

刘江, 王润元, 王鹤龄, 等. 半干旱区雨养春小麦蒸腾效率的计算与应用[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(7): 1501-1509.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.07.007

半干旱区雨养春小麦蒸腾效率的计算与应用

刘江^{1,2}, 王润元³, 王鹤龄³, 蔡立群^{1,2}, 赵福年³

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 与作物叶片水平的蒸腾效率研究相比, 由于群体蒸腾量难以直接测量, 作物产量水平的蒸腾效率往往不被重视。本研究根据文献中所给出的产量水平的小麦蒸腾效率与自由水面蒸发量之间的关系, 依据文献数据、田间试验观测资料以及桶栽试验观测资料, 建立黄土高原西端半干旱区雨养春小麦产量与耗水量之间的关系, 并计算获得了该区1987–2011年春小麦蒸腾效率, 从而模拟了该区春小麦水分利用效率的变化。结果表明, 半干旱区雨养春小麦耗水量与产量呈极显著的线性关系($P < 0.01$), 不受不同年份气候条件、供水变化以及作物品种的影响。春小麦蒸腾效率平均为 $16.301 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, 土壤水分蒸发量平均为 156 mm 。而依据自由水面蒸发量推算每年的春小麦蒸腾效率, 所获得的蒸散量与实测产量关系符合该地区文献记录的耗水量与产量关系, 论证了蒸腾效率在不同地区相同作物中的保守性特点。同时依据桶栽试验观测所得的胞间二氧化碳浓度与大气二氧化碳浓度比值与生育期平均空气饱和差之间的关系, 修订已有的研究公式, 能够模拟所研究地区的春小麦水分利用效率。本研究结果可为半干旱区雨养春小麦产量的提高及水资源的高效利用提供可借鉴的依据。

关键词: 水分利用效率; 耗水量; 光合生理过程; 空气饱和差; 大气蒸发力

中图分类号: S945.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)07-1501-09

Calculation and application of transpiration efficiency of rainfed spring wheat in semi-arid area

LIU Jiang^{1,2}, WANG Run-yuan³, WANG He-ling³, CAI Li-qun^{1,2}, ZHAO Fu-nian³

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Compared with the study of transpiration efficiency at crop leaf level, the transpiration efficiency at crop yield level is often neglected because the population transpiration is difficult to measure directly. In this study, according to the relationship between wheat transpiration efficiency and free water surface evaporation at the yield level given in the literature, the relationship between spring wheat yield and water consumption in the semi-arid area of the western end of the Loess Plateau was established based on the literature data, field experiment observation data and barrel planting experiment observation data. The transpiration efficiency of spring wheat in this area from 1987 to 2011 was calculated, and the change

of water use efficiency of spring wheat in this area was simulated. The results showed that there was a significant linear relationship between water consumption and yield of rainfed spring wheat in semi-arid area ($P < 0.01$), which was not affected by climatic conditions, water supply status and wheat varieties. The average transpiration efficiency of spring wheat was $16.301 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, and the average soil water evaporation was 156 mm . The annual tran-

收稿日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42005097、42175192); 甘肃省气象局人才项目(2122rczx-英才计划-02)

作者简介: 刘江(1999-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为旱地土壤生态。(E-mail) gauliujiang@163.com

通讯作者: 蔡立群, (E-mail) cailq@gau.edu.cn; 赵福年, (E-mail) zfn0622@163.com

spiration efficiency of spring wheat was calculated based on the free water surface evaporation. The relationship between evapotranspiration and measured yield was consistent with the relationship between water consumption and yield recorded in the literature, indicating that the transpiration efficiency was conservative in the same crop in different regions. At the same time, according to the relationship between the ratio of intercellular carbon dioxide concentration to atmospheric carbon dioxide concentration and the average vapor pressure deficit during the growth period, the existing research formula was revised to simulate the water use efficiency of spring wheat in the study area. The results of this study can provide a reference for the improvement of spring wheat yield and the efficient utilization of water resources in semi-arid rainfed areas.

Key words: water use efficiency; water consumption; photosynthetic process; vapor pressure deficit; atmospheric evaporation

西北半干旱区位于黄土高原西端,具有四季分明,春夏光照强、光照时间长、大气湿度小、降水总量少且多变,降水主要集中在夏秋季的气候特点^[1]。该区大部分作物春季播种,生长季需经历降水少且大气蒸发力较强的阶段^[2]。因此,如何利用有限的水分获得较高的作物产量,对该区农业生产具有极为重要的意义。

蒸腾效率是衡量作物对水分利用效率高低的指标,在实际应用中,其一般由叶片尺度净光合速率比蒸腾速率或一定时期内作物干物质累积量与作物蒸腾量的比值表示^[3-5]。随着红外气体技术测定叶片气体交换的不断发展与普及,叶片尺度蒸腾效率的研究被国内外大量生态学家、农学家以及植物生理学家所重视^[6-13]。然而产量水平的蒸腾效率由于作物群体蒸腾量测定繁琐,其计算和应用往往被忽略。但是过去的一些研究认为作物产量水平的蒸腾效率值相对固定,仅因不同作物类型、不同纬度以及不同气候条件的差异而存在差别^[14-15]。在同一地区不同年份,蒸腾效率的变化只与作物在不同年份生长季的平均大气蒸发力变化有关,大气蒸发力大,则蒸腾效率小,大气蒸发力小,则蒸腾效率大^[16-18]。而在特定的气候区相同的大气蒸发力条件下,同一作物类型蒸腾效率则相对稳定,趋近于固定值。

作物生长发育过程所消耗的水分,既包括通过蒸腾作用消耗的水分,还有裸露土壤的直接蒸发,作物生育期的蒸腾量与土壤水分蒸发量合称作物蒸散量或耗水量^[19]。在水分短缺的地区,作物耗水量与作物产量存在线性关系,即耗水量大则产量高,耗水量少则产量低^[20]。而同时由于土壤水分蒸发的存在,若将作物产量与耗水量之间的线性关系绘制在直角坐标系中,该线性关系不会通过原点,即只有当耗水量大于一定的值,作物

产量才会随着蒸散量的增大而大于零。因此一些研究者认为该线性关系与横坐标(蒸散量)的截距是土壤水分蒸发量,线性关系的斜率为蒸腾效率(作物产量与蒸腾量的比),即消耗每单位量的水分所能够生产的作物产量^[21-23]。该蒸腾效率与上文中所提到的干物质累积量与作物蒸腾量的比值所计算的蒸腾效率存在关系,仅需引入收获指数(作物经济产量与作物总干物质质量的比值)即可相互转换^[24]。然而,也有部分研究者发现即使是在干旱半干旱地区等水分限制地区,作物耗水量与产量的关系也不一定完全稳定,其可能受诸多环境因素(诸如高温、辐射、空气饱和差以及风速等)的影响,即使是相同作物,其耗水量与产量的关系也可能并不呈线性关系,这为特定区域作物蒸腾效率的确定带来了困难。

作物叶片水平的蒸腾效率与大气蒸发力(用叶片与大气之间的空气饱和差表示)紧密相关,而这种关系也可以扩展至冠层水平和产量水平^[10-13]。由于红外气体分析仪的应用,当前国内外有大量叶片尺度的作物与大气气体交换研究,并积累了丰富的数据,而如何将叶片尺度的观测数据与产量水平所获得数据建立联系,是目前作物蒸腾效率研究与提高作物水分利用效率亟需解决的问题。同时,传统意义的水分利用效率是作物经济产量与作物蒸散量之间的比值^[25-26],如果获得了蒸腾效率,则可以以蒸腾效率、收获指数以及作物蒸腾量与蒸散量的比值计算模拟水分利用效率。

春小麦是西北黄土高原半干旱雨养农业区最主要的粮食作物之一,因此本研究拟以该区春小麦为研究对象,从多个尺度分析蒸腾效率的计算方法及其与环境因素的相互关系,并论证其在水分利用效率模拟方面的可行性,以期半干旱区雨养春小麦产量提高、产量预测提供建议和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于中国西北地区东部,黄土高原西端,经度介于 $104^{\circ}12'E \sim 105^{\circ}01'E$,纬度介于 $35^{\circ}17'N \sim 36^{\circ}02'N$,四周群山环抱,海拔平均约为1 898 m。该区年平均气温为 $6.3^{\circ}C$,年平均降水量约为400 mm。由于该区位于东亚夏季风影响区的边缘位置,降水量受季风强弱的影响较大,造成该区降水量年际变化较大,且年内分布极不均匀,降水主要集中在夏秋季。不过该区辐射资源丰富,春夏季日照时间长,热量充足,非常适宜种植春播作物。小麦、玉米以及马铃薯是该区域最主要的3类粮食作物,但由于区域内无河流用于农业灌溉,该区大部分地区农业生产所需水分只能依赖降水供给。该区属于典型的半干旱雨养农业区。

1.2 试验观测与数据收集

本研究分析所需数据由4部分组成,分别为历史气象观测资料、农业气象试验站春小麦观测资料、文献收集的春小麦耗水量与产量关系数据集以及桶栽试验观测资料。

1.2.1 历史气象观测资料 历史气象观测资料来源于甘肃省气象局。数据主要包括定西市安定区1987–2011年25年的地面气象观测资料。资料包括定西站逐日降水量、蒸发皿蒸发量、最高气温、最低气温、最高相对湿度、最低相对湿度等。

1.2.2 农业气象试验站春小麦观测资料 选择定西市农业气象试验站为研究代表站点,该站距离气象观测站30 m。春小麦农业气象观测资料主要包括1987–2011年春小麦播种至收获主要发育期、春小麦收获时的茎秆质量、地段实际产量、播前150 cm土壤含水量以及土壤基本物理性质。春小麦发育期、茎秆质量以及地段实际产量的观测严格按照《农业气象观测规范》进行,每年观测的方法固定,没有差异,保证了数据的可靠性和一致性。播前土壤含水量采用土钻法每隔10 cm取土,取土后采用烘箱在 $105^{\circ}C$ 温度下烘干12 h称质量,以湿土与干土的质量差值除以干土质量获得每个层次的土壤含水量。

农业气象试验站1987–2011年所选用的春小麦品种与当地农户普遍种植的品种一致,通过对1987–2011年的春小麦产量与年份进行线性分析,

发现产量与年份之间无显著线性关系,可认为本研究期间小麦品种变化对小麦产量无明显影响。同时,由于农业气象试验站田间管理方式每年固定,变化较少,所以可认为本研究期间,农业管理方式对春小麦产量提高也没有明显影响。从而可设定,本研究所用农业气象试验站春小麦产量年际变动只与每年的气象条件有关,不受其他因素影响。

1.2.3 文献数据收集 在中国知网和Web of Science中以“黄土高原(Loess Plateau)”、“半干旱区(Semi-arid)”、“春小麦(Spring wheat)”、“产量(Yield)”、“耗水量(Water use、Evapotranspiration)”以及“水分利用效率”(Water use efficiency)等为检索词,检索筛选在黄土高原半干旱区开展春小麦产量与水分关系试验研究的文献,剔除不同肥料、不同耕作措施的处理数据,选择肥料供给充足,水分供给以雨养或灌溉(漫灌)为处理的研究文献,提取其中春小麦耗水量与产量关系的数据,共获得数据40组,用以建立黄土高原半干旱区春小麦耗水量与产量之间的关系。文献数据来源信息见表1。

表1 通过文献收集的耗水量与春小麦产量数据集信息

Table 1 Data on water consumption and spring wheat yield collected from references

试验品种	试验年份	水分供给方式	参考文献
陇春 8139-2	1993–1994	补充灌溉	[27]
陇春 8139-2	1995	补充灌溉	[28]
陇春 8139-2	1993–1997	雨养	[29]
陇春 8139-2	1999–2000	播前灌溉	[30]
定西 35 号	2008	雨养	[31]
春小麦 27-4	2008	雨养	[32]
陇春 27 号	2010	雨养	[33]
定西 24 号	2011	补充灌溉	[34]
陇春 27 号	2011–2013	雨养	[35]

1.2.4 桶栽试验观测资料 桶栽试验观测在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验站内进行,该站位于甘肃省定西市安定区西川($104.37^{\circ}E$, $35.35^{\circ}N$),海拔为1 920 m。试验春小麦品种为定西新24号,采用桶栽方式进行。所用桶直径29 cm,深度45 cm。供试土壤为黄绵土,从大田采集0~20 cm土壤,风干过筛,装桶,每桶装土14 kg。桶装土平均容重 $1.15 g/cm^3$,田间持水量26.8%,萎蔫系数5.5%,其中田间持水量和

萎蔫系数均为质量含水量。试验设 1 个处理(供水充足处理),6 组重复,共计 6 桶。春小麦于 2014 年、2015 年及 2017 年 3 月下旬播种,播种后每隔 3 日采用称质量法测定每个桶中土壤水分,及时补水,保证土壤相对含水量大于 60.0%。2014 年和 2015 年试验在春小麦长至拔节初期开始观测,2017 年试验在春小麦长至开花期开始观测。每年观测 7 d。观测期间,采用 Li6400 便携式光合仪(LI-COR 公司产品),每日上午测定春小麦最上部第一片完全展开叶叶片正面光合生理参数,本研究主要关注胞间 CO_2 浓度(C_i)与大气 CO_2 浓度(C_a)比值(C_i/C_a)的变化。测量光合参数时,样品室 CO_2 浓度控制在 380~400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,叶室温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ 左右。测量叶室采用红蓝光光源,设置叶室光合有效辐射(PAR)按照 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、15 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以及 2 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的梯度变化。每次测量前叶片先在小麦饱和光照度 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下适应 30~40 min,待仪器读数稳定后,进入自动测量程序。由于小麦光饱和点介于 1 200~1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,为避免不同光照度影响小麦叶片气孔导度,从而影响 C_i 的变化,因此本研究选择 PAR 在饱和光照度 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时的数据构成研究数据集,从而分析生育期平均空气饱和差(VPD)与 C_i/C_a 之间的关系。

1.3 指标计算方法

蒸腾效率:产量水平的蒸腾效率(TE)定义为干物质质量(DM)与蒸腾量(T)的比值^[13]:

$$TE = \frac{DM}{T} \quad (1)$$

同时一些研究发现蒸腾效率与生长季的平均自由水面蒸发量(\bar{E}_0)呈反比,与生育期平均空气饱和差(VPD)呈反比^[17],即:

$$TE = \frac{k}{\bar{E}_0} \quad (2)$$

$$TE = \frac{k_c}{VPD} \quad (3)$$

公式 2 中 k 为系数,根据文献[11],小麦可取 125 $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$; \bar{E}_0 是生育期蒸发皿蒸发量,公式(2)中, \bar{E}_0 由生育期蒸发皿蒸发量除以生育期天数

再乘以 0.7 获得(0.7 为蒸发皿蒸发量转换为自由水面蒸发量的系数);根据公式(2),只要观测获得春小麦生育期蒸发皿蒸发量,即可获得春小麦蒸腾效率。而公式 3 中 k_c 为系数,可由下式计算获得^[17]:

$$k_c = \frac{abcC_aP}{1.5\rho\varepsilon} \frac{PAI_d}{PAI_t} \quad (4)$$

式中, a 是糖类化合物(CH_2O)与二氧化碳的相对分子质量比,值为 0.68;参数 b 是己糖转化为干物质的转化系数,值介于 0.45~0.80,小麦为 0.74^[12]; P 为大气压强,由 Li6400 便携式光合仪测量获得; ρ 为空气密度; ε 是水气与大气分子质量比; PAI_d 是太阳直射的叶面积指数, PAI_t 是有效的蒸腾叶面积指数,二者定义及取值参见文献[17]。

参数 c 依据下式计算获得:

$$c = 1 - C_i/C_a \quad (5)$$

C_i 为胞间 CO_2 浓度; C_a 为大气 CO_2 浓度。

水分利用效率:水分利用效率(WUE)定义为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (6)$$

式中, Y 为产量,可由作物干物质质量(DM)与收获指数(HI)相乘获得; ET 为土壤水分蒸发量(E)与蒸腾量(T)的和,即蒸散量(也称耗水量, WU)。因此公式(6)可用下式表示:

$$WUE = \frac{DM}{T} \frac{HI}{E+T} \quad (7)$$

根据公式 1 和公式 3,公式 7 可转化为:

$$WUE = \frac{k_c}{VPD} \frac{HI}{E+T} \quad (8)$$

从公式(8)可以看出,作物的水分利用效率由 TE (由大气干燥情况决定)、 HI 以及 ET 在 T 与 E 之间的分配比例所决定。

VPD 的计算:

$$e_s = 0.6108 \exp[17.27T_a/(T_a+237.3)] \quad (9)$$

式中, e_s 为给定温度(T_a)条件下的饱和水气压,空气饱和差由 e_s 与大气相对湿度(RH)计算获得:

$$VPD = e_s[1 - (RH/100)] \quad (10)$$

2 结果与分析

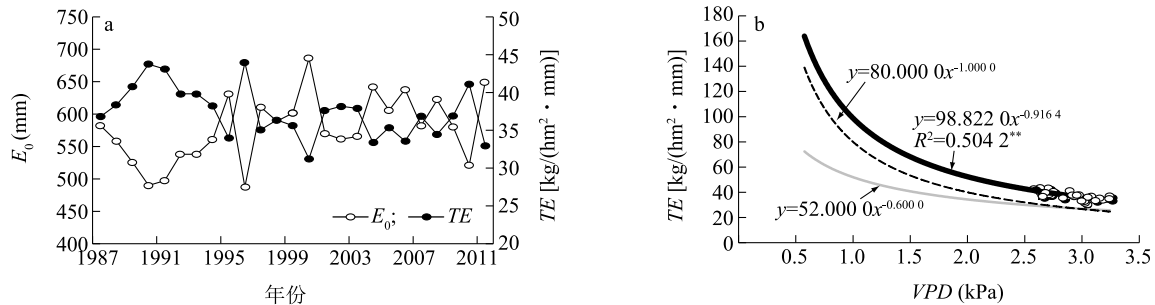
2.1 蒸腾效率年际变化及其与空气饱和差的关系

由公式(2)可计算获得 1987~2011 年每年春小麦蒸腾效率,其与春小麦生育期蒸发皿蒸发量的大小变化如图 1a 所示。从图 1a 中可以看出,1987~

2011年,春小麦生育期蒸发皿蒸发量为480~680 mm,平均为577 mm。而计算获得的蒸腾效率为32~44 kg/(hm²·mm),平均为37 kg/(hm²·mm)。

产量水平的蒸腾效率与生育期平均空气饱和差存在关系。图1b显示,这二者呈幂函数关系,即随着生育期平均空气饱和差的增大,大气变暖变干,蒸

腾效率降低。本研究小麦的蒸腾效率变动于32~44 kg/(hm²·mm)。而其他地区的研究结果^[12]同样得出生育期平均空气饱和差与蒸腾效率的幂函数关系。不过从图1b中可以看出,在相同生育期平均空气饱和差下,本研究所得的蒸腾效率要高于其他地区的研究结果。



E_0 :春小麦生育期蒸发皿蒸发量; TE :产量水平的蒸腾效率; VPD :生育期平均空气饱和差。a:1987–2011年春小麦蒸腾效率与生育期蒸发皿蒸发量的变化;b:春小麦产量水平的蒸腾效率与与生育期平均空气饱和差关系。b图中灰线和虚线引自文献^[12]。

图1 蒸腾效率(TE)年际变化及其与空气饱和差(VPD)的相互关系

Fig.1 Interannual variation of transpiration efficiency (TE) and its correlation with vapor pressure deficit (VPD)

2.2 以蒸腾效率估算蒸腾量及蒸散量

以所检索文献中春小麦耗水量与春小麦产量数据,分析研究区耗水量与产量关系。从图2a可以看出,尽管数据来源于不同年份、不同试验条件,但是春小麦耗水量与产量非常有规律地呈现出线性分布,拟合回归直线,发现该直线斜率为16.301,与 x 轴的截距为156 mm。即,可认为试验研究区域以籽粒为标准的蒸腾效率平均为16.301 kg/(hm²·mm),土壤水分蒸发量平均为156 mm。

使用农业气象试验站的观测资料,计算获得蒸腾效率,根据公式1计算蒸腾量并加上研究区平均的春小麦土壤水分蒸发量(156 mm),将所得结果绘制于图2a中,发现农业气象试验站观测资料分布于使用文献资料数据拟合的回归直线附近。然而考虑到供水较为充足的年份,由于作物地上部分的遮蔽,土壤水分蒸发量不可能很大,因而以春小麦供水量(春小麦主要生育期降水量与播前150 cm土壤含水量之和)矫正农业气象试验站春小麦耗水量,即当耗水量大于供水量时,认为春小麦耗水量为供水量(图3)。从而改进农业气象试验站计算获得的耗水量数据,发现修正后的耗水量与产量关系数据和文献资料绘制的回归直线关系更加密切(图2b),在考虑农业气象试验站资料后,拟合回归直线斜率为

16.247,接近于原回归拟合直线斜率(16.301),且截距之间也无明显差异(分别为157 mm和156 mm)。

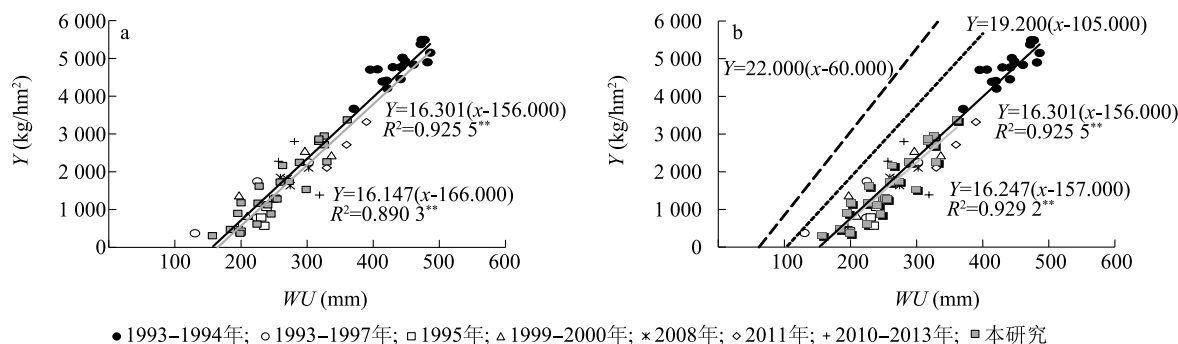
同时观察图2b,与澳大利亚学者给出的潜在蒸腾效率进行比较,发现本研究区域春小麦蒸腾效率与澳大利亚学者给出的1980年潜在蒸腾效率接近,但是明显小于1990年的蒸腾效率。而且本研究区域土壤水分蒸发量也明显大于澳大利亚学者的研究结果。说明不同气候条件以及作物品种的改良对蒸腾效率的影响需要在研究中予以考虑。

2.3 春小麦耗水量与水分利用效率的关系

无论是文献数据获得的春小麦水分利用效率,还是使用农业气象试验站资料计算获得的春小麦水分利用效率,它们均随着春小麦耗水量的增大,呈二次曲线的趋势逐渐增大,且由农业气象试验站资料模拟计算获得的数据与由文献获得的数据分布无明显差异(图4)。由文献获得的数据和农业气象试验站观测资料共同拟合耗水量与水分利用效率关系,可发现所拟合获得的二次曲线统计检验极显著($P < 0.01$),耗水量可解释水分利用效率76.12%的变率,说明使用农业气象试验站资料计算获得的蒸散量接近于实际状况。同时对所拟合的二次曲线求导,发现水分利用效率先随耗水量增大而增大,最大值出现在耗水量

为 630 mm 处,若耗水量再增加,则水分利用效率下降。不过该研究区无补充灌溉,仅靠降水量和播前土

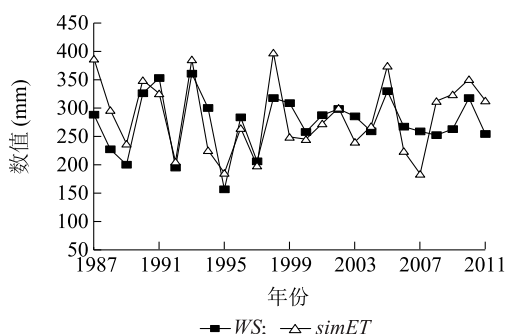
壤贮水,水分供给基本不可能达到 630 mm。



WU:耗水量;Y:春小麦产量。长虚线表示 Angus 等^[36]给出的澳大利亚 1990 年小麦潜在的耗水量与产量关系;短虚线表示 French 等^[37]给出的澳大利亚 1980 年小麦潜在的耗水量与产量关系;黑色实线表示检索文献中春小麦耗水量与产量关系。灰色直线表示农业气象试验站观测春小麦耗水量与产量关系。a:观测春小麦耗水量与春小麦产量关系;b:修正耗水量后春小麦耗水量与产量关系。

图 2 耗水量与春小麦产量关系

Fig.2 Relationship between water consumption and spring wheat yield



WS:水分供给; simET:估测获得的蒸散量。

图 3 水分供给与估测获得的蒸散量比较

Fig.3 Comparison between water supply and estimated evapotranspiration

2.4 水分利用效率的模拟计算

2.4.1 计算参数 c 根据公式 8 模拟水分利用效率,需要计算准确的 k_c ,而 k_c 的获得需要分析公式 4 中各参数的变化。其中 c 的取值与 C_i/C_a 的变化相关。通过试验发现,当 VPD 变化于 0.6~2.4 kPa 时, C_i/C_a 变化于 0.5~0.8 (图 5)。而且,随着 VPD 的增大,即空气变得更加干燥时,胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度的比值逐渐减小,二者呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。说明在大气变得干燥时, C_i/C_a 并非保持不变,而是会减小。因此公式 4 中参数 c 并不是定值,而是需要根据 VPD 与 C_i/C_a 之间的关系,由公式 5 计算获得。

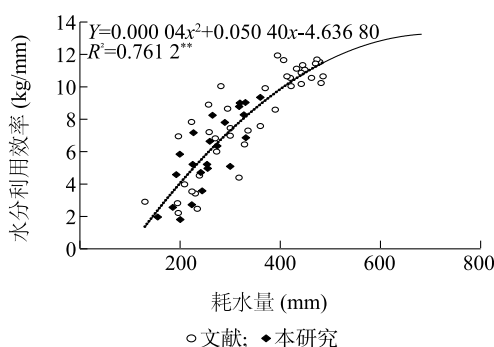
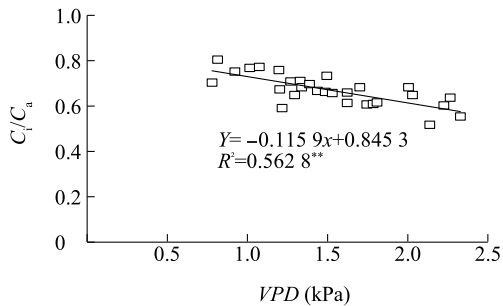


图 4 春小麦耗水量 (WU) 与水分利用效率 (WUE) 关系

Fig.4 Response of water use efficiency (WUE) to water use (WU) of spring wheat

2.4.2 模拟计算水分利用效率 以使用农业气象试验站资料估算的春小麦水分利用效率作为观测值,结合公式 4 和公式 8 模拟计算春小麦水分利用效率。根据文献^[17], PAI_d 取值 1.4, PAI_i 取值为 2.2,则二者比值为 0.64,观察图 6,可以发现模拟值与估算值呈极显著的相关关系 ($R^2 = 0.944 7$, $P < 0.01$),斜率明显小于 1,模拟获得的春小麦水分利用效率小于估算的水分利用效率。

考虑到公式 4 中参数 PAI_d 与 PAI_i 值的不确定性,比较 PAI_d/PAI_i 取值不同对模拟结果的影响。发现当 PAI_d/PAI_i 取值为 0.90 时,春小麦水分利用效率模拟效果最好,而当 PAI_d/PAI_i 值为 0.30 时,水分利用效率模拟值明显小于估算值。说明参数的定量

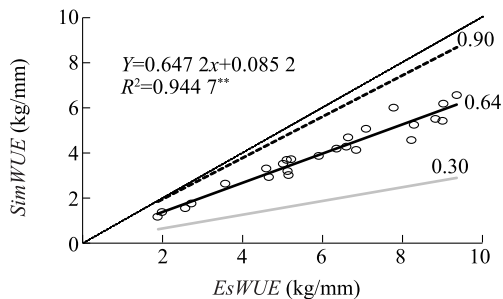


VPD:生育期平均空气饱和差; C_i :胞间二氧化碳浓度; C_a :大气二氧化碳浓度。

图5 生育期平均空气饱和差和胞间二氧化碳浓度与大气二氧化碳浓度比值之间的关系

Fig.5 Relationship between the ratio of intercellular carbon dioxide concentration to atmospheric carbon dioxide concentration and vapor pressure deficit

观测值的确定与选择对春小麦水分利用效率模拟有重要影响。



EsWUE 表示估算水分利用效率; SimWUE 表示模拟水分利用效率; 黑虚线、黑实线以及灰线分别表示 PAI_d/PAI_l 为 0.90、0.64 以及 0.30 时, 估算的水分利用效率与模拟的水分利用效率关系。拟合公式为 PAI_d/PAI_l 为 0.64 时, 估算的水分利用效率与模拟的水分利用效率的拟合关系式。

图6 估算水分利用效率与模拟水分利用效率关系

Fig.6 Relation of estimated water use efficiency and simulated water use efficiency

3 讨论

研究结果表明,在水分供给受限地区,特定作物在同一区域耗水量与产量的关系相对稳定,不随播种时间、播种密度以及水分供给量的影响而变化,但一些对作物生长极其不利的环境要素会影响作物耗水量与产量的关系,如过高的温度、较大的风速,或者其他自然灾害等^[38-39]。从本研究结果来看,黄土高原西端半干旱区由于其特殊的地理位置,对春小

麦生长发育而言,该区春夏空气温度相对不高,除水分限制外,无其他自然灾害,即使使用不同研究者获得的数据,依旧可以发现该区春小麦产量与耗水量之间呈明显的线性关系。与国外研究结果相比,该区春小麦生长季平均土壤水分蒸发量(156 mm)明显大于澳大利亚小麦的平均土壤水分蒸发量(60 mm 和 105 mm)。说明不同地区、不同气候条件下,小麦生育期平均土壤水分蒸发量不完全一致。而且,由澳大利亚不同年代数据所拟合获得的结果也说明小麦品种的更新与变化会对小麦潜在蒸腾效率与土壤水分蒸发造成影响。这是因为不同年代间作物品种的抗旱性和作物形态指标会有很大变化,从而引起作物生育期蒸散量在作物蒸腾与土壤水分蒸发间的比例发生调整,进而引起平均土壤水分蒸发量的改变。

从产量水平的角度看,蒸腾效率与生育期平均自由水面蒸发量呈反比。本研究根据这一结论,以研究区春小麦平均土壤水分蒸发量计算获得蒸散量,其与产量的关系与文献中所得耗水量与产量关系基本接近,证明了以生育期平均自由水面蒸发量与其他地区所得参数 k 计算黄土高原西端半干旱区雨养春小麦蒸腾效率的可行性。这也进一步说明尽管小麦品种、研究地区气候以及土壤等环境要素有所差异,但相同作物的蒸腾效率依然由大气蒸发力所决定。同时,本研究发现小麦蒸腾效率与 VPD 呈指数相关关系,这是因为 VPD 与大气蒸发力紧密相关,由 VPD 计算蒸腾效率也具有可行性。但是同时比较不同研究结果可以发现不同地区 VPD 与蒸腾效率关系之间存在差异。这可能是由于 VPD 的计算时段不同所造成的,例如在本研究中,VPD 是春小麦全生育期的平均值,而有的研究选择的是作物对水分较为敏感的白天时段 VPD 的平均值。

在本研究中,利用文献中春小麦耗水量与产量数据,获得了一条半干旱区雨养春小麦耗水量与产量的拟合直线,该直线斜率为 16.301。一般认为该数值是春小麦在本研究区以籽粒质量为标准计算获得的蒸腾效率,该值与其他研究者在不同地区所获得的小麦蒸腾效率结果^[40]接近。但是根据本研究计算获得的蒸腾效率(以干物质为标准)与观测计算获得的收获指数相乘,发现计算获得的以籽粒为标准的蒸腾效率明显小于以文献数据估测获得的蒸腾效率。

本研究区春小麦水分利用效率最大值出现在耗水量为 630 mm 左右,根据过去的研究结果,作物产量的最大值所对应的耗水量要大于水分利用效率出现最大值时的耗水量数值。根据图 4 拟合获得的直线,耗水量为 630 mm 时乘以 WUE 得到半干旱区雨养春小麦产量为 $7\,081\text{ kg/hm}^2$,说明该地区在水分供给充足条件下,春小麦产量可能还大于该数值。而同时,根据作物模型对本研究区毗邻地区的研究发现,与该区毗邻区域春小麦生产潜力可能为 $7\,500\sim 9\,000\text{ kg/hm}^2$ ^[41]。不过由于缺乏高水分的灌溉试验资料,该结果是否准确还无法验证。但是在纬度比该地区更高的河西地区,已有充足灌溉的小麦产量达 $10\,000\sim 12\,000\text{ kg/hm}^2$ 的记录^[42]。说明该地区产量达到 $7\,500\sim 9\,000\text{ kg/hm}^2$ 也有可能。但是考虑到本地区缺乏灌溉能力,春小麦基本依赖雨养,目前的雨养产量最高仅为 $3\,300\text{ kg/hm}^2$ 左右,因此,通过其他保水节水措施,充分利用有限的水分依旧是该地区春小麦产量提高的关键。

有研究结果表明,C3 作物叶片胞间二氧化碳浓度与大气二氧化碳浓度的比例相对稳定,为 0.7 ^[43-44]。但是也有一些研究认为 C_i/C_a 的变化受环境因素的影响,诸如水分胁迫,高温以及较大的大气蒸发力等。从本研究结果来看,随着生育期平均空气饱和差的变动, C_i/C_a 并不稳定,这与过去的一些研究结果一致^[16],即 C_i/C_a 与生育期平均空气饱和差变动呈负相关。同时一些作物在一天中光合参数的变化研究结果也证明了 C_i/C_a 随气象条件的日变化特征^[45]。这说明公式 4 中参数 c 并非定值,需根据生育期平均空气饱和差变化校正其数值,才能达到提高 k_c 模拟的精度。此外,需要注意本研究中 PAI_d 、 PAI_i 2 个参数的获得及其比值取值具有随机性,其数值变化也会影响水分利用效率的准确模拟,这 2 个参数的精确取值还有赖于更进一步的田间试验观测研究。

4 结 论

位于黄土高原西端的半干旱区雨养春小麦耗水量与产量之间关系,不受除自然灾害之外的其他因素影响。该区春小麦生育期平均土壤水分蒸发量为 156 mm,春小麦平均蒸腾效率为 $16.301\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ 。这可为评估定西区春小麦可获得产量(水分限制条件下的产量)潜力提供帮助。同

时由自由水面蒸发量可以推算春小麦蒸腾效率,这可为该区春小麦播种时间的选择提供参考,从而有利于小麦生育期避开大气蒸发力过强的季节,提高该区水分利用效率。此外,作物水分利用效率的模拟有赖于准确的生理参数估计,而这些参数的获得需要更为详细的试验观测。

参考文献:

- [1] 张秀云,姚玉璧,杨金虎,等. 中国西北气候变暖及其对农业的影响对策[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1514-1520.
- [2] 张慕琪,闻新宇,包 赟,等. 基于人工神经网络开发中国地区统计降尺度气候预估数据[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 221-233.
- [3] VADEZ V, KHOLOVA J, MEDINA S, et al. Transpiration efficiency: new insights into an old story[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(21): 6141-6153.
- [4] 谭 敏,余永富,胡正峰,等. 根系分布形式和土壤质地对作物蒸腾量影响的模拟研究[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1382-1388.
- [5] 李 聪. 农业水文模型中的关键参数对作物蒸腾量影响的数值研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- [6] 樊宪伟,李 柯,司海燕,等. 交替灌溉对山豆叶片气体交换和土壤水分以及产量指标的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 1076-1082.
- [7] TIAGO D G N, DAN Z, MICHAEL T R. Form, development and function of grass stomata[J]. Wiley, 2019, 101(4): 780-799.
- [8] 陈 斐,闫 霜,王鹤龄,等. 不同水分胁迫下的春小麦叶片气体交换参数和水分利用效率研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 821-832.
- [9] 张玉顺,路振广,张明智,等. 冬小麦叶片气体交换参数对水分胁迫的响应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(12): 32-40.
- [10] 买尔旦·阿不都卡德,阿丽亚·拜都热拉,李建贵,等. 果树叶面滞尘对叶片气体交换参数的影响——以叶城县核桃和苹果为例[J]. 新疆农业大学学报, 2021, 44(2): 91-97.
- [11] WARREN C C, JAMES R M, JAMES E N, et al. The relationship between cotton canopy temperature and yield, fibre quality and water-use efficiency[J]. Field Crops Research, 2015, 183: 329-341.
- [12] 麻雪艳,周广胜. 夏玉米叶片气体交换参数对干旱过程的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2372-2383.
- [13] KEITH R, CRISTINA C, MATTHEW J G, et al. Ecophysiological variation in two provenances of *Pinus flexilis* seedlings across an elevation gradient from forest to alpine[J]. Tree Physiology, 2011, 31(6): 615-625.
- [14] 林 文. 地膜和秸秆覆盖对黄土高原旱作农田土壤水库与作物产量的影响[D]. 北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [15] KIRKHAM M B. Principles of soil and plant water relations[M].

- Burlington: Elsevier Academic Press, 2004.
- [16] DING L, MILHIET T, PARENT B, et al. The plasma membrane aquaporin ZmPIP2;5 enhances the sensitivity of stomatal closure to water deficit[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2022, 45(4): 1146-1156.
- [17] ARMEN R K, CLAUDIO O S, DAVID R H. Transpiration-use efficiency of barley[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(1/2): 1-11.
- [18] 杨泽粟. 黄土高原植被生理过程和蒸散量计算方法及变化特征研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [19] 顾南, 张建云, 刘翠善, 等. 地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 15-24.
- [20] 吕陆鹏. 高寒草原区典型植被蒸散量变化及其影响因素分析[D]. 西宁:青海师范大学, 2021.
- [21] 梁硕, 关劼, 李璐, 等. 水分处理对冬小麦生育期耗水分配及产量影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(5): 52-59.
- [22] CUI Z J, YAN B, GAO Y H, et al. Crop yield and water use efficiency in response to long-term diversified crop rotations[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1024898.
- [23] YU A Z, CAI E T, YANG M, et al. An analysis of water use efficiency of staple grain productions in China: based on the crop water footprints at provincial level[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6682.
- [24] BLUM A. Effective use of water (EUI) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress[J]. *Field Crops Research*, 2009, 112(2/3): 119-123.
- [25] 毕郑文, 丁宏博, 刘玥婷, 等. 毛乌素沙区引种红枣叶片水分利用效率及其影响因子[J]. *节水灌溉*, 2022, 46(11): 66-72.
- [26] 胡倩, 谢丁兴, 潘岩, 等. 区域作物蒸散发时空变化及水分利用效率分析[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(9): 26-34.
- [27] 李凤民, 赵松岭, 段舜山, 等. 黄土高原半干旱区春小麦农田有限灌溉对策初探[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(3): 259-264.
- [28] 魏虹, 林魁, 李凤民, 等. 有限灌溉对半干旱区春小麦根系发育的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 106-110.
- [29] 张旭东, 杨兴国, 杨启国. 半干旱区旱作春小麦耗水规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 63-66.
- [30] LI F M, WANG P, WANG J, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 77-88.
- [31] 王晓娟, 黄高宝, 李卿沛, 等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 172-177.
- [32] 侯慧芝, 吕军峰, 张绪成, 等. 陇中半干旱区全膜覆土穴播小麦的土壤水分及产量效应[J]. *作物杂志*, 2010, 25(1): 21-25.
- [33] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 全膜覆土栽培对作物的水温效应[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1111-1117.
- [34] 李文龙, 许静, 李自珍. 干旱早期灌溉与施化肥对半干旱区春小麦产量及其水分利用效率的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 76-82.
- [35] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(22): 4392-4404.
- [36] ANGUS J F, HERWAARDEN A F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat[J]. *Wiley*, 2001, 93(2): 290-298.
- [37] FRENCH R J, SCHULTZ J E. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. some limitations to efficiency[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1984, 35(6): 765.
- [38] 李白玉, 陈金平, 刘安能, 等. 土壤增温对冬小麦生长特性、产量及耗水量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(6): 21-27.
- [39] DAVID C N, MERLE F V. Defining a dryland grain sorghum production function for the central great plains[J]. *Wiley*, 2017, 109(4): 1582-1590.
- [40] SCHILLINGER W F, SCHOFSTOLL S E, ALLDREDGE J R. Available water and wheat grain yield relations in a Mediterranean climate[J]. *Field Crops Research*, 2008, 109(1): 45-49.
- [41] 张思远. 春小麦生长和产量对生育期气象和农业干旱的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
- [42] 卢秉林, 包兴国, 车宗贤, 等. 长期留茬免耕对河西绿洲灌区春小麦产量及稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 117-126.
- [43] 韩玉薪. 不同CO₂浓度下调亏灌溉对玉米光合特性和气孔参数的影响[D]. 邯郸:河北工程大学, 2021.
- [44] 王晓, 韦小丽, 吴高殷, 等. CO₂浓度升高条件下不同氮素供应对闽楠幼苗光合特性及生长的影响[J]. *林业科学*, 2021, 57(4): 173-181.
- [45] 周宁, 沈士博, 景立权, 等. 自由空气中CO₂浓度和温度增高对梗稻叶片光合作用日变化的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2404-2416.

(责任编辑:陈海霞)