

# 蒸散的测定和模拟计算研究进展

胡继超 张佳宝 冯 杰

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008)

**摘 要** 蒸散是地表水分循环重要而复杂的过程。本文综述了近年来国内外蒸散测定和模拟的最新进展。在测定方法上, TDR、微蒸渗仪和涡度相关技术的使用明显增加及遥感技术的应用大大加强, 自动化和传感器制造技术的进步, 提高了蒸散测定的精度和时空分辨率。在模拟计算方面, 应用 Priestley-Taylor 公式、Penman 公式、Penman-Monteith 方程等单一模型较多, 但研究上已转向以 Shuttleworth-Wallace 模型为基础可估算不同植被类型和下垫面蒸散的多层模型。遥感估算区域蒸散进展明显, 已提出了多种遥感估算模式。互补相关模型也在估算区域蒸散上得到重视和应用。

**关键词** 蒸散; 测定方法; 蒸散模拟

**中图分类号** S152.7<sup>3</sup>

蒸散是 SPAC 系统中水分运动重要而复杂的过程, 其强度与土壤状况、作物状况、大气环境密切相关。田间蒸散量的精确测定、准确模拟可为正确估算土壤水分、预测农田干旱的发生和作物水分胁迫状况提供重要信息, 因此其研究一直受到农学、气象、水文等相关学科及领域的重视。研究陆地表面蒸散过程的意义还在于, 蒸散一方面关联着地-气系统的物质能量交换, 影响着对全球变化的预测, 另一方面区域蒸散的显著变化又反映着区域农业生态环境的改变<sup>[1]</sup>。本文综述了蒸散的测定和模拟计算两方面研究的最新进展。

## 1 实际蒸散测定方法

实际蒸散的测定方法可归纳为水文学方法、微气象方法、植物生理学方法、遥感遥测法等。水文学方法分为水量平衡法、蒸渗仪法; 微气象方法包括梯度法(扩散法)、涡度相关法(EC法)、包文比能量平衡法(BREB法)等, 用于测定较小时间(<1h)和空间尺度(1km)内、均匀下垫面的蒸散量; 植物生理学方法包括示踪法、蒸腾室法、气孔计法、植株液流法等; 遥感遥测法用于区域范围内的蒸散。

水量平衡法主要通过测定一定深度内土壤贮水量的变化, 利用降水量资料, 根据水分收支平衡推算某时段内农田总的实际蒸散量。土壤含水量直接测定主要有土钻法、中子仪、TDR法<sup>[2,3]</sup>等方法。国内外学者对3种方法进行了对比, TDR法精确性高,

且稳定性好<sup>[4,5]</sup>, 作为一种连续、准确地测量土壤含水量的方法目前在蒸散测定方面得到了应用。

蒸渗仪法测定蒸散量的进展表现在两个方面: 一是蒸渗仪测定精度提高, 达0.01~0.02mm, 可每小时, 甚至每间隔几分钟自动记录数据。二是大型蒸渗仪与微蒸渗仪(Micro Lysimeter)的结合使用, 国内外许多学者相继使用微蒸渗仪测定裸露土壤或作物冠层下土壤蒸发, 以区分农田土壤蒸发和作物蒸腾<sup>[6,7]</sup>。

测定蒸散的3种微气象法在传感器技术和测定方法上都得到改进和发展, 并互相结合起来, 涡度相关法逐渐走向主流。Monji等<sup>[8]</sup>提出了一个改进的梯度法, 并对泰国南部红树林上方的水汽、CO<sub>2</sub>通量在干季和湿季的变化特征进行了研究。他假设水汽扩散系数和热量扩散系数相等, 当垂直风速脉动与温度脉动的相关值及温度梯度较大时, 利用垂直风速脉动和与温度脉动的相关值计算水汽通量。BREB法的温湿度测定精度得到提高, 目前CSI公司的BREB系统温度和水汽压测定精度为0.006和0.01kPa, 其造价较低, 测定要素少, 计算方法简单, 能够取得较满意的结果。Bausch比较了BREB系统与Lysimeter的观测资料, BREB法比Lysimeter测定的日蒸散量低8%, 在06:30~18:45时段的蒸散量仅低0.2%<sup>[9]</sup>。故在无Lysimeter时, BREB法仍是获取蒸散观测资料的可靠方法。近年来, 随仪器制造技术的进步, 提高了用涡度相关法对湍流通

量测定的可靠性, 由于其物理基础完备, 受到研究者的青睐。在目前全球变化和碳通量观测研究中, 涡度相关法作为主流方法被采用。由于空气湿度脉动值的精确测定较为困难, 所以可通过测定温度脉动和垂直风速脉动, 求算感热通量, 然后结合能量平衡方程间接推算潜热通量(ECEBR法<sup>[10]</sup>)。随着高精度传感器研制进步和气象数据自动采集的迅猛发展, 用ECEBR法已成为蒸散测定的重要途径, 它避免了BREB法中包文比等于-1带来的计算困难。

有较多学者对比研究了3种微气象法测定蒸散的结果。Grant分析BREB法、梯度法、Lysimeter观测的蒸散资料, 发现观测值之间相关性很好, 尤其在作物生长季内蒸腾速率高时更加显著<sup>[11]</sup>。在风速较小的环境中, BREB法会显得比较优越, 而梯度扩散法因需要风速廓线确定 $d$ 、 $Z_0$ 、 $U$ 参数, 使其应用受到限制。EC法与BREB法具不同测定原理, 在蒸发速率低时, 空气湿度梯度小, 因湿度传感器测量精度不高, 导致BREB法的可靠性降低, 而用EC法可测得比BREB法更好的结果, 但EC法需要更频繁的维护和大量的观测数据处理。

植物生理学方法一般测定较短时间内植株某部分(叶片、茎秆)或整株或数株的水分耗损, 主要用于研究土壤-植物-水分关系, 难以准确地根据单株或数株的蒸腾量推算出大面积群体的总蒸腾量<sup>[11]</sup>。其中植株液流法又分热脉冲(Heat pulse)和热量平衡(Heat balance)两种基本方法, 由于热量释放和探测的技术问题得到解决, 目前以热量平衡法的应用较普遍, 热量由变热改为常热输入, 热电偶由插入式改为表面安置。在研究林木蒸腾时, 因Lysimeter无法使用, 故植株液流法表现出优势, 能准确测定树木的日总蒸腾量, 如果知道了树冠结构和空间分布特征, 还可以推算较大范围的蒸腾量。用植株液流法测得植株整株蒸腾后, 根据其他方法测定的蒸散量可推算林地土壤蒸发。该法的误差主要来源于植株茎秆热贮量和环境温度变化。此外, 因加热处树干组织坏死, 不利长期定点连续观测。蒸腾室法可快速测定田间作物蒸腾, 但由于改变了测定环境, 导致误差, 所以仅适用于控制环境的试验测定研究中。最近, 已开发出光合蒸腾系统, 通过控制光、温、 $CO_2$ 等, 实现对植株不同部位叶片蒸腾的直接测量。

利用遥感技术可估算大面积区域范围内植被的蒸散量, 估算模式有许多种, 它通过遥感方法获取植被表面温度、净辐射通量、植被指数、地面反射

率等信息结合其他必要的气象参数来计算区域蒸散量。国内外应用较多的区域蒸散量估算方法有地表热量平衡方法、互补相关陆面蒸散法、Penman-Montieth模型和区域蒸散的气候学方法。随着遥感遥测技术和计算机模式的发展, 用遥感技术估算蒸散在水资源利用和灌溉管理方面得到了广泛应用, 是当今蒸散研究的热点之一。区域蒸散的遥感估算逐渐与SPAC系统中大型的机理性系统模型或GIS结合起来<sup>[12]</sup>。

Brown和Rosenbeg利用遥感监测的作物表面温度, 结合下垫面的能量平衡和湍流运动规律计算农田蒸散; Hatfield、陈镜明对其进行了改进; 谢贤群以此为基础提出了根据一日一次瞬时观测资料计算农田全日蒸散的模型<sup>[13]</sup>。马耀明等<sup>[14]</sup>利用卫星遥感, 结合地面观测, 估算了非均匀地表区域能量通量。陈云浩等<sup>[15]</sup>在前人基础上, 提出利用遥感资料计算区域蒸散量计算的步骤。

Jackson<sup>[16]</sup>提出利用温度遥感资料计算实际蒸散的公式:  $ET = R_n + D(T_a - T_s)$ 。  $T_a$  为气温;  $T_s$  为作物表面温度, 由遥感测定;  $D$  为半经验系数。Brasa<sup>[17]</sup>, Dunkel<sup>[18]</sup>分别进行了应用。

Bastiaanssen<sup>[19]</sup>提出一种陆地表面能量平衡算法(SEBAL)计算区域蒸散, 利用可见光、近红外和热红外卫星遥感资料预测辐射平衡和热量平衡, 估算地表潜热、感热通量和地表粗糙度。

Crago<sup>[20]</sup>提出蒸发比EF(Evaporation Fraction)的概念, 定义  $EF = LE/(R_n - G) = LE/(LE + H)$ , 并指出EF在当地时间9:00~16:00变化小, 因而可利用这种稳定性或保守性, 根据白天测定的EF瞬时值外推一天的平均值, 结合遥感资料和相关理论估算区域蒸散。

## 2 实际蒸散的模型计算

用单一模型计算实际蒸散可分两类, 通过修正潜在蒸散的间接计算, 其思路是先求算参考作物蒸散, 然后根据实际土壤水分状况和作物生长状况, 乘以土壤水分因子和作物系数进行订正。该方案仅需要常规气象要素, 常用于一天或更长时段的蒸散量估计; 应用实际蒸散模型直接计算, 如采用密集植被状况下的Penman-Monteith公式和稀疏植被状况下的Shuttleworth-Wallance模式, 这类模型理论推导严密, 可模拟某一时刻的蒸散值, 但需要的参数较多。

### 2.1 潜在蒸散计算模型

计算潜在蒸散的模型主要有 Blancy-Criddle 公式、Thornthwaite 公式、布迪科公式、Priestley-Taylor 公式、Penman 公式、Penman-Monteith 公式等<sup>[21]</sup>。Blancy-Criddle 公式、Thornthwaite 公式因经验性强，目前应用较少。布迪科公式根据能量平衡和水汽、热量的湍流交换原理计算潜在蒸散，具有一定理论基础，但需要两个高度的非常规气象资料，故其使用受限。Priestley-Taylor 公式对辐射项进行了修正，由于省略了空气动力学项，因而在干旱和半干旱地区表现欠佳。Penman 公式具有较强的理论支持，仅需常规气象观测资料可算得潜在蒸散值，所以得到广泛的应用。FAO 于 1979 年给出基于 Penman 公式的参考作物蒸散计算公式。由于假设蒸发面温度等于气温，忽略植被对水汽输送的阻抗，且干燥力项  $E_a$  多使用经验性公式，影响了 Penman 公式理论上的完备性和计算精度。Penman-Monteith 方程考虑了影响蒸散的大气因素和作物生理因素，成为研究农田蒸散在机理上更完善的一个基本模型。研究表明，不论在湿润或干旱半干旱地区，Penman-Monteith 方程都可以较准确的计算作物潜在蒸散量，所以 1990 年 FAO 将其定为计算作物潜在蒸散量的标准方法。为解决模型中作物冠层气孔阻力估算的困难，FAO<sup>[22]</sup>定义了参考作物，高度为 0.12 m，其阻抗为 70 s/m，反射率为 0.23，并给出在其充分覆盖地表和水分供应充分条件下，计算逐日潜在蒸散的公式。国内外学者纷纷对该公式进行了应用和比较研究<sup>[23, 24]</sup>。

得到潜在蒸散后，根据作物系数和土壤水分因子就可计算出实际蒸散。

## 2.2 实际蒸散直接计算模型

### 2.2.1 Penman-Monteith(P-M)公式

对密集植被，可直接用 P-M 公式计算实际蒸散。冠层阻力  $r_c$  是 P-M 公式中的重要参数，对其研究较多。由于  $r_c$  难以用仪器测定，一般用间接方法推导，目前使用的方法主要有以下几种：根据 P-M 公式进行反推得到；利用包文比-能量平衡法 (BREB) 反推得到；利用单叶气孔阻力，结合作物群体 LAI 的空间垂直分布计算得到；利用能量平衡原理，结合冠层温度进行估算；等等。目前，基于作物冠层阻力  $r_c$  的研究已相对成熟。Allen<sup>[25]</sup>提出用有效叶面积估算作物冠层阻力。Jarvis<sup>[26]</sup>考虑辐射、水汽压差、气温、土壤含水量的影响，给出了冠层气孔阻力与环境因子的基本关系式，应用较多。Rana<sup>[27]</sup>研究了临界冠层阻力  $r^*$  与实际蒸散的关系，以计算水分胁迫下的实

际蒸散。

### 2.2.2 Shuttleworth-Wallace 模型

由于 Penman-Monteith 公式不能准确计算作物在叶面积指数较低时的蒸散量，难以进行作物全生育期蒸散量的直接估计。为此 Shuttleworth & Wallace<sup>[28]</sup>研究了稀疏覆盖表面的蒸散，假设作物冠层为均匀覆盖，引入冠层阻力和土壤阻力两个参数，建立了由作物冠层和冠层下地表两部分组成的双源蒸散模型（以下简称 S-W 模型）。模型中有  $r_{a_a}^a$ 、 $r_{a_a}^s$ 、 $r_{a_c}^c$ 、 $r_{c_s}^c$ 、 $r_{s_s}^s$  5 个阻力参数，Shuttleworth & Wallace 给出了它们的计算式或取值。Choudhury & Monteith<sup>[29]</sup>、Shuttleworth & Gurney<sup>[30]</sup>进一步研究了阻力参数的计算式。土壤表面阻力  $r_s^s$  与土壤质地和土壤含水量有关，已有几种不同形式的经验关系式<sup>[31-33]</sup>。

Choudhury & Monteith<sup>[29]</sup>把 S-W 模型发展成包括土壤干燥层和湿润层的双源 4 层模型 (C-M 模型)。考虑到植被冠层类型的不同，以 S-W 模型为基础，Dolman, Brenner & Incoll 分别提出了密闭冠层多层模型和稀疏冠层多层模型等多源模型<sup>[34, 35]</sup>。考虑到 S-W 模型的复杂性，Gardiol<sup>[36]</sup>给出了一个较简单的、能分离计算蒸发和蒸腾的模型。

## 2.3 SPAC 系统中蒸散量的系统模拟方法

上述实际蒸散的计算模型为应用作物、土壤、气象资料来计算蒸散量的单一模型。由于 SPAC 中的蒸散过程与土壤水分状况、作物生长状况、大气的环境因子相互有复杂的耦合作用，因此应用系统分析方法，综合土壤水动力学、微气象学和植物生理学等学科的理论可更真实地描述和模拟 SPAC 系统的水分传输过程。基于 SPAC 水分传输理论，应用系统方法，把上述单层或多层蒸散模型与系统的其他过程相耦合，也是进行蒸散估算研究的重要途径。

迄今为止，已有不少的系统模型模拟 SPAC 中蒸散的变化，它们依研究的目的不同，差异较大。有以作物生长模拟为中心的系统模型，该类模型中一般包括有土壤水分动态子模块，可模拟作物全生育期逐日蒸散量，如美国 CERES 系列模型<sup>[37]</sup>，荷兰 SUCROS、MACROS、SWAP 模型等<sup>[38]</sup>。有以土壤水分运移和水资源管理为中心的系统模型，如 SWIM<sup>[39]</sup>、ENWATBAL<sup>[40]</sup>、SWRRB<sup>[41]</sup>等。用于区域或全球变化预测的陆面过程子模型：如 SiB<sup>[42]</sup>，SVAT<sup>[43]</sup>等，这些模型模拟陆地表面水热、CO<sub>2</sub> 等的传输和交换，参数化后加入到大气环流模式中去。有基于植物生理过程，研究光合、蒸腾、气孔阻力、

CO<sub>2</sub> 等耦合关系的机理性模型, 如单层模型、多层模型, 以探讨植株冠层的水热传输、CO<sub>2</sub> 等环境因子变化后植株的反应<sup>[44, 45]</sup>。

国内自上世纪 80 年代末以来对 SPAC 系统的模拟研究逐渐深入。卢振民<sup>[46]</sup>、康绍忠<sup>[47]</sup>、刘昌明<sup>[48]</sup>、刘树华<sup>[49]</sup>等先后对 SPAC 中的水分传输和蒸散过程进行了模拟研究; 莫兴国<sup>[50]</sup>建立了冠层为单层、土壤为多层的 SPAC 系统中水分能量传输模型, 并用浅地下水地区田间试验资料验证了模型; 罗毅等<sup>[51]</sup>建立了 SPAC 系统中的水、热、CO<sub>2</sub> 通量与光合作用的综合模型。

#### 2.4 互补相关模型

Bouchet 于 1963 年首次提出区域范围的实际蒸散和潜在蒸散互补关系假设, 即陆面蒸散量增加(或减小)的速率与相应的蒸散能力减小(或增加)的速率相等。应用较广的互补相关模型有 Morton<sup>[52]</sup> 提出的 Complementary Relationship Areal Evapotranspiration (CRAE) 模型和 Brutsaert 等<sup>[53]</sup> 提出 Advection Aridity (AA) 模型。Hobbins<sup>[54]</sup> 比较了 CRAE 模型和 AA 模型, 认为 CRAE 模型比 AA 模型预测区域蒸散的结果要好。互补相关模型由于简化了蒸散机理, 只需要常规气象观测资料就可计算旬、月、年的陆面蒸发量, 所以在估算区域蒸散时表现出优势, 自 90 年代以来, 互补相关模型作为一种有效的方法用于区域蒸散估算研究中<sup>[54-56]</sup>, 是一种值得重视的区域蒸散估计方法。

### 3 结语

(1) 在测定方法上, TDR、微蒸渗仪和涡度相关技术的使用明显增加及遥感技术在区域水分监测应用上大大加强。由于制造技术进步和传感技术的发展, 蒸散测定在精度、测定的时空分辨率上已有明显提高, 并且尽可能做到方便、快速、省力。因各测定方法均有利弊, 为保证蒸散测定的可靠性, 未来的发展趋势是根据研究需要将两种或两种以上方法集成起来或综合运用。

(2) 在模拟计算方面, 根据资料的可用性, Priestley-Taylor 公式、Penman 公式、Penman-Monteith 方程等单一模型在应用上仍较普遍, 但研究上已向以 Shuttleworth-Wallace 模型为基础的多层模型转移, 尽管多层模型中阻力参数多使用经验表达式, 却为计算不同植物冠层类型和下垫面状况下的蒸散开辟了道路。另外, 互补相关模型作为一种方法在研究区域蒸散上得到重视和应用。由于水资源短缺

问题突出及对生态环境问题、全球变化的关注, 应用遥感估算区域蒸散进展明显, 已发展了多种估算方法。

(3) 平流作用对蒸散影响的计算, 非均匀下垫面植被的蒸散、区域蒸散的估算, 多层模型发展完善及阻力参数的确定, 遥感和 GIS 及 SPAC 中机理性系统模型的结合估算蒸散等仍是未来蒸散研究和方向。此外, 对 SPAC 中蒸散过程的模拟与 CO<sub>2</sub> 通量、热量交换等其他过程的研究结合起来, 成为陆地-大气相互作用、全球变化等研究的重要内容。

#### 参考文献

- 1 徐富安, 赵炳梓, 唐万龙. 豫北地区水分生态环境要素演变及其意义. 土壤学报, 2003, 40 (1): 29 ~ 36
- 2 周刘宗, 周凌云, 徐梦雄. 田间土壤含水量的原位测定. 土壤, 1996, 28 (4): 213 ~ 216
- 3 刘国治, 张斌, 张桃林, 孙玉龙. 时域反射仪(TDR)土壤测定红壤含水量的精度. 土壤, 1998, 30 (1): 48 ~ 50
- 4 龚元石, 李春友, 李子忠. 农田土壤水分三种测定方法比较. 中国农业大学学报, 1997, 2 (3): 53 ~ 58
- 5 Evett SR. Evapotranspiration by soil water balance using TDR and neutron scattering. In Management of Irrigation and Drainage Systems, Irrigation and Drainage Div./ASCE, July 21-23, 1993, Park City, Utah. 1993, 914 ~ 921
- 6 Wang XF, Xu F, Shani U. Evaporation from bare soil in extremely arid environment in southern Israel. Pedosphere, 1996, 6 (2): 139 ~ 146
- 7 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究. 水利学报, 1998, (10): 36 ~ 39
- 8 Monji N, Hamotani K, Tosa R, Fukagawa T, Yabuki K, Hirano T, Jintana V, Piriyaota S, Nishimiya A, Iwasaki M. CO<sub>2</sub> and water vapor flux evaluations by modified gradient methods over a mangrove forest. J. Agric. Meteorol., 2002, 58 (2): 63 ~ 69
- 9 Bausch WC, Bernard TM. Spatial averaging Bowen Ratio system: description and Lysimeter comparison. Trans. ASAE, 1992, 35 (1): 121 ~ 127
- 10 Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. Euro. J. Agron., 2000, 13:125 ~ 153
- 11 Grant. Comparison of evaporation measurements using different methods, Quart. J. R. Meteorol. Soc., 1975, 101: 543 ~ 550

- 12 Medina<sup>1</sup> JL, Camacho<sup>1</sup> E, Reza J, López R, Roldán J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. *Phys. Chem. Earth*, 1998, 23 (4): 427 ~ 432
- 13 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量. *环境遥感*, 1991, 6 (4): 253 ~ 259
- 14 马耀明, 王介民. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量. *气象学报*, 1999, 57 (2): 180 ~ 189
- 15 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型. *气象学报*, 2002, 60 (4): 508 ~ 512
- 16 Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB. Wheat canopy parameter: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.*, 1977, 13 (3): 651 ~ 656
- 17 Brasa RA, Martin de Santa Olalla F, Caselles V. Maximum and actual evapotranspiration for Barley, through NOAA satellite images in Castilla-La Mancha, Spain. *J. Agric. Engng. Res.*, 1996, 63:283 ~ 294
- 18 Dunkel Z, Grob-Szenyan I. A simple method for estimation of evapotranspiration using remotely sensed data during vegetation period in Hungary. *Phys. Chem. Earth*, 2002, 27:1109 ~ 1111
- 19 Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrology*, 1998, 212-213:198 ~ 212
- 20 Crago R. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *J. Hydrology*, 1996, 180: 173 ~ 194
- 21 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 北京: 水利电力出版社, 1994, 123 ~ 129
- 22 Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, 1998
- 23 Ventura F, Spano D, Duce P, Snyder RL. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrig. Sci.*, 1999, 18:163 ~ 170
- 24 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较. *应用气象学报*, 2000, 6 (11): 128 ~ 136
- 25 Allen RG, Smith M, Perrier A, Pereira LS. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull*, 1994, 43 (2): 1 ~ 34
- 26 Jarvis PG. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 1976, 596 ~ 610
- 27 Rana G, Katerji N, Mastrorilli M. Environmental and soil-plant parameters for modelling actual evapotranspiration under water stress conditions. *Ecol. Model.* 1997, 101: 363 ~ 371
- 28 Shuttleworth WJ, Wallace JS. Evaporation from sparse crops: an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1985, 111: 839 ~ 855
- 29 Choudhury BJ, Monteith JL. A four-layer model for the heat budget of homogenous land surfaces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1988, 114:373 ~ 398
- 30 Shuttleworth WJ, Gurney RJ. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1990, 116: 498 ~ 519
- 31 Kondo J, Saigusa N, Sato T. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteorol.*, 1990, 29:385 ~ 389
- 32 Mahfouf JF, Noihan J. Comparative study of various formulations of evaporation from bare soil using in situ data. *J. Appl. Meteorol.*, 1991, 30: 1354 ~ 1365
- 33 Farahani HJ, Bausch WC. Performance of evapotranspiration models for maize—bare soil to closed canopy. *Trans. ASAE*, 1995, 38 (4): 1049 ~ 1059
- 34 Dolman AJ, Wallance JS. Lagrangian and K theory approaches in modelling evaporation from sparse canopies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1991, 117: 1325 ~ 1340
- 35 Brenner AJ, Incoll LD. The effect clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrub land. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, 84: 178 ~ 205
- 36 Gardiol JM, Serio LA, Della Maggiora AI. Modelling evapotranspiration of corn (*Zea mays*) under different plant densities. *J. Hydrology*, 2003, 271: 188~196
- 37 Ritchie JT. A user oriented model of the soil water balance in wheat. In: Day W, Atykin RK. eds. *Wheat Growth and Modeling*. Plenum Press, 1985
- 38 Bouman BAM, van Keulen H, van Laar HH, Rabbinge R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Syst.*, 1996, 152 (23): 171 ~ 198
- 39 Ross PJ. SWIM—A simulation model for soil water in filtration and movement: Reference manual. *CSIRO Div. of Soils, Townsville, Qld*, 1990

- 40 Evett SR, Lascano RJ. ENWATBAL: A mechanistic evapotranspiration model written in compiled BASIC. *Agron. J.*, 1993, 85: 763 ~ 772
- 41 Zeng ZY, Meijerink AMJ. Water yield and sediment yield simulations for Teba catchment in Spain using SWRRB model: I. Model input and simulation experiment. *Pedosphere*, 2002, 12 (1): 41 ~ 48
- 42 Sellar PJ, Mintz Y. A simple biosphere (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43: 505~531
- 43 Oltchev A, Constantin J, Gravenhorst G, Ibrom A, Heimann J, Schmidt J, Falk M, Morgenstern K, Richter I, Vygodskaya N. Application of a six-layer SVAT model for simulation of evapotranspiration and water uptake in a spruce forest. *Phys. Chem. Earth*, 1996, 21 (3): 195 ~ 199
- 44 De Pury DGG, Farquhar GD. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant Cell Environ.*, 1997, 20 (5): 537 ~ 557
- 45 Tanaka K. Multi-layer model of CO<sub>2</sub> exchange in a plant community coupled with the water budget of leaf surfaces. *Ecol. Model*, 2002, 147 (1): 85 ~ 104
- 46 卢振民. 土壤-作物-大气系统 (SPAC) 水流运动模拟与实验研究. 见: 谢贤群, 于沪宁主编. 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992, 287 ~ 357
- 47 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟. *水利学报*, 1992, 3: 1 ~ 12
- 48 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算. *水科学进展*, 1992, 3 (4): 255 ~ 263
- 49 刘树华, 黄子琛, 刘立超. 土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模拟. *地理学报*, 1996, 51 (2): 118 ~ 126
- 50 莫兴国. 土壤-植被-大气系统水分能量传输模拟和验证. *气象学报*, 1998, 56(3): 323 ~ 332
- 51 罗毅, 于强, 欧阳竹, 唐登银. SPAC 系统中的水、热、CO<sub>2</sub> 通量与光合作用的综合模型 (I) 模型建立. *水利学报*, 2001, 2: 90 ~ 97
- 52 Morton FI. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrology*, 1983, 66: 1 ~ 76
- 53 Brutsaert W, Stricker H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, 1979, 15 (2): 443 ~ 450
- 54 Hobbins MT, Ramírez JA, Brown TC. The complementary relationship in regional evapotranspiration: the CRAE model and the Advection-aridity approach. *Proc. Nineteenth Annual A.G.U. Hydrology Days*, 1999, 199 ~ 212
- 55 Kim CP, Entekhabi D. Examination of two methods for estimating regional evaporation using a coupled mixed layer and land surface model. *Water Resour. Res.*, 1997, 33 (9): 2109 ~ 2116
- 56 李桃英. 互补相关陆面蒸散发模型在陕西关中平原地区径流深估算中的应用. *水文*, 2001, (1): 40 ~ 41

## MEASUREMENT AND ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION

HU Ji-chao ZHANG Jia-bao FENG Jie

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science), Nanjing 210008)

**Abstract** Evapotranspiration is an important and complicated part of the hydrological cycle, of which accurate measurement and computation is needed for an adequate management of agricultural water resources. In this paper, latest advances in methods for measuring and estimating actual ET at a plot and regional scale. In the past decade, the techniques of TDR, Micro-Lysimeter and Eddy covariance at plot scale and remote sensing technique for estimating regional ET have been more and more widely used. With the development of automation and sensor manufacturing techniques, ET measurement has been greatly improved in accuracy. In calculating actual ET, simple ET models, such as Priestley-Taylor model, Penman model and Penman-Monteith model, are more often employed. But in research, workers have put more and more attention to Shuttleworth-Wallace-model-based multi-layer models, which can be used to simulate ET of canopies and substrates of different types. Great progress has been made in remote sensing estimation of regional ET with several regional ET estimating approaches developed. CRAE models as an important method to estimate regional ET has found more and more recognition and application.

**Key words** Evapotranspiration, Evapotranspiration measurement, Evapotranspiration estimation and modeling