

植物水分来源季节性变化对区域蒸散发模拟的影响

苟 思, 刘 超, 贺宇欣*, 刘 挺, 李丹利, 庄文化, 刘铁刚

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要:植物水分来源会随季节变化。在旱季表层土壤水分不充裕时,植物会逐步使用深层土壤水或地下水,而当雨季表层土壤水分充足时,植物主要使用表层土壤水。然而当前的水文模型、陆面模式和气象模型很少考虑这一现象。本文对分布式陆面-水文模型ParFlow.CLM进行改进,引入以能量差为驱动根系吸水计算方法,分析植物水分来源季节性变化对区域蒸散发模拟的影响。改进后的模型能够较好地模拟区域蒸散量和土壤水动态,并能较好地再现植物对地下水的使用情况。改进模型结果显示,植物使用地下水的时间主要集中在旱季,植物对地下水的使用是植物应对干旱的重要策略之一。对比美国加利福尼亚州Tonzi实验站干旱年2008和平水年2009的结果,2008年植物使用地下水时间比2009年长53 d,用量高36%。改进模型和原模型结果对比显示:当蒸散发主要受到能量限制时,两个模型的模拟结果较为一致;但当蒸散发主要受到水量限制时,两个模型在蒸散发和深层土壤水的模拟结果上有显著差异。改进模型考虑了植物水分来源季节性变化对区域蒸散发模拟的影响,并能模拟地下水位降低对植物用水的影响。结果表明:改进模型中植物腾发量比原模型结果高71 mm/a,占全年总腾发量的43%。若忽略植物水分来源的季节性变化,会对区域蒸散量和深层土壤水的模拟产生巨大影响,且这种影响在旱季或干旱半干旱地区更为明显。

关键词:蒸散发;植物水分来源;根系吸水;分布式陆面-水文模型

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)04-0063-08

Impacts of the Shift of Plant Water Sources on Regional Evapotranspiration Simulation

GOU Si, LIU Chao, HE Yuxin*, LIU Ting, LI Danli, ZHUANG Wenhua, LIU Tiegang

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resources & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: The shift of plant water sources occurs seasonally. During the dry seasons, plants would progressively use deep soil water or groundwater when shallow soil water was depleted. During the wet seasons, when shallow soil water was adequate, plants would mainly use shallow soil water. Few hydrological, land surface and atmospheric models have addressed this phenomenon. This paper aimed to improve the performance of the distributed, land surface-hydrological model ParFlow.CLM. A new simulation method of plant root water uptake based on potential difference was coupled into ParFlow.CLM to analyze the impact of the shift of plant water sources on the regional ET simulation. The improved model was able to simulate the changes of regional ET and soil moisture, and was capable to capture the dynamics of plant groundwater use. The results from the modified model showed that the plants mainly relied on groundwater during the dry seasons. Plant groundwater use was one of the most important plant water-use strategies to mitigate the impacts of droughts. Comparing the results in dry year 2008 with those in normal year 2009, the duration and the amount of plant groundwater use were 53 days longer, 36% higher in 2008, respectively. The comparison between the modified and original model performances showed that, when ET was energy-limited, the results of two models coincided with each other. However, when ET was water-limited, the two models had significant difference in the simulations of plant transpiration and deep soil moisture dynamics. The impacts of the shift of plant water sources on the regional ET and the influences of groundwater level changes on the plant water use were considered in the modified model. As a result, the plant transpiration result from the modified model was 71 mm/a (43% of annual tran-

收稿日期:2017-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509170);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB452701)

作者简介:苟 思(1985—),女,特聘副研究员,博士。研究方向:生态水文学。E-mail:sgou@scu.edu.cn

*通信联系人 E-mail:yuxinhe@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-07-11 12:02:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180711.1202.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

spiration) higher than the results of the original model. If the shift of plant water sources was ignored in the numerical models, it would lead to considerable bias in regional ET and deep soil water simulation. Such bias would become more significant in the simulations during dry seasons or in the arid and semi-arid regions.

Key words: evapotranspiration; plant water sources; root water uptake; distributed land surface-hydrological model

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 包括水面和土壤蒸发以及植物蒸腾, 是区域水量和能量平衡的主要组分, 也是连接大气、生态和水文过程的关键纽带。区域蒸散发是水分和能量循环中最难直接观测的分项之一。利用分布式模型模拟区域蒸散量, 有助于了解区域水分和能量循环。

植物蒸腾量是区域蒸散发量的关键分量。植物蒸腾量与植物水分来源和根系吸水方式密切相关。由于气候特征、植物根系分布、和土壤地下水动态特征的不同, 植物水分来源具有明显的季节性变化。运用同位素和茎流仪等技术手段, 可以判断和分析植物水分来源。Barbeta等^[1]利用氢氧稳定同位素对西班牙地中海气候区橡树的水分来源进行监测, 发现在雨水充沛的湿润季节, 橡树的主要水分来源是表层土壤里积蓄的雨水; 当干旱季节来临, 橡树逐步使用深层土壤水或地下水。Bleby等^[2]利用茎流仪对美国德克萨斯州半干旱气候地区的橡树、楝树和牧豆树用水特征进行分析, 发现在湿润季节树木的主要水分来源是表层土壤水; 而在干旱时节, 植物对深层土壤水和地下水的利用量是表层土壤水的5倍。曹坤芳等^[3]利用稳定同位素对热带岩溶森林木本植物水分来源进行研究, 发现雨季木本植物主要利用表层深度60 cm内的土壤水, 而在旱季主要利用深层岩石缝隙和基质中所含水量。一般来说, 当表层土壤水充沛的时候, 植物会主要使用表层土壤水, 而当表层土壤水不足时, 植物会增大深层土壤水或地下水的用量。这一现象在世界各地多种植物中被广泛观测到^[4-5]。植物水分来源的季节性变化揭示了植物蒸腾量与不同水源之间的动态联系, 然而当前的水文模型、陆面模式和气候模型等很少考虑这一现象及其对于区域蒸散发模拟的影响^[6]。

模拟植物水分来源的季节性变化, 需要运用合理的植物根系吸水模拟方法。当前大多数水文模型、陆面模式中运用的植物根系吸水模拟方法是: 首先计算潜在蒸腾量, 然后考虑植物的水分胁迫, 按照植物根系比例从不同深度的土壤中同时吸水。在这种模拟方法中, 植物将会同时使用浅层土壤水、深层土壤水和地下水等不同的水源, 与实际观测结论不符。Li等提出了根系吸水的补偿模型^[7], 根据每层土壤含水量的不同, 调整根系在相应土壤层的吸水量, 即: 含水量高的土壤中, 根系吸水量加大。类似的补偿机

制模型近年被应用于模拟作物和树木的根系吸水^[8]。然而这样的模型并不适用于模拟使用地下水的植被。这类模型倾向于在含水量高的土层中加大吸水量, 而地下水能持续提供可靠的水源, 因而此类模型会过高估计植被对地下水的使用量。Gou等^[9]开发的根系吸水模型从基本的物理机制入手以能量差作为驱动水分运动的根本动力。根系的吸水量取决于每层土壤、地下水及植物根系之间的水势差, 土壤的水力传导度以及根系的水力传导度等。该模型能够用于模拟植物水分来源的季节性变化。作者通过耦合模型的开发和应用, 分析植物水分来源的季节性变化对于区域蒸散发模拟的影响。将Gou等^[10]开发的根系吸水模型耦合到分布式陆面-水文模型ParFlow-CLM中, 以美国加利福尼亚州Tonzi实验站为研究区域搭建模型, 对比改进模型和原模型在模拟蒸散发、土壤水和植物用水方面的差异, 分析植物水分来源的季节性变化对区域生态水文过程的影响。

1 耦合模型原理

1.1 以能量差为驱动的根系吸水模型

该根系吸水模型从最基本的物理机制入手, 即能量差驱动水分的运动, 而水分变化又相应改变了能量状态。首先考虑单根的吸水和输水, 单根被分为吸水部分和输水部分。单根的吸水过程是在Gardner单根吸水模型基础上改进的^[11]:

$$Q_{\text{root}} = 2\pi l K_{\text{soil}}(\psi_{\text{soil}}) \frac{\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{root}}}{\ln\left(\frac{b}{r}\right)} \quad (1)$$

式中: Q_{root} 为单根的吸水速率, m^3/s ; ψ_{soil} 为土壤水势, 以水头为单位, m ; ψ_{root} 为根的水势, m ; $K_{\text{soil}}(\psi_{\text{soil}})$ 为土壤水力传导度, m/s ; 假设根际区域的水力传导度和相邻土壤的水力传导度相同, 土壤水力传导度随土壤水势的变化而变化, 通过van Genuchten土壤水分特征曲线模型进行计算; l 为根系吸水部分的长度, m ; r 为根的直径, m ; b 为根际区域的边界到根的距离, m , 即定义了单根吸水的影晌区域。

忽略植物根系储水量的变化, 因此式(1)中根系吸收的水分 Q_{root} 将持续地通过根系进行传输:

$$Q_{\text{root}} = \pi r^2 K_{\text{root}}(\psi_{\text{root}}) \frac{\psi_{\text{root}} - \psi_{\text{ref}} - z}{0.5l + L + z} \quad (2)$$

式中: ψ_{ref} 为参考点水势, m ; 参考点被定义为植物根

系和树干相连接的位置, 该位置和地表平齐; $K_{\text{root}}(\psi_{\text{root}})$ 是根系水力传导度, m/s; 根系水力传导度随根系水势的变化而变化, 不同植物根系水力传导度的变化可以通过实测的植物“脆弱曲线”来描述^[12]; L 为根系输水部分在水平方向的长度, m; z 为根系输水部分在垂直方向的长度, m。

将式(1)和(2)结合:

$$Q_{\text{root}} = A_{\text{root}} \frac{\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{ref}} - z}{\Gamma_s + \Gamma_r} \quad (3)$$

式中: $A_{\text{root}} = 2\pi rl$ 是根系吸水部分的面积, m^2 ; $\Gamma_s = \frac{r \ln(b/r)}{K_{\text{soil}}(\psi_{\text{soil}})}$ 代表根际区域水分运动的阻力, 即根系吸水时, 水分从土壤到根际到根系这个过程中所受阻力; $\Gamma_r = \frac{2l(0.5l + L + z)}{rK_{\text{root}}(\psi_{\text{root}})}$ 代表水分在根系中运输所受到的阻力。从式(3)可以看出, 根系吸水由土壤和参考点之间的水势差驱动。当 $\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{ref}} - z > 0$, 土壤水势较高, 水势梯度驱使植物从土壤中吸水, 并将水向上运输, 最后水分通过植物气孔回归大气, 即植物腾发量。当土壤水分减少, 土壤水势降低, 若 $\psi_{\text{soil}} - \psi_{\text{ref}} - z < 0$, 表示植物根系水势高于周围土壤水势。在此条件下, 植物通过根系向土壤中释放水分, 这一过程即植物根系水力再分配 (hydraulic redistribution, HR) 现象^[13]。因此该方法能同时模拟植物根系吸水和水力再分配过程。

忽略植物体内储水量变化, 将所有土壤层根系吸水量加在一起, 即得到植物腾发速率。

$$T = \frac{A_{\text{root}}}{A_{\text{leaf}}} \sum_{i=1}^m f_{\text{root},i} \frac{\psi_{\text{soil},i} - \psi_{\text{ref}} - z_i}{\Gamma_{s,i} + \Gamma_{r,i}} \quad (4)$$

式中, T 为植物腾发速率, m/s; $f_{\text{root},i}$ 为植物在第 i 层土壤中的根系分布比例; $A_{\text{root}}/A_{\text{leaf}}$ 为根吸水部分总面积与总叶面积之比。这个变量可以用于研究根叶面积比对植物用水过程的影响。

1.2 ParFlow.CLM模型

ParFlow.CLM由两个分布式模型ParFlow和CLM耦合而成。水文模型ParFlow是基于有限差的3维土壤水地下水模型, 模型集合了地表径流的模拟, 能精确描述地表产汇流过程及地表水和地下水相互作用。但ParFlow对地表蒸散发过程的刻画较为简单。陆面模型CLM是目前国际上发展较为完善的陆面过程模型, CLM对地表蒸散发和地表能量过程的模拟较好, 但对土壤水地下水的模拟较差。因此将ParFlow和CLM耦合在一起, 发挥两个模型的优势, 耦合模型的地表蒸散发和能量过程运用CLM计算; 地表径流、土壤水和地下水过程运用ParFlow计算。ParFlow和CLM紧密耦合, 在每个计算时段进行交互。在垂直方

向上, CLM模拟每个计算网格的能量平衡, ParFlow模拟各层土壤含水量和地下水动态变化。ParFlow将土壤水和地下水运移结果反馈给CLM, CLM考虑土壤水和地下水分布, 进而计算植物水分胁迫、蒸腾量以及根系吸水量。CLM计算的根系吸水量和土壤蒸发结果进一步反馈给ParFlow, 作为ParFlow模型中Richards方程的“汇”项; 在水平方向上, 各个计算网格通过ParFlow中地表水、土壤水和地下水运动联系在一起, 组成大区域内的水分循环。ParFlow.CLM采用MPI(message passing interface)实现并行计算。

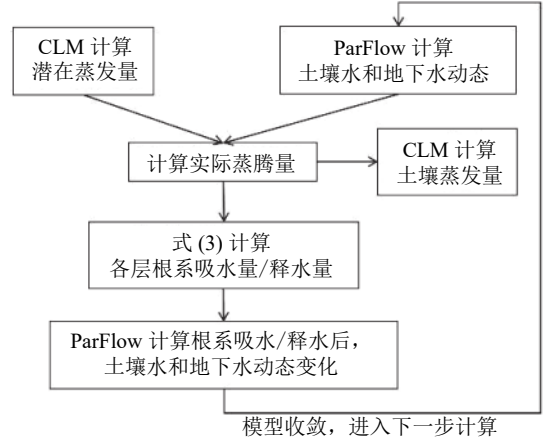


图1 模型计算流程图

Fig. 1 Flow chart of model simulation

1.3 改进ParFlow.CLM模型

改进模型运用新的根系吸水模型来替换ParFlow.CLM原模型中的相关模拟。新方法中植物在每层土壤的吸水量由该层土壤的土壤水势、植物根系水势、根际区域水分运动阻力和植物内部水分运动阻力共同决定。在改进模型中, 新方法考虑ParFlow模型反馈的土壤水和地下水动态来计算植物腾发量和根系吸水量, 其他的地表能量过程, 如土壤蒸发, 仍然由CLM计算。新方法还可以计算植物根系水力再分配, 若根系向土壤释放水, 将作为ParFlow中Richards方程的“源”项。

2 研究区域和模型搭建

2.1 研究区域

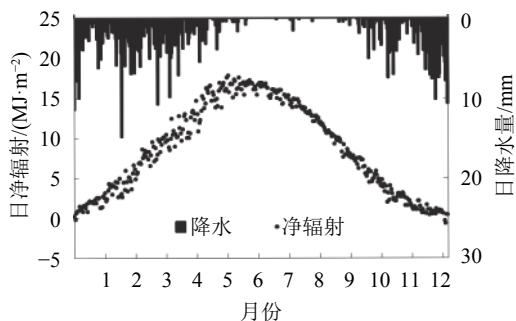
本研究选择美国加利福尼亚州Tonzi实验站点数据进行模型对比研究。Tonzi实验站属于全球通量观测研究网络 (FLUXNET) 和美国通量网 (AmeriFlux)。选择Tonzi实验站的原因有3个: 首先, Tonzi站点具有长时间高精度的观测数据, 在FLUXNET所有站点中, Tonzi站点数据质量居前列^[14], 对于模型开发和验证非常有利。其次, Tonzi站点利用不同高度的涡度相关通量塔进行观测, 可以将区域内土壤和草地

蒸散量与树木冠层蒸散量进行区分。站点利用自计水位仪对地下水动态进行高频率监测,其数据可用于推算植物对地下水的使用量^[15]。该站点还有长期的树干茎流、叶水势和同位素等研究,这些与植物蒸腾量和根系吸水过程相关的观测数据将为本文的模型对比研究提供有力的数据支持。第三, Tonzi 站点是地中海气候,具有明显的干湿季节,为模型模拟分析干旱和湿润季节蒸散量变化提供条件。

Tonzi 实验站纬度 38.43°N, 经度 120.97°W。气候为典型地中海气候,冬天温和多雨,夏天炎热干燥。年均降水量约 560 mm,绝大部分降水集中于 10 月到次年 5 月(雨季)。区域空间分布图和年均降水量和净辐射量数据如图 2 所示。



(a) 研究区空间分布



(b) 多年平均降水量和净辐射量

图 2 研究区域概况

Fig. 2 Study area

该区域表层土壤浅薄,约 60~100 cm,其下为破碎基岩,地下水埋深约 7~12 m。主要植被为多年生落叶蓝橡树 (*Quercus douglasii*),前期研究表明,该研究区的蓝橡树在旱季会大量使用地下水^[16]。地表覆盖一年生草地,其生育期主要受到水分控制。当旱季来临,表层土壤含水量极低,浅根系草地因缺水而死亡。

Tonzi 实验站有两个不同高度的涡度相关通量塔,每半小时对区域的水分和能量通量进行数据采

集。一个通量塔高 2 m,在蓝橡树冠层以下,能提供土壤和草地的蒸腾量观测数据。另一个通量塔高 23 m,提供整个区域的蒸腾量观测数据。两个通量塔观测数据的差异即反映了蓝橡树的蒸腾量。该实验站在不同地区不同土壤深度中布设了 TDR 土壤水分传感器,以半小时为间隔,对土壤水进行长期连续监测。该地区布设了 3 个地下水监测井,从 2007 年 5 月开始利用自动压力传感器以每半小时为间隔对地下水位进行观测。另外,叶面积指数 LAI、黎明前叶水势、植物气孔传导度、植物茎流、植被生长情况等也定期进行观测^[16]。

2.2 模型搭建

模型围绕 Tonzi 实验站及周边区域进行搭建。模拟区域为 200 m×200 m×15 m。模型在空间上离散为 100×100×28 个计算单元,其中侧向计算单元大小为 2 m ($\Delta x = \Delta y = 2$ m),垂直方向采用变深度计算单元。土壤层和地下水层计算单元大小为 0.2 m ($\Delta z = 0.2$ m),破碎基岩层计算单元大小为 0.8 m ($\Delta z = 0.8$ m)。4 个侧面边界条件为变水头(variable head)边界条件,其水头变化根据观测井中地下水位的波动数据进行设定。模型下边界为无通量(no-flux)边界条件。地表高程和植被分布情况根据激光雷达数据进行设定。在模型设定中,蓝橡树的主根深入到地下水,而地表草地的根系限制在土壤层中。植物根系分配比例主要依据地面穿透雷达观测数据设定。模型中土壤水力传导度随土壤水势的变化而变化,依据该实验站实测的 van Genuchten 土壤水分特征曲线设定。植物水力传导度随植物水势的变化,依据实验实测的植物“脆弱曲线”进行设定。模型由实测的气象数据驱动,包括辐射、风速、风向、气温、降水、大气压和相对湿度。模型计算步长为半小时。模型率定期为 2004—2006 年,验证期为 2007—2009 年。为了将改进模型与原模型进行对比,利用原 ParFlow.CLM 模型搭建同样的模型,其中模型计算网格划分、计算步长、土壤和植被参数、边界条件和初始条件、气象驱动数据等都与改进模型相同。

3 结果及分析

3.1 改进模型对区域生态水文过程的模拟

改进模型较好地模拟了区域蒸散量和土壤水动态。将模型模拟的每半小时全区域蒸散量统计为以日为单位的蒸散量。图 3 为改进模型模拟的全区域蒸散量和 23 m 高通量塔实测蒸散量的对比。

改进模型在干旱年份(2008 年)和平水年份(2007 和 2009 年)均较好地模拟了整个区域蒸散量的变化($R^2 = 0.72$)。均方根误差为 0.39 mm/d。在冬季,改

进模型模拟的蒸散量略低于实测蒸散量。除去模拟误差的原因, 另一部分原因是由于改进模型可以模拟冷凝过程及露水形成, 而涡度相关通量塔无法观测这部分能量变化。这种情况在冬天温度较低时较为常见。

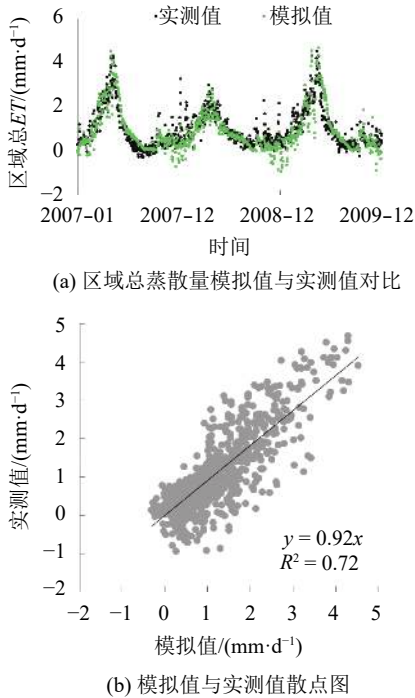


图3 区域总蒸散量模拟结果

Fig. 3 Model results of regional total ET

图4为改进模型模拟的土壤和草地蒸散量和2 m高通量塔实测蒸散量之间的对比。改进模型也模拟了土壤和草地蒸散量的变化趋势 ($R^2=0.46$), 均方根误差为0.51 mm/d。但是整体上, 改进模型模拟值低于实测值。在ParFlow.CLM中, 每个地表计算格网只允许设定一种植物类型。因此在蓝橡树覆盖区域, 其植物类型只能设定为蓝橡树。而在现实中, 蓝橡树冠层下仍然覆盖着草地, 这部分草地蒸散量在模型中没有考虑, 致使改进模型模拟结果偏小。另外, 改进模型也较好地模拟了土壤水动态。图5将模型模拟的地表10 cm内土壤水动态与实测结果进行对比。模型较好地模拟了雨季土壤水的迅速回升过程, 也抓住了旱季土壤水的快速消耗过程 ($R^2=0.79$), 均方根误差为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

3.2 改进模型和原模型结果对比

原模型和改进模型均耦合了多个模型, 包含了水分和能量循环及植物生理生态等众多复杂过程, 需要在超级计算机上进行并行计算。改进模型仅对原模型中根系吸水和植物水分胁迫等关键计算公式进行替换, 并未引入新的计算模块, 两个模型的模拟

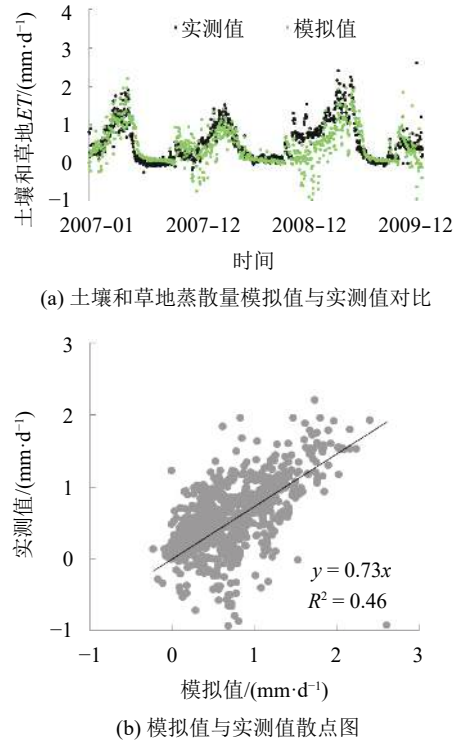


图4 土壤和草地蒸散量模拟结果

Fig. 4 Model results of regional soil evaporation and grass evapotranspiration

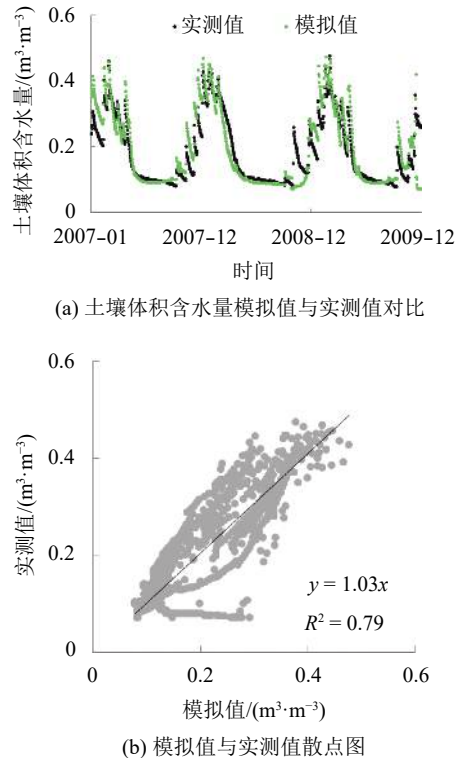


图5 表层土壤水模拟结果

Fig. 5 Model results of soil water content at the surface layer

时长没有明显差异。改进后的ParFlow.CLM能够较好地模拟区域生态水文过程和植物用水。作者将改进模

型的结果和原模型结果进行对比,分析两个模型在模拟植物蒸腾量、土壤水动态和根系吸水方面的差异。

图6为2个模型模拟蓝橡树蒸腾量的结果。在雨季时,水量充沛,该时段(3月到5月)蓝橡树的腾发主要受到能量的限制,两个模型的模拟结果非常相近。然而当旱季来临(5月底至10月初),蓝橡树的蒸腾量主要受到水分的限制。在这个时段,两个模型的模拟结果出现了巨大的差异。在旱季,表层土壤水会快速下降,而此时深层土壤和地下水层中还余存植物可用的水量。但是在原模型中,当表层土壤水降至凋萎点时,模型会强制将蒸腾量设为零。原模型模拟值和实测值对比, $R^2=0.13$, 均方根误差为0.54 mm/d。改进模型中根系吸水过程受到水势差和土壤-植物水力传导度的影响,不在模拟方法中人为地控制根系吸水过程。改进模型中,在旱季,植物用水仍然持续,植物蒸腾量主要由地下水支持。改进模型模拟的蓝橡树蒸腾量比原模型结果高71 mm/a, 占全年总蒸腾量的43%。改进模型模拟值和实测值对比, $R^2=0.58$ 。均方根误差为0.39 mm/d。由此可见,当蒸腾发主要受到能量限制时,两个模型的模拟结果差距不大,但是当蒸腾发主要受到水量限制时,模拟结果出现巨大差异。

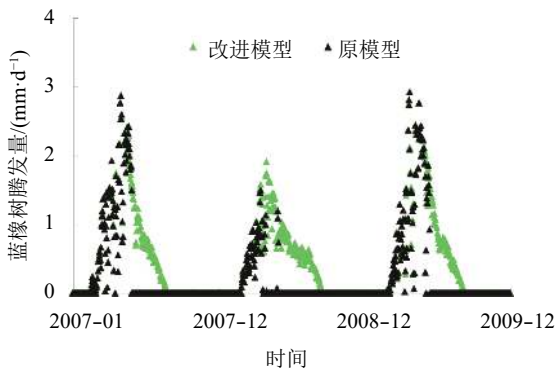
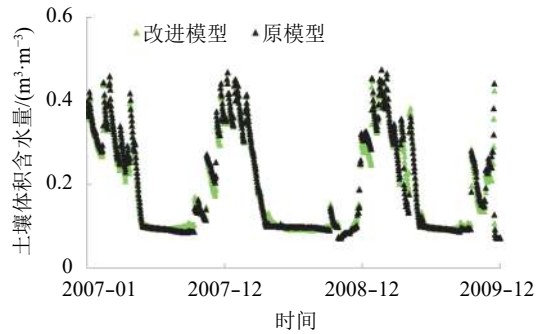


图6 改进模型与原模型蓝橡树蒸腾量模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of the blue oak transpiration results from the modified and the original models

图7为2个模型模拟土壤水动态的结果。两个模型在表层土壤水模拟中的差异并不大。在深层土壤水的模拟中,在雨季时,两个模型模拟结果类似。但是在旱季时,模型结果出现了很大差异。因为在原模型中,旱季时植物蒸腾量为零,因此植物在旱季不吸取深层土壤水,深层土壤水会维持在较高水平。原模型模拟值和实测值对比, $R^2=0.63$, 均方根误差为0.06。而在改进模型中,旱季时植物逐步使用深层土壤水和地下水,因此深层土壤水会有较大下降,符合实际观测情况。改进模型模拟值和实测值对比, $R^2=0.86$, 均方根误差为0.03。该区域土壤浅

薄,土壤质地较粗,土壤水力传导度较大。在旱季结束后,10月份雨季再次来临时,降雨量较大,土壤水分得到充分补充,在短时间内接近田间持水量。因此虽然两个模型在旱季深层土壤水模拟中差异较大,但土壤前期含水量的差异并未明显影响雨季土壤水变化,两个模型对雨季土壤水模拟结果相似。



(a) 表层土壤水模拟结果对比



(b) 深层土壤水模拟结果对比

图7 改进模型与原模型土壤水模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of the soil water content results from the modified and the original models

图8进一步分析了两个模型在模拟根系吸水方面的差异,结果展示了根系每小时从不同水源中的吸水量。在原模型中,植物根系从每层土壤中的吸水量等于植物蒸腾量乘以每层土壤中根系比例。在改进模型中,各层土壤中的根系吸水量是由能量差以及土壤和植物的水力传导度决定的。因此模型能够模拟植物水分来源的季节性变化,和实际情况相比,原模型中植物在雨季也按照根系比例使用地下水,其地下水使用时间提前。在旱季,由于表层土壤干旱,原模型中植物停止腾发,同时也停止了深层土壤水和地下水的使用,这和现实情况不符。而在改进模型中,植物在雨季主要依赖于土壤水,在旱季主要使用地下水,符合观测结果。在改进模型的根系吸水模拟结果中,有一部分根系吸水结果为负,说明植物将水从根系释放到土壤中,是植物根系水力再分配现象的体现。

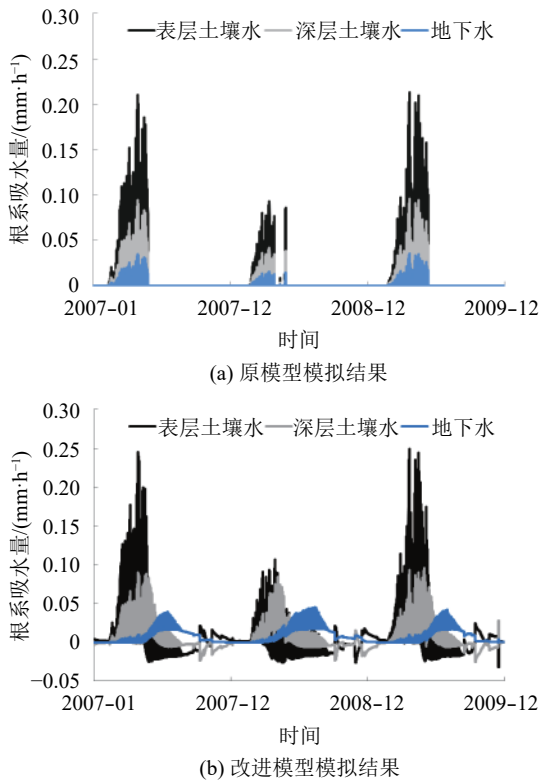


图8 改进模型与原模型根系吸水模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of the root water uptake results from the modified and the original models

4 讨论

改进模型考虑了根系吸水过程中能量和水力传导度的变化, 可以较好的模拟植物根系吸水过程以及植物水分来源的季节性变化。植物根系对地下水的吸收利用过程很难被长期监测。利用实验站地下水监测井获得的每半小时地下水水位变化数据, 可推算出该区域蓝橡树对地下水的用量^[16]。图9显示了推算的植物地下水使用量和改进模型模拟值。

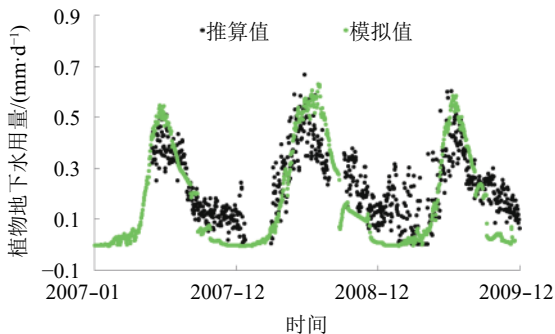


图9 植物地下水用量模拟值与根据地下水动态所得的推算值对比

Fig. 9 Comparison of the modeled and estimated plant groundwater use

地下水位从2007年5月开始连续监测, 其中2008年1~3月以及8~9月由于仪器原因, 监测数据

缺失, 无法推算植物地下水使用量。

从图9可见, 改进模型模拟结果和推算结果基本吻合。植物在雨季(10月到次年5月)对地下水的使用量非常小。当旱季来临, 土壤水逐渐减少, 植物对地下水的使用量开始急剧增加, 到6月达到顶峰。植物旱季用水量大部分由地下水提供。10月份雨季来临时, 地表的土壤水得到补充, 植物快速反应, 减少地下水用量, 又开始大量使用土壤水。由此可见, 植物在雨季主要依赖土壤水, 而在旱季主要依赖地下水。

从图9可见, 2008年植物使用地下水的的时间较长(从第90到330天), 使用地下水较多(共72 mm)。而对应的, 2009年植物使用地下水的的时间较短(从第114到301天), 使用地下水较少(共53 mm)。2008年(年降水量 373 mm)相较2009年(年降水量 572 mm)干旱。由此可知, 在干旱年份, 植物开始使用地下水的时间有所提前, 使用地下水的时期更长, 用量更大。这一结论与Miller等在该实验站的研究结果相符^[16]。植物对地下水的使用, 是植物应对干旱的重要策略之一^[1]。

地下水深度对植物用水也会产生巨大影响。地下水水位的变化, 会使得深入地下水的根系比例变化。在雨季, 腾发量主要受到能量限制, 不同地下水水位对植物腾发量仅产生较为微小的影响(图10)。

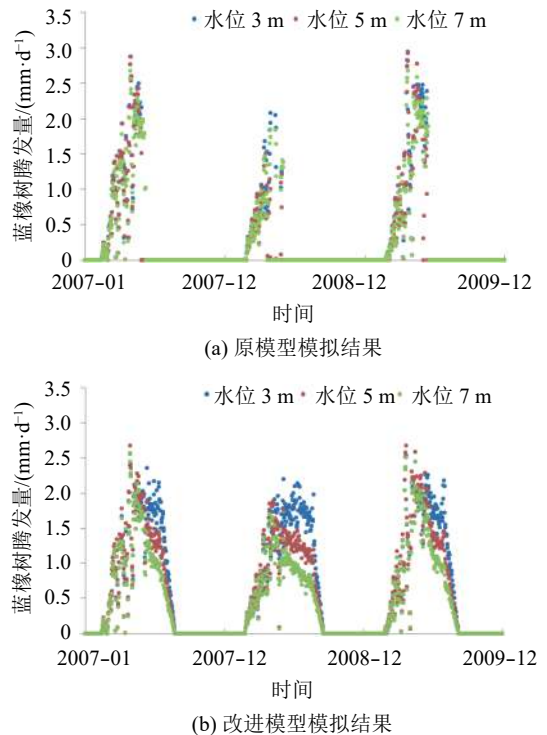


图10 改进模型与原模型模拟不同深度地下水对植物腾发量的影响

Fig. 10 Comparison of the impacts of groundwater levels on transpiration results from the modified and the original models

在旱季,腾发量主要受到水量限制,地下水深度对腾发量的影响显著。由图10(a)可见,在旱季,原模型将蒸腾量设为零,无法模拟不同地下水深度对腾发量的影响。而改进模型结果显示,旱季植物腾发量随地下水水位的降低而减少(图10(b))。当地下水埋深为3 m时,植物年平均腾发量为238 mm,比地下水埋深为5 m时的年腾发量(208 mm)高14%,比地下水埋深为7 m时的年腾发量(174 mm)高36%。

5 结 论

本文探讨植物水分来源季节性变化对区域蒸散发模拟的影响。对分布式陆面-水文模型ParFlow-CLM进行改进,将以能量差为驱动根系吸水模型耦合到ParFlow-CLM中。改进模型中植物在每层土壤的吸水量由该层土壤的土壤水势、植物根系水势、根际区域水分运动阻力和植物内部水分运动阻力共同决定。

改进模型能够重现区域蒸散发和土壤水动态,并能较好地模拟植物水分来源的季节性变化。模型结果显示,蓝橡树在雨季主要使用浅层土壤水,在旱季主要依赖地下水。植物旱季用水量的60%以上来源于地下水。

改进模型和原模型的结果对比表明:两个模型在湿润季节的模拟结果较为一致,但在干旱季节模拟结果有显著差异。改进模型中植物在旱季持续使用深层土壤水和地下水来维持旱季植物腾发量。而原模型中植物在雨季会使用深层土壤水和地下水,但在旱季植物腾发量为零,植物不再使用深层水源,与实际观测不符。忽略植物水分来源的季节性变化,会对区域蒸散发和深层土壤水的模拟产生巨大影响,且这种影响在旱季或干旱半干旱地区更为明显。今后水文模型、陆面模式和气候模型的发展,应将植物水分来源季节性变化现象纳入到模型开发改进中。

参考文献:

- [1] Barbeta A, Mejíachang M, Ogaya R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1213–1225.
- [2] Bleby T M, McElrone A J, Jackson R B. Water uptake and hydraulic redistribution across large woody root systems to

20 m depth[J]. *Plant Cell Environment*, 2010, 33(12): 2132–2148.

- [3] Cao K F, Fu P L, Chen Y J, et al. Implications of the eco-physiological adaptation of plants on tropical karst habitats for the ecological restoration of desertified rocky lands in Southern China[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(3): 238–247. [曹坤芳, 付培立, 陈亚军, 等. 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示[J]. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 238–247.]
- [4] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees[J]. *New Phytologist*, 2017, 213(2): 584–596.
- [5] Voltas J, Lucabaugh D, Chambel M R, et al. Intraspecific variation in the use of water sources by the circum-Mediterranean conifer *Pinus halepensis*[J]. *New Phytologist*, 2015, 208(4): 1031–1041.
- [6] Whitley R, Beringer J, Hutley L B, et al. Challenges and opportunities in land surface modelling of savanna ecosystems[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(20): 4711–4732.
- [7] Li K Y, Jong R D, Boisvert J B. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 252(1): 189–204.
- [8] Verma P, Li S P L, Eamus D, et al. Root water compensation sustains transpiration rates in an Australian woodland[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 74(74): 91–101.
- [9] Gou S, Miller G. A groundwater–soil–plant–atmosphere continuum approach for modelling water stress, uptake, and hydraulic redistribution in phreatophytic vegetation[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(3): 1029–1041.
- [10] Maxwell R M, Miller N L. Development of a coupled land surface and groundwater model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(3): 233–247.
- [11] Gardner W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. *Soil Science*, 1960, 89(2): 63–73.
- [12] Sperry J S, Tyree M T. Mechanism of water stress-induced xylem embolism[J]. *Plant Physiol*, 1988, 88(3): 581–587.
- [13] Neumann R B, Cardon Z G. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: a review and synthesis of empirical and modeling studies[J]. *New Phytologist*, 2012, 194(2): 337–352.
- [14] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 223–243.
- [15] Wang P, Niu G Y, Fang Y H, et al. Implementing dynamic root optimization in Noah-MP for simulating phreatophytic root water uptake[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(3): 1560–1575.
- [16] Miller G R, Chen X, Rubin Y, et al. Groundwater uptake by woody vegetation in a semiarid oak savanna[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(10): 2290–2296.

(编辑 张 琼)

引用格式: Gou Si, Liu Chao, He Yuxin, et al. Impacts of the shift of plant water sources on regional evapotranspiration simulation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(4): 63–70. [苟思, 刘超, 贺宇欣, 等. 植物水分来源季节性变化对区域蒸散发模拟的影响[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(4): 63–70.]