

中亚热带季节性干旱对千烟洲人工林生态系统碳吸收的影响*

孙晓敏** 温学发 于贵瑞 刘允芬 刘琪璟

(中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要 千烟洲中亚热带人工林生态系统受典型亚热带大陆性季风气候影响, 其特点是年水热资源丰富, 但是夏季水热资源分布明显不同步, 经常受到季节性高温干旱胁迫的影响. 作为中国大陆生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的组成部分, 利用涡度相关技术对千烟洲人工林生态系统CO₂通量进行了长期连续的观测. 本研究基于 2003 和 2004 年月尺度的净生态系统生产力(NEP)、生态系统呼吸(R_e)和总生态系统生产力(GEP)数据, 初步分析和探讨了季节性干旱对生态系统碳吸收的影响. 结果表明, 2003 和 2004 年该生态系统的碳吸收都呈现双峰曲线式的季节变化模式. 生态系统碳平衡的两个组分 R_e 和GEP的耦合关系决定了生态系统的碳吸收特征. 生态系统碳吸收的降低程度取决于季节性干旱期间温度升高和降水量减少的耦合程度. R_e 和GEP都会受到干旱胁迫的影响, 但是响应的方式与程度有所不同, 是造成森林生态系统源/汇强度变化的根本原因.

关键词 ChinaFLUX 季节性干旱 中亚热带人工林 涡度相关技术 生态系统呼吸
总生态系统生产力

生态系统尺度的全球变化研究主要集中在大气CO₂浓度升高和全球变暖效应^[1,2]. 由于全球气候变化造成的降水和蒸发的空间格局和季节模式的改变导致了陆地生态系统水分平衡正在发生改变^[3,4]. Rambal和Debussche^[5]指出全球温度升高与降水量减少导致季节性干旱的发生, 而且降水季节模式的改

变也会导致季节性干旱的发生. 全球气候变化导致的干旱胁迫对生态系统影响的强度、持续期和频率都将大大的增加^[6]. 如 2003 年欧洲夏季大干旱造成欧洲大陆的总生态系统生产力降低 30%, 从而导致 2003 年欧洲大陆表现为 0.5 Pg C 的碳源^[7], 相当于欧洲大陆 4 年的净生态系统碳吸收量^[8]. 森林生态系统

收稿日期: 2005-10-27; 接受日期: 2006-04-14

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)资助

** E-mail: sunxm@igsnr.ac.cn

是陆地生态系统碳吸收能力最强的碳库, 干旱胁迫对森林生态系统碳吸收能力的影响已经成为全球气候变化研究的重点问题之一^[9-11].

目前, 我国森林面积 1.75 亿公顷, 森林覆盖率 18.21%, 其中人工林保存面积 0.53 亿公顷, 人工林面积居世界首位. 森林蓄积量稳步增加, 蓄积量净增 8.89 亿立方米, 其中人工林蓄积量净增 4.90 亿立方米, 占森林蓄积量净增量的 55.07%. Fang 等^[12]指出, 在最近的 20 年中, 我国人工林生态系统碳吸收量约 0.45 Pg C, 是我国森林碳储量增加的最主要原因. 然而, 虽然来自各方面的“证据”表明我国人工林生态系统确实净吸收大气中的 CO₂, 但直接的观测证据仍然十分零散和缺乏^[12,13].

我国南方林区以人工林为主, 面积占全国人工林的 54.3%, 蓄积量占全国人工林的 52.6%^[14]. 由于亚热带大陆性季风气候的影响, 我国南方中亚热带地区年水热资源丰富, 但是该地区夏季的低层大气环流受太平洋副热带高压控制, 盛行下沉气流, 空气绝热增温致使水汽不饱和, 因而不易凝结成雨, 导致季节性伏旱和秋旱频繁. Baldocchi^[10]指出, 利用天然试验条件(如欧洲 2003 年夏季大干旱)研究生态系统碳吸收对于干旱胁迫的响应与适应是研究全球气候变化的一种非常重要而有效的途径. 但是到目前为止, 关于干旱胁迫如何影响人工林生态系统碳吸收及其环境和生物控制机制等方面的研究还非常匮乏.

作为中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的组成部分, 利用涡度相关技术对千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量进行了长期连续的观测. 于贵瑞等^[15]、刘允芬等^[16]和 Wen 等^[17]的研究表明, 在小时尺度上光照、温度和水分条件是控制千烟洲人工林生态系统碳固定和释放的主导环境因素, 但季节性干旱对人工林生态系统碳吸收及其环境和生物控制机制问题还未深入探讨. 因此, 本研究主要以千烟洲人工林生态系统为试验研究平台, 利用该生态系统夏季雨热不同步而造成季节性干旱(温度升高与降水减少的综合作用)的天然试验条件, 分析了 2003 和 2004 年月净生态系统生产力(NEP)、生态系统呼吸(R_c)和总生态系统生产力(GEP)的观测数据, 初步探讨了季节性干旱对生态系统碳吸收的影

响及其控制机制. 研究结果可以为预测未来全球气候变化(特别是季节性干旱)背景下我国中亚热带森林生态系统碳汇功能变化, 评价人工林生态系统在研究区域碳平衡中的作用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 站点描述

千烟洲通量站位于江西省泰和县的中国生态系统研究网络千烟洲试验站内(26°44'N, 115°03'E, 110.8 m), 下垫面坡度 2.8~13.5°. 通量塔周围林分为 1985 年前后营造的人工林, 主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelm)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等, 森林覆盖率 90%以上. 这里属典型红壤缓坡丘陵地貌, 海拔 60~115 m, 相对高差 20~50 m. 主要土壤类型为红壤, 成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩. 根据 1985~2004 年千烟洲站地面气象观测数据统计, 该站区年均气温 17.9 °C, 年均降水量 1485.1 mm, 最大年降水量 2410.4 mm (2002 年), 最小年降水量 944.9 mm (2003 年), 具有典型的亚热带大陆性季风气候特征. 关于站点的其它详细信息可以参考刘允芬等^[16]和 Wen 等^[17]的相关研究报道.

1.2 数据采集和处理

利用三维超声风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific)测定风速和温度脉动. 利用红外线 CO₂/H₂O 气体分析仪(Model LI-7500, Licor Inc.)测定 CO₂/H₂O 密度脉动. 通量仪器安装高度大约为 3 倍冠层高度即 39.6 m. 所有 10 Hz 的原始数据均利用数据采集器 CR5000(Model CR5000, Campbell Scientific)记录并储存, 同时记录并储存 30 min 间隔的 CO₂ 通量数据. 对 30 min 测定数据进行平面拟合坐标轴转换^[18], 并校正由于水热传输造成的 CO₂ 通量变化的密度效应^[19]. 仪器设备详情参见文献^[16,17].

植被/大气间净生态系统 CO₂ 交换量(F_{NEE} , NEE, mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)可以定义为:

$$F_{\text{NEE}} = \overline{w' \rho'_c(z_r)} + \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial t} dz, \quad (1)$$

式中, 右边第一项为 CO₂ 湍流通量, 第二项为测定高

度下CO₂的储存通量. 需要注意的是正值代表生态系统释放CO₂进入大气, 负值代表生态系统从大气中吸收CO₂. 植被/大气间的净生态系统CO₂交换量(NEE)与净生态系统CO₂生产力(NEP)的绝对值相等但符号正好相反, 即NEP=-NEE.

在数据分析过程中, 剔除与降水或凝水有关的异常数据. 为了能够获得可靠的夜间湍度相关(EC)测定数据, 剔除了夜间摩擦风速小于 0.2 m·s⁻¹的夜间(总辐射< 1 W·m⁻²)数据^[20], 因为在这种条件下储存和平流效应可能会造成CO₂通量的系统性低估. 白天和夜间的缺失数据插补策略请详见文献^[16].

1.3 生态系统呼吸与总生态系统生产力

为估算总生态系统CO₂交换量(F_{GEE} , GEE, mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)需要白天生态系统呼吸($R_{eco,d}$, mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)和夜间生态系统呼吸($R_{eco,n}$, mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)数据. 这里白天生态系统呼吸是依据夜间生态系统呼吸与土壤温度和含水量的函数关系外延的方法来估算的. 生态系统呼吸(F_{R_e} , R_e , mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)可以定义为,

$$F_{R_e} = R_{eco,n} + R_{eco,d}, \quad (2)$$

因此, 总生态系统交换量(F_{GEE} , GEE, mg CO₂·m⁻²·s⁻¹)可以定义为:

$$F_{GEE} = F_{NEE} - F_{R_e}. \quad (3)$$

总生态系统交换量(GEE)与总生态系统生产力(GEP)的绝对值相等但符号正好相反, 即GEP=-GEE. 在生态系统尺度上, 可以认为总生态系统生产力(GEP)与总初级生产力(GPP)相等, 即GEP=GPP. 这里, 在月尺度上通量单位则换算为g C·m⁻²·mon⁻¹.

1.4 冠层导度的模拟

在冠层水平上, 冠层导度 g_c 可以认为就是冠层的总气孔导度 g_{sw} (m·s⁻¹), 由Penman-Monteinth方程^[21]可以计算得到冠层导度,

$$g_c = \left[r_a \left(\frac{\Delta}{\lambda E} \left(\frac{A}{\lambda E} - 1 \right) - 1 \right) + \frac{\rho_a D_a \varepsilon}{E} \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中, Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率(Pa·K⁻¹), ρ_a 为空气密度(kg·m⁻³), D_a 为参考高度的饱和水汽差(mmol·mol⁻¹), λ 为潜热蒸发当量(2440 J·g⁻¹), λ 为干

湿球常数(Pa·K⁻¹), ε 为水汽和空气分子量的比值, r_a 为空气动力学阻力(s·m⁻¹). 空气动力学阻力可以通过下式得到^[21],

$$r_a = \frac{u}{u_*^2} + 6.2u_*^{-2/3}. \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 千烟洲人工林生态系统的气候特征

千烟洲人工林生态系统位于典型中亚热带大陆性季风气候区. 根据 1985~2004 年千烟洲站地面气象资料统计, 千烟洲人工林年均气温 17.9℃, 年均降水量 1485.1 mm. 2003 年降水量为 944.9 mm, 是 1985~2004 年历史最低记录, 而 2004 年降水量为 1404.5 mm, 接近 1985~2004 年历史平均记录.

如图 1 所示, 与 1985~2004 年历史同期月均降水量和月均气温相比, 2003 年 6 和 7 月的月降水量低于历史同期月均降水量±1 倍标准偏差, 而 2003 年 7, 8 和 9 月的月均气温则高于 1985~2004 年历史同期月均气温±1 倍标准偏差.

就年总量而言, 千烟洲人工林生态系统水热资源丰富, 可是生长季的水热资源分布明显不同步, 由于温度升高与降水减少的综合作用导致了季节性伏旱和秋旱的频繁发生. 温度升高与降水减少耦合程度的不同会导致季节性干旱的程度也有所不同.

2.2 环境要素对生态系统碳吸收的影响

这里首先分析和探讨了光照、温度、水气压差、土壤含水量和降水量等环境变量对千烟洲人工林净生态系统生产力(NEP)的影响. 结果表明, 光合有效辐射和空气温度是控制人工林生态系统月尺度 NEP 的主要环境要素, 但是 2003 和 2004 年光合有效辐射和空气温度对 NEP 的影响程度有所不同(图 2). 从图 2(a)和(b)可以看出, 2003 年 7 和 8 月季节性高温干旱条件 NEP 明显的降低. 从图 2(c)和(d)可以看出, 2004 年 10 月 NEP 明显的增加, 这可能与 2004 年 10 月季节性干旱末期几乎未发生任何降水事件(0.6mm)有关. 对于 2003 年来说, 土壤含水量也是限制 2003 年 7 和 8 月 NEP 的非常重要的环境变量(图 3).

不同程度的季节性干旱导致人工林生态系统碳

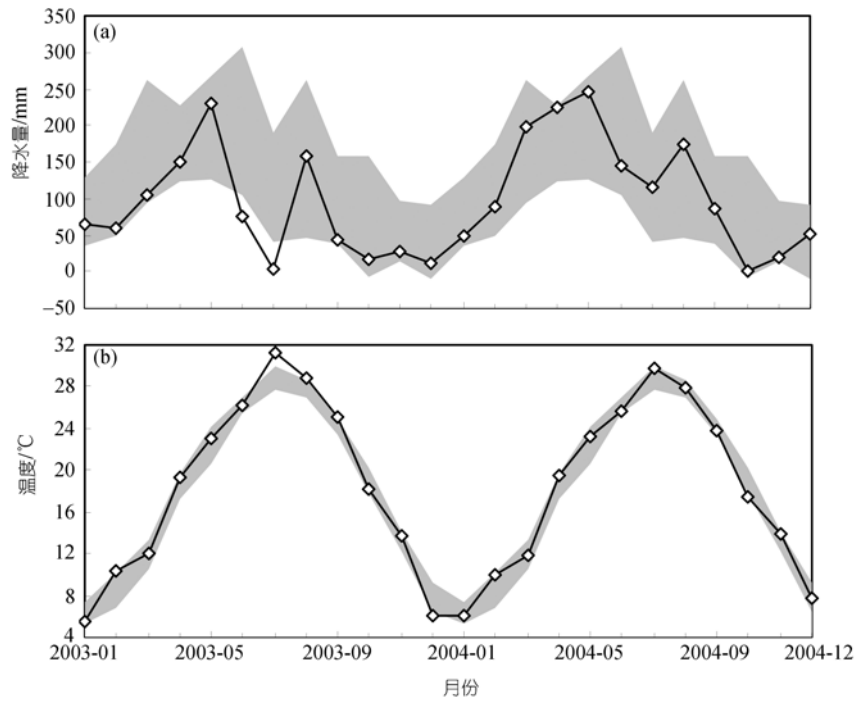


图 1 千烟洲中亚热带人工林生态系统 2003 和 2004 年月降水量(a)和月均气温(b)的季节变化特征
图中灰色区域代表中国生态系统研究网络千烟洲站 1985~2004 年气象站月降水量(a)和月均气温(b)±1 倍标准偏差

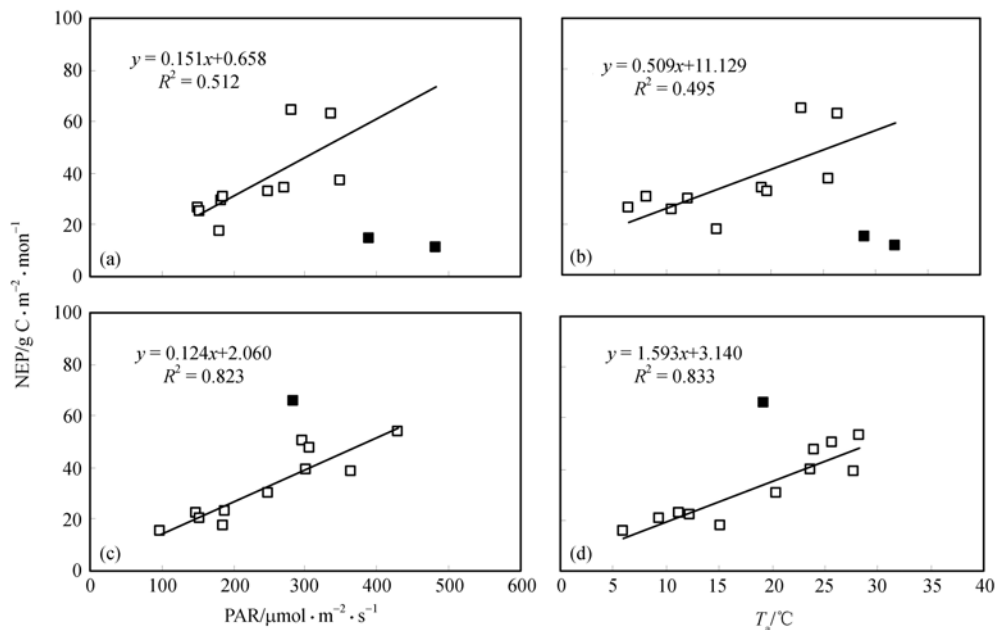


图 2 千烟洲中亚热带人工林生态系统 2003 和 2004 年月净生态系统生产力(NEP)对光合有效辐射(PAR)和空气温度(T_a)的响应特征

图(a)和(b)指 2003 年数据, 图中实心正方形代表 2003 年 7 和 8 月 NEP 值, 而图(c)和(d)指 2004 年数据, 图中实心正方形代表 2004 年 10 月 NEP 值. 图中实线代表不包括实心正方形数据的线性拟合曲线

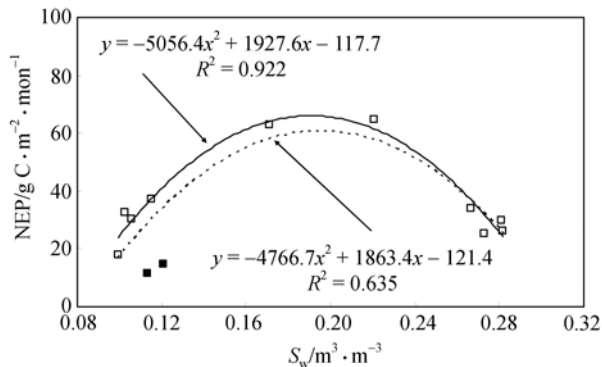


图3 千烟洲中亚热带人工林生态系统2003年月净生态系统生产力(NEP)对土壤含水量(S_w)的响应特征

图中实心正方形代表2003年7和8月NEP值。图中实线代表不包含实心正方形数据的拟合曲线,而虚线代表包括实心正方形数据的拟合曲线

吸收对干旱响应的方式和强度也不同,可能促进也有可能抑制生态系统碳吸收能力。这是由于不同程度的干旱胁迫对人工林生理生态特性的影响方式与程度有所区别。生态系统碳吸收能力增加或降低取决于季节性干旱条件下温度升高和降水量减少的耦合程度。

2.3 生态系统碳固定与释放的耦合关系

净生态系统生产力(NEP)是总生态系统生产力(GEP)和生态系统呼吸(R_e)两个方向相反且量级相近的较大生物学通量平衡的结果。基于涡度相关技术可以直接确定森林生态系统源/汇强度(NEP),也可以间接估算生态系统碳平衡的两个组分 R_e 和GEP^[22]。这里我们对千烟洲人工林2003和2004年月尺度的NEP, R_e 和GEP的相互耦合关系进行了综合对比分析。从图4可以看出,2003和2004年NEP与 R_e 都呈现显著正相关关系,但是2003年7和8月和2004年10月NEP与 R_e 的关系则表现出明显的偏离现象。从图5可以看出,2003和2004年NEP与GEP也呈现显著正相关关系,但是2003年7和8月和2004年10月NEP与GEP的关系也发生明显的偏离现象。可见,季节性干旱胁迫使NEP与 R_e 和GEP间的耦合关系发生了改变。

然而,如图6所示,2003和2004年千烟洲人工林 R_e 与GEP之间都具有非常显著的正相关关系,而且这种关系2003和2004年没有明显的差异并保持非常

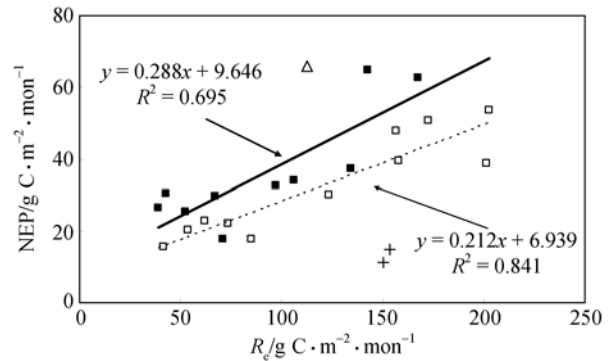


图4 千烟洲中亚热带人工林生态系统2003和2004年月净生态系统生产力(NEP)与生态系统呼吸(R_e)的相互关系。图中十字号代表2003年7和8月数据,实心正方形代表2003年其它月份数据。图中三角号代表2004年10月数据,空心正方形代表2004年其它月份数据。实线代表2003年NEP与 R_e 的线性拟合曲线,不包含2003年7和8月数据。虚线代表2004年NEP与 R_e 的线性拟合曲线,不包含2004年10月数据

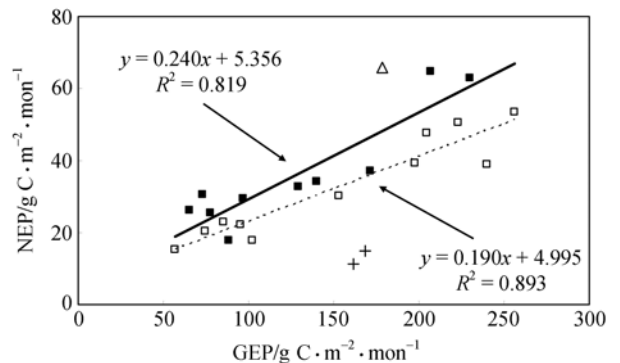


图5 千烟洲中亚热带人工林生态系统2003和2004年月净生态系统生产力(NEP)和总生态系统生产力(GEP)的相互关系

图5中符号含义与图4相同。实线代表2003年NEP与GEP的线性拟合曲线,不包含2003年7和8月数据。虚线代表2004年NEP与GEP的线性拟合曲线,不包含2004年10月数据

好的比例关系。这表明GEP和 R_e 的耦合关系基本决定了生态系统碳吸收特征。Janssens等^[23]和Högberg等^[24]研究也表明 R_e 与GEP间具有非常强的耦合关系。但是从图6也可以看出,2003年7和8月和2004年10月 R_e 与GEP的耦合关系由于季节性干旱的影响也发生了一定程度的偏离现象。

2.4 季节性干旱胁迫对生态系统碳吸收的影响

千烟洲人工林2003和2004年月净生态系统生产力(NEP),生态系统呼吸(R_e)和总生态系统生产力

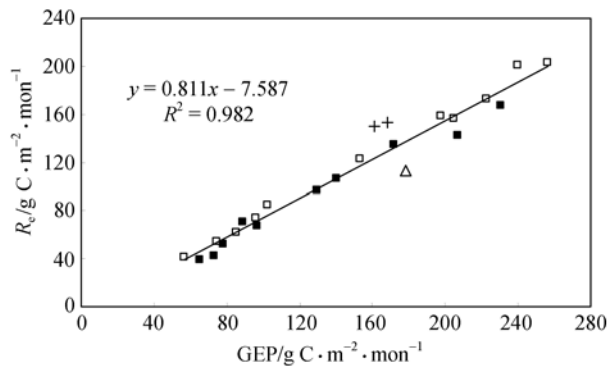


图 6 千烟洲中亚热带人工林生态系统 2003 和 2004 年月生态系统呼吸(R_e)与总生态系统生产力(GEP)的相互关系图 6 中符号含义与图 4 相同. 图中实线代表 2003 年和 2004 年 R_e 和 GEP 的线性拟合曲线, 不包含 2003 年 7 和 8 月和 2004 年 10 月数据

(GEP)的季节变异特征如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 无论极端干旱胁迫年(2003 年)还是通常的年份(2004 年), 生态系统 NEP 都表现为明显的双峰曲线变化模式. 对比两年碳吸收特征也可以发现, 2003 年季节性干旱胁迫使生态系统 7 和 8 月生态系统碳吸收能力显著低于本年度的年均值, 而 2004 年的季节性干旱胁迫也造成了 8 和 9 月碳吸收能力的下降, 但 10 月的碳吸收能力呈显著增加并且达到该年度的最高值. 从图 7 也可以看出, 人工林生态系统 R_e 和 GEP 的季节模式与 NEP 的季节模式明显不同. 2003 年季节性干旱

胁迫使 R_e 和 GEP 都呈现下降趋势, 但是下降趋势不同. 然而, 2004 年季节性干旱胁迫并未造成 R_e 和 GEP 出现明显下降趋势. 这可能是由于 R_e 主要由土壤表层含水量和温度控制, 而 GEP 主要是受辐射、空气温度、VPD 和根系吸收水总量的影响所造成的^[25].

从图 8(a)可以看出, 2003 年季节性干旱胁迫前期(2003 年 6 月)冠层导度开始下降, 但是 GEP 并没有下降仍略有增加. 随着干旱程度的增加 GEP 开始出现大幅度的下降. 2004 年季节性干旱也导致冠层导度下降, 但是并没有导致 GEP 的降低. 这表明轻度干旱胁迫可以促进 GEP 的增加, 但干旱胁迫的加重将抑制 GEP 的增加并导致 GEP 的降低. 从图 8(b)可以看出, 温度是控制生态系统碳释放特征的主导因素, 而 2003 年夏季季节性高温干旱胁迫的作用导致 R_e 出现一定程度的降低.

图 8(c)为 2003 和 2004 年 GEP 的月变化量与 R_e 的月变化量的季节变化特征. 从图 8(c)可以看出, 由于 GEP 的月增加量显著大于 R_e 的月增加量, 这导致 2003 年 5 月 NEP 显著增加. 然而, 由于 GEP 的月降低量显著大于 R_e 的月降低量导致了 2003 年 7 月 NEP 的显著降低. 2004 年 8 月 NEP 的降低也是由于 GEP 降低量较大而 R_e 几乎维持不变的结果. 2004 年 10 月 NEP 的增高则是由于 GEP 降低的程度明显低于 R_e .

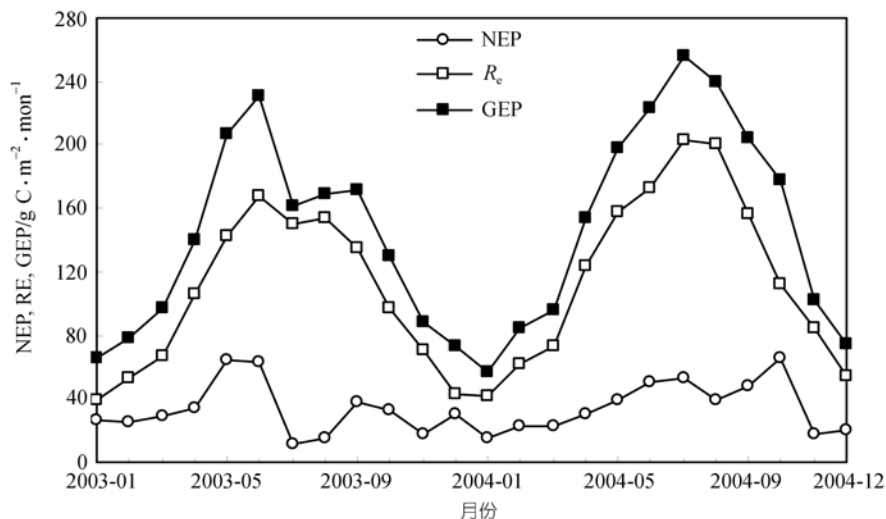


图 7 千烟洲中亚热带人工林生态系统 2003 年和 2004 年月净生态系统生产力(NEP), 生态系统呼吸(R_e)和总生态系统生产力(GEP)的季节变异特征

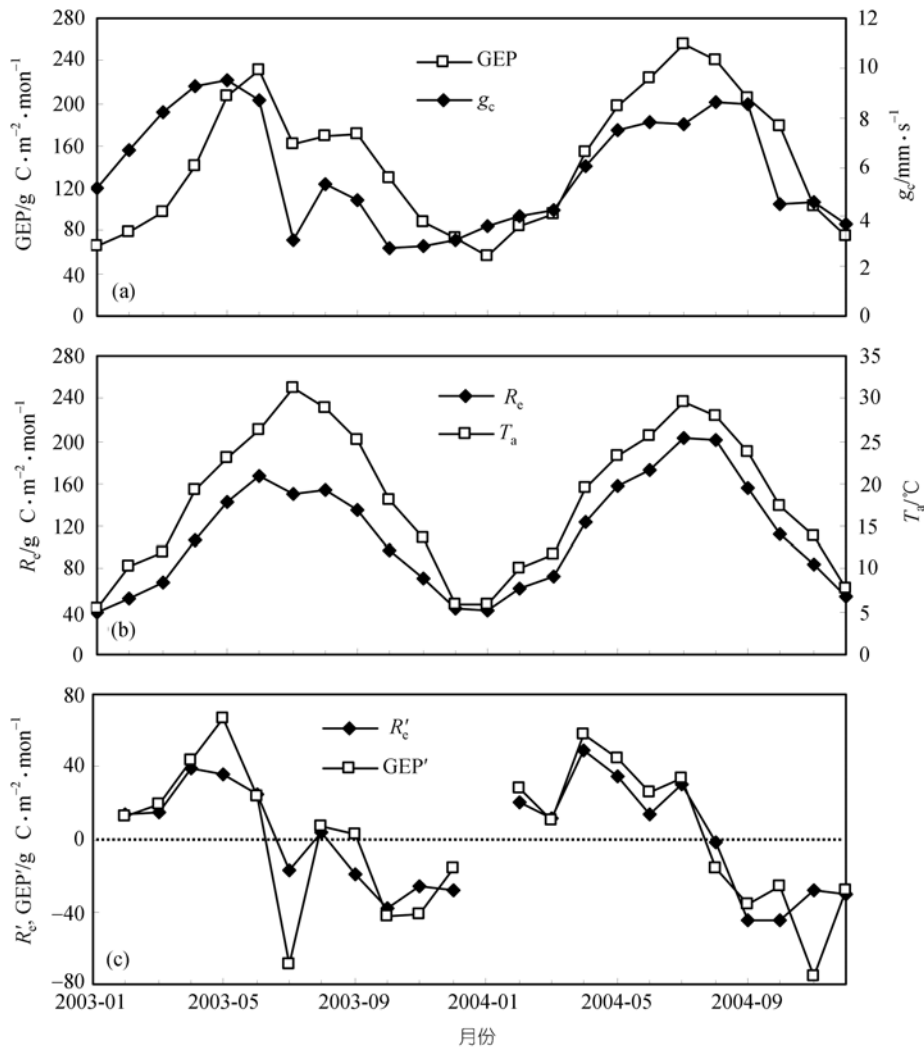


图8 千烟洲中亚热带人工林生态系统2003和2004年(a)月总生态系统生产力(GEP)和冠层导度(g_c), (b)月生态系统呼吸(R_c)和空气温度(T_a)以及(c)总生态系统生产力月变化量(GEP')与生态系统呼吸月变化量(R_c')的季节变化特征

的降低的程度。

可见,生态系统碳平衡的两个组分RE和GEP都会受到干旱胁迫的影响,但是响应的方式与程度有所不同,是造成森林生态系统源/汇强度变化的根本原因。综合考虑高温和水分亏缺造成的干旱胁迫对生态系统短期的生理行为和长期的生态过程以及生态系统碳交换过程的影响已经成为碳循环研究的焦点问题^[10]。阐明季节性干旱对千烟洲人工林生态系统碳吸收能力的影响,确定环境和生物要素对 R_c 和GEP的控制作用客观需要将碳循环、水循环以及N等

养分循环进行综合研究。

3 结论

作为中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的组成部分,利用涡度相关技术对2003和2004年千烟洲人工林生态系统 CO_2 通量进行了长期和连续的观测。对比2003和2004年碳吸收特征可以发现,由于该生态系统夏季雨热不同步而造成的季节性干旱(温度升高与降水减少的综合作用)导致2003和2004年人工林生态系统碳吸收都呈现双峰曲

线型的季节变化趋势。

季节性干旱胁迫使 2003 年 7 和 8 月人工林生态系统碳吸收能力显著降低, 相反地使 2004 年 10 月人工林生态系统碳吸收能力显著增加, 并不能由光合有效辐射、空气温度和土壤含水量等环境要素的变异来解释。生态系统碳平衡的两个组分 RE 和 GEP 的耦合关系基本决定了生态系统碳吸收特征。RE 和 GEP 都会受到干旱胁迫的影响, 但是响应的方式与程度有所不同, 是造成森林生态系统源/汇强度变化的根本原因。RE 和 GEP 对季节性干旱的响应与适应的过程与机理仍需要进一步的深入探讨。

参 考 文 献

- 1 Torbert H A, Prior S A, Rogers H H, et al. Review of elevated atmospheric CO₂ effects on agro-ecosystems: residue decomposition processes and soil C storage. *Plant and Soil*, 2000, 224: 59—73[DOI]
- 2 Zak D R, Pregitzer K S, King J S, et al. Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis. *New Phytologist*, 2000, 147: 201—222[DOI]
- 3 Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81: 417—425[DOI]
- 4 Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change. *Science*, 2003, 302: 1719—1723[DOI]
- 5 Rambal S, Debussche G. Water balance of Mediterranean ecosystem under a changing climate. In: Moreno J M, Oechel W C, eds. *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*. New York: Springer, 1995. 386—407
- 6 Meehl G A, Tebaldi C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 2004, 305: 994—997[DOI]
- 7 Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437: 529—533
- 8 Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, et al. Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12% of European Anthropogenic CO₂ Emissions. *Science*, 2003, 300: 1538—1542[DOI]
- 9 Allen C D, Breshears D D. Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: Rapid landscape response to climate variation. *Ecology*, 1998, 95: 14839—14842
- 10 Baldocchi D D. The carbon cycle under stress. *Nature*, 2005, 437: 483—484[DOI]
- 11 Schär C, Vidale P L, Luethi D, et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004, 427: 332—336[DOI]
- 12 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320—2322[DOI]
- 13 Cao M K, Prince S D, Li K, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9: 536—546[DOI]
- 14 李文华, 李 飞. 中国森林资源研究. 北京: 中国林业出版社, 1996. 39—53
- 15 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增 II): 84—94
- 16 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 等. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征. *中国科学, D 辑*, 2006, 36(增刊 I): 91—102
- 17 Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Soil moisture effects on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical pinus plantation of southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, in press
- 18 Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 127—150[DOI]
- 19 Webb E K, Pearman G L, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85—100[DOI]
- 20 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 57—66
- 21 Monteith J L, Unsworth M H. *Principle of Environmental Physics*. London: Edward Arnold, 1990
- 22 Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479—492[DOI]
- 23 Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forest. *Global Change Biology*, 2001, 7: 269—278[DOI]
- 24 Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, 411: 789—197[DOI]
- 25 Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, et al. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biology*, 2002, 8: 999—1017[DOI]