

基于 TINDVI 的伊犁河谷草地覆盖变化

闫俊杰, 陈晨, 赵阳, 沙吾丽·达吾提拜, 刘海军

(伊犁师范大学 资源与生态研究所, 新疆 伊宁 835000)

摘 要:草地覆盖动态变化是全球变化研究的重要内容。选择草地类型丰富多样的伊犁河谷为研究区,在 MODIS NDVI 数据的基础上,计算获得时间累积归一化植被指数(Time-integrated normalized difference vegetation index, TINDVI),以 TINDVI 为参考指标,借助 GIS 空间分析及 Mann-Kendall 非参数统计检验等方法,对 2000—2018 年伊犁河谷草地覆盖的动态变化进行了分析,并探讨了 TINDVI 与代表植被生长最好水平的 $NDVI_{max}$ 的比较优势。得出如下结论:(1) 利用生长季内 NDVI 累加计算得到的伊犁河谷草地 TINDVI 的多年平均取值范围为 0~11,空间上 TINDVI 海拔分异明显,全区 75.69% 的草地 $TINDVI > 4.0$;(2) 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 总体呈非显著增加趋势,而 $NDVI_{max}$ 总体呈非显著减小趋势,两者年变化速率分别为 0.015 和 -0.000 1;空间上,全区 73.95% 草地的 TINDVI 有所增大,而 57.28% 草地的 $NDVI_{max}$ 发生减小,42.58% 的区域 TINDVI 与 $NDVI_{max}$ 变化趋势相反,草地植被生长过程的年际变化是两者变化趋势有所差异的原因;(3) 伊犁河谷草地覆盖变化与降水和气温相关性的海拔分异明显,相对于 $NDVI_{max}$,草地 TINDVI 对降水和气温变化响应更敏感,且与降水相关性明显高于气温;(4) 草地植被生长过程的年际变化也是草地变化的重要方面,生长季内 NDVI 累加得到的 TINDVI 在量化草地覆盖变化上具有一定应用价值。

关键词:草地覆盖变化; TINDVI; MODIS 数据; 伊犁河谷

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0331-09

Dynamics of Grassland Coverage in Ili River Valley Based on TINDVI

YAN Junjie, CHEN Chen, ZHAO Yang, SHAMULI · Davutibai, LIU Haijun

(Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining 835000, China)

Abstract: Dynamics of grassland vegetation is one of the important contents of global change research. Ili River Valley, which is rich in grassland types, was selected as the research area. On the basis of MODIS NDVI, the time integrated normalized difference vegetation index (TINDVI) was calculated. Taking TINDVI as the indicator of grassland coverage, we used the spatial analysis of GIS and method of Mann-kendall nonparametric test to analyze the dynamics of grassland coverage in Ili River valley from 2000 to 2018, and discussed the comparative advantage between TINDVI and $NDVI_{max}$ ($NDVI_{max}$ represents the best growing status of vegetation in a growing season). The results showed that: (1) the annual-averaged range of TINDVI, calculated by NDVI accumulation in a growing season, of the grassland in Ili River Valley was 0~11; spatially, the difference of TINDVI along the elevation was obvious, and the proportion of grassland with $TINDVI > 4.0$ reached up to 75.69% in the whole area; (2) in the period 2000—2018, the grassland TINDVI in Ili River Valley showed a non-significant increasing trend, compared with a non-significant decreasing trend of $NDVI_{max}$; the annual changing rate was 0.015 and -0.000 1 for TINDVI and $NDVI_{max}$, respectively; spatially, 73.95% of the grassland TINDVI increased, and 57.28% of the $NDVI_{max}$ decreased; the proportion of grassland showing opposite changing trends in TINDVI and $NDVI_{max}$ reached up to 42.58%, and the interannual changes in the growth process of the grassland vegetation was the reason for the opposite changing trends; (3) the changes of the correlation between grassland coverage and precipitation and temperature along the elevation in the Yili River Valley was obvious; compared with $NDVI_{max}$, TINDVI was more sensitive to

收稿日期: 2020-07-08

修回日期: 2020-08-06

资助项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目“基于时间累积归一化植被指数草地退化监测研究”(XJEDU2018Y045)

第一作者: 闫俊杰(1984—), 男, 河南林州人, 博士, 副教授, 主要从事生态遥感应用研究。E-mail: yan3550@sina.com

changes in precipitation and temperature, and the correlation between grassland coverage and precipitation was higher than that of temperature; (4) the interannual change of the growing process is also an important aspect of grassland change, and the TINDVI accumulated from NDVI in the growing season has certain application value in quantifying grassland coverage change.

Keywords: changes of grassland coverage; TINDVI; MODIS data; Ili River Valley

草地占据了全球将近 20% 的陆表面积^[1],它不仅是陆地生态系统重要组成部分^[2],而且在生物多样性保护、水源涵养、大气调节及原材料供给等生态系统维护与调节方面占有重要地位^[3]。全球变化背景下,草地植被动态变化及其对生态环境的影响被广泛关注^[4-7],而对草地植被生长科学而精确的量化表达是研究草地动态变化的基础。

遥感技术在数据获取的时效性、成本及数据丰富度等方面具有难以比拟的优势^[8-9],是目前区域植被动态监测的主要方法及数据来源。基于遥感技术,不同学者将植被反射光谱中的不同波段进行线性或非线性组合来突出地表植被信息,提出了多种植被指数来对植被的生长状况进行量化表达^[10],为植被动态变化研究提供了有效且计算简便的指标。在众多植被指数中,归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)应用最为广泛,被广泛应用于全球、区域及流域等不同尺度的植被动态研究^[4-5,9,11-14]。MODIS NDVI, NOAA-AVHRR NDVI 及 SPOT NDVI 时间序列数据是主要数据源^[15]。在对 NDVI 时间序列数据预处理过程中,最大值合成法(maximum Value Composites, MVC)常被用于计算年内 NDVI 最大值(NDVI_{max}),来表征单个生长季内植被生长达到最好时的状况^[10,16],从而为植被的年际变化分析提供基础。然而植被的年际变化并不仅仅体现在不同年份植被生长可达到的最高水平的差异上,植被在不同年份的年内生长过程的差异也是植被动态变化的重要方面。时间累积 NDVI(Time integrated NDVI, TINDVI)被定义为年内 NDVI 变化曲线与时间轴围城的面积或一定时期内 NDVI 的累积值^[17-19]。相对于 NDVI_{max}, TINDVI 包含了植被生长过程的信息,且已有研究证明 TINDVI 与植被干物质质量具有很好线性关系^[20-21],然而以 TINDVI 为衡量指标来分析植被变化的研究却鲜有报道。对比分析 TNDVI 与 NDVI_{max} 在反映植被时空变化方面的比较优势,探讨 TINDVI 的应用价值,将为全面和深入认识植被的动态变化提供有利帮助。

西北地区是我国草地资源的重要分布区,而位于天山西段的伊犁河谷更是我国久负盛誉的优质牧场。已有学者以 NDVI_{max} 或覆盖度为参考,指明伊犁河谷

草地退化严重,且退化仍在持续恶化^[22-25]。本研究利用包含生长过程信息的 TINDVI 作为表征草地植被的参数指标,分析伊犁河谷草地植被 TINDVI 时空变化,并探讨 TINDVI 与 NDVI_{max} 的差异,以期进一步探明伊犁河谷草地植被的变化特征,并为相关研究提供借鉴。

1 研究区概况

伊犁河谷位于 80°09′42″—84°56′50″E, 42°14′16″—44°53′30″N, 地处天山西段, 整个河谷地势西低东高, 地形呈向西敞开的“V”字形(图 1), 西风湿润气流受此特殊地势地形影响, 容易抬升凝结, 给河谷带来丰沛降水, 成就了其“塞外江南”的美誉。伊犁河谷气候虽属于温带大陆性气候, 但却表现出明显的高山气候特征^[26], 平原区与山区气候明显不同, 平原区干旱少雨、蒸发能力强, 而山区降水丰沛、天气凉爽^[27], 平原区降水 200 mm 左右, 但山区降水可达 1 000 mm, 气温变幅约为 9.2~2.8 ℃^[26]。河谷内植被类型以草地主, 且类型丰富多样, 是新疆乃至我国著名的优质牧场, 分布有高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、温性荒漠及低平地草甸等多种类型草地^[24,28]。伊犁河谷行政区划上属于伊犁哈萨克自治州, 畜牧业在国民经济中占有重要比例, 且畜牧方式仍然以传统放牧为主。相关研究表明, 近年来受气候变化及人为影响, 草地植被覆盖度持续降低^[29], 草地生产力降低及毒害草蔓延等草地退化问题严重^[22,30]。

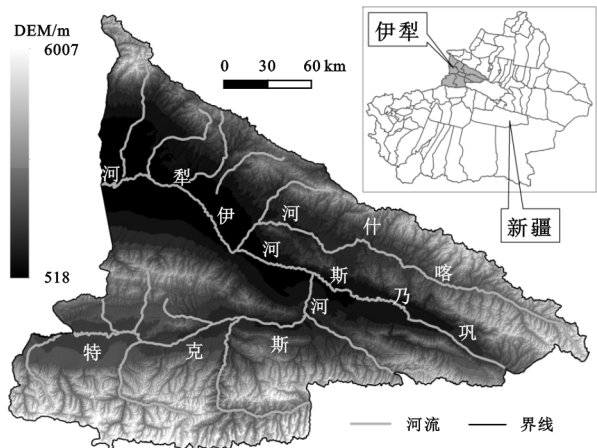


图 1 研究区示意图

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

文章用到的 NDVI 数据为美国 NASA EOS 数据中心发布的 MODIS MOD13Q1 产品。MOD13Q1 数据为 16 d 合成的时间序列数据,空间分辨率为 250 m,每年 23 期,本研究用到 2000 年 2 月—2018 年 12 月共 19 a 数据。在数据预处理过程中,对 NDVI 时间序列数据进行了镶嵌、转投影、重采样、研究区裁剪以及 Savitzky-Golay 滤波处理。用于年际变化分析的 NDVI 年数据通过对每年 23 期数据的最大值合成(MVC)处理获得^[10,16],即用年内植被生长达到最好状况时的 NDVI (NDVI_{\max})作为年尺度上的 NDVI。

草地分布边界的矢量数据是通过 2018 年 6—7 月份 sentinel-2 假彩色合成影像目视解疑获得。对解疑获得的矢量数据进行了栅格化处理,作为 NDVI 数据研究区裁剪的掩膜。为保障数据的空间匹配,草地分布数据的栅格化处理及 NDVI 数据重采样处理过程中,像元大小均设置为 250 m×250 m。

气温和降水数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>),包括伊犁河谷内伊宁市、霍尔果斯市、霍城等 10 个气象站和其周边巴音布鲁克在内的 11 个气象站的月数据。在 11 个气象站点数据的基础上,借助于 Anusplin4.2 软件及 DEM 数据,进行空间插值,获得伊犁河谷月气温和月降水空间分布数据,之后合成生长季(3—10 月份)内的平均气温和累积降水空间分布数据,插值过程中栅格大小设置为 250 m,与 NDVI 数据栅格大小一致。

2.2 研究方法

2.2.1 TINDVI 计算 TINDVI 通常被定义为生长季内 NDVI 变化曲线与时间轴围城的面积或 NDVI 的累积值^[17-19]。累积值计算方便且简单,因此 TINDVI 利用生长季内 NDVI 的累积值表示,即:

$$\text{TINDVI} = \sum_{i=65}^{305} \text{NDVI}_i \quad i=65, 81, 97, \dots, 305 \quad (1)$$

式中: i 即代表 NDVI 数据的日期。MOD13Q1 NDVI 产品每年 23 期数据,从每年的第 1 天到第 353 天每 16 d 一期数据。根据研究区草地植被返青期和枯萎日期实际情况及其空间差异^[31];TINDVI 计算取 3 月初(第 65 天)到 11 月初(第 305 天)时段内共 16 期 NDVI 数据,并在计算过程中对 3 月初和 11 月初 NDVI<0 数据进行了剔除。

2.2.2 单调趋势 Mann-Kendall 非参数检验 Mann-Kendall 非参数检验被广泛应用于时间序列数据趋势检验,其统计量 Z_c 计算过程如下^[32-33]:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(x_k - x_i) \quad (3)$$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sign}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1 & x_k - x_i > 0 \\ 0 & x_k - x_i = 0 \\ -1 & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_i 为 x_k 为时间序列数据的集合。在 α 置信水平上,若 $|Z_c| \geq Z_{1-\alpha/2}$,即时间序列在 α 置信水平上存在显著上升或下降趋势。 $Z_c > 0$,则变化趋势为上升趋势; $Z_c < 0$,则变化趋势为下降趋势。

时间序列变化速率可用 Kendall 倾斜度来表示,其计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (6)$$

式中: $1 < j < i < n$; β 表示的是斜率,正值表明为上升趋势,反之则为下降趋势。

3 结果与分析

3.1 TINDVI 空间分布特征

利用 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 的年空间分布数据,计算其多年平均值。基于 TINDVI 的多年平均数据分析伊犁河谷草地 TINDVI 的空间分布特征(图 2)。

由图 2 可知,伊犁河谷草地多年平均 TINDVI 的值域约为 0~11.0。空间上伊犁河谷草地 TINDVI 呈现明显的垂直分异特征。具体表现为 TINDVI 先随海拔的升高而逐步增加,河谷西部海拔较低的平原及山前洪积冲积扇区 TINDVI 较低($2.0 < \text{TINDVI} < 4.0$),到中山区域后 TINDVI 达到最大($\text{TINDVI} > 8.0$),但空间上主要集中在河谷中南部及东部的中山区域,之后随海拔升高 TINDVI 变化转为逐步减小,河谷周边积雪时间较长的高山区 TINDVI 最小值($\text{TINDVI} < 2.0$)。

经统计,整个河谷 $6.0 < \text{TINDVI} < 8.0$ 的面积比例最高,为 34.24%,空间上主要分布在河谷西北和乌孙山南部的低山区域、昭苏盆地—特克斯谷低、河谷东部和南部中山向高山过度区以及河谷南部高山区的山谷地带; $\text{TINDVI} > 8.0$ 的比例达到了 21.67%; $\text{TINDVI} < 2.0$ 的比例最少,为 9.34%; $2.0 < \text{TINDVI} < 4.0$ 的比例为 14.97%; $4.0 < \text{TINDVI} < 6.0$ 的比例为

19.78%，空间上主要分布在特克斯河下游两侧的低

海拔区以及伊犁河北部的低山丘陵区。

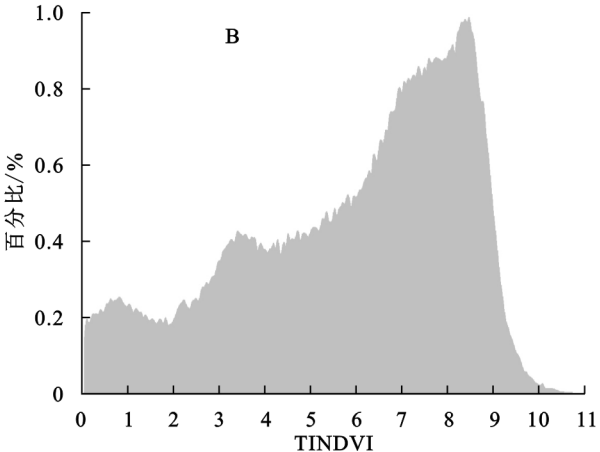
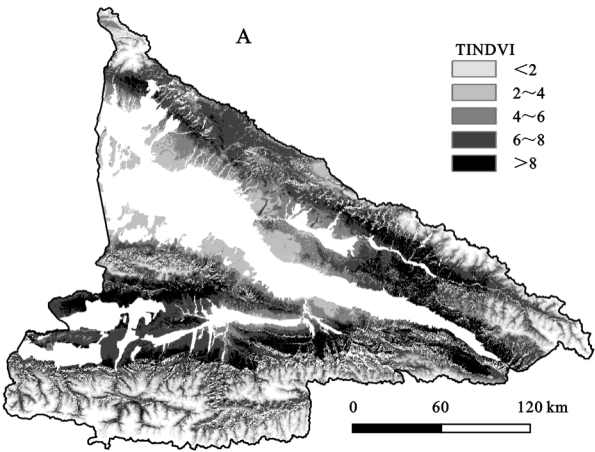


图 2 草地 TINDVI 空间分布(A)及其直方图(B)

3.2 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 时间动态

对 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 的年空间分布数据求逐年平均,绘制 TINDVI 的年际变化曲线(图 3),分析伊犁河谷草地 TINDVI 总体的年际变化。

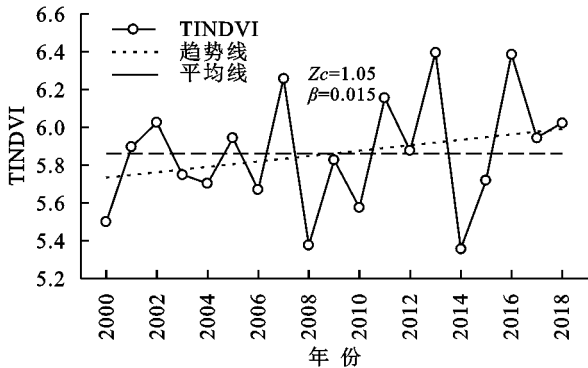
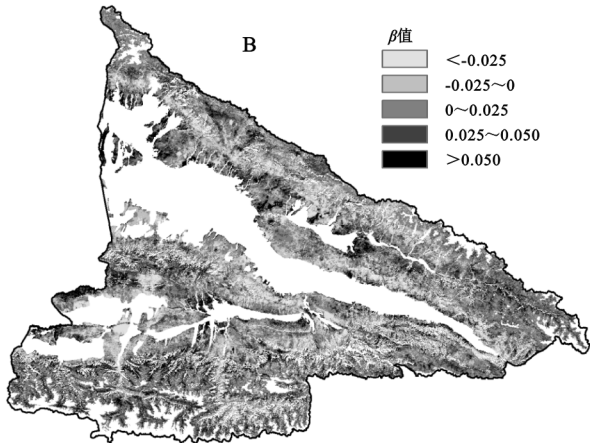
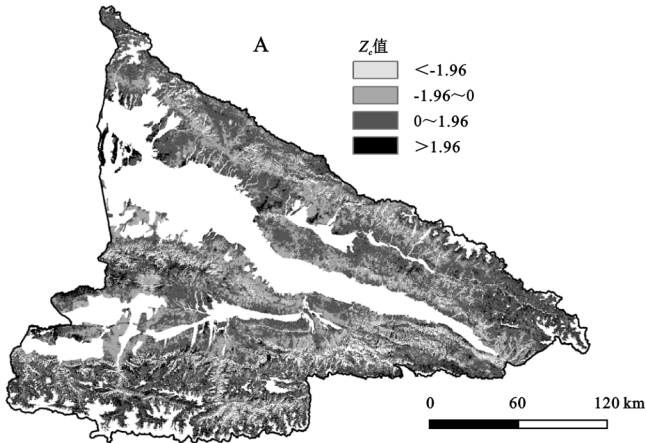


图 3 2000—2018 年 TINDVI 年际变化曲线

由图 3 可知,2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 总体呈波动增加的变化趋势,但根据 Mann—Kendall 趋势检验,其 Z_c 值为 1.05,未达到显著水平,其年变化率 β 值为 0.015。在年际波动上,TINDVI 于 2008 年和 2014 年出现较大谷值,值分别为 5.34,5.36;于 2007 年、2013 年和 2016 年出现较大峰值,值分别为 6.26,6.40,6.39;2008 年谷值前后的 2000—2007 年及 20008—2013 年分别出现两个明显的波动增加时段。

3.3 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 空间动态

基于 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 的逐年空间分布数据,根据 Mann-Kendall 检验的计算步骤,进行逐像元计算,获得 TINDVI 变化趋势 Z_c 值和变化率 β 值的空间分布数据(图 4),基于此分析 TINDVI 变化的空间特征。



注:1.96 为 Mann—Kendall 检验 $p=0.05$ 显著水平上 Z_c 临界值。

图 4 TINDVI 变化趋势 Z_c 值(A)和变化率 β 值(B)的空间分布

由图 4 可知,伊犁河谷绝大部分草地 TINDVI 呈增加趋势,经统计,其面积比例达到了 73.95%,但其中仅有 11.56%达到了显著水平,在空间上离散分布在河谷南部、东部及中西部的部分区域;整个区域

有 26.05%的区域 TINDVI 呈降低变化趋势,空间上主要分布在昭苏盆地、特克斯河下游周围及河谷北部的中山区域,而 TINDVI 降低达到显著水平的比例仅为 0.67%。

对于 TINDVI 的变化速率,全区大部分区域的变化率为 $-0.025\sim 0.050$ (图 4B),其比例达到了 85.91%,其中 TINDVI 变化率为 $0\sim 0.025$ 的分布比较广泛,比例达到了 41.29%,TINDVI 变化率为 $-0.025\sim 0$ 的比例较小,为 19.95%,空间上主要离散分布于河谷中部及北部的中山和低山区域,TINDVI 变化率为 $0.025\sim 0.050$ 的比例为 24.67%,空间上离散分布于河谷的不同区域;TINDVI 变化率 <-0.025 和 >0.050 的比例均小,比例分别为 5.99%和 8.10%,分布也均较为离散。

3.4 TINDVI 与 NDVI_{max} 年际变化的时空差异

相关研究表明,近年来伊犁河谷草地的 NDVI_{max} 及覆盖度变化总体均呈现减小趋势^[24-25,29],但根据本文的分析,伊犁河谷草地 TINDVI 却总体有所增大,空间上 73.95%草地的 TINDVI 呈现不同程度增加。鉴于本文研究与前人研究得出相反的结论,有必要对 TINDVI 及 NDVI_{max} 变化的差异性进行探讨。

对比 TINDVI 与 NDVI_{max} 年际变化曲线(图 5A),2000—2018 年 NDVI_{max} 变化总体呈减小趋势,据

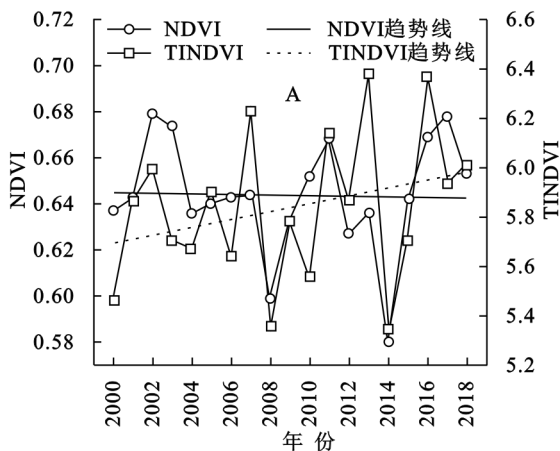
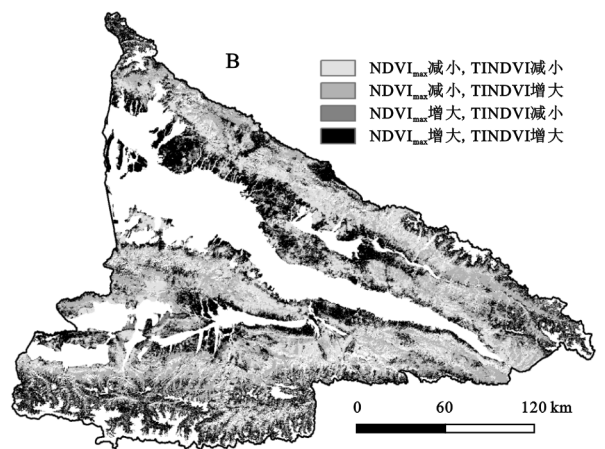


图 5 伊犁河谷草地 TINDVI 与 NDVI_{max} 年际变化曲线(A)及变化趋势的叠加图(B)

Mann-Kendall 趋势检验,其 Z_c 值为 -0.28 ,未达到显著水平,变化速率为 -0.0001 ;而 TINDVI 总体呈增加趋势, Z_c 值为 1.05 ,也未达到显著水平。在年际波动上,TINDVI 以及 NDVI_{max} 均在 2008 年及 2014 年出现较大谷值,在 2011 年出现较大峰值,但在 2005—2006 年、2009—2010 年及 2016—2017 年,NDVI_{max} 呈现增大变化,而 TINDVI 则呈现减小变化。

变化的空间分异方面,利用 TINDVI 变化趋势 Z_c 值图与 NDVI_{max} 变化趋势 Z_c 图进行叠加,对比 TINDVI 及 NDVI_{max} 变化趋势的空间差异(图 5B)。由图 5B 可知,伊犁河谷 57.28%的草地 NDVI_{max} 有所减小,42.58%草地 NDVI_{max} 和 TINDVI 的变化趋势相反,其中 NDVI_{max} 减小而 TINDVI 增加的比例达到了 36.91%,空间上主要位于 NDVI_{max} 及 TINDVI 值较高的中山区域,而 NDVI_{max} 和 TINDVI 呈相同变化趋势的面积比例虽然也达到了 57.42%,但在空间上主要分布在 NDVI_{max} 及 TINDVI 值相对较低的山前洪积冲积扇、低山丘陵及积雪时间较长的高山区域。



4 讨论

4.1 TINDVI 与 NDVI_{max} 年际变化时空差异的原因

由上文分析可知,2005—2006 年、2009—2010 年以及 2016—2017 年,全区平均 TINDVI 和 NDVI_{max} 出现相反的波动变化(图 5A),同时不同区域内,TINDVI 和 NDVI_{max} 的年际变化也不尽相同(图 5B)。NDVI_{max} 代表了生长季内植被覆盖到达最大时的 NDVI 值,而 TINDVI 代表生长季内 NDVI 的累积值。生长季内 NDVI 变化曲线即能直接展示 NDVI_{max} 值的大小,也能间接展示 TINDVI 值的大小,因此,对比不同年份及不同区生长季内 NDVI 变化曲线,能为解答 NDVI_{max} 及 TINDVI 时空变化产生差异的原因提供答案。

以 16 d 为间隔,计算生长季内(每年第 65—305 天)

TINDVI 与 NDVI_{max} 变化趋势相反年份(2005—2006 年、2009—2010 年以及 2016—2017 年),以及研究期前期(2000—2005 年)和末期(2014—2018 年) TINDVI 与 NDVI_{max} 变化趋势不同叠加类型区的区域 NDVI 平均值,制作生长季内 TINDVI 与 NDVI_{max} 变化趋势相反年份(图 6A)及研究期前期和末期两者变化趋势不同叠加类型(图 6B)的 NDVI 变化曲线,探讨 NDVI_{max} 及 TINDVI 时空变化产生差异的原因。

对于在 2005—2006 年、2009—2010 年及 2016—2017 年 NDVI_{max} 与 TINDVI 呈现截然相反的变化,由图 6A 可知,2005 年草地 NDVI 在达到最大值之前春夏季的第 65—161 天和之后夏秋季的第 209—289 天内其值均小于 2006 年同时间的值,致使 NDVI_{max} 虽有所增加,但 TINDVI 却发生减小;2009—2010 年主要是在春夏季的第 65—161 天内 2009 年 NDVI 值

小于 2010 年;2016—2017 年则主要是在夏秋季的第

193—257 天内 2016 年 NDVI 值小于 2017 年。

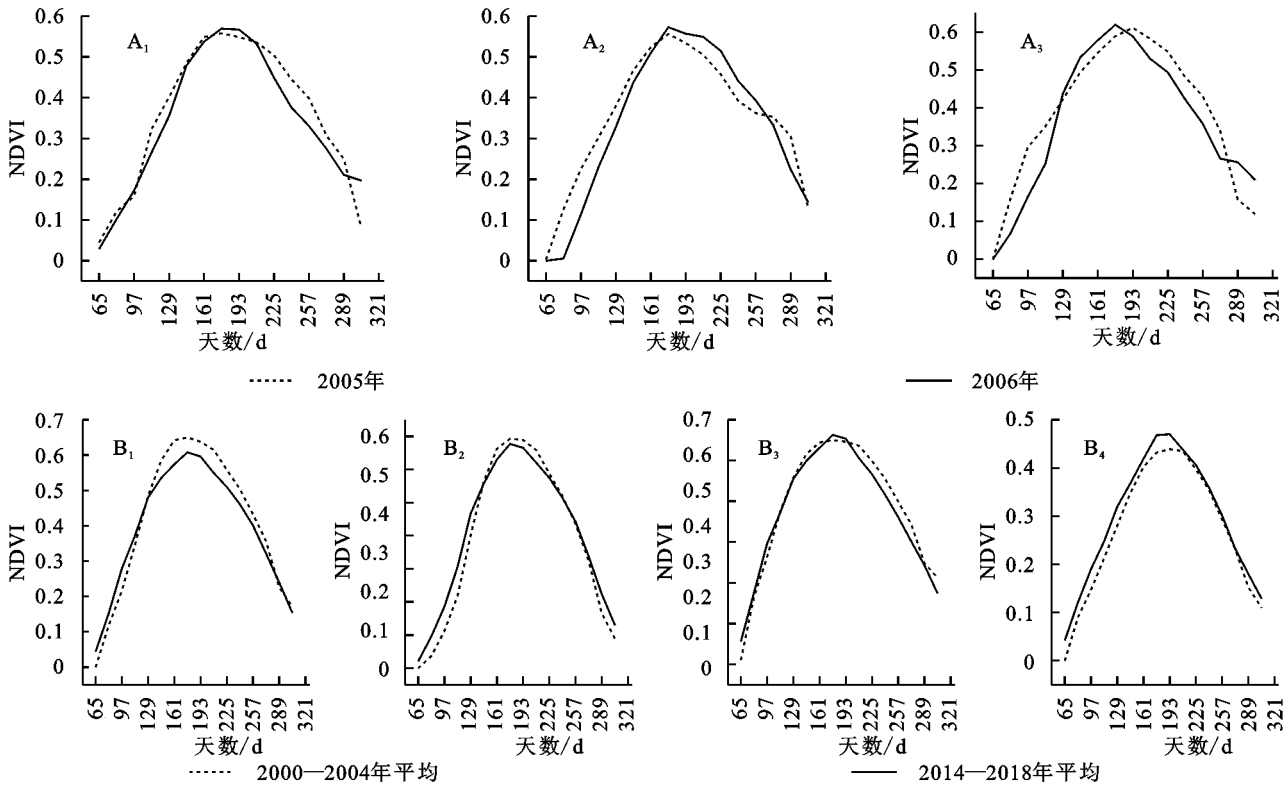


图 6 TINDVI 与 $NDVI_{max}$ 变化趋势相反年份及两者变化趋势不同叠加类型在研究期前期和末期 NDVI 生长季内的变化

而对于 $NDVI_{max}$ 及 TINDVI 变化趋势在空间上的差异,图 6B 分别展示了 $NDVI_{max}$ 及 TINDVI 变化趋势不同交互类型(图 5B)中 2000—2018 年的前 5 a (2000—2004 年)及末端 5 a(2014—2018 年)的 NDVI 平均年内变化曲线。由图可知,对于 $NDVI_{max}$ 及 TINDVI 均呈减小趋势的区域,主要是由于 $NDVI_{max}$ 减小的同时,在夏秋季的绝大部分时间内(第 129—289 天)NDVI 均有所减小(图 6B1);对于 $NDVI_{max}$ 减小而 TINDVI 增大的区域,主要是由于在春夏季的第 65—145 天内及秋季的第 257—305 天的 NDVI 均有所增大(图 6B2);对于 $NDVI_{max}$ 增大 TINDVI 减小的区域以及 $NDVI_{max}$ 增大 TINDVI 增大的区域,分别是由于夏秋季的第 209—305 天的 NDVI 均有所减小(图 6B3)或整个生长季 NDVI 几乎都有所增大(图 6B4)。

通过上述讨论和分析可以看出,生长季内 NDVI 随植被从返青到枯萎的变化过程也随区域的不同和年份的不同而存在明显差异,单利用植被生长达到最大时的 $NDVI_{max}$ 作为基础指标来评估草地的年际变化明显存在一定局限,用 TINDVI 作为参考指标来衡量草地植被变化具有一定优势。然而,虽然相关研究证实了 TINDVI 与玉米和大麦等农作的干物质量具有线性关系^[20-21],且 TINDVI 也常被作为植被生物量的相似或替代指标^[34-35],但产草量及净初等生产

力是衡量草地光合作用所积累有机质或干物质的关键指标,也是评价草地退化与否的重要参考^[4-5,28],而 TINDVI 与其关系如何仍需深入探究。

4.2 TINDVI 及 $NDVI_{max}$ 与降水和气温关系及其对比

气候变化是驱动植被变化的关键因素。分别计算 TINDVI 及 $NDVI_{max}$ 与降水和气温的偏相关系数,探讨 TINDVI 及 $NDVI_{max}$ 与降水和气温相关性及其差异(图 7—8)。

由图 7 可知,无论是对于 TINDVI 还是 $NDVI_{max}$,降水与草地植被变化的相关性明显高于气温,且与降水以正相关为主,这与前人关于天山及中亚区域的研究结果一致^[13-15]。而由图 8 可知,2000—2018 年生长季内伊犁河谷草地降水以减少为主,而全区气温均有所升高,气温升高促使水分蒸发增强,加剧了水分散失,而降水的减少又减少了水分来源,加剧水分对植被生长的胁迫,这可能是大面积草地 $NDVI_{max}$ 减小的原因。但在水分胁迫加剧的条件下,TINDVI 却发生增加,而由上文分析可知,TINDVI 增加主要得益于春季(3—4 月份)植被 NDVI 较大幅度的增加(图 6B2),经分析,2000—2018 年 3—4 月平均气温和累积降水均有所增加(气温和降水 Mann—Kendall 检验 Z_c 值分别为 0.28 及 0.98),为春季(3—4 月份) NDVI 的增加提供了有利条件。

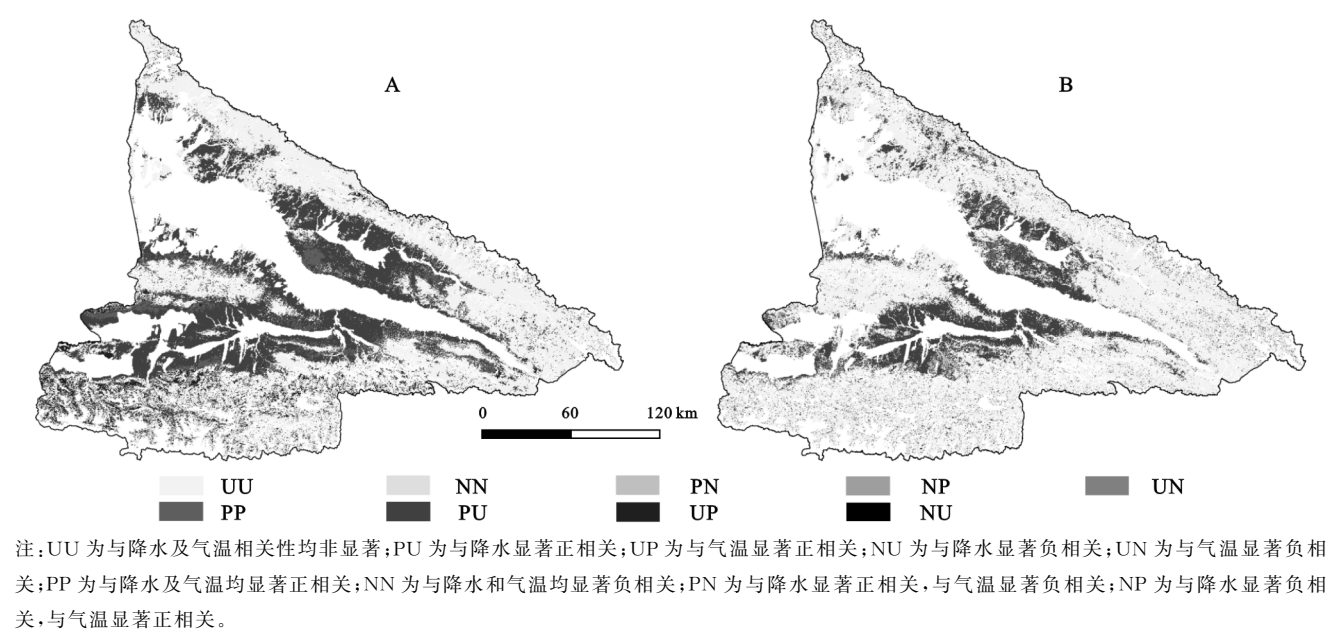


图 7 2000—2018 年 TINDVI 与降水和气温(A)及 NDVI_{max}与降水和气温(B)相关性空间分布

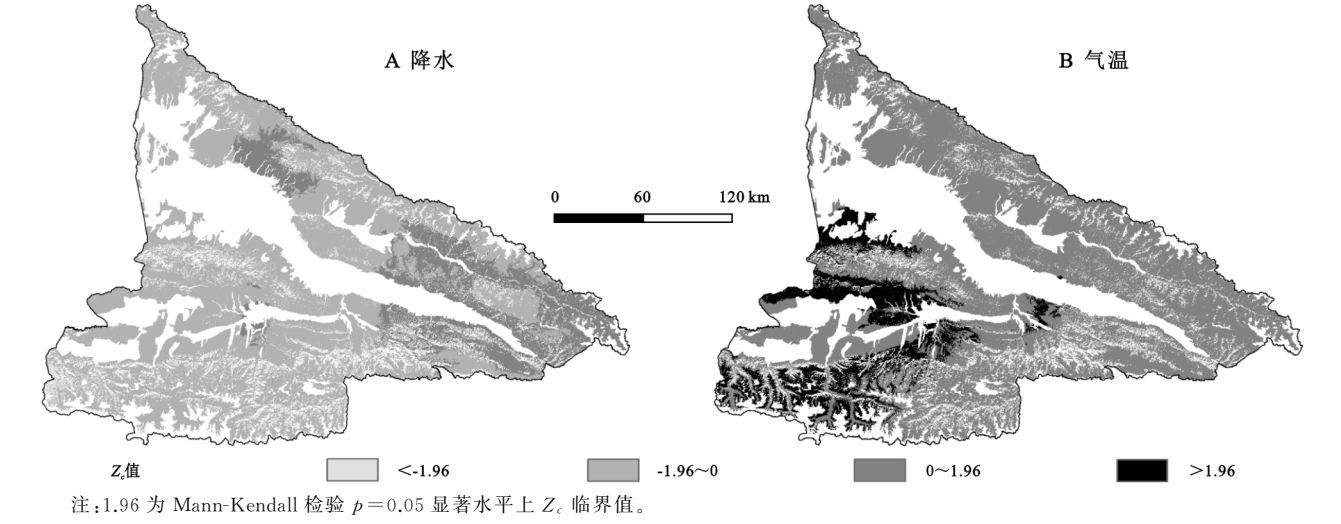


图 8 2000—2018 年变化趋势 Z_c 值空间分布

气候是驱动植被变化的关键因素,而海拔又使气候对植被的影响产生明显的海拔分异,因而植被与气候变化的相关性也常存在明显的海拔分异^[4-5]。根据图 7A,在伊犁河谷中部低海拔区和中海拔区,植被与降水呈正相关而与气温相关性较弱,而在河谷周边的高海拔区,植被气温呈正相关而与降水呈负相关。伊犁河谷地处亚欧大陆干旱与半干旱区的腹地,水分是植被生长的关键限因子,尤其在海拔较低的区域,因而低海拔区植被与降水变化呈正相关^[14];而高海拔区,降水虽然相对丰沛,但冬季漫长,全年气温明显低于平原区,气温则是限制植被生长的关键因子,因而植被变化气温呈正相关,与降水呈负相关^[14,36]。植被与气候相关性的海拔分异不仅在伊犁河谷有所表现,在整个天山、祁连山和青藏高原等区域均有所表现^[14,4-5,37]。

对比 TINDVI 及 NDVI_{max} 与降水和气温的相关性

(图 7),经计算,TINDVI 与降水和气温呈显著相关的比例分别达到了 38.51%和 12.22%,而 NDVI_{max}的该比例则分别为 22.33%和 5.27%,TINDVI 与降水和气温变化相关性明显高于 NDVI_{max},尤其是与气温的相关性,可见 TINDVI 对气候变化响应更为敏感;同时,在空间上,相对与 NDVI_{max},TINDVI 与降水和气温相关性的海拔分异规律也更为明显,这也间接表明 TINDVI 对气候变化响应更为敏感。相对于植被生长达到覆盖最高时的 NDVI_{max},TINDVI 包含了整个生长季内植被生长过程中 NDVI 变化的信息,而累积降水和平均气温也包含有整个生长季内各自信息,这应该是 TINDVI 对气温和降水变化响应更敏感的原因。

5 结论

(1) 根据多年平均数据,NDVI 累加计算得到的

伊犁河谷草地 TINDVI 的取值范围约在 0~11;空间上 TINDVI 海拔分异明显,TINDVI 的高值(>8.0)区域主要分布在中山区域,河谷平原区及冰雪覆盖时间较长的高山区为 TINDVI 低值(<4.0)区;全区 75.69%的区域 TINDVI>4.0。

(2) 2000—2018 年伊犁河谷草地 TINDVI 总体呈增大趋势,但未达到显著水平,其年变化速率为 0.015。空间上,全区 73.95%的区域 TINDVI 有所增大,其中 11.56%达到了显著水平,而 TINDVI 变化呈减小趋势的面积比例仅为 0.67%。

(3) 2000—2018 年伊犁河谷草地 NDVI_{max} 与总体呈非显著减小趋势,其年变化速率为 0.000 1,空间上 57.28%的 NDVI_{max} 发生减小,42.58%的区域 NDVI_{max} 与 TINDVI 变化趋势相反,而生长季内草地生长过程所存在的年际变化是两者变化趋势相反的原因。

(5) 相对与 NDVI_{max},伊犁河谷草地 TINDVI 对降水和气温变化响应更敏感。河谷低海拔和中海拔区草地覆盖与降水呈显著正相关,而高海拔区与气温呈显著负相关,降水与草地覆盖变化的相关性明显高于气温。

(4) 伊犁河谷草地植被 TINDVI 变化的时间和空间差异是因为生长季内草地 NDVI 变化过程在不同年份及不同区域存在差异,利用 TINDVI 作为衡量草地植被变化的参考指标具有一定优势。

参考文献:

- [1] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2):229-233.
- [2] Godínez-Alvarez H, Herrick J E, Mattocks M, et al. Comparison of three vegetation monitoring methods: Their relative utility for ecological assessment and monitoring [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(5):1001-1008.
- [3] 宋明华,刘丽萍,陈锦,等.草地生态系统生物和功能多样性及其优化管理[J].*生态环境学报*, 2018, 27(6):193-202.
- [4] 李翔,王忠,赵景学,等.念青唐古拉山南坡高寒草甸生产力对温度和降水变化的敏感性及其海拔分异[J].*生态学报*, 2017, 37(17):5591-5601.
- [5] 彭思茂.西藏植被净初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应[D].武汉:武汉大学, 2015.
- [6] 李婧梅,蔡海,程茜,等.青海省三江源地区退化草地蒸散特征[J].*草业学报*, 2012, 21(3):223-233.
- [7] Genxu W, Guangsheng L, Chunjie L. Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope hydrological processes in a permafrost watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 444:22-33.
- [8] 温庆可,张增祥,汪潇,等.西北农牧交错区草地类型遥感划分方法[J].*农业工程学报*, 2010, 26(3):171-177, 390.
- [9] 万华伟,高帅,刘玉平,等.呼伦贝尔生态功能区草地退化的时空特征[J].*资源科学*, 2016, 38(8):1443-1451.
- [10] 王正兴,刘闯, ALFREDO H. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J].*生态学报*, 2003, 23(5):979-987.
- [11] DeFries R S, Townshend J R G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17):3567-3586.
- [12] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386(6626):698-702.
- [13] 陈秀妍,付碧宏,时丕龙,等.2000—2016 年中亚天山植被变化及气候分异研究[J].*干旱区地理*, 2019, 42(1):162-171.
- [14] 张琪,袁秀亮,陈曦,等.1982—2012 年中亚植被变化及其对气候变化的响应[J].*植物生态学报*, 2016, 40(1):13-23.
- [15] 杜加强,高云,贾尔恒·阿哈提,等.近 30 年新疆植被生长异常值时空变化及驱动因子[J].*生态学报*, 2016, 36(7):1915-1927.
- [16] 李登科,郭锐.陕西 MODIS/NDVI 的区域分布和季节变化[J].*中国沙漠*, 2008, 28(1):108-113.
- [17] Hill M J, Donald G E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3):367-384.
- [18] Townshend J R G, Goff T E, Tucker C J. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales[J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985(6):888-895.
- [19] Tucker C J, Holben B N, Elgin J J H, et al. Relationship of spectral data to grain yield variation[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1980, 46(5):657-666.
- [20] Calera A, González-Piqueras J, Melia J. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1):97-109.
- [21] Teng X, Dong Y, Meng L. The study of winter wheat biomass estimation model based on hyperspectral remote sensing[R]. *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*. Springer, Cham, 2015:163-169.
- [22] 范天文,闫凯,靳瑰丽.伊犁河谷天然草地退化现状及

修复措施[J].草业科学,2008,25(3):22-25.

[23] 古孙阿依·吐尔孙.伊犁谷地草地退化因子分析及治理对策研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.

[24] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被 NDVI 变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.

[25] 闫俊杰,张静,雷雨,等.2000—2016 年新疆伊犁河谷草地 NDVI 变化趋势分析[J].草地学报,2018,26(4):859-868.

[26] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J].干旱气象,2006,24(2):1-4.

[27] 赵丽,杨青,韩雪云.1961—2009 年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):82-89.

[28] 周鑫,盛建东,张文太,等.基于 MODIS 数据的伊犁地区草地地上生物量反演[J].草地学报,2015,23(1):27-33.

[29] 闫俊杰,黄辉,崔东,等.2001—2015 年伊犁河谷草地植被覆盖度时空变化特征[J].华中师范大学学报:自然科学版,2017,51(6):865-872.

[30] 郭彦玮.新疆草原生态保护补助奖励政策实施效果及其对策研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.

[31] 张仁平,郭靖,冯琦胜,等.新疆地区草地植被物候时空变化[J].草业学报,2018,27(10):68-77.

[32] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 19485.

[33] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945,13(3):245-259.

[34] Nakayama T. Simulation of the effect of irrigation on the hydrologic cycle in the highly cultivated Yellow River Basin[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(3):314-327.

[35] Forzieri G, Feyen L, Cescatti A, et al. Spatial and temporal variations in ecosystem response to monsoon precipitation variability in southwestern North America [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014,119(10):1999-2017.

[36] Mohammad A, Wang X, Xu X, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,178:21-30.

[37] 武正丽.2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其对气候的响应研究[D].兰州:西北师范大学,2014.



(上接第 330 页)

[16] Sativ P. Landscape vulnerability and rehabilitation issues: A study of hydropower projects in Garhwal region, Himalaya [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2265-2278.

[17] Yuan C, Zhang Z W, Gao J H, et al. Evaluating landscape ecological sensitivity of an estuarine island based on landscape pattern across temporal and spatial scales [J]. Ecological Indicators, 2019,101(6):221-237.

[18] 苏显力.基于移动窗口法的下辽河平原区农田景观异质性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.

[19] 解亚丽,柯小玲,闵园园,等.基于超效率 DEA 模型的三峡库区生态效率评价及空间演化格局分析[J].中国环境管理,2020,12(1):113-120.

[20] 梅昭容,李云驹,康翔,等.基于移动窗口分析法的矿区景观格局时空演变研究[J].国土资源遥感,2019,31(4):60-68.

[21] 杨青,陆荫,张强.祁连山国家级自然保护区所属县域生态环境评价[J].甘肃科技,2019,35(21):6-7.

[22] 张寒,王浩程,王琳.基于 ArcGIS 的山东省潍坊市蔡家沟村生态敏感性差异分析[J].山东农业科学,2020,52(5):92-99.

[23] 陶帅,邝婷婷,彭文甫,等.2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力分析:以宜宾市为例[J].生态学报,2020,40(14):5029-5043.

[24] 李素萃,赵艳玲,肖武,等.巢湖流域景观生态质量时空分异评价[J].农业机械学报,2020,51(1):203-213.