

1982~2010年中国东北地区植被NPP时空格局 及驱动因子分析

毛德华^{1,2}, 王宗明¹, 韩佶兴^{1,2}, 任春颖¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:应用逐像元线性回归模型方法,整合应用MODIS和AVHRR NDVI数据集,构建1982~2010年覆盖东北地区的8 km空间分辨率的NDVI数据集,进而应用CASA模型估算得到东北地区29 a NPP数据集,模拟精度在75%以上。29 a平均的东北地区植被NPP总量为 6.5×10^8 tC/a。植被NPP的分布受植被类型、气候、地形因素的综合影响。NPP地域差异明显,山地区植被>平原区植被>高原区植被,变化最大的植被类型为草地植被。过去29 a间,植被NPP呈显著上升趋势($P < 0.01$)。气候变化和土地利用变化均是影响植被时空格局的重要因素。

关键词: NPP; AVHRR GIMMS NDVI; MODIS NDVI; CASA模型; 中国东北地区

中图分类号: TP79 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)09-1106-06

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)及其对全球变化的响应是理解陆地碳循环的关键。随着遥感技术的兴起和发展,基于遥感观测的植被NPP研究已经较好地应用于实时、连续监测和年际波动及长期变化趋势的探测^[1]。以遥感数据驱动的植被NPP模型(如CASA, CEVSA, BIOME-BGC等)得到迅速发展和应用。以归一化差异植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)为驱动的CASA模型是国际上较为常用的NPP估算方法。国内外学者基于CASA模型开展了较多植被NPP的估算及其对全球变化的响应研究^[2,3]。

东北地区地处中国东北边陲,植被是中国的重要生态屏障和区域环境调控者,对植被NPP进行长时间序列的监测与模拟具有十分重要的意义。相关学者针对中国东北地区NPP开展一些研究^[4,5],但之前研究大多局限于植被NPP对气温和降水的响应分析,而并未从多种气象因子及土地利用变化角度开展长时间序列的驱动分析。植被NPP的时间变化表征着植被生长活力的变化,分析以往基于遥感数据的NPP估算研究的时间序列,普遍存在受单一遥感数据源限制而未能完成

长时间序列NPP估算的局限。而进行长时间序列植被NPP研究,是区域植被碳储量变化以及碳循环平衡模拟的重要内容。本文以此为出发点,整合应用AVHRR和MODIS两种NDVI遥感数据源进行长时间序列的月尺度NPP模拟,旨在探讨1982~2010年间植被NPP的时空变化,为长时间序列NPP模拟提供案例支持,同时为东北地区植被碳储量变化研究提供依据。通过对NPP与气温、降水、太阳辐射和实际蒸散的相关分析及土地利用变化分析来探讨NPP变化的驱动因子,以此更好的理解NPP变化的影响因素,为植被监测和生态保育工作提供理论依据。

1 研究区概况

中国东北地区位于东经115°32'~135°09'E、北纬38°42'~53°55'N。该区北部与俄罗斯接壤,东南部与朝鲜半岛相接,南部滨临中国渤海和黄海。属温带大陆性季风气候,冬季寒冷;研究区平均气温由南往北逐渐降低,北部气温相对较低,是中国第二大多年冻土分布区。东北地区典型的热量变化和湿度分异,加上独特的植被分布格局,成为全球变化和陆地生态系统研究的敏感区域。东

收稿日期: 2011-12-23; **修订日期:** 2012-03-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050101)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-07-06, KZZD-EW-08-02)、国家自然科学基金项目(40930527)资助。

作者简介: 毛德华(1987-),男,山东沂水人,博士研究生,研究方向为资源环境遥感。E-mail: maodehua@gmail.com

部地区的年降水量为400~700 mm,属寒温带、暖温带湿润、亚湿润地区;西部仅为250~400 mm,属中国亚干旱地区。全区植被类型多样,具有明显的空间分布差异,与地形分布高度相关。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文所用遥感数据有1982~2003年8 km分辨率的AVHRR NDVI和2000~2010年1 km分辨率的MODIS NDVI。基于两种数据源重合时间段的NDVI,建立逐像元一元线性回归模型,应用重采样的8 km分辨率的MODIS NDVI对GIMMS数据集进行时间序列插补,构建1982~2010年NDVI序列^[6]。NPP模拟过程中应用到了中国科学院植被图编辑委员会2001年编制的植被图和中国气象共享服务网提供的1982~2010年东北地区各站点的逐月平均气温、降水和日照时数数据集。本研究中实际蒸散(ET)为Thornthwaite法^[7]计算得到。太阳总辐射量(SOL)由大气上界太阳辐射量和日照百分率计算得到^[8]。通量数据来自长岭草地通量观测站和三江平原沼泽湿地通量观测站。

2.2 NPP模拟与分析

本文基于所构建的1982~2010年NDVI数据集和气象数据为驱动,应用光能利用率模型CASA模型^[4]估算29 a的NPP。本文中最大光能利用率参考朱文泉等^[9]所模拟的参数值。NPP的模拟过程均在ArcInfo Workstation中编辑AML宏语言完成。NPP时间变化分析采用趋势线分析法^[5],通过逐像元计算NPP变化斜率来探讨变化趋势。NPP与气候要素间的分析主要采用空间相关分析^[10]的方法,通过计算长时间序列数据的相关系数来反映两个因子间的相关程度。

3 结果与讨论

3.1 NPP模拟结果与精度评价

本文采用将模拟值与通量观测数据比较的方式对植被NPP进行验证,将GPP数据通过单位转换和碳利用效率系数运算^[11]得到月NPP。图1看出,模拟值与实测值比较接近,误差在25%以内,相关系数为0.861,说明本文的NPP结果模拟可靠。

3.2 NPP空间变异分析

计算结果表明:1982~2010年间平均的东北地区植被年NPP总量为 6.5×10^8 tC/a。植被NPP的分

布受植被类型、气候、地形因素的综合影响,空间异质性强(图2)。呼伦贝尔草原区、吉林西部及通辽、赤峰地区是东北草地的主要分布区,气候干旱,降水较少,长期过度放牧和开垦,并有草原荒漠化、盐碱化现象存在^[12],故NPP较低,在400 gC/(m²·a)以下。东北三大平原区主要为农田植被,NPP值在400~600 gC/(m²·a)之间。大兴安岭东麓、小兴安岭地区植被主要以温带针阔混交林和落叶针叶林为主,受温度条件限制,NPP值大致在600~800 gC/(m²·a)。完达山系和长白山脉地区主要以落叶阔叶林和温带常绿针叶林植被为主,受海洋气候影响,水热条件充分,植被NPP值相对较高,在700 gC/(m²·a)以上。从地形分布看,山地植被NPP最高,平原植被区次之,高原区最低。

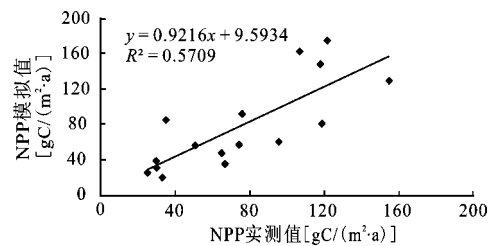


图1 涡度相关实测数据与NPP模拟值对比

Fig. 1 Coloration between eddy covariance data and simulated NPP

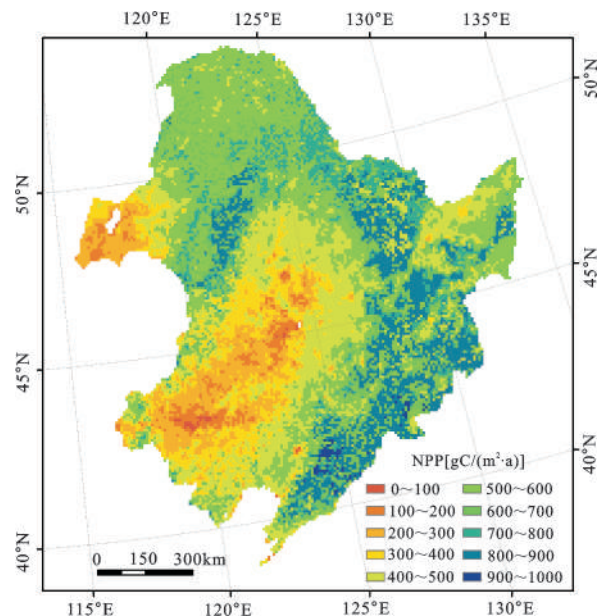


图2 东北植被NPP空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NPP in Northeast China

逐像元趋势线分析得出(图3):东北地区NPP

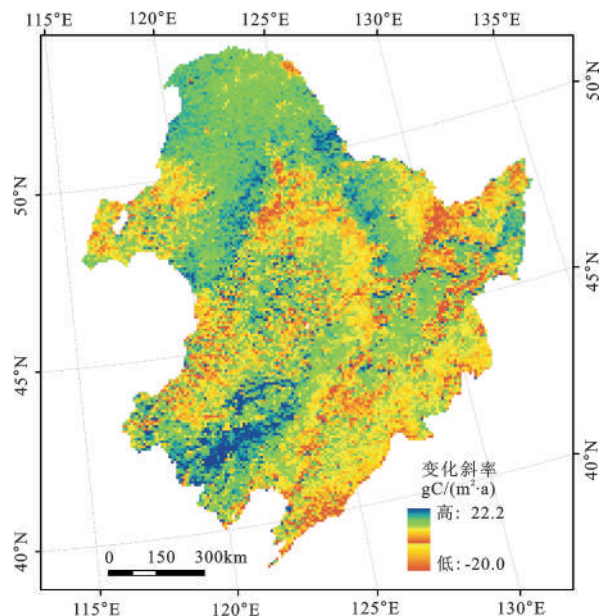


图3 东北植被NPP变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of change trends of NPP in

呈下降趋势的区域主要为典型林区与平原区的交错地带和呼伦贝尔草原区与赤峰草地亚干旱区。这些地区受人类活动影响严重;森林滥砍乱伐,草地过度放牧等因素,均是造成NPP降低的主要原因^[13]。内蒙古干旱区同时受气温升高、降水减少的气候变化影响,NPP呈现下降趋势。内蒙古干旱区部分像元表现出NPP上升趋势,土地利用类型的变化可能为主要原因之一,部分草地转化为农田植被;同时,人类逐步认识到草原荒漠化的不利后果,草地保护、合理放牧等措施为部分地区草地植被的生长提供了有利条件,故NPP呈上升趋势。大小兴安岭森林植被区呈现上升趋势,原因为该区地处东北边陲,人口稀少,受人类活动影响小,同时该区植被生长所需水分不仅有降水,还有积雪融水、冻土融水等,水热条件朝着更加适宜该区植被生长方向发展。空间变异分析结果得出,变异较大的区域与NPP低值区一致,主要分布在呼伦贝尔草原区、吉林西部亚干旱区和赤峰、通辽荒漠草原亚干旱区。

3.3 东北地区植被NPP总量的年际和年代变化分析

植被NPP区域总量与年份回归分析结果显示:植被NPP呈显著上升趋势($P<0.01$)。2010年植被NPP总量达 7.3×10^8 tC/a。分析年际变化得出,植被NPP呈现先上升后下降的趋势,2000年以后呈现轻度下降趋势。这种趋势与Zhu等^[14]和国

志兴等^[5]研究结果相吻合。由逐像元线性趋势分析和空间变异分析得出,变化较大的植被类型主要为草地,全区草地植被NPP平均值表现出显著上升趋势($P<0.01$),虽然部分区域的草地植被覆盖度降低,草原荒漠化现象严重,但耕垦活动及逐渐合理的草地保护、合理放牧等因素是全区草地NPP总和的升高的主要原因。

统计东北地区过去29 a间三个年代NPP得出,20世纪80和90年代NPP值分别为 6.25×10^8 tC/a和 6.51×10^8 tC/a,本世纪前10 a的NPP为 6.70×10^8 tC/a。可以明显看出东北地区植被净初级生产力在提高,分析主要原因为受气候变化影响,东北地区气温升高、多年冻土退化、冻土冻融时间缩短,植被发芽期提前,落叶期推后,导致植被生长期增加^[15],NPP升高。这表明东北地区植被固碳能力总体水平提高。

3.4 影响因子分析

1) 气候驱动因子。研究发现过去29 a间平均年光合有效辐射(APAR)总量与植被类型在空间分布上较为一致,NPP值较低的地区光合有效辐射低。呼伦贝尔典型草原区、吉林西部、通辽、赤峰地区光合有效辐射在 600 MJ/($\text{m}^2\cdot\text{a}$)以下。植被光合有效辐射较低,使得植被光合作用效率低,植被NPP较小。大兴安岭东麓、小兴安岭南麓和长白山地区光合有效辐射最高在 $1\ 600$ MJ/($\text{m}^2\cdot\text{a}$),主要为落叶阔叶林和针阔混交林,光合作用效率较高,该区气候湿润、适宜植被生长,平均年NPP较高。东北地区实际蒸散以由东南向西北逐渐递减。内蒙古地区属干旱、亚干旱地区,年降水量较少,地表实际蒸散较低。呼伦贝尔地区实际蒸散量最低,蒸散量在 250 mm以下,气候干旱、年降水量较少,年NPP较低。

年NPP和年平均气温与年降水量、年太阳辐射总量和年地表蒸散量4个气候因子间相关分析得出(图4):NPP与气温的相关性不明显,而NPP与降水间的相关显著性空间差异明显。研究区北部林区气温升高促进了植被的生长,表现为NPP与气温间呈正相关。大小兴安岭地区植被NPP与降水呈负相关,部分地区呈显著负相关,原因为本区相对气温较低,降水导致区域植被接受日照时数减少,太阳辐射减少,影响植被的光合作用^[16]。植被NPP与降水呈显著正相关的区域主要为内蒙古干旱区,尤其以呼伦贝尔地区最为典型,这一结

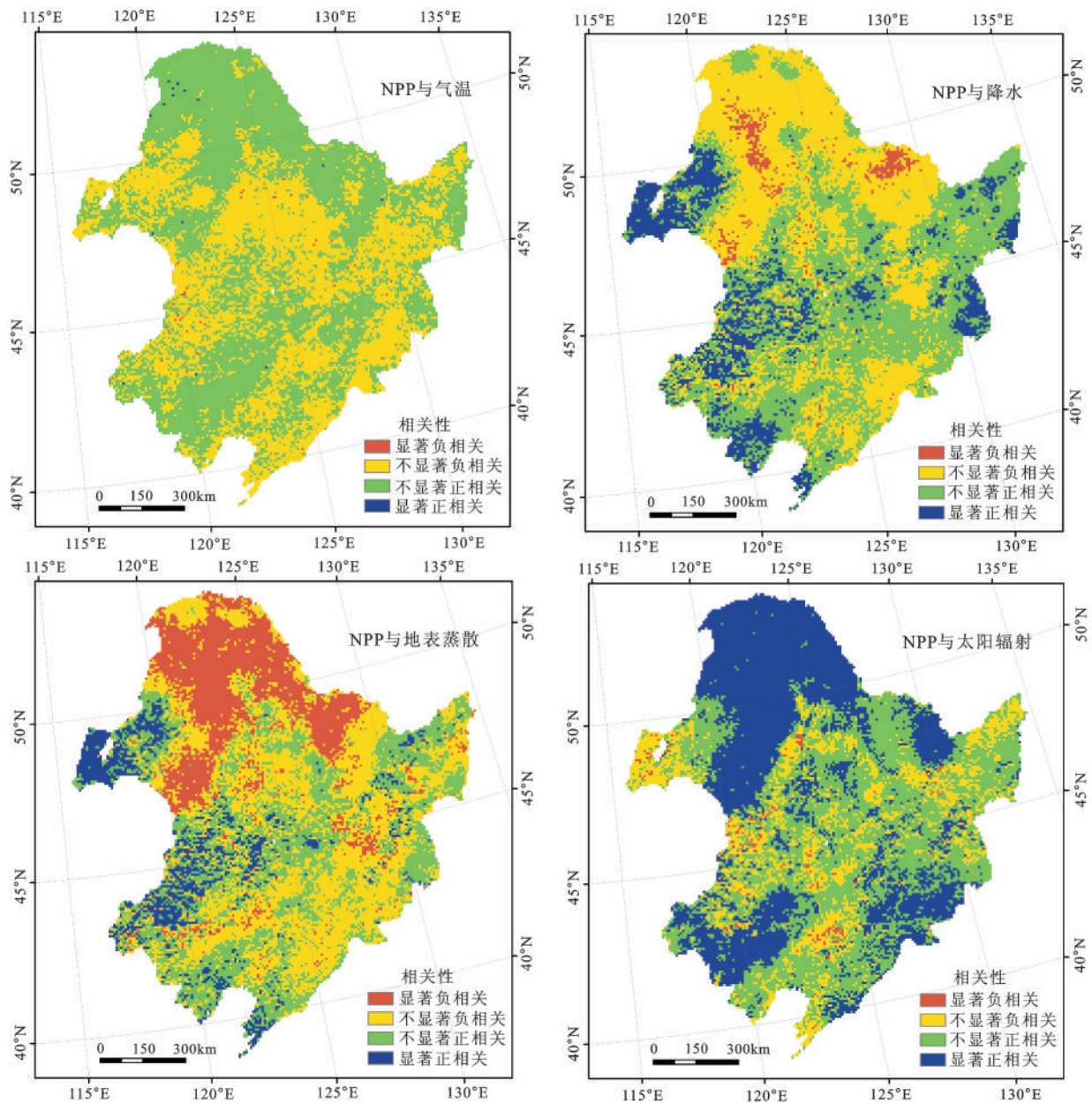


图4 东北地区植被NPP与气候因子间相关性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of correlations between NPP and climatic factors in Northeast China

论与张峰等^[17]的结论一致;降水是该区域植被所需水分的主要来源,降水是植被生长的主要限制因子^[18],降水减少导致区域内植被NPP降低。东北平原区植被与地表蒸散量无显著相关性,而大部分的大小兴安岭地区森林植被NPP与地表蒸散呈显著负相关,地表蒸散在一定程度上表征土壤水分的损失强度。地表蒸散减少,降低土壤水分的流失,植被生长所需要的土壤水丰富,故而有利于植被的生长。而该区域太阳辐射的增加表征该区域植被接收日照的时间延长,进而植被光合作用产出增加,同时气温升高延长了植被的生长期,故

植被NPP与太阳辐射呈显著正相关。在内蒙古干旱区NPP与地表蒸散呈显著正相关,尤以呼伦贝尔草原区最为明显;地表蒸散通过减少土壤水分加剧了植被生长的干旱环境,而草地植被根系较短,同时受降水量低、气温升高等因素影响,植被生长受到限制,NPP呈下降趋势,在地表蒸散同样下降的趋势下,故而呈现显著正相关。除部分干旱区植被因太阳辐射的增加而损失大量的土壤水和叶片水而呈现NPP与太阳辐射呈负相关外,东北大部分区域太阳辐射的增加对于植被的生长有利。

2) 土地利用变化驱动因子。结合植被 NPP 空间分布图可以看出: 不同土地利用类型的植被 NPP 差异明显。落叶阔叶林和常绿针叶林 NPP 最高, 落叶针叶林和针阔混交林次之, 农田植被 NPP 大于草地 NPP, 但二者均小于林地 NPP。土地利用类型分布影响植被 NPP 的空间格局。过去 29a 间土地利用类型的变化对植被 NPP 的影响在林地与耕地交错地带以及内蒙古地区表现尤为明显。林区与平原的交错地带, 植被 NPP 呈现下降趋势, 主要原因为林地面积减少, 土地利用类型转化为耕地所致。在过去几十年间东北地区经历了严重的土地利用变化。Wang 等^[19]研究东北地区土地利用变化得出, 1986~2000 年间林地面积减少 10 052 km²。林地植被转变为耕地植被和草地植被等明显降低了原处的植被 NPP。吉林西部土壤盐碱化的草地及内蒙古地区草地荒漠化现象严重, 且人为干扰大, 土地退化严重, 造成该区域的植被稀疏或直接发生土地利用类型转变由草地转变为裸地或沙漠。同样造成了植被 NPP 降低。吉林西部及内蒙古地区经济落后, 土地大规模开垦, 部分地区原有草地受人为干扰影响, 草地大面积的减少, 转变为耕地^[20], 导致植被 NPP 呈现上升趋势。东北地区经济的迅速发展^[21,22]均造成不同程度的土地利用类型转化, 进而造成了植被 NPP 的年际变化: 如城市面积的扩张, 导致城市周边耕地减少, 大面积的湿地开垦为农田等, 均影响植被 NPP 的时空分布特征。

4 结 论

本文整合 AVHRR 和 MODIS 两种遥感数据源的 NDVI 数据集, 应用 CASA 模型估算东北地区 1982~2010 年间 NPP。分析 NPP 空间格局及驱动因素得出: 东北地区平均植被 NPP 总量为 6.5×10^8 tC/a, NPP 地域差异明显, 空间异质性强, 从地形来看, 山地区植被 > 平原区植被 > 高原区植被; 针对不同植被类型而言, 落叶阔叶林和常绿针叶林 > 针阔混交林和落叶针叶林 > 农田植被 > 草地植被。东北地区植被 NPP 总量呈现显著上升趋势 ($P < 0.01$), 植被固碳能力总体升高。NPP 呈下降趋势的像元区域主要在典型山地区与平原区的交错地带和呼伦贝尔草原区与赤峰草地半干旱区。较其它植被类型而言, 近 30 a 间草地植被 NPP 变化最为明显。气候变化对植被 NPP 的影响程度地域差异明

显。气温、降水以及太阳辐射和地表蒸散的空间格局是影响植被 NPP 分布的重要控制因素, 但不同区域表现出的相关程度不同。土地利用变化通过改变植被类型进而影响植被 NPP 的时空格局。

参考文献:

- [1] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, **300**(5625): 1560-1563.
- [3] 陈福军, 沈彦俊, 李 倩, 等. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J]. *地理科学*, 2011, **31**(11): 1409~1414.
- [4] 张 峰, 周广胜. 中国东北样带植被净初级生产力时空动态遥感模拟[J]. *植物生态学报*, 2008, **32**(4): 798~809.
- [5] 国志兴, 王宗明, 张 柏, 等. 2000~2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2008, **30**(8): 1226~1235.
- [6] Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, doi: 10.1016/j.jag.2011.10.007.
- [7] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. *植物生态学报*, 1995, **19**(3): 193~201.
- [8] Seaquist J W, Olsson L, Ardo J. A remote sensing based primary production model for grassland biomass[J]. *Ecological Modelling*, 2003, **169**: 131-155.
- [9] 朱文泉, 潘耀忠, 何 浩. 中国典型植被最大光能利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006, **51**(6): 700~706.
- [10] 毛德华, 王宗明, 罗 玲, 等. 1982~2008 年东北冻土区植被生长季 NDVI 对气候变化和 CO₂ 体积分数增加的响应[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(11): 2332~2343.
- [11] Bhaskar J C. Carbon use efficiency, and net primary productivity of terrestrial vegetation[J]. *Advance Space Research*, 2000, **26**(7): 1105-1108.
- [12] 罗 玲, 王宗明, 宋开山, 等. 吉林省西部草地 NPP 时空特征与影响因素[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(1): 2319~2325.
- [13] 徐新良, 刘纪远, 庄大方, 等. 基于 3S 技术的中国东北地区林地时空动态特征及驱动力分析[J]. *地理科学*, 2004, **24**(1): 55~60.
- [14] Zhu W Q, Pan Y Z, Liu X, et al. Spatio-temporal distribution of net primary productivity along the northeast China transect and its response to climatic change[J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, **17**(2): 93-98.
- [15] Yang Z P, Ou Y H, Xu X L, et al. Effects of permafrost degradation on ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**: 33-39.
- [16] Piao S L, Fang J Y, Chen A P. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate changes in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(3): 269-275.
- [17] 张 峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植

- 被净初级生产力的动态模拟[J].植物生态学报,2008,32(4): 786~797.
- [18] 龙慧灵,李晓兵,黄玲梅,等.内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系[J].植物生态学报,2010,34(7): 781~791.
- [19] Wang Z M,Liu Z M,Song K S,et al.Land use changes in Northeast China driven by human activities and Climatic variation[J]. Chinese Geographical Science,2009,19(3):225-230.
- [20] 张 柏,崔海山,于 磊.东北平原西部半干旱地区土地退化研究[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(1):30~32.
- [21] 闫云霞,许炯心,廖建华.中国东北地区侵蚀产沙尺度效应的空间分异[J].地理科学,2010,30(5):783~789.
- [22] 杨 威,金凤君,王成金,等.东北地区经济增长效率及其时空分异研究[J].地理科学,2011,31(5):544~550.

Spatio-temporal Pattern of Net Primary Productivity and Its Driven Factors in Northeast China in 1982-2010

MAO De-hua^{1,2}, WANG Zong-ming¹, HAN Ji-xing^{1,2}, REN Chun-ying¹

(1.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: AVHRR NDVI at 8 km spatial resolution and MODIS NDVI at 1 km spatial resolution were integrated using per pixel linear regression model method to construct NDVI dataset from 1982 to 2010 at 8 km spatial resolution and covering Northeast China. Based on the constructed NDVI dataset and meteorological data, monthly net primary productivity in Northeast China in 1982-2010 were estimated using the CASA model. Simulation accuracy of net primary productivity was above 75% and through accuracy and consistency check. Annual total vegetation net primary productivity in Northeast China is 6.5×10^8 t/a (carbon), and the distribution of net primary productivity varied from vegetation types, climatic and topography differences. There are obvious difference and spatial heterogeneity for NPP in Northeast China. For the vegetation in different topography areas, net primary productivity decreased in the order of mountains, plains, plateaus. For different vegetation types, net primary productivity decreased in the order of broadleaved deciduous forest and evergreen coniferous forest, mixed coniferous and broadleaved forest and deciduous coniferous forest, crop, grass. Trend analysis at pixel extent showed that the pixels with decreased trends mainly distributed in the transitional zone between typical forest zone and plain, Hulun Buir grassland and Chifeng semi-arid region. Result of spatial variation analysis showed that the NPP of grassland vegetation had the highest changes compared with other vegetation types in the past 29 years. But net primary productivity of grassland have an obvious increase at a whole, this was maybe resulted from the conservative grazing and grassland protection. Net primary productivity exhibited obviously increasing trend in 1982-2010. Consequently, vegetation carbon fixation had enhanced as a whole acquired from the decade analysis. Climatic changes for different parameters are very important affecting factors on spatial pattern and annual dynamic of NPP. Land cover changes in Northeast China during the past 29 years influenced the spatial pattern and annual dynamic for net primary productivity of different vegetation types. Economic development in this region still makes a pressure for vegetation net primary productivity, especially the forest.

Key words: NPP; AVHRR GIMMS NDVI; MODIS NDVI; CASA model; Northeast China