

鄂尔多斯高原 1982—2006 年植被变化及其驱动因子

姚雪茹¹, 刘华民¹, 裴浩², 王立新³

(1. 内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古气象局, 内蒙古 呼和浩特 010021;
3. 内蒙古大学 环境与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 植被变化对全球气候变化的响应是近年来生态学研究的热点问题。鄂尔多斯高原地处中国西部生态敏感地带, 研究该区域植被变化及其对气候变化的响应具有重要意义。利用 1982—2006 年的 NOAA/AVHRR NDVI 数据和当地同期气象资料, 研究了鄂尔多斯高原地区植被覆盖变化及其与气象因子的关系。结果表明: (1) 1982—2006 年鄂尔多斯高原全年平均 NDVI 显著增加 ($p=0.0017$), 增加率为每年 0.04%, 平均温度也在显著增加 ($p<0.001$), 平均降水波动大但没有显著趋势 ($p>0.05$); (2) 鄂尔多斯高原植被 NDVI 增加的主要区域是典型草原, 其春、夏、秋 3 季的季节平均 NDVI 都显著增加 ($p<0.001$); (3) 鄂尔多斯高原植被 NDVI 在生长阶段增加的主要驱动因子是降水, 非生长阶段的变化主要是由温度引起的。

关键词: NDVI; 植被变化; 气候变化; 相关分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0225-06

中图分类号: P467

Variation of Vegetation and Its Driving Factors in Erdos Plateau from 1982 to 2006

YAO Xue-ru¹, LIU Hua-min¹, PEI Hao², WANG Li-xin³

(1. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia

010021, China; 2. Inner Mongolia Weather Bureau, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China;

3. College of Environment & Resources, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: The responses of vegetation variation to global climate change have become a hot issue in ecological research recently. The Erdos Plateau is located in the eco-sensitive zone of West China and its vegetation variation responding to global climate change is of great importance. We used the NOAA/AVHRR NDVI data from 1982 to 2006 and local meteorological records during corresponding time of the Erdos Plateau to analyze the vegetation variations and its relationship with meteorological parameters. Results showed that (1) from 1982 to 2006, annual mean NDVI of the Erdos Plateau increased significantly ($p=0.0017$), with an increasing rate being 0.04% per year, and the mean temperature also increased significantly ($p<0.001$) while the mean precipitation varied significantly with no clear trend ($p>0.05$); (2) in the Erdos Plateau, the NDVI increment was mainly contributed from the typical steppe whose seasonal average NDVI in spring, summer and autumn all increased significantly ($p<0.001$); (3) in the growing season of the Erdos Plateau, the main driving factor for the increment of NDVI was precipitation, while in the non-growing season, it was temperature.

Keywords: NDVI; variation of vegetation; climate change; correlation analysis

近年来,在全球气候变化的大环境下,植被变化备受关注,植被与气候的关系成为研究全球气候变化的重要途径之一。研究表明,近 20 a 来,北半球,包括我国的植被活动在增强,这种增强主要是由于植物

生长季提前和延长,以及全球范围内温度升高造成的^[1-2]。

方精云等^[3]的研究表明,近 20 a 来,我国西部的大部分区域植被 NDVI 增幅显著 ($>7%$),并且认为

收稿日期: 2011-06-30

修回日期: 2011-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“内蒙古阴山南北麓农牧交错区潜在自然植被研究”(40861002),“内蒙古高原草原区内陆河河滨植被带湿地植物群落空间分布格局形成及维持机理研究”(31060076); 国家科技支撑计划项目“乌梁素海湿地生态系统恢复与重建关键技术研究与示范”(2011BAC02B03)

作者简介: 姚雪茹(1986—),女(汉族),甘肃省庆阳市人,硕士研究生,主要研究方向为植被变化及其与气候变化的关系。E-mail: yaozhihai2006@163.com。

通信作者: 刘华民(1973—),女(汉族),内蒙古自治区呼伦贝尔市人,博士,副教授,主要研究方向为生态遥感与潜在植被。E-mail: liuhmimu@yahoo.cn。

降水,尤其是夏季降水增加是其主要原因。陈云浩等^[4]的研究也表明,在热量充裕区域,降水是植被变化的主要驱动因子。近年来,国内对全球气候变化条件下植被变化的研究主要集中在全国^[4-8]、西北^[9-10]、东北^[11]地区等大尺度上,对一些脆弱生态地区的区域尺度研究却很少^[12-16]。中国西部陆地系统的异质性或生境破碎化程度很高^[11],在总体相近的变化趋势下,各地区可能存在较高的区域差异。因此,有必要将研究视野放到区域尺度,以反映这种差异并提高分析的针对性。

鄂尔多斯高原地处中国西部生态敏感地带,对这一地区的研究有助于了解当地区域水平植被变化的趋势及原因,并为生态管理机制设计提供参考。本文利用 NOAA/AVHRR NDVI 长时间序列数据,以及与相应时期的气候数据,对鄂尔多斯高原近 25 a 来植被变化情况与气候因子的关系进行分析。不同尺度的变化模式是否一致,鄂尔多斯高原在全球气候变化背景下的植被变化特征和驱动因子是本文探讨的主要问题。

1 研究区概况

鄂尔多斯高原地处内蒙古自治区西南部,西、北、东 3 面为黄河围绕,地理坐标为北纬 $37^{\circ}35'24''$ — $40^{\circ}51'40''$,东经 $106^{\circ}42'40''$ — $111^{\circ}27'20''$ 。属于温带半干旱至干旱强大陆性气候,年平均气温为 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 $2\ 600\sim 3\ 200^{\circ}\text{C}$ 。受海洋季风影响,降水量自东向西有规律降低,为 $160\sim 400\text{ mm}$ 。

鄂尔多斯高原是我国土地荒漠化最严重的地区之一,高原的南北部分别有库布齐沙漠和毛乌苏沙漠,是我国东部沙尘源地之一。该区为沙漠和黄土交接地带,农牧镶嵌分布,生态环境脆弱,对全球气候变化敏感^[17]。

鄂尔多斯高原地带性植被可分为草甸草原带、典型草原带、荒漠草原带和草原化荒漠带,其中草甸草原带原始植被已被破坏殆尽,因此本文仅讨论另外 3 种植被类型。鄂尔多斯的植被类型区域如下:
(1) 典型草原带。包括乌审旗、鄂托克前旗、河南乡、达拉特旗、东胜、伊金霍洛旗、乌审召、准格尔旗;
(2) 荒漠草原带。杭锦旗、伊克乌苏镇、鄂托克旗;
(3) 草原化荒漠带。临河和乌拉特前旗^[18]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

2.1.1 NDVI 数据 本文所用 NOAA/AVHRR NDVI 数据来自美国马里兰大学(GIMMS)数据集,

该数据集的空间分辨率为 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$,时间分辨率为 15 d,时间序列从 1982—2006 年。利用国际上通用的 MVC 植被指数预处理方法,消除来自云和大气的干扰。在这个数据集中,云、太阳高度角、仪器视场角、气溶胶的影响已进行了校正,从而保证了数据的质量^[19-20]。数据集中缺失的 2006 年 4 月上半月的数据,我们用 3 月下半月和 4 月下半月数据的平均值来替代。鄂尔多斯高原地区多晴空天气,半月 MVC 合成的 NDVI 数据已基本能够去除云的影响,所以我们以每月上半月和下半月的 NDVI 平均值作为月 NDVI 值,建立月 NDVI 时间序列数据^[15]。

2.1.2 气候数据 本文所用的气候数据为内蒙古气象局提供的鄂尔多斯高原及其附近 13 个站台(临河、伊克乌苏、杭锦旗、东胜、伊金霍洛旗、武审召、准格尔旗、乌拉特前旗、鄂托克旗、达拉特旗、乌审旗、鄂托克前旗、河南乡)的月均温和月降水资料。选取与 NDVI 相对应的 1982—2006 年的气候数据时间序列。

2.2 计算方法

2.2.1 NDVI 变化率 NDVI 变化率的计算方法如下:

$$\text{NDVI 变率} = (\text{直线斜率} / \text{均值}) \times 25 \times 100\% \quad (1)$$

式中:直线斜率表示 NDVI 对年份的直线斜率,即对 25 a(1982—2006 年)的年平均或月 NDVI 值与年份之间求直线回归,所得回归直线的斜率。均值为 25 a 的平均年 NDVI 值。该变化率在数值上相当于研究期间年平均 NDVI 的末期值与初期值之差被初期值相除^[3,12,14]。

2.2.2 NDVI 与气象因子的相关性分析 本文用于相关性分析的指标为简单相关系数和偏相关系数。采用 t 检验对相关系数进行显著性检验^[4,7,21]。

相关系数的计算:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i ——两个要素样本的第 i 个值; \bar{x}, \bar{y} ——两个要素样本值的平均值; r_{xy} ——要素 x 与 y 之间的相关系数,它表示该要素之间的相关程度的统计指标,其值介于 $[-1, 1]$ 之间; n ——样本数。

偏相关系数的计算:

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: r_{xy}, r_{xz} 和 r_{yz} ——变量 x 与 y , 变量 x 与 z 和变量 y 与 z 各自的相关系数; $r_{xy.z}$ ——固定变量 z 后变量 x 与 y 的偏相关系数。

偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法,其统计

量计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1-r_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (4)$$

式中: $r_{xy,z}$ ——偏相关系数; n ——样本数; m ——自由度; t —— t 检验统计变量。

3 结果与分析

3.1 鄂尔多斯高原 NDVI 及气候因子变化趋势

3.1.1 全时间序列 NDVI 的年际变化

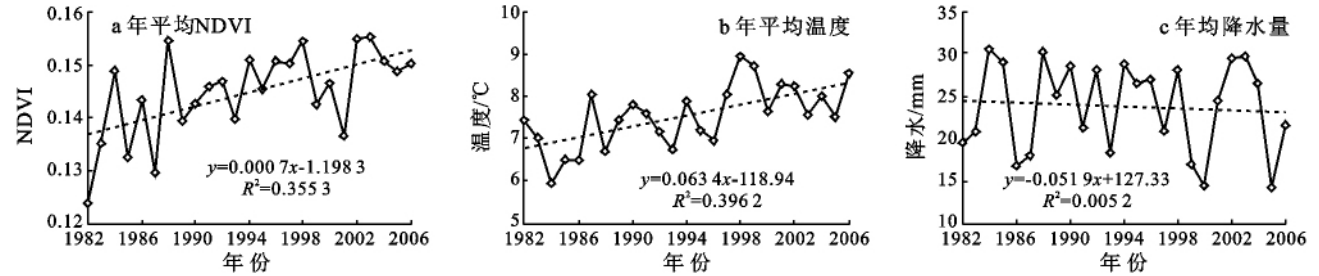


图 1 1982—2006 年鄂尔多斯高原年平均 NDVI、年平均温度和年平均降水量的变化

25 a 来,研究区温度增加显著($p=0.0007, R^2=0.3962$),每年平均增加 $0.063\text{ }^\circ\text{C}$,与方精云等^[3]得到的全国范围增温幅度相当。而研究区降水有下降趋势,但是下降趋势不显著($p=0.732, R^2=0.0052$),年平均减少 0.052 mm ,这与任健美等^[17]的研究结果一致。

3.1.2 3 种不同植被类型的草原 NDVI 的年际变化

为了更详尽地说明研究区 NDVI 的年际变化,我们对不同草原植被类型的年均 NDVI 进行分析。图 2 分别给出了典型草原、荒漠草原和草原化荒漠 3 种植被类型的年均 NDVI 及其变化趋势。

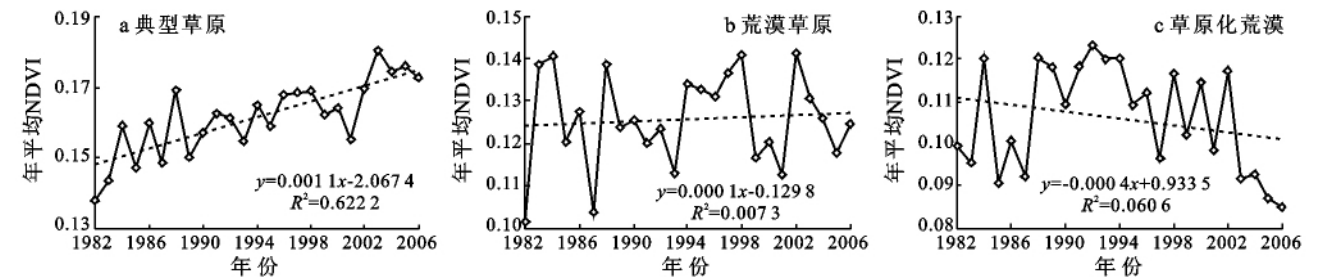


图 2 1982—2006 年鄂尔多斯高原典型草原、荒漠草原和草原化荒漠的年平均 NDVI 的变化

3.1.3 不同季节 NDVI 变化 植被生长受季节因素影响明显,因此有必要对不同季节的 NDVI 变化进行分析^[14]。鄂尔多斯高原地区,冬季 NDVI 平均值常年小于 0.1,表明受下垫面的影响较大,NDVI 值不稳定,不能真正反映植被的覆盖状况^[3,14]。因此,在作不同季节 NDVI 年变化分析时,本文只针对春季、夏

鄂尔多斯高原 1982—2006 年的年平均 NDVI(图 1a),年平均温度(图 1b)及年均降水(图 1c)的变化趋势。由图 1 可以看出,25 a 间鄂尔多斯高原年平均 NDVI 呈明显波动增加状态,整体增加趋势显著($p=0.0017, R^2=0.3553$)。年平均 NDVI 从 1982 年的 0.1239 增加到 2006 年的 0.1482,回归得到 NDVI 增加速率为 $0.007/10\text{a}$,最大值出现在 2003 年,为 0.1553,最小值出现在 1982 年,为 0.1239,平均值为 0.1447,NDVI 变化率为 12.1% 。

鄂尔多斯高原典型草原(图 2a)在 1982—2006 年的年均 NDVI 显著增加($p<0.0001, R^2=0.6222$),平均增加速率为 $0.011/10\text{ a}$ 。其中 NDVI 最大值出现在 2003 年,为 0.1803,最小值出现在 1982 年,为 0.1382;平均值为 0.1615,NDVI 增长了 17% 。而荒漠草原(图 2b)和草原化荒漠(图 2c)的年平均 NDVI 变化不显著($p>0.05$)。

另外,典型草原、荒漠草原和草原化荒漠 3 个植被区的温度在这 25 a 间也都呈显著增长趋势($p<0.001$),而降水年度波动较大,没有明显变化趋势($p>0.05$)。

季和秋季的变化情况。综上所述,年际变化的结果表明研究区 NDVI 的变化只有典型草原区出现显著增长,另外 2 类草原区的变化都不显著。所以在作季节分析时,只考虑了典型草原区的情况。图 3 所示为典型草原区春夏秋 3 季的季节平均 NDVI 在 1982—2006 年的变化。

典型草原的季节平均 NDVI 在 25 a 间的变化为:春季(图 3a)显著增加($p < 0.001, R^2 = 0.5414$),增加速率为 $0.008/10$ a;夏季(图 3b)增加显著($p = 0.0015, R^2 = 0.3598$),增加速率为 $0.022/10$ a;秋季(图 3c)增加显著($p < 0.001, R^2 = 0.5635$),增加速率为 $0.014/10$ a。对应地,春季温度显著增加($p =$

$0.0017, R^2 = 0.3541$),增加速率为 0.709 °C/10 a;夏季温度显著增加($p = 0.0024, R^2 = 0.3598$),增加速率为 0.615 °C/10 a,降水无明显变化趋势;冬季温度也有增加趋势,但增加不显著($p = 0.0629, R^2 = 0.1424$),增加速率为 $0.474/10$ a。春夏秋 3 季降水都没有明显变化趋势。

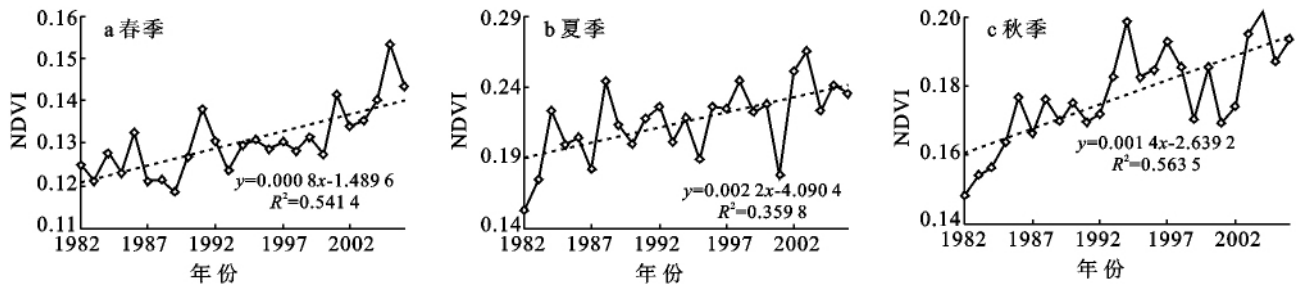


图 3 典型草原春季、夏季、秋季的 NDVI 的变化趋势

3.2 NDVI 与气候因子的相关分析

3.2.1 全时间序列 NDVI 与气候因子的相关分析

为了揭示研究区不同植被类型与气候因子的关系,我们首先对年均 NDVI 和与其相对应的气候因子进行了相关性分析^[10-11,13,16]。

从表 1 可以看出,在 3 种植被类型中,温度和降水共同对该区的 NDVI 起作用,但是 NDVI 与降水的相关性均高于 NDVI 与温度的相关性,且 NDVI 与降

水的相关性几乎都通过了 0.01 的显著性水平检验(不包括乌拉特前旗)。其中,乌拉特前旗的月 NDVI 最大值在 9 月,为 0.1019,最小值在 5 月,为 0.0787,年平均值为 0.0876。年最大 NDVI 值约等于 0.1 且全年 NDVI 值变化不大。NDVI 接近 0.1 意味着植被覆盖度不够高,下垫面的干扰严重,NDVI 值不能准确反映植被信息^[3,5]。因此这个属于草原化荒漠的站点 NDVI 和气候因子的相关性不显著。

表 1 全时间序列 NDVI 与气候因子的相关分析

植被类型	气象站名称	$R_{NDVI降水}$	$R_{NDVI温度}$	$R_{NDVI降水(温度)}$	$R_{NDVI温度(降水)}$
典型草原	东胜	0.897**	0.782**	0.705*	0.015
	伊金霍洛旗	0.926**	0.775**	0.803**	0.065
	达拉特旗	0.886**	0.774**	0.692*	0.165
	准格尔旗	0.857**	0.776**	0.596	0.186
	乌审召	0.904**	0.856**	0.655*	0.400
	鄂托克前旗	0.820**	0.651*	0.692*	-0.287
	河南乡	0.865**	0.704*	0.778**	-0.458
	乌审旗	0.872**	0.802**	0.611*	0.258
荒漠草原	鄂托克旗	0.802**	0.631*	0.642*	-0.082
	伊克乌苏	0.747**	0.521	0.658*	-0.256
	杭锦旗	0.883**	0.675*	0.794**	-0.300
草原化荒漠	临河	0.931**	0.797**	0.809**	0.227
	乌拉特前旗	0.306	0.078	0.428	-0.322

注:① $R_{NDVI降水(温度)}$ 表示控制温度的条件下,NDVI 与降水的偏相关系数;② $R_{NDVI温度(降水)}$ 表示控制降水的条件下,NDVI 与温度间的偏相关系数;③ ** 表示在 0.01 水平上显著相关;④ * 表示在 0.05 水平上显著相关。下同。

3.2.2 植被生长阶段 NDVI 与气候因子的相关分析

通常,草原植物的生长季为 4—10 月,而 11 月至翌年 3 月为非生长季。在非生长季,研究区植被平均 NDVI 为 0.1158,根据方精云等^[3]采用的 $NDVI > 0.1$ 时认为有植被活动的阈值,本研究区植被在非生

长季仍然有活动,这与前文论述的冬季 $NDVI < 0.1$ 形成对比。造成这种情况的原因是季节的划分和生长季的划分间的不完全耦合,非生长季中包括了春季和冬季的一部分。所以本文依据该时间段,对该区的 11 个站点的 NDVI 时间序列进行了植被生长过程及

非生长过程的探讨。生长季 NDVI 与气候因子的相关性如表 2 所示,3 种类型草原 NDVI 与降水的相关性均高于与温度的相关性,并且大部分台站通过 0.05 显著性水平。其中,河南乡的生长季 NDVI 与降水,温度和降水两个指标均显著相关,但与控制温度后的降水呈显著正相关($p < 0.01$),而与控制降水

的温度呈显著负相关($p < 0.05$)。和全时间序列相关分析结果一致,乌拉特前旗 NDVI 与降水呈低相关性($p = 0.528$)。不同于生长季的情况,鄂尔多斯地区非生长季 NDVI 与降水的相关性均低于与温度的相关性(表 3)并且只有少数台站与温度的相关性通过 0.05 的显著性水平。

表 2 生长季 NDVI 与气候因子的相关分析结果

植被类型	气象站名称	$R_{NDVI降水}$	$R_{NDVI温度}$	$R_{NDVI降水(温度)}$	$R_{NDVI温度(降水)}$
典型草原	东胜	0.816*	0.643	0.699	-0.320
	伊金霍洛旗	0.878**	0.670	0.774	-0.197
	达拉特旗	0.796*	0.519	0.754	-0.371
	准格尔旗	0.735	0.516	0.667	-0.339
	乌审召	0.823*	0.695	0.613	0.026
	鄂托克前旗	0.727	0.456	0.776	-0.577
	河南乡	0.785*	0.516	0.951**	-0.905*
	乌审旗	0.763*	0.584	0.613	-0.13
荒漠草原	鄂托克旗	0.701	0.385	0.698	-0.374
	伊克乌苏	0.659	0.266	0.774	-0.584
	杭锦旗	0.825*	0.499	0.846*	-0.576
草原化荒漠	临河	0.878**	0.668	0.768	0.057
	乌拉特前旗	0.290	-0.192	0.761	-0.747

表 3 非生长季 NDVI 与气候因子的相关分析

植被类型	气象站名称	$R_{NDVI降水}$	$R_{NDVI温度}$	$R_{NDVI降水(温度)}$	$R_{NDVI温度(降水)}$
典型草原	东胜	0.369	0.766	-0.99**	0.995**
	伊金霍洛旗	0.319	0.708	-0.986*	0.992**
	达拉特旗	0.338	0.736	-0.862	0.931
	准格尔旗	0.433	0.802	-0.914	0.963*
	乌审召	0.617	0.883*	-0.868	0.955*
	鄂托克前旗	-0.034	0.251	-0.627	0.656
	河南乡	-0.023	0.281	-0.649	0.684
	乌审旗	0.378	0.693	-0.869	0.923
荒漠草原	鄂托克旗	-0.053	0.398	-0.896	0.913
	伊克乌苏	-0.509	-0.073	-0.869	0.820
	杭锦旗	0.351	0.796	-0.880	0.952*
草原化荒漠	临河	0.292	0.659	-0.939	0.962*
	乌拉特前旗	-0.330	0.323	-0.880	0.880

4 结论

(1) 在 1982—2006 年,鄂尔多斯高原地区 3 种类型草原区的植被年平均 NDVI 呈现显著增加趋势,而气候因子中的降水没有明显变化,温度呈显著增加趋势。其中,荒漠草原和草原化荒漠 NDVI 变化不显著,典型草原 NDVI 显著增长。表明鄂尔多斯高原植被覆盖变化主要发生在典型草原。

(2) 在春夏秋 3 个季节,鄂尔多斯高原区 NDVI 增加最多的是夏季,其次是秋季,最小的是春季。这

与之前 Myneni 等^[1],方精云等^[3]以及 Zhou 等^[22]提出的北半球高纬度地区植被活动增强的主要原因是植被生长季提前和延迟的结论不一致。在相关分析中得到的生长季 NDVI 与降水量最显著相关,而 25 a 来平均降水量并没有发生明显的增加。因此,在这一区域可能在气候变化的驱动之外还存在其他原因,例如,近年来植被恢复和荒漠化治理等人类活动的影响。

(3) 鄂尔多斯高原年均气温为 5~8 °C, ≥10 °C 积温为 2 600~3 200 °C^[19],热量丰富,能满足该区域

植被生长的需要,而降雨较少的条件下,水分成为植被生长的主要限制因子。因此在对生长季的偏相关分析中,控制降水条件下 NDVI 与降水量大多呈显著正相关,而在控制降水的 NDVI 与温度大多呈负相关的关系。而且,全年 NDVI 变化中,NDVI 与降水的相关性也高于与温度的相关性,这说明在鄂尔多斯地区降水在全年植被生长过程中起主要作用。这与李晓兵等^[23]提出的北方中纬度地区草地植被对降水的时空变化敏感的研究结论一致。

(4) 在非生长阶段,该区的平均温度低到 -4.78°C ,因此在对非生长季的偏相关分析中,控制降水条件下 NDVI 与降水量多呈(显著)负相关,而在控制降水的 NDVI 与温度大多呈(显著)正相关的关系。所以,在植被非生长阶段,温度成为该区域植被变化的主要驱动因子。

致谢:对于内蒙古气象局王永利和刘鹏涛提供数据,厦门大学王参谋协助数据分析和文稿校对,谨此一并致谢!

[参 考 文 献]

- [1] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981—1991[J]. *Nature*, 1997, 386(17): 698-702.
- [2] Keeling C D, Chin J, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements [J]. *Nature*, 1996, 382(11): 146-149.
- [3] 方精云,朴世龙,贺金生,等.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): 229-240.
- [4] 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.
- [5] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [6] 李晓兵,史培军. 基于 NOAA/AVHRR 数据的中国主要植被类型 NDVI 变化规律研究[J]. *植物学报*, 1999, 41(3): 314-324.
- [7] 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): 204-209.
- [8] Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index(NDVI) in China from 1982 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 4401-4413.
- [9] 李月臣,宫鹏,刘春霞,等. 北方 13 省 1982—1999 年植被变化及其与气候因子的关系[J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 109-110.
- [10] 宋怡,马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3): 499-505.
- [11] 唐海萍,陈玉福. 中国东北样带 NDVI 的季节变化及其与气候因子的关系[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 318-325.
- [12] 杨建平,丁永建,陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录[J]. *地理学报*, 2005, 60(3): 467-477.
- [13] 辜智慧,陈晋,史培军,等. 锡林郭勒草原 1983—1999 年 NDVI 逐旬变化量与气象因子的相关分析[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 753-765.
- [14] 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.
- [15] 夏虹,武建军,范锦龙,等. 阴山北麓地区近 20 年来植被生长状况及其年际变化研究[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2007, 43(6): 678-683.
- [16] 赵玉萍,张宪洲,王景升,等. 1982 年至 2003 年藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1988-1998.
- [17] 任健美,尤莉,高建峰,等. 鄂尔多斯高原近 40 a 气候变化研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 874-879.
- [18] 牛建明,李博. 鄂尔多斯高原植被与生态因子的多元分析[J]. *生态学报*, 1992, 12(2): 105-112.
- [19] Brent N H. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(2): 1417-1434.
- [20] 李晓兵,史培军. 基于 NOAA/AVHRR 数据的中国主要植被类型 NDVI 变化规律研究[J]. *植物学报*, 1999, 41(3): 314-324.
- [21] 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: 37-43.
- [22] Zhou Liming, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [23] 李晓兵,王瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. *地理学报*, 2000, 55(S): 82-89.