

# 基于土壤湿度与植被覆盖变化的黄土高原生态恢复项目适宜性评价

白子怡<sup>1</sup>, 薛亮<sup>1</sup>, 张翀<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:** 基于 2001—2014 年的 MODIS 数据和 Landsat 数据, 利用温度植被干旱指数对黄土高原土壤湿度进行了反演, 并应用 Theil-Sen 趋势和 Hurst 指数, 通过分析土壤湿度与植被覆盖的时空变化特征及其相互关系, 得到了未来不同土壤湿度情境下植被覆盖的变化特征, 经过筛选和分析划分出了黄土高原生态恢复项目适宜性区域。结果表明: (1) 黄土高原 TVDI 的 Hurst 指数均值为 0.49, 其中持续性和反持续性面积分别占 42.54%, 57.46%。根据 TVDI 未来变化特征来看, 未来土壤湿度减小的区域面积占 54.08% 且遍布整个研究区。(2) NDVI 的 Hurst 均值为 0.52, 其中持续性面积占 55.01%, 表明黄土高原植被覆盖持续性强于反持续性。根据 NDVI 未来变化特征, 植被覆盖持续改善面积达 46.95%, 退化转为改善占 6.08%, 呈良好趋势。(3) 生态恢复项目弱适宜区面积最大, 占总面积的 59.90%, 其次为不适宜区, 面积占 25.39%; 适宜区面积仅占黄土高原的 13.41%, 较适宜区面积仅为 1.30%。(4) 未来的植被恢复工程主要针对坡度较大的耕地实施退耕还林, 还需要考虑对土壤水分适宜的地区进行了退草还林, 而且坡度较小的较适宜区应在粮食安全的基础上进行了退耕还林和退草还林。

**关键词:** 土壤湿度; 植被覆盖; 生态恢复; 适宜性; 黄土高原

**中图分类号:** S152.7<sup>+</sup>1; Q948; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)04-0292-07

## Evaluation on Suitability of Ecological Restoration Project in the Loess Plateau Based on Soil Moisture and Vegetation Cover Change

BAI Ziyi<sup>1</sup>, XUE Liang<sup>1</sup>, ZHANG Chong<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721000, China)

**Abstract:** Based on the MODIS data and Landsat data from 2001 to 2014, we have estimated the soil moisture in the Loess Plateau using temperature vegetation dryness index. The Theil-Sen method and Hurst index were used to analyze the spatiotemporal variation of soil moisture and vegetation cover as well as their inter-relationship and get the different vegetation changes under different situations of soil moisture in the future. The suitability region of ecological restoration project was divided through filter and analysis in the Loess Plateau. The results showed that: (1) the average Hurst index of TVDI in the Loess Plateau was 0.49, of which the persistent and anti-persistent areas accounted for 42.54% and 57.46%, respectively; according to the characteristics of future changes of TVDI, the area of soil moisture will decrease in the future, accounting for 54.08% and distributing in the whole study area; (2) the average Hurst value of NDVI was 0.52, of which 55.01% was the sustained area, indicating that vegetation cover persistence in the Loess Plateau was stronger than that in reverse; according to the future variation characteristics of NDVI, area of vegetation cover continuing to improve accounted for 46.95%, and the area of conversion of degradation into improve-

收稿日期: 2018-08-14

修回日期: 2018-09-21

资助项目: 科技基础性工作专项“黄土高原生态系统与环境变化考察”(2014FY210100); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201803051); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“基于深度机器学习的土壤水分光谱遥感反演技术研究”(2018JQ4039)

第一作者: 白子怡(1994—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为资源开发与 GIS。E-mail: zybai@snnu.edu.cn

通信作者: 薛亮(1978—), 男, 陕西洋县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源开发与 GIS 方面的教学与科研工作。E-mail: brxue@snnu.edu.cn

ment accounted for 6.08%, showing the good trend; (3) the ecological restoration project had carried out in the largest area with weak suitability, accounting for 59.9% of the total area, followed by unsuitable zones, accounting for 25.39% of the total area; the suitable area covered only 13.41% of the Loess Plateau, and the area of better suitable area was only 1.3% of the Loess Plateau; (4) the future vegetation restoration project should mainly focus on the larger sloping arable land to implement the conversion of sloping farmland into forestland, but also consider the soil water suitable areas where the grassland should be converted into the forestland, and the farmland should be converted into forestland, and the grassland should be converted into forestland in the more suitable areas with gentle slope on the basis of food security.

**Keywords:** soil moisture; vegetation cover; ecological restoration; suitability; the Loess Plateau

自1999年退耕还林草政策的实施以来,黄土高原迅速扩大人工林建设,黄土高原水土流失得到缓解,生态环境不断改善<sup>[1-7]</sup>,鉴于此国家“十三五”规划建议扩大退耕还林草政策的实施。但是,相比于天然植被,人工植被光合作用消耗的土壤水分较大,加之前期退耕还林草植被生长,植被生理需水增加,引起干旱一半干旱地区土壤湿度减小,土壤容易出现旱化特征,增加了植被衰败的可能性<sup>[8]</sup>。随着全球变暖,土壤旱化程度加重,造成地表植被退化,土壤干层又会影响到地下水补给,以及陆地水循环<sup>[9-11]</sup>。因此,基于植被覆盖与土壤水分之间的变化关系,分析植被恢复工程的适宜性具有重要的理论和现实意义。前人研究多侧重于植被覆盖变化与气候要素之间的关系<sup>[12-16]</sup>,分析植被覆盖与土壤水分之间的关系少见。而土壤水分是植物蒸腾作用和光合作用的限制性因子,土壤水分决定了生态建设中植被类型和结构,是植物生长、植被恢复、土壤侵蚀的主要影响因素<sup>[17]</sup>。土壤湿度的传统监测方法能有效监测土壤湿度,是土壤湿度监测、研究、应用的主要手段,但是其采样速度慢、耗费大量人力和物力、使用范围有限,加之测站分布不均,难以实现大范围、实时、精确的监测。随着遥感技术的迅速发展,遥感数据的多时相、多光谱、多分辨率、高光谱等特性,使得土壤水分快速、实时、动态监测成为可能<sup>[18-21]</sup>。黄土高原地处干旱一半干旱气候区,雨量少,水资源缺乏,水土流失和荒漠化严重,植被稀疏,生态环境十分脆弱,易破坏、难以恢复,加之土层厚,地下水埋藏深,土壤水分是植物生长所需水分的主要来源,土壤含水量的多寡与植被的生长密切相关,进而影响着生态系统的功能和稳定性<sup>[22-23]</sup>。如果忽略了生态脆弱区本底自然环境特征及土壤水分时空分布特征,盲目扩大生态恢复和植被建设面积,可能引起人工植被退化,甚至导致群落衰败和生态系统退化,造成巨大生态经济损失,限制了生态恢复项目的可持续发展,与生态工程预期成效产生差距。因此,有必要探明土壤水分与植被覆盖变化之间

的关系及未来变化特征,基于此分析两者相互作用下的生态恢复项目适宜性。在土壤水分遥感反演中,通过地表温度和植被覆盖特征空间反映土壤水分的遥感监测得到了广泛应用<sup>[24-27]</sup>。由于温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)计算过程输入数据少、简单易行、生物物理学含义明确等特点,因此本研究利用植被覆盖与地表温度数据构建 TVDI,用以反映黄土高原土壤湿度,基于此得到未来不同土壤湿度情境下植被覆盖的变化特征,并从中筛选出生态恢复项目的适宜性区域。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本研究所用数据包括黄土高原2001—2014年MODIS-NDVI数据、MODIS-LST数据与生态区划数据。黄土高原MODIS图幅号包括h26v4, h26v5和h27v5,利用MODIS重投影工具(MODIS Reprojection Tool, MRT)读取HDF-EOS格式的分幅数据文件,并对其坐标系/投影进行变换,将拼接影像写入HDF-EOS以外的文件格式,本研究设置输出为GeoTIFF格式;MODIS-NDVI数据来自LP DAAC中的MODIS产品的MOD13A2数据集,空间分辨率为1 000 m,时间分辨率为16 d,利用单位转换系数0.000 1将其转为0~1,采用最大值合成法将NDVI数据转换为年际数据,以反映逐年植被覆盖状况;MODIS-LST数据来源于MODIS产品的MOD11A2数据集,空间分辨率为1 000 m,时间分辨率为8 d,利用单位转换系数0.02将其转为开尔文单位(Kelvin),由于LST存在大面积的无效数据,所以采用Cressman客观分析法与非对称高斯函数拟合<sup>[28]</sup>,将8 d的LST数据进行重构,为了与NDVI数据时间分辨率统一,经过间隔筛选得到16 d数据;将16 d的NDVI和LST数据导入Matlab中,经过空间叠加形成三维矩阵数据集,以便通过提取逐像元时间序列来进行趋势等分析。生态区划数据来源于中国生态系统评估与生态安全格局数据库(<http://www.>

ecosystem.csdb.cn/index.jsp)中的中国生态功能区划数据库,其中的数据集是在生态环境问题、生态系统敏感性、生态系统服务功能重要性的基础上,将一系列相同比例尺的评价图,采用空间叠置法、相关分析法、专家集成等方法,按生态功能区划的等级体系,通过自上而下划分方法进行生态功能区划方案划分,生态区划主要用于分析不同土壤湿度变化情景下植被覆盖的变化趋势。

1.2 Theil-Sen 趋势

Theil-Sen 趋势既不受异常值影响,也不用服从一定的分布,结果更为科学、可信<sup>[29]</sup>,所以本文选用这种方法进行趋势分析,并采用非参数检验法 Mann-Kendall(M-K)<sup>[30]</sup>对其趋势进行检验,其原理如下:

$$TS_{slope} = \text{Median}(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}), \forall j > i \tag{1}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \tag{2}$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$p = 2[1 - \varphi(|Z|)] \tag{5}$$

$$\varphi(|Z|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2} dt \tag{6}$$

式中:TS<sub>slope</sub>为 Theil-Sen 趋势;x<sub>j</sub>,x<sub>i</sub>为时间序列数据;t<sub>j</sub>,t<sub>i</sub>为时间序列对应的年份;n为时间序列的时间长度;p为显著性检验值。

本文采用 p 检验值对趋势进行检验,趋势的显著性被划分为几个级别(表 1)。

表 1 趋势及其显著性划分

趋势	p 检验值	级别	趋势	p 检验值	级别
slope>0	p<0.01	极显著增加/改善	slope<0	p<0.01	极显著减小/退化
	0.01≤p<0.05	显著增加/改善		0.01≤p<0.05	显著减小/退化
	0.05≤p<0.1	弱显著增加/改善		0.05≤p<0.1	弱显著减小/退化
	p≥0.1	不显著增加/改善		p≥0.1	不显著减小/退化

1.3 土壤湿度估算

Sandholt 等<sup>[31]</sup>指出地表温度(Land Surface Temperature,LST)和植被覆盖(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)的梯形空间可以反映土壤水分,所以本文采用 TVDI 来表征土壤湿度,TVDI 值为 0~1,TVDI 越大,土壤湿度越低,TVDI 越小,土壤湿度越高。因此,本研究采用 1-TVDI 来表示土壤湿度的大小。TVDI 基于植被指数/地表温度的梯形特征空间计算而来,原理如下:

$$TVDI = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}} \tag{7}$$

式中:Ts 为每个像元的 LST;Ts<sub>min</sub>为对应像元湿边的 LST;Ts<sub>max</sub>为对应像元湿边的 LST(图 1)。

1.4 Hurst 指数

HURST 指数是英国水文学家 Hurst 提出的<sup>[32]</sup>,它已被广泛应用于水文学、经济学、气候学等领域,其原理如下:

给定一个时间序列 {ξ(t)},t=1,2,⋯,对于任意正整数 τ≥1,定义平均序列:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, 3 \tag{8}$$

累积离差:  $X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}] \quad 1 \leq t \leq \tau \tag{9}$

极差:  $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \cdots \tag{10}$

标准差:  $S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \cdots \tag{11}$

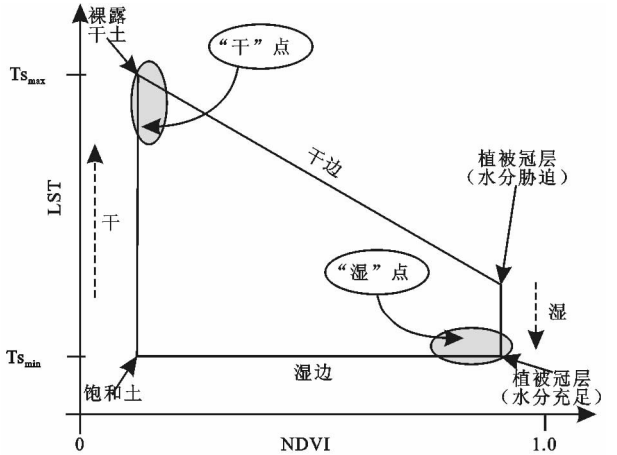


图 1 NDVI 与 LST 构建 TVDI 示意图

考虑比值  $R(\tau)/S(\tau) \triangleq R/S$ ,如果存在  $R/S \propto \tau^H$ ,那么时间序列 {ξ(t)},t=1,2,⋯,具有 Hurst 现象,H为 Hurst 指数。H 值可根据计算出的(τ,R/S)的值,在双对数坐标系(lnτ,lnR/S)中用最小二乘法拟合式得到。

如果 0.5<H<1,时间序列是一个持续性序列;如果 H=0.5,时间序列为随机序列;如果 0<H<0.5,时间序列存在反持续性。分别将植被覆盖和土壤湿度 Theil-Sen 趋势与 Hurst 指数进行空间叠置来反映两者的未来变化特征(表 2)。

表 2 基于 Theil-Sen 趋势与 Hurst 指数的未来变化特征			
项目	Hurst	Theil-Sen	未来变化特征
	>0.5	>0	持续增加
植被覆盖/	>0.5	<0	持续减小
土壤湿度	<0.5	>0	增加转为减小
	<0.5	<0	减小转为增加

注:不存在 Hurst=0.5 以及 Theil-Sen=0 的情况。

2 结果与分析

2.1 黄土高原土壤湿度与植被覆盖的趋势及未来变化

采用 Sen 趋势与 Hurst 指数计算了黄土高原 TVDI 和 NDVI 的变化趋势及其可持续性,从而分析两者的未来变化特征。生态区代码 I-10 为燕山—太行山山地落叶阔叶林生态区,I-11 为汾渭盆地农业生态区,I-12 为黄土高原农业与草原生态区,I-15 为秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区,II-1 为内蒙古高原中东部典型草原生态区,II-2 为内蒙古高原中部—陇中荒漠草原生态区,II-3 为内蒙古高原中部草原化荒漠生态区,III-1 为祁连山森林与高寒草原生态区,III-4 为江河源区—甘南高寒草甸草原生态区。黄土高原 TVDI 的 Hurst 指数均值为 0.49(0.11~0.94),其中持续性和反持续性面积分别占 42.54%,57.46%,表明黄土高原土壤湿度反持续性强于持续性。根据 TVDI 未来变化特征,土壤湿度增大转为减小面积最高,占 46.08%,集中区域分布于六盘山以东—吕梁山以西—关中盆地以北—鄂尔多斯高原以南的区域;其次为持续增大区,面积为 34.54%,集中分布于研究区南部的关中盆地、秦巴山地西部,以及研究区东北部;土壤湿度减小转为增大、持续减小区面积分别占 11.38%,8%,分布于研究区东南部 and 西北部边缘(附图 5C)。结果表明,未来土壤湿度减小的区域面积占 54.08%且遍布整个研究区,在土壤水分减少的情况下植被生长可能面临严重压力。

黄土高原植被覆盖的未来变化特征与土壤湿度差异性较大。NDVI 的 Hurst 均值为 0.52(0.13~0.99),其中持续性面积占 55.01%,表明黄土高原植被覆盖持续性强于反持续性。根据 NDVI 未来变化特征,植被覆盖持续改善面积达 46.95%,集中分布于鄂尔多斯高原以及陇中高原—太行山之间的山地区;其次为改善转为退化区,面积为 38.91%,散布于整个研究区;持续退化占 8.06%,分布于研究区边缘,集中于南北部边缘;退化转为改善占 6.08%,分布于矿业城市乌海市以东地区(附图 6C)

2.2 黄土高原未来不同土壤湿度变化情景下植被覆盖的变化趋势

随着人工林草的生长,植被对土壤水分的消耗不断增加,土壤湿度可能呈现出减小趋势,因此,未来土

壤湿度以及植被覆盖的变化特征分析对生态恢复项目的可持续性研究具有重要意义。结合 Theil-Sen 趋势和 Hurst 指数,分别得到土壤湿度和植被覆盖的未来变化特征,通过两者的空间叠加,定性分析土壤湿度未来不同情景下的植被覆盖变化特征,从而提供相关的决策支持。

(1) 土壤湿度(增大→减小)情境下。植被覆盖的持续改善面积和改善→退化面积比重较高,分别占该情境下总面积的 49.34%,40.04%;空间上,两者主要分布于农业草原区,集中于六盘山—子午岭—吕梁山之间,该区域分布着耕地和中覆盖度草地;其次分布于毛乌素沙地东南部,以及山西的低山丘陵地带(图 2A),毛乌素沙地以中、低覆盖度草地为主,山西低山区主要分布着低覆盖度草地。由于土壤湿度由增大趋势转为未来的减小趋势,原有改善的植被覆盖出现退化的区域应停止退耕还林草工程,加强土壤保水能力和水资源管理工作,合理利用现有水资源维持现有植被正常生长;植被覆盖的持续改善会加重土壤水分的损耗,当土壤水分降低到植被生理用水需求以下时,植被便开始退化,所以该区域应减缓退耕还林草进程,使得土壤水分补给以及植被涵养与土壤水分耗减达到平衡。

(2) 土壤湿度(持续减小与减小→增大)情境下。植被覆盖的持续改善面积和改善→退化面积比重较高,两个区域植被覆盖变化受土壤湿度变化的影响不明显(附图 6A);空间上,主要分布于研究区西北部边缘和东南部边缘(图 2B—2C)。西北部气候干旱,土壤水分基数小,植被覆盖稀少,主要为荒漠草原,该区域应减小人工林草种植,防治土壤水分过分消耗,保持植被覆盖的自然演替;东南部气候较为湿润,土壤湿度和植被覆盖基数大,主要为农业区,该区域受人类活动影响较大,植被覆盖和土壤湿度波动性强,但属于退耕还林适宜区,可以根据区域发展以及粮食安全等状况适当退耕还林。

(3) 土壤湿度(持续增大)情境下。植被覆盖的持续改善面积和改善→退化面积分别占该情景的 47.29%,38.81%。空间上,植被覆盖持续改善区主要分布于晋东北永定河上游山间盆地、晋西北半干旱山地丘陵、阴山山地区、内蒙古—晋西黄土丘陵沟壑区以及鄂尔多斯东部(图 2D),晋北与前套平原主要以旱地为主,其他地区以中低覆盖度草地为主,植被覆盖持续改善区主要分布在研究区北部的干旱—半干旱地区,地表蒸散量大于降水量,土壤湿度和植被覆盖基数均较小,植被覆盖的持续改善会限制土壤湿度的持续增大,所以该区域植被应以自然演替为主,人工演替作为辅助手段,并在考虑地形、气候等因子的基础上,合

理配置土地利用,以减小水土流失;植被覆盖改善→退化区分布于陕西延安北部边缘的黄土丘陵沟壑区、榆林神府地区、太行山—吕梁山北部以及秦岭西部、汾渭盆地、陇中高原南部与青海高寒区湟水南岸以及

黄河两岸(图 2D),该地区多为人类活动频繁的区域,主要包括土地资源、能源资源开发、农业种植等,但相对水热条件较好且大面积土地为耕地,所以适宜在土壤湿度持续增大的情况下开展退耕还林。

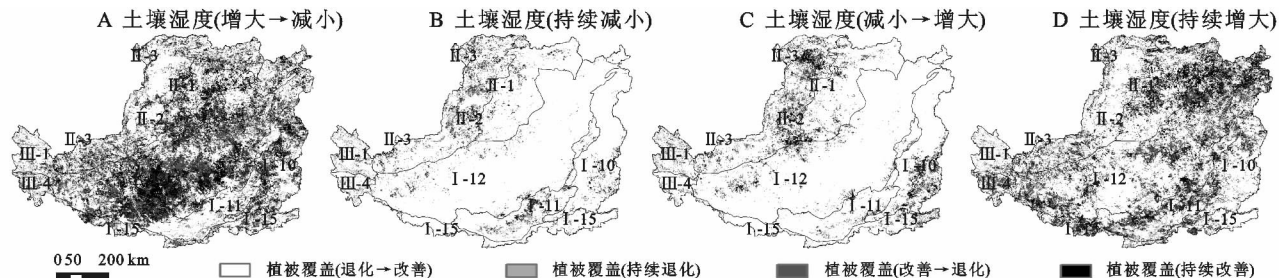


图 2 黄土高原未来不同土壤湿度变化下的植被覆盖变化趋势

### 2.3 黄土高原生态恢复项目适宜性评价

结合当地背景环境,根据未来不同土壤湿度情景下植被覆盖的变化趋势及其相互关系,将生态恢复项目适宜性分为 4 类(图 3)。其中,弱适宜区面积最大,占研究区总面积的 59.90%,其次为不适宜区,面积占 25.39%,弱适宜区和不适宜区均建议不宜进行退耕还林工程;适宜区面积仅占黄土高原的 13.41%,主要分布在陕西延安北部边缘、榆林神府地区、太行山—吕梁山北部以及秦岭西部、汾渭盆地北部、陇中高原南部与青海高寒区湟水南岸以及黄河两岸;较适宜区面积仅为 1.30%,主要分布于太岳山山间盆地、豫西山地,其次在高寒区北部以及宁夏平原东部也有分布。

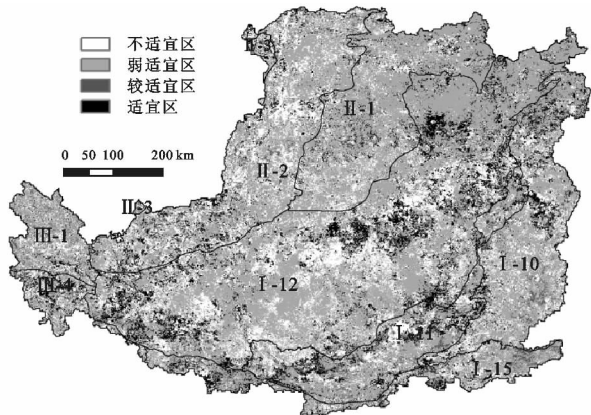


图 3 黄土高原生态恢复项目适宜性

统计研究时段末期的土地覆盖类型在每种适宜性级别中的百分比,发现每种级别中草地和耕地所占面积最高,两者面积达该适宜性级别总面积的 79% 以上。其中,适宜区中草地和耕地总面积占该级别的 80.57%,分别占该级别的 55.81%,24.76%;较适宜区中耕地面积较高,占该级别的 46.44%,其次为草地占 37.54%。从不同适宜性级别的坡度统计值来看,生态恢复项目适宜区坡度最大,平均坡度为 10.11°;其次为不适宜区,平均坡度为 9.09°;弱适宜区和较适宜区平均坡度分别为 8.40°和 7.04°。因

此,未来的植被恢复工程不仅需要考虑对坡度较大的耕地实施退耕还林,还需要考虑对土壤水分适宜的地区进行退草还林,而且坡度较小的较适宜区应在粮食安全的基础上进行退耕还林和退草还林。

### 3 讨论

本文采用 1-TVDI 来表示土壤湿度大小,通过计算土壤湿度和植被覆盖年内变化来分析 TVDI 反映土壤湿度的可靠性。将黄土高原植被覆盖和土壤湿度年内数据进行 Whittaker 平滑和傅里叶插值增采样(356 d),一定程度上剔除了数据噪声,提高了信噪比(图 4)。

土壤湿度年内季节变化特征与张蕾等<sup>[33]</sup>的西北地区土壤湿度变化特征高度吻合,差异性主要表现在土壤湿度变化特征点所对应的时间点不同。本文土壤湿度最低值对应时间较张蕾等<sup>[33]</sup>的研究提前了 1 个月以上。植被生长季始期为 4 月下旬,与土壤湿度最低值时间点契合度很好(图 4),诸多学者提取的植被生长季始末期<sup>[34-36]</sup>证明 TVDI 用来表示土壤湿度变化特征具有很高的可信性<sup>[37]</sup>。

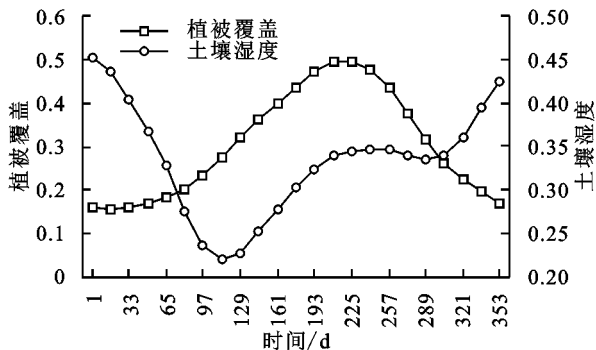


图 4 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的年内季节变化特征

虽然 TVDI 在研究中具有一定的可信性,但仍然存在不足之处:利用 TVDI 反映土壤湿度大小未经实测数据的时空验证,也未将其转换为土壤水分体积分数,后期数据应用较为困难,且土壤水分时空变化机理复杂,以及传统反演模型具有时空限制、不稳定等

缺陷。在此基础上查阅大量文献,发现高光谱遥感数据为土壤水分反演提供了大量的样本数据,且反射波谱曲线的细微差别可以反映出土壤水分的微小变化,使得单一或多波段遥感数据探测不到的时空分布规律,在高光谱遥感中得以实现<sup>[38]</sup>。另外,采用机器学习方法可构建任意的非线性关系,尤其是引起广泛关注的深度学习方法,在遥感影响分类、预测与反演等方面中表现出强大的应用潜力<sup>[39-41]</sup>。因此,以后的研究将侧重于土壤水分的高光谱遥感反演,基于高光谱遥感数据和实测土壤水分数据,利用深度学习方法建立遥感数据与实测土壤水分之间的最优模型,从而提高区域土壤水分反演精度。

## 4 结论

(1) 黄土高原土壤湿度反持续性强于持续性。研究表明,TVDI的Hurst指数均值为0.49(0.11~0.94),其中持续性和反持续性面积分别占42.54%,57.46%。从TVDI未来变化特征来看,未来土壤湿度减小的区域面积占54.08%且遍布整个研究区,在土壤水分减少的情况下植被生长可能面临严重压力。

(2) 黄土高原植被覆盖持续性强于反持续性。研究表明,NDVI的Hurst均值为0.52(0.13~0.99),其中持续性面积占55.01%。根据NDVI未来变化特征,植被覆盖持续改善面积达46.95%,退化转为改善占6.08%,整体呈良好走向。

(3) 生态恢复项目弱适宜区面积最大,占总面积的59.90%,其次为不适宜区,面积占25.39%;适宜区面积仅占黄土高原的13.41%,主要分布在陕西延安北部边缘、榆林神府地区、太行山—吕梁山北部以及秦岭西部、汾渭盆地北部、陇中高原南部与青海高寒区湟水南岸以及黄河两岸;较适宜区面积仅为1.30%,主要分布于太岳山山间盆地、豫西山地区。

(4) 未来的植被恢复工程不仅需要考虑对坡度较大的耕地实施退耕还林,还需要考虑对土壤水分适宜的地区进行退草还林,而且坡度较小的较适宜区应在粮食安全的基础上进行退耕还林和退草还林。

### 参考文献:

- [1] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [2] Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015,10(8):739-741.
- [3] 刘宇,傅伯杰.黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响[J].干旱区地理,2013,36(6):1097-1102.
- [4] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被

- 覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [5] 刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4):1244-1249.
- [6] 王朗,傅伯杰,吕一河,等.生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2010,21(8):2109-2116.
- [7] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近30a黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.
- [8] 郭忠升.土壤水分植被承载力的理论与实践[M].北京:科学出版社,2014.
- [9] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [10] 田均良.黄土高原生态建设环境效应研究[M].北京:气象出版社,2010.
- [11] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):25-51.
- [12] 张静静,郑辉,朱连奇,等.豫西山地区植被NDVI及其气候响应的多维变化[J].地理研究,2017,36(4):765-778.
- [13] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.
- [14] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [15] 方利,王文杰,蒋卫国,等.2000—2014年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J].地理科学,2017,37(11):1745-1754.
- [16] 王子玉,许端阳,杨华,等.1981—2010年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究[J].地理科学进展,2017,36(8):1025-1032.
- [17] 白天路.基于遥感和地面实测水分数据的小流域土壤水分模拟[D].西安:西北大学,2010.
- [18] Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era [J]. Remote Sensing Letters, 2013,4(4):364-372.
- [19] Karnieli A, Agam N, Pinker R T. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations [J]. Journal of Climate, 2010,23(3):618-633.
- [20] 陈书林,刘元波.卫星遥感反演土壤水分研究综述[J].地球科学进展,2012,27(11):1192-1203.
- [21] 王鹏新,龚健雅,李小文.基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J].地球科学进展,2003,18(4):527-533.
- [22] 段春青,刘昌明,陈晓楠.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.
- [23] 李新荣,何明珠,贾荣亮.黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应[J].地球科学进展,2008,23(7):685-691.

- [24] 刘立文,张吴平,段永红. 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报,2014,34(13):3704-3711.
- [25] Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index(TVDI) to infer soil moisture status[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(1):23-39.
- [26] 宋春桥,游松财,刘高焕. 基于 TVDI 的藏北地区土壤湿度空间格局[J]. 地理科学进展,2011,30(5):570-576.
- [27] 邸兰杰,王卫,成贺玺. 基于 ATI 和 TVDI 模型的河北平原土壤湿度遥感反演[J]. 中国生态农业学报,2014,22(6):737-743.
- [28] 李天祺,朱秀芳,潘耀忠,等. MODIS 陆地表面温度数据重构方法研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2015,51(S1):70-76.
- [29] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [30] Kendall M G. Rank Correlation Methods, 3rd edition [M]. New York: Hafner Publishing Company, 1962.
- [31] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2/3):213-224.
- [32] John R, Chen Jiquan, Lu Nan, et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(5):2018-2032.
- [33] 张蕾,吕厚荃,王良宇. 中国土壤湿度的时空变化特征[J]. 地理学报,2016,71(9):1494-1508.
- [34] 韦振锋,王德光,张翀. 近 12 年陕甘宁黄土高原区植被物候时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2014,30(4):423-429.
- [35] 李强,张翀. 近 15 年黄土高原植被物候时空变化特征分析[J]. 中国农业科学,2016,49(22):4352-4365.
- [36] 谢宝妮,秦占飞,王洋. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. 农业工程学报,2015,31(15):153-160.
- [37] 张翀,雷田旺,宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞互相关时空特征分析[J]. 生态学报,2018,38(6):1-11.
- [38] 杨涛,宫辉力,李小娟. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报,2010,30(22):6264-6277.
- [39] Zhao W, Du S. Spectral-spatial feature extraction for hyperspectral image classification: A dimension reduction and deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(8):4544-4554.
- [40] 刘大伟,韩玲,韩晓勇. 基于深度学习的高分辨率遥感影像分类研究[J]. 光学学报,2016,36(4):298-306.
- [41] Jean N, Burke M, Xie M, et al. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty[J]. Science, 2016,353(6301):790-794.

~~~~~

(上接第 291 页)

- [14] 王介勇,吴建寨. 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势[J]. 生态学报,2012,32(15):4861-4868.
- [15] 孔伟,任亮,王淑佳,等. 河北省生态环境与经济协调发展的时空演变[J]. 应用生态学报,2016,27(9):2941-2949.
- [16] 杨主泉,张志明. 基于耦合模型旅游经济与生态环境协调发展研究:以桂林市为例[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):262-268.
- [17] 赵莹,刘小鹏,郭永杰. 六盘山集中连片特困地区生态安全评价[J]. 水土保持通报,2014,34(2):157-162.
- [18] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 基于 PSR 模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报,2018,38(2):148-153.
- [19] 李帅,魏虹,倪细炉,等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报,2014,25(9):2700-2708.
- [20] 周成,冯学钢,唐睿. 区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测:以长江经济带沿线各省市为例[J]. 经济地理,2016,36(3):186-193.
- [21] 周成,金川,赵彪,等. 区域经济—生态—旅游耦合协调发展省际空间差异研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(7):203-208.
- [22] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 基于 RS 与 GIS 的沙坡头区生态系统服务价值研究[J]. 水土保持研究,2018,25(4):250-256.
- [23] 张玉萍,瓦哈甫·哈力克,党建华,等. 吐鲁番旅游—经济—生态环境耦合协调发展分析[J]. 人文地理,2014,29(4):140-145.
- [24] 崔木花. 中原城市群 9 市城镇化与生态环境耦合协调关系[J]. 经济地理,2015,35(7):72-78.
- [25] 易平,方世明. 地质公园社会经济与生态环境效益耦合协调度研究:以嵩山世界地质公园为例[J]. 资源科学,2014,36(1):206-216.
- [26] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
- [27] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价:以宁夏红寺堡区为例[J]. 生态学报,2018,38(8):2672-2682.
- [28] 刘彦随,李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报,2017,72(1):161-173.