中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 11 期: 2639 ~ 2647
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

青藏高原地形重力波对东亚春季降水的重要作用

李闰秋[1], 徐昕[1*], 徐祥德[2†], Theodore G. SHEPHERD[3], 王元[1]

1. 南京大学中尺度灾害天气实验室, 南京大学大气科学学院, 南京 210023;
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
3. Department of Meteorology, University of Reading, Reading RG6 6BB, UK
* 通讯作者, E-mail: xinxu@nju.edu.cn
† 通讯作者, E-mail: xuxd@cma.gov.cn

收稿日期: 2023-05-10; 收修改稿日期: 2023-09-26; 接受日期: 2023-10-11; 网络版发表日期: 2023-10-24
第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0105)和国家自然科学基金项目(批准号: 42122036、91837207、42230607)资助

摘要 春季持续性降水是东亚夏季风爆发前的主要雨季, 对东亚地区乃至全球水循环都具有深刻影响. 过去研究揭示了青藏高原大尺度地形的动力和热力作用对东亚春季降水的重要影响, 但青藏高原小尺度地形的作用尚不明确. 本研究发现, 副热带西风流受青藏高原小尺度地形扰动激发的地形重力波, 同样对东亚春季降水具有重要贡献. 垂直传播的地形重力波在对流层中层发生破碎, 产生纬向拖曳, 从而驱动跨越青藏高原的经向环流. 在青藏高原南侧, 经向环流上升支的动力抽吸作用使得对流层低层气压减弱, 从而增强经向气压梯度力和西南季风, 将更多水汽输送至下游东亚地区, 最终导致春季降水的增多. 该研究有助于更加全面地理解青藏高原多尺度地形对东亚春季降水的影响, 为西风-季风协同作用提供了新的视角.

关键词 青藏高原, 地形重力波, 季风, 春季持续性降水

1 引言

在北半球春季(3~5月), 东亚地区常出现持续性降水, 形成一条从中国华南地区延伸到日本以东的雨带. 春季持续性降水约占华南地区年降水量的35%, 在为农业和工业用水提供充沛水资源的同时, 也可能导致暴雨和洪涝灾害(Luo等, 2017; Li等, 2018; 丁一汇, 2019). 此外, 在春季持续性降水期间, 东亚地区产生大量层云, 其云辐射效应对区域乃至全球的能量平衡和水文循环都具有重要影响(例如, Wang等, 2014; Li等, 2019).

东亚春季持续性降水的形成与来自印度洋西南季风的水汽输送密切相关(Zhao等, 2007). Tian和Yasunari (1998)认为西南气流的产生是由于春季季节性变暖的时滞造成了中南半岛和北太平洋西部之间的西-东热力差异. 然而, Wan和Wu(2007)通过开展敏感性数值试验, 指出西南气流的产生主要是青藏高原的机械和热力强迫造成的. 从动力作用来看, 中纬度西风气流受到青藏高原大尺度地形的阻挡分成南北两支, 并在高原下游汇合(Yeh, 1950). 西南气流是南支偏转气流的

中文引用格式: 李闰秋, 徐昕, 徐祥德, Shepherd T G, 王元. 2023. 青藏高原地形重力波对东亚春季降水的重要作用. 中国科学: 地球科学, 53(11): 2639–2647, doi: 10.1360/N072023-0107
英文引用格式: Li R, Xu X, Xu X, Shepherd T G, Wang Y. 2023. Importance of orographic gravity waves over the Tibetan Plateau on the spring rainfall in East Asia. Science China Earth Sciences, 66(11): 2594–2602, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1204-6

© 2023 《中国科学》杂志社

一部分. 从热力作用来看, 青藏高原地表的感热加热(SH)通过“感热气泵”效应, 在对流层低层产生一个气旋性环流(Wu等, 2007), 进一步增强西南气流(Wu等, 2012). 经过多年的发展, 目前气候模式通常能够得到很好地表征青藏高原大尺度地形的动力和热力作用. 但是, 即使是最先进的气候模式, 如国际耦合模式比较计划第6阶段(CMIP6)采用的模式和现代再分析数据集, 也系统性地低估东亚的春季持续性降水和层云(Wang等, 2014; Li等, 2018)(见附图S1, http://earthcn.scichina.com).

众所周知, 青藏高原有着十分复杂的地形, 不仅包括大尺度高原, 还包括气候模式无法完全解析的水平长度从几公里到几十公里不等的小尺度山脉, 即次网格尺度地形. 这些小尺度山脉能够激发垂直传播的地形重力波, 通过波破碎产生地形重力波拖曳(OGWD), 显著影响区域和全球范围内的大气环流, 如中层大气的Brewer-Dobson环流, 对流层急流、阻高和风暴轴等(例如, Sigmond和Shepherd, 2014; Pithan等, 2016; Choi等, 2017; Sato和Hirano, 2019; Zhang等, 2020). 青藏高原是全球地形重力波活动的热点地区之一, 拥有全球最为显著的地形重力波拖曳(Eckermann和Preusse, 1999; Sato等, 2009). 近年来, 学者们在青藏高原地形重力波拖曳的天气气候效应上取得了一系列重要进展. 例如, Šácha等(2021)发现, 青藏高原上空的地形重力波拖曳能够增强罗斯贝波向极地平流层的传播, 从而导致极地涡旋减弱. Cohen和Boos(2016)发现, Madden-Julian振荡(MJO)的对流活动与冬季青藏高原的地形重力波拖曳之间存在密切关系. 在数值模式中引入地形重力波拖曳参数化可以改进对青藏高原冬季环流和降水的模拟(Zhou等, 2017). 然而, 对于青藏高原地形重力波拖曳对东亚春季降水的影响, 目前仍然知之甚少.

本研究提出了一个与青藏高原大尺度地形热力抽吸(即“感热气泵”)类似的动力抽吸机制. 纬向地形重力波拖曳能够驱动跨越青藏高原的经向环流. 在高原南侧, 经向环流的上升支将低层空气抬升, 从而导致气压降低, 增强高原南侧的西南气流及其向下游东亚地区的水汽输送. 在不考虑青藏高原地形重力波拖曳的情况下, 东亚春季降水将明显减少, 揭示了青藏高原小尺度地形的重要作用.

2 数据和方法

2.1 降水和再分析资料

本文采用2000~2017年的美国CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)降水数据(Joyce等, 2004), 时间分辨率为3小时, 水平分辨率为0.25°. 此外, 还使用了12个CMIP6高分辨率气候模式的模拟降水(见附表S1), 以及欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)综合预报系统(Integrated Forecasting System, IFS)生成的ERA-Interim再分析数据, 时间分辨率为6小时, 空间分辨率为0.75°(Dee等, 2011). 该数据还为下文提到的WRF-ARW数值模拟提供了初始和边界条件.

2.2 数值模拟

本文利用WRF-ARW(V4.0)模式对2000~2017年东亚春季降水进行模拟, 水平分辨率为27km(图1a), 垂直方向50层, 模式顶位于30hPa. 对于模式的物理过程参数化方案, 采用了WSM5微物理方案、Kain-Fritsch积云对流方案、YSU边界层方案、Noah陆面方案、CAM长波辐射方案、CAM短波辐射方案, 以及Kim和Doyle(2005)研发的地形重力波拖曳参数化方案.

为了探究青藏高原地形重力波拖曳对东亚春季降水的影响, 本文开展了三组敏感性试验. 第一组为控制(CTL)试验, 考虑整个模拟区域的次网格地形重力波拖曳; 第二组为TP_NoOGWD试验, 关闭了青藏高原区域(图1b黑框)的次网格地形重力波拖曳(即, 将该区域的次网格地形标准差设为零, 对模式可分辨的地形无影响). 这两组试验之间的差异(CTL减去TP_NoOGWD试验)反映出青藏高原次网格地形重力波拖曳的作用. 如引言所述, 过去研究发现青藏高原的地表感热对东亚春季降水具有重要影响. 为了比较地形重力波拖曳和地表感热的相对重要性, 本文还设计了第三组试验, 即TP_NoSH试验. 该试验通过修改Noah陆面方案, 将青藏高原区域高度超1km地区(即图1a中红色等值线)的SHEAT变量(表征感热通量)设置为零, 从而关闭地表感热. 每组敏感性试验均由18次独立的试验组成, 分别从2000~2017年的每年2月15日0000UTC开始运行, 到当年的6月1日0000UTC运行结束.

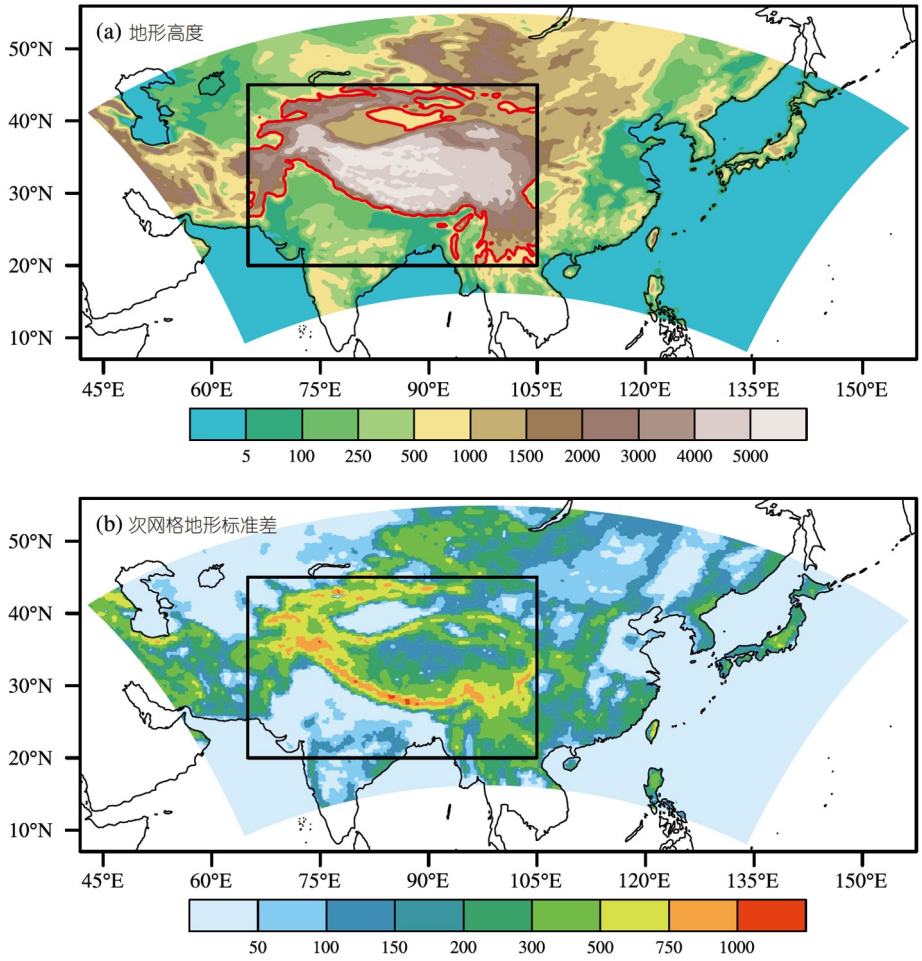

图 1　WRF模式地形高度(a)(单位: m)和次网格地形标准差(b)(单位: m)

红色等高线表示1km, 黑色矩形表示青藏高原区域(20°~45°N, 65°~105°E)

3　东亚模拟降水和环流

图2a~2d分别展示了观测和模拟的2000~2017年东亚春季降水的空间分布. CTL试验能够较好地模拟出东亚地区西南-东北走向的雨带, 从华南地区一直延伸到日本以东(图2b). 尽管模式略微高估了的中国东南部的降水中心, 但成功再现其年际变化和季节内变化(图2e、2f). 观测和模拟降水的时间序列相关系数超过0.9, 通过了99%的student-*t*显著性检验.

当关闭青藏高原区域的次网格地形重力波拖曳时, TP_NoOGWD试验仍然能够模拟出东亚地区狭长的雨带(图2c)及其时间变化(图2e、2f), 但是降水强度明显低估, 尤其是华南地区的降水中心. 同样地, TP_NoSH试验中的春季降水也明显减少(图2d), 与前人发现的"感热气泵"重要作用相一致(Wu等, 2007). 以华南地区的降水中心为例, 在TP_NoOGWD和TP_NoSH试验中, 平均降水强度(即图2a黑框内的平均值)分别低估了约24%和34%. 通过日变化可以看出, 在早春和仲春期间, TP_NoOGWD与TP_NoSH试验模拟的降水强度几乎相同, 但后者在5月份被更多低估(图2f). 这是因为从冬季到夏季, 青藏高原的地形重力波拖曳作用逐渐减弱(Xu等, 2017), 而地表感热逐渐增加(Chen等, 2019).

根据以上分析, 青藏高原地形重力波拖曳对东亚春季降水具有显著影响, 至少与青藏高原大尺度地形的地表感热作用相当. 通过选择不同的物理参数化方案(如积云对流、辐射等)进行多组敏感性试验, 模拟结果证明了地形重力波拖曳作用的鲁棒性(见附图S2,

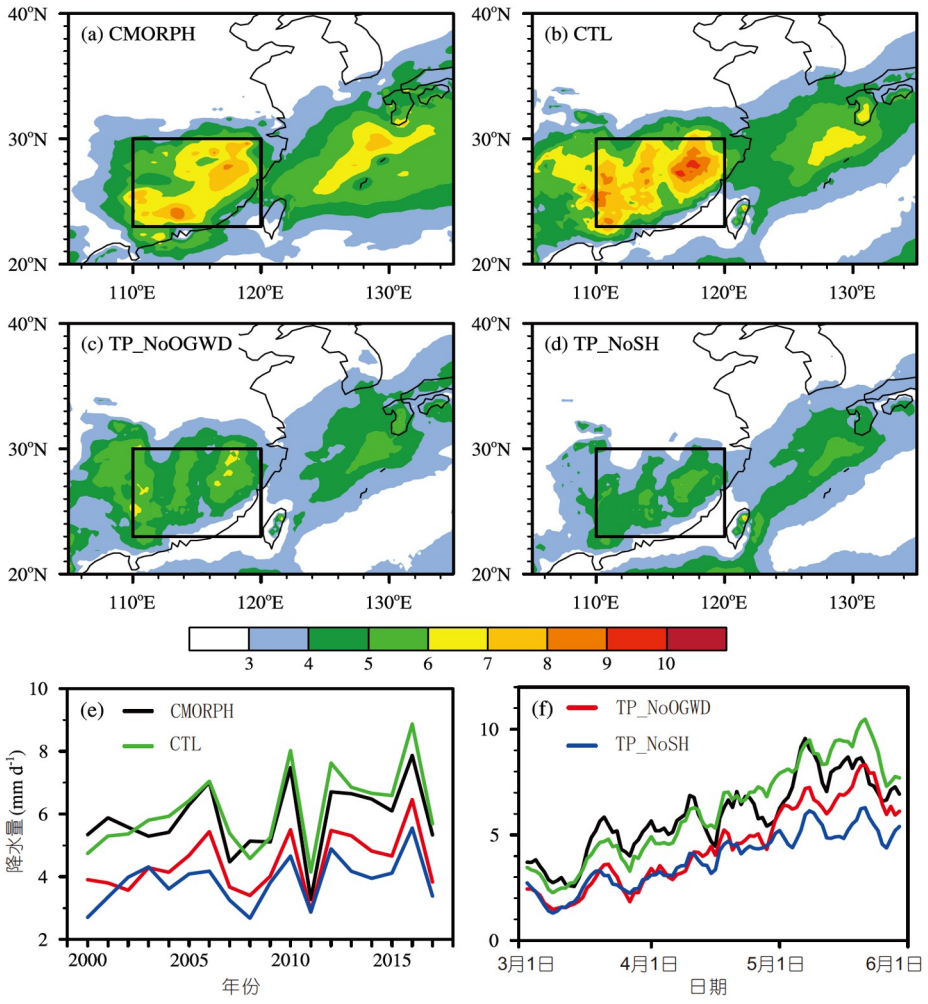

图 2　2000~2017年东亚春季降水的空间分布及时间变化(单位: mm d^{-1})

(a) CMORPH; (b) CTL; (c) TP_NoOGWD; (d) TP_NoSH试验; (e) 2000~2017年中国东南地区((a)~(d)黑色矩形区域)春季降水的年际变化和(f)逐日变化(单位: mm d^{-1}). 图中应用了5点滑动平均

附表S2). 同时, TP_NoOGWD试验中的大气顶部短波云辐射也有所减少(附图S3), 与降水减弱相吻合. 这与Li等(2015)和Zhang等(2014)的结果相一致, 即模式水平分辨率的提高能够解析更多地形, 从而增加模拟的东亚春季降水和层云.

以往研究表明, 青藏高原以南低层西南季风气流的水汽输送对东亚春季降水的发生和维持至关重要(例如, Zhao等, 2007; Tian和Yasunari, 1998). 图3a~3d分析了再分析资料ERA-Interim和三组试验的850hPa环流及水汽输送. 与再分析资料相比, CTL试验模拟出了青藏高原南侧的西南风以及从孟加拉湾到东亚地区的水汽输送(图3a、3b). 在TP_NoOGWD和TP_NoSH两组试验中(图3c、3d), 青藏高原南侧的低层气流比CTL试验(图3e、3f)弱得多. 因此西南气流无法翻越中南半岛, 向北或西北方向偏转, 导致来自孟加拉湾的水汽输送显著减少(图3c、3d). 同时, 由于西南气流减弱, 西太平洋副热带高压得以向西延伸并抑制华南地区的上升运动, 这也导致了春季持续性降水的减弱.

事实上, 在20°~30°N约60°~140°E的广大区域, CTL试验模拟的西风和西南风比TP_NoOGWD和TP_NoSH试验模拟的更强. 通过分析与TP_NoSH试验的差异(图3f), 青藏高原及其周边地区具有高原尺度的气旋环流, 并伴有负的位势高度扰动. 这与青藏高原"感热气泵"的抽吸效应相一致(Wu等, 2007). 在青藏

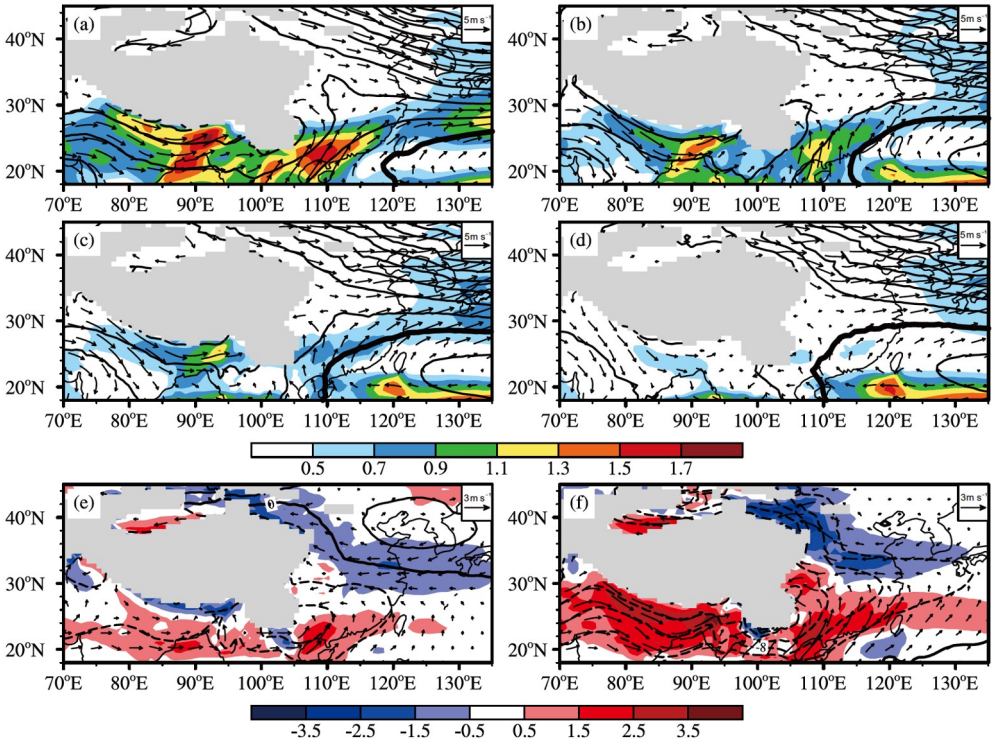

图 3　2000~2017年春季850hPa位势高度(等值线; 单位: gpm, 间隔10gpm)和水平风(矢量)

(a) ERA-Interim; (b) CTL; (c) TP_NoOGWD; (d) TP_NoSH试验. 填色是垂直积分的1000~700hPa水汽通量(单位: kg m^{-1} s^{-1}). 粗黑线为1510gpm位势高度, 表明西太平洋副热带高压的边界. (e)~(f)分别是(b)和(c)~(d)之间的差异, 填色为水平风速(单位: m s^{-1})

高原南侧, 经向气压梯度增强, 导致西风气流加速. 对于TP_NoOGWD试验, 负的位势高度扰动局限于青藏高原南侧, 而正的位势高度扰动主要位于青藏高原以北和东北(图3e). 这种环流形势类似于冬季高原两侧的非对称偶极子, 而后者是副热带西风气流受青藏高原大尺度地形的阻挡发生偏转造成的(Wu等, 2015). 如下文第4节所示, 图3e中的偶极子是青藏高原地形重力波拖曳驱动的跨越高原的经向环流所导致. 值得注意的是, "感热气泵"效应对图3e中青藏高原以南的气旋性环流差异几乎没有贡献. 从高原整体来看, 感热变化不明显. 青藏高原上的感热变化存在空间不均匀性(附图S4c), 高原西侧地表感热的减弱可能是由于地形重力波拖曳对近地面风的减速作用.

4　青藏高原地形重力波拖曳的动力作用

图4a展示了CTL试验中500hPa次网格地形重力波拖曳的空间分布. 在高原西部、中部和东南部, 都存在着显著的向西方向的地形重力波拖曳. 此外, 地形重力波拖曳主要集中在对流层中层, 低层拖曳较小. 青藏高原上空的500hPa西风受到地形重力波拖曳作用而减速(图4b). 根据准地转纬向动量方程, 并考虑地形重力波拖曳的作用, 即

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - fv = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + OGWD_x, \tag{1}$$

对于下游变化较小的定常大尺度气流, 上式可简化为

$$-fv_a = OGWD_x, \tag{2}$$

纬向地形重力波拖曳对西风气流的减速作用将导致非地转南风(v_a). 图4c清楚地显示出高原上空的南风分量, 这种向极地移动的偏南气流会产生向东的科氏力力矩, 直到与向西的地形重力波拖曳达到平衡. 根据经向平面的质量连续约束条件, 即$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial p} = 0$, 高原南部和北部分别产生上升和下沉运动, 从而形成跨越青藏高原的经向环流(图4c). 从物理学角度来看, 在高原南侧, 向极地运动的非地转风在对流层中层产生低

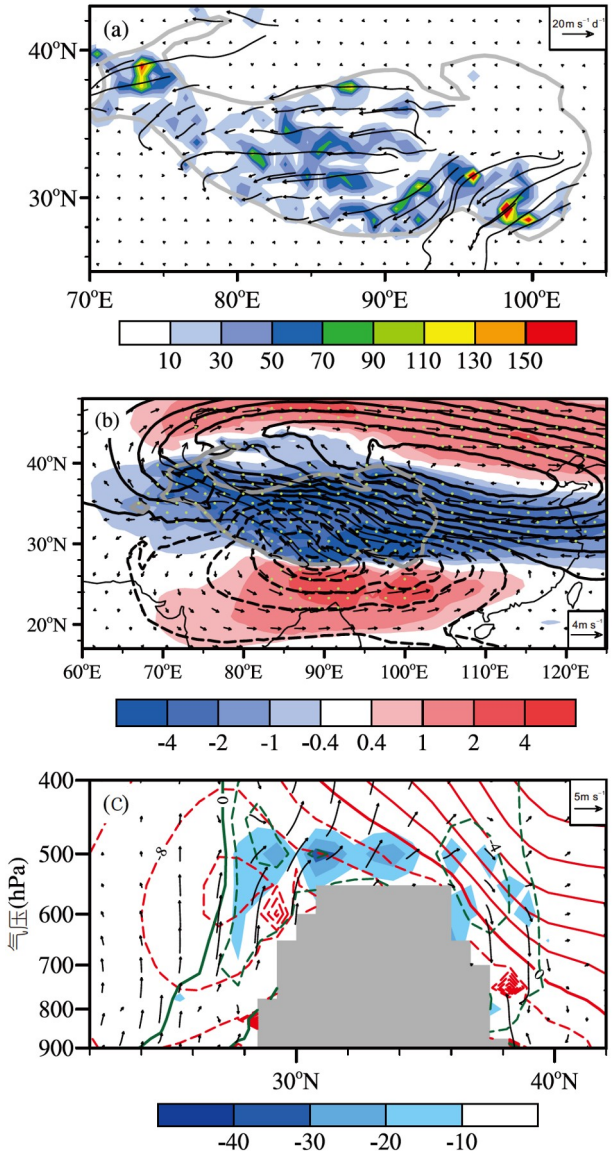

图 4　2000~2017年春季500hPa次网格地形重力波拖曳的空间分布以及不同试验的位势高度和风场差异

(a) CTL试验次网格地形重力波拖曳矢量及强度(填色; 单位: m s^{-1} d^{-1}); (b) CTL和TP_NoOGWD试验500hPa位势高度(等值线; 单位: gpm, 间隔5gpm)、水平风(矢量)和水平风速(填色, 单位: m s^{-1})差异(白色点表示通过student-*t*的95%置信度检验); (c) 85°~95°E纬向平均位势高度(等值线; 单位: gpm, 间隔4gpm)、纬向风(矢量)及纬向风速(深绿色等值线; 单位: m s^{-1}, 间隔2m s^{-1})差异. (c)中垂直速度矢量放大了100倍, 填色为CTL试验的纬向平均纬向地形重力波拖曳(单位: m s^{-1} d^{-1}). (a)和(b)中灰色等值线表示海拔3000m高度

压中心, 形成垂直向上的气压梯度力, 将低层空气动力抽吸至上层, 从而维持经向环流(Haynes和Shepherd, 1989). 对流层低层的低压扰动能够增强经向气压梯度力, 从而导致高原南侧西风/西南风的加强(图3e). 上述加速体现了模式可分辨动力过程对参数化的地形重力波拖曳的间接响应, 与van Niekerk等(2018)的观点一致(见该文中图3b、8b).

上述跨越高原的经向环流在性质上与高层波强迫激发的次级环流类似, 因此可以根据"向下控制"理论对其进行量化(Haynes等, 1991). 为了更好地揭示青藏高原地形重力波拖曳的作用, 本文利用该理论对地形重力波拖曳导致的垂直速度进行诊断. 虽然"向下控制"理论最早提出是针对纬向对称的波强迫, 但是对于纬向非对称的波强迫同样适应(Shaw和Boos, 2012).

对于定常纬向波强迫($\overline{G}$)激发的次级环流, 其垂直速度为

$$\omega(p)=\frac{\partial}{r\partial\varphi}\left[\frac{1}{f}\int_{p}^{0}\overline{G}\,\mathrm{d}p\right], \tag{3}$$

其中, ω是等压坐标系中的垂直速度, r是地球半径, φ是纬度. 在某一高度, 波强迫引起的垂直速度与位于该高度之上的垂直积分波强迫的经向梯度成正比. 图5a中蓝线表示500hPa以上垂直积分的纬向地形重力波拖曳在85°~95°E(即经向环流最显著区域)范围内的平均值. 可以看出, 垂直积分的纬向地形重力波拖曳在31°N附近达到峰值, 因此在高原南北两侧分别具有负、正经向梯度, 从而产生垂直上升和下沉运动. 根据"向下控制"理论对垂直速度(ω_D)进行定量诊断, 并将其与CTL和TP_NoOGWD试验之间的垂直速度差异(ω_d)进行对比. 总体而言, ω_D与ω_d呈现出很好的一致性, 尤其是在经向环流的上升支(图5b、5c). 该结果证明了青藏高原地形重力波拖曳对于跨越高原经向环流的重要作用.

5　讨论

本文发现了青藏高原小尺度地形激发的地形重力波对东亚春季降水的重要影响. 与众所周知的"感热气泵"效应不同, 研究提出了一种由地形重力波拖曳驱动的新型气泵效应. 对流层中层的地形重力波拖曳能够打破青藏高原上空大尺度西风气流的地转平衡, 从而驱动跨越高原的经向环流(图6). 在高原南侧, 经向环流的上升支垂直抽吸对流层下层空气, 产生低压扰动, 经向气压梯度增强. 因此, 高原东南侧的西南气流加

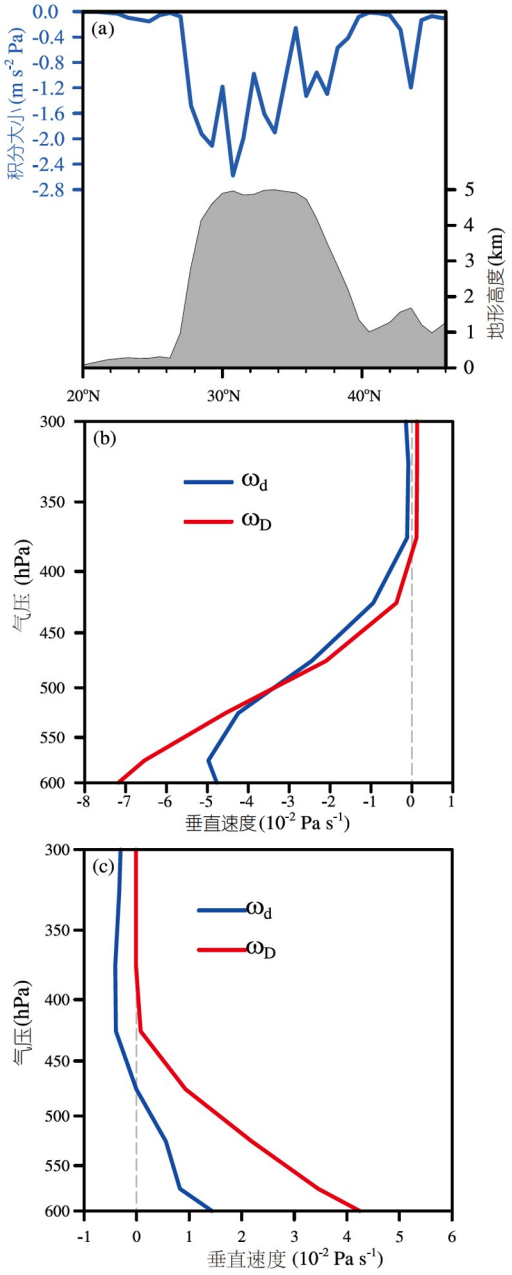

图 5　2000~2017年春季青藏高原地区的纬向地形重力波拖曳及其导致的垂直速度

(a) CTL试验85°~95°E平均的500hPa以上垂直积分的纬向地形重力波拖曳(单位: m s^{-2} Pa). 灰色阴影表示对应的平均地形(单位: km). 地形重力波拖曳驱动的跨越高原经向环流(b)上升支(23°~27°N; 85°~95°E)和(c)下沉支(37°~41°N; 85°~95°E)的平均垂直速度ω_D (根据"向下控制"理论的诊断; 红线)和ω_d (CTL和TP_NoOGWD试验的差异; 蓝线) (单位: 10^{-2}Pa s^{-1})

速，有利于将更多水汽从孟加拉湾输送到下游东亚地区. 若不考虑青藏高原地形重力波拖曳的作用，东亚

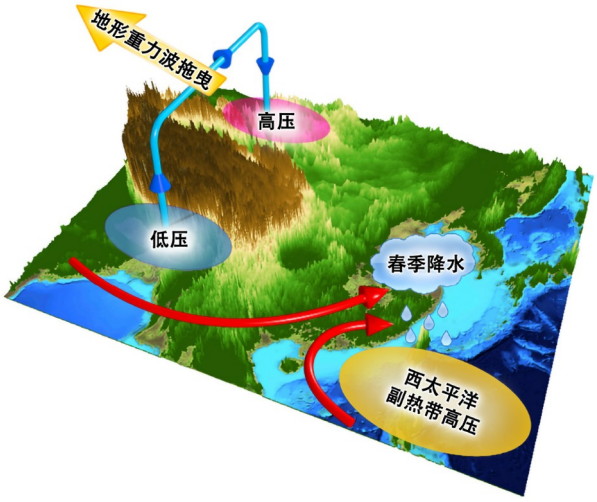

图 6　青藏高原地形重力波拖曳影响东亚春季降水的概念模型

地区春季持续性降水将显著减少.

青藏高原地形重力波拖曳对东亚春季降水的影响与青藏高原大尺度地形的地表感热作用基本相当，两者都能显著影响青藏高原及周边地区的大气环流和水汽输送. 地形重力波拖曳是西风气流受到小尺度地形扰动而产生，因此在冷季(冬季到仲春)最明显(Li等, 2020). 与之相反，青藏高原的地表感热作用在春末和夏季达到峰值(Fu等, 2020). 青藏高原地形重力波拖曳的动力气泵效应体现了西风-季风协同作用的一个重要途径(Xu等, 2014; Chen等, 2021), 但是过去从未被揭示.

该发现对于东亚春季持续性降水的气候模拟和未来预测也有着重要意义. 在气候模式中, 准确地表示青藏高原多尺度地形的动力和热力效应至关重要. 在气候变暖背景下，区域降水预测具有深刻的科学和社会意义. 东亚春季降水近几十年来呈下降趋势，已经对农业和工业用水产生威胁(Li等, 2018; Zhang等, 2020). 然而，区域降水变化的预测还存在很大的不确定性. 数值模式难以精确表征次网格地形重力波拖曳, 是当前气候变化预测不确定性的主要来源之一(Shepherd, 2014; Sandu等, 2019). 因此, 未来需要进一步开展重力波动力学研究(例如, Zhou等, 2019; Kruse, 2020; Xu等, 2021; Teixeira和Argain, 2022), 并利用深度学习等新技术来模拟或优化重力波参数化(例如, Matsuoka等, 2020; Espinosa等, 2022), 从而更好地表征复杂地形区域(如青藏高原)的小尺度地形效应.

参考文献

丁一汇. 2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展. 暴雨灾害, 38: 395–406

Chen F, Ding L, Piao S, Zhou T, Xu B, Yao T, Li X. 2021. The Tibetan Plateau as the engine for Asian environmental change: The Tibetan Plateau Earth system research into a new era. Sci Bull, 66: 1263–1266

Chen L, Pryor S C, Wang H, Zhang R. 2019. Distribution and variation of the surface sensible heat flux over the central and eastern Tibetan Plateau: Comparison of station observations and multireanalysis products. J Geophys Res-Atmos, 124: 6191–6206

Choi H, Choi S, Koo M, Kim J, Kwon Y, Hong S. 2017. Effects of parameterized orographic drag on weather forecasting and simulated climatology over East Asia during boreal summer. J Geophys Res-Atmos, 122: 10669–10678

Cohen N Y, Boos W R. 2016. Modulation of subtropical stratospheric gravity waves by equatorial rainfall. Geophys Res Lett, 43: 466–471

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M A, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars A C M, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer A J, Haimberger L, Healy S B, Hersbach H, Hólm E V, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally A P, Monge-Sanz B M, Morcrette J, Park B, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J, Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Q J R Meteorol Soc, 137: 553–597

Eckermann S D, Preusse P. 1999. Global measurements of stratospheric mountain waves from space. Science, 286: 1534–1537

Espinosa Z I, Sheshadri A, Cain G R, Gerber E P, DallaSanta K J. 2022. Machine learning gravity wave parameterization generalizes to capture the QBO and response to increased CO_2. Geophys Res Lett, 49: e2022GL098174

Fu Y, Ma Y, Zhong L, Yang Y, Guo X, Wang C, Xu X, Yang K, Xu X, Liu L, Fan G, Li Y, Wang D. 2020. Land-surface processes and summer-cloud-precipitation characteristics in the Tibetan Plateau and their effects on downstream weather: A review and perspective. Natl Sci Rev, 7: 500–515

Haynes P H, McIntyre M E, Shepherd T G, Marks C J, Shine K P. 1991. On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. J Atmos Sci, 48: 651–678

Haynes P H, Shepherd T G. 1989. The importance of surface pressure changes in the response of the atmosphere to zonally-symmetric thermal and mechanical forcing. Q J R Meteorol Soc, 115: 1181–1208

Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, Xie P. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. J Hydrometeorol, 5: 487–503

Kim Y J, Doyle J D. 2005. Extension of an orographic-drag parametrization scheme to incorporate orographic anisotropy and flow blocking. Q J R Meteorol Soc, 131: 1893–1921

Kruse C G. 2020. Regional to global evolution of impacts of parameterized mountain-wave drag in the lower stratosphere. J Clim, 33: 3093–3106

Li J, Wang W C, Mao J, Wang Z, Zeng G, Chen G. 2019. Persistent spring shortwave cloud radiative effect and the associated circulations over southeastern China. J Clim, 32: 3069–3087

Li J, Yu R, Yuan W, Chen H, Sun W, Zhang Y. 2015. Precipitation over East Asia simulated by NCAR CAM5 at different horizontal resolutions. J Adv Model Earth Syst, 7: 774–790

Li P, Zhou T, Chen X. 2018. Water vapor transport for spring persistent rains over southeastern China based on five reanalysis datasets. Clim Dyn, 51: 4243–4257

Li R, Xu X, Wang Y, Teixeira M A C, Tang J, Lu Y. 2020. The response of parameterized orographic gravity waves to rapid warming over the Tibetan Plateau. Atmosphere, 11: 1016

Luo Y, Zhang R, Wan Q, Wang B, Wong W K, Hu Z, Jou B J D, Lin Y, Johnson R H, Chang C P, Zhu Y, Zhang X, Wang H, Xia R, Ma J, Zhang D L, Gao M, Zhang Y, Liu X, Chen Y, Huang H, Bao X, Ruan Z, Cui Z, Meng Z, Sun J, Wu M, Wang H, Peng X, Qian W, Zhao K, Xiao Y. 2017. The Southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX). Bull Am Meteorol Soc, 98: 999–1013

Matsuoka D, Watanabe S, Sato K, Kawazoe S, Yu W, Easterbrook S. 2020. Application of deep learning to estimate atmospheric gravity wave parameters in reanalysis data sets. Geophys Res Lett, 47: e2020GL089436

Pithan F, Shepherd T G, Zappa G, Sandu I. 2016. Climate model biases in jet streams, blocking and storm tracks resulting from missing orographic drag. Geophys Res Lett, 43: 7231–7240

Šácha P, Kuchar A, Eichinger R, Pisoft P, Jacobi C, Rieder H E. 2021. Diverse dynamical response to orographic gravity wave drag hotspots—A zonal mean perspective. Geophys Res Lett, 48: e2021GL093305

Sandu I, van Niekerk A, Shepherd T G, Vosper S B, Zadra A, Bacmeister J, Beljaars A, Brown A R, Dörnbrack A, McFarlane N, Pithan F, Svensson G. 2019. Impacts of orography on large-scale atmospheric circulation. NPJ Clim Atmos Sci, 2: 10

Sato K, Hirano S. 2019. The climatology of the Brewer-Dobson circulation and the contribution of gravity waves. Atmos Chem Phys, 19: 4517–4539

Sato K, Watanabe S, Kawatani Y, Tomikawa Y, Miyazaki K, Takahashi M. 2009. On the origins of mesospheric gravity waves. Geophys

Res Lett, 36: L19801
Shaw T A, Boos W R. 2012. The tropospheric response to tropical and subtropical zonally asymmetric torques: Analytical and idealized numerical model results. J Atmos Sci, 69: 214–235
Shepherd T G. 2014. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. Nat Geosci, 7: 703–708
Sigmond M, Shepherd T G. 2014. Compensation between resolved wave driving and parameterized orographic gravity wave driving of the Brewer-Dobson Circulation and its response to climate change. J Clim, 27: 5601–5610
Teixeira M A C, Argain J L. 2022. The drag exerted by weakly dissipative trapped lee waves on the atmosphere: Application to Scorer′s two-layer model. Q J R Meteorol Soc, 148: 3183–3202
Tian S F, Yasunari T. 1998. Climatological aspects and mechanism of spring persistent rains over central China. J Meteorol Soc Jpn, 76: 57–71
van Niekerk A, Sandu I, Vosper S B. 2018. The circulation response to resolved versus parametrized orographic drag over complex mountain terrains. J Adv Model Earth Syst, 10: 2527–2547
Wan R J, Wu G X. 2007. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China. Sci China Ser D, 50: 130–144
Wang F, Yang S, Wu T. 2014. Radiation budget biases in AMIP5 models over the East Asian monsoon region. J Geophys Res-Atmos, 119: 13400–13426
Wu G, Duan A, Liu Y, Mao J, Ren R, Bao Q, He B, Liu B, Hu W. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook. Natl Sci Rev, 2: 100–116
Wu G, Liu Y, He B, Bao Q, Duan A, Jin F F. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. Sci Rep, 2: 404
Wu G, Liu Y, Zhang Q, Duan A, Wang T, Wan R, Liu X, Li W, Wang Z, Liang X. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. J Hydrometeorol, 8: 770–789
Xu X, Li R, Teixeira M A C, Lu Y. 2021. On the momentum flux of vertically propagating orographic gravity waves excited in non-hydrostatic flow over three-dimensional orography. J Atmos Sci, 78: 1807–1822
Xu X, Song J, Wang Y, Xue M. 2017. Quantifying the effect of horizontal propagation of three-dimensional mountain waves on the wave momentum flux using Gaussian beam approximation. J Atmos Sci, 74: 1783–1798
Xu X, Zhao T, Lu C, Guo Y, Chen B, Liu R, Li Y, Shi X. 2014. An important mechanism sustaining the atmospheric “water tower” over the Tibetan Plateau. Atmos Chem Phys, 14: 11287–11295
Yeh T C. 1950. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945–46. Tellus, 2: 173–183
Zhang L, Zhou T, Chen X, Wu P, Christidis N, Lott F C. 2020. The late spring drought of 2018 in South China. Bull Am Meteorol Soc, 101: S59–S64
Zhang R, Xu X, Wang Y. 2020. Impacts of subgrid orographic drag on the summer monsoon circulation and precipitation in East Asia. J Geophys Res-Atmos, 125: e2019JD032337
Zhang Y, Chen H, Yu R. 2014. Simulations of stratus clouds over Eastern China in CAM5: Sensitivity to horizontal resolution. J Clim, 27: 7033–7052
Zhao P, Zhang R, Liu J, Zhou X, He J. 2007. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall. Clim Dyn, 28: 797–811
Zhou X, Beljaars A, Wang Y, Huang B, Lin C, Chen Y, Wu H. 2017. Evaluation of WRF simulations with different selections of subgrid orographic drag over the Tibetan Plateau. J Geophys Res-Atmos, 122: 9759–9772
Zhou X, Yang K, Beljaars A, Li H, Lin C, Huang B, Wang Y. 2019. Dynamical impact of parameterized turbulent orographic form drag on the simulation of winter precipitation over the western Tibetan Plateau. Clim Dyn, 53: 707–720

(责任编委: 王会军)