

北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985–2015)

陈鹏飞

中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 生态系统的净初级生产力是衡量生态系统活力的重要指标, 也是全球气候变化研究的基本参数。构建长时间序列净初级生产力数据集对生态系统及全球气候变化研究具有重要意义。为此, 作者在汇集 1985–2015 年间中国区域逐月气象数据、土壤质地数据和基于 MODIS、AVHRR 遥感影像的土地覆被和植被指数数据产品的基础上, 将这些数据经过格式转换、投影转换、空间尺度匹配等统一在同一尺度等一系列数据处理过程, 再将其输入到 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型中, 经由 CASA 模型模拟计算获得北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985–2015)。本数据集包括: 1985–2015 年间北纬 18°以北中国陆地生态系统历年逐月净初级生产力 1 公里栅格数据。数据存储为.tif 格式, 文件大小为 28.2 GB。

关键词: 净初级生产力; 逐月; 公里格网; 中国陆地生态系统; 1985–2015

DOI: 10.3974/geodp.2019.01.05

1 前言

长期的观测事实和大量的研究表明, 无论是在漫长的历史时期, 还是从近百年有仪器观测的时期看, 地球气候系统都发生着显著变化^[1]。气候系统的改变影响着各生态系统的结构和功能。另外, 随着科技的进步, 人类越来越频繁地与各自然生态系统发生着交互。这种交互促进了生态系统的变化, 特别是近些年来生态环境建设与社会经济发展所涉及的退耕还林还草工程、坡耕地改造, 以及煤气油等能源开发、城镇化与新农村建设等工程^[2]。生态系统的改变直接影响着人类的生活质量, 乃至生存条件。生态系统的净初级生产力是衡量生态系统活力的重要指标, 也是全球气候变化研究的基本参数^[3–6], 利用野外观测、遥感数据和植被模型对其进行全球和区域格局以及年际和季节变化进行估算一直是国际生态学和地学领域的研究热点。

在国家尺度, 美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 基于 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 数据, 生产并提供 2000 年以

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-03-23; 出版日期: 2019-03-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2014FY210100); 国家自然科学基金 (41871344)

作者信息: 陈鹏飞 D-7136-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, pengfeichen@igsnr.ac.cn

数据引用方式: [1] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985–2015) [J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(1): 34–41. DOI: 10.3974/geodp.2019.01.05.

[2] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985–2015) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.03.02.V1.

后的时间段净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 产品。由于气候变化和经济发展给生态系统带来的效应是一个长期的过程, 因此, 基于 MODIS 一个传感器获得的遥感数据基础上的净初级生产力产品还难以满足这方面研究的需求。需要更长时间段的净初级生产力数据产品来满足气候变化和人为活动影响下的生态系统演变规律研究需求。

目前, NPP 的估算主要分为实测法和模型法两大类。实测法包括收获量测定法、生物量调查法和涡度相关法三种^[7]。其中, 前两种需要破坏性取样, 不但耗时、耗力, 且代表区域有限; 涡度相关法虽然不需要破坏性取样, 能有效地估测大气-陆地生态系统之间的碳、水汽、能量交换, 但根据观测塔高度的不同, 其代表区域也只是在几百米到 1 公里之间。模型法分为统计模型、光能利用率模型、过程模型等^[8]。其中, 统计模型又称为气候生产潜力模型, 多利用气候因子和植被生物量的经验关系, 建立净初级生产力的反演模型, 如 Miami 模型、Thorntwaite Memorial 模型、Chikugo 模型等; 相对于统计模型, 过程模型和光能利用率模型具有更好的机理性解释。生态系统过程模型通过对植物的光合作用、有机物分解及营养元素的循环等生理过程的模拟而得到净初级生产力, 如 BEPS、BIOME-BGC 等模型; 光能利用率模型以植物光合作用过程和光能利用率为基础建立, 它基于资源平衡的观点, 代表模型有 CASA 模型、GLO-PEM 模型等^[8]。以上两类模型各有优、缺点, 生理过程模型的机理性更强, 但涉及众多输入参数, 有些参数难以准确获取, 容易给估测带来误差; 光能利用率模型虽对植被的生理生态过程进行了简化, 但直接利用遥感数据作为输入参数, 计算过程相对简单, 便于应用和推广。

本数据集基于 NASA-CASA 模型生产中国陆地生态系统长时间序列净初级生产力数据。

2 数据集元数据简介

《北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985–2015)》^[9]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985–2015)》元数据简介

条目	描述
数据集名称	北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985–2015)
数据集短名	ChinaNPP_1985_2015
作者信息	陈鹏飞 D-7136-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, pengfeichen@igsrr.ac.cn
地理区域	北纬 18°以北中国陆地地区
数据年代	1985–2015 年
时间分辨率	月
空间分辨率	1 km
数据格式	.tif
数据量	28.2 GB (压缩后为 2.07 GB)
数据集组成	数据集由 1,488 个文件组成。文件名前四位为年份, 接着的数字为月份
基金项目	中华人民共和国科学技术部 (2014FY210100); 国家自然科学基金 (41871344)

续表

条目	描述
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、实体数据(中英文)和通过《全球变化数据学报》(中英文)发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放,用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文)编辑部签署书面协议,获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则,即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%,同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[10]

3 数据研发方法

3.1 算法原理

CASA 模型中植被净第一性生产力用公式(1)计算^[11]:

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

式中, $NPP(x, t)$ 为 x 地点 t 时刻的净初级生产力 ($g C/m^2$); $APAR(x, t)$ 为 x 地点 t 时刻的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 为 x 地点 t 时刻的光能利用率。

(1) 光合有效辐射的确定

植被所吸收的光合有效辐射用公式(2)计算:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SOL(x, t)$ 是 t 月份像元 x 处的太阳总辐射量 (MJ/m^2); $FPAR(x, t)$ 为植被对入射光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

(2) 光合有效辐射比例系数的确定

光合有效辐射吸收比例 $FPAR(x, t)$ 参考 Potter 等^[11], 分时间段按如下方法进行:

① 1985 年至 2000 年 2 月基于 AVHRR NDVI 数据, 进行如下计算获得:

$$SR = (1+NDVI)/(1-NDVI) \quad (3)$$

$$FPAR1(x, t) = [SR(x, t) - SR_{\min}(x, t)]/[SR_{\max}(x, t) - SR_{\min}(x, t)] \quad (4)$$

$$FPAR(x, t) = \min[FPAR1, 0.95] \quad (5)$$

式中, $SR_{\min}(x, t)$ 取值为 1.08; $SR_{\max}(x, t)$ 与植被类型有关, 根据该植被类型 NDVI 最大值确定(将某植被类型 1985-1994 连续 10 年间所有月份的像元 NDVI 值从小到大排列, 95% 处的 NDVI 值作为最大 NDVI 值)。

② 2000 年 3 月以后基于 MODIS EVI 数据, 进行如下计算获得:

$$FPAR1(x, t) = EVI(x, t) \quad (6)$$

$$FPAR(x, t) = \min[FPAR1, 0.95] \quad (7)$$

(3) 光能转化效率的确定

光能转化效率 $\varepsilon(x, t)$ 按如下公式计算获得:

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon^* \quad (8)$$

式中, $\varepsilon(x, t)$ 为光能转化效率; $T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 、 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 为温度对光能转化率的影响; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 为水

分对光能转化效率的影响，它们的详细计算过程参见 Potter 等^[12]；根据 Potter 等^[12]的研究， ϵ^* 为最大光能转化效率，在计算 1985 年至 2000 年 2 月净初级生产力，使用 AVHRR 数据时取值为 0.389，其他年份在使用 MODIS 数据时取值为 0.55。

3.2 技术路线

技术路线如图 1 所示，主要包括数据收集与预处理、数据模拟两大部分。

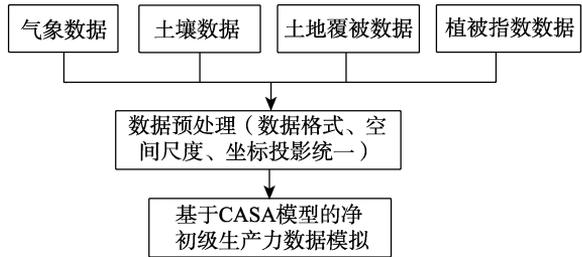


图 1 北纬 18°以北中国陆地生态系统长时间序列逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集研发技术路线图

3.2.1 数据收集与预处理

(1) 气象数据

气象数据主要包括辐射、降水、气温等，来自“中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集”^[13]，该数据集下载自网站 <http://westdc.westgis.ac.cn/>，它主要以国家现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料，以及 TRMM 降水资料为背景场，融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。数据的时间分辨率为 3 小时。本研究通过计算，将其转化为月平均气温、降水和总太阳辐射。

(2) 土壤数据

土壤数据主要包括土壤砂粒含量、粘粒含量等土壤质地数据，来自于“基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1)”^[14]。该数据集来源于联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 所构建的世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD)。中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1 : 100 万土壤数据，下载网址为 <http://westdc.westgis.ac.cn/>。

(3) 土地覆被数据

由于本研究所涉时间尺度比较长，土地覆被数据来源有两种。1985 年到 2000 年土地覆被数据取自 AVHRR 土地覆被数据产品，该数据基于 1981 到 1994 年的 AVHRR 数据制作，采用的土地覆被分类方法为马里兰大学分类法，下载网址为 <http://glcf.umd.edu/data/landcover/>。MODIS 于 2001 年提供逐年土地覆被数据产品，其时间、空间分辨率更高，所以 2000 年以后的土地覆被数据使用 MODIS 对应的土地覆被数据产品 (MCD12Q1)。数据下载自 <http://reverb.echo.nasa.gov/>。需要说明的是 MODIS 提供五种分类方法下的数据，为和 AVHRR 的土地覆被数据保持一致，使用 MODIS 数据时，也采用马里兰大学分类方法下的数据。

(4) 植被指数数据

植被指数数据的来源也有两种：1985–2000 年 2 月为 AVHRR 3G NDVI 数据，下载自 <https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>；2000 年 3 月以后，有 MODIS 可以提供更高分辨率的数据，因此使用 MODIS 的植被指数数据产品 (MOD13A3)，下载网址为 <http://reverb.echo.nasa.gov/>。

(5) 数据预处理

以上收集到的数据在数据格式、坐标投影系统、空间分辨率等方面并不统一，为生产公里格网级逐月的净初级生产力数据，本研究采用数据格式转化、投影坐标转化、数据重

采样与空间配准等技术手段，将它们统一在同一尺度下。最后数据的投影为 Krasovsky_1940_Alberts，空间分辨率为 1 km。

3.2.2 数据模拟

利用以上预处理好的数据作为输入，基于 CASA 模型用 Matlab 编制相应程序实现相关数据的制作。

4 数据结果与验证

4.1 数据结果组成

将逐月数据累加获得各年净初级生产力。各年净初级生产力空间分布大致相同，以 2010 年为例(图 2)。从图中可以看出，海南岛大部分地区、云南南部地区由于雨热条件好，年净初级生产力最高，基本在 $550 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上；青藏高原东南部、两广地区南部、福建沿海地区、台湾岛大部分地区、秦岭部分地区的年总净初级生产力次之，基本在 $400\text{--}550 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间，植被以常绿阔叶林或落叶阔叶林为主；大、小兴安岭，长白山地区，华北平原、云南北部、四川大部地区的植被净初级生产力在 $200\text{--}400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间；三江平原、内蒙古东部、新疆北部部分地区的净初级生产力在 $100\text{--}200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间，主要地面植被为草甸和农田；其他地区，包括内蒙古西部、新疆南部、甘肃西部地区的净初级生产力在 $100 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以下。另外，中国陆地生态系统总的净初级生产力在一年内随着时间变化，从 1 月 NPP 月平均为 $29 \times 10^{12} \text{ g C}$ 开始逐渐增加，到 7 月份达到最大，月平均为 $376 \times 10^{12} \text{ g C}$ ，然后开始减少，到 12 月份又回落到最低，月平均为 $33 \times 10^{12} \text{ g C}$ 。

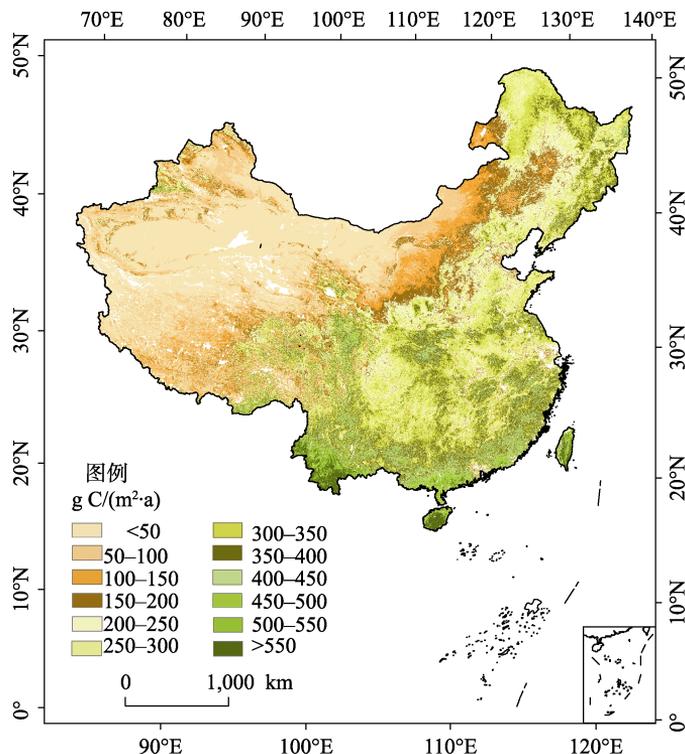


图 2 2010 年北纬 18° 以北中国陆地生态系统年净初级生产力空间分布数据可视化图

4.2 数据结果验证

由于实测数据取样量有限,其代表区域往往与基于遥感的净初级生产力模型模拟数据在空间上难以匹配。尺度效应所带来的问题,使得净初级生产力模拟数据的验证比较困难^[8]。目前,一般有两种方法来验证模型模拟的净初级生产力数据:一种是与实测数据进行对比,另一种是与其他模型估算结果对比^[15-16]。本研究主要通过收集整理已发表文章中的实测数据和模拟数据,将本研究产生的净初级生产力数据与这些数据对比,分析其准确性。

本研究基于 CASA 模型估测的 1985–2015 年全国陆地生态系统年总净初级生产力在 1.69–2.16 Pg C/a 之间 (1 Pg=1 × 10¹⁵ g)。与已有研究相比,本研究估测的净初级生产力在正常波动范围之内(表 2)。表 3 列出了已有研究中一些实测的和模型模拟的典型植被生态系统净初级生产力的范围。与它们相比,本研究模拟的常绿针叶林生态系统的年净初级生产力为 245–538 g C/(m²·a),常绿阔叶林生态系统的年净初级生产力为 484–711 g C/(m²·a),落叶针叶林生态系统的年净初级生产力为 136–276 g C/(m²·a),落叶阔叶林生态系统的年净初级生产力为 163–420 g C/(m²·a),混交林生态系统的年净初级生产力为 164–378 g C/(m²·a),草地生态系统的年净初级生产力为 159–250 g C/(m²·a),农田生态系统的年净初级生产力为 223–324 g C/(m²·a),均能与已有数据很好符合,说明本研究生成的净初级生产力数据具有较好的准确性。

表 2 不同模型模拟的中国区域总的净初级生产力比较^[15]

方法	时间范围	NPP (Pg C/a)	参考文献
Miami 模型	1992	3.719	孙锐和朱启疆 ^[17]
LUE 模型	1992	2.645	孙锐和朱启疆 ^[18]
CASA 模型	1982–1992	1.5–2.1	朴世龙等 ^[19]
LUE 模型	1990	6.13	陈利军等 ^[20]
CEVSE 模型	1981–1998	2.86–3.37	Cao 等 ^[21]
CASA 模型	1982–1999	1.44	Fang 等 ^[22]
BEPS 模型	2001	2.24	Feng 等 ^[23]
CASA 模型	1989–1993	3.12	朱文泉等 ^[24]
GLOPEM 模型	1981–2000	2.76–3.31	高志强和刘纪远 ^[25]
CEVSA 模型	1980–2000	3.13–3.68	高志强和刘纪远 ^[25]
GEOPRO 模型	2000	2.42	高志强和刘纪远 ^[25]
GEOLUE 模型	2000–2004	2.84	高志强和刘纪远 ^[25]
LPJ 模型	1981–1998	2.91–3.37	Sun ^[26]
M-SDGVM 模型	1981–2000	3.30	Mao 等 ^[27]
BEPS 模型	2000–2010	2.63–2.84	Liu 等 ^[15]
CASA 模型	2001–2010	2.25–2.62	Pei 等 ^[28]

表3 本数据集各种植被类型 NPP 与实测值和其他模型模拟结果比较表 (g C/(m²·a))

方法	植被类型							时期	空间 尺度	研究 范围
	常绿针 叶林	常绿阔 叶林	落叶针 叶林	落叶阔 叶林	混交林	农田	草地			
实测值	179–806 ^[24] 219–1550 ^[29]	407–1913 ^[24] 692–1540 ^[29]	179–824 ^[24] 258–855 ^[29]	114–1669 ^[24] 273–827 ^[29]	257–1098 ^[24] }	239–760 ^[30] }	231 ^[24] 29.5–772 ^[31] }			
BEPS 模型 ^[15]	553	810	385	641	517	584	110	2000– 2010	0.5 km	全国
CASA 模型 ^[19]	354	525	432	304	330	216	154	1997	0.04°	全国
CASA 模型 * ^[24]	367	986	439	643		427	103–507	1989– 1993	8 km	全国
本研究	245–538	484–711	136–276	163–420	164–378	223–324	159–250	1985– 2015	1 km	全国

*表示对模型进行了修改。

5 结论

作者通过汇集和综合气象、土壤、土地覆被、植被指数等数据,利用相关理论和算法,整理并计算出中国陆地生态系统长时间序列的净初级生产力数据,数据的空间分辨率为 1 km,时间分辨率为月,年度尺度从 1985 到 2015。该数据集与以往同类数据集相比,其在时间尺度上更长,空间、时间分辨率也较高。该数据集可用于气候变化对中国及区域生态系统影响研究,国家或地方政策(退耕还林还草工程、坡耕地改造、区域经济发展与城镇化等)实施前后对生态系统的影响研究,国家或区域生态系统承载力研究等。

参考文献

- [1] 熊伟. 未来气候变化情景下中国主要粮食作物生产模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [2] Lv, Y. H., Fu, B. J., Feng, X. M., *et al.* A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess plateau of China [J]. *Plos One*, 2012, 7(2): e31782.
- [3] Jia, X. X., Shao, M. G., Wei, X. R., *et al.* Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2011, 160: 281–291.
- [4] Xu, X. B., Tan, Y., Yang, G. S., *et al.* Impacts of China's Three Gorges Dam project on net primary productivity in the reservoir area [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 4656–4662.
- [5] Gao, Y. H., Zhou, X., Wang Q., *et al.* Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001–2008 in the Tibetan plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 356–362.
- [6] Yuan, Q. Z., Wu, S. H., Zhao, D. S., *et al.* Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005 [J]. *Journal of Geographical Science*, 2014, 24(1): 3–17.
- [7] 孙金伟, 关德新, 吴家兵等. 陆地植被净初级生产力研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 1–6.
- [8] Zhang, D. L., Prince, S., Wright, R. Terrestrial net primary production estimates for 0.5° grid cells from field observations—a contribution to global biogeochemical modeling [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(1): 46–64.
- [9] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985–2015) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.03.02.V1.

- [10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [11] Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811–841.
- [12] Potter, C., Gross, P., Genovese, V., *et al.* Net primary productivity of forest stands in New Hampshire estimated from Landsat and MODIS satellite data [J]. *Carbon Balance and Management*, 2007, 2: 9.
- [13] 何杰, 阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[Z]. 中国科学院寒区旱区科学数据中心, 2011. DOI: 10.3972/westdc.3002.2014.db.
- [14] Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., *et al.* Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008.
- [15] Liu, Y. B., Jv, W. M., He, H. L., *et al.* Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(1): 112–127.
- [16] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244–253.
- [17] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 36–45.
- [18] 孙睿, 朱启疆. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 58–61.
- [19] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603–608.
- [20] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 1993–2002.
- [21] Cao, M. K., Tao, B., Li, K. R., *et al.* Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998 [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552–560.
- [22] Fang, J. Y., Piao, S. L., Field, C. B., *et al.* Increasing net primary production in China from 1982 to 1999 [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(6): 293–297.
- [23] Feng, X., Liu, G., Chen, J. M., *et al.* Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 563–573.
- [24] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植被生态学报, 2007, 31(3): 413–424.
- [25] 高志强, 刘纪远. 中国植被净生产力的比较研究[J]. 科学通报, 2008, 53(3): 317–326.
- [26] 孙国栋. LPJ 模型对 1981–1998 年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 341–351.
- [27] Mao, J. F., Dan, L., Wang, B., *et al.* Simulation and evaluation of terrestrial ecosystem NPP with M-SDGVM over continental China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(2): 427–442.
- [28] Pei, F. S., Li, X., Liu, X. P., *et al.* Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 362–371.
- [29] Liang, W., Yang, Y. T., Fan, D. M., *et al.* Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22–36.
- [30] 宋富强, 康慕谊, 陈雅如等. 陕北黄土高原植被净初级生产力的估算[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2311–2318.
- [31] 程杰. 黄土高原草地植被分布于气候响应特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.