



青藏高原气候动力降尺度——从1/4度到公里尺度

高艳红^{1,2,3*}, 许建伟⁴, 张萌¹, 刘朝阳¹, 但婧瑜¹

1. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438;
2. 上海市海洋-大气相互作用前沿科学研究基地, 上海 200438;
3. 上海长江河口湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200438;
4. 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 常德 415000

* 通讯作者, E-mail: gaoyh@fudan.edu.cn

收稿日期: 2022-01-17; 收修改稿日期: 2022-06-08; 接受日期: 2022-06-13; 网络版发表日期: 2022-09-05

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK010314)、中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA2006010202)和中国科学院“西部之光-西部交叉团队”重点实验室专项计划项目(编号: xbzg-zdsys-202102)资助

摘要 青藏高原拥有全球除南北极外最大的冰冻圈, 是亚洲九大河流的发源地. 全球变暖背景下青藏高原地表环境发生了很大变化. 据预测, 在未来气候变化情景下, 到21世纪末, 大部分冰川和冻土将消失, 淡水资源大幅减少, 而全球22%人口的生活和生产依赖于来自青藏高原的淡水资源. 这些环境变化引起了全球社会的极大关注. 然而, 全球气候模拟结果在青藏高原存在较大不确定性, 为准确认知水安全危机造成干扰. 基于大气动力学和物理学过程, 动力降尺度可以比全球模拟更准确精细刻画地表状况, 从而更准确模拟和预估区域或局地天气和气候信息. 随着超级计算性能的提升, 动力降尺度模拟的水平分辨率不断提高, 目前已经达到公里尺度. 本文首先介绍了青藏高原动力降尺度研究的起源和从1/4度到公里尺度的发展历程, 论述了青藏高原公里尺度的动力降尺度模拟的优劣. 其次, 评述了青藏高原气候动力降尺度的主要陆面影响因素和高原特色陆面模式的研发进展, 指出改进陆面模式, 提高陆气相互作用的模拟是提高动力降尺度模拟性能的有效途径. 最后, 对青藏高原超高分辨率气候动力降尺度存在的问题和未来发展方向提出了展望.

关键词 青藏高原, 气候动力降尺度, 陆面过程

1 引言

青藏高原山脉众多、地形陡峭, 自然条件恶劣, 观测站点的空间代表性较差. 依靠有限的地表观测较难获得全域信息. 遥感监测可以获得空间分布信息, 但是仅可以获得表层信息. 陆面过程模拟、或者地球表层生态、水文过程模拟成为研究青藏高原地表状况重

要手段. 然而, 所有陆面模式的模拟性能都强烈依赖于气象驱动要素的数据质量, 尤其是降水数据的准确性对陆面过程, 乃至水循环模拟都有重要影响(Raleigh等, 2016; Zhang等, 2016; Gao等, 2017). 青藏高原降水数据的不确定性严重阻碍了对地球圈层相互作用的准确模拟和认知. 因此, 降水数据的准确性成为青藏高原地表环境对全球变暖响应研究的瓶颈问题.

中文引用格式: 高艳红, 许建伟, 张萌, 刘朝阳, 但婧瑜. 2022. 青藏高原气候动力降尺度——从1/4度到公里尺度. 中国科学: 地球科学, 52(12): 2342–2352, doi: 10.1360/SSTe-2022-0015

英文引用格式: Gao Y, Xu J, Zhang M, Liu C, Dan J. 2022. Regional climate dynamical downscaling over the Tibetan Plateau—From quarter-degree to kilometer-scale. Science China Earth Sciences, 65(12): 2237–2247, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9968-4>

由于恶劣的自然条件, 人们对青藏高原区域气候(尤其是降水)的认知还有很大的不确定性. 首先, 观测站点稀少且分布极不均匀. 常规气象观测站点多分布在高原中东部海拔较低地区, 高原西部的高海拔地区站点密度远低于中东部地区, 且最高的常规气象台站的海拔高度只有4800m. 而且, 藏东南地区强烈的地形起伏, 使得观测站点的空间代表性较小, 有限的气象站点观测数据难以揭示高原全域的天气、气候分布特征. 其次, 大气和地面遥感监测可以获得区域尺度地表状况, 但其准确性受到反演算法和地面观测验证数据限制. 因此, 气候模式成为获得区域尺度网格气象信息的重要手段(Giorgi和Gutowski, 2015; Papalexiou等, 2020).

大量研究表明, 全球气候模式在青藏高原的模拟误差较大(江志红等, 2009; Su等, 2013; Li Y等, 2021), 而且, 青藏高原是全球气候模式间不一致性最大的区域之一(IPCC, 2014; Li等, 2016). 再分析资料基于全球气候模式、同化大气探测和卫星观测资料, 可以产生较准确的网格化气象要素信息. 21世纪以来, 随着观测手段和能力的提升, 越来越多的观测信息的加入, 新一代的再分析资料质量有较大提升, 例如, 第二代再分析资料NCEP-DOE和ERA-Interim优于第一代产品NCEP-NCAR和ERA40, 第三代ERA5又优于第二代产品ERA-Interim, 以至于在很多气候分析中常常被作为观测资料使用. 但是, 诸多研究表明, 再分析资料在青藏高原同样存在较大的不确定性(Wang和Zeng, 2012; Broxton等, 2016; Dawson等, 2016), 例如, 不能体现出近几十年来青藏高原观测到的变暖、变湿、风速减小等气候变化强度(Gao等, 2015a, 2018b; Li X等, 2018), 有的甚至呈现相反的变化信号(Gao等, 2014). 第二代再分析资料优于第一代, 但是仍不能准确描述高原干湿变化的空间差异. 即使是获得广泛好评的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)最新一代再分析资料ERA5, 青藏高原地区的冷偏差和湿偏差仍然存在(Liu等, 2022), ERA5甚至显示出积雪方面的显著偏差(Orsolini等, 2019), 这些都严重阻碍了全球变暖背景下青藏高原区域气候和环境变化的研究.

2 青藏高原1/4度(25~30km)动力降尺度

降尺度是获取目标区域高分辨率气候信息的重要途径, 包括统计降尺度和动力降尺度(Castro等, 2005),

其中统计降尺度简单、高效, 成为较受欢迎的方式. 然而, 统计降尺度的精度高度依赖于观测数据的丰富度, 因此在观测资料稀少的青藏高原地区适用性非常有限(Chen等, 2006; Benestad等, 2015; Poschlod等, 2018). 基于区域气候模式的动力降尺度成为提供网格化高分辨率气象数据的有效途径(图1; Giorgi和Gutowski, 2015), 但是该方法对计算资源要求较高. 动力降尺度在北美洲和欧洲较早得到广泛应用(Mearns和Team, 2009; Giorgi等, 2012). 在中国, 高学杰等较早使用RegCM针对中国东部季风区开展动力降尺度研究(Gao等, 2006, 2012a, 2012b). 之后也陆续有科研团队使用其他区域气候模式, 开展中国东部季风区气候和极端天气/气候的模拟(Ji和Kang, 2015; Yu等, 2015; Xu等, 2019). 直到21世纪10年代, 国内外研究团队专门针对青藏高原, 分别开展了动力降尺度研究, 掀开了青藏高原气候动力降尺度研究的新篇章.

德国学者使用美国国家环境预报中心(NCEP)的FNL分析资料作为大尺度驱动数据, 基于中尺度气候模式WRF, 使用每天重新启动的方式, 开展了青藏高原动力降尺度模拟(Maussion等, 2011, 2014). 以地面雨量计观测和卫星降水估计热带雨量测量(TRMM)为参照, 进行了2008年10月强降水(降雪)过程的模拟, 认为模拟结果可以重现观测的降水量、降水的空间格局和季节特征, 对降雪频率和地形降水的模拟优于驱动数据. 之后发布了分辨率30、10、2km的高亚洲十年降水数据(HAR). 该研究重点关注高亚洲冰川区降水类型、季节和年际变化, 以及WRF模式设置、嵌套方法、参数化方案对模拟结果的影响, 试图给出一个提供青藏高原准确降水的模拟方案. 研究发现尽管动力降尺度可以相比百公里尺度更准确地模拟地形降水, 但是由于观测资料的缺乏, 高海拔地区的地形降水及其形成机理还有很多未解之谜.

与此同时, 中国研究团队也利用WRF模式开展了30km空间分辨率的青藏高原气候动力降尺度模拟研究(Gao等, 2015a, 2015b), 与德国团队不同的是: (1) 模拟时段; (2) 驱动数据; (3) 陆面参数化方案. 首先, 着重针对近几十年来青藏高原气候和环境变化开展研究, 因此, 采用连续模拟的方式, 开展1979~2011年长达33年的长期气候模拟. 其次, 鉴于再分析资料和全球气候模式在青藏高原的误差, 对大尺度驱动数据(再分析资料(Gao等, 2014)以及全球气候模式(Xu等, 2017))进行

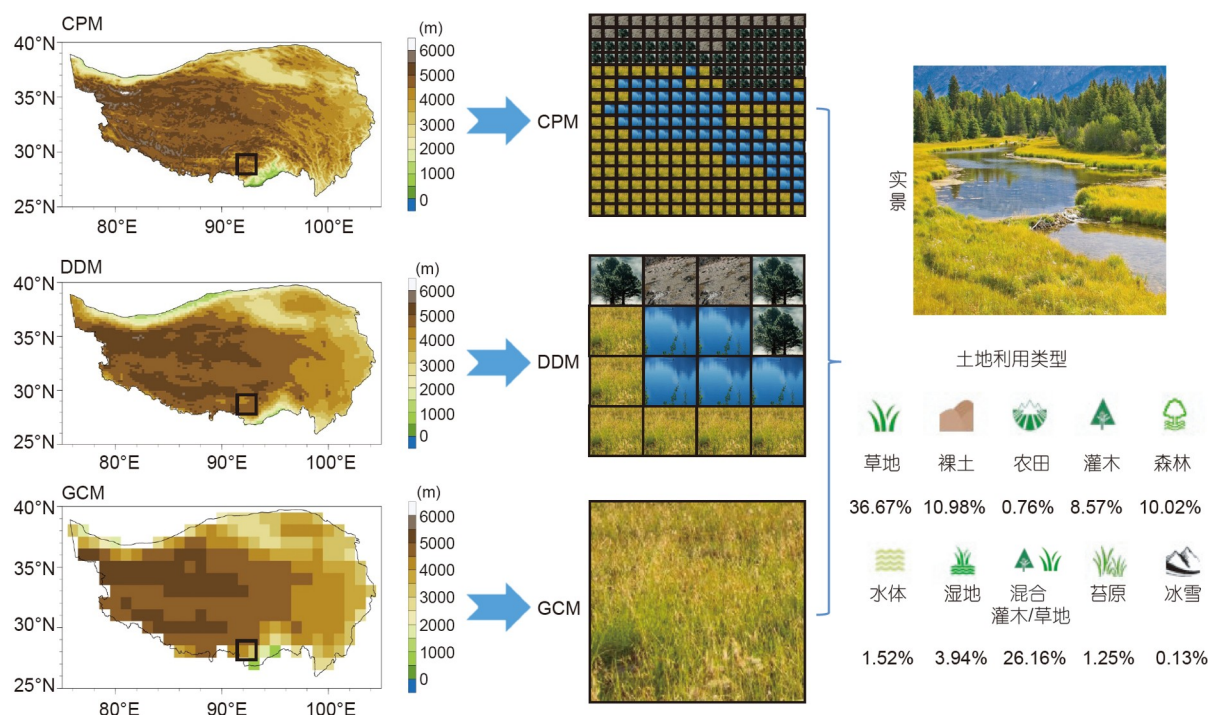


图1 青藏高原动力降尺度示意图

了优选, 选择原则为是否可以准确描述观测的变暖、变湿、风速减小的气候变化特征。经过排序, 优选出 ERA-Interim 和 CCSM4 作为驱动数据。再者, 地表状况的准确性和持续性是长期气候模拟的重要下边界条件, 研究团队通过完善和优化陆面过程模式, 为青藏高原区域气候模拟提供更准确的下边界条件。研究表明 30km 气候动力降尺度结果更准确模拟了观测到的随海拔分布的变暖特征, 更准确模拟了青藏高原西部腹地与东南部相反的 $P-E$ (降水减蒸发) 变化的空间分布特征 (Gao 等, 2015a, 2015b), 蒸散发和风速的模拟也有了一定程度的改进 (Li X 等, 2018; Dan 等, 2021), 但是仍然未能模拟出近几十年风速减小的变化趋势 (Li X 等, 2018)。

为研究青藏高原水资源的未来预估, 中国研究团队采用与再分析资料驱动模拟相同的模式配置, 使用全球气候模式作为驱动数据, 开展了全球气候模式驱动的 1980~2005 年气候模拟以及 RCM4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下 2006~2100 年水资源 ($P-E$) 变化预估 (Gao 等, 2018a)。首先, 对全球气候模式进行评估和选取。Xu 等 (2017) 比较了全球气候模式输出中用于驱动区域气候模式的高空和地面要素, 优选了 CCSM4 作为驱动数

据, 开展历史阶段和未来情景预估。历史阶段模拟结果与再分析资料驱动结果的比较发现, 尽管 CCSM4 对青藏高原气温和降水的模拟系统误差都远远大于再分析资料, 两个动力降尺度气候模拟的误差和空间分布却相差不大, 而气候要素的变化趋势受驱动数据影响明显 (Gao 等, 2017)。未来气候变化预估的研究发现, CCSM4 预估青藏高原整体暖湿化, 暖湿化程度依赖于未来时间和排放情景; 与 CCSM4 不同, 动力降尺度预估青藏高原北部暖湿化, 而南部暖干化的空间差异 (Gao 等, 2018a)。机理分析表明, CCSM4 基本遵循克劳修斯-科拉帕隆方程, 全球变暖导致空气中水汽含量增加是 $P-E$ 变化的主导因素, 而在未来预估的动力降尺度结果中, 与历史阶段 $P-E$ 变化对变暖的影响机理相同, 主导因素为体现环流变化的动力机制 (Zhang 等, 2019)。而环流的变化与动力降尺度模拟中更精细刻画的地表植被类型、更准确模拟的蒸散发和内循环过程紧密相关 (Gao 等, 2015b; Zhang 和 Gao, 2021)。

3 公里尺度动力降尺度

近年来, 随着超算能力的提升, 国内外一些研究团

队相继开展了公里尺度动力降尺度, 但是名称比较混乱, 有云解析模拟(cloud resolving modeling)、对流解析模拟(convection resolving modeling)、对流允许模拟(convection-permitting modeling)、公里尺度模拟(kilometer scale modeling)、灰色区域尺度(Gray Zone)等, 这些小于10km水平分辨率的模拟都属于公里尺度模拟. 超高分辨率可以提高模式的模拟性能, 但需消耗大量的计算资源, 寻求模式性能改进和资源消耗的平衡点也具有重要的实际意义. 美国国家大气研究中心的研究认为4km及以下尺度深对流过程基本可以被显式解析, 更高的分辨率则会使计算量指数增长, 而模拟性能进一步提升的空间有限, 因而提出4km是开展对流允许尺度气候模拟比较合适的尺度.

相对于1/4度模拟, 对流允许尺度模拟的优势不仅仅是水平分辨率的提升, 更为重要的是可以显示解析一些次网格尺度对流过程以及更准确、精细地刻画下边界的影响. 例如, 对流云的水平尺度通常在几公里到十公里, 模式水平分辨率降到公里尺度就可以在网格尺度显式解析深对流过程, 不再采用深对流参数化方案, 从而避免了对流参数化方案带来的不确定性. 因此, 对流允许尺度的区域气候模拟被认为可以较大幅度地提高降水的模拟性能(Prein等, 2020; Kendon等, 2021; Liu等, 2022).

美国和欧洲的一些研究机构在21世纪初已经开始了公里尺度动力降尺度研究. 例如, 欧洲联合区域气候降尺度协同试验(Coordinated Regional Downscaling Experiments-Europe), 由Pillipe Gorigo带领的欧洲区域气候模拟团队, 在欧洲进行了一系列对流允许尺度模拟(Convection-Permitting modeling, CPM), 研究了欧洲区域的对流过程和阿尔卑斯山脉地区的水资源问题(Torma等, 2015; Clark等, 2016; Vionnet等, 2016; Chan等, 2018; Berthou等, 2020; Knist等, 2020). 美国国家大气研究中心(NCAR)围绕落基山脉水资源的变化开展了长时间序列公里尺度的区域气候模拟, 发现公里尺度模拟更准确地再现了落基山脉降雪量、年径流量、蒸散发, 以及降水的空间分布特征, 并基于公里尺度模拟预估了气候变暖情景下落基山脉冬季和夏季降水、融雪、径流的变化(Prein等, 2016; Liu等, 2017; Feng等, 2018; Wang等, 2018).

亚洲区域的公里尺度区域气候模拟开展尚不多. Li等(2019)基于ECMWF有限区域模式模拟结果, 分析

了2016年6月30日至7月6日期间中国长江中下游地区的一次强降雨事件, 发现对流允许尺度模拟结果更好地模拟了降水的小尺度特征和日变化特征, 但模拟的雨强偏强. Yun等(2020)开展了3km分辨率的模拟试验, 结果显示对流允许尺度模拟合理地再现了中国东部季节、次季节降水的空间特征和日变化规律, 更好地模拟出夏季风活动、青藏高原对流的东向传播, 但模拟的降水量偏大. 最近, 研究人员实现了全球1km气候模拟, 尽管模拟时间只有几个月(Wedi等, 2020), 标志着数值天气、气候模拟步入超高分辨率模拟的新时代.

在青藏高原, 尽管1/4度动力降尺度模拟结果在一定程度上减小了再分析资料和全球气候模拟的冷、湿偏差, 但依然存在不可忽视的偏差, 阻碍了高原气候及其环境效应的研究. 高艳红团队在前期1/4度动力降尺度基础上, 不断探索减小青藏高原降水模拟误差的新途径和新方法, 率先在青藏高原开展了4km分辨率模拟试验, 发现4km模拟在有观测资料的海拔范围与1/4度模拟相差不大, 但大于5000m的高海拔表现出较大差异, 并于2018年9月4~6日, 在美国国家大气研究中心召开的第二届全球水循环对流允许尺度气候模拟研讨会(Gewex Convection-Permitting Climate Modeling Workshop II)上进行交流, 成为会上唯一的青藏高原对流允许尺度模拟工作.

鉴于高海拔地区气象站点数据的匮乏, 高艳红教授研究团队使用积雪遥感数据评估了4km和1/4度模拟的高海拔地区降水. Jiang等(2020)基于1/4度和4km动力降尺度模拟结果, 以及三套获得广泛好评的降水融合产品(CMFD、CMORPH、TRMM)驱动高分辨率陆面数据同化系统(HRLDAS), 模拟了青藏高原积雪覆盖度, 并与课题组开发的MODIS和风云卫星的去云产品进行了比较. 研究结果显示, 观测驱动下的HRLDAS模拟结果低估了高原的积雪覆盖度, 高估了无雪期. 相比之下, 1/4度和4km降水驱动的积雪覆盖度模拟误差都较小, 更准确再现了积雪覆盖度随海拔分布特征, 且概率密度分布函数也与MODIS积雪产品更为接近, 4km表现优于1/4度模拟结果(Gao等, 2020a). 这一研究表明对流允许尺度模拟可以为高海拔山区提供更准确的超高分辨率降水数据, 为观测资料缺乏地区的降水研究提供了新途径.

近几年, 在青藏高原地区相继开展了多个公里尺度的模拟试验(Norris等, 2017; Lin等, 2018; Ou等,

2020; Wang Y等, 2020; Li P X等, 2021; Wang等, 2021), 研究结果大多认为公里尺度模拟不再使用对流参数化方案, 是进一步减小1/4度模拟冷、湿偏差的重要途径. 由于计算条件限制, 大部分研究仅针对藏南地区或者喜马拉雅山区等较小区域开展高分辨率模拟, 对高原整体的气候模拟研究较少. 这些研究认为公里尺度可以更好地刻画高分辨率地形对水汽输送过程的阻挡, 进而较小降水模拟的正偏差(Lin等, 2018; Jiang等, 2020; Wang Y等, 2020; Li P X等, 2021; Yun等, 2021; Zhao等, 2021; Ma等, 2022).

最新研究发现, 与以往1/4动力降尺度相比, 公里尺度模拟更准确模拟出的降水的日变化特征(Ou等, 2020; Li P X等, 2021; Liu等, 2022; Ma等, 2022). 例如, Liu等(2022)研究发现4km动力降尺度模拟的降水量和其他降水产品的差异主要由降水频率引起, 再分析资料(ERA-Interim和ERA5)严重高估了青藏高原的降水量, 且ERA5中降水日峰值过早过强, 这与其较强的水汽输送和过早出现的强对流有效位能峰值有关. 4km与1/4度动力降尺度对降水的模拟明显优于再分析资料, 尤其是4km模拟能够更准确地再现高原大部分站点夏季降水的峰值出现时间(图2), 而1/4度模拟的降水峰值则提前. 大多研究从水汽传输和能量平衡角度解释了公里尺度对降水量模拟误差的改进机理, 但这不能解释对降水日变化的改进. 近期, Liu等(2022)揭示了公里尺度模拟对降水日变化的改进机理: 公里尺度模拟的湿对流不稳定性度的正偏差小于1/4度, 使得对流触发的时间和强度与观测更符合, 从而使降水峰值出现的时间更准确.

综上所述, 目前对公里尺度模拟的认知有两种主要观点, 一种观点认为公里尺度模拟减小了对流参数化的不确定性, 可以显著改进降水的模拟(Prein等, 2016; Liu等, 2017; Prein等, 2020, 2021), 另一种观点则认为公里尺度模拟在一定程度上可以提升模拟性能, 但主要体现在日变化特征的改进, 产出与投入(计算资源)相比是否值得还有待研究(Kendon等, 2021). 目前大多数研究结果尚属于个例评估阶段, 对物理机理研究不多, 短期研究结果在长期模拟中的稳健性尚需验证. 有些研究为了获得长时间序列模拟数据, 采用重复启动的模拟方式(Maussion等, 2011; Norris等, 2015, 2017), 该方法每1~2天重新启动, 将个例模拟结果衔接, 形成长时间序列. 尽管可以产生长时间序列气

象数据, 但是该模拟方式阻断了气候系统的记忆功能, 因此严格地讲属于天气模拟拼图, 不属于气候模拟的范畴.

4 青藏高原气候动力降尺度的下边界影响因素

现代的气候模式系统包含的物理过程日趋完备, 耦合了大气过程、海洋和海冰过程、陆地生物地球物理过程和生物地球化学过程等多个模块, 已经广泛用于全球或区域气候的模拟和预估. 然而, 气候模式在青藏高原的高分辨率模拟还存在较大问题. 主要表现在以下两方面: (1) 青藏高原地表特征丰富, 陆气相互作用过程复杂, 目前的气候系统模式尚不能全面刻画. 青藏高原是地球系统圈层相互作用强烈的区域之一, 不仅有低海拔地区的圈层相互作用过程, 而且独特的地形、冰川、积雪、沙漠、湿地等多种地表类型使得该地区地表和天气、气候的相互作用在空间和时间上更具有复杂性和多样性, 随着模式水平分辨率的提高和深对流过程的显式解析, 地表热源的强烈非均匀分布成为对流过程模拟的重要影响因素, 陆气相互作用的复杂性和多样性将得到更充分地体现(Gao等, 2017, 2020a, 2020b; 刘维成等, 2021). (2) 当前陆面模式中某些过程的参数化方案及参数可能不适用于青藏高原. 通用陆面模式中的物理过程和地表参数大多基于平原区的试验研发和获取的, 在青藏高原的适用性较差, 严重影响了高原区域气候的模拟效果, 进而限制了青藏高原气候及其影响的认知(Gao等, 2015c; Li Z G等, 2018; Yue等, 2021). 因此, 青藏高原多时间尺度、多物理过程天气和气候研究需要更加完善的、更加适合的陆面过程模式, 为地球气候系统模式提供更准确和精细的地表能量和水分交换信息.

近几十年来, 一批科研人员长期致力于改进青藏高原陆面过程方案, 努力提高青藏高原陆气相互作用和气候模拟的准确性. 例如, 在陆面过程模式中改进或增加了土壤质地类型(李文耀等, 2020)、土壤有机质方案(Gao等, 2015c; Chen等, 2016)、砾石参数化方案(Pan等, 2017)、地形拖曳参数化方案(Zhou等, 2018)、高寒植被根系参数化方案(Gayler等, 2014; Gao等, 2015c)、冻土参数化方案(Yang和Wang, 2019)、湖冰反照率修订(Li Z G等, 2018)、湖泊盐分参数化

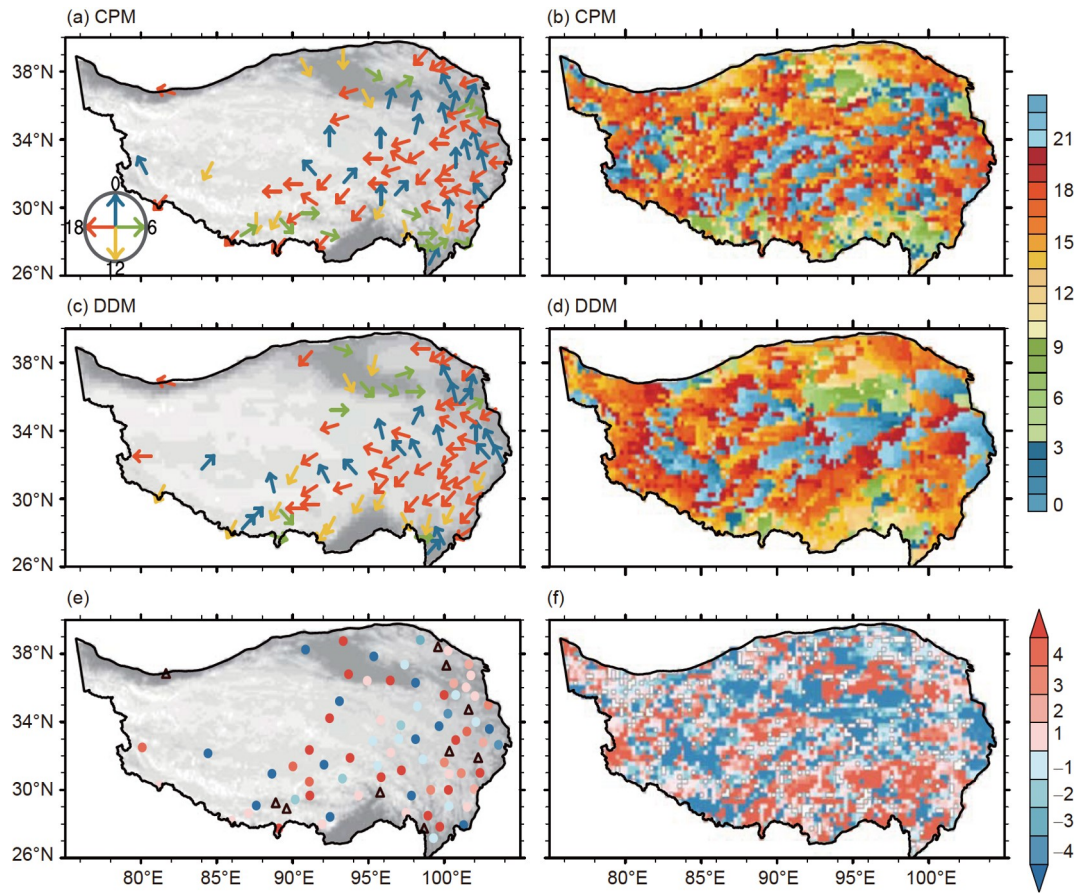


图2 青藏高原2014年6月4km((a)、(b))和1/4度模拟((c)、(d))中83个站点(左)和0.25°格点(右)降水日峰值时间分布以及两套模拟峰值的时间差异((e)、(f))

红点代表4km峰值时间晚于1/4度, 蓝点表示4km峰值时间早于1/4度, 时间相同的站点/格点用黑色三角形/空白格表示. 灰色背景为海拔高度. 自Liu等(2022)

(Wen等, 2016; Huang等, 2019)和水文过程参数化(Rummeler等, 2019)等. 由于篇幅限制, 下面仅从积雪、湖泊、土壤类型这三方面介绍陆面过程模式改进在青藏高原气候模拟中的增值效果.

积雪对地表能量平衡的影响一直是气候系统及其变化研究的重要内容. 近期对青藏高原积雪的研究发现, 相比高纬地区的积雪, 青藏高原积雪属于浅薄积雪, 维持时间短, 消融快(Li W K等, 2018; Jiang等, 2019). 而在陆面模式中的积雪参数化方案大多按照高纬度深厚积雪的特征建立, 这些方案往往会严重高估青藏高原的积雪覆盖度. Jiang等(2020)针对青藏高原积雪特征, 修改陆面模式中的积雪覆盖度参数化方案, 不仅显著减小了积雪量模拟的正偏差, 还减小了温度模拟的冷偏差. 除此以外, 还有一些研究通过减小积

雪反照率也取得相似的模拟效果(Wang W L等, 2020; Liu等, 2021).

青藏高原湖泊众多, 这些湖泊通过湖气相互作用对天气和气候有着重要影响. 传统区域天气和气候模式, 例如, WRF, 采用最近点海表温度作为湖表温度, Gao等(2020b)研究发现由于海温远高于青藏高原湖表温度, 导致湖泊上空易出现强对流, 引发过强的水汽辐合, 从而严重高估了湖泊下方方的降水量. 而使用观测订正的湖温可以显著减小了湖区模拟的湿偏差, 进而使高原平均降水的模拟误差由148%降至58%.

清华大学研究团队通过野外考察发现, 青藏高原南部山区的地表大多为不适合植被生长的裸露基岩, 而在WRF模式中, 这一区域的地表土壤类型为壤土, 非常适合植被生长. 这种地表类型识别误差将影响地

表能量平衡和水分交换, 进而对局地气候产生影响. 利用卫星数据识别青藏高原南部地区的裸露基岩, 修正WRF模式中的地表类型, 可以有效减小高原南部模拟的湿冷偏差(Yue等, 2021).

5 青藏高原动力降尺度研究的问题和展望

动力降尺度通过精细刻画地表非均匀分布, 达到更准确模拟区域气候的目的. 是否分辨率越高, 降尺度效果越好, 目前还没有统一答案. 很多研究认为提高分辨率可以进一步提高模拟性能, 例如, 小于1km分辨率的台风模拟可以更精细刻画台风垂直结构(Gao等, 2022), 也有研究认为模拟性能的提高与分辨率呈现非线性关系, 改进的最大幅度体现在由12km提高到4km, 4km以下分辨率模拟性能改进有限(Prein等, 2016, 2021), 甚至增大了虚假降水. 中国科学院地气相互作用研究团队对青藏高原地表通量尺度效应的研究认为4km是地表通量随尺度变化曲线的拐点, 小于该阈值的地表通量随空间尺度剧烈变化, 超过该阈值的区域平均地表通量变化趋于平稳(Sun等, 2016). 由于这些研究需要大量超高分辨率数据, 现有研究多在较小区域开展较短时间的模拟, 动力降尺度的最佳尺度问题还有待更多高时空分辨率数据的支持.

公里尺度动力降尺度模拟验证需要超高分辨率的观测资料, 但是青藏高原站点观测分布稀疏, 基于站点观测和遥感观测的网格数据存在较大的不确定性(Ye等, 2004; Lundquist等, 2019; Gao等, 2020a). 雷达观测可以提供超高时空分辨率的定量降水数据, 然而, 在青藏高原复杂的地形限制了雷达的架设和覆盖范围. 如何建立有代表性的观测站点、研发数据融合算法、提高网格数据准确性成为正确评估动力降尺度模拟结果的首要前提. 有研究认为, 在地形复杂地区, 基于区域气候模式的高分辨率模拟性能甚至超过观测, 尤其在高海拔地区(Lundquist等, 2019). 青藏高原东南部研究结果也与这一观点相同. 但是, 这一结论在其他地区的通用性需要进一步检验.

公里尺度动力降尺度不再使用对流参数化方案, 可以一定程度提高模拟性能, 但是其他参数化方案(辐射参数化、微物理参数化、边界层参数化和陆面过程参数化)大多来自全球模式, 缺乏适合中小尺度

的参数化方案仍然限制了次网格过程的准确表达. 例如, 陆面过程研究表明中地下水方案显著改变地表水热状况, 进而影响北美中部对流允许尺度季节预报的持续性暖偏差(Barlage等, 2021). 土壤质地分布改变土壤干湿分布, 进而影响降水量和降水的空间分布(Ács等, 2010).

最后, 动力降尺度基于区域气候模式, 受到驱动数据提供的初、边值条件的影响. 模拟区域越小, 受边界条件影响越大. 如果模拟区域足够大, 模拟范围内复杂的地形条件可以自行产生局地循环, 因此在地形复杂区域, 增大模拟范围是减小驱动数据影响的途径之一. 不过由于公里尺度模拟超高的分辨率, 增大模拟范围的代价是模拟时间的非线性增长(通常网格加倍, 运行时间将增加十倍左右)(Kendon等, 2021). 因此, 平衡缓冲区和驱动影响成为需要考虑的因素.

尽管存在以上的困难, 但随着计算力的提升, 公里尺度模拟将会大规模开展, 在更大的模拟区域开展更长时间、更高分辨率的气候模拟, 以期更准确认知地球气候系统. 数据存储和分享将成为最大的技术挑战. 海量的输出结果需要超大规模的存储空间, 更为重要的是集合预报被认为提高预报准确性的有效途径, 人们更倾向于共享模拟结果, 进行集合分析. 实现海量数据的快速共享将有助于推进青藏高原高分辨率气候和环境变化研究.

总之, 气候动力降尺度是获取高分辨率网格气候信息的有效途径, 可以为青藏高原气候和环境变化及其对全球变化的响应研究提供有力的支撑. 高性能超算能力的提升推动动力降尺度由传统的1/4度向超高分辨率发展. 伴随着水平分辨率的提升和深对流过程的显式解析, 公里尺度模拟在对流触发时间和水汽传输方面表现出一定的增值效果, 将气候动力降尺度带入一个新的阶段, 同时也暴露出一些新的问题和挑战. 后续有望在以下两方面有所进展: (1) 基于公里尺度, 深入研究非均匀性陆地表面如何影响边界层, 进而影响降水的物理机理, 这一影响在青藏高原尤为重要; (2) 如何利用高分辨率研究成果改进大尺度模拟中的对流参数化方案, 达到既能保证模拟性能又能提高运算效率的目的, 为业务应用提供科技支撑.

致谢 感谢复旦大学-西藏大学生物多样性与全球变化联合实验室和国际合作项目CORDEX-FPS-CPTP的支持.

参考文献

- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 王冀. 2009. 7个IPCCAR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估. *大气科学*, 33: 109–120
- 李文耀, 魏楠, 黄丽娜, 上官微. 2020. 土壤数据集对全球陆面过程模拟的影响. *气候与环境研究*, 25: 555–574
- 刘维成, 张强, 刘新伟. 2021. 陆-气相互作用对大气对流活动影响研究进展和展望. *高原气象*, 40: 1278–1293
- Ács F, Horváth Á, Breuer H, Rubel F. 2010. Effect of soil hydraulic parameters on the local convective precipitation. *Meteorol Zeitsch*, 19: 143–153
- Barlage M, Chen F, Rasmussen R, Zhang Z, Miguez-Macho G. 2021. The importance of scale-dependent groundwater processes in land-atmosphere interactions over the central United States. *Geophys Res Lett*, 48: 10
- Benestad R E, Mezghani A, Parding K M. 2015. 'esd'-The Empirical-Statistical Downscaling tool & its visualisation capabilities. MET report, Norwegian Meteorological Institute. 1–73
- Berthou S, Kendon E J, Chan S C, Ban N, Leutwyler D, Schär C, Fosser G. 2020. Pan-European climate at convection-permitting scale: A model intercomparison study. *Clim Dyn*, 55: 35–59
- Broxton P D, Zeng X, Dawson N. 2016. Why do global reanalyses and land data assimilation products underestimate snow water equivalent? *J Hydrometeorol*, 17: 2743–2761
- Castro C L, Pielke R A, Leoncini G. 2005. Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). *J Geophys Res*, 110: D05108
- Chan S C, Kendon E J, Roberts N, Blenkinsop S, Fowler H J. 2018. Large-scale predictors for extreme hourly precipitation events in convection-permitting climate simulations. *J Clim*, 31: 2115–2131
- Chen D L, Achberger C, Raisanen J, Hellstrom C. 2006. Using statistical downscaling to quantify the GCM-related uncertainty in regional climate change scenarios: A case study of Swedish precipitation. *Adv Atmos Sci*, 23: 54–60
- Chen L, Li Y, Chen F, Barr A, Barlage M, Wan B. 2016. The incorporation of an organic soil layer in the Noah-MP land surface model and its evaluation over a boreal aspen forest. *Atmos Chem Phys*, 16: 8375–8387
- Clark P, Roberts N, Lean H, Ballard S P, Charlton-Perez C. 2016. Convection-permitting models: A step-change in rainfall forecasting. *Met Apps*, 23: 165–181
- Dan J Y, Gao Y H, Zhang M. 2021. Detecting and attributing evapotranspiration deviations using dynamical downscaling and convection-permitting modeling over the Tibetan Plateau. *Water*, 13: 2096
- Dawson N, Broxton P, Zeng X, Leuthold M, Barlage M, Holbrook P. 2016. An evaluation of snow initializations in NCEP global and regional forecasting models. *J Hydrometeorol*, 17: 1885–1901
- Feng Z, Leung L R, Houze Jr. R A, Hagos S, Hardin J, Yang Q, Han B, Fan J. 2018. Structure and evolution of mesoscale convective systems: Sensitivity to cloud microphysics in convection-permitting simulations over the United States. *J Adv Model Earth Syst*, 10: 1470–1494
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, Giorgi F. 2012a. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. *Chin Sci Bull*, 57: 1188–1195
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, Wu J, Giorgi F, Ji Z M, Wang Y G. 2012b. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high-resolution RCM simulations. *Clim Res*, 52: 213–226
- Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, Pal J S, Giorgi F. 2006. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. *Theor Appl Climatol*, 86: 173–185
- Gao Y H, Chen F, Jiang Y S. 2020a. Evaluation of a convection-permitting modeling of precipitation over the Tibetan Plateau and its influences on the simulation of snow-cover fraction. *J Hydrometeorol*, 21: 1531–1548
- Gao Y H, Chen F, Lettenmaier D P, Xu J W, Xiao L H, Li X. 2018b. Does elevation-dependent warming hold true above 5000 m elevation? Lessons from the Tibetan Plateau. *NPJ Clim Atmos Sci*, 1: 19
- Gao Y H, Chen F, Miguez G M, Li X. 2020b. Understanding precipitation recycling over the Tibetan Plateau using tracer analysis with WRF. *Clim Dyn*, 55: 2921–2937
- Gao Y H, Cuo L, Zhang Y X. 2014. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979–2011 and possible mechanisms. *J Clim*, 27: 1876–1893
- Gao Y H, Leung L R, Zhang Y X, Cuo L. 2015b. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979–2011: Insights from a high-resolution simulation. *J Clim*, 28: 4185–4197
- Gao Y H, Li K, Chen F, Jiang Y S, Lu C G. 2015c. Assessing and improving Noah-MP land model simulations for the central Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 9258–9278
- Gao Y H, Xiao L H, Chen D L, Chen F, Xu J, Xu Y. 2017. Quantification of the relative role of land-surface processes and large-scale forcing in dynamic downscaling over the Tibetan Plateau. *Clim Dyn*, 48: 1705–1721
- Gao Y H, Xiao L, Chen D, Xu J, Zhang H. 2018a. Comparison between past and future extreme precipitations simulated by global and regional climate models over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, 38:

- 1285–1297
- Gao Y H, Xu J W, Chen D L. 2015a. Evaluation of WRF mesoscale climate simulations over the Tibetan Plateau during 1979–2011. *J Clim*, 28: 2823–2841
- Gao Z, Wu L G, Zhou X Y. 2022. Fine-scale structures in the mid-level eyewall of super typhoon Rammasun (2014) simulated with the WRF-LES framework. *Front Earth Sci*, 9: 1406
- Gayler S, Wöhling T, Grzeschik M, Ingwersen J, Wizemann H D, Warrach-Sagi K, Högy P, Attinger S, Streck T, Wulfmeyer V. 2014. Incorporating dynamic root growth enhances the performance of Noah-MP at two contrasting winter wheat field sites. *Water Resour Res*, 50: 1337–1356
- Giorgi F, Gutowski W J. 2015. Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annu Rev Environ Resour*, 40: 467–490
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla M B, Bi X, Elguindi N, Diro G T, Nair V, Giuliani G, Turuncoglu U U, Cozzini S, Güttler I, O'Brien T A, Tawfik A B, Shalaby A, Zakey A S, Steiner A L, Stordal F, Sloan L C, Brankovic C. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res*, 52: 7–29
- Huang A N, Lazhu Wang J B, Dai Y J, Yang K, Wei N, Wen L J, Wu Y, Zhu X Y, Zhang X D, Cai S X. 2019. Evaluating and improving the performance of three 1-D lake models in a large deep lake of the central Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 3143–3167
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. 151
- Ji Z M, Kang S C. 2015. Evaluation of extreme climate events using a regional climate model for China. *Int J Climatol*, 35: 888–902
- Jiang Y S, Chen F, Gao Y H, He C, Barlage M, Huang W B. 2020. Assessment of uncertainty sources in snow cover simulation in the Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e32674
- Jiang Y S, Chen F, Gao Y H, Barlage M, Li J D. 2019. Using multisource satellite data to assess recent snow-cover variability and uncertainty in the Qinghai-Tibet Plateau. *J Hydrometeorol*, 20: 1293–1306
- Kendon E J, Prein A F, Senior C A, Stirling A. 2021. Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Phil Trans R Soc A*, 379: 20190547
- Knist S, Goergen K, Simmer C. 2020. Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe. *Clim Dyn*, 55: 325–341
- Li P X, Furtado K, Zhou T J, Chen H M, 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 P X, Guo Z, Furtado K, Chen H M, Li J, Milton S, Field P R, Zhou T J. 2019. Prediction of heavy precipitation in the eastern China flooding events of 2016: Added value of convection-permitting simulations. *Q J R Meteorol Soc*, 145: 3300–3319
- Li W K, Guo W D, Qiu B, Xue Y K, Hsu P C, Wei J F. 2018. Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales. *Nat Commun*, 9: 4243
- Li W, Jiang Z H, Xu J J, Li L. 2016. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part II: Probabilistic projection. *J Clim*, 29: 8989–9004
- Li X, Gao Y H, Pan Y J, Xu Y. 2018. Evaluation of near-surface wind speed simulations over the Tibetan Plateau from three dynamical downscalings based on WRF model. *Theor Appl Climatol*, 134: 1399–1411
- Li Y, Wang C H, Su F G. 2021. Evaluation of climate in CMIP6 models over two third pole subregions with contrasting circulation systems. *J Clim*, 34: 9133–9152
- Li Z G, Ao Y H, Lyu S H, Lang J H, Wen L J, Stepanenko V, Meng X H, Zhao L. 2018. Investigation of the ice surface albedo in the Tibetan Plateau lakes based on the field observation and MODIS products. *J Glaciol*, 64: 506–516
- Lin C G, Chen D L, Yang K, Ou T H. 2018. Impact of model resolution on simulating the water vapor transport through the central Himalayas: Implication for models' wet bias over the Tibetan Plateau. *Clim Dyn*, 51: 3195–3207
- Liu C H, Ikeda K, Rasmussen R, Barlage M, Newman A J, Prein A F, Chen F, Chen L, Clark M, Dai A, Dudhia J, Eidhammer T, Gochis D, Gutmann E, Kurkute S, Li Y, Thompson G, Yates D. 2017. Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Clim Dyn*, 49: 71–95
- Liu L, Ma Y M, Menenti M, Su R M Z, Yao N, Ma W Q. 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 Z Y, Gao Y H, Zhang G. 2022. Importing or self-dependent: Energy transition in Beijing towards carbon neutrality and the air pollution reduction co-benefits. *Clim Change*, 173: 18
- Lundquist J, Hughes M, Gutmann E, Kapnick S. 2019. Our skill in modeling mountain rain and snow is bypassing the skill of our observational networks. *Bull Am Meteorol Soc*, 100: 2473–2490
- Ma M N, Hui P H, Liu D Q, Zhou P F, Tang J P. 2022. Convection-permitting regional climate simulations over Tibetan Plateau: Re-initialization versus spectral nudging. *Clim Dyn*, 58: 1719–1735
- Maussion F, Scherer D, Finkelnburg R, Richters J, Yang W, Yao T. 2011. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China—An assessment using remote sensing and ground observations. *Hydrol Earth Syst Sci*, 15: 1795–1817

- MauSSION F, Scherer D, Mölg T, Collier E, Curio J, Finkelnburg R. 2014. Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the high Asia reanalysis. *J Clim*, 27: 1910–1927
- Mearns L, Team N. 2009. The north American regional climate change assessment program (NARCCAP): Overview of phase II results. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6
- Norris J, Carvalho L M V, Jones C, Cannon F. 2015. WRF simulations of two extreme snowfall events associated with contrasting extratropical cyclones over the western and central Himalaya. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 3114–3138
- Norris J, Carvalho L M V, Jones C, Cannon F, Bookhagen B, Palazzi E, Tahir A A. 2017. The spatiotemporal variability of precipitation over the Himalaya: Evaluation of one-year WRF model simulation. *Clim Dyn*, 49: 2179–2204
- Orsolini Y, Wegmann M, Dutra E, Liu B, Balsamo G, Yang K, de Rosnay P, Zhu C, Wang W, Senan R, Arduini G. 2019. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using *in situ* and satellite remote sensing observations. *Cryosphere*, 13: 2221–2239
- Ou T H, Chen D L, Chen X C, Lin C G, Yang K H, Lai 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
- Pan Y J, Lyu S H, Li S S, Gao Y H, Meng X H, Ao Y H, Wang S J. 2017. Simulating the role of gravel in freeze-thaw process on the Qinghai-Tibet Plateau. *Theor Appl Climatol*, 127: 1011–1022
- Papalexiou S M, Rajulapati C R, Clark M P, Lehner F. 2020. Robustness of CMIP6 historical global mean temperature simulations: Trends, long-term persistence, autocorrelation, and distributional shape. *Earths Future*, 8: e01667
- Poschlo B, Hodnebrog Ø, Wood R R, Alterskjær K, Ludwig R, Myhre G, Sillmann J. 2018. Comparison and evaluation of statistical rainfall disaggregation and high-resolution dynamical downscaling over complex terrain. *J Hydrometeorol*, 19: 1973–1982
- Prein A F, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Goergen K, Teichmann C, Fox Maule C, van Meijgaard E, Déqué M, Nikulin G, Vautard R, Colette A, Kjellström E, Jacob D. 2016. Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: High resolution, high benefits? *Clim Dyn*, 46: 383–412
- Prein A F, Liu C, Ikeda K, Bullock R, Rasmussen R M, Holland G J, Clark M. 2020. Simulating North American mesoscale convective systems with a convection-permitting climate model. *Clim Dyn*, 55: 95–110
- Prein A F, Rasmussen R M, Wang D, Giangrande S E. 2021. Sensitivity of organized convective storms to model grid spacing in current and future climates. *Phil Trans R Soc A*, 379: 20190546
- Raleigh M S, Livneh B, Lapo K, Lundquist J D. 2016. How does availability of meteorological forcing data impact physically based snowpack simulations? *J Hydrometeorol*, 17: 99–120
- Rummler T, Arnault J, Gochis D, Kunstmann H. 2019. Role of lateral terrestrial water flow on the regional water cycle in a complex terrain region: Investigation with a fully coupled model system. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 507–529
- Su F G, Duan X L, Chen D L, Hao Z C, Cuo L. 2013. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. *J Clim*, 26: 3187–3208
- Sun G H, Hu Z Y, Wang J M, Xie Z P, Lin Y, Huang F F. 2016. Upscaling analysis of aerodynamic roughness length based on *in situ* data at different spatial scales and remote sensing in north Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 176–177: 231–239
- Torma C, Giorgi F, Coppola E. 2015. Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain-Precipitation over the Alps. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 3957–3972
- Vionnet V, Dombrowski-Etchevers I, Lafaysse M, Quéno L, Seity Y, Bazile E. 2016. Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps: Evaluation and application for snowpack modeling. *J Hydrometeorol*, 17: 2591–2614
- Wang A H, Zeng X B. 2012. Evaluation of multireanalysis products with *in situ* observations over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 117: D05102
- Wang W L, Yang K, Zhao L, Zheng Z Y, Lu H, Mamtimin A, Ding B H, Li X, Zhao L, Li H Y, Che T, Moore J C. 2020. Characterizing surface albedo of shallow fresh snow and its importance for snow ablation on the interior of the Tibetan Plateau. *J Hydrometeorol*, 21: 815–827
- Wang X, Tolksdorf V, Otto M, Scherer D. 2021. WRF-based dynamical downscaling of ERA5 reanalysis data for High Mountain Asia: Towards a new version of the High Asia Refined analysis. *Int J Climatol*, 41: 743–762
- Wang Y G, Geerts B, Liu C H. 2018. A 30-year convection-permitting regional climate simulation over the interior western United States. Part I: Validation. *Int J Climatol*, 38: 3684–3704
- Wang Y, Yang K, Zhou X, Chen D L, Lu H, Ouyang L, Chen Y Y, LazhuWang B B. 2020. Synergy of orographic drag parameterization and high resolution greatly reduces biases of WRF-simulated precipitation in central Himalaya. *Clim Dyn*, 54: 1729–1740
- Wedi N P, Polichtchouk I, Dueben P, Anantharaj V G, Bauer P, Boussetta S, Browne P, Deconinck W, Gaudin W, Hadade I, Hatfield S, Iffrig O, Lopez P, Maciel P, Mueller A, Saarinen S, Sandu I, Quintino T, Vitart F. 2020. A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. *J Adv Model Earth Syst*,

- 12: e02192
- Wen L J, Lyu S H, Kirillin G, Li Z G, Zhao L. 2016. Air-lake boundary layer and performance of a simple lake parameterization scheme over the Tibetan highlands. *Tellus A-Dynamic Meteorol Oceanography*, 68: 31091
- Xu J W, Gao Y H, Chen D L, Xiao L H, Ou T H. 2017. Evaluation of global climate models for downscaling applications centred over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, 37: 657–671
- Xu Z F, Han Y, Yang Z L. 2019. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Sci China Earth Sci*, 62: 365–375
- Yang K, Wang C H. 2019. Water storage effect of soil freeze-thaw process and its impacts on soil hydro-thermal regime variations. *Agric For Meteorol*, 265: 280–294
- Ye B S, Yang D Q, Ding Y J, Han T D, Koike T. 2004. A bias-corrected precipitation climatology for China. *J Hydrometeorol*, 5: 1147–1160
- Yu E T, Sun J Q, Chen H P, Xiang W L. 2015. Evaluation of a high-resolution historical simulation over China: Climatology and extremes. *Clim Dyn*, 45: 2013–2031
- Yue S Y, Wang B, Yang K, Xie Z L, Lu H, He J. 2021. Mechanisms of the decadal variability of monsoon rainfall in the southern Tibetan Plateau. *Environ Res Lett*, 16: 014011
- Yun Y X, Liu C H, Luo Y L, Gao W H. 2021. Warm-season mesoscale convective systems over eastern China: Convection-permitting climate model simulation and observation. *Clim Dyn*, 57: 3599–3617
- Yun Y, Liu C, Luo Y, Liang X, Huang L, Chen F, Rasmussen R. 2020. Convection-permitting regional climate simulation of warm-season precipitation over Eastern China. *Clim Dyn*, 54: 1469–1489
- Zhang G, Chen F, Gan Y J. 2016. Assessing uncertainties in the Noah-MP ensemble simulations of a cropland site during the Tibet Joint International Cooperation program field campaign. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 9576–9596
- Zhang H W, Gao Y H. 2021. Projected changes in precipitation recycling over the Tibetan Plateau based on a global and regional climate model. *J Hydrometeorol*, 22: 2633–2644
- Zhang H W, Gao Y H, Xu J W, Xu Y, Jiang Y S. 2019. Decomposition of future moisture flux changes over the Tibetan Plateau projected by global and regional climate models. *J Clim*, 32: 7037–7053
- Zhao Y, Zhou T J, Li P, Furtado K, Zou L W. 2021. Added value of a convection permitting model in simulating atmospheric water cycle over the Asian water tower. *Geophys Res Atmos*, 126: e34788
- 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

(责任编辑: 黄建平)