

# 长武塬区实际蒸散发变化及驱动因素分析

吴辰<sup>1,2</sup>, 王国庆<sup>2</sup>, 郝振纯<sup>1,3</sup>, 谷一<sup>1,2</sup>, 刘佩瑶<sup>1,2</sup>, 杨勤丽<sup>4</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究所水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏南京 210098; 4. 电子科技大学资源与环境学院, 四川成都 611731)

**摘要:**以大型称重式蒸渗仪系统的实测农田蒸散发量数据为基础,分别从年、月、日和生长季4个尺度分析长武塬区农田蒸散量的变化特征,采用相关分析和主成分分析法探究其影响因素,建立实测蒸散与影响因素之间的定量关系。结果表明:农田蒸散的变化特征与作物生长进程一致,高蒸散期均出现于作物生育旺期,且受到降水、气温、风速、太阳辐射、日照时数、空气相对湿度和土壤含水量的共同作用,其中,气温和太阳辐射是蒸散的主要驱动因素。

**关键词:**农田蒸散量;变化特征;驱动因素;相关性;长武塬区

中图分类号:TV93;S274 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2017)05-0037-06

## Study on the variation regulation and influencing factors of farmland evapotranspiration in Gully region of Changwu tableland

WU Chen<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>2</sup>, HAO Zhenchun<sup>1,3</sup>, GU Yi<sup>1,2</sup>, LIU Peiyao<sup>1,2</sup>, YANG Qinli<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro-Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The study analyzed the variation characteristics of farmland evapotranspiration in Changwu tableland from four scales: yearly, monthly, daily and growing season based on observation data from large scale lysimeter system and explore the influencing factors by using correlation analysis and principal component analysis method. The quantitative relationship between measured evapotranspiration and influencing factors is established. The results show that the variation characteristics of farmland evapotranspiration are consistent with the growth process of the crops and the high evapotranspiration occurs in the booming period. The evapotranspiration is affected by precipitation, air temperature, wind speed, solar radiation, sunshine hours, air relative humidity and soil water content. Temperature and solar radiation are the main driving factors of evapotranspiration.

**Key words:** farmland evapotranspiration; the variation characteristics; driving factor; relevance; Changwu tableland

我国的旱作农业区,农田蒸散是其水分消耗的主要途径,也是制约地区农业可持续发展的重要因素<sup>[1]</sup>。近年来,许多学者开展了有关农田蒸散变化的大量研究,并取得了一定成果<sup>[2-3]</sup>。目前测定农田蒸散的方法有很多,如水量平衡法、蒸渗仪法、

波文比法和涡度相关法等<sup>[4]</sup>。其中,由于大型称重式蒸渗仪测定精度较高,理论相对成熟,受到广大学者的普遍认可,并得到广泛运用<sup>[5]</sup>。王朝华等<sup>[6]</sup>基于大型蒸渗仪的实测数据,分析了农田蒸散量的时程和深度变化,揭示了其与作物和气象因素之间的

收稿日期:2017-05-15; 修回日期:2017-06-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601501、2016YFA0601601、2016YFC0402704);国家自然科学基金项目(41330854、41371063、41401026、41371047);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费(1069-514031112、2015490811)

作者简介:吴辰(1992-),女,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事流域水文模型和水资源评价研究。

通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,博士,教授,主要从事气候变化与水文水资源等方面的研究。

内在关系;郭春明等<sup>[7]</sup>利用蒸渗仪对东北地区春玉米地蒸散量进行了观测,探究了玉米生长季蒸散量的分布特征及其影响因素;甘卓婷等<sup>[8]</sup>、汪秀敏等<sup>[9]</sup>根据蒸渗仪的麦田蒸散测定结果,分别研究了黄土塬区和南京地区典型年冬小麦各生育期的蒸散特征;王同朝等<sup>[10]</sup>选择冬小麦-夏玉米一年两熟的黄淮海区,总结了作物生育期农田蒸散的周年变化规律。

黄土高原是我国北方典型的旱作农业区,相关研究表明,气候变暖将通过加快蒸散过程进而加剧黄土高原地区土壤干旱化程度<sup>[11-12]</sup>,这将对该地区的作物生长与产量产生重大影响,而目前对该地区农田蒸散不同尺度变化规律的研究较少,因此本文以陕西省长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(以下简称长武站)综合观测场的基础资料为依据,分别从年、月、日和生长季4个尺度探讨农田蒸散的变化过程,并分析其影响因素,以期水资源高效利用和农田系统的科学管理提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

长武站位于黄土高原南部高原沟壑区的陕西长武县境内,地理坐标为 $107^{\circ}41'E$ 、 $35^{\circ}14'N$ ,建于1984年。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水580 mm,汛期(5-10月)降水占年降水量的70%以上<sup>[13]</sup>,属于典型的雨养农业,玉米和小麦是该地区的主要粮食作物<sup>[14]</sup>。年均气温 $9.1^{\circ}C$ ,无霜期171 d,地下水位50~80 m。地带性土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松,通透性好,具有良好的“土壤水库”效应<sup>[15]</sup>。

本文所用资料来源于长武站综合观测场( $107^{\circ}40'59"E$ - $107^{\circ}41'01"E$ , $35^{\circ}14'24"N$ - $35^{\circ}14'25"N$ )。综合观测场位于长武塬面,地带性土壤为黑垆土,面积约为 $52\text{ m}\times 52\text{ m}$ ,采用小麦→玉米轮作,每年一熟,雨养为主,无灌溉条件。

农田蒸散量由场内大型原状土自动称重式蒸渗仪(CWAFZ13CZS\_01)测定,其体积为 $2\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ (长×宽×高),土体高度2.6 m,每隔1 h自动采集记录一次数据。场内设有中子仪监测地,利用CNC503DR中子土壤水分仪观测土壤剖面含水量,每隔5~10 d测定一次,测定深度为3 m,1 m以上每10 cm作为一个观测层,1 m以下每20 cm一层。气象数据来源于蒸渗仪正西20 m处的自动气象要素观测场,常规的气象要素监测包括气温、空气

相对湿度、风速、降雨和太阳辐射等。

### 1.2 研究方法

以蒸渗仪实测蒸散量数据和气象站点实测气象要素为基础,选取2004-2009年为研究时段,基础资料包括降水、气温、风速、相对湿度、日照时数、太阳辐射、水面蒸发、农田蒸散量和土壤含水量,分别在年、月、日和生长季4种尺度上分析实测蒸散量和降水等要素的变化特征。

采用相关分析和主成分分析方法,分析各影响因子与蒸散之间的相关性,确定蒸散变化的主要驱动因素,并建立实测蒸散与影响因素的响应关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实测蒸散发变化特征

2.1.1 年际变化特征 图1给出了2004-2009年农田蒸散量、降水量及土壤含水量的年动态变化过程。从图1中可以看出,农田蒸散量呈现下降趋势,降水量出现波动变化,但整体差异不大。各层土壤含水量有微弱的下降趋势,10 cm层土壤含水量最低,30 cm层土壤含水量较其它层略高。2004-2006年农田蒸散量大于降水量,尤其是2004年最为显著,根据气象资料显示,2003年年降水量为954.3 mm,明显高于当地年均降水,充足的降水使得土壤含水量得到极大的补充并贮存在土壤中,因而之后的农田蒸散耗水以土壤耗水为主,受降水影响较小,从而出现蒸散大于降水的现象。

2.1.2 年内分配特征 为了直观地反映农田蒸散量的年内变化规律,绘制2004-2009年农田蒸散量的月过程线,如图2所示。从图2中发现2004、2006、2007及2009年变化趋势相似,2005和2008年变化趋势相似。前者农田蒸散量集中在3-6月份,1-4月显著上升,5-7月显著下降,7月以后呈现波动变化,总体为下降趋势。后者蒸散量集中在6-9月份,6月之前蒸散显著增加,9月过后蒸散逐渐减少。

基于对图2的分析,选取2008和2009年作为研究时段内的两个典型年,进一步探讨农田蒸散量在年内的变化特点。图3给出了这两年农田蒸散量与降水量的年内变化对比。如图3(a),2008年年降水量为539 mm,年蒸散量为499 mm,降水输入满足蒸散耗水,且降水和蒸散集中在同一时期。1-5月份为低蒸散期,由于降水和气温的影响蒸散出现波动变化,但总体呈上升趋势。高蒸散期出现在6-9月份,累积蒸散量高达351 mm,占全年蒸散量

的 70.3%。这一时期降水充沛,累积降水量为 419 mm,占年降水量的 77.7%。10 月过后降水量逐渐减少,气温和风速降低,蒸散几乎为 0。如图 3(b), 2009 年年降水量为 503mm,年蒸散量为 339 mm,降水输入满足蒸散耗水,但降水与蒸散集中时期不同,降水集中在 7-9 月份,为 289 mm,占全年降水量的 57.4%,这一时期农田有稳定的蒸散量,平均为 1.0~3.5 mm/d。蒸散集中在 4-6 月份,为 238 mm,占年蒸散量的 70.3%。

2.1.3 生长季的变化特征 结合农田的作物种植情况来看,2008 和 2009 年的蒸散高峰期均出现在作物生长发育的旺盛时期。2008 年主要作物为春玉米,生育期为 04-22-09-08;2009 年主要作物为冬小麦,生育期为 01-01-06-29。春玉米和冬小麦生长季农田蒸散量随生育期的分布结果在表 1 中给出。由表可见,春玉米生育阶段蒸散量呈现由小到大又变小的抛物线型,整个生育期的蒸散总量为 367.4 mm。在播种-拔节期,降水少,气温相对较低,植株矮小,叶片还未伸展,因此蒸散量也较小,日

平均蒸散量仅为 0.91 mm/d,占整个生育期的 12.3%。拔节期过后,气温逐渐升高,雨水供应充足,玉米植株生长愈加旺盛,作物蒸腾量的增加导致农田蒸散量也逐渐增加,日均蒸散量在灌浆-成熟期达到最大,为 3.78 mm/d;拔节-抽雄期的总蒸散量最大,为 138.4 mm,占整个生育期蒸散量的 37.7%。随着玉米进入成熟期,生理活动逐渐减弱,蒸腾量缓慢减少,农田蒸散量也相应减少,蒸散量为 52.9 mm,占整个生育期的 14.4%。与春玉米类似,冬小麦生育期蒸散量的整体变化也表现为由小到大又变小的抛物线型,整个生育期的蒸散总量为 252.8 mm。冬小麦返青之前,由于气温低,植株小,蒸散量最小,播种-返青期的蒸散量仅占整个生育期的 5.9%。3 月后,冬小麦返青生长,蒸散量逐渐增大,返青-拔节期的蒸散量在全生育期内最大,达到 108.5 mm,占全生育期的 42.9%。日均蒸散量在拔节-抽穗期最大,为 3.66 mm/d。此后随着冬小麦的灌浆成熟,蒸散量缓慢减小,灌浆-成熟期的日均蒸散量为 0.49 mm/d。

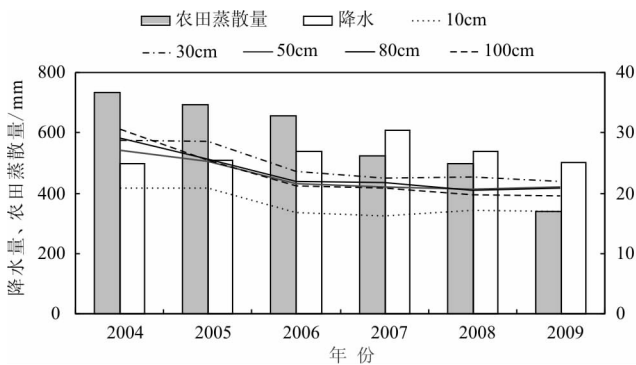


图 1 农田蒸散量、降水量、土壤含水量年动态变化

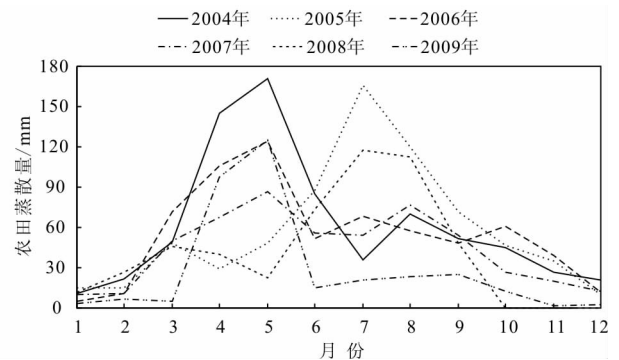


图 2 2004-2009 年农田蒸散量月过程

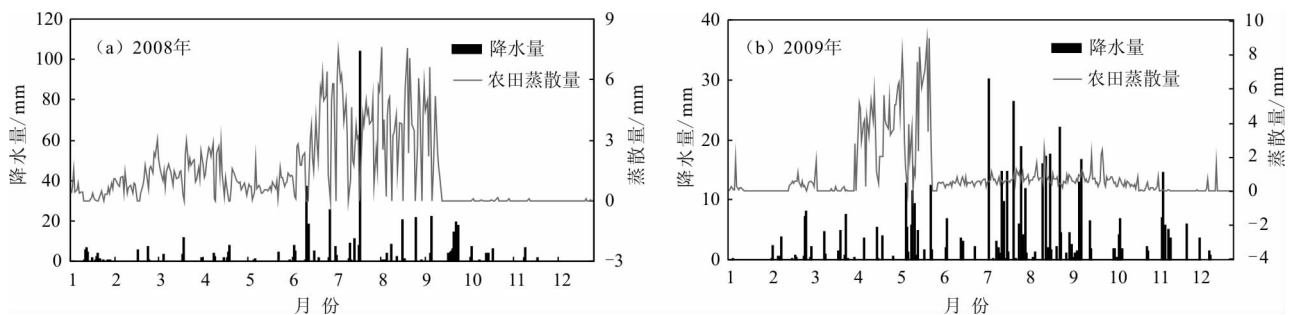


图 3 农田蒸散量与降水量年内变化

### 2.2 实测蒸散发的主要驱动因素分析

#### 2.2.1 农田蒸散量与影响因子之间的相关性分析

农田蒸散量受到气温、降水和土壤含水量等众多因子的影响,为直观地分析蒸散对这些因子的响应程

度,绘制蒸散与各因子月尺度的相关关系图(图 4),并运用 SPSS 软件分析农田蒸散量与各因子之间的相关性,分析结果见表 2。

从图 4 中可以看出,蒸散与降水、气温、风速、日

照时数、太阳辐射和水面蒸发均呈正相关关系,与气温和太阳辐射相关性较强,与相对湿度和土壤含水量为较弱的负相关关系。表2进一步验证了图4的分析结果。

表1 春玉米-冬小麦生育期蒸散量及降水分布

作物	播后天数/d	生育时期	降水量/ mm	蒸散量/ mm	日均蒸散量/ (mm·d <sup>-1</sup> )	蒸散量占生 育期比例/%
春玉米 (2008年)	50	播种-拔节	19.6	45.3	0.91	12.3
	90	拔节-抽雄	129.2	138.4	3.46	37.7
	126	抽雄-灌浆	141.4	130.9	3.63	35.6
	140	灌浆-成熟	26.5	52.9	3.78	14.4
		全生育期	316.7	367.4	2.62	100.0
冬小麦 (2009年)	68	播种-越冬	26.9	13.9	0.21	5.5
	91	越冬-返青	20.3	1.1	0.05	0.4
	122	返青-拔节	13.9	108.5	3.50	42.9
	137	拔节-抽穗	46.6	54.9	3.66	21.7
	171	抽穗-灌浆	35.8	70.0	2.06	27.7
	灌浆-成熟	2.1	4.4	0.49	1.7	
	全生育期	145.6	252.8	1.40	100.0	

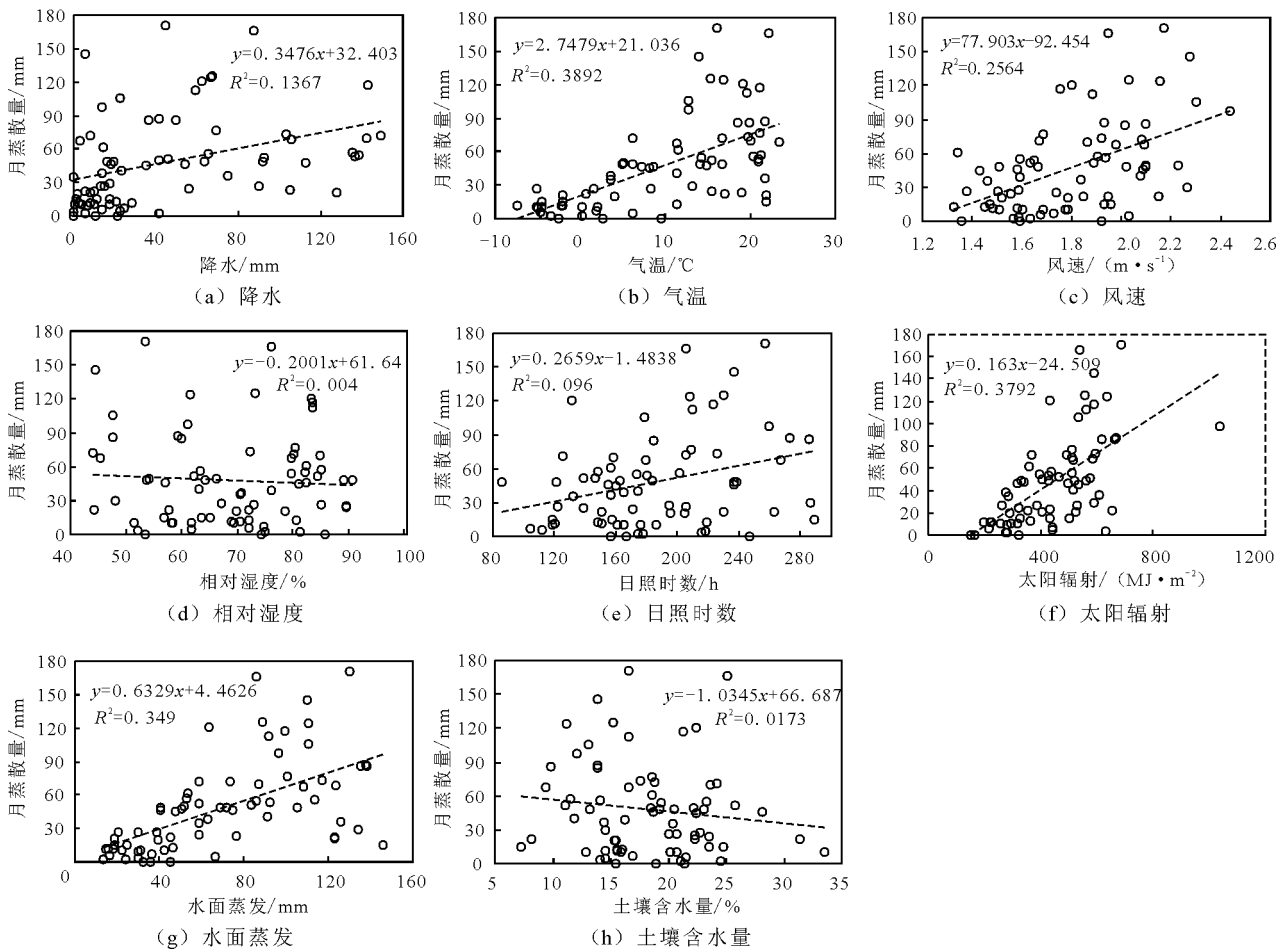


图4 月蒸散量与影响因子相关关系

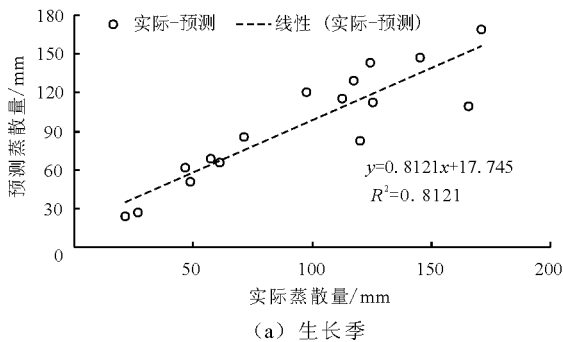
由表 2 可知,不论是月尺度还是日尺度,除了相对湿度之外,其余的影响因子与农田蒸散量均呈现显著的正相关性(由于缺少日尺度土壤含水量的资料,实际蒸散与日尺度土壤含水量的相关性未给出)。从月尺度来看,蒸散与气温和太阳辐射的相关性较好,相关系数均超过 0.6,与降水和日照时数的相关性一般,相关系数均未达到 0.4;从日尺度来看,蒸散与太阳辐射相关性最好,相关系数达到了 0.633,与气温相关性较好,相关系数接近 0.6,与降水和风速相关性较差。蒸散与水面蒸发日、月尺度的相关性较好,相关系数均超过 0.55。黄土高原处于半干旱地区,年均降水偏少,降水对蒸散影响不大;年内降水分配不均,降水集中在夏季且多暴雨,从而造成日尺度降水的相关系数明显低于月尺度降水的相关系数。

表 2 农田蒸散量与影响因子相关性分析

影响因子	月尺度	日尺度
降水	0.370**	0.074**
气温	0.624**	0.588**
风速	0.513**	0.144**
相对湿度	-0.066	-0.161
日照时数	0.310**	0.338**
太阳辐射	0.616**	0.633**
水面蒸发	0.591**	0.559**
土壤含水量	-0.132	

注:P<0.01, \*\*表示相关性显著。

随着气温的升高,植物的蒸腾作用增强,土壤蒸散增大,进而导致农田蒸散量增大;而太阳辐射提供了水分蒸发所需要的能量,因此气温和太阳辐射对蒸散的影响最为显著。降水增多使土壤含水量增大,蒸散速率加快,蒸散量增大,进而导致土壤含水



量减少,且蒸散的耗水作用大于降水的补充作用;而空气相对湿度的增大使得水分子运动变得缓慢,蒸散速率下降,蒸散量逐渐减少,所以土壤含水量和空气相对湿度与农田蒸散量呈现弱的负相关性。

为进一步确定研究区蒸散变化的主要驱动因素,基于上述分析结果运用 SPSS 软件进行主成分分析,分析结果表明,气温和太阳辐射初始特征根均大于 1,且两者累积可解释 83% 的总方差,因此气温和太阳辐射是影响黄土高原蒸散变化的主要因素。

2.2.2 实测蒸散与影响因素的响应关系 考虑到水面蒸发主要受制于所接收到的太阳辐射能量,在一定程度上能够较好地反映太阳辐射与气温的影响,因此可以作为热量控制因素;而降水和土壤含水量则作为水分控制因素。由上述分析可知,作物的生长对实测蒸散有较大影响,因此将研究时段分为作物生长季与非作物生长季两个时期,在月尺度上分别建立实测蒸散与水面蒸发、降水和土壤含水量的定量关系:

生长季:

$$E = -28.006 + 1.345E_p + 0.066P + 98.803SW \quad (1)$$

非生长季:

$$E = -59.876 + 0.503E_p + 0.201P + 240.852SW \quad (2)$$

式中:E为实测蒸散量,mm;P为降水量,mm;E<sub>p</sub>为水面蒸发量,mm;SW为100cm内的土壤含水量,mm。

图 5 给出了生长季与非生长季实际蒸散量与预测蒸散量的对比图,这两个公式的相关系数 R 分别为 0.90 和 0.75,可较好地反映实测蒸散量与影响因素的响应关系。

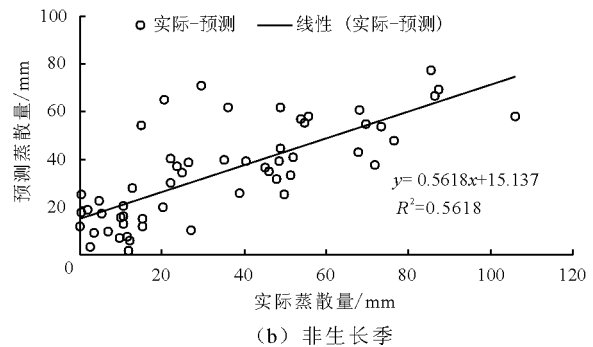


图 5 实测蒸散量与预测蒸散量对比图

### 3 结 论

(1)2004 - 2009 年农田蒸散量呈现下降趋势,

年内变化均为先增大后减小的抛物线型,但高蒸散期出现的时间不同,如 2008 年出现在 6 - 9 月份,2009 年出现在 4 - 6 月份。

(2)从农田蒸散量的生长季分布来看,蒸散的变化特征与作物生长进程一致,作物生长旺盛时期蒸散量显著增大。2008年蒸散峰值出现在春玉米拔节-抽雄期,占生育期蒸散量的37.7%;2009年蒸散峰值出现在冬小麦返青-抽穗期,占生育期蒸散量的64.6%。

(3)农田蒸散量受到多个环境因子的影响,大气温度和太阳辐射是影响农田蒸散量的主要气象因子,土壤含水量对农田蒸散量的影响也较为显著。

(4)本研究中缺乏作物叶面积指数等生物因子的观测资料,未能探讨生物因子与农田蒸散量之间的相互作用,因此,生物因子对农田蒸散量的影响应是后续研究的重点内容。

#### 参考文献:

- [1] Suyker A E, Verma S B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize - based agroecosystem [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 417 - 427.
- [2] 王笑影. 农田蒸散估算方法研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(2): 81 - 84.
- [3] 王笑影. 农田蒸散实测方法研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 20(1): 27 - 30.
- [4] 汪明霞, 陈晓飞, 王铁梁, 等. 腾发量的测定和计算方法研究综述[J]. *中国农村水利水电*, 2006(12): 9 - 12.
- [5] 刘渡. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [6] 王朝华. 农田蒸散发量变化规律分析[J]. *水文*, 2005, 25(3): 35 - 37.
- [7] 郭春明, 任景全, 张铁林, 等. 东北地区春玉米生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(4): 400 - 407.
- [8] 甘卓亭, 刘文兆. 黄土塬区麦田蒸散特征[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1435 - 1438.
- [9] 汪秀敏, 申双和, 韩晓梅, 等. 大型称重式蒸渗仪测定的冬小麦农田的蒸散规律研究[J]. *气象与环境科学*, 2011, 34(4): 14 - 18.
- [10] 王同朝, 李小艳, 李仟, 等. 冬小麦-夏玉米两熟制农田蒸散量周年变化规律初探[J]. *华北农学报*, 2014, 29(2): 218 - 222.
- [11] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981 - 2006): Impacts of climate changes and human activities[J]. *Science China Earth Sciences*, 2008, 51(1): 67 - 78.
- [12] Fan Jun, Shao Mingan, Wang Quanjie. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 98 - 102.
- [13] 刘贤赵, 谭春英, 宋孝玉, 等. 黄土高原沟壑区典型小流域土地利用变化对产水量的影响——以陕西省长武王东沟流域为例[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 99 - 102.
- [14] 张俊俊, 刘文兆, 韩晓阳. 陕西长武塬区冬小麦的蒸散特征[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(12): 60 - 63.
- [15] 张晶晶, 王力. 黄土高原高塬沟壑区坡面表层土壤水分研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 93 - 97.