

# 陆地蒸散发分割方法及影响因素研究进展

李新梦<sup>1</sup>, 狄崇利<sup>1,2</sup>, 刘琴<sup>1</sup>, 韩琼<sup>1</sup>, 王铁军<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 地球系统科学学院, 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 天津市  
环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 蒸散发(ET)是陆地水文循环的重要组成部分,蒸散发分割及其影响因素辨识在气象、水文和农业等领域均有重要意义。为研究不同蒸散发分割方法的适用性及不同时间尺度上蒸散发分割的影响因素,在总结不同蒸散发分割方法优缺点的基础上,探讨了日和季节两个时间尺度上蒸散发分割的影响因素。结果表明:水文气象和同位素方法适用于田间尺度,数值模拟方法适用于区域尺度;在日尺度上蒸腾和蒸散发比值( $T/ET$ )与太阳辐射、土壤温度及植被类型(体现在气孔导度差异)等因素呈正相关关系,在季节尺度上 $T/ET$ 与植被生长状况呈正相关关系,与降水(降水量和降水频次)及土壤含水量呈负相关关系。最后,总结了蒸散发分割研究中存在的不足,从蒸散发分割的方法和影响因素两方面提出了未来研究需要解决的关键问题,以期对蒸散发分割的研究提供参考。

**关键词:** 蒸散发; 分割方法; 太阳辐射; 降水; 土壤含水量; 植被生长状况

中图分类号: P343

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0225-08

## Research progress on methods and influencing factors of terrestrial evapotranspiration partitioning

LI Xinmeng<sup>1</sup>, DI Chongli<sup>1,2</sup>, LIU Qin<sup>1</sup>, HAN Qiong<sup>1</sup>, WANG Tiejun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Surface - Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Science and Sustainable Development of Bohai Rim, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Evapotranspiration (ET) is an integral part of the terrestrial hydrological cycle, understanding ET partitioning and the identification of its influencing factors is of great significance in the fields of meteorology, hydrology and agriculture. In order to study the applicability of different ET partitioning methods and their influencing factors on different time scales, this paper summarizes the advantages and disadvantages of the different methods for ET partitioning, and discusses their influencing factors on the daily and seasonal scales. The results show that hydrometeorological and isotope methods are more suitable for the field scale, whereas the modelling methods are more suitable for the regional scale. On the daily scale, solar radiation, soil temperature and vegetation type (especially the difference of stomatal conductance) are positively correlated with  $T/ET$ . On the seasonal scale, vegetation growth is positively correlated with  $T/ET$ , whereas precipitation (amount and frequency) and soil moisture content are negatively correlated with  $T/ET$ . Finally, the existing problems of ET partitioning are discussed and the key issues to be addressed are put forward from the aspects of methods and influencing factors of ET partitioning, so as to provide some references for the research of ET partitioning.

**Key words:** evapotranspiration (ET); partitioning method; solar radiation; precipitation; soil moisture content; vegetation growth status

收稿日期:2020-09-16; 修回日期:2020-12-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1804400);国家自然科学基金项目(U1612441)

作者简介:李新梦(1995-),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为生态水文学。

通讯作者:狄崇利(1985-),女,山东滕州人,博士,讲师,研究方向为水文学及水资源。

## 1 研究背景

陆地蒸散发 ( $ET$ ) 是全球水文循环的重要组成部分,在全球尺度上约有 73% 的陆地降水通过蒸散发返回到大气中<sup>[1]</sup>,在干旱地区甚至可以达到 90% 以上<sup>[2]</sup>。陆地蒸散发是土壤-植物-大气连续体系 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC) 能量传输的重要过程,蒸散发过程中水分汽化吸收的热量约为地表吸收太阳净辐射量的 55%,同时陆地蒸散发过程也是联系生物圈、水圈和大气圈物质交换的主要环节<sup>[3]</sup>。陆地蒸散发研究对深入了解水循环过程以及准确评估气候变化对自然生态系统的影响等具有重要科学意义<sup>[4]</sup>。

陆地蒸散发由蒸腾 ( $T$ ) 和蒸发 ( $E$ ) 两部分组成。其中,蒸腾由植物蒸腾作用实现,而蒸发则主要包括土面和冠层蒸发。植物通过蒸腾作用向大气输送水分的同时从土壤中吸水,从而保持植物体内水分和温度的平衡,因此进行蒸散发分割对理解 SPAC 中的水分运动、揭示生态系统的生态水文过程具有重要作用<sup>[5]</sup>。此外,全球农业灌溉水的平均利用率仅为 45% 左右<sup>[6]</sup>,其主要原因之一是对作物生育期蒸散发及各组分动态变化缺乏深入理解,无法准确估算蒸散发及各组分量。因此,研究陆地蒸散发分割对提高水资源利用效率<sup>[7]</sup>,实现水资源优化管理具有重要的现实意义<sup>[8]</sup>。

蒸散发分割是围绕生态系统中蒸散发各组分组成及其动态变化而进行的研究。国内外学者就蒸散发分割提出了一系列的理论和方法,这些方法在不同生态系统中得到了广泛应用<sup>[9-10]</sup>。由于蒸腾和蒸发的影响因素存在差异<sup>[11-12]</sup>,所以相较于蒸散发,蒸散发分割的影响因素更为复杂,现有研究对蒸散发分割影响因素的总结较少,且相关研究多集中于特定研究区<sup>[13-14]</sup>。本文在总结蒸散发分割主要方法的基础上,在不同时间尺度上对蒸散发分割的影响因素进行了系统地探讨,以期对蒸散发分割的进一步研究提供参考。

## 2 蒸散发分割方法

蒸散发分割方法可分为 3 类<sup>[15]</sup>,即水文学方法<sup>[16-19]</sup>、稳定同位素方法<sup>[20-22]</sup>及数值模拟方法<sup>[23-25]</sup>。

### 2.1 水文学方法

水文学方法是利用涡度相关系统、波文比系统、蒸渗仪以及植物茎流计等仪器中的两种或两

种以上相互结合,通过分别测量蒸散发量、蒸腾量和蒸发量中的两种或 3 种实现蒸散发分割。水文学方法在不同生态系统中均有应用<sup>[16-19]</sup>。祁秀娇等<sup>[16]</sup>利用植物茎流计和涡度相关系统在内蒙古小叶锦鸡儿灌丛中分别测量了灌丛的植物蒸腾量和蒸散发量,发现该灌丛中  $T/ET$  (蒸腾与蒸散发的比值) 约为 66%。Moran 等<sup>[19]</sup>利用波文比系统和微型蒸渗仪分别测量了灌丛和草地的蒸散发量和蒸发量,结果表明灌丛和草地的  $T/ET$  分别为 64% 和 79%。王渝淞等<sup>[17]</sup>以森林为研究对象,利用大型蒸渗仪和植物茎流计发现该林分 (即内部特征大体一致,而与临近地段有明显区别的一片森林) 蒸散发主要由蒸腾组成 (约占 89.6%)。

利用水文学方法可直接测量蒸散发及其各组分,物理过程明确,仪器测量精度高,所得蒸散发分割的结果准确,通常被作为其他分割方法的验证标准<sup>[23]</sup>。汉光昭等<sup>[23]</sup>利用基于涡度相关系统的水文学方法对 Shuttleworth-Wallace ( $S-W$ ) 模型得到的结果进行检验,验证了  $S-W$  模型的准确性。但是,由于水文学方法受实验场地、观测时间、仪器测量精度以及仪器费用等因素限制,同时对下垫面稳定性和均一性要求高,因此通常用于小尺度的蒸散发分割研究<sup>[15]</sup>。

### 2.2 同位素方法

利用稳定同位素方法进行蒸散发分割,是根据蒸腾和蒸发产生水汽的氢氧稳定同位素组成差别实现的,但该方法对某些盐生、旱生植物并不适用<sup>[26]</sup>。目前,氢氧稳定同位素技术在灌木<sup>[27]</sup>、草地<sup>[27]</sup>、农田<sup>[28]</sup>以及森林<sup>[17]</sup>等生态系统中均有广泛应用。Wang 等<sup>[27]</sup>在内蒙古灌丛-草原生态系统中利用同位素示踪方法量化了灌丛和草地的土壤水分利用情况,结果发现生长季灌丛蒸腾、草地蒸腾和土壤蒸发对总蒸散发量的贡献分别为 24%、20% 和 56%。与大气水汽冷阱同位素质谱仪技术相比,大气水汽稳定同位素组成的原位连续监测技术已逐渐成为蒸散发分割研究中同位素方法研究的热点。娄源海<sup>[29]</sup>利用原位连续监测技术对侧柏林进行研究,结果表明在研究期间  $T/ET$  的平均值约为 78%。

利用稳定同位素方法进行蒸散发分割的最大优势在于稳定同位素贯穿了生态系统水分循环的全过程<sup>[30]</sup>,且自身的稳定性不易受外界因素干扰,数据测定精度高。但稳定同位素方法同样存在费用较高、仪器维修不便等问题,而且还会受到样品收集效率以及分析仪器精度的双重制约<sup>[30]</sup>。

### 2.3 数值模拟方法

数值模拟由于其计算简单、易操作的优点,在许多生态系统的蒸散发分割研究中均有应用,其中应用最为广泛的是 S - W 模型<sup>[31]</sup>和双作物系数模型<sup>[32]</sup>。Jiang 等<sup>[33]</sup>利用 S - W 模型对黄河流域 1981 - 2010 年的蒸散发进行了划分,发现年均蒸散发量和蒸腾量分别为 372.18 和 179.64 mm,  $T/ET$  约为 48.3%。Bao 等<sup>[34]</sup>利用 S - W 模型对科尔沁沙地典型地貌 - 土壤 - 植被组合(流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘)的蒸散发进行了模拟和划分,并用涡度相关系统对模型进行了验证,结果发现研究期内 3 种不同的地貌 - 土壤 - 植被组合  $E/ET$  (土壤蒸发与蒸散发的比值)分别为 57.1%、25.2% 和 21.3%,随着植被覆盖度的增加,土壤蒸发所占的比重逐渐降低。于文颖等<sup>[35]</sup>利用 FAO - 56 双作物系数模型、改进后的双作物系数模型以及基于涡度相关系统的水文气象学方法进行研究,发现利用这 3 种方法得到的趋势基本一样,研究期间蒸腾一直是蒸散发的主要组成部分。

相较于实测方法,数值模拟方法更为方便简单,并且利用数值模拟方法可以实现更大时空尺度上的蒸散发分割研究,Fatichi 等<sup>[36]</sup>利用机理性生态水文模型发现在全球尺度上  $T/ET$  约为 70%。但数值模拟也有很大的局限性,如 S - W 模型适用的时间尺度较短,通常少于一个生长期,当涉及更长的时间尺度时,模型的准确性降低<sup>[31]</sup>;其次,模型参数的选择误差会造成模拟结果的准确度不高、模型普适性差,同时目前部分参数的获取也存在问题<sup>[9]</sup>。

综合分析比较上述 3 种蒸散发分割方法的优缺点(见表 1),水文气象学方法和稳定同位素方法物理基础坚实且计算结果准确<sup>[37]</sup>,但由于场地和观测时间限制,大多集中在田间尺度及植物生长季<sup>[9]</sup>,同时大多数的测量仪器存在价格昂贵、维修不便等缺点;数值模拟方法操作简单且可实现区域尺度上的研究,但是由于部分模型参数地域性强、数量大,导致模型的求解难度大、可靠性低、适用性差,且模型在与遥感方法结合的过程中存在着参数不匹配等问题<sup>[9]</sup>。

表 1 陆地蒸散发分割方法比较

类别	方法	优点	缺点	相关文献
水文气象学方法	$ET$ 与 $E$ 相结合法	测量结果准确,精度较高,通常是其他方法的验证标准	对下垫面要求较高,空间尺度小,仪器价格昂贵,维修困难	[19,38]
	$ET$ 与 $T$ 相结合法			[16,17]
	$T$ 与 $E$ 相结合法			[38,39]
稳定同位素方法	Keeling 曲线法	精度较高,不易受外界因素干扰,可同步测定蒸腾和蒸发	对下垫面有要求,设备价格昂贵,维修困难	[17,20]
	同位素质量守恒法			[40,41]
	水汽同位素原位连续观测法			[29,30]
模型方法	双源能量平衡模型	模型参数少,可结合遥感数据实现大尺度分割	计算地表温度时,易造成误差,模型应用受限	[33,34]
	双作物系数模型			[35,38]
				模型参数少,计算结果准确

注:  $ET$  表示蒸散发;  $E$  表示土壤蒸发;  $T$  表示植物蒸腾。

## 3 蒸散发分割的环境影响因素

蒸散发及其组分的影响因素主要有气象、土壤和植被等因素<sup>[42-44]</sup>。由于环境因子对蒸发和蒸腾的控制不同(例如,蒸发和蒸腾受土壤含水量、土壤温度、风速等影响,此外蒸腾还受植被生理状况、固碳能力等因素影响<sup>[45]</sup>),所以同一因素对蒸散发和蒸散发分割的影响不同。

在不同时间尺度上,影响蒸散发分割的主导因素存在差异,以下拟从日尺度以及季节尺度两方面对蒸散发分割的环境影响因素(分别包括太阳辐射、土壤温度、植被类型及降水、土壤含水量、植被生

长状况等)进行论述。

### 3.1 日尺度上蒸散发分割的环境影响因素

在日尺度上,对蒸散发分割影响最为明显的是气象因素,S - W 模型<sup>[31]</sup>、TSEB (two source energy balance) 模型<sup>[46]</sup>等均说明了气象因素对蒸散发分割的重要性;植被类型也是影响蒸散发分割的重要因素<sup>[47]</sup>。在日尺度上太阳辐射变化明显,是日尺度上影响蒸散发分割的重要环境因素,由此导致的温度、相对湿度变化对日尺度上蒸散发分割结果影响显著。同时,由植被类型和各类环境因素引起的气孔导度差异通过影响蒸腾作用进而影响蒸散发分割的结果。相对而言,植被生长状况、土壤含水量等在无

水分输入情况下日变化不大,故在日尺度上对蒸散发分割的影响不明显。

**3.1.1 太阳辐射和温度对蒸散发分割的影响** 太阳辐射是影响蒸散发分割的重要因素<sup>[48]</sup>,日尺度上太阳辐射与温度之间存在明显的正相关关系。在上午时分,太阳辐射增强,温度升高,蒸腾作用明显加强, $T/ET$ 呈现上升趋势;在正午时分,由于高温以及强辐射的影响, $T/ET$ 达到峰值后呈现下降趋势。在草地生态系统中利用氦同位素发现,日尺度上的 $T/ET$ 随着太阳辐射的增强先呈现上升趋势,在正午时分达到最大值,随后由于太阳辐射增强导致植物叶片和土壤温度升高,植物气孔关闭,蒸腾作用减弱,蒸发增强, $T/ET$ 呈现下降趋势<sup>[49]</sup>。Wang等<sup>[48]</sup>对日本温带草原的研究以及孟飞<sup>[50]</sup>在疏勒河地区的蒸散发分割研究均发现在日尺度上 $T/ET$ 与太阳辐射之间呈现正相关关系。在日尺度上, $T/ET$ 与温度之间也呈现正相关关系。Wang等<sup>[51]</sup>分别在与周围环境状况相同和额外提供热源两种不同的情况下进行实验,发现在加热条件下 $T/ET$ 值明显增加。由此可见,在日尺度上, $T/ET$ 与太阳辐射以及温度之间均呈现正相关关系,但在正午时,由于太阳辐射过强,温度升高,植物水分流失严重,出现下降现象。

**3.1.2 植被类型对蒸散发分割的影响** 植被类型也是日尺度上影响蒸散发分割的重要因素,这主要体现在植被气孔对蒸腾作用的影响上<sup>[52]</sup>,其影响程度一方面取决于植物表皮气孔的分布情况<sup>[53]</sup>,另一方面则取决于气孔的张开程度<sup>[54]</sup>,即气孔导度。其中植物表皮气孔的分布状况主要由植被类型决定<sup>[53]</sup>,气孔导度则主要是植被与环境因素共同作用的结果<sup>[55-56]</sup>。关于气孔导度,一般而言,阔叶植物大于针叶植物, $C_3$ 植物大于 $C_4$ 植物,热带植物大于温带植物,而在同一类甚至同一株植物中,新叶大于旧叶<sup>[57]</sup>。所以,日尺度上不同植被类型对蒸散发分割的影响体现在不同植被气孔导度的差异上,而同一植被类型蒸散发分割结果的差异主要受环境驱动的气孔导度影响。

Zhu等<sup>[47]</sup>分别在温带阔叶红松混交林(CBS)、亚热带针叶林(QYZ)和亚热带常绿混交林(DHS)中进行了蒸散发分割研究,结果发现3种森林中,气孔导度是日尺度上影响蒸散发分割的主要因素,CBS的气孔导度最大,相应的 $T/ET$ 最高,QYZ的气孔导度最小, $T/ET$ 也最低,且在同一种植被类型中, $T/ET$ 随着气孔导度的增加呈现增大趋势。董军等<sup>[58]</sup>在玉米地进行蒸散发研究时,同样发现气孔

导度是日尺度上影响蒸散发分割的因素,并认为这是由于太阳辐射的变化引起的,是环境因素变化导致的结果。由此可见,在日尺度上,植被类型差异和环境因素影响造成的气孔导度差异是影响蒸散发分割的重要因素, $T/ET$ 随气孔导度的增大而增大。

**3.1.3 其他环境因素对蒸散发分割的影响** 除了太阳辐射、温度和植被类型,蒸汽压差<sup>[59]</sup>、相对湿度<sup>[49]</sup>等同样会影响蒸散发分割的结果。Hu等<sup>[59]</sup>通过研究发现 $T/ET$ 的日变化与蒸汽压差有明显的相关性,早晨蒸汽压差较低,蒸腾作用变化更强烈,而在下午,蒸汽压差增加,蒸发量的增加大于蒸腾量的增加,从而使得 $T/ET$ 降低。在对肯尼亚中部某草原的研究过程中发现相对湿度也是日尺度上影响蒸散发分割的重要因素,相对湿度与 $T/ET$ 之间呈现正相关关系,上午10:00之前,相对湿度逐渐增大, $T/ET$ 呈现上升趋势,下午(15:00-16:00)相对湿度小幅度上升的同时 $T/ET$ 也出现小幅度上升<sup>[49]</sup>。

综上所述,在日尺度上,太阳辐射是影响蒸散发分割的最主要因素,伴随太阳辐射变化造成的温度、蒸汽压差、相对湿度的变化以及与植被相互作用导致的气孔导度的变化也是日尺度上影响蒸散发分割的重要因素。目前,日尺度上影响因素的研究大多侧重于太阳辐射以及植被两方面的研究,对其他因素的研究相对较少,且研究过程中通常研究单一气象因素对蒸散发分割的影响,缺少各气象和植被因素之间相互作用对蒸散发分割产生的影响。

### 3.2 季节尺度上蒸散发分割的环境影响因素

在较长的时间尺度上,蒸散发分割的影响因素更为多样。在季节尺度上,气象因素<sup>[60]</sup>、土壤因素<sup>[61]</sup>以及植被因素<sup>[62]</sup>对蒸散发分割均有明显影响。气象因素中降水的变化对蒸散发分割的影响最为突出,由降水导致的土壤含水量的变化对蒸散发分割的影响也较为强烈<sup>[61]</sup>。此外,在季节尺度上,植物的物候变化明显,植被对蒸散发分割的影响是不可忽略的,其中植被的生长状况,如叶面积指数(LAI)、归一化植被指数(NDVI)以及植被覆盖度<sup>[49]</sup>对蒸散发分割的影响尤为强烈。

**3.2.1 降水对蒸散发分割的影响** 水分是影响蒸散发各组分的重要因素,在干旱半干旱地区尤为明显。降水通过增加地表的湿润程度,进而影响蒸散发分割,使得 $T/ET$ 降低。Jiao等<sup>[39]</sup>在中国黄土高原地区进行的蒸散发分割研究表明,在季节尺度上,蒸散发分割的结果与降水量关系密切,随着降水量的不断增加, $T/ET$ 呈现不断减小的趋势,两者之间呈对

数关系。沈竞<sup>[63]</sup>通过实验发现,湿润区植物冠层截流作用产生的蒸发( $E_c$ )是不能忽略的, $E_c/ET$ 与降水量之间呈正相关关系,与暴雨频次之间呈负相关关系。由此可见,不仅降水量会影响蒸散发分割的结果,降水频次或降水天数同样会影响蒸散发分割的结果。Scott等<sup>[64]</sup>通过对美国4个干旱半干旱地区的研究发现,地表湿润程度随降水天数的增加而增强,且土壤蒸发增量大于植物蒸腾, $T/ET$ 与降水天数之间存在负相关关系。但另有研究表明<sup>[65]</sup>,在生长季尺度上,降水不是蒸散发分割的主要影响因素。根据以往研究结果,得到季节尺度上降水量与 $T/ET$ 之间的关系如图1所示,分析其Pearson系数发现,降水量与 $T/ET$ 之间的显著性较强,呈正相关关系( $R = 0.477, P < 0.0001$ )。该结果与已有研究结果存在一定偏差<sup>[43]</sup>,可能是由于数据中生态系统类型与植被类型多样,且农田生态系统中还存在灌溉、施肥以及覆盖地膜等人为活动的影响,增加了季节尺度上的水分输入,提高了水分利用效率,植物生长更加旺盛, $T/ET$ 在季节尺度上增加较为明显。

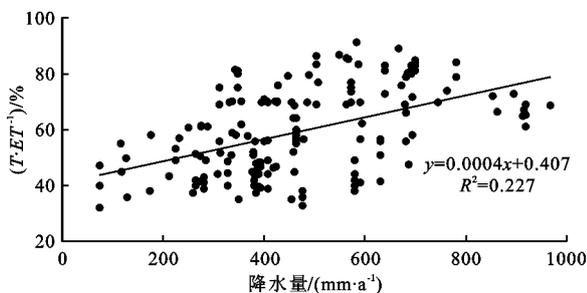


图1 季节尺度上降水量与 $T/ET$ 的关系

3.2.2 土壤含水量对蒸散发分割的影响 在季节尺度上,土壤含水量的变化也是影响蒸散发分割的重要因素,表层土壤含水量越高,则 $T/ET$ 越小。蒸发和蒸腾利用的分别是表层土壤水和较深层的土壤水,所以表层土壤水的增加会造成 $T/ET$ 减小。Rigden等<sup>[61]</sup>对美国大陆进行研究发现,在土壤含水量降低过程中, $T/ET$ 逐渐减小,尤其是美国西部缺水地区,产生这种现象主要是由于表层土壤水用于蒸发作用,而较深层的土壤水则主要是由植物根部吸收并供给植物蒸腾<sup>[66]</sup>,所以在表层土壤含水量减少时蒸发量的减小速度大于蒸腾量。Bao等<sup>[34]</sup>对科尔沁沙地典型地貌-土壤-植被组合的蒸散发进行了模拟和划分,并研究了土壤水分与蒸散发分割之间的关系,结果发现土壤含水量是影响蒸散发分割的重要因素,随着土壤水含量的增加土壤蒸发所占的比重逐渐升高。在农田生态系统中,人类活动

(灌溉、耕作方式等)都会影响表层土壤含水量<sup>[67-68]</sup>。相较于滴灌,漫灌方式增加了表层土壤含水量, $T/ET$ 值更小<sup>[67]</sup>。耕作方式也影响表层土壤含水量进而影响蒸散发分割,在王月月<sup>[68]</sup>的研究中发现,与翻耕相比,免耕由于凋落物的影响,虽然增加了土壤水含量,但由于覆盖作用,使蒸发量减少, $T/ET$ 降低,其原理与地膜覆盖类似<sup>[69]</sup>。

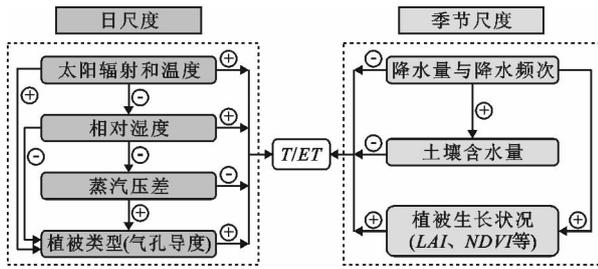
3.2.3 植被生长状况对蒸散发分割的影响 植被在生长过程中会经历明显的季节变化, $LAI$ <sup>[63]</sup>、 $NDVI$ <sup>[67]</sup>以及植被覆盖度<sup>[70]</sup>等都能够反映植被的生长状况,并影响蒸散发分割的结果。通常情况下 $LAI$ (或 $NDVI$ 、植被覆盖度)的增加会导致 $T/ET$ 的增大,这是由于 $LAI$ 增大使植物蒸腾和叶片遮荫效果增强,地表温度降低,土壤蒸发减弱,最终导致 $T/ET$ 增大。沈竞<sup>[63]</sup>通过对中亚热带人工针叶林的蒸散发及其组分拆分研究发现,在该生态系统中, $T/ET$ 约为85%,与 $LAI$ 之间呈现正相关关系。此结果在草原生态系统<sup>[48]</sup>和灌丛生态系统<sup>[34]</sup>中有相似结论。Jiang等<sup>[33]</sup>通过研究发现 $NDVI$ 是控制黄河流域植物蒸腾和蒸散发的重要因素, $T/ET$ 随着 $NDVI$ 的增加呈上升趋势。Wang等<sup>[70]</sup>利用同位素方法发现植被覆盖度与 $T/ET$ 同样存在上述关系。综上所述,植物生长状况是季节尺度上影响蒸散发分割的重要因素, $LAI$ 、 $NDVI$ 以及植被覆盖度的增加都会导致 $T/ET$ 的增大。

综上所述,在季节尺度上,蒸散发分割主要与植物的物候特征有关,而植物的物候特征又与降水、气温、土壤等因素有密切联系。由此可见,在季节尺度上, $LAI$ 、 $NDVI$ 、植被覆盖度是影响蒸散发分割最重要的因素,降水、气温以及土壤等环境因素通过影响植物生长和蒸发耗水也对蒸散发分割造成影响。

不同时间尺度上 $T/ET$ 的影响因素如图2所示。由图2可看出,在日尺度上,影响蒸散发分割的因素主要有太阳辐射、温度、相对湿度、蒸汽压差以及由植被类型和环境因素共同控制的气孔导度,其中与 $T/ET$ 呈负相关关系的因素是蒸汽压差,其余因素均呈现正相关关系;在季节尺度上,蒸散发分割的控制因素主要有降水(降水量和降水频次)、土壤含水量以及植被生长状况(可用 $LAI$ 、 $NDVI$ 等指数表示),其中与 $T/ET$ 呈正相关关系的因素是植被生长状况( $LAI$ 、 $NDVI$ 等),其余因素则与 $T/ET$ 呈负相关关系。

不同影响因素在蒸散发分割领域的研究已经较为普遍,但由于不同影响因素之间存在强烈的相互作用(见图2),如植被生长过程中通常伴随着降水

以及温度的变化,所以在研究过程中通常忽略了各影响因素之间的相互作用。



注: ⊕表示两因素间存在正相关关系; ⊖表示两因素间存在负相关关系。

图2 蒸散发分割影响因素示意图

## 4 目前研究存在的问题与展望

### 4.1 目前研究存在的问题

随着研究的深入,关于蒸散发分割的方法已经越来越完善,在此基础上,不同时间尺度上蒸散发分割的影响因素也逐步清晰,但仍存在一些亟待解决的问题。

蒸散发分割的方法目前已经取得了长足的发展,但在一些方面仍需要进一步完善,这主要体现在:(1)多数实测方法(涡度相关法、波文比法等)以及数值模拟方法(双作物系数模型、互补相关模型等)要求下垫面均匀稳定,但是在实际情况下,这种要求通常难以满足,导致蒸散发分割的结果不够精确;(2)各种实测方法都有其物理基础及适用范围,例如,涡度相关系统基于雷诺分解可连续测得地表蒸散量,而蒸渗仪则是基于质量守恒以小时或天为单位进行测量,所以直接将各种实测方法进行结合、比较或验证仍存在问题;(3)目前已有的蒸散发分割模型在与遥感方法结合的过程中仍存在较大的误差,同时部分模型参数的确定需要借助经验公式,参数依赖于研究区,不具有普适性。

蒸散发分割影响因素的研究同样存在以下问题:(1)在探讨各因素对蒸散发分割的影响时,通常对单因素进行研究,忽略了各影响因子之间相互作用对蒸散发分割的影响,如太阳辐射与土壤温度之间的相互关系、植物的生长状况与各环境因素之间的关系等;(2)各因素对蒸散发分割的影响通常不止体现在一种时间尺度上,但目前研究通常集中于特定的时间尺度,如植被的生长状况既可以在日尺度上通过气孔导度的差异进行蒸散发分割,也可以在季节尺度上影响蒸散发分割的结果。

### 4.2 研究展望

蒸散发分割的实测方法是获取地表蒸散发分割

数据的基本途径,也是检验模型可行性与准确性的有效手段。实测手段未来需要从两方面进行完善:(1)改进仪器,提高仪器的精确性以及适用性;(2)稳定同位素方法在蒸散发分割研究中的应用逐渐广泛,但由于设备价格昂贵、维修不便等问题,应寻找一种成本相对较低的同位素方法进行推广。

数值模拟可以向以下3个方向发展:(1)提出同时考虑时空延展性以及下垫面均匀性的动态模型;(2)优化模型模拟与遥感数据的结合以提高遥感数据在蒸散发分割研究中的应用;(3)采取多种手段进行研究,如目前已有的结合植物生物量<sup>[71]</sup>以及水分利用效率<sup>[14]</sup>等进行研究,以期能更方便地得到更准确的结果。

关于蒸散发分割的影响因素,未来可以从以下3个方面进行研究:(1)考虑各影响因素之间的相互作用,如人为活动、气候变化以及两者间的相互作用对蒸散发分割的影响;(2)对同一影响因素在不同时间尺度上影响蒸散发分割的机理研究是未来蒸散发分割影响因素研究的重点;(3)不同生态系统、不同气候区蒸散发分割对环境因子的响应也是本领域研究的重要内容。

### 参考文献:

- [1] GOOD S P, NOONE D, BOWEN G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes [J]. *Science*, 2015, 349(6244):175-177.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] XU Yu, XU Youpeng, WANG Yuefeng, 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.
- [5] GAO Xiaoli, PENG Shizhang, WANG Weiguang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area: A case study in Guizhou Province, China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2016, 128(5):677-688.
- [6] 张 晓. 感热平衡原理测定土壤水分蒸发的改进及分解农田蒸散的实验研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2014.
- [7] 吴 辰, 王国庆, 郝振纯, 等. 长武塬区实际蒸散发变化及驱动因素分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5):37-42.
- [8] AHOOGHALANDARI M, KHIADANI M, JAHROMI M E.

- Developing equations for estimating reference evapotranspiration in Australia [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(11):3815–3828.
- [9] KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184:56–70.
- [10] LI Xi, GENTINE P, LIN Changjie, et al. A simple and objective method to partition evapotranspiration into transpiration and evaporation at eddy-covariance sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265:171–182.
- [11] 张江辉, 刘洪波, 白云岗, 等. 果园微气候因子改善葡萄净光合速率与蒸腾速率研究[J]. *北方园艺*, 2020(1):27–33.
- [12] 马莉, 孙朋, 芮广军, 等. 裸土蒸发的微型蒸渗仪测定及其影响因素[J]. *辽东学院学报(自然科学版)*, 2019, 26(4):274–280.
- [13] CHEN Yueming, XUE Yueju, HU Yueming. How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needleleaf forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622:1217–1224.
- [14] SUN Juying, SUN Xiangyang, HU Zhaoyong, et al. Exploring the influence of environmental factors in partitioning evapotranspiration along an elevation gradient on Mount Gongga, eastern edge of the Qinghai–Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(2):384–396.
- [15] 顾春杰. 不同定义的生态系统水分利用效率对降水量变化响应的差异研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [16] 祁秀娇, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于茎干液流法和涡度相关法的小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落蒸散发特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4):73–82.
- [17] 王渝淞, 贾国栋, 张永娥, 等. 北京山区侧柏林蒸散发拆分研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2):272–278.
- [18] 刘家霖, 满秀玲. 降雨和非降雨日兴安落叶松天然林蒸腾及蒸散发特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(15):5059–5069.
- [19] MORAN M S, SCOTT R L, KEEFER T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1):59–72.
- [20] QUADE M, KLOSTERHALFEN A, GRAF A, et al. *In-situ* monitoring of soil water isotopic composition for partitioning of evapotranspiration during one growing season of sugar beet (*Beta vulgaris*) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 266–267:53–64.
- [21] 包永志. 科尔沁沙地不同地貌–土壤–植被组合单元蒸散发模拟及组分拆分研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2019.
- [22] HOGAN P, PARAJKA J, HENG L, et al. Partitioning evapotranspiration using stable isotopes and Lagrangian dispersion analysis in a small agricultural catchment [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2020, 68(2):134–143.
- [23] 汉光昭, 曹广超, 曹生奎, 等. 基于 Shuttleworth–Wallace 模型的小泊湖和沙柳河河源区湿地蒸散发模拟研究[J]. *湿地科学*, 2019, 17(5):519–526.
- [24] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于 Shuttleworth–Wallace 模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3):867–876.
- [25] 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15):117–125.
- [26] LIN Guanghui, STERNBERG L. Utilization of surface water by red mangrove (*Rhizophora Mangle* L.): An isotopic study[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1994, 54(1):94–102.
- [27] WANG Pei, LI Xiaoyan, WANG Lixin, et al. Divergent evapotranspiration partition dynamics between shrubs and grasses in a shrub-encroached steppe ecosystem[J]. *The New phytologist*, 2018, 219(4):1325–1337.
- [28] 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.
- [29] 娄源海. 基于同位素技术的森林生态系统水分通量解析[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [30] 石俊杰. 利用同位素原位监测技术分割农田蒸散发研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2012.
- [31] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops: An energy combination theory [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111(469):839–855.
- [32] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [S]. FAO, Rome:1998.
- [33] JIANG Zhiyun, YANG Zhiguang, ZHANG Siyi, et al. Revealing the spatio-temporal variability of evapotranspiration and its components based on an improved Shuttleworth–Wallace model in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262:110310.
- [34] BAO Yongzhi, DUAN Limin, TONG Xin, et al. Simulation and partition evapotranspiration for the representative landform–soil–vegetation formations in Horqin Sandy Land, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 140(3–4):1221–1232.
- [35] 于文颖, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 基于改进的双作物系数

- 法估算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量[J]. 生态学报, 2020, 40(1):325-335.
- [36] FATICHI S, PAPPAS C. Constrained variability of modeled T:ET ratio across biomes[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(13):6795-6803.
- [37] WANG Kaicun, DICKINSON R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2):RG2005.
- [38] JIANG Xuelian, KANG Shaozhong, TONG Ling, et al. Modeling evapotranspiration and its components of maize for seed production in an arid region of northwest China using a dual crop coefficient and multisource models[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222:105-117.
- [39] JIAO Lei, LU Nan, FU Bojie, et al. Evapotranspiration partitioning and its implications for plant water use strategy: Evidence from a black locust plantation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 424:428-438.
- [40] GIBSON J J, REID R. Stable isotope fingerprint of open-water evaporation losses and effective drainage area fluctuations in a subarctic shield watershed[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1):142-150.
- [41] 郭慧文. 基于氢氧稳定同位素的民勤绿洲玉米耗水规律研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2020.
- [42] 谢今范, 韦小丽, 张晨琛, 等. 第二松花江流域实际蒸散发的时空变化特征和影响因素[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12):3336-3343.
- [43] ZHANG Zhaolu, KANG Hui, YAO Yunjun, et al. Spatial and decadal variations in satellite-based terrestrial evapotranspiration and drought over Inner Mongolia Autonomous Region of China during 1982-2009[J]. Journal of Earth System Science, 2017, 126(8):119.
- [44] YU Tengfei, FENG Qi, SI Jianhua, et al. Evapotranspiration of a *Populus euphratica* Oliv. forest and its controlling factors in the lower Heihe River Basin, Northwest China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 9(2):175-182.
- [45] EVARISTO J, MCDONNELL J J, SCHOLL A M, et al. Insights into plant water uptake from xylem-water isotope measurements in two tropical catchments with contrasting moisture conditions[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(18):3210-3227.
- [46] KUSTAS W P, ALFIERI J G, NIETO H, et al. Utility of the two-source energy balance (TSEB) model in vine and interrow flux partitioning over the growing season[J]. Irrigation Science, 2019, 37(3):375-388.
- [47] ZHU Xianjin, YU Guirui, HU Zhongmin, et al. Spatio-temporal variations of T/ET (the ratio of transpiration to evapotranspiration) in three forests of eastern China[J]. Ecological Indicators, 2015, 52:411-421.
- [48] WANG Pei, YAMANAKA T. Application of a two-source model for partitioning evapotranspiration and assessing its controls in temperate grasslands in central Japan[J]. Ecohydrology, 2014, 7(2):345-353.
- [49] GOOD P S, SODERBERG K, GUAN Kaiyu, et al.  $\delta^2\text{H}$  isotopic flux partitioning of evapotranspiration over a grass field following a water pulse and subsequent dry down[J]. Water Resources Research, 2014, 50(2):1410-1432.
- [50] 孟飞. 疏勒河上游高寒草甸生态系统蒸散发分割研究[D]. 西安:西北大学, 2019.
- [51] WANG Lixin, NIU Shuli, GOOD S P, et al. The effect of warming on grassland evapotranspiration partitioning using laser-based isotope monitoring techniques[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 111:28-38.
- [52] 刘文娜. 北京山区侧柏林冠层气孔导度及其对冠层蒸腾调控的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- [53] 董天英, 尹秀玲. 植物气孔在叶片上分布状况的观察[J]. 生物学杂志, 1992(4):23+8.
- [54] MCADAM S M, BRODRIBB T J. Separating active and passive influences on stomatal control of transpiration[J]. Plant Physiology, 2014, 164(4):1578-1586.
- [55] 齐红岩, 刘洋, 刘海涛. 水分亏缺对番茄叶片气孔特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(1):9-15.
- [56] 胡伟娟, 张启翔, 潘会堂, 等. 报春叶片解剖结构与耐热性的关系[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(3):363-368.
- [57] ZEPPEL M J B, LEWIS J D, PHILLIPS N G, et al. Consequences of nocturnal water loss: A synthesis of regulating factors and implications for capacitance, embolism and use in models[J]. Tree Physiology, 2014, 34(10):1047-1055.
- [58] 董军, 岳宁, 党慧慧, 等. 应用修订的 Shuttleworth-Wallace 模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5):674-683.
- [59] HU Zhongmin, WEN Xuefa, SUN Xiaomin, et al. Partitioning of evapotranspiration through oxygen isotopic measurements of water pools and fluxes in a temperate grassland[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2014, 119(3):358-372.
- [60] 沈竞, 张弥, 肖薇, 等. 基于改进 SW 模型的千烟洲人工林蒸散组分拆分及其特征[J]. 生态学报, 2016, 36(8):2164-2174.

(下转第 240 页)

- CN201220488657.3 [P]. 2013-06-05.
- [15] 洪明,赵经华,穆哈西,等. 根层铺多孔膜对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(4):21-25.
- [16] 赵永敢.“上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
- [17] 卢修元,魏新平,邱王月,等. 粉粘土夹层对砂的减渗规律试验分析[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(2):22-25.
- [18] 王伟,李光永,段中琐,等. 利用工程措施改变地下滴灌土壤湿润模式的试验[J]. 节水灌溉,2000(3):22-24.
- [19] 于国丰,王保泽,李春龙,等. 微润灌水器的研制及沙地灌溉试验[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(11):218-222+229.
- [20] 杜志达. 地下条带式铺膜节水灌溉技术的试验与模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [21] 王娟,仲昭易,张瑜,等. 新复垦区春玉米生产适宜耕作方式试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):236-242.
- [22] 史文娟,沈冰,汪志荣,等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):23-26.
- [23] 乔海龙,刘小京,李伟强,等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. 土壤通报,2006,37(5):885-889.
- [24] 王曼华,陈为峰,宋希亮,等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报,2017,54(6):1395-1403.
- [25] 赵永敢,王婧,李玉义,等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报,2013,29(23):109-117.

(上接第232页)

- [61] RIGDEN J A, SALVUCCI G D, ENTEKHABI D, et al. Partitioning evapotranspiration over the continental United States using weather station data [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(18):9605-9613.
- [62] WEI Zhongwang, YOSHIMURA K, WANG Lixin, et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(6):2792-2801.
- [63] 沈竞. 中亚热带人工针叶林蒸散及其组分拆分的模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
- [64] SCOTT R L, BIEDERMAN J A. Partitioning evapotranspiration using long-term carbon dioxide and water vapor fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(13):6833-6840.
- [65] SUN Xiangmin, WILCOX B P, ZOU C B. Evapotranspiration partitioning in dryland ecosystems: A global meta-analysis of *in situ* studies [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576:123-136.
- [66] RAZ-YASEEF N, YAKIR D, SCHILLER G, et al. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 157:77-85.
- [67] HU Hongchang, CHEN Lajiao, LIU Hui, et al. Comparison of the vegetation effect on ET partitioning based on eddy covariance method at five different sites of northern China [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11):1755.
- [68] 王月月. 农田蒸散的测定与分解:茎流计和热脉冲传感器的应用[D]. 北京:中国农业大学,2017.
- [69] GONG Daozhi, MEI Xurong, HAO Weiping, et al. Comparison of ET partitioning and crop coefficients between partial plastic mulched and non-mulched maize fields [J]. Agricultural Water Management, 2017, 181:23-34.
- [70] WANG Lixin, CAYLOU K K, VILLEGAS J C, et al. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: Assessment of a stable isotope technique [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(9):L09401.
- [71] HU Zhongmin, WU Genan, ZHANG Liangxia, et al. Modeling and partitioning of regional evapotranspiration using a satellite-driven water-carbon coupling model [J]. Remote Sensing, 2017, 9(1):54-74.