

东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局

李 伟¹, 张国明^{2,3,*}, 李兆君⁴

(1. 山西大学资源与环境发展研究中心, 山西太原 030006; 2. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006;
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 4. 中国农业科学院农业部植物营养与养分循环重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用植被分类数据、NDVI 数据、气象数据以及观测数据, 基于 CASA 生态系统模型, 估算了东亚地区 ($10^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$) 陆地生态系统植被净第一性生产力。结果表明: 1982 ~ 1999 年研究区总 *NPP* 呈现波动增加趋势, 平均每年增加 0.08833PgC 。18a 间 *NPP* 平均值为 14.24PgC , 约占全球总 *NPP* 的 $22.6\%\sim 23.9\%$ 。研究区 *NPP* 年变化呈单峰曲线, 最大值出现在 7 月份, 达 2.98PgC , 全年中 *NPP* 积累主要发生在 4 ~ 10 月份, 该时段内 *NPP* 总量占全年总量的 86.81% 。春、夏、秋、冬四季 *NPP* 平均总量分别为: 2.31 、 8.16 、 2.79 、 1.10PgC , 分别占全年 *NPP* 平均总量的 16.20% 、 57.27% 、 19.58% 、 7.73% 。将 *NPP* 年平均值分成 3 个范围: 低值区 ($7.82\sim 300\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)、中值区 ($301\sim 700\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)、高值区 ($> 700\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$), 分别研究了其空间分布特征。

关键词: 净第一性生产力; 东亚地区; 时空格局; 遥感

文章编号: 1000-0933(2008)09-4173-11 中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

The spatio-temporal pattern of net primary productivity of terrestrial ecosystem in East Asia region

LI Wei¹, ZHANG Guo-Ming^{2,3,*}, LI Zhao-Jun⁴

1 School of Resource and Environment, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3 College of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture, Chinese Agricultural Science Academy, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4173 ~ 4183.

Abstract: By using vegetation type map, NDVI (normalized difference vegetation index) data sets, meteorological data and observed *NPP* data, the paper drove CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) ecosystem model to estimate net primary productivity for terrestrial ecosystem in East Asia region ($10^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$). The results indicated that *NPP* tends to increase during 1982 — 1999, with an average increase of 0.08833PgC per year. The mean total *NPP* during 1982 — 199 is 14.24PgC , making up $22.6\%\sim 23.9\%$ of global *NPP*. Annual *NPP* change takes on a single peak curve. *NPP* reaches the peak value (2.98PgC) on August. 96.81% of the total *NPP* accumulates during the period of April to October in a year. On the average, spring, summer, autumn and winter *NPP* in the study area are 2.31PgC , 8.16PgC , 2.79PgC and 1.10PgC , comprising 16.20% , 57.27% , 19.58% and 7.73% of the total annual *NPP*, respectively. This paper divided *NPP* value of the study area into the low value zone ($7.82\sim 300\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$), middle value zone ($301\sim 700\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$) and

基金项目: 国家 973 资助项目 (No. 2007CB109305)

收稿日期: 2008-01-28; 修订日期: 2008-05-21

作者简介: 李伟 (1964 ~), 男, 山西人, 副教授, 主要从事环境与发展研究. E-mail: Li-Wei@sxu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zgm2010@126.com

Foundation item: The project was financially supported by National 973 Project of China (No. 2007CB109305)

Received date: 2008-01-28; **Accepted date:** 2008-05-21

Biography: LI Wei, Associate-professor, mainly engaged in environment and development. E-mail: Li-Wei@sxu.edu.cn

high value zone ($>700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) and studied their spatial distribution characters.

Key Words: net primary productivity; east Asia region; spatio-temporal pattern; remote sensing

自从工业革命以来,由于人类生产、生活的影响,化石燃料的燃烧, CO_2 等温室气体的排放量急剧上升,全球气候已经发生显著变化^[1,2]。气候变化必将对陆地生态系统的结构与功能产生巨大、深远的影响^[3]。植被是陆地生态系统的主体,同时也是气候和环境变化敏感的指示器。植被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 CO_2 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^[4]。植被对全球变化的响应,大气组成、土地利用和气候的变化对植被的影响与反馈研究日益受到重视。近年来由于受大气二氧化碳浓度上升、温度升高及氮、磷沉降、人为因素影响等,植被季节、年际以及年代际活动发生了很大变化^[5]。陆地表面是高度异质的,因此陆地生态系统对全球变化的反应也具有高度的空间异质性,有的地区植被对全球变化的响应主要表现为植物生长期的回升,而另一些地区的生态系统则主要表现为振幅加大,或同时出现上述两方面的作用^[6]。研究植被对环境变化响应的季节差异有助于认识全球变化影响陆地生态系统的机制以及植被活动对全球变化的反馈机制。植被净第一性生产力(*NPP*, net primary productivity)是绿色植被在单位时间和单位面积中所生产的有机干物质的总量,反映植被对自然环境资源的利用程度。*NPP*的时空变化主要取决于植被、土壤和气候之间的复杂相互作用,并受人类活动和全球环境变化的强烈影响^[7,8]。目前估算植被第一性生产力的模型很多,Ruimy^[9]等把这些模型概括为3类,即:统计模型(statistical model),参数模型(parameter model)和过程模型(process-based model)。其中CASA (carnegie-ames-stanford approach)模型是基于光能利用率估算的过程模型,非常适合于全球尺度上的*NPP*估算^[10]。Potter^[11]等和Field^[12,13]等认为全球植被的月最高光利用率为 $0.389 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。全球不同类型植被的光利用率相差很大^[14~17],引起这种差异的主要原因是光利用率受气温、水分、土壤、营养、疾病、个体发育、基因型差异和植被维持与生长的不同能量分配等因素的影响^[15]。光能利用率的多少直接影响到植被各层中的能量分布和光合速率,基于吸收光合有效辐射(APAR, absorbed photosynthetically active radiation)的植被*NPP*的准确估测,关键在于光利用率的有效估算。准确估算植被净第一性生产力、理解它与各种气候要素的相互关系,对于了解陆地生态系统的演化和判定生态系统碳汇和生态调节过程^[12,17]具有重要的作用,同时也是揭示植被与环境条件之间的相互关系、分析生态系统对气候变化响应的有效工具^[17]。本文通过估算东亚地区陆地生态系统净第一性生产力并研究其时空分布格局,试图了解在全球变化背景下陆地生态系统的演变特征。

1 研究区自然概况

本文将研究区选定在东亚地区($10 \sim 70^\circ\text{N}$, $70 \sim 170^\circ\text{E}$)。研究区地形类型复杂,地形起伏高差很大,有世界最高的高原、山脉和高峰,同时也具有世界著名的平原和洼地,大部分地面海拔在1000m以下,复杂的地形对气候的形成以及水热条件的分配具有重大的影响。研究区几乎具有世界所有主要类型的气候特征,如横贯西伯利亚的亚寒带针叶林气候,温带季风气候和亚热带季风气候,热带季风气候,热带、亚热带和温带干旱和半干旱气候等,多样化的气候条件造成植被生产的多样化。研究区土壤类型组成及分布的空间异质性也造成了植被类型及生产力的空间异质性。

2 数据与方法

2.1 数据及处理

本文的数据资料包括遥感数据、气象数据以及定点观测数据等,其中遥感影像数据是主要的信息源。

2.1.1 遥感数据及处理

(1) NDVI (normalized difference vegetation index)数据集

本研究的地域范围从亚寒带到热带气候区,地形复杂,植被种类繁多,对这样一个大区域,研究植被生产

力必须选择合适的遥感数据源。NOAA/AVHRR 系列经过 20 余年连续观测,具有独特的性质而倍受关注,已被证明是极有价值的区域及全球植被研究的重要数据源^[18],在大、中尺度植被区域分布及动态变化研究中具有其它遥感卫星资料无法比拟的优势^[19]。以美国 EOS(earth observation system)计划为代表,正在建立和完善全球共享数据,极大地推动了全球气候与环境变化研究^[20]。本文选择 NOAA/AVHRR NDVI 数据集作为主要遥感数据源。该数据集来源于美国地球资源观测系统(earth resources observation system,EROS)数据中心的探路者数据集(Pathfinder AVHRR Land Data Set;PAL Data Set)^①,其空间分辨率为 8km×8km,时间分辨率为月,研究时段为 1982~1999 年。

(2) 植被分类数据

植被分类数据取自美国马里兰大学全球植被分类数据库^②植被类型见表 1。

2.1.2 气象数据

气象数据主要包括月降水量、月平均气温、月太阳辐射。气温及降水数据来源于美国特拉华州立大学地理系气候研究中心全球陆地空气平均气温、降水量、辐射量格网数据集,格网空间大小为 0.5°×0.5°通过线性内插法重新生成分辨率为 0.075°×0.075°的气象栅格数据,时间序列为 1982~1999 年。按照研究区范围将气象数据集处理成与 NDVI 数据时间及空间分辨率相同的栅格数据。

2.1.3 NPP 实测数据

NPP 实测数据来源之一为美国橡胶岭国家实验

编码 Code	植被类型 Vegetation types *
1	常绿针叶林 Evergreen Needleleaf Forest(ENF)
2	常绿阔叶林 Evergreen Broadleaf Forest(EBF)
3	落叶针叶林 Deciduous Needleleaf Forest(DNF)
4	落叶阔叶林 Deciduous Broadleaf Forest(DBF)
5	针阔混交林 Mixed Forest(MF)
6	有林地 Woodland(WL)
7	有林草地 Wooded Grassland(WG)
8	郁闭灌丛 Closed Shrubland(CS)
9	开放灌丛 Open Shrubland(OS)
10	草地 Grassland(GL)
11	农作物 Cropland(CL)
12	高寒植被 Tundra vegetation(TV)

* 下同 the same below

的 NPP 数据集(the oak ridge national laboratory distributed active archive center,NPP database),数据格式为 EXCEL 表格。NPP 数据集包括各种公开出版的文献和其它记录记载的全球陆地测量点的 NPP 田间测量值。该数据集包括生物量动态、气候指标及测量点的地理参数等。另一 NPP 实测数据来源于中国林业部(现国家林业局)1989~1993 年的林业普查数据。该数据集包括立木年龄、叶面积指数、总生物量和普查资料。数据格式为普通文本格式和 Excel 电子表格格式。NPP 实测数据主要用于估测不同植被类型最大光能利用率和验证 NPP 估算结果。

3.2 NPP 计算方法

本文基于 CASA 模型计算各植被类型的 NPP,其公式表述为:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR \quad (2)$$

$$\varepsilon(x,t) = f_1(x,t) \cdot f_2(x,t) \cdot f_w(x,t) \cdot \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $NPP(x,t)$ 表示空间位置 x 上的植被在 t 时间内的净第一性生产力; $APAR(x,t)$ 表示空间位置上的植被在 t 时间内所吸收的光合有效辐射; $\varepsilon(x,t)$ 表示植被在像元 x 和 t 月的实际光利用率。 $SOL(x,t)$ 是 t 月份像元 x 处的太阳总辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $FPAR(x,t)$ 为植被层对入射光合有效辐射(PAR)的吸收比例;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.4~0.7 μm)占太阳总辐射的比例。 $f_1(x,t)$ 、 $f_2(x,t)$ 及 $f_w(x,t)$ 分别是气温和水分胁迫对最大光利用率 $\varepsilon_{\max}$ 的影响。

植被对太阳有效辐射的吸收比例取决于植被类型和植被覆盖状况。研究表明^[11],由遥感数据得到的归

① <http://edcdaac.usgs.gov>

② ftp://hpsftp.umiaccs.umd.edu/project/GLCF/DerivedData/Global_Land_Cover/gl-latlong-8km-landcover

一化植被指数(NDVI)能很好的反映植被覆盖状况。Potter^[11]和 Field^[12,13]基于 CASA 模型利用遥感手段估算全球的 NPP 为 48.9 PgC , 植被最大光能利用率为 $0.389 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。显然由于植被类型、生境条件等方面的差异, 植被的最大光能利用率不可能是相同的, Ruimy^[9]估算全球植被的 NPP 值将不同植被类型的 $\varepsilon_{\max}$ 取值为 $0.108 \sim 1.580 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。彭少麟^[21]认为将全球植被月最大光能利用率设定为 $0.389 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 是偏低的。Zhu^[22]等利用不同植被类型的实测 NPP 数据, 对不同植被类型的 $\varepsilon_{\max}$ 的估测方法进行了改进, 并利用气温、降水和辐射数据估算 $f_1(x, t)$, $f_2(x, t)$ 及 $f_w(x, t)$ 。表 2 列出了各植被类型最大光能利用率($\varepsilon_{\max}$)的模拟值。其中, 农作物的实测 NPP 数据较少, 本文根据已有的文献资料^[23], 取其平均 NPP 实测值 $532.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 农作物 $APAR$ 、温度和水分胁迫因子乘积的平均值为 $876.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 由此推算得到农作物的平均月最大光能转化率为 $0.608 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$; 中国温带草原的 NPP 为 $(230.6 \pm 64.9) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[24], 本研究中温带草原 $APAR$ 、温度和水分胁迫因子乘积的平均值为 $427.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 由此推算得到温带草原的平均月最大光能转化率为 $0.541 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$; 郁闭灌丛、开放灌丛、草地等其它植被类型的最大光能转化率均以温带草原为准。有林地的最大光能转化率取林地和郁闭灌丛最大光能转化率的平均值($0.572 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$), 有林草地的最大光能转化率取有林地和郁闭灌丛最大光能转化率的平均值($0.557 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

表 2 各种植被类型的最大光能利用率 ($\varepsilon_{\max}$)Table 2 The maximal light utility efficiency ($\varepsilon_{\max}$) for different vegetations

植被类型 Vegetation type	样本数 Sample number	最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)			NPP 实测平均值 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) Mean value of observed NPP	NPP 实测值范围 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) The value scope of observed NPP
		最小值 Minimal value	最大值 Maximal value	模拟值 Modeled value		
落叶针叶林 DNF	35	0.210	1.721	0.492	469	179 ~ 824
常绿针叶林 ENF	107	0.168	2.498	0.389	395	179 ~ 806
落叶阔叶林 DBF	350	0.225	1.970	0.664	678	191 ~ 1669
常绿阔叶林 EBF	141	0.461	2.254	0.978	1015	407 ~ 1913
针阔混交林 MF	21	0.237	0.743	0.490	472	257 ~ 717
有林地 WL				0.572		
有林草地 WG				0.557		
郁闭灌丛 CS				0.541	364	
开放灌丛 OS				0.541		
草地 GL				0.541	231	
农作物 CL				0.608	532.9	152 ~ 684
高寒植被 TV				0.541		

本文通过上述方法估算不同植被类型的 NPP , 所有样本点的 NPP 估算值与模拟值总体误差为 5.15%。

3 结果与分析

3.1 研究区 NPP 时间变化

3.1.1 NPP 年际变化

1982 ~ 1999 年东亚地区陆地生态系统 NPP 年际变化见图 1。 NPP 呈波动增加趋势: 从 1982 年的 $12.84 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ ($1 \text{ PgC} = 1 \times 10^{15} \text{ gC}$), 增加到 1999 年的 $14.43 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均每年增加 0.08833 PgC 。18 年间 NPP 的平均值为 14.24 PgC , 约占全球 NPP 的 22.6% ~ 23.9% (IPCC 估算全球 NPP 大约为 $59.6 \sim 62.6 \text{ PgC}$)^[25]。 NPP 最高的 3 年依次为 1994 年、1995 年、1990 年, 最低的 3 年依次为 1992 年、1982 年、1983 年。1994 年 NPP 最高, 达 15.64 PgC , 1992 年 NPP 最低, 达 12.60 PgC , 明显小于其它各年, 在变化曲线上呈现一个明显的低谷。1982 ~ 1984 年, 1985 ~ 1991 年, 1992 ~ 1994 年这 3 个时间段是 NPP 增加最为明显的时期, 除 1996 年外, 其它年 NPP 总量与年 NPP 标准差呈现完全一致的变化趋势, 因此年度 NPP 越高, 其年 NPP 标准差也越大, 该年度 NPP 的空间分布的异质性越高。

3.1.2 NPP 季节变化

1982 ~ 1999 年研究区月 NPP 变化趋势见图 2。月 NPP 变化呈单峰曲线, 呈现标准的正态分布。最大值

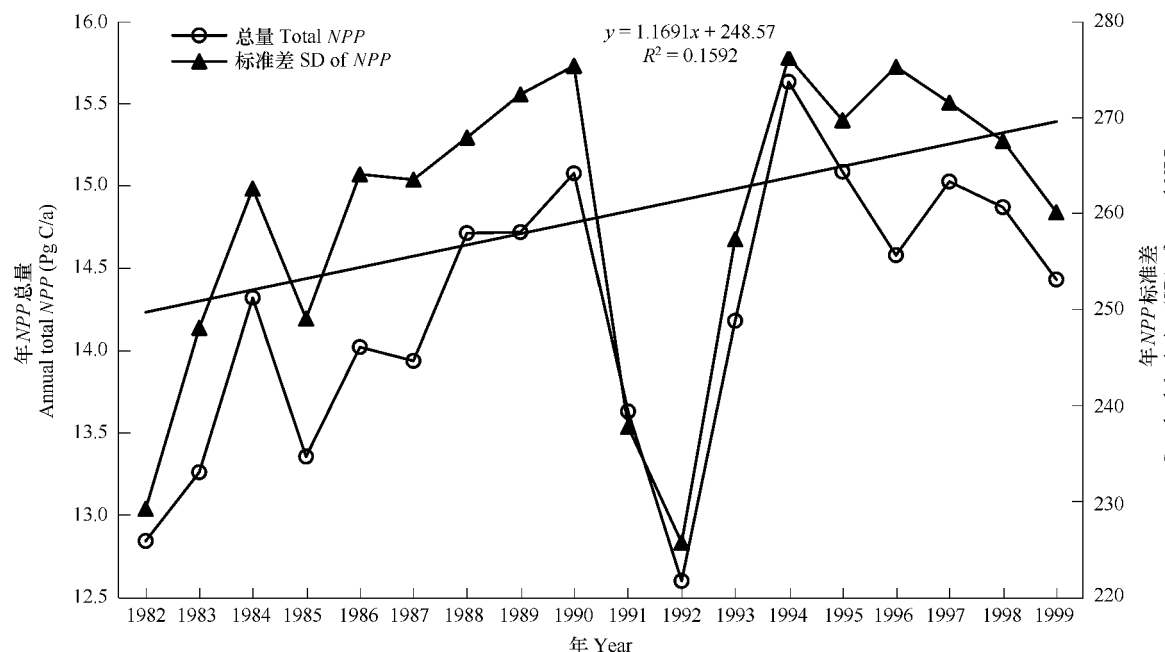


图1 1982~1999年研究区NPP总量及年NPP标准差

Fig. 1 Total quantity and standard deviation of NPP from 1982 to 1999

出现在7月份,达2.98PgC,全年中NPP积累量主要发生在4~10月份,该时段内NPP总量占全年总量的86.81%。春(3~5月份)、夏(6~8月份)、秋(9~11月份)、冬(12~翌年2月份)四季NPP总量平均值分别为:2.31、8.16、2.79、1.10 PgC,分别占全年NPP平均总量的16.20%、57.27%、19.58%、7.73%。

研究区月平均NPP与月平均温度呈显著正相关,相关系数达0.908 ($P < 0.001$),与降水与呈显著正相关,相关系数达0.977 ($P < 0.001$),因此研究区月NPP与月平均温度及平均降水量具有非常密切的关系,5、6、7、8、9月份平均温度较分别较全年平均温度高出

4.87、8.11、9.63、8.51、5.27℃,降水分别占全年平均量的8.66%、13.55%、18.76%、17.89%、12.29%,因此水、热条件较好的月份,月NPP也相对较高,温度和降水是影响研究区植被生产力的重要因子。

不同季节NPP变化趋势见图3,NPP均呈增加趋势,夏季增加最快,平均增长 $0.707 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,春季次之,平均增长 $0.401 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,秋季平均增长 $0.095 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,冬季增长最慢,为 $0.077 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。春、夏、秋、冬四季植被NPP增长分别占全年NPP增长的31.33%、55.23%、7.42%、6.02%。可见由于夏季水热等条件充足,净第一性生产力累积率最高,是植被生长的主要季节。在春、夏、秋、冬四季中,NPP平均值在1992年均较低。春、夏、秋、冬四季NPP较高值多数出现在20世纪90年代,分别为1994年(夏、冬季)、1995年(夏、冬季)、1997年(春季)、1998年(春、夏季)、1999年(春季),20世纪80年代仅出现2a,即1987年(冬)和1988年(秋),这些年份相应季节的气候条件更适合植被生长。

3.2 东亚地区陆地生态系统NPP空间分布特征

研究区NPP空间变化特征见图4。研究区东部、南部以及北纬 $50^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 区间的年均NPP相对较高。将NPP年平均值分成3个范围,低值区($7.82 \sim 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)、中值区($301 \sim 700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)、高值区

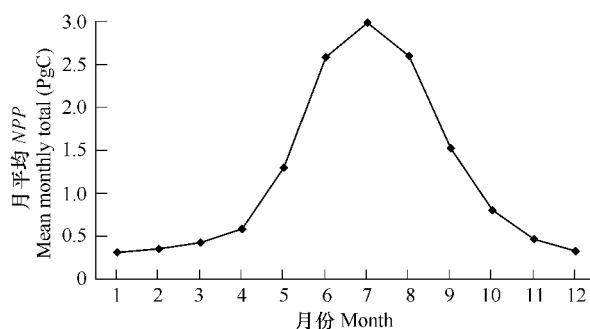


图2 研究区月NPP变化趋势

Fig. 2 The trend of monthly NPP

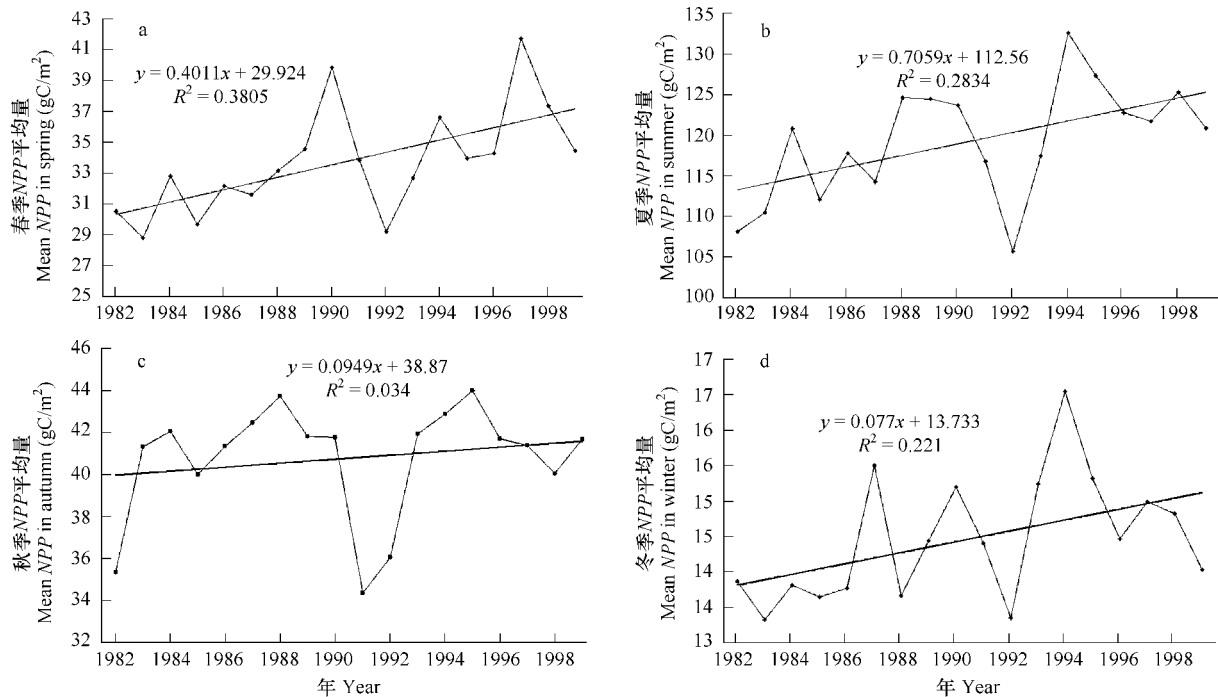


图3 不同季节 NPP 变化趋势

Fig. 3 NPP trend in different seasons

($>700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)。NPP 年平均值低值区主要分布于蒙古中南部、哈萨克斯坦东部、巴基斯坦与印度接壤地区以及中国西北部,中国西北地区主要包括新疆维吾尔自治区、西藏自治区西北部、青海省西北部、甘肃省西北部、内蒙古自治区西南部地区。这些地区主要以沙漠、戈壁、荒漠、冰原为主,还有部分草地及开放灌丛。NPP 年平均值介于 $7.82 \sim 100 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域主要介于中国西藏自治区中部、青海省中部、宁夏回族自治区大部分地区以及内蒙古自治区中北部地区,哈萨克斯坦中西部,乌兹别克斯坦北部,塔吉克斯坦中西部,巴基斯坦东北部以及俄罗斯西部靠近北极及东部部分地区。这些地区植被类型主要为郁闭灌丛、开放灌丛、草地、有林地,以及部分农作物种植区,由于气候干旱或气温较低,植被的生产力较低。NPP 年平均值介于 $201 \sim 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域主要位于北纬 $57^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ 俄罗斯大部地区、蒙古中北部,中国内蒙古自治区东北部、辽宁省和吉林省西部以及黑龙江省西南部、西藏自治区与青海省中西部、哈萨克斯坦中北部以及印度中西部地区。这些区域的植被类型主要为落叶针叶林、落叶阔叶林、有林草地、开放灌丛、草地、高寒植被,这些地区开始出现森林与草原的交界区,其中气温是高寒植被生产力的主要限制因素。

NPP 年平均值介于 $301 \sim 400 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域主要位于北纬 $50^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 的俄罗斯北方针叶林区,印度平原农业区,乌兹别克斯坦与塔吉克斯坦交界的农业区以及中国华北平原、东部农业区和东北的部分针阔混交林区,这些地区地势平坦,水热条件较好,植被生产力较高。NPP 年平均值介于 $401 \sim 700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域主要位于俄罗斯境内的阿尔泰山脉西北端以及远东地区大片的常绿针叶林和针阔混交林区,中国秦岭以南的常绿阔叶林区、东部和东南部农业区、东北的常绿针叶林、针阔混交林区、落叶针叶林区和落叶阔叶林区,朝鲜半岛和日本大部分地区,印度东南部以及泰国中部地区。这些地区自然条件较适合植被生长,是生产力较高的地区,其中农业区主要是一年两熟的地区。在地理范围上处于北纬 $35 \sim 55^\circ \text{N}$,东经 $70 \sim 125^\circ \text{E}$ 的地区主要属于温带季风气候区,四季分明,降水集中在夏季。东西伯利亚、中国东北北部、朝鲜和日本等 45°N 以北 55°N 以南的广大地区,大陆性气候强烈,部分地区开始出现雪线和冻土层。 $10^\circ \sim 20^\circ \text{N}$ 地区为热带季风气候区,印度半岛和中南半岛(老挝及越南北部除外)气温最高的时期一般为 3~5 月份,冬夏季风交替、每年分干湿两季。

NPP 年平均值介于 $701 \sim 2000 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域主要位于 $10^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ 之间,分别属于印度东南和西南部、缅

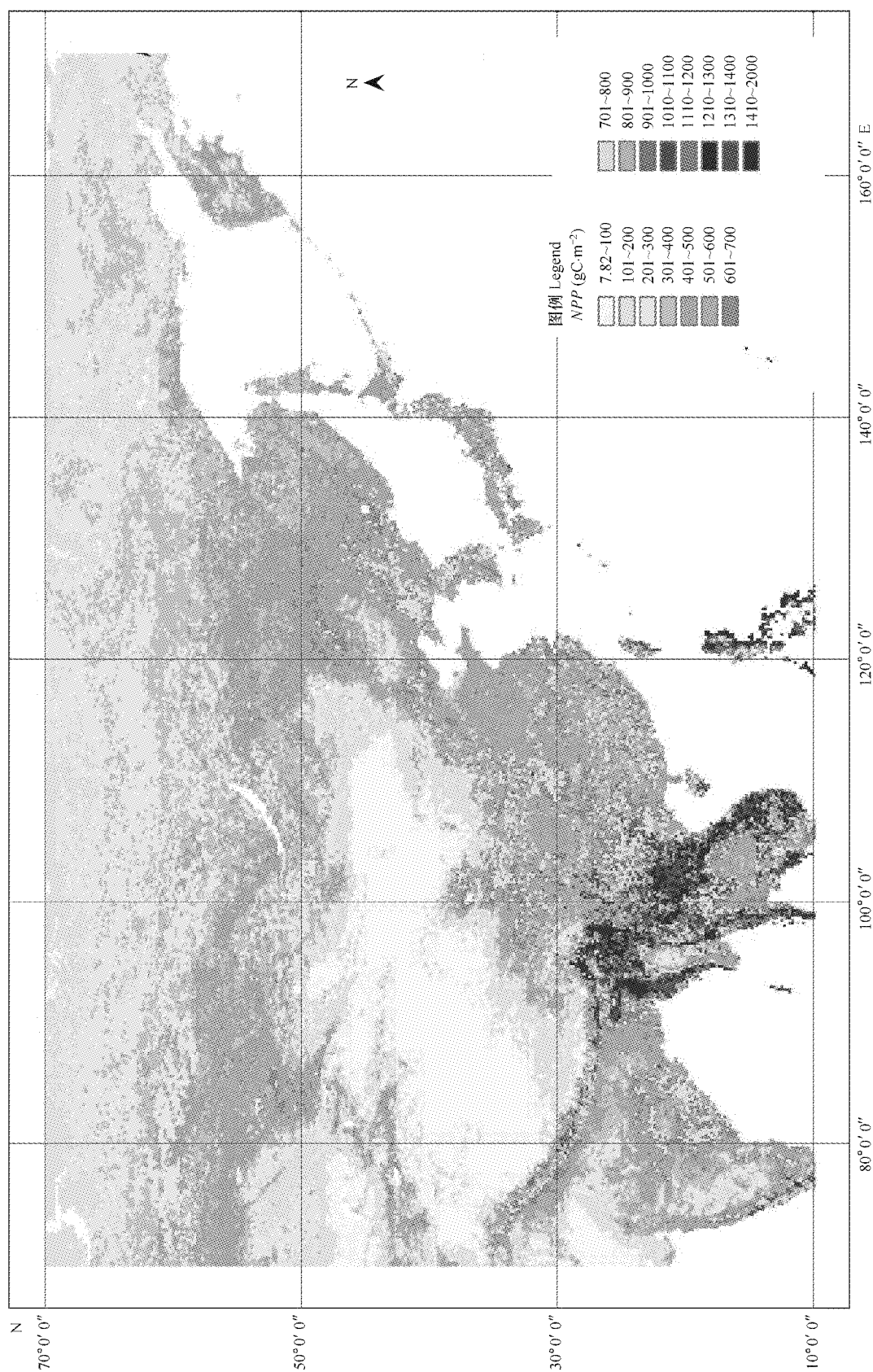


图4 1982~1999年研究区年平均NPP分布

Fig. 4 Spatial map of annual mean NPP during 1982~1999

* 研究区NPP空间分布图是根据NOAA/AVHRR NDVI数据①、植被分类数据②、气象数据、NPP实测数据, 基于CASA模型计算得到的
Spatial NPP is derived from CASA NPP model drove by NDVI data, vegetation classification data, meteorological data and field measured NPP

① <http://edcdaac.usgs.gov>

② http://hpsftp.umi.acs.umd.edu/project/GI/CF/DerivedData/Global_Land_Cover/gi-latlong-8km-landcover

甸、老挝、柬埔寨、越南、孟加拉国、菲律宾群岛、中国东南和西南以及朝鲜半岛和日本部分地区。这些地区水热非常充足,植被类型主要为常绿阔叶林,且大部分为热带雨林,植被立体空间层次梯度明显,林内物种类型繁多,该地区属于热带和亚热带季风气候区。另外喜马拉雅山脉南部和西南端出现 *NPP* 年平均值超过 $700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的一条高值条带,由于喜马拉雅山脉高大的山体阻挡了来自印度洋的暖湿气流,造成这些区域降水量增加,适合常绿阔叶林生长,因此生产力较高。

3.3 不同植被类型的 *NPP*

3.3.1 不同植被类型平均及总 *NPP*

1982 ~ 1999 年研究区各植被类型 *NPP* 见表 3。各植被类型平均 *NPP* 分别为:常绿阔叶林 ($1253.59 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 落叶阔叶林 ($568.28 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 农作物 ($516.30 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 有林草地 ($415.06 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 针阔混交林 ($405.44 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 有林地 ($399.69 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 常绿针叶林 ($326.27 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 落叶针叶林 ($302.77 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 郁闭灌丛 ($242.36 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 高寒植被 ($236.99 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 草地 ($223.57 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) > 开放灌丛 ($135.25 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)。由于常绿阔叶林分布的地区气候条件适合植被终年生长,因此常绿阔叶林平均 *NPP* 最高;农作物施加了更多的人为培育措施,因此农作物平均 *NPP* 居于较高的位置;高寒植被平均 *NPP* 虽然生长期较短,但其单位面积的生产力要高于草地,开放灌丛。

森林(包括常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林)面积占研究区面积的 36.82%,其总 *NPP* 占整个研究区的 46.55%,这与 Bunkei^[26] 的研究结果是相近的。

表 3 1982 ~ 1999 年研究区各植被类型平均及总 *NPP*

Table 3 Mean and total *NPP* for different vegetations in the study area during 1982 ~ 1999

植被类型 Vegetation type	面积 Area (10^4 km^2)	平均 <i>NPP</i> Mean <i>NPP</i> ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	总 <i>NPP</i> Total <i>NPP</i> ($\text{PgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
常绿针叶林 ENF	487.13	326.27	1.59
常绿阔叶林 EBF	153.16	1253.59	1.92
落叶针叶林 DNF	417.54	302.77	1.26
落叶阔叶林 DBF	152.25	568.28	0.87
针阔混交林 MF	242.61	405.44	0.98
有林地 WL	358.78	399.69	1.43
有林草地 WG	157.77	415.06	0.65
郁闭灌丛 CS	38.5	242.36	0.09
开放灌丛 OS	180.64	135.25	0.24
草地 GL	712.8	223.57	1.59
农作物 CL	401.95	516.3	2.08
高寒植被 TV	642.18	236.99	1.52
合计 Total	3945.31		14.22

3.3.2 不同植被类型 *NPP* 的月变化

1982 ~ 1999 年不同植被类型月平均 *NPP* 变化见图 5。常绿针叶林 *NPP* 月变化呈单峰曲线,在 6 月份达到全年月份最高值,为 $69.86 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,在 1 月份达到全年月份最低值,为 $4.44 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,全年 *NPP* 的累积主要发生在 4 ~ 10 月,占全年 *NPP* 累积量的 91.27%。常绿阔叶林 *NPP* 月变化呈“M”型双峰曲线,第一个峰值出现在 5 月份,为 $113.08 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,第二个峰值出现在 10 月份,为 $122.46 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 且为全年最高。由于气候条件能够满足常绿阔叶林常年生长的需要,故而其 *NPP* 除在 7 月份略低于落叶阔叶林外,其它月份均明显高于其它植被类型,其全年月平均 *NPP* 最低值出现在 1 月份,为 $78.05 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,4 ~ 5 月份其 *NPP* 显著增加,在 1 ~ 10 月份呈波动增加趋势,在 11 ~ 12 月份显著下降。落叶针叶林月平均 *NPP* 变化呈单峰曲线,其 *NPP* 累积主要集中在生长季节,即 4 ~ 10 月份,此时段其 *NPP* 累积量占全年的 99.89%,1 ~ 3 月份及 11 ~ 12 月份其生长活动基本停止,*NPP* 趋于 0 值。落叶阔叶林月平均 *NPP* 变化呈单峰曲线,最大值出现在 7 月,为 $115.13 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,最小值出现在 1 月份,为 $10.83 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,由于落叶阔叶林空间分布广,生长节律差异较大,在全年各

个月份中均有较高的 NPP 累积。针阔混交林 NPP 月变化呈单峰曲线, NPP 由 1 月份的 $0.83 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 缓增到 4 月份的 $12.71 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 然后迅速增加到 7 月份的 $98.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 再迅速下降到 10 月份的 $14.73 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 11 ~ 12 月 NPP 下降较平缓, 全年月 NPP 最大值出现在 7 月份。有林地月平均 NPP 变化呈单峰曲线, 在 7 月达到全年的最大值, 为 $94.47 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 4 ~ 7 月 NPP 增加迅速, 7 ~ 10 月迅速下降, 1 ~ 3 月及 11 ~ 12 月变化平缓, 4 ~ 10 月 NPP 累积量占全年累积量的 97.25%。有林草地月平均 NPP 变化呈双峰曲线, 第一个峰值出现在 2 月份, 为 $27.28 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 第二个峰值出现在 9 月, 为 $61.37 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 这主要是由于其分布区夏季炎热, 降水相对集中, 而 9 月份气温和降水更适合其生长。郁闭灌丛月平均 NPP 变化呈双峰曲线, 第一个峰值出现在 3 月, 为 $13.48 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 第二个峰值出现在 8 月且为全年最大值, 为 $35.99 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 1 ~ 4 月份 NPP 变化较缓慢, 4 ~ 8 月份 NPP 显著增加, 9 ~ 12 月份 NPP 显著减少, 全年 NPP 累积主要发生在 5 ~ 11 月份, 占其全年累积量的 73.5%。开放灌丛月平均 NPP 变化呈单峰曲线, 在 7 月份达到全年最大值, 为 $90.97 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 在 1 月达到其全年最小值, 为 $12.84 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 全年 NPP 累积主要发生在 4 ~ 10 月份, 占全年的 83.72%。草地月平均 NPP 变化具有明显的季节性特征, 呈单峰曲线, NPP 累积主要发生在 4 ~ 10 月份, 占全年累积量的 90.21%, 月 NPP 最大值出现在 7 月份, 为 $46.85 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。农作物 NPP 月变化呈单峰曲线, 具有明显的季节特征, 最大值出现在 7 月, 为 $90.97 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 最小值出现在 1 月份, 为 $12.84 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。高寒植被由于其分布区平均气温低, 低温是其生长的主要限制因子, 1 ~ 4 月份、11 ~ 12 月份, 其生长活动基本停止, NPP 趋近于 0, 全年 NPP 累积主要发生在 5 ~ 9 月份, 占全年累积量的 98.55%。落叶阔叶林、针阔混交林、有林地、落叶针叶林、农作物、高寒植被、常绿针叶林全年 NPP 累积季节性较强, 植被的生长活动主要集中在夏季, 因此夏季气候条件的变化最易影响其生长活动。

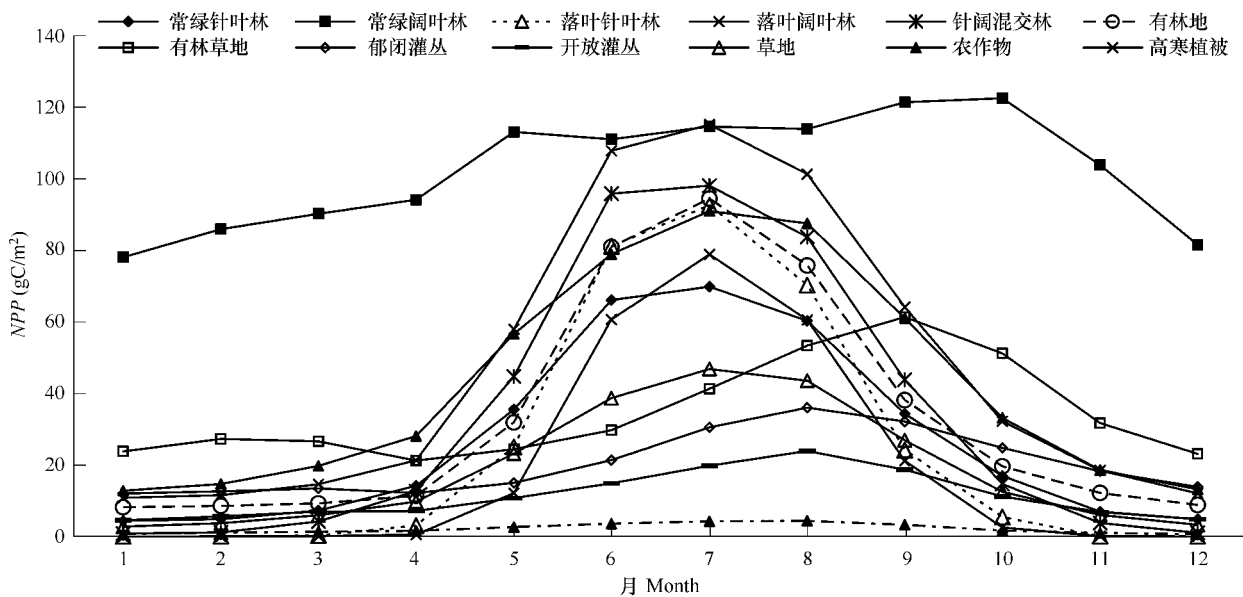


图 5 不同植被类型月平均 NPP 变化

Fig. 5 Change trend of mean monthly NPP for different vegetations

3.4 研究区 NPP 经纬向变化特征

分别划出 20、25、30、40、50、55、60、69°N 八条纬度剖线, 69、80、90、100、120、125、130°E 7 条经度剖线, 提取每条经、纬度剖线所有像元 1982 ~ 1999 年 NPP , 计算 NPP 平均值及标准差, 结果见表 4。

北纬 40°N 以南的不同纬线之间, 随着纬度的降低, NPP 与标准差越大, 以北的不同纬线之间, 随着纬度的升高 NPP 标准差减小, 而且除北纬 55°N 外, 其它各条纬线的平均 NPP 也呈减小趋势, 因此北纬 40°N 线可以看作是其南 3 条及其北 4 条纬线的分界线, 在其两侧, 不同纬度线之间随着纬度的升高, 其 NPP 平均值具

有相似的变化趋势。在八条纬度剖面中,北纬 20°N 剖面平均 NPP 最高,达 $753.80 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,该条剖面在研究区域的南端,水热条件适合植被的生长,同时其标准差也最大,说明其 NPP 的空间异质性最高,北纬 40°N 平均 NPP 最低,为 $169.71 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,在北纬 69°N 所经区域,由于植被类型差异很小,生长季节也具有高度的一致性,因此其 NPP 空间异质性最低。

表 4 各经度和纬度剖面平均 NPP 及标准差Table 4 Mean NPP and the standard deviation at different latitude and longitude sample lines

项目 Item	纬度剖面 Latitude sample line (°N)							
	20	25	30	40	50	55	60	69
平均值 Mean NPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)	753.80	612.43	409.09	169.71	334.72	380.02	309.84	215.53
标准偏差 Standard deviation	399.59	324.53	181.17	205.07	110.24	64.36	48.39	41.46
经度剖面 Longitude sample line	69°E	80°E	90°E	100°E	110°E	120°E	125°E	130°E
平均值 Mean NPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)	228.39	303.72	261.37	400.44	354.08	351.65	389.48	365.03
标准偏差 Standard deviation	122.26	188.53	212.79	268.94	200.29	150.85	114.68	128.23

不同经线剖面平均 NPP 及其标准差变化的规律性很小,八条经线剖面中平均 NPP 最高的为 100°E,达 $400.44 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,其标准差也最大,平均 NPP 最低的为经过大片沙漠地区的东经 69°E 剖面,达 $228.39 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, NPP 标准差最小的经度剖面为 125°E,其经过的区域植被生产力差别最小。

不同纬度及经度线上 NPP 的变化呈现千差万别的特征,即使同一纬度、同一经度剖面内的 NPP 变化特征也是丰富多彩,从表象上看是植被类型空间变化的多样性造成了 NPP 空间分布的多样性,实质上其主要原因是由于不同纬度和经度空间内水热条件及其分配程度的差异造成的,水热条件及其分布的差异性才使植被类型及其生产力在空间分布上复杂多样,在此基础上才衍生出了物种多样性和景观多样性,这对于生态系统的稳定极其重要。

5 结论

本文利用遥感数据、气象数据以及统计观测数据等,基于 CASA 生态系统模型估算了 1982 ~ 1999 年东亚地区陆地生态系统植被净一性生产力。

1982 ~ 1999 年研究区总 NPP 在波动中呈现增加趋势:从 1982 年的 $12.84 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加到 1999 年的 $14.43 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,平均每年增加 0.08833 PgC 。18 年间 NPP 的平均值为 14.24 PgC ,约占全球 NPP 的 22.6% ~ 23.9%。春、夏、秋、冬四季 NPP 总量分别为:2.31、8.16、2.79、1.10 PgC ,分别占全年总量的 16.20%、57.27%、19.58%、7.73%。

常绿针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、落叶针叶林、有林地、开放灌丛、草地、农作物、高寒植被平均 NPP 年变化呈单峰曲线, NPP 累积季节性较强,植被的生长活动主要集中在夏季,夏季气候条件的变化更易影响植被的生长活动。常绿阔叶林、有林草地、郁闭灌丛平均 NPP 年变化呈“M”型双峰曲线,植被生长的高峰期集中在气候条件相对适宜的月份。

研究区经纬向剖面 NPP 变化规律性并不明显,这主要是由于水热条件及其分配程度的差异造成的,不同植被类型及其生产力在空间分布上复杂多样,对于生态系统的稳定性具有重要意义。

References:

- [1] Qi Y. The effect of climate change on vegetation at high latitudes of the northern hemisphere: a functional analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (4): 474 - 477.
- [2] Matthew P A, Maris J L. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *The Science of The Total Environment*, 2000, 262: 263 - 286.
- [3] Melillo J M, Kicklighter D W, McGuire A D. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234 - 240.
- [4] Cox P M, Betts R A, Jones C D. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupling model. *Nature*, 2000, 408: 184 - 187.
- [5] Cramer W A, Bondeau F I, Woodward I C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: results from

- six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7:353 — 373.
- [6] Alexandrov G A. The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial *NPP* and its application. *Ecological Modelling*, 2002, 148:293 — 306.
- [7] Schimel D, Melillo J, Tian H. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystem in the United States. *Nature*, 2000, 278: 2004 — 2006.
- [8] He Y, Dong W, 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 — 5092.
- [9] Ruimy A, Saugier B. Methodology for the Estimation of Terrestrial Net Primary Production from Remotely Sensed Data. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 97:18515 — 18521.
- [10] Jeffrey A H. NCEP and GISS solar radiation data sets available for ecosystem modeling: Description, differences, and impacts on net primary production. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 19, 1 — 18.
- [11] Potter C S, Randerson J T, Field C B. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biochemich Cycle*, 1993, 7:811 — 841.
- [12] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:74 — 88.
- [13] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281:237 — 240.
- [14] Goetz S J, Prince S D. Remote sensing of net primary production boreal forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78:149 — 179.
- [15] Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997, 78(3):953 — 958.
- [16] McCrady R L, Jokela E J. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science*, 1998, 44(1):64 — 72.
- [17] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5:1 — 15.
- [18] Townshend J, Justice C. Global land cover classification remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35:243 — 255.
- [19] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannual change in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7):1377 — 1382.
- [20] Yang L M, Zhu Z L. The status quo and expectation of global and local land cover and land use RS research. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4):340 — 344.
- [21] Peng S L, Guo Z H. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6):903 — 909.
- [22] Zhu W Q, Pan Y Z, Hao H. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China, *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4):457 — 463.
- [23] Prince S D, Gietz S J, Goward S N. Monitoring primary production from earth observing satellite. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 82:509 — 522.
- [24] Fan J W, Zhong H P, Liang B. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. *Grassland of China*, 2003, 25(6):51 — 58.
- [25] IPCC. Climate change, impact, adaptations and mitigation of climate change: Scientific technical Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996, 25.
- [26] Bunkei M, Masayuki T. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81, 58 — 66.

参考文献:

- [1] 齐晔. 北半球高纬度地区气候变化对植被的影响途径和机制. *生态学报*, 1999, 19(4):474 ~ 477.
- [8] 何勇. 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 ~ 5092.
- [20] 杨立民, 朱智良. 全球及区域尺度土地覆盖土地利用遥感研究的现状和展望. *自然资源学报*, 1999, 14(4):340 ~ 344.
- [21] 彭少麟, 郭志华, 王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. *生态学报*, 2000, 20(6):903 ~ 909.
- [24] 樊江文, 钟华平, 梁飏. 草地生态系统碳储量及其影响因素. *中国草地*, 2003, 25(6):51 ~ 58.

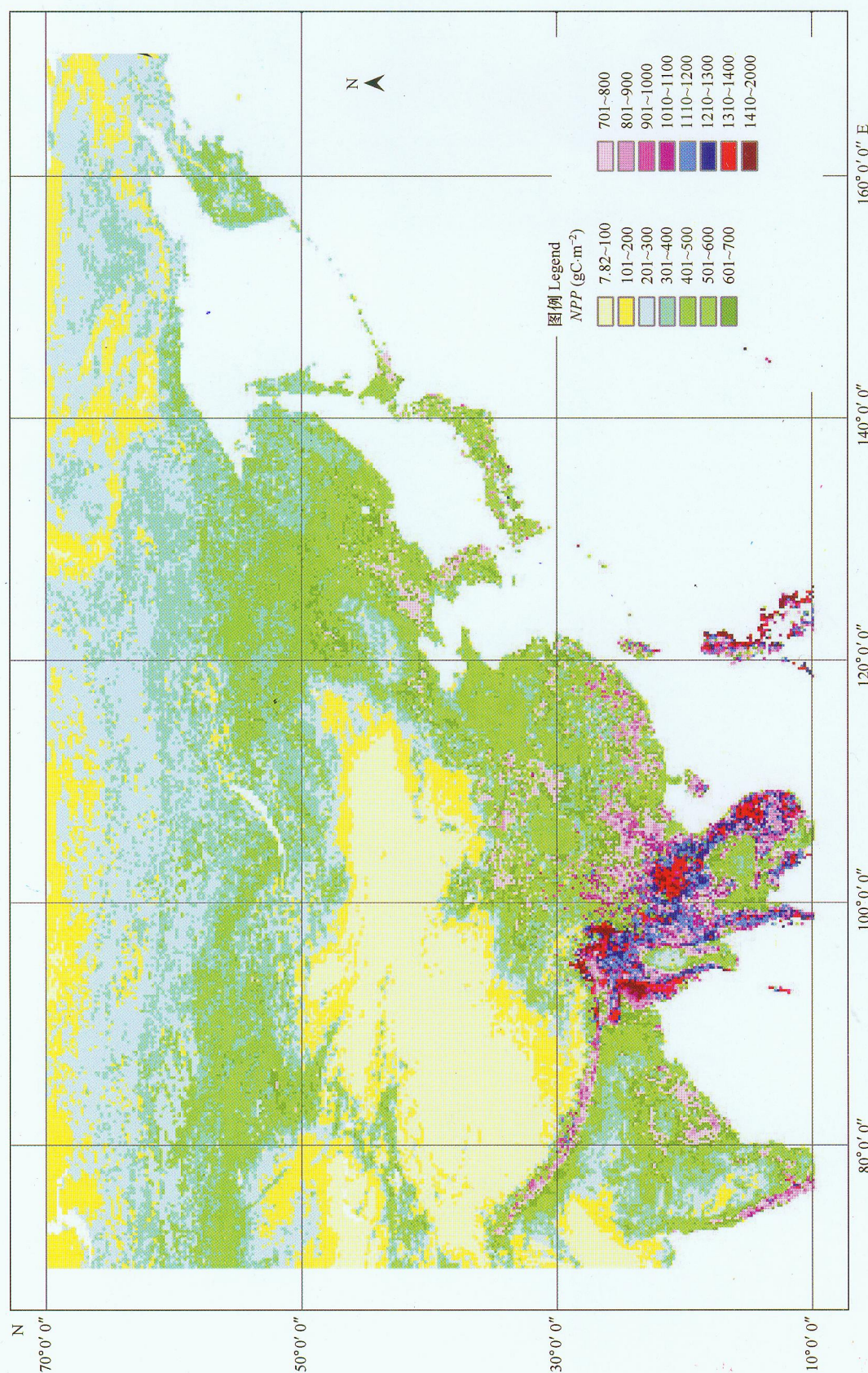


图4 1982~1999年研究区年平均NPP分布

Fig. 4 Spatial map of annual mean NPP during 1982~1999

* 研究区NPP空间分布图是根据NOAA/AVHRR NDVI数据①、气象数据、NPP实测数据, 基于CASA模型计算得到的
Spatial NPP is derived from CASA NPP model drove by NDVI data, vegetation classification data, meteorological data and field measured NPP

① <http://edcdaac.usgs.gov>

② ftp://hpsftp.umn.edu/project/GLCF/DerivedData/Global_Land_Cover/gl-latlong-8km-landcover