

对话姚檀栋: 走近第二次青藏高原综合科学考察

张冬梅, 张莉

Tandong Yao: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research

Dongmei Zhang & Li Zhang

doi: 10.1360/TB-2019-0267

青藏高原是中国最大、世界海拔最高的高原, 作为地球上最独特的地质-地理-生态单元, 是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地, 是中华民族特色文化的重要保护地. 2017年8月19日, 在拉萨启动了第二次青藏高原综合科学考察研究(简称第二次青藏科考)国家专项. 系统开展第二次青藏科考, 将为“守护好世界上最后一方净土”、“建设美丽的青藏高原”和绿色丝绸之路建设提供重要科技支撑. 到2019年9月, 第二次青藏科考已历时两年多, 陆续取得了一批重要的成果. 为进一步了解第二次青藏科考和此领域相关研究, 《科学通报》对话第二次青藏科考队队长、中国科学院院士、中国科学院青藏高原研究所姚檀栋研究员, 分享他的工作以及不同寻常的经历和用实践积累的宝贵经验. 姚檀栋从事冰川与环境变化和地球系统科学研究. 相关研究成果在*Nature*, *Science*, *Nat Clim Change*, *Nat Geosci*, *Rev Geophys*, *Proc Natl Acad Sci USA*, *Bull Amer Meteorol Soc*, *J Geophys Res*等杂志发表. 他在青藏高原冰川与环境变化方面的研究成果, 不仅为科学发展做出了贡献, 而且为社会经济发展做出了贡献.

《科学通报》: 2017年我国开始了第二次青藏科考, 作为科考队队长您可否介绍一下本次科考的目标、任务和特点?

姚檀栋: 从第一次青藏科考开始, 距今已近50年. 这50年来, 青藏高原自然与社会环境发生了巨大变化. 最大的变化是气候变暖, 这一地区的气候变暖幅度是同期中国东部和全球平均值的2倍, 因此是全球变暖背景下环境变化不确定性最大的地区. 与此密切相关的变化是青藏高原水循环和生态及生物多样性的重大变化. 冰川退缩、冻土退化、冰湖溃决、草地退化等对人类生存环境和经济社会发展造成了重大影响. 冰崩作为一种新出现的与气候变暖密切相关巨灾过程, 影响更为严重. 2016年7和9月, 在西藏阿里地区阿汝错湖区发生了两次非常严重的冰崩灾害, 给当地人民的生命和财产安全造成了非常大的损失, 这是以前没有发生过的现象. 2018年10月, 在雅鲁藏布江大拐弯发生了次冰崩堵江事件, 形成堰塞湖, 导致上游水位上



中国科学院院士 姚檀栋

涨, 对当地和下游区域居民生命财产安全造成极大的威胁. 青藏高原环境变化的影响将是广域甚至全球的. 目前大家特别关注这种不确定性对“一带一路”沿线几十个国家和30多亿人口的生存与发展带来的环境挑战. 因此, 考察研究过去50年来环境变化和影响并提出应对方案, 既是科学发展的需求, 也是社会发展需求.

在这种背景下, 中国科学院(中科院)和西藏自治区共同推动发起第二次青藏科考. 2017年8月19日在拉萨召开了第二次青藏科考启动仪式. 习近平总书记发来贺信, 时任国务院副总理刘延东同志出席启动仪式并宣读了习总书记给中科院科考队的贺信. 习总书记在贺信中指出, “青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔, 是地球第三极, 是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地, 是中华民族特色文化的重要保护地. 这次科学考察研究要聚焦水、生态、人类活动等, 揭示青藏高原环境变化机理, 优化生态安全屏障体系, 建设美丽幸福的青藏高原, 同时要推动青藏高原可持续发展、推进国家生态文明建设、促进全球生态环境保护”. 党和国家领导人对第二次青藏科考提出的要求, 使得第二次青藏科考成为国家大事. 在国务院的直接领导下, 在科技部、中科院、西藏自治区、青海省等多方力量的协调下, 第二次青藏科考国家行动的大幕正式拉开.

第二次青藏科考将重点考察研究过去50年来青藏高原环境变化的过程与机制及其对人类社会的影响, 提出应对

“亚洲水塔”变化与影响、优化青藏高原生态安全屏障体系、建设国家战略资源储备基地、引领全球生态环境保护的科学方案。第二次青藏科考有10大任务,包括西风-季风协同作用及其影响、“亚洲水塔”动态变化与影响、生态系统与生态安全、生态安全屏障功能与优化体系、生物多样性保护与可持续利用、人类活动与生存环境安全、高原生长与演化、资源能源现状与远景评估、地质环境与灾害、区域绿色发展途径。10大任务共设计了60多个科考专题。每个任务根据自己的目标和特点,领导所属专题开展考察研究。整个科学考察研究将在包括“亚洲水塔”区、喜马拉雅区、横断山高山峡谷区、祁连山-阿尔金区、天山-帕米尔区5大综合考察研究区的19个关键区展开。

第二次青藏科考将通过高寒网、青藏高原数据中心、“第三极环境(TPE)”国际中心及其旗舰站和中科院海外科教中心等国际科学联盟,结合卫星遥感、系留浮空艇、无人机等新技术,获取大范围、多尺度、系统化、标准化的精准数据。第二次青藏科考还将通过建设科考综合基地和示范工程基地,针对气候变暖影响下典型自然灾害链重灾易发点,开展监测预警和调控,产出“用得上、有影响、留得下”的科考成果,长效支撑青藏高原地区生态环境保护和绿色可持续发展。

第二次青藏科考也将充分利用以我为主的TPE国际计划,加强与国际伙伴机构及国际科学联盟顶尖科学家的合作,引领第三极地球系统科学研究,同时将推动泛第三极和三极环境的研究。

《科学通报》: 您曾担任中科院青藏高原研究所所长,还是中科院青藏高原地球科学卓越创新中心的主任和首席科学家。从普通研究人员,到研究团队的核心,再到科学计划领导者,您是如何调整自己角色的转变?您又是如何在这个过程中协调多单位、多学科研究人员的积极协作、高效、出色地完成工作的?

姚檀栋: 我是一名科学家,进行科学研究是兴趣驱动,也是我的本源。我曾是中科院青藏高原研究所所长。作为一名有责任心的科学家,服从组织的决定,进行新的科学发展所需要的科研机构建设,是应有的担当。至于科学研究团队的组建,是一个从小我到我再到小我的哲学逻辑:当在实验室组建科研小组时,有一个围绕国际科学研究前沿方向的7~8人核心骨干小组,就可以干一件事情了;当在研究所组建团队的时候,就需要从国际科学前沿推动若干领域的众多核心科学小组的建设,组成若干科研团队,这样才能保证研究所做成推动青藏高原研究整体发展的大事;当在全国层面组建像第二次青藏科考这样规模的人才集群建设的时候,就需要把最优秀的研究团队联合到一起,这样才能推动青藏事业的发展。不管是在一个核心骨干小组,还是在一个研究团队或者在一个研究集群,科学组织者一定是科学践行者。这是国际科学发展的成功理

念和模式。用这种理念和模式,我们出色完成了中科院B类先导青藏专项。用这种理念和模式,我们将继续推动第二次青藏科考。

《科学通报》: 与其他学科不同,地学研究需要长时间的实地调查,能和我们分享一下您自己是如何一步一步、坚持不懈,取得今天的成就并获得维加奖的吗?

姚檀栋: 我的冰川学研究最早是从冰川变化和冰川物质平衡研究开始的。20世纪80年代以后,国际上已经关注到气候变化研究的重要性,冰芯研究成为高分辨率研究过去气候变化的重要途径。因此我选择到当时国际冰芯研究的最权威机构法国冰川与环境地球物理研究所做博士后研究,在那里我接触到了当时进行南极冰芯研究最前沿的科学研究团队和最顶尖的冰芯科学家Claud Lorius和Jean Jouzel。与此同时,美国的Lonnie Thompson教授的研究团队开拓了山地冰芯研究的新领域。我在法国完成博士后研究以后,就直接从法国申请去Thompson教授的冰芯实验室进行山地冰芯博士后研究。在美国期间,我和Thompson教授深入讨论了在青藏高原开展冰芯研究的重要性和可能钻取冰芯的地方,并提出了研究方案。1990年回国以后,我们全力以赴开始了青藏高原冰芯研究的征程。我们先后在祁连山敦德冰帽、西昆仑山古里雅冰帽、喜马拉雅山达索普冰川、高原腹地的普若岗日冰原、藏色岗日冰帽等地钻取了一系列冰芯。我们钻取的古里雅冰芯,是全球中低纬度迄今最深的冰芯,也是除南北极以外唯一能够提供末次冰期冰盛期以来气候环境记录的冰芯。我们在达索普冰川海拔7200 m处钻取的冰芯,是全球海拔最高的冰芯,很好地记录了这一地区过去千年以来季节到年际尺度高分辨率的气候环境变化信息。后来,我的研究方向从冰芯逐渐到冰芯中古气候记录参数的现代过程研究,特别是氢氧稳定同位素现代过程研究,这和水汽输送过程密切联系到了一起。进入21世纪,地球系统科学研究兴起,青藏高原作为地球上地球系统多圈同时存在并相互强烈作用的典型地区,冰冻圈和水循环过程与影响成为这一地区最受关注的科学问题。冰川变化和冰川物质平衡、冰川-湖泊相互作用、季风与西风协同作用都要从水循环过程的角度去理解,我们的研究思路也进一步提升到地球系统科学和多圈层相互作用研究的角度,开展青藏高原环境变化研究。我们这一代科学家很幸运,赶上了一个和平巨变的时代。这个巨变对进行青藏高原的科技人员来说,就是现在我们的野外科考装备更好了,野外科考后勤保障能力更强了,野外科考手段更先进了。浮空艇、无人机、无人船、遥感飞机、冰上机器人等新技术、新手段、新方法将会大量应用于第二次青藏科考,这将大大提高野外科考效率,但更重要的是将通过新技术的应用,提高我们的科考能力,实现科学认识的新突破。第二次青藏科考的“三新”技术应用以及科考效率和科考能力的提升,是第一次青藏科考时所

无法想象的。

《科学通报》：珠穆朗玛峰、喜马拉雅山、昆仑山、喀喇昆仑山……这些在人们看来神秘又遥不可及的地方，就是您实际考察工作的场所，风餐露宿是家常便饭，甚至要冒生命危险。要在最不适合人类生存的地方，揭开自然的奥秘，能否和我们分享一下您如何与青藏高原结缘和关于那里的难忘经历吗？

姚檀栋：我是做冰川和气候环境变化研究的。说到和冰川结缘，要追溯到我的大学时代。1978年，兰州大学安排了我作为学生代表和教师代表张林源教授参加了当时的“长江流域规划办公室”组织的长江源头考察，我们承担冰川变化考察研究任务，恢宏壮阔的高原景观和耸入云天的冰川雄姿震撼了我，也深深吸引了我。后来在美国和法国进行了阿拉斯加和阿尔卑斯冰川变化考察研究，每一次的冰川之行都会在我脑海里根植下更深的信念——我爱冰川！20世纪80年代，我从冰川变化研究进入冰芯记录研究。在高山之巔钻取冰芯，条件自然是很艰苦的，但是也拥有了欣赏绝佳冰川美景和地球雄姿的机会。1997年我们在达索普冰川7200 m的海拔钻取冰芯，晚上吃饭前大家聚在帐篷门口，朝东看已经是满天繁星，朝西看仍然夕阳余光映衬下的山色湖光，恍惚就是天上人间的瞬间切换。从我们帐篷所在的达索普冰川垭口走下去就是尼泊尔首都加德满都，有队员就开玩笑说，我们吃完晚饭出一趟国吧。兴趣就是科学的恋人。您可以想象，当全世界的登山爱好者冒着生命危险，排着长队等候3个小时登珠穆朗玛峰，仅仅是为了一览众山小的超级体验的话，我们不但实地感受了这种超级体验，更重要的是通过这种超级体验探索科学的奥秘，这是一种完美的结合！我作博士生的导师施雅风先生曾经说过，“冰川研究是一项豪迈的事业，是勇敢者的事业！”我在美国作博士后的合作导师Thompson教授今年72岁，仍然在海拔5000多米的高度钻取冰芯！对大自然的热爱，对科学的着迷，科学巨匠们的所言是他们发自内心深处的热爱自然的科学表白，科学巨匠们的所行是超出常人想象的、热爱自然的科学行动。我所经历和所感受的这些人 and 事都永远难忘。

《科学通报》：青藏高原作为气候变化的敏感地带，近年来有很多团队开展相关研究，可否谈谈您所在团队做了哪些工作？

姚檀栋：在过去几年里，我的团队主要工作是集中在青藏高原地表多圈层相互作用的两个方面：

第一，通过水体稳定同位素的研究揭示了印度季风与西风协同作用在青藏高原的3种模态。我们以青藏高原24个站点长达10年的降水稳定同位素观测结果为基础，结合目前最先进的高分辨率稳定同位素大气环流模型的模拟结果和现代气象观测数据，认识到西风和印度季风对青藏高原降水稳定同位素的影响表现为3种模态，即印度季风

模态、西风模态和过渡模态。西风模态表现为降水氧稳定同位素与气温具有相同的季节变化模式，即夏季高值，冬季低值。印度季风模态表现为降水氧稳定同位素在春季达到最高值，夏季达到最低值。过渡模态由于地处西风和印度季风影响交汇区，降水氧稳定同位素没有明显的季节性极值，当区域受单一主导大气环流控制时，温度效应相对更显著。在此认识的基础上，为了更深入地认知西风-季风传输水汽与局地对流水汽对区域水循环的贡献，我们推动了青藏高原水汽稳定同位素观测体系的建立。目前已建成了全球同类最大的、首个青藏高原大气水汽稳定同位素三维观测体系，包括西风-季风主要传输路径上的9个地表连续观测站点和实现地表至3000 m高空原位连续观测的浮空艇科学观测平台。在此体系下开展的系统而长期的观测将为青藏高原水汽传输过程研究和亚洲水塔水量变化研究提供关键科学数据。

第二，揭示了西风与季风相互作用对现代冰川和湖泊的影响。我们综合分析了青藏高原地区7个代表性区域内7000多条冰川过去30年的遥感面积变化，同时结合82条冰川的末端变化及15条典型冰川的物质平衡实地观测数据研究。结果显示：受印度季风影响的喜马拉雅山脉及青藏高原东南部呈现最强烈冰川萎缩，其特点是冰川末端强烈退缩、冰川面积急剧缩小、冰川物质平衡呈强烈负平衡。冰川萎缩程度从喜马拉雅山向西风季风相互作用过渡的高原内部递减，在西风控制的帕米尔高原萎缩程度最小，其特点是冰川长度退缩较少、冰川面积减少幅度较小、冰川物质呈微弱正平衡。青藏高原冰川呈现20世纪90年代以来加速亏损的趋势。结合卫星图像和实地调查，我们证实1976~1999年青藏高原内陆封闭湖泊变化的多样性，但1999~2010年这些湖泊的面积和深度均明显增大。1999~2010年湖面面积平均增长率是1990~1999年的3倍。青藏高原内陆湖泊和喜马拉雅山地区湖泊呈现近期南北反相变化状态：印度季风影响下的高原南部雅鲁藏布江流域湖泊面积普遍缩减，而西风控制区的北部羌塘高原湖泊普遍强烈扩张。

《科学通报》：青藏高原的冰川孕育着亚洲几大河流，据说已有超过80%的冰川在退缩，这会对我们造成什么样的影响？可否谈一下目前我国对改善青藏高原的生态环境做了哪些工作？

姚檀栋：青藏高原上发育有全球中低纬度最多的冰川，是亚洲主要大江大河的发源地，学术界也因此通常称青藏高原是“亚洲水塔”。在目前的全球气候背景下，青藏高原冰川整体呈现出退缩的态势，但是存在明显的空间差异。我们的研究发现，在高原南部喜马拉雅山、藏东南一带，这些地区的冰川受到印度季风的影响。但是近几十年来印度季风带来的降水减少了，而冰川上同时期气温又升高了，这样的格局导致了这些地区冰川在过去几十年里强烈退缩，表现为冰川长度减少，冰川面积减小，冰川厚度

减薄等。但是往高原内部,比如唐古拉山、羌塘高原一带,印度季风的影响就比较弱了,这些地区冰川退缩的幅度就比南部地区小很多。到了高原北部,尤其是高原西北部的昆仑山、喀喇昆仑山、帕米尔高原一带,基本不受印度季风的影响,这些地区的降水主要是西风环流从大西洋、北冰洋和地中海携带过来。在过去几十年,这些地区降水是增加的,虽然气温也同样在升高,但是这些地区的冰川退缩就很微弱,像西昆仑-喀喇昆仑一带,大部分冰川是比较稳定的,部分冰川甚至是前进的,出现了学术界热烈讨论的“喀喇昆仑异常”现象。

冰川退缩的影响,最直接的体现是在冰川下游的湖泊。我们的研究发现,过去几十年来,高原上主要靠冰川融水补给的湖泊都呈现出了湖泊面积扩张的态势。近期青藏高原湖泊数量的增多和面积的增大是十分明显的,80%以上的湖泊在扩张。像高原内部的色林错,以前是西藏第二大湖,但近几十年大量冰川融水汇入使得湖面快速扩张,现在已经超过纳木错成为了西藏最大的湖泊。但是湖泊扩张就会淹没周边的草场湿地,使得高原的农牧业受到影响。另一方面,冰川退缩也会造成下游地区冰湖溃决等灾害风险增加。

保护青藏高原环境一直都是我国环境保护基本国策的重中之重。早在20世纪60年代,青藏高原地区就开始启动国家级自然保护区建设;1978年以后,相继实施了一系列生态建设与环境保护工程;2009年国务院常务会议审议并通过的《西藏生态安全屏障保护与建设规划》和《青海三江源自然保护区生态保护与建设工程》,集中体现了努力构建青藏高原生态安全屏障体系的国家意志。2011年国务院颁发《青藏高原区域生态建设与环境保护规划:2011~2030年》。保护青藏高原环境是新一届中央领导集体关注的重点。习近平总书记强调,“西藏是重要的国家安全屏障,也是重要的生态安全屏障、重要的战略资源储备基地、重要的高原特色农产品基地、重要的中华民族特色文化保护地、重要的世界旅游目的地,要保护好世界上最后一方净土”。2017年启动的第二次青藏高原综合科学考察研究的重要目标之一,就是青藏高原生态环境保护。

《科学通报》:“第三极环境国际计划”受到全世界关注,这一研究是从什么时间开始的?目前进展如何?您带领科研团队正在开展青藏高原地球系统相关的研究,能做一个简单介绍吗?

姚檀栋:关于“第三极”的科学理念实际上早在20世纪就提出了来。但如何将“第三极”作为一面科学的旗帜举起来,则不是一件容易的事。要举起这面旗帜,需要有全球关注的前沿科学问题的引导,需要有可实施的先进科学方案,需要有一流国际科学团队的联合,需要一定规模的研究经费的支持。在经过相当时间的酝酿和准备之后,2009年所有这些必要条件都基本具备,这一年“第三极环境国

际计划(简称TPE)”正式启动。2012年,中科院启动了战略性先导科技专项(B类)“青藏高原多圈层相互作用及其资源环境效应”,进一步强化了对TPE的全方位支持,同时也取得了具有重要国际影响力的突破性成果:提出了青藏高原碰撞隆升时空变化的新观点、证实了青藏高原的远程辐散源效应、发现了西风—季风作用下的链式响应对青藏高原现代环境的决定性影响。与这几项突破相关的SCI科学论文约900篇,包括20多篇*Nature*、*Science*等国际顶级期刊论文。中科院文献情报中心统计近期国际上青藏高原的研究工作,中国不仅仅在发文量和引用频次上超越了欧美大国,在高端杂志发表的论文也赶了上来。与此同时,研究成果的国际影响力也日益剧增。关于第三极冰川变化的研究成果进入了汤森路透(现Clarivate Analytics公司)评选出的2015年和2016年地学十大前沿领域的第一方阵。同处在第一方阵,大家提出的问题也是相似的:未来青藏高原研究的国际前沿方向在哪里?未来青藏高原研究国际前沿方向的旗帜是什么?未来青藏高原研究归集前沿的突破点在哪里?这些都需要有新的定位。从2015年开始,TPE的核心科学团队就在不断探讨这方面的问题,大家的认识也在不断深化。目前的基本共识是,地球系统科学是未来TPE的领跑方向,多圈层过程和作用是TPE地球系统研究中的一面旗帜,环境变化与影响及其应对是近期TPE研究的科学突破点。在这种理念下,青藏高原就不能作为一个孤立的地质地理单元来研究,而是要放在区域甚至全球的大背景上来研究。因此,从2015年以来,TPE的国际顶级专家们在尼泊尔加德满都、美国哥伦布、瑞士达沃斯、瑞典哥德堡等地举行的专门讨论会上,就如何在地球系统科学新高度开展了广泛而深入的讨论,提出了从TPE到PAN-TPE,从PAN-TPE到TPEC的大科学思路。相信这一全球科学共识的新的科学前沿将引导我们走向新的科学突破。

《科学通报》:您对未来我国地球科学的发展方向有何展望?对年轻科研工作者的培养有何建议和期望?

姚檀栋:21世纪,地球科学的发展呈现出向地球系统科学发展的趋势。地球系统科学研究要将大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈、生物圈、人类圈等不同的地球圈层研究有机整合起来,揭示各个子系统之间相互联系和相互作用的机制,为全球环境变化和可持续发展建立科学基础,并为地球系统变化预测和管理提供依据。地球系统科学研究的空间范围从地下到地球外层大气空间,时间尺度从地质历史时期的数亿年到未来数十年。我们前期通过中科院B类先导专项在青藏高原地球系统科学研究方面做了一些初步尝试,得到了一些重要的成果,也为以后的研究奠定了基础。我们现在推动的第二次青藏高原综合科学考察研究国家专项和正在实施的中科院A类先导专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”研究都是围绕青藏高原和以青藏高原为核心的泛第三极地区的地球系统科学

开展研究。

对年轻科研工作者培养这个问题,我简单谈一谈我对自己学生的培养。首先,兴趣非常重要,科学研究如果没有兴趣是很难坚持下去的。我的硕士生、博士生入学之后,通常都会让他们先熟悉我所从事的研究领域的最新研究动态,从中挑选自己感兴趣的方向,然后我们再多次交流,让他们逐步进入角色。其次,要坚持、要耐得住寂寞。我的学生确定好研究方向后,就需要自己去查阅相关文献,熟悉样品的获取、前处理、实验等流程。这些过程往往是高强度的脑力劳动、高强度的体力劳动、重复性的实验流程、很枯燥的工作环境的交替,所以需要毅力和忍耐。有了观测数据和实验结果,就要通过讨论提炼正确结论。我要做的就是引导他们、调动他们的主观能动性,使用正确的科学研究思路和方法,准确把握学科领域的前沿和热点,发现科学问题和解决科学问题。全身心投入十分重要。我常说8小时是做不出优秀科研成果的,要专心投入科研工作才有可能出好成果。最后,要有团队合作精神。我经常给学生强调,地学研究不是单打独斗,一定是一个团队形成

合力去做事。想着从别人那里或从这个团队那里去获取什么的时候,同时要想着自己能够给这个人或这个团队奉献点什么。

《科学通报》:作为学术沟通的桥梁,您认为《科学通报》应该怎样定位和发展,从而更好地为科学交流服务?

姚檀栋:《科学通报》是国内一份非常优秀的综合性学术期刊。我们团队,包括我本人有很多重要的成果都发表在《科学通报》上。现在《科学通报》中英文版分开了,这个变化很好。中文版针对国内的读者,继续保持国内受众面广的特色;英文版针对国际读者,介绍最新创新研究成果。这两年《科学通报》英文版改革后上升非常快,2019年的影响因子到了6.277。《科学通报》应该将扩大国际影响力作为今后的重点任务,包括扩大投稿队伍的国际群体、提高评审人的审稿能力和提高稿件的评审质量。我相信《科学通报》会发展得越来越好,并成为国际上重要的科学研究交流平台。

推荐阅读文献

- 1 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2019, 100: 423–444
- 2 Gao J, Yao T, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. *Nature*, 2019, 56: 19–21
- 3 Yao T D, Xu B Q, Guo Z T, et al. Assessment of environmental change on Tibetan Plateau (in Chinese). 2015 [姚檀栋, 徐柏青, 郭正堂, 等. 青藏高原环境变化科学评估. 2015]
- 4 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 663–667
- 5 Yao T, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. *Rev Geophys*, 2013, 51: 525–548
- 6 Yao T, Wu F, Ding L, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: A review of the recent researches. *Natl Sci Rev*, 2015, 2: 468–488
- 7 Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 22114–22118
- 8 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nat Geosci*, 2018, 11: 114–120
- 9 Piao S, Tan J, Chen A, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nat Commun*, 2015, 6: 6911
- 10 Shen M, Piao S, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 9299–9304
- 11 Liang E, Wang Y, Piao S, et al. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 4380–4385
- 12 Li X, Jiang L, Meng F, et al. Responses of sequential and hierarchical phenological events to warming and cooling in alpine meadows. *Nat Commun*, 2016, 7: 12489
- 13 Zheng H, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 7556–7561
- 14 Ni X, Li Q, Li L, et al. Oligocene primates from China reveal divergence between African and Asian primate evolution. *Science*, 2016, 352: 673–677