

基于非线性系统理论的水-碳耦合模型

赵玲玲^{1,2}, 夏军³

(1. 广州地理研究所, 广州 510002; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 针对现存水-碳耦合模型中存在机理复杂、结构不平衡、不确定性较大、资料需求难以满足等问题, 根据非线性水文循环模拟理论的“从复杂现象中, 寻找简单规律”的理念, 基于非线性水文循环理论构建具有一定物理机理和精度的水-碳耦合模拟方法。采用 AmeriCar Flux 的 Duke 站点和白洋淀上游的崇陵试验流域小区的试验数据, 在点尺度和小区尺度对构建模型的精度加以验证, 结果显示, 基于非线性理论的耦合模型能够更加合理和准确的模拟水文循环中蒸散发量和土壤含水量的变化过程; 最后采用该模型估算了温室气体排放量对水文循环要素的影响, 在二氧化碳浓度加倍情景下, 试验小区径流深增加 0.5%; 平均土壤含水量增加 1.2%; 蒸散发量减少 4.9%。综合表明, 构建模型达到了采用简单方法解决复杂问题的效果。

关键词: 非线性水系统理论; 水-碳耦合; 气候变化; 水文过程

中图分类号: TV1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0001-05

Water-carbon coupling model based on nonlinear system approach

ZHAO Ling ling^{1,2}, XIA Jun³

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510002, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. The State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The current water carbon coupling models have several issues such as complex mechanisms, unbalanced structure, large uncertainty, and difficulty to meet the information needs. According to the concept of “from the complex phenomena, find a simple rule” from the nonlinear hydrological cycle simulation theory, a nonlinear water-carbon coupling model was developed based on the nonlinear system theory of the hydrological cycle and Jarvis stomatal conductance method. The experimental data at the Duke station of AmeriCar Flux and in the Chongling experimental watershed of the upstream of Baiyangdian were used to verify the model accuracy at the point and watershed scales. The results indicated that the nonlinear water carbon coupling model can simulate the variations of evapotranspiration and soil moisture reasonably and accurately. The model was applied to estimate the effects of greenhouse gas discharge level on the hydrological cycle elements. When the concentration of carbon dioxide increases, the increase of runoff is 0.5%, increase of average soil moisture is 1.2%, while decrease of evaporation is 4.9%. Overall, the water carbon coupling model achieves a simple solution to solve the complex problems.

Key words: nonlinear system theory; water carbon coupling; climate change; hydrological process

在全球变化加剧水资源危机^[1-7]的背景下, 传统的水文学研究难以解决流域出现的新问题。流域水文循环模拟与陆地生态系统相互作用, 以气孔行为为节点发生耦合的现象, 成为研究全球变化对水资源影响的重要科学问题, 日益受到国内外学者的关注^[8-9]。但陆地生态系统和流域水文循

环过程耦合模拟中存在两方面的问题: 一方面是全球尺度通常采用 GCM 模型和陆面模型在大尺度网格上的耦合, 这时水文物理过程的参数化及参数率定都很困难, 模拟结果的准确性值得怀疑^[10]; 另一方面, 在流域和点尺度上水文循环模型和生态系统碳循环模型参数化结构往往不平衡^[11], 造成

收稿日期: 2014-04-10 修回日期: 2014-09-29 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1341.015.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“气候变化对中国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”(2010CB428406)

作者简介: 赵玲玲(1980), 女, 河南安阳人, 助理研究员, 博士, 主要从事流域水文循环模拟研究。E-mail: linglingzhao@foxmail.com

通讯作者: 夏军(1954), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 主要从事陆地表水文学及水资源研究。E-mail: xiaj@igs.nrr.ac.cn

二氧化碳的生态水文效应难以正确描述。鉴于此,本文以水文非线性理论为基础提出了基于非线性水文循环模拟的水碳耦合模型。该模型中的水文循环过程采用的是时变增益水文模型,即依据从“复杂现象中找简单规律,以解决复杂问题”的理念,从降水径流的复杂现象中,通过大量实验和模型,采用沃尔特拉函数总结了降水-径流的非线性关系^[12]。而作为模拟气孔导度的经典经验模型之一的 Jarvis 型模型具有形式简单和一定精度的特点^[13],至今仍作为许多蒸发散、光合模型或生态系统基于过程模型的气孔导度子模型,被广泛应用,这与非线性时变增益水文模型建模理念一致。因此本文选取 Jarvis 模型模拟气孔导度,采用 Penmar Monteith 方法为链接实现了水-碳耦合,将耦合模型在点尺度和小区尺度进行验证,并且用于模拟二氧化碳的生态水文效应。

1 模型及耦合方法

1.1 分布式非线性水文模型 DTVGM

基于水文系统理论,1989 年夏军对世界多个不同流域水文长序列资料分析,发现水文系统的增益因子并非常数,而是与土壤湿度有关,即时变增益因子。一般情况下,水文时变增益因子通常是流域状态变量土壤湿度的函数,由此提出时变增益水文模型 TVGM (Time Variant Gain Model) 的概念。TVGM 将地表水产流表达为有效雨量 P 与时变增益因子的乘积。利用水文时变增益系统的概念,可以建立结构简单且仅有少量几个参数的时变增益水文非线性概念性模型 TVGM。其中产流过程表达式为

$$R(t) = G(t)X(t) \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为 t 时间的降水; $R(t)$ 是 t 时间的径流; $G(t)$ 为增益因子。

许多流域观测数据表明,增益因子随时间变化,增益因子 $G(t)$ 与前期影响雨量呈非线性关系,可以表示为

$$G(t) = g_1 API^{g_2}(t) \quad (2)$$

式中: g_1, g_2 是时变增益因子有关参数; t 为时间变量; $API(t)$ 是前期影响雨量;基于流域降水-径流量的水量平衡制约关系,可以导出时变增益因子的约束和变化范围。

从理论上可以证明基于上述简单关系的水文系统模拟,可以获得与复杂的 Volterra 非线性响应模型同构的系统关系^[15]。将集总的时变增益水文非线性系统模型,通过 DEM 并结合单元水文模拟,推广到分布式水循环模拟,分布式时变增益水文模型 (Distributed TVGM, DTVGM) 既可以对水循环进行分布式描述,同时又具有水文系统分析适应性。该模型已在海河、黄河、黑河等流域应用^[16-17]。

1.2 改进的 Jarvis 气孔导度模型

气孔是植物与外界进行气体交换的重要通道,量化其水汽蒸腾、碳同化的控制,常用气孔导度来表示。气孔导度对环境和生理因子的响应及反馈机制是一个很复杂的植物生理生化过程,至今仍有很多机制尚不明确,致使目前估算气孔导度的模型仍停留在经验或半经验水平。在叶片尺度上,气孔导度可以直接测定,但在冠层及更大的尺度上,通过测定单叶来进行估算的方法不仅测定成本高,而且容易产生测定误差,尤其是在研究区域尺度问题时,对所有对象群落

进行实际测定几乎是不可能的^[12]。因此,很多学者提出了模拟冠层导度的各种模型,这些模型大都基于叶片尺度气孔导度对环境变量的响应模型 Jarvis 型模型^[13]或者气孔导度与光合作用耦合模型 BBL 型模型。Jarvis 型模型作为模拟气孔导度的经典经验模型之一,具有形式简单的特点,至今仍作为许多蒸发散、光合模型或生态系统基于过程模型的气孔导度子模型被广泛的应用。

冠层叶片气孔的开启主要由太阳辐射 (R_s)、空气饱和水汽压差 (VPD)、气温 (T_a)、土壤含水量 (S_m) 和环境 CO_2 浓度 (ρ_{CO_2}) 决定。基于以上 Jarvis 型气孔导度模型,考虑影响气孔阻力的环境因子胁迫函数法。1996 年 Olioso 提出如下参数化方法^[18]:

$$r_c = \frac{0.5LAI + 1}{LAI} \frac{r_0}{f_1(R_s)f_2(VPD)f_3(T_a)f_4(S_m)} \quad (3)$$

式中: LAI 作物叶面积指数; r_c 为叶片最小空气阻力; $f_1(R_s)$ 、 $f_2(VPD)$ 、 $f_3(T_a)$ 、 $f_4(S_m)$ 分别为太阳辐射、饱和水汽压差、空气温度和土壤含水量的胁迫函数。

$$f_1(R_s) = 1 - \exp(-R_s/500) \quad (4)$$

$$f_2(VPD) = 1 - 0.0238VPD \quad (5)$$

$$f_3(T_a) = 1 - 0.016(25 - T_a) \quad (6)$$

$$f_4(S_m) = \begin{cases} 1 & S_m \leq S_{mc} \\ \frac{S_m - S_{mw}}{S_{mc} - S_{mw}} & S_{mw} < S_m < S_{mc} \\ 0 & S_m \geq S_{mc} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{mc} 为土壤田间持水量; S_{mw} 为凋萎含水量。

本研究在环境变量中加入二氧化碳浓度胁迫函数,用于模拟二氧化碳浓度 (ρ_{CO_2}) 变化对水文循环的影响。对于气孔导度和二氧化碳浓度的关系, Rogers^[19] 经过试验,得到大豆、玉米和脱硫橡胶在二氧化碳浓度由 330 ppm 变化到 660 ppm 时,它们的气孔导度各减少 41%、47% 和 39%; Morison 利用植物测定试验,推出二氧化碳浓度增加一倍时,气孔导度减少 $40 \pm 5\%$,并且在这个范围内,气孔导度的减少是线性的。基于此理论本研究在冠层阻抗的环境胁迫函数中增加二氧化碳胁迫函数形成式(8)的参数化方法。

$$r_c = \frac{0.5LAI + 1}{LAI} \frac{r_0}{f_1(R_s)f_2(VPD)f_3(T_a)f_4(S_m)f_5(\rho_{CO_2})} \quad (8)$$

$$f_5(\rho_{CO_2}) = \begin{cases} 0 & \rho_{CO_2} \leq 100 \\ 1.4 - 0.4(\rho_{CO_2}/330) & 100 < \rho_{CO_2} < 1000 \\ 1 & \rho_{CO_2} > 1000 \end{cases} \quad (9)$$

1.3 耦合方法

本研究将 Jarvis 型估算冠层阻力模型嵌入到 Penmar Monteith 方程中,再在 DTVGM 模型中采用 Penmar Monteith 方法估算蒸散发量,最终以 Penmar Monteith 方程为链接,实现分布式时变增益模型与 Jarvis 模型的耦合,得到形式简单、结构平衡的 DTVGM-Jarvis 水碳耦合模型。

Penmar Monteith 的基本方程如下:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{y_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{\gamma_c}{\gamma_a})} \quad (10)$$

式中: E 为蒸散发量 (mm/d); λ 为汽化热; R_n 为净辐射 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 如以天计算蒸散量, 则可认为 $G=0$; γ 为湿度计常数 (kPa/C); e_s 为计算温度时的饱和水汽压 (kPa); e_a 为计算温度时的实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压温度曲线上的斜率 (kPa/C); C_p 为空气定压比热; ν_a 为空气动力学阻力 (s/m); ν_c 为冠层阻力 (s/m)。

Penman Monteith 模型能否在实际中广泛应用, 很大程度上取决于冠层阻力能否参数化。最初 Penman 将单叶子水汽交换方程用于冠层, 将冠层看成一片巨大的叶片, 对应冠层阻力为 ν_c 。冠层阻抗如同零平面位移一样, 是一个虚拟的物理量, 它是表示不同层次、不同部位叶片的气孔阻抗、土壤湿润状况、太阳辐射、二氧化碳浓度、空气温度及冠层内空气动力学特性等各种环境因子对整个冠层蒸散影响总效果的一个参数。冠层阻抗并不是一个纯粹的生理参数, 其数值大小并不是仅从冠层上各个叶片的气孔阻抗值就可以完全确定的。本研究采用前文改进的 Jarvis 气孔导度模型估算冠层阻力。

2 研究区及数据

2.1 AmeriFlux 的 Duke 站点

AmeriFlux 观测网络建于 1996 年, 该网络主要是用于研究碳在植被、土壤中的时空变化, 以及在主要植被类型和典型气候条件下碳、水、能量交换的量化, 为站点尺度的分析提供高质量数据。本文选取的 Duke 火炬松森林观测塔位于北卡罗来纳州 Durham 附近, 空间坐标为 $35.98^{\circ}-79.09^{\circ}$, 高程为 163 m。环绕站点的是相同树龄的火炬松, 森林的冠层分布均匀, 平均高度大约为 19 m。当地的地形起伏不大, 比较平缓。均匀的下垫面和平缓的地势减小平流的影响, 利于通量观测数据的稳定性。另外该站点数据量大且团队有相关研究基础, 为了便于比较不同方法成果, 故选用此站点。

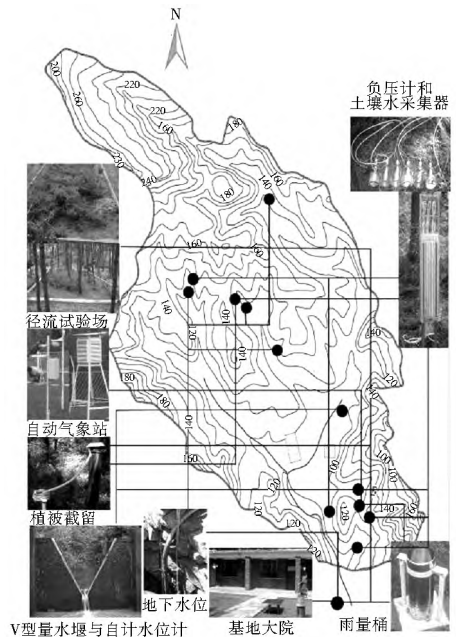
2.2 崇陵试验流域小区

崇陵流域试验基地位于河北省易县境内 ($39^{\circ}23' \text{N}$, $115^{\circ}21' \text{E}$)。地处太行山脉北端, 大清河水系白洋淀上游, 属北易水的二级支流。崇陵流域总面积 6 km^2 , 流域长 4.4 km , 平均宽 1.5 km , 海拔 $85\sim 300 \text{ m}$ 。该流域布设了自动气象站、松林荒坡径流试验场、翻斗式自记雨量计、SWR 土壤水分传感器、自记水位计、数据采集系统、负压计等仪器设备 (图 1), 实现了降水、地表水、土壤水和地下水转化的联合观测。另外在能量通量观测方面, 试验站布设了基于涡度相关技术监测地表能量通量系统。由于小区覆被较好, 故在降水量较小的情况下, 难以有径流的观测, 所以本文选取 2012 年 7 月 26 日到 2012 年 9 月 8 日的的数据, 期间有三场大的降水, 总降水量在 289 mm 。

3 结果分析

3.1 点尺度验证

采用改进 Jarvis 模型估算冠层导度的 Penman Monteith 方法在 Duke 站点进行验证, 结果见表 1, 可以看出, 该模型的相关系数和效率系数均为 0.82, 模拟年蒸散发量为 846.4



注: 来源于中国科学院地表过程与陆地水循环重点实验室

图 1 崇陵流域试验仪器分布示意图

Fig. 1 Distribution of experimental equipment in the Chongling Basin (source: key laboratory of water cycle and related land surface processes, CAS)

mm , 实测蒸散发量为 848.4 mm 。从模拟的变化过程看 (图 2), 冬季蒸散发量小, 随着时间推移逐渐增大, 直到夏季蒸散发量达到最大, 且变化幅度较大。结果显示, 模型在模拟蒸散发总量和过程的刻画方面均具有较高精度。

表 1 Duke 站点 2005 年 Penman Monteith 模型相关系数、效率系数和年值

Tab. 1 The Penman Monteith model correlation coefficient, efficiency coefficient, and annual value at the Duke station in 2005			
模拟年值/mm	实测年值/mm	相关系数	模 Nash Sutcliffe 效率系数
846.4	848.9	0.82	0.82

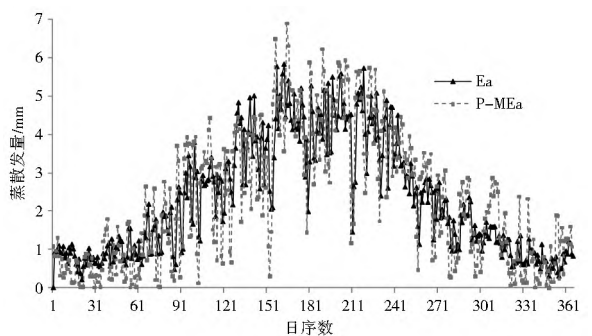


图 2 Duke 站点 2005 年 Penman Monteith 方法模拟蒸散发变化过程

Fig. 2 Variation of simulated evapotranspiration at the Duke station in 2005 using the Penman Monteith method

3.2 小区尺度验证

3.2.1 试验小区 DTVM 模型构建

首先建立崇陵试验小区的 DTVM 模型。在崇陵试验小区, 植被覆盖较好, 降水量较小时, 降水量多为土壤所涵养, 观测不到径流。为了率定和验证模型参数, 在时段上选

取 2012 年 7 月 26 日到 9 月 8 日, 期间有三场降水, 总降水量 298 mm, 有径流观测数据。选取前两场降水期为模型率定期 (7 月 26 日- 8 月 15 日), 后一场降水为验证期 (8 月 16 日- 9 月 8 日)。

表 2 是率定的模型参数和模型在模拟期的效率系数和相关系数。可以看出, 模拟径流和实测径流过程拟合较好 (图 3), 不论是相关系数和模型效率系数还是模型的水量平衡系数均达到 0.9 以上, 表明 DT VGM 模型在径流模拟上有较好的适用性。

表 2 崇陵试验小区 DT VGM 率定模型参数及模拟效果

Tab. 2 DT VGM model calibration parameters and simulation results in Chongling experimental watershed

参数	g_1	g_2	Nash Sutcliffe 效率系数	相关系数	水量平衡系数
率定期	0.290	0.117	0.920	0.960	0.968
模拟期	0.290	0.117	0.910	0.953	0.952

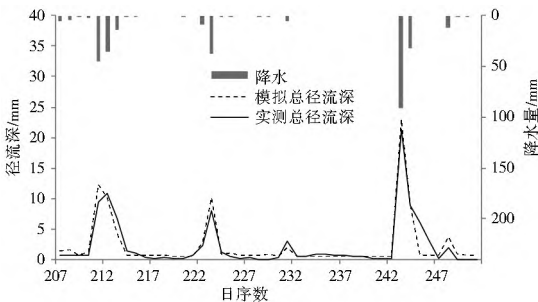


图 3 基于非线性水碳耦合模型模拟崇陵试验小区降水径流关系

Fig. 3 The simulated rainfall runoff based nonlinear water carbon coupling model in Chongling experimental watershed

3.2.2 改进前后模拟效果对比

为验证构建的 DT VGM-Jarvis 的适用性与改进效果, 将前文中构建的考虑环境胁迫因子的 Penmar Monteith 方法嵌入到 DT VGM 模型中。保持原模型的产汇流参数不变, 针对上述三场降水过程, 对改进模型中模拟的蒸散发量和土壤含水量与实测量进行比较分析。

通过改变模型产流模块中蒸散发估算方法, 可以提高模型对水文循环过程的中间状态变量土壤水 (图 4) 和蒸散发量模拟 (表 4) 的合理性和准确性, 但同时模型产汇流参数保持不变, 会造成径流模拟精度的降低。从表 3 中改进模型的各项指标来看, 不改变模型产汇流参数的情况下, 本文模型的相关系数和水量平衡系数较原模型均有提高, 而径流模拟 Nash 效率系数仅略微降低, 但改进前后均在 0.9 以上, 因此模型在此适用, 且改进合理。

表 3 崇陵试验小区基于非线性水-碳耦合模型参数及模拟效果

Tab. 3 The parameters and simulation results of nonlinear water carbon coupling model in Chongling experimental watershed

模型	g_1	g_2	Nash Sutcliffe 效率系数	相关系数	水量平衡系数
DT VGM-Jarvis	0.290	0.117	0.905	0.956	0.965

图 4 是模型改进前后模拟的土壤含水量与实测土壤含水量变化过程, 可以看出: 改进前后模型均能刻画土壤含水量随降水过程的动态变化过程, 改进前模型模拟的土壤含水量较实测值小, 而改进后的模型模拟的土壤含水量变化过程与观测土壤含水量变化过程具有更好的一致性。表明改进模型对土壤含水量变化过程的刻画更为合理准确。

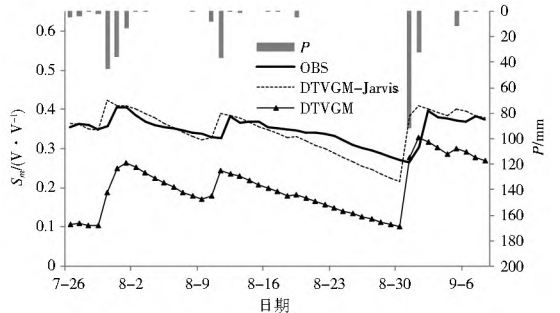


图 4 崇陵试验流域模型改进前后模拟土壤含水量变化过程

Fig. 4 Variations of soil moisture before and after model modification in Chongling experimental watershed

对于蒸散发的模拟, 由于观测潜热通量变化过程极不稳定, 故本文取其总量对模型改进效果进行验证。表 4 给出了改进前后模型模拟蒸散发量与实测量, 可以看出: 基于考虑环境胁迫因子的 Penmar Monteith 方法模拟蒸散发量与观测值更为接近。Jarvis 模型的耦合使得非线性水文模型 DT VGM 的蒸散发模拟能力有所提高, 与此同时对土壤水变化过程的模拟更加与实测相一致。并且改进的蒸散发模块没有明显降低径流的模拟精度。所以耦合的 DT VGM-Jarvis 模型具有一定的物理机理和精度。

表 4 DT VGM 改进前后估算蒸散发量与观测量

Tab. 4 Comparison of estimated and measured evapotranspiration before and after DT VGM modification

模型	DT VGM	DT VGM-Jarvis	Observed Ea
蒸散发量/mm	130.9	145.0	147.0

3.3 二氧化碳浓度加倍对水文循环的影响分析

采用耦合的 DT VGM-Jarvis 模型, 假设其他要素不变, 二氧化碳浓度加倍, 模型参数采用前文中率定的参数, 模拟蒸散发量的变化过程, 结果见图 5, 可以看出, 相比基准期背景, 蒸散发量有所减少。这是因为二氧化碳浓度增加会抑制树木生长, 减少蒸散发量。减少的这部分水量, 一部分增加了土壤蓄水量, 另一部分增加径流量。从模拟过程分析得到: 二氧化碳浓度加倍的情景下, 模拟期总径流深由 100.16 mm 增加到 100.69 mm, 增加 0.5%; 平均土壤含水量由 0.3456 增加到 0.3496, 增加 1.2%; 蒸散发量由 144.98 mm 减少到 137.76 mm, 减少 4.9%。

4 结论

本文首先分析了基于水文非线性理论的分布式时变增益水文模型和 Jarvis 型气孔导度模型的特点, 以 Penmar Monteith 方法为链接实现二者的耦合, 并在点尺度和小区尺度上对耦合模型的模拟效果进行验证, 得到如下结论。

(1) DT VGM 和 Jarvis 型模型都是同时兼具经验性和机

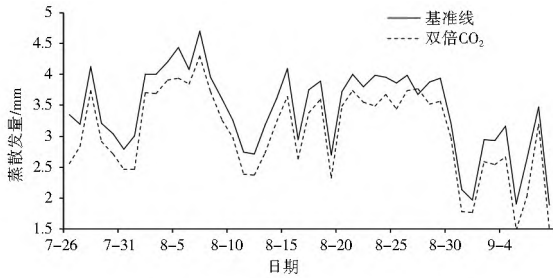


图5 崇陵试验流域二氧化碳浓度加倍情景下蒸散发变化过程

Fig. 5 The evapotranspiration process with double concentration of carbon dioxide in Chongling experimental watershed

理性,二者的复杂程度相当,且结构简单,可解决水碳耦合中结构不平衡问题。

(2)耦合模型在点尺度和小区尺度上的验证结果表明,耦合模型对水文循环中的蒸散发和土壤水变化过程模拟精度明显改进;达到从复杂现象中寻找简单规律,利用简单规律解决复杂问题的目的。

(3)采用耦合模型模拟二氧化碳的生态水文效应。在二氧化碳浓度加倍情景下,试验小区径流深增加0.5%;平均土壤含水量增加1.2%;蒸散发量减少4.9%。

参考文献(References):

- [1] 夏军,谈戈.全球变化与水文科学新的进展与挑战[J].资源科学,2002,24(3):1-7.(XIA Jun,TAN Ge. Hydrological science toward Global change: Process and Challenge[J]. Resources Science,2002,24(3):1-7(in Chinese)).
- [2] 陈华鑫,许新宜,汪党献,等.中国2001年-2010年水资源量变化及其影响分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(6):1-4,29.(CHEN Huar xin,XU Xir yi,WANG Dang xian,et al. Variation of water resources quantity and its impacts in China from 2001 to 2010[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2013,11(6):1-4,29.(in Chinese)).
- [3] 夏军,刘春葵,任国玉.气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J].地球科学进展,2011,26(1):1-12.(XIA Jun,LIU Chur zhen,REN Guo yu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. Advance in earth science.2011,26(1):1-12.(in Chinese)).
- [4] 许云锋,左其亭.气候变化对水资源影响的研究现状与展望[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):80-84.(XU Yun feng,ZUO Qi ting. Current status and prospect of research on influence of climate change on water resource[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(5):80-84.(in Chinese)).
- [5] 张彦增,秦建文,乔光建.河北省平原区水面蒸发量变化趋势及影响因素[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):63-65,90.(ZHANG Yan zeng,QIN Jian wen,QIAO Guang jian. Changing trend of water surface evaporation and its influencing factors in the plain area of Hebei Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(4):63-65,90.(in Chinese)).
- [6] 王志勇,于静洁,敖登花.近50年来额济纳三角洲气象要素变化对蒸发皿蒸发量的影响[J].南水北调与水利科技,2013,11(3):1-5.(WANG Zhi yong,YU Jing jie,AO Deng hua. Effects of climatic variables on pan evaporation in Ejina Delta in the recent 50 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2013,11(3):1-5.(in Chinese)).
- [7] 张存柱,刘峰贵,沈彦俊.柴达木流域参考作物蒸散变化成因分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(6):5-10.(ZHANG Cui zhu,LIU Feng gui,SHEN Yan jun. Cause analysis of evapotranspiration variations of reference crop in the Qaidam basin of Qinghai Tibetan Plateau[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2012,10(6):5-10.(in Chinese)).
- [8] 刘宁,孙鹏森,刘世荣.陆地水-碳耦合模拟研究进展[J].应用生态学报,2012,23(11):3187-3196.(LIU Ning,SUN Peng sen,LIU Shi rong. Research advances in simulating land water carbon coupling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology.2012,23(11):3187-3196.(in Chinese)).
- [9] 黄辉.植被冠层导度和水碳通量耦合关系的时空变异特征及其模拟研究[D].北京:中国科学院大学,2008.(HUANG Hui. Temporal vegetation canopy conductance and water coupling between carbon flux variability characteristics and simulation studies[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2008.(in Chinese)).
- [10] Ashbjornsen Heidi, Goldsmith Gregory R, Alvarado Barrientos Maria S, et al. Ecohydrological advances and applications in plant water relations research: a review[J]. Journal of Plant Ecology,2011,4(1-2):3-22.
- [11] Kruijt Bart, Witte Jar Philip M, Jacobs Cor MJ, et al. Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands[J]. Journal of Hydrology,2008,349(3):257-267.
- [12] 夏军.水文非线性系统理论与方法[M].武汉:武汉大学出版社,2002.(XIA Jun. Hydrological Nonlinear System Theory and Methods[M]. Wuhan: Wuhan University Press(in Chinese)).
- [13] Jarvis PG. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences,1976,273(927):593-610.
- [14] Testi Luca, Orgaz Francisco, Villalobos Francisco J. Variations in bulk canopy conductance of an irrigated olive(Olea europaea L.) orchard[J]. Environmental and experimental botany,2006,55(1):15-28.
- [15] 夏军,王纲胜,谈戈,等.水文非线性系统与分布式时变增益模型[J].中国科学(D辑:地球科学),2004(11):1062-1071.(XIA Jun,WANG Gang sheng,TAN Ge,et al. Nonlinear system approach and distributed time variant gain models[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences,2004(11):1062-1071.(in Chinese)).
- [16] 夏军,王纲胜,吕爱锋,等.分布式时变增益流域水循环模拟[J].地理学报,2003(5):789-796.(XIA Jun,WANG Gang sheng,LYU Ai feng,et al. A Research on distributed time variant gain modeling[J]. Acta Geographica Sinica,2003(5):789-796.(in Chinese)).
- [17] 夏军,叶爱中,王蕊,等.跨流域调水的大尺度分布式水文模型研究与应用[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):1-7,95.(XIA Jun,YE Ai zhong,WANG Rui,et al. Large scale distributed hydrological model of inter basin water transfer and its application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(1):1-7,95.(in Chinese)).
- [18] Olioso Albert, Carlson Toby N, Brisson Nadine. Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1996,81(1):41-59.
- [19] Rogers Hugo H, Sionit Nasser, Cure Jennifer D, et al. Influence of elevated carbon dioxide on water relations of soybeans[J]. Plant Physiology,1984,74(2):233-238.