



基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究

杨天一, 王 军, 张红梅, 李基, 张玉翠, 沈彦俊

Evapotranspiration of typical agroecosystems in the North China Plain based on single crop coefficient method

YANG Tianyi, WANG Jun, ZHANG Hongmei, LI Rongji, ZHANG Yucui, and SHEN Yanjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210336>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北地区设施茄子蒸散量估算模型及作物系数确定

Evapotranspiration model and crop coefficient of greenhouse eggplant in North China

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1819–1827

华北平原农田生态系统服务评价及灌溉效益分析

Evaluation of agro-ecosystem services and analysis of irrigation benefit in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1360–1370

华北平原农田生态系统碳过程与环境效应研究

Carbon processes and environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(10): 1515–1520

华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究

Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(10): 1501–1514

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(中英文). 2017, 25(10): 1413–1422

华北平原种植结构变化对农业需水的影响

Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 8–16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210336

杨天一, 王军, 张红梅, 李榕基, 张玉翠, 沈彦俊. 基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 356-366

YANG T Y, WANG J, ZHANG H M, LI R J, ZHANG Y C, SHEN Y J. Evapotranspiration of typical agroecosystems in the North China Plain based on single crop coefficient method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 356-366

基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究*

杨天一^{1,2}, 王 军³, 张红梅⁴, 李榕基^{1,2}, 张玉翠^{1**}, 沈彦俊^{1,2**}

- (1. 中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学现代农业科学学院 北京 100049; 3. 河北师范大学汇华学院 石家庄 050091; 4. 河北省供水总站 沧州 062152)

摘 要: 作物系数法可以简单、准确地反映作物不同生育期内实际蒸散量变化规律及特点, 但针对华北平原地区不同类型农业生态系统, 尤其是梨园种植区生育期内作物系数的变化及蒸散规律研究并不充分。本研究针对华北平原典型的冬小麦-夏玉米农田生态系统、棉田生态系统和梨园生态系统, 基于FAO56手册推荐的单作物系数法计算和验证了2016—2017年各农业生态系统初始生长期至生育末期的实际蒸散量, 分析了不同生育阶段蒸散变化规律。不同作物初始生长期、快速发育期、生育中期和生育末期作物系数, 冬小麦分别为0.60、0.88、1.07和0.72, 夏玉米分别为0.46、0.76、1.01和0.80, 棉花分别为0.34、0.71、1.07和0.78, 梨树分别为0.81、0.91、1.02和0.96。冬小麦-夏玉米、棉田和梨园的单作物系数法计算的蒸散量分别为694.3 mm、472.2 mm和825.7 mm。3类作物生育期内实际蒸散量计算值比实测值分别低1.0%、低4.9%和高8.1%, 变化趋势一致, 相关系数为0.80~0.91 ($P < 0.01$)。粮、棉和果树生态系统是华北平原农业生态系统的典型代表, 本研究不仅明确了各类作物尤其是研究比较缺乏的梨树的不同生育期内的作物系数, 同时利用涡度相关实测结果进行了同时空尺度的验证, 明确了单作物系数法在华北平原不同农业生态系统的适用性, 为制定合理灌溉计划、实现作物耗水精准管理提供科学依据。

关键词: 作物系数; 作物实际蒸散量; 参考作物蒸散量; 典型农业生态系统; 华北平原

中图分类号: S181

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Evapotranspiration of typical agroecosystems in the North China Plain based on single crop coefficient method*

YANG Tianyi^{1,2}, WANG Jun³, ZHANG Hongmei⁴, LI Rongji^{1,2}, ZHANG Yucui^{1**}, SHEN Yanjun^{1,2**}

- (1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huihua College, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091, China; 4. Hebei General Water Supply Station, Cangzhou 062152, China)

* 国家自然科学基金项目(41930865, 31870422, 41877169)、中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目(153E13KYSB20170010)、河北省自然科学基金项目(D2019503028)和河北省自然科学基金创新研究群体项目(D2021503001)资助

** 通信作者: 张玉翠, 主要从事生态水文研究, E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn; 沈彦俊, 主要从事农业水文与水资源研究, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
杨天一, 主要从事农田蒸散研究。E-mail: yangtianyi@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2021-06-01 接受日期: 2021-10-27

* The study was supported by the National Natural Scientific Foundation of China (41930865, 31870422, 41877169), the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (153E13KYSB20170010), the Natural Scientific Foundation of Hebei Province (D2019503028), and the Project for Innovative Research Group of the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021503001).

** Corresponding authors: ZHANG Yucui, E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn; SHEN Yanjun, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
Received Jun. 1, 2021; accepted Oct. 27, 2021

Abstract: The crop coefficient method recommended by FAO56 is a method to calculate the actual evapotranspiration of crops, which can simply and accurately reflect the evapotranspiration patterns and characteristics of different agroecosystems during different growth stages. Although the crop coefficient method is widely used, there are still some problems in applying this method in the North China Plain. Research on a single agroecosystem of winter wheat-summer maize has been conducted for a long time. However, there is a lack of systematic and comprehensive research on the evapotranspiration patterns of various typical agroecosystems in the North China Plain through the single crop coefficient method. Therefore, it is difficult to provide quantitative theoretical support for water consumption management and planting structure adjustment. Furthermore, the variation in crop coefficients for the typical pear orchard agroecosystem, the main fruit and the most important economic crop in the North China Plain, is urgently needed. In this study, the crop coefficients and evapotranspiration patterns of different growth stages of irrigated crops in the typical agroecosystems of winter wheat-summer maize farmland, cotton field, and pear orchard in the North China Plain were examined and verified from 2016 to 2017. The entire growth stage was divided into initial, developing, mid, and end stages based on the crop growth stages and physiological characteristics. According to the single crop coefficient method recorded in FAO56 manual, the average crop coefficients of the initial, developing, mid, and end stages of different crops were 0.60, 0.88, 1.07, and 0.72 for winter wheat; 0.46, 0.76, 1.01, and 0.80 for summer maize; 0.34, 0.71, 1.07, and 0.78 for cotton; 0.81, 0.91, 1.02, and 0.96 for pear trees, respectively; while the calculated actual evapotranspiration was 694.3 mm, 472.2 mm, and 825.7 mm for the above three ecosystems, respectively. Evapotranspiration measured by the eddy covariance systems was 701.4 mm, 496.5 mm, and 763.5 mm for winter wheat-summer maize, cotton field, and pear orchard agroecosystems, respectively. Both the calculated and measured actual evapotranspiration values of the four crops showed a single-peak change from the initial to the end stages, with the same trend. The correlation coefficients between the calculated and measured evapotranspiration for all three agroecosystems were greater than 0.8. The calculated actual evapotranspiration values compared to the measured values during the growth stage of winter wheat-summer maize, cotton, and pear orchard agroecosystems were 1.0% lower, 4.9% lower, and 8.1% higher, respectively. This study not only provided the crop coefficients of wheat, maize, and cotton but also filled the gap in the research on crop coefficient of pear trees in this region. It is particularly important that this study used the observed evapotranspiration by the eddy correlation system to verify the calculated evapotranspiration using the single crop coefficient method at the same spatial and temporal scale, which shows the applicability of the calculated crop coefficients in the region. The applicability of the single-crop coefficient method in different agroecosystems in the North China Plain was clarified. This research provides a scientific basis for making reasonable irrigation plans and achieving precise management of crop water consumption.

Keywords: Crop coefficient; Actual crop evapotranspiration; Reference crop evapotranspiration; Typical agroecosystem; North China Plain

华北平原是我国重要的粮食生产基地, 该区域农业用水占地下水总开采量的70%以上^[1]。地下水资源长期超采导致地下水位不断下降, 严重影响该区域农业可持续发展^[2]。近年来, 该地区低需水量作物大幅减少, 蔬菜水果等高需水量作物种植面积大幅增加, 种植结构发生了巨大变化^[3], 研究该地区典型种植作物的蒸散量特点及变化规律对减少农业用水和减缓地下水位下降具有重要意义。蒸散是植株蒸腾与土壤蒸发之和, 是连接地表能量平衡和水循环的重要纽带^[4-5]。作物蒸散是农业用水主要消耗项, 降低蒸散量是减少农业用水的关键。常用的蒸散观测方法有蒸渗仪法、基于能量平衡的波文比法、涡度相关法等, 而作物系数法是联合国粮农组织提出的基于Penman-Monteith公式, 通过参考作物蒸散量(ET_0)及作物系数(K_c)计算实际蒸散量的方法^[6], 其中作物系数受到植物类型及种类、种植地区、温度、相对湿度、风速和日照时长和土壤水分等气象因素的影响^[7], 计算不同气候及灌溉条件下的作物蒸散, 需要根据生长环境对作物系数进行调整^[8]。

作物系数法能反映影响作物蒸散的气候及生理因素, 计算简单、实用性强, 在国内外不同地区广泛应用^[9]。Kang等^[10]在西北地区结合10年的蒸渗仪数据, 对冬小麦(*Triticum aestivum*)及玉米(*Zea mays*)的作物系数进行研究, 发现在生育中期两种作物的作物系数最大。Wang等^[11]在关中平原地区结合涡度相关系统实测数据确定了该地区夏玉米生育期内作物系数。Gong等^[12]研究了温室内充分灌溉及亏缺灌溉两种条件下种植番茄(*Lycopersicon esculentum*)的作物系数, 并提出了考虑土壤水分胁迫及冠层覆盖度的作物系数模型。在西北灌溉葡萄(*Vitis vinifera*)的研究^[13]表明, 叶面积指数是预测作物系数较好的指标。在华北平原地区, 针对作物系数及其影响因素也有着一定的研究。Xu等^[14]结合称重式蒸渗仪的研究表明, 玉米冠层大小会影响作物系数, 冠层大的玉米作物系数较大, 水分利用率较高。一项针对秸秆覆盖的滴灌条件下种植的冬小麦的研究^[15]表明, 在相同灌溉条件下秸秆覆盖与非覆盖条件并没有明显改变作物系数。宿梅双等^[16]结合称重

式蒸渗仪,对喷灌条件下的冬小麦及玉米需水量及作物系数进行了测定,发现两种作物的作物系数均大于 FAO56 建议值,但变化趋势相同。韩淑敏等^[17]结合大型称重式蒸渗仪,分析冬小麦-夏玉米的作物系数,发现不同年型下冬小麦作物系数差异不明显,夏玉米在丰水年作物系数偏高。张喜英等^[18]发现在华北平原地区秸秆覆盖条件下的夏玉米整个生育期内作物系数平均值在 1 左右。李艳梅等^[19]借助水量平衡法及 Penman-Monteith 修正模型,发现芹菜 (*Apium graveolens*) 的作物系数呈移动平均函数变化。苗文芳等^[20]结合茎流计及微型蒸渗仪确定了枣树 (*Ziziphus jujuba*) 的作物系数,发现作物系数与冠层覆盖度之间呈明显的正相关关系。

作物系数法虽然有着广泛应用,但其在华北平原的研究仍存在以下的问题: 1) 针对冬小麦-夏玉米单一农业生态系统的研究较多,并且研究时间距今较长,缺少通过单作物系数法对华北平原地区多种典型农业生态系统蒸散规律进行系统综合的研究,难以对整个区域的耗水管理和种植结构调整提供量化的理论支持; 2) 梨 (*Pyrus sorotina*) 是华北平原地区的主产水果及重要的经济作物,缺少针对梨园典型农业生态系统作物系数变化规律的研究; 3) 在本区域对作物系数法计算进行验证的研究也多采用称重式蒸渗仪及水平衡法,缺少涡度相关系统实测数据在生态系统尺度对作物系数法计算值进行精度验证的研究。本研究结合田间试验及涡度相关观测方法,研究并验证华北平原地区冬小麦-夏玉米农田、棉田、梨园典型农业生态系统,灌溉作物不同生育期作物系数及实际蒸散量的变化规律,为制定合理的灌溉

计划,研究不同种植结构下蒸散规律差异,分析种植结构演变对区域耗水的影响,为实现作物精准耗水管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2016—2017 年针对不同生态系统分别在代表冬小麦-夏玉米轮作系统的中国科学院栾城农业生态系统试验站(河北省栾城区)、代表棉田生态系统的河北省农林科学院旱作节水农业试验站(河北省深州市)和代表梨园生态系统的赵县试验基地(河北省赵县)开展同步试验观测,各试验站点及涡度相关系统监测安装点地理坐标详细信息如表 1 所示。

3 处试验地均位于半湿润季风气候区,其中冬小麦生长季为 2016 年 10 月 6 日—2017 年 6 月 14 日,播种品种为‘科农 199’,行间距 25 cm; 夏玉米生长季为 2017 年 6 月 15 日—9 月 30 日,播种品质‘郑单 958’,行间距 50 cm。棉花生长季为 2017 年 5 月 1 日—10 月 25 日,种植品种为‘冀棉 958’,行距 80 cm。梨树初始生长期到生育末期为 2017 年 3 月 1 日—10 月 31 日,树龄 25 年。冬小麦-夏玉米、棉田和梨树均为地面灌溉,土壤质地均以壤土为主。冬小麦-夏玉米、棉田、梨园 3 处试验点在涡度相关系统通量贡献区内均地势平坦且下垫面单一。根据作物生长形态,不同生态系统各生育期划分如表 2 所示。

1.2 数据采集及计算方法

1.2.1 气象数据与观测数据获取

2016—2017 年不同农业生态系统作物生育期内的气象数据和通量数据由 3 处试验点安装的涡度相关系统获得,如图 1 所示。其中冬小麦-夏玉米试验

表 1 不同试验站点(农业生态系统)种植作物和土壤性质
Table 1 Detail information of plants and soil property in different experimental sites (agroecosystems)

试验站点 Experiment site	地理坐标 Geographical coordinate	作物类型 Crop type	土壤性质 Soil property				
			田间持水量 Field capacity (%)	凋萎系数 Wilting point of soil moisture (%)	碱解氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)
栾城 Luancheng	37°53'N, 114°41'E	冬小麦-夏玉米 Winter wheat-summer maize	34	12	60~80	15~20	150~170
深州 Shenzhou	37°47'N, 114°55'E	棉花 Cotton	28	11	80	21	180
赵县 Zhaoxian	37°54'N, 115°42'E	梨树 Pear	35	13	70	19	257

表 2 不同作物生育阶段(月-日)划分
Table 2 Division of growth stages (month-day) of crops of different agroecosystems

作物 Crop	初始生长期 Initial stage	快速发育期 Developing stage	生育中期 Mid stage	生育末期 End stage
冬小麦 Winter wheat	10-06—03-17	03-18—05-02	05-03—05-28	05-29—06-12
夏玉米 Summer maize	06-13—07-19	07-20—08-31	09-01—09-18	09-19—09-27
棉花 Cotton	05-01—06-15	06-16—07-15	07-16—09-30	10-01—10-25
梨树 Pear	03-01—03-31	04-01—06-30	07-01—08-31	09-01—10-31

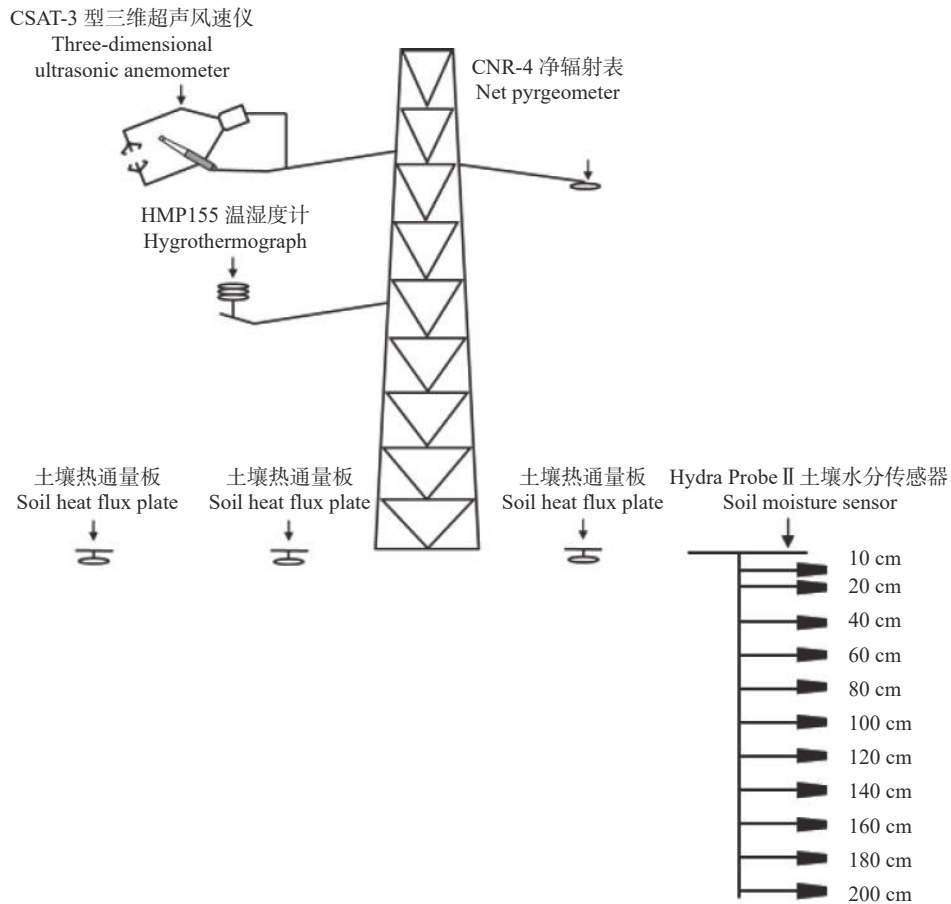


图 1 涡度相关系统及土壤水分传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of eddy covariance system and soil moisture sensors

点涡度相关系统安装高度为 3.5 m, 棉田试验点涡度相关系统安装高度为 2.0 m, 梨园试验点涡度相关系统安装高度为 6.5 m。各站点风速和蒸散量可由三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell Scientific, USA) 和 CO₂/H₂O 分析仪 (LI7500, LICOR, USA) 观测; 各站点温湿度、水汽压由空气温湿度传感器 (HMP155, Vaisala, Finland) 观测得到, 净辐射和土壤热通量分别由四分量净辐射表 (CNR-4, Kipp & Zonen, Netherlands) 和土壤热通量板 (HFP01SC, HuKseflux, Netherlands) 观测得到, 土壤含水量由土壤水分传感器 (Hydra Probe II, Stevens, USA) 测得。

涡度相关原始数据按照 China FLUX 要求进行处理^[21], 得到原始数据后采用野点剔除、倾斜校正、缺失数据插补等方法对数据进行处理, 3 个生态系统站点涡度相关系统能量闭合度均大于 0.85, 能量闭合度较高, 测量结果处于可信区间, 本研究主要利用涡度相关系统获得的实测蒸散量进行验证, 数据的具体计算过程以及详细处理方法见文献 [22-23]。

$$ET_{EC} = LE/\lambda \quad (1)$$

式中: ET_{EC} 为涡度相关系统实测蒸散量 (mm), LE 为

潜热通量 ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), λ 为汽化潜热 ($2.45 MJ \cdot m^{-2}$)。

1.2.2 单作物系数法计算作物实际蒸散量

单作物系数法计算作物实际蒸散量的公式来自《FAO Irrigation and Drainage Paper NO. 56 Crop Evapotranspiration》(简称“FAO56 手册”)^[6]:

$$ET_{a-FAO} = K_c \times ET_0 \times K_s \quad (2)$$

式中: ET_{a-FAO} 为单作物系数法计算的作物实际蒸散量 ($mm \cdot d^{-1}$), ET_0 为参考作物蒸散量 ($mm \cdot d^{-1}$), K_c 为作物系数, K_s 为土壤水分胁迫系数。参考作物蒸散量 (ET_0) 采用 Penman-Monteith 公式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率 ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), R_n 为净辐射 ($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量 ($W \cdot m^{-2}$), u_2 为 2 m 高风速 ($m \cdot s^{-1}$), T 为日平均温度 ($^\circ C$), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), γ 为干湿表常数 ($0.067 kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)。

根据 FAO56 手册以及相关文献 [24] 确定初始生长期作物系数 (K_{c-ini}) (表 3), 生育中期及生育末期作

物系数 (K_{c-mid} 和 K_{c-end}) 由式 (4)、(5) 确定:

$$K_{c-mid} = K_{c-Tab-mid} + [0.04(u_2 - 2) - 0.04(RH_{min} - 45)] \times (h/3)^{0.3} \quad (4)$$

$$K_{c-end} = K_{c-Tab-end} + [0.04(u_2 - 2) - 0.04(RH_{min} - 45)] \times (h/3)^{0.3} \quad (5)$$

式中: $K_{c-Tab-mid}$ 和 $K_{c-Tab-end}$ 为查表所得作物系数值 (表 3); RH_{min} 为日最低相对湿度 (%); h 为生育期内作物平均最大高度 (m), 在生育期不同阶段分别通过卷尺进行测量, 初始生长期、快速发育期、生育中期、生育末期的平均最大株高冬小麦分别取值 0.15 m、0.60 m、0.75 m 和 0.80 m, 夏玉米分别取值 0.88 m、2.30 m、2.40 m 和 2.40 m, 棉花分别取值 0.35 m、0.75 m、1.00 m 和 1.10 m, 梨树株高取值 3.50 m。

表 3 不同作物各生育阶段查表所得作物系数 (K_{c-Tab}) 取值
Table 3 Crop coefficient (K_{c-Tab}) values of different growth stages of crops

生育期 Growth stage	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	棉花 Cotton	梨树 Pear
初始生长期 Initial stage	0.60	0.47	0.35	0.80
生育中期 Mid stage	1.07	1.11	1.15	1.20
生育末期 End stage	0.70	0.83	0.60	0.85

由于冬小麦-夏玉米、棉花生育期内均为地面充分灌溉, 结合分析试验期间冬小麦-夏玉米、棉田不同土壤深度土壤体积含水量变化, 生育期内不存在水分胁迫现象, K_s 为 1。梨树生育期内不同深度土壤体积含水量变化表明, 其生育期内存在一定水分胁迫, K_s 计算公式为 (6)–(9)^[6,20], 最终的 K_s 计算结果如图 2 所示, 梨树的水分胁迫现象主要发生在 3 月、6 月和 7 月:

$$K_s = (TAW - D_r) / (TAW - RAW) \quad (6)$$

$$D_r = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_i) \times Z_r \quad (7)$$

$$TAW = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{wp}) \times Z_r \quad (8)$$

$$RAW = p \times TAW \quad (9)$$

式中: TAW 为根区总有效土壤水 (mm), 通过公式 (8) 计算; D_r 为根区消耗水分 (mm), 通过公式 (7) 计算; RAW 为根区易被吸收的土壤水量 (mm), 由公式 (9) 计算; θ_i 为第 i 天土壤体积含水量 (%), 研究中试验点土壤含水量测定深度均为 2 m, 其中 0~20 cm 每 10 cm 测定 1 次, 其余深度每 20 cm 测定 1 次, 逐日土壤含水量数据为各深度土壤含水量数据均值; Z_r 为根系深度 (m), 结合 FAO56 手册推荐值, 梨树 Z_r 取值 2 m; p 为不受水分胁迫时从根区土壤吸收的土壤有效水量与总有效土壤水的比值, 此参数可通过查阅 FAO56 手册确定, 梨树 p 取值 0.5; θ_{FC} 为田间持水量

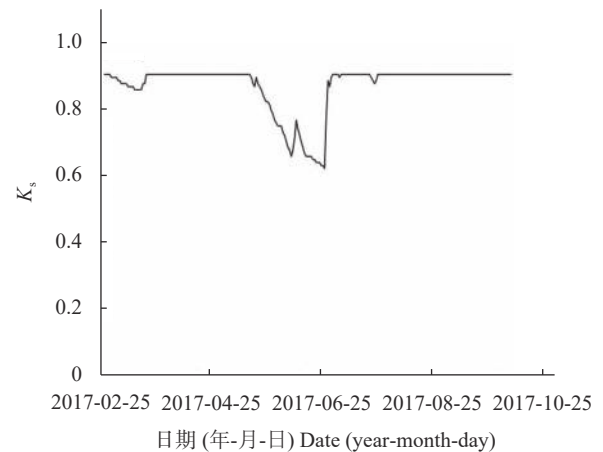


图 2 梨树生育期内土壤水分胁迫系数 (K_s) 变化
Fig. 2 Soil water stress coefficients (K_s) during growth period of pear trees

(%), θ_{wp} 为凋萎系数 (%), 具体数值如表 1 所示。

2 结果与分析

2.1 主要气象因子及参考蒸散量变化规律

结合式 (3)、(4) 和 (5) 可以发现, 温度、相对湿度、风速对计算 ET_0 及 K_c 有重要作用, 温度、降水等气象因子也影响着不同作物生育期内的蒸散量。因此需要分析生育期内不同农业生态系统不同气象因子变化规律。冬小麦-夏玉米生态系统生育期内平均温度 14.0 °C (图 3a, 3b), 大于 10 °C 积温为 4653.2 °C。棉田生态系统生育期内平均温度 22.8 °C (图 3c), 大于 10 °C 积温为 4037.0 °C。梨园生态系统生育期内平均温度 20.3 °C (图 3d), 大于 10 °C 积温 4785.0 °C。虽然棉田的平均温度在 3 类生态系统中最高, 但其大于 10 °C 积温水平却最低, 这与 3 类生态系统的生育期日期分布和天数不同密切相关。

不同农业生态系统从初始生长期到生育末期的降雨量、空气湿度和风速不同, 这些气象因子的变化也会作物生长及参考作物蒸散量的变化产生影响。如图 4 所示, 生育期内冬小麦-夏玉米农田生态系统平均相对湿度为 64%, 总降水量 358.2 mm; 棉田生态系统平均相对湿度为 73%, 总降水量 449.9 mm; 梨园生态系统相对湿度为 66%, 总降水量 414.9 mm。各生态系统 4 个生育期内平均风速为 1.1~1.6 m·s⁻¹。

由于不同类型农业生态系统各生育期内空气湿度和风速等气象因子存在差异, 各生态系统的 ET_0 的变化也各有特点。冬小麦-夏玉米生态系统初始生长期到生育末期内 ET_0 呈现出先上升后下降的单峰趋势 (图 5a), 生育期总 ET_0 为 939.0 mm (表 4), 日最大 ET_0 为 8.2 mm·d⁻¹, 出现在 2017 年 6 月 10 日, 日均

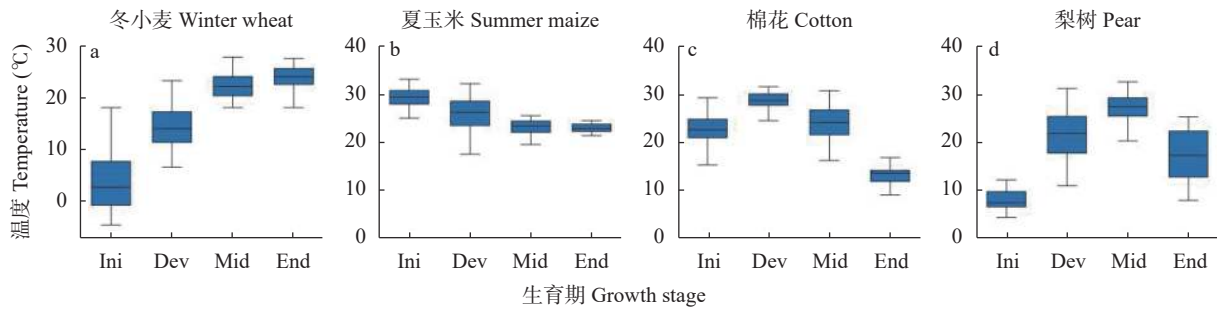


图 3 不同农业生态系统的作物生育期平均温度 (Ini: 初始生长期; Dev: 快速发育期; Mid: 生育中期; End: 生育末期)
 Fig. 3 Average temperature of different crops at different growth stages in different agroecosystems (Ini: initial stage; Dev: developing stage; Mid: mid stage; End: end stage)

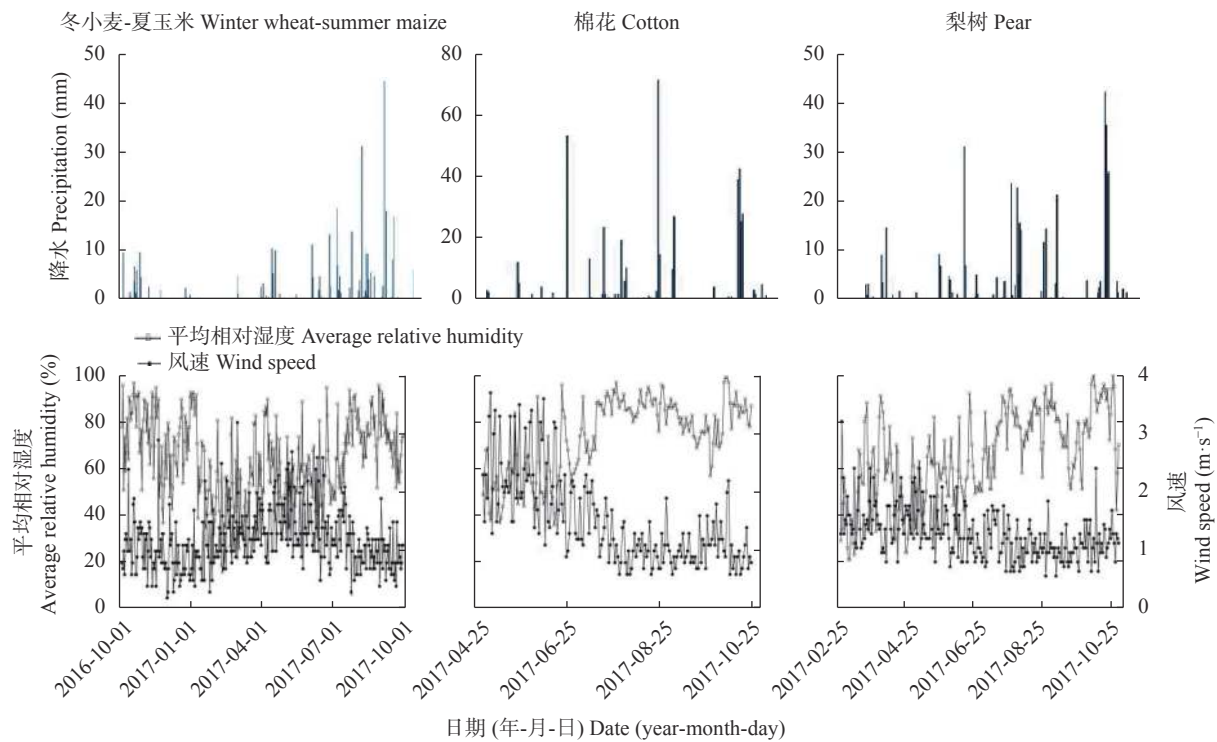


图 4 不同农业生态系统生育期降水量、平均相对湿度和风速变化

Fig. 4 Changes of precipitation, average relative humidity and wind speed at different growth stages of corps of different agroecosystems

ET₀ 为 2.6 mm·d⁻¹。棉田生态系统初始生长期到生育末期 ET₀ 呈现波动下降趋势 (图 5b), 总 ET₀ 为 673.1 mm (表 4), 最大 ET₀ 为 7.8 mm·d⁻¹, 出现在 2017 年 5 月 19 日, 日均 ET₀ 为 3.8 mm·d⁻¹。梨园生态系统初始生长期到生育末期 ET₀ 波动与冬小麦-夏玉米生态系统类似, 呈现出先上升后下降的单峰趋势 (图 5c), 生育期内总 ET₀ 为 880.5 mm (表 4), 日最大 ET₀ 为 7.3 mm·d⁻¹, 出现在 2017 年 7 月 8 日, 日均 ET₀ 为 3.6 mm·d⁻¹。冬小麦、夏玉米、棉花由于初始生长期持续时间较长且外界温度高, 多种因素作用下初始生长期总 ET₀ 最大, 成熟期由于持续时间较短, 总 ET₀ 最小; 梨树在快速发育期阶段总 ET₀ 最大, 初始生长期最小, 冬小麦、

夏玉米和棉花 3 种作物均在成熟期总 ET₀ 最小。

2.2 不同农业生态系统实际蒸散量变化规律

通过涡度相关系统观测的作物实际蒸散量 (ET_{EC}) 反映了一个生态系统在初始生长期至生育末期实际蒸发与蒸腾量之和。如图 6 和表 5 所示, 在 4 个生育期内, 冬小麦-夏玉米、棉田、梨园生态系统 ET_{EC} 分别为 701.4 mm、496.5 mm 及 763.5 mm, 日平均 ET_{EC} 分别为 2.0 mm·d⁻¹、2.8 mm·d⁻¹ 和 3.1 mm·d⁻¹。冬小麦-夏玉米农业生态系统呈双峰趋势, ET_{EC} 在冬小麦生育末期及夏玉米初始生长期较小。冬小麦生育初期会经历出苗-越冬两个时期, ET_{EC} 在越冬期呈现下降趋势, 冬小麦日最大 ET_{EC} 出现在 5 月 24 日,

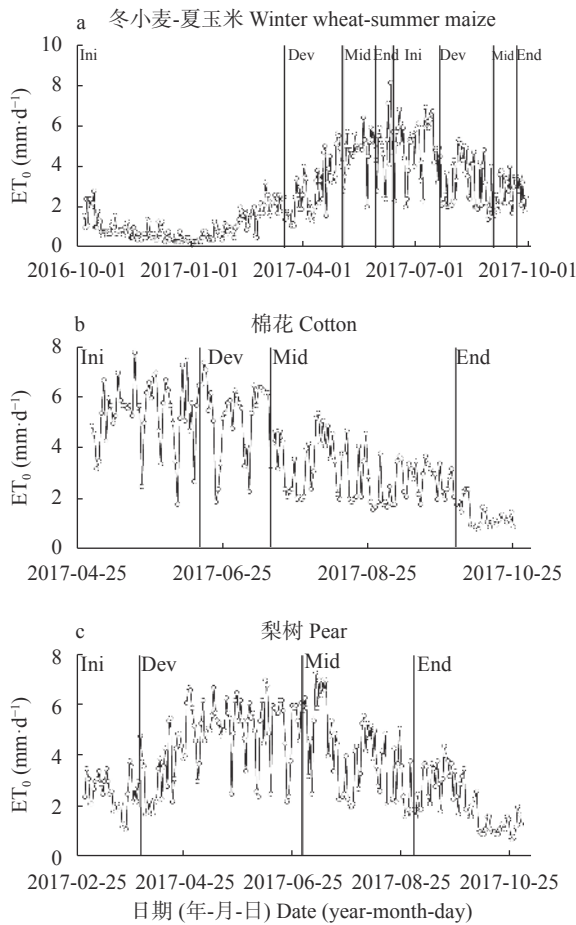


图 5 不同农业生态系统作物生育期内参考蒸散量 (ET_0) 变化 (Ini: 初始生长期; Dev: 快速发育期; Mid: 生育中期; End: 生育末期)

Fig. 5 Reference evapotranspiration (ET_0) variations during growth stages of different agroecosystems (Ini: initial stage; Dev: developing stage; Mid: mid stage; End: end stage)

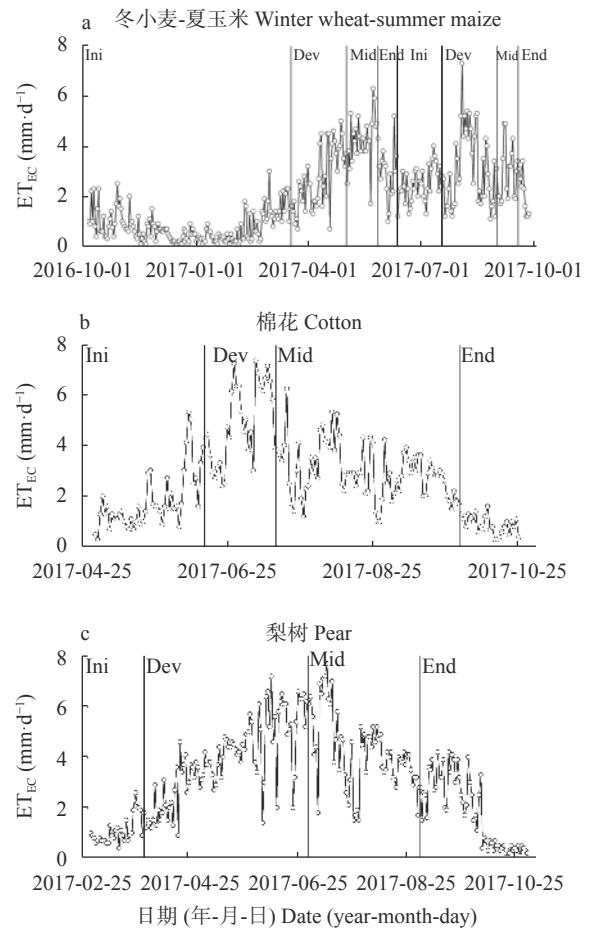


图 6 不同农业生态系统作物生育期内实际蒸散量 (ET_{ec}) 变化 (Ini: 初始生长期; Dev: 快速发育期; Mid: 生育中期; End: 生育末期)

Fig. 6 Actual evapotranspiration (ET_{ec}) variations during growth stages of different agroecosystems (Ini: initial stage; Dev: developing stage; Mid: mid stage; End: end stage)

表 4 不同农业生态系统作物不同生育阶段及总参考作物蒸散量

作物 Crop	初始生长期 Initial stage	快速发育期 Developing stage	生育中期 Mid stage	生育末期 End stage	总计 Total
冬小麦 Winter wheat	187.2	140.6	127.8	74.8	530.4
夏玉米 Summer maize	190.4	141.5	51.0	26.0	408.6
棉花 Cotton	248.2	158.5	232.2	34.2	673.1
梨树 Pear	78.8	426.5	246.5	128.7	880.5

表 5 不同农业生态系统作物不同生育阶段及总实际蒸散量

作物 Crop	初始生长期 Initial stage	快速发育期 Developing stage	生育中期 Mid stage	生育末期 End stage	总计 Total
冬小麦 Winter wheat	125.1	123.4	110.8	43.2	402.5
夏玉米 Summer maize	92.5	134.4	52.8	19.2	298.9
棉花 Cotton	86.7	149.6	236.0	24.2	496.5
梨树 Pear	33.9	355.3	263.7	110.6	763.5

处于生育中期;夏玉米日最大 ET_{ec} 出现在 8 月 4 日,处于快速发育期。棉田、梨园农业生态系统日 ET_{ec} 峰值都出现在 7 月,分别处于棉花和梨树的快速发育期和生育中期。作物在生育末期生理活性降低,蒸腾作用逐渐下降, ET_{ec} 逐渐降低。

冬小麦、夏玉米、棉花、梨树 4 种作物分别在

初始生长期、快速发育期、生育中期、快速发育期总 ET_{ec} 达最大值。冬小麦初始生长期包含出苗期和越冬期,经历时间长,总 ET_{ec} 较大(表 5)。梨树在生育初期叶片较少以及外界温度低, ET_{ec} 较低。冬小麦作物初始生长期 ET_{ec} 占生育期内总比重最大,为 31.1%;夏玉米、梨树快速发育期 ET_{ec} 占生育期内总

比重最大, 分别为 45.0%、46.5%; 棉花在生育中期 ET_{EC} 占全生育期的 47.5%。

2.3 单作物系数法计算作物实际蒸散量变化规律

涡度相关法测定作物蒸散量需要假设和安装仪器并需要对仪器进行定期维护, 而作物系数法获取蒸散量可以基于研究区内的气象数据和已知的作物系数通过计算得到, 适用于对有气象资料但没有实际观测设备的作物种植区进行灌溉用水的指导。结合不同试验点气象数据和株高数据, 得到试验期间不同农业生态系统初始生长期到生育末期的作物系数 (K_c)。本研究给出了不同作物快速发育期的 K_c , 如表 6 所示。在生育中期, 除冬小麦外, 不同作物的 K_c 均低于 FAO56 推荐值 (表 3), 生育末期棉花、梨树 K_c 明显高于 FAO56 推荐值 (表 3)。借助单作物系数法计算得到不同作物生育期内实际蒸散量变化规律如图 7 所示。冬小麦-夏玉米、棉田、梨园生态系统初始生长期到生育末期单作物系数法计算的实际蒸散量 (ET_{a-FAO}) 分别为 694.3 mm、472.2 mm、825.7 mm。单作物系数法计算所得冬小麦-夏玉米、棉花、梨树生育期内实际蒸散量变化趋势与涡度相关实测蒸散变化趋势相同。冬小麦种植期间于 2017 年 5 月 19 日 ET_{a-FAO} 达到最大值 $7.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 此时处于生育中期; 夏玉米种植期间于 2017 年 8 月 4 日 ET_{a-FAO} 达最大值 $5.6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 处于快速发育期 (图 7a)。棉田生态系统于 2017 年 7 月 14 日 ET_{a-FAO} 达最大值 $6.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 此时处于快速发育期 (图 7b); 梨园生态系统达最大日实际蒸散量 $7.4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时处于生育中期 (图 7c)。

2.4 单作物系数法与涡度相关系统所得蒸散量对比验证

为检验所得到的作物系数是否适用于计算本区域不同生态系统的实际蒸散量, 本研究将单作物系数法计算得到的实际蒸散量与涡度相关系统观测得到的结果进行了对比验证。冬小麦-夏玉米、棉田和梨园农业生态系统生育期内实际蒸散量计算值与实测值之间相关系数分别为 0.91、0.80 和 0.82, 决定系

表 6 不同农业生态系统作物不同生育阶段平均作物系数
Table 6 Average crop coefficient (K_c) in different growth stages of crops in different agroecosystems

作物 Crop	初始生长期 Initial stage	快速发育期 Developing stage	生育中期 Mid stage	生育末期 End stage
冬小麦 Winter wheat	0.60	0.88	1.07	0.72
夏玉米 Summer maize	0.46	0.76	1.01	0.80
棉花 Cotton	0.34	0.71	1.07	0.78
梨树 Pear	0.81	0.91	1.02	0.96

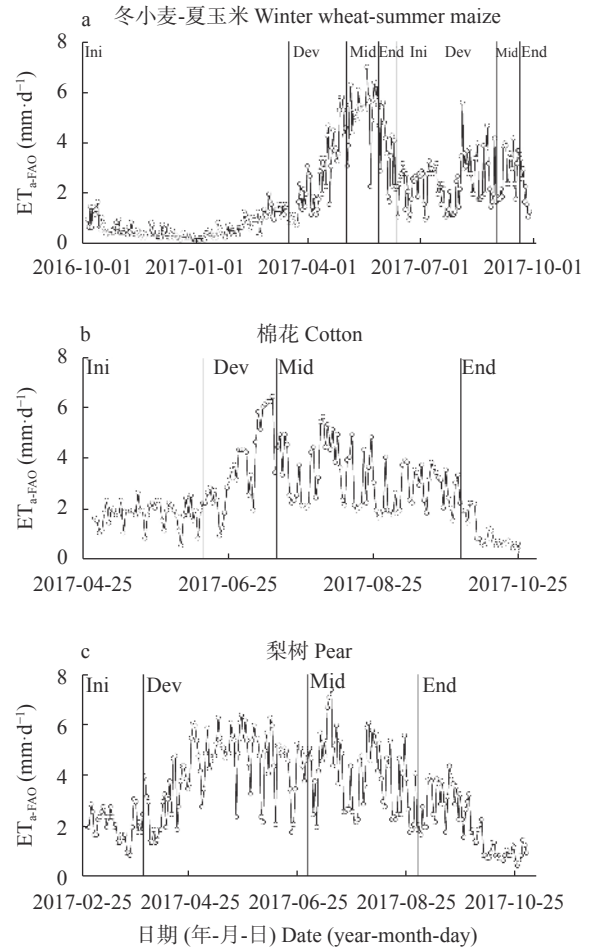


图 7 不同农业生态系统生育期内作物系数法计算的实际蒸散量 (ET_{a-FAO}) 变化 (Ini: 初始生长期; Dev: 快速发育期; Mid: 生育中期; End: 生育末期)

Fig. 7 Calculated actual evapotranspiration (ET_{a-FAO}) variations during crop growth stages of different agroecosystems (Ini: initial stage; Dev: developing stage; Mid: mid stage; End: end stage)

数分别为 0.82、0.65 和 0.67 ($P < 0.01$, 图 8)。冬小麦-夏玉米生态系统实际蒸散量计算值 (694.3 mm) 与实测值 (701.4 mm) 之间相差 1.0%, 棉田生态系统生育期内实际蒸散量计算值比实测值偏低 4.9%, 梨园生态系统计算值比实测值偏高 8.1%。单作物系数法在计算冬小麦-夏玉米生态系统实际蒸散量时精度最佳, 计算梨园生态系统实际蒸散量的精度低于冬小麦-夏玉米农田生态系统及棉田生态系统。梨园生态系统蒸散量实测值与计算值在快速发育期相差 9.2%, 偏离最大。出现这种状况可能与 K_{c-Tab} 的选择有关, FAO56 手册推荐的作物系数并不能适用于所有地区, 后续需要提高单作物系数法计算梨园生态系统实际蒸散量的精度。

3 讨论

华北平原地区针对果树实际蒸散量以及作物系

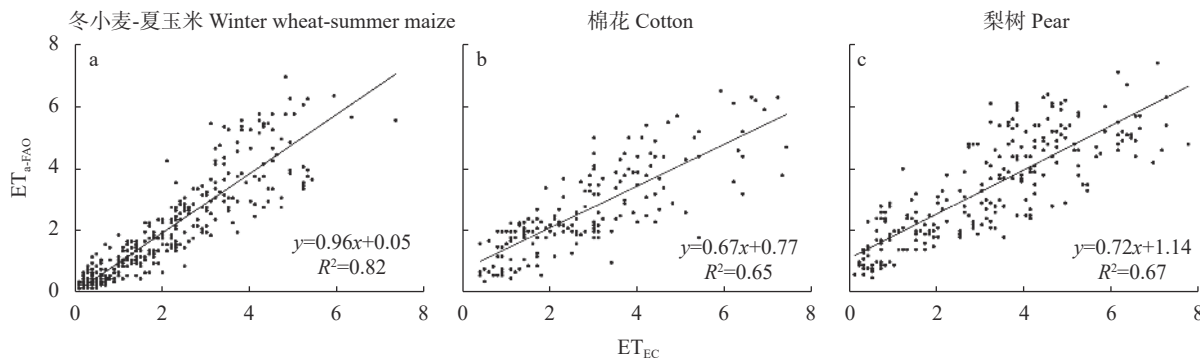


图 8 不同农业生态系统实际蒸散量实测值与计算值相关性验证

Fig. 8 Verification of correlation between measured (ET_{EC}) and calculated (ET_{a-FAO}) actual evapotranspiration of different agroecosystems

数的研究较少,此前很少有确定梨树作物系数的研究。本研究证明了在该地区通过单作物系数法计算典型梨园生态系统蒸散量的可行性,并确定了试验点梨园生态系统不同生育阶段的作物系数。单作物系数法计算的梨树实际蒸散量比实测蒸散量偏高 61.9 mm,占实测值的 8.1%,这部分误差不仅来自作物系数的计算,还有一部分原因可能与土壤水分胁迫系数有关,后续研究可以从这两个方面进一步提高单作物系数法计算梨园等果树生态系统实际蒸散量的精度。

针对同一农业生态系统,本研究的 K_c 是在 FAO56 手册作物系数推荐值基础上加入了针对研究区的气象因子校正,因此与推荐值相比存在差异,尤其是在棉花和梨园的生育中期。Li 等^[25]的研究也出现了类似情况,其研究的西北春玉米作物系数在生育中期及生育末期均高于 FAO56 推荐值。FAO56 手册推荐的作物系数仅为参考值,不同区域的作物系数值与生育期内气候及作物生长的差异有关。

作物系数的变化会受到多方面因素的影响。作物类型不同,初始生长期到生育末期的生理特性和物候特征等均存在差异,这些都会影响农业生态系统的实际蒸散量,最终体现在作物系数的差异;而参考蒸散量受气象因素的影响,试验期内冬小麦-夏玉米、棉花和梨树的初始生长期到生育末期所处季节不同,风速、温湿度等气象因子存在差异,作物的生理特性也有所不同,所以作物系数也会有相应差异,这与以往的许多研究是相似的。针对玉米的研究^[14]显示,冠层较大的玉米相比冠层较小的玉米在初始生长期至生育末期有更高的实际蒸散量。此外,地表植被覆盖度也是影响作物实际蒸散量的重要因素,冬小麦、夏玉米、棉花 3 种农业生态系统,生育初期由于播种后植被覆盖度较小,植株蒸腾作用较弱,

此时农田实际蒸散主要为土壤蒸发,实际蒸散量较小。此外,相同生育期由于所处季节不同,不同农业生态系统间日均实际蒸散量也会存在较大差异。如夏玉米、棉花初始生长期温度较高,辐射较大,日均实际蒸散量大于冬小麦、梨树农业生态系统,不同农业生态系统生育期长度也会影响实际蒸散量的数值。

试验点实际作物系数应结合该地情况确定并进行验证,本研究中涡度相关系统实测蒸散量与作物系数法计算的蒸散量及日均蒸散量变化趋势具有较高的一致性。通过单作物系数法计算作物蒸散量这种方法在华北平原各典型农业生态系统均具有较好的适用性且精度较高,应用于冬小麦-夏玉米农田生态系统效果最好。由于涡度相关系统造价昂贵,对安装点下垫面要求严格且需要后续维护,难以实现针对所有农业生态系统实际蒸散量的观测,而调整后的作物系数更适于本区域几类主要生态系统的作物蒸散量计算,所以基于作物系数法计算不同作物的实际蒸散量可以实现大范围的应用,同时由于方法较简单,其对实际农业生产中的灌溉管理具有重要的指导意义。

4 结论

作物实际蒸散量可以量化生态系统在作物各生育期内的耗水情况,准确地获得不同生育期的蒸散量,有助于实现农业用水的精准管理,以减少灌溉用水、达到节约农业用水的目的。本研究通过单作物系数法,结合气象及土壤数据,得到华北平原典型农业生态系统作物系数修正值,利用 Penman-Monteith 公式计算得出参考作物蒸散量,结合土壤水分胁迫系数的计算,本研究得到了各典型农业生态系统初始生长期至生育末期的实际蒸散量,并与涡度相关系统观测得到的实际蒸散量进行对比和验证,得到

以下结论:

1) 典型农业生态系统不同作物初始生长期、快速发育期、生育中期和生育末期作物系数, 冬小麦分别为 0.60、0.88、1.07 和 0.72, 夏玉米分别为 0.46、0.76、1.01 和 0.80, 棉花分别为 0.34、0.71、1.07 和 0.78, 梨树分别为 0.81、0.91、1.02 和 0.96。

2) 华北平原涡度相关系统实测冬小麦-夏玉米、棉田和梨园典型农业生态系统初始生长期至生育末期实际蒸散量分别为 701.4 mm、496.5 mm 和 763.5 mm, 单作物系数法计算的蒸散量分别为 694.3 mm、472.2 mm 和 825.7 mm, 4 种作物实际蒸散量实测值与计算值在初始生长期至生育末期均呈现出先上升后下降的单峰变化, 实际蒸散量实测值与计算值在初始生长期至生育末期变化趋势相同。

3) 单作物系数法计算所得实际蒸散量与实测蒸散量之间相关系数均大于 0.80, 呈极显著相关。冬小麦-夏玉米、棉田和梨园农业生态系统生育期内实际总蒸散量计算值相比实测值分别低 1.0%、低 4.9% 和高 8.1%。

本研究基于单作物系数法计算所得的实际蒸散量可以准确地反映华北平原典型灌溉冬小麦-夏玉米农田、棉田和果园农业生态系统实际蒸散量, 与涡度相关系统观测相比, 通过本研究给定的作物系数可以更简单地得到本区域主要农业生态系统的实际耗水情况, 可为制定合理的灌溉计划, 分析不同种植结构下蒸散规律差异及种植结构演变对区域耗水的影响, 实现作物精准耗水管理提供科学依据。

参考文献 References

- [1] SUN H Y, SHEN Y J, YU Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1139–1145
- [2] ZHANG Y C, LEI H M, ZHAO W G, et al. Comparison of the water budget for the typical cropland and pear orchard ecosystems in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 198: 53–64
- [3] 张雅芳, 郭英, 沈彦俊, 等. 华北平原种植结构变化对农业需水的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(1): 8–16
ZHANG Y F, GUO Y, SHEN Y J, et al. Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 8–16
- [4] 康绍忠. 旱区水-土-作物关系及其最优调控原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998
KANG S Z. *Water-Soil-Crop Relation and Its Optimum Regulation in Arid and Semiarid Areas*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998
- [5] 王振龙, 刘竹梅, 吕海深, 等. 基于修正遗传算法的夏玉米作物系数及蒸散发估算[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 108–116
WANG Z L, LIU Z M, LYU H S, et al. Estimation of summer maize crop coefficient and evapotranspiration based on modified genetic algorithm[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 108–116
- [6] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*[J]. Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, 1998: 56
- [7] GUO H, LI S E, KANG S Z, et al. Crop coefficient for spring maize under plastic mulch based on 12-year eddy covariance observation in the arid region of Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125108
- [8] YANG P J, HU H C, TIAN F Q, et al. Crop coefficient for cotton under plastic mulch and drip irrigation based on eddy covariance observation in an arid area of Northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 21–30
- [9] 牛建龙, 王家强, 彭杰, 等. 荒漠-绿洲区潜在蒸散量变化特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 766–772
NIU J L, WANG J Q, PENG J, et al. Change of potential evapotranspiration and its affecting factors in desert-oasis zone[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 766–772
- [10] KANG S Z, GU B J, DU T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(3): 239–254
- [11] WANG Y F, CAI H J, YU L Y, et al. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 236: 106164
- [12] GONG X W, QIU R J, SUN J S, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 235: 106154
- [13] WANG S T, ZHU G F, XIA D S, et al. The characteristics of evapotranspiration and crop coefficients of an irrigated vineyard in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 388–398
- [14] XU G P, XUE X Z, WANG P, et al. A lysimeter study for the effects of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 1–6
- [15] WANG J D, ZHANG Y Q, GONG S H, et al. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 218–228
- [16] 宿梅双, 李久生, 饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(8): 25–29
SU M S, LI J S, RAO M J. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 25–29

- [17] 韩淑敏, 程一松, 胡春胜. 太行山山前平原作物系数与降水年型关系探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 152-158
HAN S M, CHENG Y S, HU C S. Relationship between crop coefficient and precipitation pattern in the piedmont of Mt. Taihang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(5): 152-158
- [18] 张喜英, 陈素英, 裴冬, 等. 秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 583-592
ZHANG X Y, CHEN S Y, PEI D, et al. Evapotranspiration, yield and crop coefficient of irrigated maize under straw mulch conditions[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 583-592
- [19] 李艳梅, 廖上强, 杨俊刚, 等. 温室芹菜需水强度与作物系数研究[J]. *节水灌溉*, 2016(12): 54-58, 63
LI Y M, LIAO S Q, YANG J G, et al. Analysis of water requirement rate and crop coefficient for greenhouse celery under well-irrigated condition[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(12): 54-58, 63
- [20] 苗文芳, 刘秀位, 邵立威, 等. 金丝小枣蒸散和作物系数变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 77-81
MIAO W F, LIU X W, SHAO L W, et al. Daily transpiration, evaporation and crop coefficient of *Ziziphus jujube*[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(1): 77-81
- [21] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUX CO₂通量数据处理系统与应用[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565
LI C, HE H L, LIU M, et al. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565
- [22] 张玉翠, 姜寒冰, 张传伟, 等. 2007—2013年华北平原典型灌溉农田生态系统日通量数据集——以栾城站为例[J]. *中国科学数据*, 2020, 5(2): 40-50
ZHANG Y C, JIANG H B, ZHANG C W, et al. Daily fluxes dataset of the typical irrigated agro-ecosystem in the North China Plain: a case study of Luancheng Station (2007-2013)[J]. *China Scientific Data*, 2020, 5(2): 40-50
- [23] SHEN Y J, ZHANG Y C, SCANLON B R, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 181: 133-142
- [24] 段爱旺. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004
DUAN A W. Irrigation Water Quota for Major Crops in the Northern Region[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004
- [25] LI S E, KANG S Z, LI F S, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(11): 1214-1222