

DOI: 10.5846/stxb202104160985

何慧娟,王钊,董金芳,王娟,邹继业.陕西黄河流域植被变化与城镇化协同权衡关系研究——基于卫星遥感数据.生态学报,2022,42(9):3536-3545.

He H J, Wang Z, Dong J F, Wang J, Zou J Y. Synergy and trade-off between vegetation change and urbanization development in the Yellow River Basin of Shaanxi Province based on satellite remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3536-3545.

陕西黄河流域植被变化与城镇化协同权衡关系研究 ——基于卫星遥感数据

何慧娟^{1,2}, 王 钊^{1,*}, 董金芳¹, 王 娟¹, 邹继业¹

1 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710016

2 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016

摘要: 基于卫星植被指数与夜间灯光数据, 利用相关系数法和变化趋势法综合分析了陕西黄河流域植被变化与城镇化发展之间的协同和权衡关系。结果显示: 陕西黄河流域城镇化与经济发展实现了较高水平上的稳定增长, 灯光强度从 2000 年的 2.04 上升至 2020 年的 8.86, 呈明显上升趋势的区域占总面积的 93.46%, 形成了以中心城市带动的关中城镇发展群, 和围绕能源化工开采为主的陕北城镇发展群, 并由交通运输网建设发展带动中小城市发展; 陕西黄河流域生态环境总体向好, 植被覆盖度由 2000 年的 42.90% 增加至 2020 年的 64.19%。植被覆盖度显著增加的区域面积占 67.45%, 以陕北退耕还林(草)区植被增加最为显著; 陕西黄河流域经济与生态高质量协同发展成为主要趋势, 灯光强度与植被覆盖度同时明显上升的区域占总面积的 63.49%, 其中两者表现为协同关系的区域占比 56.42%, 主要位于退耕还林(草)区; 有占研究区域总面积 4.6% 的区域灯光强度明显增加而植被明显降低, 其中表现为权衡关系的区域占比高达 71.75%, 主要位于关中城镇化正在快速发展的地区; 城市核心区域及靠近城市的周边占总面积不到 5% 的区域, 有明显的空间分布差异, 在陕北能源化工区城市核心区域灯光强度下降而植被恢复较快, 以西安为中心关中城市群, 市中心这一概念逐渐弱化, 原来的市中心灯光强度下降, 并且随着老城区设施逐渐老旧, 新城区人口不断涌入, 城市生态环境有待改善。

关键词: 城镇化; 灯光强度; 植被覆盖度; 生态恢复; 黄河流域

Synergy and trade-off between vegetation change and urbanization development in the Yellow River Basin of Shaanxi Province based on satellite remote sensing data

HE Huijuan^{1,2}, WANG Zhao^{1,*}, DONG Jinfang¹, WANG Juan¹, ZOU Jiye¹

1 Shaanxi Agricultural Remote Sensing and Economic Crop Meteorological Service Center, Xi'an 710016, China

2 Key Laboratory of Eco-Environmental and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710016, China

Abstract: Based on the satellite vegetation index and night light data, the relationship between vegetation change and urbanization development in the Yellow River Basin of Shaanxi Province was analyzed by correlation coefficient method and change trend method. The results show that urbanization and economic development have achieved stable growth at a high level in the study area. The light intensity increased from 2.04 in 2000 to 8.86 in 2020, and the area with obvious increasing trend accounted for 93.46%. Xi'an as the core city the development of urban agglomeration in the central Shaanxi plain. Energy exploitation drove urban development in the Northern Shaanxi. Traffic construction drove the development of small

基金项目: 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2021G-31); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-978)

收稿日期: 2021-04-16; **采用日期:** 2021-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 51423919@qq.com

towns. The ecological environment was getting better, with the vegetation coverage increasing from 42.90% in 2000 to 64.19% in 2020. The area of vegetation coverage increased significantly accounted for 67.45%, which was mainly located in the area of returning farmland to forest (grassland) in Northern Shaanxi. High quality coordinated development of economy and ecology has become the main trend. The area where light intensity and vegetation coverage increased significantly together accounted for 63.49%, and 56.42% of them were positively correlated with each other, which was mainly located in the area of returning farmland to forest (grass). In 4.6% of the study area, the light intensity increased significantly while the vegetation decreased significantly, and the area with significantly negative correlation accounted for 71.75%, which was mainly located in the area with rapid urbanization in the central Shaanxi plain. Less than 5% of the areas were located in the core area of the city and near the city, with obviously spatial distribution differences. In Northern Shaanxi, the light intensity decreases and the vegetation recovered quickly in the cities developed by energy exploitation. In the central Shaanxi plain, as the original city center gradually weakened, the light intensity decreased in the central area. With the outdated facilities in the old urban areas and the continuous influx of population into the new urban areas, the urban ecological environment needs to be improved.

Key Words: urbanization; light intensity; vegetation coverage; ecological restoration; the Yellow River Basin

黄河流域构成我国重要的生态屏障,也是我国重要的经济地带,同时也是打赢脱贫攻坚战的重要区域^[1]。黄河流域生态保护和高质量发展,同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样,是重大国家战略。新的历史时期,党中央又对高质量发展提出了更高要求,不仅仅是经济的高质量发展,生态、社会、文化等各领域都需要高质量发展,并且在所有地区必须长期坚持^[2]。因此,开展黄河流域经济和生态影响关系的研究,是实现黄河流域可持续发展的迫切需求,而厘清经济发展与生态环境变化规律及其两者变化的协同性,是科学认知区域经济与生态环境关系的开始,有助于因地制宜走出适合区域实际的高发展之路。

陕西是国家生态安全战略格局的重要组成部分,也是落实黄河流域生态保护和高质量发展战略的主体区域,黄河在陕西境内全长 719km,流域国土面积、人口、经济总量分别占陕西的 65%、76%和 87%^[3]。区域长期以来开展的退耕还林(草)工程、坡耕地整治、治沟造地等生态环境建设工程,使得植被覆盖得到迅速恢复和增加,植被指数增长率远高于全国平均水平,生态环境逐渐改善^[4]。区域生态系统服务功能也整体向健康方向发展,植被的改善不仅有助于调节水沙关系,缓解区域水土流失问题^[5],还能够增加植被固碳能力^[6],实现了从碳源向碳汇的转变^[7-8]。但同时也有研究发现不合理的建设布局会造成蒸散发增加,流域产流和土壤含水量显著下降^[9-10],植被恢复已接近水资源植被承载力的阈值^[11]。在西部大开发战略的刺激下,陕西黄河流域社会经济也在发生明显变化,进入了高速发展的时期,形成以西安为中心的关中大型城市群,“一核四极、两轴两带”的城镇发展格局也已初步呈现^[12]。城镇化发展水平是一个地区社会、经济发展水平的综合体现。城镇化是保持经济持续健康发展的强大引擎^[13],但同时城镇化的快速推进对生态环境及资源环境带来巨大压力^[14]。随着环境资源限制、土地利用程度和城市用地的扩展,植被覆盖度的上升趋势已经遇到拐点,未来将出现下降趋势^[15]。不合理的生态建设布局也会影响区域水资源的可持续性和粮食安全,产生相应的社会生态问题^[16]。

社会经济与生态环境之间存在着复杂的耦合关系^[17-18],众多学者都开展了相关研究,其中利用遥感数据展现经济和生态环境长时间连续的变化过程,以及细致的体现空间变化的差异,使之成为分析社会经济与生态环境之间复杂的耦合关系最有力的工具^[19-22]。利用绿色植物叶绿素对可见光红波段的强吸收和绿色植物叶内组织对近红外波段的高反射和高透射的差异建立植被指数,可有效提取植被信息,常用来描述植被地理状况、估测土地覆盖面积、植被光合作用、叶面积指数、现存生物量及植被生产力等等,是监测全球或区域尺度植被及相关现象的最有效方法^[23]。卫星夜间灯光数据能够探测到灯光甚至车流等发出的低强度灯光,使之

区别与黑暗的乡村背景^[12,24],是监测城镇变化的重要数据源,越来越多的应用于城市发展、社会经济指标、人口发展、生态环境评估等领域^[25]。利用卫星数据单独分析生态环境或者城镇化发展的研究较多,已经取得很多有价值的研究方法和结论,但是综合两种数据分析经济与生态协同与权衡关系的研究还在探索阶段,针对陕西黄河流域高质量发展的科学支撑数据较少,因此,本文将利用卫星植被指数数据与夜间灯光数据,细致的分析陕西黄河流域经济发展与生态环境之间的协同与权衡关系,从而为区域生态环境保护和城市规划建设提供更多的数据支撑和建议。

1 研究区概况

研究区位于黄河流域中段,以黄河流域边界和陕西省省界划定研究范围(图 1),研究区域占黄河流域总面积 16%,并且也是黄土高原的核心区域,占黄土高原总面积 20%。区域主要包含陕北(榆林市、延安市)和关中(西安市、咸阳市、宝鸡市、铜川市)6 个地市。区域气候干旱少雨且降水时空分布不均,干旱、洪涝等灾害频发,是世界上水土流失最为严重的区域之一,成为制约其社会经济可持续发展的重要因素。研究区域地理环境复杂多变,生态环境建设的重点也因区施策,由北向南依次为毛乌素沙漠南缘防风固沙区(图 1 生态分区 I),陕北黄土高原丘陵沟壑退耕还林(草)区(图 1 生态分区 II)及渭北退耕还林区(图 1 生态分区 III),黄龙山子午岭天然林保护区(图 1 生态分区 IV),关中平原大宗粮食作物主产区(图 1 生态分区 V),以及秦岭北麓天然林保护区(图 1 生态分区 VI)。

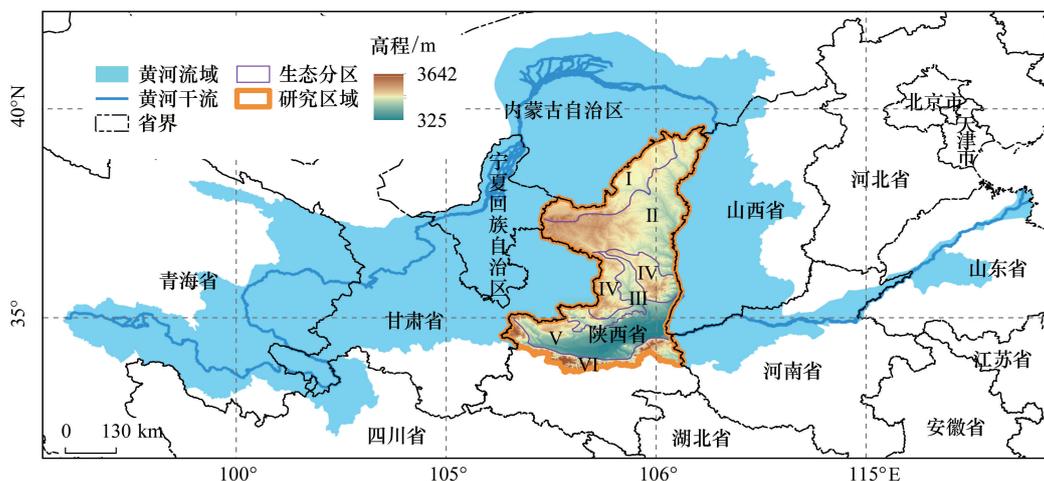


图 1 研究区域地理位置及高程

Fig.1 Geographical location and elevation of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 灯光强度数据与处理

研究所用灯光数据来自美国国家地球物理数据中心(NGDC),包括两组数据:2000—2013 年 DMSP/OLS (Version4)和 2014—2020 年 NPP/VIIRS (Day/Night Band, DNB)。

DMSP/OLS 数据主要利用各年 9—11 月光照度在 50%以下的 OLS 数据制成,空间分辨率接近 1km,像元灰度(Digital Number, DN)值的范围为 0—63,包含了 6 颗卫星数据,数据定标是预处理的重点,由于传感器之间存在差异且随着时间衰减,使得多颗卫星获取的时间序列数据缺乏可比性,本文采用 Elvidge 提供的方法进行交叉定标^[12],定标区域最终由两部分组成:DN 值变化较为稳定的西安城市中心二环以内的区域, DN 值跨度较大且多年变化值较小的中小县城作为定标点。最终选择了 F16 的 2010 年数据作为基准,建立二阶多项式回归模型,订正得到 2000—2013 年 OLS 灯光数据。

NPP/VIIRS 数据需要与 DMSP/OLS 数据建立回归模型实现两种数据的一致性和可比性。文章采用宋永对黄土高原区域的研究结果^[21], 研究显示对数模型对于黄土高原地区有较高的拟合优度, 计算公式为:

$$Y = a \times \ln X + b$$

式中, Y 为 NPP/VIIRS 数据经过尺度转换至 DMSP/OLS 尺度上的像元 DN 值; X 为 NPP/VIIRS 影像的像元 DN 值; a 、 b 为回归模型的校正参数, 分别取 8.277 和 16.747。

文章在陕西省统计局网站 (<http://tjj.shaanxi.gov.cn/>) 收集了 2000—2020 年陕西省生产总值的历史数据, 计算灯光强度与生产总值的相关系数, 进一步说明灯光数据与经济联系, 同时验证区域灯光数据变化的趋势。

2.2 植被覆盖度数据与处理

植被覆盖度 (Fractional Vegetation Coverage, FVC) 的计算使用混合像元分解模型中最常用的线性像元二分模型, 模型假设一个像元由土壤和植被两部分组成, 混合像元的植被指数值 (NDVI) 为两部分植被指数值的加权平均和, 权重为各部分在像元中的面积比例^[26]。基于遥感数据的线性像元二分模型适用于区域植被恢复效果方面的评估, 监测结果与地面调查数据呈极显著相关^[27], 公式为:

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}}$$

为了消除像元统计中的虚假信息, 在 NDVI 最大值图像频率累积表上取累积频率为 0.5% 的 NDVI 值为 NDVI_{\min} , 取累积频率为 99.5% 的 NDVI 值为 NDVI_{\max} 。

NDVI 选取美国 NASA LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) 提供的 MODIS 植被指数产品 (MOD13Q1), 空间分辨率为 250 m, 为 16 天合成数据, 陕西地区轨道号是 h26v05 和 h27v05。数据在 MODLAND 提供的 MRT (MODIS REPROJECTION TOOL) 工具中提取了 NDVI 数据, 并对 h26v05 和 h27v05 两区图像进行拼接, 转换为等经纬度坐标投影, 基准面为 WGS-84 坐标系。为了反映一年中植被生长最好的状况, 利用最大值合成法 (MVC) 对各年 NDVI 进行最大值合成, 收集处理了 2000—2020 年 NDVI 数据。

水土流失一直是区域生态环境治理的重点, 因此文章在水利部黄河水利委员会网站 (<http://www.yrcc.gov.cn/>) 收集了 2000—2019 年潼关站输沙量年值数据, 潼关站为黄河干流陕西段最下游站点, 用 2000—2019 年区域植被覆盖度与输沙量建立相关系数, 分析陕西黄河流域植被覆盖变化与水土流失治理之间的关系。

2.3 灯光强度和植被覆盖度两者协同和权衡关系分析方法

相关系数能够反映两组变量之间相关关系的密切程度, 利用相关系数可以反映两者协同和权衡关系, 公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, r 为相关系数, x 、 y 为两个变量, n 为计算的年次。利用 t 检验的方法, 将灯光强度和植被覆盖度之间的协同和权衡关系进行划分, 即协同关系 (显著正相关, $P \leq 0.05$, 且 $r > 0$); 权衡关系 (显著负相关 $P \leq 0.05$, 且 $r < 0$); 无显著相关 ($P > 0.05$)。

2.4 灯光强度和植被覆盖度两者变化趋势分析及变化关系组合

分别计算灯光强度和植被覆盖度两者的变化趋势, 变化趋势利用线性倾向率进行估计, 变量可以看作是时间的一元线性回归, 线性倾向值用最小二乘法计算:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

式中, B 为线性倾向值, x 为变量, t 为年份, n 为计算的年次。当 $B > 0$ 时, 随时间 t 的增加, x 呈上升趋势; 当 $B < 0$ 时, 随时间 t 的增加, x 呈下降趋势。 B 值大小反映了变量上升或下降的速率, 即表示上升或下降的倾向程度。变化趋势的显著性采用 t 检验, $P > 0.05$ 为没有通过显著性检验, 变化趋势为不显著; 当 $P \leq 0.05$ 时通过显著性检验, 变化趋势为显著。结合两者变化趋势, 可以将两者的变化趋势分为 9 种关系组合(表 1):

表 1 灯光强度和植被覆盖度两者变化趋势关系组合

Table 1 The trend combination of light intensity and FVC (Fractional Vegetation Coverage)

序号 Number	关系 Relationship	灯光变化趋势 Trend of light intensity	植被变化趋势 Trend of FVC	序号 Number	关系 Relationship	灯光变化趋势 Trend of light intensity	植被变化趋势 Trend of FVC
1	都明显下降	显著下降	显著下降	6	只灯光明显升	显著上升	不显著变化
2	都明显上升	显著上升	显著上升	7	只植被明显降	不显著变化	显著下降
3	灯降植升	显著下降	显著上升	8	只灯光明显降	显著下降	不显著变化
4	灯升植降	显著上升	显著下降	9	都无明显变化	不显著变化	不显著变化
5	只植被明显升	不显著变化	显著上升				

3 结果与分析

3.1 灯光数据与经济发展变化关系

2000—2020 年陕西黄河流域灯光总强度及陕西省生产总值都呈现明显的上升趋势(图 2), 卫星监测显示夜间灯光强度从 2000 年的 2.04 上升至 2020 年的 8.86, 同时陕西省统计局数据显示, 陕西省生产总值从 2000 年的 1804 亿元上升至 2020 年的 26181.9 亿元, 说明陕西经济社会发展实现了较高水平上的稳定增长, 为推动高质量发展奠定了良好的宏观经济基础。生产总值与灯光强度呈显著的正相关关系, 相关系数高达 0.94 通过了 $P \leq 0.001$ 极显著的显著性检验, 说明卫星夜光数据能够直观展示城市化发展状况, 同时也能够反映区域经济的发展水平。

2000—2020 年陕西黄河流域灯光强度呈现点、线、面三种城镇发展状态(图 3), 形成了以省会城市西安为中心的关中城镇发展群和围绕能源化工开采为主的陕北城镇发展群, 并由交通运输网建设发展带动中小城市发展。陕西黄河流域城市规模显著扩大, 大部分区域灯光强度都呈上升趋势(图 4、5), 其中明显上升的区域占到了总面积的 93.46%, 上升速率较大的区域主要位于城市周边。同时, 占总面积的 1.24% 的区域灯光强度有下降趋势, 其中显著下降区域占总面积的 0.36%。灯光强度下降的区域一部分主要位于省会及地市级城市核心区域, 另一部分位于陕北能源化工区。

3.2 植被指数与生态环境变化关系

2000—2020 年陕西黄河流域植被覆盖度呈明显增加趋势(图 6), 植被覆盖度由 2000 年的 42.90% 增加至 2020 年的 64.19%, 增速为每年 0.85%。从黄河水利委员会发布的《黄河泥沙公报》中收集的监测数据显示, 2000—2019 年黄河干流陕西段最下游站点潼关站的输沙量呈明显的下降趋势, 减少速率为 0.14 亿 t/a 。植被覆盖度与输沙量呈明显的负相关, 相关系数为 -0.476, 通过了 $P \leq 0.05$ 的显著性检验, 说明植被的改善有助于调节水沙关系, 有研究表明, 2000 年之后植被恢复措施为输沙降低的主要因子^[28], 贡献占到了 57%^[29]。

陕西黄河流域植被覆盖度空间分布差异较大(图 7), 在毛乌素沙漠南缘防风固沙区植被覆盖度最低, 陕北黄土高原丘陵沟壑退耕还林(草)区次之, 而在秦岭、黄龙山、子午岭等天然林保护区植被覆盖度较高。陕

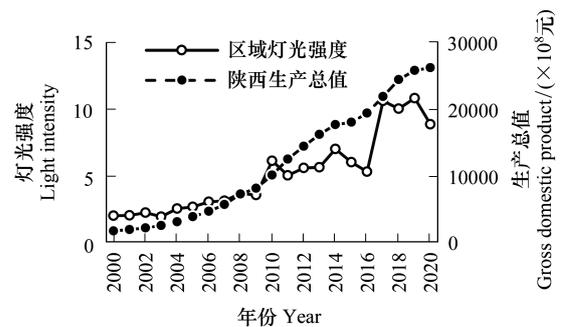


图 2 2000—2020 年陕西黄河流域灯光强度与陕西省生产总值变化曲线图

Fig. 2 Curve of light intensity and GDP in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

西黄河流域大部分区域植被覆盖度呈增加趋势(图 8、9), 占总面积的 86.61%, 其中显著增加的区域占总面积的 67.45%, 主要分布在陕北中部退耕还林(草)区, 说明退耕还林工程对区域植被增加发挥了重要的促进作用。而在城市周边植被覆盖度有下降趋势, 明显下降的区域占总面积的 5.44%, 在关中城市群下降趋势最为突出。

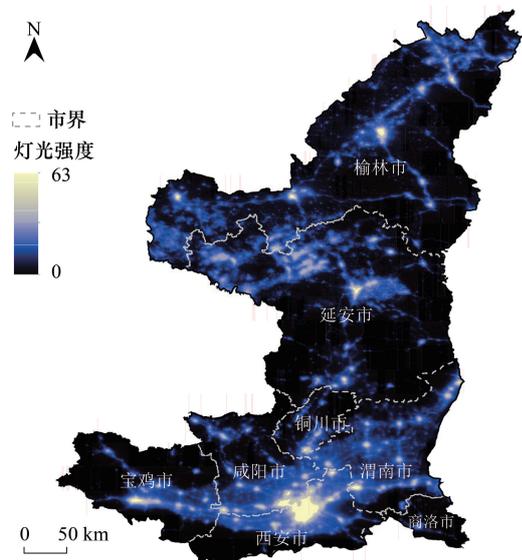


图 3 2000—2020 年陕西黄河流域灯光强度平均值空间分布图
Fig.3 Spatial distribution of mean light intensity in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

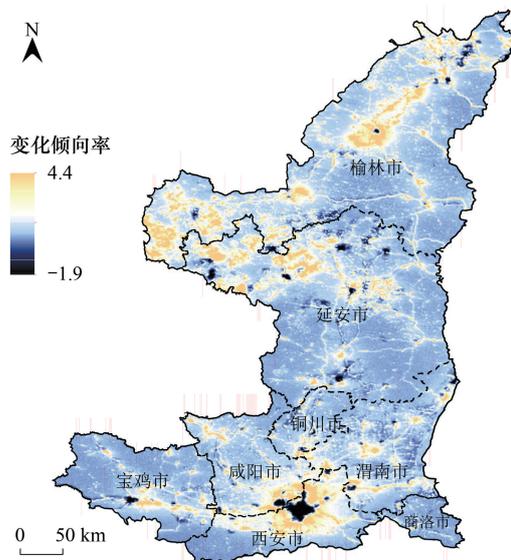


图 4 2000—2020 年陕西黄河流域灯光强度变化倾向率空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of light intensity change tendency rate in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

3.3 灯光强度与植被覆盖度两者变化关系

两者相关关系表明陕西黄河流域经济发展与生态保护协调开展(图 10), 陕西黄河流域大部分区域灯光强度与植被覆盖度呈正相关关系($r>0$), 面积占总区域的 80.68%, 其中协同关系(即显著正相关)区域占总面积的 37.54%, 主要分布在陕北退耕还林区, 这一区域植被覆盖度增速最快, 每年增加 1.48%。权衡关系(即显著负相关)的区域占总面积的 4.81%, 主要分布在城镇化发展迅速的地区, 这一区域灯光强度增速最快, 每年增加 0.72。进一步分析灯光强度与植被覆盖度两者变化趋势的组合关系(图 11、表 2):

灯光强度与植被覆盖度都明显上升的区域总面积占比最大, 占总面积的 63.49%, 其中两者呈协同关系的区域占比 56.42%, 说明灯光强度与植被生态价值同步增加成为陕西黄河流域发展的主要趋势。两者都明显上升的区域主要位于陕北及渭北退耕还林区, 此区域远离城镇化建设的干扰, 灯光强度多年平均值相对较低为 3.49, 同时生态保护工作成效显著, 植被覆盖度每年上升 1.26%。

只灯光明显上升的区域总面积占比排第二, 主要分

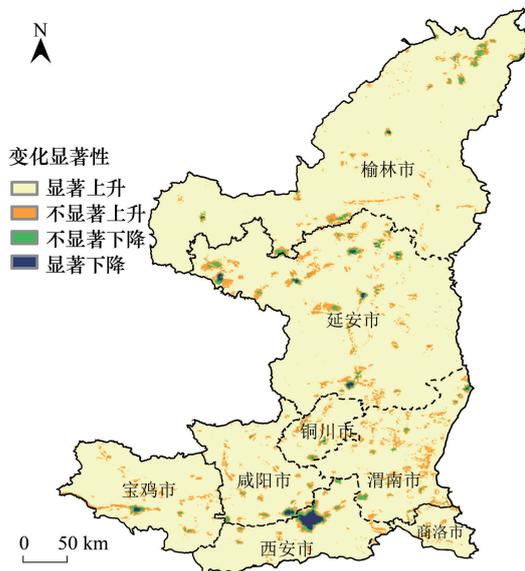


图 5 2000—2020 年陕西黄河流域灯光强度变化显著性空间分布图
Fig.5 Spatial distribution of the significance of light intensity change in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

布在关中城镇化边缘区域、黄龙山子午岭天然林区、陕西南缘防风固沙区等远离城镇建设的区域。占总面积 25.36%,其中 91.04%的区域植被覆盖度与灯光强度无显著相关关系,说明城镇化的发展没有影响植被覆盖度的变化。

灯光强度明显增加植被明显降低的区域总面积占比排第三,占总面积 4.6%,其中高达 71.75%的区域呈权衡关系(即显著负相关),主要位于关中城镇周边的农田区域,植被覆盖度与灯光强度都相对较高,变化速率也较大,说明区域城镇化处于建设发展阶段,农田正在逐渐变为城市。关中地区同时是重要的粮食主产区,这一变化趋势会对区域粮食安全造成一定压力。

剩下不到 5%的区域,主要位于城市核心区域及靠近城市的周边,但却有明显的空间分布差异。只植被明显增加和灯降植升的地区,面积占比分别为 3.84%和 0.11%,分别位于陕北能源化工区周边和核心区域,由于中心城市的吸引和矿产资源的枯竭,该类地区的人类社会经济活动在逐步减少,加之区域不断加大的生态环境保护力度,因此城市核心区域灯光强度下降而植被恢复较快。只植被明显降低的区域、只灯光明显降低的区域以及两者都明显降低的区域也都主要位于关中中心城市建城区,面积占比分别为 0.78%,0.18%和 0.07%,面积占比虽小,但从中能看出城市发展的特点。以西安市发展为例,由于城市核心区域为老城区,设施逐渐老旧,而外围新型城区不断发展,老城区人口逐渐流向外围新型城区,并且西安人才引进计划吸引的人口也主要向新型城区分散,商业文化中心也不再集中为一点,发展了多个商圈,市中心这一概念逐渐弱化,因此以前老城区市中心位置的灯光强度有明显降低。新型城区人类活动更为频繁,造成植被覆盖下降,而在老城区与新型城区交界处,灯光与植被同时明显下降。

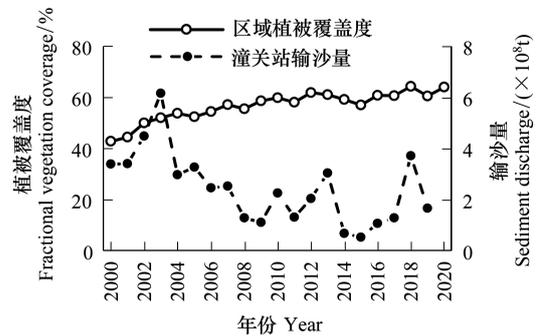


图 6 2000—2020 年陕西黄河流域植被覆盖度与 2000—2019 年黄河干流潼关站河流输沙量变化曲线图

Fig.6 Curve of FVC from 2000 to 2020 in the Yellow River Basin of Shaanxi Province and sediment discharge of Tongguan station from 2000 to 2019

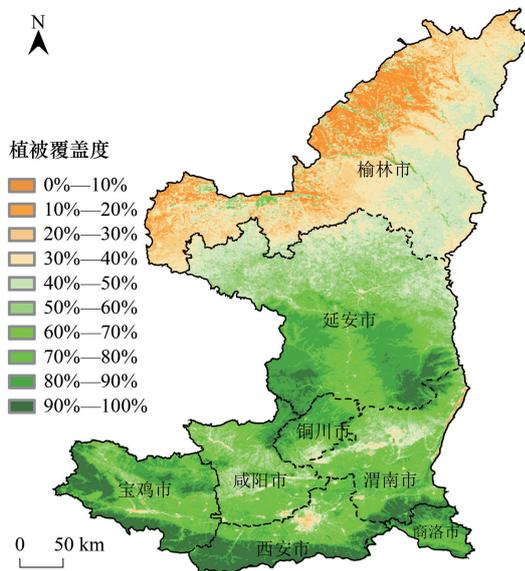


图 7 2000—2020 年陕西黄河流域植被覆盖度平均值空间分布图
Fig.7 Spatial distribution of average FVC in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

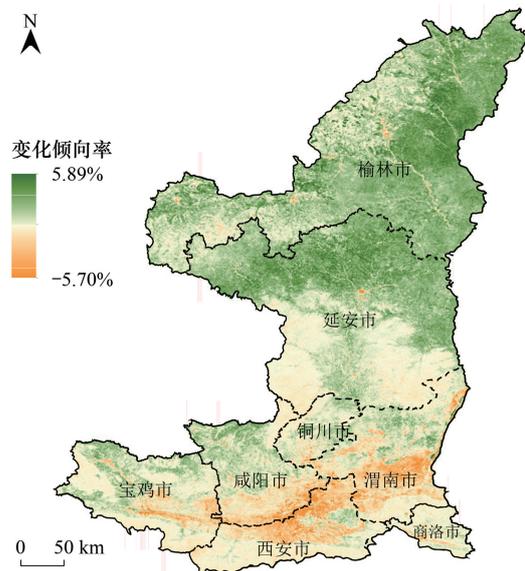


图 8 2000—2020 年陕西黄河流域植被覆盖度变化倾向率空间分布图
Fig.8 Spatial distribution of FVC change tendency rate in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

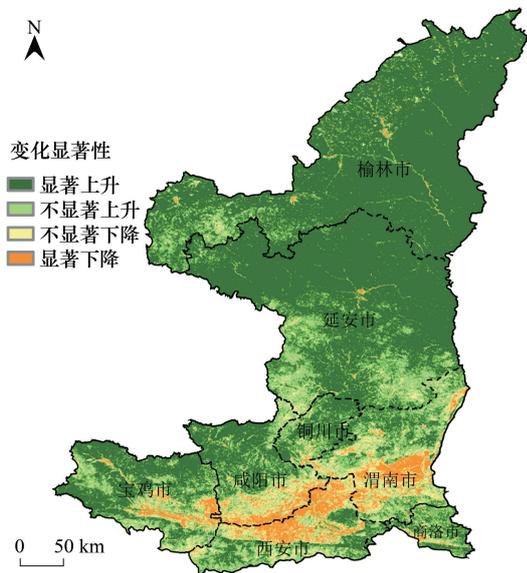


图9 2000—2020年陕西黄河流域植被覆盖度变化显著性空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of FVC change significance in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

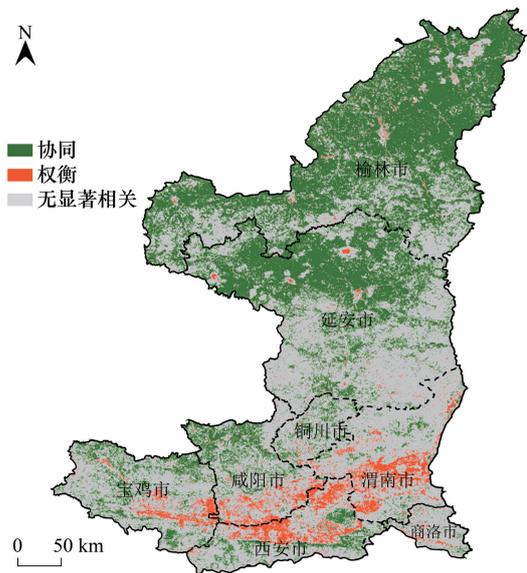


图10 2000—2020年陕西黄河流域灯光强度与植被覆盖度协同和权衡关系空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of synergy and trade-off between light intensity and FVC in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

4 结论与讨论

本文基于卫星植被指数数据与夜间灯光数据,分析了陕西黄河流域城镇化与植被生态环境之间的相关性及变化趋势的协同性,结果显示进入21世纪的21年间,陕西黄河流域城市化发展快速,生态环境总体向好,经济与生态高质量协同发展成为主要趋势,但部分区域仍存在问题,还有待进一步协调改善。主要结论如下:

(1) 陕西黄河流域城镇化与经济社会发展实现了较高水平上的稳定增长,灯光强度从2000年的2.04上升至2020年的8.86,灯光强度呈明显上升的区域占到了总面积的93.46%。陕西黄河流域灯光强度呈现点、线、面三种城镇发展状态,形成了以省会城市西安为中心的关中城镇发展群和围绕能源化工开采为主的陕北城镇发展群,并由交通运输网建设发展带动中小城市发展。

(2) 陕西黄河流域生态环境总体向好,植被覆盖度由2000年的42.90%增加至2020年的64.19%。植被覆盖度显著增加的区域面积占67.45%,以陕北中部退耕还林(草)区植被增加最为显著。同时与潼关站输沙量对比证明植被的改善有助于调节水沙关系,缓解区域水土流失问题。

(3) 陕西黄河流域经济与生态高质量协同发展成为主要趋势,灯光强度与植被覆盖度同时明显上升的区

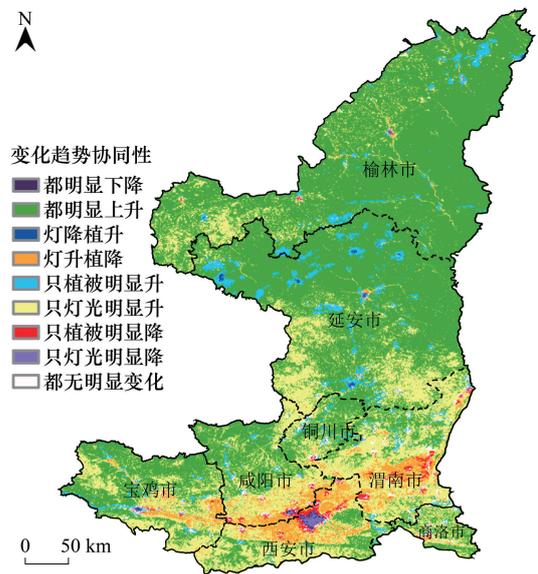


图11 2000—2020年陕西黄河流域灯光强度与植被覆盖度变化趋势组合关系空间分布图

Fig.11 Spatial distribution of combined relationship between light intensity and FVC in the Yellow River Basin of Shaanxi Province from 2000 to 2020

域占总面积的 63.49%,其中两者呈协同关系的区域占比 56.42%,主要位于陕北及渭北退耕还林区,生态保护工作成效显著。

表 2 植被覆盖度和灯光强度变化趋势组合关系统计

Table 2 Statistical analysis of the combined relationship between FVC and light intensity

序号 Number	关系 Relationship	植被覆盖度 FVC/%		灯光强度 Light intensity		总面积 占比 Total ratio/%	区域占比 Part ratio/%		
		变化 倾向率 Slope	21 年 平均 Mean	变化 倾向率 Slope	21 年 平均 Mean		协同 Synergy	权衡 Trade-off	无显著相关 Uncorrelated
1	都明显下降	-1.65	42.85	-0.72	52.19	0.07	24.83	0.44	74.72
2	都明显上升	1.29	50.65	0.43	3.49	63.49	56.42	0.03	43.56
3	灯降植升	1.51	49.31	-0.81	26.08	0.11	0.00	52.58	47.42
4	灯升植降	-1.17	67.63	0.80	13.71	4.60	0.10	71.75	28.15
5	只植被明显升	1.30	55.30	0.19	9.79	3.84	13.86	1.14	85.01
6	只灯光明显升	0.12	69.99	0.45	5.07	25.36	4.09	4.87	91.04
7	只植被明显降	-1.49	59.37	0.19	30.23	0.78	2.55	10.39	87.06
8	只灯光明显降	-0.04	33.81	-0.76	52.93	0.18	2.99	5.81	91.20
9	都无明显变化	0.06	64.09	0.17	15.92	1.57	6.47	4.38	89.15

(4) 陕西黄河流域植被变化与城镇化发展呈权衡关系的区域较小,主要表现为灯光强度明显增加而植被明显降低,占总面积 4.6%,其中明显表现为权衡关系的区域占比高达 71.75%,主要位于关中城镇化正在快速发展的地区;

(5) 城市核心区域及靠近城市的周边占总面积不到 5%的区域,有明显的空间分布差异。在陕北能源化工区,由于中心城市的吸引和矿产资源的枯竭,城市核心区域灯光强度下降而植被恢复较快;同时以西安为中心关中城市群,市中心这一概念逐渐弱化,城市中心区域灯光强度下降,并且随着城市核心区域设施逐渐老旧,外围新型城区人口不断涌入,城市生态环境也有待改善。

陕西黄河流域植被明显恢复,生态环境建设取得了显著成效,但区域仍然是生态环境较为脆弱的区域^[30]。在脆弱区,生态服务价值不足以维持系统自我循环时,会导致生态环境恶化^[31]。在全球变暖的背景下^[32],干旱、暴雨洪涝等极端天气现象加剧,区域植被覆盖难以维持稳定。随着经济发展,农业、工业和城市生活用水需水量增加,区域水资源供需矛盾将更加突出。因此还需加强气候变化对区域水资源的影响评估,完善重点生态功能区和生态修复治理区的气候变化应对能力,才能更好的满足区域高质量发展的需求。

参考文献 (References):

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. (2019-10-15) [2021-04-08]. https://www.ccps.gov.cn/xtt/201910/t20191015_134958.shtml.
- [2] 杨依军, 黄玥. 第一观察 | 高质量发展“高”在哪儿? 习近平总书记这样解析. (2021-03-08) [2021-04-08]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693595891828480772&wfr=spider&for=pc>
- [3] 刘国中. 坚定不移推动高质量发展 凝心聚力新时代追赶超越. (2021-04-01) [2021-04-08]. http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-04/01/c_1127274710.htm.
- [4] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [5] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.
- [6] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [7] Wang T M, Wu J G, Kou X J, Oliver C, Mou P, Ge J P. Ecologically asynchronous agricultural practice erodes sustainability of the Loess Plateau of China. Ecological Applications, 2010, 20(4): 1126-1135.
- [8] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's

- Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [9] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: achievements, problems, synthesis, and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [10] Feng X M, Sun G, Fu B J, Su C H, Liu Y, Lamparski H. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2617-2628.
- [11] 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.
- [12] 王钊. 基于 DMSP/OLS 数据的陕西省近 20 年城市化空间分异特征研究. *陕西气象*, 2018, (1): 10-16.
- [13] 姚小剑, 何珊. 基于我国省际面板数据的新城镇化水平测度与分析. *西安石油大学学报: 社会科学版*, 2017, 26(6): 1-7.
- [14] 邱国玉, 张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 640-649.
- [15] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 1-10.
- [16] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 王亚萍. 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性. *资源科学*, 2020, 42(1): 96-103.
- [17] Fang C L, Liu H M, Li G D. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(8): 1081-1116.
- [18] 任宇飞, 方创琳, 李广东, 孙思奥, 鲍超, 刘若文. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. *地理学报*, 2020, 75(3): 589-606.
- [19] 刘焱序, 吴文恒, 温晓金, 张东海. 晋陕蒙能源区城镇化过程及其对生态环境的影响. *地理研究*, 2013, 32(11): 2009-2020.
- [20] 徐翀崎, 李锋, 韩宝龙, 陶宇. 动态适应性生态经济区划模型及其应用. *生态学报*, 2017, 37(5): 1740-1748.
- [21] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 杨凯悦, 米文宝. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局. *经济地理*, 2020, 40(6): 174-184.
- [22] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 杨智威, Marinello F. 基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 717-729.
- [23] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 366-412.
- [24] 张锴, 薛亮. 基于多源遥感数据的陕西 2000—2015 年城市扩展研究. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1170-1177.
- [25] 曾冰. 基于 CiteSpace 的国内夜间灯光数据研究知识图谱分析. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(3): 7-11.
- [26] Quarmby N A, Townshend J R G, Settle J J, White K H, Milnes M, Hindle T L, Silleos N. Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 415-425.
- [27] 王朗, 傅伯杰, 吕一河, 曾源. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2109-2116.
- [28] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因. 北京: 科学出版社, 2016.
- [29] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [30] 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.
- [31] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [32] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.