

文章编号:0559-9350(2020)04-0439-09

生态水文双向耦合模型的研发与应用: II.模型应用

曾思栋^{1,2}, 夏军^{1,3}, 杜鸿⁴, 李浩⁵

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010;

3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

4. 中南民族大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430074; 5. 长江水利委员会澜湄水资源合作中心, 湖北 武汉 430015)

摘要: 陆地生态水文过程的耦合集中体现在水碳循环的相互作用与反馈, 研究这种耦合关系以及变化环境下水文、能量通量、碳收支过程的响应特征对于理解生态水文过程的作用机理具有重要意义。本研究基于构建的生态水文双向紧密耦合模型 DTVGM-CASACNP, 选取 Ameriflux Duke 森林生态系统站点, 验证了该耦合模型的适用性。结果表明, 该模型在水、能量通量及碳通量的模拟方面均取得了较好的效果。水碳耦合关系结果表明植被生产力与蒸散发具有较强的正相关关系; 气孔对蒸腾的调控结果显示在冬季蒸腾受到气孔的控制作用强, 在夏季蒸腾受到外界环境因子的控制作用更强; 日内变化中日间蒸腾受到环境因子的控制作用较夜间高。双倍 CO₂ 浓度条件下, 植物蒸腾减小, 但截留蒸发增加, 感热通量增加显著, 碳汇作用将加强。

关键词: 生态水文; DTVGM-CASACNP; 模型验证; 耦合特征

中图分类号: TV122

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20190518

1 研究背景

陆地生态水文过程的相互作用与反馈已受到水文、气象、生态等多个学科的普遍关注。水文过程影响着陆地生态系统碳的排放、吸收等过程; 生态过程特别是植被动态变化又影响水分运动与能量分配, 包括对蒸散发、降水截留、潜热与感热通量等的影响。这种关联性通过植被水-碳通量的相关关系在不同尺度上得到验证, 如张宝忠等^[1]研究表明在冠层尺度上水碳通量存在一致的变化特征, 与太阳辐射有相似的正相关关系。Beer等^[2]研究表明在区域尺度上陆地总初级生产力与蒸散发、降水量(GPP/ET, 即水分利用效率WUE)有正相关关系。研究表明在不同生态系统、不同环境条件下WUE日变化、季节变化特征均有所差异^[3-5]。植被与水分、能量和物质的耦合循环机理研究成为陆地生态水文相互作用的主要研究内容^[6], 其关键是气孔对光合-蒸腾作用的共同调控作用及优化调控机制^[7-9]。这种控制作用与植物生理、环境因子都有关系, 生态生理学家认为冠层蒸腾主要由气孔控制, 而微气象学家则认为辐射等环境因子对蒸腾的控制作用大于气孔^[10]。黄辉等^[10]研究表明在华北低丘山地人工林中气孔对蒸散的控制作用在不同干旱年份、生长季节均有所差异。

相关研究表明冠层尺度上CO₂浓度升高会降低植物的气孔导度减少蒸发, 提高植物水分利用效率^[11], 进而影响水文过程。如Gedney等^[12]研究表明过去的20世纪中在全球尺度上CO₂浓度升高导致气孔抑制引起蒸发减少、陆地径流增加。Zhu等^[13]分析得出在流域尺度上这种影响不一致, 在海河流域CO₂浓度升高使得径流减小, 而在珠江流域则相反。Betts等^[14]表明不考虑碳循环对水循环的影响, 可能过高或过低估计径流的变化。这些研究表明不同尺度及区域条件下, 生态水文过程相互作用的效果

收稿日期: 2019-07-23; 网络首发时间: 2020-04-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200417.1126.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51809008); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB123); 中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(CZY18042)

作者简介: 曾思栋(1987-), 博士, 副研究员, 主要从事变化环境下流域生态水文及水资源调配研究。E-mail: sidong.zeng@qq.com

存在差异，这与不同环境下生态水文的耦合机制密切相关，因此仍然有必要进一步加强生态水文过程相互作用关系及耦合机理的研究。

生态水文水碳耦合关系在冠层尺度上一般可以通过涡度相关系统观测数据进行研究^[15-16]，但由于陆面水文生态过程耦合的复杂性和不确定性以及下垫面的空间变异性，观测系统往往关注典型区域生态系统特征，限制了在区域尺度的应用，而利用生态水文耦合模型便于在流域或区域尺度上开展，使得利用生态水文耦合模型研究生态水文过程的耦合特征成为不可缺少的手段和工具，特别是为研究变化环境下生态水文过程的响应特征时提供了一种可行的科学基础。基于此，本研究通过自主开发的生态水文双向紧密耦合模型DTVGM-CASACNP模型^[17]，对生态水文过程水、能量通量、碳通量进行耦合模拟及模型验证，进一步对生态水文过程的耦合特征进行分析，并探讨CO₂浓度升高情况下水、能量通量、碳通量的响应特征，通过本研究验证模型的适用性，并探讨变化环境下生态水文的耦合特性。

2 研究区概况及模型构建

2.1 试验站点 本次研究选取美国 Ameriflux Duke 火炬松森林站点，地理坐标为 35.9782°N, 79.0942°W，主要的植被类型是火炬松，植被覆盖类型属于常绿针叶林，森林冠层分布比较均匀，平均高度大约为 19.0 m，叶面积指数在 2.5 ~ 5.5 m²m⁻²内变化。通量观测塔位于火炬松森林内，见图 1，观测塔塔高为 22.2 m，辐射和通量观测仪位于离地面 20.2 m 高处，包括 CO₂/H₂O 分析仪、净辐射计和光合有效辐射传感器，其他仪器包括气温探针和相对湿度探针、树干液流量传感器、雨量计以及时域反射土壤水传感器等。



图1 Duke火炬松森林站点通量观测塔(来源: Ameriflux)

2.2 数据分析 本次研究主要使用的数据包括 2004—2005 年气象、能量通量数据、遥感物候、叶面积指数(LAI)数据、植被及土壤类型数据等。其中气象数据主要用于驱动模型，LAI数据、能量通量数据、土壤水及土壤温度监测数据等用于模型验证。

(1)气象数据分析。根据试验站点气象观测数据，Duke火炬松森林站点年均气温为 14.7 °C，在 12 月—翌年 2 月气温较低，7—8 月气温较高；年均降水量为 958.7 mm，其中 7、8 月降水较大，占全年的 27%；年平均风速 1.3 m/s；年平均太阳辐射强度为 176.8 W/m²，辐射较大月份为 4—8 月，见表 1。

(2)能量闭合分析。大量的观测试验表明利用涡动相关法观测的湍流通量小于可利用能量，即能

表1 试验站点气象要素月平均统计值

气象要素	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
大气压/kPa	100.2	100.2	99.8	99.5	99.7	99.8	99.6	99.7	99.9	99.7	100.0	99.9	99.8
气温/°C	4.1	5.2	9.6	14.8	19.2	22.7	25.2	23.6	21.5	15.5	10.8	4.5	14.7
相对湿度/%	66.4	67.2	68.8	65.2	78.6	84.9	84.7	87.4	83.6	86.9	76.3	68.5	76.5
降水量/mm	54.6	67.4	91.0	44.1	68.5	67.1	131.0	124.3	65.6	57.6	104.5	83.1	958.7
风速/(m/s)	1.5	1.5	1.6	1.6	1.3	1.1	1.0	1.0	1.3	1.1	1.3	1.4	1.3
太阳辐射/(W/m ²)	115.5	128.0	172.2	224.4	253.1	229.3	243.0	221.2	188.3	134.4	114.1	98.6	176.8

量不闭合，这种不闭合有时达到20%以上，由于陆面过程往往是基于陆气间的能量平衡建立的，能量的不闭合必将对陆面过程带来影响，因此有必要分析能量的闭合情况，能量的闭合指净辐射(Rn)与土壤热通量(G)之差(Rn-G)应当与所分配的感热通量(H)和潜热通量(LE)的和(H+LE)相等。由于这两个站点缺乏土壤热通量的观测，同时在年、月尺度上一般土壤热通量可假设为0，故采用Rn与H+LE进行能量平衡分析，图2为试验站点半小时尺度上Rn和H+LE的关系图，从图中可看出，尽管未考虑土壤热通量，可利用能量Rn与分配的能量H+LE之间的线性关系仍然较高，2004年和2005年相关系数分别为0.92和0.93，从全年来讲，在未考虑土壤热通量情况下，能量闭合度均满足在80%以上，为模型模拟提供了较好的基础。

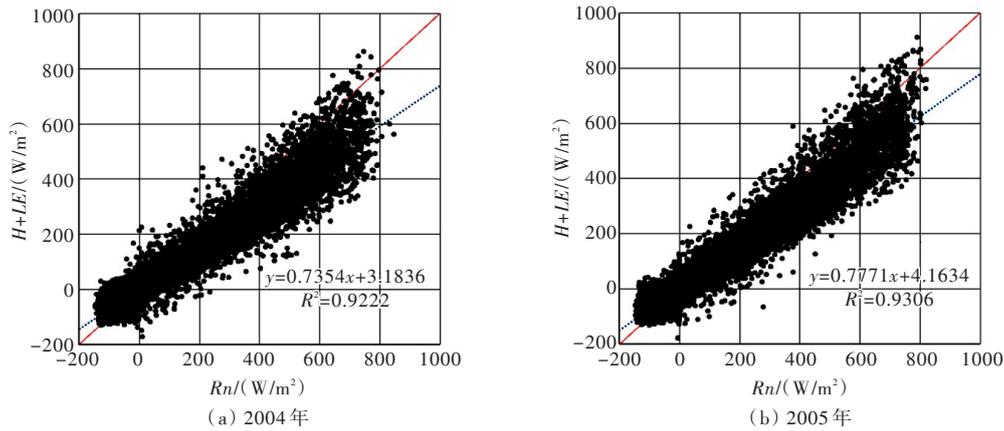


图2 试验站点能量平衡分析

2.3 耦合特征分析方法

(1)水分利用效率。水分利用效率(WUE)是农学、植物生理学、植物生态学等学科的一个常用概念，其基本内涵是生产力与耗水量的比值，它作为一个表征植物用水效率的参数在科学研究与生产实践中都有重要的意义。在陆地生态系统水碳耦合研究中，WUE一般表示为碳/水的比值，是反映水、碳耦合关系的耦合参数，在生态系统尺度上一般可以表示为总初级生产力(GPP)与蒸散发(ET)的比值。

(2)气孔对蒸腾的调控作用。本研究选取Jarvis和McNaughton提出的退耦系数(Ω)来量化气孔对蒸腾速率调控程度：

$$\Omega = \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon + g_a / g_c}, \quad \varepsilon = \Delta / \gamma \quad (1)$$

式中： ε 表示潜热相对应与感热的变化； Δ 与 γ 分别为饱和水汽压差随温度变化的斜率和干湿表常数，kPa/°C； g_a 、 g_c 分别为空气动力学导度和气孔导度，m/s。当 $g_a \gg g_c$ 时， Ω 趋向于0，表示气孔对蒸腾的控制程度非常高，气孔的微小变化会引起蒸腾的相应变化，且蒸腾作用与气孔导度、饱和差之间具有较好的线性关系；相反，当 $g_a \ll g_c$ 时， Ω 趋向于1，表示气孔对蒸腾的影响很小，此时蒸腾更依赖于环境，蒸腾速率与气孔导度的相关性较低。

3 模型验证

3.1 模型设定及参数 本模型计算时间步长为0.5 h，主要输入包括大气压、气温、相对湿度、风速、降雨、太阳辐射等，模型中CO₂浓度根据实测资料输入。模型的率定与验证采用实测水量及能量通量、碳通量数据，包括净辐射、潜热通量、感热通量，实测蒸散发、土壤水及土壤温度以及总初级生产力。模型率定采用2004年实测半小时数据，模型验证采用2005年实测半小时数据。在半小时尺度上选取水量、能量通量及碳通量模拟值与实测值进行日内变化模拟效果分析，并将半小时模拟及实测数据统计到日尺度分析整个生长期的模拟效果。

本模型参数主要包括土壤物理参数、水文过程参数、植物生理参数和生物地球化学参数等。

其中，土壤物理参数包括土壤饱和含水率、田间持水率、饱和水力传导度等，主要根据 USDA 分类系统，本研究区域内土壤类型主要为 Enon 粉砂壤土，在 0.3 m 以上为粉砂壤土，在 0.3 m 以下主要为黏土，土壤水力参数见表 2。本模型为了更加精细的研究土壤含水量变化，将土壤划分为 100 层，采用变时间步长法求解 Richards 方程。土壤温度的初值根据气温及能量平衡计算自动处理，土壤含水率的初值根据实测数据设置。

表 2 研究区内土壤水力参数

土壤深度	0 ~ 0.3m	0.3 ~ 2.4m
土壤类型	粉砂壤土 (silt loam)	黏土 (clay)
砂粒含量/%	72	33
粉粒含量/%	15	20
黏粒含量/%	13	46
饱和含水率/(m^3m^{-3})	0.54	0.56
凋萎含水率/(m^3m^{-3})	0.065	0.1
饱和水力传导度/(mm/d)	182.39	147.57

水文过程参数主要包括时变增益模型产流参数；生物地球化学过程参数和植被参数根据 IGBP 植被分类系统，参考以往研究参数化方案以及参数率定设置。本研究中主要率定的参数包括产流参数 g_1 和 g_2 ，光合作用最大羧化作用率 V_{cmax} 、最大电子传输速率 J_{max} 、光量子效率 a 及土壤阻抗参数等，参数率定依据实测与模拟水、能量通量、碳通量对比的相对误差、相关系数、均方根误差 3 个指标，采用手动调参进行参数率定，见表 3。

表 3 模型主要率定参数

描述	符号	单位	取值
时变增益产流参数	g_1		0.2
时变增益产流参数	g_2		0.95
25°C 最大羧化作用率	V_{cmax}	$\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	150
最大电子传输速率	J_{max}	$\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	75
光量子效率	a	$\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	0.2
土壤阻抗参数	a		3.5
土壤阻抗参数	b		2.3
土壤阻抗参数	c		400

3.2 模型验证分析

(1) 能量通量的模拟验证。能量平衡的模拟是陆面水文物理过程与生物地球化学耦合模拟的基础。选取 2005 年 7 月生长期半小时净辐射、感热通量、潜热通量进行分析，见图 3(a)。总体上净辐射、潜热与感热通量模拟效果较好，其中净辐射与潜热通量模拟效果较感热通量好。从日内变化过程看，各项能量通量均呈现一致的日变化周期，在正午达到峰值。图 4(a) 为率定期与验证期日尺度能量通量模拟与实测对比图，总体上净辐射与潜热通量模拟效果好于感热通量，净辐射与潜热通量实测值与模拟值的相对误差 (RE)、相关系数 (r^2) 均较高，均方根误差 ($RMSE$) 较低，见表 4，相对误差均在 15% 以内，相关系数在 0.9 以上，而感热通量模拟的相对误差较大，最大相对误差达 30%，相关系数仅 0.7 左右，这可能与冠层上感热通量经常不规则波动，捕捉其变化效率较低有关。

(2) 水量通量的模拟验证。蒸散发的模拟包括土壤蒸发、冠层截留蒸发和植物蒸腾。图 3(b) 为 2005 年 7 月生长期半小时蒸散发模拟与实测对比图，总体上模拟的蒸散发与实测蒸散发在日变化内趋势一致，在中午有些偏差。图 4(b) 为率定期与验证期日尺度蒸散发模拟与实测对比图，从结果可知模型能够反映蒸散发在不同时期的年内变化，在率定期与验证期内， RE 在 15% 以内， r^2 在 0.9 以上， $RMSE$ 在 0.8 mm 以内。在 2004 年 9 月份蒸散发模拟偏低，而在 2005 年 4—5 月蒸散发模拟偏高，这可能与植被叶面积指数、净辐射等的模拟误差有关。图 5 为 2004—2005 年土壤含水率与土壤温度随着土壤深度变化的过程图，从图中可知土壤含水率及土壤温度随着土壤深度增加，其变化滞后，土壤含水率及温度变化敏感区域在上层土壤中 (0.3 m 以上)。图 6 为上层土壤含水率及土壤温度模拟与实测对比图，土壤含水率 RE 在 4% 以内， r^2 在 0.9 左右， $RMSE$ 在 0.04 左右。土壤温度 RE 在 6% 以内， r^2 达 0.99， $RMSE$ 在 2.3 °C 以内。

(3)碳通量的模拟验证。图3(c)为2005年7月生长期半小时总初级生产力(*GPP*)模拟与实测对比图,总体上模拟的*GPP*与实测*GPP*变化趋势一致,从日变化过程可知,*GPP*在日内呈现双峰值,在上午10:00与下午2:00左右达到峰值,呈现光合“午休”现象。图4(c)为率定期与验证期日尺度*GPP*模拟与实测对比图,从结果可知模型能够反映*GPP*不同生长期的年内变化,在率定期与验证期内,*RE*在10%以内, r^2 在0.8以上,*RMSE*在 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

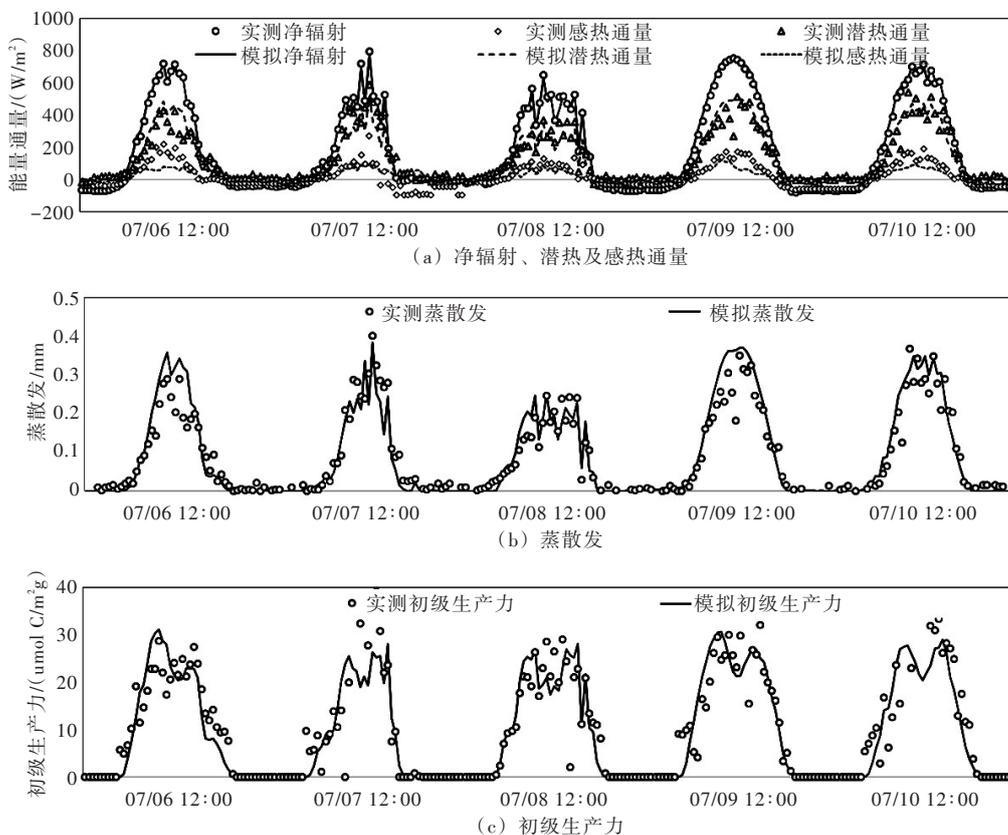


图3 水、能量通量及碳通量半小时实测与模拟结果对比图

表4 水、能量通量及碳通量模拟效果统计

	2004			2005		
	<i>RE</i>	r^2	<i>RMSE</i>	<i>RE</i>	r^2	<i>RMSE</i>
净辐射	0.04	0.97	17.01	0.14	0.96	24.37
感热通量	0.30	0.70	25.07	0.25	0.71	21.91
潜热通量	0.11	0.94	15.02	0.06	0.90	20.99
蒸散发	0.03	0.94	0.48	0.15	0.90	0.80
土壤含水率	0.04	0.90	0.03	0.01	0.92	0.04
土壤温度	0.06	0.99	1.91	0.06	0.99	2.28
总初级生产力	0.05	0.86	1.68	0.09	0.82	2.01

4 耦合特征分析

4.1 水分利用效率系数分析 图7为*GPP*与*ET*的关系图,其中斜率即为 $WUE=GPP/ET$,随着*ET*增加*GPP*也表现出增加的趋势,*GPP*与*ET*呈现较强的相关关系,但*GPP*随着*ET*增加,其增幅不断减小,即*WUE*趋于收敛。图8(a)为*WUE*在日内及年内的变化过程,从日内变化过程可知*WUE*在日内从日出至上午7点急剧增加至达到第一个峰值,之后至正午逐步减小,从正午至下午16点逐步增加达到第二个峰值,之后又急剧减小。图8(b)为*WUE*年内变化模拟与实测对比图,从模拟结果看基本

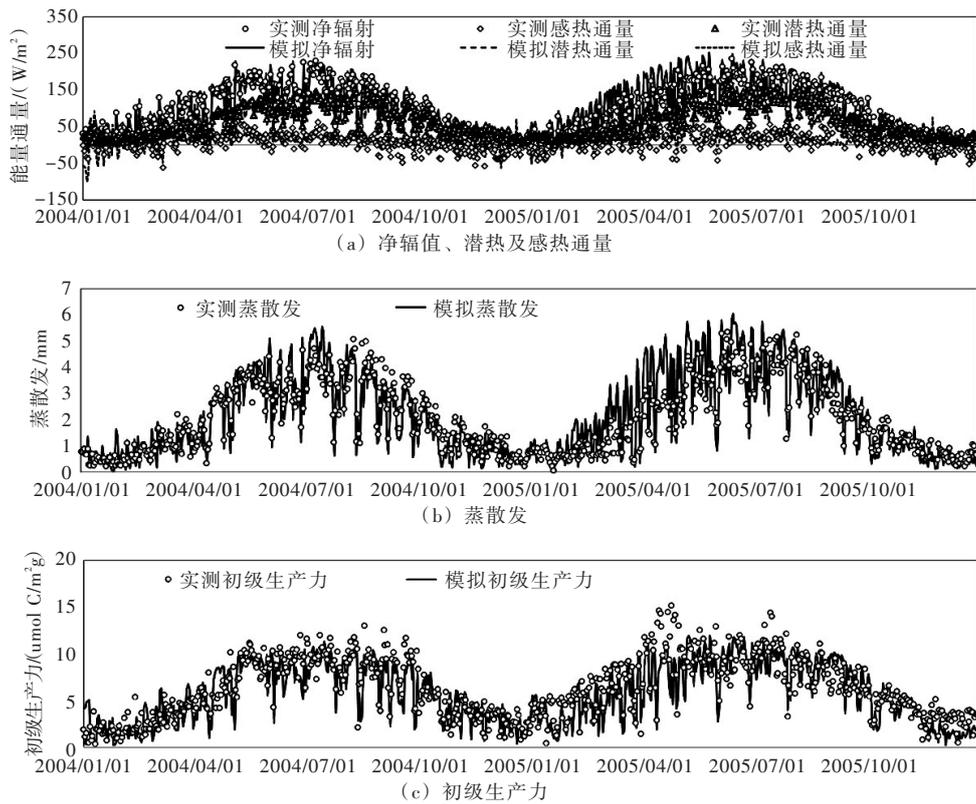


图4 水、能量通量及碳通量2004—2005年实测与模拟结果对比

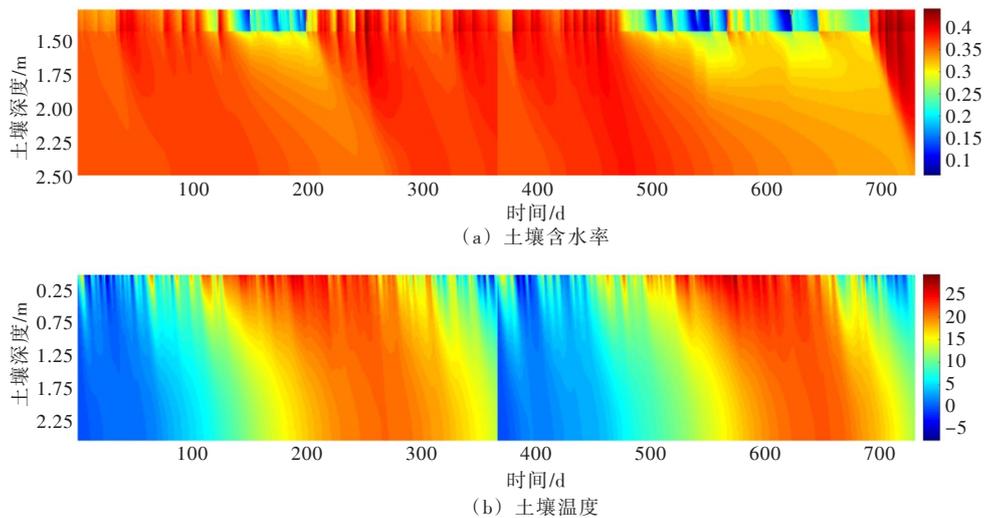


图5 2004—2005年土壤含水率及土壤温度模拟结果

能够反映 WUE 的年内变化特征，总体上在冬季 WUE 达到最大，而在夏季 WUE 为全年最小。这与相关研究表明在水分充足的森林生态系统在光合速率高的季节 WUE 较低结果是一致的^[3]。

4.2 气孔对蒸腾的调控作用分析 图9(a)为退耦系数日内变化过程图，从结果可知，在6点以前及18点以后，退耦系数较小在0.02左右，即在夜间气孔对蒸腾的控制程度非常高；从6点到18点先增加后减小，在12点左右达到峰值，平均为0.24，最大可达到0.41，在日间气孔对蒸腾的控制先减弱后增强，总体上蒸腾受到辐射等环境因子的控制作用较夜间高。

图9(b)为退耦系数年内变化过程图，从结果可知，在1—4月，11—12月，日平均退耦系数较低在0.05以内，表明气孔对蒸腾的控制作用较强；从5—10月，退耦系数先增加后减小，在7—8月达到最大值，表明气孔受到辐射等环境因子的控制作用增强。

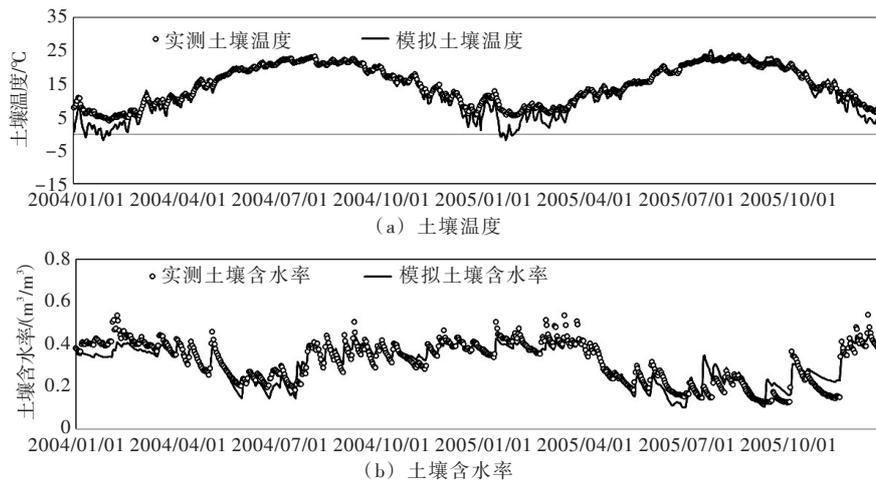


图6 2004—2005年上层土壤含水率及土壤温度(0.3m)实测与模拟结果对比

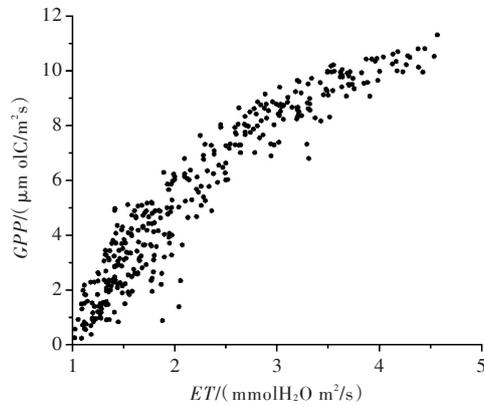


图7 GPP与ET关系

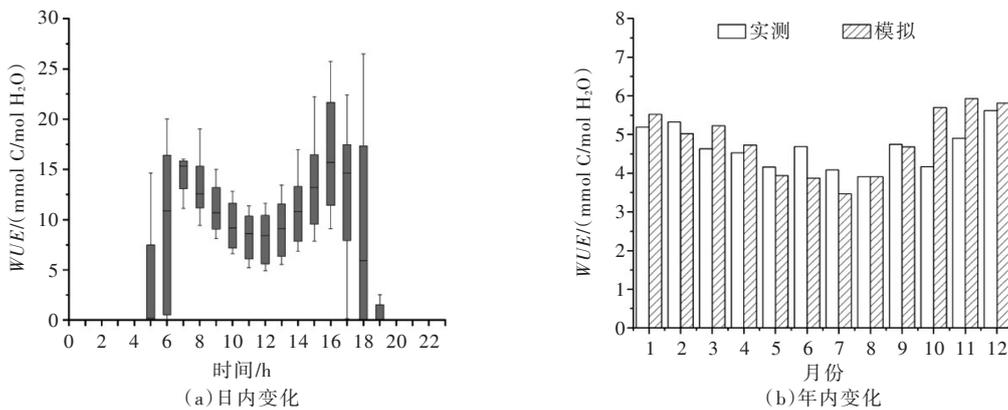


图8 WUE日内变化及年内变化过程

5 CO₂浓度升高条件下水、能量通量及碳通量的响应

本研究通过设置两个情景包括现状CO₂浓度、双倍CO₂浓度，分析CO₂浓度升高对水、能量通量及碳通量的影响。图10为水文过程、能量过程、阻抗及碳交换过程主要要素的响应变化。

从图10(a)可知CO₂浓度升高条件下，光合作用固碳增强，分配到叶面的生物量增加，植被叶面积指数增加，植被降水截留、截留蒸发增加，平均增幅在15%左右，净雨量、产流、下渗、及土壤蒸发减少，平均减幅在2%左右，同时由于CO₂浓度升高对气孔的抑制作用，蒸腾减少约12%。

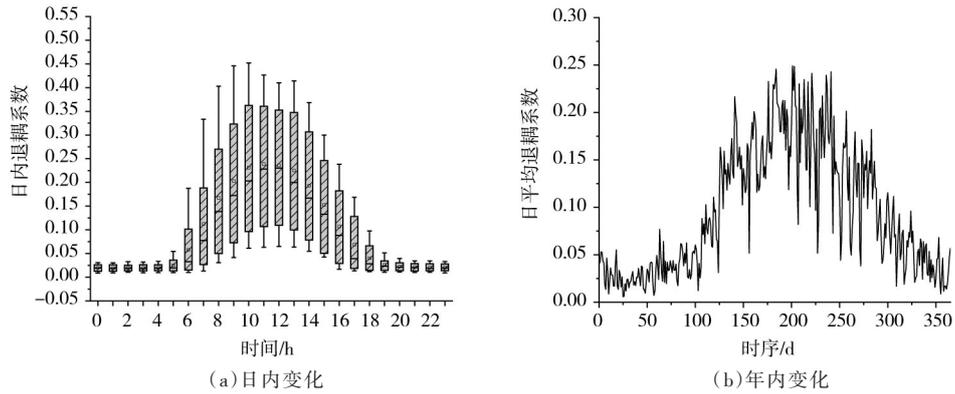


图9 退耦系数日内变化及年内变化

图10(b)为能量通量对CO₂浓度升高的响应变化，由于植被叶面积指数增加，吸收的净辐射增加约4%；由于蒸腾受到抑制，蒸散发减少，消耗的能量减少，潜热通量减少约8%；由于吸收的净辐射增加以及潜热通量减少，下垫面冠层温度升高，感热通量增加显著，平均增幅达到28%，土壤热通量的变化有增有减，平均减少0.5%左右。

图10(c)为植被及土壤蒸发阻抗的变化响应特征，从结果可知CO₂浓度升高，气孔导度减小，水汽冠层阻力增加，阳叶与阴叶面冠层阻抗均增加，平均为5%和7%，且阴叶冠层阻抗增加高。土壤阻抗变化较小，但是植被与土壤的边界层阻抗均显著增加。

图10(d)为植物碳交换主要要素的变化响应特征。从结果可知CO₂浓度升高，加大了细胞间隙与叶绿体之间的浓度梯度，有利于植物的光合作用固碳，光合有效辐射、总初级生产力、净初级生产力、植物呼吸以及叶面积指数均呈现增加，平均增加分别为5%、32%、55%、12%及20%。

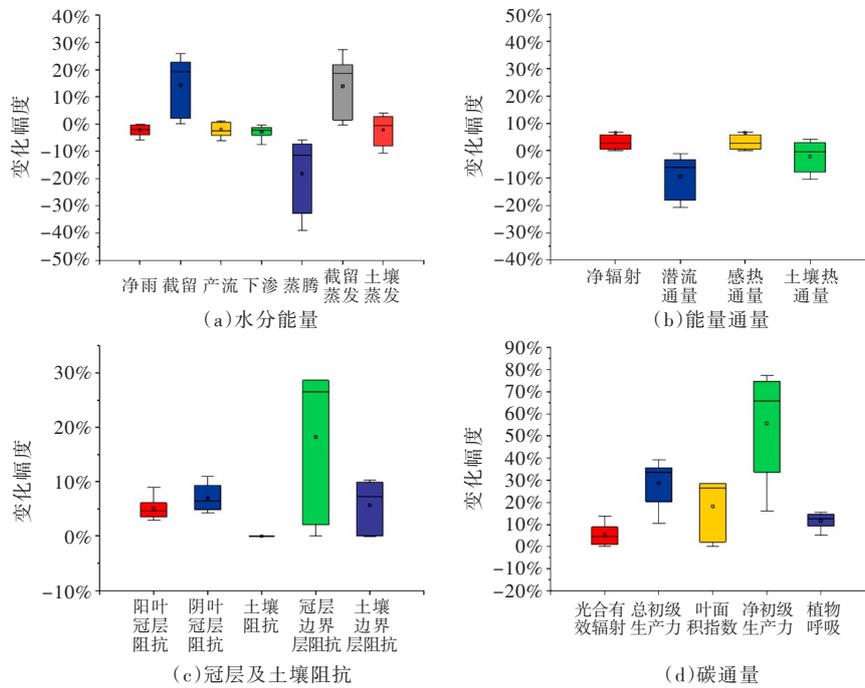


图10 双倍CO₂浓度下对水、能量通量及碳通量的影响

6 结论

(1)本研究基于构建的生态水文双向紧密耦合模型DTVGM-CASACNP，利用Ameriflux森林生态系统通量站数据对耦合模型在水、能量通量、碳通量等生态水文要素进行了模拟验证，结果表明该

模型总体上能够很好的模拟辐射传输、能量分配、蒸散发、土壤含水率及土壤温度、总初级生产力等要素,模拟误差总体较小,能够基本反映该森林生态系统生态水文要素变化特征。

(2)通过生态水文耦合特征分析,植被生产力与蒸散发具有较强的正相关关系,日间蒸腾受到环境因子的控制作用高;年内变化中夏季蒸腾受环境因子作用强,冬季受植物生理因素作用强。

(3)在双倍CO₂浓度条件下,水、能量通量及碳通量将受到影响。在水平衡方面,植被蒸腾将减小,但截留蒸发增加,地表产流及下渗都将减少;在能量分配方面,冠层吸收的净辐射增加,潜热通量减小,而感热通量增加;在碳平衡方面,总初级生产力、净初级生产力呈现增加,碳汇作用加强。

致谢:本研究采用的数据从 Ameriflux Duke Forest Loblolly Pine 森林生态系统通量站点获取,模型的开发与应用得到 DTVGM 及 CASACNP 相关模型开发人员的帮助,在此一并致谢!

参 考 文 献:

- [1] 张宝忠,刘钰,许迪,等.夏玉米叶片和冠层尺度的水碳耦合模拟[J].科学通报,2013,58(12): 1121-1130.
- [2] BEER C, REICHSTEIN M, TOMELLERI E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate[J]. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [3] YU G R, SONG X, WANG Q F, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4): 927-937.
- [4] HU Z M, YU G R, FU Y L, et al. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China[J]. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1609-1619.
- [5] HASTINGS S J, OECHEL W C, MUHLIA-MELO A. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (Sarcocaulis) in Baja California, Mexico[J]. Global Change Biology, 2005, 11(6): 927-939.
- [6] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10): 1142-1149.
- [7] YU G R, ZHUANG J, YU Z L. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field [J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158(7): 861-874.
- [8] HETHERINGTON A M, WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. Nature, 2003, 424(6951): 901-908.
- [9] 赵风华,于贵瑞.陆地生态系统碳-水耦合机制初探[J].地理科学进展,2008,27(1): 32-38.
- [10] 黄辉,孟平,张劲松,等.华北低丘山地人工林蒸散的控制因子[J].生态学报,2014,34(3): 667-673.
- [11] GERTEN D, SCHAPHOFF S, LUCHT W. Potential future changes in water limitations of the terrestrial biosphere [J]. Climatic Change, 2007, 80(3): 277-299.
- [12] GEDNEY N, COX P M, BETTS R A, et al. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records [J]. Nature, 2006, 439(7078): 835-838.
- [13] ZHU Q, JIANG H, PENG C, et al. Effects of future climate change, CO₂ enrichment, and vegetation structure variation on hydrological processes in China[J]. Global and Planetary Change, 2012(80/81): 123-135.
- [14] BETTS R A, BOUCHER O, COLLINS M, et al. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide[J]. Nature, 2007, 448(7157): 1037-1041.
- [15] 胡中民,于贵瑞,王秋风,等.生态系统水分利用效率研究进展[J].生态学报,2009,29(3): 1498-1507.
- [16] SCARTAZZA A, VACCARI F P, BERTOLINI T, et al. Comparing integrated stable isotope and eddy covariance estimates of water-use efficiency on a Mediterranean successional sequence [J]. Oecologia, 2014, 176(2): 581-594.
- [17] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.生态水文双向耦合模型的研发与应用: I.模型原理与方法[J].水利学报,2020,51(1): 33-43.

(下转第457页)

Comparative study of characteristic line method and its variants in nonlinear modeling of hydraulic turbine and water diversion system

LIU Dong^{1, 2}, ZHANG Hui³, REN Gang³, DING Qiqi³, CHEN Shang^{1, 2}, XIAO Zhihui^{1, 2}

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Key Laboratory of Hydraulic Machinery Transients, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China

3. Xiluodu Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Yongshan 657300, China)

Abstract: Establishment of hydraulic variation model for water diversion system is an important content in the nonlinear modeling and simulation of hydropower units, and the influence of hydraulic factors on the transition process of hydro-turbine regulating system (HTRS) is also the main problem to be considered systematically for the stability analysis of units and power systems. In this paper, an improved characteristic line method is proposed, and a combined nonlinear model including the basic characteristic line method and a modular nonlinear model including optional water hammer models are developed for hydro-turbine and water diversion system to conduct the comparative study for characteristic line method and its variations, so as to provide some theoretical guidance for the simulation of large and small fluctuation of hydro-turbine regulating system in the future. On this basis, taking the isolated grid operation of a large hydropower station in China as an example, under the large and small disturbances of frequency and load, the simulation of rigid and elastic water hammer, characteristic line method and its variant model is studied, the difference of instantaneous water head calculated by each model is analyzed, and the regulation rules and influence effects of different model parameters are obtained. The results show that the description of the variation trend of water head by different models of water diversion system is basically the same under the condition of large and small fluctuations, and the calculation results are only different near the local extremes, which is more obvious under the condition of large fluctuations. However, this difference can be reduced by adjusting specific model parameters.

Keywords: characteristic line method; resampling; water diversion system; unsteady friction

(责任编辑: 杨虹)

(上接第 447 页)

Development and application of bidirectional coupled ecohydrological model:

II. Model application

ZENG Sidong^{1, 2}, XIA Jun^{1, 3}, DU Hong⁴, LI Hao⁵

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

4. College of Resources and Environmental Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

5. Lancang-Mekong River Cooperation Center of CWRC, Wuhan 430015, China)

Abstract: The coupling characteristics of landsurface ecological and hydrological processes are mainly focus on the interactions and feedback of water-carbon cycles. It is significant to study the coupling relationships of water-carbon cycles and the responses of hydrological, energy transfer and carbon budget processes to changing environment for understanding the mechanisms of ecohydrological processes. In this study, the bidirectional coupled ecohydrological model DTVGM-CASACNP is validated over a forest ecosystem in Ameriflux Duke Forest Loblolly Pine site. The results show that the model could simulate water, energy and carbon flux quite well, which can characterize the vegetation dynamic and hydrological processes of this ecosystem. Furthermore, the coupling characteristics of water-carbon cycles and the controlling mechanisms of transpiration are investigated. The results show a close relationship between vegetation productivity and evapotranspiration. Besides, the controlling effects of stomatal conductance on transpiration is stronger in winter, while the controlling effects of environmental factors are stronger in summer. In the diurnal cycle, the effects of environmental factors are stronger in the daytime than in the nighttime. The enrichment of CO₂ will result in a reduction in transpiration and an increase interception evaporation and sensible heat and highly efficient carbon sinks.

Keywords: ecohydrology; DTVGM-CASACNP; model application; coupling characteristics

(责任编辑: 杨虹)