

地表过程与可持续发展研究进展与展望^{*}

效存德[†] 史培军 李小雁 张光辉 何春阳 陈 晋 丑洁明 亢力强 刘宝元
延晓冬 杨晓帆 于德永 赵传峰 赵文武 张春来 张大勇 张 强 张文生

(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 100875, 北京)

摘要 自2007年地表过程与资源生态国家重点实验室批准建设以来,围绕地表多要素、多尺度和多过程及其资源生态效应,开展了基础性和面向国家需求的系统研究。总结实验室15年来的建设和发展,取得的主要成果如下:1)地表过程监测与研究,包括风沙过程、土壤侵蚀过程和生态水文过程等的观测系统与大型模拟设施建设,以及理论突破与应用;2)资源生态研究,包括生物多样性维持机制、植被-环境系统互馈及生态参数测量、景观生态与服务等方面的理论与应用实践;3)人-地系统动力学研究,包括环境演变与人类活动、人-地系统动力学模型与模拟2方面的探索;4)区域可持续发展范式,包括土地利用/覆盖变化(LUCC)和综合自然灾害风险2个方面取得的显著成果。面对国家重点实验改革与重组,展望未来,将围绕地表过程与可持续发展,开展更加有组织的、面向系统性解决方案的科学探究,核心目标是研究生态脆弱区和灾害高风险区人-地系统耦合理论与区域高质量发展路径。主要任务:1)通过构建天空地网一体化观测体系,系统开展从“山水林田湖草沙冰”等要素过程到生命共同体的综合研究;2)通过研发实验和模拟装置,揭示水土气生人相互作用的机制与动力学过程,构建多要素、多过程、多尺度的地表动态模型体系,揭示人地系统耦合机制与过程;3)以承接系统性国家级科研任务,解析人与自然系统互馈机制和关联效应,建立区域高质量发展监测、评估和预警体系,服务于制定区域与国家生态文明建设的长远战略。

关键词 地表过程;资源生态;人地系统动力学;综合风险防范;区域高质量发展

中图分类号 K90

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022116

0 引言

人类赖以生存的地表系统是一个自组织的复杂系统,通过物质流和能量流联结在一起,与其他任何系统一样,地表系统本来是由地表要素及其属性构成的有序集合体,但因为人类的一切活动都集中在地表系统内,随着人的主观能动性不断增强并产生累积效应,对地表系统的稳态平衡产生巨大扰动,地球进入“人类世”,打破了稳态平衡。换句话说,人类对自然的扰动、对资源的过度消耗和“错配”等行为,带来人类自身发展“不可持续”问题。

对上述涌现问题,无论从科学前沿还是从国家需求而言,都需要国家级平台开展深入的实验和研究。

2007年,北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室正式获批运行。实验室以应用基础研究为主,研究地表地理过程及其对可更新资源再生机制的影响。主要研究内容为:建立与完善地表多要素、多过程和多尺度模型与人地系统动力学模拟系统,发

展以地理学和生态学为基础的人地系统动力学,构建地理过渡带区域土地退化防治与综合灾害风险防御模式,形成以大型地表过程模拟装置和典型资源生态系统实验基地为支撑的国内领先、国际一流的区域地理系统实验研究基地,服务于区域可持续发展(图1)。

实验室以开展地表系统及其资源生态效应研究为核心内容,具有鲜明的时代特征,概况而言有2点:

1)综合性和交叉性特点。地表系统以水、土、气、生、人为核心研究对象,需揭示其多要素之间多过程、多尺度问题。例如,地表系统具有全球性、区域性和局地性等尺度特征,每一个尺度上的地表过程都可以与更大和更小尺度上的地表过程产生级联,呈现出系统性结构。尺度级联和尺度转换是地表系统研究的难点,具有高度复杂性。尤其加入“人”这一因素后,必须开展人地系统耦合及其环境、灾害效应的综合研究,更加凸显了综合性和交叉性特点。

2)经世致用特点。地表系统研究不仅需揭示自然规律,还要直接服务于人类自身。地表过程与资源生

^{*} 地表过程与资源生态国家重点实验室自主资助项目

[†] 通信作者:效存德(1969—),博士,教授。研究方向:冰冻圈与全球变化,冰冻圈功能和服务。E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-28

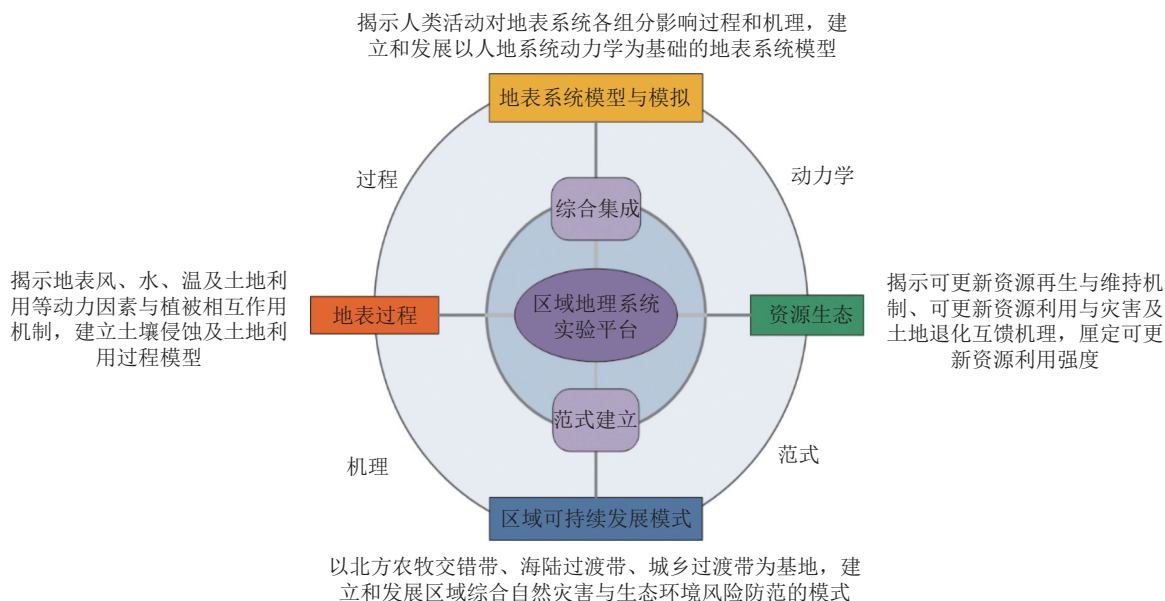


图1 地表过程与资源生态国家重点实验室的研究方向及其相互关系

态研究从传统的格局研究向格局与过程耦合、可持续性延展,研究方法、研究手段上趋向综合性、系统性与定量化,并正在实现微观过程与宏观格局相耦合,历史反演、现代过程与未来情景预估相结合,呈现出全景式发展趋势。例如,当今地球的很多区域生态系统呈现出由结构性破坏向功能性紊乱演变的发展态势,生态系统更不稳定,生态服务功能下降,生态灾害在加重,我国的情况也不例外。习近平总书记指出:“我国环境容量有限,生态系统脆弱,污染重、损失大、风险高的生态环境状况还没有根本扭转,独特的地理环境加剧了地区间的不平衡;我国的生态文明建设正处于压力叠加、负重前行的关键期,也有了有条件有能力解决生态环境突出问题的窗口期。”^[1]因此,研究地表系统及其资源环境效应,既是区域问题也是全球性问题;既是现实要求也是科学制定长远可持续性战略的基础。

在过去 15 年的运行过程中,实验室围绕地表过程、资源生态、人地系统动力学和区域可持续发展模式 4 个方向开展了系统研究,2010 和 2015 年连续 2 次获评“良好”结果。现对 4 个研究方向取得的成果总结如下。

1 地表过程

地表过程主要包括由气候、水文、植被及人类活动变化所引起的侵蚀、搬运、堆积及景观格局变化等地理过程。其中对资源生态影响最为突出的是土壤水蚀、风蚀和风水复合侵蚀过程。该方向包括风沙过程、土壤侵蚀过程、生态水文过程 3 个研究团队,主要研究目标是地表水、风、温等动力因素与植被相互

作用机制,建立土壤水蚀、风蚀以及风水复合侵蚀模型,测量地表变化和重建过去的地理环境,为评价可更新自然资源再生能力及其利用效益提供科学依据。过去 15 年来,主要围绕 3 方面开展了研究。

1.1 风沙过程 研究目标是通过开展风沙运动机制、土壤风蚀、风水复合侵蚀、风沙地貌、土地沙漠化与沙区环境变化研究,揭示风沙运动-动力过程与机制、土壤风蚀过程与机制、土地沙漠化格局与演变机制,构建土壤风蚀预报模型和防沙治沙工程技术理论体系,为中国北方土壤风蚀监测和防沙治沙工程实践提供科学支撑。

21 世纪初席卷我国北方地区的数次强沙尘暴,特别是强沙尘暴对首都北京的袭击,引起党中央、国务院的极大重视,北京师范大学风沙研究团队应运而生。在短短的 20 年,风沙研究团队从平台建设到理论创新和社会服务,都取得了可喜的成绩。

建成具有国际先进水平的大、中型 2 座风沙环境工程风洞实验室。其中,大型风洞实验段长 24 m,正常截面宽 3 m、高 2 m,实验风速 $2\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 连续可调,配备了完整、先进的测量系统,综合实验能力高于国内外同类风洞。2 座风洞投入运行以来,年均开机时间都在 1 800 h 以上,是地表过程与资源生态国家重点实验室、防沙治沙教育部工程研究中心、北京市防沙治沙工程技术中心标志性大型装备和核心技术平台之一。位于河北省康保县的土壤风蚀与粉尘释放野外试验研究站已初步建成,未来将与风洞实验平台紧密结合,组建我国风沙过程研究的综合实验基地。

利用风洞模拟实验和野外试验,风沙研究团队围绕风力作用于地表产生的侵蚀、搬运和堆积过程,系

统开展了土壤风蚀、风沙运动、风沙地貌、土地沙漠化基础研究和风沙防治工程应用基础研究: 1) 揭示了有效重力、空气拖曳力、碰撞力、Magnus 力、Saffman 力等关键力对沙粒运动的作用^[2], 实现了风沙运动中相关物理量的参数化, 阐明了地表、风场和环境对风沙运动宏观量的影响, 建立了能够准确刻画自然界风沙运动规律的理论模型, 为完善风沙物理学理论体系做出了重要贡献。“近地表风沙活动规律研究”获 2006 年度北京市科学技术奖(基础类)二等奖。2) 对土壤风蚀影响因子进行了重新分类, 建立了中国北方风蚀区风力因子、地表粗糙因子、土壤抗蚀因子和气候因子数据库, 完成地表粗糙干扰因子、风力侵蚀因子、土壤抗蚀性因子的动力学参数化, 揭示了 3 类因子不同时间尺度的动态变化规律及其动力学联系, 构建了土壤风蚀动力模型理论框架^[3]。3) 建立了应用便捷且适合于不同时空尺度沙地、灌草地、农田土壤风蚀量计算的模型——第一次全国水利普查风蚀模型^[4]。该模型得到学术界和政府部门的广泛认可和采纳, 应用于国家林业局主导的京津风沙源治理工程效果评估和水利部“第一次全国水利普查全国风力侵蚀强度计算分析与制图”^[5], 并成为水利部组织开展全国范围内的土壤风蚀监测唯一使用的风蚀模型。4) 创建了高原城镇防沙理论体系, 在突破区域风沙流场计算、防沙工程单项技术参数优化、工程体系的功能模拟和整体优化等关键技术基础上, 建立了适用于不同生物气候区的具有可复制性的城镇防沙技术模式^[6]。通过大规模工程应用, 实现由理论到工程应用的转化, 开创了高海拔城镇防沙的国际先例。5) 构建了青藏高原现代土地沙漠化分类分级指标体系^[7], 全面阐述了青藏高原土地沙漠化发生发展的物质基础及其空间格局^[8], 首次编制完成青藏高原 1977—2015 年共 5 期完整的沙漠化土地分布图^[9], 为青藏高原第二次综合科学考察之土壤风蚀调查奠定了重要基础。

1.2 土壤侵蚀(水蚀)过程 研究目标是通过开展土壤侵蚀对全球变化与重大生态工程的响应、水土流失驱动的土壤碳迁移与转化过程、多尺度土壤侵蚀预报模型、区域水土流失评价与制图、侵蚀泥沙来源诊断与模拟以及水土流失对土地生产力影响与机制等方面的研究, 为全国水土保持工作提供理论和技术支撑。

土壤侵蚀驱动的水土流失是全球性环境问题, 导致土壤品质下降、耕地面积减少、土地生产力低下、污染物迁移、河道泥沙淤积及水体水质恶化等一系列生态环境问题, 直接威胁国家生态安全和粮食安全, 制约区域社会经济可持续发展。在过去 20 多年,

土壤侵蚀研究团队从试验平台建设、理论创新到社会服务, 均取得了显著的成绩。

建成国内先进水平的房山人工模拟降雨大厅, 装备有全自动降雨强度可控的槽式下喷式模拟降雨系统和大型变坡试验水槽等试验设施, 建设了完善的大型坡面径流小区系统, 为开展土壤侵蚀过程与机制、水土保持效益评估、非点源污染模拟、水土保持监测设备测试以及教学实习与示范等基础研究和技术服务提供了良好的技术保障。自运行以来, 年均开机时间 1 500 h 以上, 是地表过程与资源生态国家重点实验室标志性的大型装置和关键的实验平台。建成教育部黑龙江九三土壤侵蚀野外科学观测研究站, 拥有完善的坡面径流小区、小流域把口站监测系统, 具有良好的实验条件和仪器设备, 已成为黑土区土壤侵蚀研究、水土保持技术研发的重要基地。房山人工模拟降雨大厅与九三站的相互配合使用, 形成了我国独具特色的土壤侵蚀与水土保持研究综合实验平台。

充分利用房山人工模拟降雨大厅和九三土壤侵蚀野外科学观测研究站, 土壤侵蚀团队紧密围绕土壤侵蚀过程与机制、土壤侵蚀预报模型和区域土壤侵蚀调查, 系统开展了土壤分离过程、坡面流挟沙力、中国土壤侵蚀预报模型和全国土壤侵蚀普查等基础和应用基础研究: 1) 发展了土壤分离能力测定方法体系, 揭示了土壤分离过程水动力学机制, 明晰了不同空间尺度土壤侵蚀阻力时空变化及其主控因素, 阐明了土壤侵蚀阻力对植被恢复驱动的近地表特性变化的响应与机制^[10-11]; 2) 建立了二沙源测定坡面流挟沙力方法, 明确了坡面流水动力学特性及泥沙粒径对挟沙力的影响, 构建了裸地坡面流挟沙力方程, 阐明了植被茎秆和枯落物对坡面流挟沙力的影响及其水动力机制, 建立了植被覆盖坡面挟沙力方程^[12-15]; 3) 完善了降水随机模拟方法, 发展了多源数据降雨侵蚀力计算模型, 修订了土壤可蚀性估算方程, 建立了陡坡坡度与坡长因子计算模型, 明确了水土保持措施因子体系, 构建了全国水土保持措施因子数据库, 建立了中国土壤流失方程^[16-17]; 4) 发展了区域土壤侵蚀调查方法体系, 编写了多部国家、行业和地方标准, 获批系列专利和软件著作权, 支撑了全国第一次水利普查的第五次土壤侵蚀普查, 绘制了全国水力侵蚀强度分布图, 支持了“水利部水土流失动态监测”“第二次青藏高原综合科学考察研究”“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”“黑土地保护与利用科技创新”“冬奥雪场赛道雪质的判定、监测和预报”等重大项目。研究成果“区域水土流失调查关键技术及其应用”获 2018 年中国水土保持学会科学技术一等奖。科研教

学相长,以土壤侵蚀研究团队为核心的“区域地理理论与教学实践教师团队”入选2022年教育部“全国高校黄大年式教师团队”。

1.3 生态水文过程 研究目标是研究生态水文过程观测的新技术与方法,构建流域生态水文过程的多尺度综合观测系统;理解陆地生态系统水文及生态过程相互作用及反馈机制;揭示生态系统气候适应性及脆弱性机制过程;发展尺度转换的理论与方法;提高流域水资源可持续管理。在北方农牧交错带、干旱区流域系统、高寒草原-湖泊系统开展系统性研究,服务于生态保育国家战略。

面对日益严峻的水资源短缺、生物多样性减少和生态环境恶化等问题,生态水文团队经长期积累和10多年集成,建设了以干旱半干旱区流域生态水文过程监测、机制分析、模型模拟及水资源可持续利用等综合集成研究为特色的科学研究与人才培养基地。生态水文团队在黑河流域和青海湖流域建立了多尺度地表过程综合观测系统^[18-19],并开展典型生态系统长期定位连续监测与数据发布(<https://data.tpdc.ac.cn/>),截至2020年底,数据下载12 034人次,服务于1 443个研究项目和400余篇高水平学术论文发表。在中国科学院A类先导专项支持下,整合构建了覆盖祁连山地区主要地表类型的天空地一体化监测网。发布数据已被浏览11万多次,下载使用4 300多次。团队开展的观测体系建设有力地服务于科学研究与国家需求,被国内外同行普遍评价为开放式研究的新模式。

团队注重学科理论发展和自主模型的构建。首次引入了生态水文连通性理论框架,创建了Iso-SPAC模型,揭示了灌丛化对蒸散发及组分的影响机制^[20-21]。基于树木年轮、遥感反演及模拟,揭示了极端干旱对树木生长的遗产效应,阐明了不同植被类型生长恢复分异规律^[22]。基于数据同化理论框架,将多源数据融合于机制模型,增强了模型的鲁棒性及对未来生态系统服务功能预测^[23]。“非均匀下垫面地表蒸散发观测与遥感估算的理论与方法”成果获2016年教育部自然科学二等奖。该成果首次提出了星-机-地综合遥感试验的设计理论,发展了多个地表蒸散发遥感估算模型,准确估算了田块、流域乃至全球尺度的地表蒸散发时空分布格局,对流域水资源管理以及农业节水具有重要的应用价值^[24-27]。

团队系统研究了植被多尺度生态水文适应机制、理论与调控对策。在国内率先开展了旱生灌木树干茎流形成过程及其对深层土壤水分补偿研究,揭示了灌木“自集水功能”机制及其对干旱的适应机制,揭示了灌丛斑块自组织水分适应机制^[28-29]。在树干茎

流、灌丛斑块和河网水分聚集系统对水分胁迫的适应机制基础上,提出干旱区植被的水分聚集适应理论^[30]。基于CT扫描及地球物理探测,揭示了复杂土壤架构特征^[31-32];探明了根系对土壤大孔隙和优势流形成的影响机制,提出寒区壤中流形成模式,发展了我国的水文土壤学^[33-34]。“半干旱区集雨保水与植被生态适应机制”成果获2015年教育部自然科学二等奖。该成果基于15年的野外试验观测,系统研究了雨水集流系统的产流机制、创建了旱作农田沟垄集雨结合覆盖作物种植高用水模式和植被恢复技术体系,拓宽了我国集雨适用的地区和范围^[35-37]。“青海湖流域生态水文过程与湿地恢复技术研究及应用”成果获2018年青海省科技进步一等奖,该成果定量辨识了气候变化和人类活动对青海湖流域水量变化的影响,发展了寒区生态水文学^[38-40];研发出高寒退化湿地植被恢复技术10项,并应用于青海湖流域的生态治理,有效促进了退化生态系统的植被恢复。

2 资源生态

资源生态研究是可更新自然资源研究的国际前沿问题。在对地表过程深入理解的基础上,资源生态研究主要集中在可更新资源再生与维持机制,尤其是水资源、土地资源、生物资源与气候变化及人类活动相互作用的互馈机制。该方向包括生物多样性维持机制、植被-环境系统互馈及生态参数测量、景观生态与服务3个研究团队,主要开展景观可持续性、全球与区域生态格局与过程、生物多样性维持机制及其与生态系统功能的关系等研究工作。强调对可更新资源利用强度厘定与效益的综合分析,为区域可持续发展,特别是区域生态-生产范式的建立奠定基础。过去15年,在以下2个方面进展突出。

2.1 生态系统服务与区域可持续性 目标是综合应用定位监测、区域调查、模型模拟和遥感、地理信息系统等空间信息技术,针对从小流域到全球不同尺度,系统开展景观格局与生态过程耦合、生态系统服务权衡与综合集成,探索全球变化对生态系统服务的影响、地表过程与可持续性等,创新发展地理科学综合研究的方法和途径。

生态系统服务是指人类从自然生态系统中得到的惠益。食品、能源、水、原材料等维持人类生计和福祉至关重要的关键生态系统服务,已经成为联合国2030年要实现的17个可持续发展目标(SDGs)的重要组成部分。景观可持续性是指景观在环境和社会文化变化的背景下,持续提供长期的、具有景观特色的生态系统服务的能力,这对于维持和改善区域环境

中的人类福祉至关重要。景观可持续科学作为新兴学科,其研究的目的是寻求在具有不确定性的内部动态和外部干扰的情况下,能够促进生态系统服务和人类福祉长期维系和改善的景观与区域空间格局。

15 年来,实验室开展了从自然景观、半自然景观、农业景观和城市景观,从多尺度、多方法、多维度角度系统开展了生态系统服务测量、相互作用关系、动态变化的驱动机制和区域/景观可持续性评价等方面研究,逐渐形成景观可持续科学的学科体系,明确了景观可持续性实现的方法途径。

如何维系具有景观特色的生态系统服务是景观可持续科学的关键科学问题,实验室该团队建立和集成了景观服务的测量指标体系与方法,提出了生态系统服务约束作用关系和量化方法,系统开展了景观格局与生态系统服务的定量关系和区域可持续性评估研究,这些创新性研究成果取得了良好的学术和社会服务影响。主要成果包括:1)提出了生态系统服务维系的约束作用关系理论,定量揭示了生态系统服务作用关系的依赖性、竞争性、独立性及阈值等线性与非线性特征及其生态学机制,克服了当前对生态系统服务关系主要界定为权衡与协同关系的不足,为理解生态系统服务维持机制及优化生态系统结构和功能提供了新的方法论^[41]。2)系统论述了景观可持续科学的学科体系、主要研究主题等内容,倡导在气候变化背景下土地利用—景观格局—生态过程/功能—生态系统服务—人类福祉为一体的研究框架,即景观可持续科学途径,在景观和区域尺度上优化生态系统服务的载体-土地系统,以促进区域可持续发展,并将生态学、地理学和景观设计方法联系起来作为实现景观可持续性的重要发展方向^[42-43]。3)过去 40 年,中国在经历高速经济增长的同时,陆地景观结构也发生了巨大变化。研究团队从地—气相互作用的角度出发,结合高分辨率遥感数据和中尺度数值预报模式,建立了土地利用/覆盖变化气候效应的精确数值模拟方法,研究表明,人类活动造成的土地系统变化对区域气候产生影响的幅度、范围和方向不可低估,为全面评估全球气候变化提供了重要补充^[44-47]。4)作为研究的典型案例之一,建立了体现青藏高原独特性和高寒生态系统质量的生态系统服务评估指标体系与方法,揭示了青海省生态系统服务的时空演变特征及驱动力,阐明了生态系统服务的得失权衡机制及关键生态系统服务的区域外溢出效应,基于研究成果撰写的咨询报告得到了青海省委书记王建军同志的批示:“既有数据的支撑,又有逻辑的推理,体现了系统思维,是一篇高质量的报告,为我们在新时代新阶段

以新视角审视青海,挖掘潜力,创新价值,提供了帮助,当重视并深化转化,可将此报告印送省级四大班子成员参阅。”^{[41]5)}作为典型案例之二,针对黄土高原土壤侵蚀严重、土壤水分亏缺、生态系统服务亟待提升等重要生态环境问题,开展了长期系统研究,以“格局-过程-尺度”思想为指导,系统分析了黄土丘陵沟壑区降雨、地形、径流、土地利用等因子与土壤侵蚀的关系,开展了流域尺度土壤侵蚀评价和土壤流失模拟,提出了流域尺度土地利用调控建议;以“格局-过程-服务-可持续性”研究范式为指引,在探讨景观格局与生态过程作用机制、辨析生态系统服务权衡协同关系及其与可持续性作用机制基础上,集成生态系统服务评估方法、多目标优化算法等发展了生态系统服务空间优化模型,开展了黄土高原等区域的生态系统服务评估,识别了生态系统服务的动态变化特征、权衡协同机制及其变化趋势,探索了生态系统服务与可持续发展的关联。

2.2 生物多样性维持机制 围绕生物多样性领域的核心科学问题,利用现代分子标记和基因组学等方法,野外观测、理论模型、实验检验 3 种途径相互配合,重点开展生物多样性的形成、维持与丧失机制的多尺度、多过程综合研究,探讨生物多样性的生态系统功能、为自然生物资源保护、国家公园和生态文明建设提高科学依据。

实验室生物多样性研究团队在生物多样性形成与维持机制和保护领域开展的创新性研究已在国际学术界产生了重要影响。在多样性形成机制方面,首次提出高温强化有利突变的适合度后果并加速自然选择的观点,使用模式实验系统对高温加速种群进化和分化的机制给出了证明,完善了解释生物多样性大尺度格局的进化速率理论^[48-50];在若干北方森林重要树种中证实了杂交、多倍化、地理隔离等生物多样性形成的重要途径^[51-55],证明了“东亚植被区系分成南北两支”的假说^[51],并首次提出栽培核桃的古老杂交起源假说^[56];以榕树-榕小蜂系统为研究系统,全面阐述了物种间关系对协同成种模式的决定作用^[57]。在多样性维持机制方面,首次提出“进化过程富养化悖论”“进化陷阱”等新概念,形成了进化过程导致多样性下降的假说;建立了调和中性过程和生态位过程的理论框架,探讨了进化过程对物种多样性和群落稳定性维持的重要性,并使用微生物系统对部分理论假说进行了严格实验验证,实验证实了随机化过程在群落组装中的重要性^[58-62]。部分基础理论研究成果被作为典型案例收入 2020 年新版国际权威分子生态学教科书《Molecular Ecology》中。

在中国东北温带针阔混交林区构建了世界一流的“天地空”一体化生物多样性科学监测体系和科学大数据平台, 获批科技部东北虎、豹生物多样性野外科学观测研究站。基于精准食物链和精准生境对虎、豹为旗舰物种的生物多样性维持与保护机制进行深入研究^[63-65], 开发了“东北虎豹国家公园自然资源监测系统”, 该系统已被国家林业和草原局确定为可借鉴、可推广、可复制的科技支撑模式。基于生物多样性基础理论研究和部分野外观测研究结果提出的《关于实施中国野生东北虎、豹恢复与保护重大生态工程的建议》, 得到了中央领导的重要批示, 促进了东北虎豹国家公园等重大保护工程的启动和实施。研究成果入选了我国“改革开放40周年”和“砥砺奋进的五年”大型成就展, 其中有关东北虎豹的研究成果(9)入选 Springer-Nature 集团发布的“可以改变世界的180篇年度杰出论文”, 并获 Science、美国科学促进会(AAAS)等报道。

3 环境变化与人地系统动力学

地表系统是一个开放的多尺度复杂系统, 是地球系统的重要组成部分。近年国际上在地球系统科学的引导下, 通过重建人类活动时期的环境演变过程, 揭示人类活动与气候变化的相互作用机制。该方向包括环境演变与人类活动、人地系统动力学模型与模拟2个研究团队, 主要开展环境变化诊断、人类活动与群体健康、气候变化归因、气候动力模型、人-地系统模拟研究。在此基础上, 通过构建多尺度的地球系统模型, 以揭示人类活动对地球系统变化的贡献率, 为可持续发展模式的建立提供科学依据。过去15年, 在以下2个方面进展突出。

3.1 城市化下气溶胶的天气气候和群体健康效应研究 过去15年来主要开展了城市化背景下气溶胶的天气气候与群体健康效应研究。近30年来, 我国经济迅速发展, 工业化与城市化进程加快, 但同时引发了一系列严重的空气污染问题^[66-68], 对群体健康、工农业生产及天气气候都有一定的危害^[69], 这些影响的严重程度和途径成为学界和公众关心的问题之一。

针对城市化背景下气溶胶的天气气候与群体健康效应, 实验室环境演变与人类活动团队开展了富有逻辑、自成系统的系列研究, 取得了系列创新成果: 揭示了气溶胶特征、时空变化和来源解析^[66-67, 70], 城市化特征、高温热浪、城市污染和健康等^[69, 71]; 厘清了气溶胶的云降水影响和天气气候效应, 探索了城市化扩展的气候效应^[72]; 阐述了气溶胶、城市化和高温热浪的群体健康效应^[71, 73]。

在气溶胶特征和城市化方面, 团队研发了气溶胶观测地面站点空间代表性的量化方法, 发现其多在1~3 km, 为站点优化提供了支撑^[68]; 明确了我国各城市近年气溶胶快速减小的变化趋势和贡献要素, 指出未来中国城市空气污染治理和研究的关注点在臭氧, 研究成果为高被引热点论文^[66]; 发展了基于城市污染物质量浓度观测反演和优化区域污染排放的方法, 为评估城市污染提供了方法支持^[67, 74]; 通过厘清健康城市和城市健康, 进一步揭示了城市污染对居民健康的影响^[71]。

在天气气候效应方面, 团队发现了中国除西北地区外的降水减少现象, 证实了人工影响天气作业的有效性, 形成了云水资源监测、开发和耦合利用的关键技术, 获得河北省科技进步奖三等奖^[72, 75]; 改进了云量参数化预报方案, 极大提升云降水模拟预报能力, 并获中国天气预报业务模式 GRAPES 应用^[76]; 发现了弱降水使气溶胶质量浓度增加、强降水使气溶胶质量浓度减小的规律, 并从气溶胶吸湿增长和降水湿沉降2方面揭示了物理机制^[77]; 揭示了气溶胶辐射效应降低边界层、减小近地面风速而反馈增强污染的机制^[78], 揭示了气溶胶对台风降水面积的扩大效应, 揭示了气溶胶对薄云的长波辐射增暖效应, 3项机制构成了北京市自然科学奖二等奖“气溶胶污染的天气气候效应”的核心内容^[79-80]; 总结提出了气溶胶通过5项机制影响青藏高原及其周边大气水循环的观点, 成果发表在《National Science Review》^[81]; 揭示了气溶胶辐射冷却效应对香港地区的气候过去近30年冬季降温的重要贡献^[82]; 阐明了气溶胶影响云滴有效半径的规律、物理机制和影响因子, 物理机制包括了凝结增长、碰并增长、活化、夹着蒸发等, 而影响因子包括了可降水量、垂直速度、气溶胶质量浓度、风切变等; 揭示了城市扩张导致的增温现象并揭示了其受土地表面条件和人为热排放影响的机制, 指出1988—2010年京津冀城市群、长三角城市群和珠三角城市群的城市扩张引起的增温幅度分别为0.85、0.78和0.57℃^[71]; 评估了到2030年未来城市扩张将对华北、中部和东南部区域气候的影响, 发现对于100%、高概率(>75%)和低概率(>0%)的城市增长情景, 近地表2 m空气温度升高分别达2、3和5℃, 居民将会承受热压力^[71]。

在群体健康效应方面, 团队探索了热浪强度和死亡率的非线性关系, 发现了高温热浪死亡风险的人群和地区差异, 尝试了高温热浪生命险的费率厘定工作, 发现老年人群为脆弱性人群, 其费率水平大约是年轻人的9~28倍, 为未来极端气候事件增加和人口

老龄化程度加剧情景下的政府风险管理和公众健康风险应对提供了参考^[69];揭示了不同区域气候背景下热浪和城市热岛的协同效应,发现热浪天气增强的太阳辐射是城市热岛增强的关键要素因素之一^[83]。

3.2 人地系统动力学模式双向耦合模式的研发 实验室人-地系统动力学模式研究团队系统开展了气候变化对社会经济系统影响的评估与适应研究^[84];构建了“人-地系统”动力学模式,创造性地提出了实现 2 类模式耦合的一系列新方法^[85-87];构建了独具特色的 BNU-HESM1.0 模式,初步实现了 2 类模式的耦合运转^[88]。地球系统模式(ESM)和综合评估模型(IAM)在进行人类活动与气候变化相互影响方面具有各自的优势^[86],但随着人类社会与自然系统相互作用关系的加强,二者在研究人类社会系统与自然系统相互作用关系方面逐渐表现出明显的不足^[89]。由于地球系统模式和综合评估模型一直以来都是各自独立发展的,其建模思想、应用变量等都有很大不同,因而将 2 类模式直接进行耦合是具有一定难度的,需要在不断探索基础上进行必要的梳理和厘清^[86, 89]。

综合评估模型和地球系统模式进行链接的关键参数是反映人类经济活动的碳排放,地球系统模式根据社会经济模型传递的碳排放进行碳在大气、陆地和海洋的分配和循环过程^[90]。因此,社会经济模型传递给地球系统模式的碳排放,必须符合地球系统模式所需的时空分布特征^[86]。另外,鉴于复杂而庞大的地球系统模式,需要保证新构建的双向耦合模式也具备可靠性、灵活性、可扩展性和可移植性等特点。最简单可靠的思路是修改经济模型来适应地球系统模式的算法、运行特点和输出输入数据格式等,然后将地球系统模式中读入碳排放数据的地方作为 2 个模式的接口,完成 2 个模式的双向耦合,而不是再重新修改地球系统模式的特点来适应经济模式的需求^[86]。基于上述认识,实验室人地系统动力学团队自主研发了人-地系统模式 HESM1.0,并实现了 HESM1.0 的自然系统模块 BNU-ESM 模式和所选择的社会经济模块 DICE 的双向耦合^[88, 91]。

由于人地系统模型中人类系统与地球系统的双向互馈耦合的机制,使人地系统在定量认识过去、现在和未来的人类活动(主要是土地利用和化石燃料燃烧排放温室气体)对全球气候的影响及反馈方面,可以进行多种模拟实验。利用 BNU-ESM 模式和 NCAR 的 CESM 模式定量评估了发达/发展中国家碳排放对历史气候变化的贡献,同时给出了不同发达/发展中国家承诺减排对减缓未来气候变化的效果,结果表明,发达/发展中国家碳排放对历史气候变化的贡献

分别为 2/3 和 1/3,而其承诺减排对减缓未来气候变化的效果分别为 1/3 和 2/3^[92]。

4 区域可持续发展范式

在中国可持续发展问题日益突出的背景下,该方向在可持续科学指导下,从区域生态系统服务改善和自然灾害综合风险防范入手,开展不同尺度的区域可持续发展理论、方法和应用实践研究。该方向包括区域可持续性与土地系统设计和综合风险评价与防御范式 2 个研究团队。1)聚焦气候变化背景下我国北方农牧交错带、海陆过渡带和城乡过渡带等生态过渡带地区如何可持续发展这一关键科学问题,以土地系统模拟、优化和设计为主线,开展不同尺度的区域可持续性模拟、评估和改善研究。2)面对国家综合防灾减灾救灾、公共安全和综合风险防范的重大科学需求,围绕重特大自然灾害的致灾-成害过程、管理模式和风险防范 4 大内容,针对灾害系统及其相互作用的社会-生态系统的复杂性,开展以气候变化和地表过程为主要驱动的自然灾害风险的综合防范研究。

过去 15 年,主要在如下 2 方面取得了显著进展。

4.1 土地利用/覆盖变化(LUCC)及其生态环境影响研究 土地利用(land use)一般指人类利用土地的方式和目的。土地覆盖(land cover)主要指地表的自然状态。土地利用/土地覆盖变化(land use/cover change, LUCC)不仅再现了地球表层景观的时空动态过程,而且客观记录了人类活动对地球表层的改造历程,是揭示人地关系的一条有效途径。近 300 年来,全球农业用地增加了 4 倍,城市用地增加了 30 倍^[93]。1970 年以来,全球湿地面积减少了 85% 以上,78% 的生态系统服务在快速下降^[94]。土地利用/覆盖变化及其生态环境影响研究,一直是当前地理学的学科前沿。

20 世纪 90 年代,国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)于 1995 年联合发起国际 LUCC 研究计划,推动国际 LUCC 研究^[95]。与此同时,史培军在北师大率先开展了 LUCC 过程、影响和驱动机制研究^[96]。2007 年,“地表过程与资源生态国家重点实验室”成立后,专门成立了 LUCC 研究团队。

近 20 年来,LUCC 团队聚焦全球变化背景下我国北方农牧交错带、海陆过渡带和城乡过渡带等生态过渡带地区如何可持续发展这一关键科学问题,基于“格局—过程—影响—可持续性”的地理学综合研究思路,以提高 LUCC 过程的监测和模拟能力,量化城

市LUCC过程对生态环境的影响为主要突破口,开展了长期研究,取得了系统性创新成果。

1)多数据复合。利用卷积神经网络集成长时间序列夜间灯光数据、植被指数数据和地表温度数据,发展了基于夜间灯光数据的大尺度城市LUCC过程监测新方法,解决了当前夜间灯光数据不稳定像元多、饱和效应和溢出效应严重问题,使植被稀疏的干旱地区的测量精度提高了10%以上^[97],并逐年重建了1 km分辨率的中国和全球近30年城市LUCC时空数据集^[98]。2)多模型耦合。从宏观用地总量需求和微观土地供给相平衡的角度,综合系统动力学模型、元胞自动机模型和共享社会经济路径,发展了多尺度城市扩展过程模型,成功解决了多尺度LUCC驱动因素的有效结合问题,改善了城市LUCC过程的模拟能力^[99]。在此基础上,模拟给出了不同情景下中国和全球未来30年1 km分辨率的城市LUCC的趋势数据集^[100]。3)多尺度综合。在区域、国家和全球等多个尺度上同时量化了城市LUCC过程的生态环境影响。发现中国城市LUCC过程中自然栖息地损失面积与濒危物种数量之间的密切关系,特别在中国的珠三角和长三角等地区,城市扩展过程导致的自然栖息地损失面积已超过1 000 km²,各区受城市扩张威胁的物种均超过600种,其中濒危物种数量均超过了50种^[101]。发现中国城市环境近10年来正在经历一个退化过程,约48%的城市地区表现出重度或中度环境退化特征^[97]。还发现2000—2013年,中国的PM_{2.5}污染致死人数新增了22.1万人,年均增长率为2.1%;而在2013—2017年,中国PM_{2.5}污染致死人数增加了3.6万人,年均增长率为1.0%^[102]。

相关研究成果发表于《Nature Communications》《Remote sensing of Environment》和《Global Change Biology》等主流学术期刊上,得到了国内外同行的广泛认可,在一定程度上拓展和丰富了中国LUCC的研究内容,促进了中国地理学的学科发展。2010年,获教育部自然科学奖二等奖。2014年获自然资源部国土资源科学技术奖二等奖。2015年,获中国自然资源学会优秀科技奖。相关论文还入选ESI数据库“Top Papers”,被全球顶尖科学家对世界上科研论文提供推荐服务的F1000Prime推荐为2017年“非常好”论文,还入选Nature Communications期刊“气候变化影响”领域“亮点文章(Featured articles)”。

4.2 综合自然灾害风险评估与重大自然灾害应对关键技术研究和应用 中国是世界上自然灾害严重国家之一,重大自然灾害频繁发生,仅汶川地震就使8.7万人遇难和失踪,直接经济损失达8 500多亿元。

针对中国自然灾害风险防范和特别重大自然灾害应对急需的关键技术,实验室灾害综合风险防范团队历经20余年的合作研究,在区域灾害系统理论与方法、重大自然灾害损失与风险综合评估技术、中国自然灾害系列地图集编制、重大自然灾害应对与农业自然灾害保险技术等方面取得多项原创性成果,创建了模式化、图谱化、实时化、标准化、一体化的综合灾害风险防范科技体系,解决了重大自然灾害评估缺少体系化统计制度保障、时效性与精准性差等科技难题。在国际上率先提出了区域灾害系统理论,据此建立了中国13种主要自然灾害数据库,编制了中国自然灾害系列地图集;首次研发“国家特别重大自然灾害损失统计制度”并在全国应用;系统建立了基于区域灾害系统理论的综合风险评估模型;首次制定了中国自然灾害系列区划与农业风险与保险区划;研发了国家重大自然灾害评估业务运行技术支撑系统。

针对综合灾害风险防范科技体系模式化、图谱化、实时化、标准化、一体化核心技术难题,团队系统研发了自然灾害风险评估与重大自然灾害应对关键技术,创新了自然灾害数据、地图、标准、模型、区划等面向综合减灾的高水平科技产品,显著提升了我国防灾减灾科技能力和国际影响。主要技术内容和技术指标包括:

1)研发中国自然灾害系列地图集。经20余年积累,建立了包括地震、泥石流、台风、洪水、干旱、沙尘暴等13个灾种的中国自然灾害数据库。先后编制了中国自然灾害地图集(中、英文版)、中国自然灾害系统地图集(中英对照)和中国自然灾害风险地图集(中英对照),共966幅地图。其中自然灾害风险地图集包括遇难人口、转移人口、房屋损失、作物损失、直接经济损失、GDP损失等风险要素,分辨率为省、市、县及1 km网格。

2)首次编制“国家特别重大自然灾害损失统计制度”。形成了完整的重大自然灾害损失统计指标体系,包含10个损失类别(经济损失、人口受灾、住宅及非住宅用房受损、居民家庭财产损失、农业损失、工业损失、服务业损失、基础设施损失、公共服务系统损失、资源与环境损失)和1个基础指标类别,共计27张损失统计表,738个损失及基础统计指标^[103]。此外,还编制了其他系列自然灾害损失和风险评估技术标准。

3)构建了重大自然灾害损失和风险评估模型。建立了地震、泥石流、台风、暴雨、洪水、干旱、大风、沙尘暴等10种自然灾害损失的快速评估模型,以及地震、泥石流、台风、洪水、干旱、沙尘暴等13个

灾种和多灾种风险评估模型。

4) 研发中国自然灾害系列区划和农业自然灾害保险系列区划, 拟定了中国气候变化(1960—2010 年)区划(5 个变化趋势带、14 个波动特征区)、中国自然灾害区划(6 个灾害带、26 个灾害区)、中国农业自然灾害区划(5 个一级区、23 个二级区)、中国城市自然灾害区划(3 个一级区、15 个二级区)和中国自然灾害救助区划(15 个救助区); 中国种植业自然灾害风险和保险区划, 包括暴雨、洪水、干旱等 7 个灾种和水稻、小麦、玉米、棉花等 7 类粮油作物。

5) 创建了重大自然灾害评估业务运行技术支持系统, 实现了地震后 0.5~1.0 h, 洪涝、台风后 2.0~4.0 h 损失快速评估, 完成了汶川地震、玉树地震、芦山地震、鲁甸地震、九寨沟地震、玛多地震、海地地震、东日本地震、尼泊尔地震、舟曲山洪泥石流、南方低温雨雪冰冻灾害等的综合评估。

获国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技成果一等奖 2 项、二等奖 1 项, 行业协会一等奖 3 项, 企业一等奖 1 项; 制定国家标准 6 项、行业标准 9 项; 获授权发明专利 8 项, 实用新型专利 5 项, 软件著作权 13 项, 出版专著 18 部, 中英文论文 170 篇。研究成果全面支撑了近年 10 多次重大自然灾害的损失评估与中国农业自然灾害保险的发展, 显著提升了我国政府与社会应对重大自然灾害的能力, 评估结果均被国家采纳, 其中, 自然灾害系列区划被国家减灾委采纳, 农业自然灾害保险与费率区划被中国银保监会推荐在全行业应用, 中国自然灾害系列地图集被联合国国际减灾战略科技委评为 10 项全球科技减灾重大成果案例之一。

近年完成的《世界自然灾害风险地图集》(英文版)、《全球变化人口和经济风险地图集》(英文版)对全球防灾减灾做出了重要贡献, 前者已下载 9.5 万次, 后者不到半年已下载 3 万多次^[104-105]。

5 开展更加有组织的科研, 提出系统性解决方案

面对国家重点实验室改革重组的重大任务和时代要求, 地表过程与资源生态国家重点实验室已开展了 2 年战略研讨, 面向世界科技变革大势和国家重大战略需求, 突出优势, 乘势而上, 做更加有组织的科研, 面向生态文明建设中系统性解决方案, 努力实现领域内自立自强, 是实验室健康发展的必由之路。以下扼要阐述基本思路。

5.1 “山水林田湖草沙冰”: 从单要素到生命共同体

实验室的研究目标是地表多要素、多过程及多尺度相互作用机制, 从中揭示其规律, 提供区域可持续

发展的决策依据。在全球变化背景下, 地球的各个角落都受到气候变化影响, 但每个人都生活在区域里, 没有哪个人生活在全球平均值里。地理学的区域性特点决定了其研究的属地化特点和经世致用的功效性。实验室一方面长期开展了单要素的精细化研究, 另一方面也对多要素、多过程和多尺度问题投入了更多关注, 但“三多”问题却异常复杂, 必须持之以恒以系统科学、整体性思维加以破解。

我国北方农牧交错带、黄河流域、青藏高原、海陆过渡带、城乡过渡带等典型地带, 或因为生态脆弱, 或因为自然资源禀赋不高, 或因为人地关系紧张等共性特点, 作为实验室的重点研究区域。在这些区域和地带上, 山水林田湖草沙冰等要素的组合特点不同, 各要素相互作用机制各异, 因而决定了人地之间的矛盾特点存在区域差异, 必须因地制宜开展系统性研究, 探索以人-地系统健康为目标的区域可持续发展范式, 从保育和利用均衡视角给出系统性解决方案。顺便提及, 在“山水林田湖草沙冰”8 个要素中, 实验室长期“冰”弱, 近几年, 在冰冻圈服务、全球和中国“水塔”、高原冻土碳排放等方面的研究有了良好开局^[106-111]。

5.2 科学前沿突破: 人地系统耦合机制 人与自然是生命共同体, 人地系统是由人类活动和自然系统交错构成的复杂开放巨系统, 研究人与自然系统互馈关系的动态作用机制, 是推动人与自然和谐共生, 实现可持续发展的重要科学基础。过去几十年来, 我国社会经济得到快速发展, 但同时也产生了一系列生态环境问题, 人与自然矛盾凸显, 可持续发展面临严峻挑战。地表过程及人-地系统耦合作为人与自然系统研究的关键内容, 对于服务国家重大需求, 推动我国生态文明、建设美丽中国, 实现区域可持续发展具有重大科学意义。在新组建的全国重点实验室中, 拟将实验室更名为地表过程与可持续发展全国重点实验室。实验室将致力于探索“山水林田湖草沙冰”生命共同体的维护机制和保育途径, 提高生态系统自我修复能力和稳定性, 从人-地系统动力学发展探求守护自然-社会生态系统安全边界, 促进区域和全球高质量发展。

综合分析人-地系统耦合与可持续发展模拟领域的国内外研究进展, 可以发现所存在的问题与发展趋势主要表现在如下方面: 1) 自然要素过程亟待深化“水、土、气、生”多要素过程集成, 揭示多圈层自然要素与过程耦合的物理、化学、生物地球化学动力机制, 为人-地系统耦合研究奠定基石; 2) 在权衡协同、优化调控、驱动机制、空间流动的基础上, 生态系统服务与人类福祉级联亟待探索不同区域和人群对生

态系统服务的具体需求,深化生态系统服务与人类福祉间级联机制与效应的科学认知,为人-地系统动力学作用的解析架构科学桥梁;3)人-地系统耦合机制分析在恢复力/脆弱性、行星边界等方面初步形成其理论框架,亟待探索不同时空尺度下人-地系统结构与动力的匹配路径和关联关系,为人-地系统动力机制的解析和可持续发展转型提供定量化途径;4)基于人-地系统耦合机制的可持续发展研究在SDGs目标关联方面取得初步成果,亟待明晰人-地系统耦合的双向反馈,在系统运行机制层面为制定可持续发展方案提供科学依据;5)随着地理大数据时代的到来,虽然人-地系统数据产品与平台初具规模,但人-地系统模型处于单向驱动、松散链接阶段,对关键过程认知不足,缺乏集成模型和综合评估,所构建的决策支持系统缺乏对社会经济大数据的认识和利用,亟待在拓展综合数据平台的基础上,发展具有双向反馈机制的人-地系统耦合模型,以服务于科学化决策。

5.3 支撑国家战略需求:近期任务 国家“十四·五”期间,实验室将以启动的重大项目作为抓手,推动实验室向着更加有组织性、针对性的方向开展科学研究,为生态文明和美丽中国建设作贡献。未来5年拟围绕以下6个方向重点开展前沿研究,力争取得突出进展:1)东北黑土区和山区、北方干旱半干旱地区地表过程及其对生态系统服务功能的影响。重点开展3项任务:一是东北黑土地坡面土壤侵蚀过程与机制,研发生态-生产-生活共赢的水土保持技术;二是东北虎豹国家公园和青藏高原国家公园群的科技支撑;三是面向干旱半干旱地区,开展变化环境下生态水文过程对生态系统服务功能的影响机制。2)人-地系统动力机制研究及其对可持续发展的支撑。重点开展2项任务:一是开展全球变化驱动下陆表自然和人文要素相互作用及区域响应研究;二是定量预估未来全球气候变化和人口与经济系统的暴露性与脆弱性变化研究,为我国参与全球气候治理及国际气候谈判,以及国际减轻灾害风险战略框架的实施提供科学支撑。3)重大自然灾害与综合风险及其防范关键技术研究与示范。重点开展3项研究:一是开展不同温升情景下区域气象灾害风险预估研究,阐明气象灾害对典型区域社会经济和生态环境的影响过程和传导机制;二是开展大都市区多灾种重大自然灾害风险综合防范关键技术研究;三是开展重特大灾害空天地一体化协同监测应急响应关键技术研究及示范,深化灾害形成机制和演进规律的科学认识,提高国家重特大灾害应急响应的科技支撑能力。4)第二次青藏高原综合科学考察研究。实验室承担着多项

科考任务,将聚焦青藏高原的气候变化应对、生态环境保护、多灾种综合研究和可持续发展等方面开展研究,为国家青藏高原生态屏障建设、自然灾害综合风险防范提供科学依据和技术支撑。5)支撑国务院第一次全国自然灾害综合风险普查。实验室主要成员承担了本次普查工作办公室技术组、评估组等工作。为落实党中央、国务院决策部署,技术组、评估组牵头制定第一次全国自然灾害综合风险普查实施方案,明确总体目标、全面部署任务,突出工作重点、细化普查流程,体现科学规范、强调综合统筹,重视数据共享、凝练成果应用,力争为高质量完成全国自然灾害防治9大工程之首,在综合灾害风险评估与灾害防治区划图等做出重要贡献。6)建好珠海基地,服务于美丽大湾区建设。按照学校本部和珠海校区“一体两翼”的布局,实验室围绕大湾区气候和生态资源环境特点,成立“地表过程与资源生态国家重点实验室珠海基地”(以下简称“珠海基地”),在海岸带、大城市群、有序人类活动与资源环境恢复力等领域布设新的研究力量。未来,珠海基地将紧紧围绕粤港澳大湾区的区域地理环境特征和地理学科“培优”发展方向,打造集教学、科研、科普教育和产业成果转化为一体的国际化高水平创新研究平台,在创新型人才培养、科技创新、产业促进和国际合作等方面,服务于国家战略与大湾区“水清、岸绿、滩净、湾美”的发展需求。

致谢:2019级博士生黄怡对本文进行了编辑协助。

6 参考文献

- [1] 习近平. 推动我国生态文明建设迈上新台阶[J]. 求是, 2019(3): 1
- [2] ZOU X Y, CHENG H, ZHANG C L, et al. Effects of the Magnus and Saffman forces on the saltation trajectories of sand grain[J]. *Geomorphology*, 2007, 90(1/2): 11
- [3] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 875
- [4] 高尚玉, 张春来, 邹学勇. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [5] 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会. 水土保持情况普查报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017
- [6] 邹学勇, 张春来, 程宏. 城镇防沙理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- [7] LI Q, ZHANG C L, SHEN Y P, et al. Developing trend of aeolian desertification in China's Tibet Autonomous Region from 1977 to 2010[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 1
- [8] 伍永秋, 谭利华, 杜世松, 等. 青藏高原地表物质组成分

- 布图(1:250万)[M]. 西安: 西安地图出版社, 2018
- [9] 张春来, 伍永秋, 李庆, 等. 青藏高原沙漠化图(1:250万)[M]. 西安: 西安地图出版社, 2018
- [10] ZHANG G H, LIU B Y, LIU G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 713
- [11] GENG R, ZHANG G H, MA Q H, et al. Soil Resistance to runoff on steep croplands in Eastern China[J]. *Catena*, 2017, 152: 18
- [12] ZHANG G H, LIU Y M, HAN Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. transport capacity estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1291
- [13] MU H L, YU X J, FU S H, et al. Effects of stem basal cover on the sediment transport capacity of overland flows[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 384
- [14] DING L, FU S H, LIN B Y, et al. Effects of *Pinus tabulaeformis* litter cover on the sediment transport capacity of overland flow[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 204: 104685
- [15] FU S H, MU H L, LIU B Y, et al. Effects on the plant stem arrangement on sediment transport capacity of croplands[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31: 1325
- [16] WANG W, YIN S Q, FLANAGAN D, et al. Comparing CLIGEN-generated storm patterns with 1-min and hourly precipitation data from China[J]. *Applied Journal of Meteorology and Climatology*, 2018, 57(9): 2005
- [17] YIN S Q, WANG Z, ZHU Z, et al. Using Kriging with heterogeneous measurement error to improve the accuracy of extreme precipitation return levels estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 518
- [18] LIU S M, LI X, XU Z W, et al. The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 180072
- [19] LI X Y, LIN H S, GERKE H H. Frontiers in hydopedology: interdisciplinary research from soil architecture to the critical zone[J]. *Vadose Zone J.* 2018, 17: 180045
- [20] WANG P, YAMANAKA T, LI X Y, et al. Partitioning evapotranspiration in a temperate grassland ecosystem: Numerical modeling with isotopic tracers[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 208: 16
- [21] WANG P, LI X Y, WANG L X, et al. Divergent evapotranspiration partition dynamics between shrubs and grasses in a shrub-encroached steppe ecosystem[J]. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1325
- [22] WU X C, LIU H Y, LI X Y, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 1
- [23] XU T R, HE X L, BATENI S M, et al. Mapping regional turbulent heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature data from polar orbiting satellites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 444
- [24] LIU S M, XU Z W, WANG W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291
- [25] LIU S M, XU Z W, ZHU Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24
- [26] LIU S M, XU Z W, SONG L, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217: 182
- [27] XU Z W, LIU S M, LI X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 13140
- [28] LI X Y, YANG Z P, LI Y T, et al. Connecting ecohydrology and hydopedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133
- [29] LI X Y, ZHANG S Y, PENG H Y, et al. Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: results from Inner Mongolia steppe ecosystem of north China[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2013, 171: 20
- [30] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(12): 1721
- [31] HU X, LI Z C, LI X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 150: 1
- [32] HU X, LI X Y, WANG P, et al. Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 21
- [33] LI X Y, LIN H, LEVIA D F. Coupling Ecohydrology and Hydopedology at Different Spatio-Temporal Scales in Water-Limited Ecosystems[J]. *Hydopedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology*, 2012: 737

- [34] LI X Y, YANG X F, MA Y J, et al. Qinghai Lake Basin Critical Zone Observatory on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1
- [35] LI X Y. Soil and water conservation in arid and semi-arid areas; the Chinese experience[J]. *Annals of Arid Zone*, 2000, 39(4): 377
- [36] LI X Y, GONG J D, GAO Q Z, et al. Rainfall interception loss by pebble mulch in the semiarid region of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(3/4): 165
- [37] LI X Y, GAO S Y, XU H Y, et al. Growth of *Caragana korshinskii* using runoff-collecting microcatchments under semiarid condition[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 338
- [38] LI X Y, XU H Y, SUN Y L, et al. Lake-level change and water balance analysis at lake Qinghai, West China during recent decades[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(9): 1505
- [39] LI X Y, MA Y J, HUANG Y M, et al. Evaporation and surface energy budget over the largest high-altitude saline lake on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2016, 121: 10470
- [40] LI X Y, SHI F Z, MA Y J, et al. Significant winter CO₂ uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2041
- [41] 于德永, 史培军, 周涛, 等. 青海省生态系统服务价值总量及时空差异的量化[M]. 北京: 科学出版社, 2022
- [42] WU J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999
- [43] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 804
- [44] CAO Q, YU D Y, GEORGESCU M, et al. Impacts of land use and land cover change on regional climate: a case study in the agro-pastoral transitional zone of China[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(12): 124025
- [45] CAO Q, YU D Y, GEORGESCU M, et al. Impacts of urbanization on summer climate in China: an assessment with coupled land-atmospheric modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(18): 10505
- [46] CAO Q, YU D Y, GEORGESCU M, et al. Substantial impacts of landscape changes on summer climate with major regional differences: the case of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 416
- [47] CAO Q, WU J G, YU D Y, et al. The biophysical effects of the vegetation restoration program on regional climate metrics in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 169
- [48] CHU X L, ZHANG Q G. Consequences of mutation accumulation for growth performance are more likely to be resource-dependent at higher temperatures[J]. *BMC Ecology and Evolution*, 2021, 21(1): 109
- [49] CHU X L, ZHANG B W, ZHANG Q G, et al. Temperature responses of mutation rate and mutational spectrum in an *Escherichia coli* strain and the correlation with metabolic rate[J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2018, 18(1): 126
- [50] CHU X L, ZHANG D Y, BUCKLING A, et al. Warmer temperatures enhance beneficial mutation effects[J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2020, 33(8): 1020
- [51] BAI W N, WANG W T, ZHANG D Y. Phylogeographic breaks within Asian butternuts indicate the existence of a phytogeographic divide in East Asia[J]. *The New Phytologist*, 2016, 209(4): 1757
- [52] BAI W N, YAN P C, ZHANG B W, et al. Demographically idiosyncratic responses to climate change and rapid Pleistocene diversification of the walnut genus *Juglans* (*Juglandaceae*) revealed by whole-genome sequences[J]. *The New Phytologist*, 2018, 217(4): 1726
- [53] CAO Y, ZHANG D Y, ZENG Y F, et al. Recent demographic histories of temperate deciduous trees inferred from microsatellite markers[J]. *BMC Ecology and Evolution*, 2021, 21(1): 88
- [54] XU L L, YU R M, LIN X R, et al. Different rates of pollen and seed gene flow cause branch-length and geographic cytonuclear discordance within Asian butternuts[J]. *The New Phytologist*, 2021, 232(1): 388
- [55] ZHANG W P, CAO L, LIN X R, et al. Dead-end hybridization in walnut trees revealed by large-scale genomic sequence data[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2022, 39(1): msab308
- [56] ZHANG B W, XU L L, LI N, et al. Phylogenomics reveals an ancient hybrid origin of the Persian walnut[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2021, 36(11): 2451
- [57] WANG A Y, PENG Y Q, HARDER L D, et al. The nature of interspecific interactions and co-diversification patterns, as illustrated by the fig microcosm[J]. *The New Phytologist*, 2019, 224(3): 1304
- [58] HAO Y Q, ZHAO X F, ZHANG D Y. Field experimental evidence that stochastic processes predominate in the initial assembly of bacterial communities[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(6): 1730
- [59] XI N X, ZHU B R, ZHANG D Y. Contrasting grass nitrogen strategies reflect interspecific trade-offs between nitrogen acquisition and use in a semi-arid temperate grassland[J]. *Plant and Soil*, 2017, 418(1/2): 267

- [60] ZHOU S R, PENG Z C, ZHANG D Y. Dispersal limitation favors more fecund species in the presence of fitness-equalizing demographic trade-offs[J]. *The American Naturalist*, 2015, 185(5): 620
- [61] ZHANG Q G, CHU X L, BUCKLING A. Overcoming the growth-infectivity trade-off in a bacteriophage slows bacterial resistance evolution[J]. *Evolutionary Applications*, 2021, 14(8): 2055
- [62] ZHANG Q G, LU H S, ANGUS B. Temperature drives diversification in a model adaptive radiation[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285(1886): 20181515
- [63] WANG T M, FENG L M, MOU P, et al. Amur tigers and leopards returning to China: direct evidence and a landscape conservation plan[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 491
- [64] WANG T M, FENG L M, YANG H T, et al. A science-based approach to guide Amur leopard recovery in China[J]. *Biological Conservation*, 2017, 210(Sup. 1): 47
- [65] WANG T M, ROYLE J A, SMITH J, et al. Living on the edge: Opportunities for Amur tiger recovery in China[J]. *Biological Conservation*, 2018, 217: 269
- [66] FAN H, ZHAO C F, YANG Y K. A comprehensive analysis about the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during recent years of 2014-2018[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 220(1): 117066
- [67] FAN H, ZHAO C F, MA Z S, et al. Atmospheric inverse estimates of CO emissions from Zhengzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115164
- [68] SHI X, ZHAO C, JIANG J H, et al. Spatial Representativeness of PM_{2.5} Concentrations Obtained Using Reduced Number of Network Stations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(6): 3145
- [69] 张领雁, 张朝, 侯斌. 高温热浪致死风险的人群和城市分异及保险费率厘定的研究[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 475
- [70] DU Z H, XIAO C D, WANG Y Z, et al. Dust provenance in Pan-third pole modern glacierized regions: what is the regional source?[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 762
- [71] CAO Q, YU D Y, GEORGESCU M, et al. Impacts of urbanization on summer climate in China: An assessment with coupled land-atmospheric modeling[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121(18): 10505
- [72] DONG X B, ZHAO C F, YANG Y, et al. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(8): e2020EA001196
- [73] WU J G, XIANG W N, ZHAO J Z. Urban ecology in China: Historical developments and future directions[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125: 222
- [74] FAN H, ZHAO C F, YANG Y K, et al. Impact of emissions from a single urban source on air quality estimated from mobile observation and WRF-STILT model simulations[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, 14(9): 1313
- [75] SU Y F, ZHAO C F, WANG Y, et al. Spatiotemporal Variations of Precipitation in China Using Surface Gauge Observations from 1961 to 2016[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(3): 303
- [76] MA Z S, LIU Q J, ZHAO C F, et al. Application and evaluation of an explicit prognostic cloud-cover scheme in GRAPES global forecast system[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(3): 652
- [77] SUN Y, ZHAO C F, SU Y F, et al. Distinct impacts of light and heavy precipitation on PM_{2.5} mass concentration in Beijing[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1915
- [78] YANG X, ZHAO C F, GUO J P, et al. Intensification of aerosol pollution associated with its feedback with surface solar radiation and winds in Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(8): 4093
- [79] ZHAO C F, GARRETT T J. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 557
- [80] ZHAO C F, LIN Y L, WU F, et al. Enlarging rainfall area of tropical cyclones by atmospheric aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8604
- [81] ZHAO C F, YANG Y K, FAN H, et al. Aerosol characteristics and impacts on weather and climate over the Tibetan Plateau[J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 492
- [82] YANG X, ZHAO C F, ZHOU L J, et al. Wintertime cooling and a potential connection with transported aerosols in Hong Kong during recent decades[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 211: 52
- [83] JIANG S J, LEE X, WANG J K, et al. Amplified urban heat islands during heat wave periods[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2019, 124(14): 7797
- [84] 丑洁明, 董文杰, 延晓冬. 关于气候变化对社会经济系统影响的机理和途径的探讨[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 191
- [85] CHOU J M, HU C Y, DONG W J, et al. Temporal and spatial matching in human-earth system model

- coupling[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(6): 231
- [86] 杨世莉, 董文杰, 丑洁明, 等. 对地球系统模式与综合评估模型双向耦合问题的探讨[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 335
- [87] 丑洁明, 董文杰, 王淑瑜, 等. 人-地系统模式耦合中数据时空匹配方法的新探索[J]. *科学通报*, 2021, 66(增刊1): 526
- [88] YANG S L, DONG W J, CHOU J M, et al. A brief introduction to BNU-HESM1.0 and its earth surface temperature simulations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(12): 1683
- [89] 董文杰, 袁文平, 滕飞, 等. 地球系统模式与综合评估模型的双向耦合及应用[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(12): 1215
- [90] 王斌, 周天军, 俞永强. 地球系统模式发展展望[J]. *气象学报*, 2008, 66(6): 13
- [91] YANG S L, DONG W J, CHOU J M, et al. Global warming projections using the human-earth system model BNU-HESM1.0[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(23): 1833
- [92] WEI T, YANG S L, MOORE J C, et al. Developed and developing world responsibilities for historical climate change and CO₂ mitigation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(32): 12911
- [93] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756
- [94] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570
- [95] GLP (Global Land Project). Science plan and implementation strategy[R]/IGBP Report No. 53/IHDP Report No. 19. Stockholm: IGBP Secretariat, 2005
- [96] 史培军. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [97] HE C Y, GAO B, HUANG Q X, et al. Environmental degradation in the urban areas of China: evidence from multi-source remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 65
- [98] HE C Y, LIU Z F, GOU S Y, et al. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 14(3): 034008
- [99] HE C Y, LI J W, ZHANG X L, et al. Will rapid urban expansion in the drylands of northern China continue: a scenario analysis based on the Land Use Scenario Dynamics-urban model and the Shared Socioeconomic Pathways[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 57
- [100] HE C Y, LIU Z F, WU J G, et al. Future global urban water scarcity and potential solutions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4667
- [101] HE C Y, LIU Z F, TIAN J, et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886
- [102] YUE H B, HE C Y, HUANG Q X, et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1462
- [103] 国家减灾委员会办公室、民政部救灾司、民政部国家减灾中心. 自然灾害灾情统计 第1部分: 基本指标: GB/T 24438.1—2009 [S]. 北京: [s. n.], 2009
- [104] SHI P J, ROGER KASPERSON (EDITORS-IN-CHIEF). World Atlas of Natural Disaster Risk[M]. Hamburg & Beijing: Springer & BNUP, 2015
- [105] SHI P J (EDITORS-IN-CHIEF). Atlas of Global Change Risk of Population and Economic Systems[M]. Hamburg: Springer, 2022
- [106] 效存德, 苏勃, 王小明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险[J]. *科学通报*, 2019, 64(19): 1975
- [107] SU B, XIAO C D, CHEN D L, et al. Mismatch between the population and meltwater changes creates opportunities and risks for global glacier-fed basins[J]. *Science Bulletin*, 2021, 67(1): 9
- [108] 黄怡, 效存德, 苏勃, 等. 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性: 基于多级流域尺度分析[J]. *科学通报*, 2020, 65(24): 2636
- [109] HUANG Y, XIAO C D, SU B. Importance and vulnerability of water towers across northwestern China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(1): 63
- [110] WANG L, DU Z H, WEI Z Q, et al. High methane emissions from thermokarst lakes on the Tibetan Plateau are largely attributed to ebullition fluxes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149692
- [111] WEI Z Q, DU Z H, WANG L, et al. Sentinel-based inventory of thermokarst lakes and ponds across permafrost landscapes on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(11): 154761

Earth surface process and regional sustainable development

XIAO Cunde SHI Peijun LI Xiaoyan ZHANG Guanghui HE Chunyang CHEN Jin
CHOU Jieming KANG Liqiang LIU Baoyuan YAN Xiaodong YANG Xiaofan
YU Deyong ZHAO Chuanfeng ZHAO Wenwu ZHANG Chunlai ZHANG Dayong
ZHANG Qiang ZHANG Wensheng

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract The State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE) was established in 2007, since then fundamental and applied systematic research have been carried out on the Earth's surface multi elements, multi-scale and multi processes and their resource ecological effects. Here we summarize works done in ESPRE in the past 15 years. Observation systems and large-scale simulation facilities were constructed for desertification process, soil erosion process and eco hydrological process. Theory and applications of biodiversity maintenance mechanism, landscape ecology and ecosystem services were studied. The environmental evolution and human activities, Earth-human system dynamics model and simulation were explored. The fourth area of emphasis was regional sustainable development, including changes in land use/cover (LUCC) and comprehensive natural disaster risk. In the future, we will carry out more organized research and explore systematic solutions to Earth surface problems. The core goal of the lab is to study human-land system coupling theory and regional high-quality development path in ecologically fragile areas and disaster high-risk areas. The main tasks are now identified: to construct space-ground integrated observation networks, to systematically carry out comprehensive research from the process of various elements such as “mountains, rivers, forests, field, lakes, grass, sand and ice” to the life community as a whole. We will develop analysis and simulation devices, to reveal mechanism and dynamic process of nature-human interaction, to build a multi-factor, multi-process and multi-scale surface dynamic model system, and to reveal coupling mechanism and process of Earth-human system. We plan to undertake systematic national scientific research tasks, to analyze mutual feeding mechanism and correlation effect between human and natural systems, and to establish a regional high-quality development monitoring, evaluation and early warning system for long-term strategies of national ecological civilization.

Keywords surface processes; resource ecology; earth-human system dynamics; comprehensive risk prevention; regional high-quality development

【责任编辑:刘先勤】