

DOI: 10.11766/trxb201603140625

黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素*

张 静^{1, 2} 王 力^{1, 2†} 韩 雪¹ 张林森³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 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)

(3 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要 蒸散是水量平衡和能量平衡的重要组成部分, 也是农田生态系统水分消耗的主要途径。为探究黄土塬区农田蒸散的日动态变化规律, 运用涡度相关法、土壤水分及常规微气象观测系统等, 于2013年作物生长季(4—10月)对试验区农田作物(冬小麦、春玉米)蒸散特征及影响因素进行分析。结果表明, 降水对蒸散的影响较为显著, 降水过后的日蒸散量较降水前会有所增加; 农田0~100 cm土壤含水量变异系数较大, 土壤水分变化剧烈, 作物根系的集中分布范围在0~80 cm之间, 因此0~100 cm土壤水分主要参与蒸散过程; 晴天蒸散的累积量大于阴天, 晴天和阴天的日均蒸散量分别为4.5、3.8 mm d⁻¹, 相差0.7 mm d⁻¹。阴天蒸散开始的时间较晴天晚, 阴天条件下的蒸散更易受到气象因子的扰动; 不同天气条件下净辐射均为蒸散的主要影响因子, 蒸散速率与净辐射变化趋势一致, 但在时间上滞后于净辐射; 在不同的土壤水分环境条件下, 蒸散的过程和强度差异较大, 水分胁迫条件下, 全天蒸散量水平较低, “蒸散高地”的持续时间较长; 而水分相对充足时, 全天蒸散水平较高, “蒸散高地”持续时间较短, 维持较高的蒸散速率的时间较长。

关键词 农田; 能量平衡; 土壤水分; 涡度相关法; 蒸散

中图分类号 S161.4 **文献标识码** A

蒸散 (evapotranspiration, ET) 是水量平衡和能量平衡的重要组成部分, 也是农田生态系统水分消耗的主要途径^[1]。在陕西咸阳地区, 年蒸散量约占年降水量的90%左右^[2]。蒸散受气象因素、作物类型、大气稳定度、土壤含水量及其他环境因素的影响。蒸散的评估方法不断改进并且日趋成熟, 目前主要有土壤水量平衡法、波文比法、同位素示踪法、涡度相关法等^[2-3]。此外, 为了更好地反映生态水文过程及其响应机制, 众多学者在实测的基础上建立了相关模型, 如Shuttleworth-Wallace (S-W) 模型^[4]、SBDART模型^[5-6]及PT-T模型^[7]等。目前涡度相关法的应用较为广泛, 可以在生态系统尺度上进行连续的测量, 并且大多

数涡度相关系统都可以同时测定气象因子及能量的各组分, 有利于分析影响因子与能量平衡各组分之间的关系。黄土高原沟壑区是我国西部主要的旱作农业区之一, 土壤水分是限制该地区作物生长的主要因子, 水资源利用率也未达到期望程度, 并且在黄土高原对于蒸散数据的观测积累较少。该地区作物需水全部来自大气降水, 蒸散又是主要的水分消耗途径, 极易受到气象因素及下垫面因素的影响, 前人对该地区冬小麦和春玉米地蒸散的主控因素以及涡度相关系统能量平衡状况的研究相对较少。

一些农田和果园植被稀疏区域, 蒸散的很大一部分来源于土壤裸露区域的土壤蒸发^[8]。有研究指出, T/ET受生态系统和时间尺度的影响, 年际

* 国家自然科学基金项目 (41390463, 41571218) 与中央高校基本科研业务费 (2452015120) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41390463 and 41571218) and the Fundamental Research Funds for Universities and Colleges (No. 2452015120)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 张 静 (1991—), 女, 山西吕梁人, 博士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: tdeq0306@126.com

收稿日期: 2016-03-14; 收到修改稿日期: 2016-06-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-09-18

间在40%~70%之间波动^[9-12]。这表明即使在土壤水分条件受限制的环境中,植被也不能完全利用降水,存在无效水分消耗,主要以土壤蒸发方式损失。Verstraeten等^[13]研究表明土壤剖面1~2 m的土壤含水量与蒸散有直接的关系。李玉山等^[14]对黄土高原地区冬小麦、玉米、高粱及棉花等农田的蒸散进行了估算,发现90%的蒸散量均来自于2 m以内的土体。翟治芬等^[15]对春玉米的研究表明,棵间蒸发强度与土壤含水率以及蒸腾总量与叶面积指数均呈现较好的线性函数关系。甘卓亭和刘文兆^[16]分析了冬小麦各个时期蒸散量的变化特征以及各个时期蒸散的影响因子。但对黄土塬区冬小麦和春玉米土壤含水量的比较,涡度相关能量闭合状况,不同土壤水分状况下蒸散的变化规律,以及蒸散量与降水量、影响因子之间的关系的研究较少。本文以冬小麦和春玉米为研究对象,运用涡度相关技术测定农田生态系统蒸散量,分析和探讨黄土塬区农田蒸散的变化特征及影响因素,以期科学密植、提高农田水分利用效率提供理论依据,并为农田生态系统的管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武县城以西12 km的陕甘交界处的王东沟小流域(107°40'30"—107°42'30"E, 35°12'16"—35°16'00"N), 试验所在地长武农业生态试验站为中国生态系统研究网络(CERN)基站之一, 负责向CERN提供标准气象数据。该地区是典型的黄土高原沟壑区, 塬面地势平坦, 土层深厚, 海拔1 215~1 226 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温9.1 °C, 无霜期171 d。主要土壤类型是黏黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 全剖面土质均匀疏松, 非饱和层深厚, 水分稳定入渗率为1.35 mm min⁻¹, 田间持水量为23%, 凋萎含水量为10.6%。降水年际间变异大, 最大年降水量为813 mm, 最小年降水量为370 mm, 多年平均降水量为584 mm, 且多集中在7—9月, 占全年降水量的54.9%。年均潜在蒸散量1 017 mm, 年日照时数为2 230 h, 日照率51%, 年辐射总量为4 837 kJ m⁻²。0~1 m、1~2 m、2~3 m、3~6 m土壤容重分别为1.34、1.28、1.31 和1.30 g cm⁻³。

1.2 研究方法

试验地选取小麦、玉米农田各5 hm², 种植密度分别为3.3×10⁶、6.25×10⁴株 hm⁻²。耕作方式为连作, 大田管理方式与当地习惯相同, 适时锄草, 播种前施肥, 播种后追肥一次, 无灌溉措施。小麦为冬小麦, 于2012年9月18日播种, 2013年6月25日收割。玉米为春玉米, 于2013年4月20日播种, 9月1日收获。

在小麦地、玉米地分别随机布置6个土壤水分监测点。利用CNC503B(DR)中子仪于每月15日与30日进行两次土壤水分的测定, 如果发生降水等突发状况, 选择相邻天进行测定。0~100 cm土层按每10 cm、100~600 cm土层按每20 cm记录读数一次, 用6个测点数据的平均值作为该层土壤含水量值, 并用土钻法校准所测得数据。

农田生态系统潜热和显热通量由Campbell公司生产的涡度相关系统进行测定。农田通量观测场内架设高度为1.86 m, 该系统由一个三维超声风速/温度计(R3-50, Gill Instruments UK)和开路CO₂/H₂O分析仪(Li-7500, Campbell Scientific, USA)组成, 原始采样频率为10Hz, 数据采集器(CR5000X, Campbell Scientific, USA)自动采集并储存。

常规气象要素的监测, 包括辐射部分: 长波、短波、净辐射(CM21, Kipp & Zonen, Inc., USA), 光合有效辐射(Li-190f, LiCor Inc., USA), 安装高度为2.5 m; 土壤热通量板(HF), 地下5cm; 雨量计(RG13); 三维超声风速/温度计(R3-50, Gill Instruments UK)和开路CO₂/H₂O分析仪(Li-7 500, Campbell Scientific, USA), 安装高度为1.86 m。

1.3 数据处理及质量控制

潜热通量LE和显热通量H通过涡度相关技术测定并由下式计算^[17]:

$$LE = L\overline{\omega'\rho'_v}$$

$$H = \rho_a C_p \overline{W'T'}$$

式中, LE为潜热通量(W m⁻²), L为汽化潜热(J g⁻¹), ω' , ρ'_v 分别为垂直风速(m s⁻¹)的脉动量和水汽密度脉动量(g m⁻³); H为显热通量(W m⁻²), ρ_a 为空气密度(g m⁻³), C_p 为空气定压比热(J kg⁻¹ °C⁻¹), T' 为空气温度的脉动量(°C), 上横线表示在一定时间间隔上的平均。

对地下5 cm土壤热通量测定数据进行换算, 得

到地表的土壤热通量^[18]。

本研究中的通量数据采用30 min间隔的平均值，数据处理的基本步骤包括：

(1) 通量数据的去除和插补：去除传感器异常标志及超阈值数据；用最大协方差法检查与去除气体分析仪信号滞后。在30 min 时间序列内，湍流资料的“野点”数少于100，“野点”数过多，则该时段通量资料舍弃。数据处理过程中，由原始时间序列 x ，求相邻点之差 $\sigma_{\Delta x}$ 的总体标准差 $\sigma_{\Delta x}$ 。逐点检查，如某点 $\Delta x \geq n\sigma_{\Delta x}$ ，本研究中 n 值取4，则为“野点”^[19]。将“野点”去除后，该值使用前后相邻两点测值线性内插取代。

(2) 倾斜校正：由于试验区下垫面较为平坦，因此采用二次坐标轴旋转法进行校正。

(3) WPL校正：Webb等^[20]从干空气质量守恒方程出发提出一种密度修正方法，即WPL法，对潜热通量进行修正，目前该方法被广泛应用。

(4) 超声虚温修正：对显热通量进行超声虚温修正。

(5) 频率响应修正。

(6) 大气平稳性检验。

其中，(2)、(3)、(4)、(5)、(6)均由软件EdiRe处理。

湍流通量资料的总体质量评价：采用“0, 1, 2”三类划分方法。级别为0是高质量数据，可采用基础研究；级别为1是中等质量数据，可采用长期观测资料处理；级别为2是低质量数据，数据舍弃。本文中运用数据为高质量数据(0)，舍弃数据运用非线性回归法进行填补。

$$\text{湍流通量} = LE + H$$

$$\text{有效能量} = R_n - G$$

式中， LE 为潜热通量($W m^{-2}$)， H 为显热通量($W m^{-2}$)， R_n 为净辐射($W m^{-2}$)， G 为土壤热通量($W m^{-2}$)。

运用Microsoft Excel和SPSS17.0统计分析软件对试验数据进行统计分析和作图。

2 结 果

2.1 涡度相关观测的能量闭合状况

系统能量平衡闭合性分析是评价涡度相关法所观测数据可靠性的方法之一，本文运用线性回归，对试验期内4—6月小麦生长关键时期晴天的日湍流通量($LE+H$)和有效能量(R_n-G)进行闭合性分析(图1)，所得回归直线斜率为0.70，相关系数为0.77。闭合的结果符合大部分文献的报道范围，如李正泉等^[21]对中国通量观测网络能量平衡闭合分析结果范围。因此该站点的涡度相关法观测的数据是基本可靠的。

2.2 土壤含水量与降水量的关系

2013年研究区降水量为523 mm，低于多年平均降水量(584 mm)10.4%，年蒸散量为995 mm，属干旱年。图2为2013年玉米和小麦生育期(0~600 cm)土壤含水量及其变异系数变化分布情况。由图2可知，0~100 cm土层土壤含水量的变异系数较大，分别为9.61%和6.85%，土壤含水量的变化较为剧烈；随着土层深度的增加，土壤水分变异系数逐渐变小，并趋于稳定。这主要是由于土

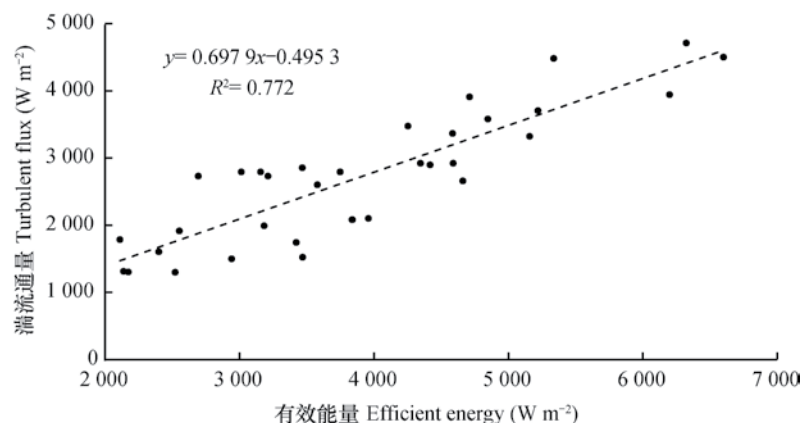


图1 试验站点经质量控制后的数据能量闭合情况

Fig. 1 Energy closure of quality-controlled data at the experiment station

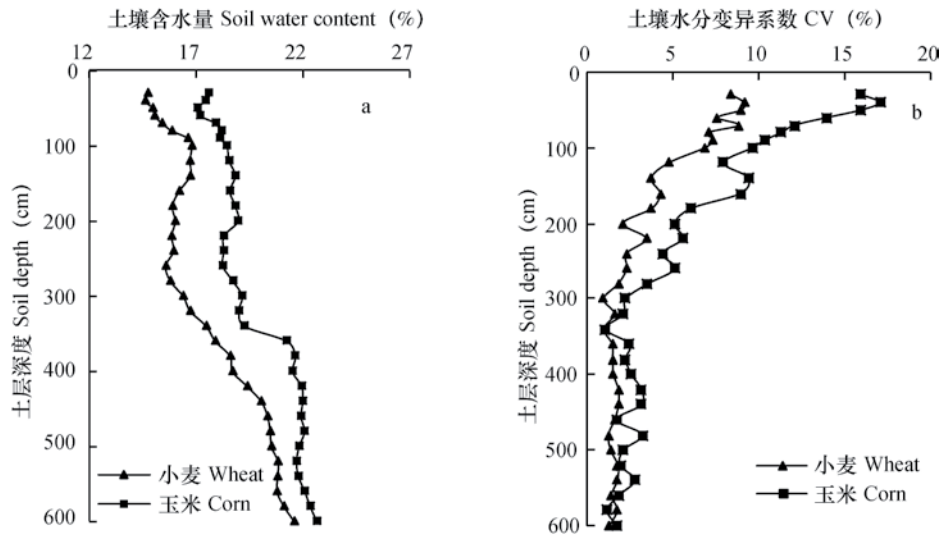


图2 作物生育期内农田平均土壤水分剖面特征变化

Fig. 2 Variation of mean soil water content along the soil profile during the crop growing season

壤 (0 ~ 100 cm) 水分受到大气降水、植被类型、土壤蒸发差异及蒸散等综合因素的影响较大；而土层越深，土壤水分受其影响越小，土壤水分含量相对稳定。同时，如图3所示，0 ~ 100 cm 土层土壤含水量的变化情况与降水量的变化趋势一致，降水能够暂时补充表层土壤的水分含量。由图2可知，玉米土壤含水量的变异系数较小麦大，这是由于二者生育期间降水量不同引起的（图3），降水是导致土壤水分变化的一个重要因素。冬小麦为秋播夏收，整个生育期都处在当年雨季后和翌年雨季前，从4月中旬拔节期开始，大气降水虽然对土壤水分有所补给，但降水偏少，同时冬小麦进入拔节期后

耗水增加，到抽穗扬花期达到耗水高峰期，土壤含水量总体呈下降趋势，观测期内土壤含水量最低为14.2%。春玉米是当年4月下旬播种，9月上旬收获，拔节期至灌浆期一般处于当地的雨季，大气降水较多，同时这段时期土壤水分消耗较大，土壤含水量最低为16.2%，除特大降水外（7月22日为120 mm），土壤含水量变化波动不大，但总体呈下降趋势。其次，玉米根系深度大于小麦也是玉米地土壤含水量变异系数大于小麦地的影响因素之一。由图2b可知，小麦地土壤含水量变异系数在120 cm以下基本不变，玉米地变异系数在200 cm以下逐渐接近小麦地。

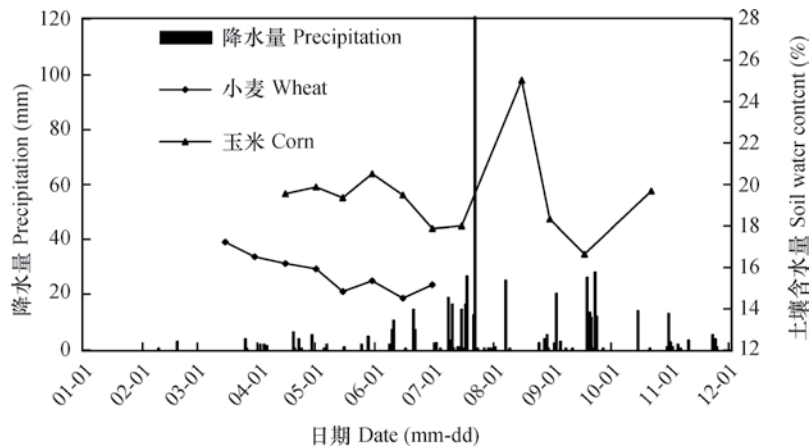


图3 作物生育期内农田土壤 (0 ~ 100 cm) 含水量与降水量变化情况 (2013年)

Fig. 3 Variation of precipitation and soil moisture in farmland soil (0 ~ 100 cm) during the crop growing season

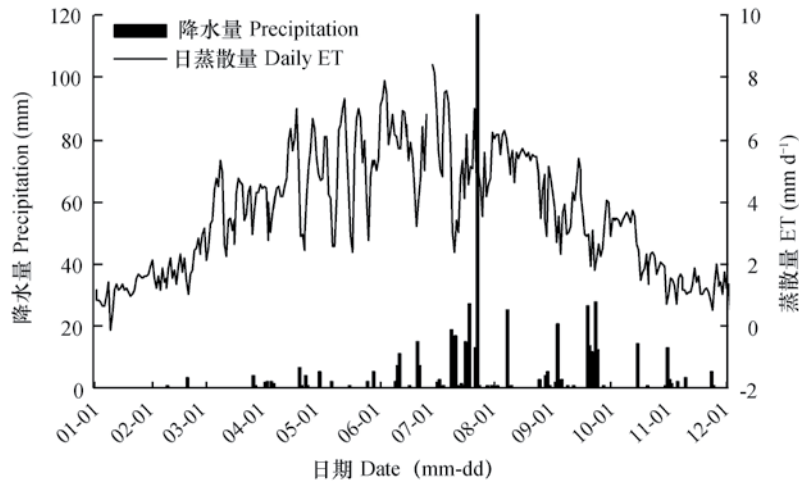


图4 小麦田蒸散量的日变化过程（2013年）

Fig. 4 Diurnal variation of evapotranspiration (ET) in wheat field in 2013

2.3 蒸散量与降水量的关系

图4为2013年全年小麦田蒸散的日变化的过程，从图中可以看出，年际内蒸散呈现先增加后下降的趋势，全年蒸散主要集中在4—10月份，在6月28日，日蒸散量最高，为 8.38 mm d⁻¹。3月份冬小麦返青后进入发育期，降水量逐渐增加，温度升高，日蒸散量逐渐增大，9月中下旬后，小麦刚刚播种，降水减少，温度降低，日蒸散量随之下落。另外，在日尺度下，降水对于蒸散量的影响较为显

著，降水过后，土壤含水量得到补充，相应地在降水后的日蒸散量曲线上也会出现一个峰值。

2.4 蒸散与影响因子的关系

蒸散的时动态变化特征可以从微观的角度理解蒸散的动态变化过程，是定量研究蒸散的基础^[20]。本研究对蒸散的时动态变化过程进行了观测（图5），观测期内，每月选取代表性的两种天气（日照分辨率 > 60%晴天， < 20%为阴雨天）对蒸散的日变化进行分析，结果发现时蒸散在遵循周期性变

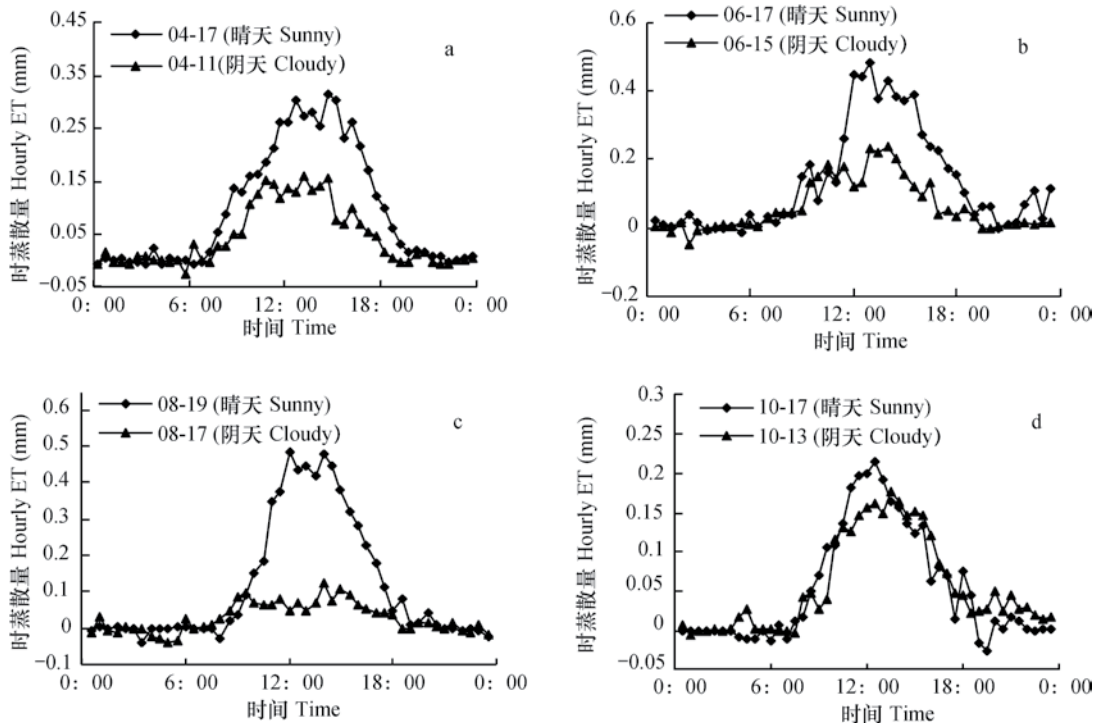


图5 不同天气条件下蒸散的动态变化规律

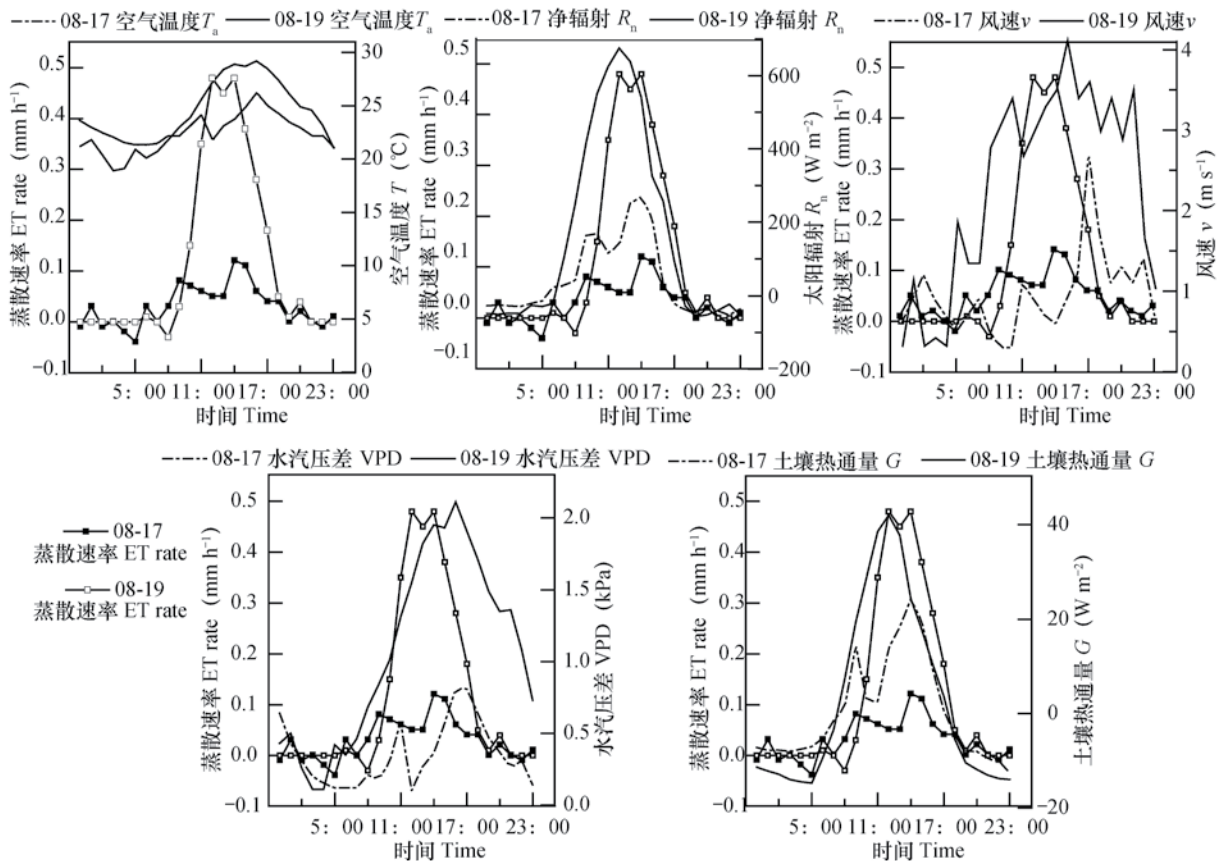
Fig. 5 Dynamics of evapotranspiration as affected by weather conditions.

化（日变化曲线总体呈单峰型）的同时随着天气条件的变化而变化。时蒸散的日变化波形均受到气象因子的扰动，但从总体而言，阴天受到的扰动更为显著。蒸散一般在6:00~7:30之间开始出现随后逐渐增加，晴天条件下蒸散的峰值一般出现在12:00~14:00之间，大多集中在12:30分左右，阴天条件下第一次出现蒸散的峰值较晴天提前约1~2 h，一般出现在10:30~11:30之间。蒸散达到峰值后会出现一个相对平稳的时期，一般持续2~5 h，阴天的持续时间相对较长。随后蒸散量开始降低，6月和8月20:00左右蒸散在零值附近变化，4月和10月蒸散出现零值较为提前，一般在19:00左右，夜间会出现负值，变动幅度小且平稳。此外，晴天蒸散的累积量均显著高于阴天，晴天和阴天的日均蒸散量分别为4.5、3.8 mm d⁻¹，相差0.7 mm d⁻¹。

蒸散量的变化受到气象因子和下垫面的共同影响，晴天的蒸散速率显著高于阴天，这是众多影响

因子共同作用的结果。图6为处于作物生长旺盛期的两种典型的代表性天气晴天（8月19日）与阴天（8月17日）各影响因子与蒸散速率日变化过程曲线，从图中可以看出，两种天气条件下净辐射和土壤热通量与蒸散速率的变化趋势一致，日变化具有相同的峰型，但是在时间上有所滞后，可能是由于清晨和傍晚能量在大气层和土壤层之间的流动过程需要时间。晴天条件下，大气温度、风速和水汽压差的变化较为平稳，相对蒸散速率的变化也较为平稳；阴天条件下大气温度变化较小，但风速和水汽压差波动较大，蒸散速率变化曲线受到的扰动较为明显。

晴天条件下，蒸散速率与各影响因子相关性均极显著，其相关程度为：土壤热通量 > 净辐射 > 水汽压差 > 大气温度 > 风速。阴天与晴天不同，阴天条件下蒸散速率与各影响因子的相关性为：净辐射 > 土壤热通量 > 大气温度 > 风速 > 水汽压差。可见无论在何种天气条件下蒸散速率与净辐射和土壤



注：T_a，空气温度；R_n，净辐射；v，风速；VPD，水汽压差；G，土壤热通量。下同 Note: T_a, Air temperature; R_n, Net radiation; v, Wind velocity; VPD, Vapor pressure deficit; G, Ground heat flux. The same below

图6 不同天气条件下蒸散与影响因子的关系

Fig. 6 Relationships between evapotranspiration and its affecting factors relative to weather conditions

热通量的相关性均最显著。阴天条件下，大气温度偏低，土壤热通量总体偏小，其他气象因子变动较大，同时这也是蒸散曲线变化波动性较大的直接原因。为了阐明影响因子对蒸散速率的复合影响，以蒸散速率为因变量，各影响因子为自变量，采用多元线性逐步回归分析中自后淘汰变量法，得到综合关系模型（表1）。

表1 不同天气条件下蒸散速率与气象因子的多元回归模型

Table 1 Multivariable regression models for relationships between evapotranspiration rate and meteorological factors relative to weather conditions

天气 Weather	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	显著水平 Sig.
晴天 Sunny	$ET=0.833R_a+0.513T_a-0.333v-0.486$	0.929	0.000
阴天 Cloudy	$ET=0.858R_a+0.219VPD-0.001$	0.754	0.000

差的影响，水汽压差反映的是大气温度与相对湿度的协同作用。两个方程没有反映出土壤热通量对蒸散的影响，净辐射为土壤热通量的能量来源，未在方程中有所体现的原因可能是由于土壤水分含量较高，土壤热通量变化不明显。

2.5 不同土壤水分条件下蒸散的日变化规律

选取研究期内农田处于水分胁迫条件下两个典型日（6月5日和10月9日）和无水分胁迫条件下的两个典型日（6月11日和10月15日）的时蒸散量进行对比（图7）。其中6月8日—6月10日降水20.2 mm，10月14日期间降水14.5 mm，使得表层土壤水分得到明显补充。6月5日和10月9日反映了农田表层土壤水分亏缺条件下农田蒸散的日变化过程，6月11日和10月15日反映了农田表层土壤水分供应相对充足条件下农田蒸散的日变化过程。在大气温

以上两个方程反映出，两种天气条件下净辐射均为控制蒸散速率最主要的因素。晴天条件下还受到大气温度和风速的影响，大气温度能够影响叶片气孔开放程度，进而增加叶片的生理活动，此外作物从土壤中吸收水分，要有足够大的根压才能够实现，温度对根压起着决定性的作用；而风速能够加速土壤蒸发作用。阴天条件下的蒸散还受到水汽压

度和风速等指标相近的条件下，比较四个典型日的蒸散变化过程，从图7可以看出农田水分亏缺和水分供应相对充足条件下蒸散的日变化存在一定的差异，主要表现为两点：第一，无水分胁迫条件下的时蒸散量高于水分胁迫条件下的时蒸散量。6月5日—6月11日正处于冬小麦的抽穗扬花期，耗水量较高，表层土壤水分得到补充后的蒸散量是水分胁迫条件下的0.7倍。10月9日—10月15日作物已经收割完成，此时的蒸散主要来源为土壤蒸发，表层土壤水分得到补充后的蒸散量是水分胁迫条件下的2.8倍；第二，无水分胁迫条件下的“蒸散高地”（Carlson等^[22]提出，晴天情况下当土壤水分不足时，农田正午前后出现持续几个小时的潜热通量保持平稳或呈下降趋势的变化，从蒸散通量日变化的过程来看，这种现象类似于“高原”，因而称之为

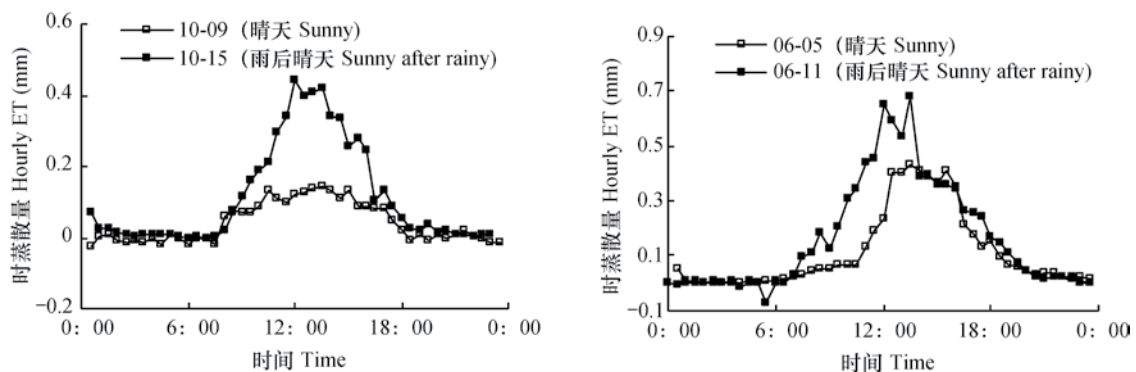


图7 不同土壤含水量条件下农田蒸散的日动态变化

Fig. 7 Diurnal variation of evapotranspiration in farmland as affected by soil water regime

“蒸散高地”)的持续时间较水分胁迫条件下的短,表现为蒸散量达到一个峰值后,蒸散曲线斜率突然变化,在两个拐点之间的蒸散量保持某个相对稳定的高值^[22],无水分胁迫日(6月11日和10月9日)的“蒸散高地”持续时间大约为2小时左右,水分胁迫日(6月5日和10月15日)“蒸散高地”持续时间分别为3小时和5小时。可见土壤含水量对农田蒸散有显著的影响。

3 讨论

研究区两种天气条件下净辐射和土壤热通量与蒸散速率的变化趋势一致,但在时间上有所滞后。阴天条件下作物受到气象因子的扰动较晴天更为显著,夜间蒸散量较小且相对稳定,这与汪秀敏等^[23]研究一致。同时夜间蒸散会出现负值,原因可能是由于该地区海拔较高,夜间降温显著,空气温度降低,相对湿度增大,在作物表面形成凝结形成露水,从而导致蒸散出现负值^[24-25]。

研究发现降水后日蒸散量会出现一个峰值,无水分亏缺条件下作物的蒸散速率较水分胁迫条件下高,说明土壤含水量是影响蒸散的一个重要因素。0~100 cm土壤含水量的变异系数较大,说明0~100 cm土壤水分受到大气降水、植被类型、土壤蒸发差异及蒸散等综合因素的影响较大。Maseyk^[26]和Grünzweig^[27]等指出土壤蒸发主要受到表层土壤含水量的影响,植物的蒸腾量受到植物根区土壤含水量控制。刘晶森等^[28]指出玉米的根系分布最深可达到230 cm,但是根系分布主要集中在0~80 cm左右,樊巍等^[29]指出小麦的根系分布范围为80 cm,结果均表明作物根系集中分布区的0~100 cm土体主要参与蒸散过程。而深层土壤含水量(100 cm以下)对蒸散的贡献率还需要在今后的研究中进一步探讨。

“蒸散高地”出现的原因很多,主要是土壤水分不足,同时还受到气象因素和植物内部限制因素的影响^[30]。土壤含水量较低条件下,作物根系的吸水速率低于蒸腾速率,导致气孔阻力上升从而造成了“蒸散高地”的形成及时间的持续。本研究中,无水分胁迫条件下“蒸散高地”的持续时间较水分胁迫条件下的时间短。在无水分胁迫条件下,正午时分,蒸散力较高,作物根系吸水速率无法满

足蒸发速率,会出现暂时的气孔阻力上升,从而出现了“蒸散高地”,但由于土壤水分相对充足,较短的时间内,随着大气和太阳辐射等因子的变化,土壤中的水分能够满足植物的蒸腾速率,这种状况就会消失,虽然蒸散速率下降,但蒸散量依然维持在相对较高的水平,而在水分胁迫条件下,“蒸散高地”的持续时间较长,蒸散量相对无水分胁迫下较低。

本研究中,作物收割后(10月9日、11日、13日、15日)蒸散的主要来源为土壤蒸发,刚刚出苗的小麦蒸腾对于蒸散的贡献率较低,仍然监测到类似“蒸散高地”的现象,这可能是由于雨后土壤表层水分得到暂时补充,正午时分,受气象因素及下垫面因素的影响,蒸散速率急剧上升,但地表水分很快达到较低水平,导致了蒸散速率的下降,然而水分亏缺条件的晴天蒸散一直维持在一个较低的水平,最高为0.17 mm h⁻¹(10月9日),同时土壤含水量已经相对较低,“蒸散高地”的持续时间较长。“蒸散高地”的出现是为了响应水分胁迫,避免损失过多的水分以便维持作物正常的生理生化过程,此时蒸散速率的降低意味着气孔阻力和冠层温度的上升。此外,Carlson等^[22]研究还指出土壤含水量是田间含水量的35%时,会出现“蒸散崩溃”(即作物会永久萎蔫),因此旱作农业区土壤含水量、冠层温度及气孔阻力之间如何相互影响的,还需要进一步研究探讨。

4 结论

降水对蒸散的影响较为显著,农田0~100 cm土层土壤水分主要参与蒸散过程。不同天气条件对蒸散的影响差异显著,晴天蒸散的累积量大于阴天,阴天蒸散开始的时间较晴天晚,且阴天条件下的蒸散更易受到扰动。不同天气条件下净辐射均为蒸散的主要影响因子,蒸散速率与净辐射变化趋势一致,但在时间上滞后于净辐射。在不同的土壤水分环境条件下,蒸散的过程和强度差异较大。水分胁迫条件下,全天蒸散量水平较低,作物为了更好地维持自身的生理生化过程,“蒸散高地”的持续时间较长;而水分充足条件下,全天蒸散水平较高,“蒸散高地”持续时间较短,维持较高的蒸散速率的时间较长。

参 考 文 献

- [1] 杨玉峥, 林青, 王松禄, 等. 大清河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究. 土壤学报, 2015, 52 (3): 547—557
Yang Y Z, Lin Q, Wang S L, et al. Transformation between soil and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 547—557
- [2] 买苗, 邱新法, 曾燕. 西部部分地区农田实际蒸散量分布特征. 中国农业气象, 2004, 25 (4): 28—32
Mai M, Qiu X F, Zeng Y. Distribution characters of actual evapotranspiration on crop fields in western China (In Chinese). Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25 (4): 28—32
- [3] 曹永强, 徐丹, 曹阳. 淮河流域地表干湿变化的时空分布特征. 土壤学报, 2015, 52 (5): 1031—1043
Cao Y Q, Xu D, Cao Y. Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (5): 1031—1043
- [4] Hu Z, Yu G, Zhou Y, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model. Agricultural & Forest Meteorology, 2009, 149 (9): 1410—1420
- [5] Wang K, Li Z, Cribb M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. Remote Sensing of Environment, 2006, 102 (3): 293—305
- [6] Yang J, Wang Y. Estimating evapotranspiration fraction by modeling two-dimensional space of NDVI/albedo and day-night land surface temperature difference: A comparative study. Advances in Water Resources, 2011, 34 (4): 512—518
- [7] Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. Sbdart: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79 (10): 2101—2114
- [8] Wilcox B, Seyfried M, Breshears D, et al. The water balance on rangelands//Stewart B A, Howell T A. Encyclopedia of water science. BocaRaton: CRC Press, 2003: 791—794
- [9] Mitchell P J, Veneklaas E, Lambers H, et al. Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalypt woodland in south-western Australia. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (1): 25—37
- [10] Moran M S, Scott R L, Keefer T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (1): 59—72
- [11] Cavanaugh M L, Kurc S A, Scott R L. Evapotranspiration partitioning in semiarid shrubland ecosystems: A two-site evaluation of soil moisture control on transpiration. Ecohydrology, 2011, 4 (5): 671—681
- [12] Staudt K, Serafimovich A, Siebicke L, et al. Vertical structure of evapotranspiration at a forest site (a case study). Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151 (6): 709—729
- [13] Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. Sensors, 2008, 8 (1): 70—117
- [14] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985 (2): 1—17
Li Y S, Han S F, Wang Z H. Soil water properties and its zonation in the Loess Plateau (In Chinese). Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, 1985 (2): 1—17
- [15] 翟治芬, 赵元忠, 景明, 等. 秸秆和地膜覆盖下春玉米农田蒸散特征研究. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2010, 41 (2): 209—215
Zhai Z F, Zhao Y Z, Jing M, et al. Evapotranspiration characteristics of spring maize under mulch film and staw cover (In Chinese). Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2010, 41 (2): 209—215
- [16] 甘卓亭, 刘文兆. 黄土塬区麦田蒸散特征. 应用生态学报, 2006, 17 (8): 1435—1438
Gan Z T, Liu W Z. Evapotranspiration of winter wheat field on Loess Plateau tableland (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (8): 1435—1438
- [17] 王安志, 刘建梅, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林显热和潜热通量测算的对比研究. 林业科学, 2003, 39 (6): 21—25
Wang A Z, Liu J M, Guan D X, et al. Comparison of the measurement and estimate of sensible and latent fluxes over broadleaved Korean Pine forest in Changbai Mountain (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39 (6): 21—25
- [18] 张强, 李宏宇, 赵建华. 垂直平流输送和土壤热储存补偿对黄土高原地表能量平衡的修正. 中国科学: 地球科

- 学, 2012, 42 (1): 42—51.
- Zhang Q, Li H Y, Zhao J H. Modification of the land surface energy balance relationship by introducing vertical sensible heat advection and soil heat storage over the Loess Plateau (In Chinese). *Science China Earth Sciences*, 2012, 42 (1): 42—51
- [19] 张智慧, 王维真, 马明国, 等. 黑河综合遥感联合试验涡动相关通量数据处理及产品分析. *遥感技术与应用*, 2010, 25 (6): 788—796
- Zhang Z H, Wang W Z, Ma M G, et al. Data processing and product analysis of eddy covariance flux data for water (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25 (6): 788—796
- [20] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106 (447): 85—100
- [21] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 2004, 34 (增II): 46—56
- Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. Energy balance closure at ChinaFlux site (In Chinese). *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 2005, 34 (Suppl II): 46—56
- [22] Carlson T N, Belles J E, Gillies R R. Transient water stress in a vegetation canopy: Simulations and measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35 (2): 175—186
- [23] 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. *气象与环境科学*, 2011, 34 (4): 14—18
- Wang X M, Shen S H, Han X M, et al. Study on evapotranspiration of the winter wheat measured by large-scale weighting lysimeter (In Chinese). *Meteorological and Environmental Sciences*, 2011, 34 (4): 14—18
- [24] 刘晨峰, 张志强, 孙阁, 等. 基于涡度相关法和树干液流法评价杨树人工林生态系统蒸发散及其环境响应. *植物生态学报*, 2009, 33 (4): 706—718
- Liu C F, Zhang Z Q, Sun G, et al. Quantifying evapotranspiration and biophysical regulations of a poplar plantation assessed by eddy covariance and sap-flow methods (In Chinese). *Journal of Plant Ecology*, 2009, 33 (4): 706—718
- [25] 刘晨峰, 张志强, 查同刚, 等. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响. *生态学报*, 2006, 26 (8): 2549—2557
- Liu C F, Zhang Z Q, Zha T G, et al. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evapotranspiration of a poplar plantation—an eddy-covariance-based study (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (8): 2549—2557
- [26] Maseyk K, Grünzweig J M, Rotenberg E, et al. Respiration acclimation contributes to high carbon-use efficiency in a seasonally dry pine forest. *Global Change Biology*, 2008, 14 (7): 1553—1567
- [27] Grünzweig J M, Hemming D, Maseyk K, et al. Water limitation to soil CO₂ efflux in a pine forest at the semiarid “timberline”. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, 114 (3): 1—14
- [28] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究. *中国生态农业学报*, 2009, 17 (3): 517—521
- Liu J M, An S Q, Liao R W, et al. Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17 (3): 517—521
- [29] 樊巍, 卢琦, 高喜荣. 果农复合系统根系分布格局与生长动态研究. *生态学报*, 1999, 19 (6): 860—863
- Fan W, Lu Q, Gao X R. Distribution pattern and growing dynamics of the roots system in apple-wheat intercropping system (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (6): 860—863
- [30] Homae M, Feddes R, Dirksen C. Simulation of root water uptake: II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Management*, 2002, 57 (2): 111—126

Evapotranspiration of Farmland on Loess Tableland and Its Major Influencing Factors

ZHANG Jing^{1, 2} WANG Li^{1, 2†} HAN Xue¹ ZHANG Linsen³

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 Evapotranspiration (ET) is a major part of water balance and energy balance, and is the main pathway of water consumption in farmland ecosystems. In Xianyang District of Shaanxi, the annual evapotranspiration accounts for about 90% of the annual precipitation. There are quite a few methods for evaluating or measuring evapotranspiration, such as eddy covariance, Bowen ratio and microclimate. Currently the eddy covariance method is more widely used than the other two because it can be used to measure evapotranspiration continuously on an ecosystem scale, and to measure simultaneously various meteorological factors and various components of energy, as well, in most of the eddy-covariance-related systems, which is conducive to analysis of relationships of various impact factors with components of energy balance. The present study is oriented to explore basic laws of water movement in soils different in land use, but under a similar plant growth environment and also to find a scientific method for estimating water consumption in soil. 【Method】 In order to explore laws of diurnal dynamics of evapotranspiration and its influencing factors in farmlands on loess tableland, with the help of some soil water and conventional micrometeorological observatory systems, the eddy covariance method was used to analyze characteristics of the evapotranspiration of the crops (winter wheat and spring corn) in the farmland studied during the growing season (from April to October) of 2013 and their influencing factors. 【Result】 Closure analysis of energy balance in the studied area using the eddy covariance method shows that the regression line was 0.54 in gradient and the determination coefficient R^2 0.80, both being in the ranges reported in most papers in the literature. Soil moisture is an important factor affecting evapotranspiration, and precipitation is another. After a rainfall event, daily evapotranspiration would increase to a certain extent. Soil water content in the 0 ~ 100 cm soil layer varied drastically with CV being quite high, while crop roots were distributed mainly in the 0 ~ 80 cm soil layer, so the soil water in the 0 ~ 100 cm soil layer was closely involved in evaporation process. Cumulative evapotranspiration was higher in a sunny day than in a cloudy day, while evapotranspiration started later in a cloudy day than in a sunny day. The daily evapotranspiration was 4.5 mm d^{-1} on average in the sunny day and 3.8 mm d^{-1} in a cloudy day, with a difference being 0.7 mm d^{-1} . Moreover, evapotranspiration in a cloudy day was more susceptible to the disturbance of meteorological factors. Net radiation was the main factor affecting evapotranspiration rate, regardless of weather conditions, and the two varied in a similar trend, but the latter lagged somewhat behind the former temporally in variation because it takes some time for energy to flow. The regression equation for analysis of relationships between evapotranspiration rate and its influencing factors in a sunny day does like: $ET = 0.833R_n + 0.513T_a - 0.333v - 0.486$; and that in a cloudy day does like: $ET = 0.858R_n + 0.219VPD - 0.001$. Evapotranspiration also varied drastically in process and intensity as affected by soil water regime. 【Conclusion】 The influence

of weather on evapotranspiration is also obvious and varies sharply with weather conditions. Cumulative evapotranspiration is higher in a sunny day than in a cloudy day, while evapotranspiration starts later in a cloudy day than in a sunny day. And the evapotranspiration under a cloudy weather was more susceptible to the disturbance of meteorological factors. Net radiation is the main factor influencing evapotranspiration rate under all weather conditions. In fields under water stress, the daily evapotranspiration is relatively low because the crops try to maintain their physiological and biochemical processes, thus forming an extensive “evapotranspiration plateau”, while in fields sufficient in soil water, the daily evapotranspiration is high, and the “evapotranspiration plateau” lasts short in duration, and evapotranspiration rate stays high for a long time.

Key words Farmland; Energy balance; Soil water content; Eddy covariance; Evapotranspiration

(责任编辑: 卢 萍)