

气候变化和人类活动对流域水文恢复力影响的研究进展

孙美荣¹, 孙鹏森¹, 张明芳², 刘世荣¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731)

摘要: 水文恢复力是流域或生态系统维持水文稳定性的重要参考指标, 深入研究植被结构和水文恢复力之间的关系是未来在全球变化背景下生态水文学的重要方向。但目前水文恢复力对气候变化与人类活动等不同干扰方式的响应机制还缺乏系统的研究, 水文恢复力的形成机制及其与植被结构的关系也尚无全面的认识。系统总结了当前水文恢复力的主要概念, 从水分利用效率、Budyko 框架的水平衡、植被景观结构变化与受到干旱干扰的恢复时间等不同角度总结了 5 种主要的算法, 分析了气候变化、人类活动和植被结构对水文恢复力的响应特点并分析了水文恢复力发挥作用的内在机制。结果表明: (1) Budyko 模式和生态系统水分利用效率在水文恢复力的计算中具有重要价值; (2) 在能量限制的流域, 水文恢复力随着暖干化程度增大而减小; 在水分限制的流域, 水文恢复力随着暖干化程度增大而增大; (3) 森林主导的流域比其他生物群落主导的流域具有更高的水文恢复力; (4) 大面积森林采伐或者造林通常会降低流域的水文恢复力; (5) 天然林、多样性较高的植被结构有利于维持较高的水文恢复力; (6) 干扰条件下植被水分利用效率较高的流域有利于维持较高的水文恢复力; (7) 流域植被类型的多样性水平高、景观破碎化程度低、植被结构稳定、土壤储水量大或者有积雪补给的流域其水文恢复力较高。未来需要探索和发展支持流域多种稳定状态下的水文恢复力计算方法。

关键词: 水文恢复力; Budyko 曲线; 气候变化; 植被结构; 水分利用效率

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0013-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.002

Progress in the Effects of Climate Change and Human Activities on Watershed Hydrological Resilience

SUN Meirong¹, SUN Pengsen¹, ZHANG Mingfang², LIU Shirong¹

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 2. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract: Hydrological resilience is an important reference index for maintaining hydrologic stability of watershed or ecosystem. An in-depth study of the relationship between vegetation structure and hydrological resilience will be an important direction of ecological hydrology under the background of global change in the future. However, there is still a lack of systematic research on the response mechanism of hydrological resilience to different intervention modes such as climate change and human activities, then the formation mechanism of hydrological resilience and its relationship with vegetation structure have not been fully understood. This paper systematically summarized the main concepts of hydrological resilience, and five main algorithms from different perspectives such as water use efficiency, water balance of Budyko framework, vegetation landscape structure change and recovery time disturbed by drought. The responses of climate change, human activities and vegetation structure to hydrological resilience were analyzed, and the internal mechanism of hydrological resilience was analyzed. (1) Budyko model and water use efficiency of ecosystem have significant value in the calculation of hydrological resilience. (2) In the energy-limited watershed, the hydrological resilience decreases with the increases of the degrees of warming and drying. In the water-limited

收稿日期: 2021-08-29

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2021QA001); 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0505006)

第一作者: 孙美荣(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事遥感生态水文学研究。E-mail: 18434306185@163.com

通信作者: 孙鹏森(1971—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事遥感生态水文学、水碳耦合过程模拟研究。E-mail: sunpsen@caf.ac.cn

watersheds, the hydrological resilience increases with the increases of the degrees of warming and drying. (3) Forest-dominated watersheds have higher hydrological resilience than other bioceno-dominated catchments. (4) Large-scale deforestation or afforestation usually reduces the hydrological resilience of watersheds. (5) Natural forest and vegetation structure with high diversity are conducive to maintaining high hydrological resilience. (6) The watersheds with higher water use efficiency of vegetation under disturbance are conducive to maintaining high hydrological resilience. (7) The hydrological resilience of the watershed with high diversity of vegetation, low degree of landscape fragmentation, stable vegetation structure, large soil water storage or snow replenishment was higher. It is necessary to explore and develop hydrological resilience calculation methods under various stable states in the future.

Keywords: hydrological resilience; Budyko curve; climate change; vegetation composition; water use efficiency

全球气温上升导致水文循环加剧,水资源分配不平衡,降水空间格局发生改变,洪水和干旱等极端水文现象增加^[1],使得本来较湿润的地区降水量增加,变得更加湿润,容易产生洪涝灾害,也使一些干燥区域由于蒸散量增加而变得更加干燥^[2-3],增加干旱发生的频率和严重程度^[4]。加剧的气候变化又导致森林抗性降低,易受到野火、昆虫和疾病的干扰,并最终改变森林的组成和结构^[5-6],进而引起森林水碳平衡的变化。气候变化不仅通过改变水文输入(降水和潜在蒸发量等)来影响水文循环^[7],而且还通过改变流域特征(土壤有机质、植被组成和结构等)来影响水文过程^[8]。对生态系统而言,干旱是一种重要的干扰事件,特别是在全球植被活动上升的总体趋势下,干旱是制约生态系统生产力的关键因素^[9],它会降低植被生产力并导致大量的植被枯死,进而对水循环产生深远影响。为了解释不同生态系统在这些干扰面前表现出的抵抗和恢复能力,许多研究都引入水文恢复力这一指标来量化这种能力,并对引起水文恢复力变化的外界驱动力、流域和生态系统的响应机理之间的关系进行探究,水文恢复力已经成为流域保护和管理中的一个关键问题^[10],研究在气候变化尤其是干旱影响下流域的水文恢复力对于维持流域稳定性具有重要意义。

人类活动(如农业管理、造林、伐林等)改变了土地利用方式和原始的森林植被结构,对流域水文恢复力产生重要影响^[11]。有研究^[12]表明,造林使得森林植被结构变得单一,且水分需求增加,很多流域出现径流下降的趋势,尤其在干旱地区,例如,黄土高原的植被恢复工程在改善土地退化、降低地表温度和促进固碳方面取得成效的同时,也使水资源的供给接近极限^[13],这些地区的植被恢复在生态系统和人类之间造成潜在的水资源需求冲突,并且由于植被恢复工程中采用的种植材料、植被类型、年龄结构等与天然植

被存在较大差异,更兼人工林的不同生长速度、采伐方式与强度等也使得植被结构发生很大变化^[14],这改变了区域植被的水文恢复力与水碳平衡关系。

综上所述,气候变化、人类活动、植被结构是影响水文恢复力的关键因素。因此,水文恢复力产生和维持的生态学机制是什么?什么样的植被结构具有更高的水文恢复力且适应未来气候变化?这是流域和森林管理者需要考虑的问题,也是本论文所要重点阐述的科学问题。研究气候变化和人类活动背景下的森林水文响应和恢复能力,一方面可以为流域水资源长期管理策略的规划提供信息,以便政府和有关部门更准确地预测未来的水供应,实现水资源的可持续利用;另一方面,也可以为森林经营管理指明方向,为森林生态系统结构改造及森林质量精准提升提供理论支持。

1 水文恢复力概念的发展

Holling^[15-16]1973年首先在环境研究中提出恢复力的概念(或称韧性),并在过去几十年中广泛应用于陆地生态系统,在1996年区分了工程恢复力和生态恢复力的概念。工程恢复力表明一个系统可能只存在一个稳定的平衡状态,为了量化这个系统的恢复力,必须确定其对变化的抵抗力和返回平衡状态所需的时间;生态恢复力则表明一个系统可以存在多个稳定的平衡状态,恢复力被量化为生态系统从一个稳定状态转移到另一个稳定状态之前可以吸收的变化量,这意味着系统可以在2个或多个稳定状态之间转移。Walker等^[17]将陆地生态系统的恢复力定义为生态系统在不断变化的环境中吸收来自气候变化(如干旱)的干扰,并维持或恢复其结构和功能的能力。

近年来,流域科学家开始将恢复力概念应用到水文科学中。Gerten等^[18]将水文恢复力定义为流域吸收变化并保持或快速恢复水文功能的能力。水文恢复力比生态恢复力更适合于探索气候变化对集水区

产水量的影响,其对应的集水区是指在不断变化的环境条件下具有稳定和可预测水量的集水区。

Budyko^[19]提出了一种曲线关系来描述气候、植被和水文的相互作用关系,通常称之为 Budyko 曲线,该曲线将蒸散量、产水量、降水量及能量相关联,在研究和量化气候变化对水文的影响方面具有巨大的潜力^[11,20],它描述了在能量和水分限制条件下生态系统中的蒸散指数(EI)和干燥指数(DI)之间的经验关系。Creed 等^[21]基于 Budyko 曲线,提出了利用动态偏差(d)和弹性(e)这 2 个指标来量化气候变化后森林集水区的水文恢复能力。 d 是一个衡量流域蒸散指数随气候变化而相对于 Budyko 曲线变化量的指标; e 是衡量一个集水区在气候变化时其水分分配与 Budyko 曲线保持一致的能力,定义为 DI 的变化幅度与 EI 残差的变化幅度值的比值。如果一个森林流域水文恢复力较差,不仅表明流域水文功能稳定性差,也意味着流域的植被结构易于从一种状态转换到另一种状态。

综上所述,水文恢复力是生态系统恢复力的一部分,是衡量植被遭受干扰后恢复其正常水文功能的能力。由于它自身是生态系统恢复力的一部分,与生态系统结构紧密联系,水文恢复力高的生态系统调节水碳平衡的能力强,生态系统的结构和功能也都趋于稳定;水文恢复力低的生态系统易受干旱等水分胁迫影响,进而抑制植被生长,易遭受植被退化和生物入侵,以及病虫害、火灾等影响。但是,水文功能的恢复不代表生态系统结构完全恢复,例如,有研究^[22]表明,川西亚高山原始林采伐后,流域产水量先是增加,然后逐渐恢复至正常水平,恢复周期大概需要 20 年,但这样短的时间不可能恢复到原始植被结构,在土壤结构等未遭受重大破坏的情况下,采伐后一些水文功能指标的恢复可能要先于植被恢复。因此,从这个意义上看,基于 Budyko 曲线的弹性计算方法计算的水文恢复力,也存在一定的局限性,因为对于仍处于演变中的非稳定生态系统,其参照曲线也是变化的。因此,基于非稳定生态系统的水文恢复力计算方式应是今后有趣的探索方向。

2 水文恢复力的主要计算方法

2.1 利用水分利用效率计算水文恢复力

在过去几十年中,陆地生态系统对气候干扰的恢复力(或称韧性)已有一些研究,例如,Sharma 等^[23-24]提出用一个无量纲弹性指数(R_d)来分析生态系统的生态水文过程应对干旱干扰的恢复能力。该弹性指数(R_d)被定义为最干旱年份的水分利用效率(WUE_d)与年平均水分利用效率(WUE_m)的比值。

它是指生态系统在水文气候干扰面前维持其结构和功能,以及在受到干扰后恢复原来功能的能力。在水分限制条件下,生态系统通过维持或增加水分利用效率来维持其生产力, R_d 用公式表示为:

$$R_d = \frac{WUE_d}{WUE_m} \quad (1)$$

可以分为 4 类: $R_d \geq 1$ 的系统都被称为是有弹性的,意味着尽管有干旱等因素干扰,生态系统仍然可以通过增加水分利用效率来维持其生产力;如果 $0.9 \leq R_d < 1$,生态系统被认为略微没有弹性;如果 $0.8 \leq R_d < 0.9$,生态系统被认为是中等的非弹性;如果 $R_d < 0.8$,生态系统被认为是严重非弹性,该方法可以用于评估水分限制条件下生态系统的水文恢复力。从本质上讲,水分利用效率是一个生理指标,描述了植被水碳关系之间的平衡,解释了水文恢复力发挥作用的内在原因^[25]。

2.2 利用 Budyko 框架计算水文恢复力

Budyko 框架是在水分限制和能量限制条件下,基于降水(P)、潜在蒸散量(PET)与实际蒸散量(AET)之间的比率,反映年水量平衡的蒸散指数(EI)随干旱指数(DI)变化的函数关系,解释了降水在径流和实际蒸散量之间的分配关系,说明在流域尺度上气候变化对水文过程的影响,水文恢复力是流域受到扰动后仍维持在 Budyko 曲线附近的能力,适用于流域长期水平衡的研究^[19,26]。理论上的 Budyko 曲线说明流域水文过程对气候变化的响应能力,参数 Budyko 方程将流域特征(地形、土壤和植被等)带入 Budyko 框架,从而更好地量化不同流域的水文恢复力^[27],且研究^[28]表明,Budyko 框架不仅可以应用于流域尺度的水平衡和水文恢复力研究,而且也可以应用于站点尺度上,但 Budyko 框架适用于描述和理解稳态条件下流域(或生态系统)长期水量平衡及水文恢复力的预期变化^[29]。然而,由于流域水系统通常是开放的,世界各地的流域实际上受到不同程度的人类干扰。如果将 Budyko 框架应用于不稳定状态下的区域,例如,未闭合、土壤水分储存显著变化或时间尺度小于 1 年的区域,将面临巨大的挑战^[30]。Du 等^[31]建立了 1 种新的 Budyko-Fu 模型方程来解释在不稳定状态下极端干旱环境的区域水平衡。

Creed 等^[21]以多年稳定生态系统的标准 Budyko 曲线为基准,利用偏差(包括动态偏差和静态偏差)和弹性这 2 个指标来量化气候变化后森林集水区的水文恢复能力,水文恢复力反映了集水区适应不断变化的气候条件的能力,Budyko 曲线及 Creed 提出的水文恢复力示意图 1。

Budyko 曲线及 Creed 提出的水文恢复力的参数

计算公式为:

$$EI = AET/P \quad (2)$$

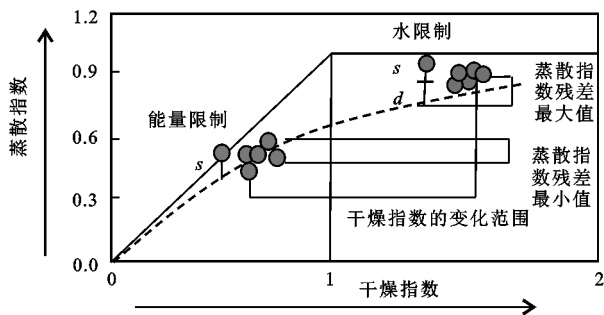
$$DI = PET/P \quad (3)$$

$$s = EI_{M, cool} - EI_{B, cool} \quad (4)$$

$$d = EI_{M, warm} - EI_{B, warm} - s \quad (5)$$

$$e = (DI_{max} - DI_{min}) / (EI_{R, max} - EI_{R, min}) \quad (6)$$

式中: EI 为蒸散指数; DI 为干燥指数; AET 为实际蒸散量; PET 为潜在蒸散量; P 为降水量; s 为静态偏差; d 为动态偏差; e 为弹性; $EI_{M, cool}$ 为流域在冷期的实测蒸散值; $EI_{B, cool}$ 为流域在冷期的理论蒸散值; $EI_{M, warm}$ 为流域在暖期的实测蒸散值; $EI_{B, warm}$ 为流域在暖期的理论蒸散值; DI_{max} 和 DI_{min} 分别为干燥指数的最大值和最小值; $EI_{R, max}$ 和 $EI_{R, min}$ 分别为蒸散指数残差最大值和最小值。



注:实线表示能量和水对蒸散指数的限制;虚线表示原始理论 Budyko 曲线;每个点表示 1 个流域的干燥指数(DI)和蒸散指数(EI)值,左侧为冷期,右侧为暖期; s 表示静态偏差; d 表示动态偏差^[19,21]。

图 1 Budyko 曲线与水文恢复力示意

Budyko 曲线定义了 2 个流域状态: $DI < 1$ 的值表示潮湿、受能量限制的集水区; $DI > 1$ 的值表示干燥、受水分限制的集水区。静态偏差是由固有的流域特征决定的,假定其随时间变化是恒定的,动态偏差是流域随时间响应气候变暖的结果,静态偏差是基于冷期来观测的,动态偏差是暖期偏差的一部分,对静态偏差分量进行了校正。当 DI 的变化导致 EI 发生相应的变化,从而使系统在理论 Budyko 曲线附近移动,此时,流域产水量与理论预期一致,表现出高弹性和低偏差;当 DI 的变化导致 EI 变化较大而使系统偏离理论 Budyko 曲线时,即表明其产水量大于或小于理论预期的预测值,表现出低弹性和高偏差。使用 $e = 1$ 作为弹性流域与非弹性流域的定义阈值,非弹性状态可能导致森林结构和功能的根本变化,并有可能将流域转变为永久性的替代状态^[19]。但是该方法提出的计算指标可能更适合相同气候背景条件下的流域水文恢复力计算,这是因为该方法中的偏差在定义时是假设由气候变化引起的冷期和暖期中 EI 的变化在不同地点是相同的,但实际上并非如此,偏差的变化不一定代表流域的抵抗力或者恢复力变化,也

可能是由于背景气候差异造成的^[30]。因此,要了解流域或者生态系统对气候变化的响应,需要一种适用于所有气候的简单评价方法。对于具有对比性本底气候的不同地点或流域,要比较局部气候对比下流域 $EI(\Delta EI)$ 和 $DI(\Delta DI)$ 的相对变化,首先应该排除由背景气候(潮湿或干燥)引起的 EI 变化。Xue 等^[32] 基于 Budyko 框架定义了 2 个度量流域水文恢复力的指标:耐受性 ψ 和适应性 φ 来评估亚洲水塔及其周边流域的水文恢复力。该方法可以用于气候条件对比鲜明的不同流域,计算过程为:

对于不同气候区域, DI 的单位变化量引起的 ΔEI_w 可能不同,即 ΔEI_w 在湿润地区(能量有限)更大,在干燥地区(降水有限)更小。对于一个经受长时间干燥/温暖条件的特定流域,定义耐受性 ψ 为:

$$\psi = \Delta EI_{Theoretical} / \Delta EI_{Actual} \quad (7)$$

式中: ΔEI_{Actual} 是在气候变化之后(EI_w)和之前(EI_c)的 EI 计算差值($\Delta EI_{Actual} = EI_w - EI_c$); ($\Delta EI_{Theoretical}$) 为 Budyko 曲线下 EI 的预期差值($\Delta EI_{Theoretical} = B_w - B_c$)。因此, $\psi > 1$ 时会获得比 Budyko 曲线预测的更多的产水量, $\psi < 1$ 将损失比预期更多的产水量。因此,一个更具恢复力的流域将倾向于有较高的 ψ ($\psi > 1$)。

水文适应性 φ 则表示为流域的 $DI(\Delta DI)$ 变化与 ΔEI_{Actual} 和 $\Delta EI_{Theoretical}$ 差的比值,用公式表示为:

$$\varphi = \Delta DI / (\Delta EI_{Actual} - \Delta EI_{Theoretical}) \quad (8)$$

与理论 Budyko 框架相比, φ 描述了在气候变化后 EI 对 DI 变化的相对强度,实际上,一个更大的 φ ($\varphi > 1$) 将表明在某种不利气候变化中, EI 随 DI 的变化比预期小,系统中有水分过剩(更多的产水量),这意味着流域在稳态条件下损失的水比预期少。一个流域 φ 为负值,表示 $\Delta DI > 0$ 时,由于实际的 EI 比预测的小,因此流域应对不利的气候变化具有较高的水文恢复力,且 φ 为正值的恢复力小于 φ 为负值的流域恢复力,因为根据定义, φ 为负值时实际 EI 小于 Budyko 曲线预测的 EI 。 $\varphi > 1$ 表示流域能够恢复到气候变化前的稳态水文条件, $0 < \varphi < 1$ 则表示流域在干扰后无法恢复到它改变前的状态。基于生态水文的观点,一个流域被认为是具有水文恢复力的则需满足 $\psi > 1$ 且 $\varphi > 1$ 或者 $\psi > 1$ 且 $\varphi < 0$ 。尽管该方法适用于所有气候的简单评价,但需要指出的是这项研究^[32] 提出的方法以及 Creed 等^[21] 和 Helman 等^[30] 的研究中,都忽略了流域特征的年际变化,这可能导致一定的不确定性。

2.3 利用植被景观参数变化指数计算流域水文恢复力

植被的长期改善主要通过改变叶面积和水力结构来影响蒸腾过程,这种变化是相对缓慢的,因此,可以用描述长期流域水量平衡的 Budyko 方程来描述。

但是 Budyko 框架可能不适合代表植被突变对流域水文的影响,比如,与造林后径流的缓慢逐渐变化相比,砍伐森林通常会导致径流的突然变化。Zhang 等^[33]基于 Budyko 框架计算了景观参数与植被变化之间的关系(用光合有效辐射 fPAR 表示),引入径流弹性量化植被变化对区域水分平衡的影响。利用每个流域的有效干旱指数(ω)和景观参数(n),经过一系列推导得出径流对植被变化的弹性(ϵ_{fPAR}):

$$\epsilon_{fPAR} = \frac{\Delta R_{fPAR}}{R} = \frac{\epsilon_n \times 0.02 \omega 2.6}{n} \quad (9)$$

式中: ϵ_{fPAR} 为径流对植被变化的弹性; R 为径流; ΔR_{fPAR} 为植被变化; n 为景观参数; ϵ_n 为由景观参数变化引起径流变化的系数; ω 为干旱指数,该方法得出在相对干旱的流域,景观参数(n)对植被变化更为敏感。这说明在干旱地区应该慎重造林,流域可能因植被变化而破坏原来的水文平衡状态,进一步降低流域水文恢复力。该方法适应于计算由于植被覆盖变化造成的水文恢复力改变,已经在中国 178 个流域得到应用。

2.4 利用对干旱的恢复时间计算水文恢复力

流域在受到干旱等干扰时会表现出一系列生理生态调整来适应干旱,其对应的水文恢复力(R_e)可以定义为流域从缺水状态恢复到水可用状态的能力^[34]。用公式表示为:

$$R_e = \frac{M}{\sum_{i=1}^M DD_i} \quad (10)$$

式中: M 为干旱事件个数; DD_i 为干旱持续时间。从公式(10)可以明显看出,平均干旱持续时间越长,流域对干旱的抵御能力越弱。因此, R_e 值越高,表明流域对干旱的适应能力越强,恢复到原来水文状态的能力也越强。此方法适应于对干旱响应的水文恢复力计算。

综上所述,水文恢复力是一个新兴的研究领域,水文恢复力的计算方法目前仍在继续探索和不断完善中,目前的主要方法有:(1)从生理生态角度分析其水分利用效率变化来表征;(2)基于 Budyko 框架对其进行改进的方法;(3)用景观参数变化计算;(4)用抵抗干旱的恢复时间度量等。但是目前还没有一种较好的方法能解决所有问题和不确定性,而且没有一个具有普适性的方法适应于所有流域,这也是未来需要探索的方向。Budyko 框架适用于描述和理解稳态条件下流域长期水量平衡及水文恢复力的预期变化,基于 Budyko 框架不断改进的公式将拥有很大的潜力,可以基于此不断拓展新的思路,发展新的计算方法,将来需要发展在物理上更合理的水文恢复力模型来支持具有多种稳定状态的流域理论^[35]。

3 气候变化对水文恢复力的影响

气候变化导致的极端降水、森林火灾、变暖和干

旱等影响流域水文过程和水文恢复力,影响机制主要分为 2 种:第 1 种是气候变化通过影响云的形成机制、改变流域降水和径流模式^[36];第 2 种是通过改变流域植被的水碳循环过程,影响植被的生产力和水分利用效率^[24]。

降水已经被认为是决定植被分布和生产力的关键因素,特别是在干旱和半干旱地区,Cierner 等^[37]的研究表明,流域恢复力随降水年际变化而增加,这主要是更高的降水年际变化可能通过选择植被对水分胁迫的适应特征来增加水文恢复力。Harder 等^[38]研究表明,加拿大落基山脉的流域在 2013 年极端降水事件的发生和森林覆盖变化中表现出微弱的水文响应。该流域的蓄水和径流生成过程减弱了气象和雪况的变率和趋势,因此流域对干扰表现出显著的水文恢复力。

此外,森林火灾通过改变土壤性质、能量预算和截流能力来影响流域水文平衡。Spence 等^[39]研究表明,开放的流域在火灾后对水文变化的恢复力更强,而且随着气候条件的潮湿,恢复力降低,流域在野火后的水文响应取决于火灾前的土地覆盖分布、野火的程度和火灾后的气候条件。在森林火灾等干扰之后,那些植被演替和恢复较快的流域因为本身较高的弹性而具有更高的水文恢复力。

目前,关于变暖和干旱^[40]背景下的水文恢复力在能量限制的流域和水分限制的流域有不同的结论。在能量限制的流域,Creed 等^[21]研究得出,在暖干化条件下,由于产水量的下降,蒸散指数(EI)上升,流域的水文恢复力沿着 Budyko 曲线向上偏离,水文恢复力降低,并且这种偏差的程度与暖干化程度呈正相关,暖干化程度越大,动态偏差(d)也越大,弹性(e)和恢复力则越小;相反,暖湿化条件下流域的水文恢复力较高。Helman 等^[30,41]根据 Budyko 曲线得出,遭受中度干旱的森林与严重干旱的森林产水量相比,前者比后者明显接近预期产水量,主要由于干旱期间相对凉爽湿润的条件减少蒸发需求,增加流域的产水量,减少与 Budyko 曲线的偏差,提高流域的水文恢复力。

在水分限制的流域,Xue 等^[29]根据全球范围 41 个国际通量研究网络(FLUXNET)站点和 2 275 个流域的数据,用 Budyko 框架中的动态偏差(d)和弹性(e)2 个指标在生态系统和流域水平上来评估水文恢复力。得出在水分限制的流域,暖干化地区的水文恢复力高于暖湿化地区,主要因为在暖干化地区当干燥指数(DI)发生变化时,蒸散指数(EI)的变化较小,同时暖干化地区的水分利用效率(WUE)大于暖湿化地区,因此水文恢复力较高。该研究还表明,暖干化条件下的大部分流域在应对外界干扰时的动态偏差和弹性是耦合

的,即动态偏差越小,弹性越大,这种耦合表明,以植被为主的流域有很大的潜力来适应气候变化,具有较高的水文恢复力,但在暖湿化条件下的一些流域则表现出响应干旱的动态偏差与弹性关系的解耦,表现出较大的动态偏差和较小的弹性,表明这些区域易受干旱的影响,具有较低的水文恢复力。

综上所述,气候变化对水文恢复力的影响研究表明,流域恢复力随降水年际变化而增加;高基岩和开放的流域在火灾后对水文变化的恢复力更强,而且随着气候条件的潮湿,恢复力降低;变暖和干旱^[40]背景下的水文恢复力在能量限制的流域和水分限制的流域有不同的结论,在能量限制的流域,暖湿化的气候变化使水文恢复力提高;在水分限制的流域,暖干化的变化趋势导致水文恢复力提高。因此,在研究气候变化对水文恢复力的影响时,应该重点区分这 2 种不同类型的流域。

植被倾向于最大限度地提高其生产力,而植被属性(如冠层覆盖和生长速率)和生物地球化学机制(即有限的资源)相互作用,影响流域水文过程。能量限制和水分限制的流域使水文恢复力变化的内在原因是:(1)水分限制流域($DI < 1$)中的森林,根据水分的可用性,倾向于增加最大潜在叶面积^[42]。叶面积的增加导致蒸腾作用的增加和降雨截留率的增加,增加降水的总利用效率,进而增加单株生长和冠层发育速度^[43]。在水分限制条件下,树木可以通过将水分吸收转移到雨季和利用更深层土壤中储存的水分而在一定程度上存活下来,以应对不利的外界条件,维持其水文恢复力^[44-45],且在水分限制的流域,生长在干燥条件下的森林比生长在潮湿条件下的森林有更大的弹性,干燥森林在干旱期间保持的降雨、能量和蒸散发的关系接近于在平均降雨条件下的关系。(2)能量限制流域($DI > 1$)植被生长主要受到其他因素限制,如氮和光,改变了植被光合作用,对植被生产力的影响大于对水的可用性的影响,从而降低水的利用效率^[46],植被通过高效率的光合作用增加生产力来维持流域的水文恢复力。在能量限制流域的研究^[47]表明,在干旱时期,温度对经历相对较冷条件对产水量有积极的影响。主要是因为干旱期间,较冷的条件通过减少蒸发需求、增加水分产量和减小 Budyko 曲线的正偏差来抵消降雨减少的负面影响,提高水文恢复力。因此,水文恢复力在这 2 种不同类型流域里的差异是植被在应对不同干扰环境条件下表现出的生理生态调整的结果。

4 人类活动干扰对水文恢复力的影响

人类活动影响生态过程和初级生产力,是加剧水

文干旱现状、影响未来干旱强度和干旱频率的主要因素^[24,48]。人类活动对水文恢复力影响的方式主要通过造林和伐林改变土地覆盖与土地利用状况、过度开采地下水,以及不合理分配地表水资源等^[48-49]。

由于人类活动导致的植被覆盖度变化可以极大地影响水资源,它们的影响与气候变化的影响一样大,甚至超过气候变化^[50-51]。人工造林和通过改进农业管理措施(如改进灌溉基础设施、增加化肥使用、用高产作物替代低产作物)提高作物产量,是植被覆盖度和生产力增加的主要原因^[52-53]。Liu 等^[54]研究表明,在大流域尺度上,植被绿化趋势对年蒸散量有正向影响,对产水量有负向影响,植被绿化率的变化对水文循环及水文恢复力的影响取决于区域的空间范围和植被绿化或褐变面积的比例;Esquivel 等^[55]研究采用 Budyko 和 Tomer-Schilling 框架评估得出,南太平洋区域的热带雨林由于具有较高的水分可用性和较高的水文弹性,森林覆盖率的变化对其影响较小,有利于维持更稳定的生态水文条件;Chen 等^[56]研究表明,中国的植被恢复工程在过去近 20 年来,极大地提高了森林覆盖率和植被生产力,植被水分需求因此提高,对土壤含水量和流域水文产生显著影响^[57],尤其在水资源有限的季节性干旱地区大面积造林减少可利用的水资源,造成生态系统和人类之间潜在的水需求冲突,改变流域水碳平衡关系,使得流域水文恢复力下降。

森林采伐后,流域恢复到干扰前水文状态需要的时间与其生态系统结构的恢复力相关,生态恢复力越高的流域受到扰动后恢复所需要的时间越短。Zhang 等^[58]研究得出,在中国长江流域岷江上游受到森林砍伐后,流域径流量恢复为原来的状态大约需要 20 年的时间,这主要得益于保存良好的土壤结构和相对湿润的环境,使得灌木和次生植被快速恢复。毁林、造林和森林更新试验的长期结果比较表明,随着原生植被的破坏,流域需要至少 5 年以上的时间才能达到新的平衡,毁林试验比造林试验更早达到新的平衡^[59]。毁林后,随着灌木等快速自然更新,通常很快能达到新的水文功能,但再造林后,由于再造林地往往采用纯林恢复,早期恢复时间长,而其达到速生期后往往具有较大的耗水量,其水文恢复周期需要更长时间^[60],相比毁林而言,再造林可能对流域水文过程造成更大的干扰,降低流域的水文恢复力。

对于不同的土地利用类型,Sharma 等^[24]研究表明,森林主导的流域比其他生物群落主导的流域具有更高的恢复力,其次是耕地、草地和稀树草原。雨季地下水补给是决定旱季供水的关键过程,大多数季节性干旱地区在旱季依靠地下水作为主要水源。主导

径流产生的地下过程可能通过调节降水输入和输出来增强流域对极端事件的抵御能力^[61]。Harder 等^[38]研究表明,由于地下水的储存和适度释放,极端降水对加拿大落基山脉流域径流的影响减弱,这表明流域具有水文弹性。

总体而言,人类活动会缩短水文干旱持续时间,增强水文干旱强度,改变流域的水文恢复力。大面积造林或者采伐通常对流域植被的水文调节能力产生负面影响,降低其水文恢复力;人类活动往往使流域脱离预期的水文功能,尤其在水分限制区域,大面积造林将导致水文恢复力的明显下降^[62];对于不同的土地利用类型,森林主导的流域比其他生物群落主导的流域具有更高的恢复力;地下水过程在调节流域水文平衡、维持流域水文稳定性方面发挥着重要的作用,尤其在干旱时期;水文恢复力越小的流域受到扰动后恢复能力越差,恢复所需要的时间也越长。同时研究指出,水文恢复力(即侧重于流域水文子系统对极端事件或人为影响的响应)不应与社会系统(如对水文灾害的社会恢复力)分开考虑,而应该考虑综合的(人—水耦合系统)社会—水文恢复力^[63]。这些研究加深了人类活动对水文恢复力影响的理解,并为未来在气候变化和日益严重的人为干扰背景下的流域管理提供科学依据。

5 流域植被结构对水文恢复力的影响

水文恢复力是生态系统或流域表现出的一种自然禀赋,是其植被在特定自然地理环境中形成的一种特性。由于目前关于植被结构对水文恢复力影响的研究多集中在森林生态系统,且相关文献对森林水文恢复力的研究总结较多,因此以森林结构为例进行讨论。有研究^[38]表明,水文恢复力取决于森林冠层恢复的时间,而冠层的恢复本身取决于树种、种植密度及森林更替和再生速率。因此,可将影响森林水文恢复力的原因总结为:

首先,森林的起源和干扰程度是重要因素。人工林的水文恢复力显著低于天然林,Yu 等^[64]比较了全国天然林和人工林的固碳量和耗水量得出,在能量限制区域,天然林和人工林的耗水量没有显著差异,但在缺水地区,人工林的耗水量明显比天然林高,且人工林对气候变化更敏感,会导致更高的用水量,降低流域产水量,随着干燥指数(DI)的增加,人工林的蒸散指数(EI)的变化幅度大于天然林,使其动态偏差增大,水文恢复力下降,因此要慎重规划未来的造林项目,尤其是在水资源有限的地区,这些地区造林对固碳的影响可能较小,但会导致产水量和水文恢复力显著下降。

其次,不同森林类型所表现出来的水文恢复力不

同。通常针叶林产水量高且稳定,水文恢复力低,一旦遭到破坏恢复原来状态所需要的时间长;落叶阔叶林产水量低且稳定,恢复力中等;混交林产水量稳定,比纯针叶林或落叶林恢复力更高,不易受外界影响而变化,更适应未来气候变化^[21]。Rigling 等^[65]研究表明,在水分胁迫条件下,针叶林主导的流域 EI 随着 DI 的变化产生较大的变化幅度(显示出低弹性),落叶林主导的流域 EI 随着 DI 的变化产生较小的变化幅度(显示出较高的弹性),这可能是因为落叶林叶片面积、叶片出叶时机和叶片掉落都可以应对温度和湿度的年际变化。长期水分胁迫将引起森林结构组成发生变化,物候规律明显的落叶树种比针叶树种更具竞争力,增温等气候变化更有利于植被向针阔混交林的方向发展,从而具有更高的水文恢复力。流域的尺度大小也是重要影响因素,在大流域尺度上,大型针叶林为主的流域对森林覆盖变化的水文敏感性最小,且对森林覆盖变化表现出更强的水文恢复力。这主要是因为决定大流域和小流域水文过程对森林覆盖变化响应的主导因素可能有很大的不同^[66-67]。

再次,森林年龄结构所表现出来的水文恢复力目前也有 2 种不同的结论。Moore 等^[68]和 Ford 等^[69]的研究认为,林龄较小的针叶树林比林龄较大的针叶树林更难调节水资源的分配,具有较小的水文恢复力,这可能是因为老龄林已经适应了过去的气候条件,并形成了相关的生物物理响应机制,对外界变化能更快做出相应的调整,以维持其水文稳定性,因此比幼林具有更高的水文恢复力。Creed 等^[21]也发现,林龄较大的森林(>100 年)水文恢复力大于林龄较小的森林,林龄较小的森林对气候变化等干扰的抵抗和适应能力较差,无法快速恢复其水文功能。然而 Helman 等^[30]在地中海地区观察到森林的水文恢复力随着森林年龄的增加而降低,即林龄较小的森林在干旱等气候变化条件下的产水量更接近理论预测值。这主要是因为与林龄较小的中幼树相比,老龄树通常具有更大的叶面积,要维持更发达的根系和更高的树冠^[70],导致较高的蒸腾作用和降雨截留率,用水效率比中幼树低得多,更容易遭受水分胁迫,因此水文恢复力较低^[71]。

此外,长期受积雪主导的流域通常具有较高的水文恢复力,这是因为积雪和融雪过程抵消了部分的径流波动。Zhang 等^[72]研究表明,受长期积雪主导的大流域水文恢复力较高,更能适应气候变化和森林覆盖率的变化,还有一些研究^[73-75]表明,高纬度地区的森林由于多年冻土退化和积雪减少,更容易受到干旱等的影响,具有较低的水文恢复力。

总之,森林起源、多样性、尺度等因素决定水文恢复

力。水文恢复力的差异性一方面可能源于不同森林类型水分利用效率的差异;另一方面,可能是流域特征的原因,比如,土层的厚度、冠层、地被层和土层的最大蓄水能力的差异,但这部分特征是流域长期形成的,在研究水文恢复力变化时,往往把它作为本底因素,不作重点考虑。研究水文恢复力的意义,即在水分限制或能量限制的情况下,在大流域尺度和小流域不同尺度上将流域的水文稳定性和和森林变化联系起来,未来的森林水文学研究应侧重于区别这几种情况下水文恢复力的变化^[76],同时应该选取更长的数据集(如更广泛的森林类型和更多的年龄结构)、更广泛的方法(如遥感、同位素示踪),利用先进的分析工具(如机器学习和气候—生态水文耦合模型),从系统的角度阐明水文恢复力在不同时空尺度上的规律^[77]。

6 流域水文恢复力形成与维持的生态学机制

二氧化碳浓度升高、气温升高、降水格局变化、植被覆盖变化等一系列气候变化与人类活动影响植被与环境之间的能量、碳、水和养分的交换,导致植被生长和结构的变化,影响流域的水文恢复力,植被的生理生态调整过程是适应这些变化维持水文恢复力的基础,如植被在干旱条件下可以通过利用深层土壤存储水、关闭气孔等节水适应性策略^[78],或者改变碳分配策略来应对水分不足(如将碳转化为产生更多的根而不是叶),改变植被生产力和蒸散发的关系来进行调节^[79-80],从而维持水文恢复力,植被水分利用效率的变化是影响水文调节和恢复能力最关键的因素之一。

植物在个体水平可以通过改变光合作用和自养呼吸过程,提高水分利用效率(WUE)在一定程度上适应气候变化^[81-83],并得以维持其水文恢复力。在生态系统水平上,不同植被类型组合表现出不同的综合水分利用效率,进而表现出不同的生态系统恢复力和水文恢复力。这是由于不同植被类型的初级生产力和蒸散对气候变化表现出不同的敏感性,导致碳吸收和水分消耗的差异^[84]。Gerten 等^[18]研究发现,增温将增加蒸散量,减少土壤水分,这种变化将影响植被组成和分布,再进一步反馈到土壤水分,植被表现出生理(关闭气孔等)和结构反应(提高净初级生产力、增加生物量和植被覆盖率),通过提高植被水分利用效率,产生 CO_2 与水分的权衡效应来维持水文功能的稳定性。因此,植被水分利用效率越高的流域其水文恢复力也越强。

树木在经历干旱事件后延迟恢复的现象称为“干旱遗留效应”^[85],它是影响植被水分利用效率的主要

原因。由于干旱后发生的植被生理和生态水文过程的相互作用影响植被的恢复,从而导致遗留效应的产生。如干旱导致植物气孔关闭,叶片蒸腾作用和蒸发作用减少,高温对植物水分循环系统的胁迫进一步加剧,将来可通过影响 CO_2 与水的关系对植被生产力及水分利用效率产生影响,阻碍树木茎干的水分运输,形成栓塞,造成树木水力衰退、枯梢甚至死亡^[-86-88],这种遗留效应至少在几十年里都会影响生态系统的水碳平衡,遗留效应在时间和空间尺度的放大影响到生态系统或流域综合水分利用效率,进一步影响其对应的水文恢复力,反之生态系统多样性和水文恢复力的大小也决定植被调节这种遗留效应的能力^[89-91]。

综合水分利用效率反映气候扰动下水文恢复力的大小。研究干旱对树木生长的滞后效应及其生理机制与水分利用效率的关系将有助于阐明干旱驱动的气候变化和森林功能之间反馈的本质,提高对森林生态系统水碳平衡的预测能力,也能更深刻理解水文恢复力存在及发挥作用的机制。

7 结论与展望

通过对国内外关于水文恢复力的研究进行总结,可得出的主要结论:(1)水文恢复力的计算方法目前仍在继续探索 and 不断完善中,Budyko 模式在评估长期流域水文恢复力中的作用得到不断发展;(2)在气候变化背景下,开放的流域在干扰后(如火灾)对水文变化的恢复力更强,而且随着气候条件的潮湿,恢复力降低;(3)在能量限制的流域,暖湿化条件下的水文恢复力高于暖干化条件下的水文恢复力,而在水分限制的流域,基于弹性限度范围内,暖干化条件下的水文恢复力则高于暖湿化条件下的水文恢复力;(4)地下水过程在调节流域水文平衡和维持流域水文稳定性方面发挥着重要的作用;(5)人类活动因素中,大面积采伐或者造林通常对流域植被的水文调节能力产生负面影响,降低其水文恢复力,尤其在水分限制流域进行大面积造林将显著降低流域水文恢复力;(6)森林主导的流域比其他生物群落主导的流域具有更高的水文恢复力;(7)流域植被结构本身也对水文恢复力具有重要影响,天然林、混交林等多样性更高的植被结构通常具有更高的水文恢复力,因此在流域管理和植被恢复中,需注意植被结构的配置问题;(8)长期受积雪主导的流域通常具有较高的水文恢复力;(9)植被可通过调节水分利用效率来提高其水文恢复力。

依据总结出的结论,可以概括出的观点有:(1)未来需要探索和发展支持流域多种稳态状态下的水文恢复力计算方法;(2)流域植被类型的多样性水平高、

景观破碎化程度高、植被结构稳定、土壤储水量大或有积雪补给的流域水文恢复力较高;(3)水文恢复力是植被在受到干扰后表现出的生理生态调整的结果,主要通过对水分利用效率的调节来适应外界变化以维持其系统内部的稳定性,其生理机制将有助于阐明流域气候变化、植被功能、水文恢复力之间相互作用及反馈的本质。

当前仍需要进一步探讨的问题有:(1)非稳定生态系统的水文恢复力计算方式问题。在气候变化和人类活动影响下,基于稳态假设的水文恢复力计算方式存在很大的局限性,亟需发展适用于变化环境下的非稳定生态系统的水文恢复力计算的新方法。

(2)人类活动和气候变化交互影响效应问题。目前研究多集中在气候变化或者人类活动其中一个方面对水文恢复力的影响,有的虽然考虑 2 个方面影响,但在建立贡献分析框架时,气候变异性 and 人类活动被认为是相互独立的,而现实中,两者之间在生态水文系统中存在较强的相互作用,因此未来研究应该系统地量化二者之间相互作用对水文恢复力的影响。

(3)森林植被结构和水文恢复力阈值问题。近自然状态下的流域植被结构维持水文稳定性的能力较高,气候变化和人类活动等大多数外界干扰是降低流域水文恢复力。水文恢复力有一定的限度,不同植被结构生态系统的水文恢复力阈值目前尚不清楚,水文恢复力在多大范围内植被可以实现自我调节以及维持系统的可持续发展,在多大的影响下又会发生系统转化和崩溃等,这些都是亟待解决的实际问题。

森林植被结构和水文恢复力之间的关系是在全球变化背景下森林生态水文效应的核心问题,深刻地揭示气候变化、人类活动、植被结构及水文恢复力之间的耦合关系,将有利于阐明森林维持内在稳定性与其服务功能输出之间的关系,让森林景观恢复与管理措施在不违背自然规律的前提下,更好地发挥森林涵养水源、维持径流稳定性的功能,提高流域水资源的利用效率,保障生态安全与水资源安全。

参考文献:

[1] Labat D, Godderis Y, Probst J L, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(6): 631-642.

[2] Chmura D J, Anderson P D, Howe G T, et al. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1121-1142.

[3] Chen Z W, Lei H M, Yang H B, et al. Historical and future trends in wetting and drying in 291 catchments across China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017, 21(4): 2233-2248.

[4] Elsner M M, Cuo L, Voisin N, et al. Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State[J]. *Climatic Change*, 2010, 102(1/2): 225-260.

[5] 罗旭,梁宇,贺红土,等.气候变化、林火和营林措施对寒温带典型森林生态弹性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1699-1712.

[6] Venäläinen A, Lehtonen I, Laapas M, et al. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(8): 4178-4196.

[7] 李朝月,方海燕.泰国蒙河流域水沙变化趋势及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 590-598.

[8] Yang H B, Yang D W. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff[J/OL]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7). DOI: 10.1029/2010WR009287.

[9] 周贵尧,周灵燕,邵钧炯,等.极端干旱对陆地生态系统的影响:进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 515-525.

[10] Davidson E A, de Araújo A C, Artaxo P, et al. The Amazon Basin in transition [J]. *Nature*, 2012, 481(7381): 321-328.

[11] 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.

[12] Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999 [J]. *Science in China (Series C: Life Sciences)*, 2004, 47(3): 229-240.

[13] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.

[14] 李月辉,常禹,胡远满,等.人类活动对森林景观影响研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42(9): 119-126.

[15] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.

[16] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience. In: *Engineering within ecological constraints* [M]. Washington: National Academies Press, 1996.

[17] Walker B, Salt D. A crash course in the science of resilience. In: *The Community Resilience Reader: Essential Resources for an Era of Upheaval* [M]. Washington: Island Press, 2017: 207-308.

- [18] Gerten D, Lucht W, Schaphoff S, et al. Hydrologic resilience of the terrestrial biosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 1-4.
- [19] Budyko M I. *Climate and life*[M]. New York: Academic Press, 1974: 41-251.
- [20] Lou Y Y, Yang Y T, Yang D W, et al. Quantifying the impact of vegetation changes on global terrestrial runoff using the Budyko framework[J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590 (4). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125389.
- [21] Creed I F, Spargo A T, Jones J A. Changing forest water yields in response to climate warming: Results from long-term experimental watershed sites across North America[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(10): 3191-3208.
- [22] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: The case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464: 1-11.
- [23] Sharma A, Goyal M K. Assessment of ecosystem resilience to hydroclimatic disturbances in India[J/OL]. *Global Change Biology*, 2017, 24(2). <https://doi.org/10.1111/gcb.13874>.
- [24] Sharma A, Goyal M K. District-level assessment of the ecohydrological resilience to hydroclimatic disturbances and its controlling factors in India[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1048-1057.
- [25] Beer C, Ciais P, Reichstein M, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level[J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2). DOI: 10.1029/2008GB003233.
- [26] Oldfield J D. Mikhail Budyko's (1920—2001) contributions to Global Climate Science: From heat balances to climate change and global ecology[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2016, 7(5): 682-692.
- [27] Fu G B, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of stream flow index to assess climate change effects on annual stream flow[J/OL]. *Water Resources Research*, 2007, 43(11). <https://doi.org/10.1029/2007WR005890>.
- [28] Williams C A, Reichstein M, Buchmann N, et al. Climate and vegetation controls on the surface water balance: Synthesis of evapotranspiration measured across a global network of flux towers[J/OL]. *Water Resources Research*, 2012, 48(6). <https://doi.org/10.1029/2011WR011586>.
- [29] Xue B L, Wang G Q, Xiao J F, et al. Global convergence but regional disparity in the hydrological resilience of ecosystems and watersheds to drought[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: e125589.
- [30] Helman D, Lensky I M, Yakir D, et al. Forests growing under dry conditions have higher hydrological resilience to drought than do more humid forests[J]. *Global Change Biology*, 2016, 23(7): 2801-2817.
- [31] Du C Y, Sun F B, Yu J, et al. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 393-409.
- [32] Xue B L, Helman D, Wang G Q, et al. The low hydrologic resilience of Asian Water Tower basins to adverse climatic changes[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 155: e103996.
- [33] Zhang S L, Yang H B, Yang D W, et al. Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko framework[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(3): 1140-1148.
- [34] Veettil A V, Konapala G, Mishra A K, et al. Sensitivity of drought resilience-vulnerability-exposure to hydrologic ratios in contiguous United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 294-306.
- [35] Peterson T J, Western A W, Argent R M. Analytical methods for ecosystem resilience: A hydrological investigation[J/OL]. *Water Resources Research*, 2012, 48(10). <https://doi.org/10.1029/2012WR012150>.
- [36] Mishra V, Lillhare R. Hydrologic sensitivity of Indian sub-continental river basins to climate change[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 78-96.
- [37] Ciemer C, Boers N, Hirota M, et al. Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(3): 174-179.
- [38] Harder P, Pomeroy J W, Westbrook C J. Hydrological resilience of a Canadian Rockies headwaters basin subject to changing climate, extreme weather, and forest management[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(18): 3905-3924.
- [39] Spence C, Hedstrom N, Tank S E, et al. Hydrological resilience to forest fire in the subarctic Canadian shield[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(25): 4940-4958.
- [40] Piao S L, 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.
- [41] Helman D, Osem Y, Yakir D, et al. Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 319-330.

- [42] Osem, Y, O'Hara K. An ecohydrological approach to managing dryland forests; Integration of leaf area metrics into assessment and management[J]. *Forestry*, 2016, 89(4): 338-349.
- [43] Raz-Yaseef N, Rotenberg E, Yakir D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 454-462.
- [44] Miranda J D, Armas C, Padilla F M, et al. Climatic change and rainfall patterns: Effects on semi-arid plant communities of the Iberian Southeast[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(12): 1302-1309.
- [45] Barbeta A, Mejía-Chang 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.
- [46] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency[J]. *Nature*, 2004, 429(6992): 651-654.
- [47] Wada Y, Beek L V, Wanders N, et al. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide[J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3). DOI:10.1088/1748-9326/8/3/034036.
- [48] Findell K L, Shevliakova E, Milly P C D, et al. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(14): 3621-3634.
- [49] Weiskel P K, Vogel R M, Steeves P A, et al. Water use regimes: Characterizing direct human interaction with hydrologic systems[J/OL]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4). DOI:10.1029/2006WR005062.
- [50] 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.
- [51] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(39): 15242-15247.
- [52] Lu Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [53] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, et al. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 404-412.
- [54] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, et al. Recent trends in vegetation greenness in China significantly altered annual evapotranspiration and water yield[J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9). DOI: 10.1088/1748-9326/11/9/094010.
- [55] Esquivel-Hernández G, Sánchez-Murillo R, Birkel C, et al. Hydro-climatic and ecohydrological resistance/resilience conditions across tropical biomes of Costa Rica[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(6): e1860.
- [56] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [57] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration[J/OL]. *Nature Communications*, 2020, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8>.
- [58] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: The case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 1-11.
- [59] 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.
- [60] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 川西亚高山森林不同恢复阶段生长季蒸腾特征[J]. *林业科学*, 2020, 56(1): 1-9.
- [61] Hund S V, Allen D M, Laura M, et al. Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 1119-1134.
- [62] Sinha J, Sharma A, Khan M, et al. Assessment of the impacts of climatic variability and anthropogenic stress on hydrologic resilience to warming shifts in Peninsular India[J/OL]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32091-0>.
- [63] Mao F, Clark J, Karpouzoglou T, et al. HESS opinions: A conceptual framework for assessing socio-hydrological resilience under change[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(7): 3655-3670.
- [64] Yu Z, Liu S, Wang J, et al. Natural forests exhibit higher carbon sequestration and lower water consumption than planted forests in China[J]. *Global Change Biology*, 2018, 25(1): 68-77.
- [65] Rigling A, Bigler C, Eilmann B, et al. Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 229-240.
- [66] Jencso K G, McGlynn B L. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation[J/OL]. *Water Resources Research*, 2011, 47(11). <https://doi.org/10.1029/2011WR010901>.

- 1029/2011WR010666.
- [67] Sivapalan M, Thompson S E, Harman C J, et al. Water cycle dynamics in a changing environment: Improving predictability through synthesis [J/OL]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10). <https://doi.org/10.1029/2011WR011377>.
 - [68] Moore G W, Bond B J, Jones J A, et al. Structural and compositional controls on transpiration in 40- and 450-year-old riparian forests in western Oregon, USA[J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(5): 481-491.
 - [69] Ford C R, Hubbard R M, Vose J M. Quantifying structural and physiological controls on variation in canopy transpiration among planted pine and hardwood species in the southern Appalachians[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 183-195.
 - [70] Schoonmaker A S, Loeffers V J, Landhäuser S M. Viewing forests from below: Fine root mass declines relative to leaf area in aging lodgepole pine stands[J]. *Oecologia*, 2016, 181(3): 733-747.
 - [71] Muñoz-Villers L E, Holwerda F, Gómez-Cárdenas M, et al. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 462: 53-66.
 - [72] Zhang M, Liu N, Harper R, et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 44-59.
 - [73] Peng C, Ma Z, Lei X, et al. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests[J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1(9): 467-471.
 - [74] Iijima Y, Ohta T, Kotani A, et al. Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 177-187.
 - [75] Walker X J, Mack M C, Johnstone J F. Stable carbon isotope analysis reveals widespread drought stress in boreal black spruce forests[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(8): 3102-3113.
 - [76] Gentile P, D'Odorico P, Lintner B, et al. Interdependence of climate, soil, and vegetation as constrained by the Budyko curve[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19). DOI:10.1029/2012GL053492.
 - [77] Zhang M F, Wei X H. Deforestation, forestation, and water supply[J]. *Science*, 2021, 371(6533): 990-991.
 - [78] Yang Y, Guan H, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: e23284.
 - [79] Sun Y, Piao S L, Huang M T, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 311-323.
 - [80] Khalifa M, Elagib N A, Ribbe L, et al. Spatio-temporal variations in climate, primary productivity and efficiency of water and carbon use of the land cover types in Sudan and Ethiopia[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 790-806.
 - [81] Tang X G, Wang Z M, Liu D W, et al. Estimating the net ecosystem exchange for the major forests in the northern United States by integrating MODIS and AmeriFlux data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 75-84.
 - [82] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: e13799.
 - [83] 周雄, 孙鹏森, 张明芳, 等. 西南高山亚高山区植被水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 628-641.
 - [84] Liu Y, Zhou Y, Ju W, et al. Evapotranspiration and water yield over China's landmass from 2000 to 2010 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(12): 4957-4980.
 - [85] Kannenberg S A, Schwalm C R, Anderegg W R L. Ghosts of the past: How drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(5): 891-901.
 - [86] Niu S L, Xing X R, Zhang Z, et al. Water-use efficiency in response to climate change: From leaf to ecosystem in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1073-1082.
 - [87] 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.
 - [88] Leng G Y, Hall J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to drought and the projected changes in the future[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 811-821.
 - [89] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287-295.
 - [90] Huang M, Wang X, Keenan T F, et al. Drought timing influences the legacy of tree growth recovery[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3546-3559.
 - [91] Ingrisch J, Bahn M. Towards a comparable quantification of resilience[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2018, 33(4): 251-259.