

北京大学综合自然地理学研究的发展与贡献

李双成, 蒙古军, 彭 建

(北京大学城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 北京大学的综合自然地理学缘起于1952年全国院系调整时在本校设置的自然地理学学科, 在半个多世纪的发展历程中, 经历了学科初创和完善等阶段, 逐渐形成了面向学科前沿和国家需求的综合自然地理学学科体系。针对日趋严峻的气候变化、资源环境和社会经济发展问题, 北京大学综合自然地理学在陆地表层过程及机理、土地利用/覆被变化及其生态环境效应、生态系统服务与人类福祉、生态风险评价与安全格局构建、自然地域系统划分等方面进行了开拓创新, 取得了丰硕成果, 引领了中国综合自然地理学的发展。展望未来, 北京大学综合自然地理学将持续进行水、土、气、生等自然地理要素与过程的综合研究, 认识人类活动与全球环境变化对主要自然地理过程和格局的影响机理, 通过构建观测数据与地表系统模型融合系统, 定量评估要素与过程耦合的区域资源环境效应及其对社会经济的影响, 在生态文明建设、主体功能区划、国土开发整治和流域综合管理等国家战略服务方面做出更大贡献。

关键词: 北京大学; 综合自然地理学; 创新; 回顾; 展望

DOI: 10.11821/dlxb201711003

1 引言

纵观自然地理学的发展历史, 分支学科的专门化和综合集成过程交织进行。20世纪, 随着研究手段、观测和实验技术的不断发展, 在以分析思维为主的还原论思潮影响下, 自然地理学内部各个分支如地貌学、气候学、水文地理学、土壤地理学、生物地理学等都形成了比较系统的独立理论和学科研究范式。这种趋势一方面促进了自然地理学研究的深入, 另一方面又使其内部产生了深刻的学科分化, 呈现出空心化现象^[1]。这种空心化的倾向对包括自然地理学在内的地理学发展产生了负面影响, 引起了国内外地理学家的广泛关注^[2-4]。然而, 随着自然地理学系统研究范式的逐步确立^[5], 在全球各个尺度资源环境问题和社会经济发展需求刺激下, 在国际重大科学研究计划如“未来地球”推动下, 自然地理学的综合研究重新成为学界关注的热点。综合自然地理学(Integrated physical geography)研究自然地理环境各组成要素间的物质能量关系, 阐明自然地理环境的历史形成、现代过程、类型结构、地域分异和发展演变, 是自然地理学的重要组成部分。从要素综合、过程综合逐渐提升到区域综合水平^[6], 综合自然地理学进入一个新的发展阶段。

目前, 综合自然地理学的前沿研究领域包括: ① 全球环境变化的影响与人类响应。在已有要素和过程综合的基础上, 探索地球系统各组成部分之间复杂的社会—环境相互作用的耦合机理, 寻求在局地、区域和全球尺度上缓解人地紧张关系的解决方案和转型

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(L1624026) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026]

作者简介: 李双成(1961-), 男, 河北平山人, 博士, 教授, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

方式^[7]；② 陆地表层过程与格局的综合研究。重点研究陆地表层过程与格局变化的成因机理、幅度与速率、影响与适应，辨识变化的自然与人文驱动因素，模拟变化的动态趋势，评估变化趋势的可控、可缓及其程度^[1,6]；③ 特殊区域的综合研究。重点关注一些更容易受到全球环境变化与人类活动影响的区域科学问题，如干旱半干旱区的水分循环和水资源形成、山地自然—人文环境和灾害相互作用、极地（包括青藏高原）冰冻圈环境变化及其对全球气候的影响、海岸带与岛屿灾害及其可持续发展等^[7]。

北京大学作为近现代中国地理学开创和发展的学术大本营，半个多世纪以来对中国自然地理学尤其是综合自然地理学发展都起到了重要的引领和推动作用。回顾发展历程、梳理学术贡献、展望发展趋势，无疑对新时期中国乃至国际综合自然地理学的发展都大有裨益。

2 发展历程

北京大学自然地理学专业的渊源可追溯到1929年建立的清华大学地学系地理组，以及抗战期间的西南联大地质地理气象系地理组。1952年全国院系调整，清华大学地学系地理组和燕京大学部分教员联合成立北京大学地质地理系时首先设立了自然地理专业，从清华大学转入北京大学的林超和李孝芳是自然地理专业的主要奠基人。随着地貌、植物地理、环境地理的相继专门化，北京大学自然地理专业形成了以自然地理综合研究为鲜明特色的研究体系。林超、李孝芳、陈传康、范信平、李寿深、关伯仁、卢培元等老一辈学者在自然地理综合研究和教学中发挥了重要作用。随着20世纪50年代末期苏联学者A. R. 伊萨钦科来中国系统讲授地理壳、自然区划和景观学进展，该讲学研修班在林超领导下经集体讨论，确定了“综合自然地理学”的学科名称，并发展为自然地理学的一门独立分科^[8]。1978年、1982年和1988年，林超陆续招收（综合）自然地理专业的硕士生、博士生和博士后，并于1978年开设了“土地类型和自然区划国内外研究动态”研究生课程，系统介绍英、澳、美、加、德、荷等国家或学派的土地系统、自然分区等理论研究和实践成果，对推动中国综合自然地理学理论发展和人才培养做出了重要贡献^[9]。

在综合自然区划方面，林超、冯绳武和关伯仁于1954年率先完成了《中国自然地理区划大纲》，是新中国第一个完备的全国综合自然地理区划方案，比之前的历次区划跨进了一大步，基本反映了全国的自然地理面貌^[10]。依据区划学和类型学相结合的方法，陈传康建立了全球性分异、大陆大洋地域分异、区域性分异、中尺度分异和地方性分异的地球表层地域分异规律体系，对自然区划的原则和方法进行了开拓性研究^[8]，提出了以双列系统分析为基础的综合单列系统，成为以后开展自然区划研究的理论基础。在土地类型学研究中，陈传康提出了以地貌部位及其结构为基础的土地分级划分标准^[11]。20世纪70年代后期，中国大、中比例尺土地类型制图中的土地分级遂趋向于采用景观学派和英澳学派相结合的三级分级系统，陈传康和蔡运龙等提出了一套汉语涵义较切合定义的名称——地块、地段、地方三级系统，更加方便推广应用^[12]。

在科学研究的同时，还十分重视教材编写工作。1983年，陈传康和李昌文在多年教学和科研实践的基础上，汲取了英、澳学派的观点和区域实践成果，进一步完善了《综合自然地理学》讲义，同时还编纂了《综合自然地理学参考资料》（共6册）。1993年，由陈传康、伍光和李昌文等编著的《综合自然地理学》教材在高等教育出版社正式出版^[13]，建立了以地域分异、自然区划、土地类型为基本理论的综合自然地理学内容体系。该教材对北京大学自然地理专业多年来的研究成果进行了总结，不仅从理论体系上

对综合自然地理学进行了系统地、深层次梳理,而且从实践上进行可操作性论证,是理论、实践与方法融为一体的教科书(该教材于1995年获国家教委优秀教材二等奖)。伍光和、蔡运龙在此基础上进行了补充完善,于2004年由高等教育出版社再版了《综合自然地理学》(第二版)^[14]。

3 学术贡献

全球及各个尺度的环境变化和资源生态问题的日益凸显,给综合自然地理学研究带来了巨大的机遇与挑战。北京大学综合自然地理研究紧跟国际前沿,注重实践应用,不断创新与拓展自然地理综合研究的领域。蔡运龙、王仰麟、许学工、陆雅海和李双成等学者相继主持了一系列国家自然科学基金重点项目,如“西南喀斯特山区土地利用/土地覆被变化及其对土地资源利用可持续性的影响”(2004-2007)、“城市景观格局演变及其生态环境效应研究”(2007-2011)、“渤海西部海岸高强度开发的环境变化影响与多功能持续发展”(2009-2012)、“水稻土甲烷氧化的微生物机理与关键调控因子”(2012-2016)、“生态系统服务与区域社会福祉耦合机制研究:基于地理学综合分析的途径”(2012-2016)、“城市景观格局与自然灾害生态风险研究”(2014-2018)等。以重大科学研究项目为支撑,将综合自然地理研究从传统的自然地域系统研究向陆地表层过程及机理、土地利用变化及生态环境效应、景观生态风险与安全、生态系统服务等学科前沿领域延伸。

3.1 陆地表层过程及机理

北京大学综合自然地理研究重点关注水、土、气、生等自然要素和过程的集成和交叉,并考虑人类活动的影响,在多尺度下对多要素进行了综合分析和模拟预测。

在植物物候时空过程方面,陈效逑等从自然地理学格局与过程视角开展研究,取得了丰硕成果:①揭示物候现象发生的顺序相关律、准年周期律和超年波动律,深化了对物候现象发生时间的基本规律及其环境机制的认识^[15];②提出物候—遥感法,实现了由点及面确定区域植被生长季节及其对气候变化的响应^[16];③建立了一系列基于气温和降水的物候时间模型和空间模型,提高了草本和木本植物物候模拟精度并揭示了气候变化响应的区域差异及其成因^[17-22]。

在气候过程研究方面,赵昕奕等长期关注下垫面气候变化及其环境效应,在气候要素时空特征、变化趋势以及人类活动影响等研究领域取得较大进展:①分析了中国和区域气温和降水的时间变化特征^[23-26];②探讨了气候变化与土地利用类型的关系^[27-29];③研究了人类活动对大气边界层尤其是城镇地区热环境的影响^[30-32]。

在古环境和气候变化过程研究方面,王红亚等综合使用地磁学、地球化学、古生物学和测年技术等手段,利用湖泊沉积物和现代气候、水文数据,估算了华北平原的古年径流深^[33],重建了内蒙古高原更新世末期和全新世^[34-35]、非洲西部 Sahel 地区全新世^[36]、中国中东部高海拔地区中、晚全新世的气候—环境变化^[37-38],深化了对这些地区古气候—环境变化的认识。

在地球化学元素循环过程研究方面,周丰等阐明了水热条件对氮排放因子空间格局的影响及其地带性规律,解决了从站点到区域/全球氮排放过程的尺度转换问题^[39-41];建立了“自下而上”和“自上而下”多模型集合方法^[42],揭示了中国农田 N_2O 排放增速变缓的人为驱动机制^[43];开发了自适应移动网格的水生态模型^[44-45]和快速源解析方法^[46-47],发现了氮沉降对湖泊生态退化的“急性激发”效应和对生态恢复的“慢性推迟”效应^[48]。围绕稻田土壤碳循环和甲烷排放过程,陆雅海等从事土壤微生物与生物地球化学机制研

究,揭示了稻田土壤有机质厌氧分解的微生物机制^[49],发现了稻田甲烷产生的关键微生物及其对土壤条件的适应机制^[50],系统研究了稻田甲烷氧化过程及其调控因子,指出了稻田干湿交替和氮肥施用对甲烷氧化的促进作用^[51]。

随着学术界对全球变化问题的日益关注,陆地表层过程与机理研究逐渐从区域尺度转向全球尺度,并强调不同空间尺度上多种自然过程的相互作用研究^[52]。赵昕奕等研究发现近年来中国的气温变化与全球气候变化有一定程度的相关关系^[53]。朴世龙等研究了温度变化对植被生长、生态系统碳源汇和农作物产量的影响及其机制,并预测了全球碳循环长期动态^[54-56]。彭书时等综合评估了土地利用变化对气候的反馈作用,揭示了植被生长对气候的影响机制^[57-58]。李双成等利用MODIS地表温度数据,基于卫星观测资料研究了森林生态系统对地表温度的影响,并揭示了其生物物理机制的作用^[59]。

地球系统模式是研究地球表层过程和机理的重要途径,也是自然地理综合研究的必备手段。针对陆面模式薄弱或缺失诸如土地利用、植被动态、碳水耦合、湿地动态、喀斯特湖动态、甲烷排放和冻土消融等地表过程,彭书时等在陆面模式 ORCHIDEE 中开发和改进了相应模块,并应用于全球变化研究^[60-63]。

3.2 土地利用变化及其生态环境效应

北京大学综合自然地理研究高度关注土地利用变化及其效应。蔡运龙等在梳理喀斯特地区土地利用研究现状的基础上^[64],分析了贵州喀斯特地区的土地利用变化及其生态效应^[65-66],提出一个土地系统变化空间尺度综合的研究方案^[67],并建立了一个土地变化科学范式与生态脆弱区研究案例相结合、土地变化生态效应评价与土地利用优化配置相结合、微观过程与宏观格局相结合、退化土地修复的社会经济途径与工程技术途径相结合的土地变化综合研究体系^[68]。王红亚等通过对贵州高原一些缺乏水文资料地区水库泥沙的¹³⁷Cs比活度分析、粒度分析、TOC和TN分析、矿物磁性测试等,推衍20世纪60年以来降水、土地利用变化对土壤侵蚀过程的影响^[69-70]。蒙吉军等在明晰河西走廊等地土地利用变化时空格局的基础上,重点研究了变化的驱动机制^[71-72],提出了驱动类型对土地系统变化产生不同的影响^[73],指出土地利用变化的驱动力存在明显的尺度依赖性^[74]。彭建等重点关注滇西北地区土地利用演变格局^[75],并在此基础上分析了退耕还林等生态工程的生态效应^[76]。杨小柳等重点关注了土地利用/覆被变化对区域洪水的影响,构建“土地利用—水文—水动力耦合模型”^[77-78],并在流域尺度上发展了“土地利用—水资源—生态联合调度优化模型”等一系列水资源综合管理方法^[79-81]。许学工等多尺度研究黄河三角洲土地利用与土地覆被的质量变化^[82];遥感监测37年渤海湾沿岸土地变化,计算了渤海湾填海造陆导致的生态损失,并提出有序填海的调控思路和方法^[83-85]。这些研究厘清了不同生态脆弱区的土地演变机制,为生态脆弱区的生态保护和重建等提供借鉴。

在关注过去和现状土地利用及其生态效应的同时,高度关注未来土地利用的模拟。蒙吉军等探索建立了土地系统变化情景模拟的不同方法^[86],利用基于邻域相关构建空间权重的Auto-logistic模型构建CLUE-S模型,模拟了漓江流域2020年土地利用格局^[87];李双成等应用基于径向基函数神经网络的CA模型,模拟了深圳市的土地利用变化情景^[88]。总体而言,通过变化监测、驱动力识别、模型模拟、效应评估与预测分析等途径,重点关注土地利用时空格局变化、驱动机制、生态效应及其重要阈值,极大地推动了中国土地利用/覆被变化(LUCC)研究的发展。

随着城市化的快速发展,城市地区的土地利用变化及其生态环境效应受到高度关注。王仰麟等较早关注城市景观格局的形成机制,在关键景观格局指标析取的基础上^[89],明晰了深圳市不透水表面指数等景观组分的多时相时空特征^[90-91],揭示了植被变化规律及

其对大城市人类活动的响应规律^[92-93];同时,通过构建社会—生态系统脆弱性、恢复力、适应性等研究框架,评估景观生态风险及适应方式^[94-95]。赵淑清等利用多源遥感数据完成了过去30年中国主要城市扩张时间序列图,解析了城市扩张过程的时空格局,评估了城市扩张的多种生态后果。她的研究小组发现,1978-2010年中国主要城市扩张速度和模式具有明显的时间和空间差异^[96-97];城市化带来了明显的热岛效应,但强度具有季节和昼夜差异^[98-99],并在方法论上探讨了使用数据的实时性对热岛效应正确评估的重要性,指出过期的边界会给热岛强度的正确评估带来误差^[100];首次建立了用遥感数据评估城市化对植被生长的直接和间接影响的理论体系、定量方法,并发现城市环境对植被生长的普遍促进作用,城市化往往导致植被生长起始期提前、结束期推迟、生长季延长^[101],这种间接促进作用大约可以抵消40%的城市化对于植被替代的直接负面影响^[102]。彭建等梳理了城市发展的生态用地需求测算研究进展^[103],基于偏相关分析明晰气候变化背景下植被对城市化进程响应机制^[104],提出了城市化进程净初级生产力(NPP)响应的互不干扰、拮抗对立与协同共生三阶段概念模型^[105];定量解析景观组分对地表温度的影响,明晰了区域绿地显著降温的规模阈值^[106];遥感识别了中国PM_{2.5}变化趋势,评价了其人群健康风险并划分控制区^[107]。许学工等研究了北京市绿色空间的变化,强调发挥绿色空间的复合功能,进行首都圈绿色空间格局的构建^[108-109]。这些研究对于科学理解城市地区土地利用变化与生态过程互馈机理、提升城市生态可持续性具有重要意义。

3.3 生态系统服务与人类福祉

生态系统服务的研究涉及不同时空尺度自然过程、自然—人文过程和人文过程及其递进关系^[110],关注时空异质性、空间流动性和区域特征,能够拓展综合自然地理学的研究视角,也是综合自然地理学的最新综合途径^[111]。北京大学综合自然地理学者极力推动生态系统服务研究的“地理化”转向。李双成等倡议建立生态系统服务地理学范式,在系统梳理生态系统服务地理学学科框架的基础上,提出了基于地理学视角的生态系统服务分类体系、形成机制及其相互作用关系、供给与需求时空特征和区域差异、生态系统服务与人类社会福祉耦合关系等重要研究议题^[112]。蒙吉军等在定量识别生态系统服务空间分异的基础上,关注土地利用对生态系统服务的影响,探讨基于生态系统服务的生态系统管理^[113-114]。彭建等关注快速城市化过程对生态系统服务变化的影响,识别了人口城市化和经济城市化对生态系统服务的影响阈值^[115]。李双成和彭建均对生态系统服务权衡的研究进展进行了系统梳理^[110, 116],对水生态系统服务的空间流动进行了模拟^[117]。

同时,随着研究尺度从生态系统向景观演进,景观多功能性的研究逐渐受到关注。彭建等在对国内外多功能景观研究进行系统梳理的基础上^[118],重点评估了都市区农业景观多功能性^[119],并分析了耕地多功能景观的动态变化及其影响机制^[120]。总体而言,生态系统服务研究极大地拓展了综合自然地理学的研究领域,成为一个新的学科增长点。

3.4 生态风险评价与安全格局构建

作为综合自然地理的重要应用出口,生态风险及其相关研究有利于更有效地应对生态风险、保障生态安全,从而促进区域可持续发展。2000年代初,许学工等最早开始探讨区域生态风险及其评价的特点,并梳理出“风险源分析—受体分析—暴露危害分析—风险表征”的区域生态风险评价概念模型^[121]。蒙吉军等构建了区域生态风险评价的“3R模型”及区域生态风险防范的基本框架^[122-123]。基于这些模型和框架,许学工、王仰麟、蒙吉军、彭建、赵昕奕等相继开展了城市、湿地、流域、山地、矿区、农牧交错带等不同类型区域/景观生态风险评价,进一步推动了国内的生态风险评价研究^[123-128]。

与此同时,彭建等在系统梳理景观生态风险研究进展的基础上^[129],开始关注生态系

统健康评价,寻求从风险的反面视角解析区域生态环境问题^[130-131]。杨小柳等提出基于土地利用的流域水安全评估框架^[132]。随着研究的不断深入,生态风险/安全的研究逐渐从关注风险/安全的空间格局认知到强调空间规避,即生态安全格局的构建。蒙古军等基于最小累积阻力模型与多目标线性规划模型分别构建了鄂尔多斯土地利用生态安全格局,并利用景观指数对两者进行评价,从而有效指导鄂尔多斯市土地资源的可持续利用^[133-134]。彭建等则系统整合提出“源地确定—廊道识别—战略点设置”的生态安全格局构建范式^[135],指出了源地识别的过程中需要考虑景观连通性、供给与需求^[136],阻力面的设定应关注夜间灯光、地质灾害敏感性修正等方面的问题^[137-138],提出了重要阈值设定、有效性评价、多尺度关联和生态过程耦合等四个生态安全格局构建研究的重点方向^[135]。

3.5 自然地域系统划分

作为地理学的传统工作和重要研究内容,区划能够从区域角度观察和研究地域综合体,探讨区域单元的形成发展、分异组合、划分合并和相互联系,是对过程和类型综合研究的概括和总结^[139]。基于前人丰富的研究成果,蔡运龙在《中国地理多样性与可持续发展》一书中阐述了三大地带和七大地区及其内部的地理多样性,视为综合区划之集成^[140]。许学工等综合考虑农业资源、农业发展、环境和生态、农村社会、科教和管理5大系统、95个指标,通过计算相对优势,进行中国农业可持续发展区划^[141]。同时,李双成、蒙古军、彭建等在综合自然区划、生态地理区划、生态功能区划、主体功能区划、生态系统服务分区等方面做了大量工作,并将快速发展的计算机技术和地理数学方法引入分区工作,有效提高了分区的客观性和科学性^[142-147]。李双成等将SOFM神经网络应用于综合自然区划研究中,指出基于SOFM网络的分区具有划分层次明显、区域分割清晰、客观性强等优点,是对传统区划方法的有力补充和拓展^[142];同时,将空间小波变换应用于生态地理界线识别与定位,解决了传统区划研究中分区界线难以多尺度、准确表达的问题^[148]。彭建等将Kohonen神经网络应用于土地资源综合分区,采用自上而下演绎与自下而上归并相结合的途径将全国划分为41个土地资源亚区^[149]。

在强化技术方法的同时,分区方案的对比验证也逐渐受到关注,从而减少分区结果的不确定性。不同分区方案间的对比以及与区域自然地理特征的空间对比被普遍应用于分区结果的验证。李双成等用黄秉维综合自然区划方案中半湿润半干旱分界线作为检验标准,检验了小波分析结果的可靠性和有效性^[148]。彭建等依循植被动态一致性准则,依据两步筛选法,实现了黄土高原生态地理分区多种方案间的优选^[143]。此外,景观指数也被逐渐引入分区方案的验证。彭建等根据分区中的区域共轭性原则,提出基于景观聚集度指数的分区方案优选方法^[150-151]。分区方法的创新和分区结果的验证,能够确保地域划分的客观性、科学性,从而有效指导区域的分区管治和可持续发展。

4 研究成果应用

北京大学综合自然地理学研究具有服务国家和社会需求的优良传统、延续至今。陈传康曾指出:综合地理学具有三重性,即要同时开展理论地理学、建设地理学和区域开发研究^[152]。20世纪80年代-20世纪末,随着综合自然地理学理论体系的建立,结合区域人口、资源、环境和发展问题,北京大学综合自然地理学在实践应用方面进行了大量探索。除了参加传统的自然资源考察、应用性自然区划外,还广泛参与国土整治、区域开发与发展战略、旅游规划等应用性课题研究,为各级政府制定社会经济发展政策提供了强有力的科学支撑。

进入 21 世纪以来, 全球气候变化和资源环境问题更加凸显, 北京大学综合自然地理学研究成果社会化应用指向更为突出。例如, 彭书时使用改进和耦合开发新模块的 ORCHIDEE 为全球碳计划碳收支平衡年度报告等多个国际模型比较项目提供模拟和分析结果^[153-155]; 他目前担任全球碳计划甲烷工作组成员, 负责全球碳计划甲烷收支平衡研究中 ORCHIDEE 模型模拟工作, 并参与完成了全球甲烷收支平衡的综合分析和全球湿地 2000-2012 年甲烷排放模型比较分析两个项目^[156], 同时完成了中国过去 30 年来甲烷人为排放清单, 修正了 EDGAR 排放数据库对中国甲烷排放量的高估^[157]。周丰等利用地面观测和调查资料数据, 集成陆面模式、大气反演和数值模拟等多种方法, 研究了氮素排放和驱动机制, 研究成果被联合国发起的“全球气候智能型农业联盟”建议为精准施肥实施效果的度量工具^[40], 同时修正了国际社会关于“中国贡献”的认识; 他目前担任全球碳计划氧化亚氮工作组成员, 负责全球碳计划氧化亚氮收支平衡研究中 1901-2014 年农田排放模拟工作和多模型比较分析。

在服务国家需求方面, 蔡运龙提出的“最小人均耕地面积”和“耕地压力指数”以及耕地价值重建理念在中国耕地资源保护方面起到了重要作用^[158-159]。杨小柳等提出的三段九步法已应用于国家节水战略的编制, 并将中国的流域综合管理经验介绍到国外^[160]; 他曾任荷兰政府/全球水资源合作组织联合专家组组长, 指导斯威士兰、喀麦隆、贝宁等国的国家水资源发展计划的编制, 并兼任亚洲开发银行高级专家, 参与亚洲—太平洋地区 40 余国家/地区的水安全评估。

5 重点发展方向

根据学科发展趋势和国际研究前沿, 结合自身优势和特点, 北京大学综合自然地理学在未来的研究中将注重以下五个方面的发展:

(1) 全球环境变化的区域响应及适应。通过地表过程和格局的动态模拟, 探讨全球环境变化对自然生态系统和社会经济系统的影响及其交互作用, 识别关键控制要素、重点响应地域, 为中国气候变化适应策略的制定提供科学支撑。

(2) 自然地理过程耦合及资源环境效应。持续关注水、土、气、生等自然地理过程, 聚焦区域水文、土壤过程及其耦合机制, 系统研究土壤微生物碳氮转化过程, 理解人类活动与全球环境变化对主要自然地理过程的影响机理, 评估过程耦合的区域资源环境效应及对社会经济的影响。

(3) 观测数据—陆地表层系统模型融合系统。聚焦全球环境变化与陆地表层系统的相互作用和调控研究, 重点理解主要陆地过程对外界扰动响应的敏感性和恢复机制, 优化和完善观测数据—陆地表层系统融合的陆面模式, 量化陆地表层系统的变化特征与调控途径。

(4) 基于土地生态系统服务的自然地理综合研究。在自然地理要素与过程研究的基础上, 以土地生态系统及其提供的服务为综合分析对象, 重点突破土地系统变化及其生态效应、区域生态风险管理及生态安全格局优化, 以及近远程视角下的生态系统服务流空间制图、驱动机理、效应评估、情景模拟和动态调控。

(5) 面向景观可持续性提升的流域综合管理。结合“未来地球”等国际研究计划对可持续性议题的高度关注, 基于流域自然生态过程的整体性, 以水文过程链接土壤、植被、大气等自然地理要素, 通过土地利用关联人类社会经济活动及发展战略, 耦合关联流域土地利用与水文过程, 模拟不同流域发展情景的景观可持续性响应, 优化流域综合管理策略、提升全球变化适应能力。

参考文献(References)

- [1] Fu Bojie. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059. [傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [2] Huang Bingwei. Some major trends in geography. *Acta Geographica Sinica*, 1960, 26(3): 149-154. [黄秉维. 自然地理学一些最主要的趋势. *地理学报*, 1960, 26(3): 149-154.]
- [3] Matthews J A, Herbert D A. *Unifying Geography: Common Heritage, Shared Future*. Routledge Press, 2002.
- [4] Stott P. Physical geographies: Past, present, and future. *Progress in Physical Geography*, 2016, 40(1): 3-6.
- [5] Li Shuangcheng. *Research Paradigm of Physical Geography*. Beijing: Science Press, 2013. [李双成. 自然地理学研究范式. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [6] Wu Shaohong, Zhao Yan, Tang QiuHong, et al. Land surface pattern study under the framework of Future Earth. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 10-17. [吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 10-17.]
- [7] Wu Xutong, Fu Bojie, Wang Shuai. Linking science and society: Review of 33rd International Geographical Congress. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(10): 1849-1855. [武旭同, 傅伯杰, 王帅. 连接科学与社会: 从第33届国际地理大会看地理学的发展态势. *地理学报*, 2016, 71(10): 1849-1855.]
- [8] Chen Chuankang. Development of physical geography in China//*Geographical Research and Development*. Hongkong: Hongkong University Press, 1993: 337-344. [陈传康. 中国自然地理学的发展//*地理研究与发展*. 香港: 香港大学出版社, 1993: 337-344.]
- [9] Cai Yunlong. Geographical thoughts and achievement of Lin Chao. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 18(3): 272-281. [蔡运龙. 林超的学术思想与成就. *地理学报*, 1993, 18(3): 272-281.]
- [10] Zhao Songqiao, Chen Chuankang, Niu Wenyuan. Thirty years in integrated physical geography in People's Republic of China. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(3): 187-199. [赵松乔, 陈传康, 牛文元. 近三十年来我国综合自然地理学的进展. *地理学报*, 1979, 34(3): 187-199.]
- [11] Cai Yunlong, Wang Enyong. A tireless explorer of geography: Mourn Chen Chuankang Professor. *Progress in Geography*, 1997, 16(4): 89-92. [蔡运龙, 王恩涌. 地理学的不倦探索者: 悼念陈传康教授. *地理科学进展*, 1997, 16(4): 89-92.]
- [12] Cai Yunlong. Land classification and physico-geographical regionalization of Guiyang. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(3): 210-223. [蔡运龙. 贵阳市土地类型和自然区划. *地理学报*, 1986, 41(3): 210-223.]
- [13] Chen Chuankang, Wu Guanghe, Li Changwen. *Integrated physical geography*. Higher Education Press, 1993. [陈传康, 伍光合, 李昌文. *综合自然地理学*. 北京: 高等教育出版社, 1993.]
- [14] Wu Guanghe, Cai Yunlong. *Integrated Physical Geography*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004. [伍光合, 蔡运龙. *综合自然地理学*. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2004.]
- [15] Chen X. *Spatiotemporal Processes of Plant Phenology: Simulation and Prediction*. Springer, 2017.
- [16] Chen X, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [17] Chen X, An S, Inouye D W, et al. Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3635-3646.
- [18] Chen X, Li J, Xu L, et al. Modeling greenup date of dominant grass species in the Inner Mongolian Grassland using air temperature and precipitation data. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 463-471.
- [19] Chen X, Xu L. Phenological responses of *Ulmus pumila*, (Siberian Elm) to climate change in the temperate zone of China. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(4): 695-706.
- [20] Chen X, Xu L. Temperature controls on the spatial pattern of tree phenology in China's temperate zone. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2012, 154/155(3): 195-202.
- [21] Chen X, Wang L, Inouye D. Delayed response of spring phenology to global warming in subtropics and tropics. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 234/235: 222-235.
- [22] Xu L, Chen X. Regional unified model-based leaf unfolding prediction from 1960 to 2009 across northern China. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1275-1284.
- [23] Feng Y, Zhao X. Changes in spatiotemporal pattern of precipitation over China during 1980-2012. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(4): 1-14.
- [24] Li Pengfei, Sun Xiaoming, Zhao Xinyi. Analysis of precipitation and potential evapotranspiration in arid and semi-arid area of China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7): 57-63. [李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近50年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 57-63.]
- [25] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial Characteristics of change in temperature and precipitation of the Qinghai-Xizang

- (Tibet) Plateau, *Science China Earth Sciences*, 1996, 26(4): 354-358. [林振耀, 赵昕奕. 青藏高原地区气温降水变化的空间特征. *中国科学(地球科学)*, 1996, 26(4): 354-358.]
- [26] Yan yan, Zhao Xinyi, Zhou Liping. The temporal and spatial characteristics of aridity and wetness variation in northwest China during recent 50 years and the factor analysis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(4): 146-158. [闫炎, 赵昕奕, 周力平. 近50年中国西北地区干湿演变的时空特征及其可能成因探讨. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 146-158.]
- [27] Feng Y, Zhao X. Daily temperature trend and sensitivity to grassland and cropland in eastern China during the past 32 years. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1510-1518.
- [28] Li Yan, Zhao Xinyi. Surface air temperature changes of different land cover types in China during 1979-2007. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(6): 1129-1135. [李琰, 赵昕奕. 近30年中国不同土地覆被类型的气温变化. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 1129-1135.]
- [29] Mou Xuejie, Zhao Xinyi. Study on the relationship between surface temperature and land use in Pearl River Delta. *Geographical Research*, 2012, 31(9): 1589-1597. [牟雪洁, 赵昕奕. 珠三角地区地表温度与土地利用类型关系. *地理研究*, 2012, 31(9): 1589-1597.]
- [30] Li Y, Zhao X. An empirical study of the impact of human activity on long-term temperature change in China: A perspective from energy consumption. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D17): 17117.
- [31] Li Y, Zhu L, Zhao X, et al. Urbanization impact on temperature change in China with emphasis on land cover change and human activity. *Journal of Climate*, 2013, 26(22): 8765-8780.
- [32] Dou Haoyang, Zhang Jingjing, Zhao Xinyi. Study on spatial distribution and intensity of urban heat island in Pearl River Delta. *Areal Research and Development*, 2010, 29(4): 72-77. [窦浩洋, 张晶晶, 赵昕奕. 珠江三角洲城市热岛空间分布及热岛强度研究. *地域研究与开发*, 2010, 29(4): 72-77.]
- [33] Wang H, Xie Q. Palaeorunoff estimations achieved from palaeoclimatic information for the southwest part of the North China Plain: An attempt to apply a climatological approach to palaeohydrology. *Journal of Environmental Sciences*, 2000, 12(3): 330-336.
- [34] Wang H, Liu H, Cui H, et al. Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2001, 170(1/2): 115-132.
- [35] Wang H, Liu H, Zhu J, et al. Holocene environmental changes as recorded by mineral magnetism of sediments from Anguli-Nuur Lake, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 285(2): 30-49.
- [36] Wang H, Holmes J A, Street-Perrott F A, et al. Holocene environmental change in the West African Sahel: Sedimentological and mineral-magnetic analyses of lake sediments from Jikariya Lake, northeastern Nigeria. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 23(5): 449-460.
- [37] Wang H, Liu H, Liu Y, et al. Mineral magnetism and other characteristics of sediments from an alpine lake (3,410 m a.s.l.) in central China and implications for late Holocene climate and environment. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(2): 345-367.
- [38] Wang H, Song Y, Cheng Y, et al. Mineral magnetism and other characteristics of sediments from a sub-alpine lake (3,080 m a.s.l.) in central east China and their implications on environmental changes for the last 5770 years. *Earth & Planetary Science Letters*, 2016, 452: 44-59.
- [39] Gao S, Xu P, Zhou F, et al. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland. *Environmental Pollution*, 2016, 211(211): 241.
- [40] Zhou F, Shang Z, Zeng Z, et al. New model for capturing the variations of fertilizer-induced emission factors of N_2O . *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(6): 885-897.
- [41] Zhou F, Ciais P, Hayashi K, et al. Re-estimating NH_3 emissions from Chinese cropland by a new nonlinear model. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2): 564-572.
- [42] Yang H, Zhou F, Piao S, et al. Regional patterns of future runoff changes from Earth system models constrained by observation. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5540-5549.
- [43] Zhou F, Shang Z, Ciais P, et al. A new high-resolution N_2O emission inventory for China in 2008. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8538.
- [44] Zhou F, Chen G, Noelle S, et al. A well-balanced stable generalized Riemann problem scheme for shallow water equations using adaptive moving unstructured triangular meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 73(3): 266-283.
- [45] Zhou F, Chen G, Huang Y, et al. An adaptive moving finite volume scheme for modeling flood inundation over dry and

- complex topography. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 1914-1928.
- [46] Zhou F, Guo H, Liu Y, et al. Chemometrics data analysis of marine water quality and source identification in Southern Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(6): 745-756.
- [47] Zhou F, Huang G H, Guo H, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong. *Water Research*, 2007, 41(15): 3429-3439.
- [48] Zhan X, Bo Y, Zhou F, et al. Evidence for the importance of atmospheric nitrogen deposition to eutrophic Lake Dianchi, China. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6699-6708.
- [49] Zhang Jianchao, Xu Yiqin, Lu Yahai. Microbial mechanisms of methane production and oxidation in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6592-6603. [张坚超, 徐懿钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理. *生态学报*, 2015, 35(20): 6592-6603.]
- [50] Lin B, Lu Y. Bacterial and archaeal guilds associated with electrogenesis and methanogenesis in paddy field soil. *Geoderma*, 2015, 259/260: 362-369.
- [51] Sun Bo, Lu Yahai, Zhang Xudong, et al. Research progress on impact mechanisms of cultivated land fertility on nutrient use of chemical fertilizers and their regulation. *Soils*, 49(2): 209-216. [孙波, 陆雅海, 张旭东, 等. 耕地地力对化肥养分利用的影响机制及其调控研究进展. *土壤*, 2017, 49(2): 209-216.]
- [52] Xu Xuegong, Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Recent progress and prospect of integrated physical geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(9): 1027-1038. [许学工, 李双成, 蔡运龙. 中国综合自然地理学的近今进展与前瞻. *地理学报*, 2009, 64(9): 1027-1038.]
- [53] Zhang Jingjing, Chen Shuang, Zhao Xinyi. Spatial divergency of temperature change during 1951-2000 in China and its correlation with global climate change. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 26(4): 1-6. [张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 近50年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系. *干旱区资源与环境*, 2006, 26(4): 1-6.]
- [54] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 49-52.
- [55] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [56] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [57] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [58] Peng S, Piao S, Zeng Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [59] Li Y, Zhao M, Motesharrei S, et al. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, 6: 6603.
- [60] Peng S, Ciais P, Krinner G, et al. Simulated high-latitude soil thermal dynamics during the past four decades. *Cryosphere*, 2016, 10: 179-192.
- [61] Peng S, Ciais P, Maignan F, et al. Sensitivity of land use change emission estimates to historical land use and land cover mapping. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31: 626-643.
- [62] Zhu D, Peng S, Ciais P, et al. Improving the dynamics of Northern Hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8: 2263-2283.
- [63] Zhu D, Peng S, Ciais P, et al. Simulating soil organic carbon in yedoma deposits during the Last Glacial Maximum in a land surface model. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 5133-5142.
- [64] Peng Jian, Cai Yunlong. Study of karst land use/cover change under the framework of LUCC: Present and prospect. *China Land Science*, 2006, 20(5): 48-53. [彭建, 蔡运龙. LUCC框架下喀斯特地区土地利用/覆被变化研究现状与展望. *中国土地科学*, 2006, 20(5): 48-53.]
- [65] Peng Jian, Cai Yunlong, He Gang, et al. Land use/cover change in ecologically fragile karst areas: A case study in Maotiaohe river basin, Guizhou China. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 566-576. [彭建, 蔡运龙, 何钢, 等. 喀斯特生态脆弱区猫跳河流域土地利用/覆被变化研究. *山地学报*, 2007, 25(5): 566-576.]
- [66] Wu Xiuqin, Cai Yunlong, Meng Jijun. Impacts of land use on soil erosion in karst mountainous area: A case study in Shibaniao catchment in Guanling county, Guizhou province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(4): 46-48. [吴秀芹, 蔡运龙, 蒙古军. 喀斯特山区土壤侵蚀与土地利用关系研究: 以贵州省关岭县石板桥流域为例. *水土保持研究*, 2005, 12(4): 46-48.]
- [67] Cai Yunlong. Spatial scales integration of land system change: A case study design on Guizhou karst plateau. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(12): 1301-1308. [蔡运龙. 贵州喀斯特高原土地系统变化空间尺度综合的一个研究方案.]

- 地球科学进展, 2009, 24(12): 1301-1308.]
- [68] Cai Yunlong. The Research on Land Change in the Guizhou karst mountainous plateau. Beijing: Science Press. [蔡运龙, 等. 贵州喀斯特高原山区土地变化研究. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [69] Wang Hongya, Huo Yuying, Zeng Lingyun, et al. A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate- rock catchment, Guizhou Plateau, Southwest China. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40: 897-921.
- [70] Wang H Y, Xu L, Sun X B, et al. Comparing mineral magnetic properties of sediments in two reservoirs in "strongly" and "mildly" eroded regions on the Guizhou Plateau, Southwest China: A tool for inferring differences in sediment sources and soil erosion. *Geomorphology*, 2011, 130(3/4): 255-271.
- [71] Meng J, Wu X, Li Z. Landuse/landcover changes in Zhangye oasis of Hexi Corridor. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(1): 71-75.
- [72] Meng Jijun, Li Zhengguo. Analysis on driving factors of LUCC in Zhangye oasis of Hexi Corridor. *Sientia Geographia Sinica*, 2003, 23(4): 464-470. [蒙古军, 李正国. 河西走廊张掖绿洲 LUCC 的驱动力分析. 地理科学, 2003, 23(4): 464-470.]
- [73] Meng Jijun, Li Zhengguo. Socio-economic driving forces of landscape change in Hexi Corridor. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 56-62. [蒙古军, 李正国. 河西走廊景观类型变化的社会经济驱动力研究. 中国沙漠, 2004, 24(1): 56-62.]
- [74] Meng Jijun, Zhu Likai, Mao Xiyan. A multi-level analysis of the driving forces of land use changes in Mu-U's Desert in recent 30 years: Case study of Uxin Banner, Inner Mongolia. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20 (suppl.): 54-66. [蒙古军, 朱利凯, 毛熙彦. 近30年来毛乌素沙地土地利用变化驱动力的多尺度研究: 以内蒙古乌审旗为例. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(suppl.): 54-66.]
- [75] Zhao Mingyue, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Landscape pattern changes at village scale using high resolution satellite images: A case study in low-slope hilly area of Dali City, northwestern Yunnan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3803-3810. [赵明月, 彭建, 刘焱序, 等. 基于高分遥感影像的滇西北村域景观格局演变: 以大理市低丘缓坡山地开发区为例. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3803-3810.]
- [76] Wang J, Peng J, Zhao M, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in north-western Yunnan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 57-64.
- [77] Wang Y, Yang X. Assessing the effect of land use/cover change on flood in Beijing, China. *Frontier of Environmental Science and Technology*, 2013, 7(5): 769-776.
- [78] Yang X, Chen H, Wang Y, et al. Evaluation of the effect of land use/cover change on flood characteristics using an integrated approach coupling land and flood analysis. *Hydrology Research*, 1998: 1161-1171.
- [79] Yang X, Xu J, Noel C, et al. A comparison between of the water management in France and China. *Frontier of Environmental Science and Technology*, 2013, 7(5): 721-734.
- [80] Zeng X, Yang X, Yu L, et al. A mix inexact-quadratic fuzzy water resources management model of floodplain (IQT-WMMF) for regional sustainable development of Dahuangbaowa, China. *Water*, 2015, 7(6): 2771-2795.
- [81] Zeng X, Huang G, Yang X, et al. A developed fuzzy-stochastic optimization for coordinating human activity and eco-environmental protection in a regional wetland ecosystem under uncertainties. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 207-230.
- [82] Xu X, Guo H, Chen X, et al. A multi-scale study on land use and land cover quality change: The case of the Yellow River Delta in China. *Geojournal*, 2002, 56(3): 177-183.
- [83] Zhu G, Xu X, Ma Z, et al. Spatial dynamics and zoning of coastal land-use change along Bohai Bay, China, during 1979-2008. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(5): 1186-1196.
- [84] Zhu G, Xu X, Wang H, et al. The ecological cost of land reclamation and its enlightenment to coast sustainable development in the northwestern Bohai Bay, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(4): 97-104.
- [85] Zhu Gaoru, Xu Xuegong. On thoughts and methods of orderly reclamation of sea. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12): 1974-1980. [朱高儒, 许学工. 关于有序填海的思路与方法. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1974-1980.]
- [86] Mao X, Meng J, Wang Q. Modeling the effects of tourism and land regulation on land-use change in tourist regions: A case study of the Lijiang River Basin in Guilin, China. *Land Use Policy*, 2014, 41(4): 368-377.
- [87] Wang Qi, Meng Jijun, Mao Xiyan. Scenario simulation and landscape pattern assessment of land use change based on neighborhood analysis and auto-logistic model: A case study of Lijiang river basin. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1073-1084. [王祺, 蒙古军, 毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化. 地理研究, 2014, 33(6): 1073-1084.]

- [88] Wang Y, Li S. Simulating multiple class urban land-use/cover changes by RBFN-based CA model. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(2): 111-121.
- [89] Peng J, Wang Y, Zhang Y, et al. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 217-223.
- [90] Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971. [刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971.]
- [91] Zhang Tian, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Multi-temporal detection of landscape evolution in western Shenzhen city during 1987-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2170-2184. [张甜, 王仰麟, 刘焱序, 等. 1987-2015年深圳市主城区景观演变过程多时相识别. *地理学报*, 2016, 71(12): 2170-2184.]
- [92] Liu Y, Wang Y, Peng J, et al. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 2067-2088.
- [93] Liu Y, Wang Y, Du Y, et al. The application of polynomial analyses to detect global vegetation dynamics during 1982-2012. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(7): 1568-1584.
- [94] Liu Y, Li S, Wang Y, et al. Identification of multiple climatic extremes in metropolis: A comparison of Guangzhou and Shenzhen, China. *Natural Hazards*, 2015, 79(2): 939-953.
- [95] Liu Y, Peng J, Wang Y. Diversification of land surface temperature change under urban landscape renewal: A case study in the main city of Shenzhen, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 919.
- [96] Zhao S, Zhou D, Zhu C, et al. Rates and patterns of urban expansion in China's 32 major cities over the past three decades. *Landscape Ecology*, 2015, 30(8): 1541-1559.
- [97] Zhao S, Zhou D, Zhu C, et al. Spatial and temporal dimensions of urban expansion in China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9600-9609.
- [98] Zhou D, Zhao S, Liu S, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152(152): 51-61.
- [99] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11160.
- [100] Zhao S, Zhou D, Liu S. Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 118-124.
- [101] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 272-281.
- [102] Zhao S, Liu S, Zhou D. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(22): 6313-6318.
- [103] Peng Jian, Wang An, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 333-346. [彭建, 汪安, 刘焱序, 等. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(2): 333-346.]
- [104] Peng J, Li Y, Tian L, et al. Vegetation dynamics and associated driving forces in eastern China during 1999-2008. *Remote Sensing*, 2015, 7: 13641-13663.
- [105] Peng J, Shen H, Wu W, et al. Net primary productivity (NPP) dynamics and associated urbanization driving forces in metropolitan areas: A case study in Beijing City, China. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1077-1092.
- [106] Peng J, Xie P, Liu Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [107] Peng J, Chen S, Lv H, et al. Spatiotemporal patterns of remotely sensed $PM_{2.5}$ concentration in China from 1999 to 2011. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 109-121.
- [108] Xu X, Duan X, Sun H, et al. Green space changes and planning in the capital region of China. *Environmental Management*, 2011, 47(3): 456-467.
- [109] Sun Haiqing, Xu Xuegong. Study on green space pattern changes in Beijing. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 48-58. [孙海清, 许学工. 北京绿色空间格局演变研究. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 48-58.]
- [110] Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390. [李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.]
- [111] Fu B, Pan N. Integrated studies of physical geography in China: Review and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 771-790.
- [112] Li Shuangcheng, Wang Jue, Zhu Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1628-1639. [李双成, 王珏, 朱文博, 等. 基于空间与区域

- 视角的生态系统服务地理学框架. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.]
- [113] Wang Ya, Meng Jijun, Qi Yang, et al. Review of ecosystem management based on the InVEST model. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3526-3532. [王雅, 蒙古军, 齐杨, 等. 基于InVEST模型的生态系统管理综述. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3526-3532.]
- [114] Wang Ya, Meng Jijun. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe River Basin. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 200-207. [王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207.]
- [115] Peng J, Tian L, Liu Y, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 706-714.
- [116] Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 960-973. [彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.]
- [117] Li D, Wu S, Liu L, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.
- [118] Peng Jian, Lv Huiling, Liu Yanxu, et al. International research progress and perspectives on multifunctional landscape. Advances in Earth Science, 2015, 30(4): 465-476. [彭建, 吕慧玲, 刘焱序, 等. 国内外多功能景观研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(4): 465-476.]
- [119] Peng J, Liu Z, Liu Y, et al. Multifunctionality assessment of urban agriculture in Beijing City, China. Science of the Total Environment, 2015, 537: 343-351.
- [120] Peng J, Liu Y, Liu Z, et al. Mapping spatial non-stationarity of human-natural factors associated with agricultural landscape multifunctionality in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 246: 221-233.
- [121] Fu Zaiyi, Xu Xuegong. Regional ecological risk assessment. Advances in Earth Science, 2001, 16(2): 267-271. [付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271.]
- [122] Zhou Ping, Meng Jijun. Progress of ecological risk management research: A review. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2097-2106. [周平, 蒙古军. 区域生态风险管理研究进展. 生态学报, 2009, 29(4): 2097-2106.]
- [123] Meng J, Xiang Y, Yan Q, et al. Assessment and management of ecological risk in an agricultural-pastoral ecotone: Case study of Ordos, Inner Mongolia, China. Natural Hazards, 2015, 79(1): 1-19.
- [124] Xu Xuegong, Lin Huiping, Fu Zaiyi, et al. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1): 111-120. [许学工, 林辉平, 付在毅, 等. 黄河三角洲湿地生态风险评价. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 111-120.]
- [125] Du Yueyue, Peng Jian, Zhao Shiquan, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters in mountainous areas of Southwest China: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1544-1561. [杜悦悦, 彭建, 赵士权, 等. 西南山地滑坡灾害生态风险评价: 以大理白族自治州为例. 地理学报, 2016, 71(9): 1544-1561.]
- [126] Fan J, Wang Y, Zhou Z, et al. Dynamic ecological risk assessment and management of land use in the middle reaches of the Heihe River based on landscape patterns and spatial statistics. Sustainability, 2016, 8(6): 536.
- [127] Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1052-1067. [刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.]
- [128] Sun Xiaoming, Zhao Xinyi. Assessment of ecological risk to climate change of the farming-pastoral zigzag zone in Northern China. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(4): 713-720. [孙小明, 赵昕奕. 气候变化背景下我国北方农牧交错带生态风险评价. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 713-720.]
- [129] Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677. [彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.]
- [130] Peng J, Liu Y, Wu J, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen city, China. Landscape & Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [131] Peng J, Liu Y, Li T, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang city, China. Ecological Indicators, 2017, 72: 399-410.
- [132] Jiang H, Yang X. Entropy weight-based water security assessment in Asia-Pacific. Progress in Geography, 2015, 34(3): 373-380. [江红, 杨小柳. 基于熵权的亚太地区水安全评价. 地理科学进展, 2015, 34(3): 373-380.]
- [133] Meng Jijun, Zhu Likai, Yang Qian, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos,

- Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6755-6766. [蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, 2012, 32(21): 6755-6766.]
- [134] Meng Jijun, Yan Qun, Xiang Yunyun. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordos, Inner Mongolia, China. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 590-596. [蒙古军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 590-596.]
- [135] Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419. [彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [136] Zhang L, Peng J, Liu Y, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 1-14.
- [137] Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484. [陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [138] Peng Jian, Guo Xiaonan, Hu Yina, et al. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: A case study in Yuxi city, Yunnan province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 627-635. [彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建: 以云南省玉溪市为例. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 627-635.]
- [139] Zheng Du. Progress and prospects of geographical research. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2001, 16(1): 10-14. [郑度. 地理学研究进展与前瞻. *中国科学院院刊*, 2001, 16(1): 10-14.]
- [140] Cai Yunlong. *Geographical diversity and sustainability in China*. Beijing: Science Press, 2007. [蔡运龙. *中国地理多样性与可持续发展*. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [141] Xu X, Hou L, Lin H, et al. Zoning of sustainable agricultural development in China. *Agricultural Systems*, 2006, 87(1): 38-62.
- [142] Huang Jiao, Gao Yang, Zhao Zhiqiang, et al. Comprehensive physiographic regionalization of China using GIS and SOFM neural network. *Geographical Research*, 2011, 30(9): 1648-1659. [黄姣, 高阳, 赵志强, 等. 基于GIS与SOFM网络的中国综合自然区划. *地理研究*, 2011, 30(9): 1648-1659.]
- [143] Zhang Tian, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Eco-geographical regionalization in Loess Plateau based on the dynamic consistency of vegetation. *Geographical Research*, 2015, 34(9): 1643-1661. [张甜, 彭建, 刘焱序, 等. 基于植被动态的黄土高原生态地理分区. *地理研究*, 2015, 34(9): 1643-1661.]
- [144] Meng Jijun, Zhou Ping, Amrulla, et al. A study on major function-oriented zoning and sustainable land use patterns of Ordos. *Resources Science*, 2011, 33(9): 1674-1683. [蒙古军, 周平, 艾木入拉, 等. 鄂尔多斯主体功能区划分及其土地可持续利用模式分析. *资源科学*, 2011, 33(9): 1674-1683.]
- [145] Xiang Y, Meng J. Research into ecological suitability zoning and expansion patterns in agricultural oases based on the landscape process: A case study in the middle reaches of the Heihe River. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20): 1355.
- [146] Peng Jian, Hu Yina, Lv Huiling et al. Ecological function zoning based on element-structure-function: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2251-2259. [彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 等. 基于要素—结构—功能的生态功能分区: 以大理白族自治州为例. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2251-2259.]
- [147] Ma Cheng, Li Shuangcheng, Liu Jinlong, et al. Regionalization of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei Area based on SOFM neural network. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1383-1393. [马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1383-1393.]
- [148] Li Shuangcheng, Zhao Zhiqiang, Gao Jiangbo. Identifying eco-geographical boundary using spatial wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4313-4322. [李双成, 赵志强, 高江波. 基于空间小波变换的生态地理界线识别与定位. *生态学报*, 2008, 28(9): 4313-4322.]
- [149] Peng Jian, Wang Jun. Land use zoning in China based on Kohonen network. *Resources Science*, 2006, 28(1): 43-50. [彭建, 王军. 基于Kohonen神经网络的中国土地资源综合分区. *资源科学*, 2006, 28(1): 43-50.]
- [150] Peng Jian, Wu Wenhuan, Liu Yanxu, et al. Soil conservation service zoning in the Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3849-3861. [彭建, 武文欢, 刘焱序, 等. 基于PSR框架的内蒙古自治区土壤保持服务分区. *生态学报*, 2017, 37(11): 3849-3861.]
- [151] Li Huilei, Peng Jian, Hu Yina, et al. Ecological function zoning in Inner Mongolia Autonomous Region based on ecosystem service bundles. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2657-2666. [李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 等. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.]
- [152] Chen Chuankang. Integrated geography and geographical construction. *Geographical Research*, 1991, 10(4): 85-86. [陈

- 传康. 综合地理学与地理建设. 地理研究, 1991, 10(4): 85-86.]
- [153] Huntzinger D N, Schwalm C, Michalak A M, et al. The North American Carbon Program Multi-Scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project (Part 1): Overview and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 2013, 6: 2121-2133.
- [154] Le Quéré C, Moriarty R, Andrew R, et al. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 2015, 7: 47-85.
- [155] McGuire A D, Koven C, Lawrence D M, et al. Variability in the sensitivity among model simulations of permafrost and carbon dynamics in the permafrost region between 1960 and 2009. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016.
- [156] Saunio M, Bousquet P, Poulter B, et al. Variability and quasi-decadal changes in the methane budget over the period 2000-2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 11135-11161.
- [157] Peng S, Piao S, Bousquet P, et al. Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 14545-14562.
- [158] Cai Yunlong, Fu Zeqiang, Dai Erfu. The minimum area per capita of cultivated land and its implication for the optimization of land resource allocation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 127-134. [蔡运龙, 傅泽强, 戴尔阜. 区域最小人均耕地面积与耕地资源调控. *地理学报*, 2002, 57(2): 127-134.]
- [159] Cai Yunlong, Huo Yaqin. Reevaluating cultivated land in China: Method and case studies. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1084-1092. [蔡运龙, 霍雅勤. 中国耕地价值重建方法与案例研究. *地理学报*, 2006, 61(10): 1084-1092.]
- [160] Yang X, Pang J. Implementing China's 'Water Agenda 21'. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 362-368.

Recent research progress at Peking University and contributions to integrated physical geography

LI Shuangcheng, MENG Jijun, PENG Jian

(Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The development of integrated physical geography at Peking University can be traced back to 1952, when the national department adjustment was taken and the Department of Physical Geography was set up at Peking University. Over the course of more than half a century, a discipline system of integrated physical geography has been gradually formed facing the disciplinary frontier and national needs. In view of the increasingly severe problems related with climate change, natural resources, eco-environment and socio-economic development, integrated physical geography of Peking University has made great progress in land surface process and mechanism, land use/cover change and its eco-environmental effects, ecosystem services and human well-beings, ecological risk assessment and security pattern construction, and physical geographical division, taking a leading role in the development of China's integrated physical geography. Looking forward to the future, the integrated physical geography of Peking University will continue to focus on the mechanism of pattern and process of water, soil, climate and biology, the effects of human activities and global environmental changes on natural geographical process and pattern, quantitative assessment of factors and processes coupled with the regional resources and eco-environmental effects and associated socio-economic impact, constructing a fusion system through coupling observation data and land surface model, so as to make contributions to national strategy such as construction of ecological civilization, main function-oriented zoning, territorial development, and integrated watershed management.

Keywords: Peking University; integrated physical geography; innovation; review; prospect