

DOI: 10.5846/stxb201905311153

宋伟,韩贇,刘琳.山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究——以陕西省为例.生态学报,2019,39(23):8975-8989.

Song W, Han Z, Liu L. Systematic diagnosis of ecological problems and comprehensive zoning of ecological conservation and restoration for an integrated ecosystem of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8975-8989.

山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究

——以陕西省为例

宋 伟^{1,*}, 韩 贇^{1,2}, 刘 琳³

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 中国地质大学(北京), 信息工程学院, 北京 100083

3 河北地质大学, 石家庄 050031

摘要:山水林田湖草生态保护修复分区的划定,是科学合理的分区域提出生态保护修复方案的基础。但是,目前生态保护修复分区的划定,对于生态系统问题诊断的综合性考虑不足,未能很好的体现山水林田湖草生命共同体的理念。因此,选取了8个指标综合考察了陕西省的山水林田湖草生态系统问题,并以小流域为基本单元,划定了陕西省山水林田湖草生态保护修复综合分区。研究表明:(1)2015年陕西省生态修复指数平均值为0.39(该值越小表明山水林田湖草人的综合问题越严重),各流域生态修复指数在0.23—0.60之间。总体来看,陕西省生态修复指数的空间分异较为明显,呈现自南向北逐渐递减的格局。(2)划分了8个生态保护修复分区,包括陕南秦岭东部地区、关中平原中部的城镇地区、汉江河谷盆地、陕北黄土高原中南部地区、陕南秦岭山区、陕北黄土高原北部地区、关中平原地区和陕南大巴山地区。在生态系统问题综合诊断方面,水土流失、植被退化、降水资源不足是陕北黄土高原地区主要生态问题;南部秦巴山区的生态系统则易受到极端降水和土壤侵蚀的影响;关中平原主要存在林草植被退化、矿产资源开采强度大和水土流失等生态问题。

关键词:山水林田湖草;生态问题系统诊断;生态保护与修复分区;陕西省

Systematic diagnosis of ecological problems and comprehensive zoning of ecological conservation and restoration for an integrated ecosystem of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Shaanxi Province

SONG Wei^{1,*}, HAN Ze^{1,2}, LIU Lin³

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 China University of Geosciences (Beijing), Department of Information Engineering, Beijing 100083, China

3 Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Delineation of the ecological protection and restoration zones from a perspective of an integrated ecosystem (including mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands) is the basis for bringing forward a scientific and rationally proposal to protect and restore ecosystems. However, the current delineation is relatively insufficient for the comprehensive consideration of ecological problems, and it does not reflect the concept that mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-

基金项目:国家自然科学基金项目(41671177);中国标准化研究院项目(标准起草专家数据库专题研究);地球观测与时空信息科学国家测绘地理信息局重点实验室项目(201807)

收稿日期:2019-05-31; 修订日期:2019-09-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songw@igsrr.ac.cn

grasslands are a shared community. In this paper, taking Shaanxi Province as a study region, we selected 8 indicators to systematically diagnose its ecological problems. On this basis, we delineated the ecological protection and restoration zones at small-watershed scale. The results showed that: (1) the average value of ecological restoration index (ERI) of Shaanxi Province in 2015 was 0.39 (the smaller the value was, the more serious ecological issues that needed to be remedied), and the ERIs of different small watersheds ranged from 0.23 to 0.60. In general, the spatial heterogeneity of ERI in Shaanxi Province was obvious, and it tended to decrease from south to north. (2) There were 8 ecological restoration zones, including the eastern part of the Qinling Mountains in southern Shaanxi, the urban areas in the central of the Guanzhong Plain, the Hanjiang River Valley Basin, the central and southern parts of the Loess Plateau in northern Shaanxi, the Qinling Mountains in the southern Shaanxi, the northern part of the Loess Plateau in northern Shaanxi, Guanzhong Plain area, and Daba Mountain area in southern Shaanxi. Soil erosion, vegetation degradation, and insufficient water resources were the main ecological problems in the Loess Plateau, while the ecological environment in Qinba Mountains area was susceptible to extreme precipitation and soil erosion. For the Guanzhong Plain, ecological problems were vegetation degradation, intensive exploitation of mineral resources, and soil erosion.

Key Words: mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands; ecological problem diagnosis; ecological protection and restoration zoning; Shaanxi Province

多年来对自然资源的过度开发,产生了诸多生态系统退化问题^[1-2],保护和修复生态系统迫在眉睫^[3]。党的十九大报告中提出了“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念^[4-5],科学界定了人与自然的内在联系和内生关系^[2,6-7]。生命共同体理念得到了财政部、国土资源部、环境保护部等各个部委的高度重视,并下发了一系列文件对生态保护修复工作提出了明确要求^[6]。为实现山水林田湖草生态保护修复工作科学落地,亟需对“生命共同体”生态保护修复基础理论进行探讨,并给出实践路径。

目前,我国已组织实施了三批山水林田湖草生态保护修复试点工程。总的来说,目前实施的山水林田湖草生态保护修复工程主要以矿山环境治理恢复^[8]、生物多样性保护、土地整治和土壤污染修复^[9-10]、流域水环境保护治理^[11-12]、区域生态系统综合治理修复^[13]等为主要内容。实施山水林田湖草生态保护修复工程,其核心理论基础是生态系统综合管理理论^[14-15],即运用系统工程思想和景观生态学理论解决资源环境生态问题^[2,16-17]。因此,山水林田湖草生态保护修复分区需打破行政区划、部门管理、行业管理和生态要素界限,统筹考虑各要素保护修复需求,健全生态环境和自然资源管理体制机制,推进生态系统整体保护、综合治理和系统修复^[18]。

山水林田湖草生态保护修复工程的具体实施方案之中,一般是先划定生态保护修复分区,然后根据各分区的特点和主要问题,提出“一区一策”实施方案^[19]。可以说,生态保护修复分区的划定,是制定生态保护修复实施方案的一项重要基础性工作^[20]。但是,目前在不同试点区划定生态系统保护修复分区的过程中,更多的依赖于修复方案制定者对区域的熟悉程度,修复分区工作还缺乏统一的理论和方法指导。山水林田湖草生态系统作为一个生命共同体,各要素彼此相互依存,相互影响^[21-22]。对于生态保护修复分区的划定,也要求能够将生态系统作为共同体综合诊断^[23],然后选择生态系统问题在空间上分布相对聚集,且各生态系统问题相互关联的区域开展。但是,目前在山水林田湖草生态保护修复分区划定的过程中,多是对于单一生态系统问题的诊断与分区,综合的山水林田湖草生态问题的诊断方法相对不足,划定的一些生态保护修复分区也往往很难体现山水林田湖草生命共同体的理念。

因此,本文以陕西省为例,提出了山水林田湖草生态问题的综合诊断方法,以及基于生态系统问题差异性的保护修复综合分区划定方法,以期为山水林田湖草保护修复项目的实施提供技术支持。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

陕西省位于中国内陆腹地(图 1),地跨 $105^{\circ}29'$ — $111^{\circ}15'E$, $31^{\circ}42'$ — $39^{\circ}35'N$,地域狭长。以北山和秦岭为界,陕西省被划分为北部黄土高原区(陕北)、中部关中平原区(关中)和南部秦巴山区(陕南)三大自然区。陕西省地势南北高,中间低,海拔在 189—3603 m 之间。陕西省横跨 3 个气候带,南北气候差异较大;陕南属北亚热带气候,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。陕西省下辖 10 个设区市,辖区土地面积达 20.56 万 km^2 ,常住人口共 3835.44 万人。

1.2 指标体系构建与数据获取方法

基于山水林田湖草系统原理,结合陕西省主要生态问题和经济状况,如水土流失、矿山开采、水资源短缺、降水不平衡、林地植被稀疏、草地退化和农田质量低等,选取 8 个生态问题诊断指标构建指标体系(表 1)。

各个指标中,土壤保持量的计算利用了通用土壤侵蚀方程。其具体计算过程为:首先利用通用土壤侵蚀方程计算潜在土壤侵蚀量;然后,计算在植被覆盖与工程措施情形下的实际土壤侵蚀;最后,通过计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值来测算实际的土壤保持量^[24-25]。

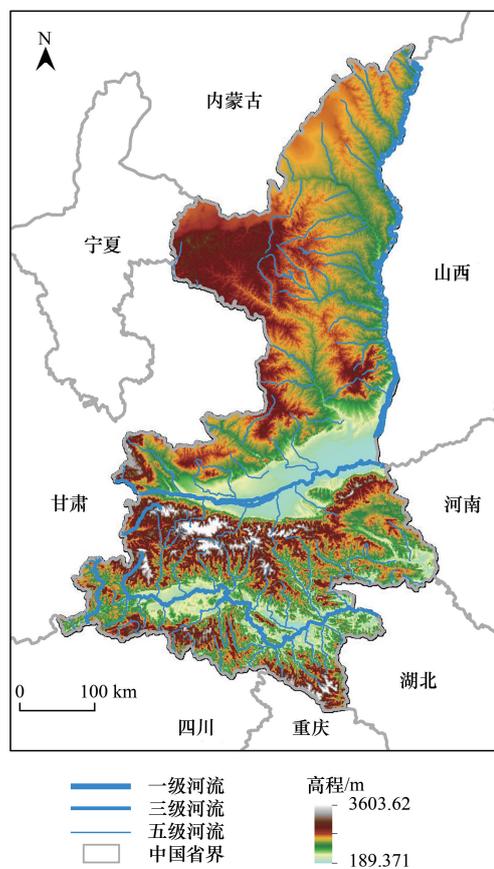


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of study region

表 1 陕西省生态问题诊断指标体系

Table 1 Diagnostic indicators of ecological problems in Shaanxi Province

类型 Types	生态问题 Ecological problems	指标名称 Name of indicators	指标方向 Direction of indicators	数据来源 Data sources
山 Mountains	水土流失	土壤保持量	+	1. 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 2. 世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1) (HWSD) 中的土壤有机质含量和土壤质地数据
	矿山开采	矿山分布密度	-	
水 Rivers	极端降水	暴雨天数	-	中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)
	降水分布不平衡	年降水量	+	
林 Forests	植被稀疏 林分质量差	林地植被年际变化率	+	1. 2001—2015 年空间分辨率为 1 km 的 MODIS 月合成植被指数产品 (MOD13A3) 中的植被指数 (NDVI) 2. 2015 年林地分布数据
田 Farmlands	农田质量	耕地等级	-	1:100 万土地资源图
草 Grasslands	草地退化	草地植被年际变化率	+	1. 2001—2015 年空间分辨率为 1 km 的 MODIS 月合成植被指数产品 (MOD13A3) 中的植被指数 (NDVI) 2. 2015 年草地分布数据
经济状况 Economic state	贫困状况	GDP	+	1. 2013 年 DMSP-OLS 稳定夜间灯光数据,空间分辨率为 1 km,像元灰度值 (DN) 范围为 0—63 2. 2013 年空间分辨率为 1 km 的 MODIS 月合成植被指数产品 (MOD13A3) 中的增强型植被指数 (EVI)

由于矿山分布的信息很难获取,因此我们编写了一个矿山信息爬取工具,抓取了陕西省矿山的分布情况。矿山信息爬取主要依托高德地图应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)工具来进行二次开发,利用兴趣点(Point of Interest, POI)搜索、地理位置反查询等相关手段获取经纬度坐标。高德地图 API 是一套由 JavaScript 语言编写的应用程序接口,它提供了一系列供 WEB 程序调用的地图服务控件。本次研究使用 Python 编程爬虫程序访问高德 WEB 服务,搜索和“矿山”有关的地名点,并进行数据清洗。通过爬取工具,能够获得陕西省矿山的地理位置,然后再通过矿山分布计算陕西省矿山分布密度,参与分区计算。

陕西省降水和极端降水数据,主要是通过对于中国地面气候资料日值数据集相关数据的再计算获得。我国在研究极端降水事件时经常使用依据日降水量大小分成不同的降水级别。如在我国北方日降水量 < 10 mm/d 的称为小雨,在 10—25 mm/d 之间的为中雨,25—50 mm/d 之间的为大雨,而 ≥ 50 mm/d 的是极端降水。本文通过在中国地面气候资料日值数据集筛选日降水大于 50 mm 的日数作为极端降水指数,并通过插值获得空间分布。

林草地植被的变化状况评估基于 2001—2015 年 MODIS 的 16 天合成的 NDVI 产品(MYD13A2 和 MOD13A2),其空间分辨率为 1000 m。为了获取 2001—2015 年植被 NDVI 时间序列曲线,首先,利用质量控制文件剔除“云污染”等噪音像元;然后,利用 Savitzky-Golay 滤波器重构各像元的 NDVI 时间序列曲线。陕西省林草植被的变化状况用植被 NDVI 的年际变化率来表征,年际变化率采用线性回归分析中的趋势线斜率来计算^[26]。

山水林田湖草生命共同体的理念,涉及的并不仅仅是自然生态系统。实际上,山水林田湖草生态保护修复工作的实施,最终的目的还是要与人的因素结合起来,实现人居环境的改善、人与自然的和谐共处。因此,在山水林田湖草生态保护修复实践过程中,如果能达到自然生态系统与社会经济可持续发展的协调,将能够更好的推进山水林田湖草生态保护修复实施方案的实施。所以,我们选择了区域贫困程度作为表征区域社会经济问题的一种重要指标。为了实现贫困程度的空间化,我们选用了灯光指数将 GDP 进行了空间化。利用夜间灯光指数进行 GDP 空间化的主要过程包括构建夜间灯光饱和模型和获取区域灯光指数两个过程。构建灯光修正指数主要是对夜间灯光影像进行预处理,包括投影、归一化等,提取灯光强度值,并计算归一化的灯光强度值。一般而言,某区域的灯光总量(总强度)或平均灯光(灯光密度)强度可以反映该区域的灯光特征^[27,28]。灯光指数越高,代表相应区域的社会经济水平越发达,反之越贫困。

陕西省土地利用数据使用了中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1970 年、1980 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 7 期土地利用数据,空间分辨率为 1 km。

1.3 陕西省生态修复综合评价

本研究选取的各项生态系统问题诊断指标都是从不同侧面来反映区域生态环境状况。本研究采用线性加权函数法构建区域生态修复指数,并利用空间聚类 and 分组方法,分析陕西省生态系统保护修复的空间差异性。具体步骤如下:

首先,由于各个指标在含义、内容、取值标准等都存在差异,导致其在数据量纲和趋势方向存在差异。因此,在进行后续的分析前,需要进行无量纲化和同趋势化处理。同趋势化将公式如下:

$$\begin{aligned} \text{正向指标: } x'_{ij} &= \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \\ \text{负向指标: } x'_{ij} &= \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \end{aligned} \quad (1)$$

其次,根据各项生态指标所涉及山水林田湖草人修复对象的个数,确定各项生态指标的权重(表 2)。在这里,我们的权重赋值方法没有采取传统的特尔斐法等方法,而是根据山水林田湖草各个指标中涉及生态系统问题的综合程度来确定。即,如果该指标只涉及山水林田湖草中的 1 个生态问题,就赋值为 1,如果涉及 2 个问题就赋值为 2,然后将所有数值加和再进行百分比化,即获得各个指标的权重。该方法的好处是能够更

好的反映各项指标涉及的生态系统问题的综合程度。

表 2 生态修复评价指标权重

Table 2 Weights of different evaluation indicators for ecological problem diagnosis

评价指标 Evaluation indicators	生态修复对象 Ecological restoration objects	指标权重 Indicator weights
土壤保持量 Soil conservation	山、水、林	0.3
矿山分布密度 Mine distribution density	山	0.1
极端降水 Extreme precipitation	水	0.1
年总降雨量 Annual precipitation	水	0.1
林地植被年际变化率 Interannual variability of forests NDVI	林	0.1
草地植被年际变化率 Interannual variability of grassland NDVI	草	0.1
耕地等级 Quality of cropland	田	0.1
地区生产总值 Gross regional product	人	0.1

最后,采用线性加权函数法,基于构建的生态修复指标体系和权重(表 2),测算生态修复指数(ERI)。该指数反映了区域山水林田湖草生态环境的综合状况。ERI 越小,代表区域山水林田湖草的综合生态问题越突出,越有必要开展综合生态保护修复工程,测算公式如下:

$$ERI = \sum_{i=1}^n w_i \times E_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (2)$$

式中, E_i 为第 i 项生态指标的值, w_i 为第 i 项生态指标的权重。

山水林田湖草生态保护修复分区指标的数据均可以细化到 1 km 栅格尺度,分区基本单元也可以使用栅格。但是,考虑到我国目前山水林田湖草生态问题的产生,基本上都会在流域尺度上形成一个比较好的相互关联关系。因此,我们利用陕西省的河流和水系数据,提取了陕西省的 80 个小流域做为评价的基础单元。然后,通过 80 个小流域山水林田湖草生态系统问题的综合诊断,进一步开展分区研究。借鉴现有山水林田湖草试点工程中的分区数量的设置,同时考虑到陕西省的面积大小,通过反复的分区测试,最终将陕西省的生态保护修复分区划分为 8 个。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

总体上,陕西省耕地主要集中分布在关中平原地区(图 2),陕北和陕南地区耕地分布破碎化程度较高;森林主要分布在黄龙山、乔山、关山、秦岭和巴山五大山地;草地分布范围较广,陕北长城沿线以北为温带草原区受水资源限制以草原植被覆盖类型为主;水资源分布主要以秦岭为界,以北属黄河流域,以南属长江流域;关中平原是陕西省建设用地最为集中分布的区域,城镇数量占陕西省总城镇数目的一半左右,大中小城市数量较多,其中全省 4 个大中城市都分布在关中地区;受气候和降水的影响,黄土高原裸土地分布明显。从 1970 到 2015 年,陕西省耕地、林地、草地、水域覆盖面积总量变化不大;建设用地以居民点和城镇为中心扩张明显,总覆盖面积由 1970 年的 2662 km²增加到 2015 年的 4412 km²;裸地面积持续减少,其中黄土高原区的部分裸地转化为草地、耕地和建设用地。

为研究不同高程下的各种土地利用类型的分布规律,以陕西省的平原、丘陵、低山区、中山区和高山区高程范围为依据,将高程划分为 500 m 以下、500—800 m、800—1200 m、1200—1800 m 和 1800 m 以上 5 个等级(图 3)。结果表明,陕西省的耕地、水域和建设用地主要分布在 1200 m 以下的平原、丘陵和低山区,建设用地区在平原地区分布最多。草地和林地分布范围较广,其中林地主要集中分布在 800 m 以上的山区,草地主要分布在 500—1800 m 的丘陵、低山区和中山区;裸地地域分布特征明显,集中在 800—1800 m 的低山区和高山区。

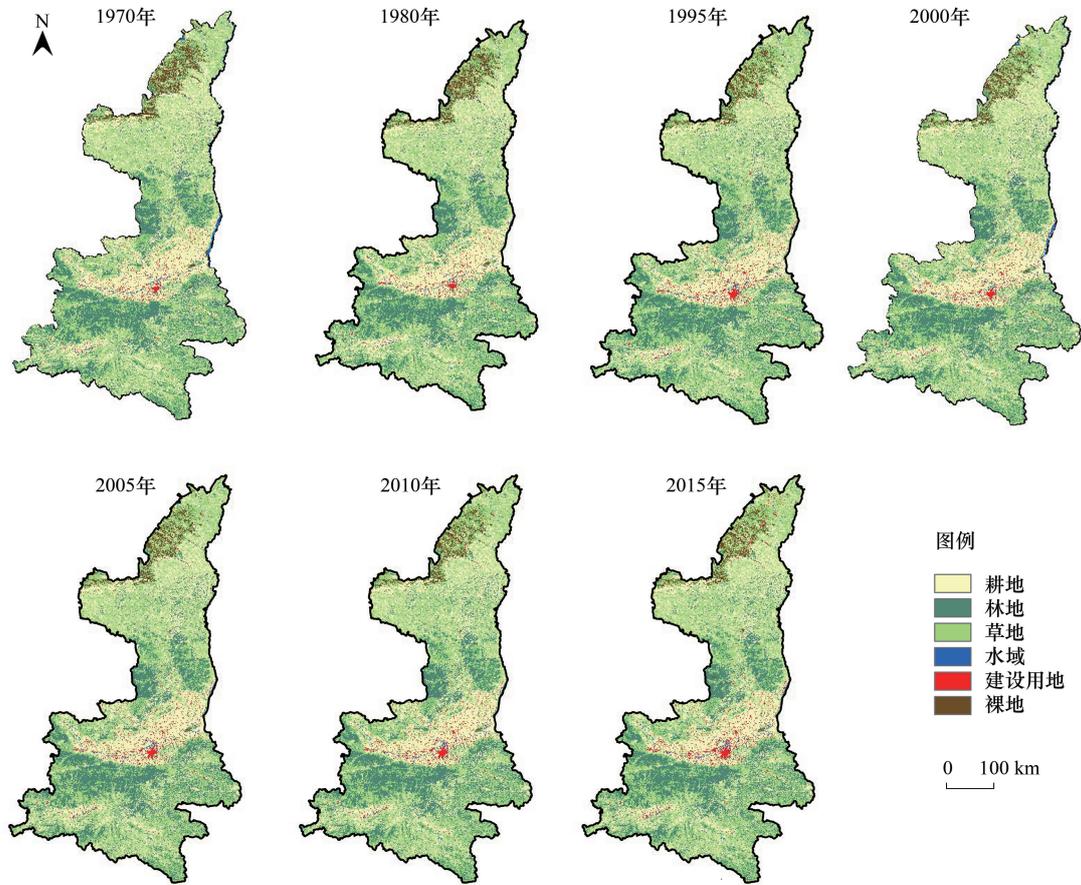


图 2 1970—2015 年陕西省土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Shaanxi Province from 1970 to 2015

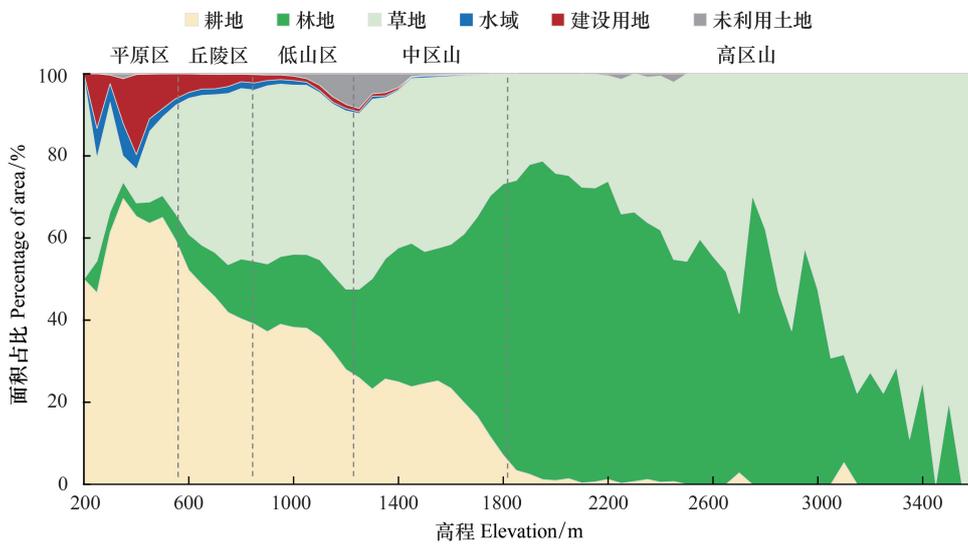


图 3 陕西省土地覆盖类型在不同高程下的分布

Fig.3 Vertical distribution of different land use types in Shaanxi Province

2.2 陕西省基本生态问题初步诊断

2.2.1 土壤保持量

2015 年陕西省土壤总保持量为 75.42×10^8 t, 不同区域土壤保持量集中分布在 $0-2549.15$ t/km² 之间

(图4)。土壤保持强度由东北向西南增加,陕北地区关中地区土壤保持量较低,陕南地区土壤保持量较高。丹江流域、汉江流域、渭河流域南部、泾河流域南部和北洛河流域中游土壤保持量高,嘉陵江流域和伊洛河流域土壤保持量次之。渭河流域南部、泾河流域南部、北洛河流域上游和下游地区土壤保持量较低,无定河流域、延河流域和窟野河流域土壤保持量低,基本都在 $1000 \text{ t}/\text{km}^2$ 以下。

2.2.2 矿山开采

矿山信息爬取结果显示,陕西省矿山的分布主要集中在陕西的中部地势较缓和的区域(图5),包括临潼县、高陵县、长安区、户县和周至县。陕西的北部山区与南部山区也有零星分布,包括神木县、榆阳区、横山县、勉县、南郑县、汉阴县和旬阳县等。

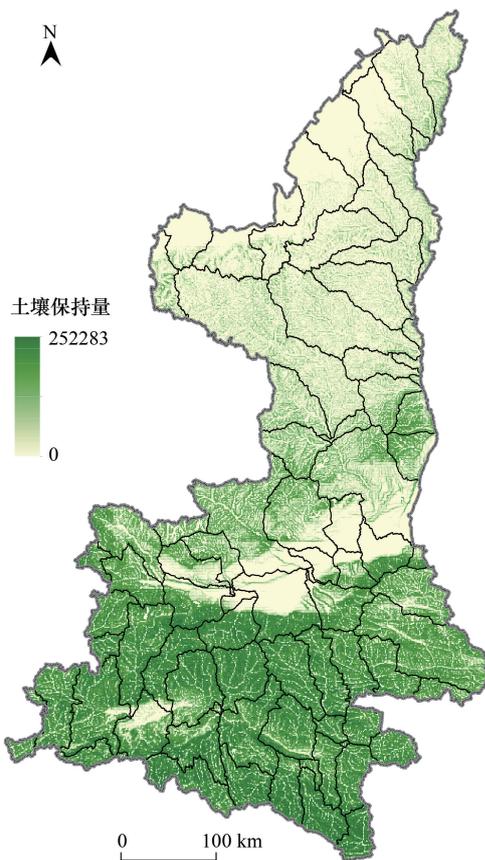


图4 土壤保持量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil conservation

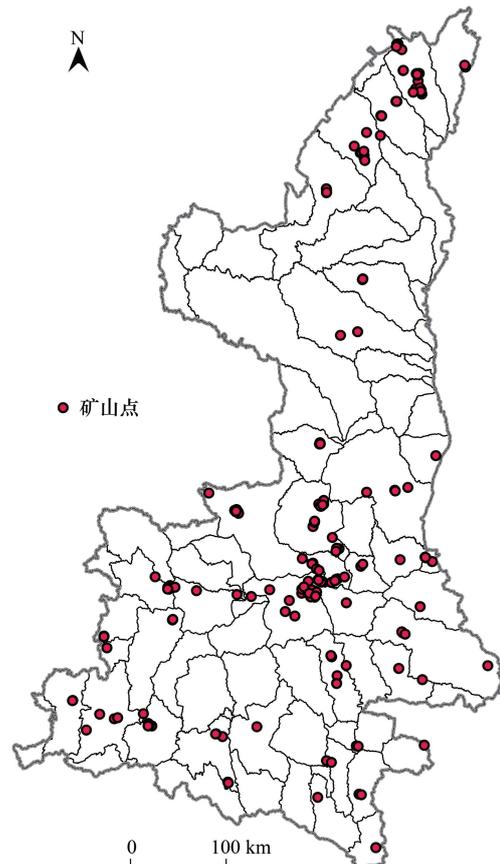


图5 2015年陕西省矿山分布

Fig.5 Spatial distribution of mine in Shaanxi Province in 2015

2.2.3 降水情况

陕西各地年降水分布差异很大,在 $300\text{—}1700 \text{ mm}$ 之间均有分布,且从南往北呈明显的逐步减少趋势(图6)。陕南的米苍山和大巴山区,年降水为 $1200\text{—}1617 \text{ mm}$,是陕西省年降水最多的区域;秦岭南坡年降水大多为 $800\text{—}1000 \text{ mm}$,秦岭以北的关中地区年降水为 500 mm 左右,陕北南部及中部地区年降水大多为 $400\text{—}600 \text{ mm}$,而陕北北部地区,年降水 $<400 \text{ mm}$,是陕西降水最少的地区。

2015年,日降水量大于 50 的天数范围是 $0\text{—}6\text{d}$,从南往北呈明显的逐步减少趋势(图6),其中汉中、安康、商洛、宝鸡和咸阳的杨凌地区天数较高。安康的镇坪县是天数最多的区域,也是暴雨的高发区,汉中的镇巴县、佛坪县次之,也是暴雨出现次数比较多的地区。

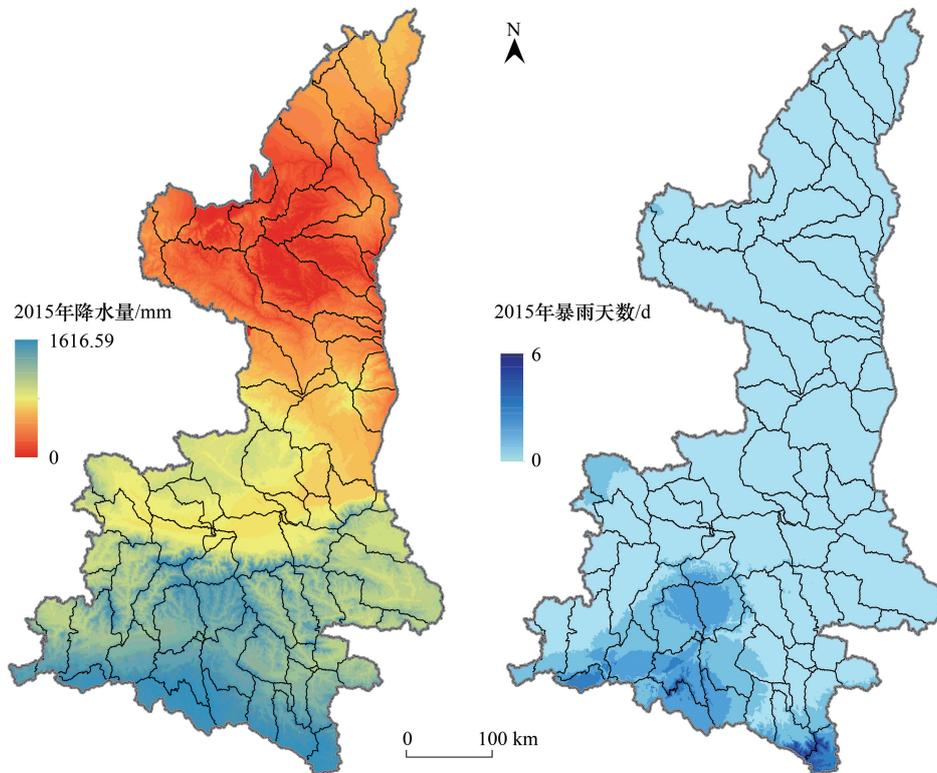


图 6 2015 年陕西省年降水量及暴雨(日降雨量>50 mm)天数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual precipitation and days of extreme precipitation (daily rainfall > 50 mm) in Shaanxi Province in 2015

2.2.4 林地植被变化

2001—2015 年陕西省林地植被 NDVI 整体呈现平稳上升趋势,年平均 NDVI、生长季(每年 4 月至 9 月)平均 NDVI 和非生长季(每年 10 月至次年 3 月)平均 NDVI 具有较一致的时间趋势,年际变化率分别为 0.0042—0.0044 之间,且变化率均通过了显著性水平为 0.01 的检验(图 7)。林地植被 NDVI 生长季与非生长季之间的差异反映了植被生长的年内波动幅度。整体而言,2001—2015 年陕西省林地植被生长的年内波动较小,生长季与非生长季之间 NDVI 的差异稳定在 0.283—0.286 之间。

利用基于像元的一元线性回归分析方法,得到了陕西省 2001—2015 林地植被 NDVI 年际变化率的空间分布状况。从像元尺度上看,92.15%(约 $3.98 \times 10^3 \text{ km}^2$) 的林地植被表现为显著的线性关系($P < 0.05$),而其中仅有 0.20%(93.86 km^2) 的林地表现为下降趋势,其余林地植被则表现为显著的线性增加趋势。空间上,林地植被 NDVI 显著下降的区域主要分布中部关中平原(白水、蒲城和合阳县)和南部汉江河谷盆地等低海拔地区(0—500 m 和 500—800 m)(图 7)。林地植被 NDVI 增加较快的区域,主要分布在海拔 1200 m 较低海拔的区域,如在陕北黄土高原南部和秦岭山地东部等。而随着海拔的增加,草地植被年际变化趋缓(年际变化率以 0—0.004 为主)(图 7)。

2.2.5 农田质量

依据《1:100 万土地资源图》的数据,陕西省耕地等级为 4 个等级。其中,关中地区耕地等级较高,陕北和陕南地区耕地等级较低(图 8)。一等耕地分布范围小且分布集中,主要分布在渭河流域范围内的宝鸡和西安两地,咸阳西南部、渭南东南部、汉中西南部和安康中部也有小范围分布。这些地区为传统农业区,种植历史悠久,土壤以褐土、壤土为主,土层深厚、保水保肥性能强。二等地分布则较为分散,主要分布在泾河流域、北洛河流域中下游及无定河流域北部。三等地主要分布在延河流域、无定河流域南部、渭河流域上游、榆林市和延安东南部。四等地分布范围较广,主要分布在陕南和陕北地区。陕南地区分布范围主要包括汉江流域、嘉

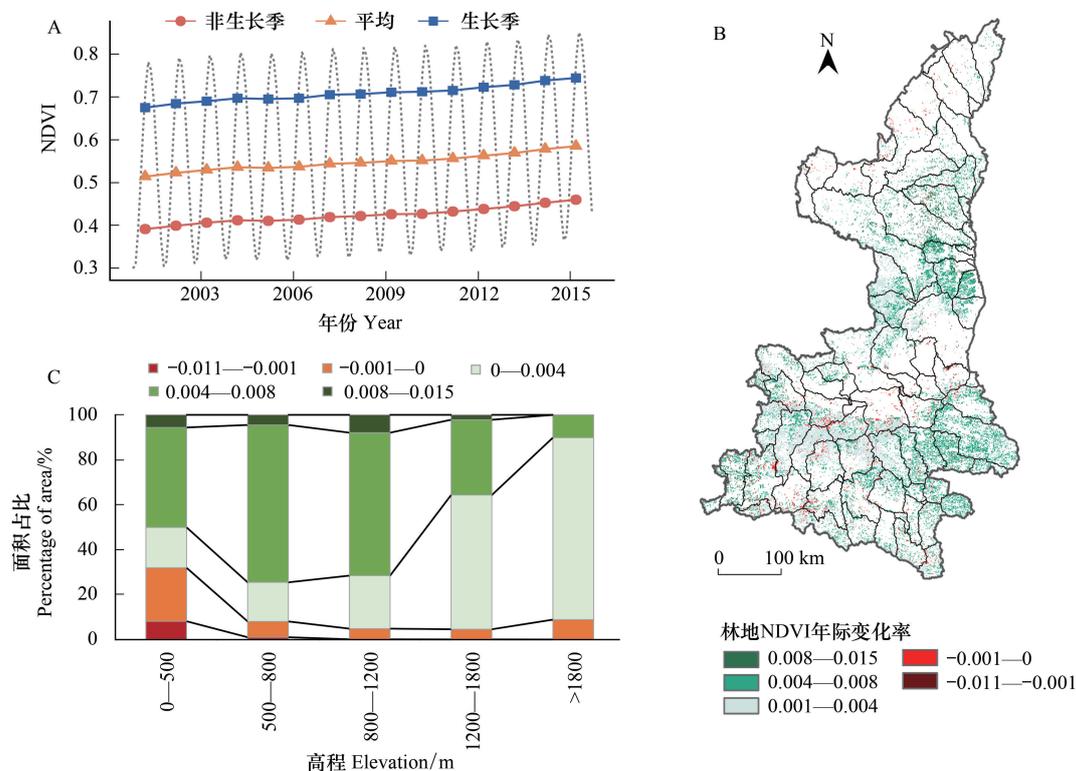


图 7 2001—2015 年陕西省林地植被 NDVI 年际变化状况

Fig.7 Forests vegetation changes in Shaanxi Province between 2001 and 2015

(A) 年平均 NDVI 变化趋势; (B) NDVI 年际变化率空间分布 ($P < 0.05$); (C) NDVI 年际变化率与海拔之间的关系

陵江流域、伊洛河流域和丹江流域,陕北地区分布范围主要包括延安市和榆林市。陕南地区耕地海拔高、气温低、季节性干旱严重,且土壤养分瘠薄,缺乏灌溉条件,耕地质量较差。陕北地土壤以黄绵土、黑垆土、灰钙土、风沙土为主,水土流失剧烈、土壤退化严重,生态环境恶化、自然灾害频繁,土壤养分贫瘠、生产力低下。

2.2.6 草地植被变化

2001—2015 年陕西省草地植被 NDVI 整体趋势与林地植被一致,均呈现平稳上升趋势。相较林地而言,草地其年平均 NDVI、生长季平均 NDVI 和非生长季平均 NDVI 的年际变化率较大,分别为 0.0053, 0.0053 和 0.0049,且变化率均通过了显著性水平为 0.01 的检验。2001—2015 年草地植被生长的年内波动较小,生长季与非生长季之间 NDVI 的差异稳定在 0.219—0.226 之间。

从像元尺度上看,91.01% (约 7.47 万 km^2) 的草地植被呈现显著的线性关系 ($P < 0.05$),且趋势以增加为主,而其中仅有 0.33% (248.82 km^2) 的草地表现为下降趋势。空间上,草地植被 NDVI 显著下降的区域主要分布在榆林西部的高海拔地区 ($> 1800 \text{ m}$) 以及中部关中平原 (白水、蒲城、合阳) 和南部汉江河谷盆地等低海拔地区 (0—500 m 和 500—800 m) (图 9)。草地植被 NDVI 增加较快的区域,主要在海拔 1200 m 较低海拔的区域,如陕北黄土高原和秦岭山地的等。随着海拔的增加,草地植被年际变化趋缓 (年际变化率以 0—0.005 为主) (图 9),如西北部的陕北榆林地区以及南部的秦巴山区等。

2.2.7 贫困状况

由于大多数社会经济活动都是在夜间光照充足的发达地区进行的,因此较高的平均夜间灯光强度值表示了一个地区更为繁荣的社会经济活力。将陕西各个县的平均夜间灯光强度值 (ANLI, average night light index) 进行分级,划分为贫困区、弱势区、一般区、优势区和富裕区,以直观地展现贫困的空间分布 (图 10)。结果表明,陕西省贫困区个数占总数 70.1%,弱势区占 20.6%、一般区占 4.1%、优势区占 3.1%、富裕区占

2.1%。总体而言,陕西的贫困差距较大,西安市和咸阳市是经济富裕区,贫困区多分布在陕西南部的汉中、安康和南洛等地区。

2.3 陕西省生态问题诊断及综合分区

2.3.1 陕西省生态修复综合分区

综合考虑流域内土壤保持量、矿山分布密度、极端降水、年平均降水量、林地植被年际变化率、农田质量、草地植被年际变化率和贫困水平 8 个因素,利用所构建的生态修复综合评价体系,测算了陕西省各流域的山水林田湖草综合生态修复指数(图 11),该指数反映了流域实施山水林田湖草综合生态保护修复的必要程度。结果表明,2015 年陕西省生态修复指数平均值为 0.39,各流域生态修复指数在 0.23—0.60 之间。总体来看,陕西省生态修复指数的空间分异规律较为明显,自南向北呈现依次递减的趋势。

由于陕西省自然资源禀赋迥异,且各项生态修复指标存在较强空间异质性,利用综合生态修复指数所划分的生态修复分区无法进一步体现各区生态修复方向的差异性。因此,本文利用 ArcGIS 分组分析工具,基于各流域 8 个生态修复指标以及生态修复指数的测算结果,进行空间聚类和分组分析。结果显示,陕西省被划分为 8 个生态修复子区域,包括陕南秦岭东部地区(分区 1)、关中平原中部的城镇地区(分区 2)、汉江河谷盆地(分区 3)、陕北黄土高原中南部地区(分区 4)、陕南秦岭山区(分区 5)、陕北黄土高原北部地区(分区 6)、关中平原地区(分区 7)和陕南大巴山地区(分区 8)(图 11 和表 3)。

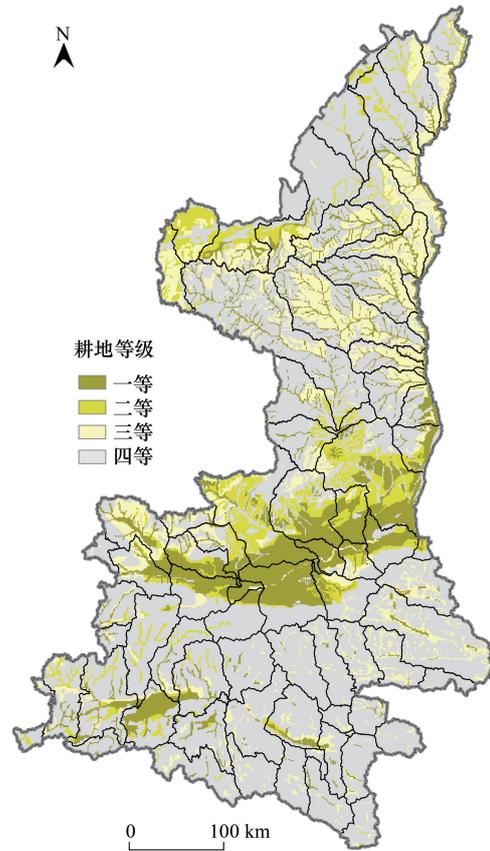


图 8 陕西省耕地质量空间分布

Fig.8 Spatial distribution of cropland quality

表 3 陕西省各生态修复分区

Table 3 Different ecological restoration zones in Shaanxi Province

分区 Ecological restoration zones	区域地理位置 Locations	涉及地区 Included cities	区域面积 Areas		流域平均 生态修复指数 Ecological restoration indices
			面积/ 万 km ²	面积 百分比/%	
分区 1 Zone 1	陕南秦岭东部地区	商洛市	1.045	5.084	0.448
分区 2 Zone 2	关中平原中部的城镇地区	西安市、咸阳市	0.557	2.710	0.382
分区 3 Zone 3	汉江河谷盆地	汉中市	0.626	3.046	0.433
分区 4 Zone 4	陕北黄土高原中南部地区	延安市、榆林市、渭南市和铜川市	3.953	19.232	0.309
分区 5 Zone 5	陕南秦岭山区	安康市、汉中市、宝鸡市商洛市和西安市	4.406	21.436	0.453
分区 6 Zone 6	陕北黄土高原北部地区	榆林市和延安市	3.906	19.004	0.255
分区 7 Zone 7	关中平原地区	西安市、渭南市、咸阳市宝鸡市、商洛市、延安市和铜川市	4.648	22.614	0.349
分区 8 Zone 8	陕南大巴山地区	汉中市和安康市	1.413	6.875	0.557

空间上,分区 1、分区 5 和分区 8 位于秦巴山区,该区的主导生态系统服务功能是水源涵养和水土保持,

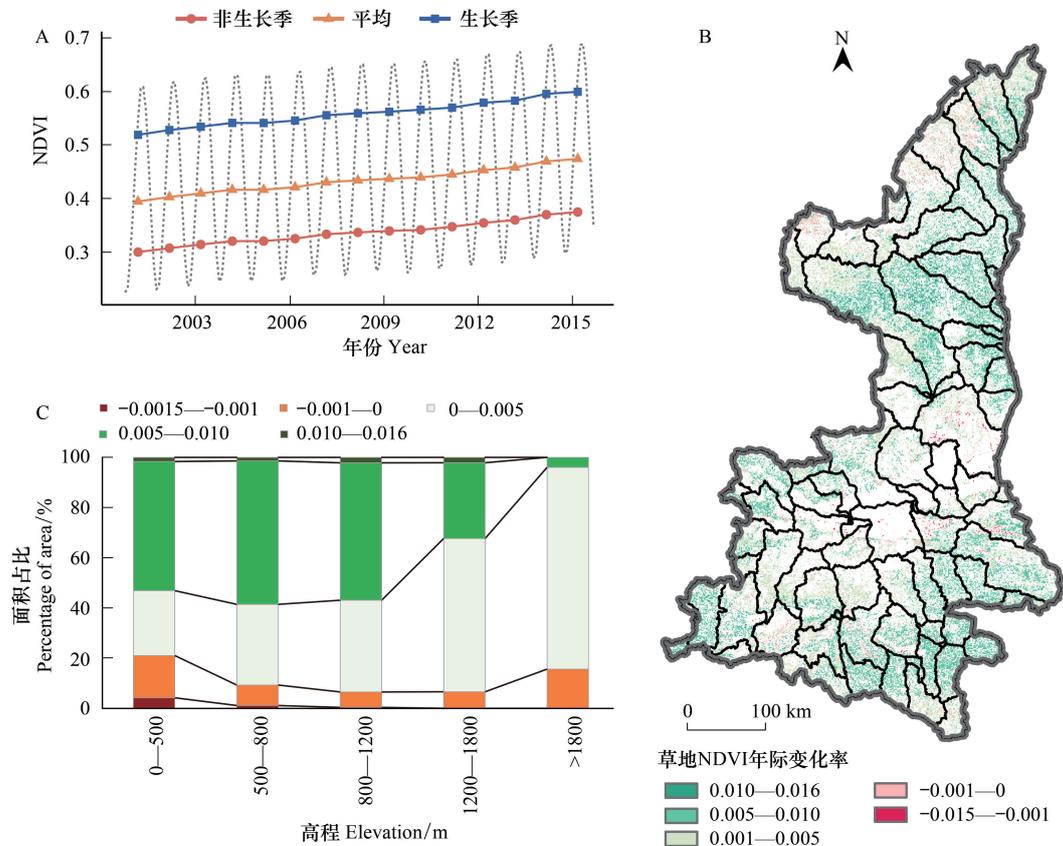


图9 2001—2015年陕西省草地植被变化状况

Fig.9 Grassland vegetation changes in Shaanxi Province between 2001 and 2015

(A) 年平均 NDVI 变化趋势; (B) NDVI 年际变化率空间分布 ($P < 0.05$); (C) NDVI 年际变化率与海拔之间的关系

区域整体生态修复指数较高,也是陕西省生态安全的重要屏障,主要涉及陕西省安康市、商洛市、汉中市和宝鸡市的 29 个区县。分区 2、分区 3 和分区 7 位于关中平原和南部的汉江河谷盆地地区,该区是陕西省农产品主产区和城镇集中分布的区域,主导生态系统服务功能为粮食生产和水土保持,生态修复指数一般,主要涉及汉中市、商洛市、宝鸡市、西安市、咸阳市、渭南市、铜川市和延安市的 55 个区县。分区 4 和分区 6 的生态修复指数最低,该区生态环境脆弱且比较贫困,主要涉及榆林市、延安市和渭南市的 28 个区县。

2.3.2 生态修复分区的生态问题诊断

本文进一步对比了不同分区各项生态修复指标值的差异(图 12),并探讨各生态修复分区的主要生态问题:

(1) 分区 1(陕南秦岭东部地区):该区位于丹江流域和秦岭山区东段,也是南水北调工程中丹江口水库的上游地区,涉及丹凤、洛南、山阳和商南 4 个区县,总面积达 1.045 万 km^2 。该区域属中低丘陵山区,水资源丰富,主导生态服务功能是水源涵养和水土保持功能。在生态问题方面,相对南部的秦巴山区(分区 5 和分区 8),该区降水量偏少且分布不均,土壤侵蚀严重。在土地利用方面,该区以林草资源为主,耕地少且质量差,农业发展水平较低,区域贫困水平较高。

(2) 分区 2(关中平原中部的城镇地区):该区域位于陕西省关中城市群的中心,是人类活动和经济发展核心区域,主要包括西安市和咸阳市的 16 个区县,总面积为 0.557 万 km^2 。该区经济相对发达,但也存在着林草植被退化、矿产资源开采强度大和水土流失等生态问题。

(3) 分区 3(汉江河谷盆地):该区域位于秦岭和大巴山之间,是汉江上游的河谷地带。该区涉及汉中市

的城固县、佛坪县、汉台区和南郑县等 6 个区县,总面积达 0.626 万 km^2 。该区与分区 2(关中平原中部的城镇地区)均为陕西省城镇发展的重点区域,但相对于分区 2,该区更易受到极端降水等灾害的影响。

(4)分区 4(陕北黄土高原中南部地区):该区域位于陕北黄土高原腹地,对于维护黄河中下游地区生态安全具有重要作用,涉及志丹县、宝塔区、吴起县、宜川县和安塞县等 21 个区县,总面积达 3.953 万 km^2 。在生态问题方面,该区属黄土高原丘陵沟壑地貌,干旱少雨,植被稀疏、水土流失敏感程度较高,整体生态环境较恶劣;在土地利用方面,该区林草植被恢复较好,但受到自然条件限制,该区耕地质量较差,粮食供给能力低于关中平原地区(分区 7)。

(5)分区 5(陕南秦岭山区):该区域位于渭河与汉江之间,是长江上游重要生态屏障,涉及白河县、城固县、凤县和佛坪县等 25 个区县,总面积达 4.406 万 km^2 。该区河流众多,水资源丰富,森林分布面积广,在水源涵养、水土保持和维护生物多样性功能具有重要功能。在生态问题方面,该区部分山地植被出现退化现象,受极端降水影响较严重;在土地资源方面,该区以林草资源为主,耕地资源较少且质量较差。

(6)分区 6(陕北黄土高原北部地区):该区位于陕西省最北部,是黄土高原与内蒙古高原的过渡区,也是黄土高原生态屏障的重要组成部分,主要涉及安塞县、定边县、府谷县、横山县和佳县等 15 个区县,总面积达 3.906 万 km^2 。在生态问题方面,该区干旱少雨且植被稀疏,相对于黄土高原中南部地区(分区 4),林地植被恢复程度较慢,且西部山区的部分地区出现林地植被退化现象;在土地利用方面,该区域矿产资源开采强度较大且林地植被比例较低。

(7)分区 7(关中平原地区):该区位于陕西省中部的渭河平原,是重要的农产品主产区之一,主要涉及灞桥区、白水县、彬县和陈仓区等 53 个区县,总面积达 4.648 万 km^2 。该区主要生态问题是林草植被退化,矿山分布较多;在土地利用方面,该区以耕地资源较多,而林草植被比例较低。

(8)分区 8(陕南大巴山地区):该区位于陕西省南段的大巴山北坡,是秦巴生物多样性生态功能区的重要组成部分,主要涉及城固县、汉滨区、岚皋县和南郑县等 11 个区县,总面积达 1.413 万 km^2 。该区属于贫困地区,同时与分区 5(陕南秦岭山区)在生态环境现状及问题方面较类似,但是更易受到极端降水和土壤侵蚀等灾害影响。

总体来看,由于陕西省生态环境的异质性,不同分区内的生态问题及未来生态修复方向存在差异。陕西北部由于干旱少雨且植被稀疏,区域主要存在水土流失、草地退化和荒漠化等生态问题,因此,增加地表植被覆盖、控制水土流失是该区主要修复方向;在陕南的秦巴山区,极端降水和土壤侵蚀是制约该区生态环境主要因素,因此,保护、修复和增加山地植被,同时提高预防自然灾害水平是该区生态修复的方向;对比来看,关中平原的生态环境则易受到林草植被退化以及矿山开采等人类活动的威胁,因此,增加地表植被覆盖、加强矿山生态环境整治和修复则是该区主要的修复方向。

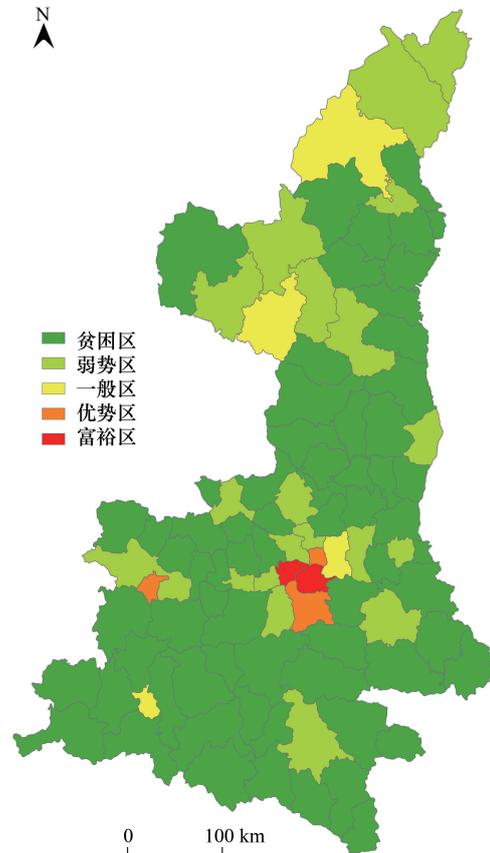


图 10 陕西省贫困分类

Fig.10 Poverty classification map in Shaanxi Province

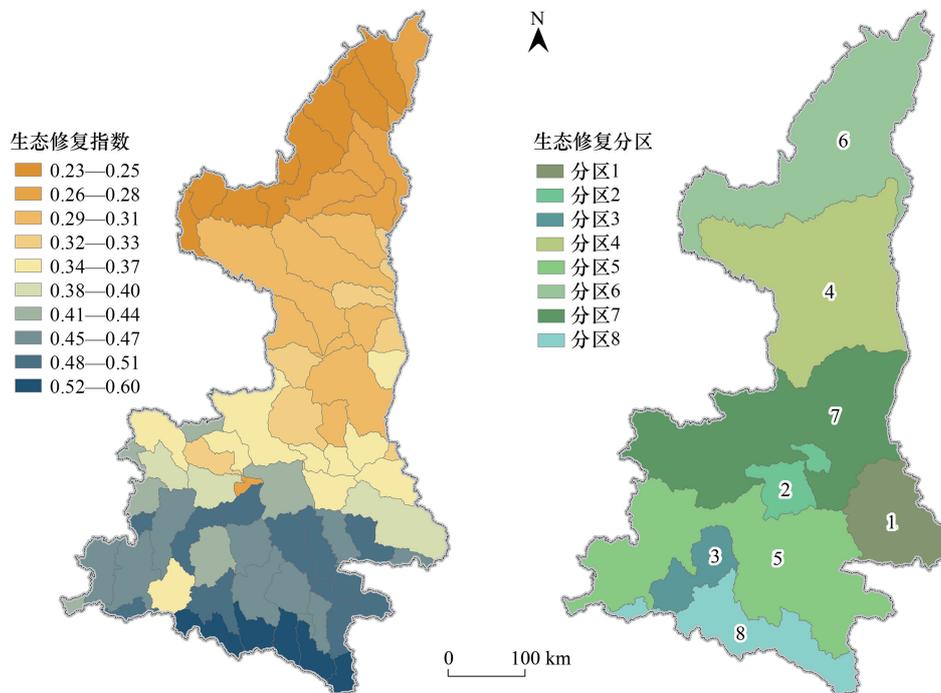


图 11 陕西省流域生态修复指数及生态修复分区

Fig.11 Spatial distribution of ERI and ecological restoration zones in Shaanxi Province

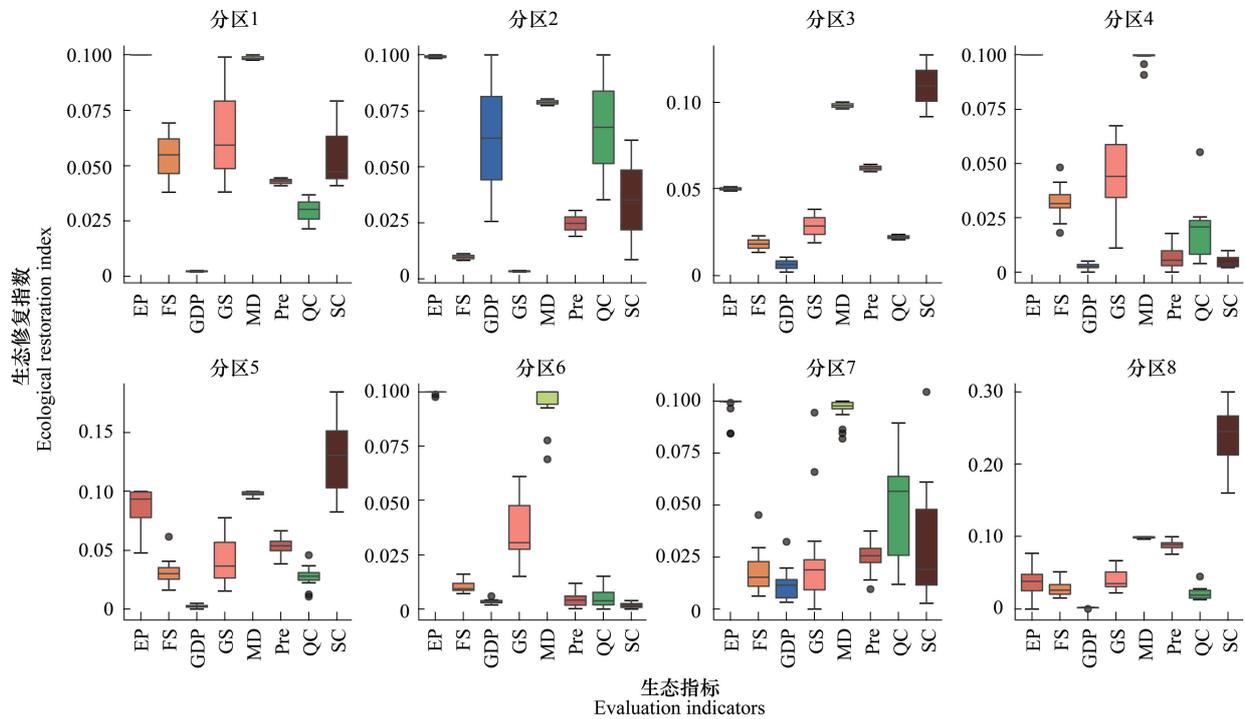


图 12 陕西不同生态修复分区的生态指数

Fig.12 Ecological restoration indexes of different ecological restoration zones in Shaanxi

EP, 极端降水, extreme precipitation; FS, 林地植被 NDVI 年际变化率, interannual variability of forests NDVI; GDP, 地区生产总值, gross regional product; GS, 草地植被 NDVI 年际变化率, interannual variability of grassland NDVI; MD, 矿山分布密度, mine distribution density; Pre, 年降水总量, annual precipitation; QC, 耕地质量等级, quality of cropland; SC, 土壤保持量, soil conservation

3 结论

山水林田湖草生态系统作为一个生命共同体,彼此相互依存,相互影响。本文以陕西省为例,通过构建包含山、水、林、田、草等方面的生态系统问题综合诊断指标体系,系统评估了陕西省生态问题。在此基础上利用采用线性加权函数法和分组方法,以小流域为单元划分了生态修复分区。研究表明,1970—2015年,陕西省耕地、林地、草地、水域覆盖面积总量变化不大;建设用地以居民点和城镇为中心扩张明显,总覆盖面积由1970年的2662 km²增加到2015年的4412 km²;裸地面积持续减少,其中黄土高原区的部分裸地转化为草地、耕地和建设用地。

陕西省植被、降水资源和土壤保持量空间差异较大,主要表现为从南往北呈明显的逐步减少趋势,极端降水事件多发生陕南山区。2001—2015年,陕西省林草植被NDVI呈显著增加趋势,且年际增长率存在随海拔的升高而下降的特点,而NDVI显著下降的区域主要分布在河谷平原以及陕北黄土高原北部地区。2015年陕西省生态修复指数平均值为0.39,各流域生态修复指数在0.23—0.60之间。总体来看,陕西省生态修复指数的空间分异规律较为明显,呈现自南向北依次递减的趋势。

依据生态修复指数,将陕西省划分了8个生态保护修复分区,包括陕南秦岭东部地区(分区1)、关中平原中部的城镇地区(分区2)、汉江河谷盆地(分区3)、陕北黄土高原中南部地区(分区4)、陕南秦岭山区(分区5)、陕北黄土高原北部地区(分区6)、关中平原地区(分区7)和陕南大巴山地区(分区8)。在生态问题诊断方面,水土流失、植被退化、降水资源不足是陕西北部(分区4和分区6)主要生态问题,而南部秦巴山区(分区8、分区5和分区1)的生态环境易受到极端降水和土壤侵蚀的影响,关中平原(分区7)则主要存在林草植被退化、矿产资源开采强度大和水土流失等生态问题。

致谢:感谢王占韵、李换换、黄强、陈双龙、刘远哲和李寒同学在数据收集和处理方面给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 封志明, 杨艳昭, 陈玥. 国家资产负债表研究进展及其对自然资源资产负债表编制的启示. 资源科学, 2015, 37(9): 1685-1691.
- [2] 王夏晖, 何军, 饶胜, 蒋洪强. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. 环境保护, 2018, 46(S1): 17-20.
- [3] 荣月静, 郭新亚, 杜世勋, 李霞, 宁婷, 张梦莹. 基于生态系统服务功能及生态敏感性与PSR模型的生态承载力空间分析. 水土保持研究, 2019, 26(1): 323-329.
- [4] 李达净, 张时煌, 刘兵, 张红旗, 王辉民, 颜放民. “山水林田湖草—人”生命共同体的内涵、问题与创新. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 1-5, 93-93.
- [5] 邹长新, 王燕, 王文林, 徐德琳, 林乃峰, 李文静. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 961-967.
- [6] 财政部, 国土资源部, 环境保护部. 关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知. (2016-09-30). http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201610/t20161008_2432147.html.
- [7] 宇振荣, 郎文聚. “山水林田湖”共治共管“三位一体”同护同建. 中国土地, 2017, (7): 8-11.
- [8] 黄齐, 高德彬, 杨永辉, 杨川. 韩城市西山废弃采石矿山环境恢复治理的途径. 水土保持通报, 2018, 38(4): 215-219.
- [9] 蒲生彦, 上官李想, 刘世宾, 石清清, 王晓科, 张颖. 生物炭及其复合材料在土壤污染修复中的应用研究进展. 生态环境学报, 2019, 28(3): 629-635.
- [10] 周煜杰, 赵永华, 李宛莹. 秦岭北麓生态问题及土壤修复研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2218-2227.
- [11] 汪自书, 杨莉, 王鹏腾, 李王锋. 环境敏感地区水环境保护与治理规划研究——以贵安新区为例. 生态经济, 2018, 34(12): 173-177.
- [12] 王圣瑞, 李贵宝. 国外湖泊水环境保护和治理对我国的启示. 环境保护, 2017, 45(10): 64-68.
- [13] 张笑千, 王波, 王夏晖. 基于“山水林田湖草”系统治理理念的牧区生态保护与修复——以御道口牧场管理区为例. 环境保护, 2018, 46(8): 56-59.
- [14] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [15] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 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.
- [16] 王波, 王夏晖. 推动山水林田湖生态保护修复示范工程落地出成效——以河北围场县为例. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 11-14.

- [17] 吴运连, 谢国华. 赣州山水林田湖草生态保护修复试点的实践与创新. 环境保护, 2018, 46(13): 80-83.
- [18] 常纪文. 国有自然资源资产管理体制改革的建议与思考. 中国环境管理, 2019, 11(1): 11-22.
- [19] 陈丹, 雷霄, 张谊佳. 加强生态保护修复维护生态系统安全——以河南省济源市为例. 林业经济, 2018, 40(9): 10-13, 17-17.
- [20] 陈安, 杨晓东, 余向勇, 梅立永, 王丁明. 宜昌市山水林田湖生态保护与修复研究. 环境科学与管理, 2018, 43(5): 125-128.
- [21] 许留兴, 熊康宁, 张锦华, 池永宽, 谌妍, 刘成名. 西南喀斯特地区草地生态系统面临的问题及对策. 草业科学, 2015, 32(5): 828-836.
- [22] 赵方凯, 杨磊, 陈利顶, 李刚, 孙龙, 李守娟. 城郊生态系统土壤安全: 问题与挑战. 生态学报, 2018, 38(12): 4109-4120.
- [23] 单卫东. 山水林田湖草综合整治亟待科技创新. 中国自然资源报, 2018-08-02(005).
- [24] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [25] 张金茜, 柳冬青, 巩杰, 马学成, 曹二佳. 流域景观破碎化对土壤保持服务的影响研究——以甘肃白龙江流域为例. 资源科学, 2018, 40(9): 1866-1877.
- [26] Han Z, Song W, Deng X Z, Xu X L. Grassland ecosystem responses to climate change and human activities within the Three-River Headwaters region of China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9079.
- [27] 卢秀, 李佳, 段平, 李晨, 王金亮. 基于夜间灯光和土地利用数据的云南沿边地区 GDP 空间差异性分析. 地球信息科学学报, 2019, 21(3): 455-466.
- [28] Xue Q, Song W, Zhang Y, Mou F Y. Research progress in ecological carrying capacity: implications, assessment methods and current focus. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(5): 514-525.