

引用格式:张苗,杨国庆,王军邦,李继园,张甜. 秦巴山区生态系统服务权衡—协同关系[J]. 山地学报,2022,40(1):1-13.
ZHANG Miao, YANG Guoqing, WANG Junbang, LI Jiyuan, ZHANG Tian. Trade-off synergy of ecosystem services in the Qinba mountainous area of China [J]. Mountain Research, 2022, 40(1):1-13.

秦巴山区生态系统服务权衡—协同关系

张苗¹,杨国庆¹,王军邦^{2*},李继园¹,张甜¹

(1. 陕西师范大学 西北国土资源研究中心,西安 710119;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室 生态系统大数据与模拟中心,北京 100101)

摘要: 权衡—协同关系时空分布及其演化机制分析有助于量化生态系统服务。当前,秦巴山区生态系统研究主要集中在刻画单个生态系统服务的演变和两两生态系统服务之间的关系,缺少对多种生态系统服务之间相互作用和演化机制的分析,致使多个生态系统之间的复杂作用机制及其影响因素不能得到全面认识。本文基于多源数据与综合模型,采用空间相关分析、线性回归等方法对秦巴山区 1995—2015 年的土壤保持量、生境质量、净初级生产力和食物供给服务进行估算,揭示了四种生态系统服务功能的时空格局与权衡—协同关系,并分析了这种关系演变背后的驱动机制。结果表明:(1)近 20 年秦巴山区土壤保持量、生境质量和净初级生产力的生态系统服务高值多出现在水热条件较好的山区,低值主要集中在盆地,食物供给则呈现相反的空间分布规律;(2)多个生态系统服务之间的权衡关系主要体现在生境质量下降而净初级生产力、食物供给增加,协同关系主要体现在净初级生产力、土壤保持量和食物供给的同步增加,区域发展建议注重动植物栖息地保护与生物多样性维持;(3)生态系统服务变化的主要原因是林地和耕地的相互转化,气温变化对净初级生产力和食物供给服务的影响大于降水。本研究可为秦巴山区生态健康发展提供理论依据和决策支撑。

关键词: 生态系统服务;权衡—协同;可持续发展;秦巴山区

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

生态系统服务(Ecosystem Services)是连接自然环境与人类福祉间的桥梁^[1],提供人类健康、安全和发展各种物质需求。不同生态系统服务之间通常相互影响,这种影响包括权衡关系(Trade-off)和协同关系(Synergy)^[2-3],生态系统服务之间的复杂关系可以通过权衡—协同作用进行量化^[4-5]。在人类活动和气候变化双重驱动下,有效评估生态系统服务演化、生态系统服务之间的联动特征,定量揭示其归因机制,不仅是人地耦合系统研究的核心议题,

也是制定减排增汇措施、实现“碳中和”的重要手段^[6]。

当前,生态系统服务权衡—协同关系的研究多基于统计分析和模型模拟两种方法^[7-8],判定区域当下生态系统服务评估和权衡—协同关系,较少涉及生态系统服务之间关系的动态趋势变化及其作用机制的转变过程分析^[9],并且在研究多个生态系统服务间的相互作用时,大部分只考虑了生态系统服务两两之间的作用关系,对多种生态系统服务间的

收稿日期(Received date):2021-08-18;改回日期(Accepted date):2022-02-14

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(31971507,41831284);陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20210704)。[National Natural Science Foundation of China (31971507,41831284); Natural Science Project of Shaanxi Province (20210704)]

作者简介(Biography):张苗(1988-),女,甘肃庆城人,博士,助理研究员,主要研究方向:数值模拟人类活动的气候、水文与生态效应。[ZHANG Miao (1988-), female, born in Qingyang, Gansu province, Ph.D., associate professor, research on numerical simulation of climatic, hydrological and ecological effects of human activities] E-mail: miaomiaozpb@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):王军邦(1974-),男,青海西宁人,博士,副研究员,主要研究方向:全球变化陆地生态学。[WANG Junbang (1974-), male, born in Xining, Qinghai province, Ph.D., associate professor, research on global change terrestrial ecology] E-mail: jbwang@igsrr.ac.cn

交互作用探索仍然比较缺乏^[10]。

秦岭是中国南北气候地理分界线,秦巴山区是我国重要的生态屏障,具有保持土壤、涵养水源等诸多生态功能^[11-12]。近年来,秦岭南北区域经济快速发展,宏观发展定位逐渐分化,城镇快速发展与区域产业转型升级加剧了秦巴山区各类生态系统功能的变化,引发水源涵养能力降低、植被固碳功能下降、土壤流失加剧、生物多样性降低等一系列生态问题^[13]。本研究采用空间相关分析、基于像元尺度时间序列的线性回归等方法,量化了 1995—2015 年秦巴山区土壤保持量 (Soil Conservation, SC)、生境质量 (Habitat Quality, HQ)、净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 和食物供给 (Food supply, FS) 四种生态系统服务之间的变化及其相互之间权衡—协同关系的时空特征,并分析了生态系统服务功能变化的驱动因素,以期为秦巴山区生态管理决策提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

秦巴山区位于中国中部,地理范围 (30°27′ ~ 34°37′N, 103°41′ ~ 113°11′E) 如图 1 所示,地跨多个省级行政区,总面积约 21.93 万 km²。区域地貌以山地丘陵为主,属亚热带气候,冬季较暖,夏秋两季多雨水,全区水系丰富,是水源涵养保护的重点区域。秦巴山区植被类型复杂,物种多样性丰富,是我重要的南北过渡区^[14]。该地区生态环境脆弱,区内土地资源短缺、土壤流失严重、灾害频发,这些因素共同制约着秦巴山区的生态可持续发展^[15]。

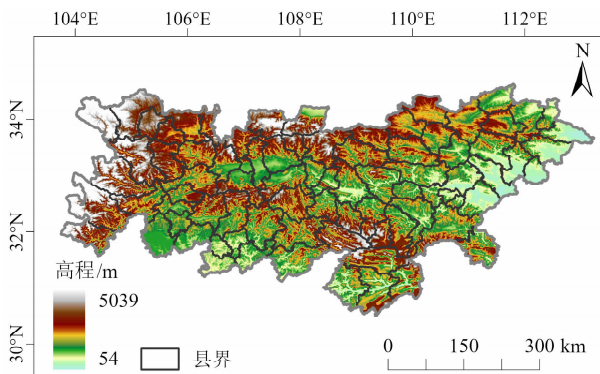


图 1 秦巴山区位置

Fig. 1 Location of the Qinba mountainous area, China

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括土地利用数据、高程、NDVI、气象数据、土壤数据和相关统计数据等,数据详情与来源如表 1 所示。

表 1 数据详情与来源

Tab. 1 Data details and sources

数据名称	数据详情	来源
土地利用	1995—2015 年,分辨率 1 km	中国科学院资源环境数据云平台
DEM	分辨率 30 m	地理空间数据云
NDVI	1995—2015,分辨率 1 km	中国科学院资源环境数据云平台
气象	1995—2015,逐日站点观测数据	中国气象数据网
土壤	世界土壤数据库 (HWSD)	国家青藏高原数据中心
统计数据	县级粮食产量	统计年鉴

2 研究方法

2.1 土壤保持量(SC)估算

基于修正通用土壤流失方程 RUSLE 计算逐像元的 SC,计算公式如下:

$$A_m = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

$$A_p = R \cdot K \cdot L \cdot S \quad (2)$$

$$SC = A_p - A_m \quad (3)$$

式中, A_m 和 A_p 分别为实际和潜在土壤侵蚀量 ($t \cdot ha^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子,与降雨强度、雨量、时长等因素有关^[16-17],采用 Wischmeier 提出的经验模型公式计算^[18]; K 为土壤侵蚀性因子,采用 Willams 和 Arnold 提出的侵蚀/生产力影响模型 EPIC 估算^[19]; L 为坡长因子, S 为坡度因子,均为地形因子,采用 Liu 等^[20]提出的方法计算; C 为植被覆盖因子,参考张园眼^[21]的方法计算; P 为土壤保持措施因子,是土壤流失量与未实施土壤保持措施下顺坡种植时的土壤流失量的比值^[22],本文结合已有研究结果对秦巴山区不同土地利用类型的 P 值进行赋值(表 2)^[23]。

2.2 生境质量(HQ)估算

基于 InVEST 模型中的生境质量模块对秦巴山区 1995—2015 年的 HQ 进行计算,该模型广泛运用于生活、生产、生态等方面的评估^[24]。生境质量与

表 2 不同土地利用类型的 P 值
Tab. 2 P value of different land use types

土地利用类型	P 值
旱田	0.35
水田	0.15
林地	1.00
灌木	1.00
草地	1.00
湿地	1.00
建设用地	0.00
未利用地	1.00
水域	0.00

栖息地受不同威胁源的影响有关,威胁源通常来自城市土地、农村居民区、建设用地和农田等人类活动区。随着威胁源与栖息地的距离增加,威胁源的影响越来越小,生境质量的计算如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中, Q_{xj} 为生境质量; H_j 为生境适宜性分值; z 为尺度常数,一般取 2.5; k 为半饱和常数,取 $k=0.5$; D_{xj} 为生境退化指数,计算过程参考相关文献^[25-26]。此外,该模块中需要输入不同土地利用类型对威胁因子的敏感性参数、生境威胁因子权重和影响距离等,取值如表 3、表 4 所示^[27]。

2.3 净初级生产力(NPP)估算

本文使用 Potter 等人建立的 CASA 模型估算秦巴山区净初级生产力,该模型在 NPP 核算研究中得到广泛应用^[28-29],计算公式如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \cdot \varepsilon(x,t) \quad (5)$$

式中, x 为像元; t 为时间; $APAR$ 为植被所吸收的光合有效辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); ε 为光能转化率($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

2.4 食物供给(FS)统计

本研究使用土地利用数据和区域县级统计年鉴数据来估算研究区内各种土地利用类型的食物供给量,以实现 FS 的空间化估算,计算公式为:

$$G_i = A_i \cdot N_i \quad (6)$$

$$N_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (7)$$

式中, G_i 为食物产量($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$); A_i 为作物面积(km^2),在本研究中为 1 km^2 的单位网格; N_i 为单位面积的食物($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$); F_i 为研究区域中该食物的

表 3 不同土地利用类型的生境适应性及对威胁因子的敏感性
Tab. 3 Habitat adaptability and sensitivity to threat factors of different land use types

地类编码	土地利用类型	生境适应性	威胁因子敏感性	
			建设用地	农田
旱田	0、11	0.30	0.50	0.30
水田	20	0.50	0.50	0.30
农、林、灌、草混合(以农为主)	29、30	0.49	0.54	0.34
农、林、灌、草混合(以非农为主)	40	0.58	0.58	0.38
绿叶阔叶林	50	0.90	0.75	0.55
落叶阔叶林	60、61	0.80	0.75	0.55
常绿针叶林	70	0.70	0.75	0.55
林、灌、草混合(以林、灌为主)	100	0.72	0.64	0.44
林、灌、草混合(以草为主)	110	0.66	0.62	0.42
灌木	120	0.70	0.55	0.35
草地	130	0.60	0.60	0.40
稀疏植被(林、灌、草)	150	0.30	0.60	0.40
被水淹的林地	170	0.85	0.83	0.63
湿地	180	0.90	0.90	0.70
建设用地	190	0.00	0.00	0.00
未利用地	200	0.00	0.00	0.00
水域	210	1.00	0.90	0.70

表 4 威胁因子权重和衰变类型

Tab. 4 Weights for threat factors and decay types

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰退类型
农田	8.00	0.70	线性衰退
城镇用地	10.00	1.00	指数衰退

总产量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); S_i 为第 i 种食物的种植总面积(km^2),对应于每种土地利用类型的面积。具体而言,谷物、油料和蔬菜产量归属于农田,肉和奶的产量归属于草地,水产品产量对应于水域。

2.5 生态系统服务间的时空相关分析

(1)单个生态系统服务之间的关系:采用基于像元尺度的相关分析空间统计映射方法计算生态系统服务之间的关系。首先逐像元对各生态系统服务

功能数据进行标准归一化,然后使用 ArcGIS 软件中的波段统计工具计算每对生态系统服务之间的相关系数与显著性,计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中, x_{ij} 为第 i 行第 j 列的数据 x 值; y_{ij} 为第 i 行第 j 列的数据 y 值; \bar{x} 与 \bar{y} 为平均值; r_{xy} 为相关系数,值介于 -1 到 1 之间, $r_{xy} > 0$ 表示生态系统服务之间存在正相关,即协同关系, $r_{xy} < 0$ 表示存在负相关,即权衡关系。

(2)多个生态系统服务之间的关系:为研究秦巴山区多种生态系统服务之间的复杂关系,参考空间叠加思维^[30],并基于 Python 代码优化了计算方法。具体步骤为:首先依据四种生态系统服务数据逐像元近 20 年的变化率 $slope$ 和显著性 p 值进行空间选取并赋值, $slope$ 大于 0 且 p 值小于 0.05 的赋值为 1(显著增长), $slope$ 小于 0 且 p 值小于 0.05 的赋值为 2(显著减少),不满足以上条件的赋值为 0(没有显著变化的区域);然后将赋值数据分别读入一个空的矩阵,生成四种生态系统服务的时间变化矩阵,同时设置一组四个数字的代码,分别规定 NPP、HQ、SC、FS 置位于千位、百位、十位和个位;最后通过空间叠加,实现四个矩阵的合并,形成类似于“1112”的合并像元,以代表 NPP、HQ、SC 正相关(协同)但与 FS 负相关(权衡)的区域。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务变化时空分异

秦巴山区 1995—2015 年 SC、HQ、NPP、FS 的平均空间分布及其变化趋势如图 2 所示。1995—2015 年平均 SC 为 $5218.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (图 2a),除汉中盆地与东部平原部分区域小于 $2500 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 外,大部分区域的 SC 集中于 $5000 \sim 11\,000 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; 1995—2015 年间 SC 的变化东西分异显著,以北边洛南县与南边巫溪县为界,西部区域显著增加,增速普遍高于 $100 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 2b);SC 高值与显著增加的区域主要集中于秦巴山区林地密集区,而研究区东部的淮海平原以及南部少量农田地区 SC 下降趋势显著,降幅高达 $100 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,尤其以镇平县、内

乡县、南召县、鲁山县、巫山县等地为典型。秦巴山区土壤保持能力有效提升是封山育林、退耕还林还草等植被恢复措施以及坡面整治、沟道防护等工程措施相结合的综合结果^[31]。

1995—2015 平均 HQ 为 0.675 (图 2c),其中研究区西北部和东北部盆地农田区域 HQ 约为 0.2 ~ 0.4,以甘肃的礼县、西和县和河南的洛宁县、鲁山县、南召县、镇平县为代表;中部山区林地集中的镇巴县、岚皋县、城口县、镇坪县等 HQ 值接近 0.9,生物多样性较高;从整体变化趋势来看,近 20 年秦巴山区 HQ 除了部分盆地呈小幅增加趋势之外,其余区域普遍降低(图 2d)。HQ 呈下降趋势的原因可以概括为两个方面:一是由于城镇扩张引起的土地利用变化导致了威胁源的扩大,使得生境质量退化;二是由于林地类型的变化,如高适宜性的常绿阔叶林类型转为以林灌、灌木草地等为主的类型^[32]。

1995—2015 年秦巴山区 NPP 平均值为 $332.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 2e),其中水热条件较好的林区 NPP 可达到 $400 \sim 450 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,主要分布在宁陕县和镇坪县等;NPP 低值主要位于南阳盆地及汉江平原,普遍低于 $200 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。近 20 年间秦巴山区 NPP 的变化趋势空间差异明显(图 2f),变幅普遍在 $\pm 10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。秦巴山区 NPP 受区域气候变化、地形因子、植被类型等多种自然因子的综合作用,而人类活动对 NPP 的影响主要包括退耕还林等积极影响和城镇开发等消极影响^[33-34]。

1995—2015 年平均 FS 与其他三种生态系统服务呈相反的空间分布规律。具体表现为:山区 FS 均值普遍小于 $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,盆地内耕地区域 FS 均值普遍保持在 $5 \sim 20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;其中仪陇县、汝阳县、鲁山县、镇平县、淅川县等区域 FS 大于 $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (图 2g)。图 2h 表明,秦巴山区 FS 在除了甘肃部分县市和四川剑阁、昭化、苍溪等县呈现减少趋势以外,其他区域 FS 普遍增高,其中洛宁县、汝阳县、南召县、鲁山县、镇平县、淅川县和内乡县地区 FS 增幅大于 $0.0002 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。FS 的变化受耕地面积变化、气候变化、粮食产量与种植结构变化等因素的综合作用。

从总体空间分异来看:1995—2015 年间秦巴山区 SC、HQ、NPP 分布格局相似,高值区均出现在水热条件较好的山区,其中以平武县、北川羌族自治区、城口县、镇巴县等为典型,低值则集中出现在盆

地区域;而 FS 则与其他三种服务分布规律相反,由盆地向山区逐步降低。从整体变化趋势来看:SC 具有明显的西增东减趋势,HQ 则在盆地呈聚集性的点状增加特征,NPP 增加区域与林地分布高度关联,

FS 除了在西部和东北部少量县市减少外,其他区域普遍增加。

3.2 单个生态系统服务之间的关系

秦巴山区 NPP 和 HQ 在空间上呈现权衡—协

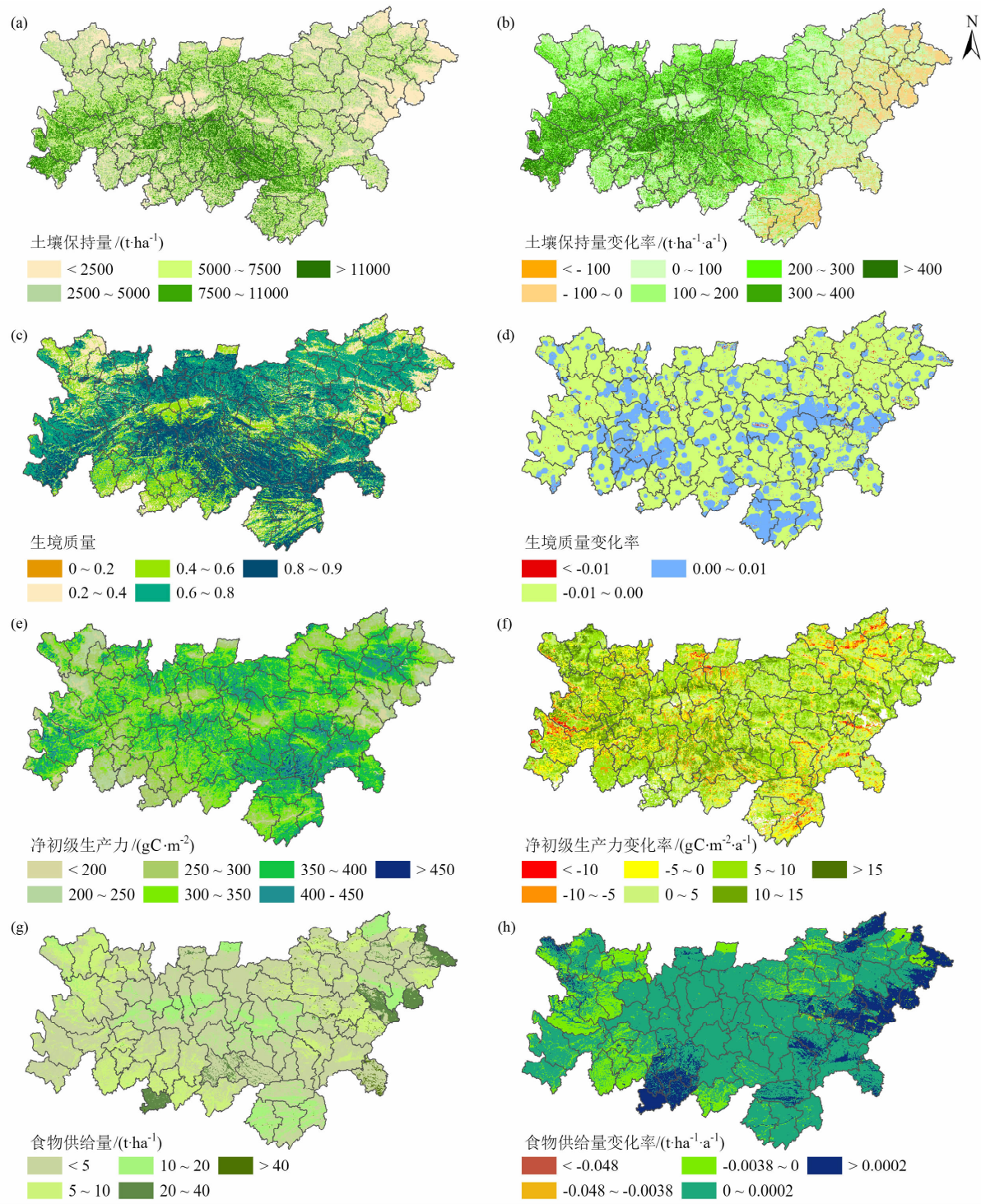


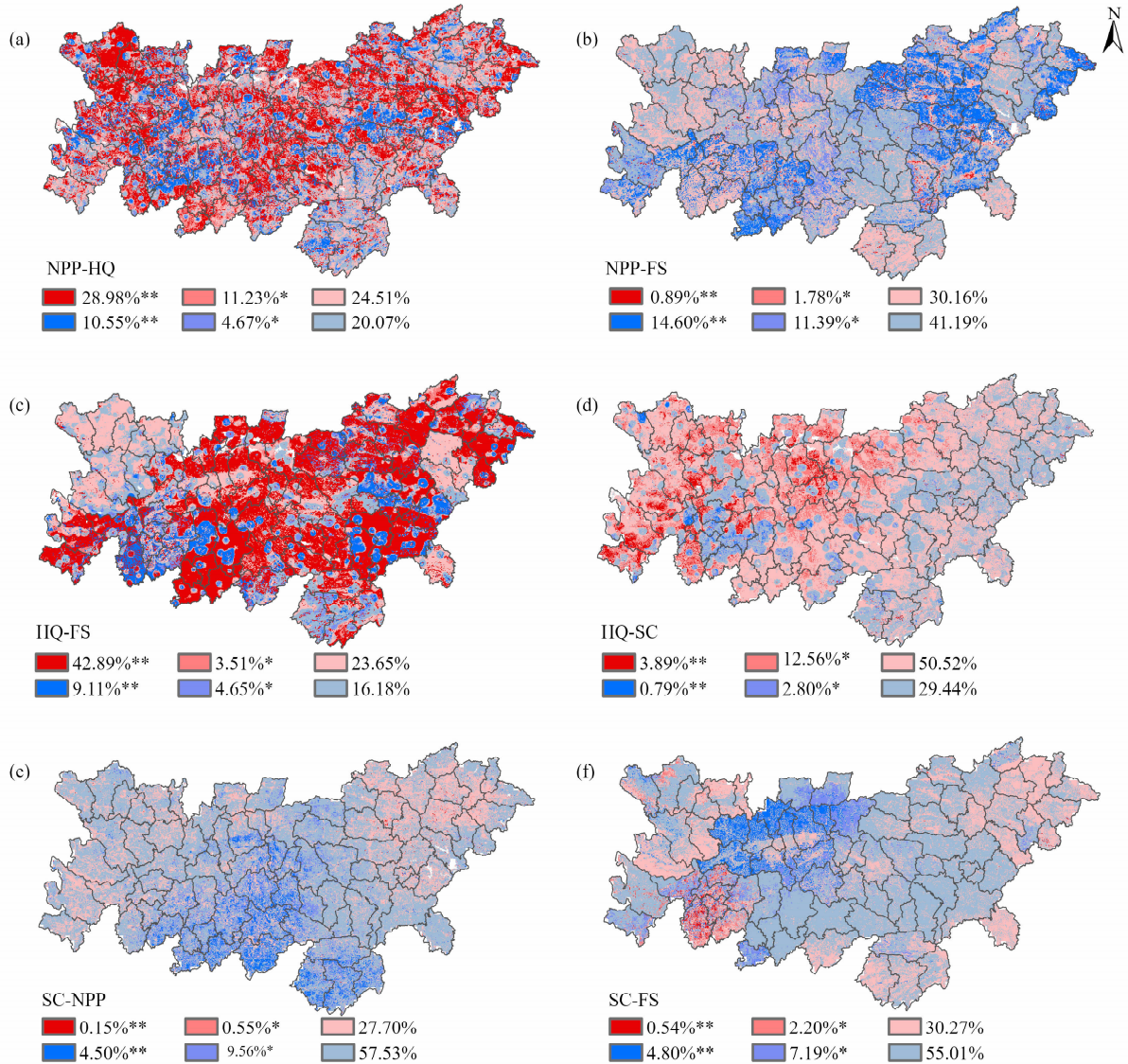
图2 1995—2015 年生态系统服务空间分布及变化趋势:(a) 平均土壤保持量;(b) 土壤保持量变化率;
(c) 生境质量;(d) 生境质量变化率;(e) 平均净初级生产力;(f) 净初级生产力变化率;(g) 平均食物供给量;(h) 食物供给量变化率
Fig.2 Spatial distribution and change trends of ecosystem services from 1995 to 2015: (a) average SC; (b) SC change rate;
(c) average HQ; (d) HQ change rate; (e) average NPP; (f) NPP change rate; (g) average FS; (h) FS change rate

同关系并存的格局(图 3a),其中显著权衡关系占比超过 40%,显著协同关系占比约为 15%。权衡关系主要分布在林地区域,即 NPP 在林地区域显著增加,但该区域 HQ 呈下降趋势,这可能与植被类型的减少有关。协同关系多集中于低海拔的耕地区域,表现为 NPP 与 HQ 同时呈下降趋势,其原因可能是耕地与城市建设用地面积扩张导致的 NPP 降低,而土地利用变化作为生境质量威胁因子之一导致了 HQ 的下降。

NPP 与 FS 在超过 70% 的区域权衡—协同关系并不显著(图 3b),二者呈现显著协同关系的区域占

比约为 28%,主要集中在安康盆地和大巴山以南的仪陇县、平昌县、通江县、南江县和巴中市等地区。这些区域多属于盆地,粮食产量与植被覆盖主要为增长趋势,NPP 与 FS 主要为协同关系。NPP 与 FS 的显著权衡关系在全域占比不到 3%,且分布不均。

HQ 与 FS 在空间上的显著权衡关系大于显著协同关系(图 3c),前者占比超过 45%,后者占比仅约 13%。显著权衡关系主要分布在山区林地,退耕还林还草政策扩大了林草地面积,增加了肉奶类食物的产量,种植结构变化和农业管理水平提升也增加了食物供给。显著协同关系主要分布于盆地



注:红色表示权衡关系;蓝色表示协同关系;数字为面积占比; ** 表示极显著($p < 0.01$); * 表示显著($0.01 < p < 0.05$)。

图 3 不同生态系统服务之间的权衡—协同关系:(a)净初级生产力与生境质量;(b)净初级生产力与食物供给;(c)生境质量与食物供给;(d)生境质量与土壤保持量;(e)土壤保持量与净初级生产力;(f)土壤保持量与食物供给

Fig. 3 Relationships between different types of ecosystem services:

(a) NPP - HQ; (b) NPP - FS; (c) HQ - FS; (d) HQ - SC; (e) SC - NPP; (f) SC - FS

的城镇地区,城镇扩张导致了耕地、林地等类型用地向建设用地的转换,降低了区域 HQ 与 FS。

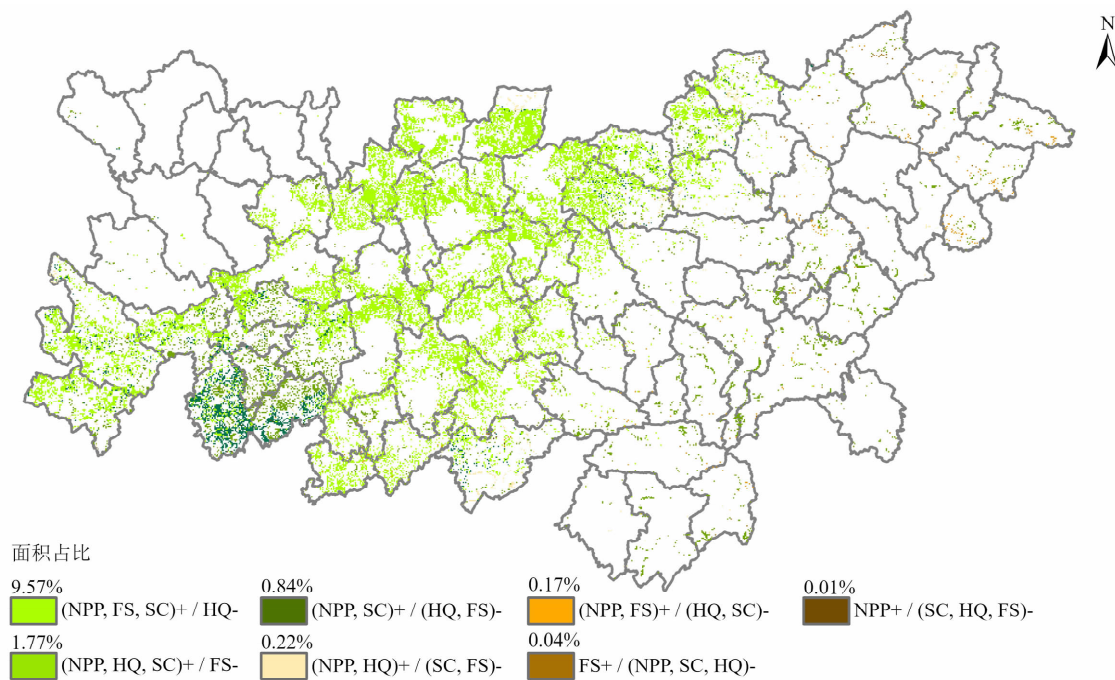
近 20 年间,秦巴山区 HQ 和 SC 的联动关系不明显(图 3d),二者不显著的权衡—协同关系超过 75%。SC 与 NPP(图 3e)和 FS(图 3f)在空间上不显著的权衡—协同关系占比均达到 85% 以上;SC 与 NPP 之间显著协同区域占比约 14%,二者几乎不存在显著权衡区域,显著协同区域主要位于西南部苍溪县、恩阳县和巴州县等大巴山以南林地区域,说明这些区域植被覆盖和土壤保持能力在同步增加。SC 与 FS 之间显著权衡—协同区域分别占比约 2% 和 12% 左右,前者主要位于剑阁县、苍溪县、朝天区等地区,后者位于略阳县、留坝县、佛坪县等地区。

综上所述,NPP、HQ、FS 和 SC 四项生态系统服务两两之间在秦巴山区大部分区域表现出并不显著的权衡—协同关系。HQ 与 FS、NPP 表现出明显的权衡关系,NPP 与 FS 在水热条件好的区域则以协同关系为主,其他各生态系统服务之间的权衡—协同关系并不显著。可以看出,NPP 和 FS 增加是秦巴山区主要的生态系统服务功能变化,而与之相反的是 HQ 显著降低。前者的原因包括退耕还林、植被恢复、种植结构调整等,后者则主要是由于人类活

动影响导致。

3.3 多个生态系统服务之间的关系

基于逐像元空间相关性分析和空间叠加分析研究了秦巴山区 1995—2015 年多个生态系统服务之间相互作用关系的空间格局(图 4)。从图中可以看出,超过 80% 的区域四种生态系统服务功能之间相互作用不显著,而在相互作用显著的区域中存在七种相互作用关系,其中相互作用显著且面积占比超过 0.5% 的关系主要有三种:(1)9.57% 的区域呈现 NPP、SC、FS 协同增加并与 HQ 显著权衡的现象,这些区域主要出现于秦巴山区中部广元市、汉中市、安康市等山区林地,这与植被变化和粮食增产有关,而 HQ 的降低主要源于人类活动影响的不断加深。(2)接近 1.77% 的区域呈现 NPP、HQ、SC 协同增加并与 FS 权衡关系,主要位于秦巴山区西南部的苍溪县、昭化县和利州县,以及秦巴山区的东南部边缘部分区域,这些地区在植被恢复的同时,由于退耕还林等生态保护措施减少了粮食产量。(3)0.84% 的区域呈现 NPP、SC 协同增加并与 HQ、FS 显著权衡的关系,主要集中于秦巴山区西南部的剑阁县和苍溪县,植被恢复促进了土壤保持能力,人类活动和退耕政策减少了 HQ 和 FS。以上三种显著关系均体



注:数字为面积占比,“+”表示服务增加;“-”表示服务减少。

图 4 多生态系统服务相互作用空间分布及面积占比

Fig. 4 Spatial distribution and area proportion of multi-ecosystem services interactions

现了 NPP 与 SC 协同增加,并与 HQ 或 FS 在不同程度上的权衡,即植被覆盖增加提升了土壤保持量,人类活动和退耕还林等抑制了生境质量和食物供给。

综上,根据秦巴山区不同生态系统服务两两之间和多个之间的权衡—协同关系,权衡关系主要表现为 HQ 与 NPP、FS,协同关系主要表现为 NPP 与 SC、FS。区域发展策略应注重动植物栖息地保护与生物多样性维持,促进人地系统协调和生态系统可持续发展。

3.4 土地利用的影响

土地利用方式的转变影响区域景观格局,进一步对生态系统服务产生影响^[35]。本研究将土地利用数据与生态系统服务交互作用关系叠加,统计分析了不同服务关系中用地类型的占比(图 5)。总体而言,秦巴山区多个生态系统服务之间的权衡—协同关系主要集中在耕地和林地,NPP 与 FS 权衡为主的关系主要发生于耕地,而在林地地区则更多地显示出 NPP 与 HQ 的权衡关系。从主要的三种多生态系统服务关系来看:(1)在 NPP、FS、SC 协同增加并与 HQ 显著权衡的区域中,林地的占比达到 95.45%,耕地的占比为 4.4%,即这类多个生态系统服务之间的权衡—协同关系主要集中在林地地区,这表明对林地资源的开发利用抑制了生境质量。(2)在 NPP、HQ、SC 协同增加并与 FS 显著权衡关系中,耕地、林地、建设用地与水体分别占比 36%、60%、2%与 2%,即这类多个生态系统服务之间的权衡—协同关系主要发生在林地和耕地区域。(3)在 NPP、SC 协同增加并与 HQ、FS 显著权衡关系

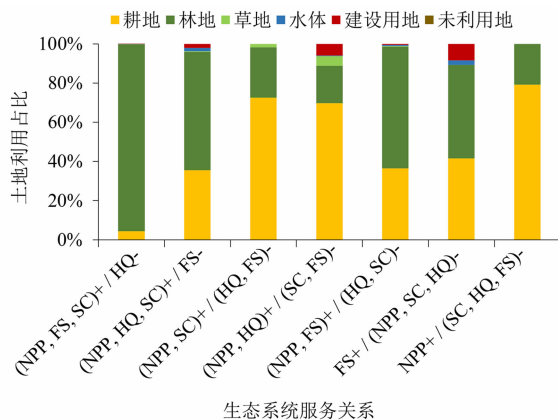


图 5 不同土地利用类型的生态系统服务相互作用关系

Fig. 5 Interactions between ecosystem services of different land use types

中,耕地、林地、草地占比分别为 72%、26%、2%。多个生态系统服务之间的显著权衡—协同关系主要发生在耕地和林地区域,农业用地开发与林地资源保护是区域主要的生态可持续发展问题。

根据 2015 年秦巴山区土地利用类型面积及占比(表 5),秦巴山区主要土地利用类型以林地为主,其次为耕地和草地,水体、建设用地和未利用地的面积占比很少。土地利用的转变主要是以耕地与林地、草地的相互转换为主,土地利用变化受不同因素的影响,导致生态系统服务功能的影响也不同。一方面,退耕还林还草、生态保护区建设等政策促使用地结构发生转变;另一方面,传统耕地由粮食种植向果园、鱼塘等经济作物用地转变^[36],这些变化共同影响不同生态系统的服务功能。

表 5 土地利用类型面积及占比

Tab. 5 Area and proportion of land use types

类型	面积/km ²	占比/%
耕地	62 627	28.55
林地	94 840	43.23
草地	57 111	26.03
水体	2301	1.05
建设用地	2143	0.98
未利用地	358	0.16

3.5 气候变化的影响

在全球变化背景下,量化气候变化对生态系统服务的影响有助于保障生态脆弱区生态安全^[37]。为评估气候变化对生态系统服务的影响,本研究提取了各生态系统服务显著变化的区域,分析了区域内历史年平均气温(Annual Temperature, AT)和年平均降水量(Annual Precipitation, AP)与各生态系统服务的同步变化特征(图 6)。由图可知,除 HQ(图 6c)以外,其他生态系统服务功能和气候因子均在近 20 年呈现波动上升的趋势。HQ 随时间的变化趋势呈阶段性特征,1995—2005 年期间呈上升趋势,2005—2015 年期间呈下降趋势,这表明自 2005 年以来人类活动对生境质量的影响逐渐增加。

通过进一步对不同生态系统服务与 AT 和 AP 进行回归分析,得到表 6 所示的线性关系。结果表明,生态系统服务的变化受气温和降水的共同作用,气温升高和降水增加对 HQ 和 FS 影响不显著,而对

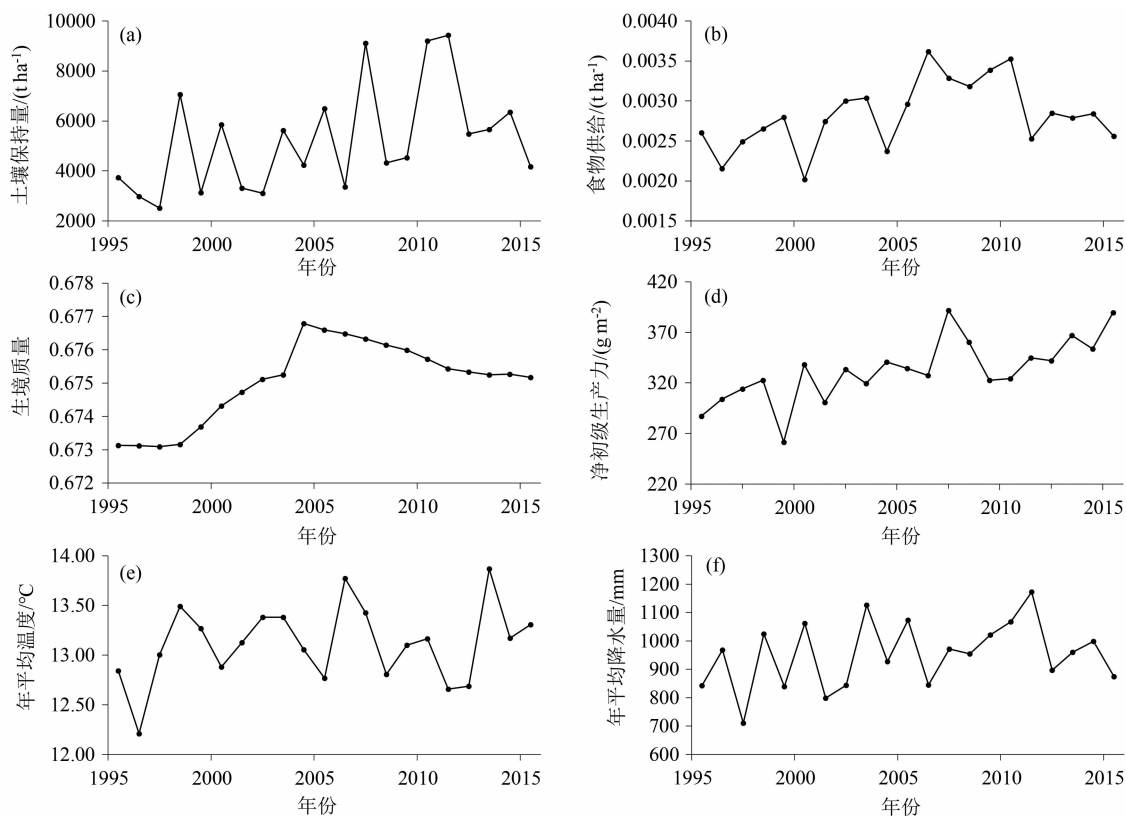


图6 1995—2015年生态系统服务与气候变化趋势：

(a) 土壤保持量变化；(b) 食物供给变化；(c) 生境质量变化；(d) 年平均气温变化；(e) 年平均降水量变化

Fig. 6 Ecosystem services and climate change trends from 1995 to 2015: (a) SC; (b) FS; (c) HQ; (d) AT; (e) AP

NPP 和 SC 变化影响显著,其中气温的促进作用是降水的 64.3 倍和 272.3 倍,气温变化的影响明显大于降水变化。秦巴山区地形复杂,气候变暖导致的地表径流和区域降水增加使得区域水循环过程加速,促进了植被生长;而植被覆盖度升高增加了降水截留,从而间接提升了土壤保持功能。此外,也有研究指出气候变化对生态系统服务的影响受海拔、地形等因素影响,即在高海拔地区对气温变化敏感,在低海拔地区对降水变化敏感^[38-39]。

表6 气温与降水对生态系统服务的影响

Tab. 6 Effects of temperature and precipitation on ecosystem services

生态系统服务	与温度和降水的线性关系	R^2	P
SC	$SC = 913AT + 14.2AP - 20262$	0.55	< 0.05
HQ	$HQ = 8.69 \times 10^4 AT + 3.77 \times 10^{-6} AP - 0.66$	0.09	> 0.05
NPP	$NPP = 21.78AT + 0.08AP - 29$	0.04	< 0.05
FS	$FS = 5.33 \times 10^{-4} AT + 4.78 \times 10^{-7} AP - 0.005$	0.15	> 0.05

注:AT 为年平均气温(°C);AP 为年平均降水量(mm); R^2 为决定系数; P 为显著性水平。

4 讨论

4.1 生态系统服务关系分析与区域社会生态可持续发展策略

受气候变化与人类活动的双重影响,NPP、FS、SC、HQ 的权衡关系成为秦巴山区生态系统服务相互作用的典型关系。一方面,随着人类活动的加剧,建设用地的开发对供应服务的需求逐渐增加,造成对区域 HQ 的威胁增加;另一方面,气候变化促进了植被生长,导致 NPP 与植被覆盖增加,从而提升了区域土壤保持能力。同时,秦巴山区林地资源的供给能力对经济发展比较重要,NPP 的逐年增加促进了当地林区经济效益,从而间接促进了 FS。虽然人类活动对区域 HQ 造成了威胁,但是近 20 年来秦巴山区交通基础设施建设的发展,也促进了秦巴山区旅游服务业的发展和区域经济增长。此外,对区域植被人工管理的加强,也使得区域 NPP、FS 和 SC 小幅上升。因此,需要集约控制与合理规划建设用地,

实现以生态优先兼顾区域绿色发展是秦巴山区高质量发展的重要途径。

4.2 研究的不足及展望

本研究选取了秦巴山区四种典型生态系统服务,但由于基础数据不足及核算方法尚不成熟等原因,暂未包含生态系统文化服务的分析。在“一带一路”倡议和“关中-天水经济区”建设的战略背景下,社会文化价值将在生态系统服务中发挥重要作用。如何更合理地估算文化服务,以及如何在社会经济和生态环境因素复杂影响下模拟未来的生态系统服务发展方向,将是未来研究的关注重点。此外,影响机制和未来情景预测也是生态系统服务未来研究的重点方向,通过模拟未来不同情景土地利用变化下的生态系统服务,可为政府的生态规划和政策制定提供理论支撑。因此,后续研究拟结合土地利用模拟情景、气候变化趋势、区域资源特色与政府政策等多视角,进一步探究影响区域生态系统服务的驱动机制,并开发模拟生态系统服务演变的综合框架。

5 结论

本文基于多源数据和综合模型探索了秦巴山区 1995—2015 年 NPP、HQ、FS、SC 四种生态系统服务的时空变化,并在像元尺度计算了其相互之间和多个之间的权衡—协同关系,分析了其变化驱动力。研究得出以下主要结论:

(1) 近 20 年秦巴山区生态系统服务高值多出现在水热条件较好的山区,低值集中于盆地,FS 则呈现相反的空间分布规律。SC 在秦巴山区西部林区增加,在东部淮海平原地区下降;HQ 总体上呈下降趋势;NPP 保持上升趋势;FS 在甘肃和四川部分县市有所削减,其他区域普遍呈增加趋势。

(2) 近 20 年秦巴山区各类生态系统服务存在两种显著的权衡—协同关系:HQ 下降并与 NPP、FS 显著权衡,NPP 增加并与 SC、FS 显著协同。

(3) 秦巴山区生态系统服务显著权衡—协同区域主要分布于林地和耕地,土地利用的转变是生态系统服务变化的主要原因,降水、气温的增加显著促进了 NPP 和 SC,气温变化的影响大于降水。

本研究有助于认识多个生态系统服务相互作用

关系,了解生态系统服务变化趋势和驱动因素,为秦巴山区的生态管理决策提供依据。

致谢:感谢九江学院资源与环境学院叶辉副教授在数据处理与文章撰写过程中提供的指导与帮助。

参考文献 (References)

- [1] 欧阳志云,王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J]. 世界科技研究与发展, 2000, **22**(5): 45 - 50. [OUYANG Zhiyun, WANG Rusong. Ecosystem services and their economic valuation [J]. World Sci-Tech Research and Development, 2000, **22**(5): 45 - 50] DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2000.05.010
- [2] 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[J]. 地球科学进展, 2015, **30**(11): 1250 - 1259. [DAI Erfu, WANG Xiaoli, ZHU Jianjia, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. Advances in Earth Science, 2015, **30**(11): 1250 - 1259] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.11.1250
- [3] 傅伯杰,于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, **38**(1): 1 - 9. [FU Bojie, YU Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services [J]. Resources Science, 2016, **38**(1): 1 - 9] DOI:10.18402/resci.2016.01.01
- [4] RODRÍGUEZ J P, BEARD JR, T D, BENNETT E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. Ecology and Society, 2006, **11**(1): 28. DOI:10.5751/ES-01667-110128
- [5] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services [J]. Ecology Letters, 2009, **12**(12): 1394 - 1404. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x
- [6] 尹飞,毛任钊,傅伯杰,等. 农田生态系统服务功能及其形成机制[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(5): 929 - 934. [YIN Fei, MAO Renzhao, FU Bojie, et al. Farmland ecosystem service and its formation mechanism [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(5): 929 - 934] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2006.0186
- [7] GRASSO M. Ecological-economic model for optimal mangrove trade off between forestry and fishery production: Comparing a dynamic optimization and a simulation model [J]. Ecological Modelling, 1998, **112**(2-3): 131 - 150. DOI: 10.1016/S0304-3800(98)00076-3
- [8] BAI Yang, ZHUANG Changwei, OUYANG Zhiyun, et al. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed [J]. Ecological Complexity, 2011, **8**(2): 177 - 183. DOI: 10.1016/j.ecocom.2011.01.007
- [9] RAU A L, BURKHARDT V, DORNINGER C, et al. Temporal patterns in ecosystem services research: A review and three

- recommendations [J]. *Ambio*, 2020, **49**(8): 1377–1393. DOI: 10.1007/s13280-019-01292-w
- [10] WU Baiqiu, WANG Junbang, QI Shuhua, et al. Review of methods to quantify trade-offs among ecosystem services and future model developments [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, **10**(2): 225–233. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2019.02.013
- [11] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证[J]. *生态学报*, 2007, **27**(7): 2774–2784. [KANG Muiyi, ZHU Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling Range [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(7): 2774–2784]
- [12] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评[J]. *地理学报*, 2003, **58**(4): 503–511. [REN Zhiyuan, LI Jing. The valuation of ecological services from the vegetation ecosystems in the Qingling–Daba Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, **58**(4): 503–511]
- [13] 李君轶, 傅伯杰, 孙九林, 等. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(10): 2449–2463. [LI Junyi, FU Bojie, SUN Jiulin, et al. Ecological civilization construction at Qinling Mountains in the new era [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(10): 2449–2463] DOI: 10.31497/zrzyxb.20211001
- [14] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, **70**(5): 705–716. [LIU Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling–Daba Mountains in relation to environmental factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(5): 705–716] DOI: 10.11821/dlxb201505003
- [15] 香薇, 程志刚, 周波涛, 等. 1975—2016 年秦巴山区极端气温事件的空间差异性分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, **14**(4): 362–370. [XIANG Wei, CHENG Zhigang, ZHOU Botao, et al. Spatial heterogeneity of temperature extremes in the Qinling–Daba mountains region in 1975–2016 [J]. *Climate Change Research*, 2018, **14**(4): 362–370] DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2017.198
- [16] 李奎, 岳大鹏, 刘鹏, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 的榆林市土壤侵蚀空间分布研究[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(6): 172–178 + 371. [LI Kui, YUE Dapeng, LIU Peng, et al. Spatial distribution of soil erosion analyzed based on GIS and RUSLE in Yulin city [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(6): 172–178 + 371] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.039
- [17] 邵方泽, 张慧, 缪旭波. 基于 RUSLE 模型的南京市 2006—2014 年水土侵蚀时空分布特征[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(17): 264–269. [SHAO Fangze, ZHANG Hui, MIAO Xubo. Spatial and temporal distribution characteristics of soil and water erosion in Nanjing city from 2006 to 2014 based on RUSLE model [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(17): 264–269] DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.17.069
- [18] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I) [J]. *水土保持学报*, 1995, **9**(4): 5–18. [WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, **9**(4): 5–18] DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.1995.04.002
- [19] WILLIAMS J R, JONES C A, DYKE P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, **27**(1): 129–144. DOI: 10.13031/2013.32748
- [20] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(5): 1759–1763. DOI: 10.2136/sssaj2000.6451759x
- [21] 张园眼, 李天宏. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, **26**(6): 1189–1202. [ZHANG Yuanyan, LI Tianhong. Soil erosion in Shenzhen city based on GIS and RUSLE model [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(6): 1189–1202] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.06.004
- [22] 杨冉冉, 徐涵秋, 林娜, 等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究[J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 2974–2982. [YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al. RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in county Changting, Fujian province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 2974–2982] DOI: 10.5846/stxb201205130701
- [23] 李京, 李晓兵, 宫阿都. 基于遥感方法的小流域土壤侵蚀研究[J]. *自然灾害学报*, 2008, **17**(6): 77–81. [LI Jing, LI Xiaobing, GONG Adu. Study on soil erosion of small watershed based on RS method [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, **17**(6): 77–81] DOI: 10.13577/j.jnd.2008.0616
- [24] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(9): 2895–2906. [HUANG Muiyi, YUE Wenzhe, FENG Shaoru, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie mountain area of west Anhui province based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(9): 2895–2906] DOI: 10.5846/stxb201904260858
- [25] 白立敏, 冯兴华, 孙瑞丰, 等. 生境质量对城镇化的时空响应——以长春市为例[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(4): 1267–1277. [BAI Limin, FENG Xinghua, SUN Ruifeng, et al. Spatial and temporal responses of habitat quality of urbanization: A case study of Changchun city, Jilin province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1267–1277] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202004.012
- [26] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服

- 务权衡协同关系的表达[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5465–5477. [YU Yuyang, LI Jing, ZHOU Zixiang, et al. Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling – Daba Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(16): 5465–5477] DOI: 10.5846/stxb201909041840
- [27] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1904–1920. [HUANG MUYI, YUE WENZE, FANG BIN, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1904–1920] DOI: 10.11821/dlxb201909015
- [28] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 811–841. DOI: 10.1029/93GB02725
- [29] YU Tao, SUN Rui, XIAO Zhiqiang, et al. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(2): 327. DOI: 10.3390/rs10020327
- [30] SUN Yijie, LI Jing, LIU Xianfeng, et al. Spatially explicit analysis of trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in Shaanxi valley basins [J]. *Forests*, 2020, **11**(2): 209. DOI: 10.3390/f11020209
- [31] 何凡, 王向东, 尹婧. 秦巴山区坡耕地整治模式及水土保持效益分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(5): 125–128. [HE Fan, WANG Xiangdong, YIN Jing. Analysis of pattern of renovation and benefit of soil and water conservation on sloping field in the Qinba Mountain area [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2010, **8**(5): 125–128] DOI: 10.3724/SP.J.2010.05125
- [32] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(4): 12–22. [YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River basin based on InVEST model and geodetector [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(4): 12–22] DOI: 10.7522/j.issn.1000–694X.2021.00026
- [33] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 等. 2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2373–2381. [WANG Yaobin, ZHAO Yonghua, HAN Lei, et al. Spatiotemporal variation of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Qinling – Daba Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2373–2381] DOI: 10.13287/j.1001–9332.201807.010
- [34] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 等. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J]. 生态学报, 2019, **39**(22): 8504–8515. [LI Jinke, YANG Yuting, ZHANG Huiru, et al. Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling – Daba Mountains in the past 15 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(22): 8504–8515] DOI: 10.5846/stxb201807231575
- [35] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 726–736. [LI Yifeng, LUO Yuechu, LIU Gang, et al. Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun reservoir watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 726–736] DOI: 10.5846/stxb201205280787
- [36] 张碧桃, 周忠学. 秦巴山区土地利用变化对农业生态系统服务的影响——以汉中盆地为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2020, **48**(1): 21–31. [ZHANG Bitao, ZHOU Zhongxue. Impact of land use change on agro-ecosystem services in Qinba Mountain area: A case study of Hanzhong basin [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, **48**(1): 21–31] DOI: 10.15983/J.CNKI.JSNU.2020.04.003
- [37] 李惠梅, 张安录. 生态系统服务研究的问题与展望[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(10): 1562–1568. [LI Huimei, ZHANG Anlu. Ecosystem services: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(10): 1562–1568] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2011.10.030
- [38] 陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 生态学报, 2019, **39**(9): 3257–3266. [CHEN Chaonan, ZHU Lianqi, TIAN Li, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling – Daba Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(9): 3257–3266] DOI: 10.5846/stxb201801300252
- [39] 雒新萍. 近 25a 来秦巴山区植被 NDVI 时空变化及其对区域气候的响应[D]. 西安: 西北大学, 2009: 33–43. [LUO Xinping. Spatial-temporal changes of NDVI and the response to the regional climate in the Qinling – Daba Mountains for 25 years [D]. Xi'an: Northwestern University, 2009: 33–43]

Trade-Off Synergy of Ecosystem Services in the Qinba Mountainous Area of China

ZHANG Miao¹, YANG guoqing¹, WANG Junbang^{2*}, LI Jiyuan¹, ZHANG Tian¹

(1. Northwest Land and Resources Research Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. National Ecosystem Science Data Center, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The analysis of spatiotemporal distribution and evolution mechanism of trade-off synergy relationship is helpful to quantify ecosystem services. Research on ecosystem in the Qinba mountains area mainly focused on the evolution of a single ecosystem service and the relationship between two ecosystem services, but less attention was paid to the interaction and evolution mechanism of multiple ecosystem services, which resulted in a lack of comprehensive understanding of the complex interaction mechanism and influencing factors among multiple ecosystems.

Based on multi-source data and comprehensive models, this paper estimated the soil conservation, habitat quality, net primary productivity and food supply of the Qinba mountainous area from 1995 to 2015 by using methods of spatial correlation analysis and linear regression. The spatiotemporal distribution and trade-off synergy relationship of four ecosystem services were studied, and the driving mechanism of the evolution of this relationship was analyzed.

The results include: (1) The high values of soil conservation, habitat quality and net primary productivity ecosystem services mostly located in the mountainous areas with better hydrothermal conditions, and the low values were mainly concentrated in the basin areas; Food supply showed an opposite spatial distribution pattern. (2) The trade-off relationship between multiple ecosystem services was mainly reflected in the decline in habitat quality with the increase in net primary productivity and food supply; the synergistic relationship was mainly reflected in the simultaneous increase in net primary productivity, soil conservation and food supply. Therefore, the protection of animal and plant habitats and the maintenance of biodiversity were suggested as a regional development strategy. (3) The changes in ecosystem services were mainly driven by the conversion between forest and cultivated land. And the increase in temperature had more influence on the net primary productivity and food supply than precipitation. This study provides theoretical basis and decision support for the ecological healthy development in the Qinba mountainous area.

Key words: ecosystem services; trade-off synergy; sustainable development; the Qinba mountainous area