

杨光超, 朱忠礼, 谭磊, 等. 怀来地区蒸渗仪测定玉米田蒸散发分析[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1095–1106, doi: 10.7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00114.

## 怀来地区蒸渗仪测定玉米田蒸散发分析

杨光超<sup>1</sup>, 朱忠礼<sup>1</sup>, 谭磊<sup>1</sup>, 刘绍民<sup>1</sup>,  
徐自为<sup>1</sup>, 柏军华<sup>2</sup>, 肖青<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室/地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

**摘要:** 利用2012年和2013年怀来遥感综合试验站蒸渗仪、涡动相关仪和自动气象站观测资料, 分析了土壤蒸发和玉米农田蒸散的日、季节变化, 用多元回归分析法研究了气象因子(净辐射、空气温度、空气湿度、风速)、土壤水分和农田蒸散量的关系, 并将蒸渗仪蒸散观测值与涡动相关仪蒸散量观测值进行了比较。结果表明, 土壤蒸发和玉米农田蒸散日变化曲线较一致, 季节性差异明显; 怀来地区日蒸散量与净辐射和土壤水分相关性较好, 与其他影响因子相关性不明显; 蒸渗仪的农田代表性受其观测范围内的作物长势影响显著, 涡动相关仪观测的蒸散量与蒸渗仪观测值相关关系较好, 蒸渗仪观测值较涡动相关仪观测值高10.5%, 这是由于不能同周围农田进行热交换, 蒸渗仪内平均土壤温度较农田高了9.5%, 导致蒸渗仪对蒸散量的相对高估。

**关键词:** 蒸渗仪; 涡动相关仪; 蒸散量; 气象因子

**文章编号:** 1000-0534(2015)04-1095-12 **中图分类号:** P426.2 **文献标志码:** A

**doi:** 10.7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00114

### 1 引言

蒸散发作为能量循环和水循环的结合点, 一直是农学、水文学、灌溉排水学等领域的重点研究内容。中国水资源分布不均, 特别是华北半干旱地区农田灌溉用水十分紧张<sup>[1]</sup>。因此, 准确地估算作物蒸发蒸腾量对于研究作物生育期的水分消耗规律, 提高水分利用率, 发展节水农业有着十分重要的意义<sup>[2]</sup>。

蒸渗仪被认为是测量蒸散量最准确的仪器, 分为称重式和非称重式, 其中称重式蒸渗仪用于直接测量蒸散量。蒸渗仪最早可以追溯到1688年, Da La Hire用3个容器分别填装沙壤土制作简易的蒸渗仪, 用于观测草地覆盖地表和裸地蒸散<sup>[3]</sup>。称重式蒸渗仪内部土壤填充方式分为回填土和原状土, 1870年以前蒸渗仪都采用回填土; 1870年之后, Lawes et al<sup>[4]</sup>认为回填土破坏了土壤原有土层结构, 采用完整的原状土填充蒸渗仪,

对蒸渗仪观测结果的可靠性有了非常大的提高。1937年美国水土保持研究所在俄亥俄州建造了第一台自记称重式原状土填充蒸渗仪, 为蒸渗仪长期自动观测提供了可能<sup>[5]</sup>。Marek et al<sup>[6]</sup>在已有研究的基础上, 详细介绍了大型称重式蒸渗仪的设计原理和建造过程, 使得蒸渗仪的设计建造技术趋于成熟。

国外利用蒸渗仪研究作物蒸散已经非常普遍。Howel et al<sup>[7]</sup>用称重式蒸渗仪测量了玉米的蒸散, 研究了蒸发蒸腾与产量、水分利用效率等的关系。Tolk et al<sup>[8]</sup>用48台称重式蒸渗仪研究了种植在3种高原土壤下玉米的蒸散与产量之间的关系。Tyagi et al<sup>[9]</sup>用称重式蒸渗仪测量了水稻、向日葵每小时的蒸发量。目前, 蒸渗仪已在世界各地广泛使用, 并且已发展成拥有各种不同类型的系列产品, 人们采用各种技术办法改进了其对蒸散的测定<sup>[10]</sup>。

中国利用蒸渗仪进行作物蒸散的研究始于20

收稿日期: 2014-01-28; 定稿日期: 2014-09-24

资助项目: 遥感科学国家重点实验室重大项目(270403GK); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA12A305)

作者简介: 杨光超(1987-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事农田多尺度蒸散发的研究. E-mail: airblue6@163.com

通讯作者: 朱忠礼. E-mail: zhuzl@bnu.edu.cn

世纪80年代中期。中国科学院禹城综合试验站于1985年安装了一台面积为 $3\text{ m}^2$ 、深度为 $2\text{ m}$ 的大型原状土自动称重土壤蒸发渗漏仪对作物蒸发蒸腾进行了连续多年的联合观测试验,取得了丰富的数据资料,为综合评价和确定适宜的作物蒸发蒸腾测定方法、模型的建立以及研究各种作物系统的蒸发蒸腾耗水规律,提供了有意义的试验依据<sup>[11]</sup>。从80年代中期开始,除禹城站外,德州、乐陵、封丘、商丘、长武等中科院野外台站也先后安装了蒸渗仪,2011年北京师范大学在怀来试验站也安装有两台表面积面积为 $1\text{ m}^2$ 、深度为 $1.5\text{ m}$ 的原状土自动称重蒸渗仪。

国内学者利用蒸渗仪进行了农田作物蒸散的研究,取得了很多的成果。黄子琛等<sup>[12]</sup>采用该所研制的电子称重蒸渗仪系统在河西干旱区研究了春小麦和玉米等农作物的蒸散,分析了春小麦不同生长发育阶段的实际耗水量和耗水特征。柯晓新等<sup>[13]</sup>利用蒸渗仪观测资料,分析了旱作春小麦农田的蒸发蒸腾耗水状况。刘昌明等<sup>[14]</sup>在山东乐陵试验站,利用大型称重式蒸渗仪(表面积为 $3\text{ m}^2$ 、深度为 $2.5\text{ m}$ )和小型棵间蒸发器(直径为 $12\text{ cm}$ 、深度为 $20\text{ cm}$ )相结合的方法,分离了作物蒸腾和棵间土壤蒸发,研究了冬小麦生长期间的逐日蒸散和蒸腾过程,确定了冬小麦生长期间的作物系数 $K_c$ 。王健等<sup>[15]</sup>利用大型称重式蒸渗仪(表面积为 $6.25\text{ m}^2$ 、深度为 $3\text{ m}$ )和小型棵间蒸发仪(直径为 $7.8\text{ cm}$ 、深度为 $20\text{ cm}$ )在不同灌溉条件下的4年观测数据,研究了不同灌溉定额条件下,夏玉米生长期间的逐日蒸发蒸腾和棵间蒸发过程。

虽然蒸渗仪用于农田蒸散量的观测精度较高,但是蒸渗仪为单点观测,观测范围较小,其空间代表性有限,因此验证蒸渗仪的观测结果能否代表区域范围内农田的蒸散值十分有必要。涡动相关仪(Eddy Covariance System, EC),是一种通过测定风速、水汽密度和空气温度等矢量和标量的高频波动来估算斑块尺度(几百米)蒸散量的仪器,近年来被广泛地应用在农田和生态系统的通量监测中<sup>[16]</sup>。涡动相关仪能观测到百米范围内的蒸散量,对比分析涡动相关仪和蒸渗仪蒸散量观测结果,对评价蒸渗仪农田代表性具有重要意义。

国内外比较涡动相关仪和蒸渗仪的研究较多。Chávez et al<sup>[17]</sup>在美国德克萨斯州,棉花田内

分别安装了两台蒸渗仪和两台涡动相关仪用于蒸散发结果比较,研究结果表明,能量闭合订正后,两台涡动相关仪观测值相比于蒸渗仪分别偏低 $4.2\%$ 和偏低 $12.3\%$ ,与涡动相关仪观测源区内作物长势更为接近的蒸渗仪的观测结果差异较小。在美国BEAREX08试验中,Evett et al<sup>[18]</sup>将大型称重式蒸渗仪(面积为 $9\text{ m}^2$ 、深度为 $2.5\text{ m}$ )和涡动相关仪在棉花田内的观测进行比较,结果表明进行能量闭合订正后,涡动相关仪观测值较蒸渗仪观测值低了 $17\%$ 。国内,Ding et al<sup>[19]</sup>、戚培同等<sup>[20]</sup>、刘国水等<sup>[21]</sup>在比较蒸渗仪和涡动相关仪观测结果时也同样发现,即使进行能量闭合订正后,涡动相关仪观测的蒸散量较蒸渗仪偏低,蒸渗仪观测结果表现出高估的现象。Liu et al<sup>[22]</sup>比较了海河流域不同试验站EC和蒸渗仪的观测结果,研究表明蒸渗仪的观测蒸散量都明显高于EC观测值。强小嫚等<sup>[23]</sup>认为蒸渗仪隔断了与周围农田的水热交换,导致的蒸渗仪内土壤水分供应与热交换与周围农田的不同,由此可能造成蒸渗仪对蒸散量的高估。Van et al<sup>[24]</sup>认为蒸渗仪内的温度对蒸散发有显著的影响,蒸渗仪和周围农田内的土壤温度差异,会造成其观测结果明显的不同。

本文利用2012年和2013年5—9月河北怀来中国科学院遥感综合试验站蒸渗仪观测资料,计算了玉米生长季的土壤蒸发、作物蒸散、降雨、渗漏量,结合气象因子探讨土壤蒸发和作物蒸散的日、季节变化规律,并比较分析涡动相关仪与蒸渗仪蒸散量的观测结果,验证蒸渗仪的代表性,初步分析两者差异产生的原因,为今后开展农田灌溉决策、农业节水等研究提供参考。

## 2 研究区域与方法介绍

### 2.1 试验区概况

试验区位于河北省怀来县东花园镇中国科学院怀来遥感综合试验站( $40^{\circ}20'\text{N}$ 、 $115^{\circ}47'\text{E}$ ),处在延庆盆地西南段,两侧山地西南东北走向,西距官厅水库约 $2\text{ km}$ (图1)。年平均气温为 $10.1^{\circ}\text{C}$ ,夏季最高气温 $39^{\circ}\text{C}$ ,冬季最低气温可达 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下。平均年降水总量约为 $370\text{ mm}$ ,主要集中在夏季。年平均风速为 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,冬季和春秋初以西风为主,生长季(5—8月)以东北风为主。试验站所在区域以沙质冲积土为主,主要种植单季玉



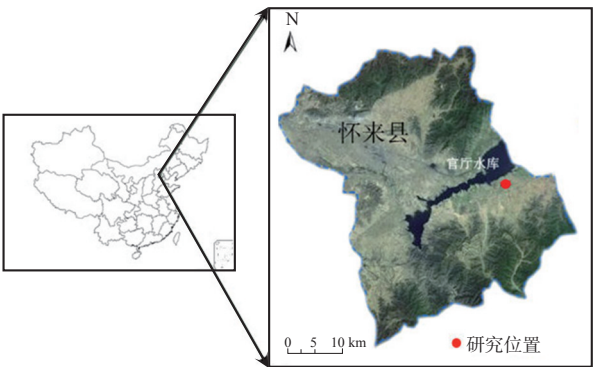


图1 怀来遥感综合试验站位置

Fig. 1 The location of Huailai Remote Sensing Experiment Station

米，品种为郑单 958，每年 5 月上旬播种，9 月中下旬成熟。

2.2 仪器布设

为研究华北区域农田蒸散发的变化特征，在研究区布设了一套多尺度蒸散发观测系统。该系统由 2 台称重式蒸渗仪、2 套涡动相关仪、2 套大孔径闪烁仪、1 套波文比能量平衡系统、2 套自动气象站以及土壤水分无线传感器网络等观测仪器构成(图 2)。实验区以图中红线为界，分为水浇地和旱地，水浇地和旱地分别架设了 10 m 气象塔和 40 m 气象塔，都安装了自动气象站和涡动相关仪，蒸渗仪和波文比能量平衡系统安装在位于水浇地的 10 m 气象塔处。大孔径闪烁仪东北、西南架设，观测源区包括了水浇地和旱地，土壤水分传感器网络分布于旱地和水浇地。

本研究所用的蒸渗仪为德国 UMS 公司生产的称重式蒸渗仪，型号为 Hydro - Lysimeter。2011 年 9 月 11 日安装于试验站外东侧约 300 m 处农田内，

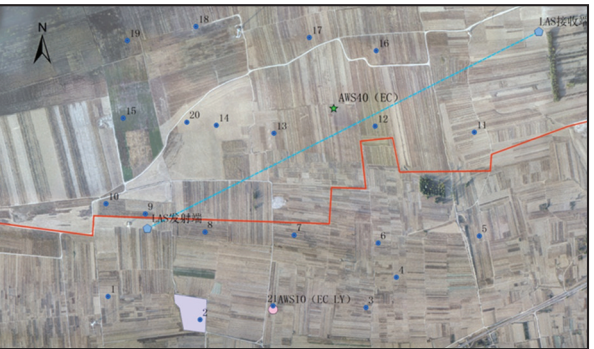


图2 怀来试验站观测仪器布置

Fig. 2 The observation instruments layout in Huilai station

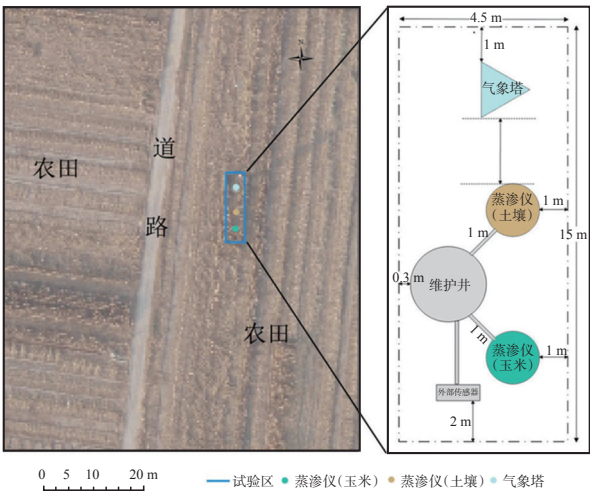


图3 蒸渗仪和气象塔安装位置

Fig. 3 The location of lysimeters and meteorological tower

距农田外道路约 10 m(图 3)。蒸渗仪为圆柱状结构，表面积为 1 m<sup>2</sup>，柱体高度为 1.5 m，蒸散测量精度为 0.1 mm。两台蒸渗仪共用一个维护井，维护井内安装了两个渗漏桶，用于蒸渗仪的渗漏量测量，测量精度为 0.01 mm。此外，两台蒸渗仪内均安装有土壤水势、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量传感器，传感器类型及埋设深度见表 1。

根据试验需求，两台蒸渗仪中的一台保持裸土，作为对比另一台则种植玉米。为了保证在试验期间蒸渗仪内玉米和周围农田玉米生长条件一致，2012 年 5 月 5 日和 2013 年 5 月 10 日，在其中一台蒸渗仪上种植了玉米，品种为郑单 958，播种时间、行距和株距同周围农田一致，并且定期对蒸渗仪内土地进行除草，尽量保证蒸渗仪内玉米生长同周围农田一致。2012 年末对两台蒸渗仪进行灌溉，2013 年对种植玉米的蒸渗仪进行过两次灌



图4 涡动相关仪源区内 LAI 和土壤水分观测点分布

Fig. 4 The observation points of LAI and soil moisture in EC source areas

表 1 蒸渗仪内的仪器配置

Table 1 The instruments within the lysimeters		
名称	型号	埋深/m
土壤温度探头	AV-10TH	0.05, 0.3, 0.5, 1.0, 1.4
土壤水分探头	CS616	0.02, 0.10, 0.20, 0.4
土壤水势探头	T8	0.3, 1.4
土壤热通量	HFT3	0.1(3块)

溉，灌溉时间同周围农田一致，灌溉量为根据农田内灌溉井流量和灌溉时长估算的区域平均灌溉量。裸土蒸渗仪进行过一次灌溉。

蒸渗仪北侧 2.8 m 处架设了 10 m 气象塔(图 3)，其上安装有自动气象站和涡动相关仪，观测要素包括感热、潜热与碳通量、风速、风向、空气温湿度、降水量、四分量辐射、地表辐射温度、平均土壤温度、土壤热通量、8 层土壤温湿度廓线等(表 2)。

2013 年玉米生长季，在 10 m 气象塔 EC 源区内选取了 13 个观测点(图 4)，对农田土壤水分(20 cm)和玉米 LAI 进行了观测。土壤水分(20 cm)用手持式 TDR300 观测，每个观测点观测 3 次，取平均值，生长季共观测了 6 次。在玉米生长前期，LAI 观测采用人工测量的方式，后期采用 LAI2000 进行观测，共观测了 5 次。

2.3 数据处理与质量控制

2.3.1 蒸渗仪

蒸渗仪的计算是以水量平衡公式为基础<sup>[25]</sup>：

$$ET=P+I-R-\Delta D-\Delta S$$
， (1)

其中： $ET$  为蒸散发，即蒸渗仪土柱质量的变化，本研究所用蒸渗仪 1 kg 质量变化对应为 1 mm 的土壤水分变化； $P$  为降水，包括降雨和露水； $I$  为灌溉； $R$  为地表径流； $\Delta D$  为渗漏量； $\Delta S$  为土壤水分变化总量。由于在研究区农田内，降雨不足以产生地表径流，所以径流可忽略。

蒸渗仪数据质量会受到强风的影响，根据 Vaughan et al<sup>[26]</sup> 的研究结果，剔除了风速  $>5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的观测数据，使用前后数据平均，对缺失数据插补。蒸渗仪的计算参照 Von Unold 提出的数据计算流程<sup>[26]</sup>，选用 1 h 为一个时间段进行计算，选取整点前后共 5 min 的原始数据平均，作为整点蒸渗仪的重量数据，以排除偶然因素带来的误差。计算每小时蒸渗仪和渗漏桶的质量变化，质量减小，正在发生蒸散或者渗漏；质量增加，正在发生降雨或者露水凝结，判断降雨和露水的质量变化分界线为 0.035 mm，质量变化  $>0.035\text{ mm}$  认为是降雨， $<0.035\text{ mm}$  认为是露水凝结。据此，得到每小时蒸散量、降水量、凝结露水量、渗漏量，将每小时蒸散量、降雨量、渗漏量、露水量累加得到各量日值。

表 2 气象塔的仪器配置

Table 2 The instruments on the meteorological tower				
名称	型号	架高、埋深/m	支臂长度/m	朝向
空气温湿度	HMP45C	5	2	北
风速/风向	Windsonic	10	2	北
四分量辐射	CNR4	5	2.8	南
地表辐射温度	IRTC-3	5	2.5	南
土壤温度廓线	AV-10TH	0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	距塔 1.5 m	南
土壤水分廓线	EC5	0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	距塔 1.5 m	南
降水量	TE525MM	10	--	--
土壤热通量	HFT3	0.06 (3块)	距塔 1.5 m	南
平均土壤温度	TCAV	0.02, 0.04	距塔 1.5 m	南
感热、潜热与碳通量	涡动相关仪: Gill & Li7500	5	2.5	北

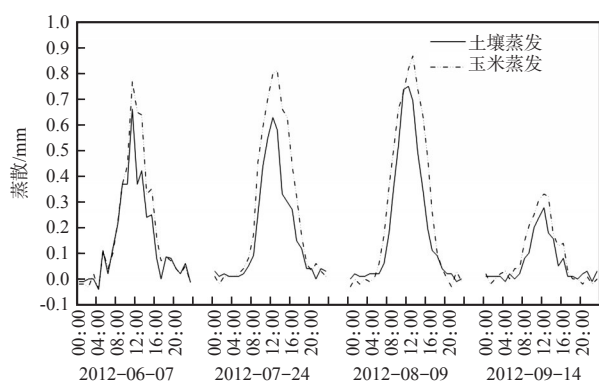


图5 2012年生长季典型晴天土壤蒸发和玉米农田蒸散的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of soil evaporation and maize field evapotranspiration in typical sunny days in growing season of 2012

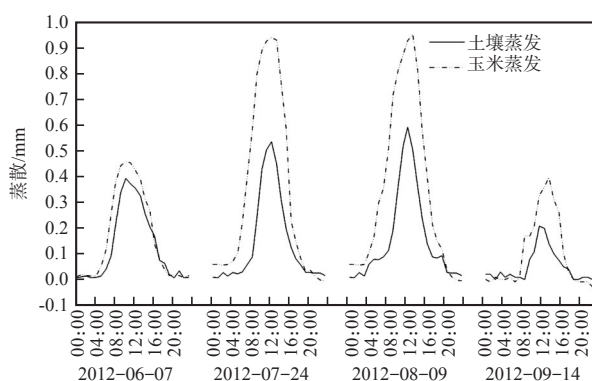


图6 2013年生长季典型晴天土壤蒸发和玉米农田蒸散的日变化

Fig. 6 Diurnal variation of soil evaporation and maize field evapotranspiration in typical sunny days in growing season of 2013

### 2.3.2 涡动相关仪

涡动相关仪数据同样进行了严格的数据质量控制和筛选<sup>[22, 28, 29]</sup>, 2012年涡动相关仪缺失较多, 未进行插补; 2013年涡动相关仪观测数据, 用非线性回归法对缺失的数据进行了插补, 在此基础上, 计算得到感热与潜热通量。涡动相关仪观测中存在能量平衡不闭合的问题, 本文利用了波文比强制闭合的方法对涡动相关仪观测结果进行了订正<sup>[30]</sup>。

### 2.3.3 自动气象站

本研究中所用气象数据包括净辐射  $R_n$ 、土壤热通量  $G$ 、空气温度  $T_a$ 、相对湿度  $RH$ 、风速  $WS$ 、土壤水分  $M_s$ , 2013年这些气象数据缺失较少, 对2013年的缺失数据采用线性插值方法进行填补。2012年自动气象站缺失较多, 未进行插补。此外, 采用土壤热流板测量值结合其上热储存的方法获取地表土壤热通量<sup>[31]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 玉米农田蒸散和土壤蒸发量的日变化

土壤蒸发强度主要由辐射能量和表层土壤含水量决定, 而农田蒸散还受到作物生长需水影响, 玉米的叶面蒸腾是农田蒸散的主要部分。通过2012年和2013年玉米生长季蒸渗仪测量的典型晴天玉米农田蒸散和土壤蒸发的日变化(图5、6)可知, 2012年和2013年典型晴天玉米农田蒸散和土壤蒸发日变化规律比较类似。日变化都呈现单峰型, 在夜间观测到结露水, 表现为负值。土壤

蒸发和玉米农田蒸散差异主要体现在量级大小和峰值出现位相上。生长季前期, 玉米蒸腾作用较小, 土壤蒸发所占比例较大, 两台蒸渗仪观测结果差异不明显。而在7、8月玉米生长旺盛期, 蒸渗仪观测蒸散量以玉米叶面蒸腾为主, 土壤裸间蒸发所占比例减小, 两台蒸渗仪观测结果差异较大。生长季后期, 玉米叶片枯萎, 叶面蒸腾微弱, 蒸渗仪观测结果较为一致。还可以发现2013年土壤蒸发量低于2012年(图5、6), 这是由于2013年蒸渗仪周围种植的玉米长势较好, 土壤蒸渗仪受到周边玉米遮蔽影响, 导致土壤蒸发较小。此外, 2012年7月24日、8月9日和2013年8月9日都表现出玉米农田蒸散峰值比土壤蒸发延后1 h的现象, 这主要因为白天冠层升温较裸土升温慢, 玉米叶面蒸腾峰值相应延后所致。

### 3.2 玉米农田蒸散和土壤蒸发量的季节变化

2012年玉米播种时间为5月5日, 2013年为5月10日, 玉米都在9月中旬成熟。从2012年和2013年5月到9月中旬蒸渗仪观测的土壤蒸发和玉米农田蒸散日值5天滑动平均后季节变化(图7, 其中LY—土壤代表蒸渗仪观测到的土壤蒸发, LY—玉米代表蒸渗仪观测到的玉米农田蒸散)可以看出, 土壤蒸发和农田蒸散的变化趋势是比较一致的, 但土壤蒸发和农田蒸散量具有明显的差异, 5月处在播种—出苗期, 农田蒸散以土壤蒸发为主, 两台蒸渗仪观测值差异较小; 6月和7月中旬处在玉米的出苗—拔节期—抽穗期, 土壤蒸发和农田蒸散开始出现明显差别, 玉米耗水强度明显



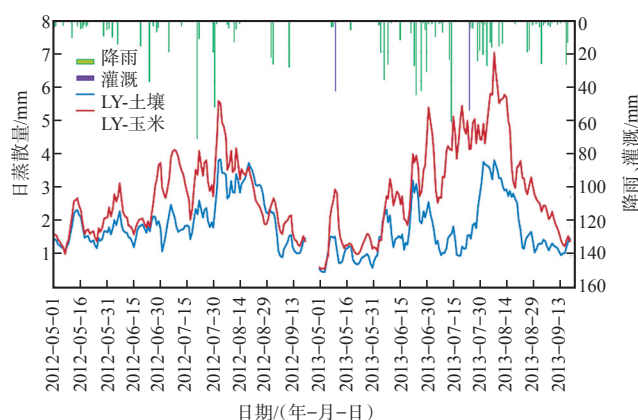


图7 2012年和2013年生长季土壤蒸发和玉米  
农田蒸散的季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of soil evaporation and maize field  
evapotranspiration in growing season of 2012 and 2013

增加；7月下旬到8月中旬为抽穗—灌浆时期，是玉米生长最旺盛的时期，蒸腾作用旺盛，最大值一般出现在此阶段；8月下旬到9月中旬，处在灌浆—蜡熟—收获期，玉米成熟，叶片衰老、变黄，蒸腾作用逐渐减弱，土壤蒸发和农田蒸散又逐步趋于一致。

2013年5月10日对种植玉米的蒸渗仪进行了灌溉，7月25日两台蒸渗仪都进行过灌溉。灌溉后，连续多天降雨，两台蒸渗仪观测蒸散量并没有立刻增加。其中裸土蒸发量主要来自上层土壤水分，蒸发量较小，灌溉和降雨后土壤蒸渗仪水分得到补充，从28日晴朗日开始蒸发量明显上升。而玉米根系能从较深层土壤吸收土壤水分，灌溉和降雨后，蒸腾量仍然很高，但是没有表现出明显的增加趋势。

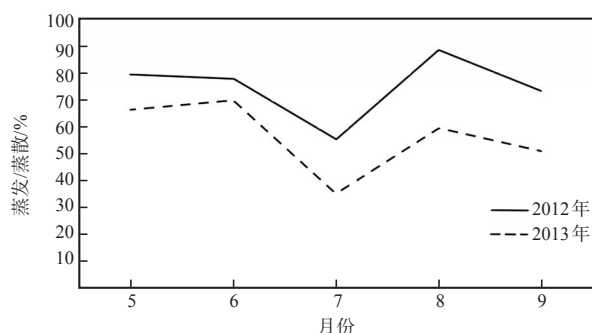


图8 2012年和2013年生长季土壤蒸发与  
农田蒸散比值的月变化

Fig. 8 Monthly variation of the soil evaporation ratio  
and the field evapotranspiration ration growing  
season of 2012 and 2013

2012年和2013年土壤蒸发和农田蒸散的比值在生长季变化趋势一致，但是量值差异较大(图8)，2012年5—9月，土壤蒸发与玉米农田蒸散比值分别为79.6%，78.2%，55.5%，88.14%和73.2%，2013年5—9月分别为66.6%，70.3%，35.5%，59.7%和51.4%，两年比值变化都表现出先减后增的规律。由于两年降水(+灌溉)条件不同，土壤蒸发与玉米农田蒸散比值具有明显的差异，但是土壤蒸发和玉米农田蒸散差异最大的时期都为7月，7月为抽穗—灌浆时期，玉米生长旺盛，叶面蒸腾作用耗水较多。

生长季后期降雨对农田蒸散影响显著。生长季前期裸间土壤蒸发占农田蒸散的比例较大，后期作物蒸腾占农田蒸散比例较大，所以5月和6月土壤蒸发和玉米农田蒸散比值较大。但是2012年8月土壤蒸发和玉米农田蒸散比值反而大于生长季前期(5月和6月)，这是由于2012年8月降水较少，玉米后期生长受到土壤水分抑制，作物蒸腾作用减弱导致的。而2013年降雨充分，玉米蒸腾作用未受到抑制，8月土壤蒸发和玉米农田蒸散比值小于生长季前期。

由以上分析可知，降水(+灌溉)不同的年份，农田土壤蒸发和玉米农田蒸散比值变化并不一致，降水较充分的年份，土壤蒸发同玉米蒸散的比值明显偏低。2012年和2013年观测结果可以为分析该地区当年农田混合象元中土壤蒸发和农田蒸散的分解和估算提供参考，但是要获得比较准确、稳定的土壤蒸发和玉米农田蒸散关系，还需要多年长期观测。

由2012年和2013年生长季土壤蒸发、玉米农田蒸散、降水、土壤水分变化统计(表3)可知，2012年生长季土壤蒸发和玉米农田蒸散量分别为276.29 mm和372.08 mm，2013年生长季土壤蒸发和玉米农田蒸散量分别为253.14 mm和470.68 mm。2012年和2013年玉米的蒸散量差别非常显著。从水量平衡的角度分析，2012年玉米蒸散量为372.08 mm，降水量为302.34 mm，降水不能满足玉米蒸散的需水量，消耗了土壤水分为67.29 mm；2013年玉米蒸散为470.68 mm，降水和灌溉量共计491.52 mm，完全满足了玉米生长所需要水分，且有8.52 mm降水(和灌溉水)储存在蒸渗仪内，由此可以推断，降水量大小和是否灌溉是造成两年玉米蒸散量差异的主要原因。

表 3 2012 年和 2013 年生长季土壤蒸发、玉米农田蒸散、降水、土壤水分变化统计  
Table 3 The statistics of soil evaporation, maize field evapotranspiration, rain and soil moisture  
change on growing season in 2012 and 2013

年份	时间	LY <sub>土壤</sub> - 蒸发	LY <sub>玉米</sub> - 蒸散	LY <sub>土壤</sub> - 降水(+ 灌溉)	LY <sub>玉米</sub> - 降水 (+灌溉)	LY <sub>土壤</sub> - 土壤水 分变化	LY <sub>玉米</sub> - 土壤水 分变化
2012	5月	22.61	28.40	18.12	18.92	-5.02	-10.16
	6月	55.77	71.32	68.18	69.65	13.61	-1.67
	7月	63.74	114.84	112.88	135.89	46.02	22.08
	8月	108.54	122.52	15.55	17.92	-95.01	-102.60
	9月1-15日	25.63	34.99	46.99	59.96	22.30	25.06
	总计	276.29	372.08	261.72	302.34	-12.10	-67.29
2013	5月	29.77	44.70	7.93	34.30	-22.06	-11.50
	6月	56.21	80.00	136.23	149.28	81.06	77.02
	7月	52.85	148.98	148.36	162.75	94.67	14.23
	8月	94.08	157.60	88.30	116.51	-22.91	-60.17
	9月1-15日	20.23	39.39	23.26	28.68	4.61	-11.06
	总计	253.14	470.68	404.08	491.52	135.37	8.52

注：生长季土壤蒸发、玉米农田蒸散、降水、土壤水分变化的单位：mm

由表3还可以发现，2012年和2013年8月玉米生长旺盛，需水量大，而两年8月降雨量都小于蒸散量，作物易受旱。2013年降水(和灌溉)充足，玉米蒸散基本未受到抑制，可认为玉米生长季耗水约为470 mm，但该结论是否每年都适用，还需要多年数据支持和验证，得出相应结论，从而为灌溉决策提供参考。

3.3 农田蒸散量与气象影响因子、土壤水分关系

农田蒸散发主要受到土壤水分、作物长势、气象条件的影响，气象条件中净辐射、空气湿度、温度和风速是影响蒸散量的主要因素<sup>[32]</sup>，但是不同地区控制蒸散发的主导影响因子并不一样，地域性差异明显。以下分析了蒸渗仪观测的日蒸散量与日平均土壤水分、净辐射、空气湿度、相对湿度、风速的相关性。

蒸渗仪观测的生长季玉米农田日蒸散量和20 cm土壤水分(删除降雨时期数据)以及各气象因子的日平均值的散点(图9)可以看出，蒸渗仪观测的农田日蒸散量与净辐射的相关性较好，与土壤水分和空气温度表现出较弱的相关性，同与空气湿度和风速没有表现出明显的相关关系。

怀来地处中温带半干旱区，属温带大陆性季风气候，降雨主要集中于生长季，辐射能量作为蒸散发的驱动因子<sup>[33]</sup>，是影响蒸散发的主要因

素，所以和蒸散量表现出较好的相关性。土壤水分是蒸散发的限制因素，玉米根系区集中在20 cm深度，因此使用了20 cm的土壤水分观测数据，并且删除了降雨日的数据(图9)，土壤水分含量在10%~20%之间，作物蒸腾受土壤水分影响明显，表现出较好的相关性。空气温度、相对湿度、风速等气象要素作为间接影响农田蒸散发的因子，没有表现出与蒸散量明显的相关性。

蒸散发过程较为复杂，受到各因子共同的作用，其中净辐射和土壤水分影响是最主要的，用spass进行多元线性回归的方法，拟合怀来地区蒸散量与净辐射Rn和土壤水分Ms的经验公式。拟合出的经验公式如下：

$$ET = -5.537 + 0.023R_n + 0.388M_s, \quad (2)$$

其中：决定系数( $R^2$ )为0.68，标准估计误差为1.2 mm， $R_n$ 、 $M_s$ 的标准回归系数分别为0.49，0.47。

3.4 蒸渗仪与涡动相关仪观测的蒸散量比较分析

涡动相关仪观测尺度相对蒸渗仪较大，源区内是玉米农田和裸地的混合下垫面，为了分析涡动相关仪观测源区下垫面状况，利用Kormann et al<sup>[34]</sup>提出的全显式解析足迹模型的方法，使用09:00-16:00大气不稳定层结数据计算了2013年EC生长季5月1日至9月15日90%源区的相对贡献

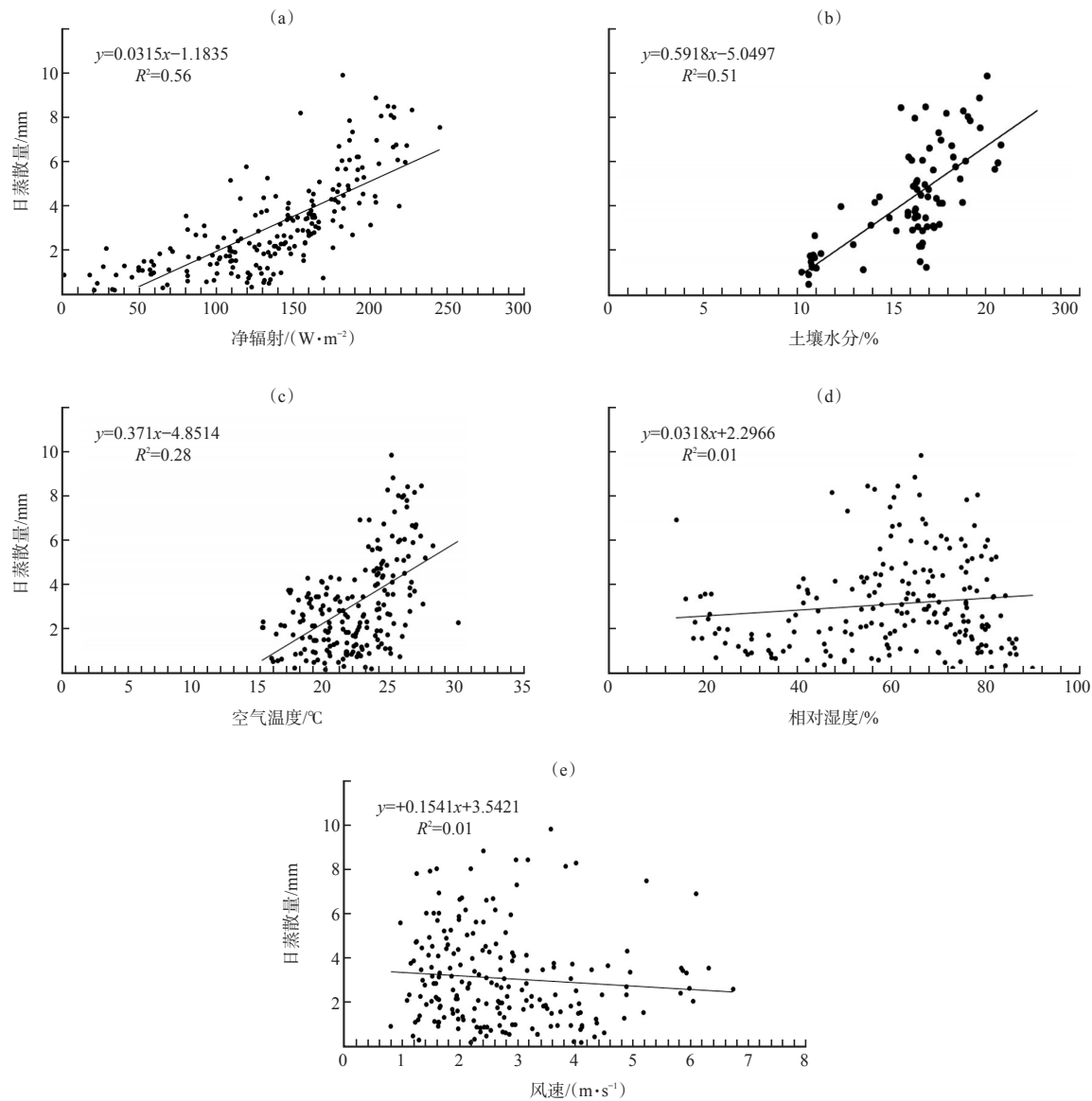


图9 2013年生长季蒸渗仪观测的日蒸散量同净辐射(a)、空气温度(b)、相对湿度(c)、  
风速(d)及土壤水分(e)日平均值的散点分布

Fig. 9 The scatter of daily evapotranspiration with the daily – averaged net radiation flux (a), air temperature (b), relative humidity (c), wind speed (d) and soil moisture (e) in growing season of 2013

(图10)。经计算，在涡动相关仪源区范围内玉米农田占97.31%，裸土占2.69%(主要为道路和较大的田埂)。

EC观测源区内主要为农田，下垫面相对均一。但是小部分裸土也会对二者比较结果造成部分影响，为了排除EC源区下垫面内裸土蒸发对观测结果的影响，对两台蒸渗仪观测值采用加权计算，即：

$$ET_{蒸渗仪} = (ET_{玉米} \times 97.31\%) + (ET_{裸土} \times 2.69\%) \quad (3)$$

涡动相关仪观测中会出现能量平衡不闭合的

问题，造成EC对蒸散量的低估，运用波文比强制闭合的方法对涡动相关仪观测结果进行了能量闭合订正<sup>[30]</sup>，比较了2013年5月1日至9月15日09:00–16:00大气状况不稳定的水浇地涡动相关仪和蒸渗仪数据，进行能量闭合订正后涡动相关仪与蒸渗仪日蒸散5天滑动平均的结果比较(图11)，生长季5月1日至8月22日，涡动相关仪与蒸渗仪观测结果的相关性系数为0.86(图12)。

但在5月初灌溉期间，由于农田内每户单独灌溉，灌溉时间较分散，5月5–16日期间涡动相关仪观测源区都有灌溉(10日灌溉量最大)，涡动相



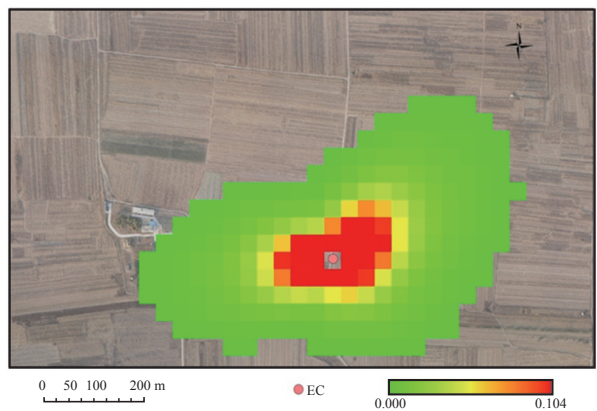


图 10 2013 年生长季 EC 90%源区相对贡献  
Fig. 10 90% of EC's relative contributed source areas in growing season of 2013

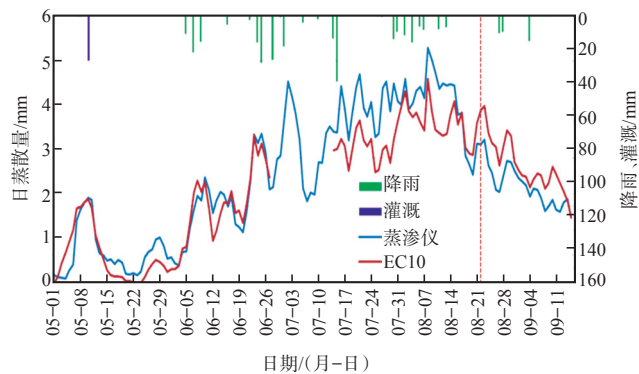


图 11 生长季 EC 和蒸渗仪观测的蒸散量比较  
Fig. 11 The comparison between evapotranspiration measured by EC and lysimeters in growing season

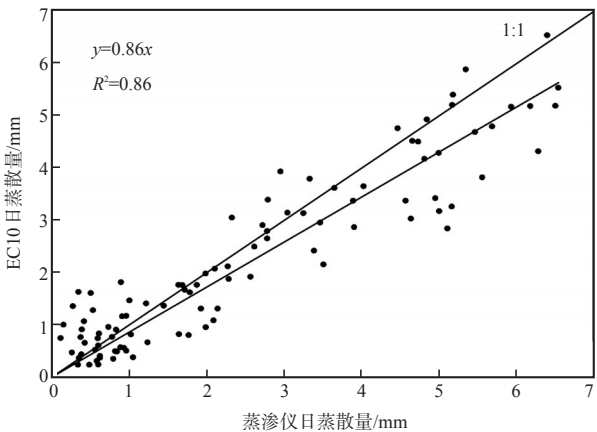


图 12 2013 年生长季 5 月 1 日至 8 月 22 日 EC 与玉米蒸渗仪测定蒸散量散点分布  
Fig. 12 The scatter of evapotranspiration measured by EC and maize lysimeter in growing season from 1 May to 22 August in 2013

关仪观测尺度更大，观测到多日多次的蒸散量变化，而蒸渗仪仅在 10 日进行了灌溉，造成蒸渗仪和涡动相关仪观测值在灌溉期间变化存在差异。

蒸渗仪观测尺度较小，其代表性受作物长势影响显著。8 月 15 日大风，蒸渗仪内玉米被风刮倒，23 日巡检发现蒸渗仪内部分玉米枯萎，仅两株玉米生长正常，同农田内作物长势差异较大。5 月 1 日至 8 月 22 日白天涡动相关仪观测蒸散值累积为 216.7 mm，蒸渗仪观测蒸散量累计值为 242.2 mm，涡动相关仪观测值偏低 10.5%。而 8 月 23 日至 9 月 15 日涡动相关仪和蒸渗仪累积蒸散量分别为 74.9 mm 和 61.0 mm，蒸渗仪偏低 22.7%，二者观测值差异较大，由此可见当蒸渗仪内玉米长势和农田内差异较大时，其观测值不能代表农田区域内的蒸散量。

由于 8 月 23 日至 9 月 15 日蒸渗仪和农田内作物长势差异较大，是造成蒸散量差异的主要原因，所以主要分析 5 月 1 日至 8 月 22 日之间二者观测蒸散量差异产生的原因，利用两台蒸渗仪加权计算后与能量闭合订正后 EC 观测值比较，蒸渗仪观测值较 EC 观测值偏高 10.5%，蒸渗仪表现出相对高估的现象。

蒸渗仪观测区域较小，其内的作物长势、土壤水分、土壤温度与周围农田的差异是造成蒸渗仪和涡动相关仪观测差异的主要原因。所以从这三个方面分别分析蒸渗仪和农田内的差异。

3.4.1 作物长势

2013 年生长季在 EC 源区内选取了 13 个观测点进行了 LAI 观测 (图 3)，同时对蒸渗仪也进行了 LAI 观测 (表 4)，其中 EC 源区值为 13 个观测点的平均值，代表 EC 源区内农田作物长势。由表 7 可以看出，EC 源区和蒸渗仪内玉米 LAI 在生长季前期较一致，生长季后期，农田内玉米长势略好于蒸渗仪内玉米，但差异不明显。

3.4.2 土壤水分

土壤水分的比较使用了多点的人工观测数据。表 5 为 2013 年生长季，利用 TDR 对蒸渗仪和 EC 源区 13 个观测点 (图 3) 20 cm 土壤水分观测结果，表中 EC 源区内土壤水分为 13 个观测点的平均值，代表 EC 观测区域内农田土壤水分状况。从观测结果可以发现，EC 源区内农田土壤水分平均值要高于蒸渗仪内土壤水分值。

表 4 2013 年生长季 EC 源区和蒸渗仪内 LAI 观测值  
Table 4 LAI in EC source area and maize lysimeter on growing season in 2013

参数	6月4日	6月16日	6月27日	7月12日	7月25日
EC 源区 LAI	0.10	0.41	1.16	2.97	3.45
蒸渗仪 LAI	0.20	0.64	0.89	2.63	2.86

表 5 2013 年生长季 EC 源区和蒸渗仪内 20 cm 土壤水分观测值  
Table 5 20 cm soil moisture in EC source area and maize lysimeter on growing season in 2013

参数	5月24日	6月16日	6月27日	7月12日	7月16日	7月25日
EC 源区 $Ms/(cm^3 \cdot cm^{-3} \cdot \%)$	26.96	31.32	34.77	26.37	35.43	25.20
蒸渗仪 $Ms/(cm^3 \cdot cm^{-3} \cdot \%)$	22.53	28.10	30.52	23.47	32.40	32.40

### 3.4.3 土壤温度

Van Bavel et al<sup>[25]</sup> 认为蒸渗仪内的温度对蒸散发有显著的影响, 蒸渗仪内土壤温度过高会造成其对蒸散量的高估。通过对 2013 年 5 月 1 日至 8 月 22 日, 10 m 气象塔(气象塔下种植玉米, 探头埋设在农田中)和蒸渗仪内不同深度土壤温度的比较, 由于蒸渗仪内和农田中埋设的土壤温度探头深度不一样, 比较相近深度土壤温度, 可以发现蒸渗仪内土壤温度总体较农田偏高 2℃, 约 9.6%, 由于蒸渗仪存在边界效应, 隔断了与周围农田的热交换, 导致蒸渗仪内温度较农田外偏高。陈建耀等<sup>[35]</sup> 在山东禹城站, 利用称重式蒸渗仪(表面积为 3.14 m<sup>2</sup>, 深度为 5 m)研究时也发现蒸渗仪内、外 0~20 cm 土壤温度相差 5.4%, 同时蒸渗仪较波文比蒸散量观测值也高了 8.75%。

表 6 2013 年 5 月 1 日至 8 月 22 日农田和蒸渗仪内不同深度土壤温度及平均值

Table 6 The averaged soil temperature in maize field and lysimeter from 1 May to 22 August 2013

农田		蒸渗仪	
深度/cm	土壤温度/℃	深度/cm	土壤温度/℃
4	20.5	5	22.7
20	19.0	30	20.0
40	17.4	50	19.8
平均	19.0	平均	20.8

由以上分析可知, EC 源区农田内玉米长势好于蒸渗仪内玉米长势, 但差异不明显, 农田内土壤含水量高于蒸渗仪, 而蒸渗仪由于边界效应, 隔断了与周围农田的热交换, 土壤温度较周围农田高了 9.5%, 由于蒸渗仪内温度对蒸散发有显著

影响, 造成蒸渗仪对蒸散量的高估。蒸渗仪内温度较高、蒸散更强, 而蒸渗仪内土壤水分又不能同周围农田进行水平交换, 由此导致蒸渗仪内土壤水分较周围农田偏低的结果。

## 4 结论与讨论

利用 2012 年和 2013 年怀来试验站的蒸渗仪、涡动相关仪和自动气象站的观测资料, 在严格数据处理与质量控制基础上, 分析了夏玉米农田蒸散和裸土蒸发量日、季节变化规律以及气象因子对农田蒸散量的影响, 并对蒸渗仪观测玉米农田蒸散量与涡动相关仪观测值进行了比较, 得出如下主要结论:

(1) 玉米农田蒸散和土壤蒸发日变化曲线相似, 季节性差异明显, 生长初期, 蒸散以土壤蒸发为主, 两者差异较小, 生长旺盛期, 蒸散以玉米叶面蒸腾为主, 两者差异较为明显, 生长末期, 蒸腾作用减弱, 两者变化逐步趋于一致。

(2) 农田土壤蒸发和农田玉米蒸散比值年际间变化差异明显, 2012 年 5—9 月比值分别为 79.6%, 78.2%, 55.5%, 88.14%, 73.2%; 2013 年 5—9 月分别为 66.6%, 70.3%, 35.5%, 59.7%, 51.4%, 两年都在 7 月抽穗—灌浆时期比值最小, 降水量大小和是否灌溉是造成 2012 年和 2013 年玉米蒸散量差异的主要原因, 辐射能量和土壤水分是影响怀来地区蒸散强度主要因子。

(3) 蒸渗仪观测尺度较小, 其农田代表性主要受其观测范围内作物长势影响显著。相对于斑块尺度的涡动相关仪的观测, 蒸渗仪观测值偏高 10.5%, 这与前人的研究结果一致。蒸渗仪与周围农田水热隔绝, 是造成其蒸散量高估的主要原因。

本次试验中还存在一些不足之处。EC源区内选取13个观测点进行土壤水分和LAI的观测,这并不能完全代表EC源区的真实情况,同时比较蒸渗仪和农田土壤温度时,仅使用单点观测数据,代表性不够;对涡动相关仪进行能量闭合订正时,用的是单点观测的土壤水分、土壤温度、土壤热通量和净辐射观测数据,存在较大的偶然性,特别是对表层土壤热通量估算时都会引入误差<sup>[36]</sup>,因此在进行能量闭合订正,必然引入误差,会增加分析结果的不确定性,文章中并未将这部分误差加入分析。这些不足之处将会在下一步试验中补充和完善。

### 参考文献:

- [1] 张堂堂,文军,李振朝,等. 基于微波遥感参数估算区域蒸散发的方法研究[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1651–1657, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00152.
- [2] 周剑,程国栋,李新,等. 应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 679–687.
- [3] Kohnke H, Dreilbelbis F R, Davidson J M K. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance[M]. US Department of Agriculture, 1940.
- [4] Lawes J B, Gilbert J H, Warrington R. On the amount and composition of the rain and drainage-waters collected at Rothamsted[M]. London: William Clowes and Sons, 1882.
- [5] Garstka W U. In-place lysimeters near coshocton, OHIO. U. S [J]. Soil Conserv Serv, 1937, 3: 91–92.
- [6] Marek T H, Schneider A D, Howell T A, et al. Design and construction of large weighing monolithic lysimeters[J]. Trans ASAE, 1988, 31(2): 477–484.
- [7] Howell T A, Tolk J A, Schneider A D, et al. Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(1): 3–9.
- [8] Tolk J A, Howell T A, Evett S R. Evapotranspiration and yield of corn grown on three high plains soils[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(4): 447–454.
- [9] Tyagi N K, Sharma D K, Luthra S K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(1): 41–54.
- [10] 孙景生,熊运章,康绍忠. 农田蒸发蒸腾的研究方法与进展[J]. 灌溉排水, 1993, 13(4): 36–38.
- [11] 谢贤群. 测定农田蒸发的试验研究[J]. 地理研究, 1990, 9(4): 94–102.
- [12] 黄子琛,蒲锦春,高征锐. 河西地区农作物的蒸发蒸腾试验研究—临泽北部绿洲春小麦和玉米的蒸发蒸腾量[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 54–64.
- [13] 柯晓新,张旭东,彭素琴,等. 旱作春小麦农田蒸散与能量平衡[J]. 气象学报, 1996, 54(3): 348–355.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 宫丽娟,刘绍民,双喜,等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 246–257.
- [17] Chávez J L, Howell T A, Copeland K S. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters[J]. Irrigation Science, 2009, 28(1): 35–50.
- [18] Evett S R, Kustas W P, Gowda P H, et al. Overview of the bushland evapotranspiration and agricultural remote sensing experiment 2008 (BEAREX08): A field experiment evaluating methods for quantifying ET at multiple scales[J]. Advances in Water Resources, 2012, 50: 4–19.
- [19] Ding R, Kang S, Li F, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 87–95.
- [20] 戚培同,古松,唐艳鸿,等. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 202–211.
- [21] 刘国水,刘钰,蔡甲冰,等. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 284–289.
- [22] Liu S, Xu Z, Zhu Z, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 24–38.
- [23] 强小嫚,蔡焕杰,王健. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 12–17.
- [24] Van Bavel C H M, Reginato R J. Precision lysimetry for direct measurement of evaporative flux [C]. UNESCO, Arid Zone Res, 1965, 25: 129–135.
- [25] 刘波,姜彤,翟建青,等. 新型蒸渗仪及其对陆面实际蒸发过程的观测研究[J]. 气象, 2010, 36(3): 112–116.
- [26] Vaughan P J, Ayars J E. Noise reduction methods for weighing lysimeters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(2): 235–240.
- [27] Von Unold G, Fank J. Modular design of field lysimeters for specific application needs[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2008, 8(2): 233–242.
- [28] 徐自为,刘绍民,宫丽娟,等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357–370.
- [29] Xu Z, Liu S, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER – MUSOEXE [J]. J Geophys Res: Atmospheres, 2013, 118(23): 13140–13157.
- [30] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(3): 279–300.
- [31] 徐自为,刘绍民,徐同仁,等. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究[J]. 地球科学进



- 展, 2013, 28(8): 875 – 889.
- [32] 张强, 张之贤, 问晓梅, 等. 陆面蒸散量观测方法比较分析及其影响因素研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(5): 538 – 547.
- [33] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 225 – 236.
- [34] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. Bound-Layer Meteor, 2001, 99(2): 207 – 224.
- [35] 陈建耀, 吴凯. 利用大型蒸渗仪分析潜水蒸发对农田蒸散量的影响[J]. 地理学报, 1997, 52(5): 439 – 446.
- [36] 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 840 – 848.

## Analysis on Evapotranspiration of Maize Field Measured by Lysimeters in Huailai

YANG Guangchao<sup>1</sup>, ZHU Zhongli<sup>1</sup>, LIU Shaomin<sup>1</sup>, XU Ziwei<sup>1</sup>, BAI Junhua<sup>2</sup>, XIAO Qing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Based on the measurements of lysimeter, eddy covariance(EC)and automatic weather station(AWS) in Huailai Remote Sensing Experiment Station in 2012 and 2013, the daily and seasonal variation of soil evaporation and maize field evapotranspiration have been analyzed. The relationship between field evapotranspiration and meteorological factors(net radiation, air temperature, air humidity, and wind speed), soil moisture has been studied through multiple regression analysis method. Comparison has been made between the evapotranspiration measured by lysimeter and EC. The result shows that the daily variation curves of soil evaporation were quite consistent with maize field evapotranspiration, while seasonal differences were obvious. In the region of Huailai, net radiation and soil moisture obviously correlated with daily evapotranspiration, while other factors did not obviously correlated. Lysimeter's representativeness was significantly affected by the growth of the crops within it. The correlativity between evapotranspiration measured by EC and that by lysimeter is very good. The value of lysimeter is 10. 5% higher than that of EC. As heat can not be exchanged between the soil in lysimeter and the soil outside, the average temperature of the soil in the lysimeter is 9. 5% higher than that of the field outside. As a result, the evapotranspiration of lysimeter is relatively larger.

**Key words:** Lysimeter; Eddy Covariance System; Evapotranspiration; Meteorological Factor