

基于 NOAA NDVI 和 MSAVI 研究 中国北方植被生长季变化

王 宏 李晓兵* 李 霞 蔺 歌 符 娜

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

摘要 利用 1982 ~ 1999 年的 NOAA/AVHRR NDVI 和 MSAVI 指数监测了中国北方植被生长季变化规律 , 主要内容包括 : (1) 不同植被类型的生长季变化监测。提取植被的 1982 ~ 1999 年 NDVI 和 MSAVI 时间序列 , 利用阈值法和滑动平均法逐年估测植被类型的生长季的开始、结束日期及长度。对估测的生长季开始、结束时间和长度进行一次线性拟合 , 得到了 18a 中植被生长季的开始、结束日期和长度的线性变化趋势 ; (2) 不同区域的植被生长季变化监测。将中国北方 13 省、区按纬向划分为 32 ~ 36° N , 36 ~ 40° N , 40 ~ 44° N , 44 ~ 48° N , 48 ~ 52° N 等 5 个区域。基于最大变化斜率法估测了不同年份的生长季开始、结束和长度 ; (3) 研究区域植被生长季的空间变化监测。利用曲线拟合出 1982 ~ 1999 年像元对应的空间位置的植被平均生长季变化 , 然后讨论了多年平均的植被生长季的空间分异规律 , 并利用一次线性拟合分析了这 18a 的植被生长季的变化趋势。结果表明 , 部分植被类型生长季的开始日期提前 , 结束日期推迟 , 而生长季长度延长 , 提前或推迟的天数不一 , 如典型草原、荒漠草原、寒温带山地落叶针叶林。而一些植被类型的生长季并没有表现出这样的趋势 , 而是开始日期延迟或结束日期推迟 , 如温带落叶阔叶林。不同纬度带的植被生长季变化监测表明 , 大部分纬度带植被生长季开始日期都表现出不同程度的提前趋势 , 生长季结束日期表现出推迟的趋势 , 整个生长季长度表现出延长的趋势。中国北方植被生长季空间变化研究表明 , 青海、甘肃、陕南地区的植被生长季开始较早。新疆天山、东北北部、青海、甘肃的部分地区植被生长季结束较早。东北、青海、新疆的大部分地区的植被生长季有明显的延长趋势 , 整个研究区内有一部分地区的植被生长季长度表现出缩短的趋势。

关键词 : NDVI , MSAVI , 生长季开始日期 , 生长季结束日期 , 生长季长度 , 生长季变化趋势

文章编号 : 1000-0933 (2007) 02-0504-12 中图分类号 : Q143 , Q145 , Q958.1 文献标识码 : A

The variability of vegetation growing season in the northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999

WANG Hong , LI Xiao-Bing* , LI Xia , YING Ge , FU Na

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 2007 27 (2) 0504 ~ 0515.

Abstract : NDVI and MSAVI based on NOAA/AVHRR from 1982 to 1999 are used to monitor variable rules for the growing season of vegetation in northern China. The following , mainly , are included : (1) an estimation of the beginning , end and length of growing season for each type of vegetation with threshold method and moving average method ; the beginning , end and length of growing season of vegetation from 1982 to 1999 linearly fitted ; and finally , an analyzation of the linear trend

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目 (30670398) ; 国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (NCET-04-0149)

收稿日期 : 2005-11-25 ; 修订日期 : 2006-05-03

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 the National Natural Science Foundation of China (No. 30670398) ; Trans-Century Training Program Foundation for the Talents Ministry of Education of China (No. NECT-04-0149)

Received date : 2005-11-25 ; **Accepted date :** 2006-05-03

Biography : WANG Hong , Ph. D. candidate , mainly engaged in resources and environment remote sensing and ecosystem management.

of the beginning , end and length of growing season of vegetation. (2) the area in northern China is divided into 32 — 36° N 36 — 40° N 40 — 44° N 44 — 48° N 48 — 52° N zones in latitudinal direction. The beginning , end and length of growing season in different years and zones are estimated based on greatest changes of slope method , (3) growing season of vegetation in different spatial locations from 1982 to 1999 are fitted based on curves. Then , the average spatial difference rules of multi-year growing seasons are discussed in article. Results show that : (1) Beginning of growing season of most types of vegetation , such as typical steppe , desert steppe and temperate mountain deciduous coniferous forest , has advanced ; end has postponed ; length has prolonged ; and advancing and postponing days are different. Moreover , the beginning of the growing season of less types of vegetation , such as temperate deciduous broadleaf forest , doesn't indicate such a trend , but its beginning has postponed or its end has advanced. (2) Beginning of growing season of desert and non-desert vegetation in most latitude zones has an exhibition of the trend of the advance , as well as the trend of the postponed , and length has prolonged. (3) There is early start to the growing season of vegetation in Qinghai , Gansu , southern area of Shannxi and an early end to the growing season of vegetation in Tian mountain of Xinjiang , northern area of Dongbei , Qinghai , Gansu. The growing season of most areas in Dongbei , Qinghai , Xinjiang shows a prolonging trend , however , that of some areas show a shortening trend.

Key Words : NDVI ; MSAVI ; beginning of growing season ; end of growing season ; length of growing season ; variability of growing season of vegetation

植被是陆地生态系统的主体 , 它不仅在全球物质与能量循环中起着重要作用 , 而且在调节全球碳平衡、减缓大气中的 CO₂ 等温室气体浓度上升以及维护全球气候稳定等方面具有不可替代的作用^[1]。植被对于全球变化的响应具有显著的地域分异和表现出不同的时间尺度。因此 , 植被对全球变化响应越来越受到关注^[2]。

许多学者基于 NDVI 数据 , 利用不同的方法对单种植物和大尺度上不同种植物的生长季进行监测 , 比较常用的方法有 NDVI 阈值法^[3-5]、平滑移动平均 (smoothed moving average) 方法^[6-7]。还有的学者提出 NDVI 中点法^[8]、植物物候期的频率分布型与 NDVI 相结合确定植被生长季^[9,10]、最大变化斜率法^[11]。从这些研究可以看出 , 许多研究集中在植被生长季的年际变化和区域空间变化 , 同时某些研究也简单分析了引起植被生长季变化的主要原因 , 部分研究者认为全球变暖引起植物生长季提前 , 秋季物候期推迟 , 生长季延长^[12-14] , 而 Eabta 等^[15]认为西伯利亚在 20 世纪 80 年代 , 植被生长季延长。生长季开始的变化与温度异常呈负相关 , 1987 年温度降低 , 因此生长季开始推迟 , 1984 ~ 1985 年温度升高 , 从而生长季提前。因此 , 在以前研究工作的基础上 , 为了阐明中国北方植被生长季的变化情况 , 采用不同的方法从以下几个方面监测植被生长季的变化 : 中国北方不同植被类型生长季的年际变化 ; 中国北方不同纬度带植被生长季的年际变化 ; 中国北方植被生长季的空间变化规律。

1 研究区

选择我国北方 13 省、区 (黑龙江、辽宁、吉林、北京、天津、山西、河北、内蒙古、甘肃、陕西、青海、宁夏、新疆) 为研究区。研究区内大兴安岭北部区属于北温带 , 其他大部分地区均处于中温带。气候区自东向西依次为湿润气候区 , 亚湿润气候区 , 亚干旱气候区 , 干旱气候区。东北平原和黄土高原的年降水量在 400 ~ 800mm , 内蒙古高原及西北内陆地区的天山、阿尔泰山区域的年降水量在 200 ~ 400mm , 新疆地区的年降水量在 200mm 以下。植被主要包括东北半湿润森林/森林草原和西北干旱/半干旱荒漠和草原两个大区。东北半湿润森林/森林草原大区可以分为大兴安岭北段落叶针叶林区、东北东部山地针阔混交林区、东北平原及大兴安岭东坡森林草原区。西北干旱/半干旱荒漠和草原大区包括了温带半湿润/半干旱森林草原灌丛草原 (南部) 区、温带半干旱典型草原区、温带干旱荒漠草原/半荒漠区、温带干旱典型荒漠区 (含山地) 、温带极干旱荒漠区。

2 数据来源及处理

2.1 数据来源

研究所用的遥感数据为 NOAA/AVHRR 第 1、2 通道及 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 $8\text{km} \times 8\text{km}$,时间分辨率为旬,时间跨度为 1982 年 1 月~1999 年 12 月。每旬的 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^[6]。植被类型参考 2000 年中国土地覆盖分类研究结果^[24]。植被物候期实测数据是从锡林浩特牧业气象站获得的植物返青期观测数据。

2.2 数据处理

2.2.1 MSAVI 指数构建

实验证明,NDVI 对土壤背景的变化较为敏感。植物覆盖度在 25%~80%,NDVI 值随植被量呈线性增加;当植物覆盖度大于 80%时,NDVI 对植被检测灵敏度下降。当植物覆盖度小于 15%时,数值高于裸土的 NDVI 值^[7]。因此,土壤背景对 NDVI 值有较大的影响。为了研究植被覆盖较少的荒漠地区植被生长季的变化,必须利用较好的消除了土壤背景影响的植被指数进行监测,从而,选用 MSAVI^[23]作为研究荒漠的植被指数。

2.2.2 NDVI 和 MSAVI 影像值平滑处理

尽管最大值合成法能消除一部分云、大气、太阳高度角等的部分干扰,但云和大气对获取的遥感影像的影像依然很大,它能降低 NDVI 值,为了降低云和大气对 NDVI 时间序列的影响,必须对 NDVI 时间序列进行平滑。所采用的方法为 Savitzky-Golay 滤波法^[8]。

3 研究方法

3.1 不同植被类型生长季的年际变化研究方法

基于 NOAA/NDVI 数据估计植被生长季的研究表明,用气候数据对生长季的开始的估计和 NDVI 值之间有很大的相关性。当 NDVI 值低于某一阈值时,植被生长季不可能开始,当 NDVI 值高于此阈值时,可以认为植被的生长季开始^[9]。此阈值为植被生长季的开始或结束的阈值。

为了避免确定阈值的随意性,本研究采用野外监测数据与 NDVI 和 MSAVI 数据相结合的方法确定生长季开始和结束的阈值。具体的实现方法是首先用不同植被类型的野外监测数据(如草原的返青日期和枯黄日期,森林树叶的萌芽、叶变色日期)在 NDVI 曲线上确定与植被生长季开始和结束日期所对应的 NDVI 阈值。以有限的正常年份生长季开始、结束日期确定的 NDVI 阈值,把确定的 NDVI 阈值的平均值作为植被类型 18a 的 NDVI 阈值。

在实测数据缺少的情况下,在 NDVI 时间序列变化曲线上确定生长季开始、结束阈值非常困难,因此,为了研究生长季的变化,采用滑动平均法监测实测数据较少地区的植被类型生长季,滑动平均值法把 NDVI 曲线突然升高时,当作植被的重要光合活动开始的标志。它是用移动平均方法提取 NDVI 序列曲线,然后比较确定与既定趋势偏离的方法^[6]。

因为研究区农业植被受人类活动影响较大,其生长季有较高的变异性,因此,农业植被不包括本研究中。而选择典型的几种自然植被进行研究:寒温带山地落叶针叶林、温带落叶阔叶林、荒漠草原、典型草原、草甸草原、温带草本沼泽。由于温带落叶阔叶林和草原的分布自然植被的分布跨越了不同类型的气候区域,因此,只研究分布在中国东北的温带落叶阔叶林。将草原按地域的不同进行了划分,本研究主要集中在内蒙的草原类型。

3.2 中国北方不同纬度带植被生长季的年际变化研究方法

把研究区按纬向划分为 $32 \sim 36^\circ\text{N}$ (区域 I), $36 \sim 40^\circ\text{N}$ (区域 II), $40 \sim 44^\circ\text{N}$ (区域 III), $44 \sim 48^\circ\text{N}$ (区域 IV), $48 \sim 52^\circ\text{N}$ (区域 V) 5 个区域。由于不同的区域中既有植被盖度高的草原、森林等植被类型,也有植被盖

度低的荒漠,因此,在研究每个区域的植被生长季变化时,分别研究荒漠和非荒漠植被类型(除荒漠植被外的其它植被类型)在此区域中的生长季。即基于 MSAVI 监测区域中荒漠的生长季变化,基于 NDVI 监测区域中非荒漠植被类型生长季的变化。

利用最大斜率法监测不同区域的植被生长季, Yu 等^[11]提出利用最大变化斜率方法基于 NDVI 数据计算中亚东部植物返青期。而 NDVI 最大变化斜率所对应的时间必须在植物生长期内(本研究区的植被生长期大约在 3 月下旬~10 月上旬)。植被生长季结束日期与开始日期的计算方法类似。

3.3 中国北方植被生长季的空间变化研究方法

对不同植被类型的植物物候的研究,只能得到反映每种植被类型年内或年际物候期变化的生长季开始日期、结束日期和长度,不能反映出植物物候的空间变化规律。而纬度区域上的植物物候研究,可以得到区域上植被生长季的变化趋势,但反映的是人为划分的区域空间分异规律,不能反映由于气候或地形等因子影响的自然分异规律。而基于曲线拟合每个像元所对应地区的生长季时空分异规律,可以弥补上述的不足,因此,本章利用曲线拟合了中国北方植被生长季,并讨论了植被生长季的时空分异规律。

利用 NDVI 拟合植被生长季的过程是:首先将时间序列划分成逐渐增加和减小的时间序列,即把平滑后的每年 36 张 NDVI 序列影像分成两部分,前一段是逐渐增加的时间序列,后一段是逐渐减小的时间序列。然后利用曲线基于每个像元拟合每段的植物物候期,所用拟合曲线的函数公式如下^[20~22]:

$$y(x) = a(x/b)^p \exp[q(b^2 - x^2)] \quad (1)$$

式中, q a b p 是 4 个估计参数, x 是从 1 月份开始算起的天数, y 是时间 x 的 NDVI 值, p 是时间序列中 NDVI 最大值。 a b 系数具有的物理意义: a 是春季植被变绿前的 NDVI, b 是春季植被变绿的日期。如果拟合秋季植物的黄枯期,把后半段的时间序列反序拟合,式中参数 b 就是植物的黄枯期。实际上,上面的函数是威布尔分布的一种特殊分布函数^[22]。这个方法最初用来基于光谱反射率数据估计农作物的生长期,后来为了估测农作物分布范围,又成功的将其用于对 Landsat 卫星数据分类^[21 22]。

拟合出 1982~1999 年中国北方植被生长季开始和结束日期。用生长季结束日期减去开始日期所得到的天数就是植被生长季的长度。为了研究 18a 植被物候期的变化趋势,分别拟合 1982~1999 年植被的每年物候期,再对 18a 的物候期进行一次线性拟合,得到植物物候期的变化趋势图,荒漠植被的生长季利用 MSAVI 指数进行拟合,拟合的方法和过程与基于 NDVI 拟合非荒漠植被生长季方法相同。

4 结果分析

4.1 不同植被类型生长季的年际变化

4.1.1 NDVI、MSAVI 阈值和滑动平均时间间隔

利用野外监测数据与 NDVI 和 MSAVI 数据相结合的方法确定生长季开始和结束的阈值,几种植被类型的 NDVI、MSAVI 阈值表 1 给出。

表 1 不同植被类型的生长季开始、结束的 NDVI 或 MSAVI 阈值

Table 1 NDVI and MSAVI threshold of beginning, end of growing season for vegetation type

| 植被类型 Vegetation type | 典型草原 (NDVI) Typical steppe (NDVI) | 草甸草原 (NDVI) Meadow steppe (NDVI) | 荒漠草原 (MSAVI) Desert steppe (NDVI) | 温带草本沼泽 (NDVI) Herbaceous swamp (NDVI) |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 生长季开始阈值 Threshold of beginning of growing season | 0.15 | 0.23 | 0.2 | 0.31 |
| 生长季结束阈值 Threshold of end of growing season | 0.16 | 0.15 | 0.2 | 0.18 |

由于缺少寒温带山地落叶针叶林和温带落叶阔叶林的展叶始期和叶变色始期实测数据,因此,应用滑动平均法估测展叶始期和叶变色始期,本研究中,把 2~15 中每个数值作为滑动平均时间间隔,分别计算滑动平

均时间序列,通过滑动平均值时间曲线与平滑时间序列曲线的交点,确定基于不同滑动平均时间间隔的森林生长季参数。通过比较分析这些生长季参数,得到不同植被类型的最优滑动平均时间间隔。这两种植被类型的最优滑动平均时间间隔均为2。

4.1.2 植被类型生长季及其年际变化

(1)生长季开始、结束日期及变化 对1982~1999年的草原返青期和黄枯期分别线性拟合,得到草原的18a物候期变化趋势(图1)。典型草原1982~1999年的牧草返青期提前(11±4)d,黄枯期推迟(7±3)d;草甸草原1982~1999年的牧草返青期提前(9±3)d,黄枯期提前(8±3)d;荒漠草原1982~1999年的草本返青期提前(14±5)d,黄枯期推迟(12±4)d。对1982~1999年的森林展叶始期和叶变色始期分别进行线性拟合,得到森林的18a物候期变化趋势(图1)。从图中可以看出,寒温带山地落叶针林1982~1999年的展叶开始日期提前(3±1)d,叶变色开始日期推迟(12±5)d;温带落叶阔叶林1982~1999年的展叶开始日期推迟(6±3)d,叶变色开始日期推迟(2±1)d;温带草本沼泽1982~1999年的返青期提前(4±1)d,黄枯期几乎没有变化。

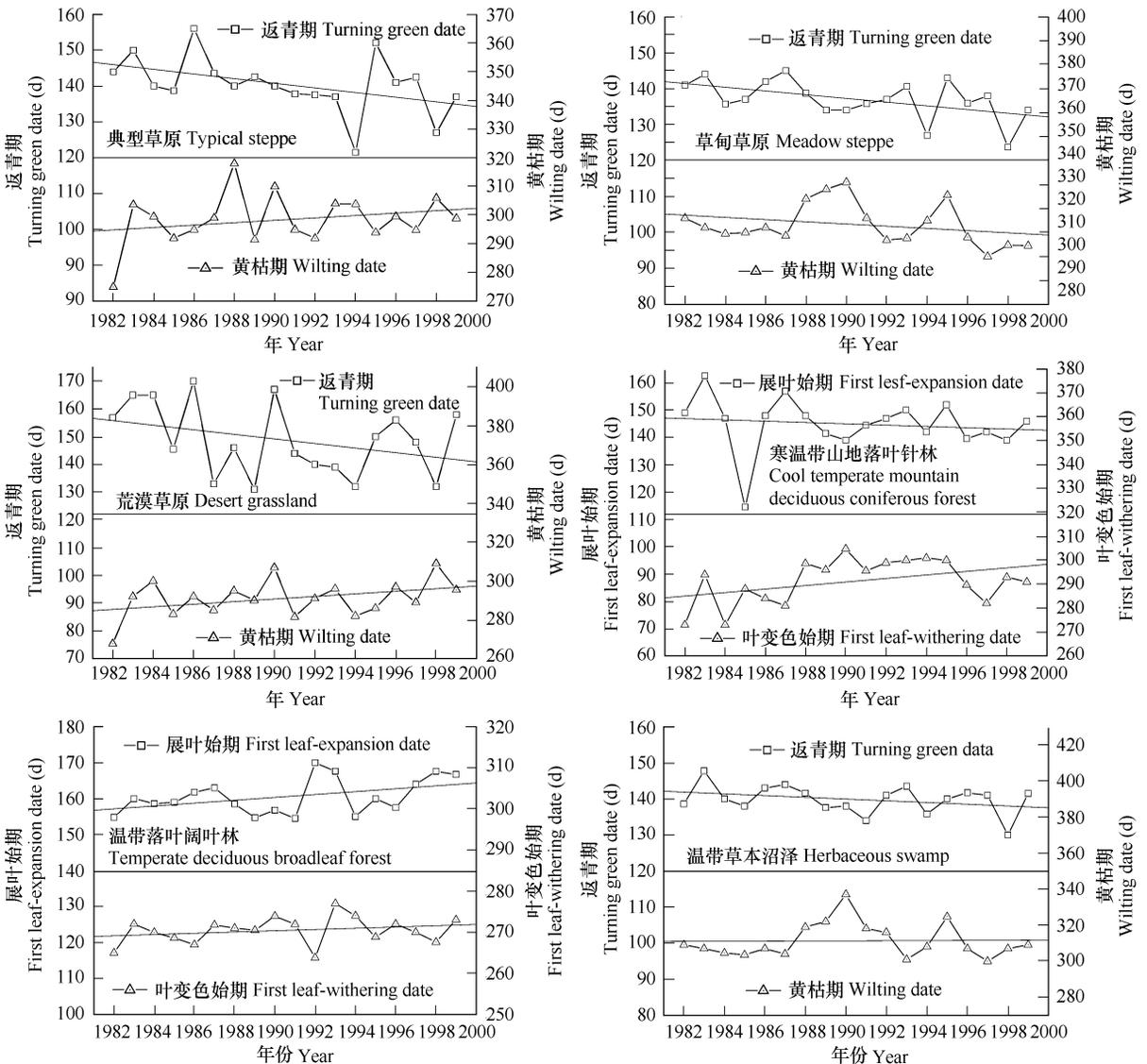


图1 植被物候期及其年际变化

Fig. 1 The phenological phase of vegetation and its variability

(2)生长季长度及变化 对1982~1999年的植被类型的生长季长度进行线性拟合,生长季长度的变化

趋势如图 2 所示,典型草原生长季延长 (13 ± 6)d,草甸草原生长季长度变化不大,荒漠草原生长季延长 (24 ± 9)d,寒温带山地落叶针林生长季延长 (16 ± 6)d,温带落叶阔叶林生长季缩短 (4 ± 1)d,温带草本沼泽生长季延长 (4 ± 2)d。

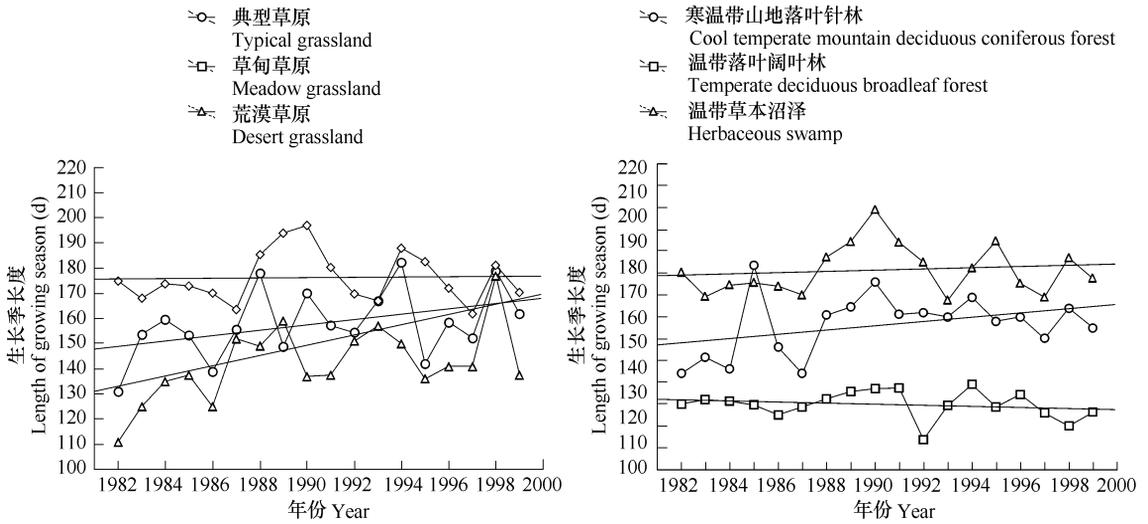


图 2 植被生长季长度及其年际变化

Fig. 2 Length of growing season and its variability

4.1.3 植被生长季监测结果验证

采用锡林浩特牧业气象站实地观测的大针茅 (*Stipa grandis*)返青期评价利用阈值法和估测的 1991 ~ 1999 年典型草原的返青期。实测大针茅的返青期如图 3a 所示,1992 ~ 1994 年针茅在 4 月上旬 (120 ~ 130d)返青,1991、1995、1997 三年的返青期为 4 月中旬 (130 ~ 140d),在 1996、1998、1999 等 3a 中,针茅的返青期较晚,大约在 4 月下旬 (140 ~ 150d)返青。利用阈值法估计内蒙典型草原返青期如图 3a,在 1991 ~ 1999 年中,阈值法估测的返青期最晚的年份为 1995 年,典型草原大约在 5 月初 (152d)返青,返青期最早的年份在 1998 年,返青日期大约为 4 月初 (127d)。1991 ~ 1999 年观测值与估测值的差值如图 3b,阈值法估测的 1993、1995 年返青期与实测结果差值最大,估测结果延迟,延迟的日期为 15d,阈值法估测的 1991 典型草原返青期与实测结果相差最小,差值为 -0.2d,在 1991、1994、1996、1997、1999 年中,阈值法估测的结果误差在 10d 之内。估测值与实测值的差值取绝对值然后计算平均值,为 8.9d。

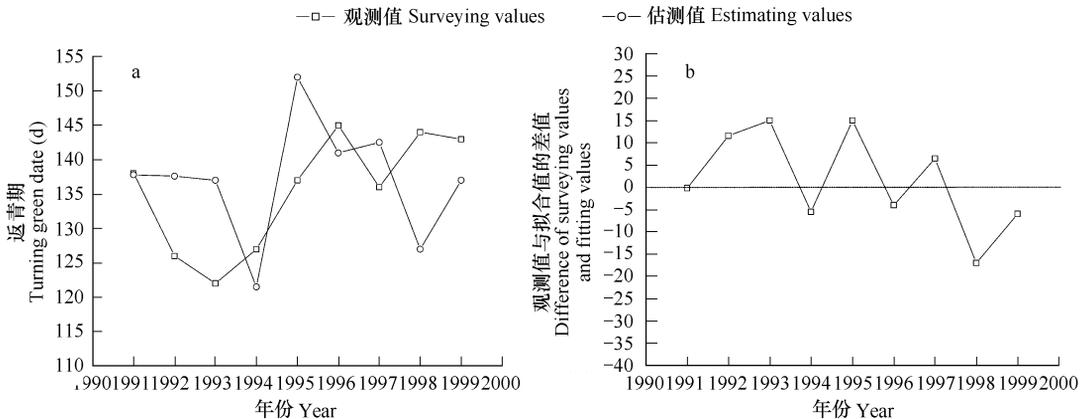


图 3 1991 ~ 1999 年典型草原返青期的观测值与估测值

Fig. 3 The difference of surveying values and estimating values of turning green date of typical steppe

a 观测值与估测值 Surveying values and fitting values, b 差值 Difference from surveying values and fitting values

对 1991 ~ 1999 年锡林浩特大针茅返青期观测值和基于阈值法估测的典型草原返青期分别作一次线性拟合。如图 4 所示, 1991 ~ 1999 年针茅返青期推迟, 推迟的时间大约为 (15 ± 5) d, 基于阈值法估测的典型草原返青期提前日期小于 2d。

4.2 中国北方不同纬度带植被生长季的年际变化

根据基于 NDVI 阈值研究的结果, 区域 I 的主要植被类型为温带山地落叶针叶林和草甸草原, 因此, 最大斜率变化所对应的 NDVI 值必须大于 0.2。区域 II 的主要植被类型为典型草原和草甸草原, 温带草本沼泽, 因此, 最大斜率变化所对应的 NDVI 值必须大于 0.15。区域 III 的主要植被类型有温带落叶灌丛与矮林、典型草原、高山草原, 最大斜率变化所对应的 NDVI 值必须大于 0.16。区域 IV 的主要植被类型有温带落叶灌丛与矮林、高寒草原、高寒草甸、落叶阔叶林灌丛、矮林 + 温带典型草原, 最大斜率变化所对应的 NDVI 值必须大于 0.1。区域 V 的主要植被类型有温带落叶灌丛与矮林, 高寒草甸, 最大斜率变化所对应的 NDVI 值必须大于 0.16。

4.2.1 不同区域植被生长季的开始和结束日期及其变化趋势

1982 ~ 1999 年的不同区域非荒漠植被生长季开始日期和结束日期如图 5, 分别对 18a 的生长季开始日期和结束日期进行一次线性拟合, 从而得出, 区域 I 1982 ~ 1999 年的植被生长季开始和结束日期变化不大; 区域 II 1982 ~ 1999 年的植被生长季开始提前 (11 ± 4) d, 植被生长季结束日期变化小于 2d; 区域 III 1982 ~ 1999 年的植被生长季开始提前 (5 ± 2) d, 植被生长季结束提前 (5 ± 2) d; 区域 IV 1982 ~ 1999 年的植被生长季开始提前 (14 ± 6) d, 植被生长季结束推迟 (15 ± 6) d; 区域 V 1982 ~ 1999 年的植被生长季开始提前 (20 ± 8) d, 植被生长季结束推迟 (19 ± 7) d。

4.2.2 不同区域植被生长季长度及其变化趋势

从不同区域植被生长季长度的变化趋势 (图 6) 可以看出, 区域 I 1982 ~ 1999 年的植被生长季长度基本无变化。区域 II 1982 ~ 1999 年的植被生长季长度延长 (10 ± 4) d; 区域 III 1982 ~ 1999 年的植被生长季长度缩短日期小于 2d; 区域 IV 1982 ~ 1999 年的植被生长季长度延长 (22 ± 8) d; 区域 V 1982 ~ 1999 年的植被生长季长度延长 (4 ± 2) d。

4.3 中国北方植被生长季的空间变化

4.3.1 平均生长季开始日期及其变化趋势

因为多年的 NDVI 平均值可以反映植被多年的平均生长状况, 因此, 为了研究 1982 ~ 1999 年中国北方的平均物候期, 把 18a 的 NDVI 影像按月平均, 得到 36 张多年平均意义上的数字影像, 然后拟合出植被生长季开始日期 (图 7a)。从而可以得到, 青海、甘肃、陕南地区的植被生长季开始较早, 大约 3 月上旬 ~ 下旬 (100 ~ 110d), 东北、华北和内蒙中部地区的植被生长季大约在 3 月下旬 ~ 4 月上旬 (110 ~ 130d) 开始。还可以看出, 锡林郭勒草原的大部分地区在 4 月底 (140 ~ 150d)、5 月初 (150 ~ 160d) 返青, 相当一部分地区在 4 月初 (120 ~ 130d) 返青, 有很少的一部分地区在 4 月中旬 (130 ~ 140d) 返青。线性拟合得到的 18a 中国北方植被生长季开始日期变化趋势如图 7b ($-25 \sim 0$ 表示生长季开始提前的天数, $0 \sim 25$ 表示生长季开始推迟的天数) 所示, 东北部分地区、陕西南部、新疆的部分地区的植被生长季提前大约 10d 左右, 辽东半岛大部分地区的生长季推迟。锡林郭勒草原大部分地区的返青期延迟, 其中, 有极少部分地区的延迟时间集中在 20 ~ 25d, 大多数地区延迟时间集中在 10 ~ 20d, 这部分地区主要在锡林郭勒草原的西南部。少部分地区的牧草返青期表现出

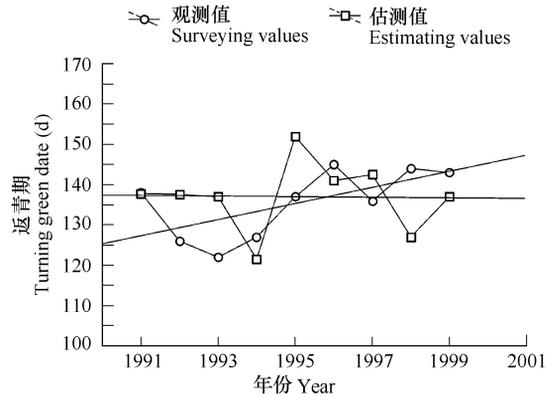


图 4 1991 ~ 1999 年典型草原返青期的观测值与估测值的线性变化趋势

Fig. 4 Linear trend of surveying values and estimating values of turning green date of typical steppe from 1991 to 1999

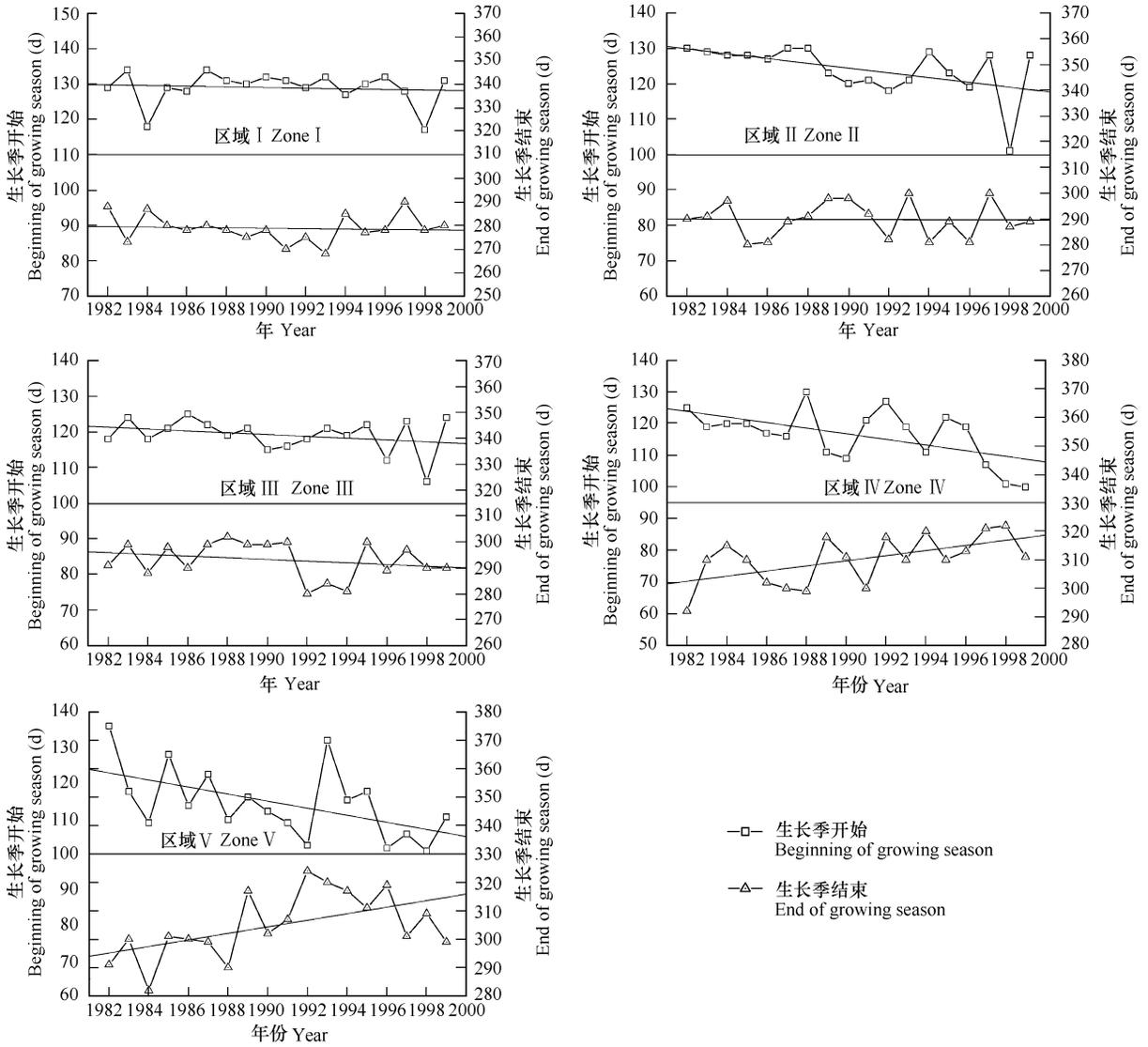


图 5 不同区域植被生长季的开始和结束日期及其变化趋势

Fig. 5 Beginning and end of growing season of vegetation in different zones and its variability

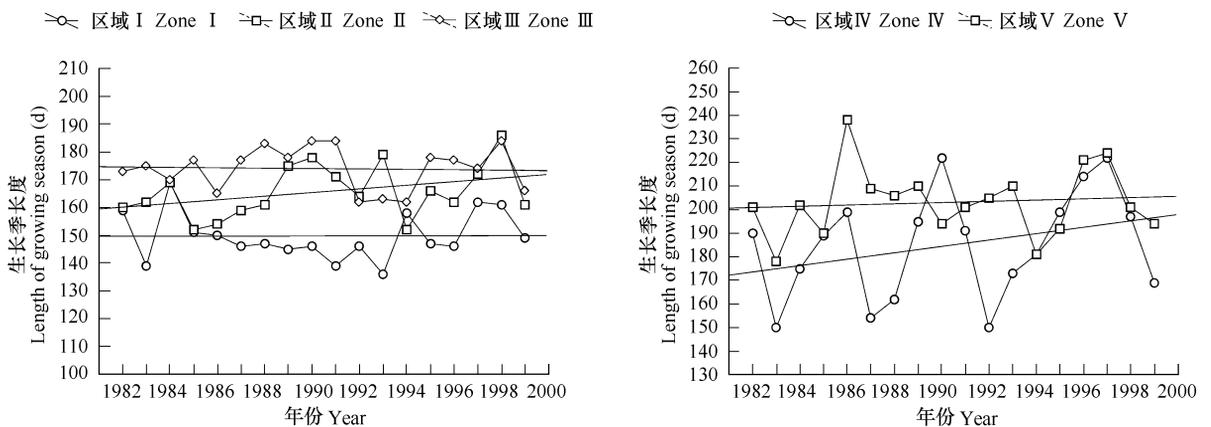


图 6 不同区域的植被生长季长度及其变化趋势

Fig. 6 Length of growing season of vegetation in different zones and its variability

接图789彩图

了提前的趋势,返青期提前日期小于 10d。

4.3.2 平均生长季结束日期及其变化趋势

平均 1982 ~ 1999 年 NDVI 影像,基于像元模拟中国北方植被生长季的结束日期。从图 8a 可以看出,新疆天山、东北北部、青海、甘肃的部分地区植被生长季结束较早,大约为 8 月底 ~ 9 月初 (260 ~ 270d),华北地区植被生长季在 9 月上中旬 (270 ~ 280d) 结束,东北、青海和陕西南部地区的植被生长季大多在 9 月下旬 ~ 10 月初 (280 ~ 300d) 结束,新疆部分地区的植被和内蒙古典型草原区的植被生长季结束较晚,大约在 10 月后。进一步分析得知,锡林郭勒典型草原的平均黄枯期大约在 8 月底 ~ 10 月初 (260 ~ 310d),整个锡林郭勒盟的 2/3 以上地区的草原在 10 月上旬 (300 ~ 310d) 枯黄,锡林郭盟的西南部不到 1/3 的地区在 8 月下旬 (260 ~ 270d) 枯黄,极少地区的牧草在 9 月初 ~ 9 月底 (270 ~ 300d) 枯黄。从整个模拟的结果来看,较好的表现出了典型草原黄枯期的变化格局。线性拟合得到的 18a 中国北方植被生长季结束日期的变化趋势如图 8b (-25 ~ 0 表示生长季结束提前的天数,0 ~ 25 表示生长季结束推迟的天数)所示,中国北方大部分地区植被生长季结束日期推迟,推迟时间长度介于 10 ~ 20d 之间,也有的地区植被生长季结束日期提前,如陕西的植被、内蒙古荒漠草原、新疆的高山草原等。锡林郭勒盟西南地区的黄枯期提前趋势最大。中部有些地区牧草枯黄提前,而有些地区牧草枯黄延迟,主要变化范围大约在 -10 ~ 10d 之间。

4.3.3 平均生长季长度及其变化趋势

中国北方植被的植被生长季结束日期减去开始日期得到整个研究区的生长季长度 (图 9a)。从整个区域看,大部分地区的生长季长度介于 140 ~ 180d 之间,内蒙古的荒漠草原、青海和甘肃的西北部植被、新疆的南部植被 18a 平均生长季较短,大约在 100 ~ 140d 之间。锡林郭勒盟大部分地区的生长季长度在 170 ~ 190d 之间,西南的少部分地区的生长季大约在 120 ~ 160d 之间,极少部分地区的生长季长度在 100 ~ 120d 之间,此区域生长季长度的变化格局为西南地区最短,中部地区最长。线性拟合得到的 18a 生长季长度变异性 (图 9b, -25 ~ 0 表示生长季长度缩短的天数,0 ~ 25d 表示生长季长度延长的天数),可以得到,东北、青海、新疆的大部分地区的植被生长季有明显的延长趋势,整个研究区内有一部分地区的植被生长季长度也表现出缩短的趋势。锡林郭勒部分地区的生长季长度增加,增加的日期主要集中在 10 ~ 20d,而有一部分地区的生长季长度缩短,缩短的日期主要集中在 20 ~ 25d。

4.3.4 拟合结果精度评价

采用锡林浩特气象站的野外观测羊草 (*Leymus chinensis*) 返青日期评价基于遥感数据模拟的锡林浩特植物返青日期的精度,锡林浩特气象站的地理位置为 N43°57', E116°40', 观测值如图 (10a) 所示,从 1991 ~ 1999 年,羊草大部分时间在 4 月底返青,而特殊年份的返青日期在 4 月上旬,有 4a 的返青期在 4 月中旬,返青期在 4 月下旬的有 5a。从图 10a 可以得到估测值,在这 9a 中,1a 牧草在 4 月上旬返青,3a 牧草在 4 月中旬返青,

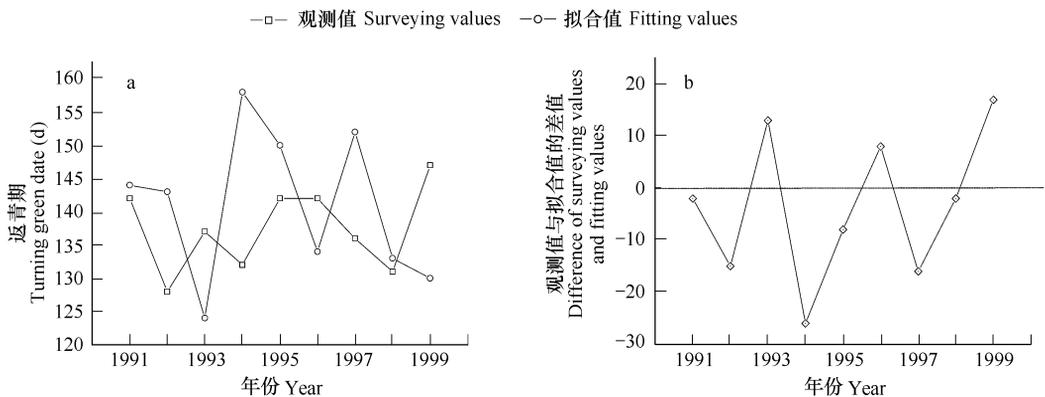


图 10 1991 ~ 1999 年锡林浩特牧草返青期观测值与拟合值的差值

Fig. 10 The difference of surveying values and fitting values of turning green date of meadow in Xilinhaote from 1991 to 1999

a 观测值和拟合值 surveying values and fitting values ; b 两者差值 difference from surveying values and fitting values

有 2a 牧草在 4 月下旬返青,有 2a 牧草在 5 月上旬返青。1991 ~ 1999 年观测值与估测值的差值如图 10b、9a 的差值平均值为 -3.4d,观测值与估测值相差最大的年份是 1994 年,估测值比观测值多了 26d,1997、1999 年拟合的结果也不是很好,与观测值差值分别 16、-17d。拟合结果最好的是 1991 年和 1998 年,两年的估测值均大于观测值,与观测值相差 2d。

5 结论和讨论

5.1 结论

(1)利用 1982 ~ 1999 年 NDVI 和 MSAVI 时间序列,基于阈值法和滑动平均法估测的生长季开始和结束的结果表明,部分植被类型生长季的开始日期提前,结束日期推迟,而生长季长度延长,提前或推迟的天数不一,如典型草原、荒漠草原、寒温带山地落叶针叶林。而一些植被类型的生长季并没有表现出这样的趋势,而是开始日期延迟或结束日期推迟,如温带落叶阔叶林。从而可以看出,与 18a 年来全球变化对我国大部分植被的影响主要是生长季提前的研究结果相一致^[25]。

(2)不同纬度带的植被生长季变化监测表明,大部分纬度带植被生长季开始日期都表现出不同程度的提前趋势,生长季结束日期表现出推迟的趋势,整个生长季长度表现出延长的趋势。符合部分研究者得到全球变暖引起植物生长季提前,秋季物候期推迟,生长季延长^[12~14,25]的结论。

(3)1982 ~ 1999 年的平均生长季开始日期及其变化趋势研究表明,青海、甘肃、陕南地区的植被生长季开始较早。东北部分地区、陕西南部、新疆的部分地区的植被生长季提前,辽东半岛大部分地区的生长季推迟。平均生长季结束日期及其变化趋势研究表明,新疆天山、东北北部、青海、甘肃的部分地区植被生长季结束较早,新疆部分地区的植被和内蒙古典型草原区的植被生长季结束较晚。华北地区的植被生长季开始与结束日期与温刚等^[26]研究结果相比较,华北地区植被生长季开始复苏,进入生长状态的日期与已有研究一致,但生长季结束日期比已有研究结果有所提前。线性拟合得到的 18a 中国北方植被生长季结束日期的变化趋势,中国北方大部分地区植被生长季结束日期推迟,也有的地区植被生长季结束日期提前,如陕西的植被、内蒙荒漠草原、新疆的高山草原等。平均生长季长度及其变化趋势研究表明,从整个区域看,大部分地区的生长季长度介于 140 ~ 180d 之间,内蒙古的荒漠草原、青海和甘肃的西北部植被、新疆的南部植被 18a 平均生长季较短。东北、青海、新疆的大部分地区的植被生长季有明显的延长趋势,究其原因,一方面,气候变暖使植物的生长季延长;另一方面,受大气 CO₂ 浓度的上升、氮 (N)、磷 (P) 沉降的影响,植被活动在季节变化中的振幅加大^[25]。研究区内有一部分地区的植被生长季长度也表现出缩短的趋势,其原因是由于气温和降水条件的影响,使得植被生长季结束日期提前,从而植被生长季长度呈现出缩短的趋势。

5.2 讨论

(1)在利用阈值估测植被类型的生长季存在几个问题:在时间序列曲线上阈值的大小不易确定,如果只根据曲线变化趋势确定阈值,估测的结果就会产生很大的误差,尤其在监测森林的物候期时误差较大。为了提高估测的精度,利用野外实测物候数据来做辅助数据,确定在 NDVI 或 MSAVI 序列曲线上对应的值,估测的结果较为准确,但在野外实测数据缺少的情况下,基于阈值估测生长季就会带来很大的困难。

(2)基于曲线拟合的生长季结果中出现了一些明显的错误值,这些值与植物物候期实测值相差较大,其主要原因是 NDVI 或 MSAVI 时间序列曲线起伏变化较大,从而降低了拟合精度,引起了拟合值与实测值有较大的偏差。为了提高拟合精度,在拟合时设置一些限制条件,如,在中国北方植被生长季开始日期时,只拟合 3 月下旬 ~ 6 月上旬的数据,其余数据不参与拟合。

References :

- [1] Fang X Q, Yu W H. Progress in the studies on the phenological responding to global warming. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (5): 714 - 719.
- [2] Cramer W P, Leemans R. Assessing impacts of climate change on vegetation using climate classification systems. In: Solomon A M, Shugart H H eds. *Vegetation Dynamics and Global Change*. London: Chapman and Hall, 1993. 190 - 217.

- [3] Fischer A. A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48 :220—230.
- [4] Markon C J, Fleming M D, Binnian E F. Characteristics of vegetation phenology over the Alaskan landscape using AVHRR time-series data. *Polar Record*, 1995, 31 :179—190.
- [5] Justice C O, Townshend J R G, Holben B N, *et al.* Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6, 1271—1318.
- [6] Reed B C, Brown J F, VanderZee D, *et al.* Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5 :703—714.
- [7] Li X B, Chen Y H, Fan Y D, *et al.* Detecting inter-annual variations of vegetation growth based on satellite-sensed vegetation index data from 1983 to 1999. *Proceedings of IGARSS*, 2003, 5 :3263—3265.
- [8] Schwartz M D, Reed B C, White M A. Assessing satellite-derived start-of-season (SOS) measures in the Conterminous USA. *International Journal of Climatology*, 2002, 22 (14) :1793—1805.
- [9] Chen X, Tan Z J, Schwartz M D, *et al.* Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China. *International Journal of Biometeorol*, 2000, 44 :97—101.
- [10] Chen X, Xu C X, Tan Z J. An analysis of relationships among plant community phenology and seasonal metrics of normalized difference vegetation index in the northern part of the monsoon region of China. *International Journal of Biometeorol*, 2001, 45 :170—177.
- [11] Yu F F, Kevin P P, James E, *et al.* Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87 :42—54.
- [12] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386 :695—702.
- [13] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, *et al.* Higher northern latitude photosynthetic and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45 :184—190.
- [14] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, *et al.* Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D17) :20069—20083.
- [15] Eabta M, Tateishi R. Phenological Stage Monitoring in Siberia by using NOAA/AVHRR data. The 22nd Astan conference on Remote Sensing, 2001, 5—9.
- [16] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 17 :3547—3565.
- [17] Chen S P, Zhao Y S. *Geoscience analysis of remote sensing*. Beijing :Survey Press, 1990.
- [18] Chen J, Jonsson P, Tamura M, *et al.* A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91 :332—344.
- [19] Eleonora R, Akihiko K, Ketut W, *et al.* NDVI-derived length of the growth period estimations for different vegetation types in Monsoon Asia. *IECI Chapter Japan Series*, 2001, 3 :106—109.
- [20] Badhwar G D, Austin W W, Carnes J G. A semi-automatic technique for multitemporal classification of a given crop within a Landsat scene. *Pattern Recognition*, 1982, 15 :217—230.
- [21] Badhwar G D. Use of Landsat-derived profile features for spring small-grains classification. *International Journal of Remote Sensing*, 1984, 5 :783—797.
- [22] Myneni R B, Tucker C J, Rsrar G, *et al.* Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Nature Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (D6) :6145—6160.
- [23] Qi J, Huete A R. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44 :89—101.
- [24] 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.
- [25] Piao S L, Fang J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (1) :119—225.
- [26] Wen G, Fu C B. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China :interannual variations. *Climatic and Environmental Research*, 2001, 6 (1) :1—11.

参考文献 :

- [1] 方修琦, 余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. *地球科学进展* 2002, 17 (5) :714—719.
- [17] 陈述彭, 赵英时. *遥感地学分析*. 北京 :测绘出版社, 1990.
- [24] 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.
- [25] 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. *地理学报* 2003, 58 (1) :119—225.
- [26] 温刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征 :年际比较. *气候与环境研究* 2001, 6 (1) :1—11.