

基于稳定碳同位素的寒地黑土区玉米水分利用效率研究

张忠学^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 陈鹏^{1,2} 郑恩楠^{1,2} 刘明^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了进一步探究不同灌溉制度对寒地黑土区玉米水分利用效率(WUE)的影响,以玉米大田试验数据为基础,研究了玉米耗水规律以及叶片和产量水平的水分利用效率的变化规律,寻找符合东北地区玉米节水高产要求的灌水方案。同时研究了玉米叶片和籽粒碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)与不同水平水分利用效率的关系,验证了玉米稳定碳同位素分辨率对作物不同水平水分利用效率的指示作用。研究表明,全生育期灌溉定额为 $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$,灌水4次时玉米产量最高为 $14\,920.62\text{ kg}/\text{hm}^2$,但此时产量水平水分利用效率(WUE_y)较低;全生育期灌溉定额为 $600\text{ m}^3/\text{hm}^2$,灌水4次时玉米 WUE_y 最大为 $3.74\text{ kg}/\text{m}^3$,但产量偏低,综合考虑产量和水分利用效率,得出符合该地区玉米节水高产要求的灌水方案为全生育期灌水 $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$,灌水3次(苗期、拔节期、抽雄期),此时玉米 WUE_y 为 $3.65\text{ kg}/\text{m}^3$,产量较最大值未发生明显下降。拔节期玉米叶片碳同位素分辨率(ΔL_B)、成熟期叶片碳同位素分辨率(ΔL_C)和籽粒碳同位素分辨率(ΔF)变化范围分别为 $0.451\% \sim 0.542\%$ 、 $0.505\% \sim 0.598\%$ 、 $0.496\% \sim 0.526\%$ 。叶片碳同位素分辨率(ΔL)、 ΔF 与瞬时水分利用效率(WUE_i)、内在水分利用效率(WUE_n)、 WUE_y 均呈负相关, ΔL 与 WUE_n 的相关性优于其与 WUE_i 的相关性, ΔF 对 WUE_y 指示作用优于 ΔL 对 WUE_y 的指示作用,玉米 ΔL 、 ΔF 可分别作为指示 WUE_n 和 WUE_y 的重要指标。研究结果可为东北地区玉米生产提供理论支持及数据参考。

关键词: 玉米; 水分利用效率; 灌溉制度; 稳定碳同位素; 分辨率

中图分类号: S124⁺.2; S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0265-10

Water Use Efficiency of Maize in Black Soil of Cold Regions
Based on Stable Carbon Isotopes

ZHANG Zhongxue^{1,2} CHEN Shuaihong^{1,2} CHEN Peng^{1,2} ZHENG Ennan^{1,2} LIU Ming^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to further investigate the influence of different irrigation systems on water use efficiency of maize in black soil of the cold regions, based on the experimental data of maize fields, the patterns of water consumption and water use efficiency were analyzed at different scales, in order to find a irrigation scheme that meets the requirement of water saving and high yield of maize in Northeast China; the relationship between stable carbon isotope resolution ($\Delta^{13}\text{C}$) and water use efficiency (WUE) of maize leaves and grains was analyzed, the indicated effect of stable carbon isotope discrimination of maize on water use efficiency of different levels of crops was validated. The results showed that the irrigation quota was $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$ during the whole growth period, and the corn yield was up to $14\,920.62\text{ kg}/\text{hm}^2$ at four times, but the yield level of water use efficiency (WUE_y) was low; the whole growth period irrigation quota was $600\text{ m}^3/\text{hm}^2$, four times irrigation maize WUE_y was up to $3.74\text{ kg}/\text{m}^3$, but yield was low. Considering yield and water use efficiency, the conclusion was drawn that the irrigation scheme that met the requirement of high water saving and yield of maize in this area was irrigation quota of $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$ and irrigation three times (at seedling stage, jointing stage and tasselling stage) in the whole growth period. At this situation, the WUE_y of maize was $3.65\text{ kg}/\text{m}^3$, and there was no significant decline in output. The stable carbon isotope discrimination of maize leaves at elongation stage (ΔL_B), leaf carbon isotope discrimination at fruit maturation stage (ΔL_C) and fruit carbon isotope discrimination (ΔF) were

between 0.451% and 0.542%, 0.505% and 0.598%, 0.496% and 0.526%, respectively, ΔL and ΔF were negatively correlated with WUE_i , WUE_n and WUE_y , respectively. Furthermore, ΔL showed a better indicating capacity on WUE_n than on WUE_i under different water treatments, the effect of ΔF on WUE_y was better than the effect of ΔL on WUE_y . Thus ΔL and ΔF could be used as important evaluation indexes of WUE_n and WUE_y in crop leaves respectively, the results can provide theoretical support and data reference for maize production in Northeast China.

Key words: maize; water use efficiency; irrigation system; stable carbon isotope; discrimination

0 引言

黑龙江省是全国重要的玉米生产基地之一,玉米总种植面积占全省粮食作物种植总面积的53.9%,总产量占全省粮食产量的56%,但目前该地区玉米生产仍以漫灌为主^[1],通过田面蒸发和土壤渗漏损失的水量较大,水分利用效率偏低。因此,提出一种满足该地区玉米高产节水生产要求的灌溉方案,使玉米达到高产目的的同时,获得更高水平的水分利用效率,显得尤为重要。为实现上述目标,需要研究不同灌溉方案下玉米水分利用效率的变化规律,前人对水分利用效率的研究多集中在叶片水分利用效率(WUE_l)^[3]和产量水分利用效率(WUE_y)^[4]上。由于 WUE_l 是基于气体交换原理计算出来的,只能用来解释植株瞬时生理状态,无法对作物生产力以及相当长一段时期内的作物水分利用效率作出综合反映^[5]。而 WUE_y 的测算需要大量复杂繁琐的工作,且在测量干物质和作物蒸发蒸腾量的过程中存在较大误差,所计算出来的 WUE_y 准确程度不高。因此如何快速、有效、准确地评价不同灌溉方案下的玉米水分利用效率(WUE),成为该地区节水灌溉的研究重点之一^[6]。

自然界的稳定碳同位素有2种,其中¹²C约占98.89%,¹³C约占1.11%。植株叶片在光合作用的过程中会对碳同位素进行判别,对重碳同位素(¹³C)有排斥作用,因此,植株在固定CO₂积累生物量的过程中会发生碳同位素的分馏^[7-8],使得作物组织CO₂中¹³C与¹²C的比值小于空气中¹³C与¹²C的比值。 $\Delta^{13}C$ 反映出细胞间CO₂浓度与空气中CO₂浓度的比值(C_i/C_a)在一段时间范围内的变化,间接地传递出干物质中¹³C和¹²C的比值相对于空气中¹³C和¹²C比值的偏离程度^[9-10]。前人的研究发现, $\Delta^{13}C$ 能够很好地反映作物生育期 WUE_y 的变化情况,同时可以对叶片瞬时水分利用效率(WUE_l)和潜在水分利用效率(WUE_n)做出推断^[11]。目前,针对 $\Delta^{13}C$ 与长期 WUE 之间指示关系的研究主要集中在水稻、大豆、小麦等C₃作物以及一些木本植物上^[12-15],对于玉米等C₄作物的研究相对较少。相

较于C₃作物,C₄作物通过光合作用同化CO₂的过程更加复杂,因此环境条件的变化会使C₄作物的光合作用以及碳同位素分馏作用产生不同于C₃作物的变化规律^[16-17]。

本文通过理论分析和田间试验相结合的方法,研究不同灌溉方案下玉米不同水平水分利用效率变化规律,分析不同灌溉方案下的玉米拔节和成熟2个时期叶片碳同位素分辨率(ΔL)以及成熟期果实碳同位素分辨率(ΔF)分别与不同水平 WUE 之间的相关关系,旨在进一步解释不同灌溉制度条件下玉米水分利用规律,找出适合东北地区玉米生产的最优灌溉制度,同时为寒地黑土区玉米 WUE 的研究提供一种准确、有效、快速的评价方法,为该地区玉米生产提供理论支撑及数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在黑龙江省大庆市肇州县农业技术推广中心进行。该中心地处125°17'57.70"E,45°42'57.50"N,黑龙江省西南部,松嫩平原腹地,属于大陆性寒温带气候,大于10℃活动积温2 845℃,无霜期138 d,多年的平均降水量为463 mm,本试验各时期降雨量见图1。年风向多属于西南风和西北风,多风少雨,十年九春旱。试验供试农田土壤类型为碳酸盐黑钙土,基础理化性质:pH值6.4,耕层土壤(0~20 cm)基础肥力如下(均为质量比):全氮1.41 g/kg、全磷0.88 g/kg、全钾19.86 g/kg、有机质28.73 g/kg、碱解氮110.17 mg/kg、速效磷44.71 mg/kg、速效钾220.16 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用灌水定额和灌水次数2因素试验,试

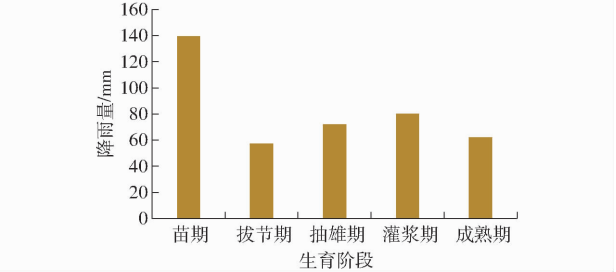


图1 玉米各生育阶段降雨量

Fig.1 Rainfall during maize growth stages

验处理方案见表 1。灌溉量设置 4 个水平,依次为 800、700、600、500 m³/hm²。灌水次数设置 3 个水平,分别为灌水 4 次(苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期)、灌水 3 次(苗期、拔节期、抽雄期)和灌水 2 次(苗期、拔节期)。试验共计 13 个处理,以不灌水作为空白对照,3 次重复,共计 39 个试验小区。小区采用随机区组布置,每个小区面积为 104 m²(10 m × 10.4 m),试验区总面积为 0.41 hm²。试验区每公顷保苗 67 500 株,每小区 16 条垄,垄宽 65 cm,植株间距 23 cm,保护区宽度 5 m,保护行宽 1 m。

表 1 试验处理设计

Tab.1 Design of experimental treatments

处理	灌溉定额/(m ³ ·hm ⁻²)	灌水次数	小区灌水量/m ³
L1	800	4	2.08
L2	700	4	1.82
L3	600	4	1.56
L4	500	4	1.30
L5	800	3	2.77
L6	700	3	2.43
L7	600	3	2.08
L8	500	3	1.73
L9	800	2	4.16
L10	700	2	3.64
L11	600	2	3.12
L12	500	2	2.60
CK	0	0	0

试验玉米品种为当地高产品种“大龙 568”,于 2017 年 4 月 21 日施基肥,4 月 28 日播种,6 月 13 日进行苗期灌水,7 月 5 日进行拔节期追肥和灌水,7 月 24 日进行抽雄期灌水,8 月 25 日进行灌浆期灌水,到 9 月 25 日成熟期结束,全生育期共 150 d。4 次灌水均在各生育阶段开始 10~15 d 进行,若该时段出现降雨,则灌水延后数天进行。试验所用的肥料为尿素(含氮质量分数 46%),磷酸二铵(含氮质量分数 18%、含磷质量分数 46%)和硫酸钾(含钾质量分数 58%)。各处理的施肥量相同,折算成元素量为施纯氮 225 kg/hm²,施纯磷 90 kg/hm²,施纯钾 90 kg/hm²,氮肥按照基肥:拔节肥为 2:1 的比例分施。

试验灌水方式为喷灌,采用 5983 型摇臂式喷头(喷洒半径 9.0~14.0 m、流量 0.74~1.02 m³/h),喷头安装在长 1.5 m 的支管上。灌水时将 4 个喷头分别布置在小区四角上,逐一对各小区进行灌水。为防止各小区之间发生水分交换,调节喷头射程略小于小区长度,且在各个小区之间设置 30 cm 宽的缓冲区。灌溉所用水源为当地地下水,用管道末端的水表控制灌水量。

1.3 观测内容与方法

1.3.1 土壤水分

从苗期开始(2017 年 5 月 16 日),利用土钻每隔 10 d 取一次土样,每个试验小区取 2 个测点,测点间距大于 1 m。取土深度 80 cm,分为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm,共 5 层。取出的土样在 105℃ 干燥箱中干燥至质量恒定,测算每个小区的土壤含水率。各时期玉米耗水量计算公式为

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P \tag{1}$$

式中 ET_{1-2} ——玉米阶段耗水量,mm

n ——土层总数目

γ_i ——第 i 层土壤干容重,g/cm³

H_i ——第 i 层土壤厚度,cm

W_{i1} ——第 i 层土壤在时段初质量含水率,%

W_{i2} ——第 i 层土壤在时段末质量含水率,%

M ——时段内灌水量,mm

P ——时段内降水量,mm

试验地地下水埋深较大(超过 6 m),且地势平坦,不计地下水补给、深层渗漏以及地表径流。

玉米产量水平水分利用效率(WUE_y)计算公式为

$$WUE_y = Y/ET \tag{2}$$

式中 Y ——玉米产量,kg

ET ——玉米全生育期耗水量,mm

1.3.2 叶片水分利用效率和气体交换参数

于各个生育期内晴朗无云的 09:00—11:00,利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合作用测定仪(LI-6400XT,LI-COR Corporation,USA),在每个小区内选取 5 株生长状态良好的玉米,测量其从上至下第 3 片叶的光合速率、呼吸速率以及气孔导度,每片叶片连续测量 3 次,取平均值。测定时设置叶室内光照强度 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、CO₂ 浓度 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,待叶片适应叶室内环境后进行测定。

叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)用作物通过蒸腾作用消耗一定量水所同化的 CO₂ 量表示,计算公式为

$$WUE_i = P_n/T_r \tag{3}$$

式中 P_n ——净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

T_r ——蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

叶片内在水分利用效率(WUE_n)用作物通过蒸腾作用消耗一定量水所同化的水量表示,计算公式为

$$WUE_n = P_n/G_s \tag{4}$$

式中 G_s ——气孔导度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

1.3.3 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{13}\text{C}$

于拔节期和成熟期在各个小区随机取 3 株玉米,将叶片从植株上分离,置于 105℃ 干燥箱中杀青 30 min,然后在 70℃ 条件下干燥 48 h,在干燥器中冷却至质量恒定。将干燥后的叶片进行研磨,过 80 目筛后装入样品袋中密封保存备测。同时将成熟期测产后的干燥玉米粒研磨,过 80 目筛后装入样品袋中密封保存。稳定同位素参数在东北农业大学农业部农业水资源高效利用重点实验室内进行测量,采用元素分析仪(Flash 2000 HT 型)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, USA)联用的方法测定叶片和果实的稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)和稳定碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)。

碳同位素参数值的计算采用国际 V-PDB 标准,根据 FARQUHAR 等^[8]的公式计算 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standard}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}$ ——叶片或籽粒样品中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率
 $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}$ ——标准物质尿素中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率

样品的 $\Delta^{13}\text{C}$ 计算公式为

$$\Delta^{13}\text{C} = \frac{\delta_{\text{air}} - \delta_{\text{sample}}}{1 + \delta_{\text{sample}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 δ_{air} ——空气中 CO_2 的 $\Delta^{13}\text{C}$ 值(−0.8%)
 δ_{sample} ——测量得到的样品中 $\Delta^{13}\text{C}$ 值

1.3.4 产量

2017 年 9 月 25 日进行玉米产量测算,按照对角线原则从每个小区中随机选取 5 个测点,每个测点连续选取 5 株玉米分别测量单株穗长、穗粗、单株穗质量、秃尖长度和百粒鲜质量。然后将玉米鲜粒放入 70℃ 的干燥箱中干燥 48 h,在干燥器中冷却到质量恒定,用精度为 0.01 g 的电子天平称量百粒干质量,装入样品袋中备用。各小区产量计算公式为

$$Y = W_1 / W_2 W_3 N \quad (7)$$

式中 W_1 ——玉米百粒干质量,g
 W_2 ——玉米百粒鲜质量,g
 W_3 ——玉米单株平均穗质量,g
 N ——每公顷玉米株数

1.4 数据统计分析

采用 EXCEL 2013 对试验数据进行收集与整理,运用 SPSS 19.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 对玉米产量、叶片水平水分利用效率以及叶片和果实的 $\Delta^{13}\text{C}$ 等进行方差分析 (Analysis of variance,

ANOVA),采用 Duncan 多重比较方法进行各处理的显著差异性分析,最后利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉制度条件下玉米各生育期日均耗水规律

由图 2 可知,不同灌溉制度条件下各处理玉米生育期日均耗水强度均呈抛物线趋势变化,在苗期和收获期各处理的日均耗水强度较小且趋于一致。这是由于苗期植株叶面积较小,作物需水量主要以棵间蒸发为主,植株本身蒸腾能力较弱。处理 L1~L8 的玉米日均耗水强度均在拔节期到抽雄期达到峰值,随后大幅度下降,在灌浆期到成熟期下降速度减缓。在灌水次数相同条件下,随着灌溉定额的增加,玉米各生育期日均耗水强度呈逐渐增加的趋势,在拔节期处理 L1 的日均耗水强度最大,峰值为 5.89 mm/d,比 L2 处理提高 7%。处理 L12 的日均耗水强度最小,峰值为 4.21 mm/d,比处理 L1 降低了 30.5%。在灌溉定额相同的条件下,玉米日均耗水强度随灌水次数的增加而增大,处理 L1 的峰值比 L5 提高了 7.2%。结果表明,玉米在拔节中期到抽雄末期生长最为旺盛,此时植株迅速生长,叶面积指数快速增加,植株的生长由营养生长逐步向生殖生长转变,同时 7 月气温较高,使得作物耗水量显著增加。在收获期植株衰老,生理活动减弱,呼吸作用大幅降低,因此收获期各处理日均耗水量降低且逐渐趋于一致。L9、L0、L11、L12、CK 5 个处理的日均耗水强度峰值在拔节期提前出现,在抽雄期初期开始逐渐下降,并且这些处理的峰值明显小于 L1 和 L2 处理。这是因为灌水 2 次的处理在苗期和拔节期灌水量较大,超过了土壤饱和含水率,因此大量水分通过田面蒸发损失。

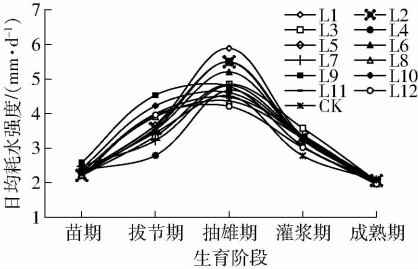


图 2 各生育阶段各处理玉米日均耗水强度变化曲线
Fig. 2 Daily average water consumption intensity curves of maize under different irrigation treatments at different growth stages

2.2 不同灌溉制度对玉米不同水平水分利用效率以及产量的影响

灌水处理与玉米水分利用效率和产量密切相

关,由表 2 可知,拔节期玉米 WUE_i 、 WUE_n 变化范围为 7.56 ~ 10.03 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 和 104.31 ~ 168.19 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。成熟期玉米 WUE_i 、 WUE_n 变化范围为 8.43 ~ 29.84 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 和 73.15 ~ 161.14 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。各处理玉米拔节期 WUE_i 在灌水 2 次的情况下未表现出显著差异,在灌水 4 次和 3 次的情况下各处理间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$),并且灌水 2 次条件下,各处理 WUE_i 明显小于 CK 处理,说明在苗期和拔节期灌水量过大会抑制玉米的光合能力,同时大量水分通过蒸腾作用散失,水分利用效率降低,无法达到最佳水分利用状态。相比于 WUE_i 而言,玉米 WUE_n 对苗期和拔节期内田间水量变化的响应更加敏感,说明 WUE_n 可以更有效地反映玉米光合作用过程中叶片对水分的吸收利用状况,更好地指示叶片 WUE 。在成熟期,灌水次数相同时, WUE_i 和 WUE_n 均随灌溉定额增加呈增大趋势,说明在玉米生育后期,适当的增加灌溉水量可以提高叶片光合能力,提高叶片水分利用效率。成熟期各处理 WUE_i 、 WUE_n 均显著高于 CK 处理。

各处理玉米耗水量 (ET) 变化范围为 378.06 ~ 428.73 mm,产量 (Y) 变化范围为 11 180.43 ~ 14 920.62 kg/hm^2 。处理 L9 和 L1 的 ET 明显大于

其余处理,这是因为灌水量超过了土壤饱和含水率,大部分灌溉水通过田面蒸发直接损失。3 种不同灌水次数水平下玉米 ET 、 Y 均随着灌溉定额的增加呈增大趋势,且各处理值均显著大于 CK 处理。在灌水次数相同的情况下,各处理之间玉米 ET 、 Y 均表现出显著性差异 ($P < 0.05$),在灌溉定额相同的情况下,不同灌水次数之间玉米 ET 、 Y 差异不显著,说明玉米 ET 、 Y 主要受到灌溉定额影响,而对灌水次数的变化不敏感。不同处理玉米 WUE_y 变化范围为 2.90 ~ 3.74 kg/m^3 ,L3 处理的 WUE_y 最大,L11 处理的 WUE_y 最小。在灌水次数为 3 次的条件下,各处理间 WUE_y 差异显著 ($P < 0.05$),且显著高于 CK 处理,而灌水次数为 4 次和 2 次的情况下,不同处理(包括对照处理)间 WUE_y 均未表现出显著性差异。处理 L9、L10、L11、L12 的 Y 、 WUE_y 显著小于其余各个处理,说明在苗期和拔节期大量灌水,抽雄期和灌浆期缺水不利于玉米产量的形成,同时仍保持较大的耗水量,降低了水分利用效率。相较于产量最高的 L1 处理,处理 L5 在产量保持同等水平的情况下 WUE_y 提高了 2.0%,表明喷灌玉米在灌溉定额为 800 m^3/hm^2 、灌水次数为 3 次(苗期、拔节期、抽雄期)时节水高产效果达到最优。

表 2 不同灌溉处理下不同时期玉米 WUE_i 、 WUE_n 、 WUE_y 、 ET 和 Y

Tab.2 WUE_i , WUE_n , ET , Y and WUE_y of maize under different irrigation treatments and growth stages

灌水 次数	处理	拔节期		成熟期		$ET/$ mm	$Y/$ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$WUE_y/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
		$WUE_i/$	$WUE_n/$	$WUE_i/$	$WUE_n/$			
		($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)			
4	L1	7.90 ^c	104.31 ^d	29.84 ^a	140.28 ^a	424.16 ^a	14 920.62 ^a	3.58 ^a
	L2	9.75 ^{ab}	149.38 ^b	23.80 ^b	139.72 ^b	412.04 ^b	14 511.02 ^b	3.52 ^a
	L3	10.03 ^a	168.19 ^a	14.64 ^c	138.27 ^c	379.77 ^d	14 293.94 ^c	3.74 ^a
	L4	8.21 ^c	158.42 ^{ab}	11.03 ^d	87.85 ^d	399.57 ^a	14 220.88 ^d	3.52 ^a
	CK	9.47 ^b	129.45 ^c	8.43 ^e	73.15 ^e	378.06 ^e	11 180.43 ^e	2.96 ^b
3	L5	7.73 ^c	110.18 ^c	26.97 ^a	161.14 ^a	403.11 ^b	14 712.47 ^b	3.65 ^a
	L6	7.56 ^c	113.20 ^c	20.76 ^b	103.07 ^b	414.64 ^a	14 769.10 ^a	3.56 ^b
	L7	9.87 ^a	156.26 ^a	13.59 ^c	99.21 ^c	399.81 ^c	13 886.19 ^c	3.47 ^{bc}
	L8	8.60 ^b	154.98 ^a	12.26 ^d	80.22 ^d	402.21 ^b	12 629.38 ^d	3.14 ^d
	CK	9.47 ^a	129.45 ^b	8.43 ^e	73.15 ^e	378.06 ^d	11 180.43 ^e	2.96 ^e
2	L9	8.67 ^b	128.75 ^c	15.75 ^a	131.87 ^a	428.73 ^a	12 748.61 ^b	2.97 ^a
	L10	8.67 ^b	125.34 ^c	14.47 ^d	104.75 ^b	418.27 ^b	12 904.69 ^a	2.96 ^a
	L11	8.19 ^c	112.30 ^d	11.84 ^c	100.94 ^c	405.77 ^c	11 778.83 ^c	2.90 ^a
	L12	9.05 ^{ab}	137.16 ^a	10.32 ^d	88.52 ^d	386.81 ^d	11 397.52 ^d	2.95 ^a
	CK	9.47 ^a	129.45 ^b	8.43 ^e	73.15 ^e	378.06 ^e	11 180.43 ^e	2.96 ^a

注:表中同一列不同小写字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.3 不同灌溉制度下玉米叶片和籽粒的碳同位素分辨率

由图 3 可知,不同灌溉制度下玉米拔节期叶片碳同位素分辨率 (ΔL_B) 变化范围为 0.451% ~ 0.542%,成熟期叶片和籽粒碳同位素分辨率 (ΔL_C 、

ΔF) 变化范围分别为 0.505% ~ 0.598%、0.496% ~ 0.526%。拔节期 L11 处理玉米 ΔL_B 最大,为 0.542%,相比 CK 处理高出了 18.34%。成熟期 L10 处理 ΔL_C 最大、L7 处理 ΔF 最大,分别为 0.598%、0.526%,相比于 CK 处理分别高出了

11.40%和3.47%。成熟期不同灌溉处理不同器官间 $\Delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异($P<0.05$),并且 ΔL 显著大于 ΔF ($P<0.01$),这是由于不同器官之间的化学组成不同(包括脂质、木质素、纤维素),同时说明碳水化合物由光合器官向营养存储器官转移时发生了碳同位素分馏作用,使得不同器官中 ^{13}C 积累量不同。在灌水次数相同时,不同时期玉米 ΔL 均随着灌溉定额的增加而增大,说明灌水量的增加提高了玉米叶片对 ^{13}C 和 ^{12}C 的辨别能力,提高了对重碳的排斥水平,因此叶片 ^{13}C 积累量减少, ^{13}C 和 ^{12}C 比值降低,进而使 ΔL 高于灌水量较低的处理。在同一灌溉定额水平下,玉米籽粒 ΔF 随着灌水次数减少呈逐渐增大的趋势,说明生育阶段内增加灌水量会抑制碳同位素的分馏,使得 ^{12}C 在籽粒中大量富集, ^{13}C

积累量减少。

通过方差分析可知,玉米 ΔL_{B} 、 ΔL_{C} 、 ΔF 均在不同灌水条件下差异显著($P<0.05$)。这与前人在水稻、葡萄等植物上的研究结果一致^[18-19]。当灌水次数相同时,不同灌溉定额下 ΔL_{B} 、 ΔL_{C} 、 ΔF 在各处理之间的差异均达到显著水平($P<0.05$)。但是在灌溉定额相同时,只有 ΔL_{B} 、 ΔL_{C} 在各处理之间差异显著($P<0.05$), ΔF 未表现出显著性差异,说明在光合产物由叶片向籽粒迁移的过程中发生的碳同位素分馏作用主要受到灌水量影响,对不同灌水次数的响应水平较低。同时比较成熟期玉米叶片和籽粒 $\Delta^{13}\text{C}$ 的均值可知, ΔL_{C} 大于 ΔF ,并且 ΔL 的离散系数(5.32%)小于 ΔF 的离散系数(8.62%),说明玉米 ΔL 对灌溉定额和灌水次数变化的响应效果优于 ΔF 。

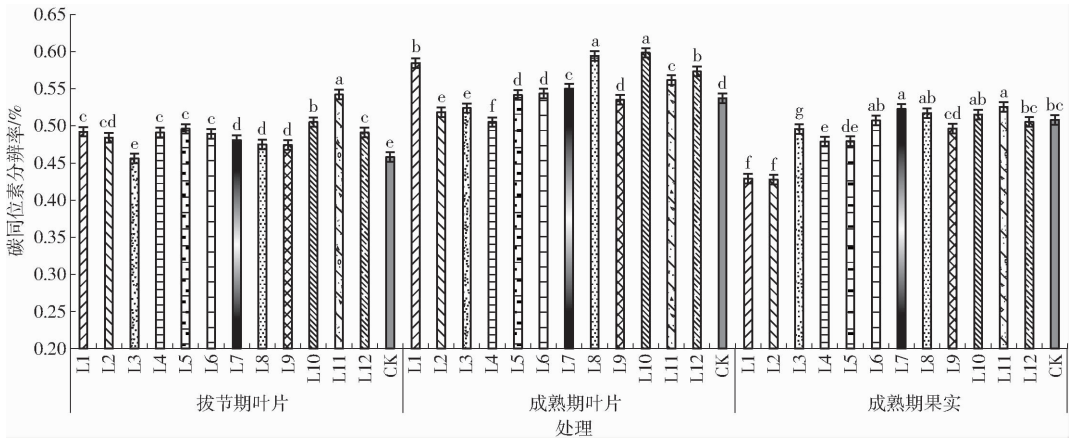


图3 不同灌溉处理下玉米叶片和果实的碳同位素分辨率

Fig. 3 Change of ^{13}C discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$) in leaves (ΔL) and fruit (ΔF) of maize under different irrigation treatments

2.4 不同灌水次数下玉米 ΔL 、 ΔF 与不同水平 WUE 、 ET 、 Y 的相关关系

为了研究稳定碳同位素指标与玉米不同水平 WUE 之间的相关关系,对 ΔL 、 ΔF 与 WUE_i 、 WUE_n 、 WUE_y 、 ET 、 Y 之间分别进行了线性相关分析,相关系数如表3所示。不同灌溉方式下,不同时期玉米 ΔL 与 WUE_i 、 WUE_n 、 WUE_y 之间均呈负相关,除灌水4次条件下 ΔL_{B} 与 WUE_n 之间的相关性达到显著水平($P<0.05$)外,其余条件下 ΔL_{B} 、 ΔL_{C} 与 WUE_i 、 WUE_n 的相关性均不显著,说明在全生育期进行4次灌水使玉米 ΔL 与叶片 WUE 更加密切。总体上可以看出,玉米 ΔL 与 WUE_n 的相关性要优于其与 WUE_i 的相关性,并且 ΔF 与 WUE_y 的相关性优于 ΔL ,说明相较于 WUE_i 而言,玉米 ΔL 可以更好地反映 WUE_n 的变化,并且 ΔF 能够比 ΔL 更好地指示玉米 WUE_y 。

在灌水4次的情况下, ΔL_{B} 、 ΔF 分别与 ET 呈显著正相关($P<0.05$),其他情况下相关性未达到显著水平, ΔL_{B} 与 Y 仅在灌水3次的条件下呈显著正相关($P<0.05$),说明玉米全生育期进行3次灌水

能更有效地调控叶片光合性状与水分利用的能力,更好地体现 ΔL 对 WUE_y 的指示作用。在灌水次数为2次时, ΔL_{B} 、 ΔF 分别与 ET 和 Y 的相关性均显著小于其余两种灌水次数,说明在苗期和拔节期大量灌水,抽雄期和灌浆期缺水的灌水方式影响叶片光合特性以及光合产物向籽粒转移过程中的碳同位素分馏作用,此时 ΔL 、 ΔF 无法准确指示玉米耗水强度和产量。

2.5 不同灌溉制度条件下玉米 ΔL_{C} 、 ΔF 与 WUE 、 ET 、 Y 的相关关系

如图4所示,通过对成熟期玉米 ΔL_{C} 、 ΔF 、 WUE_i 、 WUE_n 以及 ET 、 Y 的数据进行统计分析可以得出,在不同灌溉处理下, ΔL_{C} 与 WUE_i 、 WUE_n 的相关性存在显著差异,同时 ΔL_{C} 与 WUE_n 呈显著负相关($P<0.05$),回归方程式为

$$WUE_n = -605.81\Delta L_C + 445.4$$
$$(R^2 = 0.4106, P < 0.05)$$

其相关性优于 ΔL_{C} 与 WUE_i 的相关性。 ΔF 与 WUE_y 、 Y 均呈显著负相关,回归方程式分别为

表 3 不同灌水次数下玉米 ΔL 、 ΔF 与 WUE 、 ET 、 Y 的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between ΔL , ΔF and WUE , ET and Y under different irrigation frequencies								
灌水次数	指标	ΔL_B	ΔL_C	ΔF	WUE_i	WUE_n	WUE_y	ET
4	ΔL_C	0.181						
	ΔF	0.003	0.571					
	WUE_i	-0.772	-0.667	-0.191				
	WUE_n	-0.856 *	-0.702	-0.523	0.786			
	WUE_y	-0.660	-0.251	-0.756 *	0.717	0.784		
	ET	0.893 *	0.483	0.954 *	-0.170	0.024	-0.529	
	Y	0.627	0.112	-0.703	0.421	0.606	0.905 *	0.688
3	ΔL_C	0.095						
	ΔF	0.513	0.434					
	WUE_i	-0.709	-0.146	-0.005				
	WUE_n	-0.790	-0.354	-0.831	0.933 *			
	WUE_y	-0.963 **	-0.301	-0.452	0.889 *	0.821		
	ET	0.956 *	0.193	0.459	0.848	0.789	-0.840	
	Y	0.977 *	-0.181	-0.392	0.877	0.763	0.987 **	0.873
2	ΔL_C	0.533						
	ΔF	0.823	0.467					
	WUE_i	-0.332	0.189	-0.202				
	WUE_n	-0.751	-0.064	-0.303	0.949 *			
	WUE_y	-0.857	-0.482	-0.415	0.222	-0.508		
	ET	0.270	0.136	0.114	0.989 *	0.953 *	-0.121	
	Y	0.155	0.318	-0.137	0.962 *	0.833	0.309	0.945 *

注：* 表示变量之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著，** 表示变量之间在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

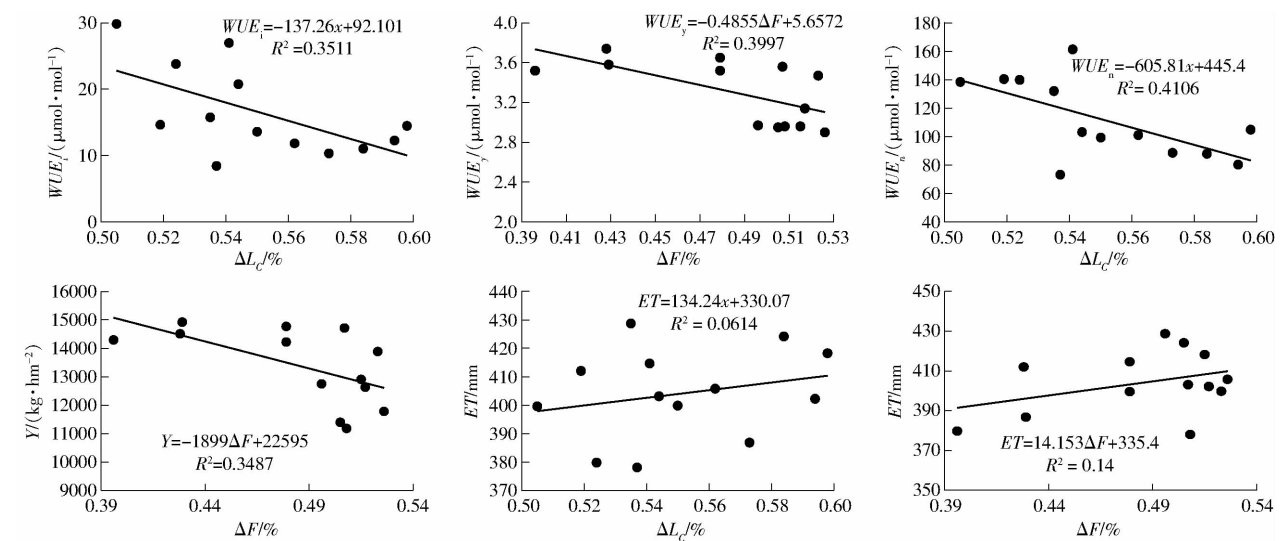


图 4 不同灌溉制度下 ΔL_c 、 ΔF 与 WUE 、 ET 、 Y 的相关关系

Fig. 4 Relationships between ΔL_c , ΔF and WUE , ET and Y under different irrigation treatments

$$WUE_y = -0.4855\Delta F + 5.6572$$

($R^2 = 0.3997, P < 0.05$)

$$Y = -18990\Delta F + 22595$$

($R^2 = 0.3487, P < 0.05$)

率的重要指标,较好地反映出玉米生育期内灌水量变化对作物耗水规律的影响。

3 讨论

ΔL_c 、 ΔF 与 ET 均呈正相关, R^2 分别为 0.061 4、0.14,均未达到显著水平,但是 ΔF 与 ET 的相关性优于 ΔL_c 与 ET 的相关性。结果表明, ΔL_c 能够作为玉米叶片水平水分利用效率的评价指标,可以反映出作物全生育期叶片同化 CO_2 、吸收水分和养分的能力, ΔF 能够作为指示玉米产量水平水分利用效

玉米在生长期需要大量水分,但其承受淹水的能力较弱。任伯朝等^[20]研究表明,在三叶期淹水对玉米的影响较为显著,且淹水过后植株吸收养分能力减弱。本研究中,在全生育期灌水 2 次的条件下,苗期和拔节期灌水量超过了土壤饱和含水率,植株处于淹水状态,使得玉米日耗水强度在拔节初期

提前出现峰值,但该峰值明显小于全生育期灌水4次和灌水3次的处理。这是因为淹水状态会降低光合羧化酶(RuBP酶和PEP酶)活性,降低光合同化能力^[21],同时引起叶片气孔的关闭,抑制叶片的呼吸蒸腾作用^[22]。这与梁哲军等^[23]对淹水状态下盆栽玉米的研究结果基本一致。本研究还发现,在抽雄期和拔节期不灌水时,玉米日耗水强度较其他处理提前下降,且在生育后期日耗水强度较小,这是因为水分亏缺抑制了叶片中叶绿素的生物合成,提高叶绿素酶活性并加速叶绿素分解,导致叶片光合能力下降^[24],植株吸水能力降低。余卫东等^[25]发现,苗期和拔节期淹水对玉米的影响较为显著,连续淹水3 d,玉米产量显著下降。本研究中,全生育期灌水2次的条件下,产量同样出现大幅度下降的现象,4个处理平均产量较4次灌水和3次灌水分别降低18.67%、14.68%。这是因为苗期淹水胁迫抑制了植株吸收水分和养分的能力,并且干物质过多的向穗部转移,降低了籽粒干质量^[26]。这与马玉平等^[27]对黄淮海地区玉米的研究结果一致。研究证明,将灌溉水量较为均衡的分配给玉米生长的各个时期内,尤其是在抽雄—乳熟期期间进行适量的补充灌水有利于玉米的生长发育,促进产量的形成,达到高产的目的。本研究还发现,灌溉次数相同时,适当减小灌溉定额,产量降低不明显,而水分利用效率显著提高,这与孙雪梅等^[28]的研究结果基本一致。

作物通过光合作用吸收的 CO_2 在各组织之间移动时会发生碳同位素分馏作用,这是光合羧化作用中核酮糖二磷酸羧化酶(Rubisco)对 $^{12}\text{CO}_2$ 和 $^{13}\text{CO}_2$ 产生不同的催化反应所导致的结果,使得植株在吸收 CO_2 的过程中,会对 $^{13}\text{CO}_2$ 产生排斥作用,导致作物组织中 ^{13}C 和 ^{12}C 比值小于大气中 ^{13}C 和 ^{12}C 比值。由于 C_4 作物和 C_3 作物的光合羧化酶(RuBP酶和PEP酶)和羧化作用在时空上存在差异,因此两者对 $^{13}\text{CO}_2$ 有不同的识别和排斥作用,使得它们组织内部的 $\Delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异。本研究中,玉米叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 在不同时期之间差异明显,这与CHEN等^[29]对加拿大4种基因型大麦的研究结果不一致,可能是因为 C_4 作物维管束鞘细胞的存在使得 C_4 作物的碳同位素分馏作用比 C_3 作物更加复杂,维管束鞘细胞会使向内转移的部分 CO_2 泄漏出来重新进入叶肉细胞之中, CO_2 泄漏量的不同会引起组织中 $\Delta^{13}\text{C}$ 的变化^[30]。本研究同时发现,随着生育期的推进,玉米叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 逐渐增大,这与陈平等^[31]对盆栽决明子的研究结果基本一致。CABRERABOSQUET等^[32]发现缺水状态下小麦叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE_i 呈负相关。CHANDEA等^[33]对雨养条件下4种基因型柱花草

研究发现叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE_n 也呈显著负相关。本研究也表明玉米在喷灌条件下叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE_i 、 WUE_n 分别呈负相关,这与El-SHERKAWY等^[34]对自然条件下木薯的研究结果一致。同时本研究发现,成熟期玉米叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE_n 的相关性优于 WUE_i ,因为 WUE_n 能够更加有效地反映出叶片气孔阻力变化所引起的胞间 CO_2 浓度变化,进而反映在叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 的变化上,这与前人对梨枣树^[8]、大麦^[35]的研究结果一致。表明叶片 $\Delta^{13}\text{C}$ 可以很好地指示作物 WUE_n ,同时说明在不同水分处理条件下,作物 $\Delta^{13}\text{C}$ 可以作为评价玉米叶片水分利用效率的一个可靠指标。

由于 ΔF 能够直接记录果实生长阶段光合产物向果实中转移的信息,因此对 Y 有较好的指示作用。本研究发现,成熟期玉米 ΔF 与 Y 之间的负相关性达到显著水平($P < 0.05$),说明玉米 $\Delta^{13}\text{C}$ 在不同灌溉条件下可以很好地表征其产量,这与MONNEVEUX等^[36]研究结果基本一致。梁银丽等^[37]研究发现小麦 ΔL 与 WUE_y 呈极显著负相关。ANYIAA等^[35]发现,不同水分处理下,大麦的 ΔF 与 WUE_y 呈较强负相关。在本研究中,成熟期玉米 ΔL 、 ΔF 与 WUE_y 同样呈负相关性,且 ΔF 与 WUE_y 相关性达到显著水平,因为产量的形成受到环境因素的强烈影响, ΔL 能够反映玉米结实期对水分的利用状况以及全生育期植株光合特性的变化情况, ΔF 能够有效地记录玉米结实期内的温度、湿度、土壤水分等外界环境因素变化以及果实成熟期植株对水分变化的响应状况。这与GRANT等^[38]对草莓的研究结果一致,说明玉米 ΔL 、 ΔF 在一定程度上可以作为快速、准确评估产量水平水分利用效率的量化指标。

目前大量的研究集中在利用 ΔL 、 ΔF 表征作物不同水平水分利用效率上,但是对 ΔL 、 ΔF 与 ET 、 Y 的相关关系仍存在争议,不同部位 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE 相关关系的稳定性仍不明确^[39],尤其与 WUE_y 的关系仍需要更深入的研究。野外试验过程中 $\Delta^{13}\text{C}$ 与 WUE 的相关性受到环境因素综合的影响,本研究仅考虑不同灌溉制度下水分变化对 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 WUE 的影响,其余不同环境因素下玉米不同部位 $\Delta^{13}\text{C}$ 对 WUE 的表征作用尚需要进一步验证。此外本研究中设置的灌水量和灌水次数梯度均较少,未考虑玉米生长性状发生突变时的水量临界值,因此增加梯度以进一步研究节水高产的玉米灌水方案很有必要。

4 结论

(1)不同灌溉制度下玉米日耗水强度均在拔节

期达到最大。灌溉定额为 $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，灌水 4 次时的日耗水强度最大，最大峰值为 5.89 mm/d ，灌溉定额为 $500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，灌水 2 次时的日耗水强度最小，峰值为 4.21 mm/d 。灌水 2 次时玉米日耗水强度较灌水 3 次和 4 次的处理提前达到峰值。不同处理拔节期到成熟期玉米 WUE_i 变化范围为 $7.56 \sim 29.84\text{ }\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ， WUE_n 变化范围为 $73.15 \sim 168.19\text{ }\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ， WUE_y 变化范围为 $2.90 \sim 3.74\text{ kg}/\text{m}^3$ 。处理 L1 的产量最高为 $14\,920.62\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，但 WUE_y 仅为 $3.58\text{ kg}/\text{m}^3$ ，处理 L3 的 WUE_y 最大为 $3.74\text{ kg}/\text{m}^3$ ，但此时产量有大幅度下降，综合考虑产量和水分利用效率，得出符合玉米节水高产生产要求的灌溉制度为全生育期灌水为 $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，分别在苗期、拔节期、抽雄期灌水 3 次，该灌溉制度下玉米 WUE_y 为 $3.65\text{ kg}/\text{m}^3$ ，产量为 $14\,712.47\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，

此时成熟期 WUE_i 和 WUE_n 均最大。

(2) 拔节期玉米叶片碳同位素分辨率(ΔL_B)、成熟期叶片碳同位素分辨率(ΔL_C)和果实碳同位素分辨率(ΔF)分别为 $0.451\% \sim 0.542\%$ 、 $0.505\% \sim 0.598\%$ 、 $0.496\% \sim 0.526\%$ ，随着生育期的推进，叶片 ΔL 逐渐增加。此外，玉米 ΔL 对灌溉定额和灌水次数变化的响应效果优于果实 ΔF 。

(3) 不同灌溉制度条件下玉米 ΔL_C 与 WUE_i 、 WUE_n 均呈负相关，且 ΔL_C 与 WUE_n 的相关性优于其与 WUE_i 的相关性，成熟期 ΔL_C 与 WUE_n 呈显著负相关($R^2=0.4106, P<0.05$)，玉米 ΔF 与 WUE_y 、 Y 均呈显著负相关。说明在寒地黑土区不同灌溉制度条件下利用玉米 ΔL 和 ΔF 指示不同水平水分利用效率具有一定的可行性，玉米成熟期叶片和籽粒 $\Delta^{13}\text{C}$ 可作为量化表征作物叶片和产量水平水分利用效率的重要指标。

参 考 文 献

- 1 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴(2016)[M]. 北京：中国统计出版社，2016:286-289.
- 2 徐杰，周培禄，王璞，等. 水肥管理对东北不同密度春玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 玉米科学，2016，24(1):142-147. XU Jie, ZHOU Peilu, WANG Pu, et al. Effects of water and fertilizer management on yield and water-nitrogen use efficiency of spring maize at different densities in northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(1):142-147. (in Chinese)
- 3 庞桂斌，徐征和，杨士红，等. 控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(4):233-241. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170430&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.030. PANG Guibin, XU Zhenghe, YANG Shihong, et al. Influence factors analysis of rice leaf water use efficiency under controlled irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):233-241. (in Chinese)
- 4 解文艳，樊贵盛，周怀平，等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报，2011，42(11):60-67. XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):60-67. (in Chinese)
- 5 WANG Jianlin, YANG Xinmin, FANG Quanxiao. The expatiation on mensurating method of field water use efficiency in different scale[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6):77-80.
- 6 LI Yuxuan, ZHANG Weifeng, MA Lin, et al. An analysis of China's grain production: looking back and looking forward[J]. Food & Energy Security, 2015, 3(1):19-32.
- 7 魏镇华，杜太生，张娟，等. 利用碳同位素分辨率表征沟灌番茄水分利用效率[J]. 农业工程学报，2013，29(7):58-65. WEI Zhenhua, DU Taisheng, ZHANG Juan, et al. Stable carbon isotope discrimination on water use efficiency of field tomato under furrow irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7):58-65. (in Chinese)
- 8 FARQUHAR G D, O'LEARY M H, BERRY J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2):121-137.
- 9 CUI N, DU T, KANG S, et al. Relationship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under regulated deficit irrigation of pear-jujube tree[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(11):1615-1622.
- 10 WEI Z, DU T, ZHANG J, et al. Carbon isotope discrimination shows a higher water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation of field-grown tomato[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165:33-43.
- 11 PATE J S. Carbon isotope discrimination and plant water-use efficiency[M]//UNKOVICH M, PATE J, MCNEILL A, et al. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. Springer Netherlands, 2001:19-36.
- 12 王振昌，郭相平，黄双双，等. 水稻天然稳定碳、氮同位素组成与产量及品质的关系[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(12):160-171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.020. WANG Zhenchang, GUO Xiangping, HUANG Shuangshuang, et al. Relationships between stable C and N isotope compositions of rice plants, rice yield and quality[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):160-171. (in Chinese)
- 13 刘慧，王为木，谈建康，等. 稻田水体碳氮稳定同位素组成与时空变化研究[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(2):132-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.020. LIU Hui, WANG Weimu, TAN Jiankang, et al. Temporal and spatial variation in stable carbon and nitrogen isotope in paddy field water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):132-136. (in Chinese)
- 14 林植芳，彭长连，林桂珠. 大豆和小麦不同基因型的碳同位素分馏作用及水分利用效率[J]. 作物学报，2001，27(4):409-414. LIN Zhifang, PENG Changlian, LIN Guizhu. Carbon isotope discrimination and water use efficiency in different soybean and

- wheat genotypes[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4):409–414. (in Chinese)
- 15 ZHAO F, GAO R, SHEN Y, et al. Foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and water use efficiency of different populus deltoids, clones under water stress[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2006, 1(1):89–94.
- 16 ELLSWORTH P Z, COUSINS A B. Carbon isotopes and water use efficiency in C_4 plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2016, 31:155–161.
- 17 HENDERSON S A, VON CAEMMERER S, FARQUHAR G D. Short-term measurements of carbon isotope discrimination in several C_4 species[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1992, 19(13):263–285.
- 18 SOUZA C R D, CHAVES M M. Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of field-grown grapevines under Mediterranean climate[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(418):2163–2172.
- 19 MURASE J, MATSUI Y, KATO H, et al. Incorporation of ^{13}C -labeled rice-straw-derived carbon into microbial communities in submerged rice field soil and percolating water[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(12):3483–3491.
- 20 任佰朝, 朱玉玲, 董树亭, 等. 大田淹水对夏玉米光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(2):329–338.
- REN Baizhao, ZHU Yuling, DONG Shuting, et al. Effects of waterlogging on photosynthetic characteristics of summer maize under field conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(2):329–338. (in Chinese)
- 21 ARAKI H, HAMADA A, HOSSAIN M A, et al. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137(3):27–36.
- 22 BRAGINA T V, PONOMAREVA Y V, DROZDOVA I S, et al. Photosynthesis and dark respiration in leaves of different ages of partly flooded maize seedlings[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, 51(3):342–347.
- 23 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. *生态学报*, 2009, 29(7):3977–3986.
- LIANG Zhejun, TAO Hongbo, WANG Pu. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedlings after water-logging[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7):3977–3986. (in Chinese)
- 24 刘小刚, 耿宏焯, 程金焕, 等. 保水剂和灌水对小粒咖啡苗木的节水调控效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(3):134–139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140323&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.023.
- LIU Xiaogang, GENG Hongzhuo, CHENG Jinhuan, et al. Effect of super absorbent polymer and irrigation on improving water use efficiency of arabica coffee seedling[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3):134–139. (in Chinese)
- 25 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13):127–136.
- YU Weidong, FENG Liping, SHENG Shaoxue, et al. Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(13):127–136. (in Chinese)
- 26 REN B Z, ZHANG J W, LI X, et al. Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, 94:23–31.
- 27 马玉平, 孙琳丽, 马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4):85–93.
- MA Yuping, SUN Linli, MA Xiaoqun. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4):85–93. (in Chinese)
- 28 孙雪梅, 李芳花, 王柏, 等. 寒地黑土区喷灌条件下玉米灌溉制度研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2013, 4(3):14–18.
- SUN Xuemei, LI Fanghua, WANG Bai, et al. Irrigation schedule of corn under sprinkling irrigation in black soil of cold area[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2013, 4(3):14–18. (in Chinese)
- 29 CHEN J, CHANG S X, ANYIA A O, et al. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the canadian prairies[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2011, 197(1):1–11.
- 30 VON C S, GHANNOUM O, PENNELLY J J, et al. Carbon isotope discrimination as a tool to explore C_4 photosynthesis[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(13):3459–3470.
- 31 陈平, 张劲松, 孟平, 等. 稳定碳同位素测定水分利用效率——以决明子为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(19):5453–5459.
- CHEN P, ZHANG J S, MENG P, et al. Feasibility analysis on the determination of WUE by stable carbon isotope: *Cassia obtusifolia* L. as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19):5453–5459. (in Chinese)
- 32 CABRERABOSQUET L, MOLERO G, BORT J, et al. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta^{13}\text{C}$ in durum wheat potted plants[J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 151(3):277–289.
- 33 CHANDEA A, BHATT R K. Carbon isotope discrimination function analysis and drought tolerance of stylo species grown under rain-fed environment[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008, 30(1):63–69.
- 34 EL-SHARKAWY M A, TAFUR S M D. Genotypic and within canopy variation in leaf carbon isotope discrimination and its relation to short-term leaf gas exchange characteristics in cassava grown under rain-fed conditions in the tropics [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(4):515–526.
- 35 ANYIAA O, SLASKI J J, NYACHIRO J M, et al. Relationship of carbon isotope discrimination to water use efficiency and productivity of barley under field and greenhouse conditions[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2007, 193(5):313–323.
- 36 MONNEVEUX P, REYNOLDS M P, TRETHOWAN R, et al. Relationship between grain yield and carbon isotope discrimination in bread wheat under four water regimes[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22(2):231–242.
- 37 梁银丽, 康绍忠, 山仑. 水分和氮磷水平对小麦碳同位素分辨率和水分利用效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3):289–292.
- LIANG Yinli, KANG Shaozhong, SHAN Lun. The effects of soil moisture and nitrogen and phosphorus addition on carbon isotope discrimination and water use efficiency in wheat[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3):289–292. (in Chinese)
- 38 GRANT O M, DAVIES M J, JAMES C M, et al. Thermal imaging and carbon isotope composition indicate variation amongst strawberry (*Fragaria* $\times$ *ananassa*) cultivars in stomatal conductance and water use efficiency[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2012, 76(1):7–15.
- 39 YOUSFI S, SERRET M D, ARAUS J L. Comparative response of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in durum wheat exposed to salinity at the vegetative and reproductive stages[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(6):1214–1227.