

文章编号:0559-9350(2021)03-0300-10

变化环境下流域水-碳平衡演化研究综述

段凯^{1,2}, 孙阁³, 刘宁³

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
3. Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Research Triangle Park, NC 27709)

摘要: 流域水量平衡与碳平衡通过植物光合作用与蒸散发过程紧密相联。在全球环境变化的背景下, 研究流域水-碳平衡的耦合关系与对变化环境的响应规律对于发展生态水文科学具有重要科学意义, 也可为区域水安全保障、生态系统服务功能评价、气候变化适应性对策制定等提供科学支撑。本文从水循环与碳循环要素的监测、水-碳耦合关系的量化和模拟、变化环境对水-碳平衡的干扰、流域尺度上水-碳平衡演化规律识别与归因等方面对相关研究进展进行综述, 探讨当前的研究热点、面临的问题与挑战、以及未来的发展趋势。

关键词: 水-碳耦合; 流域水-碳平衡; 变化环境; 研究进展

中图分类号: TV11

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200172

1 研究背景

大气与地表间水分与碳元素的交互过程是陆地生态系统物质与能量循环的核心, 降水经由下垫面的调蓄分配到土壤水、蒸散发、与产汇流, 其中土壤含水量与蒸散发是决定植物光合作用与生态系统生产力的关键因素, 而植被也通过冠层截留降水与蒸腾作用耗水反馈影响水文系统。因此, 在叶片到流域的多种空间尺度上, 水量平衡与碳平衡均紧密相联^[1-2], 二者与外部环境交互作用, 直接关系到生态系统的健康稳定与人类社会的供水安全和粮食安全。

当前地球系统已进入人类干扰日益占据主导地位的新时代, 即“人类世”^[3]。自工业革命以来, 全球气候变化持续加剧, 过去30年很可能是近1400年来北半球平均气温最高的时期^[4]; 与此同时, 我国改革开放以来经济社会的快速发展给环境带来了显著的负面影响, 自然资源的消耗、快速城市化、大规模的植被破坏与修复、空气与水体污染等高强度人类活动与气候变化交织重叠, 严重干扰了自然状态下的水量平衡与碳平衡^[5]。自然与人为因素共同作用下的环境变化与其影响已成为当前地球科学、资源环境、生命科学等多个学科领域普遍关注的热点与难点问题^[6-8]。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》也将“全球变化与区域响应”列为10个面向国家重大战略需求的基础研究方向之一。监测和模拟水循环与碳循环的演化、正确认识并精确量化变化环境对生态水文过程以及流域水-碳平衡的影响, 对于保障水安全、防灾减灾、修复水环境、维护“山水林田湖草”生态系统服务功能均具有重要的研究价值与实践意义^[9-11]。全球水文学者与生态学者已针对自然水-碳循环的物理过程与内在联系、水-碳循环要素的时空演变特征、水-碳平衡对变化环境的响应机理等问题进行多年研究, 尤其是自1990年代以来, 生态水文学作为一门新兴的交叉学科获得迅速发展^[12-13], 水-碳耦合研究开始受到广泛关注。下文从自然界中水循环与碳循环要素的监测、水-碳耦合关系、变化环境对流域水-碳平衡的干扰、以及流域水-碳平衡演化规律识别与

收稿日期: 2020-03-17; 网络首发时间: 2021-02-08

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210208.0935.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909285); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队(2019ZT08G090)

作者简介: 段凯(1989-), 副教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: duank6@mail.sysu.edu.cn

归因等方面总结相关研究进展，并对未来的发展动态做出展望。

2 水循环与碳循环要素的监测

水循环主要包括降水、蒸散发、入渗、土壤水与地下水运移、产汇流等过程，其中只有降水量与河川径流量，通过气象与水文测站有着广泛的地面实时监测。在全球尺度上，遥感技术已广泛应用于地形地貌、土地利用类型、植被分布等基础地理信息与水文循环各个变量的监测之中^[14]。在区域或流域尺度上，受限于遥感监测的精度与实测站点的数量，从经验公式、概念性降水-径流模型、大尺度水热平衡公式、到分布式水文模型等一系列水文模拟技术仍然是获取蒸散发、土壤蓄水量等水循环要素的重要手段^[15]。

碳循环主要包括光合作用固碳、呼吸作用消耗、凋落物分解与土壤碳循环等过程。相较于径流量，固碳量更加难以准确测量，目前主要的方法包括：(1)基于涡度相关技术的碳通量观测。在冠层和站点尺度上，主要通过通量塔进行碳、水、热通量及周边微气候条件的连续观测。自1990年代以来，通量塔观测网络得到迅速发展，FLUXNET^[16]、AmeriFlux^[17]、ChinaFLUX^[6,18]等全球或国家大型观测计划已有超过250个站点；(2)基于遥感技术的数学模型。在区域和全球尺度上，基于多光谱、高分辨率遥感数据的数学模型是获取水、碳通量的主要方法，但模型的率定与校验仍然依赖于站点尺度上充足的通量观测数据^[19]。

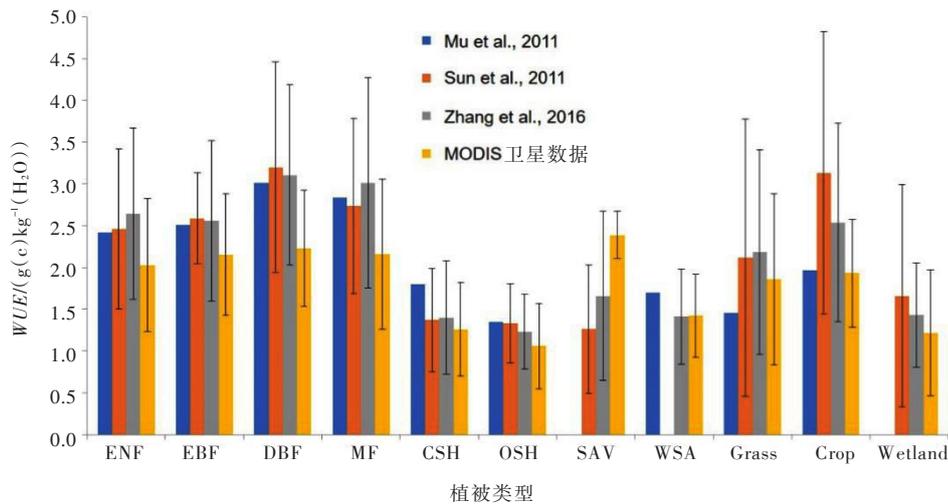
随着监测技术与仪器设备的发展，近年来开始出现针对流域尺度的综合观测实验系统^[20]，通过结合传统地面观测与载微波辐射计、成像光谱仪、热像仪、激光雷达等航空遥感设备，形成覆盖全流域的气象、水文、生态环境综合观测网，对水循环与碳循环要素进行多尺度观测实验。

3 水-碳耦合机理与模拟模型

3.1 自然界水循环与碳循环的耦合过程 在植物体内存在的以光合作用为主的一系列碳-水生化反应与水循环对碳水化合物的运输作用构成了陆地生态系统水-碳耦合关系的生理学基础与动力基础。在植物体外，水、碳在土壤-植被-大气连续体中的运动过程存在一系列的耦合关系^[21]：土壤-植被之间主要通过根系耦合，包括根系与土壤间水分与有机离子的交换、根系与凋落物分解过程中对水分的消耗及对土壤碳库的补充等；土壤与大气之间以土壤表层为耦合节点，包括土壤蒸发与土壤呼吸的相互作用、降水对土壤碳排放的影响等；植被与大气之间则以叶片气孔为水、碳交换过程的耦合节点，蒸腾作用与光合作用之间不可分割的生理联系是水-碳耦合关系的核心。

在流域尺度上，水-碳耦合主要表现在植被固碳过程对土壤水分的消耗与对产汇流的调节、降水和径流过程对地表有机物的冲刷和输移等。水-碳耦合过程直接关系到水资源(水量、水生态环境)与生态系统服务功能(提供自然资源与生物栖息地、吸收温室气体等)，因此，是气候气象、水文水资源、生态环境等领域共同关注的问题。

3.2 水-碳耦合关系的量化 经过全球通量网的多年观测与实验分析，有大量证据显示，在从叶片、冠层、到区域和全球的多种空间尺度上，固碳量与耗水量存在着显著的正相关性，且在相似的生态系统中，存在着相似的线性比例关系^[2,22]。这种植物光合作用中固碳量与耗水量的比例关系，即水分利用效率，是反映生态系统功能与水-热-碳平衡的关键指标。在生态系统尺度上，水分利用效率常用总初级生产力(GPP)与蒸散发(ET)的比值来表征($WUE = GPP / ET$)。从Mu^[23]、Sun^[1]、Zhang^[19]等基于全球地面通量数据的分析结果来看(图1)，森林、灌木、草地、农田、湿地等生态系统的水分利用效率主要在0.5~5 g(C)kg⁻¹(H₂O)之间变化，在不同植被类型及不同气候条件下有着显著差异。这些基于点尺度通量数据的WUE模拟结果与基于大尺度遥感观测(例如广泛使用的MODIS卫星数据)的结果往往有着较大偏差^[19]，反映了当前在GPP与ET的模拟计算中仍然存在较大的不确定性。



图中的植被类型包括：常绿针叶林(ENF)、常绿阔叶林(EBF)、落叶阔叶林(DBF)、混交林(MF)、封闭灌丛(CSH)、开放灌丛(OSH)、稀树草原(SAV)、木本稀树草原(WSA)、草地(GRA)、农田(Crop)、湿地(Wetland)。

图1 不同植被类型的水分利用效率比较

有研究发现空气中的蒸发动力对于水分利用效率有着显著影响。因此，针对水分利用效率与饱和水汽压差(VPD)之间线性或非线性的响应关系，有学者提出了固有水分利用效率系数($IWUE = GPP \times VPD / ET$)^[24]、潜在水分利用效率系数($UWUE = GPP \times VPD^k / ET$)^[25]等指标，从而可通过动态的水分利用效率来反映气候变化对水-碳耦合关系的影响。例如，Guerrieri等^[26]利用同位素技术分析了北美地区8个森林样地的树木年轮数据，发现IWUE在过去30年以 $0.35 \pm 0.04 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.001$)的速率递增，其中针叶林比阔叶林的IWUE更高，这种增长趋势与气温、VPD、CO₂背景浓度呈正相关，而与降水、土壤湿度呈负相关。尤其是人类活动导致的全球范围内CO₂浓度持续上升，被认为是WUE增大的重要驱动因素。CO₂背景浓度的升高降低了叶片气孔开度与蒸腾速率，从而提高了相似水分供给条件下的水分利用效率^[27-28]。有学者建议，应使用形如 $WUE = WUE_0 \frac{C_i - C_1}{C_i + C_2}$ 的经验关系来反映CO₂的这种肥化效应^[29]。式中WUE₀为基准期平均水分利用效率，C_i为环境中CO₂浓度，C₁与C₂为CO₂浓度的波动阈值。

3.3 水-碳耦合数学模型 基于水-碳平衡之间的物理联系，涌现出一些将流域水文模型与碳平衡模型耦合起来的数学模型。这类模型通常以土地利用为计算单元，模拟不同生态系统内水量平衡与碳平衡之间的相关性，并由此衍生出几种构建流域水-碳耦合模型的思路：

(1)以水定碳模型(water-centric model)。已有部分学者构建了以测算水通量和水分亏缺对光合作用的限制为基础的碳循环模型，例如：Beer等^[30]利用流域尺度的蒸散发与水分利用效率系数模拟了总初级生产力的全球分布；Sun等^[1]依据全球通量塔的水、碳通量数据，针对落叶林、常绿林等10种植被类型的不同水分利用效率建立了大尺度碳平衡模型，用于估算流域尺度的生态系统生产力。

(2)以碳定水模型(carbon-centric model)。由于蒸散发量组分复杂、难以直接测量，近年来也有尝试使用生态系统的固碳量来估算蒸散发，即以碳定水的耦合模型。例如，Zhang等^[19]利用全球通量网的观测数据与遥感数据建立了全球水-碳耦合模型，该模型首先使用碳循环模型计算总初级生产力，再以总初级生产力与水分利用效率的比值估算蒸散发。

(3)基于植物生理过程的生态系统模型(process-based model)。现有的生态系统模型大多以基于光利用效率(LUE)理论的碳循环模型为内核，模拟植物在不同生长阶段的生理过程。由于水份供给是光合作用的关键限制因素之一，这类模型也以不同方式考虑了水循环与固碳量之间的耦合关系，例如GASA^[31]、3PG^[32]、TECO^[33]、EC-LUE^[34]、RHESSys^[35]等模型，均通过对土壤含水量、蒸散发等

水循环要素的模拟来反映水分条件对固碳过程的影响。

4 变化环境对流域水-碳平衡的干扰

变化环境对流域的干扰来自于许多方面,包括多种生物(如植被演替、病虫害、物种入侵等)与非生物(如气候变化、土地开发、空气污染、水利工程建设等)因素,其中气候与下垫面土地利用/植被覆盖的变化对全球与区域尺度上的水-碳平衡造成了广泛而深刻的影响,尤为受到关注^[4,36-37]。

4.1 气候变化的影响 气候变化对水循环过程有着直接的影响,导致水循环加剧、地表干旱化、水文序列非一致性、极端洪旱事件增多等。实测数据表明,在气候暖化的背景下,近50年来我国西北部、华北大部、东北南部等地区干旱面积均呈现增长趋势^[38]。南方地区虽较北方湿润,近年来也频繁出现季节性干旱,且降水的年内分布变化也呈现出对农业生产的不利影响,自1980年代以来,华南春季与秋季降水量呈现出明显减少的趋势,夏旱、秋旱及连旱发生的可能性增加^[39]。在气候变化与用水增长的共同影响下,近50年来我国六大江河的实测径流量整体上呈下降趋势,尤其是海河、黄河、辽河、与松花江下降显著^[40]。

气候变化也对碳平衡造成了显著影响。一方面,气候变化引起水循环要素时空格局变化,从而影响植物生长期水分供应条件。已有研究表明,持续加剧的全球暖化会驱动蒸散发耗水的增长与地表土壤湿度的减小,在供水条件较好的地区会显著增大生态系统生产力^[41]。然而,气候变化背景下干旱频发,也被普遍认为是造成GPP下降的重要原因^[22,42]。另一方面,气候变化也与大气中CO₂、氮素、臭氧、气溶胶等因素一起影响着植物的生理状态与光合作用过程。例如,Sun等^[43]利用通量测站与模型模拟数据分析了生态系统水分利用效率在我国的时空演变特征,发现在1979—2012年间,水分利用效率在东北、西南、与中部地区有所增长,而下降趋势主要分布在西部。

4.2 土地利用/植被覆盖变化的影响 土地利用/植被覆盖的转变(城市化、森林砍伐、围湖造田等)则改变了自然状态下的下垫面特征,干扰了降水在生态水文系统内的分配过程,以及陆地生态系统的碳收支状况^[44]。由于固碳过程依赖于土壤与空气中的水分供给,流域产水与固碳之间不可避免地存在着矛盾^[11],而土地利用方式与植被组成的改变对于二者之间的这种转化关系有着重要影响^[45]。森林、草地、湿地等生态系统在为人类社会提供各种自然资源并充当天然碳库的同时,也能在不同程度上起到净化水质、阻滞洪水、调蓄径流年内分配的作用,但也因为比城镇地区更大的蒸散发而消耗掉大量水分。在我国范围内,自1980年代以来大规模的人工造林工程使得许多地区成为更大的碳汇^[46-47],与此同时,也因林地耗水量增大而在一定程度上导致河川径流与输沙量减少^[48-49]。例如,在湿润炎热的华南桉树林地,蒸散发可消耗掉高达90%的年降水^[50];与此相反,近半个世纪以来的快速城市化发展使得长三角、珠三角等城市密集地区不透水面积迅速增大,削弱了地表蓄滞洪水与储碳的能力。据Pei等^[51]估算,2000—2006年,城市化导致中国生态系统净生产力减少约6%(0.31×10⁻³ Pg C/年)。

4.3 变化环境的复合性与区域性 变化环境对于流域水-碳平衡的干扰往往表现出多种因素(如气候、土地利用、营养元素、水利工程等)共同作用的复合性特征;另一方面,由于水分热量条件、地质地貌、植被、人类活动强度等方面的地区差异,水-碳平衡对变化环境的响应也呈现出明显的区域性^[52-53]。例如,由卫星遥感所得到的全球叶面积指数数据显示,CO₂浓度、氮沉降、气候、以及土地利用的变化共同导致了地表储碳量在全球大范围的增长,即“全球绿化”现象,其中气候变化在高纬度地区与青藏高原起主导作用,而土地利用变化的影响在华南地区较为显著^[54-55];Feng等^[9]指出,长期的大规模植被恢复工程已使得黄土高原达到了区域水资源所能承载的极限,而Zhou等^[56]则认为,大面积植树造林并没有对广东省的水资源造成显著影响;Keenan等^[27]发现,在气候与CO₂浓度变化的组合影响下,高纬度地区的水分利用效率会有显著增长,而低纬度地区却可能下降。造成这些差异性响应的机理机制与未来可能的发展趋势并不完全清晰,而且由于研究者学科背景、建模依据与数据来源等方面的差异,不同模型之间的结果往往相差甚远,从降水、蒸散发到径流、生态系统生产力等要素的模拟均存在较大的不确定性。要厘清不同环境因素的影响范围、程度、驱动机理仍然

面临许多困难,需要做进一步的探索^[57-58]。

5 流域水-碳平衡演化规律识别与归因

已有大量研究从不同角度诊断流域水-碳平衡的变异特征与成因,并解析各个环境变化因子的贡献率。常用方法包括基于流域实验的配对流域法、基于统计关系的气候弹性模型法和大尺度经验公式法、生态水文模拟法等。

(1)配对流域法。配对流域法是生态水文学中用于分析植被变化与流域管理对流域水文过程影响的经典方法,也被公认为最直接有效的手段^[59-60]。早在1910年,美国农业部林务局在科罗拉多州的Wagon Wheel Gap开展了针对森林砍伐对径流、输沙量影响的配对流域实验^[61]。这是全球数以百计的配对流域实验的原型。其基本思路为,在研究区域内寻找气候、地质地貌、土壤条件类似的两个流域作为配对流域,设计严格的控制对照实验,人为改变其中一个流域(“实验流域”)的外部环境,同时以另一个流域为自然条件下的参照(“对照流域”),通过连续的跟踪观测,比较两个流域水-碳要素的变化特征与环境变化的影响;然而,由于实验条件的制约,发展中国家往往缺乏长期、连续的生态水文监测与配对流域实验。一种广泛使用的替代方案是在一个较长的历史时期内,遴选出环境变化剧烈的两个时期,选择地理位置接近但受到不同环境变化影响的两个流域作为配对流域,进行比较分析。例如,我国自改革开放以来许多流域经历了土地利用方式上的剧烈变化,以1980年代左右作为时间分割点,选择气候背景与地形地貌相似的两个子流域开展配对分析,已成为分割植被变化(城市化、植树造林、砍伐围垦等)与气候变化影响的常见方法^[62-63]。

(2)气候弹性模型法。由于配对流域法对两个流域的相似性要求严苛,目前国内按照配对流域法严格进行流域实验的报导并不多见,尤其是对于大流域而言这种相似性更加难以确定,且流域特征的差异性往往会掩盖人类活动干扰的影响。因此,针对单一流域进行时间序列分析,进而量化不同时期环境变化的影响是另一种常用思路^[64]。其中,气候弹性模型法被广泛应用于分割气候变化与下垫面人类活动对流域水量平衡的影响^[65]。其基本步骤包括:①使用双累积曲线法或Mann-Kendall检验等方法检测径流突变发生的时间^[66],将历史时期划分为“突变前”与“突变后”两个时期,以两个时期实测平均径流的差值代表气候变化与人类活动对径流的影响之和;②以“突变前”时期的实测降水、径流、与潜在蒸散发为基准,建立径流与降水、潜在蒸散发之间的经验关系;③利用所建立经验关系模拟“突变后”时期的平均径流并计算相较于“突变前”时期的变化,用于识别气候变化对径流的影响;④最后以总影响值减去气候变化影响得到人类活动影响。

(3)大尺度经验公式法。其基本思路为在较大尺度上建立针对某一水-碳要素的经验公式,并根据不同环境背景(如植被类型)设定不同的模型参数,进而模拟环境变化对水-碳要素的影响。其中,以Budyko公式为代表的大尺度经验模型被广泛用于诊断变化环境对流域水量平衡的影响。例如,Zhang等^[67]建立了形如 $ET = P(1 + w \cdot PET/P) / (1 + w \cdot PET/P + P/PET)$ 的蒸散发模型。式中的 w 为植被参数,可利用历史实测数据进行率定,既而通过代入不同的 w 参数估算出特定的植被变化对蒸散发的影响程度。结合大尺度水量平衡公式与水分利用效率,可进一步在年代际尺度上估算植被变化对径流和生态系统生产力的影响。

(4)生态水文模拟法。即利用具有一定物理基础的生态水文模型进行控制模拟实验与归因分析^[68-69]。归因结果一般可概化为: $\Delta W = \sum_{i=1}^N E_i + E_{int}$ 。式中 ΔW 表示流域水-碳平衡要素(如蒸散发、径流、生态系统生产力)从“突变前”到“突变后”时期的变化,即所有环境因子对其影响的总和。可将 ΔW 分解为降水、气温、辐射、空气湿度、风速、土地利用方式、植被指数(如叶面积指数、NDVI)、 CO_2 浓度等因子的独立影响 $E_i (i=1, 2, \dots, N)$,以及各因子间相互作用的影响 E_{int} 。其中, E_i 可通过控制其余因子不变来模拟单个因子变化的独立影响, E_{int} 可通过 ΔW 与 $\sum E_i$ 的差值来计算。既而可得到各因子的相对贡献率。

以上几类方法各有其优劣及适用范围。配对流域法虽直接有效,但需要投入巨大的资金与时间

成本, 而判断所选择的两个流域是否“相似”也有较强的主观性, 尤其是对于大流域而言。针对单一流域的统计方法则受限于数据资料的质量与时空分辨率, 例如, 降水监测站点的空间代表性不足、植被的历史演变缺少数据等因素, 常常会直接影响到结论的可靠性。生态水文模型在一定程度上弥补了流域实验的不足, 一方面可模拟无观测地区的水-碳平衡, 另一方面可灵活地用于预估未来一种或多种因素复合影响下的水-碳响应。然而, 模型的开发、率定、与验证均依赖于长期的观测与实验, 数据采集与尺度转换中的不确定性、异参同效性等问题, 都可能对归因分析的结果造成干扰。

6 研究难点与发展趋势

6.1 研究难点 从已有的研究来看, 变化环境下的流域水-碳耦合模拟与水-碳演化规律研究仍然存在以下难点。

(1) 蒸散发组分的分割量化。蒸散发是地表与大气之间水、热、碳交互的核心变量, 但站点尺度上的实测数据稀少且难以获取。遥感蒸散发产品虽已得到广泛应用, 但在用于流域尺度时, 仍存在较大不确定性, 用于模型校验时可能带来一定的系统性误差。尤其是植被蒸腾、冠层截留、土壤蒸发等组分所占比重在不同的水热条件下有着显著差异, 难以准确测算。例如, 在干旱且长时间无降水的地区, 冠层截留与土壤蒸发的贡献趋近于零, 但在湿润地区, 二者却常常占有重要比重。未来需要进一步明晰冠层、叶面及地表水热传导过程的物理意义, 厘清气象、植被、土壤湿度等因素对蒸散发各分量的影响。

(2) 水-碳耦合关系在流域尺度上的表达。由于不同尺度上空间结构和功能的异质性, 尺度匹配问题是水文学、生态学、及气候学耦合研究中最大的障碍之一。当前的水-碳耦合研究大多在站点或田间、样地等小尺度上, 流域尺度上水-碳平衡的耦合机制并不清晰, 通常需要根据小尺度上的实验结果进行升尺度(upscaling)分析。然而, 升尺度面临着空间异质性与非线性的难题, 往往带来较大的误差。未来需结合流域与生态系统的空间格局与嵌套关系, 进一步探索从站点到生态系统再到流域的尺度上升过程对水-碳耦合关系的影响与参数化方法。

(3) 环境因素对水-碳耦合关系的影响机理。由于植物光合作用的生理复杂性, 水分利用效率受到地形地貌、气候气象、土壤属性、树种树龄等多种流域特征的影响, 难以找到普适性的效率系数^[43,70-71]。在不同尺度上水-碳耦合关系对大气组分(如CO₂浓度、氮沉降、臭氧等)^[27,72]、饱和水汽压差^[25,30]、气溶胶^[73]等环境因素的非线性响应关系以及不同因素间的相互作用仍将是未来研究的难点。

6.2 发展趋势 针对变化环境下水-碳平衡演化研究的复杂性、区域性、交叉性, 当前研究思路与方法的发展呈现出以下趋势。

(1) 多源数据融合。随着监测技术的日益丰富成熟与对水循环、碳循环物理过程的认识逐步深入, 综合运用地表观测、航空遥感、同位素追踪、统计模型、物理模型等多种技术手段, 并集成、同化多源数据, 将是未来监测水-碳要素的主要发展方向。

(2) 基于物理机制的分布式生态水文模拟。随着观测手段与信息技术的发展, 物理意义更为明确的分布式或半分布式模型(如SWAT、VIC、RHESSys等)得到了广泛应用^[8,74]。通过综合利用遥感解译、雷达反演与地面观测等不同时空尺度上的大气与下垫面数据, 能够获取时空分辨率更高的参数与模型输入, 从而更精细、准确地模拟水-碳循环过程对变化环境的响应。开发基于多源数据同化的分布式物理模型、并针对流域特征参数化表达水-碳耦合循环过程是当前重要的研究方向。

(3) 跨学科交叉研究。随着人们对水-碳循环与气候气象、植被生态、社会城市等环境因素相互作用机理的认识逐步加深, 融合气候、水文、生态、社会等领域的跨学科综合研究逐渐走向前沿^[75-77]。例如, 传统的流域水文模型对生态机理的描述十分简略, 即使是较为复杂的分布式物理模型, 通常也是利用多期土地利用/植被覆盖条件的遥感影像获得下垫面参数, 但无法预测植被的动态变化与水-碳耦合关系的动态响应影响。致力于实现生态-水文双向耦合的‘达尔文式’模型, 在未来有着广阔的发展前景^[78-79]。

7 结论

气候系统、水文系统和生态系统之间的相互影响错综复杂,某一个要素的变化往往导致其他系统的连锁反应。研究水-碳耦合关系与水-碳平衡对变化环境的响应规律,能够为决策者在不同时空尺度上提供水土资源统筹管理的决策依据,为协调实现区域绿色发展与可持续发展奠定基础。

目前关于气候变化和人类活动对水循环或者碳循环影响的研究虽然较多,但大多只侧重于某一要素或某一过程,且往往将水、碳作为单独的研究目标来处理,对于两者交互过程与耦合关系的相关基础研究依然薄弱,尤其是流域尺度上的生态水文机理机制研究仍有待深入。在当前全球变化的背景下,环境变化对流域水-碳平衡的干扰呈现出显著的复合性与区域性,基于流域实验的配对流域法、基于统计关系的气候弹性模型法和大尺度经验公式法、与基于物理过程的生态水文模拟法等方法被广泛用于解析流域水-碳平衡关键要素的变异特征与成因。然而,相关研究仍然面临着数据短缺、水-碳耦合关系参数化与尺度转换困难、自然与人为多种因素相互作用机理不明等问题,多源数据同化及多模型集成、基于物理机制的分布式生态水文模拟、以及气候-水文-生态-社会跨学科交叉研究将是未来重要的发展方向。

参 考 文 献:

- [1] SUN G, CALDWELL P, NOORMETS A, et al. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J05.
- [2] LAW B, FALGE E, GU L V, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 97-120.
- [3] LEWIS S L, MASLIN M A. Defining the anthropocene[J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [4] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Pachauri R K, Meyer L, Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [5] FANG J, YU G, LIU L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [6] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏.中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [7] 傅伯杰.新时代自然地理学发展的思考[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 1-7.
- [8] 杨大文,徐宗学,李哲,等.水文学研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 36-45.
- [9] FENG X, FU B, PIAO S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [10] FU B, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [11] JACKSON R B, JOBBÁGY E G, AVISSAR R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [12] 夏军,李天生.生态水文学的进展与展望[J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(6): 1-5.
- [13] 严登华,何岩,邓伟,等.生态水文学研究进展[J]. *地理科学*, 2001, 21(5): 467-473.
- [14] WOOD E F, ROUNDY J K, TROY T J, et al. Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): W05301.
- [15] 徐宗学.水文模型:回顾与展望[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 278-289.
- [16] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [17] BODEN T A, KRASSOVSKI M, YANG B. The AmeriFlux data activity and data system: an evolving collection of data management techniques, tools, products and services[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Da-*

- ta Systems, 2013, 2(1): 165–176 .
- [18] YU G, WEN X, SUN X, et al . Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(3/4): 125–137 .
- [19] ZHANG Y, SONG C, SUN G, et al . Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223: 116–131 .
- [20] 李新, 刘绍民, 马明国, 等 . 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J] . 地球科学进展, 2012, 27(5): 481–498 .
- [21] 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 .
- [22] CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, et al . Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J] . Nature, 2005, 437(1/2): 529–533 .
- [23] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W . Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J] . Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781–1800 .
- [24] BEER C, CIAIS P, REICHSTEIN M, et al . Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level[J] . Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): GB2018 .
- [25] ZHOU S, YU B, HUANG Y, et al . The effect of vapor pressure deficit on water use efficiency at the subdaily time scale[J] . Geophysical Research Letters, 2014, 41(14): 5005–5013 .
- [26] GUERRIERI R, BELMECHER S, OLLINGER S V, et al . Disentangling the role of photosynthesis and stomatal conductance on rising forest water-use efficiency[J] . Proceeding of the National Academy of Sciences, 2019, 116(34): 16909–16914 .
- [27] KEENAN T F, HOLLINGER D Y, BOHRER G, et al . Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise[J] . Nature, 2013, 499(7458): 324–327 .
- [28] SOH W K, YIOTIS C, MURRAY M, et al . Rising CO₂ drives divergence in water use efficiency of evergreen and deciduous plants[J] . Science Advances, 2019, 5(12): eaax7906 .
- [29] OLLINGER S, GOODALE C, HAYHOE K, et al . Potential effects of climate change and rising CO₂ on ecosystem processes in northeastern US forests[J] . Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2008, 13(5/6): 467–485 .
- [30] 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 .
- [31] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al . Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J] . Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811–841 .
- [32] LANDSBERG J, WARING R . A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning[J] . Forest Ecology and Management, 1997, 95(3): 209–228 .
- [33] WENG E, LUO Y . Soil hydrological properties regulate grassland ecosystem responses to multifactor global change: A modeling analysis[J] . Journal of Geophysical Research, 2008, 113: G03003 .
- [34] YUAN W, LIU S, YU G, et al . Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J] . Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416–1431 .
- [35] TAGUE C, BAND L . RHESSys: Regional Hydro–Ecologic Simulation System—An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling[J] . Earth Interactions, 2004, 8(19): 1–42 .
- [36] SUN G, HALLEMA D, ASBJORNSEN H . Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review[J] . Ecological Processes, 2017, 6(1) . DOI: 10.1186/s13717-017-0104-6 .
- [37] 王根绪, 钱鞠, 程国栋 . 生态水文科学研究的现状与展望[J] . 地球科学进展, 2001, 16(3): 314–323 .
- [38] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等 . 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J] . 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3–8 .
- [39] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 等 . 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 I . 降水资源演变特征[J] . 应用生态学报, 2012, 23(7): 1875–1882 .
- [40] 张建云, 章四龙, 王金星, 等 . 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J] . 水科学进展, 2007, 18(2): 230–234 .

- [41] DUAN K, SUN G, SUN S, et al . Divergence of ecosystem services in US National Forests and Grasslands under a changing climate[J] . Scientific Reports, 2016, 6: 24441 .
- [42] NOORMETS A, MCNULTY S G, DEFOREST J L, et al . Drought during canopy development has lasting effect on annual carbon balance in a deciduous temperate forest[J] . New Phytologist, 2008, 179(3): 818–828 .
- [43] SUN S, SONG Z, WU X, et al . Spatio-temporal variations in water use efficiency and its drivers in China over the last three decades[J] . Ecological Indicators, 2018, 94: 292–304 .
- [44] DEFRIES R, ESHLEMAN K N . Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future[J] . Hydrological Processes, 2004, 18(11): 2183–2186 .
- [45] 孙鹏森, 刘宁, 刘世荣, 等 . 川西亚高山流域水碳平衡研究[J] . 植物生态学报, 2016, 40(10): 1037–1048 .
- [46] PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al . The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J] . Nature, 2009, 458(7241): 1009–1013 .
- [47] ZHOU C, WEI X, ZHOU G, et al . Impacts of a large-scale reforestation program on carbon storage dynamics in Guangdong, China[J] . Forest Ecology and Management, 2008, 255(3/4): 847–854 .
- [48] SUN G, ZHOU G, ZHANG Z, et al . Potential water yield reduction due to forestation across China[J] . Journal of Hydrology, 2006, 328(3/4): 548–558 .
- [49] WANG S, FU B, PIAO S, et al . Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J] . Nature Geoscience, 2015, 9(1): 38–41 .
- [50] ZHOU G, SUN G, WANG X, et al . Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with a dimension analysis approach1[J] . Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(1): 208–221 .
- [51] PEI F, LI X, LIU X, et al . Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171/172: 174–186 .
- [52] PIAO S, SITCH S, CIAIS P, et al . Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends[J] . Global Change Biology, 2013, 19(7): 2117–2132 .
- [53] SCHEWE J, HEINKE J, GERTEN D, et al . Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J] . Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3245–3250 .
- [54] PIAO S, YIN G, TAN J, et al . Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J] . Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601–1609 .
- [55] ZHU Z, PIAO S, MYNENI R B, et al . Greening of the Earth and its drivers[J] . Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791–795 .
- [56] ZHOU G, WEI X, LUO Y, et al . Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China[J] . Water Resources Research, 2010, 46: W09503 .
- [57] WANG S, FU B-J, HE C-S, et al . A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China[J] . Forest Ecology and Management, 2011, 262(7): 1189–1198 .
- [58] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al . The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J] . Nature, 2010, 467(7311): 43–51 .
- [59] 孙阁, 张志强, 周国逸, 等 . 森林流域水文模拟模型的概念、作用及其在中国的应用[J] . 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 178–184 .
- [60] BROWN A E, ZHANG L, MCMAHON T A, et al . A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J] . Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 28–61 .
- [61] BATES C, HENRY A . Streamflow at wagon wheel Gap, Colorado[J] . Monthly Weather Review, 1921, 49: 637–650 .
- [62] LIN K, LV F, CHEN L, et al . Xinanjiang model combined with Curve Number to simulate the effect of land use change on environmental flow[J] . Journal of Hydrology, 2014, 519: 3142–3152 .
- [63] 张建云, 王国庆 . 气候变化对水文水资源影响研究[M] . 北京: 科学出版社, 2007 .
- [64] ZHANG L, ZHAO F, CHEN Y, et al . Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia[J] . Water Resources Research, 2011, 47: W12539 .
- [65] HALLEMA D W, SUN G, CALDWELL P V, et al . Burned forests impact water supplies[J] . Nature Communications, 2018, 9: 1307 .
- [66] WEI X, ZHANG M . Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single

- watershed study[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W12525.
- [67] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701–708.
- [68] DUAN K, SUN G, MCNULTY S G, et al. Future shift of the relative roles of precipitation and temperature in controlling annual runoff in the conterminous United States[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(11): 5517–5529.
- [69] 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.
- [70] GAO Y, ZHU X, YU G, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 195/196: 32–37.
- [71] XIAO J, SUN G, CHEN J, et al. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182/183: 76–90.
- [72] ZHU Q, JIANG H, PENG C, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2414–2429.
- [73] LU X, CHEN M, LIU Y, et al. Enhanced water use efficiency in global terrestrial ecosystems under increasing aerosol loadings[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237/238: 39–49.
- [74] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 346–354.
- [75] SIVAPALAN M. From engineering hydrology to Earth system science: milestones in the transformation of hydrologic science[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(3): 1665–1693.
- [76] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. *科学通报*, 2013, 58(12): 1064–1077.
- [77] DUAN K, SUN G, ZHANG Y, et al. Impact of air pollution induced climate change on water availability and ecosystem productivity in the conterminous United States[J]. *Climatic Change*, 2017, 140(2): 259–272.
- [78] 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.
- [79] HARMAN C, TROCH P A. What makes Darwinian hydrology Darwinian? Asking a different kind of question about landscapes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(2): 417–433.

A review of research on watershed water–carbon balance evolution in a changing environment

DUAN Kai^{1, 2}, SUN Ge³, LIU Ning³

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat–Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

3. Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Research Triangle Park, NC 27709, USA)

Abstract: Watershed water balance and carbon balance are intrinsically connected through the processes of photosynthesis and evapotranspiration. Studying the coupling of water and water cycles and its response to the changing environment is vital for understanding the watershed–level eco–hydrology processes in the background of global change. The findings can provide useful information and tools for evaluating ecosystem services, managing water and land resources, and making adaptation plans at various scales. This paper synthesizes current literature to illustrate the developments, challenges, and prospects for research on watershed water–carbon response to the changing environment. We specifically focus on reviewing four aspects of the topic, including: (1) monitoring of key water–carbon cycle components; (2) coupling mechanism and modeling of water–carbon balance; (3) disturbance of changing environment on water–carbon balance, and (4) attribution analysis of variations in water–carbon balance.

Keywords: water–carbon coupling; watershed water–carbon balance; changing environment; research progress

(责任编辑: 杨虹)