

# 基于 MODIS 的东北三省植被 NPP 潜在气候生产力估算

刘丹, 于成龙

(黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030)

**摘要:**大范围准确的植被生产潜力的估测,可为区域生态建设与保护提供决策支撑。基于 MODIS/MCD12Q1 数据、MODIS/MOD17A3 数据和气象观测数据,在分析 2001—2013 年东北三省植被单位面积 NPP 年累积量时空变化的基础上,划分植被类别,构建东北三省植被 NPP 气候估算模型,并对研究区 2013 年植被 NPP 潜在气候生产力进行了估算。结果表明:(1) 2001—2013 年东北三省植被单位面积 NPP 年累积平均值( $\overline{\text{NPP}}$ )空间分异明显,变化范围为 15~1 000 gC/(m<sup>2</sup>·a),较高区域在辽宁东南部沿海和长白山东坡,达到 800~1 000 gC/(m<sup>2</sup>·a);(2) 2001—2013 年东北三省无显著的年际变化趋势,但其中自然植被 $\overline{\text{NPP}}$ 的年际波动幅度明显大于人工植被;(3) 根据 $\overline{\text{NPP}}$ 的大小将东北三省植被分成 3 个类别,在此基础上分析各个植被类别的 NPP 与温度因子(包括年平均气温、年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、4—10 月平均气温和年负积温)、降水因子(包括年降水量和 4—10 月降水量)、蒸散量因子(包括年蒸散量、4—10 月蒸散量)和光照因子(4—10 月平均日照时数和 4—10 月累计日照时数)的相关关系,进而构建 NPP 气候估测模型,观测值与模拟值结果之间的相关性均达到了极显著水平, RMSE 较小,模型的模拟结果比较可靠。(4) 2013 年东北三省 NPP 潜在气候生产力值在 422~1 100 gC/(m<sup>2</sup>·a),北部山区的 NPP 实际值接近于 NPP 潜在气候生产力值,而南部地区的 NPP 实际值较 NPP 潜在气候生产力值相差较大。

**关键词:** NPP; 估算模型; 潜力; MODIS; 东北三省

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0315-09

## Estimation on Climatic Productivity of Vegetation NPP in Northeastern China Based on MODIS

LIU Dan, YU Chenglong

(Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences; Harbin 150030; China)

**Abstract:** Net primary productivity (NPP) is a key component of the terrestrial carbon cycle and the accurate estimation on NPP can provide some reference for regional ecological construction and protection. Based on the MODIS data and meteorological data, the spatiotemporal change of annual NPP accumulation per unit area in Northeastern China from 2001 to 2013 was analyzed. Different vegetation cover types were divided and the climatic estimation model of vegetation NPP was constructed. And then we estimated the climatic productivity of vegetation NPP in 2013. The results showed as follows. (1) There were significant differences in average annual NPP accumulation ( $\overline{\text{NPP}}$ ) per unit area from 2001 to 2013 in Northeastern China. It ranged from 15 gC/(m<sup>2</sup>·a) to 1 000 gC/(m<sup>2</sup>·a) and it was especially higher in the coastal area of the southeastern Liaoning Province and on eastern slope of Changbai Mountains, with the value of 800~1 000 gC/(m<sup>2</sup>·a). (2) The interannual variation of ( $\overline{\text{NPP}}$ ) had no obvious characteristics. But its variation of natural vegetation was bigger than artificial vegetation. (3) Based on ( $\overline{\text{NPP}}$ ), the vegetation of Northeastern China was divided into three types and the relationships between NPP of each vegetation type and temperature, precipitation, evapotranspiration, and light conditions were analyzed. And then the simulated values were obtained by the climatic estimation model of vegetation NPP. The results showed that there was very significant correlation between the simulated values and the observed values. The climatic estimation model and the simulated results of vegetation NPP were more stable and reliable. (4) The climatic productivity of vegetation NPP of Northeastern China in 2013 was 422~1 100 g C/(m<sup>2</sup>·a). The simulated values in the

收稿日期: 2016-07-21

修回日期: 2016-08-05

资助项目: 中国气象局沈阳大气环境研究所 2016 年开放基金课题(2016SYIAE11); 2015 年中国气象局气候变化专项(CCSF201512)

第一作者: 刘丹(1974—), 女, 黑龙江省加格达奇人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生态气象。E-mail: nefuliudan@163.com

通信作者: 于成龙(1973—), 男, 黑龙江省桦川县人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生态气象。E-mail: nefuyuel@163.com

northern mountains were closer to the observed ones, but were greatly different in the southern area.

**Keywords:** NPP; estimation model; climatic productivity; MODIS; Northeastern China

以气候变暖、极端天气事件出现频率增加为标志的全球气候变化<sup>[1]</sup>正在对陆地生态系统固有的自然过程产生影响<sup>[2-3]</sup>,全球气候变化在不同的区域表现各异,不同的陆地生态系统对气候变化的响应也因自身的结构特点的差异而有所不同,东北三省土地覆盖类型丰富,境内森林、湿地、农田、草地等陆地生态系统面积广大,且地处全球气候变化的敏感区域,气候变化剧烈<sup>[4-7]</sup>和气象灾害频发<sup>[8-9]</sup>给该区域生态环境带来了诸多影响<sup>[10-11]</sup>,但目前关于气候变化对区域生态系统影响机制的科学支撑与对策制定需求之间还存在较大差距<sup>[12-13]</sup>,而对生态系统生产潜力的认识能力有限是其中原因之一,因此有必要进一步开展生态系统生产潜力对气候变化响应的研究,为东北三省生态建设与保护提供决策支撑。

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是植被在生态系统中物质或能量转换和传递的基础,直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力,是植被生产能力的一个重要表征指标<sup>[14]</sup>,较常用 NPP 估算模型主要有 2 种,一种是统计模型如 Miami 模型<sup>[15]</sup>、Thorntwaite Memorial 模型<sup>[16]</sup>、Chikugo 模型<sup>[17]</sup>、Wagenigen 模型<sup>[18]</sup>等,另一种是过程模型如 TEM 模型<sup>[19]</sup>、BIOME-BGG 模型<sup>[20]</sup>等。许多学者利用这些模型或基于这些模型开发的衍生模型对全球或区域生态系统 NPP 进行了估算研究,如 Gower 等研究气候变化对欧亚大陆北方森林的生物量和 NPP 的影响,并利用北方碳分配模式预估 NPP<sup>[21]</sup>;Li 等利用全球气候模式(CMIP5)模拟的气温和降水,并对未来情景的 NPP 和 LAI 进行预测研究<sup>[22]</sup>;Melissa 等基于气象格点数据利用 Agro-IBIS 动态植被模型,对美国中西部地区 NPP 进行估算<sup>[23]</sup>。但现有的 NPP 估算方法中针对东北三省植被的 NPP 资料利用较少,直接套用现有模型进行 NPP 估算势必产生较大误差,因而有必要构建适合东北三省当地气候和植被特点的 NPP 气候潜力模型,对东北三省植被的 NPP 气候潜力进行准确估算。近年来随着 MODIS 产品数据集时长的积累,为科学估算区域生态系统 NPP 潜力提供了新途径,本文正是针对以上问题,基于 Terra/MODIS NPP 产品(MOD17A3)、土地利用类型产品(MCD12Q1)和气象数据,分别植被类型分析 2001—2013 年东北三省 NPP 的时间、空间变化规律,揭示不同植被类别的 NPP 与气温、降水、蒸散量和日照时数等气象因子的

关系,构建东北三省不同植被类别 NPP 潜力估算模型,探索基于遥感的东北三省 NPP 潜力的评价方法,以为东北三省开展土地退化评估理论提供参考,进而为气候变化背景下区域可持续发展做出贡献。

## 1 研究区概况

东北三省包括黑龙江省、吉林省和辽宁省,位于东经 118.83°—135.09°,北纬 53.56°—38.72°,南邻黄海和渤海,东面和北面有鸭绿江、图们江、乌苏里江和黑龙江环绕,西面与内蒙古接壤,总土地面积 78.7 万 km<sup>2</sup>,境内有大兴安岭、小兴安岭、长白山系和东北平原(包括松辽平原、辽河平原和三江平原),海拔高度 2~2 667 m。

大兴安岭属于寒温带针叶林区,主要树木有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等;小兴安岭森林类型是以红松(*Pinus koraiensis*)为主的针阔叶混交林,主要树种有红松、云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies delavayi*)、兴安落叶松、樟子松、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、杨(*Populus*)、椴(*Tilia tuan*)、桦(*Betula*)等;长白山系海拔从低到高依次分布着阔叶林带、针阔混交林带、针叶林带、岳桦林带和高山苔原带 5 个植被垂直带。东北三省农作物以春玉米、水稻、大豆和小麦为主。该地区属温带季风气候,雨热同季,其中北部大兴安地区属寒温带气候,其他地区属温带气候,年平均气温 -4.15~10.99℃,年降水量 366.90~1 080.47 mm,主要集中在植物的生长季(4—10 月),日平均日照时数 5.22~8.10 h。

## 2 数据来源与处理

### 2.1 遥感数据

本文所用遥感数据均来源于美国 NASA LPDAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center) EOS 数据中心,包括 NPP 数据(MOD17A3)和土地覆盖类型数据(MCD12Q1)。其中 MOD17A3 数据的空间分辨率为 1 km,该数据是利用 BIOME-BGC 模型和光能利用率模型建立的 NPP 估算模型模拟得到的陆地生态系统年 NPP,产品包含植被净初级生产力(NPP)和植被初级生产力(GPP)2 个植被指数数据集和对应的质量

信息数据集;MCD12Q1 数据空间分辨率为 500 m, 该数据是利用当年的 Terra 和 Aqua 星观测所得的数据来描述土地覆盖类型,信息提取技术主要是监督决策树分类,产品包含 5 种不同土地覆盖分类方案的分类结果和对应的质量信息数据集,本研究选用其中的“IGBP 的全球植被分类方案”的结果,包含了 17 个主要土地覆盖类型。

以上两种数据均为 Sinusoidal 投影,本文所用数据的时间范围为 2001—2013 年,空间范围为东北三省,利用 MODIS Reprojection Tool software(MRT) V4.0 工具进行影像的拼接、重采样(统一空间分辨率为 500 m)和投影转换(由 Sinusoidal 投影转换为 WGS—1984 投影)等预处理。

由于植被与非植被组成的混合像元可能存在诸如像元内土地覆盖类型变化频繁等较多不确定因素,为减小研究结果的误差,在研究过程中根据每年的土地分类结果,提取出无植被覆盖地类(包括水、城市和建筑区、雪和冰、未分类共 4 个种类),做 1 km 半径的缓冲区后合并,再将无植被覆盖区从对应年份的 NPP 数据中剔除,得到 2001—2013 年植被覆盖区域的 NPP 数据。

## 2.2 地理信息数据

数字高程模型(DEM)为 SRTM 地形产品 V4.1 版本数据,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 90 m。

研究所需省级行政区划数据来自于中国气象局下发的 1:25 万基础地理信息,对数据进行拓补检查,去除省界和县界的间隙。地面观测站位置数据为中国气象局下发的矢量数据,以上数据的地理投影均转换为 WGS—1984。

## 2.3 气象数据

气象数据来源于黑龙江省、吉林省和辽宁省气象局的 2001—2013 年的 196 个气象台站逐日整编资料,包括日平均气温、日降水量、日日照时数等基本气象要素。

2.3.1 蒸散量 蒸散量能较客观地反映某一地区的水热平衡状况。计算方法如下:

月潜在蒸散量  $ET_i$ (mm)采用下式计算<sup>[24]</sup>:

$$E_{ri} = \frac{22d_i(1.6 + U_i^{1/2})\omega_{oi}(1 - h_i)}{P_i^{1/2}(273.2 + t_i)^{1/4}} \quad (1)$$

饱和水汽压  $W_o$ (mmHg)的计算考虑 2 种情况:

当月平均温度  $0^\circ\text{C} < t_i \leq 30^\circ\text{C}$  时:

$$\omega_{oi} = 1.3694 \times 10^9 \exp\left(-\frac{5328.9}{273.2 + t_i}\right) \quad (2)$$

当月平均温度  $-40^\circ\text{C} \leq t_i < 0^\circ\text{C}$  时:

$$\omega_{oi} = 2.6366 \times 10^{10} \exp\left(-\frac{6139.8}{273.2 + t_i}\right) \quad (3)$$

式中: $i$  为月份的编号; $P_i$  为月平均气压(mb); $t_i$  为平均气温( $^\circ\text{C}$ ); $d_i$  为月的天数; $U_i$  为在 10~12 m 高度处观测的月平均风速(m/s); $W_{oi}$  为在温度为  $t_i$  时的饱和水汽压(mmHg); $h_i$  为月平均相对湿度。年蒸散量为当年 12 个月  $ET_i$  的总和。

2.3.2 气象数据插值 由于气象观测点多设立在与建筑用地距离较近的位置,其所在像元多为非纯净植被像元,许多气象观测站所在像元在数据预处理阶段已经被剔除,为解决这一问题,本研究对单点观测的气象数据进行插值,使每个纯净植被像元都有气象要素相对应,从而为研究纯净植被像元 NPP 与气象要素的相关关系做准备。考虑到 4—10 月为东北三省植被的生长季,因此本文共选取与植被生长相关的 10 个气象要素,包括 4 个温度要素:年平均气温、年  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温、4—10 月平均气温、年负积温;2 个降水量要素:年降水量和 4—10 月降水量;2 个蒸散量要素:年蒸散量和 4—10 月蒸散量;2 个光照要素:4—10 月平均日照时数和 4—10 月累计日照时数。

Hutchinson<sup>[25]</sup>认为气温在山区的空间变率要远远大于 Prihodko 等<sup>[26]</sup>指出的水平距离气温每 6 km 变化小于  $0.6^\circ\text{C}$  的结果,同时 Rolland<sup>[27]</sup>的研究结果也表明海拔高度每升高 100 m,气温下降  $0.54\sim 0.58^\circ\text{C}$ ,可见温度要素与经度、纬度和海拔高度具有较好的相关性,但降水量、日照时数和蒸散量与地理因子的相关关系未见确切报道,为求得上述 10 个气象要素与地理因子确切的相关关系,本研究分别计算上述 10 个气象要素与各自气象观测站所在地的经度、纬度和海拔高度的复相关系数(表 1),分析可见,虽然各个气象要素与地理因子之间的相关性均达到了显著水平,但只有年平均气温、年  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温、4—10 月平均气温和年负积 4 个要素的复相关系数  $R > 0.9$ ,与温度因子相关的蒸散量因子的  $R > 0.6$ ,其他要素的  $R$  均小于 0.5。因此本文气象要素的插值方法分为 2 种:一种是逐年分别建立年平均气温、年  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温、4—10 月平均气温和年负积与经度、纬度和海拔高度的线性回归模型,利用模型推导空间分辨率为 500 m 的面数据;另一种是其他气象要素在 ArcGIS 平台下利用 IDW 方法进行空间分辨率为 500 m 的插值运算。

## 3 结果与分析

### 3.1 NPP 时空变化特征

2001—2013 年东北三省植被单位面积 NPP 年

累积量(简称 NPP)平均值呈现较明显的空间分异(图 1A),变化范围在  $15\sim 1\,000\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。其中辽宁东南部沿海地区和长白山东坡 NPP 的值最高,在  $800\sim 1\,000\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;大、小兴安岭和长白山大部分地区在  $600\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  以上;三江平原的 NPP 从北部的  $500\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  到南部的  $600\text{ gC}/$

$(\text{m}^2\cdot\text{a})$  之间变化;东北平原除南部地区(NPP 在  $500\sim 600\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )外,大部分地区的 NPP 低于  $500\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。在东北三省,大、小兴安岭和长白山区的主要植被类型为自然植被,东北平原和三江平原为人工植被,由此可见研究区的自然植被 NPP 普遍高于人工植被。

表 1 气象要素与地理因子的相关关系

气象要素	R	RMSE	Sig.	气象要素	R	RMSE	Sig.
年平均气温	0.947**	0.901	0.000	4—10月降水量	0.395**	134.842	0.000
年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温	0.926**	173.061	0.000	年蒸散量	0.665**	111.719	0.000
4—10月平均气温	0.915**	0.779	0.000	4—10月蒸散量	0.656**	102.028	0.000
年负积温	0.913**	248.773	0.000	4—10月平均日照时数	0.435**	0.760	0.000
年降水量	0.431**	142.977	0.000	4—10月累计日照时数	0.539**	105.571	0.000

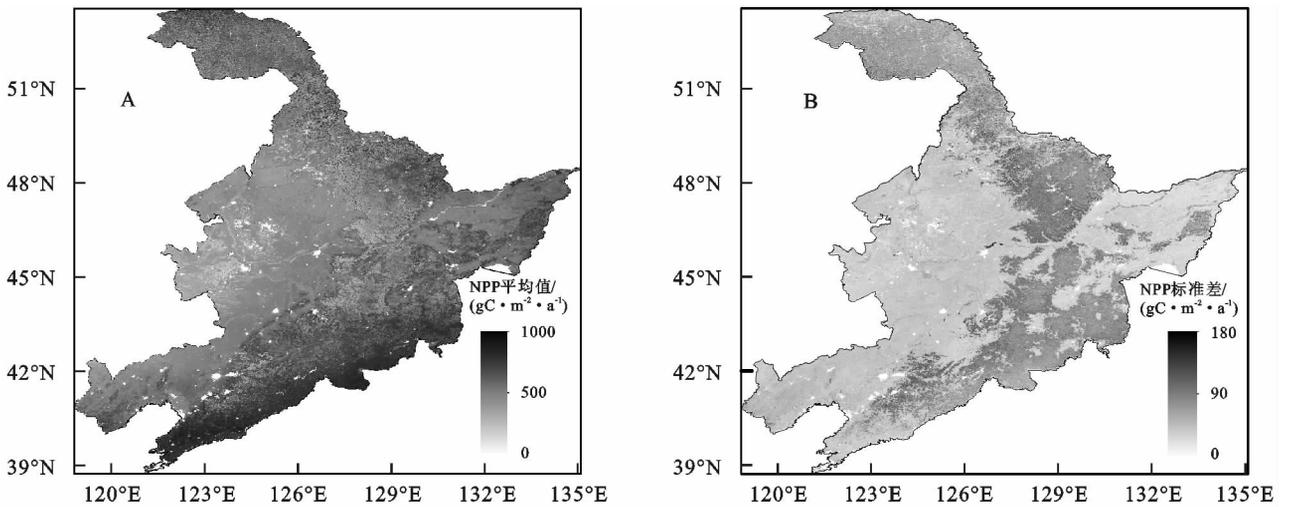


图 1 2001—2013 年东北三省植被净初级生产力(NPP)平均值和标准差

图 1B 显示,大、小兴安岭和长白山区 NPP 的标准差在  $80\sim 180\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,东北平原和三江平原 NPP 的标准差低于  $80\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,可见研究区自然植被 NPP 的变化幅度明显大于人工植被,原因主要是自然植被的生长受天气条件影响大于人工植被,人类的干预使干旱、洪涝、霜冻等极端气候事件对人工植被的影响有所降低,从而减少了人工植被 NPP 的波动。

图 2 显示了近 13 a 来东北三省 NPP 的年际变化,图中的误差线表示不同植被类型 NPP 与平均值的离散程度。从总体上看 NPP 无显著变化趋势( $\text{sig}>0.05$ ,并未通过显著性检验),但存在明显的年际波动,最高值出现在 2005 年,NPP 达  $361.28\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,之后出现了 2007 年[NPP 为  $276.76\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ]和 2010 年[NPP 为  $287.09\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ]两个低谷。

统计不同植被类型 NPP 平均值(记为  $\overline{\text{NPP}}$ ),如图 3 所示,常绿针叶林中最大,为  $390.41\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;稀疏植被中  $\overline{\text{NPP}}$  最小,为  $214.06\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。本研究根据  $\overline{\text{NPP}}$  把东北三省的植被划分为 I, II, III 三个类别,其中 I 类  $\overline{\text{NPP}}$  为  $>350\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  的植被,包括常绿针叶林、落叶阔叶林、混交林、稠密灌丛和农田/

自然植被拼接;II 类  $\overline{\text{NPP}}$  为  $300\leq 350\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  的植被,包括农田和落叶针叶林;III 类  $\overline{\text{NPP}}$  为  $\leq 300\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  的植被,包括稀疏植被、草地、稀疏灌丛和永久湿地。

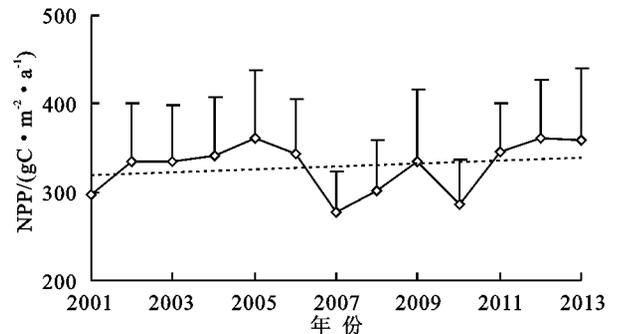
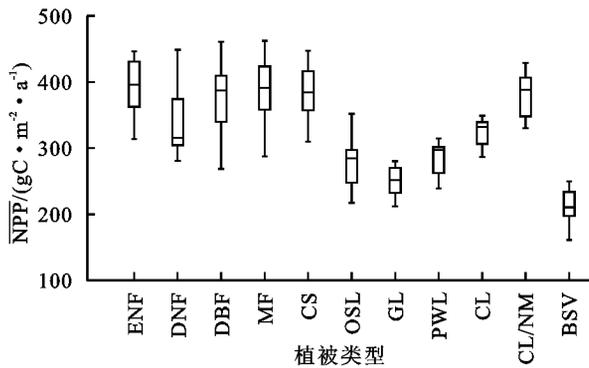


图 2 2001—2013 年东北三省 NPP 年际变化

### 3.2 NPP 气候估算模型

由于 NPP 的大小与植被类型<sup>[28-30]</sup>关系密切,本文在 ArcGIS 平台下建立  $50\text{ km}$  网格点,并基于逐年 NPP 和 2.3.2 节中经过插值的气象因素面数据,提取各点对应的 NPP 值、气象因素值和植被类型,根据植被发生学的基础原理,分别植被类别(I 类、II 类和

Ⅲ类),利用 NPP 与各气象要素的相关性,提出植被 NPP 与气象要素模型结构因子,再对各因子进行组合,构建 NPP 气候估算模型。



注:ENF 为常绿针叶林;DNF 为落叶针叶林;DBF 为落叶阔叶林;MF 为混交林;CS 为稠密灌丛;OSL 为稀疏灌丛;GL 为草地;PWL 为永久湿地;CL 为农田;CL/NM 为农田/自然植被拼接;BSV 为稀疏植被。

图 3 东北三省不同植被类型 NPP 比较

3.2.1 NPP 与气象因子的相关关系 基于 2001—2005 年 NPP、气象数据和植被类别数据,以气象因子为自变量,以 NPP 为因变量,在 SPSS 软件平台下进行线性、对数、二次项、三次项、倒数指数、幂函数拟合,结果发现各气象因子与 NPP 的拟合方程中均是线性方程的  $R$  最大,表 2 列出了 10 个气象因子与 NPP 线性方程的相关系数( $R$ ),分析可见,NPP 与各气象因子均存在显著/极显著的线性相关关系,而且植被类别Ⅱ和Ⅲ的 NPP 与气象因子的相关系数  $R$  普遍大于植被类别Ⅰ,植被类别Ⅱ和Ⅲ的  $R$  总体相当,说明 NPP 小的植被类型对气象因素变化的反应比 NPP 大的植被类型更敏感;另外分析各类别植被  $R$  总体排序发现,在 NPP 较高和中等的植被类别中,降水是影响其 NPP 的主导气象因子,日照时数其次;在 NPP 较低的植被类别中,温度是主导因子,降水其次。

表 2 气象因子与 NPP 的线性相关系数

植被类别	气象因子	拟合方程	$R$	Sig.	样本数	
Ⅰ	温度(°C)	$T_1$	$y=4.072x+368.93$	0.2534*	0.000	1295
		$T_2$	$y=0.0176x+335.32$	0.2163*	0.016	1295
		$T_3$	$y=3.219x+336.47$	0.2010*	0.016	1295
		$T_4$	$y=0.0184x+416.1$	0.2595**	0.000	1295
	降水(mm)	$P_1$	$y=0.3079x+207.79$	0.5361**	0.000	1295
		$P_2$	$y=0.346x+204.01$	0.5453**	0.000	1295
	蒸散量(mm)	$E_1$	$y=-0.1323x+435.84$	0.2882**	0.000	1295
		$E_2$	$y=-0.1475x+437.73$	0.2939**	0.000	1295
	日照时数(h)	$S_1$	$y=-44.573x+691.18$	0.4503**	0.000	1295
		$S_2$	$y=-2.0715x+7012.2$	0.3635**	0.000	1259
Ⅱ	温度(°C)	$T_1$	$y=14.782x+245.69$	0.5882**	0.000	1304
		$T_2$	$y=0.0521x+160.67$	0.2371*	0.014	1304
		$T_3$	$y=19.356x+18.582$	0.5261**	0.000	1304
		$T_4$	$y=-0.1239x-21.803$	0.1272*	0.021	1304
	降水(mm)	$P_1$	$y=0.244x+195.98$	0.6041**	0.000	1304
		$P_2$	$y=0.235x+213.15$	0.7005**	0.000	1304
	蒸散量(mm)	$E_1$	$y=-0.0453x+341.34$	0.2515*	0.014	1304
		$E_2$	$y=-0.0832x+361.42$	0.3155**	0.000	1304
	日照时数(h)	$S_1$	$y=-45.615x+659.52$	0.6354**	0.000	1304
		$S_2$	$y=-0.066x+427.59$	0.3725**	0.000	1304
Ⅲ	温度(°C)	$T_1$	$y=27.874x+75.171$	0.6808**	0.000	817
		$T_2$	$y=0.1825x-362.96$	0.6469**	0.000	817
		$T_3$	$y=41.15x-433.22$	0.6187**	0.000	817
		$T_4$	$y=0.0091x+397.81$	0.1117*	0.041	817
	降水(mm)	$P_1$	$y=0.3995x+84.504$	0.5505**	0.000	817
		$P_2$	$y=0.3151x+101.07$	0.6075**	0.000	817
	蒸散量(mm)	$E_1$	$y=-0.0124x+215.77$	0.1257*	0.037	817
		$E_2$	$y=-0.0768x+275.73$	0.2475**	0.000	817
	日照时数(h)	$S_1$	$y=-37.12x+516.81$	0.6136**	0.000	817
		$S_2$	$y=-0.3421x+826.92$	0.5239**	0.000	817

注:表中  $T_1$  为年平均气温; $T_2$  为年  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温; $T_3$  为 4—10 月平均气温; $T_4$  为年负积温; $P_1$  为年降水量; $P_2$  为 4—10 月降水量; $E_1$  为年蒸散量; $E_2$  为 4—10 月蒸散量; $S_1$  为 4—10 月平均日照时数; $S_2$  为 4—10 月累计日照时数。

由于在  $n=95$ , 置信度为 99% 时, 拟合方程有意义的 R 值低限为 0.263<sup>[31]</sup>, 因此本文选取 4—10 月降水量、4—10 月蒸散量和 4—10 月平均日照时数作为植被类别 I 的 NPP 气候估算模型的因变量; 选取年平均气温、4—10 月降水量、4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数作为植被类别 II 和 III 的 NPP 气候估算模型的因变量。

3.2.2 NPP 气候估算模型构成及参数确定 根据上述分析表明, 植被类别 I 的单位面积 NPP 与 4—10 月降水量呈正相关, 与 4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数均呈负相关, 因此植被类别 I 的 NPP 气候估算模型可表示如下:

$$\text{NPP}(P, E, S)_I = \frac{P_x/b_1 + e_1}{E_x/c_1 + S_x/d_1 + f_1} \times k_1 \quad (4)$$

式中:  $P_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月降水量 (mm);  $E_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月蒸散量 (mm);  $S_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月日照时数 (h);  $b_1, c_1, d_1$  分别为 4—10 月降水量、4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数的调节系数;  $e_1, f_1$  和  $k_1$  为模型的调节系数。

植被类别 II 的单位面积 NPP 与年平均气温和 4—10 月降水量均呈正相关, 与 4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数均呈负相关, 因此植被类别 II 的单位面积 NPP 气候估算模型可表示如下:

$$\text{NPP}(T, P, E, S)_{II} = \frac{T_x/a_2 + P_x/b_2 + e_2}{E_x/c_2 + S_x/d_2 + f_2} \times k_2 \quad (5)$$

式中:  $T_x$  表示像元  $x$  所在位置的年平均温度 (°C);  $P_x$  表示像元  $x$  所在位置的年降水量 (mm);  $E_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月蒸散量 (mm);  $S_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月日照时数 (h);  $a_2, b_2, c_2, d_2$  分别为年平均气温、4—10 月降水量、4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数的调节系数;  $e_2, f_2$  和  $k_2$  为模型的调节系数。

植被类别 III 的单位面积 NPP 与年平均气温和 4—10 月降水量均呈正相关, 与 4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数均呈负相关, 因此植被类别 III 的单位面积 NPP 气候估算模型可表示如下:

$$\text{NPP}(T, P, E, S)_{III} = \frac{T_x/a_3 + P_x/b_3 + e_3}{E_x/c_3 + S_x/d_3 + f_3} \times k_3 \quad (6)$$

式中:  $T_x$  表示像元  $x$  所在位置的年平均温度 (°C);  $P_x$  表示像元  $x$  所在位置的年降水量 (mm);  $E_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月蒸散量 (mm);  $S_x$  表示像元  $x$  所在位置的 4—10 月日照时数 (h);  $a_3, b_3, c_3, d_3$  分别为年平均气温、4—10 月降水量、4—10 月蒸散量和 4—10 月日照时数的调节系数;  $e_3, f_3$  和  $k_3$  为模型的调节系数。

在 SPSS 平台下, 利用 2006—2010 年 50 km 间隔的网格点数据对模型的参数进行求算, 公式 (4) 的最终结果为:

$$\text{NPP}_I = \frac{P_x/711.092 + 1.167}{E_x/801.251 + S_x/5.017 + 1.838} \times 770.017 \quad (7)$$

4—10 月降水量的调节系数  $b_1 = 711.092$ , 与植被类别 I 分布的 NPP 较高地区的 4—10 月降水量接近, 可以认为  $b_1$  代表了植被类别 I 的最适降水量; 4—10 月蒸散量的调节系数  $c_1 = 801.251$ , 高于东北三省平均年蒸散量 (592 mm), 也高于 4—10 月降水量调节系数, 表明东北大部分地区的水分输入小于输出, 此结论与张淑杰等<sup>[32]</sup>的研究结果一致; 4—10 月日照时数的调节系数  $d_1 = 5.017$ , 低于东北三省 4—10 月平均水平 (东北三省 4—10 月平均日照时数为 7.5 h), 可以认为该地区的日照基本能够满足植被生长需要。公式 (5) 和公式 (6) 的最终结果分别为公式 (8) 和公式 (9):

$$\text{NPP}_{II} = \frac{T_x/8.007 + P_x/600.014 + 1.22}{E_x/799.141 + S_x/5.008 + 1.974} \times 484.671 \quad (8)$$

$$\text{NPP}_{III} = \frac{T_x/9.370 + P_x/624.010 + 0.520}{E_x/754.481 + S_x/5.845 + 4.106} \times 823.508 \quad (9)$$

年平均气温的调节系数  $a_2 = 8.007$  和  $a_3 = 9.370$ , 与植被类别 II 和 III 分布的 NPP 较高地区的平均气温接近, 可以认为  $a_2$  和  $a_3$  分别代表了植被类别 II 和 III 的最适气温;  $c_2, c_3$  和  $d_2, d_3$  的生物学意义与  $c_1$  和  $d_1$  相近。

3.2.3 模型验证 以 2011—2012 年 50 km 间隔的网格点 NPP 数据为实测值, 利用同时期气象数据, 分别植被类别, 基于各自植被类别的 NPP 气候估算模型求得的 NPP 数据为模拟值, 二者比较结果见表 3。分析可见, 3 个植被类别实测 NPP 与模拟 NPP 的相关系数均超过了 0.8, 达到了极显著水平; NPP 范围、平均值、标准差和标准误均较接近, 说明上述 3 个 NPP 气候估算模型均可用。但模拟值都存在数值范围和标准差均小于实测值的问题, 分析原因可能与模型结构有关。

3.2.4 模型应用 利用不同植被类别下的 NPP 气候估算模型 (公式 7, 公式 8 和公式 9), 计算 2013 年东北三省 NPP 气候潜力, 并与对应年份实测 NPP 进行对比, 结果分别见图 4A 和图 4B。分析图 4A 可知, 研究区 NPP 气候潜力范围为 422~1 100 gC/(m<sup>2</sup>·a), 其中大兴安岭和松嫩平原西南部较低, 为 422~600 gC/(m<sup>2</sup>·a), 研究区东南部较高, 在 801~1 100 gC/(m<sup>2</sup>·a)。

表3 模拟值与实测值比较

植被类别	类型	范围	平均值	标准差	样本数	标准误	R
I	实测值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	364.50	397.57	64.05	982	2.50	0.8491**
	模拟值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	318.17	384.19	47.08	982	1.52	
II	实测值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	249.90	279.06	49.17	1047	1.22	0.8185**
	模拟值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	206.58	295.93	38.49	1047	0.98	
III	实测值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	296.51	224.58	32.11	817	2.48	0.8267**
	模拟值/( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )	258.39	221.59	24.84	817	1.89	

2013年NPP实测值与NPP气候潜力对比可见(图4B),大兴安岭和小兴安岭北部地区的NPP实测值更接近NPP气候潜力,NPP气候潜力比实测值高 $0 \sim 200 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,占研究区总面积的12.70%;有占研究区总面积28.49%的地区的NPP气候潜力比NPP实测值高 $401 \sim 600 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,主要分布在

辽宁省大部、东北平原与小兴安岭和长白山交界处;其他地区的NPP气候潜力比NPP实测值高 $201 \sim 400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。可见研究区北部山区的NPP实际值更接近于NPP气候潜力,而南部地区的NPP实际值明显低于NPP气候潜力,说明南部地区通过改进生产管理措施等手段NPP还有较大的上升空间。

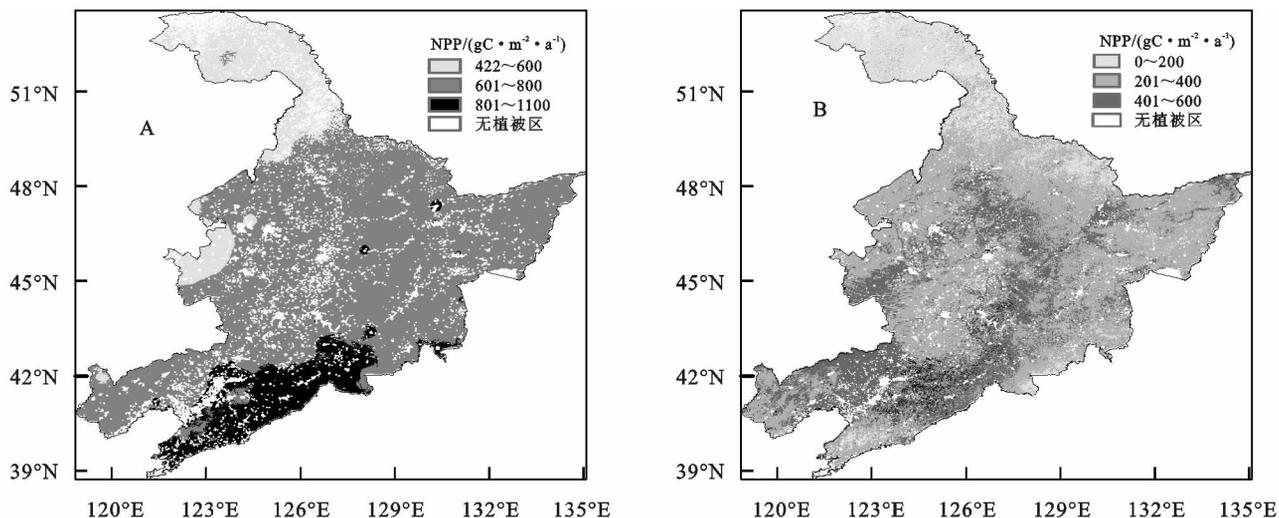


图4 2013年东北三省NPP潜在气候生产分布

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 本研究所统计的东北地区NPP平均值的空间分布结果与陈福军等<sup>[33]</sup>和毛德华等<sup>[34]</sup>的研究结果一致,但略低于国志兴等<sup>[35]</sup>的结果,原因可能与NPP获取的途径和研究时段有关。

(2) 研究表明,在NPP较高的植被类型中,温度因子与NPP的相关系数R总体上低于其他气象因子,在NPP平均值大于 $350 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 的植被类型中更是低于拟合方程有意义的R值低限0.263<sup>[31]</sup>,该结果与李永华等<sup>[36]</sup>的研究结果有相似之处;而在NPP较低的植被类型中,温度因子与NPP的相关性较好,此结果与同是以草地为研究对象的刘海江等<sup>[37]</sup>和魏靖琼等<sup>[38]</sup>的研究结果一致,说明温度和降水等气象因子对不同植被类型NPP的影响是有差异的,因此在做以气候因子为基础的NPP估算时,如果忽视这一问题,可能会对估算结果的精度产生影响。

(3) 基于2013年气象数据和土地覆盖类型数据,利用本研究构建的NPP气候估算模型 $\text{NPP}_{\text{II}}$ 和 $\text{NPP}_{\text{I}}$ ,计算得到落叶针叶林和落叶阔叶林的NPP气候潜力平均值分别为 $469 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $631 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,这与Wang<sup>[39]</sup>认为落叶针叶林和落叶阔叶林NPP最大时分别可达 $462 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $625 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的结果基本相近,因此进一步验证了本研究构建的NPP气候估算模型可用。

(4) 本文在分析不同植被类别NPP与气象要素和地理信息数据关系的基础上,构建了基于温度、降水量、蒸散量和日照时数的NPP估算模型,该模型通过独立数据的验证,模拟值与实测值之间的相关性均达到了极显著水平,RMSE较小,模型的模拟结果比较可靠。但该模型参数的准确性、输入变量的有效性、变量的适宜范围等因素对估算精度影响没有得到充分测试,因此该模型的普适性还需要进一步验证。

(5) 由于时间和数据的限制,此研究结果还存在一定的不确定性,例如本研究在建立NPP气候估算

模型时,利用的是年平均或 4—10 月平均值,并未考虑极端气候事件对 NPP 的影响;另外在研究过程中并未考虑灌溉条件对农田 NPP 的影响,虽然在灌溉条件下作物生长仍然会受到水分条件的限制<sup>[40]</sup>,但灌溉措施仍能有效提高作物的 NPP<sup>[41]</sup>。

## 4.2 结论

(1) 2001—2013 年东北三省植被单位面积 NPP 年累积平均值空间分异明显,辽宁东南部沿海地区和长白山东坡最高,达到  $800\sim 1\ 000\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;东北平原较低,大部分地区的 NPP 低于  $500\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。13 a 来研究区总体 NPP 平均值无显著变化趋势,但其中自然植被 NPP 的年际波动幅度明显大于人工植被。

(2) 常绿针叶林 NPP 平均值最大,为  $390.41\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;稀疏植被 NPP 平均值最小,为  $214.06\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;其他植被类型的 NPP 平均值为  $250\sim 388\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

(3) 温度因子对 NPP 较小植被类别的影响程度大于 NPP 较大的植被类别,而降水因子则相反。

(4) 2013 年东北三省 NPP 气候潜力在  $422\sim 1\ 100\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,北部山区的 NPP 实际值更接近于 NPP 气候潜力,而南部地区的 NPP 实际值较 NPP 气候潜力相差较大,说明南部地区 NPP 通过改进生产管理措施等手段还有较大的上升空间。

## 参考文献:

[1] IPCC. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] Tao F, Zhang Z. Dynamic responses of terrestrial ecosystems structure and function to climate change in China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, 115(11): 58-72.

[3] Xiao X, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Transient climate change and net ecosystem production of the terrestrial biosphere[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12(2): 345-360.

[4] 赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 602-610.

[5] 郝成元, 赵同谦. 中国气候变化敏感区降水量区域对比: 以黑龙江、新疆和西藏三省区为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 73-79.

[6] 付长超, 刘吉平, 刘志明. 近 60 年东北三省气候变化时空分异规律的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 60-65.

[7] 贾建英, 郭建平. 东北三省近 46 年气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 109-115.

[8] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北三省气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.

[9] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30 年来我国农业气象灾害变化趋势和分布特征[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73.

[10] 周广胜, 袁文平, 周莉, 等. 东北三省陆地生态系统生产力及其人口承载力分析[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 65-72.

[11] 王晓煜, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091-3102.

[12] 周广胜, 何奇瑾. 陆地生态系统对气候变化的脆弱性评价与适应性管理[J]. 中国基础科学, 2015, 17(3): 26-31.

[13] Geeson N, Quaranta G, Salvia R, et al. Long-term involvement of stakeholders in research projects on desertification and land degradation: How has their perception of the issues changed and what strategies have emerged for combating desertification[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 114(5): 124-133.

[14] 王红岩. 基于 NPP 和植被降水利用效率土地退化遥感评价与监测技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.

[15] Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere[M]. New York: Springer-Verlag, 1975.

[16] Thornthwaite W. Memorial model, publications in climatology[M]. New Jersey: CW Thornthwaite Associates, 1972.

[17] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.

[18] Bouman B A M, Van Keulen H, Van Laar H H, et al. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview[J]. Agricultural Systems, 1996, 52(2/3): 171-198.

[19] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: empirical and process-based estimates[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 785-796.

[20] Running S W. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, biome-bgc, and an application for global-scale models—scaling physiological processes-8 [M] // Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. 1993: 141-158.

[21] Gower S T, Krankina O, Olson R J, et al. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems[J]. Ecological Applications, 2001, 11(5): 1395-1411.

[22] Li S S, Lu S H, Zhang Y J, et al. The change of global terrestrial ecosystem net primary productivity(NPP) and its response to climate change in CMIP5[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 121(1/2): 319-335.

[23] Melissa M M, Christopher J K. Climate-induced changes in biome distribution, NPP, and hydrology in the Upper Midwest U S: A case study for potential vegeta-

- tion[J]. *Journal Of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013,118(1):248-264.
- [24] 徐宗焕,曹春荣,方柏州,等. 福建滨海湿地生态气象监测方法及指标体系研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17):292-297.
- [25] Hutchinson M G. A new objective method for spatial interpolation of meteorological variables from irregular networks applied to the estimation of monthly mean solar radiation, temperature, precipitation and windrum [J]. *Canberra, Australia:CSIRO, Division of Water Resources*, 1989,89(5):95-104.
- [26] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997,60(3):335-346.
- [27] Rolland C. Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in Alpine regions[J]. *Journal of Climate*, 2003,16(7):125-130.
- [28] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2013,33(12):3752-3764.
- [29] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, et al. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production(NPP)[J]. *Science of the Total Environment*, 2004,332(1/3):123-137.
- [30] 吴国伟,赵艳玲,付艳华,等. 复垦矿区土地利用类型变化对植被碳储量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11):1437-1444.
- [31] 孙成明,孙政国,刘涛,等. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型生态学报[J]. *生态学报*, 2015, 35(4):1079-1085.
- [32] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北三省湿润指数及其干湿界线的变化特征[J]. 2011,29(5):226-232.
- [33] 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.
- [34] 毛德华,王宗明,韩信兴,等. 1982—2010 年中国东北三省植被 NPP 时空格局及驱动因子分析[J]. *地理科学*, 2012,32(9):1106-1111.
- [35] 国志兴,王宗明,张柏,等. 2000—2006 年东北三省植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(8):1226-1235.
- [36] 李永华,高阳华,韩逢庆,等. 重庆地区年气温与降水量变化特征及对 NPP 的影响[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1):73-79.
- [37] 刘海江,尹思阳,孙聪,等. 2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应[J]. *草业科学*, 2015, 32(11):1709-1720.
- [38] 魏靖琼,柳小妮,任正超,等. 区域尺度下气候因子的插值优化及其与草地 NPP 的相关性[J]. *草业科学*, 2012,29(12):1842-2012.
- [39] Wang S Q, Zhou L, Chen J M, et al. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011,92(6):1651-11662.
- [40] 刘洛,徐新良,刘纪远,等. 1990—2010 年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. *地理学报*, 2014, 69(12): 1767-1778.
- [41] 王轶虹,王美艳,史学正,等. 2010 年中国农作物净初级生产力及其空间分布格局[J]. *生态学报*, 2016, 36(19):1-11.

~~~~~

(上接第 314 页)

- [14] 王洁,胡少伟,周跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. *水土保持研究*, 2005,12(4):188-190,194.
- [15] 李广,黄高宝. 模拟降雨与水土流失试验研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2008,24(4):443-445.
- [16] 史银志,雷晓. 基于人工模拟降雨的土壤侵蚀特性试验研究[J]. *石河子大学学报*, 2008,26(4):487-490.
- [17] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 39-44.
- [18] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2012,26(4):81-85.
- [19] 苏慧敏. 不同水土保持措施下土壤养分流失的研究[D]. 重庆:西南大学,2012.
- [20] 王晓燕,王一岫,王晓峰. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. *环境科学研究*, 2003,16(1):30-36.
- [21] 杨胜天,程红光,步青松,等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. *环境科学学报*, 2006,26(3):366-374.
- [22] 张展羽,张卫,杨洁,等. 不同尺度下梯田果园地表径流养分流失特征分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 105-108.
- [23] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5):748-752.