

青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应

孟梦^{1,2,3}, 牛铮^{1,2}, 马超³, 田海峰^{1,2}, 裴杰^{1,2}

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:高原脆弱生态区对全球变化具有放大镜效应,利用长时序遥感数据及气象观测资料探索青藏高原对全球气候变化的响应具有重要意义。以 1982—2012 年 GIMMS NDVI 数据及同时期气象观测数据为数据源,借助于最大值合成、相关性分析和线性回归等数据分析技术,分析了青藏高原 4 000 m 高海拔区域的 NDVI 的变化趋势以及气候响应。结果表明:(1) 近 31 年来,青藏高原对全球变化响应明显,年降水量、温度均呈显著增长趋势($p < 0.05$),NDVI 年变化率为正值、植被覆盖度呈增长趋势,均表明近年来青藏高原植被长势渐变良好。(2) 青藏高原 NDVI 与降水、温度弱相关,温度对高海拔地区 NDVI 的影响超过降水,且降水对青藏高原 NDVI 的影响具有滞后性。(3) 从青藏高原不同区域海拔高度和 NDVI 等值线的分布来看,地势对 NDVI 具有显著影响,海拔高度较高的区域 NDVI 值普遍较小。

关键词:青藏高原;NDVI;最大值合成法;气候变化;海拔高度

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0360-06

Variation Trend of NDVI and Response to Climate Change in Tibetan Plateau

MENG Meng^{1,2,3}, NIU Zheng^{1,2}, MA Chao³, TIAN Haifeng^{1,2}, PEI Jie^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese*

Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: The fragile ecological regions of plateau have zoom function on global change. Using the remote sensing data and meteorological data with long time series to explore the response of Tibetan Plateau to global climate change is of great significance. Variation trend of NDVI and response to climate change in 4 000 m altitude region of Tibetan Plateau were analyzed by means of maximum value composite, correlation analysis and linear regression and using 1982—2012 global inventory modeling and mapping studies normalized difference vegetation index and meteorological data contemporary with GIMMS NDVI. The results show that: (1) Tibetan Plateau has remarkable response to global change, annual precipitation and temperature show the significant growth ($p < 0.05$), the annual change rate of NDVI is positive and vegetation coverage shows growth trend over the past 31 years, suggesting that vegetation in Tibetan Plateau has been growing better; (2) NDVI of Tibetan Plateau is not significantly associated with precipitation and temperature, the effect of temperature on NDVI exceeds precipitation in the regions with high altitudes, and the effect of precipitation on NDVI shows hysteresis with 3 years; (3) the terrain has the significant influence on NDVI depending on altitudes and distributions of NDVI contour lines in different regions of Tibetan Plateau, and NDVI in regions with higher altitude is little.

Keywords: Tibetan Plateau; NDVI; maximum value composite; climate change; altitude

青藏高原总面积约 250 万 km², 约占中国陆地总 面积的 1/4, 平均海拔在 4 000 m 以上, 是中国面积最

大、世界上海拔最高的高原,被称为世界的“第三极”^[1]。其特殊的中低纬度地理位置、地貌条件以及巨大的海拔高度,形成了湿润、干旱、热带和寒带等多种气候类型,几乎囊括了东南亚所有类型的生态系统^[2]。青藏高原具有辽阔的生态脆弱区,生态系统敏感而脆弱,且受人类影响较小,这也成为其受广大生态学者钟爱的一个重要原因^[3]。

近年来,在全球变化和人为因素的共同作用下,青藏高原生态环境产生了一系列负面变化,具体表现为湿地草地面积减小、冻土退化、土地沙漠化严重、水域减少、多种动植物濒临灭绝以及自然灾害增多等现象^[4]。青藏高原作为中国乃至亚洲地区的生态安全屏障,其“一举一动”都备受社会和学术界关注,因此科学有效的评判青藏高原生态环境变化以及探讨其变化规律成为许多学者研究的重要课题^[5]。植被作为高原生态系统中重要的组成部分,植被覆盖变化在一定程度上能够反映生态环境的变化,因此植被覆盖变化研究对青藏高原生态环境变化规律的探索具有深刻意义。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)对植被的生长量和长势十分敏感,是反映地表植被生长状况的重要指标,因而在定性和定量评价植被覆盖及其生长活力时被作为重要的信息源^[6-7]。其定义为近红外波段与可见光红外波段波谱数值之差与两波段波谱数值之和的比值,计算公式为 $NDVI = (NIR - IR) / (NIR + IR)$, NDVI 能较好的反映植被生长状况,且可以消除地形、部分太阳角以及云等因素的影响^[8-9],其次,NDVI 对于干旱和半干旱地区的低植被覆盖信息十分敏感^[10],因此在低植被覆盖区用 NDVI 反映植被信息得到了广泛应用。

近年来,很多学者利用 NDVI 研究青藏高原植被的动态变化及植被与温度、降水等气候因子的关系。李艳芳等^[11]基于 SPOT-Vegetation 植被指数数据,得出了青藏高原 NDVI 总体呈上升趋势,季节变化趋势不明显的结论。向波等^[12]基于全球归一化植被指数(Glob-NDVI)发现近年来青藏高原植被向好的方面发展的现象。杨元合等^[13]利用 NOAA-AVHRR NDVI 数据,发现青藏高原植被指数在生长季阶段显著增加,春季对 NDVI 增长率贡献最大,且不同植被类型在不同的生长季 NDVI 增长率也有所区别。王青霞等^[14]基于 1982—2006 年 GIMMS NDVI 数据,研究表明青藏高原植被与温度降水等气候因子具有相关性,不同等级的植被覆盖度对温度降水的响应程度是不同的,植被生长较好的区域对气候响应更为明显。杨保等^[15]利用冰芯中的花粉以及氧同位素记录,恢复了青藏高原过去 500 多年的植被演

变与气候变化趋势,研究表明当高原为暖干气候时,植被生长范围扩大,高原气候变冷变湿则植被生长范围缩小。陆晴等^[16]基于 GIMMS NDVI 和地面气象站观测数据,发现青藏高原植被与温度降水的相关关系具有空间差异性,在温度较高、热量条件较好的高原东北部地区,降水为植被 NDVI 变化的主导因素;在降水充足的高原东中部地区,温度为植被 NDVI 变化的主导因子。

尽管前人做了大量的研究,但多以行政边界划分研究区域,并且研究区中包括了西藏自治区东南部、四川省西南部、云南省西北部和青海省中部植被十分茂盛的地区,且多数研究所用遥感数据和气象数据时序短,因此不能突出地反映青藏高原高原植被的时空变化。鉴于此,本文以地理界线划分研究区,突破人为划定的行政边界,选取青藏高原海拔 4 000 m 以上的生态极端脆弱敏感区作为本次的研究区域,此外,选用长时间序列 1982—2012 年 GIMMS NDVI 数据、1982—2012 年温度降水数据为数据源,结合多种统计方法,分析青藏高原植被 NDVI 的变化趋势及 NDVI 对气候的响应,旨在揭示全球变化背景下青藏高原植被变化趋势以及气候对高原植被生长的影响机制。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

青藏高原雄踞亚洲东南,西起帕米尔高原,东到横断山脉,北以昆仑山、阿尔金山和祁连山为邻,南抵喜马拉雅山脉,西南边缘部分分属印度、巴基斯坦、尼泊尔、锡金、不丹及缅甸等国,其地理位置大致为 $27^{\circ}17' - 40^{\circ}19'N$, $68^{\circ}52' - 102^{\circ}43'E$ (图 1)。青藏高原气温随纬度和海拔的升高而降低,气温日差大,年平均气温和降水量由东南向西北递减。该区域的气候变化不仅对北半球有巨大的影响,甚至对全球气候变化也具有显著的超前性和敏感性。

1.2 数据及数据预处理

1.2.1 数据 文中所用主要数据:GIMMS NDVI 数据,来源于美国国家航空航天局(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/>),时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$,时间跨度为 1982—2012 年,31 a 的数据共包括了 744 期半月合成图像。GIMMS NDVI 数据经过辐射定标、大气校正、除云、除坏线等处理,是目前研究干旱、半干旱区植被变化质量比较可靠的 NDVI 数据集^[17]。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>)提供的气候资料年值数据集。高程数据来源于 GTOPO30 项目所提供的 DEM 数据,分辨率为 90 m。

1.2.2 数据预处理 首先利用青藏高原矢量数据对 GIMMS NDVI 数据批量裁剪,其次采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)获取青藏高原月度、年度 NDVI 数据,最后对得到的月度、年度 NDVI 值进行计算,获取研究区月度、年度 NDVI 均值并统计入 Excel 表格。

位于青藏高原地区的气象站点数目极少,本文选取该数据集青藏高原地区 102 个地面气象站的气象数据(1982—2012 年)进行克里金插值,获取分辨率为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 的年平均气温和年平均降水量图像,从而获取青藏高原地区年气温、年降水量信息。

使用 ArcGIS 软件中的双线性插值法将 DEM 数据重采样为和 NDVI 相同的分辨率,即 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$,其次在 Global Mapper 中生成海拔为 $4\ 000\text{ m}$ 的等高线,确定本次研究区范围,即青藏高原海拔高于 $4\ 000\text{ m}$ 的区域。

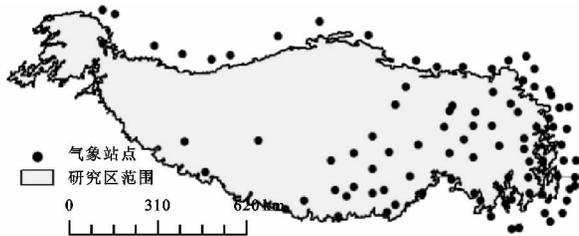


图 1 研究区域及气象站点分布

2 研究方法

(1) 最大值合成法。为了研究青藏高原地区植被在空间上的整体变化特征,采用最大值合成法获取研究区月 NDVI 值和年 NDVI 值,最大值合成法可以有效减少大气中气溶胶、云阴影、太阳高度角等因素的影响^[18]。计算公式如下:

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

式中: MNDVI_i 为第 i 月 NDVI 最大值; $i=1, 2, \dots, 12$ 为月序号; NDVI_1 为第 i 月上半月 NDVI 值; NDVI_2 为第 i 月下半月 NDVI 值。以求取的月 NDVI 值为基础求取年 NDVI。

(2) 植被变化分析。结合植被绿度变化率(Greenness Rate of Change, GRC)^[19]分析青藏高原植被变化趋势。GRC 定义为在一定时间范围内采用最小二乘法拟合年度 NDVI 均值的斜率,它能够反映出每个栅格的变化趋势^[20]。计算公式如下:

$$\text{GRC} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{YMNDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \text{YMNDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left[\sum_{i=1}^n i \right]^2} \quad (2)$$

式中:变量 i 为年份序号,取值范围为 $1 \sim 31$; n 为研

究的时间序列长度, $n=31$; YMNDVI_i 为第 i 年的年度 NDVI 平均值。 $\text{GRC} > 0$ 说明 NDVI 在 31 a 间的变化趋势是增加的,反之则是减少的^[21]。

(3) 植被覆盖度分析。计算公式如下^[22]:

$$f = \frac{\overline{\text{NDVI}} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (3)$$

式中: f 表示植被覆盖度; NDVI_{\min} , NDVI_{\max} 分别表示青藏高原植被整个生长季的 NDVI 最小值和最大值, $\overline{\text{NDVI}}$ 为年度 NDVI 均值。

(4) NDVI 变化率分析。由下式计算:

$$\text{NDVI 变化率} = \frac{\text{直线斜率}}{\text{均值}} \times 31 \times 100\% \quad (4)$$

式中:直线斜率表示 31 a(1982—2012)间 NDVI 年平均值与年份之间求直线回归所得直线的斜率,均值为 31 a 的年度 NDVI 平均值,该变化率在数值上相当于初期值除以研究期间年平均 NDVI 的末期值与初期值之差^[22]。

(5) 相关性分析。此外,考虑到植被生长与地形有密切的关系,借助 GTOP 30DEM 数据,分析了青藏高原归一化植被指数随地形的变化情况。

3 结果与分析

3.1 青藏高原 NDVI 时间序列变化特征

3.1.1 月度 NDVI 变化 从 1982—2012 年月 NDVI 变化趋势(图 2)得知,青藏高原地区归一化植被指数呈现单峰变化趋势,植被的返青期从 4 月下旬开始,持续到 6 月份^[23],一年中植被生长最旺盛的月份在 7—9 月份,12—2 月植被长势比较差,这与李娜等^[24]的研究结果保持一致。植被以年为周期的变化特征显著,与当地多数作物一年一熟的农情相符合。对青藏高原地区 NDVI 均值进行曲线拟合,发现该地区月 NDVI 均值符合 $y = 0.099 + 1.033e^{-\frac{(x-7.68198)^2}{3.136}}$ ($R^2 = 0.957$) 的高斯分布。

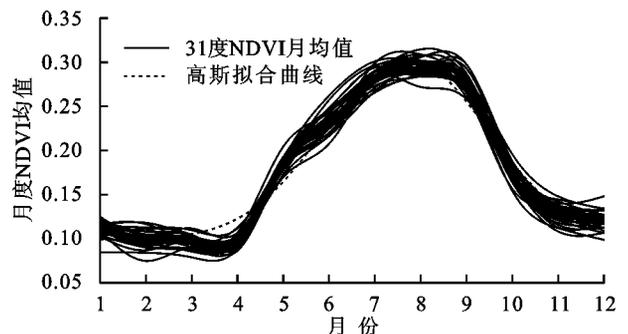


图 2 青藏高原月度 NDVI 变化趋势

3.1.2 年度 NDVI 变化 将利用最大值合成法获取的的年 NDVI 进行计算得到年 NDVI 均值,将其与年份线性回归,得到青藏高原 31 a NDVI 均值变

化趋势(图3)。可知31 a来青藏高原总体年NDVI均值呈缓慢增加趋势($\text{slope}=0.0002$),利用公式(4)可计算得到青藏高原31 a年NDVI变化率为0.029,表明该研究区植被向好的方向发展,与王敏等^[25]得出的结论一致。

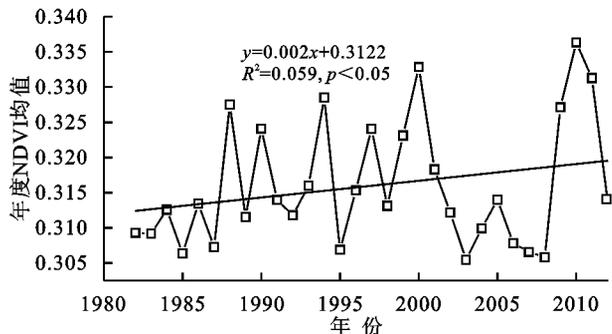


图3 青藏高原年度NDVI变化趋势

植被覆盖度是单位面积内植被(包括叶、茎、枝)垂直投影面积所占的百分比^[26],它是陆面过程模式中最重要参数^[27]。植被覆盖度不仅可以表示植被进行光合作用面积的大小,它在一定程度上对植被的茂密程度、生长态势以及区域生态系统环境变化也有所指示^[28]。由公式(3)计算得到青藏高原31 a植被覆盖度(图4),将其与年份线性回归,可知青藏高原31 a间植被覆盖度呈 $0.0003/\text{a}$ 的速率缓慢增长,其中在1988年、1994年、2000年、2010年有大幅度的跃升。认为全球变化对青藏高原起到了正面影响,植被长势逐渐向好的方向发展,植被覆盖度相应增加^[29]。

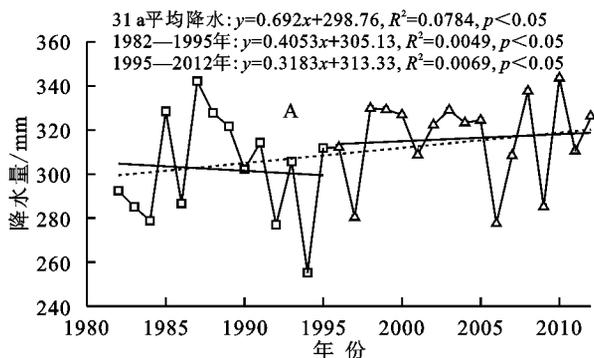


图5 青藏高原31 a降水、温度变化趋势

对青藏高原地区NDVI与降水、温度做相关性分析,见图6A,6B所示。研究区年均NDVI与降水、温度的皮尔逊相关系数分别为0.183,0.281,均呈现不显著的弱相关。相关系数表明该地区温度对植被的影响大于降水对植被的影响。此外,对降水、温度与NDVI做超前滞后分析,发现降水对研究区NDVI有三年的滞后效应,与刘雅勤等^[31]的研究结果保持一致,当降水向后移动三年时,降水与NDVI的相关

3.2 青藏高原NDVI对气候因子的响应

陆气与气候间相互作用的变化,通过降水机制改变和气温变化等对植被的生长和分布产生重要影响。图5A、图5B分别展示了青藏高原1982—2012年31 a年平均气温以及年平均降水量的变化趋势。

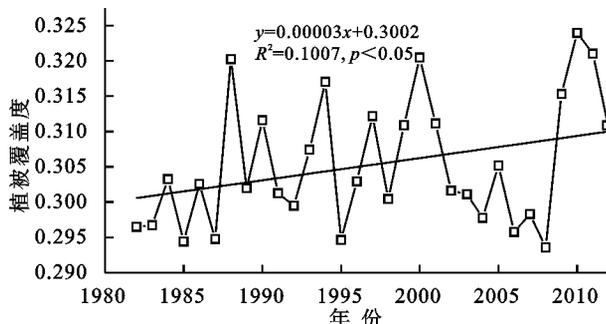
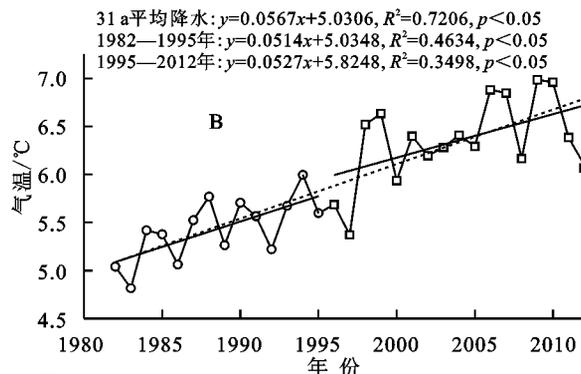


图4 青藏高原31 a植被覆盖度变化趋势

图5A展示了青藏高原1982—2012年共31 a的年平均降水量变化趋势,年最低降水量为255.2 mm(1994年),最高降水量为343.7 mm(2010年),31 a平均降水量为309.9 mm。1982—1995年,年降水量呈下降趋势,1995—2012年,年降水量呈上升趋势,31 a青藏高原地区总体降水量呈逐渐增加趋势,变化率为 $0.223 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

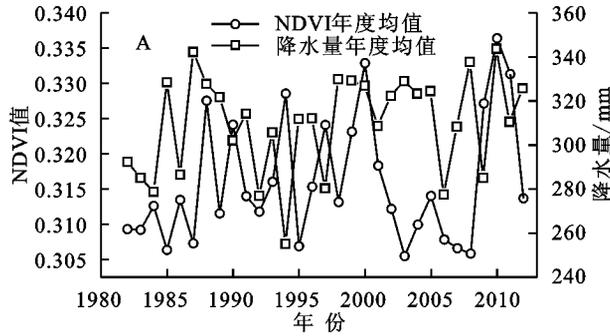
由图5B可以看出,近31 a青藏高原海拔高于4000 m的区域平均气温呈明显增加趋势,年最低气温为 4.82°C (1983年),最高气温为 6.99°C (2009年),增长速率为 $0.018^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。气温增长速率在1995年前后存在转折点,1982—1995年年平均气温增长速率为 $0.037^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,1995—2012年年平均气温增长速率为 $0.029^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,宋辞等^[30]认为青藏高原气温发生突变,整体呈波动上升的趋势。



系数达到最大值0.387。温度对植被指数滞后性影响不明显。

由图6A,6B可以看出,青藏高原地区年NDVI均值在2000—2008年呈现明显下降趋势。对此,分别对2000—2008年的年NDVI均值、年降水量、年气温与年份做一元线性回归分析(图7)。由图7可以看出,2000—2008年年降水量呈下降趋势,年气温呈升高趋势,温度的升高及降水量的减少有可能打破了青藏高原

地区降水量与蒸发量之间的平衡状态,使青藏高原干旱地区更加干旱。已有研究表明^[32],干旱对青藏高原高山草甸植被的生长具有抑制作用,加剧了植被的退化,因此对总体区域植被 NDVI 产生了重要影响。



此外,在 2008—2012 年年 NDVI 均值呈增长趋势,对于这一变化趋势,考虑到时间序列短、所用气象数据和 NDVI 数据集分辨率低、以及青藏高原自然环境复杂等因素,因此尚不能对此情况做出合理的解释。

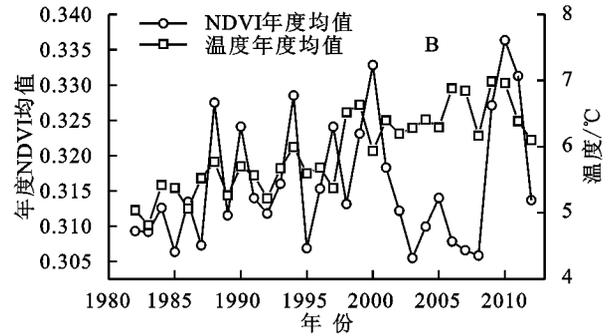


图 6 青藏高原地区 NDVI、降水相关曲线 NDVI(A)、温度相关曲线(B)

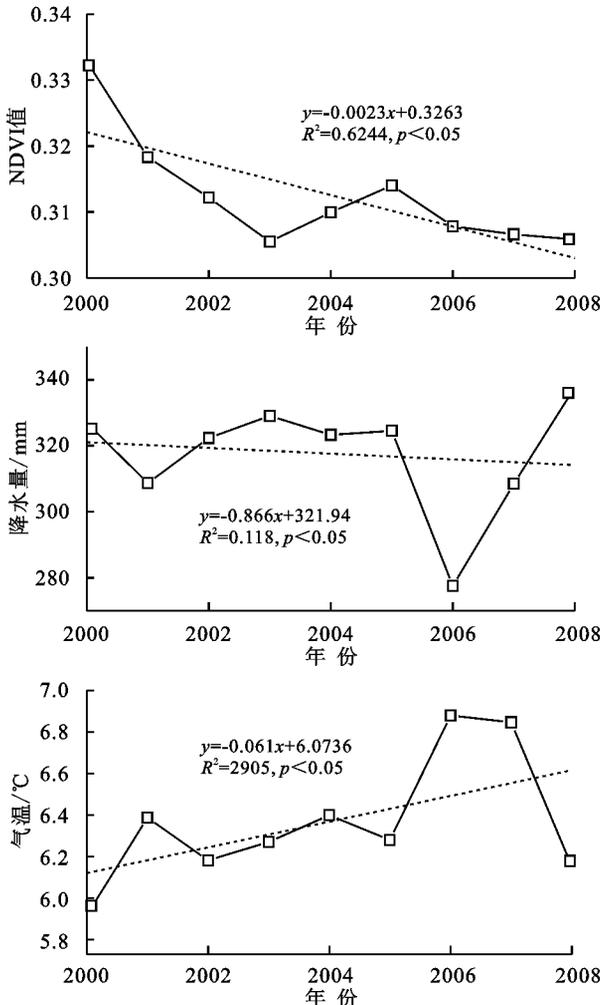


图 7 青藏高原地区(2000—2008)年 NDVI、降水量、气温变化趋势

3.3 青藏高原 NDVI 与海拔的相关性分析

高原植被在全球变化中发挥着重要的指示作用,因此备受关注。高原植被不仅对温度、降水等气候因子响应敏感,而且受海拔高度的影响也很大^[33]。在研究区 2000 年的 NDVI 影像中均匀选取 100 个样本点,分别统计它们所对应的 NDVI 值和高程值,将 NDVI 值和高程

值映射到以 NDVI 值为纵坐标,海拔高度为横坐标的坐标系中(图 8)。结果表明整体 NDVI 与海拔高度呈现相关程度不是很强的负相关,二者皮尔逊相关系数为 -0.309,究其原因可能是植被类型过多,且植被指数受植被覆盖度、海拔高度、气候因子等综合影响,因此使海拔高度的影响变的不是太明显^[34]。

在 ArcGIS 软件中用 2000 年的 NDVI 影像生成间距为 0.1 的等值线(图 9),并将等值线与青藏高原 DEM 影响叠加,可知在青藏高原中部、东南部、以及西北部海拔较低的区域 NDVI 等值线分布比较密集,印证了 NDVI 与海拔相关的事实。

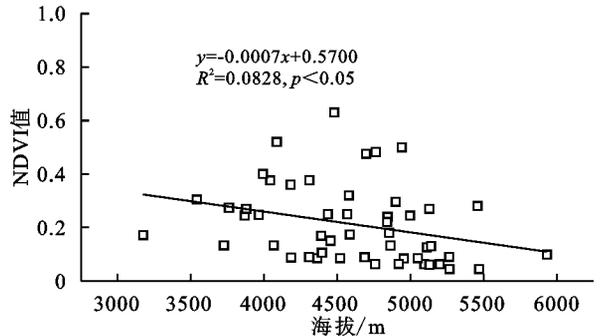


图 8 青藏高原地区 NDVI 与 DEM 相关曲线

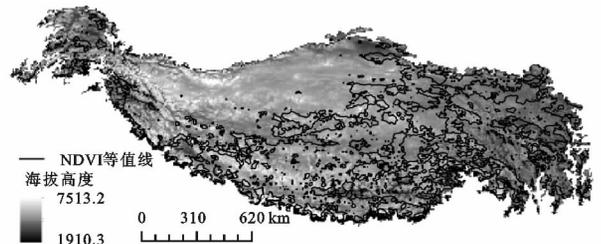


图 9 青藏高原地区 NDVI 等值线与 DEM 叠加

4 结论

(1) 在全球变化影响下,1982—2012 年各研究区 NDVI 值呈现以年为周期的变化特点,年 NDVI 值表明,植被的生长旺季处于每年的 7 月、8 月、9 月份,且年

NDVI 值总体呈增长趋势,年 NDVI 变化率为 0.029,表明青藏高原地区植被生长状况发展良好。

(2) 青藏高原地区 1982—2012 年植被覆盖度呈 0.000 3/10 a 的速率增长,认为全球变化对青藏高原起到了正面影响,植被长势逐渐向好的方向发展,植被覆盖度相应增加。

(3) 青藏高原地区温度、降水都呈增长趋势,在 1995 年之前,年降水量呈下降趋势,1995 年之后,年降水量呈增长趋势。温度在 1995 年之后增长趋势比 1995 年之前慢,总体增长趋势为前高后低。

(4) 研究区 NDVI 与温度降水的皮尔逊相关系数分别为 0.281,0.183,均呈现不显著的弱相关,降水对归一化植被指数的影响有三年的滞后效应,温度对植被指数滞后性影响不明显。

(5) 植被生长受海拔高度影响明显,NDVI 与海拔高度皮尔逊相关系数为-0.309,青藏高原中部、东南部、以及西北部海拔较低的区域植被长势相对较好,且 NDVI 值相对较高。

此外,青藏高原地区地面气象站分布稀疏,即使我们采用了国际相对认可的克里金插值方法,但气象站稀疏地区插值数据的不稳定性仍然是存在的,这种不稳定性对于后期的趋势分析会产生影响,因此,采用更多的气象观测数据来提高青藏高原地区气候插值的结果精度是十分必要的。

参考文献:

- [1] 郑度,赵东升. 青藏高原的自然环境特征[J]. 科技导报, 2017,35(6):13-22.
- [2] 莫申国,张百平,程维明,等. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展,2004,23(2):88-96.
- [3] 梁四海,陈江,金晓媚,等. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律[J]. 地球科学进展,2007,22(1):33-40.
- [4] 姚檀栋,朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展,2006,21(5):459-464.
- [5] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报,2012,67(1):3-12.
- [6] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998,13(4):327-333.
- [7] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [8] 韩瑞梅,刘培,马超,等. 鄂尔多斯植被的 NDVI3g 动态及气候响应[J]. 水土保持通报,2016,36(5):28-33.
- [9] 李春晖,杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J]. 地理研究,2004,23(6):753-759.
- [10] 刁鸣军,夏朝宗. 1982—2013 年准噶尔盆地植被长势变化分析[J]. 林业资源管理,2016(5):39-46.
- [11] 李艳芳,孙建. 青藏高原 NDVI 时空变化特征研究(1982—2008)[J]. 云南农业大学学报,2015,30(5):790-798.
- [12] 向波,缪启龙,高庆先. 青藏高原气候变化与植被指数的关系研究[J]. 高原山地气象研究,2001,21(1):29-36.
- [13] 杨元合,朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报,2006,30(1):1-8.
- [14] 王青霞,吕世华,鲍艳,等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. 高原气象, 2014,33(2):301-312.
- [15] 杨保,唐颌余,李春海,等. 近 550 年来青藏高原中部植被演化与气候变化研究[J]. 科学通报,2010,55(21):2139-2147.
- [16] 陆晴,吴绍洪,赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J]. 地理科学,2017, 37(2):292-300.
- [17] 张戈丽,徐兴良,周才平,等. 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,2011, 66(1):47-58.
- [18] 郭鹏,徐丽萍. 基于 GIMMS—NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 水土保持研究,2014,21(4):97-100.
- [19] 陈志彪,朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征[J]. 福建师大学报:自然科学版,2006,22(4):5-9.
- [20] 仝莉桐,曾彪,王鑫. 山西省不同生态区 NDVI 时空变化及其影响因素[J]. 水土保持研究,2016,23(3):71-76.
- [21] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究,2010,29(11):2004-2016.
- [22] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学,2003,33(6):554-565.
- [23] 刘双俞,张丽,王翠珍,等. 基于 MODIS 数据的青藏高原植被物候变化趋势研究(2000 年—2010 年)[J]. 遥感信息,2014,29(6):25-30.
- [24] 李娜,谢虹. 青藏高原 NDVI 对 ENSO 事件的响应[J]. 遥感技术与应用,2014,29(5):818-822.
- [25] 王敏,周才平,吴良,等. 近 10a 青藏高原干湿状况及其与植被变化的关系研究[J]. 干旱区地理,2013,36(1):49-56.
- [26] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等. 1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2014,21(5):35-40.
- [27] 何建军,余晔,陈晋北,等. 植被覆盖度对兰州地区气象场影响的模拟研究[J]. 高原气象,2012,31(6):1611-1621.

(83.80 L/s),当地下水位抬升时坎儿井出水量持续增加,抬升 2~4 m 时,出水量增加到 9 104~11 758 m³/d(105.37~136.09 L/s),增加了 25.7%~62.4%。说明抬升地下水位可以有效地增加坎儿井的出水量,是保护坎儿井的有效方法。

表 2 地下水位抬升时坎儿井出水量计算结果表

地下水位 抬升量/m	坎儿井出水 量/(m ³ ·d ⁻¹)	出水量增量/ (m ³ ·d ⁻¹)	增加 百分比/%
0.0	7240	0	0.0
1.0	7877	637	8.8
2.0	9104	1864	25.7
3.0	10617	3377	46.6
4.0	11758	4518	62.4
5.0	13001	5761	79.6

5 结论

(1) 在天山南麓冲积扇上修筑低拦洪坝,促使冲积扇上洪水回灌地下,抬升地下水位,不仅可以减轻吐鲁番北盆地的防洪压力,而且可以增加坎儿井的出水量,是坎儿井水源保护的“开源”之策和“治本”措施,合理有效。

(2) 计算表明采用山前冲积扇蓄洪入灌后,在考虑地下水下游排泄坡度在 0.4%~2.0%之间时,可以将地下水抬升 2~4 m,相应附近的坎儿井出水量可以增加 62.4%~25.7%,效果非常明显。

参考文献:

[1] 邢义川,张爱军,王力,等.坎儿井地下水资源涵养与保

护措施研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(2):129-137.

[2] 张伟,张爱军,邢义川,等.机井和地下水位对坎儿井水量影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2015,33(5):442-449.

[3] 买尔旦·买买提,张爱军,邢义川,等.辐射管技术在坎儿井水量控制中的应用及数值模拟[J].农业工程学报,2015,31(9):92-99.

[4] 爱斯卡尔·买买提.吐鲁番地区坎儿井的保护与利用[D].西安:长安大学,2010.

[5] 裴建生,王新,艾尼瓦尔·卡德尔,等.新疆吐鲁番盆地的坎儿井保护利用及工程措施[J].干旱区地理,2008,31(5):737-742.

[6] 崔峰,王思明,赵英.新疆坎儿井的农业文化遗产价值及其保护利用[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):47-55.

[7] 高春莲.谈吐鲁番坎儿井的利用与保护[J].边疆经济与文化,2012(3):76-77.

[8] 麦麦提.论新疆坎儿井的环境资源价值及其保护[J].甘肃农业,2007(10):33-34.

[9] 邓正新,胡居红.吐鲁番盆地坎儿井的利用与保护探讨[J].干旱环境监测,2008,22(3):165-168.

[10] 谢定义,姚仰平,党发宁.高等土力学[M].北京:高等教育出版社,2008.

[11] Fredlund D G, Rahardjo H.非饱和土土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

[12] 谢定义.非饱和土土力学[M].北京:高等教育出版社,2015.

[13] 张爱军,邢义川,汪海涛,等.基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J].水利学报,2017,48(1):41-51.

(上接第 365 页)

[28] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

[29] 张宪洲,杨永平,朴世龙,等.青藏高原生态变化[J].科学通报,2015,60(32):3048-3056.

[30] 宋辞,裴韬,周成虎.1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J].地理科学进展,2012,31(11):1503-1509.

[31] 刘雅勤,范广洲,周定文,等.青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J].气象学报,2007,65(6):959-967.

[32] 王敏,周才平,吴良,等.近 10a 青藏高原干湿状况及其与植被变化的关系研究[J].干旱区地理,2013,36(1):49-56.

[33] 魏伟,赵军,王旭峰.天祝高寒草原区 NDVI、DEM 与地表覆盖的空间关系[J].干旱区研究,2008,25(3):394-401.

[34] 万红,李希灿,万剑华,等.青藏高原地区不同植被类型 MODIS 植被指数与海拔高度的关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):39-44.