

郝青振,张人禾,汪品先,等. 全球季风的多尺度演化[J]. 地球科学进展,2016,31(7):689-699,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.07.0689.
[Hao Qingzhen, Zhang Renhe, Wang Pinxian, et al. Monsoons across multi-scales: Summary of fourth conference on Earth system science[J]. Advances in Earth Science,2016,31(7):689-699,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.07.0689.]

全球季风的多尺度演化*

郝青振^{1,2},张人禾³,汪品先⁴,王 斌⁵

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室,北京 100029;
2. 中国科学院大学地球科学学院,北京 100049;3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,
北京 100081;4. 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092;5. Department of Atmospheric
Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu HI 96822, USA)

摘要:作为中—低纬地区地球气候系统的重要组成部分,季风的形成演化和未来变化趋势一直是古气候和现代气候研究的重要内容。第四届地球系统科学大会第四专题“多尺度季风”从不同时间和空间尺度,对全球季风系统演化的规律和机理以及季风系统在地球系统演化中的作用进行了探讨,在季风变化的现代观测与地质重建、过去与现代季风的数值模拟、过去与现代季风对气候变暖的响应等方面开展了交流,并对未来的研究进行展望。

关键词:全球季风;亚洲季风;古季风;季风模拟;多尺度演化

中图分类号:P425.4⁺² **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2016)07-0689-11

1 引言

季风是指近地面层冬、夏风向相反,干湿呈季节性变化的现象。季风现象的理论解释早在1868年Halley就已经提出,亚洲季风是由太阳对海洋和陆地加热的差异造成的^[1,2]。随着技术的进步和科学认识的积累,对季风的认识从区域性的气候现象扩展为全球性的气候系统^[1,2],从现代过程扩展为地质尺度的全球古季风^[3-5]。季风系统是全球气候系统的重要组成部分,季风区是全球大气运动能量、水汽的主要供应地,季风活动异常可以引起夏季干旱、洪涝、冬季冷害等气候灾害事件。全球70%以上的人口生活在季风区,季风的对人们的日常生活、区域经济和社会的可持续发展具有举足轻重的影响。

季风研究在地球系统科学研究中占据着重要的位置。季风的与大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、

生物圈等地球系统表层圈层系统具有密切的联系,在地球系统中的水循环、能量循环和物质循环等过程中发挥着重要的作用。季风与地球表层圈层相互作用的过程和机制是地球系统科学急需深入探索的领域。

2 全球季风现代过程与模拟

关于全球季风的定义和影响范围,不同学者有不同的理解^[2,3,5]。根据1948—2003年降水的夏季和冬季之间的季节差定义的全球季风区包括了北美、南美、北非、南非、亚洲、澳洲—印尼等6个区域季风区^[2,3](图1)。亚洲季风通常认为由印度季风(也称南亚季风)和东亚季风组成,而东亚季风又可划分为南海—西太平洋热带季风和中国大陆东部—日本的副热带季风^[6,7]。

全球季风可视作热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)季节性迁移的表现,其变化受

* 收稿日期:2016-07-06;修回日期:2016-07-08.

* 基金项目:国土资源部公益性行业科研专项项目“我国不同季风区古气候演化差异及成因机制研究”(编号:201211077);国家自然科学基金重点项目“风成红土碳同位素组成与新近纪植被演化”(编号:41430531)资助。

作者简介:郝青振(1971-),男,河北柏乡人,研究员,主要从事风尘堆积地层与古气候研究. E-mail: haoqz@mail.iggcas.ac.cn

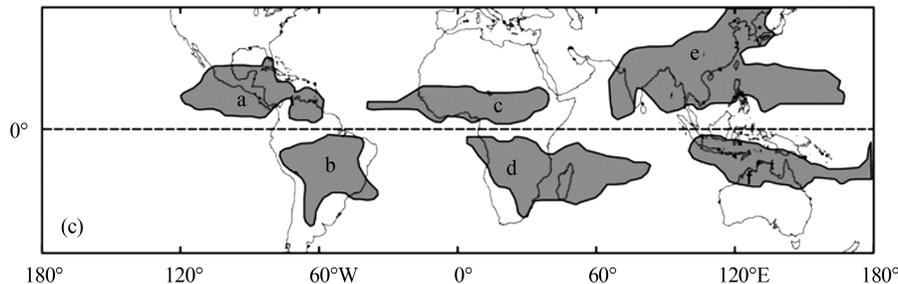


图 1 现代季风的分布

Fig. 1 Geographic distribution of the modern monsoon systems

a. 北美季风; b. 南美季风; c. 北非季风; d. 南非季风; e. 亚洲季风; f. 澳洲—印尼季风(据参考文献[3]修改)

a. North American; b. South American; c. North African; d. South African; e. Asian; f. Australian-Indonesian (modified after reference[3])

自然强迫(太阳活动和火山活动等)、人为强迫(温室气体和气溶胶)、内部变率(海—气相互作用的年际和年代际变化)等因素的共同作用。从地质角度看,自然强迫因素还包括地球轨道参数变化引起的太阳辐射在地球表面的季节分配的变化、构造变动引起的海陆分布和地形地貌变化等。ITCZ 受太阳辐射季节变化的控制而产生南北移动,是造成半球尺度的季风变化具有一致性的重要原因^[4],同时不同的季风子系统受海陆配置、地形地貌、下垫面的性质等条件的影响^[8,9],表现出区域性的特征。随着社会和科学界对全球变暖后果担忧的加剧,人类活动引起的温室气体和气溶胶含量的增加对季风气候的影响日益受到关注^[10]。在现代季风方面,本专题从全球季风、南亚和东亚夏季风、东亚冬季风的特征、模拟和预测等方面进行了讨论。

2.1 全球季风

气候模式是理解全球季风变化机理的重要工具,但是气候模拟结果尚存在不确定性^[11~13]。多模式比较是减少结果不确定性的有效途径,为此,最近由中国科学院大气物理研究所联合英国和美国学者发起了《全球季风模拟比较计划》(Global Monsoons Model Inter-comparison Project, GMMIP)^[14,15]。该计划已经获得 CMIP6 (Coupled Model Inter-comparison Project6) 委员会的正式批准。该计划的核心科学目标是深入理解全球季风系统变化的物理机制,提高全球季风的模拟能力;揭示自然变率和人为强迫对全球季风变化的贡献^[15]。目前有来自全球 20 多家国际前沿气候模拟机构参加,成果将直接支撑 IPCC 第六次评估报告有关内容的编写。周天军等^[14]对 GMMIP 计划的背景、科学目标和近期研究进展进行了论述。

Liu 等^[16]利用地球系统模式 CESM1.0 (Community Earth System Model version 1.0),发现火山驱动具有远程效应。过去 1 500 年以来,南半球或北半球的火山活动均导致另一半球降水的增加,这种远程效应主要是通过环流的影响而不是水汽含量的影响来实现的。此外,由于对赤道以外地区的环流影响较小,赤道地区的火山活动在降低南/北半球季风降水幅度方面的影响较小。

2.2 印度季风(南亚季风)

全球季风既具有全球性特征,又具有区域特征。全球季风研究的目的之一是加深对亚洲季风机制的认识,最终服务于未来气候预测。亚洲季风不同子系统的变化规律是本专题重点讨论的内容之一。对于印度季风,在年际时间尺度上,人们已经广泛研究了印度夏季风和厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)及印度洋偶极子等主要气候模态的关系。但印度夏季风降水也存在以季节内变化为主的模态,而人们对这种较高频率变化的过程、模拟和预报都缺乏足够的认识。周磊等^[17]定义了一个与印度夏季风期间季节内降水关系密切的模态,我们称其为中印度洋模态。该模态从季节内尺度的海表温度和低空风场中提取,保留了印度夏季风期间海气系统在动力场和热力场的内在关联。同时,该模态在中印度洋区域发挥着类似三通阀门的作用,可以对从热带西印度洋生成的季节内振荡信号是向东传播还是向北传播进行调节。对该模态的合理利用有助于我们加深对印度夏季风期间季节内降水的了解,并对提高季风降水的预报能力有所帮助。

最新的 IPCC 第五次评估报告指出,预估的南亚夏季风变化,无论从环流还是降水上讲均存在很大的

不确定性。了解导致不确定性产生的关键过程对准确估计未来区域气候变化至关重要。陈晓龙等^[18]通过分析在 RCP8.5 (Representative Concentration Pathways8.5) 预估情景下的 35 个 CMIP5 模式,发现南亚夏季风环流的不确定性与模式中全球平均增暖的幅度有关,反映了各模式气候敏感度的不同对预估结果的影响:气候模式对温室气体的敏感度越高,预估的南亚季风环流就越弱;但是,预估的季风降水变化与气候模式的敏感度联系不显著,原因在于增暖引起的环流减弱和水汽增加对季风降水的贡献相互抵消。季风降水变化的不确定性很大程度上由赤道中西太平洋海温增暖幅度决定,中西太平洋增暖通过改变季风区上空对流层的纬向温度梯度从而最终影响季风降水的变化。预估的季风降水变化与全球平均增暖幅度不存在显著联系这一事实表明,使用“空间型标度 (Pattern Scaling)”方法来评估温室气体强迫对区域水循环的影响具有较大的局限性^[18]。

2.3 东亚夏季风

东亚夏季风同时受到低纬海洋和副热带太平洋的影响,其时空变化特征和机制更为复杂,模拟和预测的不确定性更大。在年代际变化尺度上, Wu 等^[19]基于 20 世纪再分析资料 (20th Century Reanalysis, 20CR), 利用多变量经验正交函数分析 (Multivariate Empirical Orthogonal Function Analysis, MVEOF) 方法,研究了东亚夏季风年代际变化的主要模态,发现了第一模态以中国台湾上空的气旋异常和渤海上空的反气旋异常为特征;第二模态与我国东北到日本上空的气旋异常有关。对上述模态的性质及控制因素进行了详细的讨论。

南海夏季风 (South China Sea Summer Monsoon, SCSSM) 为东亚夏季风的一个组成部分。SCSSM 具有从季节内尺度到年代际尺度的显著变化,特别是在年际尺度上,SCSSM 准 2 年尺度变化的显著性仅次于其约 4 年的 ENSO 周期,该变化分量的时空特征是值得关注的科学问题。郑彬等^[20]使用 NCEP/NCAR, ERA40 和 JRA25 再分析资料、NCEP 降水重建资料集、CMAP 和 GPCP 降水资料、ERSST v3 逐月海表温度资料和 SODA 逐月斜温层资料,通过滤波和相关分析,探讨 SCSSM 准 2 年振荡相关的海气相互作用过程。结果表明:南海夏季风准 2 年变化相关的海—气相互作用在整个热带印度洋和太平洋都有表现。

东亚季风的季节预测是短期气候预测的热点和难点科学问题,影响因素的多样性和物理过程的复

杂性很可能是造成东亚季风难以预测的主要原因。Wu^[21]回顾了课题组对于夏季风季节预测研究的若干新进展。他们研究发现,除了 ENSO 以外,春季北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 是影响东亚夏季风年际变率的另一个重要因子,而与春季 NAO 相耦合的北大西洋三极子海温异常模态是联系春季 NAO 和东亚夏季风的关键纽带。基于此,他们利用春季 NAO 和 ENSO 建立了一个东亚夏季风经验预测模式。经对比发现,该模式具有和 14 个国际一流气候模式集合预报结果相当的预测能力。除 ENSO 和 NAO 外,青藏高原雪盖能在年代际尺度上调制东亚夏季风与 ENSO 的联系:当高原雪盖减少时,东亚和西北太平洋上空急流减弱,有利于 ENSO 激发出的热带外 Rossby 波振幅加大并向西发展,从而增强 ENSO 与东亚夏季风间的联系。高原雪盖的这种年代际调制作用,为利用 ENSO 预测东亚夏季风提供了新的物理依据^[21]。

评估全球变暖对季风气候系统的影响是季风研究的重要方向之一。西北太平洋副热带高压 (西太副高) 是影响东亚夏季气候的重要大气环流系统。随着人为温室气体排放导致的全球变暖,未来西太副高的可能变化已经引起了东亚学者的广泛关注。何超等^[22]使用第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 的 30 余个耦合模式,基于环流指标的预估结果表明,未来对流层中层的西太副高明显减弱但对流层低层的西太副高强度基本保持不变。在热成风关系的约束下,副高北侧经向温度梯度的减弱可以很好地解释对流层中层西太副高的减弱。而在对流层低层,预估的西太副高强度变化受控于热带印度洋—太平洋纬向海温梯度的变化。印度洋的海表面温度相对于太平洋增暖越强,则越有利于低层西太副高增强;反之有利于低层西太副高减弱。

2.4 东亚冬季风

冬季风是北半球冬季最强的环流系统之一,不仅在亚洲地区气候变化中发挥着重要作用,而且可形成穿赤道气流,影响到澳洲季风^[23,24],是全球气候系统中联接北半球和南半球气候系统的一个重要纽带。东亚冬季风主导着东亚的冬季气候,强冬季风往往带来低温、寒潮、冷害、冰冻雨雪等灾害性天气或气候事件。当与冬季风相伴的冷空气沿着东亚沿岸继续向南涌入南海以及东南亚一带时,就会在南海以及东南亚地区形成冷涌事件,容易激发局地的对流运动导致东南亚地区的异常降水。冬季风的变化亦会影响大气污染的扩散^[25,26]。此外,东亚

冬季风的影响不仅仅局限在冬季,还与来年中国北方春季的沙尘天气以及我国春夏的洪涝灾害存在着一定的关联。

ENSO 是热带地区海气耦合系统年际尺度上最主要的模态,是影响东亚冬季风变异的最重要的一个外强迫因子^[27,28]。研究发现,在 El Niño 年的冬季,东亚冬季风往往偏弱,东亚地区偏暖,中国南方和日本南部降水偏多;而 La Niña 年的情况虽然和 El Niño 年不完全对称,但是总体表现出东亚冬季风偏强,东亚偏冷,偏干的特征。陈文^[29]回顾了近年来有关东亚冬季风与 ENSO 研究方面的最新进展,包括东亚冬季风年际变化与 ENSO 关系的年代际变化,其中有太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)和热带太平洋 2 种不同类型的 ENSO 事件贡献。讨论了东亚冬季风与当年夏季风之间的联系,以及 ENSO 和 PDO 的作用。针对 CMIP5 耦合模式模拟结果评估了东亚冬季风气候态和年际变化的模拟能力,以及模式中模拟的东亚冬季风与 ENSO 关系,最后对未来的研究进行了展望^[29]。

贾晓静等^[30]研究了年代际尺度上我国冬季风降水的变化。她们基于 1960—2012 年的观测数据,使用经验正交方法分析了我国冬季降水的主要模态(Empirical Orthogonal Function, EOF1),该模态能够解释我国东南部 49.7% 降水的变化。研究发现,ENSO 和东亚冬季风对 EOF1 都有影响,其中冬季风能够影响东南沿海地区的风场,引起南风 and 北风强弱变化,造成冬季的干湿变化。在年代际尺度上,第一模态在 20 世纪 80 年代中期发生突变,以此为界将东南地区的降水划分为 2 个阶段,并分别讨论了冬季风和 ENSO 对不同阶段降水的影响。

吴志伟^[21]展示了其课题组关于东亚冬季风季节预测研究的若干新进展,发现冬季风变率为 3 个温度模态所主导。第一模态呈北方型,主要环流特征为东亚大槽向西偏移,其主要可预报性来源为中西伯利亚雪盖异常。第二模态呈南方型,环流特征为东亚大槽向南加深,前期 ENSO 和俄罗斯远东雪盖异常为其主要可预报性来源。第三模态与 2008 年初中国南方持续性暴雪这一类冬季风异常存在密切联系,数值试验结果显示前期秋季北冰洋海冰异常,以及北太平洋热带外海温异常是第三模态的主要可预报性来源。研究还发现,前期南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)异常对引发东亚冬季风变异同样起着不可忽视的重要作用^[21]。

3 古季风演化与模拟

大气科学界对全球季风的认识,为地质学界的古气候研究开辟了新的思路^[3]。汪品先和王斌领导的 PAGES(Past Interglacials Working Group)全球季风工作组(2007—2015 年)推动了古季风和现代季风的融合,从全球的视野将不同时间(年际到轨道、超轨道时间尺度)全球季风的全球性、区域性及其机制的认识提升到新的高度^[2~4]。

3.1 全球季风的过去变化

汪品先等^[4]提出,道尔效应(Dole effect)可以被用来指示全球季风的强度变化。道尔效应指现代大气氧同位素比全球平均海水氧同位素偏正约 23.5‰ 的同位素差异现象。道尔效应是一系列过程的综合效果,包括光合作用、呼吸作用和水循环过程(蒸发、降水、蒸散作用等)的同位素分馏。过去研究常常利用第四纪冰盖消长引起的同位素效应来计算道尔效应。然而,陆地降水的水汽最初来自表层海水。因此,计算道尔效应时不应该只考虑冰盖旋回的同位素效应,而应该考虑表层海水,尤其是中低纬海区表层海水的同位素演化历史^[31]。黄恩清等^[31]利用已发表的全球表层海水氧同位素集成记录^[32],重新估算了 80 万年以来的道尔效应。道尔效应的新建记录只呈现出非常规则的岁差周期,而没有出现过去的长期趋势性变化和冰消期氧同位素异常偏重等特点。与过去相比,新的道尔效应记录与天文岁差曲线,无论在振幅还是相位上,其吻合程度都有明显提升,并且 80 万年以来的道尔效应记录出现了 2 个明显的长偏心率周期。这说明即便在晚第四纪出现规模巨大的冰盖情况下,道尔效应依旧受控于岁差周期,而其他气候因素对道尔效应的干扰几乎可以忽略不计。虽然有待于进一步的证实,但学术界普遍认为道尔效应的岁差周期事实上是低纬水循环周期的体现。该研究证实在全球尺度上,季风和水循环强度受控于低纬太阳辐射量变化,而不是冰盖旋回周期,体现了低纬水循环的独立性。该研究在冰期—间冰期尺度上全球季风对水循环的影响提供了关键证据,为低纬过程气候变化中的作用提供了新的认识^[31]。

末次盛冰期的气候模拟一直是国际学术界持续关注重点时段之一^[33~35]。严蜜等^[36]利用 CMIP 5 对末次盛冰期的全球季风变化情况进行了多模式集合分析。通过末次盛冰期试验与工业革命前控制试验的对比,发现在末次盛冰期:①年平均全球季风

降水和全球季风区面积分别减少了10%和5%;②全球大部分季风区的季风强度(即局地夏季降水与局地冬季降水之差)减弱,但澳大利亚季风区除外;③局地夏季的季风降水较冬季减少更多;④与其余季风区不同,澳大利亚季风强度加强,季风区范围有所扩大。造成末次盛冰期全球季风发生上述变化的原因主要有4个,包括冰盖范围、太阳辐射、温室气体浓度及海陆分布。温室气体浓度偏低,加之北半球两大冰盖的存在,使得全球性的温度降低、水汽含量减少,从而造成全球季风降水减少以及全球季风区范围减小。南北半球太阳辐射的季节差异减小,可能是全球季风强度减弱的一个重要原因。对于各子季风系统来说,海陆分布的变化、北半球冰盖的存在以及较低的温室气体含量,造成海陆热力差异及南北半球热力差异加大,从而造成澳大利亚季风区独特的变化形势。虽然该模拟研究结果与重建结果存在一定的一致性,但是不同模式间还存在较大的不确定性,今后需要进一步深入研究^[36]。

季风对轨道尺度日射变化的响应方式是学术界关注的热点科学问题之一^[37~39]。自20世纪80年代Kutzbach^[39]提出岁差对季风气候的重要影响以来,天文尺度全球季风演化受控于各自半球的夏季日射的观点被广泛接受^[3]。亚—非—澳季风是传统的典型季风区,该区降水变率对岁差变化响应的空间差异仍然是没有被很好理解的问题。石正国^[40]基于数值模拟,对亚—非—澳季风天文变率及其物理机制做出探讨。模拟结果显示亚—非—澳季风变率具有显著的区域差异,即在同一子季风区域内,降水变率有明显差异甚至完全反相,且不同子季风系统对应的物理机制存在差异。对于北半球热带季风,季风降水变化同ITCZ在日射驱动下的南北摆动密切相关。对于北非季风,由于存在大范围陆地,ITCZ南北摆动明显,导致该地区降水呈现南北反相变化,偏北降水同北半球日射一致,偏南降水则与南半球日射一致。对于印度和西北太平洋季风,由于青藏高原大地形抑制以及较大海洋面积,ITCZ不存在南北摆动,使整个区域降水变化都与北半球日射同相。对于副热带东亚季风,降水受到Nino海温的重要调制,同样存在明显的南北反相变化,其中华北降水变化同南半球日射一致,华南降水变化同北半球日射一致;对于澳大利亚夏季风,虽然该地南北降水都与南半球日射相位相同,但两地降水都受到斜率强迫的东亚冬季风的重要影响,尤其在偏北地区,降水变率中斜率信号显著变强,甚至超过岁差。作

者认为虽然模拟季风变率中出现的与相反半球夏季日射同相的信号在物理上不一定源自于相反半球日射,但天文季风演化存在显著区域差异是完全可能的,简单把全球季风演化归因于各自半球日射的控制这一观点并不合理^[40]。上述某些结果与地质记录^[4]有不符之处,作者认为有必要进一步开展深入研究。

3.2 古亚洲夏季风变化历史重建

对于古夏季风重建方面的讨论,按照轨道尺度、亚轨道尺度进行论述。21世纪初以来,我国的石笋研究在季风变化时限方面取得突破性进展^[41,42],石笋氧同位素记录已经成为国际古气候的标准曲线之一。程海^[43]首先从石笋的古气候意义谈起,认为石笋氧同位素指标的气候意义从不断的争议中变得逐渐清晰起来,即石笋氧同位素指示大空间范围总体(累积)降水效应,而非仅仅是洞穴石笋所在地的降水量,即从低纬度热带海洋到洞穴石笋沉积之间的水汽降水同位素分馏的总体效应或结果。也正因为如此,其在亚洲季风区(包括中国东部和印度地区)相比其他指标具有更大的空间一致性。石笋氧同位素代表了更大范围的亚洲季风多时间尺度,特别是轨道—千年尺度上的气候变化。他介绍了最新发表的64万年以来亚洲季风强度变化的历史记录,将记录延至U-Th测年方法的年龄上限。该记录的研究证实了过去7次主要冰期结束和千年尺度气候事件的发生是由岁差引起的太阳辐射变化驱动的。研究同时指出距今40万年前后和最近2000年的氧同位素记录可为预测未来的气候变化提供参考。该成果不但为其他古气候序列提供了高精度的绝对年代控制,而且在探索气候系统的驱动因素和响应机制方面取得了新的认识^[44]。

备受争议的广东湛江湖光岩玛珥湖沉积古气候重建^[45~47]如今又取得了新的进展^[48]。王喜生等^[48]从环境磁学、地球化学和古植被的角度开展了磁学指标的环境意义和多指标古气候重建研究。在物源上,从环境磁学证据和稀土元素配分模式上证实湖泊的碎屑物质来源始终主要是湖岸围岩的侵蚀物,其磁化率指标主要反映流域侵蚀物特征和后期沉积环境的变化,进一步否定了磁化率反映与北方粉尘输送有关的冬季风变化的解释^[47]。结合孢粉分析结果,发现在全新世气候适宜期湛江地区热带和亚热带属种的浓度和百分含量最高,有效降雨量较大、湖面水位高;中晚全新世时期有效降雨量较小、湖面水位较低;记录也显示出新仙女木事件

(Younger Dryas, YD) 期间降水明显降低。机制分析表明,末次冰消期以来湖光岩玛珥湖相沉积总体上反映了由太阳辐射控制并受到高纬度短尺度事件显著影响的亚洲夏季风历史。该工作为我国南方热带—亚热带地区末次冰消期以来古环境演化过程和亚洲季风在我国热带地区的活动特征及其驱动机制研究提供了新线索^[49]。

在东亚夏季风千年尺度变化的历史与机制方面,赵绍华等^[50]提供了南海黏土矿物的新证据。他们对南海 MD12-3434 站位岩心的黏土矿物组成和 Nd, Sr 同位素组成进行了研究,提出蒙脱石/(伊利石+绿泥石)作为东亚夏季风的指标,并重建了末次冰期以来夏季风千年尺度变化历史。结果发现,在南海地区夏季风在间冰阶 Dansgaard-Oeschger 事件和 Bolling 暖期期间增强,而在冰阶 Heirich 事件和新仙女木事件期间减弱。该研究进一步证明东亚夏季风在千年尺度上快速响应高纬度地区气候的变化。

树轮古气候记录在探讨百年尺度到年际尺度气候变化上具有很大优势。由于器测记录的历史较短,印度季风在多年代际以及百年尺度的精确信息仍是印度夏季风古气候重建的难点之一。代用记录显示过去几百年印度夏季风存在多年代际—百年尺度的振荡变化,但季风区内不同地区的不同地质记录所揭示的印度夏季风过去几百年的变化趋势仍然不一致,需要进一步发展新的指标序列的研究工作。树木年轮具有定年准确、年分辨率和分布广泛的特点。树轮氧同位素的分馏主要受控于季风季节大气降水的氧同位素和相对湿度的变化,而二者都受到印度夏季风的影响,因此树轮氧同位素可以反映印度季风的变化。许晨曦等^[51]建立了喜马拉雅山南麓的近 400 年来树轮氧同位素变化序列,发现该区域的树轮氧同位素与印度夏季风指数、全印度降水具有显著的负相关关系,区域树轮氧同位素变化是印度夏季风的良好代用指标。周期分析表明研究区树轮氧同位素揭示的过去 400 年印度夏季风的变化主要以 2~7 年的年际变化为主,且与赤道太平洋的海表温度显著相关,主要受到 ENSO 的影响。在百年尺度上,印度夏季风体现出在近 200 年来减弱的趋势,其可能原因是赤道印度洋的海温近 200 年持续升高导致海陆热力差异减弱。

区域古气候记录集成是捕捉区域气候变化整体特征和规律、剔除局地因素影响的重要方式^[52]。过去的工作已经利用树轮宽度和氧同位素年表集成重

建了过去千年的南亚夏季风变化特征^[53],但是由于过去集成工作缺少季风核心区的树轮记录,导致其空间代表性不足。同时,对不同时间尺度分量在南亚夏季风变化频谱上的比重及其控制机理尚待深入研究。史锋等^[52]利用新发表的南亚季风核心区的印度境内 8 条树轮宽度年表,更新了过去 1 105 年南亚夏季风指数集成记录。结果显示,季风变化最为显著的年际分量(占总体变化方差的 47.9%)与 ENSO 指数的关系从 14 世纪末期的弱正相关,逐渐变为 19 世纪初期的显著负相关关系,且其相关性存在明显的百年际变化。并讨论了占 17.5% 季风年代际分量与 PDO、占 4.2% 的季风多年代际分量与大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)的关系,说明气候系统短周期振荡 ENSO, PDO 和 AMO 对南亚夏季风变化从年际到多年代际进行由强变弱的不同程度的调制。

3.3 古亚洲季风模拟

王跃等^[54]利用地球系统模式(the Community Earth System Model, CESM)开展了 250 ka 以来的东亚夏季风的瞬变模拟研究。结果发现与现今亚洲—太平洋涛动相似的“古亚洲—太平洋涛动”(paleo-APO)是受岁差变化驱动的。古亚洲—太平洋涛动与岁差呈反相变化,该指数和夏季风模拟结果在岁差周期上与我国的石笋氧同位素记录具有很好的一致性,暗示石笋氧同位素可能反映了夏季风的变化。敏感性实验进一步揭示出岁差降低将导致古亚洲—太平洋涛动指数的升高,并引起夏季风增强。

对于百年尺度夏季风的模拟也取得了新的进展。根据气候代用资料,过去 1 500 年以来中国东部在 622—735 年(D1)和 1420—1516 年(D2)发生了 2 次百年尺度的干旱事件。孙炜毅等^[55]基于地球系统模式 CESM 对上述百年尺度干旱事件的特征和机理进行了研究。结果发现,在 D1 时期,干旱发生在中国东部的北方地区和长江流域,而南方地区降水相对增多;在 D2 时期,整个中国东部地区降水减少。导致上述 2 个时期降水减少的直接原因是东亚夏季风的减弱,具体过程与印度—太平洋的海气相互作用紧密联系。研究进一步探讨了西太平洋和北印度洋不同海洋地区降温对 D1 和 D2 时期季风降水减少的控制作用,以及 2 个时期海温异常与太阳辐射和火山活动的关系。

地质时期温暖期的成因对认识未来气候变化的控制因素具有重要意义。中上新世是发生在 3 Ma 前后一个地质暖期,具有与现今接近的海陆分布、动

植物群落以及高于现今的大气 CO₂ 浓度、海平面高度和低于现今的格陵兰冰盖。该地质暖期气候通常被视为现今气候到 21 世纪末最可能出现的一个气候相似型^[56,57]。因此研究该时期气候变化有助于回答全球变暖背景下未来气候变化的可能性和不确定性。孙咏等^[58]将现代气候动力学方法运用到古气候模拟研究领域,理解中上新世暖期东亚夏季风降水增强的热力和动力成因。利用水汽收支方程研究提出中上新世夏季风增强的热力成因是当时地表升温的响应引起大气中水汽含量增加,利用湿静力能方程研究,揭示夏季风增强的动力成因是纬向热力对比加强东亚季风环流及与之相关的水汽输送,并经局地定常经向风辐合增加,从而使中上新世暖期东亚夏季风降水增加亚洲冬季风是古季风研究的重要内容,其演化与高纬过程具有密切的联系^[59~62]。地质证据也显示出冬季风具有广阔的影响范围,冬季风可以通过作用于南海表层水的活动影响南海海洋生产力、温跃层变化和表层海水温度梯度^[63~65];通过穿赤道气流在亚—澳季风的耦合演化中发挥重要的作用。例如,全新世亚洲冬季风驱动可能是导致全新世时期南半球澳大利亚与当地夏季太阳辐射变化不一致的重要原因^[45]。令人遗憾的是本次专题对地质历史时期的冬季风演化讨论较少,仅在山西公海湖泊沉积的粉尘记录研究中略有涉及^[66,67]。

目前对于区域气候变化的一些大的研究计划正在酝酿之中。朱立平等^[68]介绍了在青藏高原腹地纳木错湖申请国际大陆钻探计划的近期进展。如果该计划得以实施,有望对印度季风和西风环流影响的过渡区建立 1.5 Ma 以来时间尺度长、连续性好的气候环境记录序列,进一步理解青藏高原环境演化与地球系统的关系。

4 结 语

我国科学家对全球季风研究的视野不断拓宽,多个领域的研究正在或者已经跻身于国际学术研究的前沿。从这次会议可以看出一些新的动向,古气候学家和现代气候学家的交流正在日益增多,现代气候和古气候研究结果之间的相互印证在不断加强;在注重数据分析的同时,越来越多的研究组开展了古气候模拟的研究工作,数值模拟已经成为古气候研究中的重要手段;古气候的研究正在实现从现象描述到机理探索的转变,利用数值模拟来解释古气候变化的机理得到了越来越多的运用。

从地球系统科学的角度来看,季风是连接地球系统不同圈层之间的一个重要纽带,在地球系统中的水循环、能量循环和物质循环等过程中起着重要的作用。季风既有区域性,也具有全球性。因此,对季风的深入认识,需要进一步理解不同区域季风子系统之间的相互作用以及全球与区域季风演化耦合的机理,进一步理解自然因素(外部驱动和内部反馈过程)和人为因素对季风的影响机制,认识不同时间和空间尺度季风系统的演化在地球系统变化中的作用。我国科学家已经在季风领域具备了雄厚的学术积累和良好的学科研究平台,假以时日,我国季风研究有望较快在学科核心科学问题上取得原创性的突破。

参考文献(References):

- [1] Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(22): 3 969-3 993.
- [2] Wang B, Ding Q. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008, 44(3/4): 165-183.
- [3] Wang Pinxian. Global monsoon in a geological perspective[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 1 113-1 136. [汪品先. 全球季风的地质演变[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 535-556.]
- [4] Wang P, Wang B, Cheng H, et al. The global monsoon across timescales: Coherent variability of regional monsoons[J]. *Climate of the Past*, 2014, 10(6): 2 007-2 052.
- [5] An Z, Wu G, Li J, et al. Global monsoon dynamics and climate change[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43(1): 29-77.
- [6] Feng Juan, Li Jianping. Variation of the South China Sea summer monsoon and its association with the global atmosphere circulation and sea surface temperature[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 568-580. [冯娟, 李建平. 南海夏季风变化及其与全球大气和海温的关系[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 568-580.]
- [7] Zhu Q, He J, Wang P. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, 3(4): 466-477.
- [8] Zhang R, Zuo Z. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in East China[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3 309-3 322.
- [9] Zhang R, Wu B, Han J, et al. Effects on summer monsoon and rainfall change over China due to Eurasian snow cover and ocean thermal conditions[M] // Singh B R, ed. *Climate Change-Realities, Impacts over Ice Cap, Sea Level and Risks*. Rijeka: In-Tech, 2013: 227-250.

- [10] Zhang R. Natural and human-induced changes in summer climate over the East Asian monsoon region in the last half century: A review[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(2): 131-140.
- [11] Sperber K R, Annamalai H, Kang I S, *et al.* The Asian summer monsoon: An intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century [J]. *Climate Dynamics*, 2013, 41(9/10): 2 711-2 744.
- [12] Kitoh A, Endo H, Krishna Kumar K, *et al.* Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(8): 3 053-3 065.
- [13] Song F, Zhou T, Qian Y. Responses of East Asian summer monsoon to natural and Anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 596-603.
- [14] Zhou Tianjun, Chen Xiaolong, Liu Bo, *et al.* Overview of the Global Monsoons Model Inter-comparison Project (GMMIP): Aims and progress[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [何天军, 陈晓龙, 刘博, 等. 全球季风模拟研究国际计划(GMMIP): 科学目标与研究进展[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [15] Zhou T, Turner A, Kinter J, *et al.* Overview of the Global Monsoons Model Inter-comparison Project (GMMIP) [J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2016, doi: 10. 5194/gmd-2016-69.
- [16] Liu F, Chai J, Wang B, *et al.* Global monsoon precipitation responses to large volcanic eruptions[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [17] Zhou Lei, Murtugudde R, Chen Dake, *et al.* The Mode in Mid-Indian Ocean and the Indian Summer Precipitation [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [周磊, Murtugudde R, 陈大可, 等. 中印度洋模态和印度夏季风的降水[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [18] Chen Xiaolong, Zhou Tianjun. Effects of climate sensitivity and regional sea surface warming pattern on projected uncertainty in the South Asian Summer Monsoon[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [陈晓龙, 周天军. 气候敏感度和海温增暖型对南亚季风预估不确定性的影响[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [19] Wu B, Zhou T, Li T. Impacts of the Pacific-Japan and circum-global teleconnection patterns on interdecadal variability of the East Asian summer monsoon[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [20] Zheng Bin, Lu Feng, Wei Hongcheng. Quasi-two-years oscillation of atmosphere-ocean interaction of the South China Sea summer monsoon[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [郑彬, 卢峰, 魏红成. 南海夏季季风准两年振荡相关的海气相互作用过程[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [21] Wu Z. On the predictable climate dynamics of the East Asian Monsoon [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [22] He Chao, Zhou Tianjun, Lin Ailan, *et al.* Enhanced or weakened Western North Pacific Subtropical High under global warming? [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [何超, 周天军, 林爱兰, 等. 全球变暖导致西太副高增强还是减弱? [C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [23] Suppiah R, Wu X. Surges, cross-equatorial flows and their links with the Australian summer monsoon circulation and rainfall[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47(2): 113-130.
- [24] Chen L, Zhu Q, Luo H, *et al.* East Asian Monsoon [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 304-346.
- [25] Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science in China (Series D)*, 2014, 57(1): 26-35. [张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: D辑, 2014, 44(1): 27-36.]
- [26] Li Q, Zhang R, Wang Y. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1): 346-354.
- [27] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1996, 74(1): 49-62.
- [28] Zhang R, Li T, Wen M, *et al.* Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(3/4): 559-567.
- [29] Chen Wen. Progress in the investigating the link of the East Asian winter monsoon to the ENSO [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [陈文. 东亚冬季风变异与 ENSO 研究进展[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [30] Jia X, Ge J, Lin H. The interdecadal change of the winter precipitation over China [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [31] Huang Enqing, Wang Pinxian, Tian Jun, *et al.* The global monsoon recorded by changes in the dole effect over the past 800ka [C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [黄恩清, 汪品先, 田军, 等. 80 万年以来道尔效应揭示的全球季风变化[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [32] Shakun J D, Lea D W, Lisiecki L E, *et al.* An 800-kyr record of global surface ocean $\delta^{18}\text{O}$ and implications for ice volume-temperature coupling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 58-68.
- [33] Kutzbach J E, Guetter P J, Behling P, *et al.* Simulated climatic changes: Results of the COHMAP climate-model experiments [M]//Wright H E, Kutzbach J E, Wobb T, *et al.*, eds. Global

- Climates Since the Last Glacial Maximum, 1993: 24-93.
- [34] Braconnot P, Otto-Bliesner B, Kageyama M, *et al.* Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum-Part 1: Experiments and large-scale features[J]. *Climate of the Past*, 2007, 3(2): 261-277.
- [35] Braconnot P, Otto-Bliesner B, Harrison S, *et al.* Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum-Part 2: Feedbacks with emphasis on the location of the ITCZ and mid-and high latitudes heat budget[J]. *Climate of the Past*, 2007, 3(2): 279-296.
- [36] Yan Mi, Wang Bin, Liu Jian. Global monsoon change during the Last Glacial Maximum; A multi-model study[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [严蜜, 王斌, 刘健. 末次盛冰期的全球季风——多模式集合分析[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [37] Clemens S, Prell W, Murray D, *et al.* Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon[J]. *Nature*, 1991, 353(6 346): 720-725.
- [38] Clemens S C, Prell W L. The timing of orbital-scale Indian monsoon changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(3): 275-278.
- [39] Kutzbach J E. Monsoon climate of the early Holocene: Climate experiment with the Earth's orbital parameters for 9000 years ago[J]. *Science*, 1981, 214(4 516): 59-61.
- [40] Shi Zhengguo. The regional difference in the orbital changes in Asia-Africa-Australia monsoon; Evidence from climate modelling[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [石正国. 天文尺度亚—非—澳季风演化的区域差异: 基于数值模拟的探讨[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [41] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5 550): 2 345-2 348.
- [42] Yuan D, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5 670): 575-578.
- [43] Cheng Hai. Multi-scale changes of the Asian Monsoon[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [程海. 石笋记录中的多尺度亚洲季风[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [44] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, *et al.* The Asian monsoon over the past 640 000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7 609): 640-646.
- [45] Wang L, Li J, Lu H, *et al.* The East Asian winter monsoon over the last 15,000 years; Its links to high-latitudes and tropical climate systems and complex correlation to the summer monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 32: 131-142, doi:10.1016/j. quascirev. 2011. 11. 003.
- [46] Zhou H, Guan H, Chi B. Record of winter monsoon strength[J]. *Nature*, 2007, 450(7 168): E10-E11.
- [47] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, *et al.* Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon[J]. *Nature*, 2007, 445(7 123): 74-77.
- [48] Wang X, Chu G, Sheng M, *et al.* Millennial-scale Asian summer monsoon variations in South China since the last deglaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 22-30, doi:10.1016/j. epsl. 2016. 07. 006.
- [49] Wang Xisheng, Chu Guoqiang, Cheng Mei, *et al.* The magnetoclimatic records from Huguang Maar Lake, Zhangjiang, Guangdong Province since the Last Deglaciation and the implication for the changes in Asian summer monsoon[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [王喜生, 储国强, 盛美, 等. 末次冰消期以来广东湛江湖光岩玛珉湖的磁—气候记录与亚洲夏季季风演化[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [50] Zhao S, Liu Z, Zhao Y, *et al.* Clay mineralogical responses to rapid millennial-scale changes of the East Asian summer monsoon during the last glaciation in the northern South China Sea[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [51] Xu Chenxi, Sano Masaki, Takeshi Nakatsuka, *et al.* Tree ring $\delta^{18}\text{O}$ series of the Indian summer monsoon over the recent 400 years[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [许晨曦, 佐野雅规, 中塚武, 等. 树轮氧同位素记录的印度夏季季风近400年来的变化[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [52] Shi Feng, Fang Keyan, Xu Chenxi, *et al.* Changes in the South Asian summer monsoon over the past millennium[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [史锋, 方克艳, 许晨曦, 等. 近千年来南亚夏季季风变迁[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [53] Shi F, Li J, Wilson R J, *et al.* A tree-ring reconstruction of the South Asian summer monsoon index over the past millennium[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4, doi:10.1038/srep06739.
- [54] Wang Y, Jian Z, Zhao P, *et al.* Relative roles of land- and ocean-atmosphere interactions in Asian-Pacific thermal contrast variability at the precessional band[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016.
- [55] Sun Weiyi, Liu Jian, Wang Zhiyuan. Modeling study of century-scale drought events in Eastern China over the past 1500 years[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [孙炜毅, 刘健, 王志远. 过去1500年中国东部百年干旱事件的模拟研究[C]//第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [56] Haywood A M, Dowsett H, J, Dolan A M. Integrating geological archives and climate models for the mid-Pliocene warm period[J]. *Nature communications*, 2016, 7, doi:10.1038/ncomms10646.
- [57] Zubakov V, Borzenkova I. Pliocene palaeoclimates: Past climates as possible analogues of mid-twenty-first century climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1988, 65(1): 35-49.
- [58] Sun Yong, Zhou Tianjun, Gilles R, *et al.* Drivers and mechanisms for enhanced summer monsoon precipitation over East Asia

- during the Mid-Pliocene[C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [孙咏, 周天军, Gilles R, 等. 中上新世晚期东亚夏季降水增强的热力和动力成因[C] // 第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [59] Ding Z, Liu T, Rutter N W, *et al.* Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 149-159.
- [60] Hao Q, Wang L, Oldfield F, *et al.* Extra-long interglacial in Northern Hemisphere during MISs 15-13 arising from limited extent of Arctic ice sheets in glacial MIS 14[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5, doi:10.1038/srep12103.
- [61] Hao Q, Wang L, Oldfield F, *et al.* Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability[J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 393-396.
- [62] Guo Z, Peng S, Hao Q, *et al.* Late Miocene-Pliocene development of Asian aridification as recorded in the Red-Earth Formation in northern China[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(3): 135-145.
- [63] Yu P S, Huang C C, Chin Y, *et al.* Late Quaternary East Asian Monsoon variability in the South China Sea: Evidence from planktonic foraminifera faunal and hydrographic gradient records[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 236(1): 74-90.
- [64] Huang Enqing. Correlation of the East Asian winter monsoon recorded in the marine and Terrestrial Archives since the Middle Pleistocene[C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [黄恩清. 中更新世以来东亚冬季风海陆记录对比[J]. 第四纪研究, 2015, 35(6): 1331-1341.]
- [65] Jian Zhimin, Wang Pinxian, Zhao Quanhong, *et al.* Late pliocene enhanced East Asian Winter Monsoon: Evidence of isotope and foraminifers from the Northern South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 461-469. [蒋翥潜, 汪品先, 赵泉鸿, 等. 南海北部上新世晚期东亚冬季风增强的同位素和有孔虫证据[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 461-469.]
- [66] Chen F, Xu Q, Chen J, *et al.* East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5, doi:10.1038/srep11186.
- [67] Chen Shengqian, Wang Xin, Liu Jianbao, *et al.* Changes in aeolian dust flux during the Holocene recorded in the Gonghai Lake in, Shanxi Province[C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [陈圣乾, 王鑫, 刘建宝, 等. 山西公海湖泊记录的全新世粉尘演化历史研究[C] // 第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]
- [68] Zhu Liping, Wang Junbo, Daut G, *et al.* The scientific implication of Deep Drilling in Nam Co, Tibet Plateau[C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [朱立平, 王君波, Daut G, 等. 青藏高原纳木错深孔环境钻探的意义[C] // 第四届地球系统科学大会摘要. 上海, 2016.]

Monsoons across Multi-scales: Summary of Fourth Conference on Earth System Science*

Hao Qingzhen^{1,2}, Zhang Renhe³, Wang Pinxian⁴, Wang Bin⁵

(1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Severe

Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

4. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

5. Department of Atmospheric Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu HI 96822, USA)

Abstract: The evolution and future projection of the regional and global monsoons, one of the major components of Earth climate system in the low-latitudes and middle-latitudes, has long been the research focus in the paleoclimate and modern climate communities. Session 4 of the 4th Conference on Earth System Sciences (CESS) in

* **Foundation item:** Project supported by the Ministry of Land and Resources of China "Integrated study on difference and the driving mechanism of different Chinese monsoon regimes" (No. 201211077); The National Natural Science Foundation of China "Carbonate isotope compositions of the Neogene paleosols and vegetation changes" (No. 41430531).

First author: Hao Qingzhen (1971-), male, Baixiang County, Hebei Province, Professor. Research areas include stratigraphy and paleoclimate study for the aeolian deposits. **E-mail:** haoqz@mail.iggcas.ac.cn

Shanghai focused on the evolution, variability, and driving mechanism of regional and global monsoon system across multiple timescale, and the role of the monsoon system in changes in the Earth system. During the session, the issues of features of past and contemporary monsoons based on observation data and geological reconstruction, model simulation of past and contemporary monsoons, and response of monsoon climate to the past and present global warming were intensively discussed. The future research directions were also addressed.

Key words: Global monsoon; Asian monsoon; Paleomonsoon; Modeling of monsoon; Multi-scale variation.

新研究表明大气气溶胶使风暴云加强

2016年6月13日,美国得克萨斯大学(University of Texas)、科罗拉多大学(University of Colorado)和国家航空航天局(NASA)的一项研究首次提供观测证实,大气气溶胶会延长风暴生命周期,促进风暴云增长,从而产生更多极端风暴。相关成果《气象条件和气溶胶对中尺度对流系统生命周期的相对影响》(Relative Influence of Meteorological Conditions and Aerosols on the Lifetime of Mesoscale Convective Systems)发表于《美国国家科学院院刊》(PNAS)。

中尺度对流系统(MCSs)是热带和中纬度地区主要的降水来源,其生命周期对降水具有重要影响,尤其是引发洪涝的极端降水。气溶胶通过减弱或推迟降水从而延长风暴云周期的假说早已被提出,但在全球和区域尺度上的延长程度是否具有显著性还不得而知。因此,研究人员利用2003—2008年地球同步卫星和极轨卫星数据,对2430个对流云系统进行分析,提供了首个气溶胶对中尺度对流系统(MCSs)生命周期影响的观测评估。

研究发现,气溶胶可使对流云系统的生命周期延长,变化幅度与区域气象条件相关。环境气溶胶光学厚度(AOD)增加1个单位,MCSs的生命周期延长3~24 h,可以解释延长阶段24%的生命周期的变化。影响MCSs生命周期的其他气象因子还包括对流有效位能(CAPE)、相对湿度和垂直风切变等。研究还指出在不同地区,气溶胶对风暴生命周期的影响不一。在赤道南美地区的影响为20%~22%,比赤道非洲地区高8%;而印度洋气溶胶对南亚地区的影响为20%。

(刘燕飞编译)

原文题目:Relative Influence of Meteorological Conditions and Aerosols on the Lifetime of Mesoscale Convective Systems

来源:<http://www.pnas.org/content/early/2016/06/15/1601935113>