地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol.11 No.1 | Feb. 2020
DOI: 10.7515/JEE191004
专 论
REVIEW

不同尺度下蒸散量测算方法的应用及展望

杨瀚凌[1,2]，罗维均[1,3]，王彦伟[1,2]，王世杰[1,3]
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. 中国科学院大学，北京 100049
3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站，普定 562100

摘 要：在水资源日益稀缺的背景下，蒸散作为陆地水循环的重要组成部分，对水资源管理和农业灌溉方案的制定都起着决定性作用。在全球尺度上，蒸散量整体呈现出了明显的随时间增加趋势，但区域尺度及流域尺度的蒸散变化则呈现出较大的不确定性，并且在一些下垫面比较复杂的地区，如喀斯特小流域，蒸散作为流域水循环的重要组成部分往往难以准确测定，所以更需要因地制宜地选择蒸散量测算方法。基于此，本文以各种方法的研究尺度为切入点，将当前被广泛接受的蒸散研究方法分为小尺度方法，即针对单体植株和适用于田块尺度的蒸散研究方法，包括树干液流法、零通量面法、风调室法、蒸渗仪法以及土壤 - 植被 - 大气连续体（SPAC）水分传输综合模拟法；百米尺度方法，包括波文比法和涡动相关法；公里尺度方法，主要包括闪烁仪法；流域及区域尺度方法，包括水量平衡法和空间遥感法。概述了各个方法的应用范围、特点以及局限性，列举了前人工作中各种方法之间的对比验证，着重分析了闪烁仪方法在复杂下垫面的应用前景，以便在不同研究条件和研究尺度下能选择最佳的蒸散量测算方法，并对未来蒸散研究进行了展望。

关键词：蒸散量测算方法；小尺度；百米尺度；公里尺度；区域及流域尺度；闪烁仪技术

Application and prospect of evapotranspiration measuring methods under different scales

YANG Hanling[1,2], LUO Weijun[1,3], WANG Yanwei[1,2], WANG Shijie[1,3]
1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China

Abstract: ***Background, aim, and scope*** Evapotranspiration, as an important part of terrestrial water cycle, plays a decisive role in water resource management. On global scale, the evapotranspiration overall presents an obvious increasing trend, but regional scale and watershed scale evapotranspiration has a large uncertainty. And in some

收稿日期：2019-04-05；**录用日期：**2019-07-05；**网络出版：**2019-07-10
Received Date: 2019-04-05; **Accepted Date:** 2019-07-05; **Online first:** 2019-07-10
基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0502300）；国家自然科学基金项目（41673121）；中国科学院战略性先导科技专项（B 类）（XDB40020100）；贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才培养计划（[2016]-5648）
Foundation Item: National Key R&D Program of China (2016YFC0502300); National Natural Science Foundation of China (41673121); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDB40020100); Guizhou High-Level Innovative Talent Training Program “Ten” Level Talents Program ([2016]-5648)
通信作者：罗维均，E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn.
Corresponding Author: LUO Weijun, E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn.
引用格式：杨瀚凌 , 罗维均 , 王彦伟 , 等 . 2020. 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* , 11(1): 31–44.
Citation: Yang H L, Luo W J, Wang Y W, et al. 2020. Application and prospect of evapotranspiration measuring methods under different scales [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(1): 31–44.

area with complex surface condition, evapotranspiration as an important part of the basin water cycle is often difficult to be accurately measured. Therefore, it is necessary to summarize previous studies, analyze the basics, advantages and disadvantages of various evapotranspiration measuring methods in order to choose the better methods at practical works. ***Materials and methods*** In this paper, different evapotranspiration measuring methods are divided into point scale methods, including zero-flux plane (ZFP) method, lysimeter method, plant physiology method, soil-vegetation-atmospheric continuum (SPAC) comprehensive simulation method, Bowen ratio-energy balance method, eddy covariance (EC) method; and regional or watershed scale methods, including water balance method, remote sensing method, Penman-Monteith equation method and scintillometer method. ***Results*** Flux observation network (FLUXNET), remote sensing method and scintillometer method have promising application prospect. And the results of different evapotranspiration measuring methods are often compared with each other. ***Discussion*** All kinds of methods are developed and evolved according to different application scenarios and different scientific research objectives, and all have their basic principles, advantages and disadvantages which means there will be great differences in their practicability. Therefore, the evapotranspiration measuring methods should be selected according to specific researching situation. ***Conclusions*** Different evapotranspiration measuring methods are complementary in many research scenarios. When selecting methods with larger observing scale at regional and watershed area, attention should also be paid to the comparison and verification of different methods in order to obtain more accurate evapotranspiration results. ***Recommendations and perspectives*** Different researching teams should have more communications, and their results in different surface conditions should also be compared with each other more often.

Key words: evapotranspiration measuring and estimating methods; small scale; hundreds of meters scale; kilometers scale; regional and watershed scale; scintillometer technique

陆地水循环是地球系统过程中非常重要的一环，在气候学、气象学、植物群落动力学等学科领域都扮演着非常关键的角色，对水生生态系统的结构和功能也有直接影响（Vörösmarty et al，1998），而蒸散作为陆地水循环的重要组成部分，是水量平衡主要的输出项，全球 60% 的降水最后都以蒸散的形式回归大气（Wang and Dickinson，2012）。根据理想气体状态方程（Clausius-Clapeyron 关系式），空气对湿度的承载能力会随着温度的升高而上升，这就意味着在全球变暖的气候背景下蒸散和降雨量将会有所增加，并伴随全球水循环过程的加速（Huntington，2006），由此紧密制约着水资源的分布和利用。在生态系统内，蒸散同时影响着植被生产量和生态系统能量收支（Wever et al，2002）。在生态系统层面的通量观测中，总初级生产力（gross primary productivity，GPP）和蒸散（evapotranspiration，ET）的相关性证明了陆地生态系统碳、水循环的相伴相生关系，而净生态系统交换量（net ecosystem exchange，NEE）与 ET 的相关性则表明蒸散量越高则净的碳吸收量越高，对生态系统的碳汇能力具有指示作用（Xiao et al，2013）。在农业生产领域，干旱和半干旱区域的农业灌溉十分依赖于河流水，但受全球气候变化和人类活动影响，许多河流径流量都呈下降趋势（Zhang et al，2011），由此势必造成水资源利用形式和土地利用模式的改变，而相关的蒸散研究将为该地区合理进行水资源管理提供科学依据（Yang et al，2012）。此外，在一些水资源危机凸显的区域，如中国西南喀斯特山区，该地区流域特有的二元三维空间结构导致当地地表水贫乏，同时地下水以管道水形式存在，埋藏深且空间分布不均，开发利用难度大（王腊春和史运良，2006），在该区域更需要因地制宜选择适合的蒸散量测算方法，为当地水资源的分配和管理提供科学依据。

在全球尺度上，2009 年以前的 30 年间，前 20 年全球蒸散量呈现上升趋势，而后 10 年则未见明显趋势变化，其原因可能是土壤湿度不足（Zeng et al，2012；Zeng et al，2014）。而在区域和流域尺度上，因为蒸散会受到诸如土壤水分、空气温度、植被类型、太阳辐射等变量的影响，所以该尺度上的蒸散变化会有更大的差异性（Wang et al，

DOI: 10.7515/JEE191004

2010；Miralles et al，2014）。以关于中国的蒸散研究为例（Li et al，2018），在过去的 30 年间，中国地区蒸散量整体呈上升趋势的同时仍有 22% 的地区因降雨减少或植被覆盖面积减少等因素导致蒸散量呈下降趋势，并且不同蒸散计算方法在区域尺度上的计算结果没有很好的一致性。在实际的蒸散定量工作中，选择研究方法时应根据实际的研究区条件，结合各方法的研究尺度和特性来进行选择。

1　蒸散研究现状概述

自 1802 年道尔顿蒸发计算公式被提出，此后蒸散相关理论的研究就取得了很多成果，包括彭曼综合法、水平衡法、波文比法、蒸渗仪法、植物生理学法、零通量面法、涡动相关法、土壤 - 植物 - 大气连续体（SPAC）水分传输综合模拟法等一系列方法。这些方法多数仅适用于小尺度的蒸散量测算，如蒸渗仪和植物生理学方法最初主要应用于农业作物的蒸散量测定，此后逐渐发展成小尺度的蒸散量测定方法，SPAC 方法也多见于农业领域。而在 20 世纪 70 年代以来，随着遥感技术的全面发展，遥感方法计算蒸散也开拓了广泛的应用前景。作为一种反演方法，遥感法早期在复杂下垫面的计算精度还有不足（左大康和覃文汉，1988），但目前遥感模型已经可以应用于复杂下垫面进行蒸散量计算，如田雷等（2008）和钟昊哲等（2018）已通过遥感方法进行了喀斯特地区的蒸散研究。而 Wang et al（1978）在 20 世纪 70 年代提出了闪烁仪通量观测的构想，并于 90 年代广泛应用于各类型下垫面的通量研究中（de Bruin，2002）。闪烁仪通量观测是一个较新的蒸散量测定方法，但此前已经有学者在流域尺度成功应用该方法进行了通量的观测，并与涡动相关法的观测结果进行了对比验证，证明了该方法在流域尺度的适用性。

当前的蒸散研究主要包括，通过测定蒸散量来对区域和全球尺度蒸散变化趋势和其影响因素进行分析（Wang et al，2010；Zeng et al，2012；Miralles et al，2014；Zeng et al，2014）；评估用水策略改变对农业生产区域水资源利用方式和土地利用类型的影响（Yang et al，2012）；研究碳水循环在生态系统内的伴生关系并评估区域固碳能 力（Scott et al，2010；Xiao et al，2013）；以及对蒸散进行拆分，重点关注蒸腾作用水汽通量的研究（Jasechko et al，2013；Kool et al，2014；Schlesinger and Jasechko，2014）。但除此之外，针对一些特殊下垫面的蒸散研究却并不多见，而喀斯特流域就是其中的典型代表。针对闭合流域，蒸散量可以通过降雨、径流、蒸散等水均衡要素构成的平衡关系来进行计算，但在喀斯特流域，碳酸盐岩构成了非均匀且透水性能不一的含水介质，再加上该地区复杂的构造和断裂，导致地表与地下分水岭不重叠，因此喀斯特流域普遍不闭合（王腊春和史运良，2006）。同时该地区含水层裂隙和管道高度发育，地下河系统十分复杂，漏失水量还没有给出定量关系式（周念清等，2009），难以实现准确的水平衡计算，无法通过水平衡法来求得蒸散量。此外，喀斯特地区地表土壤和植被类型不连续，具有高度异质性，蒸散量受下垫面影响其空间变异性会非常明显，有必要讨论各类蒸散量测算方法在喀斯特地区的适用性。

由此可见，蒸散研究除了在区域和流域尺度上还存在不确定性，在一些复杂下垫面的蒸散定量也还存在一定难度，有必要对前人研究进行概述，分析各种蒸散量测定和估算方法的适用性及优缺点，以便在不同尺度的蒸散研究工作中能够结合实际情况选择合适的方法，并探讨现有新技术在复杂下垫面的应用潜力。

2　蒸散量测算方法

迄今，已有众多蒸散研究方法被科学家们使用过，但此前的文献中，蒸散定量方法多以实测方法和估算方法进行分类，或按其应用领域进行分类，如分为植物生理学方法、微气象学方法等。但各种方法均是根据不同的使用场景以及不同的科研目标发展和演变而来，都有其基本原理以及优缺点，实用性就会有很大差异。如在流域蒸散量的测定中，选择观测尺度更大的方法会更有优势，但流域内遇到特殊地形或孤立地块时，小尺度的蒸散量测定方法，如植物生理学方法等又会是更佳选择，在实际工作中要根据具体情况和研究尺度选择蒸散量测算方法。

基于此，本文选择了当前被广泛使用的蒸散量测算方法，包括树干液流法、风调室法、蒸渗仪法、波文比法、涡动相关法、闪烁仪法等实测方法，以及零通量面法、土壤 - 植被 - 大气连续体（SPAC）水分传输综合模拟法、水量平衡法和空间遥感法等估算方法，将上述方法按其研究尺度

DOI: 10.7515/JEE191004

分为小尺度、百米尺度、公里尺度和流域区域尺度方法，并分别论述不同尺度蒸散研究方法的适用性、局限性和优缺点。小尺度方法包括针对单体植株的树干液流法，受限于仪器设备自身体积的风调室法和蒸渗仪法，以及适用于田间尺度的零通量面法和 SPAC 水分传输综合模拟法。百米尺度方法包括观测源区可至数百米的波文比法和涡动相关法；公里尺度方法主要包括光路距离可至数公里、能测定面元通量的闪烁仪法；流域、区域尺度方法则包括水量平衡法和空间遥感法。

2.1 小尺度蒸散量测算方法

本文论述的小尺度方法即适用于田块尺度以及更小尺度的方法，包括当前被广泛用于蒸散研究的树干液流法、风调室法、蒸渗仪法、零通量面法和 SPAC 水分传输综合模拟法。前三种方法为蒸散量实测方法，后两种方法为估算方法。需要注意的是，树干液流法是测定植物蒸腾量的方法，但在前人工作中，针对植被郁闭度大的地区，长期观测中发现土壤蒸发占总蒸散量的比例几乎可以忽略不计，在这种情况下也可采用蒸腾量来代表该区域蒸散量（Zhang et al，2018）。

2.1.1 树干液流法

该方法是植物由于叶片的蒸腾作用导致植物体内水分散出，从而使水分由木质部运输到叶片，通过测定树干部分的水分流量就能得到植物的蒸腾量。实际的测量方法是基于热平衡原理，即通过向树干提供持续的热量，在理想状况下向上运移的树液会带走同等的热量。Huber 最早于 1932 提出了测定树干液流的热脉冲法，而国内则是由刘奉觉等（1993）首次进行应用。该方法使用时在树干定点部位通过热脉冲加热树液，在上下位点用电桥测定平衡时间，计算出树干的液流速度，断面的流速可进行积分进一步算出断面流量。该方法避免了植物蒸腾量测定的系统误差，并且不会受到外界气象因子的干扰。最近，Zhang et al（2018）通过热脉冲法发展而来的热探针法对喀斯特地区森林生态系统的蒸散量进行了测定，并配合经过改良的风调室法对该地区环境因子对蒸散的影响进行了分析。

2.1.2 风调室法

该方法最早由 Greenwood and Beresford 于 1979 年进行应用（Greenwood and Beresford，1979），该方法是将研究区域置于一个透明的人工腔室内，通过测定进出该区域的水汽含量差值以及风调室内水汽增量来测定蒸散。在实际应用中，风调室法在测定高通量时存在技术困难（Dragoni et al，2005），同时创造的人工环境会对植被周围环境造成扰动，腔室内的各项环境指标尤其是水蒸气压的亏缺不同于自然状态（Wullschleger et al，1998），因此通过该方法并不能很好地模拟自然环境，并且所得结果只代表蒸散的绝对值，而不能代表蒸散的实际情况（王安志和裴铁璠，2001），这是该方法在应用中的一大限制。

2.1.3 蒸渗仪法

最早的简易式蒸渗仪诞生于 17 世纪（Kohnke et al，1940），直到 1937 年才于美国俄亥俄州制造了第一台自计式称重仪（Garstka，1938），实现了蒸渗仪的自动观测。该方法基于水量平衡原理发展而来，使用时将装有土体和植被的容器没于土壤中，通过对土体水分进行调控来模拟蒸散过程，其类型主要包括大型蒸渗仪和小型、微型蒸渗仪等，大型蒸渗仪又包括非称重和称重式蒸渗仪。非称重式蒸渗仪一般在地下水位埋深较浅的地区使用，通过控制地下水位和测定补偿水量来获得蒸散量结果；相比非称重式，称重式蒸渗仪更加昂贵，安装、维修和管理工艺复杂，不适用于大面积的推广使用，但能够获得更加准确的短期蒸散量测定结果（赵华，2015）。

蒸渗仪可以研究水文循环中的地表径流、地下径流和蒸散等过程，如陈建耀等（1999）利用大型蒸渗仪对土壤 - 植物 - 大气连续体水分蒸散过程进行了模拟，为建立该系统内水分运移的模型积累了大量参数；王哲（2007）采用自制的笼屉式蒸渗仪对鄂尔多斯盆地地区的凝结水形成机理进行了研究。除了进行水文学方面的研究，大型称重式蒸渗仪的测量结果可以为其他蒸散量测定方法的标准化以及蒸散模型的参数化提供依据（WMO，1996），其测定结果也被推荐作为涡动方法蒸散研究的参照（郭家选等，2004；刘渡等，2012）。

蒸渗仪方法的优点是可以直接测定蒸散耗水量，是一种有效的农田蒸散测定方法。该方法的缺点是仪器腔体内外的土壤和植被差异可能影响该方法的精度，需要增大仪器尺寸并保持腔内作物与仪器周围大田一致来缩小边界效应的影响（刘钰和彭致功，2009）。腔体可能限制植物根系的生长，且随着腔内植被体形的增大，对设备的要

DOI: 10.7515/JEE191004

求也会更高，当蒸散失水量远小于植被与土壤的重量时，蒸散定量结果将会有较大误差（王安志和裴铁璠，2001）。此外大型蒸渗仪方法操作的复杂性和高昂的维护成本也是该方法应用的一大限制（王佩等，2017）。

2.1.4　零通量面法

零通量（ZFP）即土壤剖面上水势为零的面，该方法是通过将土壤水分运移的势能动力变化与土壤物理状况相结合来研究蒸散。零通量面以上的非饱和带水被蒸发或植物根系吸收所消耗，零通量面以下的水分则作为地下水补给，通过准确测定零通量面以上各层土壤蓄水变量即可测定蒸散量。该方法早期被用来计算土壤水分入渗，20 世纪 70 年代开始用于蒸散的测定（Cooper，1979），具有一定的理论基础，且只需要测定土壤水势以及土壤含水量等较为简单的参数。但零通量面法计算蒸散量时要求准确测定各土壤层含水量变化，当作物根系穿过零通量面进而吸取其下部土壤的水分时，该部分被植物蒸腾耗散的水量并没有包括在计算中，会造成误差（王笑影，2004）。同时零通量面法应用范围有限，多用于农田蒸散测定，且在地下水位高或降雨频繁导致零通量面不稳定时不能应用（司建华等，2005）。

2.1.5　土壤 - 植被 - 大气连续体（SPAC）水分传输综合模拟法

澳大利亚学者 Philip（1966）于 20 世纪 60 年代提出了完整的“土壤 - 植物 - 大气连续体（Soil-Plant-Atmosphere Continuum，SPAC）概念”。SPAC 系统中，尽管各界面介质不同，但却是一个连续统一的整体，水分从地下水到土壤，再到根表皮，穿过表皮进入根系的木质部，沿主根和枝茎的木质部导管到达叶片，再通过蒸腾作用由气孔进入空气层，整个系统中水分运动的各个过程可以相互链接，并可以用“水势”这个统一的能量指标来定量整个系统中各环节能量的变化。该理论充分考虑了水分在土壤、植物和大气这一相互关联的系统中迁移转换的过程，提出了水在土壤 - 植被 - 大气连续体中迁移转化的一般规律，并通过对水分在该系统内的传输过程进行模拟来得到蒸散结果。传统蒸散计算的模型多为应用气象资料、作物和土壤进行计算的单一模型，而 SPAC 则将单一模型与系统内的其他过程耦合，并基于研究目的发展出各类系统模型（胡继超等，2004），康绍忠等（1992）和刘昌明和窦清晨（1992）都对 SPAC 系统内水分传输过程进行了研究。

SPAC 方法是以水分垂直循环的动力学机制为研究对象，非常适用于干旱区内陆盆地蒸散研究，但该方法是在微观分解水文循环的基础上提出的，在研究的空间尺度上适用于“田间尺度”等小尺度的研究（周爱国等，2005）。

2.2　百米尺度蒸散量测算方法

本文论述的百米尺度方法包括波文比法和涡动相关法。二者均是基于微气象学原理发展而来，都是当前被广泛使用的蒸散量实测方法，其观测源区受地形、风速、风向、仪器搭设高度等条件影响，可达几十至上百米。在实际观测中，两种方法的观测结果都会受到下垫面均一程度和天气条件的影响。

2.2.1　波文比法

英国物理学家 Bowen 在 1926 年提出了波文比的概念（Bowen，1926），即地表能量平衡方程中的显热通量与潜热通量之比：

$$\beta = H/\mathrm{LE} \tag{1}$$

式中：β 为波文比，H 为显热，LE 为潜热。

该方法在使用时需要测定地表以上两层空气温度及水汽压差值，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，则有：

$$\beta = \gamma \Delta t/\Delta e \tag{2}$$

式中：γ 为干湿表常数，Δt 为两层高度的温度差，Δe 为两层高度的水汽压差。能量平衡方程的表达式为：

$$R_n = H + \mathrm{LE} + G \tag{3}$$

将能量平衡方程与波文比表达式联立可得显热和潜热通量表达式：

$$\mathrm{LE} = \frac{R_n - G}{1+\beta} \quad H = \frac{\beta}{1+\beta}(R_n - G) \tag{4}$$

式中：R_n 为净辐射量，G 为土壤热通量。

波文比法操作简便，花费少，只需要测定地面以上空气温度和水汽压的两层梯度。其假设传输是一维的，即水平方向上没有感热和潜热的传递，因此波文比法可广泛用于各类均一下垫面的通量观测（杨兴国等，2004；熊育久等，2014），而不需要测定和估算如湿度和粗糙度等参数（宋从和，1993）。但波文比方法要求忽略能量储存和热水平对流的影响，该要求需在均一下垫面或足够长的时间尺度上才能得以满足（Wang and Dickinson，

DOI: 10.7515/JEE191004

2012），导致波文比法在非均一下垫面的观测结果会有较大误差（黄妙芬，2003），这也限制了该方法的应用范围。此前美国内布拉斯加州开展的观测实验表明，在有平流热交换的条件下，波文比法的计算结果比实际蒸散量低 20%（Blad and Rosenberg，1974）。

2.2.2 涡动相关法

涡动相关技术（eddy covariance，EC）最初由 Swinbank（1951）提出，其原理是通过三维风速仪、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来计算该物理量的垂直湍流输送通量。其表达式为：

$$F_s=\overline{w's'} \tag{5}$$

式中：F_s 为某物理量 S 的垂直湍流输送通量，w' 为空气的瞬时垂直速度脉动值，s' 为物理量 S 的脉动量，上横线表示在一定的时间间隔上的平均。

该方法的特点是可以进行高时间分辨率通量观测（Wilson et al，2001）。由涡动技术的相关理论，显热和潜热通量可分别由以下公式进行计算：

$$H=\rho C_p\overline{w'T'},\ \mathrm{LE}=\lambda\overline{w'q'} \tag{6}$$

式中：ρ 为空气密度，C_p 为空气的定压比热，T' 和 q' 分别为温度和水汽含量的脉动值，λ 为水汽化潜热。

该方法于 20 世纪 50 年代首次在澳大利亚进行应用（Garratt and Hicks，1990），是当前最为广泛使用的通量测定方法。需要指出的是，涡动方法从原理上虽然是百米尺度的方法，但通过机载涡动相关和构建通量矩阵也可进行较大尺度的通量观测。而前人研究表明，机载涡动相关方法因其采集频率及飞行距离等限制，观测的通量数据与地面数据通常存在误差（刘绍民等，2010）；通量矩阵则是通过整合多点观测结果来进行大尺度通量观测，但该方法投入的人力物力较大，难以大范围应用。实际应用中，涡动方法常与遥感和闪烁仪等其他通量观测方法结合，用以观测不同下垫面的二氧化碳通量和水热通量（王维真等，2009），分析近地层能量收支（张芬等，2016），以及探究大范围蒸散的时空变化模式（Li et al，2018）。此外，各个 EC 观测站点的联合还可以进一步推动全球通量网络的建设，当前的全球通量网（FLUXNET）已经囊括了世界范围内超过 500 个站点，在欧洲和北美范围内都有很好的覆盖（Baldocchi，2008），为区域和全球的通量研究提供了数据支持。ChinaFlux 作为 FLUXNET 的成员，其通量观测网络也在快速建设中，如于贵瑞等已牵头举办了多次中国通量观测研究会议，为国内各通量台站数据的共享及集成利用提供了平台。

但在实际应用中，涡动方法也存在一些限制。在湍流运动强度较弱的条件下，涡动相关法难以得到准确的数据（Lee et al，1996），并且其观测结果容易受到降水影响（Pauwels and Samson，2006），有时需要进行数据插补。此外，该方法的潜热通量结果通常有 5%—20% 的误差（Foken，2008），近地层的通量观测通常会出现能量不闭合现象（Culfet al，2008），需要分析误差来源。如王介民等（2009）在“黑河综合实验”阿柔站的通量观测中，通过计算土壤热储存相，对涡动数据进行高低频损失修正，并参考大孔径闪烁仪（large-aperture scintillometer，LAS）观测数据，使涡动观测的能量闭合度最终达到 99%。

2.3 公里尺度蒸散量测算方法

本文论述的公里尺度方法主要为闪烁仪法。该方法同样基于微气象学原理发展而来。作为一种蒸散量实测方法，闪烁仪方法应用于蒸散研究的历史较短，但该方法可在数公里的光路距离上进行面元通量的测定，在一些复杂下垫面，如喀斯特小流域，具有较好的应用前景。此外，该方法作为一种公里尺度的蒸散实测方法，其观测尺度可匹配于蒸散模型的验证（孙根厚等，2016）。

光闪烁法是基于微气象学发展而来的通量测定方法。“闪烁”现象的研究可以追溯到早期的天文观测，夜晚看到的星星“眨眼”就是最直观的闪烁现象。此后近地面的闪烁强度逐渐被应用于气象学和水文学等学科。“闪烁”现象是指光在空气中传播时，受到空气温湿度变化的影响而产生了不同程度的折射和散射，造成在接收端测到的光强不断产生波动，大孔径闪烁仪就是根据接收光强的起伏波动，按照下述公式计算出空气折射率结构参数$C_{n,\mathrm{LAS}}^2$：

$$C_{n,\mathrm{LAS}}^2=1.12\sigma_{\ln I}^2D^{7/3}L^{-3} \tag{7}$$

式中：$C_{n,\mathrm{LAS}}^2$为 LAS 的空气折射率结构参数（$\mathrm{m}^{-2/3}$），$\sigma_{\ln I}^2$为接收光强（I）的自然对数方差，D 为光学孔径（m），L 为发射端和接收端的距离（m）。

而空气折射率结构参数的变化主要会受到温度或湿度的影响（Wesely，1976），由此进一步计算

DOI: 10.7515/JEE191004

出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算出显热通量。

基于上述原理制造的闪烁仪由相距百米到数公里的信号发射端和接收端组成，基于莫宁 - 奥布赫夫相似理论来计算光路上的路径平均通量。根据闪烁仪光源的波长范围，可将其分为光学闪烁仪和微波闪烁仪。上文所述的大孔径闪烁仪即是光学波段的闪烁仪，其发出的信号在空气中的折射率变化主要受温度影响，该类闪烁仪适用于测定显热通量，潜热通量通过能量平衡方程作为余项求得。而微波波段闪烁仪（microwave scintillometer，MWS）的折射率变化主要受湿度控制，构建 MWS-LAS 双波长系统，即光学 / 微波闪烁仪系统（optical and microwave scintillometer systems，OMS），可同时测定显热和潜热通量。具体应用中，OMS 又分为“双波长法”和“双波长相关法”，两种方法都需要通过公式 (8) 计算微波波段的$C_{n,\mathrm{OMS}}^2$：

$$C_{n,\mathrm{MWS}}^2=2.015\sigma_{\ln I}^2K^{-7/6}L^{-11/6} \tag{8}$$

式中：K 为空间波数（$2\pi/\lambda$，λ 为波长，m），$\sigma_{\ln I}^2$ 为接收光强（I）的自然对数方差，L 为发射端和接收端的距离（m）。

并通过公式 (9) 构建C_n^2与C_T^2和C_q^2的方程：

$$C_n^2=\frac{A_T^2}{\overline{T}^2}C_T^2+\frac{2A_TA_q}{\overline{T}\,\overline{q}}C_{Tq}+\frac{A_q^2}{\overline{q}^2}C_q^2 \tag{9}$$

式中：A_T、A_q 分别为温度和湿度结构参数系数，$\overline{T}$ 为平均温度（K），$\overline{q}$为平均湿度（$\mathrm{kg\cdot kg^{-1}}$），C_T^2和C_q^2分别为温度结构参数和湿度结构参数，C_{Tq}为温湿度交互结构参数。

“双波长法”是利用$C_{n,\mathrm{LAS}}^2$和$C_{n,\mathrm{MWS}}^2$构建两个关于C_T^2和C_q^2的方程，假设 $C_{Tq}=\pm R_{Tq}\sqrt{C_T^2C_q^2}$，（$R_{Tq}$ 为经验值，通常取 ±1），计算出C_T^2和C_q^2进而计算通量结果。而“双波长相关法”除了$C_{n,\mathrm{LAS}}^2$和$C_{n,\mathrm{MWS}}^2$之外，还通过公式 (10) 求得 LAS 与 MWS 交互的空气折射指数结构参数$C_{n,\mathrm{OMS}}^2$：

$$C_{n,\mathrm{OMS}}^2=A\sigma_{\ln I}^2K^{-7/6}L^{-11/6} \tag{10}$$

式中：A 为待定系数。并由$C_{n,\mathrm{LAS}}^2$、$C_{n,\mathrm{MWS}}^2$和$C_{n,\mathrm{OMS}}^2$构建三个关于C_T^2、C_q^2和 C_{Tq} 的方程，求得C_T^2、C_q^2并进一步计算通量。

闪烁仪方法的基础源于早期有关波在介质中传播的研究（Kolmogorov，1991），此后闪烁仪测定通量的设想在 20 世纪 70 年代被提出并由美国国家海洋大气局（NOAA）建造了第一台闪烁仪，但基于该方法的复杂性，闪烁仪测定通量的研究并不多见。此后的时间内，微波闪烁仪（MWS）等各类闪烁仪设备陆续开始出现，并于 19 世纪后段广泛应用于陆面通量观测，由此开始了闪烁仪通量观测的兴盛时期（de Bruin，2002）。

与其他蒸散测算方法的应用历史相比，闪烁仪方法是一种较新的方法，但此前已经有学者在各种下垫面进行了闪烁仪的通量观测。在草地及平坦裸地等均一下垫面上，大孔径闪烁仪均能得到合理的通量观测结果（卢俐等，2009；Savage et al，2010）。而在果林、耕地和混合植被等非均一下垫面，大孔径闪烁仪通量观测结果与 EC 结果也有较好的一致性（卢俐等，2009；Ezzahar et al，2009；Evans et al，2012），证明闪烁仪是测定非均一下垫面蒸散量的有效方法。同时，在近郊和城市下垫面，通量观测需要更加重视方法的空间代表性，测定路径平均通量的光闪烁法在此类下垫面具有广泛的应用前景（Kanda et al，2002；Ward et al，2015；Zhang and Zhang，2015）。在双波长系统研究方面，Meijninger et al（2006）的实验表明 LAS-MWS 的通量观测结果与涡动相关法的结果有较好的一致性，而 Mei et al（2015）的实验结果表明在半干旱和干旱环境下，更推荐光学闪烁仪方法进行显热通量的测定。

在流域尺度开展的工作中，Samain et al（2011）的研究结果表明光路距离为 9.5 km，有效高度为 68 m 的闪烁仪通量观测结果在面积为 102.3 $\mathrm{km^2}$ 的流域具有代表性，Ezzahar et al（2009）也进行了流域尺度的闪烁仪通量研究，其结果与涡动相关法也有较好的一致性。此外，在中国黑河流域开展的通量观测实验室中，Liu et al（2011，2013）利用 LAS 和 EC 的通量观测结果，对不同季节的能量平衡状况进行了分析，此后又通过将 EC 和 LAS 的蒸散结果与水平衡法和蒸散模型等方法对比，探究了 2013 年之前 15 年间黑河流域的蒸散变化趋势。

前人研究结果表明，光闪烁法虽是一种较新的蒸散定量方法，但其基于微气象学理论发展而来，具有完备的理论基础，可根据发射端和接收端的光路距离来进行面元通量测定，适用于流域尺度复杂下垫面的蒸散定量工作，并且其观测尺度能与遥感方法匹配，可用于蒸散模型的验证。

DOI: 10.7515/JEE191004

但需要注意的是，大孔径闪烁仪测定的通量结果没有符号，无法判断大气稳定度。此外，大气处于稳定状态时的显热通量通常被认为是 0，但在实际情况中，大气稳定状态下显热通量（H_{stable}）通常为负，该条件下显热通量常会被高估，所以 LAS 得到的蒸散数据在夏季准确，在大气普遍处于稳定状态的秋季和冬季则低估了蒸散量（Samain and Pauwels，2013），在大气稳定状态盛行的季节，有必要对 H_{stable} 进行计算（Samain et al，2012）。光闪烁法是用测得的空气折射率结构参数结合莫宁 - 奥布霍夫相似理论来获得通量结果，大气平稳状态或湍流很强的状态都会对观测结果造成影响（张功等，2018），观测过程中出现的“饱和效应”也会造成结果误差。另外，仪器本身的系统误差也会对通量观测造成影响，如相关研究结果显示，Kipp & Zonen 公司同型号六台 LAS 之间的显热回归斜率最大差异可达 21%（Kleissl et al，2008）。总体来说，前人研究已经证明闪烁仪可用于区域尺度及复杂下垫面的蒸散定量，但该方法在各类下垫面的应用还有待更深入的研究。

2.4 流域、区域尺度蒸散量测算方法

水平衡法和空间遥感法都能进行较大尺度的蒸散量估算。水平衡法应用范围广泛，且不存在天气对观测设备的影响，但该方法无法应用于如喀斯特小流域等存在地下漏失的不闭合流域。而空间遥感法是目前最广泛应用的区域蒸散量估算方法，但该方法在一些复杂下垫面的精度还有待提高，且蒸散模型的验证还需要依靠相应的地表观测数据。

2.4.1 水平衡法

在给定时间内，基于一定范围，通过计算蒸散以外的其他水均衡要素，将蒸散作为余项求出。对于闭合的小流域，其水平衡方程可简化为如下表达式：

$$\Delta W = P - E - R \tag{11}$$

式中：ΔW 为某时段内流域蓄水量的变化，是地表水、地下水和土壤水的总蓄变量；P 为同时段流域内总的降水量；E 为该时段内流域总的蒸散量，包括土壤蒸发、植物蒸腾、水面和潜水蒸发等；R 为该时段内流域出口断面总的径流量，包括地表和地下径流等。

该方法的应用在空间尺度上小至几平方米，大至几十平方千米，且不受气象因素影响，适用范围十分广泛，与经验模型结合可对全球蒸散变化进行分析（Zeng et al，2012）。在流域尺度的应用中，对于闭合流域，流域内蓄水量的变化相对多年平均趋近于零（朱新军等，2008），其水平衡方程可简化为多年平均降水量等于径流量与蒸散量之和。但针对不闭合流域，尤其是地下河道错综复杂的喀斯特小流域，水均衡要素中的漏失水量部分难以定量（周念清等，2009），导致无法进行准确的水平衡计算。同时，水平衡法测定时间较长，要求的时间尺度在一周以上，难以反映蒸散的短期动态变化（武夏宁等，2006）。

2.4.2 空间遥感法

自 20 世纪 70 年代起，利用遥感技术进行蒸散计算的研究开始兴起，Brown 和 Rosenberg 于 1973 年根据能量平衡原理和作物阻抗原理建立了作物阻抗 – 蒸散发模型（Brown and Rosenberg，1973），这一研究成果也为热红外遥感温度应用于作物蒸散模型提供了理论基础。遥感方法不能直接测定蒸散，而是通过卫星或飞机的探头在高空遥测获得近红外和热红外波段的数据，通过反演获得地表反射率和植被指数以及地表温度和比辐射率等参数，进而建立模型计算蒸散，主要包括经验模型、基于能量平衡原理的遥感蒸发模型、陆面过程模型、互补相关模型等。

此外，传统公式也可借助遥感手段，在像元空间实现尺度拓展，例如著名的 Penman-Monteith 方法最早多应用于田块尺度，后来也结合遥感反演公里网格的 ET。该方法基于 Penman 在 1948 年提出的用以计算潜在蒸发的彭曼公式，此后由 Covey 于 1959 年将气孔阻抗的概念推广到整个植被冠层表面，并最终由 Monteith 在前人的基础上于 1965 年提出了冠层蒸散计算模式，即 Penman-Monteith 模式（张劲松等，2001）。该方法将大气的物理特性和植物的生理特性纳入考量，有较好的物理基础和精度，得到了广泛的运用。如李林等（2000）运用该方法对黄河上游流域的蒸散量变化进行了研究，发现了该地区蒸散量的增长趋势。

Penman-Monteith 公式在中性层结条件下能获得较好的结果，与红外遥测技术测定的森林表面温度结合，可以进行大范围蒸散量的计算（司建华等，2005）。该方法是将植被作为一个整体看待，将植物冠层看作一片大叶，潜热交换就在这片大叶上发生，该方法适用于有植被覆盖的陆面

DOI: 10.7515/JEE191004

蒸散量计算，且下垫面最好均一化。在植被组成复杂、植被稀疏或者地表有大面积裸露的情况下会出现较大的误差（刘钰和彭致功，2009）。

遥感方法的优点在于能够连续得到不同空间尺度的地表特征信息，进而利用这些信息建立经验公式和计算模型，将蒸散量的计算工作拓展到详尽气象资料缺失的区域。该方法的观测尺度大，克服了小尺度方法测算蒸散量时以点带面的局限性（屈艳萍等，2006）。郭晓寅（2005）利用遥感模型对黑河流域蒸散发的时空分布特征进行了研究；刘绍民等（2004）通过互补相关模型较好地对黄河流域蒸散量进行了估算；Ma et al（2018）利用基于垂直方向能量平衡的单源模型，在高时空分辨率条件下对日蒸散量和灌溉水分利用效率进行了估算；Song et al（2018）则在黑河流域通过双源模型，进行了多年、各类天气条件下的蒸散量估算。此前有文献提出在下垫面比较复杂的区域，遥感蒸散估算的精度常常达不到要求（左大康和覃文汉，1988），但随着遥感技术的发展，该方法在复杂下垫面的精度已经有所提升。如钟昊哲等（2018）已基于遥感模型对桂西北喀斯特植被恢复区的蒸散量进行了估算，并与地面实测数据进行了对比验证。

总体来说，遥感法是当前广泛使用的大尺度蒸散量估算方法，基于遥感数据建立的各类模型可适用于多种研究场景，并且随着技术的进步其精度也在不断提高。但遥感蒸散模型的建立和验证需要有相应尺度的地面实测蒸散数据作为依据，这是遥感方法应用在水文监测领域的技术限制（张功等，2018）。

3　讨论和展望

针对下垫面复杂的小流域，如喀斯特小流域，推荐使用闪烁仪方法进行蒸散定量研究。该方法在数公里长的光路距离上可以进行面元通量的实测，且适用于非均一下垫面。使用闪烁仪方法时，建议与涡动相关方法的观测结果进行比对，并尽量保证涡动相关的数量和安装位置能够覆盖研究区的各类下垫面，使后期整合的涡动相关数据能够与闪烁仪观测结果能更好的匹配。此外，闪烁仪有效高度的计算需要提供光路投影在下垫面的高程数据，在地形起伏较大的地区，建议选择高精度的无人机高程数据来计算闪烁仪设备的有效高度。

在流域、区域蒸散研究中，由多套涡动相关设备组成的通量观测网络和遥感方法都具有较好的应用前景。由多套涡动相关系统构建的通量观测网格化产品（FLUXNET）在欧美及亚太地区都已颇具规模，为相关研究提供了坚实的数据基础。而遥感方法则是当前广泛使用的一种蒸散量估算方法，且随着技术的进步其精度也在不断提升，并已经能够用于流域复杂下垫面的蒸散量计算。

需要注意的是，每一种蒸散测算方法都是结合特定的对向和应用条件逐渐发展而来，都有自身的侧重，因此多种方法的综合对比可以更好地评估各类方法的适用性（Kite and Droogers，2000）。在流域和区域尺度研究中，选择具有较大观测尺度的蒸散测算方法时，也应注意不同尺度方法间的相互结合，从而得到更为可靠的蒸散定量结果。例如 Zhang et al（2018）在喀斯特地区开展的蒸散研究以及 Liu et al（2018）在黑河流域建立的综合观测网络；前者结合了遥感法、蒸渗仪法、热探针法和风调室法的观测结果，测定了喀斯特地区不同类型下垫面的蒸散量，并分析了其控制因素；后者自 2007 年建成以来，已在 2012 年开展了包括通量矩阵、遥感方法以及地面同步观测工作在内的多尺度观测试验，现已建成黑河流域地表过程综合观测网络。该观测网络通过结合遥感法、闪烁仪法和涡动相关法等多种通量观测方法，并配合其他水文气象要素，对黑河流域陆面过程进行了深入分析（Liu et al，2018）。

在蒸散研究工作中，实际下垫面情况往往错综复杂，可能会出现此前工作中未遇到过的地形和气象条件，微气象学通量观测方法在复杂下垫面的应用还有待更深入的研究。在西南地区的重庆北碚和贵州普定等地已开展了基于喀斯特下垫面的微气象学方法通量观测，未来的研究方向应加强各学科和各研究团队之间的交流学习以及相互合作，将各类下垫面的观测结果进行对比和讨论。

参考文献

陈建耀，刘昌明，吴　凯．1999. 利用大型蒸渗仪模拟土壤 - 植物 - 大气连续体水分蒸散 [J]. *应用生态学报*，10(1): 45－48. [Chen J Y, Liu C M, Wu K.1999. Evapotranspiration of soil-plant-atmospheric continuum—a simulation study with lysimeter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(1): 45－48.]

郭家选，梅旭荣，卢志光，等．2004. 测定农田蒸散的涡度相

DOI: 10.7515/JEE191004

关技术 [J]. *中国农业科学* , 37(8): 1172–1176. [Guo J X, Mei X R, Lu Z G, et al. 2004. Field evapotranspiration measurement based on eddy covariance technology [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 37(8): 1172–1176.]

郭晓寅 . 2005. 黑河流域蒸散发分布的遥感研究 [J]. *自然科学进展* , 15(10): 1266–1270. [Guo X Y. 2005. Remote sensing study on evapotranspiration distribution in Heihe River basin [J]. *Progress in Natural Science*, 15(10): 1266–1270.]

胡继超 , 张佳宝 , 冯　杰 . 2004. 蒸散的测定和模拟计算研究进展 [J]. *土壤* , 36(5): 492–497. [Hu J C, Zhang J B, Feng J. 2004. Measurement and estimation of evapotranspiration [J]. *Soils*, 36(5): 492–497.]

黄妙芬 . 2003. 地表通量研究进展 [J]. *干旱区地理* , 26(2): 159–165. [Huang M F. 2003. Advance of research on surface flux [J]. *Arid Land Geography*, 26(2): 159–165.]

康绍忠 , 刘晓明 , 高新科 , 等 . 1992. 土壤 - 植物 - 大气连续体水分传输的计算机模拟 [J]. *水利学报* , (3): 1–12. [Kang S Z, Liu X M, Gao X K, et al. 1992. Computer simulation of water transport in soil-plant-atmosphere continuum [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, (3): 1–12.]

李　林 , 张国胜 , 汪青春 , 等 . 2000. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究 [J]. *地球科学进展* , 15(3): 256–259. [Li L, Zhang G S, Wang Q C, et al. 2000. Study on evapotranspiration and it's impact pactors over Yellow River upper stream area [J]. *Advance in Earth Sciences*, 15(3): 256–259.]

刘昌明 , 窦清晨 . 1992. 土壤 - 植物 - 大气连续体模型中的蒸散发计算 [J]. *水科学进展* , 3(4): 255–263. [Liu C M, Dou Q C. 1992. Method of evapotranspiration estimation in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) [J]. *Advances in Water Science*, 3(4): 255–263.]

刘　渡 , 李　俊 , 于　强 , 等 . 2012. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响 [J]. *生态学报* , 32(17): 5309–5317. [Liu D, Li J, Yu Q, et al. 2012. Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(17): 5309–5317.]

刘奉觉 , Edwards W R N, 郑世锴 , 等 . 1993. 杨树树干液流时空动态研究 [J]. *林业科学研究* , 6(4): 368–372. [Liu F J, Edwards W R N, Zheng S K, et al. 1993. A study on the dynamics of sap flow in space and time in poplar stems [J]. *Forest Research*, 6(4): 368–372.]

刘绍民 , 李小文 , 施生锦 , 等 . 2010. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用 [J]. *地球科学进展* , 25(11): 1113–1127. [Liu S M, Li X W, Shi S J, et al. 2010. Measurement, analysis and application of surface energy and water vapor fluxes at large scale [J]. *Advances in Earth science*, 25(11): 1113–1127.]

刘绍民 , 孙　睿 , 孙中平 , 等 . 2004. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较 [J]. *地理学报* , 59(3): 331–340. [Liu S M, Sun R, Sun Z P, et al. 2004. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 59(3): 331–340.]

刘　钰 , 彭致功 . 2009. 区域蒸散发监测与估算方法研究综述 [J]. *中国水利水电科学研究院学报* , 7(2): 96–104. [Liu Y, Peng Z G. 2009. A review of monitoring and estimating methods for regional evapotranspiration [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 7(2): 96–104.]

卢　俐 , 刘绍民 , 徐自为 , 等 . 2009. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析 [J]. *应用气象学报* , 20(2): 171–178. [Lu L, Liu S M, Xu Z W, et al. 2009. Results from measurements of large aperture scintillometer over different surfaces [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 20(2): 171–178.]

屈艳萍 , 康绍忠 , 张晓涛 , 等 . 2006. 植物蒸发蒸腾量测定方法述评 [J]. *水利水电科技进展* , 26(3): 72–77. [Qu Y P, Kang S Z, Zhang X T, et al. 2006. A review of methods for measurement of evapotranspiration from plants [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 26(3): 72–77.]

司建华 , 冯　起 , 张小由 , 等 . 2005. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展 [J]. *水科学进展* , 16(3): 450–459. [Si J H, Feng Q, Zhang X Y, et al. 2005. Research progress on surveying and calculation of evapotranspiration of plants and its prospects [J]. *Advances in Water Science*, 16(3): 450–459.]

宋从和 . 1993. 波文比能量平衡法的应用及其误差分析 [J]. *河北林学院学报* , 8(1): 85–96. [Song C H. 1993. The application of Bowen ratio-energy balance method and error analysis [J]. *Journal of Hebei Forestry College*, 8(1): 85–96.]

孙根厚 , 胡泽勇 , 王介民 , 等 . 2016. 那曲地区两种空间尺度感热通量的对比分析 [J]. *高原气象* , 35(2): 285–296.

DOI: 10.7515/JEE191004

[Sun G H, Hu Z Y, Wang J M, et al. 2016. Comparison analysis of sensible heat fluxes at two spatial scales in Naqu area [J]. *Plateau Meteorology*, 35(2): 285–296.]

田　雷 , 杨胜天 , 王玉娟 . 2008. 应用遥感技术研究贵州春季蒸散发空间分异规律 [J]. *水土保持研究* , 15(1): 87–91. [Tian L, Yang S T, Wang Y J. 2008. Research on the spring evapotranspiration of Karst area based on RS and GIS in Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 15(1): 87–91.]

王安志 , 裴铁璠 . 2001. 森林蒸散测算方法研究进展与展望 [J]. *应用生态学报* , 12(6): 933–937. [Wang A Z, Pei T F. 2001. Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12(6): 933–937.]

王介民 , 王维真 , 刘绍民 , 等 . 2009. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析 [J]. *地球科学进展* , 24(7): 705–713. [Wang J M, Wang W Z, Liu S M, et al. 2009. The problems of surface energy balance closure — an overview and case study [J]. *Advances in Earth Science*, 24(7): 705–713.]

王腊春 , 史运良 . 2006. 西南喀斯特山区三水转化与水资源过程及合理利用 [J]. *地理科学* , 26(2): 173–178. [Wang L C, Shi Y L. 2006. Formation process and rational use of water resources and transform of rainfall, surface water and underground water in karst mountainous area in southwest China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 26(2): 173–178.]

王　佩 , 马琪顺 , 王家琪 , 等 . 2017. 温带草地蒸散发及波文比观测与比较：涡动相关及波文比系统 [J]. *草地学报* , 25(3): 453–459. [Wang P, Ma Q S, Wang J Q, et al. 2017. Comparison of evapotranspiration and Bowen ratio measured by eddy correlation and Bowen ratio system in a temperate grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 25(3): 453–459.]

王维真 , 徐自为 , 刘绍民 , 等 . 2009. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析 [J]. *地球科学进展* , 24(7): 714–723. [Wang W Z, Xu Z W, Liu S M, et al. 2009. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe River basin [J]. *Advances in Earth Science*, 24(7): 714–723.]

王笑影 . 2004. 农田蒸散实测方法研究进展 [J]. *农业系统科学与综合研究* , 20(1): 27–30. [Wang X Y. 2004. Study of the measuring methods for evapotranspiration in farmland [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 20(1): 27–30.]

王　哲 . 2007. 鄂尔多斯盆地风沙滩地区凝结水形成机理的实验研究 [D]. 西安 : 长安大学 . [Wang Z. 2007. Experiment research regarding formation mechanisms of condensing water in the wind beach area of Ordos [D]. Xi'an: Chang'an University.]

武夏宁 , 胡铁松 , 王修贵 , 等 . 2006. 区域蒸散发估算测定方法综述 [J]. *农业工程学报* , 22(10): 257–262. [Wu X N, Hu T S, Wang X G, et al. 2006. Review of estimating and measuring regional evapotranspiration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 22(10): 257–262.]

熊育久 , 邱国玉 , 谢　芳 . 2014. 内蒙古太仆寺旗退耕草地植物种类变化与水分收支 [J]. *植物生态学报* , 38(5): 425–439. [Xiong Y J, Qiu G Y, Xie F. 2014. Plant species change and water budget in restored grasslands in Taibus Banner, Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(5): 425–439.]

杨兴国 , 张　强 , 王润元 , 等 . 2004. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究 [J]. *高原气象* , 23(6): 828–834. [Yang X G, Zhang Q, Wang R Y, et al. 2004. Experimental study on surface energy balance over Loess Plateau of middle part Gansu in summer [J]. *Plateau Meteorology*, 23(6): 828–834.]

张　芬 , 刘绍民 , 徐自为 , 等 . 2016. 张掖绿洲 - 荒漠区域近地层微气象与水热交换特征 [J]. *高原气象* , 35(5): 1233–1247. [Zhang F, Liu S M, Xu Z W, et al. 2016. Characteristics of micrometeorology and energy transfer in the surface layer over the Zhangye oasis-desert area [J]. *Plateau Meteorology*, 35(5): 1233–1247.]

张　功 , 郑　宁 , 张劲松 , 等 . 2018. 光闪烁方法测算区域蒸散研究进展 [J]. *生态学报* , 38(8): 2625–2635. [Zhang G, Zheng N, Zhang J S, et al. 2018. Advances in the study of regional-averaged evapotranspiration using the scintillation method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(8): 2625–2635.]

赵　华 . 2015. 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 . [Zhao H. 2015. Measurement of crop evapotranspiration via lysimeters with different diameters and simulation of canopy resistance [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology.]

DOI: 10.7515/JEE191004

张劲松 , 孟　平 , 尹昌君 . 2001. 植物蒸散耗水量计算方法综述 [J]. *世界林业研究* , 14(2): 23–28. [Zhang J S, Meng P, Yin C J. 2001. Review on methods of estimating evapotranspiration of plants [J]. *World Forestry Research*, 14(2): 23–28.]

钟昊哲 , 徐宪立 , 张荣飞 , 等 . 2018. 基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算 [J]. *应用生态学报* , 29(5): 1617–1625. [Zhong H Z, Xu X L, Zhang R F, et al. 2018. MODIS-driven estimation of regional evapotranspiration in karst area of southwest China based on the Penman-Monteith-Leuning algorithm [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(5): 1617–1625.]

周爱国 , 马　瑞 , 张　晨 . 2005. 中国西北内陆盆地水分垂直循环及其生态学意义 [J]. *水科学进展* , 16(1): 127–133. [Zhou A G, Ma R, Zhang C. 2005. Vertical water cycle and its ecological effect in inland basins, northwest China [J]. *Advances in Water Science*, 16(1): 127–133.]

周念清 , 李彩霞 , 江思珉 , 等 . 2009. 普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究 [J]. *水土保持通报* , 29(1): 7–11. [Zhou N Q, Li C X, Jiang S M, et al. 2009. Models of soil and water loss and soil leakage in Puding karst area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(1): 7–11.]

朱新军 , 王中根 , 夏　军 , 等 . 2008. 基于分布式模拟的流域水平衡分析研究——以海河流域为例 [J]. *地理科学进展* , 27(4): 23–27. [Zhu X J, Wang Z G, Xia J, et al. 2008. Basin level water balance analysis study based on distributed hydrological model—case study in the Haihe River basin [J]. *Progress in Geography*, 27(4): 23–27.]

左大康 , 覃文汉 . 1988. 国外蒸发研究的进展 [J]. *地理研究* , 7(1): 86–94. [Zuo D K, Qin W H. 1988. A review of evaporation study in the world [J]. *Geographical Research*, 7(1): 86–94.]

Baldocchi D. 2008. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems [J]. *Australian Journal of Botany*, 56(1). DOI: 10.1071/BT07151.

Blad B L, Rosenberg N J. 1974. Lysimetric calibration of the Bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great Plains [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 13(2): 227–236.

Bowen I S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. *Physical Review*, 27(6): 779–787.

Brown K W, Rosenberg N J. 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field [J]. *Agronomy Journal*, 65(3): 341–347.

de Bruin H. 2002. Introduction: renaissance of scintillometry [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 105: 1–4.

Cooper J D. 1979. Water use of a tea estate from soil moisture measurements [J]. *East African Agricultural & Forestry Journal*, 43(S1): 102–121.

Culf A D, Foken T, Gash J H C. 2008. The energy balance closure problem [M]// Kabat P, Claussen M, Dirmeyer PA, et al. Vegetation, water, humans and the climate. Heidelberg: Springer: 159–166.

Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M. 2005. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1/2): 85–94.

Evans J G, McNeil D D, Finch J W, et al. 2012. Determination of turbulent heat fluxes using a large aperture scintillometer over undulating mixed agricultural terrain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166/167: 221–233.

Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J, et al. 2009. Combining scintillometer measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 375(1/2): 217–226.

Foken T. 2008. The energy balance closure problem: an overview [J]. *Ecological Applications*, 18(6): 1351–1367.

Garratt J R, Hicks B B. 1990. Micrometeorological and PBL experiments in Australia [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 50: 11–29.

Garstka W U. 1938. Design of the automatic recording in-place lysimeters near Coshocton, Ohio [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2(C): 555–559.

Greenwood E A N, Beresford J D. 1979. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique: Ⅰ. Comparative transpiration from juvenile Eucalyptus above saline groundwater seeps [J]. *Journal of Hydrology*, 42(3/4): 369–382.

Huntington T G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 319(1/2/3/4): 83–95.

Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. *Nature*, 496(7445): 347–350.

Kanda M, Moriwaki R, Roth M, et al. 2002. Area-averaged sensible heat flux and a new method to determine zero-plane displacement length over an urban surface using scintillometry [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 105(1): 177–193.

Kite G W, Droogers P. 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data [J]. *Journal of Hydrology*, 229(1/2): 3–18.

Kleissl J, Gomez J, Hong S H, et al. 2008. Large aperture scintillometer intercomparison study [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 128(1): 133–150.

Kohnke H, Dreibelbis F R, Davidson J M. 1940. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance [M]. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture.

Kolmogorov A N. 1991. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers [J]. *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, 434(1890): 9–13.

Kool D, Agam N, Lazarovitch N, et al. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 56–70.

Lee X, Black T, den Hartog G, et al. 1996. Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81(1/2): 13–29.

Li X Y, He Y, Zeng Z Z, et al. 2018. Spatiotemporal pattern of terrestrial evapotranspiration in China during the past thirty years [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259: 131–140.

Liu S M, Li X, Xu Z W, et al. 2018. The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China [J]. *Vadose Zone Journal*, 17(1). DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072.

Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. 2011. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4): 1291–1306.

Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 487: 24–38.

Ma Y F, Liu S M, Song L S, et al. 2018. Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 216: 715–734.

Mei S Y, Pauwels V R N, Daly E, et al. 2015. A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213: 226–239.

Meijninger W M L, Beyrich F, Lüdi A, et al. 2006. Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface—a contribution to litfass-2003 [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(1): 89–110.

Miralles D G, van den Berg M J, Gash J H, et al. 2014. El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation [J]. *Nature Climate Change*, 4(2): 122–126.

Pauwels V R N, Samson R. 2006. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland [J]. *Agricultural Water Management*, 82(1/2): 1–24.

Philip J R. 1966. Plant water relations: some physical aspects [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 17(1): 245–268.

Samain B, Defloor W, Pauwels V R N. 2012. Continuous time series of catchment-averaged sensible heat flux from a large aperture scintillometer: efficient estimation of stability conditions and importance of fluxes under stable conditions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2): 423–442.

Samain B, Ferket B V A, Defloor W, et al. 2011. Estimation of catchment averaged sensible heat fluxes using a large aperture scintillometer [J]. *Water Resources Research*, 47(5). DOI: 10.1029/2009WR009032.

Samain B, Pauwels V R N. 2013. Impact of potential and (scintillometer-based) actual evapotranspiration estimates on the performance of a lumped rainfall-runoff model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11): 4525–4540.

Savage M J, Odhiambo G O, Mengistu M G, et al. 2010. Measurement of grassland evaporation using a surface-layer scintillometer [J]. *Water SA*, 36(1). DOI:10.4314/wsa.v36i1.50901.

Schlesinger W H, Jasechko S. 2014. Transpiration in the global water cycle [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189/190: 115–117.

Scott R L, Huxman T E, Cable W L, et al. 2006. Partitioning

DOI: 10.7515/JEE191004

of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide exchange in a Chihuahuan Desert shrubland [J]. *Hydrological Processes*, 20(15): 3227–3243.

Song L S, Liu S M, Kustas W P, et al. 2018. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 219: 72–88.

Swinbank W C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [J]. *Journal of Meteorology*, 8(3): 135–145.

Vörösmarty C J, Federer C A, Schloss A L. 1998. Potential evaporation functions compared on US watersheds: possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 207(3/4): 147–169.

Wang K C, Dickinson R E. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. *Reviews of Geophysics*, 50(2). DOI: 10.1029/2011RG000373.

Wang K C, Dickinson R E, Wild M, et al. 2010. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. model development [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(D20). DOI: 10.1029/2009JD013671.

Wang T, Ochs G R, Clifford S F. 1978. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 68(3): 334–338.

Ward H C, Evans J G, Grimmond C S B. 2015. Infrared and millimetre-wave scintillometry in the suburban environment—part 2: large-area sensible and latent heat fluxes [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1407–1424.

Wesely M L. 1976. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 15(1): 43–49.

Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(1): 31–49.

Wilson K B, Hanson P J, Mulholland P J, et al. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2): 153–168.

WMO. 1996. Guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. Geneva: WMO.

Wullschleger S D, Meinzer F C, Vertessy R A. 1998. A review of whole-plant water use studies in tree [J]. *Tree Physiology*, 18(8/9): 499–512.

Xiao J F, Sun G, Chen J Q, et al. 2013. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182/183: 76–90.

Yang Y T, Shang S H, Jiang L. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: 112–122.

Zeng Z Z, Piao S L, Lin X, et al. 2012. Global evapotranspiration over the past three decades: estimation based on the water balance equation combined with empirical models [J]. *Environmental Research Letters*, 7(1). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/014026.

Zeng Z Z, Wang T, Zhou F, et al. 2014. A worldwide analysis of spatiotemporal changes in water balance-based evapotranspiration from 1982 to 2009 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(3): 1186–1202.

Zhang H, Zhang H S. 2015. Comparison of turbulent sensible heat flux determined by large-aperture scintillometer and eddy covariance over urban and suburban areas [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 154(1): 119–136.

Zhang Q, Singh V P, Sun P, et al. 2011. Precipitation and streamflow changes in China: Changing patterns, causes and implications [J]. *Journal of Hydrology*, 410(3/4): 204–216.

Zhang R F, Xu X L, Liu M X, et al. 2018. Comparing evapotranspiration characteristics and environmental controls for three agroforestry ecosystems in a subtropical humid karst area [J]. *Journal of Hydrology*, 563: 1042–1050.