

华北人工林水热碳通量环境影响因子分析

谭丽萍^{1,2} 刘苏峡^{1*} 莫兴国¹ 杨丽虎¹ 林忠辉¹

¹中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 基于河北崇陵流域人工林涡度相关通量观测数据, 采用通径分析和分段回归解析了水热碳通量与土壤水分、饱和水汽压差、空气和土壤温度, 及净辐射、光合有效辐射等环境因子的关联性。结果表明, 通径分析法揭示了各指标的主导/次要因子的直接及间接效应, 显热通量和水分利用效率的主要影响因子为饱和水汽压差, 而潜热通量、碳通量的影响因子以辐射、温度为主; 分段回归法进一步探讨了次要因子对主导因子的限制作用, 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < \text{土壤水分含量} \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 潜热通量、生态系统呼吸及水分利用效率与其主导因子间相关性最高, 当饱和水汽压差 $\leq 1.0 \text{ kPa}$ 时, 净生态系统生产力、总生态系统生产力与其主导因子间相关性最高; 两种方法的有机结合, 使我们对生态水文过程各驱动因子有了清晰的宏观认识, 并量化了次要因子起限制作用的数量范围。

关键词 水热通量, 碳通量, 环境因子, 华北人工林, 通径分析, 分段回归

引用格式: 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 杨丽虎, 林忠辉 (2015). 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析. 植物生态学报, 39, 773–784. doi: 10.17521/cjpe.2015.0074

Environmental controls over energy, water and carbon fluxes in a plantation in Northern China

TAN Li-Ping^{1,2}, LIU Su-Xia^{1*}, MO Xing-Guo¹, YANG Li-Hu¹, and LIN Zhong-Hui¹

¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; and ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Our objective was to examine the underline mechanisms on the driving factors of eco-hydrological processes and identify the limiting factors through both path analysis and piecewise regression.

Methods The eddy covariance and meteorological data of a plantation in Chongling watershed in Northern China over the period from August 2012 to August 2013 were used for analyzing the relationships between flux indices and environmental factors. The flux indices include sensible heat, latent heat, net ecosystem production, gross ecosystem production, and ecosystem respiration, and the environmental factors include soil water content, vapor pressure deficit, air temperature, soil temperature, net radiation and photosynthetically active radiation. The direct and indirect effects of dominant and secondary factors were determined through the path analysis, and the control of secondary factors on dominant factors were analyzed using the piecewise regression.

Important findings We found that the primary factor affecting sensible heat and water use efficiency was vapor pressure deficit, while latent heat and carbon fluxes were mainly controlled by radiation and temperature respectively. There also appeared significant influences from secondary variables on those fluxes. The correlations between latent heat and net radiation, ecosystem respiration and soil temperature, and water use efficiency and vapor pressure deficit were all strong when soil water content was between $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. The correlations between ecosystem production (both gross and net) and photosynthetically active radiation was strong when vapor pressure deficit was $\leq 1.0 \text{ kPa}$.

Key words water and heat flux, carbon flux, environmental factors, plantation in Northern China, path analysis, piecewise regression

Citation: Tan LP, Liu SX, Mo XG, Yang LH, Lin ZH (2015). Environmental controls over energy, water and carbon fluxes in a plantation in Northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 773–784. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0074

生态系统的能量流动和物质循环一直是生态学的核心研究内容(Law *et al.*, 2002; Launiainen, 2010), 单位时间内单位体积物质和能量流在生态系统不同组分之间的转移量(也即通量)是表征生态系统能量利用效率和物质循环速率高低的标志性变量。通过对生态系统能量和物质通量的长期监测和分析, 可以深刻揭示生态系统的结构、功能的变化与环境因子的关系。

目前, 森林生态系统通量观测和分析集中于水热通量和碳通量。其中, 水热通量主要包括显热(H)通量和潜热(LE)通量。由 LE 可得到蒸散发(ET)。 ET 是水循环的主要成分。碳通量主要包括净生态系统生产力(NEP)、总生态系统生产力(GEP)和生态系统呼吸(RE)等, 用于描述生态系统的碳收支状况(于贵瑞和孙晓敏, 2006)。近年来, 涡度相关通量观测技术普遍用于测量生态系统水热碳通量, 为解释森林生态系统的各项生理过程、生态功能的变化及其与环境因子的关系提供了大量数据(王玉辉等, 2014)。研究表明, 气候、土壤等环境因子对森林生态系统的能量循环、水碳循环有复杂的影响(Ge *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2011)。水热碳通量对应于不同的主导因子, 且次要因子对主导因子存在限制作用(国林, 2010)。例如: 潜热通量受净辐射(岳平等, 2013)、温度(黄辉等, 2011)的影响更为显著; 生态系统生产力主要由光合有效辐射控制(唐祥等, 2013); 生态系统呼吸主要受温度影响(于贵瑞等, 2005)。主要的研究方法包括相关分析、回归分析或各通量与环境因子的动态比较分析。

河北易县崇陵流域人工林是华北山地丘陵典型的森林生态系统, 自2004年开始进行比较完善的气象、水文试验, 2012年又安装了涡度相关观测系统。深入开展基于水热碳通量的分析研究, 可进一步揭示华北地区森林生态系统对区域水热平衡各过程的作用机制。本文基于已有的通量观测和气象水文数据, 采用通径分析和分段回归, 初步分析崇陵流域人工林生态系统水热碳通量等相关指标与环境因子间的关联性, 解释各环境因子对华北地区能量及水碳平衡的影响, 为生态系统水热调控提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省易县崇陵流域(115.49° E,

39.35° N), 属海河流域大清河水系白洋淀上游北易水二级支流, 具有太行山山地丘陵典型地貌特征, 面积约6 km², 属温带大陆性季风气候, 冬季干冷, 盛行西北风, 夏季湿热, 盛行东南风。流域植被完全靠天然降水, 年降水量641 mm, 降水大部分集中在汛期, 7–9月降水量占全年的76.6%, 年平均气温11.6 °C, 年蒸发能力1 250 mm。

流域内分布着不同的植被类型, 主要乔木树种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)等, 灌木有荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)等, 草本植物包括羊须草(*Carex callitrichos*)、大披针藁草(*Carex lanceolata*)等。其中, 侧柏、油松林约占流域总面积的15%, 于1959年人工种植, 株高5–6 m, 胸径11–12 cm, 郁闭度70%, 林下灌木返青均较晚; 后期种植的刺槐株高6–8 m, 胸径10–15 cm, 林下灌木、草本较多; 杨树株高10 m以上, 胸径75–95 cm, 林下植被稀少, 但凋落层较厚。荆条为当地原生植被, 株高2 m左右, 其间杂生有酸枣等植物。林下土壤主要为砂壤土、壤土等。

通量观测塔位于流域南部, 周围林地以油松、侧柏等针叶林为主。

1.2 研究方法

1.2.1 试验观测系统

2012年, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室在崇陵流域安装涡度相关观测系统以及配套的气象要素梯度观测系统和土壤温湿度剖面观测系统, 系统于2012年7月27日开始进行连续观测。涡度相关系统安装在距地面20 m高度, 主要仪器有三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, USA)和开路式红外气体分析仪(IRGA, LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA), 分别观测三维风速、空气温度和大气中的CO₂、水汽浓度组成。配套的气象观测系统为4层梯度观测(2 m, 6 m, 12 m, 20 m), 分别安装有空气温湿度传感器(HMP155A-L, Vaisala, Helsinki, Finland)、总辐射传感器(LI200X, Campbell Scientific, Logan, USA)、光合有效辐射传感器(LI-190SB, LI-COR, Lincoln, USA)、雨量筒(TE525MM, Texas Electronics, Dallas, USA)、风速风向传感器(034B, MetOne, Washington, USA), 观测各个高度的温度、湿度、辐射、降水及风速风向等。另外, 在

地下10 cm、20 cm、40 cm、80 cm等不同深度分别埋有土壤温度传感器(109-L, Campbell Scientific, Logan, USA)、土壤湿度传感器(CS616, Campbell Scientific, Logan, USA)、土壤热通量板(HFP01-L, Campbell Scientific, Logan, USA)等, 观测不同深度的土壤温度、湿度及热通量等。以上数据采集频率为10 Hz (即1 s更新10次), 通过数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, Logan, USA)在线采集。实验人员每月定期进行现场仪器检查、数据下载及数据质量检查等工作。

由于雷击导致仪器损坏, 2013年2月–2013年4月的通量数据缺失, 气象数据未缺失。本研究选用2012年8月–2013年1月及2013年5月–2013年7月共9个月的通量数据, 对对应时间段的气象数据进行分析。考虑季节动态时, 选择2013年5月代表春季, 2013年6–7月及2012年8月代表夏季, 2012年9–11月代表秋季, 2012年12月–2013年1月代表冬季。

1.2.2 通量数据处理及计算方法

涡度相关数据的计算及质量控制主要包括以下步骤: 对10 Hz原始数据依次进行野点去除、平面拟合、水汽密度校正、超声虚温修正等处理, 剔除同期有降水的数据、摩擦风速低于 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 所对应的数据、与平均值相差超过4倍方差的数据、各通量阈值外的数据等(朱治林等, 2006), 最终获得30 min的平均通量数据, 所用软件为Eddypro (庄金鑫等, 2013)。

由于仪器故障、断电、不利天气等原因造成部分数据缺失, 碳通量数据采用非线性回归法进行拟合插补, 具体方法为: 利用Lloyd & Taylor方程拟合夜间碳通量, 即 RE 与10 cm深度土壤温度(soil temperature, T_s)的关系, 进而外推至白天; Michaelis-Menten方程拟合日间碳通量(即净生态系统碳交换量(net ecosystem exchange, NEE)与光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)的关系(于贵瑞和孙晓敏, 2006)。 H 及 LE 采用平均日变化法进行插补, 夜间的数据插补窗口为4天, 白天的数据插补窗口为7天(李春等, 2008)。整个数据处理过程中, 能量或物质通量向上散出时为正值。 H 和 LE 的计算公式如下:

$$H = c_p \rho_a \overline{w'\theta'} \quad (1)$$

$$LE = \lambda c_p \rho_a \overline{w'q'} \quad (2)$$

式中, c_p 为定压比热, ρ_a 为空气密度, w' 、 θ' 、 q' 分别为垂直风速、温度和湿度脉动值, 撇号表示瞬时值与平均值的偏差, 上划线指在某时间段内的平均值, λ 为水汽化潜热, 本文中取值为 $2450 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

NEE 及其组分的计算公式如下:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (3)$$

$$F_{\text{storage}} = \frac{\Delta c}{\Delta t} h \quad (4)$$

$$NEE = F_c + F_{\text{storage}} \quad (5)$$

式中, ρ_c 为待测气体在空气中的浓度, Δc 为相邻两次测量的 CO_2 浓度差, Δt 为前后两次测量的时间间隔(30 min), h 为测量 CO_2 的高度(20 m), F_c 为冠层上方测定的 CO_2 通量, F_{storage} 为群落内冠层下方的 CO_2 储存通量。

RE 可用经验方程(公式6)模拟后进行插值, 根据公式(7)得出总生态系统碳交换量(GEE)。

$$RE = RE_{T_{\text{ref}}} e^{\left[E_0 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T_K - T_0} \right) \right]} \quad (6)$$

$$GEE = NEE - RE \quad (7)$$

式中, RE 为生态系统呼吸, E_0 是常量, 一般为309 K, T_{ref} 为参考温度, 一般为298.16 K, T_0 为生态系统呼吸为0时的温度, T_K 为空气或土壤温度, $RE_{T_{\text{ref}}}$ 是 T_{ref} 下的生态系统呼吸, 参数 T_{ref} 和 $RE_{T_{\text{ref}}}$ 可用观测数据回归拟合得到(于贵瑞和孙晓敏, 2006)。总生态系统生产力(GEP)与 GEE 绝对值相等但符号相反, 同理, $NEP = -NEE$ 。

为进一步研究生态系统水、碳循环之间的联系, 引入水分利用效率(WUE), 它系指消耗单位量的水分所生产的干物质的量, 是理解陆、气间水碳交换原理的基础。

1.2.3 能量闭合分析

绝大部分涡度相关数据存在能量无法闭合的情况, 能量平衡情况会因气候变化、季节及生态系统类型不同而有所差异。一般能量平衡表达式为: $H + LE = R_n - G - S - Q$, 其中, G 为土壤热通量, S 为冠层热储量, Q 为其他来源的能量(常忽略不计)。本文用线性回归的最小二乘法评价能量闭合情况, 回归方程为: $H + LE = a(R_n - G - S) + b$, 根据斜率与截距分析能量闭合的程度。当湍流能量($H + LE$)与有效能量($R_n - G - S$)相等时, 为能量闭合。 G 由埋放在地下10 cm的土壤热通量板测得。 S 的计算公式为:

$$S = \int_0^h \lambda \frac{\partial \rho_v}{\partial t} dz + \int_0^h \rho_c p \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (8)$$

式中, ρ_v 为冠层内空气水汽密度, T 为冠层气温 (Oliphant *et al.*, 2004)。

1.3 分析方法

在研究一个因变量与多个自变量之间的关系时, 常采用多元回归方法来寻找能代表它们之间关系的数学表达式, 但当自变量间相关性很高时, 回归分析不再准确。通径分析是 Sewall Wright 于 1921 年提出的多元统计技术, 可以很好地解释自变量对因变量的直接作用和间接作用, 并找出具有高度共线性的自变量, 比相关分析及多元回归分析更为全面和准确 (杜家菊和陈志伟, 2010)。

在通径分析中, 研究 n 个自变量对因变量 y 的影响, 采用通径系数 (标准化的偏回归系数) 表示相关变量间的因果关系, 分为直接和间接关系两种。设各自变量间的相关系数为 r_{ij} , 各自变量与因变量间的相关系数为 R_j 。通径系数可以表示为:

$$\sum_{j=1}^n r_{ij} \times R_j - r_{iy} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

当 $i=j$ 时, 式 (9) 表示直接通径系数, 即自变量 x_i 对因变量 y 的直接作用; 当 $i \neq j$ 时, 式 (9) 表示间接通径系数, 即自变量 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接作用。通径系数的大小表示自变量对因变量的作用效果, 正负值分别代表正向影响及负向影响 (敬艳辉和邢留伟, 2006)。

分段回归的原理简述为: 假设影响研究对象的因子有 a 、 b 、 c 等, 其中, a 为主导因子, b 或 c 为次要因子。为分析次要因子对研究对象与主导因子关系的影响, 在次要因子的不同水平下, 对主导因子与研究对象关系进行讨论, 可以更准确、具体地反映研究对象与环境因子间的关系, 以及次要因子的限制作用。

2 结果

2.1 能量闭合分析

能量闭合回归分析结果见表 1, 从表 1 中的斜率可知月尺度上的能量闭合情况比日尺度及 0.5 h 尺度的理想, 方程的决定系数也表现出同样的结果。中国通量网 8 个站点的能量平衡闭合度斜率范围为: 0.49–0.81, 截距范围为: 10.8–79.9, 决定系数范围为: 0.52–0.94 (李正泉等, 2004)。本研究能量闭合情

况属于正常范围, 但湍流能量低于有效能量。影响能量平衡的原因包括: 仪器的系统性偏差, 低频、高频湍流通量的损失, 能量吸收项的部分忽略等 (Wilson *et al.*, 2002)。

表 1 不同时间尺度上的能量闭合情况

Table 1 Energy balance on different time scales

数据集(时间尺度) Data set (time scale)	斜率 Slope	截距 Intercept	决定系数 Determination coefficient (R^2)
30 分钟 30 min	0.60	27.5	0.76
1 天 One day	0.71	21.3	0.78
1 月 One month	0.99	5.3	0.93

2.2 气象要素季节变化特征分析

如图 1 所示, 各气象要素具有明显的季相变化特征, 日均空气温度 (T_a) 的变化范围为 -7.2 – 24.8 °C, 土壤温度与 T_a 呈现一致的季节动态, 但与 T_a 相比, 趋势较为平稳。日均净辐射 (R_n) 的变化范围为 -14.2 – 223.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 冬季 (12 月、1 月) 的 R_n 明显低于其他季节的月份, 但整体平稳, 而夏季的 R_n 波动剧烈, 可见夏季天气状况多变, 并有较多阴天出现。日降水量 (precipitation, P) 的变化范围为 0 – 93 mm, 主要降水集中在夏季、初秋, 最大降水量发生在 2012 年 9 月 1 日, 冬季降水极少, 2013 年 1 月无降水。土壤水分含量 (SWC) 最高值 ($0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 主要出现在夏季, 与降水峰值对应, 最低值出现在冬季的 1、2 月, 随着气温不断回暖, 冻土消融, SWC 逐渐上升, 但在 5 月中下旬, 急剧下降, 原因在于 5 月降水几乎为 0, 且辐射增强、温度升高, 导致土壤蒸发量增大。饱和水汽压差 (VPD) 在春季最高, 结合 SWC 在春末降低可知当时气候干燥, 而冬季由于降雪, 部分天气较为湿润。随着夏季降水量增多, 气候湿润, VPD 波动较大。

2.3 各通量及相关指标季节变化特征分析

该生态系统各通量及相关指标也呈现明显的季节动态, 日尺度波动较为剧烈 (图 2)。 R_n 主要转化为 H 及 LE 。从图 2 中可知: H 及 LE 存在不同的季节分配, H 在夏季最低, 春季最高, 而 LE 在夏季最高, 冬季最低; NEP 、 RE 及 GEP 波动规律基本一致, 均在夏季达到最高值, 可见温度、辐射对其产生关键作用; WUE 在冬季整体高于其他季节, 原因可能在于冬季 GEP 、 ET 较低, 但 ET 降低的程度远远超过 GEP , 因此 WUE 明显升高。

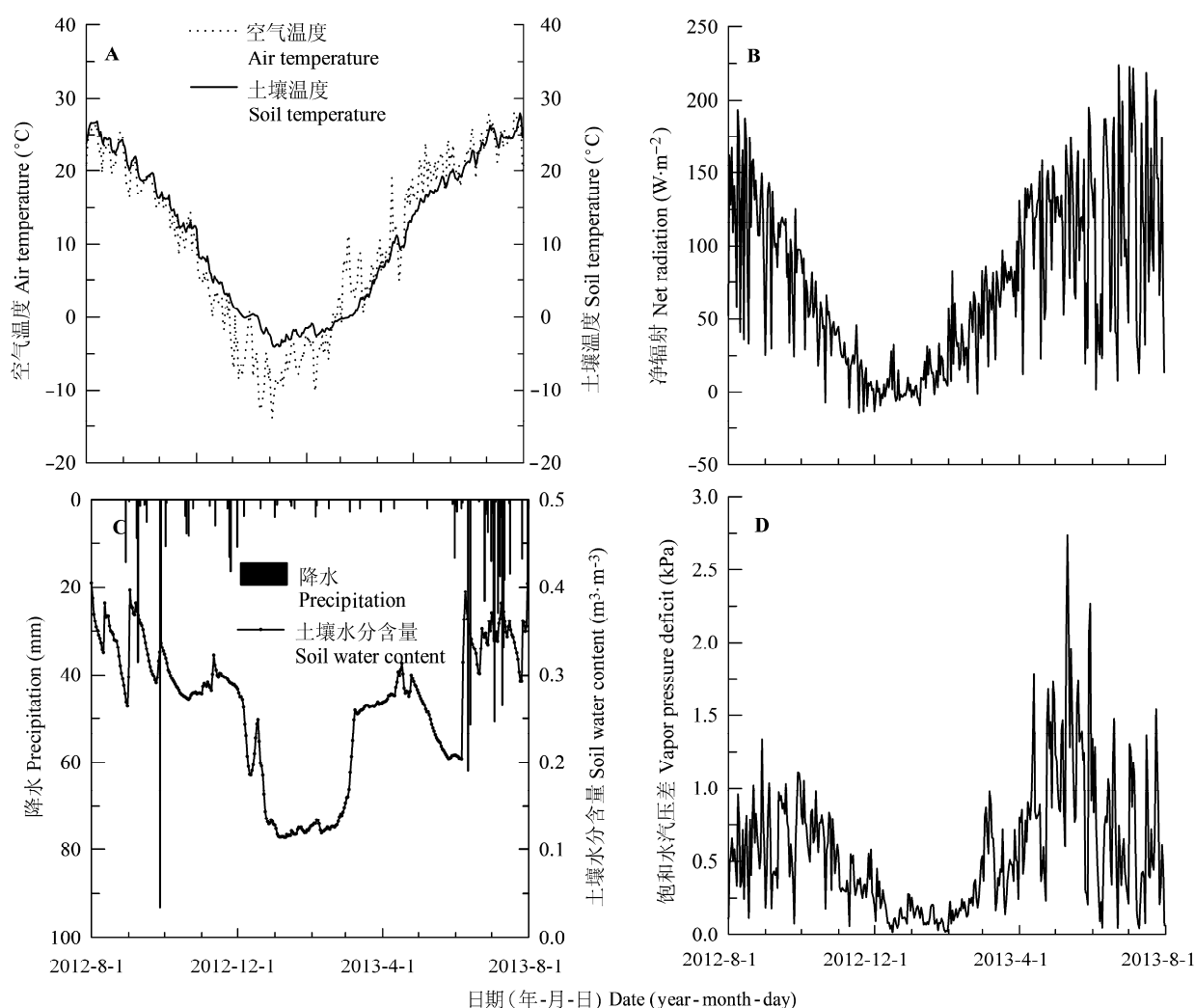


图1 研究期间日平均气温、土壤温度、净辐射、降水量、土壤水分含量和饱和水汽压差的季节变化。

Fig. 1 Seasonal changes in average daily air temperature, soil temperature, net radiation, precipitation, soil water content and vapor pressure deficit over the study period.

2.4 基于通径法的环境影响因子识别分析

选择 T_a 、 T_s 、 R_n 、 PAR 、 VPD 、 SWC 等环境因子进行分析。表2展示了通径分析得出的各通量及相关指标主要影响因子。

H 是下垫面与大气间能量交换的主要表现形式之一,分析得出其环境影响因子为 VPD 及 T_a 。其中, VPD 主要表现为直接作用,与 H 呈显著的正相关关系,而 T_a 与 H 呈负相关,其直接和间接效应均较弱。需注意的是, VPD 及 T_a 仅能解释27%的 H 方差,可见影响 H 的因子较为复杂。

LE 是能量通量的另一种表现形式,影响 LE 的因子主要包括: R_n 、 T_a 及 SWC ,均为正效应,解释了

LE 方差的94%;空气温度、土壤水分含量通过 R_n 对 LE 产生的间接效应均大于其直接效应,可见, R_n 是影响 LE 的主导环境因子。对 LE 与 R_n 的回归分析表明, LE 随 R_n 升高而升高,尚无抑制情况发生。

NEP 包括光合作用及呼吸作用两部分,主要相关环境因子为: PAR 、 VPD 及 T_a 。其中, PAR 的直接作用最明显,高达0.54。影响 GEP 的主要环境因子同上,但 T_a 的直接作用最为明显,直接通径系数高达0.85。次要影响因子 VPD 的间接作用为负,且较明显,因此, VPD 对 NEP 及 GEP 存在抑制作用。

RE 是土壤(土壤微生物)呼吸和植被(根、茎、叶)呼吸的总和(于贵瑞等, 2005), T_s 、 SWC 是影响 RE 的

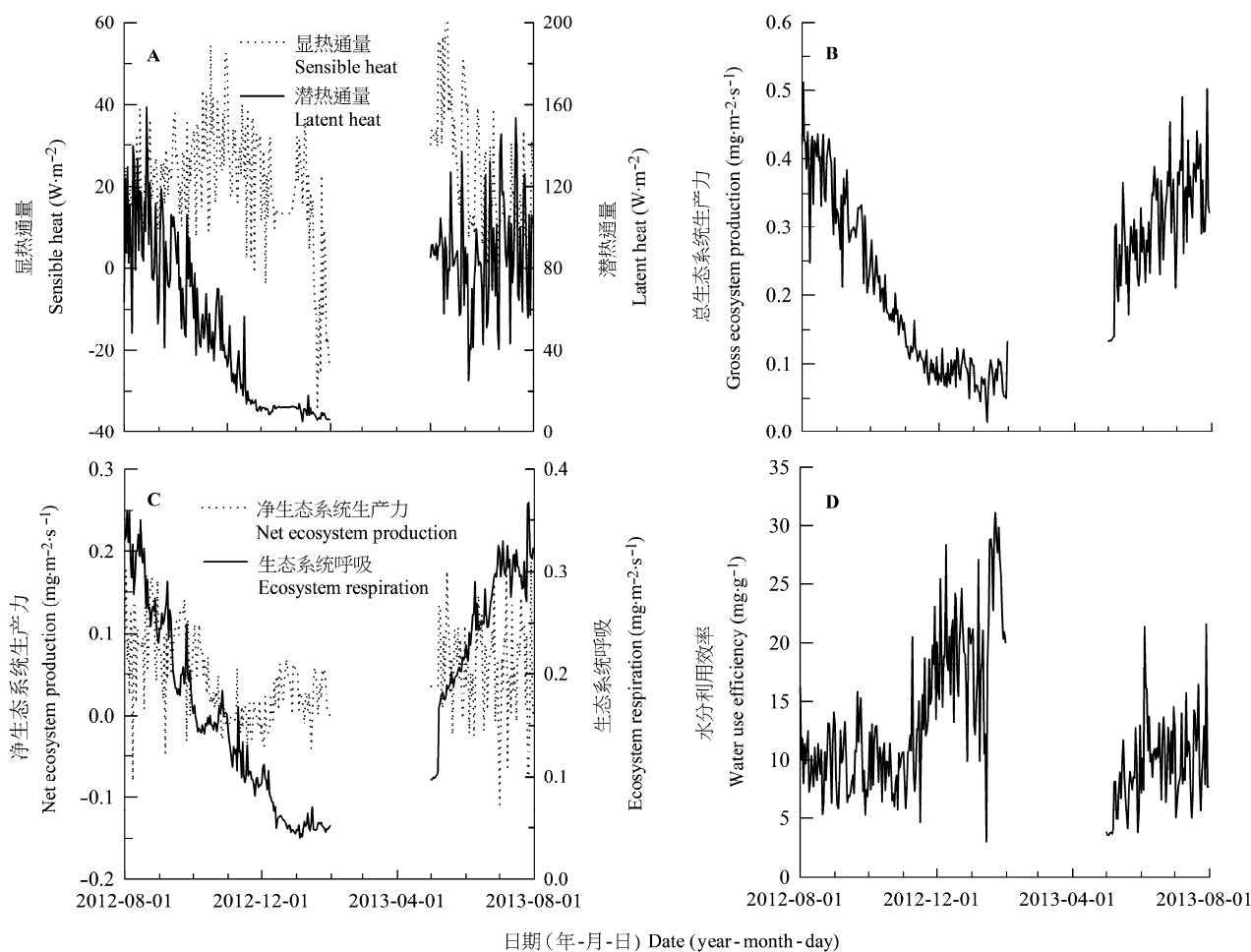


图2 研究期间显热通量、潜热通量、总生态系统生产力、净生态系统生产力、生态系统呼吸和水分利用效率的季节变化。
Fig. 2 Seasonal changes in sensible heat, latent heat, gross ecosystem production, net ecosystem production, ecosystem respiration, and water use efficiency over study period.

主要环境因子。其中, T_s 的直接作用最为明显, 高达 0.86, 其间接途径系数高达 0.63, 可见, T_s 通过直接和间接作用两种方式影响 RE 的变化, 其重要程度明显高于 SWC , 但 SWC 的间接效应较为明显, 主要通过 T_s 影响 RE 。

WUE 与 T_a 、 VPD 、 SWC 呈显著的负相关关系, 其中 VPD 的影响最为明显, 其直接途径系数为 -0.44, 其次为 SWC 。

2.5 基于分段回归法的进一步分析

通径分析筛选出关键影响因子后, 采用分段回归进一步探讨在次要因子的不同水平下, 各通量及相关指标与主导因子间的关系。通径分析得出, LE 、 NEP 及 GEP 均包含两个次要影响因子, 由于 T_a 与 R_n 、 PAR 之间存在较强的共线性, 因此分别选择 SWC 、 VPD 作为分段的次要因子。根据前人研究, 将次要

因子 SWC 的分段区间定为: $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 次要因子 VPD 的分段区间定为: $VPD \leq 1.0 \text{ kPa}$, $VPD > 1.0 \text{ kPa}$ (Bernier *et al.*, 2002; 同小娟等, 2009; 周洁等, 2013)。

影响 H 的主导因子为 VPD , 对不同温度条件下 H 与 VPD 的关系分析发现, 当 T_a 变化时, H 与 VPD 的关系并未受到显著影响, 如图 3 所示。进一步尝试其他的分段方法, 仍未发现明显的变化, 因此, 温度未能限制 H 对 VPD 的响应方式。

LE 的主要影响因子为 R_n , 分析得出: 当 $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, LE 与 R_n 相关性最差, 说明在干旱条件下, 较低的土壤水分含量对植物的生理活动产生限制; 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 两者呈良好的线性相关 ($R^2 = 0.75$),

表2 环境因子对各通量及相关指标的直接途径系数和间接途径系数
Table 2 Direct and indirect path coefficients of environmental factors on fluxes and related indices

通量 Flux	决定系数 Determination coefficient	自变量 Independent variable	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient	
显热通量 <i>H</i>	0.27	饱和水汽压差 <i>VPD</i>	0.59	0.11 (<i>VPD</i> → <i>T_a</i> → <i>H</i>)	
		空气温度 <i>T_a</i>	-0.28	0.29 (<i>T_a</i> → <i>VPD</i> → <i>H</i>)	
潜热通量 <i>LE</i>	0.94	净辐射 <i>R_n</i>	0.57	0.66 (<i>R_n</i> → <i>T_a</i> → <i>LE</i>)	
		空气温度 <i>T_a</i>	0.33	0.68 (<i>T_a</i> → <i>R_n</i> → <i>LE</i>)	
		土壤水分含量 <i>SWC</i>	0.12	0.44 (<i>SWC</i> → <i>R_n</i> → <i>LE</i>)	
净生态系统生产力 <i>NEP</i>	0.34	光合有效辐射 <i>PAR</i>	0.54	0.18 (<i>PAR</i> → <i>VPD</i> → <i>NEP</i>)	
		饱和水汽压差 <i>VPD</i>	-0.28	0.36 (<i>VPD</i> → <i>PAR</i> → <i>NEP</i>)	
		空气温度 <i>T_a</i>	0.25	0.32 (<i>T_a</i> → <i>PAR</i> → <i>NEP</i>)	
总生态系统生产力 <i>GEP</i>	0.76	空气温度 <i>T_a</i>	0.85	0.20 (<i>T_a</i> → <i>VPD</i> → <i>GEP</i>)	
		饱和水汽压差 <i>VPD</i>	-0.43	0.49 (<i>VPD</i> → <i>T_a</i> → <i>GEP</i>)	
		光合有效辐射 <i>PAR</i>	0.41	0.57 (<i>PAR</i> → <i>T_a</i> → <i>GEP</i>)	
生态系统呼吸 <i>RE</i>	0.90	土壤温度 <i>T_s</i>	0.86	0.63 (<i>T_s</i> → <i>SWC</i> → <i>RE</i>)	
		土壤水分含量 <i>SWC</i>	0.11	0.80 (<i>SWC</i> → <i>T_s</i> → <i>RE</i>)	
水分利用效率 <i>WUE</i>	0.50	空气温度 <i>T_a</i>	-0.17	-0.34 (<i>T_a</i> → <i>VPD</i> → <i>WUE</i>)	
		饱和水汽压差 <i>VPD</i>	-0.44	-0.37 (<i>VPD</i> → <i>T_a</i> → <i>WUE</i>)	
		土壤水分含量 <i>SWC</i>	-0.33	0.49 (<i>SWC</i> → <i>T_a</i> → <i>WUE</i>)	

H, sensible heat; *LE*, latent heat; *NEP*, net ecosystem production; *PAR*, photosynthetically active radiation; *RE*, ecosystem respiration; *R_n*, net radiation; *SWC*, soil water content; *T_a*, air temperature; *T_s*, soil temperature; *VPD*, vapor pressure deficit; *WUE*, water use efficiency.

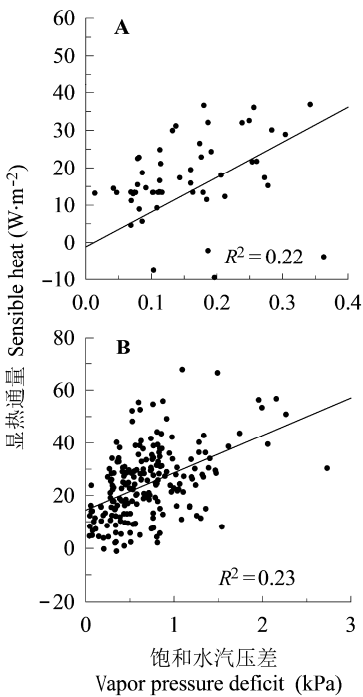


图3 不同空气温度(*T_a*)条件下显热通量对饱和水汽压差的响应。A, *T_a* < 0 °C。B, *T_a* > 0 °C。
Fig. 3 Changes in sensible heat with vapor pressure deficit under different air temperature (*T_a*). A, *T_a* < 0 °C. B, *T_a* > 0 °C.

即此种水分条件下, *R_n*可以很好地促进潜热通量的发生; 当 $0.35\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3} < \text{SWC} < 0.45\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 线性

相关变弱($R^2 = 0.40$), 但仍为正相关。
*PAR*为*NEP*的主导因子, *VPD*作为次要因子, 可以影响植物气孔的闭合程度, 从而影响光合生产力。为进一步研究水分因子(*VPD*)的抑制作用, 分析了不同的*VPD*条件下*NEE*对光的响应情况, 结果表明: 当 $\text{VPD} \leq 1.0\text{ kPa}$ 时, *NEP*与*PAR*呈较好的线性相关($R^2 = 0.38$), 此时, 散射辐射在太阳总辐射中所占比例较大, 容易穿过叶片到达冠层下部, 植物整体能充分利用*PAR*来促进自身生长; 当 $\text{VPD} > 1.0\text{ kPa}$ 时, 两者关系不再明显, 且当*VPD*继续增大时, *NEP*有降低的趋势, 原因在于*VPD*增大会导致植物气孔关闭, 从而降低蒸腾速率。
不同水分情况(*VPD*)下, *GEP*与*T_a*的关系与*NEP*与*T_a*的关系如下: 当 $\text{VPD} \leq 1.0\text{ kPa}$ 时, *GEP*与*T_a*呈良好的线性关系($R^2 = 0.81$); 当 $\text{VPD} > 1.0\text{ kPa}$ 时, 两者相关性不再明显。

*RE*的主要影响因子为*T_s*, *SWC*在一定范围内可以增强呼吸, 但过多水分将对呼吸产生抑制作用, 进一步分析不同*SWC*情况下*RE*与*T_s*的关系得出, 当 $0.10\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3} < \text{SWC} \leq 0.20\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 二者呈微弱的线性相关; 当 $0.20\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3} < \text{SWC} \leq 0.35\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 时, *RE*随*T_s*升高呈显著线性增长($R^2 = 0.84$); 当 $0.35\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3} < \text{SWC} < 0.45\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 二者相关性降低

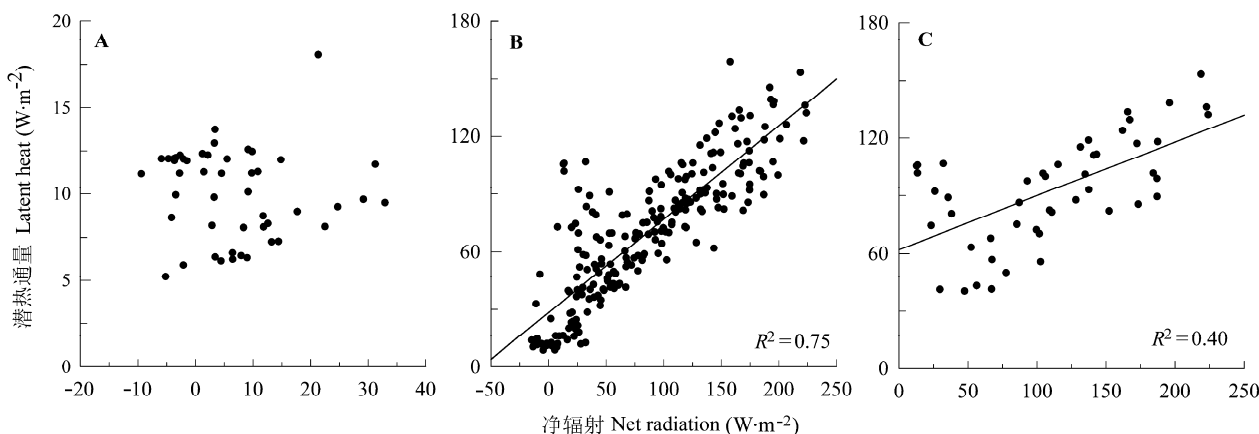


图4 不同土壤水分含量(SWC)条件下潜热通量对净辐射的响应。A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

Fig. 4 Changes in latent heat with net radiation under different soil water content (SWC). A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

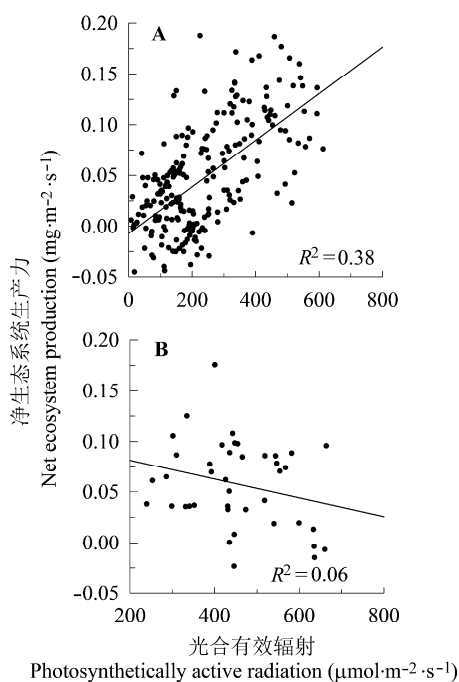


图5 不同饱和水汽压差(VPD)条件下净生态系统生产力对光合有效辐射的响应。A, $VPD \leq 1.0 \text{ kPa}$ 。B, $VPD > 1.0 \text{ kPa}$ 。

Fig. 5 Changes in net ecosystem production with photosynthetically active radiation under different vapor pressure deficit (VPD). A, $VPD \leq 1.0 \text{ kPa}$. B, $VPD > 1.0 \text{ kPa}$.

($R^2 = 0.63$)。因此, 当土壤干旱时, RE 随 T_s 升高的变化受到抑制; 土壤水分过高时, 将对 RE 产生轻度的抑制作用。

WUE 的主导因子为 VPD , 次要因子为 SWC , 对

SWC 分段讨论后发现, 当 $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, WUE 与 VPD 基本无相关, 即干旱土壤条件下, 植物受到一定的水分胁迫, 限制了正常的生理活动; 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, WUE 随 VPD 的增长呈非线性的下降趋势($R^2 = 0.41$), 当 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, WUE 与 VPD 呈负相关, 且关系变弱, 即在较高的土壤水分条件下, WUE 亦可能受到抑制。

3 讨论

鉴于所依赖的观测资料年限较短, 表3总结了国内外部分森林生态系统各通量的影响因子。由表3可见, H 主要受水分及温度影响, H 变化与 VPD 呈正相关关系, 与 T_a 呈负相关关系, 原因可能在于 VPD 越低, RH 则越高, 必然因蒸发增强而散失更多的热量, 从土壤传递给大气的热量将随之减少, 而 T_a 越高, 将同样导致热量减少。 LE 的主导因子为 R_n , 部分为 T_a 。目前关于 NEP 的研究较多, 其主导因子包括 PAR 、 T_a 、 VPD 。在其他相关研究中, 年尺度上 T_a 起决定作用, 影响 RE 的因子主要有 T_a 、 T_s 、 SWC 、 VPD 。温度波动将造成生态系统生产力的变化(Xiao et al., 2013)。本研究中 RE 的主导因子为 T_s , 其次为 SWC 。影响 WUE 的主要因子为 VPD , 其次为 SWC , 当 VPD 增大时, WUE 降低。

分析结果表明, 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, LE 、 RE 及 WUE 与其各自的主导因子相关性较强, 而当 $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 及

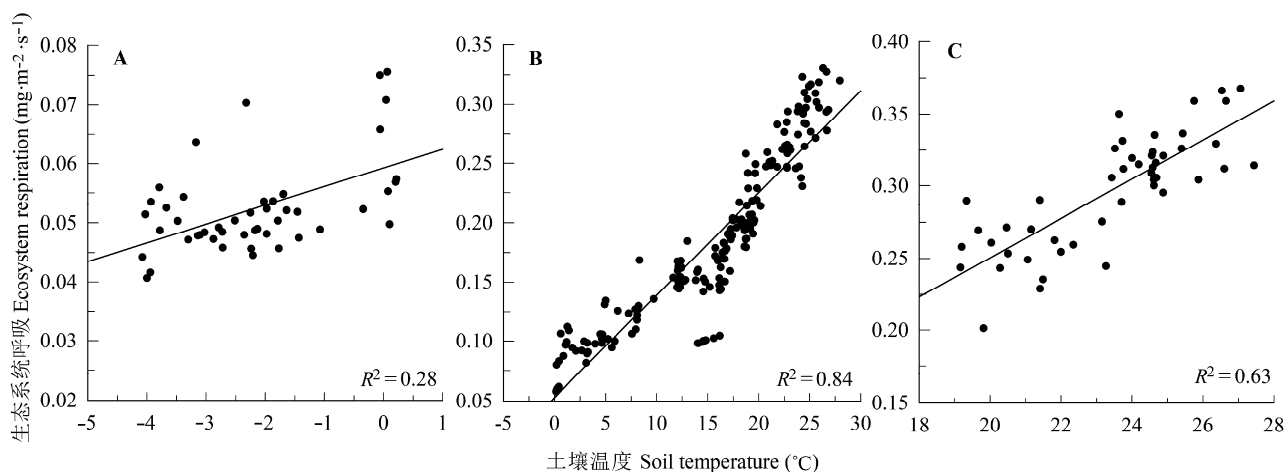


图6 不同土壤水分含量(SWC)条件下生态系统呼吸对土壤温度的响应。A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

Fig. 6 Changes in ecosystem respiration with soil temperature under different soil water content (SWC). A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

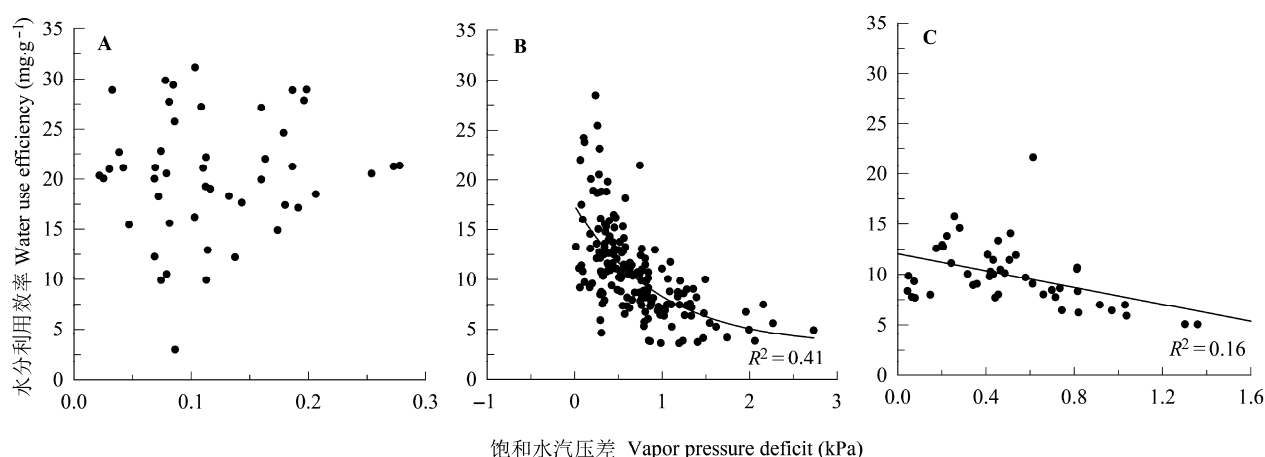


图7 不同土壤水分含量(SWC)条件下水分利用效率对饱和水汽压差的响应。A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

Fig. 7 Changes in water use efficiency with vapor pressure deficit under different soil water content (SWC). A, $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. B, $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. C, $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

$0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 相关性变弱。可见, 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC < 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 该生态系统处于较好的水分条件, 植物可最大程度地利用环境因子促进自身生长。综合以上分析可得, 该生态系统内存在一定程度的干旱胁迫, 水分不足比水分过多对植物的生理活动限制更为明显。

当 SWC 下降超过其阈值时, 叶片或冠层对水分的传导则受到影响。土壤水分对植物的影响主要通过气孔限制与非气孔限制两种方式(Chen *et al.*, 2008)。周洁等(2013)在北京人工杨树林进行了类似

的研究工作, 得出的 ET 、 WUE 与环境因子的关系受到 SWC 条件的影响。在华北人工混交林的研究结果表明, 干旱程度会影响水汽通量与温度的相关性, 水汽通量与降水的关系也受到干旱的影响(国琳, 2010)。Jassal等(2008)研究发现, 当 $SWC > 0.11 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 冷杉林 RE 随 T_s (2 cm深度)的升高而升高, 但当 SWC 低于这一值时, 两者则不再相关。Eamus等(2013)研究发现, 在干旱季节(土壤水分含量较低时), 随 VPD 增大, WUE 呈非线性的递减, 但在湿润季节, 两者无显著相关性。Yang等(2010)研究发现,

表3 不同生态系统各通量主要的影响因子

Table 3 The primary driving forces on ecosystem flux in different ecosystems

生态系统 Ecosystem	研究区域 Study area	通量 Flux	主导因子 Primary factor	参考文献 Reference
针叶林 Coniferous forest	中国江西 Jiangxi, China	显热通量 H	饱和水汽压差(非干旱胁迫期) VPD (non-drought stress period)	He <i>et al.</i> , 2011
混交林 Mixed forest	中国北京 Beijing, China	显热通量 H	土壤温度 T_s	Li & Yu, 2013
人工杨树林 Poplar plantation	中国北京 Beijing, China	潜热通量 LE	净辐射 R_n	Zhou <i>et al.</i> , 2013
橡树草原 Oak savanna	美国 America	潜热通量 LE	土壤水分含量 SWC	Chen <i>et al.</i> , 2008
杉木林 Fir plantation	中国湖南 Hunan, China	净生态系统生产力 NEP	光合有效辐射、气温 PAR, T_a	Zhao, 2011
混交林 Mixed forest	中国河南 Henan, China	净生态系统生产力 NEP	光合有效辐射 PAR	Tong <i>et al.</i> , 2009
针叶林 Coniferous plantation	中国江西 Jiangxi, China	净生态系统生产力 NEP	光合有效辐射 PAR	Huang <i>et al.</i> , 2011
杉木林 Fir planation	中国湖南 Hunan, China	总生态系统生产力 GEP	气温 T_a	Zhao, 2011
桉树林 Eucalyptus forest	澳大利亚 Australia	总生态系统生产力 GEP	光合有效辐射 PAR	Kilinc <i>et al.</i> , 2013
杉木林 Fir plantation	中国湖南 Hunan, China	生态系统呼吸 RE	土壤温度 T_s	Zhao, 2011
冷杉林 Fir plantation	加拿大 Canada	生态系统呼吸 RE	土壤水分含量 SWC	Jassal <i>et al.</i> , 2008
人工杨树林 Poplar plantation	中国北京 Beijing, China	水分利用效率 WUE	饱和水汽压差 VPD	Zhou <i>et al.</i> , 2013
稀疏草原 Savanna woodland	澳大利亚 Australia	水分利用效率 WUE	土壤水分含量 SWC	Eamus <i>et al.</i> , 2013

GEP , gross ecosystem production; H , sensible heat; LE , latent heat; NEP , net ecosystem production; PAR , photosynthetically active radiation; RE , ecosystem respiration; R_n , net radiation; SWC , soil water content; T_a , air temperature; T_s , soil temperature; VPD , vapor pressure deficit; WUE , water use efficiency.

影响 WUE 的因子主要是饱和水汽压差、土壤水分、散射辐射比例等, SWC 的抑制性次于 VPD , 但可以影响 VPD 的作用方式。可见, 土壤水分含量虽然未能成为影响通量的主要环境变量, 但作为次要因子, 其对主导因子起一定的限制作用。

VPD 是影响生态系统光合生产力的重要环境因子, 反映了大气的温度及湿度状况, 可以影响植物的气孔关闭程度。本文分析得出, 当 $VPD \leq 1.0$ kPa时, NEP 、 GEP 与环境因子密切相关, 但当 $VPD > 1.0$ kPa时, 相关性不再明显。对华北针阔混交林的研究同样发现, 不同水分条件(VPD)下 NEP 对 PAR 的响应情况将发生变化, 当 $1.0 \text{ kPa} < VPD < 2.5 \text{ kPa}$ 时, NEP 与 PAR 呈直角双曲线关系, 只有当 $VPD > 2.5 \text{ kPa}$ 时, NEP 对 PAR 的响应关系变差(同小娟等, 2009)。可能原因在于: 观测期间, 该针叶林生态系统降水较多, 因此对应的 VPD 值总体偏低, 在较高的 VPD 条件下, 少量的日尺度数据未能展现应有的关系, 可在今后更长的时间尺度上加以验证。而Eamus等(2013)在澳洲温带雨林的研究发现, 冬季的 GEP 主要由 PAR 控制, 而夏季的 GEP 则主要与 VPD 及 SWC 有关, 可见次要因子的限制作用确实存在, 环境因子对水热碳通量的影响受到其他因子的影响。

4 结论

采用通径分析和分段回归, 综合分析了河北崇

陵流域人工林各通量及相关指标与环境因子的关系, 发现影响 H 及 WUE 的因子主要为 VPD , 影响 LE 、 NEP 及 GEP 的因子以辐射、温度为主; 各通量及相关指标与其主导环境因子间的相关性受到次要因子的明显限制, 当 $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} < SWC \leq 0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, LE 、 WUE 与主导因子间相关性最高; 不同 VPD 条件下, NEP 与 PAR 、 GEP 与 T_a 之间的相关性不同, 当 $VPD \leq 1.0 \text{ kPa}$ 时, 相关性最高。

采用通径分析可以对生态水文过程的驱动因子有清晰的宏观认识, 而分段回归的结合使用, 可以揭示次要因子在不同水平下, 相关过程如何对主导因子产生响应, 量化了次要因子起限制作用的数量范围, 从而可加深对生态系统功能与环境因子间关系响应机制的理解。

基金项目 国家自然科学基金面上项目(3117145)和中国科学院地理科学与资源研究所135重点项目(2012ZD003)。

致谢 感谢中国科学院地理科学与资源研究所崇陵流域试验基地工作人员张广英、王盛宝的热心帮助。

参考文献

Bernier PY, Bréda N, Granier A, Raulier F, Mathieu F (2002). Validation of a canopy gas exchange model and derivation of a soil water modifier for transpiration for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) using sap flow density measurements. *Forest Ecology and Management*, 163, 185–196.

- Chen XY, Rubin Y, Ma SY, Baldocchi D (2008). Observations and stochastic modeling of soil moisture control on evapotranspiration in a Californian oak savanna. *Water Resources Research*, 44, 99–119.
- Du JJ, Chen ZW (2010). Method of path analysis with SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 45(2), 4–6. (in Chinese) [杜家菊, 陈志伟 (2010). 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法. *生物学通报*, 45(2), 4–6.]
- Eamus D, Cleverly J, Boulain N, Grant N, Faux R, Villalobos-Vega R (2013). Carbon and water fluxes in an arid-zone *Acacia* savanna woodland: An analyses of seasonal patterns and responses to rainfall events. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 225–238.
- Ge ZM, Zhou X, Kellomäki S, Peltola H, Wang KY (2011). Climate, canopy conductance and leaf area development controls on evapotranspiration in a boreal coniferous forest over a 10-year period: A united model assessment. *Ecological Modeling*, 222, 1626–1638.
- Guo L (2010). *The Variations of Water Use Efficiency and Evapotranspiration over a Plantation in the Southern Part of Hilly Areas of North-China*. PhD dissertation, Graduate University of Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [国琳 (2010). 华北低丘南段山地人工林蒸散和水分利用效率的变化特征. 博士学位论文, 中国林业科学院研究生院, 北京.]
- He YW, Wang QB, Wen XF, Wang JL, Sun XM, Wang HM (2011). The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 3069–3081. (in Chinese with English abstract) [贺有为, 王秋兵, 温学发, 王建林, 孙晓敏, 王辉民 (2011). 季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响. *生态学报*, 31, 3069–3081.]
- Huang H, Meng P, Zhang JS, Gao J, Jia CR (2011). Seasonal variations and environmental control impacts of evapotranspiration in a hilly plantation in the mountain areas of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 3569–3580. (in Chinese with English abstract) [黄辉, 孟平, 张劲松, 高峻, 贾长荣 (2011). 华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素. *生态学报*, 31, 3569–3580.]
- Jassal RS, Black TA, Novak MD, Gaumont-Guay D, Nesic Z (2008). Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Global Change Biology*, 14, 1305–1318.
- Jing YH, Xing LW (2006). Path analysis and its application. *Statistical Education*, (2), 24–26. (in Chinese) [敬艳辉, 邢留伟 (2006). 通径分析及其应用. *统计教育*, (2), 24–26.]
- Kilinc M, Beringer J, Hutley LB, Tapper NJ, McGuire DA (2013). Carbon and water exchange of the world's tallest angiosperm forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 215–224.
- Launiainen S (2010). Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal scots pine forest. *Biogeosciences*, 7, 3921–3940.
- Law BE, Falge E, Gu L, Baldocchi DD, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman AJ, Falk M, Fuentes JD, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens IA, Jarvis P, Jensen NO, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw UKT, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97–120.
- Li C, He HL, Liu M, Su W, Zhang LM, Wen XF, Yu GR (2008). The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX. *Geo-Information Science*, 10, 557–565. (in Chinese with English abstract) [李春, 何洪林, 刘敏, 苏文, 伏玉玲, 张雷明, 温学发, 于贵瑞 (2008). ChinaFLUX CO₂通量数据处理系统与应用. *地球信息科学*, 10, 557–565.]
- Li YT, Yu XX (2013). Research of the heat balance in a typical *Platycladus orientalis* plantation in the west mountain area of Beijing. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21, 600–607. (in Chinese with English abstract) [李轶涛, 余新晓 (2013). 北京西山典型侧柏人工林热量平衡研究. *应用基础与工程科学学报*, 21, 600–607.]
- Li ZQ, Yu GR, Wen XF, Zhang LM, Ren CY, Fu YL (2004). The evaluation of energy balance closure of ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 34, 46–56. (in Chinese) [李正泉, 于贵瑞, 温学发, 张雷明, 任传右, 伏玉玲 (2004). 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. *中国科学D辑: 地球科学*, 34, 46–56.]
- Liu ZP, Shao MA, Wang YQ (2011). Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142, 184–194.
- Oliphant AJ, Grimmer CSB, Zutter HN, Schmid HP, Su HB, Scott SL, Offerle B, Randolph B, Randolph JC, Ehman J (2004). Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 185–201.
- Tang X, Chen WJ, Li CY, Zha TS, Wu B, Wang XP, Jia X (2013). Net carbon exchange and its environmental affecting factors in a forest plantation in Badaling, Beijing of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3507–3064. (in Chinese with English abstract) [唐祥, 陈文婧, 李春义, 查天山, 吴斌, 王小平, 贾昕 (2013). 北京八达岭林场人工林净碳交换及其环境影响因子. *应用生态学报*, 24, 3057–3064.]

- Tong XJ, Zhang JS, Meng P, Yin CJ, Gao J, Huang H, Guo L (2009). Relationship between net ecosystem carbon exchange and meteorological factors in a plantation in the hilly area of the North China. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 6638–6645. (in Chinese with English abstract) [同小娟, 张劲松, 孟平, 尹昌君, 高峻, 黄辉, 国琳 (2009). 华北低丘山地人工林生态系统净碳交换与气象因子的关系. 生态学报, 29, 6638–6645.]
- Wang YH, Jing CQ, Bai J, Li LH, Chen X, Luo GP (2014). Characteristics of water and carbon fluxes during growing season in three typical arid ecosystems in central Asia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 795–808. (in Chinese with English abstract) [王玉辉, 井长青, 白洁, 李龙辉, 陈曦, 罗格平 (2014). 亚洲中部干旱区3个典型生态系统生长季水碳通量特征. 植物生态学报, 38, 795–808.]
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oecher W, Tenhunen J, Valetini R, Verma S (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243.
- Xiao JF, Sun G, Chen JQ, Chen H, Chen SP, Dong G, Gao SH, Guo HQ, Guo JX, Han SJ, Kato T, Li YL, Lin GH, Lu WZ, Ma MG, McNulty S, Shao CL, Wang XF, Xie X, Zhang XD, Zhang ZQ, Zhao B, Zhou GS, Zhou J (2013). Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 76–90.
- Yang B, Pallardy SG, Meyers TP, Gu LH, Hanson PJ, Wullschlegel SD, Heuer M, Hosman KP, Riggs JS, Sluss DW (2010). Environmental controls on water use efficiency during severe drought in an Ozark forest in Missouri, USA. *Global Change Biology*, 16, 2252–2271.
- Yu GR, Sun XM (2006). *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems*. China Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [于贵瑞, 孙晓敏 (2006). 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 高等教育出版社, 北京.]
- Yu GR, Wen XF, Li QK, Zhang LM, Ren CY, Liu YF, Guan DX (2005). Seasonal patterns of Chinese typical subtropical and temperate forest ecosystem respiration and its response to environmental changes. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 34, 84–94. (in Chinese) [于贵瑞, 温学发, 李庆康, 张雷明, 任传友, 刘允芬, 关德新 (2005). 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: 地球科学, 34, 84–94.]
- Yue P, Zhang Q, Zhao W, Wang JS, Wang RY, Yao YB, Wang S, Hao XC, Yang FL, Wang RA (2013). Effects of clouds and precipitation disturbance on the surface radiation budget and energy balance over loess plateau semi-arid grassland in China. *Acta Physica Sinica*, 62, doi:10.7498/aps.62.209201. (in Chinese with English abstract) [岳平, 张强, 赵文, 王劲松, 王润元, 姚玉璧, 王胜, 郝小翠, 阳伏林, 王若安 (2013). 云和降水扰动对黄土高原半干旱草地辐射收支及能量分配的影响. 物理学报, 62, doi:10.7498/aps.62.209201.]
- Zhao ZH (2011). *A Study on Carbon Flux Between Chinese Fir Plantations and Atmosphere in Subtropical Belt*. PhD dissertation, Center South University of Forestry & Technology, Changsha. (in Chinese with English abstract) [赵仲辉 (2011). 亚热带杉木林生态系统与大气间的碳通量研究. 博士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.]
- Zhou J, Zhang ZQ, Sun G, Fang XR, Cha TG, Zhang Y, Wang XP, Chen JQ, Chen JQ (2013). Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 1465–1474. (in Chinese with English abstract) [周洁, 张志强, 孙阁, 方显瑞, 查同刚, 张燕, 王小平, 陈俊崎, 陈吉泉 (2013). 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应. 生态学报, 33, 1465–1474.]
- Zhu ZL, Sun XM, Wen XF, Zhou YL, Tian J, Yuan GF (2006). The study of eddy covariance flux data processing of ChinaFLUX network. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 36, 34–44. (in Chinese) [朱治林, 孙晓敏, 温学发, 周艳莲, 田静, 袁国富 (2006). 中国通量网(China-FLUX)夜间CO₂涡度相关通量数据处理方法研究. 中国科学D辑: 地球科学, 36, 34–44.]
- Zhuang JX, Wang WZ, Wang JM (2013). Flux calculation of eddy-covariance method and comparison of three main softwares. *Plateau Meteorology*, 32, 78–87. (in Chinese with English abstract) [庄金鑫, 王维真, 王介民 (2013). 涡动相关通量计算及三种主要软件的比较分析. 高原气象, 32, 78–87.]

责任编辑: 程 磊 责任编辑: 王 威