

DOI: 10.5846/stxb201909041840

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.

Yu Y Y, Li J, Zhou Z X, Ma X P, Zhang C. Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling-Daba Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5465-5477.

基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达

余玉洋¹, 李晶^{1,*}, 周自翔², 马新萍^{1,3}, 张城¹

1 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054

3 咸阳师范学院 资源环境与历史文化学院, 咸阳 712000

摘要: 秦巴山区是中国南北过渡带, 具有明显的多维地带性结构和复杂的地貌特征, 从大、中、小不同的空间尺度上研究生态系统服务权衡协同关系, 为区域间的山水林田湖草生态保护提供基础性参考。从全域、综合分区、典型样区、样点间隔 4 个尺度分析秦巴山区 2005—2015 年植被净初级生产力(NPP)、粮食生产、土壤保持、生境质量、水资源供给 5 种生态系统服务之间权衡协同关系。结果表明: ①从全域尺度: 水资源供给分别与生境质量、土壤保持、NPP、粮食生产呈现协同关系; NPP 分别与生境质量、土壤保持同呈现协同关系; 生境质量与土壤保持是协同的关系; 粮食生产分别与生境质量、土壤保持呈现权衡的关系。②从综合分区尺度: 依据地貌和气候类型划分的综合分区, 会出现特定的区域内生态系统服务关系的异同, 加上影响生态系统服务的机制不同, 促使生态系统服务间的关系在综合分区的体现也有所差别。③典型样区尺度: 山地的南北坡在气候类型、植被类型、地貌特征等方面存在明显的差异性, 随着时间的推移生态系统服务之间会发生相互转变。④样点间隔尺度: 成对服务间的权衡/协同关系与样点间隔尺度存在一定的关联性, 不同的间隔尺度权衡/协同关系的发展趋势存在差异性。该研究可以协助决策者在适当的空间尺度制定相应生态管理策略, 促进生态-经济协同发展。

关键词: 生态系统服务; 多维地带性; 多尺度表达; 权衡与协同; 秦巴山区

Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling-Daba Mountains

YU Yuyang¹, LI Jing^{1,*}, ZHOU Zixiang², MA Xinping^{1,3}, ZHANG Cheng¹

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

3 Resources Environment and History Culture College, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China

Abstract: Qinling-Daba Mountains is a transitional zone between the north and the south of China, which has obvious multi-dimensional zonal structure and complex geomorphological characteristics. The purpose of this paper is to study the trade-off and synergy of ecosystem services on different spatial scales which provides basic reference for the ecological protection of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses among regions. We analyzed the trade-offs and synergies among Net Primary Productivity (NPP) of vegetation, grain production, soil conservation, habitat quality and water resources supply in the Qinling-Daba Mountains from 2005 to 2015 at the global, comprehensive regionalization, typical sample areas, and sample interval scales. The results showed that: ① at a global scale, there was a synergistic relationship

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771198, 41771576); 国家科技基础资源调查专项“中国南北过渡带综合科学考察”项目第五课题-基础地理要素及主要资源调查与制图 (2017FY100905); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2019TS019)

收稿日期: 2019-09-04; 网络出版日期: 2020-06-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijing@snnu.edu.cn

between water resources supply and habitat quality, soil conservation, NPP and grain production, NPP and habitat quality, soil conservation, habitat quality and soil conservation, and there was a trade-off relationship between grain production and habitat quality, soil conservation. ② At the regional scale, according to the geomorphological and climatic types of the comprehensive zoning, there were similarities and differences in the service function relationship within a specific region, coupled with different mechanisms affecting ecosystem services. It will lead to differences in the relationship between ecosystem services in the overall region. ③ At the typical sample area scale, there were obvious differences in climate type, vegetation type and geomorphological characteristics between the north and south slopes of the mountain, and the ecosystem services changed each other with the passage of time. ④ At the sample interval scale, there was a certain correlation between the trade-off/synergy relationship between the paired services and the sample interval scale, and the development trend of the trade-off/synergy relationship of different interval scales was different. It is of practical significance to study from large, medium and small scales, which can help decision makers to formulate corresponding ecological management strategies at appropriate spatial scales and promote eco-economic coordinated development.

Key Words: ecosystem services; multidimensional zonality; multi-scale representation; trade-offs and synergies; Qinling-Daba mountains

生态系统服务是指人类从生态系统所获取到的所有惠益^[1-2],同时具有多重特性,如服务类型的多样性、服务关系的不均衡性、空间分布的差异性等,但是在外力的作用下,生态系统服务之间的关系发生转变,权衡或者协同关系逐渐显现^[3]。所以,明晰生态系统服务之间的关系和作用已经成为区域发展必不可少的步骤,也是制定区域绿色经济发展和生态环境等一系列可持续发展政策的前提条件。

随着人们对生态环境重视程度的加深,促使越来越多的学者对生态系统服务进行探究,并且取得了丰厚的学术成果。在探究生态系统服务的方法上普遍采用空间制图^[4-6]、情景分析^[7-9]、玫瑰图^[10]、模型模拟^[11]等来研究生态系统服务的权衡协同关系的空间特征、尺度效应以及影响机制等。而在探究生态系统服务关系时发现,供给和调节服务是相互抑制的,处于权衡的关系^[12-13],例如植被生长状况良好时,能提供的调节服务水平高,但是粮食生产的能力会降低,导致供给服务的水平下降^[14-16]。由于生态系统服务关系存在区域差异性,不同服务之间在不同的研究区域所表现的权衡和协同关系不同^[17-18]。Qiao 等^[19]通过不同的空间尺度对太湖流域上生态系统服务间的关系进行探究,研究发现全域尺度和县域尺度下生态系统服务间的关系均会有所改变;Turner 等^[4]从不同的空间尺度对丹麦 11 种生态系统服务进行研究,发现植被固碳、旅游休憩等文化服务在 50km 的空间范围内聚集分布,而畜牧量、粮食产出和淡水产出等供给服务在 150km 的空间范围内聚集分布。上述的研究大多集中在行政区划尺度和整体尺度上探究生态系统服务,同时对于权衡与协同关系分析多基于统计关系的数量分析,来反映区域的整体差异性,缺少区域内部时空差异的空间表达和系统的了解生态系统服务关系形成的内在机制以及对自然生态系统内部异质性的研究。

秦巴山区是中国地理格局的重要枢纽、大尺度东西向的生态廊道,以复杂、多样、独特的自然环境孕育了丰富的天然动植物资源,对其生态环境变化的研究具有重要意义。根据秦巴山区当地的区域特点和特殊的地理位置选取了五种生态系统服务(粮食生产、NPP、土壤保持、水资源供给、生境质量)探究彼此之间的关系,从不同尺度分析生态系统服务的异质性和定量评估生态系统服务权衡关系,从宏观和微观两方面表现出秦巴山区多维地带性对生态系统服务关系的影响,运用分解和综合的视角凸显生态系统服务功能间的相互变化。该研究可以协助决策者在适当的空间尺度制定相应的管理策略,同时为区域间的山水林田湖草生态保护提供基础性参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 尺度划定

全域尺度:秦巴山区是我国南北过渡地带,特殊的地理位置使得该区域在地理上有明显的地域分异规律,作为南北生态屏障和安全区具有很突出的研究价值;**综合分区尺度:**综合自然地理分区主要结合自然地理环境各组成成分(气候、地貌、地形、土壤等)的相互关系,进行自然区划研究,探讨自然区划之间的差异性。本文根据秦巴山区的气候、地貌、土壤等差异性,将区域划分为 14 个子区域,研究生态系统服务关系在子区域的异同;**典型样区尺度:**秦岭-大巴山是南北过渡带,其气候条件、地貌特征在南北坡存在差异性,因此选取了秦岭和大巴山的南北坡做为典型样区;**样点间隔尺度:**本研究通过 ARCGIS 软件建立渔网,按照一定的间距设置随机点,分别设定 500m、1km、3km、5km、10km、20km、30km、40km、55km、85km、100km、200km 共 12 种空间尺度,探讨每种间隔尺度下生态系统服务的权衡协同关系,4 种尺度划分如图 1 所示。

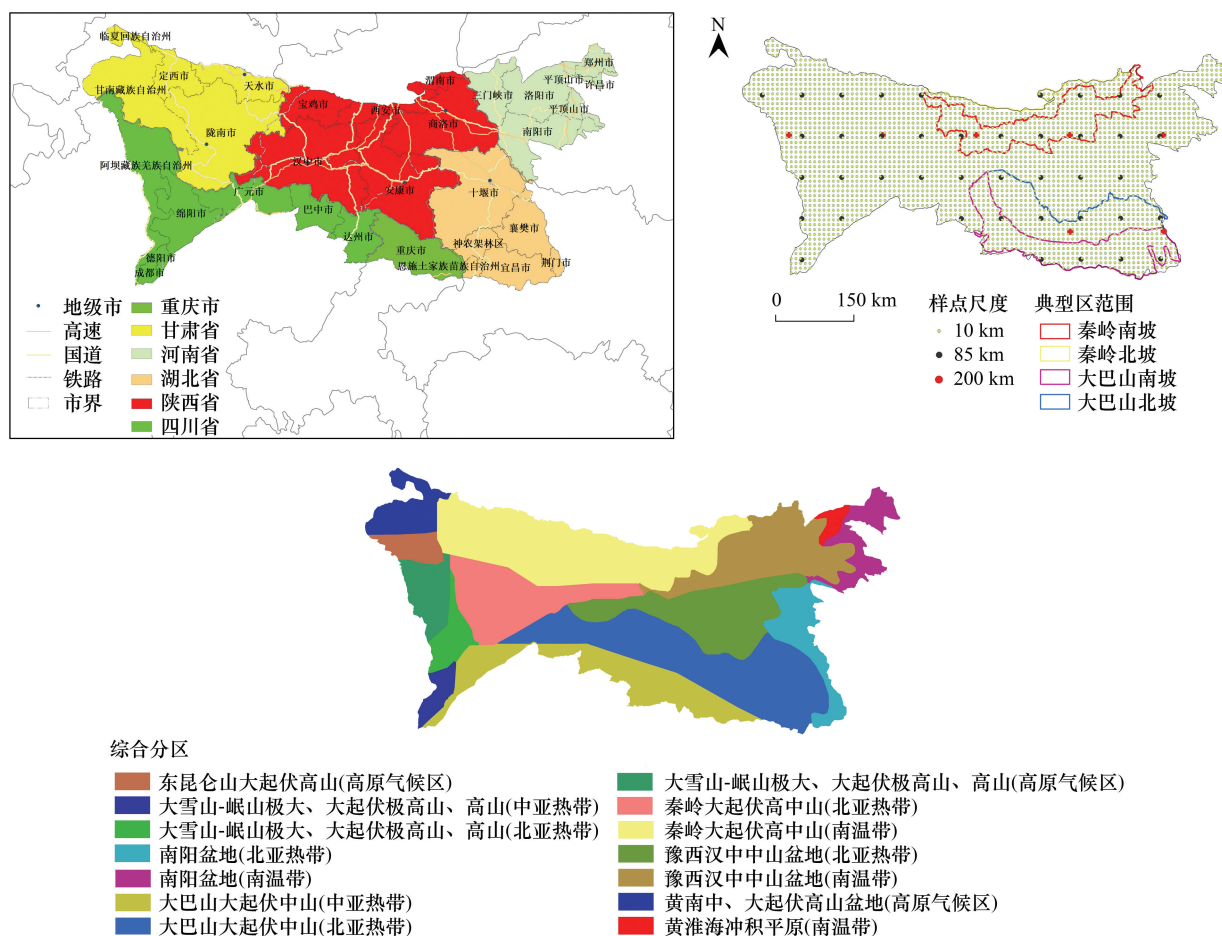


图 1 研究区的地理位置、尺度类型
Fig.1 Geographical location, scale division of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究主要利用的数据包括遥感数据、高程数据、土地利用数据、气象数据、统计数据等多源数据集。DEM 数据主要来源于地理空间数据云;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;2005、2010、2015 年陕西省、河南省、湖北省、甘肃省、四川省和重庆市的粮食产量、种植面积等统计数据,来源于各省及市域的统计年鉴;遥感数据主要是 2005 年、2010 年、2015 年 250m 空间分辨率 MOD13Q1 数据;气象数据源为中国气象科学数据共享服务网。

2 研究方法

2.1 植被净初级生产力估算(NPP)

CASA 模型最早是在 1993 年由 Potter 等^[20]提出的,主要是从遥感影像中提取的 NDVI 数据,并通过光能利用率的原理来估算全球生态系统的净初级生产力(NPP)。计算表达式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x, t)$ 代表的是 t 月中像元 x 吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 代表的是 t 月中像元 x 的实际光能利用率 (gC/MJ); $NPP(x, t)$ 为像元 x 在 t 月份的净初级生产力 (gC/m^2)。

2.2 土壤保持估算

Wischmeier 和 Smith^[21] 提出通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE), 后经改进形成修正的通用土壤流失方程^[22] (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE), 其计算方式如下:

$$A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中, A 为年均土壤侵蚀模数 ($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ \text{ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$), 采用 Wischmeier 和 Mannering^[23] 提出的公式估算所得; LS 为坡长、坡度因子, 无量纲, 坡长因子采用 Wischmeier 和 Mannering^[23] 提出的计算公式, 坡度因子采用 Mc Cool 等^[24] 提出的计算公式; K 为土壤可蚀性因子 ($t \text{ hm}^2 \text{ h MJ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$); C 为植被覆盖与管理因子, 无量纲, 参照了蔡崇法等^[25] 的研究成果; P 为水土保持因子, 无量纲。

2.3 水资源供给估算

本文采用 In VEST 模型中的产水模块计算秦巴山区的产水量, 基本原理如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (3)$$

式中, $Y(x)$ 为栅格单元 x 的年产水量 (mm); $AET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸发量 (mm); $P(x)$ 为栅格单元 x 的年降水量 (mm)。

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^w\right]^{1/w} \quad (4)$$

$$PET(x) = K_e(x) \times ET_0(x) \quad (5)$$

$$W(x) = \frac{AWC(x) \times Z}{P(x)} + 1.25 \quad (6)$$

式中, $PET(x)$ 为栅格单元 x 的潜在蒸散量 (mm); $ET_0(x)$ 表示栅格单元 x 的参考作物蒸散 (mm); $K_e(x)$ 为作物蒸散发系数; $AWC(x)$ 为土壤有效含水量 (mm); $W(x)$ 为经验参数; Z 为 Zhang 系数^[26]。

2.4 生境质量估算

InVEST 软件的生境质量模块测算生境质量指数评价生境质量, 计算结果范围为: 0—1, 值越大代表栖息地质量越高, 生境质量质量越高。计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j(1 - (D_{xj}^z / (D_{xj}^z + k^z))) \quad (7)$$

式中, Q_{xj} 是土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xj} 是土地利用类型 j 栅格 x 的生境胁迫水平; k 是缩放参数 (常数)。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(W_r / \sum_{r=1}^R W_r \right) r_y i_{rxy} b_x S_{jr} \quad (8)$$

栅格 y 中胁迫因子 $r(r_y)$ 对栅格中生境的胁迫作用为 i_{rxy} , 结合相关文献^[27-29], 选取了研究区域的耕地、园地、公路、铁路、城镇村及工矿用地和其他用地作为其生境质量的威胁因子, 对其赋值, 如表 1 所示。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (9)$$

式中, d_{xy} 为栅格 x 与 y 之间的线性距离; d_{rmax} 为胁迫因子最大有效威胁距离; W_r 为胁迫因子的权重; β_x 为栅格 x

的可达性水平; S_{jr} 为土地利用类型 j 对胁迫因子的敏感性。

2.5 粮食产量估算

粮食生产与农田的面积呈现正向关系,但是不同的种植物对粮食产量具有不同的影响。根据相关文献^[30],统计分析建模是实现粮食产量空间化的一种常用的方法,所以本文选用旱地和水田的面积作为自变量,县级尺度的粮食总产数据作为因变量,建立多元线性回归方程来实现粮食产量的空间化。

表 1 生境质量的威胁因子
Table 1 Threats to habitat quality

威胁因子 Threat factor	最大影响距离/km Maximum impact distance	权重 Weight	衰减线性相关性 Attenuation linear correlation
耕地 Farmland	0.5	0.5	指数
园地 Garden	0.8	0.5	指数
公路 Highway	10	0.8	线性
铁路 Railway	7	0.7	线性
城镇 Town	10	1	线性
其他用地 Other land use	5	0.2	线性

3 结果与分析

3.1 不同尺度下生态系统服务关系分析

3.1.1 全域尺度

2005—2015 年生态系统服务间的相关系数进行计算,并对计算结果进行 t 检验,根据 t 分位数表将结果划分为 6 个等级^[31],协同**($r>0,0.01<P<0.05$)、协同*($r>0,0.05<P<0.1$)、协同($r>0,0.1<P$)、权衡($r<0,0.1<P$)、权衡*($r<0,0.05<P<0.1$)、权衡**($r<0,0.01<P<0.05$),分析不同生态系统服务间权衡关系的空间格局和相关关系(图 2)。图 2 的饼状图填充大小代表相关系数值,颜色深浅代表值的大小,值越大颜色越深,蓝色代表正相关,粉色代表负相关。

水资源供给与生境质量以权衡关系为主,南阳盆地、汉中盆地、大巴山北部的权衡关系较突出;水资源供给与土壤保持在部分区域(60.88%)呈现协同关系,但权衡关系在汉江上游尤为显著,主要是人口密集、植被对水分的消耗导致水资源供给量的减少,土壤保持量在增加,导致在汉江上游两者呈现显著权衡关系;水资源供给与 NPP 以协同关系为主,面积为 56.16%,NPP 有很强的区域依赖性,植被覆盖度的增加会提升 NPP 指数;水资源供给与粮食产量以协同关系为主,汉中盆地以南呈现权衡的关系;NPP 与生境质量是协同关系,面积为 59.69%,显著协同的区域分布在伏牛山区以及秦岭山脉西侧,大巴山的东南以及东昆仑山区两者关系呈现显著权衡的关系;NPP 与土壤保持为协同关系,显著协同比例高达 36.36%,主要集中在昆仑山、岷山以及大雪山一侧;粮食产量和 NPP、水土保持、生境质量之间均是权衡关系,面积分别为 61.27%、57.62%、68.69%,因为粮食种植与地形有关,主要分布在平原和盆地,同时区域的 NPP、水土保持和生境质量值都较低;土壤保持和生境质量以协同关系为主,面积为 55.25%,在豫西汉中盆地和秦 岭山脉西侧呈现显著权衡关系。

3.1.2 综合分区尺度

根据划分的综合分区,得到子区域两两生态系统服务的相关关系(图 3)。水资源供给和 NPP 整体上为协同的关系,但在子区域 4、6、7、9、12、13、14 中呈现权衡关系,原因是子区域内植被覆盖率提升的同时增加了地表植被的蒸腾作用,黄淮海平原和南阳盆地人口密集,生活和工业用水增多,促使子区域水资源供给量降低;水资源供给和粮食生产整体上是协同关系,而在子区域 1、5、6、12 呈现权衡关系,原因是坡度小的地区适合粮食生产,地貌类型以高山为主的区域不适合粮食生产,同时气候类型属于亚热带气候,水资源供给量丰富,促使子区域两者关系是权衡,同样坡度较小,土壤侵蚀量小,所以在子区域 1、2、5、7、12、13 的水资源供给和土壤保持呈现权衡关系;水资源供给与生境质量总体以权衡关系为主,仅有区域 6 为协同的关系,相关系数

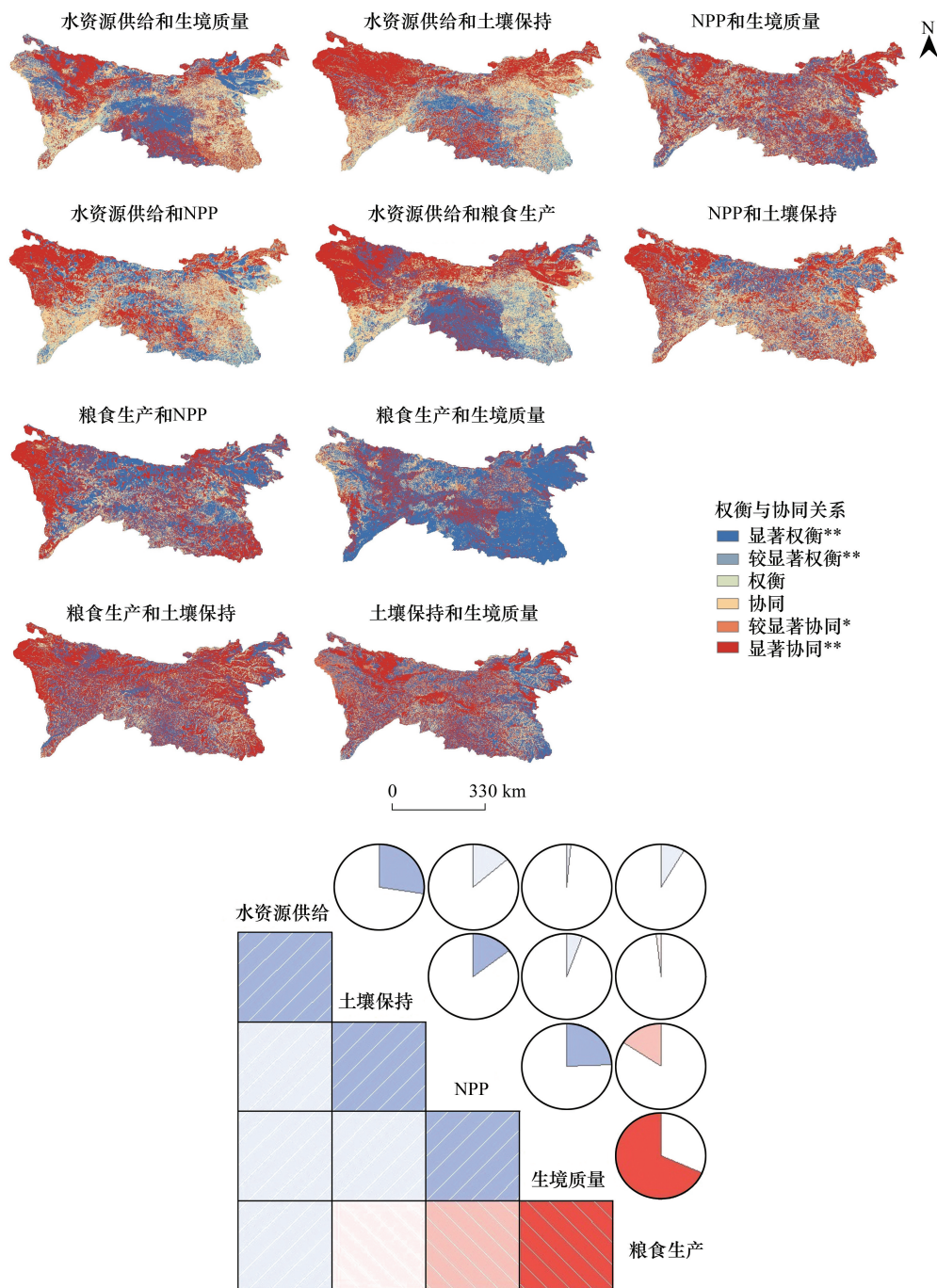


图2 生态系统服务空间权衡关系, 全域尺度生态系统服务相关关系

Fig.2 Spatial trade-offs of ecosystem services, Relevance of ecosystem services at global scale

0.25, 主要因为秦岭山脉北坡生境质量丰富, 而区域内水资源供给量较为丰富; NPP 与生境质量在区域 5 呈现权衡关系, 主要因为海拔高, 高山气候类型, 促使生境质量单一, 而原始植被状况良好, 破坏程度低; NPP 与粮食生产整体上呈权衡关系, 而在子区域 2、3、4、5 为协同关系, 主要原因是气候和地形综合影响, 使得区域粮食生产能力和植被覆盖度低; 粮食产量和土壤保持在子区域 1、2、3、4、5 呈现协同关系, 主要原因是坡度在 10—15° 之间, 实际和潜在侵蚀量较小, 促使土壤保持能力弱, 而气候条件也会影响粮食生产; 生境质量和土壤保持以协同关系为主, 但在区域 9 却呈现权衡关系。

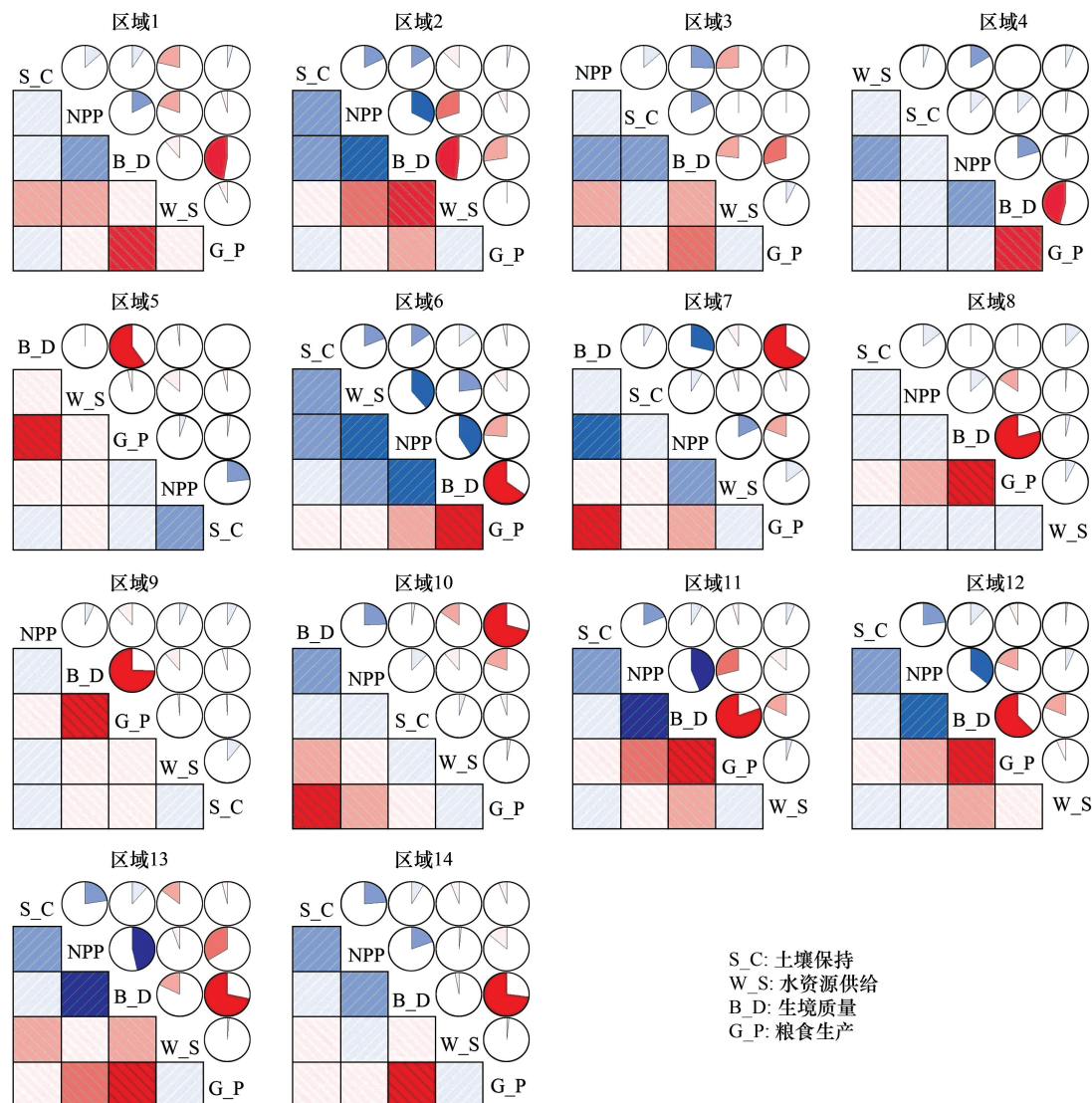


图3 综合分区尺度下生态系统服务相关性

Fig.3 Relevance of ecosystem services at integrated zoning scale

3.1.3 典型样区尺度

本文整理了2005、2010、2015年秦岭和大巴山的南北坡的五种生态系统服务值(图4),研究出生态系统服务关系在特定年份发生转变。水资源供给与NPP在2005年大巴山的北坡、2010年秦岭南北坡呈现权衡关系;水资源供给和粮食产量在2015年四个典型区表现为权衡关系;水资源供给和土壤保持在2010年秦岭北坡表现为权衡关系;水资源供给与生境质量在2015年大巴山南坡表现为协同关系;NPP与生境质量在2015年大巴山南坡表现为权衡关系;粮食生产和土壤保持在2005、2010、2015年大巴山南坡均表现为协同关系,2010年秦岭北坡、大巴山北坡、2015年大巴山北坡均表现为协同关系;土壤保持和生境质量在2005、2010、2015年大巴山的南北坡均表现为权衡关系等,通过研究典型区服务间关系得出生态系统服务在随着时间的推移而发生了改变。

3.1.4 样点间隔尺度

根据计算结果,将样点尺度下生态系统服务关系大致分为4类(图5):①生态系统服务以协同关系为主,并且协同效应随着尺度的增大而增强。比如:NPP与生境质量、水资源供给,水资源供给与粮食生产、土壤保

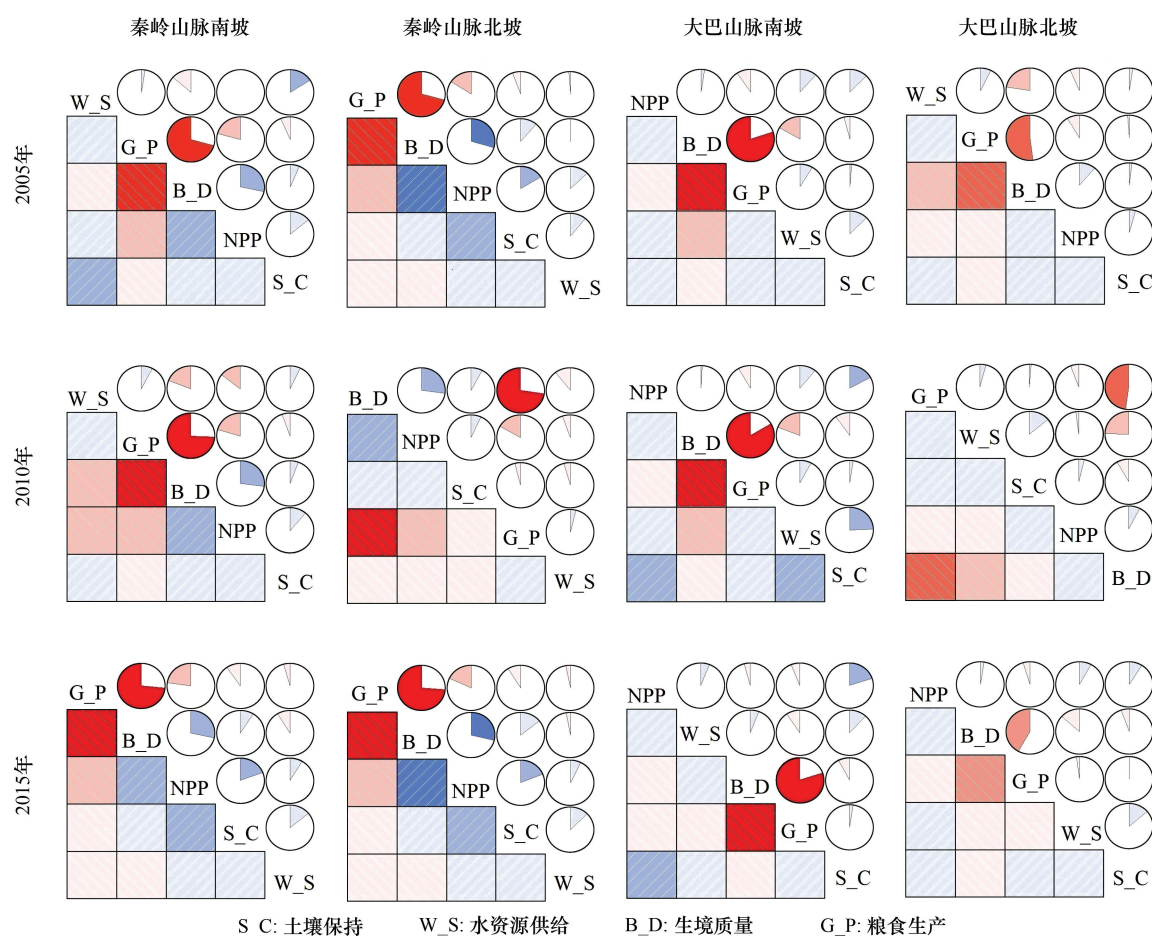


图4 典型样区尺度下生态系统服务相关性
Fig.4 Ecosystem service relevance at typical sample scale

持;②生态系统服务以协同关系为主,并且协同效应随着尺度的增大而减小。比如:NPP 与土壤保持;③生态系统服务以权衡关系为主,并且权衡效应随着尺度的增大而增加。比如:NPP 与粮食生产、粮食生产与生境质量、水资源供给与生境质量;④生态系统服务之间的关系随尺度的增加由权衡变为协同和由协同变为权衡。比如:粮食生产与土壤保持以及生境质量与土壤保持。

3.2 4种研究尺度下生态系统服务关系对比分析

四种尺度下部分区域成对生态系统服务之间的相关系数(图6)。在子区域4和大巴山南坡的NPP与粮食生产、粮食生产与土壤保持相关系数分别为0.056、0.032、0.061、0.025,并且都通过了 $P<0.05$ 显著性检验,在全域尺度和样点间隔尺度下两者关系却为权衡关系;子区域7、12的水资源供给与土壤保持相关系数分别为-0.051、-0.07,并且都通过了 $P<0.01$ 显著性检验,而全域尺度、典型样区尺度、样点间隔尺度下两对关系却为协同关系;水资源供给与粮食生产在秦岭、大巴山南坡、子区域12的相关系数分别为-0.042、-0.093、-0.087,并且都通过了 $P<0.01$ 显著性检验,而全域尺度和样点间隔尺度下两对关系却为协同关系。

4种尺度下完整的生态系统服务权衡与协同关系(表2),在全域尺度下探究生态系统服务之间的权衡与协同关系,能比较宏观的揭示服务之间的关系。随着尺度的不断缩小,在中尺度范围内(综合分区尺度)发现生态系统服务之间的差异性,由于尺度之间基础条件的差异性,造成在中尺度下服务之间关系的转变。在典型区之间生态系统服务关系也有所区别,由于南北坡的气候、土壤、地貌等差异,造成南北坡生态系统服务关系的差异性,并在特定的年份服务之间的关系发生转变。在小尺度下研究生态系统服务之间的权衡协同关系也会随着尺度的差异而逐渐发生变化,服务之间的关系随着尺度的增大而逐渐呈现不同方式的变化。

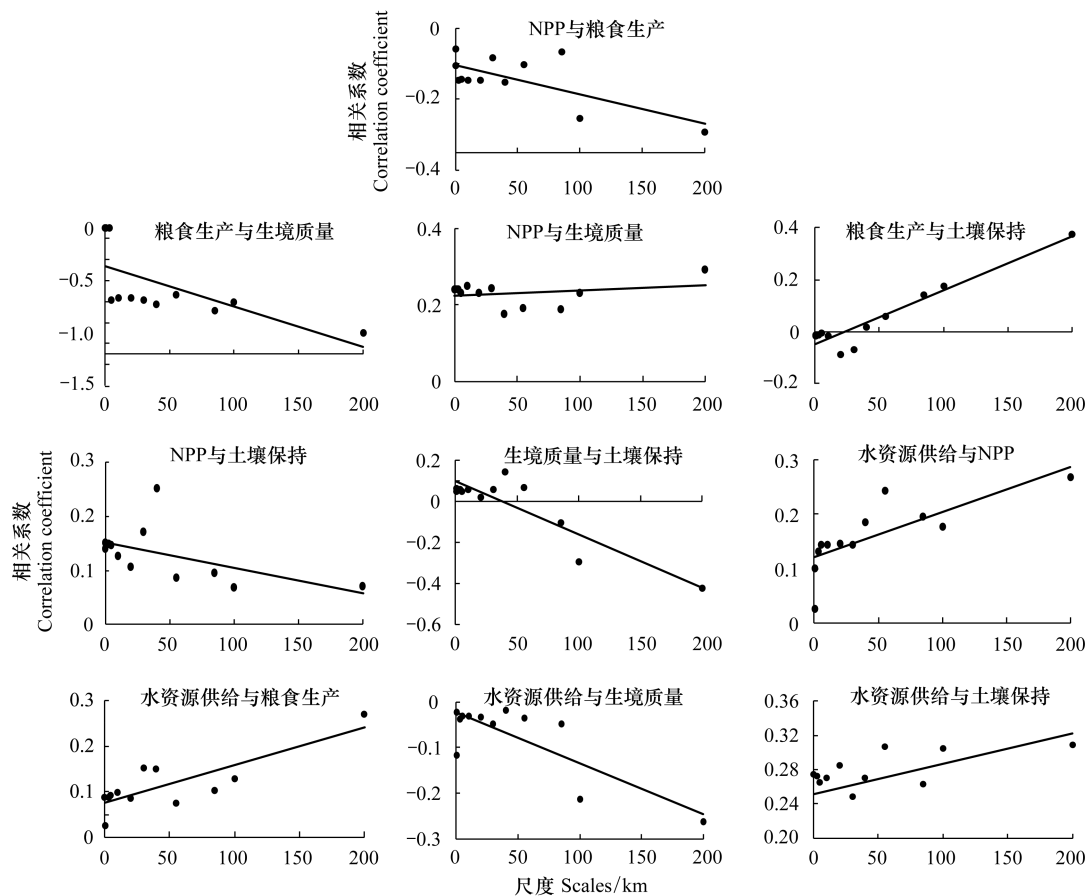


图5 样点间隔尺度下生态系统服务相关性

Fig.5 Ecosystem service correlation at sample interval scale

4 讨论与讨论

4.1 讨论

4.1.1 尺度差异性的驱动因素

秦巴山区是我国南北过渡地带,过渡性对东西方向高大山脉的阻隔和分异作用产生影响,坡向和垂直分异使得南北方向的土壤和植被具有多重分异的结果。东西向延伸的秦巴山脉,不仅对南北方向的地理分异规律产生影响,而且还具有更明显的阴阳坡和侧翼的分异^[31],造成地形、地貌、气候等多方面的差异性,会对生态系统服务关系产生影响,促使生态系统服务关系的差异性。秦巴山区土壤层从南向北依次是半淋溶土、初育土、淋溶土、人为土、铁铝土等过渡形式;气候类型从南温带、北亚热带、中亚热带过渡;地貌类型也从秦岭大起伏高中山、豫西汉中中山盆地、南阳盆地、大巴山大起伏高中山过渡。地形、土壤、气候的差异性主要是受到纬度地带分异、经度分异、垂直地带性、坡向分异等自然规律的影响,促使了秦巴山区高度复杂性、多样性和异质性。同时,在区域内存在非地带性作用,例如山体效应^[31-32],也会增加秦巴山区环境的复杂性和异质性。

秦巴山区具有多维地带性结构,高程、坡度因素会对整个生态系统服务造成不同的影响,如图7。大面积的耕地都处在 DEM<2000m 和坡度>25°,大量的梯田和坡耕地存在,适合粮食的种植,但是区域内人口密度较大,在一定程度上会破坏植被的生长环境,促使生境质量和植被的碳储量下降。森林和草地覆盖度高的区域大多集中在 DEM>4000m 和坡度在 15—25°高海拔山区,草地和森林的抗土壤侵蚀力比较强,大面积的阔叶林分布,人工林面积小,故有较大的生态效益,所以 NPP、土壤保持、生境质量等功能较强。草地的分布也会

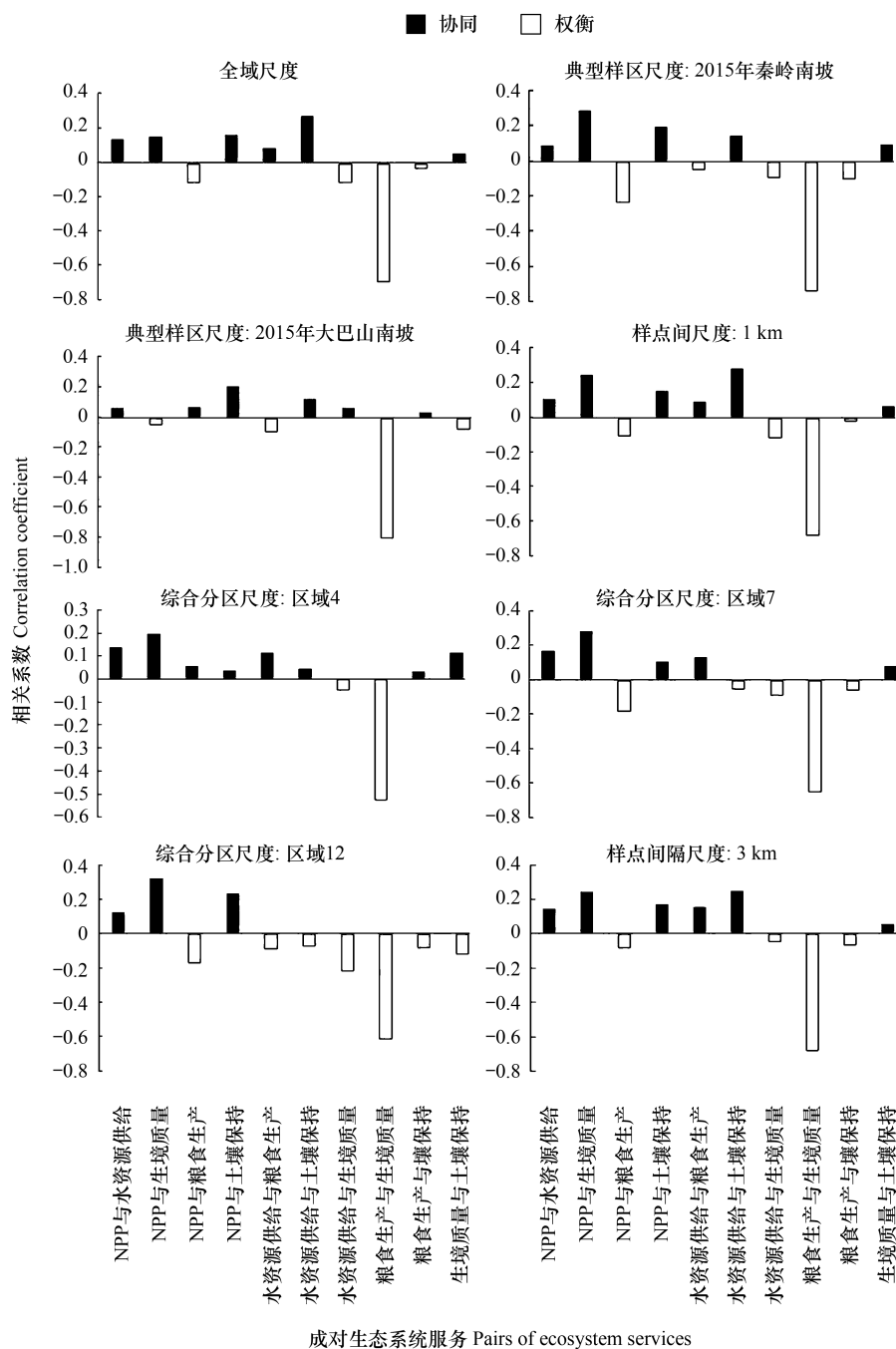


图6 全域、综合分区、典型样区、样点间隔尺度上生态系统服务间的相关系数

Fig.6 Pearson's correlation coefficients between ecosystem services on the scale of global region, comprehensive zoning, typical sample areas and sample-point interval zoning

增加地表覆盖,更进一步的增强了地表抗侵蚀能力,同时草地具有防风、固沙、保土、调节气候、净化空气、涵养水源等生态功能,促使草地覆被的区域生态效益也非常突出。

近年来,退耕还林还草、生态效益补偿、生境质量主体功能区的建设等国家政策的提出,促使秦巴山区生态结构发生转变。相较于2005年,2015年秦巴山区的耕地面积减少了10.04%,林地面积增加了5.03%,草地增加了5.24%,城市用地增加了25.54%,水域增加了4.13%,未利用地减少了9.54%。土地利用形式的转变在一定程度上影响景观格局,从而对生态系统生态系统服务产生影响。经研究发现仅有农作物生产服务与人类

活动之间的关系是正相关,凸显了人类活动对生态系统服务的影响程度^[33-34]。随着经济的发展,大量的非建设用地转换为建设用地,一方面导致了土壤保持能力的下降,植被生长状态被破坏,降低了 NPP 值,另一方面也会降低地表的蒸散作用,导致水资源供给量的增加,从而促使一部分地区水资源供给和上述几种生态系统服务呈现权衡的关系,这些结果和已有的研究成果相类似^[35-36]。粮食生产与土壤保持、NPP、生境质量之间是权衡关系。当为了提升粮食的产量,会对其他的土地类型进行开垦和修复,虽然提升了粮食产量,但相对应的林地、草地的面积减少,造成生境质量和 NPP 服务大幅度减少,引发一系列的环境问题,所以在增加粮食产量的同时也要考虑生态问题,促使生态系统良性发展。

表 2 生态系统服务四种尺度依赖性比较
Table 2 Comparison of four scales dependence of ecosystem services

生态系统服务类型 Types of ecosystem services	空间尺度 Spatial scale			
	全域尺度(大尺度) Global scale (large scale)	综合分区尺度(中尺度) Regional scale (mesoscale)	典型样区尺度(小尺度) Typical sample area scale (small scale)	样点间隔尺度(点尺度) Sample interval scale (point scale)
NPP 与粮食生产 NPP and Grain production	权衡关系	权衡关系 (综合分区 2、3、4、5 为协同关系)	权衡关系	权衡关系 随着尺度增大,权衡关系越强
NPP 与生境质量 NPP and Habitat quality	协同关系	协同关系 (综合分区 5 为权衡关系)	协同关系 (2015 年大巴山南坡为权衡关系)	协同关系 随着尺度增大,协同关系增强
NPP 与土壤保持 NPP and Soil conservation	协同关系	协同关系 (综合分区 5 为权衡关系)	协同关系	协同关系 随着尺度增大,协同关系减弱
粮食生产与生境质量 Grain production and Habitat quality	权衡关系	权衡关系 (综合分区 2、3、4、5 为协同关系)	权衡关系	权衡关系 随着尺度增大,权衡关系越强
粮食生产与土壤保持 Grain production and Soil conservation	权衡关系	权衡关系 (综合分区 1、2、3、4、5 为协同关系)	权衡关系 (2005、2010、2015 年大巴山南坡、2010 年秦岭北坡、大巴山北坡、2015 年大巴山北坡为协同关系)	权衡关系 随着尺度增大,由权衡关系变为协同关系
生境质量与土壤保持 Habitat quality and Soil conservation	协同关系	协同关系 (综合分区 9 为权衡关系)	协同关系 (2005、2010、2015 年大巴山的南北坡为权衡关系)	协同关系 随着尺度增大,由协同关系变为权衡关系
水资源供给与 NPP Water resources supply and NPP	协同关系	协同关系 (综合分区 4、6、7、9、12、13、14 为权衡关系)	协同关系 (2005 年大巴山的北坡、2010 年秦岭南北坡为权衡关系)	协同关系 随着尺度增大,协同关系增强
水资源供给与粮食生产 Water resources supply and Grain production	协同关系	协同关系 (综合分区 1、4、6、12 为权衡关系)	协同关系 (2015 年在秦岭南北坡、大巴山南北坡均为权衡关系)	协同关系 随着尺度增大,协同关系增强
水资源供给与生境质量 Water resources supply and Habitat quality	权衡关系	权衡关系 (6 为协同关系)	权衡关系 (2015 年大巴山南坡为协同关系)	权衡关系 随着尺度增大,权衡关系增强
水资源供给与土壤保持 Water resources supply and Soil conservation	协同关系	协同关系 (综合分区 1、2、5、7、12、13 为权衡关系)	协同关系 (2010 年秦岭北坡为权衡关系)	协同关系 随着尺度增大,协同关系增强

4.1.2 尺度方法的不统一性

本文为了凸显 4 种尺度下生态系统服务间权衡与协同关系的差异性,采用了 3 种不同的方法来探究不同尺度下生态系统服务关系。在不考虑区域内部结构差异性的情况下,采用相关分析法探究秦巴山区生态系统服务间关系的整体趋势,凸显整体性;基于 R 语言探究子区域(中、小尺度)生态系统服务的关联性;随机样点法定量描述样点间隔尺度生态系统服务之间的关系;样点尺度的选择具有随机性,根据所设的空间间隔来进行相应的计算,可以对比不同间隔尺度下成对服务关系,来体现出小范围间区域特征的差异性。但是文中没

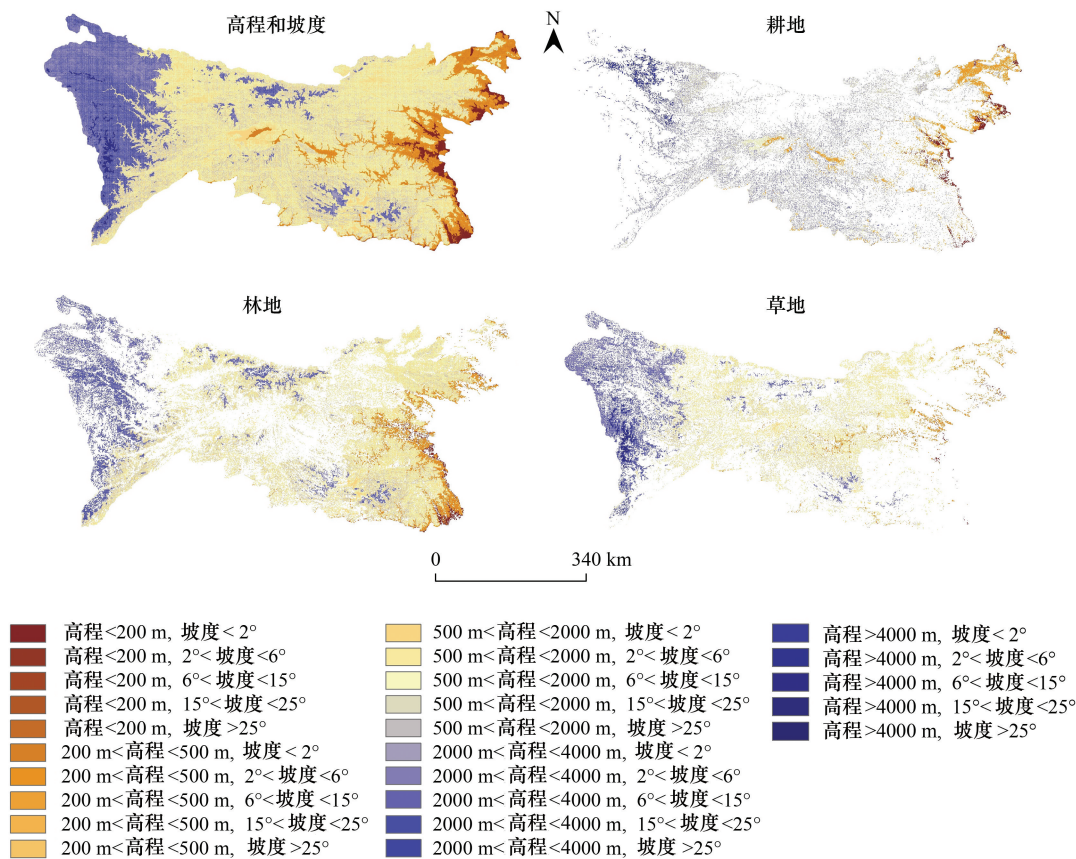


图7 不同的高程和坡度组合下土地利用形式的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of land use patterns under different elevation and slope combinations

有考虑在相同方法下生态系统服务关系究竟是如何变化的,用相同的方法来衡量更具有说服力,所以怎么样使用同一种方法在不同的时空尺度下都能清晰明了的展现出生态系统服务之间的关系转换是今后努力的方向。

4.2 结论

本文利用 2005、2010 和 2015 年数据,探究秦巴山区大、中、小尺度下 NPP、土壤保持、生境质量、水资源供给、粮食生产 5 种生态系统服务之间的权衡协同关系,研究发现生态系统服务彼此关系在不同的研究尺度下存在差异性。结果表明:

- (1)全域尺度、综合分区尺度、典型样区尺度下生态系统服务之间的关系相同,但在综合分区尺度下存在特定分区中生态系统生态系统服务之间的转变,与全域间的生态系统服务关系出现差异;典型样区尺度下与全域尺度在年际间发生变化,在特定的年份服务之间的关系相互转变。
- (2)样点间隔尺度下协同与权衡关系在不同的间隔尺度中存在差异性,协同、权衡效应随着尺度的增加而增强;协同效应随着尺度的增加而减少;权衡与协同关系随着尺度的增大相互发生转变。

参考文献 (References):

[1] Daily G C. Nature's Services; Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington; Island Press, 1997; 1-25.

[2] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-639.

[3] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.

[4] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark; trade-offs and synergies in a cultural

- landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [5] Gonzalez-Redin J, Luque S, Poggio L, Smith R, Gimona A. Spatial Bayesian belief networks as a planning decision tool for mapping ecosystem services trade-offs on forested landscapes. *Environmental Research*, 2016, 144: 15-26.
- [6] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [7] Thompson J R, Lambert K F, Foster D R, Broadbent E N, Blumstein M, Zambrano A M A, Fan F C. The consequences of four land-use scenarios for forest ecosystems and the services they provide. *Ecosphere*, 2016, 7(10): e01469.
- [8] 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.
- [9] Mina M, Bugmann H, Cordonnier T, Irauschek F, Klopčič M, Pardos M, Cailleret M. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(2): 389-401.
- [10] Yang X N, Zhou Z X, Li J, Fu X, Mu X M, Li T. Trade-offs between carbon sequestration, soil retention and water yield in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10): 1449-1462.
- [11] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005-2015 年石羊河流域生态系统服务时空分异. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 474-485.
- [12] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. *地理研究*, 2010, 29(3): 383-396.
- [13] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710.
- [14] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [15] 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.
- [16] Fu B J, Zhang L W, Xu Z H, Zhao Y, Wei Y P, Skinner D. Ecosystem services in changing land use. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 833-843.
- [17] Onaindia M, De Manuel B F, Madariaga I, Rodríguez-Loinaz G. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 1-9.
- [18] Raymond C M, Singh G G, Benessaiah K, Bernhardt J R, Levine J, Nelson H, Turner N J, Norton B, Tam J, Chan K M A. Ecosystem services and beyond: using multiple metaphors to understand human-environment relationships. *Bioscience*, 2013, 63(7): 536-546.
- [19] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 218-229.
- [20] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [21] Wischmeier W H, Smith D D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, DC: Department of Agriculture, 1978: 5373-5377.
- [22] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, Porter J P. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 30-33.
- [23] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1): 131-137.
- [24] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1571-1576.
- [25] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [26] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [27] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 622-629.
- [28] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 熊木齐, Wasowski J. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 1-15.
- [29] 谭君. 区域土地利用变化对生态系统服务功能价值的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.
- [30] 姬广兴, 廖顺宝, 岳艳琳, 候鹏敏, 杨旭. 不同样本尺度和分区方案的粮食产量空间化及误差修正. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 272-278.
- [31] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311.
- [32] 张翔, 张百平, 姚永慧, 齐文文, 庞宇, 赵芳. 山体效应对台湾常绿阔叶林分布上限的影响. *山地学报*, 2013, 31(5): 24-31.
- [33] 张玲玲. 甘肃白龙江流域生态系统服务评估及影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [34] Carreño L, Frank F C, Viglizzo E F. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154: 68-77.
- [35] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一和, 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.
- [36] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 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.