

气候变化对净生态系统生产力的影响

周 涛¹, 史培军¹, 孙 睿², 王绍强³

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875;

2. 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于生态系统碳平衡方程以及净第一性生产力 (NPP) 和气候资料反演了 1km 分辨率的中国土壤异养呼吸系数 (a_{ij}), 结果表明: a_{ij} 总体上是东南和东北地区高, 西北地区低; 和 NPP 相比, 东南沿海和华南的大部分地区的 a_{ij} 值并不大, 而在东北北部和东部有大面积的 a_{ij} 高值区。这表明当气候适宜时, 这些地区的土壤异养呼吸将具有较大的增长潜力。在假定气温平均升高 1.5 °C, 降水平均增加 5% 的情景下, 对中国净生态系统生产力 (NEP) 的研究表明: 生态系统与大气的碳通量都有所增加, 其中 NPP 平均增加了 6.2%, 土壤异养呼吸平均增加了 5.5%, 不同生态系统的 NEP 存在很大的差异, 其中最稳定最有潜力的自然生态系统的碳汇是北方落叶阔叶林; 对人工植被而言, 最多最稳定的碳汇是一年一熟作物; 而双季稻连作喜温作物和单 (双) 季稻连作喜凉作物生态系统起着较稳定的碳源作用。

关键词: 土壤异养呼吸; 净初级生产量; 净生态系统生产力; 气候变化; 中国

土壤异养呼吸是指土壤有机质在土壤微生物参与下的矿质化过程, 它是土壤向大气排放 CO₂ 的主要途径之一。由于人类燃烧化石燃料及土地利用方式的改变, 释放了大量的 CO₂ 到大气中, 从而引起全球和区域气候的变化^[1], 反过来气候变化又影响着陆地的碳循环过程^[2]。土壤碳库是陆地生态系统的重要组成部分, 与大气进行交换的土壤活性碳大约占生态系统碳的 2/3^[3]。在大气-植被-土壤碳循环过程中, 土壤呼吸的微小变化将加速未来气候的变化^[4]。在自然环境下, 土壤碳储量的变化取决于相互联系的净第一性生产力 (NPP) 与土壤有机质分解速度的变化^[5]。气候变暖一方面潜在刺激了营养物质的矿质化和生长季节的长度, 这会增大植物的生长和碳的固定^[6], 另一方面气候变暖会加速生物圈的新陈代谢, 从而导致更多的温室气体释放到大气中^[2,7]。未来土壤到底是“源”还是“汇”, 受到自然和人类活动的多种限制, 因而存在很大的不确定性。国内外学者对中国生态系统 NPP 分布的研究取得了相当大的进展, 有简单的统计模型^[8], 也有基于机理的过程模型^[9-11]。但关于土壤异养呼吸的空间分布的研究比较少, 现有的模型对土壤属性的空间差异考虑得很少。事实上, 影响土壤异养呼吸的因素很多, 除气候因素外, 土壤的某些属性对异养呼吸的影响也相当大^[12], 所以如果忽略土壤理化性质的差异, 必然会降低土壤异养呼吸模型的效果。综观土壤异养呼吸的影响因素, 它可以分为快变量 (气候因子) 与慢变量 (土壤属性) 两类。当气候条件相同时, 土壤异养呼吸的差异主要是由土壤属性的差异造成的。因此, 作者利用生态系统碳平衡方程反演了土壤异养呼吸系数 (温度为 0 °C 且无水分胁迫下的土壤异养呼吸量) 的空间分布, 并在此基础上研究了气候变化后, 中国陆地生态系统中土壤异养呼吸和 NPP 的空间变化, 从而得出了不同生态系统的净生态系统生产力 (NEP) 的变化。

收稿日期: 2003-06-10; 修订日期: 2003-09-12

基金项目: 国家自然科学基金主任基金项目 (40352004); 自然科学基金面上项目 (40371001) [Foundation: Director Fund of Natural Science Foundation of China, No. 40352004; Natural Science Foundation of China, No. 40371001]

作者简介: 周涛 (1972-), 男, 博士, 湖南冷水江人, 主要从事土地利用 / 土地覆被变化与碳循环方面的研究。
Email: zhoutao13@263.net

1 土壤异养呼吸的研究现状

土壤呼吸主要包括植物根系呼吸量与土壤异养呼吸量,此外还有小部分土壤动物呼吸量和化学氧化量^[13]。根系呼吸的贡献率随生态系统的不同差异很大,而且往往难以和异养呼吸量完全区分^[14]。由于净生态系统生产力(NEP)等于NPP与生态系统的异养呼吸量之差,而在估算NPP时已经扣除了植物根系的呼吸量,因此,如果不能将植物根系呼吸量从土壤呼吸中区分开来,这必然会给NEP的计算增添了难度和不确定性,因此,通过模型直接获得土壤的异养呼吸量在确定生态系统的源与汇方面具有更大的价值。

除气候因素外,土壤理化性质同样影响着土壤异养呼吸^[12]。但由于土壤属性的空间差异显著,土壤异养呼吸模型主要考虑温度和水分条件的影响。现有的土壤呼吸模型主要有两种形式:其一是Van't Hoff模型,其二是Lloyd-Taylor模型^[15]。

其中Van't Hoff模型的形式为:
$$R_H = a \times e^{b \times T} \quad (1)$$

式中: R_H 为土壤异养呼吸量, T 为土壤温度, a 为土壤异养呼吸系数,它代表的是土壤温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的土壤异养呼吸量, b 为温度敏感性系数^[16]。由于大气温度波动通常大于土壤温度,因此当土壤异养呼吸模型采用气温作为指标时,系数 b 的取值相应变小^[13]。

Lloyd-Taylor方程的形式为:
$$R_H = A \times e^{[-E_0/(T - T_0)]} \quad (2)$$

式中: R_H 为土壤异养呼吸量, E_0 为拟合参数($^{\circ}\text{K}$), T_0 为拟合的温度值($^{\circ}\text{K}$), T 为土壤温度, A 为与研究站点有关的特定因子,它反映的是没有被温度所解释的变异^[17]。

除此之外,其他学者根据研究站点或区域的实测数据特性,得出了其他的土壤异养呼吸模型,这些模型的研究范围有基于立地的,也有基于全球和区域的^[12, 16, 18-21]。从现有的模型效果来看,通常以立地或小区域为研究对象的土壤异养呼吸模型的效果要优于全球或大区域的模型。造成这种差异的一个重要原因在于,当采用Van't Hoff方程时,其土壤异养呼吸系数 a 和温度敏感性系数 b 都是当成常数,而从物理意义上来看, a 代表的是温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤的异养呼吸量,因此,土壤属性的空间差异使得土壤异养呼吸系数 a 的值是一个随空间而变化的变量(用 a_{ij} 表示,其中 i, j 代表空间经纬度)。当研究区土壤属性差异小时, a_{ij} 可以看成常数,因此模型的效果较好(具有较大的测定系数 R^2),如有的模型的 R^2 甚至达到 0.97 ^[22]。但土壤属性差异大时,把 a_{ij} 当成常量来处理必然会降低模型的效果,如Raich模型的 R^2 在 0.4 左右^[18]。如果事先获得土壤异养呼吸系数 a_{ij} 的空间分布,再采用式(3)进行计算,可以消除土壤属性差异造成的影响,从而提高土壤异养呼吸模型的效果。但由于影响土壤异养呼吸系数 a_{ij} 的因素非常复杂,其空间差异大,要通过实测获得有相当的困难,只有通过模型来进行估算。

$$R_H = a_{ij} \times e^{b \times T} \quad (3)$$

当大气—植被—土壤碳交换处于平衡状态时,根据生态系统的碳平衡规律,可以通过碳循环平衡方程间接计算出土壤异养呼吸系数 a_{ij} 的分布。

2 土壤异养呼吸系数的区域分布

2.1 陆地生态系统碳循环方程

大气—植被—土壤碳处在相互联系的动态变化中,植被通过光合作用固定大气中的碳,形成净第一性生产力(NPP),从而增加了植被的生物量,其中一部分生物量又以凋落物的形式脱离生物体,凋落物在细菌和微生物的作用下进行矿质化过程和腐殖化过程,一部分凋落物通过矿质化过程向大气释放 CO_2 ,一部分凋落物通过腐殖化过程转为土壤腐殖质,土壤腐殖质又通过呼吸作用释放 CO_2 到大气中^[23]。其中凋落物矿质化过程和土

壤腐殖质的分解过程向大气释放的碳的速率即为土壤异养呼吸速率 (图 1)。

根据陆地生态植被、凋落物、土壤碳的动态变化规律, 在不考虑自然和人类干扰事件的情况下, 生物量方程、凋落物方程、土壤腐殖质方程分别为:

$$dB / dt = NPP - f_{BL} \quad (4)$$

式中: B 为生物量 ($g C/m^2$), f_{BL} 为凋落速率 ($g C/m^2 \cdot a$), NPP 为净光合作用速率 ($g C/m^2 \cdot a$)。根据光能利用率模型, NPP 可以表述为温度 (T)、土壤水分 (β)、到达地表的光合有效辐射 (PAR)、植物吸收的光合有效辐射比例 ($FPAR$)、植被呼吸消耗 (R) 的函数, 而 $FPAR$ 由植被指数 $NDVI$ 来确定^[9]:

$$NPP = c_g^* \times f_1(T) \times f_2(\beta) \times PAR \times FPAR - R \quad (5)$$

凋落速率 f_{BL} 同生物量 B 呈线性关系^[24], 其凋落速率系数与植被类型有关:

$$f_{BL} = k_{BL} \times B \quad (6)$$

由于陆地表层生物量中植物占有绝大多数, 所以凋落物主要由植物的凋落物组成, 它是形成土壤腐殖质及进行矿质化的物质基础, 凋落物方程为:

$$dL / dt = f_{BL} - f_{Lh} - R_L \quad (7)$$

式中: L 为凋落物量 ($g C/m^2$), f_{Lh} , R_L 分别为凋落物的腐殖化速率及凋落物矿质化速率 ($gC/m^2 \cdot a$), 它们是温度 (T) 和土壤湿度 (β) 的函数, 并且受凋落物组成等因素有关^[23, 25], 它们可以表示为:

$$f_{Lh} = \sigma_1 \times f(T) \times f(\beta) \times L \quad (8)$$

$$R_L = \sigma_2 \times f(T) \times f(\beta) \times L \quad (9)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为腐殖化速率系数和矿质化速率系数, 它们的比值由植被类型来决定, 如式 (10) 所示, 其中 K_v 表示凋落物中矿质化所占的比例, 在相同植被类型下为常数, K_v 在热带雨林和季雨林中最小, 为 0.65, 在热荒漠和半荒漠中最大, 为 0.75, 而对于中国大部分植被类型其值为 0.70^[26]。

$$\sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_2) = K_v \quad (10)$$

土壤腐殖质的变化取决于凋落物的腐殖化速率和腐殖质的分解速率:

$$dS / dt = f_{Lh} - R_h \quad (11)$$

式中: R_h 为土壤腐殖质分解速率。当大气—植被—土壤处在平衡状态时, 植被和土壤碳保持稳定, 由式 (4) ~ (11) 得:

$$NPP \times (1 - K_v) = R_h \quad (12)$$

$$NPP \times K_v = R_L$$

$$NPP = R_H$$

考虑到影响土壤异养呼吸速率的土壤微生物数量受水分条件的影响, 而中国水分条件又存在巨大的空间差异性, 因此作者参照 CENTURY 模型, 将水分的限制加入方程中, 改善后的土壤异养呼吸模型为:

$$R_H = a_{ij} \times e^{(b \times T)} \times y \quad (13)$$

$$y = 1 / (1 + 30.0 \times e^{-8.5 \times x}) \quad (14)$$

$$x = PPT / PET \quad (15)$$

式中: a_{ij} 为土壤异养呼吸系数, PPT 为年降水量, PET 为年潜在蒸散量, y 为水分对土壤

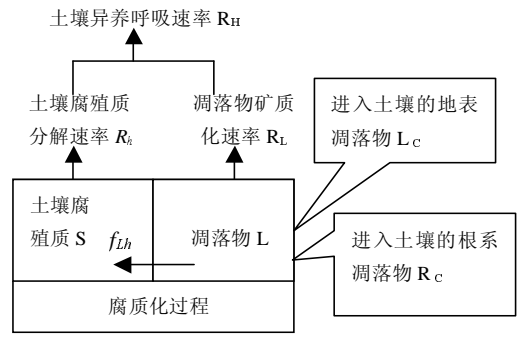


图 1 生态系统中土壤有机碳的动态变化

Fig. 1 Dynamics of organic carbon in soil

异养呼吸的限制^[27], 介于 [0.03, 1) 间, 当降水量等于潜在蒸散量时, $y \approx 1$, 水分对异养呼吸没有限制; 当降水量小于潜在蒸散量时, $y < 1$, 异养呼吸受温度和降水共同决定。

2.2 中国土壤异养呼吸系数的空间分布

当大气-植被-土壤碳循环处在平衡状态时, 利用式 (12)~(15) 并结合 NPP 、降水、温度资料、植被分布图等可以反演土壤异养呼吸系数 a_{ij} 的空间分布, a_{ij} 的计算公式为:

$$a_{ij} = NPP / (e^{(b \times T)} \times y) \quad (16)$$

当大气-植被-土壤碳循环不平衡时, 假设生态系统净碳通量为 Δ , 则它们的关系为:

$$\Delta = NPP - R_H \quad (17)$$

由式 (13)、式 (17) 得到非平衡状态下的土壤异养呼吸系数 a'_{ij} 的计算公式为:

$$a'_{ij} = (NPP - \Delta) / (e^{(b \times T)} \times y) \quad (18)$$

当大气-植被-土壤碳循环不平衡时, 如采用平衡状态下的计算公式, 则误差率 $|Er|$ 为:

$$|Er| = \left| \frac{a'_{ij} - a_{ij}}{a_{ij}} \right| = \frac{|\Delta|}{NPP} \quad (19)$$

与 NPP 固定的碳及土壤异养呼吸释放的碳通量相比, 生态系统与大气之间的净碳通量 Δ 是很小的量^[28], 因此, 在计算土壤异养呼吸系数时, 误差率是小量, 不会因为这种误差而影响到土壤异养呼吸系数的空间分布规律。考虑到中国环境的复杂性及实测土壤异养呼吸数据的匮乏, 采用生态系统碳平衡方程来估算土壤异养呼吸系数不失为一种较好的选择。作者假设 1982~1999 年的多年平均 NPP 与多年平均土壤异养呼吸量处于平衡状态。采用的 NPP 资料是 1992 年 4 月~1993 年 3 月的年 NPP 量, 是利用地球资源观测系统数据中心 (EROS-EDC) 提供的每月的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率 NOAA/AVHRR NDVI 数据集, 结合植被分类图、土壤质地图、全国 658 个月气象资料, 采用光能利用率与过程混合模型计算得到^[9]。由于受气候因子年际变化的影响, 单个年份的 NPP 与多年平均 NPP 有一定的差别, 考虑到 NDVI 与 NPP 的关系密切, 因此在获取多年平均 NPP 时, 本文结合 EROS 数据中心提供的 1982~1999 年间 8 km 分辨率的每旬 AVHRR/NDVI 数据, 对 NPP 进行修正, 其计算式为:

$$NPP_{avg} = \left(1 + W_i \times \frac{NDVI_{92} - NDVI_{avg}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) \times NPP_{92} \quad (20)$$

式中: NPP_{avg} 为 1982~1999 年的多年平均 NPP , NPP_{92} 为 1992 年 4 月~1993 年 3 月一年的 NPP , $NDVI_{92}$ 为 1992 年生长季节 (4 月~10 月) 的 7 个月的平均 $NDVI$, $NDVI_{avg}$ 为 1982~1999 年生长季节的多年平均 $NDVI$, $NDVI_{max}$ 为 1982~1999 年生长季节的年平均 $NDVI$ 的最大值, $NDVI_{min}$ 为 1982~1999 年生长季节的年平均 $NDVI$ 的最小值, W_i 为第 i 种植被类型在 1982~1999 年的 NPP 的波动的幅度, 它的计算式为:

$$W_i = (NPP_{i \max} - NPP_{i \min}) / NPP_{i \text{avg}} \quad (21)$$

式中: $NPP_{i \max}$ 为第 i 种植被在 1982~1999 年的最大的年 NPP , $NPP_{i \min}$ 为第 i 种植被在 1982~1999 年的最小的年 NPP , $NPP_{i \text{avg}}$ 为第 i 种植被在 1982~1999 年的多年平均 NPP 。根据已有 NPP 年际变化的研究^[29], 确定了不同植被类型的 NPP 年际波动幅度 W_i (表 1)。

土壤异养呼吸系数 a_{ij} 计

表 1 主要植被类型 NPP 年际波动幅度

Tab. 1 The NPP interannual variability of different vegetations

植被类型	波动幅度 (W_i)	植被类型	波动幅度 (W_i)
常绿阔叶林	0.39	温带草甸、草原	0.33
落叶阔叶林	0.32	稀树草原	0.35
针阔混交林	0.33	高寒植被	0.36
常绿针叶林	0.36	荒漠	0.50
落叶针叶林	0.46	耕作植被	0.36
矮林、灌丛	0.37		

算流程如图 2，其具体步骤为：

(1) 在 Arc/Info 中将 658 个气象站点的经纬度坐标作投影变换，使之成为与 NPP 具有相同的投影(兰勃特投影)，然后用 Kriging 对气象站点的 1982~1999 年多年平均温度和多年平均降水量进行空间插值，格点的大小为 1

km，并由温度和降水插值图来估算土壤异养呼吸的水分限制因素 y 的分布图；(2) 将 1:

400 万中国植被图作投影变换，转换成兰勃特投影，根据植被类型生成 1 km 分辨率的 W_i 分布图(图 3)；同时将植被图划分为人工植被类型和自然植被类型，并生成温度敏感性系数 b 分布图(图 4)，其中自然植被下 b 的取值为 0.0459，人工植被下 b 的取值为 0.0306^[18]；(3) 将 1982~1999 年各年生长季节的 8 km 分辨率的 NDVI 重采样到 1 km，并结合 W_i 分布图和 1992 年 1 km 分辨率的 NPP 分布图^[9]，计算 1982~1999 年多年平均 NPP；(4) 利用式 12~15 及式 20~21，根据多年平均 NPP 和气候数据计算土壤异养呼吸系数 a_{ij} 的空间分布(图 5)，当 $NPP = 0$ 时，令 $a_{ij} = 0$ 。

a_{ij} 值的空间分布与 NPP 的空间分布有相同点，但也存在差异。其共同点表现为它们在总体上都是东南地区比较高，西北地区比较低。其差异表现在，东南沿海和华南的大部分地区的 a_{ij} 值并没有像该地区的 NPP 那样大，相反在东北北部和东北东部有大面积的 a_{ij} 高值区。此外，新疆塔里木河沿岸的绿洲带也有比较高的 a_{ij} 值。这表明当气候适宜时，这些地区土壤异养呼吸具有较大增长潜力。由于 a_{ij}

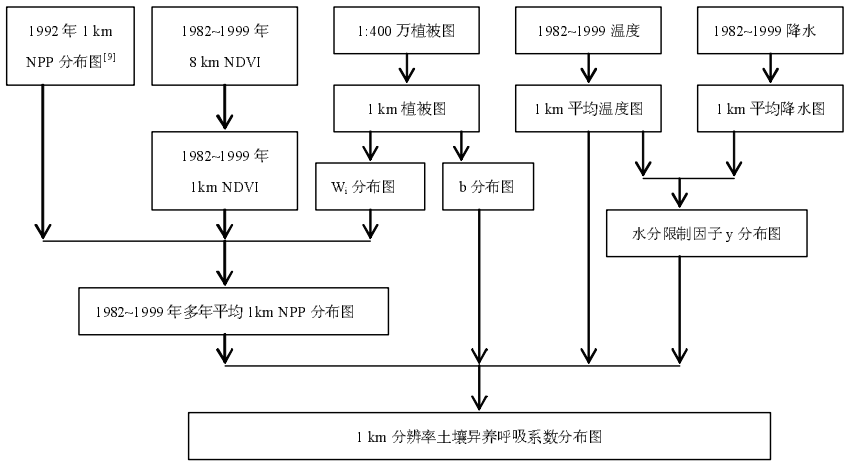


图 2 土壤异养呼吸系数 a_{ij} 计算流程

Fig. 2 Flow chart for calculating the coefficient of soil heterotrophic respiration in China

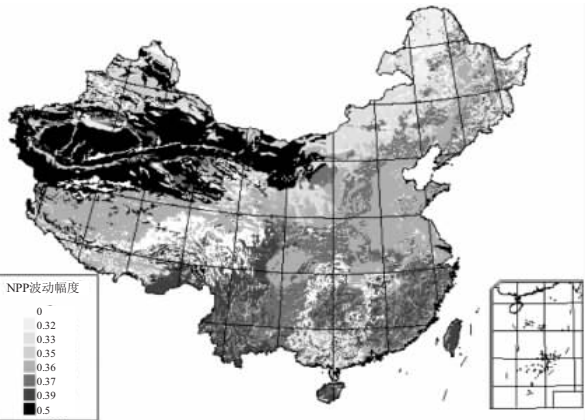


图 3 NPP 波动幅度 W_i 分布图

Fig. 3 Fluctuant range map of NPP

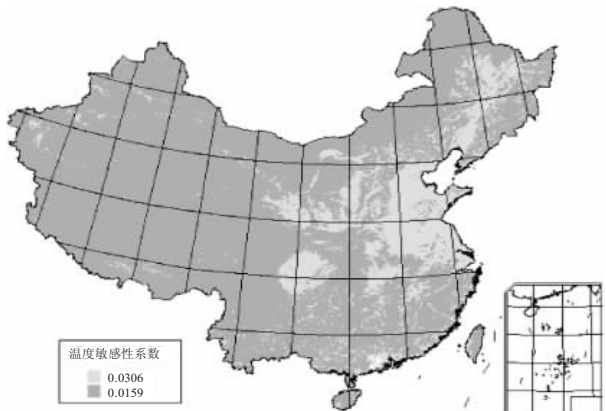


图 4 温度敏感性系数 b 分布图

Fig. 4 Map of temperature sensitivity coefficient

值反映的是气温为零度、没有水分胁迫下的土壤异养呼吸量,实际土壤异养呼吸量还取决于当地实际温度和降水条件。在中国东北和西北地区,实际土壤异养呼吸量正受到温度和水的限制,使其实际异养呼吸量小于东南地区。

3 陆地生态系统碳循环对气候变化的响应

不少学者研究了气候变化对中国生态系统净第一性生产力的影响。总体上 NPP 随气候变暖有所增加。由于土壤异养呼吸也随气候变化而变化,而在这方面的研究较少,因此很难确定气候变化后中国陆地生态系统与大气碳的净交换变化,即碳“源”与“汇”的变化。为研究气候变暖后中国陆地生态系统净碳通量的变化并与已有的 NPP 预测结果比较,作者在同样的气候变化情景下计算了土壤异养呼吸的变化,即假设全国气温升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 降水平均增加 5% 的情形下^[30], 计算气候变化后土壤异养呼吸的变化量和变化百分比如(图 6、7)。

气候变化后土壤异养呼吸释放碳的绝对量和相对量的大小与 NPP 的变化具有相似性,表现在:绝大部分地区的土壤异养呼吸释放的碳有所增加,它的变化与 NPP 的变化具有较大的正相关。气候变化后土壤异养呼吸量降低的地区主要在西北和华北干旱地区。

表 2 列出了气候变化后中国不同植被类型下土壤异养呼吸与 NPP 的比较。从全国看,生态系统向大气释放的碳的增量小于吸收碳的增量,每年增加的净吸收碳约为 $1.86 \times 10^7\text{ t}$ 。如果以当前中国森林每年的净碳吸收量 0.022 PgC 为参考^[31], 气候变化导致的生态系统每年净碳吸收量的增加约占当前森林净碳吸收量的 85% , 因此气候变化后中国生态系统的碳汇的变化是相当显著的。对自然植被而言,单位面积上落叶针叶林的净吸收量增长

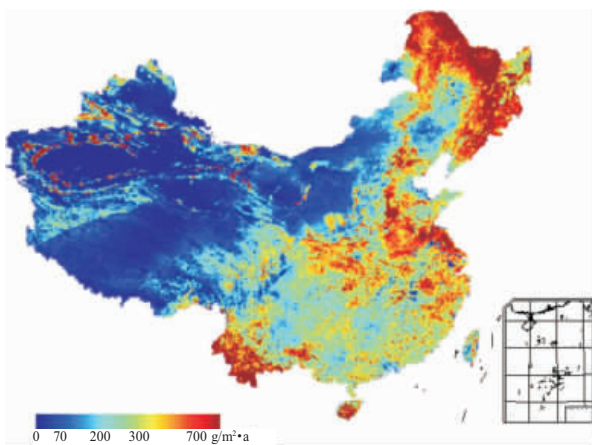


图 5 中国土壤异养呼吸系数 α_h 的空间分布

Fig. 5 The coefficient of soil heterotrophic respiration in China

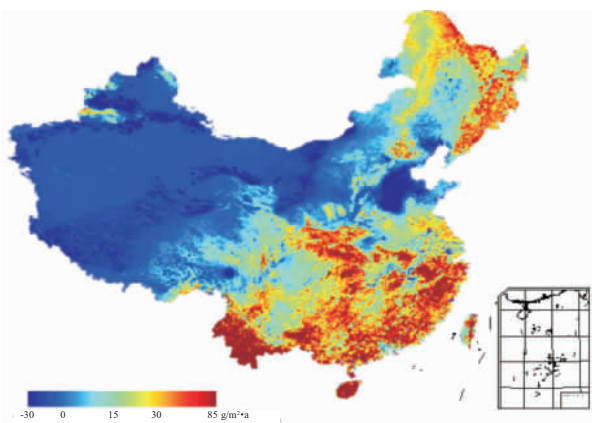


图 6 气候变化后土壤异养呼吸绝对变化量

Fig. 6 The variation of soil heterotrophic respiration in changed climate factors

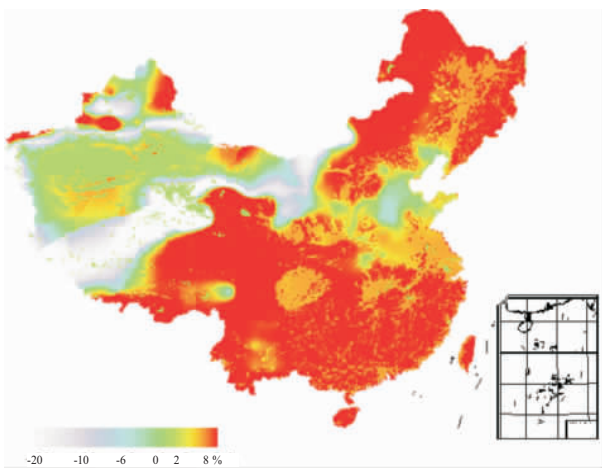


图 7 气候变化后土壤异养呼吸相对变化量 (%)

Fig. 7 The relative variation (%) of soil heterotrophic respiration in changed climate factors

最大, 达到 $17.15 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$, 而且其区域差异最小, 是最为稳定的碳“汇”。常绿阔叶林、常绿灌丛、常绿针叶林也起着碳汇的作用, 但其碳汇的强度都小于落叶针叶林, 而区域差异大于落叶针叶林。草原的平均净碳吸收量增长得很大, 达到了 $9.67 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$, 仅次于落叶针叶林, 但区域差异相当大, 其差异系数达到 193%。对人工植

表 2 气温升高 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 降水增加 5% 时中国不同生态系统 NEP 的比较Tab. 2 NEP change with climate change, $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ higher in temperature and 5% more in precipitation

植被类型	$\text{NPP}_0^{\text{**}}$ ($\text{gC/m}^2\text{a}$)	$\text{NPP}_1^{\text{**}}$ ($\text{gC/m}^2\text{a}$)	$\Delta \text{NPP}^{\text{**}}$ ($\text{gC/m}^2\text{a}$)	ΔR_{H} ($\text{gC/m}^2\text{a}$)	ΔR_{H} (%)	$\text{Cv}(\Delta R_{\text{H}})$ (%)	$\Delta R_{\text{H}} - \Delta \text{NPP}$ ($\text{gC/m}^2\text{a}$)
落叶针叶林	419.86	466.08	46.22	29.07	6.92	33	-17.15
针阔叶混交林	402.89	437.44	34.55	40.67	10.09	15	6.12
落叶阔叶林	459.70	494.21	34.51	37.43	8.14	30	2.92
常绿针叶林	529.40	566.62	37.22	34.03	6.43	60	-3.19
常绿阔叶林	971.90	1029.28	57.38	52.10	5.36	62	-5.28
落叶灌丛	290.17	313.85	23.68	23.27	8.02	76	-0.41
常绿灌丛	555.42	574.44	19.02	14.73	2.65	99	-4.29
草原	116.03	131.23	15.20	5.53	4.77	193	-9.67
一年一熟作物	313.31	336.37	23.06	11.33	3.62	106	-11.73
一年两熟或两年三熟作物	396.36	410.77	14.41	6.33	1.60	220	-8.08
单(双)季稻连作喜凉作物	496.87	509.27	12.40	20.97	4.22	37	8.57
双季稻连作喜温作物	574.56	584.15	9.59	28.53	4.97	54	18.94
荒漠	15.74	18.56	2.82	-0.43	-2.75	-585	-3.25
全国	276.88	294.05	17.17	15.23	5.50	134	-1.94

注: *资料来源, 孙睿^[30]

(1) NPP_0 为当前气候条件下的 NPP; NPP_1 为气候变化后的 NPP; ΔNPP 为气候变化后 NPP 的绝对变化量; (2) ΔR_{H} 为气候变化后土壤异养呼吸的绝对变化量和相对变化率; $\text{Cv}(\Delta R_{\text{H}})$ 为差异系数, $\text{Cv}(\Delta R_{\text{H}}) = \sigma / \text{Mean}(\Delta R_{\text{H}}) \times 100\%$, σ 为 R_{H} 的标准差; (3) $\Delta R_{\text{H}} - \Delta \text{NPP}$ 为净生态系统生产力的相反数, 负值表示碳从大气流向生态系统, 即生态系统是碳“汇”, 正值表示陆地生态系统是碳“源”

被而言, 气候变化后吸收碳增长最多最稳定的是一年一熟作物, 其吸收的碳增长了 $11.73 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$, 但其区域差异较落叶针叶林和常绿阔叶林等森林要大。在人工植被中, 双季稻连作喜温作物和单(双)季稻连作喜凉作物生态系统起着碳源的作用, 生态系统向大气释放的碳大于它们固定的碳, 而且它们的区域差异较小, 是一个较稳定的碳源, 双季稻连作喜温作物的碳源作用最明显, 达到了 $18.94 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$ 。

4 结论与讨论

采用遥感与生态系统碳平衡方程相结合的方法可以有效地反演土壤异养呼吸系数的空间分布, 进而提高土壤异养呼吸模型的预测精度。基于中国生态系统碳平衡方程以及 NPP 资料、气候资料反演的 1 km 分辨率的土壤异养呼吸系数 (a_{ij}) 的分布表明, a_{ij} 总体上是东南地区高, 西北地区低, 与 NPP 相比东南沿海和华南大部分地区的 a_{ij} 值并不大, 而在东北北部和东部有大面积的 a_{ij} 高值区。此外, 新疆塔里木河沿岸的绿洲带也具有比较高的 a_{ij} 值。当气候适宜时, 这些地区的土壤异养呼吸将具有较大增长潜力。在获取土壤异养呼吸系数空间分布的基础上, 利用改善后的土壤异养呼吸模型估算了气温平均升高 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 降水平均增加 5% 的情景下, 中国土壤异养呼吸量的变化, 并与相同气候变化情景下 NPP 的变化进行比较, 从而获得了气候变化后中国净生态系统生产力 (NEP) 变化的空间分布。结果表明, 随着气候变化, NPP 与土壤异养呼吸量都有所增加, 其中 NPP 平均增加了 6.2%, 土壤异养呼吸平均增加了 5.5%。因此, 总体上气候变化后将加强生态系统的碳汇趋势。另外, 气候变化后中国不同陆地生态系统的 NEP 存在很大的差异。最稳定最有潜力的自然生态系统的碳汇是北方的落叶针叶林。对人工植被而言, 最多最稳定的碳汇是一年一熟作物。而双季稻连作喜温作物和单(双)季稻连作喜凉作物生态系统起着较稳定的碳源作用。

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 1-896.
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [4] Rustad L. Matter of time on prairie. *Nature*, 2001, 413: 578-579.
- [5] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1997, 94: 8284-8291.
- [6] Schimel D S et al. Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling. *Global Biogeochemical. Cycle*, 1996, 10: 677-692.
- [7] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.*, 1994, 8: 315-323.
- [8] Li Diqiang. Modelling the net primary productivity of the natural potential vegetation in China. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(6): 560-566. [李迪强. 中国潜在植被生产力的分布与模拟. *植物学报*, 1998, 40(6): 560-566.]
- [9] Sun Rui, Zhu Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36-45. [孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被第一性生产力及季节变化研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 36-45.]
- [10] Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608. [朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型模拟估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.]
- [11] Yu Mei, Gao Qiong, Xu Hongmei et al. Response of vegetation distribution and primary production of the terrestrial ecosystems of China to climatic change. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 281-293. [喻梅, 高琼, 许红梅等, 刘颖慧. 中国陆地生态系统植被结构和净第一性生产力对未来气候变化响应. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 281-293.]
- [12] Fang Jingyun, Liu Shaohui, Zhao Kun. Factors affecting soil respiration in reference with temperature's role in the global scale. *Chinese Geographical Science*, 1998, 8(3): 246-255.
- [13] Raich J W, Schelesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [14] Blanke M M, Barritt, B H, Kappel F. Contribution of soil respiration to the carbon balance of an apple orchard. *Acta Hort.*, 1997, 451: 337-344.
- [15] Leiros M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 327-335.
- [16] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [17] Savage K E, Davidson E A. Interannual variation of soil respiration in two New England forests. *Global Biogeochemical Cycle*, 2001, 15(2): 337-350.
- [18] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soil. *Global Biogeochemical Cycle*, 1995, 9(1): 23-36.
- [19] Fernandez I J. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and harvest. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1993, 57: 1115-1121.
- [20] Buyanovsky G A. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Soc. Am. J.*, 1986, 50: 338-344.
- [21] Liu Shaohui, Fang Jingyun. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2). [刘绍辉, 方精云. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22(2).]
- [22] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [23] Zhou Tao, Yi Chuixiang, Shi Peijun et al. A feedback mechanism research on the carbon cycle and temperature of terrestrial surface system. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 45-53. [周涛, 仪垂祥, 史培军等. 陆地表层碳循环与温度反馈机制研究. *地理研究*, 2002, 21(1): 45-53.]
- [24] King A W, Post W M, Wullschlegler S D. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO₂. *Climate Change*, 1997, 35: 199-227.
- [25] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Liu Jiyuan et al. Simulation analyses of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 390-400. [王绍强, 周成虎, 刘纪远等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. *地理学报*, 2001, 56(4): 390-400.]
- [26] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 1995, 47B: 310-319.
- [27] Parton W J, McKeown B, Kircher V et al. *CENTURY User Manual*, 1992, Colorado State University, NREL

Publication, Fort Collins, Colorado, USA.

- [28] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404: 819-820.
- [29] Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982-1999. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(4): 563-569. [朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982-1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(4): 563-569.]
- [30] Sun Rui. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 58-61. [孙睿. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究. *遥感学报*, 2001, 5(1): 58-61.]
- [31] Fang Jingyun. Dynamic forest biomass carbon pool in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973. [方精云. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.]
- [32] National Soil Survey Office. *Chinese Soils*. Beijing: China Agriculture Press, 1998. 1-1252. [全国土壤普查办公室. *中国土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1-1252.]
- [33] National Soil Survey Office. *Chinese Soil Census (Volumes 1-6)*. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [全国土壤普查办公室. *中国土种志 (1-6 卷)*. 北京: 中国农业出版社, 1995.]

The Impacts of Climate Change on Net Ecosystem Production in China

ZHOU Tao¹, SHI Peijun¹, SUN Rui², WANG Shaoqiang³

(1. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China; Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2. *Department of Resource and Environment Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

3. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)*

Abstract: Many factors can impact R_H , but up to now most of the researches only consider the climatic factors such as temperature and soil moisture or precipitation. The impacts of soil properties on R_H have been ignored, so the models' effect is not as good in large area where soil properties vary greatly as in small area where soil properties vary less. The coefficient of soil heterotrophic respiration reflected the influence of soil properties on R_H . Based on carbon balance equations of ecosystems, the 1-km resolution's soil heterotrophic respiration coefficient (a_{ij}) in China has been calculated by using net primary production (NPP) of ecosystems and observed climate data. The results show that the value of a_{ij} as a whole, is larger in Southeast and Northeast China than that in Northwest China. Compared with the NPP's distribution throughout the country, the value of a_{ij} in most parts of Southeast China is not large, but it is large in vast area of Northeast and East China, which indicates that the soil heterotrophic respiration has great increase potential in these regions if climate becomes favorable. And then, the authors simulate the carbon flux change between terrestrial ecosystem and atmosphere on the hypothesis of climate change, the average temperature is 1.5°C higher and average precipitation is 5% more. The results show that both fluxes from atmosphere to terrestrial and from terrestrial to atmosphere increase. The rate of average increase of NPP and soil heterotrophic respiration is about 6.2% and 5.5% respectively. The most powerful natural ecosystem which could accumulate carbon is needle-leaved deciduous forest, and the most powerful agricultural ecosystem which could accumulate carbon is one crop per year. On the contrary, the double cropping rice followed by a cool-loving crop per year and the double cropping rice followed by a thermophilous crop per year are potential carbon sources.

Key words: soil heterotrophic respiration; NPP; net ecosystem production; climate; China