根系水力再分配对陆地碳水循环的影响 ——以亚马孙流域为例

王媛媛^{1,2}, 贾炳浩^{2*}, 谢正辉²

1. 北京市气象台, 北京 100089;

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: bhjia@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2017-12-06; 收修改稿日期: 2018-03-03; 接受日期: 2018-05-16; 网络版发表日期: 2018-07-11

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA0600203)、中国科学院前沿科学重点项目(编号: QYZDY-SSW-DQC012)和国家自然科学基金项目(批准号: 41575096)资助

摘要 水力再分配是指在根系-土壤界面水势梯度驱动下, 水分经由根系在土壤不同部位之间的被动运输过程, 是陆地表层系统地下生态过程的一个重要环节, 它影响植被根系与土壤水分相互作用并在生态系统碳水循环过程中起着关键调节作用. 利用模式探讨水力再分配对陆地碳水循环的影响, 对定量评估水力再分配的作用及促进陆面模式的发展具有重要意义. 文章将水力再分配方案应用于通用陆面过程模式CLM4.5, 并以亚马孙流域为例进行数值模拟试验, 探讨水力再分配对陆地碳水通量的影响. 结果表明: 在亚马孙塔帕若斯河国家森林(BRSa3)站点, 由于湿润季的根区水分充足, 根系水力再分配作用较小(小于 0.1 mm day^{-1}); 在干旱季水力再分配作用明显, 土壤水由下层向上层传输的最大值可达 0.3 mm day^{-1} , 使得更多深层土壤水被根系吸收, 从而减小干旱季土壤水分对植被的胁迫, 改善模式对植被总初级生产力和蒸散发的低估, 均方根误差分别减小了 $14.9\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 7.5 mm month^{-1} . 文章表明, 考虑水力再分配作用的陆面过程模式能够更好的再现植被对季节性干旱及严重干旱的响应.

关键词 陆面过程模式, CLM4.5, 水力再分配, 植被总初级生产力, 蒸散发

1 引言

根系作为植被的重要组成部分, 其生长及功能具有重要的生态水文意义. 一方面植物在蒸腾作用下, 随着叶片水势的降低, 形成了“土壤-根系-茎-叶”逐渐减小的水势分布, 在这种水势梯度下土壤水分被根系

抽吸, 以维持植物蒸腾所需要的足够水分. 另一方面, 在气孔关闭条件下(一般为夜间), 水分也会经由根系从深层湿润土壤向浅层干燥土壤进行被动运输(Richards和Caldwell, 1987; Prieto等, 2010), 这种向上的水力再分配称为水力提升(Hydraulic Lift, HL); 也会在表层湿润条件下, 经由根系从表层湿润土壤向深层干燥

中文引用格式: 王媛媛, 贾炳浩, 谢正辉. 2019. 根系水力再分配对陆地碳水循环的影响——以亚马孙流域为例. 中国科学: 地球科学, 49: 456–467, doi: 10.1360/N072017-00427

英文引用格式: Wang Y Y, Jia B H, Xie Z H. 2018. Impacts of hydraulic redistribution on eco-hydrological cycles: A case study over the Amazon basin. Science China Earth Sciences, 61: 1330–1430, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9219-5>

土壤被动运输(Emmerman和Dawson, 1996; Burgess等, 1998; Schulze等, 1998), 这种向下的水力再分配称为水力下降(Hydraulic Descent, HD)或反向水力提升(Inverse Hydraulic Lift, IHL). 以上这两种过程统称为水力再分配(Hydraulic Redistribution, HR), 这一过程不同于水分由表层向深层土壤的下渗过程.

作为大自然界中植物的一种普遍现象, 根系水力再分配作用已得到该领域很多学者的认可(Ishikawa和Bledsoe, 2000). 至今通过各种观测手段, 如土壤水势或水分测定、同位素示踪法和液流测定法等, 已发现超过110种植物存在水力再分配现象, 包括乔木、灌木、草本和浅根系农作物等, 主要分布在全球各种不同生态系统中, 如北美西北部针叶林(Brooks等, 2002; Warren等, 2007)、北美南部荒漠灌木(Hultine等, 2003, 2004)、亚洲中部落叶阔叶林(Hao等, 2009)、南非西北部荒漠灌木(Burgess等, 1998)、亚马孙流域阔叶林(Oliveira等, 2005)、欧洲针叶林(Nadezhdina等, 2006)、欧洲半干旱区灌木(Armas等, 2010; Prieto等, 2010)和巴西热带稀疏草原草本植物(Scholz等, 2010)等. 这种水力再分配现象不同于一般意义上的非饱和土壤水运动, 非饱和土壤水运动发生在各层土壤界面, 而水力再分配则发生在任何根系水势有所差别的土壤层之间. 野外观测结果表明水力再分配对陆地生态水文过程有着非常重要的影响, 在干旱时可将水分从更湿润的深层土壤中运输到浅层干燥土壤中, 从而增强植物光合作用及蒸腾作用(Scholz等, 2010); 延长根系生命周期, 维持根系界面联系(Domec等, 2004; Bauerle等, 2007); 也可通过降水向深层土壤的运输来减少水分的无效蒸发(Smith等, 1999; Scott等, 2008).

尽管如此, 目前国内外大量研究集中于水力再分配观测事实的实证研究, 而目前用来描述这一过程的水力再分配模型却并不多见, 考虑这一过程描述的陆面过程模式更为少见(Neumann和Cardon, 2012; Warren等, 2015; Zhu等, 2017). Ryel等(2002)提出了一种经验性水力再分配方案, 并被应用于一些陆面模式, 例如, Zheng和Wang(2007)和Baker等(2008)分别将该水力再分配方案应用到陆面过程模式IBIS2(Integrated Biosphere Simulator)和SiB3(Simple Biosphere model)中, 结果表明考虑水力再分配后的两个模型均可改进对干旱季潜热通量的模拟; Wang等(2011)则利用该水力再分配模型, 研究了水力再分配对亚马孙植被分布

的影响, 结果表明考虑水力再分配作用的模型与原模型相比, 使得亚马孙东南部干旱落叶林覆盖比例有所增加, 而常绿林有所减少; Zhu等(2017)将该模型应用于CoLM(Common Land Model), 模拟结果表明考虑水力再分配作用可以改善模式对干旱季潜热通量的低估.

通用陆面过程模式CLM4.5(Community Land Model version 4.5)是美国国家大气科学研究中心(National Center For Atmospheric Research, NCAR)于2013年发布的新一代陆面模式, 已被广泛用于冠层、土壤水文、陆地碳氮循环和动态植被等方面的研究(Fisher等, 2015; Jia等, 2018; Raczka等, 2016; Wang等, 2015, 2016; Zeng等, 2016). 尽管如此, 该模式尚未考虑水力再分配的作用, 而与大多陆面模式类似, CLM4.5在土壤水分匮乏时对碳水循环模拟较差, 尤其是在亚马孙区域, 一般会低估干旱季植被生产力和蒸散发(Natalia等, 2013; Jia等, 2015; Wang等, 2016; Zhu等, 2017). 因此, 本研究将该水力再分配模型耦合到CLM4.5, 并以亚马孙流域为例进行数值模拟试验, 探讨其对生态系统陆地碳水通量模拟的影响.

2 模型、数据与方法

2.1 陆面过程模式CLM4.5

陆面过程模式CLM4.5是地球系统模式CESM1.2.0 (Community Earth System Model, version 1.2.0)的陆面子模块. CLM4.5与其早期版本相似, 能够考虑模型网格尺度内地表特征的差异、不同植被类型生态学差异以及不同土壤层水动力学和热力学上的差异性, 并通过嵌套次网格实现(Oleson等, 2013). 而在光合作用、土壤生物地球化学、火模型、寒区水文和湖模型等方面, 其相比上一版本模型均有很大改进(王媛媛等, 2015). 在CLM4.5中, 植被根据光合作用参数和光学特性(叶和茎反射率以及在可见光和近红外波段的透过率)的不同, 被划分为16种植被功能型(Plant Functional Types, PFTs); 垂直土壤柱被分为15层, 但水文计算只在上10层中进行. 另外, CLM4.5还包含碳氮相互作用的生物地球化学模块(CLM4.5-CN), 用来模拟陆地植被、凋落物和土壤有机质中的碳、氮循环过程.

2.2 水力再分配方案

为了定量表述水力再分配过程, 本研究采用Ryel等(2002)发展的一种经验性水力再分配参数化方案, 第*i*层土壤中通过水力再分配与其他各层土壤发生的净水分交换量 H_i (单位: mm s^{-1})表示为

$$H_i = C_{RT} \sum_j (\varphi_j - \varphi_i) \times \max(c_i, c_j) \frac{f_{\text{root},i} f_{\text{root},j}}{1 - f_{\text{root},X}} D_{\text{tran}}, \quad (1)$$

式中, C_{RT} 为活跃根系的最大径向导度, 为常数 $0.097 \text{ cm MPa}^{-1} \text{ h}^{-1}$; $\varphi_j - \varphi_i$ 为各层根系间水势差(单位: MPa); $f_{\text{root},i}$ 、 $f_{\text{root},j}$ 为各层根系分布比例(无量纲); D_{tran} 为时间系数(无量纲), 0为白天、1为夜间, 即水力再分配过程只在夜间无蒸腾时发生; c_i 表示土壤水势对根系导度的影响(相对根系导度, 无量纲), 表示为

$$c_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{50}} \right)^b}, \quad (2)$$

式中, φ_i 为第*i*层根系中的土壤水势(单位: MPa); φ_{50} 为根系导度降至50%时的土壤水势, 为-1MPa; b 为形态参数, 为经验常数3.22; $f_{\text{root},X}$ 表示为

$$f_{\text{root},X} = \begin{cases} f_{\text{root},i} & \theta_i > \theta_j, \\ f_{\text{root},j} & \theta_j > \theta_i, \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ_i 、 θ_j 分别为第*i*、*j*层土壤体积含水量(单位: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

如图1所示, 该水力再分配计算方法的含义为: 当白天叶片气孔打开进行蒸腾时, 根系吸水的动力来源于叶片与根系间的水势差, 此时无水力再分配过程; 而当夜间气孔关闭时, 在各层根系间的水势差驱动下, 不仅是相邻的两层土壤, 即使是相隔的土壤层间, 只要有水势差的存在, 则会发生水力再分配, 从而完成了土壤水在各层间的重新分配. 当 H_i 为正时, 表示净流入; 为负时, 表示净流出. 本研究将该方案耦合到陆面模式CLM4.5中, 其先计算水力再分配造成的每一层土壤水变化量 H_i , 并作为每一层土壤水分通量 q (单位: mm s^{-1})的更新量来计算每一层总水分通量 q_{total} (单位: mm s^{-1} , 如式(4)所示), 再进行原模式中非饱和土壤水运动的计算.

$$q_{\text{total}} = q + H_i. \quad (4)$$

图1 根系水力再分配示意图

2.3 研究区域

亚马孙区域(图2)包含世界50%的热带雨林, 对全球水循环和碳循环都至关重要, 而此区域植被生理状态的改变也将大大影响到全球气候(Baker等, 2008). 本研究选择这一重要区域进行模拟试验, 分析根系水力再分配对植被总初级生产力(Gross Primary Production, GPP)和蒸散发(Evapotranspiration, ET)的影响. 如图2a所示, 亚马孙区域的主导植被类型为热带阔叶常绿林(BET Tr)、热带阔叶落叶林(BDT Tr)、C₃非极草地(C₃ NA)和C₄草地(C₄) (来源于2000年MODIS地表覆盖资料, Lawrence和Chase, 2007). 该区域能量、水循环和碳循环的主要驱动因子为降水, 通常将该区域月总降水量小于100mm的月份定义为干旱季(Baker等, 2008). 如图2b所示, 根据1982~2010年CRUNCEP再分析资料(Climatic Research Unit-National Centers for Environmental Prediction reanalysis; Viovy, 2011), 该区域多年平均降水为 $185.3 \text{ mm month}^{-1}$, 变化范围为 $29.2 \sim 372.6 \text{ mm month}^{-1}$. 干旱季长度由西北向东南递增(图2c), 同时伴随着植被类型由常绿林向落叶林和C₄草地的转变.

大尺度生物圈-大气圈(Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia, LBA)试验对生态系统与大气间的水、能量、碳交换进行观测(Avissar等, 2002). 这里选取位于亚马孙区域的BRSa3(Tapajos National Forest km83)点进行验证. BRSa3站点位处巴西塔帕若斯河国家森林(3.02°S , 54.97°W ; 图2c), 主导植被类型为热带阔叶常绿林(BET Tr). 冠层平均高度35m, 叶面积指数约为 $4.9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. 本研究选择的研究时段为2001~2003年, 年平均气温为 25.9°C , 年平均辐射为 188.7 W m^{-2} . BRSa3站点2001~2003年平均年总降水

图2 亚马孙区域主导植被类型分布(a)、该区域多年平均降水分布(b)和该区域多年平均干旱季长度分布(c)

16种植被功能型依次为裸土(Bare)、温带针叶常绿林(NEM Tr)、寒带针叶常绿林(NEB Tr)、寒带针叶落叶林(NDB Tr)、热带阔叶落叶常绿林(BET Tr)、温带阔叶常绿林(BEM Tr)、热带阔叶落叶林(BDT Tr)、温带阔叶落叶林(BDM Tr)、寒带阔叶落叶林(BDB Tr)、温带阔叶常绿灌木(BE Sh)、温带阔叶落叶灌木(BDM Sh)、寒带阔叶落叶灌木(BDB Sh)、C₃极地草地(C₃ AR)、C₃非极地草地(C₃ NA)、C₄草地(C₄)、农作物(Crop). (c)为月总降水量小于100mm的月份数

量为1658mm, 7~12月为干旱季(图3). 气温的季节变化很小, 不足2°C; 而干旱季的太阳辐射略高于湿润季. 该点通过涡度相关系统(Eddy Covariance, EC)对能量、水汽和二氧化碳等通量进行观测, 同时还包含运行CLM4.5所需的气象变量.

2.4 实验设计

为了探讨动态根系水力再分配对生态水文过程模拟的影响, 本研究分别对BRSa3站点和亚马孙区域设计两组数值试验: 第一组为控制试验, 记为ctl, 即采用原CLM4.5模型进行模拟试验; 第二组为对比试验, 记为new, 即采用考虑根系水力再分配作用的新模型进行模拟试验. 土壤水力学参数主要决定于土壤类型, 本研究中土壤质地数据采用Bonan等(2002)基于国际陆地圈-生物圈计划(International and Geosphere-Biosphere Program, IGBP)收集的土壤资料, 制作的全球土壤质地数据. 而植被根系分布方案及参数采用Zeng(2001)提出的一种仅依赖于植被类型的静态分布. 为

了使得碳库和氮库尽量达到平衡(Hudiburg等, 2013), 每个试验均采用1200年积分结果作为初始场. 同时, 为了避免除水力再分配方案外其他因素造成模拟结果的差异, 两组试验都采用相同的初始场(Yan和Dickinson, 2014).

在本研究中, BRSa3站点半小时、日和月尺度的观测从FLUXNET(www.fluxdata.org)下载得到. 对于单点模拟, BRSa3站点2001~2003年半小时气象观测数据, 包括风速、2m气温、相对湿度、气压、入射太阳辐射和降水, 用于驱动离线陆面模式. 同时, 该点同时时间段的GPP、ET和SWC(0~20cm土壤体积含水量)观测数据用来进行模型验证. 对于区域模拟, 选用1901~2010年CRUNCEP大气强迫数据作为驱动场, 该数据为1901~2002年空间分辨率为0.5°CRU TS3.2月数据与1948~2010年空间分辨率为2.5°NCEP的6h再分析数据的结合(Viovy, 2011). 本研究中使用1901~1981年CRUNCEP数据循环驱动模式运行1200年生成初始场, 如此长时间的spin-up过程则是为了建立达碳库及氮库

图3 BRSa3站点2001~2003年多年平均月降水量(PR)、向下太阳辐射(SWDR)和气温(TA)

灰色区域代表干旱季

的平衡态(Kendra等, 2012); 1982~2010年数据用于驱动模式运行生成分析结果, 模式输出结果为月输出, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Jung等(2009, 2011)采用机器学习——模型树集合算法(Model Tree Ensemble, MTE), 将全球涡度相关通量观测数据进行经验性升尺度, 得到空间分辨率为 0.5° 的全球1982~2011年的月GPP和ET数据集(<http://www.bgc-jena.mpg.de/geodb/projects/Data.php>), 本研究中采用该数据作为观测评估

模型的模拟能力. 尽管MTE数据并不是真实的通量观测数据, 但与FLUXNET观测相比有较好的一致性(Jung等, 2011; 王媛媛等, 2015). Jung等(2010)应用该数据研究了近年来全球陆表蒸散发的减少情况以及其可能原因; Shi等(2013)利用该数据评估了CLM4对蒸散发的模拟能力, 并研究了多种环境因子对蒸散发时空分布的影响; Liu等(2016)利用该数据评估了多模型多强迫对中国区域蒸散发模拟的影响; Jia等(2018)以该数据为参考, 研究了中国区域碳循环对干旱的响应.

3 结果分析

3.1 单点验证

图4给出了BRSa3点水力再分配(HR)的日内变化. 如图所示, 在BRSa3站点, 水力再分配主要发生在夜间19点至次日7点, 即气孔关闭无蒸腾作用时段, 而白天并不发生. 在湿润季夜间(图4a), 由于降水充足, 表层土壤湿润, 水力再分配使得土壤水由上层向下层传输; 在干旱季夜间(图4b), 由于降水匮乏, 表层土壤较干, 深层较湿, 水力再分配使得土壤水由下层向上层传输.

图4 BRSa3点水力再分配日内变化
(a) 湿润季; (b) 干旱季

图5 BRSa3点水力再分配垂直廓线

(a) 湿润季; (b) 干旱季; (c) 根系分布

湿润季平均夜间水力再分配最大可达 0.09 mm day^{-1} , 而干旱季相对而言水力再分配较大, 可达 1.2 mm day^{-1} , 远大于湿润季. 图5分别给出了湿润季和干旱季BRSa3点水力再分配垂直廓线. 可以看出在湿润季, 由于水力再分配作用2~7层土壤水向8~10层深层土壤移动, 第10层水力再分配作用最强; 而在干旱季, 与之相反8~10层土壤水向2~7层移动, 第9层水力再分配作用最强.

图6和7分别给出了BRSa3点2001~2003年平均水力再分配的季节变化和垂直廓线. 如图所示, 水力再分配在湿润季量值较小, 不足 0.1 mm day^{-1} , 土壤水由土壤上层(为负)向下层(为正)传输; 而在干旱季水力再分配表现明显, 土壤水由土壤下层(为负)向上层(为正)传输, 最大值可达 0.3 mm day^{-1} .

图8给出了BRSa3点0~20cm土壤湿度与观测的对比. 可以看出, 由于水力再分配作用, 在干旱季深层土壤水分被输送到上层, 因此在干旱季new试验模拟的SWC相比ctl试验有一定增加, 从而部分改善了干旱季模型对表层土壤水的低估, 平均偏差和均方根误差均有所减小, 且相关系数也有所提高(表1).

土壤水分的变化将直接影响根系获取水分的多少, 从而影响土壤水分胁迫函数 $\beta_i (0 \sim 1)$, 并最终影响光合和蒸腾, 其计算如式5所示, 其中 w_i 为第 i 层土壤中的植被萎蔫系数, r_i 为第 i 层土壤中的根系比例. β_i 越接近于1表示土壤越湿, 水分胁迫越小, 越接近于0表示土壤

越干, 水分胁迫越大. 水分利用率(Water Use Efficiency, WUE), 定义为光合速率与蒸腾速率的比值, 如式(6)所示, 其反映的是单位水分消耗所产生的碳吸收, 是植物碳水耦合关系的量化. 图9给出了BRSa3点 β_i 、GPP、蒸散发ET和WUE的季节变化. 可以看到, 在干旱季由于水分胁迫严重, ctl试验对GPP和ET模拟存在低估, 当考虑水力再分配过程后, 深层土壤水被抬升到土壤表层, 更多的水分可以被根系吸收用来供给植被蒸腾, 因此土壤水分的缺乏对植被的胁迫减小, 即 β_i 增加(图9a), 进而改善了模式对干旱季GPP和ET模拟的低估, 均方根误差分别减小了 $14.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ mm month}^{-1}$ (图9b和c). 在干旱季, 水力再分配作用使 β_i 平均增加0.1左右(图9e), 与之对应GPP增加约10%(图9j), ET增加约15%(图9k), 因而WUE在该时间段有所减小. 总体而言, 水力再分配使得模式对GPP和ET的模拟得到了显著改善.

$$\beta_i = \sum_j w_j r_j, \quad (5)$$

$$\text{WUE} = \frac{\text{GPP}}{\text{ET}}. \quad (6)$$

3.2 亚马孙区域碳水通量的季节特征

为了进一步探讨根系水力再分配如何影响亚马孙陆地生态系统碳水循环水对季节性干旱的响应, 本研究选择该区域内两个不同植被主导类型及不同干旱季

图6 BRSa3点水力再分配季节变化

长度的典型区域(R1和R2; 图2c)进行分析. 图10给出了两个典型区 β_i 、GPP和ET的季节变化. 对于R1区域, 干旱季为6~9月, 为期4个月; 其主要植被类型为BET Tr. 在其干旱季, 由于水分胁迫严重(图10a), ctl试验模拟的GPP和ET都表现出明显的下降(图10b和c). 相比而言, 当考虑根系水力再分配后, new试验模拟的GPP和

ET得到了改善, R1区域GPP和ET在干旱季的平均值分别由195.95增加为219.29g C m⁻² month⁻¹, 91.47增加为105.83mm month⁻¹, 从而更接近于MTE. 其相应均方根误差(RMSE), 分别由39.52降为22.24g C m⁻² month⁻¹, 18.80降为16.71mm month⁻¹. 对于R2区域, 干旱季为5~9月, 为期5个月; 其主要植被类型为C₄. 相比于R1, R2区域GPP和ET稍低, 这是由于不同植被类型的光合作用和蒸腾参数造成的. R2区域在其干旱季, β_i 下降为0.6, 两种模拟试验对GPP和ET的模拟都表现出显著下降, 这是与观测相一致的, 但ctl试验表现过于强烈. 而new试验在R2区域表现出与R1区域相似的改善(图10e和f), 干旱季GPP和ET的平均值分别由128.84增加为146.15g C m⁻² month⁻¹, 78.0增加为87.69mm month⁻¹, 其均方根误差分别由65.70g C m⁻² month⁻¹和23.0mm month⁻¹降为48.10g C m⁻² month⁻¹和21.18mm month⁻¹. 总体而言, 当考虑根系水力再分配

图7 BRSa3点水力再分配季节变化垂直廓线

图8 BRSa3点2001~2003年月平均0~20cm土壤湿度模拟与观测的对比

表 1 BRSa3点2001~2003年月平均0~20cm土壤湿度统计特征^{a)}

统计量	ctl	new
相关系数 R	0.76	0.84
平均偏差MBE($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0.15	-0.11
均方根误差RMSE($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.16	0.13

a) 相关系数加粗显示表示通过95%信度水平检验

作用后, 植被对季节干旱的响应得到了明显改善.

2005年, 亚马孙区域经历了一场严重干旱(Saleska等, 2007; Chen等, 2009). 当热带北大西洋表层温度最高时, 亚马孙区域2005年7~9月, 降水减小最为严重(Zeng等, 2008). 图11a给出了亚马孙区域2005年7~9月降水异常分布图(采用1982~2010年CRUNCEP降水资料), 其中R3区域最为严重($\leq -50 \text{mm month}^{-1}$), 该区域在2005年降水仅有 $41.4 \text{mm month}^{-1}$ (图11b). 本研究中选择R3区域作为2005年严重干旱的典型区进行分析,

其主要植被类型为BET Tr. 由于严重干旱, R3区域GPP和ET都表现出明显下降, 明显低于多年平均值, 尤其是7~9月, 低于观测值(图11). 然而new试验通过增加可获得的土壤水分, 缓解了这种低估, GPP与ET的RMSE分别由 $30.3 \text{g C m}^{-2} \text{month}^{-1}$ 和 $16.9 \text{mm month}^{-1}$ 降为 $16.45 \text{g C m}^{-2} \text{month}^{-1}$ 和 $14.0 \text{mm month}^{-1}$. 总体而言, new试验也改善了植被对极端干旱的响应.

4 结论

本研究将水力再分配方案耦合到陆面过程模式CLM4.5, 并以亚马孙流域为研究区域进行数值模拟试验, 探讨了根系水力再分配对生态系统碳水循环的影响. 结果表明, 对于亚马孙BRSa3站点, 水力再分配作用在湿润季量值较小, 不足 0.1mm day^{-1} , 表现为由土壤上层向下层传输; 而在干旱季水力再分配的作用较为明显, 由土壤下层向上层传输的水量最大值可达 0.3mm day^{-1} , 并使得模式模拟的表层土壤湿度更接近

图 9 BRSa3点 β_t 、GPP、ET和WUE的季节变化

图 10 AM区 β_t 、GPP、ET的季节变化

(a)~(c)为R1区; (d)~(f)为R2区

图 11 2005年7~9月降水异常(a)、1982~2010年R3区域平均降水时间序列(b)和R3区域平均 β_t 、GPP和ET与对应MTE产品的比较((c)~(e))

观测, 表明考虑水力再分配作用能够减少陆面过程模式CLM4.5在干旱季对表层土壤湿度的低估. 不仅如此, 增大的表层含水量为根系提供更多水分, 增加了植被蒸腾, 减小了土壤水分对植被的胁迫作用, 改善了模型对GPP和ET的低估, 均方根误差分别减小其他了 $14.9\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 7.5 mm month^{-1} . 尽管如此, 两个模拟试验的SWC值与观测相比均表现出较大系统偏差, 一方面这可能是由于土壤水力特征参数(由土壤质地决定)的选取不够准确, 另一方面对于根系分布的描述与实际情况可能有所差异, 因此对于准确的陆面过程模拟, 除需完善的参数化方案, 准确的参数也很重要. 在今后的研究中要加强对各下垫面参数的改进工作, 从而移除模式系统性偏差.

在亚马孙区域, 在干旱季原CLM模式对两个典型区域的碳水通量模拟都存在一定低估, 而新模型可改善植被对季节干旱的响应. 对于主要植被类型为热带阔叶常绿林(BET Tr)、干旱季为6~9月的R1区域, GPP和ET的均方根误差分别由 39.52 减小为 $22.24\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$, 18.80 减小为 $16.71\text{ mm month}^{-1}$. 对于主要植被类型为C4草地、干旱季为5~9月的R2区域, 干旱时节GPP和ET均方根误差分别由 $65.70\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 $23.0\text{ mm month}^{-1}$ 降为 $48.10\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 $21.18\text{ mm month}^{-1}$. 对于2005年发生的严重干旱, 主要植被类型为BET Tr的R3区域最为严重, 通过对此区域比较分析, 发现新模型模拟效果也要优于原模型, GPP与ET的RMSE分别由 $30.3\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 $16.9\text{ mm month}^{-1}$ 降为 $16.45\text{ g C m}^{-2}\text{ month}^{-1}$ 和 $14.0\text{ mm month}^{-1}$.

本研究仅针对亚马孙区域进行了研究, 下一步将针对其他一些区域开展分析研究, 如亚热带区域、干旱区域等; 其次仅使用离线陆面过程模式分析了根系水力再分配对陆地碳水循环的影响, 并未利用陆气耦合模式探讨该方案对气候的影响. 在未来的工作中将进行完善, 以帮助我们深入理解植被与气候的相互作用.

参考文献

王媛媛, 谢正辉, 贾炳浩, 于燕. 2015. 基于陆面过程模式CLM4的中国区域植被总初级生产力模拟与评估. 气候与环境研究, 20: 97-110

- Armas C, Padilla F M, Pugnaire F I, Jackson R B. 2010. Hydraulic lift and tolerance to salinity of semiarid species: Consequences for species interactions. *Oecologia*, 162: 11-21
- Avissar R, Silva Dias P L, Silva Dias M A F, Nobre C. 2002. The large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *J Geophys Res*, 107: 8086
- Baker I T, Prihodko L, Denning A S, Goulden M, Miller S, Da Rocha H R. 2008. Seasonal drought stress in the Amazon: Reconciling models and observations. *J Geophys Res*, 113: G00B01
- Bauerle T L, Richards J H, Smart D R, Eissenstat D M. 2007. Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. *Plant Cell Environ*, 31: 177-186
- Bonan G B, Levis S, Kergoat L, Oleson K W. 2002. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Glob Biogeochem Cycle*, 16: 5-1-5-23
- Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, Gregg J. 2002. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiol*, 22: 1107-1117
- Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, Ong C K. 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115: 306-311
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, Yang Z L, Niu G Y. 2009. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *J Geophys Res*, 114: B05404
- Domec J C, Warren J M, Meinzer F C, Brooks J R, Coulombe R. 2004. Native root xylem embolism and stomatal closure in stands of Douglas-fir and ponderosa pine: Mitigation by hydraulic redistribution. *Oecologia*, 141: 7-16
- Emerman S H, Dawson T E. 1996. Hydraulic lift and its influence on the water content of the rhizosphere: An example from sugar maple, *Acer saccharum*. *Oecologia*, 108: 273-278
- Fisher R A, Muszala S, Versteinsten M, Lawrence P, Xu C, McDowell N G, Knox R G, Koven C, Holm J, Rogers B M, Spessa A, Lawrence D, Bonan G. 2015. Taking off the training wheels: The properties of a dynamic vegetation model without climate envelopes, CLM4.5(ED). *Geosci Model Dev*, 8: 3593-3619
- Hao G Y, Jones T J, Lutton C, Zhang Y J, Manzano E, Scholz F G, Bucci S J, Cao K F, Goldstein G. 2009. Hydraulic redistribution in dwarf Rhizophora mangrove trees driven by interstitial soil water salinity gradients: Impacts on hydraulic architecture and gas exchange. *Tree Physiol*, 29: 697-705
- Hudiburg T W, Law B E, Thornton P E. 2013. Evaluation and improvement of the Community Land Model (CLM4) in Oregon forests. *Biogeosciences*, 10: 453-470
- Hultine K R, Williams D G, Burgess S S O, Keefer T O. 2003.

- Contrasting patterns of hydraulic redistribution in three desert phreatophytes. *Oecologia*, 135: 167–175
- Hultine K R, Scott R L, Cable W L, Goodrich D C, Williams D G. 2004. Hydraulic redistribution by a dominant, warm-desert phreatophyte: Seasonal patterns and response to precipitation pulses. *Funct Ecol*, 18: 530–538
- Ishikawa C M, Bledsoe C S. 2000. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: Evidence for hydraulic lift. *Oecologia*, 125: 459–465
- Jia B H, Xie Z H, Zeng Y J, Wang L Y, Wang Y Y, Xie J B, Xie Z P. 2015. Diurnal and seasonal variations of CO₂ fluxes and their climate controlling factors for a subtropical forest in Ningxiang. *Adv Atmos Sci*, 32: 553–564
- Jia B H, Wang Y Y, Xie Z H. 2018. Responses of the terrestrial carbon cycle to drought over China: Modeling sensitivities of the interactive nitrogen and dynamic vegetation. *Ecol Model*, 368: 52–68
- Jung M, Reichstein M, Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences*, 6: 2001–2013
- Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, de Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467: 951–954
- Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J Q, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C. 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J Geophys Res*, 116: G00J07
- Kendra G C, Levis S, Thornton P. 2012. Evaluation of the new CNDV option of the community land model: Effects of dynamic vegetation and interactive nitrogen on CLM4 means and variability. *J Clim*, 25: 3702–3714
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the community land model (CLM 3.0). *J Geophys Res*, 112: G01023
- Liu J G, Jia B H, Xie Z H, Shi C X. 2016. Ensemble simulation of land evapotranspiration in China based on a multi-forcing and multi-model approach. *Adv Atmos Sci*, 33: 673–684
- Nadezhdina N, Cermak J, Gasperek J, Nadezhdin V, Prax A. 2006. Vertical and horizontal water redistribution in Norway spruce (*Picea abies*) roots in the Moravian Upland. *Tree Physiol*, 26: 1277–1288
- Natalia R C, Humberto R R, Lucy R H, Alessandro C A, Laura S B, Bradley C, Osvaldo M C, Plinio B C, Fernando L C, Antonio C C, David R F, Michael L G, Bart K, Jair M M, Yadvinder S M, Antonio O M, Scott D M, Antonio D N, Celso V R, Leonardo S, Ricardo K S, Julio T, Steven C W, Fabricio B Z, Scott R S. 2013. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. *Agric For Meteorol*, 182–183: 128–144
- Neumann R B, Cardon Z G. 2012. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: A review and synthesis of empirical and modeling studies. *New Phytologist*, 194: 337–352
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G, Drewniak B, Huang M, Koven C D, Levis S, Li F, Riley W J, Subin Z M, Swenson S C, Thornton P E, Bozbiyik A, Fisher R, Kluzek E, Lamarque J E, Lawrence P J, Leung L R, Lipscomb W, Muszala S, Ricciuto D M, Sacks W, Sun Y, Tang J, Yang Z L. 2013. Technical Description of Version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR Tech. Note, NCAR/TN-503+STR, National Center for Atmospheric Research, 434
- Oliveira R S, Dawson T E, Burgess S S O. 2005. Evidence for direct water absorption by the shoot of the desiccation-tolerant plant *Vellozia flavicans* in the savannas of central Brazil. *J Trop Ecol*, 21: 585–588
- Prieto I, Martínez-Tillería K, Martínez-Manchego L, Montecinos S, Pugnaire F I, Squeo F A. 2010. Hydraulic lift through transpiration suppression in shrubs from two arid ecosystems: Patterns and control mechanisms. *Oecologia*, 163: 855–865
- Raczka B, Duarte H F, Koven C D, Ricciuto D, Thornton P E, Lin J C, Bowling D R. 2016. An observational constraint on stomatal function in forests: Evaluating coupled carbon and water vapor exchange with carbon isotopes in the community land model (CLM4.5). *Biogeosciences*, 13: 5183–5204
- Richards J H, Caldwell M M. 1987. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 73: 486–489
- Ryel R J, Caldwell M M, Yoder C K, Or D, Leffler A. 2002. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: Evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia*, 130: 173–184
- Saleska S R, Didan K, Huete A R, da Rocha H R. 2007. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, 318: 612–612
- Scholz F G, Bucci S J, Hoffmann W A, Meinzer F C, Goldstein G. 2010. Hydraulic lift in a Neotropical savanna: Experimental

- manipulation and model simulations. *Agric For Meteorol*, 150: 629–639
- Schulze E D, Caldwell M M, Canadell J, Mooney H A, Jackson R B, Parson D, Scholes R, Sala O E, Trimborn P. 1998. Downward flux of water through roots (i.e. inverse hydraulic lift) in dry Kalahari sands. *Oecologia*, 115: 460–462
- Scott R L, Cable W L, Hultine K R. 2008. The ecohydrologic significance of hydraulic redistribution in a semiarid savanna. *Water Resour Res*, 44: W02440
- Shi X Y, Mao J F, Thornton P E, Huang M. 2013. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration in response to multiple environmental factors simulated by the Community Land Model. *Environ Res Lett*, 8: 024012
- Smith D M, Jackson N A, Roberts J M, Ong C K. 1999. Reverse flow of sap in tree roots and downward siphoning of water by *Grevillea robusta*. *Funct Ecol*, 13: 256–264
- Viogy N. 2011. CRUNCEP Dataset, description available at <http://dods.extra.cea.fr/data/p529viov/cruncep/readme.htm>, data available at http://dods.extra.cea.fr/store/p529viov/cruncep/V4_1901_2011/
- Wang G, Alo C, Mei R, Sun S. 2011. Droughts, hydraulic redistribution, and their impact on vegetation composition in the Amazon forest. *Plant Ecol*, 212: 663–673
- Wang Y Y, Xie Z H, Jia B H, Yu Y. 2015. Improving simulation of the terrestrial carbon cycle of China in version 4.5 of the Community Land Model using a revised Vcmax scheme. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 8: 88–94
- Wang Y Y, Xie Z H, Jia B H. 2016. Incorporation of a dynamic root distribution into CLM4.5: Evaluation of carbon and water fluxes over the Amazon. *Adv Atmos Sci*, 33: 1047–1060
- Warren J M, Meinzer F C, Brooks J R, Domec J C, Coulombe R. 2007. Hydraulic redistribution of soil water in two old-growth coniferous forests: Quantifying patterns and controls. *New Phytol*, 173: 753–765
- Warren J M, Hanson P J, Iversen C M, Kumar J, Walker A P, Wulschleger S D. 2015. Root structural and functional dynamics in terrestrial biosphere models-evaluation and recommendations. *New Phytol*, 205: 59–78
- Yan B Y, Dickinson R E. 2014. Modeling hydraulic redistribution and ecosystem response to droughts over the Amazon basin using Community Land Model 4.0 (CLM4). *J Geophys Res-Biogeosci*, 119: 2130–2143
- Zeng N, Yoon J H, Marengo J A, Subramaniam A, Nobre C A, Mariotti A, Neelin J D. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ Res Lett*, 3: 014002
- Zeng X. 2001. Global vegetation root distribution for land modeling. *J Hydrometeorol*, 2: 525–530
- Zeng Y J, Xie Z H, Yu Y, Liu S, Wang L Y, Zou J, Qin P H, Jia B H. 2016. Effects of anthropogenic water regulation and groundwater lateral flow on land processes. *J Adv Model Earth Syst*, 8: 1106–1131
- Zheng Z, Wang G. 2007. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the Reserva Jaru site in Amazonia. *J Geophys Res*, 112: G04012
- Zhu S G, Chen H S, Zhang X X, Wei N, Wei S G, Yuan H, Zhang S P, Wang L L, Zhou L H, Dai Y J. 2017. Incorporating root hydraulic redistribution and compensatory water uptake in the common land model: Effects on site level and global land modeling. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 7308–7322

(责任编辑: 黄建平)