

DOI: 10.20103/j.stxb.202310122206

李茂娟, 李天奇, 朱连奇, 谷艳春, 张丹. 基于袋状图和相关系数的太行山地生态系统服务权衡/协同关系分析. 生态学报, 2025, 45(13): - .

Li M J, Li T Q, Zhu L Q, Gu Y C, Zhang D. The trade-offs and synergistic relationships among ecosystem services based on bagplots and correlation coefficients: a case study in Taihang Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

基于袋状图和相关系数的太行山地生态系统服务权衡/协同关系分析

李茂娟^{1,2,3}, 李天奇^{3,4,*}, 朱连奇³, 谷艳春¹, 张 丹^{1,2}

1 黄河水利职业技术大学, 测绘工程学院, 开封 475004

2 河南省测绘实景三维技术工程研究中心, 开封 475004

3 河南大学地理科学与工程学部, 地理科学学院, 郑州 450046

4 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 开封 475004

摘要:旨在探讨太行山地生态系统服务之间的权衡与协同关系,并据此进行生态服务分区,以支持太行山地及华北平原的生态保护和高质量发展。研究运用产量空间化、InVEST 模型和 ArcGIS 核密度分析对太行山生态系统的供给服务(食物供给)、调节服务(产水服务和固碳服务)、支持服务(土壤保持和生境质量)和文化服务(休闲游憩)进行评估,采用线性的 Pearson 相关系数和非线性的袋状图相结合的方法,深入剖析了各服务之间的相互关系,并根据袋状图结果识别出生态系统服务权衡/协同关系的地理格局和主导服务分布。结果表明:(1)食物供给与调节服务、支持服务之间均为权衡关系,调节服务和支持服务之间大多互为协同关系,而休闲游憩与其他服务间则表现为既不权衡也不协同的兼容关系;(2)生态系统服务间的权衡与协同关系在空间上分布不均,其分区面积与相关性强度(相关系数绝对值)紧密相关。(3)多种服务协同效应较好,权衡效应较强和协同/权衡效应相当的区域面积比例约为 4:3:2;供给为主导服务的区域多分布在研究区边缘的平原地区 and 山间盆地,休闲游憩为主导服务的区域多分布在东部丘陵和平原的过渡的浅山地带,海拔、坡度和植被覆盖较高的区域则以调节和支持服务为主导服务。基于袋状图生态系统服务协同分区及主导生态系统服务识别对优化生态保护红线布局、补充保护范围及实施生态空间用途管制具有重要的实践指导意义。

关键词:生态系统服务;权衡/协同;Bagplot 袋状图;相关系数;InVEST 模型;太行山地

The trade-offs and synergistic relationships among ecosystem services based on bagplots and correlation coefficients: a case study in Taihang Mountains

LI Maojuan^{1,2,3}, LI Tianqi^{3,4,*}, ZHU Lianqi³, GU Yanchun¹, ZHANG Dan^{1,2}

1 Department of Geomatics Engineering, Yellow River Conservancy Technical University, Kaifeng 475004, China

2 Henan Surveying and Mapping 3D Real Scene Technology Engineering Research Center, Kaifeng 475004, China

3 College of Geographical Sciences, Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China

4 National Demonstration Center for Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Ecosystem services refer to the various benefits humans derive from nature, including tangible material products and intangible regulatory services. Due to the heterogeneity of ecosystem spatial distribution structures and the complexity of ecological processes, enhancing one ecosystem service may potentially harm another. Therefore, a profound understanding of the interactions between ecosystem services, assessing the trade-offs (where one service's enhancement leads to another's

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合重点项目(U23A2020);河南省自然科学基金面上项目(252300420275);河南省重点研发专项(241111210300);河南省高等学校重点科研项目(24A170021)

收稿日期:2023-10-12; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianqi_li@henu.edu.cn

decline) and synergies (where multiple services improve together), and identifying regional ecological priorities and dominant services are crucial for rational planning, management, and improving human well-being. Combining bagplots with correlation coefficients can not only determine the overall positive or negative correlation between two services but also visually express their spatial interactions, enabling the partitioning of trade-off/synergy zones and identification of dominant services across regions. The Taihang Mountains, as an important water conservation and soil retention functional area, serve as a critical ecological barrier and “water tower” for the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region and the North China Plain. It undertakes significant ecological tasks such as climate regulation, water conservation, sediment retention, and biodiversity conservation. This study aims to explore the trade-offs and synergies among ecosystem services in the Taihang Mountains and, based on these findings, delineate ecological service zones to support ecological conservation and high-quality development in the Taihang Mountains and the North China Plain. The study employed methods such as yield spatialization, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model, and ArcGIS kernel density analysis to assess the provisioning services (food supply), regulating services (water yield and carbon density), supporting services (soil retention and habitat quality), and cultural services (leisure and recreation) of the Taihang Mountain ecosystem. By combining linear Pearson correlation coefficients with nonlinear bagplots, the study conducted an in-depth analysis of the interrelationships among these services. Furthermore, based on the bagplot results, the study identified the geographical patterns and dominant service distributions of ecosystem service trade-offs and synergies. The results indicate that: (1) There are trade-offs between food supply services and both regulating and supporting services, while most regulating and supporting services exhibit synergistic relationships with each other. Leisure and recreation services, on the other hand, show neither trade-offs nor synergies with other services, representing a compatible state; (2) The spatial distribution of trade-offs and synergies among ecosystem services is uneven, with the area of each zone closely related to the strength of correlation (absolute value of correlation coefficient); (3) The ratio of areas with strong synergy, strong trade-offs, and balanced synergy/trade-offs among multiple services is approximately 4:3:2. Regions where provisioning services dominate are mainly located in the plain areas and intermountain basins at the edges of the study area. Areas dominated by leisure and recreation services are mostly found in the shallow mountainous zones transitioning from eastern hills to plains. Other regions with higher altitudes, slopes, and vegetation cover are primarily dominated by regulating and supporting services. Identifying synergistic zones and dominant ecosystem services based on bagplots has important practical significance for optimizing the layout of ecological protection red lines, supplementing protection areas, and implementing regulations on the use of ecological spaces.

Key Words: ecosystem services; trade-off and synergistic; bagplot; correlation coefficient; InVEST model; Taihang mountains

生态系统服务是人类从自然中获取的各种惠益,包括有形的物质产品和无形的调节服务^[1-2]。随着人类对自然资源的开发越来越深入,尤其是人类对自然资源和生态过程的干预对生态系统及其提供的服务造成了严重的压力^[3]。根据《千年生态系统评估报告》,全球约有 60%的生态系统服务处于某种程度的退化状态^[4]。由于生态系统空间分布结构的异质性和生态过程的复杂性,提升某种生态系统服务有可能导致另外一种生态系统服务受到损害^[5-6]。因此,深入理解生态系统服务之间的相互作用关系,评估生态系统服务之间此消彼长的权衡作用和相互促进的协同作用,识别区域主要生态问题和主导生态系统服务,对合理的规划和管理生态系统服务以及提升人类福祉具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕生态系统服务权衡/协同的关系识别及空间制图开展了大量研究。戴尔阜等^[7]将生态系统服务权衡/协同研究方法总结为情景模拟方法、统计学方法和空间分析方法等。情景模拟方法主要通过土地利用情景和气候变化模拟等,从未来生态系统服务管理的角度进行权衡分析^[8-9],但由于是对未来生态系统服务进行评估,设定的土地利用和气候等情景是否科学以及预测是否准确难以检验。相关系数和聚类分析等统计学方法大多基于生态系统服务之间存在线性关系的假设,然而部分研究者认为生态系统服务在空间和时间上是自然交互而不仅仅是线性关系^[10-12],国内外多位学者的研究成果也证明了生态系统服务

之间的非线性关系^[13-14];另一方面,相关系数等线性分析方法存在信息含量低的缺陷,仅能够确定两种服务之间总体的正负线性关系,难以实现空间上的量化表达,不利于研究区域内部差异^[15-17]。有学者将空间制图方法如均方根误差法^[18]等引入到区域生态系统服务权衡/协同关系研究中,用于从空间上量化生态系统服务之间的权衡强度,然而该方法认为只有服务效益值相等时关系才为协同关系,如若效益值不相等则为权衡关系,存在一定的片面性。目前研究或大多集中在整体上基于统计关系的数量分析探究生态系统服务权衡与协同关系,或缺少区域内部时空差异的科学空间表达。因此,需要引入新的分析方法,既要考虑生态系统服务权衡/协同的非线性关系,又要能够实现区域权衡/协同差异性表达。Jokpe 等^[13]提出使用 bagplot(袋状图)分析生态系统服务之间的权衡/协同关系,并绘制了欧洲生态系统服务的相互作用图,该方法在中国东部南四湖流域^[19]和法国西北部^[20]的生态系统服务权衡/协同分析中得到一定的实践应用。将袋状图与相关系数相结合,既可以从整体上确定两种服务的正负相关性,又能更为直观地获得生态系统服务相互作用的空间表达,实现多种生态系统权衡/协同分区及区域主导服务识别。

太行山是中国重要而典型的山脉,地形陡峭,土壤贫瘠,但居住人口多达 1097.5 万人,与同为中国典型山地的横断山地和黔桂喀斯特山地相比,人地矛盾最为突出^[21],食物供给难以满足人类发展,山地生态系统也更为脆弱。同时,太行山是我国重要的水源涵养和土壤保持功能区,作为京津冀城市群和华北平原的生态屏障和“水塔”,承担着气候调节、水源涵养、土壤保持、生物多样性保育等重大生态任务,研究山地生态系统服务权衡/协同关系、进行权衡/协同分区及识别主导服务对太行山地乃至华北平原的生态保护和高质量发展至关重要。因此,本文根据太行山地实际生态状况、区域生态功能定位和人类福祉需求,选择供给(食物供给)、调节(产水服务和固碳服务)、支持(土壤保持和生境质量)以及文化(休闲游憩)4类6种生态系统服务,基于线性(Pearson 相关系数)和非线性(Bagplot 袋状图)相结合的方法讨论生态系统服务对之间的相互关系,并进行多种生态系统服务分区和主导服务识别。

1 研究区概况、数据来源与处理

1.1 研究区概况

太行山是我国重要的地理分界线,位于黄土高原和华北平原之间,北起西山,南至王屋山,西接黄土高原,东临华北平原,跨越北京市、山西省、河南省和河北省,呈东北—西南走向,南北绵延 800km,东西宽约 200km。本研究范围(110°14'E—116°35'E, 34°34'N—40°47'N)特指太行山过境的 101 个县级行政单元(图 1),总面积约 $1.37 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。太行山地质基底是复式单斜褶皱,东侧为断层构造,山前则发育典型的洪积扇和冲洪积平原。区域内多东西向横谷,山势东部陡峭西部和缓,地势西北高东南低,大部分海拔在 1200m 以上。海拔高差和地形起伏较大,海拔最低约 14m,最高超过 3000m,最陡处坡度约达 78°。太行山西翼连接黄土高原,东翼由中山、低山、丘陵过渡到平原,山间盆地较多,南部山西省境内分布着晋中、长治和泽州三大盆地。

1.2 数据来源与处理

本研究所使用数据包括土地利用类型、地形、土壤、植被、气象、道路、自然景观分布和统计年鉴等。(1)土地利用类型(2018 年):来源于中国科学院资源环境科

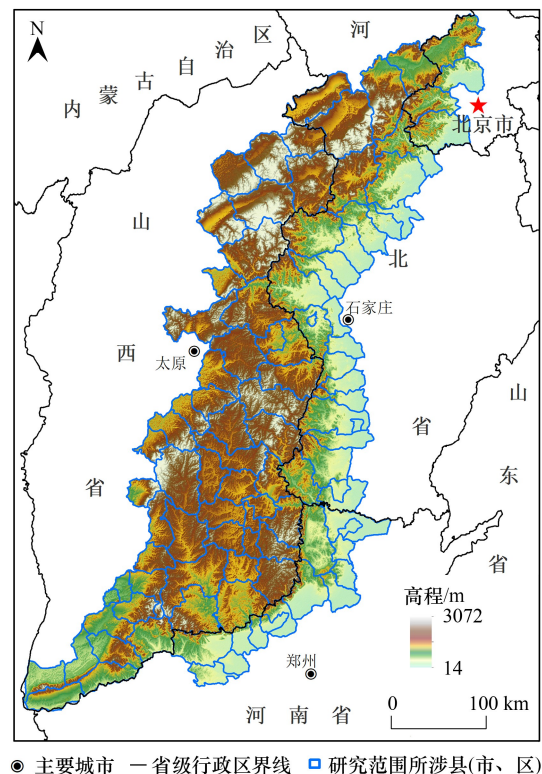


图 1 研究区位置范围、气象站点和 DEM

Fig.1 Location range, meteorological stations, and DEM of study area

学数据中心,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。(2)地形数据 DEM:来源于地理空间数据云 ASTER GDEM,空间分辨率 30m。(3)土壤数据:包括土壤质地、土壤有机质、土壤有机碳含量和土壤深度,来源于国家青藏高原数据中心的中国土壤质地空间分布数据和中国土壤有机质数据集^[22],土壤深度根据土壤剖面深度获得。(4)植被数据(2018 年):NDVI 来源于中国科学院资源环境科学数据中心年度植被指数空间分布数据集^[23],采用像元二分模型^[24]进行变换获得植被覆盖度(VCF)。(5)气象数据:包括研究区及周边 246 个气象站点,来源于中国气象科学网中国地面气候资料日值数据集,运用 ANUSPLIN 插值软件生成研究区 1986—2018 年的月降水量、年降水量和多年平均降水量;太阳辐射数据来源于国家青藏高原数据中心全球高分辨率地表太阳辐射数据集(1983—2018)^[25],经处理生成研究区 2018 年太阳辐射逐月值。(6)道路数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心全国道路数据集,包括高速公路、铁道、国道、省道和县道。(7)自然景点分布数据(2020 年):根据百度地图 POI 采集,删除重复记录并根据建设用地位置和人文特征的关键字,手动去除偏人文特色的景点后获得。(8)统计年鉴:来源于统计年鉴分享平台和地方统计局统计年鉴,查找研究区包含县区 2018 年的粮食、油料、肉蛋奶类产量。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估方法

本研究采用统计数据空间化、InVEST 模型(v.3.9.0)和 ArcGIS 核密度分析分别对食物供给(Food supply, FS)、产水服务(Water yield, WY)、土壤保持(Sediment retention, SR)、固碳服务(Carbon density, CD)、生境质量(Habitat qaulity, HQ)和休闲游憩(Leisure & recreation, LR)6 种服务进行评估和空间制图,所需参数和计算过程见表 1。

表 1 生态系统服务评估数据需求及说明
Table 1 Data commands and descriptions of ecosystem services assessment

服务类型 Service types	模型与方法 Model and method	数据需求及说明 Data commands and descriptions
食物供给 Food supply	产量 NDVI 分配	根据各个县级行政区内耕地和草地的 NDVI 对食物产量空间化,粮食、油料产量按照 NDVI 值分配给耕地栅格,肉蛋奶类产量按照 NDVI 值分配给草地栅格。 ①土地利用 100m 栅格;②多年平均降水量(mm);③参考蒸散量(mm):利用模型推荐的 Modified-Hargreaves 法计算;④植物可利用含水量(PAWC):采用周文佐等 ^[26] 非线性拟合土壤水分常数的模型估算;⑤流域:根据研究区 DEM 提取;⑥根系限制层深度(mm):用土壤深度代替,根据研究区土壤剖面深度插值获得;⑦生物物理表:参考 InVEST 模型根系深度表和联合国粮农组织蒸散系数指南获得;⑧Zhang 系数:降水特征参数,根据经验和水文站实际径流量进行调整校验,本研究取 10。
产水服务 Water yield	InVEST 模型 Water yield 模块	①土地利用 100m 栅格;②降雨侵蚀力因子(R):采用 Wischmeier ^[27] 月尺度模型计算;③土壤可蚀性因子(K):采用 Williams EPIC ^[28] 模型计算;④植被覆盖因子(C):根据土地利用类型赋值或植被覆盖度计算获得;⑤水土保持措施因子(P):参照美国农业部手册及相关文献,结合当地实际情况进行赋值;⑥DEM 及流域。
土壤保持 Sediment retention	InVEST 模型 SDR 模块	①土地利用 100m 栅格;②碳密度:根据以往文献研究结果进行降水量修正后获得。参考 Fang ^[29] 、Tang ^[30] 、Zheng ^[31] 和 Zhao ^[32] 等对中国不同土地利用类型碳密度的研究结果,根据 Alam ^[33] 降水量与生物量碳密度、土壤碳密度的关系,对全国地上生物量、地下生物量和土壤碳密度进行修正获得研究区碳密度。
固碳服务 Carbon density	InVEST 模型 Carbon 模块	①土地利用 100m 栅格;②威胁因子图层:耕地、城镇用地和农村居民点土地利用/覆被数据提取,道路数据分为铁高速公路、铁路、国道、省道和县道;③威胁源数据表:包括威胁因子名称、最大影响距离和相对权重,参考《InVEST 模型用户手册》和相关文献赋值;④威胁源敏感性:生境类型对威胁因子的敏感性,参考 InVEST 模型生态因子划分标准和相关文献,结合研究区实际情况赋值;⑤半饱和常数:系统默认 0.5。
生境质量 Habitat qaulity	InVEST 模型 Habitat qaulity 模块	①土地利用 100m 栅格;②威胁因子图层:耕地、城镇用地和农村居民点土地利用/覆被数据提取,道路数据分为铁高速公路、铁路、国道、省道和县道;③威胁源数据表:包括威胁因子名称、最大影响距离和相对权重,参考《InVEST 模型用户手册》和相关文献赋值;④威胁源敏感性:生境类型对威胁因子的敏感性,参考 InVEST 模型生态因子划分标准和相关文献,结合研究区实际情况赋值;⑤半饱和常数:系统默认 0.5。
休闲游憩 Leisure & recreation	Kernel density 分析	ArcGIS 核密度模块(Kernel density)对自然景点分布数据分析获得。

2.2 生态系统服务权衡/协同关系分析方法

将 6 种生态系统服务评估结果统一到 1km×1km 格网中,并对格网进行编号,研究区共计 138733 个格网

单元。由于生态系统服务数据并不完全符合正态分布,因此通过 Python 语言的 Quantile 函数将数据进行正态分布改善和标准化,使数据均值为 0,标准差为 1。本研究使用 R 语言 bagplot 包进行计算制图,生成袋状图来描述生态系统服务对之间的相互关系。袋状图由标记最高半空间深度的点组成,最深的位置点称为深度中位数,周围包含 50%数据点位置的区域称为袋,将袋放大 3 倍生成的边界称为围栏,袋和围栏中间的区域称为环,围栏外数据点视为异常值。袋的方向用来描述相关性,袋的形状用来描述分布不对称性和异常值,袋状图将深度中位数的位置作为参考点,可将袋状图分为 4 个象限(图 2),每个象限表示生态系统服务 A 和 B 关系的可能性空间。正/正空间(两种服务相对表现良好)位于深度中位数的右上角,负/负空间位于左下角。如果袋的方向从左下到右上主要覆盖负/负和正/正空间,则认为两种服务总体为协同关系;如果袋的方向从左上到右下主要覆盖正/负和负/正空间时,则认为两种服务总体为权衡关系;若所有 4 个空间被均等覆盖,则认为存在兼容关系^[13]。

为便于比较,使用 Pearson 相关系数 r 对两种生态系统服务的相关关系进行量化,结合袋状图特征对生态系统服务间的权衡/协同关系进行解释。此外,将累积相关系数 R 作为一个指标,根据生态系统服务与相关矩阵中所有其他服务的协同或权衡作用,对生态系统服务进行排序。 ES_i 的累积 R_i 为特定生态系统服务 i 贡献的所有成对相关系数 r_i 的总和,表明特定生态系统服务的总体冲突程度。其基本原理为,对于某种特定的生态系统服务,累积 R_i 值越为正,则其与所有其他生态系统服务协同作用越大/权衡作用越少。将袋中的所有数据点映射到选定的生态系统服务对上,识别分析生态系统服务对之间协同作用(正/正、负/负)、权衡作用(正/负、负/正)和无关(异常值)的区域,绘制生态系统服务相互作用图。将 6 种生态系统服务按照正、负区域叠加划分获得多种生态系统服务分区。取标准化后数值最大的一种服务作为格网单元主导服务,6 种服务均为负值视为无主导服务(N),获得研究区主导生态系统服务空间分布。

3 结果与分析

3.1 两种生态系统服务权衡/协同关系

基于袋状图和 Pearson 相关系数,本研究从协同关系、权衡关系和兼容关系的角度确定了每个生态系统服务对的相互作用。袋状图的方向和形状显示,在整个研究区的 15 对生态系统服务中总体上为权衡、协同和兼容的关系均存在,线性相关系数结果与袋状图分析的结果相互印证(图 3)。

5 种生态系统服务对之间为相对明显的协同关系,主要发生在调节服务和支持服务之间,其中以 CD 与 HQ 之间的协同效应最强($r=0.85$),SR 与 HQ($r=0.63$)次之,总体上表现为较强的协同关系,SR 与 CD($r=0.45$)、WY 与 SR($r=0.37$)也存在较为明显的协同效应,WY 与 HQ($r=0.18$)总体上为协同关系但协同效应较弱。以 CD 与 HQ 为例,显示其相互依赖关系的袋状图以拉长的形状为特征,图形从负/负向正/正空间方向沿对角线延伸,袋和环区域只有少部分覆盖负/正和正/负空间,整个图形呈细长椭圆形,无论是相关系数还是袋状图形状,都表现为较强的协同效应。4 种生态系统服务对之间总体为权衡关系,主要发生在供给服务与调节、支持服务之间。FS 与 HQ、FS 与 CD 之间线性关系最强, r 分别为 -0.58 和 -0.56 ,总体上表现为较强的权衡关系,FS 与 SR($r=-0.44$)权衡效应也较为显著,FS 与 WY($r=-0.14$)总体上为权衡关系但权衡效应较

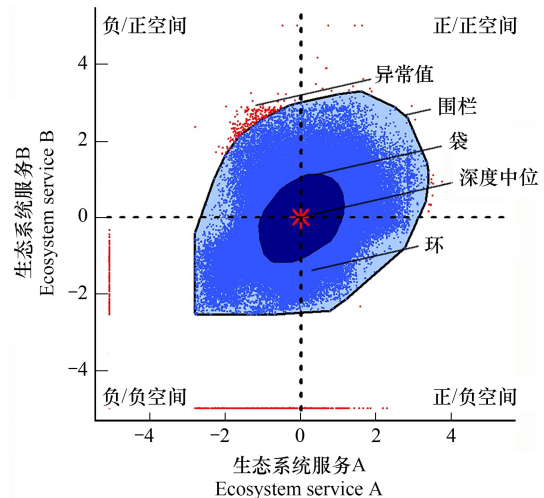


图 2 生态系统服务 A 和 B 袋状图原理

Fig.2 Theory of bagplot for ecosystem services A and B

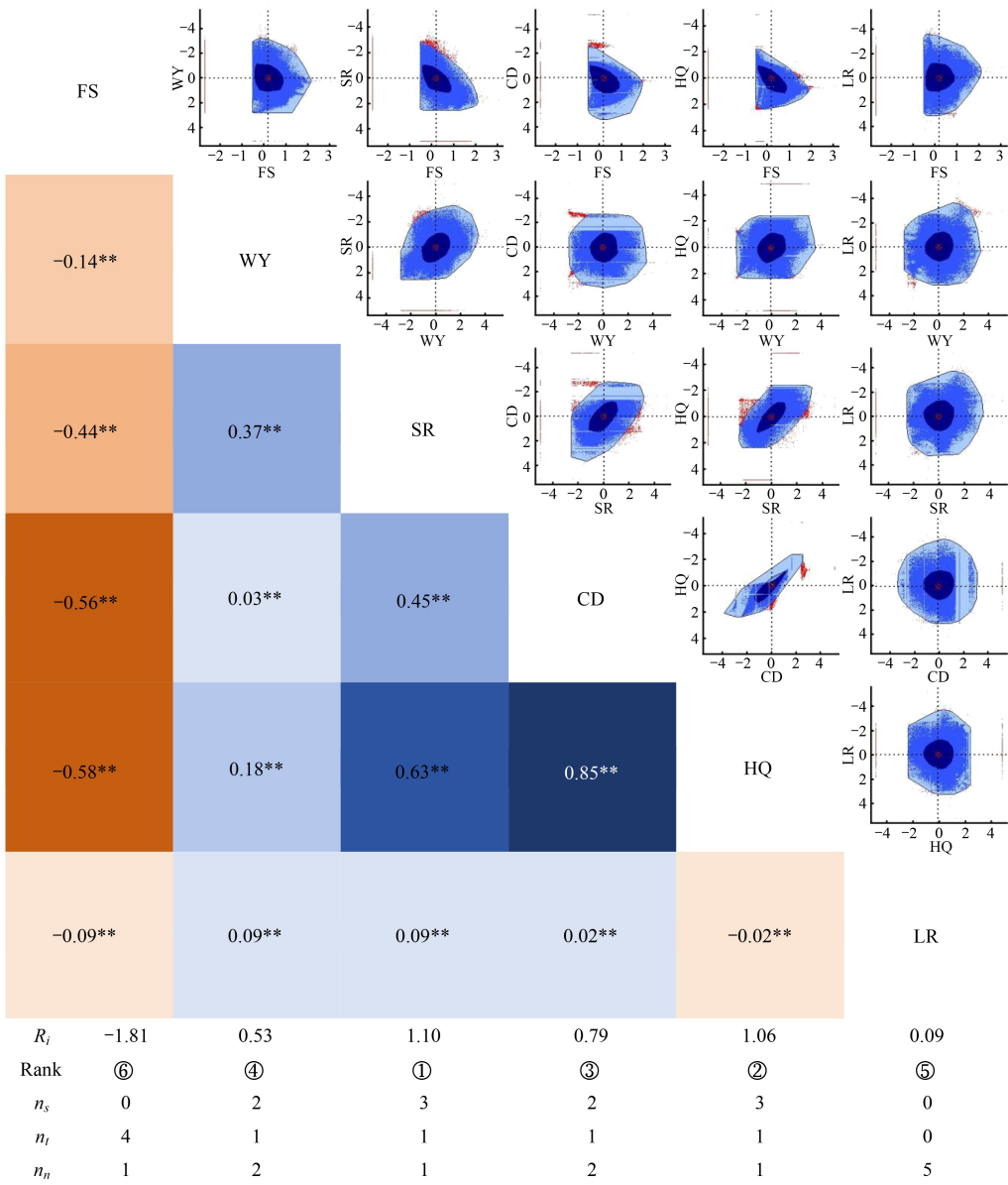


图3 研究区生态系统服务袋状图和相关系数

Fig.3 Bagplots and correlation coefficients of two ecosystem services in study area

表示相关性通过 0.01 水平显著性检验, R_i 为某种生态系统服务累积相关系数, Rank 为生态系统服务协同潜力排序, n_s 、 n_t 和 n_n 分别表示与之协同、权衡和兼容关系的生态系统服务数量。FS: 食物供给; WY: 产水服务; SR: 土壤保持; CD: 固碳服务; HQ: 生境质量; LR: 休闲游憩

弱。以 FS 与 CD 为例, 袋状图从正/负空间延伸到负/正空间, 其袋和环呈斜漏斗形, 从左上角指向右下角, 向 x 值较小方向逐渐变宽。一般来说, 供给服务之间或供给与调节、支持服务之间容易产生权衡。更多生态系统服务对 (6 种) 之间则表现出兼容关系 ($|r| < 0.1$), r 值接近于 0, 袋状图也没有明显的偏向, 主要发生在文化服务与其他服务之间, 此外, WY 与 CD 相关性也较低 ($r = 0.03$), 在整个区域上表现为兼容关系。

此外, 图 4 还显示了每种关系类型相互作用 (协同、权衡、兼容) 的数量。根据累积 R_i 排名, 研究区土壤保持 ($R = 1.10$) 是累积相关系数最高的生态系统服务, 具有最高的协同潜力, 除食物供给外 ($r = -0.44$) 与其他所有其他服务均为正相关关系。生境质量 ($R = 1.06$) 次之, 具有最强的协同效应 ($r = 0.85$) 和权衡效应 ($r = -0.58$)。食物供给为具有最高负累积系数的生态系统服务 ($R = -1.81$), 与其余生态系统服务均呈现负相关关系。

3.2 两种生态系统服务权衡/协同分区

由图4统计,FS与WY在整个区域上协同的面积比例为35.18%,其中正/正空间比例为20.65%,呈马蹄形分布于研究区南部降水量较高的区域,负/负空间比例为14.53%,零散分布于研究区北部和中部;权衡的面积比例为54.78%,其中正/负空间占比31.36%,主要位于研究区边缘平原和南部盆地,负/正空间占比23.42%,主要分布在海拔和坡度较高的山区;无关区域则主要分布于东北和西南部分区域。FS与SR几种空间分布状况同FS与WY较为类似,但权衡区域更多(67.04%)而协同区域较少(22.09%)。FS与CD、FS与HQ无关区域面积比例较低,而权衡区域面积百分比最高(分别为74.18%和81.60%),协同区域占比较低且分布零散。FS与LR之间协同区域面积占比较高且分布连片集中(47.59%),正/正空间主要分布于东部边缘的低山和平原地带,食物供给和休闲游憩值都较高,负/负空间则分布于西部的高山区域,耕地和旅游景点开发程度都较低。

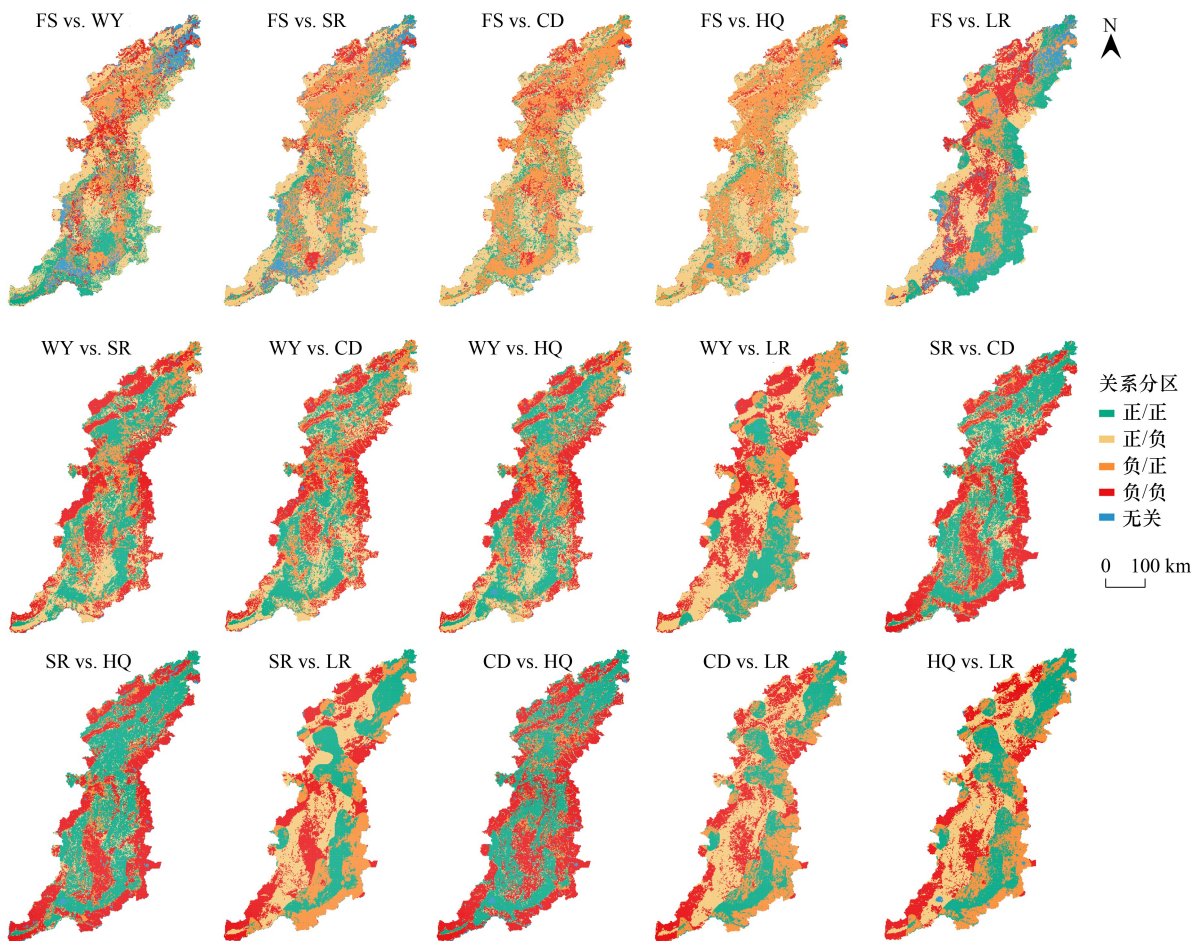


图4 研究区两种生态系统服务之间权衡/协同/无关分区

Fig.4 Trade off / synergy / unrelated zoning between two ecosystem services in study area

4种调节服务和支持服务之间由于大多互为协同关系,因此协同区域面积占比均较高(56.98%—84.82%),协同区域分布状况也较为类似,负负空间大多呈条带状分布在研究区边缘和南部盆地等食物供给较高的区域,正/正空间呈片状分布于中间高海拔、高坡度的区域;权衡区域占比较低且分布较为零散,主要分布在研究区中段和南部盆地附近。文化服务与调节、支持服务之间权衡/协同比例和分区都较为类似,协同和权衡面积占比较为接近,正/正空间主要分布在研究区东北部、五台山附近及东南部,负/负空间则分布在研究区西部和南部盆地,正/负空间主要在研究区西部与协同区域交错分布,负/正空间则呈条带状分布在研究区

东部边缘。总体来看,两种服务之间权衡/协同的面积大小与相关系数绝对值高低相对应, $|r|$ 越高, 权衡/协同的区域面积越大。

3.3 多种生态系统服务权衡/协同分区及主导服务分布

由图 5 统计结果, 研究区仅有 3.09% 的区域 6 种服务均处于较高供给水平, 为研究区协同效应最好的区域。15.41% 的区域生态系统服务 5 正 1 负, 协同效应较高, 其中 WY/SR/CD/HQ/LR 协同的比例最高, 占研究区总面积的 8.06%。4 正 2 负的区域面积最大, 所占比例为 24.22%, 其中 WY/SR/CD/HQ (8.83%) 和 SR/CD/HQ/LR (5.48%) 协同的状况最为普遍。3 正 3 负的区域面积比例为 21.61%, 以 FS/WY/LR (6.62%) 和 SR/CD/HQ (3.96%) 协同的状况为主。2 正 4 负的区域占研究区面积 21.84%, 主要以 FS/LR (10.17%) 和 FS/WY (4.45%) 协同的状况为主。1 正 5 负的区域面积占比为 13.49%, 其中 FS 为正值的比例为 12.46%。2 正 4 负和 1 正 5 负的区域基本包含了研究区食物供给服务的热点区域, 分布在研究区边缘地带和南部盆地。6 种服务均为负值的区域占比仅有 0.34%。总体上看, 研究区生态系统服务协同效应较好 (6 正 0 负、5 正 1 负和 4 正 2 负) 的区域约占 42.72%, 协同/权衡效应相当 (3 正 3 负) 的区域占比为 21.61%, 权衡效应为主 (2 正 4 负、1 正 5 负和 0 正 6 负) 的区域约占 35.67%。

由图 6 统计结果, 食物供给主导的区域面积最大, 约占研究区总面积的 31%, 与 2 正 4 负和 1 正 5 负的区域重合度很高, 大多分布在研究区耕地范围内。以产水服务为主导的区域面积比例为 18.84%, 在研究区北部和南部海拔较高地区均有分布, 中部区域产水服务主导的区域分布较少。主导服务为土壤保持的区域面积百分比为 14.46%, 呈“S”型分布在研究区中部高坡地区。以固碳服务和生境质量为主导服务的区域面积比例分别为 12.20% 和 7.39%, 大多分布在研究区高海拔地区, 土地利用类型主要为林地, 植被覆盖度高。休闲游憩服务主导的区域面积百分比为 16.14%, 基本分布在自然景点密度较高的地带。

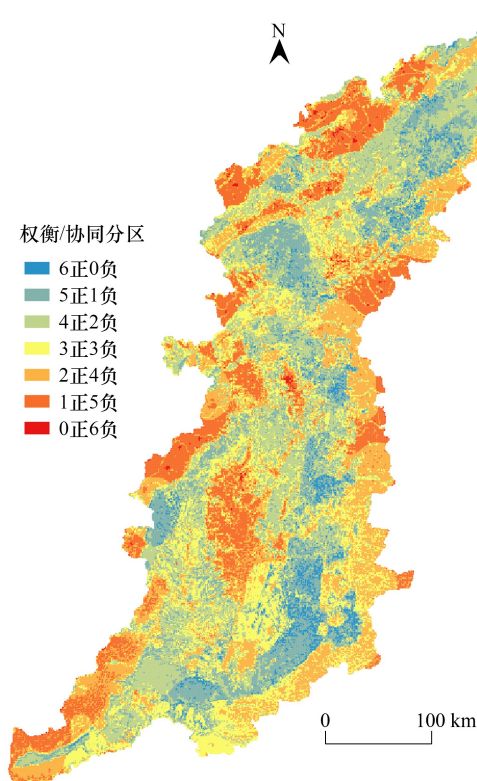


图 5 研究区多种生态系统服务权衡/协同分区

Fig.5 Trade off/synergy zoning between multiple ecosystem services

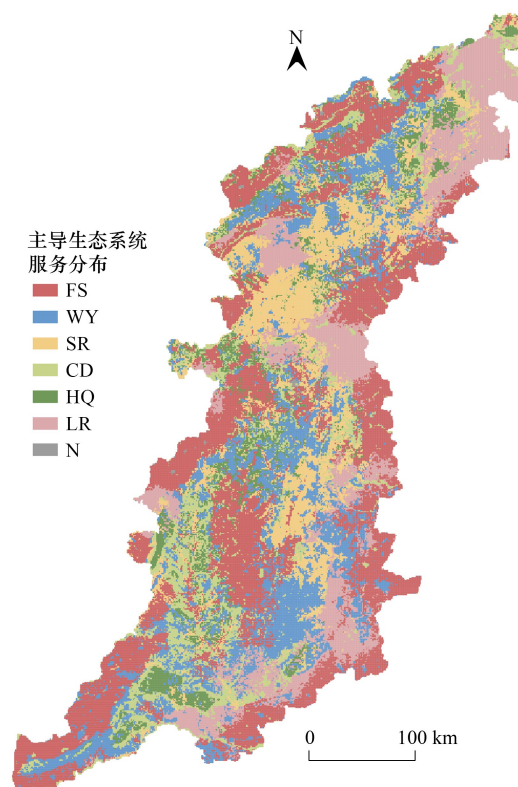


图 6 研究区主导生态系统服务分布

Fig.6 Distribution of dominant ecosystem service in study area

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 两种生态系统服务之间的相互作用

本论文研究了 15 个生态系统服务对的相互作用,较多数的生态系统服务对之间表现为兼容关系(没有显著的线性相关),部分生态系统服务对表现出协同关系,少数生态系统服务对表现出权衡关系。食物供给与调节和支持服务之间存在权衡,国内外学者的相关研究结果印证了这一点。Raudsepp-Hearne 等^[34]通过分析加拿大魁北克省 12 种生态系统服务的相互作用,发现作物产量与其他服务之间为权衡关系;Jopke 等^[13]研究了整个欧洲 45 各生态系统服务对之间的关系,发现作物产量与调节服务之间呈现显著的负相关关系;余玉洋等^[35]研究发现粮食产量在秦巴山地全域尺度上与初级净生产力、土壤保持以及生境质量之间均为权衡关系。本研究中食物供给的累积相关系数 R 为绝对值最大的负值也强调了食物供给与其他服务之间的权衡作用。由此可见,人类对自然资源的改造和索取产生的食物供给服务,与调节和支持服务之间多存在此消彼长,因此更应该把握好开发的“度”,避免由于对区域的过度开发导致区域内其他生态系统服务失衡,进而影响区域人类福祉。

调节与支持服务之间大多为协同关系,与国内其他地区的研究案例结果较为相似。武文欢等^[36]对 2010 年鄂尔多斯市产水服务、固碳服务和土壤保持 3 种服务之间的关系研究结果均为正相关;尹礼唱等^[37]基于公里格网单元对国家屏障区产水、固碳和土壤保持 3 种服务的研究结果表明,3 种服务两两之间主要为协同和兼容关系;余玉洋等^[35]发现在秦巴山地全域尺度上,产水服务、土壤保持、生境质量和 NPP 之间均存在较为显著的协同作用。本研究中产水服务与固碳服务相关系数仅为 0.03,表现为兼容作用,同时鄂尔多斯市的研究结果($r=0.183$,二者不显著相关)、东北森林带($r=0.039$)和川滇—黄土高原屏障带($r=-0.025$)均表现出类似的规律^[36—37]。

与其他研究相反,本研究发现休闲游憩与其他服务没有明显的交互作用,这可能与研究区自然景观的开发方式有关。休憩服务的分析表明,太行山地区游憩服务的开发受自然景观资源的空间分布影响较为显著。由于太行山海拔高差大,多悬崖峭壁,导致其自然景观开发仍然停留在较小尺度范围,多集中在中山、浅山和山前地带,因此该服务类型较少与其他生态系统服务产生权衡/协同的交互作用。

4.1.2 袋状图与相关系数及累积相关系数

目前相关系数是比较研究结果最常用的方法,袋状图法由于其数据处理方式较为复杂,应用潜力还亟待深入,研究生态系统服务关系的案例也较少,但这些研究实践均表明袋状图揭示的结果与相关系数产生的结果类似^[13,19—20],使用袋状图分析生态系统服务权衡/协同具有一定的科学性。生态系统服务之间的协同/权衡关系可以通过袋状图进行很好地解释说明,识别和绘制袋状图的 4 个象限更是理解和管理生态系统服务新见解的关键——可以确定正/正空间,并在可比较的环境条件下将其作为管理的参考与蓝图。确定负/负空间并研究其原因同样重要,可以同时提升两种生态系统服务,但有可能处于负/负空间的区域不适合生态系统服务的提升。例如图 6 中研究区边缘食物供给主导的区域,调节和支持服务两两之间多为负/负情境,由于这些区域主要用于作物生产,难以提升产水、土壤保持、固碳和生境质量等服务能力也较为合理。因此,对于袋状图信息的解读远远超出了生态系统服务之间的线性相关系数,能够补充传统生态系统服务之间相互作用的研究。

累积相关系数 R 表明了一种生态系统服务与所有其他生态系统服务的摩擦程度,将复杂的相互作用进行简单的计算就可以对区域生态系统服务进行排序。然而, R 值对生态系统服务的选择高度敏感,且在相关系数较为接近的情况下对相关方向的变化却不敏感,数值接近的 R 可能是由不同的关系模式引起的。例如基于欧洲 3 级编码行政单元的研究结果显示^[13],水源供给和水文调节服务的 R 值非常接近,但水源供给与其他服务表现出 2 种协同关系、3 种权衡关系和 4 种兼容关系,而水文调节与其他服务表现出 7 种协同关系、1

种权衡关系和 1 种兼容关系。因此,表示与此种生态系统服务协同(n_s)、权衡(n_t)和兼容(n_c)关系的生态系统服务数量的参数也很必要。

4.1.3 生态系统服务权衡/协同和主导服务空间格局形成机理

分辨区域主要生态环境问题并划定主导生态功能区,是保障区域生态安全和优化国土资源开发的重要前提。太行山地位于东部平原和西部山地的过渡地带,自然因素、人类活动和社会经济要素都具有过渡和波动的特点。近年来,太行山地快速发展的社会经济与改善环境的生态工程齐头并进,生态系统服务供给产生了较大变化,生态系统服务之间权衡/协同的空间格局也随之发生改变。

海河和黄河携带的泥沙在研究区边缘海拔和坡度较低的地带形成冲击平原,为耕地开垦和农业发展提供了良好的土壤和水源条件,因此,研究区边缘地区 and 山间盆地耕地分布最为广泛。耕地的农业产值在食物供给服务中的贡献值远高于其他土地利用类型,因此耕地以及耕地和草地交错区域成为食物供给为主导服务的区域。在海拔和坡度较高的区域,人类活动影响也较小,土地利用类型多为植被覆盖度高的林地和草地。已有研究表明植被覆盖度越高,固碳、土壤保持和生物多样性保育等服务较好^[38],因此,这些区域成为固碳、土壤保持和生境质量的主导服务区域,相对应地,这 3 种服务彼此之间也存在强烈的协同关系(r 分别为 0.45、0.63 和 0.85),在空间上协同的面积百分比约为 24%。降水量和蒸散量是影响产水服务的关键因子,不同土壤类型的蓄水能力也影响产水服务的供给能力^[39],因此,降水量高、植被蒸散量低且土壤蓄水能力弱的区域成为产水服务的主导区域。研究区东部丘陵和平原的过渡地带以及五台山附近为休闲游憩服务的主导区域,这些地区具备良好的气候条件和自然生境,海拔和坡度中等,植被覆盖较高,位于道路通达性较好的浅山和山前地带,适合开发为休闲游憩价值较高的自然景区和生态农业旅游区。此外,生态保护政策和社会经济需求等因素,也影响着生态系统服务权衡/协同和主导服务空间格局形成。为实现生态系统的可持续管理和利用,需要综合考虑各种因素带来的生态系统服务变化,制定合理的政策和管理措施,以促进生态系统服务的协同发展和主导服务的优化布局。

4.1.4 生态系统服务协同区域识别及主导生态系统服务功能分区的实践意义

生态系统服务及权衡/协同研究的一个核心目标是将生态系统管理纳入发展决策中,促进区域的可持续发展。生态系统服务热点区域和重点生态功能区的识别,是生态保护红线划定的重要内容^[40],袋状图识别的多种生态系统服务正向协同区域是多种生态系统服务热点区域的叠加,也是生态保护的重点区域,能够为生态保护红线的格局优化和范围补划提供科学依据。

生态空间管制是国土空间规划背景下对国土空间配置与生态系统保护的整体谋划,生态空间管制分区需要科学的理论逻辑框架和实施路径,“生态系统服务判别—生态用地分类—管控分级分类”的生态空间管制逻辑同时考虑到了生态功能的权衡、生态功能与土地利用类型的匹配以及行政管理的衔接,得到多数学者的认同^[41—42]。基于正向效应最大的主导生态系统服务功能确定,进而开展生态空间用途分区管控,对于国土空间生态保护和国土综合整治具有更好的指导作用。

4.2 结论

本论文对太行山地生态系统的食物供给、产水服务、固碳服务、土壤保持、生境质量和休闲游憩 6 种服务进行评估,采用线性的 Pearson 相关系数和非线性的 Bagplot 袋状图相结合的方法,分析了服务之间的相互关系,最后识别出生态系统服务权衡/协同关系的地理格局和主导服务分布。结果表明:

(1) 食物供给服务与调节服务、支持服务之间均为权衡关系,休闲游憩服务与其他生态系统服务之间主要为兼容关系,产水服务、土壤保持、固碳和生境质量之间大多互为协同关系。

(2) 生态系统服务之间权衡/协同分区存在明显的空间差异,两种服务之间权衡/协同的面积大小与相关系数绝对值高低相对应,| r |越高,权衡/协同的区域面积越大;多种服务协同效应较好、权衡效应较强和协同/权衡效应相当的区域面积比例约为 4:3:2;研究区边缘地区 and 山间盆地的耕地以及耕草交错区以食物供给为主导服务,东部丘陵和平原过渡的浅山地带以休闲游憩为主导服务;其他海拔、坡度和植被覆盖较高的区域则

以调节和支持服务为主导服务。

(3) 袋状图揭示的结果与相关系数的结果具有高度一致性,袋状图能够揭示两种生态系统服务组合的可能性空间,补充线性相关系数分析的不足,获得生态系统服务相互作用的空间表达和解释。基于袋状图生态系统服务协同区域识别及主导生态系统服务功能分区对生态保护红线的格局优化、范围补充和生态空间用途分区管制具有重要的实践意义。

参考文献 (References):

- [1] 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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] Daily G C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997: 1-25.
- [3] Koellner T, de Baan L, Beck T, Brandão M, Civit B, Margni M, i Canals L M, Saad R, de Souza D M, Müller-Wenk R. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(6): 1188-1202.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Our human planet*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [5] 殷允可, 李昊瑞, 张铭, 王良杰, 姜姜. 不同气候区生态系统服务权衡空间异质性及其驱动因素——以川滇-黄土高原生态屏障带为例. *生态学报*, 2024, 44(1): 107-116.
- [6] 石金鑫, 梁小英, 李辉蕾, 魏峥. 陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响. *生态学报*, 2023, 43(21): 8958-8972.
- [7] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [8] 林媚珍, 刘汉仪, 周汝波, 龚建周. 多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究. *地理研究*, 2021, 40(9): 2657-2669.
- [9] Du Y J, Li X L, He X L, Li X Q, Yang G, Li D B, Xu W H, Qiao X, Li C, Sui L. Multi-Scenario Simulation and Trade-Off Analysis of Ecological Service Value in the Manas River Basin Based on Land Use Optimization in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(10): 6216.
- [10] 荀斌, 郑莹, 范蓉, 郝蕊芳, 刘宝印. 陕西省生态系统服务权衡/协同关系阈值识别. *生态学报*, 2024, 44(17): 7431-7444.
- [11] 郭婷婷, 丁洪伟, 张浩, 曾昭霞, 刘孝利. 中国西南喀斯特地区生态系统服务权衡/协同研究及展望. *自然资源学报*, 2024, 39(6): 1384-1398.
- [12] 刘颂, 张浩鹏, 裴新生, 王颖. 长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例. *生态学报*, 2024, 44(5): 1780-1790.
- [13] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Interactions among ecosystem services across Europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [14] Hong G, Liu S J, Liu W P, Wu X F. Nonlinear trade-off relationship and critical threshold between ecosystem services and climate resilience for sustainable urban development. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 103: 105253.
- [15] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [16] 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. *中国生态农业学报: 中英文*, 2020, 28(10): 1509-1522.
- [17] Li Y, Luo H F. Trade-off/synergistic changes in ecosystem services and geographical detection of its driving factors in typical Karst areas in Southern China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110811.
- [18] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [19] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122338.
- [20] Ellili-Bargaoui Y, Walter C, Lemerrier B, Michot D. Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107211.
- [21] 戴尔阜, 王亚慧, 马良, 李双成, 张红旗, 辛良杰, 徐尔琪, 高江波, 朱连奇, 王玉宽. 中国典型山地土地利用变化与资源生态效应. *自然杂志*, 2018, 40(1): 33-40.
- [22] 戴永久, 上官微. 中国土壤有机质数据集. 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- [23] 徐新良. 中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, <https://www.resdc.cn/>

data.aspx? DATAID=257, 2021-01-05.

- [24] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [25] 唐文君. 全球高分辨率(3 小时, 10 公里)地表太阳辐射数据集(1983—2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- [26] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 中国土壤有效含水量分布(英文). Journal of Geographical Sciences, 2005, (1): 5-14.
- [27] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1965.
- [28] Williams J, Nearing M, Nicks A, Skidmore E, Valentin C, King K, Savabi R. Using soil erosion models for global change studies. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 51: 381-385.
- [29] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Stuart Chapin F 3rd. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [30] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [31] Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, Dai Y J, Shanguan W. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(6): 662-670.
- [32] Zhao S Q, Zhu C, Zhou D C, Huang D, Werner J. Organic carbon storage in China's urban areas. PLoS One, 2013, 8(8): e71975.
- [33] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [34] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [35] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [36] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 胡熠娜. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [37] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [38] Chuai X W, Huang X J, Lai L, Wang W J, Peng J W, Zhao R Q. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. Environmental Science & Policy, 2013, 25: 50-61.
- [39] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [40] 范小杉, 高吉喜, 何萍, 冯朝阳, 徐杰, 侯利萍, 任颖, 王德旺, 贾娇, 侯春飞. 基于生态安全问题的生态保护红线管控方案. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4749-4754.
- [41] 岳文泽, 夏皓轩, 吴桐, 熊锦惠, 钟鹏宇, 陈阳. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估. 生态学报, 2022, 42(15): 6406-6417.
- [42] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076.