北京大学学报(自然科学版) Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis ISSN 0479-8023,CN 11-2442/N

《北京大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目:	青藏高原对非洲北部降水影响的模拟研究
作者:	陈志宏,杨海军
DOI:	10.13209/j.0479-8023.2020.063
收稿日期:	2019-12-20
网络首发日期:	2020-08-17
引用格式:	陈志宏,杨海军.青藏高原对非洲北部降水影响的模拟研究.北京大学学报(自
	然科学版). https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2020.063



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。 北京大学学报(自然科学版) Acta Scientiarµm Naturaliµm Universitatis Pekinensis doi: 10.13209/j.0479-8023.2020.063

青藏高原对非洲北部降水影响的模拟研究

陈志宏1 杨海军2,*

北京大学气候与海--气实验室,北京大学物理学院大气与海洋科学系,北京 100871;†通信作者,E-mail:hjyang@pku.edu.cn

摘要利用耦合模式 CESM1.0, 研究青藏高原地形对非洲北部降水的影响。敏感性试验结果表明, 去掉青藏高原地形后, 首先, 大气环流迅速做出调整, 出现自热带大西洋向东北方向至北非的水汽输送异常和自印度洋向西至北非的水汽输送异常, 造成北非大气水汽含量增加和水汽辐合增强, 降水增多。其后, 当海洋环流调整到准平衡态时, 北大西洋降温, 南大西洋升温, 在南北温度梯度的影响下, 原本由热带大西洋向北非的水汽输送发生转向, 导致北非的水汽含量减少和水汽辐合减弱, 使得降水比前一阶段减少。即便如此, 在没有青藏高原的试验中, 当海洋环流调整到平衡态时, 北非大部分区域水汽辐合仍然强于有青藏高原的真实地形试验, 区域平均降水也增多。结果表明, 青藏高原的隆升可能在一定程度上加剧了北非的干旱化。

关键词 青藏高原;北非降水;水汽输送;水汽辐合

A Modeling Study of the Impact of Tibetan Plateau on the North African Precipitation

CHEN Zhihong¹, YANG Haijun^{2,†}

Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: hjyang@pku.edu.cn

Abstract The impact of Tibetan Plateau (TP) on the North African precipitation is investigated using a fully coupled climate model (CESM1.0). Results from sensitivity experiments show that, when the TP is removed, first of all the atmospheric circulation responds quickly and there are enhanced northeastward moisture transport from the tropical Atlantic Ocean to the North Africa and the westward moisture transport from the Indian Ocean to the North Africa. As a result, the atmospheric moisture content increases and moisture convergence enhances over the North Africa, leading to more precipitation. Later on when the ocean circulation reaches the quasi-equilibrium (QE), the sea surface temperature (SST) in the North (South) Atlantic decreases (increases). The surface air temperature (SAT) changes synchronously with the SST. This temperature gradient anomaly leads to the moisture transport out of the North Africa, so that the atmospheric moisture content decreases and moisture convergence weakens over the North Africa. Consequently, the precipitation over there decreases. Even so, in the QE stage in the world without the TP, the moisture convergence over the North Africa is still much stronger than that in the realistic topography experiment., and the precipitation is still increased significantly. This study suggests that the uplift of the TP may contribute to the aridification in the North Africa.

Key words Tibetan Plateau; North African precipitation; moisture transport; moisture convergence

国家自然科学基金(91737204, 41725021, 41376007)资助

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-04-27

青藏高原总面积为250万km²,约占我国国土面积的1/4,平均海拔在4000m以上,能够达到对流层的中上层。凭借其独特的热力和动力作用,青藏高原不仅影响东亚天气,而且影响全球气候。多年来,已有很多科学家从各种角度揭示青藏高原对全球气候,甚至整个地球系统的重要性^[1-4]。

非洲北部(简称北非)与青藏高原同处北半球热带-亚热带,大部分区域气候干旱,以沙漠为主,北部的 撒哈拉沙漠是球最大的沙质荒漠,面积超过 800 万 km²,部分区域年平均降水量甚至不足 5 mm^[5],其干旱 化是当今世界面临的严峻问题之一。因此,研究撒哈拉沙漠干旱化的形成过程和机制具有重要的现实意义。

青藏高原大部分地区当今的海拔高度形成于距今 8~10 百万年^[6]。对于撒哈拉沙漠的形成, 传统观念认为始于距今 2~3 百万年^[7-8], 但 Schuster^[9]和 Zhang 等^[10]的研究结果表明, 北非干旱区尤其是撒哈拉沙漠形成于距今 7~11 百万年, 与青藏高原隆升的时间吻合。也就是说, 北非干旱化与青藏高原隆升在同一时期发生。因此, 我们推测青藏高原的隆升对北非的干旱化可能有一定程度的贡献。另外, 北非在这一时期的干旱化与人类的起源紧密相关^[11], 因此探讨北非干旱化的成因对人类起源的研究也具有重要的科学意义。

已有一些研究发现青藏高原与非洲气候之间存在联系。Yang 等^[12]发现, 去掉青藏高原后北半球会变得 干燥寒冷。姚杰等^[13]的研究表明, 去掉青藏高原会减弱孟加拉湾向北的水汽输送, 使东非地区的水汽增多。 刘晓东等^[14]发现, 青藏高原四周的下沉气流是北非干旱化加剧的重要原因。Maffre 等^[15]在耦合模式中将全 球地形高度设为 200 m, 发现亚洲夏季风崩溃, 并出现穿越整个非洲向西的水汽输送。上述研究揭示青藏高 原地形对非洲地区气候态具有显著影响, 但这些研究要么没有定量地分析北非降水变化及其机制, 要么只 考虑大气环流的影响, 忽略海洋环流的影响。本文利用美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Researc, NCAR)的地球系统模式(CESM1.0), 定量地分析青藏高原对北非降水的影响, 验证青 藏高原的隆升是否使得北非更加干旱, 并分析其中的海-气相互作用机制。

1 试验设置

NCAR 的 CESM1.0 (http://www2.cesm.ucar.edu)是全耦合的全球气候系统模式,能够对地球系统过去、现在及未来的气候状态进行准确的模拟。CESM1.0 由 5 个分量模式和一个耦合器组成:大气模式(CAM5)^[16]、陆面模式(CLM4)^[17]、海冰模式(CICE4)^[18]、海洋模式(POP2)^[19]、陆冰模式(Glimmer-CISM)以及耦合器(CPL7)。模式采用的网格是 T31_gx3v7。大气模式垂直方向分为26 层,采用混合坐标,水平分辨率为3.75°×3.75°;陆面模式分辨率与大气模式相同,植被分布采用 CLM4 的默认设置;海洋模式垂直方向分为60 层,纬向分辨率为3.6°,经向采用不均匀网格,赤道附近分辨率为0.6°,往两级递增,到南北纬35°处达到最大值3.4°,之后往两级递减;海冰模式与海洋模式分辨率一致。模式中无通量调整。CESM1.0 已经在青藏高原地形对全球气候影响的研究中得到广泛的应用和验证^[12,20]。

试验分为两组。一组为控制试验(记为 Real):采用真实地形(图 1(a)),积分 2400 年,在 1000 年以后达 到气候平衡态^[20]。控制试验中 CO₂浓度设置为 285 μL/L (工业革命前的水平),其余参数均为 CESM1.0 模 式默认值。另一组为敏感性试验(记为 NoTibet):在控制试验积分到 2000 年时,去掉青藏高原地形(将海拔 高程设置为 50 m,图 1(b)),继续往前积分到至 2400 年。

Yang 等基于本次青藏高原地形试验的结果,已经对青藏高原影响全球气候的概况^[12]以及青藏高原对AMOC 的影响^[21]做了分析。本文主要研究青藏高原对北非气候的影响,通过对比 2000~2400 年的两组数据,分析青藏高原地形对北非干旱化的影响机制。需要说明的是,本试验中的地形改变对气候系统是一个很大的强迫,因此气候变化信号是很明显的。*T*检验结果显示,试验中大部分变化都能通过 95%的显著性检验。考虑到图形的清晰度与美观性,只在图 2(b)中给出显著性检验结果。

2 准平衡态时北非降水的变化

试验中,真实地形情况下北非降水量明显低于同纬度其他地区,尤其是撒哈拉沙漠部分区域年降水量 甚至不足 20 mm (图 2(a)),与美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NECP)再

分析资料结果(图略)基本上一致。去掉青藏高原地形后,准平衡态时,北非大部分地区降水增加,靠近印度 洋的东南部地区尤为明显,年平均降水增量可达 400 mm 以上,北部可以延伸到 30°N,区域年平均降水量 增加 26.5 mm,比真实地形情况下增加 4.3% (图 2(b))。特别值得关注的是,北部的沙漠区域年降水量变化 虽然只有 20~80 mm,但比真实地形情况下增加 400%~600% (图 2(c)),已经能够影响沙漠植被的生长。显然, 青藏高原地形对北非降水有显著的影响。下面通过分析降水等气候特征随时间的演变,进一步探究其影响 过程。



(a) 控制试验中采用的真实地形(Real); (b) 敏感性试验中去掉青藏高原地形(NoTibet)



(a) 真实地形情况下的降水量(*P*)(Real); (b) 去掉青藏高原地形后降水量的变化(NoTibet – Real), 黑点表示通过 95%的显著性 检验; (c) 降水变化量与真实地形情况下降水量的比值((NoTibet – Real)/Real)。红线框区域(6 -32 N, 15 W-45 E)为北非地 区(下同)

图 2 真实地形情况下的降水量和准平衡态降水量的变化

Fig. 2 Precipitation in realistic topography and change of precipitation in quasi-equilibrium state

3 气候态随时间演变过程

图 3 展示北非地区平均地表大气温度、地表大气湿度及降水变化的时间序列。移除青藏高原后,北非 地表大气湿度先增加,到160年左右开始一个迅速降低的过程,260年以后进入相对稳定的状态(图3(a)中蓝 色曲线); 地表温度先降低, 160年后进一步降低, 260年后进入相对稳定的状态(图 3(a)中红色曲线); 降水先 增加,160年后迅速回落,260年后进入相对稳定的状态,此时降水依然高于控制试验(图 3(b))。区域平均地 表大气温度、湿度和降水的变化趋势及变化节点基本上一致,先是瞬时响应,100多年后经历一个迅速降低 过程,最后进入一个相对稳定的状态。从图 3 中灰色虚线所示的阶段平均值也可以看出,湿度、温度和降 水在前 50 年和最后 100 年明显处于不同的水平。根据这种时间演变特征,将前 50 年定义为"Stage-I"(图 3 左侧阴影部分), 代表去掉青藏高原后气候态迅速响应的阶段, 将最后 100 年定义为"Stage-II" (图 3 右侧阴 影部分), 代表准平衡态。因此, 下面主要通过分析两个阶段气候态变化的空间分布以及 Stage-II 相对于 Stage-I的变化, 探究去掉青藏高原后北非气候态的变化机制。需要说明的是, 在最后 100 年, 系统并未完全 达到平衡, 地表大气的温度和湿度在最后 10 年依然有下降的趋势。从时间序列来看, Stage-I 代表大气的调 整过程, 之后的 160~260 年在海洋过程的影响下迅速变化, 与两阶段之间的快速变化相比, Stage-II 的演变 已经非常缓慢, 所代表的气候态与 Stage-I 也有明显的区别。Yang 等^[21]发现, 去掉青藏高原后北大西洋经 向翻转流(the Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)先增强, 50年以后开始近线性地衰减, 300 年后已经减弱 80%, 可以认为 AMOC 已经崩溃。因此, Stage-II 中海洋调整已经近似地达到平衡, 可以认为 是准平衡态。

4 Stage-I 气候态的响应

4.1 大气环流及水汽输送场的调整

图 4 展示 Real 实验中青藏高原及周边的大气环流结构。青藏高原区域高空是反气旋性高压(图 4(a)),低 层是气旋性低压(图 4(b)),这种高层辐散、低层辐合的结构导致高原区域出现局地垂直环流,即高原上气流 辐合上升,到达高空后往高原四周辐散下沉(图 4(c))。在这种环流结构的影响下,高原南侧的低层大气以西 风为主,并且高原西边的下沉气流使得中亚--北非--北副热带大西洋东北信风增强。叶笃正等^[22] 1957 年就发 现夏季 1.5 km 和 3 km 高度处青藏高原附近的大气绕高原做气旋性旋转,而 6 km 以上呈反气旋性旋转,本 次试验模拟结果与之相符。

移除青藏高原后,这种高空高压、底层低压的结构消失,大气环流迅速发生调整,印度洋上空转为东风,高原四周尤其是中亚下沉气流减弱,伴随中亚-北非--北副热带大西洋东北信风减弱(图略)。图 5(a)~(c)展示移除青藏高原后 Stage-I 中大气环流的调整,可见高层大气中,青藏高原出现气旋性低压异常(图 5(a));中低层大气中,青藏高原及其南侧出现反气旋性高压异常,导致印度洋东风异常(图 5(b))。这种高低空配置导致高原四周尤其是中亚出现异常上升气流(图 5(c)),伴随着中亚-北非-北副热带大西洋出现西南风异常(图 5(b))。

图 5(d)展示移除青藏高原后 Stage-I 中 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送(*v*q)及水汽辐合辐散(*v*·(*v*q))的调整。由于试验中北非地区大气中水汽变化主要发生在 600 hPa 以下,因此 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送和水汽辐合辐散与整层积分的结果基本上一致。其中,在陆地上水汽辐合度值基本上相当于降水量值^[23]。由于水汽的垂直分布特征是越靠近地面湿度越大(图略),因此 600~1000 hPa 积分的水汽输送(*v*q)方向与中低层大气环流(*v*)基本上一致(图 5(b)和(d))。但是,水汽输送场与大气环流场并不完全相同,因为水汽输送不但受大气环流场(*v*)的作用,还与湿度(q)的改变有关。真实地形情况下,北印度洋上空水汽输送向东,无法影响北非,而北非上空在东北信风的作用下,从陆地向热带大西洋输送水汽(图略)。移除青藏高原后,由于北印度洋东风异常和热带大西洋—北非—中亚西南风异常以及水汽变化的共同影响,北非地区得到来自印度洋向西的水汽输送和来自热带大西洋向东北的水汽输送(图 5(d))。



(a) 地表气温(SAT)和比湿(Q); (b) 降水量。曲线均经过 10 年滑动平均处理, 灰色虚线表示变量在该阶段的平均值

图 3 温度、湿度及降水量变化(NoTibet - Real)的时间序列

Fig. 3 Temporal evolution of change (NoTibet - Real) in temperature, humidity and precipitation



(a) 100~500 hPa 平均的位势高度(Z)(减去同纬度平均值)和风场(矢量); (b) 海平面气压(SLP)(减去同纬度平均值)和底层风场 (矢量); (c) 500 hPa 大气垂直运动速度,正值表示上升运动。小于参考值 1/20 的矢量没有画出(下同);黑线框区域为青藏高原 (25 ~40 N, 70 ~110 E)



Fig. 4 Atmosphere circulation field in Real experiment

4.2 温度、湿度和降水变化及其机制

Stage-I 中海洋上空大气温度(the surface air temperature, SAT)主要受海表温度(the sea surface temperature, SST)影响,大西洋呈三极子结构,印度洋呈偶极子结构(图 6(a))。温度通过蒸发作用影响海洋上空的水汽含量,进而通过水汽输送影响北非陆地上的水汽。北非地区的平均 SAT 是减小的(图 6(a)),与同纬度海洋上的气温变化并不一致,其变化主要受低云的影响。北非地区水汽及水汽辐合增加导致低云量增加(图 6(c)),地表净短波辐射减少(图 6(b)),最终造成北非地区温度降低。

Stage-I 中北非东西两侧海洋上的水汽变化主要来自温度变化导致的蒸发速率改变,北副热带大西洋和 西印度洋水汽都增加(图 7(a))。北非陆地上的地表大气湿度也增加,其变化主要来自周围海洋的水汽输送, 在 Stage-I 中,其来源主要有两个途径,一是热带大西洋向东北的水汽输送,二是自印度洋向西的水汽输送 (图 5(d))。

Stage-I 中北非地区降水改变非常显著,除北部边缘地带外,其他区域降水都明显增加,区域平均降水量增加 146 mm/a,变化幅度为 25.5% (图 7(b)),特别是北部撒哈拉沙漠区域,增幅为 600%以上(图 7(c))。来自印度洋向西和热带大西洋向东北的充足的水汽输送使得局地水汽增加,同时使得局地水汽辐合增强(图

5(d)),导致北非降水增加。需要说明的是,北非中东部的部分区域整层水汽通量是弱辐散的,但是降水增加。 这是由于全球区域来看,大气中的水汽基本上集中在近地面层,但是该区域地处撒哈沙漠腹地,底层大气 中水汽含量很低,高、低空大气中水汽含量的差异没有其他区域明显,因此高空水汽通量辐散在整层积分 中的占比相对较大,导致此区域虽然整层积分的水汽通量是弱辐散的,但是低层的水汽辐合引起降水增加。



(a) 100~500 hPa 平均的位势高度(减去同纬度平均值)和风场(矢量); (b) 海平面气压(减去同纬度平均值)和底层风场(矢量); (c) 500 hPa 大气垂直运动速度,正值表示上升运动; (d) 矢量表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送ρ·**v**q, 阴影表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送ρ(**v**q, 阴影表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送ρ(**v**q, 阴影表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送ρ(**v**q, 阳影表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输合辐散(ρ**v**·(**v**q)),正值表示辐散,负值表示辐合,其中ρ=1.29 kg/m³。所有变量都基于 NoTibet – Real, 代表去掉青藏高原地形后气候态的变化(下同)





(a) 地表气温; (b) 地表净短波辐射通量(SW), 正值代表入射, 负值代表出射; (c) 低云量(LC)



Fig. 6 Change of temperature, radiation flux and low cloud fraction in Stage-I

5 Stage-II 气候态的响应

5.1 大气环流及水汽输送场的调整

图 8 展示到达准平衡态(Stage-II)时大气环流的改变。达到准平衡态时, AMOC 崩溃^[21], 北大西洋降温, 南大洋升温, 导致大气环流出现轻微的调整。与 Stage-I 相比, 此时青藏高原区域大气结构以及垂直速度没

有变化,最大的改变在于北非北部高空的高压异常增强(图 8(a1)和(b1))、地面出现高压异常(图 8(a2)和(b2)) 以及东北部下沉气流增加(图 8(a3)和(b3)),有利于地面东北风的增强(图 8(b2))。另外,热带大西洋气流上升 支南移(图 8(a3)和(b3)),导致南大西洋发生抽吸作用,造成北非南部的地面风场穿越赤道指向南半球。在北 部下沉加压和南部抽吸的共同作用下,准平衡态时地面风场由北非和北热带大西洋指向南半球(图 8(a2))(5.2节将讨论造成这种变化的原因)。



(a) 地表大气比湿; (b) 降水量; (c) 降水变化量与真实地形情况下降水量的比值

图 7 Stage-I 湿度和降水量的变化



(a1)和(b1) 100~500 hPa 平均的位势高度及风场, 阴影代表位势高度(减去同纬度平均值), 矢量代表风场; (a2)和(b2) 阴影表示 海平面气压(减去同纬度平均值), 矢量表示底层风场; (a3)和(b3)) 500 hPa 大气垂直运动速度, 正值表示上升运动; (a1)~(a3) Stage-II 的变化, (b1)~(b3) Stage-II 变化量与 Stage-I 变化量的差值

图 8 Stage-II 中大气环流场的变化以及 Stage-II 相对于 Stage-I 的调整 Fig. 8 Change of atmosphere circulation in Stage-II and change compared to Stage-I 图 9 展示移除青藏高原后 Stage-II 中 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送及水汽辐合、辐散的调整。受 底层环流调整和水汽调整的共同影响,水汽输送和水汽辐合、辐散也发生调整。与 Stage-I 相比,准平衡态 (Stage-II)时北印度洋向非洲的水汽输送略微增加,而原本由热带大西洋向北非的水汽输送转向南半球(图 9(a)和(b))。



(a) 矢量表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽输送 $\rho \cdot \vec{v}q$, 阴影表示 600~1000 hPa 垂直积分的水汽辐合辐散 $\rho \nabla \cdot (\vec{v}q)$, 正值表示 辐散, 负值表示辐合, 其中 ρ =1.29 kg/m³; (b) Stage-II 中水汽输送和水汽辐合辐散变化量与 Stage-I 变化量的差值

图 9 Stage-II 垂直积分的水汽输送和水汽辐合的变化以及 Stage-II 相对于 Stage-I 的调整

Fig. 9 Changeof vertically-integrated moisture transport, its convergences and change compared to Stage-I





5.2 温度、湿度和降水变化及其机制

从图 10(a)可以看出,北大西洋及周边区域 SAT 降低,南半球 SAT 升高。这是由于去掉青藏高原后 AMOC 崩溃,海洋向北的热量输送减弱,北大西洋 SST 显著降低,南大西洋 SST 升高^[21]。与 Stage-I 相比, Stage-II 主要的变化是北大西洋降温和南大西洋升温。此时,北大西洋及周边陆地作为冷源,南大西洋作为 热源发生抽吸作用,导致向南的经向风增强,直接造成大气环流场的调整。正是南、北温度梯度的变化造 成 5.1 节述及的大气环流场和水汽输送场再次微调整,也体现海洋环流在青藏高原地形影响北非气候过程 中对大气环流的反馈作用。从图 10(a)也可以看出,北非地区平均 SAT 整体降低,但是变化的幅度并不均匀。 一方面是因为北大西洋大幅度降温导致周边区域整体降温,另一方面则是由于北非低云的减少(图 10(c)), 导致地面净短波辐射增强(图 10(b)),抵消部分降温,因此北非降温没有同纬度周边地区明显。从图 10(a)和 (b)可以看出,温度水平梯度与净短波辐射水平梯度有很好的对应关系。

从图 10(d)可以看出, 与真实地形情况相比, Stage-II 中北非地区水汽在中部和东部增多, 而在北部和西南部减少, 区域平均减少, 而 Stage-I 中几乎整个北非地区水汽都是增加的。发生这种变化的原因主要是 Stage-II 中水汽输送出现轻微调整, 一是北热带大西洋以及北非西南部的水汽输送出现偏向南半球的分量)(图 9(b)), 二是北非北部出现向外的水汽输送(图 9(b))。其中, 热带大西洋的水汽输送变化对北非水汽变 化的影响最大。

如第2节所述,准平衡态(Stage-II)时,北非降水比 Real 试验增加26.5 mm/a (4.3%)(图2(b))。但是,与 Stage-I 相比, Stage-II 降水出现回落,减少119 mm/a (图7(b))。出现这种改变的原因主要是 Stage-II 中水汽 输送和水汽辐合发生变化。尤其在西南部,偏向南半球的水汽输送导致水汽辐合比 Stage-I 减弱(图9(a)和(b))。然而,大部分区域的水汽辐合还是以增强为主,因此平衡态时整个北非地区的平均水汽辐合依然比 Real 试验中强(图9(a)和(b)),降水也增多。

6 结论与讨论

本文利用耦合模式 CESM1.0 探究青藏高原对北非降水的影响,对比两组试验发现,去掉青藏高原地形后北非变得更寒冷,空气更干燥,但是降水增加,这种变化的过程主要分为以下两个阶段。1)大气迅速响应阶段(Stage-I),移除高原地形后,大气环流迅速发生调整,北印度洋自东向西往北非输送水汽,热带大西洋也出现往北非的水汽输送异常,北非水汽增加,水汽在北非辐合,造成北非降水增加 25.5%。2) 准平衡态(Stage-II)时,加入海洋环流的影响。在大气水汽输送的触发下,AMOC 崩溃,导致海温呈现"南暖北冷"的变化,温度梯度引起向南的经向风增加,大西洋及周边陆地大气环流和水汽输送场调整,尤其是北热带大西洋和北非西南部出现向南半球的水汽输送异常,导致北非地区水汽辐合略微减弱,降水比 Stage-I 减少,但是区域平均降水依然比真实地形情况下增加 4.3%,尤其是北部的撒哈拉沙漠区域,降水增加幅度甚至达到 400%~600%。

青藏高原隆升是重大的古气候事件之一,其对现代气候形成的影响已经得到广泛的研究。本研究的意 义在于利用反证法,从古气候的角度定量地揭示出,正是青藏高原在距今8~10百万年期间的隆升造成北非 降水的减少,并指出海洋环流在其演变过程中起着不可忽略的作用。另外,青藏高原的隆升与早期人科在 非洲的出现时间吻合,意味着青藏高原的隆升通过影响北非气候,间接地改变了人类演变进程。

本次试验虽然对青藏高原加剧非洲于旱的原因给出相对合理的定量化的解释,但也存在局限性。首先, 结果的可信度依赖于模式的准确度,与实际情况存在一定的偏差。例如,本次试验采用的分辨率较低,海洋 模式不能准确地模拟出拉布拉多海的对流。其次,除地形外,同时期的其他因素(CO₂ 浓度、轨道参数、植 被类型、海-陆分布以及太阳活动等)对北非干旱化也有不可忽略的影响,而模式中这些参数都是根据现代 气候设置的,与距今 8~10 百万年期间不完全一致。例如,模式中将 CO₂浓度设置成固定值 285 µL/L (工业 革命前的含量),实际上,根据 Lowenstein 等^[24]的研究,距今 8~10 百万年期间大气中 CO₂浓度并不等同于 这个数值。地中海、红海和特提斯海等洋盆 10 百万年前与现在差异较大,会在一定程度上影响海洋环流, 进而造成非洲气候变化。Zhang 等^[10]指出,特提斯海在晚中新世的收缩造成撒哈拉沙漠的干旱。并且,距 今 8~10 百万年期间植被类型、轨道参数以及太阳活动等要素与现代也有很大的差别。因此,需要强调的 是,本文只是探讨青藏高原隆升这一因素对北非干旱化的影响,而不是对真实世界中所有因素的综合讨论。

本文主要分析年平均气候态的变化,由于北非地区的降水有很强的季节特征^[25],并且青藏高原的热力 作用在冬季与夏季也不相同^[22],因此后续工作中将针对季节性变化特征进行更深入的探究。

致谢 研究工作得到北京大学气候与海-气实验室温琴、姚杰、李洋、韩晶、姜睿、王丽萍、邵星和 沈星辰同学的帮助,模式试验在国家超级计算天津中心天河一号超级计算机上完成,在此一并致以谢意。

参考文献

- Boos W R, Kuang Z. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. Nature, 2010, 463: 218–222
- [2] Wu G, Liu Y, Zhang Q, et al. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(4): 770–789
- [3] Ruddiman W F, Kutzbach J E. Forcing of late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American west. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1989, 94(D15): 18409–18427
- [4] Zhao P, Zhou X, Chen J, et al. Global climate effects of summer Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2019, 64(1): 1–3
- [5] Faure H, Faure-Denard L. Sahara environmental changes during the quaternary and their possible effect on carbon storage // Issar A S, Brown N. Water, environment and society in times of climatic change. Dordrecht: Springer, 1998: 319–322
- [6] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. Science, 1992, 255: 1663–1670
- [7] Swezey C S. Revisiting the age of the Sahara Desert. Science, 2006, 312: 1138–1139
- [8] deMenocal P B. Plio-pleistocene African climate. Science, 1995, 270: 53–59
- [9] Schuster M. The age of the Sahara Desert. Science, 2006, 311: 821–821
- [10] Zhang Z, Ramstein G, Schuster M, et al. Aridification of the Sahara Desert caused by Tethys Sea shrinkage during the Late Miocene. Nature, 2014, 513: 401–404
- Brunet M, Guy F, Pilbeam D, et al. A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. Nature (London), 2002, 418: 145–151
- [12] Yang H, Shen X, Yao J, et al. Portraying the impact of the Tibetan Plateau on global climate. Journal of Climate, 2020, 33(9): 3565–3583
- [13] 姚杰, 温琴, 沈星辰, 等. 青藏高原对全球大气温度和水汽分布的影响. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 46-52
- [14] 刘晓东,李力,安芷生.青藏高原隆升与欧亚内陆及北非的干旱化.第四纪研究,2001,21(2):114-122
- [15] Maffre P, Ladant J B, Donnadieu Y, et al. The influence of orography on modern ocean circulation. Climate Dynamics, 2017, 50(2): 1277–1289
- [16] Park S, Bretherton C S, Rasch P J. Integrating cloud processes in the community atmosphere model, version 5. Journal of Climate, 2014, 27(18): 6821–6856
- [17] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. The CCSM4 land simulation, 1850–2005: assessment of surface climate and new capabilities. Journal of Climate, 2012, 25(7): 2240–2260
- [18] Hunke E C, Lipscomb W H. CICE: the los alamos sea ice model, documentation and software user's manual, version 4.1 [EB/OL]. (2010.05.05) [2010.07.20]. https://github.com/CICE-Consortium/CICE-svn-trunk/releases/tag/cice-4.1
- [19] Smith R S, Gregory J M. A study of the sensitivity of ocean overturning circulation and climate to freshwater input in different regions of the North Atlantic. Geophysical Research Letters, 2009, 36(15): 66–78
- [20] Yang H, Li Q, Wang K, et al. Decomposing the meridional heat transport in the climate system. Climate Dynamics, 2015, 44(9/10): 2751–2768
- [21] Yang H, Wen Q. Investigating the role of the Tibetan Plateau in the formation of Atlantic Meridional Overturning Circulation. Journal of Climate, 2020, 33(9): 3585–3601
- [22] 叶笃正,罗四维,朱抱真.西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡.气象学报,1957,28(2):20-33
- [23] Yang H, Dai H. Effect of wind forcing on the meridional heat transport in a coupled climate model: equilibrium response. Climate Dynamics, 2015, 45(5/6): 1451–1470
- [24] Lowenstein T K, Demicco R V. Elevated Eocene atmospheric CO₂ and its subsequent decline. Science, 2006, 313: 1928–1928
- [25] Hulme M. Rainfall changes in Africa: 1931–1960 to 1961–1990. International Journal of Climatology, 1992, 12(7): 685–699