

内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系

龙慧灵, 李晓兵*, 王 宏, 魏丹丹, 张 程

(地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: 利用 NOAA/AVHRR GIMMS NDVI 数据、土地覆盖分类数据、气象数据等, 基于改进的基于光能利用率的净初级生产力 (Net Primary productivity, *NPP*) 遥感估算模型对内蒙古草原区 1982—2006 年的 *NPP* 进行估算, 并分别以年、季节和月为时间单位, 计算基于像元的 *NPP* 与降水、温度之间的相关及偏相关系数, 分析不同时间单位及尺度上 *NPP* 与气候的关系。结果表明, 1982—2006 年内蒙古草原区 *NPP* 总量呈波动增加的趋势, 平均增加值为 0.861 Mt C/a。以年为时间单位, 内蒙古草原区年 *NPP* 与降水的关系比较明显。以季节为时间单位, 年际春季和夏季 *NPP* 与降水的关系比较明显, 秋季二者关系相对较弱, 春季和秋季 *NPP* 与温度的相关系数和偏相关系数空间格局比较一致, 且相关性明显高于夏季。以月为时间单位的相关水平明显高于年际水平, 多年平均年内月 *NPP* 与降水、温度的相关程度明显增强, 除去降水的影响, 月均温对 *NPP* 的影响明显下降, 且空间格局也有明显的变化, 说明以月为时间单位在年内尺度上降水对植被生长的影响比温度要大。而以 4、7、10 月份为例, 在年际尺度上, 虽然各月份 *NPP* 均受降水的影响较大, 但与降水关系最为密切的是 4 月份和 10 月份 *NPP*, 与之相比, 7 月份 *NPP* 与温度的关系明显高于其他两月。

关键词: 净初级生产力; 植被与气候关系; 内蒙古草原区; GIMMS NDVI

Net primary productivity (*NPP*) of grassland ecosystem and its relationship with climate in Inner Mongolia

LONG Huiling, LI Xiaobing*, WANG Hong, WEI Dandan, ZHANG Cheng

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Net primary productivity (*NPP*) of grassland ecosystem in Inner Mongolia from 1982 to 2006 was estimated using improved light use efficiency model using NOAA/AVHRR GIMMS NDVI, land use classification data and meteorological data. And the relationship between *NPP* and climate in different temporal unites (annual, season and month) and scales were analyzed based on correlation and partial correlation coefficients of the two-group elements. Results indicated that *NPP* tends to increase during 1982—2006, with an average of 0.861 Mt C/a. The relation between *NPP* and climate in different unites and scales can be interpreted as follows: annual *NPP* of Inner Mongolia correlated more with precipitation than temperature, while interannual spring and summer precipitation influence *NPP* more seriously than that of autumn, but taking account of temperature, the correlation of summer *NPP* was the weakest. Correlation between month *NPP* and climate rises significantly than annual level. Multi-year average month *NPP* within a year strongly correlated with precipitation and temperature. Eliminating influence of precipitation, correlation coefficients of *NPP* and temperature dropped obviously and spatial distribution changed dramatically, which revealed that precipitation contributed more to vegetation growth than in month unite and within a year scale. Taking April, July and October for example, though *NPP* was affected more by precipitation, correlation coefficients of interannual April and October *NPP* with precipitation were larger than that of July and that showed contrary results in temperature.

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目(108020); 国家重点基础研究发展计划资助项目(“973”)(2006CB400505)

收稿日期: 2009-01-05; **修订日期:** 2009-06-15

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

Key Words: net primary productivity; relationship between *NPP* and climate; Inner Mongolia; GIMMS *NDVI*

净初级生产力(net primary productivity, *NPP*)是指绿色植物在单位面积和单位时间内所累积的有机物的数量,即由植物光合作用固定的有机质总量中扣除自养呼吸后剩余的部分,它代表从空气中进入植被的纯碳量,是表征植被活动和陆地生态系统过程的关键参数,对于理解地表碳循环过程具有重要的意义^[1-2]。*NPP*的研究方法有很多,有关学者从不同角度及学科对 *NPP* 的估算进行了深入细致的研究,当前,大范围陆地植被净初级生产力的研究主要以模型估算为主,这也是一种重要而且被广泛接受的研究方法。近年来,尤其在粮食安全和全球变暖两项重大问题的驱动下,*NPP* 建模及其应用都得到迅速的发展,一系列适用于不同尺度的 *NPP* 估算模型相继出现。不同模型估算的结果存在一定的差异,据估算全球陆地生态系统 *NPP* 在 48—68Pg C 之间^[3]。

NPP 存在明显的时间和空间变化,气候因子特别是降水和温度因子的周期性变化是植被季相变化最直接的因素。目前对 *NPP* 时空变化原因的分析主要集中在气候变化、CO₂ 浓度的变化、氮沉降和人类活动引起的土地利用变化等方面^[4-8]。分析陆地生态系统 *NPP* 与环境关系的方法主要是基于生态系统结构及气候变化与植被响应之间因果关系的模型,如 *NPP* 或各种植被指数与气候因子的回归模型、模拟植被生物物理和生理过程的过程模型等^[9-12]。全球或区域生态系统 *NPP* 与气候因子的关系研究从 19 世纪中期已经开始^[13-14],然而对于气候因子对生态系统 *NPP* 的影响却存在不同的认识^[15-17]。目前大部分对 *NPP* 与气候因子关系的研究集中在年和月的时间尺度上,对不同时间尺度上 *NPP* 与气候因子关系的比较性研究较少,而该方面的研究对于认识 and 了解不同时间单位和尺度上植被与气候之间相互作用的机理具有重要的意义,因此二者关系的研究需要进一步的探索与发现。本文从该角度出发,利用 NOAA/AVHRR GIMMS *NDVI* 数据、土地覆盖分类数据、气象数据等,基于改进的基于光能利用率的净初级生产力遥感估算模型对内蒙古草原区 1982—2006 年的 *NPP* 进行估算,并分别以年、季节和月为时间单位,计算基于像元的 *NPP* 与降水、温度之间的相关及偏相关系数,分析不同时间单位及尺度上 *NPP* 与气候的关系,对 3 个时间单位和尺度上 *NPP* 与气候因子关系差异进行比较和分析。

1 数据与方法

1.1 方法

采用朱文泉等改进的基于光能利用率的净初级生产力(*NPP*)遥感估算模型对内蒙古草原区 1982—2006 年的 *NPP* 进行估算。该模型在已有的光能利用率模型(CASA 模型)的基础上有诸多改进:引入了植被盖度分类,并考虑植被覆盖分类精度对 *NPP* 的影响;根据误差最小的原则,利用中国的 *NPP* 实测数据,模拟各植被类型的最大光能利用率,使之更符合中国的实际情况;根据区域蒸散模型模拟水分胁迫因子,对相关参数进行了简化,提高了可操作性^[20-22]。

基于像元的 *NPP* 与气候因子的相关系数计算如下:

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

式中, x, y 代表两变量, $\bar{x}, \bar{y}$ 分别为变量 x, y 的均值, R_{xy} 为变量的相关系数, n 为样本量。

利用如下公式,计算基于降水的 *NPP* 和气温的偏相关系数,以及基于气温的 *NPP* 与降水的偏相关系数:

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}}$$

式中, r_{12}, r_{23}, r_{13} 分别表示变量 V_1 与 V_2 、 V_1 与 V_3 、 V_2 与 V_3 的相关系数, $r_{12.3}$ 是将变量 V_3 固定后变量 V_1 与 V_2 之间的偏相关系数。

根据已有的 *NPP*、降水和温度数据,在年、季节和月 3 个时间单位上计算基于像元的 *NPP* 与降水、温度之

间的相关系数和偏相关系数,分析 NPP 与气候因子的关系。其中以月为时间单位时,分析年内和年际月 NPP 与气候的关系,年内二者的关系以 1982—2006 年 NPP 与各气候指标不同月份的多年平均值为基础,计算一年内各月的均温、降水与相应的月 NPP 之间的相关系数与偏相关系数;年际月 NPP 与气候的关系则选择代表内蒙古草原区植被生长特点的典型月份(4 月、7 月份和 10 月份)为研究对象,将 1982—2006 年不同年份间同一月份的 NPP 序列作为一组变量,相应的不同年份间同一月份的降水、温度作为另外一组变量,分析年际月 NPP 与降水和温度的关系。

1.2 数据

NOAA/AVHRR 数据具有全球覆盖、重访周期短的特点,在时间和空间上具有连续性,是研究植被、气候及地表长期变化非常有效的数据源。采用 NOAA/AVHRR-NDVI 数据,来自 NASA 戈达德航天中心的 GIMMS (global inventory modeling and mapping studies)数据集,是基于 AVHRR 的空间分辨率为 8km、时间跨度为 1981 年 7 月至 2006 年 12 月的每半月合成的 NDVI 数据集。该数据库采用国际上公认的、可靠的方法对卫星数据采取了必要的几何校正、大气校正和辐射校正^[18-19]。GIMMS NDVI 数据集为了进一步消除云的残留影响采用 15d 最大化合成,每月产生 2 个合成数据;采用经验模式分解更有效的确定并消除由于卫星轨道漂移所产生的噪音;利用交叉辐射定标方法降低仪器定标对 NDVI 的影响;采用卫星过境观望校正消除由于太阳天顶角变化引起的 NDVI 差异;并利用 NOAA-9 降交点的资料,插补了 1994 年 9 月—1995 年 1 月由于 NOAA-13 发射失败而 NOAA-11 过轨道时间偏晚造成的 PAL 资料空缺,使数据保持连续。

此处采用 1982—2006 年 25a 的 GIMMS NDVI 数据作为 NPP 模型的输入量,采用最大值合成法,对每月 2 次的 NDVI 取最大值,得到 25a 每月的 NDVI 时间序列。

气象数据包括内蒙古地区内及周边气象站点的 1982—2006 年的月降水量、月平均气温、月总太阳辐射,来自中国气象局。为了与遥感数据匹配,利用 ARCGIS 插值工具,根据各气象站点的经纬度信息,采用 Kriging 方法对气象数据进行插值,栅格化的气象数据与 NDVI 数据具有相同的像元大小和投影信息。除此之外,还准备了内蒙古行政边界图、植被类型及区划图(图 1)^[23]、土地覆盖分类图等基础图件^[22]。根据植被类型区划图确定内蒙古草原区包括温带北部草甸草原区、温带北部典型草原区、温带南部典型草原区、温带灌木、禾草半荒漠区、温带南部荒漠草原区。

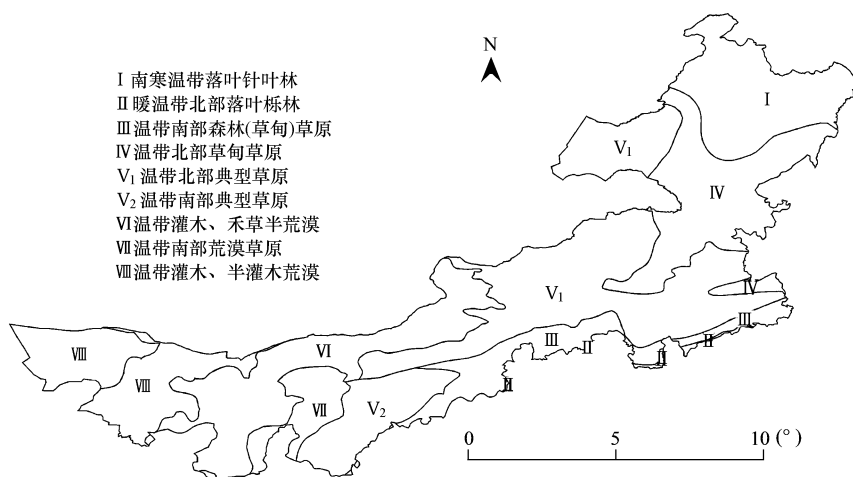


图1 研究区及内蒙古植被区划图

Fig. 1 Study area and its vegetation regionalization map

1.3 NPP 估算结果的精度验证

实测数据来源于美国橡树岭国家实验室分布式数据中心(The Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, ORNL DAAC, USA),它为环境过程研究提供相关的生物地球化学和生态学数据,这些数

据来自于地面观测站、飞机和卫星探测、以及计算机模拟等,空间尺度从某地点到全球范围,时间尺度从几天到几年不等。本文选取其 NPP 数据库中在该研究区内的站点的实测 NPP 数据与模型模拟的 NPP 进行比较^[24],结果见图 2。实测净初级生产力是干物质的重量(g/m^2)。总体来看,NPP 实测值与模拟值之间有良好的线性关系,成对的模拟值与实测值的线性回归方程决定系数可达到 0.86,且 $P < 0.0001$,说明用上述模型估算的 NPP 能够反映该区域实际净初级生产力的变化状况,可以用来分析 NPP 与气候变化之间的关系。

2 结果分析

2.1 内蒙古地区 NPP 的年际变化

1982—2006 年内蒙古地区年 NPP 总量变化如图 3 所示。25 年内蒙古地区的 NPP 总量呈波动状态,NPP 总量位于 $443.68\text{—}536.88\text{Mt C/a}$ ($1\text{Mt C/a} = 10^{12}\text{g C/a}$) 之间,单位面积 NPP 在 $272.87\text{—}330.16\text{g C}/\text{m}^2/\text{a}$,多年平均 NPP 总量为 487.36Mt C/a ,单位面积 NPP 均值为 $299.75\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。25 年 NPP 总量的变化幅度不大,变异系数为 6.34%,波动范围为 93.20Mt C ,占 25 年平均值的 19.1%。其中 1982、1983、1987、2000、2004 年的 NPP 总量值较低,而 1990、1993、1994、1996、2002、2003 年 NPP 总量值较高,NPP 最小值出现在 1983 年,为 443.68Mt C/a ,最大值是 1996 年的 536.88Mt C/a 。虽然 25 年来 NPP 总量处于波动状态,总体而言 NPP 总量有增加的趋势,平均增加值为 0.861Mt C/a ,并没有达到显著性水平,主要是因为内蒙古 2000、2001、2002、2003 年出现了不同程度的干旱,降水量分别为 271.87、242.66、243.69mm 和 220.69mm,均低于内蒙古的多年平均降水量 312.42mm,严重影响生产力水平。如果只考虑 1982—1999 年,内蒙古 NPP 总量的增加就达到了显著的水平($R^2 = 0.435, P < 0.01$),平均每年增加 3.67Mt C 。

用偏差分析的方法分析 1982—2006 年各年 NPP 总量偏离多年平均水平的程度(图 4),偏差值定义为每一年的 NPP 总量减去多年平均的 NPP 总量,负值表示低于 25a 平均水平,反之则高于 25a 平均水平。整体来看,从 1982 年开始,NPP 总量与 25a 平均值的偏差值先增大后减小,其中 20 世纪 80 年代除 1989 年以外均低于多年平均水平,而 90 年代则均高于平均水平,2000 之后 NPP 总量波动较大,除 2002 和 2003 年高于平均水平外均低于平均水平。

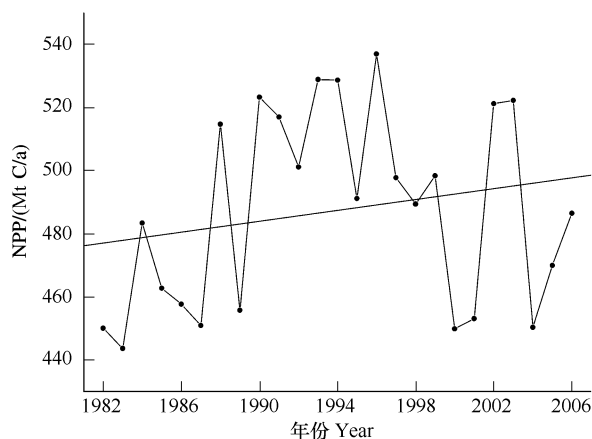


图 3 1982—2006 年内蒙古自治区 NPP 总量年际变化

Fig. 3 Interannual variation of total NPP in Inner Mongolia during 1982—2006

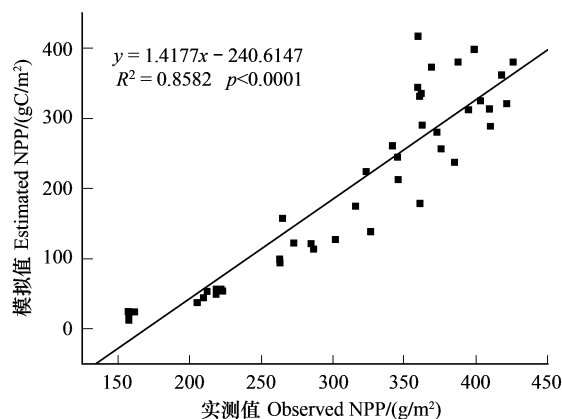


图 2 净初级生产力(NPP)模拟值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated and observed NPP

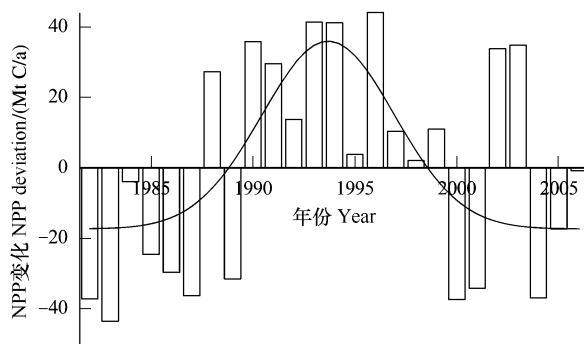


图 4 内蒙古 1982—2006 年 NPP 总量偏差分析

Fig. 4 Deviation analysis of total NPP in Inner Mongolia during 1982—2006

2.2 年 NPP 与气候因子的关系

以年为时间单位,计算各像元 1982—2006 年年 NPP 与年降水量和年均温的相关系数,以及分别除去年均温、年降水量影响的二者的偏相关系数(图 5)。

NPP 与降水的年际相关系数与除去温度影响后的偏相关系数变化不太,且空间分布基本一致(图 5(a)(b)),大致可以分为 3 个区域:内蒙古草原区东北部锡林郭勒盟阿巴嘎旗以东的区域,该区域主要为温带北部草甸草原区和温带北部典型草原的中东部地区,绝大多数区域相关系数在 0.2—0.6 之间,尤其是草甸草原区,由于比较寒冷,而降水量相对比较丰沛,植被的生长更多受到低温的影响;阿巴嘎旗以西至巴彦淖尔盟和鄂尔多斯市的区域 NPP 与降水的关系最为明显,相关系数大都在 0.40—0.87 之间,该区域主要分布着温带南部典型草原、温带半灌木、禾草半荒漠的东北部地区以及温带北部典型草原的西南部地区,除去温度的影响后该区域内降水对 NPP 的影响更加明显,0.60—0.88 范围内的相关系数分布区域有所扩大,因此在该区域内 NPP 与降水的互动最为明显;最后是温带半灌木、禾草半荒漠区的西部地区相关系数较低,在 -0.57—0.20 之间,该区域气候条件相对比较恶劣,温度高降水少,严重影响植被的生长,NPP 与降水呈负相关的区域也主要位于该范围内,这主要是因为除了降水和温度外 NPP 是多种因素共同作用的结果,如水热组合情况和光照条件等。

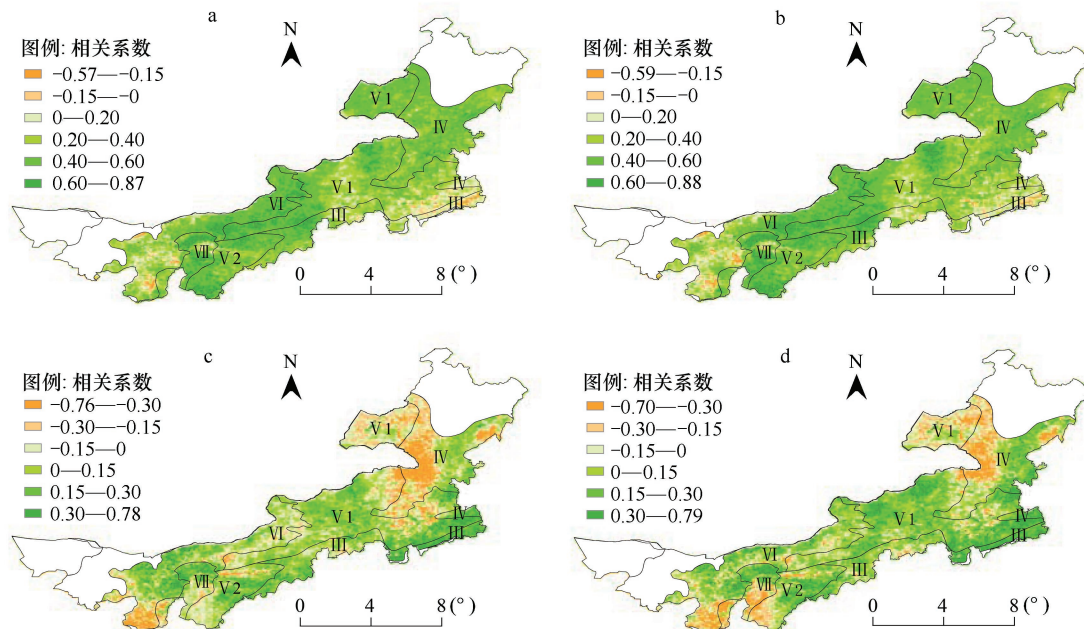


图 5 1982—2006 年内蒙古草原区年 NPP 与气候因子的相关关系

Fig. 5 Correlation relationship between annual NPP and climate factors in Inner Mongolia during 1982–2006

年 NPP 与降水的相关性:a 相关系数,b 偏相关系数;年 NPP 与温度的相关性:c 相关系数,d 偏相关系数;Ⅲ、Ⅳ、…、植被类型区,见图 1

1982—2006 年内蒙古草原区的年 NPP 与对应的年均温的相关关系并不如降水量明显,总体而言相关系数偏小。由图 5(c)可以看出呼伦贝尔市和兴安盟西部、阿拉善盟的阿拉善左旗南部部分地区年 NPP 与年均温呈现较强的负相关,很可能是由这些地区水热不同期造成的,也可能是这些地区植被的生长与水分的关系更为密切。内蒙古中部的温带北部和南部典型草原及灌木、禾草半荒漠地区 NPP 与年均温的相关系数大多在 0—0.30 之间,半荒漠区 NPP 的年际变化不大,导致 NPP 与温度的相关性不好,而在典型草原区由于热量条件相对充足能够满足植被生长的需要,植被的生长状况主要受同期降水量多少的影响,因此导致 NPP 与年均温的关系并不是很密切。除去降水对 NPP 的影响,年均温对年 NPP 的偏相关系数在空间上有些许变化(图 5(d))。首先北部草甸草原和典型草原内与年均温呈负相关的区域界线北移,面积明显减少,西南部则增加

了鄂尔多斯市西部部分地区,其它区域 NPP 与年均温的偏相关系数与相关系数的空间分布格局基本一致,但值的大小有明显的增加,说明内蒙古草原区内在一定程度上存在水热组合不同步,影响降水和温度在植被生长过程中的有效性。

2.3 季节 NPP 与气候因子的关系

了解不同季节 NPP 的年际变化与气候的相互关系,可以揭示出 NPP 年际变化的发生时间和形成机制,有助于准确预测未来气候变化条件下内蒙古草原区的生产力格局和潜力。由于内蒙古草原区冬季(12—2 月份)植被生长活动基本停止,在此仅以春、夏、秋 3 个季节为研究对象,通过计算 25a 各季节的 NPP 与对应的降水、温度之间的相关系数和偏相关系数,分析内蒙古草原区季节 NPP 的年际变化与气候因子的关系。

年际季节 NPP 与温度的关系如图 6 所示,春季和秋季 NPP 与温度的相关系数和偏相关系数空间格局比较一致,且相关性明显高于夏季,夏季的相关系数和偏相关系数存在一定的差异。温带半灌木、禾草半荒漠区由于植被覆盖较小,生长季长度较短,生长季结束较早,NPP 的年际变化并不明显,因此春季和秋季 NPP 与温度呈明显的负相关;其它草原区春季和秋季限制植被生长的最主要因子是温度,因此在降水充足的情况下,春季和秋季的 NPP 与温度呈明显的正相关,相关系数在 0.40—0.83 之间,最大值均出现在呼伦贝尔盟的温带北部草甸草原区内。夏季温度的过高引起的气候干旱和植物生理干旱会限制植被的光合作用,内蒙古草原区 NPP 与温度呈明显的负相关,整个草原区 NPP 与温度的相关系数为负的区域占 80% 以上,除去降水的影响,

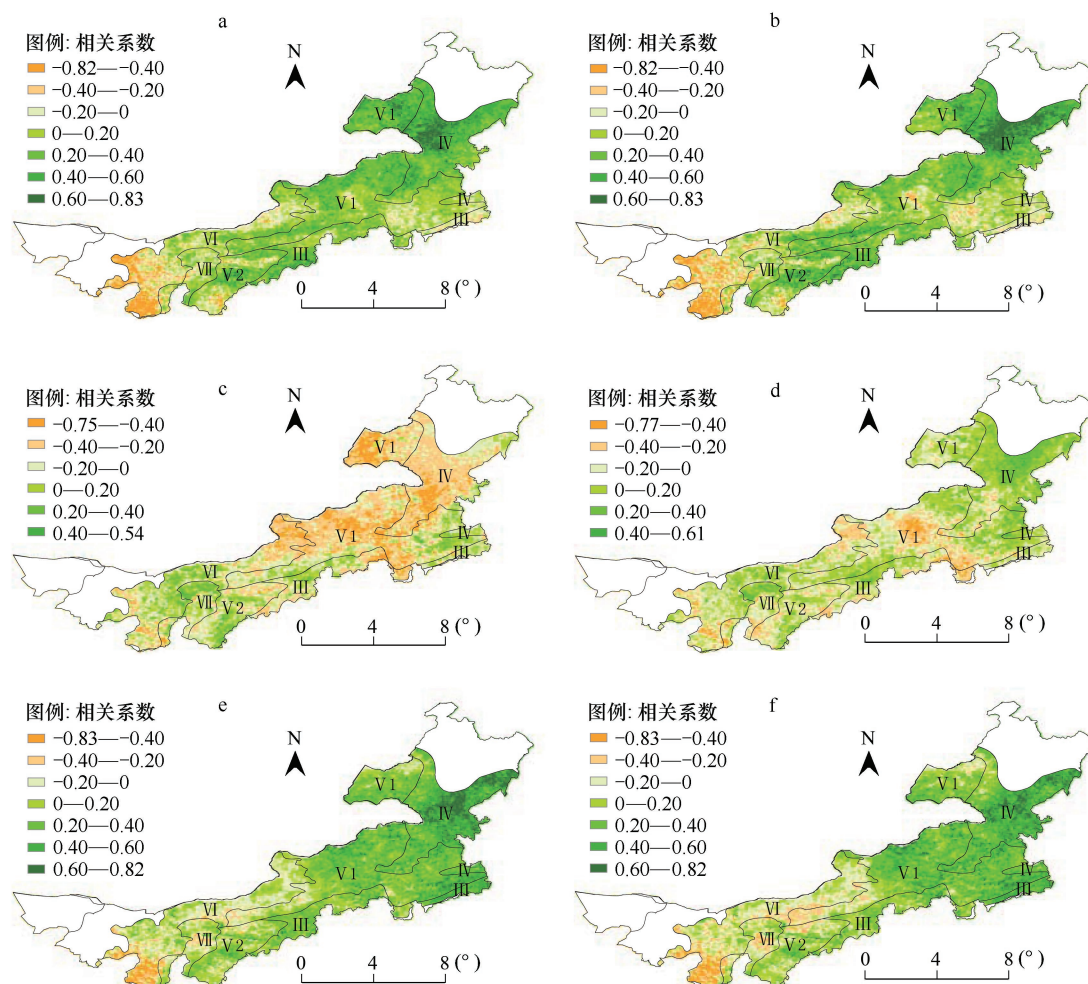


图 6 1982—2006 年内蒙古草原区年际季节 NPP 与温度的相关关系

Fig. 6 Correlation between interannual seasonal NPP and temperature in Inner Mongolia during 1982—2006

a/b 春季相关/偏相关系数, c/d 夏季相关/偏相关系数, e/f 秋季相关/偏相关系数; III、IV、…、植被类型区, 见图 1

夏季 NPP 与温度的偏相关系数与相关系数相比有明显的增加,且在内蒙古草原区东北部的温带北部草甸草原和典型草原区内负相关明显减弱,甚至呈正相关,说明在此区域内的强负相关很可能是由于水分条件没有跟上植被生长的需要而引起的。

年际季节 NPP 与降水的关系明显比温度密切,图 7 为 1982—2006 年内蒙古草原区年际季节 NPP 与降水的相关系数和偏相关系数的空间分布图,可以看出,3 个季节 NPP 与降水的两种相关系数的空间分布均比较一致,3 个季节之间却存在明显差异。春季和夏季 NPP 与降水的关系比较明显,秋季二者关系相对较弱,3 个季节 NPP 与降水的相关系数分别在 $-0.37 \sim -0.90$ 、 $-0.58 \sim -0.88$ 和 $-0.52 \sim -0.79$ 之间变动,春季 NPP 与降水关系最密切的地区主要分布在内蒙古草原区中部的温带南部森林(草甸)草原、温带北部典型草原西部和温带半灌木、禾草半荒漠区的东部,内蒙古草原区随着春季温度的升高和降水的增加,逐渐进入生长季,由于降水和温度同步,中部地区植被生长与降水关系密切,东北部地区气候转暖较晚,温度成为植被生长的主要限制因素,NPP 与降水的关系并不明显,在某些地区甚至呈负相关。

到了夏季,随着温度的升高和湿季的到来,草原区植被进入生长旺盛阶段,NPP 与降水相关性最好的区域在空间位置上也发生了转移,转移至内蒙古草原区东北部呼伦贝尔盟境内的温带北部草甸草原和典型草原内,该区域内水分比较充足,对植被生长的限制作用也较弱。夏季 NPP 与降水相关较弱的区域主要位于温带半灌木、禾草半荒漠区以及内蒙古草原区内人类活动密集的区域(如呼和浩特市、锡林郭勒盟中部的锡林浩

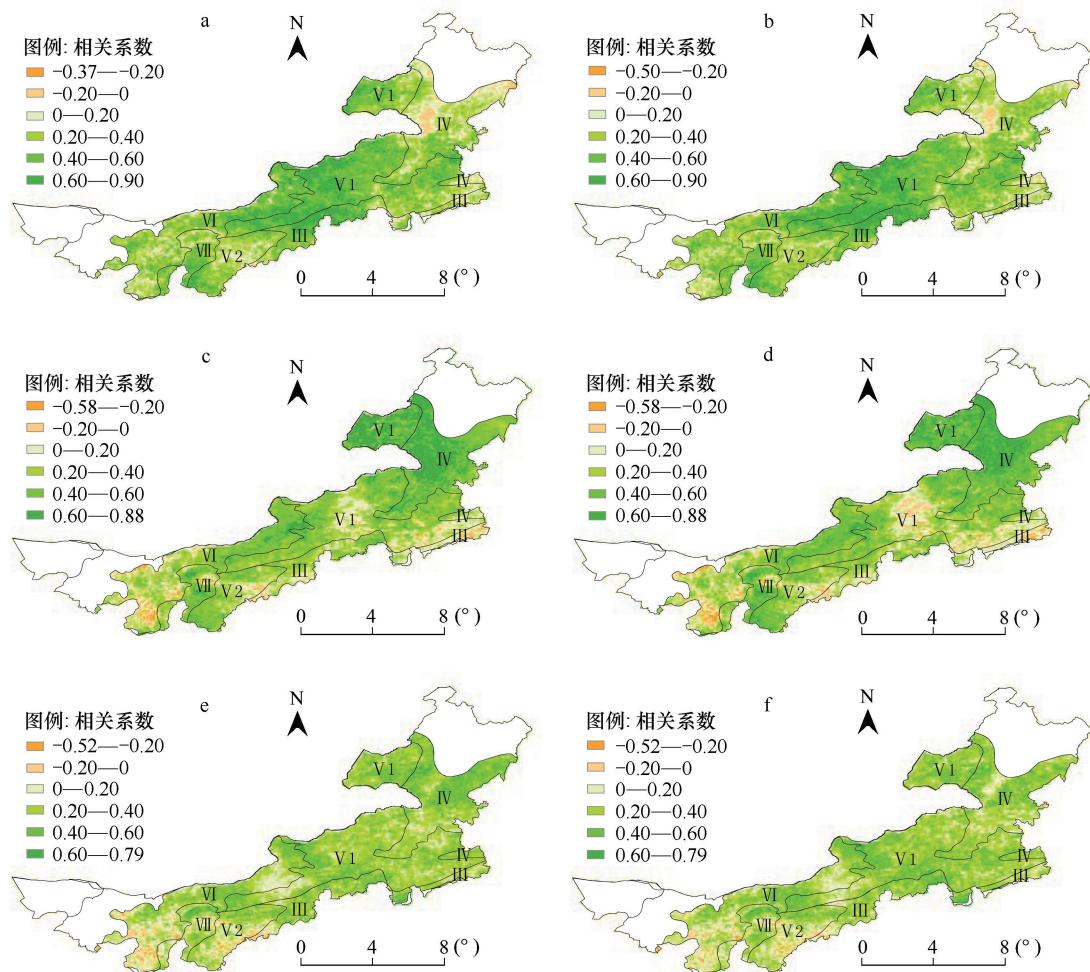


图 7 1982—2006 年内蒙古草原区年际季节 NPP 与降水的相关关系

Fig. 7 Correlation between interannual seasonal NPP and precipitation in Inner Mongolia during 1982—2006

a/b 春季相关/偏相关系数, c/d 夏季相关/偏相关系数, e/f 秋季相关/偏相关系数; III、IV、…、植被类型区, 见图 1

特市、赤峰至通辽沿线等), 主要以半荒漠植被和无植被覆盖为主, 植被 NPP 的年际变化不大, 与降水的关系也不大。秋季植被生长速率减缓甚至衰退, 整个草原区 NPP 与降水的关系都不太明显, 大部分地区 NPP 与降水的相关系数在 0.00—0.40 之间。

2.4 月 NPP 与气候因子的相关分析

以月为时间单位, 分析 1982—2006 年全时间序列月 NPP 与气候因子的关系、不同月份的多年平均值与气候指标的关系以及典型月份 25 年 NPP 时间序列与气候因子之间的关系。

2.4.1 年内月 NPP 与气候因子的关系

以 1982—2006 年 NPP 与各气候指标不同月份的多年平均值为基础, 计算一年内各月的均温、降水与相应的月 NPP 之间的相关系数与偏相关系数(图 8), 总体而言以月为时间单位的相关水平明显高于年际水平。多年平均月 NPP 与月降水的相关程度明显增强(图 8(a)), 温带半灌木、禾草半荒漠西部以外的地区相关系数几乎都在 0.9 以上, 占内蒙古草原区总面积的 87.1%。除去温度的影响(图 8(b)), 年内月 NPP 与月降水量的关系在空间上有一定的变化, 温带北部草甸草原和典型草原的东部地区的相关系数从大于 0.90 下降到 0.75—0.90 之间, 西部温带半灌木、禾草半荒漠区内 NPP 与降水呈负相关的区域扩大, 占草原区总面积的 8.8%, 且整个区域西北部边缘二者相关性明显下降, 说明这些地区的变化很可能是因为水分条件没有跟上温度的变化, 满足不了植被的生长造成的。相关性在 0.90 以上的区域下降到 56.0%, 相应的 0.75—0.90 的区域从 2.9% 上升到 26.6%, 说明在这些区域除了降雨量外, 温度等因素对 NPP 的影响也不能忽略。

与年际的均温对 NPP 的影响相比, 月均温对 NPP 的影响更为显著, 然而月均温与 NPP 的相关系数和偏相关系数存在一定的差异(图 8c, d)。除温带半灌木、禾草半荒漠区东北部至温带北部典型草原西部的部分地区、温带南部典型草原西部以及温带北部草甸草原的小范围区域(占草原区总面积的 25.9%) NPP 与温度的相关系数在 0.9 以上外, 64.8% 的区域相关系数在 0.75—0.90 之间, 月均温对 NPP 影响最小的区域依然位于温带半灌木、禾草半荒漠区的西南部。除去降水的影响, 月均温对 NPP 的影响明显下降, 且空间格局也有明显的变化, 说明以月为时间单位降水对植被生长的影响比温度要大。原本相关系数大于 0.90 的区域, 偏相

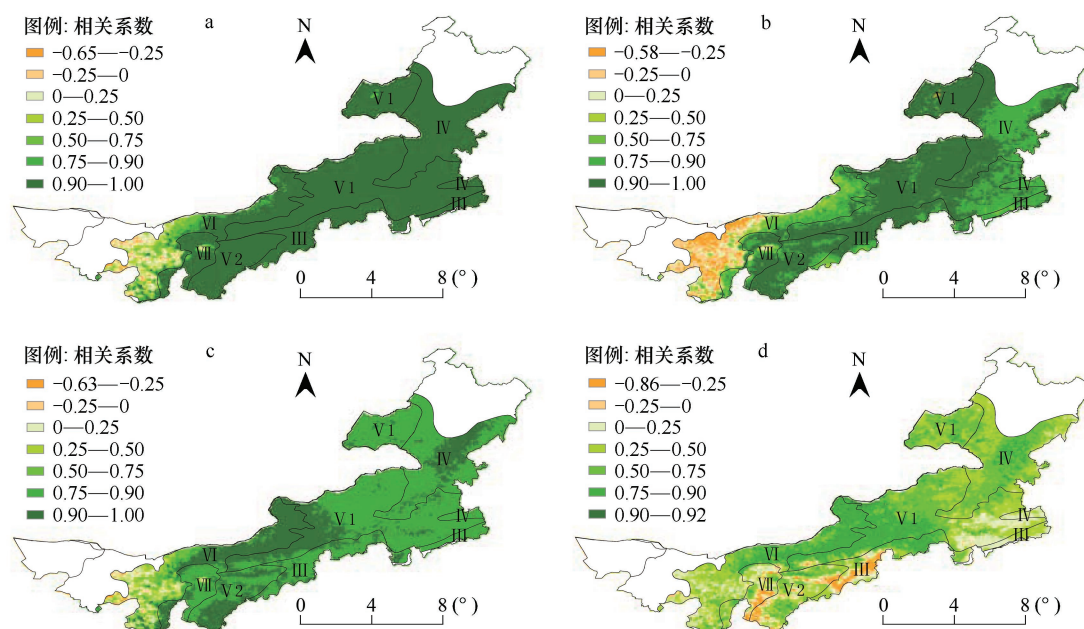


图 8 1982—2006 年内蒙古草原区多年平均年内月 NPP 与气候因子的相关关系

Fig. 8 Correlation between multi-year average month NPP within a year and climate factors in Inner Mongolia during 1982–2006

多年平均年内月 NPP 与降水的相关性: a 相关系数, b 偏相关系数; 多年平均年内月 NPP 与温度的相关性: c 相关系数, d 偏相关系数; III、IV、…、植被类型区, 见图 1

关系数基本都为 0.75—0.90 之间(11.5%),大部分区域的偏相关系数分别在 0.50—0.75(37.4%)和 0.25—0.50(30.0%)之间,这可能是由于这些区域除了受温度的影响以外,降水、日照条件等都影响着植被的生长引起的。除此之外,NPP 与月均温的偏相关系数在某些区域出现了明显的负相关,主要位于温带南部森林(草甸)草原西南部和温带南部荒漠草原东南部(6.9%),这可能与这些地区温度与水分不同期造成的。

2.4.2 年际月 NPP 与气候因子的关系

内蒙古草原区的降水和气温在一年存在明显的季节和月的变化,而只有降水和温度满足一定的条件,植被才会开始生长,也只有在合适的降水和温度范围内,植被的生长才会与降水和温度表现出明显的线性关系。选择代表内蒙古草原区植被生长特点的典型月份(4 月、7 月份和 10 月份)为研究对象,将 1982—2006 年不同年份间同一月份的 NPP 序列作为一组变量,相应的不同年份间同一月份的降水、温度作为另外一组变量,分析年际月 NPP 与降水和温度的关系。

图 9 是 1982—2006 年内蒙古草原区年际 4、7、10 月份 NPP 与降水的相关系数分布图,总体来看 4 月、7 月份和 10 月份各自的相关系数与偏相关系数的空间分布基本一致,但 3 个月份之间却存在一定的差异。4 月份内蒙古草原区气温回升,开始满足植被发芽生长的需求,此时随着降水的发生,植被迅速返青,因此 NPP 与降水有明显的相关性,尤其是在锡林郭勒盟及其南部的温带北部典型草原相关系数达到 0.60 以上,西南部的温带半灌木、禾草半荒漠区、温带南部荒漠草原及温带南部典型草原区由于降水量稀少,植被生长并不如东部地区那么迅速,相关系数相对较低,在 0—0.4 之间。到了 7 月份,降水不是影响植被生长的唯一因素,NPP 与降水的关系的区域差异也充分体现出来,温带北部草甸草原区剔除温度影响后的偏相关系数明显高于其相

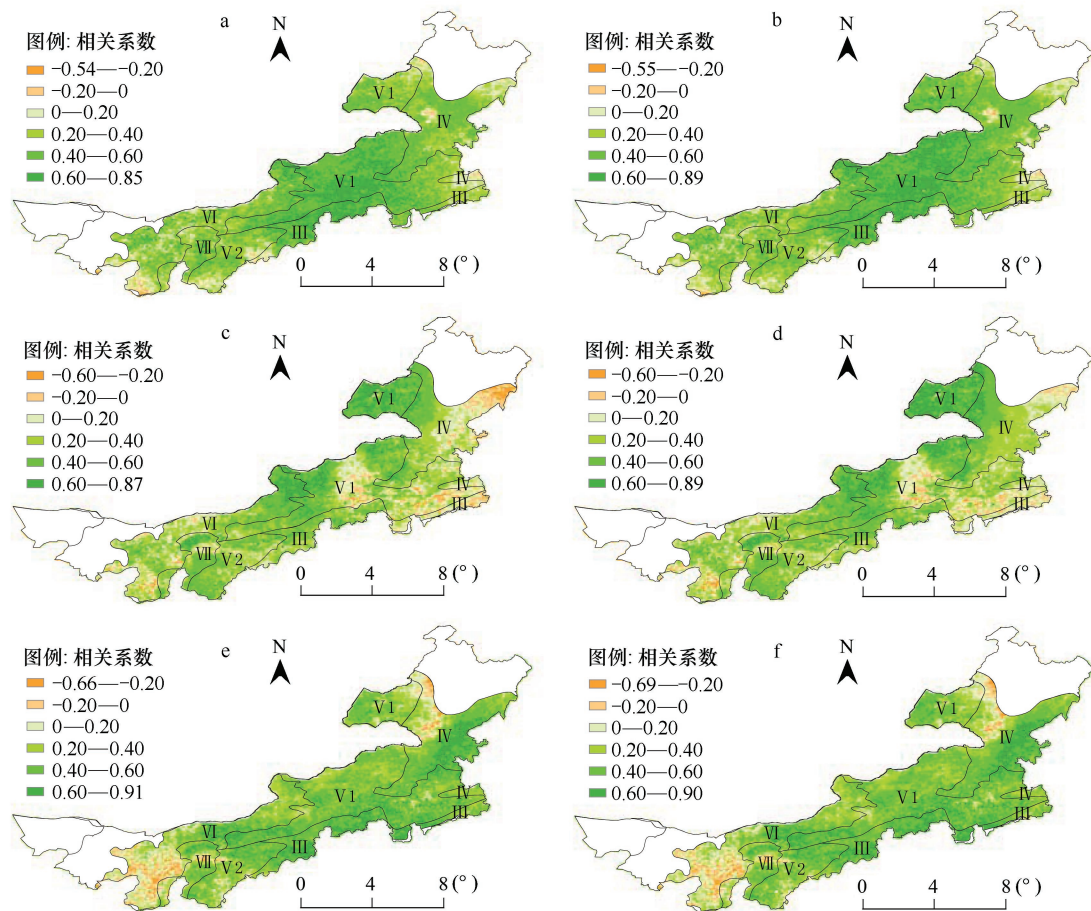


图 9 1982—2006 年内蒙古草原区年际月 NPP 与降水的相关关系

Fig. 9 Correlation between interannual month NPP and precipitation in Inner Mongolia during 1982—2006

a/b: 4 月份相关系数/偏相关系数, c/d: 7 月份相关系数/偏相关系数, e/f: 10 月份相关系数/偏相关系数; III、IV、…、植被类型区, 见图 1

关系数,且区域内的负相关明显减弱,说明在该区域内7月份由于降水的充沛,温度成了限制植被生长的因素。温带北部典型草原区中部局部地区 NPP 与降水的相关系数很低,甚至出现负相关,说明该地区虽然7月降水丰沛,局地高温却抑制了植被的进一步生长。10月份内蒙古地区温度逐渐降低,降水量减少,植被生长基本停止,是草原区生长季的末期。东北部温带北部草甸草原区、温带南部典型草原和温带南部荒漠草原的局部地区由于生长季结束较晚,而此时温度也还适宜植被生长,因此 NPP 与降水有很好的相关性,相关系数在0.6以上。

与降水不同,1982—2006 年内蒙古草原区年际4、7、10月份 NPP 与温度的关系并不十分显著,且变化相当剧烈(图10)。4月份 NPP 与温度的相关系数与偏相关系数空间分布基本相同,除了温带南部典型草原、荒漠草原和温带南部森林(草甸)草原的部分地区,NPP 与温度呈明显的负相关,由于剔除了降水对 NPP 的影响,说明4月份内除了月均温与降水之外,有其它因素影响植被生长,如光照条件、植被开始生长所需满足的积温条件等。与4月份相比,7月份均温与 NPP 的负相关明显减弱,整体呈现弱的正相关关系,且偏相关系数与相关系数存在明显的差异。由于内蒙古草原区由东北向西北存在明显的温度梯度,不同草原类型对温度的变化响应不尽相同。7月份内蒙古北部呼伦贝尔盟内的温带北部草甸草原和典型草原区由于纬度较高,温度相对较低,而且7月份降水非常充足,随着温度在植被生长的适宜范围之内升高,NPP 有明显的增长。7月份 NPP 与月均温相关系数为负的区域,除去降水的影响后,负相关减弱或是呈明显的正相关,说明7月份 NPP

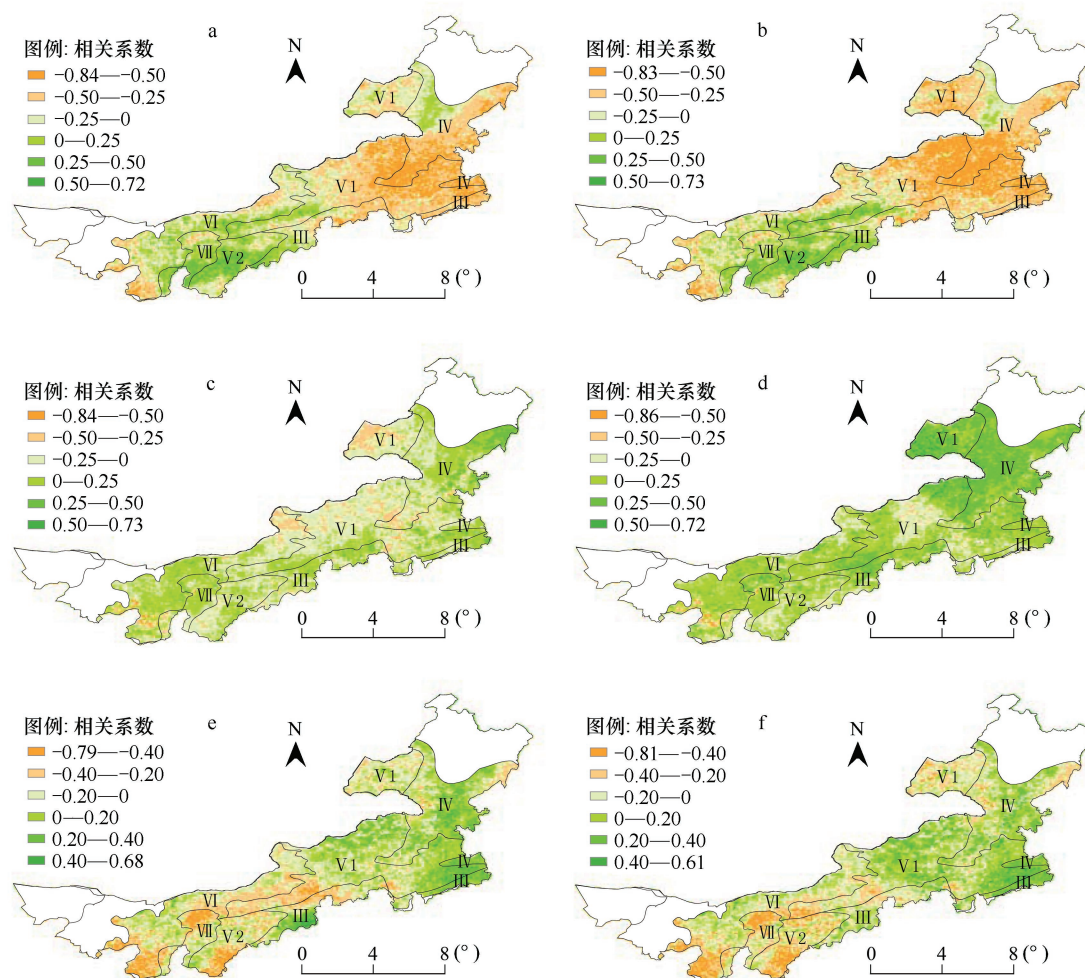


图10 1982—2006 年内蒙古草原区年际月 NPP 与温度的相关关系

Fig. 10 Correlation between interannual month NPP and temperature in Inner Mongolia during 1982–2006

a/b:4月份相关系数/偏相关系数,c/d:7月份相关系数/偏相关系数,e/f:10月份相关系数/偏相关系数;Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ:植被类型区,见图1

与月均温之间的负相关很可能是因为水分条件未满足植被生长而造成的。与 7 月份相比 10 月份 NPP 与温度呈负相关的区域明显增加,且主要分布在内蒙古草原区的中西部地区,10 月份 NPP 与温度的相关系数和偏相关系数的空间分布格局也比较一致。进入 10 月份以后,内蒙古西部的温带半灌木、禾草半荒漠由于生长季较短,植被率先停止生长,即使温度仍然满足植被生长的要求,NPP 与温度间也没有必然的联系。与之相比,东北部的温带北部草甸草原和典型草原区由于仍然维持着缓慢的生长趋势,NPP 与月均温间仍存在一定的联系。

3 结论与讨论

本文计算 1982—2006 年内蒙古草原区 NPP,通过分析不同时间单位 NPP 与气候的关系,对 3 个时间单位上 NPP 与气候因子关系差异进行比较和分析,从而得出不同时间单位和尺度上气候对净初级生产力的影响。

1982—2006 年内蒙古地区 NPP 总量在 443.68—536.88Mt C/a 之间呈波动增加的趋势,平均增加值为 0.861Mt C/a,单位面积 NPP 在 272.87—330.16g C/(m²·a),多年平均 NPP 总量为 487.36Mt C/a,单位面积 NPP 均值为 299.75g C/(m²·a)。

不同时间单位 NPP 与气候因子的关系不尽相同。以年为时间单位,内蒙古草原区年 NPP 与降水的关系比较明显。温带北部草甸草原区和温带北部典型草原的中东部地区,尤其是草甸草原区,由于比较寒冷,而降水量丰沛,植被的生长更多受到低温的影响,温带南部典型草原、温带半灌木、禾草半荒漠的东北部地区以及温带北部典型草原的西南部地区,除去温度的影响后该区域内降水对 NPP 的影响更加明显。

以季节为时间单位,春秋两季内蒙古草原区东北部的草甸草原和温带北部典型草原主要受温度的影响,春季和夏季内蒙古草原区中部温带北部典型草原区及周边地区植被 NPP 则主要受水分条件的影响。

以月为时间单位的相关水平明显高于年际水平。多年平均年内月 NPP 与降水、温度的相关程度明显增强,除去降水的影响,月均温对 NPP 的影响明显下降,且空间格局也有明显的变化,说明内蒙古草原区年内月 NPP 受降水的影响明显大于温度,且二者相关性显著;除去降水的影响,温度对 NPP 影响较大的区域主要集中在温带北部典型草原西部部分地区和温带半灌木、禾草半荒漠区的东北部。而以 4、7、10 月份为例,在年际尺度上,虽然各月份 NPP 均受降水的影响较大,但与降水关系最为密切的是 4 月份和 10 月份 NPP,与之相比,7 月份 NPP 与温度的关系明显高于 4 月份和 10 月份。

References:

- [1] Kimmins J. Foresteology. New York: Maemillan Publishing ComPany · 930 · Carbon and Climate Working Group. A. U. S. Carbon cycle science plan [EB/OL], P1986.
- [2] Fang J Y. Global ecology-climate change and ecological responses. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [3] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, Moore B, Churkuna G, Nemry B, Ruimy A, Sdhloss A L. Participants of Potsdam NPP model intercomparison. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. Global Change Biology, 1999, 5 (Suppl. 1): 1-15.
- [4] Sala O E, Chapin F S III, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall DH. Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 2000, 287(5459): 1771-1774.
- [5] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. Science, 2001, 291(5503): 481-484.
- [6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [7] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, Ikeda K, Kato K. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). Science of Total Environment, 2004, 332(1/3): 123-137.
- [8] Gao Q Z, Wan Y F, Li Y E, Sheng W P, Jiangcun W Z, Wang B S, Li W F. Trends of grassland NPP and its response to human activity in Northern Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4612-4620.
- [9] Li B, Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loss Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 82-89.

- [10] Chen X G, Li J P, Li Z J, Chen B D, Han Y J. Vegetation change in Yanchi of Ningxia and its relationship with climate change in recent years. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1516-1522.
- [11] Xu H M, Gao Q Z, Huang Y M, Jia H K. Simulated the impact of climate change on net primary production in hilly area of Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2939-2947.
- [12] He Y, Dong W J, Guo X Y. The terrestrial growth and its relationship with climate in China based on the MODIS data. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5086-5093.
- [13] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 92-104.
- [14] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105(2727): 367-368.
- [15] Lieth H. Primary production of major vegetation units of the world//Lieth H, Whittaker R H, editors. *Primary production of the biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [16] Goward S N, Prince S D. Transient effects of climate on vegetation dynamics: satellite observations. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(1): 549-563.
- [17] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723a, DOI: 10.1126/science. 293. 5536. 1723.
- [18] Pinzon J, Brown M E, Tucker C J. Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition//N. Huang editor, *Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications*, 2005: 167-186.
- [19] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D, Pak E W, Mahoney R, Vermote E and Saleous N. An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [20] Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, Chen Y H, Li J, Hu H B. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300-307.
- [21] Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424.
- [22] Zhu W Q. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing and its relationship with global climate change. Beijing: Beijing Normal University, 2005.
- [23] Zhang X S, *et al.* Vegetation map of the people's republic of China (1:1000000) (Digital Version). Beijing: Geological Press, 2008.
- [24] Xiao X, Ojima D. NPP Grassland; Xilingol, China, 1980-1989. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A, 1996.

参考文献:

- [2] 方精云主编. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 盛文萍, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 藏北高寒草地 NPP 变化趋势及其对人类活动的响应. *生态学报*, 2007, 27(11): 4612-4620.
- [9] 李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. *生态学报*, 2003, 23(1): 82-89.
- [10] 陈晓光, 李剑萍, 李志军, 陈葆德, 韩颖娟. 宁夏盐池近年来植被与气候变化分析. *生态学报*, 2006, 26(5): 1516-1522.
- [11] 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 贾海坤. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟. *生态学报*, 2006, 26(9): 2939-2947.
- [12] 何勇, 董文杰, 郭晓寅. 基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系. *生态学报*, 2007, 27(12): 5086-5093.
- [13] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. *生态学报*, 2008, 28(1): 92-104.
- [20] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [21] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [22] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系研究. 北京: 北京师范大学出版社, 2005.
- [23] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1000000)(电子版). 北京: 地质出版社, 2008.