

中国北方草原对气候干旱的响应

王 宏, 李晓兵*, 李 霞, 王丹丹

(北京师范大学资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 草原生长动态受气候条件的影响和制约, 在很大程度上取决于水分条件。为了较好阐明草原生长与干旱气候关系, 利用表征草原生长变化的 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 指数和表征干旱的 SPI (Standardized Precipitation Index) 指数研究了荒漠草原、典型草原、草甸草原与干旱气候的线性关系, 表明荒漠草原的生长动态受季节性干旱影响很大, 短期、中长期和长期干旱对荒漠草原影响较小。典型草原对季节性干旱响应较强, 而对短期、中长期和长期的干旱响应较弱。草甸草原对季节性干旱和长期干旱响应较强。并且草原对降雨量的响应具有时滞效应, 水分盈亏对草原的影响是累积效应。利用基于虚拟变量的回归模型和简单回归模型模拟了草原 NDVI 对 SPI 指数的响应关系, 基于虚拟变量的回归模型显示出对草原 NDVI 与 SPI 关系的较优拟合度。表明了草原生长动态对干旱气候响应应具有季节性效应。

关键词: 中国北方草原; 干旱; NDVI; SPI

文章编号: 1000-0933(2008)01-0172-11 中图分类号: Q142, S812 文献标识码: A

Grassland response to drought in northern China

WANG Hong, LI Xiao-Bing*, LI Xia, WANG Dan-Dan

College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0172 ~ 0182.

Abstract: Dynamic variation of grassland growth is influenced and restricted by climatic conditions. However, it mainly depends on moisture condition. To clarify preferably relations between grassland growth and drought, we adopted NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) representing variation of grassland growth and SPI (Standardized Precipitation Index) characterizing drought to study linear relations between desert, type, meadow steppe and drought. The results showed that seasonal drought had great influence on dynamics of desert steppe growth, whereas, short-term, medium-term and long-term drought had little influence. Dynamics of typical steppe growth showed a strong response to seasonal drought, a lower response to short-term, medium-term and long-term drought. Dynamics of meadow steppe growth indicated clearly a strong response to seasonal drought and long-term drought. It was found to have lag effects of precipitation on grassland, cumulative effects of abundance and lack of moisture on grassland. Simulated response relation grassland NDVI to SPI by regression model containing dummy variables and simple regression model respectively, goodness of fit occurred in regression model with dummy variables. It was concluded that dynamic variation of grassland growth response to drought had seasonal effects.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (“973”) (2006CB400505); 国家教育部新世纪优秀人才支撑计划资助项目 (NCTE-04-0149)

收稿日期: 2006-07-14; **修订日期:** 2007-04-15

作者简介: 王宏 (1979 ~), 男, 陕西人, 博士生, 主要从事资源环境遥感与生态系统管理研究. E-mail: wanghong@ires.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbli@ires.cn

Foundation item: The project was financially supported by State Key Basic Research and Development Plan of China (No. 2006CB400505); Ministry of Education Trans-century Training Program Foundation for the Talents, China (No. NCTE-04-0149)

Received date: 2006-07-14; **Accepted date:** 2007-04-15

Biography: WANG Hong, Ph. D. candidate, mainly engaged in resources and environment remote sensing and ecosystem management. E-mail: wanghong@ires.cn.

Key Words: grassland in northern China; drought; NDVI; SPI

全球变化与陆地生态系统(Global Change and Terrestrial Ecosystem, GCTE)是当前全球变化研究的重要内容,气候变化对陆地生态系统的影响及其反馈一直是其研究的焦点问题之一^[1]。植物生态学的观点认为主要的植被类型表现着植物界对主要气候类型的反应,每个气候类型或分区都有相应的植被类型。由于气候是决定地球上植被类型及其分布的最主要因素,因此在全球变化与陆地生态系统关系的研究中,气候-植被关系的确定具有十分重要的实际意义^[2]。

草地是地球上主要的生物群落之一,面积约 2400 万 km²,覆盖了陆地表面近五分之一的区域,在全球变化研究领域占据非常重要的地位,受到国内外学者的高度重视^[3~6]。中国北方草原生长动态和产量形成受气候条件的影响和制约,特别是水分条件在很大程度上决定着草原的地理分布和生物生产力水平,许多研究草原对气候变化的响应时指出气候变化对草原植被可能产生的重要影响:草原面积显著减少,草原生产力明显下降,在干旱地区表现尤为严重^[2,6~8]。因此,中国北方草原对于旱气候的响应研究成为植被对全球变化响应研究的重要部分。

干旱是指在相对广阔的地区,长期无降水或降水异常偏少的气候背景下,水分供求严重不足的一种现象^[9]。它是一种复杂的自然灾害,会在大范围内造成严重的环境、社会和经济后果,是难于监测的自然现象,其原因是^[10]:(1)它发展趋势较慢,开始和结束界定比较模糊;(2)没有精确和通用的定义;(3)它的影响效应是非结构性的并且向大范围地区蔓延。尽管干旱现象非常复杂,但可以用于干旱指数来表征,并且这些指数可以用来量化气候异常变化强度、持续时间、空间范围等^[11]。较常用的干旱指数有:衡量干旱状况的干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[12],农作物湿度指数(Crop Moisture Index, SMI)^[13],地面水分供应指数(Surface Water Supply Index, SWSI)^[14],标准化降雨指数(Standardized Precipitation Index, SPI)^[15,16]。大多数研究利用不同的干旱指数进行区域气候干旱强度与覆盖范围进行了监测,并对干旱发展趋势进行预测^[9,11,14~16]。

NOAA/AVHRR 具有较高的辐射分辨率,数据量化等级为 1024,温度分辨率为 1℃,并且时间分辨率极高,以上特征决定了它可以为大面积的草原测量提供一个良好的数据源,并且有可能为任何待研究的区域提供生长期内的无云层干扰的数据。在大、中尺度植被区域分布及动态变化研究中具有很大优势^[17]。绿色植被在可见光和近红外波段的不同反射特性为从空间监测植被提供了创新的方法。归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)就是常被用于监测植被的遥感指数^[18,19]。对于 NOAA-7 和 NOAA-9 极轨卫星搭载的先进的甚高分辨率辐射仪(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR),NDVI 被定义为:

$$NDVI = (Ch2 - Ch1) / (Ch1 + Ch2)$$

式中,Ch1 和 Ch2 分别代表可见光(0.58 ~ 0.68 μm)通道和近红外(0.725 ~ 1.1 μm)通道^[20]。因此,NOAA/AVHRR NDVI 数据使得在大尺度上研究植被对气候干旱响应成为可能。

许多研究已经表明,SPI 指数相对简单、有较强的空间一致性和时相灵活性,考虑了不同尺度的水分盈亏,因而,SPI 指数比 PDSI 和其它指数有更大的优势^[21~23]。在草原对气候变化的响应研究方面,主要集中在气候变化与草原生长动态的关系分析,而缺少气候特定事件(干旱)对中国北方草原影响方面的研究^[1,2,6~8,28]。从而,本研究选择 SPI 指数作为表征干旱变化趋势的参量,分析了生长季内不同月份中国北方草原 NDVI 与不同月时间尺度 SPI 的关系。如果不考虑植被季相节律,利用一般的统计模型研究 NDVI 与降雨量时间序列的关系将会产生不准确的结果^[10],因此,为了考虑降雨的季节性效应,本研究在草原生长季内,分析了草原 NDVI 对不同月时间尺度的 SPI 响应。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

选择中国北方处于北半球中纬度地区地带性植被类型——草甸草原、典型草原、荒漠草原植被作为研究

目标。草甸草原大部分分布于松辽平原上,一部分分布于内蒙高原的东部边缘,分布区年降水量为 350 ~ 550mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温约 1800 ~ 2500 $^{\circ}\text{C}$, 干燥度为 0.7 ~ 1.2, 地形平坦, 土壤为草甸黑钙土或暗栗钙土。常见的优势种有: 贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*), 西伯利亚艾菊(*Tanacetum sibiricum*)。典型草原主要分布于锡林郭盟, 气候特征是半干旱、冬寒夏温, 多风沙, 富日照。全年降水量在 150 ~ 400mm, 水分条件满足温带旱生低温草本植物的生长, 草本植物生长较好, 主要优势植物种类为: 大针茅(*Stipa grandis*)、羊草(*Leymus Chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*), 主要土壤类型为淡栗钙土, 其有机质含量通常在 1.5% ~ 2.5% 之间。荒漠草原主要分布在二连浩特和鄂尔多斯西部, 年降水量 150 ~ 280mm, 年均温度 2.6 ~ 4.7 $^{\circ}\text{C}$, 土壤为棕钙土。建群种由强旱生丛生小禾草组成, 以戈壁针茅(*S. gobica*)、石生针茅(*S. kleinenzii*)等为优势植物, 生产力较低。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

气象数据是从国家气象局获得的中国 1982 ~ 1999 年的 727 个基本标准气象站的月降水量资料。遥感数据为 NOAA/AVHRR NDVI 数字影像, 来自美国 NASA 和 NOAA 的 EOS 计划所建立的地球资源观测系统 (Earth Resources Observation System; EROS) 数据中心的探路者数据库。图像分辨率为 8km \times 8km, 时间分辨率为旬, 时间跨度为 1982 年 1 月 ~ 1999 年 12 月。每月的 NDVI 数据是通过国际通用的可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰的 MVC(最大合成)方法获得^[24]。植被类型参考 2000 年中国土地覆盖分类研究结果^[25]。

1.2.2 数据处理

(1) NDVI 影像值域转换

获取的 NDVI 影像值域在 3 ~ 253 之间, 利用下面的公式将 NDVI 影像的值域转换到 -1 ~ 1 之间:

$$\text{NDVI}_j = (\text{NDVI}_i - 128) \times 0.008 \quad (1)$$

NDVI_i 是转换前的 NDVI 值, NDVI_j 是转换后的 NDVI 值。-0.2 ~ 0.1 范围内的 NDVI 值主要表现积雪、内陆水体、沙漠、土壤等, 0.1 ~ 0.7 之间的 NDVI 值的增加表示绿色植被的生长和变化^[26]。

(2) 草原植被类型对应气象站点的选取

在 GIS 支持下, 将研究区域气象站点分布图与利用时间序列 NDVI 影像分类得到的土地覆盖分类图^[25]叠加。从土地覆盖分类图上, 提取每一种类型的空间分布范围, 根据其空间分布的范围和气象站点空间分布特征, 标定各草原类型分布区所对应的气象站点(表 1)。

表 1 不同草原类型对应的气象站点

Table 1 Meteorologic station corresponding to different steppe type

草原类型 Steppe type	站点序号 Station number	站点名称 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude
草甸草原 Meadow steppe	1	海拉尔 Hailaer	119°45'	49°13'
	2	西乌珠穆沁旗 Xi Ujimqin County	117°36'	44°35'
典型草原 Typical steppe	3	新巴尔虎左旗 Xinbaerhuzuo county	118°16'	48°13'
	4	满洲里 Manzhouli	117°26'	49°34'
	5	东乌珠穆沁旗 Dong Ujimqin county	116°58'	45°31'
	6	新巴尔虎右旗 Xinbaerhuyou county	116°49'	48°40'
	7	锡林浩特 Xilinhaote	116°04'	43°57'
荒漠草原 Desert steppe	8	阿巴嘎旗 Abaga county	114°57'	44°01'
	9	那仁宝力格 Narenbaolige	114°09'	44°37'
	10	朱日和 Zhurihe	112°54'	42°24'
	11	二连浩特 Erlanhaote	111°58'	43°39'
	12	满都拉 Mandoula	110°08'	42°32'

(3) 气象数据和 NDVI 数据处理

对每种草原类型对应的所有站点月降雨量求平均, 构成草原类型 1982 ~ 1999 年的月降水量时间序列。把研究区域气象站点分布图与 1982 ~ 1999 年 NDVI 时间序列叠加, 选取距每个站点最近的 9 个像元作空间平均 (图 1), 作为与站点对应的 NDVI 值, 然后对每种草原类型所有站点对应的 NDVI 求平均, 得到草原类型 1982 ~ 1999 年的 NDVI 时间序列。

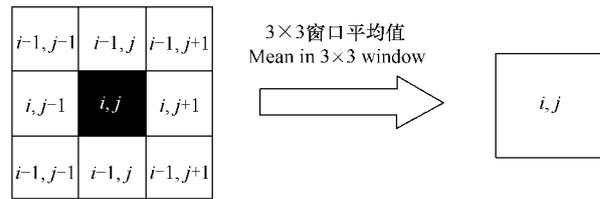


图 1 NDVI 数字影像空间平均示意图

Fig. 1 Graph of spatial average for NDVI digital images

1.3 分析方法

1.3.1 SPI 指数构建

McKee 等^[15] 为了定义和监测气候干旱的变化情况, 提出了标准化的降雨指数 (SPI), 可以用来确定有降雨量记录的任何地区特定时间尺度的降雨异常事件。利用 Gamma 分布函数可以较好的拟合降雨时间序列, Gamma 分布概率密度函数定义如下:

$$g(x) = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0, \alpha > 0, \beta > 0) \quad (2)$$

式中, α 是函数的形状参数, β 是函数的比例参数, x 是降雨量。

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (3)$$

式中, $\Gamma(\alpha)$ 是 Gamma 分布函数。 α, β 参数通过最大似然进行最优估计。

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (5)$$

式中, n 为降雨量观测值样本数, A 通过公式(6)计算, (5)式中, \bar{x} 为降雨量均值。

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\ln(x)}{n} \quad (6)$$

特定时间尺度降雨事件观测值的累积频率为:

$$G(\alpha) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x X^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\beta} dx \quad (7)$$

以上的降雨事件的累积频率是在降雨量大于零的前提下计算的, 而实际降雨量的分布可能出现零值, 因此, 累积频率可以进一步表示为:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (8)$$

式中, q 是降雨事件出现零的概率。把 $H(x)$ 转换成均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布。

SPI 指数为标准正态分布变量 (Z) 值。一般把 SPI 分为 7 类: 极度湿润 ($Z \geq 2.0$), 非常湿润 ($1.5 \leq Z \leq 1.99$), 中度湿润 ($1.0 \leq Z \leq 1.49$), 正常 ($-0.99 \leq Z \leq 0.99$), 中度干旱 ($-1.49 \leq Z \leq -1.0$), 严重干旱 ($-1.99 \leq Z \leq -1.5$), 极度干旱 (≤ -2.0)。SPI 指数可以反映不同时间尺度的降雨事件, 用来计算 i 个月时间尺度 SPI 的降雨量可以通过公式(9)得到。

$$P_i = \sum_{j=1}^i p_j \quad (9)$$

式(9)中, i 为月数, P_i 为 i 个月时间尺度的降雨量, p_j 为草原类型对应的降雨量。已有的研究表明, 降水季节分配对我国北方植被的生长有重要的影响, 不同时间尺度的降雨量对草原生长状况的影响有很大的差异^[1], 因此, 利用不同月时间尺度降雨量计算的 SPI, 以研究月时间尺度上 SPI 对草原 NDVI 的影响。不同月

时间尺度的 SPI 代表以下含义:1-月 SPI(代表 1 个月 SPI)和 2-月 SPI(代表 2 个月 SPI)反映了短期的降雨状况,最接近于土壤湿度;3-月 SPI(代表 3 个月 SPI)反映了季节性的降雨状况;6-月 SPI(代表 6 个月 SPI)和 9-月 SPI(代表 9 个月 SPI)反映了中长期的降雨变化趋势;12-月 SPI(代表 12 个月 SPI)反映了长期的降雨格局^[10]。

1.3.2 NDVI 与 SPI 关系分析

荒漠草原、典型草原、草甸草原对应的 1982 ~ 1999 年 NDVI 时间序列分别与 1 月 SPI、2 月 SPI, ..., 12 月 SPI 作相关分析。因为在植被生长季内,降雨量强度、影响范围不断变化,而植被生长状况也不断做出相应调整以适应降雨事件的变化,因此,主要分析草原生长季内(4 ~ 9 月份)NDVI 与 SPI 关系。

根据相关分析的结果,选择草原生长季内相关性最为显著的 NDVI 与 SPI 时间序列,进行线性回归分析。考虑到生长季内草原 NDVI 与 SPI 指数有较大的变异性,因此,在线性回归模型中引入了虚拟变量^[27],以说明因季节性波动 NDVI 与 SPI 的线性关系变化情况。在实际研究中,引入了 6 个虚拟变量 D_1, D_2, \dots, D_6 , 线性回归系数为 a_0, a_1, \dots, a_{11} 。从而,线性回归模型可以表示为^[10]:

$$NDVI = a_0 + a_1 SPI + a_2 D_1 + a_3 D_2 + a_4 D_3 + a_5 D_4 + a_6 D_5 + a_7 D_1 SPI + a_8 D_2 SPI + a_9 D_3 SPI + a_{10} D_4 SPI + a_{11} D_5 SPI \tag{10}$$

根据虚拟变量的定义,变量 D 取 0, 1 两种值进行量化,因此, D_1, D_2, \dots, D_6 取值如表 2 所示,草原生长季内不同时间尺度的线性回归模型可以用式(11)表示^[10]:

$$\begin{aligned} 4 \text{ 月份 } \quad NDVI &= a_0 + a_1 SPI & 5 \text{ 月份 } \quad NDVI &= (a_0 + a_2) + (a_1 + a_7) SPI \\ 6 \text{ 月份 } \quad NDVI &= (a_0 + a_3) + (a_1 + a_8) SPI & 7 \text{ 月份 } \quad NDVI &= (a_0 + a_4) + (a_1 + a_9) SPI \\ 8 \text{ 月份 } \quad NDVI &= (a_0 + a_5) + (a_1 + a_{10}) SPI & 9 \text{ 月份 } \quad NDVI &= (a_0 + a_6) + (a_1 + a_{11}) SPI \end{aligned} \tag{11}$$

为了验证基于新建立的线性回归分析结果,利用没有虚拟变量的简单回归模型分析 NDVI 与 SPI 指数的线性回归关系。

2 结果分析

2.1 草原 NDVI 与 SPI 关系分析

2.1.1 荒漠草原 NDVI 与 SPI 时间序列关系分析

荒漠草原 NDVI 与 SPI 时间序列的散点图如图 2 所示(图中,纵坐标为生长季内不同月份的草原 NDVI,横坐标为不同月时间尺度的 SPI,下同)。可以

看出,荒漠草原 NDVI 与 SPI 的相关系数随着时间尺度不同而发生变化,表明荒漠草原对不同时间尺度的干旱气候响应有很大差异。4 月份 NDVI 与不同时间尺度的 SPI 序列均呈显著性相关,因为 4 月份是荒漠草原的返青期,从而表明了干旱对草原的返青影响较大。5 月份 NDVI 与 2-月 SPI 指数的相关性较高,而 6 月份 NDVI 与 3-月、6-月 SPI 也有较高的相关性,说明短期和中长期降雨量对荒漠草原生长影响较大。可以断定,从荒漠草原返青到绿度峰值出现这段时期,气候干旱对荒漠草原的生长动态影响较为显著。8 月份为荒漠草原生长最好时期,此时,NDVI 与不同时间尺度 SPI 指数呈现出较好的相关性。9 月份,草原 NDVI 与不同时间尺度的 SPI 相关性较低,其原因是植被绿度由高峰逐渐降低,直至草原停止生长,气候干旱对草原影响较小。因为 5、6、7、9 月份草原 NDVI 与 1-月 SPI 指数相关性较小,因而,可以得到短期的气候干旱对荒漠草原影响不大。总体看来,荒漠草原的生长动态受季节性干旱影响很大,短期、中长期和长期干旱对荒漠草原影响较小。在生长期,荒漠草原对不同时间尺度的 SPI 指数表现出较好的相关性,从另一角度证明了主要分布于大陆性干燥气团控制下的中纬度地带的内陆盆地与低山的荒漠草原,分布区的气候极端干旱,所以水分条件的变化对草原的生长状况有明显地影响^[28]这一结论。

表 2 虚拟变量取值

Table 2 Value of dummy variables

月份 Month	D1	D2	D3	D4	D5
4	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0
7	0	0	1	0	0
8	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	1

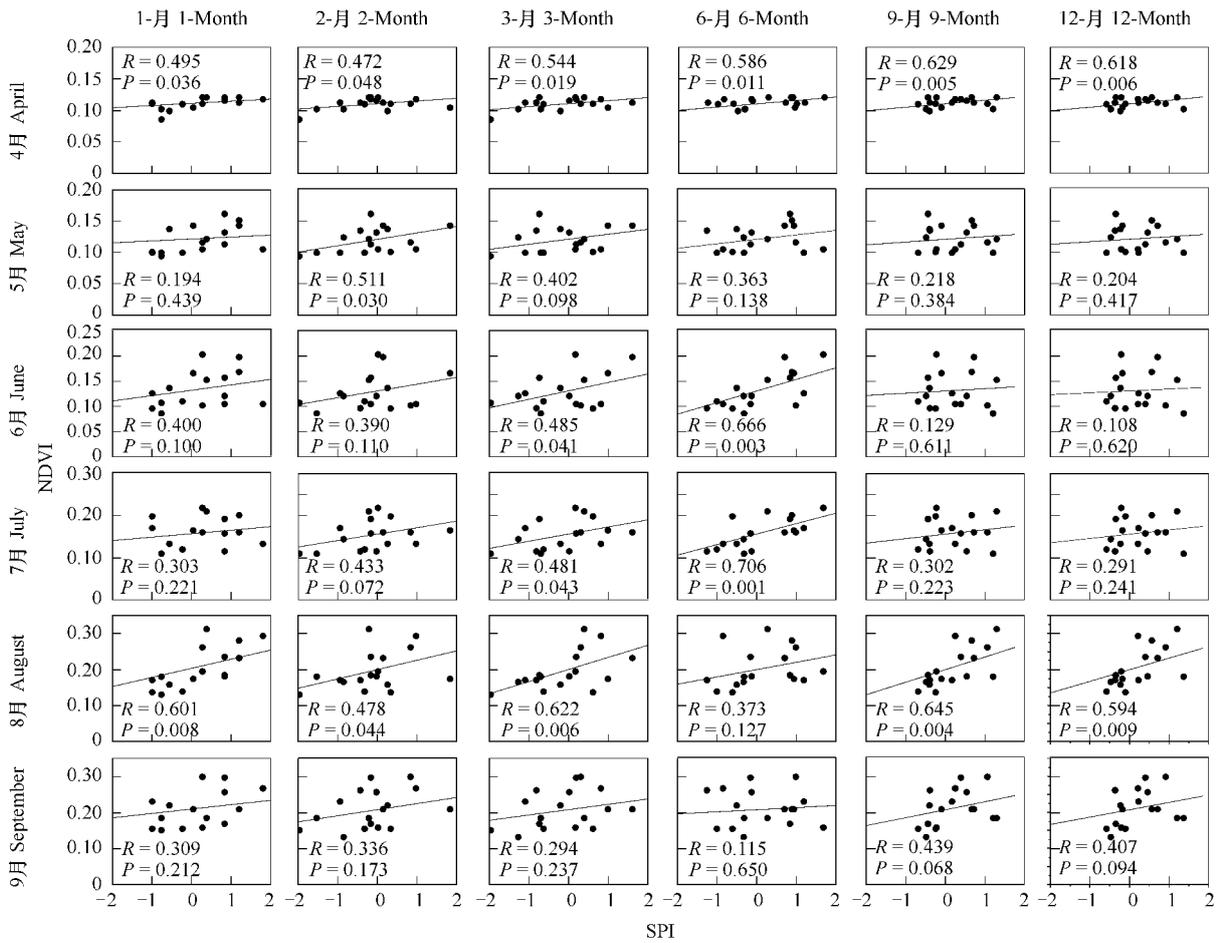


图2 1982 ~ 1999 年荒漠草原 NDVI 与不同月时间尺度 SPI 的相关性

Fig.2 Correlation of NDVI for dessert steppe and SPI with different time scale from 1982 to 1999

2.1.2 典型草原 NDVI 与 SPI 时间序列关系分析

对典型草原 NDVI 与 SPI 指数时间序列进行相关分析,两者散点图如图 3 所示。与荒漠草原相比较,典型草原 NDVI 与不同时间尺度的 SPI 指数相关性较低,表明了典型草原对干旱的响应不如荒漠草原明显。究其原因,典型草原生长动态不仅受降雨量的影响,而且气温对典型草原生长起着一定的影响作用。在典型草原生长初期,2-月、3-月、6-月、9-月、12-月 SPI 与草原 NDVI 的相关性均显著,反映出草原返青期对这些不同月时间尺度的干旱有较大响应。在草原处于生长期的 5、6 月份,5 月份草原 NDVI 与 2-月 SPI、6 月份草原 NDVI 与 3-月 SPI 呈显著性相关,说明短期和季节性干旱对典型草原生长有很大的影响。处于草原生长旺盛的 7、8 月份,降水不是影响草原的唯一因子,适值雨热同季,草原绿色植物生产量达到顶峰,草原对气候干旱反应不是特别明显,因而,草原 NDVI 与干旱指数相关性较低。进入 9 月份后,草原开始枯萎,长期的干旱对草原影响不大,但短期干旱对典型草原有一定程度的影响,如 2-月 SPI。从图 3 还可以看出,典型草原对季节性干旱响应较强,而对短和中长期、长期的干旱响应较弱。

2.1.3 草甸草原 NDVI 与 SPI 时间序列关系分析

草甸草原 NDVI 与不同月时间尺度 SPI 指数的相关系数如图 4 所示,除 3-月 SPI 外,4 月份草甸草原 NDVI 与 SPI 指数并没有呈现较显著的相关性,而 5 月份的草原 NDVI 与干旱指数的相关性较 4 月份显著。其可能原因是 1982 ~ 1999 年中大多年份的草甸草原在 5 月初返青,而少部分草甸草原在 4 月下旬返青,因此,4 月份的草甸草原对气候干旱响应不明显,而 5 月份草原开始发育,草原进入生长期,对干旱响应逐渐增强。6、7 月份草甸草原 NDVI 与 2-月、3-月、6-月 SPI 指数表现出较强相关性,草原 NDVI 对于旱较为敏感。8 月份的

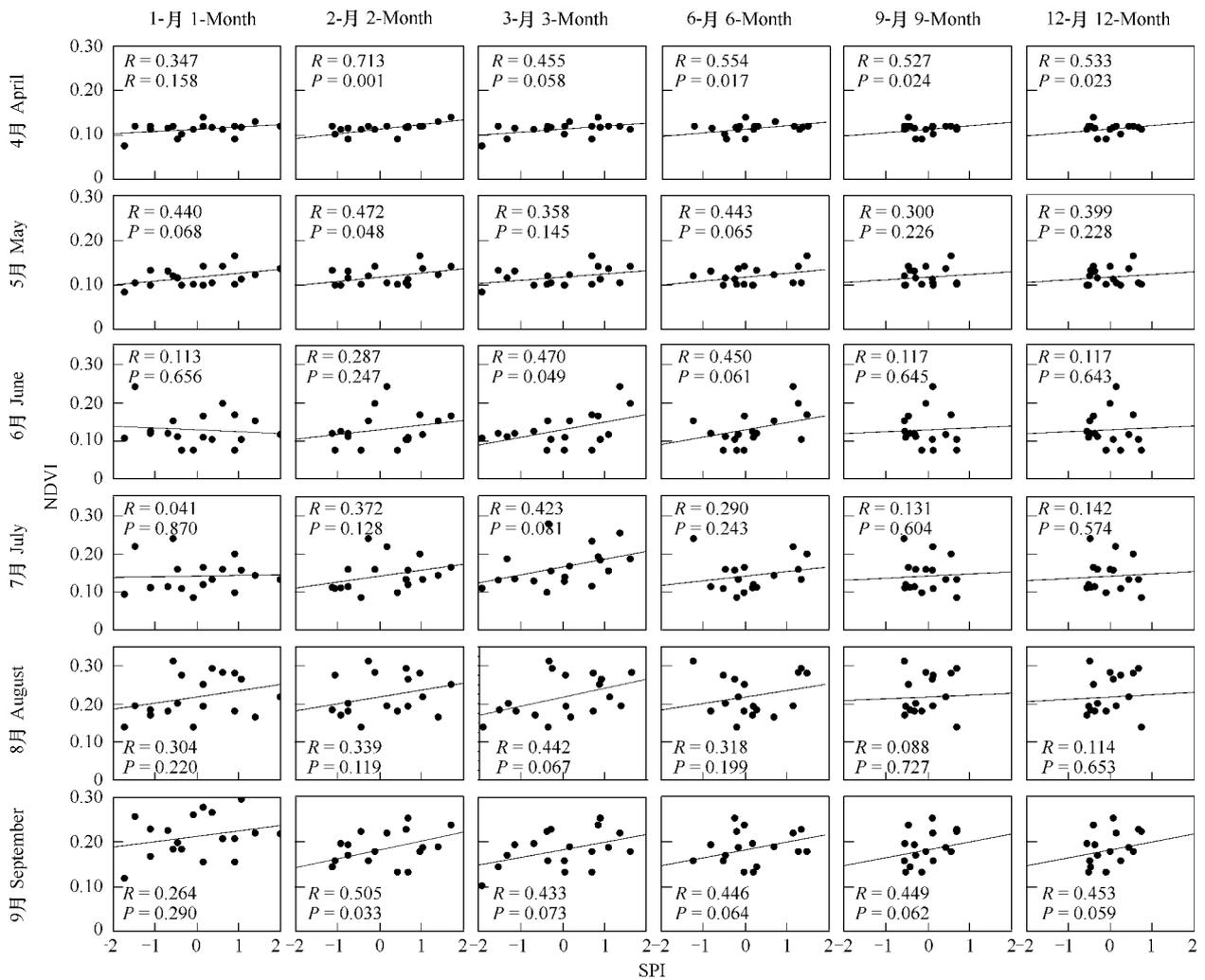


图3 1982~1999年典型草原NDVI与不同月时间尺度SPI的相关性

Fig. 3 Correlation of NDVI for type steppe and SPI with different time scale from 1982 to 1999

草原NDVI与干旱指数没有表现出强的相关性,因为8月份为草甸草原生长最旺盛时期,绿度达到峰值,因此,干旱对草原生长动态影响不大。9月份草甸草原NDVI与短期和长期的干旱指数(6-月、9-月SPI)的相关性较弱,表明对气候干旱响应不明显,其可能原因是草甸草原的生长季除受降雨量的影响外,气温对其影响也很大,当进入9月份后,如果有适合的气温,植物生长期延长,导致草原绿度降低速率变缓,使得气候干旱对草甸草原NDVI的影响不明显。从草甸草原对SPI响应时间尺度来看,草原对季节性和长期干旱响应较强。

从以上3种草原类型NDVI对多尺度SPI指数的响应可以看出,草原生长季内的每月NDVI与1-月SPI相关性较弱,而与3-月SPI相关性较强。从而表明了降雨量对草原不会产生短期影响,而是累积效应。在大多数情况下,降雨量对同期的草原生长动态影响较小,而草原生长动态对降雨量的响应有时滞效应,与以前的研究结论一致^[28]。

2.2 草原NDVI对于干旱响应的季节性效应

分别基于虚拟变量的回归模型(公式10)分析3种草原类型NDVI与3-月SPI指数的关系,为了比较回归分析结果拟合度优劣,又利用了简单回归模型分析了草原NDVI与SPI指数的关系,两种回归模型得到的结果如表3、4、5所示,基于虚拟变量的回归模型分析的荒漠草原、典型草原、草甸草原NDVI与SPI线性关系显著性($P < 0.0001$)和 R^2 (0.606, 0.619, 0.852)均高于基于简单模型分析的显著性($P = 0.002, 0.004, 0.044$)

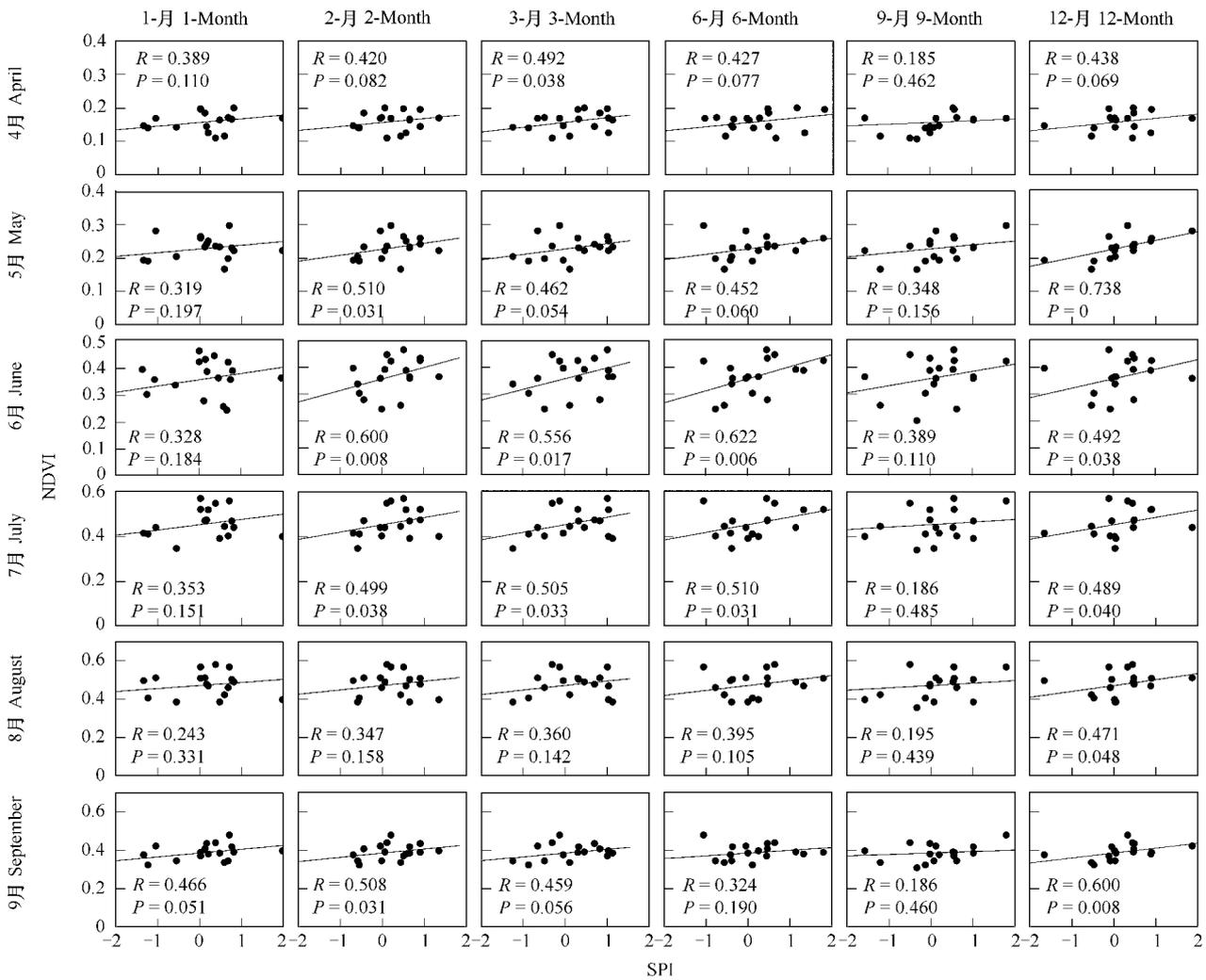


图4 1982~1999年草甸草原NDVI与不同月时间尺度SPI的相关性

Fig. 4 Correlation of NDVI for meadow steppe and SPI with different time scale from 1982 to 1999

和 R^2 (0.089, 0.074, 0.038)。可以看出, 尽管基于简单回归模型拟合的草原 NDVI 与 SPI 关系通过显著性检验, 但相关关系和拟合度较低。而基于虚拟变量的回归模型表明了对草原 NDVI 与 SPI 关系的较优拟合度。

在消除了非显著性变量后, 荒漠草原 NDVI 与 SPI 回归方程中剩余变量为 $D_3, D_4, D_5, SPI, D_4(SPI)$, 将回归系数代入公式(11), 生长季内每月的 NDVI 与 SPI 关系可以表示为以下的公式:

$$\begin{aligned}
 &4月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0123SPI & 5月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0123SPI \\
 &6月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0123SPI & 7月 \quad NDVI = 0.1561 + 0.0123SPI \\
 &8月 \quad NDVI = 0.1997 + 0.0337SPI & 9月 \quad NDVI = 0.2073 + 0.0123SPI
 \end{aligned} \tag{12}$$

去除典型草原 NDVI 与 SPI 回归方程中非显著性变量后, 剩余变量为 D_3, D_4, D_5, SPI , 将回归系数代入公式(11), 生长季内每月的 NDVI 与 SPI 关系根据可以表示为以下的公式:

$$\begin{aligned}
 &4月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0159SPI & 5月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0159SPI \\
 &6月 \quad NDVI = 0.12 + 0.0159SPI & 7月 \quad NDVI = 0.1425 + 0.0159SPI \\
 &8月 \quad NDVI = 0.2184 + 0.0519SPI & 9月 \quad NDVI = 0.2134 + 0.0159SPI
 \end{aligned} \tag{13}$$

同样, 草甸草原 NDVI 与 SPI 回归方程中剩余变量为 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, SPI$, 将回归系数代入公式(11), 生长季内每月的 NDVI 与 SPI 关系可以表示为公式(14):

表3 荒漠草原 NDVI 与 3-月 SPI 回归分析

Table 3 Regression analyses for NDVI of dessert steppe and 3-month SPI

变量 Variables	回归系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	P(显著性水平) Significance level
引入虚拟变量的回归模型 Regression model including dummy variables			
常数项 Constant	0.1200	0.005	<0.0001
D_3	0.0361	0.009	<0.0001
D_4	0.0797	0.009	<0.0001
D_5	0.0873	0.009	<0.0001
SPI	0.0123	0.004	0.001
D_4 (SPI)	0.0214	0.009	0.017
$F = 31.338 \quad R^2 = 0.606 \quad P < 0.0001$			
简单回归模型 Simple regression model			
常数项 Constant	0.1540	0.005	<0.0001
SPI	0.0158	0.005	0.002
$F = 10.325 \quad R^2 = 0.089 \quad P = 0.002$			

表4 典型草原 NDVI 与 3-月 SPI 回归分析

Table 4 Regression analyses for NDVI of type steppe and 3-month SPI

变量 Variables	回归系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	P(显著性水平) Significance level
引入虚拟变量的回归模型 Regression model including dummy variables			
常数项 Constant	0.1200	0.005	<0.0001
D_3	0.0225	0.010	0.028
D_4	0.0984	0.010	<0.0001
D_5	0.0934	0.010	<0.0001
SPI	0.0159	0.004	<0.0001
$F = 41.766 \quad R^2 = 0.619 \quad P < 0.0001$			
简单回归模型 Simple regression model			
常数项 Constant	0.1550	0.005	<0.0001
SPI	0.0159	0.005	0.004
$F = 8.442 \quad R^2 = 0.074 \quad P = 0.004$			

4 月 $NDVI = 0.156 + 0.0247SPI$

5 月 $NDVI = 0.2263 + 0.0247SPI$

6 月 $NDVI = 0.359 + 0.0247SPI$

7 月 $NDVI = 0.454 + 0.0247SPI$

(14)

8 月 $NDVI = 0.472 + 0.0247SPI$

9 月 $NDVI = 0.386 + 0.0247SPI$

从公式(12)、(13)、(14)可以看出,引入虚拟变量的模型反映了虚拟变量与干旱指数之间存在的交互效应,并且这一交互效应对因变量的取值产生影响,使模型的截距和斜率在不同的月份发生了变化。从而表明草原 NDVI 和 SPI 的线性关系随生长季月份的变化而具有显著性差异,并且 3 类草原 NDVI 与 SPI 指数的基于虚拟变量回归模型具有较高的显著性水平和相关性,因而,草原生长季内动态变化对干旱的响应具有季节性效应。简单回归模型只能反映草原 NDVI 与 SPI 之间的直接线性关系,并不能反映 NDVI 与 SPI 随季节性变化而具有较大变异性的线性关系,因此,尽管基于简单回归模型拟合的草原 NDVI 与 SPI 关系通过显著性检验,但相关关系较低。

为了进一步说明引入虚拟变量后的回归模型更好的表明草原 NDVI 与干旱的线性关系,利用基于虚拟变量回归模型(公式 12、13、14)和简单回归模型模拟了 1990~1999 年生长季内的草甸草原 NDVI,其结果如图 5 所示。

基于虚拟变量回归模型模拟的草甸草原 NDVI 远远好于基于简单回归模型模拟值。两种回归模型对草甸草原 NDVI 预报精度的差别是由年内降雨量对草原影响的季节性效应所引起。从而表明只有利用考虑草原对降雨量响应的季节性效应关系模型,才能更好表达草原植被生长动态对干旱的响应关系。

4 结论与讨论

利用生长季内 3 种草原类型(荒漠、典型、草甸草原)的 NDVI 与不同月时间尺度的 SPI 指数进行了相关分析,生长季内不同草原类型 NDVI 与 SPI 指数相关性较为显著,从草原对 SPI 指数响应的的时间尺度来看:荒漠草原的生长动态受季节性干旱影响很大,短期、中后期和长期干旱对荒漠草原影响较小。典型草原对季节

表5 草甸草原 NDVI 与 3-月 SPI 回归分析

Table 5 Regression analyses for NDVI of meadow steppe and 3-month SPI

变量 Variables	回归系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	P(显著性水平) Significance level
引入虚拟变量的回归模型 Regression model including dummy variables			
常数项 Constant	0.156	0.012	<0.0001
D_1	0.0703	0.017	<0.0001
D_2	0.203	0.017	<0.0001
D_3	0.298	0.017	<0.0001
D_4	0.316	0.017	<0.0001
D_5	0.230	0.017	<0.0001
SPI	0.0247	0.005	<0.0001
$F = 96.985 \quad R^2 = 0.852 \quad P < 0.0001$			
简单回归模型 Simple regression model			
常数项 Constant	0.342	0.012	<0.0001
SPI	0.0247	0.012	0.044
$F = 4.139 \quad R^2 = 0.038 \quad P = 0.044$			

性干旱响应较强,而对短和中长期、长期的干旱响应较弱。草甸草原对季节性和长期干旱响应较强。可以看出,3种草原类型的NDVI受季节性干旱影响较为显著,干旱对草原的影响是累积效应。而气候干旱表明了降雨变化趋势,可以断定草原生长动态对降雨量的响应有时滞效应,水分盈亏对草原的影响是累积效应。

在草原NDVI与SPI指数的关系分析中还可以看出,在草原生长季内,与干旱指数相关性显著的阶段出现在生长初期至峰值这一时段内。其原因是这一阶段草原对土壤水分变化较为敏感,而气候干旱导致土壤水分缺乏,从而使得SPI指数对草原NDVI影响较大。当草原生长达到最旺盛时期,绿度达到峰值,这一生长时间段,干旱对草原生长动态影响较小。

在量化草原NDVI与SPI指数的线性关系时,利用基于虚拟变量的回归模型和简单回归模型模拟了草原NDVI对SPI指数的响应关系,基于虚拟变量的回归模型显示出对草原NDVI与SPI关系的较优拟合度。最后,利用两种回归模型预报了草甸草原NDVI,基于虚拟变量回归模拟的草甸草原NDVI远远好于基于简单回归模型模拟值。表明了草原生长动态对于干旱响应具有季节性效应,从而在研究草原与干旱的关系时,季节性效应是必须考虑的重要因素之一。从模拟的结果可以看出,NDVI与SPI指数不失为量化植被与干旱关系的有效指数。

在研究草原与干旱的关系,只从点的角度来研究,而没有从点到面进行研究,因此,研究的结果不能反映草原生长季动态与干旱关系的空间变格局,因而,下一步的工作是从点到面,进行草原生长季动态对于干旱的空间响应研究。

References:

- [1] Li X B, Chen Y H, Zhang Y X, *et al.* Impact of climate change on desert steppe in northern China. *Advance Earth Sciences*, 2002, 17(2): 254-261.
- [2] Li Z Q, Liu Z G, Chen Z Z, *et al.* The effects of climate changes on the productivity in the Inner Mongolia Steppe of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(1): 4-10.
- [3] Douglas G G, Geoffrey M H. A technique for monitoring ecological disturbance in tallgrass prairie using seasonal NDVI trajectories and a discriminant function mixture model. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61: 270-278.
- [4] Limin Y, Bruce K W, Larry L T, *et al.* An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U. S. northern and central great plains. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65:25-37.
- [5] Plessis W P. Linear regression relationships between NDVI, vegetation and rainfall in Etosha National Park, Namibia. *Journal of Arid Environments*, 1999,42:235-260.
- [6] Niu J M. Impacts prediction of climatic change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2001,9(4): 277-282.
- [7] Wang M, Li Y, Bai X Z, *et al.* The impact of global warming on vegetation resources in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*,2004,19(3):331-336.
- [8] Deng H P, Liu H F, Zhu T C. Temperature and precipitation changes over Songnen Steppe and their impacts since mid-20th century. *Scientia Geographica Sinica*,1999,19(3): 220-224.
- [9] Li X Z, Liu X D, Ma Z G. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years. *Arid Zone Research*, 2004,21(2):97-103.
- [10] Lei J, Albert J P. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of*

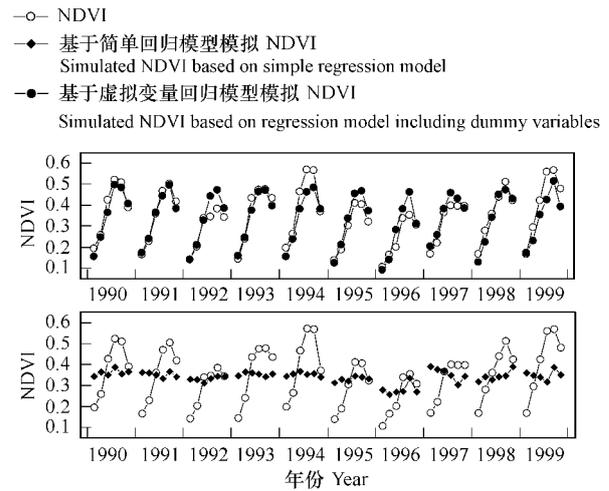


图5 基于不同线性回归模型模拟的草甸草原NDVI
Fig.5 Simulating NDVI of meadow steppe based on different linear regression models

- Environment, 2003, 87: 85—98.
- [11] Wilhite D A. Drought as a natural hazard. In: Wilhite D A (Ed.). Drought A Global Assessment. London: Routledge, 2000. (I) :1—18.
- [12] Palmer W C. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau Research Paper, 1965, No. 45, Washington D C.
- [13] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. Weatherwise, 1968, 21, 156—161.
- [14] Shafer B A, Dezman L E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference, 1982, 164—175.
- [15] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, 1993, 179—184.
- [16] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. 1995, 233—236.
- [17] Zhou C H, Luo J C, Yang X M, *et al.* Geoscience understanding and analysis of remote sensing images. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] Justice C O, Hoben B N, Gwynne M D. Monitoring east African vegetation using AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7: 1453—1474.
- [19] Turker C J, Townshend J R G, Goff T E. African land-cover classification using satellite data. Science, 1985a, 227: 369—375.
- [20] Shi P J, Gong P, Li X B, *et al.* Study methods and practice of land use/cover changes. Beijing: Science Press, 2000.
- [21] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34: 113—121.
- [22] Guttman N B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35: 311—322.
- [23] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A *et al.* Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80: 429—438.
- [24] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1994, 17: 3547—3565.
- [25] Pan Y Z, Li X B, He C Y. Research on comprehensive land cover classification in China: based on NOAA/AVHRR and Holdridge PE index. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 270—282.
- [26] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 20069—20083.
- [27] Doran H. Applied regression analysis in econometrics. New York: Marcel Dekker, 1989.
- [28] Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(3): 379—382.

参考文献:

- [1] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254~261.
- [2] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 等. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响. 草业学报, 2003, 12(1): 4~10.
- [6] 牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究. 草地学报, 2001, 9(4): 277~282.
- [7] 王谋, 李勇, 白宪洲, 等. 全球变暖对青藏高原腹地草地资源的影响. 自然资源学报, 2004, 19(3): 331~336.
- [8] 邓慧平, 刘厚凤, 祝廷成. 松嫩草地 40 余年气温、降水变化及其若干影响研究. 地理科学, 1999, 19(3): 220~224.
- [9] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析. 干旱区研究, 2004, 21(2): 97~103.
- [17] 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. 遥感影像地学理解与分析. 北京: 科学出版社, 2001.
- [20] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社, 2000.
- [25] 潘耀忠, 李晓兵, 何春阳. 中国土地覆盖综合分类研究——基于 NOAA/AVHRR 和 Holdridge PE. 第四纪研究, 2000, 20(3): 270~282.
- [28] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379~382.