全球山脉隆升影响副热带干旱气候的模拟

苏宝煌^{1,3}, 姜大膀^{1,2,3*}, 田芝平¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

2017-12-06 收稿, 2018-02-10 修回, 2018-02-11 接受, 2018-04-11 网络版发表

国家自然科学基金(41572159, 41625018)资助

摘要 现代全球山脉主要形成于新生代, 对全球气候格局起重要作用. 本文利用全球海气耦合模式CESM, 设计并开展了3组不同地形隆升情景的数值试验, 集中研究了全球地形对干旱的影响. 在全球无地形试验中, 各大陆副热带干旱区总体呈现东西对称的纬向型带状分布. 随着全球地形隆升, 一方面, 亚洲东南部和中部、北美东南部和南美中部由干旱区变为湿润区, 而欧亚内陆、东非沿岸则由湿润区退化为干旱区; 青藏高原隆升的作用主要局限在欧亚大陆和非洲东部有限区域. 另一方面, 欧亚和非洲地形的存在缓解了北非西部沿岸及其北部的干旱化, 但在一定程度上加剧了北非中部、北美西部和南美西部的干旱环境; 而青藏高原隆升加剧了其西部包括中东、北非大部 and 东非的干旱化. 干燥度指数分析表明, 地形隆升主要通过改变降水影响干旱, 潜在蒸散发的作用其次, 二者对干燥度指数的贡献在空间分布格局上定性一致, 但定量上有所差别. 潜在蒸散发的影响因子中, 地形隆升主要通过改变相对湿度和近地面气温影响干燥度, 近地面风速的作用其次. 上述模拟结果在一定程度上与地质时期重建证据和以往大气模式结果定性一致, 表明其科学合理性及其古气候意义, 从而有助于加深理解全球地形的气候效应.

关键词 全球山脉, 青藏高原, 干燥度指数, 海气耦合模式

新生代以来的地质构造演化造就了当前遍布全球的主要山脉地形^[1,2], 山脉隆升被认为是长时间尺度气候格局发生变化的重要驱动因素^[3~5]. 与此同时, 新生代气候经历了以两极冰盖发育为主要标志的长期全球变冷和干旱化的演变过程^[6,7]. 大量地质记录表明, 新生代干旱环境的变迁与全球变冷、海陆分布变化及区域构造隆升皆有紧密的联系^[8~13]. 然而, 对上述长期气候驱动因素作用的认识至今尚未明确.

构造时间尺度上干旱环境的演变及其成因不仅是古气候模拟领域的热点, 也是难点. 大气环流模式是首先被用于探讨这一问题的重要手段和有效工具.

例如, 早期利用大气环流模式开展的“有山-无山”试验揭示, 青藏高原和北美西部山脉隆升能够合理解释中纬度欧亚内陆和美国西部干旱的成因及其维持机制^[14~16]. 有关青藏高原阶段性隆升的大气模式试验显示, 亚洲内陆干旱气候对青藏高原高度增长的响应是非线性的^[17,18]. 地质记录与数值模拟的对比研究进一步揭示了青藏高原区域隆升与构造尺度上的亚洲内陆干旱历史存在阶段性的耦合关系^[19]. 同样, 大量数值模拟试验表明东非高地、北美落基山脉、安第斯山脉隆升能够引起大气环流发生调整, 并通过“雨影效应”深刻影响其背风侧大陆区域的干旱

引用格式: 苏宝煌, 姜大膀, 田芝平. 全球山脉隆升影响副热带干旱气候的模拟. 科学通报, 2018, 63: 1142–1153

Su B H, Jiang D B, Tian Z P. Numerical simulation on the impact of global mountain uplift on the subtropical arid climate (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1142–1153, doi: 10.1360/N972017-01275

环境^[10,20-22]。

需要指出的是,早期的大气环流模式试验主要是通过给定海表温度来开展的,并未考虑地形改变引起的海表温度变化的作用。随着数值模式的不断发展,Kitoh^[23]模拟研究指出,与单纯大气环流模式试验相比,亚洲季风环流对地形隆升的响应在海气耦合模式试验中可能更为显著。Okajima和Xie^[24]则揭示,海气耦合模式中西北太平洋季风对全球地形的响应与单纯大气环流模式中的截然不同,并强调了海气相互作用引起的海表温度变化对季风具有放大作用。最近,多个海气耦合模式试验相继表明,现代全球地形的存在对于维持和加强现代北大西洋温盐翻转环流、减弱北太平洋翻转环流起着重要作用^[22,25,26]。然而,迄今鲜有基于海气耦合模式针对构造尺度干旱变化的模拟工作。

鉴于动力海洋引起的潜在气候反馈作用不可忽视,因此有必要利用海气耦合模式开展全球地形模拟试验,系统评估全球地形对于干旱环境的影响。为此,本文设计并开展了3组不同地形配置的海气耦合模式数值试验,利用国际上广泛使用的干燥度指数及相关诊断方法,结合已有的地质记录,集中讨论了全球地形、尤其是青藏高原隆升对于干旱的影响及其动力学机制。

1 模式、试验设计方案和分析方法

1.1 模式简介

所采用的模式为美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的通用地球系统模式——CESM,它由大气(CAM4)、陆地(CLM4)、海冰(CICE4)、海洋(POP2)和耦合器五大模块组成^[27]。考虑到地形模拟试验边界条件改动较大,模式达到相对稳定的气候平衡态需要上百年的积分时间,为了节约计算成本,本文采用CESM低分辨率版本开展数值试验。其中大气和陆地模块水平分辨率为T31(约 $3.75^{\circ} \times 3.75^{\circ}$),垂直方向为26层;海洋和海冰模块水平分辨率为 $g \times 3v7$ (约 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$),垂直方向共60层。该低分辨率版本模式已被广泛应用于全球和区域气候模拟,且表现出较好的模拟能力^[28,29]。

1.2 试验设计方案

如图1所示,共设计了3个不同地形试验情景,分别为现代地形试验(MP)、全球无地形试验(GM)以及无青藏高原试验(NP)。全球无地形试验是将全球山脉(包括南极冰盖和格陵兰冰盖)主体大于200 m的高度统一降低为200 m高度(图1(b))。与GM地形高度处理类似,NP试验在现代地形基础上降低了青藏高原

图1 (网络版彩色)现代地形(MP)(a)、无全球地形(GM)(b)和无青藏高原(NP)(c)试验中使用的地形边界条件

Figure 1 (Color online) The topographical conditions used in the present-day topography configuration (MP) (a), no global topography (GM) (b), and no Tibetan Plateau (NP) (c) experiments

主体高度(20°~60°N, 60°~110°E, 图1(c)). 为了突出地形高度改变的影响, 所有试验除了地形边界条件不同之外, 地表植被类型、反照率、地表径流等其他边界条件均采用模式默认的设置. 如表1所示, 所有试验的积分时间均大于或等于500个模式年, 且所有试验的海表温度和近地面气温均达到了准平衡态(图略). 下述分析采用的是模式积分达到平衡的最后100个模式年的气候态.

1.3 分析方法

采用干燥度指数(aridity index, AI)来定量研究地形对干旱的影响. 如式(1), AI是降水(PR)和潜在蒸散发(PET)的比值, 它是当前量化陆地干燥程度较为直接有效的指标, 广泛应用于干旱研究中^[30,31]. 潜在蒸散发通常采用彭曼公式来计算, 如式(2), 期间综合考虑了近地面温度、相对湿度、可用能量等多个因子的共同作用, 能够较好地反映不同下垫面热状况的蒸散发能力^[32]. AI值越小, 表征气候越干燥, 例如沙漠区的AI值接近于零. 参考联合国环境规划署划分标准^[30], 根据AI数值将干旱定性地划分为4个等级: AI<0.05表示极端干旱区, 0.05≤AI<0.2为干旱区, 0.2≤AI<0.5是半干旱区, 0.5≤AI<0.65则是半湿润干旱区. 为便于阐述, 下文将AI<0.65的区域统称为干旱区, AI≥0.65的区域则为湿润区.

$$AI = \frac{PR}{PET}, \quad (1)$$

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U)}, \quad (2)$$

其中, Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率(kPa °C⁻¹), R_n 为地表净辐射(W m⁻²), G 为土壤热通量(W m⁻²), γ 为温湿计算常数(kPa °C⁻¹), T 为近地面2 m气温, U 为地面2 m风速(m s⁻¹, 可由地面10 m风速换算而来), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa, 可由 e_s 和相对湿度RH计算得出).

表1 试验名称、边界条件和所对应的模拟时间长度

Table 1 Experiment name, boundary conditions, and running time

试验名称	地形	最大高度(m)	积分时间(模式年)	边界条件
MP	现代地形	4859.3	1000	各个试验地形边界条件如图1所示, 其他边界条件均一致
GM	全球无地形	200	1000	
NP	无青藏高原	200	500	

为了量化降水和潜在蒸散发对AI的相对作用, 可将AI的变化近似分解为如下两项, 即降水和潜在蒸散发的分别贡献^[31]:

$$\frac{\Delta AI}{AI} \approx \frac{\Delta PR}{PR} - \frac{\Delta PET}{PET}, \quad (3)$$

其中, 潜在蒸散发变化又可以进一步分解为近地面气温(T)、相对湿度(RH)、近地面风速(U)和可用能量($R_n - G$, 简称为 E)4个气象因子的单独作用. 本文采用Fu和Feng^[31]提出的一种简单有效计算每个因子相对贡献的方法, 即通过对潜在蒸散发算法进行单因子逐一扰动量化各因子的影响. 具体而言, 我们将潜在蒸散发函数关系式记为 $PET = F(T, RH, U, E)$ 、参照试验标记为“0”、强迫试验标记为“1”, 那么 T 和 RH 扰动对潜在蒸散发的贡献可分别由以下两式表达:

$$\Delta PET_T = F(T_1, RH_0, U_0, E_0) - F(T_0, RH_0, U_0, E_0), \quad (4)$$

$$\Delta PET_{RH} = F(T_1, RH_1, U_1, E_1) - F(T_1, RH_0, U_1, E_1). \quad (5)$$

U 的贡献计算与式(4)类似, 而 E 的贡献与式(5)类似. 最后, 通过以上表达式可以将式(3)进一步分解得到AI所有贡献项如下(已省略残余项):

$$\frac{\Delta AI}{AI} \approx \frac{\Delta PR}{PR} - \frac{\Delta PET_T}{PET} - \frac{\Delta PET_{RH}}{PET} - \frac{\Delta PET_U}{PET} - \frac{\Delta PET_E}{PET}. \quad (6)$$

2 试验结果分析

2.1 地形对AI等级类型的影响

由图2(a)所示, 现代地形MP试验模拟得到的全球干旱区分布与观测大体一致^[30]. 在无全球地形的GM试验中, 北半球的干旱区集中在副热带20°~40°N之间, 呈纬向带状均匀分布(图2(b)). 比较GM, NP和MP试验可见, 地形隆升明显改变了无地形情形下纬向对称的干旱分布格局. 首先, 亚洲内陆副热带干旱区所在位置的北边界不断向北扩展到中纬度, 同时其东部的干旱区显著收缩; 其次, 南美中部和北美大陆南部尤其是大平原地区的副热带干旱区明显缩小, 取而代之的是南美和北美季风湿润气候; 再者, 北非东海岸的湿润区逐渐转变为干旱区, 而南非大部分干旱区明显减少变为湿润区; 另外, 澳大利亚内陆干旱区范围在不同地形试验中变化很小.

在定量上, 相对于GM和NP试验, MP试验模拟得到的全球陆地干旱区面积分别减小了13%和3%, 这主要包括两方面的原因: 一方面, 由湿润区变为干旱区的面积均增加了5%, 主要源于亚洲内陆和东非干

图 2 MP (a), GM (b)和NP (c)试验中根据年平均干燥指数AI划分的全球干旱区类型分布,包括极端干旱区(Hyperarid; $AI < 0.05$)、干旱区(Arid; $0.05 \leq AI < 0.2$)、半干旱区(Semi-arid; $0.2 \leq AI < 0.5$)和半湿润干旱区(Sub-humid; $0.5 \leq AI < 0.65$),以及湿润区(Humid; $AI \geq 0.65$),由于本文仅研究干旱环境的变化,三个试验中均为湿润类型的区域并未显示。(d), (e)分别为全球干旱区和湿润区之间的转变对全球地形隆升和青藏高原隆升的响应,其中“Increased”表示从湿润区变为干旱区的面积占原有干旱区面积的百分比,即干旱区面积增加的百分比;而“Decreased”表示从干旱区变为湿润区的面积占原有干旱区面积的百分比,即干旱区面积减少的百分比

Figure 2 The geographic distribution of climate categories of dryland subtypes simulated by MP (a), GM (b), and NP (c) experiments, including hyperarid ($AI < 0.05$), arid ($0.05 \leq AI < 0.2$), semi-arid ($0.2 \leq AI < 0.5$), and sub-humid ($0.5 \leq AI < 0.65$) regions, as well as humid regions ($AI \geq 0.65$) with grid points being left blank when all three experiments simulated the same climate category of humid type. (d) and (e) represent changes of arid and humid subtypes in MP relative to GM and NP experiments, respectively. Blue represents increased dryland regions due to transitions from humid to arid subtypes, with the “Increased” bar denoting the percentage of increased dryland area; while yellow refers to decreased dryland regions due to transitions from arid to humid subtypes, with the “Decreased” bar denoting the percentage of decreased dryland area

旱区的扩张;另一方面,由于干旱区转变为湿润区的面积则分别增加了18%和8%,主要归因于大陆季风湿润气候区范围的增加(图2(d)和(e)).综上所述,全球地形隆升使得副热带干旱区面积总体减小.在区域尺度上,青藏高原隆升的影响主要集中在欧亚大陆和东非,对其他地区的作用很弱(图2(e)).

2.2 降水和潜在蒸散发对AI变化的贡献

前文提到AI的大小可以表征干旱度,因而如果不考虑不同干旱类型之间的转变,直接分析AI的数值差异即可定性评估地形对干旱度的影响.由图3(a)可以看出,全球地形隆升在一定程度上缓解了副热

带欧亚大陆、北非西北部沿岸、南美中部和北美东南部的干旱,但加剧了欧亚北部、北非中东部、北美西部及南美南部部分区域的干旱化.青藏高原隆升对AI的影响在高原以西和非洲北部与全球地形隆升效应应有显著差异(图3(a)和(b)),一方面,说明青藏高原以西的东非高地和伊朗高原等地形的存在缓解了中东、北非西海岸及其北部的干旱度;另一方面,尽管前文提及青藏高原隆升并未显著改变北非已有的干旱类型(图2(e)),但却加剧了其干旱化(图3(b)).

根据式(3)可进一步将AI变化近似分解为降水和潜在蒸散发的作用,显示降水对全球地形或单独青藏高原隆升的响应与AI总变化的相应空间格局在定

图3 MP试验相对于GM试验((a), (c), (e))和NP试验((b), (d), (f))的AI总变化($\Delta AI/AI$)以及降水变化的贡献($\Delta PR/PR$)和潜在蒸散发变化的贡献($-\Delta PET/PET$)

Figure 3 Changes of total AI ($\Delta AI/AI$) in MP relative to GM experiment ((a), (c), (e)) and NP experiment ((b), (d), (f)) and the two contributions (in percentage) due to changes in precipitation ($\Delta PR/PR$), and potential evapotranspiration ($-\Delta PET/PET$)

性和定量上均大体一致(图3(a)~(d)). 换言之, 降水变化主导了全球干旱对地形隆升的响应, 而潜在蒸散发的作用次之. 在全球地形隆升情景下, 潜在蒸散发变化对AI的贡献与降水的大体类似但幅度偏弱, 而在非洲大陆表现出明显的区域差异(图3(c)和(e)). 具体而言, 潜在蒸散发变化使得整个非洲大陆干旱以减弱为主(图3(e)); 而降水的作用一方面缓解了北非大西洋沿岸地区的干旱度, 另一方面则进一步加剧了北非内陆干旱化(图3(c)). 与全球地形隆升情景不同, 在青藏高原隆升情景下, 潜在蒸散发变化对AI贡献的空间分布与降水的十分相似(图3(d)和(f)), 但潜在蒸散发的干旱化作用主要局限在青藏高原以西和东非大陆, 这进一步说明了伊朗高原和东非高地等地形对非洲干旱的潜在影响. 最近有研究指出, 上述两大地形同时隆升对南亚季风加强有显著的调制作用^[33], 但对北非干旱环境的影响尚不明确, 因而有待下一步开展单独改变这些地形的数值试验来评估其对非洲干旱的可能影响.

综上所述, 地形隆升影响干旱主要是通过改变降水来实现的, 潜在蒸散发引起的变化量级较小且分布格局大体上与降水的相似.

2.3 降水变化及其环流解释

上一节讨论了降水和潜在蒸散发对AI的影响, 有必要进一步研究这两个因子变化的原因. 由于全球地形、尤其是青藏高原的隆升, 欧亚大陆南部季风环流加强, 因而从海洋带来充沛的水汽, 造成欧亚大陆南部降水出现正异常, 而其北部则为负异常(图4(a)和(b)). 首先, 欧亚地形隆升可通过改变气温和大气环流引起降水变化. 如图4(f)所示, 青藏高原隆升直接导致近地面温度大范围下降, 大气含水量减少; 同时, 高原的阻挡效应导致大气环流尤其是纬向西风减弱, 这两方面综合作用导致欧亚大陆北部的整层水汽输送减少(图5(c))、降水减少(图4(b)), 进一步造成AI减小(图3(b)), 干旱化加剧(图2(e)). 同时, 东非高地隆升通过“雨影效应”显著减少其背风侧降

图4 MP试验相对于GM和NP试验的降水PR、相对湿度RH、2 m气温T和2 m风速U的异常

Figure 4 Changes of precipitation (PR), relative humidity (RH), 2-m air temperature (T), and 2-m wind speed (U) in MP relative to GM and NP experiments

水, 对应东非沿岸大陆为明显的水汽辐散异常(图5(b))和下沉运动增强(图5(e)), 从而加剧其干旱度(图2(d)); 而其西侧迎风面则对应季风降水增加(图4(a)). 青藏高原隆升对更远陆地的干旱化影响主要局限于东非沿岸大陆(图4(b), 5(c)和5(f)). 这里需要指出的是, 全球地形隆升引起的东非降水减少明显大于青藏高原隆升的作用(图4(a)和(b)). 实际上, 前人研究也指出青藏高原和伊朗高原隆升都可以加强北非大陆的干旱化^[13,34,35], 因此东非大陆降水的减少可能是东非高地及其东面两个地形共同作用所致. 此外, 北美南部和南美中南部则因为地形的动力阻挡作用引起富含水汽的热带气流发生绕流, 从而引起局地水汽辐合加强、降水增加. 例如, 当南美安第斯山脉隆升之后, 南大西洋的东南信风经过安第斯山脉后发生绕流转而向南, 这一强大的地形阻挡将大量水汽输送到南美南部, 造成局地水汽辐合和垂直上升运动加强(图5(b)和(e)), 从而降水增加(图4(a)). 与此类

似, 北美西海岸的科迪勒拉山系的隆升使得其东部毗邻地区成为干旱少雨的雨影区, 而为北美南部大平原带来了充沛的水汽输送(图5(b)和(e))和季风降水(图4(a)), 使得该地区由干旱转为季风湿润型气候.

2.4 潜在蒸散发变化及其贡献因子

虽然潜在蒸散发不是影响干旱的主要因子, 但由于其本身变化是多因素联合所致, 因而有必要定量研究其各贡献因子之间是如何协同作用的. 图6为相对湿度、近地面2 m气温、2 m风速和可用能量变化对AI总变化的贡献百分比. 总体上, 相对湿度和近地面气温是潜在蒸散发变化的主因, 近地面风速次之, 可用能量影响最小. 首先, 相对湿度变化通常与降水变化同步, 降水正异常往往伴随着更大的相对湿度. 随着全球地形隆升, 欧亚大陆南部、北美南部和南美南部季风降水增加(图4(a)), 对应相对湿度增大(图4(c)), 造成相对湿度对AI的贡献相应增加(图6(a)). 其

图 5 MP试验中年平均气候态的垂直积分水汽输送通量(矢量)及其散度(阴影填色; 负值表示辐合)(a)以及它们相对于MP试验(b)和NP试验(c)的变化; 其中垂直积分从地面向上积分到 300 hPa, 已假定液态水密度为 10^3 kg m^{-3} 将散度单位转换为 mm d^{-1} . (d)~(f)同(a)~(c), 但为垂直速度, 其中负值代表上升运动

Figure 5 The simulated annual climatology of vertically integrated moisture flux (vector) and its divergence (shaded; negative values represent convergence) in MP experiment (a) and its changes relative to the GM experiment (b) and NP experiment (c). The vertical integration is performed from the surface to 300 hPa, and the units of divergence has been converted to mm d^{-1} assuming the density of liquid water as 10^3 kg m^{-3} . (d)~(f) The same as (a)~(c), but for vertical velocity, with negative values denoting ascending motions

次, 近地面气温变化对地形隆升的响应主要包括两方面. 一方面, 已往的数值模拟研究指出, 地形隆升导致的降水正异常往往伴随着云量增加, 从而造成降温^[23]. 例如, 随着全球地形隆升, 亚洲南部和东部、北美东南部降水增加, 使得气温降低; 而欧亚大陆北部降水减少, 气温升高(图4(e)和(f)). 另一方面, 地形隆升还可以通过温度垂直递减率使得近地面强烈降温. 因此, 全球山脉隆升区和降水正异常区均对应温度的负异常, 从而抑制潜在蒸散发, 进而对AI产生正贡献(图6(c)和(d)). 此外, 地形对经向和纬向气流有显著的摩擦阻挡, 从而引起全球陆地近地面风速减弱(图4(g)和(h)). 一般而言, 风速和蒸发量具有正相关关系, 风速越大, 蒸发越强. 相应地, 全球陆地近地面风速大范围减弱, 导致蒸发减弱, 最终对AI产生正作用(图

6(e)和(f)). 综上所述, 全球地形、包括青藏高原隆升对干旱影响的首要因子是降水, 随后依次为相对湿度、近地面气温和风速, 而可用能量的作用很弱.

3 讨论

先前已有改变地形的数值模拟试验工作, 其中多是采用早期的大气环流模式来开展的, 因而有必要将其与本文试验进行比较. 虽然在定量上存在差别, 但全球地形隆升情景下各大陆降水异常的分布同以往仅单独考虑青藏高原隆升^[15,16,36]、非洲高地隆升^[10,20,37]、南美安第斯山脉隆升^[21,38,39]和北美落基山脉隆升^[40]所得的降水变化是定性一致的, 这也反映出本文试验在一定程度上合理再现了各地形对区域降水的影响. 另外需要指出的是, 本文研究是基于海

图6 MP试验中相对湿度RH、2 m气温 T 、2 m风速 U 和可用能量 E 相对于GM试验((a), (c), (e), (g))和NP试验((b), (d), (f), (h))的变化对AI总变化的贡献百分比

Figure 6 Contribution terms to total AI changes due to changes in relative humidity (RH), 2-m air temperature (T), 2-m wind speed (U), and available energy (E) in MP relative to GM ((a), (c), (e), (g)) and NP experiment ((b), (d), (f), (h))

气耦合模式开展的, 模拟得到的干旱变化是地形隆升的直接效应叠加在动力海洋作用上的综合结果. 已有模拟试验表明, 去除全球地形会明显改变大尺度海洋和大气环流^[22,25,26], 同时也伴随着海表温度的大幅调整. 这必然会产生一个新的问题: 剧烈的大洋环流和海洋温度的响应是如何进一步反馈作用于全球干旱? 为了回答上述问题, 基于本文开展的海气耦合模式试验, 下一步有待相应开展改变地形的大气模式试验, 通过试验间对比来检查海洋反馈对全球干旱的调制作用.

需要提及的是, 本文仅采用两组理想化试验来模拟干旱对地形隆升的响应, 显然这种简单的地形

设置情景与地质证据显示的新生代以来各大陆地形的隆升时间、青藏高原生长方式等存在不同. 尽管如此, 作为敏感性试验, 我们仍然可以用该模拟结果与地质时期区域干旱演化记录进行定性比较, 从而探讨其古气候意义. 大量地质证据表明, 亚洲干旱环境经历了从早-中渐新世由行星风系控制的東西向带状分布格局向季风主控下现代湿润环境格局的演变^[11,41~43]. 本文试验表明, 青藏高原主体隆升是造成这种干湿格局转变的重要原因之一, 这同早期大气模式试验得到的结论是一致的^[44,45]. 其次, 氧同位素记录显示, 整个中新世北美东部和大盆地地区的干旱环境受到西边内华达山脉隆升导致的“雨影效应”

的影响^[46,47],这在本文全球地形隆升模拟试验中也有体现(图4(a)和(b)).最近的重建工作表明,早在3500万年前的晚始新世落基山中部的隆升可以解释自身及其东边毗邻大平原地区显著的干旱化^[48],本文试验中也在一定程度上反映了该现象(图4(a)).再者,我们的模拟显示全球地形隆升导致北美大平原由副热带气候控制的干旱区转变为季风湿润区(图2(d)),该湿润区在现代观测资料中也是存在的^[49].事实上,已有的相关地质证据和数值试验均表明,北美西部山脉的隆升促进了北美古季风气候的形成^[50,51].此外,与本文模拟一致(图2(d)),大量地质记录同样揭示安第斯山的隆升使得其以东区域气候格局经历了从副热带干旱气候向季风湿润气候的过渡^[52~54],而东非高地的存在则引起其沿岸由湿润区转为干旱区^[10,55].最后需要指出的是,因为计算资源的限制,本文所采用的模式水平分辨率较低,该分辨率虽然能够合理刻画大尺度地形分布,但是总体相对平滑,对真实地形的高度和起伏特点均刻画不足.譬如,该粗分辨率版本模式不能很好地描述南美和北美大陆西岸的狭长陡峭山脉,因而未能模拟出其背风侧大范围的干旱区(图2(d)).因此,未来有必要

利用更高分辨率模式开展试验,以得到与实际更为接近的干旱分布,从而更好地理解地形对干旱的影响,推进地质记录和模拟试验的相互比较和验证.另一方面,本文数值试验采用的是现代边界条件下的理想化试验,但正如前文所述,新生代全球环境经历了由“温室期”向“冰室期”的过渡;而其之前的中生代,如白垩纪则为高温温室气体浓度、且海陆和地形分布显著不同于现代.这就产生了另外一个待解问题:地形隆升在不同纬度位置和暖期气候背景下对陆地干旱环境的影响是否会有不同.

4 结论

本文使用全球海气耦合模式,开展了3个不同地形边界条件的数值试验,模拟了全球地形和青藏高原对干旱的影响.所得主要结论如下:全球地形隆升导致副热带干旱区面积总体减小,其中扩展的干旱区面积要小于增加的湿润区面积;青藏高原隆升造成欧亚大陆干旱区和湿润区之间发生了显著的转换,同时加剧了北非干旱化;基于干燥度指数的定量研究表明,地形隆升影响全球干旱的首要贡献因子是降水,而后依次为相对湿度、近地面气温和风速.

参考文献

- 1 Hay W W, Soeding E, DeConto R M, et al. The Late Cenozoic uplift—Climate change paradox. *Int J Earth Sci*, 2002, 91: 746–774
- 2 Potter P E, Szatmari P. Global Miocene tectonics and the modern world. *Earth Sci Rev*, 2009, 96: 279–295
- 3 Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain-ranges and global climate change—Chicken or egg. *Nature*, 1990, 346: 29–34
- 4 Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 1992, 359: 117–122
- 5 Zachos J C, Kump L R. Carbon cycle feedbacks and the initiation of Antarctic glaciation in the earliest Oligocene. *Glob Planet Change*, 2005, 47: 51–66
- 6 Miller K G, Wright J D, Fairbanks R G. Unlocking the Ice House: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion. *J Geophys Res*, 1991, 96: 6829–6848
- 7 Zachos J C, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, 292: 686–693
- 8 Cane M A, Molnar P. Closing of the Indonesian seaway as a precursor to East African aridification around 3–4 million years ago. *Nature*, 2001, 411: 157–162
- 9 Hartley A J. Andean uplift and climate change. *J Geol Soc Lond*, 2003, 160: 7–10
- 10 Sepulchre P, Ramstein G, Fluteau F, et al. Tectonic uplift and eastern Africa aridification. *Science*, 2006, 313: 1419–1423
- 11 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159–163
- 12 Miao Y F, Herrmann M, Wu F L, et al. What controlled Mid-Late Miocene long-term aridification in Central Asia?—Global cooling or Tibetan Plateau uplift: A review. *Earth Sci Rev*, 2012, 112: 155–172
- 13 Zhang Z S, 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
- 14 Kutzbach J E, Guetter P J, Ruddiman W F, et al. Sensitivity of climate to Late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American West: Numerical experiments. *J Geophys Res*, 1989, 94: 18393–18407
- 15 Manabe S, Broccoli A J. Mountains and arid climates of middle latitudes. *Science*, 1990, 247: 192–195

- 16 Broccoli A J, Manabe S. The effects of orography on midlatitude northern hemisphere dry climates. *J Clim*, 1992, 5: 1181–1201
- 17 Liu X D, Yin Z Y. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Paleogeogr Paleoclimatol Palaeoecol*, 2002, 183: 223–245
- 18 Jiang D, Ding Z, Helge D, et al. Sensitivity of East Asian climate to the progressive uplift and expansion of the Tibetan Plateau under the Mid-Pliocene boundary conditions. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 709–722
- 19 An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62–66
- 20 Slingo J, Spencer H, Hoskins B, et al. The meteorology of the Western Indian Ocean, and the influence of the east African highlands. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2005, 363: 25–42
- 21 Garreaud R D, Molina A, Farias M. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 292: 39–50
- 22 Maffre P, Ladant J B, Donnadiou Y, et al. The influence of orography on modern ocean circulation. *Clim Dyn*, 2018, 50: 1277–1289
- 23 Kitoh A. Effects of mountain uplift on East Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM. *J Clim*, 2004, 17: 783–802
- 24 Okajima H, Xie S P. Orographic effects on the northwestern Pacific monsoon: Role of air-sea interaction. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L21708
- 25 Fallah B, Cubasch U, Prömmel K, et al. A numerical model study on the behaviour of Asian summer monsoon and AMOC due to orographic forcing of Tibetan Plateau. *Clim Dyn*, 2016, 47: 1485–1495
- 26 Sun Y, Yang H J. Coupled model studies of the topography effect on the global meridional overturning circulations (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Peking*, 2015, 51: 735–744 [孙瑜, 杨海军. 全球地形影响大气和海洋经圈环流的耦合模式研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51: 735–744]
- 27 Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. The community climate system model version 4. *J Clim*, 2011, 24: 4973–4991
- 28 Shields C, Bailey D, Danabasoglu G, et al. The low-resolution CCSM4. *J Clim*, 2012, 25: 3993–4014
- 29 Tian Z P, Jiang D B, Zhang R, et al. Long-term climate simulation of CCSM4.0 and evaluation of its performance over East Asia and China (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2012, 36: 619–632 [田芝平, 姜大膀, 张冉, 等. CCSM4.0 的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估. *大气科学*, 2012, 36: 619–632]
- 30 Middleton N, Thomas D. *World Atlas of Desertification*. London: Hodder Arnold Publication, 1992
- 31 Fu Q, Feng S. Responses of terrestrial aridity to global warming. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 7863–7875
- 32 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998
- 33 Zhang R, Jiang D, Zhang Z S, et al. The impact of regional uplift of the Tibetan Plateau on the Asian monsoon climate. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2015, 417: 137–150
- 34 Rodwell M J, Hoskins B J. Monsoons and the dynamics of deserts. *Q J R Meteorol Soc*, 1996, 122: 1385–1404
- 35 Liu X D, Li L, An Z S. Tibetan Plateau uplift and drying in Eurasian interior and North Africa (in Chinese). *Quat Sci*, 2001, 21: 114–122 [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: 114–122]
- 36 Liu X, Guo Q, Guo Z, et al. Where were the monsoon regions and arid zones in Asia prior to the Tibetan Plateau uplift? *Natl Sci Rev*, 2015, 2: 403–416
- 37 Prömmel K, Cubasch U, Kaspar F. A regional climate model study of the impact of tectonic and orbital forcing on African precipitation and vegetation. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2013, 369: 154–162
- 38 Ehlers T A, Poulsen C J. Influence of Andean uplift on climate and paleoaltimetry estimates. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 281: 238–248
- 39 Poulsen C J, Ehlers T A, Insel N. Onset of convective rainfall during gradual Late Miocene rise of the central Andes. *Science*, 2010, 328: 490–493
- 40 Ting M, Wang H. The role of the North American topography on the maintenance of the Great Plains summer low-level jet. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 1056–1068
- 41 Liu T S, Zheng M P, Guo Z T. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia (in Chinese). *Quat Sci*, 1998, 18: 194–204 [刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. *第四纪研究*, 1998, 18: 194–204]
- 42 Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, et al. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Clim Past*, 2008, 4: 153–174
- 43 Sun X J, Wang P X. How old is the Asian monsoon system?—Palaeobotanical records from China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2005, 222: 181–222
- 44 Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat? *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2007, 245: 317–331

- 45 Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. Impacts of tectonic changes on the reorganization of the Cenozoic paleoclimatic patterns in China. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 257: 622–634
- 46 Crowley B E, Koch P L, Davis E B. Stable isotope constraints on the elevation history of the Sierra Nevada Mountains, California. *Geol Soc Am Bull*, 2008, 120: 588–598
- 47 Mulch A, Sarna-Wojcicki A M, Perkins M E, et al. A Miocene to Pleistocene climate and elevation record of the Sierra Nevada (California). *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 6819–6824
- 48 Fan M, Heller P, Allen S D, et al. Middle Cenozoic uplift and concomitant drying in the central Rocky Mountains and adjacent Great Plains. *Geology*, 2014, 42: 547–550
- 49 Vera C, Higgins W, Amador J, et al. Toward a unified view of the American monsoon systems. *J Clim*, 2006, 19: 4977–5000
- 50 Sewall J O, Sloan L C. Come a little bit closer: A high-resolution climate study of the early Paleogene Laramide foreland. *Geology*, 2006, 34: 81–84
- 51 Fricke H C, Foreman B Z, Sewall J O. Integrated climate model-oxygen isotope evidence for a North American monsoon during the Late Cretaceous. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 289: 11–21
- 52 Rohrmann A, Sachse D, Mulch A, et al. Miocene orographic uplift forces rapid hydrological change in the southern central Andes. *Sci Rep*, 2016, 6: 35678
- 53 Kleinert K, Strecker M R. Climate change in response to orographic barrier uplift: Paleosol and stable isotope evidence from the late Neogene Santa María Basin, northwestern Argentina. *Geol Soc Am Bull*, 2001, 113: 728–742
- 54 Strecker M R, Alonso R N, Bookhagen B, et al. Tectonics and climate of the southern central Andes. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 747–787
- 55 Wichura H, Bousquet R, Oberhäusli R, et al. Evidence for middle Miocene uplift of the East African Plateau. *Geology*, 2010, 38: 543–546

Summary for “全球山脉隆升影响副热带干旱气候的模拟”

Numerical simulation on the impact of global mountain uplift on the subtropical arid climate

Baohuang Su^{1,3}, Dabang Jiang^{1,2,3*} & Zhiping Tian¹

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

The global cooling, regional tectonic uplift, and land-sea redistribution have long been considered as the main drivers of the long-term evolution of dry climates during the Cenozoic. However, their relative importance is still a matter of hot debate. The effect of mountain uplift on forming the global mid-latitude dry climates has been widely investigated by lines of geologic evidences and numerical experiments based on atmospheric general circulation models. These previous simulation results are directly derived from the mountain climatic effects, without considering the superimposed effects due to sea surface temperature changes caused by mountain uplift. In order to address this issue, the impact of global topography on the arid environment is investigated by three numerical experiments of different mountain uplift scenarios performed with a global coupled atmosphere–ocean model CESM. The CESM consists of atmosphere, land, ocean, and sea ice components that exchange state information and fluxes through a coupler. The low-resolution version of CESM with less computationally expensive is used for this study. In addition, an aridity index is further taken to measure the global dryland area driven by mountain uplift. The aridity index is defined as the ratio of annual precipitation to potential evapotranspiration. The latter represents the evaporative demand of the atmosphere, which is composed of four meteorological parameters including surface air temperature, relative humidity, wind speed, and available energy. The relative contribution of these five factors to the aridity index is further evaluated to identify the underlying potential mechanism in response to the mountain uplift.

By using the three simulations with modern topography, without global topography, and without the Tibetan Plateau, it is accessible to examine how the global mountain uplift affects the factors controlling the aridity index. In the global no-topography experiment, the subtropical arid zones in all continents exhibit an overall symmetrically zonal distribution. As the global mountain uplifts, on the one hand, southeastern and central Asia, southeastern North America, and central South America vary from arid to wet areas, while inland Eurasia and the coast of East Africa degenerate from humid to arid areas. The Tibetan Plateau uplift mainly affects the limited areas of Eurasia and eastern Africa. On the other hand, the topography of Eurasia and Africa relieves the aridification of coastal and northern North Africa, but to a certain extent, exacerbates the arid environment in central North Africa and western North and South America. The Tibetan Plateau uplift aggravates the drought climate on its western side, including the Middle East and most parts of North and East Africa. As a whole, the global mountain uplift leads to an overall decrease in the subtropical arid areas, with the expanded arid areas being less than the increased wet areas.

The quantitative analysis of aridity index indicates that, the global topography uplift affects the terrestrial drought climate primarily by changing precipitation, and then by modifying the potential evapotranspiration. Their contributions to the aridity index are qualitatively consistent in the spatial pattern but different in magnitude. Among the impact factors of the potential evapotranspiration, the uplift of the terrain affects the aridity mainly through changes in relative humidity and near-surface air temperature, and then near-surface wind speed. To some extent, these simulation results agree qualitatively with the evidence of reconstructed geological records and previous atmosphere-only model results, indicating that the present study has scientific and palaeoclimate significance and thus helps to deepen the understanding of the climatic effect of global topography.

global mountain, Tibetan Plateau, aridity index, coupled atmosphere-ocean model

doi: 10.1360/N972017-01275