

2000—2016年黄土高原不同土地覆盖类型 植被NDVI时空变化

孙锐^{1,2}, 陈少辉^{1*}, 苏红波¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:了解植被覆盖的时空变化对区域环境保护及生态环境建设具有重要意义。基于MOD13A1数据, 辅以Sen+Mann-Kendall、变异系数、Hurst指数, 通过分析2000—2016年间黄土高原NDVI年最大值(NDVI_{ymax})和生长季均值(NDVI_{gsmean})时空变化特征及趋势, 以了解黄土高原实施退耕还林(草)等生态工程后的植被覆盖恢复情况。结果表明: ① 2000—2016年植被NDVI_{ymax}和NDVI_{gsmean}呈现波动式增长趋势, 增长率分别为0.0070/a ($P < 0.01$)和0.0063/a ($P < 0.01$), 生态环境整体不断改善。② NDVI_{ymax}和NDVI_{gsmean}显示黄土高原植被覆盖呈增加趋势的面积远高于呈减少趋势的面积(93.42%和96.22%、6.58%和3.78%), 植被覆盖状态正在不断改善。2种数据变化趋势下, 不同土地覆盖类型表现略有差异, 森林极显著增加趋势面积最大(73.02%和82.60%), 其次为耕地(47.87%和67.43%), 再次为裸地(47.03%和61.68%)。③ NDVI_{gsmean}的变异系数小于NDVI_{ymax}的变异系数, 相对稳定区域面积比分别为63.31%与56.64%, 2种数据分析下森林变异系数最小, 植被稳定性最好。④ 从植被NDVI变化趋势与Hurst组合结果得出, NDVI_{ymax}未来呈现改善趋势面积占41.35%, 退化趋势面积占58.65%; NDVI_{gsmean}呈现改善趋势面积占49.19%, 退化趋势面积占50.81%。2种数据下, 灌木地未来发展趋势最好, 森林和耕地退化趋势面积超过了50%。研究人员应持续关注退化趋势地区的植被状态。

关键词:黄土高原; NDVI; MOD13A1; 植被变化; 土地覆盖

作为陆地生态系统的主体(刘宪锋, 任志远等, 2013; 周伟等, 2014; 刘宪锋等, 2015; 高海东等, 2017), 植被的年际和季节变化显著, 影响着全球的物质循环和能量流动(易浪等, 2014; Sun et al, 2015)。植被覆盖状态的改变会影响碳循环和气候系统的稳定性(Piao et al, 2011; 赵卓文等, 2017), 了解植被变化趋势对区域环境保护及生态环境建设、生态系统过程理解和模拟、气候变化和碳循环关系的建立都具有重要的意义。

遥感数据宏观、快捷、信息量丰富, 可定量反映植被生长状况、植被生物量、植被覆盖度以及植被

物候等方面的信息。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可以反映植被生长状况, 与植被覆盖度、净初级生产力及叶面积指数等相关性较好(李双双等, 2012; 张学珍等, 2012), 是研究植被覆盖变化首选的指标(徐兴奎等, 2007; 张戈丽等, 2011; 李双双等, 2012; 龙岳红等, 2015; 赵安周等, 2016; 贺振等, 2017; 赵杰等, 2018)。同时, NOAA-AVHRR、SPOT-VGT、MODIS等传感器为长时间序列植被覆盖变化研究提供了免费的NDVI数据支撑, 当前使用较多的是覆盖范围广、时间序列长的NOAA-AVHRR NDVI数据。

收稿日期: 2018-12-12; 修订日期: 2019-01-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671368, 41371348); 中国科学院战略重点研究计划A(XDA20010301)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671368 and 41371348; Strategic Priority Research Program A of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA20010301.]

第一作者简介: 孙锐(1988—), 男, 山东临清人, 博士生, 研究方向为植被与气候变化研究。E-mail: sunrui11@126.com

*通信作者简介: 陈少辉(1976—), 男, 河北保定人, 副研究员, 研究方向为数据融合与同化。E-mail: chensh@igsnrr.ac.cn

引用格式: 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 2019. 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, 38(8): 1248-1258.
[Sun R, Chen S H, Su H B. 2019. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016. Progress in Geography, 38(8): 1248-1258.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.013

黄土高原位于半干旱半湿润气候带,1999年开始实施“自然林保护”“退耕还林(草)”等工程以改善黄土高原脆弱的生态环境,时至今日,亟需掌握这些工程所取得的效果。近年来,研究者利用不同NDVI遥感产品,如GIMMS NDVI、SPOT VGT NDVI、MODIS NDVI等,对黄土高原生态工程前后的植被覆盖时空演变进行了分析。张宝庆等(2011)综合GIMSS和SPOT VGT 2两种资料分析了近30 a黄土高原植被覆盖演变趋势,结果表明1999年以来NDVI年均值显著增加,空间上显著增加趋势呈现出区域性。刘宪锋、杨勇等(2013)利用MOD13Q1数据,分析了2000—2009年植被覆盖度时空变化,得到植被覆盖整体上呈增加趋势。赵安周等(2017)基于GIMMS NDVI 3g数据分析了退耕还林(草)工程前后植被覆盖时空变化情况,得到2000—2013年植被覆盖改善情况好于1982—1999年。张春森等(2016)结合GIMMS NDVI和MODIS NDVI数据得到黄土高原植被NDVI年际上呈显著增加趋势,空间分布上具有明显的差异性。张含玉等(2016)利用SPOT VGT NDVI数据研究表明1999—2013年黄土高原地区NDVI呈极显著增加趋势。

目前研究成果多以原始GIMMS NDVI或经过MODIS、SPOT VGT NDVI扩展的GIMMS NDVI数据为主(张宝庆等, 2011; 张戈丽等, 2011; 张春森等, 2016; 赵安周等, 2017),其8 km的空间分辨率导致混合像元较为严重,对区域细节刻画程度不够,难以反映植被覆盖时空变化的真实情况,另外,MODIS数据选取时间较短(刘宪锋, 杨勇等, 2013; 张玉东等, 2017);趋势分析基本采用了一元线性回归;植被覆盖时空变化分析选用NDVI年最大值($NDVI_{y_{max}}$)、NDVI生长季均值($NDVI_{gsmean}$)或NDVI年平均值($NDVI_{y_{mean}}$)等单个评价指标,未对结果进行对比。

因此,本文利用MOD13A1产品,结合Sen+Mann-Kendall (M-K)趋势分析、变异系数和Hurst指数等方法,对2000—2016年间黄土高原植被 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 时空变化特征进行分析,评价了 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 这2种指标在分析植被变化过程的表现和差异。结合GlobeLand30分类数据,分析不同土地覆盖类型下植被NDVI变化特征,以掌握退耕还林(草)等生态工程下黄土高原地区不同土地覆盖类型植被的恢复情况,为区域生态环境改善、植被恢复及未来生态环境建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域中部,地理范围为 $100^{\circ}54' \sim 114^{\circ}33'E$ 、 $33^{\circ}43' \sim 41^{\circ}16'N$,地跨山西、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古、河南和青海,总面积约64万 km^2 (图1)。地势西北高、东南低,平均海拔1500~2000 m。植被生态系统受地形和气候共同影响具有明显的地带性,由东南向西北,依次为森林生态系统、灌丛生态系统、草地生态系统及荒漠生态系统。研究区土地覆盖类型为耕地(38.09%)、森林(15.86%)、草地(37.51%)、灌木地(1.17%)、湿地(0.19%)、水体(0.47%)、人造地表(2.48%)、裸地(4.13%)和冰雪(0.09%)(图2)。

1.2 数据源与预处理

1.2.1 MODIS NDVI数据

MODIS NDVI采用NASA的EOS/MODIS提供的16 d合成的MOD13A1产品,时间为2000年2月至2016年12月,空间分辨率为500 m (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/>)。该产品经过了几何纠正、辐射校正、大气校正等预处理。利用MODIS Reprojection Tools (MRT)进行投影和拼接,经过裁剪得到黄土高原NDVI数据集。利用最大值合成方法(MVC)(Holben, 1986)进一步减少云、大气、太阳高度角等影响得到NDVI月值数据。所有数据均采用WGS1984地理坐标系统、Albers等面积投影、南标准纬线 $25^{\circ}N$ 、北标准纬线 $47^{\circ}N$ 、中央经线 $105^{\circ}E$ 。黄土高原生长季为每年4—10月(赵安周等, 2016)。

1.2.2 土地覆盖数据

土地覆盖数据为MCD12Q1V05和2010年GlobeLand30。根据研究区植被特征,将MCD12Q1中的国际地圈生物圈计划(IGBP)分类方案进行合并,

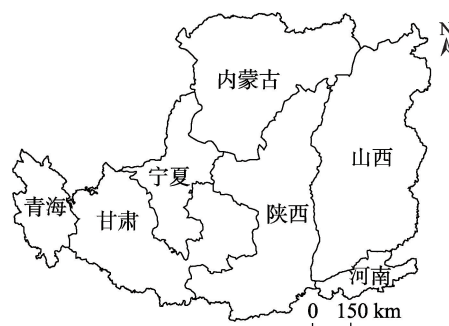


图1 黄土高原行政区划组成

Fig.1 Administrative areas of the Loess Plateau

最终为:森林、灌木地、稀疏植被、草地、耕地、人造地表和水体。GlobeLand30是国家基础地理信息中心提供的全球30 m地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>),该数据集包含10个类型,分别是:耕地、森林、草地、灌木地、水体、湿地、苔原、人造地表、裸地、冰川与永久积雪,详细类型定义可参考说明文件。黄土高原地区没有苔原这一土地类型,同时,植被主要集中在耕地、森林、草地、灌木地、湿地和裸地等6种分类数据上,因此本文主要分析这6种土地类型。GlobeLand30分类精度和空间分辨率高于MCD12Q1,因此MCD12Q1数据仅作为辅助数据,用于分析植被NDVI变异系数的空间分布特征,利用GlobeLand30分析不同土地覆盖分类下植被覆盖时空变化情况。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析与检验

采用气象学和水文学中广泛应用(Gocic et al, 2013; Farshad et al, 2016)的Sen趋势分析法(Sen, 1968)+M-K检验(Mann, 1945; Kendall, 1975)相结合的方法,分析植被NDVI的变化特征。Sen趋势分析法对离群数据或测量误差的规避能力良好,不受异常值的干扰(易浪等, 2014; 赵安周等, 2017),计算公式为:

$$\rho = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列第 i, j 个数据。当 $\rho < 0$ 时,表示下降趋势;当 $\rho > 0$ 时,表示上升趋势。趋势是否显著通过M-K方法检验。检验公式为:

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

其中

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (3)$$

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

式中: S 为检验统计量; Z 为标准化后的检验统计量; x_j 和 x_i 为时间序列数据; n 为序列样本数; 当 $n \geq 8$ 时, S 近似为正态分布,方差计算公式如下:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

标准化后的 Z 为标准正态分布,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 表示趋势变化显著。 $Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布函数分布表在置信度水平 α 下所对应的值。结合 ρ 值和 $|Z|$ 值,将NDVI变化趋势分为6个等级:0.01置信水平下,极显著增加($\rho \geq 0, |Z| > 2.58$)、极显著减少($\rho < 0, |Z| > 2.58$); 0.05置信水平下,显著增加($\rho \geq 0, |Z| > 1.96$)、显著减少($\rho < 0, |Z| > 1.96$)、不显著增加($\rho \geq 0, |Z| \leq 1.96$)和不显著减少($\rho < 0, |Z| \leq 1.96$)。

1.3.2 Hurst指数

Hurst指数(Hurst, 1951)可依据长时间序列数据预测未来数据的变化趋势,是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法(赵安周等, 2017),在气象、水文等领域应用较广(Zamani et al, 2017; Liu et al, 2017),计算过程可参考相关研究(李双双等, 2012; 刘宪锋等, 2015; 贺振等, 2017)。Hurst指数分为3种情况:当 $0.5 < H < 1$ 时,表明未来变化趋势与过去趋势一致,且 H 越接近于1,持续性越强;当 $H = 0.5$ 时,为随机序列,即未来变化趋势与过去趋势无关;当 $0 < H < 0.5$ 时,序列具有反持续性,即未来变化趋势与过去趋势相反,且 H 越接近于0,反持续性越强。

1.3.3 稳定性分析

利用变异系数 C_v 来反映植被NDVI相对波动程度,数值大则植被受到干扰强度大,越不稳定;数值小说明植被状态相对稳定。计算公式如下:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} / \overline{\text{NDVI}} \quad (6)$$

式中: C_v 为变异系数; $\overline{\text{NDVI}}$ 为多年NDVI平均值。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖的空间分布特征

通过均值法得到多年平均NDVI(图2),发现黄土高原NDVI呈现西北低、东南部和东部高的分布。西北地区属于干旱和半干旱气候,海拔相对较高,草地、裸地分布广泛,除河套平原(银川平原、后套平原和土默川平原)外,NDVI值相对较低;东南部地区属于半湿润气候,森林和农田分布较为广泛,NDVI值较高;耕地年均NDVI值介于0.2~0.5之间;NDVI值小于0.1的区域主要是以稀疏植被为主的裸地。

2.2 植被覆盖时间变化特征

为研究2000—2016年植被NDVI随时间变化

情况,利用均值法得到每年 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 影像的平均值,代表当年植被覆盖最好状态和生长季平均状态(图3)。黄土高原植被 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 都呈现波动式增长的趋势且波动情况相似,其范围分别在0.460~0.600和0.328~0.441之间,增长趋势分别为 $0.0070/a(P<0.01)$ 和 $0.0063/a(P<0.01)$,植被生长状态整体上呈现较好的发展趋势。

2.3 植被覆盖的空间变化趋势

将Sen和M-K检验结合得到植被 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 变化趋势的空间分布(图4)。统计2种数据在不同变化等级中所占面积及重合比例(表1)。发现2种数据通过显著性检验的增加趋势面积比例分别为63.87%和78.16%(极显著增加、显著增加分别为49.86%和66.99%、14.01%和11.17%),减少趋势面积比例(极显著减少、显著减少)为1.23%和0.76%。增加趋势的面积比例均远高于减少趋势,表明植被覆盖状态正在不断改善。仅有61.89%的像元在2种数据下均表现为增加趋势,49.23%的像

元通过显著性检验;减少趋势中仅有0.35%的像元通过显著性检验。这可能是因为 $NDVI_{y_{max}}$ 容易受到异常值的影响。利用GlobeLand30统计2种数据在不同土地覆盖类型下的表现(图4c,表2)。6种土地覆盖类型植被NDVI呈增加趋势的面积均要高于呈减少趋势面积,森林呈极显著增加趋势的面积比例最大(73.02%和82.60%),其次为耕地(47.87%和67.43%),再次为裸地(47.03%和61.68%)。可见,退耕还林还草政策实施以来,不同土地覆盖类型的植被都呈现较好的生长趋势。

植被 $NDVI_{gsmean}$ 变化趋势要好于 $NDVI_{y_{max}}$ 变化趋势(图4a、4b和表2),极显著增加分布范围较广,主要分布差异在山西北部的大同盆地、忻定盆地及恒山和五台山等山区,宁夏东部和南部,青海地区,内蒙古的河套平原及中东部地区,甘肃西部和河南

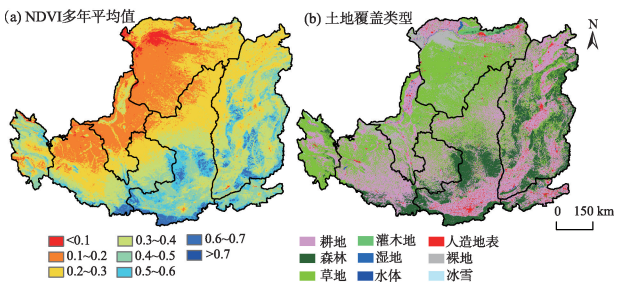


图2 黄土高原多年NDVI值及土地覆盖类型空间分布
Fig.2 Spatial distribution of multi-year $NDVI_{y_{mean}}$ and land cover on the Loess Plateau

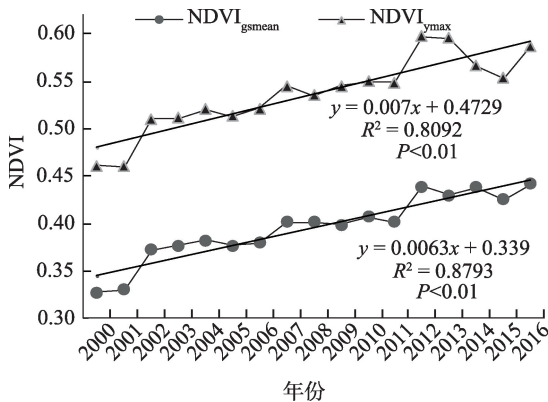
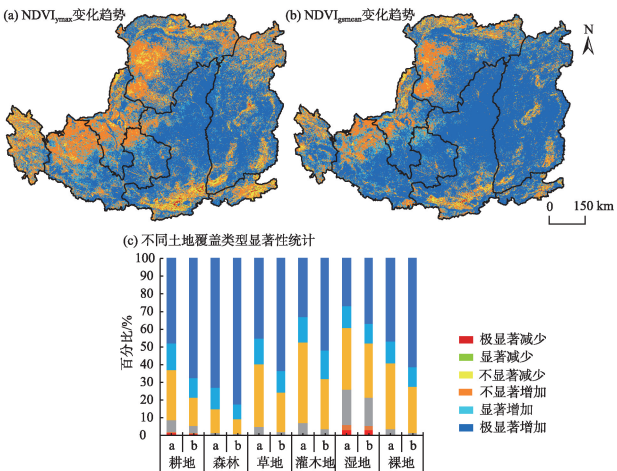


图3 2000—2016年黄土高原植被NDVI
年际变化及线性趋势

Fig.3 Temporal variation of NDVI in 2000–2016 with fitted linear trend for the Loess Plateau



注:图c中的a和b分别代表 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$,下同。

图4 黄土高原 $NDVI_{y_{max}}$ (a)、 $NDVI_{gsmean}$ 变化趋势(b)及不同土地覆盖类型显著性统计(c)

Fig.4 Spatial variation of $NDVI_{y_{max}}$ change (a) and $NDVI_{gsmean}$ change (b), significance level of different land cover change (c) on the Loess Plateau

表1 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmean}$ 不同像元变化趋势百分比

Tab.1 Percentage areas of $NDVI_{y_{max}}$ and $NDVI_{gsmean}$ change by significant level (%)

变化趋势	面积百分比		
	$NDVI_{y_{max}}$	$NDVI_{gsmean}$	重合面积
极显著增加	49.86	66.99	47.03
极显著减少	0.66	0.42	0.27
显著增加	14.01	11.17	2.20
显著减少	0.57	0.34	0.08
不显著增加	29.55	18.06	12.66
不显著减少	5.35	3.02	1.59

表2 不同土地覆盖类型的像元变化趋势百分比
Tab.2 Percentage of NDVI_{ymax} and NDVI_{gsmcan} change by land cover type (%)

变化趋势	NDVI _{ymax}						NDVI _{gsmcan}					
	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地
极显著减少	1.06	0.06	0.11	0.12	2.78	0.04	0.57	0.05	0.09	0.19	3.01	0.03
显著减少	0.93	0.08	0.15	0.22	2.87	0.06	0.51	0.05	0.10	0.13	2.45	0.04
不显著减少	6.70	1.34	4.37	6.53	20.25	3.41	4.13	0.62	1.90	3.26	15.69	1.48
不显著增加	28.45	13.33	35.71	45.29	34.58	37.05	16.21	8.39	21.74	28.31	30.52	25.73
显著增加	14.99	12.17	14.21	14.55	12.62	12.40	11.15	8.28	12.27	16.20	11.18	11.05
极显著增加	47.87	73.02	45.45	33.29	26.89	47.03	67.43	82.60	63.89	51.91	37.14	61.68

中西部等地区;显著增加区域的分布差异为甘肃、陕西和宁夏交界处,甘肃北部,宁夏中部等地区;不显著增加区域的分布差异为内蒙古北部和西部、宁夏中部、甘肃北部和山西北部等地区;不显著减少区域分布差异主要为青海地区、内蒙古的河套平原、陕西南部及河南东部等地区;显著减少区域分布差异为河南东部、陕西南部等地区;极显著减少区域的分布差异为陕西南部等地区。相同地区的植被在2种数据的显著性表现上略有差异,如甘肃、宁夏和陕西交界处等,因此分析某研究区植被覆盖

变化时应该慎重选用植被NDVI评价指标。
2.4 植被稳定性的空间格局

变异系数可以反映植被NDVI多年的稳定性(图5a, 5b)。NDVI_{ymax}和NDVI_{gsmcan}变异系数的平均值为0.14和0.13。相同地区的NDVI_{gsmcan}变异系数明显小于NDVI_{ymax}变异系数(图5, 表3)。变异系数在0~0.15范围定义为相对稳定,高于0.15定义为不稳定。NDVI_{ymax}变异系数在相对稳定区域占56.64%,22.83%分布在0.10~0.15范围内,20.12%在0.05~0.10范围。NDVI_{gsmcan}变异系数相对稳定区域

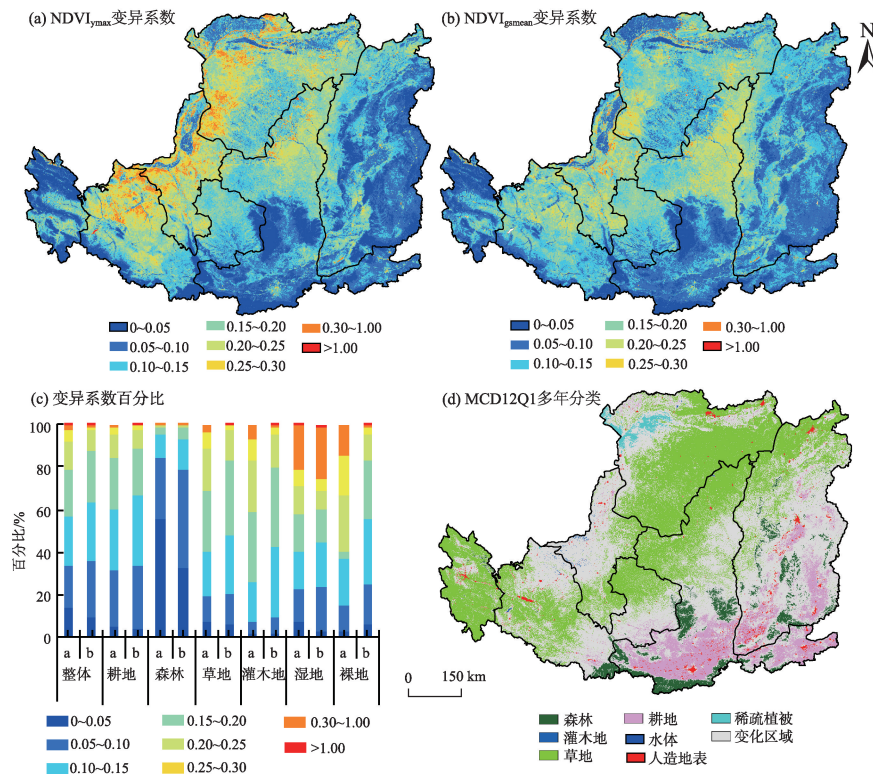


图5 黄土高原NDVI_{ymax}变异系数(a)、NDVI_{gsmcan}变异系数(b)、整体及不同土地覆盖类型变异系数统计图(c), 以及MCD12Q1多年分类图(d)

Fig.5 Coefficients of variation of NDVI_{ymax} (a) and NDVI_{gsmcan} (b) and total and different land cover types (c) on the Loess Plateau, and MCD12Q1 multi-year classification (d)

表3 整体及不同土地覆盖类型的变异系数统计

Tab.3 Coefficients of variation of total and different land cover types (%)

变异系数	NDVI _{y_{max}}							NDVI _{gsmean}						
	整体	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地	整体	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地
0~0.05	13.69	4.82	55.91	7.35	1.82	6.48	2.25	8.65	3.15	32.32	5.20	1.07	1.86	5.99
0.05~0.10	20.12	26.05	28.90	11.48	4.53	16.27	9.05	26.45	30.02	46.98	14.40	7.77	21.16	18.98
0.10~0.15	22.83	29.60	10.52	21.19	19.45	17.67	18.21	28.21	33.03	14.21	28.71	33.00	21.39	30.81
0.15~0.20	22.53	24.05	3.87	28.90	33.09	17.51	22.86	24.55	23.01	5.02	34.60	38.56	15.84	27.57
0.22~0.25	13.05	11.12	0.69	19.36	24.68	12.72	21.04	9.83	8.96	1.26	14.35	14.82	8.56	12.19
0.25~0.30	5.08	2.88	0.08	8.24	9.65	7.65	15.18	1.54	1.22	0.16	2.17	3.35	4.99	2.85
0.30~1.00	2.68	1.48	0.04	3.48	6.78	21.67	11.41	0.74	0.60	0.03	0.56	1.37	24.25	1.57
>1.00	0.02	0	0	0	0	0.02	0	0.03	0.01	0	0.01	0.02	1.46	0.03

占63.31%,28.21%分布在0.10~0.15范围,26.45%在0.05~0.10范围,由此可知,植被生长季的状态更稳定。结合GlobeLand30,统计6种土地类型变异系数在2种数据相对稳定范围内所占平均比例,从高到低依次为森林(94.42%)、耕地(63.34%)、草地(44.17%)、裸地(42.65%)、湿地(42.42%)、灌木地(33.82%)。将黄土高原变化趋势与变异系数进行组合得到黄土高原整体及不同土地覆盖分类下变化趋势的稳定性统计(表4)。NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}两种指标下黄土高原整体以稳定-增加趋势为主(52.35%和60.45%),不同土地覆盖差异明显,耕地和森林均以稳定-增加趋势为主,但森林的稳定-增加趋势所占比例远高于耕地;草地、灌木地和湿地均以不稳定-增加趋势为主,灌木地所占比例最高;NDVI_{y_{max}}指标下裸地以不稳定-增加趋势为主(67.92%),而NDVI_{gsmean}指标下以稳定-增加趋势为主(54.35%);NDVI_{gsmean}指标下不同土地覆盖类型植被在稳定-增加趋势所占比例均高于NDVI_{y_{max}}。综合来看,森林增加趋势及稳定性最好。

利用MCD12Q1(2001—2013年)数据,得到多年分类图(图5d)。图5d中变化区域代表土地覆盖类型在2001—2013年存在转移的现象。变化区域与变异系数高值(范围>0.2)区域分布基本吻合(图5a、5b、5d)。宁夏的土地覆盖类型主要为耕地和草

地(图2b),变化区域分布较广泛(图5d),这表明受到“退耕还林(草)”等生态工程的影响,除银川平原外,耕地与草地之间存在类型转移现象,因此变异系数较大,植被整体稳定性较差。山西中部地区也存在类型转移现象,但山西以耕地和森林为主(图2b),变异系数较小。陕西中南部森林和耕地分布较广,北部以草地为主。草地受降水影响高于森林和农田,植被稳定性较差(图5c),因此陕西北部变异系数高于南部地区。相同土地覆盖类型在不同区域的变异系数差异较大,如陕西北部、内蒙古南部和宁夏南部等地区的草地变异系数普遍在0.2~0.3范围内;青海的草地变异系数则主要在0~0.2之间分布。MCD12Q1和GlobeLand30两种数据在分类方法、分类精度和空间分辨率等方面存在差异,GlobeLand30空间分辨率较高,分类精度较高,因此用于研究不同土地覆盖类型下植被时空变化情况,MCD12Q1仅用于植被稳定性空间格局的研究。

2.5 植被覆盖变化可持续分析

由黄土高原NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}的Hurst指数空间分布(图6)及分类统计(表5)可知,NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}的Hurst指数均值分别为0.484和0.505。NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}的Hurst指数大于0.5的区域分别占41.129%和50.109%,其中只有1个像元的Hurst指数为0.5,可以忽略不计(表5)。NDVI_{y_{max}}的

表4 不同土地覆盖下植被变化趋势稳定性统计

Tab.4 Percentage of stability and variation trend of vegetation under different land cover (%)

趋势稳定性	NDVI _{y_{max}}							NDVI _{gsmean}						
	整体	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地	整体	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地
稳定-增加	52.35	53.49	93.98	37.94	24.74	26.79	28.58	60.45	61.82	92.90	46.85	40.62	36.35	54.86
不稳定-增加	41.11	37.82	4.53	57.43	68.39	47.31	67.92	35.77	32.97	6.38	51.05	55.79	42.50	43.59
不稳定-减少	2.26	1.71	0.14	2.55	5.81	12.27	2.57	0.90	0.83	0.11	0.64	2.37	12.60	0.63
稳定-减少	4.28	6.98	1.35	2.08	1.06	13.63	0.94	2.87	4.38	0.61	1.46	1.22	8.55	0.92

Hurst指数小于0.5的区域较广,56.971%的像元在0.3~0.5区间内,整体趋向于反持续性(图6a,表5)。图6b中,正向持续性和反持续性面积基本相同,整体趋于平衡状态。仅有33.547%的像元在2种数据下均表现出植被未来发展与当前相反的变化趋势;仅有23.993%的像元在两种数据下保持了与原先相同的变化趋势(表5)。2种数据的Hurst指数分布差异较大,所得结论也有差异。

将NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}的变化趋势与Hurst指数进行组合,结果类型包括:(反)持续性极显著减少、(反)持续性显著减少、(反)持续性不显著减少、(反)持续性极显著增加、(反)持续性显著增加、(反)持续性不显著增加(图7)。

NDVI_{y_{max}}未来改善趋势面积占41.35%(持续性增加37.97%、反持续性减少3.38%)。持续性增加即植被状态过去和未来将持续改善,主要分布在山西省中部和北部、甘肃省东部、宁夏南部和内蒙古东部等地区;反持续减少即植被状态将由退化趋势转变为改善趋势,主要分布在陕西南部、河南东部、青海北部和内蒙古西部。NDVI_{y_{max}}未来呈退化趋势面积占58.65%(持续性减少3.16%、反持续性增加55.49%)。持续性减少即植被状态未来将持续退化,主要分布在陕西南部、河南东部和山西南部等

地区;反持续性增加即植被状态将由改善转变为退化趋势,主要分布在陕西中部及北部、山西中部和南部、甘肃、青海、宁夏和内蒙古西南部,其中甘肃北部、内蒙古西部、宁夏西部和青海大部分地区为反持续性不显著增加区域。NDVI_{gsmean}改善趋势面积占49.19%(持续性增加47.76%、反持续性减少1.43%)。持续性增加区域主要分布在山西中部、内蒙古东部、陕西中部及北部、甘肃北部及中部、宁夏东部等地区,维持在400 mm等降水量附近;反持续性减少区域主要分布在陕西南部、河南东部等地区。NDVI_{gsmean}未来呈退化趋势面积占50.81%(持续性减少2.35%、反持续性增加48.46%)。持续性减少区域主要分布在陕西南部、河南东部、宁夏北部和内蒙古北部等地区。反持续性增加区域主要分布在山西北部 and 南部、青海、甘肃北部、内蒙古西部和陕西北部等地区,其中甘肃北部、内蒙古西部主要为反持续不显著增加区域。

2种数据在揭示黄土高原植被未来发展趋势上略有差异,图7c中持续性增加趋势面积高于图7a,分布差异集中在陕西北部、内蒙古东部和甘肃东部等地,NDVI_{y_{max}}未来会呈现退化趋势,而NDVI_{gsmean}依旧为增加趋势。反持续性增加和持续退化地区的植被状态需要利用未来数据进行验证,研究人员需要保持关注。

利用GlobeLand30,统计6种土地覆盖类型未来趋势(表6)。不同土地覆盖类型下,NDVI_{gsmean}增加趋势的面积均高于NDVI_{y_{max}}。2种数据分析下,

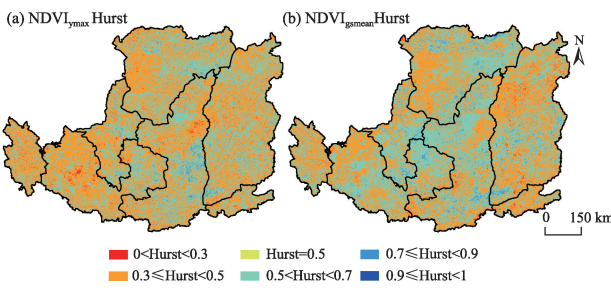


图6 黄土高原NDVI_{y_{max}}和NDVI_{gsmean}的Hurst指数分布
Fig.6 Distribution of NDVI_{y_{max}} and NDVI_{gsmean} Hurst index of the Loess Plateau

表5 不同像元Hurst指数分级百分比
Tab.5 Percentage of areas of Hurst index classes (%)

Hurst指数	所占面积		
	NDVI _{y_{max}}	NDVI _{gsmean}	重合面积
0<Hurst<0.3	1.900	1.330	0.098
0.3≤Hurst<0.5	56.971	48.561	33.449
Hurst=0.5	0	0	0
0.5<Hurst<0.7	39.116	47.075	23.460
0.7≤Hurst<0.9	2.006	3.020	0.532
0.9≤Hurst<1	0.007	0.014	0.001

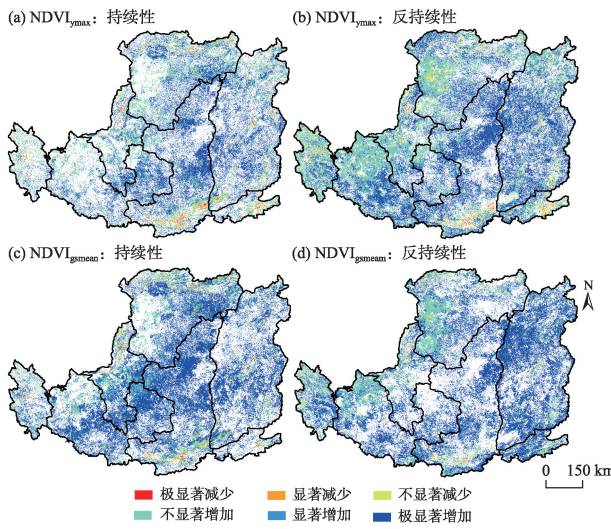


图7 植被覆盖未来变化特征的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of vegetation change characteristics in the future

表6 不同土地覆盖类型下植被NDVI未来变化趋势
Tab.6 Trend of NDVI change under different land cover in the future (%)

变化趋势	NDVI _{ymax}						NDVI _{gsmean}					
	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地	耕地	森林	草地	灌木地	湿地	裸地
持续性增加	37.20	41.21	37.84	47.05	35.37	38.81	47.88	42.13	50.19	60.49	45.58	50.37
持续性减少	4.61	0.74	1.76	3.94	15.22	1.18	3.33	0.50	1.12	2.84	15.44	0.63
反持续性增加	54.11	57.30	57.52	46.07	38.73	57.68	46.91	57.15	47.70	35.93	33.27	48.08
反持续性减少	4.08	0.75	2.88	2.94	10.68	2.33	1.88	0.22	0.97	0.74	5.71	0.92

灌木地未来增加趋势所占面积比例最高,分别为49.99%和61.23%,即NDVI_{ymax}基本保持平衡,但NDVI_{gsmean}逐渐改善;森林和耕地未来退化趋势所占面积均超过了50%。草地、灌木、湿地和裸地等NDVI_{ymax}未来退化趋势超过50%,但NDVI_{gsmean}退化趋势所占面积均低于50%,植被NDVI_{ymax}趋于降低但植被NDVI_{gsmean}状态趋于改善。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文选用NDVI_{ymax}和NDVI_{gsmean}两种数据评价植被覆盖变化,发现同一地区植被在2种指标的变化趋势和稳定性表现略有差异,NDVI_{gsmean}的表现更好,这可能是因为异常值对NDVI_{ymax}影响较大。NDVI_{ymax}仅代表植被覆盖一年中的最大值,时间上属于点尺度,一般而言变化不大,而NDVI_{gsmean}是植被生长季的平均值,时间上属于线尺度,更能揭示植被覆盖的年际变化。若仅选用NDVI_{ymax}、NDVI_{gsmean}或NDVI_{ymean}其中一个分析某地区植被的时空变化,会因数据的不同导致结论上的差异,不能较为全面地反映植被变化情况,考虑到NDVI_{gsmean}比NDVI_{ymean}有更好的代表性,因此文中选用NDVI_{ymax}与NDVI_{gsmean}两种指标来综合反映研究区植被状况。不同土地覆盖类型中,森林变异系数最小,稳定性最好且植被NDVI增加趋势(显著和极显著增加)最明显,这可能是由于森林海拔相对较高,自然林受人类活动的影响较少;降水对草地的影响的程度超过耕地,耕地除自然降雨外还可以人工灌溉,因此植被NDVI增加趋势和稳定性好于草地。根据组合结果可知,森林和耕地未来退化趋势的面积超过了持续增加的面积,需未来采用数据进行验证。由图5d可知,2000—2013年下垫面植被类型发生了转变,GlobeLand30为2010年的土地覆盖分类产品,考虑到MCD13Q1分类精度较低,时间段不完整

(2001—2013年),选用分类精度较高的GlobeLand30作为标准进行不同土地覆盖类型植被变化分析。土地覆盖数据的缺失为研究长时间序列植被覆盖变化带来了一定的困扰,下垫面植被类型的转变对分析植被恢复产生了直接或间接的影响,应该尽量避免这种影响。

本文选用2000—2016年的MOD13A1数据分析,结果与已有研究成果(袁丽华等, 2013; 贺振等, 2017; 赵安周等, 2017)相近,但略有差异,可能原因,一是NDVI产品质量和分辨率不同所致,因为较高分辨率遥感数据对植被变化刻画更清晰,二是选用NDVI特征及分级上存在差异。另外较多研究以GIMSS NDVI为基础,选择MODIS或SPOT VGT NDVI进行扩展,这种方式仅扩展了GIMSS NDVI时间尺度,空间分辨率没有变化,对地表细节信息损失较为严重。因此应该考虑对MODIS等中高分辨率遥感数据进行时间尺度扩展,构建更长时间序列NDVI数据集。气温、降水等自然因素(张晓东等, 2018)和人类活动(李仕冀等, 2015)共同影响了植被覆盖变化,不同土地覆盖类型、不同地域的植被变化差异较为显著,需要更深入剖析NDVI变化的原因,尽早确定不同因素对植被覆盖变化的贡献比例。下一步将借助GIMMS NDVI对MODIS NDVI数据进行时间尺度扩展,同时分析不同土地覆盖类型和海拔下植被变化与气候因子响应关系,定量评估人类活动对黄土高原植被恢复的影响。

3.2 结论

本文基于MOD13A1数据,结合多种方法分析了黄土高原植被NDVI整体分布、时间变化、趋势变化、稳定性空间格局及可持续性。

(1) 黄土高原植被覆盖地域特征明显,植被NDVI呈现西北低、东南部和东部高的分布特点,NDVI平均值为0.313,87.51%的NDVI值分布在0.1~0.5范围内。NDVI<0.1的区域主要覆被为裸地(63.38%),草地和耕地的NDVI值范围分布较广。

(2) NDVI年际变化表明,2000—2016年黄土高原植被 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmcan}$ 呈现波动式增长趋势,波动范围分别为0.460~0.600和0.328~0.441,增长率分别为0.0070/a($P<0.01$)和0.0063/a($P<0.01$),生态环境整体不断改善。

(3) 空间变化趋势上, $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmcan}$ 显示植被呈增加趋势面积均高于减少趋势面积(63.87%和78.16%、1.23%和0.76%),植被覆盖状态正在不断的改善。2种数据变化趋势下,不同土地覆盖类型表现略有差异,森林极显著增加趋势面积最大(73.02%和82.60%),其次为耕地(47.87%和67.43%),再次为裸地(47.03%和61.68%)。

(4) 在同一地区, $NDVI_{gsmcan}$ 的变异系数小于 $NDVI_{y_{max}}$ 的变异系数,相对稳定区域面积分别为63.31%和56.64%,黄土高原整体以稳定-增加趋势为主,耕地和森林以稳定-增加趋势为主;草地、灌木地和湿地以不稳定-增加趋势为主;裸地在 $NDVI_{y_{max}}$ 和 $NDVI_{gsmcan}$ 两种指标下分别以不稳定-增加趋势和稳定-增加趋势为主,综合来讲森林的增加趋势及稳定性最好。

(5) $NDVI_{y_{max}}$ 的Hurst指数表明,植被NDVI反持续性面积要大于正向持续性面积(58.871%>41.129%),整体趋向于反持续性。 $NDVI_{gsmcan}$ 的Hurst指数的正向持续性和反持续性所占面积基本相同,整体趋于平衡状态。从组合结果可知,2种数据在反映植被未来发展趋势略有差异, $NDVI_{y_{max}}$ 未来改善趋势面积占41.35%,退化趋势面积占58.65%。 $NDVI_{gsmcan}$ 改善趋势面积占49.19%,退化趋势面积占50.81%。不同土地覆盖类型下, $NDVI_{gsmcan}$ 增加趋势面积均高于 $NDVI_{y_{max}}$ 。灌木地未来植被状态表现最好,森林和耕地退化趋势面积超过了50%,反持续性增加和持续退化地区的植被状态需要未来数据进行验证,并持续关注。

参考文献(References)

高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 2017. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报, 72(5): 863-874. [Gao H D, Pang G W, Li Z B, et al. 2017. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 72(5): 863-874.]

贺振, 贺俊平. 2017. 近32年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. 农业机械学报, 48(2): 179-185. [He Z, He J P. 2017. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982-2013.

Transactions of the CSAM, 48(2): 179-185.]

李双双, 延军平, 万佳. 2012. 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, 67(7): 960-970. [Li S S, Yan J P, Wan J. 2012. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geographica Sinica*, 67(7): 960-970.]

李仕冀, 李秀彬, 谈明洪. 2015. 乡村人口迁出对生态脆弱地区植被覆盖的影响: 以内蒙古自治区为例[J]. 地理学报, 70(10): 1622-1631. [Li S Y, Li X B, Tan M H. 2015. Impacts of rural-urban migration on vegetation cover in ecologically fragile areas: Taking Inner Mongolia as a case. *Acta Geographica Sinica*, 70(10): 1622-1631.]

刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2015. 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, 70(5): 705-716. [Liu X F, Pan Y Z, Zhu X F, et al. 2015. Spatio-temporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors. *Acta Geographica Sinica*, 70(5): 705-716.]

刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2013. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 68(7): 897-908. [Liu X F, Ren Z Y, Lin Z H, et al. 2013. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater region in recent 12 years. *Acta Geographica Sinica*, 68(7): 897-908.]

刘宪锋, 杨勇, 任志远, 等. 2013. 2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J]. 中国沙漠, 33(4): 1244-1249. [Liu X F, Yang Y, Ren Z Y, et al. 2013. Changes of vegetation coverage in the Loess Plateau in 2000-2009. *Journal of Desert Research*, 33(4): 1244-1249.]

龙岳红, 秦建新, 贺新光, 等. 2015. 洞庭湖流域植被动态变化的小波多分辨率分析[J]. 地理学报, 70(9): 1491-1502. [Long Y H, Qin J X, He X G, et al. 2015. Wavelet multi-resolution analysis of vegetation dynamic change in Dongting Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 70(9): 1491-1502.]

徐兴奎, 陈红, 张凤. 2007. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J]. 环境科学, 28(1): 41-47. [Xu X K, Chen H, Zhang F. 2007. Temporal and spatial change of vegetation cover in the northwest of China and factors analysis influencing on vegetations variation. *Environmental Science*, 28(1): 41-47.]

易浪, 任志远, 张翀, 等. 2014. 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, 36(1): 166-174. [Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. 2014. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau. *Resources Science*, 36(1): 166-174.]

袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2013. 2000—2010年黄河流域

- 植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 33(24): 7798-7806. [Yuan L H, Jiang W G, Shen W M, et al. 2013. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 33(24): 7798-7806.]
- 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 2011. 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, 27(4): 287-293. [Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N. 2011. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982–2009. *Transactions of the CSAE*, 27(4): 287-293.]
- 张春森, 胡艳, 史晓亮. 2016. 基于AVHRR和MODIS NDVI数据的黄土高原植被覆盖时空演变分析[J]. 应用科学学报, 34(6): 702-712. [Zhang C S, Hu Y, Shi X L. 2016. Analysis of spatial-temporal evolution of vegetation cover in Loess Plateau in recent 33 years based on AVHRR NDVI and MODIS NDVI. *Journal of Applied Sciences*, 34(6): 702-712.]
- 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 2011. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 66(1): 47-58. [Zhang G L, Xu X L, Zhou C P, et al. 2011. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 66(1): 47-58.]
- 张含玉, 方怒放, 史志华. 2016. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 36(13): 3960-3968. [Zhang H Y, Fang N F, Shi Z H. 2016. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 36(13): 3960-3968.]
- 张晓东, 朱文博, 张静静, 等. 2018. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 73(1): 41-53. [Zhang X D, Zhu W B, Zhang J J, et al. 2018. Phenology of forest vegetation and its response to climate change in the Funiu Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 73(1): 41-53.]
- 张学珍, 戴君虎, 葛全胜. 2012. 1982—2006年中国东部春季植被变化的区域差异[J]. 地理学报, 67(1): 53-61. [Zhang X Z, Dai J H, Ge Q S. 2012. Spatial differences of changes in spring vegetation activities across Eastern China during 1982–2006. *Acta Geographica Sinica*, 67(1): 53-61.]
- 张玉东, 谭红兵. 2017. 黄土高原典型干旱区退耕还林后植被覆盖变化研究[J]. 生态科学, 36(1): 139-146. [Zhang Y D, Tan H B. 2017. Study on changes of land cover in the typical arid region of the Loess Plateau after the Grain for Green Project. *Ecological Science*, 36(1): 139-146.]
- 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2016. 2000—2014年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 中国环境科学, 36(5): 1568-1578. [Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. 2016. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau. *China Environmental Science*, 36(5): 1568-1578.]
- 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 2017. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 32(3): 449-460. [Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. 2017. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 32(3): 449-460.]
- 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 2018. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J]. 地理学报, 73(3): 395-404. [Zhao J, Du Z Q, Wu Z T, et al. 2018. Seasonal variations of day- and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone. *Acta Geographica Sinica*, 73(3): 395-404.]
- 赵卓文, 张连蓬, 李行, 等. 2017. 基于MOD13Q1数据的宁夏生长季植被动态监测[J]. 地理科学进展, 36(6): 741-752. [Zhao Z W, Zhang L P, Li X, et al. 2017. Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data. *Progress in Geography*, 36(6): 741-752.]
- 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 2014. 1982—2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 69(1): 15-30. [Zhou W, Gang C C, Li J L, et al. 2014. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010. *Acta Geographica Sinica*, 69(1): 15-30.]
- Farshad F, Zohreh D, Hadi B M, et al. 2016. Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake Basin, Iran [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 61(5): 892-904.
- Gocic M, Trajkovic S. 2013. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global and Planetary Change*, 100(1): 172-182.
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434.
- Hurst H E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116: 770-799.
- Kendall M G. 1975. Rank correlation methods [M]. London, UK: Griffin.
- Liu Y T, Xu G L, Li P, et al. 2017. Study on runoff uniformity and variation in the upper reaches of Huaihe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 24(5): 99-104.

- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 13(3): 245-259.
- Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. 2011. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 17(10): 3228-3239.
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.
- Sun W Y, Song X Y, Mu X. M, et al. 2015. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209: 87-99.
- Zamani R, Mirabbasi R, Abdollahi S, et al. 2017. Streamflow trend analysis by considering autocorrelation structure, long-term persistence, and Hurst coefficient in a semi-arid region of Iran [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1-2): 33-45.

Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016

SUN Rui^{1,2}, CHEN Shaohui^{1*}, SU Hongbo¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Understanding the spatial-temporal changes of vegetation and future trends of spatial pattern is of great significance to regional environmental protection and ecological construction. In order to understand the vegetation changes on the Loess Plateau after the implementation of the Grain for Green Project, the spatial-temporal variation characteristics of annual maximum Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ($NDVI_{y_{max}}$) and growing seasonal mean NDVI ($NDVI_{gsmean}$) were analyzed based on MOD13A1 data for the Loess Plateau during 2000–2016, supplemented by Sen + Mann-Kendall, coefficient of variation, and Hurst index analysis. The results indicate that: 1) $NDVI_{y_{max}}$ and $NDVI_{gsmean}$ showed a fluctuating growth trend from 2000 to 2016, with growth rates of 0.0070/a ($P < 0.01$) and 0.0063/a ($P < 0.01$), respectively, and the ecological environment improved continuously. 2) $NDVI_{y_{max}}$ and $NDVI_{gsmean}$ showed that the area of vegetation coverage on the Loess Plateau with increasing trend were much higher than that with decreasing trend (93.42% and 96.22% versus 6.58% and 3.78%). This means that vegetation coverage was improving. With regard to the trends of change of the two evaluation indices, the performance of different land cover types slightly differed. The area of forest with most significant increasing trend was 73.02% and 82.60%, followed by cultivated land (47.87% and 67.43%) and bare land (47.03% and 61.68%). The coefficient of variation of $NDVI_{gsmean}$ was smaller than that of $NDVI_{y_{max}}$, and the stable area was 63.31% and 56.64%, respectively. Of the two evaluation indices, the coefficient of variation of forest was the smallest, representing the best stability. According to the coupling results of NDVI and Hurst index, the areas with increasing trend of $NDVI_{y_{max}}$ account for 41.35%, and the areas with degrading trend account for 58.65% of the total area in the future. The areas with increasing trend of $NDVI_{gsmean}$ account for 49.19%, and the areas with degrading trend account for 50.81% of the total area. The two evaluation indices show that shrubland has the best growth trend. The areas of forest and cultivated land with degrading trend would be greater than 50%. The vegetation status in the areas of unsustainable increase and sustainable degradation need continuous attention of researchers.

Keywords: Loess Plateau; NDVI; MOD13A1; vegetation change; land cover