

# 西北地区 NDVI 变化与气候因子的响应关系研究

周梦甜<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>, 朱康文<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆市高校 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:** 基于 1998—2012 年 SPOT VEGETATION/NDVI 数据, 研究近 15 年来西北地区植被覆盖时空特征。通过时滞相关分析法, 分析研究区不同地区植被对气温和降水的响应程度。结果表明: (1) 西北地区总体植被覆盖率偏低, 极低植被区分布较广, 主要位于新疆东南大部以及内蒙古西北部; (2) 西北地区退化区所占西北总面积比例小, 主要位于新疆阿尔泰山脉周边、天山山脉以南和塔里木盆地以北。改善区范围分布分散, 其中轻微改善区主要位于新疆天山周边、准格尔盆地边缘及甘肃东部; (3) 年尺度来看, 西北各地区 NDVI 年均值均出现缓慢增长的趋势, 新疆、青海 NDVI 的年均值保持相对稳定; 甘肃、宁夏、内蒙古西部 NDVI 的年均值在此期间先增加而后减少, 起伏波动较大。月尺度, 西北各地区 NDVI 多年平均月值呈现出明显的季节变化, 因此与气温、降水等气候因子密切相关; (4) 西北各地区 NDVI 与气温、降水的年际相关性不大, 而年内相关性显著。新疆、宁夏 NDVI 对气温、降水不具有滞后性, 而甘肃 NDVI 对气温具有明显滞后一个月的性质, 青海地区 NDVI 对气温、降水的滞后性不明显, 而内蒙古西部地区 NDVI 对气温具有明显滞后性而对降水具有及时性。

**关键词:** NDVI; MVC 最大合成法; SPSS; 时滞性

**中图分类号:** P461+.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)03-0182-06

## Changes of NDVI in Different Regions of Northwest Area and Its Responses to Climate Factor

ZHOU Mengtian<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, ZHU Kangwen<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of GIS Application, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The spatial distribution and dynamic changes of vegetation in Northwest China were analyzed using SPOT/NDVI data during the period from 1998 to 2012. According to different regional NDVI, we analyzed the correlation between NDVI and climate factors such as temperature and precipitation. The results showed that: (1) vegetation coverage was low, the extremely low vegetation area was great in northwest China, and the extremely low vegetation area was mainly located in the southeast of Xinjiang and western Inner Mongolia; (2) degraded areas accounted for small proportion of total area of northwest China, and was mainly located in the Altai mountains, south of the Tianshan mountains and the north of Tarim Basin in Xinjiang. However, some areas had higher vegetation coverage that was improved slightly as a whole during the past years, the improved area was mainly located in surrounding of Tianshan mountains, edge of Junggar Basin and eastern Gansu; (3) on the annual scale, vegetation coverage in each area in northwest slowly increased in the recent 15 years, vegetation coverage in Xinjiang and Qinghai remained relatively stable, the vegetation coverage in Gansu, Ningxia and western region of Inner Mongolia presented the fluctuating trend, on the monthly scale, there were significant correlations between NDVI and both temperature and precipitation; (4) by comparison, the vegetation NDVI with temperature and precipitation had significant monthly correlations but less significant annual correlations in different areas. The responses of vegetation NDVI showed no significant time lag to temperature and precipitation in Xinjiang, Ningxia and Gansu, the response of NDVI exhibited noticeable

收稿日期: 2014-06-05

修回日期: 2014-08-03

资助项目: 重庆师范大学资助项目(11XLB050); 国家自然科学基金资助项目(40701148); 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201106025); 重庆市气象局开放式研究资助项目(Kfj-201303)

第一作者: 周梦甜(1990—), 女, 四川遂宁人, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: mengtianzhou@163.com

通信作者: 李军(1974—), 男, 天津人, 副教授, 主要从事农业遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: zju\_ljun@163.com

lag to temperature, and NDVI to temperature and precipitation lag in Qinghai Province was not obvious. The NDVI of western region of Inner Mongolia had the lag to temperature, but it had no lag to precipitation.

**Keywords:** NDVI; MVC; SPSS; time delay

植被作为生态系统的重要组成部分,不仅是重要的自然资源,同时还具有指示性作用,在一定程度上能代表土地覆盖的变化,并在全球变化研究中充当指示器的作用<sup>[1]</sup>。归一化植被指数(NDVI)是反映土地覆盖植被状况的一种遥感指标,为近红外通道与可见光通道反射率之差与之和的比值<sup>[2]</sup>,用以确定被观测的目标区是否为绿色植物覆盖,以及植被覆盖程度的指标值,研究植被 NDVI 变化可以反映出研究区植被生长状况及生态绿化状况。气候因子在一定程度上影响植被生长,并起着至关重要的作用,研究 NDVI 与气候因子的关系为区域植被建设提供科学依据<sup>[3]</sup>,其中研究植被 NDVI 对气候因子的时滞响应更进一步反映出二者之间的关系。

中国西北地区以高原、盆地为主,具有干旱大陆性气候特征,主要为干旱与半干旱区。近年来,植被变化与气候因子之间关系的研究备受国内外学者的青睐<sup>[4-16]</sup>。在我国,对西北地区植被变化与气候因子之间关系已有一些研究,李震等<sup>[17]</sup>利用 NOAA/AVHRR1981—2001 年 21 a 的 NDVI 时间序列分析 NDVI 与降水存在明显的正相关关系,而与气温变化的关系并不明显;张钰仁等<sup>[18]</sup>利用相同的数据集研究发现西北地区植被覆盖呈现出明显的季相变化特征;这些工作大都从西北整体范围研究并没有进行分区讨论。研究植被变化对气候因子的时滞响应也逐渐引起学者的关注<sup>[19-21]</sup>,研究西北地区植被变化对气候因子的时滞响应的学者人数尚少。

本文通过遥感影像图处理建立了西北地区 1998—2012 年近 15 a 的 NDVI 时间序列,并采用均值法、差值法分别分析了植被空间分布状况及其动态变化,并且比较西北各地区植被 NDVI 的年际、月变化及其对气温、降水不同的响应程度,最后研究了植被 NDVI 对气温、降水影响的滞后效应。

## 1 研究区概况

西北地区位于中国的西北部,史称“西陲”或“回疆”,大体上位于大兴安岭以西、长城和昆仑山—阿尔金山以北,包括新疆维吾尔自治区全境,甘肃河西走廊、青海祁连山地区,内蒙古阿拉善高原以及黄河宁夏段以西的宁夏回族自治区部分<sup>[22]</sup>。本文以行政边界为界,将西北地区划分为 5 个地区,分别为甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区及内蒙古西部。由于西北地区地处大陆腹地,远离海洋,气候干燥少雨,植被稀疏,因此对气候变化十分敏感。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

本文采用的数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心提供的 SPOT VEGETATION/NDVI 的植被 NDVI 指数数据集,为 1998 年 4 月至 2012 年 12 月空间分辨率为 1 km 的数据。该数据经过大气校正、辐射校正、几何校正,生成 10 d 最大化合成的 NDVI 数据。在 ArcGIS 10.0 软件中,将 DN 值转换为 NDVI 标准值 $[-1, 1]$ 。气象数据采集于研究区及其周边 78 个气象站点 1998—2012 年逐月平均气温和降水,基于 ArcGIS 10.0 平台,对 1998—2012 年的月降水量及月均温数据进行空间插值。气象数据来源于中国气象局。

本文采用国家通用的 MVC 最大合成法,得到西北各地区逐月植被 NDVI 最大值,多年平均月值和年均值。1998 年的遥感数据为 4—12 月,但植被生长最好时期是 6—9 月,因此不会影响后期计算。

### 2.2 研究方法

2.2.1 均值法分析 研究区近 15 a 的 4—10 月(植被生长季)NDVI 平均值( $K$ )作为西北地区植被空间分布指标,计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=4, j=1}^{i=10, j=15} NDVI_{ij}}{15} \quad (1)$$

式中:当  $j = 1, 2, 3, \dots, 15$  时,对应年份为 1998—2012 年。按照植被密度划分的方法<sup>[3]</sup>,将西北地区 NDVI 空间分布情况划分为 5 个等级: $K \leq 0.1$  时,记为极低值植被区; $0.1 < K \leq 0.25$  时,记为低植被区; $0.25 < K \leq 0.4$  时,记为中等植被区; $0.4 < K \leq 0.6$  时,记为高植被区; $K > 0.6$  时,记为浓密植被区。

2.2.2 差值法分析 差值法是以后一时期的 NDVI 值减去前一时期的 NDVI 值,可以用来衡量两个年份的 NDVI 动态变化,计算公式如下:

$$C = NDVI_i - NDVI_j \quad (2)$$

式中: $C$ ——第  $i$  年相对第  $j$  年的 NDVI 变化值;将每年的变化相加,就得到 15 a 西北地区的植被动态变化。该方法借鉴蒲蕾等<sup>[3]</sup>按照植被退化及改善情况划分的方法,将西北地区 NDVI 动态分布分为: $C \leq -0.25$  为严重退化区, $-0.25 < C \leq -0.15$  为中度退化区, $-0.15 < C \leq -0.05$  为轻微退化区, $-0.05 < C \leq 0.05$  为无变化区, $0.05 < C \leq 0.15$  为轻微改善区, $0.15 < C \leq 0.25$  为中度改善区, $C > 0.25$  为高度改善区。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被变化特征

3.1.1 植被的空间分布特征 由均值法计算可以得到西北地区植被的空间分布状况,并赋予西北地区行政区划图。如图 1 所示,由明到暗表明植被覆盖由低值到浓密转变的状况。总体分析极低植被区分布较广,极低植被区:低值植被区:中等植被区:高等植被区:浓密植被区=95:37:12:10:1。极低植被区主要位于新疆东南大部以及内蒙古西北部,范围之广主要由于其特殊的干旱地形以及干燥的气候环境。低值区位于新疆天山山脉以北,甘肃以南以及内蒙古(西部)南部。中植被区主要分布于阿尔泰山以南,准格尔盆地边缘、甘肃省东南部以及青海东部。高等植被区与中植被区位置大体一致。浓密区范围极少,集中分布在新疆天山山脉西南部。

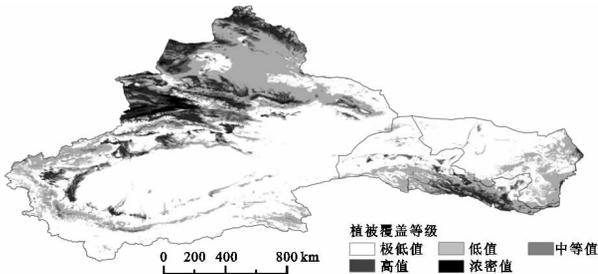


图 1 西北地区植被空间分布

3.1.2 植被的动态变化特征 根据差值法可以得到 1998—2012 年 15 a 西北地区植被动态分布状况。如图 2 所示,西北地区高度退化区、中度退化区、轻微退化区、无变化区、轻微改善区、中度改善区、高度改善区分别占西北地区总面积的 0.003%, 0.489%, 10.217%, 87.248%, 1.848%, 0.170%, 0.025%。可见退化区占西北地区总面积的比例小,主要位于新疆阿尔泰山脉周边、天山山脉以南和塔里木盆地以北。改善区范围分布分散,其中轻微改善区主要位于新疆天山周边、准格尔盆地边缘及甘肃东部,中度改善及高度改善区范围较小。

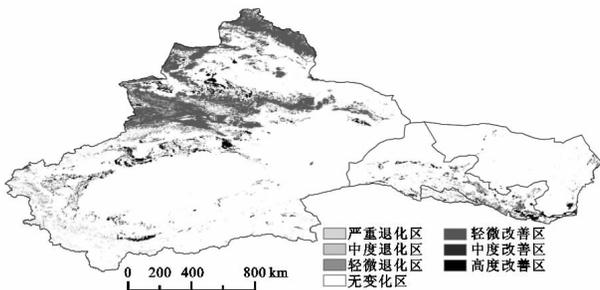


图 2 西北地区植被动态分布

3.1.3 植被的年际变化 近 15 a 西北各地区植被 NDVI 年际变化如图 3 所示,各地区 NDVI 年均值均

出现缓慢增长的趋势,且 NDVI 值均为 0.3~0.5,其中内蒙古西部植被 NDVI 的年均值总体低于其他 4 个地区,最小值达到 0.328,甘肃植被 NDVI 的年均值总体较高,最大值达到 0.454。

就趋势线来看,新疆、青海植被 NDVI 的年均值保持相对稳定;甘肃、宁夏、内蒙古西部植被 NDVI 的年均值在此期间先增加而后减少,起伏波动较大,其中内蒙古西部植被 NDVI 的年均值在 2009—2012 年逐年增长,宁夏植被 NDVI 的年均值 2011 年呈现快速增长的趋势,最大值达到 0.747。

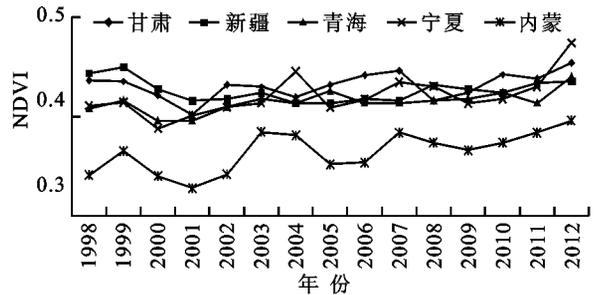


图 3 西北各地区植被 NDVI 年际变化

3.1.4 植被的月变化 从植被的生长期(4—10月)可以看出,各地区在这一时期呈现出整体增加的趋势,其中甘肃、青海、宁夏和内蒙古西部植被 NDVI 值在 7 月达到最大,分别为 0.456, 0.428, 0.468, 0.404,而新疆植被 NDVI 值在 8 月则达到最大,为 0.446。从多年季节变化来看,春季生长季(3—5月),新疆、宁夏植被 NDVI 月值在此期间增长速度迅速,其中宁夏增长速度最快,增长速度近 3 倍。青海、内蒙古西部植被 NDVI 值增长速度缓慢,而甘肃植被 NDVI 值则先降低后增长且达到最小值(0.264),因为甘肃种植冬小麦,冬小麦成熟期在 5 月底至 6 月初,致使甘肃 5 月植被 NDVI 开始上升;夏季生长季(6—8月),甘肃、新疆和内蒙古西部植被 NDVI 变化趋势缓慢,宁夏、青海则呈现出缓慢增加的趋势,其中青海增加速度较快,增长率为 12.24%;秋季生长季(9—11月),各地区植被 NDVI 值均出现逐渐降低的趋势,其中宁夏下降的速度最快,近 3 倍。

从图 4 可以看出,西北各地区植被 NDVI 多年平均月值呈现出明显的季节变化,因此与气温、降水等气候因子密切相关。

#### 3.2 植被 NDVI 与气候因子的关系

3.2.1 植被 NDVI 与气候因子的年际关系 从图 5 可以看出,各地区年均气温变化趋势平缓,甘肃、新疆、宁夏及内蒙古西部年均温均在 15℃ 以上,甘肃较其他 3 个地区气温低,最高气温为 16.7℃。而青海年均气温最低,均在 10℃ 左右,最高气温为 10℃。

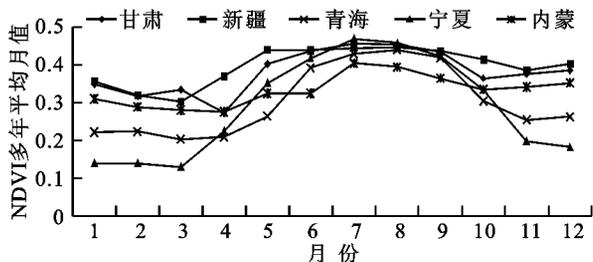


图 4 西北各地区近 15 a 植被 NDVI 月变化

各地区年降水量不同,甘肃、新疆及内蒙古西部年降水量变化趋势较为缓和,均为 10~20 mm。宁夏年降水量变化波动大,呈现出“两峰一谷”趋势,最

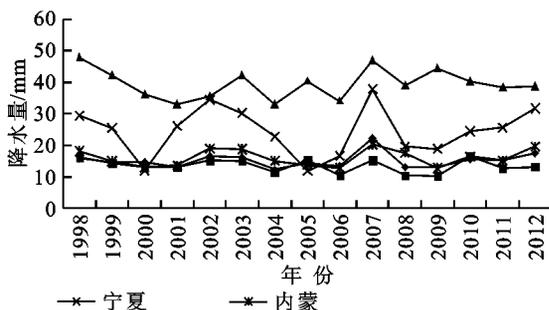
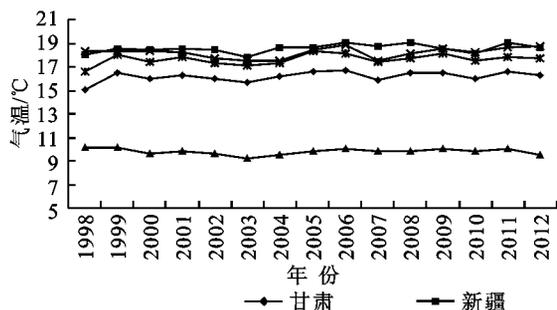


图 5 西北各地区气温、降水年际变化

表 1 西北地区植被 NDVI 与气候因子的年际相关系数

地区	气温	降水
甘肃	-0.102	0.674*
新疆	-0.024	-0.008
青海	-0.219	0.280
宁夏	-0.008	0.331
内蒙古西部	-0.086	0.419

注: \* 表示  $p < 0.05$ 。

3.2.2 植被 NDVI 与气候因子的年内关系 表 2 为西北各地区植被 NDVI 多年平均月值(4—10 月)与同期气候因子(气温、降水)的相关系数,可以看出,各地区均与同期的气温、降水具有较大的敏感性,其中甘肃、新疆对同期气温的敏感性大于对同期降水的敏感性,说明气温在很大程度上影响着植被的生长,青海、宁夏及内蒙古西部对同期降水的敏感性大于对同期气温的敏感性,即降水量多少制约着植被生长。

由图 6 可见,甘肃、新疆植被 NDVI 变化与气温、

表 2 西北各地区植被 NDVI 多年平均月值与同期气候因子相关系数

	甘肃		新疆		青海		宁夏		内蒙古西部	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
同期	0.818*	0.883**	0.741	0.632	0.781*	0.841*	0.822*	0.950**	0.667	0.861*

注: \* 表示  $p < 0.05$ , \*\* 表示  $p < 0.01$ , 下表同。

表 3 植被 NDVI 对气候因子的滞后关系

	甘肃		新疆		青海		宁夏		内蒙古西部	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
滞后一个月	0.845*	0.496	0.376	0.617	0.907*	0.822**	0.714	0.329	0.538	0.777
滞后两个月	-0.198	-0.486	-0.203	0.506	-0.106	-0.129	-0.282	-0.756	0.912	-0.415

大值为 37.8 mm,最小值为 11.9 mm。而青海年降水量均大于其他 4 个地区,最大值达到 46.9 mm。

由表 1 可知,西北大部地区植被 NDVI 与降水相关系数均大于植被 NDVI 与气温相关系数,甘肃、青海、宁夏及内蒙古西部植被 NDVI 对降水的变化敏感性最大,其中甘肃植被 NDVI 与降水相关系数达到了  $p < 0.05$  水平上的显著相关。新疆植被 NDVI 对气温的变化敏感性最大。甘肃气温适中,降水量最大,有助于植被的生长,内蒙古西部气温较低,降水量较少,制约着植被生长,其他 3 个地区气温、降水均适中,植被生长较好。

降水变化基本吻合,当气温、降水达到最大值时,植被 NDVI 值均在 7 月达到顶峰,反之,随着气温降低、降水减少,植被 NDVI 值也随之减小。宁夏、内蒙古西部分别在降水达到最大值时植被 NDVI 达到顶峰,所以降水成为这两个地区影响植被生长的主导因素。青海地区气温、降水最大值在 7 月,而植被 NDVI 峰值却在 8 月,说明气温、降水对植被的生长具有一定的滞后性。

3.2.3 植被 NDVI 对气候因子的滞后性 将表 2,3 进行比较分析可得出:新疆、宁夏对气温、降水具有及时性,不具有滞后性。甘肃植被对降水具有及时性,而气温与滞后一个月植被 NDVI 值相关性较大,具有明显的滞后性。青海地区植被 NDVI 对气温、降水具有滞后一个月的性质但滞后性不明显。内蒙古西部地区对降水具有及时性,而气温与滞后两个月植被 NDVI 值相关性较大,既内蒙古西部植被 NDVI 对气温具有滞后两个月的性质。

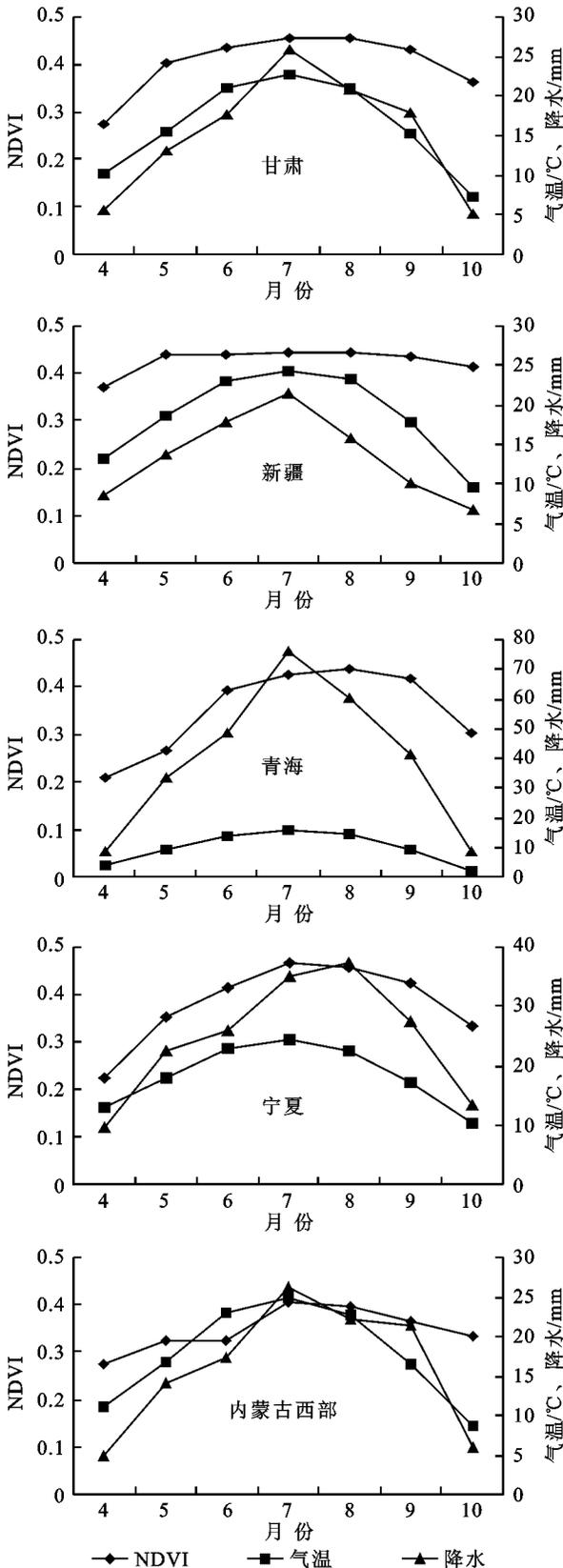


图6 西北各地区植被NDVI随气候因子的变化

## 4 结论

(1) 西北地区近15 a 植被空间分布表明:1998—2012年西北地区总体植被覆盖率偏低,极低植被区

范围广,主要位于新疆东南大部以及内蒙古西北部。植被动态变化表明,西北地区植被整体变化不明显。

(2) 西北各地区植被NDVI的年际变化说明:各地区NDVI年均值均逐年增加,新疆、青海植被NDVI的年均值保持相对稳定;甘肃、宁夏、内蒙古西部植被NDVI的年均值起伏波动较大。而内蒙古西部植被NDVI的年均值总体低于其他4个地区。

(3) 西北各地区植被NDVI的月变化以及对气候因子的响应说明:气温、降水在一定程度上影响着植被的生长。各地区在植被生长季(4—10月)的NDVI值各不相同,春季生长季(3—5月),新疆、宁夏、青海及内蒙古西部植被NDVI月值在此期间都有所增长,而甘肃植被NDVI值则先降低后增长且达到最小值;夏季生长季(6—8月),各地区植被NDVI值均平缓增加;秋季生长季(9—11月),各地区植被NDVI值均出现逐渐降低的趋势。总体来说,各地区植被均在春季处于快速生长期,夏季植被生长状况最佳,秋季植被出现衰减的现象。

(4) 西北各地区年均气温变化趋势平缓,降水变化趋势较为波动,但与植被NDVI值的年际相关性不大。

(5) 西北各地区气候因子(气温、降水)与同期植被NDVI(4—10月)的年内相关性表明:甘肃、新疆植被NDVI变化与气温、降水变化基本吻合,宁夏、内蒙古西部两地区降水成为影响植被生长的主导因素。最后通过植被NDVI对气候因子的滞后性分析得出新疆、宁夏对气温、降水具有及时性。甘肃气温与滞后一个月植被NDVI值具有明显的滞后性。青海地区植被NDVI对气温、降水具有滞后一个月的性质但滞后性不明显。内蒙古西部地区对降水具有及时性,而植被NDVI对气温具有滞后两个月的性质。

### 参考文献:

- [1] 郑玉坤. 多时相AVHRR-NDVI数据的时间序列分析及其在土地覆盖分类中的应用[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2002.
- [2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [3] 蒲蕾,任志远. 陕西省不同地区NDVI变化与气候因子的关系及响应研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 265-270.
- [4] 王箐,赵天保,侯美亭,等. 21世纪初中国北方地区植被变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 156-164.
- [5] 徐丽萍,郭鹏,王玲,等. 天山北麓中段植被NDVI变化及其对气候因子的响应[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 158-161.

- [6] 夏照华,张克斌,李瑞,等.基于 NDVI 的农牧交错区植被覆盖度变化研究:以宁夏盐池县为例[J].水土保持研究,2006,13(6):178-181.
- [7] 丁涛,李远,刘艳.巴音布鲁克草原主要植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].遥感信息,2009(1):53-59.
- [8] 王永立,范广洲,周定文,等.我国东部地区 NDVI 与气温、降水的关系研究[J].热带气象学报,2009,25(6):725-732.
- [9] 王兮之,陆龙,梁钊雄.青海湟水流域植被覆盖度时空变化分析[J].水土保持研究,2010,17(6):172-176.
- [10] 马安青,高峰,贾永刚,等.基于遥感的贺兰山两侧沙漠边缘带植被覆盖演变及对气候响应[J].干旱区地理,2006,29(2):170-177.
- [11] 付新峰,杨胜天,刘昌明.雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及与站点气候因子的关系[J].水土保持研究,2006,13(3):229-232.
- [12] 罗玲,王宗明,宋开山,等.1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究[J].西北植物学报,2009,29(4):800-808.
- [13] 王灿,任志远,张翀.陕北地区 NDVI 对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J].水土保持研究,2014,21(1):173-177.
- [14] 张艺,任志远.基于 SPOT VEGETATION 数据的关中地区近 10 年来植被覆盖变化分析[J].农业系统科学与综合研究,2010,26(4):425-430.
- [15] 鲍雅静,宋国宝,李政海,等.纵向岭谷区植被覆盖的空间分异及其对气候的时滞效应[J].科学通报,2008,52(S2):37-42.
- [16] 丁涛,李远,刘艳.巴音布鲁克草原主要植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].遥感信息,2009(1):53-59.
- [17] 李震,阎福礼,范湘涛.中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J].遥感学报,2005,9(3):308-313.
- [18] 张钛仁,张佳华,申彦波,等.1981—2001 年西北地区植被变化特征分析[J].中国农业气象,2010,31(4):586-590.
- [19] 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.
- [20] 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):1054-1062.
- [21] 刘成林,樊任华,武建军,等.锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J].干旱区地理,2009,32(4):512-518.
- [22] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1283-1291.

(上接第 181 页)

- [10] 黄中艳.1961—2007 年云南干季干湿气候变化研究[J].气候变化研究进展,2010,6(2):113-118.
- [11] 刘劲龙,徐刚,杨娟,等.近 55 a 来四川盆地气候的干湿变化趋势分析[J].西南大学学报,2013,35(1):138-143.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [13] 于红博,包玉海,李和平,等.锡林河流域蒸散量遥感反演[J].水土保持研究,2014,21(1):224-228.
- [14] 曲学斌,吴昊.呼伦贝尔市 53 a 气候变化特征分析[J].水土保持研究,2014,21(1):178-182.
- [15] 毛飞,唐世浩,孙涵,等.近 46 a 青藏高原干湿气候区动态变化研究[J].大气科学,2008,32(3):499-507.
- [16] 鞠笑生,杨贤为.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,1997,8(1):26-33.
- [17] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.
- [18] 魏凤英.现代气象统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [19] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature,1995,377(6551):687-688.
- [20] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.青藏高原近 30 a 气候变化趋势[J].地理学报,2005,60(1):3-11.
- [21] 尹云鹤,吴绍洪,郑度.近 30 a 我国干湿状况变化的区域差异[J].科学通报,2005,50(15):1636-1642.
- [22] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.