

青藏高原隆起及海陆分布变化对 亚洲大陆气候的影响

陈隆勋^① 刘骥平^① 周秀骥^① 汪品先^②

(^①中国气象科学研究院, 北京 100081; ^②同济大学海洋地质开放实验室, 上海 200092)

摘要 我们利用经过改进的 NCAR CCM1 动力气候模式并综合出一个 40~50MaB.P. 的下垫面情景, 进行了海陆分布和 SST 分布由古代到现代、青藏高原由隆起初期、隆起到现代高原一半和现代高度共 5 个情景的数值试验。结果表明, 从古代到现代, 模拟的中国气候是变冷的并且东部变湿而西北部变干。青藏高原的隆起是模拟出来的中国变冷的主要原因。青藏高原从隆起初期到隆起到现代高度一半时期中国地区降水是增加的, 但当继续隆起后降水却有所减少, 尤其是中国西北地区。本文还对海陆分布和 SST 分布变化以及青藏高原隆起对季风环流的影响作了分析。

关键词 青藏高原隆起 古海陆分布 古亚洲气候

1 引言

青藏高原东西横贯 30 个经度, 南北纵跨 15 个纬度, 面积达 240 万平方公里, 耸立于我国西南, 是世界上最高的高原, 它对全球气候必然产生极大影响。研究现代青藏高原以及它的隆升过程对气候的影响, 一直是国内外气象学家和地质学家最为关心的科学问题之一。

早在 50 年代, 叶笃正等^[1~3], 陶诗言和陈隆勋^[4]以及邬鸿勋和陈隆勋^[5]就已研究了现代青藏高原对亚洲大气环流的影响。他们发现它对原已存在的冬季高空两支西风急流起稳定作用并促使它们在下流汇合成全球最强的高空急流; 夏季则使副热带高空反气旋稳定于其上空, 在其南侧形成东风急流。青藏高原还对冬季 NW 季风的形成和夏季 SW 季风深入大陆以及季风季节变化的突变性起重要作用。

对于青藏高原隆起对中国气候变化的影响, 中国地质学家和地理学家作了大量研究, 得到了许多优秀成果^[6~9]。总的来说, 青藏高原地区在 40~50MaB.P. 的始新世中期还是古特提斯洋地区, 亚洲、欧洲和印度次大陆尚未合并。那时的中国地区气候以干热为主, 副热带森林可分布于 40°N 以北, 这是研究青藏高原隆起的第一个重要时期。大约在 40MaB.P. 以后, 主要在 25MaB.P., 三块大陆合并, 古特提斯洋消失, 青藏高原北侧开始隆

第一作者简介: 陈隆勋 男 66岁 研究员 大气环流学与数值模拟专业 E-mail: zhouxj@sun.ihep.ac.cn

1999-03-20收稿, 1999-05-10收修稿稿

起,随后高原地区全部成为大陆。这个时期中国气候已比上一时期冷,这是青藏高原隆起的第二个重要时期。青藏高原隆起过程是十分复杂的,李吉均等^[10]、孙鸿烈等^[7]、施雅风^[11]、李吉均和方小敏^[9]的研究结果表明,有3次隆起和2次被夷平过程,但前2次隆起不到海拔2000m。最后一次隆起开始于3.4MaB.P.,约在2.5MaB.P.到达海拔2000m以上,该时期中国大陆降水增加,但气候继续变冷。随着高原继续隆起,虽然气候继续变冷,但降水却由前期的增加变为减少,还出现随后的第四纪大冰期。高原北侧沙漠开始形成,中国黄土也于2.6MaB.P.前后开始发育^[6]。因而青藏高原隆起到海拔2000~2500m(亦即相当于现代高度一半)也是一个对气候变化有重要影响的时期。最后一个时期是现代青藏高原,它平均海拔高度已达4000m以上,正在继续隆起。

本文目的是用动力气候模式模拟青藏高原隆起以及海陆分布变化对亚洲大陆,特别是中国大陆气候的影响。这方面,D.G.Hahn和S.Manabe^[12]作了开创性研究,指出无全球地形时,夏季风难以深入大陆并且没有季节突变。随后,J.E.Kutzbach^[13],A.J.Broccoli和S.Manabe^[14]作了进一步研究。他们的许多工作是研究全球地形变化的影响。本文拟专门研究青藏高原隆起对气候变化的作用。根据中国地质学家和地理学家的研究结果,我们准备研究以下4个时期。1)青藏高原未隆起前时期(GPSSTP),我们定为40~50MaB.P.。该时期为古海陆分布(GP),表面海温(SST)亦为古代分布(SSSTP)。为了研究SST的作用,我们还另外作了古代海陆分布下(GP)和现代海温(SSMT)配合的数值试验(GPSSMT)。2)青藏高原开始隆起时期(NTP),此时期假设为现代海陆分布和现代SST分布,但青藏高原高度假定为海拔500m。估计此时期可能为25~40MaB.P.。3)青藏高原隆起到现代高度一半时期(1/2MTP),这是一个关键时期,可能是青藏高原对中国气候影响转变的临界高度时期^[15]。4)现代青藏高原时期(MTP),这是本文的控制试验,由于有现代观测资料可以对模拟结果进行验证,因而可以表明模拟的可信度。

2 模拟设计

根据引言中的论述,我们作了以下5个数值试验:

(1) 现代青藏高原试验(MTP) 现代海陆分布和青藏高原地形以及现代植被,这是一个控制试验,即把模式调整到适合现代观测的最佳状态。

(2) 青藏高原隆起到现代高度一半的试验(1/2MTP) 只调整青藏高原各地高度到试验MTP设置的现代高度一半。植被则采用东侧地区同高度的植被分布。其它与试验MTP一致。

(3) 青藏高原开始隆起时期的试验(NTP) 在试验中设现代海陆分布和现代SST分布,但青藏高原地区地形高度取海拔500m。现代的青藏高原的许多周围地区地形高度超过海拔500m,为此我们在此试验中扩大了青藏高原地区,把40~120°E范围内(如阿富汗,中国的秦岭、四川、河南和河北)高于500m的地形均削减到海拔500m。若边界再有大于海拔500m高度的地形,则在边界地区采用平滑方法使地形高度连续变化。其植被也采用东西两侧同高度的现代植被。

(4) 古代海陆和古代SST时期的试验 我们综合了国内外研究结果,作成图1。该图大致代表40~50MaB.P.的古海陆分布、古植被分布和古SST分布。可以看到,此时欧

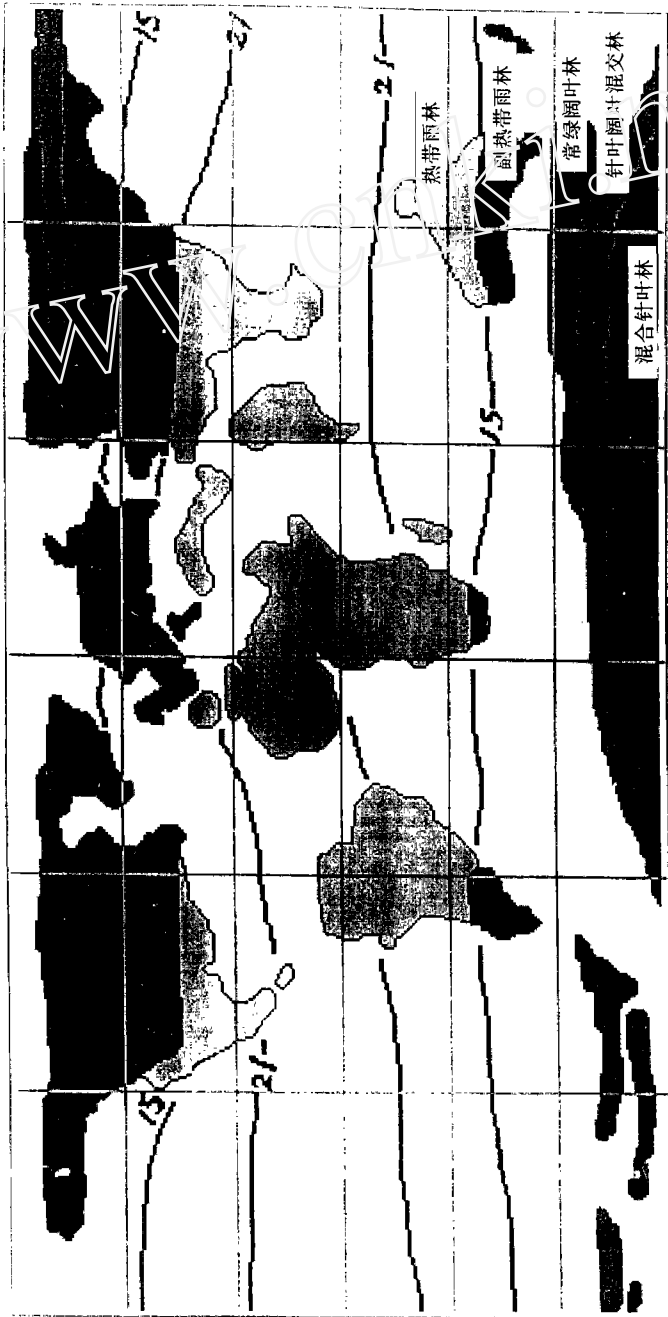


图1 始新世中期(约40~50MaB.P.)海陆分面和下垫面概况
15和21分别为SST/°C

Fig.1 The patterns of land-ocean and vegetation and SST during the period of 40~50Ma B.P.

洲、亚洲和印度 3 个大陆尚未合并,从亚洲大陆植被分布来看其气温远比现代为暖,副热带森林北界可到 60°N ,以此推测当时地表气温比现代暖 15°C 左右。北半球 SST 分布在温带也比现代暖,但热带比现代冷,所以南北海温差比现代小。图中 SST 为年平均值,为了讨论该时期的季节变化,我们利用现代的各地各月 SST 季节变化值,加到古代 SST 年平均值上,做出有季节变化的古代各月 SST 值。

(5) 古代海陆分布和现代 SST 组合的试验 (GPSSTM) 为了讨论 SST 对古代气候的作用,我们也作了古代海陆和植被分布 (即 GP) 下 SST 改换成现代分布 (SSTM) 的试验。GPSSTP 与 GPSSTM 结果的比较可以用来讨论 SST 变化对气候变化的作用,同时也可用来推测古代海陆分布的作用。由于篇幅限制,只在必要处对这个试验结果加以介绍,而没有给出图件。

我们采用美国 NCAR 的 CCM1 动力气候模式作以上 5 个试验。在试验中对原模式作了以下改变: 1) 模式中原设置的青藏高原地形十分平滑,用实际地形作了改进,青藏高原最高高度也由原来的海拔 $4\ 000\text{m}$ 改为海拔 $4\ 600\text{m}$ 左右。此外,中国大陆植被分布也由中国资料作了改动; 2) 对模式中对流参数化方案及计算大尺度稳定降水的某些参数作了调整,以使控制试验的模拟降水分布更接近中国 $1961\sim 1990$ 年平均的气候观测值^[16]; 3) 根据近几年在西藏设立的热量平衡观测站资料推算的青藏高原地区滞性系数 C_d 、感热和潜热交换系数 C_h 、 C_q 观测计算值远比模式中计算值小,因此调整了其中参数使其计算平均值在 $5\times 10^{-3}\sim 4\times 10^{-3}$ 之间。这个改进调节了青藏高原及其邻近地区的地表气温计算值,更接近实际气候观测值。

在实际积分中,试验 1~3 的全球能量积分曲线到第 3 年已达稳定,但试验 4 要到第 5 年才见稳定,为此对各个试验一律积分 6 年,取最后 2 年平均作为结果。

3 海陆变化和青藏高原隆起对年降水量变化的影响

图 2 表示试验 MTP, GPSSTP 的年降水量模拟值分布和它们与 NTP, 1/2MTP 结果的差值。

对现代海陆、SST 和青藏高原下模拟的年降水量分布 (MTP, 图 2a), 可以看到在印度东北和孟加拉湾存在一强降水中心,并扩展到中国大陆,因而形成中国大陆年降水量分布呈自 SE 向 NW 减少的特征,这种分布与实际观测到的气候的平均气温分布是相似的。中国地区 30°N 以南实际的年降水约在 $1\ 500\sim 2\ 000\text{mm}$ 之间,而图 2a 模拟值为 6mm/d ,即年降水量约为 $2\ 190\text{mm}$,模拟值与观测值之间是比较接近的,但前者略为偏大。此外,实测值在南海和西太平洋西部近赤道处有两个降水中心,中心约 $3\ 500\text{mm}$,而模拟结果也有两个中心,但数值过大。大致说,模拟结果就定性分布而言是可信的,中国大陆地区模拟与观测的数值也十分相近。对古代海陆分布 (GPSSTP, 图 2f) 模拟结果表明,只有在赤道处有大的降水。在亚洲大陆上,仅仅在其西南部 (相当于现今中亚到中国西部) 有 4mm/d 降水,其余地区降水小于 2mm/d ,是相当干旱的。这与地质时期估测的气候的平均气温分布是接近的。从 GPSSTP 到现代 (MTP) 之间降水差值分布 (图 2e) 来看,中国大陆中部和东部降水是增加的,平均年降水量增加 $700\sim 1\ 400\text{mm}$ 以上,但西北地区的北部是减少的,减少达 700mm 。图 2b~d 是 3 个时期年降水量差值分布,可用来说明这种变化发生在那一个

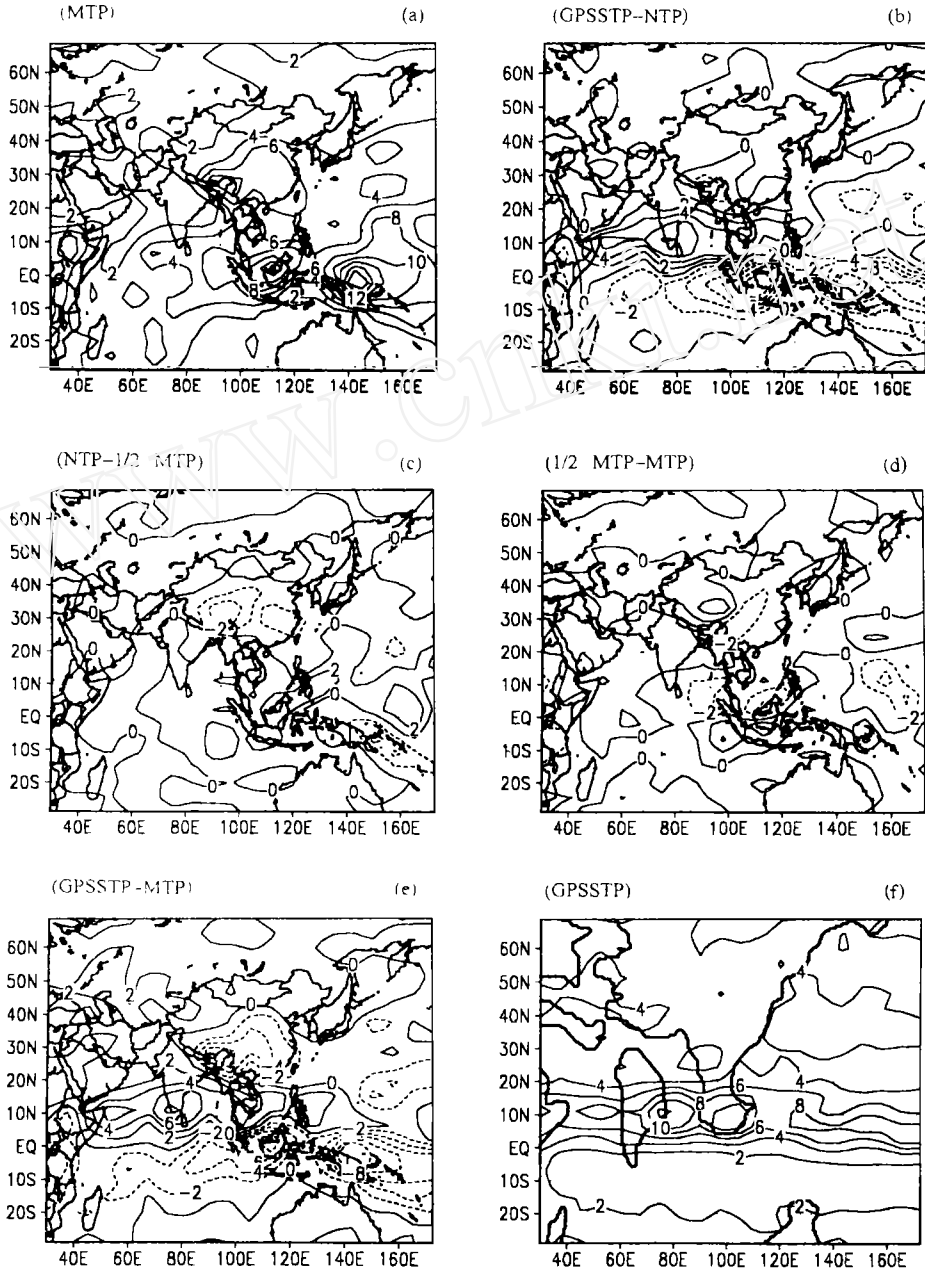


图2 青藏高原隆起和海陆分布变化对亚洲地区年降水量(mm/d)变化的影响

(a)现代海陆、现代 SST 和现代青藏高原下模拟的年降水量分布 (MTP) (b)青藏高原未隆起时古代海陆及 SST 和现代海陆及 SST 分布之间模拟的年降水量差值分布 (GPSSTP-NTP) (c)现代海陆及 SST 分布下青藏高原未隆起 (NTP) 和隆起到现代高度一半时 (1/2MTP) 模拟的年降水量差值分布 (NTP-1/2MTP) (d)现代海陆及 SST 分布下青藏高原隆起一半和隆起到现代高度时模拟的年降水量差值分布 (1/2MTP-MTP) (e)古代海陆及 SST 分布 (GPSSTP) 和现代海陆及 SST 分布之间模拟的年降水量差值分布 (GPSSTP-MTP) (f)古代海陆和 SST 分布下模拟的年降水量分布 (GPSSTP)

Fig.2 Effect of QTP uplift and land-ocean pattern change on Asian yearly precipitation (mm/d)

时期。图 2b 代表的情景是青藏高原还未隆起,但从古海陆和 SST 到现代海陆和 SST 已改变,我们看到只有在中国南部和四川等地降水有少量的增加,其余地区均未有明显变化,这表明图 2e 表现的降水明显增加并不发生在这两个时期之间,亦即海陆和 SST 变化并未影响中国降水有很大变化。青藏高原隆起后,从无高原(NTP)到高原隆起至现代高度一半(1/2MTP)时,从其差值分布(NTP-1/2MTP,见图 2c)可以看到,除中国西北的北部略有减少外,其余地区降水有很大增加,降水增加中心主要集中在青藏高原 80°E 以东的中国西部和中部以及华东和中南地区。中国西北地区的东部(包括甘肃、青海、宁夏和内蒙古西部)以及相当于现今戈壁沙漠地区降水也有增加。从青藏高原隆起至现代高度一半(1/2MTP)到现代高原(MTP)时期的年降水量差值分布(1/2MTP-MTP,见图 2d)来看,整个中国西部(包括青藏高原地区)降水明显减少,东部大部分地区降水也减少,只有云南、贵州和四川降水仍在增加。

上述结果表明,从古代到现代,中国降水增加并不发生在从古海陆及 SST 到现代海陆和 SST 的变化时期,而是发生在青藏高原隆起时期。但在整个隆起时期中,只有在隆起开始至隆起到现代高原高度一半的期间,降水是增加的。隆起一半以后降水反而减少。因而,对中国降水变化而言,开始隆起到隆起至现代高度一半时期是一个十分重要的时期, J. E. Kutzbach 等^[15]称这个时期的高度为“临界高度”,是有一定根据的。但对于降水发生如此重大变化的原因,除了已提出的该时期有利于气流爬坡并使季风越过高原到达西部而发生降水的动力原因外,我们认为还应该有力原因。在高原隆起到现代高度一半以前,高原与周围邻近地区尚未形成明显的热力差异。而当高原继续隆起以后,除了爬坡降水减少的动力作用外,此时高原与邻近地区已形成明显的热力差异,造成夏季高原上升并在周围地区下沉,高原自身形成独特的高原季风环流,阻止南侧的印度夏季风进入高原,使热带季风强对流发生在 23°N 附近的印度季风槽中。只有当印度季风槽破坏,从正常位置推进到高原边缘而与高原季风系统相联,印度发生季风雨中断,青藏高原才能有南侧的夏季风进入,引起降水^[17]。

从以上结果可以推测,中国西北地区在高原隆起到现代高度一半前并不缺乏降水。现代的西北干旱区(如塔克拉玛干沙漠)应发生在青藏高原隆起到现代高度一半以后,中国黄土的堆积也应发生在此时期之后。

4 海陆变化和青藏高原隆起对年平均气温变化的影响

依图 2,我们也作了各个时期模拟的年平均地表气温分布及其差值分布,用来讨论海陆变化和青藏高原隆起对亚洲,特别是中国地区年平均气温变化的影响(图 3)。

对现代情景(MTP,图 3a),模拟的年平均气温分布与实际观测到的气候平均气温分布是十分相近的。就数值而言,模拟的中国地区年平均气温值(在 $\sigma = 0.991$ 高度)为 7.42°C,由 $\sigma = 0.991$ 订正到 $\sigma = 1$ (即地面)需加 0.5°C,即模拟的地表气温应为 7.94°C,而 1961~1990 年间中国气温平均值为 8.4°C^[16]。二者相差 0.46°C,模拟值与观测值是十分接近的,表示控制试验的气温结果是比较可信的。

对古代情景(GPSSTP,图 3f),亚洲大陆等温线呈纬向分布,它们与现代情景的差值(GPSSTP-MTP,图 3e)表明,自古代情景到现代情景,青藏高原地区气温变冷 15~25°C,

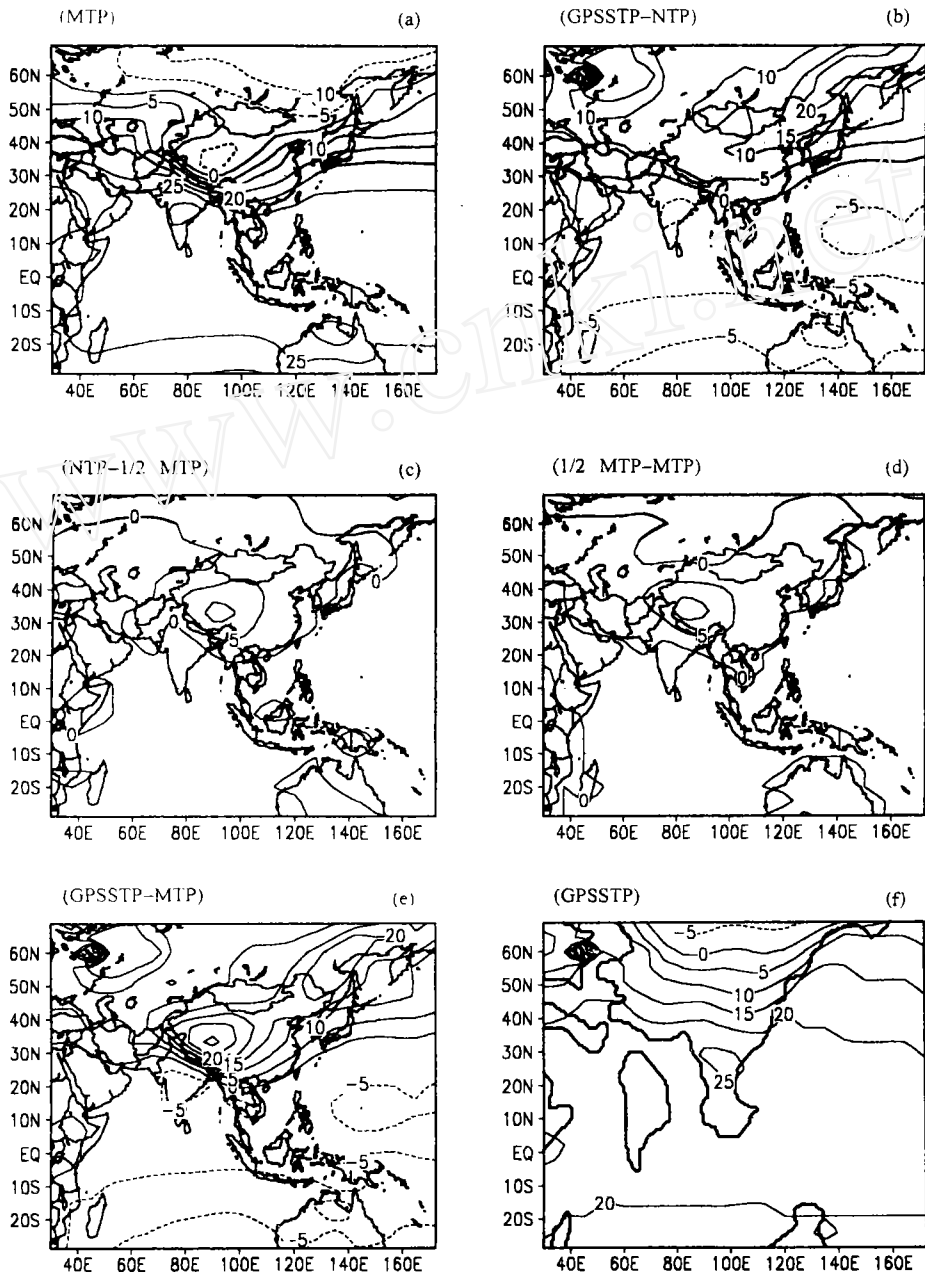


图3 青藏高原隆起和海陆分布变化对亚洲地区年平均气温变化的影响

3a~f说明与图2a~f相同,但为年平均气温/℃

Fig.3 The same as Fig.2 but for yearly temperature/℃

而其东侧大陆则变冷 10~15℃,中国西北地区变冷 15℃,这与地质估算变冷从定性来说是相近的^[9]。这种变冷发生的时期可见图 3b~d。从古海陆和 SST 情景 (GPSSTP)到现代海陆和 SST 分面 (NTP),青藏高原均未隆起,而差值分布 (GPSSTP-NTP, 见图 3b)表明,中

国东部变冷约 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$, 西部地区变冷约 5°C 。因而从古代到现代情景(见图 3e)的模拟变冷, 中国西部地区主要发生在青藏高原的隆起而东部地区至少有 70% 发生在青藏高原隆起以后。在现代海陆和 SST 分布下, 高原自隆起开始到隆起至现代高度一半情景下, 两个时期气温差值分布(NTP-1/2MTP, 见图 3c)为青藏高原变冷 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$, 中国东部地区变冷 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$, 西北变冷 5°C 。而自 1/2MTP 到现代高原, 其气温差值(1/2MTP-MTP, 见图 3d)也与前一时期相似, 即青藏高原地区变冷 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$, 东部变冷 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$, 西北变冷 5°C 。

从以上讨论可以对模拟结果作如下结论: 从古代情景(GPSSTP)到现代情景(MTP), 青藏高原地区气温模拟变冷 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$, 高原以东地区模拟变冷约 10°C , 中国西北地区变冷 15°C 。其中青藏高原隆起对变冷的影响在青藏高原地区是主要的原因, 但在中国西北及东部地区的影响分别为 10°C 和 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。因而 70% 变冷发生于青藏高原隆起以后, 而其余的 30% 应归因于在青藏高原未隆起下自古代海陆和 SST 情景(GPSSTP)变到现代海陆和 SST 分布的变化(MTP)。其次, 从模拟来看, 青藏高原自隆起开始到现代, 对中国大陆气温变冷的影响似乎是线性的, 看不到有一个“临界高度”的存在。

需要注意的是, 以上的讨论只是因青藏高原隆起而模拟出来的结果。自 GPSSTP 到 MTP, 全球一直处于波动降温过程, 根据海底有孔虫遗体积 $\delta^{18}\text{O}$ 资料, 高纬地区自 50MaB.P. 以来气温大约下降 15°C , 其中多次回暖也出现多次冰期。因而青藏高原的隆起可能是降温的重要原因之一, 但不是唯一的。我们的结果只是表示青藏高原隆起可以使中国地区变冷。

5 青藏高原隆起和海陆变化对低空季风变化的影响

图 4 是模拟的 4 个情景的 1 月 850hPa 风场。对现代情景(MTP, 图 4a), 1 月 850hPa 上中国大陆地区出现了 NW 冬季风, 到达黄海后向南到 22°N 转向为 NE 冬季风(现代气候流场的转向纬度在 850hPa 上为 25°N , 而在海上为 27°N), 随后经南海赤道到达南半球。模拟的 1000hPa 流场(图略)上, NW 季风出现地区更偏内陆(即更偏西)。在 NW 季风之东, 850hPa 上出现一东亚大槽。这一些特征与实际观测到的现代流场是十分相似的^[17]。但在古海陆和古 SST 分布下(GPSSTP, 图 4d), 亚洲大陆及以东海洋上空只存在 WNW 风, 没有出现冬季 NW 季风, 东亚大槽非常弱, 也没有出现热带地区的 NE 季风, 相反的反而出现在 SW 风。从 GPSSTP 流场减 MTP 流场的差值流场分布来看(图略), 在现今的 NW 季风出现地区出现了 SE 差值风气流场, 南海出现强 SW 差值风气流。在古海陆分布下若换成现代 SST 分布而作数值模拟(即 GPSSTM, 图略), 模拟出的流场在中纬度($30\sim 50^{\circ}\text{N}$)与 GPSSTP 流场一样出现比较平直的风, 但在 20°N 以南出现热带 NE 冬季风。因而可以推测, 冬季在热带出现的现代低空 NE 季风是现代 SST 和大陆热力差作用下形成的, 不是青藏高原隆起的结果。

在现代海陆和 SST 分布但青藏高原未隆起时模拟的流场(NTP, 图 4c), 中纬度上空的流场与 GPSSTP 以及 GPSSTM 流场十分相似, 主要为偏西风, 在东亚沿海有 WNW 风, 尚未形成现今的 NW 季风。但热带已出现 NE 季风, 因而与 GPSSTP 流场不同, 但与 GPSSTM 流场相似, 表明在古代 SST 分布下不能形成热带冬季 NE 季风, 只有转变为现代 SST 分布并与大陆热力场配合才产生 NE 季风。在高原隆起到现代高度一半时, 模拟的流

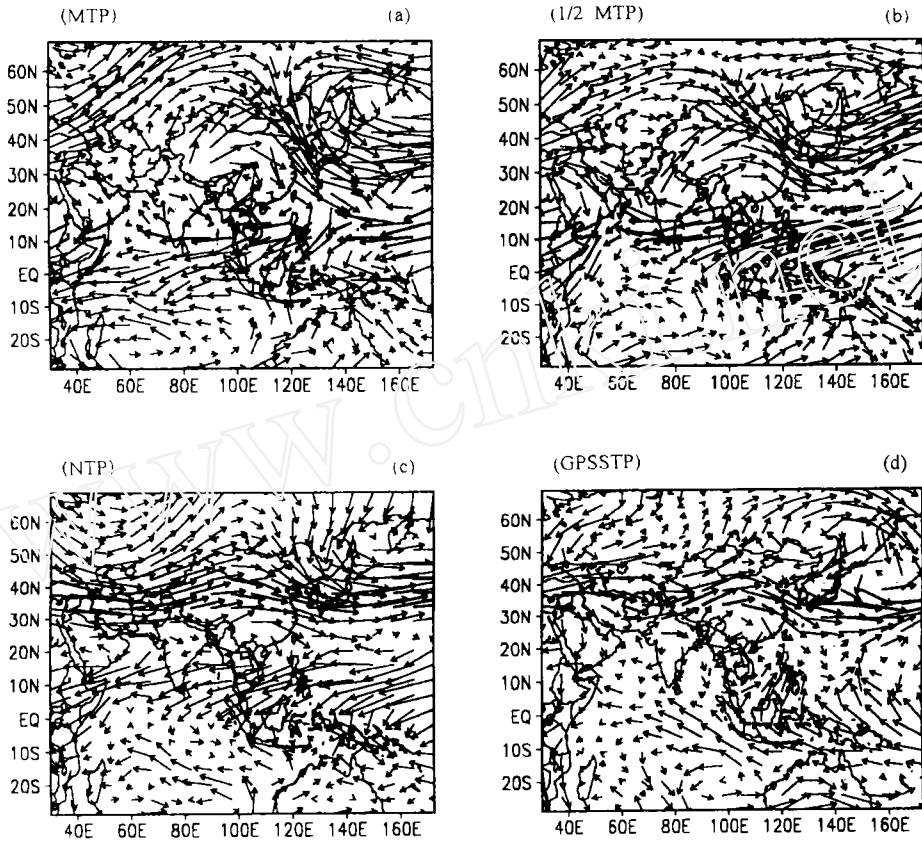


图4 青藏高原隆起和海陆变化对1月850hPa环流的影响

(a)现代海陆、SST分布和青藏高原地形下模拟的流场 (b)现代海陆和SST分布下青藏高原隆起到现代高度一半时模拟的流场 (c)现代海陆和SST分布下无青藏高原时的模拟流场 (d)古代海陆和SST分布下的模拟流场

Fig.4 Effect of QTP uplift and land-ocean pattern change on January 850 hPa flow field

场(1/2MTP, 图4b)已在东亚沿海出现明显的NW冬季风,并且已与热带NE季风连接。但此时期的NE季风强度还未达到现代NE季风强度。我们还可以看到,此时(见图4b)在中国西部出现来自阿拉伯海并转向而成的SW风,这种SW风在NTP和MTP流场中并未出现,这表明当高原隆起到现代高度一半时,东部出现NE季风,西部出现SW风,这有利于西部冬季降水,这与中国西部只在该时期降水最多(见图2c)是一致的。当高原进一步隆起时,中国西部冬季850hPa上的SW风迅即消失。

从上述可见,冬季中国大陆出现的NW季风主要是青藏高原隆起的作用,隆起越高NW季风越强。而热带NE季风则主要是SST由古代分布转变为现代分布影响下形成的。但青藏高原越隆起,NE季风的偏北分量越大,表明高原的隆起对NE季风强度也起一定作用。此外,青藏高原隆起到现代高度一半时,中国西部地区冬季850hPa出现SW风并能深入到中国大陆西部,有利于降水。当高原进一步隆起后,这支SW风随即消失。

现在来讨论夏季(7月)低空 850hPa 流场模拟结果(图 5)。对现代情景(MTP, 图 5a), 模拟的流场表示在热带存在完整的 SW 季风。存在两支明显的越赤道气流, 一支在非洲东岸, 即索马里低空越赤道气流, 另一支在 105°E 附近进入南海。在 1000hPa 低空(图略), 这两支越赤道气流明显地划分了印度季风环流系统和东亚季风环流系统。这一些特征与现代实测的气候流场是十分一致的^[17]。我们看到, 模拟的 MTP 流场夏季 SW 季风可进入中国大陆中部, 在东部并可进入中国东北地区。在古代情景(GPSSTP, 图 5d)下, 亚洲大陆上空夏季只存在具有偏北分量的西风, 在这种流场下中国大陆必然是干旱的。在古代情景下, 在 100°E 以西, 偏北风一直扩展到 $10\sim 15^{\circ}\text{N}$, 以南为 SW 风。 100°E 以东的东亚大陆则为偏北风, SW 风自南海向东扩展到西太平洋。这表明在古海和 SST 海陆分布下, 夏季 SW 季风不能深入到大陆。青藏高原开始隆起时(即现代海陆和 SST 分布但青藏高原尚未隆起, NTP)模拟的流场(图 5c)表明, 热带地区已出现 SW 季风, 但偏南分量不强, 只有在阿拉伯海和南海东部地区才有较强偏南分量, 并且只在东亚大陆东岸可以伸入到大陆。在高原隆起到现代高度一半时(1/2MTP, 图 5b), 热带 SW 季风更强, 100°E 以东 SW 季风可伸入到中国大陆 35°N , 随后转向深入到中国西北地区东部。

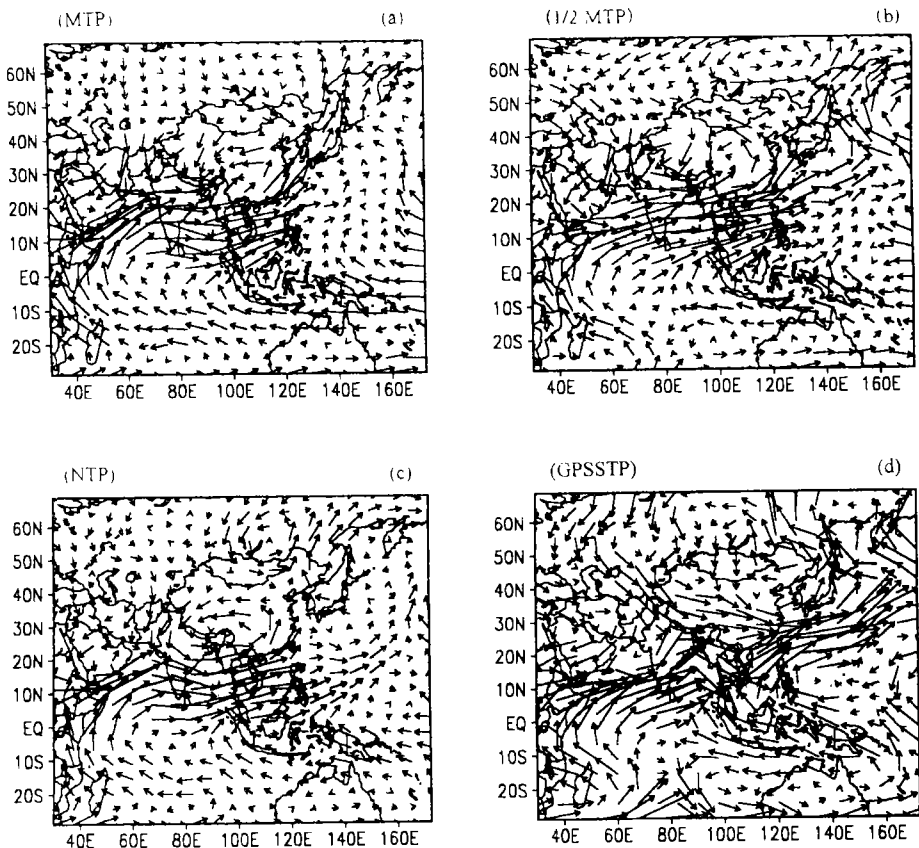


图5 青藏高原隆起和海陆变化对7月850hPa环流的影响

5a~d说明与图4a~d一致

Fig.5 Same as Fig.4 but for July at 850 hPa

从以上讨论可以看到,在古代情景下,夏季热带 SW 季风只出现在 15°N 以南,到现代海陆和 SST 情景才扩展到 $20\sim 25^{\circ}\text{N}$,但此时期偏南分量仍然不强。只有在青藏高原隆起以后,SW 季风才迅速增强并得以深入中国大陆。在高原隆起到现代高原一半时,到达深入大陆西部的最强时期。当高原继续隆起,SW 季风虽然比以前强,但反而难以深入到大陆西部。从强度变化而言,与冬季 NE 季风强度一直随高原隆起而增强是一致的。

6 青藏高原隆起和海陆变化对高空环流变化的影响

仿照图 4 和图 5,我们作了图 6 和图 7,以讨论青藏高原隆起和海陆变化对 1 月和 7 月 200hPa 环流的影响。图 6 为 1 月模拟结果。对现代情景 (MTP, 图 6a),在 1 月欧亚大陆 200hPa 上空模拟的流场上明显地存在两支西风急流,一支在 35°N 以南,另一支在 40° 以北。在欧洲也同样存在两支急流并延伸到青藏高原南北两侧,然后在下游汇合。这表明,这两支急流并不是青藏高原影响下形成的,但青藏高原对这两支急流起稳定作用和促使它们在下游汇合,并形成东亚大槽。早在 50 年代,邬鸿勋和陈隆勋^[5]已指出这个事实。这些特征与现代的实际观测结果十分一致^[17]。对古代情景 (GPSSTP, 图 6d),模拟的流场难

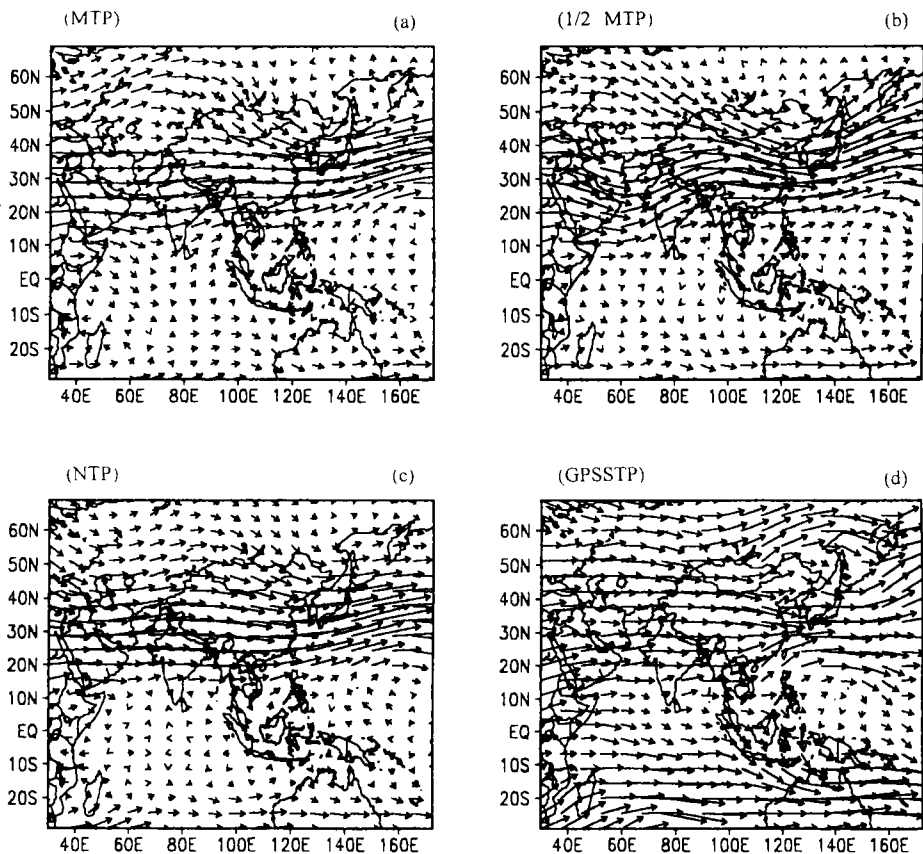


图6 青藏高原隆起和海陆分布变化对亚洲1月200hPa流场的影响

6a~d说明和图4a~d相同,但为1月200hPa

Fig.6 The same as Fig.4 but for 200 hPa

于在大陆上空分出两支高空西风急流, 只在 120°E 以东才出现, 但这两支急流不是汇合而是扩散分离, 所以不能形成东亚大槽。GPSSTP 和 MTP 情景的差值流场 (GPSST-MTP, 图略) 在 MTP 的东亚大槽地区出现一个差值反气旋, 在 $20\sim 40^{\circ}\text{N}$ 间出现差值东风, 表明 GPSSTP 情景的副热带西风急流远远弱于 MTP 情况。

在青藏高原开始隆起时期 (NTP, 图 6c), 大陆上空两支西风急流开始明显起来, 在东亚沿岸出现浅低压槽, 这是海陆热力差异形成的。当隆起到现代高原高度一半时 (1/2MTP, 图 6b), 高空两支急流已表现得十分清楚, 但两支急流汇合和东亚大槽出现的经度要比现代情景 (MTP) 偏西。此外, 在阿拉伯海出现南支急流槽, 槽前偏南气流一直扩展到中国西部, 表明该时期在中国西部, 即使在冬季也能得到更多降水所需的水汽。随着高原进一步隆起, 这支偏南气流随即消失。以上结果表明, 高空冬季两支急流在高原隆起初期即已出现, 但随着高原隆起, 两支急流强度增强并稳定于青藏高原南北两侧, 同时在下游汇合, 并加强而形成东亚大槽。

图 7 为 7 月的 200hPa 流场模拟结果。在现代情景下 (MTP, 图 7a), 青藏高原上空出现一个高空反气旋, 高空反气旋轴约位于 35°N , 南侧出现两支东风急流, 一支于非洲越赤

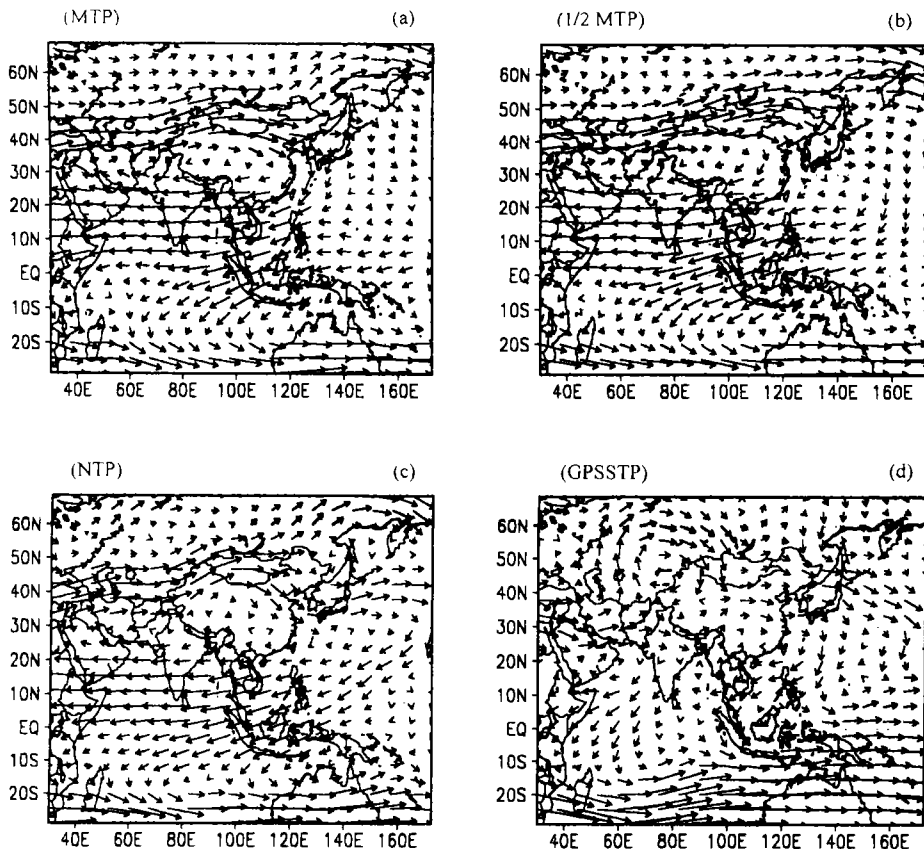


图7 青藏高原隆起和海陆分布变化对亚洲7月200hPa流场的影响

7a~d说明见图5a~d, 但为7月200hPa

Fig.7 The same as Fig.5 but for 200 hPa

道,另一支于南海上空越赤道,这与现在观测到的气候流场十分相似^[17]。在古代情景下(GPSSTP,图7d),高空高压带非常弱且出现于约 20°N ,在中国华南和阿拉伯海上空分别有两个弱反气旋中心。从总体看,副热带反气旋带并不明显。到高原开始隆起时期(NTP,图7c),高空反气旋带明显地出现,在西太平洋(约 32°N)和高原上空(90°E)出现两个反气旋中心。因而高空反气旋带及青藏高原上空出现反气旋,不能完全归因于青藏高原隆起,现代海陆和SST分布也起一定作用。

在青藏高原隆起到现代高度一半时(1/2MTP,图7b),西太平洋高空反气旋已消失,高空高压带上只出现一个反气旋中心并且稳定于高原上空。1/2MTP与MTP两个模拟流场十分一致。因而青藏高原隆起的作用不在于形成高空副热带高压带,相反的在于加强高空副热带高压带并使反气旋中心稳定于高原上空。

7 结论和讨论

我们进行了5个数值试验,分别代表从古代到现代的海陆和SST分布以及青藏高原不同隆起阶段的情景。从上述模拟的结果来看,可以得到以下几点结论:

(1) 由于模式的改进,我们模拟出了接近于中国现代观测到的气候情景。这一点是重要的,这使其它情景的模拟结果有一个可以令人信赖的基础。

(2) 模拟的40~50MaB.P.时期中国是一个干热的气候。该时期中,除了西部部分地区外,中国其它地区降水很少。从古代情景到青藏高原隆起初期(现代海陆和SST,青藏高原地形高度为海拔500m),模拟的中国地区降水并未明显增加。但自隆起初期到隆起至现代高度一半时期,模拟的中国年降水量增加很多。随着高原继续隆起,中国地区除云南、贵州和四川地区外,模拟的降水反而减少,尤以西部地区降水减少最多。这表明,就降水而言,可能存在一个“临界高度”,这个临界高度大致为现代青藏高原海拔高度的一半。我们认为,该时期以后,除了爬坡作用减弱并且在正常情况下季风不能越过高原到达中国西部而使降水减少外,还存在青藏高原继续隆起后形成与周围地区的热力差异,这种热力差异使中国西部地区降水迅速减少。从模拟来看,我国西部地区干旱和沙漠主要应是高原隆起到1/2现代高度以后才形成的。

(3) 从模拟来看,40~50MaB.P.到现代,中国地区气温明显变冷,青藏高原地区变冷 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$,中国东部变冷约 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$,西北部变冷 15°C 。其中,自古代到青藏高原隆起初期,中国西部地区变冷 5°C ,东部地区变冷 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$,而自高原隆起初期到现代,由于青藏高原的隆起,青藏高原地区变冷约 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$,中国东部变冷 10°C 。因而,从模拟来看,就地形变化影响和海陆分布变化的影响变冷而言,中国变冷主要发生于青藏高原隆起时期,高原隆起使中国气候变冷。对青藏高原隆起造成中国气候变冷而言并未有一个“临界高度”,变冷是随着隆起而线性变冷的。

本文只讨论海陆分布和高原隆起的影响。事实上,中国地区40~50MaB.P.以来的变冷因子十分复杂,我们讨论的因素只是其中之一。

(4) 在古代情景下,东亚地区冬季不可能出现现代中纬低空NW季风和热带NE季风,高空也不可能出现明显的两支西风急流及其在下游汇合。夏季的低空SW风只在 15°N 以南出现,高空也未见明显的副热带高压带。当情景自古代变到隆起初期,由于海陆分

布和海陆热力差异的作用, 冬季开始出现弱的中纬 NE 风和比较明显的热带 NE 季风, 高空出现弱的两支西风急流及东亚沿岸弱的东亚大槽。夏季则出现弱的低空 SW 季风和高空反气旋。但此时的 SW 季风只在中国沿海可以深入大陆, 并且高空反气旋存在多个中心。这表明高空副热带高压带弱。随着高原隆起至现代高度一半时, 由于青藏高原隆起的作用, 夏季低空出现了明显的 SW 季风并可以深入到中国大陆, 由 SW 风转向的 SE 风可以深入到中国西部地区。高空副热带高压带中反气旋中心已开始稳定到高原上空, 冬季东亚地区的低空 NW 季风和 NE 季风已十分明显, 高空两支西风急流和东亚大槽也已形成。我们还可看到, 只有这个时期, 冬季可以出现来自阿拉伯海的偏南气流并深入到达中国西部。而在夏季, 深入大陆的 SW 季风可以转向深入到中国西部, 这可能是造成该时期降水最丰富的环流条件。

从总的结果来看, 青藏高原隆起对中国气候影响主要是起了变冷作用, 在隆起至初期到隆起现代高度一半期间, 中国地区, (尤其是西部地区) 降水大量增加, 但继续隆起后中国地区降水除云南、贵州和四川地区外, 反而迅速减少, 尤其是中国西北地区。

我们的模拟结果是初步的。虽然得到的结果令人鼓舞, 但我们用的是粗分辨率(菱形 15 波)大气模式并且也不是海-地-气耦合的, 所以许多条件的设置(如 SST)是人为的, 不能得到自然而细致的结果。我们期望用一个高分辨率海-地-气耦合模式并嵌套一个细网格的区域气候模式, 再次进行青藏高原隆起对气候影响的数值模拟。另外, 在我们的模拟中, 没有考虑天文因子的变化, 因而难以模拟出诸如冰期的出现。这是今后需要改进的。我们期望中国地质学家、地理学家和气象学家联合起来利用数值模拟工具开拓这方面的研究, 使中国地区地质时期的气候情景有一个理论上的认识。

参 考 文 献

- 1 Staff members of the section of synoptic and dynamic meteorology, Institute of Geophysics and Meteorology. On the general circulation over eastern Asia I. *Tellus*, 1957, 9(4): 432~446
- 2 Staff members of the section of synoptic and dynamic meteorology, Institute of Geophysics and Meteorology. On the general circulation over eastern Asia II. *Tellus*, 1957, 10(1): 60~75
- 3 Staff members of the section of synoptic and dynamic meteorology, Institute of Geophysics and Meteorology. On the general circulation over eastern Asia III. *Tellus*, 1957, 10(3): 299~312
- 4 陶诗言, 陈隆勋. 夏季亚洲上空大气环流的结构. *气象学报*, 1957, 28(2): 234~246
- 5 邬鸿勋, 陈隆勋. 冬季亚洲上空大气环流的结构. *气象学报*, 1957, 27(4): 361~382
- 6 刘东生等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 1~481
- 7 孙鸿烈主编. 青藏高原的形成演化. 上海: 上海科技出版社, 1996. 152~184
- 8 施雅风, 汤懋苍, 冯玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(3): 263~271
- 9 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 1998, 43(15): 1569~1574
- 10 李吉均, 文世宣, 张青松等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. *中国科学*, 1979, 6: 608~616
- 11 施雅风. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 浙江大学百年校庆两院院士科学报告会. 杭州: 浙江大学出版社, 1997. 67~79
- 12 Hahn D G, Manabe S. The role of mountain in South Asian monsoon circulation. *Journal of Atmospheric Science*, 1975, 32: 1515~1541
- 13 Kutzbach J E. Sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in southern Asian and the American west. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 18393~18407

- 14 Broccoli A J, Manabe S. The effect of orography on midlatitude northern hemisphere by climates. *Journal of Climate*, 1992, 5: 1182~1201
- 15 Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *Journal of Geology*, 1993, 101:177~190
- 16 Chen L X, Zhu Wenqin, Wang Wen *et al.* Studies on climate change in China in recent 45 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 12(1): 1~17
- 17 陈隆勋,朱乾根,罗会邦等.东亚季风.北京:气象出版社,1991. 189~191

IMPACT OF UPLIFT OF QINGHAI-XIZANG PLATEAU AND CHANGE OF LAND-OCEAN DISTRIBUTION ON CLIMATE OVER ASIA

Chen Longxun^① Liu Jiping^① Zhou Xiuji^① Wang Pinxian^②

(^① Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; ^② Ministry of
Education Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

Using an improved CCM1/NCAR climate dynamic model and a combination distribution of land-ocean-vegetation during 40~50Ma B.P. (Fig. 1), a series of numerical experiments representing different stages of the Qinghai-Xizang Plateau (QTP) uplifting and different land-ocean distributions are designed to assess the influence of the plateau uplifting and land-ocean distribution variation on Asian climate changes. The simulated results of the control test are close to the present Chinese climatic observations. During 40~50 Ma B.P., the simulated Chinese climate is dry and hot along with little rainfall in the most region aside from some of West China. In the course from the ancient stage to the initial stage of the QTP uplift, the simulated rainfall in China does not obviously increase, but from initial uplift to half height of modern QTP the simulated yearly precipitation amplifies in China (Fig. 2). However, the rainfall, particularly in the west part of China, decreases except for Yunnan and Guizhou and Sichuan as the QTP continues to rise, which suggests that in so far as rainfall is concerned, there possibly exists a 'critical height' that is as high as half of the present QTP. From 40~50 MaB. P. to modern time, the temperature of China obviously becomes cold (Fig. 3). There does not exist a 'critical height' in temperature. Under the ancient condition, in the eastern Asia there are no modern low-level winter monsoon (Fig. 4) in mid-latitudes and monsoon in tropics and two upper-level strong westerly jets and the merge of the two jets downstream of QTP (Fig. 5). In summer the SW monsoon enters into the mainland and changes

direction and then reaches West China, resulting in the circulation condition which is helpful to much precipitation (Fig. 6, 7). The effect of the plateau uplift on the Chinese climate predominantly makes the place colder and from the early stage to the half height the rainfall in China remarkably amplifies (specially in the west part of China). However, with the continuing uplift the rainfall quickly decreases, particular in the northwest of China.

Key words uplift of Qinghai-Xizang Plateau, paleo-land and ocean distribution, Asian paleo-climate

《第四纪研究》征订启事

《第四纪研究》自 1989 年创办发行以来已出版了 43 期(其中,1989 年因改换印刷厂只出版 3 期)。本刊得以顺利出版发行是与第四纪工作者和国内外广大订户、读者的大力支持和热情关怀分不开的,编辑部特致谢意。

《第四纪研究》经获准 1992 年起通过北京报刊发行局向全国发行。邮发代号 82-428。凡需本刊的读者可通过当地邮电局订购。如需 1998 年以前的期刊仍请汇款至编辑部购买(邮汇地址:北京 9825 信箱《第四纪研究》编辑部,邮政编码:100029)。1989~1990 年各期刊物每期定价 5.65 元;1991~1996 年每期定价 6.00 元;1997~1999 年每期定价 12.00 元。

本刊力求为从事教学、科研、工程设计、区域规划、生态环境、农田水利和国土整治的科技人员提供资料。具体刊登内容为:第四纪沉积与地层,第四纪沉积环境与古气候,第四纪资源(金属、非金属及自然资源)开发利用与管理,第四纪研究新理论与技术,环境工程与应用第四纪,第四纪动植物演化与新发现,全球变化与人类环境相关性,天文周期与气候演化,第四纪地质事件(包括灾害性事件)与国土整治,国内外有关第四纪研究新趋势等。希望广大读者关心本刊并随时将意见写给编辑部,让我们共同办好《第四纪研究》。