

山西省不同生态区 NDVI 时空变化及其影响因素

仝莉棉, 曾彪, 王鑫

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:利用 MODIS-NDVI 数据研究了 2000—2012 年山西省生长季平均 NDVI 的时空变化特征,并分析了气候变化和人类活动对生长季平均 NDVI 变化的影响。结果表明:(1) 13 a 来山西省山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区生长季平均 NDVI 均呈显著增加趋势,增长率分别为 0.052/10 a,0.079/10 a,0.049/10 a。(2) 山西省植被变化存在明显的空间差异,改善区占全省面积的 73.76%,主要分布在太行山、太岳山、吕梁山、中条山等地区;而退化区占全省面积的 3.29%,主要分布在太原盆地及临汾盆地的边缘地区。(3) NDVI 变化是气候变化和人类活动共同影响的结果。不同生态区 NDVI 对气候变化的响应不同。其中,前一年 11 月至 5 月降水增多可能是山地落叶阔叶林生态区 NDVI 增加的主要原因,前一年 12 月至 1 月气温降低和 2—5 月降水增多可能是农业与草原生态区 NDVI 增加的主要原因,5—9 月气温降低和前一年 11 月至 8 月降水增多可能是汾河谷地农业生态区 NDVI 增加的主要原因。而人类活动对 NDVI 变化的影响主要表现在退耕还林、防护林建设、采矿、城市扩张等方面。

关键词:MODIS-NDVI; 时空变化; 气候影响; 人类活动

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0071-06

Spatiotemporal Variation of NDVI and Its Influence Factors in Different Ecological Districts, Shanxi Province

TONG Limian, ZENG Biao, WANG Xin

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Spatiotemporal variation of growing-season average NDVI in Shanxi Province was analyzed based on MODIS-NDVI during the period from 2000 to 2012, and the influence of climate change and human activities impacting on vegetation growth were discussed. The result showed that: (1) the growing-season average NDVI of three ecological districts in Shanxi Province which were the Mountain Deciduous Broad-leaved Forest Ecological District, the Agriculture and Grassland Ecological District and the Fen River Valley Agricultural Ecological District showed a significant increase trend; the growth rates of three ecological districts were 0.052/decade, 0.079/decade and 0.049/decade, respectively; (2) there were obvious spatial differences about vegetation change in Shanxi Province, the greening area accounted for 73.76% of the total area that was mainly distributed in Taihang Mountain, Taiyue Mountain, Lüliang Mountain, Zhongtiao Mountain, the degraded area accounted for 3.29% of the total area that was mainly distributed in the edge of Taiyuan Basin and Linfen Basin; (3) both climate change and human activities were important factors on vegetation variation. Different districts had different responses to climate change. Increasing precipitation from November to May probably was the main reason for average NDVI increase in the Mountain Deciduous Broad-leaved Forest District. Decreasing temperature from December to January and increasing precipitation from February to May probably were the main reasons for average NDVI increase in the Agriculture and Grassland District. Decreasing temperature from May to September and increasing precipitation from November to August probably were the main reasons for average NDVI increase in the Fen River Valley Agricultural District. In addition, the impacts of human activities on the NDVI changes mainly were observed in forestland shifted from the cropland, shelter forest construction, mining, urban expansion.

Keywords: MODIS-NDVI; spatiotemporal variation; climate influence; human activities

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,与大气、土壤等进行着物质循环、能量转换和信息传递,能够反映其所在生态系统的总体环境状况^[1-4]。植被的变化一定程度上是环境发生变化的结果,而在环境条件中气候和人类活动是植被生长的重要影响因素,因此,研究植被变化及其影响因素有助于理解陆地生态系统中植被的动态变化规律及其与周围环境的相互作用关系。归一化植被指数已被证明能够很好地表征植被生长状况,并广泛应用于植被覆盖变化、生物量估测等领域^[5-9]。许多学者在不同空间尺度上就植被变化及其对气候变化的响应研究取得了大量成果^[10-13]。

山西省位于黄土高原东部,自然植被破坏严重,水土流失、土壤肥力下降等生态环境问题突出,该地区植被变化及其与气候变化的关系引起了国内学者的关注。刘森等^[14]发现 1988—2000 年山西省植被覆盖度呈下降趋势,武永利等^[15-16]发现 1982—2006 年山西省平均 NDVI 呈波动上升趋势,且对气候年际变化响应有明显的滞后性,NDVI 受降水的年际变化影响最大。为了进一步更准确地理解山西省不同生态区的植被变化特征及气候变化和人类活动对植被变化的影响,本文利用 MODIS-NDVI 数据,研究 2000—2012 年山西省不同生态区植被生长季 NDVI 时空变化,并计算气候变化和人类活动对三个生态区植被变化的相对作用,进而分析气候变化和人类活动对植被生长的影响。

1 数据及研究方法

1.1 研究区概况

山西省位于 110°14′—114°33′E,34°34′—40°43′N,属于温带大陆性季风气候,年平均气温为 4~14℃,年降水量为 400~600 mm,从东南向西北由半湿润区过渡到半干旱区。由于水热组合状况、地貌特征和植被类型等的差异,按照中国生态区划方案,将山西省分为山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区和汾河谷地农业生态区(附图 5)。其中,山地落叶阔叶林生态区地貌类型主要为山地、丘陵和山间盆地,该区属于暖温带半湿润气候,降水较多,自然植被以落叶阔叶林和灌草丛为主。农业与草原生态区地貌类型主要为山地、丘陵、黄土梁峁沟壑,该区属于暖温带半湿润至半干旱气候,雨量较少且变率较大,热量条件优越,地带性植被为温带草原及暖温带落叶阔叶林。汾河谷地农业生态区地貌类型主要为汾河河谷冲积平原及黄土台地,该区属于暖温带半湿润气候,光热条件好,自然植被已被栽培植被所代替,现有的次生自然植被较少,主要为灌丛、灌草丛,分布在盆地边缘的低山丘陵区。

1.2 数据来源与处理

NDVI 数据采用美国国家宇航局(NASA)提供的 2000—2012 年 MODIS 植被指数产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,经过辐射校正、大气校正、几何精度纠正,用最大值合成法减弱云、大气、太阳高度角等对数据精确度的影响。对遥感数据进行格式转换、重投影、拼接、裁剪等预处理,并用非对称高斯方法对其进行拟合,得到光滑的 NDVI 时间序列数据。

山西省生态区划数据来自中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn>),分为山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区和汾河谷地农业生态区。

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,考虑到生长季平均 NDVI 可能受生长季前期及同期气候条件的影响,将前一年 11 月、12 月以及当年 1—10 月作为一个生长年,采用山西省 1999 年 11 月—2012 年 10 月气象资料完整的 17 个气象站点的逐月平均气温及降水量资料。其中,山地落叶阔叶林生态区包括五台山、原平、榆社、长治、阳城 5 个气象站点;农业与草原生态区包括右玉、大同、河曲、五寨、兴县、离石、隰县 7 个气象站点;汾河谷地农业生态区包括太原、介休、临汾、侯马、运城 5 个气象站点。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 一元线性回归趋势分析能够模拟出每个栅格 NDVI 的变化趋势,进而反映区域上 NDVI 变化的空间分布特征^[17]。本文通过 Matlab 计算每个栅格像元生长季平均 NDVI 的变化斜率,得到山西省生长季平均 NDVI 的空间变化特征,计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (i \cdot \text{NDVI}_{i\text{mean}}) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_{i\text{mean}}}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中: slope——生长季平均 NDVI 变化的斜率; n ——监测时间段的年数; $\text{NDVI}_{i\text{mean}}$ ——第 i 年生长季平均 NDVI。slope > 0,表示在所监测时间段内 NDVI 呈增长趋势,slope < 0,则表示呈减少趋势。根据生长季 NDVI 变化斜率及其范围,将山西省各生态区植被变化划分为严重退化、中度退化、轻微退化、稳定、轻微改善、中度改善、明显改善 7 个等级(表 1),进而统计各生态区不同变化程度地区的面积及其百分比。

1.3.2 气候变化和人类活动影响的分离 山西省植被 NDVI 主要受气候变化和人类活动的影响,在不

考虑其他非决定影响因素的条件下,利用残差法分离两者的影响。首先,分别计算不同月份气温、降水与 NDVI 的相关系数,选择最相关月份的气温和降水数据,结合生长季平均 NDVI 建立二元一次线性回归方程 ($p < 0.05$);然后,模拟每年每个栅格像元的 NDVI 回归值,将其视作是气候变化影响的结果,用实际观测的 NDVI 真实值减回归值得到残差值,将其视作是人类活动影响的结果,残差值为正,表明人类活动对植被生长起正向作用,反之则起负向作用。

表 1 2000—2012 年山西省植被变化分级

NDVI 变化趋势	植被变化程度
$\text{slope} \leq -0.02$	严重退化
$-0.02 < \text{slope} \leq -0.01$	中度退化
$-0.01 < \text{slope} \leq -0.003$	轻微退化
$-0.003 < \text{slope} \leq 0.003$	稳定
$0.003 < \text{slope} \leq 0.01$	轻微改善
$0.01 < \text{slope} \leq 0.02$	中度改善
$\text{slope} > 0.02$	明显改善

回归方程式如下:

$$\text{NDVI}'_{i\text{mean}} = aT + bP + e$$

式中: $\text{NDVI}'_{i\text{mean}}$ ——第 i 年生长季平均 NDVI 的回归值; T ——与生长季 NDVI 最相关月份的平均气温; P ——与生长季 NDVI 最相关月份的降水量; a , b , e ——待定系数。

分离气候变化和人类活动对植被 NDVI 影响的公式如下:

$$\sigma_i = \text{NDVI}_{i\text{mean}} - \text{NDVI}'_{i\text{mean}}$$

式中: σ_i ——第 i 年 NDVI 真实值和回归值的残差,表示人类活动对 NDVI 的影响; $\text{NDVI}_{i\text{mean}}$ ——第 i 年生长季平均 NDVI 真实值; $\text{NDVI}'_{i\text{mean}}$ ——第 i 年生长季平均 NDVI 的回归值,表示气候变化对 NDVI 的影响。

2 结果与分析

2.1 山西省不同生态区生长季平均 NDVI 时空变化

分析山西省 2000—2012 年不同生态区生长季平均 NDVI 的际变化(图 1)可知,山地落叶阔叶林生态区平均 NDVI 最高,汾河谷地农业生态区次之,农业与草原生态区最低。13 a 来,三个生态区 NDVI 均呈显著增加趋势。农业与草原生态区 NDVI 增长最快,山地落叶阔叶林生态区次之,汾河谷地农业生态区最慢,增长速率分别为 0.079/10 a, 0.052/10 a, 0.049/10 a。

13 a 来山西省生长季平均 NDVI 变化表现出明显的空间差异(附图 6),统计全省及各生态区不同变化程度区域的面积及百分比(表 2),可以得到山西省

大部分地区植被在改善,改善区(包括明显改善区、中度改善区、轻微改善区)面积占全省面积的 73.76%,主要分布在太行山、太岳山、中条山、吕梁山等地区;植被退化区(包括严重退化区、中度退化区、轻微退化区)面积占全省面积的 3.29%,主要分布在太原盆地、临汾盆地边缘地区;植被稳定区占全省面积的 22.95%,主要分布在中条山东部及东北部、长治盆地、太原盆地等地区。

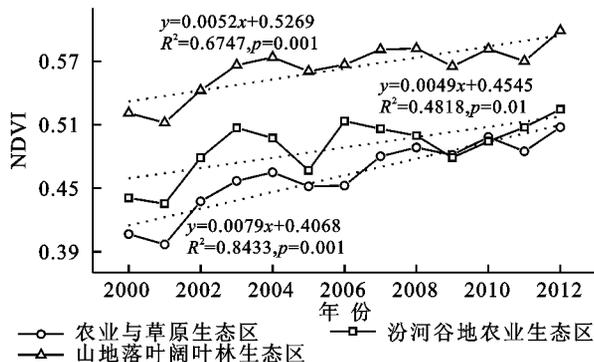


图 1 不同生态区生长季平均 NDVI 年际变化

不同生态区植被变化的状况不同。山地落叶阔叶林生态区改善区面积为全区面积的 65.96%,退化区面积为 3.19%;农业与草原生态区改善区面积为全区的 87.29%,退化区为 1.21%;汾河谷地农业生态区植被改善区面积占全区面积的 56.24%,退化区为全区的 11.38%。

2.2 气候变化和人类活动对生长季平均 NDVI 的相对作用大小

由于山西省植被退化区占全省面积的比例较小(3.29%),本文仅探讨在改善区气候变化和人类活动对植被的相对作用。两者的相对作用大小通过计算生长季平均 NDVI 回归值和残差值对真实值的贡献率得到。经计算,气候变化在山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区的相对作用分别为 45.07%, 24.25%, 43.72%, 而人类活动的相对作用分别为 54.93%, 75.75%, 56.28%。同时气候变化与人类活动对植被改善的相对作用表现出明显的空间分异(图 2),气候变化对植被改善起主导作用(气候变化的相对作用大于 50%)的地区主要分布在恒山、五台山、太行山、吕梁山及中条山西段,而人类活动起主导作用(人类活动的相对作用大于 50%)的地区主要分布在山西省的西北部及东南部地区。

结果表明,山西省植被的改善是气候变化和人类活动共同作用的结果,而各个生态区植被改善受人类活动的影响相对气候变化来说较大。

2.3 气候变化对不同生态区生长季平均 NDVI 变化的影响

2.3.1 山西省不同生态区气候变化特征 由图 3 可

知,13 a来山西省各个生态区的气候变化特点存在差异。山地落叶阔叶林生态区平均气温和降水量的年际变化均表现为不显著的下降趋势,年平均气温的变化率为 $-0.475^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,年降水量的变化率为 $-10.356\text{ mm}/10\text{ a}$ 。农业与草原生态区年平均气温呈不显著的下降趋势,变化率为 $-0.124^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;年降水量则呈不显著的增加趋势,变化率为 $56.269\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

表2 不同生态区植被变化状况及百分比

生态区	明显改善		中度改善		轻微改善		稳定		轻微退化		中度退化		严重退化	
	面积/ km ²	百分 比/%												
山西省	728.7	0.46	28353.6	18.05	86783.6	55.25	36057.5	22.95	4192.3	2.67	828.5	0.53	142.8	0.09
山地落叶阔叶林生态区	33.3	0.04	6142.2	8.30	42622.6	57.62	22818.5	30.85	1971.5	2.66	331.6	0.45	58.4	0.08
农业与草原生态区	578	0.88	19724.6	30.13	36837.6	56.28	7522.6	11.49	605.1	0.92	159.3	0.24	29.8	0.05
汾河谷地农业生态区	117.4	0.67	2486.8	14.09	7323.4	41.49	5716.4	32.38	1615.7	9.15	337.6	1.91	54.6	0.31

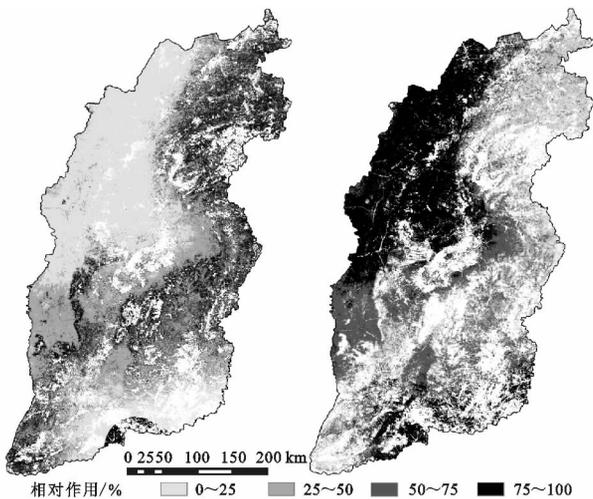


图2 山西省气候变化与人类活动对改善区植被相对作用的空间分布

2.3.2 气候变化对生长季平均NDVI的影响 将山西省各个生态区前一年11月至当年10月的月平均气温、月降水量资料整理成不同开始时间、不同时间间隔的平均气温、降水量数据,计算不同生态区生长季平均NDVI与各地区气温、降水的相关系数,并列最相关的月份(表3)。

由表3可知,山地落叶阔叶林生态区生长季平均NDVI与前一年11月至当年5月降水呈显著正相关,可能是由于该区属于半湿润季风气候区,该时期降水较多可以使得土壤中储存较多的水分,为植被生长提供较好的水分条件,有利于植被生长。

农业与草原生态区生长季平均NDVI与前一年12月至1月气温呈显著负相关,可能是由于该段时间较高的气温使得蒸发相对加强,导致土壤中可储存的水分相对减少,植被返青时可利用水分不足,抑制植被的生长,另外,该时期较高的气温可能会使得一部分害虫存活下来,在植被生长时会对其产生不利影

响;同时该区平均NDVI与2—5月降水呈显著正相关,可能是由于2—5月是植被生长季前期及返青期,较多的降水可以为植被生长提供必要的水分条件。

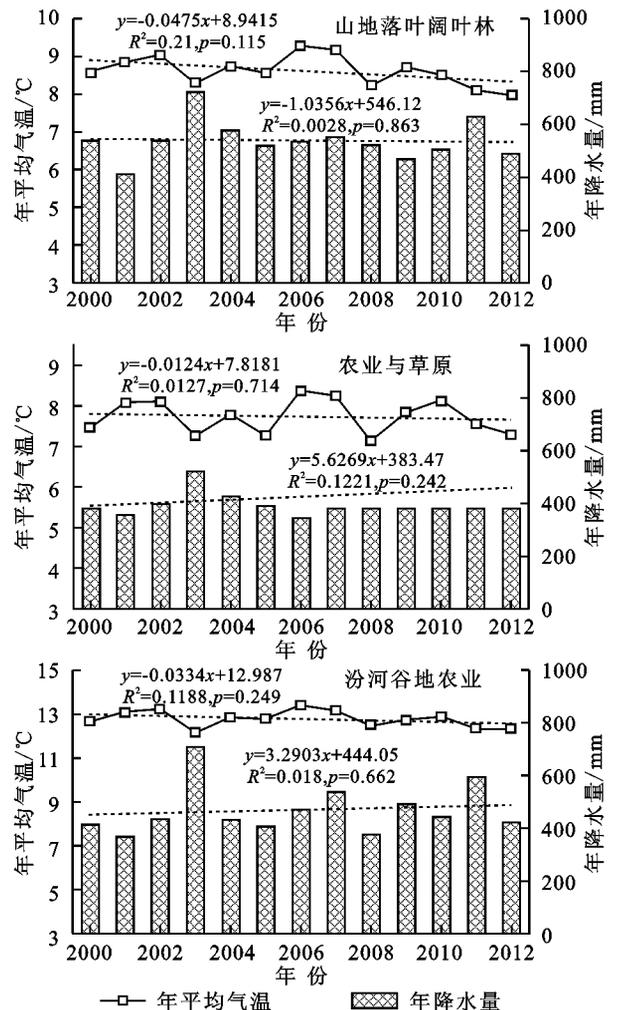


图3 不同生态区年平均气温及年降水量变化

汾河谷地农业生态区生长季平均NDVI与5—9月气温呈显著负相关,而与前一年11月至当年8月降

水呈显著正相关,可能是由于该生态区为谷地地形,背景气温高(2000—2012年年平均气温为12.75℃),在植被生长的旺盛期,气温过高可能会对植物的生长产生负向胁迫。同时气温高导致蒸发强烈,较多的降水可弥补蒸发而损失的水分,缓减高温对植被生长的

抑制作用。另外,该生态区虽然有汾河流经可以以河水灌溉,但该区是城市、工业、人口密集区,城市化及工业化的快速发展,使得城市用水及工业用水大大增加,用于农业灌溉的水量受到限制,导致该区植被的生长仍然对降水变化敏感。

表3 不同生态区生长季平均 NDVI 与气温和降水的相关性

生态区	气温		降水	
	月份	相关系数	月份	相关系数
山地落叶阔叶林生态区	3—9月	-0.5149	前一年11月—5月	0.82249***
农业与草原生态区	前一年12月—1月	-0.6569**	2—5月	0.72414***
汾河谷地农业生态区	5—9月	-0.5898*	前一年11月—8月	0.75855***

注:*代表0.05置信度水平,**代表0.02置信度水平,***代表0.01置信度水平。

2.4 人类活动对生长季平均 NDVI 变化的影响

2000—2012年山西生长季平均 NDVI 的增长除受气候变化的影响外,人类活动对其作用更大。分析山西省生长季平均 NDVI 残差变化趋势(附图7)可知,人类活动对生长季平均 NDVI 的影响存在明显的空间差异。人类活动对生长季平均 NDVI 起正向作用(斜率大于0)的地区占研究区面积的71.8%,主要分布在山西西部、西北部地区及中条山东部、太原盆地以东地区。具体来说,人类活动对山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区生长季平均 NDVI 起正向作用的地区占所对应生态区面积的百分比分别为54.5%,84.6%,64.7%。尉文龙等^[18]研究发现吕梁林区实施的封山育林工程,明显促进了森林的更新和繁衍速度。同时,20世纪三北防护林建设、退耕还林还草等工程的开展使得植被恢复效果显著,改善了生态环境,为植被生长提供了良好的条件,而自然保护区的建设也对植被的保护起到了积极的作用^[19-21]。山西西部河谷地区人类活动促进植被改善,可能与农业技术水平的提高以及化肥、农药等的合理使用有关。

同时,人类活动对生长季平均 NDVI 起负向作用(斜率<0)的地区占研究区面积的21.2%,主要分布在五台山、太岳山、太行山及大同盆地、太原盆地、长治盆地、临汾盆地、运城盆地的部分地区。对山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区生长季平均 NDVI 起负向作用的地区占所对应生态区面积的百分比为45.5%,15.4%,35.3%。张健雄^[22]研究发现长治矿区由于采矿造成的矿区沉陷一定程度上对地表覆被的生长状况产生负向作用。另外,城市扩张以及交通等基础设施建设也是导致 NDVI 下降的重要原因^[21]。

3 结论

(1) 近13 a 山西省三个生态区生长季平均 NDVI

均呈显著增加趋势,山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区的年际变化率分别为0.052/10 a,0.079/10 a,0.049/10 a。

(2) 山西省大部分地区植被在改善,改善区面积占全省面积的77.3%,主要分布在太行山、太岳山、吕梁山、中条山等地区;退化区占3.29%,主要分布在太原盆地、临汾盆地的边缘地区;稳定区为22.95%,主要分布在中条山东部及东北部、长治盆地、太原盆地等地区。

(3) 山西省 NDVI 变化是气候变化与人类活动共同作用的结果,而受人类活动的影响较大。在植被改善区,山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区受人类活动影响的相对作用分别为54.93%,75.75%,56.28%。

(4) 不同生态区生长季平均 NDVI 对气候变化的响应存在差异。在气温方面,农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区 NDVI 分别与前一年12月至1月、5—9月气温呈显著负相关;在降水方面,山地落叶阔叶林生态区、农业与草原生态区、汾河谷地农业生态区植被分别与前一年11月至当年5月、2—5月、前一年11月至当年8月降水呈显著正相关。

(5) 人类活动对植被 NDVI 变化的影响表现为正负两方面的作用,并且存在明显的空间分异。大部分地区人类活动均有利于植被生长(71.8%),在农业与草原生态区人类活动的积极作用表现最为突出,面积百分比为84.6%。退耕还林还草、封山育林、防护林建设等生态工程的实施以及农业技术和生产方式的改进有利于植被改善,而采矿、城市扩张、基础设施建设等则会导致植被退化。

在研究植被 NDVI 与气候变化的关系时,考虑了气温和降水两个气候要素,此外,太阳辐射、光照、土壤等环境条件也会对植被 NDVI 变化产生影响,今后的研究可以结合多环境要素来全面分析植被对气候变化的响应,深入探索植被与环境的相互作用机理。

参考文献:

- [1] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 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[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [2] 陈云浩,李晓兵,史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报,2001,25(6):716-720.
- [3] 侯美亭,赵海燕,王笋,等. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展[J]. 气候与环境研究,2013,18(3):353-364.
- [4] 方精云,朴世龙,贺金生,马文红. 近 20 年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.
- [5] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment,1997,62(3):241-252.
- [6] Lin C, Dugarsuren N. Deriving the Spatiotemporal NPP Pattern in Terrestrial Ecosystems of Mongolia Using MODIS Imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2015,81(7):587-598.
- [7] Piao S, Fang J, He J. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang Plateau, China, from 1982 to 1999[J]. Climatic Change,2006,74(1/3):253-267.
- [8] 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.
- [9] 孙睿,朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报,2000,55(1):36-45.
- [10] Nash M S, Bradford D F, Wickham J D, et al. Detecting change in landscape greenness over large areas: An example for New Mexico, USA[J]. Remote Sensing of Environment,2014,150:152-162.
- [11] Landmann T, Dubovyk O. Spatial analysis of human-induced vegetation productivity decline over eastern Africa using a decade(2001—2011) of medium resolution MODIS time-series data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2014,33:76-82.
- [12] 宋怡,马明国. 基于 SPOTVEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠,2007,27(1):89-93.
- [13] 毛德华,王宗明,宋开山,等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学,2011,31(2):283-292.
- [14] 刘森,秦大庸,刘家宏,等. 基于 NDVI 的山西省植被覆盖度变化研究[J]. 人民黄河,2009,31(5):17-18.
- [15] 武永利,栾青,赵永强,等. 近 25 年山西植被指数时空变化特征分析[J]. 生态环境,2008,17(6):2330-2335.
- [16] 武永利,李智才,王云峰,等. 山西典型生态区植被指数(NDVI)对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2009,28(5):925-932.
- [17] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. International Journal of Remote Sensing,2003,24(5):1111-1117.
- [18] 尉文龙. 封山育林:又好又快恢复森林植被的有效途径:山西吕梁林区的实践与探索[J]. 林业经济,2007(12):32-35.
- [19] 王强. 三北防护林工程区植被覆盖变化特征及其对气候变化的响应研究[D]. 兰州:西北师范大学,2012.
- [20] 信忠保,许炯心,郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学:D 辑,2007,37(11):1504-1514.
- [21] 易浪,任志远,张翀,等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学,2014,36(1):166-174.
- [22] 张健雄. 煤矿沉陷区地表覆被的时空变化规律研究[D]. 河南焦作:河南理工大学,2011.

~~~~~

(上接第 70 页)

- [16] 董磊,彭春明,王崇云,等. 基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究,2012,19(2):11-18.
- [17] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation[J]. Soil Science Society of America Journal,1959,23(3):246-249.
- [18] 杨琴. 基于 USLE 的喀斯特地区水土流失定量监测研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2008.
- [19] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers,1989,32(5):1571-1576.
- [20] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.
- [21] 邓辉,何政伟,陈晔,等. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析:以四川泸定县为例[J]. 地球与环境,2013,41(6):669-678.