

引用格式：姚檀栋, 黄建平, 徐柏青, 等. 绿色丝绸之路建设的气候变化科技应对战略. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1264-1272, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230715001.

Yao T D, Huang J P, Xu B Q, et al. Climate change adaptation and mitigation strategies for building a Green Silk Road. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(9): 1264-1272, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230715001. (in Chinese)

绿色丝绸之路建设的气候变化科技应对战略

姚檀栋^{1*} 黄建平² 徐柏青¹ 王艳芬³ 陈曦⁴ 刘俊国⁵ 段青云⁶ 邬光剑¹ 王伟财¹

1 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101

2 兰州大学 大气科学学院 兰州 730000

3 中国科学院大学 北京 101408

4 中国科学院新疆生态与地理研究所 乌鲁木齐 830011

5 华北水利水电大学 水利学院 郑州 450046

6 河海大学 水文水资源学院 南京 210024

摘要 绿色丝绸之路建设是高质量共建“一带一路”的重要领域，对于构建丝绸之路人类命运共同体具有重要意义，其沿线地区面临着气候异常变暖导致的极端事件频发、水资源分配不均等自然过程问题，同时也面临着资源管理粗放、生态与生物多样性保护不足、碳汇潜力利用缺失等管理过程问题。因此需要加强沿线地区气候变化应对的科技合作，提升绿色丝绸之路建设质量。在战略层面上，我国需要重点开展气候变化影响下的水—生态变化规律与协同管理、生态系统碳汇功能与碳交易机制、绿色能源发展、第三极和泛第三极环境变化与应对战略研究等方面的科技合作。在政策层面上，应加强山水林田湖草沙冰一体化生态屏障建设，创新保护—开发—利用全链条水资源长期战略，建立系统的监测-研究-预警-服务平台，推动和培育国际大科学计划。

关键词 绿色丝绸之路，气候变化，水资源，碳汇，第三极，泛第三极环境

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230715001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20230715001

作为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者和引领者，我国正与联合国携手共同推动落实《2030年

可持续发展议程》，通过共建“一带一路”推动全球生态环境保护和绿色发展。绿色丝绸之路建设是“一

*通信作者

资助项目：中国科学院“一带一路”创新发展重大咨询项目（2021-LSH-SMDX-001），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20000000）

修改稿收到日期：2023年9月10日

带一路”高质量发展的重要内容。绿色丝绸之路建设高度契合我国生态文明建设理念，顺应全球绿色、低碳、可持续发展趋势。气候变化是人类社会面临的共同挑战，同样深刻影响着“一带一路”沿线地区（本文所指“一带一路”沿线地区为“一带一路”倡议提出之初目标合作区域的64个国家，以下简称“沿线地区”）赖以生存的自然环境和经济社会的可持续发展。积极应对丝绸之路的气候变化，践行绿色发展理念，推进生态文明建设，是推进“一带一路”高质量发展、构建“一带一路”人与自然生命共同体的重要载体。

1 绿色丝绸之路建设面临的气候变化问题

1.1 气候异常变暖引发极端事件频发

沿线地区气候特征复杂，包括湿润的东南亚/南亚、极度干旱的中亚/西亚、高寒的青藏高原等气候带。总体来看：①近百年来沿线地区各气候带的气温均显著上升。1901—2018年，沿线地区整体增温率为每10年0.11℃。1960年以来是快速增温阶段，增温率为每10年0.22℃。②近百年来沿线地区降水量整体呈现增加的趋势。1901—2018年，沿线地区降水量每10年增加12.2毫米。尤其是，1960年以来降水量增加趋势变大，整个沿线地区每10年增加24.4毫米。③沿线地区主要国家的气温呈现明显的区域差异。1980—2014年，中国、蒙古国、俄罗斯的升温速率分别为每10年0.28℃、0.16℃和0.27℃；中亚（哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦等）和东南亚/南亚（尼泊尔、印度、巴基斯坦、缅甸、孟加拉国等）的升温速率均为每10年0.32℃^[1,2]。④未来排放情景下，沿线地区总体将持续增暖，降水量增加，高纬地区总降水量增加较多^[3,4]。

20世纪50年代以来，极端暖日普遍增多，极端冷日则普遍减少。同期，很多沿线地区干旱化趋势增强，全球干旱、半干旱地区（以下统称为“旱区”）

的荒漠化面积扩张了10%—20%。人为影响已经使得12.6%（543万平方千米）的旱地荒漠化，其影响波及2.13亿人，其中93%生活在发展中经济体^[5]。未来气候变化的预估结果表明，到21世纪末，沿线地区热浪、极端降水、干旱等极端天气事件的发生频率和强度将大幅增加。升温2℃与升温1.5℃的情景相比，极端热浪天数将增加4.2天/年，特别是在中亚地区热浪将更频繁、持续时间更长；极端降水事件趋多，印度和中南半岛季风区的变化尤其突出；中东欧及俄罗斯、蒙古国的干旱强度和频率都将增大，持续4—6月的干旱事件的频率将翻倍。

1.2 水资源整体增加但分配不均

2015年，中亚地区的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦5国的水资源量分别是727亿、434亿、732亿、218亿、12亿立方米；东南亚和南亚地区的尼泊尔、印度、巴基斯坦、缅甸、孟加拉国5国的水资源量分别是1980亿、11410亿、1894亿、8669亿、2170亿立方米^[6]。过去10年乌兹别克斯坦水资源总量减少了12%，目前缺水量达30亿立方米。气候变暖将加剧水资源变化的不确定性。冰川普遍退缩，导致区域水资源分布格局发生变化^[7]。当前，全球水危机形势严峻，世界上20亿—30亿人身处缺水困境，在非洲和西亚尤为严重^[8]。至少有17个非洲国家因缺水而在粮食生产、生态系统保护和经济发展上面临严重制约。如果当前的水资源利用方式不改变，到2030年世界将只能满足所需水量的60%。由于气候变化会导致更加不稳定的降水分布，水资源短缺问题将更为严峻。

作为“亚洲水塔”的青藏高原地区^[9]，地表水储量超过9万亿立方米，但水资源分配不均，表现为冰川、冻土强烈融化，部分地区的湖泊水体扩张^[7,10,11]。“亚洲水塔”的10多条江河径流量呈现不稳定的变化，特别是径流的季节分配不均匀更为明显，春季径流峰值明显提前，威胁着下游的水安全和粮食安全^[12,13]。

中亚大湖区咸海水资源减少，湖泊面积锐减，由20世纪60年代的6.7万平方千米减少到现在的0.6万平方千米以下。东南亚国家水资源时空分布不均导致区域季节性水资源短缺^[14]，威胁到该地区的生物多样性。

1.3 碳汇潜力增加但利用不足

沿线地区陆地碳汇约21亿吨CO₂/年，占全球碳汇的57%。以全球各气候带最优生态资产水平为目标，沿线地区陆地碳汇总潜力约23亿吨CO₂/年，较现状还可提升11%。但是，最新的沿线国家可持续发展评估显示^[15]，有近半数国家发展不均衡，不同可持续发展目标进展差异较大，其经济发展状况、总碳排放量和生产效率格局在空间上匹配度较低。例如，初步估算中亚五国和蒙古国碳汇潜力高于其现碳排放总量，且在土地复垦与耕地转移等管理措施下呈增加趋势，有待开发利用的碳交易潜力巨大，需进一步加强碳交易框架和机制研究。

2 绿色丝绸之路建设气候变化应对相关的主要科技活动

丝绸之路沿线地区气候变化应对的主要科技活动有以下3个方面。

2.1 第三极环境（TPE）国际计划和中国科学院战略性先导科技专项

TPE国际计划致力于研究环喜马拉雅“水-冰-气-生-岩（土）-人”多圈层相互作用，揭示环境变化的过程与机制及其对气候变化的响应和影响，人类活动对环境变化的影响，提高人类对环境的适应能力，推动区域绿色可持续发展，为促进人与自然和谐共生服务。

中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”（PAN-TPE）面向整个“一带一路”沿线地区，针对全球气候变化应对和共建人类命运共同体的科技问题和生态环境问题，

开展了气候变化对“亚洲水塔”、环境灾害、生物多样性、生态系统、农业可持续发展的影响和气候变化适应研究；围绕联合国2030年可持续发展目标，研究沿线地区社会、经济、资源、环境特点和发展态势，提出绿色发展途径和路线图；在沿线地区建立示范平台，展示中国技术和方案，为沿线地区提供应对气候变化和绿色发展的措施和技术手段。

2.2 “一带一路”国际科学组织联盟（ANSO）科技活动

ANSO是科技支撑“一带一路”建设及全球社会经济可持续发展的国际合作平台，成员国单位已达67家。ANSO围绕气候变化与绿色丝绸之路建设，实施了系列科技行动，迄今创建了10个海外科教中心，培养了5000多名高层次科技人才，启动了一批解决沿线地区应对气候、生态、环境、民生、福祉问题的科技示范和技术转化合作项目，在绿色低碳、节能环保、饮用水安全、灾害防治等方面取得了新的成果。

2.3 联合国等国际组织的科技活动

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《气候变化2021：自然科学基础》报告和联合国发布的《团结于科学2020》报告，指出未来几十年里，热浪、强降水、干旱和台风等极端天气事件将变得更加频繁，对人体健康、农业生产和生态系统等带来巨大影响。联合国环境规划署（UNEP）与TPE国际计划联合发布的《第三极环境科学评估报告》指出，第三极环境变化整体呈暖湿趋势，生态趋好，但环境风险增加。因此，要加强气候变化适应、应对气象灾害等重大课题的研究和强化多灾种的早期预警。世界银行、全球环境基金、亚洲开发银行和欧洲复兴开发银行等也资助“一带一路”发展中国家开展了节水、水资源利用、生物多样性及生态环境保护等相关科技活动。

3 绿色丝绸之路建设气候变化应对的重点国际科技合作方向

3.1 极端事件的综合应对

未来气候变化下,沿线地区热浪、极端降水、干旱等极端天气事件的发生频率和强度将大幅增加。应加强极端事件的趋势预测和归因分析研究。针对热浪、极端降水、干旱等极端天气事件的挑战,需要加强综合管理和综合应对,既要注重气候变化的减缓,又要加强社会适应能力。一方面,坚持全球范围内推行减缓气候变化的行动,推行可持续发展战略,减少温室气体的排放,加快传统能源产业转型,加强绿色能源产业的推广。另一方面,社会要进一步提高适应能力,加强极端事件导致的灾害早期监测预警系统建设,提升应急响应措施和城市规划中的极端事件灾害防治要求,从水安全、粮食安全、生态安全多方位保障人民生活。

3.2 气候变化影响下的水—生态变化协同管理

水资源与生态系统和谐共生是丝绸之路建设适应气候变化的关键。为此,需要加强沿线地区水-生态多圈层作用的合作研究,揭示水资源和生态系统变化规律及驱动机制。同时,还需加强沿线地区水-生态协同管理,以适应气候变化的挑战。针对“亚洲水塔”气候变化,应建立水与生态监测预警平台,提出典型流域/区域山水林田湖草沙冰一体化保护修复治理的科学方案,以保障国家水资源和水安全战略。针对中亚大湖区气候变化,应建立区域水与生态协同管理示范体系,提出咸海、巴尔喀什湖和伊塞克湖生态治理路线图和中亚国家“水-社会经济-生态”协调方案,为咸海流域生态修复治理提供服务。针对东南亚大河区气候变化,应建立水资源可持续性研究范式,提出“水-粮食-能源”协调方案,以及东南亚大河区洪涝灾害防治和气候变化适应方案,以支撑澜湄流域国际河流水资源协同管理与共享。

3.3 气候变化影响下生态系统碳汇功能与碳交易机制

沿线地区陆地碳汇潜力大。以中亚五国和蒙古国为例,估算结果发现其碳汇能力高于其年碳排放量,已经实现碳中和目标,有望成为区域碳排放配额的提供方。同样,我国青藏高原地区生态系统碳汇目前为1.2亿—1.4亿吨 CO_2 /年,相当于全国生态系统碳汇的8%—16%;而该区域人为 CO_2 排放仅为5500万吨 CO_2 /年。因此,青藏高原整体上已经实现了碳中和,而且还可以提供超过6500万吨 CO_2 /年的碳汇盈余^[16,17],可为我国整体实现碳中和作出贡献。同时,通过生态系统修复和改善等解决方案,持续推动生态建设,生态系统得到有效改善,生态系统碳汇能力大幅提升。此外,青藏高原气候暖湿化影响下,植被质量将会显著改善。至2060年,生态保护与各类生态恢复措施下,生态系统可增加1.01亿—1.52亿吨 CO_2 /年的碳汇,增汇潜力达到62%—94%;未来气候变暖将使青藏高原生态系统碳汇增加0.78亿吨 CO_2 /年。青藏高原地区巨大的碳汇潜力和交易空间有望成为推动“一带一路”倡议的重要抓手之一。

沿线地区的国家在自然和社会经济基础、固碳与减排潜力等方面存在较大差异,国家间开展碳交易的潜力巨大。在此背景下,亟待系统分析区域碳交易潜力,明确不同国家优先需求,建立统一标准的区域碳交易市场以及多边合作机制。在综合考虑生态补偿成本的基础上,通过合理交易机制与定价体系,实现区域内生态保护与经济发展协同^[18]。碳交易价值除以货币形式体现外,还应包括基础设施建设投资、能源结构优化、技术转移、教育与科研能力提升等。在干旱半干旱地区需要综合考虑水资源可利用性同增汇减排的关系,应首先保障粮食、生活和生态安全基本用水^[19]。

3.4 风能、水能、太阳能等绿色能源

沿线地区可开发的绿色能源丰富,加强绿色能源

发展的科技合作，是减缓气候变化的重要途径，将为沿线各国的碳达峰、碳中和目标作出重要贡献。中亚地区干燥少雨、日光充足、光照强烈，太阳能资源丰富。东南亚地区具有良好的太阳能、风能和水电。南亚地区也拥有丰富的太阳能、水电和风电等可再生资源。孟加拉国、印度有丰富的光照资源，平均每日日照量达到每平方米4—7千瓦时；尼泊尔水资源丰富，水电理论蕴藏量约83000兆瓦。青藏高原地区风电、水电、太阳能、地热能等绿色能源资源丰富，总储量达到1010千瓦量级，绿色能源开发潜力巨大。

沿线地区的许多国家正处于工业化阶段，能源需求量增长迅猛，迫切需提升能源供给能力和绿色能源占比。这一地区绿色能源的快速发展为丝绸之路绿色能源科技合作奠定了基础。要充分利用这一地区在风电、水电、光伏和地热发电等领域的技术优势，进一步强化储能技术研发和特高压输电工程建设，进一步提升外输电稳定性和供电效率，改善电网连通条件，因地制宜开展绿色能源协同开发。

3.5 第三极和泛第三极环境研究的国际合作和国际计划

TEP国际计划是适应气候变化和实现丝绸之路绿色可持续发展的重要科学实践^[20,21]。在此基础上，中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”开展了聚焦于绿色丝绸之路建设的泛第三极环境研究。自2011年TPE被列为联合国教科文组织（UNESCO）-UNEP等共同支持的旗舰计划和中国科学院战略性先导科技专项启动以来，先后建成了国际旗舰观测网络，成立了在中国、尼泊尔、美国、瑞典、德国的5个科学中心。此后，在第二次青藏高原综合科学考察（以下简称“第二次青藏科考”）的支持下，相关工作又有了新的发展。通过持续的科学研究，揭示了第三极地区环境变化及其链式响应过程和“亚洲水塔”失衡的问题，提出区域水资源协同管理的对策，形成的研究成果是《团结于科

学2020》的重要组成部分，也是世界气象组织（WMO）水和气候联盟的经典案例，撰写的第三极环境变化科学评估已由UNEP于2022年4月28日全球发布^[22]。在此基础上，建立了冰崩和冰湖溃决灾害监测预警体系，推动实施了拉萨地球系统多维网保护、修复、治理应用示范科考平台，提出了第三极国家公园群建设方案等生态环境保护措施，成为引领第三极研究的一面旗帜，并成为与尼泊尔、巴基斯坦、印度、不丹等青藏高原周边国家开展气候环境变化国际合作的重要平台。该计划将聚焦气候变化影响下的第三极地球系统多圈层变化过程及其灾害风险这一大科学问题，加强5个TPE科学中心的活动；组织资深专家论坛及不同主题的专题会议，形成推动科学前沿重大突破和促进社会重大发展的导向性重大科学问题，开展联合野外科考研究；建设地球系统综合观测旗舰站，服务区域社会发展；强化与国际组织和国际计划的合作，拓展与南、北极的联动研究。

4 政策建议

4.1 优化山水林田湖草沙冰一体化的生态屏障建设战略

生态安全屏障建设优化方案以全面提升国家生态安全屏障质量、促进生态系统良性循环和永续利用为总体目标，以水源涵养为核心，以统筹山水林田湖草沙冰一体化保护和修复为主线，以生态屏障区国家重点生态功能区为基础，统筹考虑自然条件相似性、生态系统完整性、生态地理单元连续性和工程实施可操作性。形成重点工程和重点项目，聚力建立以国家公园为主体的自然保护地体系，提高生态系统自我修复能力，切实增强丝绸之路沿线生态屏障区生态系统稳定性，显著提升生态系统功能。通过生态安全屏障建设，提升生态资产价值。遵循渐进式生态修复的理念，坚持保护优先，自然恢复为主；坚持统筹治理，推动科学施策；坚持突出重点，抓好关键问题；坚持

精准推进，完善监管机制。着力解决重点生态区的主要生态与环境问题；发展与优化青藏高原生态资产价值评估方法，建立解决碳汇补偿的新机制，最终促成碳汇市场的建立。促进国家公园群建设与重点生态区保护有机结合，开展针对性的自然保护地建设；建立林草生态工程技术模式与生态工程优化体系，科学实施重大生态工程建设；完善和加强生态工程成效和生态资产评价的时空监测，开展成效评估与动态调整。

4.2 创新保护—开发—利用全链条水资源利用战略

“亚洲水塔”是亚洲大江大河文明的重要水源地，对流域下游的水资源安全与经济社会发展具有至关重要的意义。面对下游水资源问题和水治理挑战，应加强青藏高原环境变化与流域水资源保护—开发—利用的结合，研究上游冰冻圈变化对区域水资源的影响，提出水资源保护—开发—利用全链条的技术模式和对策措施。研究建设水资源战略储备库的可行性，探索有效储备水资源的途径。开展全流域水循环过程系统集成，发展水循环过程模拟技术，预估未来水资源变化，阐明“亚洲水塔”失衡对全流域上下游水资源和人类生产发展的影响，并提出应对“亚洲水塔”失衡的措施与方案。

4.3 建立系统和长期的监测-研究-预警-服务平台

建立沿线地区相关国家主要江河湖源流域系统的监测—研究—预警—服务平台，长效支撑区域气候变化适应与生态环境保护。强化高新装备的应用，形成规范化的地球系统多圈层链式响应地球系统综合观测与预警技术体系，并与已有站点观测研究及预警工作融合，构建地球系统多圈层综合观测研究与预警网络，从根本上揭示气候变化与丝绸之路生态环境的长周期演化规律；研发基于空—天—地观测与预警的生态环境变化与可持续发展模型，形成集大数据、云计算和人工智能技术支持的可视化展示系统，构建跨学

科、跨领域的监测—研究—预警—服务一体化大数据管理系统；推动一体化保护与系统治理示范工程体系在共建国家主要大江大河源区推广应用，服务气候变化适应、碳中和先行示范等国家战略和川藏铁路、青藏高速等国家重大工程建设，探索高原自然-社会-经济协调发展新路径。

4.4 建设青年科技人才队伍

通过设立各种类型的人才计划，真正为绿色丝绸之路建设组织有能力、有事业心、有志向的人才梯队，在绿色丝绸之路建设中发挥重要作用。依托 TPE 国际计划、ANSO 等平台，通过为沿线国家青年科学家到中国深造提供学习条件、共同举办培训班等形式，加强沿线国家气候变化领域青年人才培养，培养一批丝绸之路气候变化研究领域的优秀青年学者。

4.5 推进国际大科学计划

进入 21 世纪以来，第三极和泛第三极研究日益成为全球科研的前沿和热点。随着综合国力提升，我国第三极科学研究领域已处于世界领先的主导地位，正在发挥日益重要的引领作用。中国科学家在第二次青藏科考中对青藏高原进行了系统考察和观测，为我国主导这一区域的研究打下了基础。但还要把研究尺度从青藏高原拓展到全球，从全球联动的角度实现环境变化与影响及机制认识的新突破。这也是增强我国科学研究国际影响和话语权的必由之路。要进一步加强与 WMO、UNEP、UNESCO、国际水文科学协会 (IAHS)、国际冰川协会 (IGS)、国际冰芯科学伙伴计划 (IPICS)、北极圈联盟 (Arctic Circle) 等国际组织和国际计划的合作，积极承办水文知识创新与发展中国国家实践国际会议、世界生态峰会等国际有影响力的全球性的学术活动，站在科学制高点，主导第三极科学研究话语体系，拓展泛第三极研究，为高质量建设“一带一路”和全球生态环境保护服务。

参考文献

- 徐新良, 王靓, 蔡红艳. “丝绸之路经济带”沿线主要国家气候变化特征. 资源科学, 2016, 38(9): 1742-1753.
Xu X L, Wang L, Cai H Y. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Silk Road Economic Belt. Resources Science, 2016, 38(9): 1742-1753. (in Chinese)
- 王会军, 唐国利, 陈海山, 等. “一带一路”区域气候变化事实、影响及可能风险. 大气科学学报, 2020, 43(1): 1-9.
Wang H J, Tang G L, Chen H S, et al. The Belt and Road region climate change: facts, impacts and possible risks. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 1-9. (in Chinese)
- Liu Z, Duan Q, Fan X, et al. Bayesian retro- and prospective assessment of CMIP6 climatology in Pan Third Pole region. Climate Dynamics, 2023, 60: 767-784.
- Fan X, Duan Q, Shen C, et al. Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature over the Pan-Third Pole region. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29: 26214-26229.
- Burrell A L, Evans J P, Kauwe M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. Nature Communications, 2020, 11(1), 3853.
- 贾绍凤. “一带一路”沿线国家水资源量数据集(2015). (2021-04-18) [2023-09-04]. <https://doi.org/10.11888/Socioeco.tpd.270475>.
Jia S F. Dataset for country level water resources in 2015 in Belt and Road Region (2015). (2021-04-18) [2023-09-04]. <https://doi.org/10.11888/Socioeco.tpd.270475>.
- Yao T D, Bolch T, Chen D, et al. The imbalance of the Asian water tower. Nature Review Earth & Environment, 2022, 3: 618-632.
- Liu J, Yang H, Gosling S N, et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future. Earth's Future, 2017, 5: 545-559.
- Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature, 2020, 577: 364-369.
- Yao T D, 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: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100: 423-444.
- 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
Yao T D, Wu G J, Xu B Q, et al. Asian Water Tower change and its impacts. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209. (in Chinese)
- Lutz A F, Immerzeel W W, Siderius C, et al. South Asian agriculture increasingly dependent on meltwater and groundwater. Nature Climate Change, 2022, 12: 566-573.
- Wang T, Zhao Y, Xu C, et al. Atmospheric dynamic constraints on Tibetan Plateau freshwater under Paris climate targets. Nature Climate Change, 2021, 11: 219-225.
- Liu J, Chen D, Mao G, et al. Past and future changes in climate and water resources in the Lancang-Mekong River Basin: Current understanding and future research directions. Engineering, 2022, 13: 144-152.
- Liu Y, Ning Y, Du J, et al. Uneven progress toward sustainable development goals reveals urgency and potential for Green Belt and Road initiative. Ecosystem Health and Sustainability, 2023, 9: 0092
- Piao S, He Y, Wang X, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. Science China Earth Sciences, 2022, 65: 641-651
- Wang T, Wang X, Liu D, et al. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 2023, 66(7): 1493-1503.
- 刘雅莉, 王艳芬, 杜剑卿, 等. 地球大数据助力均衡发展评估. 中国科学院院刊, 2021, 36(8): 963-972.
Liu Y L, Wang Y F, Du J Q, et al. Big earth data promotes assessment of even development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(8): 963-972. (in Chinese)
- 宁瑶, 刘雅莉, 杜剑卿, 等. 黄河流域可持续发展评估及协同发展策略. 生态学报, 2022, 42(3): 990-1001.
Ning Y, Liu Y L, Du J Q, et al. Sustainable development assessment of the Yellow River Basin and the coordinated development strategy. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 990-1001. (in Chinese)

- 20 Yao T D, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. Third Pole Environment (TPE). *Environmental Development*, 2012, 3: 52-64.
- 21 Yao T D, Thompson L, Chen D, et al. Reflections and future strategies for Third Pole Environment. *Nature Review Earth & Environment*, 2022, 3: 608-610.
- 22 United Nations Environment Programme. A Scientific Assessment of the Third Pole Environment. (2021-04-21) [2023-09-04]. <https://www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment>.

Climate change adaptation and mitigation strategies for building a Green Silk Road

YAO Tandong^{1*} HUANG Jianping² XU Baiqing¹ WANG Yanfen³ CHEN Xi⁴ LIU Junguo⁵ DUAN Qingyun⁶
WU Guangjian¹ WANG Weicai¹

(1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

4 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

5 School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

6 College of Hydrology and Water Resources, Hehai University, Nanjing 210024, China)

Abstract Areas along the Belt and Road face not only natural process-related challenges such as frequent extreme weather events caused by abnormal climate warming, uneven distribution of water resources, but also management-related challenges such as extensive resource management, insufficient protection of ecology and biodiversity, and underutilization of carbon sink potential. To address these challenges and ensure a sustainable future, it is necessary to strengthen scientific and technological cooperation in response to climate change along the Silk Road, and to enhance the quality of the Green Silk Road construction. Key areas of scientific and technological cooperation should focus on water-ecological collaborative management under climate change, ecosystem carbon sink functionality and carbon trading mechanism, green energy development, and strategic research on environmental change and response of the Third Pole and Pan-Third Pole regions. Additionally, it is essential to fortify the integrated ecological barrier composed of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasslands, deserts, and ice. This study proposes innovating a long-term strategy for the protection, development, and utilization of the complete water resources chain, establishing a comprehensive monitoring, research, warning, and service platform, and promoting and cultivating international big science programs.

Keywords Green Silk Road, climate change, water resources, carbon sink, Third Pole, Pan-Third Pole

*Corresponding author

姚檀栋 中国科学院院士,第二次青藏高原综合科学考察研究队队长,中国科学院战略性先导科技专项(A类)“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”首席科学家,中国青藏高原研究会理事长,“第三极环境”(TPE)国际计划主席,美国地球物理学联合会(AGU)会士。《中国科学院院刊》编委。长期从事青藏高原科学考察研究,在冰川与环境变化研究领域作出了系统性创新贡献。E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

YAO Tandong Member of Chinese Academy of Sciences, Chief Scientist of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research program and Pan-Third Pole Environment study for a Green Silk Road program, Chairman of the China Society on Tibetan Plateau, Co-chair of Third Pole Environment (TPE) Program, and Fellow of American Geophysical Union. Editor of *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. Yao Tandong has been focusing and internationally acknowledged of his study on glacier and environment on the Tibetan Plateau. His study reveals that, under the impact of global warming, glaciers in the Tibetan Plateau and surrounding regions are retreating rapidly and spatially different because of the interaction between the Indian monsoon and westerlies, with the most rapid retreating in the southeast Tibetan Plateau and the least retreating in the northwest Tibetan Plateau. E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

■ 责任编辑：文彦杰