

DOI: 10.5846/stxb202101290312

孙泽兴, 李文怡, 刘嘉敏, 曹淑慧, 张伟娟, 王浩. 陕西省生态恢复综合效益评估. 生态学报, 2022, 42(7): 2718-2729.

Sun Z X, Li W Y, Liu J M, Cao S H, Zhang W J, Wang H. Evaluation of comprehensive benefit for ecological restoration in Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2718-2729.

## 陕西省生态恢复综合效益评估

孙泽兴<sup>1</sup>, 李文怡<sup>1</sup>, 刘嘉敏<sup>1</sup>, 曹淑慧<sup>1</sup>, 张伟娟<sup>2</sup>, 王浩<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

<sup>2</sup> 福建师范大学马克思主义学院, 福州 350117

**摘要:**开展区域内生态恢复综合效益评估工作, 将为地区生态恢复成果梳理及生态系统管理提供决策支持, 为未来生态恢复工作的开展提供理论依据。以陕西省为研究区, 基于空间遥感数据和生态模型模拟, 从生态系统结构、质量和服务 3 个方面综合评估区域内 2000—2015 年生态恢复效益。研究结果表明: 1) 近 16 年间陕西省土地利用类型呈现林地增加, 耕地减少的态势, 同时关中地区建设用地大量增加。陕西省 87.95% 和 72.72% 的区域分别呈现植被覆盖和生态系统服务总值增加的趋势, 尽管区域内人类活动占地增加, 但整体生态恢复效果明显。2) 陕南地区植被覆盖及生态系统服务总值相对较高, 特别是秦岭地区, 生态环境较为优越。陕北地区植被覆盖及生态系统服务均值虽相对较低, 但均呈现显著增加趋势, 未来区域范围内生态环境有着较大的发展潜力。3) 尽管不同生态工程基本覆盖了陕西省全境, 但受气象因素影响, 生态系统服务总值在关中及陕南地区仍呈现出了一定的下降趋势。在未来相关区域的生态恢复资源投入中, 应注意干旱环境对生态恢复效果的影响, 因地制宜地选取适宜生态工程措施, 以保证生态恢复的有效性和持续性, 将生态恢复资源的成效最大化。

**关键词:**生态恢复评价; 土地利用; 植被覆盖; 生态系统服务; 陕西省

## Evaluation of comprehensive benefit for ecological restoration in Shaanxi Province

SUN Zexing<sup>1</sup>, LI Wenyi<sup>1</sup>, LIU Jiamin<sup>1</sup>, CAO Shuhui<sup>1</sup>, ZHANG Weijuan<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

<sup>2</sup> College of Marxism, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

**Abstract:** The comprehensive benefit evaluation of regional ecological restoration will provide decision-making support for ecosystem management and regional ecological restoration results sorting and provide a theoretical basis for future ecological restoration work. However, most of the studies have not formed a systematic theoretical framework in the evaluation process. The selected indicators in these studies are often relatively one-sided, focusing only on a certain field, which unable to form a comprehensive evaluation and overall cognition of the ecological restoration benefits of the study area. Therefore, this study takes Shaanxi Province as the study area, based on spatial remote sensing data and ecological model simulations, the ecological restoration benefits of the region from 2000 to 2015 were comprehensively evaluated from the aspects of ecosystem structure, quality, and service. The results showed that: (1) in the past 16 years, the land use types in Shaanxi Province presented a trend of increasing in forest land and decreasing in the farmland, which was in line with the characteristics of ecological restoration programs such as returning farmland to forest. At the same time, the construction land in Guanzhong area increased greatly, and the main source of construction land was farmland, indicating that urban construction occupied

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2020JQ-415, 2019JQ-767); 国家自然科学基金 (41801180); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504701)

**收稿日期:** 2021-01-29; **网络出版日期:** 2021-12-15

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

farmland seriously. However, 87.95% and 72.72% of Shaanxi Province increased in vegetation coverage and total ecosystem services, respectively, which indicated that the effect of ecological restoration was obvious despite the increase in human activity. (2) At the time scale, both the vegetation coverage and ecosystem services in Shaanxi Province showed an increasing trend. And at the spatial scale, the average value of vegetation coverage and ecosystem services in the southern Shaanxi were relatively high, especially in the Qinling Mountains, where the ecological environment is superior. Although the mean value of vegetation coverage and ecosystem services in the Northern Shaanxi was relatively low, both of them showed a significant increasing trend, and there is a great potential for the development of ecological environment in the future. (3) Although different ecological programs basically covered the entire territory of Shaanxi Province, the total ecosystem services in Guanzhong and southern Shaanxi still showed a decreased trend due to the meteorological factors. Therefore, in the future implementation of ecological restoration measures in relevant regions, more attention should be paid to the effects of arid environment on ecological restoration. Appropriate restoration measures should be selected according to local conditions to ensure the effectiveness and sustainability, and maximize the benefits of ecological restoration.

**Key Words:** ecological restoration assessment; land use; vegetation cover; ecosystem services; Shaanxi Province

我国幅员辽阔,资源丰富,自然环境复杂多样,区域生态状况差异显著。近年来,城市化快速发展,巨大的人口基数及其增长态势,日益增长的物质需求,高速增长的经济总量,对生态环境形成巨大压力,人地矛盾几乎无处不在,广泛的资源开发及全球变化更加剧了这种冲突,并最终导致不同区域内呈现出了诸如植被退化、水土流失、生物多样性丧失等不同类型及不同程度的生态问题<sup>[1-3]</sup>。生态恢复不仅是扭转由人类活动引起的生态环境退化和生物多样性损失,并保证生态系统服务等生态资源可持续供给的一项主要战略措施,更是帮助退化、受损或毁坏的生态系统恢复正常功能的过程<sup>[4]</sup>。为了有效治理我国的生态环境,恢复自然资源,20世纪90年代以来,我国针对相关生态问题开展了三北防护林、退耕还林还草、退牧还草、京津风沙源治理和天然林保护等一系列的重大生态恢复工程<sup>[5-7]</sup>。总体来说,目前的生态恢复工程取得了显著成效,不同生态问题得到了有效改善,相应生态资源得到了极大恢复<sup>[8-10]</sup>。但如何更为全面的评估生态恢复效果,不同区域内如何更好的因地制宜继续开展生态恢复工作,仍是目前相关研究的热点内容之一。

针对生态恢复效益评估,众多学者从不同角度开展了大量研究<sup>[11-13]</sup>。Wang等基于植被净初级生产力指标,分析了我国5大脆弱生态区生态恢复效果。刘国彬等围绕黄土高原水土流失问题,选取土壤侵蚀相关参数对黄土高原生态恢复成效进行研究。吴丹等以京津风沙治理工程为研究对象,针对研究区防风固沙服务,评估了相关生态工程的实施效果。这些涉及不同地区、不同对象的生态恢复效益研究,有利于明晰各个区域的生态恢复状况,并为生态恢复工程的进一步实施和生态系统管理提供决策依据。然而,大部分研究在评估过程中没有形成系统的理论框架,其选取的指标往往相对单一,常常仅侧重于某一个领域,无法形成对研究区生态恢复效益的综合性评价与整体认知<sup>[14-16]</sup>。因此,针对区域生态恢复效益评估,构建一套系统、全面的综合效益评估框架,对于实现区域内生态恢复效果的科学认识和生态恢复措施的进一步实施调整具有现实意义。陕西省地处我国内陆腹地,黄河流域中游,横跨中温带、暖温带及北亚热带3个气候带,省内高原、山地、平原和盆地错落分布,其自然环境复杂、生态资源丰富<sup>[17]</sup>。长久以来,由于人口增加,城镇扩张和林、牧业利用等人类活动的持续影响,该区域植被破坏严重、土壤侵蚀强烈、生物多样性持续降低。为应对和解决相关环境问题,陕西省范围内接连实施了以退耕还林、天然林保护等为代表的一系列生态工程和恢复措施,并取得了较好的成效<sup>[17-19]</sup>。复杂的人类活动对区域内生态环境的时空分布格局造成了显著影响,然而在作为生态工程重点实施区域的陕西地区,从区域尺度上对陕西省生态恢复的综合效益进行评估总结的研究仍相对有限<sup>[20-23]</sup>。因此,以陕西省为研究区,开展生态恢复综合效益评估工作,将为该地区生态恢复的成果梳理和经验总结提供理论依据,为地区未来生态恢复工作的开展提供意见和建议。

综上所述,本研究以陕西省为研究区,基于空间遥感数据和生态模型估算等理论、方法,尝试从生态系统

结构、质量和服务 3 个方面综合评估区域内 2000—2015 年生态恢复效益,并期望达到以下目的:(1) 基于土地利用、植被覆盖度及生态系统服务综合指数的时空变化分析结果,分别展现 2000—2015 年这近 16 年来陕西省在生态系统结构、质量和服务方面的生态恢复成效;(2) 结合冷、热点分析、气象数据、生态工程实施区域等数据和方法手段,分析研究区生态恢复工程的有效性及其合理性,为未来该区域生态恢复措施的实施提供意见及建议,以达到将生态恢复效果最大化的目的。

## 1 方法及数据

### 1.1 研究区概况

陕西省地处黄河流域和长江流域的中部,土地面积 20.6 万  $\text{km}^2$ ,横跨 3 个气候带,南北气候差异较大(图 1)。陕南属于北亚热带气候,关中及陕北大部属暖温带气候,陕北北部长城沿线属中温带气候<sup>[17]</sup>。全省年平均气温 9—16 $^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 340—1240 mm。陕西省地势南北高、中间低,有高原、山地、平原和盆地等多种地形<sup>[20]</sup>。北山和秦岭把陕西分为三大自然区,从北至南依次为黄土高原区(陕北地区)、关中平原区(关中地区)、秦巴山区(陕南地区)。陕西生物资源丰富,多样性突出,秦岭巴山素有“生物基因库”之称,其生态系统、物种和遗传基因的多样性,在中国乃至东亚地区具有典型性和代表性。

### 1.2 研究方法

本研究选取了近年来有关生态系统结构、质量和服务评价的共计 150 余篇文献进行统计分析,分析结果表明在有关生态系统的结构变化研究中,有近 45% 的文献选取土地利用作为研究的主要指标<sup>[24—25]</sup>。而在评估生态系统的质量方面,有超过 40% 的文献选取植被覆盖度作为核心指标之一<sup>[26—27]</sup>。基于文献调查结果,结合研究特点及实际数据准备情况,本研究分别选取土地利用和植被覆盖度作为衡量研究区生态系统结构和质量的评估指标,并选取生态系统服务综合指数评估研究区主要生态系统服务变化<sup>[28—29]</sup>。

#### 1.2.1 土地利用

本研究分别选取研究区 2000、2005、2010 和 2015 年土地利用数据进行分析,将研究区主要土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和裸地 6 种类型。利用变化贡献率<sup>[30]</sup>以及变化强度指数<sup>[31]</sup>来表征陕西省 2000—2015 年间土地利用的结构变化,同时利用转移矩阵以更好地体现单一土地利用类型转入转出及其年际变化。变化贡献率、变化强度及转移矩阵的计算方法如下:

变化贡献率,指某一土地利用类型发生变化的面积与同一时期内所有发生变化的土地利用类型总面积的百分比,公式如下:

$$A_i = \frac{|U_{bi} - U_{ai}|}{\sum |U_{bi} - U_{ai}|} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $A_i$ 指的是第  $i$  种土地利用类型的变化贡献率, $U_{bi}$ 指的是  $b$  时段第  $i$  种土地利用类型的面积, $U_{ai}$ 是指  $a$  时段第  $i$  种土地利用类型的面积( $b > a$ )。

变化强度,是指某一土地利用类型发生变动的面积与该研究区域总面积的百分比,公式如下:

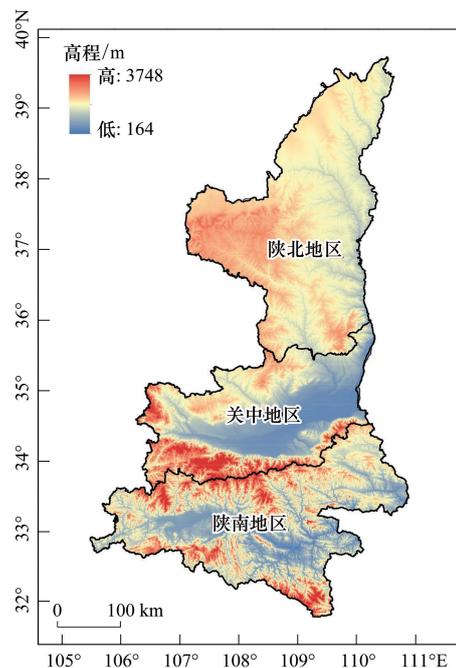


图 1 陕西省示意图

Fig.1 The location of Shaanxi

$$T_i = \frac{|U_{bi} - U_{ai}|}{B} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $T_i$  表示的是第  $i$  种土地利用类型的变化强度,  $B$  为研究区土地利用类型总面积。

转移矩阵, 在某一研究区的一定时间段内, 各土地利用类型面积存在着相互之间的转移, 当一种土地利用类型的部分转成其他土地利用类型时, 转成部分的土地面积即为该土地利用类型的转出部分, 同理, 其他土地利用类型转成该土地利用类型时, 转成部分的土地面积即为该土地利用类型的转入部分<sup>[32]</sup> (图 2)。

此外, 为全面了解土地利用对各地类增加面积的贡献, 通过如下公式计算获得:

$$D_{ij} = \frac{B_{ij}}{\sum B_{ij}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $D_{ij}$  表示土地利用类型  $i$  转成土地利用类型  $j$  的面积占  $j$  地类增加面积的百分比,  $B_{ij}$  表示土地利用类型  $i$  转成土地利用类型  $j$  的面积。

### 1.2.2 植被覆盖度

本研究基于 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 归一化植被指数) 构建像元二分模型对植被覆盖进行反演<sup>[33-37]</sup>。计算公式如下:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (4)$$

$$f_{ci} = \frac{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \quad (5)$$

式中, NIR 指的是近红外波段的反射率值,  $R$  指的是红外波段的反射率值。  $f_{ci}$  指的是像元  $i$  的植被覆盖度,  $\text{NDVI}_s$  指的是裸土或者没有植被覆盖区域 NDVI 数值,  $\text{NDVI}_v$  指的是完全被植被覆盖区域 NDVI 数值。

### 1.2.3 生态系统服务

本研究选取碳固定、水土保持、水源涵养和栖息地提供四种服务进行评估, 并根据生态系统服务综合指数法对四种服务的总值进行了估算<sup>[38-39]</sup>。生态系统服务综合指数法利用 NPP (Net Primary Productivity, 植被净初级生产力) 与环境变量因子建立的因果关系构建模型并进行空间制图, 该方法已有效应用于不同尺度的生态系统服务变化研究<sup>[40-42]</sup>, 其各服务的空间制图模拟方法如表 1 所示:

表 1 生态系统服务空间制图方法  
Table 1 Mapping of ecosystem services

类型 Type	制图方法 Mapping method	参数 Parameter
植被碳固定 Vegetation carbon fixation	CASA 模型	NPP: 植被净初级生产力因子
土壤保持 Soil conservation	$\text{NPP} \times K \times F_{\text{slo}}$	$K$ : 土壤侵蚀因子; $F_{\text{slo}}$ : 坡度因子;
水源涵养 Water conservation	$\text{NPP} \times F_{\text{sic}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{slo}}$	$F_{\text{pre}}$ : 年降水量因子; $F_{\text{sic}}$ : 土壤入渗能力因子
栖息地提供 Habitat provision	$\text{NPP} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times D$	$F_{\text{tem}}$ : 年均气温因子; $D$ : 地表粗糙度因子
总生态系统服务 Total ecosystem services	以上 4 种服务之和	

其中 NPP 使用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 光能利用率模型进行估算<sup>[43-44]</sup>, 其计算公式如下:

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (6)$$

式中,  $x$  为栅格数据中的具体像元,  $t$  为时间;  $\text{NPP}(x, t)$  为像元  $x$  上的植被在时间  $t$  内的净初级生产力;  $\text{APAR}$

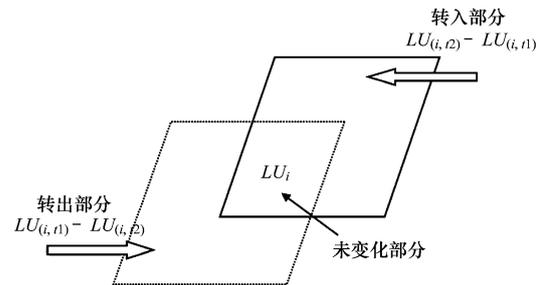


图 2 土地利用转移矩阵示意图

Fig.2 Map of land use transfer matrix  
 $LU_i$  代表  $i$  类土地利用类型,  $b, a$  为时间 ( $b > a$ )

$(x, t)$  是像元  $x$  上的植被在时间  $t$  内吸收的光合有效辐射;  $\varepsilon(x, t)$  是像元  $x$  上的植被在时间  $t$  内的实际光能利用率。

#### 1.2.4 变化趋势及显著性分析

本研究利用 pearson 相关系数公式计算各指标变化趋势,并确定其变化显著性<sup>[45-46]</sup>,具体的计算公式为:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \times \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \times \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}} \quad (7)$$

式中,  $r$  为相关系数;  $i$  为 2000 至 2015 年份;  $x_i$  为时间  $i$  时的指标变量;  $y_i$  为时间  $i$  时的年份顺序, 即 1 至  $n$ ,  $n=16$ 。  $r$  的值域在 -1 到 1 之间, 当  $0 < r < 1$  时, 则其结果呈增加趋势; 当  $-1 < r < 0$  时, 则呈下降趋势。本研究根据相关系数检验规则, 定义  $r > r_{0.05}$  为显著相关。

### 1.3 数据来源

本研究中涉及的土地利用、NDVI 等数据均来自资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 其数据空间分辨率为 1 km。气象数据来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 基于台站气象数据, 在 ArcGIS 软件中进行克里金插值, 得到空间分辨率为 1 km 的温度、降水空间分布数据。研究中涉及的土壤入渗能力、地表粗糙度、坡度数据、土壤侵蚀因子等土壤数据来自于中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>), 为确保研究相关数据在空间尺度上的匹配性, 所有栅格数据均被重采样为 1 km 分辨率。

## 2 结果

### 2.1 土地利用变化

根据陕西省 2000—2015 年际土地利用变化统计结果(表 2), 研究区主要土地利用类型为草地, 耕地以及林地, 其他的土地利用类型占整个研究区的面积比例仅为 4.60% 左右。在近 16 年内, 陕西省耕地面积大幅减小, 其次为草地和裸地面积, 林地和建设用地面积明显增加, 水体也有小幅度的增加。其中面积减少最明显的是耕地, 其面积比例由 2000 年的 34.93% 降低至 2015 年的 33.88%, 其中 2005 年降低至 34.18%, 2010 年降低至 34.09%, 对本研究区的土地利用结构的变化贡献率是 41.44%。面积增加最大的是建设用地, 由 2000 年的 1.49% 增加到 2015 年的 2.14%, 其中 2005 年增加至 1.65%, 2010 年增加至 1.69%, 对本研究区的土地利用结构变化贡献率是 25.78%。林地的面积占比由 22.62% 增加到了 23.18%, 对本研究区的土地利用结构的变化贡献率为 22.32%。

表 2 陕西省 2000—2015 年土地利用年际变化表

Table 2 Interannual Land Use Changes in Shaanxi Province from 2000 to 2015

类型 Type	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2000—2015 年		
	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	变化量/km <sup>2</sup> Variation	变化贡献率/% Contribution rate	变化强度 Intensity						
耕地 Farmland	71867	34.93	70318	34.18	70136	34.09	69699	33.88	-2168	41.44	1.05
林地 Forest	46529	22.62	47585	23.13	47791	23.23	47697	23.18	1168	22.32	0.57
草地 Grassland	77554	37.7	77696	37.77	77694	37.77	77286	37.57	-268	5.12	0.13
水体 Waterbody	1867	0.91	1930	0.94	1907	0.93	1966	0.96	99	1.89	0.05
建设用地 Construction land	3063	1.49	3387	1.65	3476	1.69	4412	2.14	1349	25.78	0.66
裸地 Bare land	4846	2.36	4810	2.34	4722	2.30	4666	2.27	-180	3.45	0.09

研究区 2000—2015 年土地利用空间分布结果表明(图 3), 研究区的耕地主要分布在关中及陕北地区。林地的面积在陕南秦岭地区有所扩大, 而陕北地区主要以草地为主。建设用地集中分布在关中地区尤其是西安市及其周围地区, 且面积上有明显的增加, 说明西安及其周边城市的城市化进程不断加快。

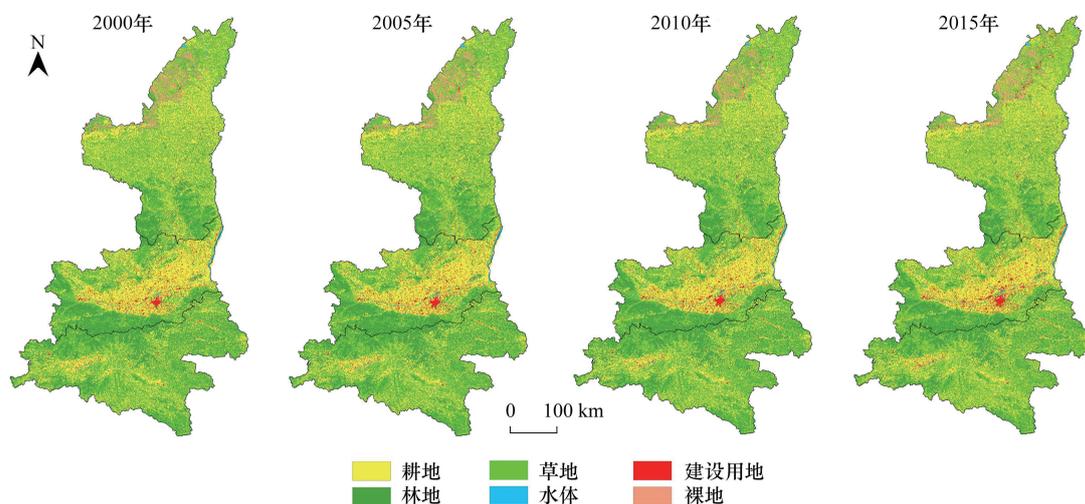


图3 陕西省2000—2015年土地利用空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use in Shaanxi Province in 2000 and 2015

陕西省2000—2015年间各土地利用转移矩阵分析结果如表3所示。其中,在扣除各土地利用类型转出的面积之后,林地、水体和建设用地均呈现出净增加的趋势,其较2000年的净增长比例分别是2.50%、5.30%和44.04%,净增长比率最为显著的是建设用地。建设用地面积增加的主要来源是耕地,其贡献率达到了68.32%。净增长比例最小的土地利用类型为林地,但值得注意的是,林地的增加面积主要来自于耕地和草地,二者对林地的增加面积贡献率分别为56.00%和42.68%。

同时,陕西省主要土地利用类型中,裸地、耕地和草地在2000—2015年间呈现负向的净变化。负向净变化比例最大的为裸地,达到了-3.71%,其主要转出类型为草地、耕地以及建设用地。负向净变化比例第二大的土地利用类型为耕地,其主要转出类型为建设用地,其次是草地和林地。负向净变化最小的为草地,比例仅为-0.35%,其中有相当一部分草地转化为了林地。

表3 陕西省2000—2015年土地利用转移矩阵

Table 3 Land Use Transfer Matrix between 2000 and 2015 in Shaanxi Province

2015	转移面积/km <sup>2</sup> Transfer area	2000												净变化% Net change rate
		耕地 Farmland	增加面积 贡献率/% Contribution rate	林地 Forest	增加面积 贡献率/% Contribution rate	草地 Grassland	增加面积 贡献率/% Contribution rate	水体 Waterbody	增加面积 贡献率/% Contribution rate	建设用地 Construction land	增加面积 贡献率/% Contribution rate	裸地 Bare land	增加面积 贡献率/% Contribution rate	
耕地	69191	—	50	10.46	255	47.07	85	17.78	2	0.42	116	24.27	-3.05	
林地	761	56.00	46332	—	580	42.68	8	0.59	0	0	10	0.73	2.50	
草地	773	78.40	54	5.48	76300	—	28	2.84	3	0.30	128	12.98	-0.35	
水体	175	75.43	7	3.02	41	17.67	1734	—	0	0	9	3.88	5.30	
建设用地	925	68.32	47	3.47	282	20.83	11	0.81	3058	—	89	6.57	44.04	
裸地	36	20.93	39	22.67	96	55.81	1	0.59	0	0	4494	—	-3.71	

## 2.2 植被覆盖变化

对陕西省2000—2015年平均植被覆盖度进行了统计分析,其结果如图4所示,年平均植被覆盖度总体上在波动中呈现增加趋势,且在2003—2013年间上升趋势相对较为平稳。平均植被覆盖度在2000年为最低值,为76.23%。在2013年达到最大值,接近89.08%。年均植被覆盖总体以每年0.73%的速率增加,但在2013—2015年却呈下降趋势。

对陕西省 2000—2015 年平均植被覆盖度的空间分析结果表明(图 5),近 16 年来陕西省平均植被覆盖度极小值为近似为 10%,植被覆盖的低值地区主要集中在榆林市、延安市等陕北黄土高原地区。随着向南的不断推进,平均植被覆盖度逐步增大,在关中地区以及陕南地区植被覆盖度相对较高。总体而言,陕西省的平均植被覆盖度呈现出由南向北递减的趋势。

对研究区近 16 年来植被覆盖度的空间变化趋势分析表明(图 5),陕西省植被覆盖呈现增加的区域占全省面积比例为 87.95%,其中显著增加区域面积比例为 60.29% ( $P < 0.05$ )。显著增加的区域主要分布在陕北地带,该区域以西安市为界,西安市以北地区植被覆盖普遍显著增加,其中榆林市以北、延安市以南的防风治沙区和退耕还林区最为明显。相对的,陕西省植被覆盖减少区域面积占比为 12.05%,其中显著减少区域为 1.38% ( $P < 0.05$ )。这些区域主要集中在关中平原,尤其是西安市周边地区,此外,陕南部分地区植被覆盖度也有一定下降趋势。

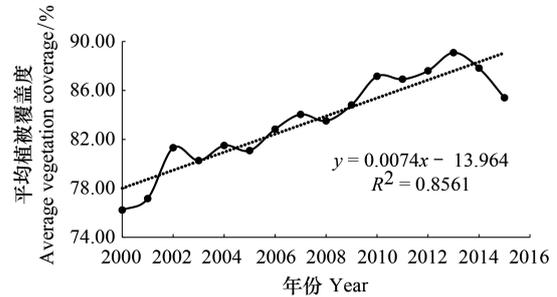


图 4 陕西省 2000—2015 年平均植被覆盖度变化

Fig.4 Changes of Average Vegetation Coverage in Shaanxi Province from 2000 to 2015

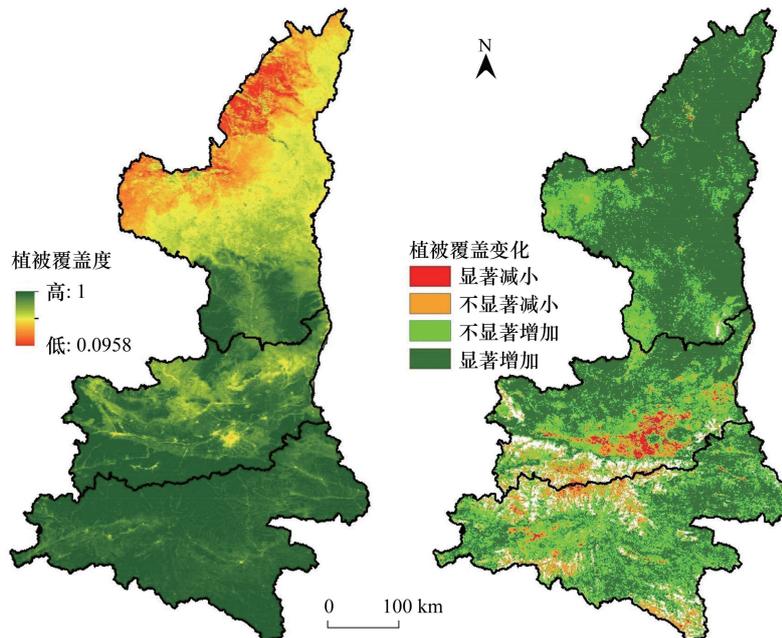


图 5 陕西省 2000—2015 年平均植被覆盖度及植被覆盖变化趋势

Fig.5 Average vegetation cover and changes of vegetation cover in Shaanxi Province from 2000 to 2015

### 2.3 生态系统服务

本研究对陕西省典型生态系统服务总值进行了估算,其最终值为无量纲数值,能够有效代表研究区生态系统服务的变化趋势。年均生态系统服务总值变化趋势如图 6 所示,研究区 2000—2015 年间生态系统服务在波动中整体持续改善,变化速率为 1730/a。其中 2001—2003 年间服务总量波动较大,分别于 2001 年达到 16 年间最低值,于 2003 年达到 16 年间最高值。2004—2010 年间研究区服务总量相对稳定增长,2011—2015 年则在持续波动中略有下降。

本研究对 2000—2015 年间陕西省碳固定、水土保持、水源涵养和栖息地提供四种生态系统服务的平均空间分布进行了制图模拟,结果如图 7 所示。从空间分布来说,各服务的分布基本都呈现由北向南逐渐增加的

态势。由于陕南地区靠近秦岭,土地利用类型以林地为主,因此该区域固碳、水土保持和水源涵养能力较强。同时由于该区域地形复杂,人类活动相对较弱,特别是陕南的山地区域内,拥有较强的栖息地提供服务能力。反之,陕北地区土地利用类型以耕地和草地为主,地势相对平坦,人类活动频繁,因此其相关服务能力相对较弱。而陕西省关中地区,由于拥有一定规模的城市群,因此能够在生态系统服务的均值空间分布中看出明显的低值凹陷区。

对近 16 年生态系统服务总值进行时空变化分析(图 7),研究结果表明陕西省生态系统服务总值整体呈增加趋势,增加态势区域面积占了研究区总面积的 72.72%,其中显著增加区域占 32.30% ( $P < 0.05$ )。与生

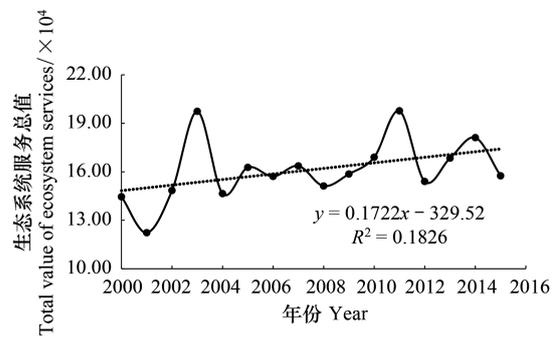


图 6 陕西省 2000—2015 年年均生态系统服务总值  
Fig.6 Average annual total ecosystem services in Shaanxi Province from 2000 to 2015

图中生态系统服务总值为无量纲数值

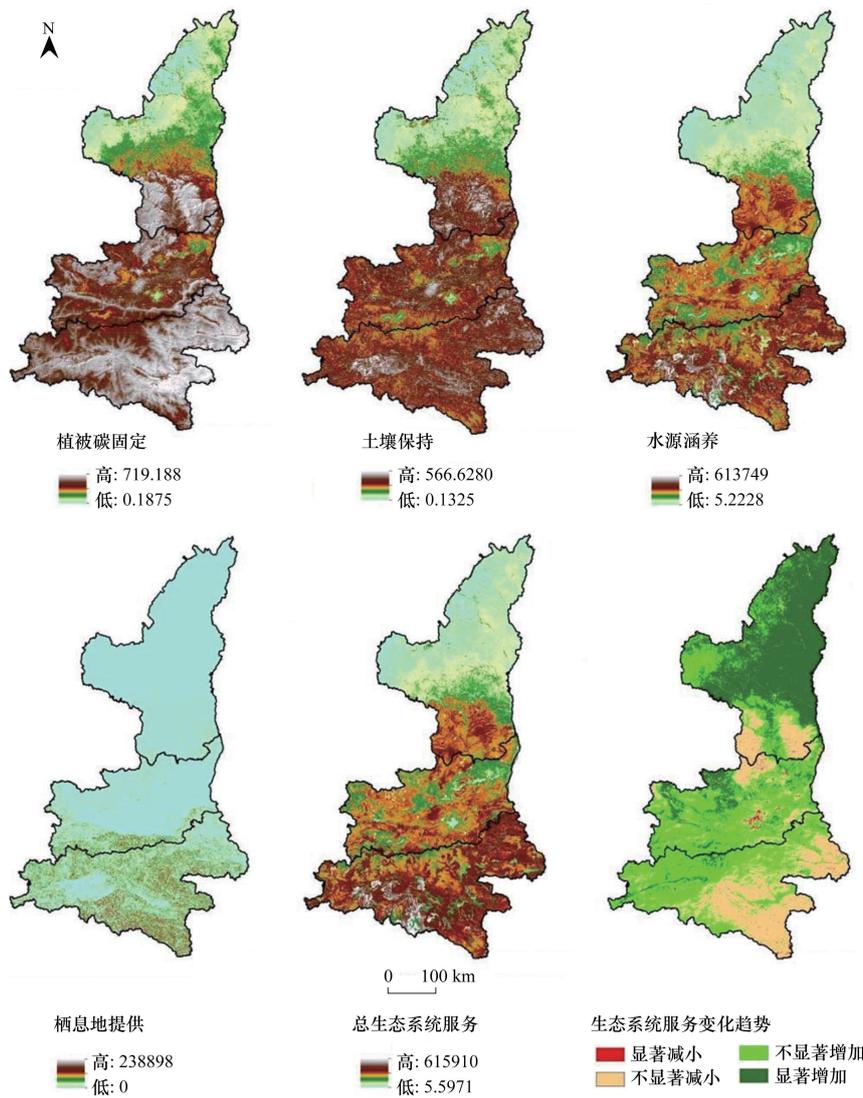


图 7 陕西省 2000—2015 年生态系统服务空间分布及变化趋势

Fig.7 Spatial distribution and trends of ecosystem services in Shaanxi Province from 2000 to 2015

图中生态系统服务模拟值为无量纲数值

态系统服务均值分布结果不同的是,服务总值呈显著上升趋势的地区主要集中在陕北地带。生态系统服务总值呈减少趋势的区域仅占全省面积的 27.28%,主要集中在关中地区及陕南地区。其中呈现显著减少的区域面积比例仅为 0.59% ( $P < 0.05$ ),主要集中在关中地区的西安市及其周边。

### 3 讨论

#### 3.1 生态恢复综合效益

在生态恢复的过程中,来自于自然和人为的因素都将对生态系统的结构组成和整体质量产生影响,这些影响将改变生态系统的演变进程,并最终体现为生态系统所能提供的不同服务产生此消彼长的变化<sup>[47]</sup>。这一客观进程决定了生态恢复综合效益评估是一个多属性、多准则的问题,本研究尝试以生态系统的结构、质量和服务为框架,选取指标对陕西省生态恢复综合效益进行了评估。

评估结果表明,研究区生态系统结构、质量和服务在这近 16 年间,总体均呈现逐步改善和增强的趋势。其中,以土地利用为代表的生态系统结构呈现林地不断增加,耕地持续减少的变化结果(表 3 和图 4),林地增加来源大部分来自于耕地和草地等的转化,这与研究区域内持续推行的退耕还林及天然林保护等生态恢复措施效果相吻合。结构的转变带来了生态系统质量的变化,研究区 60.29% 的区域植被覆盖呈显著增加趋势(图 5)。而生态系统服务的变化同样显著,研究区 32.30% 的区域生态系统服务总量显著增加(图 7),充分说明了近年来陕西省各项生态恢复措施成效斐然。

为了更好的阐明研究区生态系统结构、质量和服务的空间变化特点,本研究选取生态系统质量指标(植被覆盖)和生态系统服务总量同时显著增加及减少的地区进行空间叠加分析,分别构成生态恢复热、冷点地区(图 8)<sup>[48]</sup>。如图所示,陕西省生态恢复热点地区主要集中在陕北地区,对该区域内生态系统结构指标进行分析发现,热点地区内 2000—2015 年土地利用发生变化最大的转化类型分别为耕地转化为林地(565 km<sup>2</sup>),草地转化为林地(419 km<sup>2</sup>),耕地转化为草地(345 km<sup>2</sup>)(图 9)。同时以县为单位对陕西省主要生态工程(包

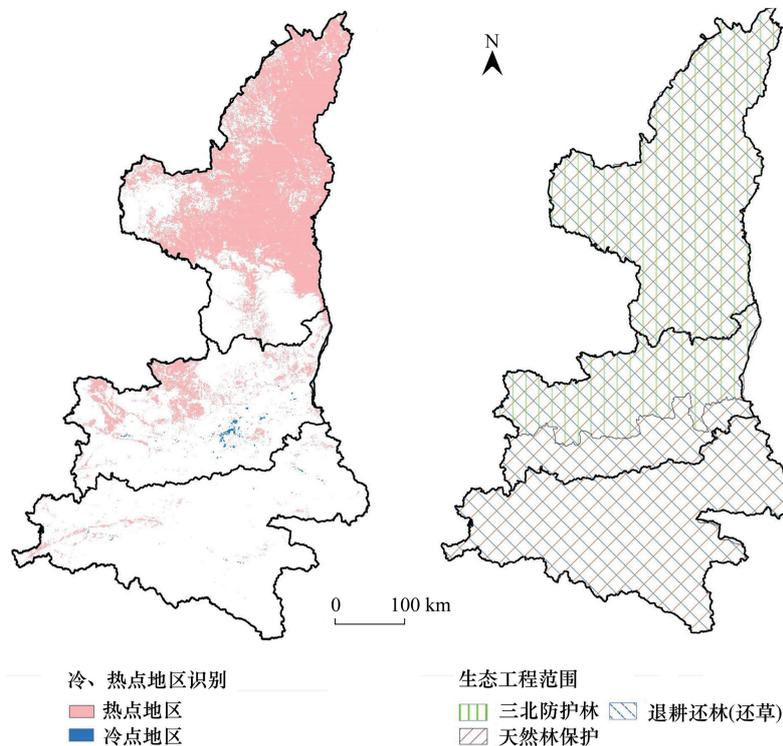


图 8 冷、热点地区识别及典型生态工程实施范围

Fig.8 Spatial distribution of cold and hot spots and typical ecological programs

括退耕还林、三北防护林和天然林保护工程)实施区域进行统计,可以看出三类大型生态工程重点覆盖区域正是陕北地区(图 8)。生态系统结构、质量及服务的变化均证实了生态恢复措施在该区域的有效性。

### 3.2 现存生态问题

尽管研究区内生态环境不断恢复,但现存的一些生态问题仍然值得关注。土地利用变化过程中建设用地大幅增加,植被覆盖及生态系统服务总量在城市群区域内显著下降,各项分析结果均表明以城市扩张为代表的活动对区域内生态系统结构、质量和服务产生了明显的负向影响。例如,生态恢复冷点地区就主要集中在关中地区的城市群区域,排名前三的冷点地区土地利用类型转化情况则分别为耕地转化至建设用地,林地转化至建设用地和草地转化建设用地(图 8 和图 9)。

与此同时,生态系统结构、质量和服务的时空变化不仅与人类活动息息相关,同时也在一定程度受到自然因素(温度、降水等)的影响。本研究结果表明,生态系统服务总值除了在城市分布区域显著下降外,同时在关中及陕南地区呈现出了非显著性的下降趋势(图 7)。

基于气象数据,结合陕西省近 16 年来温度、降水的变化趋势(图 10),可以看出在关中地区,温度呈现增加趋势,降水则呈现下降趋势,而陕南的生态系统服务下降区域与陕南降水呈减少趋势的区域范围基本吻合。暖干化的气象因素对处于干旱半干旱区的生态系统健康发展将带来较大的制约影响<sup>[49-50]</sup>。因此,在未来的生态恢复资源投入及实际操作中,应注意相关区域生态工程与自然因素的相互配合,因地制宜地选择植被恢复物种及种植措施,以保证生态恢复的有效性和持续性<sup>[51-52]</sup>。

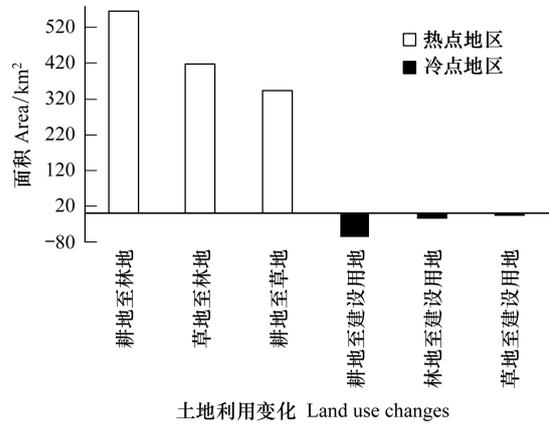


图 9 冷、热点地区土地利用变化统计(前 3 位)

Fig.9 Land use change statistics in cold and hot spots areas (top 3)

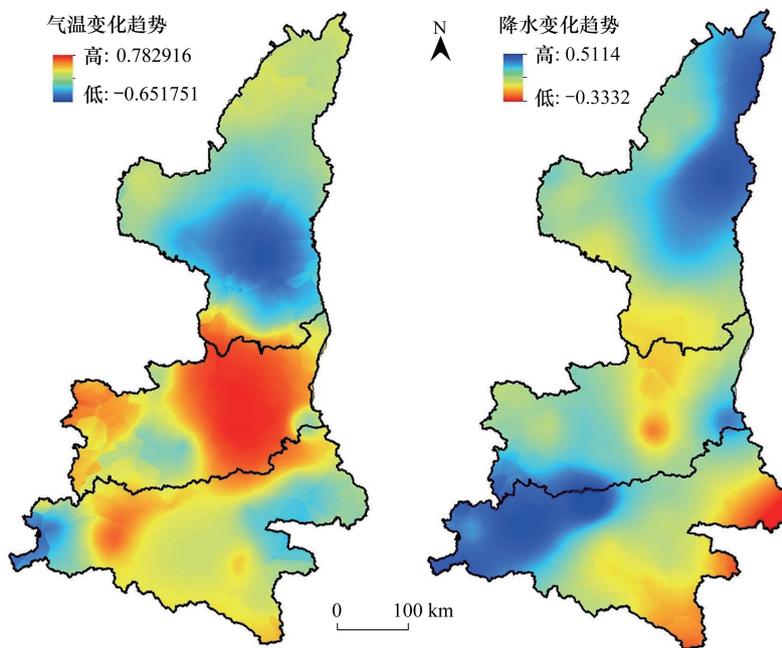


图 10 陕西省 2000—2015 年温度降水变化趋势

Fig.10 Changing trends of Temperature and Precipitation in Shaanxi Province from 2000 to 2015

## 4 结论

1) 近 16 年来陕西省生态系统结构、质量和服务总体均呈现逐步改善和增强的趋势。同时,研究区城市扩张明显,并由此引发了城市区域植被覆盖下降、生态系统服务总值降低等负向生态影响。在未来的区域发展建设过程中,应注重改善城市建设范围中的生态环境质量,合理规划城市建设用地。

2) 陕南地区植被覆盖及生态系统服务总值中均值较高,特别是秦岭地区,生态环境较为优越。陕北地区植被覆盖及生态系统服务均呈现显著增加趋势,未来区域范围内生态环境有着较大的发展潜力。坚持现有的生态恢复策略,维持区域内目前生态系统结构、质量和服务向好发展的势头,将对未来区域的建设发展提供有效助力。

3) 尽管不同生态工程已经覆盖了陕西省全境,但受气象因素中水分限制的影响,生态系统服务总值在陕西省中部及东南部地区仍然呈现出了非显著性的下降趋势。在未来相关区域的生态恢复过程中,应注意干旱环境对生态恢复效果的影响,因地制宜地选取生态工程措施,将生态恢复的成效最大化。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘亚东. 探析甘肃省黄河流域生态环境保护问题. 甘肃科技纵横, 2020, 49(9): 23-25.
- [ 2 ] 王根绪, 程国栋, 徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题. 自然资源学报, 1999, 14(2): 109-116.
- [ 3 ] 董锁成, 周长进, 王海英. “三江源”地区主要生态环境问题与对策. 自然资源学报, 2002, 17(6): 713-720.
- [ 4 ] 王壮壮, 王浩, 冯晓明, 王晓峰, 张立伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系. 生态学报, 2019, 39(20): 7356-7366.
- [ 5 ] 张力小, 宋豫秦. 三北防护林体系工程政策有效性评析. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(4): 594-600.
- [ 6 ] 徐晋涛, 陶然, 徐志刚. 退耕还林: 成本有效性、结构调整效应与经济可持续性——基于西部三省农户调查的实证分析. 经济学(季刊), 2004, 4(1): 139-162.
- [ 7 ] 胡会峰, 刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算. 生态学报, 2006, 26(1): 291-296.
- [ 8 ] 吴丹丹, 蔡运龙. 中国生态恢复效果评价研究综述. 地理科学进展, 2009, 28(4): 622-628.
- [ 9 ] 吴后建, 王学雷. 中国湿地生态恢复效果评价研究进展. 湿地科学, 2006, 4(4): 304-310.
- [ 10 ] 郭锐, 梁芸, 王小平. 黑河调水对下游生态环境恢复效果的卫星遥感监测分析. 中国沙漠, 2004, 24(6): 740-744.
- [ 11 ] 黄明芝, 蓝家程, 文柳茜, 黄启艳, 黄兴顺, 田燕玲. 喀斯特石漠化地区土壤质量对生态修复的响应. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 148-156.
- [ 12 ] 慕宗杰, 刘果厚, 桂荣, 苏海林, 李红颖, 刘利红, 曹瑞, 姜莹, 王亚东. 浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 46-56.
- [ 13 ] 赵瑾, 王得祥, 杨航, 李文根, 罗琦, 张晓梅. 延安市退耕还林及植被恢复工程生态服务功能评价. 陕西林业科技, 2019, 47(1): 38-44.
- [ 14 ] Wang H, Liu G H, Li Z S, Wang P T, Wang Z Z. Comparative assessment of vegetation dynamics under the influence of climate change and human activities in five ecologically vulnerable regions of China from 2000 to 2015. *Forests*, 2019, 10(4): 317.
- [ 15 ] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [ 16 ] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 曹巍. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.
- [ 17 ] 范建忠, 李登科, 董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测. 农业工程学报, 2012, 28(7): 228-234.
- [ 18 ] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响——以陕西省安塞县为例. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1878.
- [ 19 ] 刘娜娜. 加强陕西天然林保护的策略. 北京农业, 2015, (6): 53-53.
- [ 20 ] 赵永华, 张玲玲, 王晓峰. 陕西省生态系统服务价值评估及时空差异. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2662-2672.
- [ 21 ] 潘宜, 解建仓, 朱记伟, 韩霁昌. 陕西省卤泊滩盐碱地和谐生态系统评价体系. 水利学报, 2009, 40(4): 492-497.
- [ 22 ] Zhang D J, Jia Q Q, Xu X, Yao S B, Chen H B, Hou X H. Contribution of ecological policies to vegetation restoration: a case study from Wuqi County in Shaanxi Province, China. *Land Use Policy*, 2018, 73: 400-411.
- [ 23 ] Cao S X, Chen L, Yu X X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions: a case study in northern Shaanxi Province. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(3): 536-543.

- [24] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [25] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 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. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [26] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [27] 王浩, 李文龙, 杜国祯, 朱晓丽. 基于 3S 技术的甘南草地覆盖度动态变化研究. 草业学报, 2012, 21(3): 26-37.
- [28] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, 23(6): 5-9.
- [29] 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): 607-613.
- [30] 吕春艳, 王静, 何挺, 宇振荣. 土地资源优化配置模型研究现状及发展趋势. 水土保持通报, 2006, 26(2): 21-26.
- [31] Wang X H, Yu S, Huang G H. Land allocation based on integrated GIS-optimization modeling at a watershed level. Landscape and Urban Planning, 2004, 66(2): 61-74.
- [32] Ziegler E H Jr. 城市分区与土地规划: 打造美国的大型都市. 周雪, 译. 国外城市规划, 2005, 20(3): 60-63.
- [33] 于裴洋, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣. 中国东部暖温带刺槐物候模型比较. 中国农业气象, 2020, 41(10): 609-621.
- [34] 龚围, 李丽, 柳钦火, 辛晓洲, 彭志晴, 邬明权, 牛铮, 田海峰. “一带一路”区域水电站工程生态环境影响遥感监测. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1424-1436.
- [35] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [36] 甘春英, 王兮之, 李保生, 梁钊雄, 李志文, 温小浩. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. 地理科学, 2011, 31(08): 1019-1024.
- [37] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 陈鹏, 谭森. 基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1790-1799.
- [38] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [39] 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 董治宝, 李英杰, 曾源, 吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. 地理学报, 2016, 71(5): 768-780.
- [40] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. PLoS One, 2017, 7(2): e31782.
- [41] Zhang L W, Lü Y H, Fu B J, Dong Z B, Zeng Y, Wu B F. Mapping ecosystem services for China's ecoregions with a biophysical surrogate approach. Landscape and Urban Planning, 2017, 161: 22-31.
- [42] Zheng H B, Zhang L W, Wang P T, Li Y J. The NPP-based composite indicator for assessing the variations of water provision services at the national scale. Water, 2019, 11(8): 1628.
- [43] 梁珂. 基于 CASA 模型的陕西省陆地植被 NPP 估算研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [44] 冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 39-43.
- [45] 简敏菲, 刘琪璟, 朱笃, 游海. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析. 植物生态学报, 2009, 33(4): 672-680.
- [46] 杨晓东, 傅德平, 袁月, 杨军, 吕光辉. 新疆艾比湖湿地自然保护区主要植物的种间关系. 干旱区研究, 2010, 27(2): 249-256.
- [47] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估. 生态学报, 2016, 36(20): 6337-6344.
- [48] Li Y J, Zhang L W, Yan J P, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 681-696.
- [49] Wang H, Liu G H, Li Z S, Zhang L W, Wang Z Z. Processes and driving forces for changing vegetation ecosystem services: insights from the Shaanxi Province of China. Ecological Indicators, 2020, 112: 106105.
- [50] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [51] Cao S X, Chen L, Shankman D, Wang C M, Wang X B, Zhang H. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. Earth-Science Reviews, 2010, 104(4): 240-245.
- [52] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, Zhang C H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China. Ecological Engineering, 2015, 81: 451-461.