

2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析

王逸男¹, 孔祥兵¹, 赵春敬¹, 姚贵琦², 郭凯¹

(1.黄河水利科学研究院,水利部黄土高原水土保持重点实验室,郑州 450003; 2.河南省水土保持监测总站,郑州 450008)

摘要:以 2000—2020 年 MODIS—NDVI 植被指数为数据源,反演计算黄土高原植被覆盖度,通过转移矩阵和重心迁移等方法分析黄土高原植被覆盖度时空格局变化及其与降水、气温、坡度和土壤类型等因素的关系。结果表明:(1)2000—2020 年黄土高原植被覆盖度由 0.39 提高到 0.61,整体呈上升趋势,2017 年后实现快速提升;(2)近 20 年,黄土高原植被覆盖度显著好转类型与极显著好转类型改善面积比例达到 37.93%,2009 年前以低覆盖和中低覆盖植被为主,2010 年后以中覆盖及更高等级覆盖植被为主,2019 年以后中高覆盖植被所占比例最高;(3)从 2000 年到 2020 年,黄土高原低覆盖、中低覆盖、中覆盖和中高覆盖植被向更高等级覆盖植被转化比例分别为 93.10%,96.57%,82.99%,43.34%,中低覆盖、中覆盖、中高覆盖和高覆盖植被向更低等级覆盖植被转化比例分别为 0.30%,2.21%,7.83%,12.47%;(4)近 20 年黄土高原植被覆盖度变化与气温和降水的变化表现敏感,斜坡地和陡坡地植被覆盖度较高,淋溶土类型下的植被覆盖度较高,国家政策和措施实施等人为因素对植被覆盖度改善发挥重要作用。

关键词: 植被覆盖度; 黄土高原; 时空格局变化; 转移矩阵; MODIS

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0130-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.019

Change of Vegetation Coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2020 and Its Spatiotemporal Pattern Analysis

WANG Yinan¹, KONG Xiangbing¹, ZHAO Chunjing¹, YAO Guiqi², GUO Kai¹

(1.Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Water and Soil Conservation on the Loess Plateau of MWR, Zhengzhou 450003; 2.Henan Soil and Water Conservation Monitoring Central Station, Zhengzhou 450008)

Abstract: This research calculated vegetation coverage on the Loess Plateau from 2000 to 2020 by using the MODIS—NDVI vegetation index, analyzed its relationship with rainfall, temperature, slope and soil by using the transfer matrix and other methods. The results showed that: (1) The vegetation coverage increased from 0.39 to 0.61, and increased rapidly after 2017. (2) The area ratio of significantly improved and extremely significantly improved reached 37.93%. The coverage was dominated by low and middle-low before 2009, and dominated by medium and higher coverage after 2010. The proportion of middle-high coverage was the highest after 2019. (3) The conversion ratios of low, medium-low, medium and medium-high cover to the higher cover were 93.10%, 96.57%, 82.99%, 43.34% respectively. The conversion ratios of medium-low, medium, medium-high and high cover to the lower cover were 0.30%, 2.21%, 7.83%, 12.47% respectively. (4) The changes of vegetation coverage were sensitive to the changes of temperature and rainfall. The vegetation coverages of slope, steep slope and leached soil were higher. Human interventions, such as policies and soil conservation measures, played an important role in vegetation coverage improvement.

Keywords: vegetation coverage; loess plateau; spatio-temporal variation; transfer matrix; MODIS

植被是土地覆被的最主要部分,其变化对全球能量循环及物质的生物化学循环具有重要的影响^[1]。植被与气候、土壤、地下水、生物量等因素密切相关,因此,对植被覆盖的动态监测研究广泛应用于土壤、水土保持、生态环境等领域^[2-3]。党的十八大以来,我国对环境保护的重视程度达到了新的高度,提出良好

收稿日期:2021-11-11
资助项目:国家自然科学基金项目(61501200);国家重点研发计划项目(2017YFC0504501);河南省水利科技攻关计划项目(GG201942, GG201829);黄科院研究开发项目(HKY-YFXM-2020-02)
第一作者:王逸男(1992—),男,硕士,助理工程师,主要从事多源遥感解译与应用研究。E-mail:812207639@qq.com
通信作者:孔祥兵(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事水土保持遥感研究。E-mail:kongxb@foxmail.com

的生态环境与民生福祉、人类生存、生产力密不可分,也是展现我国良好形象的发力点,对生态环境的研究提出了新的要求^[4-5]。归一化差异植被指数(NDVI)对绿色植被表现敏感,该指数常被用来进行区域和全球的植被状态研究^[6]。李凯等^[7]基于像元二分法,利用 MODIS 数据分析了近 10 年白龙江流域植被覆盖度变化与滑坡的相关性;张晓东等^[8]利用 Landsat 影像分析了 1989—2014 年盐池县植被覆盖度与地质灾害点时空格局关系;宋敏敏等^[9]利用 8 年 MODIS 数据分析了延河流域的时空演变规律;康满萍等^[10]利用 Landsat 数据结合实测数据分析了苏干湖湿地植被覆盖度时空变化格局;王建国等^[11]使用像元二分法和重心迁移模型分析了 2000—2019 年新疆植被覆盖度时空格局及重心变化。以上研究结果表明,不同地区植被覆盖度时空变化特征及驱动机制存在明显差异。黄土高原是世界上最大的黄土堆积区,也是我国乃至世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区。研究黄土高原的植被变化及其时空格局对分析该地区水土流失状况具有重要的战略意义。本研究基于 MODIS 数据,运用像元二分法、转移矩阵、重心模型等,获取并分析了黄土高原 2000—2020 年植被覆盖信息的时空分布格局和变化规律,并结合气温、降水、土壤、地形等因素,通过研究分析 20 年来对黄土高原植被覆盖度时空格局及影响因素,为未来黄土高原生态保护和高质量发展工作提供科学依据和决策支撑。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原在中国北方地区与西北地区的交界处,它东起太行山,西至乌鞘岭,南连秦岭,北抵长城,主要包括山西、陕西、以及甘肃、青海、宁夏、河南等省部分地区(图 1)。全区总面积 63.5 万 km²,是世界上水土流失最严重的地区,是我国生态问题集中体现的地区,也是我国水土保持和生态建设的重点地区。黄土高原海拔 1 000~2 000 m,黄土厚 50~80 m,是世界上最大的黄土覆盖区^[12]。黄土高原矿产丰富,煤、石油、铝土储量大。黄土颗粒细,土质松软,含有丰富的矿物质养分,利于耕作,盆地和河谷农垦历史悠久,是中国古代文化的摇篮。黄土高原地区属(暖)温带(大陆性)季风气候,冬春季受极地干冷气团影响,寒冷干燥多风沙;夏秋季受西太平洋副热带高压和印度洋低压影响,炎热多暴雨。多年平均降水量 466 mm,总的趋势是从东南向西北递减,东南部 600~700 mm,中部 300~400 mm,西北部 100~200 mm。以 200,

400 mm 等年降水量线为界,西北部为干旱区,中部为半干旱区,东南部为半湿润区。由于缺乏植被保护,在长期流水侵蚀下地面被分割得非常破碎,形成沟壑交错其间的塬、梁、峁^[13]。

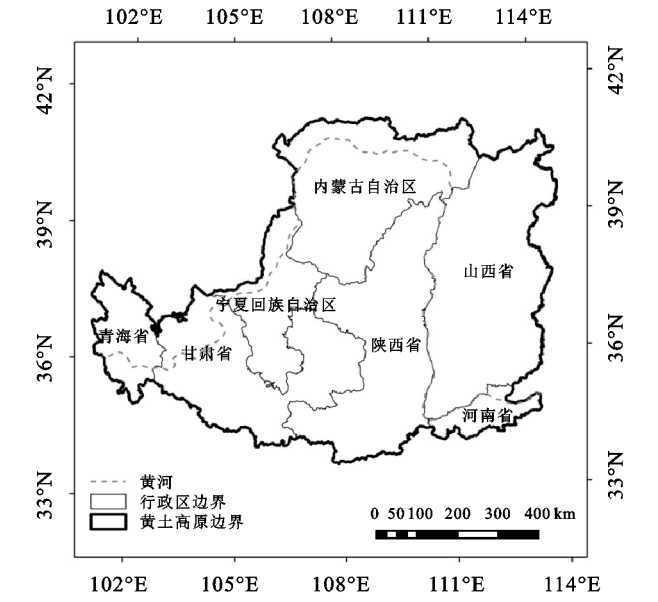


图 1 黄土高原行政区边界

1.2 数据来源

MODIS (moderate-resolution imaging spectro-radi-ometer),即中等分辨率成像光谱仪^[14]。该数据在地表覆盖变化、自然灾害与生态环境监测、全球生产力、全球气候变化等综合性研究等方面广泛应用。本研究使用的遥感数据源为美国地球资源观测系统数据中心 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供的 MODIS 植被指数 16 天合成数据 (MOD13Q1),获取时间为 2000—2020 年每年 6—9 月,空间分辨率为 250 m,存储格式为.hdf,共 168 期影像。通过数据提取和最大值合成法生成每月 1 期共 84 期植被指数数据。

气温和降水数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)月值 0.5 格点数据集,时间范围 2000—2020 年每年 6—9 月,通过格式转换、重采样等,生成每月 1 期,共 84 期,250 m 气温、降水数据各 1 套。高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)DEM 数据,空间分辨率 30 m,通过镶嵌、裁剪等,生成黄土高原高程数据,通过坡度计算并分级^[15]($<3^{\circ}$, $3^{\circ}\sim7^{\circ}$, $7^{\circ}\sim15^{\circ}$, $15^{\circ}\sim25^{\circ}$, $>25^{\circ}$,分别称为平地、平坡地、缓坡地、斜坡地、陡坡地,为了更好分析坡度关系,陡坡地改为 $25^{\circ}\sim60^{\circ}$,增加级别为 $>60^{\circ}$,称为极陡坡地),得到黄土高原坡度数据(图 2)。土壤数据来源于中国科学院数据中心(<http://www.csdb.cn/>),空间分辨率为 1 km,通过投影、裁剪、重采样生成黄土高原 250 m 土壤数据(图 3)。

2 研究方法

2.1 植被覆盖度

植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在地面上的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是衡量地表植被状况的一个重要指标^[16]。根据像元中植被覆盖结构不同,可分为均一像元和混合像元 2 类。当像元完全由植被覆盖时,其植被覆盖度为 100%(值为 1),为均一像元;如果植被未能覆盖整个像元,其植被覆盖度小于 1,即该像元为植被与非植被混合构成,为混合像元。因此,用 0~1 数值范围作为衡量研究区域植被覆盖指标,数值越接近 1,表示植被覆盖程度越接近全覆盖。

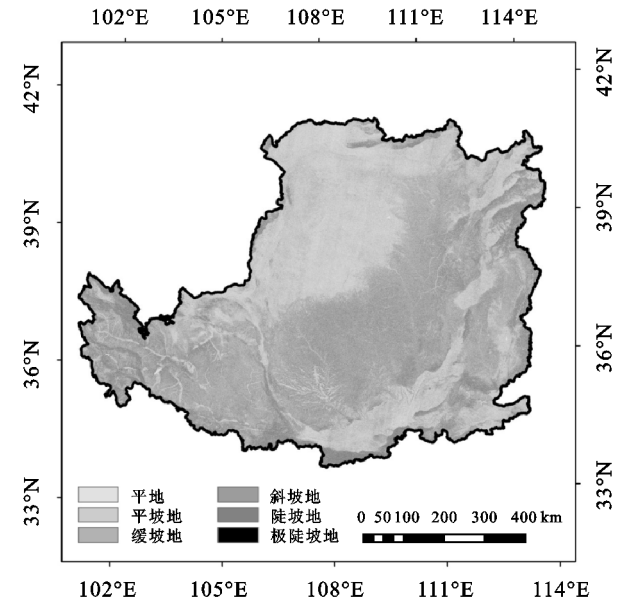


图 2 黄土高原坡度分布

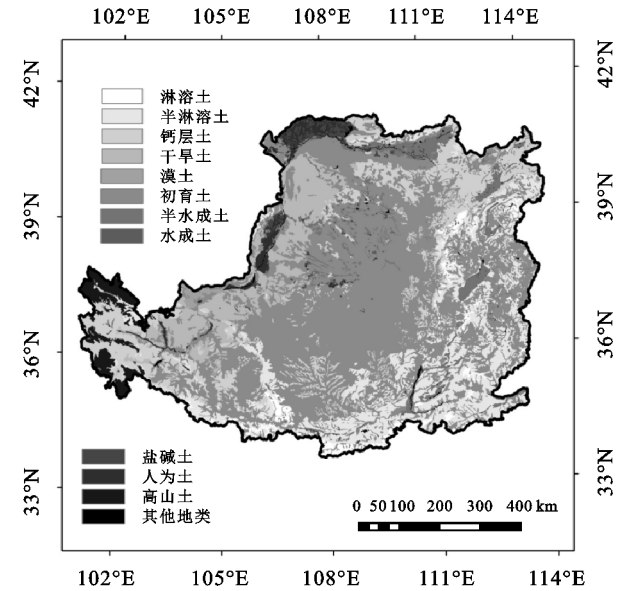


图 3 黄土高原土壤类型分布

植被覆盖度(FVC)是衡量一个地区地表植被覆盖的重要指标,与 NDVI 具有较强的正相关关系。基于像元二分模型,可在 NDVI 数据基础上,通过反

演模型计算得到植被覆盖度^[17],计算公式为:
$$FVC = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI_i 为该时期某像元 NDVI 值;NDVI_{min} 和 NDVI_{max} 分别为该研究区内所有像元 NDVI 的最小值和最大值;并以 5%~95% 作为 NDVI 置信区间^[16]对 NDVI_{min} 和 NDVI_{max} 进行优化处理。

根据 FVC 变化情况,将 FVC 变化趋势等级划分为:极显著好转(变化值>0.5)、显著好转区域(0.5≥变化值>0.3)、变化不显著区域(0.3≥变化值>-0.3)、显著恶化区域(-0.3≥变化值>-0.5)、极显著恶化区域(变化值≤-0.5)5 个等级^[18]。在参考已有植被覆盖度等级划分标准与方法^[19-20]的基础上,结合研究区植被特点,将研究区植被覆盖度进行了如下分级,即低覆盖(FVC≤0.3)、中低覆盖(0.3<FVC≤0.45)、中覆盖(0.45<FVC≤0.6)、中高覆盖(0.6<FVC≤0.75)和高覆盖(FVC>0.75)共 5 个级别。黄土高原 2020 年植被覆盖度见图 4。

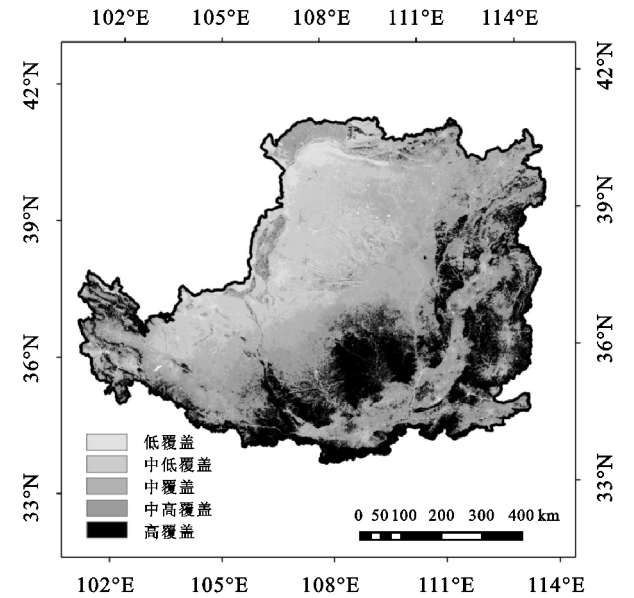


图 4 黄土高原 2020 植被覆盖度分级

2.2 重心迁移模型

通过计算不同时期各级覆盖度植被的分布重心,可以从空间上描述各级植被覆盖度随时间的变化过程和迁移趋势^[21]。第 t 年植被斑块重心坐标及迁移距离为:

$$X_i = \sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_i) / \sum_{i=1}^n C_{ti} \quad (2)$$

$$Y_i = \sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_i) / \sum_{i=1}^n C_{ti} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{\Delta X_t^2 + \Delta Y_t^2} \quad (4)$$

式中: X_t 、 Y_t 为第 t 年某级植被斑块重心的经纬度坐标(°); X_i 、 Y_i 为第 t 年该级植被第 i 个斑块的几何中

心坐标(°); C_{it} 为第 t 年该级植被第 i 个斑块 的面积 (km^2); n 为第 t 年该级植被的斑块数(个); D 为 迁移距离(°); ΔX_t 、 ΔY_t 分别为第 t 年该级植被重心 的经度、纬度变化(°)。

2.3 植被覆盖度转移矩阵

转移矩阵以图像像元相互之间面积的转移概率 为矩阵中的元素,转移矩阵模型为:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

矩阵中每个元素 P_{ij} 为植被覆盖等级 i 转化为等 级 j 的转移概率。 P_{ij} 具有 2 个特点:各元素非负;每 行元素之和为 1。

转移矩阵不但可以定量说明植被覆盖等级之间 的相互转化状况,而且能够揭示不同植被覆盖度之间 的转移概率,从而更准确地了解植被覆盖的时空 变化情况^[22]。通过对黄土高原 2000 年和 2020 年的 植被覆盖度分级图进行混淆矩阵计算,可得到各级 植被覆盖度之间相互转化的数量关系,即植被覆盖 度转移矩阵。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度年际变化分析

图 5 为黄土高原 2000—2020 年各年 FVC 均值 和标准差的统计情况。2020 年与 2000 年相比,FVC 值从 0.39 提高到 0.61,2000 年以来,黄土高原 FVC 呈上升趋势,拟合趋势斜率为 7.60×10^{-3} , R^2 为 0.80。其中 2000—2004 年逐年增加;2004—2007 基本不 变;2007—2010 年略有波动,总体增加;2011 年有所 降低,2012—2014 年有明显增加;2015—2017 年有所 下降且总体平稳;2017 年后快速增加。2000—2018 年标准差集中在 0.62 左右,2019—2020 年标准差较 低,说明区域内 FVC 值离散程度从 2019 年起大幅度 降低,黄土高原总体植被状况明显向好。

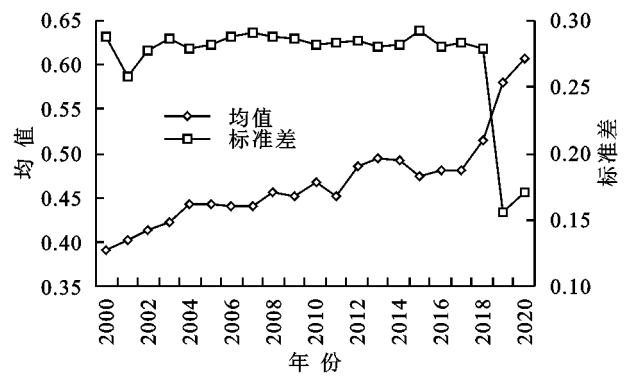


图 5 黄土高原 2000—2020 年植被覆盖度变化

3.2 植被覆盖度变化趋势分析

由图 6 可知,2000—2020 年黄土高原的植被变化以

变化不显著类型为主,该类型面积比例占到全区面积 的 61.98%,其次为显著好转类型,面积比例占到全区面 积的 36.39%。总体上植被改善(显著好转类型与极 显著好转类型)面积比例达 37.93%,植被恶化(显著 恶化类型与极显著恶化类型)面积比例仅为 0.08%, 其中极显著恶化类型面积比例不足 0.01%。

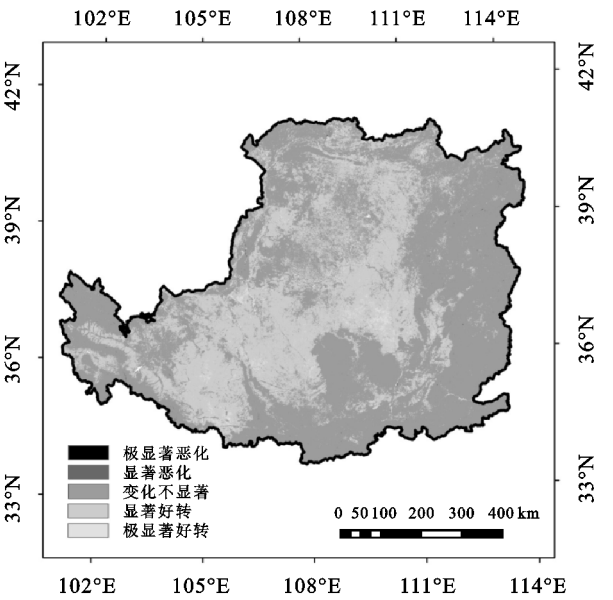


图 6 黄土高原 2000—2020 植被覆盖度变化趋势

3.3 植被覆盖度等级变化分析

由表 1 可知,2000—2020 年,黄土高原低覆盖植 被面积所占的比例总体上呈下降的趋势,减少面积为 271 627.72 km^2 ,降低比例为 92.29%;中低覆盖、中 覆盖、中高覆盖及高覆盖植被面积都有所增加,分别 为 13 210.53,68 245.27,135 411.22,54 760.69 km^2 , 增加比例分别为 12.79%,82.14%,210.99%,59.47%,中 高覆盖植被面积和比例增加最多;2000—2018 年,低 覆盖植被面积所占比例最高,2019—2020 年,中高覆 盖植被面积明显增加,所占比例最高。另外,黄土高原 2000—2009 年以低覆盖和中低覆盖为主,2010— 2020 年,以中覆盖及以上等级植被为主。

根据 2000 年和 2020 年 2 年的植被覆盖度分布 结果可计算得到转移矩阵,分析转移矩阵可以得到各 级植被覆盖度相互转化的情况。由表 2 可知,黄土高 原 2000 年低覆盖植被转出面积为 271 972.92 km^2 , 转出比例为 93.10%,转为 2020 年中低覆盖和中覆盖 植被比例为 74.68%,转为中高覆盖和高覆盖植被比 例为 18.42%;2020 年低覆盖植被转入面积为 516.82 km^2 ,占 2020 年低覆盖植被面积比例为 2.57%,说明 2000 年以来由中低、中、中高、高覆盖植被恶化而转 为低覆盖植被的情况较少。2000 年黄土高原中低植 被覆盖区域的转出面积为 100 207.86 km^2 ,转为更高

覆盖等级植被面积比例为 96.57%，其中转出占比最高的为中高覆盖，比例为 56.16%，其次为转出到中覆盖，占比为 26.10%；2020 年中低覆盖等级区域转入面积为 113 323.17 km²，主要由 2000 年低覆盖植被转化而来，占转入面积比例为 98.04%。2000 年黄土

高原中覆盖植被的转出面积为 70 893.33 km²，转为更高覆盖等级植被面积比例为 82.99%；2020 年中覆盖等级区域转入面积为 139 107.83 km²，主要为 2000 年低覆盖和中低覆盖植被转化而来，占转入面积比例为 96.37%。

表 1 黄土高原不同年份各等级植被覆盖度

年份	低覆盖/ km ²	低覆盖 比例/%	中低 覆盖/km ²	中低覆盖 比例/%	中覆盖/ km ²	中覆盖 比例/%	中高 覆盖/km ²	中高覆盖 比例/%	高覆盖/ km ²	高覆盖 比例/%
2000	292330.60	46.04	103321.32	16.27	83086.75	13.08	64179.85	10.11	92081.49	14.50
2001	263704.03	41.53	126261.07	19.88	95984.58	15.12	71808.98	11.31	77241.34	12.16
2002	251379.36	39.59	131204.24	20.66	100143.90	15.77	57931.26	9.12	94341.24	14.86
2003	254187.73	40.03	110767.32	17.44	92510.98	14.57	73891.67	11.64	103642.30	16.32
2004	216713.89	34.13	117072.57	18.44	109803.37	17.29	89714.75	14.13	101695.43	16.02
2005	214856.56	33.84	122925.06	19.36	111774.01	17.60	79574.44	12.53	105869.93	16.67
2006	227067.67	35.76	112489.83	17.71	105937.97	16.68	78568.51	12.37	110936.03	17.47
2007	242630.72	38.21	100265.82	15.79	92389.06	14.55	83838.73	13.20	115875.67	18.25
2008	212072.97	33.40	108180.01	17.04	103936.46	16.37	94642.24	14.90	116168.31	18.29
2009	219702.10	34.60	110814.87	17.45	104525.30	16.46	87234.43	13.74	112723.29	17.75
2010	199779.65	31.46	109431.30	17.23	115380.16	18.17	92394.88	14.55	118014.01	18.58
2011	215361.42	33.92	106495.44	16.77	106000.44	16.69	95712.93	15.07	111429.77	17.55
2012	188278.80	29.65	103118.21	16.24	111134.08	17.50	103949.11	16.37	128519.81	20.24
2013	170183.83	26.80	92409.30	14.55	137189.27	21.60	107727.76	16.97	127489.84	20.08
2014	173994.35	27.40	105340.78	16.59	123536.67	19.45	100937.12	15.90	131191.09	20.66
2015	197500.17	31.10	103286.41	16.27	109243.11	17.20	96807.90	15.25	128162.40	20.18
2016	186824.91	29.42	96471.74	15.19	129663.59	20.42	99989.61	15.75	122050.15	19.22
2017	183644.71	28.92	103790.26	16.34	124707.77	19.64	95503.75	15.04	127353.51	20.06
2018	155004.49	24.41	89804.03	14.14	134571.86	21.19	114125.08	17.97	141494.54	22.28
2019	18968.35	2.99	121295.63	19.10	195074.49	30.72	203616.50	32.07	96045.03	15.13
2020	20702.88	3.26	116531.85	18.35	151332.02	23.83	199591.07	31.43	146842.18	23.12

2000 年黄土高原中高覆盖植被的转出面积为 32 832.21 km²，主要转为高覆盖植被，占比为 43.34%，原 48.84% 的区域仍为中高覆盖植被，转为较低等级覆盖植被比例为 7.83%；2020 年，中高覆盖区域转入面积为 168 172.71 km²，主要由 2000 年的低覆盖、中低覆盖和中覆盖植被转化而来，占转入面积比例分别为 29.92%，34.54%，29.08%。

2000 年高覆盖植被的转出面积为 11 484.34 km²，主要转化为 2020 年的中高覆盖区域，占比为 11.80%，转为中覆盖及更低等级覆盖植被比例为 0.67%，87.45% 的区域仍为高覆盖区域；2020 年高覆盖区域中，由 2000 年的低覆盖、中低覆盖、中覆盖转为而来的比例仅为 26.19%。近 20 年来黄土高原低覆盖、中低覆盖、中覆盖以及中高覆盖植被向更高覆盖等级植被转出比例高，大部分区域植被好转明显；2000 年的高覆盖区域植被总体保持了稳定。

3.4 植被覆盖度重心迁移

利用迁移模型，计算出 2000 年和 2020 年各级植

被覆盖度的重心坐标，并根据坐标绘制出黄土高原各级植被覆盖度重心迁移图。由图 7 可知，低覆盖和中低覆盖植被覆盖等级区域主要集中在西北部，而中覆盖、中高覆盖和高覆盖植被覆盖等级区域主要集中在东南部，说明黄土高原东南部整体比西北部植被覆盖状况要好。具体来看，2000—2020 年，低覆盖、中低覆盖、中覆盖、中高覆盖植被重心均是向西北方向迁移，分别迁移了约 161.24，251.13，173.87，107.59 km；而高覆盖植被重心向东南方向迁移了 34.55 km。其中，中低覆盖植被重心迁移距离最大，高覆盖植被重心迁移距离最小，从迁移程度分析可知，2000—2020 年黄土高原植被覆盖由低覆盖、中低覆盖植被为主逐渐转移为中覆盖、中高覆盖植被为主。

3.5 植被覆盖度影响因素分析

由图 8 可知，黄土高原 6—9 月平均降水量变化趋势总体与植被覆盖度变化趋势基本一致，即 2000—2003 年、2009—2013 年、2015—2020 年等时

段,随着月平均降雨量增多,植被总体状况向好;2004—2006 年、2004—2005 年等时段,随着月平均降雨量减少,植被总体状况变差;2000—2020 年,黄土高原植被覆盖度与月平均降雨量相关系数为 0.44。由图 9 可知,将植被覆盖度变化数据与降水量变化数

据叠加进行空间分析,相关性较高区域集中在东北至西南一带,相关系数 0.4 以上面积达到 197 230.13 km²,相关系数超过 0.6 面积达到 29 036.98 km²,对应图 6 中植被覆盖显著好转和极显著好转区域,其他区域相关性较低。

表 2 黄土高原 2000 年和 2020 年植被覆盖度转移矩阵

年份	指标	2020				
		低覆盖/km ²	中低覆盖/km ²	中覆盖/km ²	中高覆盖/km ²	高覆盖/km ²
2000	低覆盖/km ²	20136.96	111097.67	107060.12	50310.15	3504.98
	比例/%	6.89	38.03	36.65	17.22	1.20
	中低覆盖/km ²	313.90	3227.91	26997.09	58091.41	14805.45
	比例/%	0.30	3.12	26.10	56.16	14.31
	中覆盖/km ²	146.03	1692.18	12318.11	48905.21	20149.91
	比例/%	0.18	2.03	14.80	58.77	24.22
	中高覆盖/km ²	46.73	473.65	4502.05	31338.64	27809.78
	比例/%	0.07	0.74	7.02	48.84	43.34
	高覆盖/km ²	10.16	59.68	548.57	10865.93	80587.72
	比例/%	0.01	0.06	0.60	11.80	87.53

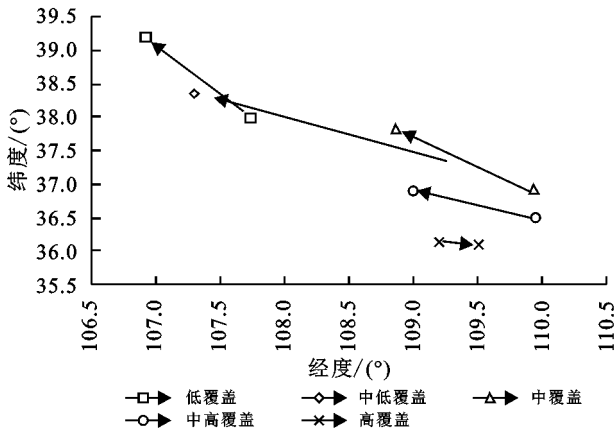


图 7 黄土高原各级植被覆盖重心迁移

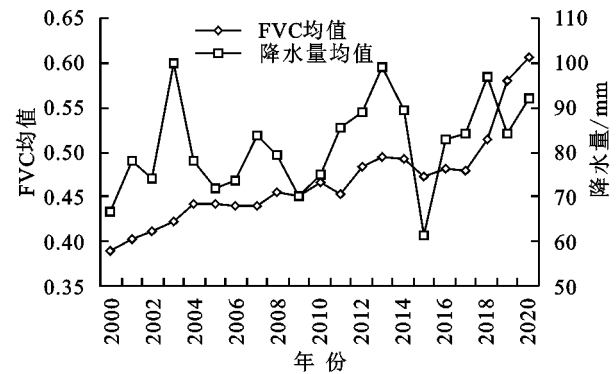
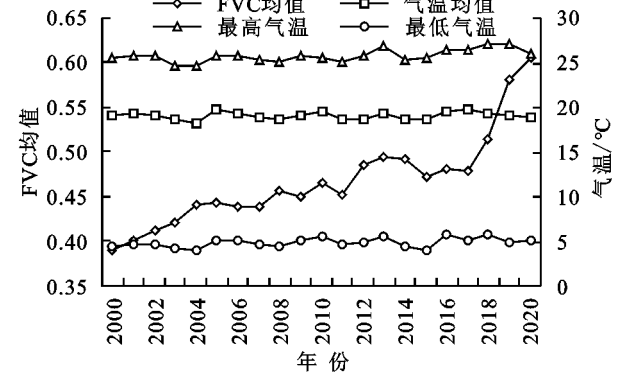


图 8 黄土高原 2000—2020 年植被覆盖度与降水量和气温变化

黄土高原地形复杂,不同坡度、土壤成分对植被覆盖度的影响程度也不同。为揭示地形及土壤分布特征对植被覆盖度的影响,根据黄土高原的 DEM 数据生成坡度分级图,对 2020 年植被覆盖度以及 2000—2020 年植被覆盖度变化结果进行分区统计,并叠加土壤类型数据进行分析。

2000—2020 年黄土高原植被覆盖度变化与 6—9 月平均气温、最高气温和最低气温的关系不明显,相关系数分别为 0.05,0.57,0.33。将植被覆盖度变化数据与气温变化数据叠加进行相关分析,黄土高原中北部、东部、南部和西部区域相关性较高,相关系数 0.4 以上面积达到 5 139.92 km²,相关系数超过 0.6 面积达到 86.91 km²,对应图 6 中部分显著好转区域和部分变化不显著区域。综合分析黄土高原植被覆盖变化与气温、降水变化的相关性可知,植被覆盖显著好转与极显著好转区域对应植被覆盖度与气温、降水相关性较高,水热因素对植被覆盖变化影响显著。



由图 10 可知,在各级坡度中,陡坡地植被覆盖度均值最高,为 0.72,其次为斜坡地,为 0.68,极陡坡地植被覆盖度均值最低,为 0.45,其次为平地,为 0.52,缓坡地和平坡地植被覆盖度均值为 0.61 和 0.54。植被覆盖度高的地区主要集中在缓坡地、斜坡地和陡坡地,均高于 0.60。近 20 年来,平地、平坡地、缓坡地和

斜坡地等坡度类型区域的植被覆盖度状况改善最为明显,相应类型区域 FVC 变化值分别为 0.25,0.24,0.23 和 0.19;陡坡地和极陡坡地等坡度类型区域的植被覆盖度状况改善程度最小,相应类型区域 FVC 变化值分别为 0.13 和 0.02。

在土壤类型方面,淋溶土类型下的植被覆盖度均值最高,为 0.85,其次为半淋溶土和高山土,植被覆盖

度均值分别为 0.73 和 0.67,最低为干旱土和漠土,植被覆盖度均值为 0.39 和 0.37。近 20 年来,干旱土、漠土、水成土等土壤类型区域的植被覆盖度状况改善最为明显,相应类型区域 FVC 变化值分别为 0.31,0.30和 0.26;淋溶土、半淋溶土和高山土等土壤类型区域的植被覆盖度状况改善程度最小,相应类型区域 FVC 变化值分别为-0.01,0.07,0。

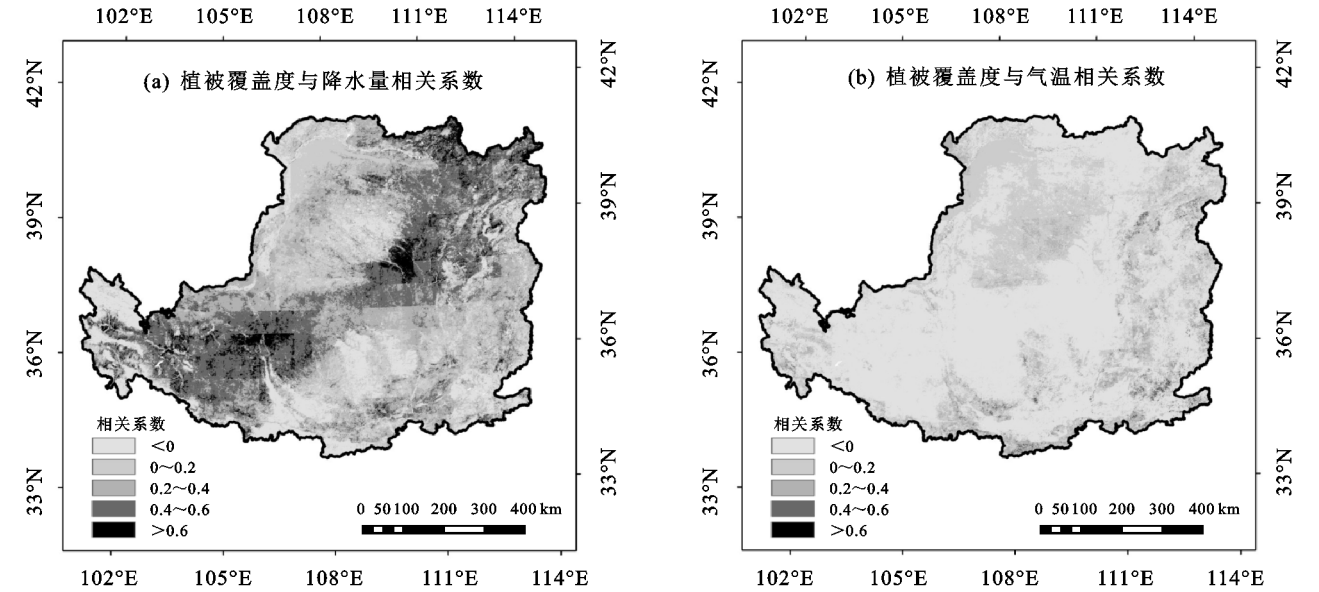


图 9 黄土高原植被覆盖度与降水量和气温相关系数

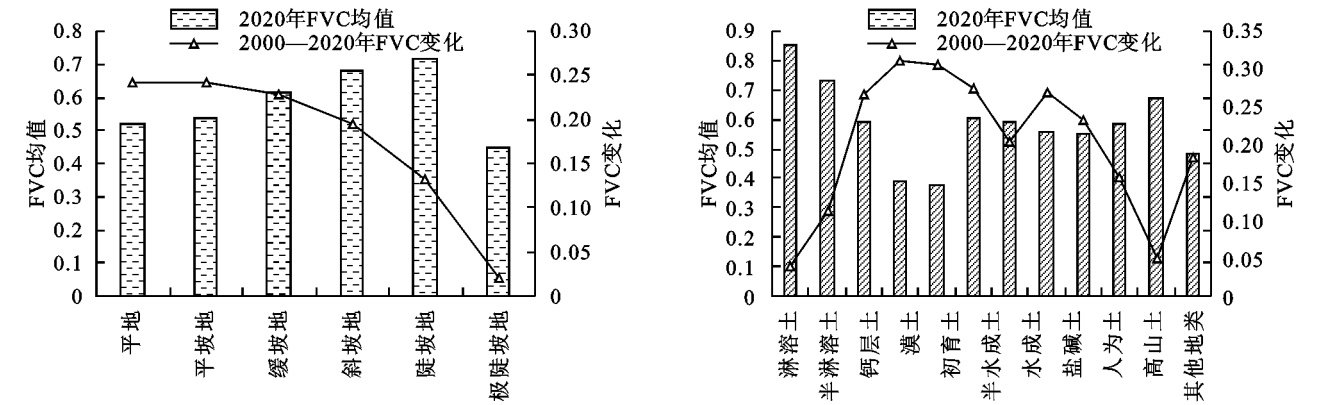


图 10 黄土高原植被覆盖度与坡度等级和土壤类型关系

近 20 年来,国家退耕还林、天然林保护、生态安全屏障建设、产业结构调整等诸多政策实施力度逐渐加大,其结果对黄土高原地区植被覆盖度变化有着重大影响。自 2000 年以来,国家先后对黄土高原地区施行了退耕封禁、人工种植、封山禁牧等政策^[3-5],为该地区植被恢复速率加快、植被覆盖面积增大、覆盖程度提高起到关键作用。自国家政策颁布实施以来至 2015 年间,黄土高原地区共修建淤地坝 5 万余座,其中骨干坝数量达到 5 千余座,梯田面积超过 4 万 km²,封禁面积超过 3 万 km²,造林种草面积超过 11 万 km²,水土保持治理总面积超过 19 万 km²(表 3)。诸多水土保持工程措施和生物措施的实施为黄土高

原植被覆盖度提高创造了优越条件,对该地区植被覆盖程度改善发挥重要作用。

表 3 截至 2015 年黄土高原水土保持措施实施统计

措施名称	数量/座	面积/万 km ²
淤地坝(骨干坝)	5621	
淤地坝(中小坝)	50564	
梯田		4.24
封禁		3.46
造林		9.62
种草		2.12
水土保持治理总面积		19.44

4 结论

(1)以 2000—2020 年 MODIS—NDVI 作为数据

源,反演计算得到植被覆盖度 FVC 数据。自 2000 年到 2020 年,黄土高原 FVC 均值整体呈上升趋势,植被生长状况明显朝着改善的方向发展;对比 2000 年和 2020 年 FVC 差值结果,植被改善面积超过 37.93%;2010 年以来,黄土高原植被覆盖以中覆盖及以上等级覆盖植被为主。

(2)从黄土高原 2000 年和 2020 年的植被覆盖度转移矩阵和重心迁移分析可知,较低植被覆盖度向较高植被覆盖度转移面积较大,体现出了植被覆盖度逐渐改善的趋势;东南部植被覆盖度较高,且高植被覆盖重心向西北方向迁移。

(3)分析了气温、降水、地形、土壤和人为因素与黄土高原植被覆盖度时空格局变化的关系。2000—2020 年黄土高原植被覆盖度变化与水热变化总体趋势相关;显著好转与极显著好转区域与水热因素相关性较高;2020 年,黄土高原较高植被覆盖度主要分布在斜坡地与陡坡地等坡度类型区域,与淋溶土、半淋溶土和高山土等土壤类型区域;2000 年以来,平地、平坡地、缓坡地和斜坡地等坡度类型区域与干旱土、漠土、水成土等土壤类型区域的植被覆盖度状况改善最为明显;国家政策及水土保持措施实施等人为因素对植被覆盖度改善有重要作用。

参考文献:

[1] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):86-92.

[2] 何亮,吕渡,郭晋伟,等.基于 MODIS 的北洛河流域植被盖度变化研究[J].人民黄河,2020,46(2):67-71,76.

[3] 姜德文.新时代黄河流域水土保持战略举措探讨[J].中国水利,2019(21):3-5,20.

[4] 刘毅.为建设美丽中国提供制度保障[N].人民日报,2020-03-13(005).

[5] 姜德文.与时代同进水土保持在改革开放中不断前行[J].中国水土保持,2018(12):20-23,84.

[6] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

[7] 李凯,孙悦迪,江宝骅,等.基于像元二分法的白龙江流域植被覆盖度与滑坡时空格局分析[J].兰州大学学报,2014,50(3):376-382.

[8] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.基于像元二分法的盐池县植被覆盖度与地质灾害点时空格局分析[J].国土资源遥感,2018,30(2):195-201.

[9] 宋敏敏,张青峰,吴发启,等.基于 NDVI 的延河流域时空演变分析[J].水土保持研究,2017,24(4):6-11.

[10] 康满萍,赵成章,白雪,等.苏干湖湿地植被覆盖度时空变化格局[J].生态学报,2020,40(9):2975-2984.

[11] 王建国,张飞.2000—2019 年新疆植被覆盖度时空格局及重心变化分析[J].农业工程学报,2020,36(20):188-194.

[12] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.

[13] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.

[14] Brian B B, Jennifer P C, David C E, et al. Validation of VIIRS and MODIS reflectance data in coastal and oceanic waters: An assessment of methods [J].Remote Sensing of Environment,2019,220:110-123.

[15] 刘志鹏.黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.

[16] 贾坤,姚云军,魏香琴,等.植被覆盖度遥感估算研究进展[J].地球科学进展,2013,28(7):774-782.

[17] Meroni M, Fasbender D, Rembold F, et al. Near real-time vegetation anomaly detection with MODIS NDVI: Timeliness vs.accuracy and effect of anomaly computation options [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,221:508-521.

[18] Idowu E O, Johnson T F, Ayorinde A O, et al. GIS and remote sensing-based analysis of the impacts of land use/land cover change (LULCC) on the environmental sustainability of Ekiti State, southwestern Nigeria [J]. Environment Development and Sustainability,2020,22(2):661-692.

[19] Rhyma P P, Norizah K, Hamdan O, et al. Integration of normalised different vegetation index and Soil Adjusted Vegetation Index for mangrove vegetation delineation [J].Remote Sensing Applications: Society and Environment,2020,17(C):1-14.

[20] 李林叶,田美荣,梁会,等.2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2018,34(7):584-591.

[21] 周智勇.基于 Landsat 遥感影像的围场县植被覆盖时空格局变化[J].水文地质工程地质,2020,47(6):81-90.

[22] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报,2014,69(1):54-63.