植物生态学报 2010, **34** (7): 781–791 doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系

龙慧灵 李晓兵* 黄玲梅 王 宏 魏丹丹

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 该文在利用朱文泉等(2007)构建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生态系统1982–2006年的*NPP*进行估算的基础上, 选取包括降水量、温度、有效降水、有效温度和3种地表干湿度指数在内的气候指标, 充分考虑地表覆盖状况和气候因子的时滞和累积效应, 探讨了内蒙古草原生态系统*NPP*与气候因子之间的相互作用关系。结果表明, 以年为时间单位, 在年际水平上, 温度相关的各指标与年*NPP*的关系并不明显, 当年的气候条件对草原区植被的生长影响最大。以月为时间单位, 年内月气温和降水是影响*NPP*的重要因素。且所有植被类型区在年内月际水平上气候各指标对*NPP*的影响时效最大为1个月, *NPP*和各气候参量的关系时效也为1个月; 在年际水平上5–9月的*NPP*与降水、地表干湿度指数的互相关系数明显高于同温度各指标的互相关系数, 表明降水是影响内蒙古草原*NPP*的主要气候因子, 且降水的累积效应影响显著。不同植被类型区年际月*NPP*与降水指标之间的关系也各不相同。

关键词 有效降水, 有效温度, 地表干湿度指数, 净初级生产力, 时滞互相关

Net primary productivity in grassland ecosystem in Inner Mongolia and its relationship with climate

LONG Hui-Ling, LI Xiao-Bing*, HUANG Ling-Mei, WANG Hong, and WEI Dan-Dan

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

Abstract

Aims Net primary productivity (*NPP*) is a key parameter in vegetation growth and terrestrial ecosystem processes and plays an important role in carbon circulation. The relationship between *NPP* and climate is complicated and needed additional research. Our aim was to study this relationship in different time units and scales to uncover their interaction mechanism.

Methods Based on remotely-sensed estimated *NPP* calculated by light use efficiency model, the relationship between *NPP* and climatic indices (including precipitation, temperature, and effective precipitation and temperature) and three land surface humidity indices during 1982–2006, are assumed in Inner Mongolia. We considered land cover condition and time lag and accumulation effect of climate factors, using time lag correlation analysis, to uncover the interaction between *NPP* and climate.

Important findings Temperature related indices correlate poorly with annual *NPP,* and current year precipitation affects *NPP* the most. With month as the time unit, intra-annual monthly climatic factors are key factors influencing vegetation growth. In all vegetation types, intra-annual monthly climate indices could affect *NPP* in an effective time period of one month and so do *NPP* to climate. At the inter-annual level, monthly precipitation and humidity index affect *NPP* more than temperature related indices, which reveals that precipitation is the restricted climatic factor in this area with obvious accumulation effects. Areas with different vegetation types represent various relations between inter-annual monthly *NPP* and climatic indices.

Key words effective precipitation, effective temperature, land surface humidity index, net primary productivity, time lag correlation

植被是自然生态系统的一个重要组成成分, 在全球变化中起着重要作用。净初级生产力(net

收稿日期Received: 2009-06-05 接受日期Accepted: 2010-01-21
* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: xbli@ires.cn)

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(方精云, 2000)。

*NPP*具有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。目前对引起*NPP*时空变化原因的分析主要集中在气候变化、CO_2浓度变化、氮沉降和人类活动引起的土地利用变化等方面(Sala *et al.*, 2000; Knapp & Smith, 2001; Nemani *et al.*, 2003; Mohamed *et al.*, 2004)。全球或区域生态系统*NPP*与气候因子关系的研究从19世纪中期已经开始, 研究发现, 多数植物在生长过程中, 其植被指标随着温度和降水等气候指标呈周期性变化。降水和温度对*NPP*的各个方面均有一定的影响, 如植物的组成、分布状况、季节活动、光合作用的水分需求、水分平衡和固碳量等(郝永萍等, 1998)。一般来讲, 森林植被的*NPP*与温度和实际蒸发量均存在正相关关系(Raich *et al.*, 1991), 降水的适量增加将使植物的生长期延长, 从而使*NPP*增加(Sala *et al.*, 1988)。然而对气候因子对生态系统*NPP*的影响却存在不同的认识, 某些研究认为植被能够缓解气候波动的影响, 因为降水量的变化比*NPP*的变化要大得多(Goward & Prince, 1995; Fang *et al.*, 2001)。总之, *NPP*与气候因子随时间的动态变化之间存在着很复杂的关系。

尽管许多学者对*NPP*与气候之间的关系进行了大量的研究, 但大多偏重于降水和温度对*NPP*的影响, 且考虑气候条件时所选取的指标大多为单月的降水量和温度。众所周知, 降水中能够被植被吸收的部分及对植被生长有效的温度对植被生长的影响更为重要, 同时气候因子与*NPP*之间的相互作用还存在一定的时滞和累积作用, 但是关于气候参量和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*)之间有效时程为多少、时滞问题是否在不同时间尺度上依然存在等的研究并不充分。因此, 本文在利用朱文泉等(2007)构建的基于光能利用率的*NPP*遥感估算模型对内蒙古草原生态系统1982–2006年的*NPP*进行估算的基础上, 选取包括降水量、温度、有效降水、有效温度和3种地表干湿度指数在内的气候指标, 充分考虑地表覆盖状况和气候因子的时滞和累积效应, 探讨了内蒙古草原生态系统*NPP*与气候因子之间的相互作用关系。

1 数据和方法

1.1 *NPP*的遥感估算

采用朱文泉等(2007)构建的基于光能利用率的*NPP*遥感估算模型对内蒙古自治区草原生态系统1982–2006年的*NPP*进行估算。该模型在已有的光能利用率模型的基础上, 引入了植被盖度分类, 并考虑了植被覆盖分类精度对*NPP*的影响; 根据最小误差原则, 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(朱文泉等, 2007)。

1.2 数据

本文所用的遥感数据为1982–2006年空间分辨率为8 km、每半月合成的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,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(Pinzon *et al.*, 2005; Tucker *et al.*, 2005)。采用最大值合成法, 对每月两次的*NDVI*取最大值, 进一步消除数据中残留的云、大气和太阳高度等因素的影响, 得到25年每月的*NDVI*时间序列。气象数据来自中国气象局, 包括研究区内及周边气象站点1982–2006年的月降水量、月平均气温和月总太阳辐射。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。

1.3 *NPP*与气候关系的分析

选取与降水和温度相关的多个气候指标, 采用时滞互相关分析法计算降水和温度各指标与*NPP*之间的时滞互相关系数(张学霞等, 2004), 分析其从1982到2006年25年间*NPP*与气候因子之间的关系。所选取的气候指标包括降水量(*P*)、温度(*T*)、有效降水(*EP*)、有效温度(*ET*1、*ET*2)和3种地表干湿度指数(*K*1、*K*2、*BK*)。

1.3.1 有效降水

根据张学霞等(2004)对有效降水的定义, 即在不考虑土壤水的前提下, 通过比较月潜在最大蒸散

量和月降水量定义有效降水量, 月降水量大于月潜在最大蒸散量时其差值对于植被而言是无效的, 此时对植被生长发育有效的蒸散量是月潜在最大蒸散量, 反之有效蒸散量即为月降水量, 通过这种方法定义的蒸散量是降水中对植物生长发育有效的部分, 即为有效降水量。采用改进过的Thornthwaite方法计算月潜在最大蒸散量(P_{ei}), 具体表达式为:

$$P_{ei}=\begin{cases}0 & T_i\leqslant 1\\ 1.6d(10T_i/I)^a & 1<T_i\leqslant 26.5\\ a_1+a_2T_i+a_3T_i^2 & T_i>26.5\end{cases} \tag{1}$$

其中, d为每月的天数除以30 (保留四位小数), T_i为月平均气温; a = 0.49 239 + 1.792 × 10^{-2} − 7.71 × $10^{-5}I^2$ + 6.75 × $10^{-7}I^3$, $I=\sum_{i=1}^{12}i$, 为月总加热指数, i = $(T_i/5)^{1.514}$, 为月平均加热指数, 其中T_i为第i个月的月平均温度, a_1 = –415.854 7, a_2 = 32.244 1, a_3 = –0.432 5 (黄庆旭等, 2006)。

根据张学霞等(2004)的定义, 有效降水量的计算方法为:

$$EP_i=\begin{cases}AP_i & AP_i<P_{ei}\\ P_{ei} & AP_i\geqslant P_{ei}\end{cases} \tag{2}$$

其中EP_i、AP_i为i月的月有效降水和月降水量。

1.3.2 有效温度

只有在热量能稳定地满足某一最低要求时, 植物才能正常生长, 因此对植物生长具有直接作用的热量指标就是有效温度。对有效温度的界限值的定义各不相同, 有0、3、5和10 ℃。此处选用5 ℃ (即Kira温暖指数, Yim & Kira, 1975)和10 ℃ (即生物温暖指数BWI, 倪健, 1997)以上的温度作为有效温度并进行比较。

$$ET1=\sum_{i=1}^{n}(t_i-5) \tag{3}$$

$$ET2=\sum_{i=1}^{n}(t_i-10) \tag{4}$$

$ET1$、$ET2$分别为大于5和10 ℃的有效温度, t_i为i月份的平均温度(I = 1–12)。

1.3.3 地表干湿度指数

选取3种表征地表干湿程度的指数, 综合考虑降水和温度对植被的影响, 分别为表征年平均干湿程度的Kira干湿度指数($K1$) (Yim & Kira, 1976)、修正的生物干湿度指数(BK) (徐文铎, 1983; 倪健, 1997)和表征月干湿程度的地表湿润指数($K2$)。

1) Kira干湿度指数($K1$)

$$K1=\begin{cases}P/(ET1+20) & ET1\leqslant 100\\ 2P/(ET1+140) & ET1>100\end{cases} \tag{5}$$

其中P为年降水量(mm)。

2) 修正的生物干湿度指数(BK)

倪健(1997)在Kira指数的基础上提出了生物温暖指数(BWI, 即$ET2$), 在徐文铎(1983)提出的湿润指数的基础上修正并提出了生物干湿度指数(BK), 公式如下:

$$BK=\begin{cases}P/(ET2+40) & ET2\leqslant 80\\ 2P/(ET2+120) & ET2>80\end{cases} \tag{6}$$

3) 地表湿润指数($K2$)

马国柱和符淙斌(2001)及马国柱等(2005)用降水量与潜在最大蒸发量的比值来表征地表的湿润程度。

$$K2_i=P_i/P_{ei} \tag{7}$$

其中P_i为i月的降水量, P_{ei}为i月的潜在最大蒸发量(见式(1))。

2 研究区概况

本文以内蒙古草原生态系统为研究对象(图1)。内蒙古自治区位于中国北部边疆, 面积118.3万km^2, 呈狭长型, 东起126°29' E, 西至97°10' E, 属于典型的中温带季风气候, 具有降水量少而不匀、寒暑变化剧烈的特点, 降水量受地形和海洋远近的影响, 自东向西由500 mm递减为50 mm左右, 日照时数普遍在2 700 h以上。内蒙古的气候带呈带状分布, 从东向西由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。从东北到西北随着降水量的减少和温度的上升, 分布着温带山地针叶落叶林、草甸草原、典型草原、荒漠草原、荒漠和戈壁。本文研究的草原生态系统的范围包括: 温带南部森林(草甸)草原、温带北部草甸草原、温带北部典型草原、温带南部典型草原和温带南部荒漠草原, 由于温带灌木、禾草半荒漠位于温带草原与荒漠的过渡地带, 故也将其包括在内。

3 结果分析

3.1 *NPP*遥感估算结果的验证

*NPP*估算结果验证的实测数据, 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,

doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003

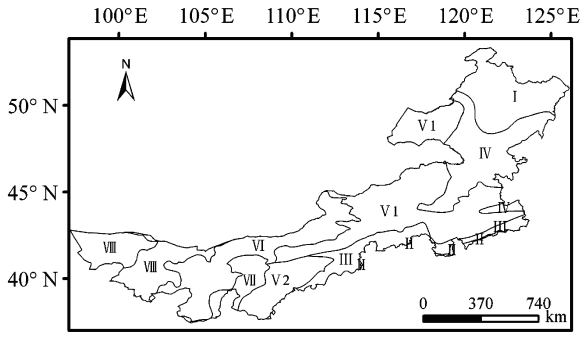

图1 研究区植被区划图(张新时, 2008)。I, 南寒温带落叶针叶林; II, 暖温带北部落叶林; III, 温带南部森林(草甸)草原; IV, 温带北部草甸草原; V, 温带典型草原(V1, 温带北部典型草原; V2, 温带南部典型草原); VI, 温带灌木、禾草半荒漠; VII, 温带南部荒漠草原; VIII, 温带灌木、半灌木荒漠。

Fig. 1 Study area and its vegetation type. I, south cold- temperate deciduous needle forest; II, northern warm- temperate deciduous forest; III, southern temperate forest-meadow steppe ; IV, northern temperate meadow steppe; V, temperate typical steppe (V1, northern temperate typical steppe; V2, southern temperate typical steppe); VI, temperate shrub-grass semi-desert; VII, southern temperate desert steppe; VIII, temperate shrub-semi-shrub desert.

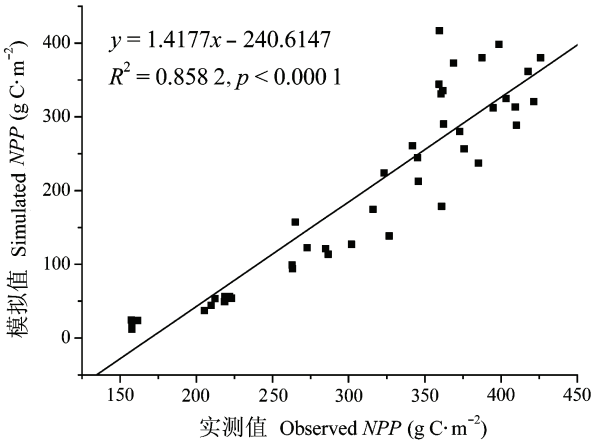

图2 净初级生产力(*NPP*)实测值与模拟值的比较。

Fig. 2 Comparison between simulated and observed net primary productivity (*NPP*).

ORNL DAAC, USA), 它为环境过程的研究提供相关的生物地球化学和生态学数据。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(Xiao & Ojima, 1996), 结果见图2。实测*NPP*是干物质的重量($g\cdot m^{-2}$), 为了与模拟*NPP*进行比较, 转换为以碳为单位($g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$)时, 乘以转换系数0.475 (Scrulock *et al*., 1999)。总体来看, *NPP*的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$p < 0.000\ 1$, 说明用上述模型估算的*NPP*能够反映该区域实际*NPP*的变化状况, 可以用来分析*NPP*与气候变化之间的关系。

3.2 内蒙古草原区年*NPP*与气候因子的时滞关系

以年为时间单元, 25年的年*NPP*与年和生长季(4–9月)降水量、有效降水量、平均温度、有效温度及干湿度指数之间的时滞互相关分析结果如表1所示。在年际水平上, 温度相关的各指标(年/生长季平均温度*T*、有效温度*ET*1/*ET*2)与年*NPP*的关系并不显著。降水量和3种地表干湿度指数与*NPP*的年际关系比较统一, 当$k = 0$ (k表示时滞时间)时, 互相关系数最大且能达到0.01或0.05的显著性水平, 即降水量和地表干湿度指数的相互作用最大为零时滞, 在其他时滞条件下, *NPP*与这4种气候指标的关系并不显著, 说明在年际水平上, *NPP*与年/生长季降水和地表湿润指数的相互作用只出现在当年, 时滞并没有出现, 即以年为时间单位, 对草原区植被生长影响最大的是当年的气候条件。

3.3 内蒙古草原区月*NPP*与气候因子的时滞关系

3.3.1 内蒙古草原区年内月*NPP*与气候因子的时滞关系

以1982–2006年各气候指标和*NPP*不同月份的多年平均值为基础数据, 计算一年内各月*NPP*与降水和温度各指标的时滞互相关系数(表2)。显然, 月际水平的互相关系数明显高于年际水平, 不同时滞情况下的互相关系数明显增大, 最大值出现在时滞为0时, 即年内月*NPP*与同月内的气候各指标的相关程度明显增强, 表明月内的气温和降水是影响*NPP*的重要因素, 且降水和温度与*NPP*的相互作用具有较强的同步性。比较$k > 0$和$k < 0$时的互相关系数不难发现, 在月际水平上气候各指标对*NPP*的影响时效最大为1个月, *NPP*和各气候参量的关系时效也为1个月。除此之外, 时滞情况下各气候指标与*NPP*的相关程度也存在一定差异, 3种温度指标中两种有效温度与*NPP*的相关程度明显高于月平均温度, 说明与月平均温度相比, 由于有效温度是表征对植被生长具有直接作用的热量的度量, 它对*NPP*的作用更加明显, 而这种差异在月降水量和月有效降水之间并没有如此显著。

表1 1982–2006年内蒙古草原区年净初级生产力与气候因子各指标之间的关系
Table 1 Relationship between annual net primary productivity (*NPP*) and climatic index during 1982–2006

时滞 Time lag		–4	–3	–2	–1	0	1	2	3	4
年指标 Annual index	*T*	0.24	0.10	0.21	0.13	0.12	0.28	0.13	–0.13	0.08
	*ET*1	0.20	0.06	0.00	–0.20	–0.24	–0.13	0.17	–0.10	–0.15
	*ET*2	0.25	0.10	–0.03	–0.18	–0.21	–0.19	0.21	–0.08	–0.16
	P	–0.01	–0.11	–0.08	0.37	0.59**	0.01	0.15	0.28	0.30
	EP	0.16	–0.56**	–0.29	0.20	0.35	–0.02	0.02	0.19	0.17
	*K*1	–0.11	–0.15	–0.11	0.18	0.55**	0.12	–0.04	0.14	0.14
	*K*2	0.03	–0.16	–0.18	0.19	0.64**	0.03	0.00	0.08	0.13
	BK	–0.11	–0.17	–0.10	0.18	0.55**	0.14	–0.05	0.14	0.14
生长季指标 Index in growing season	*T*	0.14	–0.05	–0.07	–0.18	–0.24	–0.10	0.27	–0.05	–0.17
	*ET*1	0.16	0.01	–0.06	–0.18	–0.24	–0.14	0.24	–0.05	–0.14
	*ET*2	0.24	0.10	–0.04	–0.18	–0.22	–0.20	0.22	–0.07	–0.16
	P	–0.06	–0.16	–0.12	0.28	0.62**	0.00	0.16	0.30	0.28
	EP	0.07	–0.58**	–0.38	0.04	0.33	–0.13	–0.03	0.13	0.08
	*K*1	–0.16	–0.18	–0.13	0.08	0.54**	0.10	–0.03	0.16	0.12
	*K*2	–0.03	–0.18	–0.17	0.09	0.64**	0.03	0.01	0.13	0.13
	BK	–0.17	–0.21	–0.14	0.08	0.53**	0.12	–0.03	0.17	0.14

**, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.
BK, 修正的生物干湿度指数; *EP*, 有效降水; *ET*1, 5 ℃以上的有效温度; *ET*2, 10 ℃以上的有效温度; *K*1, Kira干湿度指数; *K*2, 地表湿润指数; *P*, 降水; *T*, 温度。
BK, Modified bio-humidity index; *EP,* effective precipitation; *ET*1*,* effective temperature above 5 ℃; *ET*2*,* effective temperature above 10 ℃; *K*1, Kira humidity index; *K*2*,* land surface humidity index; *P*, precipitation; *T*, temperature.

表2 1982–2006年内蒙古草原区多年平均年内月净初级生产力气候因子各指标之间的关系
Table 2 Relationship between multiyear average intra-annual monthly net primary productivity (*NPP*) and climatic indices

时滞 Time lag	–4	–3	–2	–1	0	1	2	3	4
T	–0.58*	–0.28	0.23	0.66*	0.90**	0.72**	0.40	0.00	–0.41
*ET*1	–0.64*	–0.38	0.15	0.69*	0.98**	0.82**	0.35	–0.22	–0.59*
*ET*2	–0.61*	–0.38	0.11	0.66*	0.99**	0.82**	0.31	–0.28	–0.61*
P	–0.55*	–0.30	0.22	0.74**	0.99**	0.74**	0.18	–0.34	–0.60*
EP	–0.61*	–0.30	0.27	0.76**	0.97**	0.75**	0.28	–0.23	–0.57*
*K*2	–0.57*	–0.29	0.27	0.77**	0.98**	0.73**	0.20	–0.28	–0.57*

**, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.
EP, 有效降水; *ET*1, 5 ℃以上的有效温度; *ET*2, 10 ℃以上的有效温度; *K*2, 地表湿润指数; *P*, 降水; *T*, 温度。
EP, effective precipitation; *ET*1*,* effective temperature above 5 ℃; *ET*2*,* effective temperature above 10 ℃; *K*2*,* land surface humidity index; *P*, precipitation; *T*, temperature.

在此基础上进一步分析不同草原类型区气候与植被之间的时滞关系发现，内蒙古草原区不同草原类型在年内月际水平上各气候指标与*NPP*之间的相互作用表现比较一致，且与整个草原区的平均状况相同，均为各气候指标对*NPP*的影响时效最大为1个月，*NPP*和各气候参量的关系时效也为1个月，但各气候指标在不同植被类型区与*NPP*的关系却各不相同。图3显示了5种月气候指标(*P*/*EP*/*T*/*ET*1/*K*2)在时滞为–1、0、1时与*NPP*的互相关系数的空间分布，所有植被类型区年内月*NPP*与各气候指标的最大互相关系数均出现在$k = 0$时，且除月平均温度(0.86–0.94)外的其他5种指标与*NPP*的相关系数均在0.96–0.99之间，差异并不明显，表明温度和降水各指标与*NPP*的相互作用在所有草原类型区均具有较强的同步性。时滞为1时，气候因子各指标对不同草原类型区的*NPP*的影响出现了空间分异，以月平均温度(*T*)和月降水(*P*)为参考，在月际水平上温带南部荒漠草原和温带南部典型草原主要受温度的

doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003

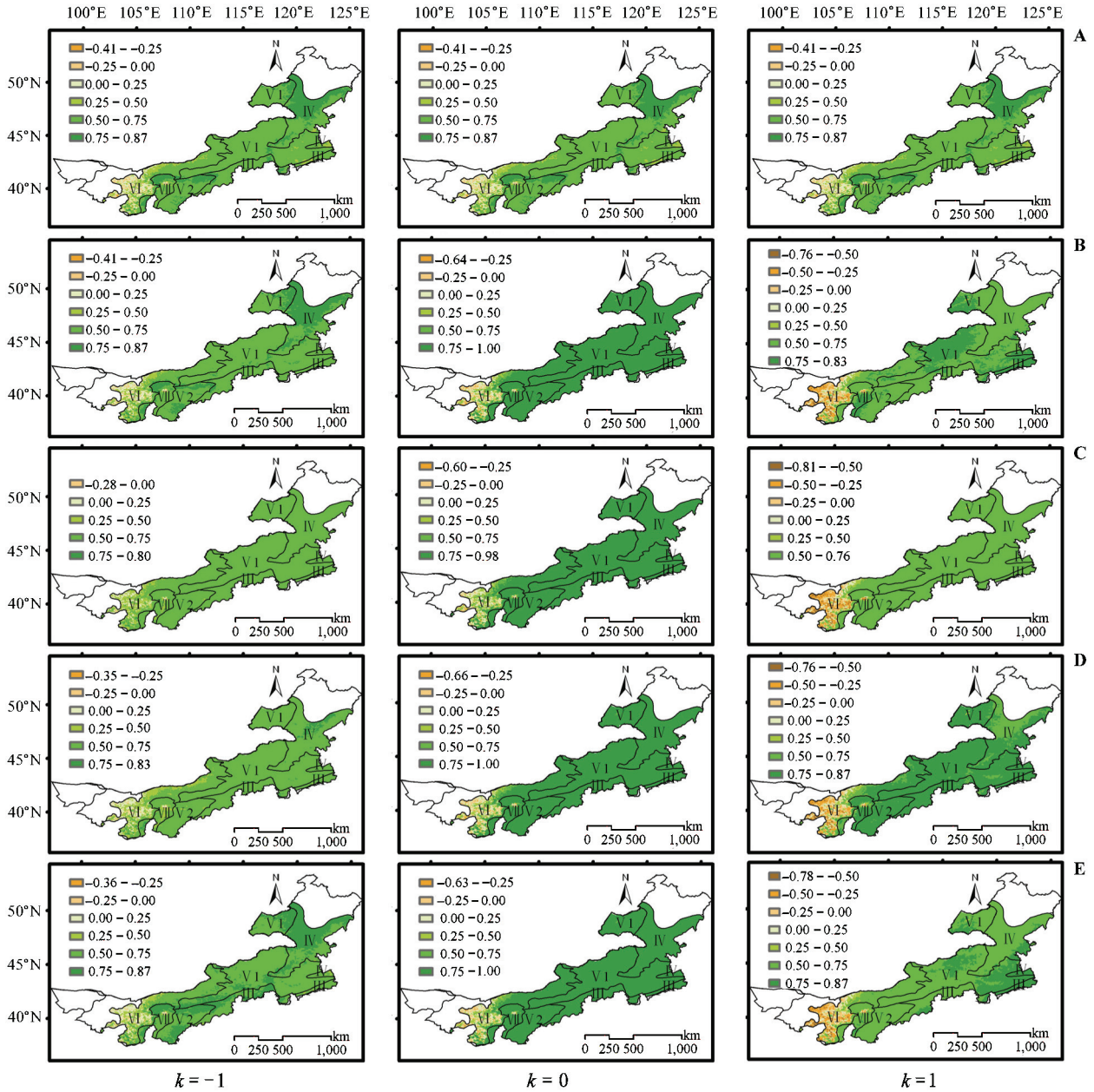

图3 1982–2006年内蒙古草原区多年平均年内月*NPP*与气候因子(**A,** 降水量; **B,** 有效降水; **C,** 温度; **D,** 有效温度和**E,** 地表湿润指数)之间的时滞关系(*k*表示时滞时间)。*EP*、*ET*1、*K*2、*P*和*T*见表1。

Fig. 3 Time lag correlation coefficients between multiyear average intra-annual monthly *NPP* and climatic index (**A,** *P*; **B,** *EP*; **C,** *T*; **D,** *ET*1, and **E,** *K*2) during 1982–2006 (*k* means time lag). *EP*, *ET*1, *K*2, *P*, and *T* see Table 1.

影响(*NPP*与月平均温度的相关系数大于月降水), 其他草原类型区则受降水影响较大; 若考虑对植被生长有效的温度和降水(*ET*1、*ET*2、*EP*、*K*2), 所有植被类型区均受有效温度影响较大, 且除温带北部草甸草原外, *ET*2对*NPP*的影响更突出。不同气候指标在各草原区上的表现各不相同, 月降水和有效降水对温带北部典型草原的*NPP*影响最大, 3种温度指标则对温带南部典型草原的*NPP*影响最大, 地表干湿度指数(*K*2)则与温带南部森林(草甸)草原和温带北部典型草原的*NPP*密切相关。

3.3.2 内蒙古草原区年际月*NPP*与气候因子的时滞关系

选取5–9月为研究时间段, 将不同年份同一月份的*NPP*序列作为一组变量, 相应的不同年份同一

月份及该月份前期的气候因子各指标作为另外一组变量, 分析1982–2006年气候因子对5–9月*NPP*的影响, 探讨同期及前期各气候因子对5–9月各月份*NPP*的贡献; 同样将不同年份同一月份的*NPP*序列作为一组变量, 相应的不同年份同一月份及该月份后期的气候因子各指标作为另外一组变量, 分析1982–2006年5–9月的*NPP*对同期及后期气候的响应。考虑到气候因子的累积作用, 分析年际月*NPP*与气候因子时滞关系时, 加入气候因子累积的影响。以7月为例说明此分析过程:

1) 气候因子对7月*NPP*的影响

首先分析单月气候因子对7月*NPP*的影响。分别计算7月*NPP*与7、6、5、4月(分别用0、1、2、3表示当月、前一月、前两月、前三月)气候因子的相关系数; 然后对不同时段气候因子进行累积(其中*K*2计算各时段内的平均值), 计算累积的气候因子与7月*NPP*的相关系数, 分析累积的气候因子对*NPP*的影响, 气候因子累积的时段分两种类型, 一是当月及前期降水累积, 包括当月与前一月的累积(7月与6月之和, 用01表示)、当月与前两月的累积(7月与5、6月之和, 02)、当月与前三月的累积(7月与4、5、6月之和, 03), 另外一种是前期降水的累积, 包括前两月的累积(5、6月之和, 12)和前三月的累积(4、5、6月之和, 13)。

2) 7月*NPP*对气候的影响

首先分析7月*NPP*对单月气候因子的影响, 分别计算7月*NPP*与8、9、10月(分别用–1, –2, –3表示后一月、后两月、后三月)气候因子的相关系数; 然后对不同时段气候因子进行累积(其中*K*2计算各时段内的平均值), 计算累积的气候因子与7月*NPP*的相关系数, 分析*NPP*对累积的气候因子的影响, 气候因子的累积方式与1)相同, 累积的月份则为当月与之后的月份, 即当月与后一月的累积(7月与8月之和, 用–01表示)、当月与后两月的累积(7月与8、9月之和, –02)、当月与后三月的累积(7月与8、9、10月之和, –03)、后两月的累积(8、9月之和, –12)和后三月的累积(8、9、10月之和, –13)。

3.3.2.1 内蒙古草原区年际月*NPP*与气候因子的时滞关系 内蒙古草原区单月温度各指标与6–8月*NPP*之间的关系并不显著(表3, 时滞k = –3, ……, 3), 5月和9月的*NPP*仅与当月温度密切相关, 说明在年际水平上以月为时间单位的温度指标对5月*NPP*的影响时效仅限于当月, 且3种温度指标对9月*NPP*的影响程度差异并不大, 主要是由于9月气温较高, 有效温度与月平均温度基本相同。由$k < 0$时9月的*NPP*与单月温度指标间显著的相关系数可知, 9月的*NPP*对温度的影响存在一定的时滞, 9月的*NPP*对有效温度(*ET*1、*ET*2)的影响时效为1个月, 即会影响10月的有效温度, 对月平均温度的影响时效则较长, 有3个月之久。若考虑温度的累积效应(k = 01, 02, 03, 13, 12), 在年际水平上仅5月份的*NPP*受当月和前期温度的累积的影响较为显著, 且此时3种温度指标的表现也出现明显的差异, 月平均温度(*T*)与>10 ℃的当月和前两月的温度累积对5月*NPP*的影响较大。内蒙古草原区大都从4月中下旬开始进入生长季, 只有当积温满足一定的阈值范围时, 草原植被的返青与发育才会正常进行, 因此积温对*NPP*的影响主要体现在生长季初期, 且与>5 ℃积温相比, >10 ℃的积温对促进植被的返青与发育更有效。由于植被生长对气候变化具有累积作用, 其与外界的物质和能量交换过程比较缓慢, 因此与月*NPP*对后期单月温度的影响相比, *NPP*对温度的影响主要体现在对之后时期累计温度的影响, 其中以6月和9月的*NPP*对温度的影响最大。

1982–2006年内蒙古草原区5–9月的*NPP*与降水、地表干湿度指数的互相关系数明显高于同温度各指标的(表4), 表明降水是影响内蒙古草原*NPP*的主要气候因子。5–7月当月的降水和有效降水与*NPP*的相关程度较高, 比较k = –3, ……, 3时的相关系数不难发现, 5–7月的*NPP*与两种降水指标的最大相关系数均出现在k = 0时, 说明5–7月降水和*NPP*的相互作用具有较强的同步性。比较$k > 0$和$k < 0$的相关系数可以看出, 月降水量对7–9月的*NPP*的影响时效为1个月, 月有效降水对8月和9月*NPP*的影响时效也为1个月, 其他月份降水量指标对*NPP*的影响只出现在当月, 并没有时滞现象, *NPP*对气候的影响时滞则仅出现在6月。比较月降水量(*P*)和月有效降水(*EP*)与*NPP*之间的相互作用关系不难发现, 除6月外, 其他月份的*NPP*与有效降水的相关系数均较高, 说明对植被而言真正有意义的并不是降水量本身, 而是能够以土壤水的形式通过植物根系为植物生长提供必需的水分的那部分有效降水。与单月的相关系数相比, 累积降水与*NPP*的相关程度明显增强, 表明降水的累积效应对*NPP*的影响至关重要,

doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003

表3 1982–2006年内蒙古草原年际5–9月净初级生产力与各温度指标的关系

Table 3 Relationship between inter-annual monthly net primary productivity (*NPP*) and temperature indices from May to September during 1982–2006

时滞 Time lag	5月 May			6月 June			7月 July			8月 August			9月 September		
	T	*ET*1	*ET*2	*T*	*ET*1	*ET*2	*T*	*ET*1	*ET*2	*T*	*ET*1	*ET*2	*T*	*ET*1	*ET*2
–13	–0.23	–0.23	–0.24	–0.32	–0.32	–0.32	0.14	0.15	0.18	0.02	–0.05	0.05	0.54	0.39*	0.36*
–12	–0.16	–0.16	–0.17	–0.21	–0.21	–0.21	0.17	0.17	0.17	–0.05	–0.05	0.05	0.44*	0.39*	0.36*
–03	–0.07	–0.07	–0.09	–0.38*	–0.39*	–0.38*	0.10	0.10	0.11	–0.03	–0.12	–0.09	0.58**	0.52**	0.52**
–02	0.01	0.01	–0.01	–0.28	–0.28	–0.28	0.10	0.10	0.10	–0.12	–0.13	–0.09	0.51**	0.52**	0.52**
–01	0.12	0.12	0.10	–0.35*	–0.35*	–0.35*	0.10	0.10	0.10	–0.07	–0.07	–0.07	0.52**	0.52**	0.52**
–3	–0.27	–0.27	–0.27	–0.46**	–0.46**	–0.45*	0.04	0.04	0.14	0.10	0.33	–	0.51**	–	–
–2	–0.15	–0.15	–0.15	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	–0.14	–0.19	–0.19	0.42*	0.21	–
–1	–0.09	–0.09	–0.10	–0.31	–0.31	–0.31	0.23	0.23	0.23	0.10	0.10	0.08	0.39*	0.39*	0.36*
0	0.36*	0.37*	0.36*	–0.21	–0.21	–0.22	0.00	0.00	0.00	–0.22	–0.22	–0.22	0.50**	0.50**	0.50**
1	0.27	0.15	0.03	–0.03	–0.04	–0.06	0.00	0.00	0.00	–0.31	–0.31	–0.31	–0.11	–0.11	–0.11
2	0.17	0.16	–	–0.12	–0.21	–0.36*	0.07	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	–0.06	–0.06	–0.06
3	0.13	–	–	–0.07	0.16	–	–0.11	–0.08	–0.05	0.00	0.00	0.00	–0.45*	–0.45*	–0.45*
01	0.36*	0.32	0.35*	–0.14	–0.15	–0.17	0.00	0.00	0.00	–0.32	–0.32	–0.32	0.23	0.23	0.23
02	0.36*	0.32	0.35*	–0.15	–0.19	–0.20	0.03	0.03	0.02	–0.26	–0.26	–0.27	0.10	0.10	0.10
03	0.32	0.32	0.35*	–0.16	–0.19	–0.20	–0.02	0.00	0.01	–0.23	–0.23	–0.24	–0.11	–0.11	–0.11
12	0.29	0.15	0.03	–0.09	–0.14	–0.14	0.03	0.03	0.02	–0.22	–0.22	–0.22	–0.09	–0.09	–0.09
13	0.24	0.15	0.03	–0.11	–0.14	–0.14	–0.02	0.00	0.01	–0.17	–0.17	–0.18	–0.31	–0.31	–0.30

*ET*1, 5 ℃以上的有效温度; *ET*2, 10 ℃以上的有效温度; *T*, 温度。

*ET*1, effective temperature above 5 ℃; *ET*2, effective temperature above 10 ℃; *T*, temperature.

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

但不同月份累积降水与*NPP*的最大相关系数出现的累积时段各不相同, 生长季开始和结束期间草原区植被分别处于生长开始和生长逐渐停止的阶段, 植被对气候变化的响应受植被所处生长阶段的影响而比较缓慢, 因此对5月和9月的*NPP*影响最大的是当月和前一月的累积有效降水, 6月的是当月和前一月的累积降水量; 而植被生长旺盛阶段(7月和8月), 由于生长速率加快, 对物质和能量的需求不断增大, 这一点在植被对水分的需求上充分体现出来, 除了对及时降水的充分利用外, 植被还会从土壤中汲取前期的以土壤水的形式保留在土壤中的那部分降水, 表现在*NPP*与累积降水之间的相关关系上, 即为7月的*NPP*与当月和前三月的累积降水量相关系数最大, 8月的则是当月和前两月的累积降水量。与温度相似, *NPP*对降水的影响主要体现在对之后时期累计降水的影响, 其中以5、6和9月的*NPP*对降水的影响最大。地表干湿度指数(*K*2)定义为降水量与潜在最大蒸发量的比值, 综合考虑了降水和温度与*NPP*之间的关系, 因此通过比较降水和*K*2与*NPP*间的相关系数可以看出, *K*2与*NPP*的相关系数均小于降水, 充分说明了*NPP*是降水和温度等气候因子共同作用的结果。

3.3.2.2 草原区不同植被类型区年际月*NPP*与气候因子的时滞关系 由于绝大部分地区年际月*NPP*与温度的关系并不十分显著, 在分析不同植被类型区年际月*NPP*与气候因子之间的关系时, 主要考虑年际降水指标与月*NPP*之间的关系。

1) 温带南部森林(草甸)草原

在年际水平上, 温带南部森林(草甸)草原区当月降水量、有效降水和地表干湿程度对5–6月的植被生长状况影响最为显著, 前三月与当月的累积降水的影响也不容忽视; 对该地区9月的*NPP*来说, 相对于当月的降水, 当月和前期的累积降水的作用更大, 尤其是8月和9月的累积降水中对植被生长有效的部分。而在植被的生长旺盛期, 7月降水的单独作用在当月的植被生长中并没有立即体现出来, 而是5–7月总的水分状况积极地促进着植被的生长。温带南部森林(草甸)草原植被*NPP*对气候的影响主要体现在9月的*NPP*对后3个月(10–12月)的累积月降水和有效降水的影响上。

表4　1982–2006年内蒙古草原年际5–9月净初级生产力与降水和地表干湿度指标的关系

Table 4 Relation ships between inter-annual monthly net primary productivity (*NPP*) and precipitation, humidity indices from May to September during 1982–2006

时滞 Time lag	5月 May			6月 June			7月 July			8月 August			9月 September		
	P	*EP*	*K2*	*P*	*EP*	*K2*	*P*	*EP*	*K2*	*P*	*EP*	*K2*	*P*	*EP*	*K2*
–13	0.24	0.19	0.27	0.24	–0.27	0.20	–0.18	–0.08	–0.14	0.06	–0.13	0.00	0.39*	0.14	0.08
–12	0.32	0.34*	0.34*	0.26	–0.07	0.23	–0.17	–0.10	–0.15	–0.02	**–0.13**	–0.01	0.35*	0.14	0.08
–03	0.30	0.40*	0.32	0.45*	0.04	0.43*	0.15	0.03	0.17	**0.29**	–0.01	0.24	**0.43***	0.29	0.20
–02	0.40*	**0.48****	0.41*	0.48**	0.33	0.47**	0.16	0.07	0.19	0.26	–0.02	0.23	0.40*	**0.29**	**0.20**
–01	**0.46***	0.44*	**0.43***	**0.69****	**0.46***	**0.68****	**0.16**	**0.11**	**0.19**	0.28	0.03	**0.25**	0.30	0.28	0.18
–3	–0.01	–0.18	0.00	–0.03	–0.31	–0.01	–0.06	–0.04	–0.03	0.23	0.09	0.09	0.32	–	–
–2	0.25	0.27	0.25	–0.06	–0.13	–0.12	0.06	0.02	0.07	–0.03	–0.08	0.02	**0.44***	0.30	0.11
–1	0.32	0.25	0.34*	0.50**	0.06	0.48**	–0.22	–0.24	–0.21	0.00	–0.15	–0.04	0.09	0.12	0.05
0	**0.35***	**0.43***	**0.26**	**0.73****	**0.49****	**0.71****	**0.52****	**0.53****	**0.51****	0.32	0.34*	0.32	0.32	0.35*	0.23
1	0.20	0.30	0.24	0.29	0.29	0.24	0.41*	0.15	0.44*	**0.63****	**0.35***	**0.63****	**0.43***	**0.45***	**0.42***
2	0.28	0.21	0.22	0.30	0.38*	0.33	0.26	0.26	0.25	0.23	0.24	0.20	0.12	0.12	0.13
3	–0.19	–	–	0.45*	0.28	0.32	0.26	0.20	0.24	0.03	0.06	0.00	–0.46**	–0.35*	–0.43*
01	0.37*	**0.44***	0.32	**0.78****	0.47**	**0.73****	0.56**	0.35*	0.58**	0.60**	**0.46****	0.64**	**0.48****	**0.51****	**0.44***
02	**0.40***	0.43*	**0.33**	0.73**	**0.51****	0.65**	0.61**	**0.37***	**0.64****	**0.62****	0.46**	**0.66****	0.43*	0.49**	0.42*
03	0.26	0.43*	0.33	0.73**	0.51**	0.63**	**0.62****	0.37*	0.64**	0.61**	0.33	0.64**	0.26	0.25	0.26
12	0.27	0.30	0.26	0.37*	0.40*	0.36*	0.49*	0.26	0.51**	0.56**	0.36*	0.57**	0.38*	0.41*	0.38*
13	0.08	0.30	0.26	0.45*	0.41*	0.39*	0.48*	0.28	0.46*	0.55**	0.24	0.55**	0.19	0.00	0.21

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

EP, 有效降水; *K2*, 地表湿润指数; *P*, 降水; 加粗数字表示各月份净初级生产力与气候指标的最大相关系数。

EP, effective precipitation; *K2,* land surface humidity index; *P*, precipitation; Bold represents maximum correlation coefficients between net primary productivity and climate index.

2) 温带北部草甸草原

相对于单月的降水指标, 温带北部草甸草原区降水的累积效应最为明显, 5–9月*NPP*与降水指标的相关性分析结果显示, 所有的最大相关系数均出现在累积降水的时段, 即除8月外, 当月和前一月的累积降水对其他4个月的植被生长具有显著的作用, 而6–8月的降水对8月植被的生长最有效。温带北部草甸草原区植被*NPP*对气候的影响明显大于温带南部森林(草甸)草原区, 5–9月*NPP*对后期气候的影响也主要体现在对当月和后一月各项指标累计值的影响上, 6月最为显著, 其次为9月和5月。

3) 温带北部典型草原

与温带北部草甸草原相似, 降水的累积效应在温带北部典型草原区5–9月植被的生长中起着重要的作用。在该区域内, 相对于有效降水, 月降水量指标与各月*NPP*之间的关系更为显著, 从对植被生长最为有效的降水的累积时段来看, 5、7、8月均为当月和前两月降水的累积, 而6和9月则为当月和前一月的累积。温带北部典型草原植被5月和6月*NPP*对气候的影响较大, 主要表现在对当月和后一个月累积气候指标的影响上。

4) 温带南部典型草原

与温带北部典型草原区相比, 温带南部典型草原区5–9月的*NPP*与降水之间的关系相对复杂。除5月的*NPP*主要受5月有效降水的影响外, 其他月份影响最大的均为累积月降水量, 分别为: 3–6月、5–7月、7–8月、7–9月的累积降水量。温带南部典型草原*NPP*对气候的影响主要体现在5、6、8月*NPP*对当月和后一月累积降水指标的影响上, 其中5月和6月*NPP*对有效降水的影响较大, 而8月则为月降水量。

5) 温带南部荒漠草原

与其他类型的草原相比, 温带南部荒漠草原气候因子各指标与月*NPP*的相关程度明显较强, 与温带南部典型草原相似, 除5月的*NPP*主要受5月有效降水的影响外, 其他月份影响最大的均为累积月降水量, 与温带南部典型草原区6–9月降水量累积时段有差别的主要出现在8月, 累积时段为6–8月。温带南部荒漠草原6–8月的*NPP*对当月和随后一月(分

doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003

别为6–7、7–8、8–9月)的气候因子的累积影响较大, 而5月和9月的*NPP*主要影响当月和随后两个月(分别为5–7月和9–11月)的气候因子的累积, 与温带灌木、禾草半荒漠相同, 5月*NPP*对气候的影响最大。

6) 温带灌木、禾草半荒漠

温带灌木、禾草半荒漠位于温带草原和温带荒漠的过渡地带, 地表植被覆盖状况东西差异较大, 因此年际月*NPP*与气候因子之间的关系相对比较复杂, 5个月份内二者之间的关系没有显著的规律性。

4 结论和讨论

本文在利用朱文泉等(2007)构建的基于光能利用率的*NPP*遥感估算模型对内蒙古草原生态系统1982–2006年的*NPP*进行估算的基础上, 选取包括降水量、温度、有效降水、有效温度和3种地表干湿度指数在内的气候指标, 探讨内蒙古草原生态系统*NPP*与气候因子之间的相互作用关系。

以年为时间单位, 在年际水平上, 温度相关的各指标与年*NPP*的关系并不显著, 对草原区植被生长影响最大的是当年的气候条件。以月为时间单位, 年内月际水平的互相关系数明显高于年际水平, 月内的气温和降水是影响*NPP*的重要因素。且所有植被类型区在年内月际水平上气候各指标对*NPP*的影响时效最大为1个月, *NPP*和各气候参量的关系时效也为1个月。

年际月*NPP*与气候因子关系的研究表明, 内蒙古草原区单月温度各指标与6–8月*NPP*之间的关系并不显著, 5月和9月的*NPP*仅与当月温度密切相关, 考虑温度的累积效应, 在年际水平上仅5月份的*NPP*受当月和前期温度的累积的影响较为显著。5–9月*NPP*与降水、地表干湿度指数的互相关系数明显高于同温度各指标的, 表明降水是影响内蒙古草原*NPP*的主要气候因子。与单月的相关系数相比, 累积降水与*NPP*的相关程度明显增强, 表明降水的累积效应对*NPP*的影响至关重要。不同植被类型区年际月*NPP*与降水指标之间的关系各不相同。

对比现有部分研究, 本文除了在不同的时间尺度上对*NPP*与气候指标之间的关系进行了综合性的分析外, 在年际月尺度上, 针对不同月份的研究结果更为详细, 已有的研究中该部分的研究结果并不多见, 对更清楚地认识草原*NPP*与气候之间的关系、草场保护等具有一定的实际意义。

致谢 国家自然科学基金面上项目(30970513)和教育部科学技术研究重点资助项目(080120)。

参考文献

Fang JY (方精云) (2000). *Global Ecology: Climate Change and Ecological Responses* (全球生态学: 气候变化与生态响应). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)

Fang JY, Piao SL, Tang ZY, Peng CH, Ji W (2001). Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science,* 293, 1723a, doi: 10.1126/science.293.5536.1723a.

Goward SN, Prince SD (1995). Transient effects of climate on vegetation dynamics: satellite observations. *Journal of Biogeography,* 22, 549–563.

Hao YP (郝永萍), Chen YF (陈育峰), Zhang XY (张兴有) (1998). Progress in estimation of net primary productivity and its responses to climate change. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 13, 564–571. (in Chinese with English abstract)

Huang QX (黄庆旭), Shi PJ (史培军), He CY (何春阳), Li XB (李晓兵) (2006). Modelling land use change dynamics under different aridification scenarios in Northern China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 61, 1299–1310. (in Chinese with English abstract)

Knapp AK, Smith MD (2001). Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science,* 291, 481–484.

Ma GZ (马国柱), Fu CB (符淙斌) (2001). Trend of surface humid index in the arid area of Northern China. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 59, 737–746. (in Chinese with English abstract)

Ma GZ (马国柱), Huang G (黄刚), Gan WQ (甘文强), Chen ML (陈明林) (2005). Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over Northern China during the last century. Chinese *Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 29, 671–681. (in Chinese with English abstract)

Mohamed MAA, Babiker IS, Chen ZM, Ikeda K, Kato K (2004). The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (*NPP*). *Science of Total Environment,* 332, 123–137.

Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H, Jolly WM (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science,* 300, 1560–1563.

Ni J (倪健) (1997). Development of Kira's indices and its application to vegetation-climate interaction study of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 8, 161–170. (in Chinese with English abstract)

Pinzon J, Brown ME, Tucker CJ (2005). Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: Huang N ed. *Hibert-Huang Transform*: *Introduction and Applications.* World Scientific,

Hackensack NJ, USA. 167–186.

Raich JW, Rastetter EB, Melillo JM, Kicklighter DW, Steudler PA, Peterson BJ, Grace AL, Moore III B, Vörösmarty CJ (1991). Potential net primary production in South America: application of a global model. *Ecological Applications,* 1, 399–429.

Sala OE, Biondini ME, Lauenoroth WK (1988). Primary production of the central grasslands region of the United States. *Ecology,* 69, 40–45.

Sala OE, Chapin III FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science,* 287, 1771–1774.

Scurlock JMO, Cramer W, Cramer W, Olson RJ, Parton WJ, Prince SD (1999). Terrestrial *NPP:* towards a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Applications,* 9, 913–919.

Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, Slayback DA, Pak EW, Mahoney R, Vermote EF, Saleous NE (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing,* 26, 4485–4498.

Xiao X, Ojima D (1996). *NPP* grassland: Xilingol, China, 1980–1989. Data set: Available on-line from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. http://www.daac. ornl.gov.

Xu WD (徐文铎) (1983). The relation between distribution of edificator and companion in zonal vegetation and water-temperature condition in Northeast China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 25, 264–274. (in Chinese with English abstract)

Yim Y, Kira T (1975). Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. I. Distribution of some indices of thermal climate. *Japanese Journal of Ecology,* 25, 77–88.

Yim Y, Kira T (1976). Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. II. Distribution of climatic humidity/aridity. *Japanese Journal of Ecology,* 26, 157–164.

Zhang XS (张新时) (2008). *Vegetation Map of the People's Republic of China* (中华人民共和国植被图) (1:1000000) (Digital Version). Geology Press, Beijing. (in Chinese)

Zhang XX (张学霞), Ge QS (葛全胜), Zheng JY (郑景云) (2004). Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phonological data. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 28, 499–506. (in Chinese with English abstract)

Zhu WQ (朱文泉), Pan YZ (潘耀忠), Zhang JS (张锦水) (2007). Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology* (*Chinese Version*) (植物生态学报), 31, 413–424. (in Chinese with English abstract)

责任编委: 杨 劼 实习编辑: 黄祥忠

doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.07.003