

黄土残塬沟壑区范围界定及近 21 年来 NDVI 时空变化特征

刘泽晖¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5}, 侯贵荣⁶

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,山西 吉县 042200;
3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),
北京 100083;5.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083;6.四川农业大学林学院,成都 611130)

摘要:为探究黄土残塬沟壑区退耕还林(草)工程等林业生态工程实施后林业资源恢复情况,以黄土高原 DEM 数据及 2000—2020 年归一化植被指数 NDVI 数据为基础,采用地形因子计算、水文分析、空间叠加分析等方法,划分了较为完整的黄土残塬沟壑区的范围,并利用趋势分析法、变异系数的相关理论与方法,分析了近 21 年来黄土残塬沟壑区 NDVI 时空变化特征。结果表明:(1)黄土残塬沟壑区横跨山西、陕西和甘肃 3 省,面积约为 2.99 万 km²,沟壑密度为 1.91~3.21 km/km²;(2)黄土残塬沟壑区 NDVI 从时序变化上看,全区 21 年总平均 NDVI 值为 0.711,2000—2020 年该区植被 NDVI 变化趋势呈快—慢—较快增长;从空间分布来看,植被覆盖度 NDVI 值总体为 0.6~0.9,研究区中部地区植被覆盖度较其他地区高;(3)在时空趋势特征方面,研究区西部和东部部分地区植被覆盖改善程度明显,中部地区植被覆盖情况较为稳定;在时空波动特征方面,该区植被 NDVI 时序波动稳定,空间波动差异性较大,低波动区域面积占比为 48.06%。整体而言,黄土残塬沟壑区主要分布在山西、陕西和甘肃 3 省,该区 2000—2020 年间植被 NDVI 整体呈上升态势,植被覆盖水平整体较高且波动较低,并呈持续改善趋势。研究结果可为黄土残塬沟壑区水土保持工作提供理论基础和科学依据。

关键词:黄土残塬沟壑区;地形因子;NDVI

中图分类号:TP79;S127

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0144-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.020

Determining the Scope of the Residual Gully Region on the Loess Plateau and the Characteristics of Temporal and Spatial Changes of NDVI

LIU Zehui¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5}, HOU Guirong⁶

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Jixian, Shanxi 042200;

3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to explore the restoration of forest resources after the implementation of forestry ecological projects such as Grain for Green Project in the residual gully region of the Loess Plateau, the calculation was based on the DEM data of the Loess Plateau and the normalized vegetation index NDVI data from 2000 to 2020. The calculation of topographic factors, hydrological analysis, spatial overlay analysis, etc, were used to divide the relatively complete range of the residual gully region of the Loess Plateau area. The trend analysis and coefficient of variation were used to analyze the characteristics of the temporal and spatial changes of NDVI in the residual gully region of the Loess Plateau area. The results showed that: (1) The residual gully region of the Loess Plateau area spanned three provinces of Shanxi, Shaanxi, and Gansu, covering an area of approximate 29 900 km², and the gully density was between 1.91~3.21 km/km². (2) The NDVI of residual gully region

收稿日期:2021-05-13

资助项目:国家自然科学基金面上项目“晋西黄土区水土保持林林分结构与功能耦合机理研究”(3197140271);国家重点研发计划项目“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范”(2016YFC0501704)

第一作者:刘泽晖(1997—),女,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail:ryunikong@163.com

通信作者:毕华兴(1969—),男,教授,博导,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:bhx@bjfu.edu.cn

of the Loess Plateau area varied with time, the total average NDVI value of the region for 21 years was 0.711, and the change trend of vegetation NDVI in this area from 2000 to 2020 showed a fast-slow-fast growth. In terms of spatial distribution, the vegetation coverage was generally in the range of NDVI value 0.6~0.9. The vegetation coverage in the central part of the study area was higher than those of other areas in the study area. (3) In terms of temporal and spatial trend characteristics, the vegetation coverage in the western and eastern parts of the study area had improved significantly, and the vegetation coverage in the central area of the study area was relatively stable. In terms of temporal and spatial fluctuation characteristics, the vegetation NDVI in this area fluctuated steadily in time series, and the difference in spatial fluctuation was large, and the area of low fluctuation area accounted for 48.06%. On the whole, the residual gully region on the Loess Plateau was mainly distributed in three provinces: Shanxi, Shaanxi and Gansu. From 2000 to 2020, the NDVI of vegetation in this area showed an overall upward trend. The overall vegetation coverage level was relatively high with low fluctuations, and showed a trend of improvement. These results could provide theoretical and scientific basis for soil and water conservation in the residual gully region on the Loess Plateau.

Keywords: residual gully region on the Loess Plateau; topographic factors; NDVI

黄土残塬沟壑区煤炭、天然气等能源资源丰富,光热条件好,雨热同期,昼夜温差大,是重要的旱作农业区,但同时也有旱灾发生频繁、生态环境脆弱等问题^[1]。自退耕还林(草)工程等林业生态工程实施以来,该区林草植被得到极大恢复。随着我国经济社会步入新时代新阶段,黄土残塬沟壑区的生态治理与恢复也进入到全新的质量提升阶段。对于黄土残塬沟壑区来说,植被发挥着重要的生态功能,对该区的生态安全、可持续发展起着不容忽视的重要作用。黄土残塬沟壑区作为黄土高原在侵蚀过程中形成的新生地貌,研究其范围以及植被覆盖状况可以更好地为该区域因地制宜实施水土保持工作提供借鉴,为黄土残塬沟壑区乃至黄土高原的生态文明建设和经济社会发展做出新的贡献。归一化植被指数 NDVI 可以很好地反映植被覆盖状况^[2],已有较多学者^[3-4]利用归一化植被指数 NDVI 数据从不同尺度和方法对黄土高原不同研究区包括整个黄土高原和部分省市及小流域的植被覆盖度进行研究,但针对完整的黄土残塬沟壑区植被覆盖相关研究较少。究其原因发现,黄土高原沟壑区和黄土丘陵沟壑区的范围在黄土高原分区中已有较成熟的划分,而黄土残塬沟壑区作为二者的过渡地带,虽然有学者从土壤、水土保持措施等方面对其展开探究,但多以小流域为主。到目前为止,其界线和范围还没有一个公认的划分与界定,区域边界非常模糊。现有的相关研究^[5]只有类似于如晋西黄土残塬沟壑区、陇东黄土残塬沟壑区等分散的描述,严重缺乏对该区整个范围界定的研究,进而影响了以黄土残塬沟壑区整体范围为研究区的植被 NDVI 时空变化情况等相关研究。

本文首先利用数字地形提取分析方法对地形因

子进行处理,旨在得到相对完整的黄土高原残塬沟壑区,对前人的分散性研究进行补充完善,丰富黄土高原地形地貌分区理论;其次,进一步通过趋势分析法和变异系数法,对黄土残塬沟壑区归一化植被指数 NDVI 的时空变化进行研究,以期为黄土残塬沟壑区植被恢复、生态环境建设、乡村振兴提供科学依据。

1 研究区概况

黄土残塬是完整的黄土塬受到侵蚀后形成的塬面起伏不平、塬边残破、沟深坡陡的塬地。黄土高原残塬沟壑区内部黄土残塬与黄土沟壑交错分布,以陕西南部、晋西和陇东一部分最为典型。该区是典型的温带大陆性季风气候,多年平均降水量 150~750 mm,且由东南向西北递减。降水多为暴雨,全年降水量约 80% 主要集中在 6—9 月。年水面蒸发量为年降水量的 2~8 倍^[6]。受水文资料的限制,目前可知黄河中游黄土高原残塬沟壑区在 1998—2008 年退耕后的 10 年间,平均土壤侵蚀模数为 5 420 t/(km²·a)^[7]。残塬沟壑区的沟壑面积占总面积的 40%~50%,塬面完整性和连续性很差,多呈细梁状或串珠状,尤其是太德塬、古县一无患塬等较大的塬周侵蚀沟较为活跃,危害严重^[8]。黄土残塬沟壑区地下水主要以黄土裂隙孔隙潜水为主,在塬顶处接受大气降雨补给,在塬周边深切沟谷处以泉的形式排泄^[9]。土层厚度和土壤粒径大致由东南向西北逐渐增加,区域总体土层厚度 100~200 m^[10]。黄土残塬沟壑区地貌特点是一塬、一梁、二沟、三面坡,塬面平坦,塬面坡度多为 1°,但受沟谷切割,导致塬边残破呈锯齿状^[11],沟深坡陡,沟坡一般坡度为 7°~25°^[12]。该区植被主要以天然森林植被为主,如华山栎、侧柏等,此外本区还是褐马

鸡等黄土高原典型动物的主要栖息地^[13]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究所使用的 DEM 数据来源于地理空间数据云平台网站(<http://www.gscloud.cn>)。数据分辨率为 90 m×90 m,空间参考为 WGS_1984_UTM_Zone_48°N,投影类型为通用横轴墨卡托投影(UTM)。将获取到的 DEM 数据,在 ArcGIS 10.2 中以黄土高原矢量边界为要素进行掩膜提取,以得到黄土高原地区 DEM 基础数据。归一化植被指数 NDVI 数据来源于美国 NASA 定期发布的 MODIS 数据(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),采用最大值合成法生成。数据的空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 1 年,时间跨度为

2000—2020 年。将其导入 ArcGIS 中按照研究区的坐标系统(WGS_1984_UTM_Zone_48°N)进行坐标转换,最后利用本文划分出的黄土残塬沟壑区的矢量边界裁剪得到研究区 NDVI 栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 黄土残塬沟壑区范围界定 划分较为完整的黄土残塬沟壑区范围需从地形入手对整个黄土高原地貌进行分析,考虑到数据与现有技术条件,依据中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系^[14]、《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)》^[15],参考张磊^[16]提出的黄土地貌核心地形因子,从微观宏观、地表形态、侵蚀程度等方面选取坡度、高程、沟壑密度、地表切割深度、山顶点密度 5 个地形因子指标对黄土高原地形地貌进行空间分析,地形因子具体含义及公式见表 1。

表 1 各地形因子含义及公式

地形分析因子	含义	公式
高程	是地面点沿垂线到大地水准面的距离,能直观反映地形的起伏形态	在 DEM 数字地形分析中,高程值可以直接从 DEM 中读取
坡度	是指在地表面选取任一点,过该点的切平面和水平地面的夹角	$S=\arctan \sqrt{p^2+q^2} \times \frac{180}{\pi}$
沟壑密度	是指单位面积内沟壑的总长度	$D=\sum L/A$
地表切割深度	反映一定程度上的地表受内力外力作用被切割的程度	$D_i=H_{\text{mean}}-H_{\text{min}}$
山顶点密度	反映研究区中局部山顶点数量的多少	$D_p=n/A$

DEM 数据中的信息可以经由数字地形分析技术或者基于对象的图像分析获取,基于流域单元的地貌识别分类,可以取得比较好的分类效果^[17]。因此本研究以流域单元作为地貌分类的基本单元对地形进行分类和分割。首先在 ArcGIS 10.2 平台下,利用水文分析提取沟谷网络;其次按照 Strahler 法对河网进行分级,并得到相应的流域单元。将相关数据重分类后进行空间叠加分析,进行研究区所有流域单元的地貌分类。由于分类结果较为零散,对照全国水土保持区划、中国地貌区划、黄土高原水土保持耕作区划^[1]等图件,结合区域的实际情况,通过专家判别对分区进行调整和归并,最后根据人工判读法^[17],利用 ArcGIS 数据管理工具使计算机随机选取黄土高原范围内 200 个检验样本(图 1),对照黄土高原分区以及黄土残塬沟壑区局部范围的研究结果^[5],将人工判别结果与分区结果对比进行精度检验。

2.2.2 黄土残塬沟壑区 NDVI 时空变化特征分析 变化趋势分析:使用一元线性回归计算 2000—2020 年黄土残塬沟壑区植被变化趋势,将线性回归方程的斜率(slope)定义为 NDVI 的年际变化率^[18]。slope 的正负表示像元内植被的退化情况,slope 的绝对值越大,说明年际 NDVI 变化越快^[19]。公式为:

$$\text{slope}=\frac{n\sum_{i=1}^n i\text{NDVI}_i-\sum_{i=1}^n i\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n\sum_{i=1}^n i^2-(\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中: n 为样本的数量,即研究年份,在本研究中, $n=21$;NDVI _{i} 表示第 i 年的植被指数值, $i=1,2,3,\cdots,21$;slope 代表每年的平均植被指数的变化率。

变异系数法:通过变异系数可以反映 NDVI 随时间序列变化的波动情况,公式为:

$$\text{CV}=\frac{\sqrt{(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i-\overline{\text{NDVI}})^2)}}{\overline{\text{NDVI}}}$$

式中: n 表示研究年份,本研究中 $n=21$; i 指年序号;NDVI _{i} 指第 i 年 NDVI 的平均值; $\overline{\text{NDVI}}$ 表示研究区 21 年的 NDVI 平均值。CV 值越大,表明 NDVI 年际变化越大,时序波动不稳定;CV 值越小,则表明 NDVI 年际变化越小,时序波动越稳定^[19]。

3 结果与分析

3.1 黄土残塬沟壑区范围界定

根据地形因子分析、水文分析、空间叠加分析和人工判读法,将黄土高原共分成 6 种地貌类型区(图 2),分别是黄土高塬沟壑区、黄土残塬沟壑区、黄土丘陵沟壑区、土石山区、风沙区及平原阶地区。黄土高原地形地貌分区精度检验随机样本 200 个,其中黄土高塬沟壑区分布随机样点数 20 个,黄土残塬沟壑区 20 个,黄土丘陵沟壑区 60 个,土石山区 35 个,风沙区 40 个及平原阶地区 25 个。分区结果和人工目译地貌类型吻合的共 167 个检验样本,占总样本数 200

的 83.5%，其中黄土高原沟壑区识别正确的样点数 18 个，黄土残塬沟壑区 17 个，黄土丘陵沟壑区 49 个，土石山区 29 个，风沙区 33 个及平原阶地区 21 个，分区准确率相对较高。通过对不同分区之间海拔、坡度等主要特征进行差异性分析，结果显示不同分区整体上海拔、坡度、地表切割深度等方面的差异具有显著性。不同分区之间在海拔、坡度等方面的差异显著性见表 2。差异性分析结果表明，研究选取的地形因子合理，不同分区的区域差异性较大，取得了较理想的分区结果。各分区基本情况和主要特征统计结果见表 2。

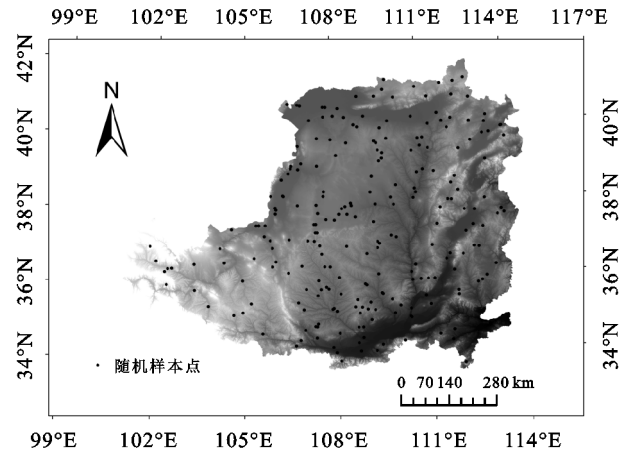


图 1 黄土高原地形地貌分区检验样本空间分布

黄土高原沟壑区和黄土残塬沟壑区都主要分布在黄土高原中部偏南，横跨晋、陕、甘三省，尽管 2 个分区主要的地貌类型为塬面和沟壑 2 部分组成，但是高塬沟壑区地貌完整度更高，并且残塬沟壑区坡面的平均坡度较高塬沟壑区小；其次高塬沟壑区水土流失形式以沟蚀为主、面蚀次之，残塬沟壑区的水土侵蚀形式复杂，以水蚀为主，重力侵蚀为辅，塬面以层状面

蚀和细沟状面蚀为主，沟道内侵蚀以沟头前进、沟底下切、沟岸扩张为主并相继交替发生，是主要的产沙区^[20]。因此区分黄土高原沟壑区和黄土残塬沟壑区具有不可忽视的现实意义。丘陵沟壑区分布面积最大，全区地貌地形以梁状、梁峁状丘陵为主，坡度在 15°以上的土地面积占比较大，因地形破碎、千沟万壑，所以该地区水土流失情况最为严重。土石山区主要涉及六盘山、吕梁山、太行山等山地，山高坡陡谷深、沟道比降大且多呈“V”形是该区主要的地形地貌特点。风沙区包括毛乌素沙地和库布齐沙漠，风蚀极为剧烈，土地沙化严重，其东南边缘地带的大量尘沙通过风力搬运散落在邻近的黄土丘陵区，形成侵蚀模数极大的高产沙地区，是粗泥沙的重要补给源。冲积平原及阶地区由黄河流域的汾河平原、渭河平原以及周边台塬阶地组成，整体呈狭长的新月型，即使有轻微的水土流失现象，但也是黄土高原重要的农业产区之一。

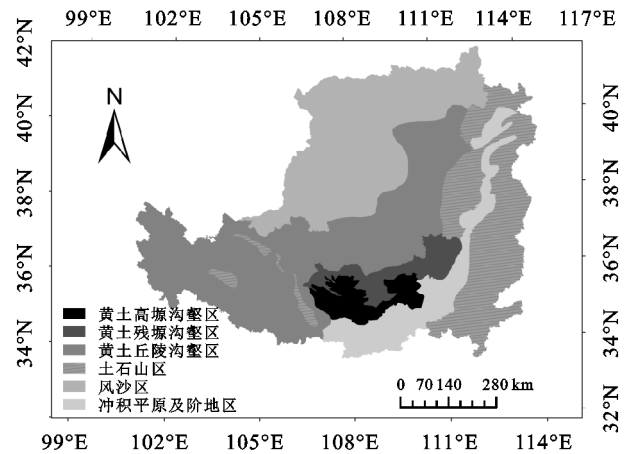


图 2 黄土高原地形地貌分区示意

表 2 黄土高原各分区基本情况和主要特征

地形地貌 分区	面积/ 万 km ²	面积所占 比例/%	平均 海拔/m	平均 坡度/(°)	沟壑密度/ (km · km ⁻²)	平均地表 切割深度/m
黄土高原沟壑区	2.75	4.21	1280.93±157.94b	13.21±7.78a	1.53±0.53d	78.66±23.86a
黄土残塬沟壑区	2.99	4.58	1338.13±151.75b	16.76±7.52a	2.56±0.65c	91.86±19.52a
黄土丘陵沟壑区	23.36	35.77	1658.47±577.05a	12.15±7.86a	4.20±1.86a	85.72±37.30a
土石山区	12.80	19.60	1312.87±386.64b	14.24±9.98a	3.28±0.98b	81.20±44.29a
风沙区	16.97	25.99	1488.47±151.02ab	5.96±6.29b	1.93±0.81cd	30.29±25.31b
冲积平原及阶地区	6.43	9.85	644.27±201.68c	2.12±3.52b	1.14±0.80e	43.25±33.82b

注：平均海拔、坡度、沟壑密度及地表切割深度数据为平均值±标准差；同列不同字母表示不同分区间差异显著 ($P<0.05$)。

3.2 黄土残塬沟壑区 NDVI 时空分布特征

3.2.1 时序变化特征 近 21 年来(2000—2020 年)黄土残塬沟壑区年均植被 NDVI 的变化趋势见图 3，其中 2000—2008 年每年的 NDVI 均值都低于 21 年 NDVI 总均值 0.711(2000 年 NDVI 均值最低，为 0.591)，从 2009 年开始各年份的 NDVI 年均值都高于 21 年 NDVI 总均值，并在 2020 年达到 21 年中年

均 NDVI 最大值 0.793。从图 3 可看出，在 2000—2008 年期间，黄土残塬沟壑区平均 NDVI 年际变化由 0.591 上升到 0.696，增长趋势斜率为 0.014/a，而在 2008—2015 年，研究区平均 NDVI 年际变化略有波动但整体呈上升趋势，波动范围在 0.696~0.765，年增长斜率为 0.007，在 2015—2020 年，研究区平均 NDVI 年际变化在 0.729~0.793 范围内，年增长趋势

斜率为 0.011。从总的上升阶段来看,2020 年 NDVI 增长幅度最大。在 2000—2020 年 21 年间,研究区年均 NDVI 变化大致波动范围为 0.591~0.793,2000—2008 年研究区年均 NDVI 的年际变化速率最快,2008—2015 年黄土残塬沟壑区年均 NDVI 的年际变化速率最慢。总的来说,黄土残塬沟壑区年均 NDVI 增长率为 0.008/a,表明该区在 2000—2020 年 NDVI 总体呈上升趋势,相关林业生态工程实施以来植被覆盖度向着良好的方向发展。

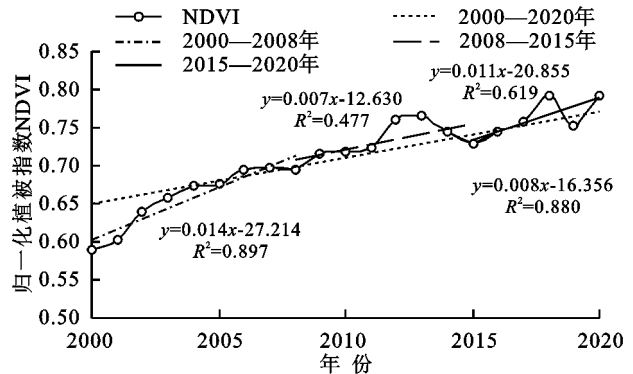


图 3 2000—2020 年黄土残塬沟壑区年均 NDVI 值变化趋势

3.2.2 空间分布特征 根据 ArcGIS 中的像元统计工具,得到黄土残塬沟壑区年平均 NDVI 空间分布图(图 4)。依据李楠等^[21]的划分标准并根据实际情况将植被覆盖度划分成 5 个等级,具体见表 3。

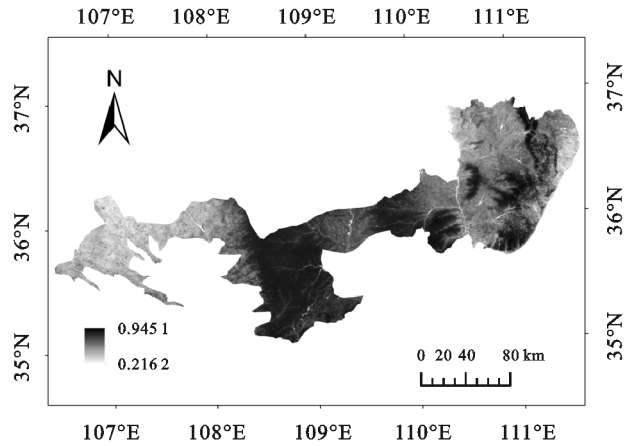


图 4 黄土残塬沟壑区年平均 NDVI 空间分布

表 3 黄土残塬沟壑区植被覆盖情况统计			
NDVI 值	植被覆盖情况	像元数	所占比例/%
<0.6	低覆盖度	118149	24.61
0.6~0.7	中覆盖度	110320	22.98
0.7~0.8	中高覆盖度	86298	17.97
0.8~0.9	高覆盖度	164026	34.16
>0.9	极高覆盖度	1354	0.28

由图 4 和表 3 可知,黄土残塬沟壑区平均年度 NDVI 处于 0.21~0.95,该区域的植被覆盖度总体处于 NDVI 值为 0.6~0.9,即中到高水平,像元数所占比例高达 75.11%。运用 ArcGIS 空间分析工具可以计算各覆盖度区域面积,其中分布面积最广的为高覆

盖度区域,NDVI 值在 0.8~0.9,面积约为 10 258.02 km²,主要分布在大多为常绿阔叶林覆盖的研究区中部以及东部的少部分地区。低覆盖度区域 NDVI 值在 0.6 以下,分布面积约为 7 376.44 km²,像元数占比为 24.61%,主要位于研究区东部和西部由农作物覆盖的地区以及水体覆盖区。

3.3 黄土残塬沟壑区 NDVI 时空格局演变

3.3.1 时空趋势特征 根据一元线性回归趋势分析法计算得到 2000—2020 年黄土残塬沟壑区植被覆盖变化趋势,依据李楠等^[21]的 NDVI 变化类型划分标准,并根据实际情况将趋势线斜率(slope)划分为 5 个等级(表 4),并绘制 NDVI 变化趋势空间分布图(图 5)。由表 4 可以看出,植被变化趋势呈退化的区域主要以点状分布在城镇中心及周边地区,这可能是由于 21 世纪以来我国城市化进程加快,大量人口集中在相对经济发达的地区导致城镇扩张,以至于生态环境被破坏。植被覆盖情况基本不变的区域面积为 9 058.27 km²,轻微改善的区域面积为 9 099.19 km²,这 2 种变化情况面积共占比超过 60%,主要分布于研究区中部和东部部分地区,这些区域的植被覆被类型多为林地和草地^[22]。而其他地区的植被覆盖情况大部分得到了中度到显著改善,植被覆盖变化中度和显著改善地区面积共达到 11 540.19 km²。总的来看,黄土残塬沟壑区植被覆盖变化呈改善态势。

表 4 2000—2020 年黄土残塬沟壑区植被覆盖变化趋势			
趋势线斜率变化范围	变化程度	面积/km ²	所占比例/%
slope<0	退化	158.02	0.53
0≤slope<0.005	基本稳定	9058.27	30.34
0.005≤slope<0.01	轻微改善	9099.19	30.48
0.01≤slope<0.015	中度改善	9392.19	31.46
slope≥0.015	显著改善	2148.00	7.19

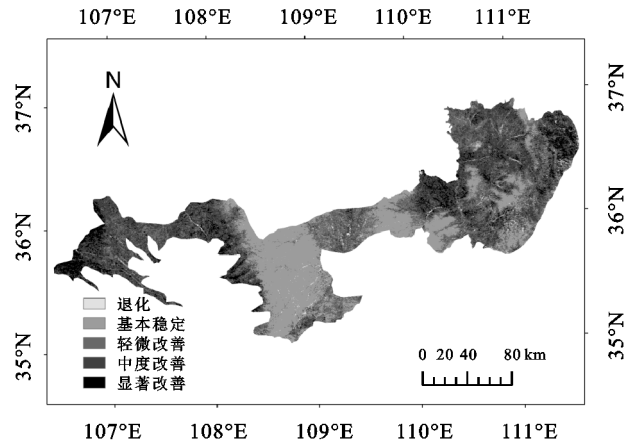


图 5 黄土残塬沟壑区年均 NDVI 变化趋势空间分布

3.3.2 时空波动特征 依据李楠等^[21]的划分标准并根据实际情况将黄土残塬沟壑区 2000—2020 年 21 年间植被 NDVI 变异程度分为 5 个等级:低波动($CV \leq 0.1$),较低波动($0.1 < CV \leq 0.15$),中波动($0.15 <$

$CV \leq 0.2$), 较高波动($0.2 < CV \leq 0.3$), 高波动($CV \geq 0.3$)。据统计, 黄土残塬沟壑区 21 年来植被 NDVI 变异系数处于 0.009~0.463, 平均值为 0.106, 21 年来黄土残塬沟壑区植被 NDVI 整体上处于低波动变化阶段。由表 5 可知, 黄土残塬沟壑区植被 NDVI 变异系数等级分类中高波动变化等级面积的比例最小, 为 0.09%, 低波动变化等级面积占比最大, 为 48.06%, 表明黄土残塬沟壑区植被 NDVI 时序波动稳定。但空间波动差异性较大, 植被覆盖波动程度为中到高波动的地区植被覆盖类型多为农田^[23], 受耕作收割等人类活动作用较大^[24], 由此影响这些地区的空间波动变化情况。低波动和较低波动变化等级主要呈面状分布在研究区中部及东部部分地区(图 6)。

表 5 黄土残塬沟壑区植被覆盖波动程度面积占比

波动程度	面积/km ²	所占比例/%
低波动	14350.02	48.06
较低波动	7241.75	24.26
中波动	6385.4	21.39
较高波动	1850.46	6.20
高波动	28.04	0.09

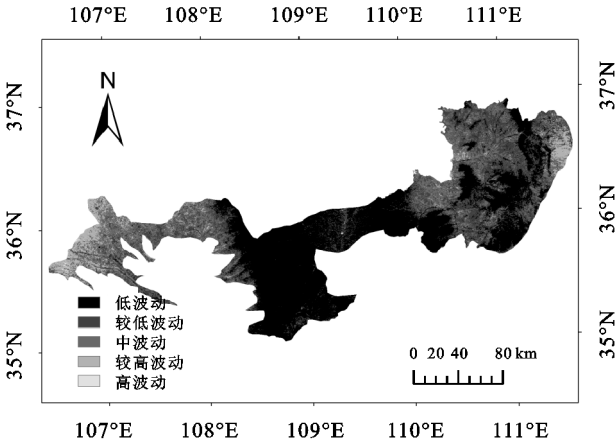


图 6 黄土残塬沟壑区 NDVI 波动程度分布

4 讨论

(1) 本研究划分黄土残塬沟壑区是通过地形入手对整个黄土高原地貌进行了分析。传统的地形分类主要通过人工分类, 主观因素对分类结果影响较大。随着数字地形分析理论不断发展, 目前的研究热点已逐渐成为利用 DEM 进行地形因子提取与地形地貌自动分类。进行黄土地貌形态研究工作较为重要的是选取合适的地形因子。已经有学者^[25]认识到这一点, 选取多个宏观地形因子生成了黄土高原综合地貌图。而本研究参考前人的研究结果并结合微观地形因子和宏观地形因子, 考虑现有技术条件, 选取具有实用性和操作性的多个地形因子分析黄土地貌形态, 相比单个或分析角度单一的地形因子来说可增加对黄土地貌分析的准确性。

黄土残塬沟壑区与黄土高塬沟壑区、黄土丘陵沟

壑区在坡度、沟壑密度、水土流失形式等方面存在差异, 因此在生态建设方面不能一概而论。现有的研究缺乏对黄土残塬沟壑区宏观视角的探索。本研究划分黄土残塬沟壑区范围, 可对黄土高原现有的分区理论进行补充, 可以在水土保持工程、乡村振兴、产业扶贫等方面做到因地制宜, 有利于黄土残塬沟壑区生态文明建设。本研究主要是根据空间上的差异进行地形地貌分区, 未来的研究中可以进一步分析各地形因子时空变异特征。此外本研究分区以黄土高原为整体, 范围大、流域划分数据多、研究过程复杂, 后续可以通过分省分市进行研究, 使黄土高原残塬沟壑区范围研究更加精细化, 简单化。

(2) 本研究以黄土残塬沟壑区为研究对象, 对黄土残塬沟壑区年均 NDVI 时空变化特征进行分析。2000—2020 年研究区年均 NDVI 年际变化趋势方面, 研究显示 21 年来植被年均 NDVI 整体呈上升趋势, 趋势斜率为每年 0.008。以 2008 年和 2015 年为间隔将植被年均 NDVI 年际变化划分为 3 个时间段, NDVI 增长趋势呈现快—慢—较快形态。表明在这期间, 尤其是相关林业生态工程实施以来, 由于国家法律政策的支持与人民群众环保意识的提高, 黄土残塬沟壑区生态环境变化总体向好发展, 这与刘宪锋等^[26] 对全国以及黄土高原 NDVI 时空变化特征的研究结论相一致。从空间分布特征来看, 黄土残塬沟壑区植被年均 NDVI 的多年平均值为 0.711。植被覆盖程度整体上呈现为中到高等级分布状态, 但是有零星的退化区域分布在城镇及周边辐射地区, 有相关研究^[27] 证明产生这种情况的原因是工农业经济日益增长与农村人口迁移导致劳动力向经济发达地区转移使得城市扩张, 进而影响城镇及附近植被覆盖度退化, 而劳动力迁出地即农村地区植被覆盖度会有所恢复。研究^[27] 还表明, 黄土高原地区实施林业生态工程以来 96% 的县域植被覆盖度都呈现上升态势, 且生态保护和恢复政策的实施、气候变化和经济增长都对黄土高原植被覆盖度增长做出了重要贡献, 与此对应, 2000—2020 年研究区植被年均 NDVI 时空格局演变趋势以改善为主, 其中 2000—2008 年、2008—2015 年、2015—2020 年黄土残塬沟壑区年均 NDVI 斜率呈现快—慢—较快增长趋势。黄土残塬沟壑区 21 年来植被 NDVI 变异系数均值为 0.106, 整体上呈低波动变化状态。本文对黄土残塬沟壑区植被 NDVI 时空变化进行了分析, 在以后的研究中将进一步研究黄土残塬沟壑区植被覆盖变化与土地利用情况、地形、气候等因素之间的关系, 为黄土残塬沟壑区的水土保持工

作提供更加全面的理论基础和科学依据。

5 结论

(1)黄土残塬沟壑区主要位于 35° — 37° N, 106° — 112° E, 分布在甘肃、山西、陕西 3 省, 面积约为 2.99 万 km^2 , 海拔在 1 186.38~1 489.88 m, 坡度处于 9.24° ~ 24.28° , 沟壑密度为 1.91~3.21 km/km^2 , 地表切割深度在 72.34~111.38 m。

(2)在时间序列上, 黄土残塬沟壑区 2000—2020 年 NDVI 年均值在 21 年间的变化趋势呈整体上升趋势, 年均 NDVI 增长率为 0.008/a。在空间分布上, 黄土残塬沟壑区整体植被覆盖处在中到高水平上, 其中高覆盖度区域像元数占比达到 34.16%, 面积约为 10 258.02 km^2 。而研究区西部的大部分地区、东部部分县市及水体覆盖区域植被覆盖水平较低。

(3)由植被覆盖时空变化趋势情况可知, 黄土残塬沟壑区植被覆盖情况整体得到改善, 改善总面积达到 20 639.38 km^2 , 大部分位于研究区东西部。在 NDVI 时空波动方面, 黄土残塬沟壑区时序波动较稳定, 21 年间整体上处于低波动阶段, 低波动区域面积占比为 48.06%。但是空间波动性较大, 整体来看, 研究区中部和东部地区较西部地区植被覆盖空间波动较低。

参考文献:

- [1] 刘玉兰. 黄土高原地区水土保持耕作措施区划探讨[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [2] Wang H S, Liu D S, Lin H, et al. NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan plateau[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(5): 687-698.
- [3] 董懿, 尹冬勤, 李渊, 等. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 120-131.
- [4] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1248-1258.
- [5] 张丽萍, 张海霞. 简论黄土高原地貌类型的空间组合结构: 以陇东、陕北、晋西为例[J]. 山西大学师范学院学报(综合版), 1991, 3(1): 88-92.
- [6] 舒若杰, 高建恩, 赵建民, 等. 黄土高原生态分区探讨[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 143-148.
- [7] 王万忠, 焦菊英, 马丽梅, 等. 黄土高原不同侵蚀类型区侵蚀产沙强度变化及其治理目标[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 1-7.
- [8] 李小芳, 张霞, 朱莉莉, 等. 晋西残塬沟壑区水土保持措施体系研究[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 157-160.
- [9] 王雨山, 潘建永. 基于包气带剖面研究黄土地下水补给[J]. 地质论评, 2019, 65(增刊 1): 15-16.
- [10] 袁晓波, 尚振艳, 牛得草, 等. 黄土高原生态退化与恢复[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 363-371.
- [11] 姚建民. 黄土残塬沟壑区土地开发适宜性评价方法研究[J]. 自然资源学报, 1994, 9(2): 185-192.
- [12] 甘枝茂. 黄土高原地貌的基本特征[J]. 中学地理教学参考, 1993(10): 5-7.
- [13] 聂兴山, 王志坚, 赵昌亮, 等. 山西省黄土残塬沟壑区“固沟保塬”综合治理规划研究[J]. 山西水土保持科技, 2019(2): 1-8.
- [14] 中国科学院地理研究所. 中国 1: 100 万地貌制图规范(试行)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-44.
- [15] 国家发展改革委, 水利部, 农业部, 等. 《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)》[EB/OL]. (2010-12-30). http://www.gov.cn/zwggk/2011-01/17/content_1786454.htm.
- [16] 张磊. 基于核心地形因子分析的黄土地貌形态空间格局研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [17] 曹泽涛, 方子东, 姚瑾, 等. 基于随机森林的黄土地貌分类研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 452-463.
- [18] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [19] 吴霞, 张永宏, 王长军, 等. 基于 MODIS 的宁夏植被覆盖时空变化特征分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 204-208.
- [20] 柴亚凡, 周波, 吕忠明, 等. 黄土高原残塬沟壑区红土泻溜面防治模式研究[J]. 中国水土保持, 2014(2): 49-51.
- [21] 李楠, 韩金锋, 阳维宗, 等. 2000—2019 年若尔盖高原植被生长季 NDVI 时空变化特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(1): 133-139.
- [22] 黄麟, 曹巍, 巩国丽, 等. 2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117.
- [23] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.
- [24] 肖强, 陶建平, 肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7594-7602.
- [25] 张晖, 王晓峰, 余正军. 基于 ArcGIS 的坡面复杂度因子提取与分析: 以黄土高原为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2009, 43(2): 323-326.
- [26] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [27] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, et al. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau[J]. Science Bulletin, 2021, 66(12): 1160-1163.