孙国栋. 2009. 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，14 (4)：341－351. Sun Guodong. 2009. Simulation of potential vegetation distribution and estimation of carbon flux in China from 1981 to 1998 with LPJ dynamic global vegetation model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，14 (4)：341－351.

LPJ 模型对 1981～1998 年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟

孙国栋[1, 2]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院研究生院，北京 100049

摘 要 利用一个基于过程的动态植被模型 LPJ DGVM (Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model)，模拟了中国区域潜在植被分布，考察了 1981～1998 年中国区域净初级生产力 (NPP)、异养呼吸 (Rh) 和净生态系统生产力 (NEP) 的年际变化。模拟结果表明，在 LPJ 模型提供的植被功能类型 (PFT) 划分的条件下，中国区域除了分布裸土外，主要分布了 6 种潜在植被功能类型，即热带常绿阔叶林带、温带常绿阔叶林带、温带夏绿阔叶林带、北方常绿针叶林带、北方夏绿针叶林带和温带草本植物。在所考察的时间段内，中国区域总 NPP 从 2.91 Gt · a^{-1} (C) (1982 年) 变化到 3.37 Gt · a^{-1} (C) (1990 年)，平均每年增加 0.025 Gt (C)，其平均增长率为 0.96%。中国区域总 Rh 从 2.59 Gt · a^{-1} (C) (1986 年) 变化到 3.19 Gt · a^{-1} (C) (1998 年)，具有 1.05% 的平均年增长率，即平均每年增加 0.025 Gt (C)，并且中国区域温带草本植物相比其他植被功能类型，其 NPP 和 Rh 线性增加的趋势最为显著。研究结果还表明，LPJ 模型在引入火灾机制后，中国区域总 NEP 的变化范围更加合理，即每年总 NEP 在－0.06 Gt · a^{-1} (C) (1998 年) 和 0.34 Gt · a^{-1} (C) (1992 年) 之间变化，其平均值为 0.12 Gt · a^{-1} (C)。该结果表明，在所考察的时间段内，中国区域的陆地生态系统是碳汇。上述结果与其他研究结果基本一致，因而此模型模拟中国区域潜在植被分布和碳循环是有效的。

关键词 LPJ 植被功能类型 净初级生产力 异养呼吸 火灾 净生态系统生产力
文章编号 1006-9585 (2009) 04-0341-11 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

Simulation of Potential Vegetation Distribution and Estimation of Carbon Flux in China from 1981 to 1998 with LPJ Dynamic Global Vegetation Model

SUN Guodong[1,2]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

Abstract The LPJ-DGVM (Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model), which is a process-based model, is used to simulate the vegetation distribution and estimate the interannual variation of net primary production (NPP), heterotrophic respiration (Rh) and net ecosystem production (NEP) in China from 1981 to 1998. It is

收稿日期 2008-04-30 收到，2009-05-06 收到修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400503，中国科学院知识创新工程主要方向项目 KZCX3-SW-230、国家自然科学基金 40675030、LASG 自由探索项目和 LASG 国家重点实验室专项经费
作者简介 孙国栋，男，1980 年出生，博士，主要从事生态系统模拟研究。E-mail：sungd@mail.iap.ac.cn

shown that there are six main plant functional types (PFTs) besides the desert, that is tropical broadleaved evergreen tree, temperate broadleaved evergreen tree, temperate broadleaved summergreen tree, boreal needleleaved evergreen tree, boreal needleleaved summergreen tree and C3 perennial grass. In China, the total NPP varies between 2.91 Gt·a^{-1} (C) (1982) and 3.37 Gt·a^{-1} (C) (1990), increases by 0.025 Gt (C) average per year and has an increasing trend of 0.96%. The total Rh varies between 2.59 Gt·a^{-1} (C) (1986) and 3.19 Gt·a^{-1} (C) (1998), grows by 1.05% per year and by 0.025 Gt (C) per year. The linear trend of NPP and Rh for C3 perennial grass is more remarkable than those for other PFTs. The simulation of NEP is reasonable when the fire is brought in the model. Annual total NEP varies between −0.06 Gt·a^{-1} (C) (1998) and 0.34 Gt·a^{-1} (C) (1992). It is demonstrated that the terrestrial ecosystem is carbon sink in China. The above results are similar to those simulated by other models.

Key words LPJ DGVM, plant functional type, net primary production, heterotrophic respiration, net ecosystem production

1 引言

陆地生态系统是地球生态系统的重要组成部分，陆地生态系统中碳的变化是影响大气 CO_2 浓度和气候变化的重要因素之一，因此陆地生态系统碳循环在全球碳循环和全球气候变化中扮演了关键的角色。对于陆地生态系统碳循环已有大量的研究（McGuire et al.，2001；Houghton et al.，2003；Lü et al.，2006），但是由于陆地生态系统碳循环机制的复杂性等因素，对其的研究仍然存在不确定性（Cao et al.，2003a），因此继续探讨陆地生态系统碳循环及其变化是非常有意义的。

作为世界上陆地面积位居第三的国家，中国处于亚洲季风区域，包含众多陆地生态系统。中国区域陆地生态系统碳的变化与区域或者全球陆地生态系统碳循环和水循环的变化密不可分，因此研究中国区域陆地生态系统碳循环及其变化，对于理解区域或者全球陆地生态系统碳循环有重要的意义，特别“为中国碳的《京都议定书》国际谈判及作物估产提供参考依据”（高志强等，2008）。在过去的几十年中，关于中国区域碳循环已有大量的研究，例如，Ni（2004）利用74个站点观测资料研究了中国北方温带草原生物量和净初级生产力（NPP）；方精云等（2007）利用地面观测资料和卫星遥感数据分析了1981～2000年中国植被碳的变化，并且指出碳汇的估算存在不确定性；另外，李克让等（2003）利用CEVSA模型研究了中国区域植被碳贮量和土壤碳贮量；朴世龙等（2001）利用CASA模型研究了中国1997年植被净第一生产力。在这些研究中，由于不同模型的物理过程有所差异，并且一些模型的扰动机制仍然存在改进的空间，比如：火灾、土地利用等机制，因此进一步利用模型考察中国区域陆地生态系统碳通量的变化是非常必要的。

LPJ DGVM（Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model)(Sitch et al.，2003）模型是GCTE（Global Change and Terrestrial Ecosystem）（Cramer et al.，2001）发展动态植被模型计划中6个动态全球植被模型之一。自从该模型建立以来，已被广泛的应用于中国区域碳循环、古气候以及大气陆地之间反馈等研究。梁妙玲等（2006）利用LPJ模型和气候场观测资料研究了中国气候对植被分布和净初级生产力的影响；孙艳玲等（2007）根据中国气候特点，修正了LPJ模型中的生物气候参数，研究了20世纪中国潜在植被分布的变化。但未见文献用LPJ模型研究中国区域1981～1998年中国陆地生态系统碳通量，以及中国区域不同植被功能类型碳通量的年际变化。另外，LPJ模型一个重要优势在于引入了火灾机制，这对于研究碳循环及其变化是非常有意义的。因此，本文将在考虑火灾机制的条件下，对中国区域碳通量的变化及其趋势进行研究。

2 模型和资料介绍

2.1 模型介绍

LPJ DGVM是基于过程能够描述大尺度陆地生态动力和陆地大气间水分、碳交换的生物化学模型。它采用了BIOME模型中的一些特点，并

且包括了光合作用和植物水分之间的连接和反馈、快过程和慢过程之间的耦合以及土壤和凋落物之间碳的周转和火灾的模块。此模型能够研究光合作用以及 10 种植被功能类型（Plant Functional Types，PFTs）之间的竞争。这 10 种植被功能类型分别是热带常绿阔叶林带、热带雨林阔叶林带、温带常绿针叶林带、温带常绿阔叶林带、温带夏绿阔叶林带、北方常绿针叶林带、北方夏绿针叶林带、北方夏绿阔叶林带、温带草本和赤道草本。LPJ 模型中植被分布是基于生物气候指标，碳量贮存在叶、边材、心材、根以及地面凋落物池、两个土壤碳池和地下凋落物池。LPJ 模型的物理过程框架来源于 Sitch et al.（2003）（图 1）。

2.2　资料介绍

LPJ 模型是由月温度、月降水、月云量、土壤质地和 CO_2 浓度资料驱动的。本文采用的月气候要素场资料来自 Climatic Reseavch Unit（Mitchell et al.，2005）。这套资料利用若干数据库建立，不仅空间分辨率高（0.5°×0.5°），而且具有较长的时间跨度（1901～2002 年）。特别是对于那些缺乏观测的区域，此资料可以作为一定信度的参考（闻新宇等，2006）。大气 CO_2 浓度来自碳循环模型（Kicklighter et al.，1999）。这套数据利用冰芯和大气的观测资料获得。土壤数据为 FAO（联合国粮食及农业组织）（Zobler，1986；FAO，1991）提供的土壤数据集。

LPJ 模型在模拟前，假设没有植被（全为裸土）和生物量，因此需要积分 LPJ 模型 1000 年直到植被覆盖和土壤碳池达到平衡态。在这个阶段中 LPJ 模型需要具有年际变化的气候资料场，本文中循环使用 1901～1930 年 CRU 资料驱动 LPJ 模型达到平衡态。计算得到的平衡态作为初始值，积分 98 年（1901～1998 年）。本文只分析了从 1981～1998 年的计算结果。

3　结果

3.1　中国区域潜在植被分布

本文分析 1998 年中国区域潜在植被功能类型的分布（图 2）。从图 2 可以看出，中国区域分布除裸土外，主要分布了 6 种植被功能类型，它们分别是热带常绿阔叶林带（TrBE）、温带常绿阔叶林带（TeBE）、温带夏绿阔叶林带（TeBS）、北方常绿针叶林带（BoNE）、北方夏绿针叶林带（BoNS）和温带草本植物（C3 grass），其中裸土的定义参考 Sitch et al.（2003），即所有 PFTs 叶投影盖度（Foliar Projective Cover，FPC）的最大值小于 0.1。热带常绿阔叶林带主要分布在海南；温带常绿阔叶林带主要分布在长江以南除去岛屿以外的陆地区域；温带夏绿阔叶林带主要分布在华中、华北东部和东北南部；北方常绿针叶林带主要分布在东北大部分区域，华中东部、西南北部和西北南部的部分区域；温带草本主要分布在华北西部和南部、东北中部、西藏和新疆的部分地区；裸土分布在西北的大部分地区。LPJ 模型模拟的中国区域的植被功能类型与观测基本一致（Ni et al.，2000），其分布区域也类似。然而在东北区域，观测资料中不仅包含北方植被，而且还包含了温带植被。这说明模型模拟的潜在植被与观测是有一定差异的，可能是由模型中相关参数的不确定性所致。

3.2　净初级生产力

净初级生产力（NPP）是植被净的碳获取，是总初级生产中获得的碳与植物呼吸所释放的碳之间的平衡。NPP 直接反映了植物在自然环境条件下的生产能力，是判断生态系统碳源/汇和调节生态过程的重要因子，在全球或区域碳循环中具有特殊地位（Field et al.，1998；陶波等，2003）。

由 LPJ 模型模拟的中国区域年平均（1981～1998 年）净初级生产力的空间分布如图 3 所示。中国区域净初级生产力由南至北、由东至西依次缩减。在中国干旱和半干旱地区，随着降水的减少，NPP 成阶梯状减少，并有明显的分界线。年平均 NPP 变化范围大约在 0～1000 g · m^{-2} · a^{-1}（C），年平均 NPP 为 0 g · m^{-2} · a^{-1}（C）的区域主要分布在裸土地带，而年平均 NPP 大值区主要分布在华南（赤道常绿阔叶林带和温带常绿阔叶林带）和华东北部的部分区域。另外，从 1981～1998 年中国区域总 NPP 呈现递增趋势（图 4）。总 NPP 在 2.91 Gt · a^{-1}（C）（1982 年）～3.37 Gt · a^{-1}（C）（1990 年）之间变化，18 年的平均值为 3.11 Gt · a^{-1}（C），平均每年增加 0.025 Gt（C），平均增长率为 0.96%。

由于观测手段的匮乏，利用模型计算 NPP 是

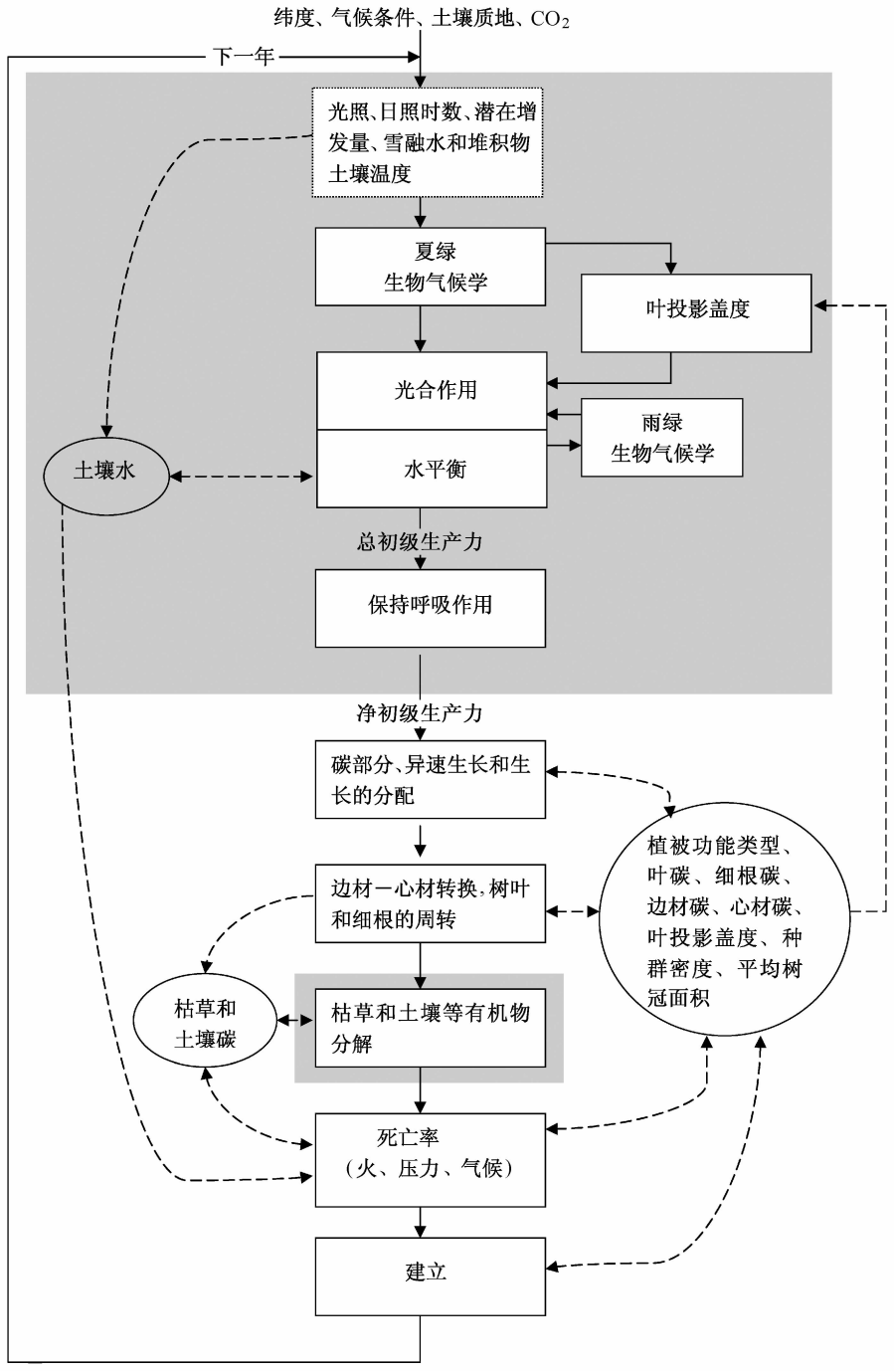


图 1 LPJ 模型的流程（Sitch et al.，2003）。虚线表示在单个模块中植被和土壤变量信息的交换，箭头表示信息流的方向。阴影模块的时间步长为 1 天和 1 个月，其余模块的是 1 年

Fig. 1 Flowchart of the LPJ model from Sitch et al. (2003). The dashed lines represent exchange of information between vegetation and soil state variables and the individual modules, with arrows representing the direction of information flow. Shaded modules are called on a daily or monthly time step, the others called annually

一个重要的方法（朴世龙等，2001）。本文比较了 LPJ 模型与其他模型估算 NPP 的差异（表 1）。对于年平均 NPP、NPP 最小值和最大值而言，CEVSA、GLO-PEM（Cao et al.，2003b）和 LPJ 估算的结果相似，但都大于 CASA（Piao et al.，2005）估算的结果。对于平均年增长率，CASA

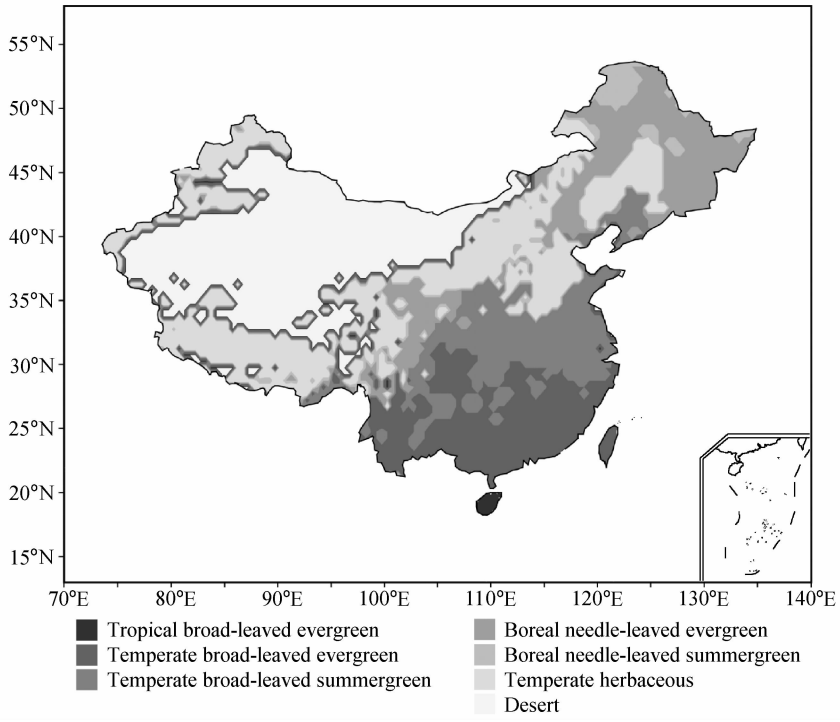


图 2　中国区域潜在植被功能类型分布

Fig. 2　The potential distribution of plant functional types in China

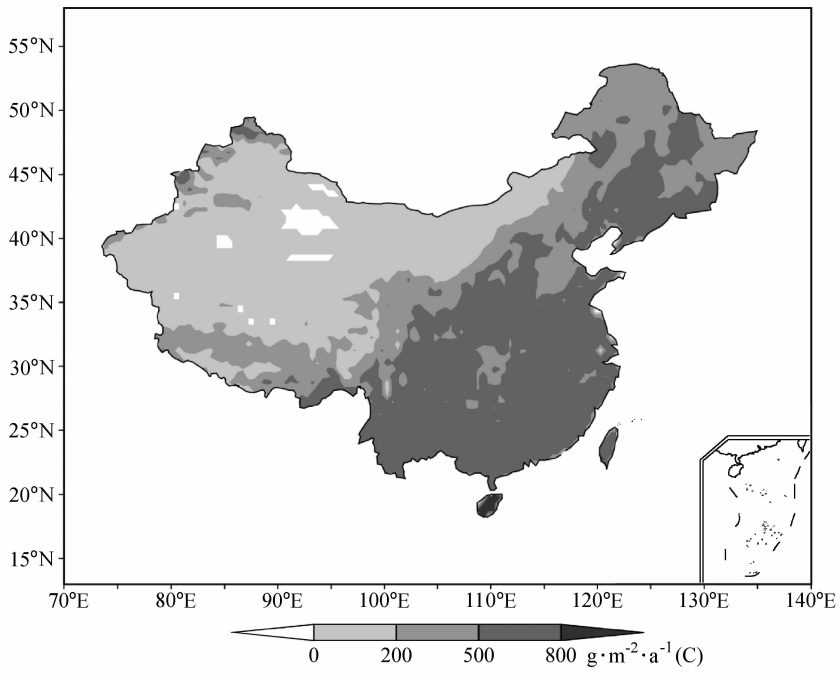


图 3　中国区域 1981～1998 年平均 NPP 分布

Fig. 3　The average NPP distribution from 1981 to 1998 in China

和 LPJ 估算的结果差别不明显，但大于 CEVSA 和 GLO-PEM 估算的结果；对于平均年增加值，CASA 和 LPJ 的结果也是类似的。3 个模型采用不同的方法来计算 NPP，CASA 模型中 NPP 的计

表1 不同模型模拟中国区域NPP的比较

Table 1 The comparison of NPP in China among the different models

模型	平均值/Gt · a^{-1}(C)	极小值和极大值/Gt · a^{-1}(C)	平均增加值/Gt · a^{-1}(C)	平均增长率/a^{-1}
CASA	1.43	1.27～1.63	0.015	1.03%
CEVSA	3.09	2.86～3.37	——	0.32%
GLO-PEM	3.00	2.77～3.33	——	0.57%
LPJ	3.11	2.91～3.37	0.025	0.96%

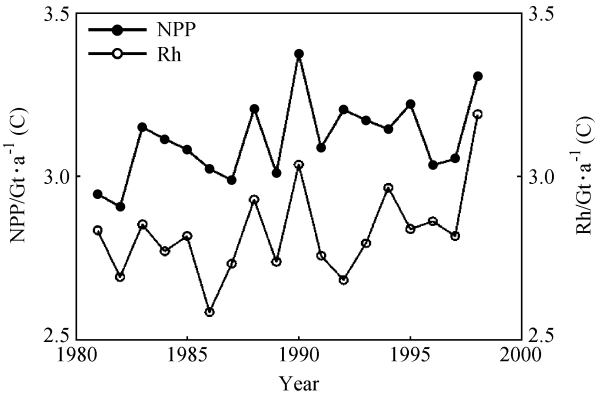


图4 中国区域1981～1998年总NPP和总Rh的年际变化

Fig. 4 The interannual variation of the total NPP and Rh in China from 1981 to 1998

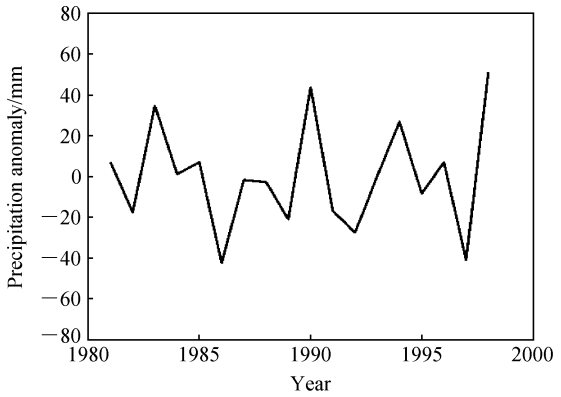


图5 中国区域1981～1998年平均降水量距平

Fig. 5 Anomaly of annual precipitation in China from 1981 to 1998

算公式为

$$N_{PP} = I_{PAR} \times \varepsilon,$$

其中，I_{PAR}为截取的光合有效辐射，ε为光的利用效率；CEVSA模型中NPP的计算公式为

$$N_{PP} = \frac{1}{t_2 - t_1}(Q_l' - Q_w'),$$

其中，Q_l'是叶的质量，Q_w'是除去叶后其他组织的质量；LPJ模型中NPP的计算公式为

$$N_{PP} = G_{PP} - R_m - \max[(G_{PP} - R_m) \times 0.25, 0],$$

其中，G_{PP}为总初级生产力，R_m为所有植被功能类型维持所需要的呼吸作用。模型采用不同的NPP计算方法可能是导致不同模型计算NPP数值有较大差异的原因。不仅如此，模型中有关变量的计算方法也有所不同，如叶、根的质量等，这些差异也将会对NPP估算的结果产生影响。

为了比较中国区域NPP和降水的关系，我们计算了它们之间的相关系数为0.55，超过了98%的信度检验，表明中国区域NPP和降水（图5）有正相关性，这一结果与其他研究结果类似（梁妙玲等，2006；Cao et al.，2003b）。

3.3 异养呼吸

异养呼吸（Rh）是指异养生物通过消费有机质获取碳而非自身生产有机质的生物呼吸，异养生物包括动物和微生物。

利用LPJ模型，模拟了中国区域异养呼吸的空间分布（图6）。其分布与NPP分布相似，从南到北、从东到西依次减少。Rh的年际变化如图4所示，总Rh在2.59 Gt · a^{-1}（C）（1986年）～3.19 Gt · a^{-1}（C）（1998年）之间变化，年平均值为2.83 Gt · a^{-1}（C），平均每年增加0.025 Gt（C），每年增长率为1.05%。为了研究Rh估算的不确定性，我们比较了LPJ模型和CEVSA模型（Cao et al.，2003b）的估算结果。Cao et al.（2003b）估算的总Rh最小值为2.89 Gt · a^{-1}（C），最大值为3.21 Gt · a^{-1}（C）和平均值为3.02 Gt · a^{-1}（C），这些估算值都大于LPJ模型的估算值，说明不同模型对于Rh的估算存在差异。

温度是影响Rh的重要因素（Cao et al.，2003b），本文估算的Rh和温度的相关系数为0.65，超过了99%的信度检验，说明在中国区域Rh与温度（图7）的相关性很好。另外，从图4可以发现，Rh在1990、1994和1998年偏高，而在1986和1992年偏低，这与温度偏高和偏低的

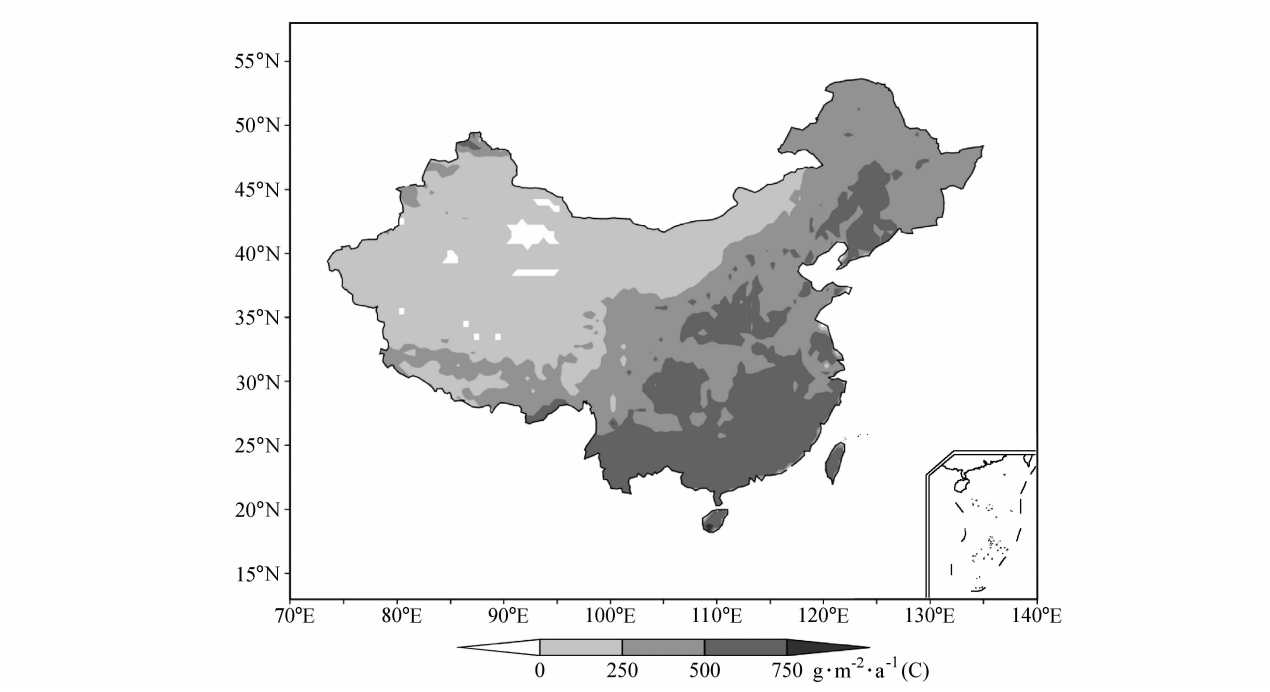


图 6　中国区域 1981～1998 年平均 Rh 的分布

Fig. 6　The average Rh distribution from 1981 to 1998 in China

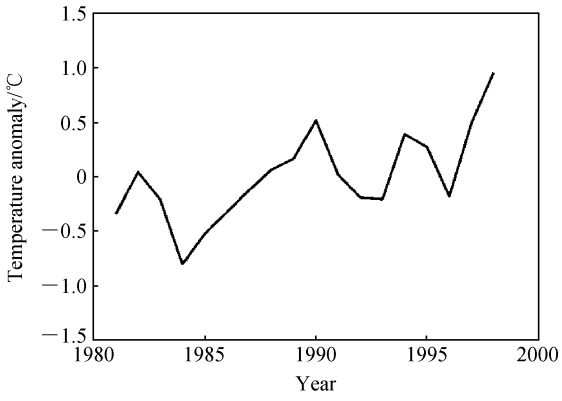


图 7　中国区域 1981～1998 年平均温度距平

Fig. 7　Anomaly of annual temperature in China from 1981 to 1998

年份一致。但是对于 1984 年，虽然温度是所有年份中最低的，但是总 Rh 并不是最小的。这也说明，Rh 的变化不仅与温度有关系，还与其他的气候因素有关（土壤湿度和日照等）。

3.4　净生态系统生产力

陆地生态系统碳的净吸收或净排放被称为净生态系统生产力（NEP），NEP 能够描述陆地生态系统碳源/汇的性质和能力，并且通过生物地球化学机制直接影响气候系统。

火灾是研究碳循环过程中一个非常重要的因素，在不考虑火灾干扰的模型中，用如下公式估算 NEP：

$$N_{EP} = N_{PP} - R_h,$$

式中 N_{EP}、N_{PP}和 R_h分别代表 NEP、NPP 和 Rh。LPJ 模型一个重要的改进就是将火灾机制引入到模型中，并且将由火灾所导致的碳通量变化引入到 NEP 的估算中，即

$$N_{EP} = N_{PP} - R_h - F_c, \qquad (1)$$

式中 F_c表示由于火灾释放到大气中的碳量。从上述公式可知，若 N_{EP}为正，说明研究区域的生态系统从大气中吸收了 CO_2，生态系统是碳汇。若 N_{EP}为负，则说明研究区域的 CO_2释放到大气中，生态系统是碳源。

火灾机制是 LPJ 模型中重要的扰动机制之一。它是在生态系统及其碳通量确立之前一个重要的步骤。火灾的发生主要依赖于燃料负荷（能够燃烧的干物质的数量）和凋落物的水分。火灾是通过其发生时间的长度和不同植被功能类型对火灾的阻抗能力两个方面来确定的。而火灾所引起的碳通量变化，是通过计算地表燃烧的凋落物和燃烧的植被功能类型的碳来获得的。

从图 8 可见，用 LPJ 模型模拟 F_c的大值区主

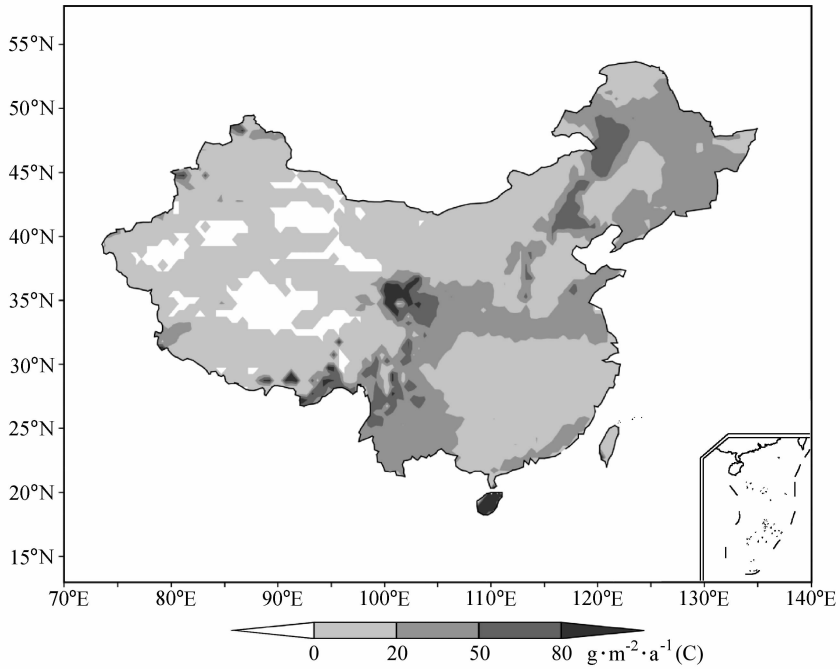


图 8 中国区域 1981～1998 年平均 F_c的分布

Fig. 8 The average F_c distribution from 1981 to 1998 in China

要分布在海南、内蒙古东部、西藏和四川交界处以及青海的东部。这些区域 LPJ 模型模拟的潜在植被功能类型主要为赤道常绿阔叶林和北方常绿针叶林。总 F_c的年际变化如图 9 所示，结果表明估算的总 F_c 变化范围在 0.12 Gt · a^{-1} (C)（1983 年）和 0.17 Gt · a^{-1} (C)（1997 年）之间，平均值为 0.16 Gt · a^{-1} (C)。

根据 NPP、Rh 和 Fc 的估算结果，我们分析了中国区域 1981～1998 年 NEP 的年际变化（图 10）。图中可见，估算的总 NEP 变化范围在 −0.06 Gt · a^{-1} (C)（1998 年）和 0.34 Gt · a^{-1} (C)（1992 年）之间，1981～1998 年的平均值为 0.12 Gt · a^{-1} (C)。这一结果说明，中国区域大部分时间内生态系统是碳汇，对于生态系统是碳源的年份里，释放到大气中的 CO_2 较少。陶波等（2006）指出估算 NEP 的不确定性远远大于估算 NPP 的，原因在于土地利用、森林变化和火灾等因素对 NEP 估算的影响。LPJ 模型通过考虑了火

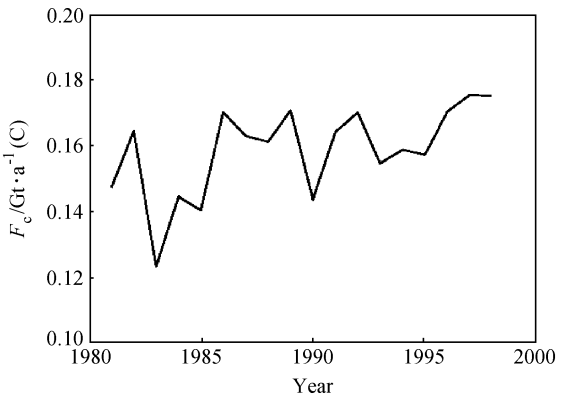


图 9 中国区域 1981～1998 年总 F_c的年际变化

Fig. 9 The interannual variation of the total F_c in China from 1981 to 1998

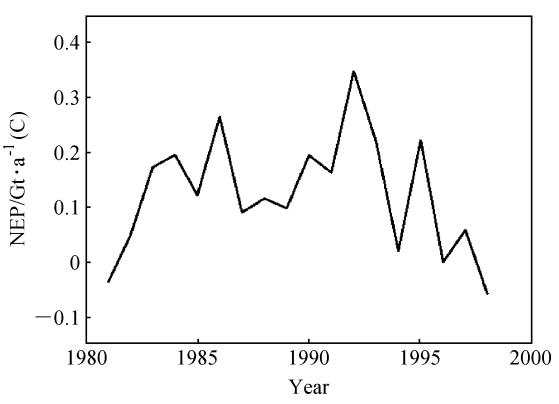


图 10 中国区域 1981～1998 年总 NEP 的年际变化

Fig. 10 The interannual variation of the total NEP in China from 1981 to 1998

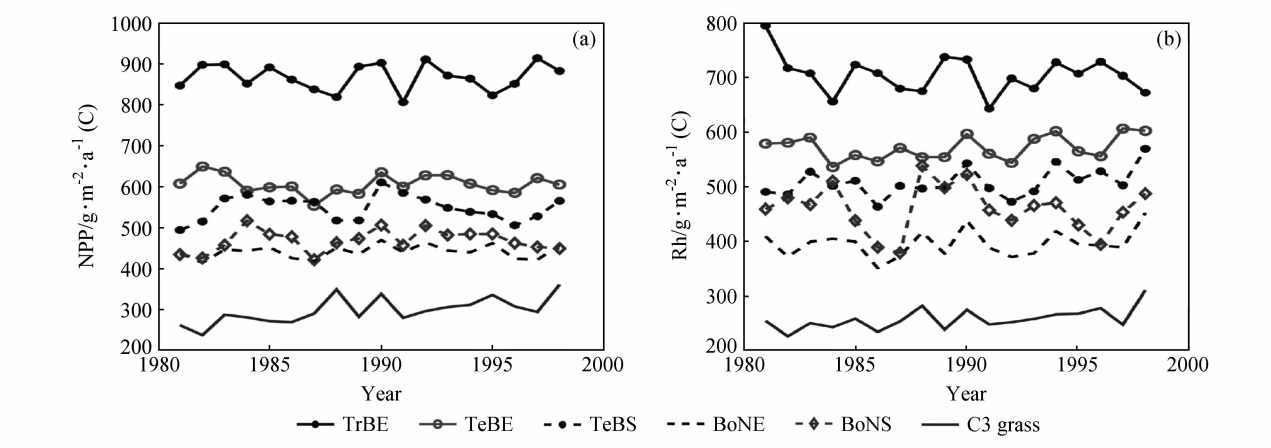


图 11　中国区域不同植被功能类型碳通量的年际变化：(a) NPP；(b) Rh

Fig. 11　The interannual variation of carbon flux in China for different PFTs: (a) NPP; (b) Rh

灾对于碳循环的影响，因而减少了对中国陆地生态系统碳汇/源估算不确定性的影响。

3.5　不同植被功能类型碳通量的年际变化

我们研究了中国区域 6 种植被功能类型 NPP 和 Rh 的年际变化及其趋势（表 2 和 3，图 11）。和上述研究结果类似，6 种植被功能类型总 NPP 有线性增加的趋势，超过 95%的信度检验。其中，NPP 线性增加趋势最为显著的植被功能类型是温带草本（C3 grass），超过了 99%的信度检验。而对于其他植被功能类型，将其分为两类。一类是 NPP 减少，但是并不显著（如 TeBE），另一类尽管 NPP 有增加趋势，但并不显著（如 TrBE）。因此在中国区域温带草本 NPP 的变化可能是 NPP 增加的主要因素。

中国区域 6 种植被功能类型总 Rh 具有线性增加趋势，但不同植被功能类型的变化不尽相同，我们将其归为 3 类。首先，植被功能类型的 Rh 显著增加（例如：温带草本植物）；其次，植被功能类型 Rh 虽然增加，但是并不显著（例如：BoNE）；最后，植被功能类型 Rh 逐渐减少，但并不显著（例如：TrBE）。上述结果说明，尽管研究区域植被功能类型总 Rh 是线性增加的，但是其中也包含 Rh 线性减少的植被功能类型。

不同植被功能类型 NEP 的变化基本类似。在研究的大部分时间内，除了少数植被功能类型外，其余植被功能类型都为碳汇，特别是热带常绿阔叶林带和温带草本植物，年平均 NEP 分别为－40.66 g·m^{-2}·a^{-1} (C) 和－30.56 g·m^{-2}·a^{-1} (C)。

表 2　不同植被功能类型 NPP 的变化

Table 2　The variation of the NPP for different plant functional types (PFTs)

植被功能类型	斜率	相关系数
TrBE	7.72×10^{-2}	1.25×10^{-2}
TeBE	－0.42	-9.60×10^{-2}
TeBS	4.99×10^{-3}	8.52×10^{-4}
BoNE	0.62	0.20
BoNS	0.85	0.17
C3 grass	4.02	0.67
Total	1.14	0.48

表 3　不同植被功能类型 Rh 的变化

Table 3　The variation of the Rh for different plant functional types

植被功能类型	斜率	相关系数
TrBE	－1.67	－0.25
TeBE	1.30	0.31
TeBS	2.19	0.44
BoNE	1.17	0.25
BoNS	－0.86	－0.10
C3 grass	2.13	0.57
Total	1.19	0.44

然而，在研究时段内北方夏绿针叶林带却是碳源，年平均 NEP 为 7.54 g·m^{-2}·a^{-1} (C)。

4　结论和讨论

本文基于动态植被模型 LPJ DGVM，利用 CRU 提供的空间分辨率为 0.5°×0.5°的月降水、

月温度和月云量资料，模拟了中国区域1998年潜在植被分布，并对中国区域1981～1998年的总NPP、Rh和NEP的年际变化进行了估算，最后探讨了中国区域不同植被功能类型NPP、Rh和NEP的年际变化，主要结论如下：

（1）在LPJ模型提供的植被功能类型划分的条件下，中国区域主要分布了除裸土外的6种植被功能类型：热带常绿阔叶林带、温带常绿阔叶林带、温带夏绿阔叶林带、北方常绿针叶林带、北方夏绿针叶林带和温带草本植物，此模拟结果与观测基本一致。

（2）中国区域1981～1998年总净初级生产力（NPP）在2.91 Gt · a^{-1}（C）和3.37 Gt · a^{-1}（C）之间变化，年平均值为3.11 Gt · a^{-1}（C），平均每年增加0.025 Gt（C），增长率为0.96%，此结果与其他模型模拟的结果类似。NPP和降水的相关系数为0.55，说明降水是NPP变化的一个重要因素。总异养呼吸（Rh）在2.59 Gt · a^{-1}（C）和3.19 Gt · a^{-1}（C）之间变化，年平均值为2.83 Gt · a^{-1}（C），平均每年增加0.025 Gt（C），增长率为1.05%。Rh和温度的相关系数为0.65，说明异养呼吸与温度之间有很强的相关性。同时，分析6种植被功能类型NPP和Rh的年际变化，发现温带草本NPP和Rh线性增加的趋势最为显著。

（3）LPJ模型中一个重要的改进是引入了火灾机制。考虑到火灾对碳循环的影响，研究了中国区域总净生态系统生产力（NEP）的年际变化。总NEP在−0.06 Gt · a^{-1}（C）和0.34 Gt · a^{-1}（C）之间变化，年平均值为0.12 Gt · a^{-1}（C）。此结果说明，从1981～1998年中国区域陆地生态系统是碳汇。

中国区域LPJ估算的结果和其他模型估算的结果相似，说明此模型模拟的结果在中国区域是合理的，但不同模型间的结果依然存在差异和不确定性。比如，对于中国区域总NPP和总Rh出现极值的年份。LPJ模型虽然引入了火灾干扰，但是此模型还未能完全给出触发火灾的机制，所以估算NEP的过程中仍然存在不确定性。另外，本文利用的LPJ模型版本没有考虑到氮循环过程等。基于上述因素，LPJ模型的发展及在中国区域的应用还需要进一步探讨。

致谢 本文是在穆穆院士指导下完成的，在此深表感谢。

参考文献（References）

Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. 2003a. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China [J]. Global Change Biology, 9 (4): 536－546.

Cao M K, Tao B, Li K R, et al. 2003b. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998 [J]. Acta Botanica Sinica, 45 (5): 552－560.

Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: Results from six dynamic global vegetation models [J]. Global Change Biology, 7 (4): 357－373.

方精云，郭兆迪，朴世龙，等. 2007. 1981－2000年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学（D辑），37 (6): 804－812. Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. 2007. Terrestrial vegetation carbon sinks in China during 1981－2000 [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 37 (6): 804－812.

FAO. 1991. The digitized soil map of the world (Release 1.0) [R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 67/1.

Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 281: 237－240.

高志强，刘纪远. 2008. 中国植被净生产力的比较研究 [J]. 科学通报，53 (3): 317－326. Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan. 2008. Simulation study of China's net primary production [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (3): 317－326.

Houghton R A, Hackler J L. 2003. Sources and sinks of carbon from land-use change in China [J]. Global Biogeochem. Cycles, 17 (2), 1034, doi: 10. 1029/2002GB001970.

Kicklighter D W, Bruno M, Donges S, et al. 1999. A first-order analysis of the potential role of CO_2 fertilization to affect the global carbon budget: A comparison of four terrestrial biosphere models [J]. Tellus (Ser. B), 51 (2): 343－366.

李克让，王绍强，曹明奎. 2003. 中国植被和土壤碳贮量 [J]. 中国科学（D辑），33 (1): 72－80. Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. 2003. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. Science in China (Series: D) (in Chinese), 33 (1): 72－80.

梁妙玲，谢正辉. 2006. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究，11 (5): 582－592. Liang Miaoling, Xie Zhenghui. 2006. Simulations of climate effects on vegetation distribution and net primary production in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 582－592.

Lü A, Tian H, Liu M, et al. 2006. Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000

[J]. J. Geophys. Res., 111, D05313, doi: 10. 1029/2005JD006198.

McGuire A D, Sitch S, Clein J S, et al. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO2, climate and land use effects with four process-based ecosystem models [J]. Global Biogeochem. Cycles, 15 (1): 183 - 206.

Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. Int. J. Climatol., 25 (6): 693 - 712.

Ni J, Sykes M T, Prentice I C, et al. 2000. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3 [J]. Global Ecol. Biogeogr., 9 (6): 463 - 479.

Ni J. 2004. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China [J]. Plant Ecol., 174 (2): 217 - 234.

朴世龙，方精云，郭庆华. 2001. 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，25 (5): 603 - 608. Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinhua. 2001. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. Acta Phytoecologica Sinica (in Chinese), 25 (5): 603 - 608.

Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming, et al. 2005. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China [J]. Global Biogeochem. Cycles, 19, GB2027, doi: 10. 1029/2004GB002274.

Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. Global Change Biol., 9 (2): 161 - 185.

孙艳玲，延晓冬，谢德体，等. 2007. 应用动态植被模型 LPJ 模拟中国植被变化研究 [J]. 西南大学学报（自然科学版），29 (11): 86 - 92. Sun Yanling, Yan Xiaodong, Xie Deti, et al. 2007. Application of LPJ model in simulating vegetation distribution of China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 29 (11): 86 - 92.

陶波，李克让，邵雪梅，等. 2003. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟 [J]. 地理学报，58 (3): 372 - 380. Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. 2003. Temporal and spatial pattern of net primary production ecosystems in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (3): 372 - 380.

陶波，曹明奎，李克让，等. 2006. 1981～2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化 [J]. 中国科学（D 辑），36 (12): 1131 - 1139. Tao Bo, Cao Mingkui, Li Kerang, et al. 2006. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981 - 2000 [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 36 (12): 1131 - 1139.

闻新宇，王绍武，朱锦红，等. 2006. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化 [J]. 大气科学，30 (5): 894 - 904. Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. 2006. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 894 - 904.

Zobler L. 1986. A world soil file for global climate modelling [R]. NASA Technical Memorandum, 87802, Washington, D. C., 32pp.