2001－2013 年宝鸡地区植被 NDVI 对气温和降水量的季节响应特征

王 静[1,2]，万红莲[1,2]，张 翀[1,2]

（1. 宝鸡文理学院，陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，
陕西 宝鸡 721013；2. 宝鸡文理学院 地理与环境学院，陕西 宝鸡 721013）

摘 要：[目的] 研究 2001—2013 年陕西省宝鸡地区植被变化与气温和降水量的时空变化特征及其相关性，为区域农业发展和区域生态文明建设提供有力支撑。[方法] 基于 2001—2013 年宝鸡地区气温和降水量数据，利用 MODIS NDVI 数据和 11 个气象站点实测数据，结合实际调查，采用一元线性回归、标准化处理、相关分析等方法，基于季尺度、参照年尺度分析宝鸡地区植被覆盖季节时空变化及其与气温和降水量的相关性。[结果] 夏季植被 NDVI 增加趋势最为明显，其次为秋季，冬季植被覆盖最差；宝鸡地区四季标准化值 NDVI 与气温、降水量的变化趋势相接近，其最大值点的出现时间与气温和降水量基本对应。同一季节 NDVI 与气温的相关系数均高于 NDVI 与相应季节降水量的相关系数（除夏季）；春季 NDVI 与冬季气温（－0.592）、夏季 NDVI 与春季降水量（0.640）之间显著相关，表明近 13 a 来春季植被覆盖变化与冬季气温、夏季植被覆盖与春季降水量的变化较为一致，NDVI 与降水之间的滞后关系为 0～3 个月。[结论] 2001—2013 年宝鸡地区年均、季 NDVI 整体均呈增加趋势，8 月植被覆盖变化与降水量的变化较为一致，降水量较气温对 8 月植被生长影响强烈。

关键词：植被覆盖；植被季节变化；气温；降水量；宝鸡地区

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)05-0235-06 **中图分类号**：P964，P461^{+}.7

文献参数：王 静，万红莲，张 翀. 2001—2013 年宝鸡地区植被 NDVI 对气温和降水量的季节响应特征[J]. 水土保持通报，2017，37(5)：235-240. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 039；Wang Jing，Wan Honglian，Zhang Chong. Seasonal response characteristics of temperature and precipitation based on vegetation NDVI in Baoji Area during 2001—2013[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(5)：235-240. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 039

Seasonal Response Characteristics of Temperature and Precipitation Based on Vegetation NDVI in Baoji Area During 2001－2013

WANG Jing[1,2]，WAN Honglian[1,2]，ZHANG Chong[1,2]

（1. *Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation，Baoji University of Arts and Sciences，Baoji，Shaanxi* 721013，*China*；
2. *College of Geogrophy and Environment，Baoji University of Arts and Sciences，Baoji，Shaanxi* 721013，*China*）

Abstract：[Objective] Temporal and spatial variations of vegetation and its links with temperature and precipitation in Baoji area of Shaanxi Province in the past 13 years during 2001—2013 were studied，in order to provide a strong support for regional agricultural development and ecological civilization construction work. [Methods] Based on the temperature and precipitation in Baoji area from 2001 to 2013，using MODIS NDVI data and 11 meteorological site data，combined with field investigation，univariate linear regression，standardized processing，correlation analysis and other methods were used to analyze the temporal and spatial variation of vegetation

收稿日期：2016-12-07 **修回日期**：2017-03-23
资助项目：国家自然科学基金项目“拉萨旅游业利益相关者网络研究：基于动态社会网络视角”（71361023）；陕西省科技计划项目（2016KTCL03-17）；陕西省重点实验室项目（15JS008）
第一作者：王静（1990—），女（汉族），陕西省岐山县人，硕士研究生，研究方向为资源开发与环境变迁等。E-mail：451104231@qq. com。
通讯作者：万红莲（1969—），女（汉族），陕西省麟游县人，博士，教授，硕士生导师，研究方向为资源开发与环境变迁等。E-mail：hyhm2006@163. com。

cover and its correlations with temperature and precipitation in Baoji area at seasonal scale and reference yearly scale. [Results] Summer vegetation NDVI had an obvious increasing trend, followed by the autumn one, winter vegetation coverage was the worst. The trend of seasonally normalized NDVI in Baoji area was similar to that of temperature and precipitation, the occurrence time of the maximum point was corresponding to that of temperature and precipitation. The correlation coefficients between NDVI and temperature of the four seasons were all higher than that between NDVI and precipitation of the same season (except summer). Correlation coefficient between spring NDVI and winter temperature (−0.592), summer NDVI and spring precipitation (0.640) were all significantly correlated, which implied that spring vegetation cover and previous winter temperature changed consistently in the past 13 years. Summer vegetation cover was coincided with spring precipitation, and NDVI had a lag of 0～3 months behind precipitation. [Conclusion] The average annual and seasonal NDVI in Baoji area showed an increasing trend over all from 2001 to 2013. The vegetation cover change of Baoji area in August was consistent with the change of precipitation, meanwhile precipitation affected vegetation cover stronger than air temperature did in August.

Keywords: vegetation cover; seasonal variation of vegetation; air temperature; precipitation; Baoji area

植被是陆地生态系统的最重要成分,其覆盖变化是反映所在环境状况的重要指标之一,很大程度上影响生态系统的功能和生物地球化学循环过程[1]。分析和研究植被与气候因子间的相互关系,是植被生态学的主要任务之一[2]。在陆地植被与气候因子相互作用研究中,有关植被季节性特征及其对气候响应的问题研究较为普遍[3-5]。研究表明,未来气候变暖可能使极端高温和寒冷的频度及强度增大[6],气候的季节波动更为明显[7]。气候的季节变化是形成植被季节生长变化特征的关键控制因素之一,国内外学者大量研究了不同空间尺度上植被覆盖季节变化与气候因子的特征[8-11]。气温和降水量是影响植被覆盖的最根本的因素,两者之间存在紧密联系。众多学者对不同区域植被覆盖季节变化及其与气候因子的关系进行了研究[12-17]。总体来看,季节的区域差异性较明显。Zhang 等[12]对东南亚热带森林植被活动的季节和年际变化研究表明,东南亚的北部和南部地区森林干湿季节性周期明显,NDVI 与气温和降水量及太阳辐射的变化周期一致;Mao 等[13]对中国东北地区夏季植被的 NDVI 分析后,得出 1995 年后 NDVI 有明显的下降趋势,且温度与植被的相关性显著高于降水的结论;Weiss 等[14]对新墨西哥州植被覆盖对气温和降水的年际及季节变化的响应特征的研究发现,季风季节降水(6—9 月)与 NDVI 值在同期夏季、下季春季和夏季均呈显著正相关,非季风降水(10 月至次年 5 月),温度和风力与 NDVI 值分别呈正、负相关性,且存在一定的滞后效应;王林林等[15]研究了近 14 a来柴达木盆地 NDVI 季节时空变化及其影响因素,表明春、夏、秋季 NDVI 分别与气温、降水潜在蒸散量呈正相关,春、夏两季 NDVI 对气温和降水的滞后效应突出,并以冬季降水、最低气温对来年春季植被生长影响最显著,春季降水则对夏季植被生长贡献最大;崔林丽等[16]和陈效逑等[17]都对中国东部植被 NDVI 的季节时空变化进行了研究,前者研究表明,中国东部植被总体上对气温变化的响应大于降水,秋季植被 NDVI 对气温和降水变化响应最大,夏季 NDVI 对气温和降水响应的滞后期较长。后者表明,近 18 a 来,整个区域的物候春季初日以提前为主,且以华北平原提前的趋势最为显著。夏季、秋季和冬季初日以推迟为主,也以华北平原推迟的趋势比较显著。

宝鸡地区地处陕西省关中地区西部,是关中地区秋季连阴雨最多的地区。学者们的研究中将气温和降水量因素相结合,基于季尺度、参照年尺度分析宝鸡地区植被覆盖季节时空变化及其与气温和降水量的相关性的研究却不常见。本研究拟通过宝鸡地区 2001—2013 年气温和降水量数据,基于季尺度,参照年尺度对近 13 a 来植被变化与气温和降水量的时空变化特征及其相关性进行分析,旨在揭示该地区植被变化与气温和降水量的相互关系。

1 研究区概况

宝鸡地区南、西、北三面环山,以渭河为中轴向东拓展,呈尖角开口槽形的特点;山、川、塬兼备,以山地、丘陵为主。属暖温带半湿润气候,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨和炎热干燥天气交替出现;春季升温迅速且多变少雨,秋季因降温迅速又多伴随阴雨连绵,为关中秋季连阴雨最多的地区。年平均气温 13 ℃左右,年降水量 710～1 000 mm,气温、降水量季相较为分明。宝鸡地区生境条件多样和植被类型多样,主要包括落叶阔叶林、针叶林、草原、灌丛和栽培植被等。森林覆被率达 36%～42%,但分布不均,以秦岭和关山

为主要集中区域,关中盆地和台塬地区以栽培植被为主(附图 5)。

2　数据与方法

2.1　数据来源

MODIS NDVI 数据来自 LP DAAC 中的 MODIS产品的 MOD13 A3 数据集,借助 ArcGIS 软件中空间分析(spaitial analyst)模块对数据进行处理,得到宝鸡地区 2001 年 1 月到 2013 年 12 月每月 NDVI 数据,再由均值法获得 NDVI 年、季植被指数的时间序列;气象数据选自宝鸡市气象局时间尺度为 2001—2013 年的 11 个气象站点气温和降水量观测资料,将其处理为与 NDVI 时间序列相匹配的气温和降水量数据。

2.2　研究方法

2.2.1　*一元线性回归*　利用最小二乘法对每一个像元对应的年均 NDVI 值与时间进行线性拟合,计算其趋势斜率,公式如下:

$$b=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{1}$$

式中:b——趋势斜率;x,y——年份和该年的 NDVI 值;$\bar{x}$,$\bar{y}$——年平均值和所有年份 NDVI 值;$b<0$ 表示植被覆盖度下降;$b>0$ 表示植被覆盖度上升[18]。显著性检验采用 F 检验。

2.2.2　*标准化处理*　又叫无量纲化处理,即统计数据的指数化,该方法是目前多变量综合分析中使用最多的一种方法,解决各种数值不具综合性的问题。经标准化处理,原始数据均转换为无量纲化指标测评值,即各指标值都处于同一数量级别上,可进行综合测评分析[19]。计算公式如下:

$$Z_{ij}=\frac{x_{ij}-x_i}{s_i} \tag{2}$$

式中:Z_{ij}——各变量标准化后的变量值;x_{ij}——实际变量值;x_i——算术平均值;s_i——标准差,标准化后的变量值围绕 0 上下波动,$Z>0$ 说明高于平均水平,$Z<0$ 说明低于平均水平。

2.2.3　*相关分析*　对两要素之间的相关性进行分析,其目的是为了揭示要素之间相互关系的密切程度,公式如下[20]:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中:n——样本总数;x,y——相关分析的 2 个变量;$\bar{x}$,$\bar{y}$——变量样本的平均值,$R>$表示正相关,$R<0$ 表示负相关,数值大小表示相关程度。

3　结果与分析

3.1　宝鸡地区 NDVI 变化特征分析

(1) 年变化特征分析。如图 1 所示,2001—2010 年宝鸡地区植被覆盖整体呈增加趋势,增速为0.032/10 a,经显著性检验,在 0.01 水平上显著相关。与三北防护林工程区 1982—2006 年近 25 a 植被覆盖增速(0.007/10 a)相比较快[21]。NDVI 变化情况为:2006—2007,2008—2010,2011—2012 年缓慢增长,2001—2002,2003—2004 年飞速增长,2004—2006,2007—2008,2010—2011 年缓慢下降,2002—2003 年迅速下降,2012—2013 年较不明显。2001 年宝鸡地区平均 NDVI 值为 0.527 4 a,2013 年增加至 0.566 8,增速为 7.47%,且 NDVI 值在 2010 年达到最高值 0.572。近年来退耕还林还草、天保工程、公益林保护工程等全国范围的实施,以及在城市发展和人类活动对生态环境共同作用的大力影响下,确保了宝鸡地区近 13 a 来植被覆盖的有增无减,植被呈现快速恢复趋势。

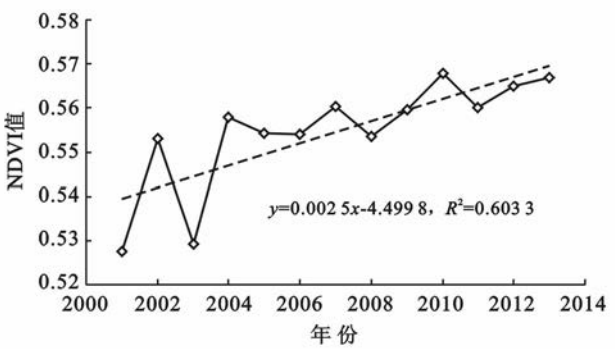


图 1　2001－2013 年宝鸡地区年均 NDVI 变化趋势

(2) 季变化特征分析。如图 2 所示,近 13 a 来宝鸡地区四季平均 NDVI 中,春、夏两季呈较显著上升趋势,秋、冬两季分别呈小幅度上升和小幅度下降。

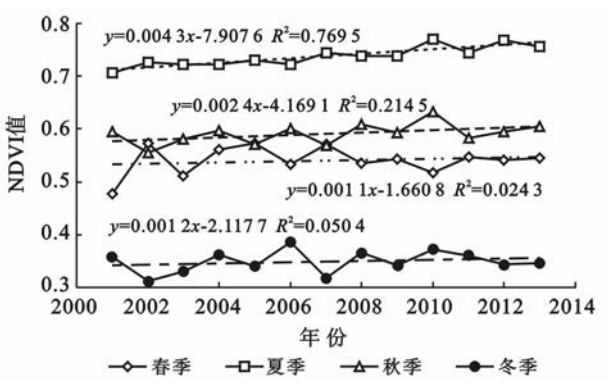


图 2　2001－2013 年四季 NDVI 变化趋势

春季 NDVI 波动趋势在 4 个季节中表现最为强烈,2001—2002,2003—2004,2006—2007,2010—

2011年较显著上升，2002—2003，2005—2006，2007—2008，2009—2010年较显著下降，2004—2005，2008—2009，2012—2013年小幅度上升，2011—2012年小幅度下降，且在2002年达到最大值0.573 3；夏季2001—2002，2006—2007年小幅度上升，2002—2003，2005—2006，2012—2013年小幅度下降，2003—2005，2007—2009年基本持平，2009—2010，2011—2012年较显著上升，且2010年达到最大值0.770 1；秋季波动趋势弱于春季，植被覆盖较好的年份为2010年(0.631 9)，但整体较为平缓；冬季下降较为缓慢，2006年植被覆盖最好(0.386 5)。宝鸡地区植被覆盖夏季最好，冬季最差，春、秋两季为NDVI增加的主要支撑。

3.2 植被指数NDVI与气温和降水量空间变化趋势

(1) 年空间变化趋势 宝鸡地区2001—2013年平均NDVI空间分布整体上呈东北向西南递增的特征(附图6)。由于太白山的山地地貌类型和其为秦岭山脉主峰的原因，因此，宝鸡地区植被覆盖最高值区集中分布在太白县南部。同时，太白县西北部及麟游东部是气温较低至最低的地区，且全区仅太白县西北部雨量充沛；宝鸡市北部边缘、宝鸡县中心至岐山县的蔡家坡一带植被覆盖最低。主要原因是由于这些地区发展迅速，削减了植被面积而增大了建筑面积，造成植被覆盖度下降。而就宝鸡地区的气温分布状况而言，最高值集中在宝鸡市和宝鸡县中心。

(2) 季空间变化趋势 研究区4个季节2001—2013年，以夏季全区植被NDVI增高趋势最为明显(附图7)，而春季气温与宝鸡地区年均温(13 ℃)最为靠近。宝鸡县中心至扶风南部边缘连接一带春季植被覆盖度最高，主要是该区域属于平原地区，冬小麦种植较为普遍，春季到初夏是NDVI值最大值期，但小麦蜡黄后NDVI值会急剧下降。气温4个季度最高值均集中在宝鸡市及宝鸡县中心地区，太白县西北部地区春、夏、秋3个季度降水量均最为充沛，但此地区4个季度气温均为最低。由于以高山草甸为主体的关山草原位于陇县县区、北山坐落于麟游境内，春季是草原植被覆盖度的低值期，从而导致春季植被覆盖低值区集中在陇县东部，此地区同时也是春、秋2个季度降水量最低的地区，麟游东部4个季节气温均呈现最低；夏季植被覆盖高值区广泛分布在宝鸡东南—西北连线以西，扶风、眉县夏季气温也表现为最高，扶风南部夏季降水量呈降低趋势，凤县西南角降水量有逐年增加的趋势。凤翔县中部连接宝鸡县中心至岐山中部及南部大面积地区夏、秋两季植被覆盖均为最低；秋季植被覆盖除最低区外，其他地区均较为良好，尤以太白县南部植被覆盖度最高，植被覆盖整体分布状况与夏季较相似，但较差于夏季。秋季气温分布状况与春季基本一致，最高温分布面积有所减小。宝鸡市北部连接宝鸡县中心降水量也成为了雨量充沛地区。另外，凤县西南部秋、冬两季降水量最低，冬季气温最高。导致此现象的原因是凤县西南部靠近紫柏山，森林对于裸地而言，比热容大，升温快，降温慢，所以该地区冬季气温较高；冬季太白县南部植被覆盖状况最好，与秋季最高值分布区域一致。冬季气温最高值分布区域面积小于秋季，冬季植被覆盖中、低值广泛分布在整个宝鸡地区，降水量均偏高。综合来说，宝鸡地区水热条件较好的地区植被覆盖增加趋势越明显，且覆盖度较好。

3.3 NDVI对气温和降水量的响应

(1) 季节NDVI与气温和降水量的相关性分析 四季按照本年3—5，6—8，9—11，12月至次年2月依次划分为春、夏、秋、冬4个季节，在ArcGIS中利用像元统计出每个季度值，一年共4个。基于SPSS软件将宝鸡地区2001—2013年近13 a四季平均NDVI值、气温、降水量数据经标准化处理得到NDVI与气温、降水量变化的偶合关系(图3)。宝鸡地区四季平均气温和降水量变化趋势一致，属于雨热同期；降水年内分配不均，主要集中在夏季；NDVI与气温、降水量的变化趋势相接近，其最大值点的出现时间与气温和降水的极值出现时间基本对应。

考虑到植被生长对气候变化可能存在滞后效应，表1是对春、夏、秋、冬4个季节的NDVI分别与同季、上季气温和降水量的相关系数，可以看出宝鸡地区NDVI与同季气温的相关系数均高于同季降水量(除夏季)，上季降水量整体偏高于上季气温(除冬季)。另外，春季NDVI与春季气温和降水量、冬季降水量均为正相关且均较显著，表明春季气温和降水量的高低与植被生长同步，且冬季降水量对春季植被生长具有一定的时滞作用。春季NDVI与冬季气温呈显著负相关($p<0.05$)，这一数据结果与实际情况相吻合，即冬季气温越高，次年春季植被覆盖越低；夏季NDVI与夏、春季气温呈负相关、与夏、春两季降水量呈正相关，且与春季降水量呈显著正相关，表明夏、春两季气温对夏季植被生长具有一定的时滞作用，春季降水量促进夏季植被的生长；宝鸡地区为关中秋季连阴雨最多的地区，而秋季为农民播种冬小麦的时期，强降雨会抑制小麦出土发芽，而夏季多雨有利于秋季播种时的土壤墒情，故秋季NDVI分别与秋季、夏季降水量呈负相关和正相关；冬季NDVI与同季降水量呈弱负相关，可能的解释是秋季强降雨已

满足冬季植被的生长需求,而冬季再次的降水在土壤含水量达到饱和时土壤蓄水量将不会增加,在界面上会形成积水,不利于植被生长[22]。综合表 1 可以看出,除冬季外,春、夏两季 NDVI 与上季气温均成负相关,说明城市热岛对植被覆盖有一定的阻碍作用[23],同时植被覆盖的提高与质量还有赖于人类改善绿化城区、保护森林、退耕还林还草等活动的大力实施。

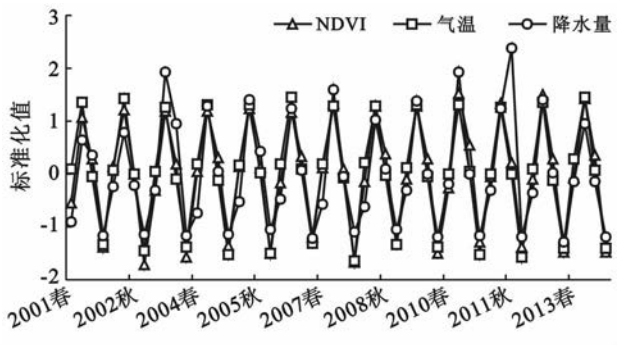


图 3　宝鸡地区植被指数与气温、降水量关系

表 1　宝鸡地区四季 NDVI 与同季、上季气温和降水量的相关系数

季节	同季气温	上季气温	同季降水量	上季降水量
春季	0.302	−0.592*	0.244	0.289
夏季	−0.071	−0.079	0.393	0.640*
秋季	0.245	0.005	−0.152	0.186
冬季	0.336	0.365	−0.190	0.126

注:* 表示在 0.05 水平上显著相关。

(2) 气温和降水量对月 NDVI 的影响 选取每年植被最好的 8 月 NDVI 作为数据源来分析月 NDVI 与气温和降水量的相关性(表 2)。由表 2 可见,NDVI与气温呈负相关,与降水量呈正相关,表明宝鸡地区 8 月植被覆盖变化与降水量的变化较为一致,降水量较气温对 8 月植被生长影响强烈;当不考虑降水量的累积效应,只考虑滞后效应时,与 8 月 NDVI 相关性最好的是 6 月降水量,其次是 7 月降水量;当考虑降水的累积效应时,相关性均呈现较好,故NDVI与降水之间的滞后关系为 0～3 个月。

表 2　8 月 NDVI 与 6 个时间段的气温、降水量的相关系数

项目	相关系数					
	6 月	7 月	8 月	6—7 月	7—8 月	6—8 月
气温	−0.066	−0.301	−0.041	−0.165	−0.169	−0.125
降水量	0.409	0.358	0.145	0.395	0.284	0.405

4　讨论与结论

(1) 2001—2013 年宝鸡地区年均 NDVI 空间分布整体上呈从东北向西南递增的特征。春、夏、秋、冬 4 个季节 NDVI 高值区空间分布及其不均,春季零散分布在宝鸡县中心至扶风南部边缘连接一带(冬小麦分布区),夏季高值区广泛分布在宝鸡东南—西北连线以西,由于太白山的山地地貌类型和其为秦岭山脉主峰的原因,因此,宝鸡地区秋、冬两季植被覆盖最高值区集中分布在太白县南部。综合来说,全区四季植被覆盖表现为夏季最好、冬季最差。

(2) 宝鸡地区四季标准化值 NDVI 与气温、降水量的变化趋势相接近,其最大值点的出现时间与气温和降水的极值出现时间基本对应。从季节相关性分析来看,宝鸡地区 NDVI 与同季气温的相关系数均高于 NDVI 与相应季节降水量(除夏季),上季降水量整体偏高于上季气温(除冬季)。且在四季 NDVI 与同季和上季气候因子相关系数中,春季 NDVI 与冬季气温(−0.592)、夏季 NDVI 与春季降水量(0.640)之间显著相关,表明近 13 a 来春季植被覆盖变化与冬季气温、夏季植被覆盖与春季降水量的变化较为一致。

(3) 8 月 NDVI 与气温呈负相关,与降水量呈正相关,表明宝鸡地区 8 月植被覆盖变化与降水量的变化较为一致,降水量较气温对 8 月植被生长影响强烈,且 NDVI 与降水之间的滞后关系为 0～3 个月。

本研究基于不同县区分析了植被指数 NDVI 的季节变化及其与气温和降水量的相关性,采用分辨率为 1 km 的月 MODIS NDVI 时间序列,所得结果不够精细。今后可以在以分析逐旬变化的季相、以生长季的开始和结束为时间指标的更长时间序列数据的基础上做出更加精细的时间尺度季相变化研究。

[参 考 文 献]

[1] 陈效逑,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94.

[2] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. 应用生态学报,2000,11(1):47-52.

[3] 彭代亮,黄敬峰,王秀珍. 基于 MODIS-EVI 区域植被季节变化与气象因子的关系[J]. 应用生态学报,2007, 18(5):985-990.

[4] 裴欢,房世峰. 南京市夏季热岛特征及其与土地利用覆盖关系研究[J]. 干旱气象,2008,26(1):23-27.

[5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003,300(5625):1560-1563.

[6] 赵宗慈,王绍武,罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估[J]. 气候变化研究进展,2007,3(3):183-184.

[7] 方精云,朴世龙,贺金生. 近 20 a 来中国植被活动在增强[J]. 中国科学:C 辑(生命科学),2003,33(6):554-565.

[8] 张国斌,张勃,王东. 近 14 a 西南地区植被季节变化及与

气候关系[J]. 遥感信息,2016,31(1):89-95.

[9] 宋富强,邢开雄,刘阳,等. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J]. 生态学报,2011,31(2):354-0363.

[10] 廖建华,李丹勋,王兴奎. 长江上游植被覆盖的时空分异季节变化及其驱动因子研究[J]. 环境科学学报,2009,29(5):1103-1112.

[11] Pinzon J. Using HHT to successfully uncouple seasonal and interannual components in remotely sensed data [C] // SCI 2002 Conference Proceedings. Orlando, Florida, 2002:14-18.

[12] Zhang Yuan, Zhu Zaichun, Liu Zhuo, et al. Seasonal and interannual changes in vegetation activity of tropical forests in Southeast Asia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016,224:1-10.

[13] Mao Dehua, Wang Zongming, Luo Ling, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18:528-536.

[14] Weiss J L, Gutzler D S, Coonrod J E A, et al. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):507-534.

[15] 王林林,刘普幸,王允. 近 14 a 来柴达木盆地 NDVI 时空变化及其影响因素[J]. 生态学杂志,2015,34(6):1713-1722.

[16] 崔林丽,史军,杨引明,等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征[J]. 地理学报,2009,64(7):850-860.

[17] 陈效逑,喻蓉. 1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化[J]. 地理学报,2007,62(1):41-51.

[18] 韦振锋,任志远,张翀. 西北地区植被覆盖变化及其与降水和气温的相关性[J]. 水土保持通报,2014,34(3):238-289.

[19] 金丽娜. 西安近 10 a 植被覆盖变化及其与气候因子的相关性研究[J]. 甘肃科学学报,2014,26(3):23-27.

[20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:37-68.

[21] 王强,张勃,戴声佩,等. 基于 GIMMSAVHRRNDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J]. 资源科学,2011,33(8):1613-1620.

[22] 贾东于,文军,张堂堂,等. 黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响[J]. 高原气象,2014,33(3):712-720.

[23] 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.

(上接第 234 页)

[参 考 文 献]

[1] 李钜章. 中国地貌形态基本类型数量指标初探[J]. 地理学报,1982,37(1):17-25.

[2] 李钜章. 中国地貌基本形态划分的探讨[J]. 地理研究,1987,6(2):32-39.

[3] 李炳元,潘保田,韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究,2008,28(4):536-542.

[4] 冯玉祥,邓青春,向卫,等. 基于地形起伏度的元谋干热河谷区地貌划分研究[J]. 四川林勘设计,2016,38(3):27-32.

[5] 刘新华,杨勤科,汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报,2001,21(1):57-59.

[6] 冉红,黎武,杨晓,等. 重庆市地形起伏度的提取及其在水土流失评价中的应用[J]. 安徽农学通报,2017,23(9):92-94.

[7] 黎武,贺春明,杨晓,等. 地形起伏度在云南省元谋县水土流失评价中的应用[J]. 四川林勘设计,2016,38(2):15-20.

[8] 王庆安,毛竹,张翔,等. 汶川地震极重灾区地形起伏度特征及其与生态环境受损关联分析[J]. 四川环境,2009,28(5):44-48.

[9] 毕晓玲,李小娟,胡卓玮,等. 地形起伏度提取及其在区域滑坡灾害评价中的应用:以四川省为例[J]. 安徽农业科学,2011,39(4):2413-2416.

[10] 郭芳芳,杨农,孟晖,等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质,2008,35(1):131-143.

[11] 谢晓议,李月臣,曾晅. 重庆市地形起伏度及其与人口、经济的相关性研究[J]. 资源开发与市场,2014,30(6):656-659.

[12] 周自翔,李晶,任志远. 基于 GIS 的关中—天水经济区地形起伏度与人口分布研究[J]. 地理科学,2012,32(8):951-957.

[13] 封志明,张丹,杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性[J]. 吉林大学社会科学学报,2011,51(1):146-151.

[14] 于慧,邓伟,刘邵权. 地形起伏度对三峡库区人口及经济发展水平的影响[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(6):686-690.

[15] 中国科学院地理研究所. 中国 1∶1 000 000 地貌图制图规范(试行)[M]. 北京:科学出版社,1987:33-34.

[16] 陈学兄,常庆瑞,郭碧云,等. 基于 SRTM DEM 数据的中国地形起伏度分析研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(4):670-678.