

中国自然地域分区研究前沿与挑战

彭建, 毛祺, 杜悦悦, 苏冲, 张甜, 胡熠娜, 王仰麟

(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:分区是地理学认知世界的基本途径。作为综合自然地理学的重要研究内容,自然地域分区通过对区域的划分,有助于进一步认识自然地域系统要素特征及其相互作用过程的地域分异规律,可为制定差异化的空间管治政策提供科学依据。自然地域分区的主题与方法随着社会经济发展在不断变革与创新,本文系统梳理了中国学者在自然地域动态分区、分区界线自动划定与多分区方案定量优选等前沿领域的近期进展,总结了自然地域分区理念、方法的创新与拓展。在此基础上,探讨了新时代自然地域分区在理念、技术与任务方面面临的挑战,建议开展面向人类—自然耦合系统、综合定性定量途径、从全球到地方多尺度的自然地域分区研究,以期进一步完善自然地域分区理论与方法。

关键词:自然地域分区;动态分区;方案优选;界线划分;研究进展

1 引言

分区是地理学认知世界的基本途径。通过对区域的划分,直观地表达地理环境中各组分的属性与相互联系,进而理解发掘其发生、发展、分布、结构等地理规律(黄秉维, 1960; 陈传康, 1988)。自然地域分区将光、热、水、土、气、生等要素相互作用形成的地域综合体划分为若干区内特征相似、区间差异显著的空间共轭区域(Baily, 1983; 黄秉维等, 1996; Wu et al, 2016),是一项兼有理论性与实践性的工作(黄秉维, 1958):在认识分区对象、揭示区域特征与地域分异规律的同时,以服务生产为目的,为区域发展规划、利用自然资源与保护生态环境提供必要的科学依据。

自然地域分区工作往往具有鲜明的时代色彩,其内涵随着社会经济的发展在不断地发展。以实践应用为指向不断变革分区主题与技术手段是贯穿中国自然地域分区工作发展过程的主线。建国以来,自然地域分区的开展为国家经济建设作出了

巨大的贡献。以合理安排农业生产布局为目的,全国先后形成林超(林超, 1954)、罗开富(罗开富, 1954)、黄秉维(黄秉维, 1958)、任美镔(任美镔等, 1961)、侯学煜(侯学煜等, 1963)等若干自然分区方案。这些方案增进了人们对自然地域分异规律的认识,指导全国农林牧副渔各产业的发展,推动了农业自然资源的合理利用(郑度等, 2005)。此外,配合全国性自然调查,为分析评价区域自然资源与发展条件服务的省级、地级自然分区方案和服务公路建设等特定目的的自然分区方案也有了较大的发展(陈传康等, 1994)。20世纪80年代之后,基于生态建设和环境保护的迫切需求,生态地理分区研究成为新的热点,先后开展了自然生态区划(侯学煜, 1988)、生态地域区划(杨勤业, 1999)、生态区划(傅伯杰等, 1999)等研究。这些研究重点关注区域生态环境问题,通过分析生态保护与环境建设的地域特征及差异,为土地管理政策的制定、自然保护区的规划和生态修复工程的实施等提供了必要的科学依据(刘焯序等, 2017)。

收稿日期:2018-01-01;修订日期:2018-01-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

作者简介:彭建(1976-),男,四川彭州人,博士,副教授,研究方向为景观生态与土地利用, E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn。

引用格式:彭建, 毛祺, 杜悦悦, 等. 2018. 中国自然地域分区研究前沿与挑战[J]. 地理科学进展, 37(1): 121-129. [Peng J, Mao Q, Du Y Y, et al. 2018. Research frontier and challenges of terrestrial system regionalization in China[J]. Progress in Geography, 37(1): 121-129.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.013

总体看来,社会需求的演变催生了新的分区主题,也是分区方法与技术手段创新的内在动力。自然地域分区不仅可综合地表征自然地域系统的复杂状况,也可揭示系统要素间相互耦合、反馈等机制的区域差异性。无论任何时期,分区都是开展自然地域系统研究的基础工作。基于此,本文重点总结了自然地域分区近年来的前沿领域及其研究进展,在此基础上对新时代自然地域分区面临的挑战略陈管见,以期推动自然地域分区理论与方法的进一步完善。

2 中国自然地域分区研究前沿领域

进入21世纪以来,中国的自然地域分区工作进入了新的发展时期,这一时期工作的主要特点可归纳为以下3方面(图1):①多学科交叉。面临日益严峻的生态环境问题,需要从可持续发展的视角重新认识中国地域分异规律,因此自然地域分区逐渐成为了生态学、环境科学、灾害学和传统自然地理学等多学科交叉融合的重要研究主题(高江波等, 2010)。同时,针对不同的区域主导功能,还开展了水功能区划(李艳梅等, 2009)、海洋功能区划(栾维新等, 2002)和自然保护功能区划(呼延佼奇等, 2014)等特色主题分区研究;②多数据源支持。在

自然地域分区主题不断发展的同时,遥感与地理信息系统等技术手段的不断进步促使分区数据源由传统的地面调查数据向“地面调查+遥感观测+台站监测+模拟数据”四位一体多数据转变(高江波等, 2010),为学科交叉的新主题分区提供了关键的数据支持;③多方法应用。结合多样的分区要素与丰富的数据支持,传统的专家集成、阈值控制等定性、半定量分区方法逐渐被综合识别数据结构特征的定量分区方法所取代,主成分分析、聚类分析、神经网络等方法得到了广泛应用(陈述彭, 2001; 郑度等, 2008; 吴绍洪等, 2017)。

随着对自然地域系统研究的深入,自然地域分区的研究方向也发生了深刻的变化。研究表明,气候变化以及人类活动对地域系统要素及其作用关系产生了显著的影响(Cao et al, 2013);基于时间序列平均数据反映自然地域系统长期状态的分区思路,在刻画系统动态变化特征方面的局限性越来越显著(吴绍洪等, 2017)。基于此,有必要考虑自然地域系统动态特征与不同的全球变化情景开展自然地域分区,但这无疑大大增加了自然地域分区的工作量。因此,需要完善定量分区方法,实现标准化的自动分区系统,从而高效率地完成自然地域分区工作。由于群落交错区、生态过渡带等的客观存在,自然地域系统各要素间的非线性作用使分区边界不能简单叠加,而随着分区要素的进一步增加,要素结构更加复杂,分区界线往往难以直接划定(郑度等, 2016)。另外,应用定量分区方法尽管能较好地解决传统专家集成方法主观性强的问题,但仅从数据结构与特征出发进行分区,其地理学意义并不清晰,而且基于不同参数设置得到不同的分区结果之间往往难以直接评判。针对上述三方面问题,近年来中国学者进行了大量的理论方法探索与个案研究尝试,极大地拓展了自然地域分区理念与方法。

2.1 自然地域动态分区

郑度等(2016)、吴绍洪等(2017)在总结全球变化背景下的自然地域研究特征时指出,自然地域系统动态研究的核心在于明晰关键要素变化与互馈对陆地表层格局形成的作用,重点回答对应于不同的全球变化过程或情景,关键要素怎么演化? 要素间相互作用的关系如何改变以及这些变化对陆地表层格局产生何种影响等问题,并对比分析不同次

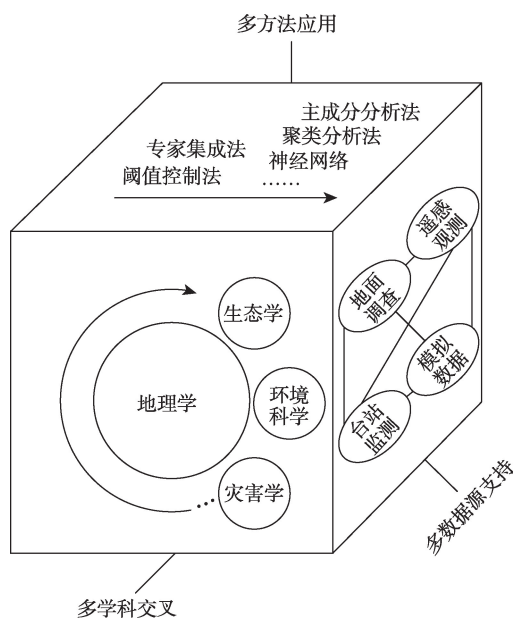


图1 21世纪自然地域分区研究特点

Fig.1 Characteristics of the study on terrestrial system regionalization in the 21st century

区域之间的差异。从这个角度出发,关注自然地域系统的变化及其可能对资源环境格局和社会经济布局产生的影响,进行自然地域动态分区,对于适应与减缓全球变化的影响具有重大意义。

这里的动态分区包括两方面的含义,其研究各有侧重。一方面,是侧重解析自然地域系统动态变化的特征与格局。与采用多年平均值反映自然地域系统状态的传统自然地域分区不同,自然地域动态分区引入诸多表征动态过程的指标,刻画自然地域系统的变化趋势、幅度与规律。这一理念在气候变化分区研究中应用广泛,如 Shi 等(2014)利用 1961-2010 年气温和降水量的变化趋势值、波动特征值定量识别气候变化,结合中国地形特点,基于县级行政单元完成了中国气候变化区划(1961-2010 年),揭示气候变化及其影响的地域分异。在土地利用/土地覆盖变化的研究中,刘纪远等(2014)提出并发展了土地利用动态区划的方法,参照土地利用动态度和各土地利用类型相互转化信息开展了 20 世纪末与 21 世纪初 2 个 10 年间的全国土地利用动态区划,揭示了前后十年间中国土地利用变化的基本特征及其主要驱动力。

另一方面,则是考虑基于未来不同情景形成相应的动态分区方案。相较完成后就不会变化的静态分区方案,根据不同模拟情景,设置相应的约束条件或分区准则、要素,依照统一的方法生成自然地域动态分区方案,可直观地展示不同情景下的区域特征与状态,有助于区域动态监测与精细化管理的实现。例如,徐翀崎等(2017)分别以保持现状、建设低碳生态城市为发展目标,调节社会经济发展度、生态系统保护度和资源环境承载力等分区指标的分类阈值,构建动态适应性生态经济区划模型,在广州市增城区划分出生态管控区域、生态优先区域、优化开发区域和重点开发区域,探讨了不同情景下各分区的主要发展目标及政策建议;吴未等(2016)以苏锡常为研究区域,分别以生态系统服务价值高的水域、林地及建设用地现状为扩张源,生态系统服务价值和生态风险值为阻力赋值依据,基于建设用地优先、均衡和低等级 3 种发展模式,以及底线、满意与理想 3 种生态用地数量构建九种发展情景进行模拟,测算互侵结果得到相应的土地生态安全分区,以此展示不同城市发展模式对土地生态安全的影响并提出相应土地用途管制措施。

在全球变化背景下,将传统的静态状态量与动态变化量结合,对深入理解自然地域系统演变的格局与过程有重大意义;而根据不同情景形成相应的动态分区方案,则更加直观地展示不同变化情景下区域特征与状态的空间分异,有助于提升相关规划、决策的科学性;二者均为全球变化背景下的区域可持续发展提供了重要的空间决策指引。

2.2 分区界线自动划定

分区边界的识别与划定是分区过程中的关键一步。分区边界既表征了区域的范围,同时也是各区域间联系的重要标志。然而,分区边界的划定问题一直以来未能得到很好的解决(郑度等, 2008; 范泽孟等, 2007; 吴绍洪等, 2017)。由于自然地域系统各要素间的非线性作用,无论是基于某一要素特征来划定边界,还是将多个要素进行简单叠加,都难以得到令人信服的结果,导致分区工作中往往需要反复讨论边界位置及其合理性。如何实现自然地域分区界限的自动、准确划定,成为提升分区工作效率的重要环节。

一些学者尝试通过保持行政区或流域等单元的完整性来划定区域边界。尽管这样的简化可能会影响到分区的精确性,但考虑到政策落实的便捷性,基于行政单元划定分区边界仍有其必要性。例如,殷洁等(2013)基于承灾体脆弱性和台风发生可能性定量评估不同强度等级台风灾害风险,充分考虑了不同的行政单元间资金、政策的差异,使台风灾害风险分区尽量不打破行政界线,从而切实保障了分区结果的可用性及防灾减灾措施实施的便捷性。李慧蕾等(2017)结合区域的自然要素和社会经济活动连续性,通过关键生态系统服务的定量评估开展内蒙古生态功能分区,明晰不同区域的生态系统服务结构和主导服务类型,以旗县(区)为基本空间单元的分区结果极大地促进了生态保护措施的区域实践。可以看到,在合理选取行政或流域单元尺度的前提下,保证基本空间单元的社会/生态完整性不失为一种行之有效的分区划界方法。

但是,在识别重要自然边界时,构建合理的定量模型,以各次区域内的相似性与区间的差异性最大原则来划定边界,其意义更为突出。例如, Gao 等(2010)基于地统计方法,将半方差分析与分形维数应用到基于 NDVI 的青藏高原生态地理分区边界划定与验证,通过 NDVI 的统计指标验证了其结果的

准确性,表明地统计方法可为分区边界定量划定提供科学客观的依据。董玉祥等(2017)依托地理探测器模型,基于气候指标识别不同边界下区域特征的空间异质性进行了中国热带北界的划定,其结果与土壤性质、植被种类及农作物熟制等分界线基本吻合。

可以预见,分区边界划定新方法的探索能为自动分区提供重要的技术支持,将成为自然地域分区研究的关键突破点。必须说明的是,大部分的分界线并不依托实体存在,而是在实践需求指引下人为划定的。因此,在实际工作中,不应机械地拘泥于单一划界原则或方法,需要结合分区目的灵活选择划定区域界线的技术手段。

2.3 多分区方案定量优选

在“3S”技术快速发展与海量数据积累的推动下,利用聚类分析(谢明霞等, 2016)、人工神经网络(彭建, 武文欢, 等, 2017)等定量方法,从数据结构与内在特征联系出发进行分区,显著地提高了自然地域分区结果的客观性。但是,基于定量手段得到的分区结果的地理意义有时难以诠释,人工神经网络等数据变换过程的内在机理尚不清楚,单纯使用数学检验并不足以说明分区方案的可靠性(黄娇等, 2011; 马程等, 2013)。因此,为减少分区结果的不确定性,对比不同参数设置下的分区方案并基于特定需求或偏好开展优选是十分必要的(彭建等, 2016; 李双成等, 2017)。分区方案的定量评价与优选方法,是解读数学手段背后的地理意义、提升分区结果准确性和可用性的关键步骤,也是标准化自动分区技术的重要补充。

基于不同的学科视角,中国学者先后提出多种分区方案评价与优选方法,其中区域地理特征被普遍应用于分区结果的验证。例如,张甜等(2015)进行黄土高原生态地理分区时,基于植被多年动态一致性,提出两步优选方法:首先,对比不同分区方案下各分区净初级生产力变化动态,各分区净初级生产力年平均折线相交越少,分区间差异就越大、分区越准确;其次,对比各分区净初级生产力的变异系数,变异系数越小,分区内部相似性越高、分区越准确。Peng等(2015)基于相对一致性与区域共轭性原则在开展深圳市综合土地利用分区时,提出各分区内部同一类型斑块的聚集程度越高其分区方案就越准确,并据此以景观聚集度指数为标准优

选多重分区方案。

设计多重分区方案的定量优选方法,是实现自动分区系统的关键一环,能确保分区的客观性、科学性。应指出的是,在进行分区方案的优选时,不仅需关注各方案分区内部的一致性与分区之间的差异性,还要考虑具体的分区主题与实践需求。

3 新时代中国自然地域分区面临的挑战

自然地域分区是认识地表关键要素相互作用机理及区域分异特征、深入理解陆地表层格局变化规律的理论基础,是自然地域系统研究的重要组成部分。在近70年发展历程中,中国学者坚持以服务国家、促进社会发展进步为宗旨,不断发展分区理念与技术手段,取得了大量科学成果。现今,中国处于新的历史时期,深化生态文明、美丽中国建设与构建人类命运共同体将成为国家发展的重大目标;而随着“大数据”与“人工智能”时代的到来,计算机硬件存储与计算能力的发展也为自然地域分区研究的深化提供了新的思路 and 模式。因此,新时代的自然地域分区也将面临着新挑战,需要对分区的理念、技术与任务作进一步的创新与拓展(图2),推动中国的自然地域分区研究向更高水平发展。

3.1 面向人类—自然耦合系统的自然地域分区

随着全球变化研究的逐步深入,越来越多的研究表明,自然地域系统的形成与演化受到自然要素与人类活动的共同驱动作用,而人类活动在典型区域的主导作用越来越清晰,正在深刻地影响着自然地域系统的关键要素及其相互作用机制(Kahn, 2016)。人地关系地域系统(陆大道, 2002)、人类—自然耦合系统(Liu et al, 2007)、社会—生态系统(Ostrom, 2009)由此成为地理学新的综合研究对象,强

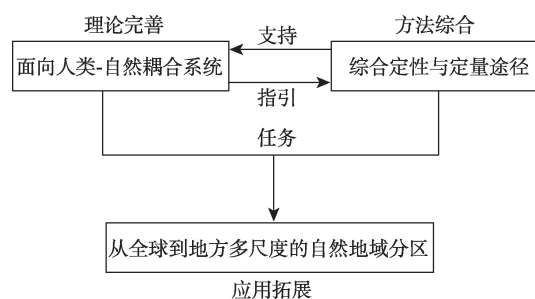


图2 新时代自然地域分区面临的挑战

Fig.2 Challenges of contemporary terrestrial system regionalization

调将人类活动整合为自然系统演化的内在要素考虑。因此,面临中国社会转型时代背景下生态保护、新型城镇化等众多方面的发展需求,如何开展面向人类—自然耦合系统的自然地域分区,既是新时代面临的重要挑战,也是可能诞生重大理论创新的重要研究课题,而这一研究的深入将更好地提升自然地域分区在区域可持续发展中的应用价值。

面向人类—自然耦合系统开展自然地域分区,就是要更全面地刻画区域自然生态系统与人类活动的分异规律。不同于过去将人类活动作为自然地域系统外在胁迫因素的分区思路,新时代的自然地域分区应重视多尺度下要素、格局、过程间的人类—自然耦合效应,需要将人类与自然要素纳入综合的指标框架。如何合理选取定量指标表征这些要素,协调自然、人类要素在综合指标框架中的重要性,处理难以量化的文化、制度等关键人类要素,是面向人类—自然耦合系统的自然地域分区需要重点探索的关键科学问题。

3.2 综合定性与定量途径的自然地域分区

方法和技术的进步是自然地域分区研究发展的重要基石。从传统的专家集成、阈值控制等定性、半定量分区方法到主成分分析、模糊聚类、人工神经网络等定量分区方法的发展,极大地提升了分区工作的客观性(蔡运龙, 2010)。基于人类—自然耦合系统研究的内在要求,自然地域分区的技术手段也将进一步走向综合。一方面,自然地域分区往往是自然地域系统研究的基础工作,在多时空尺度将反复进行,涉及海量空间数据的交换、融合、匹配及交叉学科的联合分析(吴志峰等, 2015),因此要求分区方法具有较高的可重复性;运用量化技术形成一套标准化的自动分区流程,将节约大量的人力物力,克服以往自然地域分区周期长、更新难等问题;另一方面,在人类—自然耦合系统框架下,面对难以量化的文化、制度等关键人类要素,集成野外观测、传统经验和模型数据由专家作出综合判断,识别要素的空间分异特征,是自动化定量分区技术的重要补充。

因此,通过结合基于定量方法的数据结构分析、关键步骤的专家综合判断、可视化制图构建人机交互协作的自然地域分区技术平台,将是新时代自然地域分区的重要技术创新,有助于从人类—自然耦合系统的视角重新认识自然地域系统。而随

着人工智能技术的不断发展,人机交互协作分区技术平台的应用也将积累大量开发人工智能分区系统所需的训练样本,为实现基于人工智能的自然地域分区奠定坚实基础。

3.3 从全球到地方多尺度的自然地域分区

在当前世界多极化、经济全球化、社会信息化、文化多样化的背景下,中国提出构建人类命运共同体的重大构想,坚持推进“一带一路”愿景,进一步深化对外开放,深度参与全球治理(陆大道, 2016)。此外,区域人类、自然要素在诸如贸易、物种入侵、疾病传播、生态系统服务流动等影响下存在远距离相互作用不断增加的现象,对区域社会经济和环境可持续发展产生了深远的影响(刘建国等, 2016; 彭建, 胡晓旭, 等, 2017)。由于经济活动和局地政策的溢出效应,全球各地的联系与远程耦合愈发紧密(Folke et al, 2016),温室气体排放等典型环境问题更需要从全球尺度寻求解决方案。因此,面向国家重大战略需求,基于针对中国不同类型地域系统开展分区的实践经验与技术积累,中国主导的全球或大陆尺度自然地域分区研究将不断涌现。

近年来,国外学者已开展了部分全球尺度的自然地域分区工作。例如,基于柯本—盖革分类更新的全球气候分区(Peel et al, 2007)、全球城市生态分区(Schneide et al, 2010)、全球陆地生态分区(The Nature Conservancy et al, 2006)等全球尺度的分区方案被广泛采用,为增进人们对全球自然地域系统的认识发挥了关键的作用。但这些分区工作往往较少考虑人类在自然系统中的作用,在指导不同国家和地区自然系统综合管理中仍有不足(刘焱序等, 2017)。从中国国家发展视角开展全球自然地域分区,不仅需要从理论上进一步完善已有的全球分区工作,也需要在实践中为中国的全球战略提供科学指引与决策支持,从而推动全球可持续发展目标的实现(Yang et al, 2016)。

与此同时,国内自然地域分区的应用方向与服务对象也在不断的变化和发展。随着新型城镇化建设的快速推进,城市群已经成为中国区域经济发展的重要支柱与空间载体(方创琳, 2014; 彭建等, 2015)。因此,开展基于城市群的自然地域分区,有助于识别更大时空尺度下的城市化过程中人类—自然耦合系统的特征与动态变化,为制定国家的城市群发展战略提供空间决策指引。此外,在国土精

细化治理过程中,开展小尺度的自然地域分区可直接为生态保护与修复工程及山水林田湖草综合治理提供参考,并将进一步提升分区工作对国土空间治理实践的指导意义。

4 结语

空间分异是地理学对科学哲学的核心贡献,分区则是地理学解构事物规律的重要手段。作为综合自然地理学的重要研究内容,自然地域分区极大地提升了中国地理学“经世致用”的社会贡献。随着国家发展重点从农业生产向生态环境保护、生态经济协同转型,自然地域分区的内涵也不断拓展,从强调自然资源禀赋、农业生产适宜性转向生态功能重要性、敏感性,以及国土开发格局优化。近年来,随着全球变化及机器学习算法研究的不断深入,自然地域分区研究逐步聚焦于自然地域动态分区、分区界线自动划定、多分区方案定量优选等三大前沿领域。其中,动态分区直接对应自然地域系统动态演变,有助于提升气候变化的区域适应能力,受到了较大关注;分区方案优选及界线划定的进展推进,则有赖于地域分异认知与空间数据分析方法的高度融合。

在国家生态文明、全球人类命运共同体这一新的时代背景下,“大数据”、“人工智能”技术为自然地域分区的迅速发展提供了新的发展机遇,但同时也面临着理念创新、技术发展与任务拓展的三重挑战。测度多尺度下要素、格局、过程间的人类-自然耦合效应,厘清人类-自然过程的内在联系,从而构建人类-自然耦合系统指标体系,将为自然地域分区理论的完善提供机理支持;借助人工智能等先进数据分析手段处理多源异构的海量地理空间数据,依托专家知识综合判断识别难以定量表征的人类要素时空格局,是综合定性定量途径开展自然地域分区的技术导向;面向全球和区域可持续发展目标,厘清从全球到地方多尺度自然地域分区的管理需求差异,权衡城市发展、生态恢复等国土空间开发保护战略导向,将为新时代全球与地方国土空间治理提供重要的决策依据。

参考文献(References)

蔡运龙. 2010. 当代自然地理学态势[J]. 地理研究, 29(1): 1-

12. [Cai Y L. 2010. New perspectives on physical geography[J]. Geographical Research, 29(1): 1-12.]
- 陈传康. 1988. 自然地理学、地球表层学和综合地理学[J]. 地理学报, 43(3): 258-264. [Chen C K. 1988. Physical geography, epigeosphere science and integrated geography[J]. Acta Geographica Sinica, 43(3): 258-264.]
- 陈传康, 郑度, 申元村, 等. 1994. 近10年来自然地理学的新进展[J]. 地理学报, 49(增刊): 684-690. [Chen C K, Zheng D, Shen Y C, et al. 1994. Progress of Chinese physical geography in recent ten years[J]. Acta Geographica Sinica, 49 (SI.): 684-690.]
- 陈述彭. 2001. 地理科学的信息化与现代化[J]. 地理科学, 21(3): 193-197. [Chen S P. 2001. Information and modernization of geography[J]. Scientia Geographica Sinica, 21(3): 193-197.]
- 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 2017. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. 地理学报, 72(1): 135-147. [Dong Y X, Xu Q, Yang R, et al. 2017. Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using geodetector[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 135-147.]
- 范泽孟, 岳天祥. 2007. 生态区边界智能识别模型构建分析[J]. 地球信息科学, 9(1): 40-45. [Fan Z M, Yue T X. 2007. Intelligent recognition model of the ecoregion boundary [J]. Geo-Information Science, 9(1): 40-45.]
- 方创琳. 2014. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 69(8): 1130-1144. [Fang C L. 2014. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. Acta Geographica Sinica, 69(8): 1130-1144.]
- 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 1999. 中国生态区划的目的、任务及特点[J]. 生态学报, 19(5): 591-595. [Fu B J, Chen L D, Liu G H. 1999. The objectives, tasks and characteristics of China ecological regionalization[J]. Acta Ecologica Sinica, 19(5): 591-595.]
- 高江波, 黄姣, 李双成, 等. 2010. 中国自然地理区划研究的新进展与发展趋势[J]. 地理科学进展, 29(11): 1400-1407. [Gao J B, Huang J, Li S C, et al. 2010. The new progresses and development trends in the research of physiogeographical regionalization in China[J]. Progress in Geography, 29(11): 1400-1407.]
- 侯学煜. 1988. 论我国自然生态区划及其大农业的发展(I) [J]. 中国科学院院刊, (1): 28-37. [Hou X Y. 1988. Lun woguo ziran shengtai quhua jiqi danongye de fazhan[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, (1): 28-37.]
- 侯学煜, 姜恕, 陈昌笃, 等. 1963. 对于中国各自然区的农、林、牧、副、渔业发展方向的意见[J]. 科学通报, 14(9): 8-

26. [Hou X Y, Jiang S, Chen C D, et al. 1963. Duiyu zhongguo ge ziranqu de nong, lin, mu, fu, yuye fanzhan fangxiang de yijian[J]. Chinese Science Bulletin, 14(9): 8-26.]
- 呼延俊奇, 肖静, 于博威, 等. 2014. 我国自然保护区功能分区研究进展[J]. 生态学报, 34(22): 6391-6396. [Huyan J Q, Xiao J, Yu B W, et al. 2014. Research progress in function zoning of nature reserves in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(22): 6391-6396.]
- 黄秉维. 1958. 中国综合自然区划的初步草案[J]. 地理学报, 24(4): 348-365. [Huang B W. 1958. Zhongguo zonghe ziran quhua de chubu caoan[J]. Acta Geographica Sinica, 24(4): 348-365.]
- 黄秉维. 1960. 地理学一些最主要的趋势[J]. 地理学报, 26(3): 149-154. [Huang B W. 1960. Dilixue yixie zuizhong-yao de qushi[J]. Acta Geographica Sinica, 26(3): 149-154.]
- 黄秉维, 陈传康, 蔡运龙, 等. 1996. 区域持续发展的理论基础: 陆地系统科学[J]. 地理学报, 51(5): 445-453. [Huang B W, Chen C K, Cai Y L, et al. 1996. The theoretical foundation of regional sustainable development: Land system science[J]. Acta Geographica Sinica, 51(5): 445-453.]
- 黄姣, 高阳, 赵志强, 等. 2011. 基于GIS与SOFM网络的中国综合自然区划[J]. 地理研究, 30(9): 1648-1659. [Huang J, Gao Y, Zhao Z Q, et al. 2011. Comprehensive physiographic regionalization of China using GIS and SOFM neural network[J]. Geographical Research, 30(9): 1648-1659.]
- 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 等. 2017. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区[J]. 应用生态学报, 28(8): 2657-2666. [Li H L, Peng J, Hu Y N, et al. 2017. Ecological function zoning in Inner Mongolia Autonomous Region based on ecosystem service bundles[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(8): 2657-2666.]
- 李双成, 蒙古军, 彭建. 2017. 北京大学综合自然地理学研究的贡献[J]. 地理学报, 72(11): 1937-1951. [Li S C, Meng J J, Peng J. 2017. Recent research progress at Peking University and contributions to integrated physical geography[J]. Acta Geographica Sinica, 72(11): 1937-1951.]
- 李艳梅, 曾文炉, 周启星. 2009. 水生态功能分区的研究进展[J]. 应用生态学报, 20(12): 3101-3108. [Li Y M, Zeng W L, Zhou Q X. 2009. Research progress in water eco-functional regionalization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 20(12): 3101-3108.]
- 林超, 冯绳武, 关伯仁. 1954. 中国自然地理区划大纲(草案)[M]. 北京: 北京大学地质地理系. [Lin C, Feng S W, Guan B R. 1954. Zhongguo ziran dili quhua dagang(caoan)[M]. Beijing, China: Department of Geology and Geography, Peking University.]
- 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 2014. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 69(1): 3-14.]
- 刘建国, Hull V, Batistella M, 等. 2016. 远程耦合世界的可持续性框架[J]. 生态学报, 36(23): 7870-7885. [Liu J G, Hull V, Batistella M, et al. 2016. Telecoupling sustainability framework in Chinese final[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(23): 7870-7885.]
- 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 等. 2017. 从生物地理区划到生态功能区划: 全球生态区划研究进展[J]. 生态学报, 37(23): 7761-7768. [Liu Y X, Fu B J, Wang S, et al. 2017. From biogeography to ecological function: Progress and prospect of global ecological regionalization research[J]. Acta Ecologica Sinica, 37(23): 7761-7768.]
- 陆大道. 2002. 关于地理学的“人-地系统”理论研究[J]. 地理研究, 21(2): 135-145. [Lu D D. 2002. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science[J]. Geographical Research, 21(2): 135-145.]
- 陆大道. 2016. 当代中国的全球观念与全球战略[J]. 地理科学, 36(4): 483-490. [Lu D D. 2016. The global concept and strategy of contemporary China: Analysis on the geopolitical and geoeconomic environment of the 'Belt and Road Initiative'[J]. Scientia Geographica Sinica, 36(4): 483-490.]
- 栾维新, 阿东. 2002. 中国海洋功能区划的基本方案[J]. 人文地理, 17(3): 93-95. [Luan W X, A D. 2002. The fundamental programs of marine functional division of China[J]. Human Geography, 17(3): 93-95.]
- 罗开富. 1954. 中国自然地理分区草案[J]. 地理学报, 20(4): 379-394. [Luo K F. 1954. Zhongguo ziran dili fenqu caoan[J]. Acta Geographica Sinica, 20(4): 379-394.]
- 马程, 李双成, 刘金龙, 等. 2013. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区[J]. 地理科学进展, 32(9): 1383-1393. [Ma C, Li S C, Liu J L, et al. 2013. Regionalization of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei Area based on SOFM neural network[J]. Progress in Geography, 32(9): 1383-1393.]
- 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 2017. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. 地理学报, 72(6): 960-973. [Peng J, Hu X X, Zhao M Y, et al. 2017. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J]. Acta Geographica Sinica, 72(6): 960-973.]

- 彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 等. 2016. 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[J]. 生态学杂志, 35(8): 2251-2259. [Peng J, Hu Y N, Lü H L, et al. 2016. Ecological function zoning based on element-structure-function: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture[J]. Chinese Journal of Ecology, 35(8): 2251-2259.]
- 彭建, 魏海, 李贵才, 等. 2015. 基于城市群的国家级新区区位选择[J]. 地理研究, 34(1): 3-14. [Peng J, Wei H, Li G C, et al. 2015. Research on location accessibility of national new areas based on urban agglomerations[J]. Geographical Research, 34(1): 3-14.]
- 彭建, 武文欢, 刘焱序, 等. 2017. 基于PSR框架的内蒙古自治区土壤保持服务分区[J]. 生态学报, 37(11): 3849-3861. [Peng J, Wu W H, Liu Y X, et al. 2017. Soil conservation service zoning in the Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework[J]. Acta Ecologica Sinica, 37(11): 3849-3861.]
- 任美镛, 杨纫章. 1961. 中国自然区划问题[J]. 地理学报, 27: 66-74. [Ren M E, Yang R Z. 1961. Zhongguo ziran quhua wenti[J]. Acta Geographica Sinica, 27: 66-74.]
- 吴绍洪, 高江波, 戴尔阜, 等. 2017. 中国陆地表层自然地域系统动态研究: 思路与方案[J]. 地球科学进展, 32(6): 569-576. [Wu S H, Gao J B, Dai E F, et al. 2017. Research on dynamic of terrestrial system of China: Academic logic and synthetic scheme[J]. Advances in Earth Science, 32(6): 569-576.]
- 吴未, 陈明, 范诗薇, 等. 2016. 基于空间扩张互侵过程的土地生态安全动态评价: 以(中国)苏锡常地区为例[J]. 生态学报, 36(22): 7453-7461. [Wu W, Chen M, Fan S W, et al. 2016. A dynamic approach to land ecological security assessment: A case study of Su-Xi-Chang area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(22): 7453-7461.]
- 吴志峰, 柴彦威, 党安荣, 等. 2015. 地理学碰上“大数据”: 热反应与冷思考[J]. 地理研究, 34(12): 2207-2221. [Wu Z F, Chai Y W, Dang A R, et al. 2015. Geography interact with big data: Dialogue and reflection[J]. Geographical Research, 34(12): 2207-2221.]
- 谢明霞, 王家耀, 陈科. 2016. 地理国情分类区划模型构建及实证研究: 以河南省为例[J]. 地理科学进展, 35(11): 1360-1368. [Xie M X, Wang J Y, Chen K. 2016. The model construction and empirical research on classification-based regionalization of geographical national conditions: Take Henan Province as an example[J]. Progress in Geography, 35(11): 1360-1368.]
- 徐肿崎, 李锋, 韩宝龙, 等. 2017. 动态适应性生态经济区划模型及其应用[J]. 生态学报, 37(5): 1740-1748. [Xu C Q, Li F, Han B L, et al. 2017. Adaptive eco-economic regionalization model and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 37(5): 1740-1748.]
- 杨勤业, 李双成. 1999. 中国生态地域划分的若干问题[J]. 生态学报, 19(5): 596-601. [Yang Q Y, Li S C. 1999. Some themes on eco-regionalization of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 19(5): 596-601.]
- 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 2013. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. 地理科学, 33(11): 1370-1376. [Yin J, Dai E F, Wu S H. 2013. Integrated risk assessment and zoning of typhoon disasters in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 33(11): 1370-1376.]
- 张甜, 彭建, 刘焱序, 等. 2015. 基于植被动态的黄土高原生态地理分区[J]. 地理研究, 34(9): 1643-1661. [Zhang T, Peng J, Liu Y X, et al. 2015. Eco-geographical regionalization in Loess Plateau based on the dynamic consistency of vegetation[J]. Geographical Research, 34(9): 1643-1661.]
- 郑度, 葛全胜, 张雪芹, 等. 2005. 中国区划工作的回顾与展望[J]. 地理研究, 24(3): 330-344. [Zheng D, Ge Q S, Zhang X Q, et al. 2005. Regionalization in China: Retrospect and prospect[J]. Geographical Research, 24(3): 330-344.]
- 郑度, 欧阳, 周成虎. 2008. 对自然地理区划方法的认识与思考[J]. 地理学报, 63(6): 563-573. [Zheng D, Ou Y, Zhou C H. 2008. Understanding of and thinking over geographical regionalization methodology[J]. Acta Geographica Sinica, 63(6): 563-573.]
- 郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 2016. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿[J]. 地理学报, 71(9): 1475-1483. [Zheng D, Wu S H, Yin Y H, et al. 2016. Frontiers in terrestrial system research in China under global change[J]. Acta Geographica Sinica, 71(9): 1475-1483.]
- Bailey R G. 1983. Delineation of ecosystem regions[J]. Environmental Management, 7(4): 365-373.
- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(15): 8197-8207.
- Folke C, Biggs R, Norström A V, et al. 2016. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science[J]. Ecology and Society, 21(3): 41.
- Gao J B, Li S C, Zhao Z Q. 2010. Validating the demarcation of eco-geographical regions: A geostatistical application[J]. Environmental Earth Sciences, 59(6): 1327-1336.
- Kahn M E. 2016. The climate change adaptation literature[J]. Review of Environmental Economics and Policy, 10(1): 1-14.

- 166-178.
- Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. 2007. Complexity of coupled human and natural systems[J]. *Science*, 317(5844): 1513-1516.
- Ostrom E. 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 325(5939): 419-422.
- Peel C, Finlayson L, McMahon A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(2): 439-473.
- Peng J, Ma J, Yuan Y, et al. 2015. Integrated urban land-use zoning and associated spatial development: Case study in Shenzhen, China[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(4): 05014025.
- Schneider A, Friedl M A, Potere D. 2010. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on 'urban ecoregions' [J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1733-1746.
- Shi P J, Sun S, Wang M, et al. 2014. Climate change regionalization in China (1961-2010)[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(11): 2676-2689.
- The Nature Conservancy, World Wildlife Fund. 2006. Standards for ecoregional assessments and biodiversity visions [R]. Arlington, VA: The Nature Conservancy.
- Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. 2016. Advances in terrestrial system research in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 26(7): 791-802.
- Yang D W, Cai J J, Hull V, et al. 2016. New road for telecoupling global prosperity and ecological sustainability[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(10): e01242.

Research frontier and challenges of terrestrial system regionalization in China

PENG Jian, MAO Qi, DU Yueyue, SU Chong, ZHANG Tian, HU Yi'na, WANG Yanglin

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

Abstract: Regionalization is a fundamental way for geographers to cognize the world. As an important part of integrated physical geography, terrestrial system regionalization aims at revealing rules of regional differentiations of terrestrial system features and their interaction processes, supporting the development of reasonable land management policies. The topics and methods of terrestrial system regionalization are constantly changing and innovated with the development of society and economy. After a brief review of research on terrestrial system regionalization in China, this study summarized the progress of Chinese scholars in the research frontier, i.e., dynamic regionalization, quantitative optimization of multi-regionalization schemes, and automatic demarcation. The study of dynamic regionalization could effectively depict the pattern and process of terrestrial system, with important guidance for regional sustainable development in the context of global change, while the study of quantitative optimization of multi-regionalization schemes and automatic demarcation might offer significant theoretical and technical supports for automatic regionalization. Furthermore, this study discussed the research challenges faced today, including the challenges of undertaking terrestrial regionalization for coupled human and natural systems, integrating qualitative and quantitative methods, and carrying out regionalization from the global to local scales.

Key words: terrestrial system regionalization; dynamic regionalization; scheme optimization; boundary demarcation; research progress