中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 8 期: 2770 ~ 2780
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

优化地表反照率关键参数减少青藏高原气候模拟湿偏差

马小刚[1,4], 赵龙[2,3*], 孙静[4], 陈进燕[3], 王岩[5], 周建宏[3,4], 刘嘉睿[4], 卢麾[4,6,7], 阳坤[2,4]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085
2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101
3. 西南大学地理科学学院, 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715
4. 清华大学地球系统科学系, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 清华大学全球变化研究院, 北京 100084
5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101
6. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084
7. 清华大学-西安市勘察测绘院新型智能测绘联合研究中心, 北京 100084
* 通讯作者, E-mail: zhao104@swu.edu.cn

收稿日期: 2025-04-12; 收修改稿日期: 2025-06-17; 接受日期: 2025-06-26; 网络版发表日期: 2025-07-17
青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室开放课题项目(TPESER202506)、国家重点研发计划项目(2024YFC3013403)、国家自然科学基金项目(42271491、42205155、42371085)和应急管理部国家自然灾害防治研究院重点基金项目(ZDJ2024-25)资助

摘要 地表反照率在调节地表能量收支及陆-气相互作用中扮演着重要角色. 当前多数数值模式使用土壤颜色参数计算干/湿土壤的反照率, 但气候研究和预测(WRF)模式对该参数的表达存在缺陷, 导致其对青藏高原夏季地表反照率的模拟被低估. 鉴于此, 本研究引入了优化的土壤颜色参数, 有效改善了WRF模式对青藏高原2011~2020年夏季地表反照率和地表温度的模拟性能. 引入优化的土壤颜色参数, 削弱了模拟过程中青藏高原的热力作用, 使得地表净辐射、潜热通量和感热通量减少, 增加了对流层低层的位势高度, 减少了高原上空的水汽通量辐合. 与IMERG和GSMaP降水产品相比发现, WRF模式对夏季降水模拟的湿偏差从52%减少到36%; 与雨量计观测数据的评估表明, 66%站点的降水模拟得到改善, 湿偏差从1.02mm d^{-1}减小为0.82mm d^{-1}. 研究结果表明, WRF模式对青藏高原夏季地表反照率的低估是造成其降水模拟湿偏差的原因之一, 而通过联合使用陆面模式和卫星遥感产品来优化陆面参数可有效改进气候模拟.

关键词 地表反照率参数, 降水模拟, 水汽通量辐合, 蒸散发, 青藏高原

1 引言

地表反照率直接影响地表对太阳辐射的吸收, 进而影响地表能量收支, 包括感热通量和潜热通量(Henderson-Sellers和Wilson, 1983)等. 其作用在青藏高原更为显著——该地区典型的中纬度和高海拔条件导致高原表面接收强烈的太阳辐射, 从而产生强烈的热力作用并加热其上空的对流层(Duan和Wu, 2005; Liu等,

中文引用格式: 马小刚, 赵龙, 孙静, 陈进燕, 王岩, 周建宏, 刘嘉睿, 卢麾, 阳坤. 2025. 优化地表反照率关键参数减少青藏高原气候模拟湿偏差. 中国科学: 地球科学, 55(8): 2770–2780, doi: 10.1360/N072025-0131
英文引用格式: Ma X, Zhao L, Sun J, Chen J, Wang Y, Zhou J, Liu J, Lu H, Yang K. 2025. Optimization of key land surface albedo parameterreduces wet bias of climate modeling for the Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 68(8): 2653–2662, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1635-0

© 2025 《中国科学》杂志社

2020), 进而对高原及其周边的大气环流和气候产生显著影响(Ye和Wu, 1998; Wu和Liu, 2016; Huang等, 2023). 因此, 准确表征青藏高原的地表反照率对于理解高原地表能量平衡和区域气候模拟至关重要.

然而, 当前气候模式无法准确刻画青藏高原的地表反照率. 一般来说, 模式往往高估青藏高原冬季的地表反照率, 进而导致近地表气温的系统性冷偏差(Li等, 2016, 2024). 通过改进气候模式中积雪反照率参数化方案, 能够有效消除这些偏差(Tomasi等, 2017; Liu等, 2021; Hao等, 2023). 在夏季, 模式低估了青藏高原中西部的地表反照率, 导致地表吸收更多的太阳辐射, 模拟的地表温度偏高(Cai等, 2023; Zhou等, 2023b). 这种暖偏差增强了地表的加热作用, 导致更强的上升运动和更活跃的对流, 从而造成降水模拟湿偏差(Gu等, 2022; Cai等, 2023). 这些研究表明, 模式对青藏高原地表反照率的准确刻画, 是描述高原陆-气相互作用及环流过程的关键, 而反照率模拟的误差可能是高原气候模拟存在误差的原因之一.

前人针对气候模式的反照率模拟已经进行了大量研究, 主要通过人为改变反照率的敏感性实验来检验其气候影响. Lu等(2021)使用地球系统模式CESM将整个高原的地表反照率从0.20人为降低到0.10, 揭示了青藏高原变热会增强亚洲大尺度季风, 但会削弱东南亚夏季季风. 这种数值实验能够加深学者对高原地表反照率作用的理解, 但并未真正纠正模式中的反照率误差(Liu等, 2012; Lu等, 2018; Kala和Hirsch, 2020). 也有一些研究直接将遥感资料反演的地表反照率产品引入气候研究和预测(Weather Research and Forecasting, WRF)模式(Meng等, 2018; Thackeray等, 2019), 显著缓解了模式对青藏高原冬春季节地表气温的冷偏差. 然而, 这种方法仅是针对地表反照率, 无法区分地表各部分要素(如植被、土壤或积雪)的反照率及其能量收支过程(Ran等, 2016; Vahmani和Ban-Weiss, 2016), 也并未解决模式中的参数问题, 且对卫星数据的依赖可能会限制模式在未来预测中的应用.

在青藏高原中部和北部, 植被覆盖稀疏(叶面积指数小于1.0)且夏季雪盖较少(Pu等, 2007), 地表反照率主要由土壤反照率决定. 大多数模式将土壤反照率表示为表层土壤湿度与干土壤/饱和土壤反照率的函数, 而后者通过"土壤颜色"进行参数化, 通常被认为与时间无关(Oleson等, 2013). 例如, 在广泛使用的陆面模式Noah-MP中(Niu等, 2011), 当表层土壤湿度为0.2时, 土壤颜色值为1和8的土壤在可见光波段的反照率分别为0.18和0.08. 然而, Noah-MP的各个版本都将土壤颜色参数值在全球范围内固定为4, 在WRF模式中也是如此(He等, 2023), 直接导致WRF模式对青藏高原地表反照率的模拟误差(Zhou等, 2023b). 有研究利用MODIS地表反照率产品反演了20个颜色等级的全球土壤颜色参数, 改善了陆面模式CLM的模拟能力(Lawrence和Chase, 2007; Li等, 2019), 但在模拟青藏高原地表反照率时偏差仍然显著. 因此, 有必要优化青藏高原网格化的土壤颜色参数, 从而提升地表反照率及气候模拟精度.

针对青藏高原地表反照率模拟改进的需求, Chen等(2023)使用MODIS反照率数据, 借助同化土壤湿度产品, 筛选出青藏高原的最优土壤颜色参数, 在青藏高原超过70%区域提升了Noah-MP模型对于地表反照率的离线模拟能力. 不同于已有的反照率敏感性实验以及简单的卫星反照率产品替换方案, 上述优化的土壤颜色参数可直接用作区域气候模式的输入. 在以上工作的基础上, 该研究旨在从模式参数问题出发, 改善地表反照率模拟, 并探索其对气候模拟的影响.

2　模型简介与实验设计

本研究使用WRF4.0(Skamarock等, 2019)来研究土壤颜色参数优化的影响. 该模式耦合了Noah-MP陆面模型, 有50个垂直层, 模式层顶为50hPa. 模拟区域的中心为(30.0°N, 87.5°E), 水平分辨率为0.1°, 包含453×303个网格. 如图1a所示, 区域海拔以颜色阴影表示(单位: m), 高原区域(海拔≥2500m)由黑色实线划定, 也是本文的研究区域.

本研究使用的WRF模式改进了多个参数化方案, 以表征青藏高原典型的复杂地形、陆面过程和云过程. 这些参数化方案改进包括: 湍流地形阻力拖曳方案(Zhou等, 2018)、高原南部的裸露基岩下垫面(Yue等, 2021)、土壤有机质水力方案(Sun等, 2021)、裸地热粗糙度长度方案(Zhou等, 2022)、复杂地形积雪覆盖和浅雪反照率方案(Zhou等, 2023b), 以及Gauss-PDF统计云量方案(Liu等, 2024a). 本研究选择Thompson微物理方案(Thompson等, 2008)、Dudhia短波辐射方案

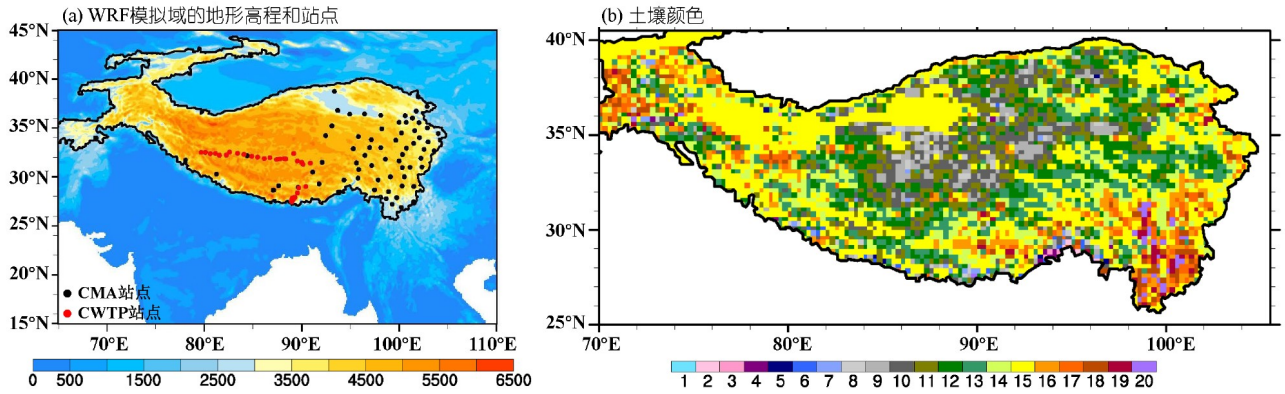

图 1　WRF模拟域及土壤颜色优化参数图

(a) 中国气象局观测站与青藏高原中西部降水量观测站分布, 青藏高原指海拔≥2500m的区域, 黑色圆点代表中国气象局(CMA)观测站, 红色圆点代表青藏高原中西部(CWTP)降水量观测站, 背景颜色为WRF模拟区域的海拔高度(色度条, 单位为m); (b) 青藏高原土壤颜色优化参数的空间分布

(Dudhia, 1989)、RRTM长波辐射方案(Mlawer等, 1997)、UW浅对流方案及其相应的边界层方案(Bretherton和Park, 2009), 同时关闭了灰区分辨率下的积云参数化方案(Ou等, 2020; Zhou等, 2023a).

本研究共设计两组数值模拟实验, 以研究土壤颜色参数优化对青藏高原区域气候模拟的影响. 鉴于Chen等(2023)已将WRF模式中的土壤颜色参数扩展到20个等级, 对照模拟采用模式默认的土壤颜色参数值15, 命名为WRF-CTL; 优化模拟采用Chen等(2024; 图1b)优化的土壤颜色图, 命名为WRF-OPT. 两个模拟除土壤颜色参数外, 其他设置完全相同. 需要注意的是, 土壤颜色参数主要针对土壤进行优化并应用于整个青藏高原区域. 因此, 预期裸地或植被稀疏下垫面的地表反照率变化更为明显, 而植被密集或积雪覆盖区域则变化较小. WRF模式计算的土壤湿度同时用于地表反照率的模拟. 为了确保模拟结果的统计显著性, 本研究模拟分析了2011~2020年夏季(即6、7、8月)的模拟均值. ERA5再分析数据能够更好地表征青藏高原暖季的土壤水热性质, 有助于减少模式初始化所需时间窗口(Yue等, 2021; Yang等, 2022; Zhang等, 2022; Sun等, 2023; Liu等, 2024a). 因此, 本研究使用ERA5再分析数据(0.25°, 小时分辨率; Hersbach等, 2020)提供模式的初始和边界条件, 从每年5月25日开始模拟, 连续积分至9月1日, 其中5月25~31日用于模型初始化, 其余结果用于分析和评估.

3　研究数据

如图1b所示, 与模式默认的土壤颜色参数值15相比, 土壤颜色优化主要集中在青藏高原中部和西部. 可以预见, 气温和降水模拟的变化也主要发生在这些区域. 同时, 本研究收集了两组雨量计观测网络的逐日降水数据, 即中国气象局(CMA; 图1a中的黑点)和青藏高原中西部(CWTP, 图1a中的红点)新部署的雨量站, 用以评估土壤颜色参数优化的气候模拟影响. 大多数CMA观测站位于青藏高原东部(90°E以东), CWTP观测站(自2017年起建立, 大部分位于羌塘高原; Chen等, 2022; Yang等, 2023)部分弥补了高原中西部地区降水观测的不足. 本研究只保留降雨缺测不超过10天的CMA和CWTP观测站, 最终105个站点的降雨观测数据用于模式评估(见图1a).

本研究还采用了遥感产品来评估模式性能. 具体而言, 使用了基于MODIS的地表反照率(Wen等, 2022)和地表温度数据集(Zhao和Yu, 2021), 以及全球降水观测计划的IMERG(Huffman等, 2023)和GSMaP(GSMaP, 2024)产品. 其中, 地表反照率产品结合了地形效应和BRDF先验知识, 其空间分辨率为0.004°. LST数据集利用了MODIS的温度反演和ERA5-Land的再分析产品云信息, 其空间分辨率为0.05°, 时间分辨率为每天4次. 这两套数据集被广泛应用于环境监测和生态系统研究, 在多种下垫面类型中均表现出良好的适用性(Hu等, 2023; Li等, 2023; Qu等, 2024). 最新版本的逐日

IMERG产品和GSMaP标准降水产品, 其空间分辨率为0.1°, 集成了微波传感器和红外辐射计的数据, 并通过雨量计观测进行校准. 大量评估工作表明, 这两套降水产品能够作为青藏高原网格尺度上的降水参考数据集(Li等, 2022; Zhan等, 2023; Lyu等, 2024). 在本研究中, 地表反照率和地表温度产品均重采样到0.1°, 并对每日4次的地表温度反演数据进行平均, 以获取逐日地表温度序列, 用以评估模式性能.

4　结果与讨论

4.1　改进的地表反照率和地表温度模拟

与WRF-CTL相比, WRF-OPT引入优化的土壤颜色参数, 使模拟的地表反照率在统计显著区域平均增加0.03, 这在青藏高原中部和北部最为显著(图2a). 由于本研究中两个模拟的差异仅是土壤颜色参数, 地表反照率的增加或减少可完全归因于土壤颜色参数值的

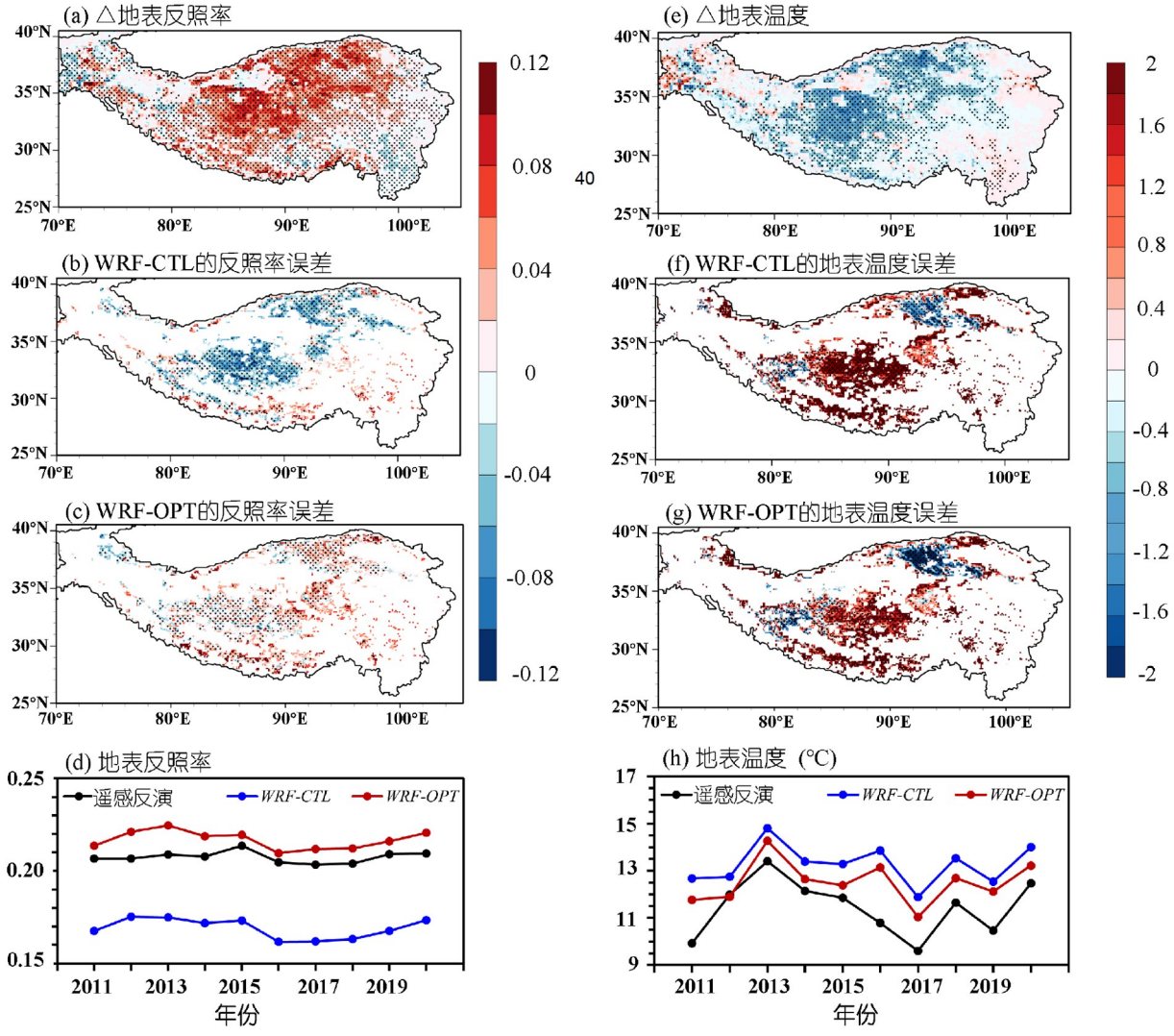

图 2　2011~2020年夏季地表反照率和地表温度模拟

(a) 地表反照率模拟差异(WRF-OPT减去WRF-CTL); (b, c) WRF-CTL和WRF-OPT地表反照率模拟偏差的空间分布; (d) 青藏高原中部(30°N~35°N, 80°E~90°E)遥感反演、WRF-CTL和WRF-OPT模拟的地表反照率年际变化; (e) 地表温度(单位: ℃)模拟差异(WRF-OPT减去WRF-CTL); (f, g) WRF-CTL和WRF-OPT地表温度模拟偏差的空间分布; (h) 青藏高原中部(30°N~35°N, 80°E~90°E)遥感反演、WRF-CTL和WRF-OPT模拟的地表温度年际变化. (b, c)和(f, g)中仅显示了低植被覆盖(叶面积指数小于1.0)、无积雪(覆盖率小于5%)且土壤颜色参数值不等于默认值15区域内的结果. (a~c)和(e~g)中的点表示通过显著性检验(90%置信区间的t检验)

减小或增大.

本研究进一步使用遥感数据评估模拟的地表反照率和地表温度. 为了突出土壤颜色参数优化的效果, 仅保留土壤颜色参数值不等于默认值15、植被覆盖率低(叶面积指数小于1.0)和无积雪(覆盖率小于5%)的网格进行评估. 图2b和2c显示了WRF-CTL和WRF-OPT模拟的地表反照率误差的空间分布. 在使用区域均一的土壤颜色参数值15的情况下, WRF模式会低估青藏高原特别是在高原中部和北部的地表反照率(图2b), 表明WRF模式的土壤反照率存在不合理的"暗化". 而对土壤颜色参数进行优化后, WRF-OPT改进了这些区域的地表反照率模拟(图2c). 图2d显示了遥感数据和WRF模拟的地表反照率的年际变化, 尽管WRF-CTL能够有效捕捉地表反照率的年际变化, 但低估了青藏高原的地表反照率, 其平均偏差为−0.04. 而对WRF-OPT而言, 土壤颜色参数的优化减弱了地表反照率模拟的低估, 其平均偏差为0.01. 此外, 地表反照率的低估进一步导致地表温度高估, 特别是在青藏高原中部区域(图2f). 可以看到, WRF-OPT在一定程度上减小了地表温度估计的暖偏差(图2g), 在2011~2020年期间模拟得到更合理的地表温度(图2h).

4.2 地表能量收支和气温模拟影响

以上结果表明, 与WRF-CTL相比, 土壤颜色参数优化增加了地表反照率, 减少了高原地面吸收的短波辐射, 从而降低了模拟的地表温度(图2e). 这进一步减少了青藏高原的地表能量交换——净辐射、感热通量和潜热通量分别减少了5.82、2.72和2.53 W m^{-2}(图3a~3c). 类似于地表反照率增加的空间分布(图2a), 地表温度和地表能量的减少也是主要发生在青藏高原中部和北部. 图3e~3g的箱型图进一步表明, 与默认土壤颜色值15相比, 土壤颜色参数值的减小(或增大)导致了地表净辐射和湍流热通量的减少(或增加). 可见, 土壤颜色参数的优化减少了青藏高原的地表能量, 进而削弱了从高原地表向近地面大气的能量和水汽传输. 由于青藏高原强烈的陆-气相互作用, 地表能量收支的变化会进一步影响局地气候. 图3d表明WRF-OPT模拟的2m气温平均比WRF-CTL低0.26℃, 而气温发生显著变化的区域与感热通量显著减少的区域几乎重合, 主要位于青藏高原中部和北部. 接下来, 我们分析土壤颜色参数的优化如何通过陆-气相互作用影响降水模拟.

4.3 土壤颜色优化减小模拟湿偏差

图4a为WRF-CTL和WRF-OPT模拟之间夏季日降水量的差异. 在青藏高原腹地(30°N~35°N, 90°E~95°E)以及高原东北部, WRF-OPT模拟的日降水量减少约为0.47mm d^{-1}. 鉴于降水变化主要发生在高原腹地, 本研究使用遥感降水产品对该区域的降水模拟进一步评估. 图4b展示了2011~2020年夏季期间, IMERG、GSMaP和WRF模拟的夏季降水的年际变化. 总体而言, WRF-CTL能够有效捕捉高原腹地夏季降水的年际变化(相关系数为0.81), 但呈现出显著的湿偏差(IMERG为249.36mm, WRF-CTL为378.44mm, 高估52%), 而夏季降水模拟湿偏差亦为青藏高原区域气候模拟中的普遍问题(Li等, 2021; Wang等, 2021; Liu等, 2023). 对土壤颜色参数进行优化后, WRF-OPT模拟的降水湿偏差降低到约36%(WRF-OPT为339.65mm), 同时其年际变化与观测基本一致(相关系数为0.80). 图4c进一步展示了高原腹地夏季降水的季节内变化. 显然, WRF-CTL在整个夏季持续存在降水湿偏差, 但这种情况在WRF-OPT中得到一定程度的缓解. 使用CMA观测站和青藏高原中西部雨量站的降雨观测数据进一步评估表明, 引入优化参数后, 约66%站点(69/105个站点)的降水模拟得到改善, 湿偏差从1.02mm d^{-1}减小为0.82mm d^{-1}(图4d~4f). 这些结果表明土壤颜色参数在改善区域气候模式中地表反照率和降水模拟的关键作用.

降水通常受局地陆-气相互作用和大尺度环流的共同影响. 如前所述, WRF模式中引入优化的土壤颜色参数削弱了高原地表与大气的能量交换, 这会对青藏高原的大气环流产生一定程度的影响. 地表感热通量的减少使得近地层(500hPa)位势高度增加, 特别是在青藏高原中部(图5a), 而200hPa的位势高度减小. 这导致高原上空出现反气旋异常, 从孟加拉湾和高原东南边界进入高原的水汽减少(图5b). 由此, 高原上空的水汽通量辐合受到抑制, 其与降水变化的空间分布和量级基本一致(图5c). 此外, 土壤颜色参数的优化还抑制了高原的地表蒸散发, 尽管其变化程度低于水汽通量辐合(图5d). 在季节尺度上, 水汽通量辐合的减少对夏季降水减少的贡献约为77.4%, 而蒸散发减少的贡

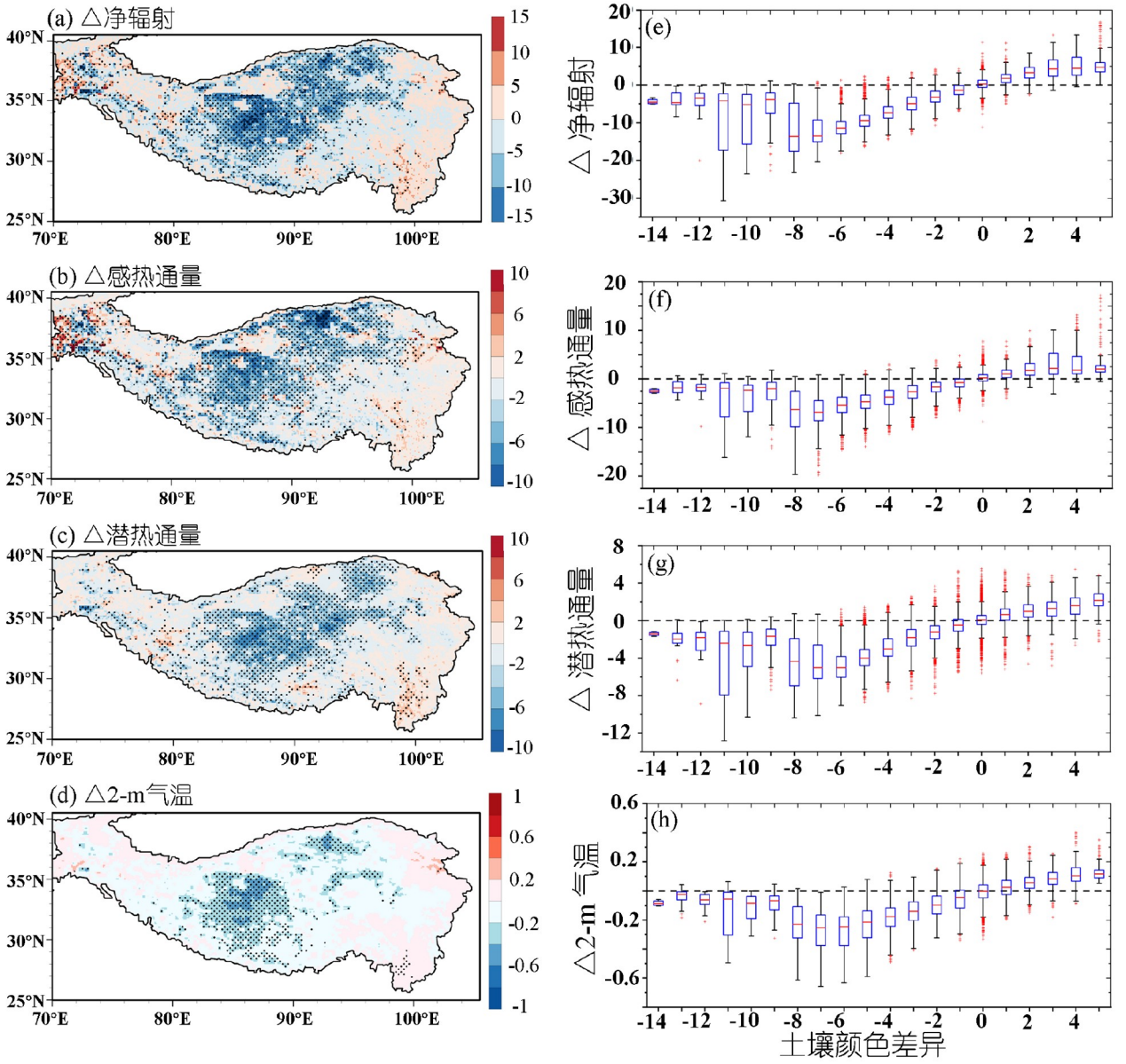

图 3　2011~2020年夏季地表能量收支和气温模拟

(a~d) 净辐射、感热通量、潜热通量(单位: W m^{-2})以及2m气温(单位: ℃)差异(WRF-OPT减去WRF-CTL)的空间分布; (e~h) 土壤颜色差异(即土壤颜色参数优化值减去默认值15)对通量/温度的影响. (a~d)中的点表示通过显著性检验(90%置信区间的*t*检验)

献约为22.6%. 土壤颜色参数的优化虽然未从根本上改变高原的大尺度环流模式, 却影响了高原地表能量收支和近地表热力条件, 对水汽输送产生有限但不可忽视的影响. 这些变化最终抑制了水汽通量辐合, 减弱地表蒸散发, 这二两者共同造成青藏高原模拟降水的减少, 而这个过程中前者(即水汽辐合减少)起主导作用.

5　结论

地表反照率会影响地表能量收支, 这在太阳辐射强烈的青藏高原显得尤为重要. 然而, 目前气候模式在刻画青藏高原地表反照率时往往存在显著偏差, 影响了气候模拟精度. 前人通过离线的陆面过程模拟和卫星反演产品, 优化得到了青藏高原的土壤颜色参数.

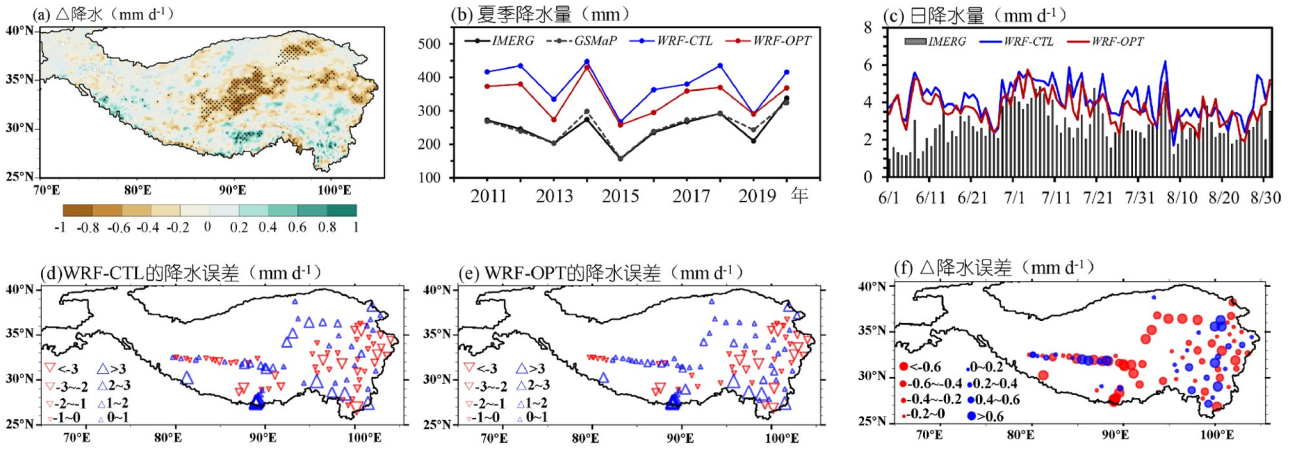

图 4　2011~2020年夏季降水模拟

(a) 两个实验降水量差异(WRF-OPT减去WRF-CTL; 单位: mm d^{-1})的空间分布, 图中点表示通过显著性检验(90%置信区间的*t*检验); (b, c) 青藏高原腹地(30°N~35°N, 90°E~95°E)IMERG、GSMaP、WRF-CTL和WRF-OPT夏季降水的年际和季节变化; (d, e) WRF-CTL与WRF-OPT在每个站点的降水模拟误差; (f) 两个实验在每个站点的降水误差空间分布(单位: mm d^{-1})

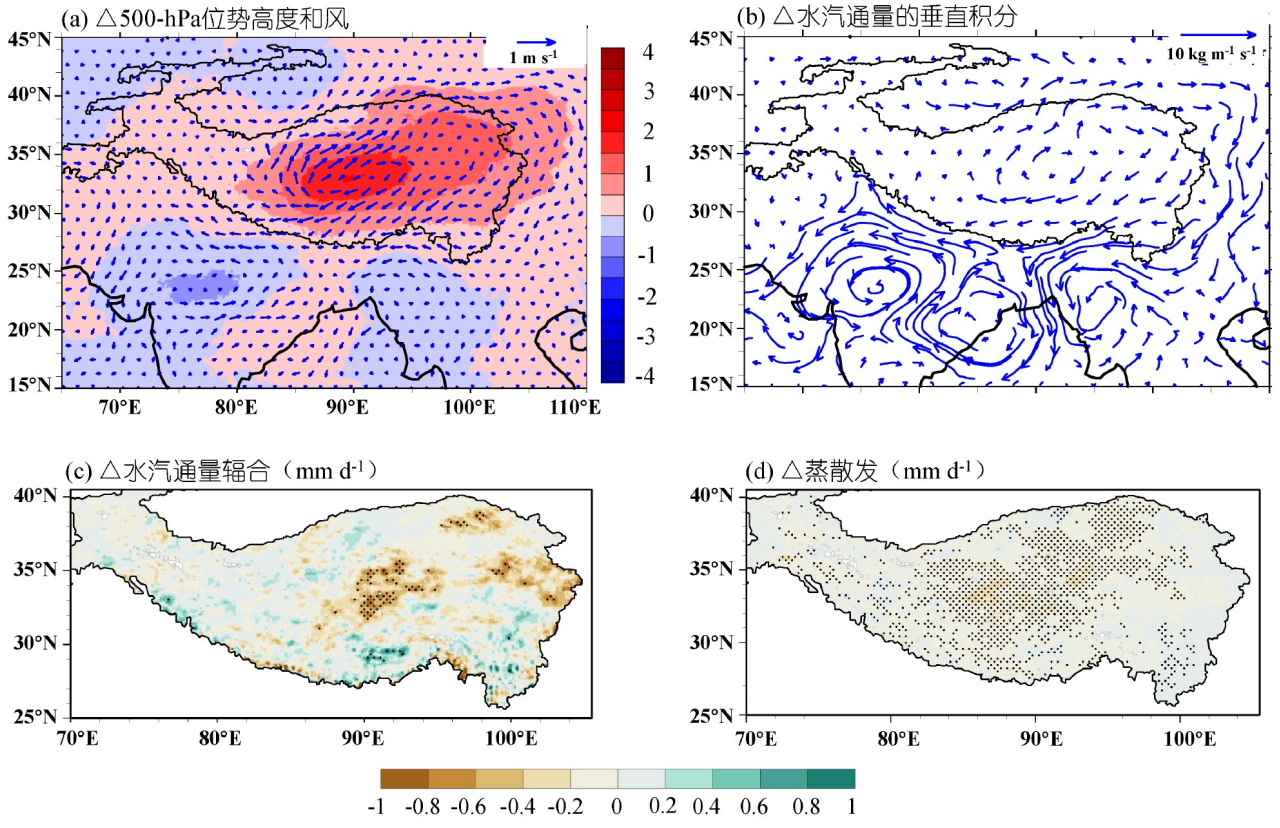

图 5　2011~2020年夏季水汽通量和蒸散发模拟

(a) 两个实验模拟得到的500hPa位势高度(gpm, 阴影)和风场(m s^{-1}; 矢量); (b) 水汽通量垂直积分(kg m^{-1} s^{-1}); (c, d) 水汽通量辐合差异和蒸散发(mm d^{-1})差异(WRF-OPT减去WRF-CTL)的空间分布. (c, d)中的点表示通过显著性检验(90%置信区间的*t*检验)

本研究在此基础上进一步探索了土壤颜色参数优化对青藏高原陆-气耦合模拟的影响. 结果表明, 原WRF模式中默认土壤颜色参数导致地表反照率被低估, 但可通过引入优化的具有空间异质性的土壤颜色参数得到大幅度改善. 这进一步削弱了青藏高原的陆-气相互作用, 进而减少地表蒸散发和感热通量, 削弱青藏高原的热力效应, 降低近地表气温, 抑制高原上空的水汽通量辐合, 最终减小了区域气候模式中在青藏高原降水模拟的湿偏差.

本研究不同于以往的反照率模拟敏感性实验或简单的基于卫星反照率产品的替换方案, 首次尝试通过优化模式中的土壤反照率参数(即土壤颜色)改善区域气候模拟的可行性. 该工作对于站点观测稀缺的偏远地区意义尤为重要, 其能借助遥感产品实现参数的有效优化. 同时, 类似土壤颜色的模型参数在较长时间尺度内保持不变, 通常只需校准一次, 从而降低了计算需求. 本研究聚焦于青藏高原, 但该解决方案可应用于土壤主导地表反照率的其他类似地区.

本研究仍存在一定局限性. 首先, 土壤颜色参数的优化改善了地表反照率和青藏高原夏季降水的模拟, 但湿偏差仍然存在(与站点观测的降水相比偏多0.82mm d^{-1}); 其次, 气候模式在刻画青藏高原的云、浅对流方面的不足, 可能是造成降水模拟湿偏差的原因(Liu等, 2024b), 而对陆面和大气过程参数化的综合考虑有望进一步改进高原的区域气候模拟.

数据可用性声明　优化的土壤颜色参数可从Zenodo免费获取(Chen等, 2024; https://doi.org/10.5281/zenodo.12643531). 国家青藏高原科学数据中心(TPDC)提供了全球0.05°时空连续地表温度数据集(Zhao和Yu, 2021; https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.271663)、逐日地表反照率产品(Wen等, 2022; https://doi.org/10.11888/Terre.tpdc.272047)以及青藏高原中西部暖季(5月至9月)的雨量计数据(Chen等, 2022; https://doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.272983). GPM IMERG降水数据可从https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/07获取(Huffman等, 2023). GSMaP降水数据集可在日本宇宙航空研究开发机构GSMaP数据服务器获取(https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/registration.html).

致谢　感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”(https://cstr.cn/31134.02.EL)、中国科学院计算机网络信息中心CASEarth云平台(http://portal.casearth.cn)和兰州大学超级计算中心对本研究模拟的支持.

参考文献

Bretherton C S, Park S. 2009. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. J Clim, 22: 3422–3448

Cai S, Huang A, Zhu K, Guo W, Wu Y, Gu C. 2023. The forecast skill of the summer precipitation over Tibetan Plateau improved by the adoption of a 3D sub-grid terrain solar radiative effect scheme in a convection-permitting model. J Geophys Res-Atmos, 128: e2022JD038105

Chen J, Zhao L, Yang K, Tian J, Pan J, Zhang K. 2023. Toward optimization of key parameters in Noah-MP surface albedo using satellite remote sensing products. Chin J Space Sci, 43: 1135–1149

Chen J, Zhao L, Yang K, Tian J, Pan J, Zhang K. 2024. Toward optimization of key parameters in Noah-MP surface albedo using satellite remote sensing products [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.12643531

Chen Y, Yang K, La Z, Zhou X, Jiang Y, Tian J. 2022. Hourly rain gauge data of warm season (May–September) in the central and western Tibetan Plateau (2017–2020) [Dataset]. National Tibetan Plateau Data Center. https://doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.272983

Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. Clim Dyn, 24: 793–807

Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci, 46: 3077–3107

GSMaP. 2024. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) global satellite mapping of precipitation (GSMaP) data [Dataset]. https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/registration.html

Gu C, Huang A, Zhang Y, Yang B, Cai S, Xu X, Luo J, Wu Y. 2022. The wet bias of RegCM4 over Tibet Plateau in summer reduced by adopting the 3D sub-grid terrain solar radiative effect parameterization scheme. J Geophys Res-Atmos, 127: e2022JD037434

Hao D, Bisht G, Rittger K, Bair E, He C, Huang H, Dang C, Stillinger T, Gu Y, Wang H, Qian Y, Leung L R. 2023. Improving snow albedo modeling in the E3SM land model (version 2.0) and assessing its impacts on snow and surface fluxes over the Tibetan Plateau. Geosci Model Dev, 16: 75–94

He C, Valayamkunnath P, Barlage M, Chen F, Gochis D, Cabell R, Schneider T, Rasmussen R, Niu G, Yang Z. 2023. The community Noah-MP land surface modeling system technical description version 5.0. NCAR Technical Note NCAR/TN-575+ STR

Henderson-Sellers A, Wilson M F. 1983. Surface albedo data for

climatic modeling. Rev Geophys, 21: 1743–1778

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, Thépaut J. 2020. The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteorol Soc, 146: 1999–2049

Hu Y, Wei F, Fu B, Zhang W, Sun C. 2023. Ecosystems in China have become more sensitive to changes in water demand since 2001. Commun Earth Environ, 4: 444

Huang J, Zhou X, Wu G, Xu X, Zhao Q, Liu Y, Duan A, Xie Y, Ma Y, Zhao P, Yang S, Yang K, Yang H, Bian J, Fu Y, Ge J, Liu Y, Wu Q, Yu H, Wang B, Bao Q, Qie K. 2023. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau. Rev Geophys, 61: e2022RG000771

Huffman G J, Stocker E F, Bolvin D T, Nelkin E J, Tan J. 2023. GPM IMERG final precipitation L3 1 day 0.1 degree × 0.1 degree V07. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Dataset]. https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/07

Kala J, Hirsch A L. 2020. Could crop albedo modification reduce regional warming over Australia? Weather Clim Extremes, 30: 100282

Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). J Geophys Res, 112: 2006JG000168

Li C, Lu H, Leung L R, Yang K, Li H, Wang W, Han M, Chen Y. 2019. Improving land surface temperature simulation in CoLM over the Tibetan Plateau through fractional vegetation cover derived from a remotely sensed clumping index and model-simulated leaf area index. J Geophys Res-Atmos, 124: 2620–2642

Li D, Qi Y, Chen D. 2022. Changes in rain and snow over the Tibetan Plateau based on IMERG and ground-based observation. J Hydrol, 606: 127400

Li M, Liu Q, Qu Y. 2023. A comparative study of long-time series of global-scale albedo products. Int J Digital Earth, 16: 308–322

Li P, Furtado K, Zhou T, Chen H, Li J. 2021. Convection-permitting modelling improves simulated precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau. Q J R Meteorol Soc, 147: 341–362

Li Y, Gao Y, Chen G, Wang G, Zhang M. 2024. Decomposition and reduction of WRF-modeled wintertime cold biases over the Tibetan Plateau. Clim Dyn, 62: 4189–4203

Li Y, Wang T, Zeng Z, Peng S, Lian X, Piao S. 2016. Evaluating biases in simulated land surface albedo from CMIP5 global climate models. J Geophys Res-Atmos, 121: 6178–6190

Liu H, Liu X, Liu C, Yun Y. 2023. High-resolution regional climate modeling of warm-season precipitation over the Tibetan Plateau: Impact of grid spacing and convective parameterization. Atmos Res, 281: 106498

Liu J, Yang K, Zhao D, Wu P, Wang J, Zhou X, Lin Y, Lu H, Jiang Y, Shi J. 2024a. Cloud radiative feedback to the large-scale atmospheric circulation greatly reduces monsoon-season wet bias over the Tibetan Plateau in climate modeling. Geophys Res Lett, 51: e2024GL109180

Liu J, Yang K, Wang J, Zhou X, Jiang Y, Shao C, Lu H, Yao X, Sun J, Shi J. 2024b. Impacts of a shallow convection scheme on kilometer-scale atmospheric simulations over the Tibetan Plateau. Clim Dyn, 62: 8019–8034

Liu L, Ma Y, Menenti M, Su R, Yao N, Ma W. 2021. Improved parameterization of snow albedo in Noah coupled with Weather Research and Forecasting: Applicability to snow estimates for the Tibetan Plateau. Hydrol Earth Syst Sci, 25: 4967–4981

Liu Y, Wu G, Hong J, Dong B, Duan A, Bao Q, Zhou L. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change. Clim Dyn, 39: 1183–1195

Liu Y, Lu M, Yang H, Duan A, He B, Yang S, Wu G. 2020. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts. Natl Sci Rev, 7: 534–552

Lu M, Yang S, Li Z, He B, He S, Wang Z. 2018. Possible effect of the Tibetan Plateau on the “upstream” climate over West Asia, North Africa, South Europe and the North Atlantic. Clim Dyn, 51: 1485–1498

Lu M, Yang S, Wang J, Wu Y, Jia X. 2021. Response of regional Asian summer monsoons to the effect of reduced surface albedo in different Tibetan Plateau domains in idealized model experiments. J Clim, 34: 7023–7036

Lyu Y, Yong B, Huang F, Qi W, Tian F, Wang G, Zhang J. 2024. Investigating twelve mainstream global precipitation datasets: Which one performs better on the Tibetan Plateau? J Hydrol, 633: 130947

Meng X, Lyu S, Zhang T, Zhao L, Li Z, Han B, Li S, Ma D, Chen H, Ao Y, Luo S, Shen Y, Guo J, Wen L. 2018. Simulated cold bias being improved by using MODIS time-varying albedo in the Tibetan Plateau in WRF model. Environ Res Lett, 13: 044028

Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, Iacono M J, Clough S A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J Geophys Res, 102: 16663–16682

Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, Chen F, Ek M B, Barlage M, Kumar

A, Manning K, Niyogi D, Rosero E, Tewari M, Xia Y. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. J Geophys Res, 116: D12109

Oleson K, Lawrence D, Bonan G, Drewniak B, Huang M, Koven C, Levis S, Li F, Riley W, Subin Z. 2013. Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM). NCAR Tech. Bounder: National Center for Atmospheric Research

Ou T, Chen D, Chen X, Lin C, Yang K, Lai H W, Zhang F. 2020. Simulation of summer precipitation diurnal cycles over the Tibetan Plateau at the gray-zone grid spacing for cumulus parameterization. Clim Dyn, 54: 3525–3539

Pu Z, Xu L, Salomonson V V. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. Geophys Res Lett, 34: 2007GL029262

Qu Z, Li X, Shi F. 2024. Contrasting responses of land surface temperature and soil temperature to forest expansion during the dormant season on the Qinghai-Tibet Plateau. J Geophys Res-Atmos, 129: e2023JD039595

Ran L, Pleim J, Gilliam R, Binkowski F S, Hogrefe C, Band L. 2016. Improved meteorology from an updated WRF/CMAQ modeling system with MODIS vegetation and albedo. J Geophys Res-Atmos, 121: 2393–2415

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, Gill D O, Liu Z, Berner J, Wang W, Powers J G, Duda M G, Barker D M. 2019. A description of the advanced research WRF version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145

Sun J, Chen Y, Yang K, Lu H, Zhao L, Zheng D. 2021. Influence of organic matter on soil hydrothermal processes in the Tibetan Plateau: Observation and parameterization. J Hydrometeorol, 22: 2659–2674

Sun J, Yang K, Yu Y, Lu H, Lin Y. 2023. Land-atmosphere interactions partially offset the accelerated Tibetan Plateau water cycle through dynamical processes. J Clim, 36: 3867–3880

Thackeray C W, Fletcher C G, Derksen C. 2019. Diagnosing the impacts of Northern Hemisphere surface albedo biases on simulated climate. J Clim, 32: 1777–1795

Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, Hall W D. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. Mon Weather Rev, 136: 5095–5115

Tomasi E, Giovannini L, Zardi D, de Franceschi M. 2017. Optimization of Noah and Noah_MP WRF land surface schemes in snow-melting conditions over complex terrain. Mon Weather Rev, 145: 4727–4745

Vahmani P, Ban-Weiss G A. 2016. Impact of remotely sensed albedo and vegetation fraction on simulation of urban climate in WRF-urban canopy model: A case study of the urban heat island in Los Angeles. J Geophys Res-Atmos, 121: 1511–1531

Wang X, Chen D, Pang G, Anwar S A, Ou T, Yang M. 2021. Effects of cumulus parameterization and land-surface hydrology schemes on Tibetan Plateau climate simulation during the wet season: Insights from the RegCM4 model. Clim Dyn, 57: 1853–1879

Wen J, You D, Tang Y, Han Y. 2022. The daily albedo product coupling topographic effects over the Tibet Plateau (2002–2020) [Dataset]. National Tibetan Plateau Data Center. https://doi.org/10.11888/Terre.tpdc.272047

Wu G, Liu Y. 2016. Impacts of the Tibetan Plateau on Asian climate. Meteorol Monogr, 56: 7.1–7.29

Yang K, Chen Y, Lazhu Y, Zhan C, Ling X, Zhou X, Jiang Y, Yao X, Lu H, Ma X, Ouyang L, Pan W, Ren Y, Shao C, Tian J, Wang Y, Yang H, Yue S, Zhang K, Zhao D, Zhao L, Zhou J, Zou M. 2023. Cross-sectional rainfall observation on the central-western Tibetan Plateau in the warm season: System design and preliminary results. Sci China Earth Sci, 66: 1015–1030

Yang S, Zeng J, Fan W, Cui Y. 2022. Evaluating root-zone soil moisture products from GLEAM, GLDAS, and ERA5 based on in situ observations and triple collocation method over the Tibetan Plateau. J Hydrometeorol, 23: 1861–1878

Ye D Z, Wu G X. 1998. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation. Meteorl Atmos Phys, 67: 181–198

Yue S, Yang K, Lu H, Zhou X, Chen D, Guo W. 2021. Representation of stony surface-atmosphere interactions in WRF reduces cold and wet biases for the Southern Tibetan Plateau. J Geophys Res-Atmos, 126: e2021JD035291

Zhan C, Chen Y, Yang K, Lazhu K, Zhou X, Jiang Y, Ling X, Tian J, Wang Y, Li X, Yang H. 2023. First evaluation of GPM-Era satellite precipitation products with new observations on the western Tibetan Plateau. Atmos Res, 283: 106559

Zhang P, Zheng D, van der Velde R, Wen J, Ma Y, Zeng Y, Wang X, Wang Z, Chen J, Su Z. 2022. A dataset of 10-year regional-scale soil moisture and soil temperature measurements at multiple depths on the Tibetan Plateau. Earth Syst Sci Data, 14: 5513–5542

Zhou P, Shao M, Ma M, Ou T, Tang J. 2023a. WRF gray-zone dynamical downscaling over the Tibetan Plateau during 1999–2019: Model performance and added value. Clim Dyn, 61: 1371–1390

Zhao T, Yu P. 2021. Global daily 0.05° spatiotemporal continuous land surface temperature dataset (2002–2022) [Dataset]. National Tibetan Plateau Data Center. https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.271663

Zhou X, Yang K, Wang Y. 2018. Implementation of a turbulent orographic form drag scheme in WRF and its application to the

Tibetan Plateau. Clim Dyn, 50: 2443–2455

Zhou X, Yang K, Jiang Y, Sun J, Chen Y, Li X, Li J, Shi J. 2022. The influence of bare ground thermal roughness length parameterization on the simulation of near-surface air and skin temperatures over the Tibetan Plateau. J Geophys Res-Atmos, 127: e2022JD037245

Zhou X, Ding B, Yang K, Pan J, Ma X, Zhao L, Li X, Shi J. 2023b. Reducing the cold bias of the WRF model over the Tibetan Plateau by implementing a snow coverage-topography relationship and a fresh snow albedo scheme. J Adv Model Earth Syst, 15: e2023MS003626

(责任编委: 陈文)