

DOI: 10.5846/stxb202204291190

王诗绮, 刘焱序, 李琰, 傅伯杰. 近 20 年黄土高原生态系统服务研究进展. 生态学报, 2023, 43(1): 26-37.

Wang S Q, Liu Y X, Li Y, Fu B J. Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 26-37.

## 近 20 年黄土高原生态系统服务研究进展

王诗绮, 刘焱序\*, 李 琰, 傅伯杰

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

**摘要:**生态系统服务是自然生态系统及其物种提供的供给和维持人类生存的条件和过程,是人类通过生态系统的功能直接或间接得到的产品或服务,具有典型的区域性特征。黄土高原是黄河流域重要生态安全屏障,生态建设规模大、历时长,是我国生态系统服务研究的重要案例区。已有研究针对黄土高原生态系统服务进行物质量与价值量估算、权衡与协同关系识别和供需关系评估,但不同结论之间缺少归纳和对比。研究对近 20 年来黄土高原地区生态系统服务研究的文献总体特征和主要研究发现分析表明:相关中英文论文数量和被引频次整体呈上升趋势,研究内容上主要关注黄土高原生态系统服务的定量估算,近年来逐渐向生态系统服务权衡分析和供需关系评估拓展;黄土高原地区自退耕还林以来,各项生态系统服务总量呈上升趋势,呈现出东南增量较多、西北增量较少的空间格局;黄土高原地区供给服务和调节服务存在较明显的权衡关系,但在不同尺度上强度分异明显;区域内生态系统服务供给量和需求量均呈增加趋势,供需匹配状况具有明显时空差异。面向当前研究中物质量评估种类不足、价值量估算高度不确定、权衡与协同现象缺乏归因、空间流动性体现不足等问题,未来黄土高原生态系统服务研究有待加强面向生态产品价值实现的生态系统服务价值估算,空间流动视角下的生态系统服务供需关系评估,以及基于生态系统服务权衡情景模拟的国土空间优化。

**关键词:**生态系统服务评估;权衡与协同;供给与需求;退耕还林;文献共现性

## Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years

WANG Shiqi, LIU Yanxu\*, LI Yan, FU Bojie

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875 Beijing, China

**Abstract:** Ecosystem services are the conditions and processes provided by natural ecosystems and their species that supply and sustain human existence, and are products or services that human received directly or indirectly through the functions of ecosystems. It has typically regional characteristics. The Loess Plateau is an important ecological security barrier in the Yellow River Basin, with a large scale and long duration of ecological construction, and is an important case area for ecosystem service research in China. Previous studies have estimated the value and quality of ecosystem services, identified their trade-offs and synergies, and evaluated their supply-demand relationship on the Loess Plateau. However, there is a lack of generalization and comparison among different conclusions. We analysed the main findings of the literature on ecosystem services on the Loess Plateau region over the past 20 years, and got the following results. The number of relevant papers in both English and Chinese have been generally increasing, as well as the frequency of citations. The research content was mainly concerned with the quantitative estimation of ecosystem services on the Loess Plateau, and it has gradually expanded to the analysis of ecosystem service trade-offs and the assessment of supply-demand relationship in recent years. Since the Grain-for-Green project, the vegetation cover of the Loess Plateau has increased and the total amount

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42041007, 42171088);中央高效基本科研业务费专项资金资助

**收稿日期:**2022-04-29; **采用日期:**2022-11-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanxuli@bnu.edu.cn

of ecosystem services has been on the rise, presenting a spatial pattern of more increased in the southeast and less increased in the northwest. There are clear trade-offs between provision and regulation services on the Loess Plateau, and the intensity varies apparently at different scales. Both the supply and demand of ecosystem services are increasing in the region, with clear spatial and temporal differences in their matching degree. To address the limitations of insufficient types of quality assessments, high uncertainty in value estimation, lack of attribution of trade-offs and synergies, and insufficient representation of spatial delivery, future research on ecosystem services on the Loess Plateau needs to strengthen the estimation of ecosystem service values towards the realization of ecological product value, improve the assessment of ecosystem service supply and demand from the perspective of spatial delivery, and enhance the simulation of ecosystem service trade-off scenarios to support territorial space optimization.

**Key Words:** ecosystem services assessment; trade-off and synergy; supply and demand; Grain-for-Green; literature co-occurrence

生态系统服务是自然生态系统及其物种提供的供给和维持人类生存的条件和过程<sup>[1]</sup>,是人类通过生态系统的功能直接或间接得到的产品或服务<sup>[2]</sup>。自 20 世纪 90 年代后期生态系统服务概念系统形成以来,生态系统服务已经成为学术界和管理者共同关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。联合国千年生态系统评估报告的发布、国际生物多样性和生态系统服务科学—政策平台的建立,不仅推动了在全球和区域层面生态系统服务相关研究的深化,也为各国和地区政府进行生态系统管理提供了科学依据<sup>[3]</sup>。为确保生态系统与社会系统健康协调发展,中共中央国务院先后颁布《全国主体功能区规划》《全国生态功能区划》《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》等文件,明确提出构建国家和区域生态安全格局;“十九大”报告也提出“要提供更多优质生态产品以满足人民日益增长的优美生态环境需要”。以上国家和区域生态安全格局构建、生态产品价值实现等目标也需要以生态系统服务作为科学基础。通过阐释区域生态系统服务的形成机制与优化途径,将为促进生态系统综合管理、自然资源合理配置、国土空间格局优化、生态产品提质增效、民生福祉全面提升提供重要科学支撑<sup>[4-6]</sup>。

黄土高原地处黄河流域中游,地势西北高、东南低,地形破碎、沟壑纵横,气候以半湿润和半干旱气候为主,受季风影响明显,且降水在时间和空间分布上极不均匀;黄土高原在行政区划上包括山西、内蒙古、河南、陕西、甘肃、宁夏、青海共 7 省(自治区)45 市(州、盟)341 县(旗),土地面积约 65 万 km<sup>2</sup>,承载着 1.18 亿人口<sup>[7-8]</sup>。易扰动的自然条件和强烈的人类活动使得该区域生态环境面临巨大压力,水土流失严重,是世界土壤侵蚀最严重的地区之一;但同时,黄土高原承担着粮食生产、水源涵养、土壤保持、固碳释氧等重要的生态服务功能,是中国重点生态功能区的重要组成部分,是黄河流域重要生态安全屏障<sup>[9-10]</sup>。尤其是 1999 年中国政府启动退耕还林工程以来,黄土高原作为退耕还林工程的重点区和示范区,其生态系统服务研究是反映退耕还林成果的科学展现,为区域可持续生态管理提供范本,因此一直以来是中国生态系统服务研究的重要案例区<sup>[11-12]</sup>。

目前已有众多学者对黄土高原生态系统服务进行评估分析,发现黄土高原的植被覆盖已得到明显改善,多项生态系统服务相应提升<sup>[13-14]</sup>;也有一些研究对黄土高原生态系统服务权衡与协同、供需关系等进行讨论<sup>[15-17]</sup>。然而,虽然黄土高原生态系统服务取得了大量案例积累,但不同结论之间缺少归纳和对比,研究主题的演变过程、研究结论的一致性、科学规律的争论点和前沿研究议题有待进一步凝练,目前聚焦黄土高原生态系统服务研究的综述梳理尚较为缺乏。本文拟通过文献计量方法梳理黄土高原生态系统服务研究主题的发展脉络,综述黄土高原生态系统服务的物质量建模测算、价值量评估、权衡与协同关系识别和供需关系评价研究进展,讨论未来研究的前沿议题,从而进一步认识黄土高原生态系统服务研究现状和发展方向,为黄土高原和黄河流域的生态保护与高质量发展提供科学参考。

## 1 区域生态服务研究的历程与热点

### 1.1 研究的关注度

分别在 Web of Science 的核心合集和中国知网的北大核心、CSSCI、CSCD 数据库中,以高级检索方式,检索式分别为“TI=((Loess Plateau) OR (Middle Yellow River) OR (northern Shaanxi)) AND TI=(ecosystem service)”和“篇关摘:黄土高原(精确)OR 篇关摘:黄河中游(精确)OR 篇关摘:陕北(精确)AND 篇关摘:生态系统服务(精确)”,时间范围均为 2000—2021 年,检索时间为 2022 年 7 月 4 日,得到相关英文论文 31 篇,中文论文 93 篇。对检索出的文献通过计量分析方法得到以下结果。

黄土高原生态系统服务相关中文论文从 2003 年才开始出现,03 年至 10 年每年论文数量浮动,但均不超过 4 篇,2011 年论文数量出现一个小高峰达到 6 篇,之后至 2018 年平均每年 5 篇左右,直到 2019 年首次超过 10 篇,19—21 年论文数量均保持 12 篇左右(图 1)。相关英文论文从 2005 年开始出现,但 2006—2010 年都没有相关论文,直到 2011 年重新出现,2019 年以来相关英文论文数量增幅较大。相关中文论文主要发表在《生态学报》、《地理学报》和《资源科学》,相关英文论文主要发表在“SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT”和“JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION”。中国科学院生态环境研究中心相关论文发表数量最高,达到 14 篇,发文量超过 10 篇的还有中国科学院大学和中国科学院地理科学与资源研究所。

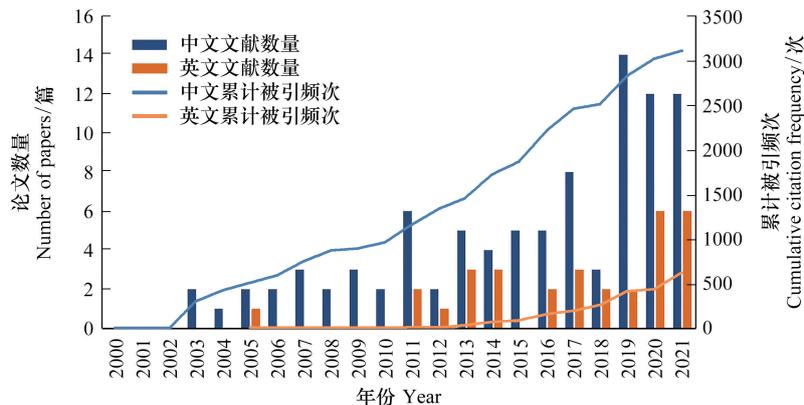


图 1 2000—2021 年黄土高原生态系统服务相关中英文论文统计

Fig.1 Statistics of the related research papers of ecosystem services in the Loess Plateau in Chinese and English during 2000—2021

### 1.2 研究热点

利用 VOSviewer 进行中英文文献题录信息共现性分析发现(图 2),相关中文文献中与生态系统服务联系密切的主题词主要包括生态恢复、权衡、水土保持、土壤保持、水源涵养和 InVEST 模型,与黄土高原联系密切的主题词包括土地利用、生态系统服务价值和生态系统服务功能。结合论文时间发现,2014 和 2015 年的相关研究多与生态恢复、土地利用变化和生态系统服务功能相关,2016 年至 2018 年研究多与生态系统服务权衡、生态系统服务价值和水土保持相关。相关英文文献的共现性分析结果也基本一致,但比中文文献多提到气候变化的影响。对黄土高原全域尺度的生态系统服务物质质量评估常用基于生态系统服务形成机理构建模型,如评估土壤保持服务的通用水土流失方程,评估净初级生产力的光能利用率模型,以及评估水源涵养的水量平衡模型、分布式水文模型等。可见随着时代发展,学者们对黄土高原生态系统服务的研究目标和内容在不断深化,从早期的定量描述生态系统服务价值、识别生态系统服务恢复动态等逐步走向权衡各类生态系统服务,提出基于生态系统服务的生态安全格局构建方案,从而为黄土高原水土保持和生态系统可持续管理提出更具科学性的决策建议。

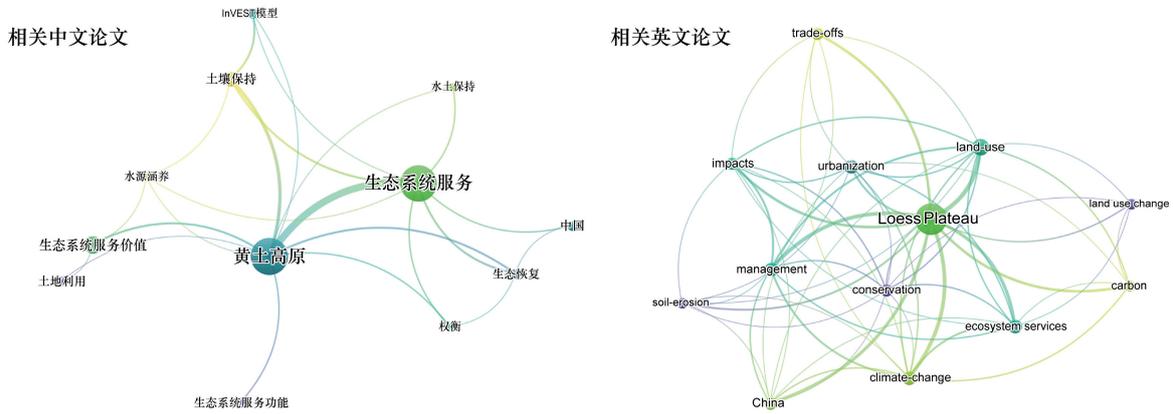


图 2 黄土高原生态系统服务相关中英文论文主题共现性分析

Fig.2 Topic co-occurrence of the related research papers of ecosystem services in the Loess Plateau in Chinese and English  
词频越高圆圈越大;两个词在同一文献摘要中出现次数越多,连线越粗;颜色代表时间,越接近黄色越晚

## 2 主要研究发现

梳理近 20 年相关论文发现,黄土高原生态系统服务研究可分为物质量评估、价值量估算、权衡与协同分析、供需关系评估 4 个方面,在研究对象上的分析重心在不同时间有所变化。具体表现在,前期侧重对粮食生产、植被生产力、水源涵养、土壤保持服务的物质量和价值量测算,近年来侧重于权衡与协同关系分析,后期有向供需关系探讨的趋向(图 3)。

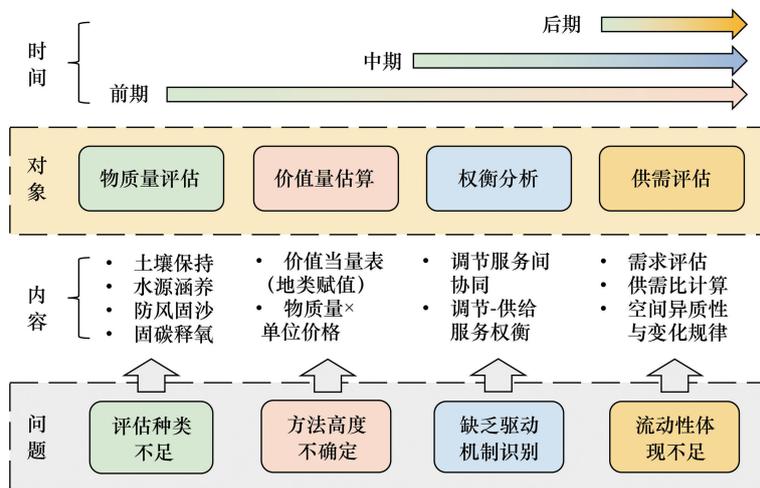


图 3 黄土高原生态系统服务主要研究内容

Fig.3 Main research content of ecosystem services in the Loess Plateau

### 2.1 生态系统服务物质量评估

自 1999 年实施退耕还林工程以来,黄土高原生态系统整体向健康方向发展<sup>[18]</sup>。大量研究针对生态系统服务形成的过程机理开展观测,尤其关注退耕还林对黄土高原土壤保持、水源涵养、固碳释氧等服务的重要作用,发现植物冠层和枯落物能有效减少径流和土壤侵蚀,不同植物和垂直覆盖结构组分的减流减沙能力存在差异<sup>[19-20]</sup>,同时植物蒸腾提供植物所需水分,进而影响森林固碳<sup>[21-22]</sup>。

以整个黄土高原为研究单元,以模型法得到的结果总体呈现为:区域整体土壤保持、碳固定、粮食生产、防

风固沙服务均得到提升,产水服务有所波动。傅伯杰团队应用水量平衡模型、通用土壤流失方程、光能利用率模型等,评估发现 2000—2008 年间 38% 的区域产水量减少,土壤保持量逐年增加,生态系统固碳量增加<sup>[23—25]</sup>。Lü 等同样发现 2000—2008 年黄土高原产水量减少,土壤保持和固碳增加,此外还评估发现粮食生产服务提高<sup>[26]</sup>。孙文义等应用修正通用土壤流失方程,发现 1990—2010 年各生态系统土壤保持量均增加,且土壤保持量表现为农田<草地<林地<sup>[27]</sup>。除土壤保持服务,宁佳等还关注了黄土高原水源涵养和防风固沙服务,采用降水贮存量法和修正土壤风蚀方程,发现相较于 2000—2010 年,2011—2015 年黄土高原的水源涵养量有所增加,防风固沙量有所下降<sup>[28]</sup>。针对产水服务,利用不同模型得到的结果不一致,如张琨等采用产水模型得到 2000—2015 年黄土高原产水服务总体较为稳定<sup>[29]</sup>,而汪晓珍等基于 InVEST 评估发现 2000—2015 年产水量增加 5.3%<sup>[30]</sup>。

一些学者针对黄土高原内部小流域、行政区和地理区域,进行生态系统服务物质质量评估,结果与黄土高原整体生态系统服务评估结果基本一致。例如,高旺盛等计算了 2000 年安塞县生态系统土壤保持服务、水源涵养服务、固碳释氧服务物质质量<sup>[31]</sup>。李晶等测算发现陕北黄土高原风沙保持量增长,充分说明了陕北黄土高原防风固沙效益显著<sup>[32]</sup>。李晶等还选取遥感估算模型进行陕北黄土高原地区净初级生产力物质质量估算,发现 1978—2005 年固碳释氧也呈增加趋势<sup>[33]</sup>。李苒基于 InVEST 模型计算出 2000—2010 年榆林市土壤保持量,证明榆林市土壤保持服务先减少后增加<sup>[34]</sup>。

## 2.2 生态系统服务价值量估算

由于各类生态系统服务物质质量因评估指标不同、计算模型不同,无法直观地进行横向对比,因此学者们以货币为统一指标,针对不同生态系统或不同土地利用方式,估算黄土高原整体或子区域的生态系统服务价值量。价值量评估可分类两大类,一是基于单位面积价值当量因子的评估方法,二是基于服务物质质量的单位价格评估方法。

许多学者选择借鉴谢高地等制定的我国陆地生态系统服务价值当量表或根据具体情况稍加修改后的价值当量表<sup>[35]</sup>,直接计算区域各类生态系统各个服务的价值量,该方法不依托生态系统服务物质质量计算。评估结果显示,近 30 年黄土高原整体生态系统服务价值提高<sup>[36]</sup>,内部小区域服务价值总量也增长了<sup>[37—38]</sup>,在 2001—2006 年陕北黄土高原是增长最明显的地区<sup>[39]</sup>。但是从不同时间尺度看,发现局部地区评估结果不一致,例如 1990—2000 年中部局部地区生态系统服务功能变差的趋势明显<sup>[36]</sup>,1980—2016 年汾河流域的生态系统服务价值呈现先增长后减少的趋势<sup>[40]</sup>。学者们从不同景观类型对服务价值量进行了深入研究,发现生态系统服务价值总量增加主要得益于林地和草地价值增加,在黄土丘陵区的中庄小流域上农田和水域生态系统服务价值甚至是减少的<sup>[37]</sup>。此外,不同景观类型面积变化所导致的价值变化主要体现在土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护和气候调节等方面<sup>[36]</sup>,张瑜等得到 2010 年黄土高原生态系统服务功能价值由大到小依次为:土壤保持>维持生物多样性>水文调节>气候调节>废物处理>食物生产>提供美学景观>原材料生产>气体调节<sup>[15]</sup>。

另一些学者选择先利用模型计算出生态系统服务物质质量,然后选用市场价值法、费用支出法、恢复和防护费用法、影子工程法、机会成本法、条件价值法等多种方法计算各类生态系统服务价值,将生态系统服务物质质量与单价相乘,得到研究区生态系统服务总价值量。例如高旺盛等计算了安塞县生态系统每年提供的总服务价值,证明脆弱生态系统依然担当了重要的生态系统服务功能,但其“生态生产力”与“经济生产力”严重失衡<sup>[31]</sup>。刘秀丽等发现 2001—2011 年宁武县生态系统服务价值总量呈现逐年增加的趋势,其变化过程主要受到供给服务和文化服务的影响<sup>[41]</sup>。李晶等发现 1978—2000 年陕北黄土高原总防风固沙价值和固碳释氧价值均增加,空间分布上固碳释氧价值沿北部向南部逐渐升高<sup>[32—33]</sup>。李苒发现 2000—2010 年榆林市土壤保持生态效益呈持续减少的趋势,空间上大致呈现西北高东南低的格局,河流中上游地区比下游地区高<sup>[34]</sup>。

## 2.3 生态系统服务权衡分析

生态系统服务权衡或者协同关系的形成受到不同尺度上生态系统结构、过程、功能的多重影响。当人们

消费某一种或某几种生态系统服务时,就会有意或无意地对其它生态系统服务的提供产生影响,随即产生生态系统服务的权衡与协同现象<sup>[16]</sup>。黄土高原生态过程复杂,各种生态系统服务之间产生了较多权衡与协同关系。莫兴国等通过模拟分析发现,气候变化条件下,21 世纪末无定河流域蒸散将增加 23%,地表径流增加约 45%,植被净初级生产力上升约 38%,径流与植被生产力呈现协同关系<sup>[42]</sup>。在退耕还林还草工程背景下,人工植被建设改变了植被自然演替的方向,从而改变了土壤水分的演化过程。相比自然植被,人工植被群落往往结构单一、密度过大,尽管提高了植被生产力,但会消耗更多的土壤水分,加剧土壤干燥化程度,反而影响人工植被的生长发育,不利于生态恢复<sup>[43-45]</sup>。为了探寻管理生态系统服务的最优途径,识别黄土高原生态系统服务之间的权衡和协同关系是不可或缺的研究环节。

与国际主流观点一致,研究发现黄土高原调节服务之间通常是协同关系,而调节服务与供给服务之间通常是权衡关系<sup>[46]</sup>。整个黄土高原地区土壤保持和固碳服务具有正效应,与产水服务间存在负效应<sup>[16,30]</sup>。在子流域案例区,固碳、土壤保持、生物多样性之间表现为协同关系,而产水与它们之间均表现为权衡关系<sup>[47-48]</sup>。以行政区为研究单元,通常补充分析了食物供给与其他服务之间的关系,例如延安市和榆林市的食物供给服务和土壤保持、固碳服务均为权衡关系,榆林市食物供给与产水服务为协同关系<sup>[49-50]</sup>。

同时,研究表明黄土高原生态系统服务之间的消长和权衡具有尺度依赖性,其强度也具有空间异质性。在整个黄土高原上,泥沙输出与产水量呈显著正相关,而在延河流域尺度上,泥沙输出与水源涵养呈负相关<sup>[51]</sup>;在黄土高原不同气候区也存在权衡规律不一致,如净初级生产力、土壤保持服务与水源涵养服务在半干旱气候区和半湿润气候区呈权衡关系,而在高原气候区和半湿润气候区为协同关系<sup>[30]</sup>。孙艺杰等发现净初级生产力与水源涵养的协同关系在延安市北部和中部较强,净初级生产力与食物供给的权衡关系在东北部及中部较高,水源涵养与食物供给权衡程度在西南部和东南部地区较强<sup>[49]</sup>;王川等发现榆中县 2015 年食物供给与土壤保持和生物多样性维持的权衡关系较强,与固碳量和产水量的权衡关系较弱,除食物供给外的 4 种服务之间主要是强弱不等的协同关系,空间格局上服务之间关系的异质性较强<sup>[52]</sup>。生态系统服务权衡和协同强度随时间可能发生改变,如延安市 20 年来退耕还林区大多呈现协同加强权衡减弱的趋势,而在非退耕还林区存在生态服务冲突加强、协同减弱的现象<sup>[49]</sup>。

#### 2.4 生态系统服务供需评估

当前学者们针对黄土高原生态服务供需研究还较少,在已有研究中主要发现黄土高原生态服务供给量整体呈上升趋势,供需比呈下降趋势,各项生态系统服务供需关系在不同区域有各自的空间分布规律。整个黄土高原尺度上,赵雪雁等应用 InVEST 模型和构建的需求量算法,发现 1990—2018 年除水源涵养服务供给量外,粮食供给、碳固定、土壤保持服务供需量均呈上升趋势,且各生态系统服务供给量及土壤保持服务需求量均呈“东南高、西北低”的分布特征,而粮食供给、水源涵养、碳固定服务需求量呈“四周高、中间低”的分布特征,各类生态系统服务供需比均呈下降趋势<sup>[17]</sup>。在兰州市,各项服务总供给量均大于总需求量,综合生态系统服务供需比为 0.039,其中产水服务(0.098)>碳固持服务(0.066)>食物供给服务(0.030)>土壤保持服务(0.001),且城乡供需匹配差异显著<sup>[53]</sup>。陈泓文等利用价值当量法计算生态服务供给量,选取人口总量、GDP 总量、居民消费强度等指标反映生态系统服务需求,发现 2000—2015 年陕北黄土高原各类供需均有所增加,其中供给服务增幅最大,调节服务增幅最小;供需格局大体保持一致,供给呈现为北部高值、中部中值、中东部较低值和中部偏北低值格局,需求呈现南部和中东部以低需求和较低需求类型为主、中西部以中需求和较高需求为主、北部以高需求为主的格局<sup>[54]</sup>。

黄土高原的地域文化与生态系统特征紧密联系,由此形成了生态系统文化服务的供需关系。通常采用问卷调查法或访谈法评估区域文化服务的供给和需求。已有研究表明,居民对美学和场所感的需求较高,但对精神和宗教的需求较低,不同景观与居民区的可达性影响着文化服务的供应机会<sup>[55]</sup>;黄土高原退耕还林使得文化服务供给发生改变,如宗教和精神服务以及文化遗产的价值有所下降,而审美服务、娱乐、教育和科学以及灵感服务的价值有所上升<sup>[56]</sup>。此外,访谈发现居民认为耕地比森林重要,并且居民区被视为文化生态系统

服务的重要提供者,因此在生态恢复项目中不应低估居住区的重要性以及耕地和森林之间的权衡<sup>[56]</sup>。

### 3 研究结论的一致性与存在的问题

通过对近 20 年黄土高原相关研究成果的梳理可以明确:黄土高原的综合治理使得区域整体植被覆盖度显著提高,农田向草地和林地、草地向林地转换导致生态系统服务相应增强,总物质和价值量均显著增加<sup>[57]</sup>。从空间格局来看,黄土高原生态系统服务价值基本呈现东南高、西北低的特点,林地的价值增量最高。就生态系统服务评估类型,学者们重点关注了土壤保持、水文调节和碳固定服务,对生态价值增长贡献最大的是土壤保持服务。从生态系统服务权衡关系来说,学者们均证实了净初级生产力与土壤保持服务之间是协同关系的观点,但对水源涵养和粮食生产与土壤保持服务之间的关系分析存在不一致的看法。在生态系统服务供需角度,黄土高原的生态系统服务供给量和需求量都有所增加,并存在空间上供需不平衡的现象。尽管研究者们已对黄土高原生态系统服务物质质量测算、价值量评估、权衡关系分析、供需关系评估等达成一定共识,但大量的认识和计算结果仍有待商榷,表现在以下 5 个方面:

第一,类型涵盖不全面的生态系统服务评估。生态系统服务在定义上种类繁多,但并非所有服务都具有精准制图的可行性,例如文化服务本身就是主观的,部分调节服务评估是没有可用的空间数据集的。这就造成在黄土高原生态系统服务研究中,过度关注土壤保持服务和其他几种容易制图的服务,而忽视了教育、美学、文化传承等文化服务,以及授粉、病虫害控制等非空间化的调节服务。虽然土壤保持服务确是黄土高原最典型的调节服务,但并不意味着上述其他调节和文化服务在黄土高原是不重要的,服务评估类型不足将直接导致管理者忽视非空间化的黄土高原生态系统服务。

第二,不足的生态系统服务物质质量评估方法。目前,对同一种生态系统服务的物质质量评估方法在种类上相对不足。尤其是水源涵养,是指生态系统内多个水文过程及其水文效应的综合表现<sup>[58]</sup>,其服务相对难以制图,一些研究使用产水量表示水源涵养,往往会得出错误结论。这是由于无论是借助蒸散发和降水量的水平衡方程,还是 InVEST 模型中的产水量算法,都暗含了森林通过更大的蒸散发耗水并减少产流的规律。这导致植树造林减少了产水量,黄土高原越绿则所谓的“水源涵养”物质质量越低,显然脱离水源涵养服务的实际内涵。因此,包括水源涵养服务在内的一些服务物质质量评估结果存疑,实际上是由于生态系统服务物质质量评估的方法种类不足导致的。此外,在目前搜索的文章中仅有一篇在流域和区域层面验证了蒸散模型<sup>[23]</sup>,因此部分结论不一致可能是未经验证的评估结果不确定性导致的。

第三,高度不确定的生态系统服务价值量估算方法。一方面,基于土地利用或生态系统类型制作当量因子表,的确是生态系统服务价值快速评估的有力途径,但目前研究对当量因子表存在滥用,使用全国或者青藏高原的当量因子表分析黄土高原,完全无视中国巨大的地域分异规律。如果在黄土高原使用中国生态系统服务价值量当量因子表,需要假设黄土高原的生态系统结构和功能趋近于中国平均水平,但这一假设没有依据,间接造成了这种极简的价值估算结果不易取得国际学术界认可。另一方面,采用生态系统生产总值(GEP)核算方法,即在生态系统产品与服务功能量核算的基础上,借助价格将不同生态系统产品产量与服务量转化为货币单位表示产出,核算生态系统产品与服务的总经济价值,是来衡量和展示生态系统的状况及其变化的重要手段<sup>[59]</sup>。然而在使用物质质量乘以单位价格测算价值量时,不同算法得出的价值直接累加导致了误差传递,影响了总价值的可信度;而单价的文献依据往往来自于多年以前,也容易忽视社会经济进步导致的单价调整。尤其是前者的不同方法测算结果累加,使本来市场价值法测算出的可交易的价值如粮食、果品等,被不可交易的价格放大了数量级,让总价值量既不能用于绿色金融业,也难以向生态补偿提供定价标准,弱化了生态系统服务价值的行业应用潜力。

第四,缺乏驱动机制识别的生态系统服务权衡分析。目前在黄土高原以观测手段对生态系统服务代表性指标进行测度的研究相对少,大部分研究使用评估模型进行服务制图,这就造成了研究者所关注的气候、土地类型、土壤、植被等因素对服务的驱动机制是已经被嵌入模型的,不需要再逆向对这些因素进行归因。但是,

生态系统服务评估结果的驱动力不代表服务之间权衡和协同关系的驱动力,而如果不能准确把握权衡和协同关系的驱动力,弱化服务之间权衡实现多目标共赢的愿景就没有了支撑。目前对黄土高原的大多数研究仅识别了生态系统服务的权衡和协同的时空变化特征,尚需要从两方面进一步扩展。一方面,在黄土高原城市化背景下,需要基于能够反映人类活动的代表性指标,回答人类活动在多大程度上影响了服务之间权衡和协同关系这一问题,从而为调整人类活动方式、优化服务之间的关系提供明确的管理导向。另一方面,既然黄土高原不可能无限变绿,就需要找到土壤保持、粮食生产、产水等多项服务之间此消彼长关系的关键驱动因子,并且识别该驱动因子的作用是否具有阈值效应,从而让服务之间权衡关系保持在可控的范围内。

第五,流动性体现不足的生态系统服务供需评估。目前对黄土高原生态系统服务供需的评估案例相对少,主要是由于服务需求刻画和服务流动示踪存在方法上的难点。一方面,服务需求的刻画最好是面向人类福祉的,例如安全、健康、生计、交往、公平、自由等,但此类指标的取值与生态系统服务取值不是一一对应的,二者关系的空间计量难度较大。退而求其次的方法是用物质的消耗量或排放量作为需求,如人均粮食、人均碳排放等;但不是所有指标都有明确的物理量需求,例如教育、娱乐等难以在估算的量纲上直接匹配供需取值;即使是黄土高原最重要的土壤保持服务,由于需求集中在下游并体现为洪涝灾害风险,目前也很难界定量纲上匹配的需求阈值。另一方面,不考虑流动的生态系统服务供需比计算很难直接指导实践。例如不可能因为黄土高原中陕北的调节服务比关中平原高,就鼓励将关中平原的人口和产业向陕北转移以增加匹配度。目前,以水文过程为媒介是串联上下游水生态系统服务方向性供需的有效途径;而考虑到碳固定的全球性需求和文化遗产的局地性需求,对其他非方向性的生态系统服务流刻画还需要更加巧妙。

#### 4 研究展望

按照近 20 年相关论文主题的演变脉络,面向更好地对黄土高原生态系统综合管理、促进区域可持续发展,未来研究在生态系统服务物质和价值量评估基础上,将更加重视区域生态系统服务权衡与协同、供给与需求关系识别,进而深入研究黄土高原各生态系统服务的空间流动性,以及生态系统服务间权衡协同关系变化、供需关系变化的驱动机制等。为了更有效揭示黄土高原生态系统服务与人类福祉关系,为生态系统综合管理、国土空间优化提供决策依据,面向生态产品价值实现的生态系统服务价值估算、空间流动视角下的生态系统服务供需关系评估、基于生态系统服务权衡情景模拟的国土空间优化可以作为近期研究的突破点。

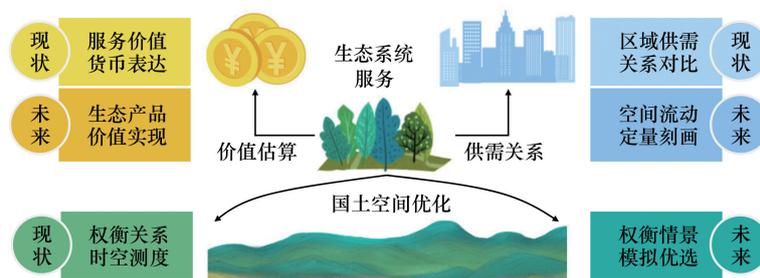


图 4 黄土高原生态系统服务近期研究突破点

Fig.4 Key research frontiers of ecosystem services in the Loess Plateau in the near future

##### 4.1 面向生态产品价值实现的生态系统服务价值估算

生态系统服务价值评估方法可分为市场价值法、费用支出法、旅行费用法、恢复和防护费用法、影子工程法、机会成本法、条件价值法等多种形式<sup>[60]</sup>,这些方法各有优缺点<sup>[61]</sup>,并且尚未能与人类日常生产、生活中的物质使用和价格水平直接对接,从而影响了生态服务核算的决策应用能力<sup>[62]</sup>。为了让生态系统服务与人类福祉联系更加紧密,“生态产品”概念逐渐推广。生态产品被定义为生态系统通过生物生产和与人类生产共同作用为人类福祉提供的最终产品或服务,是与农产品和工业产品并列的、满足人类美好生活需求的生活必

需求品<sup>[63]</sup>。因此,面向生态产品价值实现的生态系统服务价值估算量也已逐步成为衡量区域可持续发展的重要评价工具。

为了增强生态价值核算内容的针对性,降低核算结果的不确定性,需要在生态产品价值实现的导向下,在生态服务价值估算中以计算供给、调节、文化服务为主,并重视自然资源储量与生态系统服务物质量的因果关系,避免重复计算<sup>[62]</sup>。由于生态产品价值实现实质上是价值交易,事关利益相关方的权益,因此识别供给方和受益方尤为重要<sup>[64]</sup>。譬如黄土高原地区不仅为区域内提供土壤保持、水源涵养、碳固定、粮食生产、文化旅游等服务,更要考虑其作为生态安全屏障对区域外固碳释氧、土壤保持、产水服务的产品消费需求。所以在围绕生态系统结构与功能-生态系统服务-人类社会福祉这一主线开展研究中,在扩大生态系统服务物质量评估类型的同时,应更进一步关注黄土高原生态系统服务价值中可进行市场交易或作为区域补偿依据的生态产品,进行分项精确估算,为区域可持续发展决策提供定量化依据。

#### 4.2 空间流动视角下的生态系统服务供需关系评估

生态系统服务研究以人为中心,生态系统服务产生、使用和损耗都与人类社会和人类福祉密切相关<sup>[65]</sup>。生态系统服务的供给和需求反映生态系统和人类社会间复杂的动态关联<sup>[66]</sup>。目前生态服务供给量计算方法已较为成熟,而需求量的计算仍是难点,有学者构建了价格与偏好相组合的生态系统服务供需指标体系,初步实现了评价指标的整合<sup>[65]</sup>。然而,即便确定了生态系统服务的供给与需求量,并不一定能够在空间上刻画生态系统服务间的供需关系。退耕还林背景下黄土高原向其他区域的外溢服务不一定是正向的,尤其是向黄河提供的产水服务等。有学者发现黄土高原径流量的减少影响了当地以及黄河下游居民的生产生活,导致了区域内水供给和下游水需求的不平衡<sup>[67]</sup>。也有学者在黄土高原小流域和区域尺度上研究单个生态系统服务,发现水供给服务的供给与需求在空间分布上呈现显著的不匹配特征<sup>[68]</sup>。此外,固碳服务在区域内也存在较明显的空间流动<sup>[69]</sup>。

生态系统服务的供给方和需求方在空间位置上的不匹配,形成了生态系统服务原位流、定向流和全向流<sup>[65]</sup>。黄土高原生态系统服务流动研究实质上就是要在服务供给与需求之间建立时空关联,明确某项生态系统服务有多少受益对象,这些受益对象在哪里,能够受益多长时间;针对定向流和全向流,生态系统服务在向受益对象空间传递时,空间溢出范围有多大,或者空间溢出强度有多少<sup>[62]</sup>。黄土高原面临保护生态、乡村振兴、高质量发展等多重任务,关注生态服务潜在供给、实际供给、实现需求和总量需求的四者关系,厘清土壤保持、水源涵养、防风固沙、固碳释氧等每项具体生态系统服务的内外部供需与空间流动,不仅将科学支撑黄土高原自身的可持续发展,也对促进黄河流域的生态保护和高质量发展提供了上下游、域内外联动的决策依据。

#### 4.3 基于生态系统服务权衡情景模拟的国土空间优化

生态系统服务权衡分析的应用出口是为了引导生态系统管理决策,找到权衡中的“平衡点”,达成多目标的共赢。黄土高原经历了“退耕还林”这一大型生态修复工程,尽管总体生态服务价值显著增加,但有研究指出在干旱地区一味提高植被覆盖率,加强了实际蒸散发,导致地下水减少和土壤干层出现,进而引起土地退化<sup>[70-71]</sup>,黄土高原仍是生态风险指数高值区<sup>[72]</sup>。可见,黄土高原区域尺度上的土壤保持、碳固定等生态系统服务提升是以产水和粮食生产的权衡为代价的<sup>[73]</sup>,不能认为某几项代表性生态系统服务的提升就是可持续的国土空间治理。生态系统调节服务和供给服务之间权衡是固有特性,因而权衡关系不能完全消除只能缓解,从而达成生态建设和社会高质量发展的共赢。在美丽中国建设目标下的黄土高原国土空间优化也有必要建立在生态系统服务权衡情景模拟的基础上。

在黄土高原基于生态系统服务权衡情景开展的国土空间优化研究尚为少见。在山水林田湖草沙冰生命共同体的思想引领下,生态系统服务权衡情景的模拟需要在内容上注重生态系统间的权衡与协同关系以及自然要素与社会经济要素的匹配性,在空间上强调对景观格局的整体性认识,在时间上关注城市化和气候变化下的动态需求和风险;以多目标优化算法为支撑,实现国土空间优化中社会—生态目标下的规模、质量、发展

并重,以生态系统服务为纽带,同步提高生态系统的自然稳定程度和社会福祉效益,守住黄土高原生态安全边界<sup>[74]</sup>。黄土高原作为国家重点生态功能区之一,其空间优化要坚持保护优先的基本原则。在以往生态修复工程中,过于强调了人为开展生态建设在生态保护和恢复中的作用,多数生态建设为了实施某一类型生态系统恢复,较少顾及及其他类型生态系统,易于忽视不同生态系统服务之间的权衡协同关系,在实施过程造成新的生态破坏<sup>[75]</sup>。因此深入量化产生协同和权衡关系的原因,通过权衡与协同关系的情景预测,把握生态保护与管理措施的功能提升效果,才能发挥黄土高原国家重点生态功能区的主导生态功能<sup>[76]</sup>。

生态系统服务权衡情景模拟也是黄土高原生态安全屏障建设的重要依据。生态安全屏障是生态文明建设中构建国家生态安全战略格局的重要组成部分,对生态安全屏障的构建和维持也是国土空间优化的重要任务<sup>[77]</sup>。从生态系统服务角度来说,生态安全屏障多处于过渡地带,保护着重要生态系统服务供给区,影响着生态系统服务流动,从而保障区域或国家生态安全<sup>[78]</sup>。厘清区域主导生态系统服务类型及其权衡关系,制定生态功能区划,是构建和优化生态安全屏障体系,科学配置生态功能和生产功能的必要前提<sup>[79-80]</sup>。黄土高原生态安全屏障的核心任务是加强水土保持服务以缓解区域水土流失,但不能因为过度植树而影响水安全和粮食安全<sup>[78]</sup>。此外,生态系统变化是一个长期、复杂的动态过程,在黄土高原生态安全屏障构建中,有必要加强植树造林活动导致的生态系统结构改变对生态系统服务的长期影响研究和趋势预测研究,识别生态系统服务的稳定区域或持续变化区域,从而保障生态安全屏障的稳定性和生态系统服务供给能力的持续性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Daily G C. Nature's services; societal dependence on natural ecosystems (1997)//Robin L, Sörlin S, Warde P, eds. The Future of Nature: Documents of Global Change. New Haven: Yale University Press, 2013.
- [ 2 ] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 3 ] 郭宗亮, 刘亚楠, 张璐, 冯朝阳, 陈艳梅. 生态系统服务研究进展与展望. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 928-936.
- [ 4 ] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13.
- [ 5 ] 欧阳志云, 郑华, 谢高地, 杨武, 刘桂环, 石英华, 杨多贵. 生态资产、生态补偿及生态文明科技贡献核算理论与技术. *生态学报*, 2016, 36(22): 7136-7139.
- [ 6 ] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [ 7 ] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. *水科学进展*, 2012, 23(3): 310-316.
- [ 8 ] Chen F, Yuan Y J, Zhang R B, Qin L. A tree-ring based drought reconstruction (AD 1760-2010) for the Loess Plateau and its possible driving mechanisms. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 82-88.
- [ 9 ] 李凤民, 徐进章, 孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. *生态学报*, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [ 10 ] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. *地理学报*, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [ 11 ] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 23-31.
- [ 12 ] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 高晴, 姚顺波, 龚直文, 鲁亚楠, 贾磊, 李园园. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响. *生态学报*, 2020, 40(18): 6597-6612.
- [ 13 ] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [ 14 ] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. *自然杂志*, 2012, 34(5): 261-272.
- [ 15 ] 张瑜, 赵晓丽, 左丽君, 张增祥, 汪潇. 黄土高原生态系统服务价值动态评估与分析. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 170-176.
- [ 16 ] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [ 17 ] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [ 18 ] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [ 19 ] 邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 傅伯杰. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应. *生态学报*, 2022, 42(1): 322-331.
- [ 20 ] Hou J, Zhu H X, Fu B J, Lu Y H, Zhou J. Functional traits explain seasonal variation effects of plant communities on soil erosion in semiarid

- grasslands in the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2020, 194: 104743.
- [21] 许红梅, 贾海坤, 黄永梅. 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产力模型. *生态学报*, 2005, 25(5): 1064-1074.
- [22] Wang D, Gao G Y, An J X, Shao Y M, Lü Y H, Fu B J. Comparisons of three scaling up methods to estimate stand transpiration of a xerophytic shrub (*Salix psammophila*) in northern China. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127593.
- [23] Feng X M, Sun G, Fu B J, Su C H, Liu Y, Lamparski H. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2617-2628.
- [24] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [25] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [26] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [27] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 365-376.
- [28] 宁佳, 邵全琴. 黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 774-785.
- [29] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [30] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 上官周平, 邓蕾. 2000-2015 年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和 NPP 服务的时空分布与权衡/协同关系. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 114-121, 128-128.
- [31] 高旺盛, 董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 182-188.
- [32] 李晶, 任志远. 陕北黄土高原土地利用防风固沙功能价值时空研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(7): 183-187.
- [33] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2943-2950.
- [34] 李苒. 基于 InVEST 模型的榆林市土壤保持生态效益研究. *干旱区研究*, 2015, 32(5): 882-889.
- [35] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [36] 刘琳, 刘雪华. 黄土高原 1990-2000 年间的景观格局演变及生态系统服务功能分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(5): 8-13.
- [37] 李娜, 董立国, 刘长宁, 李生宝. 黄土丘陵区土地利用格局与生态系统服务价值分析——以中庄流域为例. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 144-147.
- [38] 靳甜甜, 张云霞, 朱月华, 巩杰, 燕玲玲. 黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性——以子午岭区为例. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1623-1632.
- [39] 赵永华, 张玲玲, 王晓峰. 陕西省生态系统服务价值评估及时空差异. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2662-2672.
- [40] 伍博炜, 杨胜天, 邵南方, 彭瑞文, 管亚兵. 黄土高原生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以汾河流域为例. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 340-345.
- [41] 刘秀丽, 张勃, 张调风, 何旭强. 黄土高原土石山区土地利用变化对生态系统服务的影响——以宁武县为例. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 1017-1022.
- [42] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 气候变化对无定河流域生态水文过程的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 4999-5007.
- [43] Yang L, Wei W, Chen L D, Chen W L, Wang J L. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. *CATENA*, 2014, 115: 123-133.
- [44] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. *林业科学*, 2004, 40(1): 84-91.
- [45] 李军, 王学春, 邵明安, 赵玉娟, 李小芳. 黄土高原不同密度刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟. *生态学报*, 2008, 28(7): 3125-3142.
- [46] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [47] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 李婷, 刘婧雅. 关中-天水经济区生态系统服务的权衡关系. *地理学报*, 2015, 70(11): 1762-1773.
- [48] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [49] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 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. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [50] 杨海娟, 孙来玎, 周美君, 李飞. 黄土高原粮食生产空间重构过程中的生态系统服务权衡——以陕北榆林市为例. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 226-236.
- [51] Su C H, Fu B J, Wei Y P, Lü Y H, Liu G H, Wang D L, Mao K B, Feng X M. Ecosystem management based on ecosystem services and human activities: a case study in the Yanhe watershed. *Sustainability Science*, 2012, 7(1): 17-32.
- [52] 王川, 刘春芳, 乌亚汗, 刘有延. 黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系——以榆中县为例. *生态学杂志*, 2019, 38(2):

521-531.

- [53] 刘立程,刘春芳,王川,李鹏杰.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例.地理学报,2019,74(9):1921-1937.
- [54] 陈泓文,巩杰.陕北黄土高原生态系统服务供需格局及其演变.水土保持研究,2021,28(6):226-232.
- [55] Shi Q Q, Chen H, Liu D, Zhang H, Geng T W, Zhang H J. Exploring the linkage between the supply and demand of cultural ecosystem services in Loess Plateau, China: a case study from Shigou Township. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 12514-12526.
- [56] Dou Y H. Cultural Ecosystem Services of Chinese Typical Landscapes: Rethinking Non-Material Links Between People and their Landscapes[D]. Wageningen: Wageningen University, 2020.
- [57] 张立伟,傅伯杰,吕一河,董治宝,李英杰,曾源,吴炳方.基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究.地理学报,2016,71(5):768-780.
- [58] 张彪,李文华,谢高地,肖玉.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法.生态学杂志,2009,28(3):529-534.
- [59] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,徐卫华,郑华,张琰,肖焱.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究.生态学报,2013,33(21):6747-6761.
- [60] 王娟娟,王大娟,彭晓春,洪鸿加,杨霞,刘培亮.关于生态资产核算方法探讨.环境与可持续发展,2014,39(6):14-18.
- [61] 刘玉龙,马俊杰,金学林,王伯铎,林积泉,张铭.生态系统服务功能价值评估方法综述.中国人口·资源与环境,2005,15(1):88-92.
- [62] 刘焱序,傅伯杰,赵文武,王帅.生态资产核算与生态系统服务评估:概念交汇与重点方向.生态学报,2018,38(23):8267-8276.
- [63] 张林波,虞慧怡,李岱青,贾振宇,吴丰昌,刘旭.生态产品内涵与其价值实现途径.农业机械学报,2019,50(6):173-183.
- [64] 高晓龙,林亦晴,徐卫华,欧阳志云.生态产品价值实现研究进展.生态学报,2020,40(1):24-33.
- [65] 肖玉,谢高地,鲁春霞,徐洁.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展.生态学报,2016,36(10):3096-3102.
- [66] 马琳,刘浩,彭建,吴健生.生态系统服务供给和需求研究进展.地理学报,2017,72(7):1277-1289.
- [67] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,金双彦,高亚军,高云飞.基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析.地理学报,2014,69(11):1595-1603.
- [68] 陈登帅,李晶,张渝萌,张城,周自翔.延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究.生态学报,2020,40(1):112-122.
- [69] 李婷,李晶,王彦泽,曾莉.关中-天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化.中国农业科学,2017,50(20):3953-3969.
- [70] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [71] 杨磊,张子豪,李宗善.黄土高原植被建设与土壤干燥化:问题与展望.生态学报,2019,39(20):7382-7388.
- [72] 陈峰,李红波,张安录.基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价.地理学报,2019,74(3):432-445.
- [73] 包蕊,刘峰,张建平,段颖琳,赵帅,严晓亚,刘英.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.生态学报,2018,38(3):812-828.
- [74] 王晨旭,刘焱序,于超月,刘小茜.国土空间生态修复布局研究进展.地理科学进展,2021,40(11):1925-1941.
- [75] 侯鹏,杨旻,翟俊,刘晓曼,万华伟,李静,蔡明勇,刘慧明.论自然保护地与国家生态安全格局构建.地理研究,2017,36(3):420-428.
- [76] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,王世豪,黄麟.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同.生态学报,2020,40(23):8694-8706.
- [77] 樊杰.中国主体功能区划方案.地理学报,2015,70(2):186-201.
- [78] 王晓峰,尹礼唱,张园.关于生态屏障若干问题的探讨.生态环境学报,2016,25(12):2035-2040.
- [79] 白永飞,赵玉金,王扬,周楷玲.中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设.中国科学院院刊,2020,35(6):675-689.
- [80] 刘焱序,傅伯杰,王帅,赵文武.从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展.生态学报,2017,37(23):7761-7768.