

黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应

覃巧婷¹,陈建军^{1,2*},杨艳萍¹,赵晓宇¹,周国清^{1,2},尤号田^{1,2},韩小文^{1,2} (1.桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林 541004; 2.桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要: 基于 2000~2019 年 MODIS 归一化植被指数(NDVI)遥感数据,辅以同期气温、降水和地形数据,通过最大值合成、趋势分析及相关分析法,分析了黄河源区植被的时空变化特征及其对地形和气候变化的响应。结果表明:黄河源区植被 NDVI 整体处于中高水平,但空间差异显著,呈现由东南向西北递减的空间分布格局;近 20a 来,植被总体上呈现出变好的趋势。植被对高程和坡度响应明显,随着高程的增加,植被 NDVI 呈现先增加后减少的趋势,但在 3500~4100m 区间植被 NDVI 变化不显著;此外,植被 NDVI 随着坡度的增大呈现出先增大后减小的变化趋势,且在 24~26°坡度带植被 NDVI 达到最大值。黄河源区植被受气温和降水的共同影响,与降水相比,气温对黄河源区植被变化的影响更为显著。

关键词: 植被变化; MODIS 数据; 空间分析; 经典统计分析方法; 黄河源区

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)08-3832-10

Spatiotemporal variations of vegetation and its response to topography and climate in the source region of the Yellow River.

QIN Qiao-ting¹, CHEN Jian-jun^{1,2*}, YANG Yan-ping¹, ZHAO Xiao-yu¹, ZHOU Guo-qing^{1,2}, YOU Hao-tian^{1,2}, HAN Xiao-wen^{1,2} (1.College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China). *China Environmental Science*, 2021,41(8): 3832~3841

Abstract: Based on MODIS normalized differential vegetation index (NDVI) remote sensing data from 2000 to 2019, combined with temperature, precipitation and topographic data during the same period, this paper analyzed the spatiotemporal variation characteristics of vegetation and its response to topographic and climate change by maximum value synthesis, trend analysis and correlation analysis in the source region of the Yellow River. The results showed that : The NDVI of vegetation in the source region of the Yellow River was at a medium to high level, but the spatial difference was significant, showing a decreasing spatial distribution pattern from southeast to northwest. In the past 20years, the vegetation generally showed a trend of improvement. Vegetation had a significant response to elevation and slope. With the increase of elevation, the NDVI of vegetation first increased and then decreased, but there was no significant change in vegetation NDVI between 3500~4100m. In addition, the NDVI of vegetation first increased and then decreased with the increase of slope, and reached the maximum in the slope zone of 24 ° ~26°. The vegetation in the source region of the Yellow River was affected by both temperature and precipitation. Compared with precipitation, the influence of temperature on vegetation change was more significant.

Key words: vegetation variation; MODIS data; spatial analysis; classical statistical analysis method; the source region of the Yellow River

黄河源区位于青藏高原腹地,是黄河流域的主要产流区、水源涵养区,也是我国重要的生态屏障^[1-2]。黄河源区植被以高寒草甸、高寒草原和高寒灌丛为主,其草地生态系统是长期自然演化的结果,生态环境十分脆弱,容易因外界的干扰和破坏而发生变化,恢复难度极大且恢复过程缓慢^[3]。近几十年来,在气候变化和人类活动的影响下,黄河源区的生态环境发生了显著的变化,主要表现为高寒草地严重退化^[4]、土地沙漠化^[5]、生物多样性和数量锐减^[6]、水土流失加剧^[7]等,引起了众多学者和决策部门的广泛关注^[8-10]。作为青藏高原陆地生态系统的

重要组成部分,黄河源区植被对维护黄河流域生态环境安全及可持续发展具有非常重要的作用^[11]。因此,研究黄河源区植被的变化及其驱动机制具有重要意义。

利用遥感卫星数据监测植被的生长有助于更好地了解植被信息。当前用于度量植被变化的植被

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41801030、41961065);广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFBA281054);广西科技计划项目(桂科 AD19245032);广西八桂学者专项项目和桂林理工大学科研启动基金资助项目(GUTQDJJ2017069)

* 责任作者,副教授,chenjj@glut.edu.cn

int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/),空间分辨率为 0.5°.ERA-Interim 提供了自 1979 年以来的再分析资料,并实时更新.相比第二代产品 ERA-40 数据同化模型,ERA-Interim 采用了四维变分分析(4D-Var),并结合改进的湿度分析,卫星数据误差校正等技术,实现了再分析资料质量的提升^[30].采用克里金插值法对气象数据进行空间插值,将气象数据重采样为空间分辨率为 250m 的栅格数据,实现气象数据与 NDVI 数据空间分辨率的统一.

1.2.3 辅助数据 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30m,地理坐标为 GCS_WGS_1984,对 DEM 数据进行拼接、裁剪、重投影的处理,获得黄河源区的高程数据,并提取坡度数据,研究黄河源区植被随高程、坡度的变化特征.植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),其植被类型主要包括针叶林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草甸、沼泽、高山植被、栽培植被等,本文仅选取主要的 3 种植被类型(高寒草甸、高寒草原、高寒灌丛)进行分析,其空间分布如图 1 所示.

1.3 研究方法

1.3.1 最大值合成法 采用最大值合成法获取黄河源区年 NDVI 的最大值,从而去除残云、残雾、大气等的影响.计算方法如下所示:

$$\text{NDVI}_i = \max(\text{NDVI}_1, \text{NDVI}_2, \text{NDVI}_3, \text{NDVI}_4) \quad (1)$$

式中: i 为年序号,取值范围为 2000~2019; NDVI_i 为第 i 年的最大 NDVI 值; NDVI_1 、 NDVI_2 、 NDVI_3 、 NDVI_4 分别表示每年 7 月份上半月和下半月、8 月份上半月和下半月的 NDVI 数据.

1.3.2 NDVI 变化趋势 采用线性回归趋势分析方法计算植被 NDVI 的变化趋势.多年回归方程中的趋势斜率代表年际变化,通常利用最小二乘法求解.计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为 NDVI 的回归斜率; n 为研究时间段累计年数,本文中 $n=20$; i 代表年序号; NDVI_i 为第 i 年平均 NDVI 值.若 $\theta_{\text{slope}} > 0$,表明 NDVI 在 n 年间呈增加趋势; $\theta_{\text{slope}} < 0$,表明 NDVI 在 n 年间为下降趋势;

$\theta_{\text{slope}} = 0$,表明 NDVI 在 n 年间无明显变化^[31].

1.3.3 NDVI 与气温、降水的偏相关分析 偏相关分析是探索植被生长与单一气候因子之间的联系,同时剔除其他气候因子的影响,被广泛用于检测影响植被生长的主要气候驱动因子^[32].计算公式如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: x 为 NDVI; y/z 为气温/降水,单位为 °C/mm; $r_{xy,z}$ 为将降水/气温固定后气温/降水与 NDVI 的偏相关系数.若 $r > 0$,表明气温/降水与 NDVI 呈正相关; $r < 0$ 表明气温/降水与 NDVI 呈负相关; $r = 0$ 表明气温/降水与 NDVI 不存在线性相关性. r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别代表 NDVI 与气温、NDVI 与降水、气温与降水的相关系数.其中,相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x 为 NDVI; y 为气温/降水; r_{xy} 为气温/降水与 NDVI 之间的相关系数; x_i 与 y_i 分别为 NDVI、气温/降水第 i 年的值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示 NDVI、气温/降水两变量 n 年的平均值; n 为样本数,本文中 $n=20$.

1.3.4 NDVI 与气温、降水的复相关分析 复相关分析是研究一个变量与多个变量之间的相关程度.植被是受到多种因素影响的,因此运用复相关分析计算出 NDVI 与气温、降水的复相关系数,以此分析 NDVI 受两者共同作用的影响有多大.复相关系数计算公式如下所示:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (5)$$

式中: x 为 NDVI; y 为气温; z 为降水; $r_{x,yz}$ 为 NDVI 与气温、降水的复相关系数.

复相关系数的显著性检验采用 F 检验法,其统计量计算公式如下所示.

$$F = \frac{r_{x,yz}^2}{1 - r_{x,yz}^2} \frac{n - k - 1}{k} \quad (6)$$

式中: n 为样本数,本文中 $n=20$; k 为自变量个数.

1.3.5 NDVI 与高程、坡度的关系 为了探究 NDVI 随海拔梯度的分布和变化特征,将黄河源区分为 37 个 100m(2564~6295)的高程带,统计每一高程带的平均 NDVI 值和所占的像元比例,其中整个研

究区共有 156056034 个像元.同理,将黄河源区分为 30 个 $2^\circ(0\sim60^\circ)$ 和 1 个 $30^\circ(60\sim90^\circ)$ 的坡度带,统计不同坡度带所占的像元比例和 NDVI 值,分析 NDVI 随坡度的变化特征.

2 结果与分析

2.1 植被 NDVI 的时空变化特征

2.1.1 植被 NDVI 的时间变化特征 如图 2 所示,2000~2019 年黄河源区植被 NDVI 呈波浪式的增加趋势,线性增长率为 $0.0014/a$.在 2003 年植被 NDVI 出现最小值,在 2018 年植被 NDVI 出现最大值.黄河源区各植被类型 NDVI 的年际变化与植被整体基本一致.其中高寒草原的增加速率最大,为 $0.0027/a$;高寒草甸次之,为 $0.0013/a$;高寒灌丛的增加速率最小,为 $0.0008/a$.表明近 20a 来研究区高寒草原的改善趋势更为明显.在数值上,3 种植被类型 NDVI 值从大到小依次为高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原.其中高寒草甸与植被整体的变化趋势最为接近.

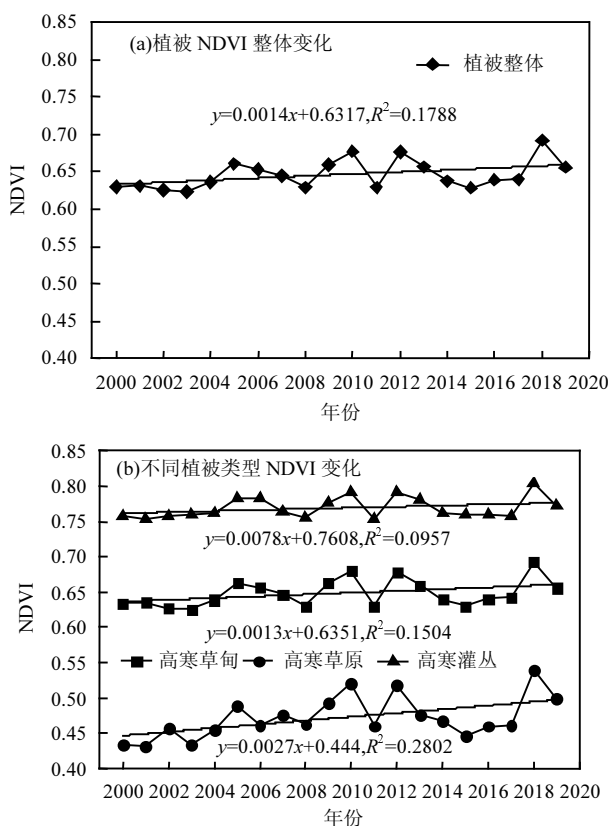


图 2 黄河源区植被 NDVI 的年际变化

Fig.2 Annual variation of vegetation NDVI in the source region of the Yellow River

2.1.2 植被 NDVI 的空间分布格局 将黄河源区

植被 NDVI 划分为 <0.2 、 $0.2\sim0.4$ 、 $0.4\sim0.6$ 、 $0.6\sim0.8$ 、 >0.8 5 个等级.如图 3 所示,2000~2019 年黄河源区平均 NDVI 为 0.65,表明多年植被 NDVI 处于中高水平,但不同地区差异较大,呈现出由东南向西北递减的变化趋势.其中中高植被覆盖区主要分布在东南部的红原县、若尔盖县、玛曲县、久治县等区域;低植被覆盖区主要分布在西北部的玛多县、曲麻莱县的部分区域.

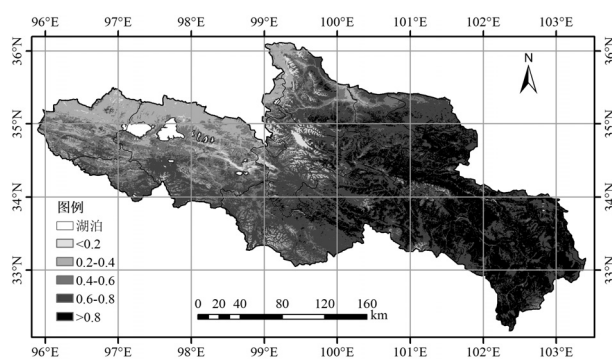


图 3 黄河源区植被 NDVI 的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of vegetation NDVI in the source region of the Yellow River

2.1.3 植被 NDVI 的变化趋势 对黄河源区 2000~2019 年植被 NDVI 做一元线性回归分析,根据回归显著性检验结果 ($P < 0.01$),将黄河源区植被 NDVI 变化情况划分为显著减少、无显著变化和显著增加 3 类.

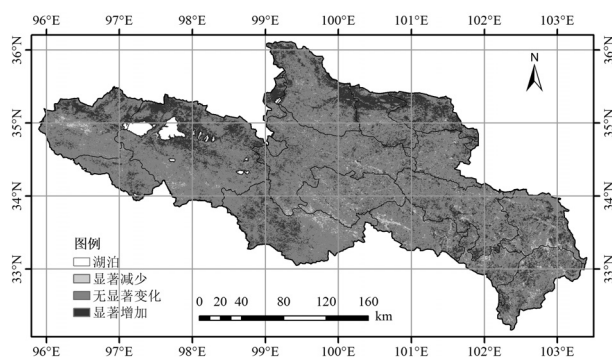


图 4 黄河源区植被 NDVI 的变化趋势

Fig.4 Variation trend of vegetation NDVI in the source region of the Yellow River

如图 4 所示,总体上植被 NDVI 显著增加的面积大于植被 NDVI 显著减少的面积.分析其原因,一方面是近几十年来实施的生态保护与建设工程取得的成效,例如围封、退牧还草、湿地保护等;另一方

面是降水增多、气温升高等使得植被生长的气候环境变好.其中植被 NDVI 显著增加的面积占源区总面积的 20.42%,主要呈块状分布在黄河源区北部的兴海县、同德县和泽库县的部分区域以及扎陵湖和鄂陵湖周边地区;植被 NDVI 显著减少的面积占研究区总面积的 3.14%,主要零星分布在东南部曲麻莱县和南部达日县和久治县等部分区域;植被 NDVI 基本不变的面积占研究区总面积的 76.44%,分布于黄河源区大部分区域.

2.2 NDVI 随地形因子的变化特征

2.2.1 NDVI 随海拔的变化特征

黄河源区地势西高东低,最高海拔达到 6295m,高海拔地区主要分布在黄河源区西北部,低海拔地区主要分布在东南部.如图 5 所示,黄河源区的高程主要分布在 3400~4700m 之间,其所占比例达到整个研究区的 92.26%.植被 NDVI 随着高程带的不同而存在一定的差异,在高程小于 3500m 范围内,植被 NDVI 随着高程的增加而增加;高程在 3500~4100m 之间,植被 NDVI 处于一个较平缓的趋势,之后随着高程的增加迅速下降;高程在 5300m 以上时,植被 NDVI 极小,接近于 0.

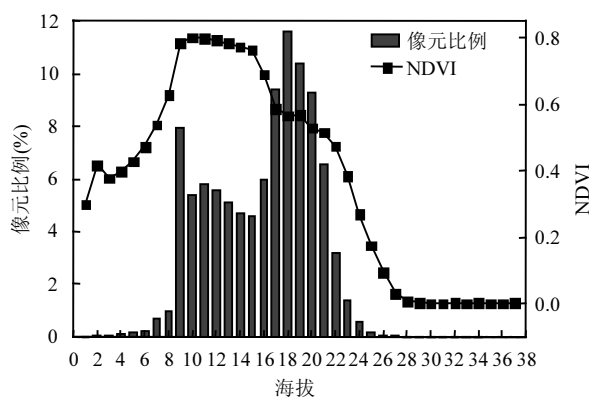


图 5 黄河源区植被 NDVI 随海拔的变化关系

Fig.5 The relationship of vegetation NDVI with altitude in the source region of the Yellow River

1~37 分别代表高程带 2600~2700m、2700~2800m、2800~2900m.....6100~6200m、6200~6300m

2.2.2 NDVI 随坡度的变化特征

由图 6 可知,研究区内坡度小于 20°的区域所占比例较大,占研究区总面积的 72.42%,主要分布在黄河源区的西北部和东南部.植被 NDVI 随着坡度的增加呈现出单峰型曲线,在 24~26°坡度带达到峰值.当坡度小于 24°时,植

被 NDVI 随着坡度的增加而逐渐增大;当坡度大于 26°时,植被 NDVI 随着坡度的增大而逐渐减小.

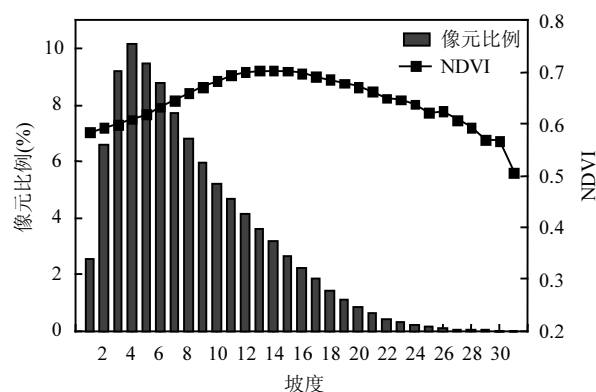


图 6 黄河源区植被 NDVI 随坡度的变化关系

Fig.6 The relationship of vegetation NDVI with slope in the source region of the Yellow River

1~31 分别代表坡度带 0~2°、2~4°、4~6°.....58~60°、60~90°

2.3 气候因子对植被 NDVI 的影响

2.3.1 植被 NDVI 与气温、降水的时间相关性

植被 NDVI 与气温、降水时间序列的相关性采用皮尔逊系数来表示,如表 1 所示,黄河源区植被 NDVI 与气温、降水的相关性均显著,相关系数分别为 0.5109 和 0.5048,均通过了 0.05 的显著性检验,表明气温、降水对植被的生长起促进作用.各植被类型与气温、降水均表现出正相关关系,其中气温与高寒草甸的相关性最好,且通过了 0.05 的显著性检验;降水与高寒灌丛的相关性最好,高寒草甸次之;高寒草原与气温、降水的相关性相对较差,其与降水的相关系数通过了 0.05 的显著性检验,与气温的相关系数不具有统计上的显著性.

2.3.2 植被 NDVI 与气温、降水的空间相关性

由于不同地区特殊的自然条件,植被对气温、降水的响应程度各不相同.由图 7 可知,黄河源区植被 NDVI 与气温、降水在空间上呈现出以正相关为主的趋势.NDVI 与气温、降水的最大偏相关系数分别为 0.922 和 0.907.植被 NDVI 与气温呈现正相关的区域主要分布在黄河源区西北部,表明在这些区域气温是影响植被变化的重要因素;与气温呈现负相关的区域主要分布在黄河源区东南部.植被 NDVI 与降水呈现正相关的区域主要分布在扎陵湖、鄂陵湖西北部及龙羊峡水库周边,与降水呈现负相关的区域主要分布在研究区中部和东南部部分地区.

表 1 黄河源区植被 NDVI 与气温、降水的相关系数
Table 1 The correlation coefficient between vegetation NDVI and temperature and precipitation in the source region of the Yellow River

项目	NDVI	高寒草甸	高寒草原	高寒灌丛
气温	0.5109*	0.5298*	0.3481	0.4748*
降水	0.5048*	0.5101*	0.4580*	0.5188*

注:*指相关系数通过了0.05的显著性检验.

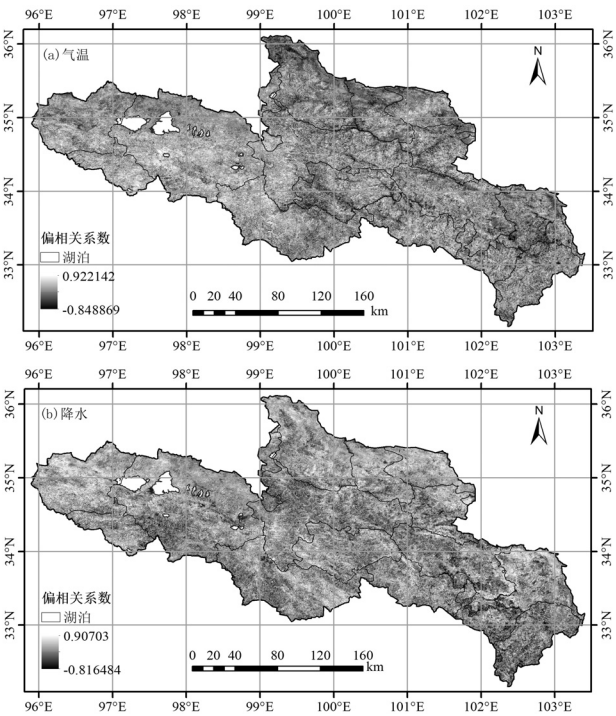


图 7 黄河源区植被 NDVI 与气温和降水的偏相关系数
Fig.7 Partial correlation coefficient between vegetation NDVI and air temperature and precipitation in the source region of the Yellow River

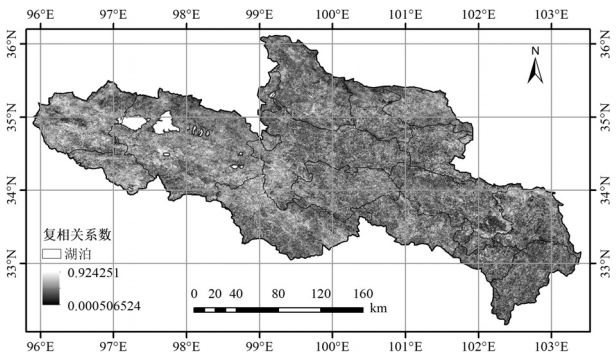


图 8 黄河源区植被 NDVI 与气温、降水的复相关系数
Fig.8 The multiple correlation coefficient between vegetation NDVI and temperature and precipitation in the source region of the Yellow River

除了单一的气候因子对植被的影响之外,植被的变化还受到多种因素共同作用的影响.利用复相

关公式对气温、降水进行计算并用 F 检验法进行显著性检验,分析气温、降水共同作用下植被的变化.由图 8 可知,黄河源区植被 NDVI 与气温、降水的复相关系数介于 0~0.93 之间.整体上,植被 NDVI 与气候因子复相关性较强的区域主要集中在黄河源区西北部的曲麻莱县、玛多县、达日县;复相关性较弱的区域分布在龙羊峡水库周围及若尔盖县等海拔较低的区域.

3 讨论

3.1 植被 NDVI 动态变化

本文基于 MODIS NDVI 数据,采用最大值合成法、趋势分析法研究黄河源区植被的时空变化特征.研究表明,2000~2019 年黄河源区植被 NDVI 呈增长趋势,与刘启兴^[24]、Yang^[33]等的研究结论相一致,表明近年来黄河源区生态环境在不断改善.植被的变化是气候因子和人类活动共同作用的结果^[34],对于生态系统较为脆弱的敏感区域,气候的突变或人类活动的加剧,都会使植被的变化出现较大的波动^[35].黄河源区地处高海拔地区,是我国生态环境脆弱的地区之一.近年来由于人类活动加剧和全球气候变暖,区域内植被变化在不同年份间出现了较大的波动性,整体上植被呈增加趋势.但植被的改善主要依赖于局部地区的生长,而不是整个区域.其中植被 NDVI 增加的区域主要分布在研究区北部,例如泽库县、兴海县和玛多县等;植被 NDVI 减少的区域主要分布在研究区南部和东南部,例如红原县、若尔盖县、达日县和甘德县等.除了气候因素,植被变化与人类活动也有着不可分割的联系.黄河源区在过去很长一段时间一直处于严重超载放牧的状态,过度放牧是引起该区草地生态系统退化的主要原因^[36].过度放牧会破坏黄河源区脆弱的草地生态系统,降低其保水性能,从而导致草场退化,地表裸露,出现沙砾地.近年来黄河源区植被的好转可能与多种生态保护与建设工程有关,例如三江源自然保护区、退耕还草、生态移民等.

3.2 植被与气候因子的相关性

气候变化对草地生态系统的影响主要是通过降水和温度的变化,改变土壤湿度和温度,同时影响光合作用和植物呼吸作用,进而调节草地的生长和生态系统生产力^[37-38].在全球变暖的大背景

下,对植被变化与气候因子的研究呈现多样性,尤其是在年尺度上.通过对黄河源区过去 20a 气温和降水的变化曲线进行分析(图 9),发现近 20a 间研究区气温和降水整体上均呈增加趋势,线性增长率分别为 $0.0344^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $0.4949\text{mm}/\text{a}$,其中气温增长速率与冯晓莉^[39]、刘光生^[40]等的研究结果一致,降水增长率低于两位作者的研究结果,可能是研究区域范围以及研究时间段不一致导致的结果.植被 NDVI 随气温和降水上下波动,与降水相比,NDVI 与气温的变化曲线走势较为一致,表明植被对气温的响应更强烈.

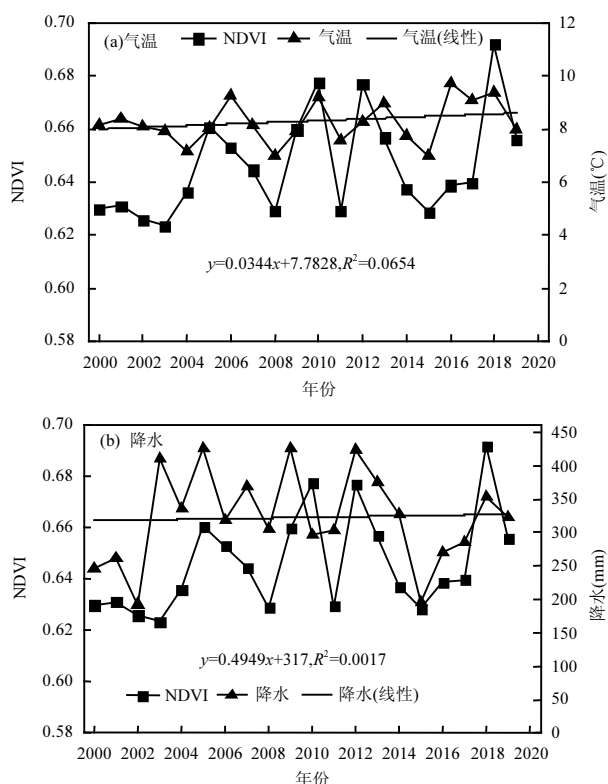


图 9 黄河源区植被 NDVI 与气温和降水的变化曲线

Fig.9 Variation curve of NDVI, temperature and precipitation in the source region of the Yellow River

经过计算可知,植被 NDVI 与气温、降水均呈线性正相关关系,与气温、降水的相关系数均通过了 0.05 的显著性检验(表 1).不同植被类型对气候变化的响应存在差异,其中高寒草甸受到气温的影响较大,高寒灌丛对降水的敏感性强于气温.高寒草甸主要分布在较高海拔地区,气温较低,降水量较大,植被的生长主要受气温的影响,所以高寒草甸对气温的敏感性更强.高寒灌丛主要分布在较低海拔地区,气

温高,蒸发量大,可能由于水分条件的限制,植被的生长受到影响,所以其生长更依赖于降水^[41].结合相关分析,发现近 20a 来黄河源区植被 NDVI 与气温、降水均呈现出以正相关为主的趋势,但与降水相比,气温对黄河源区植被变化的影响更为显著,这与相关研究结果一致^[42-43].在一定程度上,温度的升高可以增强植物的光合强度,延长植物的生长期^[44-45],从而促进植被的生长.因此,黄河源区植被覆盖的提高可能是气候变暖的结果.

3.3 植被与地形因子的相关性

相关研究表明,海拔高度对植被覆盖有一定的影响,植被覆盖与温度的关系随着海拔的变化具有不同的特征^[46-47].在本文的研究结果中,植被 NDVI 随着海拔高度的增加呈现出单峰型曲线,峰值出现在 2700~2800m 和 3500~3600m.植被 NDVI 较大的区域主要集中在 3100~4800m 的中高海拔地区.在高程 <3600m 的范围内,植被 NDVI 与高程呈正相关,NDVI 随着海拔高度的增加而增加.海拔在 3600~5300m 的范围内,植被 NDVI 随着高程的增加呈现出减小的趋势;当海拔 >5300m 时,植被 NDVI 趋于稳定,且数值较低,这可能反映了气候变化条件下高寒植被对环境的响应.分析其原因,可能是在低海拔地区,地势相对平缓,水热条件优越,人类活动较为频繁,严重影响了植被的恢复和生长,使植被覆盖降低.而高海拔地区人口稀少,人类活动相对较少,从而黄河源区植被呈现出增长的趋势,并达到一个峰值.而后,随着海拔的进一步升高,地势陡峭,降水量增加,气温下降,光照强烈,风速大,蒸散迅速,植被的生长受到限制,因此植被呈减少的趋势.

坡度是影响地表物质流动的重要因子,直接影响物质交流与能量转换的方式和程度,改变土壤的基本属性,从而影响植被的分布态势^[48].本文的研究结果表明,随着坡度的增大,植被 NDVI 呈现出先增大后减小的变化趋势,且在 24° ~ 26° 坡度带 NDVI 达到最大值(图 6).相对于坡度较大的区域,坡度平缓更有利于植被的生长,但黄河源区大部分坡度相对较缓的地区受到的人为干扰相对较多,所以水热条件较好的缓坡地区其植被覆盖反而较低.坡度影响地表径流和排水状况,所以坡度越高的区域自然降水就越容易流失,土壤矿质营养等稀薄,植被生长差,植被覆盖也较低.

3.4 本研究的局限性

植被的动态演变受到气候因素、地形因素、土壤因素、人类活动等多个方面因素的共同影响,作用机制复杂.本文由于缺少相关资料,只考虑了地形因子和气候因子对黄河源区植被变化的影响,尚未考虑到其他的因子,若能把影响植被变化的其他因子共同进行研究,则更能深刻地揭示各种因素对植被生长的作用机理.

此外,目前 NDVI 时间序列数据主要有 NOAA/AVHRR NDVI、MODIS NDVI、SPOT/VGT NDVI 等,而研究植被变化及其影响机制的方法也有许多种,例如趋势分析法、相关分析法、残差分析法、Hust 指数法、统计分析法等.本研究使用的数据为 MODIS NDVI,采用的方法为趋势分析法、偏相关分析法、复相关分析法,研究结果因使用的数据、方法不同可能存在一些差异.

4 结论

4.1 黄河源区植被 NDVI 整体呈增加趋势,线性增长率为 0.0014/a,波动性较大.多年平均 NDVI 为 0.65,但空间差异显著,呈现出由东南向西北递减的空间分布格局.NDVI 显著增加的区域主要呈块状分布在黄河源区北部及扎陵湖、鄂陵湖周边地区,NDVI 显著减少的区域主要零星分布在研究区东南部及南部的部分区域.

4.2 高海拔地区主要分布在黄河源区西北部,低海拔地区主要分布在东南部.随着高程的增加,植被 NDVI 呈现出先增加后减少的趋势,但在 3500~4100m 区间 NDVI 变化不显著.随着坡度的增大,植被 NDVI 呈现出单峰型曲线,并在 24~26°坡度带达到最大值.

4.3 2000~2019 年气温和降水整体上均呈上升趋势.NDVI 与气温、降水的相关性均通过了 0.05 的显著性检验,表明气温、降水对植被的生长起促进作用.与降水相比,NDVI 对气温的敏感性更强.

参考文献:

[1] 赵志平,吴晓蕾,李 果,等.黄河源区高寒草地 NDVI 格局与梯度变化 [J]. 草业科学, 2013,30(12):1917-1925.
Zhao Z P, Wu X P, Li G, et al. Spatial pattern and change gradient of alpine grassland in the source region of Yellow River [J]. Pratacultural Science, 2013,30(12):1917-1925.

[2] 赵成章,贾亮红.黄河源区退牧还草工程生态绩效与问题 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009,45(1):37-41.
Zhao C Z, Jia L H. Ecological performance and sustainable problems with the grazing forbidden project in the resource regions of the Yellow River [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009,45(1):37-41.

[3] 曹文炳,万 力,曾亦键,等.气候变暖对黄河源区生态环境的影响 [J]. 地学前缘, 2006,13(1):40-47.
Cao W B, Wan L, Zeng Y J, et al. Impacts of global warming on the eco-environment in the headwater region of the Yellow River [J]. Earth Science Frontiers, 2006,13(1):40-47.

[4] 周华坤,赵新全,温 军,等.黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征 [J]. 草业学报, 2012,21(5):1-11.
Zhou H K, Zhao X Q, Wen J, et al. The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River Source Region [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2012,21(5):1-11.

[5] 封建民,王 涛,齐善忠,等.黄河源区土地沙漠化的动态变化及成因分析——以玛多县为例 [J]. 水土保持学报, 2004,18(3):141-145.
Feng J M, Wang T, Qi S Z, et al. Study on dynamic changes of land desertification and causal analysis in source region of Yellow River—a case study of Maduo county [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(3):141-145.

[6] 杨建平,丁永建,陈仁升.长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录 [J]. 地理学报, 2005,60(3):467-478.
Yang J P, Ding Y J, Chen R S. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Acta Geographica Sinica, 2005,60(3):467-478.

[7] 侯春梅,张志强,刘小伟,等.黄河源区生态环境问题与可持续发展对策 [J]. 中国人口·资源与环境, 2001,11(51):52-54.
Hou C M, Zhang Z Q, Liu X W, et al. Eco-environmental problem in Yellow River source region and corresponding solutions in sustainable development [J]. China Population, Resources and Environment, 2001,11(51):52-54.

[8] 史丹丹,杨 涛,胡金明,等.基于 NDVI 的黄河源区生长季植被时空变化及其与气候因子的关系 [J]. 山地学报, 2018,36(2):184-193.
Shi D D, Yang T, Hu J M, et al. Spatio-temporal variation of NDVI-based vegetation during the growing-season and its relation with climatic factors in the Yellow River Source Region [J]. Mountain research, 2018,36(2):184-193.

[9] 牛玉国,张学成.黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析 [J]. 人民黄河, 2005,27(3):31-36.
Niu Y G, Zhang X C. Preliminary analysis on the change of hydrological and water resources situation in the source area of the Yellow River and its causes [J]. Yellow River, 2005,27(3):31-36.

[10] 顾明林.黄河源区生态环境保护与水资源可持续利用分析 [J]. 甘肃农业, 2019,(9):76-77.
Gu M L. Analysis on ecological environment protection and sustainable utilization of water resources in the source area of the Yellow River [J]. Gansu Agriculture, 2019,(9):76-77.

[11] 林 琳,金会军,罗栋梁,等.黄河源区高寒植被主要特征初探 [J]. 冰川冻土, 2014,36(1):230-236.
Lin L, Jin H J, Luo D L, et al. Preliminary study on major features of alpine vegetation in the source area of the Yellow River (SAYR) [J].

- Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(1):230-236.
- [12] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30years [J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.
- [13] 乔雪梅,刘普幸,任 媛,等.基于遥感的黑河流域生态环境变化特征及成因分析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(9):3962-3971.
- Qiao X M, Liu P X, Ren Y, et al. Analysis of the characteristics and driving factors of ecological environment changes in Heihe River basin based on remote sensing data [J]. China Environmental Science, 2020, 40(9):3962-3971.
- [14] Duo A, Zhao W J, Qu X Y, et al. Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33years [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2016,53:103-117.
- [15] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin [J]. Ecological Indicators, 2015,51:117-126.
- [16] Zhou Y K, Fan J F, Wang X Y. Assessment of varying changes of vegetation and the response to climatic factors using GIMMS NDVI3g on the Tibetan Plateau [J]. PLOS ONE, 2020,15(6).
- [17] Tai X L, Epstein H E, Li B . Elevation and climate effects on vegetation greenness in an arid mountain-basin system of Central Asia [J]. Remote Sensing, 2020,12(10):1665.
- [18] Li L H, Zhang Y L, Wu J S, et al. Increasing sensitivity of alpine grasslands to climate variability along an elevational gradient on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2019, 678:21-29.
- [19] Wei X X, Yan C Z, Wei W. Grassland dynamics and the driving factors based on net primary productivity in Qinghai Province, China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019,8(2):73.
- [20] 吴喜芳,李改欣,潘学鹏,等.黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究 [J]. 资源科学, 2015,37(3):512-521.
- Wu X F, Li G X, Pan X P, et al. Response of vegetation cover to temperature and precipitation in the source region of the Yellow River [J]. Resources Science, 2015,37(3):512-521.
- [21] 徐浩杰,杨太保,曾 彪.黄河源区植被生长季 NDVI 时空特征及其对气候变化的响应 [J]. 生态环境学报, 2012,21(7):1205-1210.
- Xu H J, Yang T B, Zeng B. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(7):1205-1210.
- [22] Zhao F Y, Zhang R J, Chen H, et al. Study of Qinghai-Tibet Plateau uplift response to eco-geological environment based on remote sensing [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012,24(3): 116-121.
- [23] 潘竟虎,刘菊玲.黄河源区土地利用和景观格局变化及其生态环境效应 [J]. 干旱区资源与环境, 2005,19(4):69-74.
- Pan J H, Liu J L. Land use change and its impact in the eco-environment on the Yellow River Source Region during the past 15 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(4):69-74.
- [24] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000-2016年黄河源区植被NDVI变化趋势及影响因素 [J]. 水土保持研究, 2019,26(3):86-92.
- Liu Q X, Dong G T, Jing H T, et al. Change trend of vegetation NDVI and its influencing factors in the source region of the Yellow River in the Period from 2000 to 2016 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):86-92.
- [25] 李海荣.黄河源区水源涵养保护与治理开发研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2011:15-18.
- Li H R. Study on water conservation, protection, management and development in the source area of the Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2011:15-18.
- [26] 郑子彦,吕美霞,马柱国.黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2020,35(1):61-72.
- Zheng Z Y, Lv M X, Ma Z G. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2020,35(1):61-72.
- [27] 刘庆广,陈兴鹏.基于 RS/GIS 的黄河源区土地覆被变化机理与对策研究 [J]. 绿色经济, 2009,0(12):54-59.
- Liu Q G, Chen X P. Land-cover changes' mechanism and some proposals in the source regions of the Yellow River from remote sensing date and GIS technique [J]. Green Economy, 2009,0(12): 54-59.
- [28] 蓝永超,鲁承阳,喇承芳,等.黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应 [J]. 冰川冻土, 2013,35(4):920-928.
- Lan Y C, Lu C Y, La C F, et al. The Fact of Climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its hydrologic response [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(4):920-928.
- [29] 吴 青,周艳丽.黄河源区生态环境变化及水资源脆弱性分析 [J]. 水资源保护, 2002,(4):21-24.
- Wu Q, Zhou Y L. Analysis of ecological environment change and water resource vulnerability in the source region of the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2002,(4):21-24.
- [30] Uppala S S, Dee D P, Kobayashi S, et al. Towards a climate data assimilation system: Status update of ERA-Interim [J]. ECMWF Newsletter, 2008,115:12-18.
- [31] Zhang Y L, Song C H, Band L E, et al. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,191:145-155.
- [32] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015,21(9):3520-3531.
- [33] Yang Z P, Gao J X, Zhou C P, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(6):979-993.
- [34] Tong L J, Liu Y Y, Wang Q, et al. Relative effects of climate variation and human activities on grassland dynamics in Africa from 2000 to 2015 [J]. Ecological Informatics, 2019,53:100979.
- [35] 王伟军,赵雪雁,万文玉,等.2000-2014 年甘南高原植被覆盖度变化及其对气候变化的响应 [J]. 生态学杂志, 2016,35(9):2494-2504.
- Wang W J, Zhao X Y, Wan W Y, et al. Variation of vegetation coverage and its response to climate change in Gannan Plateau from 2000 to 2014 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(9):2494-2504.

- [36] Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. Altitudinal variability of climate-tree growth relationships along a consistent slope of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Dendrochronologia*, 2008,26(2):87-96.
- [37] He C Y, Tian J, Gao B, et al. Differentiating climate-and human-induced drivers of grassland degradation in the Liao River Basin, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,187(1):1-14.
- [38] Horion S, Cornet Y, Ericum M, et al. Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013,20(1):20-32.
- [39] 冯晓莉,刘彩红,林鹏飞,等.1953~2017 年黄河源区气温变化的多尺度特征 [J]. *气候与环境研究*, 2020,25(3):333-344.
- Feng X L, Liu C H, Lin P F, et al. Multi-timescale features for surfaces air temperature in the source region of the Yellow River during 1953~2017 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(3):333-344.
- [40] 刘光生,王根绪,胡宏昌,等.长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析 [J]. *资源科学*, 2010,32(8):1486-1492.
- Liu G S, Wang X G, Hu H C, et al. Climate change characteristics in the source region of the Yangtze River and Yellow River over the Past 45years [J]. *Resources Science*, 2010,32(8):1486-1492.
- [41] 康悦,李振朝,田辉,等.黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究 [J]. *气候与环境研究*, 2011,16(4):505-512.
- Kang Y, Li Z C, Tian H, et al. Trend of vegetation evaluation and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011,16(4):505-512.
- [42] 马守存,保广裕,郭广,等.1982~2013 年黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应 [J]. *干旱气象*, 2018,36(2):226-233.
- Ma S C, Bao G Y, Guo G, et al. Change trend of vegetation and its responses to climate change in the source region of the Yellow River [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018,36(2):226-233.
- [43] Wang M Y, Fu J E, Wu Z T, et al. Spatiotemporal variation of NDVI in the vegetation growing season in the source region of the Yellow River, China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020,9(4):282.
- [44] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,599-600:967-980.
- [45] Liu Z J, Wu C Y, Liu Y S, et al. Spring green-up date derived from GIMMS3g and SPOT-VGT NDVI of winter wheat cropland in the North China Plain [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017,130:81-91.
- [46] Kim Y. Drought and elevation effects on MODIS vegetation indices in northern Arizona ecosystems [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013,34(14):4889-4899.
- [47] Tao J, Xu T Q, Dong J W, et al. Elevation - dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of Southwest China during 1982~2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2017,38(4):2029-2038.
- [48] Ostendorf B, Reynolds J F. A model of arctic tundra vegetation derived from topographic gradients [J]. *Landscape Ecology*, 1998,13(3):187-201.

作者简介：覃巧婷(1997-),女,广西南宁人,桂林理工大学测绘地理信息学院硕士研究生,主要研究方向为生态遥感.发表论文 1 篇.

《中国环境科学》核心影响因子学科排名实现五连冠

根据中国科学技术信息研究所 2016 年 10 月 12 日发布的《2016 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》2015 年核心影响因子 1.812,在环境科学技术及资源科学技术学科排名继续位居第一,在统计的 1985 种中国核心科技期刊中排名 38 位.自 2011 年以来,《中国环境科学》影响因子排名一直保持学科榜首.

《中国环境科学》编辑部