

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.020

使用微型蒸发器测定土壤蒸发的研究进展

高晓飞 史海珍 杨 洁 王晓岚

(北京师范大学地理学与遥感科学学院 北京 100875)

摘要 :对微型蒸发器相关的文献进行综合与分析 ,并对其应用进行了综述。认为微型蒸发器的材料以热容量高、导热性差的非金属材料为宜 ;蒸发器口径一般应大于 56 mm ,小于 150 mm ;深度以 150 ~ 200 mm 为宜 ,安装方法还可以进一步改进。合理运用微型蒸发器可以得到更精确的观测结果。
关键词 :微型蒸发器 ;裸土蒸发 ;冠层下蒸发 ;研究进展

中图分类号 :S152.7⁺3 S163⁺.5 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)01-0085-06

Advances in soil evaporation measured by micro-lysimeter//GAO Xiao-fei , SHI Hai-zhen , YANG Jie , WANG Xiao-lan (School of Geography , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

Abstract : The references about the micro-lysimeter were integrated and analyzed , and its application was summarized. The results show that the nonmetallic materials with high heat capacity and low heat conductivity are favorable for the manufacture of the micro-lysimeter. The diameter of the micro-lysimeter should be between 56 mm and 150 mm ; and its length should be between 150 mm and 200 mm. The installation of the micro-lysimeter can be further improved. Rational application of the micro-lysimeter may result in more accurate results.

Key words : micro-lysimeter ; bare soil evaporation ; soil evaporation under plant canopies ; advance

土壤蒸发在水量平衡中占有重要的地位。然而 ,由于观测技术上的困难 ,其测定的方法一直是土壤蒸发研究的主要内容之一^[1]。

Boast 等^[2]提出用一种微型蒸发器(micro-lysimeter)测定土壤蒸发。该方法方便、灵活 ,测定结果有较高的精确性^[3-4] ,在裸土蒸发^[5-19]、植物棵间蒸发^[19-50]和林冠下土壤蒸发^[51-57]等相关研究中得到了广泛的应用 ,成为直接测定土壤浅层蒸发的重要方法之一。

微型蒸发器的形状一般为硬质材料的薄壁圆筒。使用时 ,将微型蒸发器打入土体内取原状土后封底 ,使得内部土体与外界隔离。外套一个内径略大于蒸发器外径的塑料袋或有底薄壁圆筒。在观测地挖一个与蒸发器内土柱高度相同、直径略大于蒸发器套筒外径的圆孔 ,将蒸发器连同套筒一起放入土孔中。固定时间间隔(一般为 1 d) ,取出蒸发器称重 2 次称重的差值即被认为是土壤蒸发的水量^[7,9]。为了使观测具有代表性 ,取土点和观测点土壤的性质、含水量等都应当基本一致^[30]。

由于微型蒸发器体积有限 ,以及使用者考虑的

侧重点不同 ,多位学者也对微型蒸发器的制作与使用进行了探讨^[6,9,14-15,17]。概括起来主要有 4 个方面 :①微型蒸发器的制作应使用何种材料 ,其对测定结果的影响有多大 ;②理想的微型蒸发器口径和长度是多少 ,既可以方便操作 ,又使观测结果具有代表性 ;③如何给微型蒸发器取土和封底以减少测量误差 ;④如何将微型蒸发器安装到观测地点。因此 ,有必要对微型蒸发器的发展历程、使用情况及存在的问题进行探讨。

笔者根据国内外的相关文献 ,对微型蒸发器的制作、安装及使用方法进行了综述 ,希望对提高微型蒸发器的使用水平有所参考。

1 微型蒸发器的材料、规格和使用方法

1.1 微型蒸发器的材料

Boast^[7]提出的微型蒸发器是铜质材料的 ,其他还有 PVC 管^[6,22-23,25-27,29-31,33-38,40,42,46,51,52,54-57]、硬质塑料^[4,9,20,32]、钢管^[3,23,42]、不锈钢管^[10,48,50,53]、镀锌铁皮^[40,43,46]和有机玻璃^[19]等材料的。Salehr^[5]发现钢制微型蒸发器的表面温度比邻近的土壤低 ,原因

可能是金属材料热容量低,导热性远远超过土壤所致^[5,6,17]。Shawcroft 等^[20]采用硬质塑料蒸发器也得到了 Boast^[7]的赞许,Walker^[21]推荐使用 PVC 管材质的微型蒸发器。Evet^[9]发现钢制微型蒸发器内的土壤在 150 mm 和 300 mm 深处的温度都高于周围土壤相应深度的温度,而塑料微型蒸发器内的土壤温度虽然也略高于周围土壤相应深度的温度,但比钢制微型蒸发器的情况好。Evet^[9]研究还发现,长度为 100 mm 的塑料微型蒸发器与同等长度的钢制微型蒸发器的蒸发量测定值差异不显著;长度为 200 mm 的塑料微型蒸发器的测定值大于钢制微型蒸发器的测定值,两者的差异显著;长度为 300 mm 的微型蒸发器因数据不足,未能进行差异显著性的检验,但认为差异应该也是显著的。李王成等^[17]在西北地区的研究发现,封底情况下,砂土上 PVC 管材和铁对微型蒸发器测量结果的影响不显著,认为主要原因是环境因素的影响;但对于壤土,铁和 PVC 管对微型蒸发器测定值的影响是显著的。综上所述,一般认为微型蒸发器应当采用非金属材料。

考虑到金属材料的微型蒸发器比非金属材料的微型蒸发器在耐用程度和使用方便性上要好一些。所以,如何通过调整蒸发器的规格,降低金属材料对微型蒸发器测定土壤蒸发量的影响,值得进一步研究。

1.2 微型蒸发器的规格与土体有效使用时间

针对不同材料的微型蒸发器,其规格要求也有差异,尤其对金属的微型蒸发器,增大口径可能会降低材料的影响程度^[17]。但为了便于安装和称量,微型蒸发器的体积不宜太大,但体积过小又会造成蒸发器内部土体有效使用时间太短,从而影响测定结果的精确性。

Boast 等^[2,7]研究发现,20 mm 长度的微型蒸发器使用时间太短。而 70 mm 长的微型蒸发器,日蒸发量在 8.8 mm 左右的,使用时间可达 1.4 ± 0.8 d;日蒸发量在 5.5 mm 左右的,使用时间可达 1.6 ± 0.4 d;日蒸发量在 2.6 mm 左右的,使用时间可达 2.9 ± 0.8 d。使用时间的长短与土壤初始含水量和蒸发速率有关。因此,Boast^[7]提出的微型蒸发器为长 76 mm、内径 76 mm、壁厚 3 mm,前端有 25 mm 长、刃口厚 0.5 mm 的圆筒(刃口为方便取土),内部土柱长度为 70 mm。Shawcroft 等^[20]分别采用长 50 mm,100 mm 和 200 mm 的微型蒸发器研究土壤水分蒸发时发现,50 mm 的微型蒸发器内土壤干得太快,不适合测定土壤蒸发,而 100 mm 和 200 mm 的微型蒸发器在无降雨情况下,累积蒸发量超过 5 mm 之后,测定值也开始出现比较明显的差异。Daamen 等^[6]在对尼日尔

沙土的研究中发现,在日蒸发量较低的情况下($0.5 \sim 3$ mm/d),长度为 100 mm 和 200 mm 的微型蒸发器 1~2 d 的测量值无显著差异;在对印度沙土的研究中发现,在累积蒸发量不超过 4 mm 的情况下,使用寿命达 7 d 以上。Evet^[9]研究认为,在 9 d 累积蒸发量为 8 mm 左右的情况下,100 mm,200 mm 和 300 mm 的塑料微型蒸发器的蒸发量测定值是递增的。认为在这种情况下测定蒸发量,蒸发器长度应大于或等于 300 mm。孙宏勇等^[15]在华北地区对比了不同长度微型蒸发器测定土壤蒸发量的结果,从数据可以看出,日蒸发量为 2.5~3.5 mm 时,3 d 之内,长度大于 150 mm 的蒸发器的测定值之间差异较小。孙宏勇等^[15]综合各方面因素认为长度为 150 mm 的微型蒸发器是比较适用的。李王成等^[17]在中国西北地区的砂土和壤土进行研究后认为,200 mm 是一个适宜的长度。所以,目前大部分研究采用的微型蒸发器长度为 150~300 mm。个别研究的微型蒸发器长度达到 600 mm,用于测定比较疏松的风沙土的蒸发量^[16]。另外还有使用 570 mm 的微型蒸发器进行长期的土壤蒸发量监测研究^[11-12]。

微型蒸发器的口径也可能是一个影响观测结果的因素。Daamen 等^[6]对比了 56 mm,152 mm 和 214 mm 口径微型蒸发器的蒸发量,认为口径对 PVC 管材的微型蒸发器影响不显著。李王成等^[17]发现口径影响与长度影响有耦合关系,口径较小的情况下,长度对蒸发量影响显著;口径较大时,长度对蒸发量影响不显著,推荐测量沙土蒸发量的微型蒸发器的理想口径为 150 mm,测量壤土蒸发量的微型蒸发器的理想口径为 100 mm。目前,一般研究采用的蒸发器口径为 50~214 mm。

微型蒸发器的体积较小,需要比较频繁地更换土壤,一般研究的更换时间为 1~2 d,但根据以往的研究,在蒸发率较低的情况下,较长的微型蒸发器使用时间应该可以更长一些。系统地研究蒸发器在不同蒸发速率下的换土时间可以减少频繁换土的工作量。另外,Daamen 等^[6]和 Evet^[9]的研究也发现,在降雨后的 1~2 d 内必须更换土壤,否则会因蒸发器底盖阻止土壤渗漏,影响观测结果。

1.3 微型蒸发器的取土方法

微型蒸发器使用之前需要先取土,取土是将蒸发器插入土内取原状土,因此一般的微型蒸发器都要求前端有刃口。取土深度要求土面比蒸发器上缘低数毫米。

Boast^[7]是用手将蒸发器压入土壤中,但这种方法对于坚硬的土壤是不适用的;Allen^[4]则先将微型蒸发器压入土壤一定深度,然后将蒸发器周围的土

壤挖掉,再压入一定深度,阶段性地将微型蒸发器压入土壤中取土;Walker^[21]则采用木板垫在微型蒸发器的上缘,使用锤子将微型蒸发器打入土壤中。Shawcroft等^[20]和Klocke等^[22]使用了一种液压土壤取样器(hydraulic soil sampler)将微型蒸发器压入土壤中,Plauborg^[10]则使用锤子和一种手柄将微型蒸发器直接打入土壤取土。Evet^[9]采用的是滑动锤子(slide hammer)和一种金属击打头的自制工具将微型蒸发器压入土壤中取土,滑动锤子的移动方向只能是上下运动,可以保证微型蒸发器被垂直打入土壤。这些方法虽略有差异,但都是在测定蒸发量之前较短的时间内将微型蒸发器压入土壤取土,也是大多数学者经常采用的方法。这种方法的缺点包括①土壤含水量较高时取土,容易产生压实现象;土壤含水量较低时,则取土困难;②击打容易导致土壤蒸发面破裂,从而引起蒸发量观测值偏高的现象。因此,Evet^[9]认为取土应在灌溉后数天再进行,此时土壤既不具有可塑性,也不很坚硬。

Villalobos等^[23]提出了另一种取土方法——预埋蒸发器法。即在植物生长季早期的一次降雨之后,先将微型蒸发器(无底直筒)垂直压入土壤中。为了保证蒸发器内土壤与周围土壤水分一致,在微型蒸发器壁上钻一系列小孔,使植物根系能够进入蒸发器内。在观测当日,将蒸发器挖出,并切断连带的植物根系。这样土壤蒸发面一般比较完整,可以避免因蒸发面破碎导致测定值偏高的问题。Jackson等^[30]发现,该方法对蒸发器内水分影响很小,内部与外部土壤水分质量分数的差值一般不超过2%。Leuning等^[27]也采用了这种壁上有孔的微型蒸发器和预埋蒸发器的方法测定植物冠层下的蒸发量。

1.4 微型蒸发器的封底和安装方法

微型蒸发器装进原状土后,需要进行封底,使蒸发器内土体与外界土壤隔离,防止发生水分交换。Boast等^[2]采用厚度为30 mm的橡皮塞子封底,Matthias等^[3]、Plauborg^[10]、Eastham等^[29]也采用了类似的方法。但许多研究都发现,封底会阻止热量的传输,引起热量在微型蒸发器中累积^[6,9,17],而过厚的材料可能更甚。因此,有多位学者采用了金属片^[4,20,23]、金属板^[30]、铝箔^[8]、聚乙烯片^[21]、塑料胶带^[14-15,18,39,42,50,52,56]和报纸套网袋^[17]等导热性好或较薄的材料封底。Evet^[9]认为铝箔封底应该是最理想的。

微型蒸发器的安装,一般都是在观测点挖一个直径比蒸发器套筒的外径略大、深度与蒸发器高度相等的土孔,然后将蒸发器连同外筒一起放入土孔,并使蒸发器内外的土面高度一致。在观测点挖土孔

的时候,王会肖等^[13]建议用一个外径与套筒外径相同的PVC管打入土中,掏空其内部土壤即可,其他学者未详细介绍挖孔方法。

目前,几乎所有的研究都因为取土方式破坏蒸发器取土点的土孔,无法将微型蒸发器安装到原地,即取土点与观测点不能完全重合。因此,设计一种不破坏取土孔的取土方法和工具,使取土孔和安装孔合一,既可提高工作效率,也可提高观测精度。

2 微型蒸发器测定土壤蒸发

2.1 裸土蒸发的测定

国外在研究测定裸土蒸发的同时,也进行微型蒸发器的适用性研究^[2-3,5-10]。Matthias等^[3]和Plauborg^[10]分别对比了微型蒸发器与热红外法和TDR方法的测定值,得到了较一致的观测结果。后期使用微型蒸发器仅测定裸土蒸发的研究比较少,有的学者测定裸土蒸发主要是为了验证或发展土壤蒸发模型^[11-12]。孙宏勇等^[14-15]和李王成等^[17]的裸土蒸发研究主要目的也是探讨微型蒸发器的适用性。王会肖^[13]、刘钰等^[19]、刘新平等^[16]和翟翠霞等^[18]专门测定了土壤或沙土蒸发。

总体而言,裸土蒸发研究开展较早,但仅测定裸土蒸发的研究比测定植物棵间和冠层下蒸发的研究少。另有个别的工程废渣蒸发测定也采用了微型蒸发器的方法,观测方法类似于裸土蒸发测定^[58]。

2.2 农作物棵间和冠层下土壤蒸发量测定

农作物棵间和冠层下土壤蒸发量的测定是微型蒸发器应用最多的研究领域。从研究目的上看,可以分为仅测定植物棵间和冠层下蒸发的研究^[19-24,26,30,32-33,35-36,39-40,47-48]和不同耕作措施对植物棵间蒸发影响的研究^[25-26,34,37-38,41-46]。研究所针对的作物种类包括小麦^[25,27,29,31,33,35-37,41-42,45,48]、玉米^[20-21,23,30-32,34,37-40,43,46,48]、大豆^[1,22,37]、大麦^[4,48]、高粱^[34,37]、粟^[24,37]、棉花^[23,37]、向日葵^[23]、羽扇豆(lupine)^[29]、马铃薯^[34,44]和白菜^[47]等。其中,与小麦、玉米冠层和棵间蒸发测量相关的研究最多。

根据作物种植行距和密度的不同,微型蒸发器的口径一般有所差异。总体而言,窄行作物(如冬小麦等)使用的蒸发器口径较小,内径一般在120 mm以下,安装在行上的在50 mm以下^[35];宽行作物(夏玉米、大豆、向日葵等)使用的蒸发器口径较大,有的可达200 mm左右^[23]。但单个微型蒸发器口径超过214 mm的情况较少^[6]。根据研究目的也可在行间安装数个微型蒸发器^[22]。由于不连续冠层下的蒸发条件比较复杂,微型蒸发器所测得的数值并不能直接代表冠层下所有土壤的蒸发情况。因此有学者

建议,应当根据观测值与实际蒸发值,建立一种关系方程,根据观测值推断实际的土壤蒸发量^[20]。

另外,也有将微型蒸发器应用到草地土壤蒸发的研究中^[49-50],操作方法与作物棵间蒸发测定方法类似。

2.3 林下和林间土壤蒸发测定

近年,也有应用微型蒸发器测定林木下土壤蒸发的研究。研究对象包括中国西北沙漠区的人工植被^[51-56]、南方红壤区的柑橘和茶树^[52]、黄土高原地区的刺槐林^[53]、华北土石山区的人工林^[54]、葡萄牙沙土上的桃树^[55]、美国亚利桑那州图森市 Lucky Hills 的天然灌丛^[57]等人工林和天然植被。由于林下土壤的蒸发条件差异较大,微型蒸发器需要按照一定的规律进行布设,并对数据进行综合处理,才能得出林下蒸发量的情况。

张志山等^[51-56]在研究西北沙漠区柠条下土壤蒸发时,沿植株的 3 个方向(夹角 120°)距植株 0.2 m、0.5 m 和 1.0 m 处安装微型蒸发器。王晓燕等^[52]在研究茶园和橘园林下土壤蒸发时,布设了无遮阴和遮阴 2 种光照处理,及坡上、坡中和坡下 3 种地形对比处理。张卫强等^[53]则在刺槐林下布设了测定不同土壤含水量的微型蒸发器,研究林下的土壤蒸发特征。Paco 等^[55]在研究桃树下土壤蒸发时,沿桃树行向布设了 5 个微型蒸发器,并在这行桃树冠地面垂直投影两侧边界的行间地上也各设 2 个微型蒸发器。Moran 等^[57]在研究美国亚利桑那州图森市的 Lucky Hills 灌丛植被下土壤蒸发时,采用了在研究区(60 m × 60 m)对角线分布 20 个微型蒸发器的方法。

林下蒸发观测的目的也包括林下土壤蒸发量的测量^[51-54-56-57]和模型验证^[55]等,使用的微型蒸发器规格、材料与裸土蒸发和植物棵间蒸发的微型蒸发器基本相同。

3 结 论

微型蒸发器因其制作简单、安装灵活、造价低廉、观测精度相对较高等优点,已广泛应用于土壤蒸发测定,尤其是植物棵间和冠层下蒸发的研究中。

根据相关的参考文献,微型蒸发器的材料应当以热容量高、导热性能差的非金属材料为宜,而封底材料一般采用导热性较好的薄金属片。从微型蒸发器的观测精度和使用方便等因素来看,其口径应在 56 ~ 150 mm 之间,但根据宽行植物棵间蒸发观测的需要,也可以采用相应的大口径微型蒸发器,或小型蒸渗仪。长度为 150 ~ 200 mm 的微型蒸发器基本可以保证较好的观测精度和一定的使用时间,而一些

疏松沙土的蒸发量观测可能需要更长的微型蒸发器,但沙土上的深层取土相对比较容易。

金属材料的微型蒸发器在耐用程度和使用方便性方面优于非金属材料的微型蒸发器,但许多研究者担心因金属的热容量低、导热性高,会影响其观测值的代表性。因此,研究两者的差异性,及如何消除材料的影响是有意义的。微型蒸发器的土体使用寿命有限,且缺乏不同土壤湿度和蒸发强度情况下土壤使用寿命情况的系统研究,因此需要频繁地更换土壤。在降雨后(可能产生入渗)或土壤水再分配的 1 ~ 2 d 内也必须更换土壤,劳动量较大。目前研究所采用的取土和安装方法,取土点和安装点一般不能重合,频繁更换土壤也可能因取土点和观测点土壤情况的差异而导致观测误差。预埋蒸发器的方法对于提高观测精度有一定的改进。设计一种对取土孔破坏较少的取土工具(土钻),可以使取土点与安装点重合,减少取土和安装的工作量。

参考文献:

- [1] 王会肖,刘昌明,由懋正.玉米、大豆棵间蒸发 micro-lysimeter 测定分析[C]//刘昌明,于沪宁.土壤作物大气系统水分运动试验研究.北京:气象出版社,1997:120-129.
- [2] BOAST C W,ROBERTSON T M.A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory Evaluation[J]. Soil Science Society of American Journal,1982,46:689-696.
- [3] MATTHIAS A D,SALEHI R,WARRICK A W. Bare soil evaporation near a surface point source emitter[J]. Agricultural Water Management,1986,11:257-277.
- [4] ALLEN S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1990,49:291-309.
- [5] SALEHI R. Micro-lysimeter and thermometric measurements of soil evaporation near a point source emitter[D]. Tucson: University of Arizona,1984.
- [6] DAAMEN C C,SIMMONDS L P,WALLACE J S. Use of micro-lysimeters to measure evaporation from sandy soil[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1993,65:159-173.
- [7] BOAST C W. Evaporation from bare soil measured with high spatial resolution[C]//KLUTE A. Methods of soil analysis, Part I: physical and mineralogical methods. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Inc,1986:889-890.
- [8] LASCAON R J, Van BAVEL C H M. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil[J]. Soil Science Society American Journal,1986,59:1127-1132.
- [9] EVETT S R,WARRICK A W,MATTHIAS A D. Wall material and cropping effects on micro-lysimeter temperatures and evaporation[J]. Soil Science Society of American Journal,1995,59:329-336.

- [10] PLAUBORG F. Evaporation from bare soil in a temperate humid climate-measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry[J]. Agricultural and Forest Meteorology , 1995 ,76 :1-17.
- [11] AYDIN M ,YANG Sheng-li ,KURT N ,et al. Test of a simple Model for estimating evaporation from bare soils in different environments[J]. Ecological Modelling , 2005 ,182 :91-105.
- [12] AYDIN M. A model for evaporation and drainage investigations at ground of ordinary rainfed-areas [J]. Ecological Modeling , 2008 , 217 :148-156.
- [13] 王会肖. 砂土土壤蒸发的测定与模拟[J]. 中国农业气象 ,1997 ,18(4) :29-35.
- [14] 孙宏勇 ,刘昌明 ,张喜英 ,等. 不同长度 micro-lysimeter 对测定土壤蒸发的影响[J]. 西北农林科技大学学报 : 自然科学版 , 2003 ,31(4) :167-170.
- [15] 孙宏勇 ,刘昌明 ,张永强 ,等. 微型土壤蒸发器测定土面蒸发的实验研究[J]. 水利学报 , 2004(8) :114-118.
- [16] 刘新平 ,张铜会 ,赵哈林 ,等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J]. 干旱区地理 , 2006 ,29(4) :524-526.
- [17] 李王成 ,王为 ,冯绍元 ,等. 不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J]. 农业工程学报 , 2007 ,23(10) :6-13.
- [18] 翟翠霞 ,马健 ,李彦. 古尔班通古特沙漠风沙土土壤蒸发特征[J]. 干旱区地理 , 2007 ,30(6) :805-811.
- [19] 刘钰 ,FERNANDO F M ,PEREIRA L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. 水利学报 ,1999(6) :45-50.
- [20] SHAWCROFT R W ,GARDNER H R. Direct evaporation from soil under a row crop canopy[J]. Agricultural Meteorology , 1983 ,28 :229-238.
- [21] WALKER G K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies[J]. Canadian Journal of Soil Science , 1983 , 63 :137-141.
- [22] KLOCKE N L ,MARTIN D L ,TODD R W. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies [J]. Transactions of the ASAE ,1990 ,33 :1590-1596.
- [23] VILLALOBOS F J ,FERERES E. Evaporation measurement beneath corn ,cotton , and sunflower canopies[J]. Agronomy Journal ,1990 ,82 :1153-1159.
- [24] WALLACE J S ,LLOYD C R ,SIVAKUMAR M V K. Measurements of soil , plant and total evaporation from millet in Niger[J]. Agricultural and Forest Meteorology ,1992 ,63 :149-169.
- [25] YUNUSA I A M ,SEDGLEY R H ,BELFORD R K ,et al. Dynamic of water use in a dry Mediterranean environment I : soil evaporation little affected by presence of plant canopy[J]. Agricultural Water Management ,1993 ,24 :205-224.
- [26] YUNUSA I A M ,BELFORD R K ,TENNANT D ,et al. Row spacing fails to modify soil evaporation and grain yield in spring wheat in a dry Mediterranean environment[J]. Australian Journal of Agriculture Research ,1993 ,44 :661-675.
- [27] LEUNING R ,CONDON A G ,DUNIN F X ,et al. Rainfall interception and evaporation from soil below a wheat canopy [J]. Agricultural and Forest Meteorology ,1994 ,67 :221-238.
- [28] JACOBS A F G ,VERHOEF A. Soil evaporation from sparse natural vegetation estimated from Sherwood numbers[J]. Journal of Hydrology ,1997 ,188 :443-452.
- [29] EASTHAM J ,GREGORY P J. The influence of early sowing of wheat and lupin crops on evapotranspiration and evaporation from the soil surface in a Mediterranean climate[J]. Agricultural Water Management ,1999 ,42 :205-218.
- [30] JACKSON N ,WALLACE J S. Soil evaporation measurements in an agro-forestry system in Kenya[J]. Agricultural and Forest Meteorology ,1999 ,94 :203-215.
- [31] LIU Chang-ming , ZHANG Xi-ying , ZHANG Yong-qiang. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology , 2002 ,111 :109-120.
- [32] TAHIRI A Z ,YASUDA H A H. Fixed and variable light extinction coefficients for estimating plant transpiration and soil evaporation under irrigated maize[J]. Agricultural Water Management , 2006 ,84 :186-192.
- [33] QIU Guo-yu ,WANG Li-ming ,HE Xin-hua ,et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology , 2008 ,148 :1848-1859.
- [34] WANG Ya-jun ,XIE Zhong-kui ,MALHI S S ,et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau ,China [J]. Agricultural Water Management , 2009 ,96 :374-383.
- [35] 王会肖 ,刘昌明 ,袁小良. 小麦棵间蒸发 micro-lysimeter 测定分析[C]//刘昌明 ,于沪宁. 土壤作物大气系统水分运动试验研究. 北京 :气象出版社 ,1997 :111-119.
- [36] 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[J]. 水利学报 ,1998 (10) :36-39.
- [37] 裴冬 ,张喜英 ,李坤. 华北平原作物棵间蒸发占蒸散比例及减少棵间蒸发的措施[J]. 中国农业气象 ,2000 ,21(4) :33-37.
- [38] 陈素英 ,张喜英 ,裴冬 ,等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报 , 2004 ,23(40) :32-36.
- [39] 王健 ,蔡焕杰 ,陈凤 ,等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报 , 2004(11) :108-113.
- [40] 孙景生 ,康绍忠 ,王景雷 ,等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报 , 2005 ,21(11) :20-24.
- [41] 陈素英 ,张喜英 ,陈四龙 ,等. 种植行距对冬小麦田土壤蒸发与水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报 , 2006 , 14(3) :86-89.
- [42] 刘浩 ,段爱旺 ,高阳. 间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型[J]. 农业工程学报 , 2006 ,22(12) :34-38.
- [43] 刘小飞 ,孙景生 ,刘祖贵 ,等. 交替隔沟灌条件下夏玉米棵间蒸发研究[J]. 节水灌溉 , 2007(6) :10-12 ,16.
- [44] 田媛 ,李峰民 ,刘效兰. 半干旱区不同垄沟集雨种植马铃薯模式对土壤蒸发的影响[J]. 应用生态学报 , 2007 ,

18(4):795-800.

[45] 黄高宝, 秦舒浩. 耕作措施对绿洲灌区冬小麦田蒸散特征的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5):793-799.

[46] 李彩霞, 陈晓飞, 王铁良, 等. 控制性交替灌溉情况下土壤蒸发的预测研究[J]. 节水灌溉, 2007(3):29-31.

[47] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 日光温室白菜棵间土壤蒸发变化规律试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):207-211.

[48] 刘丽霞, 王辉, 孙栋元, 等. 绿洲农田防护林系统土壤蒸发特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10):162-166.

[49] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4):319-328.

[50] 宋克超, 康尔泗, 金博文, 等. 两种小型蒸渗仪在黑河流域山区植被带的应用研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5):617-623.

[51] 张志山, 王新平, 李新荣, 等. 沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2):243-248.

[52] 王晓燕, 陈洪松, 王克林. 红壤坡地不同土地利用方式土壤蒸发和植被蒸腾规律研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12):41-45.

(上接第 71 页)

参考文献:

[1] 北京市水利科学研究所, 北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室. 北京城市道路积水排除与城市河湖联合调度研究[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 2007.

[2] 北京市水务局. 水务数据[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 2005.

[3] 北京市水利科学研究所. 国外雨洪利用调查研究[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 1992.

[4] 于立, 单锦炎. 西欧国家可持续性城市排水系统的应用[J]. 国外城市规划, 2004, 19(3):51-56.

[5] 周玉文, 赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[6] TEMPRANO J, ARANGO O, CAGIAO J, et al. Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in northern Spain[J]. Water SA, 2006, 32(1):55-63.

[7] FUNAYAMA Y, SHINKAWA M, TAKAGI K, et al. Stormwater control using storage and networking techniques[M]. Portland: Global Solutions for Urban Drainage, American Society of Civil Engineers, 2002:1-6.

[8] NIE Lin-mei, SCHILLING W, KILLINGTVEIT A, et al. GIS based urban drainage analysis and their preliminary applications in urban stormwater management[M]. Portland: Global Solutions for Urban Drainage, American Society of Civil Engineers, 2002:7-13.

[9] MARK O, PARKINSON J. The future of urban stormwater management: an integrated approach, Water2[M]. London: IWA Publishing, 2005:30-32.

[53] 张卫强, 贺康宁, 周毅, 等. 黄土半干旱区刺槐林地土壤蒸发特性研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6):396-399, 403.

[54] 鲁绍伟, 杨新兵, 聂森, 等. 华北土石山区土壤水分蒸发特性[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(24):7532-7533, 7539.

[55] PACO T A, FERREIRA M I, CONCEICAO N. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by FAO 56 approach[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85:305-313.

[56] ZHANG Zhi-shan, LIU Li-chao, LI Xin-rong, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger desert, North China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72:964-973.

[57] MORAN M S, SCOTT R L, KEEFER T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrub land ecosystems using time series of soil surface temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149:59-72.

[58] NEWSON T A, FAHEY M. Measurement of evaporation from saline tailings storage[J]. Engineering Geology, 2003, 70:217-233.

(收稿日期: 2009-05-11 编辑: 方宇彤)

[10] 魏林宏, 郝振纯, 邱绍伟. 雷达测雨在水文学中的应用——影响预报精度的因素分析[J]. 水利水电技术, 2004, 35(5):1-3.

[11] 3ZM-GRIMEX-Ground water simulation[EB/OL]. [2009-05-20]. http://www.mpecc.de/mpecc_community_grimex.html.

[12] 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J]. 热带气象学报, 2004, 20(2):192-197.

[13] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2):213-219.

[14] 刘勇明, 孔银华, 王和平. 雷达测量降水及其在水文气象中的应用[J]. 山西气象, 2006(2):43-45.

[15] 刘俊, 陆剑峰, 方正杰, 等. 上海市杨浦区防汛决策支持系统研究[J]. 城市道桥与防洪, 2004(3):1-4.

[16] 郑晓阳, 胡传廉. 上海市防汛决策支持系统设计[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1):25-27.

[17] 天津市城市防洪决策支持系统通过专家鉴定[EB/OL]. [2009-05-20]. <http://www.mwr.gov.cn/xxh/20060515/72312.asp>.

[18] 乔纳森·帕金森, 奥尔·马克. 发展中国家城市雨洪管理[M]. 周玉文, 赵树旗, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[19] Regional precipitation observation by cellular network microwave attenuation and application to water resources management[EB/OL]. [2009-05-20]. <http://www.imk-ifu.kit.edu/1179.php>.

(收稿日期: 2009-05-20 编辑: 方宇彤)