

DOI: 10.5846/stxb201405211045

潘竟虎,文岩.中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局.生态学报,2015,35(23): - .

Pan J H, Wen Y. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23):

中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局

潘竟虎^{1,*}, 文 岩²

1 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 北京师范大学 资源学院, 北京 100875

摘要:通过修正的 CASA 模型估算 2001—2012 年间西北干旱区陆地生态系统的净第一性生产力(NPP),并结合土壤微生物呼吸方程,计算出 12 年的净生态系统生产力(NEP),分析了植被碳汇的时空变化规律。结果表明:研究区的 NPP 表现出很强的随季节变化的规律,全年 7 月份 NPP 为最高值,12 月为最低值,12 年间 NPP 的年均值变化不大。2001—2012 年研究区的植被碳汇在波动变化中有所增加,其中 2006 年的碳汇平均值最小,为 609.04 gC m⁻² a⁻¹,2012 年最大,为 648.02 gC m⁻² a⁻¹;年内碳汇的最大值主要出现在 5—7 月;碳汇能力由大到小的植被类型为针叶林>农田>灌丛>阔叶林>草原>荒漠草原。研究区多年平均碳汇量呈现自西向东逐渐增加的规律,西辽河流域草原区的 NPP 和碳汇平均值最大,塔里木盆地暖温带荒漠区最小。

关键词:植被碳汇;NPP;CASA 模型;遥感;西北干旱区

Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China

PAN Jinghu^{1,*}, WEN Yan²

1 College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 College of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China

Abstract: Global warming caused by greenhouse gas emissions has had a profound impact on human survival and development. Consequently, this phenomenon has received widespread attention from the international community. Vegetation can absorb greenhouse gases CO₂, and has a huge carbon sink function, so it has an irreplaceable role in slowing global warming. The carbon sink capacity of vegetation has a significant impact on regional and global climate change. Carbon emissions are undoubtedly enormous in the mid and high latitudes of the Northern Hemisphere, so studies on terrestrial ecosystem carbon dynamics and spatial patterns in the arid region of northwest China may provide an accurate assessment how China contributes towards mitigating global climate change and CO₂ emission reduction. The net primary productivity (NPP) and heterotrophic respiration (R_H) in the arid region of northwest China were calculated by using MODIS images, meteorological data, and a vegetation type map, in combination with an improved CASA model and soil microbial respiration model. The NPP and R_H were then used to estimate net ecosystem productivity (NEP) and vegetation carbon sink from 2001 to 2012. Spatial-temporal characteristics and the reasons for NPP and carbon sink variation in the arid region of northwest China were analyzed. The results show that research methods used in this paper were able to quickly extract ecosystem net primary productivity and carbon sink for the northwest arid region. The methods used are efficient, convenient, and practical for large scale carbon balance and carbon cycling studies in this region. Comparison indicated

基金项目:国家自然科学基金项目(41361040);甘肃省自然科学基金项目(1208RJZA159);甘肃省高校基本科研业务费项目(2014-63)

收稿日期:2014-05-21; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panjh_nwnu@nwnu.edu.cn

small gaps between simulated and measured site values. The overall difference in the spatial distribution between simulated values and MODIS NPP products is also small, and the volatility of the analog value is less than the value of MODIS NPP products. NPP in the study area showed strong seasonal variation. The maximal NPP value was obtained in July, while the minimum value was obtained in December. In the 12 study years, annual averages of *NPP* changed minimally. Average carbon sinks showed fluctuating in the 12 years, but increased in general, overall. The carbon sink mean changed from a minimum of $609.04 \text{ gC}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in 2006 to a maximum of $648.02 \text{ gC}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in 2012. The change in mean carbon sink was less than $39 \text{ gC}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, with a standard deviation of 11.68. Annual maximum carbon mainly occurred in May, June, and July. Carbon sink fluctuated, but showed an overall upward trend in the northwest arid region between 2001 and 2012. Carbon sink in this region gradually increased from West to East, with Eastern > West > Central. The carbon sink capacity of different natural areas was quite different. The largest carbon sink capacity was recorded in the grassland area of West Liaohe River Basin, while the smallest was recorded in the warm temperate desert region of the Tarim Basin. The annual maximum carbon sink mainly occurred from May to July. Carbon sink was ranked in the order of coniferous forest > farmland > shrubs > broad-leaved forest > grassland > desert steppe.

Key Words: carbon sink; NPP; CASA model; remote sensing; arid region of northwest China

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)的研究报告(<https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/index.html>)指出,大气中二氧化碳(CO_2)的浓度从工业革命前 1705 年的 $0.000 278 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 增加到了 2011 年的 $0.000 391 \text{ m}^3/\text{m}^3$,增加了 40%。 CO_2 浓度的持续升高致使全球平均气温不断提升,继而引发了一系列气候和环境问题,对人类的生存和发展产生了重要影响,碳循环研究引起了全球科学家和各国政府的强烈关注。陆地生态系统是全球碳循环的重要组成部分,也是大气 CO_2 进入陆地圈的主要平台,且最易受到气候变化和人类活动的强烈干扰。如果生态系统固定的碳量大于排放的碳量,认为该生态系统为大气 CO_2 的汇,简称碳汇(Carbon sink),反之,则为碳源(Carbon source)^[1]。国外植被碳汇相关问题的研究始于 1960 年代,由国际科学联合会(International Council of Scientific Unions, ICSU)发起的国际生物学计划(International Biological Programme, IBP)标志着全球陆地森林生态系统碳蓄存研究的开始。此后,欧洲和美国分别开展了大量区域生态系统的碳平衡与全球碳循环的研究。国内相关研究则直到 1970 年代后期才陆续展开,主要以借鉴国外较为成熟的理论和方法为主,并结合中国的实际情况,改良了相关的估测模型。纵观国内外植被碳汇研究,主要集中在以下两方面:①利用土地利用和资源清查数据,估算国家或地区的碳收支情况^[2,3]。②采用各种模型的模拟结果来估算全球或区域的植被碳汇^[4-6]。整体而言,从研究对象看,大多数已有研究都是针对森林生态系统开展^[7],其他土地利用类型(如农田和草原)尽管也是陆地生态系统碳汇的重要组成部分,但相关研究较少;且已有针对区域的碳汇研究仅分析了区域内单一的植被类型^[5],缺少对于整个生态系统的综合性研究。从研究内容看,现有研究较少能反映植被碳汇的空间分布,只能从总量上确定生态系统是否为碳汇,无法在空间上加以区分^[8],使得研究的实用性大大降低。从研究尺度看,多集中于较小的区域尺度,或以省区为单元^[9],鲜见大尺度上的自然地理区研究。从研究方法看,虽然已有部分研究应用遥感和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术并提出了区域估算模型^[1,9],但综合型、简便、快速、准确提取碳汇空间分布的方法还远未成熟。

干旱区约占地球陆地面积的 30%左右,其生态系统的植被碳汇在全球的碳平衡中具有重要的地位。中国西北干旱区深居内陆,严酷的气候环境导致生态系统生产能力普遍低下,系统自我调控能力较低,生态系统表现出极端的敏感性和脆弱性。因此,研究中国西北干旱区陆地生态系统的植被碳汇,分析其时空变化规律,可以为全球中高纬度地区陆地生态系统植被碳汇研究提供科学借鉴。基于以上原因,本文以遥感数据、气象站点观测数据、GIS 本底数据及植被类型数据等为基础,利用 Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型和土壤微生物呼吸模型,对中国西北干旱区 2001—2012 年的碳汇进行估算,并分析其时空演变格局,以期为中

国温室气体减排计划和区域生态系统保护措施的制定、实施提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文采用赵松乔^[10]提出的中国自然地区区划方案,其中的西北干旱区主要包括大兴安岭以西,昆仑山—阿尔金山—祁连山和长城一线以北的广大地区,地理上介于东经 70°01′—121°09′,北纬 36°16′—46°25′之间,总面积约 246×10⁴km²。西北干旱区深居欧亚大陆内部,受东亚夏季风的影响较少,来自海洋的湿润气流被山岭阻隔,难以深入,导致气候干燥。区内年降水量从东部的 400 mm 左右,往西减少至 100 mm 以下。地貌外营力主要为风化、物质移动、水力侵蚀和堆积以及广泛的风力侵蚀、搬运和堆积,沙漠和戈壁广布。绝大部分属内陆流域,山地径流是本区主要水资源,补给来源为雨水及冰雪融水。地表的生态系统类型由东往西大体上依次为森林草原、典型草原、荒漠草原、荒漠。分为两个自然地区和八个自然区(图 1)。

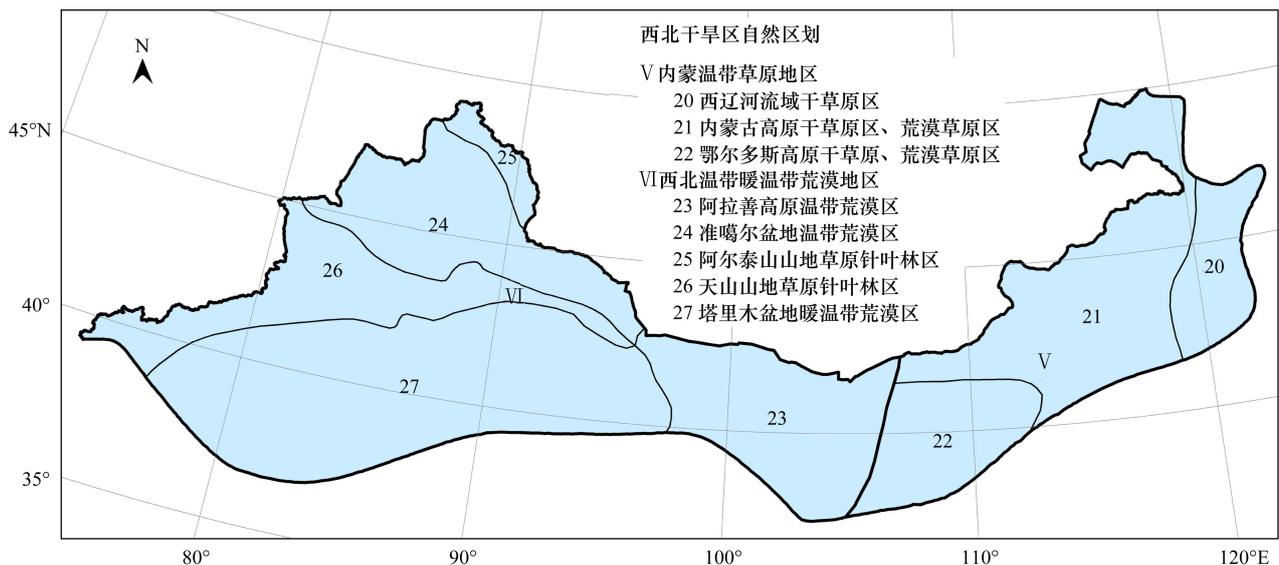


图 1 中国西北干旱区自然区划

Fig. 1 Comprehensive physical regionalization of the arid region of northwest China

1.2 数据源

遥感观测宏观性强、信息量大、快速动态更新、现势性好、全空间覆盖,加之因其能够有效反映植被的空间差异,在估算生物量空间分布格局方面具有明显的优势。考虑到本文的研究区面积广大,中、高分辨率的地球资源卫星数据显然不适合大范围宏观研究,且数据的连续性不强,时间分辨率不高,影像镶嵌等处理过程也会带来一定的误差,为此,本文采用 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) 的归一化差异植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 产品。数据获取自 Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/order.html>) 网站,为十六日合成数据,空间分辨率为 1 km,共计下载遥感影像数据 2368 幅,行列号为 4-5 和 23-26,覆盖研究区全部。气象数据包括月平均气温,月总降水量和月总太阳辐射,取自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。为了保证空间插值精度,共选取研究区内及周边的常规气象站 314 个,太阳辐射监测站点 48 个(图 2),其中位于研究区内部的常规气象站点 103 个,太阳辐射站点 21 个。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据获取自美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 网站 (<http://glavis.usgs.gov/>),分辨率为 1 km。植被类型数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>),为便于分析,将指标类型归并为针叶林、阔叶林、灌木林地、草原、农田、荒漠、水体及无植被地段 8 类(图 3)。

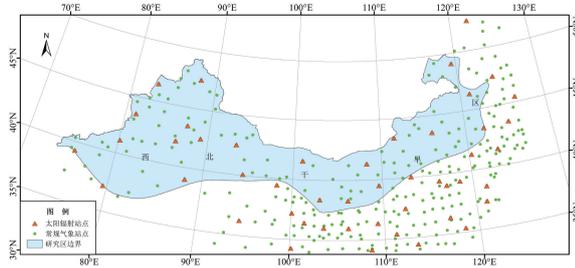


图2 研究区气象站点分布示意图

Fig. 2 Distribution of meteorological stations in study area

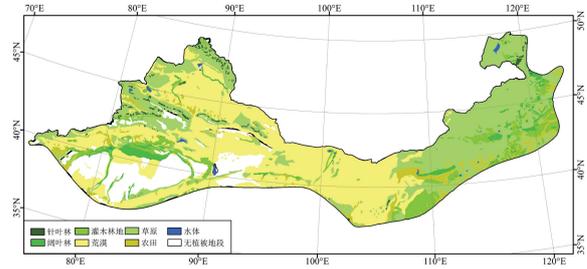


图3 西北干旱区植被类型图

Fig. 3 Vegetation map of the arid region of northwest China

2 碳汇估算方法

2.1 净初级生产力估算

采用基于光合利用率、适合估算大区域尺度的 CASA 模型计算 (Net Primary Productivity, NPP)。表达式为^[11]:

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

式中, $APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$), $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

2.1.1 APAR 的计算

计算式为^[12]:

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

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR} \quad (3)$$

$$FPAR_{NDVI} = \frac{NDVI_{(x,t)} - NDVI_{(i,min)}}{NDVI_{(i,max)} - NDVI_{(i,min)}} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \quad (4)$$

$$FPAR_{SR} = \frac{SR_{(x,t)} - SR_{(i,min)}}{SR_{(i,max)} - SR_{(i,min)}} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \quad (5)$$

$$SR_{(x,t)} = \frac{1 + NDVI_{(x,t)}}{1 - NDVI_{(x,t)}} \quad (6)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示 t 月像元 x 处的太阳总辐射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{month}^{-1}$), $FPAR$ 为植被层对太阳入射光合有效辐射的吸收比例, $NDVI_{(i,max)}$ 和 $NDVI_{(i,min)}$ 分别表示第 i 种植被类型的 $NDVI$ 的最大值和最小值, $FPAR_{min}$ 和 $FPAR_{max}$ 分别取值 0.001 和 0.95, $SR_{(i,min)}$ 和 $SR_{(i,max)}$ 分别对应某种植被类型 $NDVI$ 的 5% 和 95% 处的百分位数, α 值取 0.5^[13]。

2.1.2 光能利用率的计算

计算式为^[14]:

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{max} \quad (7)$$

式中, $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 分别为低温和高温对光能利用率的胁迫作用, $W_e(x, t)$ 为水分胁迫影响系数, ε_{max} 为理想条件下植被的最大光能利用率。

$T_{e1}(x, t)$ 的计算式为^[15]:

$$T_{e1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \quad (8)$$

式中, $T_{opt}(x)$ 为某一区域年内 $NDVI$ 值达到最高时的月平均气温。

$T_{e2}(x, t)$ 计算式为^[15]:

$$T_{e2}(x, t) = 1.184 / \{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]\} \times$$

$$1/\{1 + \exp [0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x,t))]\} \quad (9)$$

式中, $T(x,t)$ 为月平均温度, 当某月平均温度比最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 高 10 °C 或低 13 °C 时, 该月的 $T_{e2}(x,t)$ 值等于月平均温度 $T(x,t)$ 为最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 时 $T_{e2}(x,t)$ 值的一半。

$W_e(x,t)$ 计算式为^[15]:

$$W_e(x,t) = 0.5 + 0.5 \times E(x,t)/E_p(x,t) \quad (10)$$

式中, 区域实际蒸散量 $E(x,t)$ 根据周广胜^[16] 建立的区域实际蒸散模型求取, 区域潜在蒸散量 $E_p(x,t)$ 根据 Boucher^[17] 提出的互补关系求取。

最大光利用率 ε_{max} 的取值因不同的植被类型而有所不同, 本文采用朱文泉^[18] 和 Running 等^[19] 根据生态生理过程模型 BIOME-BGG 对 10 种植被类型所模拟的值: 针叶林 1.008 gC/MJ, 阔叶林 1.044 gC/MJ, 灌丛 0.768 gC/MJ, 草原 0.608 gC/MJ, 农田 0.604 gC/MJ, 荒漠、无植被地段和水体等生态系统取 CASA 模型所估算的全球月平均最大光利用率 0.389 gC/MJ。

2.1.3 气象数据的空间分布模拟

气温垂直递减率会随着季节的变化而变化^[20], 根据 314 个气象站的海拔高度和月平均气温资料, 计算研究区各月平均气温的垂直递减率, 再根据气象站点海拔高度, 将观测气温换算为海拔高度为“0”处的气温值。利用普通 Kriging 插值法, 模拟海拔为“0”处的温度 $T_{k(x,t)}$; 根据 DEM 和气温垂直递减率, 模拟起伏地形下的真实温度 $T_{(x,t)}$ 。降水数据直接采用 Kriging 插值对气象站点观测数值进行插值。

西北干旱区面积广大, 山区地形复杂, 仅仅依靠气象观测站的资料, 采取空间插值的方法来描述研究区太阳总辐射的精确空间分布, 容易造成较大误差。因此, 本文以 DEM 为基础, 充分考虑地形之间相互遮蔽对太阳总辐射的影响, 利用日照百分率与天文辐射拟合太阳总辐射, 获取经验系数, 从而计算起伏地形下的太阳总辐射。计算式为^[21]:

$$Q_i = Q_0' (a + b) S \quad (11)$$

式中, Q_i 为起伏地形下月太阳总辐射; Q_0' 为为月天文辐射量, 篇幅所限, 其具体计算方法可参考文献 [22]; a 、 b 为拟合得到的经验系数, 本文经计算, 取值 0.22 和 0.773; S 为日照百分率。受篇幅所限, 图 4 仅列出了 2012 年 7 月地形校正前后模拟的太阳总辐射。

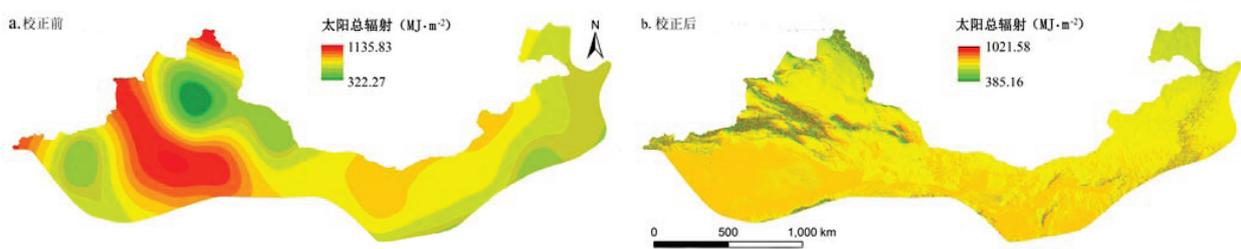


图 4 2012 年 7 月太阳总辐射地形校正对比

Fig. 4 Solar radiation Contrast used topographic correction in July, 2012

2.2 碳汇的计算

生态系统的碳汇储量包含了绿色植物生物量、凋落物量及土壤有机质, NEP (Net Ecosystem Productivity) 是估算区域植被碳源和碳汇的重要指标, 尽管严格来说 NEP 在区域尺度上不完全等于碳汇, 但常常将其作为碳汇大小的度量。在不考虑其它自然和人为因素影响的前提下, 植被碳汇可表示为 NPP 与土壤微生物呼吸碳排放之间的差值, 计算式为^[23]:

$$NEP = NPP - R_H \quad (12)$$

式中: NEP 为植被净生态系统生产力, NPP 为植被净初级生产力, R_H 为土壤微生物呼吸量。当 $NEP > 0$, 说明植被固定的碳多于土壤排放碳, 表现为碳汇, 反之则为碳源。

土壤微生物呼吸量与土壤中微生物的数量、种类以及植物根系的分泌物有关,在所有影响土壤微生物呼吸的因素中,温度和降水是最重要的两个因素^[24]。裴志永等^[6]建立了气温、降水与碳排放的回归模型,估测土壤微生物呼吸的分布状况,汤洁等^[9]将其应用于吉林西部碳汇估算中。上述研究范围部分包含于本文研究区范围内,因本文研究区面积很大,目前尚未建立普适模型,故本文采用裴志永等的经验模型。计算式为^[6]:

$$R_H = 0.22 \times (\exp(0.0912T) + \ln(0.3145R + 1)) \times 30 \times 46.5\% \quad (13)$$

式中: T 为气温($^{\circ}\text{C}$), R 为降水(mm)。

3 结果与分析

3.1 西北干旱区 NPP 时空分布

3.1.1 估算结果的不确定性

在 ArcGIS 软件支持下,将空间化后的各参数代入 CASA 模型进行栅格地图代数运算,得到 2001—2012 年逐月 NPP 空间分布。图 5 所示为 12 年间 NPP 平均值的空间分布。区域或全球尺度的 NPP 估算结果的精度评价,一直是 NPP 遥感估算的难题和最具有争议的环节。NPP 估算模型的精度验证方法一般有两种:一种是实测法,即通过估算值与若干实际测量值的对比来验证估算精度;另一种是相对法,即将估算的空间分布图与其他模型估算的结果或遥感数据产品进行对比来评价估算效果。尽管野外调查获得实测的生物量数据比较可靠,但很难在整个研究区内进行大范围比较均匀地实地调查取样。加之研究区横跨中国北方,时间跨度为 12 年,生物量分布的空间和时间异质性较大,因此如果简单地利用有限的实地调查所获得的平均生物量来推算整个区域的生物量,则可能产生较大误差。

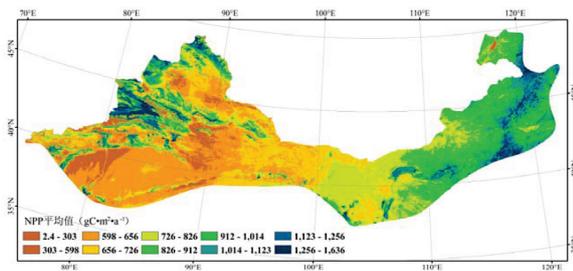


图 5 2001—2012 年西北干旱区 NPP 平均值 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of 12-year mean annual NPP of the arid region of northwest China in 2001-2012

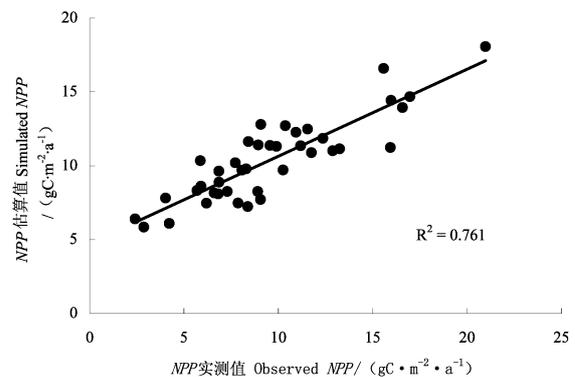


图 6 NPP 估算值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of simulated NPP and observed NPP

为此,本文利用分布在研究区内的 40 组实测资料值(来源于全球 NPP 数据库 <http://www.daac/ornl.gov/NPP/npp.home.html>)对估算结果进行验证,考虑到实测值为来自各试验站点上的多年平均值(1946—2006),因此以本文模拟的 12 年 NPP 的平均值参与检验。由于气温、降水、人类活动等环境变化的影响,二者之间存在一定的差异是难免的。相关性散点图如图 6 所示,由图 6 可知,NPP 的实测值和估算值之间具有较高的拟合度,其相关系数高达 0.87。尽管实测值与模拟值的时间不一致,但对于大多数观测点来说,估算值基本上都落在实测值的变动范围内。由于实测数据的限制,精度验证存在一定的不确定性。其一,全球 NPP 数据库的实测数据与本文估算的时段不一致,尽管均采用多年平均值比较,但时间差异导致生物量估算偏差的因素仍不能忽视。其二,全球 NPP 数据库的实测数据来自于北方针叶林、温带森林和草地的监测值,对于干旱区普遍存在的稀疏植被地表覆盖类型缺乏实测数据支持。第三,受 MODIS 数据空间分辨率的限制,大量混合像元存在的事实不可避免地会影响估算精度,也给精度验证带来了极大困难。

3.1.2 估算结果与 MODIS NPP 产品的对比

本文将估算结果与 2001—2010 年 MODIS 的 1 km 分辨率 NPP 产品进行了对比,结果发现二者在空间分布上较为吻合。除去 2001、2003、2007、2010 年这 4 年中 MODIS 产品值与本文估算值相差稍大外,其余年份相差很小,差值介于 $3.71\text{—}24.46\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间。MODIS 的 NPP 产品年总量与本文估算结果总体差距亦不大,差距较大的年份是 2001 年和 2003 年,且除 2001 年外,各年份估算的 NPP 总量均略高于 MODIS 产品值,其中,2001 年 NPP 的估算值大于 MODIS 产品值 $22.47\text{ MtC}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体而言,MODIS 产品的年际波动明显大于本文估算值。

3.1.3 NPP 的时空分布

总体来看,年内 NPP 随季节具有明显的规律性变化,NPP 值较高的月份主要出现在 3—9 月。多年 1 月的平均 NPP 基本全部小于 $74\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,平均值仅为 $27.81\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$;7 月时 NPP 达到最大值 $112.96\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$;12 月的 NPP 值最低,多年平均值仅为 $22.85\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。计算研究区 NPP 各年的平均值,结果发现 NPP 年平均值在 12 年间表现出波动中上升的趋势,2001 年平均 NPP 值为 $791.29\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,2006 年为 12 年中的最低值, $789.14\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,2012 为 12 年间最高值, $829.15\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

按照中国自然地理区划的三级自然分区,统计各三级自然区的年平均 NPP 及标准差(表 1)。NPP 多年平均值最大的区域为西辽河流域草原区,尽管该区受垦荒等人类活动影响,植被退化严重,其 NPP 平均值仍达到 $1223.59\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,远高于西北干旱区的平均值;阿尔泰山山地草原针叶林区、内蒙古干草原荒漠草原区和天山山地草原及针叶林区的 NPP 平均值均在 $1000\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上;NPP 平均值最小的区域是塔里木盆地暖温带荒漠区,年平均 NPP 仅 $258.75\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。标准差的统计值则显示,天山山地草原及针叶林区内部 NPP 的空间差异最大,阿拉善高原温带荒漠区内部 NPP 的空间差异最小,这主要和自然区内的植被类型丰富度有关,植被类型数量越多,内部 NPP 的空间差异越大,反之亦然。

表 1 自然区划三级分区 NPP 统计值 ($\text{gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)

Table 1 Statistics of NPP values in the third level natural division

| 自然区 Natural regions | 净第一性生产力 NPP | | 净生态系统生产力 NEP | |
|---|-------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| | 平均值 Mean | 标准差 Standard deviation | 平均值 Mean | 标准差 Standard deviation |
| 塔里木盆地暖温带荒漠区 Warm-temperate desert region of Tarim Basin | 258.75 | 108.07 | 172.16 | 112.81 |
| 鄂尔多斯高原干草原、荒漠草原区 Steppe and desert steppe region of Erdos Plateau | 793.65 | 136.14 | 715.72 | 139.84 |
| 西辽河流域草原区 Steppe region of West Liaohe River Basin | 1223.59 | 110.72 | 842.69 | 116.32 |
| 内蒙古干草原、荒漠草原区 Steppe and desert steppe region of Inner Mongolia | 1051.14 | 133.62 | 794.62 | 131.94 |
| 阿拉善高原温带荒漠区 Temperate desert region of Plateau | 436.44 | 77.25 | 266.53 | 77.03 |
| 天山山地草原及针叶林区 Grassland and coniferous forest region of Tianshan Mountains | 1040.85 | 247.97 | 667.98 | 251.49 |
| 准噶尔盆地荒漠区 Desert region of Junggar Basin | 560.25 | 169.95 | 480.85 | 166.46 |
| 阿尔泰山山地草原及针叶林区 Grassland and coniferous forest region of Altai Mountains | 1055.20 | 216.92 | 794.77 | 214.33 |

3.2 西北干旱区植被碳汇时空分布

3.2.1 植被碳汇的时间变化

利用公式(12)计算得到 2001—2012 年的植被碳汇(NEP)分布(图 7)。2001—2012 年西北干旱区的植被碳汇总体呈现波动性上升的趋势,从植被碳汇的年平均值来看,2006 年碳汇最小,仅为 $609.04\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,2012 年最大,为 $648.02\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。植被碳汇的年际变化不大,年变化量小于 $39\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,标准差为 11.68

$\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。从 2001—2012 年间各月碳汇的平均值来看,碳汇月平均值与 NPP 具有较大差异,2001 年、2004 年和 2009 年的月植被碳汇最大值出现在 5 月,2005 年、2006 年、2008 年和 2010 年月碳汇最大值出现在 6 月,其余年份月碳汇最大值均出现在 7 月。

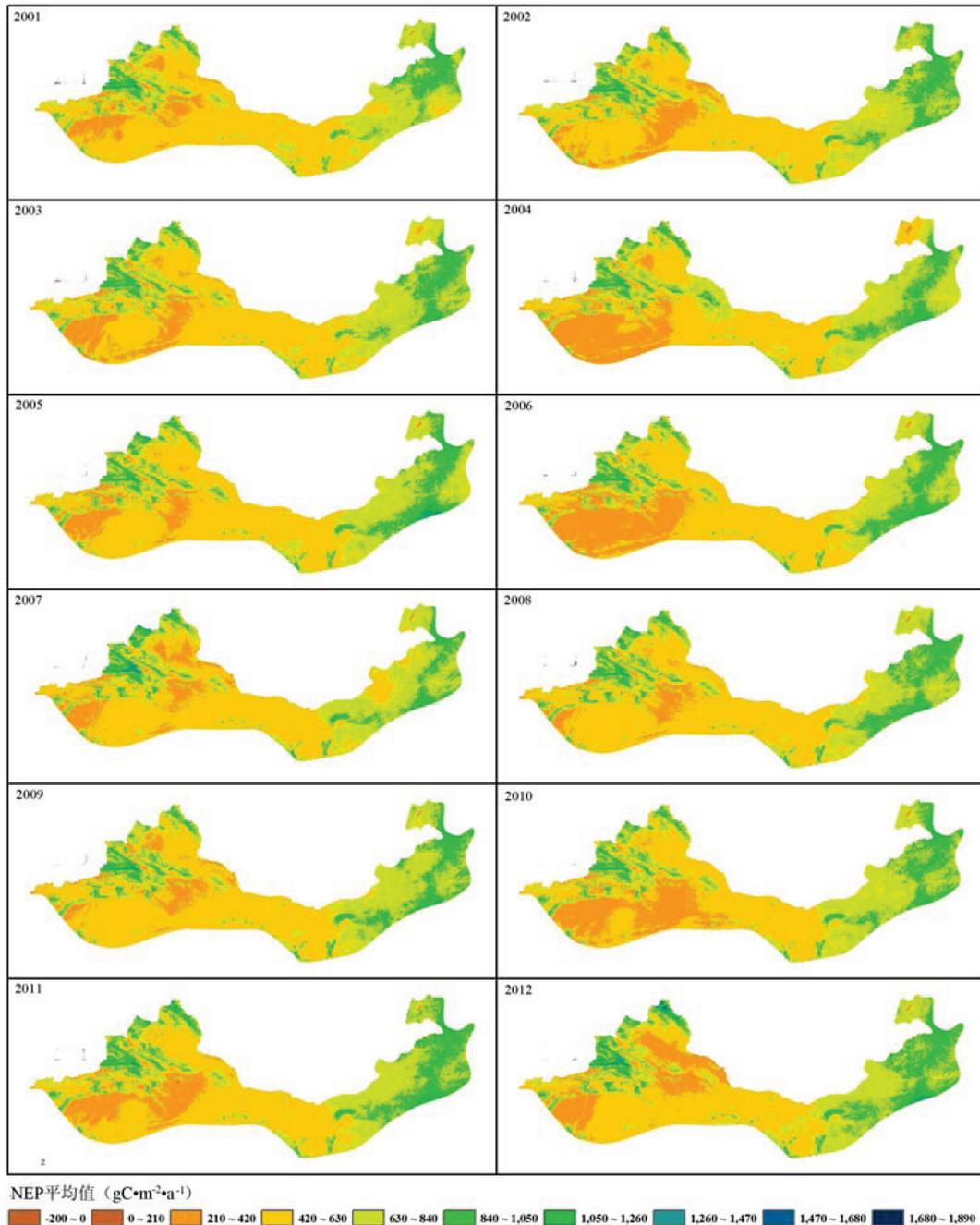


图 7 2001—2012 年植被碳汇空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of carbon sinks during 2001—2012

3.2.2 植被碳汇的空间变化

计算 2001—2012 年西北干旱区陆地生态系统的植被碳汇平均值及标准差(图 8)。从图 8 中可以看出,西北干旱区的植被碳汇总体上呈现自西向东逐渐增加的趋势,中、西部广泛分布着戈壁、沙漠、裸岩石砾地、稀疏草地等土地类型,植被稀疏,碳汇量很少,东部则分布有较多的温带草原和森林,以及小部分高质量的农田,碳汇量较大。从植被碳汇年际变化的标准差空间分布图来看,大部分地区的碳汇年际波动均不大,变化较大

的区域主要分布于阿尔泰山、天山、吐哈地区、呼伦贝尔地区、塔城地区以及塔里木盆地北缘的阿克苏、沙雅、尉犁等绿洲。究其原因,一方面,绿洲地区的耕地不同于草原、森林等植被,地表植被覆盖年际、年内变化大;另一方面,山地区域地形复杂,地表覆盖类型多样,景观相对较为破碎,易受气象等因素的影响而发生变化,也是影响植被碳汇波动的重要因素;此外,由于难以获取到国外气象观测数据,可能影响研究区北部的气象插值结果,这也是造成北部沿边地区植被碳汇年际波动相对较大的原因之一。

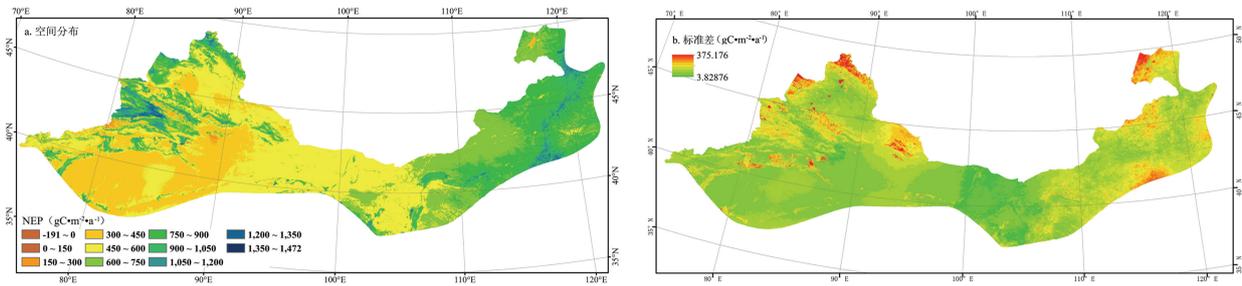


图 8 西北干旱区植被碳汇量 (a) 及其标准差 (b) 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of carbon sinks (a) and its standard deviation (b) in the arid region of northwest China

按照中国自然地理区划的三级自然分区,统计各三级自然区的年平均植被碳汇及标准差(表 1)。植被碳汇多年平均值最大的区域为西辽河流域草原区,其碳汇平均值为 $842.69 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,远高于西北干旱区的平均值;阿尔泰山山地草原针叶林区、内蒙古干草原荒漠草原区和鄂尔多斯高原干草原、荒漠草原区,碳汇平均值均在 $700 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上;植被碳汇平均值最小的区域是塔里木盆地暖温带荒漠区,年平均 NEP 仅 $172.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。标准差的统计值则显示,植被碳汇空间差异最大的自然区均为山地区,天山山地草原及针叶林区和阿尔泰山山地草原针叶林区的碳汇标准差都大于 $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;阿拉善高原温带荒漠区内部碳汇的空间差异最小,仅有 $77.03 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

3.2.3 不同植被类型的碳汇量

将植被类型图与植被碳汇 (NEP) 年平均值空间分布图进行叠置,分析不同植被类型的碳汇能力。结果发现不同植被类型的碳汇能力强弱差异较大,其中碳汇能力最强的为针叶林 ($918.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),其次是农田 ($818.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),碳汇能力最小的是荒漠 ($152.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。研究区各植被覆盖类型碳汇能力大小依次为针叶林>农田>灌丛>阔叶林>草原>荒漠。

4 结论与讨论

本文通过修正的 CASA 模型估算西北干旱区陆地生态系统的 NPP,并结合土壤微生物呼吸方程,计算出西北干旱区陆地生态系统 2001—2012 年间植被碳汇的时空分布格局,研究结果能够较好地反映出西北干旱区的植被生长及分布状况。研究区的 NPP 表现出很强的随季节变化的规律,全年 7 月份 NPP 为最高值,12 月为最低值,12 年间研究区 NPP 的年均值变化不大,碳汇均值总体表现为增加趋势,其中 2006 年的碳汇平均值最小,2012 年最大;年内碳汇的最大值出现在 5—7 月。西辽河流域草原区的 NPP 和碳汇平均值最大,塔里木盆地暖温带荒漠区最小。植被碳汇与降水、温度和太阳辐射之间具有很强的相关性;不同植被类型的碳汇能力差异巨大。方精云等^[1]研究发现北半球高纬度陆地生态系统是全球重要的碳汇,本文通过对西北干旱区的碳汇量估算,验证了该结论,有助于为国际碳贸易提供科学依据,也为碳汇的定量研究提供方法参考。在 2001—2012 年间,研究区碳汇量呈波动增加的特征,说明西北干旱区的植被生长状况总体有所改善,陆地植被生态系统持续恢复,土壤中碳元素的流失受到抑制。

大尺度上生物量遥感估算的精度评价,一直是定量遥感估算非常困难和最具争议的问题,由于研究区面积广大和资料所限,本文利用全球 NPP 数据库中的部分实测样点对估算结果进行了评估。但全球 NPP 数据库作为精度验证依据尚存在以下不确定性:首先,多数样点为北方针叶林、温带森林和荒漠草原,并不能完全

代表整个研究区的各生态系统类型;其次,实测值为有限点数据,不能从空间上反映研究区生态功能的异质性和差异性;第三,实测时间与本文估算的时段不完全一致,尽管文中采用多年平均值作比较,但时间差异可能导致生物量估算出现偏差。此外,目前已经提出的植被碳汇估算模型和方法,各有其优势和不足,尚无统一的普适性方法。本文虽对 CASA 模型进行了改进,但由于当前生态系统的植被碳汇计算模型大都建立在经验统计的基础上,而经验公式多是依赖于较小尺度的实验区或少数试验站的监测数据建立起来的,在由点向面推算的过程中,经验模型能否完全适用于大尺度上生态系统的植被碳汇研究,尚需在增加观测数据的基础上进一步加以验证。受遥感数据本身的误差及遥感模型中关键参数的不确定性等因素的制约,单纯的遥感方法存在一定误差,通过降尺度等方法将遥感数据与地面观测资料的优势结合起来,应是下一步研究的重点。

致谢:感谢匿名审稿人对本文提出的建设性修改建议。

参考文献 (References):

- [1] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [2] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the World carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [3] Kauppi P E, Mielikäinen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, 256(5053): 70-74.
- [4] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 1990, 247(4949): 1431-1438.
- [5] 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 冯琦胜, 黄晓东, 侯扶江, 邹德富, 王翀. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. 草业学报, 2011, 20(2): 1-22.
- [6] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 杨文斌. 青藏高原高寒草原区域碳估测. 地理研究, 2010, 29(1): 102-110.
- [7] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [8] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Bakwin P S, Daube B C, Bassow S L, Bazzaz F A. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260(5112): 1314-1317.
- [9] 汤洁, 姜毅, 李昭阳, 张楠, 胡猛. 基于 CASA 模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 4-10.
- [10] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10.
- [11] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. 生态学报, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [12] 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. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [13] 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. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
- [14] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [15] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [16] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候—植被分类研究. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.
- [17] Boucher J, Quilliot D, Pradères J P, Simon M F, Grès S, Guigné C, Prévot D, Ferry G, Boutin J A, Carpené C, Valet P, Saulnier-Blache J S. Potential involvement of adipocyte insulin resistance in obesity-associated up-regulation of adipocyte lysophospholipase D/autotaxin expression. *Diabetologia*, 2005, 48(3): 569-577.
- [18] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [19] Running S W, Thornton P E, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System // Sala O, Jackson R, Mooney H. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer Verlag, 2000: 44-57.
- [20] 李军, 游松财, 黄敬峰. 中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114.
- [21] 刘玉安, 黄波, 易成功, 程涛, 余健, 曲乐安. 基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析. 农业工程学报, 2013, 29(13): 130-141.
- [22] 王丽, 邱新法, 王培法, 刘爱利. 复杂地形下长江流域太阳总辐射的分布式模拟. 地理学报, 2010, 65(5): 543-552.
- [23] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data. *Tellus B*, 1996, 48(4): 420-432.
- [24] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌. 土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 44-51.