



东北地区陆地碳循环平衡模拟分析

作者: 王绍强 周成虎

依据陆地碳循环过程, 基于多年平均气候数据建立陆地碳循环平衡模型, 并模拟了陆地碳循环平衡状态下, 我国东北地区陆地碳循环的主要碳通量, 其中, 东北地区植被潜在净第一性生产力 (NPP) 估算为 5.16×10^8 tC/a, NPP的分布由于受纬度地带性、经度地带性等植被、气候和地形因素的综合影响, 总体呈现从东南到西北递减的趋势, 东北地区植被潜在年凋落物速率为 5.16×10^8 tC/a, 凋落物年矿化分解速率为 3.61×10^8 tC/a, 凋落物年腐殖化速率为 1.55×10^8 tC/a, 凋落物碳库为 4.67×10^8 tC, 土壤有机碳年分解速率为 1.55×10^8 tC/a。通过探讨各主要碳库和碳通量的大小以及空间分布特点, 描绘了东北地区陆地碳循环平衡状态的空间格局。研究表明NPP、凋落物碳库和土壤碳库的分解速率对于整个陆地碳循环过程是很重要的。

东北地区陆地碳循环平衡模拟分析 王绍强 1 周成虎 1 刘纪远 1 李克让 1 杨晓梅 2 (1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 日本宇宙事业开发团, 东京 106-0032)

摘要: 依据陆地碳循环过程, 基于多年平均气候数据建立陆地碳循环平衡模型, 并模拟了陆地碳循环平衡状态下, 我国东北地区陆地碳循环的主要碳通量, 其中, 东北地区植被潜在净第一性生产力 (NPP) 估算为 5.16×10^8 tC/a, NPP的分布由于受纬度地带性、经度地带性等植被、气候和地形因素的综合影响, 总体呈现从东南到西北递减的趋势, 东北地区植被潜在年凋落物速率为 5.16×10^8 tC/a, 凋落物年矿化分解速率为 3.61×10^8 tC/a, 凋落物年腐殖化速率为 1.55×10^8 tC/a, 凋落物碳库为 4.67×10^8 tC, 土壤有机碳年分解速率为 1.55×10^8 tC/a。通过探讨各主要碳库和碳通量的大小以及空间分布特点, 描绘了东北地区陆地碳循环平衡状态的空间格局。研究表明NPP、凋落物碳库和土壤碳库的分解速率对于整个陆地碳循环过程是很重要的。关键词: 东北地区; 陆地碳循环; 碳平衡; 模型中图分类号: P149 文献标识码: A

1 引言 全球碳循环研究表明北半球中纬度地区是大气CO₂的一个重要的碳汇 [1, 2]。最近基于大气CO₂观测和模型的研究, 指出北美并非 1.7×10^9 t/a这么大的碳汇 [3~6], 而在亚洲的北部则存在着一个较大的碳汇 [7]。在1965年~1996年的30年间, 气温升高1~2℃以上的地区主要集中于北纬50°以上的陆地表面 [8], 所以, 北半球中高纬度地区在全球变化与陆地生态系统研究中成为世界各国科学家关注的焦点 [9~11]。东北地区是全球变化最为敏感的区域之一, 东北地区生物地球化学循环特征将对其陆地生态系统的演化、区域气候和中国温室气体源汇总量等较大的影响 [12]。然而目前东北地区陆地碳循环的系统研究工作和相关实测数据还比较缺乏, 所以本文基于多年平均气候资料建立陆地碳循环平衡模型, 用于解释和预测东北地区大气和陆地之间碳循环的区域尺度形式, 为更好的理解控制大气-陆地生态系统之间碳通量和碳储存的过程提供方法上的探讨。东北地区西起东经115° 37' 的内蒙新巴尔虎右旗以西与蒙古人民共和国交界处, 东至东经135° 5' 的黑龙江省抚远以东乌苏里江汇入黑龙江处的耶字碑东角, 跨经度19° 2 8', 经度位置对自然环境的影响不如纬度位置所起的作用明显 [13]。东北地区行政上包括辽宁、吉林、黑龙江3省和内蒙古自治区东部的呼伦贝尔盟、兴安盟、哲理木盟、赤峰市, 南北长1600多km, 东西宽1400多km, 土地总面积约 124.14×10^4 km², 约占我国国土总面积的12.94%。2 数据来源和研究方法 东北地区的土壤、植被数据来源于全国1979~1984年第2次土壤普查资料、1989~1993年第4次森林清查资料、公开发表的文献和样地统计资料, 其中, 土壤剖面共有466个 (包括内蒙古)。本论文基础图件取自中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室的1:400万中国资源环境数据库, 使用ARC/INFO软件对上述图件进行编辑, 剪切形成东北地区土壤、植被、水系、省界、国界、县界、县城位置图, 经过投影和矢量-栅格转换, 与气象站点属性图层进行叠加处理。2.1 气候数据库的建立 气候要素包括每月平均温度、降水量、蒸发量和相对湿度, 所采用的气象数据均取自《中国地面气候资料》(1951~1980年, 做为平衡态的基准数据)中东北94个站点的观测值。将气象站点的经纬度坐标、海拔高度和代码均输入到计算机, 使用ARC/INFO和ArcView 软件, 建立了温度、降水和蒸发量具有地理定位的基础气象数据库。同时, 在GRID中经过不同栅格步长调试, 按照属性插值采用普通克里格法生成15km×15km的12个月平均气温、降水和蒸发栅格文件, 便于模型运算。2.2 植被生物量和土壤有机质中的碳含量及其估算 植物不同组成部分的碳含量是不同的, 而且, 其碳含量随着植物类型和季节的不同而有所变化 [14~16]。不同的植被考虑其树种、年龄、组成和种群结构, 碳含量从0.45到0.55 [17~25] (表1), 所以在本文中我们采用常用的50%的碳含量转换率, 土壤有机碳量也采用国际上通用的58%的比率进行计算。表1 植被生物量和土壤碳含量比率 Tab.1 Conversion coefficient of biomass and soil organic content 利用样地数据得到植被和土壤的平均碳密度, 然后用每一种植被和土壤类型的碳密度与面积相乘估算生态系统的碳量, 是国际上较为通用的一种方法 [26, 27]。因而本文也采用该方法, 其中, 植被碳密度的估算主要是根据公开发表

的文献和报告中的生态样方资料 [28, 29]。土壤碳储量估算方法采用土壤碳密度与土壤分布面积相乘的方法 [30]，按照1m的土壤深度估算出了东北地区土壤碳库储量。3 植被和土壤碳库储量 3.1 植被碳库储量与空间分布特征 在模拟陆地碳循环平衡之前，必须估算陆地碳库的储量。经过计算，东北地区植被碳储量约为 $28.11 \times 10^8 \text{ tC}$ ，平均植被碳密度为 2.27 kgC/m^2 。东北全境森林植被生物量为 $21.90 \times 10^8 \text{ tC}$ ，占东北地区总量的77.90%，表明东北森林植被具有很高的碳储量，在吸收大气 CO_2 和增加碳汇方面能发挥更大的作用。草甸、草原面积约为 $35.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，碳储量估计为 $0.71 \times 10^8 \text{ tC}$ ，分别占东北地区总面积和植被碳储量的28.54%和2.53%，说明草原分布面积虽然广大，但是生物量低，增加碳汇吸收的潜力较大。东北地区植被碳储量空间分布特点是：东部长白山、千山山地和北部大、小兴安岭较高，松嫩平原和辽河平原等中部地区居中，中西部三江平原、科尔沁沙地和呼伦贝尔大草原较低（图1）。3.2 土壤碳库储量与空间分布特征 东北地区土壤总碳库约为 $264.26 \times 10^8 \text{ t}$ ，平均土壤碳密度为 21.27 kgC/m^2 。碳密度最大的是泥炭沼泽土，碳密度为 92.55 kgC/m^2 。其土壤平均碳密度是全国土壤平均碳密度 10.53 kgC/m^2 的2.02倍 [30]，其面积仅占全国的12.94%，但土壤碳储量却占全国的28.59% [30]，说明东北地区的土壤碳储量是相当高的。东北地区土壤碳储量空间分布特征主要是：北部地区土壤碳密度高，中南部地区低，东部地区土壤碳密度略高于西部地区，这与东北土壤地带性分布、植被类型分布和气候梯度变化规律是一致的。大、小兴安岭北部地区土壤碳密度较高（图1），原因是寒温带针叶林地带温度低，植被以森林群落为主，地表腐殖质积累速率高，土壤有机质输入速率大，土壤呼吸速率低，土壤腐殖质分解速度慢。图1 东北地区植被生物量和土壤碳密度图（单位： kgC/m^2 ）

2) Fig.1 Spatial distribution of vegetation and soil carbon density in Northeast China 3.3 碳库估计中的问题 在生态系统尺度上，植被和土壤碳储量主要受立地条件、植被类型、林分年龄、群落和土壤结构等的影响；在区域尺度上，则主要受气候、土壤和人类活动的影响，这种时空上的变异性就对测定区域和全球植被生物量和土壤有机碳产生了很大的不确定性。同时，在采样过程中，由于采样方法标准不一，样本数量不足，分析计算方法各异，也比较容易产生估算偏差。而且，碳库储量估算方法也存在一定的不确定性，将样方数据外推到区域尺度上需要更合理和更科学的新方法解决尺度变换问题。4 陆地碳平衡模型构建 由于目前还没有定量确定陆地碳循环的通用方法 [31~33]，模型模拟便成为一种重要的方法。本文根据陆地表层碳循环过程，采用国内外的经验关系，建立基于气候数据的陆地碳循环平衡模型，模拟东北地区陆地碳库、碳通量的空间分布。该模型以年际变化为时间尺度，不考虑有关矿物营养元素的动态变化，而且该模型简化气候要素便于对结果进行讨论，因而有更少的参数，便于以后添加其它状态变量、各种干扰因子和机理过程。4.1 碳平衡模型状态变量的提取 为了能够抽象概括出陆地生态系统碳循环更一般的运作机制，揭示陆地表层碳循环的本质，选择在碳循环过程中起关键作用的因素为模型的状态变量。状态变量选择如下： V —植被生物量； L_t —凋落物量； H —土壤腐殖质；陆地表层中其它要素的变化可以通过用状态变量参数化来表述。4.2 区域陆地碳循环平衡模型描述 4.2.1 植被生物量方程 在自然状态下，不考虑人类活动的影响，以及忽视食草动物的影响，生物量的控制方程可以表示为： $dV/dt = \text{NPP} - f_{VL}$ (4-1) 式中

dV/dt 为单位时间、单位面积变化的生物量 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)。NPP为净光合作用速率 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)，即净第一性生产力。 f_{VL} 为植被凋落速率 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)，它同生物量 V 呈线性关系 [34]： $f_{VL} = k_{VL} V$ (4-2) 式中 k_{VL} 为植被凋落速率系数，它与植被类型有关。(1) NPP模型在Chi kugo模型的基础上，国内科学家利用中国植被NPP散点测量数据建立了一些模型 [35~36]。本文采用周广胜和张新时 [37~38] 建立的联系植物生理生态学特点和水热平衡关系的自然植被NPP模型，该模型克服了Chi kugo模型在我国干旱半干旱地区的不足，模型如下： $\text{NPP} = \text{RDI} \cdot r \cdot R_n \cdot (r^2 + R_{2n} + rR_n) \cdot (R_n + r) \cdot (R_{2n} + r^2) \cdot e^{-9.87 + 6.25 \text{ RDI}}$ (4-3) 式中 r 为年降水量 (mm)； R_n 为年净辐射 kcal/hm^2 ，它代表热量或温度因子，是生态系统生物物理过程强度的度量；NPP为自然植被的净第一性生产力 ($\text{tDW/hm}^2 \text{ a}$)；RDI为辐射干燥度， $\text{RDI} = R_n / (L_r)$ [37~38]，其中 L 为蒸发潜热，RDI是辐射能量的年净收入与蒸发掉年降水所需能量的比值，是表示气候干燥程度的一种指数。(2) 植被凋落速率的确定 根据经验关系和统计分析，采用Kwon [39] 建立的植被凋落速率方程计算凋落速率常数： $k_{VL} = k_e \cdot C_1 \cdot K_M + C_1$ (4-4) 式中 k_e 为凋落物速率常数，其中， C_1 为大气中的 CO_2 浓度， $K_M = 400 \text{ ppm}$ 为大气 CO_2 自饱和速率 (self-saturated velocity)。根据植被生物量、NPP模型和以上方程，可以计算出 k_e 和 k_{VL} 参数值，并可估算陆地生态系统自然植被的碳通量。4.2.2 凋落物方程 凋落物来源于生物，即植物的枯枝落叶和动物的尸体，因为陆地表层生物量中植物占有绝大部分，所以凋落物主要由植物的凋落物组成 [39]。同时它也是形成土壤腐殖质和分解出 CO_2 的原始物质，它的变化由如下方程控制： $dL/dt = f_{VL} - f_{LH} - f_{LC}$ (4-5) 式中 dL/dt 为单位时间、单位面积变化的凋落物量 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)， f_{LH} 为凋落物转变为土壤腐殖质的腐殖化速率 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)， f_{LC} 为凋落物分解生成 CO_2 的速率 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)。凋落物分解包括有机成分分解和腐殖质形成两个过程，并都是在微生物作用下进行的；凋落物分解过程中，微生物一方面促使有机成分分解矿化（释放出 CO_2 ），另一方面又利用分解有机物放出的能量，把一些简单的有机产物转变为复杂的有机化合物 [40, 41]。凋落物矿质化速率 f_{LC} 和腐殖化速率 f_{LH} 与植被类型和凋落物组成、微生物的活性、温度、土壤水、土壤通气性和土壤结构有关 [40, 41]。在平衡状态下，陆地生态系统中凋落物量没有发生变化，因为输入量等于输出量： $f_{VL} = f_{LH} + f_{LC} = k_{VL} V = k_{VL} K_j$ (4-6) 式中 K_j ($j=1, 2, 3$) 分别为凋落物分解速率 f_{LH} 和 f_{LC} 的系数，采用Foley的凋落物分解速率系数公式 [26]， K_j 值计算如下： $K_j = \varepsilon_j \cdot 10^{-1.4553 + 0.0014175 \text{ AET}}$ (4-7) 式中 $j=1, 2, 3$ ，分别代表植物的叶、茎、根组成部分，表示叶、枝、根等不同凋落物类型分解的难易程度，分别等于1.0、0.5、2.0 [26]，AET为每年实际蒸发量 (mm/a)，平衡态下等于水面蒸发量)。根桩的生物量占树木总生物量的很大一部分比例，例如杉木人工林根桩生物量一般占总生物量的10~25% [42]。本文根据相关凋落物文献中叶、枝和根所占的比例 [14, 42]，假定凋落物层中叶、枝、根所占的比例分别为60%、20%、20%，则 $\varepsilon_j = 1.1$ 。本文根据Foley [26] 给出的参数值和东北地区的植被类型分布，假设东北地区植被凋落物分解成 CO_2 进入大气的部分占凋落物分解总量的70%。

4.2.3 土壤腐殖质方程 土壤腐殖质是土壤的重要有机胶体物，吸附性强，能和粘土矿物结合形成有机-无机复合体和团聚体，提高土壤肥力 [40]。腐殖质的变化率主要取决于凋落物腐殖化速率 f_{LH} ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)和腐殖质矿质化速率 f_{HC} ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)之差。故： $dH/dt = f_{LH} - f_{HC}$ (4-8) 式中 dH/dt 为在单位时间、单位面积腐殖质的变化速率 ($\text{tC/hm}^2 \text{ a}$)。腐殖质的变化也主要依靠土壤微生物

物的活动, 同样与温度、土壤含水量、腐殖质数量有关。腐殖质矿质化过程是个生物化学过程, 持续有利的温度和高的湿度能促进生物的高速分解[41~42]。Rai ch建立了一个半机理半经验的统计模型研究土壤释放CO₂, 该模型考虑温度、水汽对土壤CO₂释放的影响[43]。本文采用该方程估算土壤腐殖质分解速率 $f_{HC} : f_{HC} = K_{HC} (e^{F+Q/T-PK+P} - 1.0)$ (4-9) 式中 f_{HC} 为土壤呼吸速率 ($gCm^{-2}d^{-1}$), F ($gCm^{-2}d^{-1}$) 是温度为零、水汽不受限制时的碳通量, Q ($^{\circ}C^{-1}$) 代表温度常数, T ($^{\circ}C$) 为月平均温度, P (cm) 为月平均降水量, K ($cm\ month^{-1}$) 为降水函数的自饱和系数。在自然状态下, F 、 Q 、 K 分别为0.579、0.0396、2.19 [43]。 k_{HC} 为土壤腐殖质分解常数, 联立方程 (4-6、4-7、4-8、4-9), 可以估算出土壤腐殖质碳量分布和土壤与大气之间的碳通量。其中, 当月均温 <-13.3 或者 $>33.5^{\circ}C$, 则土壤呼吸速率为零 [43]。

5 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析 生物地球化学循环中的各种物质, 在自然状态下应该是处于稳定状态的, 即各蓄库之间输出量应该等于输入量, 不存在碳源和汇。确定陆地碳循环平衡模型中的参数, 首先是平衡态开始, 平衡态即整个陆地生态系统植被生物量、凋落物和土壤腐殖质3大碳库总量是不变的。

5.1 东北地区自然植被潜在NPP分布现状 计算结果表明, 东北地区自然植被NPP为 $5.16 \times 10^8 tC/a$ 。东北地区自然植被NPP的分布由于受纬度地带性、经度地带性等植被、气候、地形因素的综合影响, 总体呈现从东南到西北递减的趋势 (图2a)。长白山脉等东部山地, 临近海洋, 受海洋性气候影响, 水热条件充分, 植被以温带落叶阔叶林、寒温带和温带山地常绿针叶林为主, 森林植被覆盖率高, 生长季长, NPP在 $4.5 \sim 5 tC/hm^2 a$ 以上。大、小兴安岭山地植被以温带针阔混交林为主, 由于受到温度条件的限制, NPP大致在 $3.5 \sim 4.5 tC/hm^2 a$ 之间。西北部地区由于历史的原因, 长期过度放牧和开垦, 导致草原荒漠化, NPP较低, 同时温度和水分条件的限制, 植被类型单一, 覆盖度低, 也成为因素。5.2 东北地区凋落物量分布现状和特征 由凋落物方程计算可得东北地区凋落物总量约为 $4.67 \times 10^8 tC$ 。东北地区植被凋落物量分布与植被类型、气候因素关系很大, 因为地表凋落物的积累, 不仅需要植被的生产力, 而且与凋落物呼吸分解速率有关, 因而它的分布特征也比较复杂。基本特征是东南部长白山、千山山地和大兴安岭、小兴安岭北部地区凋落物量较高, 凋落物量大致在 $7 tC/hm^2$ 以上, 中部、西部和南部地区较低, 凋落物量大致在 $4 tC/hm^2$ 以下 (图2b)。松嫩平原、西辽河平原和呼伦贝尔高平原以南和西的地区, 主要为草甸、温带草原和粮食作物等草本植物, 生产力低, 气候干燥, 降水少, 地面凋落物积累少, 大部分凋落物量在 $3 tC/hm^2$ 以下。图2 a. 东北自然植被潜在NPP分布; b. 东北凋落物量分布; c. 东北凋落物矿化速率分布; d. 东北土壤分解速率分布 (单位: $tC/hm^2 a$)

Fig.2 Spatial distribution of natural vegetation NPP (a), litter (b), litter mineralization rate (c) and soil decomposition rate (d) in Northeast China (units: $tC/hm^2 a$)

5.3 凋落物量矿化分解现状和特征 东北地区凋落物量分解进入大气约为 $3.61 \times 10^8 tC/a$, 矿化分解速率的空间分布特征 (图2c): 具有经度地带性和纬度地带性特征, 东南部凋落物分解速率高且变化大, 等值线密集, 越向西北部越低, 明显与热量、水分的梯度变化有关。东北地区的东南部地区植被类型主要为温带针阔混交林等森林和沼泽草甸, 气温高, 水分充足, 微生物活性大, 这样凋落物分解速率快, 达到 $5 tC/hm^2 a$ 以上。北部地区由于寒冷气团的影响, 温度偏低, 微生物活性低, 地表凋落物分解速率缓慢, 一般在 $2.5 \sim 3.5 tC/hm^2 a$ 之间。呼伦贝尔高平原以南和西的地区, 主要为草甸、温带草原和粮食作物等草本植物, 生产力低, 由于气温、降水偏低和偏少, 矿化速率分解较慢, 大部分低于 $2.0 tC/hm^2 a$ 。

5.4 土壤腐殖质分解现状和特征 在平衡模式下, 土壤分解速率等于凋落物腐殖化速率, 其东北地区土壤腐殖质分解进入大气部分总量约为 $1.55 \times 10^8 tC/a$ 。土壤分解速率与凋落物矿化分解速率之和就是东北地区的NPP, 而土壤分解速率的空间分布特征与凋落物矿化分解速率是相似的 (图2c、2d)。东北地区土壤分解速率特征是: 东南部高, 而且变化快, 越向西北, 土壤分解速率越低, 变化就更加平缓, 与温度、降水和蒸发空间分布特征密切相关。东南部地区温度高、水分充足, 土壤微生物活性比西北部强, 土壤腐殖质易分解。大、小兴安岭虽然原始森林植被茂盛, 土壤肥沃, 但主要受制于温度低, 土壤微生物活性低, 土壤分解速率就低。从图2c、2d可见, 东部凋落物、土壤分解速率在更大程度上受控于气温, 西部地区受控于降水因素, 表明气候因素对陆地碳循环的影响是非常重要的。

5.5 东北地区陆地碳平衡分析 模型计算表明 (图3), 在平衡状态下, 东北地区自然植被NPP等于植被年凋落物量同为 $5.16 \times 10^8 tC/a$, 模型估算的东北地表凋落物层储量为 $4.67 \times 10^8 tC$, 凋落物年矿化分解速率为 $3.61 \times 10^8 tC/a$, 凋落物年腐殖化速率为 $1.55 \times 10^8 tC/a$, 土壤年分解速率为 $1.55 \times 10^8 tC/a$ 。东北地区陆地碳库 (植被、土壤和凋落物) 总量为 $297.04 \times 10^8 tC$, 土壤碳占88.97%, 植被碳库占9.46%, 凋落物碳库占1.57%。东北地区陆地生态系统碳通量为 $17.02 \times 10^8 tC$, 其中NPP占30.31%, 年凋落物量占30.31%, 凋落物年矿化分解速率占21.23%, 凋落物年腐殖化速率为9.08%, 土壤年分解速率占9.08%。以上表明NPP、土壤碳库和凋落物碳库及其分解速率在总碳通量中所占比例较大, 对于整个碳循环来说都是很重要的。所以应该保护土壤层和林下凋落物层, 减缓碳素的自然释放。图3 东北地区平衡模式下的陆地碳循环 (单位: $\times 10^8 tC$)

Fig.3 Terrestrial carbon balance model in Northeast China

6 结论 基于气候数据的陆地碳循环平衡模型的核心问题是估算陆地生态系统的碳储量和碳通量。从整个模型来看, 净第一性生产力 (NPP) 的计算是核心。NPP反映了植物群落在自然环境条件下的生产能力, 是描述陆地生态系统碳循环及其环境特征的重要参数, 对深刻理解和研究陆地碳循环及其全球变化等都具有重要的意义。通过以上的研究, 我们认识到: 首先, 碳通量的估算是研究陆地碳循环的关键; 第二, 建立的陆地碳循环平衡模型应该是一个稳健模型, 参数的微小变化不应导致结果太敏感, 指标的选取非常重要, 需要采用更好的方法来计算碳通量, 例如机理分析和统计相结合的方法; 第三, 由于缺乏必要的实测数据和经验统计关系, 因而采用了国内外的经验统计关系, 未来应采集更多的实测数据, 对模型进一步地修正和丰富, 使之符合中国的实际情况; 第四, 遥感 (RS) 技术和数据能为模型的运行提供技术支持和更多、更详细的数据源; 第五, 基于陆地碳循环过程的动态模型的发展是进一步研究的方向。

参考文献 (References): [1] Tans P P, Fung I Y, Takahashi N P, et al. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget [J]. Science, 1990, 247: 1431-1438. [2] Ciais P, Tans P P, Trolier M, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂ [J]. Science, 1995, 296: 1098-1101. [3] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States [J]. Tellus, 1999, 51B: 414-452. [4] Hough

ton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: contributions from Land-use change [J]. Science, 1999, 285: 574-578. [5] Field C, Fung I Y. The not-so-big U.S. carbon sink [J]. Science, 1999, 285: 544-545. [6] Schimel D, Melillo J, Tian H, et al. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States [J]. Science, 2000, 287: 2004-2006. [7] Bousquet P, Ciais P, Peylin P, et al. [J]. J. Geophys. Res., 1999, 104 (D2), 26, 161. [8] Hansen J, Ruedy R, Mki Sato, et al. Global surface air temperature in 1995: Return to pre-Pinatubo level [J]. Geophysical Research Letter, 1996, 23: 1665-1668. [9] Goulden M I, Wofsy S C, Harden J W, et al. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw [J]. Science, 1998, 279: 214-217. [10] Sellers P J, Cihlar J, Apps M, et al. "Charting the Boreal Forest's Role in Global Change," EOS Transactions [R]. American Geo-physical Union, 1991, 72 (4) : 33-40. [11] GCTE. GCTE Core Research: 1993 Annual Report [R]. GCTE Office, Canberra, Australia, 1994, 135. [12] Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun et al. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (3) : 318-322. (In Chinese). [董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO₂、N₂O、CH₄ 通量的同时观测及其日变化 [J]. 科学通报, 2000, 45 (3) : 318-322.] [13] Li Zhenquan, Shi Qingwu. Geography pandect of Northeast economic region in China [M]. Changchun: Press of Northeast Normal University, 1988, 1-530. (In Chinese) [李振泉, 石庆武主编. 东北经济区地理总论 [M]. 长春: 东北师范大学, 1988, 1-530.] [14] Wang Yexu. Study on regional carbon cycle of forest ecosystem in China [D]. Commission for Integrated Survey of Natural Resources, CAS, Beijing, 1999. (In Chinese). [汪业勛. 中国森林生态系统区域碳循环研究 [D]. 中国科学院自然资源综合考察委员会理学博士学位论文, 1999.] [15] Li Minghong, Yu Mingjian, Chen Qichang et al. Dynamics of carbon in the evergreen broadleaved forest dominated by Cyclobalanopsis Glauca in South-east China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16 (6) : 313-320. (In Chinese). [李铭红, 于明坚, 陈启常等. 青冈常绿阔叶林的碳素动态 [J]. 生态学报, 1996, 16 (4) : 313-320.] [16] Wu Zhongmin, Zeng Qingbo, Li Yide et al. A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Acta Phytoecologica Sinica. 1997, 21 (5) : 416-423 (in Chinese). [吴仲民, 曾庆波, 李意德等. 尖峰岭热带森林土壤C储量 and CO₂排放量的初步研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21 (5) : 416-423.] [17] Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. Monitoring and relevant process of greenhouse gas concentration and emission [M]. Chinese Environment Science Publishing House: 1996, 109-128 (In Chinese). [方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 温室气体浓度和排放监测及相关过程 (王庚辰, 温玉璞, 主编) [M]. 中国环境科学出版社, 1996, 129-139.] [18] Schroeder, Paul, Lew Ladd. Slowing the increase of atmospheric carbon dioxide: a biological approach [J]. Climatic Change, 1991, 19: 283-290. [19] Olson J S, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems [M]. Oak Ridge National Laboratory, 1983, P. 180. Oak Ridge, Tennessee. [20] Knigge W, Schulz H. Grundriss Der Forstbenutzung. Verlag Paul Parey [M]. Hamburg Und Berlin, 1966. [21] De Moraes J F L, Seyler F, Cerri C C, et al. Land cover mapping and carbon pools estimates in Rondonia, Brazil [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (5) : 921-934. [22] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes [J]. Science, 1984, 223: 1290-1293. [23] Fearnside P M. Greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon [A]. In Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Seven Developing Countries [C], edited by W. Makundi and J. Sathaye (Washington D.C.: U.S. Department of Energy), 1992, 1-73. [24] Li Yide, Wu Zhongmin, Zeng Qingbo et al. Carbon reservoir and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18 (4) : 371-378 (In Chinese). [李意德, 吴仲民, 曾庆波等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究 [J]. 生态学报, 1998, 18 (4) : 371-378.] [25] Li Yede, Zeng Qingbo, Wu Zhongmin et al. Estimation of carbon storage in tropical natural forest vegetation in China [J]. Forest Research, 1998, 11 (2) : 156-162. (In Chinese) [李意德, 曾庆波, 吴仲民等. 我国热带天然林植被C贮存量的估算 [J]. 林业科学研究, 1998, 11 (2) : 156-162.] [26] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget [J]. Tellus, 1995, 47B, 310-319. [27] Peng Changhui, Michael J. Apps. Contribution of china to the global carbon cycle since the Last Glacial Maximum reconstruction from palaeovegetation maps and an empirical biosphere model [J]. Tellus, 1997, 49B: 393-408. [28] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Luo Chengwen. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China [J]. Progress in Geography, 1999, 18 (3) : 238-244 (In Chinese). [王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨 [J]. 地理科学进展, 1999, 18 (3) : 238-244.] [29] Krankian O N, Harmon M E, Winjum J K. Carbon storage and sequestration in russian forest factors [J]. AMBIO, 1996, 25 (4) : 284-288. [30] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li kerang et al. Study on spatial distribution character analysis of the soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographic Sinica, 2000, 55 (5) : 533-544 (In Chinese). [王绍强, 周成虎, 李克让等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. 地理学报, 2000, 55 (5) : 533-544.] [31] Moore III B H, Braswell Jr. Planetary metabolism: an understanding of carbon cycle [J]. AMBIO, 1994, 23 (1) : 4-12. [32] Tatyana P. Kolchugina, Ted S. Vinson. Role of Russian forests in global carbon balance [J]. AMBIO, 1995, 24 (5) : 258-264. [33] Walker B H. 陆地生态系统对全球变化从景观到区域范围的效应 [J]. AMBIO, 1994, 23 (1) : 67-

73. [34] King A W, Post W M, Wullschlegler S D. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO₂ [J]. *Climatic Change*, 1997, 35:199-227. [35] Zhu Zhihui. Climatic coupling between natural vegetational productivity function and zonality structure in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51 (supplement):66-72 (In Chinese). [朱志辉. 我国自然植被生产力功能和地带性结构的气候耦合 [J]. *地理学报*, 1996, 51 (增刊):66-72.] [36] Li Diqiang, Sun Chengyong, Zhang Xinshi. Modelling the net primary productivity of the natural potential vegetation in China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40 (6):560-566. (In Chinese). [李迪强, 孙成永, 张新时. 中国潜在植被生产力的分布与模拟 [J]. *植物学报*, 1998, 40 (6):560-566.] [37] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. A natural vegetation NPP model [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19 (3):193-200. (In Chinese). [周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探 [J]. *植物生态学报*, 1995, 19 (3):193-200.] [38] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on natural vegetation NPP in China under global climate change [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20:11-19. (In Chinese). [周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被净第一性生产力研究 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20:11-19.] [39] Kwon O-Yul, Schnoor J L. Simple global carbon model: the atmosphere-terrestrial biosphere-ocean interaction [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8 (3):295-305. [40] Hao Yuxiang. *Soil Microbiology* [M]. Beijing: Science Press, 1982, 1-167. (In Chinese). [郝余祥. *土壤微生物* [J]. 北京: 科学出版社, 1982, 1-167.] [41] M. Alexander. *Soil Microbiology Introduction* [M]. Beijing: Science Press, 1983, 1-285 (In Chinese). [M. 亚历山大. *土壤微生物导论* [M]. 北京, 科学出版社, 1983, 1-285.] [42] Huang Zhiquan, Liao Liping, Gao Hong et al. Decomposition process of Chinese fir stump roots and changes of nutrient concentration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (1):40-42. (In Chinese). [黄志群, 廖利平, 高洪等. 杉木根桩分解过程及几种主要营养元素的变化 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11 (1):40-42.] [43] Raich J W, Scheliesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44B:81-99. Simulation Analyses of Terrestrial Carbon Cycle Balance Model in Northeast China WANG Shao-qiang¹, ZHOU Cheng-hu¹, LIU Ji-yuan¹, LI Ke-rang¹, YANG Xiao-mei² (1. The State Key Lab of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 2. Earth Observation Research Center, National Space Development Agency of Japan) Abstract: Key Words:

关键词: 东北地区; 陆地碳循环; 碳平衡; 模型