

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 06. 12

中国南方农田蒸散量实测及其影响因素分析

陈 晗¹, 黄津辉²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要:利用基于闭路 QCLAS-EC 激光分析仪的涡度相关法对湖南省岳阳市郊区的一片蔬菜地的实际蒸散发、水汽通量以及潜热通量进行了连续两年的野外观测,并对原始观测数据进行处理,计算蒸散量,以分析研究区域实际蒸散量的年际尺度周期变化趋势和季节变化规律。结果表明,实验区域全年蒸散量在 730 ~ 803 mm 之间;季节变化大,8 月达到全年最高水平 3.5 mm/d,而 1 月只有 0.4 mm/d。整个研究区域实测蒸散量变化规律是:春夏季较高,秋冬季较低;种植季较高,非种植季较低;每天的正午以及下午较高,夜晚较低。此外,利用高分辨率的实测工具观察不同的农业活动对实际蒸散的影响,发现种植引起蒸散发上升,收割引起蒸散发下降,并且收割使蒸散发下降的幅度要明显高于种植使蒸散发上升的幅度;灌溉对蒸散发有促进作用但是作用较小,施肥对蒸散发的影响目前尚不明确。

关键词:蒸散发;南方农田;蔬菜地;涡度相关法

中图分类号:P332.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2017)06 - 0079 - 08

Study on in-situ evapotranspiration measurement and its influential factors in farmland in Southern China

CHEN Han¹, HUANG Jinhui²

(1. *Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;*
2. *College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: Field observations for two consecutive years were carried out on the actual evapotranspiration, water vapor flux and latent heat flux (LE) for two consecutive years in the vegetable land in the suburb of Yueyang City, Hunan Province by using eddy covariance technique based on closed-path QCLAS-EC Analyzer. The original observation data were processed and the evapotranspiration was calculated so as to analyze the annual periodic change trend and seasonal variation law of the regional evapotranspiration. The results show that annual evapotranspiration in the study area were between 730 and 803 mm; the seasonal variation was substantial, reaching the highest level in August, 3.5 mm/d and in January, only 0.4mm/d. The actual evapotranspiration in the whole study area can be summarized as follows: higher in spring and summer, lower in autumn and winter; higher in planting season, lower in non-planting season; higher at midday and afternoon, lower at night. In addition, the effects of different agricultural activities on the actual evapotranspiration were observed by using high-resolution measured data. The findings are that the evapotranspiration was increased by planting and was decreased by harvesting, and the reduction of evapotranspiration by harvesting was significantly higher than that by planting.

基金项目:国家自然科学基金(41561124015)
作者简介:陈晗(1992—)男,硕士研究生,研究方向为生态水文。E-mail:15620691073@163.com
通信作者:黄津辉,教授。E-mail:huangj@nankai.edu.cn

While irrigation also contributed to the promotion of evapotranspiration but was less pronounced, the effect of final fertilization on evapotranspiration was not yet clear.

Key words: evapotranspiration; southern farmland; vegetable land; eddy covariance method

人类对水循环特点及水资源的了解程度,直接影响流域水资源利用、开发、管理的合理性与科学性^[1]。农业是各个行业中第一用水大户,而灌溉用水大部分通过蒸散发返回大气中,因此研究农田蒸散发(ET),可以为农业节水和高效水资源利用提供科学依据。

蒸散发是水分从地表传输到大气中的水分运移过程,是植物与外界环境水分交换的一种普遍现象。蒸散发不仅是生态圈水循环重要的组成部分,也是陆地以及大气之间能量循环的重要组成部分。准确测定蒸散发量,对优化区域水资源配置、水资源规划与管理,以及对更加深入地了解陆面生态水文过程,正确评估气候和人类活动对生态系统的影响具有重要的现实意义^[2-5]。近年来随着微气象学理论以及量子激光技术的逐步成熟,利用微气象学中涡度相关法高精度测定蒸散发成为可能。

湖南省是我国农业大省,位于亚热带季风区,多年平均降水量为1427 mm。从总量看,湖南省降水丰沛,但水资源分布不均,年内各季节降水量相差较大,而且农业用水消耗量大,用水效率较低^[6-8]。农业灌溉用水主要用于补给作物生长所需的水量,而作物需水量与土壤蒸发和作物蒸腾有着密切的关系,研究不同的农业活动如何影响蒸散发至关重要^[9]。

本研究通过长达两年的对湖南省岳阳地区一年两熟的蔬菜地进行高精度连续观测,探索蒸散发变化规律和农业活动对蒸散发的影响情况。

1 研究区概况

本研究始于2014年10月,止于2016年12月。实验地点位于湖南省岳阳市君山区广兴洲镇六支渠村的一块典型施肥蔬菜农田。实验地属典型的亚热带季风气候,多年平均气温16.5~17.0℃,冬季平均气温3.8~4.7℃;夏季平均气温29~30℃左右,年平均降水量1250~1450 mm^[10];秋冬季盛行风向为东北风,春夏季盛行风向为南风;土壤质地为沙壤土,离地表0~1 m的平均土壤容重为1.38 g/cm³,土壤含水量为29%,土壤偏碱性,pH值在7.0到8.0之间。

研究区域蔬菜地总面积大约25 hm²,中间有很

多沟和水渠把整个蔬菜地分为面积1.5~2.5 hm²的小斑块,这些斑块东西向长100 m,南北向宽8~15 m不等,每块地分别由不同农户种植,作物类型、种植时间、施肥时间、施肥量都由农户自行决定。在两年的观测时间里,每年都会有两个种植季,春季种植季始于每年的冬季,大约在2月份;夏季种植季始于每年的夏季,大约在8月份。春季种植季的作物一般有包菜、辣椒、南瓜、甜瓜和西瓜等,夏季种植季一般为包菜。每个种植季之前农户们都会施用肥料(一般为复合肥和碳酸氢铵),施肥量大约在300~400 kg/hm²,待作物成熟收割之后,会进行旋耕灭茬。当种植作物为包菜时,种植密度为2700株/hm²,每株之间间距为50 cm左右,成熟期包菜高40 cm左右,种植深度为4 cm。灌溉采用引水渠漫灌的方式,夏季大约每10~15 d灌溉一次,平均每次灌溉水量10~15 mm。

2 研究方法

2.1 微气象学方法—闭路 QCLAS-EC 法

闭路 QCLAS-EC 法是基于涡度相关法对通量进行监测的方法。涡度相关是指某种物质的垂直通量,即这种物质的浓度与其垂直速度的脉动协方差。涡度相关法的优点在于能通过测量各种属性的湍流脉动值得到它们的通量。和其他方法相比,涡度相关法并不是建立在经验关系基础之上,或从其他气象参量推论而来,而是建立在微气象学的物理原理之上,是一种直接测量湍流通量的方法,比其他各种实测方法更加精密和可靠,并且该方法有利于蒸散发观测工作的长期开展^[10-13]。传统涡度相关法测量蒸散通量多采用基于开路式气体分析仪(如LI-7500,LI-COR Bioscience,美国),优点是省电、维护简便,缺点是容易受到天气影响,降雨期间的数据无法使用。本研究采用闭路 QCLAS-EC 法测量农田的 H₂O 通量,可以最大程度增加数据有效性。测量的通量是观测塔上风向斑块蔬菜地(约100 m 范围内,根据通量贡献区模型估算得到)的平均通量。

2.2 实验仪器

选取靠近整个蔬菜地中间的一个地块,在地块东西向中点位置搭建安放涡度相关系统气体分析仪

的临时小屋。整个系统的主要设备包括:一台三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc, 美国)、一台数据采集器(CR3000, Campbell Scientific Inc, 美国)、一台大流量真空泵(XDS 35i, Edwards, 美国)和一台双光路量子级联可调谐红外激光差分吸收光谱仪(QC-TILDAS-DUAL, Aerodyne Research Inc, 美国)。数据采集器安装在不锈钢制作的观测塔上, 超声风速仪以垂直于实验地主风向的方向(东西向)垂直安装在2m的高度。采用的QCLAS分析仪安装了两个不同波段(2256.3 cm^{-1} 和 1901 cm^{-1})的激光发射器, 可以高频(10 Hz)同时测量多种温室气体及 H_2O 浓度。采样口位于超声风速仪一侧20 cm处, 样气在真空泵的抽力下, 经过一条长约10 m的特氟龙管路(内径6.4 mm)进入QCLAS分析仪, 完成 H_2O 浓度的实时检测。10 Hz的三维风速和 H_2O 浓度数据存储在CR3000数据采集器内。

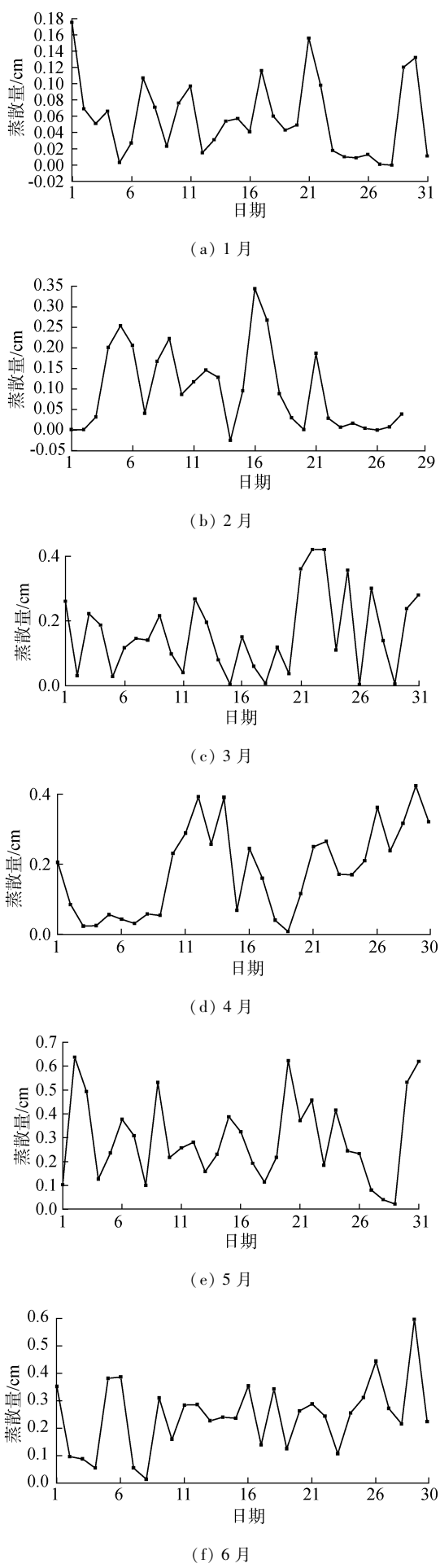
2.3 数据处理及通量计算

由于原始观测数据有许多因为人为操作和仪器故障导致的无效值, 所以必须进行数据预处理。数据的准确处理是涡动相关法能否正确测定蒸散量的关键。根据涡度相关系统得到的10 Hz湍流原始记录, 完整的通量计算过程如下: 首先进行原始水汽浓度及风速数据的预处理, 步骤如下: ①查看超声风速仪和激光分析仪的状态信息报告, 仪器出现异常状态时要将此时间段的观测数据删除。②查看几个观测变量的原始数据, 手动删除明显不合理的数据点(如明显超出或者低于上下界阈值的数据), 然后, 进行几项重要修正: ①倾斜修正, 即坐标旋转, 对于相对较为平坦均一的下垫面, 一般采用2次坐标旋转; 而对于非平坦下垫面情况, 采用“平面拟合”的方法。②对于每个测定的统计参数, 如实测均值、实测方差、实测协方差, 以及偏斜值、峰值等统计参数。依据数据获取情况设置, 必要时对水汽浓度做相应的校正或者转换。③对切应力项, 感热通量以及潜热通量和水汽通量等进行频率响应修正。④校正各项通量, 其中对显热通量做超声虚温修正, 以用于去除湿度的影响。

3 结果与讨论

3.1 蒸散量的季节变化趋势

根据计算的0.5 h蒸散量, 可得到研究区域日蒸散量(图1)。从图1中可以看出, 蒸散量在2015年内的日变化幅度较大, 日蒸散量在0.4~6.7 mm之间, 日与日之间变化无规律可循。初步猜测这与每日温度、湿度、风速、降雨等气象因子变化有关。



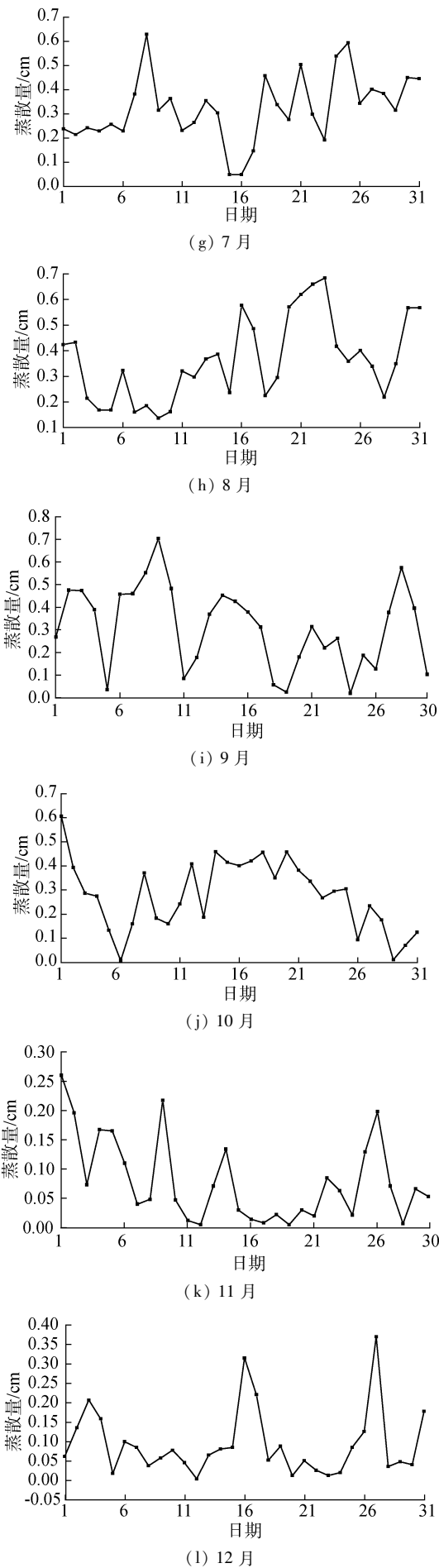


图1 实测蒸散量在2015年内日变化量

图2为实验地从2014年10月至2016年9月连续两年的蒸散量实测数据。从图2可以看出蒸散量在这两年之内具有相似的变化趋势,变化规律大致可以总结为:蒸散量秋冬季较低,春夏季较高;蒸散量在种植季较高而在非种植季较低。具体来说,实测蒸散量从2014年10月至2015年1月逐渐下降,2015年1月蒸散量达到实验期间较低水平,只有0.5 mm/d,蒸散量从2015年2月春季种植季开始逐渐升高,一直持续到2015年6月收割后蒸散量出现了明显下降。造成这个现象的原因是每年的6月处于两个种植季之间,土壤此时为裸土状态,缺少了植物蒸腾导致。从2015年7月开始,随着夏季的到来,气温和太阳辐射急剧升高,导致蒸散量也明显增高;从2015年8月下半年种植季开始,蒸散量持续升高,在2015年8月达到全年最高水平,为3.5 mm/d;试验地蒸散量从2015年9月开始持续降低,直到2016年1月的0.4 mm/d。造成蒸散量在冬季较低主要有两个原因:①冬季温度低,太阳辐射强度小于其他几个季节;②冬季一般是非种植季,缺少了植物蒸腾。2016年的变化情况与2015年类似,不做赘述。经计算,实验地在2015年蒸散量为730 mm,每日平均蒸散量2.0 mm/d;2016年蒸散量为803 mm,每日平均蒸散量2.2 mm/d。

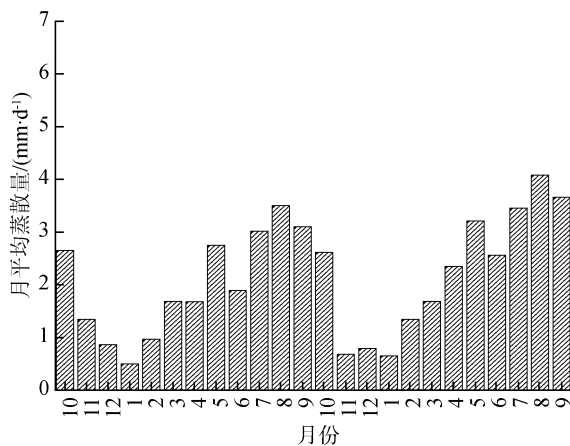


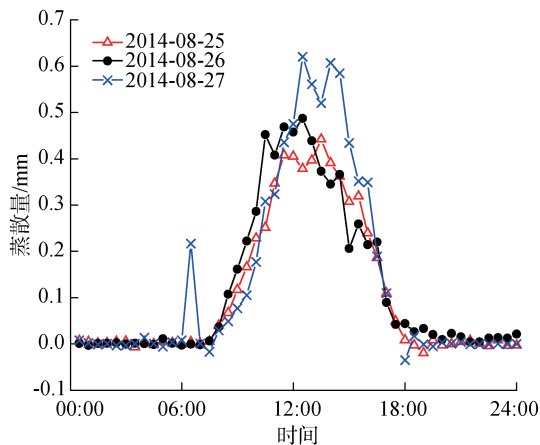
图2 2014年10月至2016年9月实测蒸散量变化趋势

3.2 蒸散量在植物生长季的影响因子分析

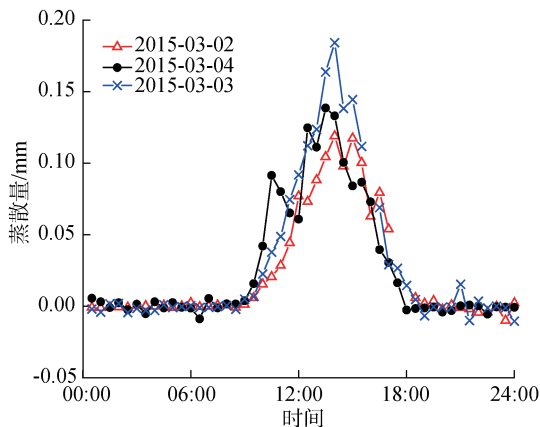
观测采用高分辨率的蒸散监测仪器,最小时间尺度可观测0.5 h蒸散量。相比于其他涡动相关监测方法,蒸散监测仪的分辨率和精度都更高,并且可以在雨天进行观测。本研究采用了两个指标来评估农业活动对蒸散的影响:①农业活动发生前后0.5 h蒸散变化量;②农业活动发生前后10 d累积蒸散量变化量。通过监测到蒸散量的变化来定量分析不同农业活动对蒸散的影响。

3.2.1 种植和收割对蒸散的影响量化评估

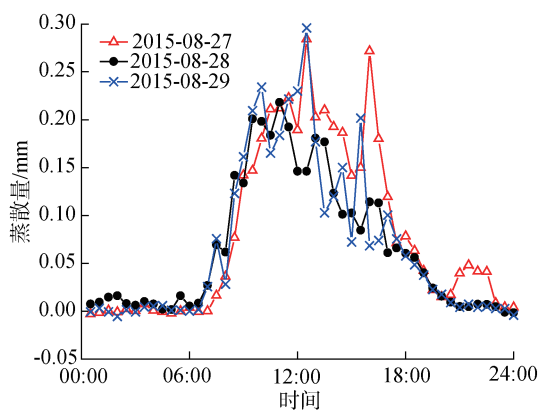
量化评估结果见图3~5,表1~2。



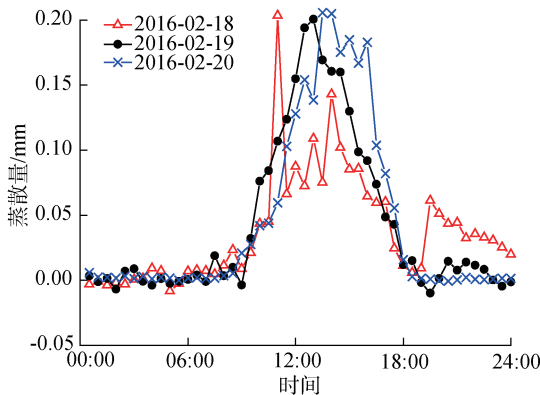
(a) 2014 年下半年



(b) 2015 年上半年

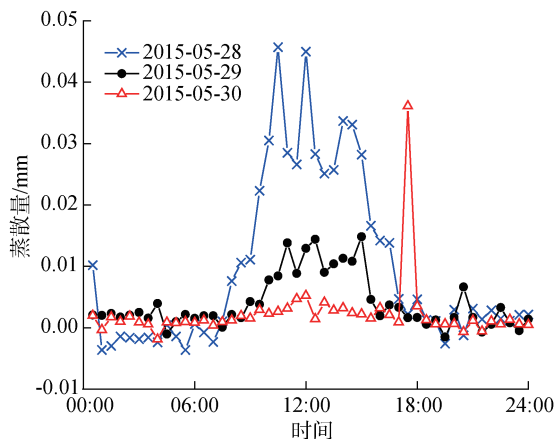


(c) 2015 年下半年

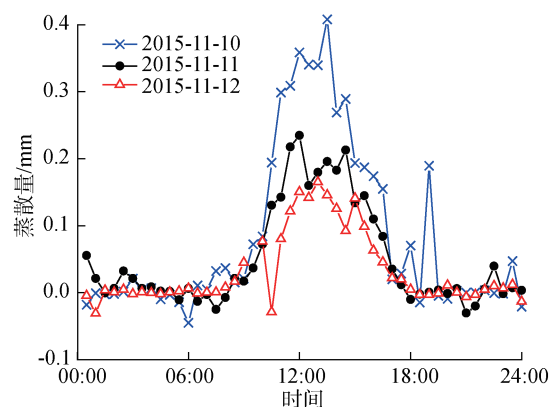


(d) 2016 年上半年

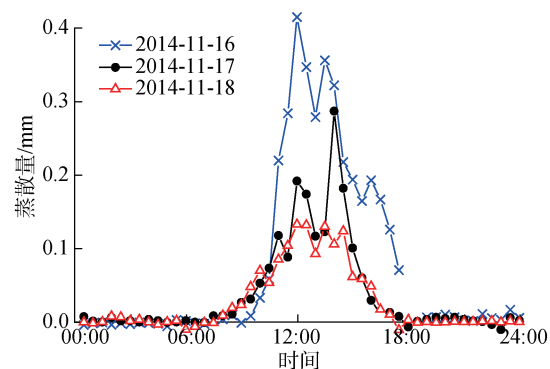
图3 每个种植季种菜后蒸散量的变化



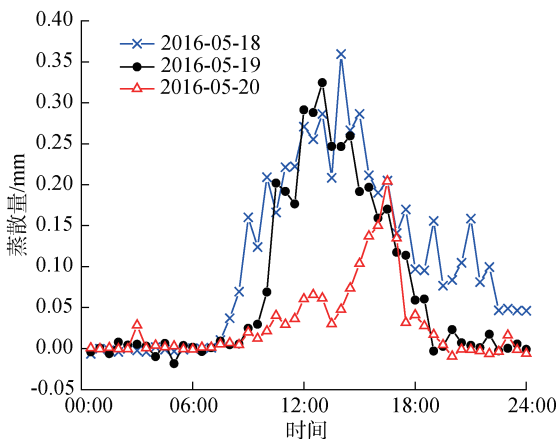
(a) 2015 年上半年



(b) 2015 年下半年



(c) 2014 年下半年



(d) 2016 年上半年

图4 每个种植季收菜后蒸散量的变化

表 1 种菜前后实测蒸散量变化情况 mm

时间	2014 年下半年种植季		2015 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
种菜前	0.45	16.8	0.12	14.7
种菜后	0.64	19.6	0.19	17.9

时间	2015 年下半年种植季		2016 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
种菜前	0.28	17.7	0.21	13.9
种菜后	0.29	19.2	0.21	17.5

表 2 收菜前后实测蒸散量变化情况 mm

时间	2014 年下半年种植季		2015 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
收菜前	0.46	24.2	0.48	18.6
收菜后	0.05	18.6	0.05	10.5

时间	2015 年下半年种植季		2016 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
收菜前	0.60	23.6	0.39	20.2
收菜后	0.42	20.1	0.16	12.3

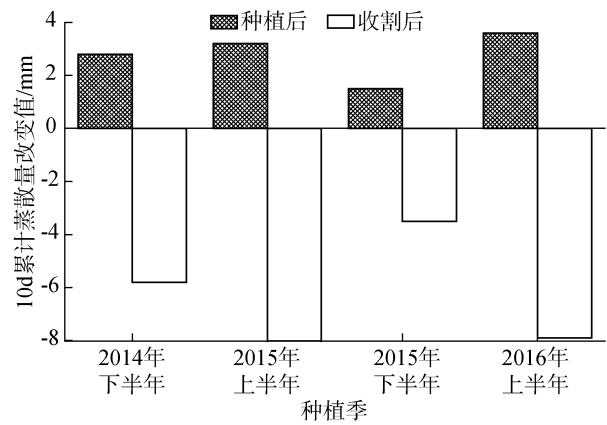


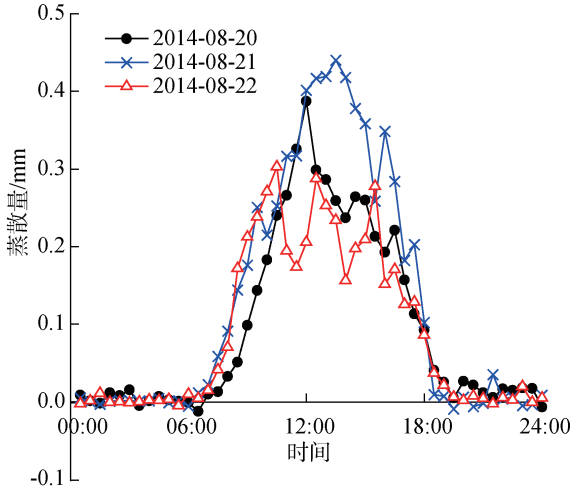
图 5 每个种植季种植后和收割后蒸散量的变化

通过蒸散发实测数据,可以清楚看出种菜和收割对农田实际蒸散的影响。其中,种植使农田实测蒸散升高,种植后的几天之内,4 个施肥季 0.5 h 蒸散峰值分别升高了 0.19、0.07、0.01 和 0 mm;而 10 d 累计蒸散量分别升高了 2.8、3.2、1.5 和 3.6 mm。种植使蒸散升高的主要原因是由于原本裸露的土壤表面突然加入了植物产生了作物蒸腾,但是由于作物处于生长初期阶段,作物高度和生物量都较小,因此并不会使实测蒸散发生明显升高,10 d 累积量只升高了 2~3 mm 左右。而收割后的几天之内,实测蒸散则发生了明显下降,4 个施肥季 0.5 h 蒸散峰值分别下降了 0.41、0.43、0.26 和 0.23 mm;10 d 累计蒸散量分别下降了 5.8、8.1、3.5 和 7.9 mm。需要注意的是,收割使蒸散发生变化的幅度要明显高于种植,这是由于收割时作物已经处于生长后期,生物

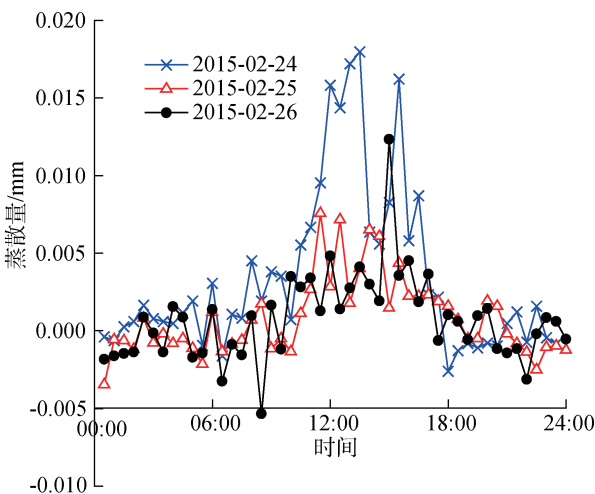
量较大,作物蒸腾已经在总蒸散中占据主导地位,所以收割后蒸散量的下降幅度更大。

3.2.2 施肥与灌溉对蒸散的影响量化评估

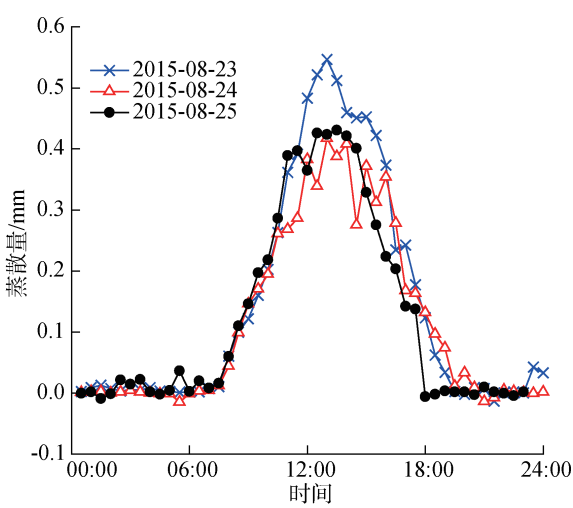
施肥与灌溉对蒸散的影响量化评估见图 6~8、表 3~4。



(a) 2014 年下半年



(b) 2015 年上半年



(c) 2015 年下半年

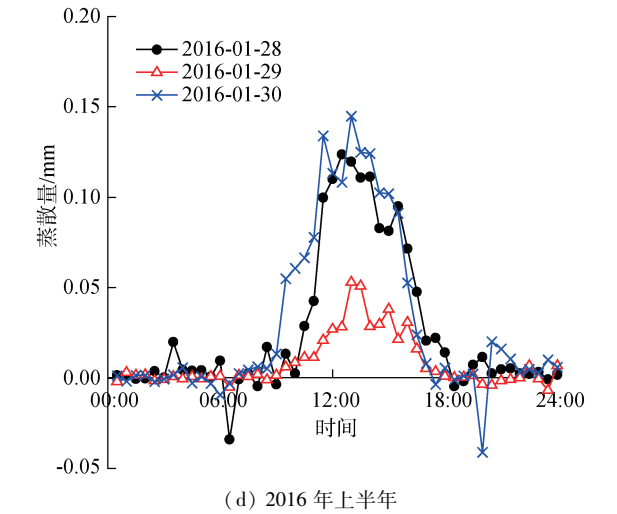


图 6 每个种植季施肥后蒸散量的变化

表 3 施肥前后实测蒸散量变化情况 mm

时间	2014 年下半年种植季		2015 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
施肥前	0.42	19.2	0.017	16.4
施肥后	0.46	20.1	0.013	15.1

时间	2015 年下半年种植季		2016 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
施肥前	0.56	20.5	0.13	14.9
施肥后	0.45	19.9	0.15	16.5

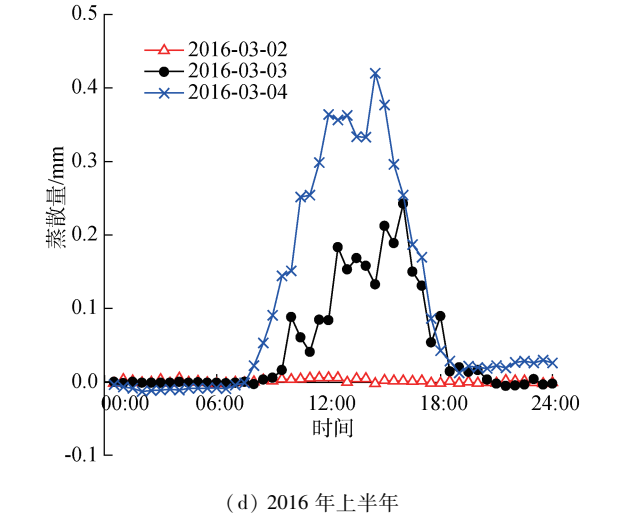
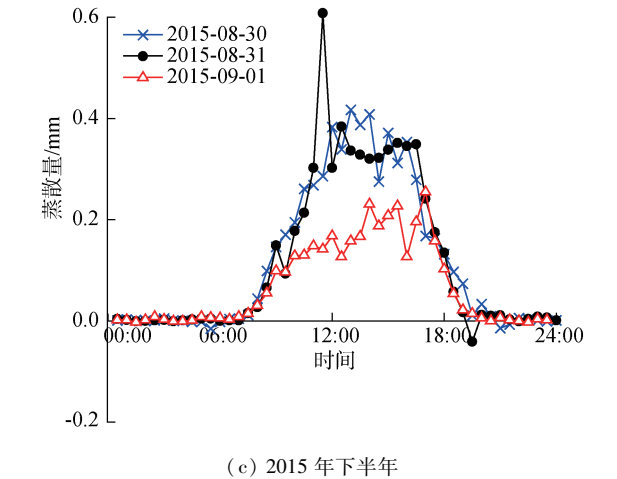
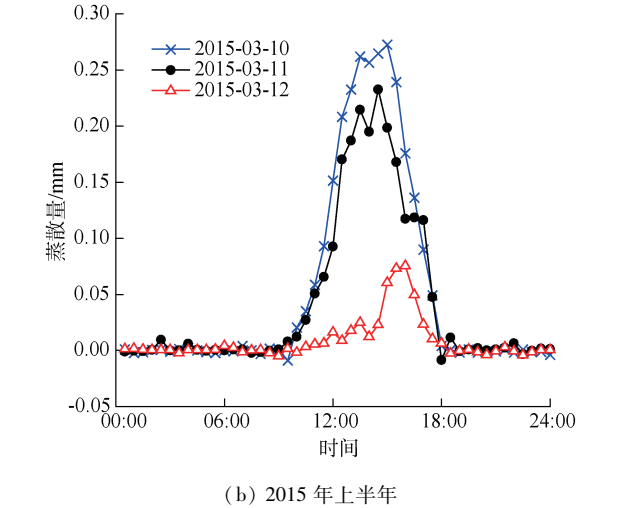
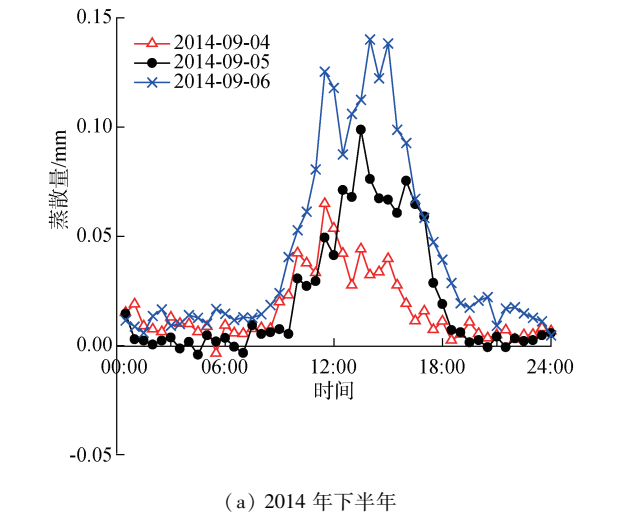


图 7 每个种植季灌溉后蒸散量的变化

表 4 灌溉前后实测蒸散量变化情况 mm

时间	2014 年下半年种植季		2015 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
灌溉前	0.07	19.8	0.08	15.9
灌溉后	0.14	21.5	0.27	16.6

时间	2015 年下半年种植季		2016 年上半年种植季	
	峰值	累计量	峰值	累计量
灌溉前	0.24	20.2	0.01	16.3
灌溉后	0.63	22.8	0.44	16.9

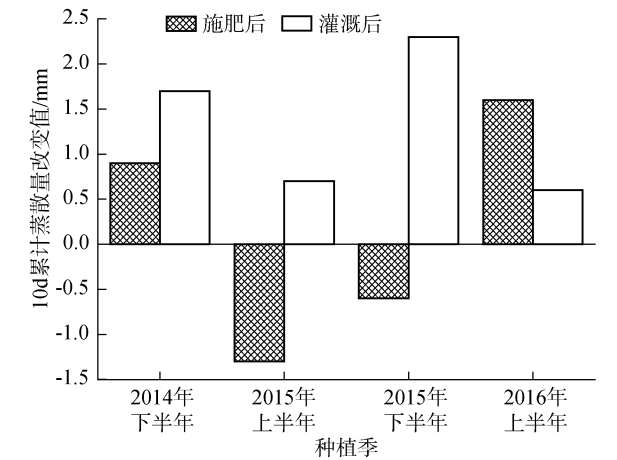


图 8 每个种植季施肥和灌溉后蒸散量的变化

4 个种植季施肥后的几天之内,蒸散量虽然发生了变化,但是这种变化并没有明显的规律。2014 年下半年种植季和 2016 年上半年种植季,施肥后的 10 d 累计蒸散量分别上升了 0.9 mm 和 1.6 mm,而在另外两个种植季,2015 年上半年种植季和 2015 年下半年种植季,施肥后的 10 d 累计蒸散量分别下降了 1.3 mm 和 0.6 mm。因此,农田施肥对于实际蒸散是促进还是抑制作用从本次试验中并不能得出定性的结论,这是由于每次施肥对土壤注入了氮磷钾等元素,并没有直接的水分加入。但是灌溉对蒸散的影响却比较显著,从图 8 可以看出,4 个种植季每次灌溉之后 0.5 h 蒸散峰值分别升高了 0.07、0.19、0.39 和 0.43 mm,灌溉前后 10 d 累计蒸散量分别升高了 1.7、0.7、2.3 和 0.6 mm。灌溉对农田实际蒸散的促进作用主要是由于两个原因导致:①每次灌溉之后都会引起土壤含水量的升高,而土壤蒸发的来源是土壤里的水分,因此灌溉会增大土壤蒸发量。②植物生长是一个需水过程,灌溉水的注入会促进作物生长,进而加大了植物蒸腾量。

4 结 论

蒸散量与农业种植规律有很强的相关性,同时也表现出很强的季节差异性:实际蒸散量在 1 月份较小,从 2 月份种植季开始逐渐增大,到 5 月份达到最高;6 月份由于蔬菜收割,农地变成裸地,蒸散量显著减小;下半年种植季从 9 月份开始蒸散量逐渐增高,10 月份达到最大,11 月份开始逐渐减小。总体来说,蒸散量在春夏季较高,秋冬季较低;在种植季较高,非种植季较低。此外,人类的种植活动增加了田间蒸散量,而收割则使蒸散量发生明显下降;灌溉对总蒸散有促进作用,但是这种促进作用幅度比较小,而施肥对于蒸散的影响却并不明显。

参考文献:

[1] 宋小宁. 基于植被蒸散法的区域缺水遥感监测方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2004.

[2] 辛晓洲,田国良,柳钦火. 地表蒸散定量遥感的研究进展[J]. 遥感学报,2003,7(3):233-240. (XIN Xiaozhou, TIAN Guoliang, LIU Qinhua. A review of researches on remote sensing of land surface evapotranspiration [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7 (3): 233-240. (in Chinese))

[3] 赵传燕. 甘肃省祖厉河流域潜在生态条件的 GIS 辅助模拟研究[D]. 兰州:兰州大学,2003.

[4] 童瑞,杨肖丽,任立良,等. 黄河流域 1961—2012 年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015,31 (3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN

Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (3): 16-21. (in Chinese))

[5] 张守平,蒲强,李丽琴,等. 基于可控蒸散发的狭义水资源配置[J]. 水资源保护,2012,28(5):13-18. (ZHANG Shouping, PU Qiang, LI Liqin, et al. Special water resources allocation based on controllable ET[J]. Water Resources Protection,2012,28(5):13-18. (in Chinese))

[6] 邹君. 湖南省水资源可持续利用综合评价研究[J]. 节水灌溉, 2007 (2): 18-21. (ZOU Jun. Study on comprehensive evaluation of water resources in Hunan Province[J]. Water Saving Irrigation, 2007 (2): 18-21. (in Chinese))

[7] 湖南省国土委员会编. 湖南国土资源[M]. 长沙:湖南科技出版社,1985.

[8] 刘培亮,毛德华,周慧,等. 1990-2013 年湖南四水入洞庭湖汛期径流量的变化规律[J]. 水资源保护,2015,31 (4): 52-61. (LIU Peiliang, MAO Dehua, ZHOU Hui, et al. Variation law of runoff in flood seasons into Dongting Lake from Four Rivers in Hunan Province during 1990-2013[J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (4): 52-61. (in Chinese))

[9] 张强,孙鹏,程辰,等. ENSO 影响下安徽省旱涝灾害及农业生产损失时空变化特征[J]. 水资源保护,2016,32 (6):6-18. (ZHANG Qiang, SUN Peng, CHENG Chen, et al. Temporal and spatial variations of ENSO-induced flood and drought disasters and loss in agricultural production in Anhui Province[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (6): 6-18. (in Chinese))

[10] 侯志勇,谢永宏,陈心胜,等. 洞庭湖湿地的外来入侵植物研究[J]. 农业现代化研究,2011,32(6):744-747. (HOU Zhiyong, XIE Yonghong, CHEN Xinsheng, et al. Study on invasive plants in dongting lake wetlands [J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32 (6): 744-747. (in Chinese))

[11] MASSMAN W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2000, 104 (3): 185-198.

[12] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [J]. Journal of Meteor, 1951, 8: 135-145.

[13] SUN X M, ZHU Z L, WEN X F, et al. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at China FLUX sites [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2006, 137 (3): 188-193.

(收稿日期:2017-04-19 编辑:彭桃英)