

引用格式:王帅,傅伯杰,武旭同,等.黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性[J].资源科学,2020,42(1):96-103.[Wang S, Fu B J, Wu X T, et al. Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 96-103.] DOI: 10.18402/resci.2020.01.10

# 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性

王帅<sup>1</sup>,傅伯杰<sup>1</sup>,武旭同<sup>2</sup>,王亚萍<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 北京大学城市与环境学院,北京 100871)

**摘要:**在全球变化和人类活动驱动下,社会系统与生态系统均处在不断加剧的动态变化中,揭示二者之间的互馈机制是保持和增强系统弹性以及可持续性的科学基础。黄土高原地区是中国人口、资源、环境矛盾最集中的区域之一,也是黄河重要的产水区 and 绝大部分泥沙的来源区。合理布局黄土高原土地利用格局,协调黄土高原水土保持和黄河下游水资源利用与泥沙控制,是黄土高原地区和黄河流域可持续发展的重大需求。本文立足于国际社会-生态系统耦合研究前沿和可持续发展与生态建设的国家需求,综述了区域社会系统与生态系统的互馈机制和社会-生态系统的耦合模拟的研究进展,总结了黄土高原社会-生态系统的变化过程和驱动机制,认为发展社会-生态系统动态机制分析方法和稳态转换识别方法,建立耦合社会系统与生态系统的土地利用权衡与优化模型,是推动社会-生态系统耦合研究理论与方法创新、为黄土高原的可持续发展提供科学依据的重要途径。

**关键词:**社会-生态系统;互馈机制;可持续性;弹性;稳态转换;人地耦合;黄土高原

DOI :10.18402/resci.2020.01.10

## 1 引言

随着人类对自然环境的影响加剧,地表生态过程逐渐受人类行为主导,地球进入了“人类世”阶段<sup>[1]</sup>。生态系统受到了巨大的破坏与威胁,可持续发展面临严峻挑战<sup>[2]</sup>。社会-生态系统(Social-ecological System, 也被称为“复合人-地系统”或“人与自然复合系统”)是指人类与环境相互作用形成的具有复杂性、非线性、不确定性和多层嵌套等特性的耦合系统<sup>[3,4]</sup>。面对环境问题的复杂性,多学科交叉研究逐渐发展,社会-生态系统理论框架被认为是极具潜力的分析方法和学科前沿<sup>[5,6]</sup>。美国自然科学基金会(NSF)于2001年就开展了自然与人类耦合系统动力学(Dynamics of Coupled Natural and Human Systems, CNH)研究计划,2019年进一步发展为CNH2,即社会-环境综合系统动力学研究计划。

社会-生态的互馈机制是社会-生态系统研究

的核心内容。在全球变化和人类活动驱动下,社会系统与生态系统均处在不断加剧的动态变化中,揭示耦合系统的互馈机制是保持和增强系统弹性和可持续性的科学基础,也是当前研究的主要难点<sup>[7]</sup>。包含弹性(Resilience, 也称“恢复力”、“韧性”)、适应力(Adaptability)和转换力(Transformability)等概念的弹性理论是研究社会-生态系统动态演化和互馈机制的重要理论<sup>[8]</sup>,是理解和揭示复杂社会-生态系统非线性变化过程的关键<sup>[9]</sup>。

随着“未来地球”科学计划的发起,不同空间尺度上人类活动与自然环境的耦合关系正在成为国际地球系统科学研究的前沿<sup>[10]</sup>。黄土高原地区是中国人口、资源、环境矛盾最集中的区域之一,脆弱的自然条件加之人类长期高强度的利用导致了黄土高原生态系统退化,曾是中国乃至全球水土流失最为严重的地区之一。退耕还林还草等一系列生态

收稿日期:2019-12-09 修订日期:2020-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41930649;41722102);中央高校基本科研业务费专项。

作者简介:王帅,男,教授,主要从事人地系统耦合与可持续发展研究。E-mail: shuaiwang@bnu.edu.cn

通讯作者:傅伯杰,男,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要从事地理学综合研究。E-mail: bfu@rcees.ac.cn

2020年1月

建设工程增加了黄土高原的植被覆盖率,提升了主要生态系统服务<sup>[11,12]</sup>,但不合理的生态建设布局也影响了区域水资源的可持续性<sup>[13]</sup>和粮食安全<sup>[14]</sup>,产生了相应的社会生态问题。

黄土高原生态建设,带动的是黄土高原生境改善,牵动的是黄河下游水资源利用、水利工程安全、河道长治久安,因此是黄土高原地区、黄河流域系统合理调控的焦点。开展黄土高原社会-生态系统耦合研究,是实现黄土高原可持续发展的迫切需求。本文从社会-生态系统的视角出发,综述区域社会系统与生态系统的互馈机制和社会-生态系统的耦合模拟研究进展,总结黄土高原社会-生态系统的变化过程和驱动机制,提出未来研究方向,以期黄土高原社会-生态系统变化研究和可持续发展提供理论基础。

## 2 社会-生态系统研究

人与自然是密不可分的,面对日益紧迫的可持续发展的挑战,需要一门综合社会系统与生态系统的科学<sup>[3]</sup>,实现从将人与自然视为独立的系统,到将它们视为一个由两个相互作用部分组成的复杂动态系统的转变<sup>[15,16]</sup>。将社会系统与生态系统要素综合分析,可以更好地理解人类活动与自然环境的耦合关系,而不仅仅关注单向关系(如人类活动对自然环境、生态系统服务等的影响)或单一成分<sup>[17,18]</sup>。

社会-生态系统研究鼓励对社会与生态系统的动态进行整体评估<sup>[15,19]</sup>,尤其关注人类和生态系统相互作用,及其在多个相互关联的尺度上形成的动态反馈循环<sup>[3]</sup>。这些相互作用和反馈可能对社会系统和生态系统要素产生积极或消极影响<sup>[20]</sup>。如果不加以控制,这些反馈会导致系统转变到不良状态或进入社会-生态贫困陷阱,或者导致其他意想不到的后果<sup>[21,22]</sup>。因此,发展跨学科的研究框架和分析方法,深入了解社会-生态系统的动态机制,对于设计更有效的政策和干预措施以应对可持续发展的挑战至关重要<sup>[4,17]</sup>。

社会-生态系统研究在推动可持续发展方面的作用和重要性越来越受到重视<sup>[15]</sup>。通过社会-生态系统研究,多个系统(如社会、经济、生态系统等)和多个学科(如生态学、社会学、政治学、公共健康等)被整合到生物多样性保护、农业管理、可持续发展、环境管理等可持续议题之中<sup>[23]</sup>。社会-生态系统主

题的文章数量逐渐增多,提出了很多分析框架和方法以更好地实现社会-生态系统的综合<sup>[20]</sup>。成立于1999年的弹性联盟(Resilience Alliance)致力于研究社会-生态系统动态演化,推动对弹性、适应力、转换力等概念的理解和应用<sup>[7,8,24,25]</sup>,以应对全球变化,促进人类福祉。2009年,Ostrom<sup>[18]</sup>在大量实践案例研究的基础上,提出了社会-生态系统可持续性研究框架,包括资源系统、资源单位、管理单位和行动者等要素,为社会-生态系统理论与实践探索提供了指导,吸引了全球可持续性领域众多学者的广泛关注,被应用于渔业、森林、水资源管理等研究领域<sup>[6,26]</sup>。概括起来,目前社会-生态系统的研究主要集中在理论框架的探索与政策管理方面,虽然提出了耦合分析的框架和区域管理策略,但仍需要加强对动态过程的刻画和模拟,对复杂耦合与反馈过程的方法研究,以及对稳态转换的识别和机制分析,为社会-生态系统管理提供科学依据。

社会-生态问题的复杂性和跨学科性质导致用以准确捕获耦合系统的结构和功能要素的分析框架在目的、内容、理论背景和前沿等方面都各不相同。这些框架主要包括人类生态系统、恢复力、生态系统服务综合评估、脆弱性、人与自然系统耦合以及社会生态系统的框架。通过比较各框架内容与前沿,认为对新兴理论核心的讨论集中在社会生态系统的四个共享结构元素上:组件,连接,尺度和背景(表1)。共同的跨领域研究前沿包括:从单一案例研究转向有关社会生态系统结果的整合分析与比较工作;结合描述性和数据驱动的建模方法进行社会-生态系统分析;通过实践应用和测试以及框架间学习来促进框架的发展和完善<sup>[27]</sup>。

## 3 社会系统和生态系统的互馈机制

社会-生态系统的动态演化和互馈机制是社会-生态系统研究的核心内容。弹性理论认为系统具有多种稳态,跨越表征系统关键变量的临界阈值,系统可以在不同稳态间转换<sup>[36,37]</sup>。弹性是指系统在发生变化时吸收干扰、重新组织,以维持其结构、功能、特性和反馈的能力<sup>[38]</sup>;适应力是弹性的一部分,表示系统对外部驱动因素和内部过程变化做出响应以按照现有轨迹(稳定域)发展的能力<sup>[8]</sup>;转换力是指当生态、经济或社会条件使现有系统难以维持时,跨越阈值进入新的发展轨迹的能力<sup>[8,38]</sup>。当

表1 常见社会生态系统分析框架总结

Table 1 Summary of selected social-ecological system research frameworks

框架	目的	组件	连接	尺度	背景
人类生态系统 <sup>[28]</sup>	发展生态系统管理的跨学科组织概念	关键性资源(自然、社会经济和文化资源)和人类社会系统(社会制度、周期和秩序)	连接表征流向;未关注非线性或随机连接;反馈作用有所涉及	强调多尺度,组件所处时空尺度决定了对组件的理解;跨尺度连接有所涉及	社会和土地利用的历史状态
恢复力 <sup>[24,29-31]</sup>	关注社会生态系统动态演化机制与系统稳健性	框架未指定组件或子组件	用可标度变量表征连接,连接程度影响系统状态;系统本身体现非线性或随机关系,以及反馈作用,但未通过连接表示	强调无限尺度,复杂系统在演化适应过程中,组件的相互连接呈现多层次结构,该结构在其形成、发展、重组和更新周期中具有时间无限性;跨尺度连接表述详细	系统历史状态
生态系统服务综合评估 <sup>[32]</sup>	加强生态系统功能、商品和服务研究的对比性	生态系统服务(调节、供给、文化和支持)与人类福祉	连接表征生态系统对人类福祉的影响程度;非线性或随机连接有所涉及;关注管理对生态系统结构的反馈	强调多尺度,生态系统与其所提供的服务的交互作用可发生在单一尺度,也可跨尺度	影响价值评估的驱动因子
脆弱性 <sup>[33]</sup>	关注人类与环境复杂系统的脆弱性,并为其分析与评估构建概念框架	脆弱性(暴露度、敏感性和恢复力)评估组件和背景组件(系统外部人类与环境对系统的影响)	连接表征组件间的因果关系,用箱体表示组件内部的连接;非线性或随机连接有所涉及;反馈作用表述详细	强调多尺度,认为多尺度连接和跨尺度反馈对系统脆弱性产生影响	灾害驱动因子;考虑背景与系统内部交互作用
人与自然系统耦合 <sup>[3,34]</sup>	促进范式转换,强调人与自然在空间、组织和时间尺度上的多层次耦合	人类与自然两类,具体构成取决于研究对象	对系统中存在的多种连接展开详细描述,包括连接间的非线性或随机关系和反馈作用	强调多尺度,认为系统中人与自然的耦合以不同速率在嵌套空间中发生;跨尺度连接表述详细	人与自然的多层次耦合关系;考虑背景与系统内部交互作用
社会生态系统 <sup>[18,35]</sup>	聚焦公共池塘资源,识别影响社会生态系统中自组织结构可持续发展的重要变量	资源系统、资源单位、管理系统和行动者,及其相互作用与结果构成系统主体,相关生态系统及社会、经济和政治环境构成背景组件	通过制度分析与发展(IAD)框架探索变量之间的连接,连接有正负之分;连接间的非线性或随机关系及反馈作用均有所涉及	强调多尺度,认为理解复杂系统的多层嵌套结构和时间周期是识别可持续与否的重要前提;跨尺度连接有所涉及	社会、经济、政治和生态状况

前研究主要集中在社会-生态系统弹性的定量评估,社会-生态系统动态演化和稳态转换等方面。

由于社会-生态系统的复杂性、非线性、多稳态等特征,其弹性的直接量化非常困难,很多学者通过发展系统模型以识别替代指标的方法进行间接评估<sup>[39-41]</sup>,主要包括问题界定、反馈过程辨识、系统模型设计和弹性替代识别等步骤。弹性联盟提出的社会-生态系统弹性评估手册和澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的弹性、适应力和转型评估框架等弹性评估框架,为识别系统边界、理解系统动态、探索系统的交互作用提供了指导。相关研究在利用社会-生态系统框架和弹性评估框架选取相关指标、识别系统边界和反馈过程的基础上,建立包括所有关键要素和反馈过程的系统模型,进而定义并量化系统的弹性<sup>[42,43]</sup>。使用系统动态模型的方法,可以识别系统不同稳态,量化系统对相关扰动的弹性,进而分析不同条件下弹性的变化及影

响因素<sup>[43-45]</sup>。

稳态转换是指系统的结构和功能发生巨大、突然和持续的变化,是理解社会-生态系统演化和弹性变化的重要视角<sup>[21]</sup>。关于稳态转换的研究,主要集中在稳态转换的识别与驱动机制分析两个方面。稳态转换的识别方法包括统计分析和模型分析两大类<sup>[46]</sup>。统计分析基于系统关键变量长时间序列状态变化,采用Mann-Kendall趋势分析、奇异谱分析、序贯T检验等方法,识别稳态转换的关键节点和变换类型,揭示稳态转换的因果机制<sup>[47]</sup>,但对长时间序列数据的积累有较高的要求。模型分析则通过系统动力学(System Dynamics)模型、均衡模型(Equilibrium Models)、智能体模型(Agent-based Models)等方法,选取相关指标,建立系统内部的反馈机制,模拟复杂系统的过程,识别其稳态转换。在识别稳态转换的基础上,稳态转换的影响因素与驱动机制也受到了研究者的关注<sup>[7]</sup>。稳态转换数据

2020年1月

库提供了大量不同类型稳态转换的实例,其中,气候变化和农业相关的活动是最突出的驱动因子<sup>[48]</sup>。针对不同稳态转换之间的相互作用,也有学者研究了稳态转换的级联效应<sup>[49]</sup>。

目前,社会与生态系统的互馈关系研究正在从直接的相互作用深化为间接相互作用,从邻域效应发展为远程耦合,从局地尺度拓展到全球尺度,从简单过程演化为复杂模式<sup>[34,50]</sup>。Rockström 等提出的“地球界限”在全球尺度上量化了地球系统生命承载力<sup>[51]</sup>,并进一步考虑社会界限,提出既可以使自然资源可持续利用又可以保障人类福祉和社会公正的安全空间<sup>[52]</sup>。Bodin 等将社会与自然相互作用的模式进行拆解、定义和形式化,有根据的提出假设,将社会-生态网络结构与社会-生态过程(功能)相关联<sup>[53]</sup>,并从经验上将其与具体的治理挑战和机遇联系起来,实现社会生态关系的定量研究<sup>[54]</sup>。在面对人类行为主导地表过程的“人类世”,社会-生态系统适应性治理通过建立具有适应性的社会权利分配与行为决策机制,使社会-生态系统能够在满足人类所需的生态系统服务的同时实现其可持续性,并为“转型治理(Transformative Governance)”与“协作治理(Collaborative Governance)”提供了基础<sup>[55,56]</sup>。随着全球变化研究的广泛开展,不同尺度的可持续性之间问题的相互联系逐渐得到重视,其中远程耦合概念就是人地耦合系统在尺度效应上的自然延伸。远程耦合框架包括五个相关的组成部分,即:人地耦合系统、流、行动者、机制、和影响<sup>[57]</sup>。

尽管社会-生态系统弹性评估、稳态转换识别和互馈关系适应研究取得了大量进展,目前的研究还存在以下难点和问题:①对于社会-生态系统复杂反馈过程和弹性机制的识别是开展弹性、稳态转换和适应性研究的基础,也是当前社会-生态系统研究的难点与重要突破点;②弹性评估和测度方法仍较薄弱,还没有得到广泛认可的弹性评估框架和评估方法;③选取什么指标和数据刻画社会-生态系统稳态也存在争议,对于稳态转换的影响因素与驱动机制等方面的研究仍显不足;④耦合系统的互馈机制是适应性治理的重要参考,如何识别、分解、定义系统的互馈关系仍需思考;⑤现有的弹性、稳态转换和适应性研究仍主要停留在理论分析和案

例研究层面,如何指导实践仍需要进一步探索。

社会-生态系统研究需要落实到区域景观格局的空间规划上,以达到自然与社会土地利用的平衡和优化,形成可持续的社会-生态系统结构与功能<sup>[58]</sup>。土地利用是人类对土地自然属性的利用方式和使用状况,土地利用变化受社会-生态系统反馈的影响<sup>[59]</sup>,不同的稳态下土地利用的格局也不同<sup>[38]</sup>,通过研究社会-生态系统动态演化与互馈机制,建立区域社会-生态系统耦合模拟模型或模型系统,实现土地利用的权衡与优化是将社会-生态系统研究实践化的重要途径。模型需要耦合格局与过程,自然与社会多个方面,实现多模型集成,集成分析也需要依赖系统整体的分析方法,分析探讨系统的脆弱性、弹性、适应力等<sup>[60]</sup>。通过模型模拟,情境分析和优化调控,可以探讨区域可持续发展的方向和途径<sup>[61,62]</sup>。

#### 4 黄土高原的社会-生态系统研究

黄土高原地区是中国人口、资源、环境矛盾最集中的区域之一,是一个生态环境脆弱区、气候变化敏感区,也是黄河重要的产水区和绝大部分泥沙的来源区,关系到黄河水沙关系和上下游协调,是社会-生态系统研究的理想区域。作为中国乃至全球水土流失最为严重的地区之一,黄土高原位于半干旱和干旱区域,是中国水土保持和生态建设的重点地区。近几十年来,该区域生态系统发生变化。伴随着耕地与水体缩减,非农业植被覆盖与建筑用地显著增加<sup>[12]</sup>。生态恢复与社会发展加剧了水资源与土地资源的供需矛盾,改善生态环境、保障粮食安全与促进区域发展成为黄土高原社会-生态研究面临的主要挑战。此外,黄土高原自然环境的脆弱性、生态保护的必要性及其对黄河下游水沙协调的重要性使得该区域区别于其他社会-生态系统。故识别该系统关键要素,厘清其社会-生态变化过程、驱动机制与互馈作用是区域可持续发展的重要途径。

目前,黄土高原生态综合研究主要关注区域生态系统的变化及驱动机制、退耕还林还草等生态工程的生态效应以及工程实施中存在的问题与解决方案等。相关研究分析了黄土高原的土地利用和土地覆被变化、植被覆盖变化、水沙变化等问题<sup>[11,12,63]</sup>,评估了黄土高原土壤保持、产水、固碳、物质供给等

多项生态系统服务的时空变化和影响因素<sup>[11,64,65]</sup>,量化分析了黄土高原多尺度不同生态系统服务间的权衡和协同关系<sup>[66,67]</sup>,发展了区域生态系统服务空间评估与优化工具<sup>[68]</sup>。

相关研究表明,随着一系列生态工程的开展,黄土高原的生态环境得到显著改善。从植被覆盖指数(NDVI)来看,20世纪80年代以来黄土高原植被指数呈现增长趋势。2000—2015年,黄土高原植被指数增长率远高于全国平均水平<sup>[69]</sup>。在固碳方面,黄土高原净生态系统生产力(NEP)显著增加,主要集中在黄土丘陵沟壑区等退耕还林还草工程实施区域<sup>[64]</sup>。在土壤保持方面,2000—2015年,平均土壤侵蚀由47.37 t/hm<sup>2</sup>下降到18.77 t/hm<sup>2</sup>,黄河黄土高原段输沙量呈现显著下降趋势<sup>[69]</sup>。相关研究发现坝库、梯田等工程措施是70—90年代黄土高原产沙减少的主要原因,占54%。2000年以来,随着退耕还林还草工程的实施,植被措施成为了土壤保持的主要贡献者,占57%<sup>[63]</sup>。

与此同时,黄土高原的社会经济也发生了显著的变化。根据黄土高原各县统计数据,2000—2015年黄土高原农林牧渔总产值增加164.5%,农林牧渔从业比例从72.3%下降到57.9%,2000—2010年黄土高原城市化率提高13.2%<sup>[69]</sup>。在粮食生产方面,2015年黄土高原粮食总产量比2000年增加56.7%,增加幅度高于同期全国平均水平。但仍有21.3%的县粮食产量下降,集中在退耕还林还草的主要实施区<sup>[69]</sup>。黄土高原社会经济发展水平的提升受到城市化、工业化、经济发展、生态工程等多种社会经济、政策因素的共同影响。退耕工程促使农民转变生产生活方式,大量剩余劳动力从事非农劳动或外出务工,家庭收入结构发生变化<sup>[70]</sup>,另一方面,社会经济的发展也吸引劳动力从农村向城市转移,减轻农村土地压力<sup>[71,72]</sup>。

虽然黄土高原生态系统服务整体向健康方向发展,但也面临区域产水量下降,植被恢复是否稳定和区域粮食生产等问题。植被建设虽然带来各项生态系统服务的提升,但不合理的建设布局也造成蒸散发增加,流域产流和土壤含水量显著下降<sup>[73]</sup>,部分地区出现了土壤干层和“小老头树”等现象<sup>[74]</sup>。综合考虑区域产水、耗水和用水来看,黄土高原植被恢复已接近水资源植被承载力的阈值<sup>[13]</sup>,植被恢

复的稳定性和可持续性需要加强。大规模的退耕还林工程也威胁到区域粮食安全<sup>[14]</sup>。此外,现有的研究仍主要集中在生态系统和环境效应的变化,对社会系统和生态系统的交互作用和互馈机制关注较少。以黄土高原的生态工程建设为例,正确认识生态工程建设对社会-生态系统的具体影响需要同时考虑其他社会经济、政策和环境因素的相互作用<sup>[71]</sup>,揭示其具体影响路径<sup>[69]</sup>。解决黄土高原面临的社会生态问题,实现区域可持续发展,需要加强社会-生态系统耦合分析,研究黄土高原区域社会-生态系统各要素变化及互馈机制,为黄土高原生态建设提供科学基础。

## 5 研究展望

黄土高原社会-生态系统发生了显著变化,是开展社会-生态系统耦合研究的理想区域,以往研究主要集中在生态系统方面,人地综合研究多为定性描述。未来开展黄土高原社会-生态系统研究,应重点关注以下方面:

(1)黄土高原社会-生态系统变化过程与驱动机制。以生态系统服务为核心,连接生态系统结构、过程与社会系统结构和功能,构建黄土高原社会-生态系统评估指标。分析自20世纪80年代以来黄土高原社会-生态系统结构及其主要要素的动态变化和区域差异。探讨社会-生态系统结构及要素变化的自然和社会经济驱动机制。

(2)黄土高原社会-生态系统互馈机制研究。识别黄土高原社会系统与生态系统的相互作用和复杂反馈机制。选取表征社会-生态系统状态的指标,发展稳态转换识别方法,探究稳态转换的关键节点,揭示稳态转换的驱动机制。

(3)面向可持续发展的黄土高原土地利用优化。发展耦合社会系统与生态系统的土地利用权衡与优化模型。模拟不同情景下社会-生态系统状态与区域可持续发展目标实现情况,确定统筹区域自然与社会需求的土地利用配置方案。

综上,通过发展社会-生态系统动态机制分析方法和稳态转换识别方法,揭示黄土高原社会-生态系统的变化过程与驱动机制、社会系统与生态系统的互馈机制,建立耦合社会系统与生态系统的土地利用权衡与优化模型,提出可持续的土地利用优化配置方案,可以推动社会-生态系统耦合研究的

2020年1月

理论与方法创新,为黄土高原的适应性治理和可持续发展提供科学依据。

### 参考文献(References):

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [2] Sachs J D. Sustainable development[J]. *Science*, 2004, 304(5671): 649-649.
- [3] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems[J]. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [4] Levin S, Xepapadeas T, Crépin A-S, et al. Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications[J]. *Environment and Development Economics*, 2013, 18(2): 111-132.
- [5] Glaser M, Krause G, Ratter B, et al. Human/Nature interaction in the anthropocene potential of social-ecological systems analysis[J]. *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2008, 17(1): 77-80.
- [6] Leslie H M, Basurto X, Nenadovic M, et al. Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(19): 5979-5984.
- [7] Reyers B, Folke C, Moore M L, et al. Social-ecological systems insights for navigating the dynamics of the anthropocene[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43(1): 267-289.
- [8] Folke C, Carpenter S R, Walker B, et al. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability[J]. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): 299-305.
- [9] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 社会-生态系统恢复力研究进展: 基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 367-377. [Huang X J, Wang B, Liu M M, et al. Research progress on socio-ecosystem resilience: A bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 367-377.]
- [10] 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务[J]. *地理科学*, 2015, 35(8): 939-945. [Fu B J, Leng S Y, Song C Q. The characteristics and tasks of geography in the New Era[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 939-945.]
- [11] Lv Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [12] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [13] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [14] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [15] Fischer J, Gardner T A, Bennett E M, et al. Advancing sustainability through mainstreaming a social-ecological systems perspective[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 144-149.
- [16] Mace G M. Whose conservation?[J]. *Science*, 2014, 345(6204): 1558-1560.
- [17] Liu J G, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability[J]. *Science*, 2015, DOI: 10.1126/science.1258832.
- [18] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [19] Berkes F, Folke C, Colding J. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [20] Guerrero A M, Bennett N J, Wilson K A, et al. Achieving the promise of integration in social-ecological research: A review and prospectus[J]. *Ecology and Society*, 2018, DOI: 10.5751/ES-10232-230338.
- [21] Biggs R, Carpenter S R, Brock W A. Turning back from the brink: Detecting an impending regime shift in time to avert it[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(3): 826-831.
- [22] Cinner J E, Huchery C, MacNeil M A, et al. Bright spots among the world's coral reefs[J]. *Nature*, 2016, 535(7612): 416-419.
- [23] Kajikawa Y, Tacona F, Yamaguchi K. Sustainability science: The changing landscape of sustainability research[J]. *Sustainability Science*, 2014, 9(4): 431-438.
- [24] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [25] Walker B, Carpenter S R, Anderies J M, et al. Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach[J]. *Conservation Ecology*, 2002, 6(1): 14-31.
- [26] McGinnis M D, Ostrom E. Social-ecological system framework: Initial changes and continuing challenges[J]. *Ecology and Society*, 2014, DOI: 10.5751/es-06387-190230.
- [27] Simone P, Nicola U, Kathryn L S, et al. Frontiers in socio-environmental research: Components, connections, scale, and context[J]. *Ecology and Society*, 2018, DOI: 10.5751/ES-10280-230323.
- [28] Machlis G E, Force J E, Burch W R. The human ecosystem Part I: The human ecosystem as an organizing concept in ecosystem management[J]. *Society & Natural Resources*, 1997, 10(4): 347-367.
- [29] Carpenter S, Walker B, Anderies J M, et al. From metaphor to measurement: Resilience of what to what?[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765-781.
- [30] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*[M]. Washington: Island Press, 2001.
- [31] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.

- [32] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393–408.
- [33] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074–8079.
- [34] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Coupled human and natural systems[J]. *Ambio*, 2007, 36(8): 639–649.
- [35] Ostrom E. A diagnostic approach for going beyond panaceas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(39): 15181–15187.
- [36] Angeler D G, Allen C R. Quantifying resilience[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 617–624.
- [37] Walker B H, Meyers J A. Thresholds in ecological and social–ecological systems: A developing database[J]. *Ecology and Society*, 2004, DOI: 10.5751/ES-00664-090203.
- [38] Walker B, Hollin C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 2004, DOI: 10.1890/04-0463.
- [39] Walker B, Salt D. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*[M]. Washington: Island Press, 2012.
- [40] Darnhofer I, Fairweather J, Moller H. Assessing a farm’s sustainability: Insights from resilience thinking[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2010, 8(3): 186–198.
- [41] Carpenter S R, Westley F, Turner M G. Surrogates for resilience of social–ecological systems[J]. *Ecosystems*, 2005, 8: 941–944.
- [42] Homayounfar M, Muneeppeerakul R, Anderies J M, et al. Linking resilience and robustness and uncovering their trade–offs in coupled infrastructure systems[J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(4): 1159–1168.
- [43] Meyer K, Hoyer–Leitzel A, Iams S, et al. Quantifying resilience to recurrent ecosystem disturbances using flow–kick dynamics[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(11): 671–678.
- [44] Lade S J, Tavoni A, Levin S A, et al. Regime shifts in a social–ecological system[J]. *Theoretical Ecology*, 2013, 6(3): 359–372.
- [45] Walker B, Pearson L, Harris M, et al. Incorporating resilience in the assessment of inclusive wealth: An example from South East Australia[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2010, 45(2): 183–202.
- [46] Filatova T, Polhill J G, van Ewijk S. Regime shifts in coupled socio–environmental systems: Review of modelling challenges and approaches[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 333–347.
- [47] Gunderson L H, Cosens B A, Chaffin B C, et al. Regime shifts and panarchies in regional scale social–ecological water systems[J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(1): 1–31.
- [48] Biggs R, Peterson G D, Rocha J C. The regime shifts database: A framework for analyzing regime shifts in social–ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 2018, DOI: 10.5751/ES-10264-230309.
- [49] Rocha J C, Peterson G D, Bodin O, et al. Cascading regime shifts within and across scales[J]. *Science*, 2018, 362(6421): 1379–1383.
- [50] Hull V, Liu J G. Telecoupling: A new frontier for global sustainability[J]. *Ecology and Society*, 2018, DOI: 10.5751/ES-10494-230441.
- [51] Rockström J, Steffen W L, Noone K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472–475.
- [52] Rockström J, Steffen W L, Noone K, et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity[J]. *Ecology and Society*, 2009, DOI: 10.5751/ES-03180-140232.
- [53] Bodin Ö, Crona B, Thyresson M, et al. Conservation success as a function of good alignment of social and ecological structures and processes[J]. *Conservation Biology*, 2014, 28(5): 1371–1379.
- [54] Bodin Ö, Alexander S M, Baggio J, et al. Improving network approaches to the study of complex social–ecological interdependencies[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(7): 551–559.
- [55] Chaffin B C, Garmestani A S, Gunderson L H, et al. Transformative environmental governance[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2016, 41(1): 399–423.
- [56] Ansell C, Gash A. Collaborative governance in theory and practice [J]. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 2008, 18(4): 543–571.
- [57] Liu J G, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world[J]. *Ecology and Society*, 2013, 36(23): 7870–7885.
- [58] Ellis E C. Sharing the land between nature and people[J]. *Science*, 2019, 364(6447): 1226–1228.
- [59] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio–ecological feedback versus socio–economic change[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108–118.
- [60] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 1–7. [Fu B J. Thoughts on the recent development of physical geography[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 1–7.]
- [61] Gao L, Bryan B A. Finding pathways to national–scale land–sector sustainability[J]. *Nature*, 2017, 544(7649): 217–222.
- [62] Kates R W. What kind of a science is sustainability science?[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(49): 19449–19450.
- [63] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 9(1): 38–41.
- [64] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China’s Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2013, DOI: 10.1038/srep02846.
- [65] Fu B J, Liu Y, Lv Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284–293.

- [66] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1250-1263.
- [67] Lv N, Fu B J, Jin T T, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [68] Hu H T, Fu B J, Lu Y H, et al. SAORES: A spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 30(3): 547-560.
- [69] Wu X T, Wang S, Fu B J, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 565-573.
- [70] Wu X T, Wang S, Fu B J, et al. Pathways from payments for ecosystem services program to socioeconomic outcomes[J]. *Ecosystem Services*, 2019, DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101005.
- [71] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [72] Yang H B, Yang W, Zhang J D, et al. Revealing pathways from payments for ecosystem services to socioeconomic outcomes[J]. *Science Advances*, 2018, DOI: 10.1126/sciadv.aao6652.
- [73] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: Achievements, problems, synthesis, and applications[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [74] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.

## Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau

WANG Shuai<sup>1</sup>, FU Bojie<sup>1</sup>, WU Xutong<sup>2</sup>, WANG Yaping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Driven by global environmental changes and human activities, the dynamic changes of social systems and ecological systems are increasing. Revealing the interaction mechanisms of this coupled system is the scientific basis for maintaining and enhancing resilience and sustainability. The Loess Plateau (LP) is one of the regions under great pressure from population, resources, and environment in China. It is also an important water and sediment source area of the Yellow River. Rational land use and the coordination of soil and water conservation with water resources use and sediment control are the main requirements of watershed management and regional sustainable development in the lower reaches of the Yellow River Basin. Based on the frontier research of coupled social-ecological system (SES) and the national needs for sustainable development and ecological construction, feedback mechanisms for regional social and ecological systems and coupled SES simulation are the key issues of research. Social-ecological system research in the Loess Plateau needs to illustrate the dynamics and mechanisms of SES evolution, develop methods for analyzing system dynamics and identifying regime shifts, and develop land-use optimization models for sustainable development in the LP, which are useful for the development of theories of SES and practices of sustainable development of the Loess Plateau.

**Key words:** social-ecological systems; feedback mechanism; sustainability; resilience; regime shift; coupled human and environment systems; Loess Plateau