基于关联性及趋势性分析的 AVHRRNDVI 及 MODISNDVI 数据产品比较^{*1}

王高杰^{1,2,3}黄进良^{1,2}肖飞^{1,2*}冯奇^{1,2}

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所,湖北武汉 430077;

2. 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室,湖北武汉 430077;

3. 中国科学院大学,北京 100049)

【摘 要】:针对 AVHRRNDVI 和 MODISNDVI 数据集中不同数据产品间的差异和区域适应性问题,利用 2003~2013 年重叠时间段 MODIS Terra/Aqua 的 NDVICollection5 (C5) 和 Collection6 (C6) 产品以及 AVHRRNDVI 中的 GIMMSNDVI3g 产品,选择汉江流域典型区域进行数据对比分析。通过关联指数 IOAs (Index of Association) 来评价各数据在季节 波动上的一致性;采用 Mann Kendall 检验分析各数据的长期趋势差异。结果表明,在季节性变化上,同一卫星不 同版本产品之间的关联性相对较高。在年际变化上,GIMMS 产品相对 MODIS 产品,仅能检出部分 NDVI 变化趋势。在 地表覆被异质性相对较高地区,GIMMS 产品的长期变化趋势检出率较低。MODIS Terra 的 NDVIC5 产品受传感器退化 影响,表现出相对较高的减少趋势。

【关键词】:GIMMSNDVI; MODISNDVI; MannKendal1 检验; 趋势分析

【中图分类号】:P237【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227 (2018) 05-1143-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201805021

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 广泛用于生态环境监测和气候变化等方面^[1~3],相关数据产品众多。AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) NDVI 数据集是目前持续时间最长的连续数据集^[4],具有覆盖范围广、时间跨度长和较强的植被监测能力等优点。但存在空间分辨率较低,易受水汽干扰等缺点^[5]。而 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 数据集则被认为是 AVHRRNDVI 的完善^[6],在空间分辨率和叶绿素敏感度等方面有所提升^[7]。

在众多 AVHRRNDVI 数据集中,最常用的是 GIMMSNDVI 数据集。而在 MODISNDVI 数据集中也存在着多种不同的产品,常见的则是 MOD13Q1 和 MYD13Q1。同时,它们的产品版本也很多。C5(Collection5)和 C6(Collection6)版本是 MODISNDVI 比较常用的

¹ 收稿日期:2017-07-07; 修回日期:2017-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41271125);国家自然科学基金青年项目(41301098);湖北省科技支撑计划项目(2015BCA288) 作者简介:王高杰(1993~),男,硕士研究生,主要从事遥感应用方面的研究.E-mail:wgj6112345@gmail.com *通讯作者 E-mail:xiaof@whigg.ac.cn 数据版本。国外已有学者发现^[8],同一产品不同版本和不同产品同一版本之间也存在着差异。

对比研究是不同数据集一致性处理及后续植被时空变化分析的基础。由于传感器及数据处理方法等方面的不同,AVHRRNDVI 数据集和 MODISNDVI 数据集往往具有一定的差异^[9,10]。国内外关于 GIMMSNDVI 和 MODISNDVI 数据的对比研究相对较多^[11~13],而 对于 MODISNDVI 不同产品版本之间的对比研究较少。Terra 和 Aqua 虽然均作为 MODISNDVI 产品来源,但由于探测时间、太阳高 度角和几何位置等的不同,两种 MODIS 数据对于监测同一空间植被指数时会产生一定的差异。并且近年来,传感器的退化导致 MODISNDVIC5 版本出现了一些问题^[14,15],所以有必要对比 C5 和 C6 产品之间的差异。

前人在比较数据动态变化的一致性时,大多采用方差、相关系数等指标进行统计分析^[16],上述指标能较好反映不同数据集的量值差异,但在反映不同 NDVI 数据集的季节波动性差异方面有所不足。本文引入关联指数 IOAs 进行季节波动性差异对比。 在数据变化趋势对比方面,本文拟采用 Mann Kendall 检验方法。Mann Kendall 检验方法通常用于分析水文、气象等要素时间序 列的趋势变化。该方法不需要样本遵循正态分布,也不受少数异常值的干扰,目前还较少用于 NDVI 数据对比分析中。本文选取 异质性比较高的汉江流域样区,对比 2003~2013 年 AVHRRNDVI 和 MODISNDVI 中常用的数据集,分析它们在空间上的一致性和长时间的动态变化方面的差异,为相关研究进行数据分析和数据选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区处于汉江流域,主要位于湖北省十堰市和襄阳市,地理坐标为110°45'~111°30'E,32°15'~32°45'N。地势总体呈西南高东北低,西南部为山地地区,地势较高;东北部为平原、丘陵地区,地势较低。最高海拔为1689m。研究区土地覆被类型主要包括林地、耕地、居民用地、水域。其中,水域为丹江口水库的一部分。区内植被类型主要为亚热带常绿阔叶林和针叶林,其次为灌丛、草丛等。研究区地貌类型、土地覆被及植被类型丰富多样,以该区进行对比试验具有较好的区域典型性和代表性。



图 1 研究区地理位置 Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据及预处理

本文所用的数据集有:GIMMSNDVI3g、MOD-13Q1、MYD13Q1、MOD13C2 和 MYD13C2。另外还有该研究区的 DEM 数据和 2005 年的 土地覆盖数据。

GIMMSNDVI3g 是 NASA 推出的最新版的全球植被指数数据集。空间分辨率为 8km,时间分辨率为半个月。它时间跨度比较长,从 1981~2013年,是长期监测植被覆盖变化和趋势分析的常用数据集。该数据集均经过辐射校正、几何纠正和图像增强等预处理,可以为全球及区域物候研究提供质量更高时间序列更长的数据。

MOD13Q1 和 MYD13Q1 空间分辨率均为 250m,时间分辨率为 16d 的植被指数产品。两个产品均包含 NDVI, EVI, VI Qualities 等 12 个波段,经过严格的大气校正、辐射校正、几何校正,并且附有关于数据质量信息等元数据记录。前者("MOD")来自 Terra 卫星,是 NASA 的 EOS 观测计划的第一颗卫星,发射于 1999年,由于它每天上午从北向南通过赤道,因此被称为上午星。后者("MYD") 来自 Aqua 卫星,是 NASA 的 EOS 观测计划的第二颗卫星,于 2002年成功发射,为了与 Terra 卫星在数据采集时间上相互配合, Aqua 卫星每天下午从南向北通过赤道,因此也被称为下午星。两颗卫星均为太阳同步极轨卫星。

MOD13C2 和 MYD13C2 均为空间分辨率 0.05 度(5600m),时间分辨率为一个月的植被指数产品。该数据采用气候模式网格 CMG(Climate Model Grid)的投影方式,通过用历史 MODIS 时间序列记录替代有云的数据来实现无云的全球覆盖。

从 NASA 官网 (https://ladsweb. nascom. nasa. gov/) 上下载 MOD13Q1 和 MYD13Q1 的 Collection5 和 6 的数据,从 ECOCAST (https://ecocast. arc. nasa. gov/) 网站可以下载到 NDVI3g 产品,分辨率为 1/12 度,也就是通常说的 "8km"。

两个数据集的处理过程相同,包括:

(1) 从数据集中提取出 NDVI 和 pixel reliability 的波段; (2) 根据影像的像元可信度去除云、雪等像元; (3) 根据每个像元的时间序列,用 Whit taker 平滑方法填补上一步的空缺; (4) 运用最大值合成法将 16d 的影像合成为每月的影像。

对于 MODISCMG 产品 (MOD13C2、MYD13C2),我们将它与 GIMMSNDVI3g 进行对比,分析不同产品之间的一致性。将 CMG 产品进行空间采样到与 NDVI3g 一样的分辨率 (8km)。最后,对于 NDVI 时间序列平均值低于 0.15 的像元均不视为植被,不参与计算。

1.3 研究方法

关联指数 IOAs^[17]能够用来指示两个相同长度时间序列是否"同步"的一种状态。在这里可以看作是两个 NDVI 时间序列每 月数据的"同增"或"同减"的一种积累。IOAs 值的范围位于 0~1 之间。

在时间序列趋势分析中, Mann Kendall 检验常用于降水、径流、气温和水质等要素时间序列趋势变化。在这里,采用预白化方法(pre-whitening)去除时间序列中的自相关成分,减少自相关成分对 Mann Kendall 检验的影响,然后再进行检验。关联指数和趋势分析的计算均在 Python 脚本语言中编程实现。

1.3.1 关联指数 IOAs

关联指数 IOAs (Index of Association)用于指示不同产品之间的季节性波动的相似程度。计算公式如下:

$$IOAs = \frac{1}{n} \times \sum_{i=2}^{n} \begin{cases} 1, & \text{if } sgn(x_{i} - x_{i-1}) = sgn(y_{i} - y_{i-1}) \\ 0, & \text{if } sgn(x_{i} - x_{i-1}) \neq sgn(y_{i} - y_{i-1}) \end{cases}$$

$$(1)$$

$$sgn \ z = \begin{cases} 1, & z > 0 \\ 0, & z = 0 \\ -1, & z < 0 \end{cases}$$

$$(2)$$

式中:x,y指的是长度为n的两个时间序列;i为时间序列中的月份。sgn为符号函数;z为相邻月份NDVI差值。x,y同时 增加或减少,IOAs的值就越大,季节性信号就越强,也用来指示两个数据集之间的一致程度。

1.3.2MannKendall 趋势分析

Mann Kendall 检验是一种非参数的检验方法,能很好的揭示时间序列的趋势变化。它无需样本遵从一定的分布,允许出现 异常值、缺失值,几乎不受少数异常值的影响,常用于水文气象领域^[18]。近年来,国外已有部分学者将 Mann Kendall 方法应 用于 NDVI 时间序列趋势分析的相关研究中^[19, 20]。

当时间序列中存在序列自相关时,通常会对该序列的趋势分析造成影响,使趋势中较大的部分更大^[21]。相关研究^[22, 23]指出,植被对气温和降水会出现滞后效应。同样也会反映在 NDVI上。而在长江流域上,植被对气温变化的最大响应无滞后,对降水变化的最大响应滞后1个月^[24]。因此在这里 NDVI 的自相关采用 AR(1)模型。针对存在序列自相关的问题,在进行趋势分析前应去除它。这里采用 TFPW 方法^[25]去除序列自相关。

为了减小序列自相关对 Mann Kendall 检验的影响, Von 提出了 Pre-Whitening 方法去除时间序列中的序列相关成分^[26]。NDVI 时间序列 Yt 可以看作是由异常值(ε),趋势部分(bt)和序列自相关(AR(1))3个部分组成^[27],表示如下:

$$Y_t = AR(1) + bt + \varepsilon$$
(3)

由于序列自相关(AR(1))的存在,会使趋势部分 bt 的值更大;同样的,bt 的存在也会使 AR(1)部分的结果偏大^[21]。因此, 先除去趋势部分,得到去趋势的时间序列 Y',:

$$Y_{t} = Y_{t} - bt \tag{4}$$

式中 t 为时间序列中的月份。

而趋势部分的 b 值的计算方式如下:

$$b = median\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \ \forall j < i$$
(5)

式中:1<j<i<n,i,j为时间序列 x 中的月份,n 为时间序列 x 的长度;median 指的是中位数。 然后对 Y',去除自相关成分,得到既去除趋势又去除自相关成分的序列 X',:

$$X'_{t} = Y'_{t} - r_{1} Y'_{t-1}$$
(6)

由于存在自相关,自相关系数r1的计算方式如下:

$$r_{1} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^{n} \left[Y_{t} - E(Y_{t}) \right] \left[Y_{t-1} - E(Y_{t}) \right]}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \left[Y_{t} - E(Y_{t}) \right]^{2}}$$
(7)

最后将去掉自相关的结果和趋势部分组合,就得到除去自相关的序列:

$$X_t = X_t' + bt \tag{8}$$

得到去相关序列后,再进行 Mann Kendall 趋势检验。

假设 (x_i, y_i) , (x_2, y_2) , …, (x_n, y_n) 是两个随机变量 X, Y 的一组观察值, n 为观察组的个数。任何一对 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) , 在 i ≠ j 的情况下,如果 x_i>y_i并且 x_j>y_j,或者 x_i<y_i同时 x_j<y_j,则将它们视为一致的。确定该组观察值的一致的对数的个数,将它记为 P。然后计算 Kendall 统计量 τ 和方差 σ_{τ}^{2} :

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$$
(9)
$$\sigma_{\tau}^{2} = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$$
(10)

标准化变量 U_a=τ/σ_τ,若 U_a>0,说明该时间序列有增大的趋势,反之 U_a<0则说明序列有减小的趋势。当 n>10 时, τ

的分布可以用正态近似检验:(显著性水平 α 为 0.05)

$|\tau| > U_{\alpha}$

2 结果与分析

2.1 关联指数 IOAs

图 2 是基于每个像元的时间序列,是逐栅格统计 GIMMSNDVI 和 MODISCMGNDVI (MYD13C2) 的时间序列得到的。图 3 则是研究区的土地覆盖图。结合图 2,图 3 能够看出,NDVI 的值均在 0.25 以上。在含有水域和居民区的像元中,GIMMSNDVI 的值较 MODISNDVI 的值而言偏高。在图 2 中,即蓝色线明显高于橙色线的像元。由于 GIMMSNDVI 产品的空间分辨率很粗,所以一个像元里面会有不同的土地覆盖类型。同时在土地覆盖类型多样的像元中,GIMMSNDVI 和 MODISNDVI 的时间序列曲线差异较大。



图 2 研究区单个像元的时间序列





图 4 显示的是 GIMMSNDVI3g 和 MODISCMGNDVI 之间 IOAs 值的空间分布。总体上看,研究区的整体 IOAs 较高,为 0.606~0.773 之间,说明在此研究区关联性整体较好。Detsch^[28]在研究乞力马扎罗山地区相同产品的一致性时,发现该地区 IOAs 值的跨度 较大,为 0.4~0.9 之间,并且显示出明显的空间梯度,同时也得出了 IOAs 值与像元异质性的关系。与乞力马扎罗山地区相比, 本区的平均 IOAs 值与之相当,但本区的 IOAs 变幅相对较小,并且没有表现出于明显的空间梯度。乞力马扎罗地区海拔差异较 大,土地覆盖类型具有明显的空间梯度变化。而在本研究区海拔与植被垂直梯度差异相对较小,即使是使用相同的数据集,也 没有显示出相同的规律。



IOAs 能够指示不同产品季节波动的一致性好坏。表1所示的是不同产品之间的平均 IOAs 值,其中与 GIMMS 产品作比较的是 MODISCMG 产品,而 MODIS 产品之间的比较则是 250m 分辨率的产品。可以发现 MODIS 产品之间的一致性比较好。其中,NDVITerraC5 和 NDVITerraC6, NDVIAquaC5 和 NDVIAquaC6 一致性最好,分别为 0.813 和 0.807,表明同一卫星产品之间的一致性最好。当 MODIS 产品之间交叉比较时,IOAs 的均值比同一卫星产品之间的稍差,但平均 IOAs 值都在 0.74 以上。可能是 Terra 和 Aqua 卫星过境时间的大气条件不一样^[29]。而 GIMMS 产品,不论与何种产品比较,它的平均 IOAs 值都要比 MODIS 产品之间的低。

	NDVI _{3g}	NDV I_{TerraC5}	NDV I_{AquaC5}	$NDVI_{{}_{\mathrm{TerraC6}}}$	$NDVI_{\rm AquaC6}$
NDV I _{3g}	1				
$NDVI_{\tt TerraC5}$	0.690	1			
NDV I_{AquaC5}	0.704	0. 749	1		
$NDVI_{{\scriptscriptstyle {\rm TerraC6}}}$	0.685	0. 813	0. 741	1	
NDV I_{AquaC6}	0.677	0.746	0.807	0.748	1

表1 イ	下同产	品之	间的	平均	IOAs	值
------	-----	----	----	----	------	---

2.2MannKendall

图 5 显示的是显著性水平 P<0.05 下,研究区内 GIMMSNDVI3g 产品 Kendall 统计量 τ 的值。图中有 6 个像元检测出有显著 的趋势,占整个研究区像元数的 11.1%。



图 6 显示的是显著性水平 P<0.05 下, MODIS 产品之间 Kendall 统计量 τ 的值。结合图 1, 图 6 可以发现,在山地区域的趋势均不显著。差异主要分布在平原地区,海拔较高的地方差异不大或基本无差异。综合图 5 和图 6 能发现,GIMMSNDVI3g 在有些MODIS 产品有明显趋势的地方,没有检测出趋势。图 6 中 a、b 和 c、d 都可看作是同一产品的不同版本比较; a、c 和 b、d 可看作是不同产品的同一版本比较。整体上,4 个产品得到的 τ 值空间分布大体一致。进行同一产品的不同版本比较时,在 a、b 中 C6 产品趋势像元明显比 C5 产品的多,在 c、d 中则不明显。进行不同产品的同一版本比较时,a、c 同为 C5 产品,但是 Aqua-MODIS 的趋势像元明显比 Terra-MODIS 多; b、d 同为 C6 产品,而 Terra-MODIS 的趋势像元则明显比 Aqua-MODIS 多。





从定量的角度来看,表2表明NDVITerraC6趋势像元最多。与NDVITerraC5相比,NDVITerraC6趋势像元增加了8943(+67.5%)。 与NDVIAquaC6相比,增加了4996(+29.0%)。同版本的产品在增加趋势上,Terra-MODIS和Aqua-MODIS分别增加0.119(+15.0%) 和减少0.007(-0.81%)。所有MODIS产品中,均以增加趋势为主,基本都在80%以上。其中NDVITerraC5的减少趋势最高(20.9%), 最明显的就体现在图6左上角和右下角的城镇区域。

表 2 p<0.05 下不同产品趋势分析时像元数量

	趋势像元	趋势占比	增加趋势	减少趋势
NDV I _{3g}	6	0.111	0.667	0. 333
$NDVI_{\text{TerraC5}}$	13 251	0.210	0.791	0. 209
$NDVI_{\rm AquaC5}$	19 099	0.303	0.867	0. 133
$NDVI_{\text{TerraC6}}$	22 194	0.352	0.910	0.090
NDV I _{AquaC6}	17 198	0.273	0.860	0. 140

针对不同的传感器, Wang 等^[8]对 Terra-MODIS 和 Aqua-MODISCollection5 的 NDVI 产品进行趋势分析对比时,在北美地区显示 Terra-MODIS 的减少趋势是 Aqua-MODIS 的 3 倍左右。同时指出, Terra-MODIS 传感器的红波段和近红外波段是由于遭受显著的退化,因而导致较高的减少趋势。而在本研究区,Terra-MODIS 的减少趋势是 Aqua-MODIS 的 1.85 倍左右,同样显示出 Terra-MODIS 传感器的退化现象。

C6产品在设计之初就是为退化的传感器提供新的校正方法。Lyapustin^[30]指出,C6产品相比于C5产品,降低了NDVI产品中的因传感器退化而产生的减少趋势。在本研究区,Terra-MODIS从C5到C6,减少趋势降低了56.9%。对于Aqua-MODIS传感器而言,减少趋势则相差不大。

3 结论

通过利用 2003~2013 年重叠时间段的 MODISTerra/Aqua, Collection5 和 6 以及 AVHRRNDVI 中的 GIMMS3g 产品,选择汉江 中游地区在季节性尺度和长期趋势上进行对比分析,得出以下结论:

(1) MODIS 数据在重采样至与 GIMMS 同一分辨率下时,两者之间的差异与土地覆被有一定的关系,土地覆盖类型越多样, MODISNDVI 与 GIMMSNDVI 的时间序列曲线差异越大;

(2)在季节性变化方面,MODISNDVI和GIMMSNDVI一致性较好,与地形没有表现出明显关系。同一卫星不同产品版本之间的关联性表现最佳。不同卫星同种产品版本之间,关联性略微下降;

(3) 在长期趋势方面, MODISNDVI 与 GIMMSNDVI 产品在山地区域均未表现出明显的变化趋势。在山地区域外的城镇区域, MODISNDVI 产品表现出明显的减少趋势,而平原区表现出明显的增加趋势;而在同样的显著性水平下,GIMMS产品只能检测出其 中小部分区域的变化趋势,说明粗分辨率的GIMMS产品无法获取到细分辨率的MODIS产品才能获取的小尺度信息,不适用于地 表覆被异质性相对较高地区;

(4)新版本的产品改善了趋势分析时造成相对高的减少趋势的问题。但是仅仅是在 Terra-MODIS 的产品上表现较为明显,在 Aqua-MODIS 上则不明显。

参考文献:

[1] 张钛仁,张明伟,多福学. 中国西北地区植被时空动态及其影响因子分析 [J]. 高原气象,2010,29 (5):1148--1152.

ZHANG T R, ZHANG M W, DUO F X. Analyses on vegetation time-space dynamics in Northwestern China and its effect factor [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(5) : 1148-1152.

[2] 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.

LI H X, LIU G H, FU B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three -River Headwaters region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19) : 5495-5504.

[3] 翟孟源,徐新良,江东,等. 1979 ~ 2010 年乌海市煤矿开采对生态环境影响的遥感监测 [J]. 遥感技术与应用,2012,27(6):933-940.

ZHAI M Y, XU X L, JIANG D, et al. Remote sensing monitoring of the ecological environment in Wuhai minining area since 1979 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(6) : 933-940.

[4] 陈燕丽,龙步菊,潘学标,等. MODIS NDVI 和 AVHRRNDVI 对草原植被变化监测差异[J]. 遥感学报,2011,15(4): 831-845.

CHEN Y L, LONG B J, PAN X B, et al. Differences between MODIS NDVI and AVHRR NDVI in monitoring grasslands

change [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4) : 831-845.

[5] ALCARAZ-SEGURA D, LIRASE, TABIKS, et al. Evaluating the consistency of the 1982 — 1999 NDVI trends in the Iberian Peninsula across four time—series derived from the AVHRR sensor:LTDR,GIMMS,FASIR, and PAL-II[J]. Sensor, 2010, 10: 1291—1314.

[6] FENSHOLT R, RASMUSSEN K, NIELSEN T T, et al. 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 [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: 1886 - 1898.

[7] HUETEA, DIDANK, MIURAT, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 195 -213.

[8] WANG D, MORTON D, MASEK J, et al. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 55-61.

[9] 刘良明,梁益同,马慧云,等. MODIS 和 AVHRR 植被指数关系的研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004, 29(4): 307-310

LIU L M, LIANG Y T, MA H Y, et al. Relationship research between MODIS-NDVI and AVHRR-NDVI [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29 (4) :307-310.

[10] 程乾,黄敬峰,王人潮. MODIS 和 NOAA/AVHRR 植被指数差异初步分析 [J]. 科技通报, 2005, 21 (2): 205 -

209.

CHENG Q, HUANG J F, WANG R C. Preliminary analysis of difference between MODIS and NOAA/AVHRR vegetation indices [J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21 (2) :205-209.

[11] 杜加强, 舒俭民, 王跃辉, 等. 青藏高原 MODIS NDVI 与 GIMMS NDVI 的对比[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2):533-544.

DU J Q, SHU J M, WANG Y H, et al. Comparison of GIMMS and MODIS normalized vegetation index composite data for Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2) : 533-544.

[12] 宋富强,康慕谊,杨朋,等. 陕北地区 GIMMS、SPOTVGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析 [J]. 北京林业大 学学报,2010,32(4):72-80.

SONG F Q, KANG M Y, YANG P, et al. Comparison and validation of GIMMS, SPOT-VGT and MODIS global NDVI products in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University2010, 32(4) : 72-80.

[13] 刘惠敏,黄勇,何彬方. 基于 MODIS 与 AVHRR 数据的安徽省覆被变化比较 [J]. 中国农业气象,2007,28(3):338-341.

LIU H M, HUANG Y, HE B F. Comparison of Vegetation Cover Change Based on AVHRR and MODIS Data in Anhui Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3):338-341.

[14] DJAVIDNIA S, MELIN F, HOEPFFNER N. Comparison of global ocean colour data records [J]. Ocean Science, 2010, 6:61-76.

[15] LEVY R C, REMER L A, KLEIDMAN R G, et al. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products overland [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10:10399-10420.

[16] 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 [J]. 遥感学报. 2009, 13(6):1177-1186.

CAIBF, YUR. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6) : 1177-1186.

[17] MATLOFF N. The art of R programming [M]. No Starch Press:San Francisco, CA, USA, 2011.

[18] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究 [J]. 自然资源学报,2001,9:1585-1591.

YU Y S, CHEN X W. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 31(19) : 5495-5504.

[19] TIAN F, FENSHOLT R, VERBESSELT J, et al. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 163:326-340.

[20] NEETI N, EASTMAN J R. A contextual Mann-Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series [J]. Transaction in GIS, 2011, 15: 599-611.

[21] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrol. Process, 2002, 16: 1807-1829.

[22] 安如,徐晓峰,杨仁敏. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析 [J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(2): 1-5.

AN R, XU XF, YANG RM. Time-Lag effect of vegetation NDVI on regional climate in "Three River Source" region [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37 (2) :1-5.

[23] 李霞,李晓兵,陈云浩,等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (6):1045-1062.

LI X, LI X B, CHEN Y H, et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31 (6) :1045-1062.

[24] 白淑英,王莉,史建桥. 长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应 [J]. 中国农业气象,2012,33(4):579-586.

BAISY, WANGL, SHIJQ. Time lag effect of NDVI Response to climatic change in Yangtze River Basin [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 579-586.

[25] SHENG Y, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrol Process, 2002, 16: 1807-1829.

[26] STORCH V H. Analysis of climate variability: applications of statistical techniques [M], Springer-Verlag Berlin, 1995.

[27] DE JONG R, DE BRUIN S, DE WIT, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 692 -702.

[28] DETSCH F, OTTE I, APPELHANS T, et al. A comparative study of cross-product NDVI dynamics in the Kiliman jaro region a matter of sensor, degradation calibration, and significance [J]. Remote Sensing, 2016, 8: 159.

[29] DUANE W J, PEPIN N C, LOSLEBEN M L, et al. General characteristics of temperature and humidity variability on Kilimanjaro, Tanzania [J]. Arctic Antarctic And Alpine Research, 2008, 40: 323-334.

[30] LYAPUSTIN A, WANG Y, XIONG X, et al. Scientific impact of MODIS C5 calibration degradation and C6 +

improvements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7: 4353-4365.