

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.048.

呼海涛, 畅易飞, 王凯博. 2000—2020年陕西省植被覆盖时空变化多尺度分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 345-352.

HU Haitao, CHANG Yifei, WANG Kaibo. Multi-Scale Analysis of Spatiotemporal Change of Vegetation Cover in Shaanxi Province from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 345-352.

2000—2020年陕西省植被覆盖时空变化多尺度分析

呼海涛¹, 畅易飞², 王凯博³

(1.陕西省林业调查规划院, 西安 710082; 2.陕西省水利电力勘测设计研究院,
西安 710001; 3.中国科学院地球环境研究所, 西安 710061)

摘要: [目的] 退耕还林还草工程实施以来, 陕西省植被覆盖度明显提高。然而, 省级尺度上植被覆盖度的增加一定程度上掩盖了部分市、县级区域植被覆盖度下降的实事, 当前迫切需要加强对不同空间尺度植被覆盖变化及其驱动因素的研究。 [方法] 基于 MODIS NDVI 数据计算了陕西省植被覆盖度, 分析了 2000—2020 年陕西省、地区、市和县四级尺度植被覆盖度时空变化趋势。 [结果] 2000—2020 年陕西省植被平均覆盖度为 $64.3\% \pm 2.1\%$, 增长率为 $0.24\%/a$; 陕北植被覆盖度平均为 $37.6\% \pm 4.4\%$, 增长率为 $0.63\%/a$; 陕南植被覆盖度平均为 $89.6\% \pm 1.2\%$, 增长率为 $0.13\%/a$; 关中植被覆盖度平均为 $70.6\% \pm 3.5\%$, 下降率为 $-0.18\%/a$ 。延安市、榆林市、铜川市、宝鸡市、安康市、商洛市的植被覆盖度呈持续增加趋势, 而西安市、渭南市、咸阳市和汉中市的植被覆盖度呈先增加后下降趋势; 全省有 72.3% 的区县植被覆盖度呈增加趋势, 有 22.3% 的区县植被覆盖度变化方向与所在市相反。在不同空间尺度上, 陕西省植被覆盖度增速均表现为 2000—2010 年高于 2010—2020 年, 这与两个时期的造林面积差异有关。 [结论] 陕西省植被覆盖度变化存在空间尺度依赖性, 对不同尺度植被覆盖变化的精确认知有助于科学评估区域生态建设成效。

关键词: 植被覆盖度; 像元二分模型; 多尺度; 时空变化; 退耕还林还草工程

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0345-08

Multi-Scale Analysis of Spatiotemporal Change of Vegetation Cover in Shaanxi Province from 2000 to 2020

HU Haitao¹, CHANG Yifei², WANG Kaibo³

(1. Shaanxi Forestry Survey and Planning Institute, Xi'an 710082, China;
2. Shaanxi Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute, Xi'an 710001,
China; 3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: [Objective] Since the Grain for Green Project was implemented, the vegetation coverage in Shaanxi Province has been improved significantly. However, the increase of vegetation cover at the provincial scale conceals the fact that the vegetation cover decreases in some cities and counties. Thus, there is an urgent need to strengthen the study of vegetation cover change and its driving factors in different spatial scales. [Methods] The vegetation coverage of Shaanxi Province from 2000 to 2020 was calculated based on the MODIS NDVI data, and the spatiotemporal change trend of vegetation coverage in different spatial scales was analyzed. [Results] The average vegetation coverage of Shaanxi Province was $64.3\% \pm 2.1\%$ and the annual growth rate was 0.24% , the average vegetation coverage of northern Shaanxi was $37.6\% \pm 4.4\%$ with the annual growth rate of 0.63% , and the average vegetation coverage of southern Shaanxi was $89.6\% \pm 1.2\%$ with the annual growth rate of 0.13% , the average vegetation coverage in middle Shaanxi was $70.6\% \pm 3.5\%$ with the annual decline

收稿日期: 2022-01-01

修回日期: 2022-01-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“松栎混交林土壤团聚体—微生物耦合调控有机碳库稳定性作用机制”(42177339), 陕西省重点研发计划项目“沙漠—黄土过渡带植被结构特征阈值与提质增效关键技术研究”(2021ZDLSF05-02)

第一作者: 呼海涛(1983—), 男, 陕西省延川县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态空间资源监测、生态系统碳汇研究等。E-mail: 8534022@qq.com

通信作者: 王凯博(1982—), 男, 河南省西平县人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与碳循环研究。E-mail: wangkb@ieecas.cn

<http://stbcy.paperonice.org>

rate of -0.18% from 2000 to 2020. The vegetation coverage of Yan'an, Yulin, Tongchuan, Baoji, Ankang and Shangluo continued to increase, while the vegetation coverage of Xi'an, Weinan, Xianyang and Hanzhong increased first and then decreased from 2000 to 2020. In the whole province, vegetation coverage in 72.3% of the districts and counties showed an increasing trend, and changes of vegetation coverage in 22.3% of the districts and counties showed the opposite direction. The growth rate of vegetation coverage in Shaanxi Province was higher in 2000—2010 than that in 2010—2020 at different spatial scales, which could be attributed to the difference of afforestation area in the two periods. [Conclusion] The change of vegetation cover in Shaanxi Province is dependent on spatial scale. The accurate understanding of the change of vegetation cover at different scales is helpful to scientifically evaluate the effectiveness of regional ecological construction.

Keywords: vegetation coverage; dimidiate pixel model; multi-scale; spatiotemporal change; Grain for Green Project

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统初级生产力的提供者,植被覆盖度的增加或下降能够直接反映生态环境的改善或退化状况^[1-2]。通过监测植被覆盖度的变化,能够准确认识区域生态环境的演变特征,进而科学评估重大生态工程建设的成效与问题,为新时期国家和区域生态工程建设规划决策提供科学依据^[3-4]。

退耕还林还草工程始于1999年,是我国乃至全世界投资最多、建设规模最大、政策性最强的重大生态工程^[5-7]。陕西省是我国退耕还林还草工程实施的首批试点省份之一,也是国家退耕还林还草工程生态效益监测的重点地区^[8]。该省南北跨越亚热带湿润、暖温带半湿润和温带半干旱气候区,地貌类型涵盖山地、平原、高原、丘陵、沙地等,对陕西省退耕还林还草工程实施以来植被覆盖变化的研究在全国具有很好的典型性和代表性。已有学者利用遥感数据产品对退耕还林还草工程实施以来陕西省植被覆盖变化进行了一些研究。如:秦超等基于2000—2012年SPOT-VGT NDVI数据研究了陕西省植被覆盖的时空变化,并探讨了NDVI与降雨量和气温的关系^[9];殷崎栋等利用MODIS NDVI数据分析了2001—2018年陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响^[10];高滢等利用MODIS NDVI数据探讨了2001—2018年陕西省植被覆盖的时空变化及其对极端气温和降水的响应^[11]。然而,上述工作重点研究了陕西省省级尺度上植被覆盖的时空变化特征,而对市、县级尺度上植被覆盖变化缺少精细化的分析,限制了对小尺度上植被覆盖变化规律及其驱动因素的认识;并且已有研究均直接采用NDVI表征植被覆盖变化情况,尽管NDVI与植被覆盖度成正比,但二者并非线性关系,当植被覆盖度值较大时,NDVI随植被覆盖度增大的增幅会减少^[12],一定程度上增加了研究结果的不确定性。

因此,为了更加科学、全面、系统地认识陕西省退耕

还林还草工程实施以来植被覆盖变化特征,本文基于2000—2020年陕西省250 m×250 m分辨率MODIS NDVI数据,采用像元二分模型计算植被覆盖度,分析省、地区、市和县四级尺度植被覆盖度时空变化规律,探讨植被覆盖度空间格局形成及演化原因,为新时期陕西省不同空间尺度生态建设规划实施提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

陕西省位于我国内陆腹地($105^{\circ}29'—111^{\circ}15'E$, $31^{\circ}42'—39^{\circ}35'N$),地势南北高、中间低,从南到北跨越秦巴山地、关中平原和黄土高原3种地貌类型,地跨长江、黄河两大流域,总面积20.6万 km^2 (图1)。省内南北气候差异大,年平均气温 $9\sim 16^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $300\sim 1\,200\text{ mm}$,自南向北、自东向西递减。陕南为湿润气候区,年均降雨量超过800 mm;关中为半湿润气候区,年均降雨量约600 mm;陕北为半干旱气候区,年平均降雨量不足500 mm^[13]。本研究中陕北地区包括陕西省北部的榆林和延安两个地级市所有区县,关中包括陕西省中部的宝鸡、西安、咸阳、渭南和铜川5个地级市所有区县,陕南包括陕西省南部的汉中、安康和商洛3个地级市所有区县。为便于统计,本文将各地级市辖区合并为市区。

1.2 数据来源与处理

本研究采用数据产品为美国国家航空航天局(NASA)发布的空间分辨率为250 m×250 m,时间分辨率为16 d的MODIS NDVI。数据下载地址为:<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>。MODIS NDVI经过格式转换后,利用ArcGIS软件进行研究区边界裁剪,采用年最大值合成方法(MVC)获取陕西省2000—2020年NDVI值。在此基础上,采用像元二分模型计算陕西省每年的植被覆盖度^[2],具体公式如下:

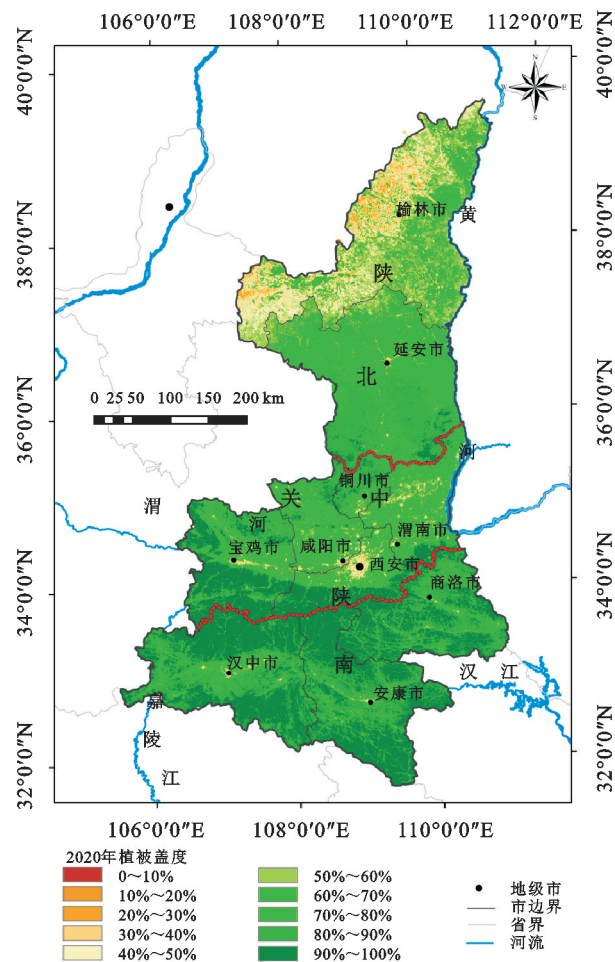


图 1 陕西省地理位置及分区图

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$
 (1)

式中: FVC 表示植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 分别表示无植被覆盖和完全植被覆盖像元的 NDVI 值。为去除噪声影响, 本文 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 分别对应累积概率 5% 和 95% 的区域 NDVI 最小和最大值。

采用线性回归趋势分析法, 逐像元计算陕西省 2000—2020 年植被覆盖度年际变化率, 计算公式如下^[14]:

$$FVC_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times FVC_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$
 (2)

式中: n 为植被覆盖度的年序列长度, 本研究为 21; FVC_i 表示某像元第 i 年的植被覆盖度; FVC_{slope} 表示植被覆盖度的年际变化率, 当 $FVC_{slope} > 0$ 时, 表示该像元的植被覆盖度呈增加趋势, 反之, 表示植被覆盖度呈下降趋势。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年陕西省植被覆盖的基本特征

2000—2020 年陕西省植被平均覆盖度 $64.3\% \pm$

2.1%, 变化范围在 59.2%~66.7% 之间; 陕南地区植被覆盖度最高, 平均为 $89.6\% \pm 1.2\%$, 在 87.4%~91.8% 之间变化; 其次为关中地区, 植被平均覆盖度为 $70.6\% \pm 3.5\%$, 变化范围在 64.8%~77.3% 之间; 陕北地区植被覆盖度最低, 平均为 $37.6\% \pm 4.4\%$, 在 28.4%~42.8 之间变化(图 2)。

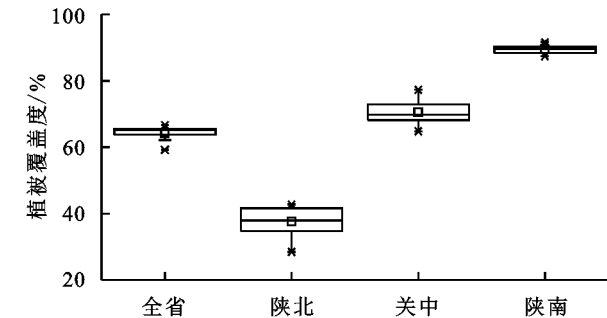


图 2 2000—2020 年植被覆盖度总体特征值

2.2 2000—2020 年陕西省植被覆盖变化特征

2000—2020 年陕西省植被覆盖度明显增加, 平均增长率为 0.24%/a。其中, 植被覆盖度在 2000—2010 年呈快速增长趋势, 其值从 60.0% 增加至 66.7%, 平均增长率达 0.70%/a。2010 年后, 植被覆盖度趋于稳定, 其值在 64.3%~66.7% 之间波动(图 3)。

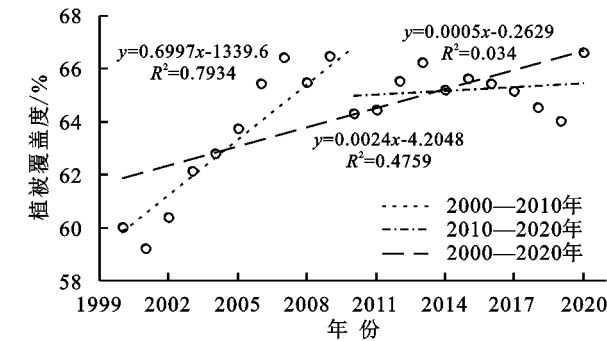


图 3 陕西省 2000—2020 年植被覆盖度变化

参考陕西省林业统计年鉴, 以植被覆盖度递增 20% 为阈值范围, 将陕西省植被覆盖分为高(80%~100%)、较高(60%~80%)、中(40%~60%)、较低(20%~40%)和低(0%~20%)植被覆盖 5 个等级。总体上看, 2000—2020 年陕西省高覆盖度和中覆盖度植被面积明显增加, 2020 年较 2000 年分别增加了 16.3% 和 33.4%; 低覆盖度植被面积明显下降, 2020 年较 2000 年下降了 41.6%; 此外, 较低覆盖度和较高覆盖度植被面积也有所下降, 其下降比例分别为 5.5% 和 7.1%(图 4)。

2.3 2000—2020 年陕北、关中和陕南植被覆盖变化特征

陕北、关中和陕南 3 个分区的植被覆盖在 2000—2020 年呈现出不同的变化趋势(图 5)。其中, 陕北地区植被覆盖改善最为明显, 植被覆盖度从 2000 年的 28.4% 增加到 2020 年的 42.0%, 年增加幅

达 0.63%/a; 陕南地区植被覆盖也呈增加趋势, 但增速较为缓和, 植被覆盖度增加为 0.13%/a; 而关中地区植被覆盖呈先增加后下降趋势, 植被覆盖度下降为 -0.18%/a。与全省类似, 陕北和陕南地区植被覆盖度呈现 2010 年前增加迅速, 2010 年后趋缓的变化趋势, 陕北地区 2010 年前后增幅分别为 1.05%/a 和 0.27%/a, 陕南地区增幅分别为 0.29%/a 和 0.08%/a; 关中地区植被覆盖度在 2000—2010 年增速为 0.72%/a, 介于陕北和陕南增速之间, 但 2010—2020 年植被覆盖度转为下降趋势, 下降速度为 -0.33%/a。

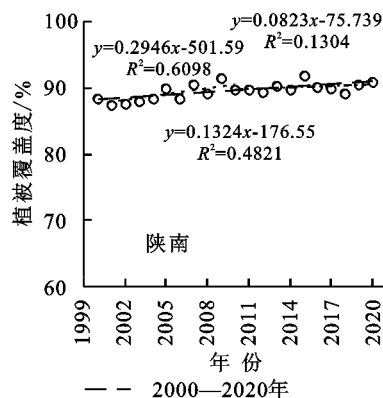
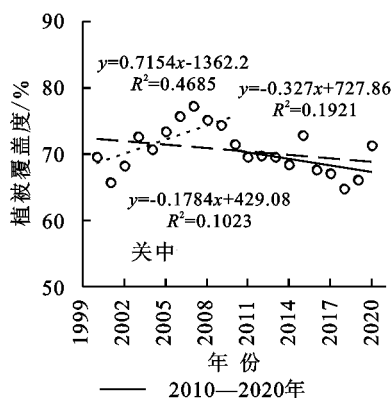
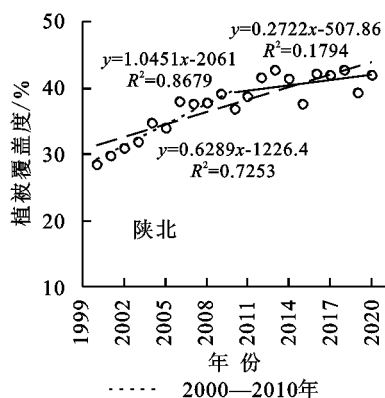


图5 陕西省2000—2020年三大区植被覆盖度变化趋势

2.4 2000—2020年陕西省市级植被覆盖变化特征

对陕北、关中和陕南各市 2000—2020 年植被覆盖度变化的进一步分析可以看出, 陕北地区的延安市、榆林市, 关中地区的铜川市、宝鸡市, 陕南地区的安康市、商洛市的植被覆盖度呈持续增加趋势, 其增幅为延安市 (0.59%/a) > 榆林市 (0.51%/a) > 铜川市 (0.42%/a) > 商洛市 (0.19%/a) > 安康市 (0.18%/a) > 宝鸡市 (0.07%/a)。而位于关中地区的西安市、渭南市、咸阳市和陕南地区的汉中市, 2000—2020 年植被覆盖度呈先增加后下降趋势, 并且植被覆盖度降幅为西安 (-0.59%/a) > 渭南市 (-0.50%/a) > 咸阳市 (-0.18%/a)。除西安市外, 2010 年前陕西省各市植被覆盖度均呈现不同程度增加趋势, 但 2010 年后各市植被覆盖度增速减缓或转为下降趋势 (图 6)。

2.5 2000—2020年陕西省县级植被覆盖变化特征

2000—2020 年, 陕西省有 72.3% 的区县植被覆盖度呈增加趋势, 以延安市所属各县增幅最大, 在所有植被覆盖度下降区县中, 以咸阳市南部区县和西安市各区县降幅最大 (图 7)。在 2000—2010 年, 陕西省 70.2% 的区县植被覆盖度呈现增长趋势, 其中 33.0% 的区县植被覆盖度增速超过了 0.5%/a, 主要分布在延安市和榆林市, 以延安市延长县增长趋势最为明显, 达到 2.0%/a; 这一时期植被覆盖度快速下降的区县主要分布在西安市、咸阳市南部区县、汉中市

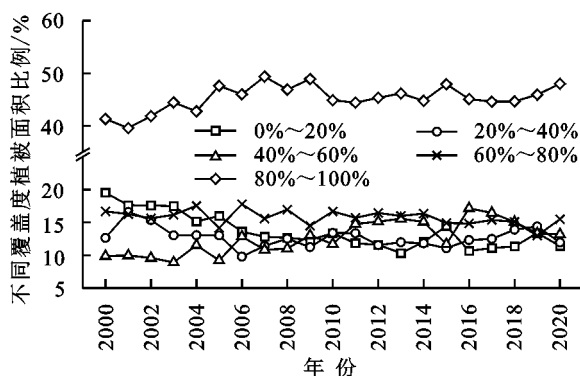


图4 2000—2020年陕西省不同覆盖度植被面积比例变化

等, 其中 5.3% 的区县植被覆盖度下降超过了 0.5%/a, 以西安市高陵县下降最快, 为 -1.6%/a。在 2010—2020 年, 陕西省植被覆盖度增加的区县下降到 66.0%, 植被覆盖度增速超过 0.5%/a 的区县下降到 16.0%, 主要分布在延安市、榆林市以及咸阳市北部区县等, 以咸阳市长武县增加最快, 为 1.3%/a; 与此同时, 陕西省有 8.5% 的区县植被覆盖度下降超过 0.5%/a, 主要分布在咸阳市南部区县、汉中市区及西安市和渭南市的部分区县, 以咸阳市兴平市下降最快, 为 -1.3%/a。

3 讨论

3.1 陕西省植被覆盖空间格局形成原因分析

陕西省植被覆盖空间格局形成主要由省内南北气候、地貌和土地利用类型等的差异引起。气候条件是影响植被空间分布的主要因素, 气温和降水共同决定了区域尺度上植被的分布特征及生产潜力^[15-17]。陕南地区位于亚热带湿润气候区, 年平均降水量 700~1 200 mm, 年平均气温 11.1~15.7℃, 水热条件最优, 植被平均盖度为 89.6%; 关中地区属于暖温带半湿润气候区, 年平均降水量在 500~800 mm, 年平均气温 7.9~13.9℃, 水热条件次之, 植被平均盖度为 70.6%; 陕北地区属于中温带半干旱气候区, 年平均降水量 300~600 mm, 年平均气温 8.4~10.0℃, 水热条件最差, 植被平均盖度为 37.6% (图 2)。

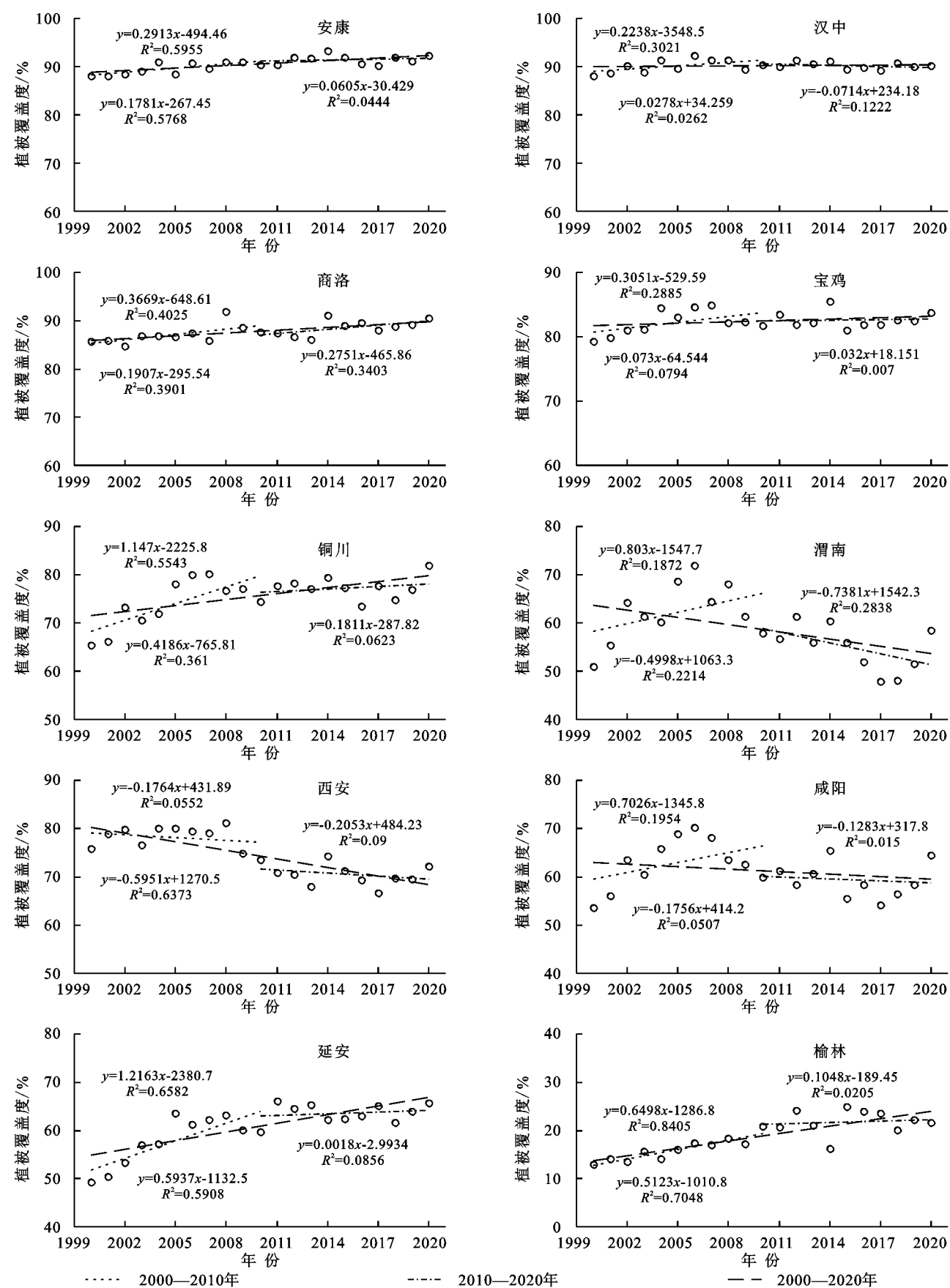


图 6 2000—2020 年陕西省各市植被覆盖度变化

除气候条件外,地貌和土地利用类型也对植被覆盖度空间分布格局有重要影响^[10-18]。陕南地区分布着秦岭和巴山两大山系,地貌类型以山地和丘陵为主,占该区国土面积的 90% 以上^[13]。因秦巴山脉地形陡

峭,受人类活动影响较小,陕南地区土地利用类型以林地为主,植被覆盖度最大。关中地区以分布于秦岭和北山之间的渭河平原为主,由于地势平坦,易于耕作,区内土地利用类型以耕地为主;同时,关中平原南

部的秦岭北麓也保留着一定面积的林地(表1),该区植被覆盖度居中。陕北地区主要地貌类型为黄土高原和毛乌素沙地长期受到人类活动影响,土地利用类型以草地和耕地为主,该区植被覆盖度最低。

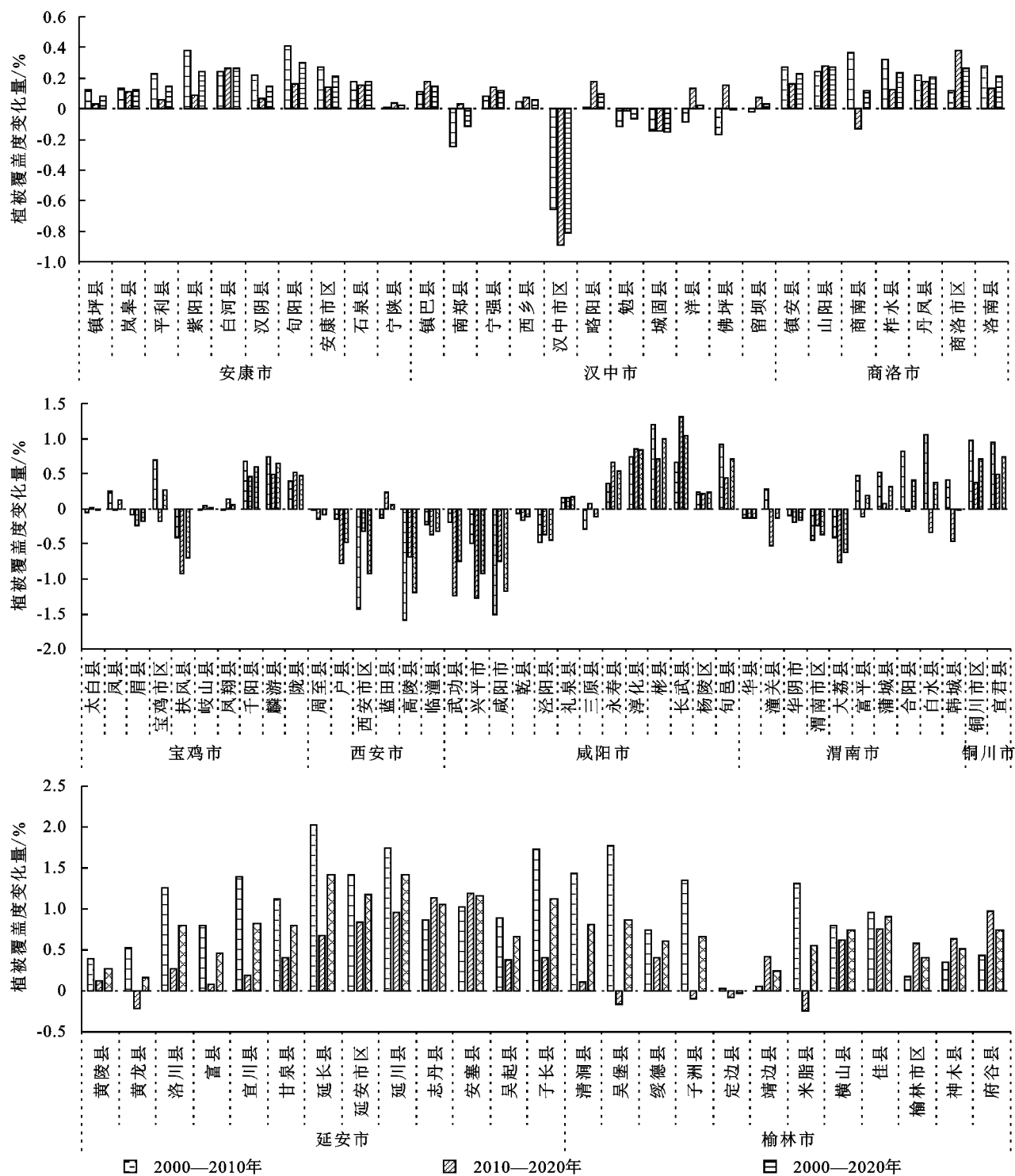


图7 2000—2020年陕西省各区县植被覆盖度年均变化量

3.2 陕西省植被覆盖度时空变化分析

退耕还林还草工程的实施是陕西省2000—2020年植被盖度明显增加的直接原因。国家自1999年启动退耕还林还草工程,陕西省是全国率先开展退耕还

林还草工程的省份之一。截至2018年,陕西省累积完成退耕还林268.9万 hm^2 ,其中退耕地还林124.1万 hm^2 ,荒山造林128.8万 hm^2 ,封山育林16.0万 hm^2 ^[19]。此外,退耕还林还草一期工程实施周期为1999—2010年,在这

一时期,陕西省累积造林面积为 211.3 万 hm^2 ^[20],占 2018 年以前退耕还林面积的 78.6%,因此,2000—2010 年陕西省植被盖度增速显著高于 2010—2020 年(图 3)。从空间上看,陕北黄土高原是我国水土流失治理的重点地区,即陕西省退耕还林工程建设的核心区,其退耕还林面积占陕西省工程实施面积的 49%,而陕南和关中地区分别占比为 28%和 23%^[21],因此,

陕北地区是省内植被盖度增幅最明显地区。而在关中地区,2000—2020 年林地面积增加的同时,城市建设用地也在大幅度增加,并且其增幅超过了林地增加面积^[22],导致关中地区植被盖度下降(图 8)。对于陕南地区,尽管植被覆盖也呈增加状况,但秦巴山地植被覆盖基准值较高,植被增长潜力相对较小,植被盖度增速较低。

表 1 陕西省 2020 年土地利用类型面积及比例

土地利用 类型	陕西省		陕北		关中		陕南	
	面积/ 10^4 hm^2	比例/%	面积/ 10^4 hm^2	比例/%	面积/ 10^4 hm^2	比例/%	面积/ 10^4 hm^2	比例/%
耕地	626.7	30.4	261.7	32.7	250.4	44.9	114.6	16.3
林地	922.9	44.7	149.6	18.7	230.9	41.4	542.3	77.0
草地	422.2	20.5	360.0	44.9	26.2	4.7	36.0	5.1
其他	91.0	4.4	30.1	3.7	49.6	9.0	11.13	1.6

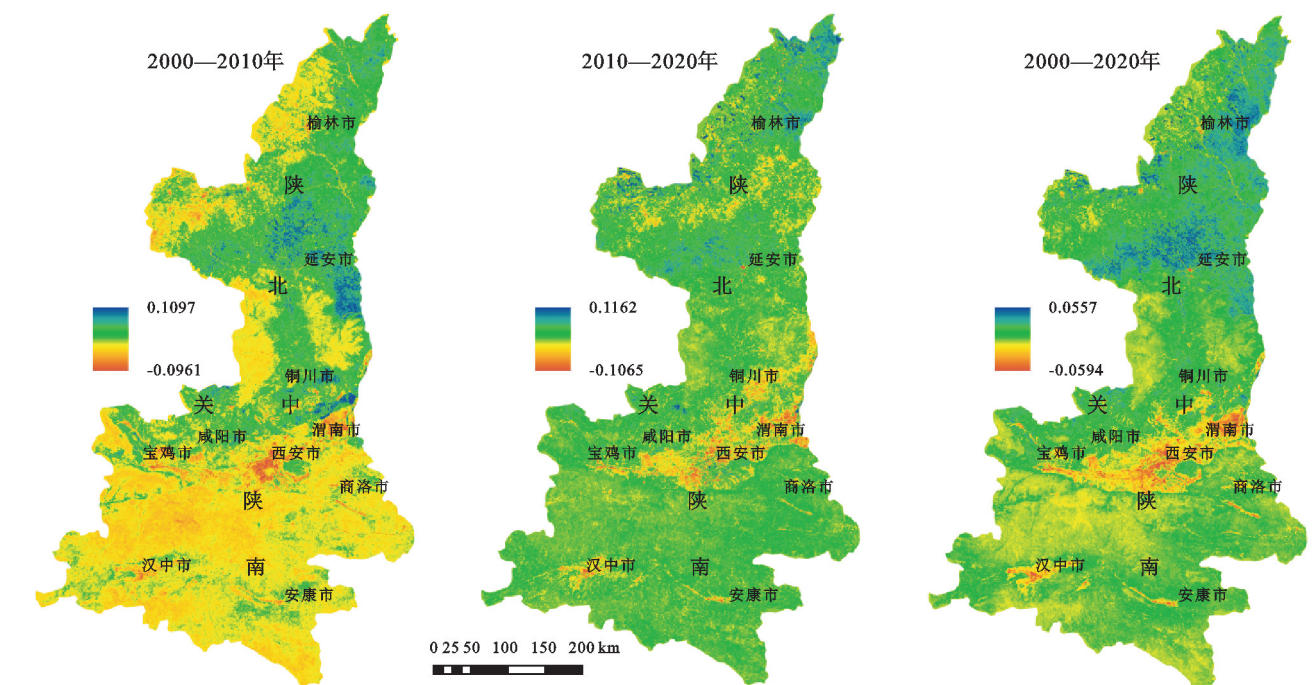


图 8 陕西省 2000—2020 年植被覆盖度时空变化特征

3.3 不同空间尺度植被盖度变化分析

植被覆盖的空间变异程度具有明显的尺度依存性^[23],陕西省植被盖度变化趋势在不同空间尺度表现出一定差异。从全省看,2000—2020 年植被盖度增加明显;而从各分区看,陕北和陕南地区植被盖度变化趋势与全省一致,表现为不同程度增加,但关中地区植被盖度总体变化表现出下降趋势;从关中各市看,西安市、咸阳市和渭南市植被盖度表现出不同程度下降,但宝鸡市和铜川市植被盖度仍呈增长趋势;在县域尺度上,全省有 22.3%的区县植被盖度变化与所在市相反,具体表现为咸阳(53.8%)>汉中(45.5%)>渭南(40%)>宝鸡(30%)>西安(16.7%)>榆林(8.3%)。上述差异表明:在大尺度上进行的植被盖度变化分析不

能充分揭示小尺度上植被变化的时空分异及其驱动力^[24],与大尺度相比,小尺度在空间分析上能更详尽地反映近 21 年来陕西省植被盖度变化的空间格局。因此,在重大生态工程效益评估时,需要加强对小尺度植被盖度变化的研究,探究县域尺度植被覆盖变化的关键驱动力,并在未来生态建设规划中,重点关注植被盖度下降的县区,加强该地区植被建设,遏制植被盖度持续下降趋势。

4 结 论

(1) 2000—2020 年陕西省植被平均覆盖度 64.3%±2.1%,年均增长率为 0.24%,全省植被覆盖度变化呈先增长后稳定趋势,植被变化以中覆盖度增加和低覆

盖度下降最为明显。从分区看,陕北地区植被覆盖度最小,平均为 $37.6\% \pm 4.4\%$,但增速最快,平均增长率为 $0.63\%/a$;陕南地区植被覆盖度最大,平均为 $89.6\% \pm 1.2\%$,年平均增长率为 0.13% ;关中地区植被覆盖度居中,平均为 $70.6\% \pm 3.5\%$,但总体呈下降趋势,年平均下降率为 -0.18% 。

(2) 在市级尺度,2000—2020 年陕北地区的延安市、榆林市,关中地区的铜川市、宝鸡市,陕南地区的安康市、商洛市的植被覆盖度呈持续增加趋势,而关中地区的西安市、渭南市、咸阳市和陕南地区的汉中市,植被覆盖度呈先增加后下降趋势。在县域尺度上,2000—2020 年全省有 72.3% 的区县植被覆盖度呈增加趋势,以延安市延长县增幅最大,在植被覆盖度下降区县中,以西安市高陵县降幅最大。此外,全省有 22.3% 的区县植被覆盖度变化趋势与所在市相反,表明陕西省植被覆盖度空间变化存在尺度依赖性。

(3) 2000—2010 年陕西省植被覆盖度增速显著高于 2010—2020 年,这一特征在省、地区、市和县四级尺度上呈现出高度一致性,其主要原因是这一时期是退耕还林工程一期工程实施期间,超过的 70% 植树造林是在这一时期完成。

参考文献:

- [1] Wang K B, Deng L, Shangguan Z P, et al. Sustainability of eco-environment in semi-arid regions: Lessons from the Chinese Loess Plateau[J]. *Environmental Science & Policy*, 2021,125:126-134.
- [2] 马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,等.基于地理探测器的砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析[J].*生态学报*, 2022,42(8):3389-3399.
- [3] Wu X, Wang S, Fu B, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,678:565-573.
- [4] 苏冰倩,王茵茵,上官周平.西北地区新一轮退耕还林还草规模分析[J].*水土保持研究*, 2017,24(4):59-65.
- [5] Deng L, Liu S, Kim D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program[J]. *Global Environmental Change*, 2017,47:13-20.
- [6] Wang K, Hu D, Deng J, et al. Biomass carbon storages and carbon sequestration potentials of the Grain for Green Program-Covered Forests in China[J]. *Ecology and Evolution*, 2018,8(15):7451-7461.
- [7] 李世东,陈应发.退耕还林还草工程综合效益监测进展与展望[J].*林业资源管理*, 2021(5):1-9.
- [8] 刘胜涛,牛香,王兵,等.陕西省退耕还林工程生态效益评估[J].*生态学报*, 2018,38(16):5759-5770.
- [9] 秦超,李君轶,陈宏飞,等.陕西省植被覆盖时空演变特征及其与气候因子的关系[J].*中国农业气象*, 2015,36(1):108-114.
- [10] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].*生态学报*, 2021,41(4):1571-1582.
- [11] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].*生态学报*, 2022,42(3):1022-1033.
- [12] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(1):76-87.
- [13] 王德丽.全球变暖环境下陕北、关中、陕南气候变化对比研究[D].西安:陕西师范大学,2011.
- [14] 张家政,李崇贵,王涛.黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J].*水土保持研究*, 2022,29(1):224-230,241.
- [15] Wang K B, Li J P, Shangguan Z P. Biomass components and environmental controls in Ningxia Grasslands[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012,11(12):2079-2087.
- [16] 李斌,张金屯.黄土高原地区植被与气候的关系[J].*生态学报*, 2003,23(1):82-89.
- [17] 董思,任志远,张翀,等.陕西省气候变化及其气候生产潜力的时空变化[J].*中国农业大学学报*, 2016,21(8):142-149.
- [18] 裴志林,杨勤科,王春梅,等.黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J].*干旱区研究*, 2019,36(3):546-555.
- [19] 国家林业和草原局政府网.退耕还林在陕西的实施综述[EB/OL]. (2019-12-13) [2021-12-10]. <http://www.forestry.gov.cn/tghl/934/20191223/093751396333717.html>.
- [20] 丁振民.退耕还林工程有效性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [21] 陈孝勇.陕西省退耕还林工程分析与评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [22] 杜金龙,朱记伟,解建仓,等.近 25 a 关中地区土地利用及其景观格局变化[J].*干旱区研究*, 2018,35(1):217-226.
- [23] 高江波,吴绍洪,蔡运龙.区域植被覆盖的多尺度空间变异性:以贵州喀斯特高原为例[J].*地理研究*, 2013,32(12):2179-2188.
- [24] 黄淑玲,周洪建,王静爱,等.中国退耕还林(草)驱动力的多尺度分析[J].*干旱区资源与环境*, 2010,24(4):112-116.