

生态系统服务权衡与协同视角下的 重点生态功能区保护特征

祝汉收, 翟俊, 侯鹏, 王桥, 陈妍, 金点点, 王永财

(生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 重点生态功能区提供着源源不断的生态系统服务, 在保障国家生态安全和社会可持续发展方面, 有着不可或缺的基础作用。但是, 以生态系统服务权衡与协同关系为视角, 进而探讨分析重点生态功能区保护特征的研究案例相对较少。本文以秦巴重点生态功能区为评估分析区域, 选择自然地理条件相似度极高的秦巴山区为参照单元, 以生态系统供给服务与调节服务为核心内容, 在定量分析2000—2019年期间的生态空间变化特征基础上, 分析评估生态系统服务权衡与协同关系。结果表明: 秦巴山区生态状况逐渐变好, 重点生态功能区划定之后, 生态系统趋于稳定; 重点生态功能区服务能力呈逐渐增强的趋势, 平均净初级生产力、土壤保持总量和水源涵养总量比重点生态功能区外分别高出了25.95 gC/m²、5.81 亿t和24.95 亿m³; 土壤保持服务和生态系统供给服务的协同关系与生态状况改善呈正相关; 由于受到降水的影响, 2010年之后的水源涵养服务与生态系统供给服务的协同关系变差。总体来看, 秦巴重点生态功能区的划定带动了区域生态空间“量的增长”和生态系统服务“质的提升”, 但生态系统服务之间关系的“协调性”仍然不足, 甚至从“协同”转为“权衡”关系, 这要求未来国家需要制定更有针对性的生态系统保护管理决策, 提高生态系统总体效益, 支撑区域生态系统服务的可持续供给。

关键词: 秦巴山区; 重点生态功能区; 生态系统服务; 权衡与协同

DOI: 10.11821/dlxb202205016

1 引言

生态系统服务是生态系统综合评估的热点和核心内容, 理论框架和研究体系日渐成熟, 但是现有研究多针对单一的服务类型或多种服务进行单独分析^[1-6]。随着对生态系统服务权衡与协同认识的加深, 逐渐从单独分析发展到协同关联分析, 如针对生态系统管控和保护修复等方面, 通过分析不同生态系统服务之间权衡与协同的关系, 识别权衡与协同区域, 为生态建设、保护和修复, 以及自然保护区划定和功能定位等提供对策建议^[7-10]; 针对城市群规划建设和土地结构优化等方面, 通过情景模拟或耦合生态系统服务与土地利用变化, 寻求生态效益最大化, 提出土地利用结构优化和国土空间规划的可行性措施和建议^[11-15]; 针对农田、云杉林和非原生人工林等单一生态系统, 关联分析不同服务之间的关系, 以有效实施单一生态系统的资源管理和保护^[16-19]。

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2022-02-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503903); 全国生态状况定期遥感调查评估(22111101006001) [Foundation: National Key Research and Development Program, No.2017YFB0503903; Regular Remote Sensing Survey and Assessment of National Ecological Status, No.22111101006001]

作者简介: 祝汉收(1989-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 工程师, 主要从事生态遥感监测评估研究。

E-mail: zhuhanhoucq@163.com

通讯作者: 侯鹏(1978-), 男, 山东泰安人, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态评估和环境遥感研究。

E-mail: houpcy@163.com

近年来,中国更加注重国土空间优化布局和国家生态安全格局构建,日渐形成了以自然保护区为核心,重点生态功能区、生物多样性保护优先区为重要补充的自然保护地体系^[20],2010年国务院发布了《全国主体功能区规划》。作为限制开发区的重点生态功能区,实现生态保护与社会经济发展的协同是主要目标之一。按照《全国主体功能区规划》要求,国家重点生态功能区范围内各类开发活动要进行严格管控,使人类活动占用的空间控制并逐步缩小,以腾出更多的空间用于维系生态系统的良性循环。同时,加强国家重点生态功能区环境保护和管理,也是增强生态系统服务,构建国家生态安全屏障的重要支撑。围绕着“限制开发区”的功能定位,不同学者从不同角度开展了相关研究,从生态状况时空变化规律角度,侯鹏等^[21-24]总结为基于生物群落和生态系统保护成效评估两大类,并从生态系统结构优化、质量改善、服务提升情况和动物群落栖息地适宜性与有效性等方面开展生态保护成效评估。从生态补偿角度,评估重点生态功能区实施保护类社会经济政策带来的生态质量改善情况^[25-27]。从生态保护和建设工程角度,评估重要保护区域实施生态工程后对区域生态的保护成效^[28-30]。但是,这些现有评估研究对重点生态功能区生态系统供给和调节服务权衡与协同关系的耦合研究相对较少。面对区域生态系统服务的多元化特点,本文以秦巴重点生态功能区为对象,选择自然地理条件相似度极高的秦巴山区为参照单元,从生态空间和生态系统服务角度识别和分析区域生态系统时空演变特点,并在生态系统服务权衡与协同变化的视角下审视生态保护特征,对探讨重点生态功能区政策效果和服务生态保护管理决策具有重要意义。

2 研究区概况、数据来源与方法

2.1 研究区概况

秦巴山区是中国南北地理分区的重要界线,横跨甘肃、四川、陕西、重庆、湖北、河南5个省市;也是南北气候交汇区和分界线,横跨暖温带和亚热带两种气候带,由于地理位置和气候条件的特殊性,秦巴山区拥有丰富多样的自然植被类型和生物资源,是中部重要的生态安全屏障^[31]。秦巴重点生态功能区是中国第一批划定的重点生态功能区,占据着秦岭和大巴山的主体区域,其南北两侧为平原或盆地,丰富的生态资源使秦巴山成为中部区域的“生态高地”,为区域提供了重要的生态系统服务。鉴于秦巴山区范围内的水热气候条件、自然地理条件和生态环境条件等极为相似,是一个相对独立而完整的自然地理单元,本文以秦巴重点生态功能区为评估对象,选择其周边秦巴山自然地理单元为参照单元,两者面积均约14万km²。

2.2 数据资料收集与处理

研究数据包括生态系统类型、气象数据、高程数据和土壤数据等多源数据集。生态系统类型参考刘纪远等^[32-33]的分类体系和方法,基于Landsat TM/ETM等遥感影像数据,经人机交互解译获取,空间分辨率为30 m。根据解译结果将国土空间识别为3类,即生态空间、农业空间和城镇空间,其中生态空间包括森林、草地、湿地和荒漠等自然生态系统;农业空间包括水田和旱地等人工农田生态系统;城镇空间包括城镇建设用地、农村居民点和工矿用地等类型。生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)能够反映自然条件下生态系统的生产能力^[12, 34],本文采用全球陆地卫星(Global Land Surface Satellite, GLASS) NPP数据产品^[35-36],空间分辨率为500 m。此外,气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网;高程数据来源于地理空间数据云;土壤数据来源于中国科学院1:100万土壤类型。最后对数据进行拼接融合、重采样和统一坐标等预处理。

数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

一阶偏相关系数计算公式如下:

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}} \quad (3)$$

t 检验公式如下:

$$t = \frac{\sqrt{n - k - 2} \times r_{ij \cdot h}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (4)$$

式中: r 为变量 x 和变量 y 的相关系数; $r_{ij \cdot h}$ 为在控制变量 h 后, 变量 i 与 j 的一阶偏相关系数; r_{ij} 、 r_{jh} 和 r_{ih} 分别为两个变量的相关系数; n 为样本观测数; k 为可控制变量数; 当 $t > t_{0.05}(n - k - 2)$ 时, 拒绝原假设, 相关性结果显著, 当 $t > t_{0.01}(n - k - 2)$ 时, 拒绝原假设, 相关性结果极显著, $t_{0.05}(n - k - 2)$ 和 $t_{0.01}(n - k - 2)$ 查阅 t 检验表确定临界值。

3 结果分析

3.1 生态空间的时空变化特征分析

2019年秦巴山区共有生态空间 20.58 万 km^2 , 占秦巴山区总面积的 73.2%。从秦巴重点生态功能区内外对比来看, 重点生态功能区内的生态空间为 11.06 万 km^2 , 面积占比为 77.94%, 重点生态功能区外的生态空间为 9.52 万 km^2 , 面积占比为 68.38%, 重点生态功能区内的生态空间面积占比高出了 9.57 个百分点。从空间分布来看 (图 2), 重点生态功能区内生态空间分布广泛、连片, 但重点生态功能区外主要集中分布在西部和东北部及东南部等部分区域, 城镇空间和农业空间在秦巴山区的北部、东部和南部较为集中。20 世纪 80 年代 (以下简称 1980s) 至 2019 年的近 40 年间, 重点生态功能区内生态空间总体呈增加趋势, 面积占比一直保持在 78% 左右, 比重点生态功能区外的比例高出约 10 个百分点。从不同时段来看, 2010 年之前, 重点生态功能区的生态空间一直呈波动变化; 2010 年之后, 生态空间面积逐渐增加且趋于稳定 (图 3)。

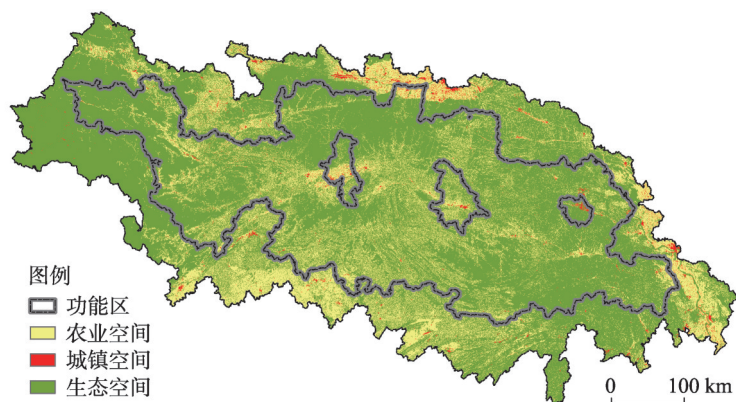


图 2 2019 年秦巴山区国土空间构成及分布状况

Fig. 2 Spatial distribution of the three types of land space in the Qinba Mountains region in 2019

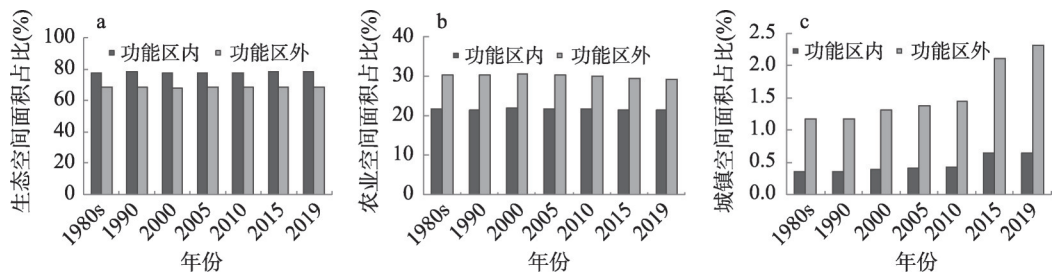


图3 1980s—2019年秦巴山区农业空间、城镇空间和生态空间占比及其变化特征

Fig. 3 The proportion of agricultural space, urban space and ecological space inside and outside the key ecological function zones of the Qinba Mountains region from the 1980s to 2019

从国土空间整体变化来看，2005年为明显分界点。2005年之前生态空间和其他空间面积比例呈波动变化趋势，2005年之后变化逐渐放缓，如图4所示。从重点生态功能区内外差异对比来看，2010年成为了内部和外部变化模式的分界点：其中，2010年之前，重点生态功能区内外变化特征较为一致、均呈波动变化；但在2010年之后，重点生态功能区内的生态空间面积占比稳定上升，非生态空间面积占比稳定降低，而重点生态功能区外的生态空间和非生态空间面积占比变化则相反，表现为生态空间受到挤占并持续缩减。因此，秦巴重点生态功能区在2010年划定之后，对于维持并提升内部生态空间面积、抑制人类活动干扰、促进生态空间保护修复等方面，体现出明显的政策效应。

从每类国土空间的动态度来看，重点生态功能区的划定推动着整个秦巴山区国土空间动态度的显著减小。如表1所示，对于生态空间，重点生态功能区的动态度有所下降且均为正向变化，表明生态空间趋于稳定并持续扩大，明显好于重点生态功能区之外的区域。总体来看，重点生态功能区受人为干扰逐渐降低，生态空间趋于稳定；而重点生态功能区之外，2010年之后生态空间动态度由正转负，生态空间持续受到挤占，面积逐

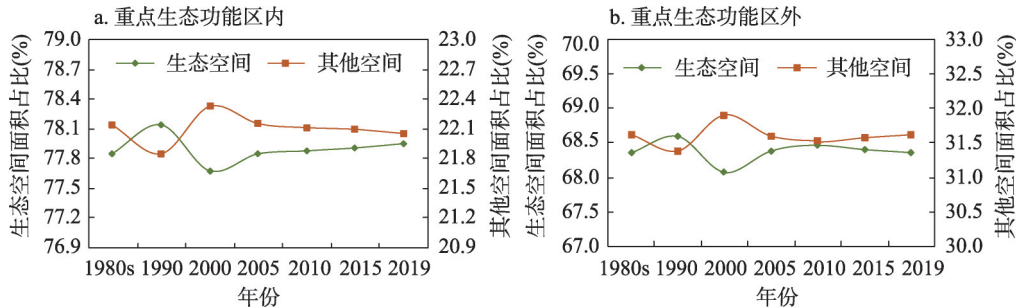


图4 1980s—2019年秦巴山区重点生态功能区内、外国土空间面积占比变化

Fig. 4 Changes in the proportion of land spatial area within and outside key ecological function zones of the Qinba Mountains region from the 1980s to 2019

表1 1980s—2010年和2010—2019年秦巴山区三大类空间的动态度特征

Tab. 1 Dynamic degree characteristics of three types of land space in the Qinba Mountains region from the 1980s to 2010 and 2010 to 2019

年份	农业空间		城镇空间		生态空间	
	功能区内	功能区外	功能区内	功能区外	功能区内	功能区外
1980s—2010	-0.013	-0.040	0.566	0.754	0.002	0.006
2010—2019	-0.007	-0.014	0.296	0.332	0.001	-0.001

渐减小。因此，秦巴重点生态功能区在2010年划定之后，对于扩大生态空间，以及维护生态空间内部的稳定性和抑制不同生态系统类型之间变化具有明显作用，重点生态功能区生态空间有了“量的增长”。

3.2 生态系统服务时空变化特征与成效分析

3.2.1 生态系统供给服务 本文通过定量测算2000—2019年秦巴山区植被NPP的多年均值及年际线性变化趋势，分析了重点生态功能区内外生态系统供给服务的时空差异特征。从多年均值的空间分布来看，重点生态功能区内外的NPP分别为214.95 gC/m²和189.01 gC/m²，重点生态功能区内的生态系统供给服务能力更高，且空间异质性较小，在重点生态功能区外部，生态系统供给服务空间差异相对较大，仅西南部等植被本底较好的局部区域较高，如图5a所示。从时间变化趋势及空间特征来看，重点生态功能区的NPP年际线性变化趋势总体呈现增加趋势、平均增速为1.07，表明重点生态功能区内部的生态系统供给服务总体增强，如图5b所示。在重点生态功能区外部，NPP的年际线性变化趋势空间差异较为明显，西部和北部的部分区域呈现显著下降趋势、下降速率大于0.5，表明生态系统的供给服务变差趋势明显。

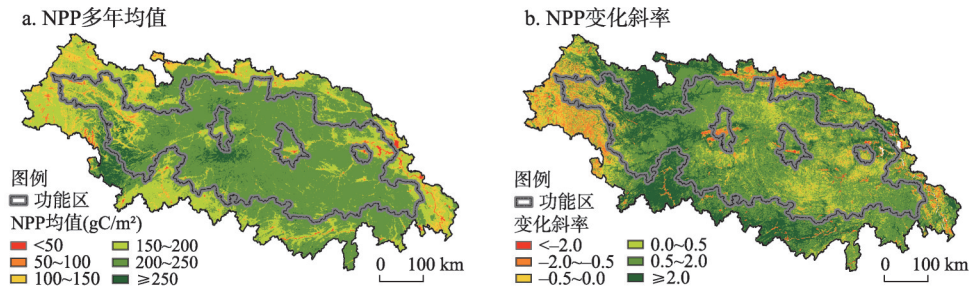


图5 2000—2019年秦巴山区NPP多年均值和变化斜率空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of annual mean NPP and change slope in Qinba Mountains region from 2000 to 2019

3.2.2 生态系统调节服务 通过定量测算2000—2019年秦巴山区土壤保持量和水源涵养量多年均值及年际线性变化趋势，分析了重点生态功能区内外生态系统调节服务的时空差异特征。从多年均值的空间分布来看，重点生态功能区内外土壤保持总量分别为18.57亿t和12.76亿t，单位面积土壤保持量分别为130.9 t/hm²和91.6 t/hm²；水源涵养总量分别为178.29亿m³和153.34亿m³，单位面积水源涵养量分别为12.74万m³/km²和12.13万m³/km²，表明重点生态功能区内的生态系统调节服务能力高于外部，且重点生态功能区内部的生态系统调节服务空间异质性较小（图6a、6c）。

从时间变化趋势及空间特征来看，与供给服务在空间上的变化趋势基本一致，重点生态功能区的生态系统调节服务年际线性变化总体呈增加趋势，土壤保持量的平均增速为2.69，水源涵养量的平均增速为0.16，表明重点生态功能区内部的生态系统调节服务总体增强（图6b、6d）。在重点生态功能区外部，生态系统调节服务的年际线性变化趋势空间差异较为明显，生态系统调节服务提升幅度低于内部，土壤保持量平均增速为2.35，水源涵养平均增速为0.11，其中，东部和西部的部分区域呈现下降趋势。表明功能区的划定对生态系统调节服务能力的提升具有正向作用，且对功能区内的提升作用大于功能区外。

可以看出，生态空间与生态系统调节和供给服务能力息息相关，功能区内生态空间占比较大且逐渐增加，生态系统调节服务和供给服务能力相对较高且呈提升趋势；而功能区外生态空间占比相对较小且逐渐减少，生态系统调节和供给服务能力相对较低且多

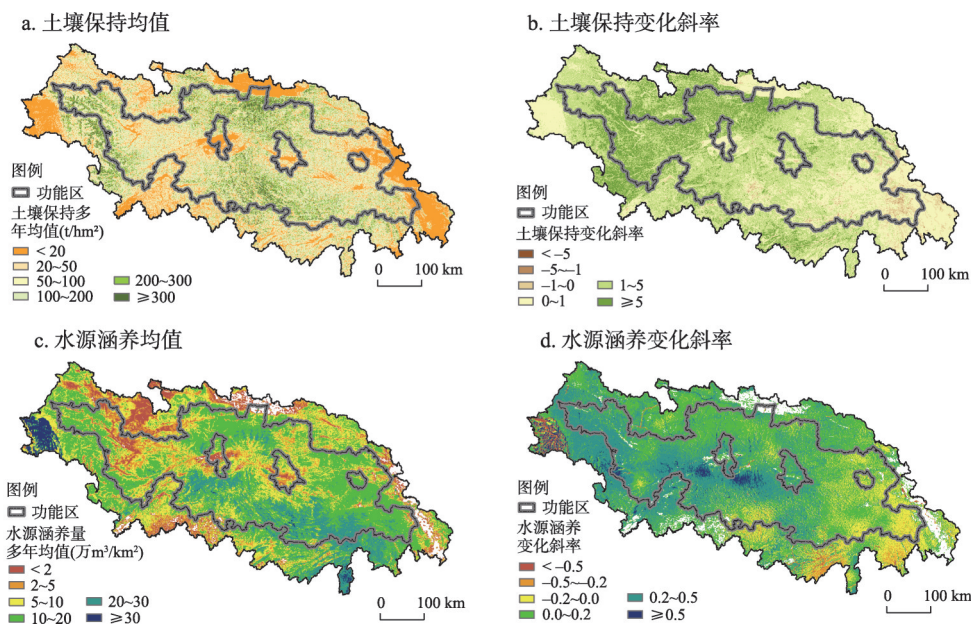


图6 2000—2019年秦巴山区生态系统调节服务多年均值和变化斜率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual mean and change slope of ecosystem regulation services in Qinba Mountains region from 2000 to 2019

个区域呈变差趋势，说明秦巴重点生态功能区的划定在提高生态空间面积占比的同时，也提升了区域内的生态系统服务能力，重点生态功能区生态系统服务有了“质的提升”。

3.3 生态系统服务权衡与协同特征

通过测算重点生态功能区内外生态系统调节服务和供给服务的偏相关系数，根据t检验转换为不同等级的权衡和协同关系，分区县统计分析了生态系统调节服务与供给服务的权衡与协同关系。为探究功能区的划定对不同生态系统服务协同关系的影响，将时间划分为功能区划定前（2000—2010年）和划定后（2010—2019年）两个时间段进行分析。

从功能区内外协同关系来看（图7），功能区划定前（2000—2010年）土壤保持服务和供给服务主要表现为协同关系，各区县呈协同关系的面积占比均值线为73.09%，总体高于权衡关系；功能区划定后（2010—2019年）土壤保持服务和供给服务呈协同关系的占

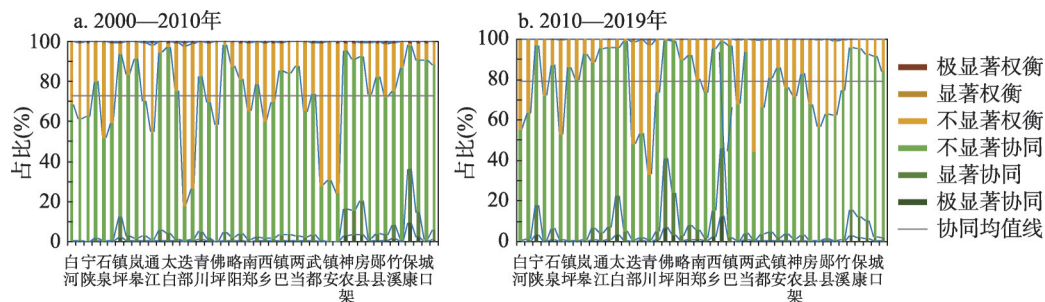


图7 2000—2010年和2010—2019年秦巴山区重点生态功能区内土壤保持和供给服务的权衡与协同关系

Fig. 7 Trade off and synergy between soil conservation and supply service in 2000-2010 and 2010-2019 inside the key ecological function zones of the Qinba Mountains region

比均值线上移, 变为 79.19%, 增加了 6.1%, 且呈显著协同和极显著协同关系的面积占比明显增加, 其中佛坪县、洋县等区县增加最明显。从功能区外来看 (图 8), 2000—2010 年土壤保持服务和供给服务呈协同关系的面积占比均值线为 65.86%, 功能区划定后 (2010—2019 年) 均值线上移, 变为 75.22%, 增加了 9.36%, 且呈显著协同和极显著协同关系的面积占比有所增加, 但总体低于功能区内。通过分析发现, 功能区内土壤保持服务和供给服务的协同关系大于功能区外, 但在功能区划定后, 功能区外二者的协同关系提升幅度大于功能区内, 表明功能区的划定对功能区内生态系统服务的协同提升关系成效不明显, 仍需进一步优化生态保护政策, 平衡促进二者的协同提升。

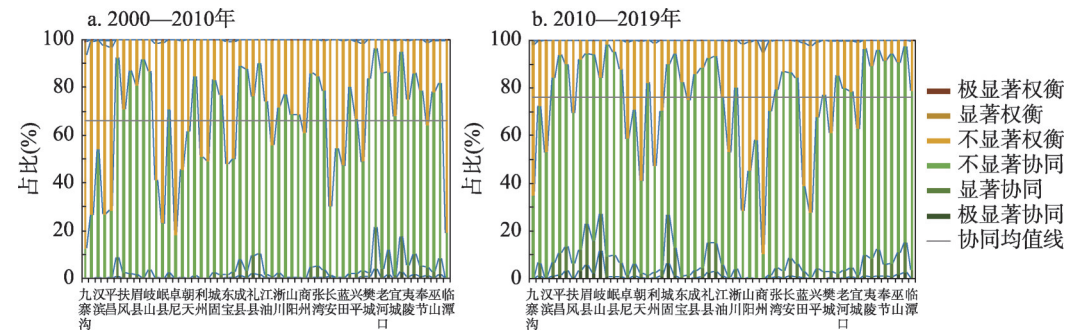


图 8 2000—2010 年和 2010—2019 年秦巴山区重点生态功能区外土壤保持和供给服务的权衡与协同关系
Fig. 8 Trade off and synergy between soil conservation and supply service in 2000-2010 and 2010-2019 outside the key ecological function zones of the Qinba mountains region

从重点生态功能区内水源涵养服务和供给服务协同关系来看 (图 9), 功能区划定前 (2000—2010 年) 水源涵养服务和供给服务主要呈协同关系, 各区县为协同关系的区域面积占比均值线为 56.29%。功能区划定后 (2010—2019 年) 水源涵养服务和供给服务呈协同关系的区域缩减, 协同关系面积占比均值线下移至 23.92%, 下降了 32.37%。从功能区外来看 (图 10), 在功能区划定前 (2000—2010 年) 水源涵养服务和供给服务主要呈协同关系, 各区县协同关系的面积占比均值线为 66.08%; 功能区划定后 (2010—2019 年), 水源涵养服务和供给服务的协同关系面积占比均值线下移至 38.54%, 下降了 27.54%。通过分析发现, 功能区内外水源涵养服务和供给服务在功能区划定前均主要表现为协同关系, 而在功能区划定后, 转为相互权衡的关系。且从协同关系面积占比均值线可知, 功能区外二者的协同关系总体高于功能区内, 但功能区外显著权衡和极显著权衡关系的区域面积增加更多。

为进一步分析生态系统调节服务和供给服务之间的关系, 探究水源涵养与生态系统供给服务表现为权衡关系的驱动因素, 从长时间序列上对比生态系统供给服务、土壤保持和水源涵养服务的变化趋势, 并将降雨量加入对比分析, 结果如图 11 所示。

从时间变化趋势来看, 2000—2019 年生态系统供给服务能力总体呈增加趋势, 2010 年之后增长趋势进一步增大。土壤保持量和生态系统供给能力的变化趋势基本一致; 水源涵养量在功能区划定前与生态系统供给能力的变化趋势基本一致, 但功能区划定后, 受降雨影响, 二者变化趋势相反。从趋势线斜率来看, 2010 年之后 NPP 和土壤保持量斜率更加接近, 表明功能区划定后二者变化趋势一致性进一步增大, 协同关系更加显著。在 2010 年之前, 水源涵养量和 NPP 均呈增加趋势, 二者协同变化趋势略小于土壤保持量与 NPP; 2010 年之后水源涵养服务总体呈下降趋势, 基本与降雨量变化一致, 与 NPP 变

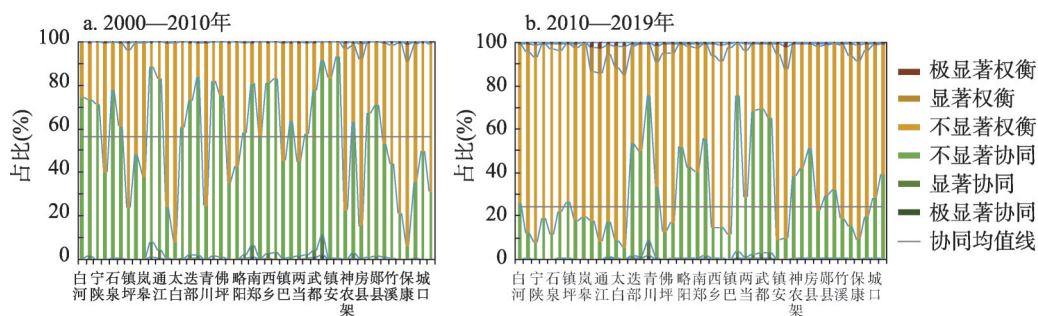


图9 2000—2010年和2010—2019年秦巴山区重点生态功能区区内水源涵养和供给服务的权衡与协同关系

Fig. 9 Trade off and synergy between water conservation and supply service in the key ecological function zones of the Qinba mountains region in 2000-2010 and 2010-2019

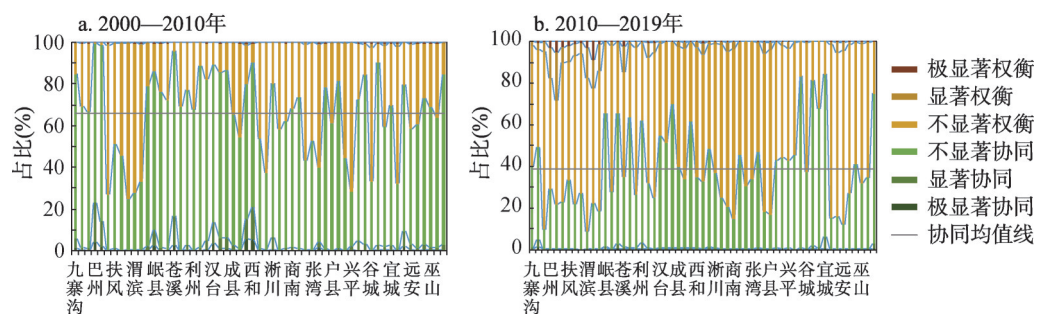


图10 2000—2010年和2010—2019年秦巴山区重点生态功能区外水源涵养和供给服务的权衡与协同关系

Fig. 10 Trade off and synergy between water conservation and supply service outside the key ecological function zones of the Qinba mountains region in 2000-2010 and 2010-2019

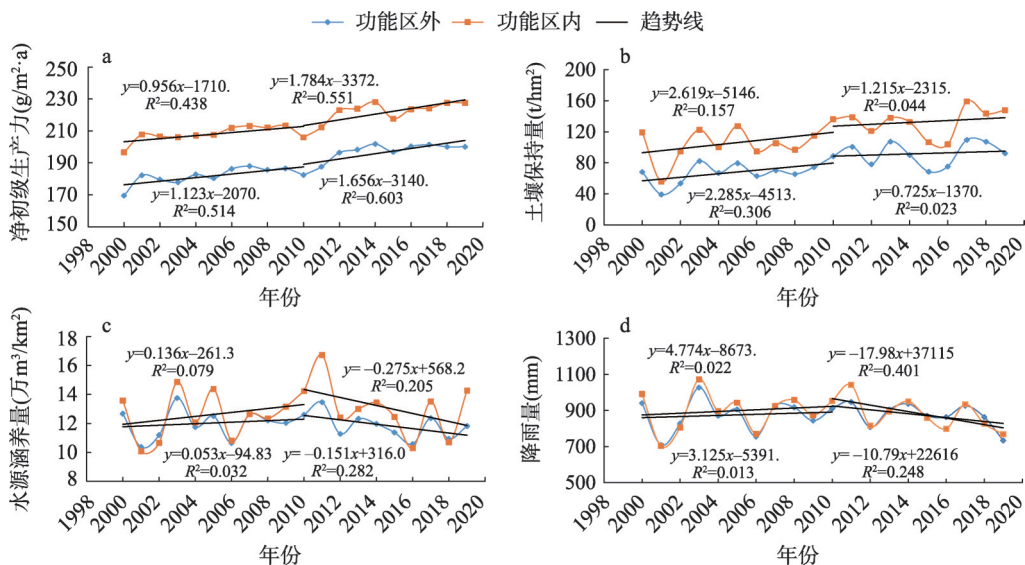


图11 2000—2019年NPP、土壤保持服务、水源涵养服务和降雨量变化

Fig. 11 Changes of NPP, soil conservation services, water conservation services and rainfall from 2000 to 2019

化趋势相反,表明水源涵养服务受降雨的影响较大,功能区划定后与供给能力更多表现为权衡关系。

通过分析发现,土壤保持服务与供给服务主要呈协同关系,并且与生态空间变化趋势吻合。功能区划定后,生态空间逐渐增大,土壤保持服务与供给服务能力持续提升,二者表现为协同关系的区域有所增加。由于水源涵养服务受降雨影响较大,在直观反映区域生态状况波动差异方面表现较弱,在功能区划定前,与供给服务主要呈协同关系,功能区划定后,与供给服务由协同关系转为权衡关系。可以看出,重点生态功能区的生态系统服务关系体现出一定的“逐步协调”特点,但并不明显,特别是水源涵养服务与供给服务,甚至从“协同”转为“权衡”关系。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文通过对秦巴山重点生态功能区的生态空间、供给服务、调节服务的综合评估,表明重点生态功能区带动了区域生态空间“量的增长”和生态系统服务“质的提升”,但在生态系统服务之间关系的“协调性”仍然不足,甚至部分区域生态功能从“协同”转为“权衡”关系。

(1) 功能区划定后,对于维持并提升内部生态空间面积、抑制人类活动干扰、促进生态空间保护修复等方面,体现出较为明显的政策效应,生态空间动态度减小了1倍,面积占比逐步提升,体现生态空间“量的增长”。

(2) 功能区的划定在提高生态空间面积占比的同时,也提升了区域内的生态系统服务能力。区域内NPP、土壤保持量和水源涵养量的年际增长趋势分别为1.07、2.69和0.16,体现生态系统服务“质的提升”。

(3) 重点生态功能区不同生态系统服务之间“协调性”不足,功能区划定后,土壤保持服务与生态系统供给服务协同关系有所提升,但提升幅度低于功能区外,甚至出现了水源涵养服务与生态系统供给服务由“协同”关系转为“权衡”关系。

4.2 讨论

面对区域生态系统服务的多元化特点,更多学者耦合各类生态系统服务分析相互之间的权衡与协同关系^[45];针对重点生态功能区,主要从生态参数或生态系统服务的单要素或多要素变化角度开展功能区分析与成效评估^[9, 23-24]。相关研究表明,国家重点生态功能区提供了重要的生态系统服务,功能区划定后人类干扰程度明显低于外部^[23],生态系统服务有所提升,各生态系统服务整体呈协同关系^[9, 24]。本文在生态要素分析基础上,综合考虑了自然地理单元的整体性特征,将具有相似地理特征的功能区内外情况作为对比,从“结构—服务—关系”级联关系入手,对生态空间、供给服务、调节服务开展时空变化特征分析,并耦合了多要素之间的权衡与协同关系的分析。研究结果体现出了重点生态功能区对区域生态保护的促进作用,但是也发现在重点生态功能区内,生态系统服务之间的“协调性”明显不足,甚至出现从“系统”转为“权衡”的变化特征,这对国家通过生态系统保护与管理实现生态系统总体效益最大化带来挑战。也要求未来国家需要制定更有针对性的生态系统保护管理决策,提高生态系统总体效益,支撑区域生态系统服务的可持续供给。

生态系统服务权衡与协同关系研究多聚焦在相互之间的定量化分析,并在宏观层面上分析驱动因素,但生态系统变化是一个长期、复杂的动态过程,生态系统服务相互增

益的协同关系需要在针对性更强的精准评估框架下才能实现科学量化。目前, 尚缺少对其内在驱动因素的定量化分析。在未来的研究中, 应聚焦生态系统服务涵义之间的区别与联系, 在气候变化和生态系统地带性规律框架下, 以区域生态系统服务协同提升为导向, 分区域分类型开展主导生态系统服务之间的时空动态关联特征, 定量识别影响生态系统服务协同关系的关键驱动因素, 为有针对性的生态保护与修复政策制定以及区域可持续发展提供支撑。

参考文献(References)

- [1] Hou Peng, Wang Qiao, Shen Wenming, et al. Progress of integrated ecosystem assessment: Concept, framework and challenges. *Geographical Research*, 2015, 34(10): 1809-1823. [侯鹏, 王桥, 申文明, 等. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. *地理研究*, 2015, 34(10): 1809-1823.]
- [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997: 412.
- [3] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [4] Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 3-5. [欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 3-5.]
- [5] Huang Run, Wang Shengtang, Ni Jianhua, et al. Ecosystem service functions of the five reservoirs in Dabie mountain, west Anhui province. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(10): 1270-1274. [黄润, 王升堂, 倪建华, 等. 皖西大别山五大水库生态系统服务功能价值评估. *地理科学*, 2014, 34(10): 1270-1274.]
- [6] Wang Ailing, Zhu Wenquan, Li Jing, et al. Measurement of ecosystem service value based on remote sensing: A case study in Inner Mongolia, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 325-330. [王爱玲, 朱文泉, 李京, 等. 内蒙古生态系统服务价值遥感测量. *地理科学*, 2007, 27(3): 325-330.]
- [7] Li Shujuan, Gao Lin. Ecosystem service values for 4 periods and ecological function zoning of coastal wetlands on north shore of Jiaozhou Bay. *Wetland Science*, 2020, 18(2): 129-140. [李淑娟, 高琳. 胶州湾北岸滨海地区4个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究. *湿地科学*, 2020, 18(2): 129-140.]
- [8] Zhang Yumeng, Li Jing, Zeng Li, et al. Optimal protected area selection: Based on multiple attribute decision making method and ecosystem service research: Illustrated by Guanzhong-Tianshui economic region section of the Weihe River basin. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2114-2127. [张渝萌, 李晶, 曾莉, 等. 基于OWA多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究: 以渭河流域(关天段)为例. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2114-2127.]
- [9] Zhu Ping, Liu Xin, Zheng Yuhua, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in key ecological function zones in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8694-8706. [祝萍, 刘鑫, 郑瑜哈, 等. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2020, 40(23): 8694-8706.]
- [10] Li Qi, Zhu Jianhua, Xiao Wenfa. Relationships and trade-offs between, and management of biodiversity and ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2655-2666. [李奇, 朱建华, 肖文发. 生物多样性与生态系统服务: 关系、权衡与管理. *生态学报*, 2019, 39(8): 2655-2666.]
- [11] Shui Wei, Du Yong, Wang Yanan, et al. Spatio-temporal dynamics and scenarios simulation of trade-offs between ecosystem services in Min Delta urban agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5188-5197. [祝伟, 杜勇, 王亚楠, 等. 闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟. *生态学报*, 2019, 39(14): 5188-5197.]
- [12] Wang Shihao, Huang Lin, Xu Xinliang, et al. Spatial and temporal evolution of ecosystem services and its trade-offs and synergies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8403-8416. [王世豪, 黄麟, 徐新良, 等. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征. *生态学报*, 2020, 40(23): 8403-8416.]
- [13] Bao Rui, Liu Feng, Zhang Jianping, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 812-828. [包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 基于多目标线性规划的甲峪小流域生态系统服务权衡优化. *生态学报*, 2018, 38(3): 812-828.]
- [14] Ning Shan, Zhang Zhengyong, Zhou Hongwu, et al. Optimization of land use structure based on ecological service

- value in Manas River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5208-5217. [宁珊, 张正勇, 周红武, 等. 基于生态服务价值的玛纳斯河流域土地利用结构优化. *生态学报*, 2019, 39(14): 5208-5217.]
- [15] Nelson E, Mendoza J, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [16] Benra F, Nahuelhual L, Gaglio M, et al. Ecosystem services tradeoffs arising from non-native tree plantation expansion in southern Chile. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 190: 103589. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103589.
- [17] Lan Jie, Lei Xiangdong, Zhang Yutao. Analysis on trade-offs and synergies of multiple functions of picea schrenkiana forests in central Tianshan mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(11): 9-18. [兰洁, 雷相东, 张毓涛. 天山中部雪岭云杉林多功能权衡与协同关系. *林业科学*, 2019, 55(11): 9-18.]
- [18] Liu Jingping, Xu Xibao. Simulating the effects of different management modes on the ecosystem services of agroecosystems: A case study of the Taihu Lake basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9314-9324. [刘静萍, 徐昔保. 不同管理模式对农田生态系统服务的影响模拟研究: 以太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9314-9324.]
- [19] Zhong Juntao, Wang Bei, Mi Wenbao, et al. Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 268-275. [仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 等. 农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 268-275.]
- [20] Hou Peng, Yang Min, Zhai Jun, et al. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 420-428. [侯鹏, 杨旻, 翟俊, 等. 论自然保护区与国家生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 420-428.]
- [21] Hou Peng, Gao Jixi, Wan Huawei, et al. Progress and some scientific issues on effectiveness assessment of terrestrial ecosystem conservation and restoration. *Environmental Ecology*, 2021, 3(4): 1-7. [侯鹏, 高吉喜, 万华伟, 等. 陆地生态系统保护修复成效评估研究进展及主要科学问题. *环境生态学*, 2021, 3(4): 1-7.]
- [22] Hou Peng, Wang Qiao, Yang Min, et al. China's ecological protection redlines: Evaluation framework and method of protection effect. *Geographical Research*, 2018, 37(10): 1927-1937. [侯鹏, 王桥, 杨旻, 等. 生态保护红线成效评估框架与指标方法. *地理研究*, 2018, 37(10): 1927-1937.]
- [23] Hou Peng, Zhai Jun, Cao Wei, et al. Evaluation on ecosystem changes and protection of the national key ecological function zones in mountainous areas of central Hainan Island. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 429-441. [侯鹏, 翟俊, 曹巍, 等. 国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估: 以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例. *地理学报*, 2018, 73(3): 429-441.]
- [24] Chen Yan, Hou Peng, Wang Yuan, et al. Evaluation of protection effect of coordinated management of different kinds of nature reserves. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 779-787. [陈妍, 侯鹏, 王媛, 等. 生态保护地协同管控成效评估. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 779-787.]
- [25] Li Guoping, Li Hongwei. Evaluation of green poverty reduction in national key ecological functional areas. *Soft Science*, 2018, 32(12): 93-98. [李国平, 李宏伟. 绿色发展视角下国家重点生态功能区绿色减贫效果评价. *软科学*, 2018, 32(12): 93-98.]
- [26] Li Guoping, Yang Lei, Liu Shengsheng. Study on spatial spillover effect of eco-environmental quality in counties of national key ecological function areas. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2016, 16(1): 10-19. [李国平, 杨雷, 刘生胜. 国家重点生态功能区县域生态环境质量空间溢出效应研究. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2016, 16(1): 10-19.]
- [27] Zhang Wenbin, Li Guoping. Dynamic incentive effect analysis of transfer payment in national key ecological function zone. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(10): 125-131. [张文彬, 李国平. 国家重点生态功能区转移支付动态激励效应分析. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(10): 125-131.]
- [28] Gong Guoli, Yao Ling, Ren Lixia, et al. Effects of ecological protection and construction project on windbreak and sand fixation service function in Beijing-Tianjin area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 181-188, 2. [巩国丽, 姚玲, 任丽霞, 等. 京津风沙源区生态保护与建设工程对防风固沙服务功能的影响. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 181-188, 2.]
- [29] Shao Quanqin, Fan Jiangwen, Liu Jiyan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 3-20. [邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.]

- [30] Shao Quanqin, Liu Jiyuan, Huang Lin, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1645-1656. [邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005—2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656.]
- [31] 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: Northwest University, 2009. [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.]
- [32] Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [33] Liu Jiyuan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802. [刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [34] Yan Huimin, Zhen Lin, Li Fengying, et al. Measurement method of reasonable consumption for ecosystem productivity supply service: A case study of Inner Mongolia grassland transect. *Resources Science*, 2012, 34(6): 998-1006. [闫慧敏, 甄霖, 李凤英, 等. 生态系统生产力供给服务合理消耗度量方法: 以内蒙古草地样带为例. *资源科学*, 2012, 34(6): 998-1006.]
- [35] Yu T, Sun R, Xiao Z Q, et al. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 327. DOI: 10.3390/rs10020327.
- [36] Cui T X, Wang Y J, Sun R, et al. Estimating vegetation primary production in the Heihe River Basin of China with multi-source and multi-scale data. *PLOS ONE*, 2016, 11(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0153971.
- [37] Liu Jiyuan, Liu Wenchao, Kuang Wenhui, et al. Remote sensing-based analysis of the spatiotemporal characteristics of built-up area across China based on the plan for major function-oriented zones. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 355-369. [刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析. *地理学报*, 2016, 71(3): 355-369.]
- [38] Wu Dan, Zou Changxin, Lin Naifeng, et al. Characteristic analysis of ecological status in the Yangtze River economic belt based on the plan for major function-oriented zones. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(8): 1676-1682. [吴丹, 邹长新, 林乃峰, 等. 基于主体功能区规划的长江经济带生态状况变化. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1676-1682.]
- [39] Shi Xiaoliang, Zhang Ying. Review of forest water conservation. *Resource Development & Market*, 2015, 31(3): 332-336. [石小亮, 张颖. 森林涵养水源研究综述. *资源开发与市场*, 2015, 31(3): 332-336.]
- [40] Jiang Wenlai. Theory and method to accounting value of forest water conservative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 34-36, 40. [姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 34-36, 40.]
- [41] Cao Wei, Liu Lulu, Wu Dan, et al. Spatial and temporal variations and the importance of hierarchy of ecosystem functions in the Three-River-Source National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1361-1374. [曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 等. 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识. *生态学报*, 2019, 39(4): 1361-1374.]
- [42] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26: 189-193.
- [43] Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24. [蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 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.]
- [44] Xiao Yu, Xie Gaodi, An Kai. The function and economic value of soil conservation of ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2367-2378. [肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值. *生态学报*, 2003, 23(11): 2367-2378.]
- [45] Fu Bojie, Yu Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9. [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.]

The protection characteristics of key ecological functional zones from the perspective of ecosystem service trade-off and synergy

ZHU Hanshou, ZHAI Jun, HOU Peng, WANG Qiao,

CHEN Yan, JIN Diandian, WANG Yongcai

(Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment,
Beijing 100094, China)

Abstract: Key ecological functional zones provide continuous ecosystem services and play an indispensable role in ensuring national ecological security and social sustainable development. From the perspective of ecosystem service trade-off and synergy, this paper discusses and analyzes the protection characteristics of key ecological functional areas. The data includes multi-source datasets such as ecosystem types, meteorological data, elevation data and soil data from 2000 to 2019. Methods of the dynamic degree of ecological spatial change, ecosystem service model and partial correlation coefficient were used for evaluation and analysis. This research selects the Qinling-Daba (Qinba) Mountains region with high similarity of natural and geographical conditions as the reference unit, takes ecosystem supply services and regulation services as the core content, and analyzes the trade-off and synergy relationship of ecosystem services based on the quantitative analysis of the characteristics of ecological spatial changes from 2000 to 2019. The results showed that the ecological status of the study area gradually improved, and the ecosystem tended to be stable after the delimitation of key ecological functional zones. The service capacity of key ecological functional zones is gradually increasing, and the average net primary productivity, total soil conservation and total water conservation are higher than those outside the key ecological functional zones by 25.95 gC/m^2 , $5.81 \times 10^8 \text{ t}$ and $24.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The synergy between soil conservation services and ecosystem supply services was positively correlated with the improvement of ecological status. Due to the impact of precipitation, the synergistic relationship between water conservation services and ecosystem supply services after 2010 became worse. Overall, the designation of key ecological functional areas in the Qinba Mountains has driven the "quantitative growth" of regional ecological space and the "qualitative improvement" of ecosystem services. However, the "synergy" of the relationship between ecosystem services is not obvious, and even changed to "trade-off", which requires the country to make more targeted ecosystem protection and management decisions in the future, and improve the overall benefits of ecosystem and support the sustainable supply of regional ecosystem services.

Keywords: Qinba Mountains region; key ecological function zone; ecosystem services; trade-off and synergies