

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

王周锋, 王文科, 李俊亭

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

WANG Zhoufeng, WANG Wenke, and LI Juntong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究

An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the HuaiBei Plain

顾南, 张建云, 刘翠善, 王振龙, 王国庆 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 15-24

黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River

李云凤, 王文科, 王国庆, 刘翠善, 郑昊昌, 马稚桐 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 10-19

西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 赵富波, 孙彭成, 宋燕妮, 邱临静 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 20-30

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012042

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

王周锋^{1,2}, 王文科^{1,2}, 李俊亭^{1,2}

(1. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 地表蒸散发是地下水-地表水-土壤-植物-大气连续体(GSSPAC)中水分和能量传输的纽带,也是研究陆面水量平衡的关键环节。受气象条件、地质地貌、水文地质条件和人类活动的影响,蒸散发过程机理复杂、时空变异性大,是目前水循环研究的热点之一。在大量文献调研的基础上,本文综合分析了国内外学者围绕蒸散发水源组成和测定方法方面取得的研究成果,得到以下认识:(1)蒸散发的水分来源及其组成逐渐明确,地表水(河流、湖泊等)、土壤水、地下水和植被截留的水分是蒸散发主要的水分来源;(2)蒸散发测定方法可分为水文学方法、植物生理学方法、微气象学方法和同位素方法等,这些方法在研究蒸散发过程和驱动机制等方面具有优势;(3)不同蒸散发测定方法适用的时空尺度不同,可以综合多种测定方法获取更为可靠的蒸散发数据。根据蒸散发测定研究的现状,下一步应该加强 GSSPAC 系统中水分运移耦合机制的研究,并加强多学科交叉研究,进一步厘清水分、能量和物质循环和流动的相互作用机制。另外,通过不同气候和地貌单元上监测网络的建设,可以获得多重影响因素交互下的蒸散发变化规律与基础数据,以期为大尺度、精细化蒸散发研究提供支撑。

关键词: 蒸散发;水循环;水分来源;测定方法

中图分类号: P641.131

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0001-09

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

WANG Zhoufeng^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, LI Junting^{1,2}

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Evapotranspiration is the link of water and energy transfer in the continuum of groundwater, surface water, soil, plants and the atmosphere (GSSPAC). Evapotranspiration is also a key in the study of land surface water balance. Affected by meteorological conditions, geological landforms, hydrogeological conditions and human activities, the mechanism of evapotranspiration process is complex, and its temporal and spatial variability is quite large. Based on many published journal papers, this paper comprehensively analyzes water resources and observation methods for evapotranspiration proposed by scholars at home and abroad. The results show that (1) surface water (rivers, lakes, etc.), soil water, groundwater and vegetation intercepted water are the major water sources of evapotranspiration. (2) The methods for measuring evapotranspiration can be divided into hydrology method, plant physiology method, micro-meteorological method and isotope method. These methods have advantages in studying the process and driving mechanism of evapotranspiration. (3) Different evapotranspiration

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406504); 陕西省重点研发项目(2020SF-425; 2019ZDLSF05-01); 国家自然科学基金青年项目(41202164)

第一作者: 王周锋(1979-), 男, 讲师, 主要从事地下水和气候变化关系研究。E-mail: wangzf@chd.edu.cn

measurement methods are suitable for different spatiotemporal scales, and more reliable evapotranspiration data can be obtained by integrating various measurement methods. According to the current situation of evapotranspiration researches, the next step is to strengthen the coupling mechanism researches of water transport in the GSSPAC system, and strengthen interdisciplinary researches to further clarify the interaction mechanism of water, energy and material cycle and flow. In addition, through the construction of monitoring network on different climate and geomorphic units, we can gain basic data of evapotranspiration variation under the interaction of multiple influencing factors, which can support large-scale and refined evapotranspiration researches.

Keywords: evapotranspiration; water cycle; water source; observation methods

蒸散发是指陆面和水体(海洋、湖泊、河流等)水分通过蒸发作用、植物体内水分通过蒸腾作用以水汽形式进入大气的过程,它是陆气系统水分和能量循环的重要的生物物理过程(图 1)^[1]。陆地蒸发过程包括水体蒸发(包括冰雪升华)、土壤蒸发以及植被表面的蒸发过程,而蒸腾过程主要是植物在光合作用过程中吸收的水分经由植物叶片气孔的散失。其中,植物蒸腾是陆面水分消耗的主要方式^[2-3]。

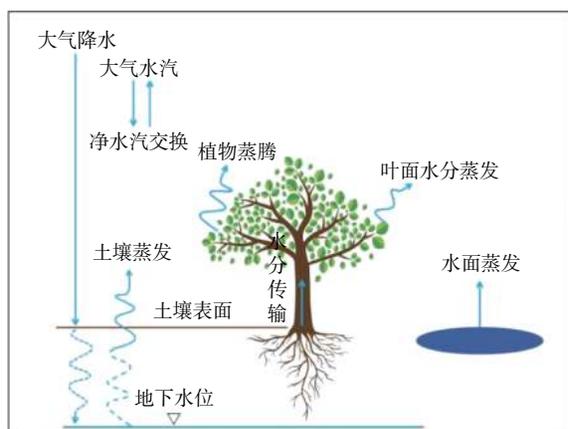


图 1 陆面的蒸散发组成 (改自 Zhang 等^[1])

Fig. 1 Evapotranspiration composition of the land surface (modified from Zhang et al.^[1])

作为最重要的水循环过程,蒸散发是联系大气圈、水圈、生物圈、土壤圈和岩石圈的重要纽带,全球陆地 60% 的降水通过蒸散发的形式进入大气^[2,4]。在干旱半干旱地区,这一比例甚至高达 95% 以上^[5]。蒸散发过程中水汽的散失以潜热形式消耗大量的能量,引起地表降温。因此,蒸散发显著影响着地球的气象和气候变化^[1]。同时,气象要素、下垫面、水分条件、土地利用方式、生态环境变化等多种要素又影响着蒸散发过程^[6]。尽管通过地面观测、遥感监测和模型估算等方法对蒸散发过程进行了大量的研究,但是仍然存在时空尺度匹配、尺度提升、精度验证、真实性检

验等很多问题没有完全解决^[7-10]。可见,清晰认识蒸散发过程与控制因素,精确测定和估算蒸散发量对于深刻认识气候变化与水循环过程、地表水量平衡、水资源开发与优化管理、农业用水调控等具有重要意义^[1,11-12]。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新报告指出,按照目前的现状,全球气温将在 2030—2050 年某个时刻升温达 1.5 °C^[13]。气温的升高加快蒸散发速率,引起大气中水汽含量增加,影响到水文循环过程,进而导致极端气候事件(如大暴雨、极端干旱等)发生的频率增加,引发严重的洪涝、泥石流等地质灾害,影响陆地生态系统和生物多样性,进一步威胁到粮食安全、水安全、人类健康和经济增长等^[13]。同时,城市化、农牧业活动以及生态工程建设等人类活动极大地影响了土地利用方式,引起地面覆盖度、反照率和地表粗糙度等生物物理性状的改变,造成地表蒸散发的显著变化^[12]。薛阳等^[14]研究表明,2001—2014 年宁夏沿黄经济区蒸散量增加了近 100 mm,主要源于耕地面积的增加。生态工程也会造成植被变绿等现象,增加了水资源匮乏区的蒸散量,加剧这些地区水资源的短缺状况。而城市化过程使得地表不透水面增加、大气中 CO₂ 浓度升高,影响到局地水循环,造成城市热岛效应、雨岛效应增强^[12]。上述这些变化显著影响了水文循环过程,导致水资源的时空格局发生改变,为水资源的可持续发展带来新的问题。因此,在气候变化和人类活动共同影响下,深化对蒸散发过程、格局和尺度变化的深入认识,有助于对水资源的合理开发利用、规划管理和优化配置。

综合而言,蒸散发的测定方法大致可分为植物生理生态学法、水文学法和微气象学法等^[6]。尽管这类测定方法只能在小尺度范围进行研究,但是其理论基础严密、数据准确可靠,同时在揭示机理机制方面具有优势。如果仪器测定方法能够与遥感大数据等有

机结合,则可为大尺度蒸散发研究提供保障。可见,通过仪器测定研究蒸散发过程是深入揭示蒸散发机理,深化蒸散发研究的重要基础。基于此,本文对蒸散发水分来源与传输过程进行了阐述,对地表蒸散发的主要测定方法和存在问题进行归纳和总结,讨论了这些方法的适用性和优缺点,在此基础上展望今后的发展方向,以期精确研究陆面蒸散发时空演化和陆面水均衡提供支持。

1 蒸散发的水分来源及其传输过程

在太阳辐射、地球引力等的推动下,地球上的水循环是一个持续的动态过程。海洋表面蒸发的水汽以大气环流方式进入陆地,然后通过降水(降雨或降雪)到达陆地表面。之后,以水汽、地表水(河流、湖泊等)、土壤水或地下水的形式存在于陆地表面,蒸散发与入渗是这几种水分动态联系的纽带。以往研究表明,陆面蒸散发主要通过水面蒸发、土壤蒸发和植物蒸腾等形式进行。特别是在干旱内陆地区,蒸散发是地表水和地下水排泄的主要形式^[15]。随着研究的深入,发现地表植被对降水也有一定的截留作用,导致在短时间内有些水分也会存留在植物表面(叶片、茎秆部位等),这部分水分不能被植物利用,也进入不了土壤或者地下水含水层,最终会通过蒸发作用以水汽形式进入大气中^[16]。陆地尺度上,这个截留量和土壤蒸发量差不多,也是陆地蒸散发的重要组成部分^[17]。

在一些地下水浅埋区,地下水通过毛细力作用进入包气带,影响到土壤层中水分的分布和植物根系生长,进而产生了水分的蒸散发^[18]。席丹等^[19]在新疆玛纳斯河流域的研究表明,绿洲带地区地下水位小于5.5 m时,地下水位埋深与日蒸散量呈负相关。Ma等^[20]通过场地实验和数值模拟研究发现,在陕北风沙滩地区地下水的极限蒸发深度约为毛细上升高度的2倍。如果这个结果具有广泛性,那么土壤的蒸发应该有一个极限蒸发深度的存在。也有研究认为,在极干旱区地下水埋深较大情况下(>200 m),极干旱气候、地热和上层土壤温度变化也会导致地下水的水分运转和蒸发现象^[21]。但是对于这种大埋深条件下的地下水蒸发研究还较少,其内在机制也不甚明确,还需要对其结果进行机制上的研究和验证。特别是,现有的研究并没有将大气环境变化和土壤、地下水之间的互馈考虑在内,在热力作用下大气的上升和下沉运动对土壤中水分的运移是否会产生影响,目前还没有

相关报道。

植物根系也可以通过蒸腾作用消耗地下水。研究发现,在干旱半干旱地区,地下水是旱柳蒸腾的重要水源,且存在一个最佳的水位埋深深度^[22]。基于地下水、土壤、植物和大气的连续性特点,刘昌明^[23]提出在土壤-植物-大气系统(SPAC)中需要考虑地下水的作用。在此基础上,杨剑锋等^[24]根据李宝庆对“四水转化”的研究成果,首次提出地下水-土壤-植物-大气连续体(groundwater aquifer-soil-plant-atmosphere continuum, GSPAC)的概念。这为地下水对地表过程的影响机理研究,以及将地下水纳入蒸散发过程提供了坚实的基础。

GSPAC系统更多是从垂向角度考虑水分的传输和运移过程。然而,地球表面受地质地貌影响,其水平高低变异性大,水分的侧向流动是一个不可忽视的要素。在大尺度蒸散发研究过程中,未将侧向地下水流考虑进去会低估陆面蒸散量20%左右^[4]。在河流和河岸之间、湖泊和湖岸之间、或者具有坡度的地形上都存在水分的侧向补给。从而产生湖泊和河岸交界带、河岸交界带,甚至地形导致的地下水浅埋区的出现,这些地区都有可能出现地下水的蒸散发作用。Wang等^[25]研究表明,河流和地下水之间存在着频繁的转换关系。由此可以看出,从空间角度看,地下水、地表水、土壤、植物和大气之间是一个互相连接的耦合单元,水分在这些系统之间通过蒸散发、入渗等形式进行着频繁转换。因此,就形成了地下水-地表水-土壤-植物-大气连续体(groundwater-surface water-soil-plant-atmosphere-continuum, GSSPAC)。GSSPAC系统内部进行着复杂的互馈活动,水分和能量在GSSPAC系统中流动,带动了C、N、P等物质循环,产生了一系列生物地球化学过程,耦合研究这个系统内部水分、物质和能量的流动对于蒸散发的研究具有重要作用。

2 蒸散发研究主要测定方法

早在200年前,科学家就认识到了蒸散发对水循环的重要性,开展了蒸散量的研究。Dalton^[26]首次发现蒸散发与气象因子关系密切,建立了基于饱和水汽压差的道尔顿蒸发定律,是近代蒸发理论创立的鼻祖。Bowen^[27]基于地表能量平衡方程提出了波文比能量平衡法,发展出了波文比能量平衡蒸散发测定系统。Swinbank^[5]提出涡度相关法,通过监测近地面物质能量输送过程、计算湍流通量获取蒸散量。基于涡

度相关法的涡度相关仪,由于其理论基础坚实,成为目前监测不同生态系统蒸散发的主要方法。Wang 等^[28]提出了通过闪烁仪进行通量观测的构想,并在 20 世纪 90 年代开始应用,这为流域尺度蒸散发研究开辟了道路。

蒸散发的研究和尺度关系密切,小到一个叶片,大到流域或全球尺度,都是其研究的范畴。地面观测、遥感监测和模型估算是目前研究蒸散发生规律的主要方式,这些方法提供了从叶片、植株、场地、流域到整个全球尺度的蒸散量研究数据。小尺度研究方面,器测法更有优势,通过直接测定植物的蒸腾量、或者土壤水分的消耗量,能够精确地获取单位植物和土壤的水分消耗量^[7]。同时,这种小尺度研究可以对监测对象及其相关要素进行精确测定,揭示蒸散发的驱动机制及其影响因素。如果研究单元扩展到公里级,甚至流域尺度或全球尺度,必须依靠遥感或者数值模型的方法。本文对目前主要的蒸散量测定方法进行了总结,系统阐明了其适用性和优缺点。

2.1 水文学方法

(1) 水均衡法

水均衡法通过计算特定时间和空间内水分的收入和支出差额,将蒸散发作为余项求出^[7]。因为不受大气环境变化的影响,水均衡法数据获取较易且计算简单,在小尺度和大尺度研究上均具有较高的适用性^[29]。通过结合 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星反演陆地水储量,水均衡法能够测算全球尺度的蒸散量,是大尺度研究陆面蒸散发的有效途径^[30]。2018 年,GRACE Follow-on 卫星发射,为进一步精细化研究全球尺度蒸散发提供了更多的可能性。

(2) 蒸渗仪法

蒸渗仪法是基于水量平衡原理,通过对装填在容器中土壤的水分进行监测,研究土壤和植物的蒸散发过程。蒸渗仪可以分为称重式和非称重式。相比于非称重式蒸渗仪,称重式蒸渗仪能够更准确地获取单位体积的蒸散量。通过建立大型的蒸渗仪,甚至可以模拟地表径流、地下水流和蒸散发过程等^[31]。蒸渗仪的优点在于可以直接测定腔体内的蒸散量,但是腔体会限制植物根系的生长,由于在桶壁会形成边界效应,水容易循着边壁入渗。研究农田蒸散发时,桶壁边界效应造成的影响较小,但是由于灌木或者乔木的根系发达,会循着水向边壁生长,此时,该研究方法测试结果就会与野外实际情况存在差异性。同时,大型蒸渗仪和称重式蒸渗仪的价格相对昂贵,安装、维修

和管护工艺复杂,在大尺度研究方面不具有优势^[7]。

长安大学在旱区水分蒸散发监测与模拟方面做了系统性工作^[32]。例如:温差条件下的蒸发模拟试验系统和咸水水面蒸发试验系统、水面蒸发试验系统的发明和改进为深入研究蒸散发的驱动机制提供了理论支撑^[33-35]。特别通过对给蒸渗仪补水的马里奥特瓶进行了全新的设计和自动化改造,研发的全自动蒸发降水计量装置为高精度、高时间分辨率测定蒸散发提供了可能^[36]。在鄂尔多斯盆地、渭河关中平原建立了水与环境野外原位试验基地,开展了大量的有关土壤蒸发、植物蒸腾、水面蒸发的机理机制研究工作,获取了大量的基础研究数据^[37-43]。

2.2 植物生理学方法

植物蒸腾过程中,经由根系吸收的水分经茎干木质部传输到叶片,并从气孔中进入大气。陆生植物吸收的水分只有约 1% 用于植物体的构成,绝大部分通过蒸腾作用散失^[44]。通过测定植物茎干部分的水分流量可以得到植物的蒸腾量^[45]。茎干液流经热脉冲法是基于热平衡原理计算茎干的液流速度,进而计算出植物蒸腾量^[46]。这种方法不受气象因子的干扰,也能够避免测定的系统误差。液流法的缺点是只能进行点上的测量,无法扩展到更大尺度进行研究。

2.3 微气象学方法

(1) 波文比能量平衡法

波文比能量平衡法是基于 Bowen^[27]提出的波文比概念发展起来的,理论基础是能量平衡原理和边界层扩散理论。核心思想是波文比等于地表能量平衡方程中的显热通量与潜热通量之比。通过测定地表以上两层空气的温度及水汽压值,在假定热量交换系数和水汽的湍流交换系数相等的前提下,将能量平衡方程与波文比表达式联立求解可得显热和潜热通量^[45]。该方法操作简单,测定参数少,对于均匀下垫面的研究方面效果较好,但是对非均匀下垫面研究会产生较大误差。

(2) 涡度相关法

涡度相关技术(Eddy Covariance, EC)测定蒸散发是通过三维风速仪、红外气体分析仪等探头测定有关物理量的脉动值与垂直风速脉动值的协方差计算该物理量的垂直湍流输送通量^[7],自 20 世纪 50 年代在澳大利亚应用以来^[47],得到广泛应用。当前,全球已经建立了 500 余个观测点,形成了覆盖全球的通量网络 Fluxnet^[48]。中国基于建立的 CERN 网络,建立了中国的 ChinaFlux,为中国不同生态系统蒸散发量的研究

提供了坚实的数据基础^[49]。涡度相关法能够进行高时间分辨率的蒸散量观测^[50]。其最大的问题是存在能量不平衡问题,该方法测定的潜热通量会有5%~20%的误差^[51]。

(3) 闪烁仪法

受空气温度和水汽浓度影响,光在空气中传播会产生折射和散射。利用大孔径闪烁仪,接受端通过测定发射端发出的光强变化计算空气的折射率,进一步计算空气温湿度参数结构函数,结合相似理论以及气象参数迭代计算显热通量^[7]。已有研究表明,闪烁仪法在非均一的复杂下垫面条件下(如林地、耕地、混合植被、城市等)均有较好的适用性^[52]。该方法可以进行公里级尺度上的蒸散量测定^[53],特别是在流域尺度上,能够进行相关的蒸散发研究^[54],可以用于蒸散量模型的验证,为开展大尺度数据融合提供了基础。

2.4 同位素方法

近年来,由于同位素技术的普及,利用同位素技术研究蒸散发受到广泛关注。特别是激光同位素技术的发展,克服了以往质谱同位素仪操控复杂、对环境要求高的缺点,为快速测定和野外实时监测提供了可能^[55]。一般认为,植物根系吸收的水分经由叶片蒸腾的过程中,水的氢氧同位素不会发生分馏,而土壤蒸发的过程会导致水的氢氧同位素分馏,这一特性为区分土壤蒸发和植物蒸腾提供了理论基础^[56]。因此,通过不同来源水分氢氧同位素的测定,还可以进行蒸散发过程中水分来源的区分^[57]。同位素方法又可以分为基于大气水分的 Keeling Plot 方法和基于土壤水同位素质量守恒及水量平衡法。Keeling Plot 方法将 Keeling^[58] 创立的 Keeling Plot 曲线原理和 Craig^[59] 建立的同位素质量守恒方程结合,通过计算蒸发水汽、蒸腾水汽和蒸散发混合水汽同位素组成求得蒸腾比例和蒸发比例,进而分别求出蒸腾量、蒸发量和蒸散量^[55]。土壤水同位素质量守恒及水量平衡法是在不考虑土壤水的侧向流,假定降水同位素进入土壤没有分馏和土壤水是活塞流的条件下,通过土壤同位素守恒和水量平衡原理建立方程求解蒸发量和蒸腾量^[60]的方法。

3 研究方向分析

蒸散发是陆气系统水分和能量循环的重要的生物物理过程,通过仪器测定蒸散量是蒸散发研究的主要方法之一。尽管仪器测定方法只能在小尺度范围进行研究,但是其理论基础严密、数据准确可靠,在揭

示机理机制方面具有优势。通过不同时间尺度和空间尺度蒸散发的研究,能够为水资源管理、气候变化、自然灾害监测以及农业灌溉等提供重要的数据支撑。文献已经大量报道了有关蒸散发测定技术与方法。这些方法为蒸散发理论和驱动机制的研究提供了重要的数据支撑,但是,上述的监测方法更多地适用于点位研究,开展流域尺度甚至更大尺度的研究,需要通过建立监测网络进行弥补。因此,将点位研究和遥感相结合可能是弥补这一短板的有效途径。

(1) 蒸散发水分运移机制的耦合研究

水分的传输涉及 GSSPAC 连续体的各个组成单元。要清晰认识水分的蒸散发过程及水分在 GSSPAC 中的耦合运移机制,需要将这些系统进行一体化研究。这就需要利用新方法、新技术对水分的传输路径和传输过程进行整体观测。例如,通过同位素技术研究植物蒸腾和水分蒸发过程,进行不同生态系统中水分的蒸散发分离,结合涡度相关等连续观测的数据,可能对揭示水分的传输与蒸散发过程有较大帮助。

(2) 不同尺度技术方法的融合研究

通过将涡度相关技术、无人机遥感技术和大尺度遥感数据相结合,不但为高精度的地表蒸散发研究提供了有力工具,同时也为空间尺度融合提供了新的思路,这可能是克服大尺度蒸散量研究中结果精度低、分辨率低和实时性差的途径之一。

(3) 蒸散发监测网络建设

蒸散发涉及地下水、地表水、土壤、植被、大气等多个组成单元,在不同的地貌单元和气候条件下,其主控因素不同,需要在典型地区建立有效的监测点,进行 GSSPAC 系统内部不同单元水分和能量的观测,厘清典型地区蒸散发的作用过程和主控因素,为开展大尺度的遥感研究提供基础资料。特别是在气象条件、地质条件和人类活动等因素的交互作用下,影响蒸散发的各个因子之间相互作用的复杂性增加,多重影响因素交互下的蒸散发变化规律研究,也需要实测的监测数据。

(4) GSSPAC 系统水分、物质和能量耦合研究

GSSPAC 系统内部包含土、水分、植物、碳、真菌、细菌等生物和非生物要素,涉及到水分、能量和 C、N、P 等物质的交互作用,需要将地质学、水文地质学、土壤学、植物学、大气科学、生态学等多学科交叉应用,厘清水分、能量和物质循环和流动的相互作用机制,为提升蒸散量时空尺度变化研究提供更加坚实的基础。

4 结论

本文在分类总结蒸散量测定方法的基础上,得出以下结论和建议:

(1)地表水(河流、湖泊等)、土壤水、地下水和植被截留的水分是蒸散发主要的水分来源,水分在 GSSPAC 系统内部通过蒸散发、入渗等形式进行着频繁转换,带动了系统内部 C、N、P 等物质的循环。加强 GSSPAC 系统中水分、物质和能量耦合研究,通过多学科交叉,能够进一步厘清水分、能量和物质循环和流动的相互作用机制。

(2)蒸散发的测定方法可以归纳为 4 大类:水文学方法(水均衡法、蒸渗仪法)、植物生理学方法(液流法)、微气象学方法(波文比能量平衡法、涡度相关法、闪烁仪法)和同位素方法。不同方法适用条件不同,综合应用多种方法对蒸散发过程进行研究,获取更为可靠的蒸散量数据,是提升蒸散发研究精度的有效途径之一。

(3)不同蒸散量测定方法适用的时空尺度不同,建议建立不同气候和地貌单元上的监测网络,综合多种测定方法获取多重影响因素交互作用下蒸散量变化规律与基础数据,为大尺度、精细化蒸散量研究提供支撑。

参考文献 (References):

- [1] ZHANG J H, BAI Y, YAN H, et al. Linking observation, modelling and satellite-based estimation of global land evapotranspiration[J]. *Big Earth Data*, 2020, 4(2): 94 - 127.
- [2] WANG K C, DICKINSON R E, WILD M, et al. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. Model development[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D20): D20112.
- [3] JASECHKO S, SHARP Z D, GIBSON J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. *Nature*, 2013, 496: 347 - 350.
- [4] MAXWELL R M, CONDON L E. Connections between groundwater flow and transpiration partitioning[J]. *Science*, 2016, 353: 377 - 380.
- [5] SWINBANK W G. An experimental study of eddy transports the lower atmosphere[M]. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1955.
- [6] 郭小娇,石建省.水分蒸散发研究国内外进展与趋势[J].地质论评,2019,65(6):1473-1486. [GUO Xiaojiao, SHI Jiansheng. Global review of the research progress and trend of evapotranspiration[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1473 - 1486. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨瀚凌,罗维均,王彦伟,等.不同尺度下蒸散量测算方法的应用及展望[J].地球环境学报,2020,11(1):31-44. [YANG Hanling, LUO Weijun, WANG Yanwei, et al. Application and prospect of evapotranspiration measuring methods under different scales[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(1): 31 - 44. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 尹剑,欧照凡,付强,等.区域尺度蒸散发遥感估算——反演与数据同化研究进展[J].地理科学,2018,38(3):448-456. [YIN Jian, OU Zhaofan, FU Qiang, et al. Review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation: inversion and data assimilation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 448 - 456. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张圆,贾贞贞,刘绍民,等.遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展[J].遥感学报,2020,24(8):975-999. [ZHANG Yuan, JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(8): 975 - 999. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LI X, LIU S M, LI H X, et al. Intercomparison of six upscaling evapotranspiration methods: from site to the satellite pixel[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(13): 6777 - 6803.
- [11] XU Y, XU Y P, WANG Y F, et al. Spatial and temporal trends of reference crop evapotranspiration and its influential variables in Yangtze River Delta, Eastern China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(3/4): 945 - 958.
- [12] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].干旱区研究,2020,37(1):26-36. [LI Xiaoyuan, YU Deyong. Progress on evapotranspiration estimation methods and driving forces in arid and semiarid regions[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 26 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [13] MASSON-DELMOTTE, ZHAI P, PÖRTHNER H O, et al. Global warming of 1.5 °C[R]. 2018.
- [14] 薛阳,金晓媚,朱晓倩.宁夏沿黄经济区蒸散量变化特征及水均衡方法验证[J].水文地质工程地质,2017,44(3):27-32. [XUE Yang, JIN Xiaomei, ZHU Xiaoqian. Variation of evapotranspiration of Ningxia

- Yellow River economic zone and the validation using water budget method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 等. 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 55 – 64. [ZHU Xiaoqian, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 55 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [16] MIRALLES D G, BRUTSAERT W, DOLMAN A J, et al. On the use of the term “evapotranspiration” [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2020WR028055.
- [17] WEI Z, YOSHIMURA K, WANG L, et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(6): 2792 – 2801.
- [18] 杨建锋, 李宝庆, 刘士平, 等. 地下水对农田腾发过程作用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 45 – 49. [YANG Jianfeng, LI Baoqing, LIU Shiping, et al. Review on progress of effects of groundwater on evapotranspiration in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 45 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 席丹, 王文科, 赵明, 等. 玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 25 – 34. [XI Dan, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 25 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [20] MA Z T, WANG W K, ZHANG Z Y, et al. Assessing bare-soil evaporation from different water-table depths using lysimeters and a numerical model in the Ordos Basin, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(7): 2707 – 2718.
- [21] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 用拱棚法对极干旱区 GSPAC 水分运转的分析[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 572 – 579. [LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHANG Guobin, et al. GSPAC water movement by greenhouse method in the extremely dry area[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 572 – 579. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 许文豪, 尹立河, 贾伍慧, 等. 环境因素对毛乌素沙地旱柳树干液流的影响分析[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 102 – 108. [XU Wenhao, YIN Lihe, JIA Wuhui, et al. Impact of environmental factors on the Sap flow of willows in the Muus Sandland[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 102 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J]. *地理学报*, 1997, 52(4): 366 – 373. [LIU Changming. Study on interface processes of water cycle in soil plant atmosphere continuum[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4): 366 – 373. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨建锋, 李宝庆, 李运生, 等. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用初步研究[J]. *水利学报*, 1999, 30(7): 27 – 32. [YANG Jianfeng, LI Baoqing, LI Yunsheng, et al. Preliminary studies on groundwater effects on SPAC system in shallow groundwater field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(7): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [25] WANG W K, LI J T, WANG W M, et al. Estimating streambed parameters for a disconnected river[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(10): 3627 – 3641.
- [26] DALTON J. *Experimental Essays*[M]. USD: University of Hawaii Press, 1802: 392-395.
- [27] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779.
- [28] WANG T I, OCHS G R, CLIFFORD S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 [J]. *JOSA*, 1978, 68(3): 334 – 338.
- [29] 张珂, 鞠艳, 李致家. 金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J]. *水科学进展*, 2020, 32(2): 182-191. [ZHANG Ke, JU Yan, LI Zhijia. Satellite-based reconstruction and spatiotemporal variability analysis of actual evapotranspiration in the Jinshajiang basin, China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 32(2): 182-191. (in Chinese with English abstract)]
- [30] CHEN J L, TAPLEY B, SEO K W, et al. Improved quantification of global mean ocean mass change using GRACE satellite gravimetry measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(23): 13984 – 13991.
- [31] 赵华. 不同尺寸蒸渗仪测定农田蒸散量的对比及冠层阻力的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015. [ZHAO Hua. Measurement of crop evapotranspiration via lysimeters with different diameters

- and simulation of canopy resistance[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702 - 718. [WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 702 - 718. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 王文科, 李俊亭, 侯莉莉, 等. 温差条件下的蒸发模拟试验系统: CN202442980U[P]. 2012-09-19. [WANG Wenke, LI Junting, HOU Lili, et al. Evaporation simulation test system under temperature difference condition: CN202442980U[P]. 2012-09-19.(in Chinese)]
- [34] 王文科, 李俊亭, 王哲, 等. 咸水水面蒸发试验系统: CN202442936U[P]. 2012-09-19. [WANG Wenke, LI Junting, WANG Zhe, et al. Water surface evaporation testing system for salt water: CN202442936U[P]. 2012-09-19.(in Chinese)]
- [35] 李俊亭, 王文科, 王哲, 等. 水面蒸发试验系统: CN202443138U[P]. 2012-09-19. [LI Junting, WANG Wenke, WANG Zhe, et al. Water surface evaporation testing system: CN202443138U[P]. 2012-09-19.(in Chinese)]
- [36] 申圆圆, 李俊亭, 王文科, 等. 全自动蒸发降水计量用数据采集装置: CN203721111U[P]. 2014-07-16. [SHEN Yuanyuan, LI Junting, WANG Wenke, et al. Automatic data acquisition device for measurement of evaporation and rainfall: CN203721111U[P]. 2014-07-16.(in Chinese)]
- [37] 杨泽元. 地下水引起的表生生态效应及其评价研究——以秃尾河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2004. [YANG Zeyuan. Study on supergene ecological effect excited by groundwater and its evaluation — take Tuwei river drainage as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 赵贵章. 鄂尔多斯盆地风沙滩地区包气带水—地下水转化机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. [ZHAO Guizhang. Study on transformation mechanism of vadose zone water-groundwater in the wind-blown sand area of the Ordos basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 黄金廷. 半干旱区蒸散发对地下水变化响应机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [HUANG Jinting. The responses of evapotranspiration to the groundwater changes in the semi-arid area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 张蕾. 水面蒸发尺度效应及其与气象要素关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. [ZHANG Lei. The relationship between the water surface evaporation scale effect and its meteorological parameters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 祁泽学. 水面蒸发盐度效应及影响因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. [QI Zexue. Study on the water evaporation salinity effect and the influencing factors[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 安可栋. 旱区土气界面水热传输机理及对包气带水热运移的影响[D]. 西安: 长安大学, 2016. [AN Kedong. Mechanism of heat and water transfer at the land-atmosphere interface and its effects on the heat and water flow in vadose zone in an arid region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 李婉歆. 不同岩性饱和裸土潜在蒸发量规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2017. [LI Wanxin. The law of potential evaporation between different saturated soils[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 李合生. 现代植物生理学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006. [LI Hesheng. *Modern plant physiology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)]
- [45] NOURI H, BEECHAM S, KAZEMI F, et al. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation[J]. *Urban Water Journal*, 2013, 10(4): 247 - 259.
- [46] ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 899 - 920.
- [47] GARRATT J R, HICKS B B. Micrometeorological and PBL experiments in Australia[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 50(1/2/3/4): 11 - 29.
- [48] BALDOCCHI D. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems[J]. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26.
- [49] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 903 - 917. [YU Guirui,

- ZHANG Leiming, SUN Xiaomin. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX)[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903 – 917. (in Chinese with English abstract)
- [50] WILSON K B, HANSON P J, MULHOLLAND P J, et al. A comparison of methods for determining forest[J]. *Australian Journal of Botany*, 2001, 56(1): 153 – 168.
- [51] FOKEN T. The energy balance closure problem: an overview[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1351 – 1367.
- [52] ZHANG H, ZHANG H S. Comparison of turbulent sensible heat flux determined by large-aperture scintillometer and eddy covariance over urban and suburban areas[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(1): 119 – 136.
- [53] 孙根厚, 胡泽勇, 王介民, 等. 那曲地区两种空间尺度感热通量的对比分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 285 – 296. [SUN Genhou, HU Zeyong, WANG Jiemin, et al. Comparison analysis of sensible heat fluxes at two spatial scales in Naqu area[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 285 – 296. (in Chinese with English abstract)]
- [54] LIU S M, XU Z W, ZHU Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24 – 38.
- [55] 吴友杰, 杜太生. 基于氧同位素的玉米农田蒸散发估算和区分[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 127 – 134. [WU Youjie, DU Taisheng. Estimating and partitioning evapotranspiration of maize farmland based on stable oxygen isotope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(4): 127 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [56] STOY P C, ELMADANY T S, FISHER J B, et al. Reviews and syntheses: Turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(19): 3747 – 3775.
- [57] WU Y J, DU T S, DING R S, et al. Multiple methods to partition evapotranspiration in a maize field[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(1): 139 – 149.
- [58] KEELING C D. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1958, 13(4): 322 – 334.
- [59] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702 – 1703.
- [60] HSIEH J C C, CHADWICK O A, KELLY E F, et al. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration[J]. *Geoderma*, 1998, 82(1/2/3): 269 – 293.

编辑: 汪美华