

引用格式:王浩阳,牛文浩,宋曼,等.基于LUCC及其ESV响应的陕西省生态网络构建与空间优化[J].资源科学,2023,45(7):1380-1395. [Wang H Y, Niu W H, Song M, et al. Construction and spatial optimization of ecological network in Shaanxi Province based on LUCC and its ESV response[J]. Resources Science, 2023, 45(7): 1380-1395.] DOI: 10.18402/resci.2023.07.08

基于LUCC及其ESV响应的陕西省生态网络构建与空间优化

王浩阳,牛文浩,宋曼,张蚌蚌,靳亚亚

(西北农林科技大学经济管理学院,杨凌 712100)

摘要:【目的】构建生态网络、优化生态空间布局,对协调区域社会经济和生态环境可持续发展具有重要作用。【方法】本文以陕西省为例,在土地利用变化(LUCC)分析和生态系统服务价值(ESV)定量评价基础上,利用MSPA方法、Linkage Mapper工具等手段构建生态网络,并进一步展开了生态空间优化布局研究。【结果】①陕西省各地类面积在2000—2020年间发生了显著变化,期间面积(绝对值)变化从大到小依次为:耕地>林地>建设用地>草地>未利用地>水域;②陕西省生态系统服务价值在2000—2020年增加了47.84亿元,其空间分布格局总体保持稳定,高价值区主要分布在秦岭、巴山和延安市南部,低价值区集中分布在关中地区;③识别30处生态源地总面积约46465.92 km²,提取生态廊道62条、生态夹点36个、生态障碍点85个,共同组成生态网络;④提出“五带、六区、多廊道、多组团”的生态空间优化布局方案,为陕西省生态空间的修复管理提供了参考。【结论】从LUCC及ESV变化出发构建生态网络,识别生态空间中的问题区域并提出针对策略,可有效解决土地利用变化过程中的生态破坏、生态孤岛等问题,为统筹省域生态保护、促进区域可持续发展提供科学指导,也为国土空间规划编制提供科学借鉴。

关键词:土地利用变化;生态系统服务价值;生态网络;空间优化;陕西省

DOI: 10.18402/resci.2023.07.08

1 引言

随着社会经济的快速发展和人类活动的日益频繁,生态系统的结构和功能遭到不同程度的破坏,大量生态空间被生产生活空间挤占替代^[1,2],大量独立生态空间也因受到人类干预变成由人类参与和控制的综合生态空间^[3,4],由此引发了生态环境破坏、生态空间破碎、生态服务功能退化等一系列问题^[5]。十八大以来,党中央高度重视生态文明建设的持续推进和国土空间格局的优化保护,科学构建生态网络、针对性优化生态空间布局,促进生态环境和经济社会和谐发展,对中国生态文明建设目标的实现及区域生态系统服务功能的改善具有重要意义^[6,7]。

生态网络是指由生态系统核心、廊道和斑块组成的复合型网络^[8],是提高生态系统结构连通性、功能完整性^[9]以及修复国土生态的重要途径。目前,国内外学者构建生态网络主要按照“源地提取—廊道构建—节点识别”的范式^[10,11],科学确定生态源地、提取生态廊道是其中的关键^[12]。生态源地作为对区域生态安全具有重要意义、对区域生态过程与功能起决定作用^[13]、为区域提供主要生态产品与服务的关键斑块,其识别方法可以归纳为直接识别和间接识别两种^[14]。前者直接选取湿地、水体、自然保护区等具有良好生态环境的斑块作为生态源地^[15,16],但这种方法存在较大的主观性^[17];后者基于生态系统服务重要性评价、生态敏感性评价、生态适应性评价^[6,18]

收稿日期:2023-02-27;修订日期:2023-06-09

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022ZDLNY02-01);国家自然科学基金项目(42171267;41961124006);陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2022JQ-747)。

作者简介:王浩阳,男,四川乐山人,硕士生,研究方向为土地利用与生态安全。E-mail: wang_haoyang@nwfufu.edu.cn

通讯作者:张蚌蚌,男,河南太康人,博士,副教授,研究方向为耕地质量与土地评价。E-mail: bangbang.zhang@nwfufu.edu.cn

2023年7月

确定生态源地,或者直接采用形态空间格局分析(MSPA)方法来确定生态源地^[19-21],能在一定程度上保证识别结果的客观性。结合生态系统服务价值(ESV)评价、MSPA方法和景观连通性指数识别生态源地,能有效避免主观选择法、综合分析法的主观性,也能解决识别过程中景观连通性考虑不足的问题^[22]。在提取生态廊道方面,常用的方法有最小累积阻力(MCR)模型^[23]、图论^[24]、电路理论^[25]等,Linkage Mapper工具识别生态廊道的原理与MCR模型基本相同,通过操作筛选出生态源地和阻力栅格来绘制核心区域之间的最低成本通道,无需手工剔除繁杂廊道过程而直接获得含一定宽度信息生态廊道^[26];此外,Linkage Mapper工具通过调用电路理论的连接度模型Circuitscape可以生成带有明确空间信息的生态“夹点”和生态“障碍点”,被广泛用于识别生态节点^[26,27]。

在生态网络优化方面,国内外学者常通过增加生态源地、构建生态踏脚石、修复断裂点等方法直接进行优化^[11,28-30],这些思路具有较强的可实施性。但现有研究大都是从县级、市级和小流域等小尺度进行分析,较少从省级尺度开展生态网络构建与优化分析研究。此外,长期以来许多生态网络研究没有与生态空间优化有效衔接^[31],导致研究结果很难对空间优化和管理发挥作用。因此,在省级尺度上构建生态网络,依据土地利用和ESV时空变化分析结果,针对不同区域特征提出优化建议,具有较强的可实施性和现实意义,也可以为国土空间规划编制提供科学借鉴。

本文以陕西省为例,基于土地利用时空演变分析和生态系统服务价值定量评价,利用MSPA、Linkage Mapper工具等手段方法构建生态网络,并进一步根据生态网络各组分要素的空间分布、用地特征和生态环境问题提出生态空间优化布局方案,结果可为科学构建空间结构和配置、优化生态空间布局、促进区域可持续发展提供科学参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

陕西地处中国内陆腹地、黄河中游地区(105°29'E—111°15'E, 31°42'N—39°35'N),总面积约20.56万 km²,约占国土面积的2.14%(图1)。地势呈南北高、中间低,主要由高原、山地、平原和盆地

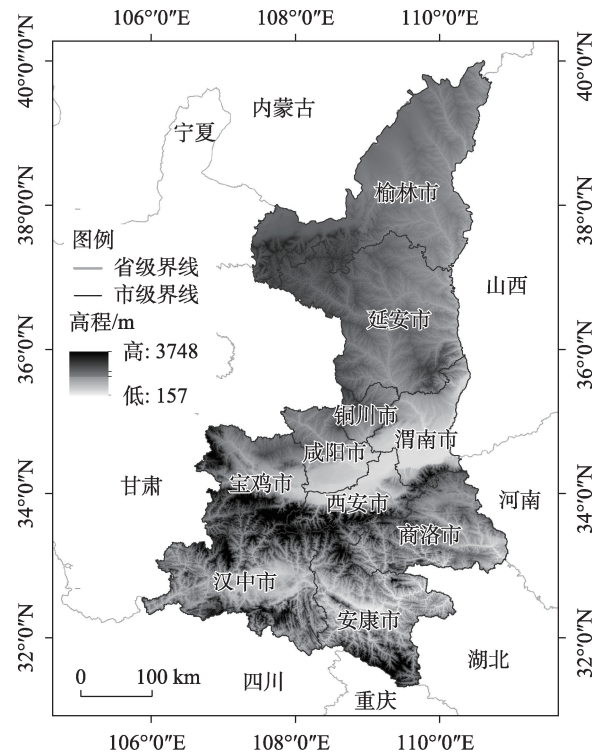


图1 研究区地理位置图

Figure 1 Location of the study area

等多种地貌构成。地跨黄河、长江两大水系,横跨3个气候带,根据气候、地形、社会经济和人文风俗等的不同,从北向南分为三大自然生态区:北部是黄土高原区,水土流失严重,而长城沿线的风沙草滩区还存在生态环境敏感脆弱的问题;中部是关中平原区,城镇分布密集,随着社会经济的快速发展,区域内生态用地面临着巨大威胁;南部是秦巴山区,随着人类活动的加剧,生物多样性减少、水环境破坏等问题凸显。陕西省作为西部大开发新引擎、丝绸之路经济带新起点和国家重要生态安全屏障,在社会经济飞速发展的同时也面临着生态环境破坏问题,厘清陕西省生态空间分布并制定科学合理的生态空间规划和布局方案是当前亟待解决的问题。此外,不同地理环境、气候条件以及经济发展状况,使陕西省北部、中部和南部生态系统存在较大差异,为了保证全域协调可持续发展,陕西省必须要重视各区域间、各生态系统间的连通性。因此,选取陕西省作为研究区进行生态网络构建和生态空间优化,具有较强的现实意义和代表性。

2.2 数据来源

本文使用的土地利用数据为2000和2020年的

土地利用分类图(1 km×1 km),数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),对各年份的土地利用类型进行重分类,得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种土地利用类型;DEM(数字高程模型30 m分辨率)栅格数据,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),由此生成高程、坡度;道路数据来源于OpenStreetMap网站;NPP数据下载自美国国家航空航天局网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)提供的MODIS 17A3HF数据产品,空间分辨率为500 m。平均谷物总产值数据、平均谷物播种面积和单位面积粮食产量数据来源于2000年、2020年的陕西省统计年鉴和中国统计年鉴。

3 研究思路与方法

3.1 生态网络构建与空间优化分析框架

本文基于土地利用变化及其生态系统服务价

值响应分析,利用MSPA-Linkage Mapper方法构建生态网络,在此基础上提出生态空间优化布局方案,为省域生态空间治理与优化提供理论指导(图2)。框架包括3个部分:①LUCC及其ESV响应分析。土地利用方式随着不同利益主体对土地利用需求的改变而改变,将国土空间分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种利用情况,首先基于土地利用转移矩阵方法和GIS空间分析方法分析土地利用时空演变特征,在此基础上再通过ESV改进当量因子法分析ESV时空演变特征。②生态网络构建。结合ESV分级结果,利用形态学空间格局分析(MSPA)方法识别生态源地;综合考虑自然环境和社会经济要素的影响,构建生态阻力面;再借助Linkage Mapper工具提取生态廊道和生态节点,并利用重力模型对生态廊道分级。③生态空间优化。综合考虑研究区自然地理特征、土地利用和

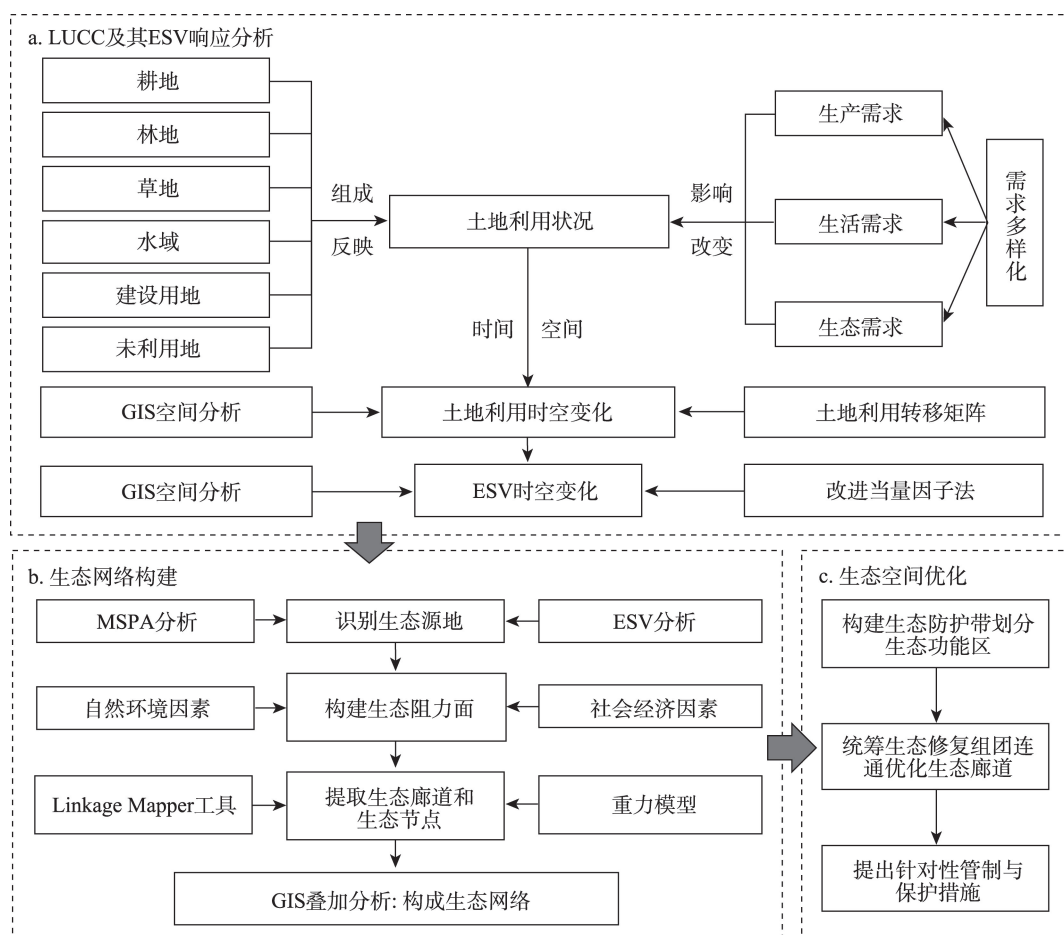


图2 生态网络构建与空间优化分析框架

Figure 2 Analytical framework of ecological network construction and spatial optimization

2023年7月

生态系统服务价值时空演变,从生态保护视角对国土空间进行分区管理,进而实现研究区的生态空间布局优化。

3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可以反映研究区域土地利用变化的结构特征和不同类型土地的变化方向^[32,33]。土地利用转移矩阵的数学形式为:

$$S_{qh} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{qh} 为研究期间转变的面积; n 为土地利用分类的数量; q, h 分别为转移前和转移后的土地利用类型($q, h=1, 2, \dots, n$)。

3.3 生态系统服务价值估算

关于生态系统服务价值的估算,本文采用了谢高地等^[34,35]提出的改进当量因子算法。将林地、草地、耕地、水域和未利用地分别对应当量表中的森林、草地、农田、河流、湖泊和荒漠,并根据前人研究^[36-38],将建设用地的当量设为0。所有的生态系统服务价值以2020年为基准进行计算。计算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^n A_k \times VC_k \quad (2)$$

$$VC_k = \sum_{l=1}^m EC_l \times E \times \delta \quad (3)$$

式中: ESV 为研究区生态系统服务总价值(元); A_k 为研究区第 k 种土地利用类型的面积(hm^2); VC_k 为第 k 类土地利用类型的单位面积价值量(元/ hm^2); k 为土地利用的类型($k=1, 2, \dots, 6$); EC_l 为某土地利用类型第 l 项生态系统服务的当量系数; E 为单位面积耕

地上粮食产量的经济价值(元/ hm^2); δ 为校正因子。

为得到更加精确的研究区生态系统服务价值,本文基于陕西省谷物产值和谷物播种面积修订单位面积ESV,利用植被净初级生产力(NPP)代替生物量对生态系统服务价值当量进行修正。其计算公式为:

$$E = \frac{1}{7} \times \frac{T}{F} \times \frac{Q_{st}}{Q_{CN}} \quad (4)$$

式中: T 为2020年研究区平均谷物总产值(元); F 为2020年研究区平均谷物播种面积(hm^2); Q_{st} 和 Q_{CN} 分别为2020年研究区和全国范围的单位面积粮食产量(kg/hm^2)。

$$\delta = NPP_{st} / NPP_{CN} \quad (5)$$

式中: NPP_{st} 和 NPP_{CN} 分别为2020年研究区和全国范围的平均NPP(kg/m^2)。

2020年陕西省谷物产值为300.6亿元,谷物种植面积为246.83万 hm^2 ,计算出2020年陕西省的谷物单位面积产值为12178.42元/ hm^2 。依据陕西省和全国的粮食产量,根据公式(4)求出单位当量因子的价值为1287.42元/ hm^2 。通过ArcGIS计算2020年全国NPP的平均值为4568.84 kg/m^2 ,陕西省NPP的平均值为5088.22 kg/m^2 ,根据公式(5)计算出修正系数为1.11。综上,最终得出符合陕西省用地和发展特征的ESV系数表(表1)。

3.4 生态网络构建

3.4.1 生态源地识别

生态源地是对区域生态安全具有重要意义,对区域生态过程与功能起决定作用,并且能为区域提供主要生态产品与服务的关键斑块^[13]。形态学空间

表1 陕西省单位面积生态系统服务价值系数(元/ hm^2)

Table 1 Ecosystem service value coefficient per unit area in Shaanxi Province (Yuan/ hm^2)

一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	水域	未利用地
供给服务	食物生产 ^a	473.14	616.52	1433.77	759.90	28.68
	原材料生产 ^a	4272.63	516.16	559.17	501.82	57.35
调节服务	气体调节	6193.89	2150.66	1032.31	731.22	86.03
	气候调节	5835.44	2236.68	1390.76	2953.57	186.39
	水文调节	5864.12	2179.33	1104.00	26911.86	100.36
	废物处理	2466.08	1892.58	1992.94	21291.48	372.78
支持服务	保持土壤	5763.76	3211.64	2107.64	587.85	243.74
	维持生物多样性	6466.30	2681.15	1462.45	4917.83	573.51
文化服务	提供美学景观	2982.24	1247.38	243.74	6365.94	344.10

格局分析(MSPA)方法通过对栅格图像空间格局进行度量、识别和分割,能够精准地分辨研究区景观类型与结构,被广泛应用于生态源地识别^[27,39]。利用ArcGIS自然断点法^[40]将陕西省ESV评价结果分为低、中、高三级。经过多次实验,在MSPA分析中将中等和高等级ESV区域作为前景数据,低等级ESV区域作为背景数据,然后通过Guidos Toolbox软件将前景数据划分为核心区、桥接区、孔隙、边缘区、环道区、支线和孤岛7类景观类型,在得到的核心区中筛选生态源地,与研究目的相符合。此外,生态源地面积需要达到一定规模才能有效抵抗外界的干扰^[39,41],因此本文将面积最大的40个核心区作为备选生态源地。然后,本文还综合考虑了景观连通性指数,从而避免只考虑面积而忽略具有重要连通作用的斑块^[39]。参考相关文献^[42],使用Confer 2.6软件进行计算可能连通性指数和斑块重要性指数代表各斑块的景观连通重要性,设定2500 m为距离阈值,概率为0.5,将备选源地中连通性最高的前30个斑块识别为生态源地,其他没有被选择的前景数据作为生态用地。计算公式如下:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^u a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (6)$$

$$dPC = \frac{PC - PC'}{PC} \times 100 \quad (7)$$

式中:PC为可能连通性指数;dPC为斑块重要性指数;u为斑块数量; a_i 和 a_j 分别表示斑块i和j的面积; p_{ij}^* 为物种在斑块i、j之间移动的最大概率; A_L 为景观总面积;PC'为去除某一斑块后的整体连通性指数值。

3.4.2 阻力面构建

阻力面的本质是对现实环境中物种迁移难易

程度的模拟面,主要受到土地覆被状况、地形地貌和人类干扰等情况的影响^[22,43,44]。在参考相关文献^[45-48]的基础上,综合考虑陕西省经济和自然地理特征选取阻力因子、分级和设置阻力值,并采用层次分析法确定权重,进而构建阻力因子分级赋权结果如表2所示,在此基础上通过多要素加权叠加的方法构建研究区综合阻力面。

3.4.3 生态廊道提取与分级

利用Linkage Mapper工具提取生态廊道^[27]。在ArcGIS中导入综合阻力面和生态源地,利用Linkage Mapper工具箱中的Build Network and Map Linkages工具计算最小阻力成本路径,获得最小成本距离通道,即生态廊道。由于识别出的生态源地分散且彼此相隔较远,经过多次实验将生态廊道的阶段距离阈值设置为300 km,结果符合研究目的。

利用重力模型(Gravity model)对生态廊道分级。重力模型通过构建生态源地相互作用矩阵,能定量评价生态源地间的相互作用强度,源地间相互作用力越大,表明生态廊道重要性程度越高^[28],以此作为廊道分级的科学依据。计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_i} \ln S_i \right] \left[\frac{1}{P_j} \ln S_j \right]}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_i \ln S_j}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (8)$$

式中: G_{ij} 是斑块i和j的相互作用力; N_i 、 N_j 分别是斑块i、j的权重值; D_{ij} 是斑块i与j之间潜在廊道阻力值; L_{ij} 为斑块i与j之间潜在廊道的累积阻力值; L_{\max} 为研究区内所有潜在廊道累积阻力值中的最大者; S_i 、 S_j 分别为斑块i、j的面积(m^2); P_i 、 P_j 分别为斑块i、j

表2 阻力因子赋值与权重

Table 2 Value assignment and weights of resistance factors

阻力因子	单位	阻力分值					权重
		1	2	3	4	5	
土地利用类型	—	林地	耕地、草地	水域	未利用地	建设用地	0.38
高程	m	(0, 200]	(200, 400]	(400, 800]	(800, 1000]	>1000	0.03
坡度	°	(0, 7]	(7, 15]	(15, 25]	(25, 30]	>30	0.03
距国道距离	m	>10000	(5000, 10000]	(2000, 5000]	(1000, 2000]	(0, 1000]	0.06
距省道距离	m	>5000	(2000, 5000]	(1000, 2000]	(500, 1000]	(0, 500]	0.09
距县道距离	m	>1000	(500, 1000]	(250, 500]	(100, 250]	(0, 100]	0.14
距居民点距离	m	>2000	(1000, 2000]	(500, 1000]	(250, 00]	(0, 250]	0.27

2023年7月

区域范围内的平均阻力值。

3.4.4 生态节点识别

生态节点是生态廊道中生态功能脆弱的地方,恢复和改善该区域生态环境,能对区域生态过程起到巨大促进作用^[42]。利用Linkage Mapper工具箱中的Barrier Mapper和Pinchpoint Mapper工具分别识别生态障碍点和生态夹点,以此作为生态节点。Pinchpoint Mapper工具将最小成本通道与电路理论相结合,通过调用Circuitscape程序将生态廊道中的关键“夹点”区域进行显示;鉴于廊道宽度不会影响夹点位置与区域连通性^[49],设置2 km加权成本距离为廊道宽度。Barrier Mapper工具可以检测出影响生态廊道质量的障碍区域,即生态障碍点^[26];选择“Maximum”模式,经过反复阈值迭代计算,以2 km为半径迭代运算结果最佳。

3.5 国土生态空间优化布局

参考杨天荣等^[6]和郭荣朝等^[50,51]提出的“廊道组团网络化”优化模式,以及李思楠等^[52]和李青青等^[53]使用的国土空间地域功能优化分区方法,综合考虑研究区自然地理特征、土地利用和生态系统服务价值时空演变,从生态保护视角对国土空间进行分区管理,进而实现研究区的生态空间布局优化。

按照生态源地集中、重点保护原则,依托生态源地空间分布和研究区地貌特征构筑生态防护带,将研究区划分为不同生态区域;基于Barrier Mapper工具分析得到的障碍区域及其改善系数(IS),利用自然断点法划分为两级生态修复组团,改善系数较高($1.40 < IS \leq 2.02$)的障碍区域作为一级生态修复组团,改善系数较低($1.12 < IS \leq 1.40$)的为二级生态修复组团,是生态修复的重点区域;以生态廊道为

轴线,连通各生态分区和生态修复组团,形成全域生态保护、修复、发展强大合力。通过生态修复组团、廊道网络、生态保护优化分区等“点-线-面”生态空间结构要素的优化重组,构建一个多层次、复合型的“廊道组团网络+生态保护优化分区”的生态空间优化布局方案。

4 结果与分析

4.1 陕西省2000—2020年土地利用时空变化

2000—2020年,陕西省各地类的面积变化及其空间分布见表3和图3。整体来看,陕西省土地利用类型以耕地、林地和草地为主,2020年占全省面积的94.40%。耕地主要分布在关中地区,林地主要分布在秦岭和延安市南部,未利用地主要分布在榆林市北部,建设用地在关中平原分布最集中,草地和水域分布零散。20年间各地类在空间分布上发生了显著变化。大约有3099 km²的耕地转变成建设用地,主要集中在关中地区;大约有29096 km²耕地转变为林草地,主要分布在陕北和陕南地区;大约有25462 km²林草地转变为耕地,主要集中在陕北地区;约有10955 km²林地转变为草地,约有12017 km²草地转变为林地,林草地的相互转换主要分布在陕南和延安地区。根据各地类的变化面积(绝对值)排序,从大到小依次为耕地>林地>建设用地>草地>未利用地>水域。分析原因包括两个方面:一是由于陕西省经济快速发展,建设用地以自身为中心不断向四周扩张,而受“耕地占补平衡”政策的限制,关中地区城市扩张占用的耕地部分补在了陕南、陕北地区;二是和“退耕还林还草”政策有关,过去20年许多符合退耕标准的耕地转变为林地和草地。

表3 2000—2020陕西省土地利用转移矩阵(km²)

Table 3 Land use transfer matrix in Shaanxi Province, 2000-2020 (km²)

土地类型		2020年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2000年	耕地	38669	6603	22493	636	3099	291	71791
	林地	5362	29689	10955	85	188	146	46425
	草地	20100	12017	43389	323	730	1033	77592
	水域	560	89	372	735	69	30	1855
	建设用地	1761	109	253	29	965	3	3120
	未利用地	428	109	1159	28	211	2904	4839
	总计	66880	48616	78621	1836	5262	4407	205622

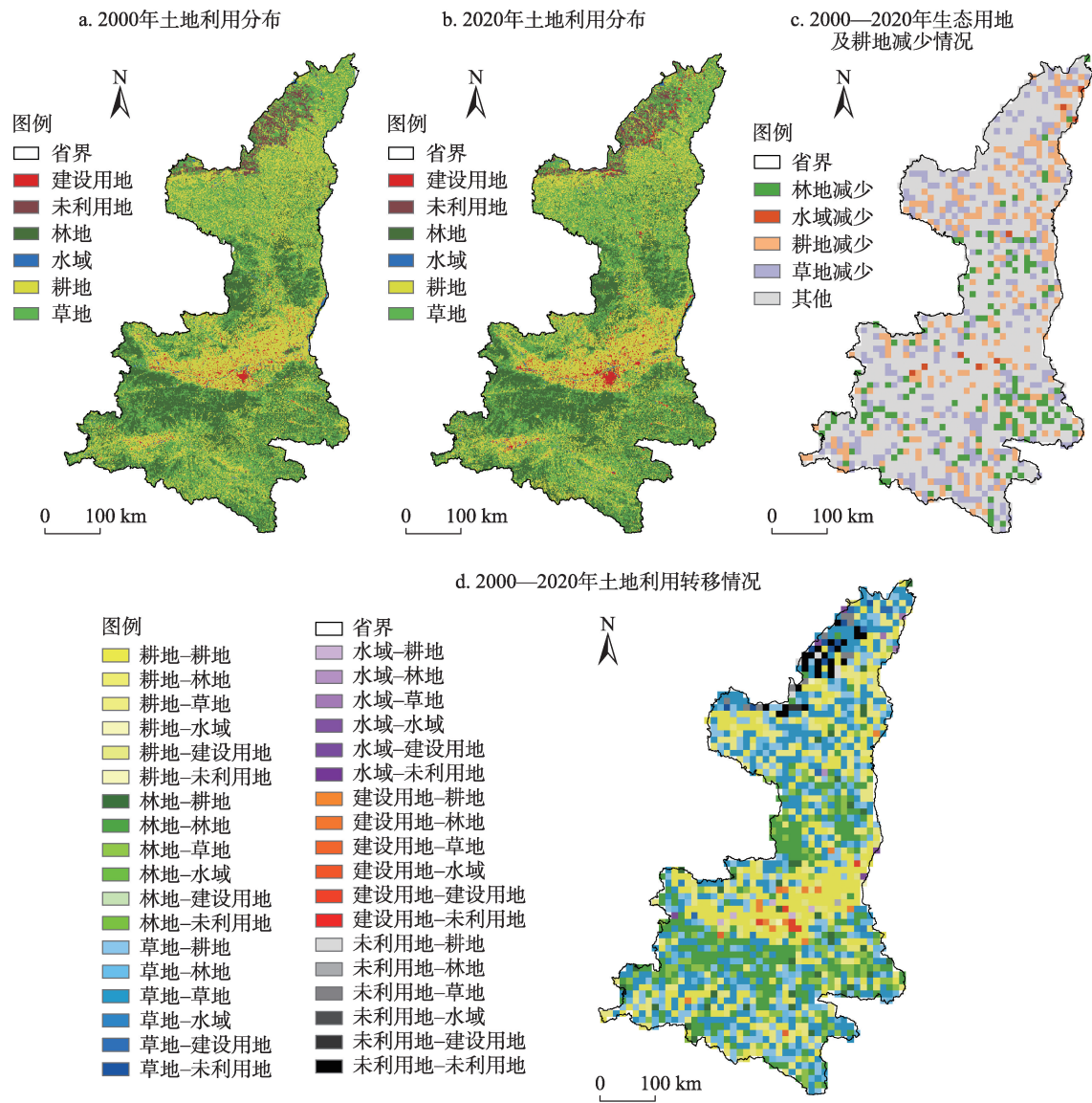


图3 2000—2020陕西省土地利用类型转移
Figure 3 Land use type transfer in Shaanxi Province, 2000-2020

4.2 陕西省ESV时空演变

陕西省ESV在2000—2020年增加了47.84亿元(表4)。2000年陕西省ESV共计4113.43亿元,其中林地最高为1871.74亿元。2020年陕西省ESV共计4161.27亿元,其中林地最高为1960.08亿。2000—2020年间,林地和草地ESV分别提高了4.72%和1.3%,但耕地、水域和未利用地均有不同程度的下降。

基于自然断点法,将ESV分为低、中、高3个等级(图4a、图4b)。高ESV区域为林地和水域,中ESV区域为草地,低ESV区域为耕地、未利用地和

表4 2000—2020年陕西省各地类生态服务价值变化

Table 4 Changes in the value of ecological services by land use category in Shaanxi Province, 2000-2020

土地利用类型	生态系统服务价值/亿元		变化量/亿元	变化率/%
	2000年	2020年		
耕地	813.16	757.54	-56.62	-6.84
林地	1871.74	1960.08	88.34	4.72
草地	1298.28	1315.49	17.21	1.33
水域	120.61	119.38	-1.23	-1.02
未利用地	9.64	8.78	-0.86	-8.92
总计	4113.43	4161.27	47.84	1.16

2023年7月

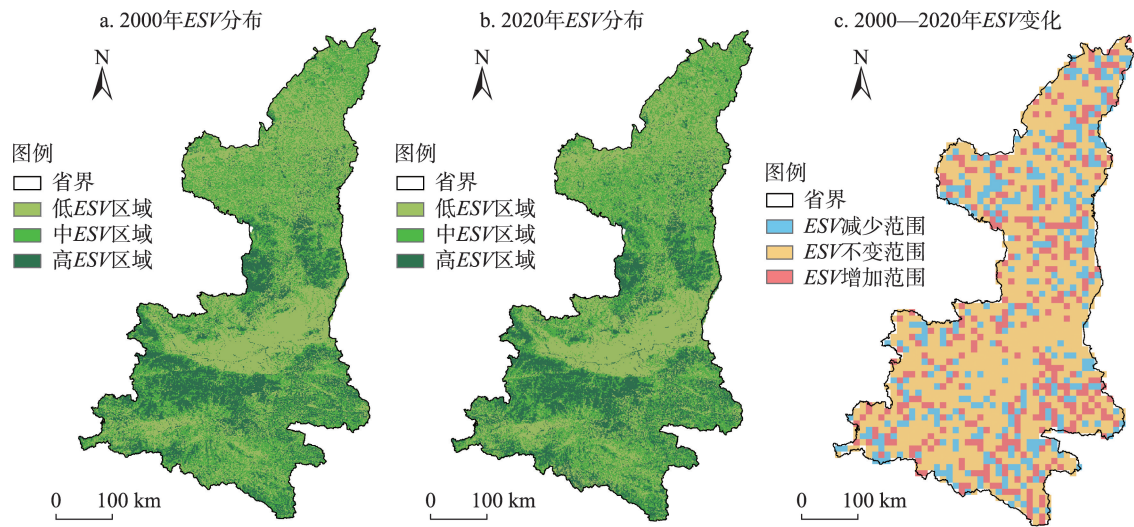


图4 2000年和2020年陕西省ESV分布

Figure 4 Distribution of ecosystem service values (ESV) in Shaanxi Province, 2000 and 2020

建设用地。2000年和2020年陕西的ESV分布格局基本一致,高ESV区域主要分布在秦岭一带和延安市南部的塬梁沟壑区,中ESV区域主要分布在陕北和陕南地区,低ESV区域主要分布在关中地区。2000年到2020年,ESV空间分布在小尺度上有许多变化(图4c),主要是由于土地利用类型的相互转换。在陕北地区,ESV减少区域主要是由于林草地被开垦为耕地,而ESV增加区域主要是因为20年来国家高度重视黄土高原生态治理工作,生态环境得到显著改善;在关中地区,ESV减少区域主要是由

于建设用地扩张占用耕地;在陕南地区,耕地、林地和草地间的相互转换以及建设用地的扩张,是造成ESV变化的主要原因。

4.3 陕西省生态网络构建与分析

4.3.1 识别生态源地

识别出的生态源地总面积46465.92 km²,约占省域总面积的22.60%。如图5a所示,这些生态源地较为集中的分布在秦岭、巴山、子午岭和梁山山脉,这些区域都是提供生态系统服务和功能最多、最重要的地区,必须严格保护和管控。总体来说,陕西

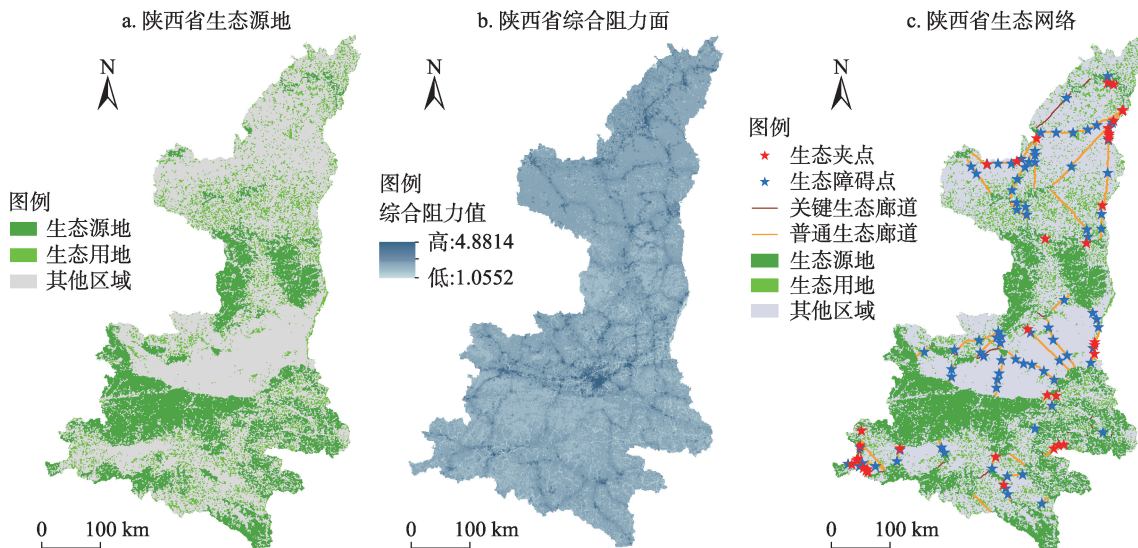


图5 陕西省生态网络构建

Figure 5 Ecological network construction in Shaanxi Province

省北部生态源地分布较少,陕北地区的防风治沙、水土流失治理对于全省乃至全国生态高质量发展具有重要作用,应该加大环保措施来改善生态环境质量。

4.3.2 建立综合阻力面

对各阻力因子加权求和,构建出陕西省综合阻力面分布图(图5b)。陕西省生态阻力值范围在1.05~4.88之间,阻力值越小表示生境适应性越高。关中地区城市、道路和居民点都比较密集,土地利用类型主要是耕地,是生态高阻力区;陕北地区生态阻力值普遍较高,尤其是西北部毛乌素沙漠边缘地区,这里以活动的沙丘、沙垄和片沙为主,对生态系统的生物物质能量流动有较大的影响;陕南地区主要为林地和草地,区域内分布着许多森林公园和自然保护区,整体生态环境良好,是生态低阻力区。整体来看,陕西省高阻力值区域的分布呈现网络状,这种分布格局阻碍了各生态源地间的联系,特别是从陕北、关中和陕南地区间的生态联系。因此,通过构建生态廊道加强生态源地间的联系,对促进生物、物质和能量的流动具有重要意义。

4.3.3 构建陕西省生态网络

以生态源地分布和综合阻力面为基础,利用Linkage mapper工具识别陕西省最小成本路径,得到生态廊道62条,总长度为2871.42 km。利用重力模型计算30个生态源地间的相互作用力,并根据作用力大小将生态廊道划分为两级:引力值 ≥ 500 的定义为关键生态廊道,引力值 < 500 的定义为普通生态廊道。如图5c所示,共获得关键生态廊道27条,平均长度16.75 km,主要分布在商洛市、汉中市南部和榆林市北部,将邻近的生态源地串联成大生态系统,从而增强生态系统的抗干扰能力和稳定性;获得普通生态廊道35条,平均长度69.12 km,主要分布在陕北中部地区、关中地区和陕南中部地区,以南北走向为主,将陕西省南部、中部和北部生态源地连接起来,形成连通全省的廊道回路。

基于提取的生态廊道,利用Linkage mapper工具识别出生态节点121个,包括生态夹点36个和生态障碍点85个。从空间分布来看,榆林市北部和陕南地区生态夹点分布较为密集,这些地区生态源地面积较小但分布密集,对地区生态保护具有重要作

用;生态障碍点主要分布在关中地区和榆林市西南部,这主要由于榆林市西南部毛乌素沙地生态本底质量差,而关中地区城市化规模大、路网密集、人类活动频繁,对生物物质和能量流动带来许多阻碍。

4.4 陕西省生态空间优化布局

依据陕西省2000—2020年土地利用时空变化和生态系统服务价值分析结果,根据陕西省自然地理特征和生态网络构成分布,按照空间相互作用与协同进化原理,对国土空间和生态网络各组分要素进行优化重组,提出陕西省“五带、六区、多组团、多廊道”的生态空间优化布局方案(图6,表5)。首先,基于陕西省自然地理特征和生态源地分布特点,从北向南分别打造位于延安中部、延安南部、秦岭北麓、秦岭南麓和巴山北麓的五条生态防护带,作为各地区生态绿地的保护屏障,并依此将陕西省划分为六个生态主体功能区,构筑“五带六区”生态安全分区保障。其中,“六区”由北向南依次排序为黄土高原生态恢复区、延安-铜川生态保护区、关中综合发展区、秦岭生态保护区、陕南绿色发展区和巴山生态保护区。

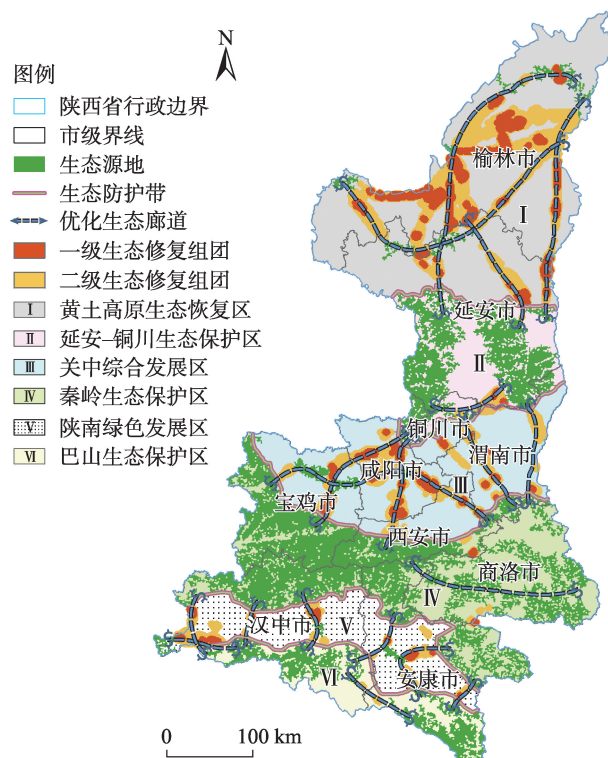


图6 陕西省生态空间优化布局方案

Figure 6 Optimization of ecological space layout in Shaanxi Province

表5 “五带、六区、多廊道、多组团”生态空间优化布局方案说明

Table 5 Description of the “five belts, six zones, multiple corridors, and multiple clusters” ecological space optimization layout plan		
核心概念	解释说明	优化策略
五带	保护生态源地的生态安全屏障	加强监督管理,防止非生态用地的无序扩张
六区	黄土高原生态恢复区	以提高植被覆盖度为主,改善其水土流失状况
	延安-铜川生态保护区	限制开发,加强区域植被的保育,加大监督管理力度
	关中综合发展区	加强耕地保护、加强城市生态廊道建设,经济和生态综合发展
	秦岭生态保护区	加强森林资源保护,强化各项生态服务和功能
	陕南绿色发展区	重点发展生态农产品、生态康养等绿色产业
	巴山生态保护区	严禁开发占用,加强森林资源保护,强化各项生态服务和功能
多廊道	连通各生态分区的优化生态廊道	在宜林宜草区域植树种草,保证生态廊道的连通性
多组团	生物迁移路径中的障碍区域	调整用地结构,加强区域植被恢复与保育,建设生态公园

生态保护区。然后,基于Barrier Mapper工具识别结果,利用自然断点法将生态障碍区划分为两级生态修复组团。最后,筛选并构建生态廊道将所有的生态区、生态修复组团连接成到一起,并分别提出针对性优化方案,形成全省生态保护、修复、发展强大合力。

4.4.1 构建生态防护带,划分生态功能区

根据陕西省的地理特点和生态需求构建的五条生态防护带均呈东西走向,能够有效保护生态环境和促进生态修复。其中,延安中部的生态防护带主要涵盖延安市的子午岭和北山的北部地区,该地区地形起伏较大、气候偏干旱,生态防护带构建应以防止水土流失为重点,加强水土保持工程建设和植被恢复。延安南部的生态防护带主要涵盖铜川市、延安市等地,该地区地势较为陡峭,植被类型多样,生态防护带构建应注重加强植被恢复和自然保护区建设,控制土地退化和生态用地占用等问题,维护生态系统的完整性。秦岭北麓的生态防护带主要涵盖宝鸡市、西安市等地,该生态防护带建设

要重点保护和恢复森林植被,加强土地利用管理,防止城市化扩张占用秦岭生态用地,促进生态系统的健康发展。秦岭南麓和巴山北麓的生态防护带所处地区地貌复杂、气候多样,其建设应注重保护山地植被和水源地,加强土壤保持和植被覆盖,采取合理的农田利用和生态修复措施,促进生态环境的可持续发展。

6个生态区域2000—2020年的土地利用变化和ESV变化如表6、表7所示。由于区域2、4、6的单位面积ESV远大于其他区域,生态保护价值巨大,因此将其设置为生态保护区,其他区域则设置为生态修复和发展区。区域1在2000—2000年间耕地减少了4.86%,林地和草地分别增加了2.27%和2.05%,建设用地也增加了1.44%,区域ESV和单位面积ESV显著增加,但截至2020年其单位面积ESV只有157.81万元/km²,与其他区域仍有较大差距,因此这一区域未来应以提高植被覆盖度为主,并加强水土流失治理,进而改善生态环境;区域2在2000—2020年间耕地和林地分别减少了3.18%和0.56%,

表6 2000—2020年“六区”土地利用变化
Table 6 Land use changes in the “six zones”, 2000-2020

六区	2000—2020年各区域地类变化面积/km ²						2000—2020年各区域地类变化比例/%					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
区域1	-2917.67	1366.44	1232.55	-70.32	868.00	-479.00	-4.86	2.27	2.05	-0.12	1.44	-0.80
区域2	-748.53	-131.66	815.28	-18.89	57.80	26.00	-3.18	-0.56	3.46	-0.08	0.25	0.11
区域3	-1152.35	126.41	15.72	-16.77	1017.70	9.30	-3.23	0.35	0.04	-0.05	2.85	0.03
区域4	-71.00	93.84	-107.43	18.59	61.29	4.70	-0.13	0.18	-0.20	0.04	0.12	0.01
区域5	-142.14	-8.94	-49.16	67.33	128.91	4.00	-0.72	-0.05	-0.25	0.34	0.65	0.02
区域6	120.69	744.92	-877.97	1.07	8.30	3.00	0.87	5.38	-6.34	0.01	0.06	0.02

表7 2000—2020年“六区”生态系统服务价值(ESV)变化

Table 7 Changes in the value of ecosystem services (ESV) in the “six zones”, 2000-2020

六区	单位面积生态系统服务价值/(万元/km ²)			区域生态系统服务总价值/亿元		
	2000年	2020年	变化量	2000年	2020年	变化量
区域1	151.63	157.81	6.18	911.13	948.27	37.14
区域2	250.69	250.13	-0.56	590.22	588.92	-1.30
区域3	146.93	144.48	-2.45	524.87	516.10	-8.77
区域4	267.70	268.16	0.46	1411.58	1412.98	2.40
区域5	182.83	183.63	0.80	360.57	362.16	1.59
区域6	228.15	240.26	12.11	317.06	332.84	16.78

草地和建设用地分别增加了3.46%和0.25%,区域ESV减少了1.30亿元,因此该区域未来应该注重限制开发、加强区域植被的保育并加大监督管理力度,以保障其生态功能稳定;区域3在2000—2020年间耕地减少了3.23%,林地和建设用地分别增加了0.35%和2.85%,区域ESV减少了8.77亿元,未来一方面应该以促进城市发展而提供所需的农副产品为主,为该区城市发展提供基本保障,另一方面在城市内加强生态廊道建设,如公园、观景步道等形式,逐渐形成生态建设与城市建设协调发展的新局面;区域4在2000—2020年间耕地和草地分别减少了0.13%和0.20%,林地和建设用地分别增加了0.18%和0.12%,单位面积ESV增加了0.46万元/km²达到268.16万元/km²,是陕西省生态质量最好的地区,在未来应该加强森林资源保护,为城市化地区提供气体调节、水文调节、气候调节、水源涵养等生态服务功能;区域5在2000—2020年间主要是水域面积增加了0.34%,使区域ESV略微增加,未来应以发展生态农产品、生态康养等绿色产业为主,充分利用现有生态资源产生经济效益带动地区发展;区域6在2000—2020年间大量草地转变为林地,草地减少而6.34%,林地增加了5.38%,生态环境质量持续提升,到2020年区域ESV增加了16.78亿元,在未来要严禁开发占用,加强森林资源保护,强化各项生态服务和功能。

4.4.2 统筹生态修复组团,连通优化生态廊道

生态修复组团总面积约为3.51万km²,其中,一级修复组团面积约为1.23万km²,二级修复组团面积约为2.28万km²,大部分位于“六区”中的生态治理与发展区域,用地类型主要为建设用地和未利用地,少量为耕地。修复组团区域是影响生物、物质

和能量沿生态廊道流动的高阻力区域,保护这些区域能显著提高生态源地间的景观连通性。而这些修复组团所占面积越小代表清除此障碍点难度越小^[54],由此可知陕北地区生态修复难度最大、陕南地区难度最小,陕北地区虽然近20年生态治理与恢复成效显著(ESV显著增加),但仍需继续加大生态保护治理力度。此外,为加强各生态分区、生态源地和生态修复组团的系统保护,促进生态资源与要素的有效流通,在生态廊道提取和分级的基础上,以生态廊道为轴线形成“点—线—面”生态格局体系。整体来看,未来陕西省需要对生态修复组团进行自然资源统筹监测,依据各生态修复组团所处生态分区自然地理特征分类、分级修复,加强对生态廊道沿线的生态绿化建设,进而提升全省生态环境质量。

5 讨论与结论

5.1 讨论

关注省级层面生态空间格局及其优化,对推动绿色发展、促进人与自然和谐共生和建成美丽中国具有重要现实意义。在研究方法上,本文基于生态斑块的生态系统服务价值、形态学空间格局和景观连通性的综合考虑识别生态源地,基于Linkage Mapper工具识别生态障碍范围作为生态修复重点区域,可以为相关研究提供新的思路和方法。此外,以往大多数基于生态网络和生态安全格局的生态空间优化方案就是增加重要生态源地、规划生态踏脚石和修复生态障碍点,而本文基于土地利用和生态系统服务价值的时空变化分析,针对性提出区域优化策略和整体优化布局,具有一定创新性。

陕西省作为一个由陕北、关中、陕南三大自然生态区组合的生态大省,在本文中基于生态系统服

2023年7月

务价值更是被划分为6块生态功能区,不同生态区、地市的生态环境存在较大差异,未来发展应以保证全域协调可持续发展为首要目标,在此基础上分别对各生态区存在的生态问题提出针对性管治措施。首先,陕西省应该高度重视各区域间、各生态系统间的连通性,建立体系化的跨市、跨区县的生态保护与修复治理机制。其次,陕西省应该针对各区域生态基底和生态系统状况提出针对性措施,在陕北地区继续施行退耕还林还草政策,提高植被覆盖率,加强水土流失治理;在关中地区严格保护耕地,并逐步形成自然生态与城市建设发展和谐共生的新局面;在陕南地区发展生态农产品产业、康养产业等特色产业,带动经济发展同时保证良好的生态系统服务功能。

本文存在如下不足之处:①在本文中生态系统服务价值当量系数、生态源地斑块规模、生态阻力因子及其权重等阈值的选择和设置是生态网络构建的重点,在参考前人研究的基础上根据陕西省的自然、地理和经济特征进行修正,但并未考虑这些阈值随着时空演变发生的变化,也没有考虑在陕西省如此大的研究范围内,是否应该针对不同市、县、区的不同生态基底、经济发展水平等特点而选择适应其特殊性的阈值,在未来相关研究中仍须进一步探讨。②本文以陕西省行政区范围为界进行的生态网络构建和空间优化布局分析,但从空间上来看陕西省生态空间大部分会延伸至省外,客观存在生物物质和能量的空间流动转移,因此可以从流域范围进一步考虑生态要素的系统性和整体性。

5.2 结论

本文以陕西省为例,在土地利用时空演变分析和生态系统服务价值定量评价的基础上,利用MS-PA、Linkage Mapper工具等手段方法构建生态网络,并进一步根据生态网络各组分要素的空间分布、用地特征和生态环境问题提出生态空间优化布局方案。主要研究结论如下:

(1)2000—2020年,陕西省土地利用发生了显著变化。在数量上,耕地、未利用地和水域面积减少,林地、草地和建设用地面积增加,根据各土地利用类型变化面积(绝对值)排序,从大到小依次为:耕地>建设用地>林地>草地>未利用地>水域;在空

间上,耕地转变成建设用地主要集中在关中地区,耕地转变为林草地主要分布在陕北和陕南地区,林草地转变为耕地主要集中在陕北地区。

(2)2000—2020年陕西省ESV增加了47.84亿元,ESV主要来自于林地和草地。2000年陕西省ESV共计4113.43亿元,其中林地最高为1871.74亿元;2020年陕西省ESV共计4161.27亿元,其中林地最高为1960.08亿元。在空间上,2000年和2020年的ESV分布格局基本保持稳定:高ESV区主要分布在秦岭、巴山和梁山山脉等地区,以林地为主;中ESV区要分布在陕北和陕南地区,表现为草地;低ESV区主要分布在关中地区,以耕地和建设用地为主。

(3)本文构建出包含30处生态源地、62条生态廊道和121个生态节点的陕西省生态网络体系。其中,生态源地总面积约46465.92 km²,主要分布在秦岭、巴山和延安市子午岭、梁山山脉;关键生态廊道27条,主要分布在商洛市、汉中市南部和榆林市北部;二级生态廊道35条,主要分布在陕北中部地区、关中地区和陕南中部地区,以南北走向为主;生态节点121个,其中36个生态夹点在榆林市北部和陕南地区分布较为密集,对地区生态保护具有重要作用,85个生态障碍点主要分布在关中地区和榆林市西南部,是生态本底较差或者人类影响较大的区域。

(4)在综合考虑LUCC和ESV变化的基础上,根据陕西省自然地理特征和生态网络构成分布,提出“五带、六区、多廊道、多组团”的生态空间优化布局方案,针对不同区域的生态问题提出对应性优化方案,统筹全域的生态保护和修复,推动陕西省生态经济可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 殷嘉迪,董金玮,匡文慧,等. 20世纪90年代以来中国生态空间演化的时空格局和梯度效应[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5904–5914. [Yin J D, Dong J W, Kuang W H, et al. Pattern and gradient effects of ecological space changes in China since 1990s[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5904–5914.]
- [2] 赵宏波,魏甲晨,孙东琪,等. 大城市内部“生产-生活-生态空间”多尺度耦合协调度:以郑州市为例[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 944–953. [Zhao H B, Wei J C, Sun D Q, et al. Multi-scale

- analysis on the coupling coordination degree of production-living-ecological spaces in cities: A case study of Zhengzhou City[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 944-953.]
- [3] 陈新闻, 李小倩, 吕一河, 等. 区域尺度生态修复空间辨识研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8717-8724. [Chen X C, Li X Q, Lv Y H, et al. Review of spatial identification of ecological restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8717-8724.]
- [4] 翟俊, 金点点, 陈妍, 等. 黄河三角洲高效生态经济区生态变化、问题与对策[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 517-526. [Zhai J, Jin D D, Chen Y, et al. Ecological changes, problems and countermeasures in the High Efficiency Eco-economic Zone of the Yellow River Delta[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 517-526.]
- [5] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395. [Feng Z M, Yang Y Z, Yan H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [6] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 441-452. [Yang T R, Kuang W H, Liu W D, et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 441-452.]
- [7] 杨林哲, 牛腾, 于强, 等. 基于复杂网络理论的生态空间优化: 以松花江流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(9): 91-103. [Yang L Z, Niu T, Yu Q, et al. Ecological spatial optimization based on complex network theory: A case study of Songhua River Basin of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(9): 91-103.]
- [8] 刘晓阳, 魏铭, 曾坚, 等. 闽三角城市群生态网络分析与构建[J]. *资源科学*, 2021, 43(2): 357-367. [Liu X Y, Wei M, Zeng J, et al. Ecological network analysis and construction: A case study of the urban agglomeration of the Min River Delta, China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(2): 357-367.]
- [9] 焦胜, 刘奕村, 韩宗伟, 等. 基于生态网络-人类干扰的国土空间生态修复优先区诊断: 以长株潭城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2294-2307. [Jiao S, Liu Y C, Han Z W, et al. Determining priority areas for land ecological restoration based on ecological network-human disturbance: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2294-2307.]
- [10] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1986-2001. [Zhu J, Su J, Yin H W, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1986-2001.]
- [11] Huang X X, Wang H J, Shan L Y, et al. Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity[J]. *Ecological Indicators*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108319.
- [12] Shen Z, Wu W, Tian S Q, et al. A multi-scale analysis framework of different methods used in establishing ecological networks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104579.
- [13] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 等. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7056-7067. [Tu Y, Liu M, Gao C C, et al. Construction of ecological sources identification system for metropolitan areas and diagnosis of key areas for ecological restoration in nationally spatial areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 7056-7067.]
- [14] 高娜, 姜雪, 郑曦. 基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(3): 106-118. [Gao N, Jiang X, Zheng X. Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(3): 106-118.]
- [15] 王云才, 刘悦来. 城市景观生态网络规划的空间模式应用探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(9): 819-824. [Wang Y C, Liu Y L. Researches on spatial model application of urban landscape eco-network planning[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(9): 819-824.]
- [16] 胡道生, 宗跃光, 许文雯. 城市新区景观生态安全格局构建: 基于生态网络分析的研究[J]. *城市发展研究*, 2011, 18(6): 37-43. [Hu D S, Zong Y G, Xu W W. Research on the construction of landscape ecological security pattern in the new urban region development based on ecology network analysis[J]. *Urban Development Studies*, 2011, 18(6): 37-43.]
- [17] 郑群明, 扈嘉辉, 申明智. 基于 MSPA 和 MCR 模型的湖南省生态网络构建[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(5): 1-10. [Zheng Q M, Hu J H, Shen M Z. Construction of ecological network in Hunan Province based on MSPA and MCR models[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2021, 44(5): 1-10.]
- [18] 章瑞, 王凯平, 张云路, 等. 基于空间演变多元分析的市域生态空间优化研究: 以宁波市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 127-137. [Zhang R, Wang K P, Zhang Y L, et al. Urban ecological space optimization based on multivariate analysis of spatial evolution: A case study of Ningbo City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 127-137.]
- [19] 王越, 赵雯琳, 刘纯青. 基于 MSPA-Conefor-MCR 路径的生态网络优化及其构建: 以彭泽县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(2): 504-518. [Wang Y, Zhao W L, Liu C Q. Optimization and construction of ecological network based on MSPA-Conefor-MCR

2023年7月

- path: A case study of Pengze County[J]. *Acta agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(2): 504–518.]
- [20] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于MSPA和MCR模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 139–147. [Chen Z A, Ma B B, Wei X J, et al. Construction and optimization of ecological network of Nanchang City based on MSPA and MCR model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 139–147.]
- [21] Wei Q Q, Halike A, Yao K X, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA–MCR models[J]. *Ecological Indicators*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108857.
- [22] 金爱博, 张诗阳, 王向荣. 宁绍平原绿地生态网络时空格局与优化研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1415–1426. [Jin A B, Zhang S Y, Wang X R. Spatial-temporal pattern and optimization of the green space ecological networks in the Ning Shao Plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11): 1415–1426.]
- [23] Dai L, Liu Y B, Luo X Y. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141868.
- [24] Loro M, Ortega E, Arce R M, et al. Ecological connectivity analysis to reduce the barrier effect of roads. An innovative graph-theory approach to define wildlife corridors with multiple paths and without bottlenecks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 149–162.
- [25] Peng J, Yang Y, Liu Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 644: 781–790.
- [26] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY–LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2995–3009. [Wei B J, Su J, Hu X J, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2995–3009.]
- [27] 廖剑威, 闫淑君, 叶佳伟, 等. 基于MSPA–Linkage Mapper的福州滨海长乐区生态网络构建与优化[J/OL]. *西北林学院学报*, (2023–02–03) [2023–02–27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1202.S.20230203.1407.002.html>. [Liao J W, Yan S J, Ye J W, et al. Construction and optimization of ecological network based on Mspa–Linkage Mapper in Changle District, Fuzhou[J/OL]. *Journal of Northwest Forestry University*, (2023–02–03) [2023–02–27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1202.S.20230203.1407.002.html>.]
- [28] 武子豪, 张金懿, 帕茹克·吾斯曼江, 等. 县域生态网络构建与优化研究: 以河北省曲周县为例[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(7): 221–234. [Wu Z H, Zhang J Y, Paruke W, et al. Construction and optimization of county ecological network: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(7): 221–234.]
- [29] 吴倩莲, 李飞雪, 张启舜, 等. 基于网络分析的城市生态空间结构优化: 以常州市为例[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1983–1992. [Wu Q L, Li F X, Zhang Q S, et al. Optimization of urban ecological spatial structure based on network analysis: A case study of Changzhou City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1983–1992.]
- [30] 高宇, 木皓可, 张云路, 等. 基于MSPA分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究: 以招远市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7547–7556. [Gao Y, Mu H K, Zhang Y L, et al. Research on construction path optimization of urban-scale green network system based on MSPA analysis method: Taking Zhaoyuan City as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7547–7556.]
- [31] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建: 以广西河池为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2596–2608. [Gao M W, Hu Y C, Li X, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem services and environmental sensitivity in karst mountainous areas: A case study in Hechi, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2596–2608.]
- [32] 傅家仪, 臧传富, 吴铭婉. 1990–2015年海河流域土地利用时空变化特征及驱动机制研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(5): 131–139. [Fu J Y, Zang C F, Wu M W. Spatial and temporal variability characteristics and driving mechanism of land use in Haihe River Basin from 1990 to 2015[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(5): 131–139.]
- [33] 李帅呈, 龚健, 杨建新, 等. 兰西城市群土地利用/覆被变化模式特征: 基于强度分析框架[J]. *资源科学*, 2023, 45(3): 480–493. [Li S C, Gong J, Yang J X, et al. Characteristics of LUCC patterns of the Lanzhou–Xining urban agglomeration: Based on an intensity analysis framework[J]. *Resources Science*, 2023, 45(3): 480–493.]
- [34] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243–1254. [Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on Per Unit Area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.]
- [35] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, (5): 911–919. [Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, (5): 911–919.]
- [36] 耿鑫, 胡实, 肖玉, 等. 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7):

- 1799–1814. [Geng X, Hu S, Xiao Y, et al. Land use pattern optimization and evaluation based on ESV of agro-pastoral ecotone in Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1799–1814.]
- [37] 丁振民, 姚顺波. 陕西省耕地转移对生态系统服务价值的影响[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1070–1081. [Ding Z M, Yao S B. Effects of cultivated land transition on ecosystem service value in Shaanxi Province of China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1070–1081.]
- [38] 邵大伟, 吴殿鸣. 景观破碎化对生态系统服务价值的影响作用分析: 以苏州为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11): 2436–2449. [Shao D W, Wu D M. Analysis on the effect of landscape fragmentation on ecosystem service value: A case study of Suzhou[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(11): 2436–2449.]
- [39] 陈瑾, 赵超超, 赵青, 等. 基于 MSPA 分析的福建省生态网络构建[J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 1–12. [Chen J, Zhao C C, Zhao Q, et al. Construction of ecological network in Fujian Province based on Morphological Spatial Pattern Analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 1–12.]
- [40] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 1120–1127. [Wu J H, Liu S Y, Bai S. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 1120–1127.]
- [41] 艾婧文, 余坤勇, 黄娟鲜, 等. 风电项目对潜在生态廊道的影响: 基于 MSPA-MCR 模型[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3665–3676. [Ai J W, Yu K Y, Huang R X, et al. The impact of wind power projects on potential ecological corridors based on the MSPA-MCR Model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3665–3676.]
- [42] 朱炳臣, 李同昇, 朱小青, 等. 基于生态网络优化的生态保护重要性评价: 以陕西省为例[J/OL]. *农业资源与环境学报*, (2023–01–31) [2023–02–27]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0746>. [Zhu B C, Li T S, Zhu X Q, et al. Importance evaluation of ecological conservation based on ecological network optimization: A case study of Shaanxi Province[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, (2023–01–31) [2023–02–27]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0746>.]
- [43] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 等. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461–1473. [Li Q Q, Jin X B, Zhang X L, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1461–1473.]
- [44] 刘林, 雷冬梅, 冉玉菊, 等. 基于生态系统服务功能的滇池流域关键性生态用地识别[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 277–284. [Liu L, Lei D M, Ran Y J, et al. Identification of critical ecological land in Dianchi Watershed based on the perspective of ecosystem service function[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 277–284.]
- [45] 李红润, 刘慧芳, 王瑾, 等. 基于 Markov-FLUS-MCR 模型的晋中市“三生”空间优化[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 267–276. [Li H R, Liu H F, Wang J, et al. Optimization of production-living-ecological space based on Markov-FLUS-MCR model in Jinzhong, Shanxi of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10): 267–276.]
- [46] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 等. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 263–272. [Tang F, Wang L, Zhang P T, et al. Construction of county-level ecological security pattern based on ecological protection red line and network in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 263–272.]
- [47] 马才学, 杨蓉莹, 柯新利, 等. 基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1): 135–147. [Ma C X, Yang R X, Ke X L, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Yangtze River Delta based on the perspective of ecological pressure[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(1): 135–147.]
- [48] 黄雪飞, 吴次芳, 游和远, 等. 基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 243–251. [Huang X F, Wu C F, You H Y, et al. Construction of rural landscape ecological corridor in water network plain area based on MCR Model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 243–251.]
- [49] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3344–3352. [Song L L, Qin M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3344–3352.]
- [50] 郭荣朝, 苗长虹. 城市群生态空间结构研究[J]. *经济地理*, 2007, (1): 104–107. [Guo R C, Miao C H. A study on the eco-spatial structure of the urban group[J]. *Economic Geography*, 2007, (1): 104–107.]
- [51] 郭荣朝, 苗长虹, 夏保林, 等. 城市群生态空间结构优化组合模式及对策: 以中原城市群为例[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(3): 363–369. [Guo R C, Miao C H, Xia B L, et al. Research on the model of optimization and reorganization of eco-spatial structure in urban agglomeration region and its application: A case study of the urban agglomeration in Central Plains Region[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(3): 363–369.]
- [52] 李思楠, 赵筱青, 普军伟, 等. 西南喀斯特典型区国土空间地域功能优化分区[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 242–253. [Li S N, Zhao X Q, Pu J W, et al. Optimization of regionalization of territorial space function regions in typical karst areas of southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17): 242–253.]
- [53] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农

业生态管理分区[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1359–1373. [Guan Q C, Hao J M, Xu Y Q, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1359–1373.]

[54] 高阳, 刘悦忻, 钱建利, 等. 基于多源数据综合观测的生态安全

格局构建: 以江西省万年县为例[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 2010–2021. [Gao Y, Liu Y X, Qian J L, et al. Improving ecological security pattern based on the integrated observation of multiple source data: A case study of Wannian County, Jiangxi Province [J]. Resources Science, 2020, 42(10): 2010–2021.]

Construction and spatial optimization of ecological network in Shaanxi Province based on LUCC and its ESV response

WANG Haoyang, NIU Wenhao, SONG Man, ZHANG Bangbang, JIN Yaya

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] Building ecological networks and optimizing ecological space layouts play an important role in coordinating the sustainable development of regional social-economic systems and ecological environments. [Methods] Taking Shaanxi Province as an example, this study constructed an ecological network model based on the analysis of land use and cover change (LUCC) and the quantitative evaluation of ecosystem service value (ESV) by using the MSPA method and the Linkage Mapper tool, and further carried out a study on the optimal layout of ecological space. [Results] The results show that: (1) The area of each land use category in Shaanxi Province changed significantly between 2000 and 2020, and the changes in area (absolute value) during the period were, in descending order: arable land > forest land > construction land > grassland > unused land > water area; (2) The value of ecosystem services in Shaanxi Province increased by 4.784 billion yuan, and its spatial distribution pattern remained stable overall, with high-value areas mainly distributed in the Qinling Mountains, the Bashan Mountains, and the southern part of Yan'an City, and low-value areas concentrated in the Guanzhong area; (3) This study identified 30 ecological source sites with a total area of 46465.92 km², and extracted 62 ecological corridors, 36 ecological pinch points, and 85 ecological barrier points, which together form an ecological network; (4) We proposed an ecological space optimization plan of “five belts, six zones, multiple corridors, and multiple clusters”, providing a reference for the restoration and management of ecological space in Shaanxi Province. [Conclusion] Constructing an ecological network model from LUCC and ESV changes, identifying problematic areas in the ecological space, and proposing targeted strategies can effectively solve the problems of ecological damage and isolated ecological islands in the process of land use change, providing a scientific guidance for coordinating the ecological protection of the provincial area and promoting the sustainable development of the region, as well as providing scientific references for the preparation of territorial spatial planning.

Key words: land use change; ecosystem service value; ecological network; spatial optimization; Shaanxi Province