

2001—2018 年雅砻江流域植被 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应

陈安¹, 李景吉^{1,2}, 黎文婷¹, 刘延国³, 王娜⁴

(1.成都理工大学 生态环境学院, 成都 610059; 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059; 3.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 4.成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059)

摘要:为了了解雅砻江流域植被覆盖变化及其对气候的响应,基于 MOD13Q1 和气象数据,采用趋势分析和偏相关分析等方法,分析了 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 的时空变化特征,探讨了 NDVI 变化对气候因子的响应。结果表明:(1) 2001—2018 年雅砻江流域 NDVI 均值为 0.66,呈东南向西北逐渐下降趋势,并随海拔的升高呈先增后减趋势;(2) 2001—2018 年雅砻江流域 NDVI 整体以 0.003/10 a 的速率波动上升,NDVI 增加面积(63.97%)大于减少面积(36.03%);2001—2018 年雅砻江流域生长季的气温上升趋势显著,降水上升趋势不明显,流域上、中游气候向暖湿方向发展;(3) 整体上 NDVI 受气温影响大于降水,与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系;空间差异明显,上游受气温和降水共同影响,中、下游大部分地区受降水影响。整体而言,雅砻江流域植被的生长受地形、气候和人类活动等因素影响,近 18 年植被 NDVI 改善面积持续增加。

关键词:NDVI; 偏相关分析; 雅砻江流域

中图分类号:Q948.12

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0169-07

Spatiotemporal of NDVI in the Yalong River Basin from 2001 to 2018 and Its Response to Climate Change

CHEN An¹, LI Jingji^{1,2}, LI Wenting¹, LIU Yanguo³, WANG Na⁴

(1.College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3.Southwest University, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4.College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the changes in vegetation cover in the Yalong River Basin and its influences on climate, based on the MOD13Q1 and meteorological data, the spatiotemporal distribution and changing trends of the NDVI in the Yalong River Basin in the growing season during the period from 2001 to 2018 were analyzed by trend analysis and partial correlation analysis methods, and the response of NDVI variations to climate factors was also explored. The results indicated that: (1) from 2001 to 2018, the mean value of NDVI in the Yalong River Basin was 0.66, showing a trend of gradual decrease from southeastern to northwestern; In vertical distribution, the mean value of NDVI firstly increased and then decreased with the increasing of elevation; (2) in nearly 18 years, the NDVI increased at the rate of 0.003/decade in the Yalong River Basin; The area (63.97%) with increase of NDVI was greater than area (36.03%) with decrease of NDVI; from 2001 to 2018, the air temperature in the Yalong River Basin showed an upward trend and no significant trend of precipitation was observed; the climate of upper and middle streams presented the warmized and humidized developing orientation; (3) on the whole, NDVI was more affected by temperature than precipitation; temperature was positively correlated with NDVI, and precipitation was negatively correlated with NDVI. There were spatial differences in the response of NDVI to climate; the upper stream of the

收稿日期:2020-12-22

修回日期:2021-01-19

资助项目:国家重点研发项目“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0307)

第一作者:陈安(1995—),男,河北省沧州市人,硕士研究生,主要从事生态环境监测与评价。E-mail:350583076@qq.com

通信作者:李景吉(1983—),男,江苏省徐州市人,讲师,博士,主要从事植物多样性与生态保护研究。E-mail:lijingji2014@cdut.edu.cn

Yalong River Basin was affected by both temperature and precipitation, and most of the middle and lower stream was affected by precipitation. In general, vegetation growth in the Yalong River Basin was controlled by climate, topography and human activities, the improved areas of NDVI continued to increase in nearly 18 years.

Keywords: NDVI, partial correlation analysis, Yalong River Basin

陆生植被作为巨大的碳汇,在减缓气候变化方面发挥着重要作用^[1]。植被覆被常被用来表征气候变化影响的程度,指示着植被对气候变化的敏感程度,其变化幅度可以改变碳汇强度,并对当地气候起到反馈作用^[2]。因此,植被与气候变化关系及作用机制一直是全球气候变化研究的热点问题,也成为了开展区域植被保护和实现生态系统可持续发展的重要理论依据^[3-4]。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够精准反映植被覆盖度、植被生产力、叶面积指数和土地利用等变化特征^[5-7]。研究 NDVI 与气候变化关系,能够有效表达流域植被生长与气候变化的相互关系。分析 NDVI 时空变化特征及其与气候变化响应的研究方法已较为成熟,如国内外学者基于 MOD13Q1/NDVI, Spot VEGETATION/NDVI 等数据,采用线性回归分析^[8]、Theil-Sen median 趋势分析^[9]、Mann-Kendall 检验等^[10]方法,对黄河流域^[11]、三江源区等^[12]重大流域开展了大量研究。目前普遍认为不同尺度上植被覆盖变化主要是受气候要素变化作用的结果^[13],并且气温和降水的变化对植被覆盖变化影响最为直接^[14-15],是植被覆盖变化与气候响应研究的首选因子^[16]。然而,限于影像数据精度的要求和数据处理的难度,对于垂直地带性显著的高山峡谷区复杂植被组成与多气候类型变化的交叉影响机制研究鲜有报道。研究复杂植被组成与多气候条件的交互影响,更有助于理解全球气候变化背景下植被与气候要素的作用机制^[17]。

雅砻江流域地处青藏高原东南缘,区域地质条件复杂,气候类型多变,是青藏高原典型生态脆弱区和生物多样性保护重要区。流域内植被垂直地带性十分显著(地势落差 5 188 m),并且对全球气候变化的响应极为敏感^[18-19]。目前,国内外对雅砻江流域植被分布与气候变化作用机制的研究鲜有报道,流域尺度水平的气候变化对植被分布影响的特征及机制不清楚。鉴于此,本研究基于 MODIS/NDVI 数据及同期气候数据,重点研究 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 的时空变化特征及其对气候变化的响应规律,以期为流域生态环境保护和植被恢复提供科学依据。

1 研究区概况

雅砻江发源于青海省巴颜喀拉山,是长江上游金沙

江的最大支流,地理位置为 26°32′—33°58′N, 96°52′—102°48′E, 石渠至新龙为上游段,中游段为新龙至木里,木里至攀枝花为下游段。雅砻江干流全长约为 1 571 km,流域面积约 10.68 万 km²。流域内高空西风带大气环流和西南季风活动频繁,加之地形差异大,造成区内气候条件复杂多变^[20]。流域的多年平均降水量为 500~2 470 mm,多年平均蒸发量为 1 166~2 500 mm,多年平均气温为 -4.9~19.7℃,并且降水量、蒸发量和气温均呈由北向南的递增分布^[21-22]。流域内植被水平地带性和垂直地带性显著,主要植被类型沿东南至西北一线依次为森林、灌丛和草甸。

2 数据和方法

2.1 数据来源及处理

NDVI 数据来源于美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)发布的空间分辨率 250 m、时间分辨率 16 d 的 MOD13Q1(MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid)数据集。地形数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)的 ASTER GDEM V2 数字高程数据,空间分辨率为 30 m。土地覆被数据来源于资源环境数据云(<http://www.resdc.cn>)。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),包括研究区及其周边 45 个气象站点 2001—2018 年的逐月平均气温和累积降水量。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>) 1:100 万中国植被类型图。

利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具对下载的 MOD13Q1 数据进行格式转换和重投影等预处理,应用时间序列谐波分析法(Harmonic analysis of time series, HANTS)对 NDVI 数据进行降噪处理(图 1)。HANTS 算法滤波后的 NDVI 曲线变的较为平滑,与植被生长周期和物候特征基本吻合^[23]。采用最大值合成法 MVC(maximum Value Composite)得到逐月 NDVI 数据,选取植被长势较好的 5—9 月份作为其生长季^[24]。本文为减少土壤背景影响、增强绿色植被信号,剔除了 NDVI<0.1 的区域(非植被区)^[25]。气象数据中降水选用 Kriging 方法进行空间插值,气温采用 ANUSPLIN 方法^[26]进行空间插值。植被类型数据以植被大类为分类基准进行合并、

裁剪后形成研究区植被类型分布。

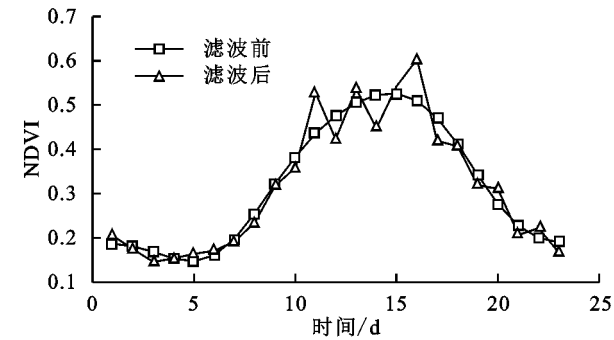


图 1 HANTS 滤波前后 NDVI

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析法 采用 Theil-Sen Median 方法分析 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 的变化趋势,并结合 Mann-Kendall 检验方法判断 NDVI 变化趋势的显著性。上述两种方法结合使用可有效降低异常值对数据的影响^[27]。Theil-Sen Median 公式如下:

S_NDVI = Median((NDVI_j - NDVI_i) / (j - i)) (1)

式中:NDVI_i 和 NDVI_j 分别表示像元 *i* 年和 *j* 年的 NDVI 值。当 S_{NDVI} > 0 时,表明 NDVI 呈增加趋势,反之则表明 NDVI 呈下降趋势。Mann-Kendall 方法中统计量 *Z* 值等计算公式如下:

Z = { (S-1)/sqrt(var) (S>0), 0 (S=0), (S-1)/sqrt(var) (S<0) } (2)

其中, S = sum_{i=1}^{n-1} sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) (3)

sgn(x_j - x_i) = { 1 |if(x_j - x_i) > 0|, 0 |if(x_j - x_i) = 0|, -1 |if(x_j - x_i) < 0| } (4)

var(S) = n(n-1)(2n+5)/18 (5)

式中:sgn 为函数符号。结合 *p* 值和 *Z* 值,将 NDVI 变化趋势在 0.01 置信水平下划分为极显著增加(*p* ≥ 0, |*Z*| > 2.58)、极显著减少(*p* < 0, |*Z*| > 2.58);0.05 置信水平下划分为显著增加(*p* ≥ 0, |*Z*| > 1.96)、显著减少(*p* < 0, |*Z*| > 1.96)、不显著增加(*p* ≥ 0, |*Z*| < 1.96)及不显著减少(*p* < 0, |*Z*| < 1.96)。

2.2.2 相关分析法 对 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 与气候因子(气温和降水)进行逐像元的偏相关分析和复相关分析,采用 0.05 的置信水平完成偏相关分析的 *T* 检验和复相关分析的 *F* 检验。

偏相关系数计算公式如下:

r_{ab,c} = (r_{ab} - r_{ac}r_{bc}) / sqrt((1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)) (6)

式中:*r*_{ab,*c*} 为变量 *c* 固定后变量 *a* 与 *b* 的偏相关系数;*r*_{ab}, *r*_{ac}, *r*_{bc} 为两因子间的相关系数;*a* 为 NDVI 值;*b* 为气温值;*c* 为降水值。

3 结果与分析

3.1 NDVI 的时间变化特征

利用线性回归方法,分析 2001—2018 年雅砻江流域生长季平均 NDVI 的年际变化趋势(图 2)。结果表明,近 18 年流域生长季 NDVI 值介于 0.68~0.73 之间,增长率为 0.003/10 a,2006 年、2011 年和 2013 年出现最高值,2001 年出现最低值。整体而言,2001—2018 年流域生长季平均 NDVI 上升趋势显著(*p* < 0.05),表明植被生长总体呈较好的发展趋势。

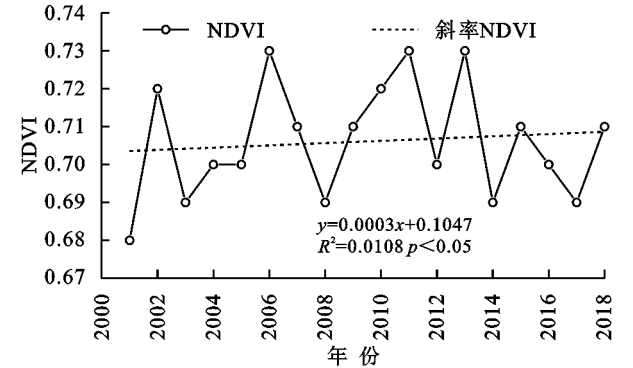


图 2 NDVI 的年际变化趋势

3.2 NDVI 的空间分布及变化特征

3.2.1 NDVI 的空间分布 2001—2018 年雅砻江流域生长季平均 NDVI 空间分布见图 3A 所示,全区 NDVI 总体状况良好,平均值为 0.66,整体呈东南向西北逐渐下降趋势。由于流域地形差异大,海拔由西北向东南逐渐下降,因此植被 NDVI 的空间分布具有明显的地域性特征。NDVI 低值区多出现在流域上游海拔高于 4 500 m 的高海拔区,主要分布在石渠县北部和甘孜县,植被类型以草甸和高山植被为主(图 3B)。NDVI 高值区多集中于流域中、下游海拔 3 500 m 以下地区,主要分布在雅江县、木里县、九龙县和盐源县,植被类型多为针叶林、阔叶林和针阔叶混交林。

结合雅砻江流域的地形特征,将其海拔划分为 5 个海拔区间(<1 500 m, 1 500~2 500 m, 2 500~3 500 m, 3 500~4 500 m, >4 500 m),统计出植被 NDVI 均值随海拔变化情况(表 1)。结果显示,近 18 年来雅砻江流域植被 NDVI 均值随海拔升高呈现出先增后减的特点。海拔低于 3 500 m 地区的面积占

比 21.63%，该区植被 NDVI 是随海拔的升高而增加；高于 3 500 m 地区的面积占比 78.37%，植被 NDVI 随海拔升高呈现出下降趋势。植被 NDVI 均值的最高值(0.74)出现在 2 500~3 500 m 海拔区间，主要植被类型为针叶林和阔叶林；最低值(0.52)出现在>

4 500 m 海拔区间，主要植被类型为草甸和高山植被。1 500~2 500 m 和 3 500~4 500 m 海拔区间的 NDVI 均值分别为 0.7,0.68，主要植被类型分别为灌丛和草甸。海拔低于 1 500 m 地区的植被 NDVI 均值为 0.57，该区由于人类活动较强，植被 NDVI 较低。

表 1 雅砻江流域植被 NDVI 垂直分布特征

海拔高度/m	<1 500 m	1 500~2 500 m	2 500~3 500 m	3 500~4 500 m	>4 500 m
NDVI 均值	0.57	0.7	0.74	0.68	0.52
面积占比/%	0.8	6.02	14.81	54.36	24.01
主要植被类型	草丛、栽培植被	灌丛	针叶林、阔叶林	草甸、灌丛	草甸、高山植被

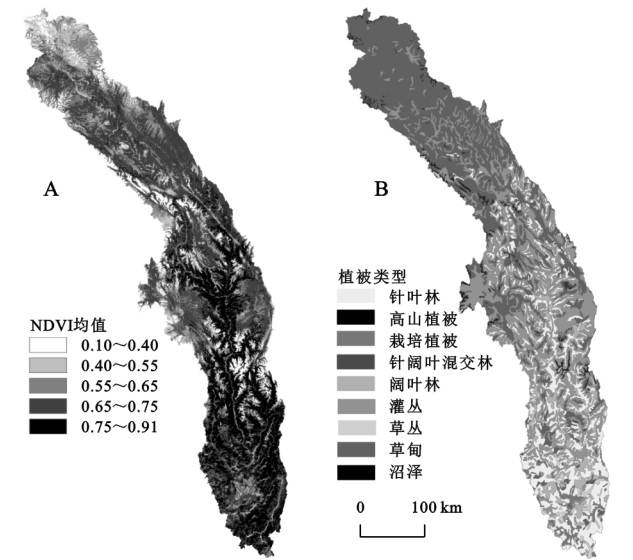


图 3 研究区多年生长季平均 NDVI 空间分布和植被类型

3.2.2 NDVI 的空间变化特征 基于 Sen+Mann-Kendall 检验方法得到雅砻江流域生长季平均 NDVI 变化趋势(图 4A、表 2)。结果发现，流域生长季 NDVI 整体以增加趋势(极显著增加、显著增加和不显著增加总和)为主，面积占比为 63.97%，多出现在流域上游和下游，其中极显著增加和显著增加区域主要分布在石渠县北的长沙贡马乡和盐源县，该地区主要植被类型为草甸和针叶林。NDVI 呈减少趋势(极显著减少、显著减少和不显著减少的总和)区域面积占比为 36.03%，多出现在流域中游，其中极显著减少和显著减少区域主要分布在石渠县南部、雅江县两河口、理塘河河谷和盐边县二滩等地，植被类型以灌丛和草甸为主。

表 2 NDVI 变化趋势统计

p	Z 值	NDVI 变化趋势	面积百分比/%
$p<0$	$ Z >2.58$	极显著减少	0.51
$p<0$	$ Z >1.96$	显著减少	8.62
$p<0$	$ Z \leq 1.96$	不显著减少	26.90
$p\geq 0$	$ Z \leq 1.96$	不显著增加	57.36
$p\geq 0$	$ Z >1.96$	显著增加	1.36
$p\geq 0$	$ Z >2.58$	极显著增加	5.25

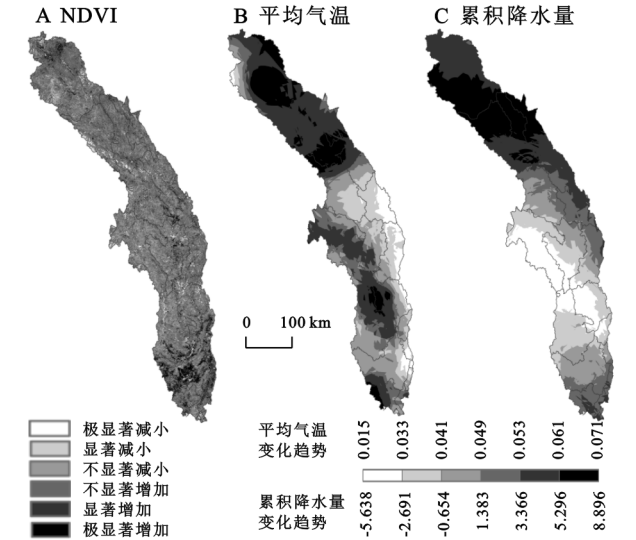


图 4 NDVI 与气温、降水变化趋势

3.3 NDVI 变化对气候因子的响应

3.3.1 气候因子的时空变化特征 采用线性回归方法，分析 2001—2018 年雅砻江流域生长季平均气温、累积降水量的年际变化趋势(图 5)。近 18 年雅砻江流域生长季平均气温上升趋势显著($p<0.05$)，平均增速为 0.48℃/10 a，2009 年出现最高值 15.34℃，2004 年出现最低值 14.04℃。流域生长季累积降水量整体呈增加趋势($p=0.147$)，平均增速为 15.34 mm/10 a，2014 年出现最高值 675.76 mm，2006 年出现最低值 476.4 mm。

2001—2018 年雅砻江流域生长季平均气温和累积降水量的空间变化特征见图 4B、图 4C 所示。近 18 年雅砻江流域生长季气温增速为 0.15~0.71℃/10 a，以中、上游地区的增温趋势最显著，主要分布在石渠县、甘孜县和木里县，区内植被类型主要为草甸和针叶林。近 18 年雅砻江流域生长季累积降水量增速介于-56.38~88.96 mm/10 a 之间，其变化趋势具有明显的空间差异性。上游地区降水量呈增加趋势，主要分布在石渠县南部和甘孜县，植被类型多为草甸。中游地区降水量呈下降趋势，以理塘县、木里县和九龙县最明显，植被类型多为灌丛和针叶林。

3.3.2 NDVI 对气候因子的响应分析 将 2001—

2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 均值与平均气温、累积降水分别进行线性回归(图 6)。结果表明,研究区生长季 NDVI 随气温的上升而增加,随降水的增加而减少。生长季 NDVI 与平均气温的相关系数为 0.358,与累计降水的相关系数为-0.469,整体上植被生长受气温影响大于降水。

相关研究表明^[28-29],植被生长对气候因子的响应存在一定程度的“时滞效应”。本研究将雅砻江流域生长季逐月 NDVI 与同期及提前 1—2 月气候因子的响应进行分析(表 3)。从气温变化来分析,前 1 个月气温和 NDVI 的相关系数较大,并且 6 月、7 月、8 月、9 月份都通过了显著性检验($p<0.05$),表明研究区前 1 个月气温上升对当月植被生长起较强促进作用。其中 8 月份的 NDVI 与同期及前 1—2 月的气温呈正相关性都较显著,说明 6—8 月份的气温与 8 月份的

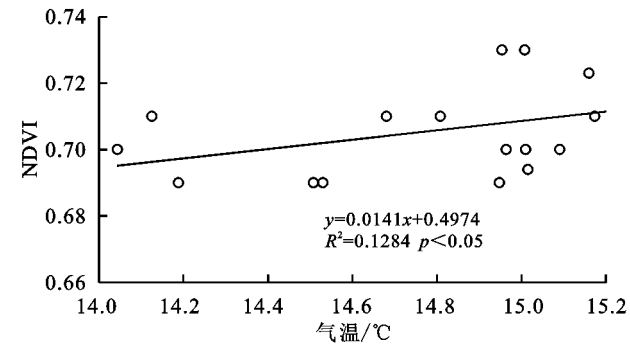


图 6 逐年 NDVI 与气候因子的相关性

表 3 逐月 NDVI 与气候因子的相关性						
项目		5月	6月	7月	8月	9月
气温	同期	0.206	0.625 **	0.216	0.359 *	0.256
	前 1 个月	0.023	0.386 *	0.630 **	0.497 **	0.657 **
	前 2 个月	-0.116	-0.087	0.032	0.494 **	0.240
降水	同期	0.010	-0.259	-0.054	-0.569 **	0.183
	前 1 个月	-0.157	-0.335 *	-0.360 *	-0.549 **	0.037
	前 2 个月	0.249	0.090	-0.116	-0.207 *	0.161

注: * 表示在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

对流域生长季 NDVI 与平均气温和累积降水进行逐像元的偏相关分析(图 7)。由图 7A 知,NDVI 与平均气温的偏相关系数范围为-0.90~0.94,平均值为 0.11,正、负相关区域面积占比分别为 65.05%和 34.95%。通过显著性检验($p<0.05$)的区域占流域面积的 13.6%,其中显著正相关区域(11.19%)主要分布在石渠县长沙贡玛乡—色达、新龙县城—鲜水河和盐源盆地一带(图 7D),该地区植被类型为草甸和针叶林;显著负相关区域(2.41%)分布在中、下游的理塘县、盐边县等地,植被类型以灌丛为主。由图 7B 可以看出,NDVI 与累积降水的偏相关系数范围为-0.89~0.91,平均值为-0.015,正、负相关区域面积

植被生长关系密切,7 月份温度升高对 8 月份植被生长影响最大。从降水变化来分析,当月 NDVI 与前 1 个月降水的相关系数较大,并且通过显著性检验($p<0.05$)的月份最多(6 月、7 月和 8 月),表明研究区前一个月降水对当月植被生长有一定抑制作用。

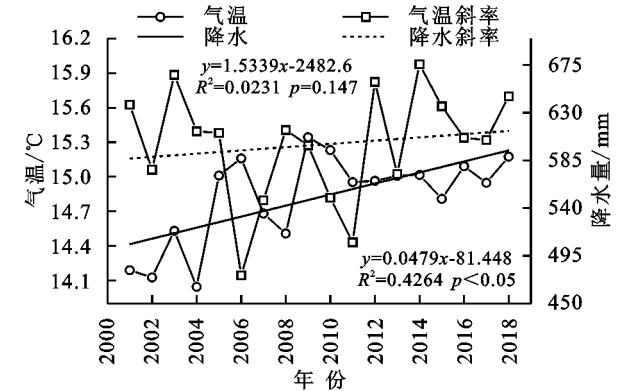
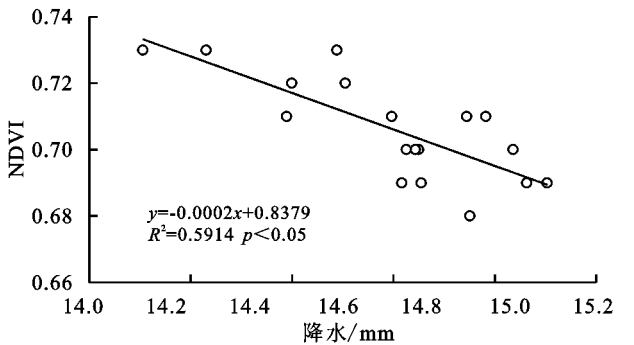


图 5 生长季平均气温及累计降水量



占比分别为 47.68%和 52.32%,显著正、负相关区域面积占比仅为 2.76%和 2.88%。显著正相关区域分布在新龙县及周边区域(图 7E),主要植被类型为草甸;显著负相关区域零散分布在流域中、下游的河谷地带,植被类型多为灌丛。

通过复相关分析(图 7C)发现,NDVI 与气候因子(平均气温、累积降水)的平均复相关系数为 0.36,研究区有 27.59%的面积通过了显著性检验($p<0.05$)。其中复相关关系显著区域主要分布在流域上游石渠和甘孜二县(图 7F),植被类型以草甸和草丛为主,说明这些植被生长发育受水热条件限制较大。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究发现,近 18 年雅砻江流域植被 NDVI 整体呈波动上升趋势,植被总体趋于向好,局部变差。这种变化与流域差异性气候变化有关,近年来青藏高原增温同时,降水也出现不同程度增加,使流域整体的植被生产力和覆盖度增加^[30],植被生长总体向好。另外,植被覆盖的增加与多年来流域内实施的退耕还

林、封山育林和土地沙漠化治理等^[31-32]各项生态保护工程也有关,生态恢复工程在植被恢复方面发挥出显著生态效益^[33-34]。雅砻江流域局部区域植被 NDVI 呈减少趋势,以石渠县南部、理塘县、雅江县两河口和盐边县二滩最为集中。NDVI 减少区域在流域中游分布较集中,一方面这与中游各县快速城镇化而大量修建基础设施和不合理的旅游开发密切相关^[35-36],另一方面由于流域上、中游水热条件的增加导致局部冰川冻土消融,使原有脆弱的生态地质环境发生变化,植被生长受到影响^[37]。

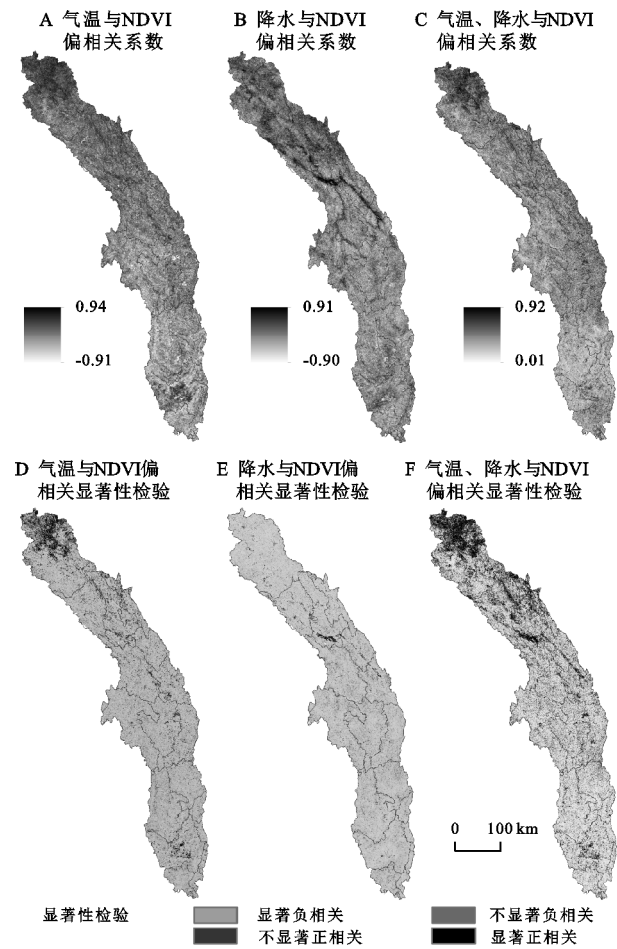


图 7 NDVI 与气候因子的偏相关、复相关系数及显著性检验结果

本文分析了不同时间尺度上植被 NDVI 对气温和降水的响应,得到研究区植被 NDVI 整体上受气温和降水共同影响,但不同地区空间差异较大的结果。雅砻江流域上游为高原高寒气候,而下游多为干旱河谷气候,受西南季风影响,下游的降雨量远大于上游。上游脆弱的生态环境造成植被生长受水热条件限制较大,植被生长和气温、降水主要为正相关关系,即水热条件的增加会促进该区植被生长,这与杨元合等^[38]得出的青藏高原东南缘夏季高寒草甸、草地 NDVI 的增长是受温度、降水共同影响的结论相

一致。而在中、下游地区植被的生长具有相对适宜温度,降水成为植被生长的主控因子。近 18 年流域中、下游地区的降雨量减少,蒸发量增加,土壤承载力变低,并且受流域地形影响,虽然降水对土壤有保湿作用,但易造成地区水土流失^[39],甚至引起不同程度的地质灾害,破坏植被生长环境,导致植被 NDVI 降低^[40]。此外,极端事件的发生也会影响植被正常生长,如 2008 年汶川地震导致地表大面积裸露,部分植被根系的生长环境被破坏,造成水土流失加重,植被覆盖状态退化^[41]。2012 年左右雅砻江流域气温较低,降水增多,发生的洪涝灾害^[42]直接导致 2012 年植被 NDVI 的降低。不同地域植被 NDVI 对气候要素的响应较为复杂,文中只选择气温和降水这两个对植被生长影响最大的气候因子进行分析,但湿度和日照等也会影响植被 NDVI 的变化^[43],未来可以加以考虑。

4.2 结论

(1) 2001—2018 年雅砻江流域生长季植被生长状况良好,NDVI 均值为 0.66,且以 0.003/10 a 的速率波动上升。NDVI 分布受地形影响较大,空间上呈东南向西北逐渐下降的分布格局,垂直分布上呈现随海拔上升呈现出先升后降的特点。

(2) 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 整体以不显著增加趋势为主,面积占比达 57.36%,广泛分布在流域各县。近 18 年流域生长季平均气温上升趋势显著($p < 0.05$),累积降水量上升趋势不显著($p = 0.147$),流域上、中游气候向暖湿方向发展。

(3) 2001—2018 年雅砻江流域生长季 NDVI 对气温、降水变化的响应均滞后一个月。整体上 NDVI 受气温影响大于降水,与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系;空间差异明显,上游受气温影响较大,中、下游大部分地区受降水影响较大。

参考文献:

[1] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance [J]. Nature Communications, 2018,9(1):679.

[2] Mahmood R, Pielke R A., Hubbard K G. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate [J]. International Journal of Climatology, 2014,34(4): 929-953.

[3] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau [J]. The Science of the Total Environment, 2019,660(10):236-244.

[4] Wang J, Wang K, Zhang M, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China [J]. Ecological Engineering, 2015, 81:

451-461.

[5] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.

[6] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. *遥感学报*, 2006, 10(3): 421-431.

[7] 周小驰, 刘咏梅, 杨海娟. 西安市城市边缘区空间识别与边界划分[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1327-1335.

[8] Jiang L, Guli · Jiapaer, Bao A, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. *Ence of the Total Environment*, 2017, 599/600: 967-980.

[9] Liu Z, Wang H, Li N, et al. Spatial and Temporal Characteristics and Driving Forces of Vegetation Changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2198.

[10] 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[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 443-451.

[11] 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[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.

[12] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.

[13] 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[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1665-1670.

[14] Cong N, Shen M, Yang W, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1433-1444.

[15] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.

[16] 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[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9998-10016.

[17] Ouyang W, Wan X, Xu Y, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 701(20): 134782.

[18] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏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*, 2018, 38(9): 3208-3218.

[19] 任平, 洪步庭, 程武学, 等. 长江上游森林生态系统稳定性评价与空间分异特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 1017-1024.

[20] 魏榕, 刘冀, 李世俊, 等. 雅砻江流域 1961—2017 年气候干湿变化特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 193-199.

[21] 田甜, 李绍才, 陈敏, 等. 雅砻江流域植被指数长时间序列变化分析[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(2): 159-164.

[22] 李峥嵘, 彭涛, 董晓华, 等. 雅砻江流域径流极值变化规律及影响因素分析[J]. *水力发电*, 2020, 46(5): 33-37, 84.

[23] 韩炳宏, 孔祥萍, 周秉荣, 等. 气候变化情景下青藏高原物候研究的若干进展[J]. *草业科学*, 2019, 36(11): 2786-2795.

[24] 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.

[25] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.

[26] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 875-886.

[27] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends: Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 131-147.

[28] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.

[29] 谢胜金, 刘永和, 姚凤欣. 1998—2015 年北京市 NDVI 时空变化及其与气候因子的响应关系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 190-196, 202.

[30] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.

[31] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7858-7869.

[32] 鄢武先, 邓东周, 余凌帆, 等. 川西北地区沙化土地治理有关技术问题探讨: 以川西北防沙治沙试点示范工程为例[J]. *四川林业科技*, 2015, 36(3): 62-68.

[33] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 398-411.

[34] 祁威, 摆万奇, 张懿锂, 等. 生态工程实施对羌塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响[J]. *生物多样性*, 2016, 24(2): 127-135.

[35] 荣欣, 易桂花, 张廷斌, 等. 2000—2015 年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12): 3014-3028.

[36] 杨桂山, 徐昔保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(11): 1356-1367.

[7] 焦翠翠,于贵瑞,展小云,等.全球森林生态系统净初级生产力的空间格局及其区域特征[J].第四纪研究,2014,34(4):699-709.

[8] 潘洪义,黄佩,徐婕.基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J].生态学报,2019,39(20):7621-7631.

[9] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.

[10] 刘刚,孙睿,肖志强,等.2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J].生态学报,2017,37(15):4936-4945.

[11] 杜耘.保护长江生态环境,统筹流域绿色发展[J].长江流域资源与环境,2016,25(2):171-179.

[12] 柯金虎,朴世龙,方精云.长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究[J].植物生态学报,2003,2003(6):764-770.

[13] 王琳,景元书,张悦.基于 MODIS 的长江中下游地区植被净第一性生产力时空变化规律[J].浙江农林大学学报,2015,32(6):829-836.

[14] 潘萌甜,梁俊红,李佳,等.基于 LUE 模型的长江源流域 NPP 时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2017,32(5):237-242.

[15] 苗茜,黄玫,李仁强.长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应[J].自然资源学报,2010,25(8):1296-1305.

[16] 裴凤松,王坤,刘小平,等.长江三角洲城市化地区植被初级生产力的时空变化研究[J].地球信息科学学报,2018,20(6):862-870.

[17] 姚玉璧,杨金虎,王润元,等.50 年长江源区域植被净初级生产力及其影响因素变化特征[J].生态环境学报,2010,19(11):2521-2528.

[18] 苗茜,黄玫.气候变化对长江流域陆地生态系统的影响研究[C].中国地理学会,中国地理学会百年庆典学术论文摘要集,2009.

[19] 袁喆,喻志强,冯兆洋,等.长江流域陆地生态系统 ND-VI 时空变化特征及其对水热条件的响应[J].长江科学院院报,2019,36(11):7-15.

[20] 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.

[21] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[22] 仲晓春,陈雯,刘涛,等.2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系[J].中国农业资源与区划,2016,37(9):16-22.

[23] 张凤英.基于遥感和 LPJ 模型模拟的长江流域植被净初级生产力格局及驱动力分析[D].南京:南京林业大学,2020.

[24] 左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J].生态环境学报,2020,29(4):686-694.

[25] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.

[26] 王强,张廷斌,易桂花,等.横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2017,37(9):3084-3095.

[27] 王娟,卓静,何慧娟,等.2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].西北林学院学报,2016,31(5):238-245.

[28] 陈福军,沈彦俊,李倩,等.中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J].地理科学,2011,31(11):1409-1414.

[29] 赵晓.2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空分异研究[D].重庆:西南大学,2019.

[30] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.长江流域中上游植被 ND-VI 时空变化及其地形分异效应[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):66-78.

(上接第 175 页)

[37] Wang R, Dong Z B, Zhou Z C. Changes in the depths of seasonal freezing and thawing and their effects on vegetation in the Three-River Headwater Region of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(12):2810-2827.

[38] 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.

[39] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等.川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J].水土保持通报,2020,40(4):286-294,328,2.

[40] 朱昌丽,张继飞,赵宇鸾,等.青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应:以岷江上游为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1687-1699.

[41] 倪忠云,何政伟,赵银兵,等.汶川地震前后都江堰植被盖度变化的遥感研究[J].水土保持研究,2009,16(4):45-48.

[42] 杜华明,延军平.四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J].资源科学,2013,35(12):2491-2500.

[43] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.