

伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同 效应多尺度分析

张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红

(河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 森林生态系统服务权衡与协同研究已成为当前相关学科的研究热点和前沿, 对服务权衡与协同关系的多尺度分析有助于更加有效地实施森林资源管理。综合森林类型图、NDVI、气象和土壤等多源数据, 借助CASA模型、InVEST 3.2模型和ArcGIS 10.2软件, 开展伏牛山地区森林生态系统服务评估, 运用空间叠置方法从多个空间尺度(区域、南北坡、垂直带)探讨服务权衡与协同效应。结果表明: ① 研究区森林生态系统平均蓄积量为 $49.26 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 碳密度为 $156.94 \text{ t}/\text{hm}^2$, 供水深度为 494.46 mm , 土壤保持量为 $955.4 \text{ t}/\text{hm}^2$, 生境质量指数为0.79。② 区域尺度上, 28.79%的森林服务之间存在高协同效应, 10.15%的森林存在低协同效应, 61.06%的森林存在强权衡和弱权衡效应。③ 南北坡尺度上, 南坡服务之间的协同关系优于北坡。垂直带尺度上, 南坡中山落叶阔叶林带(SIII)服务之间协同关系最好, 北坡低山落叶阔叶林带(NI)协同关系最差。

关键词: 森林生态系统服务; 权衡/协同; 多尺度; CASA模型; InVEST模型; 伏牛山地区

DOI: 10.11821/dlxb202005007

1 引言

陆地生态系统为人类社会提供多种多样的产品和服务, 在形成与维持人类生存与发展的环境条件及物质基础方面发挥重要作用^[1-2]。不同方式的自然资源利用与管理导致生态系统功能的明显变化, 使生态系统的物质生产、水源供给、土壤保持和碳储存等服务之间形成此消彼长的权衡或相互增益的协同关系^[3-4]。千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)指出人类对某些生态系统服务的利用程度正在快速增加, 导致一些关键类型的服务尤其是调节服务和文化服务的供给能力在持续衰减, 严重影响人类福祉, 直接威胁区域乃至全球的生态安全^[5]。为了减少服务之间相互关系的负面效应, 服务权衡关系研究应运而生, 成为当前生态系统服务研究的一个重要议题^[6]。目前, 许多学者在国家、区域以及流域等多种尺度上探讨了生态系统服务之间的权衡关系^[3-4, 8-14], 发现同一对服务在不同研究尺度或不同区域上的权衡与协同关系存在差异性。比如, 研究表明涵养水源与固碳释氧这一对服务在较大空间尺度上主要以协同关系为主^[11-12], 而在中小尺度上则以权衡关系为主^[13-14]。究其原因, 主要是自然条件和生态过程在不同尺度空间均存在不整合或者生态系统服务供给与需求在空间上的不匹配造成的^[15]。不同空间尺度

收稿日期: 2019-03-27; 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671090); 国家重点基础研究发展计划(2015CB452702) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671090; National Basic Research Program of China, No.2015CB452702]

作者简介: 张静静(1991-), 女, 河南柘城人, 博士, 主要从事全球变化与生态系统服务研究。E-mail: zhang1126x@qq.com

通讯作者: 朱连奇(1963-), 男, 河南郸城人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110007014M), 主要从事山地地理环境及资源开发利用的研究。E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

内的利益群体对不同生态系统提供的产品与服务各有侧重,如木材生产、涵养水源等主要服务于区域尺度,而生物多样性、固碳释氧等则服务于全球尺度^[2]。这必然导致不同利益相关者对不同类型生态系统服务重视程度的差异以及管理策略之间的权衡^[15]。因此生态系统服务权衡研究必须超越单一尺度模式,应综合考虑不同空间尺度上利益相关者的实际需求,开展多尺度多类型服务之间的权衡研究,厘清多种服务之间的权衡或协同关系及其尺度依存与空间差异特征,以明确服务权衡管理的优先顺序与侧重点,从而更加有效地实施生态系统服务管理^[8-9, 15]。

森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,为不同尺度区域提供不同类型的服务和福祉^[16-18];而科学认识森林生态系统服务之间的权衡与协同关系是实现森林生态系统多目标经营与管理的前提^[19-20]。国内外学者围绕森林生态系统服务空间格局特征、服务之间相互作用关系以及服务受益方赔偿支付等方面开展了深入研究^[16-17, 21-22],探讨了森林生态系统服务之间的相互关系:供给服务之间以权衡关系为主^[23-24];供给服务与调节、支持及文化服务之间以权衡关系为主^[19, 25-26],但也有少数协同关系^[19, 24];供给服务与支持服务之间普遍以权衡关系为主^[24-25, 27],少数为协同关系^[28];调节服务之间以协同关系为主^[24];调节与支持服务之间既存在权衡关系^[24, 28],也存在协同关系^[29-30];支持服务之间以协同关系为主^[31]。由此,同一种类服务(除供给服务外)两两之间普遍以协同关系为主,而不同种类的两种服务之间权衡/协同关系存在明显的尺度依存和空间差异特征,这将会导致对服务权衡关系的认识存在一定片面性,无法正确引导决策者制定合理的管理措施来提升区域生态系统服务整体水平。而森林生态系统一般位于山区,特殊的地形特征导致服务之间的相互作用呈现复杂的空间异质性特征,然而多数研究忽略了地形的影响,难以更好地为决策制定提供更加精准的信息。因此,从多种空间尺度上全面探讨服务权衡/协同关系是当前森林生态系统服务与可持续经营研究亟需解决的问题。

伏牛山处于中国北亚热带向南暖温带过渡的地区,也是秦岭山地与黄淮海平原的过渡地带,具有优越的自然环境条件,是中国重要的生态功能区。但该区面临着比较严峻的生态环境问题^[32],这些问题的产生都是在人类活动或自然因素影响下不同生态系统服务之间相互竞争的结果。为了使该区更好地发挥经济效益,而又不减弱生态效益与社会效益,有必要深入研究该区森林生态系统服务之间权衡与协同关系。目前针对该区森林生态系统服务的研究,多集中于局部地区如宝天曼自然保护区、西峡县等,或仅探讨某一类型的森林生态系统如栎类林、锐齿栎林生态系统^[33-35],没有从综合性和整体性的角度展开研究,使相关研究成果呈现局域化和碎片化,而服务之间作用关系的研究更是少见,很难为管理者提供系统的森林可持续经营方案。鉴于此,本文以伏牛山地区森林生态系统为研究对象,综合森林类型图、NDVI、气象和土壤等多源数据,借助CASA模型、InVEST 3.2模型和ArcGIS 10.2软件,开展综合森林生态系统服务评估,采用空间叠置等方法,从不同空间尺度(区域、南北坡、垂直带)探讨服务权衡与协同效应,有助于制定分区域、分类型的森林资源管理方案,可为伏牛山地区森林可持续经营管理提供理论指导和决策支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

伏牛山位于河南省西部,是秦岭山系的重要余脉,呈西北—东南走向,西至河南、陕西省界,东至方城北部,北与熊耳山、外方山相接,南至南阳盆地。研究区包括8个

完整县域单元,面积约2万 km^2 ,卢氏、栾川、嵩县和鲁山位于伏牛山北坡,内乡、西峡、镇平和南召位于南坡(图1)。地势自西向东逐渐降低,海拔介于50~2200 m,地貌类型复杂,高差起伏较大;植被类型属于北亚热带常绿落叶混交林向暖温带落叶阔叶林的过渡类型,植被和气候特征垂直差异显著^[36]。

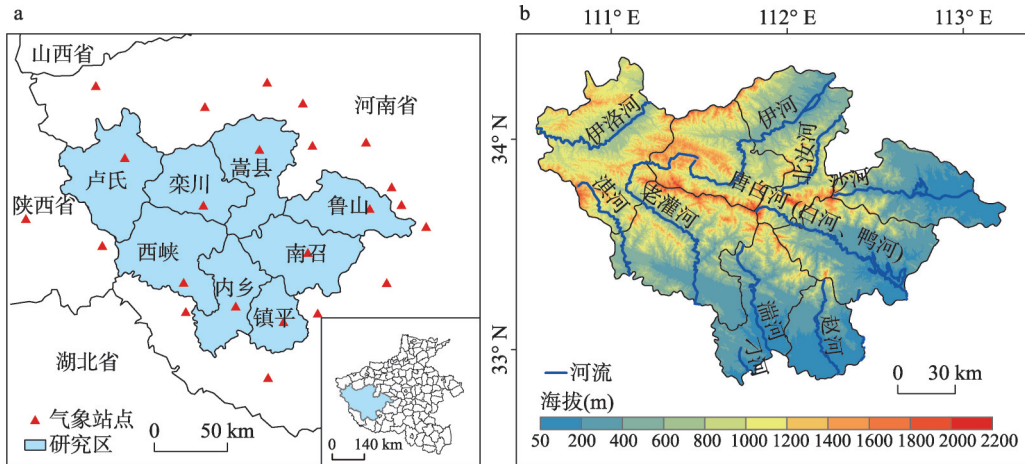


图1 研究区位置及高程示意图

Fig. 1 Location and elevation map of the study area

2.2 数据来源与处理

本文基础数据包括:①森林类型图。选取35景高分1号影像,时间为2016—2017年6—10月,将2 m全色和8 m多光谱影像进行融合,经镶嵌、裁剪得到研究区2 m分辨率多光谱图像。基于此,参照2015年1:10万土地覆被图、1:100万植被类型图等数据,对研究区森林类型进行目视解译,生成森林类型分布图(图2)。伏牛山森林生态系统主要优势树种有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、短柄枹栎(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)、锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、阔杂、油松(*Pinus tabulaeformis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、华山松(*Pinus armandi*)与华山松—锐齿槲栎混交林(*Pinus armandi*, *Quercus aliena* var. *acuteserrata*, 以下简称针阔混交林)^[37]。并采用179条野外调查数据进行精度验证,解译精度为82.39%。②DEM数据。采用ASTER GDEM,来源于地理空间数据云,空间分辨率为30 m。③NDVI数据。采用2016—2017年MODIS NDVI数据,空间分辨率为250 m,来源为<http://landsweb.nascom.nasa.gov/data/>。④气象数据。包括研究区及周边24个气象站点2016—2017年逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量、风速、日照时数和平均气压,来源于河南省气象局和国家气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。⑤土壤属性数据。包含1:100万的土壤质地、土壤有机质、土壤深度等数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

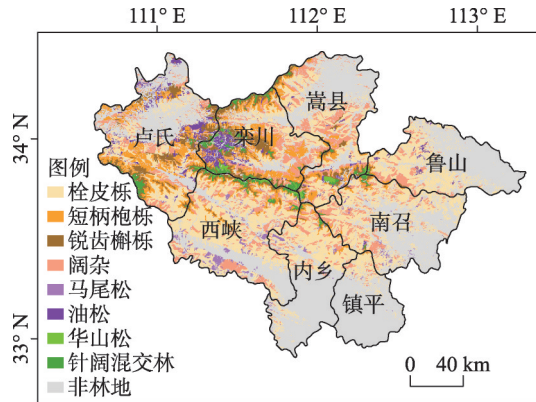


图2 伏牛山地区森林类型分布图

Fig. 2 Spatial distribution of forest types in Funiu Mountain

由于森林类型图解译所用影像为2016年和2017年两年影像拼接而成,因此NDVI、气象数据均采用2016—2017年两年的平均值。

基于森林类型图和DEM数据,统计伏牛山南北坡主要森林类型分布的海拔范围,据此划分南北坡垂直带谱。南坡垂直带谱相对北坡较为复杂,南坡包括低山落叶阔叶林带(SI)(≤ 800 m)、含常绿树种的针阔混交林带(SII)(800~1200 m)、中山落叶阔叶林带(SIII)(1200~1600 m)和中山针阔混交林带(SIV)(> 1600 m)4个垂直带;北坡包括低山落叶阔叶林带(NI)(≤ 1000 m)、中山落叶阔叶林带(NII)(1000~1500 m)和中山针阔混交林带(NIII)(> 1500 m)3个垂直带。

2.3 生态系统服务评估方法

本文借助CASA模型、InVEST模型和ArcGIS 10.2软件,定量评估研究区森林蓄积量、固碳、水源供给、土壤保持和生境支持5种服务的空间格局。模型所需参数计算过程如表1所示。

表1 模型所需参数计算方法
Tab. 1 Computational methods of parameters

服务类型	计算模型或思路	所需主要参数及处理
蓄积量	利用CASA模型计算森林植被净初级生产力(NPP) ^[38] ,参照文献[39-40],确定伏牛山地区不同森林类型NPP与蓄积量之间的转换公式,从而得到森林蓄积量空间数据。	植被指数采用MODIS NDVI,气温、降水量和太阳辐射均运用ANUSPLIN软件进行空间插值得到。太阳辐射是由日照时数计算所得 ^[41] 。
固碳	InVEST模型碳储量模块 ^[42]	碳密度的获取主要参照文献[43-44],并根据不同树种的根茎比 ^[36] ,计算得到地上和地下碳密度。
水源供给	InVEST模型水源供给模块 ^[42]	潜在蒸散量,利用Penman-Monteith公式(日尺度) ^[38] ,并经ANUSPLIN插值得到;土壤深度,由土壤数据通过栅格化所得;植被可利用含水量,采用非线性拟合土壤可用含水率估算模型计算所得 ^[45] ;流域和子流域图,基于DEM数据,运用Hydrology分析工具提取得到。
土壤保持	InVEST模型土壤保持模块 ^[42]	降雨侵蚀力因子,采用Wischemeier的月尺度公式计算得到 ^[46] ;土壤可蚀性因子,采用土壤可蚀性估算模型计算得到 ^[47] ;工程措施因子,均赋为1,表示均未采取水土保持措施;植被覆盖和管理因子,参考文献[48]中关于林地植被管理因子的计算方法计算得到。
生境支持	InVEST模型生境支持模块 ^[42]	生境威胁源包括水田、旱地、农村居民点、城镇建设用地、工矿用地及交通用地,由2015年1:10万土地覆盖提取得到,并转为30 m的栅格数据;生境威胁源表和敏感性表参照文献[49],并结合研究区实际情况进行赋值;法律准入性矢量图,利用伏牛山国家级自然保护区植被图提取出保护区边界,并根据保护区程度分级,在属性表中分别赋予其可达度值。

注:气象、土壤、植被等栅格数据均使用Grid格式,空间分辨率为250 m,地理坐标系均采用WGS_1984_Albers。

2.4 服务权衡/协同效应分析方法

本文采用空间叠置分析方法识别服务权衡或协同的类型和区域^[17],该方法可以直观地展示多种服务之间权衡或协同关系的空间分异特征,有助于服务权衡管理决策有效地落实到特定空间位置上。具体计算步骤如下:

(1) 服务能力分级。由于不同类型服务物质质量的单位不同,无法进行同一尺度上的关联和比较,因此首先对各项服务进行标准化处理^[50],并运用自然间断点法将各服务的供给能力分为3个级别:低、中、高,编号依次为1、2、3(表2)。

(2) 服务空间叠置。将5种服务标准化并分级后的栅格数据进行叠置,规则如下:

$$CODE = \text{蓄} \times 10000 + \text{碳} \times 1000 + \text{水} \times 100 + \text{土} \times 10 + \text{生} \quad (1)$$

式中:“蓄”、“碳”、“水”、“土”和“生”分别代表蓄积量、固碳、水源供给、土壤保持和生境支持服务;CODE是五位数代码,每一个代码序列都是1、2和3任意组合的栅格值,代表对应服务类型的供给能力。

(3) 服务权衡或协同关系分类标准。根据5种服务叠置结果及权衡和协同的定义^[2],制定权衡/协同分类标准(表3)。将权衡划分为强权衡和弱权衡,强权衡为一种服务供给能力较强而其他较低的状态;弱权衡为2种、3种或4种服务能力较高而其他服务较低的状态。协同划分为高协同和低协同,高协同即5种服务能力都较高,是最协调的状态,也是生态系统管理的最终目标;低协同即5种服务能力都较低,这种状态是最不理想的。

表2 各生态系统服务能力分级

Tab. 2 Classification of ecosystem services capacity

服务类型	低(1)	中(2)	高(3)
蓄积量服务	0~0.224	0.224~0.329	0.329~1
固碳服务	0~0.293	0.293~0.619	0.619~1
水源供给服务	0~0.325	0.325~0.569	0.569~1
土壤保持服务	0~0.184	0.184~0.541	0.541~1
生境支持服务	0~0.111	0.111~0.362	0.362~1

表3 生态系统服务权衡/协同划分标准及统计

Tab. 3 Classification criteria and statistics of tradeoffs and synergies among the five ecosystem services

服务关系	面积占比(%)	亚类	面积占比(%)	供给能力组合	面积占比(%)	样例		
权衡	61.06	强权衡	24.56	1高4低	1.45	11311、11113		
				1高1中3低	2.07	11321、12113		
				1高2中2低	7.37	12312、12321		
				1高3中1低	13.67	22312、32212		
				弱权衡	36.5	2高3低	1.89	11133、11313
						2高1中2低	4.72	23113、31123
		2高2中1低	10.78			23213、23123		
		3高2低	3.99			33113、13313		
		3高1中1低	12.41			33213、23313		
		4高1低	2.72			33313、33133		
		5高	0.83			33333		
		协同	38.94	高协同	28.79	4高1中	4.52	33233、23333
						3高2中	7.82	33223、32332
2高3中	7.83					22332、32322		
1高4中	6.54					22322、22232		
5中	1.24					22222		
低协同	10.15					1中4低	0.25	11211、12111
						2中3低	2.11	12112、12211
						3中2低	3.6	12212、22112
						4中1低	4.2	22212、22122
						5低	0	11111

3 结果分析

3.1 森林生态系统服务总量评估

2016—2017年研究区森林生态系统总蓄积量 $6.18 \times 10^7 \text{ m}^3$,单位蓄积量 $49.26 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;固碳量 $1.97 \times 10^8 \text{ t}$,碳密度 $156.94 \text{ t}/\text{hm}^2$;水源供给量 $6.06 \times 10^9 \text{ m}^3$,供水深度 494.46 mm ;土壤保持量 $1.16 \times 10^9 \text{ t}$,单位土壤保持量 $955.4 \text{ t}/\text{hm}^2$;生境质量指数约0.79(表4)。

表4 不同森林类型各生态系统服务总量及比例

Tab. 4 Total amount and proportion of various ecosystem services of different forest types

森林类型	蓄积量		固碳		水源供给		土壤保持		生境质量
	总量(10^6 m^3)	比例(%)	总量(10^6 t)	比例(%)	总量(10^8 m^3)	比例(%)	总量(10^7 t)	比例(%)	
栓皮栎	27.37	44.29	92.15	46.82	31.95	52.70	54.79	47.27	0.71954
阔杂	12.25	19.83	43.97	22.34	12.31	20.31	26.18	22.59	0.79984
短柄枹栎	10.12	16.38	29.63	15.05	7.45	12.28	16.18	13.96	0.88991
锐齿槲栎	6.00	9.71	16.67	8.47	3.56	5.88	7.29	6.29	0.97995
油松	2.33	3.78	5.15	2.62	1.82	3.00	3.63	3.13	0.81979
针阔混交林	2.41	3.90	5.63	2.86	1.69	2.78	4.31	3.72	0.99998
马尾松	0.78	1.26	2.39	1.21	1.45	2.40	2.15	1.86	0.70949
华山松	0.53	0.86	1.24	0.63	0.40	0.66	1.37	1.18	0.99798
合计/平均值	61.78	100	196.83	100	60.64	100	115.9	100	0.7934

不同森林类型各项服务总量变化规律与其面积大小基本一致(表4)。栓皮栎林面积比重最大(49.03%),其提供的各项服务总量所占比重也分别达到最大,均在44%~53%之间,尤其对水源供给量的贡献最大,超过50%;其次为阔杂林(20.12%),各项服务总量均占20%左右,其中对土壤保持和固碳的贡献最大,为22.59%和22.34%;短柄枹栎林(13.83%)和锐齿槲栎林(7.25%)次之,各项服务总量分别占12%~17%和5%~10%,两者尤其对蓄积量贡献最大,分别占16.38%和9.71%;油松林(3.72%)和针阔混交林(3.31%)所占面积相当,其对各项服务的贡献也比较相近,均在2.6%~4%之间,其中除水源供给外,蓄积量、固碳量和土壤保持量均表现为针阔混交林的贡献高于油松林;面积较小的马尾松林(1.96%)和华山松林(0.78%),各项服务总量都较小,均不超过2.5%,其中马尾松林对水源供给量的贡献最大(2.4%),华山松林对土壤保持量的贡献最大(1.18%)。由此,栓皮栎、阔杂、短柄枹栎和锐齿槲栎等地带性阔叶林是研究区森林生态系统服务总量的主要贡献者。

不同森林类型的生境质量存在明显差异(表4),其中针阔混交林、华山松林和锐齿槲栎林最大,均高于0.97;其次为短柄枹栎林,约0.89;油松林和阔杂林相当,约0.8;栓皮栎林和马尾松林最差,约0.7。由此,以天然林为主的针阔混交林、锐齿槲栎林和华山松林生境质量明显高于以天然次生林或人工林为主的栓皮栎林和马尾松林等。

3.2 服务能力分级的空间分布和统计分析

各类型生态系统服务不同分级区的空间特征(图3)、森林面积比重(图4)以及服务总量和单位量(图5)均表现出明显的差异。

由图3、图4和图5a发现,蓄积量高值区内森林面积占35.51%,主要位于海拔1500 m以上的中高山地带,单位蓄积量达到最大($62.82 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),总蓄积量占45.29%;中值区内,森林面积比重最大(45.9%),但总蓄积量(44.33%)略低于高值区,单位量为 $47.57 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,主要位于高值区周边的中山地带;低值区内,森林面积比重最小(18.58%),主要位于海拔低于1000 m的低山和山麓地带,单位量最低($27.52 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),总蓄积量仅占10.38%。由图3、图4和图5b发现,固碳服务高值区内森林面积占41.34%,碳密度最大($174.11 \text{ t}/\text{hm}^2$),碳储量占45.86%,主要位于北坡卢氏和栾川境内的中高山地带;中值区森林面积(52.1%)超过研究区一半,其碳储量(49.68%)也将近达到研究区总碳储量的一半,碳密度为 $149.63 \text{ t}/\text{hm}^2$,主要位于伏牛山南坡及北坡鲁山境内的中低山地带;低值区内森林面积占6.56%,碳密度为 $106.74 \text{ t}/\text{hm}^2$,碳储量仅占

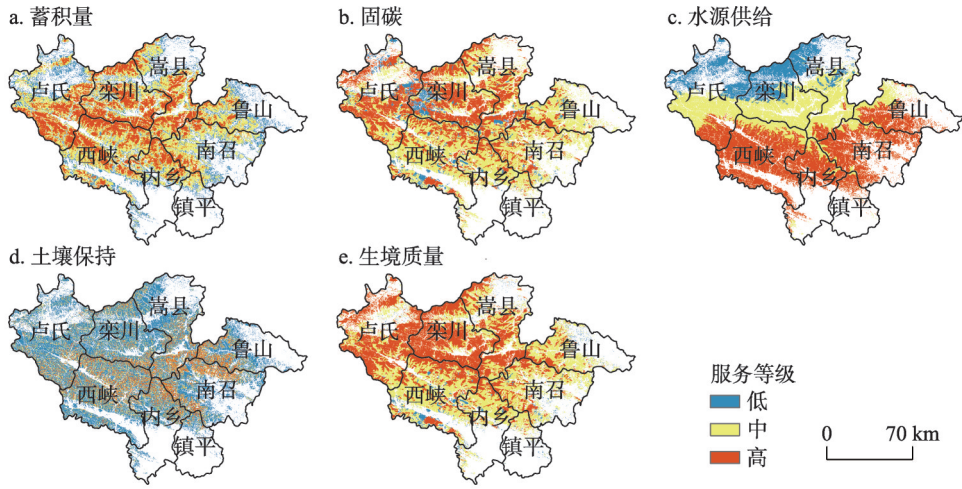


图3 各生态系统服务供给能力分级区域的空间分布

Fig. 3 Spatial pattern of the five ecosystem services based on the providing capacity classification

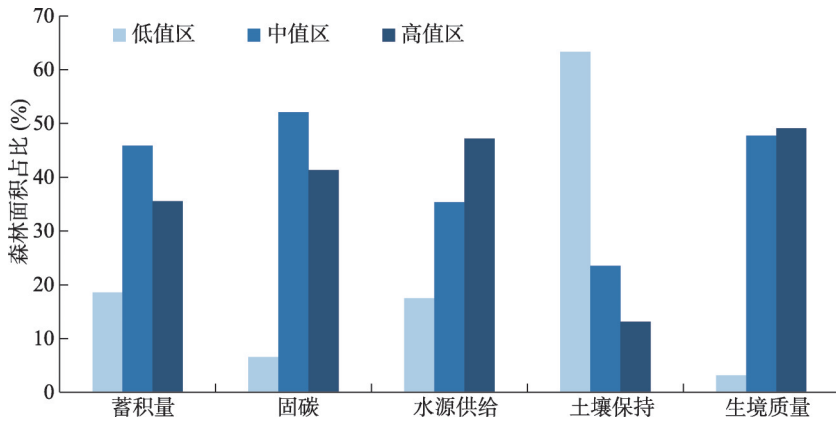


图4 各类型生态系统服务不同分级区内的森林面积占比

Fig. 4 Forest area in different classification regions of the five ecosystem services

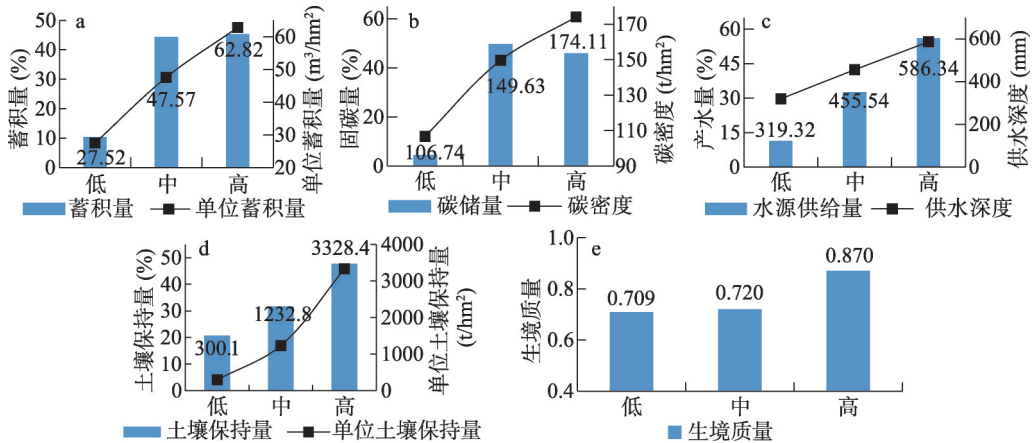


图5 各服务不同分级内服务总量和单位量

Fig. 5 Total amount and unit amount of different regions for various ecosystem services

4.46%，主要位于南坡马尾松林及北坡油松林区。由此，森林蓄积量和固碳服务整体上处于中等以上水平，但中值区占比例较大，未来若能提升中低值区的森林质量，将能够更明显地提升两种服务的整体水平。

由图3、图4和图5c发现，水源供给服务高值区内森林面积比重（47.2%）、水源供给量比重（56.08%）和供水深度（586.34 mm）均达到最大，提供着研究区一半以上的供水量，主要位于降水量丰富的伏牛山南坡及北坡卢氏和鲁山的南部；中值区内森林面积占35.34%，供水深度为455.54 mm，水源供给量占32.62%，主要位于干燥度指数较大的北坡中高山地带；低值区内森林面积比重最小（17.46%），供水深度为319.32 mm，水源供给量占11.3%，主要位于北坡卢氏、栾川、嵩县的北部，这些地区降水量少，蒸发量高。由此，水源供给服务整体处于中等以上水平，但空间差异明显，研究区北部地区供水能力较弱，水资源安全形势相对严峻。由图3、图4和图5d发现，土壤保持中值区和高值区内森林面积分别占23.52%和13.14%，土壤保持量占31.61%和47.67%，单位量为1232.81 t/hm²和3328.4 t/hm²。高值区主要位于东部各县交界处，中值区主要位于西峡北部及其与内乡、栾川和嵩县等地的交界处。低值区内森林面积比重最大，为63.34%，但其土壤保持量仅占20.72%，单位量也最低，仅为300.08 t/hm²，主要位于南坡海拔1000 m以下的低山区，以及北坡海拔1200 m以下的中低山地区。由此，高值区单位土壤保持量分别约为中值区和低值区近3倍和10倍。可见研究区超过一半的森林土壤保持服务处于较低水平，土壤保持服务还有巨大潜力，未来应加强伏牛山南坡低山区以及北坡中低山地区的水土保持工作，改善其生态环境，以提升研究区整体土壤保持服务。

由图3、图4和图5e发现，生境质量中值区和高值区内森林面积相当，分别占47.75%和49.13%，生境质量指数分别为0.72和0.87。中值区主要位于南坡以及北坡鲁山境内中低山区，高值区主要位于山脉主脊地带以及北坡卢氏、栾川和嵩县境内中高山地区。低值区森林面积比重较小（3.13%），生境质量指数最低（0.709），主要位于伏牛山南坡马尾松和栓皮栎人工林和次生林区。由此，研究区森林生境质量整体处于较高水平，但山麓地带的人工林和次生林生境质量较差，亟需加强管理和生态恢复，以提升整体生境支持服务水平。

3.3 生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析

3.3.1 区域尺度服务权衡/协同效应分析 由表3和图6a发现，研究区有28.79%的森林服务之间存在高协同效应，主要位于伏牛山主脊地带、南坡海拔1000 m以上的中高山以及北坡海拔1500 m以上的高山地区。其中5种服务同时达到高值的森林面积仅占0.83%，仍有大面积的森林5种服务之间未达到最优协同状态。由表3和图6b发现，有10.15%的森林服务之间存在低协同效应，即5种服务都较低，主要位于北坡山麓地带，受人为干扰严重，多为人工林和次生林，林龄较小，蓄积量、碳储量、土壤保持和生境支持服务都较低，且该区降水量较少，导致水源供给服务能力也较弱。因此，亟需加强对该区森林资源的保护，及时对其环境条件与森林资源状况进行修复和优化管理。

由表3和图6c发现，有24.56%的森林服务之间存在强权衡效应，即仅有1种服务能力较高，服务之间竞争激烈，效益冲突明显。一部分位于南坡中低山区以及鲁山南部，其水源供给占主导优势；其次零星分布在北坡栾川、嵩县和卢氏境内，多为油松人工林和飞播林区，海拔较高，人为干扰弱，生境质量较高，但其他服务都较低。由表3和图6d发现，弱权衡区面积比重较大（36.5%），至少有2种服务处于高值水平，但至少有一种处于低值水平。一部分位于北坡较高海拔区，蓄积量、固碳等服务能力较高，但降水量少，干燥指数大，导致水源供给能力弱；另一部分零星地分布在南坡中低山区，其水源供给和蓄积量服务能力较强，而生境支持和土壤保持服务较弱。

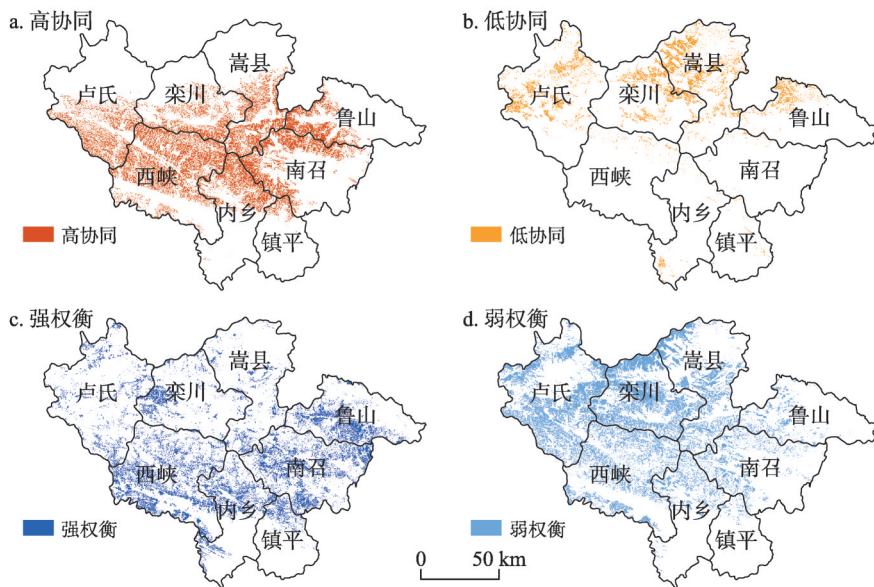


图6 森林生态系统服务权衡(强、弱)/协同(高、低)空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of trade-offs (severe or weak) and synergies (good or bad) among ecosystem services

综上，研究区有28.79%的森林服务之间存在高协同效应，但仍有71.21%的森林5种服务之间的作用关系还不够理想。由此，研究区服务整体效益较低，未来应将低协同和强权衡区作为森林资源管理和效益调控的重点对象。

3.3.2 南北坡尺度服务权衡/协同效应分析 伏牛山北坡和南坡森林生态系统服务权衡与协同效应具有一定差异(图7a、图7b)，均为高协同区占比最大，但南坡(37.09%)明显高于北坡(22.32%)；低协同区则为北坡(17.06%)明显高于南坡(1.24%)，由此南坡服务之间协同关系优于北坡。其次，北坡分别有17.51%和17.39%的区域为3种服务(蓄+碳+生)和2种服务(碳+生)协同主导，与其余服务呈弱权衡关系；而南坡则是水源供给单一服务主导占比重大(34.6%)，存在强权衡关系。

3.3.3 垂直带尺度服务权衡/协同效应分析 不同垂直带服务权衡与协同效应也存在明显差异(图7c~图7i)。北坡低山落叶阔叶林带(NI)(图7c)，有28.95%的区域服务之间存在低协同效应；22.05%的区域存在高协同关系；17.27%的区域为固碳+生境支持服务协同主导，14.45%的区域为水源供给单一服务主导。北坡中山落叶阔叶林带(NII)(图7d)，蓄积量+固碳+生境支持服务协同主导、高协同及固碳+生境支持服务协同主导分别占30.58%、22.94%和19.31%，可见2种及2种以上服务协同主导面积比重较大，因此该垂直带服务之间协同关系良好。中山针阔混交林带(NIII)(图7e)，蓄积量+生境支持服务协同主导、蓄积量单一服务主导以及蓄积量+固碳+生境支持服务协同主导面积分别占26.71%、24.31%和21.24%；高协同区占19.58%，略低于前两个垂直带。由此，NII服务之间协同关系最好；NI低协同区占比重大，亟待进行低效林改造和优化管理，并考虑蓄积量和土壤保持服务的提升；NIII要注重水源供给和土壤保持服务的提升。

南坡低山落叶阔叶林带(SI)(图7f)，水源供给单一服务主导占比最大(48.95%)；其次为高协同区(28.98%)；固碳+水源供给+生境支持服务协同主导占10.63%。南坡含常绿树种的针阔混交林带(SII)(图7g)和中山落叶阔叶林带(SIII)(图7h)，高协同区占比相当(约50%)；其次，SII水源供给单一服务主导与蓄积量+水源供给2种服务协同

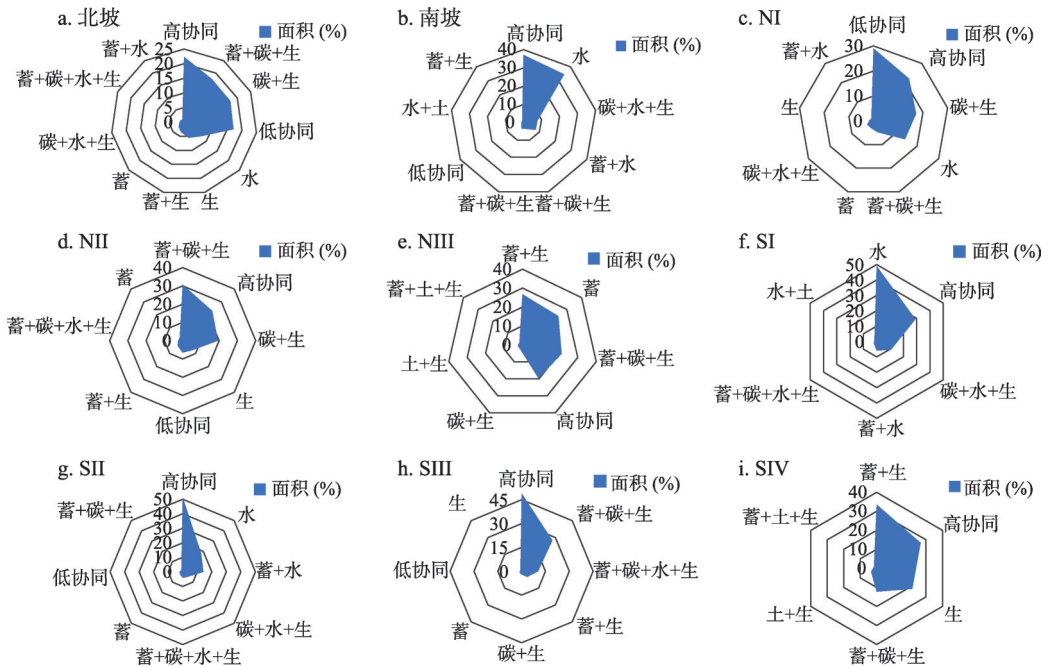


图7 南北坡和垂直带尺度森林生态系统服务权衡与协同效应

Fig. 7 Ecosystem service trade-off and synergy on the north and south slopes and on the vertical belt scale

主导占 32.17%，而 SIII 内 3 种（蓄+碳+生）和 4 种（蓄+碳+水+生）服务协同主导占 37.71%，可见 SIII 服务之间的协同关系优于 SII。中山针阔混交林带（SIV）（图 7i），蓄积量+生境支持服务协同主导占比重最大（33.52%）；其次为高协同区（26.74%）；生境支持单一服务主导、蓄积量+固碳+生境支持服务协同主导分别占 21.61%和 12.24%。由此，SIII 服务之间协同关系最好，SII 次之，SI 要注重提升蓄积量和土壤保持服务，SIV 要注重提升水源供给和土壤保持服务。

综上，南坡中山落叶阔叶林带（SIII）服务之间协同关系最好，北坡低山落叶阔叶林带（NI）服务之间协同关系最差。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究区森林生态系统平均蓄积量为 49.26 m³/hm²，碳密度为 156.94 t/hm²，供水深度为 494.46 mm，土壤保持量为 955.4 t/hm²，生境质量指数为 0.79。

(2) 不同分级区内服务供给能力存在一定差异。土壤保持服务变化幅度较大，高值区约是中值区和低值区的 3 倍和 10 倍，其余 4 种服务变化幅度相对较小，高值区约是低值区的 1~2.5 倍。由此，应亟需加强土壤保持服务中低值区的林分改造，或采取工程措施提升土壤保持服务，以充分发挥研究区森林生态系统土壤保持服务的潜力。

(3) 区域尺度上，有 28.79% 的森林服务之间表现为高协同效应，有 10.15% 的森林存在低协同效应，有 61.06% 的森林存在强权衡和弱权衡效应。由此，研究区森林生态系统服务整体效益还较低，服务之间的作用关系还不够理想。未来应将低协同和强权衡区作

为森林资源管理和效益调控的重点对象。

(4) 南北坡尺度上,南坡服务之间的协同关系优于北坡。垂直带尺度上,SIII服务之间协同关系最好,NI协同关系最差。

4.2 讨论

本文从区域、南北坡和垂直带3种空间尺度出发,运用空间叠置法判别5种森林生态系统服务之间的权衡与协同效应,该方法可以识别多种服务之间权衡关系发生的特定区域^[7],有助于权衡管理决策与特定空间位置相对应,从而更加有效地实施森林资源管理。研究发现伏牛山地区有71.21%的森林5种服务之间的作用关系还不够理想,不同空间尺度存在不同程度、不同类型的效益冲突,亟需进行分区域、分类型的管理权衡。

就南北坡尺度而言,南坡服务之间的协同关系优于北坡,北坡水源供给能力较弱是导致服务之间权衡发生的主要原因,而南坡水源供给单一服务主导占据明显优势,因此在进行低效林改造时,北坡需要考虑结合气候背景和立地条件,采取科学管理方案或工程措施提升水源供给服务,而南坡则应注意监测森林结构变化对水源供给服务的影响。就垂直带尺度而言,北坡低山落叶阔叶林带(NI)内服务之间的协同关系最差,亟需进行优化管理,这些地区位于北坡山麓地带,5种服务供给能力都较弱。针对这些地区的森林资源,应加强保护,禁止乱砍乱伐,一方面可通过增加成熟林和近成熟林比例,提升森林蓄积量、固碳和生境支持服务水平,另一方面可通过结合气候背景和立地条件,采取工程措施,提升水源供给和土壤保持服务。其次,南坡低山落叶阔叶林带(SI)内服务之间强权衡区占据明显优势,也亟待进行优化管理。具体来看,SI内降水量充沛,且大多位于河流的中下游地区,海拔较低,汇水量大,因此该区水源供给能力达到最大,但由于该区地形起伏相对平缓,人为活动频繁,林分质量不高,多为栓皮栎林、阔杂林和马尾松林等林龄较小的次生林和人工林,因此其余4种服务供给能力都相对较弱,导致服务之间强权衡关系显著。针对这些地区,一方面要加强对次生林和人工林的管理,推广针阔混交林代替纯林,提升蓄积量、固碳、土壤保持和生境支持服务的供给能力,以缓解服务之间的强权衡关系;另一方面还应结合当地经济发展需要,引入生态补偿措施,或协助转变该区粗放型的农业生产方式,做好森林资源的维护和监管,以提升服务整体效益。

以上讨论了伏牛山地区森林资源分区域、分类型的权衡管理策略,但是这些策略多是宏观尺度上的建议,有助于为不同空间尺度上森林资源的管理目标提供导向和科学依据。未来的森林资源管理还需要结合森林生态学知识,并考虑当地环境条件,因地制宜地制定管理方案。此外,本文未对服务之间权衡关系的驱动机制进行定量探讨,明确自然过程和社会经济发展过程对服务权衡关系的驱动机制有助于制定科学高效的管理方案^[6]。因此,未来应定量探讨自然环境因素、社会经济因素以及森林资源管理行为对服务之间权衡关系的影响程度及差异,厘清服务之间权衡关系的主要驱动因素,为生态系统服务管理筛选最适宜的自然环境条件、社会经济条件及森林资源管理行为,以改进森林资源管理方式,促进研究区森林生态系统多种服务的可持续供给,从而实现森林资源的可持续经营与管理。

参考文献(References)

- [1] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Dai Erfu, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe basin as the south source of Wujiang. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1268-1282. [侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 等. 基于SWAT模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异. *地理学报*, 2018, 73(7): 1268-1282.]
- [2] Li Peng, Jiang Luguang, Feng Zhiming, et al. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: An

- overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5219-5229. [李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.]
- [3] Asadolahi Z, Salmanmahiny A, Sakieh Y, et al. Dynamic trade-off analysis of multiple ecosystem services under land use change scenarios: Towards putting ecosystem services into planning in Iran. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 250-260.
- [4] Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868-879. [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. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.]
- [5] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [6] Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(11): 1250-1259. [戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259.]
- [7] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125(10): 89-104.
- [8] Xu X, Yang G, Tan Y, et al. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015. *Science of The Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [9] Liu Y, Bi J, Lv J, et al. Spatial multi-scale relationships of ecosystem services: A case study using a geostatistical methodology. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [10] Wang Pengtao, Zhang Liwei, Li Yingjie, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the upper reaches of Hanjiang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2064-2078. [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. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.]
- [11] Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [12] Xue H, Li S, Chang J. Combining ecosystem service relationships and DPSIR framework to manage multiple ecosystem services. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(3): 1-15.
- [13] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [14] Sun Zexiang, Liu Zhifeng, He Chunyang, 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4881-4891. [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. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891.]
- [15] Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973. [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. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [16] Strand J, Soares-Filho B, Costa M H, et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon forest's ecosystem services. *Nature Sustainability*, 2018, 1(11): 657-664.
- [17] 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. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [18] Wang X, Dai E, Zhu J. Spatial patterns of forest ecosystem services and influencing factors in the Ganjiang River Basin. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(6): 439-452.
- [19] Dai E, Wang X, Zhu J, et al. Quantifying ecosystem service trade-offs for plantation forest management to benefit provisioning and regulating services. *Ecology and evolution*, 2017, 7(19): 7807-7821.
- [20] Zhu Jianjia, Dai Erfu, Zheng Du, et al. Characteristic of tradeoffs between timber production and carbon storage for plantation under harvesting impact: A case study of Huitong National Research Station of Forest Ecosystem. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 152-163. [朱建佳, 戴尔阜, 郑度, 等. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功能权衡特征: 以湖南会同森林生态实验站为例. *地理学报*, 2018, 73(1): 152-163.]
- [21] Jonah B, Kalifi F G, Jens E, et al. Reductions in emissions from deforestation from Indonesia's moratorium on new oil palm, timber, and logging concessions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(5): 1328-1333.
- [22] Thompson B S, Friess D A. Stakeholder preferences for payments for ecosystem services (PES) versus other environmental management approaches for mangrove forests. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 636-648.

- [23] Chisholm R A. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot. *Ecological Economics*, 2010, 69(10): 1973-1987.
- [24] Gou Mengmeng. Trade-off and synergy analysis of ecosystem services of subtropical secondary forests in southern China [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017. [勾蒙蒙. 亚热带次生林生态系统服务权衡与协同分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.]
- [25] Kang H, Seely B, Wang G, et al. Evaluating management tradeoffs between economic fiber production and other ecosystem services in a Chinese-fir dominated forest plantation in Fujian Province. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 80-90.
- [26] Delphin S, Escobedo F J, Abd-Elrahman A, et al. Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Policy*, 2016, 54: 188-199.
- [27] Vangansbeke P, Blondeel H, Landuyt D, et al. Spatially combining wood production and recreation with biodiversity conservation. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(13): 3213-3239.
- [28] Eak R, Rik T, Gary L. Trade-offs and synergies between carbon, forest diversity and forest products in Nepal community forests. *Environmental Conservation*, 2017, 44(1): 5-13.
- [29] He Y, Qin L, Li Z, et al. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. *Forest Ecology & Management*, 2013, 295(5): 193-198.
- [30] Wang H, Liu S, Wang J, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China. *Forest Ecology & Management*, 2013, 300(4): 4-13.
- [31] Liang J, Crowther T W, Picard N, et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 2016, 354(6309): aaf8957. Doi: 10.1126/science.aaf8957.
- [32] Zhang Yamei, Guo Fang. Ecological carrying capacity of vegetation landscape at Baotianman Nature Reserve in Funiu Mountain. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(5): 224-228. [张雅梅, 郭芳. 河南伏牛山宝天曼自然保护区植被景观生态承载力分析. *西北林学院学报*, 2011, 26(5): 224-228.]
- [33] Yang Hongxia. Study on community structure and biomass, carbon storage of Oak natural secondary forest in the Funiu mountains of Henan Province [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016. [杨红霞. 河南伏牛山区栎类天然次生林群落结构与生物量、碳储量研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.]
- [34] Yu Chao, Song Liyi, Li Mingyang, et al. Spatio-temporal dynamics of forest aboveground biomass in Xixia County, Henan Province, China. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(6): 93-101. [余超, 宋立奕, 李明阳, 等. 河南西峡县森林地上生物量时空动态分析. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(6): 93-101.]
- [35] Guo Jianrong. Studies on technologies of ecosystem service monitor and regulation and control of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests of Baotianman [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012. [郭建荣. 宝天曼自然保护区锐齿栎森林生态系统服务功能监测与调控技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.]
- [36] Zhu W, Zhang X, Zhang J, et al. A comprehensive analysis of phenological changes in forest vegetation of the Funiu Mountains, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 131-145.
- [37] Song Chaoshu. Scientific Survey of the Funiu Mountain Nature Reserve. Beijing: China Forestry Publishing House, 1994. [宋朝枢. 伏牛山自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 1994.]
- [38] Zhang Y, Qi W, Zhou C, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 269-287.
- [39] Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508. [方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.]
- [40] Guang Zengyun. Study on forest biomass and productivity in Henan. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(5): 493-497. [光增云. 河南森林生物量与生产力研究. *河南农业大学学报*, 2006, 40(5): 493-497.]
- [41] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Land and Water Development Division. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [42] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2014.
- [43] Cui Gaoyang, Chen Yunming, Cao Yang, et al. Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(4), 333-342. [崔高阳, 陈云明, 曹扬, 等. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析. *植物生态学报*, 2015, 39(4): 333-342.]
- [44] Hu Wenjie, Wang Xiaorong, Cui Hongxia, et al. Comparison of ecosystem carbon density between *Quercus aliena* var. *acuteserrata* and *Quercus variabilis* forest. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(1): 8-15. [胡文杰, 王晓荣, 崔鸿侠, 等. 锐齿槲栎和栓皮栎林生态系统碳密度比较. *森林与环境学报*, 2017, 37(1): 8-15.]

- [45] Zhou W, Liu G, Pan J, et al. Distribution of available soil water capacity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [46] 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. Washington: US Department of Agriculture, 1965.
- [47] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion: Sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [48] Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang, Liu Zhi. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Eoil Conservation*, 1996, 2(1): 1-9. [江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *水土保持学报*, 1996, 2(1): 1-9.]
- [49] Yao Yunchang. Evaluation and dynamics analysis of habitat quality based on InVEST model in the Sanjiang Plain [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2017. [姚云长. 基于InVEST模型的三江平原生境质量评价与动态分析[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2017.]
- [50] Mao Qi, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. An ecological function zoning approach coupling SOFM and SVM: A case study in Ordos. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 460-474. [毛祺, 彭建, 刘焱序, 等. 耦合SOFM与SVM的生态功能分区方法: 以鄂尔多斯市为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 460-474.]

Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region

ZHANG Jingjing, ZHU Wenbo, ZHU Lianqi, LI Yanhong

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Forest ecosystem service trade-offs and synergies are important research topics for several disciplines. The multi-scale analysis of service trade-offs and synergies assists in the implementation of more effective forest resource management. Based on multi-source data including forest distribution, topography, NDVI, meteorology and soil conditions, key forest ecosystem services, including total forest volume, carbon storage, water yield, soil retention and habitat quality were mapped and evaluated for the Funiu Mountain Region through integrated deployment of the CASA model, the InVEST3.2 model and the ArcGIS10.2 software. The characteristics of trade-offs and synergies among different ecosystem services were then mapped and considered across multiple spatial scales (i.e., by region, north and south slopes, vertical belt) using the spatial overlay analysis method. The main results are as follows: (1) Mean forest volume is 49.26 m³/hm², carbon density is 156.94 t/hm², water supply depth is 494.46 mm, the unit amount of soil retention is 955.4 t/hm², and the habitat quality index is 0.79. (2) The area of forests with good synergy is 28.79%, and the area of forests with poor synergy is 10.15%, while about 61.06% of forests show severe trade-offs and weak trade-offs. The overall benefits of forest ecosystem services in the study area are still low. In the future, bad synergy and severe trade-off areas should be the focus of forest resource management and efficiency regulation. (3) Synergy between ecosystem services is better for forest on south slope than that on north slope. Deciduous broad-leaved forest belt at moderate elevations on south slope in the mountains (SIII) has the highest synergies, while that at low elevations on north slope (NI) exhibits the lowest synergy levels.

Keywords: forest ecosystem services; trade-off/synergy; multi-scale analysis; CASA; InVEST; Funiu Mountain Region