

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.003

老哈河流域地表植被覆盖对干旱的响应

刘晓帆^{1,2}, 任立良², 徐 静³, 袁 飞²

(1. 四川省交通厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要:在原有的帕尔默旱度模式中嵌套双源蒸散发能力计算模型和混合产流模型, 采用老哈河流域内及周边的 15 个气象站资料修正模型参数, 构建可用于变化环境下植被-干旱响应关系分析并适用于我国北方地区的机理性旱度模式, 计算研究区域各栅格逐月的帕尔默干旱指标, 通过分析和建立归一化植被指数与帕尔默干旱指标的关系来定量评价老哈河流域不同植被类型归一化植被指数对气象干旱的响应. 研究表明: (a) 在植被生长期的开始和结束阶段, 干旱对植被的影响较小. 在植被生长期的中间月份, 干旱对植被影响较大, 其中 6 月份是研究流域植被的水分敏感期. (b) 不同的植被类型受干旱影响的程度不同, 干旱对灌丛和草地的影响大于对林地的影响. (c) 带虚拟变量的回归模型能够合理地描述季节性的影响, 模型的模拟精度较高, 因此在考虑季节影响的情况下归一化植被指数可以用于干旱监测.

关键词:分布式水文模型; 旱度模式; 归一化植被指数; 蒸散发; 地表植被; 老哈河流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2012)02-0134-07

Vegetation response to meteorological drought in Laohahe Basin

LIU Xiao-fan^{1,2}, REN Li-liang², XU Jing³, YUAN Fei²

(1. Sichuan Communication Surveying and Design Institute, Chengdu 610017, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on the Palmer drought severity model, a physically-based drought severity model, which can be applied to assessment of the vegetation response to meteorological drought in a changing environment and is applicable to semi-arid regions in northern China, was established using the two-source PET model and hybrid runoff model. The model parameters were modified using the data from 15 meteorological stations in the Laohahe Basin from 1957 to 2008. The monthly PDSI value of each grid cell in the study area was calculated, and the correlation analysis and regression analysis of monthly NDVI and PDSI were conducted to quantitatively evaluate the responses of different types of vegetation to drought. The results show the following: (a) The effect of drought on vegetation was limited in the beginning and end of the growth period, and the drought influenced the vegetation remarkably in the middle of the growth period, during which the moisture-sensitive period appeared in June. (b) The responses of different types of vegetation to drought were different. The effect of drought on woodland was less than that on grassland and shrubland. (c) The high goodness-of-fit of the NDVI and PDSI correlation using the regression model with dummy variables indicated that NDVI is a good indicator of moisture conditions and can be used for detecting and monitoring drought with consideration of seasonal effects.

收稿日期: 2011-04-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB400502) 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2010490111)

作者简介: 刘晓帆(1982—), 女, 辽宁大石桥人, 工程师, 博士, 主要从事数字水文、流域水文过程模拟及航道整治研究. E-mail: liuxiaofanhhu

@yahoo.com.cn

Key words: distributed hydrological model; drought severity model; NDVI; evapotranspiration; vegetation; Laohahe Basin

气候条件是植被分布和变化的直接驱动力,同时,植被对气候也有反馈作用^[1],可在一定程度上减缓或加剧气候变化的幅度,而归一化植被指数能较好地表现地表植被的分布特征和变化情况,因此,自20世纪90年代以来,归一化植被指数与气候相互关系的研究已成为全球变化,尤其是气候变化领域的热点,已经取得了许多研究成果^[2-6].例如,Kazuhito等^[2]认为,在中高纬度地区的春夏季归一化植被指数的年际变化与气温变化显著相关,而半干旱地区归一化植被指数与降水和气温的相关性都很显著.信忠保等^[3]的研究表明,黄土高原地区植被整体呈现增加趋势,并存在明显的空间差异,降水是影响黄土高原地区植被变化的重要因素.李本纲等^[4]研究了气候因子与归一化植被指数的相关关系,发现中国大部分地区的气温对植被的影响超过降水对植被的影响,降水影响取决于耕作制度、作物种类等因子.这些研究大多数只涉及归一化植被指数与单一气象因子(降水、温度等)之间的关系,不能全面反映气候变化条件下的植被变化规律.我国北方主要为干旱半干旱区,是干旱发生频率最高的地区.符淙斌院士通过对比分析不同的干旱指标,阐述了我国北方1951—2004年干旱化的基本事实^[7].因此,在我国北方植被与气候相互关系研究中引入综合气象指标干旱指数探讨干旱化气候变化趋势下的植被动态演变具有重要意义.

笔者拟从流域水循环的角度出发,在原有的帕尔默旱度模式中嵌套双源蒸散发能力计算模型和混合产流模型,建立可用于变化环境下植被-干旱响应关系分析并适用于我国北方地区的机理性旱度模式.以老哈河流域为研究区域,利用改进的旱度模式计算1982—2006年不同植被类型帕尔默干旱指标月尺度时间序列,通过分析和建立归一化植被指数与帕尔默干旱指标的关系来定量评价老哈河流域不同植被类型归一化植被指数对气象干旱的响应.由于归一化植被指数与气候因子之间并不是简单的线性关系,因此在研究植被对干旱的响应时引入了虚拟变量以考虑季节性的影响.

1 研究区域与数据准备

老哈河是西辽河南源,发源于河北省平泉县西北山区柳西川,以小河沿水文站为出口断面的流域面积为18599 km²,多年平均年降水量为450 mm,是典型的半干旱区.由于水资源缺乏,因此气候变化显著影响着流域内的植被状况.

研究采用的水文气象资料包括2部分:(a)用于构建机理性帕尔默旱度模式所需的资料,来源于流域内及周边的15个气象站,包括各站的站点信息资料、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均水汽压、日平均风速、日照时间和日降水等资料,站点资料年限均为1957—2008年,其中选用赤峰、围场、承德和建平4个站的资料推导帕尔默干旱指标计算公式,选取林东、林西、开鲁等11个站的资料修订权重因子.(b)计算流域内各栅格帕尔默干旱指数值所用资料,除了采用上述气象站的气象资料外,降水数据采用老哈河流域内52个雨量站的资料,资料年限为1982—2006年.对于上述数据均采用反距离平方法,将各站的水文气象要素插值到空间分辨率为30"的栅格单元,为后续研究提供空间数据输入.

归一化植被指数数据来自美国航空航天局全球监测与模型研究组发布的归一化植被指数最大值半月合成数据,资料时间跨度为1982—2006年,空间分辨率为8 km,利用遥感影像处理软件ENVI切割得到老哈河流域的归一化植被指数数据,并将其分辨率转变为30".土地覆被资料采用的是美国马里兰大学的全球1 km土地覆被资料,空间分辨率为30".老哈河流域内主要植被类型有林地、灌丛、草地和耕地,它们分别占流域面积的18.1%,5.6%,40.2%,35.6%,其余水体和城乡用地约占流域面积的0.5%.

2 帕尔默旱度模式

2.1 原模式及其不足

1965年,帕尔默在提出对当时情况气候上适应的降水(climatically appropriate for existing conditions, CAFEC)概念的基础上,推导出一套分析计算干旱严重程度的完整方法^[8],亦称帕尔默模式.该旱度模式具有严密的系统性,考虑因子较全面,能较合理地描述干旱的各项特征,且具有较好的时空比较性,已得到广泛应用.1984年,范嘉泉等^[9]在国内期刊上介绍了帕尔默干旱指数的原理、优点和计算方法.1985年安顺清等^[10]根据帕尔默干旱指数的思路,采用济南、郑州2个气象站的资料对帕尔默模式进行修正,建立了我国的气象

旱度模式,其后很多文献对帕尔默旱度模式都有不同程度的改进和修正^[11-12]。但帕尔默旱度模式由于存在一些缺点而难以应用于变化环境下半干旱流域地表植被覆盖对干旱的响应研究。这些缺点归纳如下:(a)蒸散发能力的计算采用经验公式或者‘大叶’模型,不能充分考虑植被类型及其物候生理特性对水文分量计算的影响;(b)水量平衡计算模型采用均化土层的概念性模型,难以描述半干旱地区的产流特点;(c)基于单个气象站点进行水量平衡分析,而不是从流域水循环的角度计算水文分量,因而无法反映气象条件以及流域下垫面空间变化对干旱形成和发展的影响;(d)模式中的参数区域性十分敏感,用于不同区域时必须对其进行修正。

2.2 模式改进方案

考虑上述不足以及本文的研究目的,在建立北方半干旱地区的机理性旱度模式时对帕尔默旱度模式进行了4个方面的改进。

a. 采用双源蒸散发模型^[13-16]计算蒸散发能力。该模型将土壤和冠层作为2个相互独立又相互作用的源汇,分别对土壤表面和冠层进行能量平衡计算,从而推导出蒸散发能力的计算公式。利用遥感数据反演研究区域栅格化的陆面覆被空间分布信息(如归一化植被指数和土地利用类型等),然后基于陆面数据同化系统和相关文献确定各类植被的参数^[14],利用辐射平衡和陆面阻抗参数化方案^[13]计算公式中的各净辐射项和阻抗项,从而获得各种植被覆被类型的蒸散发能力。由于流域中除了陆面覆被以外,还存在水体,因而笔者在原双源蒸散发能力计算模型的基础上增加了水面蒸发(ET)的计算^[16]。上述改进后的模型能较好地反映流域下垫面地形、植被覆盖的空间差异性(植被物候特性、根系深度和生理特征等)对陆面蒸散发过程的影响,适用于半干旱地区稀疏植被覆盖情况的蒸散发能力计算。

b. 利用混合产流模型^[17-18]计算各单元水文分量。老哈河流域属于北方半干旱地区,产流机制较为复杂,往往是蓄满产流和超渗产流交互发生。为了更准确地描述土壤水分传输、下渗和径流等陆面水文过程对干旱形成的影响机制,采用混合产流模型替代帕尔默旱度模式中简单概念性的水量平衡模型。该模型通过土壤蓄水容量曲线和下渗能力曲线的结合来实现蓄满产流模式和超渗产流模式的有机融合,为半干旱、半湿润地区水量平衡分析提供了一种较全面的方式。

c. 基于栅格水文单元进行水量平衡分析。帕尔默旱度模式仅是根据气象站点的资料来估算站点所在位置的干旱情况,难以反映旱情的空间发生、发展状况,不利于研究区域植被动态演变规律与干旱之间的响应关系。笔者从流域水文循环的角度,基于 $30''$ 分辨率的空间数据,将研究区域划分为30577个栅格单元,通过遥感反演或插值方法获取区域地形、植被、土壤和降水等要素的空间分布,针对栅格单元进行水量平衡计算,充分考虑水文气象要素以及下垫面信息(植被、地形等)的空间变异性对干旱形成和空间发展的影响。

d. 利用研究区域资料建立机理性帕尔默旱度模式并修正权重因子。为了使旱度模式中的参数能更好地代表研究区域的特点,利用流域周边4个气象站的长序列(1957—2008年)历史资料建立帕尔默模式,采用15个气象站的资料修正权重因子,构建适用于研究我国北方地区的机理性旱度模式。

改进后的机理性帕尔默旱度模式与原帕尔默旱度模式相比具有以下优点:在研究区域具有较好的适用性;便于获取干旱指数空间分布;能充分考虑下垫面空间变异性对干旱演变的影响;对干旱机理描述更具科学性。因此,笔者拟利用该改进模式探讨老哈河流域变化环境下干旱-植被的响应关系以及演变规律。

3 植被覆盖对干旱的响应

3.1 数据分析方法

基于空间分辨率为 $30''$ 的栅格单元,利用准备好的空间数据展布以及构建的机理性帕尔默旱度模式计算老哈河流域内每个栅格单元1982—2006年逐月帕尔默干旱指标。按照土地覆被资料的分类情况,对研究区域内各种植被类型所在栅格单元上月归一化植被指数和帕尔默干旱指标求平均值,作为该植被类型的归一化植被指数和帕尔默干旱指标值。为了客观真实地反映降水、温度对植被生长的影响,避免冬季积雪对归一化植被指数数值的影响,只对生长季(4—10月)的归一化植被指数进行研究。

由于植被对水分的响应在生长期各阶段是不同的,所以应用皮尔逊相关分析对每个月归一化植被指数和帕尔默干旱指标的关系进行分析,得到各种植被类型在生长期各月归一化植被指数与帕尔默干旱指标的相关系数及其概率值 P , P 值的含义是拒绝零假设(相关系数为零)的概率。在相关分析的基础上,进一步

对归一化植被指数与帕尔默干旱指标时间序列进行线性回归分析,考虑到归一化植被指数与帕尔默干旱指标关系在生长季内的变异性,在线性回归模型中引入季节性虚拟变量^[19]. 本研究中引入 6 个虚拟变量,分配给生长季中的 4—10 月,表示“月份”对归一化植被指数和帕尔默干旱指数关系的影响. 带季节性虚拟变量的线性回归模型表达式如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 D_1 + \beta_3 D_2 + \beta_4 D_3 + \beta_5 D_4 + \beta_6 D_5 + \beta_7 D_6 + \beta_8 D_1 X + \beta_9 D_2 X + \beta_{10} D_3 X + \beta_{11} D_4 X + \beta_{12} D_5 X + \beta_{13} D_6 X + \varepsilon$$

(1)

式中:Y——归一化植被指数;X——帕尔默干旱指数; $D_1, D_2, \cdots, D_6$ ——虚拟变量; $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_{13}$ ——回归系数; ε ——随机误差.

表 1 给出了虚拟变量 $D_1 \sim D_6$ 的二进制值. 在拟合式(1)回归系数的过程中,逐步去掉表达式中回归系数的 P 值比较大的变量,当变量回归系数的 $P > 5\%$ 时,该变量就会被剔除,最后留下相关性显著的变量. 统计性检验的显著水平取 $\alpha = 0.05$,采用决定性系数 R^2 来表示模型的拟合程度(即归一化植被指数与帕尔默干旱指数关系的相关性).

将表 1 中虚拟变量的值代入式(1),可得生长季内不同月份的线性回归模型:

表 1 虚拟变量的二进制值

Table 1 Binary values of dummy variables

月份	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
4	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	1

$$Y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 X & 4 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_2 + (\beta_1 + \beta_8) X & 5 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_3 + (\beta_1 + \beta_9) X & 6 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_4 + (\beta_1 + \beta_{10}) X & 7 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_5 + (\beta_1 + \beta_{11}) X & 8 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_6 + (\beta_1 + \beta_{12}) X & 9 \text{ 月} \\ \beta_0 + \beta_7 + (\beta_1 + \beta_{13}) X & 10 \text{ 月} \end{cases}$$

(2)

3.2 归一化植被指数与帕尔默干旱指数时间序列的相关性

如表 2 所示,不同植被类型的归一化植被指数与帕尔默干旱指数时间序列的相关系数随着月份的不同变化明显. 在 4 月和 10 月,各种植被类型的归一化植被指数和帕尔默干旱指数相关系数均很小, P 值均大于 5%,没有通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,而其他月份(除了 9 月的林地和草地)各种植被类型的相关系数均通过了显著性检验. 这表明生长期开始和结束阶段的干旱对植被长势的影响较小,植被生长期中间月份的干旱对植被长势影响较大.

表 2 老哈河流域内各种植被类型归一化植被指数与帕尔默干旱指数的相关系数

Table 2 Coefficients of correlation between NDVI and PDSI for different types of vegetation in Laohahe Basin

月份	林地		灌丛		草地		耕地	
	r	P	r	P	r	P	r	P
4	0.211	0.311	0.101	0.631	0.164	0.433	0.172	0.412
5	0.460	0.002	0.702	0.000	0.675	0.000	0.662	0.000
6	0.668	0.000	0.803	0.000	0.801	0.000	0.759	0.000
7	0.594	0.004	0.705	0.000	0.644	0.001	0.632	0.001
8	0.629	0.001	0.618	0.001	0.546	0.005	0.538	0.006
9	0.240	0.248	0.428	0.033	0.379	0.061	0.434	0.030
10	0.304	0.140	0.235	0.258	0.289	0.161	0.268	0.194

注: r 为相关系数.

通过对比不同植被类型间的相关系数可以发现,灌丛和草地的归一化植被指数和帕尔默干旱指数相关系数较高,耕地的归一化植被指数和帕尔默干旱指数相关系数次之,林地的归一化植被指数和帕尔默干旱指数相关系数较低. 这说明干旱对灌丛和草地的影响大于对林地的影响. 实际上,干旱对植被影响的差异主要

取决于2点:(a)植被的生长环境.老哈河流域林地主要分布在流域高海拔的源头区域,这些区域降水相对丰沛、蒸散发能力相对较小.由于降水不是限制植被生长的主要因素,因此老哈河流域林地受干旱的影响较小.(b)植被自身的特性.灌丛和草地的根系发达、深度较浅,对降水的响应敏感,因此受干旱的影响较大.

3.3 植被生长状态与水分关系的季节性

图1展示了各种植被类型归一化植被指数与帕尔默干旱指数相关系数季节变化及其与归一化植被指数年内变化的对比情况.归一化植被指数的年内变化曲线清楚地展示了植被生长过程,如开始生长,达到成熟和进入衰退.通过对比归一化植被指数和帕尔默干旱指数相关系数与归一化植被指数物候循环,可以解析植被对可利用水量变化的响应.由图1可知,各类植被的月平均归一化植被指数年内分配曲线是单峰的,最大值出现在8月,此时植被生长最为繁茂,而各植被类型的归一化植被指数与帕尔默干旱指数相关系数的最大值并未在此月出现,而是出现在6月.这表明6月是老哈河流域植被生长过程中对水分比较敏感的特殊时期,此时该区域植被正处于生长发育阶段,植物发育对可利用的水量十分敏感,因此在水分敏感期加强灌溉最有利于增加产量,并且过剩的水量对植株的反作用很小,不会造成减产.

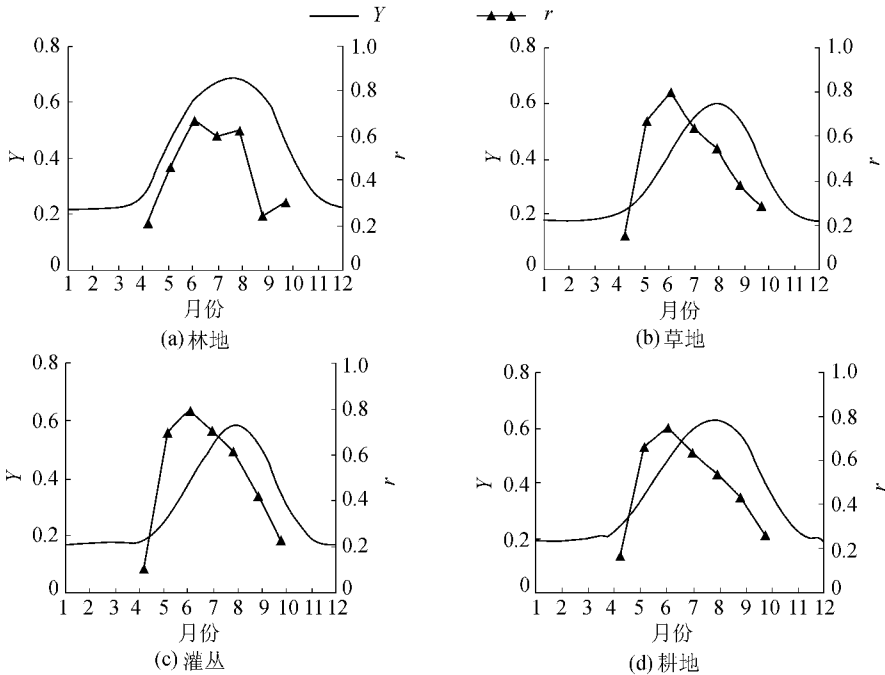


图1 归一化植被指数与帕尔默干旱指数相关系数的季节性变化以及与归一化植被指数年内变化的比较

Fig. 1 Comparison of seasonal variation of coefficient of correlation between NDVI and PDSI and inner-annual variation of NDVI

3.4 归一化植被指数与帕尔默干旱指数的定量关系

利用带虚拟变量的回归模型(式(1))分析林地、灌丛、草地和耕地归一化植被指数与帕尔默干旱指数的关系,采用决定性系数 R^2 来表示模型的拟合程度.该模型的模拟精度较高,4种植被类型归一化植被指数与帕尔默干旱指数的相关性显著,模型 P 均小于0.001, R^2 均大于0.9.以草地为例,给出回归分析结果(表3).在消除非显著性变量后,草地归一化植被指数与帕尔默干旱指数回归方程中剩余变量为 $X, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_2X, D_3X$.将表2中各剩余变量的回归系数代入式(2)得到草地在生长季节内每个月归一化植被指数与帕尔默干旱指数的线性回归方程如下:

$$Y = \begin{cases} 0.198 + 0.009X & 4 \text{ 月} \\ 0.279 + 0.009X & 5 \text{ 月} \\ 0.402 + 0.021X & 6 \text{ 月} \\ 0.538 + 0.019X & 7 \text{ 月} \\ 0.583 + 0.009X & 8 \text{ 月} \\ 0.522 + 0.009X & 9 \text{ 月} \\ 0.326 + 0.009X & 10 \text{ 月} \end{cases} \tag{3}$$

表 3 老哈河流域草地归一化植被指数与帕尔默干旱指数回归分析结果
Table 3 Regression analysis of NDVI and PDSI for grassland in Laohahe Basin

变量	回归系数	标准误差	<i>t</i>	<i>P</i>
截距	0.198	0.008	25.326	< 0.000 1
<i>X</i>	0.009	0.002	4.994	< 0.000 1
<i>D</i> ₁	0.081	0.011	7.369	< 0.000 1
<i>D</i> ₂	0.204	0.011	18.221	< 0.000 1
<i>D</i> ₃	0.340	0.011	30.464	< 0.000 1
<i>D</i> ₄	0.385	0.011	34.883	< 0.000 1
<i>D</i> ₅	0.324	0.011	29.374	< 0.000 1
<i>D</i> ₆	0.128	0.011	11.579	< 0.000 1
<i>D</i> ₂ <i>X</i>	0.012	0.004	2.702	0.008 0
<i>D</i> ₃ <i>X</i>	0.010	0.004	2.549	0.012 0

注： $F_{9,165} = 245.222, P < 0.001, R^2 = 0.930$.

由式(3)可以看出,带虚拟变量的回归模型反映了季节性虚拟变量与帕尔默干旱指数干旱指标之间的交互效应,该效应对变量 *X* (帕尔默干旱指数)的取值产生影响,使模型斜率和截距随月份产生变化,从而改变各月归一化植被指数与帕尔默干旱指数之间的相互关系.此外,老哈河流域 4 种植被回归方程的截距最大值均出现在 8 月,因为 8 月植被生长最茂盛,归一化植被指数值达到了最大.回归方程斜率的最大值均出现在 6 月,这是由于 6 月植被对水分条件最为敏感.

为了验证带虚拟变量的回归模型拟合归一化植被指数与帕尔默干旱指数关系的精度,以草地为例,计算了 2000—2001 年生长季节内的月归一化植被指数值.图 2 为 2000—2001 年草地生长季节的归一化植被指数模拟值与实测值的比较.可以看出,带虚拟变量的回归模型模拟的归一化植被指数值与实测值拟合较好,进一步说明带虚拟变量的回归模型能够较好地表达植被生长动态对干旱的响应关系.

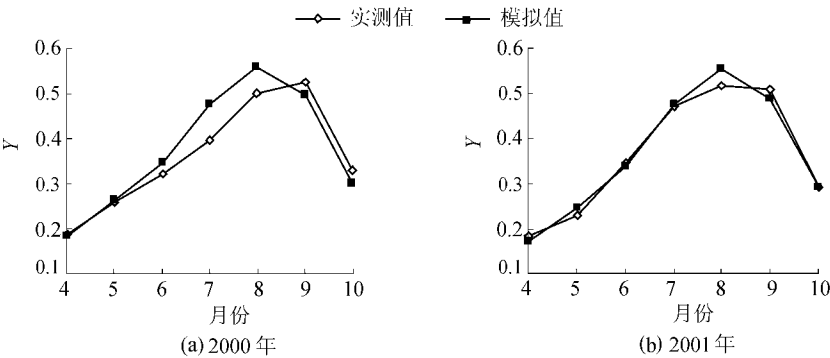


图 2 老哈河流域 2000—2001 年草地生长季归一化植被指数模拟值与实测值的比较
Fig. 2 Comparison of simulated and observed NDVI for grassland in Laohahe Basin during growth period from 2000 to 2001

4 结 论

- a. 在老哈河流域,归一化植被指数与帕尔默干旱指数时间序列的相关系数在植被生长期的开始和结束阶段较小,在植被生长期的中间月份较大.由于植被的生长环境和自身特性差异的影响,各类植被对干旱的响应不尽相同,干旱对老哈河流域灌丛和草地的影响大于对林地的影响.
- b. 通过对比归一化植被指数-帕尔默干旱指数相关系数与归一化植被指数物候循环发现,研究流域的水分敏感期出现在植被生长发育的 6 月,而不是植被最为茂盛的 8 月.这表明植被对干旱的响应依赖于植被的生长阶段,水分敏感期可利用的供水对植物生长发育的促进作用最为明显.
- c. 带虚拟变量的回归模型较为合理地考虑了季节性的影响,有利于阐明各种植被类型归一化植被指数与帕尔默干旱指数的关系.验证表明,该模型的模拟精度较高,因此在考虑季节影响的情况下,归一化植被指数可以用于监测老哈河流域的干旱状况.

参考文献:

- [1] DING Y H, LI Q P, DONG W J. A numerical simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in china [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 613-621.
- [2] KAZUHITO I, AKIRA K, YASUSHI Y. Global decadal changes in NDVI and its relationships to climate variables [C]//NELSON N R. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Sydney: IEEE, International Pub, 2001: 2937-2941.
- [3] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 770-778. (XIN Zhong-bao, XU Jiong-xin. Response of vegetation dynamics to climate change in Loess Plateau [J]. *Advances in Natural Science*, 2007, 17(6): 770-778. (in Chinese))
- [4] 李本纲, 陶澍. AVHRRNDVI 与气候因子的相关分析 [J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 898-902. (LI Ben-gang, TAO Shu. Correlation between AVHRRNDVI and climate factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 898-902. (in Chinese))
- [5] 刘晓帆, 任立良, 袁飞, 等. 老哈河流域 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系 [J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(1): 1-5. (LIU Xiao-fan, REN Li-liang, YUAN Fei, et al. Dynamic variation of NDVI in Laoha River Basin and its relationship with climatic factors [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2010, 38(1): 1-5. (in Chinese))
- [6] 张圣微, 雷玉平, 姚琴, 等. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响 [J]. *水资源保护*, 2010, 36(2): 39-44. (ZHANG Sheng-wei, LEI Yu-ping, YAO Qin, et al. Runoff response to land cover and climate change in Lasa River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 36(2): 39-44. (in Chinese))
- [7] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 2006, 51(20): 2429-2439. (MA Zhu-guo, FU Chong-bin. Basic facts of drying trends in North China at the periods of 1951-2004 [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2006, 51(20): 2429-2439. (in Chinese))
- [8] PALMER W C. *Meteorological Drought* [D]. Washington, D.C.: US Weather Bureau, 1965.
- [9] 范嘉泉, 郑剑非. 帕默尔气象干旱研究方法介绍 [J]. *气象科技*, 1984(1): 63-71. (FAN Jia-quan, ZHENG Jian-fei. Introduction of Palmer meteorological drought severity model [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1984(1): 63-71. (in Chinese))
- [10] 安顺清, 邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用 [J]. *气象*, 1985, 1(12): 17-19. (AN Shun-qing, XING Jiu-xing. modification and application of Palmer drought severity model [J]. *Meteorological Monthly*, 1985, 1(12): 17-19. (in Chinese))
- [11] 刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 等. 帕尔默旱度模式的进一步修正 [J]. *应用气象学报*, 2004, 15(2): 207-216. (LIU Wei-wei, AN Shun-qing, LIU Geng-shan, et al. The farther modification of Palmer Drought Severity Model [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(2): 207-216. (in Chinese))
- [12] 杨小利, 杨兴国. 甘肃黄土高原气象旱度模式研究 [J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(5): 30-36. (YANG Xiao-li, YANG Xing-guo. Research on meteorological drought severity model for Loess Plateau in Gansu [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(5): 30-36. (in Chinese))
- [13] MO X, LIU S, LIN Z, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 125-142.
- [14] ZHOU M C, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327: 151-173.
- [15] 刘晓帆, 任立良, 袁飞, 等. 双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性 [J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(2): 138-142. (LIU Xiao-fan, REN Li-liang, YUAN Fei, et al. Application of two-source potential evapotranspiration model in semiarid areas [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, 37(2): 138-142. (in Chinese))
- [16] SHUTTLEWORTH W J. *Evaporation, Handbook of Hydrology* [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [17] 胡春歧. 半干旱半湿润地区产流计算方法的研究 [C]//葛维亚. *水文情报预报学术交流会议论文选集*. 北京: 中国水利水电出版社, 1993: 57-62.
- [18] LIU Xiao-fan, REN Li-liang, YUAN Fei, et al. Quantifying the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2009, 13: 735-747.
- [19] LEI J, ALBERT J P. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 85-98.