中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征

张振宇，刘丽娟，李小玉

引用本文:
张振宇, 刘丽娟, 李小玉. 干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1195–1204.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190151

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用修订的Shuttleworth–Wallace模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究

Estimation of evapotranspiration in maize fields with ground mulching with plastic film in semi–arid areas using revised Shuttleworth–Wallace model

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 674–683 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151184

HIMS模型蒸散发模块的改进及在海河流域的应用

Improvement of HIMS evapotranspiration module and its application in Haihe River Basin

中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1339–1347 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150252

黑河中游绿洲区玉米冠层阻抗的环境响应及模拟

Response of maize canopy to environmental factors in the middle reach oasis of Heihe River Basin

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 247–257 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160772

分时段修正双源模型在西北干旱区玉米蒸散量模拟中的应用

Simulation of maize evapotranspiration at different growth stages using revised dual–layered model in arid Northwest China

中国生态农业学报. 2017, 25(5): 634–646 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160839

华北平原典型冬小麦农田生态系统 能量平衡与闭合研究

Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报. 2017, 25(10): 1413–1422 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170150

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 8 月 第 27 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2019, 27(8): 1195−1204

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190151

张振宇, 刘丽娟, 李小玉. 干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1195−1204
ZHANG Z Y, LIU L J, LI X Y. Evapotranspiration characteristics of mulched drip-irrigated sunflower farmland in arid region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1195−1204

干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征*

张振宇[1,2,3], 刘丽娟[1,2], 李小玉[1,2**]

(1. 浙江农林大学林业与生物技术学院 杭州 311300; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 膜下滴灌是中国西北干旱区农业的新兴节水灌溉模式, 定量分析膜下滴灌农田蒸散发特征并对比分析其与普通灌溉农田蒸散发的差异, 对认识和优化干旱区节水滴灌技术有重要意义。本文以新疆天山北坡三工河流域绿洲向日葵农田为研究对象, 基于 2016 年作物生育期观测数据, 利用波文比-能量平衡法、地理探测器及通径分析方法对作物不同生育期农田蒸散发特征进行了定量分析, 并与普通灌溉农田进行了比较。结果表明: 1)膜下滴灌农田日均蒸散量在作物开花期最高, 成熟期次之, 苗期最小; 随着作物的生长发育, 净辐射通量与日蒸散发的相关性逐渐降低; 日均蒸散量在各阶段的变化特征与普通灌溉相同, 但每个阶段的日均蒸散量均小于普通灌溉农田。2)膜下滴灌农田日内净辐射通量在开花期最高, 成熟期次之, 苗期最小; 日内湍流通量方面, 苗期潜热通量与显热通量相当, 开花期潜热通量明显高于显热通量, 而成熟期潜热通量小于显热通量; 而普通灌溉农田在 3 个时期的潜热通量均高于显热通量。3)温度、湿度与风速是影响膜下滴灌向日葵农田蒸散发的主导因子, 湿度的下限决定了蒸散发下限, 风速与气温的上限决定了蒸散发的上限; 风向对蒸散发的作用不明显。膜下滴灌向日葵农田具有独特蒸散发特征, 与普通灌溉农田相比, 全生育期节水量超过 300 mm。

关键词: 干旱区; 向日葵农田; 膜下滴灌; 蒸散发; 波文比能量平衡; 通径分析

中图分类号: S641.1

文章编号: 2096-6237(2019)08-1195-10 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Evapotranspiration characteristics of mulched drip-irrigated sunflower farmland in arid region*

ZHANG Zhenyu[1,2,3], LIU Lijuan[1,2], LI Xiaoyu[1,2**]

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Mulched drip-irrigation is a burgeoning water-saving irrigation mode in the arid region of Northwest China. It is of great significance to understand and optimize mulched drip irrigation in arid region by analyzing the characteristics of evapotranspiration in mulched drip-irrigated farmland and comparing it with ordinarily irrigated farmland. Using the oasis sunflower farmland in the Sangong River basin on the northern slope of the Tianshan Mountain in Xinjiang as the study area,

* 国家自然科学基金项目(31470708, U1503182, 41271202)资助
** 通信作者: 李小玉, 主要研究方向为景观生态学。E-mail: lixy76@163.com
张振宇, 主要研究方向为干旱区农业水文环境。E-mail: zhangzhenyu162@mails.ucas.ac.cn
收稿日期: 2019-02-28 接受日期: 2019-04-23
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31470708, U1503182 and 41271202).
** Corresponding author, E-mail: lixy76@163.com
Received Feb. 28, 2019; accepted Apr. 23, 2019

the farmland evapotranspiration characteristics during the sunflower growth period in 2016 were analyzed using the Bowen ratio-energy balance method, geographical detector, and path analysis method. Furthermore, these characteristics were compared to those of ordinarily irrigated farmlands. The results showed that: 1) for mulched drip-irrigated farmland, the average daily evapotranspiration was highest at the flowering stage, followed by the maturity stage, and lowest in the seedling stage. With the growth of crops, the correlation between net radiative flux and daily evapotranspiration gradually decreased. The change trends of average daily evapotranspiration were the same as those of ordinarily irrigated farmland, whereas the average daily evapotranspiration of mulched drip-irrigated farmland was lower than that of ordinarily irrigated farmland at each stage. 2) Regarding the intraday flux in mulched drip-irrigated farmland, the net radiative flux peak was highest at the flowering stage, followed by that at the mature stage, and the minimum appeared at the seedling stage. In terms of turbulent flux, the latent heat flux was equivalent to the sensible heat flux at the seedling stage. Post the flowering period, the latent heat flux was significantly higher than the sensible heat flux, and this characteristic was the opposite at the mature stage. For the ordinarily irrigated farmland, the latent heat flux was higher than the sensible heat flux in all three crop growth stages. 3) The relationship between evapotranspiration and meteorological factors calculated by path analysis showed that temperature, humidity, and wind speed were the dominant factors influencing evapotranspiration. The lower limit of humidity determined the minimum evapotranspiration. The upper limit of wind speed and temperature determined the maximum evapotranspiration. The influence of wind direction was not significant on evapotranspiration. Sunflower farmland using mulched drip-irrigation has unique evapotranspiration features compared with ordinarily irrigated farmland, the amount of water saving exceeds 300 mm during the entire growth period.

Keywords: Arid region; Sunflower farmland; Mulched drip-irrigation; Evapotranspiration; Bowen ratio energy balance method; Path analysis

蒸散发作为陆表能量循环及水循环的重要一环，对全球水资源的分配及气候变化产生了巨大作用[1-3]。干旱区占据着全球陆地面积 26%以上区域[4]，是全球生态系统的重要组成部分。近年来，干旱区蒸散发研究也逐渐成为热点。干旱区由于水资源的相对匮乏，农业灌溉多采用节水灌溉，而节水灌溉势必会改变农田的蒸散发过程，进一步对局地生态环境造成影响。因此研究干旱区节水灌溉农田的蒸散发过程对理解干旱区水循环过程和优化水资源配置有着重要意义[5-6]。

目前对地表蒸散发的测量方法主要有：涡度相关法[7]、波文比能量平衡法[8]、大孔径激光闪烁仪法等[9-10]。波文比能量平衡法因其操作简单、精度较高等特点在田块等小尺度蒸散发测量上得到了广泛应用[11-13]。近年来国际上利用波文比能量平衡法对农田蒸散发进行了大量的研究[14-15]，该法在国内也得到了较多应用。沈彦俊等[16]利用波文比能量平衡法对太行山平原冬小麦(*Triticum aestivum*)农田蒸散进行了测量，分析了冬小麦农田能量平衡和能量分配的变化特征及影响因素。吴锦奎等[17]采用波文比能量平衡法对干旱区内陆河低湿草地的蒸散进行了有效估算，阐明了低湿草地蒸散特征。戚培同等[18]利用波文比系统对青藏高原草甸生态系统蒸散发进行了测定并与其他蒸散发测量方法进行了比较，结果表明波文比观测结果与其他方法测量结果相关性良好。李玉霖等[19]采用波文比能量平衡法分析了科尔沁沙地玉米(*Zea mays*)农田蒸散发特征，结果表明波文比能量平衡法可以较准确地估算玉米农田晴天时的蒸散量。张永强等[20]利用波文比系统对华北平原冬小麦农田蒸散发特征进行了讨论并对比分析了不同作物通量特征随时间的变化，结果表明净辐射通量主要用于作物潜热消耗。以上研究均基于波文比能量平衡法对不同气候条件下的农田蒸散发特征进行分析，部分研究还讨论了蒸散发与气象因子间的关系，这些应用充分肯定了波文比能量平衡法在地表蒸散研究中的有效性。

然而针对膜下滴灌农田的蒸散发研究目前仍较少，如 Ding 等[21]对中国黄土高原地区不同覆膜处理下农田蒸散发进行了探究，结果表明膜下滴灌有效减少了土壤蒸发并极大地促进了作物蒸腾。林涛等[22]探究了膜下滴灌频率对南疆棉(*Gossypium* spp.)田蒸散发及水分利用效率的影响，认为高频灌溉能降低农田无效耗水，提升水分利用效率。Shukla 等[23]利用蒸渗仪对不同季节美国佛罗里达膜下滴灌甜椒(*Capsicum annuum* var. *grossum*)农田蒸散发进行建模与比较，结果表明春季农田蒸散总量显著高于秋季。已有的研究更多地侧重于作物不同生长阶段蒸散发的变化特征，但是对膜下滴灌农田的日内通量变化特征分析不够深入；同时，针对气象因子对蒸散发的影响分析没有考虑气象因子间是否存在交互作用[24]。因此本文以新疆三工河流域膜下滴灌农田为研究对象，利用波文比系统对农田蒸散发特征

及通量变化进行研究，并基于通径分析讨论气象因子的交互作用对蒸散发的影响，为认识干旱区节水灌溉农田蒸散发特征和农田水资源的合理配置提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

以位于新疆天山北坡的三工河流域绿洲为研究区，区域气候类型为温带大陆性气候，年平均气温为 6.9 ℃，年日照时数大于 2 600 h，日照充足；春夏多雨，自南向北降水量递减，多年平均降水 234.5 mm。境内分布有三工河、四工河和水磨河 3 条河流，水资源主要源于天山冰川及积雪融水。观测站位于流域绿洲农田内部(44.36°N，87.87°E，海拔 457 m)，作物种植类型为向日葵(*Helianthus annuus*)，作物长势均匀，是流域内主要经济作物之一，农田灌溉方式为膜下滴灌。

1.2　数据来源

主要数据来源于观测点架设的波文比自动观测系统(型号为 HTWS07)，观测项目包括风速、风向、温度、湿度、净辐射通量、土壤热通量、降水量等，主要观测仪器信息见表 1。观测时段为 2016 年 4—10 月，相关研究表明[25]，新疆北部向日葵生育期为 4—9 月，观测时段能够覆盖作物生育期，观测期内降水量变化见图 1。

表 1　主要观测仪器信息

Table 1　Summary of instruments used for observation

观测项目 Observation project	安装高度 Installation height (m)	型号 Model
风速/风向 Wind speed / wind direction	3.0	05103-6
温度/湿度 Temperature / humidity	1.5/2.0	111N&222N
净辐射通量 Net radiant flux	2.0	Q*7.1
土壤热通量 Soil heat flux	−0.1	HFP01
降水量 Precipitation	2.0	7852M

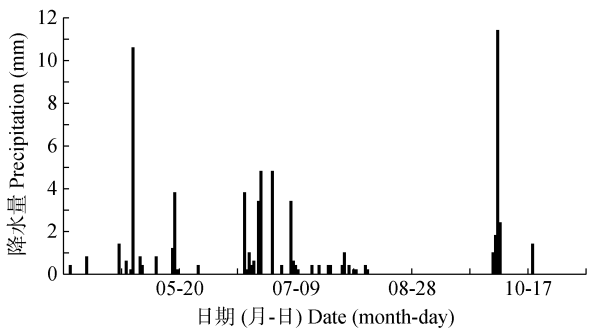

图 1　2016 年观测期内站点降水量变化

Fig. 1　Change of precipitation during the observation period at observation station

1.3　波文比能量平衡法

波文比能量平衡法基于波文比(b)[26]和能量平衡方程，大量研究证明该法是一种有效且精度较高的蒸散量测定方法[27-29]：

$$R=\lambda E+H+G \tag{1}$$

式中：R 为净辐射通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)，λE 为潜热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)，λ 为水的汽化潜热系数($\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$)，E 为蒸散量($\mathrm{kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}}$)，$H$ 为显热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)，G 为土壤热通量($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)。

$$b=\frac{H}{\lambda E}=\frac{P_{\mathrm{a}}C_{\mathrm{p}}K_{\mathrm{h}}\dfrac{\Delta\theta}{\Delta H}}{\lambda P_{\mathrm{a}}C_{\mathrm{p}}K_{\mathrm{w}}\dfrac{\Delta q}{\Delta H}} \tag{2}$$

式中：P_{a} 为空气密度($\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$)；C_{p} 为空气定压比热($\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot ℃^{-1}}$)；$\lambda$ 为水的汽化潜热系数($\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$)；K_{h} 为热量的湍流交换系数；K_{w} 为水汽的湍流交换系数，根据相似理论，实际计算中通常认为 $K_{\mathrm{h}}=K_{\mathrm{w}}$[30]；$\Delta\theta$ 为观测高度间的位温差；Δq 为观测高度间的湿度差；ΔH 为观测高度差(m)。

由上面两式可得到瞬时蒸散量(E)：

$$E=\frac{R-G}{\lambda(1+b)} \tag{3}$$

由于单个时间段内部各瞬时波文比不同，在计算某个时间段的蒸散量时，使用平均波文比 $\bar{b}$ 进行相应计算[31]，如果在某一时间段内进行了 m 次波文比观测，则该时间段的蒸散量($\mathrm{ET_h}$)为：

$$\bar{b}=\frac{\sum_{i=1}^{m}b_i}{m} \tag{4}$$

$$\mathrm{ET_h}=\frac{R-G}{\lambda\left(1+\bar{b}\right)}\times h \tag{5}$$

式中：b_i 为第 i 次测量的瞬时波文比，h 为波文比观测时间长度。本研究中使用的波文比自动观测系统记录间隔时间段长度为 1 h，因此通过逐小时蒸散量累加得到日蒸散量。另外对波文比系统观测异常值，使用该值对应前后两天正常数据求平均进行处理。

1.4　地理探测器

地理探测器是一种基于空间分异性，探究因变量背后驱动因子的一种统计学方法[32-34]。地理探测器主要有 4 个部分组成：因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互作用探测器。因子探测器用于表达某种因子对因变量的解释力，交互作用探测器用来识别两种因子共同作用时是否会增加对因变量的解释力，抑或是两种因子相互独立。传统的地理探

测器主要探测空间数据因子对因变量的影响及互作用，长时间序列站点观测数据由于时间的重现性使其成为“类空间数据”(图 2)，因此本研究通过地理探测器相关模块探究不同气象因子对蒸散发的解释力及气象因子间是否存在交互作用。地理探测器软件及操作说明来源于 www.geodetector.org。

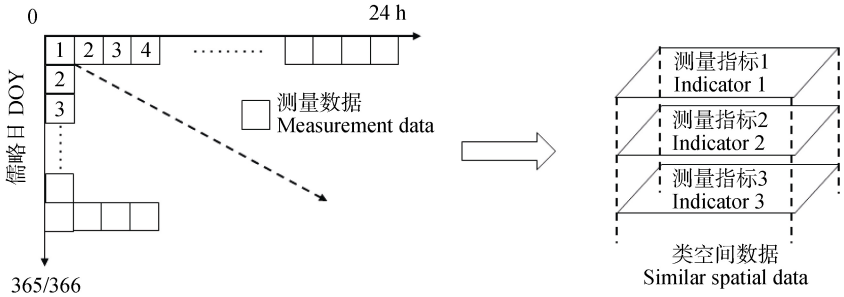

图 2 “类空间数据”示意图(横轴代表日内时间变化，以小时计，0:00—24:00；纵轴代表观测日数，以 d 计，0—365/366 儒略日；每个格代表某一天某时段的测量数据，每个测量数据包含多个测量指标，从而构成了多层测量数据)

Fig. 2 Schematic of similar spatial data (the horizontal axis represents the time variation in the day, from 0:00 to 24:00. The vertical axis represents the number of observation days, from 0 to 365/366 days of year (DOY). Each grid represents measurement data of a certain period of time in a certain day, each measurement data contains multiple measurement metrics constituting multi-layer measurement data)

1.5 通径分析

气象因子的变化可能会直接导致地表蒸散发的变化，同时多种气象因子间也可能互相产生作用，从而间接的影响蒸散发。因此传统的相关分析无法满足复杂系统的变量分析需求，而通径分析则是一种满足复杂系统的多元统计方法，它通过定量描述多重自变量对因变量的直接、间接作用，从而精确反映变量对因变量的影响程度。

设对因变量 y 有 n 个自变量，任意 2 个自变量的相关系数为 r_{ij}，则自变量 x_i 对因变量 y 的影响程度 I 为:

$$I = P_{iy} + \sum_{j \neq i}^{n} r_{ij} \times P_{jy} \tag{6}$$

式中: P_{jy} 为自变量 x_i 对因变量 y 的直接通径系数，P_{jy} 为自变量 x_i 外的其他自变量 x_j 对因变量 y 的通径系数。

2 结果与分析

2.1 向日葵生育期蒸散量及各通量变化

向日葵生育期内农田日均蒸散量($\overline{\mathrm{ET}}$)在开花期达最大(2.77 mm·d^{-1})，成熟期次之(1.79 mm·d^{-1})，苗期最小(1.68 mm·d^{-1})(图 3)。净辐射通量作为蒸散发的主要能量来源，其变化趋势与日蒸散量相同，开花期>成熟期>苗期($\overline{R}$: 337.79 W·m^{-2}>266.25 W·m^{-2}>236.37 W·m^{-2})。日均土壤热通量($\overline{G}$)的变化趋势与前两者不同，开花期最大(34.38 W·m^{-2})，苗期次之(27.85 W·m^{-2})，成熟期最小(19.02 W·m^{-2})(图 3)；成熟期向日葵花及叶片会严重遮蔽地表，这是造成成熟期土壤热通量较小的主要原因。与此同时，灌溉对土壤热通量的影响也较显著，观测期内土壤热通量出现负值的日期与灌溉日期一一对应，说明充足的灌溉水阻碍了土壤温度的升高，降低了土壤内部的热交换强度。日均显热通量($\overline{H}$)的变化趋势与前 3 者均不同，成熟期最大(134.36 W·m^{-2})，开花期次之(131.16 W·m^{-2})，苗期最小(95.50 W·m^{-2})，由于显热通量主要用于加热空气，新疆地区夏季主要在 6—8 月[35]，这是气温最高的时期，开花期与成熟期均主要处于夏季，并且成熟期向日葵由于叶片密度达到最大，呼吸作用最高，进一步的加热了空气，造成开花期和成熟期农田显热通量较大。不同时期农田日蒸散量与净辐射通量的拟合结果(图 4)表明，随着作物的不断发育，日蒸散量与净辐射通量的相关性逐渐降低(苗期 R^2=0.73>开花期 R^2=0.58>成熟期 R^2=0.45)，这说明随着作物生长，净辐射通量不仅作为蒸散发的来源，且越来越多的净辐射能量开始转化为其他能量，其中有相当部分转化为作物自身的有机质能量[36]，尤其是向日葵这种喜阳作物；同时随着作物叶片密度的不断增大，至成熟期，农田的主要能量耗散开始变成作物叶片与大气间的显热交换，从而进一步降低了净辐射通量在蒸散发中的作用[37]。

2.2 生育期不同阶段日内辐射通量和热通量变化

将作物 3 个生育期相同时刻通量分别进行平均处理，得到各时期农田一天内不同时刻通量变化(图 5)。通量变化形态上，3 个生育时期内各通量的日内变化相同，均呈现出明显的“单峰”特征。除土壤热通量外，各时期其他通量 0:00—9:00 均小于 0，自 9:00 起至 21:00 通量大于 0，21:00—24:00 通量小于 0；日内土壤热

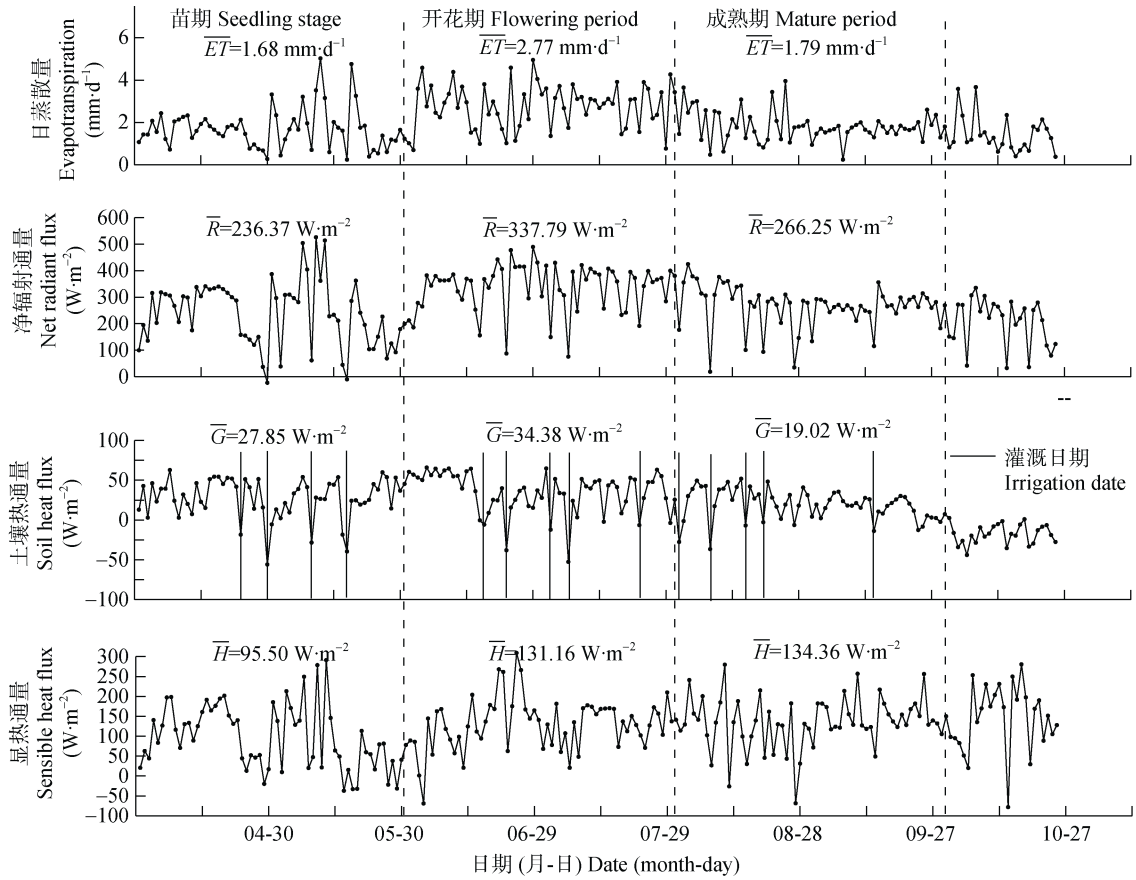

图 3　膜下滴灌向日葵农田不同生育期日蒸散量及各通量变化

Fig. 3　Changes of daily evapotranspiration and fluxes of sunflower field at different growth stages under mulched drip-irrigation

$\overline{ET}$：日均蒸散量; $\overline{R}$：日均净辐射通量; $\overline{G}$：日均土壤热通量; $\overline{H}$：日均显热通量。$\overline{ET}$: average daily evapotranspiration; $\overline{R}$: average daily net radiation flux; $\overline{G}$: average daily soil heat flux; $\overline{H}$: average daily sensible heat flux.

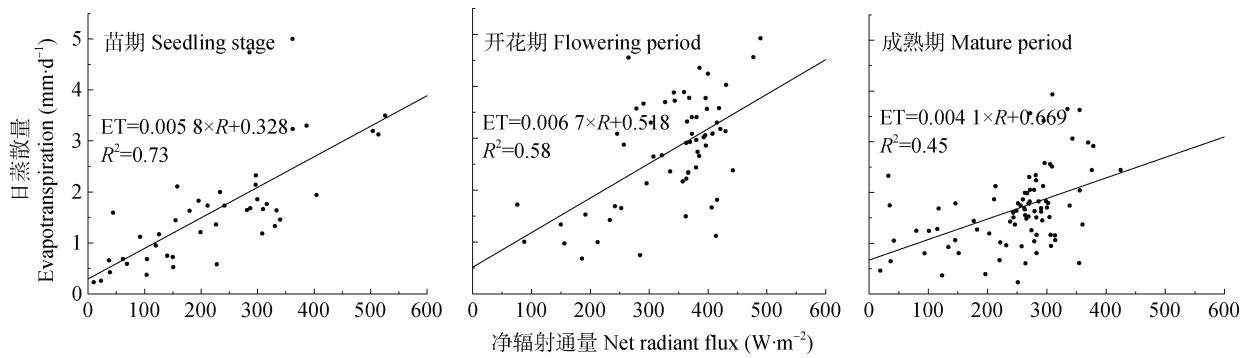

图 4　膜下滴灌向日葵农田不同生育期日蒸散量(ET)与净辐射通量(*R*)拟合结果

Fig. 4　Fitting results of daily evapotranspiration (ET) and net radiant flux (*R*) of sunflower field at different growth stages under mulched drip-irrigation

通量从负值上升到正值的时间要明显晚于其他通量，在作物苗期和开花期，从 10:00 开始转正，21:00 由正转负，作物成熟期，土壤热通量从 11:00 才开始由负转正，从 21:00 后开始由正转负，相较于其他通量，土壤热通量的变化存在“时滞效应”，时滞 1~2 h。作物不同生育期同种通量的变化上，从各通量峰值来看，净辐射通量(*R*)在开花期最大(470.38 W·m^{-2})，成熟期次之(435.95 W·m^{-2})，苗期最小(383.96 W·m^{-2})；潜热通量日内峰值变化和净辐射通量一致，开花期(207.63 W·m^{-2})>成熟期(147.31 W·m^{-2})>苗期(145.59 W·m^{-2})；显热通量(*H*)在成熟期峰值最大(209.15 W.m^{-2})，开花期次之(167.89 W·m^{-2})，苗期最低(144.42 W·m^{-2})；土壤热通量(*G*)日内峰值在开花期最大(101.25 W·m^{-2})，苗期次之(101.21 W·m^{-2})，成熟期最低(83.12 W·m^{-2})。

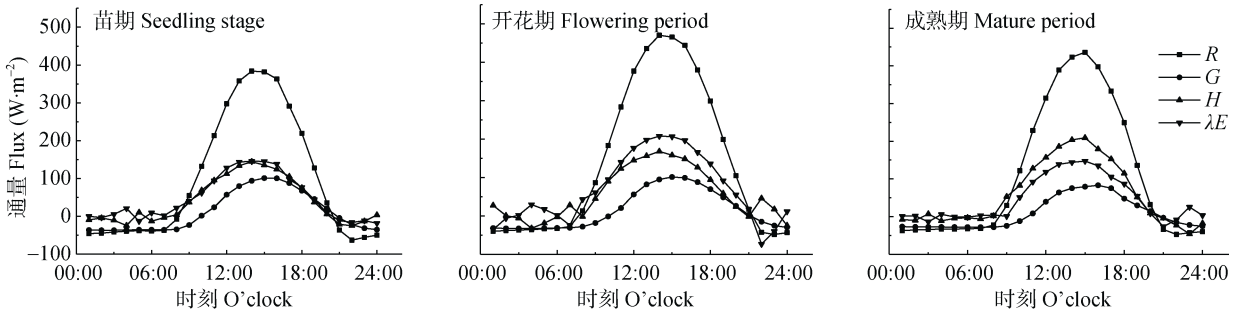

图 5 膜下滴灌向日葵农田不同生育期日内净辐射通量(***R***)、土壤热通量(***G***)、显热通量(***H***)及潜热通量(***λE***)变化

Fig. 5 Intraday changes of net radiation flux (*R*), soil heat flux (*G*), soil sensible heat flux (*H*) and soil latent heat flux (*λE*) of sunflower field at different growth stages under mulched drip-irrigation

湍流通量(潜热通量 λE 和显热通量 H)上，苗期作物日内潜热通量与显热通量相当，开花期日内白天潜热通量显著高于显热通量[38]，成熟期湍流通量则呈现相反特征，日内白天显热通量显著高于潜热通量，成长期作物蒸腾作用相对较强，蒸腾的吸热效应使得显热通量降低，从而使得潜热通量高于显热通量[39]；进入成熟期后，农田灌溉次数逐渐减少，作物开始处于干旱胁迫期，净辐射通量分配以显热为主[40]。

2.3 气象因子对蒸散发的贡献

选取每小时风速、风向、最低温度、最低湿度、最高温度、最高湿度作为自变量，以每小时蒸散量作为因变量进行探测分析。因子探测结果表明(表 2)，各气象因子对蒸散发的解释程度整体超过 50%，其中湿度因子对蒸散发的解释程度最高(最高湿度: 0.72；最低湿度: 0.64)，温度因子解释程度次之(最高温度: 0.54；最低温度: 0.56)，风速因子最低。各因子间相互作用结果显示，任意两两不同气象因子的相互作用均大于两者中最大 q 值，这说明任意两两因子相互作用对蒸散发的解释程度有促进作用，从而表明这 6 个气象因子对蒸散发产生直接作用的同时，通过相互作用间接地影响蒸散发。各因子对蒸散发影响差异结果显示，风速对蒸散发的影响与其他因子均不一致，这说明风速可能是影响其他因子的重要因素，风向对蒸散发的影响与最低湿度、最高湿度不同，与温度因子一致，这说明风向对温度和湿度因子的作用可能相反。

根据交互作用探测器结果(表 3)，选取风速、风向等 6 个气象因子数据作为自变量，每小时蒸散量作为因变量，进行通径分析。结果表明(表 4)，在变量对蒸散发的直接作用上，风速、最高温度和最高湿度对蒸散发起到正向作用，而风向、最低温度和最低湿度对蒸散发起到了负向作用，同时在作用程度上，气温和湿度影响占据绝对主导。间接作用方面，温度与湿度因子受其他变量的影响较大，其中其他变量对最低温度、最低湿度起正向作用，对最高温度、最高湿度起反作用。总贡献方面，风向、最低湿度和最高湿度对蒸散发起反作用，风速、最低温度和最高温度对蒸散发起正向作用，总贡献强度上，最低温度(0.24)>最高温度(0.21)>风速(0.19)=最低湿度(|–0.19|)>最高湿度(|–0.17|)>风向(|–0.04|)，温度、湿度和风速是影响蒸散发的主要因子，同时温度和风速决定了蒸散发的上限，湿度决定了蒸散发的下限。

3 讨论

3.1 膜下滴灌农田日通量变化成因

膜下滴灌向日葵农田蒸散量与通量变化上，日蒸散量与净辐射通量变化一致，开花期最大，成熟期次之，苗期最小，净辐射通量是蒸散发的主要能量来源[41-42]；土壤热通量上表现为开花期最大，苗期次之，成熟期最小。开花期所处的夏季是太阳辐射最强烈的时期，气温也达到全年最高水平(图 6)，作物处于快速发育阶段，呼吸作用开始加强，同时，覆膜良好的保温性使土壤温度维持在较高水平[43]，多种因素使得开花期土壤热通量达到了最大；成熟期由于向日葵叶片密度达到最大，阻碍了太阳辐射能量进入土壤，使得土壤热通量最小。显热通量苗期最小，开花期次之，成熟期最大。苗期作物叶片未发育完全，较弱的呼吸作用不足以产生较大的显热通量，进入成熟期后作物叶片发育完全，叶片密度达到最大，强烈的呼吸作用使得显热通量达到最大值。

3.2 膜下滴灌与普通灌溉模式下农田蒸散研究结果的对比

考虑到研究对象(膜下滴灌向日葵农田)的特殊性，研究统计了国内外普通灌溉向日葵农田的蒸散研究结果(表 5)。结果表明，不同地区的普通滴灌向日葵农田在各阶段的蒸散量变化特征均与本研究相同：苗期蒸散量最小，成熟期次之，成长期最大。同

表 2　各气象因子对膜下滴灌向日葵田蒸散发的解释贡献

Table 2　Interpreting contribution of various meteorological factors to evapotranspiration of sunflower field under mulched drip-irrigation

	风速 Wind speed	风向 Wind direction	最低温度 Minimum temperature	最低湿度 Minimum humidity	最高温度 Maximum temperature	最高湿度 Maximum humidity
q	0.49	0.58	0.56	0.64	0.54	0.72

q 值代表自变量 x 解释了 q×100%的因变量 y。q represents the explanatory power of independent variable x to dependent variable y which explains the dependent variable y of q × 100%.

表 3　各气象因子间交互作用对膜下滴灌向日葵田蒸散发的解释贡献及各因子对蒸散发的影响差异

Table 3　Interpreting contributions of interaction and impact difference of various meteorological factors to evapotranspiration of sunflower field under mulched drip-irrigation

	风速 Wind speed	风向 Wind direction	最低温度 Minimum temperature	最低湿度 Minimum humidity	最高温度 Maximum temperature	最高湿度 Maximum humidity
风速 Wind speed	0.49					
风向 Wind direction	0.99 (Y)	0.58				
最低温度 Minimum temperature	0.99 (Y)	0.99 (N)	0.56			
最低湿度 Minimum humidity	1.00 (Y)	0.99 (Y)	1.00 (Y)	0.64		
最高温度 Maximum temperature	0.99 (Y)	1.00 (N)	0.99 (N)	0.99 (N)	0.54	
最高湿度 Maximum humidity	1.00 (Y)	0.99 (Y)	1.00 (Y)	0.99 (Y)	0.99 (Y)	0.72

Y 表示两个因子对因变量的影响具有明显差异，N 表示两个因子对因变量的影响没有明显差异。“Y” means obvious differences in effects between two factors, “N” means no significant difference in effects between two factors.

表 4　逐小时尺度气象因子与膜下滴灌向日葵田蒸散量通径分析结果

Table 4　Path analysis between weather factor and evapotranspiration of sunflower field at hour scale under mulched drip-irrigation

气象因子 Meteorological factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect							总贡献 Total contribution
		风速 Wind speed	风向 Wind direction	最低气温 Minimum temperature	最低湿度 Minimum humidity	最高气温 Maximum temperature	最高湿度 Maximum humidity	总和 Total	
风速 Wind speed	0.168 1		−0.007 9	−0.612 7	0.779 6	0.539 9	−0.677 1	0.021 9	0.19
风向 Wind direction	−0.112 3	0.011 8		−0.186 5	−0.065 0	0.227 3	0.084 6	0.072 3	−0.04
最低温度 Minimum temperature	−2.663 7	0.038 7	−0.007 9		1.364 4	2.841 6	−1.333 0	2.903 7	0.24
最低湿度 Minimum humidity	−2.165 7	−0.060 5	−0.003 4	1.678 1		−1.733 4	2.094 8	1.975 7	−0.19
最高温度 Maximum temperature	2.841 6	0.031 9	−0.009 0	−2.663 7	1.321 1		−1.311 9	−2.631 6	0.21
最高湿度 Maximum humidity	2.115 9	−0.053 8	−0.004 5	1.678 1	−2.144 0	−1.761 8		−2.285 9	−0.17

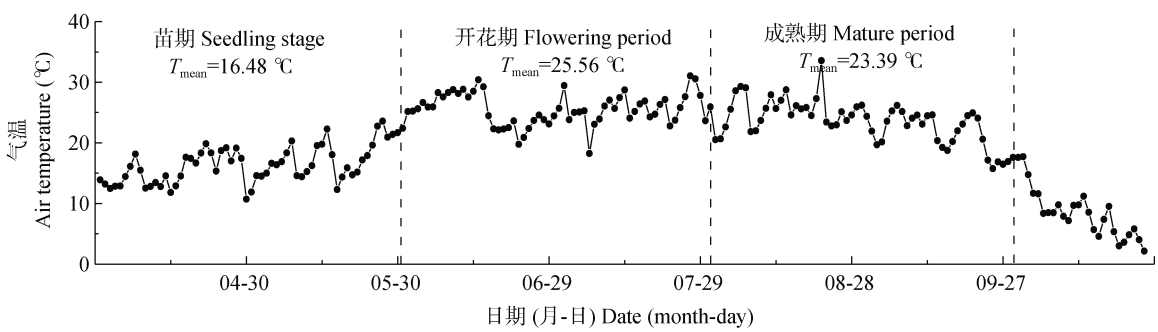

图 6　膜下滴灌向日葵生育期内农田日均温变化及各生育期的平均气温

Fig. 6　Daily average temperature and each stage’s average temperature of sunflower field during growth period under mulched drip-irrigation

表 5 部分普通灌溉向日葵农田蒸散研究结果

Table 5 Results of some evapotranspiration studies in ordinary irrigated sunflower fields

研究区 Research area	阶段 Stage	日均蒸散量 Daily average evapotranspiration ($mm \cdot d^{-1}$)	文献 Literature
Karnal, India	苗期 Seedling stage	2.22	[44]
	开花期 Flowering period	3.93	
	成熟期 Mature period	2.73	
Albacete, Spain	苗期 Seedling stage	1.80	[45]
	开花期 Flowering period	6.45	
	成熟期 Mature period	4.40	
河套灌区 Hetao irrigation area	苗期 Seedling stage	—	[46]
	开花期 Flowering period	3.85	
	成熟期 Mature period	3.25	

时，上述各阶段农田蒸散量与本研究比较结果显示：3 个阶段下普通灌溉向日葵农田日均蒸散量均高于本研究结果，苗期略高 0.1~0.6 $mm \cdot d^{-1}$，差异较小；成熟期约高 0.9 $mm \cdot d^{-1}$，差异次之；成长期高约 1.0~3.7 $mm \cdot d^{-1}$，差异最大，膜下滴灌的主要节水阶段在作物成长期。由于用作对比的研究涵盖了干旱区与湿润地区，因此结果从侧面表明膜下滴灌农田能够极大地减少蒸散量，达到节水的目的，在整个作物周期中，节水量可达 300 mm。

3.3 不同灌溉模式下农田日内通量变化比较

膜下滴灌向日葵农田不同生育期日内通量变化方面，除土壤热通量外，其他通量从 9:00 开始由负转正，至 21:00 由正转负，土壤热通量相较于其他通量在日内变化上有明显的时滞，由负转正时间滞后 1~2 h，深层土壤向土壤表层的热传递过程是导致土壤热通量相较于其他通量在日变化上出现时滞的主要原因[47]。潜热通量和显热通量占据了净辐射通量的主要部分，土壤热通量在不同时期日内峰值变化不大。潜热通量与显热通量在苗期基本相等，开花期由于作物蒸腾作用加强使得潜热通量显著高于显热通量，作物进入成熟期后，干旱胁迫程度增强使得显热通量明显高于潜热通量。研究区膜下滴灌农田日内通量变化结果与普通灌溉农田研究结果有所不同，郭家选等[48]和袁再健等[49]分别于 2001 年和 2005 年在华北平原进行了普通灌溉模式下冬小麦田的蒸散试验及通量测定，结果表明，无论在作物的苗期、开花期还是成熟期，冬小麦田日内潜热通量均高于显热通量，通量峰值差为 50~400 $W \cdot m^{-2}$，差异明显。本研究中，除作物成长期外，作物苗期和成熟期日内潜热通量与显热通量变化特征与普通灌溉农田均存在较大差异：作物苗期期间，膜下滴灌农田日内潜热通量与显热通量相当，两者在日内变化上呈现交替上升和交叉现象，进入作物成熟期后，膜下滴灌农田日内显热通量则高于潜热通量(图 5)，通量峰值差约 50 $W \cdot m^{-2}$，该结果与普通灌溉农田相反，表明膜下滴灌在作物成熟期对潜热通量存在限制作用，从而阻止了此阶段水分的不必要蒸发。

4 结论

研究利用 2016 年膜下滴灌向日葵农田观测数据，探讨了作物不同阶段农田蒸散发及地表通量的变化特征，并比较了其与普通灌溉农田蒸散结果上的差异，同时，基于地理探测器和通径分析方法实现了各气象因子对农田蒸散发的直接和间接作用定量分析，得出结论如下：

1)不同阶段膜下滴灌向日葵农田蒸散发变化特征与普通灌溉农田一致，开花期日均蒸散量最大，成熟期次之，苗期最小；同时，普通灌溉农田在各阶段的日均蒸散水平均高于膜下滴灌农田。

2)日内通量变化方面，成长期膜下滴灌农田各通量变化特征与普通灌溉农田一致；苗期日内显热通量与潜热通量相当，成熟期日内显热通量均显著高于潜热通量，该结果与普通灌溉农田存在较大差异。

3)各气象因子对蒸散发的作用方面，温度、湿度与风速是影响干旱区膜下滴灌农田蒸散的主要因素，风向的作用不明显。

参考文献 References

[1] 赵文智，吉喜斌，刘鹄. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散研究展望[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 463–470
ZHAO W Z, JI X B, LIU H. Progresses in evapotranspiration research and prospect in desert oasis evapotranspiration re-

search[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 463–470

[2] 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
ZHANG Q, ZHANG Z X, WEN X M, et al. Comparisons of observational methods of land surface evapotranspiration and their influence factors[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(5): 538–547

[3] STOCKER T F, RAIBLE C C. Climate change: Water cycle shifts gear[J]. Nature, 2005, 434(7035): 830–833

[4] 贾永莹. 世界干旱地区概貌[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 121–126
JIA Y Y. General situation of dryland areas in the world[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995, 13(1): 121–126

[5] PAUWELS V R N, SAMSON R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1/2): 1–24

[6] 袁国富，罗毅，邵明安，等. 塔里木河下游荒漠河岸林蒸散规律及其关键控制机制[J]. 中国科学：地球科学, 2015, 45(5): 695–706
YUAN G F, LUO Y, SHAO M A, et al. Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(5): 695–706

[7] WILLIAMS D G, CABLE W, HULTINE K, et al. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(3/4): 241–258

[8] 马玲，赵平，饶兴权，等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 88–96
MA L, ZHAO P, RAO X Q, et al. Main determination methods of tree transpiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(1): 88–96

[9] DE BRUIN H A R, VAN DEN HURK B J J M, KOHSIEK W. The scintillation method tested over a dry vineyard area[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1995, 76(1/2): 25–40

[10] MCANENEY K J, GREEN A E, ASTILL M S. Large-aperture scintillometry: The homogeneous case[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(3/4): 149–162

[11] MALEK E, BINGHAM G E. Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 1993, 146(2/3): 167–178

[12] LI F Q, LYONS T J. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(11): 1644–1654

[13] 杨兴国，杨启国，柯晓新，等. 旱作春小麦蒸散量测算方法的比较[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 651–656
YANG X G, YANG Q G, KE X X, et al. Comparison of methods for estimating evapotranspiration in rainfed spring wheat field[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 651–656

[14] CARGNEL M D, ORCHANSKY A L, BREVEDAN R E, et al. Evapotranspiration and energy balance measurements over a soybean field in the semiarid southwestern region of Buenos Aires Province (Argentina)[J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2017, 86: 181–189

[15] ZÁBRANSKÝ P, PIVEC J, BRANT V, et al. The values of crop coefficients and bowen ratio of field crops in areas with insufficient precipitation in central Europe[J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64(2): 253–262

[16] 沈彦俊，刘昌明，莫兴国，等. 麦田能量平衡及潜热分配特征分析[J]. 中国生态农业学报, 1997, 5(1): 12–17
SHEN Y J, LIU C M, MO X G, et al. Energy balance and latent heat flux partition in wheat field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1997, 5(1): 12–17

[17] 吴锦奎，丁永建，王根绪，等. 干旱区内陆河流域中游低湿草地蒸散特征[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 18–21
WU J K, DING Y J, WANG G X, et al. Characteristics of low-lying wet-grassland evapotranspiration in the middle reach of the inland river basin of Northwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(4): 18–21

[18] 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
QI P T, GU S, TANG Y H, et al. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 202–211

[19] 李玉霖，张铜会，崔建垣. 科尔沁沙地农田玉米耗水规律研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 354–358
LI Y L, ZHANG T H, CUI J Y. Water consumption law of maize in Horqin sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 354–358

[20] 张永强，沈彦俊，刘昌明，等. 华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定[J]. 地理学报, 2002, 57(3): 333–342
ZHANG Y Q, SHEN Y J, LIU C M, et al. Measurement and analysis of water, heat and CO_2 flux from a farmland in the North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 333–342

[21] DING D Y, ZHAO Y, FENG H, et al. Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 246–257

[22] 林涛，郭仁松，徐海江，等. 滴灌频率对南疆棉田水分蒸散特征及 WUE 的影响[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(7): 1224–1229
LIN T, GUO R S, XU H J, et al. The impact of irrigation frequency on the characters of evapotranspiration and WUE which use plastic film under drip irrigation in southern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(7): 1224–1229

[23] SHUKLA S, SHRESTHA N K. Evapotranspiration for plastic-mulched production system for gradually cooling and warming seasons: Measurements and modeling[J]. Irrigation Science, 2015, 33(5): 387–397

[24] 马金龙，刘丽娟，李小玉，等. 干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散过程[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 974–981
MA J L, LIU L J, LI X Y, et al. Evapotranspiration process of cotton field under mulched drip irrigation of oasis in arid region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 974–981

[25] 马盾，刘忠山，周小云，等. 新疆北部向日葵病虫草害发生及综合防治[J]. 作物杂志, 2011, (2): 94–97
MA D, LIU Z S, ZHOU X Y, et al. New trends of disease, pest and weeds on sunflower in northern Xinjiang and comprehensive control measures[J]. Crops, 2011, (2): 94–97

[26] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. Physical Review, 1926,

27(6): 779–787

[27] GRACE J, LLOYD J, MCINTYRE J, et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia[J]. Global Change Biology, 1995, 1(1): 1–12

[28] CELLIER P, BRUNET Y. Flux-gradient relationships above tall plant canopies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58(1/2): 93–117

[29] RANA G, KATERJI N. Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: The sweet sorghum case[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 54(3/4): 187–200

[30] 冯起, 司建华, 席海洋. 荒漠绿洲水热过程与生态恢复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009
FENG Q, SI J H, XI H Y. Hydrothermal Process and Ecological Recovery Technology in the Desert Oasis[M]. Beijing: Science Press, 2009

[31] 朱劲伟. 波文比在研究森林蒸发散中的作用及其处理[J]. 林业科学, 1980, 16(1): 58–61
ZHU J W. The role and process of Bowen ratio in studying the evapotranspiration of forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1980, 16(1): 58–61

[32] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 24(1): 107–127

[33] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250–256

[34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134

[35] 黄小涛, 罗格平. 天山北坡低山丘陵干草原生长季蒸散特征[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1198–1206
HUANG X T, LUO G P. Evapotranspiration characteristics of the growing season in hilly dry steppe, the northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(6): 1198–1206

[36] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 黑河中游间作灌溉农田的能量平衡[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 443–449
WU J K, DING Y J, SHEN Y P, et al. Energy balance in the irrigational intercropping field in the middle reaches of Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 443–449

[37] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245–1249
WU J B, GUAN D X, ZHANG M, et al. Comparison of eddy covariance and BREB methods in determining forest evapotranspiration — Case study on broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1245–1249

[38] SÁNCHEZ J M, LÓPEZ-URREA R, RUBIO E, et al. Assessing crop coefficients of sunflower and canola using two-source energy balance and thermal radiometry[J]. Agricultural Water Management, 2014, 137: 23–29

[39] 吴海龙, 余新晓, 张艳, 等. 异质下垫面显热通量动态变化及对环境因子的响应[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 160–165
WU H L, YU X X, ZHANG Y, et al. Dynamic changes in sensible heat flux of heterogeneous surface and response to environment factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 160–165

[40] 贺有为, 王秋兵, 温学发, 等. 季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3069–3081
HE Y W, WANG Q B, WEN X F, et al. The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3069–3081

[41] 李阳, 景元书, 李根, 等. 低丘红壤区集水区和田块尺度农田能量平衡特征比较[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2393–2403
LI Y, JING Y S, LI G, et al. Comparison of the energy balance characteristics of cropland on catchment and field scales in low hilly region of red soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2393–2403

[42] 司建华, 冯起, 张艳武, 等. 荒漠-绿洲芦苇地蒸散量及能量平衡特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 160–168
SI J H, FENG Q, ZHANG Y W, et al. Research on evapotranspiration and energy budget of *Phragmites australis* stand in oasis[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(2): 160–168

[43] 王秀康, 李占斌, 邢英英. 覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 884–897
WANG X K, LI Z B, XING Y Y. Effects of mulching and fertilization on maize yield, soil temperature and nitrate-N distribution[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 884–897

[44] 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

[45] LÓPEZ-URREA R, MONTORO A, TROUT T J. Consumptive water use and crop coefficients of irrigated sunflower[J]. Irrigation Science, 2014, 32(2): 99–109

[46] 黄凌旭. 利用作物冠层温度估算农田蒸散量[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018
HUANG L X. Estimation of evapotranspiration using the crop canopy temperature[D]. Beijing: Chinese Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018

[47] 王旭, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 260–265
WANG X, ZHOU G Y, ZHANG D Q, et al. Soil heat fluxes of mixed coniferous and broad-leaf forest in the south subtropics in China[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 260–265

[48] 郭家选, 梅旭荣, 林琪, 等. 冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水、热通量日变化[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 130–137
GUO J X, MEI X R, LIN Q, et al. Diurnal variation of water and heat flux under transient water stress in a winter wheat field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 130–137

[49] 袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 41–48
YUAN Z J, SHEN Y J, CHU Y M, et al. Characteristics and simulation of heat and CO_2 fluxes over a typical cropland during the winter wheat growing in the North China Plain[J]. Environmental Science, 2010, 31(1): 41–48