



全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究

作者: 李银鹏 季劲钧

利用陆面物理过程和植被生理生态过程完全动态耦合的大气植被相互作用模式 (AVIM), 对全球陆地生态系统的净初级生产力进行模拟。全球陆地生态系统植被分为13类, 土壤质地分为7类, 确定了各种植被和土壤的模式参数。采用全球陆地0.5×0.5网格点气候平均资料; 以30分钟为步长进行积分。并用全球不同地区各种植被类型的19个NPP观测样点数据校准模型。AVIM 模拟全球陆地生态系统NPP的主要模拟结果如下: 全球陆地生态系统净初级生产力 (NPP) 总量约为60.72GtCyr⁻¹。分析了不同植被类型的NPP分布, 模式较好地模拟了全球陆地生态系统净初级生产力的纬向分布和区域分布的差异, 模拟出中国植被生产力的分布特征。陆地生态系统净初级生产力与温度、降水和辐射等气候因素在不同地区有不同程度相关性, 北方针叶林地区气候因子与NPP的相关性明显, 反映出植被对环境因子的不同响应及其物候特征。赤道热带雨林地区NPP与气候因子的相关性不明显。

全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究 李银鹏 季劲钧 (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029) 摘要: 利用陆面物理过程和植被生理生态过程完全动态耦合的大气植被相互作用模式 (AVIM), 对全球陆地生态系统的净初级生产力进行模拟。全球陆地生态系统植被分为13类, 土壤质地分为7类, 确定了各种植被和土壤的模式参数。采用全球陆地0.5×0.5网格点气候平均资料; 以30分钟为步长进行积分。并用全球不同地区各种植被类型的19个NPP观测样点数据校准模型。AVIM 模拟全球陆地生态系统NPP的主要模拟结果如下: 全球陆地生态系统净初级生产力 (NPP) 总量约为60.72GtCyr⁻¹。分析了不同植被类型的NPP分布, 模式较好地模拟了全球陆地生态系统净初级生产力的纬向分布和区域分布的差异, 模拟出中国植被生产力的分布特征。陆地生态系统净初级生产力与温度、降水和辐射等气候因素在不同地区有不同程度相关性, 北方针叶林地区气候因子与NPP的相关性明显, 反映出植被对环境因子的不同响应及其物候特征。赤道热带雨林地区NPP与气候因子的相关性不明显。关键词: 大气-植被相互作用; 净初级生产力 (NPP); 陆地生态系统;

碳交换中图分类号: P149; 文献标识码: A 1 引言 CO₂ 是所有大气中温室气体中浓度最大, 气候效应显著的一种气体。从工业革命开始到现在大气中的CO₂ 浓度已从280ppm[1] 增长到目前的368ppm [2]。现有的研究认为大气中CO₂ 的迅速增长主要是由于人类活动造成的, 其中最主要是由于工业发展而大量使用化石燃料。在自然界碳的生物地球化学循环中最主要的3个碳库是海洋、陆地生态系统和大气。海洋是最大最活跃的碳库, 海洋深水中的碳含量约为4×10⁴ Gt。据理论估计, 海洋每年从大气中吸收的CO₂ 为2.5Gt。陆地生态系统总的碳贮量为2200Gt。其中, 植被中约含600 Gt, 陆地土壤中1600Gt。大气中的C贮量为720~765Gt。陆地生态系统中的有机碳贮量是大气中的2倍多。陆地生态系统的年碳交换量为120Gt左右, 化石燃料每年的燃烧量为5.5Gt [1], 也就是说大气和陆地生态系统交换量5%的变化就等于每年的化石燃烧释放量。由此可见陆地生态系统与大气之间碳交换在全球碳循环的重要作用。但地球系统中碳循环的研究中仍有许多没有解决的难题, 如'失踪的碳汇'。正是因为碳循环的重要性, 成为IGBP现在和未来一段时间内的重要研究课题。 陆地生态系统与大气之间的相互作用在时间和空间上包括不同的层次和尺度, 从植物的生化反应, 微生物的分解作用, 一直到整个生物圈。从瞬间的生化反应到几百万年的地球系统演化。因此在全球变化研究中, 包含了不同层次和不同尺度的研究内容。模式研究是研究全球尺度陆地生态系统与大气相互作用的重要手段。经过20年的发展已建立了一些有关全球陆地生态系统的模型。这些模型可分为动力生态系统模型, 地球化学模型等。大气植被相互作用模式 (AVIM) [3] 是与陆面物理过程模型完全耦合的生态系统模式。本文是将AVIM应用于全球陆地生态系统与大气的碳交换研究。 2 模型简述与植被土、壤分类和参数 2.1 大气植被相互作用模式 (AVIM) AVIM是季劲钧 [3] 建立的大气植被相互作用模式。该模式把陆面物理过程模式和植被的生理生态过程模式有机地结合起来, 实现了大气和包括根圈在内的植物圈之间的动态相互作用, 并且对森林[3]、作物 [4]、和草原 [5], 以及中国的东北样带和青藏高原区域 [6] 作了模拟实验。本研究是把AVIM模式全球化, 并应用于全球各类生态系统。图1用于全球陆地生态系统与大气碳交换模拟研究的AVIM示意图 Fig.1 Model structure of AVIM for the study of global carbon exchange between terrestrial ecosystem and atmosphere AVIM主要包括物理交换子模块和植物生长子模块和物理参数转换子模块 (图1)。物理交换子模块根据在土壤、植被、大气之间质量和能量传输过程来决定状态变量的变化。即用热量转换和传输方程计算植被冠层和土壤及雪盖中的温度。用水分方程计算植被冠层和土壤的水分变化。本研究使用原有物理交换子模式, 其详细描述可以参见Ji和Hu (1989) [3]。植被分为叶、茎、根3部分, 以及一个枯枝落叶层。植物生长子模式包括了完整的光合作用、呼吸作用、分配、凋落和物候过程。本研究的光合作用、呼吸干物质在叶、茎、根之间的分配和凋落过程均采用 [2] 方程。物理模块: 在大气和土壤环境作用下得到的植被、土

壤的温度、湿度和辐射强度将直接影响植物的生理过程，同时也向大气输送热量和水分。单位面积最佳环境条件下的最大光合速率： $P_{max} = A \ln A + B \times I_0 A + B \times -k \times LAI$ (2-1) 式中 A 为饱和光合速率，B 为光反应曲线斜率， I_0 为冠顶光合有效辐射，k 为叶丛消光系数，LAI 为叶面积指数。植物的光合作用受到温度，土壤水分和叶氮浓度等环境条件的限制。 $GP = P_{max} \times f(T_f) \times f(\Psi) \times f(N)$ (2-2) $f(T_f) = (T_f - T_{min}) \times (T_f - T_{max}) / (T_{min} - T_{opt}) \times (T_{max} - T_{opt})$ (2-3) $f(\Psi) = 1 - e^{-b(w - w_i)}$ $\geq w_i$ $f(\Psi) = 0$ $w \leq w_i$ (2-4) 式中 T_f 为叶面温度， T_{min} ， T_{opt} ， T_{max} 分别为最低，最适和最高光合温度，w 为土壤含水量， w_i 为土壤萎蔫含水量，b 为参数。本文暂不考虑叶氮浓度对光合作用的影响，令 $f(N) = 1$ 植物的呼吸作用包括维持呼吸和生长呼吸，维持呼吸是温度的函数，而生长呼吸正比于干物质增长率，有如下形式： $R_m = \alpha_i M_i \times Q_{0.1} \times (T - T_0)^i = f, s, r$ (2-5) $R_g = \sigma_i \eta_i NP$ $NP > 0$ $i = f, s, r$ (2-6) $R_g = 0$ $NP < 0$ $\eta_i = 1$ 式中 R_m 为维持呼吸量， α_i 为呼吸系数， M_i 为生物量，Q 为呼吸常数 (2 左右)， T_0 为参考温度 (25°C)，T 为叶面或土壤温度， R_g 为生长呼吸量， σ_i 为生长呼吸系数， η_i 为分配系数， $NP = GP - R_m$ 。下标 f, s, r 分别表示叶、茎和根的值。植物总生物量的变化是光合同化产物减去呼吸、凋落之差，如下式： $dM/dt = GP - R_m - R_g - F_{al}$ (2-7) 式中 M 为单位面积总生物量， F_{al} 为凋落率，与生物量成正比。综合以上所述，各组织的生物量变化方程是： $dM_f/dt = (1 - \sigma_f) \eta_f (GP - R_m) - F_{af}$ (2-8) $dM_s/dt = (1 - \sigma_s) \eta_s (GP - R_m) - F_{as}$ (2-9) $dM_r/dt = (1 - \sigma_r) \eta_r (GP - R_m) - F_{ar}$ (2-10) 式中 M_f ， M_s ， M_r 分别为植物叶、茎和根的生物量， F_{af} ， F_{as} ， F_{ar} 分别为叶、茎和根的凋落量，其它符号如前。由叶生物量变化可知叶面积指数，从而求得光合速率，由叶、茎、根生物量计算呼吸速率。所以植物的净初级生产力 (NPP) 可以求得： $NPP = GP - R_m - R_g$ (2-11) 这是一个随季节变化的陆地生态系统与大气之间碳交换的动态过程。

2.2 植被和土壤分类 用于全球尺度的全球植被的功能型分类，其分类应该主要考虑的因素有 (1) 这种功能分类应该包括最主要的陆地植被类型特别是主要的自然植被，有时也需考虑次生植被 (如农田)。(2) 这样的植被类型必须反映植被的功能和特性。(3) 植物的功能型能够地理上代表整个陆地区域 [7]。本文使用的是物候生理—结构特性分类方法。这种方法主要考虑植被地理和气候因素，特别是生物群区的水平。主要包括的优势植物类型及其功能特性，包括生物量结构 (例如有地表覆盖的阔叶林等) 和季节特性等。本研究植被使用 Dorman & Sellar (1989) [8] 的全球 0.5×0.5 经纬网格分类，中国部分参考了中国自然地图集的中国植被图。全球陆地生态系统分为 13 类，各种植被类型的名称及其格点数如表 1。全球土壤质地分类采用 NASA 的分类方法，按土壤中粘土、淤积土和砂土占的比例划分为 6 类 (表 2)。在全球化时的假定植被和土壤在整个经纬网格点是一致的。表 1 全球植被分类及格点数 Tab.1 Global vegetation types and grid cells 表 2 全球土壤质地分类及格点数 Tab.2 Global soil texture classification and grid cells 全球陆地气候资料 (0.5×0.5 经纬网格) 和天气发生器均由 Friend (1998) [9] 提供。包括 1961~1990 多年月平均降水日数的分数，每个降水日的降水量，最高温度，最低温度，太阳辐射和水汽压。利用天气发生器，由月平均量产生逐日降水，最高温度，最低温度，太阳辐射，相对湿度和日长。

2.3 植被和土壤参数的选取 AVIM 包括的主要参数有光合作用参数 (1) 最大光合速率 A，是植物在最适条件下的光合速率，不同的植被类型，A 与植物本身的特性相关，是反映植被对 CO_2 的同化能力，是光合作用的关键指标，本模型对 A 的确定参考了 Larcher 1995 [10]；Sellers et al 1996 [11]；Collatz et al 1991 [12] 等人的结果而确定；

(2) 光合温度，包括最适温度、最高温度和最低温度。最适温度是植物达到最大光合速率的叶面温度。最高和最低是光合作用的温度临界值。高于最高温度或低于最低温度植物都不能进行光合作用。本模型的光合温度参考了 Melillo et al. 1993 [13]；Larcher, 1995 [10] 的研究。通常植物适应其长期生长的环境，热带植物的光合温度较高，寒带植物的光合温度较低，甚至可以在 $0^\circ C$ 以下生长 [10]。(3) 冠层对有效辐射的消光系数选择为常数 0.5。(4) 光合有效辐射为入射辐射的 0.48。各种植被类型的具体光合作用参数见表 3。呼吸系数：(1) 维持呼吸系数 α_i ，是指在参考温度下单位生物量植物组织的维持呼吸速率。(2) 生长呼吸系数 σ_f ，是用于生长所需的呼吸与生长的量比例，根、茎、叶有不同的呼吸速率。(3) 呼吸系数的温度反应系数 2.0。其中 (t_0) 是呼吸基础温度为 298K。呼吸系数的确定参考了 Larcher (1995) [10] 的研究。各种植被的呼吸参数见表 4。植被形态参数，用于地表物理参数计算。包括：植被的高度和叶片形态参数等。选取时参考了李文华 (1996) [14] 和 Schulze et al (1994) [15] 的研究。表 3 各种植被类型的光合作用参数 Tab.3 Photosynthesis parameters of vegetation types 表 4 各种植被类型的呼吸参数 (单位: kg/kg) Tab.4 Respiration parameters of vegetation types (unit: kg/kg)

土壤的基本物理参数有：土壤孔隙度 (θ_s)，饱和水势 Ψ_s ，饱和导水度 K_s ，土壤热容量 c_p ，c 为比热， ρ 为密度，和萎蔫含水量 w_i ，B 为曲线参数。其中 Ψ_s 和 K_s 的参数化方法，参考了 NASA 的资料和 Peilke (1984) [16]。3 模型校准和模拟结果与分析 3.1 模型校准 在全球范围内选择 19 个有 NPP 观测值的植被样点 (表 5)，包括了冻原、常绿针叶林、阔叶落叶林、灌丛、草地、热带雨林等不同的植被类型。从模式模拟结果中选出与观测样点位置最近的网格点的模拟 NPP 值，与观测值比较，用于校准 AVIM 模型。从表 7 可以看出，AVIM 对大部分植被类型的 NPP 模拟均接近观测值。相关系数为 0.96。表明 AVIM 对各种植被类型 NPP 有较好的模拟效果，可用于全球 NPP 的模拟。3.2 全球 NPP 模拟结果 全球 NPP 分布图如图 2。AVIM 模拟的全球 NPP 单个网格点的值在 $0 \sim 1800 g C m^{-2} yr^{-1}$ 之间。不同植被类型的平均 NPP 变化在 $99.58 g C m^{-2} yr^{-1}$ (冻原) 到 $996.82 g C m^{-2} yr^{-1}$ (热带雨林)。全球植被平均的 NPP 为 $405.131 g C m^{-2} yr^{-1}$ 。(表 6)。表 5 AVIM 校准样点观测 NPP 及其与模拟 NPP 的对比 Tab.5 Comparison between estimated and observed NPP at AVIM calibration sites

3.2.1 碳交换的空间分布 北纬 $60^\circ N \sim 30^\circ N$ 之间是一个单位面积 NPP 较高地区，副热带生产力较低，而热带 $15^\circ N \sim 15^\circ S$ 是单位面积 NPP 最高的地区，单位面积 NPP 最高值可以达到 $953 g C m^{-2} yr^{-1}$ 左右，这个地区的植被主要为热带雨林 (图 3)。而 NPP 总量是以中纬度为总生产力最高的区域，因为为植被分布面积最大，热带雨林分布在赤道附近，是第 3 个高总净生产力区。北温带植被的总净生产力较高，半个纬度带的年总 NPP 最高值达到 $0.8 g C / 0.5 lat$ 。 $60^\circ N \sim 30^\circ N$ 地区占全球陆地生态系统年总 NPP 的 44.0%，赤道地区 $15^\circ N \sim 15^\circ S$ 占 22.7%， $15^\circ S \sim 60^\circ S$ 地区占 11.1%。AVIM 模拟的 NPP 纬向分布与 Cao & Woodward (1998) [17] 和 Cramer et al (1999) [18] 的研究结果的 NPP 纬向分布均接近。图 2 全球陆地生态系统年 NPP 分布图 Fig.2 Global distribution of annual NPP of terrestrial ecosystem 表 6 全球各植被

类型的分布面积和年NPP估计 Tab.6 Distribution of simulated annual NPP for global vegetation types from China range within, 模拟结果反映了我国植被NPP受水热条件限制, 总体呈从东南到西北递减的趋势。亚热带地区基本在500gC/m²/y, 东南部最高可以达到1000g/m²/y。在高原干旱地区基本低于100gC/m²/y。与周广胜和张新时(1996) [19] 利用经验模型模拟的中国植被第一性生产力, 以及孙睿和朱启疆(2000) [20] 利用卫星遥感资料的模型所得的中国植被NPP的结果基本一致, 也比较符合中国植被NPP的实际分布。在其他地区也基本与实际NPP分布基本一致。AVIM模式估计全球陆地年NPP碳总量为60.72GtCyr⁻¹, PIK生态系统模型比较计划中13个模型对全球NPP总量的估算在39.9~80.5GtCyr⁻¹, 平均结果为54.9GtC [13, 17, 18, 21] AVIM与该模式比较计划中13个模型的平均结果相比略高。各种植被类型的NPP模拟结果, 与观测值和其它模式的结果也接近。图3 单位面积NPP和NPP总量的纬向分布 Fig.3 Latitudinal profiles of NPP per unit area (a) and total NPP (b) 3.2.2 各种植被类型的NPP不同的植被类型覆盖的地球面积差别较大(表6)。其中以有地表覆盖的阔叶林的面积最大, 为23.1Mkm², 其次为热带雨林面积为15.89Mkm²。各种植被类型中以热带雨林NPP最大为996.2gm-2yr-1。热带雨林的年总NPP为15.84 GtCyr-1为在各种植被类型中碳净同化量最大。热带雨林是大气的主要碳汇, 有研究表明在近几年全球变化的过程中起吸收人为排放CO₂的作用 [22], 但热带地区的土壤异养呼吸较高 [23], 可能降低热带雨林生态系统的碳汇的作用。有地表覆盖的阔叶林年总NPP 占第二位, 常绿针叶林占第三。这三种森林植被类型占全球陆地总净生产力的近56%。如果再加上其他类型的森林, 森林的总年净生产力占全球净生产力的近80%。所以说森林是地球的“肺”, 是讲森林有很强的C吸收和交换能力。草地也是陆地生态系统的重要组成部分。其面积仅次于有地表覆盖的阔叶林。其生产力也占到4.63GtCyr-1; 如果再加上Savanna(稀树草地)则更能显示草地在陆地生态系统中的作用 [24]。本研究的植被分类系统中, Savanna被分入有地表覆盖灌木类中。Lieth (1975) [25] 对草地面积的估计为24Mkm²。而NPP总量达到15GtC。约占全球总量1/4。本文对草地NPP总量的较低估计主要是由于分类系统中全球草地的面积较小。有研究表明, 草地可能是碳的汇, 可以吸收0.8GtCyr-1 [24], 但目前缺乏直接的证据。作物是人工植被, 生产力一般与相同地区的自然植被相当。本模式模拟的全球作物的总生产力为4.86GtCyr-1。 3.2.3 在典型纬度带气候因子与NPP的季节相关性分析。选择植被类型以北方针叶林森林为主50° N~60° N地区, 分析植被NPP的季节变化与气候因子的关系(图4)。图中不同的标号是植物不同月份NPP, 横坐标为气候因子:降水、温度和辐射。如果NPP与气候因子关系密切则相同的气候因子值会有相近的NPP值, 所以图中NPP月变化连线形成的圈的大小形象说明了NPP与气候因子的相关性。如图4所示在3个因子中以温度与NPP的关系图中形成的圈最小, 而NPP与辐射形的圈最大, 降水居中。说明在该地带月NPP与温度的关系最紧密, 而与辐射的关系较差。这种相关性也说明, 植被不同物候期生产力的差异。植被物候对不同环境因子的响应不同。在该地带NPP对温度的响应有对称性, 而对降水和辐射的响应对称性差。图4 典型区域模拟月NPP与降水温度和辐射的关系。左边为50° ~60° N, 右边为5° N~5° S, 图中数字1~12代表1~12月份 Fig.4 Relationship between simulated monthly NPP and climatic variables for typical regions. Left side is the regional mean of5° N~6° N, right side is the regional mean of5N~5S, 1 to12in the figure symbols January to December 另外, 选择5° N~5° S代表热带雨林地带。如图4所示, NPP随降水, 温度的季节变化幅度不大, 不对称的月变化与气候因子显现了复杂的关系。植被的季节变化不明显。 4 结论和讨论 本文利用陆面物理过程和植被生理生态过程完全动态耦合的模式AVIM研究陆地生态系统和大气之间碳交换(NPP)。通过本文的研究得出如下结论: (1) AVIM用30分钟实际步长对生态系统的物理过程, 包括植被和土壤的水热转换和传输的过程模拟的同时模拟了NPP, 机理性的模拟了植被、大气、土壤之间的相互作用。AVIM经过全球陆地生态系统的参数化和校准后用于模拟全球陆地生态系统NPP。(2) 把全球陆地植被和土壤质地进行分类, 使用0.5×0.5度格点月平均气候资料产生的模式所用的“天气”资料, 用全球不同地区19个观测样点的NPP对AVIM进行校准, 表明AVIM全球参数化具有较好的模拟能力。能够进行全球陆地生态系统NPP的模拟。(3) AVIM模式估计全球陆地年NPP碳总量为60.72GtCyr⁻¹。单位面积NPP最高的地区为热带雨林地区, 而NPP总量最高的地区为北半球中纬度地区。(4) 全球植被平均的NPP为405.13gCm-2yr-1。不同植被类型的单位面积平均NPP 变化在99.58gCm-2yr-1(冻原)到996.82gCm-2yr-1(热带雨林)之间。热带雨林是NPP总量最高的植被类型, 占全球陆地NPP总量的26.09%。(5) AVIM模拟表明陆地生态系统NPP与温度、降水辐射等气候因子的季节变化有明显的相关性。其中与温度的关系最密切, 特别是在温带地区相关性最大。陆地生态系统是气候系统的重要组成部分, 二者是不可分割的, 对生态系统在气候生态系统中的作用及其相互作用的研究需要深入研究。已经发展的AVIM可以与大气环流模式GCMs耦合, 研究陆地生态系统与大气系统的动态相互作用, 研究陆地生产力、生物地化循环的季节、年际变化, 甚至年代际变化的机理。这些研究可以帮助了解气候变化的原因。参考文献(References): [1] J M Melillo, I C Prentice, G D Faquahar et al. (eds) IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change): Climate Change. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedback to climate [M]. UK: Cambridge University Press, 1995. [2] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO₂ concentrations-Maura Loa, Observatory, Hawaii, 1958~1999 (revised August2000) (www.cdi.ac.esd.ornl.gov/npds/npd001.html) [3] Ji J. A climate~vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface [J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 445~451. [4] Ji J, Hu Y. A simple land surface process model for use in climate study [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989, 3: 344-353. [5] Ji Jinjun, Yu Li. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23 (4): 439-448. (In Chinese) [季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究 [J]. 大气科学, 1999, 23 (4): 439-448. [6] Lu Jianhua. A simulation study of regional atmosphere-vegetation interactions on seasonal and interannual scales, Doctoral Thesis, Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences, 1999. (In Chinese) [吕建华. 区域性和年际尺度大气植被相互作用的模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文 [D]. 1999.] [7] Box E O. Plant function types and climate at the global scale [J]. Journal of Vegetation Science, 1996, 7: 309-320.

[8] Dorman J L, Sellers P J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation model as represented by the simple biosphere model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28: 833-855. [9] Friend A D. Parameterisation of a global weather generator for terrestrial ecosystem modelling [J]. *Ecological Modelling*, 1998, 109: 121-140. [10] Larcher W, *Physiological Plant Ecology* (3rd ED) [M]. Germany: Springer-Verbege, 1995. [11] Sellers P J, Randall DA, Collatz G J et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 676-705. [12] Collatz G J, Ball J T, Grievet C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 54: 107-136. [13] Melillo J M, McGuire, A D, Kicklighter, D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, 363: 234-240. [14] Li Wenhua, *Study on forest resources of China* [M]. Beijing: China Forestry Press, 1996. [李文华. 中国森林资源研究 [M], 北京: 中国林业出版社. 1996.] [15] Schulze E D, Kelliher F M, Lloyd J et al. Relationship among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate, and plant nitrogen nutrition: a global ecology scaling exercise [J]. *Annu. Rev. Ecol. Syst*, 1994, 25: 629-660. [16] Peilke. *Mesoscale meteorological modeling* [M]. New York: Academic Press, 1984. [17] Cao M, Woodward F I. Net Primary and ecosystem production and Carbon stocks of terrestrial ecosystem and their responses to climate change [J]. *Global Change Biology*. 1998, 4: 185-198. [18] Cramer 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, 5 (suppl.1), 1-5. [19] Zhou Guangsheng, Zhang Xinsheng. Study on NPP of nature vegetation in China under global climate change [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20 (1): 11-19. (In Chinese) [周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力的研究 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20 (1): 11-19.] [20] Sun Rui, Zhu Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55 (1): 36-45. (In Chinese) [孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化的研究 [J]. *地理学报*, 2000, 55 (1): 36-45. [21] Post W M, Peng I, Emanuel W R., et al. The global Carbon cycle [J]. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326. [22] Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N et al. Changes in carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots [J]. *Science*, 1998, 282: 442-446. [23] Nemry B, Francois L, Gerard J-C et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of the seasonal atmospheric CO2 signal [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5 (suppl.1): 65-76. [24] Scurlock J M O & Hall, D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J], *Global Change Biology*, 1998, 4: 229-233. [25] Lieth H. Modeling the primary production of the world. In: (Lieth & Whittaker eds) *Primary Productivity of the Biosphere* [M], Berlin: Springer-Verlag 1975. Simulations of Carbon Exchange Between Global Terrestrial Ecosystem and the Atmosphere LI Yin-peng J I Jin-jun (Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China) Abstract: Key words:

关键词: 大气-植被相互作用; 净初级生产力 (NPP); 陆地生态系统; 碳交换