

中国西南喀斯特水源涵养特点及其生态功能

周利^{1,2,3}, 彭韬^{1,2}, 王世杰^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 旨在探讨喀斯特水源涵养特点及功能, 为深入理解其水源涵养内在过程并改进综合评估方法提供理论支持。[方法] 回顾水源涵养的概念发展、生态功能及其评估与研究方法, 针对喀斯特区域生态地质特点与水文过程, 讨论喀斯特水源涵养特点及其生态功能, 展望喀斯特水源涵养研究并提出建议。[结果] 1) 喀斯特水源涵养在岩土结构、水文地质条件、生态水文过程方面显著区别于非喀斯特区域。2) 喀斯特水源涵养的主要功能包括储存、调节与供给。3) 建议利用高精度地球物理探测技术, 加强喀斯特地下结构的定量研究与探索, 提升对喀斯特地下系统结构的认识, 强化喀斯特地下结构对水文过程和水源涵养能力的作用研究, 量化喀斯特地下结构对水源涵养的贡献。针对喀斯特地下结构特点和储水层空间发育规律, 基于喀斯特长期流域实测数据优化现有模型并开发新的评估方法。提升对喀斯特地下水源涵养重要性的认识与重视, 建议将喀斯特地区水源涵养同土壤保持功能提升到同等极重要等级。[结论] 未来研究应聚焦喀斯特水源涵养中的地下水文过程, 融合多学科方法, 完善喀斯特水源涵养评估体系, 以推动相关理论与应用的进一步发展。

关键词: 喀斯特; 水源涵养; 表层岩溶带; 生态系统服务

中图分类号: X171.1; TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0001-14

Characteristics and Ecological Functions of Water Conservation in Karst Regions of Southwest China

ZHOU Li^{1,2,3}, PENG Tao^{1,2}, WANG Shijie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou 562100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the characteristics and functions of water conservation in karst regions, in order to provide theoretical support for understanding its intrinsic mechanisms and improving comprehensive assessment methods. [Methods] The conceptual development, ecological functions, assessment techniques, and research methods of water conservation were reviewed. Based on the ecological, geological, and hydrological characteristics of karst regions, the unique features and ecological functions of karst water conservation were discussed, insights and recommendations for future research were offered. [Results] 1) Karst water conservation significantly differs from non-karst areas in terms of rock-soil structure, hydrogeological conditions, and eco-hydrological processes. 2) The main functions of karst water conservation include water storage, regulation, and supply. 3) Suggest utilizing high-precision geophysical detection technologies to enhance quantitative research on karst subsurface structures, improving understanding of karst underground systems, and

收稿日期: 2024-12-12

修回日期: 2025-02-24

录用日期: 2025-03-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077317); 国家自然科学基金委 NSFC-INSF(中伊)国际(地区)合作重点项目(42261144672); 国家重点研发计划项目(2023YFF0806002); 贵州省科技厅基础研究重点项目(黔科合基础-ZK[2022]重点 048); 贵州省高层次(百层次)创新型人才项目(黔科合平台人才-GCC[2023]059)

第一作者: 周利(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特生态环境研究。E-mail: zhou-li@mail.gyig.ac.cn

通信作者: 彭韬(1984—), 男, 博士, 研究员, 主要从事喀斯特生态环境、土壤侵蚀、水土保持和水文水资源研究。E-mail: pengtao@mail.gyig.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

strengthening research on the influence of karst subsurface structures on hydrological processes and water conservation capacity, and quantify their contributions to water conservation. Based on the characteristics of karst subsurface structures and the spatial development patterns of aquifers, optimizing existing models and developing new evaluation methods based on long-term watershed monitoring data from karst regions. Increasing awareness and emphasis on the importance of karst underground water conservation and advocating for its prioritization, suggesting that water conservation should be considered as equally critical as soil conservation in karst regions. [Conclusion] Future research on karst water conservation should focus on subsurface hydrological processes, integrate multidisciplinary approaches to improve the karst water conservation assessment system and advance both theoretical and practical applications.

Keywords: karst; water conservation; epikarst zone; ecosystem services

Received: 2024-12-12

Revised: 2025-02-24

Accepted: 2025-03-06

Online(www.cnki.net): 2025-04-16

受气候变化和人为干预的影响,水资源短缺、水体污染、水质性缺水等问题日益突出,水资源供需矛盾逐渐发展为全球性问题^[1]。水资源是国家社会可持续发展 and 长久治安的重大战略资源,不仅关系人类的健康和社会经济发展,也是维持生态系统稳定及可持续发展的基础。水源涵养作为生态系统服务的关键功能之一,近年来成为生态学和水文学的重要研究热点,在生态产品价值评估^[2]、核算^[3]、水源供给服务时空变化^[4]、生态功能区划^[5]等方面取得丰硕的研究成果。然而,水源涵养概念提出以来,其定义、内涵、功能等在不同区域间存在着较大争议,水源涵养内涵范畴仍存在较大争议,生态功能等基础理论问题仍有待进一步探讨。尤其是在喀斯特等特殊地貌区,其产汇流特征、水源分配等方面均与非喀斯特存在不同程度的差别,而传统模型(InVEST模型、SWAT模型等)忽视地表-地下二元结构间的相互作用,研究结果可能存在低估生态系统的真实涵养能力^[6]。

我国西南喀斯特地区水文地质结构独特,拥有二元地表、地下水文结构系统,地表地下水交互频繁,水文过程迅速,其独特的水文循环过程与非喀斯特地区存在显著差异,喀斯特地表地下双重水文结构及表层岩溶带对水分的涵养和调蓄作用被忽视,导致现有评估方法对喀斯特水源涵养能力的评价结果存在较大不确定性,且目前缺乏对喀斯特水源涵养内在过程及其功能的探讨。因此,本文旨在总结回顾水源涵养概念、内涵演变发展的已有研究基础上,结合喀斯特区地质结构和生态特点,揭示喀斯特区水源涵养关键过程,分析喀斯特区水源涵养的特点及其生态功能,为认识喀斯特区水源涵养的内在过程和改进综合评估方法提供科学理论依据(图1)。

1 水源涵养的概念、生态功能及其评估方法

1.1 水源涵养的概念

水源涵养一词最早可追溯至1892年,源自学者对森林水文学的研究,开始认识到森林与水二者间的相互影响,到20世纪60年代,森林水源涵养的概念由苏联传入我国。值得一提的是,通过阅读国内外关于水源涵养的文献可以发现,国内外学者对其有不同的理解,侧重点也不同。在国外,水源涵养可用“water conservation”“water retention”“water storage”和“water yield”等词汇表示,其概念更侧重于水资源保护、储存及产水量的计算,属于森林水文学的研究范畴。在国内,水源涵养则更侧重于揭示水文循环机理,强调水源涵养的形成过程及原理,力求全面探讨生态系统对水文过程各个环节的作用和能力,属于生态系统服务领域。

水源涵养研究尺度最早聚焦于森林生态系统,被解释为对水的储存。1944年,美国学者^[7]发现,砍伐木材影响溪流可用水量,随后阐述了森林对降雨径流的影响,将水源涵养简单理解为森林对河流径流量的影响。随着研究的不断深入,植被对流域截流-蒸发-蒸腾作用的影响,森林对河流水质的净化功能等研究使得水源涵养概念更为丰富。1989年,片冈顺等^[8]参照《广辞苑》中对涵养的解释,将水源涵养理解为自然地、缓慢地保护水源地。此外,森林可实现对降水的有效截留,肯定水源涵养林在贮水方面的效益,水源涵养被解释为森林生态系统对降水的拦截和滞留作用,包括林冠、枯落物和土壤截留3部分^[9]。

1997年,随着DAILY^[10]和COSTANZA等^[11]对生态系统服务内涵与服务价值估量方法的明确界定,特别是联合国在2005年发布千年生态系统评估

(MA)结果后,水源涵养作为生态系统服务的关键评估内容受到更为广泛的关注。研究尺度从单一生态系统拓展到复合生态系统,研究内容从植被调节降水拓展到生态系统不同圈层、功能和服务多个方面,研究学者都从不同角度阐述水源涵养的概念。例如,植被的林冠层和枯枝落叶层既影响水分的输入、下渗、贮蓄及产流,同时植物根系活动增加土壤渗透性能,抑制土壤蒸发并减少径流,从而提升土壤的蓄水能力。因此,从形成的原理和过程出发,水源涵养被认为是生态系统通过林冠、枯落物、根系及土壤将降水拦蓄在系统内部,以满足系统及外部用水需求^[12]。降水是系统涵养水源的前提,不少学者^[13]提出应更加强调生态系统从降水中拦截或储存水资源的能力,认为这构成水源涵养的核心。因此,从涵养的作用层和功能出发,认为水源涵养是生态系统在一定时空范围内,通过不同作用层对降水进行拦截、渗透、储存,在系统内充分维持水分的过程和能

力^[14]。除自然生态系统储存外,水库等生态工程建设在水资源储存方面也发挥重要作用。因此,从涵养作用的主体和功能出发,认为水源涵养是在一定时段内,通过自然调节或生态工程建设,系统截留降水、贮存水分、调节径流、净化水质、维持生态的过程和现象^[15]。

总体来说,随着研究的不断深入,水源涵养的概念在不断完善和丰富,以期从生态系统的综合视角全面概括水源涵养概念。尽管不同学者对其表述各异,但均认同水源涵养的本质在于尽可能地将水资源储存在系统内,延长水分在系统内的储存时间,以提高水资源的利用效率。目前,国外将水源涵养诠释为保护和维持水资源的生态系统功能^[16],国内吕一河等^[17]对水源涵养概念的阐述在学术界获得广泛认可,将其定义为在一定时空范围和条件下,将水分保持在系统内的过程和能力,在多种因素的作用下具有复杂性和动态性特征。

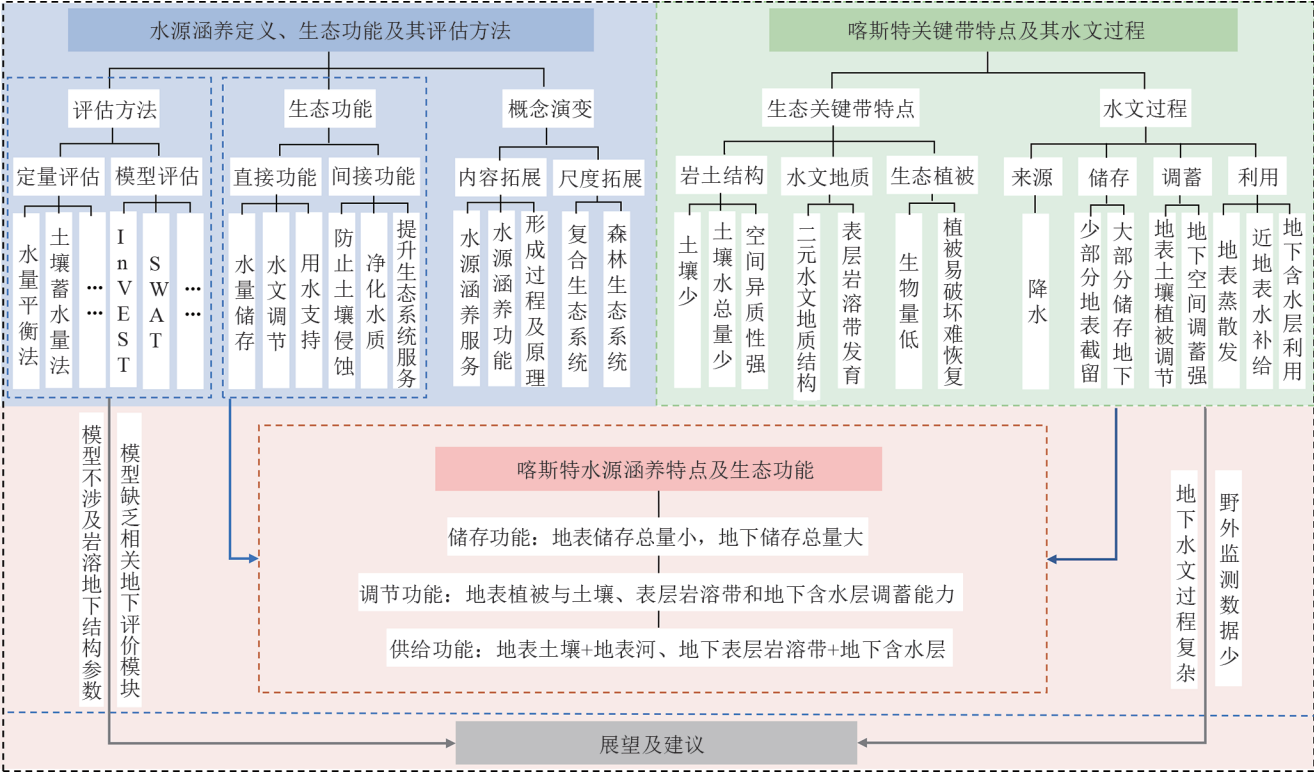


图 1 喀斯特水源涵养特点及其生态功能概念

Fig. 1 The characteristics of karst water conservation and the concept of its ecological functions

1.2 水源涵养功能分析

水源涵养的功能演变同其概念一样,随着研究的不断深入,对功能的认识也不断丰富拓展。研究初期,人们集中关注森林的水源涵养功能,认为水源涵养林能调节水量,保护水资源,并提出衡量森林水源涵养功能的指标。到 20 世纪 80 年代,研究森林水源涵养功能更为全面,具体到计算林冠层对降水的截留、对降雨动能的影响、枯枝落叶层的蓄

水透水能力,以及对河川年径流量、枯水径流量和洪峰流量的影响,水源涵养功能可归纳为截留保水、调节径流、削弱洪峰 3 个方面。1998 年,我国“三江”发生特大洪涝灾害后,有学者^[9]意识到森林的水源涵养作用不仅在于植被的截留保水,同时根系活动还能改善土壤结构,增加土壤-根区储水能力,防止土壤侵蚀。森林的水源涵养功能随后被归纳为涵养水源、调节径流、削弱洪峰、改善水质、抵

御土壤侵蚀 5 个方面。随着研究内容和尺度的拓展,水源涵养功能也从单一生态系统拓展至复合生态系统,被认为是生态系统对大气降水、地表水、土壤水及地下水实施截留储存、调节径流、用水补给、净化水质等的全方位作用。同时,水源涵养功能作为生态系统服务关键功能之一,不少学者提出在关注水源涵养的直接功能之余,也应关注在水源支持下生态系统的其他产品和服务,从而全面提升生态系统服务质量(图 2)。

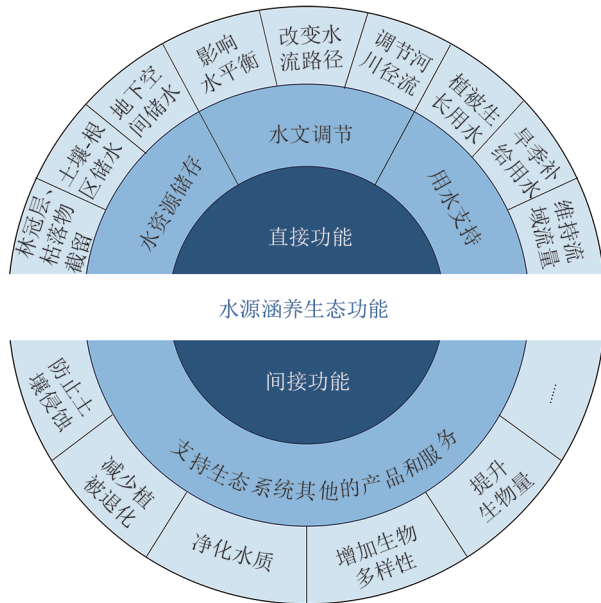


图 2 水源涵养功能示意

Fig. 2 Schematic diagram of the functions of water conservation

水源涵养的首要直接功能是系统对降水的截留储存,它是水源涵养发挥功能的前提和核心,深刻依赖于植被-土壤-地下空间结构三者的交互作用。除植被冠层、枯枝落叶层和土壤-根区储水外,地下空间结构为水资源储存提供巨大的空间,尤其是在丰水期,地下空间在水资源储存中占主导地位,储水量往往超过总储水量的 1/2^[18]。其次,对水文的调节作用同样不可忽视。一方面,植被对降雨进行截留、下渗、贮蓄,调节地表水资源,降低林地径流速度,影响地表蒸散发,从而影响系统水平衡;另一方面,植被恢复能有效阻缓地表径流,削弱洪峰,植被-地形耦合因子使得水流路径发生变化^[19],有效调节河川径流。储存的水资源能提供整个生态系统运行期间的用水支持,尤其是在枯水季节,显得尤为关键。有研究^[20]表明,地下水是旱季流域的主要水源,它维持着枯水期流域的流量,水量的波动影响对地表植被的供水,同时影响植被生长、组成和结构。

水源涵养功能的提升与植被恢复和土壤侵蚀之

间存在密切联系,三者存在基于区域的时空变化关系。具体而言,水源涵养与植被恢复之间相辅相成,系统涵养的水源为植被正常生长用水提供必要的保障,植物多样性在干旱区受地下水变化敏感;反过来,植被生长提高植被覆盖率和林冠层密度,显著增强对降雨的截留和土壤根区的蓄水能力,同时降低降雨动能,提高侵蚀性降雨阈值,有效减少水土流失。水源涵养和土壤侵蚀之间在不同尺度上存在权衡协同关系,在时间尺度上主要表现为协同,在空间尺度上既有权衡也有协同^[21],这些变化还与气候、海拔、地貌等环境因子密切相关。不仅如此,水源涵养功能的提升还对生物量积累、生物多样性保护及社会经济福祉起到正向作用,进一步凸显水源涵养功能提高对间接改善生态环境,提高生态水文服务功能,全面推动生态系统服务水平提升的重要性^[22]。

1.3 水源涵养评估与研究方法

我国从 20 世纪 80 年代以来开始定量评估水源涵养,研究方法多采用水量平衡法、降水贮存法、年径流法、土壤蓄水量法等^[15]。样地尺度,有学者^[23]将广西大明山作为典型森林样地,将土壤蓄水量和枯枝落叶持水量作为核算指标,利用水量平衡法计算该样地水源涵养量,并认为这些水资源可持续补充水库和河川流量;或划分标准样地,采用土壤蓄水量法比较不同林分土壤水源涵养功能差异,发现天然次生林和混交林具有更高的水源涵养功能^[24]。小流域尺度,将径流量和降雨量作为核算指标,采用年径流法比较 2 种森林集水区的水源涵养功能发现,马尾松林下枯枝落叶层和土壤孔隙结构更好,水源涵养功能更强^[25]。流域尺度,将林冠截留率作为核算指标,采用降水贮存法计算长江上游森林生态系统水源涵养量并计算每年的经济价值,或采用水量平衡法计算太湖流域在土地利用变化下的水源涵养量发现,在同等降雨条件下,耕地面积减少和建设用地面积增加对流域产水量有较大影响^[26-27]。区域尺度,将年降水量、年蒸发量和出入境水量作为核算指标,采用水量平衡法计算 2010 年贵州省水源涵养量,并计算其经济价值^[3]。

除定量计算水源涵养量外,不少研究开始对各区域水源涵养进行时空动态分析,研究尺度也逐渐扩大。得益于遥感卫星影像的快速发展,地理信息技术和遥感技术被应用于评估水源涵养,众多水文模型和生态模型尤其是 InVEST 模型和 SWAT 模型的开发应用,实现水源涵养时空动态分析模拟,使得水源涵养的研究进入大发展期。这些模型基于水量平衡原理,将处理后的降水、蒸散发、高程、土地利用

等栅格数据带入模型,不仅简化评估流程,还使研究尺度和研究内容得以拓展至更大范围。例如,利用InVEST模型探讨三江源区水源涵养30 a的时空变化发现,该区水源供给量整体呈下降趋势,处于该区东南部的县域水源供给量高^[28];或结合地理探测器等方法分析影响其功能的驱动因素发现,大部分受土地利用类型和降水的影响^[29];利用SWAT模型评估三江源区的水源涵养功能及其驱动因素发现,土地利用和植被变化影响流域径流的输出,植被破坏导致地下径流减少和地表流量增加^[30]。除此以外,还可利用模型评估全球陆地生态系统水源涵养,预测未来不同情景下水源涵养状况,或进一步探讨与其他生态系统服务功能的权衡协同关系。

可以看出,水源涵养的评估方法逐渐从定量评估转为应用综合模型法,但二者各有优劣势。定量评估法通过实地调研和验证,能精确定量林冠层、枯枝落叶层、土壤等截留蓄水能力,核算指标也均为影响水源涵养的关键要素,所得结果不仅具备坚实的理论依据,还有助于理解水源涵养过程。但这些方法所需人力大,研究周期短,缺乏连续的动态观测,且有针对性地研究某几个相关因子并不能综合反映水源涵养功能和变化规律。相较于定量评估法,综合模型法简化评估流程,所需人力少,可实现长周期研究,有利于连续地动态观测,研究区域实现从小尺度到大尺度的拓展,更有利于水源涵养驱动因素识别、时空变化分析和空间制图表达。但该类评估方法在一定程度上忽视水源涵养的内在过程,并且缺乏对地下结构水源涵养功能的计算方法。因此,对于具有复杂地下结构的区域来说,对水源涵养的认知和评估都存在问题,如喀斯特地区。

当前对地下水源涵养的处理方式主要有3种,均存在局限性:一是忽略计算,认为地下水以水平径流为主,地表水与浅层地下水相互转换,最终以河川外泄形式成为地表水;二是将地下结构视为储水容器,但同样不纳入计算,未考虑其水资源利用价值;三是虽然意识到地下水源涵养的重要性,但因地下结构复杂,计算难度大,至今未有较准确的计算方法。尽管有不少学者都提出改进模型地下水源涵养的建议,但侧重点也略有不同。相比于非喀斯特地区,喀斯特地区更关注地下水的储存与利用,特别是对生态用水的补给作用^[31]。其原因在于地下结构的复杂性,难以全面解析其水文过程,缺乏对地下水源涵养清晰的刻画和认识,导致对地下涵养机制的理解模糊,同时也源于地下水源涵养的区域性特点,地下结构对水的储存和补给过程在喀斯特地区尤为突出,

且南北方喀斯特也存在巨大差异,北方喀斯特以水平层状型地貌为主,而南方喀斯特的裂隙管道型地貌更为典型,对深入理解水源涵养的作用过程构成一定挑战。已有大量研究尝试利用InVEST模型和SWAT模型来评估喀斯特水源涵养,大多基于地表径流变化的特点来进行核算,对于具有下垫面的地区而言,其评估结果的准确性往往难以保证。尽管通过校准参数可以得到相似的结果,但BARCLAY等^[32]研究指出,即使模型间具有相似校准指标,但各模型间差距依旧很大。尤其对于地下结构复杂、裂隙更加发育的喀斯特地区来说,此类问题则更加突出。

2 喀斯特关键带特点与水源涵养功能

2.1 喀斯特关键带特点

我国西南喀斯特是全球三大岩溶集中连片分布区之一,是公认的裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶最发育、生态环境最为脆弱的地区^[33-34]。我国西南喀斯特地区古生代和中生代的碳酸盐岩古老坚硬,在青藏高原隆升作用下暴露出地表受到风化剥蚀和溶蚀作用,在亚热带季风气候条件下驱动水-岩-气三者强烈的岩溶动力过程。水分的下渗和运移不断促进包气带岩溶管道及裂隙的发育,溶蚀的孔、洞、缝,构成独特的喀斯特地上地下二元水文地质结构^[35],尤其是位于包气带上部的表层岩溶带是指表层碳酸盐岩在强烈的溶蚀作用下形成的各种犬牙交错的岩溶个体形态和微形态构成的不规则带状组合层^[36],溶蚀裂隙高度发育^[37],具有较大的调蓄和水资源储存能力。

碳酸盐岩为背景的喀斯特坡地岩土结构特点与非喀斯特区存在较大差异。土层薄、土壤少,风化岩土速率低,形成1 m厚土层需2~5 m的碳酸盐岩风化63 000~788 000 a^[38]。喀斯特坡地土壤厚度通常在30~50 cm,开挖法实测石灰岩坡地平均土壤质量厚度仅1.6 cm,白云岩坡地平均土壤质量厚度仅2.2 cm^[39]。高密度电法探测表明,环江坡地土壤深度为0~6.4 m^[40],喀斯特森林坡地平均土壤厚度为0.20~1.97 m,等效土壤厚度为0.60 m^[41]。这种石多土少的自然条件极大地限制该区土壤的水源涵养能力。喀斯特坡地土石直接接触、生境条件具有高度空间异质性。与非喀斯特区土壤均匀分布于地表不同,喀斯特区土壤分布极不均匀,坡地土壤自坡顶到坡脚存在垂直分带性,坡顶到坡麓土层逐渐变厚。因矿物结构不同,石灰岩与白云岩坡地岩土结构也存在较大差别,石灰岩差异性风化作用明显,具有大的土楔,大部分土壤易聚集于溶沟、溶槽和凹地内,呈镶嵌斑块状分布^[39]。白云岩坡地土楔少,细小裂

隙弥散性均匀分布,土层极薄,均匀覆盖。由于喀斯特坡地溶蚀裂隙广泛存在,喀斯特坡地渗透性强,降水、径流、泥沙向岩溶裂隙及管道中流失,坡面地表径流系数普遍低于0.05^[42]。

除坡地岩土结构区别于非喀斯特坡地外,溶蚀作用过程形成的二元水文地质地下空间结构与非喀斯特地区也有很大差别(图3)。西南喀斯特地下空间结构表层岩溶带“孔、洞、缝”等裂隙发育密度大,是实现喀斯特地区水资源转化的重要临界带^[43],包气带自上而下沿层理和解理发育水平管道带和垂直管道带。一方面,表层岩溶带厚度从几米到十几米不等,相比浅薄土壤具有巨大的储存空间。大气降水和地表水通过岩溶地表渗透至地下成为地下水,水的溶蚀作用促使裂隙、孔隙等形成更为丰富的地下水流路径,进一步促进对水的储存和渗透;另一方面,表层岩溶带具有强大的调节能力^[44],尤其表现为对洪峰的调蓄能力和旱季对土壤和植被用水的补给能力。表层岩溶带广泛分布的裂隙和高渗透性特点在暴雨过程中发挥关键作用,表现出对暴雨的滞后效应。在枯水期时,表层岩溶带水对地表的补给则更为明显,表现为对地表水的补给和植被生长用水的补给。因此,喀斯特水文过程是由降水、植被、土壤、表层岩溶带及管道裂隙耦合而成的复杂多界面结构进行控制,且表层岩溶带和地下空间在水资源的储存和调节过程中起到关键作用。

独特的水文地质结构背景也形成喀斯特区不同于非喀斯特区的生态水文特点。相比于非喀斯

特地区,喀斯特坡地土壤层浅薄、区域主要发育常绿与落叶阔叶混交林和含有较多落叶成分的季节性雨林,植被多具旱生结构和耐瘠抗旱的生态特性。喀斯特地区生物量普遍较非喀斯特地区低,森林生态系统地上生物量1/2仅为非喀斯特森林的2/3^[45]。植被一旦破坏,造成大量水土和养分流失后^[46],植被恢复困难。喀斯特坡地岩土结构与坝区存在显著差异,坡顶石质坡地,坡腰石土质或土石质坡地,坡脚土质坡地,存在岩土结构的垂直分带性。石质、石土质坡地植被生物量都显著低于土石质和土质坡地。石漠化坡地基岩裸露减少单位面积土壤总量,供植被生长的土壤蓄水总量减少,大型植被很难在喀斯特地区存活,只有在裂隙较大的地方水分养分才会保证植被生长良好,如较纯的具有大型裂隙土楔的石灰岩坡地。随着生态工程建设的开展,喀斯特区植被覆盖度的速度已经略高于非喀斯特地区,生态环境也有所改善,但年平均归一化植被指数(NDVI)仍低于非喀斯特地区^[47]。尽管如此,植被恢复依旧对喀斯特地区的水文过程产生积极影响。有研究^[48]表明,人工植树造林减少流域约7.0%~7.6%的径流,植被覆盖度的增加有效减弱降雨强度对径流的影响,植被根系活动增加土壤-根区的储水能力,从而有效降低喀斯特坡地的地表径流和地下径流;另一方面,随着植被的增加,该区域的蒸散发也随之增加,从而加快陆地水文循环。因此,植被恢复对水源涵养功能的提升具有重要作用,但总体来说实测数据极少,相关研究仍较为薄弱。

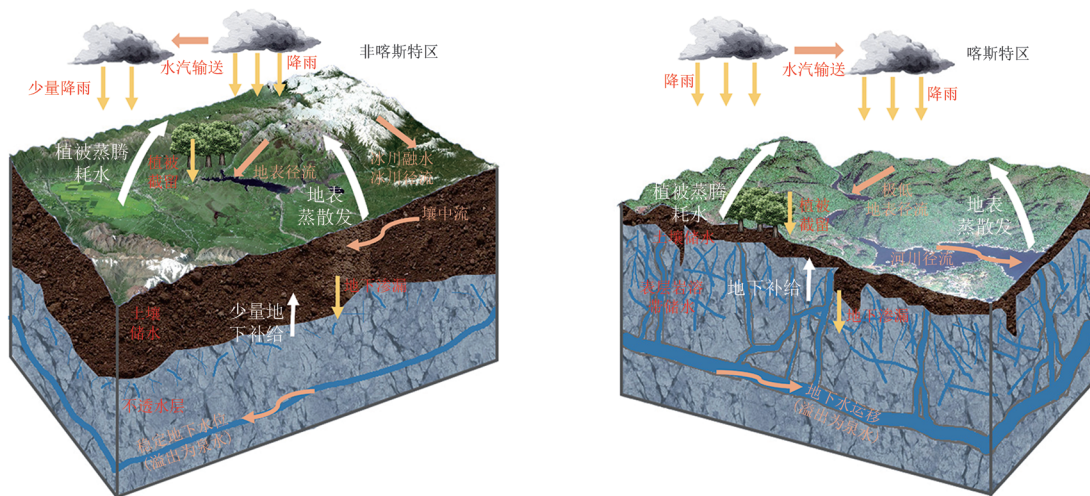


图3 非喀斯特区与喀斯特区水文循环

Fig. 3 Schematic diagrams of the hydrological cycles in the non-karst and karst regions

2.2 喀斯特区水源涵养功能

区别于非喀斯特区域,喀斯特区的水源涵养功能除关注地表功能外,同时需要关注地下结构带来

的水源涵养功能。

储存功能。植被林冠、枯枝落叶层及土壤层在森林水资源储存中发挥关键作用。然而,诸多研究

表明,喀斯特地区的植被覆盖率和生物量普遍较低。例如,黔中高原喀斯特次生林的生物量约为 $89\text{ t/hm}^{2[49]}$,茂兰喀斯特顶级群落常绿阔叶林的生物量为 $202.15\text{ t/hm}^{2[50]}$,均显著低于非喀斯特地区的生物量水平。喀斯特地区植被冠层截留率($1.1\%\sim 29.4\%$)和枯落物持水能力($10.63\sim 17.88\text{ t/hm}^2$)也较低,仅占非喀斯特地区的 $4.37\%\sim 69.18\%$ 和 $71.32\%\sim 82.85\%$ ^[51-53]。对土壤层而言,由于喀斯特土壤总量少,所以土壤水总量少,可供植被利用的水更少。环江站对深层(66 cm)和浅层(35 cm)土壤含水量研究^[54]表明,土壤越薄的地方其持水和保水能力越小。喀斯特地区表土和表层岩溶带滞蓄水能力(约为40 mm)远比湿润的非喀斯特地区土壤蓄水能力小(120 mm左右)^[55]。普定站定量研究喀斯特坡地不同岩土结构下土壤植被可利用水量,尽管坡地土壤植被可利用有效水含量白云岩、石灰岩和黄壤坡地土壤相当,但受限于岩土结构和土壤总量。白云岩坡地和石灰岩坡地土壤植被可利用水总量远低于黄壤坡地,平均仅为1/5,同时呈极强的异质性^[56]。因此,喀斯特区地表水源涵养能力总体低于非喀斯特地区。

喀斯特大量的溶蚀地下空间为水源涵养提供可能。广泛分布的碳酸盐岩具有强烈的可溶蚀性,在长期的水岩作用下,岩溶管道裂隙发育,密集裂隙和管道网络系统,有助于快速汇水和导水,同时雨水沿地下裂缝管道运动,促使沿节理发育的垂直裂缝不断加宽加深,最终形成洞穴系统或地下河道,进一步形成地下空间网络结构,为地下水资源的储存提供物理空间。可将地下空间水源涵养分为3部分:一部分位于包气带上部裂隙广泛发育的表层岩溶带,一部分是包气带的垂直管道带和水平管道带,还有一部分是侵蚀基准面的地下含水层。我国西南喀斯特地区降水量丰富,为 $800\sim 1\,600\text{ mm}^{[57]}$,多年平均降雨量约为 $1\,450\text{ mm}$,为地下储水提供充足的水源。有研究^[42]指出,约有98%的降雨进入土壤-表层岩溶带重新分配,在喀斯特地区地表地下的双重水文结构下,大多数降雨通过石灰岩裂隙和裂缝输送到地下。表层岩溶带在其中发挥重要的储存和传输作用,也能在一定程度上提供植被耗水。大量的水分可以储存在岩溶裂隙和导管孔隙中,含水量约为地下水资源的10%~12%,在一些岩溶发育特别强烈的区域,其储水比例能达到30%,具有重要的水资源储存能力,也是区别于非喀斯特地区的储存和利用水资源的核心区域^[44]。其次,不同喀斯特区域包气带厚度可达 $50\sim 1\,000\text{ m}$,除表层岩溶带外,还大量发

育垂直管道带和水平管道带,据估算^[58],包气带渗流可占年总径流量的43%~62%,具有强大的储水容量。据中国地质调查局发布的西南岩溶地下水调查报告,该区发育2 763条地下河,枯季流量达470亿 m^3/a ,西南岩溶区地下水总资源量达1 620.57亿 m^3/a ,可开发利用量达534.40亿 m^3/a ,等同于黄河的径流量,地下水资源储存和调蓄量巨大。

调节功能。与非喀斯特地区以地表为主的水文调节不同,喀斯特地区的水文调节功能除地表植被、土壤调节功能外,由地下表层岩溶带和包气带、管道裂隙等构成的多界面结构对径流的调节功能更为重要,尤其是存在高密度裂隙发育的表层岩溶带,裂隙密度越大,越发育的地带其储存效应和调节能力更强。主要表现为改变水流路径、参与水流调节和洪峰调蓄3个方面。2007—2010年,贵州普定喀斯特坡地地表径流研究^[42]结果表明,喀斯特坡地的地表径流系数普遍低于5%,明显区别于非喀斯特地区(平原区域22%^[59],黄土高原4%~17%^[60])。近10 a地表径流数据^[61]显示,喀斯特坡地降雨侵蚀力阈值为50 mm,远高于非喀斯特坡地10 mm阈值。原因在于喀斯特表层岩溶带的发育往往使石灰岩坡地存在包含地表、地下排水系统在内的双重水文结构,增加地表径流的阈值和径流的产生机制,只有当表层岩溶带蓄满时才产生地表径流^[62]。人工示踪试验^[63]也表明,降雨时雨水填充至地下管道网络,而旱季时部分管道保持干燥,雨季时流域的水流路径明显增加。据估算^[64],法国东南部非饱和带含水量季节性变化高达3%,说明储水极大可能参与喀斯特季节性水流调节。因此,喀斯特地下结构在改变水流路径和参与水流调节过程中起到关键作用。不仅如此,喀斯特地下结构在洪峰调蓄中同样重要。桂林狮子岩地下河系统的调蓄系数平均值为0.53,说明地下总库容中每年有53%的水量可以得到调蓄或更新,且表层岩溶带水存在明显的滞后性,随降雨量减少而增大,中雨比大暴雨滞后时间长2 d^[65],显著高于非喀斯特地区,证实喀斯特地下结构强大的储存和调蓄能力。

供给功能。从联合国2022年和2024年发布的世界水发展报告^[66-67]来看,全球淡水使用量正在以每年略低于1%的速度增长,加剧全球供水压力,而地下水资源具有巨大的社会、经济和环境效益。据估算^[68],喀斯特区为25%的世界人口提供生活用水,中国西南喀斯特地下水可开采资源量为 $534.4\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}^{[69]}$ 。喀斯特水源涵养的供给功能可按地表、近地表和地下划分为3个部分,地表土壤水和地表河流供给功能和非喀斯特地区一样。近地表主要指土壤以下包气

带上部表层岩溶带部分孔、洞、裂隙广泛发育部分。这部分水可以储存降水,也可以将储存水提供给地表植被利用,同时也可以局部隔水层部位补充地表河。表层岩溶带储水通过渗漏形成表层岩溶泉,其中有 72.1% 来自夏季降水储存,有 21.9% 来自冬季降水储存^[70]。已有研究^[71]表明,喀斯特坡地植被水分利用不仅来源于土壤水,也来源于表层岩溶带水,在植被生长的中晚期还使用更多的表层岩溶带水,氢氧同位素工作计算地下水对植物蒸腾的相对贡献时发现,在旱季时植物吸收的地下水更多,旱季蒸腾用水有 49% 来源于地下水,雨季占 28%。

喀斯特地下水源涵养供给功能主要体现在表层岩溶带的植被水分供给、地表水的侧向补给和地下含水层的开发利用。在土壤含水率较低的环境下,喀斯特石生优势种通过较强的根系穿透能力能够渗透岩石裂隙吸收表层岩溶带水,为植被生长提供水源,并有效抵御外部干旱压力^[72]。尤其是在旱季和植被生长的早中期,植被吸收的水分约占地下水的 62%,雨季占 41%^[73],对地下水的利用率达 53.1%~79.0%^[74]。值得注意的是,地下水系统并非封闭状态,水流通常沿着管道、裂隙等通道向外渗透补给地表水,且地下水排放产生河流基流,对维持季节性低流量和干旱期间河流流量具有重要作用^[75]。处于饱和带(岩溶含水层枯水期地下水位以下的地带^[35])的深层地下水进一步影响地下水的储存与开发利用。在没有天然补给量的情况下,滇东断陷盆地南洞岩溶地下河在 120 d 内消耗非饱和带 $4\,503.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水资源调蓄量,占此地下水资源储存量的 12.65%^[76]。随着地下深层水资源被消耗,降雨优先补给该含水层。地下含水层水资源主要通过水井和岩溶泉供给工农业利用,且深层地下水的补给对地下生物栖息地水资源的维持具有关键作用。地下包气带和含水层中的特有地下生物,如盲鱼、盲蛛甲壳类、腹足类等多种类型的地下动物种群^[77],构成部分或完全依赖于地下水的生态系统(GDEs-地下水依赖型生态系统),并受到气候变化、地下水水量和水环境变化的影响。

3 喀斯特水源涵养研究现状与存在问题

喀斯特水源涵养的研究同样经历从定量分析到综合模型评估的发展过程。在早期的实测研究中,研究者通过计算降水量与蒸发量之差,林冠层、枯枝落叶层、土壤层截留量或结合水资源公报统计数据^[3,78-79],从物质量和价值量 2 个角度初步对喀斯特

水源涵养进行量化评估。随着研究的深入,综合模型评估逐渐成为主流方法,主流模型包含 InVEST 模型和 SWAT 模型等,这些模型能够在不同尺度上评估水源涵养功能。例如,在景观尺度上,比较不同石漠化区的水源涵养差异认为,潜在石漠化和轻度石漠化区水源涵养功能较好^[80]。在区域尺度上,研究者通常集中使用模型计算水源涵养量、时空变化、驱动因素及与其他生态系统服务的权衡协同效应。如有学者^[81]研究发现,喀斯特水源涵养量总体呈下降趋势,且下降速度是非喀斯特地区的 1.59 倍,空间差异与降水量的空间分布密切相关;高江波等^[82]计算三岔河流域水源涵养量并分析与土壤侵蚀的空间权衡关系发现,随植被覆盖度的增加二者间空间权衡度逐渐减小。另有学者^[6]指出,喀斯特区和非喀斯特区的产水量并未表现出显著差异,但不同岩性地貌区非喀斯特、亚喀斯特、纯喀斯特 3 种不同景观单元水源涵养能力呈逐渐增强趋势^[83]。

其原因一部分源于模型的计算原理为水量平衡法,该方法以降水量和蒸散发为主要计算模块,忽视喀斯特区与非喀斯特区在植被、土壤截留储水、径流、补给等水文过程调节等方面的差异,因此水源涵养也应有所差别。尽管现有的模型能提供某种程度的水源涵养评估,但其在喀斯特地区的适用性仍存在一定局限性,尤其是在地下结构的认识方面,往往忽视喀斯特地貌中复杂的裂隙、溶洞系统,导致对地下水流路径和水量的估算存在偏差。部分学者尝试将不同模型的优势相结合,利用 SWAT-InVEST 耦合模型来评估喀斯特水源涵养^[84],但研究多侧重于生态系统服务功能的权衡与协同管理,而对水源涵养量的精确计算仍存在不足;也有学者^[85]根据喀斯特地区的径流特点,结合喀斯特地貌形态和地下水补给排泄特征改进 InVEST 模型计算典型流域水源涵养的时空格局,评估结果的可信度相较之前有所提高,但研究尺度有限,且均认为对内在结构的认知深度直接影响模型输出的准确性。

近年来研究发现,喀斯特地下结构差异对产流汇流特征及水分配具有重要作用,岩土结构显著影响坡地土壤和表层岩溶带土壤水文过程和储水能力。例如,不同土壤厚度对地表水、土壤水和地下水的产流和响应具有显著影响,土层薄更容易形成径流,与表层岩溶带之间有更快速的水文连通性^[54],基岩裸露样地的土壤水储量高于土壤浅薄样地^[56],坡地基岩出露率越高其地表径流越小^[61]。地质条件同样影响产汇流过程,顺层坡比逆层坡更容易产生地表径流和土壤侵蚀,地下径流则相反^[86];表层岩溶带的

发育程度也对泉流量的响应速度和幅度有显著影响,发育程度高的岩溶带具有更高的储水能力和更快的水文连通性,泉流量对降雨的响应更迅速且幅度更大^[87]。研究^[88]表明,喀斯特坡地表层岩溶带的平均径流系数为31.2%,远高于壤中流(3.8%)和地表径流(通常低于5%)的径流系数。这些研究成果为深入理解地下结构对水文过程的影响提供重要线索。同样,针对地下水文过程模型也取得新进展,例如,有学者^[89]建立Darcy-Navier-Stokes耦合数学模型来研究不同岩溶裂隙对地下水流的影响,或改进地下水补给模型(groundwater recharge modeling)以便更精准计算非饱和带和地表水体对饱和带水的补给量^[90]。SWAT(V2012)模型与其他模型耦合建模也逐渐成为研究热点,通过将地下结构分层,引入比例系数计算地下对流域出口流量的贡献,以此提高地下径流模拟精度^[91-92],新版本SWAT+耦合其他模型还能更好展现流域交互过程^[93],但现今未在喀斯特地区实施。此外,中国科学院地理所何洪林研究组近期开发的基于过程的生态系统服务评估模型(CEVSA-ES)^[94],进一步考虑生态系统服务之间的相互联系。这些新进展为深化对喀斯特地下水文过程的理解,并提高对其动态特征和水文机制的精准表征提供新的思路。

目前,喀斯特地下水源涵养的研究仍显薄弱,缺乏系统性的研究和实测数据支撑,使得针对拥有复杂下垫面的喀斯特地区水源涵养的有效评估方法仍缺乏,现有的研究大多集中在量化地下结构对径流、补给、调蓄等水文过程的影响,虽然有助于提升对喀斯特地下水文过程的认识和理解,但依然无法有效评估复杂二元三维水文地质结构下的水源涵养。对于喀斯特地区而言,地下结构和地下水文过程与非喀斯特地区的差异显著,现有模型往往忽略喀斯特地区独特的径流特点,也未充分考虑地下结构对水源涵养、储存、调节和供给功能的影响。使得现有评估模型的计算结果缺乏可信度和说服力,且难以进行验证。因此,未来研究应聚焦于深化对喀斯特地下结构和水文过程的认知,改进现有模型,从而提升评估的准确性和可靠性。

4 研究展望与建议

1)加强喀斯特地下结构的定量研究、地下水文过程机理研究与喀斯特地表地下水源涵养功能探讨,支撑喀斯特地下水源涵养研究结构信息。利用高精度地球物理探测技术,如探地雷达、高密度电法探测、三维地震探测、地球物理成像等,深入定量研究喀斯特地貌的地下结构,加密探测喀斯特表层岩溶带关键结

构信息参数(裂隙率、厚度与分布情况等),结合水文过程分析地下水源涵养的储存和调蓄能力。尤其是通过长期野外观测数据,探讨喀斯特地下结构在水文循环中的作用,特别是其对降雨入渗、地下径流和水资源补给的影响。量化喀斯特地下结构对水源涵养的贡献,为水资源可持续利用提供科学依据。

2)改进模型并发展新的评估方法。现有模型未考虑地下结构对水源涵养储存、调节和供给功能的影响,使得计算结果出现偏差,不适用于喀斯特地区,需针对喀斯特地下结构特点和储水层空间发育规律,改进模型或补充完善模型地下水源涵养评估模块。基于喀斯特长期流域实测数据结合地下水文过程模型计算方法,在现有综合评估水源涵养模型的基础上开发更精确的水文模型,优化模型参数,提升预测精度,同时针对不同类型的喀斯特地区提出差异化的水源涵养策略。

3)提升对喀斯特地下水源涵养重要性的认识与重视。喀斯特水源涵养与非喀斯特地区的水源涵养存在较大差异,尤其表现为3点:土壤水源涵养能力弱,总量小;地下空间水源涵养能力强,总量大;表层岩溶带作为连接地表、地下关键地带,对水资源储存和调蓄能力强。目前《全国主体功能区规划》(2010年)将贵州省列为桂黔滇石漠化防治生态功能区,提出加强水土保持功能。《全国生态功能区划》(2015年修编版)将贵州省划分为西南喀斯特土壤保持重要区,其中土壤保持功能极重要,水源涵养和生物多样性功能较重要。在目前水资源紧张和气候变化日益严峻的背景下,水源涵养能力直接关系到可利用水资源的供应能力,对区域经济社会高质量发展至关重要,同土壤保持功能同等重要,相辅相成。因此,从整体生态系统服务的角度来看,水源涵养功能是喀斯特地区当前更为优先考虑的重点,建议提高喀斯特地区水源涵养的重要性等级和重视程度。

参考文献:

- [1] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, 2(2): e1500323.
- [2] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003(2): 189-196.
XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003(2): 189-196.
- [3] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.

- OUYANG Z Y, ZHU C Q, YANG G B, et al. Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (21): 6747-6761.
- [4] 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[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- GONG S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7):2455-2462.
- [5] 贾良清,欧阳志云,赵同谦,等.安徽省生态功能区划研究[J].生态学报,2005,25(2):254-260.
- JIA L Q, OUYANG Z Y, ZHAO T Q, et al. The ecological function regionalization of Anhui Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2):254-260.
- [6] ZHANG S H, XIONG K N, QIN Y, et al. Evolution and determinants of ecosystem services: Insights from South China karst [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133: e108437.
- [7] WILM H G. The effect of timber cutting in a lodgepole-pine forest on the storage and melting of snow [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, 25: 153-155.
- [8] 片冈顺,王丽.水源林研究述评[J].水土保持科技情报,1990(4):44-46.
- PIAN G S, WANG L. Review of research on watershed forests [J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1990(4):44-46.
- [9] 高成德,余新晓.水源涵养林研究综述[J].北京林业大学学报,2000,22(5):78-82.
- GAO C D, YU X X. Review on researches of water conservation forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5):78-82.
- [10] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [C]. Washington D C: Island Press, 1997:237-252.
- [11] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387:253-260.
- [12] 傅斌,徐佩,王玉宽,等.都江堰市水源涵养功能空间格局[J].生态学报,2013,33(3):789-797.
- FU B, XU P, WANG Y K, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3):789-797.
- [13] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102:51-64.
- [14] XU F, ZHAO L L, JIA Y W, et al. Evaluation of water conservation function of Beijiang River basin in Nanling Mountains, China, based on WEP-L model [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: e108383.
- [15] 左其亭,王骄阳,杨峰,等.水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J].水利水电科技进展,2022,42(2):13-19.
- ZUO Q T, WANG J Y, YANG F, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2):13-19.
- [16] BROCKERHOFF E G, BARBARO L, CASTAGNEYROL B, et al. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(13):3005-3035.
- [17] 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[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
- LÜ Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15):5191-5196.
- [18] ENZMINGER T L, SMALL E E, BORSA A A. Sub-surface water dominates sierra Nevada seasonal hydrologic storage [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21):11993-12001.
- [19] SUN S L, XIANG W H, OUYANG S, et al. Higher canopy interception capacity of forests restored to the climax stage in subtropical China [J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(3):e14538.
- [20] FAN Y, LI H, MIGUEZ-MACHO G. Global patterns of groundwater table depth [J]. *Science*, 2013, 339 (6122): 940-943.
- [21] ZUO L Y, GAO J B. Dynamic analysis of the determinants of trade-off and synergy between karst soil loss and water yield with integration of geomorphological differentiation [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: e108754.
- [22] LI P, XIE Z, YAN Z H, et al. Assessment of vegetation restoration impacts on soil erosion control services based on a biogeochemical model and RUSLE [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: e101830.
- [23] 阎树文,王斌瑞,赵开国.广西大明山林区不同森林类型水源涵养机能的计量化研究[J].林业科技通讯,1982(9):15-18.
- YAN S W, WANG B R, ZHAO K G. Quantitative study on water conservation function of different forest types in Daming Mountain forest region of Guangxi [J]. *Forest Science and Technology*, 1982(9):15-18.
- [24] 王勤,张宗应,徐小牛.安徽大别山区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2003,17(3):59-62.
- WANG Q, ZHANG Z Y, XU X N. Soil properties and water conservation function of different forest types in Dabieshan district, Anhui [J]. *Journal of Soil Water Con-*

- servation, 2003, 17(3):59-62.
- [25] 郭晋川, 梁宏温, 潘伟, 等. 两种森林集水区径流量及其径流过程初步分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 55-59.
- GUO J C, LIANG H W, PAN W, et al. Preliminary study on the runoff and its processes of two kinds of forest watersheds[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6):55-59.
- [26] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学, 2002, 24(6):68-73.
- DENG K M, SHI P L, XIE G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits [J]. Resources Science, 2002, 24 (6) : 68-73.
- [27] 高俊峰, 闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(2):194-200.
- GAO J F, WEN Y H. Impact of land use change on runoff of Taihu basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2):194-200.
- [28] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):183-189.
- PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1):183-189.
- [29] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的InVEST模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5):381-388.
- WANG X M, LIU X C, LONG Y X, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan City based on improved InVEST[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5) : 381-388.
- [30] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. 环境科学研究, 2018, 31:1010-1018.
- QIAO F, FU G, XU X Q, et al. Assessment of water conservation function in the Three-River Headwaters Region [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6):1010-1018.
- [31] 王耀鑫, 高家勇, 张玉珊, 等. 喀斯特流域水源涵养功能时空分异及其对景观格局的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):169-178.
- WANG Y X, GAO J Y, ZHANG Y S, et al. Spatial and temporal differentiation of water conservation function in karst basin and its response to landscape pattern[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):169-178.
- [32] BARCLAY J R, STARN J J, BRIGGS M A, et al. Improved prediction of management-relevant groundwater discharge characteristics throughout river networks[J]. Water Resources Research, 2020, 56(10):e2020WR028027.
- [33] FORD D, WILLIAMS P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. New York: Wiley, 2007.
- [34] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5):41-43.
- YUAN D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the south-west China[J]. World Sci-Tech R & D, 1997, 19(5):41-43.
- [35] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- YUAN D X. Glossary of Karstology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [36] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, 20(3):302-308.
- JIANG Z C, YUAN D X. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1999, 20(3):302-308.
- [37] 高强山, 彭韬, 付磊, 等. 探地雷达技术对表层岩溶带典型剖面组构刻画与界面识别[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5):759-765.
- GAO Q S, PENG T, FU L, et al. Structure description and interface recognition on epikarst typical profiles using GPR technology [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38 (5) : 759-765.
- [38] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1999, 29(5):441-449.
- WANG S J, JI H B, OUYANG Z Y, et al. Preliminary study on the weathering of carbonate rocks into soil [J]. Scientia Sinica (Terrae), 1999, 29(5):441-449.
- [39] 彭韬, 邢学刚, 蔡先立, 等. 保水剂与活性炭改良白云岩石漠化坡地土壤促进植物生长的盆栽试验研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5):525-532.
- PENG T, XING X G, CAI X L, et al. Pot experiment research on the effects of water retaining agent and activated carbon as soil amendments for plant growing on dolomitic rocky desertification slopes [J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5):525-532.
- [40] 王发, 聂云鹏, 陈洪松, 等. 典型喀斯特白云岩小流域土壤-表层岩溶带厚度空间异质性特征[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1):306-314.
- WANG F, NIE Y P, CHEN H S, et al. Spatial heterogeneity characteristics of soil-epikarst thickness in a typical karst dolomite small watershed [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1):306-314.
- [41] LUO Z D, LIAN J J, NIE Y P, et al. Improving soil thickness estimations and its spatial pattern on hillslopes in karst forests along latitudinal gradients[J]. Geoderma, 2024, 441:e116749.
- [42] PENG T, WANG S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst

- slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90: 53-62.
- [43] KHAN A A, ZHAO Y J, KHAN J, et al. Spatial and temporal analysis of rainfall and drought condition in southwest Xinjiang in northwest China, using various climate indices[J]. Earth Systems and Environment, 2021, 5(2): 201-216.
- [44] JACOB T, CHERY J, BAYER R, et al. Time-lapse surface to depth gravity measurements on a karst system reveal the dominant role of the epikarst as a water storage entity[J]. Geophysical Journal International, 2009, 177(2): 347-360.
- [45] 于维莲, 董丹, 倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(2): 25-30.
- YU W L, DONG D, NI J. Comparisons of biomass and net primary productivity of karst and non-karst forests in mountainous areas, southwestern China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(2): 25-30.
- [46] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- ZHANG X B, WANG S J, CAO J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 274-279.
- [47] TIAN Y C, BAI X Y, WANG S J, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Guizhou Province, southern China[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(1): 25-38.
- [48] CAI L B, CHEN X, HUANG R C, et al. Runoff change induced by vegetation recovery and climate change over carbonate and non-carbonate areas in the karst region of south-west China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: e127231.
- [49] 刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 等. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.
- LIU C C, WEI Y F, LIU Y G, et al. Biomass of canopy and shrub layers of karst forests in Puding, Guizhou, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 698-705.
- [50] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 358-367.
- ZHU S Q, WEI L M, CHEN Z R, et al. A preliminary study on biomass components of karst forest in Maolan of Guizhou Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1995, 19(4): 358-367.
- [51] 曹恭祥, 王云霓, 王彦辉, 等. 间伐强度对华北落叶松林穿透雨和树干茎流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 79-85.
- CAO G X, WANG Y N, WANG Y H, et al. Effects of thinning intensity on throughfall and stemflow of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3): 79-85.
- [52] 宫联沙, 杨静, 戴全厚, 等. 不同降雨类型下植被剔除对灌木林降雨再分配特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 315-322.
- GONG L S, YANG J, DAI Q H, et al. Effects of vegetation exclusion on rainfall redistribution characteristics of shrubs under different rainfall types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 315-322.
- [53] 周秋文, 罗雅雪, 罗娅, 等. 喀斯特灌木林枯落物持水特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 14-20.
- ZHOU Q W, LUO Y X, LUO Y, et al. Water holding characteristics of litter in karst shrubs[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 14-20.
- [54] ZHANG J, CHEN H S, FU Z Y, et al. Effect of soil thickness on rainfall infiltration and runoff generation from karst hillslopes during rainstorms[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(4): e13288.
- [55] 陈喜, 张志才. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 356-364.
- CHEN X, ZHANG Z C. An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 356-364.
- [56] LI Y Q, WANG S J, PENG T, et al. Hydrological characteristics and available water storage of typical karst soil in SW China under different soil-rock structures[J]. Geoderma, 2023, 438: e116633.
- [57] 杜军凯, 仇亚琴, 李云玲, 等. 1956—2016年中国年降水量及其年内分配演变特征[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 182-196.
- DU J K, QIU Y Q, LI Y L, et al. Evolution characteristics of the interannual and intra-annual precipitation in China from 1956 to 2016[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 182-196.
- [58] JUKIĆ D, DENIĆ JUKIĆ V. Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3/4): 302-315.
- [59] RAWAT K S, SINGH S K. Estimation of surface runoff from semi-arid ungauged agricultural watershed using SCS-CN method and earth observation data sets[J]. Water Conservation Science and Engineering, 2017, 1(4): 233-247.
- [60] ZHENG H Y, MIAO C Y, ZHANG G H, et al. Is the runoff coefficient increasing or decreasing after ecological restoration on China's Loess Plateau? [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3): 333-343.

- [61] 焦锡桦,彭韬,李社红,等.喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探[J].水土保持学报,2023,37(5):57-63.
JIAO X H, PENG T, LI S H, et al. Preliminary research on the threshold of erosive rainfall on karst slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 57-63.
- [62] WANG S, FU Z Y, CHEN H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: e124370.
- [63] BARNA J M, FRYAR A E, CAO L, et al. Variability in groundwater flow and chemistry in the Houzhai karst basin, Guizhou Province, China [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2020, 26(3): 273-289.
- [64] CARRIÈRE S D, CHALIKAKIS K, DANQUIGNY C, et al. The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone: An integrated hydrogeophysical approach [J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(7): 1905-1918.
- [65] 卢丽,邹胜章,赵一,等.桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应[J].水文地质工程地质, 2022, 49(5): 63-72.
LU L, ZOU S Z, ZHAO Y, et al. Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(5): 63-72.
- [66] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). The united nations world water development report 2022: Groundwater: Making the invisible visible [EB/OL]. [2024-03-31] (2024-11-10). <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1496>.
- [67] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). The united nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace [EB/OL]. [2024-03-22] (2024-11-10). <https://www.unesco.org/en/articles/united-nations-world-water-development-report-2024-water-prosperity-and-peace?hub=418>.
- [68] CHEN Z, AULER A S, BAKALOWICZ M, et al. The world karst aquifer mapping project: Concept, mapping procedure and map of Europe [J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(3): 771-785.
- [69] XIA R Y. Groundwater resources in karst area in southern China and sustainable utilization pattern [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2016, 4(4): 301-309.
- [70] DENG Y, ZHU A J, LI Y Q, et al. Groundwater recharge mechanisms in a vegetated epikarst spring catchment using water isotopes methods [J]. Carbonates and Evaporites, 2023, 38(1): e19.
- [71] BARBETA A, PEÑUELAS J. Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): e10580.
- [72] LIU W N, BEHZAD H M, LUO Z D, et al. Species-specific root distribution and leaf iso/anisohydric tendencies shape transpiration patterns across heterogeneous karst habitats [J]. Plant, Cell and Environment, 2025, 48(1): 199-212.
- [73] WU Z, BEHZAD H M, HE Q F, et al. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone karst area, southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: e126199.
- [74] 陈燕,杨慧,宁静,等.重度干旱条件下典型岩溶区植被恢复过程中植物水分利用来源和效率研究[J].生态环境学报, 2024, 33(10): 1534-1543.
CHEN Y, YANG H, NING J, et al. Plant water use sources and efficiency during vegetation restoration in typical karst area under severe drought conditions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(10): 1534-1543.
- [75] HAYASHI M, ROSENBERY D O. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water [J]. Ground Water, 2002, 40(3): 309-316.
- [76] 赵一,李衍青,李军,等.滇东断陷盆地南洞岩溶地下水系统地下河水文动态特征与资源量评价[J].地球学报, 2021, 42(3): 324-332.
ZHAO Y, LI Y Q, LI J, et al. Underground river hydrological dynamic characteristics and resource evaluation of the Nandong karst water system in east Yunnan faulted basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 324-332.
- [77] HUMPHREYS W F. Aquifers: The ultimate groundwater-dependent ecosystems [J]. Australian Journal of Botany, 2006, 54(2): e115.
- [78] 李苇洁,汪廷梅,王桂萍,等.花江喀斯特峡谷区顶坛花椒林生态系统服务功能价值评估[J].中国岩溶, 2010, 29(2): 152-154.
LI W J, WANG T M, WANG G P, et al. Value evaluation on the eco-services function of *Zanthoxylum planispinum* var. *dingtanensi* woods in Huajiang karst valley [J]. Car-sologica Sinica, 2010, 29(2): 152-154.
- [79] 凡非得,罗俊,王克林,等.桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析[J].生态学杂志, 2011, 30(4): 804-809.
FAN F D, LUO J, WANG K L, et al. Assessment and spatial analysis of ecosystem service importance in karst area of northwest Guangxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 804-809.
- [80] 张斯屿,白晓永,王世杰,等.基于 InVEST 模型的典型石漠化地区生态系统服务评估:以晴隆县为例[J].地球环境学报, 2014, 5(5): 328-338.

- ZHANG S Y, BAI X Y, WANG S J, et al. Ecosystem services evaluation of typical rocky desertification areas based on in VEST model-a case study at Qinglong Country, Guizhou Province[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(5): 328-338.
- [81] 田义超, 白晓永, 黄远林, 等. 基于生态系统服务价值的赤水河流域生态补偿标准核算[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 312-322.
- TIAN Y C, BAI X Y, HUANG Y L, et al. Ecological compensation standard accounting of Chishui River basin based on ecosystem service value[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 312-322.
- [82] 高江波, 左丽媛, 王欢. 喀斯特峰丛洼地生态系统服务空间权衡度及其分异特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7829-7839.
- GAO J B, ZUO L Y, WANG H. The spatial trade-offs and differentiation characteristics of ecosystem services in karst peak-cluster depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 7829-7839.
- [83] 夏林, 安裕伦, 姜海峰, 等. 基于 InVEST 模型的喀斯特流域水源涵养量: 以贵州省内乌江流域为例[J]. *贵州科学*, 2019, 37(1): 27-32.
- XIA L, AN Y L, JIANG H F, et al. Water conservation of karst river basins based on InVEST model: A case study of Wujiang River basin in Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 2019, 37(1): 27-32.
- [84] AZIMI M, BARZALI M, ABDOLHOSSEINI M, et al. Examining the impact of rangeland condition on water conservation by using an integrated modelling approach[J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(13): 3711-3719.
- [85] 刘佳, 肖玉, 张昌顺, 等. 基于地表水与地下水分割校正的漓江流域水供给服务时空格局研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(15): 6099-6116.
- LIU J, XIAO Y, ZHANG C S, et al. Spatio-temporal patterns of water supply service in the Li River basin based on correction method of surface water and groundwater partitioning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6099-6116.
- [86] GAN F L, HE B H, QIN Z Y. Hydrological response and soil detachment rate from dip/anti-dip slopes as a function of rock strata dip in karst valley revealed by rainfall simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: e124416.
- [87] ZHANG Z C, CHEN X, CHENG Q B, et al. Storage dynamics, hydrological connectivity and flux ages in a karst catchment: Conceptual modelling using stable isotopes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(1): 51-71.
- [88] WANG S, YAN Y, FU Z Y, et al. Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hill-slope in a peak-cluster depression region[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: e127370.
- [89] LI X, KE T T, WANG Y Q, et al. Hydraulic conductivity behaviors of karst aquifer with conduit-fissure geomaterials[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: e30.
- [90] WAN W H, DÖLL P, MÜLLER SCHMIED H. Global-scale groundwater recharge modeling is improved by tuning against ground-based estimates for karst and non-karst areas[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(3): e2023WR036182.
- [91] WANG Y F, SHAO J L, SU C T, et al. The application of improved SWAT model to hydrological cycle study in karst area of South China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): e5024.
- [92] GENG X X, ZHANG C P, ZHANG F E, et al. Hydrological modeling of karst watershed containing subterranean river using a modified SWAT Model: A case study of the Daotian River basin, southwest China[J]. *Water*, 2021, 13(24): e3552.
- [93] ZHANG J P, LIAN Y Q, DUAN Q Y, et al. Coupled hydrologic and hydraulic modeling for a lowland river basin in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 649: e132470.
- [94] NIU Z E, HE H L, PENG S S, et al. A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(6): e2020MS002451.