

复杂地形对大理地区风场的影响研究 ——兼论观测、理论和数值模拟配合解答科学问题

薛海乐

由于观测资料不能覆盖研究所关注的高空区域，已有理论又无法解释所面对的问题，所以希望利用数值模拟来生产一套逼近真实的数据，以补充观测的欠缺。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.002

气候预测和天气预报一方面关注低频缓慢过程并向延伸期推进，另一方面关注快速变化的小尺度灾害性过程并向高精度和高准确率预报努力。然而对后者的观测仍然非常困难，其强非线性作用也导致了理论研究的困难，因此如何将模式模拟、观测和理论恰当地配合起来研究我们所关注的科学问题变得非常迫切。大理作为著名的旅游地，其“大理四绝，风花雪月”指的是下关的风、上关的花、苍山的雪和洱海的月。其中大理下关位于洱海南端，处于点苍山和哀牢山之间山谷的东侧，常年盛行强劲的偏西风。而位于大理古城东侧洱海西岸的大理气象站的大风蓝色预警（风速大于17 m/s）平均每年可达50次以上。一般而言大风往往和台风、强对流和地形重力波等天气过程有关，大理区域的大风天气很显然与其西侧的地形及其相关流场相关。

1 观测事实

大理地区未设探空站，观测主要以地面测站为主。以往研究显示大理下关常年盛行偏西风，古城东侧的大理站在大风期间主要为偏西风而其他时段盛行偏东风，机场盛行偏南风。所有站点都显示冬季风速大、夏季风速小、白天风速大、夜间风速小的特征（3个位置如图1所示）。大理站大部分的大风蓝色预警都发生在冬半季的午后。古城东侧另有一个20 m的观测铁塔和2 km有效观测的风廓线雷达。地表600 m以上基本为西风并随高度增速，600 m以下具有风向东西风交替的日变化，从午后到傍晚高空的西风下伸到近地面，其余时间盛行偏东风。尽管没有探空站，但是再分析资料仍然可以提供粗分辨率的高空风场信息，最新的ERA5数据显示北半球冬季副热带高空急

流位于该区域附近，夏季也以西风为主但风速稍弱。

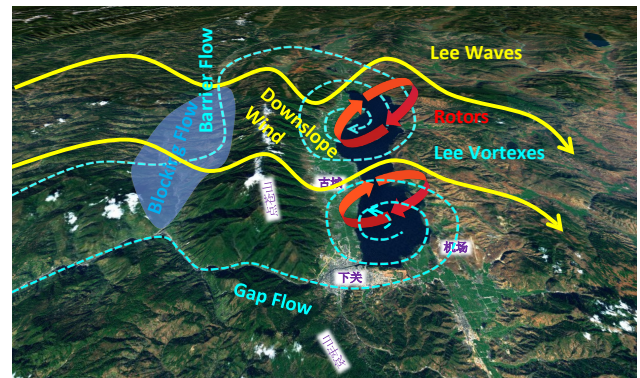


图1 大理区域流场结构示意图

如果去掉图1的流场概念图，仅凭上述观测是很难推测点苍山东侧的洱海上空发生了怎样的天气过程，当然也不能判断是什么机制导致了大理的大风。因此，如果希望通过观测来揭开大理大风的成因，点苍山背风区域对流层内的三维流场信息必不可少。

2 理论分析

关于地形造成的背风坡风暴的研究较为悠久而丰富，这很大程度上和欧洲的阿尔卑斯山和北美的落基山相关。尤其是因为美国国家大气研究中心位于落基山东麓，经常可以观测到超强的下坡风，因此大气科学家从20世纪60年代开始集中研究大型山体导致的背风坡风暴的机理。从简单的水跃模型、重力波破碎导致的波反射理论到非线性波破碎理论，都需要在对流层上部存在一个波破碎导致的湍流区域。另外，这种地形重力波一般针对巨大的山体（几十到上百千米宽度）。而大理区域的点苍山的山体横向宽度仅10~20 km，其上方存在稳定的西风急流，因此上述

理论很难直接应用。其次讨论背风坡风的线性背风波理论起步更早（20世纪40年代），该理论认为地形激发的重力波会被上层大气反射从而被“困”在对流层下部，因此在波谷和山顶之间会形成下坡风。然而这种理论一般针对的是高度很矮的山体（不超过数百米），且根据该理论波长会在上午和傍晚增长，但振幅会减小。而点苍山的高度（山顶距离东西侧山谷）可达1.8 km，另外这一理论的预测也和大理站的观测事实不符。大理站的大风主要出现在午后而早晨很少能够观测到，且大风表示波的振幅也应该增大，这也与线性背风波理论相悖。

3 大涡模拟

由于观测资料不能覆盖本文关注的高空区域，已有理论又无法解释所面对的问题，所以希望利用数值模拟来生产一套逼近真实的数据，以补充观测的欠缺。针对所关心的问题：地形对其流场的影响，需要在3个方面使得模式（WRF3.81版本）模拟逼近真实。首先，为了使得地形更真实，将90 m分辨率的地形导入到模式中。一方面高分辨地形资料能够更精确地刻画地形的复杂性而使其接近真实地形，另一方面当地形分辨率和模式分辨率相近的时候会对模式积分稳定性造成影响。因此，将90 m分辨率地形进行滤波，滤掉400 m以下尺度的地形后导入到WRF模式当中进行模拟。其次，为了让大气背景和边界更真实，

使用美国环境预报中心的最终分析资料（FNL）并同化了我国常规地面资料和探空资料。最后，为了让模式更真实，使用了110 m分辨率的大涡模拟以避免边界层参数化所带来的不确定性。所谓大涡模拟是指模式分辨率高到足以分辨边界层中的含能尺度的大涡，白天典型边界层高度为1 km左右，因此大涡尺度可达几百米到1 km。由于模式网格能够分辨大部分湍能，因此传统的边界层参数化方案可以关闭，从而使得模式对边界层的模拟不确定性减小。由于本文主要介绍文献中的主要结论，在此不再赘述具体的模式参数。

该模拟选取了2015年1月23日傍晚的大风个例进行模拟，该个例地面风观测和大理站风廓线观测与历史统计基本相似。图2给出了大理站的风廓线观测和模拟在该日的演变过程。无论是观测还是模拟，都给出了距地600 m范围内从上午的东风转为下午的西风，并在夜间重新转为东风的变化过程。垂直速度也显示了下沉—上升—下沉的变化过程。因此认为模拟基本接近真实。Xue等的文献同时也给出了点苍山周围几个地面站的风演变过程和模式模拟结果的对比，都显示了模拟可信度。图3a和3b分别给出了早晨和傍晚流场垂直剖面。早晨，点苍山上下游都是偏东风，仅仅在山体东侧上半部分存在小段西风下坡风；傍晚，上游区域的东风基本转为西风，下游低层仍然存在一支东风回流区，而下坡风明显伸展到接近谷

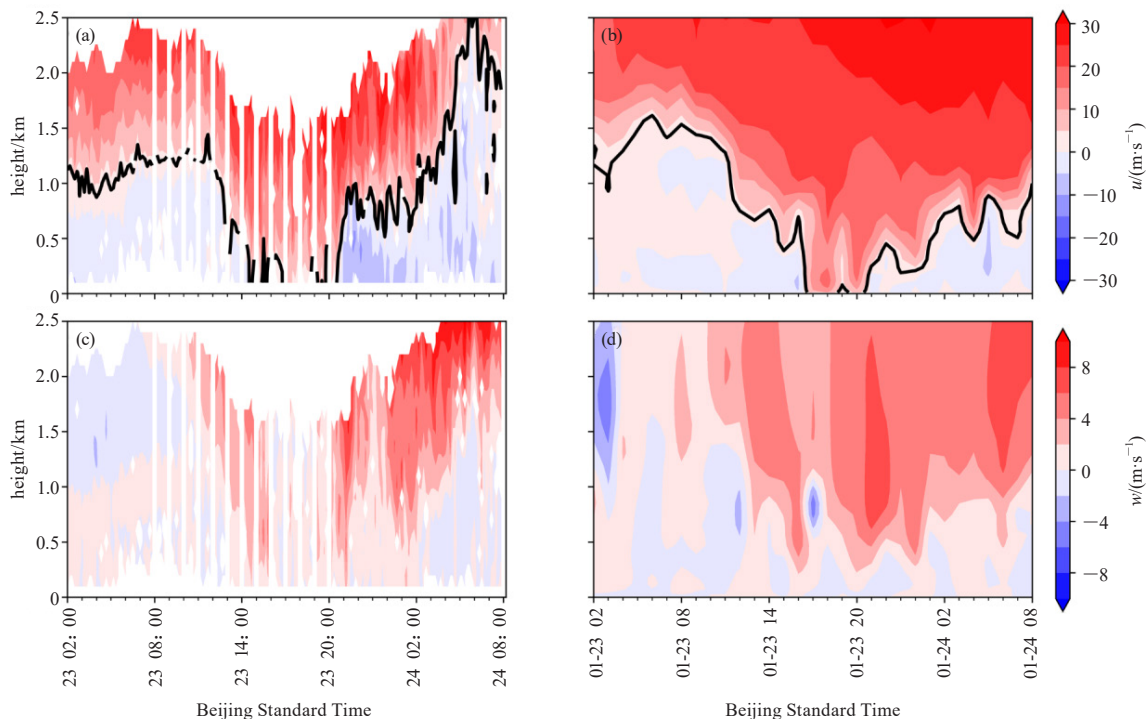


图2 纬向风速(a, b)及垂直速度(c, d)的时间变化图
(a, c) 风廓线雷达观测, (b, d) 模式模拟结果(黑线大概区分了东西风的边界)

底的位置了。从早晨到傍晚，位于背风坡上方的重力波的振幅和波长明显增大和伸长了。图3d明显地展示了下坡风在傍晚伸展到了点苍山东侧谷底附近（100.1°—100.2°E，25.6°—25.8°N），因此在背风波的波谷没有伸展到的地方，地表附近为偏东风回流，而当背风波波谷伸展所到之处，地表附近为西风。这种背风波伸展和收缩造成的近地表附近风向的周期性变化和上文中提到的观测事实相符，能非常合理地解

释大风为什么是西风，且发生在午后到傍晚。而大理下关（100.2°E，25.57°N）无论是早晨还是傍晚都位于点苍山和哀牢山之间峡谷的出口处而盛行强盛的西风。大理机场（100.3°E，25.65°N）所在的位置为峡谷绕流后并经过东侧山体阻挡后加强的一支气流，叠加其上方重力波第二个波谷（图3b），形成强劲的西南风（图3d）。

模拟结果分别解释了大理下关西风、机场偏南风

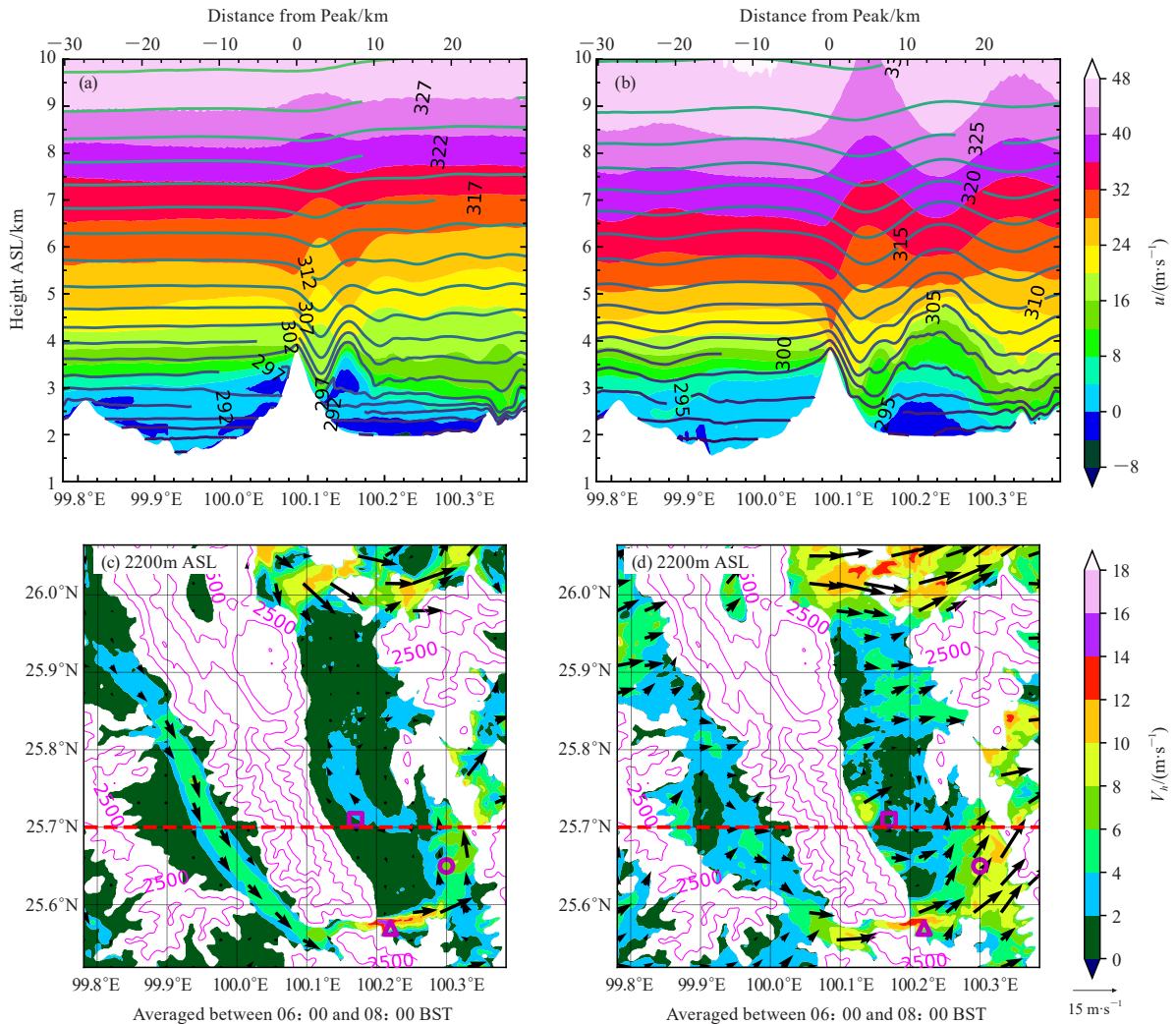


图3 (a, b) 为纬向风速 (填色) 和位温 (等值线) 剖面图, (c, d) 为海拔 2.2 km 平面上的风速和风向矢量截面; (a, c) 为早晨, (b, d) 为傍晚; (b, d) 中的红色虚线标记了 (a, b) 的剖面位置 (c 和 d 中紫色方框、圆圈和三角形分别代表大理站、机场站和下关站所在位置)

和大理站东西风日循环。其中下关西风是由点苍山和哀牢山之间的峡谷风造成的，机场偏南风是由于南支绕流（包括了峡谷风）复原并受下游山体阻挡而加强的气流，而大理站东西风交替是因为其上方背风波周期性加强伸长和减弱缩短而导致的。图1所示的概念图非常形象地展示了上述高低空气流的配合。底层气流遇到较高山体阻挡会形成绕流，在两侧的山体

形成峡谷流，并在背风区域形成水平旋转的涡旋。较高高度上的气流会翻越山体而形成背风波，这种背风波会在午后伸长变强，导致强劲的西风下坡风可以伸展到更远的地方，其波峰下方会形成垂直方向旋转的转子，转子的地面支为东风回流。因此，背风波的周期性伸缩导致了近地面东西风的交替变化。

(下转 72 页)

的高温、寒冷为话题，向公众展示真实的气候环境，也取得了一定的浏览量和互动量。

因此，基于气象的公众服务要求，为充分发挥移动端直播平台的优势来传播气象信息，就必须扎实研究受众特点和受众需求，从内容出发，提高气象服务的整体形象和能力；加密直播时次，提高对移动端直播平台的利用率；以服务为核心，提高直播内容对用户的实际服务作用；加强节目互动，提高公众与节目的参与热情和参与度；提高直播节目质量，将气象直播节目打造成专业、正规的服务品牌，区别于直播乱象中的其他内容。

(上接6页)

4 总结和讨论

本文引用了一次基于真实地形和大气背景的大涡模拟，阐述了大理大风成因并就如何配合使用观测资料、理论研究和模式模拟来研究小尺度高影响天气现象进行了讨论。通过大涡模拟的方式补充了观测的稀疏和理论的缺失，解答了大理三处地方大风形成的机制。同时又反过来分别对观测、理论和模式发展提出了新要求。本研究通过个例研究了大理风成因，更多的科学问题可以被提出来。1) 背风波是否真实存在，具有何种日变化和季节变化特征，如要提供更加坚实的证据，就必须要有长期的三维流场观测；2) 背风波为什么会有周期性增强伸展和减弱缩短的现象，这要求对这种特殊的大振幅背风波的机理进行研究（将会在另一篇文章中进行介绍），而机理研究要求进行理论研究和理想模拟研究，因此本次大涡模拟对模式（理想模型的建立）和理论（非线性背风波）也提出了新要求；3) 背风波的这种周期性变化会对动量在垂直和水平方向上的分布造成何种影响，其导致的背风波转子会对水汽和热量通量造成何种影响，这要求建立这种大振幅背风波的参数化方案或者使用超高分辨率大范围模拟，这对模式研发也提出了新要求。

大理被中国气象局确定为山地气象野外科学试验基地，已在点苍山东西向剖面（沿25.7°N）不同海拔高度（4092、3520、2640、2130、1990、1975、2088 m）建设地面自动气象站，并环洱海周边布设12个地面自动站。其他观测设备包括边界层风（温）廓线雷达、多普勒天气雷达、地面基准辐射站、近地层

深入阅读

- 李岩, 胡静, 谭宇. 2019. 以网络直播为例探究桂林气象服务新模式. 新媒体研究, (10): 3-44, 58.
- 孟京, 李孟頔. 2018. 基于云端的气象融媒体直播演播室平台构建. 网络新媒体技术, 7(5): 51-57.
- 王晨, 田依洁, 唐立岩. 2017. 网络直播在气象宣传科普工作中的应用研究——以一直播平台为例. 新媒体研究, 3(16): 33-35.
- 王子龙. 2016. 直播APP下的全民网络主播初探. 新闻研究导刊, (4): 142.
- 吴吉义, 李文娟, 黄剑平, 等. 2015. 移动互联网研究综述. 中国科学(信息科学), 45(1): 45-69.

(作者单位: 徐实, 海南省气象服务中心;
李亚平, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室)

通量观测系统和双波段（红外和微波）大口径闪烁仪等。然而，除了一个风廓线雷达以外，大部分观测设备只能观测到地面附近的气象要素场，这与山地气象所关注的重力波、地形阻挡、地形降水、冷池、污染物扩散、背风波及其转子湍流等的要求仍然有较大差距。目前点苍山上游几百千米范围内无探空数据可用，仅仅在其北部100 km左右的丽江站有一天两次的常规探空。如能在其上游的泸水市建立探空观测将不仅对横断山脉区域的背景场的改善有帮助，也会为大理山地气象的研究具有重要意义。

深入阅读

- 毕波, 赵建伟, 杨航. 大理机场风特征分析及对飞行的影响. 中低纬山地气象, 2019, 43(1): 50-54.
- 董保举, 李建, 孙绩华, 等. 青藏高原东南缘大理低层风场垂直结构与变化特征. 高原气象, 2016, 35(3): 597-607.
- 杨澄, 付志嘉, 赵晓红. 1971—2010年云南大理大风天气特征统计及分析. 沈阳: 第29届中国气象学会年会, 2012.
- Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B. Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges. Berlin: Springer, 2013.
- Durrant D R. Mountain waves and downslope winds. Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteor Monogr No. 45, American Meteorological Society, 1990: 59-81.
- Pearce R P, White P W. Lee wave characteristics derived from a three-layer model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 93: 155-165.
- Scorer R S. Theory of waves in the lee of mountains. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1949, 75: 41-56.
- Xue H, Li J, Qian T, Gu H. A 100-m-scale modeling study of a gale event on the Lee side of a long narrow mountain. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59(1): 23-45.

(作者单位: 薛海乐, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)