中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

生态系统服务权衡最新研究进展

邓楚雄，朱大美，聂小东，刘唱唱，李忠武，刘俊宇，张光叶，肖林辉，张宇婷

引用本文:
邓楚雄, 朱大美, 聂小东, 等. 生态系统服务权衡最新研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1509–1522.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200062

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究

Study on dynamic changes in ecosystem service values in Qinglong County based on coefficient correction

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 971–980 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180927

耦合景观格局与生态系统服务的区域生态承载力评价

Evaluation of regional ecological carrying capacity coupling with landscape pattern and ecosystem services

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 694–704 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180910

市域尺度两种生态系统服务评价方法对比研究

Comparative study on two evaluating methods of ecosystem services at city–scale

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1315–1323 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171159

东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析

Synergies and trade–offs of agro–ecosystem in dry–farming areas in Northeast China

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 892–902 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170903

重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析

Temporal and spatial variation and driving factors of farmland ecological service value in Chongqing

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1637–1648 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190192

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 10 月 第 28 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2020, 28(10): 1509−1522

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200062

邓楚雄, 朱大美, 聂小东, 刘唱唱, 李忠武, 刘俊宇, 张光叶, 肖林辉, 张宇婷. 生态系统服务权衡最新研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1509−1522
DENG C X, ZHU D M, NIE X D, LIU C C, LI Z W, LIU J Y, ZHANG G Y, XIAO L H, ZHANG Y T. Progress of research regarding the trade-offs of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1509−1522

生态系统服务权衡最新研究进展*

邓楚雄, 朱大美, 聂小东, 刘唱唱, 李忠武**, 刘俊宇, 张光叶, 肖林辉, 张宇婷

(湖南师范大学资源与环境科学学院 长沙 410081)

摘 要: 生态系统服务权衡研究对协调生态环境保护和社会经济发展至关重要。为推动生态系统服务管理和提升人类福祉, 本文以Web of Science核心合集(WOS)和中国科学引文数据库(CSCD)为数据源, 运用文献计量分析法, 系统梳理和总结生态系统服务权衡研究的学科知识基础、科学领域结构和热点变化等发展现状以及最新研究进展。研究表明: 1)不同研究层面上, 生态系统服务间的权衡关系受外部风险和人类需求、参数选取和服务提供者及区域差异性和不均衡性的影响。2)研究方法主要有基于关系识别和具体表征的权衡分析、权衡模拟和预测的模型量化分析和生态系统服务权衡管理优化的多准则分析 3 类。3)生态系统服务权衡关键驱动因子为城市化、生态工程和气候变化。基于此, 我们认为把握生态系统服务权衡不同研究层面的关联特征、创新和优化生态系统服务权衡研究方法、准确甄别生态系统服务权衡关键驱动因子以及充分整合多维生态系统服务权衡资源搭建数据共享平台是未来研究的重点。

关键词: 生态系统服务权衡; 文献计量; 评估方法; 供需特征; 关键驱动因子

中图分类号: K9 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Progress of research regarding the trade-offs of ecosystem services*

DENG Chuxiong, ZHU Damei, NIE Xiaodong, LIU Changchang, LI Zhongwu**, LIU Junyu, ZHANG Guangye, XIAO Linhui, ZHANG Yuting

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The extreme intensification of human activities and global climate change have exerted immense pressure on the ecological environment. According to the Millennium Ecosystem Services Assessment, approximately 60% of ecosystem services are in decline globally. Therefore, to better maintain ecological health, promote human well-being, and achieve more sustainability in harmonizing environmental protection and socio-economic development, there remains an urgent need to summarize recent studies on the trade-offs of ecosystem services. In this study, based on the Web of Science Core Collection Database (WOS) and the Chinese Science Citation Database (CSCD), CiteSpace was used to determine the current situation and analyze the latest research on ecosystem services trade-offs by choosing different techniques to create a co-citation cluster view of the citations, a knowledge map of the co-occurrence of subject structure, and a key word emergence map. The results showed that: 1) the trade-offs between ecosystem services are affected by external risks and human needs at the ecosystem

* 国家自然科学基金项目(U19A2047)、湖南省教育厅重点项目(18A044)和湖南省研究生科研创新项目(CX2018B298)资助
** 通信作者: 李忠武, 主要研究方向为土壤侵蚀与碳循环。E-mail: lzw17002@hunnu.edu.cn
邓楚雄, 主要研究方向为资源评价与生态经济。E-mail: dcxppd@hunnu.edu.cn
收稿日期: 2020-02-03 接受日期: 2020-05-29
* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U19A2047), the Key Project of Department of Education of Hunan Province (18A044) and the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX2018B298).
** Corresponding author, E-mail: lzw17002@hunnu.edu.cn
Received Feb. 3, 2020; accepted May 29, 2020

level, parameter selection and service providers at the landscape level, and regional differences and heterogeneity at the regional level. 2) Research methods mainly include three categories: trade-off analysis based on relationship recognition and concrete characterization, a module-based quantitative analysis of trade-off simulation and prediction, and multi-criterion analysis toward the optimization of ecosystem service trade-off management. 3) Urbanization, ecological engineering, and climate change are three key drivers of the trade-offs associated with ecosystem services. Most of the trade-offs between supply services, regulation, and support services are caused by urbanization. Ecological engineering improves ecosystem regulation and support services, but reduces supply services to some extent. Global climate change increases external risks while decreasing ecosystem service provision, regulation, and support functions. Based on this analysis, understanding the associated characteristics of ecosystem service trade-offs at various research levels, modifying and innovating study methods, identifying the major factors, and finally, integrating resources to build a data-sharing platform for ecosystem service trade-offs should be the focus of future research.

Keywords: Ecosystem services trade-offs; Literature statistical analysis; Assessment methods; Supply and demand characteristics; Key driving factors

自 1967 年“权衡”一词首次出现在物理学领域，用于探讨信号可检测性、准确性、分辨率和背景抑制间的关系以来[1]，越来越多的研究领域中都引入权衡以理解事物间的相互作用关系，生态系统服务领域也不例外。生态系统服务权衡反映生态系统服务间的“此消彼长”关系，即一种生态系统服务使用的增加会造成其他生态系统服务的减少[2]。

生态系统服务权衡研究是理解多种生态系统服务间关系的基础，有利于减小社会经济发展与生态保护目标间的冲突。自千年生态系统服务(MA)计划实施以来[3]，生态系统服务权衡逐渐成为了生态学、地理学、管理学、经济学和环境学等学科的研究热点和重要领域，得到了学术界和政府的高度关注[4-6]。在世界人口不断增长和资源日渐衰竭的背景下，开展生态系统服务权衡研究对合理开发利用自然资源和积极应对全球气候变化有重要作用。目前，生态系统服务权衡研究已积累了大量较为可观和丰硕的成果，但仍存在一些问题和局限。

近年来，“3S”和人工智能等先进技术的广泛运用及新理论的涌现，极大地促进了生态系统服务权衡的发展，有必要跟踪和梳理其最新进展，为未来研究提供借鉴。因此，本文以 WOS 和 CSCD 数据库为数据源，运用文献计量分析法，借助 CiteSpace 工具，梳理和总结了生态系统服务权衡研究的学科知识基础、科学领域结构和热点变化等发展现状，系统评述了不同研究层面上生态系统服务间的权衡与协同关系、权衡研究方法和关键驱动因子，提出当前生态系统服务权衡研究存在的问题和指明未来发展方向，以期为推动生态系统服务管理和推进理论成果转化提供参考。

1 生态系统服务权衡研究现状

以 WOS 和 CSCD 数据库收录的论文为研究对象。登录 WOS 平台，在核心合集数据库中检索主题为 Ecosystem services and tradeoffs 的文献，经筛选，发现 2005—2019 年共计 653 篇；在 CSCD 数据库，查询主题为“生态系统服务”并且“权衡”和“生态系统服务”并且“协同”的文献，发现 2007—2019 年共计 209 篇；经文献去重后，分别得到 652 篇和 152 篇题录文献，并将其导入 CiteSpace V 软件，从文献共被引聚类、Category 共现、关键词突现等多维度探析和对比国内外生态系统服权衡研究的学科知识基础、科学领域结构和热点，以更好地把握其国内外发展现状。

1.1 生态系统服务权衡研究的学科知识基础

为了解生态系统服务权衡领域的知识体系和学科知识基础[7]，本文以 cited references 和 cited author 为探测类型，绘制共被引聚类视图(图 1)。从共被引看，在 WOS 数据库中，自 2007 年以来，Nelson、Raudsepp-Hearne、Bennett 的文献共被引次数分别为 155、143、115，稳居前三；此外，Goldstein、Chan、Burkhard、De Groot、Daily、Polasky 等研究成果的共被引次数为 65~92，比较领先。在 CSCD 数据库中，自 2011 年以来，李双成的文章共被引次数为 68，位居该检索时段和领域内的榜首；其次是傅伯杰，自 2013 年以来，其文章共被引次数为 63；此外，彭建、戴尔阜、李鹏、谢高地、Nelson、Raudsepp-Hearne、Bennett 等的研究成果的共被引次数为 16~30。从中心性强弱程度看，CSCD 数据库中，中心性>0.1 的有 BAI(0.23)、李鹏(0.22)、李双成(0.15)、傅伯杰(0.14)、Bennett(0.13)、张立伟(0.13)、 Burkhard(0.11)；WOS 数据库中，中心

性>0.1 的有 Naidoo(0.16)、Carpenter(0.15)、Bennett(0.14)、Nelson(0.12)、Burkhard(0.11)、Polasky(0.11)、Tilman(0.11)、Raudsepp-Hearne(0.1)、Daily(0.1)、Costanza(0.1)、Kremen(0.1)。从聚类词看, WOS 数据库检索的结果重点关注 spatial covariation(#1、#2、#7、#8)、生态系统服务间的关系(#3、#4、#5)、土地利用对生态系统服务权衡的影响(#0)、重大挑战(#5)等 4 个方面; CSCD 数据库中主要侧重于生态系统服务权衡评估方法(#2、#3、#8、#9)、时空变化或不同研究层面上的关系变化(#0、#4、#10)、生态系统服务功能和管理(#1、#7)、前沿问题(#5)等 4 个方面。总的来说, 研究者成果的共被引次数、中心性强弱及其研究侧重点等为未来生态系统服务权衡的研究奠定了重要的知识基础。

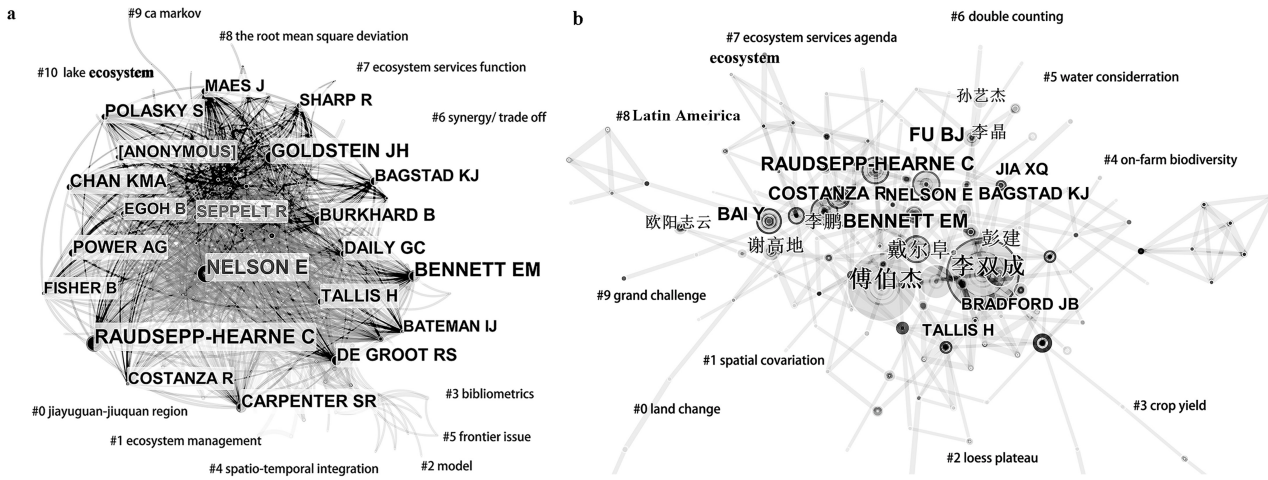

图 1　WOS(a)和 CSCD(b)数据库题录文献共被引聚类视图

Fig. 1　Bibliographic literature co-citation clustering view in WOS (a) and CSCD (b) databases

1.2　生态系统服务权衡研究的科学领域结构

文献类别在一定程度上反映了研究的学科结构以及所代表学科之间的联系。共词方法分析科学结构及演化的运用十分广泛[8]。本文利用节点类型“Category”, Years per slice 选择 1, 剪裁方式采取“Pathfinder”进行共现分析(图 2), 以探究生态系服务权衡研究的优势领域。本文根据共现和检索结果中所涉及研究方向的发文数量判断该领域主要的科学领域结构, 在 WOS 数据库中, 所发表文献涉及研究方向排名前 5 的是 Environmental Sciences & Ecology (456 篇)、Environmental Sciences(347 篇)、Ecology(219 篇)、Environmental Studies(134 篇)、Science & Technology-Other Topics(106 篇), 可看出环境科学和生态学是生态系统服务权衡研究主要的

图 2　WOS 和 CSCD 数据库题录文献主要研究方向的共现知识图谱

Fig. 2　Bibliographic literature co-occurrence knowledge map of main research directions in WOS and CSCD databases

优势学科; 此外, Agriculture(68 篇)、Water Resources (47 篇)、Business & Economics(27 篇)、Economics(26 篇)、Urban Studies(20 篇)、Geography (19 篇)等研究方向与生态系统服务权衡有着较大关联。在 CSCD 数据库中, 发现 Environmental Sciences Ecology 方向的文献为 59 篇, 约占总发文量的 1/3, 充分说明该研究方向在生态系统服务权衡研究中的重要性和关联性; 研究方向 Life Sciences Biomedicine Other Topics(22 篇)、Business Economics(8 篇)、Agriculture(16 篇)、Forestry(4 篇)等的发文量在总发文量中也占有较大比重。可以看出, 生态系统服务权衡研究的学科结构比较广泛, 各学者从不同的学科视角或多学科视角研究生态系统服务权衡, 集中体现了生态系统服务权衡研究中, 多学科交叉和融合的趋势逐渐增强。

1.3 生态系统服务权衡的研究热点及演变

研究热点是一个研究领域中最近、最具有发展潜力的研究主题, 代表学科未来发展方向[9-10]。关键词突现检测可反映某个专业兴趣的变化, 从而揭示不同时期的研究热点[11]。本文运用关键词突现分析表示该领域的研究热点和前沿。

WOS 数据库中(表 1), 从突现强度来看, 连接强度较高的有“ecology”(4.90)、“wetland”(4.33)、“urban expansion”(2.97)、“InVEST model”(3.49)、“indicator” (4.42), 集中反映了其对生态系统服务权衡的影响程度; 从关键词及起始年份看, 在 WOS 数据库中, “economic value”(2009—2011)、“valuation”(2011—2012)、“gi”(2013—2016)、“InVEST model”(2017—2019)等关键词表明, 2009—2019 年, 生态系统服务权衡的研究热点之一为利用 gi 指数、InVEST model 等工具评估和量化生态系统服务权衡及其经济价值; 由“indicator”(2014—2016)、“urban expansion” (2017—2019)等关键词可知, 2014—2019 年, 国外学者侧重于关注城市化及其背后因素等对生态系统服务权衡的影响, 着重关注形成机制研究; 由“ecology” (2011—2014)、“environment” (2013—2014)等可知, 随着生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)会议的召开以及联合国 2015 年后《全球发展议程》的提出, 2011—2019 年, 国外的研究重点在生态系统(环境)的可持续性和管理; 此外, 由“wetland” (2009—2014)、“the United States”(2015—2016)等知, 国外的研究比较注重从各地区、各层面出发研究生态系统服务权衡。

表 1 WOS 数据库中前 16 个关键词突现表

Table 1 Top 16 keywords with the strongest citation bursts in WOS database

Keyword	Year	Strength	Begin	End	2005–2019
need	2005	3.087 1	2006	2013	
water quality	2005	2.719 4	2008	2014	
wetland	2005	4.327 6	2009	2014	
economic value	2005	2.514 9	2009	2011	
benefit	2005	2.671 0	2011	2012	
ecology	2005	4.896 9	2011	2014	
valuation	2005	2.627 3	2011	2012	
gi	2005	3.290 7	2013	2016	
habitat	2005	3.605 0	2013	2014	
indicator	2005	4.422 3	2014	2016	
environment	2005	2.572 7	2013	2014	
the United States	2005	2.722 9	2015	2016	
deforestation	2005	2.722 9	2015	2016	
payment	2005	2.722 9	2015	2016	
urban expansion	2005	2.971 9	2017	2019	
InVEST model	2005	3.490 8	2017	2019	

CSCD 数据库中(表 2), 连接强度较高的有“生态系统服务”(3.97)、“土壤保持”(1.27)、“生态系统服务价值”(1.01)、“生态用地”(0.93)等, 这些词的连接强度集中反映了其对生态系统服务权衡的影响程度。在 CSCD 数据库中, 从热点词“生态系统服务”(2007—2014)、“生态服务价值”(2015—2016)、“价

值评估”(2015—2016)、“生态系统服务价值”(2017—2019)可知, 2007—2019 年, 国内生态系统服务权衡研究侧重于生态系统服务价值评估; 由“生态用地”(2015—2016)、“京津冀城市群”(2017—2019)可知, 近 5 年国内侧重于研究土地利用变化、经济发展与生态建设对生态系统服务权衡的影响, 且随着社会经济的快速发展, 该研究热点可能得到持续关注。

表 2　CSCD 数据库中前 12 个关键词突现表

Table 2　Top 12 keywords with the strongest citation bursts in CSCD database

关键词	Keyword	Year	Strength	Begin	End	2007–2019
生态系统服务	Ecosystem services	2007	3.969 7	2007	2014	
土壤保持	Soil conservation	2007	1.271 3	2013	2014	
权衡	Tradeoffs	2007	1.827 6	2015	2016	
生态系统	Ecosystem	2007	1.409 6	2015	2016	
生态服务价值	Eco-services value	2007	0.946 9	2015	2016	
价值评估	Value evaluation	2007	0.933 5	2015	2016	
生态用地	Ecological land	2007	0.933 5	2015	2016	
InVEST 模型	InVEST model	2007	0.229 6	2015	2016	
生态安全	Ecological security	2007	1.010 5	2017	2019	
生态系统服务价值	Ecosystem services value	2007	1.010 5	2017	2019	
京津冀城市群	Beijing-Tianjin-Hebei city cluster	2007	0.669 3	2017	2019	
生态	Ecology	2007	0.669 3	2017	2019	

综合分析学科知识基础、科学领域结构、研究热点和前沿等变化可知, 国内外学者的研究成果为生态系统服务权衡研究奠定了坚实的学科知识基础, 能够有机地将各学科内容融合在生态系统服务权衡研究中。随着时间的不断推移, 结合关键词出现次数看, 研究热点发生了一些变化, 但总体来说, 国内外现有研究热点主要于生态系统服务权衡的不同研究层面(wetland、the United States、生态系统、京津冀城市群、空间分异)、研究方法(InVEST model、valuation、情景、gi)和驱动因子(indicator、urban expansion、生态用地、人工林、气候变化)等方面积累了大量研究成果, 下文将从这 3 方面跟踪其最新研究进展。

2　生态系统服务权衡研究最新进展

2.1　不同研究层面上生态系统服务间的权衡关系

生态系统服务间的关系因研究层面不同而体现空间差异化特征, 多层面理解生态系统服务间的关系有利于促进经济与生态的协同发展。本文主要从生态系统、景观和区域 3 个层面探讨生态系统服务权衡关系特征, 从而为生态系统服务管理提供理论依据。

2.1.1　生态系统层面上, 生态系统服务间的权衡关系受外部风险和人类需求影响

探讨生态系统层面上生态系统服务间的权衡与协同关系, 需要充分考虑生态系统服务供给与人类需求。本文以森林生态系统为例概括生态系统层面上生态系统服务间的关系。

在国家森林生态系统中, 法国阿尔卑斯山森林的研究表明, 作物生产、植物多样性与休闲旅游呈负相关关系, 木材生产、碳储存和水量调节间呈多重正相关关系[12]。当考虑外部风险和人类需求时, 生态系统服务间的关系存在显著差异。德舒特美国国家森林的研究发现, 森林能为野生动物提供栖息地, 但森林野火的发生破坏土壤稳定性, 增加了沉积, 影响了水质[13]; 当人类管理美国弗洛里达州东南部湿地松森林时, 碳储量增加, 但会影响水产量, 如果对灌溉用水有需求, 更多的木材将导致更少的水产量, 如果优先考虑木材生产, 将导致树木生物量和碳储存减少, 伐木减少的木材将导致更多的水产量, 进一步导致更多的灌溉用水或增加径流、沉积和洪水[14]。在热带森林生态系统中, 固碳、木材生产和作物授粉之间存在经济权衡, 若仅考虑授粉服务时, 不同生态系统服务之间潜在的权衡可能导致造林项目的吸引力降低[15], 但碳固存的经济激励将对供水和生物多样性产生负面影响[16]; 温带森林生态系统控制土壤侵蚀, 防止了水流与沉积物的超载, 却增加了营养负荷, 减少天然和人工水体中的有效氧含量; 此外, 虽墨西哥温带森林供应了大量食物和木材, 但导致调节和文化服务下降[16-17]。总的来说, 生态系统层面上, 生态系统服务间的权衡关系深受人类偏好和外部风险的影响。

2.1.2 景观层面上，生态系统服务权衡关系随选取参数和服务提供者而变化

跨景观管理多个生态系统服务是生态系统管理的重要环节。景观层面上分析生态系统服务权衡关系，有利于促进景观格局的空间优化配置和保证景观生态的完整性。

为探究生态系统服务供给与社会需求的权衡，学者们综合考虑生物物理、社会文化和经济 3 个维度进行不同景观单元评估，表明种植作物带来的增产增收却损害了脊椎动物的栖息地，调节服务(水流维持和气候调节)比供应服务更具价值，由于农业集约化，种植作物与维持生境和土壤侵蚀呈显著负相关，但增加了氮肥排放量和加剧水污染[18]。农业景观提供调节土壤和水质、固碳、支持生物多样性和文化服务的同时，也造成了野生动物栖息地丧失、营养物质流失、水道沉积、温室气体排放增加以及农药中毒等问题[19]。在 137 个城市的混合利用景观提供的 12 种生态系统服务间的权衡关系研究中，作物产量与其他 9 项生态系统服务呈负相关，猪肉产量与其他 5 项生态系统服务功能呈负相关，表明景观层面上的生态系统服务的供给服务与大部分调节和文化生态系统服务之间存在权衡关系[20]。根据生态系统服务分类来看，该项研究涉及的城市和生态系统服务种类多，研究结果的适用性高，但生态系统服务供给与空间异质性间的关系仍需深入探讨[21]。基于此，一些学者使用景观指标来量化景观层面上生态系统服务的多样性和异质性，认为其与当地的环境背景、生态参数以及生态系统服务提供紧密关联[22-23]。因此，在景观层面上探讨生态系统服务权衡关系时，需清晰认识各生态参数的代表意义和不同景观单元间的社会经济联系情况。

2.1.3 区域层面上，区域之间和区域内部生态系统服务间的关系差异显著

厘清区域层面上生态系统服务权衡关系，有利于促进区域协同发展。通过文献阅读与梳理，发现区域层面上，生态系统服务间的关系在区域之间和区域内部均存在显著差异。

区域层面上，碳固持服务、土壤保持与产水服务之间的权衡与协同关系在不同气候类型区(温带大陆性季风气候区、亚热带季风气候区、温带季风气候区、青藏高寒区)有较大差异。在区域之间，碳固持与产水服务在关中-天水地区、汉江上游流域、东北森林带和青藏高寒区以协同关系为主[24-27]，在黄土高原、呼包鄂榆等地表现为权衡关系[28-29]，而在鄂尔多斯市无显著权衡关系[30]；就土壤保持与产水服务而言，在鄱阳湖地区和关天地区、青藏高寒区、鄂尔多斯市等较为干旱和寒冷地区主要是协同关系[24-25,27,30-32]，却在呼包鄂榆地区和整个汉江上游呈现明显的权衡关系[26-27]。在区域内部，食物供给与土壤保持在鄱阳湖丘陵地区表现为协同关系，在鄱阳湖平原地区却为权衡关系；国家屏障区内部，川滇-黄土高原屏障带的中部主要为土壤保持服务增加区域，北方防沙带和青藏高原生态屏障区为固碳服务集中上升区，东北森林带的西北部和南方丘陵山地带中部产水量增加[28]；从关中-天水经济区 64 个县来看，除 NPP 与保水服务呈现协同关系，大部分县域的固碳释氧、水文调节、水土保持与粮食生产之间表现为权衡关系[24]。整体而言，生态系统服务间的权衡与协同关系在整个区域之间和区域内部存在显著差异性，主要表现为不同气候类型区之间及其内部差异。因此需要处理好整体和局部的关系，宏观把握的同时结合局部特征分区制定生态保护政策。

不同的研究层面体现着不同的生态格局和过程。总的来说，学者们就生态系统服务权衡在生态系统、景观和区域层面上的体现做了大量工作，但是不同层面间或同一层面内生态系统服务权衡的关联特征没有得到很好的揭示，很少有学者刻画不同层面及同一层面内生态系统服务供给和人类需求的流动过程[33]。因此，今后的研究应结合多个层面的生态系统服务权衡关联特征及其变化，着重考虑生态系统服务间的供需流动关系，推动不同层面上生态系统服务权衡研究结果的综合集成，从而优化生态系统服务管理。

2.2 生态系统服务权衡识别和量化方法

准确识别和科学量化生态系统服务间的关系是有效管理生态系统的基础。生态系统服务权衡经历了长期的发展，涌现了诸多研究方法，为推动生态系统服务权衡研究理论体系构建和方法集成，根据其作用将生态系统服务权衡研究方法划分为 3 类。

2.2.1 基于关系识别和具体表征的权衡分析

生态系统服务权衡与协同关系的识别和表征是理解区域之间及内部差异的基础。在生态系统服务权衡关系研究中，统计学分析与空间制图分析通常结合使用。

基于统计学分析的相关分析和聚类分析应用较为广泛。相关性分析用于识别生态系统服务簇之间的相互作用，Tian 等[34]利用斯皮尔曼相关分析识

别和利用玫瑰图进行表征生态系统服务间的关系; 聚类分析是识别生态系统服务簇类型和分析生态系统服务权衡关系的有力工具, 学者们采用该方法确定了 12 种生态系统服务间的相互作用情况[20]。但是这两种方法忽略了空间位置的具体信息, 不利于根据研究区内部差异制定差别化的管理政策。空间制图法能够通过可视化弥补这一局限。为揭示京津冀地区生态系统服务的时空变化特征, 学者利用多层次空间统计法和玫瑰图法直观表征与对比分析不同时段、不同地类或区域的生态系统服务权衡关系[35]; 李晶等[24]利用相关系数和空间制图方法, 研究 2000—2010 年间关天经济区及其内部固碳释氧、水文调节、水土保持、粮食生产之间复杂的权衡协同关系。此外, 生态系统服务权衡分析大多考虑生物物理供给, 从社会经济需求层面研究生态系统服务权衡的很少[4]。为探求社会-经济-生态三者供给和需求的平衡, 学者运用相关分析探讨了供应和社会需求间的权衡, 并分析了空间单元内生态系统服务在生物物理、社会文化和经济方面的空间不匹配特征[18]。总的来说, 统计学分析与空间制图分析的结合使用是识别和具体表征生态系统服务权衡的有效工具。但部分学者认为该方法主要用于区域层面上, 其他层面上的应用较为少见[36-37], 由于数据获取等原因, 研究结果的准确性受到影响[38]。因此, 亟需整合土地利用、社会经济、生态景观等数据资源, 为提高生态系统服务权衡分析结果精准性奠定基础。

2.2.2　基于权衡模拟和预测的模型量化分析

集成建模分析不仅可以量化生态系统服务权衡关系的时空变化, 还能够澄清人类社会和生态系统之间的复杂相互作用[39]。近年来, 许多模型广泛应用于生态系统服务权衡评估, 本文根据其功能划分为生态生产功能模型、人类偏好模型和价值转移模型(表 3)。

在表 3 中, InVEST 模型以土地利用/覆被数据为基础, 是目前在生物多样性、水土保持、碳储量等模块研究最为成熟, 也是在全球大部分地区广泛应用的生态系统服务权衡评估模型[27-28], 但授粉、游憩、木材产量等模块有待深入研究和推广应用[40-41]。研究美国俄勒冈流域时, 学者采用 InVEST 模型设置 3 种土地利用情景, 评估生态系统服务供给水平与生态系统多样性间的权衡关系, 但是忽略了地理要素的异质性, 造成模拟结果与实际情况有一定偏差[42]。ARIES 模型是一个 web 可访问的应用程序, 用于动态评估生态系统服务供给和使用区域间的权衡并可视化, 具有良好的应用前景, 但受限于模型复杂性和模型代码的透明度, 尚未得到广泛使用[43]。MIMES 模型、EPM 模型、EcoAIM 模型等均为生态系统服务权衡模拟和预测作了很多贡献, 但在降低模型的不确定和主观性及推广应用方面仍有很大的提升空间。因此, 要优化模型以提高其普遍适用性和公开性, 需综合考虑区域社会经济、生物物理等条件分区设置参数, 将地面调查与实验分析相结合获取实证数据用于参数和评估结果的校验[44]。同时, 强化多个模型模拟对比研究, 充分考虑人类需求和利用先进技术拓宽模型适用范围, 从而提高模型评估结果的准确性和提升其实际应用价值。

2.2.3　基于生态系统服务权衡管理优化的多准则分析

多准则分析是兼顾社会经济和生态准则的工具, 近年来被广泛用于解决生态系统服务管理中多重目标冲突问题[45], 从而实现社会经济、生态环境的多元平衡。

情景模拟应用比较广泛, 通常是基于土地利用数据, 模拟未来某时期不同情景下生态系统服务权衡与协同关系变化, 从而保障区域生态经济安全[32], 但情景设定的科学性和预测的精准性有待检验。比较常见的是利用多目标线性规划, 设置多个决策目标, 探讨区域生态系统服务权衡优化[46], 但参数的选取和约束条件设置的准确性有待验证。基于此, 学者们运用 OWA(ordered weighted averaged, 有序加权平均)多属性决策方法测算生态系统服务价值, 设立不同风险值和权重, 计算 OWA 算子得出风险情景和保护效率, 从而选择最优保护区[47]。近年来, 学者们开始探求耦合模型模拟生态系统服务权衡情景, 如运用 Logistic-CA-Markov 耦合模型, 设置自然情景、规划情景和保护情景, 模拟和估算了 2030 年保水、保土、固碳和食物供给 4 种关键的生态系统服务功能及权衡关系以优化未来生态系统服务管理[32]。多种模型的耦合提高了生态系统服务时空动态演变和模拟预测能力, 对该区域的生态安全协同联动管理以及社会经济可持续发展具有重要意义, 但是关于模型间耦合程度如何尚鲜见报道。总的来说, 多准则分析在优化生态系统服务管理上发挥着重要作用, 但不同情景和约束条件设置等方面有待优化, 未来需根据社会经济发展状况设定不同预测情景, 并对预测结果进行检验, 从而促进生态系统服务权衡内部机理及相互作用的揭示[31]。

表 3 生态系统服务权衡模拟与预测模型

Table 3 Models of ecosystem service trade-offs simulation and prediction

模型分类 Model classification	具体模型 Concrete model	优点 Advantage	不足 Disadvantage
生态生产功能模型 Ecological production function model	InVEST	参数需求少、操作灵活、应用广泛、可视化表达强、认可度高 Less parameters requirement, flexible operation, wide application, strong visual expression and high recognition	参数设置依据不充分、忽略生物物理过程 Insufficient basis for parameter setting, ignoring bio-physical processes
	InFOREST		处开发初级阶段，推广少 In the initial stage of development, less promotion
	MIMES	能较好地模拟生态系统服务时空动态功能 Better simulate the spatiotemporal dynamic functions of ecosystem services	模型尚不成熟，有很多模块正在开发之中 The model is not yet mature and many modules are under development
	EPM	考虑了生态、经济和居民生活质量等问题 Consider ecological, economic, and quality of life of residents	可推广性差 Poor scalability
	SolVES	适用性广 Wide applicability	只能对生态系统服务社会价值进行量化 Only quantify the social value of ecosystem services
	SAORES	为土地利用格局优化和关键生态系统服务最大化提供借鉴 Provide references for optimization of land use patterns and maximization of key ecosystem services	模型评估的准确性校验及不确定性分析有所忽略 The accuracy check and uncertainty analysis of the model evaluation are ignored
	EcoMetric	输入地面调查的物理环境因子，结果较准确 Enter the physical environmental factors of the ground survey with more accurate results	
人类偏好模型 Human preference model	EcoAIM	利于多种生态系统服务权衡方法间的比较 Facilitate comparisons among multiple ecosystem service trade-offs	依靠管理者的决策，主观性较强 Reliance on managerial decision making, strong subjectivity
	ESValue	利于比较现实产出和预期产出之间的关系，有助于确立最合适的自然资源管理策略 Facilitate comparison of the relationship between actual and expected output, and help to establish the most appropriate natural resource management strategy	依赖专家经验，主观性较强，主要用于美国地区 Reliance on expert experience, strong subjectivity, mainly used in the United States
价值转移模型 Value transfer shift model	ARIES	智能化实现生态系统服务功能的评估，应用前景好 Intelligent assessment of ecosystem service functions and good application prospects	数据分辨率差、评估结果精度低、目前只适用于美国及墨西哥部分区域 Poor data resolution, low accuracy of evaluation results, currently only applicable to parts of the United States and Mexico
	NAIS		基于文献数据确定生态系统服务价值，忽略了时空差异性 Determine ecosystem service value based on literature data, ignoring spatio-temporal differences

2.3 生态系统服务权衡关键驱动因子

生态系统是多种因素相互作用相互制约、多层面相互影响的耦合系统。甄别生态系统服务权衡关键驱动因子，有利于揭示生态系统服务权衡作用机理，优化生态系统服务管理。根据生态系统服务权衡研究文献的梳理，将影响生态系统服务权衡的主要因子概括为城市化、生态工程和气候变化。

2.3.1 城市化造成大部分供给服务与调节和支持服务间存在权衡关系

快速的城市化进程塑造着土地利用格局，给生态系统带来巨大压力。全球可持续性的挑战在很大程度上取决于城市化进程[48]。在过去的半个世纪里，全球 60%的生态系统服务因城市化而退化[3]。

城市土地利用方式的改变和城市人口的增长加速了城市化进程，影响生态系统服务间的关系。土地利用方面，耕地减少、建设用地增加使净生产力[35]、水源涵养[46]、气候调节、土壤养分保持[49]、碳储存(下降 6%)、水供应、栖息地供应(2000—2010 年南京市适宜生境减少 7.57×10^3 hm^2)[50]、粮食供应服务[51]等有所减少；城市人口增加使得生活和生产用水量急剧增加，导致城市用水供需紧张，研究显示城市化水平提高 1 个百分点，可使水资源利用率下降 0.47 个百分点[52]。随着开发强度的增加，表层土壤被清除，封闭土壤中有机碳的累积中断，损失了土壤碳储量，加之砍伐城郊森林导致植被覆盖度和地表蒸散作用的降低导致水产量增加[30]，从而降低碳固持

服务和木材供应。此外，碳储量和栖息地质量与水净化之间存在协同关系，与食物供应之间存在权衡关系[53]。然而，有少数学者认为，随着人们生活质量的提高，城市化背景下净水、水土流失控制、蔬菜供应、水果供应[48]、空气污染去除率(绿色基础设施的增加)、娱乐潜力(上升 1%)都有所增加[49]。总的来说，城市化不仅改变了人类对生态系统服务的需求[54]，还改变了城市化进程中生态系统服务的潜在供给，主要造成了供给服务与调节和支持服务之间的权衡。

2.3.2　生态工程提高了生态系统调节和支持服务，却降低了供给服务

恢复森林正成为改善生态系统服务的主要战略[55]。1990—2015 年间全球大部分地区森林覆盖率呈增加趋势，中国的森林覆盖率在全球 21 世纪的森林扩张率排名中位列第 1[56]，2019 年我国完成退耕还林还草 80 万 hm^2，森林覆盖率近 23%，这主要得益于国土绿化等生态恢复工程的开展。

目前，已有研究对全球范围内 89 项生态恢复案例进行 meta 分析，结果显示生态恢复与生态系统服务呈正相关关系，能够促使生态系统服务恢复 25%，但尚未达到退化前水平[57]。大量研究表明，大规模的造林和再造林可以防止植被和土壤碳流失，提高亚洲陆地生态系统碳储量和碳汇[58-59]。生态工程的开展控制或减少土壤侵蚀，风力和空气湿度的降低改善了风沙[60]，丰富生物多样性，增强气候调节和森林水质净化等功能[42,61]。西澳洲实施的生态恢复项目使得碳固存和水源涵养得到明显改善，提高了支持功能[40]]；中国退耕还林区大多呈现协同加强、权衡减弱的趋势，非退耕还林区，存在生态系统服务冲突加强、协同减弱的现象[29]，退耕还林政策有利于实现自然环境和人类社会的协调发展。然而，有学者认为植树造林固碳可能与土壤肥力[61]、生物多样性价值、产水量、食物供给等其他生态系统服务相冲突[62]。就影响产水而言，植被覆盖度的增加导致地表蒸散作用增强，树木根系生长过度吸收有限的土壤水分，减缓了渗透过程；由于坡度较陡，大部分降雨以地表径流的形式流动，基流较小[63]，降低了水的可利用能力；在降水量有限地区，种植过多的树木可能会减少产水和土壤保持等服务[64]，造成生态系统和人类之间潜在的水需求冲突，从而影响食物和原材料的供给[65]。总的来说，生态工程的开展极大地改善了生态环境，增强了生态系统的调节和支持服务，但一定程度上影响了产水量和粮食供给。

2.3.3　全球气候变化增加外部风险，一定程度上降低生态系统服务供给、调节和支持功能

2014 年 IPCC 第 5 次评估报告指出全球变暖现象愈加明显[66]。全球气候变暖作为生态系统服务权衡的重要驱动力之一，是全人类共同面临的重大问题，气候变化对 59%的生态系统服务都具有负面影响，且未来效应还会逐渐增强[56] 。

外在风险上，全球极端强降水事件和极端高温事件均表现出增多趋势，极端低温事件呈现减少趋势[67]，潜在火灾/洪涝的发生一定程度上对人类赖以生存的自然地理环境构成威胁。供给服务上，温度升高和降雨量减少可能会使湖泊干涸，海洋将变暖变酸使热带珊瑚礁退化[68-69]。在农业生产力上，随着气温的升高，中高纬度地区作物生产力预计略有增加后下降，低纬度地区气温的小幅上升可能使农业用水需求增加，造成生产力下降[70-71]，如气温升高将降低美国猪、牛(牛奶)的产量，气候变化对非洲农业有强烈负面影响[72-73]。调节服务上，水质净化方面，气候(全球)变化的影响可能会增加城市或农业径流等的扩散污染，洪水和干旱将影响稀释(有机物分解)或溶解物质浓度以改变水质[74]。生物多样性方面，气候变化通过影响开花植物和昆虫传粉者的物候变化正直接影响全世界森林生物多样性，在未来可能对生物多样性构成极大威胁[75-76]。支持服务上，温度升高与 NDVI 表现为权衡关系的区域于全球范围内广泛分布，表现为温度升高减少植物可利用水分，降低了植被绿度[77-78]，增加了植被破坏的可能性[79]，降低了植被初级生产力。此外，温度升高可能通过增强土壤呼吸作用来提高 CO_2 排放量，降水量的减少会对农田和灌木的土壤有机碳产生不利影响[80-81]，影响碳循环过程。总的来说，全球气候变化给生态环境带来的压力逐渐增强，影响了生态系统服务供给、调节、支持服务，增加潜在极端天气灾害风险[55,82-83]。

综合来看，虽然很多研究已经关注到以上 3 个关键驱动因子对生态系统服务的影响，但目前对不同生态系统服务间相互作用形成原因的理解尚浅，并且多停留在表象描述[84]，也很少有学者去探讨以上关键因子及其组合怎样推动生态系统服务功能的变化，三者的协调度如何仍不清楚[85]。要尽可能地减少生态系统服务功能的下降，亟需加强人类活动的定量化研究和多种驱动因素组合的深层次机理分析[86]，以期为国土空间优化配置、生态经济协同高

质量发展提供决策参考。

3 不足与展望

生态系统服务权衡研究受到国内外学者的广泛关注，取得了大量研究成果。本文归纳梳理了生态系统服务权衡发展历程和研究热点，并就生态系统服务不同研究层面的关系、权衡研究方法和关键驱动因子 3 方面的最新进展进行论述，发现现有生态系统服务权衡主要存在研究层面间的关联性需加强、量化方法的时空表征和模拟优化有待改进、相互作用机理尚未阐明以及大数据应用有待拓展等方面的不足。为更好地服务于生态系统服务管理，未来的研究应着重考虑以下 4 个方面。

3.1 动态刻画研究层面间供需流动过程，把握生态系统服务权衡关联特征

不同的研究层面体现着不同的生态格局和过程。各个层面上生态系统服务权衡的侧重点不同，且不同层面生态系统服务间的关系可能随时间推移和利益需求而发生变化。因此，今后的研究应结合不同层面上不同利益相关者的需求，协调不同层面或同一层面的生态系统服务供给，细致刻画不同研究层面的生态系统服务间的供需流动过程及供给方和需求方的平衡机理，全面探讨不同层面上生态系统服务间的权衡与协同关系，准确把握不同层面上生态系统服务权衡的关联特征和内在形成机制[33]，推动不同层面上或同一层面内部生态系统服务权衡研究结果的综合集成，从而应对生态系统服务权衡过程研究中的挑战，为生态系统服务可持续管理和规划实践提供参考依据。

3.2 优化生态系统服务权衡方法，为生态系统服务管理提供参考

量化生态系统服务权衡能为生态系统服务可持续管理提供权威依据。当前的生态系统服务权衡评估模型大多由国外学者开发，用于国内相关研究时都需要考虑数据的适用性和参数修正[87]。此外，现有生态系统服务权衡模型多从环境因子的变化出发探讨生态系统服务之间的权衡关系，尚不能很好地解释生态系统服务权衡的动态变化及相互作用机制。因此，在使用模型时，需结合生态学和环境学等理论知识评估模型分析结果的准确性和适用性[4]。在此基础上，优化现有生态系统服务权衡量化模型，可以更好地凸显生态系统服务权衡的“非线性”关系和降低研究过程中的不确定性和主观性等[5,88]，也将对降低生态系统服务权衡发生的风险、揭示未来生态系统服务权衡的动态变化规律产生重要影响。

3.3 准确甄别生态系统服务权衡驱动因子，系统揭示内在机理

生态系统服务权衡为何产生？其过程是怎样的？这是生态系统服务权衡的内在构造和驱动机制迫切需要回答的问题。现有研究中，自然和人文驱动力贡献率定量化和综合化研究略显不足。筛选影响生态系统服务权衡的限制性因素是准确量化和科学评估生态系统服务权衡的前提。因此，要重点关注土地利用、退耕还林、农业生产、城镇扩张等人为扰动和自然环境变化与生态系统结构和功能间的“滞后效应”和反馈机制[89]，基于格局分析和过程解析甄别关键驱动力，辨析和探讨驱动因素对不同生态系统服务或生态系统服务簇的影响强度和作用大小，从而深层次地揭示生态系统服务权衡内在机理。

3.4 充分整合多维生态系统服务权衡资源，提高综合研究能力

数据资源作为一种战略资源，已引起科技界、企业、决策界的高度重视。然而数据多样且分散，获取成本高、周期长、难度大，如果不充分地整合数据资源就不能很好地发挥“大数据”的无形价值，甚至造成生态系统服务权衡细节信息的大量忽视[4]。为提升生态系统服务权衡综合研究能力，需利用快速发展的大数据、云计算、人工智能地物识别等高新技术深入挖掘数据，汇聚国家/地区、机构、作者、政府等多方力量，整合土地利用、水文、气候、社会经济、生态景观等数据资源，构建一个全球覆盖的多学科、高精度、多尺度、长时序、实时更新的空间数据库，搭建生态系统服务权衡领域数据共享平台，形成宏观、综合、动态的数据模型，为提升生态系统服务权衡综合研究能力提供参考。

参考文献 References

[1] BERGER T, BROOKNER E. Practical design of infrared detector circuits[J]. Applied Optics, 1967, 6(7): 1189–1193

[2] 郝梦雅，任志远，孙艺杰，等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 592–602
HAO M Y, REN Z Y, SUN Y J, et al. The dynamic analysis of trade-off and synergy of ecosystem services in the Guanzhong Basin[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 592–602

[3] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-Being[M]. Washington, DC: Island Press, 2005: 1–12

[4] 戴尔阜，王晓莉，朱建佳，等. 生态系统服务权衡：方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1005–1016
DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J].

Geographical Research, 2016, 35(6): 1005–1016

[5] 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[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379–1390
LI S C, ZHANG C Y, LIU J L, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1379–1390

[6] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5219–5229
LI P, JIANG L G, FENG Z M, et al. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: An overview[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5219–5229

[7] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242–253
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242–253

[8] 卫军朝, 蔚海燕. 科学结构及演化分析方法研究综述[J]. 图书与情报, 2011, (4): 48–52
WEI J C, WEI H Y. Review on analysis methods of science structure and evolution[J]. Library and Information, 2011, (4): 48–52

[9] 陈静飞, 王怀璋, 梁婷. 基于 CiteSpace 的全球炭疽研究演化及其热点可视化分析[J]. 微生物学报, doi: 10.13343/j.cnki.wsxb.20190589
CHEN J F, WANG H Z, LIANG T. Global anthrax research evolution and hot spot visualization analysis based on CiteSpace[J]. Acta Microbiologica Sinica, doi: 10.13343/j.cnki.wsxb.20190589

[10] 刘婧, 江沁雨, 常李艳. 近 20 年来国内外数字阅读研究热点与进展分析[J]. 图书馆, 2020, (2): 80–87
LIU J, JIANG Q Y, CHANG L Y. Analysis of hotspots and progress in digital reading research at home and abroad in the recent 20 years[J]. Library, 2020, (2): 80–87

[11] 王梓懿, 沈正平, 杜明伟. 基于 CiteSpace Ⅲ的国内新型城镇化研究进展与热点分析[J]. 经济地理, 2017, 37(1): 32–39
WANG Z Y, SHEN Z P, DU M W. The research status and hotspots of new urbanization based on CiteSpace Ⅲ[J]. Economic Geography, 2017, 37(1): 32–39

[12] CROUZAT E, MOUCHET M, TURKELBOOM F, et al. Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale: Insights from the French Alps[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(5): 1145–1155

[13] SCHRODER S A, TÓTH S F, DEAL R L, et al. Multi-objective optimization to evaluate tradeoffs among forest ecosystem services following fire hazard reduction in the Deschutes National Forest, USA[J]. Ecosystem Services, 2016, 22: 328–347

[14] CADEMUS R, ESCOBEDO F J, MCLAUGHLIN D, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in Southeastern USA[J]. Forests, 2014, 5(6): 1409–1431

[15] OLSCHEWSKI R, KLEIN A M, TSCHARNTKE F. Economic trade-offs between carbon sequestration, timber production, and crop pollination in tropical forested landscapes[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 314–319

[16] CHISHOLM R A. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot[J]. Ecological Economics, 2010, 69(10): 1973–1987

[17] CORBERA E, BROWN K. Building institutions to trade ecosystem services: Marketing forest carbon in Mexico[J]. World Development, 2008, 36(10): 1956–1979

[18] CASTRO A J, VERBURG P H, MARTÍN-LÓPEZ B, et al. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: A landscape-scale spatial analysis[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 132: 102–110

[19] POWER A G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2959–2971

[20] RAUDSEPP-HEARNE C, PETERSON G D, BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(11): 5242–5247

[21] MEYER B C, GRABAUM R. MULBO: Model framework for multicriteria landscape assessment and optimisation. A support system for spatial land use decisions[J]. Landscape Research, 2008, 33(2): 155–179

[22] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17–29

[23] SYRBE R U, WALZ U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 80–88

[24] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3053–3062
LI J, LI H Y, ZHANG L. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong-Tianshui economic region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3053–3062

[25] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 868–879
QIAN C Y, GONG J, ZHANG J X, et al. Change and trade-offs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 868–879

[26] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064–2078
WANG P T, ZHANG L W, LI Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2064–2078

[27] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2162–2172
YIN L C, WANG X F, ZHANG K, et al. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier Zone[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2162–2172

[28] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4881–4891
SUN Z X, LIU Z F, HE C Y, et al. Multi-scale analysis of

ecosystem service trade-offs in urbanizing drylands of China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4881–4891

[29] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 等. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3443–3454
SUN Y J, REN Z Y, HAO M Y, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yan'an, Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3443–3454

[30] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571–1581
WU W H, PENG J, LIU Y X, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571–1581

[31] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995–1004
RAN F W, LUO Z J, WU J P, et al. Spatiotemporal patterns of the trade-off and synergy relationship among ecosystem services in Poyang Lake Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 995–1004

[32] 税伟, 杜勇, 王亚楠, 等. 闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5188–5197
SHUI W, DU Y, WANG Y N, et al. Spatio-temporal dynamics and scenarios simulation of trade-offs between ecosystem services in Min Delta urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5188–5197

[33] 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[J]. 地理学报, 2017, 72(6): 960–973
PENG J, HU X X, ZHAO M Y, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 960–973

[34] TIAN Y C, WANG S J, BAI X Y, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 1297–1308

[35] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(3): 141–147
ZHANG Y S, WU D T. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs and associated influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(3): 141–147

[36] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3102–3111
CAO Q W, WEI X M, WU J S. A review on the tradeoffs and synergies among ecosystem services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 3102–3111

[37] DENG X Z, LI Z H, GIBSON J. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 953–968

[38] 吕一河, 张立伟, 王江磊. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1237–1243
LYU Y H, ZHANG L W, WANG J L. Assessment of ecosystem and its services conservation: Indicators and methods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1237–1243

[39] HUBER R, BUGMANN H, BUTTLER A, et al. Sustainable land-use practices in European mountain regions under global change: An integrated research approach[J]. Ecology and Society, 2013, 18(3): 37

[40] BARBIER E B, KOCH E W, SILLIMAN B R, et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values[J]. Science, 2008, 319(5861): 321–323

[41] 王雅, 蒙吉军, 齐杨, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统管理综述[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3526–3532
WANG Y, MENG J J, QI Y, et al. Review of ecosystem management based on the InVEST model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3526–3532

[42] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4–11

[43] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2403–2409

[44] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43–51

[45] DAILY G C, POLASKY S, GOLDSTEIN J, et al. Ecosystem services in decision making: Time to deliver[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 21–28

[46] 包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 812–828
BAO R, LIU F, ZHANG J P, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 812–828

[47] 张渝萌, 李晶, 曾莉, 等. 基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究——以渭河流域(关天段)为例[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2114–2127
ZHANG Y M, LI J, ZENG L, et al. Optimal protected area selection: based on multiple attribute decision making method and ecosystem service research — Illustrated by Guanzhong-Tianshui economic region section of the Weihe River Basin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(12): 2114–2127

[48] SUN X, LU Z M, LI F, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 117–129

[49] LI B J, CHEN D X, WU S H, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 416–427

[50] KAREIVA P, WATTS S, MCDONALD R, et al. Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare[J]. Science, 2007, 316(5833): 1866–1869

[51] 赵茹欣, 王会肖, 董宇轩. 气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 467–479
ZHAO R X, WANG H X, DONG Y X. Impact of climate change on grain yield and its trend across Guanzhong re-

gion[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 467–479

[52] YAN T T, WANG J X, HUANG J K. Urbanization, agricultural water use, and regional and national crop production in China[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 226–235

[53] LYU R F, ZHANG J M, XU M Q, et al. Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in northern Ningxia, China[J]. Land Use Policy, 2018, 77: 163–173

[54] WEI H J, FAN W G, WANG X C, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review[J]. Ecosystem Services, 2017, 25: 15–27

[55] BRANDT P, ABSON D J, DELLASALA D A, et al. Multifunctionality and biodiversity: Ecosystem services in temperate rainforests of the Pacific Northwest, USA[J]. Biological Conservation, 2014, 169: 362–371

[56] RUNTING R K, BRYAN B A, DEE L E, et al. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: A review[J]. Global Change Biology, 2017, 23(1): 28–41

[57] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7344–7355
WANG X F, MA X, FENG X M, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7344–7355

[58] FANG J Y, GUO Z D, HU H F, et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth[J]. Global Change Biology, 2014, 20(6): 2019–2030

[59] 伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 等. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 429–437
WU F J, LIU N, HU P L, et al. Soil carbon and nitrogen dynamics during vegetation restoration and their responses to extreme water-logging disasters in a typical karst depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 429–437

[60] WU X T, WANG S, FU B J, et al. Land use optimization based on ecosystem service assessment: A case study in the Yanhe watershed[J]. Land Use Policy, 2018, 72: 303–312

[61] DYMOND J R, AUSSEIL A G E, EKANAYAKE J C, et al. Tradeoffs between soil, water, and carbon — A national scale analysis from New Zealand[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 95(1): 124–131

[62] JACKSON R B, JOBBÁGY E G, AVISSAR R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. Science, 2005, 310(5756): 1944–1947

[63] ONAINDIA M, DE MANUEL B F, MADARIAGA L, et al. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 1–9

[64] LEE J M, PARK Y S, KUM D, et al. Assessing the effect of watershed slopes on recharge/baseflow and soil erosion[J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(S1): S169–S183

[65] WANG S, FU B J, HE C S, et al. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(7): 1189–1198

[66] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076
SHEN Y P, WANG G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068–1076

[67] BHATT U S, WALKER D A, RAYNOLDS M K, et al. Recent declines in warming and vegetation greening trends over pan-Arctic tundra[J]. Remote Sensing, 2013, 5(9): 4229–4254

[68] 何洁琳, 黄卓, 谢敏, 等. 广西生物多样性优先保护区的气候变化风险评估[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2581–2591
HE J L, HUANG Z, XIE M, et al. Risk assessment of climate change in Guangxi biodiversity conservation priority areas[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2581–2591

[69] HOEGH-GULDBERG O, MUMBY P J, HOOTEN A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification[J]. Science, 2007, 318(5857): 1737–1742

[70] MIZYED N. Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the west bank[J]. Water Resources Management, 2009, 23(10): 2015–2029

[71] 陈怀亮, 李树岩. 气候变暖背景下河南省夏玉米花期高温灾害风险预估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 337–348
CHEN H L, LI S Y. Prediction of high temperature disaster risks during summer maize flowering under future climate warming background in Henan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 337–348

[72] MADER T L, FRANK K L, HARRINGTON J A JR, et al. Potential climate change effects on warm-season livestock production in the Great Plains[J]. Climatic Change, 2009, 97(3/4): 529–541

[73] SCHLENKER W, LOBELL D B. Robust negative impacts of climate change on African agriculture[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 014010

[74] EVANS C D, MONTEITH D T, COOPER D M. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts[J]. Environmental Pollution, 2005, 137(1): 55–71

[75] PEREIRA H M, LEADLEY P W, PROENÇA V, et al. Scenarios for global biodiversity in the 21st century[J]. Science, 2010, 330(6010): 1496–1501

[76] PAWSON S M, BRIN A, BROCKERHOFF E G, et al. Plantation forests, climate change and biodiversity[J]. Biodiversity and Conservation, 2013, 22(5): 1203–1227

[77] ELMENDORF S C, HENRY G H R, HOLLISTER R D, et al. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(6): 453–457

[78] GRIFFIN D, ANCHUKAITIS K J. How unusual is the 2012—2014 California drought[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(24): 9017–9023

[79] BOKHORST S, TØMMERVIK H, CALLAGHAN T V, et al. Vegetation recovery following extreme winter warming events in the sub-Arctic estimated using NDVI from remote sensing and handheld passive proximal sensors[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 81: 18–25

[80] SMITH W N, GRANT B B, DESJARDINS R L, et al. Potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada 2000–2099[J]. Climatic Change, 2009, 93(3): 319–333

[81] ALBALADEJO J, ORTIZ R, GARCIA-FRANCO N, et al. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(2): 265–277

[82] KEEGAN K M, ALBERT M R, MCCONNELL J R, et al. Climate change and forest fires synergistically drive widespread melt events of the Greenland Ice Sheet[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(22): 7964–7967

[83] KASER G, GROßHAUSER M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(47): 20223–20227

[84] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度-生态系统服务-人类福祉时空关系研究——以安定区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 637–648
LIU D Q, ZHANG J X, GONG J, et al. Spatial and temporal relations among land-use intensity, ecosystem services, and human well-being in the Longzhong Loess Hilly Region: A case study of the Anding District, Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 637–648

[85] XU S N, LIU Y F, WANG X, et al. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: A case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 297–306

[86] HICKS C C, GRAHAM N A J, CINNER J E. Synergies and tradeoffs in how managers, scientists, and fishers value coral reef ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2013, 23(6): 1444–1453

[87] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360–3367
HUANG C H, YANG J, ZHANG W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360–3367

[88] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1–9
FU B J, YU D D. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 1–9

[89] BENNETT E M, BALVANERA P. The future of production systems in a globalized world[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(4): 191–198

欢迎订阅 2021 年《中国生态农业学报（中英文）》

《中国生态农业学报(中英文)》原名《中国生态农业学报》，由中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国生态经济学学会主办，中国科学院主管，科学出版社出版。系中文核心期刊、中国科技精品期刊、百种中国杰出学术期刊、中国权威学术期刊，为中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊全文数据库、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国科技论文与引文数据库、CNKI 中国期刊全文数据库源刊，并被国际农业生物学文摘(CABI)、美国化学文摘(CA)、哥白尼索引(IC)、美国乌利希国际期刊指南、SCOPUS 等国际数据库及检索单位收录。

《中国生态农业学报(中英文)》报道农业生态学、农业生态经济学及生态农业和农业生态工程等领域的创新性研究成果。内容划分为农业生态系统及其调控、作物栽培与生理生态、农业资源与环境、农业生态经济与生态农业 4 个栏目。

据《中国科技期刊引证报告》(核心版) 2019 年影响因子为 1.800，学科排名第 2。据 CNKI《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)·2019 版》期刊复合影响因子为 3.193，期刊综合影响因子为 2.024。在 2019 年中国科学文献计量评价研究中心发布的《世界学术期刊学术影响力指数(WAJCI)年报》中，《中国生态农业学报(中英文)》在农业科学综合期刊中排名第 2，入选 Q1 区。

《中国生态农业学报(中英文)》国内外公开发行，每期定价 70 元，全年 840 元。邮发代号: 82-973，全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订。

地址: (050022) 河北省石家庄市槐中路 286 号《中国生态农业学报(中英文)》编辑部

电话: (0311) 85818007; 网址: http://www.ecoagri.ac.cn; E-mail: editor@sjziam.ac.cn

淘宝购买 微店购买

公众微信号：zgstnyxb