

水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析

高红凯^{1,2}, 刘俊国³, 高光耀⁴, 夏 军⁵

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与
资源环境全国重点实验室, 北京 100101; 3. 华北水利水电大学 河南省水圈与流域水安全重点实验室,
郑州 450046; 4. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
5. 武汉大学水安全研究院, 武汉 430000)

摘要: 水源涵养是评价陆地生态系统服务功能的重要指标, 然而学界对水源涵养功能概念和计算方法仍存在诸多争论。这一方面说明水源涵养功能评估具有重要的现实意义, 同时也说明其概念的复杂性和模糊性, 亟需从生态学和文学的基本理论出发, 厘清水源涵养功能概念的内涵和评估方法, 促进科学决策和有效管理。研究水源涵养功能时, 生态学家更关注陆地生态系统的蓄水能力(S_{\max}), 而文学家更关注流域的产流量(Q), 两者均具有合理性, 但各有侧重, 若不分别辨析, 极易造成概念混淆。理论和数据分析表明, 蓄水能力和产流量虽然联系紧密, 但概念完全不同。陆地生态系统的 S_{\max} 决定了流域对降水的分配: 即蒸散发(绿水)和 Q (蓝水), S_{\max} 和 Q 在降水量一定的情况下往往存在此消彼长的关系。研究发现生态系统的根区蓄水能力($S_{r\max}$)是联系绿水和蓝水的核心要素, 是水源涵养功能评估的关键变量。大尺度根区蓄水能力主要由气候决定, 可借鉴工程水文设计中设计水库的累积曲线法, 根据生态系统用水的生存策略通过气候反演。最后, 本文提出3点建议: ① 在实践中分别评估生态系统的绿水和蓝水涵养功能; ② 进一步全面考虑冰川积雪、地下水等多要素的水源涵养功能; ③ 协同耦合自然和人工水源涵养功能, 提高水资源在生态和经济社会系统中的高效优化利用。

关键词: 水源涵养功能; 生态水文; 根区蓄水能力; 水量平衡方程; 蓝水—绿水

DOI: 10.11821/dlxb202301009

1 引言

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源, 水问题随着气候变化和人类活动的影响日益突出。河川径流作为陆地水循环的核心要素, 直接影响了经济、社会、生态系统的韧性和可持续发展。陆地生态系统孕育了河川径流, 其水源涵养功能直接关系到生态文明建设、水安全保障、水旱灾害防治等涉及国计民生的重大问题。并且, 水源涵养功能作为生态环境考核的重要指标, 受到政府、学界、社会的广泛关注。

水源涵养功能的讨论最早起源于森林水文学。关于森林水文功能的讨论由来已久, 持续了数个世纪, 目前仍是学界讨论和研究的热点问题^[1]。1949年之后, 中国针对森林对地表径流影响、森林的防洪效应等问题, 持续了数十年的“林水”之争^[2]。1998年长江、松花江流域洪水后, 对森林和湖泊防洪效应的讨论一时成为社会热点问题^[3-4]。随着

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42122002, 42071081) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42122002, No.42071081]

作者简介: 高红凯(1984-), 男, 河南濮阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究工作。

E-mail: gaohongkai2005@126.com

中国大规模生态工程建设、“山水林田湖草沙冰”综合治理等重大工程的规划和实施,对生态系统水源涵养功能的准确评价,成为迫切解决的重要理论和现实问题。但针对水源涵养功能从定义到计算方法,仍存在一定的争议,这势必造成具体实施过程中一定程度的模糊和混乱。迫切要求从生态学、水文学等基本理论出发,厘清陆地生态系统水源涵养的科学内涵,为中国重大生态战略的科学规划和实施提供支撑。

中国知网(CNKI)中以“水源涵养”为关键词搜索(2022年6月13日),共有8595篇文献,涵盖众多领域,包括林业(3529篇)、环境科学与资源利用(2805篇)、农业经济(1054篇)、农业基础科学(1014篇)、自然地理学和测绘学(501篇)、水利水电工程(493篇)。“水源涵养”的研究跨越林学、生态学、水文学、农学、地理学等众多学科方向,具有典型的交叉学科特点。农林学科和生态学对水源涵养功能的理解大同小异,但与水文学视角差别明显,地理学则更强调区域性和综合性,往往兼具两者。本文主要针对水源涵养功能的自然属性,从生态学和水文学视角对该概念进行剖析。

水源涵养功能的定义众多,且与计算方法直接相连,主要包括:综合蓄水法、水量平衡法、模型法、土壤蓄水法、林冠截留量法、降水储存量法、年径流量法、地下径流法、综合指标法等^[5]。总结起来大概分为蓄水能力法和水量平衡法两种方法:一种方法认为水源涵养功能的直接体现是生态系统的蓄水能力,蓄水能力越大则水源涵养功能越高;另一种方法是水文学采用的水量平衡法,认为水源涵养能力为降水量减去蒸散发消耗即产流量,产流量越大则水源涵养功能越高。

这两种不同的计算方法是导致在实践中水源涵养功能评估出现偏差的主要原因。以水源涵养功能评估中最具争议性的森林生态系统为例:三北防护林和退耕还林还草工程,导致中国普遍变绿,通过蓄水能力法计算的水源涵养功能是增加的。但大量水文观测发现,植树造林导致地表水资源急剧减少,也就是说用水量平衡计算出来的水源涵养功能是减少的。蓄水能力为指标评价的森林水源涵养功能增加,但以产流量为指标评价却是下降的。两者都有大量观测事实作为支撑,但计算结果却截然相反。更为严重的是,在实践中,中国众多干旱缺水地区,想通过植树造林等生态措施增加水源涵养,却导致可用水资源进一步减少的尴尬局面。这给生态工程效用评估和决策制定带来了困惑。

本文拟针对水源涵养功能在具体应用实践中存在的模糊性,分别从生态学和水文学的视角,厘清水源涵养功能的概念和计算方法,并在此基础上提出改进水源涵养评估的路径,以期为陆地生态系统水文服务的研究和管理提供有益参考。

2 水源涵养功能概念 和而不同的生态学和水文学视角

2.1 生态学视角的水源涵养功能及其计算方法

从生态学视角研究水源涵养功能是该领域的主流思路,从发表文献的分布可见一斑。石培礼等定量研究了长江上游各类森林生态系统的林冠层、枯落物层和土壤层的蓄水能力^[6],并将其加和得到长江上游森林水源涵养功能。余新晓等利用InVEST模型融合了流速、地形、土壤饱和导水率、产水量等要素^[7],评估了北京山区森林水源涵养功能。吕一河等从生态视角解析了水源涵养和水文调节功能^[8],认为生态系统内的水分存量是水源涵养功能。龚诗涵等认为降水量与森林蒸散量以及地表径流量等消耗的差即为水源涵养功能^[9],并依据水量平衡方法得到了全国水源涵养功能分布图。周佳雯等^[5]认为森林的水源涵养功能是森林各组成层次蓄水能力的总和。

从生态学视角来看,水源涵养是生态系统在一定的时空范围和条件下,将水分保持

在系统内的过程和能力^[8]。在计算时,生态学方法认为水源涵养能力是植被冠层、枯枝落叶层、土壤层蓄水能力之和,这被称为蓄水法。蓄水能力代表的是最大的可持水性(Water Storage Capacity, S_{\max}),是可供植被截留、蒸发、蒸腾吸收利用的水量。其中,植被冠层和枯落层蓄水能力远小于土壤层蓄水能力,而土壤层中能被根系吸收用于蒸腾的水分才是有效的,所以根区蓄水能力是核心的评价指标。但由于根区分布于地下,难以直接观测,在实际操作过程中,往往采用查找表等间接方法估计:首先将区域划分为几种不同的植被类型,然后通过野外植被土壤调查、遥感反演等方法,制作每种植被类型的冠层、枯枝落叶层、根区的蓄水能力查找表,最终按照面积比例计算不同植被类型蓄水能力,并进行加和得到流域整体的水源涵养能力^[6]。

2.2 水文学视角的水源涵养功能及其计算方法

水文学家也很早就关注到植被对水文过程的影响。水文气象领域著名的布德科假说(傅抱璞公式),就是在“气候与生命”的框架下讨论大尺度水文学问题^[10-11],假说认为降水和能量等气候要素在整体上决定了自然植被和水文状况,且植被和水文密不可分。Eagleson和Rodriguez-Iturbe等敏锐地认识到生态与水文的密切联系,构建了生态水文学的框架体系^[12-13]。越来越多的水文学家认识到,流域内水文和生态过程是高度自组织和自适应的有机整体^[14-15]。具体实践中,森林对径流(包括洪水和基流)、入渗、蒸发、降水等水循环要素的影响,也是水文学界长期关注的热点^[16-19]。

水量平衡原理是物质守恒定律在水文学中的表现形式,是现代水文学的基石。经典的流域水量平衡方程如下:

$$dS/dt = P - E - Q \quad (1)$$

式中: t 为研究时段; S 为蓄水量; dS/dt 为研究时段 t 内蓄水量的变化; P 是研究时段流域的降水量,既包含降雨又包含降雪; E 是研究时段流域总的蒸发,包含植被截留、土壤蒸发、植被蒸腾、水面蒸发等; Q 是研究时段流域流出的径流量,主要包括地表径流、壤中流、地下水补给的基流,在有冰雪覆盖的流域,还包括冰川和积雪融水产生的径流。

长期以来,传统水文学的研究重点关注径流过程,因为河川径流是对人类影响最大的陆面水文过程,其产汇流过程直接影响到水资源的时空分布,径流过程的精确模拟和预报对于水资源管理、水旱灾害防治等都有重要意义。将该公式简单变形,可得 t 时段计算径流的公式如下:

$$Q = P - E - dS/dt \quad (2)$$

产流量(Q)即为采用水量平衡方法计算得到的水源涵养功能。本文将产流量笼统归为水文意义上的水源涵养功能,并没有详细考虑其时空变化,及其与人类社会需水之间的复杂关系。如果河川径流短时间汇集产生洪水,或者水质受到污染,则无法将径流转化为有效水资源,反而带来水灾害和水环境等严重的水问题。但限于本文主题和篇幅,对此不做过多论述。

2.3 此消彼长的生态(绿色)与水文(蓝色)水源涵养功能

生态学的水源涵养功能是陆地表层生态系统的 S_{\max} ,或者说是蓄水量(S)最大值与最小值间的变幅,而水文学的水源涵养功能是径流量(Q),两者截然不同。从生态学角度来看,植被生长需要耗水是不争的事实,植被像抽水机一样从根区吸水,通过叶片的气孔蒸腾逸散到大气中。以根区为主的生态系统蓄水能力,是植被为了满足干旱季节用水需求形成的“水库”,是陆地表层生态系统水分变化最活跃的圈层。陆表生态系统的蓄水能力既是最大蓄水量,也是干旱季节植被最大可吸收使用的水量,还是自然状态下根区最大的水分可亏缺量。因此,蓄水能力越大,说明可供植被吸收利用的水量越多;也

说明干旱季节土壤的水分损失量越大,需要更多的湿润季节降水补充水分亏缺。在降水量一定的情况下, S_{\max} 越大势必造成 Q 的减少。

从生态学角度来讲,生态系统的目的不是为人类提供水源,而是首先满足自身生存发展的用水需求,多余的或利用成本过高的水分才形成径流,流出山坡或流域^[20]。因此,生态学意义的水源涵养(S_{\max})与水文学意义的水源涵养(Q)密切相连,但却是此消彼长的关系,大量数据和实证研究已证实这一点^[21-23]。笔者认为本质上来讲,生态学是以自然生态系统为视角,而水文学是以人类为中心,两种视角的差异是导致水源涵养功能概念混淆的根本原因。

2002年Falkenmark等提出将水资源分为蓝水和绿水的理念^[24],即传统意义上的河川径流等液态水资源是“蓝水”;降水进入土壤被植被吸收利用,供给蒸发蒸腾和植物生长的水资源是“绿水”。因此,在降水量一定的情况下,绿色和蓝色两种水源涵养功能是一个硬币的正反两面,往往是此消彼长的关系。鉴于此,笔者认为将生态学意义的 S_{\max} 定义为绿色水源涵养功能,将水文学意义的 Q 定义为蓝色水源涵养功能,具有合理性,有助于厘清水源涵养功能长期以来存在的争议。

3 根区蓄水能力 水源涵养功能评估的关键要素

3.1 水量平衡视角下根区的关键作用

根据流域水量平衡方程,在稳定的气候背景下自然流域较长期的蓄水量变化可以忽略($dS/dt = 0$)。则降水主要有两个去处:一部分产生蒸散发,另一部分形成径流(图1)。全球陆地水循环中,降水(745 mm/a、111 km³/a)60%以蒸散发的形式返回大气(440 mm/a、65.5 km³/a),只有40%以地表径流、壤中流、地下径流的方式流出流域(305 mm/a、45.5 km³/a)^[25-26]。而植被蒸腾占陆地总蒸散发的60%~90%^[27-28],因此植被用水(蒸散发)对陆地水量平衡和水循环起主导作用。

陆地生态系统的垂向剖面大致可以分为林冠层、枯枝落叶层、根区、水分过渡带、饱和地下水等。陆地表层生态系统影响降水再分配的主要是林冠层、枯落层和根区。根据全球叶面积指数(LAI)计算的植被截留能力为1.65 mm^[29]。枯落层的蓄水能力在不同生态系统差别很大,但量级一般略高于冠层,约为2~5 mm^[6]。根据累积曲线算法^[21, 30],全球根区蓄水能力约为228 mm(具体方法见下文3.2),远高于林冠层和枯落层(图1)。可见根区蓄水能力远高于冠层和枯落层,决定了流域对降水的再分配。根区以下为水分渗漏的过渡带,再往下是潜水面和饱和的浅层地下水^[26]。无论是过渡带还是浅层地下水,均不涉及到水分的相变,自然情况下最终以径流的形式流出。深层地下水循环跟地表过程联系弱,一般不做考虑。因此,导致森林对降水分配的主要是由根区决定的。根区是联系生态视角和水文视角水源涵养功能的关键,直接影响了生态水文两个核心要素——蒸散发和径流,所以,根区蓄水能力是研究陆地生态系统水源涵养功能的关键。

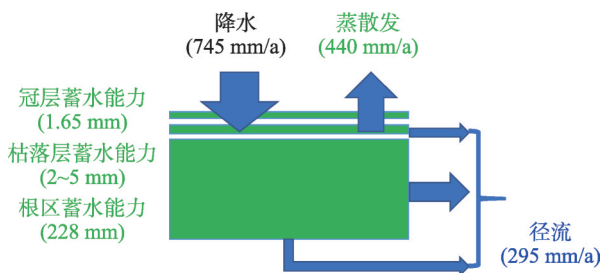


图1 全球陆地表层生态系统平均蓄水能力及水文过程通量示意图

Fig. 1 Water storage capacities and water fluxes of terrestrial ecosystem on global scale

3.2 根区蓄水能力的推求方法

根区蓄水能力受气候、土壤、地形、地质、植被根系分布和动态等众多要素共同影响。尤其是对于流域或区域等宏观尺度,只能通过间接方法估算。传统研究多采用查找表方法:通过点尺度土钻等野外实测,结合土壤等信息,估计某种植被类型的根区蓄水能力,并将其制作成查找表,后续研究中根据查找表和植被覆盖状况,得到不同流域或区域的根区蓄水能力^[6]。该方法操作方便,应用较广,但存在一定问题:①查找表的制作多基于点尺度的观测,由于尺度效应,在大尺度应用时将造成较大不确定性;②忽略了气候、地形、土壤、地质等复杂互馈过程的影响,无法考虑根区对气候变化和人类活动的动态响应。简单来讲,同样一个树种在不同气候、地形等条件下,耗水量差别很大;而且气温、降水、二氧化碳浓度、人类灌溉等变化都会对根区蓄水能力产生影响,查找表方法无法考虑。

最优根区蓄水理论认为根区蓄水能力是流域生态系统在一定气候背景下,长期演化出的适应干旱的生存策略,即在投入(根系生长所需物质和能量)和收益(增强应对干旱能力)间达到最优的平衡^[21]。若根区蓄水能力太小则不能满足干旱用水,从而导致植被死亡;若过大,则要消耗过多的物质和能量。基于该理论,借鉴工程水文设计中设计水库库容的累积曲线法(Mass Curve Technique, MCT)^[31](图2),可通过气候数据推求:将根区假象为水库,其入流(供给)为降水、融雪、灌溉等,干旱季根区的出流(需求)则为植被蒸腾耗水,且在湿润季节供给大于需求,在干旱

季节需求大于供给;将累积入流和出流绘入累积曲线图中;从干旱季节开始到干旱季节结束,分别作与累积耗水(需求)平行的切线,使之与累积入流(供给)相切;其差值则为该年度过干旱所需的根区蓄水能力(S_R)。进而采用频率分析的方法,计算度过不同重现期干旱所需的根区蓄水能力,例如20 a($S_{R, 20 a}$)、40 a($S_{R, 40 a}$)等。不同生态系统应对干旱的策略和能力也有差别,一般森林适应干旱能力强,根区蓄水容量可度过20~40 a一遇干旱;灌木则适应能力较弱,小于20 a一遇干旱;草本抵御干旱能力更弱,往往采取休眠等其他生存策略。总体来看,通过美国300多个流域的计算和分析,笔者发现温带生态系统的根区蓄水能力可满足其度过20 a一遇干旱用水^[21]。也就是说,根区蓄水能力过小则无法在干旱期生存,过大则要消耗过多的物质和能量,这很有可能是植被根据区域的水热条件优化和自适应的结果^[21, 30]。

需要指出的是根区蓄水能力不同于根系深度,也不同于土壤蓄水能力。它是一个概念性参数,但同径流系数、径流深等水文学基本概念一样,具有明确的物理意义,是连接生态、气候、水文、地表生物地球化学循环的关键变量。并且可以通过容易观测的气候要素直接推求,已广泛应用于全球和区域陆面过程和水文模拟中^[30, 32-33]。即使在土层较薄,基岩裸露的区域也具有高精度的模拟效果^[34]。累积曲线法推求的根区蓄水能力随着气候变化(降水、潜在蒸散发、融雪)和人类活动(灌溉)等动态适应,可用于大尺度生态系统水源涵养功能的动态估算^[35]。

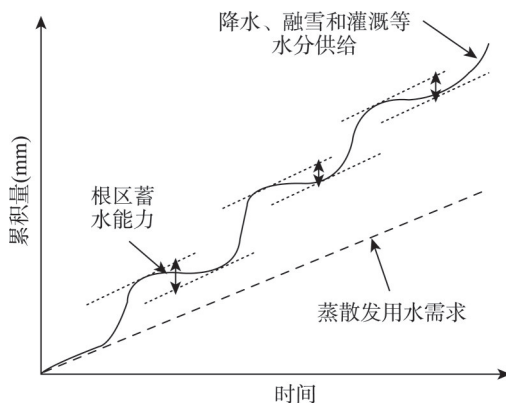


图2 累积曲线法(MCT)计算根区蓄水能力示意图
Fig. 2 The diagram of using Mass Curve Technique (MCT) to estimate root zone water storage capacity

4 研究展望

4.1 亟需分别评估绿色和蓝色水源涵养功能

当前水源涵养功能的概念相对笼统,亟需在研究和决策时充分考虑和权衡绿水和蓝水此消彼长的关系,分别评估两种水源涵养功能。植树造林等生态工程确实可以增加根区蓄水能力,在湿润季节在根区储存更多水分,用于干旱季节的耗水。但这部分水是森林自身的水源涵养,并没有为人类干旱用水提供更多可用水资源。相反,众多研究发现森林恢复或植树造林显著增加了耗水,导致黄土高原等河流、湖泊等水资源减少^[36]。增加“水源涵养”的初衷,却导致更多降水用于植物蒸散消耗,人类所需的径流反而减少。因此建议谨慎使用“绿色水库”的说法,因为森林的蓄水有别于我们普遍认为的,可以根据人类需求取用水的水库概念。如果以增加蓝色水源涵养功能(径流)为目标,而增加绿色水源涵养功能(根区蓄水能力),可能会适得其反。尤其对于干旱区,本来降水就少,增加的蓄水能力,往往导致产流量减少,产生更为严重的人与生态的用水不平衡。

在进行水源涵养功能评估时,将绿色(S_{\max})和蓝色(Q)水源涵养功能区分辨析。另外,在评估时要区分 S 与 S_{\max} 、 Q 的关系。一般情况下水源涵养能力是最大的蓄水量,而水源涵养量一般为实际的蓄水量,产流量则为流出流域的水量,三者意义截然不同。 S_{\max} 一般较稳定,而 S 和 Q 有非常强的时间依赖性,且变动很大。一般情况下,湿润季节流域内根区的蓄水量为蓄满状态, S 约等于 S_{\max} ;但干旱季节由于蒸散发耗水, S 减少,极端干旱甚至导致植物枯萎凋落。厘清这一系统的复杂关系,亟需进一步加强生态、水文、地理、环境、大气、管理等多学科领域的交叉合作。

4.2 广义的水源涵养功能评估

广义的森林涵养功能不仅包括拦蓄降水、调节径流等传统的水文调节,还包括净化水质、影响降水等,这些都与根区蓄水能力紧密相关。根区的土壤、微生物对化合物的分解、吸附、沉淀等作用,导致经过根区的作用,降水后产生径流中的溶解氧、总盐度、氮磷等营养元素等成分明显增加,pH值、浑浊度等明显下降,水质得到不同程度净化^[37]。植被通过根区吸收水分,供给干旱季节蒸腾,深刻影响了地表能量和水分循环^[38]。传统研究认为蒸散发的水汽是损失量,但最新的模型和同位素等研究发现:植被蒸散发会增加下风向的降水,增加水汽内循环速率^[18]。全球尺度模拟发现,增加森林会减少局地径流,但会增加下风向降水,在一定程度上缓解森林造成的蒸散发增加,对径流减少的影响^[39],这说明在评估水源涵养功能时考虑地表大气双向反馈的重要性。

传统研究多集中在森林、草地等陆地生态系统和湖泊等水生态系统的水源涵养功能,但对冰川、冻土、积雪等冰冻圈的水源涵养功能讨论较少。冰川积雪是“白色”水资源,为中国西北干旱区水安全保障起到了至关重要的作用^[40]。冰川、积雪涵养功能指的是固态蓄水量(S),可消融成液态水,供人类用水。其以固态形式存储的量越大,则可以液态水形式释放的量越大,则水源涵养功能越大。冰雪作为固态水库,其融水还对河川径流起到调峰补枯的季节调节作用^[41]。需要注意的是,冰川多影响江河源头的水文过程,对中下游的影响随着流域面积增大,降雨径流补给逐渐增多,而影响逐渐减弱(干旱区除外)。

地下水水源涵养功能评估是现有研究中较少涉及的领域。地下水是陆地重要的淡水库,储量巨大,又分为与大气直接联通的浅层地下水,以及与大气隔绝的存在承压特征的深层地下水。由于管理和历史等原因,地下水和地表水往往是分别开展研究和管理,

但从科学角度来看,他们都属于水循环的不同阶段,应统筹管理。尤其是在干旱区,地下水埋藏深,包气带厚。增加地下的水源涵养,并与地表生态系统的水源涵养功能统一管理和评估,不失为明智之举。

需要注意的是,冰川积雪、地下水等水源涵养能力是指蓄水量(Storage, S),有别于生态学所指的陆地生态系统的蓄水能力(Storage Capacity),也有别于水文所指的水源涵养能力是通量(Flux),如 Q 。广义的水源涵养功能可同时包含蓄水量、蓄水能力、通量,但使用时一定要严格定义和说明,避免混淆。

4.3 自然水源涵养(绿色、蓝色)与人工水源涵养(灰色)功能协同

中国已建成世界规模最大、范围最广、受益人口最多的水利基础设施体系。传统水利设施多以灰色的土石和混凝土结构为主,也被称为灰色基础设施。不可否认,水利设施取得了巨大的建设成就,为防洪减灾和水资源高效利用做出了巨大贡献^[42]。目前长江、南方诸河等流域,人工蓄水能力已超过陆地表层生态系统的蓄水能力^[35]。但与此同时,人工水利设施其对生态环境的影响也日益受到关注。国内外也涌现出众多协同绿色与灰色基础设施进行水资源管理的自然解决方案(Nature-based Solution)的理论探讨和应用实践^[43-46]。决策时应统筹考虑自然水源涵养和人工水利设施的关系,协同优化水系统的结构和功能。从学科发展角度,亟需推动水文学和生态学不同视角和学科的交叉研究和深度融合,以更定量系统地认识水源涵养功能的内涵和外延,全面支撑自然—人工水系统的协同优化^[47]。

5 结论

本文针对水源涵养功能概念广泛存在的模糊性问题,通过从生态学和文学视角分别辨析。发现生态学是以自然生态系统为视角,关注生态系统蓄水能力(绿水、 S_{\max}),而水文学是以人类为中心,关注径流(蓝水、 Q)。在降水量一致的情况下,两者存在明显的此消彼长关系。把自然生态满足自身需要的水源涵养与人类社会期望的水源涵养混淆,是导致水源涵养功能概念不清的根本原因。进而,本文发现根区蓄水能力是连接绿水、蓝水的关键要素,提出了大尺度估算根区蓄水能力及其动态变化的方法。鉴于此,本文建议:① 分别评估生态系统绿色和蓝色水源涵养功能;② 重视冰川积雪和地下水等多要素水源涵养功能的研究;③ 统筹考虑并耦合自然水源涵养和人工水利设施的功能,提高水资源在生态和经济社会系统中的高效优化利用。总之,本文通过从生态和水文视角辨析水源涵养功能的概念,厘清了造成概念模糊性的原因,并提出了具体的改进建议,以期为中国大型生态工程评估、水安全保障、水旱灾害防治等重大问题提供更为坚实的科学基础。

致谢:感谢两位匿名审稿人对论文提出的宝贵意见和建议。

参考文献(References)

- [1] Liu J, Clewell A. Management of Ecological Rehabilitation Projects. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] Huang Bingwei. Several issues with the role of forests on the environment. China Water Resources, 1982, 33(4): 29-32. [黄秉维. 森林对环境作用的几个问题. 中国水利, 1982, 33(4): 29-32.]
- [3] Jiang Zehui. Protecting forest resources and building green ecological barriers: Reflections after the floods of the Yangtze, Nenjiang and Songhua rivers. Scientific and Technological Forestry Management, 1998, 27(3): 12-16. [江泽慧. 保护森林资源建设绿色生态屏障: 长江、嫩江、松花江特大洪水后的反思. 林业科技管理, 1998, 27(3): 12-16.]

- [4] Wu Yingwen, Zhang Zhonghua, Yu Shuping. Protecting forest resources and building green barriers: Reflections on the floods of 1998. *Protection Forest Science and Technology*, 1999, 38(1): 42-43. [吴映文, 张忠华, 于淑萍. 保护森林资源建设绿色屏障: 1998年特大洪水引发的思考. *防护林科技*, 1999, 38(1): 42-43.]
- [5] Zhou Jiawen, Gao Jixi, Gao Zhiqiu, et al. Analyzing the water conservation service function of the forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1679-1686. [周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. *生态学报*, 2018, 38(5): 1679-1686.]
- [6] Shi Peili, Wu Bo, Cheng Genwei, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze Basin. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 351-360. [石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 351-360.]
- [7] Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lv Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10): 1-5. [余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于InVEST模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.]
- [8] Lv Yihe, Hu Jian, Sun Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191-5196. [吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.]
- [9] Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462. [龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.]
- [10] Budyko M I, Miller D H. *Climate and Life*. London: Academic Press, 1974.
- [11] Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31. [傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.]
- [12] Yang Dawen. *Ecohydrology*. Cong Zhentao, trans. Beijing: China Water & Power Press, 2008. [杨大文. *生态水文学*. 丛振涛, 译. 北京: 水利水电科学出版社, 2008.]
- [13] Wang Genxu, Zhang Zhiqiang, Li Xiaoyan, et al. *Introduction to Ecohydrology*. Beijing: Science Press, 2020. [王根绪, 张志强, 李小雁, 等. *生态水文学概论*. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [14] Dooge J C I. Looking for hydrologic laws. *Journal of Hydrology*, 1986, 22(9): 46-48.
- [15] Savenije H H G, Hrachowitz M. HESS Opinions "Catchments as meta-organisms: A new blueprint for hydrological modelling". *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 1107-1116.
- [16] Andreassian V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1): 1-27.
- [17] Zhang M, Wei X. Deforestation, forestation, and water supply. *Science*, 2021, 371(6533): 990-991.
- [18] Zhang Q, Tian L, Yang Y T, et al. Revegetation does not decrease water yield in the Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): 13. DOI: 10.1029/2022GL098025.
- [19] Zuo Qiting, Wang Jiaoyang, Yang Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2): 13-19. [左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 13-19.]
- [20] Bonan G B. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. New York: Cambridge University Press, 2016.
- [21] Gao H, Hrachowitz M, Schymanski S J, et al. Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 7916-7923.
- [22] Cain M R, Ward A S, Hrachowitz M. Ecohydrologic separation alters interpreted hydrologic stores and fluxes in a headwater mountain catchment. *Hydrological Processes*, 2019, 33(20): 2658-2675.
- [23] Bouaziz L J E, Aalbers E E, Weerts A H, et al. Ecosystem adaptation to climate change: The sensitivity of hydrological predictions to time-dynamic model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(5): 1295-1318.
- [24] Falkenmark M, Folke C. The ethics of socio-ecohydrological catchment management: Towards hydrosolidarity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 1-9.
- [25] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [26] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99: 125-161.
- [27] Evaristo J, Jasechko S, McDonnell J J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. *Nature*, 2015, 525: 91-94.
- [28] Lian X, Piao S L, Huntingford C, et al. Partitioning global land evapotranspiration using CMIP5 models constrained by

- observations. *Nature Climate Change*, 2018, 8(7): 640-646.
- [29] De Roo A, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins (I): Theory, input and output. *Hydrological processes*, 1996, 10(8): 1107-1117.
- [30] Wang- Erlandsson L, Bastiaanssen W G M, Gao H K, et al. Global root zone storage capacity from satellite-based evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(4): 1459-1481.
- [31] Rippl W. The capacity of storage reservoirs for water supply. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1883, 71: 270-278.
- [32] Singh C, Wang- Erlandsson L, Fetzer I, et al. Rootzone storage capacity reveals drought coping strategies along rainforest-savanna transitions. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 124021. DOI: 10.1088/1748-9326/abc377.
- [33] Wang Jingjing, Gao Hongkai, Liu Min, et al. Parameter regionalization of the FLEX-Global hydrological model. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51(5): 805-823. [王璟京, 高红凯, 刘敏, 等. 参数区域化在全球水文模型 FLEX-Global 中的应用. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 805-823.]
- [34] McCormick E L, Dralle D N, Hahm W J, et al. Widespread woody plant use of water stored in bedrock. *Nature*, 2021, 597(7875): 225-229.
- [35] Xi Qiaojuan, Zhong Hua, Wang Tao, et al. Spatio-temporal variation of gray-green-blue storage capacity in nine major basins of China. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(34): 4437-4448. [奚巧娟, 钟华, 王涛, 等. 中国主要流域灰—绿—蓝蓄水能力时空演变. *科学通报*, 2021, 66(34): 4437-4448.]
- [36] Zeng Y, Yang X K, Fang N F, et al. Comments on "Large-scale afforestation significantly increases permanent surface water in China's vegetation restoration regions". *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 108001. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108213.
- [37] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534. [张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.]
- [38] Lan X, Li Y, Shao R, et al. Vegetation controls on surface energy partitioning and water budget over China. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 125646. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125646.
- [39] van Dijke A J H, Herold M, Mallick K, et al. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geosciences*, 2022, 15(5): 363-368.
- [40] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng. Cryospheric hydrology: Decode the largest freshwater reservoir on Earth. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 414-424. [丁永建, 张世强, 陈仁升. 冰冻圈水文学: 解密地球最大淡水水库. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 414-424.]
- [41] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 2019, 569(7758): 649-654.
- [42] Liu J G, Zang C F, Tian S Y, et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward. *Global Environmental Change*, 2013, 23(3): 633-643.
- [43] Palmer M A, Liu J G, Matthews J H, et al. Manage water in a green way. *Science*, 2015, 349: 584-585.
- [44] Huang Y J, Tian Z, Ke Q, et al. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2020, 7: e1421. DOI: 10.1002/wat2.1421.
- [45] Shi Haiyang, Luo Geping, Zheng Hongwei, et al. Water use analysis of Syr Darya river basin: Based on "Water-Energy-Food-Ecology" nexus and Bayesian network. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 1036-1052. [施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 等. 基于“水—能源—食物—生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 1036-1052.]
- [46] Zang Chuanfu, Liu Junguo. Spatial and temporal pattern difference of blue-green water flows in typical reference years in the Heihe River Basin, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(3): 1-10. [臧传富, 刘俊国. 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异特征. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 1-10]
- [47] Liu Changming, Liu Xuan, Yang Yafeng, et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 3-15. [刘昌明, 刘璇, 杨亚锋, 等. 水文地理研究发展若干问题商榷. *地理学报*, 2022, 77(1): 3-15.]

Ecological and hydrological perspectives of the water retention concept

GAO Hongkai^{1,2}, LIU Junguo³, GAO Guangyao⁴, XIA Jun⁵

(1. School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System and Resources Environment (TPESRE),
Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Water Conservancy,
North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
4. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental
Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 5. Research Institute for Water Security (RIWS),
Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: Water retention plays a critical role in terrestrial ecosystem service. However, regarding its definition and calculation, there is a long debate in academia, which illustrates its importance in practice, and simultaneously demonstrates the complexity and vagueness of this essential concept. Thus, there is an urgent need to clarify its definition and calculation method based on basic ecological and hydrological theories, and eventually promote science-based decision-making and integrated water management. Interestingly, we observed that for the same term of "water retention function", ecologists intended to concern the terrestrial ecosystem's water storage capacity (S_{\max}), while hydrologists concerned more about the water yield from the catchment (Q). Both perspectives have their own rationality, but with totally different vision and emphasis. By theoretical discussion and data analysis, we found that water storage capacity (S_{\max}) and water yield (Q) indeed have strong connection, but they are definitely two different concepts. The S_{\max} of terrestrial ecosystem determined the separation of precipitation into either evaporation (green water) and Q (blue water). The size of S_{\max} in most cases trades off with the amount of Q . We further revealed that the root zone storage capacity ($S_{R\max}$) of ecosystem is at the heart of water retention function assessment, and plays a key role linking blue and green water. The $S_{R\max}$ is the result of ecosystem's adaption to its climate, and can be derived by the classic method to design reservoir, i.e. the Mass Curve Technique (MCT). Lastly, we gave three recommendations: (1) simultaneously evaluating green water retention capacity and blue water yield in practice; (2) further investigating the water retention functions of more water bodies, e.g. glacier, snow cover, and groundwater; (3) synergizing natural and artificial water retention capacities to enhance the water use efficiency in both the ecosystem and our economic-social system.

Keywords: water retention function; ecohydrology; root zone storage capacity; water balance equation; blue water and green water