

· 专题一：双清论坛“黄河流域生态保护与可持续发展” ·

黄河流域人地系统耦合机理与优化调控*

傅伯杰^{1,2**} 王 帅² 沈彦俊³ 程昌秀²
李 琰² 冯晓明¹ 刘焱序²

1. 中国科学院 生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
2. 北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875
3. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 石家庄 050022

[摘要] 人地系统耦合是地球系统科学研究的前沿领域,是区域可持续发展的重要理论基础。面向黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略需求,亟待需要聚焦人地系统耦合机理与调控途径,揭示黄河流域人水关系演变及社会—水文—生态系统动态。采取调查观测、遥感监测、统计分析、模型模拟等手段,识别变化环境下的水—粮食—能源关联与协同优化机制,发展人地系统耦合模型,提出流域人地系统统筹优化调控方案。从而为黄河流域可持续发展与协同治理提供科学依据,推动我国跻身地球系统科学研究的国际前沿。

[关键词] 黄河流域;人与自然耦合系统;社会—生态系统;反馈机制;演变规律;驱动机制

1 黄河流域人地系统耦合研究意义

黄河是中华民族的母亲河,“黄河宁,天下平”,治理黄河是千年夙愿。黄河流域大部分属于旱半干旱地区,流域面积占全国陆地面积的8.3%,年径流量只占2%,却承担着全国12%的人口、15%的耕地和13个国家能源化工基地的供水任务。水资源开发利用接近80%,为我国十大一级流域中最高,远超国际上流域水资源开发利用40%的生态警戒线。黄河上游局部地区生态系统退化、中游水土流失威胁依然严峻、下游生态流量偏低带来多重生态胁迫,全国14个集中连片贫困地区有5个涉及黄河流域,这些问题都可归结为人地系统不协调。由于社会经济发展与自然水文过程、生态系统过程严重失调,黄河流域是我国人地矛盾最为突出和复杂的区域之一。全面保障流域水安全与生态安全,需要以水资源为主要约束条件,从全流域并统筹上中下游的联动关系,从系统视角针对多种情景制定优化调控方案,从而实现流域自然生态环境整体保护与社会经济的高质量发展。总之,黄河流域作为我



傅伯杰 中国科学院院士,发展中国家科学院院士,美国人文与科学院外籍院士,英国爱丁堡皇家学会外籍院士,中国科学院生态环境研究中心研究员、北京师范大学地理科学学部部长,兼任国际地理联合会副主席。从事综合自然地理学和景观生态学研究,在土地利用与生态过程、景观格局与生态系统服务优化等方面取得了系统性创新成果。获国家自然科学奖二等奖、中国科学院杰出科技成就奖、何梁何利科学技术进步奖和欧洲地球科学联合会洪堡奖章等奖项。

国重要的生态屏障和经济地带,如何协调流域人地关系,全面应对和解决脆弱生态环境、水资源保障压力、区域发展滞后等综合性问题,实现系统性、整体性、协同性的流域保护和治理,是现阶段黄河流域生态保护和高质量发展的重大挑战。

在人类活动的强烈影响下,全球资源环境面临前所未有的压力,地球进入“人类世”的新纪元^[1]。深入理解现代环境变化机理、准确预测未来变化趋势是地球系统科学研究的前沿领域^[2]。这就需要发展系统整体的方法,耦合自然与人文过程,探讨变化

收稿日期:2021-01-04;修回日期:2021-01-07

* 本文根据第274期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: bfu@rcees.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42041007, 41991230)的资助。

环境下人地系统耦合机制。人地系统是自然地理环境与人类社会经济所构成相互作用、相互影响的复杂巨系统,揭示其要素动态演化、解析过程耦合机制、明晰优化调控途径,可为区域可持续发展提供坚实的理论基础^[3-5]。黄河流域在三千多年来悠久的历史开发和近现代的高强度经济活动影响下,人类活动与资源环境间的要素关系、上中下游区域之间的空间联系不断变化。作为具有明确边界范围内“水—土—气—生—人”要素相互作用的完整单元,流域是环境变化背景下人地系统研究的理想场所^[6]。阐明黄河流域人地系统耦合机理,构建耦合模型探求流域人地系统优化调控路径,支撑流域可持续发展,将有助于推动我国跻身地球系统科学研究的国际前沿。

2 流域人地系统耦合研究进展

随着人类活动对陆地表层系统的影响范围、强度和幅度不断扩大,当前可持续发展面临的核心问题就是如何科学理解和管理人类与自然之间的复杂互动关系^[7]。在流域人地系统研究中,主要通过人地系统耦合机制解析、人地系统模拟工具研发、人地系统优化调控三个方面进行分析。

2.1 人一水关系与水—粮食—能源关联研究进展

人地系统耦合机制即地球表层人与环境相互作用的机制,需要耦合自然要素和人文要素^[8]。水是流域系统中串联其他自然要素过程的核心,人一水关系因而成为流域人地关系研究的核心^[9, 10]。人类对水循环过程的影响已从外部动力演变为系统内力,旨在理解人一水之间共同演化规律和互馈机制的社会—水文学应运而生并不断发展成熟^[11, 12]。国际水文科学协会提出2013—2022年的“科学十年”研究主题为“万物皆流”(Panta Rhei—Everything Flows),将解析人水系统的内在变化过程作为水文学的关键发展蓝图,广泛寻求水文学与社会经济的跨学科联系,并已在人一水关系变化的现象检测、机理分析、模型预测等方面获得了长足发展^[13]。水—粮食—能源三者关联被视为应对水安全、粮食安全、能源安全多重风险的综合性解决措施^[14]。相关研究经历了从“单一中心”,向“双双关联”,再到三者“纽带关系”耦合的发展历程,目前研究在三要素系统分析框架、协同与权衡效应分析、气候变化与贸易影响评估、耦合模型研发等方面取得进展^[15]。在方法学上发展了包括生命周期评价、可计算的一般均衡模型、系统动力学模型、多主体建模、计量经济分析、生态网

络分析和综合指数分析等研究手段^[16, 17]。

黄河流域是人—水相互作用的典型案例,一方面流域环境受人类活动强烈影响,另一方面水资源匮乏成为流域社会发展的重要约束条件。然而,当前流域人一水关系研究中存在关键过程变量表征不足,重要互馈关系难以实现量化,共性机理和系统弹性认识不足的问题^[18],制约了对黄河流域人一水关系演化的系统性认知。同时,黄河流域粮食生产和能源开发对水资源依赖程度高,生态用水的变化也会加剧流域水资源短缺与水—粮食—能源之间的冲突^[19, 20],亟需通过多目标协同优化提出在保障流域生活、生态环境用水安全的基础上粮食与能源安全的解决方案^[21]。然而,国内外研究中针对大流域上中下游之间的农业土地、水资源利用以及能源发展之间协同机理和优化配置的研究案例尚不多见,变化环境下黄河流域水—粮食—能源关联的演变机制识别、外部效应评估与协同提升途径仍有待深入探索。

2.2 人地系统耦合模型构建研究进展

人地系统耦合模型是人地系统研究的关键工具,是地球系统科学研究的难点^[22]。近年来已发展出不同复杂程度,从个体、区域到全球尺度的一系列人地系统模型,包括了简单概念模型^[23]、智能体模型^[24]、系统动力学模型^[25]、综合评估模型^[26]、加入人类活动的陆面过程与地球系统模型^[27]、地球系统模型与综合评估模型的耦合模型^[28]等。然而,现有的流域人地系统耦合模型中对人类活动的描述基本处于起步阶段,对人类活动时空分布认识有很大不确定性,对社会经济系统的定量表征更有待提高^[29]。

人地系统耦合模型构建的难点在于所构建的模型如何能较好反映研究区的自然物理特征与社会现实,从而实现对不同管理方案下耦合系统变化的模拟与决策支持。现有地球系统模型中的人类活动通常以外部情景方式表达,未能将社会经济过程以内生变量纳入模型框架,只能实现自然系统与人类活动的单向耦合。然而,人地系统之间的相互作用是双向的^[30],忽视双向耦合将无法反映出人地系统之间的真实反馈与系统动态^[23, 28],因此实现双向耦合建模对于人地系统可持续发展的优化决策至关重要^[31]。黄河流域的社会经济发展受到水土资源限制,自然生态环境受到人类活动的强烈扰动,自然灾害对社会经济发展造成了重大风险。黄河流域人地系统的复杂性进一步加剧了人地系统耦合模型在流域人地系统耦合结构刻画、自然与社会经济过程的

尺度匹配与转换,系统反馈的表征与模拟等方面的困难和挑战。针对这种人地关系不匹配,亟待进一步提高对流域人地系统结构、功能过程的定量表达,发展耦合的尺度转换与建模方法,研发流域尺度人地系统模型,从而有望为流域可持续发展决策提供切实可靠的情景分析工具。

此外,全面、系统的科学数据成为大数据时代地球系统研究以及人地耦合研究创新的重要驱动力^[32, 33]。大型流域的人地系统数据资源呈现数据量大、种类多和结构复杂的特征,既包括了作为人类生存与发展物质基础的自然资源,又包括人类开发利用相关的人类活动资源^[34]。由于人地系统数据存在种类繁多、格式多样、标准难以统一的特点,流域人地系统大数据普遍存在数据集成度不高、自然与社会经济数据的尺度匹配困难,数据质量难以满足需求的问题。黄河流域的资源环境数据平台相对薄弱,人地系统耦合的研究亟需黄河流域“水、土、气、生、人”等各类数据资源综合集成的大数据平台支持。

2.3 人地系统优化调控进展

人地系统优化调控是流域因地制宜实现可持续发展的科学途径。区域可持续发展的政策挑战在于经济发展、社会进步和生态环境保护目标的同步实现,而不同发展目标之间可能存在此消彼长的权衡效应^[35]。因此,对可持续发展诸多目标之间关联机理的认识,不应局限于简单数理统计的分析结果,而应当理解关联现象背后更深层次的人地系统互馈机制^[36]。面向流域可持续发展整体诉求,资源环境开发和保护需要从调控的主体“人”出发,实现多层次利益相关者在流域人地系统治理尤其是“水”资源管理的统筹协作,而景观格局的优化配置则为人地系统调控落“地”提供了实践抓手。

大型流域通常涉及多个利益相关者,并具有复杂、动态、非线性的社会及生态过程,在传统流域管理模式中,对人地系统结构特征及其功能效应未加以足够重视^[37]。理解流域水资源使用时上中下游不同行业利益相关者的冲突、合作,及其相互作用下治理体系的整体结构与功能,逐渐成为流域可持续治理的重要基础^[38]。同时,气候变化和人类活动在改变流域水循环的同时也影响着自然和农业生态系统水分利用效率,进而影响着流域资源环境承载力^[39]。在以水定人、以水定产的过程中,需要从水资源和生态系统承载底线、粮食需求上限以及三者的空间关系入手,发挥人地系统耦合模型的情景预测能力,并考虑流域内不同利益相关者之间形成的

治理结构关系^[40]——如水资源使用、粮食生产和生态保护之间的协作,从而优化流域上中下游水资源配置的社会—生态网络结构,提升水安全保障下的流域可持续发展水平。

黄河流域生态安全、粮食安全、经济安全与社会安全的权衡协同关系复杂,在以水定地的战略目标下,景观配置通过影响水循环和水沙过程,成为串联作物种植、生态系统保护与恢复、城乡发展的重要空间载体^[41]。基于黄河流域面临水问题的多样性、利益相关者的多元性、环境社会问题的复杂性,亟需以景观单元为对象,强化对流域整体生产—生活—生态空间的系统认知^[42]。可持续发展目标为大尺度区域发展情景模拟的目标设置提供了有力抓手,可以基于土地利用规模达成资源环境指标与社会经济指标的系统建模,实现可持续发展目标评估与模拟^[43]。然而,对人地系统可持续发展的情景模拟不等同于可持续发展指标数据分析,基于数理统计的社会经济指标分析往往弱化了人地系统动力学的空间机制,而流域尺度的模拟往往需要破除行政单元而融入地理空间信息和模型^[44]。以黄河流域人口、社会、经济、制度和资源环境相协调为导向,以维持生态系统稳定、灾害风险调控、粮食安全保障、城乡统筹发展为目标,通过景观尺度生产—生活—生态要素的整合,提出流域景观优化配置方案,将为流域可持续发展提供空间上落“地”的科学支撑。

3 黄河流域人地系统耦合研究挑战与关键科学问题

3.1 研究挑战

由以上进展可知,国内外人地系统研究近年来在以人—水系统理论、水—粮食—能源关联为主的流域人地系统耦合机制研究中取得系列进展,流域人地系统耦合模型与大数据平台的发展成为人地系统耦合方法学研究的重要发展方向,基于人地系统耦合机理的流域综合治理和优化受到高度关注。其中:人—水关系是流域人地系统耦合研究的核心,正从概念框架发展阶段走向定量表达与预测;水—粮食—能源关联是黄河流域人地系统耦合研究特色,有待深化其关联机制与协同提升途径;人地系统耦合模型是地球系统科学研究的重点和难点,仍需提升双向互馈过程模拟能力与数据之间的尺度匹配与转换方法;流域可持续发展需要人地系统统筹优化调控,基于情景模拟揭示系统结构特征及其功能效应。

黄河流域保护和发展强调系统性、整体性、协同

性的解决思路,需要针对以下研究挑战实现重点突破,包括:流域人水系统中社会—水文—生态要素互馈机理与弹性特征缺乏定量表达,流域水—粮食—能源系统的动态演变与外部效应的关联未能整体刻画,人地系统模型中自然生态与社会经济过程的数据匹配和互馈机制定量刻画能力不足,流域水安全、生态安全协同保障下的可持续发展路径亟待系统研判等。抓住当前黄河流域生态保护和高质量发展的国家战略机遇,揭示黄河流域人地系统耦合机理与优化调控机制,将从系统性、整体性、协同性等方面为黄河流域生态保护与可持续发展提供科学依据,也将通过流域集成研究推动我国地球系统科学的发展。

3.2 关键科学问题

针对黄河流域人地系统耦合研究挑战,亟待解决黄河流域人地系统耦合机理、人地系统耦合方法与模型模拟两项关键问题:

第一,人类对水循环过程的影响已从外部动力演变为系统内力,流域人地系统耦合机理是地球系统科学的前沿和应对环境变化挑战、保持人水和谐、实现流域可持续发展的重要科学基础。亟待通过阐释黄河流域人水关系演变与互馈机理、水—粮食—能源关联机制,揭示人地系统耦合机理及其协同进化过程,为黄河流域可持续发展提供科学依据。

第二,流域可持续发展水平与发展趋向预测是进行流域有效调控的前提,人地系统耦合方法与模型模拟是其核心技术问题。亟待在发展大数据平台、构建人地系统指标体系的基础上,实现陆面过程模型与综合评估模型的耦合,建立黄河流域人地系统耦合模型,从而为自然生态水文过程与社会经济过程综合模拟、情景分析与优化调控提供关键技术途径。

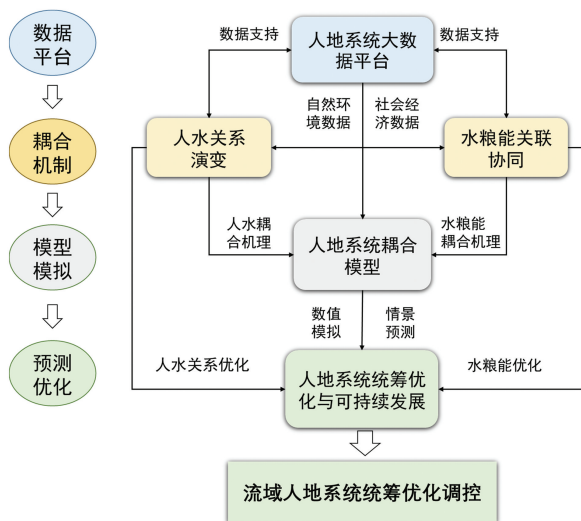


图 1 黄河流域人地系统耦合关键科学问题的逻辑关联

4 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控研究建议

4.1 黄河流域人水关系演变与耦合机理

针对社会—生态用水、缺水、分水以及输沙等方面建立表征人水关系变化的指标和方法,解析长时间尺度黄河流域人水关系的发展演变过程;以人水关系变化为枢纽,结合关键突变点识别,揭示黄河流域人水关系的稳态类型、特征与阈值,阐明历史和当代黄河流域人水关系发展演变特征与驱动机制。量化社会—水文系统的关键变量,识别人—水主要互馈过程并量化正负反馈循环。分析经济发展、管理决策、社会感知等社会要素通过反馈循环对流域生态健康、洪旱风险适应、水沙调控等流域社会—生态过程的影响,揭示人—水相互作用及其协同进化机制。综合分析黄河流域社会—生态—水文系统动态演化特征,建立表征流域对气候变化和人类活动响应的弹性指标体系;评估流域社会—生态—水文系统弹性时空格局并分析水对流域弹性的影响及作用方式、关键过程、临界阈值,探寻弹性提升途径。

4.2 黄河流域水—粮食—能源关联机制与协同优化

揭示黄河流域土地利用和农作物种植类型的时空演变规律;分析黄河流域粮食生产、水资源利用、能源消耗的变化特征,揭示黄河流域农业和能源产业的用水供需变化规律。结合黄河流域水资源、粮食和能源的时空布局以及供给、生产和消耗特征等,构建适用于黄河流域水—粮食—能源关联作用的耦合模型,模拟分析流域上中下游水—粮食—能源之间的关联机制和演化特征,识别其气候和社会等驱动力因素。考虑农业灌溉、能源消耗及经济发展等需求,确立生态系统稳定、粮食能源安全等多目标下的水资源需求;开展水资源约束下流域水—粮食—能源—生态多目标协同优化的情景模拟,提出不同情景下水—粮食—能源协同发展的水资源优化配置及风险应对策略。

4.3 黄河流域人地系统耦合方法与模型模拟

面向黄河流域不同区域、不同尺度人地系统要素特征,构建人地系统指标体系,解析不同自然与人类社会经济过程之间的空间与时间匹配关系,分析人地系统多要素之间的关联度与相互作用机理。针对流域自然生态水文过程,构建黄河流域生态水文关键参数体系,定量揭示气候变化和人类活动驱动下,生态和水文过程的响应和反馈;针对流域社会经

济系统,发展适用于流域尺度的社会经济系统模型,构建黄河流域社会经济系统关键参数体系,揭示社会经济过程对气候变化与人类活动的响应及反馈。研究流域自然过程与社会经济过程的尺度匹配与转换方法,建立黄河流域人地系统耦合模型,开展自然生态水文过程与社会经济过程的综合模拟,定量刻画黄河流域人地系统对气候变化的响应与反馈。

4.4 黄河流域人地系统统筹优化与可持续发展

构建黄河流域不同气候变化和社会经济发展情景,分析不同情景下生态系统的服务功能及服务流,辨析流域水资源以及生态系统的服务功能与人类需求的匹配状况,定量识别流域水资源安全和生态安全的影响因素,提出水安全、生态安全条件下的流域发展情景。定量模拟不同流域发展情景下气候变化和社会经济快速发展对流域可持续发展的影响与调控作用。构建流域人地系统的优化指标体系,明晰流域社会经济发展、能源保障、粮食生产、生态安全、水安全等的调控关键指标及其范围,结合流域可持续发展适应情景提出流域可持续发展方案和调控对策。

参 考 文 献

- [1] Crutzen PJ, Stoermer EF. The "Anthropocene". IGBP Newsletter, 2019, 41: 16—18.
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of earth system science. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1: 54—63.
- [3] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1—6.
- [4] 陆大道. 关于地理学的“人—地系统”理论研究. *地理研究*, 2002, 21(2): 135—145.
- [5] 傅伯杰. 地理学:从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923—1932.
- [6] 程国栋, 李新. 流域科学及其集成研究方法. *中国科学:地球科学*, 2015, 45(6): 811—819.
- [7] Hull V, Tuanniu MN, Liu J. Synthesis of human-nature feedbacks. *Ecology and Society*, 2015, 20(3): 17.
- [8] 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务. *地理科学*, 2015, 35(8): 939—945.
- [9] 邓铭江, 龙爱华, 李江, 等. 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析. *地理学报*, 2020, 75(7): 1333—1345.
- [10] 王浩, 龙爱华, 于福亮, 等. 社会水循环理论基础探析 I: 定义内涵与动力机制. *水利学报*, 2011, 42(4): 379—387.
- [11] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 7—21.
- [12] Sivapalan M, Savenije HH, Blöschl G, et al. Sociohydrology: a new science of people and water. *Hydrological Processes*, 2012, 26(8): 1270—1276.
- [13] Montanari A, Young G, Savenije HH, et al. "Panta Rhei—Everything Flows": change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013—2022. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1256—1275.
- [14] Smajgl A, Ward J, Pluschke L. The water-food-energy nexus—realising a new paradigm. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 533—540.
- [15] 张宗勇, 刘俊国, 王凯, 等. 水—粮食—能源关联系统述评: 文献计量及解析. *科学通报*, 2020, 65: 1569—1580.
- [16] Albrecht TR, Crootof A, Scott CA. The water-energy-food nexus: a systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 043002.
- [17] Daher BT, Mohtar RH. Water-energy-food (WEF) nexus tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision making. *Water International*, 2015, 40(5—6): 1—24.
- [18] Lu ZX, Wei YP, Feng Q, et al. A framework for incorporating social processes in hydrological models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 42—50.
- [19] Cai X, Rosegrant MW. Optional water development strategies for the Yellow River Basin: balancing agricultural and ecological water demands. *Water Resources Research*, 2004, 40(8): W08S04.
- [20] Feng XM, Fu BJ, Piao SL, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019—1022.
- [21] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源—能源—粮食的协同优化. *水科学进展*, 2017, 28(5): 681—690.
- [22] 彭书时, 朴世龙, 于家焯, 等. 地理系统模型研究进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 109—120.
- [23] Woodard DL, Davis SJ, Randerson JT. Economic carbon cycle feedbacks may offset additional warming from natural feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(3): 759—764.
- [24] An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 25—36.
- [25] Qu W, Shi W, Zhang J, et al. T21 China 2050: a tool for national sustainable development planning. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 33—46.
- [26] Hasegawa T, Fujimori S, Havlik P, et al. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 2018, 8(8): 699—703.
- [27] Pongratz J, Dolman H, Don A, et al. Models meet data: challenges and opportunities in implementing land management in Earth system models. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1470—1487.
- [28] Thornton PE, Calvin K, Jones AD, et al. Biospheric feedback effects in a synchronously coupled model of human and earth systems. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 496—500.
- [29] Robinson DT, Di Vittorio A, Alexander P, et al. Modelling feedbacks between human and natural processes in the land system. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 895—914.

- [30] Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E, et al. Modeling sustainability: population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the earth and human systems. *National Science Review*, 2017, 3(4): 470—494.
- [31] Fu BJ, Li Y. Bidirectional coupling between the earth and human systems is essential for modeling sustainability. *National Science Review*, 2016, 3(4): 397—398.
- [32] 程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. *地理学报*, 2018, 73(8): 1397—1406.
- [33] Markus R, Gustau C, Bjorn S, et al. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science. *Nature*, 2019, 566: 195—204.
- [34] Fu B. Promoting geography for sustainability. *Geography and Sustainability*, 2020, 1: 1—7.
- [35] 张军泽, 王帅, 赵文武, 等. 可持续发展目标关系研究进展. *生态学报*, 2019, 39(22): 8327—8337.
- [36] Fu BJ, Wang S, Zhang JZ, et al. Unravelling the complexity in achieving the 17 sustainable-development goals. *National Science Review*, 2019, 6(3): 386—388.
- [37] Wang S, Fu BJ, Bodin Ö, et al. Alignment of social and ecological structures increased the ability of river management. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1318—1324.
- [38] Bodin R, García MM, Robins G. Reconciling conflict and cooperation in environmental governance: a social network perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, 45(1): 471—495.
- [39] 于贵瑞, 徐兴良, 王秋凤, 等. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 19—23.
- [40] Ansell C, Gash A. Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2007, 18(4): 543—571.
- [41] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798—804.
- [42] 傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法. *科学通报*, 2019, 64(21): 2172—2179.
- [43] Gao L, Bryan BA. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, 544(7649): 217—222.
- [44] 李新, 程国栋, 康尔泗, 等. 数字黑河的思考与实践 3: 模型集成. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 851—865.

Mechanisms of Human-natural System Coupling and Optimization of the Yellow River Basin

Fu Bojie^{1,2*} Wang Shuai² Shen Yanjun³ Cheng Changxiu²
 Li Yan² Feng Xiaoming¹ Liu Yanxu²

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875
 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022

Abstract The Human-Natural system coupling is a frontier research area in Earth system science and it serves as an important basis for regional sustainable development. To support the major national strategic needs of ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin, we need to focus on coupling mechanism and optimization approaches of the Human-Natural system in the Yellow River basin, and use multiple methods including field survey, remote sensing monitoring, statistical analysis, and model simulation. The research frontiers include: investigating human-water relationship evolution and social-hydrological-ecosystem dynamics in the Yellow River Basin, identifying linkages and synergy mechanisms of the water-energy-food nexus under changing environments, and proposing an integrated scheme to optimize the Human-Natural system in the Yellow River basin. The expectant scientific output is providing a scientific basis for the sustainable development and collaborative governance of the Yellow River Basin, and promote China to the international research frontiers of Earth system science.

Keywords Yellow River basin; human-natural system; social-ecological systems; feedback mechanism; evolution; driving mechanism

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: bfu@rcees.ac.cn