

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201907036

杨荣荣, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡主要河谷 NDVI 时空变化及影响因素分析 [J]. 广西植物, 2021, 41(3): 429–437.
YANG RR, CAO GC, CAO SK, et al. Temporal and spatial variations of NDVI and analysis of influencing factors in main valleys of southern slope of Qilian Mountains [J]. *Guihaia*, 2021, 41(3): 429–437.



祁连山南坡主要河谷 NDVI 时空变化及影响因素分析

杨荣荣^{1,2,3}, 曹广超^{2,3*}, 曹生奎^{1,2,3}, 兰 垚^{1,2,3}, 张 卓^{1,2,3}, 陈治荣^{1,2,3}

(1. 青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008; 3. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008)

摘 要: 为进一步保护祁连山生态环境及合理开发利用河流沿线的植被资源, 该文基于 MODIS 数据的 NDVI 产品及 DEM 数据集, 对祁连山南坡主要河流谷地 2000—2018 年植被生长季的 NDVI 时空分布特征进行了研究, 并提取研究区的主要地形因子, 分析其对河流谷地植被生长季 NDVI 的影响。结果表明: 随着河流两侧缓冲区距离逐渐增大, 各年份的 NDVI 值呈现先增加后平稳再减少的分布特点; 2000—2018 年研究区河谷 NDVI 的变化趋势基本一致, 整体表现出 2010 年出现了近 20 年的峰值; 祁连山南坡河流谷地 NDVI 值, 从斜坡 ($16^{\circ}\sim 25^{\circ}$) 至急坡 ($41^{\circ}\sim 45^{\circ}$) 增加的速率最大, 说明该区间为 NDVI 值突变区间。2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地的 NDVI 时空分布, 可能受地形、气温和降水等自然因素影响较大, 其受人为干扰因素影响较小, 其中降水并非影响研究区河谷植被 NDVI 分布的主导因素, 而气温可能是影响研究区河谷植被 NDVI 分布的主导因素。在地形因子中, 存在较适合植被生长的特定坡度区间, 且太阳辐射能量的增加有利于植被的生长。

关键词: 河流谷地, NDVI, 时空分布, 影响因素

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2021)03-0429-09

Temporal and spatial variations of NDVI and analysis of influencing factors in main valleys of southern slope of Qilian Mountains

YANG Rongrong^{1,2,3}, CAO Guangchao^{2,3*}, CAO Shengkui^{1,2,3}, LAN Yao^{1,2,3},
ZHANG Zhuo^{1,2,3}, CHEN Zhirong^{1,2,3}

(1. College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. MOE Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Xining 810008, China; 3. Key Laboratory of Qinghai Province Physical Geography and Environmental Processes, Xining 810008, China)

收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404304); 青海省科技厅重大专项(2019-SF-A12); 国家自然科学基金(41361005); 青海省自然科学基金(2018-ZJ-903) [Supported by the National Key Research and Development Plan Project(2017YFC0404304); Key Specital Foundation/Project of Science and Technology Department of Qinghai Province(2019-SF-A12); the National Natural Science Foundation of China(41361005); Qinghai Natural Science Foundation(2018-ZJ-903)]。

作者简介: 杨荣荣(1992-), 硕士研究生, 研究方向为遥感与地理信息系统应用, (E-mail) 1370532120@qq.com。

通信作者: 曹广超, 教授, 博士研究生导师, 主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究, (E-mail) caoguangchao@126.com。

Abstract: In order to protect the ecological environment of the Qilian Mountains and utilize the vegetation resources along the river, the spatial and temporal distribution characteristics of NDVI in the main growing valleys of the southern slope of Qilian Mountains on the vegetation growing season from 2000 to 2018 based on the NDVI products and DEM datasets of MODIS data, and extracts the main topographic factors of the study area was analyzed. The results were as follows: With the increasing distance of buffers on both sides of the river, the NDVI values of each year showed increase first and then level off and then decreased. The trend of NDVI was basically same and the peak of the past 20 years appeared in 2010 in the study area from 2000 to 2018. The NDVI value of the river valley increased from the slope (16° – 25°) to the steep slope (41° – 45°) in the southern slope of the Qilian Mountains, indicating that the interval is the NDVI value mutation interval. The spatial and temporal distribution of NDVI may be affected by natural factors such as topography, temperature and precipitation, which were less affected by human disturbance factors, and the precipitation did not affect the NDVI distribution, and temperature may be the dominant factor affecting the distribution of NDVI in the valleys of the southern slope of Qilian Mountains from 2000 to 2018. Among the topographic factors, there was a specific slope interval that suitable vegetation growth, and the increase of solar radiation energy is beneficial to the growth of vegetation.

Key words: river valley, NDVI, time and space distribution, influencing factor

陆地是人类进行生产生活的重要场所,而植被又是陆地生态系统中重要的一部分。鉴于此,研究陆地生态系统植被的健康状况对人类的生产生活具有非凡的意义(赵鲁青,2011;袁文平等,2014)。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是判断地球表面植被覆盖度高低与生长健康与否的重要指标,可用于监测植被的生长动态变化及其对全球气候变化的响应(李小燕等,2013;王永锋和靖娟利,2017)。Aburas et al.(2015)以马来西亚芙蓉市的 NDVI 为基础数据源,分析了该地区土地覆盖率和土地利用的变化情况;Maxwell & Sylvester(2012)以美国西南部的堪萨斯州为例,对其 NDVI 进行了研究;国内众多学者基于 MODIS 数据、Landsat 数据及地形因子等数据,采用相关系数法、非参数检验方法曼—肯德尔法(Mann-Kendall)检验法、斜率变化趋势分析法及复直线回归分析法等一系列时间与空间分析方法,研究了山东省、青海高原、黄土高原、黄河源区、和田绿洲及西双版纳等地的归一化植被指数(NDVI)的时空变化特征及其驱动因子(宋鹏飞等,2019;陈海喜等,2019;刘凤和曾永年,2019;刘咏梅等,2019;刘启兴等,2019;董弟文等,2019;赵桔超等,2019);Gao et al.(2013)利用 MODIS 时间序列数据,对内蒙古草原 2001 年至

2011 年的地上生物量及其时空变化进行了估算。目前,国内外学者对归一化植被指数进行研究较多,可见归一化植被指数在植被研究中的重要性,而国内外学者对河流谷地 NDVI 的研究少有报道,因此河流谷地 NDVI 的变化规律有待于研究。同时,众多学者对 NDVI 影响因素的研究主要集中在气候因素的研究,而对地形因素的研究相对较少,尤其在地形地貌相对复杂的青藏高原,地形因素对植被生长季 NDVI 的影响程度需要进一步探究。鉴于此,本文基于 MODIS 数据对祁连山南坡主要河流谷地植被生长季 NDVI 的时空分布特征及其影响因素进行了研究,进一步为研究区主要河流谷地植被的动态监测提供数据支撑。

1 研究区概况

祁连山南坡雄踞于青藏高原东北边缘,处于黄土高原向青藏高原的过渡地带,集青藏高原和黄土高原的特征于一体(刘贤德和张学龙,2004)。研究区总面积约为 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔为 2 257 ~ 5 235 m(袁杰等,2019),冬季漫长且寒冷,夏季短暂而温凉,年平均降水量为 400 mm,年均气温为 -5.9°C (牛赟等,2014)。祁连山南坡地表径流丰富,黑河、大通河、托勒河和八宝河等河流自西北向东南贯穿整个研究区(图 1)。

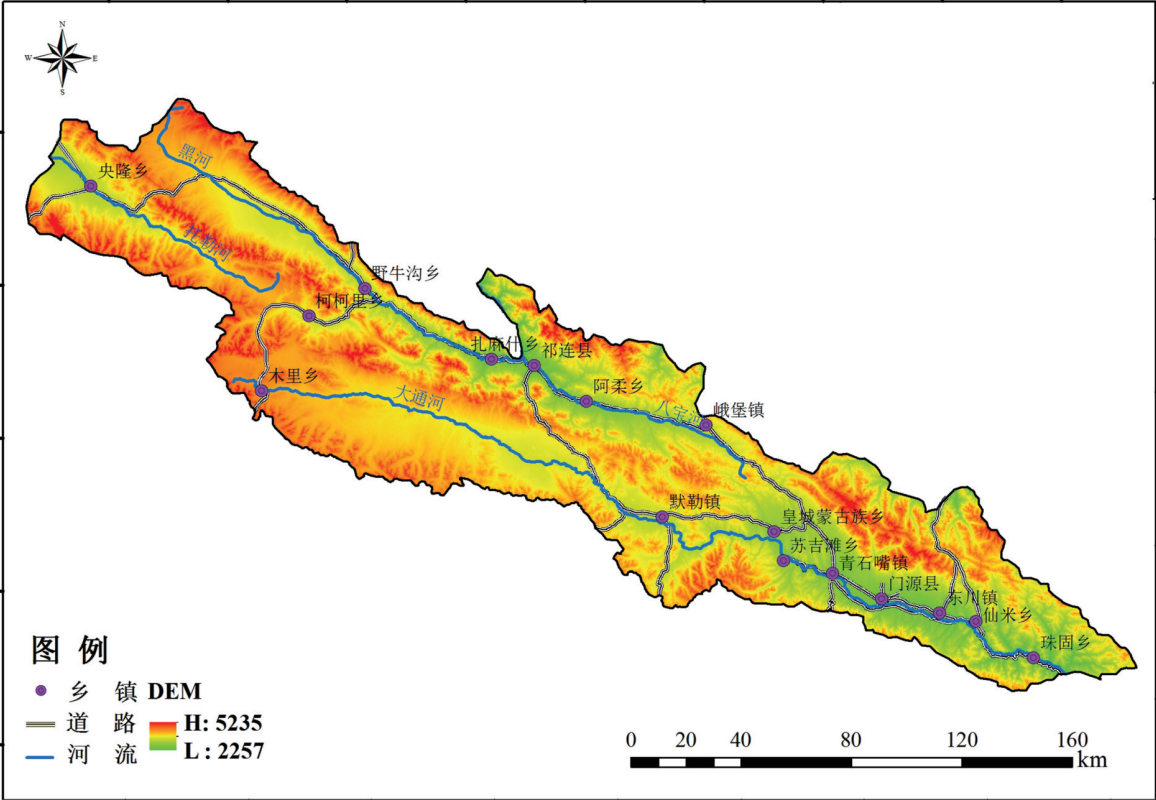


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 是美国宇航局研制的大型空间遥感仪器, 主要用于了解全球气候的变化情况, 可实现对地球表面各大圈层长时间序列的观测 (苏慧敏等, 2019)。文章中所研究的 NDVI 数据来源于 NASA 网站的 MOD13 数据产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), 行列号为 h25v05 和 h26v05。借助 ENVI 5.3 软件平台对 NDVI 数据进行格式转换, 并采用月最大化合成法 (monthly maximum value composite, MVC) 获取植被生长季的年 NDVI, 对 NDVI 数据进行投影、重采样等操作, 并利用祁连山南坡河流缓冲区矢量文件进行裁剪, 得到研究区 NDVI 数据。

2.2 河流的选取及缓冲区的确定

从古至今以来, 河流与人类文明的起源就具有密切的关系 (周长勇, 1992)。河流两侧一定范

围内是人类活动的重要区域, 同时也是植被分布范围较广、长势较好区域 (梁轶等, 2007)。因此, 选取祁连山南坡主要河流两侧的缓冲区植被生长季的 NDVI 进行研究, 对研究区河流两侧植被生长的动态监测具有指示性的意义。研究区内分布的黑河、八宝河、托勒河及大通河等河流贯穿于整个研究区, 呈现西北东南流向。本文同样以主要河流为基准线, 以 0.5 km 作为最小缓冲区距离, 以 8 km 作为河流两侧最大的影响范围, 依次等距离划分为 16 个缓冲区 (蒋蕊竹等, 2011; 林志东和武国胜, 2015), 研究各个缓冲区植被生长季 NDVI 的空间分布及其影响因素。

3 结果与分析

3.1 祁连山南坡主要河流谷地植被生长季 NDVI 的时空分布

2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地各缓冲区的 NDVI 时空分布特点如图 2 所示。从图 2

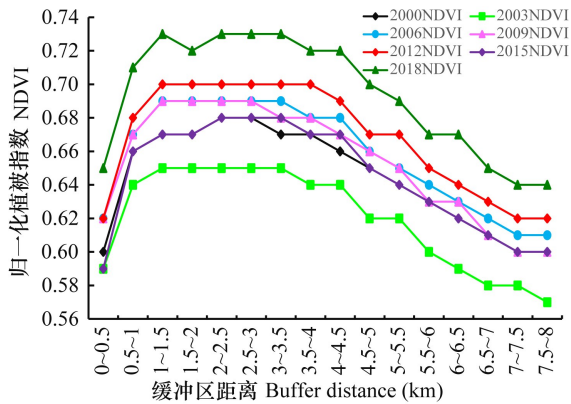


图 2 2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地各缓冲区的 NDVI 时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of NDVI in buffer zones of main river valleys on the southern slope of Qilian Mountains from 2000 to 2018

可以看出,随着河流两侧缓冲区距离逐渐增大,各年份的 NDVI 呈现先增加后平稳再减少的分布特点,且变化趋势基本一致。在距离河流 0~1.5 km 的范围内,随着缓冲区距离的增加,NDVI 值逐渐增大,其范围在 0.59~0.73 之间,在此距离区间内,河流谷地的 NDVI 与距离呈正相关关系;在距离河流 1.5~4 km 的范围内,随着缓冲区距离的增加,NDVI 值达到稳定状态,且此距离区间属于河流谷地 NDVI 的高值区;在距离河流 4~8 km 的范围内,随着缓冲区距离的增加,NDVI 值逐渐减小,其范围在 0.57~0.72 之间,在此距离区间内,河流谷地的 NDVI 与距离呈负相关关系。2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地的 NDVI 值分布在 0.57~0.73 之间。2003 年河流谷地各缓冲区的 NDVI 值均低于其他年份,2018 年河流谷地各缓冲

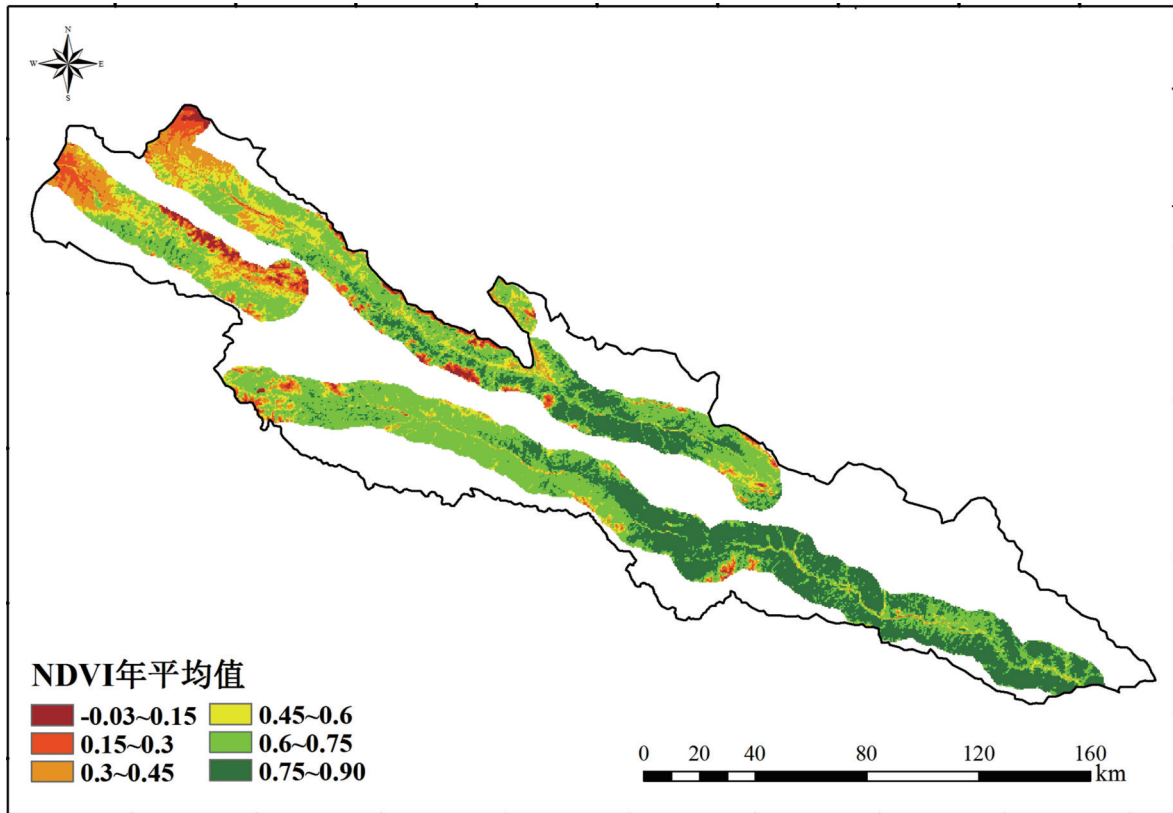


图 3 2000—2018 年祁连山南坡河流谷地植被生长季 NDVI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI in the vegetation growing season in river valley on the southern slope of Qilian Mountains from 2000 to 2018

区的 NDVI 值均高于其他年份,且其他各年份 NDVI 值在各缓冲区范围内均低于或高于某年份

的 NDVI 值。个别年份某个缓冲区距离区间内会出现 NDVI 突然增加或突然减少的现象,这可能由

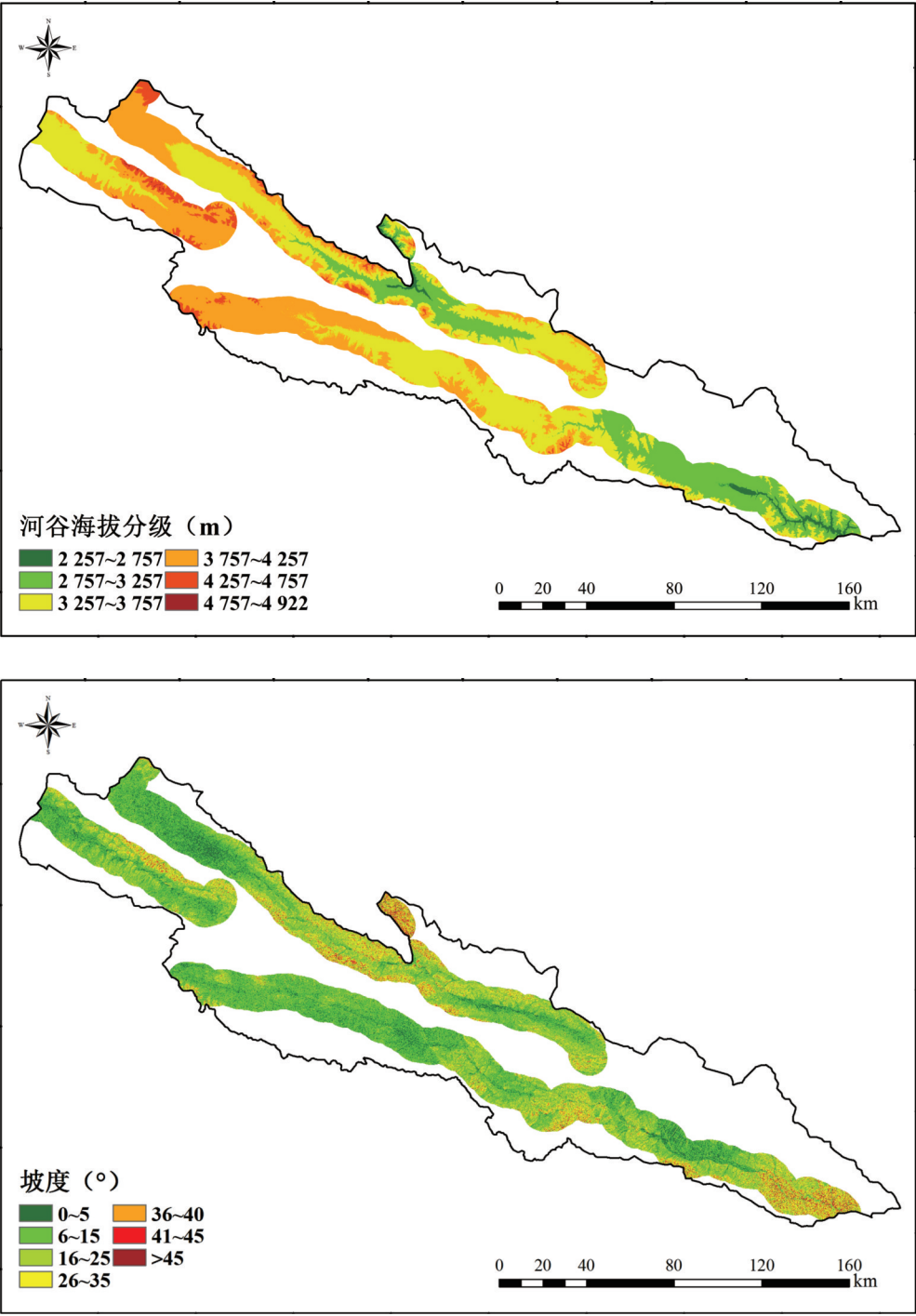


图 4 祁连山南坡河流谷地地形空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of river valleys in the southern slope of Qilian Mountains

于此区间范围人类放牧活动的增加或减少造成的。

祁连山南坡植被生长季 NDVI 变化呈现由西北向东南逐渐增加的特点 (图 3)。其中,低值区 (−0.03~0.45) 主要位于祁连县的央隆乡、野牛沟

乡及研究区内部分高海拔地区,占整个研究区面积的 14.79%;中值区 (0.45~0.75) 遍布整个研究区,但主要分布于祁连县的野牛沟乡、柯柯里乡、天峻县木里镇,占整个研究区面积的 56.00%;高值区 (0.75~0.9) 主要分布于门源县、祁连县的扎

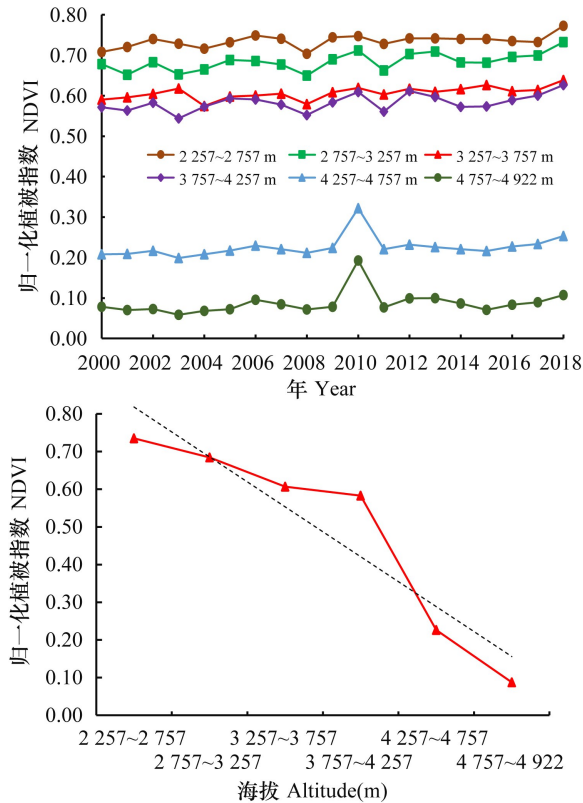


图 5 2000—2018 年祁连山南坡河流谷地不同海拔区间 NDVI 的分布
Fig. 5 Distribution of NDVI at different altitudes in the valley of the southern slope of Qilian Mountains from 2000 to 2018

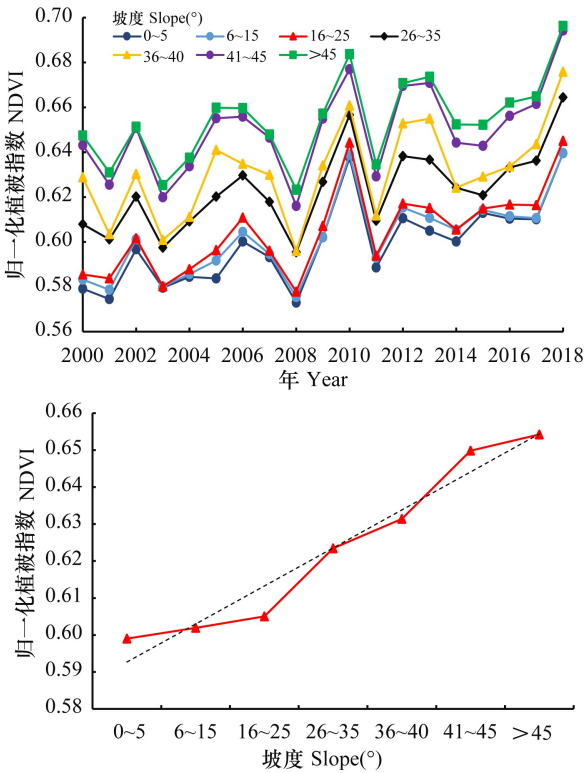


图 6 2000~2018 年祁连山南坡河流谷地不同坡度区间 NDVI 的分布
Fig. 6 Distribution of NDVI in different slopes of river valley in the southern slope of Qilian Mountains from 2000 to 2018

麻什乡、阿柔乡、峨堡镇及默勒镇,占整个研究区面积的 29.21%。这可能是由于海拔对植被生长的影响,随着海拔的升高,植被覆盖度会降低,即 NDVI 会减少。

3.2 地形因素对祁连山南坡主要河流谷地 NDVI 的影响

3.2.1 海拔对河流谷地 NDVI 的影响 祁连山南坡主要河流谷地 2000—2018 年植被生长季 NDVI 随着海拔的逐渐升高呈现逐渐降低的趋势(图 4,图 5)。2000—2018 年研究区河谷 NDVI 的变化趋势基本一致,整体表现出在 2010 年出现了近 20 年的峰值,其在海拔 4 257~4 922 m 的区间内表现得尤为突出,而其他年份的 NDVI 变化趋势较为平缓。2000—2018 年研究区河谷 NDVI 值在不同的海拔区间内差距较大。其中,在 2 257~4 257 m 的

海拔区间内,NDVI 值分布在 0.54~0.77 之间;在 4 257~4 922 m 的海拔区间内,NDVI 值分布在 0.06~0.32 之间;从 3 757~4 257 m 区间至 4 257~4 757 m 区间 NDVI 值降低的速率最大,表明该区间为 NDVI 值突变区间。

3.2.2 坡度对河流谷地 NDVI 的影响 祁连山南坡主要河流谷地 2000—2018 年植被生长季 NDVI 随着坡度的逐渐升高呈现逐渐增加的趋势(图 4,图 6)。2000—2018 年研究区河谷各坡度区间 NDVI 的变化趋势基本一致,整体在 2010 年出现了近 20 年的峰值,而其他年份的 NDVI 变化趋势较为平缓。2000—2018 年研究区河谷 NDVI 值在不同的坡度区间内存在差距,其 NDVI 值分布在 0.57~0.70 之间;且从斜坡(16°~25°)至急坡(41°~45°)NDVI 值增加的速率最大。

4 讨论与结论

4.1 研究区植被生长季 NDVI 的时空分布

本研究得出的植被生长季 NDVI 时空分布规律,主要由于在距离河流最近的缓冲区范围内,河流在流经当地的过程中会在两岸堆积大量的泥沙,土壤类型主要以沙质土壤为主,其有机质含量较小,因此植被发育欠佳,NDVI 值较小;随着缓冲区距离进一步增加,河流为植被提供的水分适宜,且土壤发育良好适宜植被生长,因此其 NDVI 达到最大值;随着缓冲区距离的再次增加,河流供给水分的能力减弱,植被未能得到充沛的水源,其生长能力减弱,NDVI 的值再次达到较小。2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地的 NDVI 时空分布,可能受气温和降水等自然因素影响较大,受人为干扰因素影响较小。本研究与苏军德和李国霞(2019)对祁连山区植被 NDVI 的时空变化的研究结果相似,同样得出 NDVI 的时空变化特征受到气象因子和人类活动的共同影响的结论。但国内其他学者对 NDVI 时空变化规律的研究主要集中在应用趋势分析法、一元线性回归法等传统的研究方法(李新鸽等,2018;闫俊杰等,2018;位宏等,2019),而本研究中所提及的植被生长季 NDVI 的空间分布主要是以河流为基准线的缓冲区内 NDVI 值的变化,这在相关的研究中是少有报道的。

4.2 地形因素对研究区 NDVI 的影响

众多研究表明气温与降水对植被 NDVI 的影响较大(岳喜元等,2019;尤南山等,2019;李舒婷等,2019),但地形因子对植被 NDVI 的影响目前鲜有研究。本研究选取海拔、坡度等主要地形因子,将海拔按照等间隔标准、坡度按照平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡和险坡等标准划分为不同的区间,研究各区间内地形因子对河流谷地 NDVI 的影响。

随着海拔的逐渐升高,植被生长季 NDVI 呈现逐渐降低的趋势,这与熊亚兰等(2018)所得出的结论相反,其认为高程与 NDVI 呈极显著正相关关系,且随着海拔的逐渐升高,植被受到人类活动的影响较小,有利于植被生长。而本研究认为,由于

青藏高原的海拔较高,随着海拔的逐渐升高,气温变化幅度较大,海拔对植被生长的影响远远大于人类活动的影响。然而,此变化规律可能与当地气温的相关性大于与降水的相关性。海拔每升高 100 m 气温下降 0.6 °C,这与本研究结果 NDVI 随着海拔的变化规律一致,均呈现降低的趋势;而随着海拔的逐渐上升,降雨量呈现先增加后降低的“单峰型”曲线,与本研究结果 NDVI 随着海拔的变化规律不一致。2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地 NDVI 随着海拔的变化中,气象要素中降水并非主导因素,而气温可能是影响研究区河谷植被 NDVI 分布的主导因素,人类活动对其影响较小。但该研究所得出的随着海拔逐渐升高,植被 NDVI 值在逐渐减少与宋鸿等(2019)所得出的结论具有相似性,其认为在高程大于 400 m 的区域,NDVI 随高程增加呈现减小趋势,而由于研究区位于青藏高原其海拔最低值为 2 257 m,因此其植被 NDVI 值随着海拔的逐渐增加呈减小趋势的结论具有一定可靠性。

研究区不同坡度区间 NDVI 的变化趋势说明不同坡度 NDVI 值的变化受客观因素影响较大。这与崔晓临(2019)所得出的坡度在 0°~45°的范围内,随着坡度的逐渐增加,NDVI 值呈增加趋势的结论具有相似性。这主要是由于研究区位于青藏高原,太阳辐射强度较大,随着坡度的逐渐增加,植被接收太阳辐射量在逐渐变化,当坡度达到 45°时,植被接收到的太阳辐射能量越大,因此植被的 NDVI 值最大。2000—2018 年祁连山南坡主要河流谷地存在适合植被生长坡度区间,且太阳辐射能量的增加有利于植被的生长,青藏高原植被 NDVI 随着坡度变化的主导因素为太阳辐射量。

参考文献:

- ABURAS MM, ABDULLAH SH, RAMLI MF, et al., 2015. Measuring land cover change in Seremban, Malaysia using NDVI Index [J]. *Procedia Environ Sci*, 30:238–243.
- CHEN HX, ZHONG JS, LAN AJ, et al., 2019. Analysis of temporal and spatial variation of NDVI in Guizhou Province based on landform factors [J]. *Guizhou Sci*, 37(2): 36–43. [陈海喜, 钟九生, 兰安军, 等, 2019. 基于地形地貌

- 因子的贵州省 NDVI 时空变化分析 [J]. 贵州科学, 37 (2): 36-43.]
- CUI XL, CHENG Y, WANG JC, 2019. Correlation analysis between NDVI and topographic factors in Qinling Area [J]. Beijing Survey Map, 33(1): 24-29. [崔晓临, 程贇, 王嘉诚, 2019. 秦岭地区 NDVI 与地形因子的相关性分析 [J]. 北京测绘, 33(1): 24-29.]
- DONG DW, ABDHRM HALIWANG, WANG DW, et al., 2019. Spatio-temporal variations in vegetation cover in Hotan Oasis from 1994 to 2016 [J]. Acta Ecol Sin, 39(10): 3710-3719. [董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 等, 2019. 1994—2016 年和田绿洲植被覆盖时空变化分析 [J]. 生态学报, 39(10): 3710-3719.]
- GAO T, XU B, YANG XC, et al., 2013. Using MODIS time series data to estimate aboveground biomass and its spatio-temporal variation in Inner Mongolia's grassland between 2001 and 2011 [J]. Internat J Remote Sensing, 34 (21): 7796-7810.
- JIANG RZ, LI XQ, ZHU YA, et al., 2011. Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data [J]. Acta Ecol Sin, 31 (22): 6708-6716. [蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等, 2011. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征 [J]. 生态学报, 31(22): 6708-6716.]
- LI ST, ZHOU Y, WANG SX, et al., 2019. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to precipitation and temperature in Inner Mongolia from 2001 to 2015 [J]. J Univ Chin Acad Sci, 36(1): 48-55. [李舒婷, 周艺, 王世新, 等, 2019. 2001—2015 年内蒙古 NDVI 时空变化及其对降水和气温的响应 [J]. 中国科学院大学学报, 36(1): 48-55.]
- LI XG, ZHU LQ, CHEN CN, 2018. Analysis on the temporal and spatial variations of vegetation NDVI in Henan Province from 2000 to 2015 [J]. J Henan Univ (Nat Sci Ed), 48 (5): 554-564. [李新鸽, 朱连奇, 陈超男, 2018. 2000—2015 年河南省植被 NDVI 时空变化特征分析 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 48(5): 554-564.]
- LI XY, REN ZY, ZHANG C, 2013. The correlation analysis and space-time changes of NDVI and hydro-thermal index in Hanjiang basin [J]. Geogr Res, 32(9): 1623-1633. [李小燕, 任志远, 张翀, 2013. 汉江流域 NDVI 与水热指数时空变化及相关性分析 [J]. 地理研究, 32(9): 1623-1633.]
- LIANG Y, LIU K, WANG L, et al., 2007. Research on vegetation changes in drainage area based on integration of streams network and NDVI—A case study in Xunhe Watershed [J]. Bull Soil Water Conserv, (5): 101-104. [梁轶, 刘康, 王雷, 等, 2007. 基于河流网络结构和 NDVI 集成的流域植被变化研究——以旬河流域为例 [J]. 水土保持通报, (5): 101-104.]
- LIN ZD, WU GS, 2015. Spatial-temporal changing characteristics of NPP and NDVI correlation in Junxi Valley, Datian County: A study based on MODIS [J]. J Subtrop Resour Environment, 10(1): 27-33. [林志东, 武国胜, 2015. 基于 MODIS 的大田县均溪谷地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征 [J]. 亚热带资源与环境学报, 10(1): 27-33.]
- LIU F, ZENG YN, 2019. Spatial-temporal change in vegetation net primary productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years [J]. Acta Ecol Sin, 39(5): 1528-1540. [刘凤, 曾永年, 2019. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响 [J]. 生态学报, 39(5): 1528-1540.]
- LIU QX, DONG GT, JING HT, et al., 2019. 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]. Res Soil Water Conserv, 26(3): 86-92. [刘启兴, 董国涛, 景海涛, 等, 2019. 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, 26(3): 86-92.]
- LIU XD, ZHANG XL, 2004. Natural forest of Qilian Mountain—The life line of the Hexi Hallway [J]. For & Humankind, (4): 16-19. [刘贤德, 张学龙, 2004. 祁连山天然林——河西走廊生命线 [J]. 森林与人类, (4): 16-19.]
- LIU YM, MA L, HUANG C, et al., 2019. Study on the change of vegetation coverage of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province based on MODIS-Landsat fusion data [J]. J NW Univ (Nat Sci Ed), 49(1): 62-70. [刘咏梅, 马黎, 黄昌, 等, 2019. 基于 MODIS-Landsat 时空融合的陕北黄土高原植被覆盖变化研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 49 (1): 62-70.]
- MAXWELL SK, SYLVESTER KM, 2012. Identification of “ever-cropped” land (1984-2010) using landsat annual maximum NDVI image composites: Southwestern Kansas case study [J]. Remote Sens Environ, 121: 186-195.
- NIU Y, LIU XD, WANG L, et al., 2014. Feature analysis on stand structure of *Picea crassifolia* and its water and temperature of soil in Dayekou basin of Qilian Mountains [J]. Ecol Environ Sci, 23(3): 385-391. [牛贇, 刘贤德, 王立, 等, 2014. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析 [J]. 生态环境学报, 23(3): 385-391.]
- SONG H, HUANG YF, LIU H, et al., 2019. Spatial-temporal change of NDVI and its potential influence factors in Lushan Scenic Area for nearly 30 years [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 28(4): 917-927. [宋鸿, 黄跃飞, 刘海, 等, 2019. 近 30 年来庐山风景名胜区内 NDVI 时空变化及其潜在影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 28(4): 917-927.]
- SONG PF, JI M, LIU ZQ, et al., 2020. Correlation analysis of vegetation coverage change and climate factors in Shandong Province [J]. Sci Survey Map, 45(3): 81-86. [宋鹏飞, 季民, 刘泽群, 等, 2020. 山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析 [J]. 测绘科学, 45(3): 81-86.]
- SU HM, GUO H, XIA ZH, et al., 2019. Dynamic monitoring on vegetation coverage of Beijing based on MODIS data [J]. Soil Water Conserv Chin, (2): 41-43. [苏慧敏, 郭

- 浩,夏照华,等,2019. 基于 MODIS 数据的北京市植被覆盖度动态监测 [J]. 中国水土保持, (2): 41-43.]
- SU JD, LI GX, 2019. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation NDVI in Qilian mountains based on GIS [J]. Mine Survey, 47(4): 33-38. [苏军德, 李国霞, 2019. 基于 GIS 的祁连山区植被 NDVI 时空变化特征研究 [J]. 矿山测量, 47(4): 33-38.]
- WANG YF, JING JL, 2017. Spatial-temporal variations of vegetation cover and its response to climate factors in Guangxi over the past 15 Years [J]. Res Agric Modern, 38(6): 1086-1096. [王永锋, 靖娟利, 2017. 广西近 15 年植被覆盖变化及其对气候因子的响应 [J]. 农业现代化研究, 38(6): 1086-1096.]
- WEI H, LI XL, XU LP, et al., 2019. Spatial and temporal distribution of NDVI and its response to climate factors in the Manasi River Basin [J]. Res Soil Water Conserv, 26(1): 215-220. [位宏, 李晓蕾, 徐丽萍, 等, 2019. 玛纳斯河流域 NDVI 时空变化及对气象因子的响应 [J]. 水土保持研究, 26(1): 215-220.]
- XIONG YL, ZHANG KL, ZHU YH, et al., 2018. Multi-scale coupling relationships between NDVI and environmental factors in sub-watershed of the Minjiang River Upper Reaches [J]. J Sichuan Agric Univ, 36(06): 792-797. [熊亚兰, 张科利, 朱雅晗, 等, 2018. 岷江上游小流域 NDVI 与环境要素的多尺度耦合关系研究 [J]. 四川农业大学学报, 36(06): 792-797.]
- YAN JJ, ZHANG J, LEI Y, et al., 2018. Analysis of the changing trend of grassland NDVI in the Ili Valley of Xinjiang during 2000—2016 [J]. Acta Agr Sin, 26(4): 859-868. [闫俊杰, 张静, 雷雨, 等, 2018. 2000—2016 年新疆伊犁河谷草地 NDVI 变化趋势分析 [J]. 草地学报, 26(4): 859-868.]
- YOU NS, MENG JJ, SUN MT, 2019. Spatio-temporal change of NDVI and its relationship with climate in the upper and middle reaches of Heihe River Basin from 2000 to 2015 [J]. Acta Sci Nat Univ Pekinen, 55(1): 171-181. [尤南山, 蒙古军, 孙慕天, 2019. 2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 55(1): 171-181.]
- YUAN J, CAO SK, CAO GC, et al., 2019. Soil particle size characteristics under different vegetation types on southern slope of Qilian Mountains [J]. Bull Soil Water Conserv, 39(2): 76-82. [袁杰, 曹生奎, 曹广超, 等, 2019. 祁连山南坡不同植被类型土壤粒度特征 [J]. 水土保持通报, 39(2): 76-82.]
- YUAN WP, CAI WW, LIU D, et al., 2014. Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: An overview [J]. Adv in Earth Sci, 29(5): 541-550. [袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等, 2014. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展 [J]. 地球科学进展, 29(5): 541-550.]
- YUE XY, ZUO XA, CHANG XL, et al., 2019. NDVI of typical steppe and desert steppe in Inner Mongolia in response to meteorological factors [J]. J Desert Res, 39(3): 25-33. [岳喜元, 左小安, 常学礼, 等, 2019. 内蒙古典型草原与荒漠草原 NDVI 对气象因子的响应 [J]. 中国沙漠, 39(3): 25-33.]
- ZHAO JC, ZHU YH, DUAN GH, et al., 2019. Spatial and temporal dynamics of vegetation in Xishuangbanna from 2001 to 2015 based on MOD13Q1 data [J]. Chin J Ecol, 38(4): 1083-1092. [赵桔超, 朱彦辉, 段国辉, 等, 2019. 基于 MOD13Q1 数据分析 2001—2015 年西双版纳植被变化特征 [J]. 生态学杂志, 38(4): 1083-1092.]
- ZHAO LQ, 2011. Spatio-temporal patterns of the vegetation greenness period and net primary productivity and their responses to climate change in the middle and lower reaches of Yarlung Zangbo River [D]. Shanghai: East China Normal University. [赵鲁青, 2011. 雅鲁藏布江中下游区域植被绿期和净初级生产力时空格局及其对气候变化的响应 [D]. 上海: 华东师范大学.]
- ZHOU CY, 1992. Rivers and human civilization [J]. Governing, (3): 42-43. [周长勇, 1992. 河流与人类文明 [J]. 治淮, (3): 42-43.]

(责任编辑 何永艳)