

# 黄土高原不同生态类型NDVI时空变化及其对气候变化响应

孙锐<sup>1,2</sup>, 陈少辉<sup>1</sup>, 苏红波<sup>1</sup>

(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:** 了解植被的时空变化及其气候主控因子可为植被保护和恢复提供重要的理论依据。基于MOD13A1和气象数据,分析了黄土高原Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)时空变化特征,探讨了NDVI对水热条件在不同时间尺度的响应特征。结果表明:黄土高原植被覆盖状态正在不断的改善,气候呈暖湿的发展趋势;83.77%的植被退化区(退化区面积占研究区总面积的5.79%)海拔<2000 m且退化类型以不显著减少为主,不同覆被类型的退化区海拔分布及退化比例差异明显,湿地的退化面积比最高(23.91%)、其次耕地(11.88%)。年尺度上,NDVI与降水呈正相关的面积高于气温,约75.06%的区域受水分条件控制;灌木地(海拔分布<2200 m)、耕地(<3000 m)、草地(<3000 m)和裸地(600~3700 m)等植被生长受水分条件影响;森林(<1000 m、1700~3700 m)和湿地(>2500 m)的植被生长受热量影响。月尺度上,黄土高原植被NDVI对热量响应以滞后1个月为主,不同植被对水热响应的滞后性差异明显,草地、湿地、耕地和裸地对热量响应以滞后1个月为主;森林和灌木地则表现水热同期的特征。伴随滞后时间的推移,水分主控面积逐渐降低,热量成为影响植被生长的主要因素,水热主控及响应滞后性分布受海拔影响明显。

**关键词:** 黄土高原;水热条件;土地覆盖;归一化植被指数

DOI: 10.11821/dljy020190399

## 1 引言

黄土高原位于半干旱半湿润气候带,生态脆弱且自然环境复杂,是中国水土保持、植被恢复的重点区域<sup>[1]</sup>。植被作为陆地生态系统的主体<sup>[2-4]</sup>,其动态变化影响着全球的物质循环和能量流动<sup>[3-5]</sup>,掌握植被变化的空间格局及其驱动因素可以为生态环境建设提供有效的理论依据。

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<sup>[6]</sup>,土地利用/土地覆被的时空特征发生了很大变化<sup>[5,7]</sup>,为植被变化与气候变化关系研究带来很多不确定性因素,也间接的改变了区域小气候<sup>[8]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)通常是分析植被变化的首选指标<sup>[9-12]</sup>,被广泛用于植被变化及其对气候变化的响应研究<sup>[13,14]</sup>。目前普遍认为植被覆盖变化是气候变化和

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-11-05

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); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK1003)

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

通讯作者: 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@igsnr.ac.cn  
1200-1214 页

人类活动共同作用的结果<sup>[15]</sup>,气候变化在区域大尺度上对植被生长起主导作用,人类活动对植被生长的影响主要体现在区域小尺度<sup>[16]</sup>。气候因子中水热条件与植被的生长关系密切<sup>[17,18]</sup>,是植被变化与气候响应关系研究的首选<sup>[19]</sup>。黄土高原作为典型研究区,研究者利用多种传感器NDVI数据进行了植被与气候因子响应关系的研究,取得了阶段性研究成果<sup>[13,20-22]</sup>。目前更多的关注了黄土高原整体或部分子流域的植被变化及其对气候因子的响应,然而深入探究不同海拔上不同植被NDVI动态变化的气候调控因子,确定不同气候条件主控的海拔范围,有利于因地制宜,选取合适的植被类型进行生态植被恢复,对生态环境恢复(建设)具有重要的指导意义。

因此基于MOD13A1、MCD12Q1、平均气温(Tmean)和累计降水量(PRE)插值资料,分析黄土高原NDVI、Tmean和PRE的时空变化特征。结合Digital Elevation Model (DEM)统计分析不同植被在不同海拔上的动态变化及其对气候因子敏感性和响应滞后性的变化情况。旨在探讨不同高程下影响植被生长的关键气候因子,及不同植被退化的主要原因,以期对未来气候变化情境下黄土高原可持续发展提供重要的理论依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域中部(100°54'E~114°33'E, 33°43'N~41°16'N),地跨山西、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古、河南和青海省,总面积约为64万km<sup>2</sup>。地势西北高、东南低,平均海拔1500~2000 m,年降水量300~650 mm,多年平均温度为3.6~14.3℃。利用MCD12Q1数据得到的综合土地覆盖分类,见图1,由森林(4.61%)、灌木地(0.09%)、草地(60.68%)、湿地(0.03%)、耕地(18.90%)、人造地表(1.82%)、水体(0.04%)、裸地(2.32%)和变化区域(11.51%)构成。

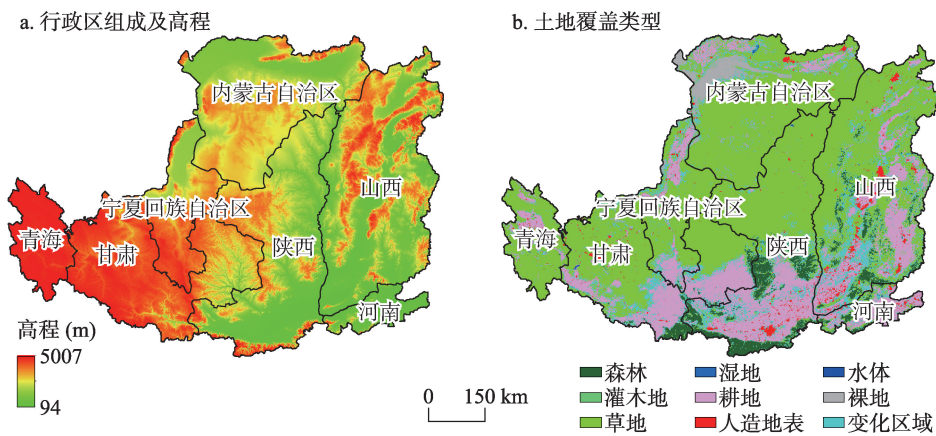


图1 黄土高原行政区组成及高程和土地覆盖类型

Fig. 1 Administrative divisions and elevations of the Loess Plateau and the corresponding land cover types

### 2.2 数据源与预处理

**2.2.1 NDVI、土地覆被和DEM数据** NDVI采用National Aeronautics and Space Administration提供的2000年2月—2016年12月的MOD13A1V006产品,时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m。利用MODIS Reprojection Tools和ENVI软件进行投影、拼接和裁剪

处理, 利用最大值合成法<sup>[23]</sup>得到月值数据。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°N; 北标准纬线: 47°N; 中央经线: 105°E)。土地覆被数据采用MCD12Q1V006, 空间分辨率为500 m。根据植被特征, 将MCD12Q1中的国际地圈生物圈计划分类方案进行合并, 最终为: 森林、灌木地、草地、湿地、耕地、人造地表、水体和裸地。利用2001—2016年MCD12Q1得到16年间未发生土地覆盖类型变化的综合土地覆盖分类图(图1b)。DEM数据来源于ASTGTM2, 空间分辨率为30 m, 经过最邻近法重采样及裁剪得到黄土高原500 m空间分辨率数据。本文关注植被NDVI为森林、灌木地、草地、湿地、耕地和裸地六种类型, 空间分析、平均值计算和区域统计时, 黄土高原整体指六种植被类型覆盖的总和。

**2.2.2 气候数据** 采用国家气象科学数据共享服务平台提供的地面气候资料日值数据集(V3.0), 经过异常值处理、数据合并得到站点月值数据。利用气象插值软件Anusplin 4.2, 以经度和纬度作为自变量, 引入高程作为协同变量对气温和降水进行插值。随机选取5%的站点用于精度验证(表1), 剩余95%的站点用于插值, 得到500 m空间分辨率的全国气候月值数据。验证结果表明, 插值数据与对应验证站点数据具有显著的相关性, Tmean插值精度高于PRE, 两者的插值精度可靠, 可以用于NDVI与气候因子关系研究。

表1 气象数据不同年份和月份的平均插值精度分析

Tab. 1 Average interpolation accuracy analysis of meteorological data in different years and months

年份	相关系数		平均误差		月份	相关系数		平均误差	
	PRE	Tmean	PRE (mm)	Tmean(°C)		PRE	Tmean	PRE (mm)	Tmean(°C)
2000	0.920	0.985	4.936	0.051	1月	0.972	0.992	0.196	-0.116
2001	0.931	0.987	4.010	0.040	2月	0.973	0.991	0.481	-0.108
2002	0.923	0.987	1.239	0.063	3月	0.977	0.989	0.396	0.001
2003	0.914	0.989	2.120	0.114	4月	0.960	0.984	0.397	0.096
2004	0.912	0.987	1.011	0.073	5月	0.928	0.983	1.083	0.103
2005	0.928	0.988	1.943	0.049	6月	0.900	0.981	4.635	0.094
2006	0.931	0.986	1.501	0.098	7月	0.851	0.983	6.299	0.130
2007	0.909	0.986	-0.876	0.120	8月	0.842	0.983	3.234	0.119
2008	0.913	0.987	0.854	0.087	9月	0.881	0.986	3.669	0.097
2009	0.929	0.987	1.842	0.118	10月	0.919	0.990	0.732	0.076
2010	0.929	0.988	1.637	0.084	11月	0.947	0.992	0.623	0.030
2011	0.935	0.988	2.398	0.111	12月	0.944	0.992	0.696	-0.065
2012	0.928	0.987	0.469	0.069					
2013	0.911	0.988	2.341	0.123					
2014	0.920	0.986	1.846	0.012					
2015	0.935	0.986	3.220	0.092					
2016	0.934	0.987	1.243	0.065					

## 2.3 分析方法

**2.3.1 基于Sen+ Mann-Kendall检验的趋势分析** 采用气象学和水文学中广泛应用<sup>[24,25]</sup>的Sen<sup>[26]</sup>+Mann-Kendall<sup>[27]</sup>相结合的方法, 分析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<sup>[22]</sup>, 计算过程参考易浪等<sup>[20]</sup>。结合 $\rho$ 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 ( $\rho < 0$ ,  $|Z| \leq 1.96$ )。

**2.3.2 偏相关分析** 利用偏相关系数分析NDVI与气候因子的相关性, 计算公式可参考陈登魁等<sup>[28]</sup>。年尺度上, NDVI为年内12个月NDVI的最大值 ( $NDVI_{y,max}$ ), 平均气温为年平均气温 ( $Tmean_y$ ), 降水量为年累计降水量 ( $PRE_y$ )。月尺度上, NDVI、Tmean和PRE分别为多年逐月数据, 通过计算NDVI与前0~2个月气候因子的偏相关系数, 研究植被对气候因子响应的滞后效应。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被 $NDVI_{y,max}$ 、 $Tmean_y$ 和 $PRE_y$ 年际变化趋势

利用线性回归方法分析黄土高原整体的  $NDVI_{y,max}$ 、 $Tmean_y$  和  $PRE_y$  的年际变化趋势 (图2)。 $NDVI_{y,max}$  呈波动增长趋势, 范围: 0.46~0.60, 增长趋势为 0.007/a ( $p < 0.01$ ), 植被生长整体上呈现较好的发展趋势。 $Tmean_y$  和  $PRE_y$  斜率分别为 0.013 °C/a ( $p > 0.1$ ) 和 3.828 mm/a ( $p > 0.1$ ), 呈不显著增加。

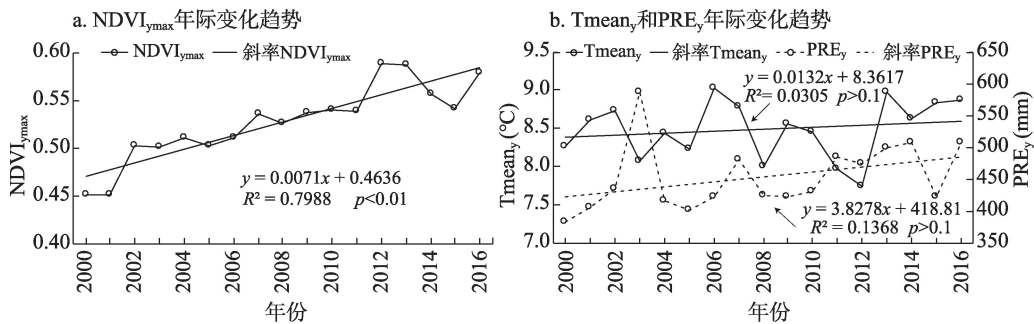


图2 2000—2016年黄土高原  $NDVI_{y,max}$ 、 $Tmean_y$  和  $PRE_y$  年际变化及线性趋势

Fig. 2 Interannual variations of  $NDVI_{y,max}$ ,  $Tmean_y$  and  $PRE_y$  over the last 17 years with its fitted linear trend in the Loess Plateau from 2000 to 2016

#### 3.2 植被 $NDVI_{y,max}$ 、 $Tmean_y$ 和 $PRE_y$ 空间变化趋势分析

基于Sen+Mann-Kendall检验的分析方法得到  $NDVI_{y,max}$ 、 $Tmean_y$  和  $PRE_y$  变化趋势的空间分布及不同土地覆盖显著性统计 (图3)。 $NDVI$  以增加趋势为主, 面积占研究区总面积的 94.21% (极显著增加、显著增加和不显著增加的总和), 远大于  $NDVI$  减少趋势面积 (极显著减少、显著减少和不显著减少的总和), 表明植被覆盖状态不断的改善。 $NDVI$  呈减少趋势的区域主要在陕西南部、河南东部、宁夏北部、内蒙古北部等地区。该地区以耕地和草地为主 (图1b), 城镇化进程的加快, 部分农田和草地转为建筑用地加剧了植被退化。极显著增加区域主要分布在山西中部及南部、陕西中北部、甘肃东部及南部和宁夏南部等地区, 显著增加区域分布较为零散, 不显著增加区域主要分布甘肃北部、宁夏中部、内蒙古中西部和山西北部等地区 (图3a)。 $Tmean_y$  平均增速为 0.017 °C/a ( (-0.043~0.069) °C/a), 增温趋势不明显, 其中呈显著增加和极显著增加趋势的面积总和仅占研究区面积的 5.16%。陕西中部及北部、内蒙古西部及北部和山西北部等区域气温呈下降趋势。青海、宁夏北部、河南东部等地增温较为明显 (图3c)。 $PRE_y$  平均增速为 4.44 mm/a ( (-5.84~14.95) mm/a), 降水增加趋势不明显, 呈显著增加和极显著增加趋势的面积总和仅占研究区总面积的 7.04%。河南东部、甘肃中部和内蒙古北部等部分区域降水

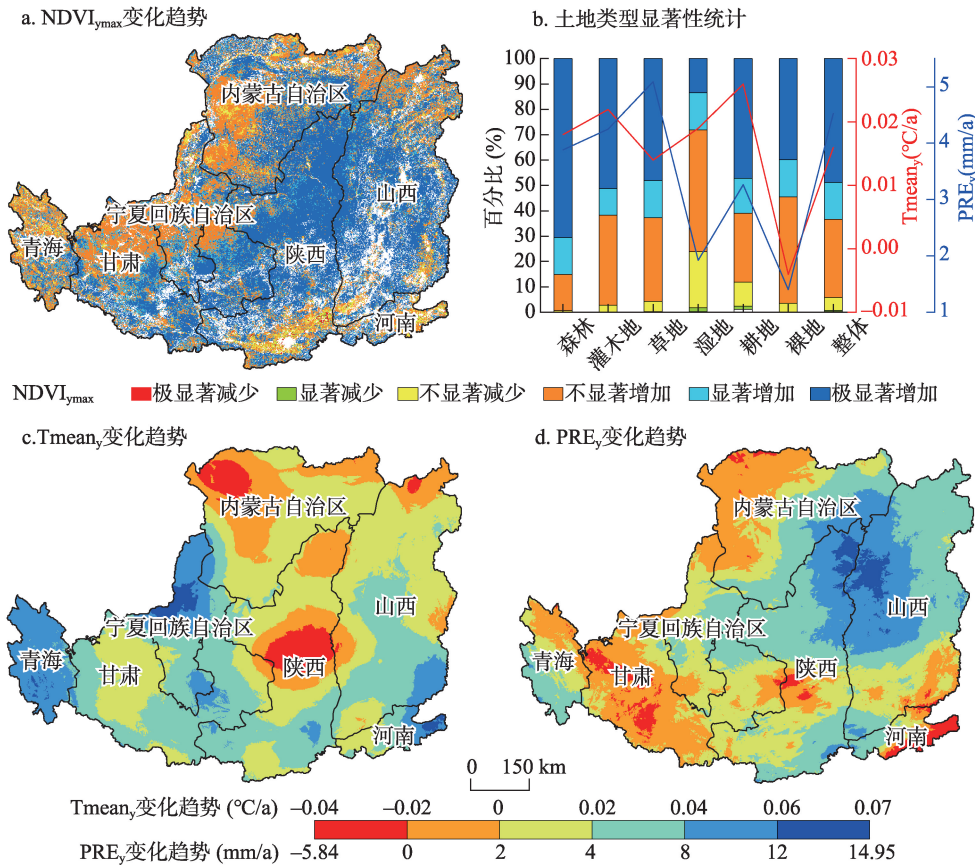


图3 2000—2016年黄土高原NDVI<sub>y,max</sub>、Tmean<sub>y</sub>、PRE<sub>y</sub>变化趋势及不同土地覆盖类型显著性统计

Fig. 3 The variation trends of NDVI<sub>y,max</sub>, Tmean<sub>y</sub>, PRE<sub>y</sub> and the significant level of different land cover types in the Loess Plateau from 2000 to 2016

呈下降趋势，大部分区域降水呈增加趋势，陕西北部、山西中部和内蒙古东南部降水增加趋势较为明显（图3d）。黄土高原退化的土地覆盖组成为草地（52.88%）、耕地（44.72%）、裸地（1.61%），其中83.77%的退化区域海拔低于2000 m，海拔2000~3000 m的退化区占8.04%，海拔3000 m以上的退化区占8.19%。借助土地覆盖数据和DEM对六种植被进行统计分析表明其增加趋势的面积均大于减少趋势面积，且退化类型以不显著减少为主。仅有0.64%的森林发生退化，集中在海拔1500~2600 m（面积占80.73%，下同）；4.38%的草地产生退化，海拔分布1000~2200 m（75.43%）和3000~4100 m（12.79%）；23.91%的湿地发生了退化，海拔在900~1100 m（84.41%）；约11.88%的耕地产生退化，海拔在1200 m以下（86.64%）和2200~3000 m（8.00%）；约3.49%的裸地有退化现象，海拔分布900~2000 m（78.33%）和4000 m以上（17.44%）；约2.74%的灌木地发生退化，集中在海拔1200~1700 m（88.33%）。草地、灌木地、森林和耕地水分条件改善趋势明显高于湿地和裸地，黄土高原气候整体呈暖湿的发展趋势。

### 3.3 植被NDVI<sub>y,max</sub>与Tmean<sub>y</sub>、PRE<sub>y</sub>的相关性分析

NDVI<sub>y,max</sub>与Tmean<sub>y</sub>、PRE<sub>y</sub>的偏相关系数简称R<sub>T</sub>、R<sub>P</sub>，正负号表示正负相关。图4a的均值为0.028，正相关的面积占55.56%，2.83%（*p*<0.05）和0.61%（*p*<0.01）的区域通过了显著性检验。图4b的均值为0.367，正相关的面积占91.34%，18.55%（*p*<0.05）和

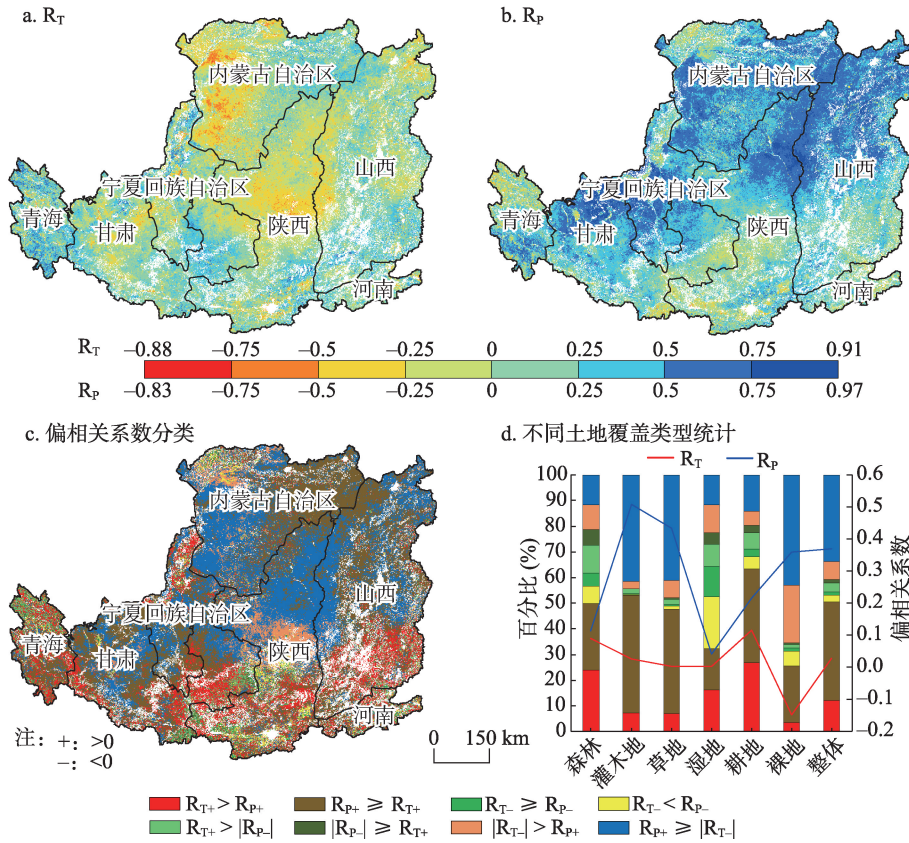


图4 黄土高原NDVI<sub>ymax</sub>与Tmean<sub>y</sub>、PRE<sub>y</sub>偏相关系数的空间分布、偏相关系数分类及不同土地覆盖类型统计

Fig. 4 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI<sub>ymax</sub> and Tmean<sub>y</sub>, PRE<sub>y</sub>, classification of partial correlation coefficients and statistics of different land cover types in the Loess Plateau

16.49% ( $p < 0.01$ ) 的区域通过了显著性检验。NDVI<sub>ymax</sub>对Tmean<sub>y</sub>和PRE<sub>y</sub>的响应空间差异明显，陕西中部及北部、内蒙古西部、甘肃西部、山西西部及北部等地区NDVI<sub>ymax</sub>与Tmean<sub>y</sub>呈明显负相关；内蒙古北部、青海北部、陕西南部、甘肃东南部和河南东部等地区NDVI<sub>ymax</sub>与PRE<sub>y</sub>呈明显负相关（图4a、图4b）。

图4c可知，陕西南部、山西南部、宁夏北部及东南部、甘肃中部和青海南部等地区， $R_{T+}$ 高于 $R_{P+}$ ，Tmean<sub>y</sub>与PRE<sub>y</sub>呈增加趋势（图3c、图3d），热量的增加可以延长植被生长季<sup>[29, 30]</sup>，提高光合作用效率和水分的利用率，是影响该地区植被生长的主要因子。山西中部、内蒙古东南部、宁夏南部、甘肃中部和青海南部等地区， $R_{P+}$ 高于 $R_{T+}$ ，水热条件的增加会促进植被生长，且水分条件对植被生长影响程度高于热量。陕西中部、内蒙古北部、宁夏北部及青海中部等少量地区， $R_{P-}$ 高于 $R_{T-}$ ，水热条件的增加对植被生长有抑制作用，且热量影响程度更大。如陕西中部地区Tmean<sub>y</sub>和PRE<sub>y</sub>呈下降趋势，NDVI<sub>ymax</sub>呈改善趋势；内蒙古地区Tmean<sub>y</sub>呈下降趋势，PRE<sub>y</sub>呈上升趋势，NDVI<sub>ymax</sub>呈增加趋势（图3a、图3c、图3d）。陕西中部及南部、青海北部等地区， $R_{T-}$ 高于 $R_{P-}$ ，分布零散，水分条件影响程度更大。青海北部、甘肃东南部、陕西西南部、内蒙古北部和河南东部等地区， $|R_{P-}|$ 低于 $R_{T+}$ ，热量对植被生长影响程度高于水分。如河南东部地区PRE<sub>y</sub>呈下降趋势，Tmean<sub>y</sub>呈增加趋势，NDVI<sub>ymax</sub>呈增加趋势（图3a、图3c、图3d）。青海北部、甘肃东南

部、陕西南部、山西东南部、内蒙古北部和河南东部等地区， $|R_p|$ 高于 $R_{T+}$ ，水分条件为主要影响因素。陕西中部及南部、内蒙古北部等地区， $|R_p|$ 高于 $R_{p+}$ ，植被生长受热量影响程度高于水分。陕西北部、山西中北部、内蒙古西部及北部、宁夏中部和甘肃西部等地区， $|R_T|$ 低于 $R_{p+}$ ，水分条件是植被的生长主要限制因子。

图4d为 $R_T$ 、 $R_p$ 在不同土地覆盖类型下的统计情况，黄土高原约75.06%的区域受水分条件的限制。灌木地与 $PRE_y$ 偏相关系数最大 ( $R_p=0.51$ )，对水分依赖程度最高，其次为草地 ( $R_p=0.43$ ) 和裸地 ( $R_p=0.36$ )；湿地因自身水分条件充足，对 $PRE_y$ 响应程度最低 ( $R_p=0.04$ )；森林根系发达，可以吸收土壤深层的水分，受 $PRE_y$ 响应程度较弱 ( $R_p=0.11$ )；耕地的 $R_p$ 为0.22，耕地除自然降水外，还可以人工灌溉补充水分，受水分条件限制程度小于灌木地、草地和裸地，高于森林和湿地。裸地的 $R_T$ 为-0.15，温度升高，加速地表蒸散发及土壤水分的流失，限制了植被生长；森林、灌木地和耕地与 $Tmean_y$ 呈正相关 ( $R_T=0.09$ 、0.03和0.12)，温度上升，有利于叶片光合作用，促进了植被的生长；草地和湿地与 $Tmean_y$ 正相关性极弱 ( $R_T<0.01$ )。水分条件对灌木地、耕地、草地和裸地的影响程度远高于热量。灌木地、草地、裸地和耕地对热量和水分条件的敏感性高于森林和湿地植被。

高程影响了NDVI和水热条件的变化趋势，不同海拔上植被气候主控也必然发生变化。结合DEM，以100 m为步长统计 $R_T$ 、 $R_p$ 在不同海拔上的变化情况（图5）。曲线断开

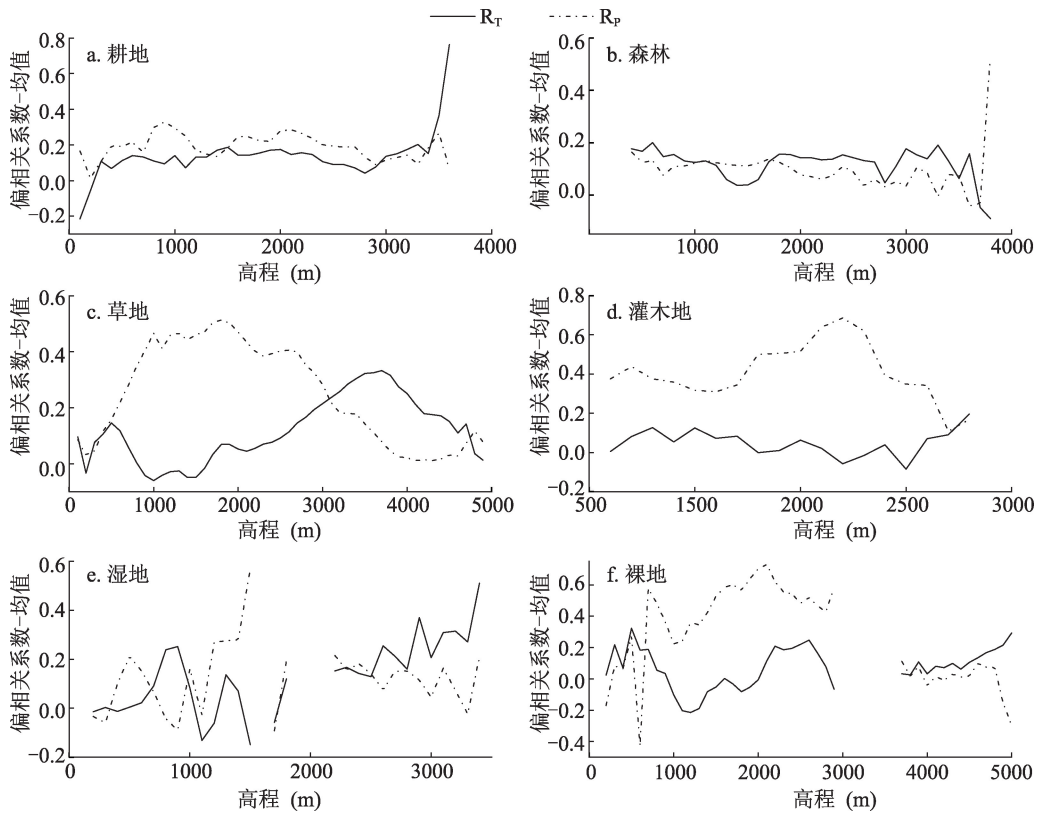


图5 年尺度上不同土地覆盖NDVI<sub>max</sub>与Tmean<sub>y</sub>、PRE<sub>y</sub>偏相关系数随高程变化曲线

Fig. 5 Curves of partial correlation coefficients of NDVI<sub>max</sub> and Tmean<sub>y</sub>, PRE<sub>y</sub> with elevation based on different land cover types on the annual scale

表示对应海拔上没有该植被类型。降水对植被生长的影响程度高于气温称为水分主控,反之为热量主控。由图4d和图5可知,热量是限制森林生长的主要因子,主控比例占51.19%,分布在海拔1000 m以下、1700~3700 m范围,水分主控则集中在海拔1000~1700 m、高于3700 m范围。水分条件是灌木地生长的主要因子,主控比例占87.63%,集中在海拔2200 m以下范围。草地受水分主控面积为83.11%,主要分布在海拔3000 m以下、4700 m以上,热量主控则集中在海拔3000~4700 m。热量是影响湿地植被生长的主要因子,主控比例占56.17%,主要集中在海拔2500 m以上,低于2500 m时,热量和水分主控存在交替变化的情况。水分条件是影响耕地植被的重要因子,主控比例为56.63%,海拔通常低于3000 m,热量主控区域的海拔为1300~1500 m、高于3000 m。水分条件是裸地植生长的主要因子,主控比例占67.42%,集中在海拔600~3700 m左右。

### 3.4 黄土高原植被NDVI与Tmean、PRE月尺度响应关系分析

利用NDVI与前0~2个月Tmean和PRE的偏相关系数,研究植被对气候响应的滞后效应,结合图1b得到不同植被对气候响应的滞后性统计(图6)。月尺度上,黄土高原整体对Tmean的响应滞后1个月为主,对PRE未表现明显滞后性,与张含玉等<sup>[21]</sup>的结论相同,对Tmean响应滞后0~2个月的比例为21.35%、61.68%和16.97%,对PRE响应滞后0~2个月的比例为96.79%、2.73%和0.47%(图6c)。对热量响应滞后2个月的区域分布在黄土高原西北地区,没有响应滞后性的区域则主要分布在东南地区。内蒙古西部和甘肃西北部等地区对水分响应滞后期为1个月,对热量响应存在2个月的滞后期。月尺度上不同植被对Tmean响应滞后性略有差异,草地、湿地、耕地和裸地植被对Tmean的响应滞后性明显,滞后1个月的比例占63.64%、71.85%、68.68%和60.77%;森林和灌木地对Tmean的响应则以没有滞后性为主,占91.35%和62.71%,六种植被对PRE的响应均以没有滞后性为主。

通过偏相关系数得到滞后0~2个月的气候主控分布图(图7)。从图7a可知,NDVI与Tmean和PRE的偏相关系数以正相关为主,热量主控占56.75%,主要集中在陕西南部、陕西南部、河南、甘肃南部、宁夏北部和内蒙古北部等地区;水分主控占43.25%,主要分布陕西北部、山西北部、内蒙古中部、宁夏中南部、甘肃北部和青海等地区。当滞后时间为1个月时,热量正主控约占92.40%,水分主控仅为7.51%,陕西南部、甘肃南部和山西中部等地区NDVI与Tmean的偏相关系数为正,与PRE的偏相关系数为负(图7b)。当响应滞后2个月时,黄土高原约85.87%的区域,与PRE呈负相关,热量主控面积约占98.68%(图7c)。伴随滞后时间的推移,水分主控比例逐渐降低,热量成为影响植被生长的主要因素。

NDVI与Tmean、PRE滞后0~2个月偏相关系数分别简称 $R_{T0}$ 、 $R_{T1}$ 、 $R_{T2}$ 和 $R_{P0}$ 、 $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$ ,利用DEM统计 $R_T$ 、 $R_P$ 在不同海拔上的变化情况(图8,见第1209页)。结合图6c和图8可知,68.68%的耕地中对Tmean存在1个月的响应滞后期,主要在海拔150 m以下、350~2250 m、2550~2900 m、3430~3560 m范围;没有滞后性的区域主要在150~350 m、2250~2550 m附近;当2900~3430 m附近,响应滞后时间为2个月;当海拔超过2670 m, $R_{P0}$ 大于 $R_{T0}$ ,水分对耕地的影响程度超过热量,其他海拔上热量是影响耕地的重要因素。91.35%的森林对Tmean响应不存在滞后性,主要在海拔2900 m以下、3450 m以上;热量是影响森林生长的主要因素。63.64%的草地对Tmean响应滞后1个月,主要在海拔710~3800 m,低于710 m时不存在滞后性,当超过3800 m时,响应滞后性长达2个月;当海拔超过1260 m时, $R_{P0}$ 大于 $R_{T0}$ ,草地更容易受水分条件的限制,其他高度上,热量是主要



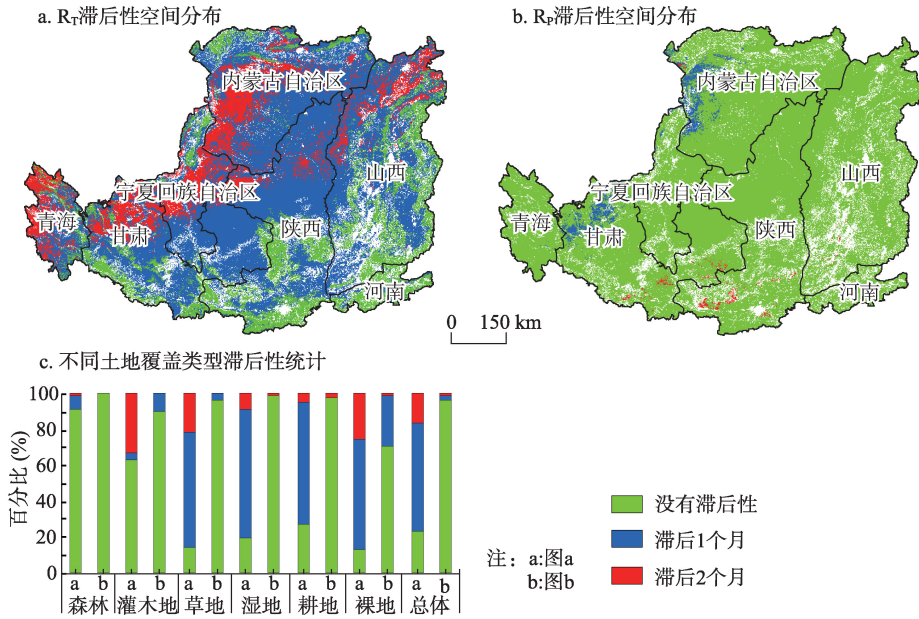


图6 月尺度上NDVI与前0~2个月Tmean和PRE滞后性空间分布及不同土地覆盖类型统计

Fig. 6 On the monthly scale, the lagging spatial distribution of NDVI and Tmean and PRE in the preceding 0-2 months and the statistics of different land cover types in the Loess Plateau

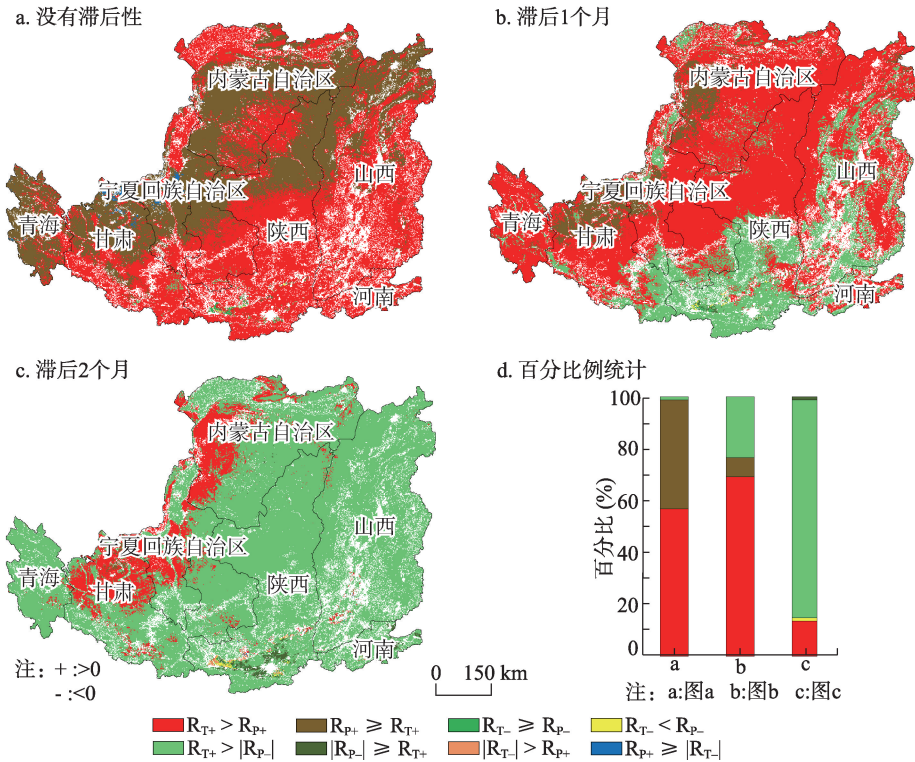


图7 月尺度上植被与气候因子响应滞后0~2个月的气候主控分布及百分比统计

Fig. 7 On the monthly scale, the main climatic control distribution and percentage statistics of vegetation lagging 0-2 months in response to climate factors

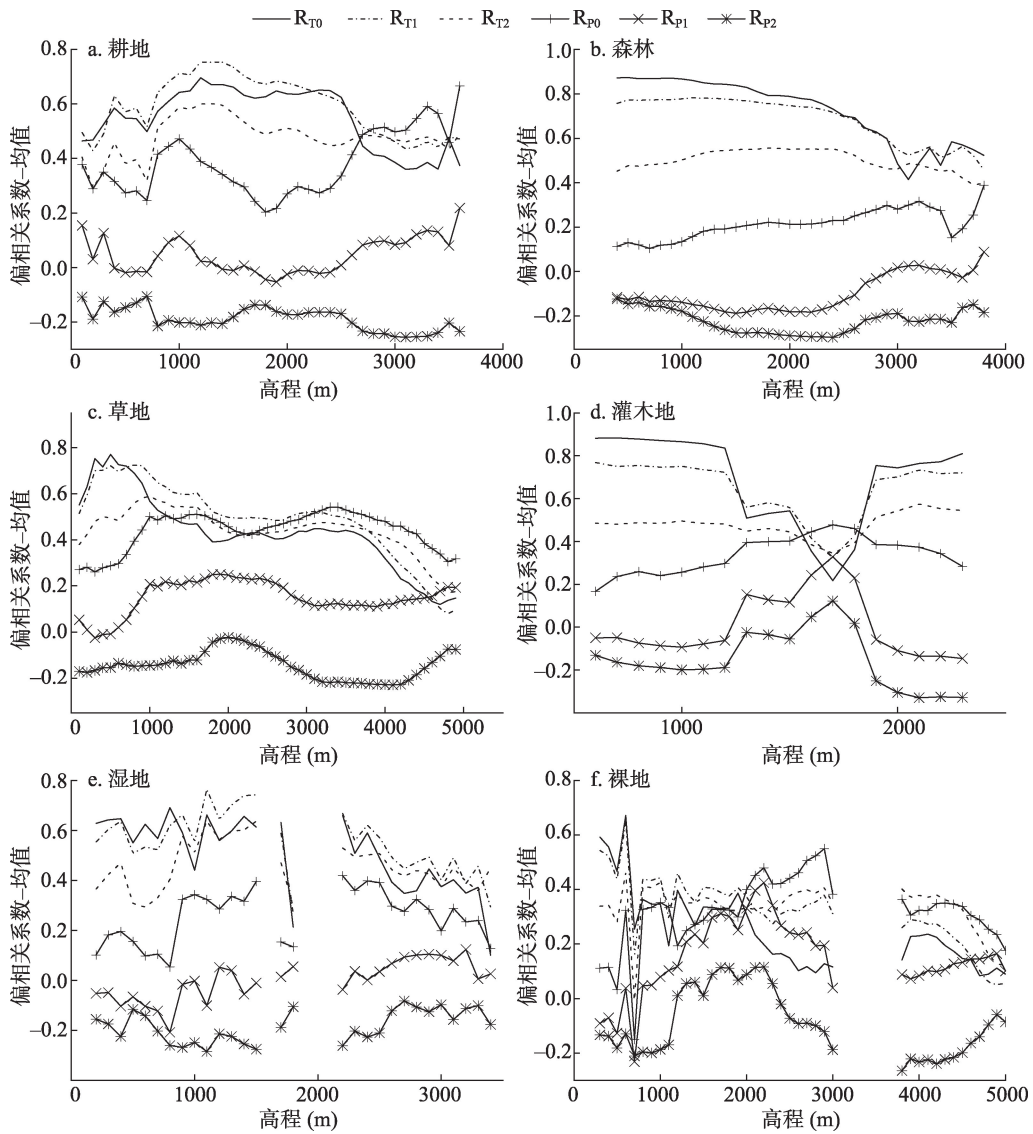


图8 月尺度上不同土地覆盖NDVI与Tmean、PRE的相关系数随高程变化曲线

Fig. 8 Curves of correlation coefficients of NDVI with Tmean and PRE with elevation based on different land cover types on the monthly scale

影响因素。62.71%的灌木地对Tmean的响应没有滞后性，主要在海拔1270 m以下、1860 m以上的区域；当海拔1560~1820 m时， $R_{P0}$ 大于 $R_{T0}$ ，水分更容易影响灌木地的生长，其他海拔热量是主要的影响因素。71.85%的湿地对Tmean响应存在1个月的滞后期，主要在海拔860 m以上，低于860 m时，没有滞后期，整体上热量对湿地的影响程度高于水分条件。60.77%的裸地对Tmean有1个月的滞后期，主要在海拔760~2100 m，海拔高于2100 m时，响应滞后为2个月，低于760 m时候，响应不存在滞后性；当低于1950 m时，热量是影响植被生长的主要因素，高于1950 m时，水分条件成为限制植被生长的主要因素。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于MOD13A1、MCD12Q1、气象数据及DEM数据,分析了黄土高原NDVI时空变化特征,探讨了两种尺度下NDVI对气候变化的响应特征,主要结论如下:

(1) 黄土高原 $NDVI_{y_{max}}$ 、 $Tmean_y$ 和 $PRE_y$ 增长率分别为0.007/a ( $p<0.01$ )、0.013 °C/a ( $p>0.1$ )、3.828 mm/a ( $p>0.1$ ),生态环境整体不断改善,气候呈暖湿的发展趋势。

(2) 黄土高原退化区域的土地覆盖构成为草地(52.88%)、耕地(44.72%)、裸地(1.61%),83.77%的植被退化区域海拔低于2000 m,8.04%的退化区域在2000~3000 m。不同植被类型的退化区海拔差异明显,森林(退化区海拔主要集中在1500~2600 m,该海拔范围退化区占该覆被类型总退化区的80.73%,下同)、草地(1000~2200 m,75.43%、3000~4100 m,12.79%)、湿地(900~1100 m,84.41%)、耕地(<1200 m,86.64%、2200~3000 m,8.00%)、裸地(900~2000 m,78.33%、>4000 m,17.44%)、灌木地(1200~1700 m,88.33%),退化类型以不显著减少为主。

(3) 年尺度上,黄土高原 $NDVI_{y_{max}}$ 与 $Tmean_y$ 、 $PRE_y$ 偏相关系数呈正相关的面积分别占总面积的55.56%、91.34%。不同植被对水热条件响应差异较大,同时水热主控分布受海拔影响明显。水分条件是限制灌木地(海拔分布<2200 m,下同)、耕地(<3000 m,热量主控1300~1500 m、>3000 m)、草地(<3000 m,热量主控3000~4700 m)和裸地(600~3700 m)生长的主要因素。热量是影响森林(<1000 m、1700~3700 m,水分主控1000~1700 m、>3700 m)和湿地(>2500 m)生长的主要因素。

(4) 月尺度上,黄土高原植被NDVI对热量响应存在1个月的滞后期,对水分响应没有明显滞后性;草地(滞后性海拔分布710~3800 m,下同)、湿地(>860 m)、耕地(<150 m、350~2250 m、2550~2900 m、3430~3560 m)和裸地(760~2100 m)对热量响应存在1个月的滞后效应;森林(<2900 m、>3450 m)和灌木地(<1270 m、>1860 m)对热量响应没有滞后性。六种植被对水分条件响应均没有滞后性。伴随滞后时间的推移,水分主控比例逐渐降低,热量成为影响植被的主要因素。水热主控及响应滞后性分布受海拔影响明显,不同区域和海拔高度应选择合适的植被类型,合理的利用水资源进行植被恢复。

### 4.2 讨论

根据结论可知,自从“自然林保护”“退耕还林(草)”等工程以来,黄土高原植被NDVI整体逐渐改善,贺振等<sup>[11]</sup>、赵安周等<sup>[22]</sup>和袁丽华等<sup>[31]</sup>也得出了类似的研究结果。随着经济的高速发展,城镇化进程的加快,部分低海拔范围的农田和草地逐渐转为建筑用地,加速了城镇附近区域植被覆盖的退化,如关中平原、河南中东部地区,这与王涛等<sup>[15]</sup>研究结果相同。暖湿的气候环境有利于植被的生长,研究表明,热量的增加有利于冬小麦种植范围的北移西扩<sup>[32]</sup>,未来情境模式下林草界线整体将向西北方向迁移<sup>[33]</sup>。退耕还林工程在增加植被资源的同时改善了当地气候状况,增加了降水,缓解了气候变化的幅度<sup>[34]</sup>,然而气候的变化再次影响了植被的再生潜力。

受地形因素的影响导致水热条件的变化趋势存在明显的地域差异性,不同类型的植被因自身特性,对水热条件响应的敏感程度存在差异。利用DEM统计 $NDVI_{y_{max}}$ 、 $Tmean_y$ 和 $PRE_y$ 变化趋势,结合图3、图4和图5可知,80.73%的森林退化集中在海拔1500~2600 m,水分主控(1500~1700 m)和热量主控(1700~2600 m)区域都有分布,1500~1700 m植被退化区主要由于气温升高、水分流失加速导致,1700~2600 m的植被退化区是因为降水的增加,降低了植被日照时间,影响了植物光合作用。75.43%的草地退化分布在

水分主控区, 1000~2200 m 植被退化区主要由于降水的减少, 引起水分条件不足、气温升高加速了地表水分的流失, 不利于植被生长, 12.79%的植被退化区位于热量主控区, 高海拔区域的植被通常为热量主控(图5), 降水量的增加, 导致日照时间的减少, 不利于植被的生长。84.41%的湿地退化分布在水热主控交替区域, 900~1000 m时降水增加, 气温升高放缓, 热量条件不足引起了植被退化, 而1000~1100 m时, 降水和气温同时降低, 水分条件是植被退化的主要因素(图5)。耕地的退化区域主要分布在水分主控区, 海拔500 m以下的退化区占53.17%, 耕地的退化可能与农作物品种、灌溉时间和田间管理方式等因素有关。78.33%的裸地退化分布在水分主控区域, 海拔900~1100 m时, 降水量减少, 温度降低, 当1100~2000 m时, 气温迅速增加, 降水量增加缓慢, 水分条件的不足限制了裸地植被的生长; 4000 m以上的退化区主要是由气温的快速增加, 加速了地表水分的蒸发, 限制了植被的生长。88.33%的灌木地退化区主要在水分主控区, 海拔小于1700 m时, 降水量减少, 水分条件的不足和气温的升高导致了植被的退化。

整体上, 水分条件是影响植被生长的主控因子<sup>[22,35]</sup>, 黄土高原植被主要受水分条件控制, 与史晓亮<sup>[36]</sup>研究结论一致。植被生长所需水分主要来自降水<sup>[37]</sup>, 水热条件的地域差异性, 必然引起同种植物对气候响应程度及主控因子的不一致。因此, 应考虑不同植被对水热条件的需求能力及该区域的水热条件变化趋势, 因地制宜, 合理的利用水热资源进行植被恢复。植被对气候的响应关系及滞后性与地形因素息息相关, 目前只关注了海拔影响, 未考虑坡度和坡向, 未来研究将结合三者进行综合分析, 进一步揭示植被变化及其气候响应的差异特征。人类活动作为影响植被变化的重要途径, 通常在小尺度区域具有决定性影响<sup>[38]</sup>, 本研究未评价人类活动在黄土高原植被变化过程中所起的作用, 下一步将黄土高原植被变化的人为因素进行定量分析和驱动机制研究。另外, 未来将土壤湿度、太阳辐射、蒸散发和干旱指数等数据与气温和降水数据一起进行综合分析, 进一步探索植被变化与气候变化的关系。

**致谢:** 真诚感谢二位匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力, 评审专家对本文引言的撰写、结果分析时NDVI类型的选取、讨论和结论梳理方面的修改意见, 使本文获益匪浅。

## 参考文献(References)

- [1] 刘哲, 邱炳文, 王壮壮, 等. 2001-2014年间黄土高原植被覆盖状态时空演变分析. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 192-198. [Liu Zhe, Qiu Bingwen, Wang Zhuangzhuang, et al. Temporal and spatial variation analysis of vegetation cover in the Loess Plateau from 2001 to 2014. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(1): 192-198.]
- [2] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874. [Gao Haidong, Pang Guowei, Li Zhanbin, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 863-874.]
- [3] 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. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716. [Liu Xianfeng, Pan Yaozhong, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 705-716.]
- [4] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 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. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30. [Zhou Wei, Gang Chengcheng, Li Jianlong, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982-2010. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15-30.]
- [5] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. Agricultural Forest Meteorology, 2015, 209-210(1): 87-99.
- [6] 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. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1248-1258. [Sun Rui, Chen Shaohui, Su Hongbo. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on

- the Loess Plateau from 2000 to 2016. *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1248-1258.]
- [7] Li J J, Li Z, Lü, Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986-2010. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 1-12.
- [8] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 63-68. [Deng Jingcheng, Gao Peng, Mu Xingmin, et al. Impacts and advice of the Grain for Green Project to ecological environment on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 63-68.]
- [9] 龙岳红, 秦建新, 贺新光, 等. 洞庭湖流域植被动态变化的小波多分辨率分析. *地理学报*, 2015, 70(9): 1491-1502. [Long Yuehong, Qin Jianxin, He Xinguan, et al. Wavelet multi-resolution analysis of vegetation dynamic change in Dongting Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1491-1502.]
- [10] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000-2014年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1568-1578. [Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1568-1578.]
- [11] 贺振, 贺俊平. 近32年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 179-185. [He Zhen, He Junping. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the yellow river basin during 1982-2013. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 179-185.]
- [12] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响. *地理学报*, 2018, 73(3): 395-404. [Zhao Jie, Du Ziqiang, Wu Zhitao, et al. Seasonal variations of day and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 395-404.]
- [13] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [14] Zhang Z, Chang J, Xu C Y, et al. The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetan Plateau during the past 30 years. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 443.
- [15] 王涛, 李贝贝, 裴春莹. 植被NDVI对城市扩展及气候变化的响应: 以西安及其附近区域为例. *干旱区地理*, 2017, 40(2): 388-396. [Wang Tao, Li Beibei, Pei Chunying. Impact of urban expansion and climate change on vegetation NDVI: A case of Xi'an city and its nearby area. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 388-396.]
- [16] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999-2010年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1665-1670. [Wei Zhenfeng, Wang Deguang, Zhang Chong, et al. Response of vegetation cover to climate change and human activities in Northwest China during 1999-2010. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1665-1670.]
- [17] Nan C, G M, Shen, Wei Y, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1-12.
- [18] Kong D D, Zhang Q, Singh Vijay P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the northern hemisphere (1982-2013). *Global Planetary Change*, 2016, 148: 1-8.
- [19] He B, Chen A F, Wang H L, et al. Dynamic response of satellite-derived vegetation growth to climate change in the Three North Shelter Forest Region in China. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9998-10016.
- [20] 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. *资源科学*, 2014, 36(1): 166-174. [Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau. *Resources Science*, 2014, 36(1): 166-174.]
- [21] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968. [Zhang Hanyu, Fang Nufang, Shi Zhihua. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3960-3968.]
- [22] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 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. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 449-460. [Zhao Anzhou, Zhang Anbing, Liu Haixin, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449-460.]
- [23] Holben Brent N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [24] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 2013, 100(1): 172-182.
- [25] Farshad F, Zohreh D, M B, Hadi, et al. Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2016, 61(5): 892-904.

- [26] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Publications of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [27] Mann Kendall, Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1975: 57.
- [28] 陈登魁, 马超, 王夏冰, 等. 1982-2015年可可西里NDVI变化特征及其气候响应. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1410-1417. [Chen Dengkui, Ma Chao, Wang Xiabing, et al. Variation of NDVI and Its response to climate change in Hoh Xil during the period of 1982-2015. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1410-1417.]
- [29] Hwang T, Band L E, Miniat C F, et al. Divergent phenological response to hydroclimate variability in forested mountain watersheds. *Global Change Biology*, 2014, 20(8): 2580-2595.
- [30] Dragoni D, Rahman A F. Trends in fall phenology across the deciduous forests of the eastern USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 96-105.
- [31] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806. [Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806.]
- [32] 吴乾慧, 张勃, 马彬, 等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 429-436. [Wu Qianhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3): 429-436.]
- [33] 李国庆, 张晓芹, 杜盛. 基于随机森林模型的黄土高原林草界线模拟研究. *中国科技论文*, 2017, 12(15): 1780-1784. [Li Guoqing, Zhang Xiaojin, Du Sheng. Simulating the boundary of forest and grass on the Loess Plateau based on random forest model. *China Science Paper*, 2017, 12(15): 1780-1784.]
- [34] 程晓鑫, 何远梅, 张岩. 黄土高原植被恢复与局地气候变化的关系. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4): 25-33. [Cheng Xiaoxin, He Yuanmei, Zhang Yan. Correlations between vegetation restoration and regional climate change in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(4): 25-33.]
- [35] 王宇航, 赵鸣飞, 康慕谊, 等. 黄土高原地区NDVI与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究. *地理研究*, 2016, 35(3): 493-503. [Wang Yuhang, Zhao Mingfei, Kang Muyi, et al. Spatial scale-dependent and non-stationarity relationships between NDVI and climatic factors in the Loess Plateau. *Geographical Research*, 2016, 35(3): 493-503.]
- [36] 史晓亮, 王馨爽. 黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 189-194. [Shi Xiaoliang, Wang Xinshuang. Spatial and temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 189-194.]
- [37] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 26-30. [Ai Ning, Wei Tianxing, Zhu Qingke. The effect of rainfall for runoff-erosion-sediment yield under the different vegetation types in Loess Plateau of northern Shaanxi province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 26-30.]
- [38] 陈佑启, Peter H. Verburg, 徐斌. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 116-127. [Chen Youqi, Peter H. Verburg, Xu Bin. Spatial modeling of land use and its effects in China. *Progress in Geography*, 2000, 19(2): 116-127.]

## Spatiotemporal variation of NDVI in different ecotypes on the Loess Plateau and its response to climate change

SUN Rui<sup>1,2</sup>, CHEN Shaohui<sup>1</sup>, SU Hongbo<sup>1</sup>

(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 spatio-temporal changes of vegetation and its climatic control factors can provide important theoretical basis for the protection and restoration of ecological vegetation. Based on MOD13A1 and meteorological data, the spatial patterns and trends of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Loess Plateau were analyzed. The response of NDVI to temperature and precipitation was analyzed on the annual and monthly scales. The results showed that the vegetation coverage in the study area was improving continuously, and the climate showed a warm and wet trend. Of the degraded areas in the Loess Plateau, some 83.77% (area only 5.79%) was below 2000 m and the number of vegetation degradation types were not significantly reduced. The altitude distribution and degraded proportion of different vegetation degraded areas were significantly different. The degraded area ratio of wetland was the highest (23.91%), followed by cultivated land (11.88%). On the annual scale, the area with positive correlation between NDVI and precipitation was higher than that of temperature, and about 75.06% of the area was affected by precipitation. Precipitation was the main factor affecting the growth of shrub land (altitude distribution < 2200 m, the same below), cultivated land (< 3000 m), grassland (< 3000 m) and bare land (600-3700 m). Temperature was the main factor affecting the growth of forests (< 1000 m, 1700-3700 m) and wetlands (>2500 m). On the monthly scale, the overall response lag period of the Loess Plateau to temperature was one month, and there was no response lag period to precipitation. The response lag period of different vegetations to hydrothermal conditions was obvious. Grassland (lagging altitude distribution 710-3800 m, the same below), wetland (> 860 m), cultivated land (< 150 m, 350-2250 m, 2550-2900 m, 3430-3560 m) and bare land (760-2100 m) had a one month lag effect on temperature response, while forest (< 2900 m, > 3450 m) and shrub land (< 1270 m, > 1860 m) had no lag effect on temperature response, and six types of vegetation had no lag effect on water condition response. With the time lagging, the proportion of precipitation control gradually decreases. Temperature becomes the main factor affecting vegetation. The main control of water and heat and the lagging distribution of response are obviously affected by altitude. The proper vegetation type should be selected in different areas and altitudes, and water resources should be used reasonably for vegetation restoration.

**Keywords:** Loess Plateau; hydrothermal conditions; land cover; Normalized Difference Vegetation Index