

青藏高原隆升对我国西南地区气候的影响——从季风角度研究

包浪^{1,2}, 王楠^{1,2}, 倪志耀¹, 卢涛²

1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059

2. 中国科学院成都生物研究所 中国科学院山地恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041

摘要: 青藏高原隆升作为新生代最重要的地质事件, 对亚洲乃至全球气候演化产生了深刻的影响。我国西南地区因紧邻青藏高原、地形地貌复杂, 该区青藏高原隆升的气候效应至今仍然存在许多需要探讨的问题。本文通过整理总结青藏高原隆升与亚洲季风各子系统形成与发展的相关性, 从季风的视角分析了高原隆升对西南地区气候的影响。主要结论如下: (1) 对西南地区气候起控制性作用的东亚季风、南亚季风以及高原季风的形成与青藏高原的隆升密切相关。虽然东亚夏季偏南风在约 22 Ma 就因海陆差异形成, 但冬季风却是在约 7.2 Ma 因青藏高原隆升才出现; 南亚夏季风(西南季风)约在 12 Ma 因喜马拉雅山脉及临近山脉形成而出现, 而其冬季风形成时间及原因与东亚冬季风相似, 同样离不开青藏高原的隆升; 高原季风形成的直接因素就是高原隆升, 其约在 36 Ma 青藏高原主体隆升至约 1500 m 时才开始形成。(2) 亚洲季风各子系统对西南地区的气候演变有重要影响。尽管东亚冬季风不能直接影响西南地区, 但青藏高原隆升增强了海陆差异及其热源作用, 在一定程度上扩大了东亚夏季风的影响范围, 并给西南地区带来水汽; 南亚冬季风使得西南地区变得相对寒冷干燥, 而南亚夏季风因青藏高原的隆升得到进一步加强, 其通过形成南北向的水汽通道成为西南地区温暖湿润气候的主导者; 高原冬、夏季风随着青藏高原隆升使得西南地区季节性干冷与湿润气候的差异更加显著。

关键词: 青藏高原; 构造隆升; 亚洲季风; 气候演化; 西南地区

Influence of the Tibetan Plateau uplift on climate evolution in southwestern China: from the monsoon perspective

BAO Lang^{1,2}, WANG Nan^{1,2}, NI Zhiyao¹, LU Tao²

1. Chengdu University of Technology, Geosciences College, Chengdu 610059, China

2. Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration, Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

收稿日期: 2018-05-20; 录用日期: 2018-07-19

Received Date: 2018-05-20; Accepted Date: 2018-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502101); 国家自然科学基金项目(41371126)

Foundation Item: National Key R & D Program of China (2016YFC0502101); National Natural Science Foundation of China (41371126)

通信作者: 卢涛, E-mail: lutao@cib.ac.cn

Corresponding Author: LU Tao, E-mail: lutao@cib.ac.cn

引用格式: 包浪, 王楠, 倪志耀, 等. 2018. 青藏高原隆升对我国西南地区气候的影响——从季风角度研究 [J]. 地球环境学报, 9(5): 444–454.

Citation: Bao L, Wang N N, Ni Z Y. 2018. Influence of the Tibetan Plateau uplift on climate evolution in southwestern China: from the monsoon perspective [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(5): 444–454.

Abstract: Background, aim, and scope As one of the most important geological events in Cenozoic era, the uplift of Tibetan Plateau had profound influences on the Asian and global climate evolution. The southwestern China is close to Tibetan Plateau and the uplift of the plateau has great impact on its climate. But so far, there are still a lot of issues that need to be investigated further. **Materials and methods** To study the influence of Tibetan Plateau uplift on Asian monsoon environment, and to summarize the correlation between different forms of tectonic uplifts and Asian monsoon, and especially to analyze the influence of Tibetan Plateau uplift on the climate evolution in southwestern China, this paper reviewed most of the relevant literatures in the past decades. **Results** The results showed that: (1) The formation of East Asian monsoon, South Asian monsoon and plateau monsoon, which control the climate evolution in southwestern China, is closely related to the uplift of Tibetan Plateau. (2) The three Asian monsoon subsystems have great impact on the climate evolution in southwestern China. **Discussion** (1) Although the East Asian summer monsoon formed at about 22 Ma due to sea and land differences, the winter monsoon formed at 7.2 Ma due to Tibetan Plateau uplift. Moreover, the South Asian summer monsoon formed at about 12 Ma due to the uplifts of the Himalayas and adjacent mountains, and its winter monsoon formed at the same time of East Asian winter monsoon. Remarkable facts are that the formation of plateau monsoon is directly due to plateau uplift. (2) The uplift of Tibetan Plateau has enhanced the land-sea difference, and its heat source effect expand the influence of East Asian summer monsoon and bring water vapor to southwestern China. The South Asian winter monsoon makes the southwestern region relatively cold and dry, and the summer monsoon further strengthened due to the Tibetan Plateau uplift, which has made the climate become more warm and humid by forming north-south water vapor channel. As for the winter and summer plateau monsoons, the plateau uplift has made the difference between seasonal dry-cold and humid climates in southwestern China even more significant. **Conclusions** The uplift of Tibetan Plateau has great impact on the climate evolution in southwestern China by affecting Asian monsoon in this region. **Recommendations and perspectives** The explanation of Tibetan Plateau uplift's impact on the climate evolution in southwestern China remains controversial. Thus, it is necessary to provide more accurate data for further verification.

Key words: Tibetan Plateau; tectonic uplift; Asian monsoon; climate evolution; southwestern China

青藏高原隆升对中国、亚洲乃至世界的气候都有着重要影响(周明煜等, 2000; Gettelman et al, 2004; Ma et al, 2006)。目前, 有关青藏高原隆升对西北地区干旱化的研究已经比较成熟。如郭正堂等(1999)研究发现青藏高原隆升有利于西伯利亚高压的形成与发展, 并阻挡暖湿气流进而导致干旱化; 宋之琛等(2008)通过孢粉资料指出中新世时青藏高原隆升对东亚季风的屏蔽及促成冬季风强劲进而导致植被荒漠化; 汤懋苍和刘晓东(1995)、刘晓东(1999)认为近地层风速增大为黄土搬运提供了良好的动力条件, 并且随着青藏高原的隆升, 黄土正在向南侵蚀(李吉均等, 1983)。

我国西南地区因紧邻青藏高原、地形地貌复杂, 因此其气候也呈现出独特性。西南地区气候主要是受到南亚季风(夏季风为印度洋西南季风)、

东亚季风(夏季风为东南季风)和高原季风三个亚洲季风子系统的共同影响(李吉均, 1999; 齐冬梅和李跃清, 2007; 宋之琛等, 2008)。已有研究表明: 当青藏高原隆升高度不够时, 不能对周边地区的气候产生显著的影响。如渐新世时青藏地区高度较低, 未成为能够改变气候与自然分带的高原(施雅风等, 1998)。刘晓东(1999)研究发现: 当青藏高原隆升高度达到1500—2000 m时, 纬向气流受阻便由爬坡分量转为绕流分量为主, 且行星风系受到季风的影响更为强烈, 此时气候才会受到影响。因此, 从季风角度研究青藏高原隆升对西南地区气候演化的影响具有重要意义。然而, 针对亚洲季风各子系统的形成、发展与青藏高原隆升的相关性, 目前还缺乏系统的分析, 这阻碍了对该区气候演化过程的清晰认识。因此, 本文在整理总结前人相关研究的基础上,

从季风的角系统分析了青藏高原隆升这一重大地质事件对西南地区气候的影响,以期为进一步深入详细地研究区域气候演化等问题提供借鉴资料。

1 青藏高原隆升对亚洲季风的影响

亚洲东部和南部受到如此强大的季风影响,根本原因就是青藏高原隆升的结果(Manabe and Terpstra, 1974)。已有研究表明:青藏高原隆升对亚洲季风和全球气候的影响一般随高原高度上升而增大(Kutzbach and Guetter, 1989)。然而,目前对青藏高原抬升过程的起始时间、阶段时间点以及高原隆升的机制和模式等仍存在争议。本文对于青藏高原隆升阶段的划分,主要依据方小敏(2017)的最新研究结果。其认为青藏高原隆升经历了多阶段、多幕次、准同步异幅度以及后期快速隆升的生长过程。其中碰撞早期(55—30 Ma),“原青藏高原”(拉萨地体和羌塘地体)抬升至2—3 km,南部喜马拉雅地区很低,东—东北部地区不超过2 km;到了碰撞中期(25—10 Ma),“原青藏高原”基本达目前海拔,喜马拉雅地区也达到一定高度,东—东北部大部分地区仍然不超过2 km;晚期碰撞(8—0 Ma),喜马拉雅地区继续抬升至今,东北部发生剧烈隆升。

此外,本文采用汪品先(2009)关于季风的定义,即季风是近地面层冬、夏风向相反的现象。也就是说,必须冬、夏季风均出现才能称之为季风。

1.1 青藏高原隆升对东亚季风的影响

通常认为,季风的形成是由于海陆热力差异季节性变化造成的。东亚季风作为亚洲季风中的“超级季风”,主要就是由于东亚季风区位于印度—欧亚超级大陆和太平洋之内。从全球范围来看,按照行星风系的气候分带呈纬向分布,同纬度地区的撒哈拉沙漠属于副热带高压控制的干旱气候,与我国同纬度江南地区温暖湿润气候形成鲜明的对比,这主要是由于季风系统的建立会破坏准纬向性的气候分带。

关于东亚季风的形成时间,张林源(1981, 1995)认为,我国早第三纪基本无季风,晚第三纪古季风出现,第四纪现代季风发育,并认为海陆热力差异、青藏高原隆升两大因素才导致现代东亚季风的形成。刘东生等(1998)认为海陆热力差异增强以及当时两极冰盖的不对称性,是东

亚夏季风形成的两大因素,并认为东南季风初步形成于渐新世。安芷生等(2006)通过临夏盆地动物化石出现、花粉类型转变反映的气候变暖变潮湿特征,推断东亚季风约在21.8 Ma开始发育。汪品先(2009)认为东亚季风系统的形成是在渐新世的晚期。张克信等(2013)通过对前人孢粉、分子化石、黏土矿物、磁化率等多种代用指标,判定东亚季风形成于25—17 Ma。安芷生和刘晓东(2000)通过不同地形高度数值实验发现,即使没有青藏高原,东亚夏季风(偏南风)因海陆差异的存在就会出现;但只有当青藏高原隆升至现今的一半时才会出现冬季风(偏北风)。并对高分辨率的黄土—古土壤—红粘土序列的磁性地层和替代性季风气候指标研究发现东亚冬季风形成于7.2 Ma以前,与青藏高原东北大部分地区8 Ma左右隆升至约2000 m时间接近。Liu et al(2017)研究地形的有无在5个典型新生代地质时期中的作用发现,中纬度东亚季风的形成与中新世晚期青藏高原北部的抬升有着强烈的依赖关系。因此,可以理解为没有青藏高原隆升,就没有东亚季风,且只有青藏高原隆升到足够的高度,东亚季风才能得以维持。

郑度和姚檀栋(2006)通过大气环流模式(GCM R15 L9)的系列数值试验,研究了青藏高原隆升对东亚季风的影响。结果显示青藏高原隆升至现今高度一半时,青藏高原成为东亚季风冬、夏反向的重要因素,同时指出东亚冬季风受到青藏高原隆升的影响相对于东亚夏季风要强烈得多。这个结果与刘晓东和焦彦军(2000)利用大气环流模式(GCM)数值试验得出的结论是一致的。刘晓东和焦彦军(2000)同时利用美国大气研究中心的公用气候系统模式(NCAR CCSM T31-gx3v4-L26)明确指出青藏高原是东亚季风的放大器,当高原隆升至一定的高度时,也会因为海拔过高,高原的温度随之降低。黄荣辉等(2008)研究发现青藏高原热力变化对东亚季风系统的变化也有重要影响。安芷生等(2015)则指出,在构造尺度上,青藏高原隆升对季风的演化与变率起着主要的影响。因此,青藏高原隆升对东亚季风的形成、发展及维持起着至关重要的作用。

1.2 青藏高原隆升对南亚季风的影响

已有研究表明青藏高原隆升不仅仅对东亚季

风的发展和维持起着关键性的作用, 而且还使得南亚季风进一步加强。有关南亚季风的形成时间, 目前还有争议。如刘晓东(1999)通过GCM数值试验及地质记录分析, 得出南亚季风在青藏高原隆升之前因为Paratethys海退缩引起的海陆分布就已经形成。而宋之琛等(2008)认为西南季风是青藏高原隆升至一定高度阻碍并破坏行星风系形成的。刘晓东和Dong(2013)则认为南亚季风形成与发展的主要因素是喜马拉雅山脉的形成与海陆分布。Liu et al(2017)通过综合高原抬升和板块运动两大因素的数值实验对亚洲和澳大利亚季风的影响发现, 印度次大陆北移进入热带北半球并与欧亚大陆拼接时, 南亚季风就已经存在并保持稳定, 因而认为南亚季风可能形成于始新世晚期。随着越来越多的地质记录研究及更准确、更接近真实地质历史的数值模拟, 南亚季风的形成也更加明确。目前南亚季风最长的地质记录约12 Ma(Gupta, 2010)。刘东生等(1998)重建的中新世环境格局中, 同样暗示西南季风大约形成于中新世中后期。上述研究结论与喜马拉雅山脉主体形成时间(10 Ma左右)也是比较接近的。

当喜马拉雅山脉及邻近山脉达到一定高度后, 最直接的影响体现在动力阻挡方面。青藏高原对冬季风的阻挡有利于高原冷空气的聚集, 促进了蒙古-西伯利亚高压的形成; 而携带有大量热带海洋水汽的印度洋西南季风受阻不能北移, 一方面使得温暖湿润的西南季风不受北方寒冷干燥冷气流所侵袭, 另一方面使得西南季风能在喜马拉雅山脉南部汇集更多温暖湿润的气流, 使得南亚夏季风获得更强的驱动力, 进而使得南亚季风加强。这与李吉均(1999)的观点也是相互印证的, 其认为与同纬度的非洲热带雨林相比, 主要就是由于青藏高原的存在, 印度热带雨林向北多延伸了 18° , 一直到喜马拉雅山麓。需要指出的是, 青藏高原隆升后, 使得高原热源加强、亚洲大陆和印度洋之间的热力差明显增强(刘晓东和Dong, 2013), 这在很大程度上又促进了南亚季风的发展。可见, 青藏高原的存在对西南季风有着不可替代的重要作用。

1.3 青藏高原隆升对高原季风的影响

汤懋苍等于1962年在甘肃省气象学会年会上首次提出“高原季风”一词, 该词指高原主体因

高原与大气之间的热力作用, 冬季呈冷高压, 夏季呈热低压, 高原气流也具相反性的年变化(施雅风等, 1998)。高原季风形成的直接原因是青藏高原隆升, 该观点目前已经被广泛认可。只有高原隆升至斜压大气地转适应的临界尺度, 高原季风才开始形成。汤懋苍和刘晓东(1995)根据高原水平尺度扩展过程的曲线, 计算得出斜压大气地转适应的临界尺度曲线交汇点, 确定高原季风形成于渐新世初期。

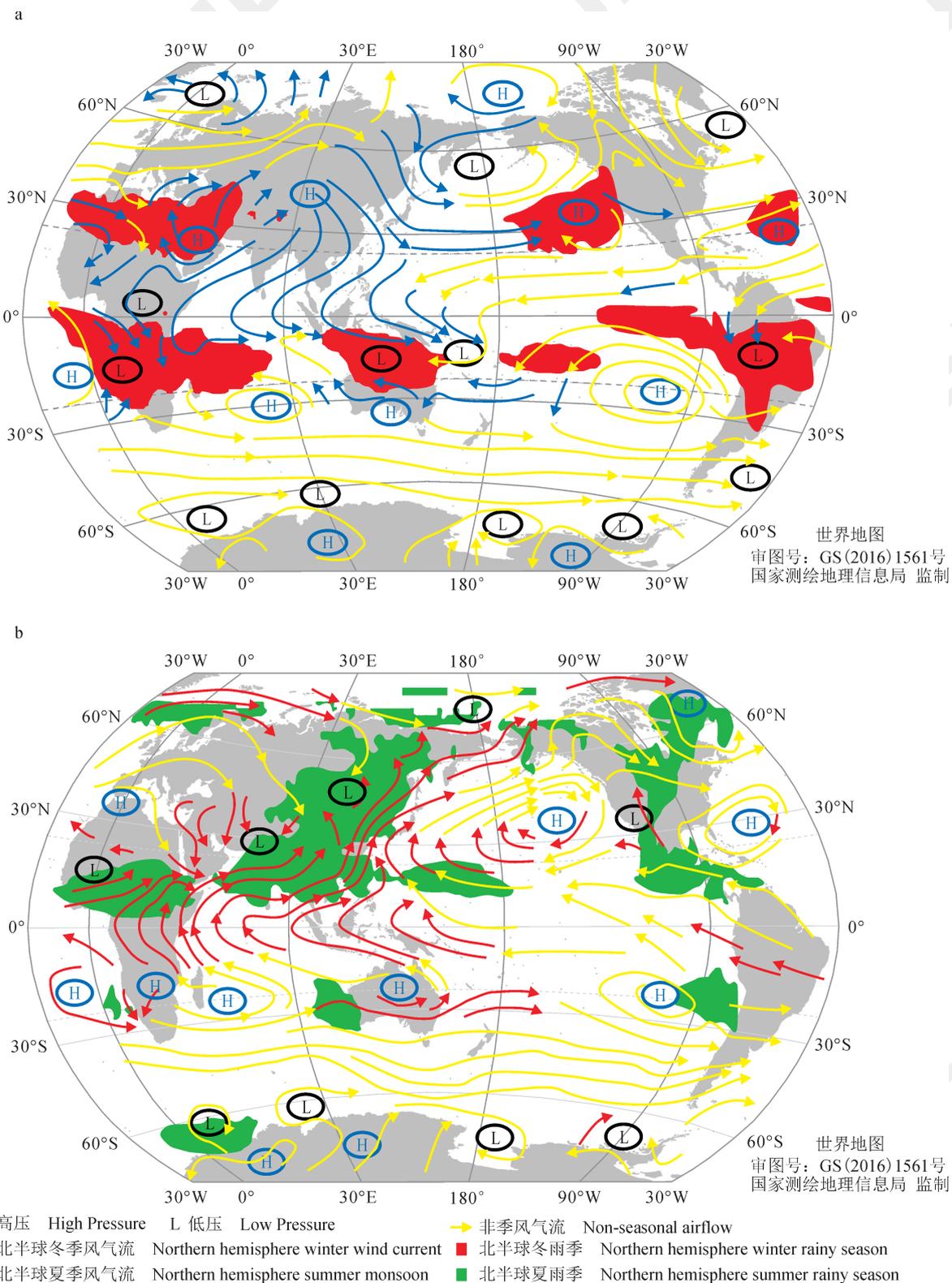
随着青藏高原继续隆升并达到“动力临界高度”(1500—200 m)后, 原本以爬越高原为主的气流转变为绕流为主(刘晓东, 1999)。当青藏高原进一步隆升至水汽凝结高度, 高原因凝结大量水汽, 并伴随着高原的扩展使得高原热源作用显著增强。由于高原季风是随着青藏高原的隆升逐渐形成的, 因而其也随着隆升由无高原季风到浅薄高原季风, 最后形成稳定的高原季风。根据汤懋苍和刘晓东(1995)的研究结论, 深厚的高原季风形成是第四纪开始的标志。因此, 可以认为稳定高原季风大约形成于第四纪初(2.6 Ma BP), 这个时间与青藏高原主体及高原东北地区隆升高度超过2000 m后达到动力临界高度和水汽凝结高度相呼应。

2 亚洲季风子系统对西南地区气候的影响

2.1 东亚季风对西南地区的影响

根据李吉均(1999)的研究成果, 当代东亚季风中夏季风可分为两支: 一支由于南北半球季节差异, 澳大利亚处于冬季, 产生高压向北低气压流动, 当越过赤道之后, 由于北半球处于夏季, 印度-欧亚大陆为低气压, 气流再从南海进入大陆, 属于热带季风; 另一支东亚夏季风则是由于夏威夷高压, 气流从西太平洋副热带向欧亚大陆侵袭, 呈现为东南方向气流, 属于亚热带季风。

东亚冬季风来自亚洲北部蒙古-西伯利亚高压偏北气流向南侵袭, 由于青藏高原及秦岭高海拔阻挡, 我国东北地区及部分东部地区处于冬季风被迫偏东形成的西北风影响范围内, 同时由于阿留申低气压的存在, 朝鲜半岛、日本均遭受西北风侵袭; 西北风越过秦岭一带下海时又转变为东北风, 并与北半球东北信风带叠加吹向赤道(图1、图2)。因此, 现今大多数观点是东亚季风的影响地区主要是我国东部、朝鲜半岛以及日本。



红色和绿色区域分别为北半球冬季 (a) 和北半球夏季 (b) 干 - 湿指数为正值区域。

The areas with positive seasonal dry-wet index values are red shaded for boreal winter (a) and green shaded for boreal summer (b).

图 1 850 h Pa 亚洲及周边区域季风风场环流 (流线) (据安芷生等 (2015) 修改)

Fig.1 Circulation patterns (streamlines) of the monsoonal and nonmonsoonal winds at Asian and its surrounding region (the circulation patterns are modified from An et al (2015))

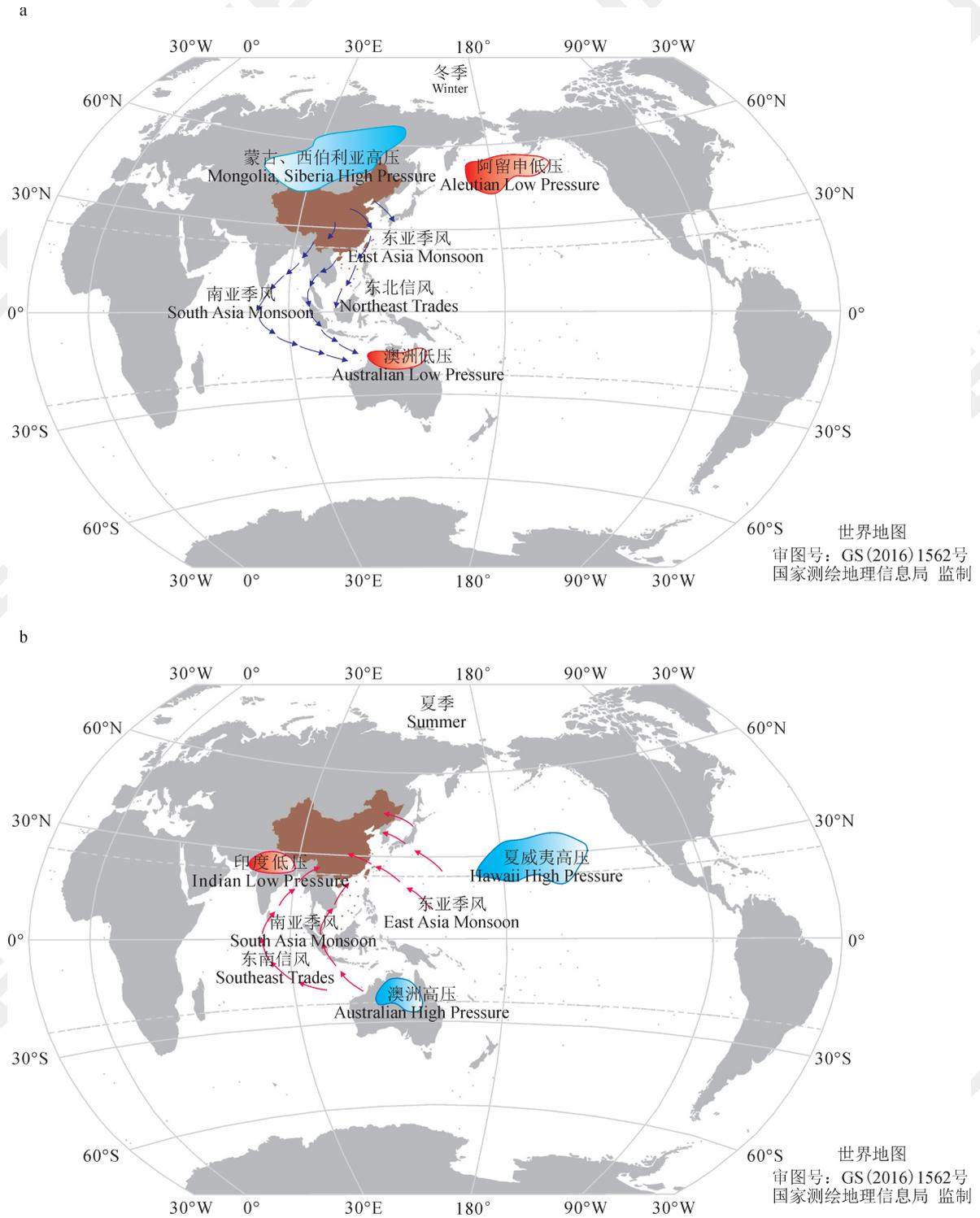


图2 南亚和东亚季风示意图: 冬季 (a), 夏季 (b)

Fig.2 Schematic diagrams of South and East Asia monsoons in winter (a) and summer (b)

但最新研究表明, 东亚季风同样会对我国西南地区的气候产生影响。据宋之琛等 (2008) 的研究结果, 我国西南地区广泛分布着新近纪煤层, 且这些煤层均含有枫香属 (*Liquidambar*) 花粉,

而这被认为是东亚季风侵袭过的证据 (黄翡和宋之琛, 2002)。蔡演军等 (2001) 研究发现贵阳地区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值的加权平均值处于西南季风、东亚季风控制区之间。彭子成等 (2002) 对贵州七

星洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的研究也同样表明该区处在两季风控制区之间。柳鉴容等 (2007) 通过降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 示踪数据和气象数据的分析发现: 云南省受到南海通道 (即东亚季风夏季风) 水汽的影响; 胡茵和王建力 (2015) 通过 1986—2003 年我国夏季和冬季风矢量图分析判定云南也受到了东亚季风的影响。韦小雪等 (2015) 则发现: 东亚季风活动及强弱因季节性变化导致西南地区往往出现连旱现象。秋季东亚夏季风强度常偏弱, 导致西南地区水汽不足, 降雨量少及温度往往持续增高, 进而出现干旱; 紧接着在冬季, 冬季风强度增强, 加重了西南地区的干燥程度; 春季受到强冬季风和弱夏季风的共同影响, 降水处于较少的状态; 夏季, 东亚夏季风通常增强, 给西南地区携带大量水汽。此外, 齐冬梅等 (2016) 围绕西南地区干旱与东亚冬季风的相关性研究也发现: 西南地区低温主要受东亚冬季风月内尺度准 1 周、准 2 周时间尺度振荡的影响。因此, 东亚季风夏季风是能够侵袭至我国西南地区, 并对区域气候造成影响的, 其主要使得西南地区夏季呈现温暖湿润的特征。

2.2 南亚季风对西南地区的影响

与对东亚季风的研究相比较, 目前围绕西南季风的研究还非常薄弱 (薛滨等, 2016)。我国西南地区及印度半岛一带的西南季风, 由于夏季气压带、风带汇合处的热带辐合带 (intertropical convergence zone——ITCZ) 北移, 南半球的东南信风夏季北移越过赤道并移至印度半岛, 在地转偏向力影响下向右偏转而成为西南方向的南亚夏季风 (郭正堂, 2017); 而冬季气压带、风带向南移, 赤道低气压带移至南半球, 由于强大的亚洲大陆冷高压, 风由蒙古-西伯利亚吹向印度, 在地转偏向力影响下成为东北方向的亚洲南部冬季风。鉴于夏季西南风强于冬季东北风, 故该季风称西南季风 (图 1、图 2)。

西南地区夏季风主要是受到西南季风的影响, 尤其当从印度南端 (孟加拉湾中部) 经中南半岛气流与阿拉伯海, 经过孟加拉湾北部的气流在西南地区汇合时, 西南季风势力最强 (徐嘉行和冯国柱, 1982)。因此, 无论是冬季还是夏季, 如果不是由于青藏高原的隆升在一定程度上阻碍了季风的迁移, 并增大了海陆热力差异, 西南地区就不会形成现在的气候格局。在夏季, 西南季风

虽然受到喜马拉雅山脉的阻挡, 但是由于在西南部地区发育着不少水汽通道, 如雅鲁藏布江大峡谷、怒江、澜沧江和金沙江等向南开口的南北向谷地 (李吉均, 1999), 这使得南亚温暖湿润印度洋气流由孟加拉湾和阿拉伯海向北推进时, 沿着青藏高原东部南北走向的横断山脉流向我国的西南地区, 使得西南地区夏季温暖湿润; 而在冬季, 受到干冷的冬季风影响, 西南季风又使得西南地区变得相对寒冷干燥。因此, 西南季风通过水汽输送对我国西南地区的生态与气候有着重要的影响 (洪冰等, 2004)。

2.3 高原季风对西南地区气候的影响

汤懋苍 (1998) 通过对地面盛行风的流线图进行分析, 发现由于行星西风的掩盖, 高原季风主要出现在地势相对平坦且较低的地区, 如高原内部平坦地区、云贵高原、黄土高原等。这一点也得到白虎志等 (2004) 的印证, 他们对我国各地降水量差异研究表明: 高原雨季主要集中在高原东南部, 多雨日集中在高原东侧、四川盆地及云南高原等地。而高原季风通过促进低层对流层季风的增强, 使得对流层中层的行星气压带和行星风带遭到破坏 (齐冬梅和李跃清, 2007), 进而形成高原气候特征。

由于西风和高原季风的共同影响, 使得青藏高原具有不同于其它地区的独特气候。冬季, 高原气候主要受到冬季北半球西风带南移遇高原向北分支的西风急流影响 (白虎志等, 2004)。这支西风急流绕过新疆正好与南下的大陆冷气团汇合, 一方面形成更为寒冷强劲的西北气流, 另一方面也加强了高原地面冷高压 (高原冬季风), 使得高原更加干冷。夏季, 青藏高原上因热低压 (高原夏季风) 的存在, 呈现暖湿的特征。此时西风带北移虽不能直接影响高原气候, 但却促成了西南季风的形成与东南季风的北进。此外, 西风北移在一定程度上也为高原夏季风提供了水汽, 使得青藏高原 90% 以上的降水出现在夏季 (罗华, 2015)。可见, 西风对青藏高原气候起主导作用, 并且由于西风的的存在, 加强了高原季风, 使得高原干湿季节更加明显。

高原季风在对流层中下层呈现冬季冷高压, 夏季热低压的特征。因此, 高原东南部地区相应受到高原冬、夏季风的影响 (图 3)。因青藏高原热源强迫促进了对流层底层气旋环流、低涡的形成与发展, 进而增强了季风环流, 使得西南地区

降水发生变化(华明, 2003)。冬季由于高原冬季风增强了高原周围的反气旋式环流, 北方大陆性冷高压中心的冷干偏北气流向西南地区侵袭, 使得西南地区冬季干冷; 夏季高原周围成气旋式环流, 由于羌塘高原处于热低压, 来自低纬海洋性暖湿偏南气流流经西南地区流向高原, 使得西南地区呈现夏季温暖湿润的气候特征。王颖和李栋梁(2015)研究表明: 高原季风强度与中心经度对西南地区的气温、降水、日照等多种气象要素有着重要的影响。当高原季风强度增加时, 西南地区降水量增加, 气温变化较小, 日照较短; 当高原季风中心位置偏东时, 降水较少, 气温较高; 而高原季风强度和中心经度的变化也是西南地区日趋干旱化的原因之一。

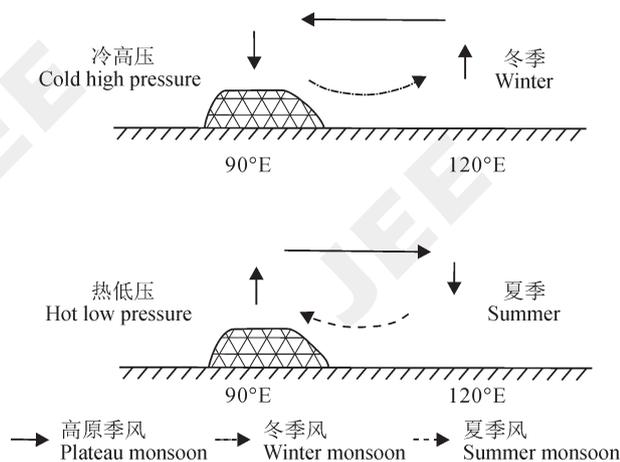


图3 高原季风环流示意图

Fig.3 Circulation patterns for plateau monsoon

3 讨论

综上所述, 青藏高原隆升是亚洲季风形成与发展的重要因素, 并对我国西南地区的气候有着重要的影响。青藏高原对季风的影响主要可归结为热力作用和机械阻挡作用两个方面(吴国雄等, 2005), 且相较于机械阻挡作用, 迄今为止多数学者认为热力作用对亚洲季风的影响更为重要。如有研究发现: 冬、春季, 青藏高原机械阻挡和屏障作用显著影响周边天气及大陆冷空气南下(乔钰等, 2014); 而在夏季, 热力作用比机械阻挡作用更为重要(吴国雄等, 2005; Wu et al, 2007)。王同美等(2008)对青藏高原纬向偏差流场研究则发现: 高原动力和热力作用也有随季

节变化的特点, 从冬季到夏季, 环流受高原动力作用的影响逐渐减弱, 而高原的热力作用逐渐增强。Wu et al (2012) 基于数值试验、模拟, 发现青藏高原对亚洲夏季风起主导作用的是热力强迫作用, 而不是机械强迫作用。然而, Boos and Kuang (2010) 和 Molna et al (2010) 的研究则表明: 相比青藏高原的热力作用, 高原南部喜马拉雅山对印度次大陆暖湿气流的阻隔, 对于南亚季风有着更加显著的控制作用。不过宋静和刘屹岷(2014)则指出 Boos and Kuang (2010) 通过去除青藏高原主体后进行的模拟实验中实际上仍保留了青藏高原南坡加热的影响。

可见, 尽管关于青藏高原隆升对亚洲季风的影响研究已经取得了很大进展, 但争议依然存在。主要原因是数据质量还不够高, 因此需要更多、更为精确的数值数据与模拟实验才能加以证明。在青藏高原及其周边地区布设更多的地面气象观测站点和探空站点, 以及发展雷达和卫星遥感信息反演技术, 以获取更为准确、精密的数据, 将有助于上述问题的解决。

4 结论

(1) 亚洲季风各个子系统的形成时间与相应青藏高原隆升有着直接的联系。东亚夏季偏南风形成时间约 22 Ma, 此时高原主体隆升已达足够高度; 东亚冬季风形成于 7.2 Ma 以前, 即青藏高原东北大部分地区已达到约 2000 m 时。南亚夏季风形成时间约在 12 Ma 左右, 与喜马拉雅山脉及临近山脉形成时间接近; 南亚冬季风与东亚冬季风均源于蒙古-西伯利亚高压, 所以也应是 7.2 Ma 以前形成的。高原季风形成于渐新世初(约 36 Ma), 与高原主体达到 2000—3000 m 时间同样很接近。

(2) 青藏高原的隆升是导致我国西南地区呈现现有气候特征的直接因素。正是由于青藏高原的隆升, 使得东亚季风得以发展与维持, 南亚季风进一步加强, 并导致高原季风的形成与发展。西南地区受到东亚季风、南亚季风及高原季风三大季风的共同影响。东亚夏季风使得西南地区呈现温暖湿润的特征; 南亚夏季风携带了大量的水汽进入西南地区, 使得该区湿润气候形成; 高原季风进一步加强了西南地区冬夏季干冷与湿润的变化。

参考文献

安芷生, 刘晓东. 2000. 东亚季风气候的历史与变率 [J]. 科学

- 通报, 45(3): 238–249. [An Z S, Liu X D. 2000. The history and variability of the East Asian monsoon climate [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(3): 238–249.]
- 安芷生, 吴国雄, 李建平, 等. 2015. 全球季风动力学与气候变化 [J]. *地球环境学报*, 6(6): 341–381. [An Z S, Wu G X, Li J P, et al. 2015. Global monsoon dynamics and climate change [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(6): 341–381.]
- 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 2006. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长 [J]. *第四纪研究*, 26(5): 678–693. [An Z S, Zhang P Z, Wang E Q, et al. 2006. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene [J]. *Quaternary Sciences*, 26(5): 678–693.]
- 白虎志, 董文杰, 马振锋. 2004. 青藏高原及邻近地区的气候特征 [J]. *高原气象*, 23(6): 890–897. [Bai H Z, Dong W J, Ma Z F. 2004. Climatic characteristics of Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding [J]. *Plateau Meteorology*, 23(6): 890–897.]
- 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 2001. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化 [J]. *科学通报*, 46(16): 1398–1402. [Cai Y J, Peng Z C, An Z S, et al. 2001. Oxygen isotope records of Holocene stalagmites in Guizhou Qixing cave and its indicated monsoon climate change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(16): 1398–1402.]
- 方小敏. 2017. 青藏高原隆升阶段性 [J]. *科技导报*, 35(6): 42–50. [Fang X M. 2017. Phased uplift of the Tibetan Plateau [J]. *Science & Technology review*, 35(6): 42–50.]
- 郭正堂, 彭淑贞, 郝青振, 等. 1999. 晚第三纪中国西北干旱化的发展及其与北极冰盖形成演化和青藏高原隆升的关系 [J]. *第四纪研究*, 19(6): 556–567. [Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z, et al. 1999. Late Tertiary development of aridification in northwestern China: Link with the Arctic ice-sheet formation and Tibetan uplifts [J]. *Quaternary Sciences*, 19(6): 556–567.]
- 郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47(4): 421–437. [Guo Z T. 2017. The Loess Plateau witnesses the origin of the monsoon and desert [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 421–437.]
- 洪冰, 林庆华, 洪业汤, 等. 2004. 全新世青藏高原东部西南季风的演变 [J]. *地球与环境*, 32(1): 42–49. [Hong B, Lin Q H, Hong Y T, et al. 2004. Evolution of southwest monsoon in the eastern part of Qinghai-Tibet Plateau during Holocene [J]. *Earth and Environment*, 32(1): 42–49.]
- 胡茵, 王建力. 2015. 云南地区大气降水中氢氧同位素特征及水汽来源分析 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 40(5): 142–149. [Hu H, Wang J L. 2015. On characteristics of hydrogen and oxygen isotope in precipitation in Yunnan and analysis of moisture sources [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 40(5): 142–149.]
- 华明. 2003. 青藏高原热状况对夏季西南地区气候影响的分析及模拟 [J]. *高原气象*, 22(S1): 152–156. [Hua M. 2003. Analysis and simulation study on the influence of heat condition over Qinghai-Xizang Plateau on climate over southwest China [J]. *Plateau Meteorology*, 22(S1): 152–156.]
- 黄翡, 宋之琛. 2002. 依据 *Altingiaceae* 和 *Juglandaceae* 孢粉化石探讨我国第三纪植物群及气候特征 [J]. *古生物学报*, 41(2): 232–240. [Huang F, Song Z C. 2002. Tertiary flora and climate in China inferred from fossil records of *Altingiaceae* and *Juglandaceae* [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 41(2): 232–240.]
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32(4): 691–719. [Huang R H, Gu L, Chen J L, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32(4): 691–719.]
- 李吉均, 张林源, 邓养鑫, 等. 1983. 庐山第四纪环境演变和地貌发育问题 [J]. *中国科学(B辑)*, 13(8): 734–745. [Li J J, Zhang L Y, Deng Y X, et al. 1983. The evolution of Quaternary environment and landform development in Lushan Mountain [J]. *Science in China (Series B)*, 13(8): 734–745.]
- 李吉均. 1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 19(1): 1–11. [Li J J. 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 1–11.]
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 1998. 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 [J]. *第四纪研究*, (3): 194–204. [Liu T S, Zheng M P, Guo Z T. 1998. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia [J]. *Quaternary Sciences*, (3): 194–204.]
- 刘晓东, Dong B W. 2013. 青藏高原隆升对亚洲季风-干旱

- 环境演化的影响[J]. *科学通报*, 58(28/29): 2906–2919. [Liu X D, Dong B W. 2013. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28/29): 2906–2919.]
- 刘晓东, 焦彦军. 2000. 东亚季风气候对青藏高原隆升的敏感性研究[J]. *大气科学*, 24(5): 593–607. [Liu X D, Jiao Y J. 2000. Sensitivity of the East Asian monsoon climate to the Tibetan Plateau uplift [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(5): 593–607.]
- 刘晓东. 1999. 青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候与环境变化的影响[J]. *高原气象*, 18(3): 321–332. [Liu X D. 1999. Influences of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau uplift on the atmospheric circulation, global climate and environment changes [J]. *Plateau Meteorology*, 18(3): 321–332.]
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 2007. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. *自然资源学报*, 22(6): 1004–1012. [Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. 2007. Stable isotope evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over southern China [J]. *Journal of Natural Resources*, 22(6): 1004–1012.]
- 罗华. 2015. 青藏高原对气候的影响[J]. *青海科技*, 22(3): 46–48. [Luo H. 2015. Impacts of Qinghai/Tibet Plateau on climate change [J]. *Qinghai Science and Technology*, 22(3): 46–48.]
- 彭子成, 张兆峰, 蔡演军, 等. 2002. 贵州七星洞晚更新世晚期石笋的古气候环境记录[J]. *第四纪研究*, 22(3): 273–282. [Peng Z C, Zhang Z F, Cai Y J, et al. 2002. The paleoclimatic records from the late Pleistocene stalagmite in Guizhou Qixing cave [J]. *Quaternary Sciences*, 22(3): 273–282.]
- 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 2016. 2010年东亚冬季风月内尺度振荡特征及其与西南地区冬季气温的关系[J]. *热带气象学报*, 32(1): 19–30. [Qi D M, Li Y Q, Chen Y R, et al. 2016. Submonthly timescales oscillation characteristics of the East Asian winter monsoon and its effect on the temperature in southwest China—a case study in 2010 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 32(1): 19–30.]
- 齐冬梅, 李跃清. 2007. 高原季风研究主要进展及其科学意义[J]. *干旱气象*, 25(4): 74–79. [Qi D M, Li Y Q. 2007. The major progress of the plateau monsoon study and its scientific significance [J]. *Arid Meteorology*, 25(4): 74–79.]
- 乔钰, 周顺武, 马悦, 等. 2014. 青藏高原的动力作用及其对中国天气气候的影响[J]. *气象科技*, 42(6): 1039–1046. [Qiao Y, Zhou S W, Ma Y, et al. 2014. Dynamic effect of Tibetan Plateau and its impact on weather and climate in China [J]. *Meteorological Science and Technology*, 42(6): 1039–1046.]
- 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 1998. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨[J]. *中国科学(D辑)*, 28(3): 263–271. [Shi Y F, Tang M C, Ma Y Z. 1998. A study on the relationship between the second stage uplift of Tibetan Plateau and Asian monsoon [J]. *Science in China (Series D)*, 28(3): 263–271.]
- 宋静, 刘屹岷. 2014. 近期青藏高原对亚洲气候影响的动力学研究进展[J]. *热带气象学报*, 30(2): 201–209. [Song J, Liu Y M. 2014. Dynamics study on recent influence of Tibetan Plateau on Asian climate [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(2): 201–209.]
- 宋之琛, 王伟铭, 毛方园. 2008. 依据孢粉资料探讨我国西北地区第三纪时期的干旱化及其与季风的关系[J]. *古生物学报*, 47(3): 265–272. [Song Z C, Wang W M, Mao F Y. 2008. Palynological implications for relationship between aridification and monsoon climate in the Tertiary of NW China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 47(3): 265–272.]
- 汤懋苍, 刘晓东. 1995. 一个新的划分第四纪的标志——高原季风演变的地质环境后果[J]. *第四纪研究*, 15(1): 82–88. [Tang M C, Liu X D. 1995. A new mark for delimitation of Quaternary: Stable appearance of Plateau Monsoon and its environmental effects [J]. *Quaternary Sciences*, 15(1): 82–88.]
- 汤懋苍. 1998. 青藏高原季风的形成、演化及振荡特性[J]. *甘肃气象*, 16(1): 1–14. [Tang M C. 1998. Formation, evolution and oscillation characteristics of the monsoon over the Tibetan Plateau [J]. *Gansu Meteorology*, 16(1): 1–14.]
- 汪品先. 2009. 全球季风的地质演变[J]. *科学通报*, 54(5): 535–556. [Wang P X. 2009. Global monsoon in a geological perspective [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(5): 535–556.]
- 王颖, 李栋梁. 2015. 变暖背景下青藏高原夏季季风变异及其对中国西南气候的影响[J]. *气象学报*, 73(5): 910–924. [Wang Y, Li D L. 2015. Variation of the Tibetan Plateau summer monsoon under the background of global warming and its impact on the climate in southwestern China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 73(5): 910–924.]
- 王同美, 吴国雄, 万日金. 2008. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响[J]. *高原气象*, 27(1): 1–9. [Wang T M, Wu G X, Wan R J. 2008. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area [J]. *Plateau*

- Meteorology*, 27(1): 1–9.]
- 韦小雪, 周渭, 黄远盼, 等. 2015. 东亚季风对西南地区秋冬春连旱的影响分析 [J]. *安徽农业科学*, 43(28): 154–156. [Wei X X, Zhou W, Huang Y P, et al. 2015. Analysis on the influence of East Asian monsoon on the drought in autumn, winter and spring in southwest China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 43(28): 154–156.]
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局 [J]. *大气科学*, 29(1): 47–56. [Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al. 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 29(1): 47–56.]
- 徐嘉行, 冯国柱. 1982. 西南地区夏季风定义与特征的分析 [J]. *云南大学学报*, (3): 1–10. [Xu J X, Feng G Z. 1982. Analysis of the definition and characteristics of summer wind in southwestern China [J]. *Journal of Yunnan University*, (3): 1–10.]
- 薛滨, 金章东, 强小科, 等. 2016. 西南季风演化与南半球气候的联系 [J]. *科技资讯*, 14(19): 174–175. [Xue B, Jin Z D, Qiang X K, et al. 2016. The southwest monsoon: evolution and its link with the southern Hemisphere [J]. *Science and Technology Information*, 14(19): 174–175.]
- 张克信, 王国灿, 洪汉烈, 等. 2013. 青藏高原新生代隆升研究现状 [J]. *地质通报*, 32(1): 1–18. [Zhang K X, Wang G C, Hong H L, et al. 2013. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau: a review [J]. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 1–18.]
- 张林源. 1981. 青藏高原上升对我国第四纪环境演变的影响 [J]. *兰州大学学报*, (3): 142–155. [Zhang L Y. 1981. The influence of the uplift of Qinghai-Xizang Plateau on the Quaternary environmental evolution in China [J]. *Journal of Lanzhou University*, (3): 142–155.]
- 张林源. 1995. 青藏高原形成过程与我国新生代气候变化阶段的划分 [M]. 北京: 科学出版社: 267–280. [Zhang L Y. 1995. Formation process of Qinghai-Tibet Plateau and division of Cenozoic climate change in China [M]. Beijing: Science Press: 267–280.]
- 郑度, 姚檀栋. 2006. 青藏高原隆升及其环境效应 [J]. *地球科学进展*, 21(5): 451–458. [Zheng D, Yao T D. 2006. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects [J]. *Advances in Earth Science*, 21(5): 451–458.]
- 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社: 197. [Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. 2000. Observation analysis and dynamic study on the atmospheric boundary layer in the Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: Meteorology Press: 197.]
- Boos W R, Kuang Z M. 2010. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating [J]. *Nature*, 436(7278): 218–223.
- Gettelman A, Kinnison D, Dunkerton T, et al. 2004. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(D22): 51–67.
- Gupta S M. 2010. Indian monsoon cycles through the last twelve million years [J]. *Earth Science India*, 3: 248–280.
- Kutzbach J E, Guetter P J. 1989. Sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in southern Asia and the American west: numerical experiments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 19(15): 18393–18407.
- Liu X D, Dong B W, Yin Z Y, et al. 2017. Continental drift and plateau uplift control origination and evolution of Asian and Australian monsoons [J]. *Scientific Reports*, 7. DOI: 10.1038/srep40344.
- Ma Y, Zhong L, Su Z, et al. 2006. Determination of regional distributions and seasonal variations of land surface heat fluxes from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper data over the central Tibetan Plateau area [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D10): 1843–1852.
- Manabe S, Terpstra T B. 1974. The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1): 3–42.
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38: 77–102.
- Wu G X, Liu Y M, Dong B W, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing I. Formation [J]. *Climate Dynamics*, 39(5): 1169–1181.
- Wu G X, Liu Y M, Wang T M, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 770–789.