

利用环刀法快速原位测定土壤蒸发量

刘 萌¹, 王善举^{2*}, 樊 军¹, 付 威¹, 杜梦鸽¹

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 甘肃 张掖, 734000)

摘 要: 原位准确快速测量土壤蒸发量, 对研究干旱与半干旱地区土壤蒸发规律和水量平衡计算具有重要意义。本研究采用环刀法分别在两种质地土壤(风沙土和黄绵土)上原位测量土壤蒸发量, 并与传统微型蒸发器法测定结果进行分析对比。结果表明: 在风沙土上环刀法表层(0~5 cm)土壤日平均蒸发量为微型蒸发器法蒸发量的 81.68%, 而在黄绵土上仅占 60.71%。在风沙土上环刀法四层累加值(0~20 cm)与微型蒸发器法测定结果极显著相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.52$), $RMSE$ 为 0.84, 在连续无降水事件发生时, 二者测定结果接近。在黄绵土上环刀法(0~20 cm)与微型蒸发器法测定结果极显著相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.59$), $RMSE$ 为 1.07, 在连续无降水事件发生时, 二者测量结果差异明显, 但降雨强度较小的事件发生后, 二者测量结果一致。因此, 环刀法可以用于准确快速原位测定土壤蒸发量, 但降水事件会对环刀测量土壤蒸发量结果产生显著影响。

关 键 词: 环刀法; 微型蒸发器; 土壤蒸发; 土壤质地

中图分类号: S152.7+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)01-0055-07

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2020031001](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020031001)

刘 萌, 王善举, 樊 军, 付 威, 杜梦鸽. 利用环刀法快速原位测定土壤蒸发量 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 55 - 61

LIU Meng, WANG Shan-ju, FAN Jun, FU Wei, DU Meng-ge. Rapid *In-situ* Determination of Soil Evaporation with Cutting Ring Method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 55 - 61

土壤蒸发是水循环最重要的环节之一, 是干旱与半干旱区作物水分高效利用的关键^[1]。我国西北地区光照充足, 降雨较少, 而且土地面积广, 自然地理条件差异较大, 强烈的水分蒸发导致了土壤水分无效损失, 在部分干旱区域甚至会出现次生盐渍化, 其中土壤蒸发量远高于降水量, 致使土壤干燥化程度加剧。传统方法测量土壤蒸发耗时费力。因此, 一种快速、准确的土壤蒸发测量方法对于研究当地蒸发规律和计算水量平衡具有重要的现实意义。目前, 测定土壤蒸发主要有大型蒸渗仪、微型蒸发器、热脉冲法和水量平衡法^[2-4]。其中大型蒸渗仪体积大、价格昂贵, 无法大范围使用。水量平衡法作为测定土壤蒸发的常用方法, 测定结果易受其他分量测定的影响, 精确性较差^[5]。热脉冲法作为一种新颖的测定方法, 其准确性还有待商榷。同时, 大量研究已经表明微型蒸发器(micro-lysimeter)作为一种无扰动, 可移动的小型观测器皿, 已广泛应用于测定土壤蒸发^[6-8], 但是却存在与周围土壤水热交互不畅, 原状土受到了扰动等缺点。

众多学者对不同规格微型蒸发器进行了研究。例如李王成等研究了不同直径、长度、材质以及是否封底对测定结果的影响, 结果表明在西北地区不同微型蒸发器测得的土壤蒸发变化趋势一致, 并且不封底 20 cm PVC 材质微型蒸发器效果最好^[9]。而杨宪龙等研究显示, 长度为 20 cm、内径为 10 cm 且用薄铁皮封底的微型蒸发器更适合^[10]。马富亮等研究发现一般条件下不封底的微型蒸发器效果更好, 降雨多的区域采用封底的更好^[11]。Evet 等发现封底会使土壤水分运动受阻, 引起微型蒸发器内部的水分高于周围土壤, 且 20 cm 高的塑料微型蒸发器测得的值要高于钢制微型蒸发器, 这是由于钢制材料导热率高^[12]导致的。Boast 等则认为防止发生水分交换需要进行封底, 采用直径 30 cm 的橡皮塞子封底使蒸发器内土体与外界土壤隔离, 另外 Boast 研究发现 70 cm 高的微型蒸发器日蒸发量在 2.6 mm 左右时, 使用时间可达 2.9 ± 0.8 d^[13]。Facchi 等认为微型蒸发器的长度应该涉及到整个土层的蒸发, 否则测量值可能低于实际蒸发量^[14]。5 cm 的微型蒸发器在蒸发

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-10-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41977016)资助

作者简介: 刘 萌(1995-), 男, 山东省泰安市人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理方面研究。E-mail: mengl2019@163.com

*通讯作者: E-mail: 870028013@qq.com

强度不高的情况下,可以测量裸土的日蒸发量^[15]。综合考虑各种影响因素的结果表明,15 cm 的微型蒸发器是比较合适的最短长度^[16]。Kidron 等研究自然条件下的露水、雾、水蒸气等对于不同长度微型蒸发器的影响,结果显示由于热量沿侧壁传输导致微型蒸发器的测得数据与对照土壤有明显差异,需要对微型蒸发器进行校准才能反映自然土壤的真实蒸发量^[17]。此外,高晓飞等研究不同直径的微型蒸发器在裸土上的蒸发量,结果表明蒸发器的口径一般应大于 104 mm^[18]。刘春伟等通过对冬小麦和夏玉米地土壤蒸发的测定,最终认为直径 125 mm 的铁皮或者 PVC 外筒,直径 118 或 114 mm 的铁皮内桶比较适合测定裸间土壤蒸发量^[19]。Daamen 等将 51 mm、152 mm 和 214 mm 直径微型蒸发器的蒸发量进行比较,发现直径对 PVC 管材的测量结果影响不显著^[20]。因此,本试验采用长度为 20 cm,直径 110 mm 的微型蒸发器作为标准。

综上所述,以往的研究大多集中于微型蒸发器的材料^[9,12]、长度^[14-15]、直径^[18-21]和是否封底^[9-13]等,

很少考虑到传统微型蒸发器和周围土壤水热交换不畅,需要定期更换土壤等问题。因此,本试验选择直径 50 mm、高度 50 mm 测量土壤容重的环刀,在土壤容重一致的情况下对等体积土壤进行称重,2 次质量之差为土壤蒸发量,从而与传统的微型蒸发器进行比较,力求找出一种简单、快速用于测量土壤实际蒸发量的方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于陕西省神木市西沟乡六道沟小流域进行(110°21′~110°23′E, 38°46′~38°51′N, 海拔 1094~1274 m)。该地区属于中温带半干旱气候,年均潜在蒸散量 1100 mm,年均气温 8.4℃,多年平均降雨量 437.4 mm,年内年际变化较大,其中 6~9 月份的降雨量占全年的 75% 以上,平均干燥度为 1.8 是典型的半干旱区,雨热同期。

六道沟小流域主要土壤类型为风沙土和黄绵土。试验土壤理化性状如表 1 所示。

表 1 研究区土壤的部分物理化学性质
Table 1 Some physical and chemical properties of soil in the study area

土壤类型 Soil type	土层 Soil layer (cm)	容重 Bulk Density (g cm ⁻³)	总孔隙度 Total Porosity (%)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)
风沙土	0~5	1.61	39.25	84.69	10.78	4.53	2.41
	5~10	1.64	38.11	80.93	13.48	5.59	2.49
	10~15	1.67	36.98	84.09	11.20	4.71	2.15
	15~20	1.67	36.98	85.78	10.22	4.00	2.15
黄绵土	0~5	1.36	48.68	54.64	37.67	7.69	4.41
	5~10	1.42	46.42	53.60	38.77	7.63	2.83
	10~15	1.49	43.77	52.25	40.22	7.53	1.39
	15~20	1.51	43.02	51.03	41.20	7.77	1.29

1.2 试验设计的方法

试验选取六道沟小流域风沙土和黄绵土两种典型土壤进行土壤蒸发测定,测定方法采用传统微型蒸发器法和环刀法。为了排除试验地形,气象和植被等其他因子的影响,试验样点选取均为平坦裸地,且两种测定方法均在同一样点进行。微型蒸发器用 PVC 管制成,内筒内径为 11 cm,长度为 20 cm;套筒直径 15 cm,使微型蒸发器内筒能够方便的放入;套筒与微型蒸发器之间用 2 cm 厚不透水珍珠棉做隔层,防止雨水进入间隙。内筒与外筒前端均打磨成刃口,以便于制作试样时压入土壤中。

微型蒸发器试样制作方法是内筒自刃口一端垂直压入土中至其上端低于地面,然后将内筒小心

整体挖出,削去上下两端多余土壤使之成平面,底端用 300 目的纱网托底、纱网用胶带固定。测定时,先在测定地点埋入套筒,再将装有试样的蒸发器内筒整体放入套筒,并使内、外筒与土壤表面齐平^[11]。

环刀法使用的环刀直径为 50 mm,长度 50 mm,体积 100 cm³。试样制作方法为将环刀垂直压入并使土壤充满,再用土铲将环刀小心取出,去掉多余土壤并修平两端,利用精度为 1 g 的天平称重。

试验于 2019 年 8 月 6 日至 2019 年 8 月 31 日进行,期间平均空气温度 18.63℃,降雨量 37.1 mm(图 1)。微型蒸发器法在风沙土和黄绵土上分别设置微型蒸发器 5 个,每天下午 5~6 点将微型蒸发器内筒取出称量,两次质量之差即为当天的蒸发量;

在降雨量比较大时,及时更换土体,在8月11日对微型蒸发器土体进行了更换。微型蒸发器共测得25 d的土壤蒸发数据。环刀法8月8日至8月25日期间每2天测定1次,26日至31日每天测定1次。其中表层0~5 cm环刀两次称重差值作为0~5 cm环刀蒸发量,四层环刀累加值的差值为0~20 cm环刀蒸发量。取样时间与微型蒸发器时间一致,共26 d、测得15次蒸发数据。



图1 微型蒸发器布设及环刀法

Fig.1 Micro-lysimeter layout and ring-cutting method

1.3 数据处理

本试验中数据的整理和计算采用Excel 2010。各处理土壤蒸发量测定值之间的Pearson相关分析、以及t检验等统计分析均采用SPSS 22。试验数据绘图采用Origin 2016。

2 结果与分析

2.1 土壤日蒸发量的变化

试验于8月6日布置后在8月11日至8月17日,8月27至8月31日期间没有降水,风沙土和黄绵土的土壤蒸发量逐日降低,而8月6日至8月9日期间连续强降雨使得8月10日土壤蒸发量显著提高,表明微型蒸发器在连续测定土壤蒸发量时受降雨影响很大,这与Allen和Plauborg等提出的降雨对微型蒸发器测量蒸发量有影响相一致^[1,6]。此外观察图2a和图2b可以发现土壤日蒸发量受到日平均温度的影响,这与李王成等的研究结果相一致^[9]。进一步将风沙土和黄绵土的日蒸发量比较发现,两者的日蒸发量变化趋势大体一致,但黄绵土的日蒸发量高于风沙土的蒸发量,特别是在降雨过后,差异显著,无降雨事件发生时,黄绵土与风沙土的蒸发量逐渐降低并且差距逐渐缩小。将25 d的有效数据计算日平均蒸发量发现,风沙土平均蒸发量为 1.30 mm d^{-1} ,而黄绵土则达到 1.73 mm d^{-1} ,其日平均蒸发量比风沙土高33.1%,这可能是由于风沙土表层土壤粗砂粒含量高,导致土壤表层大孔隙较黄绵土多^[22-23],在土

壤连续蒸发过程中能迅速形成干土层抑制了土壤蒸发,这与赵丹等^[24]研究的土壤蒸发形成干层后,在蒸发后期土壤水逐渐转变为以水汽扩散的方式进行蒸发,从而使蒸发量减小的研究结果一致。

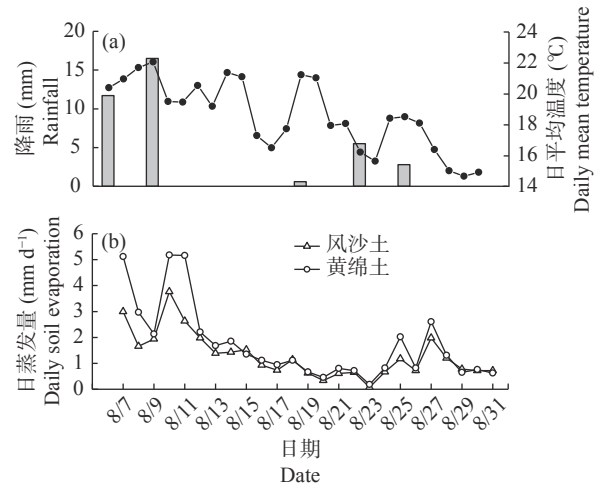


图2 试验期内降雨、日平均温度(a)和土壤蒸发量(b)的连续动态变化

Fig.2 Dynamics of rainfall and daily mean temperature (a) and soil evaporation (b) with time during the monitoring period

2.2 两种方法测定土壤蒸发量的对比

环刀法获得4个土层蒸发量相加与微型蒸发器测定结果对比显示,风沙土在8月8日到8月25日之间测得的9次数据,两者的日平均蒸发量分别为 1.36 mm d^{-1} 和 1.50 mm d^{-1} ,微型蒸发器和环刀法测得的蒸发量在8月13日之后更加接近,说明两种方法测定结果具有较好的一致性,环刀法可以替代微型蒸发器法进行土壤蒸发测定(图3a)。而在8月8日和8月11日两天环刀法在两种质地土壤上测得数据变异较大,与微型蒸发器的蒸发量差异也较大,因受降雨影响导致实际蒸发量测定困难,这与龙桃等^[25]在田间裸地得到的蒸发量测量精度降低受较强降雨影响的结果相一致。图3b显示黄绵土中微型蒸发器和环刀法测得的9次平均蒸发量分别为 1.93 mm d^{-1} 和 1.15 mm d^{-1} ,微型蒸发器的日平均蒸发量比环刀法高67.8%,主要是8月8日和8月11日的测定是在雨后进行,环刀法测得蒸发量显著低于微型蒸发器法,这可能是因为微型蒸发器法降低了土壤水分入渗速率,阻挡了与周围土体的水热交换,从而造成微型蒸发器内土壤水分含量高于周围土体。单独对后面7次所测数据进行分析,两者的平均蒸发量分别为 1.18 mm d^{-1} 和 0.92 mm d^{-1} ,微型蒸发器的平均蒸发量比环刀法高28.3%。以上结果表明,在

连续无降雨事件发生时, 环刀法在风沙土上比黄绵土上与微型蒸发器的测定结果更接近, 效果更好。

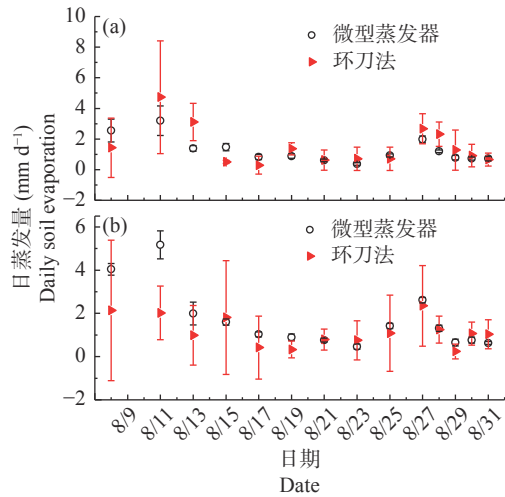


图 3 两种方法在不同土壤质地(a 风沙土, b 黄绵土)的蒸发量对比

Fig.3 Comparison of evaporation of different soil textures by using two methods (a, Aeolian soil; b, Loessal soil)

8月23日和8月26日晚小雨过后, 连续5天图3a中风沙土上环刀法与微型蒸发器所测的蒸发量趋势一致, 都是逐渐降低的, 但环刀法每日所测得蒸发量均高于微型蒸发器, 特别是27、28日, 环刀法测得蒸发量比微型蒸发器分别高35.1%和92.8%, 这可能是由于雨后土壤水分不稳定导致的, 而且变异也显著高于微型蒸发器^[23]。计算5天的累计蒸发量得到微型蒸发器累计蒸发量达5.40 mm, 而环刀法达到7.84 mm, 比微型蒸发器高45.2%, 结果显示环刀法在风沙土不适合雨后马上进行测定。图3b黄绵土

连续5天蒸发量同样呈现逐渐降低的趋势, 并且环刀法所测得蒸发量与微型蒸发器所测得的差异不大, 计算累计蒸发量可知, 微型蒸发器累计蒸发量为5.96 mm, 而环刀法也达到5.93 mm, 两者仅相差0.03 mm, 但是若短时间降雨强度过大会发现黄绵土上微型蒸发器法的测定结果会远大于环刀法。导致以上结果可能原因是风沙土粗砂粒含量高, 因此土壤大孔隙较多^[22-23], 雨后风沙土水分入渗与再分布速度较快, 微型蒸发器阻断了土体和土壤之间的水分交换, 导致部分水分不能离开20 cm土体, 但是环刀测量不存在此问题, 可能将入渗离开20 cm土体的部分水分也算到蒸发里面, 而黄绵土由于粘粒和粉粒含量高, 土壤孔隙当量直径较小, 土壤水分入渗与再分布没有超过20 cm深度, 此外, 短时间强降雨会使黄绵土上微型蒸发器蓄积水分, 导致测定结果高于环刀法, 这在一定程度是由于装置本身测定误差导致的。所以雨后密集测定结果表明, 小规模降雨后, 环刀法在黄绵土测定效果更好, 若在风沙土测定土壤蒸发, 两种方法的测量深度均需要增加。

微型蒸发器和环刀法测得的土壤蒸发量具有显著的线性相关关系, 由图4a风沙土可知, 两种方法相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$), 相关关系为 $y = 1.095x + 0.0762$, 并且 $R^2 = 0.52$, $RMSE$ 为 0.84。图4b黄绵土表明: 环刀法与微型蒸发器两种方法同样极显著相关 ($P < 0.01$), 相关关系为 $y = 0.3729x + 0.5398$, 而且 R^2 达到 0.59, 与风沙土相比, 其线性相关性更好, 但其 $RMSE$ 为 1.07, 比风沙土稍高。从图中可以看出在黄绵土和风沙土上环刀法和微型

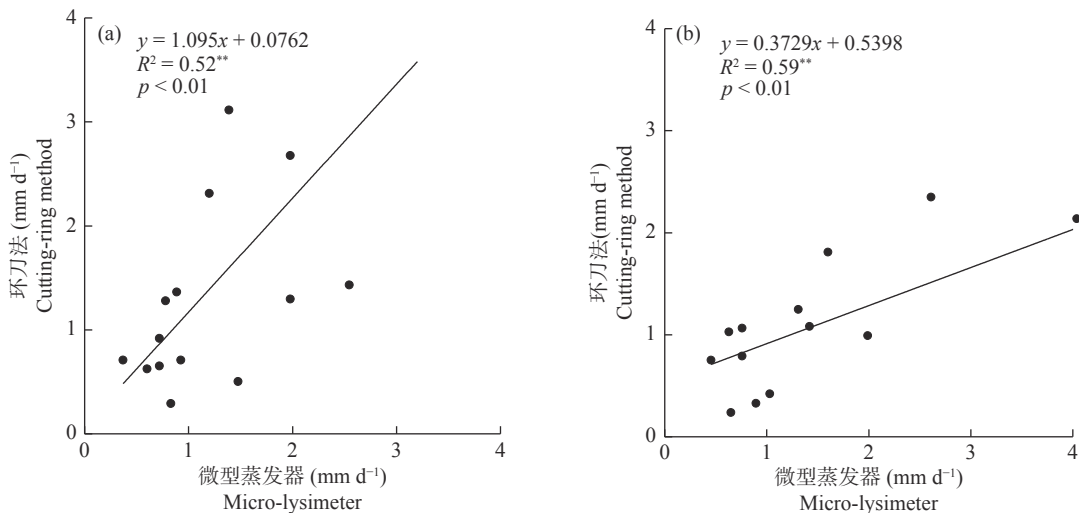


图 4 两种方法在不同土壤质地(a 风沙土, b 黄绵土)的相关性

Fig.4 Correlation of the evaporation results between two methods in different soil textures (a, Aeolian soil; b, Loessal soil)

蒸发器法两种方法达到紧密联系的程度,并且两者均极显著相关,因此环刀法可以很好的反映土壤蒸发量的大小。

土壤蒸发需要一定的水分和热量。其中当土壤水分一定时,土壤蒸发主要受太阳辐射和土壤热量的影响,太阳辐射能既可以蒸发地表的水分又可以增加土壤热量,而土壤作为良好的介质可以实现能量传递,加快土壤蒸发。环刀法采用原位原状土体测定,对土体蒸发过程没有扰动,因此隔天测定,雨后密集测定以及相关性分析都表明环刀法能够应用于土壤蒸发量的测定,而且其与传统的微型蒸发器具有良好的线性关系,但是与微型蒸发器测量结果相比,有一定差异,尤其是雨后差异可达 60%~100%。而连续无降水发生时差异较小,与微型蒸发器具有很好的一致性。此外,本文作为对比的 20 cm 微型蒸发器测量精度也没有得到有效验证,因为其底部和周边与原位土壤没有水热交换过程,粗质地土壤水分入渗与蒸发较快,必定存在一定误差。

2.3 0~5 cm 土壤蒸发量与微型蒸发器的对比

高晓飞等研究发现在蒸发量小于 3 mm 的情况下,5 cm 的蒸发器也是可以使用的^[15],本研究采用的环刀法测得表层 0~5 cm 的蒸发量与微型蒸发器的蒸发量如图 5 所示。结果表明,除 8 月 8 日和 11 日由于降雨后蒸发量增大之外,其余测定结果均在 3 mm 之下,微型蒸发器的蒸发量普遍高于 0~5 cm 环刀法蒸发量(图 5a,图 5b),风沙土微型蒸发器日平均蒸发量为 1.31 mm d⁻¹,环刀法为 1.07 mm d⁻¹,微

型蒸发器的蒸发量比环刀法高 22.4%,而黄绵土中两者的日平均蒸发量为 1.68 mm d⁻¹和 1.02 mm d⁻¹,微型蒸发器的蒸发量比环刀法高 64.7%,因此,风沙土中环刀法表层 0~5 cm 蒸发量和微型蒸发器更接近,可能是因为两种土壤的孔隙状况不同,导致蒸发作用深度存在差异。进一步将环刀法表层蒸发量与微型蒸发器的蒸发量进行 Pearson 相关性分析,结果如图 6 所示。风沙土中两者的 RMSE 为 0.57,黄绵土中 RMSE 为 0.92,说明环刀法在黄绵土上与微型蒸发器差异较大。但是,环刀法表层 0~5 cm 蒸发量通过校准可以反映两种不同质地土壤的实际蒸发量。

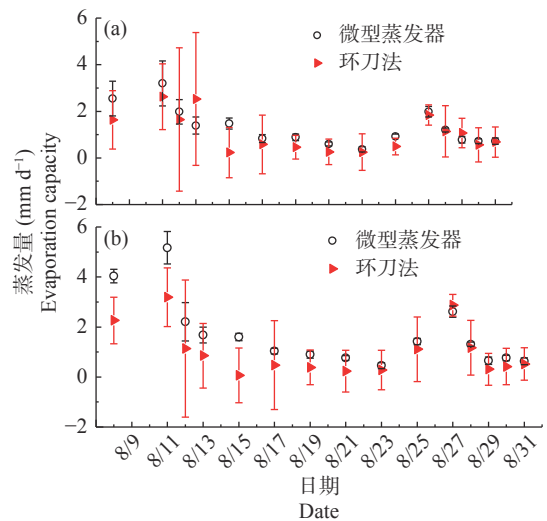


图 5 0~5 cm 环刀法蒸发量与微型蒸发器在不同土壤质地(a 风沙土,b 黄绵土)的对比

Fig.5 Comparison of soil evaporation at 0-5 cm depth between cutting-ring method and micro-lysimeter method in different soil texture (a, Aeolian soil; b, Loessial soil)

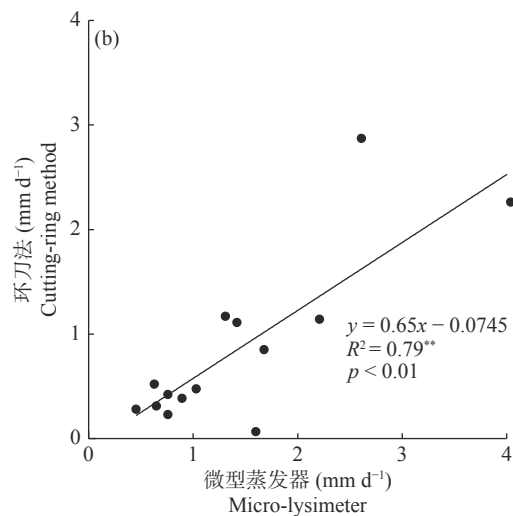
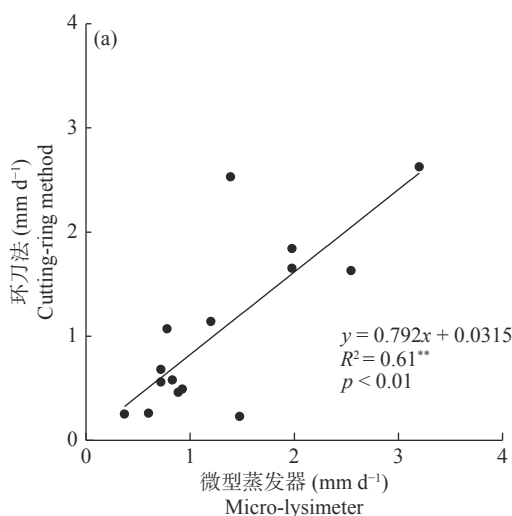


图 6 0~5 cm 环刀法蒸发量与微型蒸发器在不同土壤质地(a 风沙土,b 黄绵土)的相关性

Fig.6 Correlation between the soil evaporation at 0-5 cm depth between the cutting-ring method and micro-lysimeter method in different soil texture (a Aeolian soil, b Loessial soil)

3 结论

0 ~ 5 cm 环刀法或者 0 ~ 20 cm 环刀法与微型蒸发器法在两种不同质地土壤上测量结果相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。无降水事件发生时, 0 ~ 20 cm 环刀法与微型蒸发器法所测的风沙土日平均蒸发量分别为 1.50 mm d^{-1} 和 1.36 mm d^{-1} , 黄绵土日平均蒸发量分别为 1.15 mm d^{-1} 和 1.93 mm d^{-1} , 在黄绵土上, 环刀法低估土壤蒸发量, 需要进行校准。0 ~ 5 cm 环刀法在风沙土上日平均蒸发量为 0 ~ 20 cm 微型蒸发器法蒸发量的 81.68%, 而在黄绵土上仅占 60.71%, 同样需要进行校准。因此, 环刀法与微型蒸发器法相比, 具有不扰动原位土体与周围土壤水热交换的优点, 并且经过简单的校正后可快速、准确原位测定土壤蒸发量, 是一种简便快捷的新方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 牛 勇, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 基于大型称重式蒸渗仪的日光温室黄瓜蒸腾规律研究[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 52 – 56.
- [3] 米美霞, 樊 军, 邵明安. 利用热脉冲技术研究石子覆盖对土壤内部蒸发的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 75 – 82.
- [4] 屈艳萍, 康绍忠, 王素芬, 等. 液流-株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量适用性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 88 – 94.
- [5] 汪增涛, 孙西欢, 郭向红, 等. 土壤蒸发研究进展[J]. *山西水利*, 2007, (1): 76 – 78.
- [6] Allen S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 49(4): 291 – 309.
- [7] Matthias A D, Salehi R, Warrick A W. Bare soil evaporation near a surface point source emitter[J]. *Agricultural Water Management*, 1986, 11(3): 257 – 277.
- [8] Wallker G K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1983, 63(1): 137 – 141.
- [9] 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.
- [10] 杨宪龙, 魏孝荣, 邵明安. 不同规格微型蒸渗仪测定土壤蒸发的试验研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 343 – 350.
- [11] 马富亮, 朱小立, 符素华, 等. 封底与不封底微型蒸发器测定东北典型黑土区土壤蒸发量差异性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(12): 7 – 11.
- [12] Evett S R, Warrick A W, Matthias A D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(2): 329 – 336.
- [13] 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 America Journal*, 1982, 46(4): 689 – 696.
- [14] Facchi A, Masseroni D, Miniotti E F. Self-made microlysimeters to measure soil evaporation: a test on aerobic rice in northern Italy[J]. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15(3): 669 – 680.
- [15] 高晓飞, 史海珍, 杨 洁, 等. 微型蒸发器长度影响土壤蒸发测量值的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 11 – 15.
- [16] 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.
- [17] Kidron G J, Kronenfeld R. Assessing the effect of micro-lysimeters on NRW: Do micro-lysimeters adequately represent the water input of natural soil?[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 548: 382 – 390.
- [18] 高晓飞, 王晓岚. 微型蒸发器口径影响土壤蒸发测量值的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 1 – 4.
- [19] 刘春伟, 邱让建, 孙亚卿, 等. 不同材料和尺寸微型蒸渗仪测定土壤蒸发量[J]. *中国农村水利水电*, 2018, (6): 1 – 5.
- [20] Daamen C C, Simmonds L P, Wallace J S. Use of micro-lysimeters to measure evaporation from sandy soils[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65: 159 – 173.
- [21] Voortman B R, Bosveld F C, Bartholomeus R P, et al. Spatial extrapolation of lysimeter results using thermal infrared imaging[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 230 – 241.
- [22] 张保华, 陶宝先, 曹建荣, 等. 黄河下游不同质地潮土孔隙形态特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (3): 8 – 14.
- [23] 张丽萍, 陈儒章, 邬燕虹, 等. 风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 620 – 632.
- [24] 赵 丹, 李 毅, 冯 浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1058 – 1068.
- [25] 龙 桃, 熊黑钢, 李宝富, 等. 微型蒸发器测量精度的影响因素试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 21 – 26.

Rapid *In-situ* Determination of Soil Evaporation with Cutting Ring Method

LIU Meng¹, WANG Shan-ju^{2*}, FAN Jun¹, FU Wei¹, DU Meng-ge¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Administration of Qilianshan National Nature Conservation, Zhangye, Gansu, 734000, China)

Abstract: Accurate and rapid measurement of soil evaporation *in-situ* is of great significance for studying soil evaporation and water balance in the arid and semi-arid regions. The evaporation *in-situ* on the Aeolian soil and the Loessial soil was measured by using the cutting ring method. And then the results obtained by the cutting ring method and the traditional micro-evaporator method were compared. The average daily evaporation rate at the surface layer (0 - 5 cm) by using the cutting ring method was 81.68% and 60.71% of that by using the micro-evaporator method on the Aeolian soil and Loessial soil, respectively. There was an extremely significant correlation between the accumulative soil evaporation at four layers (0-20 cm) by using the cutting ring method and the results by using the micro-evaporator method on the Aeolian soil ($P < 0.01$, $R^2 = 0.52$), and the RMSE was 0.84. In the case of continuous non-precipitation events, the results were approximate between the two methods. There was an extremely significant correlation between the determination results by using the cutting ring method (0-20 cm) and by using the micro-evaporator method ($P < 0.01$, $R^2 = 0.59$) on the Loessial soil, and the RMSE was 1.07. The measurement results by using the two methods were significantly different under no continuous precipitation event, while they were consistent after the occurrence of an event with a low rainfall intensity. Although the cutting-ring method can be used to accurately and rapidly measure soil evaporation *in-situ*, precipitation events would have a significant impact on the cutting-ring method.

Key words: Cutting-ring method; Micro-lysimeter; Soil evaporation; Soil texture

[责任编辑: 韩春兰]