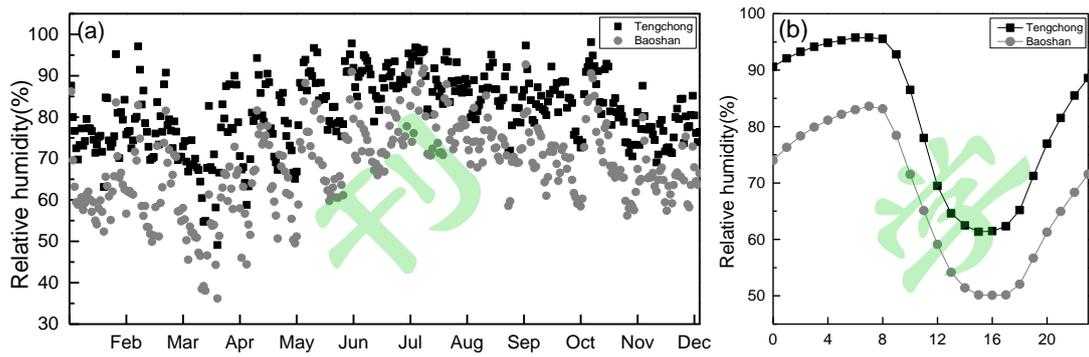


图4 腾冲站（黑色）和保山站（灰色）相对湿度（单位：%）年变化（a）和日变化（b）

Fig.4 Annual variation (a) and daily variation (b) of relative humidity(units:%) at Tengchong station (black) and Baoshan station (gray)

腾冲站全年平均风速 1.94m/s，干季（图 5a）风向以东南风为主，湿季有西南风也有东南风。风向日变化表现出上午有短时的西北风，白天多为西南风，夜间转为东南风；保山站全年平均风速 1.75m/s，干季（图 5c）主要吹西南风，湿季为东南偏南风、偏南风 and 东南风。无论腾冲还是保山，西南风风速多为 4~7m/s，大于东南风主要风速 2~4m/s。

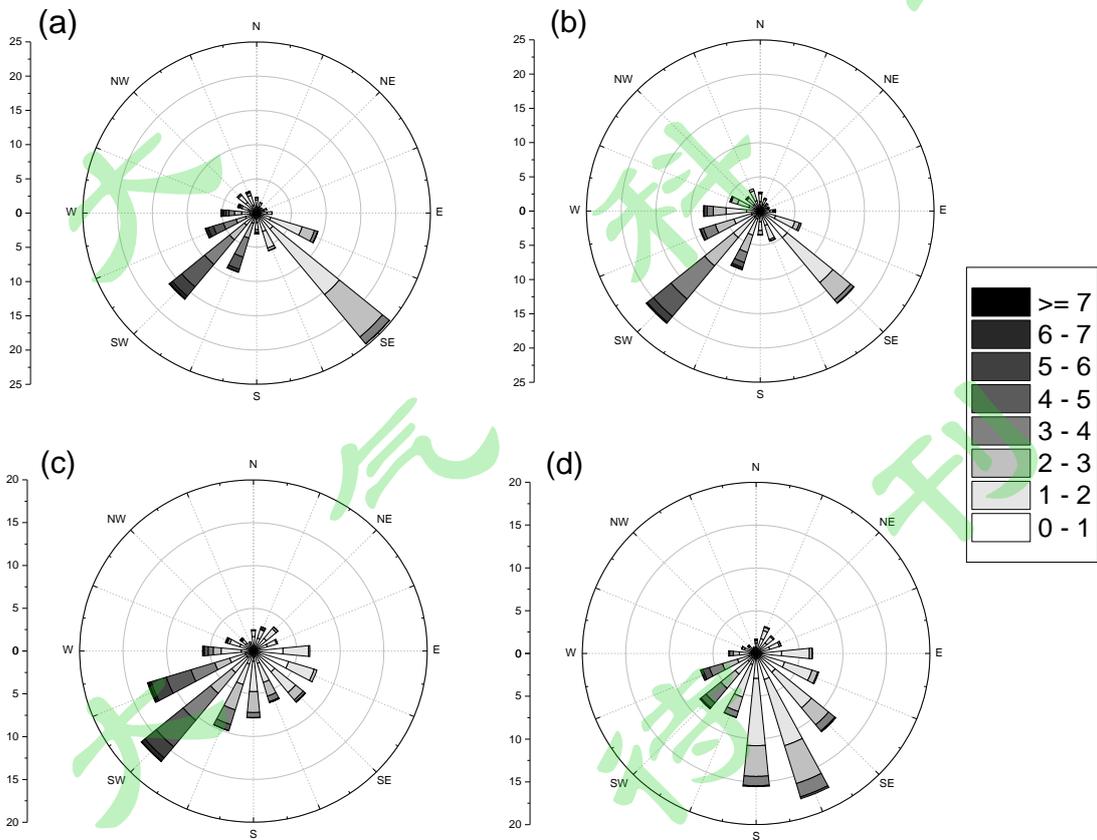


图5 腾冲站干季（a）、湿季（b）和保山站干季（c）、湿季（d）风玫瑰图

Fig.5 wind roses of dry season(a) and wet season(b) at Tengchong station and dry season(c) and wet seasons(d) at

Baoshan station

南北走向的高黎贡山阻碍了西南季风，其中一部分气流被阻挡，一部分较强气流翻越高黎贡山。来自孟加拉湾的西南季风，在迎风坡爬升时水汽凝结降落，气流过山以后温度升高而湿度降低。所以位于山脉西侧的腾冲站相比于东侧的保山站温度低且湿度高。哀牢山同样在湿季西坡湿度资源明显优于东坡（刘玉洪等，1996）。

### 3.2 不同边界层参数化方案的适用性

为了得到最佳的模拟效果，本文选择的5种行星边界层方案对比的结果如下。温度模拟的误差主要是最低温度模拟偏高，YSU方案和ACM2方案模拟的平均绝对误差最小。观测风向受地理位置和局地环流影响很大。上午10:00—11:00常出现西北风，白天多为西南风，夜间转为东南风。模拟结果显示，MYNN3模拟的风向平均绝对误差最小，MYJ和BouLac方案其次，但是YSU和MYJ方案的日变化趋势与观测值更加接近。腾冲站观测平均风速1.8m/s，各个方案模拟的平均绝对误差都偏小，其中ACM2最小。综合风速样本结构分析，MYJ方案和ACM2方案模拟效果较好（图6d）。

表2 五种边界层参数化方案对温度、风向和风速的模拟值与观测值的平均绝对误差

Table 2 The mean absolute errors between observed and simulated values of air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), wind direction ( $^{\circ}$ ), wind speed (m/s) by five boundary layer parameterization schemes

平均绝对误差	YSU	MYJ	MYNN3	ACM2	BouLac
温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	1.41	2.39	2.47	1.41	1.50
风向 ( $^{\circ}$ )	62.09	57.51	56.86	62.41	59.05
风速 (m/s)	1.04	1.01	1.03	0.88	1.07

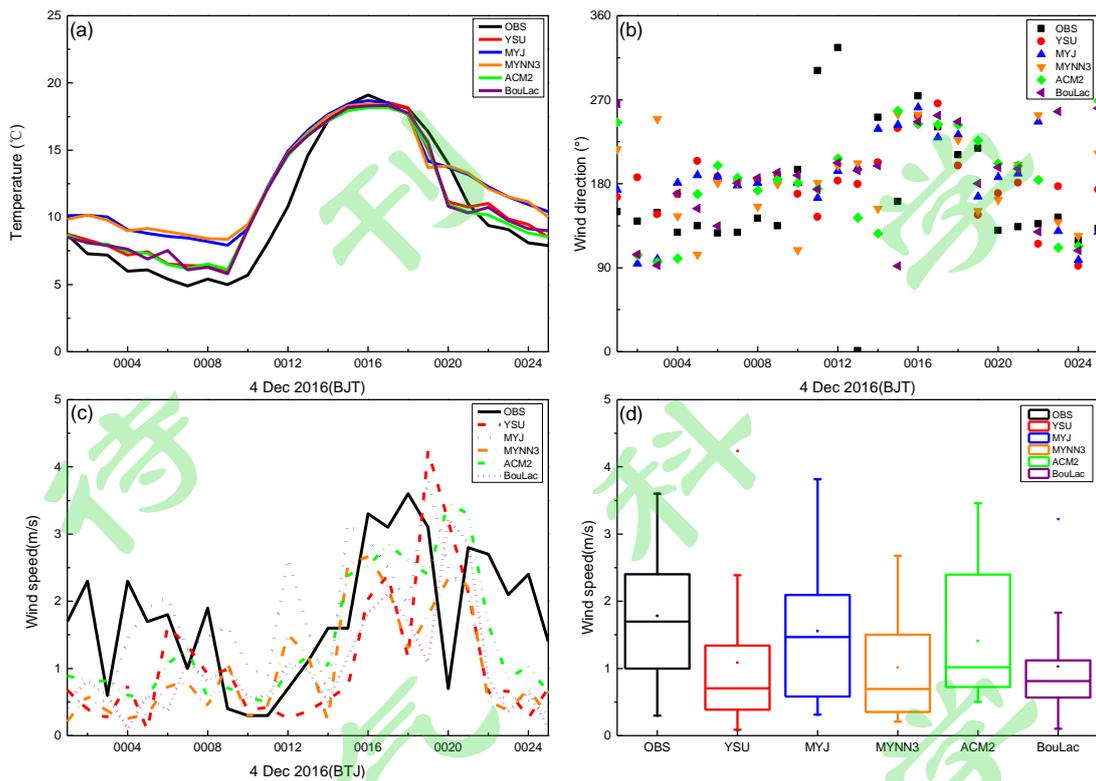


图6 观测值与YSU、MYJ、MYNN3、ACM2、BouLac模拟值对比 (a) 2m 温度 (单位: °C) (b) 10m 风向 (单位: °) (c) 10m 风速日变化 (单位: 米/秒) (d) 10m 风速箱图

Fig.6 Comparisons between observed and simulated values (a) 2m temperature (units: °C) (b) 10 m wind speed (unit: m/s) of daily variation (c) 10 m wind direction (unit: °) (d) box chart of 10 m wind speed

### 3.3 干季和湿季局地环流分析

#### 3.3.1 干季局地环流

基于 3.2 的分析, 干季和湿季局地环流的模拟采用了 YSU 边界层参数化方案。最内层模拟区域内的 2m 温度叠加 10m 风矢量图如图 7, 黑色等值线为地形高度。夜间 (图 7a) 山体温度较低, 高黎贡山山顶气温低至零下, 其东侧的怒江大峡谷温度较高, 山谷之间温差较大。腾冲和保山 (图 7d 中黑色圆点所示位置) 由于城市热岛效应温度偏高。夜间风速较小, 山坡辐射冷却降温较大, 山谷降温较慢, 盛行由山坡吹向山谷的山风, 高黎贡山东西两侧山风明显, 西北部海拔较高的区域和东部的碧罗雪山, 也以山坡吹向山谷的山风为主要环流形势, 山顶气流辐散而山谷气流辐合。并且, 东侧怒江大峡谷内风向偏北, 直至上午模拟区域内的气流基本都有偏北分量, 日出之后地面开始接收太阳辐射加热, 山谷开始升温, 9 时山风减弱而谷风开始发展。山坡东侧升温快, 在气压梯度力的作用下, 高黎贡山东侧最先开始

形成由山谷吹向山坡的谷风。随着温度升高，10时（图7b）西侧的谷风也逐渐发展起来。下午14时（图7c）谷风环流更加明显，高黎贡山两侧气流沿山坡上升，气流在山顶附近辐合，怒江大峡谷气流辐散。腾冲站基本为西南气流，保山站为偏东气流。高黎贡山西侧气流转为有偏南分量。傍晚19时高黎贡山东坡开始出现山风环流，20时西坡也开始出现山风，21时山风环流加强。夜间高黎贡山山体气流辐散，腾冲站主要为南风，东侧保山站主要为西北风。综上，地面风速较小，尤其在夜间，高黎贡山东西两侧主要在地形热力作用下形成有日变化的山谷风环流；从夜间到白天，气流的偏北分量逐渐转为偏南分量，同样是北高南低的地形热力作用导致。夜间山顶气流辐散，山谷气流辐合，白天则相反。腾冲站和保山站分别位于山的西侧和东侧谷内，风向受山谷风环流发展转换的影响，风向基本相反，这与观测事实是相符的。

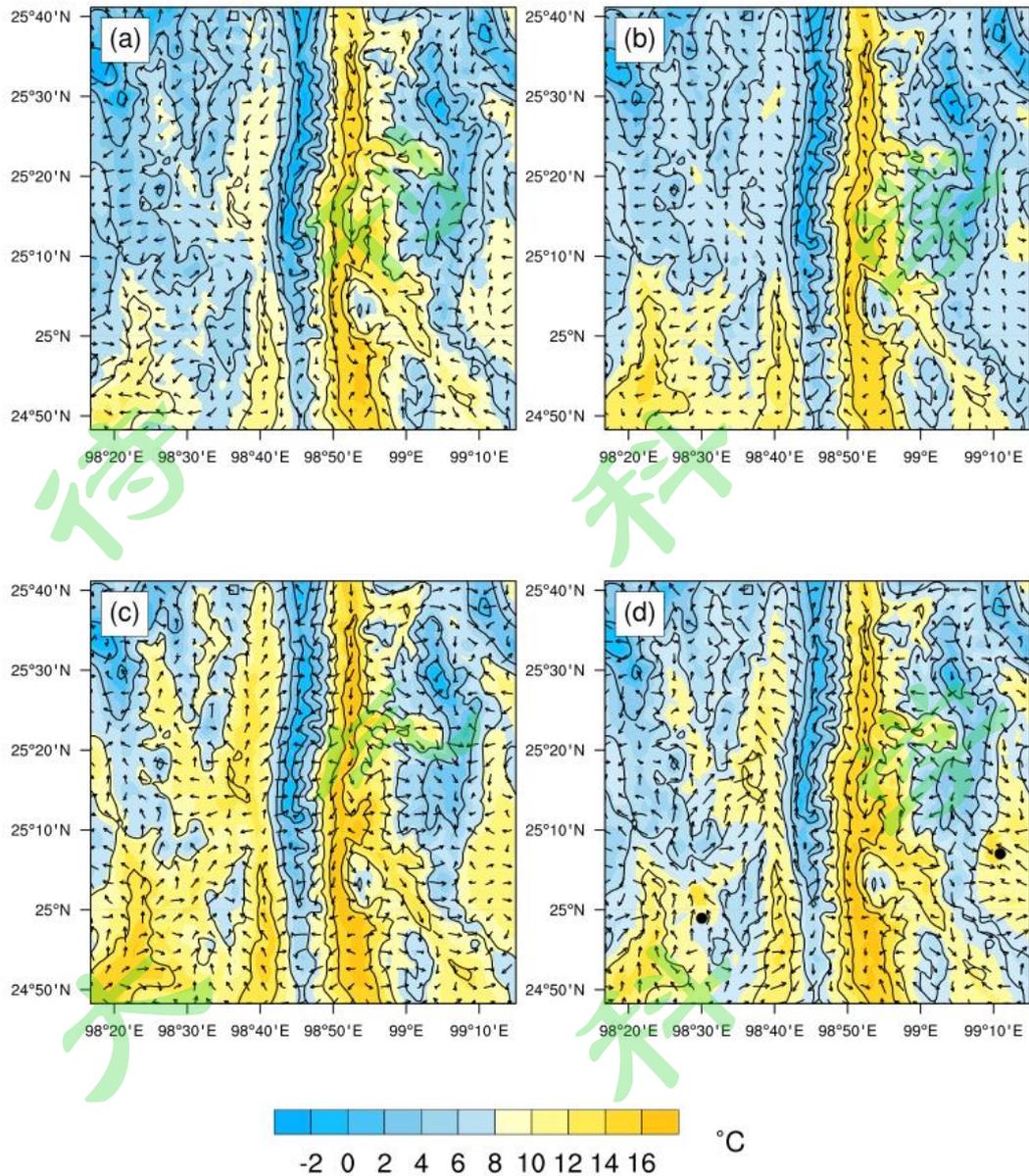


图7 模拟的10米风场(箭头, 单位: m/s)、2米温度(阴影, 单位: °C)和地形高度(等值线, 单位: m)

(a) 02:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 20:00

Fig. 7 Simulated diurnal variation of 10m wind field (black vector, units: m/s), 2m temperature (shaded, units: °C), terrain height (contour, units: m)

为了分析位温和垂直环流结构, 沿  $25.23^{\circ} \text{N}$  做  $5\text{km}$  以下的垂直剖面图。干季中层盛行偏西风。夜间, 低层垂直剖面图上全部为平直的东西气流。在高黎贡山东侧的怒江大峡谷, 西风过山以后形成了小的空腔区和逆向气流。西侧山谷低层有被高黎贡山阻挡的折返气流。日出以后, 对流边界层开始发展, 在高黎贡山西侧山谷地面以上  $1\text{km}$  出现东风气流, 西侧怒江大峡谷内的逆向气流也更加旺盛。由于东侧碧罗雪山的阻挡, 峡谷内近地层位温较低,

上层背风坡升温快，高黎贡山两侧等位温线东高西低。谷风环流也开始发展。下午 14 时，西风更加强盛，且在西侧山谷内气流上升往两侧下沉，形成小的涡旋，对流边界层高度达 1km 以上。高黎贡山东侧大峡谷内西风气流逆转下沉，碧罗雪山西坡出现下坡风。日落后地面长波辐射冷却，谷风减弱而山风逐渐发展。4 日晚上冷高压南压，东北季风较强，20 时碧罗雪山以西 3.2km 以下出现东风气流，东西风交汇，湍流混合层较弱。峡谷内东风下传，西侧山谷内气流仍然存在小的涡旋。

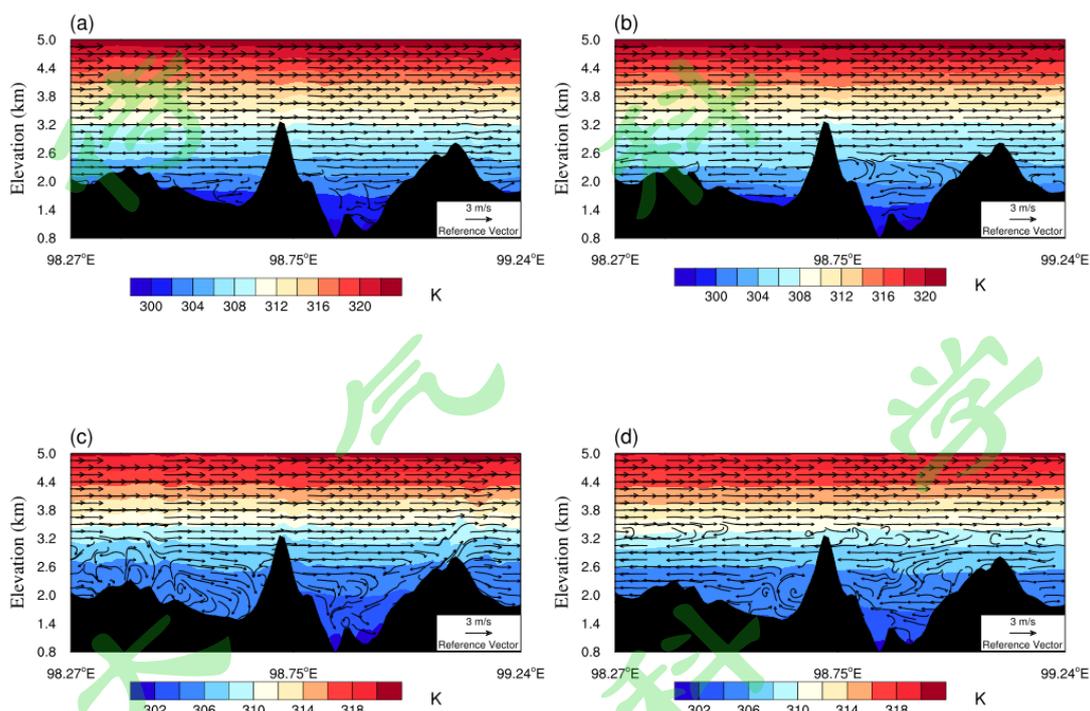


图 8 沿 25.23°N 的位温（填色，单位：K）、风场（箭头，单位：m/s）的垂直剖面图

(a) 02:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 20:00

Fig. 8 Vertical cross sections of potential temperature (shaded, units:K), wind field (vector, units: m/s), at 25.23°N

### 3.3.2 湿季局地环流

湿季腾冲保山地区受偏东背景风的影响，夜间高黎贡山山顶已转为偏东风，在东风的影响下东侧的山风明显比西侧弱。与干季不同的是西侧仍以山风环流为主而风向偏北，但东侧风向偏南。白天，谷风环流 10 点发展旺盛，谷风在山顶辐合。午后 14:00 时，高黎贡山东侧的偏东谷风加大，甚至在有些地方越过山顶，明显抑制了西侧偏西谷风的发展。在青藏高原的南克湖盆地，较强的背景风会推迟湖风甚至模拟不出湖风 (Gerken et al, 2014)。腾冲站风向西南，保山站风向东南。综上，东风导致白天高黎贡山西侧谷风减弱，夜间东侧山风减弱。可见当背景风较强和风向与局地风风向相反时，会抑制局地环流的发展。

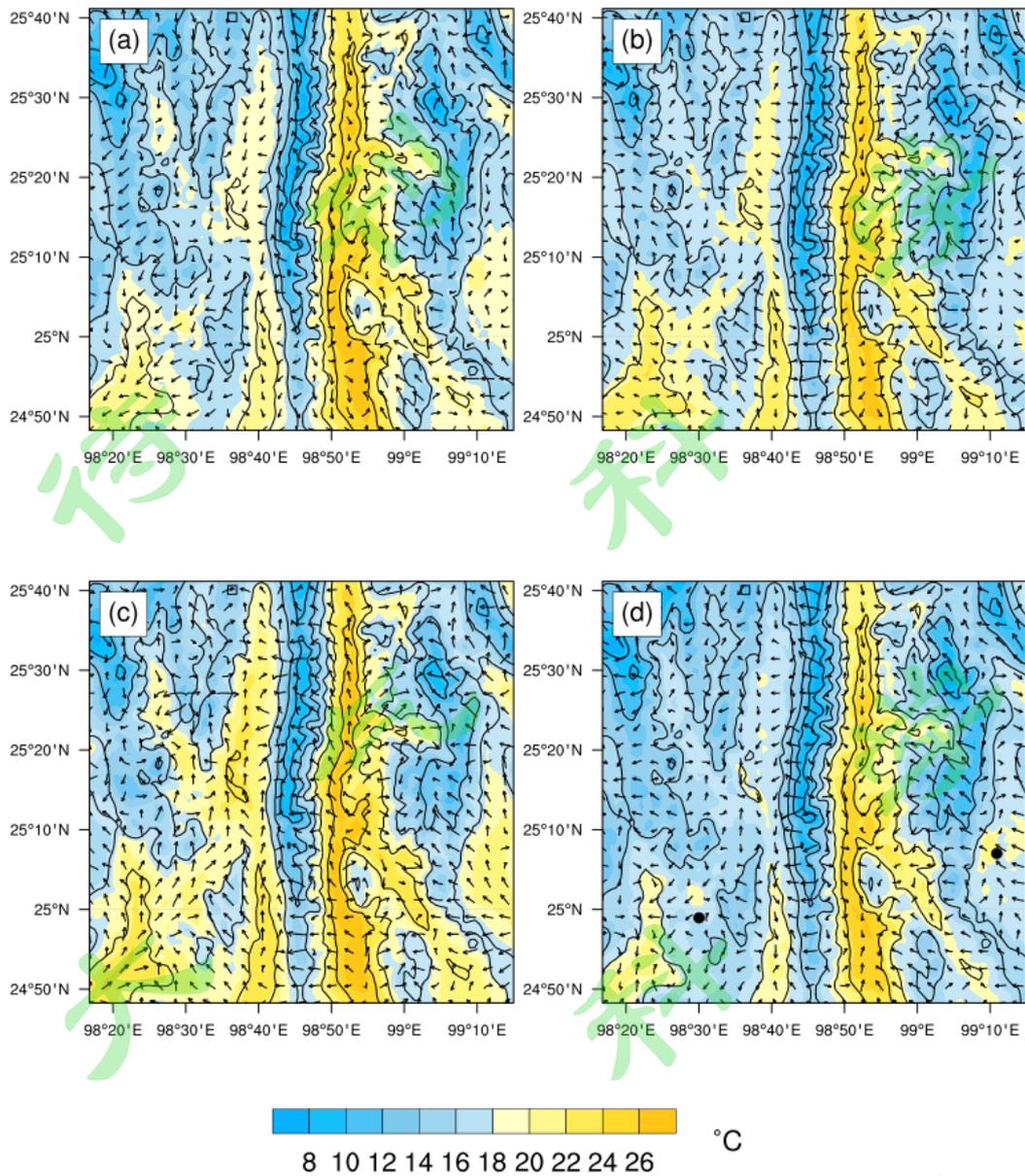


图9 同图7，但为湿季的平面风场图 (a) 02:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 20:00

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for wind field figure in the dry season

夜间 4.4km 到地面全部为东风控制。上层西风与下层东风交汇形成交换带 (图 10)。上午 10 点山谷风环流开始形成。东西风相遇的高度下降至 3.5km，在东、西风相遇高度上形成若干个小的涡旋。在东侧峡谷内东风受高黎贡山阻挡后下沉或弯折。午后高黎贡山西侧高层西风动量下传，与下层东风产生扰动，西侧近地面气流起伏波动，等位温线也随之起伏。东侧的东西风交换带更低一些，东风在怒江大峡谷下沉，怒江大峡谷以 314K 位温充分发展混合层。东风气流在低层被高黎贡山阻挡而高层强西风气流翻越高黎贡山逐渐下传，使得山脉两侧东、西风混合层高度不同。晚上 20 时气流已没有中午时那么强盛，东风高度在 4km

左右。湿季，在偏东背景风的影响下，中层东风和西风的动量交换会使底层产生波动，东风气流的影响高度仅在 5km 以下。

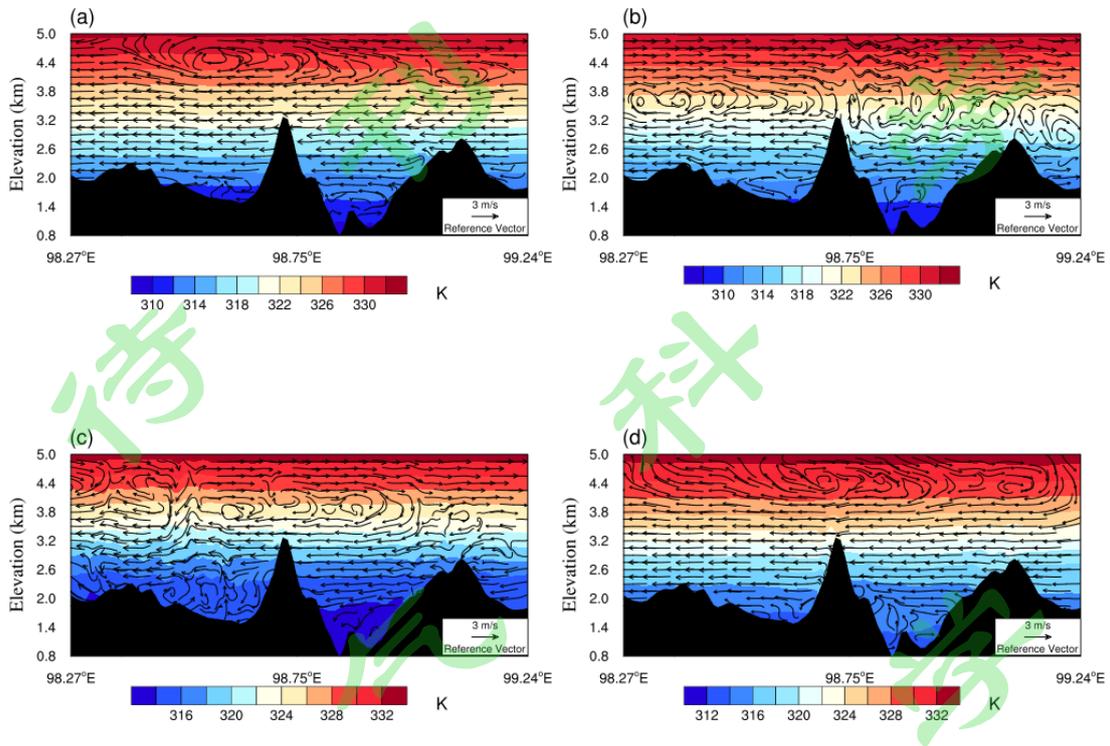


图 10 同图 8，但为湿季的垂直剖面图 (a) 02:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 20:00

Fig. 10 Same as Fig. 8, but is the vertical section in the dry season

### 3.3 边界层高度分析

图 11 为干季和湿季腾冲站、保山站边界层高度的日变化。夜间稳定边界层高度几乎保持不变，维持在几十米的高度。上午 9 时谷风环流开始时边界层开始发展，午后对流边界层充分发展，14 时至 15 时高度达到最高，干季腾冲站大气边界层高度可达到 2500m 以上，保山站大气边界层高度为 2169m，腾冲边界层高度比保山高 300m 左右。干季边界层高度高于湿季。腾冲站和保山站都位于高黎贡山南段纬度上，基于上述干季和湿季位温和风场的剖面分析，可以注意到干季背景风环流较弱，利于局地环流的发展；而湿季受偏东背景风影响时，白天的谷风环流与背景风风向是相反的，因而抑制了局地环流的发展，边界层高度也就低于干季。正如当背景风风速较大时，湖风会被推迟或者抑制 (Tobias et.al, 2013)。另外，高黎贡山西侧干季由于山脉阻挡，西风气流下沉会形成小的涡旋，湍流混合充分，边界层高度高于保山；湿季受偏东风影响时，背景风使高黎贡山西侧谷风和东侧山风减弱，而湍流混合层主要受白天谷风发展的影响，故而湿季腾冲与保山的边界层高度相差不大。

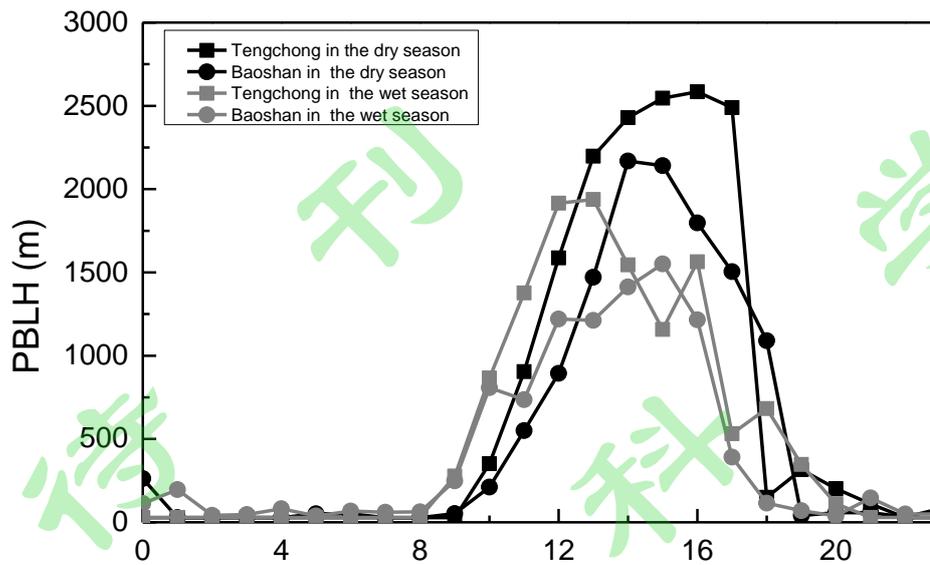


图 11 模式中干季（黑色）、湿季（灰色）腾冲站（方框）和保山站（圆点）的边界层高度（单位：米）对比

Fig. 11 Comparison of boundary layer height (units: meter) between Tengchong station (square) and Baoshan station (dot) of dry season (black) and wet season (grey) in model

#### 4 结论

本文基于高黎贡山东、西两侧腾冲和保山站气象观测资料，验证 WRF 模式不同边界层参数化方案在复杂地形下的适用性，并模拟分析高黎贡山局地环流特征。研究表明，高黎贡山西侧比东侧温度低、湿度大，东、西两侧干季和湿季主导风向不同。高黎贡山南段的腾冲-保山地区谷风出现在上午 9:00 时，山风出现在下午 19:00 时。局地环流以山谷风环流为主，白天多为偏南风，夜间为偏北风和偏西风。白天山顶气流辐合，山谷辐散，夜间相反。白天风速大于夜间。干季西风风力较弱，有利于对流层低层局地环流的发展。湿季偏东风较强，谷风环流发展受到抑制，边界层高度低于干季。另外，干季较强的西风遇到高黎贡山，在西坡下沉和形成涡旋，西侧湍流混合充分，边界层高度高于东侧。湿季受较强的偏东背景风削弱了西侧谷风环流的发展，因而腾冲与保山的边界层高度相差不多。

本文对高黎贡山南段地区的局地环流做了个例分析，结果与该区的气候特征、背景风等较为一致，具有一定的代表性。但是仅模拟了两个时段的局地环流，若要了解高原复杂地形下在西南季风和东南季风交汇区的局地环流，还需要汇集更多的地面观测资料以及背景风资料来进行更加深入的研究。

## 参考文献 (References)

- Arritt R W, Pielke R A. 1986. Interactions of nocturnal slope flows with ambient winds[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 37(1-2):183-195.
- Barr S, Orgill M M. 1989. Influence of External Meteorology on Nocturnal Valley Drainage Winds[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 28:6(6):497-517.
- Bougeault P, Lacarrère P. 1989. Parameterization of orographic induced turbulence in a mesobeta scale model[J]. *Monthly Weather Review*, 117(8):1872-1890.
- 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响[J]. *大气科学*, 30(1):25-37. Chen Yan, Ding Yihui, Xiao Ziniu, et al. 2006. Effects of water vapor transport on monsoon outbreak and precipitation anomalies in early summer in Yunnan [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 30(1):25-37.
- Clements W E, Archuleta J A, Hoard D E. 1989. Mean Structure of the Nocturnal Drainage Flow in a Deep Valley[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 28(28):457-462.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an Advanced Land Surface Hydrology Model with the Penn State NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity[J]. *Monthly Weather Review*, 129(4):569-585.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *Journal of the Atmospheric Science*. 46, 3077 - 3107
- Doran J C. 1991. The effects of ambient winds on valley drainage flows[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 55(1-2):177-189.
- Gross G. 1987. Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate — A numerical study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 38(4):315-337.
- Holt T, Raman S. 1988. A review and comparative evaluation of multilevel boundary layer parameterizations for first - order and turbulent kinetic energy closure schemes[J]. *Reviews of Geophysics*, 26(4):761-780.
- Hong S Y, Y Noh, J Dudhia. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341

- Jiménez P A, Dudhia J. 2012. Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2):300-316.
- Jiménez P A, Dudhia J. 2013. On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over Complex Terrain[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(7):1610-1617.
- Jin L, Li Z, He Q, et al. 2016. Observation and simulation of near-surface wind and its variation with topography in Urumqi, West China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 30(6):961-982.
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective Parameterization for Mesoscale Models: The Kain-Fritsch Scheme[J]. *Meteorological Monographs*, 24:165-170.
- 刘玉洪, 张克映等. 1996. 哀牢山(西南季风山地)空气湿度资源的分布特征[J]. *自然资源学报*, 11(4):347-354. Liu Yuhong, Zhang Keying, et al. 1996. Distribution characteristics of air humidity resources in Ailao mountains (southwest monsoon mountains) [J]. *Journal of Natural Resources*, 11(4):347-354.
- 刘辉志, 洪钟祥, 桑建国. 2001. 对流边界层中过山气流的数值模拟[J]. *气候与环境研究*, 2001, 6(3):305-311. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, and Sang Jianguo. 2001. Numerical simulation of crossing mountain flow in convective boundary layer [J]. *Climate and Environment Research*, 2001, 6(3):305-311.
- 刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. 2012. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2012(2):301-312. Liu Zhenxin, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2012. Comparative study of MM5 and WRF on the simulation capability of local circulation in the lower atmosphere of Beijing region [J]. *Chinese Science: Earth Science*, 2012(2):301-312.
- 李汀, 琚建华. 2013. 孟加拉湾西南季风与南海热带季风的气候特征比较[J]. *地球物理学报*, 56(1):27-37. Li Ding, Ju Jianhua. 2013. Comparison of climatic characteristics between southwest monsoon from the bay of Bengal and tropical monsoon from the south China sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(1):27-37.
- 李斐, 邹捍, 周立波, 等. 2017. WRF 模式中边界层参数化方案在藏东南复杂下垫面适用性研

- 究[J]. 高原气象, 36(2):340-357. Li Fei, Zou Jian, Zhou Libo, et al. 2017. Applicability study of boundary layer parameterization scheme in WRF model for complex underlying surface in southeast Tibet [J]. Plateau Meteorology, 36(2):340-357.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models[J]. Monthly Weather Review, 138(138):1587-1612.
- Lee J, Shin H H, Hong S, et al. 2015. Impacts of subgrid-scale orography parameterization on simulated surface layer wind and monsoonal precipitation in the high-resolution WRF model[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 120(2):644-653.
- 马舒坡, 周立波, 王维. 2008. 珠穆朗玛峰北坡绒布河谷地面风特征的初步分析[J]. 气候与环境研究, 13(2):189-198. Ma Shupo, Zhou Libo, Wang Wei. A preliminary analysis of the surface wind characteristics of the Rongbuk valley on the northern slope of Mount Everest [J]. Climate and Environment Research, 2008, 13(2):189-198.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 20(4):851-875.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 102(D14):16663-16682.
- M.G. Cogliatta, N.A. Mazzeo. 2006. Air flow analysis in the upper Rio Negro Valley (Argentina) [J]. Atmospheric Research 80 (2006):263 - 279
- Nakanishi M, Niino H. 2004. An Important Mellor-Yamada Level-3 Model with Condensation Physics: Its Design and Verification[J]. Boundary-Layer Meteorology, 112(1),1-31.
- Pleim J E. 2007. A Combined local and nonlocal model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in mesoscale meteorological model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46(9), 1396-1409.
- Prasad K B R R H, Srinivas C V, Rao T N, et al. 2017. Performance of WRF in Simulating Terrain Induced Flows and Atmospheric Boundary Layer Characteristics over the

- Tropical Station Gadanki[J]. *Atmospheric Research*, 185(1):101-117.
- 齐瑛, 傅抱璞. 1992. 过山气流与地形形状[J]. *南京大学学报自然科学*, 1992(4):146-156.
- Qi Ying, Fu Baopu. 1992. Air flow crossing mountain and topographic shape [J]. *Journal of Nanjing University, Science*, 1992(4):146-156.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 2005. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 277 - 281. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2005. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peking University Press, 277 - 281.
- 孙绩华, 樊风, 徐安伦等. 2015. 西南季风爆发前后大理近地层风场及湍流通量的变化特征[J]. *气候与环境研究*, 20(4):369-379. Sun Jihua, Fan Feng, Xu Anlun, et al. 2015. Variation characteristics of wind field and turbulence flux in the surface layer of Dali before and after the outbreak of southwest monsoon [J]. *Climate and Environment Study*, 20(4):369-379.
- Schmidli J, Rotunno R. 2011. Influence of the Valley Surroundings on Valley Wind Dynamics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(2):561-577.
- Sun, F., Y. Ma, Z. Hu, M. Li, G. Tartari, F. Salerno, T. Gerken, P. Bonasoni, P. Cristofanelli, and E. Vuillermoz. 2018. Mechanism of Daytime Strong Winds on the Northern Slopes of Himalayas, near Mount Everest: Observation and Simulation[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(2):255-272
- Tobias G, Tobias B, Wolfgang B, et al. 2014. A modelling investigation into lake-breeze development and convection triggering in the Nam Co Lake basin, Tibetan Plateau[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(1-2).
- 屠妮妮, 何光碧, 张利红. 2012. 不同边界层和陆面过程参数化方案对比分析[J]. *高原山地气象研究*, 32(3):1-8. Tu Nini, He Guangbi, Zhang Lihong. 2012. Comparative analysis of different parameterization schemes for boundary layer and land surface processes [J]. *Plateau Mountain Meteorology Research*, 32(3):1-8.
- 王瑾, 张镭, 王腾蛟, 等. 2012. 兰州附近山谷典型日环流特征对比分析[J]. *干旱气象*, 2012, 30(2):169-177. Wang Jin, Zhang Lei, Wang Tengjiao, et al. 2012. Comparative analysis of typical daily circulation characteristics in the valley near Lanzhou [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2012, 30(2):169-177.
- Wang W, Xiao W, Cao C, et al. 2014. Temporal and spatial variations in radiation

and energy balance across a large freshwater lake in China[J]. Journal of Hydrology, 511(7):811-824.

徐嘉行, 李良敏, 刘敏蓉. 1984. 盛夏云南大一暴雨与季风活动的关系[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 1984(3):57-66. Xu Jiaying, Li Liangmin, Liu Minrong. 1984.

Relationship between heavy rain and monsoon activity in Yunnan in mid-summer [J]. Journal of yunnan university: natural science, 1984(3):57-66.

Xie B, Fung J C H, Chan A, et al. 2012. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 117(D12), 12103

叶笃正. 1956. 小地形对于气流的影响[J]. 气象学报, 1956(03):243-262. Ye Duzheng. 1956.

Effect of small topography on airflow [J]. Journal of Meteorology, 1956(03):243-262.

叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡[J].

气象学报, 1957(02):108-121. Ye Duzheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. Flow field structure of Tibetan plateau and its vicinity and heat balance in troposphere [J]. Journal of Meteorology, 1957(02):108-121.

尹相玉. 2014. 基于WRF模式的济南地区大气边界层特征模拟研究[D]. 山东师范大学, 2014.

Yin Xiangyu. 2014. Simulation study of atmospheric boundary layer characteristics in Jinan region based on WRF model [D]. Shandong Normal University, 2014.

张克映, 马友鑫, 李佑荣等. 1992. 哀牢山过山气流的气候效应[J]. 地理研究, 1992,

11(3):65-70. Zhang Keying, Ma Youxin, Li Yourong, et al. 1992. Climatic effects of the flow across Ailao mountains [J]. Geographic Studies, 11(3):65-70.

张人文, 范绍佳, 李颖敏. 2012. 2008年秋季从化山谷风观测研究[J]. 热带气象学报,

28(1):134-139. Zhang Renwen, Fan Shaojia, Li Yingmin. 2012. Conghua autumnal valley wind observation research in 2008 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 28(1):134-139.

张小培, 银燕. 2013. 复杂地形地区WRF模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学

学报, 36(1):68-76. Zhang Xiaopei, Yin Yan. 2013. Evaluation of four boundary layer parameterization schemes for WRF model in complex topographic areas [J].

Journal of Atmospheric Sciences, 36(1):68-76.

Zängl G. 2009. The impact of weak synoptic forcing on the valley-wind circulation in the Alpine Inn Valley[J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 105(1-2):37-53.

刊

海

德

科

风

海

大

科

风

刊

大

德