

# 基于 CASA 模型的海河流域生物量估算及特征分析

王岚, 陈雪洋\* (重庆市地理信息中心, 重庆 401121)

**摘要** 生物量估算研究有助于寻找陆地植被从大气中固定碳的数量及影响其时空分布的驱动因子, 在此基于 CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) 模型, 结合遥感数据和匹配的温度、降水、太阳辐射资料以及全国 1:400 万植被图, 估算海河流域 2002~2007 年的生物量, 并以 2007 年为例分析了不同植被类型、不同植被覆盖度的生物量差异以及生物量随季节变化特征和空间分布。结果表明, CASA 模型适用于海河流域生物量研究; 6 年来, 海河流域年均生物量总量为 405.5 Tg; 海河流域的年生物量分布呈东南高西北低的趋势, 平原生物量 > 山区生物量 > 高原生物量。

**关键词** 生物量; CASA 模型; 海河流域; 变化特征

中图分类号 S181.3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)19-06346-04

## Estimation and Characteristics Analysis of Haihe Rive Biomass Based on CASA Model

WANG Lan, CHEN Xue-yang (Chongqing Geomatics Center, Chongqing 401121)

**Abstract** The research of biomass estimation will help in understanding the amount of carbon fixed by terrestrial vegetation and its influencing factors. Using CASA model, combined with remote sensing image, temperature, precipitation, solar radiation with matches and 1:4 000 000 vegetation mapping, the Haihe River biomass (2002-2007) was estimated. The biomass variation of different vegetation types and vegetation cover was analyzed, meanwhile, spatial distribution and characteristics was analyzed as the seasons change. The results validate the CASA's applicability in Haihe River; during the past 6 years, the average biomass is 405.5 Tg; the total annual biomass in the Haihe River watershed appears an overall trend of high in southeast and low in northwest, plain biomass > mountains biomass > plateau biomass.

**Key words** Biomass; CASA model; Haihe River; Variation characteristics

自 20 世纪 60 年代国际生物学计划(International Biological Programme, IBP)实施以来, 生态系统生物量和生产力的研究一直是生态学中一个重要的研究方向<sup>[1-2]</sup>。生物量是生态系统研究中最重要生物物理参数之一, 它是监测植物冠层生理过程的重要参数, 同时也是监测全球变化的常用参数之一<sup>[3]</sup>。随着全球变化研究的不断深入, 植被作为陆地生物圈的主体, 在全球物质循环、能量流动、碳循环、吸收温室气体等方面具有不容忽视的意义<sup>[4]</sup>。流域尺度的生态系统生物量与流域碳循环与碳扰动、土地利用变化、气候变化和自然资源管理等研究有密切联系, 对其的估算具有现实意义<sup>[5]</sup>。同时分析海河流域的生物量的时空变化特征为区域可持续发展和流域生态环境问题的解决提供重要的数据支撑。

直接测量的手段获取生物量费时费力, 且难以在大尺度上进行生物量的估算, 因此利用模型估算生物量已成为一种经济高效的研究方法<sup>[6-7]</sup>。近年来, 随着实验观测数据和资料的不断积累以及对生态系统认识的不断加深, 模式模拟在大时空尺度的生物量估算中得到广泛应用, 已经从原来的静态统计模型转为生态系统机理性模式<sup>[8]</sup>。CASA 模型是从植被的生理过程出发而建立的植被初级生产力模型, 在大尺度植被净初级生产力研究和全球碳循环研究中被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。笔者利用目前流行的 CASA 模型估算 2002~2007 年间海河流域生物量及其分布, 并分析海河流域生物量的时空变化特征。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

海河流域东临渤海, 西倚太行, 南界黄

河, 北接蒙古高原。流域跨越 8 省(自治区、直辖市), 总面积 31.8 万 km<sup>2</sup>, 占全国总面积的 3.3%。全流域总的地势是西北高东南低, 大致分高原、山地及平原 3 种地貌类型。流域年平均气温在 1.5~14.0℃, 年平均相对湿度 50%~70%; 年平均降水量 539 mm, 属半湿润半干旱地带; 年平均陆面蒸发量 470 mm, 水面蒸发量 1 100 mm。

**1.2 生物量估算方法** CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) 模型是一个主要表征陆地生态系统中水分、碳素和氮素通量随时间变化的生态系统过程模型, 它主要应用陆地卫星观测资料和气候驱动因子来估测陆地生态系统生物地球化学循环, 此模型经常用来模拟生态系统中凋落物、土壤养分矿化、土壤 CO<sub>2</sub> 气体排放、净碳固定与分配的季节变化特征<sup>[11]</sup>。生物量计算运用了遥感光学模型, 其公式为:  $BIO-MASS = \sum \epsilon \times APAR(t)$ , 其中,  $APAR = FPAR \times PAR$ ,  $\epsilon = \epsilon' T_1 T_2 W$ , 式中, 吸收光合有效辐射 PAR 是植被进行光合作用的驱动能量, 计算由 FAO(世界粮农组织)公布的技术文档中的经验公式来完成; FPAR 表示植被对入射光合有效辐射的吸收比例, 可通过陆地卫星遥感数据资料直接获得;  $\epsilon'$  指的是最大光利用率(单位: g/MJ),  $T_1$  和  $T_2$  表示环境温度对光利用的抑制影响;  $W$  为水分影响胁迫系数, 用以表达水分因素影响植被对光的利用程度。  $T_1$ 、 $T_2$  和  $W$  均为无量纲参数。

## 2 结果与分析

**2.1 海河流域生物量估算结果** 根据我国 1:400 万植被图, 将海河流域划分为常绿针叶林、落叶阔叶林、灌丛、草原、草甸、一年一熟作物以及一年两熟或两年三熟作物 7 种植被类型统计了 2007 年海河流域不同植被的生物量(表 1)。从统计的不同植被的生物量总量(表 1)来看, 海河流域一年两熟或两年三熟作物累积的生物量最多, 从植被分布(图 1)来

作者简介 王岚(1981-), 女, 重庆人, 工程师, 从事 3S 技术应用研究。

\* 通讯作者, 工程师, 硕士, 从事资源环境遥感研究。

收稿日期 2014-06-09

看,这些作物主要分布在海河平原区,光热充足,土壤肥沃,降水充沛,良好的气候条件保证了作物的生长,这些作物的面积约占全流域总面积的 47.85%,而生物量累积量总计占流域生物量的 64.47%,约为 234.57 Tg,它对整个海河流域生物量的贡献最大;其次是灌丛,海河流域灌丛面积约占全流域面积的 28.21%,而其生物量累积量占流域生物量年总量的 19.60%,约为 71.32 Tg;而一年一熟作物的面积占整个流域的 9.66%,生物量累积总量约为 27.83 Tg,占流域生物量年累积量的 7.65%;占流域面积 11.45% 的草原草甸累积生物量总量约为 24.27 Tg,占流域生物量总量的 6.67%;流域内包括针叶林和阔叶林等林地,覆盖面积很小,仅占流域总面积的 2.66%,贡献的生物量总量也较小,总计仅为 5.88 Tg。从单位面积上的生物量来看,一年两熟或两年三熟作物累积生物量平均值最大,达 15 415.90 kg/hm<sup>2</sup>,主要指冬小麦、玉米、棉花以及花生等作物,这个地区一直是全国重点的产粮区,多年来人们一直在这里从事农业生产活动;主要分布在山西省的一年一熟作物生物量均值达 9 059.00 kg/hm<sup>2</sup>,这与朱文泉等用 Chikugo 模型计算的结果(9 302 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>比较吻合,这些作物主要是小麦、玉米和马铃薯、甜菜、胡麻等经济作物林地;灌丛主要分布在燕山山脉北侧山区以及滦河山区北部,大致分为荆条灌丛、绣线菊灌丛、蒿灌丛、草原沙地锦鸡儿以及柳树等,从西南到东北横贯整个流域山区,均值达 7 950.40 kg/hm<sup>2</sup>,与 Chikugo 模型的计算结果(7 444 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>一致;草甸主要是分布在渤海湾沿岸的盐生草甸和内蒙谷多伦一带的普通草甸,面积较小,生物量累积均值在 7 904.31 kg/hm<sup>2</sup> 左右;草原主要分布在海河流域的内蒙古境内,属于温带禾草草原,生物量均值在 6 252.83 kg/hm<sup>2</sup> 左右,与陶波等用 CEVSA 模型计算的结果(6 960 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>一致;面积较小的针叶林和阔叶林散落的分布于流域内的山区,生物量累积均值在 6 900.00 kg/hm<sup>2</sup> 左右。

**2.2 模型验证** 为了验证 CASA 模型在海河流域的适用性,在此将 CASA 模型计算出的各植被类型的生物量结果换算成净第一性生产力(Net Primary Production, NPP),与其他研究成果以及收集到的部分实测数据进行了比较。结果表明(表 2),通过 CASA 模型计算出的针叶林和阔叶林值在实测值范围之内,结果还是比较准确的,其他模型计算出的

表 1 2007 年海河流域不同植被生物量统计

植被类型	总面积 像素	面积百 分比//%	生物量 总量//Tg	生物量总量 百分比//%	生物量平均 值//kg/hm <sup>2</sup>
常绿针叶林	1 719	0.54	1.18	0.32	6 863.95
落叶阔叶林	6 770	2.12	4.70	1.29	6 976.01
灌丛	90 211	28.21	71.32	19.60	7 950.40
草原	27 461	8.59	17.08	4.69	6 252.83
草甸	9 150	2.86	7.19	1.98	7 904.31
一年一熟作物	30 879	9.66	27.83	7.65	9 059.00
一年两熟或两 年三熟作物	153 033	47.85	234.57	64.47	15 415.90

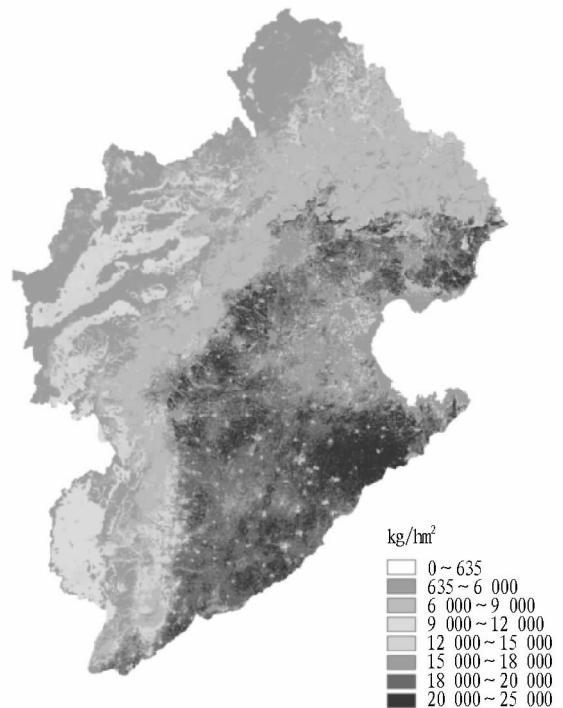


图 1 2007 年海河流域生物量分布

NPP 是全国年累积量的均值,均应小于海河流域 NPP 的年累积量均值,造成各个模型估算结果差异还有最大光能利用率取值不同的原因,该研究中的 CASA 模型光能最大利用率的取值是根据植被类型的不同而取不同的值,充分考虑了植被的差异性,其他模型中有的光能最大利用率用的是经验值 0.389 gc/MJ,这就造成了结果的差异。

表 2 不同模型估算的 NPP

模型	常绿针叶林	落叶阔叶林	灌丛	草原	草甸	一年一熟作物	一年两熟或两年三熟作物
该研究 CASA 模型	343.2	348.8	397.5	312.6	395.2	453.0	770.8
Chikugo 模型[12]	476.8	513.4	372.2	442.9		465.1	
孙睿等[14]	264.5	230	145	58	95.5	156.5	198
Miami 模型[14]	344.5	220.5	158	138.5	156.5	186	249
CEVSA 模型[13]	486	624		348			
刘明亮[15]	587	928		271			752
Prince[16]	833	549		280		468	
朴世龙等[17]	297		102	80	176		
柯金虎等[18]	295	269	287	223			
实测值[19]	160~680	250~700					

gc/(m<sup>2</sup>·a)

**2.3 海河流域生物量时空变化特征** 从2007年海河流域生物量季节变化可以看出,海河流域的生物量具有明显的季相变化特征,这与流域内气温、降水、太阳辐射和农作物耕作方式有很大的相关性。12月~次年2月份是入冬季节,海河流域处在干冷的偏北气流控制下,气候干冷,是全年降水最少的季节,平均气温在 $-21.0\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,农作物和草地停止生长,森林生物量累加缓慢,3个月的生物量均值分别为142.4、182.2、211.1  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;春季(3~5月),大地回暖,气温回升,平均气温在 $2.0\sim 15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,各类作物开始萌发生长,需水量较大,但春季降水量较少,加上春季风速大、升温快、相对湿度为全年最小,但蒸发量却是全年最大,生物量累计值不高,3个月的均值分别为346.5、866.1、1 203.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;夏季(6~8月),是全年太阳辐射最强的季节,气温也达到最高,平均气温在 $17.4\sim 27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全年的降水量也主要集中于夏季,7、8月的降水量占全年的一半左右,水汽充沛,相对湿度为全年最大,良好的光、热、水条件,使得流域内植被处于生长的最佳时期,尤其7、8月份对全年的生物量贡献最为明显,3个月的均值分别为1 158.1、2 485.2、2 449.6  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;9月入秋,气温开始下降,流域内平均气温在 $1.0\sim 15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此期间流域处在变性极地大陆气团和极地大陆气团控制下,降雨较少,农作物逐步开始收割,草地开始枯黄,生物量有明显的下降,从9月的1 840.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 降至10月的454.8  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,到了11月就减少至177.9  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

海河流域生物量分布受地形条件限制比较明显,总体呈现从西北向东南递增的趋势。西北部的内蒙古高原区,海拔均在1 000 m以上,气候上属于温带,主要为灌丛和草原植被,土壤以栗钙土为主,生物量累积平均值为7 018.0  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占整个海河流域总生物量的21.61%;中部为华北山区,该区属于高原—平原的过渡区,地面起伏较大,海拔100~3 000 m,主要为落叶灌丛和矮林,土壤以褐土为主,生物量累积平均值为9 272  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占整个流域的28.54%;东南为海河平原区,海拔在100 m以下,主要为栽培作物,是全国重要的产粮区,农作物以小麦、棉花、玉米以及花生为主,该区开垦历史悠久,土壤以潮土为主,其次是黄垆土和盐土,生物量累积平均值为16 194  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占整个流域的49.85%。

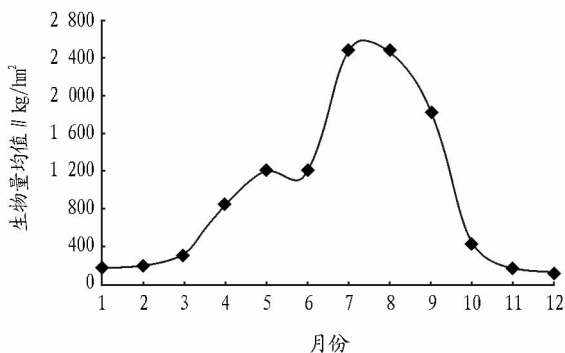


图2 2007年海河流域生物量季节变化

根据CASA模型计算结果,6年来海河流域的年平均生物量为405.5 Tg,单位面积植被的年平均生物量为12 751.49

$\text{kg}/\text{hm}^2$ ,是全国平均水平的1.8倍(全国同期水平在6 918.20  $\text{kg}/\text{hm}^2$ <sup>[20]</sup>);研究区的面积为31.8万  $\text{km}^2$ ,占全国面积的3.3%,而植被年均生物量总量为405.5 Tg,占全国总量的6.1%(根据全国单位面积生物量均值及面积推算,全国生物量应在6 641.7 Tg),海河流域生物量对全国生物量的贡献有着重要的作用。从海河流域2002~2007年生物量变化情况(图3)可看出,除2003和2007年以外4年大致平稳,呈缓步上升的趋势,而2003年生物量年均值增至14 114.3  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,2007年又降至11 500.0  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,这两年出现了较大的变化,2007年的气象数据不全,插值精度受到影响,进而影响到了模型最终的计算结果。

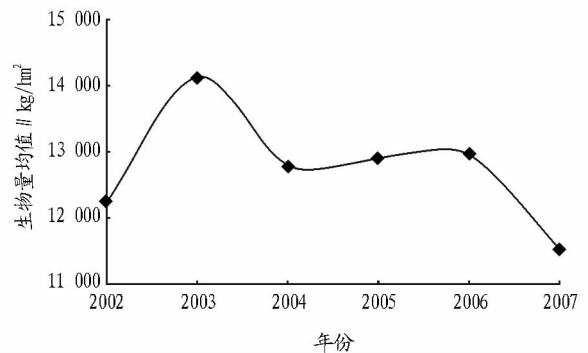


图3 海河流域生物量年际变化

**2.4 海河流域不同植被覆盖度的生物量评价** 通过2007年中旬NDVI数据,计算出海河流域植被覆盖分布情况,从图4可以看出7月中旬,流域内大部分植被覆盖度在70%以上,平原区达90%左右,只有流域内的内蒙古高原区在40%左右。结合2007年7月份的海河流域生物量分布图,得到了生物量与植被覆盖度的变化曲线(图5),随着流域内植被覆盖度的增加,生物量也呈线性增加,在植被覆盖度为20%的时候,生物量仅有953.26  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,而当覆盖度达90%时,生物量也随之达2 830.59  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,两者具有极好的相关性,相关系数( $R^2=0.966$ )。

### 3 结论

利用CASA模型,结合遥感数据、气象数据以及1:400万植被图,对整个海河流域植被生物量的空间格局、年际变化趋势和季节变化进行了研究,并对不同植被的生物量分布和生物量与植被覆盖度的关系进行了评价,结果表明,6年来海河流域年均生物量总量为405.5 Tg,占全国总量的6.1%,单位面积的年平均生物量为12 751.49  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,是全国平均水平的1.8倍。在海河流域所有植被类型中,以一年两熟或两年三熟作物的平均生物量最大,达15 415.90  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;草原的平均生物量最小,仅为1.18  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。海河流域的年生物量分布呈东南高西北低的趋势,平原生物量>山区生物量>高原生物量。海河流域的生物量具有明显的季相变化特征。流域内不同植被覆盖度的生物量差异明显,两者具有很强的相关性( $R^2=0.966$ )。

该试验验证了CASA模型在内陆河流域范围内的适用性。CASA模型一般是用来估算全国尺度的生物量,研究

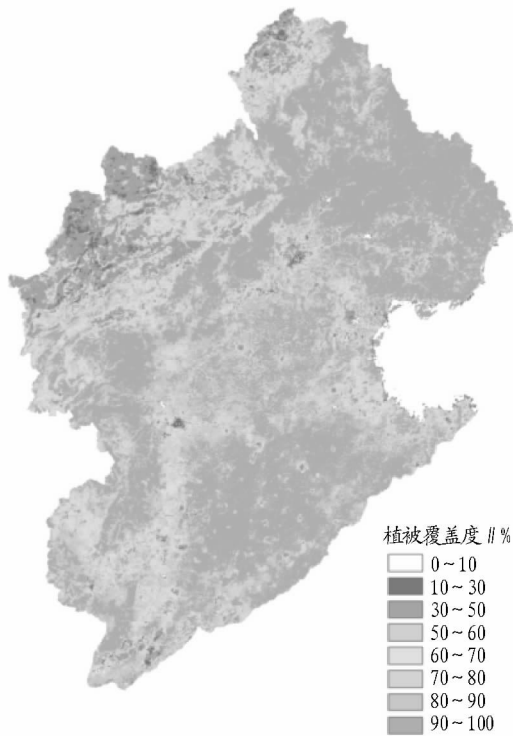


图 4 2007 年 7 月中旬海河流域植被覆盖图

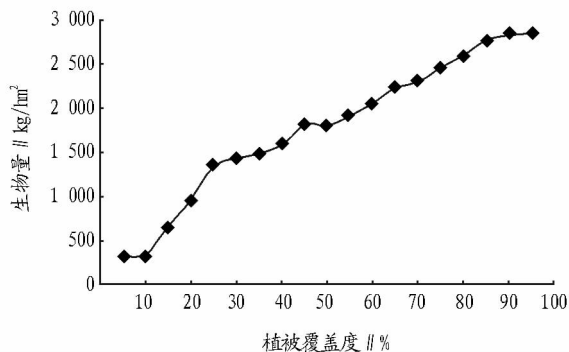


图 5 海河流域生物量与植被覆盖度的变化

证明该模型在海河流域仍然具有较高的准确性。由于目前的遥感技术手段和机理模型模拟的局限性,该研究估算的生物量具有一定的不确定性。这些不确定性主要包括遥感数据分辨率的影响、反演算法的不确定性、生态机理模型的不确定性等。为降低不确定性的影响,可采用以下手段:①准确估算光能利用率。模型中设定的全球植被最大光能利用率为经验值,但不同年龄的相同植被类型,以及同一植被在一年不同环境中最大光能利用率是不同的。如何准确地依据植被类型、年龄、环境因素来确定某种植被最大光能利用率是 CASA 模型需要改进之处;②开展实地观测以提高模型的

估算精度。受时间、地域等多方面因素影响,此次工作未开展实地数据采集,下一步的工作将开展与遥感数据空间和时间分辨率相对应的地表实测来进一步验证和改进模型;③随着 3S 技术的发展,利用 CASA 模型结合实地观测数据,建立区域尺度的生物量空间数据库,实时、动态估算区域生物量并实现数据共享,是未来生态学模型的发展方向。

### 参考文献

- [1] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):479-508.
- [2] 冯宗饰,王效科,吴刚.中国森林生态系统的生物量和生产力[M].北京:科学出版社,1999:1-6.
- [3] 宋开山,张柏.玉米地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究[J].农业系统科学与综合研究,2005(1):21-22.
- [4] CIAIS P, TANS P P, TROLIER M J, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO<sub>2</sub> sink indicated by the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Science, 1995, 269: 1098-1102.
- [5] FILED C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281: 237-240.
- [6] ALEXANDROV G A, OIKAWA T, YAMAGATA Y. The Scheme for Globalization of a Process-based Model Explaining Gradations in Terrestrial NPP and Its Application [J]. Ecological Modeling, 2002, 148(3): 293-306.
- [7] GRAMER W, KICKLIGHTER D W, BONDEAU A, et al. Comparing Global Models of Terrestrial Net Primary Productivity (NPP): Overview and Key Results [J]. Global Change Biology, 1999, 1(S1): 1-15.
- [8] CAO M K, WOODWARD F. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. Nature, 1998, 393: 249-252.
- [9] ICHII K, MATSUI Y, YAMAGUCHI Y, et al. Comparison of global net primary production trends obtained from satellite-based normalized difference vegetation index and carbon cycle model [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15: 351-363.
- [10] POLLER 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: 811-841.
- [11] 裴志才,周才平,欧阳华,等.青藏高原高寒草原区域碳估测[J].地理研究,2010,29(1):102-110.
- [12] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等.基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算[J].遥感学报,2005(3):303-304.
- [13] 陶波,李克让.中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J].地理学报,2003(5):377-378.
- [14] 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(1):40-41.
- [15] 刘明亮.中国土地利用/土地覆盖变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2001.
- [16] PRINCE D S, GOETZ J S. Satellite sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(D15): 20077-20091.
- [17] 朴世龙,方精云.1982-1999年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J].自然资源学报,2002(5):375-376.
- [18] 柯金虎,朴世龙,方精云.长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究[J].植物生态学报,2003(6):766-767.
- [19] 刘世荣,徐德应,王兵.气候变化对中国森林生产力的影响[J].中国森林现实生产力的特征及地理分布格局[J].林业科学研究,1993(6):634-640.
- [20] 郭晓寅,何勇,沈永平.基于 MODIS 资料的 2000-2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J].冰川冻土,2006(4):514-515.