第 29 卷 第 1 期
2010 年 1 月

地 理 研 究
GEOGRAPHICAL RESEARCH

Vol. 29, No. 1
Jan., 2010

青藏高原高寒草原区域碳估测

裴志永[1], 周才平[2*], 欧阳华[2,3], 杨文斌[2]

(1. 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 国际山地中心, 加德满都, 尼泊尔)

摘要: CASA (Carnegie-Ames-Stanford Biosphere) 模型是一个表征陆地生态系统水、碳素和氮素通量随时间变化的生态系统过程模型。本研究采用 MODIS 遥感数据与 CASA 模型相结合的方法计算了青藏高原高寒草原生态系统植被净初级生产力 (NPP) 总量为 20.57×10^{12} g·a^{-1}的碳。同时根据五道梁实验点上得到的经验关系估算了青藏高原高寒草原生态系统区域上的土壤碳排放 (Heterotrophic respiration) 总量为 8.07×10^{12} g·a^{-1}, 因此推算得高寒草原区域内净生态系统生产力 (NEP) 折算成碳为 12.50×10^{12} g·a^{-1}。

关 键 词: 碳估测; NPP; 呼吸; 高寒草原; 青藏高原

文章编号: 1000-0585(2010)01-0102-09

1 前言

来自大气中 CO_2 浓度梯度及海洋表面 CO_2 分压特征、大气中 CO_2 浓度监测、同位素信息、陆地植被观测、全球土地利用资料数据统计分析、卫星遥感数据分析以及应用生态系统过程模型模拟等研究都表明, 北半球中高纬度陆地生态系统是一个巨大的碳汇, 它固定了大部分全球范围内来自人为排放的 CO_2[1~3]。对于陆地表层碳过程的研究认为在全球气温普遍升高、大气中 CO_2 浓度剧增、大气中氮沉降的作用以及陆地植被生长期延长等因素的作用下, 陆地植物的物质合成能力在不断增加[4]。但是此方面的结论也只是局部性的, 既没有在全球尺度上也没有在整个生态系统植被的碳循环过程中得到证实[5]。在碳汇研究中最关键, 也是最糟糕的问题是不同研究工作对于碳汇量的估算相差太大, 这主要是由于不同研究工作者使用不同的数据源、估算方法和模型假设及参数等所导致的[6], 因此精准地估测中小尺度地域碳源或碳汇的状况应该是全球碳循环研究的工作重点。

青藏高原因其是全球海拔最高的一个独特地域单元而被称为世界的第三极, 其独特的自然环境和生态系统在全球占有特殊的地位。另外, 青藏高原位于中纬度西风带对流层中部, 是亚洲季风气候变化的敏感区, 其上的任何变化都可能迅速波及周围地区, 所以说发生在青藏高原上的生态演变和全球变化的研究都息息相关。高原的地势格局及作用于它的大气环流对高原自然地域的分异有着决定性的影响, 东南温暖湿润向西北寒冷干旱的变化明显, 表现为森林—草甸—草原—荒漠的地带更迭, 是亚欧大陆东部相应水平自然地带在巨大高程上的变异, 由地势和海拔引起的辐射、温度和水分条件的不同是变异的主导因

收稿日期: 2009-01-14; **修订日期**: 2009-03-02
基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2005CB422005) 和科技基础性工作专项 (2006FY110200)
作者简介: 裴志永 (1976-), 男, 副研究员, 博士。主要从事生态学、科技管理研究。
E-mail: pei@acca21.org.cn
*通讯作者: 周才平, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: zhoucp@igsnrr.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素[7,8]。青藏高原上独特的自然地理特征，使得其生态系统内部碳的迁移、循环都与众不同，因而探讨高原生态系统的碳循环特征将对全球变化的研究有重大意义，青藏高原上植被变迁、自然植被的生物量、净初级生产力估算的研究不断涌现[9,10]，也有专门针对高寒草原生态系统土壤碳库、植被覆被与气候变化关系的探讨[11,12]，但作为高原面上面积分布比较广泛的重要生态系统，高寒草原地处北半球中低纬度，它的碳源汇作用尚没有野外实验、遥感等直接数据能够给出确切答案，本文将结合野外实测数据，应用模型方法来探讨高寒草原的源汇问题。

2　模型选择与数据

区域上的碳平衡就是区域陆地植被净生产力（NPP）与土壤微生物呼吸（R_H）之间的动态关系。为了精准估算青藏高原高寒草原区域上的碳收支总体状况，我们必须寻找可以描述陆地植被生产力与碳排放地理分布的生态学模型，早期研究中都是一些根据与气候因子的回归关系建立来表述陆地植被生产力的静态模型。Lieth 等早在 1972 年就提出了一个基于蒸散来估测陆地植被初级生产力的生物模型[13]，但以后他又主张用 Miami 模型根据温度和降水资料对植被生产力进行估算[14]，还有 Meentemeyer 等也曾经发展了一个根据常规气候数据对陆地生态系统凋落物生产力进行估算的模型[15]。以上这些模型都能用于描述陆地植被的生产力总体特征，但是它们并不能说明区域上碳库的大小、循环状况以及气体通量季节变化特征等关键性问题。近几年的研究中，涌现出了大量可以描述区域碳库、通量、碳循环和碳交换特征地理分布的动态模型，诸如 TEM、Century、BIOME、FBM、SILVAN、Hybrid、NASA-CASA 和 CEVSA 等。本文采用一个参数最少的模型（CASA）来模拟青藏高原高寒草原地区植被净初级生产力的分布特征，而土壤碳排放采用我们通过野外实测数据得到的模拟关系来估测。

2.1　CASA 模型

NASA-CASA（Carnegie-Ames-Stanford Biosphere）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[16]，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_2 气体排放、净碳固定与分配的季节变化特征。CASA 模型在本研究中的应用，主要是通过太阳辐射、大气温度、土壤湿度、土壤结构和地表植被类型等资料来估算青藏高原高寒草原生态系统净初级生产力（NPP）的空间分布特征。CASA 模型中模拟植物固定碳量（CO_2）主要是根据直接照射到植被冠层并且被植物转化成为生物量的光合有效辐射（Photosynthetically active radiation，PAR，$W \cdot m^{-2}$）来确定的，本文的青藏高原高寒草原生态系统净初级生产力就采用每月每平方米上固定的碳量来计算。

生态系统净初级生产力就是被植物净固定大气 CO_2 中的碳，在 CASA 模型中主要是根据陆地植被对光能的利用效率来计算[17]，模型中的具体估算方法是通过随时间变化的地表太阳辐射量（Solar radiance，S_r，$W \cdot m^{-2}$）、被植物吸收的有效光合部分（Fraction of absorbed PAR，FPAR，）和一个光能利用效率常量（Light utilization efficiency term，ε_{max}）的乘积来表述每个月植被初级生产力的变化，诚然，它同样受到大气温度和土壤湿度的影响，计算公式如下：

$$NPP = S_r \times FPAR \times \varepsilon_{max} \times T_a \times W \tag{1}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

公式 1 中的太阳辐射(S_r) 和植物吸收的有效光合 ($FPAR$) 都可以通过陆地卫星遥感数据资料直接获得。应用全球各种主要植被类型 2000 多个实验点植被净生产力(NPP) 野外实测值对 CASA 模型进行校正，光能利用效率常量 (ε_{max}) 被确定为 0.56 $g\ C\ MJ^{-1}\ PAR$[18]。公式 1 中的大气温度影响因子 (Ta) 主要是通过有利于植被生长的最佳气温 (Optimal temperatures for plant production, T_{opt}) 与大气温度的偏差来确定，详见公式 2～公式 5。最佳气温 (T_{opt}) 随经纬度的不同而不同，从极地的接近 0 ℃到低纬度地区的 > 30 ℃不等，在我们研究的青藏高原高寒草原区域，有利于植被生长的最佳气温 (T_{opt}) 取值为 17 ℃。

$$T_a = T_1 \times (1.1919 \times T_{low} \times T_{high}) \tag{2}$$

$$T_1 = 0.8 + 0.02 \times T_{opt} - 0.0005 \times T_{opt}^2 \tag{3}$$

$$T_{low} = 1.0/(1 + e^{0.2 \times (T_{opt} - 10 - T)}) \tag{4}$$

$$T_{high} = 1.0/(1 + e^{0.3 \times (T - 10 - T_{opt})}) \tag{5}$$

公式 1 中的土壤湿度因子 (W) 是通过实际蒸散 (Actual evapotranspiration, AET) 和潜在蒸散 (Potential evapotranspiration, PET) 来计算的 (见式 6)，其中潜在蒸散 (PET) 可以应用 Priestly 等的方法计算得到[19]，实际蒸散 (AET) 是根据 Thormthwaite 等的理论技术由 Vorosmarty 等提出的水分平衡模型 (Water balance model, WBM) 计算出来的[20,21]。

$$W = 0.5 + (0.5 \times \frac{AET}{PET}) \tag{6}$$

2.2 土壤微生物呼吸计算方法

在以往的研究中，我们详细探讨过青海省五道梁实验点上碳排放与环境因子的关系，并在此基础上建立了温度、降水与碳排放的回归方程，本文就采用我们既得的研究成果来估测青藏高原高寒草原区域上土壤微生物呼吸 (Heterotrophic respiration, R_H) 的分布状况，计算公式如下：

$$R_H = 0.22(\mathrm{Exp}(0.0913T) + \mathrm{Ln}(0.3145R + 1)) \times 30 \times 46.5\% \tag{7}$$

经验公式 7 应用常规的气象资料 (温度 T 和降水 R) 与土壤碳排放的回归关系建立[22]。

2.3 数据源

为了提高输入数据和参数的精准程度，我们主要应用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 遥感数据来进行模型运算。模型运算过程中主要应用 MODIS 中的第三层遥感数据，主要包括 MOD12 和 MOD15，从中我们可获得青藏高原高寒草原实验区内的土地覆被 (Land Cover) 和区域植物吸收的有效光合 (FPAR) 等数据。以上数据中，土地覆被状况是 CASA 模型运行的基础，同时也是我们进行区域内植被类型划分的依据。在以往 CASA 模型应用中，都是采用植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 来估算植被有效光合的空间分布状况[16,18]，本研究中我们可以直接应用 MODIS 遥感数据获得植被有效光合数据，MODIS 遥感数据中的植被有效光合是根据植被冠层光能转换算法计算得到的[23]。考虑到验证数据源大都来自 2001 年的野外调查数据，本研究采用的 MODIS 数据均为 2001 年的 MOD12 和 MOD15 数据产品，植被分类数据源为 MODIS 遥感数据 (MOD12, 2001)，气象资料根据中国温度和降水数据库 (1960～1990)，有效光合辐射数据来自于 MODIS 遥感数据 (MOD15, 2001)。另外，CASA

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型是以月为步长计算 NPP 的, 而 MODIS 的 FPAR 数据产品是 8 天为步长, 本研究采用最大值法 (MVC) 获得每月的 FPAR 数据, 从而能有效去除云产生的影响。

包括月均温、降水及海拔高程数据的栅格式气候数据是根据中国温度和降水数据库 (1960～1990) 应用 PRISM 模型 (Parameter-elevation regressions on independent slopes model) 计算出来的[24], 分辨率为经纬度 0.042°×0.042°。云量数据是通过经纬度 0.5°×0.5°全球 30 年月平均气候数据资料经过插值处理得来[25], 土壤结构数据可以通过经纬度 1°×1°的全球土壤结构数据插值获得[26]。

在运转模型之前, 首先需要将所有输入数据资料的分辨率统一, 我们把模型运行需要的区域植被类型数据 (Land cover types)、土壤质地结构数据 (Soil texture)、植被有效光合数据 (FPAR)、和太阳辐射数据 (Solar radiation)、气温数据 (Air temperature)、降水数据 (Precipitation) 和云量 (Cloudiness) 等常规气象数据资料栅格的分辨率提高到了经纬度 0.05°×0.05°, 应用此高分辨率数据资料, 经过模型运算我们可以得到如下结果: 青藏高原植被分类、高寒草原植被净初级生产力分布、高寒草原土壤呼吸分布状况和高寒草原区净生产力分布。

3　模拟结果验证

青藏高原是一个条件艰苦的地域, 有关高寒草原碳排放的研究工作也非常少。中国科学院地理科学与资源研究所拉萨农田试验站工作组在西藏班戈地区做了部分工作, 我们就用他们的野外实验数据对本研究中的模拟结果进行验证。班戈的具体位置为为 89°59′E, 31°40′N, 海拔 4700m, 该地区的生态系统为典型的高寒草原生态系统, 土壤类型亦为高寒草原土。通过项目交流我们得到了班戈野外实验点上 2001 年春季到秋季的土壤碳排放野外实测数据, 我们用相同经纬度上通过模拟得到的春季到秋季的估测数据与之进行比对, 如图 1 所示可以看出, 通过模型估测出来的结果和野外实测数据的变化趋势基本保持一致 ($R^2 = 0.95$, $p < 0.001$)。

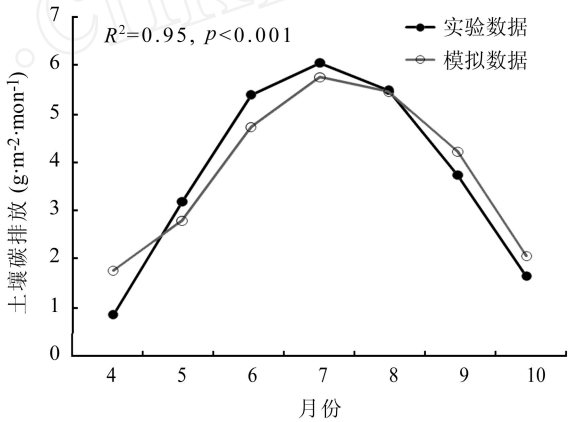

图 1　班戈实验点野外数据与模拟值对比

Fig. 1　Comparison between experimental data and simulated data, Bange, Tibet

通过野外实验和文献资料查阅, 一共收集到了 3 个在青藏高原高寒草原区域内野外实验点的植物初级生产力数据, 除了五道梁是我们自己测定的数据以外, 沱沱河和班戈都是通过资料收集得到的, 我们应用由 CASA 模型估算得到的植被初级生产力与这些野外实测数值进行对比, 由表 1 中可以看出, 应用 CASA 模型估算得到高寒草原各个野外实验点区域的植被初级生产力与实测值基本是一致的。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 NPP 实测值与模拟值对比 (NPP 为含碳量 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)

Tab. 1 Validation of simulated NPP

位 置	海拔	初级生产力实测值	初级生产力模拟值
五道梁	4767m	92.50	96.07 ±4.25
沱沱河①	4582m	95.26	99.39 ±9.41
班戈②	4700m	67.49	66.30 ±4.63

说明: ①沱沱河实验点上的植被初级生产力数据是根据 Luo 等 (2002) 在青藏高原植被样带上地上生物量计算得来的, 首先根据 Pei 等 (2002) 植物地上生物量中有机碳的含量计算出当地植被的地上生产力, 然后根据 Yang 等 (1988) 关于地上植被生产力和地下部分植被生产力的比率关系 (1.2.182 ±0.204) 换算出实验点上植物初级生产力; ②通过 973 项目交流, 获得了班戈野外实验点上植被初级生产力为植被干重 225.66 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 通过上述资料和规律将其换算成为碳量。

4 高寒草原区域碳特征

4.1 青藏高原生态系统分布特征

整个青藏高原占地面积 $250 \times 10^4 km^2$, 图 2 是根据 MODIS 遥感数据得出的青藏高原主要生态系统类型空间分布特征, 青藏高原地带性具体表现为森林—草甸—草原—荒漠从东南到西北的地带更迭, 这是亚欧大陆东部相应水平自然地带在高程上的巨大变异, 由地势和海拔引起的辐射、温度和水分条件的不同是变异的主导因素[7,8]。由图 2 可计算出高寒草原覆盖区域的面积, 通过 MODIS 数据资料获得的高寒草原生态系统区域共覆盖 8978 个栅格, 每个栅格点的分辨率 5km ×5km, 高寒草原区占地面积为 $22.45 \times 10^3 km^2$。

4.2 高寒草原区域碳排放 (R_H)

图 3 是根据空间数据资料应用公式 7 估测得到的青藏高原高寒草原地区土壤碳排放 (R_H) 分布图, 由于受降水、温度等环境因子的影响, 高寒草原区土壤碳排放由东南向西北呈递减趋势, 其平均碳排放为 35.94 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ (此排放值已经扣除了植物根呼吸部分), 整个高寒草原区域上土壤总碳排放量为 $8.07 \times 10^{12} g \cdot a^{-1}$。土壤呼吸量与土壤有机碳含量的多少有着最直接的关系, 之前有研究也是通过 CENTURY 模型估测高寒草地土壤有机碳的动态分布特征, 发现明显存在地带性分异特征, 整体出现东南高西北低的特征[11], 这和我们的估测结果特征一致。

4.3 高寒草原区植被净初级生产力 (NPP)

应用 CASA 模型估测出的高寒草原区域上植被净初级生产力 (NPP) 的特征与土壤碳排放非常相似, 也是由东南向西北逐渐递减 (见图 4), 理论上来讲生物区系的植被生产力应该更明显地受到水温等气候条件的控制, 这和之前有关草地植被 NPP 空间分布研究的结果完全一致[27]。CASA 模型估测高寒草原区植被净初级生产力 (NPP) 平均为 91.20 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$的碳, 此高寒草原区内植被净初级生产力总和为 $20.57 \times 10^{12} g \cdot a^{-1}$ 的碳, 就植被多年平均净初级生产力而言, 整个区域上的平均值比藏北那曲地区的平均值要高一些[27], 这正是由青藏高原上植被 NPP 的空间分异特征决定的。

4.4 高寒草原区域净生态系统生产力 (NEP)

其实应用经验公式和 CASA 模型得到了以上高寒草原区土壤碳排放 (R_H) 与植被净初级生产力 (NPP) 以后, 我们就可以得出高寒草原区域上净生态系统生产力 (NEP)。净生态系统生产力也就是生态区内植被净初级生产力与土壤微生物呼吸碳排放之间的差额 (见公式 8)[28]。由此计算得到的 NEP 是区域上碳平衡估算的重要指标, 如果 NEP 为正, 说

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

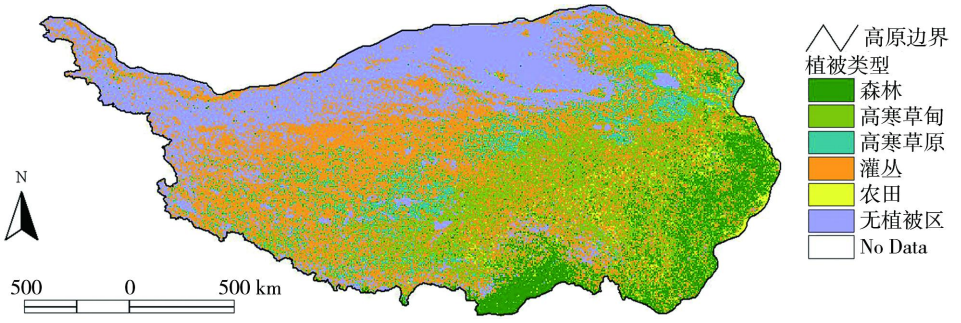

图 2　青藏高原植被分类图

Fig. 2　Land cover on Tibetan Plateau area

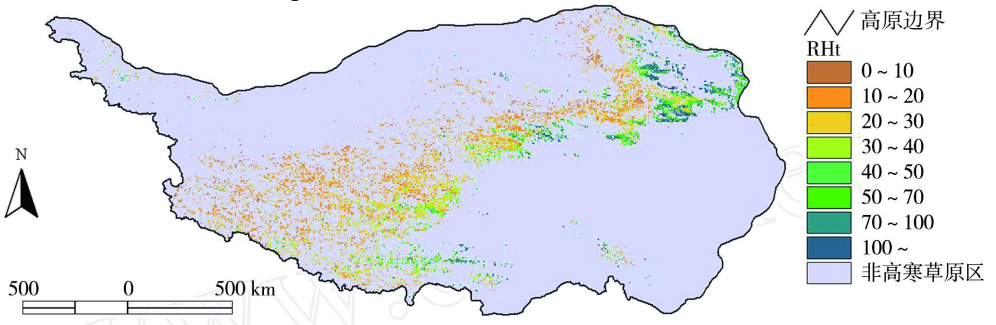

图 3　高寒草原土壤碳排放

Fig. 3　Heterotrophic respiration in the alpine steppe area

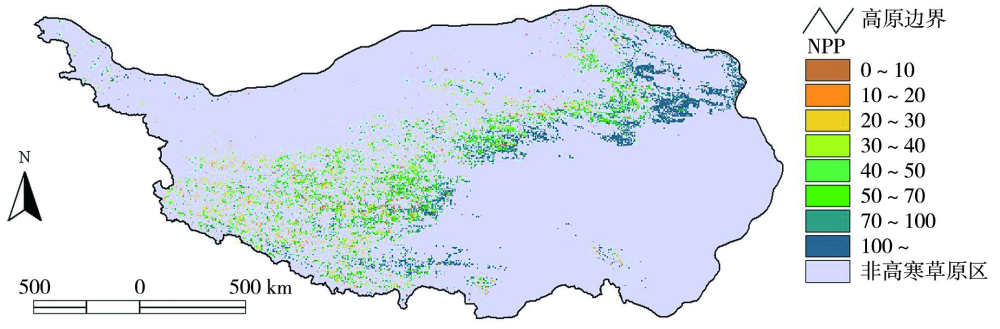

图 4　高寒草原区域植被 NPP 分布

Fig. 4　Spatial distribution of vegetation NPP

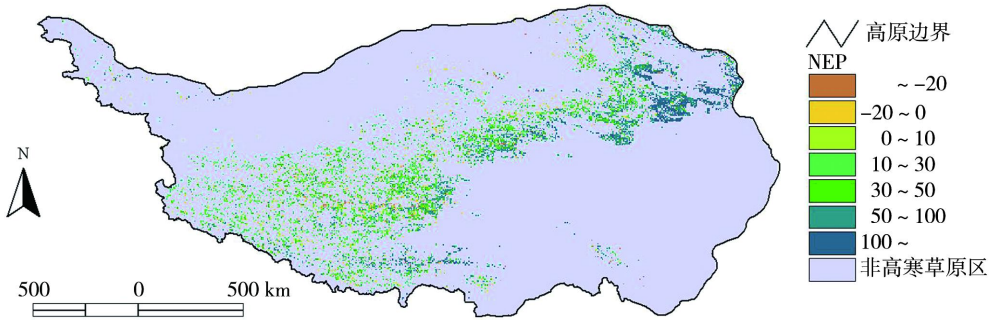

图 5　高寒草原净生态系统生产力

Fig. 5　Net ecosystem productivity of alpine steppe area

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

明植被固定的碳多于土壤排放碳，表现为碳汇。如果其值为负，则土壤排放碳多于植被的碳固定量，起到碳源的作用。

$$NEP = NPP - R_H \tag{8}$$

图 5 所示为青藏高原高寒草原区域上净生态系统生产力的分布状况，其中正负都有分布，碳汇主要分布在高寒草原条带的东南侧，碳源则分布于草原区的西北部，而且碳汇稍多于碳源。经统计，区域内净生态系统生产力平均为 55.26 g·m^{-2}·a^{-1}的碳，而整个高寒草原区内的总 NEP 为 12.50 ×10^{12} g·a^{-1}的碳。

5 结论

(1) 应用遥感数据与模型结合的方法计算出青藏高原高寒草原生态系统植被净初级生产力（NPP）总量为 20.57 ×10^{12} g·a^{-1}的碳，根据野外实验数据得到的经验关系估算出青藏高原高寒草原生态系统区域上的土壤碳排放（Heterotrophic respiration）总量为 8.07 ×10^{12} g·a^{-1}，高寒草原植被净初级生产力和土壤碳排放在区域上呈现出明显的由东南向西北递减的趋势。

(2) 由植被净初级生产力和土壤碳排放推算出高寒草原区域内净生态系统生产力（NEP）平均为折算成碳为 55.26 g·m^{-2}·a^{-1}，NEP 空间上没有鲜明的分布特征，高寒草原总 NEP 为 12.50 ×10^{12} g·a^{-1}的碳，这说明此高寒草原区整体上还是以固定碳为主，表现为明显的碳汇作用。

(3) 在碳失汇的研究中，有学者认为那部分由人类活动排放出的碳很有可能被陆地生态系统中多个相对较小的碳汇吸收[29,30]。之前有研究证明青藏高原灌丛和草甸都表现为小型碳汇[31,32]，本文通过野外实验并结合 CASA 模型估测出青藏高原上高寒草原生态区每年由大气中净吸收 12.50 ×10^{12} g 的碳，虽然其碳汇的作用在全球碳循环中的贡献很小，但是我们的研究结果正好验证了存在诸多较小碳汇的论断。

(4) 我们的研究工作也存在一定缺陷，最明显的就是我们没有将任何人类活动影响考虑到此碳估测的研究工作中；另外，由于研究方法和条件等方面的限制，本文我们只对青藏高原上高寒草原生态系统空间的碳吸收与排放的状况进行了描述，今后还应加强对高寒草原碳循环随时间变化特征的深入研究。

参考文献:

[1] Ciais P, Tans P P, Trolier M, *et al*. A large northern hemisphere terrestrial CO_2 sink indicated by $^{13}C/^{12}C$ ratio of atmospheric CO_2. Science, 1995, 269: 1098～1102.

[2] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al*. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. Nature, 2001, 414: 169～172.

[3] Tans P, White J W C. In balance, with a little help from the plants. Science, 1998, 281: 183～184.

[4] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO_2. Nature, 2001, 411: 466～469.

[5] Walker B, Will S. A synthesis of GCTE and related research. in IGBP Science, 1997, No. 1, IGBP Secretariat, Sweden pp32.

[6] 方精云,朴世龙,赵淑清. CO_2失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594～602.

[7] 郑度,张荣祖,杨勤业. 试论青藏高原的自然地带. 地理学报, 1979, 34(1): 1～11.

[8] 郑度,李炳元. 青藏高原自然环境的演化与分异. 地理研究, 1990, 9(2): 1～10.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[9] 罗天祥,李文华,冷允法,等. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布. 地理研究,1998,17(4):337～344.

[10] 徐兴奎,陈红,LEVY Jason K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析. 科学通报,2008,53(4): 456～462.

[11] 张永强,唐艳鸿,姜杰. 青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征. 中国科学(D),2006,36 (12): 1140～1147.

[12] 杨元合,朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报,2006,30 (1):1～8

[13] Lieth H, Box E. Evapotranspiration and primary productivity; C. W. Thornthwaite Memorial Model. C. W. Thornthwaite Assoc., Centerton-Elmer, NJ. Publ. Cllimatol, 1972,25(2):37～46.

[14] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems. Human Ecol, 1973,1: 303～332.

[15] Meentemeyer V, Box E O, Thompson R. World patterns and amounts of terrestrial plant litter production. Bioscience, 1982,32:125～128.

[16] Potter C S, Klooster S A, Brooks V. Interannual variability in terrestrial net primary production: Exploration of trends and controls on regional to global scales. Ecosystems, 1999,2(1): 36～48.

[17] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1972,9:747～766.

[18] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al*. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993,7(4): 811～841.

[19] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev, 1972,100: 81～92.

[20] Thornthwaite C W, Mather J R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Inst. Technol. Publ. Clim. 1957,X(3).

[21] Vorosmarty C J, Moore III B, Grace A L, *et al*. Continental scale models of water balance and fluvial transport: An application to South America. Global Biogeochem. Cycles, 1989,3:241～265.

[22] Pei Z, Ouyang H, Zhou C, Xu X. Carbon balance in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau. Journal of Integrative Plant Biology. 2009,51(5):521～526.

[23] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, *et al*. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. Journal of Geophysical Research,1998,103: 32257～32276.

[24] Daly C, Taylor G H, Gibson W P, *et al*. High-quality spatial climate data sets for the United States and beyond. Transactions of the ASAE,2000,43: 1957～1962.

[25] New M, Hulme M, Jones P D. Global 30-year mean monthly climatology, 1961-1990(New et al.). Available online at [http://www.daac.ornl.gov/] from the ORNL Distributed Active Archive Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. 2000.

[26] Webb R W, Rosenzweig C E, Levine E R. Global soil texture and derived water-holding capacities (Webb et al.), 2000, Available online at [http://www.daac.ornl.gov/] from the ORNL Distributed Active Archive Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.

[27] 高清竹,万运帆,李玉娥,等. 藏北高寒草地 NPP 变化趋势及其对人类活动的响应. 生态学报,2007,27(11):4612～4619.

[28] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, *et al*. Potential net primary production in South America: Application of a global model. Ecological Application, 1991, 1:399～429.

[29] Schindler D W. The mysterious missing sink. Nature, 1999, 398:105～106.

[30] 方精云. 探索 CO_2失汇之谜. 植物生态学报,2002,26(2):255～256.

[31] ZHAO L, LI Y, XU S, *et al*. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO_2 exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau. Global Change Biology, 2006, 12:1940～1953.

[32] KATO T, TANG Y, GU S, *et al*. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO_2 exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2006, 12:1285～1298.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau

PEI Zhi-yong[1], ZHOU Cai-ping[2], OUYANG Hua[2,3], YANG Wen-bin[2]
(1. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
3. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, Nepal)

Abstract: The Tibetan Plateau, the third pole of the earth, is one of the least human-disturbed regions in the world. Its outstanding topographic feature and ecological characteristics have significant effects on modern atmospheric circulation and climate, so the greenhouse gases emission and absorption are linked to climate changes at local, regional and even global scales. Also, to examine or estimate the actual magnitude of carbon uptake or release from this terrestrial ecosystem has become the central issue in global carbon cycle researches. However, relatively few studies have been reported in the literatures about the carbon contributions of the alpine grassland area on the Tibetan Plateau. In this paper, we use a mechanistically based ecological simulation model to describe and analyze the spatial pattern of terrestrial net primary productivity (NPP), carbon fluxes and net ecosystem productivity (NEP) in this alpine steppe area. The NASA-CASA (Carnegie-Ames-Stanford Biosphere) model is designed to simulate seasonal patterns in net carbon fixation and allocation, litterfall, and soil nutrient mineralization, and soil CO_2 emissions. Our fundamental approach is to use CASA to estimate net primary production (NPP) in the alpine steppe area on the Tibetan Plateau. We combined MODIS data and CASA to estimate NPP, and soil carbon emissions were calculated by the regression formula obtained in the pre-study. Upon these, we estimated the carbon budget for each of the 0.05°latitude ×0.05°longitude grid cells in the alpine steppe area. The potential annual net primary productivity (NPP) of this alpine steppe area is estimated to be 20.57×10^{12} g·a^{-1} of carbon. The annual NPP has the distinct spatial distribution, whereas vegetation NPP decreased gradually from southeast to northwest due to the temperature and precipitation gradients. Soil carbon emission (heterotrophic respiration) is estimated to be 8.07×10^{12} g·a^{-1}. Net ecosystem productivity (NEP), an indicator for carbon budget, is the difference between annual net primary productivity (NPP) and annual soil respiration. Determination of net ecosystem productivity showed that the alpine steppe ecosystem acts as a distinct carbon sink (12.50×10^{12} g·a^{-1} of carbon), although this carbon reservoir is quite small.

Key words: carbon budget; NPP; respiration; alpine steppe; Tibetan Plateau

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net