

DOI: 10.5846/stxb201506071149

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

Liu Y, Li C Z, Liu Z H, Deng X Y. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6198-6208.

1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化

刘 洋^{1,2,3}, 李诚志^{1,2,3}, 刘志辉^{2,3,*}, 邓兴耀^{1,2,3}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 利用美国国家航天航空局 (NASA) 全球检测与模型组 (Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS) 的归一化植被指数数据 (NDVI) 和英国东英格利亚大学气候研究所 (Climate Research Unit, CRU) 全球气温降水数据 (1982 至 2013 年), 研究新疆 1982—2013 年植被覆盖格局的时空变化。运用一元线性回归法分析近 32 年来新疆 NDVI 变化趋势; 运用 Theil-Sen median 与 Mann-Kendall 检验研究新疆 NDVI 格局及趋势特征; 并将检验的结果和 Hurst 指数的结果相结合, 研究新疆 NDVI 格局的可持续性特征。研究表明: (1) 新疆植被覆盖在空间分布上差异明显, 其中北疆优于南疆, 西北优于东南; (2) 近 32 年来新疆年 NDVI 均值在 0.10—0.12 之间波动, 且存阶段变化性; (3) 新疆植被改善趋势的区域占总面积的 25.89%, 轻微退化的区域占总面积的 18.00%; (4) 从可持续性来看, 新疆大部分地区植被变化将保持现在的趋势, 但局部地区具有反持续性, 持续性改善的面积占全疆总面积的 24.39%, 持续性轻微退化的区域占 15.73%, 另外 59.88% 为严重退化和未来变化趋势无法确定区域。开展 NDVI 空间格局的变化研究, 对于干旱区新疆来说具有重要的理论和实际意义。

关键词: 新疆; 植被覆盖变化; 趋势分析

Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI

LIU Yang^{1,2,3}, LI Chengzhi^{1,2,3}, LIU Zhihui^{2,3,*}, DENG Xingyao^{1,2,3}

1 Xinjiang University, School of Resources and Environment Science, Urumqi 830046, China

2 Xinjiang University, Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang University, Institute of Arid Ecology and Environment, Urumqi 830046, China

Abstract: The aim of this study was to adopt the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data provided by the Global Inventor Modeling and Mapping Studies (GIMMS) of NASA and combine them with the global temperature and precipitation data supplied by the Climatic Research Unit of East Anglia University (CRU) in order to study vegetation coverage patterns in Xinjiang from 1982 to 2013. The linear regression method was used to study the trends of the changes in NDVI in Xinjiang over the last 32 years. The Theil-Sen median slope trend analysis and the Mann-Kendall test were also used to study the patterns and trends of NDVI in Xinjiang. The results of these analyses and of the Hurst index to determine the sustainability characteristics of NDVI patterns in Xinjiang show that (1) from the point of view of spatial distribution, the vegetation cover in the North and the South is significantly different. Coverage in the north is better than that in the

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题 (2012BAC23B01); 水利部公益性行业科研专项经费 (201301103); 国家自然科学基金面上项目 (41171023); 国家自然科学基金 (41301286, 41561100); 新疆维吾尔自治区社会科学基金 (14BGL041); 新疆大学博士启动基金 (BS120137)

收稿日期: 2015-06-07; **网络出版日期:** 2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzh@xju.edu.cn

south, and that in the northwest is superior to that in the southeast; (2) when viewed over time, the annual mean value of NDVI over the last 32 years in Xinjiang is between 0.10 and 0.12. An observable change in phase exists. (3) The vegetation distribution pattern reveals that 25.89% of the total area of Xinjiang shows a trend towards improvement in vegetation cover. Degradation in the area under vegetation accounts for 18.00% of the total area in Xinjiang. Overall, NDVI trends remain relatively stable in Xinjiang. (4) From the point of sustainability, most of the changes in vegetation cover maintained the development trends that are currently observed, with anti-continuity in some areas. Areas showing a robust trend towards improvement accounted for 24.39% of the total area in Xinjiang, and the areas that continue to degenerate account for 15.73%. Additionally, 59.88% of the total area in Xinjiang is affected by serious degradation of vegetation and uncertain development. Research on the changes in NDVI spatial patterns in Xinjiang has theoretical and practical significance for this arid region.

Key Words: Xinjiang Province; vegetation cover change; trend analysis

植被是连接大气、水体和土壤的纽带,也是陆地地表生态系统的核心组成部分^[1]。植被覆盖度同植被茂密程度及植被进行光合作用面积的大小呈现出鲜明的对应关系,植被覆盖度的变化改变陆地地表下垫面属性,对水土保持、气候调节以及整个生态系统的稳定等方面都有显著的影响^[2]。归一化植被指数(NDVI)是当前广泛应用的表征植被覆盖的参数^[3]。将 NDVI 影像数据用于监测植被覆盖空间格局的变化,了解干旱区植被覆盖的时空变化的方式、过程、机理,寻求改善和提高区域自然环境质量的方法和途径,从而为改善人们的生活居住环境、促进区域经济社会可持续发展提供参考。

长时间序列的 NDVI 数据集已经成功地应用于植被的动态监测^[4]。美国国家航天航空局(NASA)的全球监测与模型研究组(global inventory modelling and mapping studies, GIMMS)根据搭载在 NOAA 系列卫星的先进甚高分辨率雷达(the Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)影像,制作了间隔 15 d 的最大值合成 GIMMS-NDVI 产品,分辨率为 8 km×8 km;法国空间研究中心(CNES)研制的 SPOT 地球卫星观测系统(SPOT/VGT)的 SPOT-NDVI 合成产品,分辨率为 1 km×1 km;美国国家航天航空局(NASA)地球观测系统(EOS)的 MODIS 中分辨率成像光谱数据衍生出的 MODIS-NDVI 数据产品,均在全球范围内长期监测植被覆盖度变化,数据时空精度高,且可以免费分享^[5-10]。同时,基于长时间序列的 NDVI 数据集,国内外学者在不同的空间和时间尺度上对地表植被覆盖时空变化规律进行了深入分析研究,并建立了一些广泛应用的分析方法。如采用主成分分析法^[5]、一元线性回归^[6]、变向量分析^[7]、Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验^[8]、傅立叶变换^[9]和小波分析方法^[10]等。另外,研究者将长时间序列 NDVI 数据与同期的气温、降水等数据相结合,对植被覆盖变化与气候因子相关性进行了分析^[11-12]。

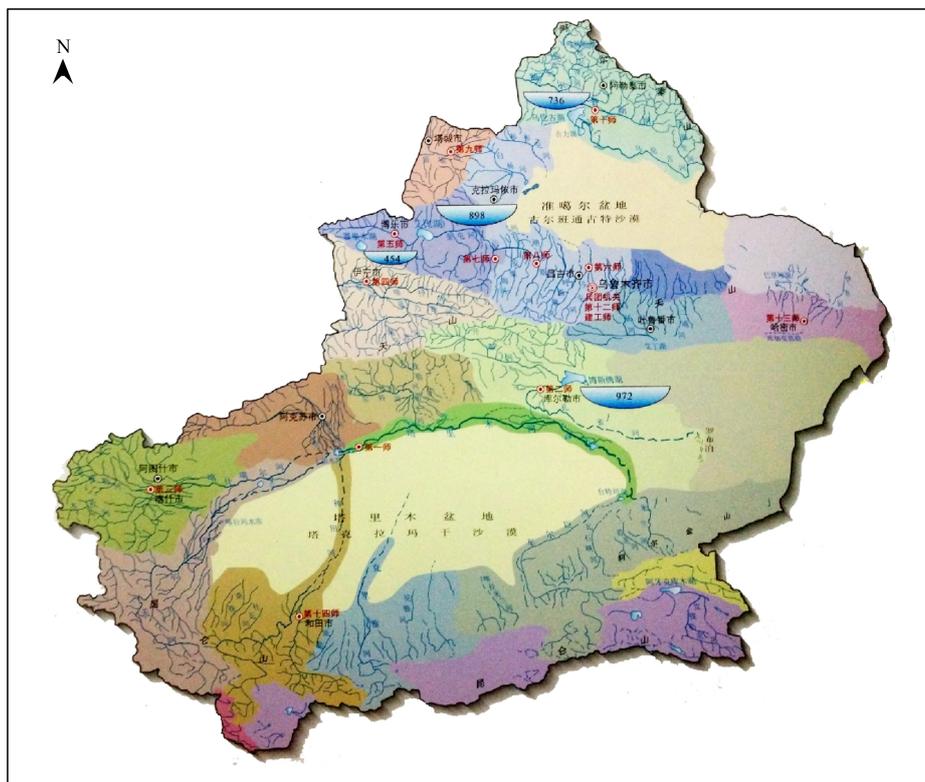
新疆位于中国的西北部,地处欧亚大陆中心,属于典型的温带大陆型干旱气候。新疆自然植被的特点是:平原植被稀疏,山地垂直带明显,森林面积有限,总体植被覆盖度低,生态系统脆弱。近年来,随着全球气候变化和人类活动的不断加剧,该地区植被覆盖随之发生变化^[13]。利用遥感数据对新疆植被覆盖状况的研究有了大量的成果,李秀花等^[14]利用 1982—2001 年 NOAA/AVHRR 的 NDVI 数据分析发现,新疆植被覆盖的改善与新疆的暖湿化气候有关,而降水是控制植被覆盖的主要气象因子。陈曦等^[15]利用 1982—2006 年的 GIMMS-NDVI 数据和新疆天山北坡气象数据分析了天山北坡 NDVI 与气温、降水的响应特征及敏感性;王贵钢,周可法等^[16]利用 1999—2008 年的 SPOT-NDVI 数据,研究了不同土地覆盖类型的 Hurst 指数的分布规律及其差异;赵霞等^[17]利用 1982—2006 年 GIMMS-NDVI 数据,结合植被、地形和气候等资料,研究了新疆植被活动的年际变化及季节差异;石磊^[18]利用 GIMMS-NDVI 数据对新疆植被进行了专家分类,分析了 1982—2006 年的新疆森林面积、蓄积量和密度的动态变化及可能原因;孙钦明等^[19]以 1981—2009 年 GIMMS-NDVI 数据和同期降水、温度数据为基础,采用小波互相关的方法,选取新疆北部额尔齐斯河流域、天山北坡、准噶尔西部山地、博尔塔拉谷地和伊犁河谷,研究了近 29a 各区域的植被覆盖变化特征及其对区域降水、温度在不同时间尺度和时滞下的响应关系。

上述研究成果主要针对区域 NDVI 均值的时序分析,但这不能反应出具体某区域的植被覆盖格局动态变化,同时,NDVI 影像的异常值会对趋势变化带来一定的偏差^[20-21]。再者,很少有研究者对新疆的植被覆盖变化趋势进行预测。鉴于上述情况,文中选用 GIMMS-NDVI 数据集对新疆植被变化趋势进行研究。尽管空间分辨率相对较低(8 km×8 km),但与其他数据集相比,GIMMS-NDVI 数据集时间序列最长,用于研究的年数共 32 年,相对其他 NDVI 数据产品更能充分地反应出变化趋势。将 GIMSS-NDVI 数据进行一系列预处理后,裁剪出新疆,并结合变异系数、Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验及 Hurst 指数等方法,研究新疆植被覆盖格局的时空变化特征、波动特征、变化趋势及未来变化趋势。将新疆 32 年 NDVI 影像数据用于监测植被覆盖度变化特征,可以有效地进行生态环境建设和促进区域生态保护。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

新疆位于中国的西北部,地处欧亚大陆中心,地理坐标介于 34°—50°N,73°—97°E 之间,面积约为 160 万 km²。北部有阿尔泰山脉、南部有昆仑山脉,天山山脉横亘中央,把新疆分割为南北两大部分,形成三大山系包围两大盆地的地形轮廓。习惯上称天山以北为北疆,天山以南为南疆(图 1)。新疆气候具有典型的干旱气候特征,其降水稀少(年平均降水 145 mm 左右),相对湿度低,冬季漫长,春、秋短,夏季日照长,昼夜温差大^[22]。新疆平原区植被稀疏,山地垂直带明显,北疆的植被覆盖度约 30.00%—40.00%,而南疆不到 10.00%。由于缺少水源,新疆多为裸地、荒漠等,生态环境脆弱^[22]。



审图号: 新S(2015)172号

图 1 新疆示意图

Fig.1 Map of the Xinjiang

1.2 数据获取与方法

1.2.1 数据来源

文中所用 NDVI 数据产品采用美国全球检测与模型组(Global Inventor Modeling and Mapping Studies,

GIMMS)发布的间隔 15 d 合成的最大值 NDVI 数据集,空间分辨率为 8 km×8 km,时间序列 1982 年 1 月至 2013 年 12 月。该数据经过辐射校正、大气校正、坐标转换等预处理,再进一步对每日、每轨图像进行几何精校正、除云、除坏线等处理后,进行 NDVI 计算并合成。

计算归一化植被指数(NDVI)是由 AVHRR 的第一通道(可见光)和第二通道(近红外)反照率的比值参数得到:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS})$$

式中,NIR 和 VIS 分别是可见光(0.58—0.68 μm)和近红外(0.725—1.10 μm)的反照率。

文中使用的气温和降水资料来源于英国 East Anglia 大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)发布的全球陆地表面月平均气候资料。CRU 整合了已有的若干个知名数据库,重建了一套覆盖完整、高分辨率、且无中断的地表气候要素数据集,空间分辨率 0.5°×0.5°。该资料不包含卫星观测,不使用模式同化,仅仅用数学方法对数据源进行整合和插值。CRU 气候资料尽管包含插值带来的误差,但经对比,CRU 气温和降水除青藏高原西部外与中国台站观测气温和降水具有很好的一致性^[23-24],故可以用作本文的研究。

1.2.2 研究方法

文中采用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验、Hurst 指数法,用于研究新疆植被覆盖的时空变化特征。

(1) 变异系数法

用变异系数法分析植被覆盖的波动规律^[25]。计算公式为:

$$\text{CV}_{\text{NDVI}} = \frac{\sigma_{\text{NDVI}}}{\overline{\text{NDVI}}} \quad (1)$$

式中, CV_{NDVI} 是指某时序的 NDVI 值的变异系数。 σ 表示标准差, $\overline{\text{NDVI}}$ 表示均值,用于分析 NDVI 在时间序列上的稳定性。 CV_{NDVI} 值越大,表明数据分布越离散,波动较大,时序不稳定;反之表明数据分布较为集中,时序较为稳定。

(2) Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合,用以判断长时间序列数据的趋势^[26]。其中,Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j}{i - j}, \forall i < j \right) \quad (2)$$

式中, $1 < i < j < n$ 。 β 是计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数,用以量化单调趋势。当 $\beta > 0$ 时,反映了这一时间序列的植被数据呈增强趋势;反之,则呈现出衰减趋势。

Mann-Kendall 属于非参数检验方法,与其它参数检验的方法相比,不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值干扰,更适合顺序变量。Mann-Kendall 检验已经在水文、气象得到成功应用^[27-29],用于判断时间序列中是否具有上升或下降的趋势。

在用 Mann-Kendall 法进行 NDVI 趋势检验时,将某时序的 NDVI 值看作一组独立分布的样本数据,以参数 Z_c 作为像元 NDVI 衰减指标,计算公式如下:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(NDVI_k - NDVI_i) \quad (4)$$

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

$$\text{sign}(NDVI_k - NDVI_i) = \begin{cases} 1 & NDVI_k - NDVI_i > 0 \\ 0 & NDVI_k - NDVI_i = 0 \\ -1 & NDVI_k - NDVI_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $NDVI_k$ 和 $NDVI_i$ 为样本时序数据集合, n 为数据集合长度, sign 为符号函数。在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z_c| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表示研究的时间序列数据在 α 水平上显著的变化, 其中, $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 是标准正态偏差。 $Z = \pm 2.576$ 表示显著性水平 $\alpha = 0.01$, $Z = \pm 1.96$ 表示显著性水平 $\alpha = 0.05$, $Z = \pm 1.645$ 表示显著性水平 $\alpha = 0.10$ 。一般取 $\alpha = 0.05$, 当 $|Z_c| > 1.96$ 时表示时间序列置信水平 $\alpha < 0.05$, $|Z_c| < 1.96$ 表示置信水平 $\alpha > 0.05$ 。

(3) Hurst 指数分析

Hurst 指数用于定量描述时间序列数据的可持续性, 在水文学、经济学、气候学等领域有着广泛的应用。

考虑 NDVI 时间序列 $\{NDVI(t)\}$, $t = 1, 2, 3, 4, \dots, n$, 对于任意正整数 $t \geq 1$, 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{NDVI}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} NDVI_{(t)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

计算累积离差为:

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^t (NDVI_{(i)} - \overline{NDVI}_{(\tau)}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (8)$$

极差序列为:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

标准差序列为:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (NDVI_{(t)} - \overline{NDVI}_{(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

计算 Hurst 指数如下:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (11)$$

式中, H 即为 Hurst 指数, 对公式 (11) 两边同时取对数即得到 Hurst 经验公式。基于时间序列并利用 Hurst 经验公式得到一簇 H 值进行最小二乘法拟合, 得出的直线斜率即为修正后的 Hurst 指数 (H)。它揭示了时间序列的分形特征。

不同的 H 对应不同的时间序列趋势变化: 当 $H = 0.5$ 时, 表明时间序列是完全独立的, 没有相关性或只是短程相关; $0 < H < 0.5$ 时, 意味着未来的变化状况与过去趋势相反, 即反持续性, H 越小, 反持续性越强; 当 $H > 0.5$ 时, 意味着未来的变化状况与过去趋势一致, H 越大, 持续性越强。

2 结果和分析

2.1 新疆植被覆盖的空间分布特征

基于 1982—2013 年的 GIMMS-NDVI、CRU 气温和降水量数据的每一像元逐年均值, 用以说明新疆植被覆盖格局变化特征 (图 2)。

将 NDVI 值范围分为 5 级, 统计结果如表 1。新疆植被覆盖区域 (NDVI 值大于 0.10) 占全疆面积 33.70%, 无植被覆盖区域 (NDVI 值小于 0.10) 占总面积 66.30%, 该区域主要由湖泊、冰川、戈壁、沙漠等组成。植被覆盖的低值区域 (NDVI 值在 0.10—0.40) 占总面积的 32.27%, NDVI 值大于 0.40 的区域占总面积的 1.43%。

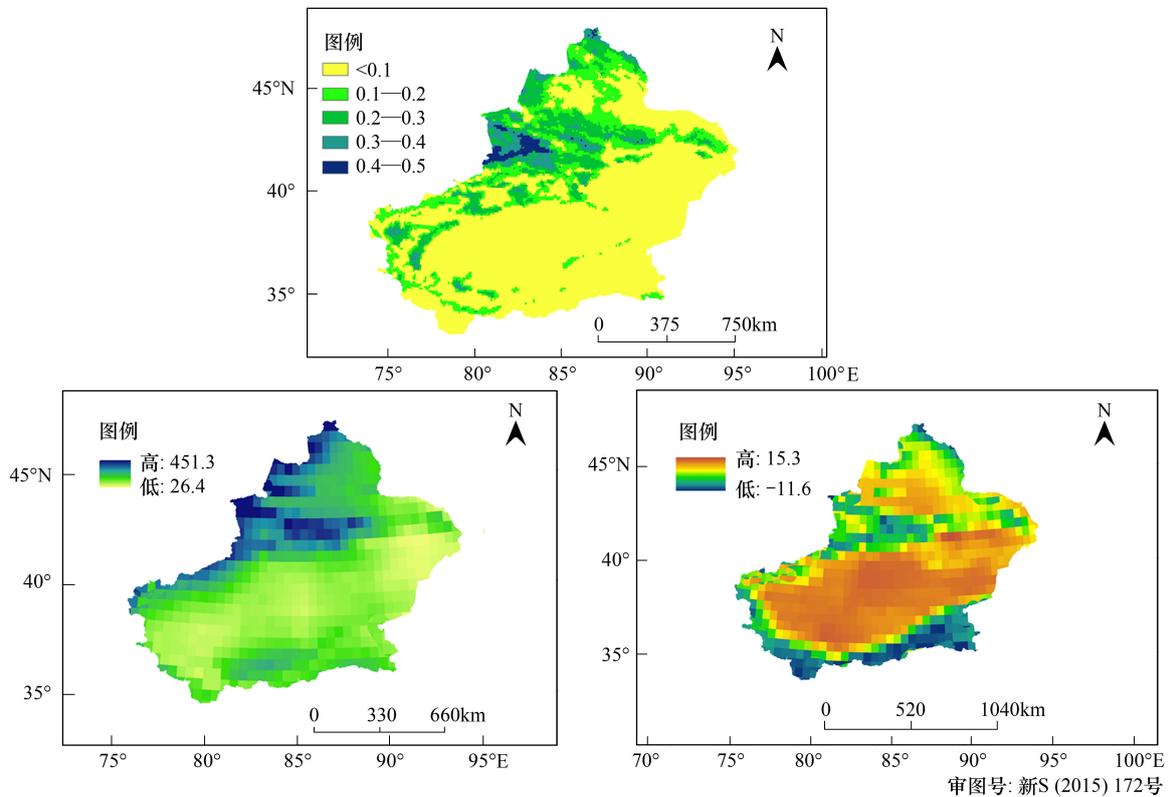


图 2 新疆 1982—2013 年年均 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、年均降雨量、年均气温空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average annual value of NDVI, precipitation and temperature in the Xinjiang from 1982 to 2013

表 1 新疆 NDVI 分级

Table 1 Coefficient of level of NDVI in Xinjiang

NDVI	占总面积百分比 Area percentage/%	NDVI	占总面积百分比 Area percentage/%
0.4<NDVI<0.5	1.43	0.3<NDVI<0.4	5.02
0.2<NDVI<0.3	11.25	0.1<NDVI<0.2	16.0
<0.1	66.3		

新疆 NDVI 空间分布特征有明显的规律性变化。北疆植被覆盖度高于南疆,西部和西北部植被覆盖度优于东部和东南部。降水量不同是导致植被南、北疆差异的主要原因。北疆的降水主要来自大西洋和北冰洋,受西风气流影响,带来较多降水;而南疆地处沙漠边缘,蒸发量大,降水量小。北疆的西部植被覆盖状况最好,全疆范围内的 NDVI 最大值出现在此区域的伊犁河谷,为 0.4861。伊犁河谷是形似向西开口的三角形,有 3 条自西向东逐渐收缩的山脉,全河谷处于迎风面,年降水量约 400 mm^[31]。由于降水充沛,山地自然植被丰富。其次是北部沿边境地带以及天山北麓沿线的植被覆盖区域,西风环流带来的大西洋水汽,遇阿尔泰山脉受逼抬升降水,年降水量约在 200 mm^[31]。南疆也有较好的植被覆盖,分布在水、热组合条件适宜的西部昆仑山山脉部分的带状山麓地带及零散在盆地中的沙漠绿洲区域。北疆和南疆植被覆盖低值区域集中在两大沙漠腹地(塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠)及周边荒漠地区,并延伸到邻省省界处的区域。这种现象是由于来自大西洋的水汽被帕米尔高原与南天山阻隔,造成新疆东部年降水量不足 150 mm,塔里木盆地年均降水量少于 100 mm,同时年均气温又在 10℃ 以上造成的。

2.2 新疆植被覆盖度的时间变化特征

为了研究新疆植被覆盖区域 NDVI 随时间变化的特点,取 1982—2013 年 NDVI,CRU 气温和降水量的区域均值进行时序上的分析,代表逐年的植被覆盖、气温、降水量的状况,并制作年际变化图(图 3)。

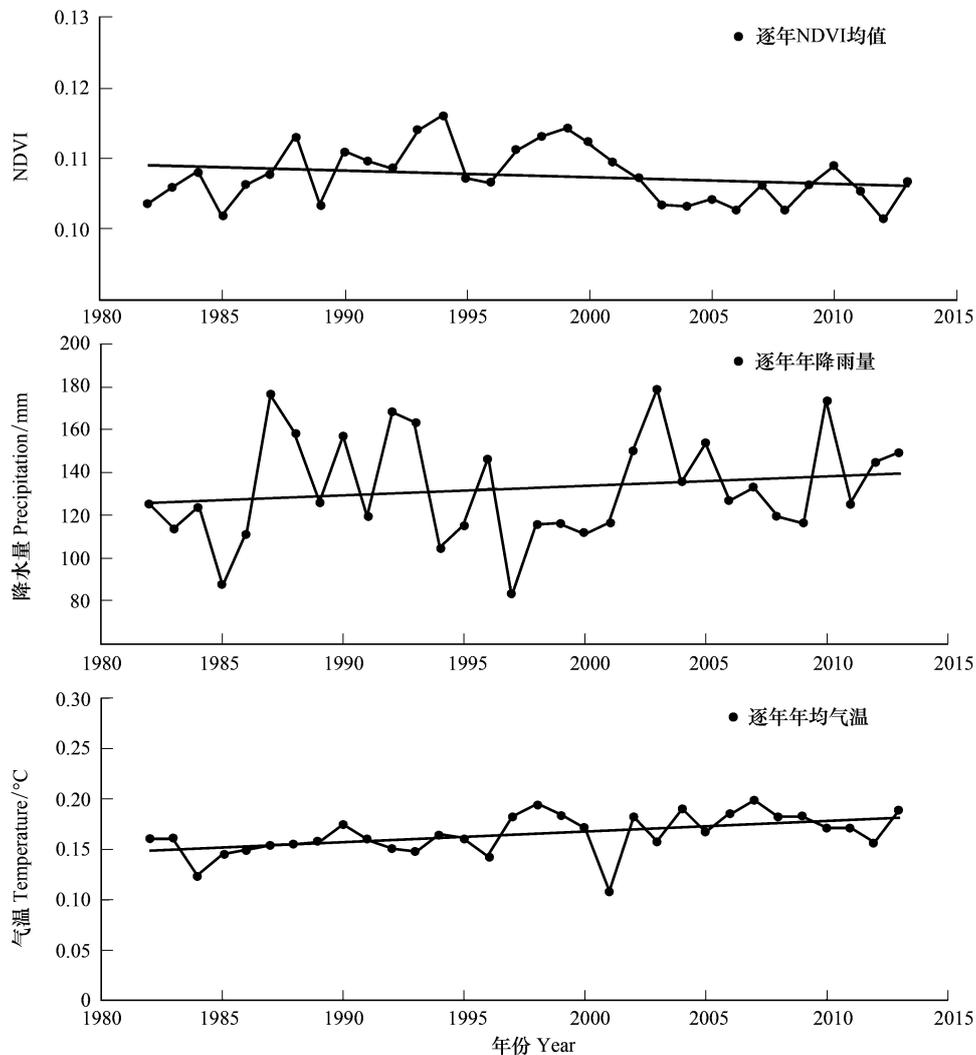


图3 1982—2013年新疆年际NDVI、降水量、气温变化

Fig.3 Inter-annual variation of the NDVI, precipitation and temperature in the Xinjiang from 1982 to 2013

从图3可以看出,1982—2013年,新疆NDVI逐年均值平稳分布在0.10—0.12。最小值出现在2012年,最大值出现在1994年。32个NDVI数据变化范围小,这表明新疆的植被覆盖变化虽然总体稳定,但存在明显的阶段变化。从年际变化来看,20世纪80年代总体变化呈增长趋势,1986年以前增长较缓慢,之后迅速增长,但在1989年有一个较大的下降;进入90年代以后,除1992年、1996年、2003年、2012年有较大的下降外,其它年份NDVI值均较高,2012年达到这一阶段的最低值。与80年代相比,90年代以后的波动性较大,但波幅较小。

图3还反映1982—2013年全疆年均气温与年降水量的时序变化情况。在32年间,全疆年均温度趋于稳定上升;同时年降水量也呈逐渐上升的趋势,有助于新疆植被覆盖保持平稳状态。

2.3 新疆NDVI的区域分异特征分析

基于1982—2013年各像元年际NDVI值变异性分析,给出新疆植被波动状态(图4)。

将新疆变异值 CV_{NDVI} 值分为5级,统计结果如表2所示。植被覆盖度的年际波动变化主要是由气候的波动引起。从图4和表2可知,1982—2013年新疆植被覆盖总体上处于低态势的波动。其中,波动程度高的区域占全疆面积的28.21%,主要分布在新疆天山、阿尔泰山、昆仑山的山区。山区地带以林地为主,水分条件充足,气温逐渐升高延长植被生长期,植被响应显著;中等波动变化以下区域占全疆面积的71.79%,多集中在绿

洲与荒漠交错带。水分条件是控制该地区植物生长状况的主要因素。该区域以小灌木为主,或是耐盐碱的稀疏植被,生态环境脆弱,故该区域植被波动变化低。

2.4 新疆植被覆盖空间分布趋势变化

本研究将 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结合起来,用以反映 1982—2013 年新疆 NDVI、年降水量的变化趋势,并根据 S_{NDVI} 的实际情况,将 S_{NDVI} 进行分级, S_{NDVI} 介于 -0.0005 和 0.0005 的区域划分为稳定不变区域, $S_{NDVI} \geq 0.0005$ 的区域划分为改善区域, $S_{NDVI} < -0.0005$ 的区域划分为退化区域。

选取 Mann-Kendall 显著性检验的置信水平为 0.05,将结果划分为显著变化 ($Z \geq 1.96$ 或 $Z \leq -1.96$) 和变化不显著 ($-1.96 \leq Z \leq 1.96$)。并把 Theil-Sen median 趋势分析的分析结果与 Mann-Kendall 检验的分级结果相结合,得到基于像元尺度的 NDVI、年际降水量的变化趋势结果如表 3 和图 5 所示。

新疆 1980 年代中期以来,呈现出显著的由干转湿的转型趋势,增湿度强盛区主要发生在南、北疆西部以及天山中段南北坡。越靠近山区,或者山体越大的地方,年降水量增加的趋势也就越大^[22]。结合图 5 和表 3,北疆植被覆盖较南疆改善显著,改善的区域主要分布在伊犁河流域、天山北麓、准噶尔盆地中部和南缘;南疆植被改善区域集中在南部山地的北坡;植被退化的区域主要分布在新疆天山山区部分的草原区。新疆南部,东部也有部分区域出现植被覆盖减少的情况,同时在植被覆盖增加和显著增加的区域之间也存在零星的减少区域。

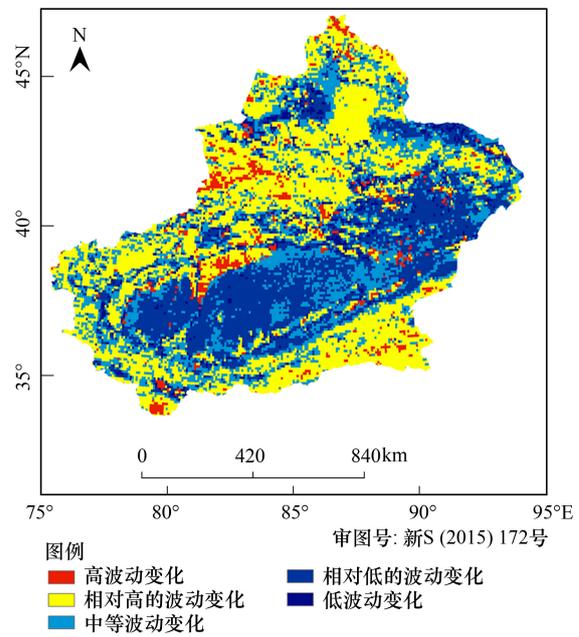


图 4 1982—2013 年新疆年均 NDVI 变异程度

Fig.4 Spatial distribution of the coefficient of variation of the inter-annual NDVI Xinjiang from 1982 to 2013

表 2 NDVI 变异系数统计

Table 2 Statistics of variation Coefficient of NDVI

CV_{NDVI}	变异程度 Volatility degree	占总面积百分比 Area percentage/%
$CV_{NDVI} \geq 0.20$	高波动变化	3.93
$0.15 \leq CV_{NDVI} \leq 0.20$	相对较高的波动变化	24.28
$0.10 \leq CV_{NDVI} \leq 0.15$	中等波动变化	25.53
$0.05 \leq CV_{NDVI} \leq 0.10$	相对较低的波动变化	40.48
$CV_{NDVI} < 0.05$	低波动变化	5.78

表 3 NDVI 变化趋势统计

Table 3 Statistics of NDVI Trend

S_{NDVI}	$ Z_c $	NDVI 趋势 NDVI trend	占总面积百分比 Area percentage/%
≥ 0.0005	≥ 1.96	明显改善	18.57
≥ 0.0005	≤ 1.96	轻微改善	7.32
$-0.0005 \leq S_{NDVI} \leq 0.0005$	≤ 1.96	稳定	0.11
≤ -0.0005	≤ 1.96	轻微退化	18.00
≤ -0.0005	≥ 1.96	严重退化	56.00

从表 3 可看出,1982—2013 年植被状况呈现出改善趋势的区域占新疆总面积的 25.89%,轻微退化的面积占全疆面积的 18.00%,综合可以发现,植被的增加区域主要在水资源比较丰富的区域,而植被减少的区域主要分布在人口稀少的地区和水资源稀少的沙漠地区。

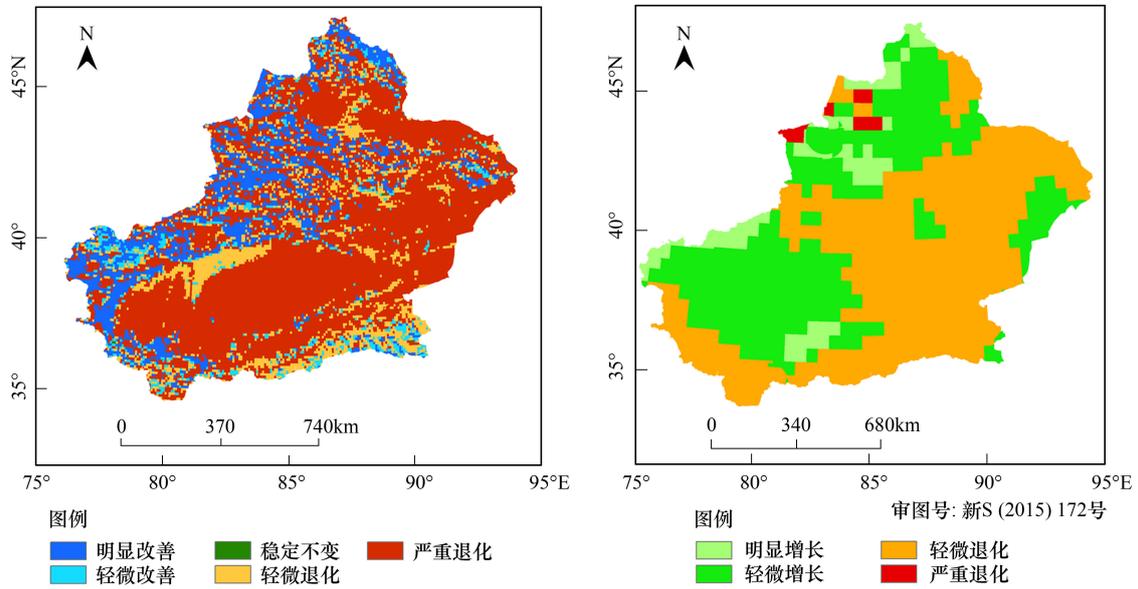


图 5 1982—2013 年新疆年均 NDVI 变化趋势

Fig.5 Spatial distribution of the coefficient of variation of the inter-annual NDVI and precipitation in Xinjiang from 1982 to 2013

2.5 植被覆盖变化的可持续性分析

基于 R/S 理论,研究 NDVI 变化趋势的复杂度及对未来变化趋势进行预测,得到 1982—2013 年新疆 NDVI 的 Hurst 指数空间分类分布图(图 6)。为预测植被变化持续性的趋势,将 NDVI 的变化趋势结果与 Hurst 指数结果进行结合,得到变化趋势与持续性的耦合结果(图 7)。统计结果见表 4。

新疆 NDVI 的 Hurst 指数均值为 0.80,表明新疆植被覆盖格局继续保持现有的变化趋势。从图 6 可以看出,北疆 NDVI 的 Hurst 指数分布复杂,而南疆的 Hurst 指数分布较为集中。

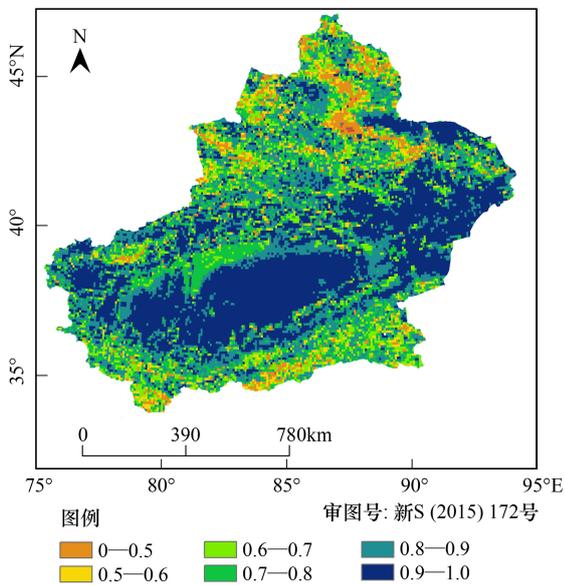


图 6 1982—2013 年新疆年际 NDVI 均值可持续性

Fig.6 Sustainability of inter-annual NDVI change in Xinjiang from 1982 to 2013

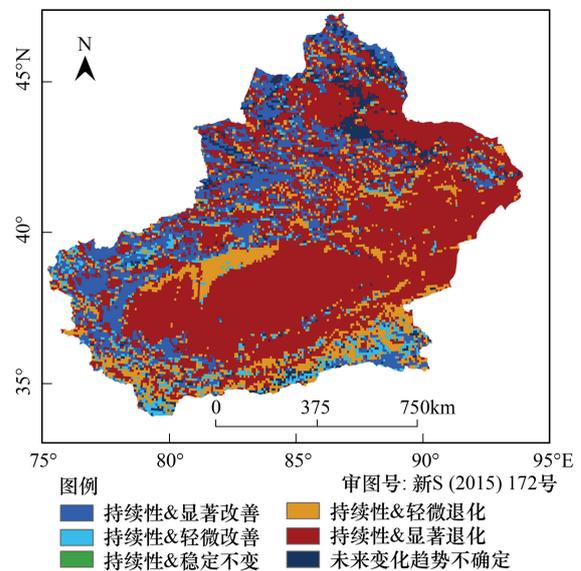


图 7 植被覆盖变化特征图空间分布

Fig.7 Spatial distribution of NDVI based on trend and Hurst index

表 4 NDVI 变化趋势及 Hurst 指数分级统计
Table 4 Statistics of NDVI Trend and Hurst Index

S_{NDVI}	$ Z_c $	H	NDVI 变化类型 NDVI Variation types	占总面积百分比/% Area percentage
≥ 0.0005	≥ 1.96	> 0.5	持续性明显改善	18.00
≥ 0.0005	≤ 1.96	> 0.5	持续性轻微改善	6.39
$-0.0005-0.0005$	≤ 1.96	> 0.5	持续性稳定不变	—
≤ -0.0005	≤ 1.96	> 0.5	持续性轻微退化	15.73
≤ -0.0005	≥ 1.96	> 0.5	持续性严重退化	54.71
—	—	< 0.5	其它	5.17

从图 7 和表 4 可以看出,1982—2013 年,持续性改善的面积比重达 24.39%,分布在天山、阿尔泰山、昆仑山等山区。这是因为山区的雨水资源持续增加,并以河流为纽带,供应盆地的植被,使零散在沙漠中的绿洲得到持续改善,植被覆盖度增加。持续性轻微退化的植被覆盖面积占全疆面积 15.73%。分布在准噶尔盆地西部,伊犁河谷的绿洲荒漠交错带。这种分布可能是受到人类活动因素影响,不合理的水土资源利用导致绿洲荒漠化^[30]。图 7 中植被变化状况呈现出未来变化趋势无法确定和持续性严重退化的区域,还需要研究人员进一步关注。

3 结论

本文采用变异系数法、Theil-Sen median 分析与 Mann-Kendall 检验及 Hurst 指数方法,利用 GIMMS-NDVI 1982—2013 年时序数据,结合 CRU 气候数据,分析新疆植被空间格局、变化趋势和可持续性特征,得到以下结论:

(1)从时间变化上分析,新疆近 32 年来植被覆盖年均 NDVI 值在 0.11 上下波动,虽然呈现出总体稳定的态势,但存在明显的阶段变化。

(2)从空间分布上分析,新疆植被分布具有明显的地域性特征。南北差异明显,西北优于东南。北疆的植被覆盖分布在天山、阿尔泰山山区地带;南疆植被主要分布在昆仑山山区地带。另外,新疆北部和南部盆地植被沿河流流域分布,均呈现出条带状。

(3)从 NDVI 变化趋势上分析,1982—2013 年新疆植被覆盖改善的区域大于植被退化的区域。改善的区域占全疆面积的 25.89%,轻微退化的区域占 18.00%。1980 年代中期以来,气候出现由暖干向暖湿转变的趋势,山区植被覆盖对这种气候变化响应显著。

(4)从 NDVI 变化可持续性来看,新疆植被覆盖将保持现有的稳定趋势。同时新疆南北部存在显著差异。北疆的 Hurst 指数空间分布复杂,而南疆的 Hurst 指数空间分布较为集中。持续改善的区域占全疆总面积的 24.39%,持续性退化面积占 70.44%。趋势无法确定的区域占 5.17%,持续退化的区域和未来变化趋势无法确定的区域的植被的变化状况需要研究人员继续关注。

参考文献 (References):

- [1] Meyer W B, Turner B L. Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23(1): 39-61.
- [2] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵. 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. *遥感学报*, 1998, 03: 204-210.
- [3] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of remote sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [4] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [5] 范娜,谢高地,张昌顺,陈龙,李文华,成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. *资源科学*, 2012, 07: 1222-1231.

- [6] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, Prince S D. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1133-1135.
- [7] Chen X Q, Pan W F. Relationships among phenological growing season, time-integrated normalized difference vegetation index and climate forcing in the temperate region of eastern China. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(14): 1781-1792.
- [8] Pouliot D, Latifovic R, Olthof I. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(1): 149-168.
- [9] Lunetta R S, Elvidge C D. *Remote Sensing Change Detection; Environmental Monitoring Methods and Applications*. London, UK: Taylor Francis Ltd., 1999.
- [10] Martínez B, Gilabert M A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1823-1842.
- [11] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7): 1377-1382.
- [12] Blazkova S, Beven K. Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 2004, 292(1/4): 153-172.
- [13] Cao X M, Chen X, Bao A M, Wang Q. Response of vegetation to temperature and precipitation in Xinjiang during the period of 1998-2009. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(2): 94-103.
- [14] 李秀花, 师庆东, 常顺利, 郭娟, 巴音达拉, 齐家国. 1981-2001 年中国西北干旱区 NDVI 变化分析. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 940-945.
- [15] Chen X, Luo G P, Xia J, Zhou K F, Lou S P, Ye M Q. Ecological response to the climate change on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(6): 765-777.
- [16] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 秦艳芳, 李雪梅. 近 10a 新疆地区植被动态与 R/S 分析. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 84-90.
- [17] 赵霞, 谭琨, 方精云. 1982-2006 年新疆植被活动的年际变化及其季节差异. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 10-16.
- [18] 石雷. 近 25 年来新疆森林的动态变化. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 17-24.
- [19] Sun Q M, Liu T, Han Z Q, Liu H F. Effects of climate changes on vegetation cover in the northern Tianshan mountains using multiple time scales. *Research on Crops*, 2014, 15(1): 264-269.
- [20] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. *遥感学报*, 2009, 06: 1170-1186.
- [21] Ma M G, Veroustraete F. Reconstructing Pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 835-840.
- [22] 徐贵青, 魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 14-18.
- [23] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, Viner D. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.
- [24] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 519-525.
- [25] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 235-260.
- [26] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [27] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbow C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007—An Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 144-158.
- [28] Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, Lyon J G, Worthy L D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(2): 142-154.
- [29] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S, Elvidge C D. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, 64(2): 143-150.
- [30] 李秀花, 师庆东, 郭娟, 巴音达拉, 常顺利, 齐家国. 中国西北干旱区 1981-2001 年 NDVI 对气候变化的响应分析. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 12-16.
- [31] 杨青, 姚俊强, 赵勇, 赵玲, 韩雪云, 赵丽, 黄有志. 伊犁河流域水汽含量时空变化及其和降水量的关系. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1174-1183.
- [32] Yu F F, Price K P, Ellis J, Shi P J. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 42-54.
- [33] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, Mbow C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1886-1898.
- [34] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [35] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. *生态学报*, 2007, 27(1): 346-356.
- [36] 张晓刚, 曾辉. 从系统到景观: 区域物质流分析的景观取向. *生态学报*, 2014, 34(6): 1340-1351.