

旱稻水分利用率与碳同位素识别值之间的关系*

赵炳梓 张佳宝

(中国科学院封丘农业生态国家实验站, 河南封丘 453300)

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

近藤 始彦 前田 守弘 尾崎 保夫

(日本中央农业综合研究中心, 筑波 305-8666)

摘要 通过温室盆栽试验, 分析和探讨了三个水平的土壤水分条件对分蘖期和成熟期收获的旱稻 (*Oryza sativa* L.) 生物量累积、水分利用率 (WUE)、植株不同部位的碳同位素识别值 (CID) 的影响, 并了解了它们之间的相互关系。水分条件包括: 饱和含水量 ($W1$)、饱和含水量的 70% ($W2$)、饱和含水量的 40% ($W3$)。结果表明当土壤水分条件从 $W1$ 降低到 $W2$ 时, 分蘖期收获的生物量降低 45% 左右, 成熟期收获的生物量降低 16%~19%; 而当从 $W1$ 降低到 $W3$ 时, 分蘖期收获的生物量降低 73% 左右, 成熟期收获的生物量降低 55%~57%。然而, 根据地上部干重计算而来的 WUE ($WUE_{地上部}$) 和根据全株干重计算而来的 WUE ($WUE_{全株}$) 则随土壤含水量的降低而增加, 其增幅在分蘖期为 $0.07\sim 0.28\text{ g kg}^{-1}$, 在成熟期为 $0.07\sim 0.45\text{ g kg}^{-1}$ 。植株的 CID 值变幅为 $17.0\sim 20.6$, 但植株不同部位间差别显著, 分蘖期收获的样品 CID 值从小到大的顺序为: 根 < 最近完全伸展叶 < 叶芽 < 茎秆; 而成熟期收获的样品 CID 值从小到大的顺序为: 籽粒 < 根 < 茎秆 < 旗叶。随着土壤含水量的降低, 植株所有部位的 CID 值亦显著减小。叶部的 CID 值与 $WUE_{地上部}$ (和 $WUE_{全株}$) 之间呈一致的负相关关系。

关键词 水分条件; 旱稻; 水分利用率; 碳同位素识别值; 相互关系

中图分类号 S152.7+5

文献标识码 A

水分利用率 (WUE) 是衡量作物是否适应干旱的一个重要生理特征指标。许多研究结果已经表明在水分胁迫条件下 WUE 与作物产量之间存在着正相关^[1-3], 但是评价大田作物的这一特性比较困难。无论是田间还是盆栽试验, 在大批量品种间运用传统方法评价在一定土壤水分状况下的 WUE 高低或作物某一特殊阶段的 WUE 高低, 工作繁琐、复杂, 工作量大, 尤其是在田间条件下的水平衡参数中的水分入渗、径流及地下水补充量等参数均不容易控制。如果我们能找到一个指标, 只要测定植株的某一部位的某一参数就可用来比较不同品种间的 WUE , 那么评价品种间 WUE 高低的程序将大大简化。

评价 WUE 可以从不同层次来考虑, 如果考虑环境因素(光、水、热等)对作物-水分关系及作物产量的综合影响, 那么 WUE 可以定义为某一特定

期作物干物质累积量和土壤水分消耗量(蒸腾或蒸发)之间的比值; 如果从植物生理的层次上来考虑, WUE (即瞬时水分利用率 WUE_i) 也可以定义为光合作用速率和蒸腾速率之间的比值, 该比值与叶片细胞内外的 CO_2 浓度比 (C_i/C_a) 紧密联系, 而 C_i/C_a 又是气孔导度和叶绿体吸收 CO_2 速率相互作用的结果^[4]。空气 CO_2 中 ^{13}C 的含量为 1.1%, 而 98.9% 的 C 为 ^{12}C 。作物对 ^{13}C 吸收的歧视导致植株 ^{13}C 含量比空气 CO_2 中 ^{13}C 的含量低, 一般来说, C_3 作物低 20% 而 C_4 作物低 10% 左右^[5]。

20 世纪 80 年代初, Farquhar 等从理论上证明了 WUE_i 和碳同位素识别值 (CID) 均与 C_i/C_a 有关^[5], 寻求 CID 和 WUE 之间的关系引起了许多研究者的极大兴趣, 尤其对 C_3 作物来说。理论上, 如果 WUE 和 WUE_i 紧密相关, 那么外部环境改变比如水

* 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410808、中国科学院知识创新工程领域前沿项目 ISSASIP02027、教育部留学回国人员科研启动基金及国家高技术研究发展计划(863 课题, 编号 2003AA209010) 部分资助

作者简介: 赵炳梓 (1967~), 女, 副研究员, 主要研究方向为土壤水分与作物生长、溶质迁移。E-mail: lzhaob@issas.ac.cn

收稿日期: 2003-07-11; 收到修改稿日期: 2003-12-01

分胁迫或者其他养分胁迫所引起的 WUE (或 WUE_i) 的增加应该伴随着 CID 的降低。 CID 和 WUE (或 WUE_i) 的这种负相关关系在许多种作物中已经被证实, 并且有可能用来建立作为在干旱条件下衡量 WUE 高低的指标^[6-8]。但是也有研究者发现 WUE 的变化与 CID 的变化与理论不一致^[9]。

旱稻是热带和温带地区(主要为亚洲和拉丁美洲)的主要粮食来源, 提高旱稻的 WUE 对稳定该地区的粮食产量非常有意义。但是, 有关不同水分条件下旱稻的 WUE 与 CID 之间关系的研究报道还不是很多。因此本研究的目的是: (1) 了解不同灌溉水平对旱稻的干物质累积量、水分利用率及植株不同部位的碳同位素识别值的影响; (2) 分析碳同位素识别值和水分利用率之间的关系。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验和旱稻生长条件

盆栽试验于 2001 年 5 月 23 日至 2001 年 10 月 23 日在日本筑波市的中央农业综合研究中心(National Agricultural Research Centre)的玻璃温室中进行, 温室的三面由丝网组成而与外部环境相通, 因此温室环境与外部环境基本相同。试验用旱稻 (*Oryza sativa* L.) 品种为 Azucena (IRRI acc. No. 328), 它为菲律宾常见的、比较适宜在旱地生长的 Japonica 水稻品种^[10]。作物在塑料盆钵(直径 0.16 m, 高 0.20 m)

中生长, 盆钵装风干土 3.0 kg (相当于烘干土 1.9 kg), 盆钵底部用橡皮塞塞紧以防灌溉水渗漏。所有盆钵放置于 1 m 高桌子并且每隔 1 周重新随机排列。试验用土壤为日本广泛分布的火山灰土(Andisols), 土壤的全 C 和全 N 含量分别为 38.5 和 2.8 g kg⁻¹; 饱和含水量和田间持水量(体积含水量)分别为 77% 和 59%。播种前, 每一盆钵的土壤和含 1.0 g N 的缓释尿素(在施肥的 40、70、100 d 后分别释放总 N 量的 1/3)、及含 0.9 g P 和 0.9 g K 的 PK 复合肥充分混合; 9 月 1 日发现有轻微的缺 N 现象, 因而再追加含 0.3 g N 的普通尿素。5 月 23 日, 每一盆钵播种已经发芽好的健康种苗 2 棵, 播种深度 2.5 cm。6 月 6 日旱稻开始分蘖, 同时对每一盆钵间苗留一棵苗。所有盆钵在间苗前水分充足以保证幼苗的健康生长, 间苗后开始不同的水分处理。水分处理前所有盆钵用铝箔纸(Aluminum foil)覆盖, 这样基本可以认为试验期间的所有水分损失为旱稻的蒸腾损失。铝箔纸上开一十字小口供作物生长所需。每个盆钵平均出现 3 个花穗的日期为(对成熟期收获样品而言): W1W1 处理(处理所表示的灌溉水平见表 1, 下同)8 月 31 日, W2W2 处理 9 月 20 日, 而 W3W3 处理则没有花穗出现。在整个作物生长过程中采取了适当的措施保证没有病虫害和杂草对作物生长的影响。温室内设一小型气象观察站, 自动记录每小时的温度和相对湿度变化。

表 1 灌溉试验设计

Table 1 The experimental design of the irrigation level

处理代号 Treatment symbol	生长期 Growth stage		含水量 Moisture content	收获日期 Harvest date (YYYY-MM-DD)
	苗期~ 分蘖(S1) Seedling~ tillering (Jun. 12~ Jul. 22)	分蘖~ 成熟(S2) Tillering~ maturity (Jul. 23~ Oct. 23)		
W1	W1		饱和含水量 Saturated moisture	2001-07-23
W2	W2		饱和含水量的 70% 70% of the saturated moisture	
W3	W3		饱和含水量的 40% 40% of the saturated moisture	
W1W1	W1	W1	饱和含水量 Saturated moisture	2001-10-23
W2W2	W2	W2	饱和含水量的 70% 70% of the saturated moisture	
W3W3	W3	W3	饱和含水量的 40% 40% of the saturated moisture	

试验处理包括 3 个灌溉水平和 2 次收获期。3 个灌溉水平为: (1) 充分供水, 即土壤始终维持饱和含水量水平(W1), (2) 饱和含水量的 70% (W2), (3) 饱和含水量的 40% (W3); 2 次收获期分别在分蘖期和成熟期进行。所有处理 4 个重复, 因此共有 24 个试验钵钵。水分和收获期的相互组合处理见表 1。

通过每天称盆钵来控制水分, 根据重量变化每天补充水分到所处理的水分水平。每天的水分损失量就是过去一天作物的蒸腾量。收获时, 地上部分和地下部分生物量分别在 70°C 烘箱烘干至恒重, 记录地上部分生物量干重和全株生物量干重。地上部干重或全株干重除以生物量累积时期的作物蒸腾量就可得到基于地上部干重或全株干重的作物水分利用率(Water-use efficiency, *WUE*), 分别冠以 *WUE*-地上部或 *WUE*-全株。

1.2 碳同位素识别值

用来测定碳同位素组成(Carbon isotopic composition), 即 $\delta^{13}\text{C}$ 值的作物组成部分有: 最近长出的叶芽(在第 1 次收获时采样), 最近完全伸展叶片(简称伸展叶, 在第 1 次收获时采样), 旗叶(第 2 次收获时采样), 茎秆(即和其他所有叶片混合在一起), 籽粒(只在第 2 次收获的样品中存在), 根。所有需测定的样品先烘干, 然后研磨, 用锡箔纸杯裹成球状, 在

Automated Nitrogen and Carbon Analyzer-Mass Spectrometer (ANCA-MS, Europa Scientific, Crewe, UK) 上测定。碳同位素识别值(Carbon isotope discrimination, *CID*) 根据 Farquhar 等提出的公式计算^[11], 计算时假设空气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -8.0‰ 。

$$CID(\text{‰}) = [(\delta_a - \delta_p) / (1 + \delta_p)] \times 1000 \text{‰}$$

式中, δ_a 、 δ_p 分别表示相对于 Pee Dee Belemnite (PDB) ($\delta = 0$) 的空气中 CO_2 和植株样品中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。实际测定时的标准样为 DL- α Alanine, 其 δ 值为 -25.43‰ 。

对每次收获样品的干物质量、*WUE*、*CID* 值进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 环境条件

作物生长期间的温度变幅为 $13^\circ\text{C} \sim 34^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $54\% \sim 98\%$ (图 1)。其中苗期~分蘖期(06-12~07-22)的平均温度为 27.2°C , 平均相对湿度为 75.4% ; 而苗期~收获期(06-12~10-22)的平均温度为 25.4°C , 平均相对湿度为 78.3% 。苗期~分蘖期的平均饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)为 0.95 kPa , 而苗期~收获期的平均 VPD 则为 0.74 kPa 。

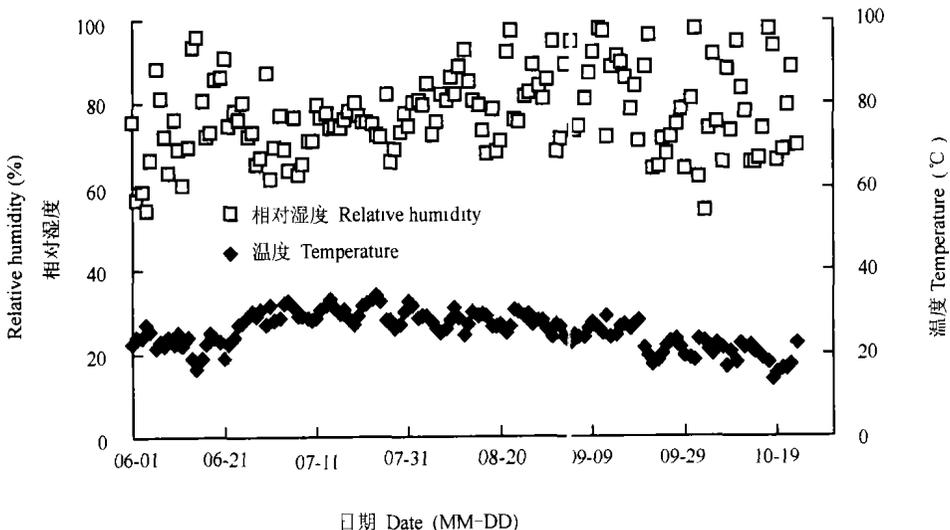


图 1 作物生长期间日平均相对湿度 RH 和日平均气温 T 的变化

Fig. 1 Daily mean relative humidity RH and temperature T during the growing period

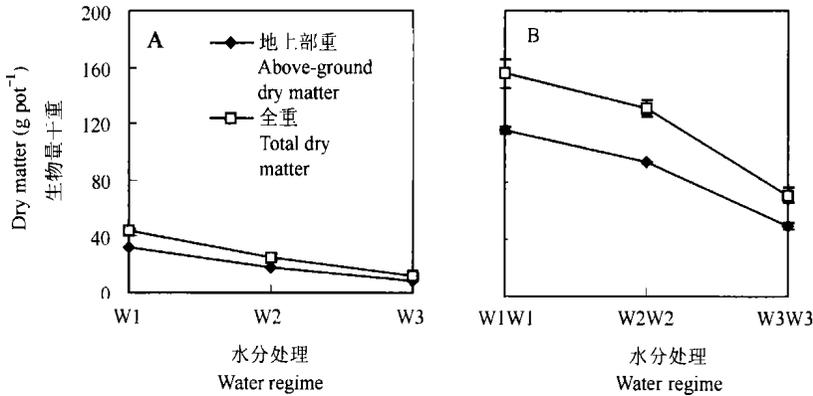
2.2 干物质累积量和水分利用率

地上部生物量干重和全株生物量干重均随着土壤含水量的降低而极显著降低(图 2)。分蘖期收获的样品中, W1、W2、W3 处理的地上部干重分别为

32.5 、 18.2 、 8.9 g pot^{-1} , 全株干重分别为 44.2 、 24.5 、 12.1 g pot^{-1} ; 也就是说, 当土壤水分条件从 W1 降低到 W2 时, 分蘖期收获的地上部干重和全株干重均降低 45% 左右, 而当从 W1 降低到 W3 时, 它们均降

低 73% 左右。成熟期收获的样品中, W1W1、W2W2、W3W3 处理的地上部干重分别为 116. 2、93. 6、49. 7 g pot^{-1} , 全株干重分别为 156. 2、131. 8、71. 0 g pot^{-1} ; 也就是说, 当土壤水分条件从 W1 降低到 W2 时, 成熟期收获的地上部干重和全株干重降低 16% ~ 19%, 而当从 W1 降低到 W3 时, 它们降低 55% ~ 57%。因此, 水分胁迫对生物量累积的影响在植株生长的前期表现得更为显著。尤其值得一提的

是, 过度的水分胁迫导致了旱稻的颗粒无收, W3W3 处理在整个作物生长阶段没有开花(当然没有籽粒)。水分胁迫引起生物量累积减少的原因主要是由于随着土壤含水量的降低, 可供植物生长所需的碳水化合物量的降低, 而碳水化合物含量的降低是由于植物光合作用能力的减弱(具体数据没有在此标出)。苗期~ 分蘖期是植物营养生长的主要阶段, 显然此阶段的生物量累积对不利的外界环境更为敏感。



A. 苗期~ 分蘖期 Seedling~ tillering; B. 苗期~ 成熟期 Seedling~ maturity

W1、W2、W3 分别表示为土壤始终维持饱和含水量、饱和含水量的 70%、饱和含水量的 40%

W1, W2, and W3 represent 100%, 70%, and 40% of saturated moisture, respectively

图 2 水分处理对旱稻生物量累积的影响

Fig. 2 Dry matter accumulation of upland rice as affected by water regime

旱稻的水分利用率(包括 WUE -地上部和 WUE -全株)随土壤含水量的降低而显著增加(图 3)。根据分蘖期收获的样品计算而来的水分利用率, W1、W2、W3 处理的 WUE -地上部和 WUE -全株分别为 2.25、2.33、2.47 和 3.06、3.13、3.34 g kg^{-1} ; 也就是说, 当土壤水分条件从 W1 降到 W2 时, WUE -地上部和 WUE -全株分别增加 0.08 和 0.07 g kg^{-1} , 而当从 W1 降到 W3 时, 它们分别增加 0.22 和 0.28 g kg^{-1} 。根据成熟期收获的样品计算而来的水分利用率, W1W1、W2W2、W3W3 处理的 WUE -地上部和 WUE -全株分别为 2.30、2.37、2.48 和 3.09、3.33、3.54 g kg^{-1} ; 也就是说, 当土壤水分条件从 W1 降低到 W2 时, WUE -地上部和 WUE -全株分别增加 0.07 和 0.24 g kg^{-1} , 而当从 W1 降到 W3 时, 它们分别增加 0.18 和 0.45 g kg^{-1} 。方差分析结果显示土壤水分处理对它们的影响均达 $p = 0.01$ 的极显著水平。水分利用率随土壤水分胁迫程度的加重而增加的原因主要是由于随着含水量的降低, 植物气孔导度降低的速率大于植物光合作用降低的速率。这与前人的许多报道结果一致^[4, 12]。但也有试验结果表示

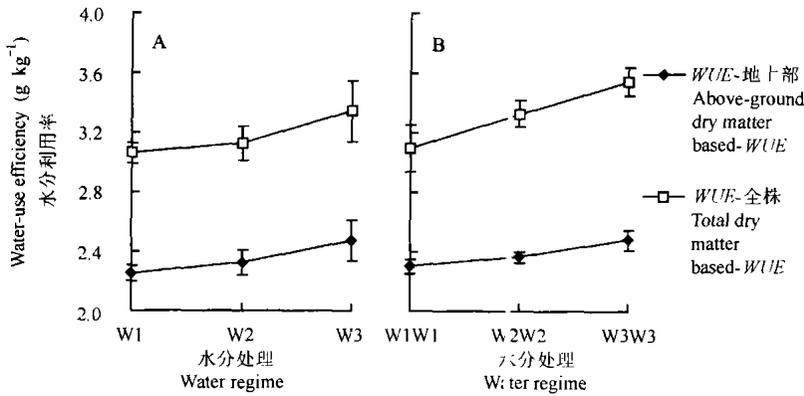
水分利用率与土壤含水量变化之间的关系不明显^[9], 这可能与试验条件不同有关。一般来说, 适度的水分胁迫能提高作物的水分利用率; 但如果作物的水分胁迫程度严重到损害光合作用酶的活性, 那么土壤含水量的降低将会导致相应水分利用率的降低。

2.3 植株不同部位的碳同位素识别值

植株不同部位的 CID 值各不相同, 分蘖期收获的样品中, 根的 CID 值最小, 然后依次为最近完全伸展叶、叶芽、茎秆; 同样, 成熟期收获的样品中, 籽粒的 CID 值最小, 然后依次为根、茎秆、旗叶(表 2, 表 3)。方差分析结果显示 CID 在植株不同部位之间的差异达极显著水平。很显然, 以上结果总的趋势为: 与叶片和茎秆相比, 根和籽粒中的 ^{13}C 比较容易富集。水稻上的试验曾得到相似的结果^[3]; 其他作物上的试验也曾有类似结果报道, 比如小麦^[7]、花生^[13]。造成植株不同部位之间 CID 差异的原因还不是很清楚。Brugnoli 和 Farquhar 概括指出可能的原因包括: (1) 韧皮部的输出、装载、下载过程中以及碳水化合物从源运输到库(比如籽粒)过程中可能发生的 ^{13}C 分馏, (2) 植株不同部位的化学组成成分不同^[14]。比如, 油脂和

木质素含量比较高的植株器官往往¹³C 含量低, 而纤维素含量高的器官往往¹³C 富集。另一方面, Condon 等认为植物籽粒中的¹³C 富集可能与植物生长后期土壤比较干旱而造成的气孔关闭有关^[6]。这样的可能

性推测好像并不适合本试验结果, 因为即使 W1 和 W1W1 处理, 植株不同部位之间的 CID 差异依然存在。CID 值越低, 表明该器官吸收¹³C 的量越多, 而反之则表明该器官对¹³C 的歧视程度越大。



A. 苗期~分蘖期 Seedling~tillering; B. 苗期~成熟期 Seedling~maturity

W1、W2、W3 分别表示为土壤始终维持饱和含水量、饱和含水量的 70%、饱和含水量的 40%

W1, W2 and W3 represent 100%, 70% and 40% of saturated moisture, respectively

图 3 水分处理对旱稻水分利用率(根据地上部生物量计算的 WUE-地上部和全部生物量计算的 WUE-全株)的影响

Fig. 3 Water use efficiency (WUE, above ground dry matter based WUE and total dry matter based WUE) of upland rice as affected by water regime

表 2 分蘖期植株各部位的碳同位素识别值(采样日期: 2001 年 7 月 23 日)

Table 2 Carbon isotope discrimination (CID) values in various plant parts at the tillering stage (Sampling date: 2001-07-23)

(‰)

处理 Treatment	碳同位素识别值 Carbon isotope discrimination			
	茎秆 Stem	根 Root	最近完全伸展叶 Recently fully expanded leaves	叶芽 The newest leaves
W1	20.6	19.3	20.0	20.3
W2	19.8	18.4	19.1	19.5
W3	19.1	17.4	18.0	17.9
平均 av.	19.8	18.4	19.0	19.2
显著性检验 Significance	**	**	**	**
LSD _(0.05) 值	0.22	0.18	0.22	0.61

** 表示 $p = 0.01$ 的极显著水平 ** marks significant at $p = 0.01$ of probability

方差分析结果表明所有样品的 CID 值随着土壤含水量的降低而降低, 并且水分处理达极显著水平(表 2, 表 3)。这与豇豆^[15]、小麦^[7]、大麦^[13]、俄罗斯野生黑麦^[16]上的试验结果相一致, 表明土壤水分对作物 CID 值的影响趋势是一致的。但其影响程度随植株不同部位和收获时期的不同而异。对分蘖期收获样品来说, 土壤水分对叶芽的影响最为明

显, 其 CID 值在 W1 和 W3 之间相差 2.4 个千分点, 而其他样品的 CID 值在 W1 和 W3 之间的相差幅度为 1.5 至 2.0 个千分点之间, 也就是说, 在此阶段, 最近形成的植株器官的 CID 值对土壤水分的变化最为敏感, 这可能与最近形成的植株器官受环境因素影响比较小有关。而对成熟期收获的样品来说, 土壤水分对根的影响最为明显, 其 CID 值在 W1W1

表 3 成熟期植株各部位的碳同位素识别值(采样日期:2001 年 10 月 23 日)

Table 3 Carbon isotope discrimination (*CID*) values in various plant parts at the maturing stage (Sampling date: 2001-10-23)

处理 Treatment	碳同位素识别值 Carbon isotope discrimination (%)			
	茎秆 Stem	根 Root	旗叶 Flag leaves	籽粒 Grain
W1W1	20.1	19.5	19.7	19.3
W2W2	19.1	18.2	19.4	18.1
W3W3	17.9	17.0	18.5	
平均 av.	19.0	18.2	19.2	18.7
显著性检验 Significance	**	**	**	**
LSD _(0.05) 值				
LSD _(0.05)	0.15	0.28	0.51	0.23

** 表示 $p = 0.01$ 的极显著水平 ** marks significant at $p = 0.01$ of probability

和 W2W2(由于 W3W3 处理没有籽粒收获)之间相差 1.3 个百分点,而其他测定样品的 *CID* 值在 W1W1 和 W2W2 之间的相差幅度为 0.3 至 1.2 个百分点之间;尽管旗叶和籽粒是此阶段最近形成的植株器官,但由于收获时的旗叶已经衰老发黄,可能已经发生碳水化合物的运输,因而其 ^{13}C 含量可能与直接受制于气孔行为的健康旗叶有所不同;而籽粒是库器官,其 C 在累积过程中受制于各环境因素和代谢因素而非直接受制于气孔行为,这可能是造成它们对水分变化不是最敏感的原因。比较分蘖期和成熟期测定的茎秆 *CID* 值,我们发现随着植株的成长,其 *CID* 值不断降低,但降低幅度与水分的胁迫程度成正比。植株结构物质的 *CID* 值变化是植株 C 在吸收累积的整个过程中叶片细胞内外 CO_2 浓度比 (C_i/C_a) 的长期综合作用结果^[3]。显然,水分胁迫

时间越长,其影响越大。

2.4 水分利用率和碳同位素识别值之间的关系

根和籽粒的 *CID* 值一般比较小,但它们不是直接的吸收器官,它们的 *CID* 值变化可能与碳水化合物运输转移过程中造成的 ^{13}C 的二次分馏有关,因而该过程中的各种环境因素或代谢因素或许会增加试验误差;而吸收器官(比如叶片)的 ^{13}C 含量直接受制于气孔行为,因此当我们试图研究 *WUE* 和 *CID* 值之间的关系时,采用吸收器官的 *CID* 值可能是最适宜的^[17]。图 4 表示的是分蘖期收获的叶芽和最近完全伸展叶片的 *CID* 值与 *WUE*(包括 *WUE*-地上部和 *WUE*-全株)之间的关系;成熟期收获样品中,我们考虑旗叶的 *CID* 值与 *WUE*-地上部(和 *WUE*-全株)之间的关系(图 5)。

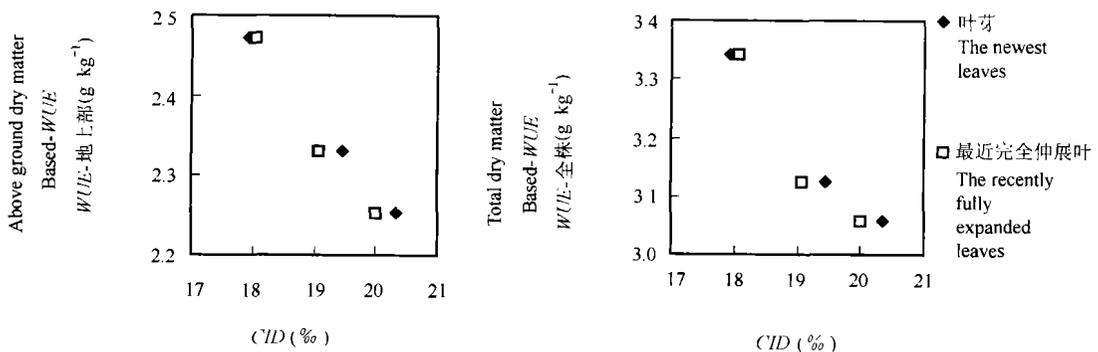


图 4 苗期~分蘖期间水分利用率和分蘖期测定的碳同位素识别值之间的相互关系

Fig. 4 Water use efficiency measured over the period from seedling to tillering and carbon isotope discrimination value measured at the tillering stage

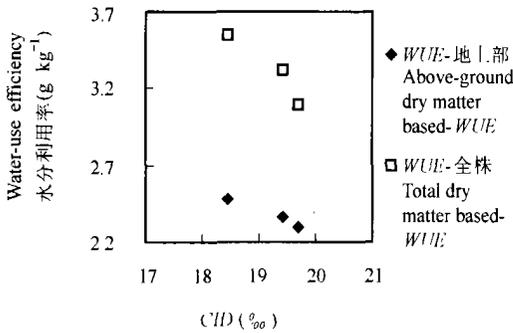


图5 苗期~成熟期间水分利用率和成熟期测定的碳同位素识别值之间的相互关系

Fig. 5 Water use efficiency measured over the period from seedling to maturity and carbon isotope discrimination value measured at the maturing stage

无论是分蘖期还是成熟期收获的样品,其叶部的CID值与WUE(包括WUE-地上部和WUE-全株)均呈一致的负相关关系(图4和图5)。WUE与植株组织的CID值之间的负相关关系是由于下列两相互独立的相关关系衍生而来:(1)CID与 C_i/C_a 之间的正相关关系;(2)WUE_i与 C_i/C_a 之间的负相关关系^[5]。因为在干旱条件下, C_i/C_a 和WUE(或WUE_i)的变化主要是由气孔关闭所引起^[14]。这也意味着如果根据整个作物生长阶段测定所得的水分利用率(干物质质量/干物质质量累积时期水分蒸腾损失量)和根据叶片水平测定所得的蒸腾率(叶片光合作用速率/蒸腾速率)之间的相关关系紧密,那么作物的水分利用率越高必然会导致CID值越低(即¹³C相对富集)。显然本试验结果与理论相吻合,也就是说,在本试验条件下,旱稻单一品种内部的WUE-地上部(和WUE-全株)与CID之间的相关关系与理论比较相吻合。一般来说,CID与 C_i/C_a 之间的正相关关系比较稳定,而当根据叶片水平测定所得的蒸腾率扩展到根据整个作物生长阶段测定所得的水分利用率的水平时,其相关关系比较容易不稳定^[18]。本试验对同一作物不同品种间的比较试验或者同一品种在不同生长阶段遭受水分胁迫后的WUE和CID之间的相关关系研究还没有考虑到,因此,利用本试验结果显然还不足以解释CID能否用来指示WUE-地上部(或WUE-全株)的变化,能否用来评价和选择品种间WUE高低的指标,进一步的相关研究十分必要。

3 小结

旱稻的干物质累积量随着土壤含水量的降低而显著降低,而水分利用率则显著增加;植株不同部位的碳同位素识别值亦随着土壤含水量的降低而显著减小;二次代谢产物(比如根和籽粒)的碳同位素识别值通常比主要光合作用产物(比如叶片)的要低;叶部的碳同位素识别值与水分利用率之间呈一致的负相关关系。以上结果对我们研究比较品种间的碳同位素识别值变化以及它们与水分利用率之间的关系,进而探讨碳同位素识别值能否作为水分利用率变化的指示指标显然还不足,因而进一步的研究十分必要。

参考文献

- [1] 赵炳梓,徐富安,周刘宗等. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率. 土壤, 2003, 35(2): 122~125. Zhao B Z, Xu F A, Zhou L Z, et al. Wheat yield and water use efficiency as influenced by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer (In Chinese). Soils, 2003, 35(2): 122~125
- [2] 徐富安,赵炳梓,唐万龙. 豫北地区水分生态环境要素演变及其意义. 土壤学报, 2003, 40(1): 29~36. Xu F A, Zhao B Z, Tang W L. Changes in some environmental factors and their ecological significance in north Henan Province, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 29~36
- [3] Scartazza A, Lauteri M, Guido M C, et al. Carbon isotope discrimination in leaf and stem sugars, water use efficiency and mesophyll conductance during different developmental stages in rice subjected to drought. Aust. J. Plant Physiol., 1998, 25: 489~498
- [4] Sun Z J, Livingston N J, Guy R D, et al. Stable carbon isotopes as indicators of increased water use efficiency and productivity in white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings. Plant, Cell and Environ., 1996, 19: 887~894
- [5] 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. Aust. J. Plant Physiol., 1982, 9: 121~137
- [6] Condon A G, Richards R A, Farquhar G D. The effect of variation in soil water availability, vapour pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon isotope discrimination in wheat. Aust. J. Agric. Res., 1992, 43: 935~947
- [7] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes. Aust. J. Plant Physiol., 1984, 11: 539~552
- [8] Martin B, Tauer C G, Lin R K. Carbon isotope discrimination as a tool to improve water use efficiency in tomato. Crop Sci., 1999, 39: 1775~1783

- [9] Walley F L, Lafond G P, Matus A, *et al.* Water Use efficiency and carbon isotopic composition in reduced tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 356~ 361
- [10] Dingkuhn M, De Datta S K, Dörffling K, *et al.* Varietal differences in leaf water potential, leaf net CO₂ assimilation, conductivity and water use efficiency in upland rice. *Aust. J. Agric. Res.*, 1989, 40: 1 183~ 1 192
- [11] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1989, 40: 503~ 537
- [12] Saranga Y, Flash I, Paterson A H, *et al.* Carbon isotope ratio in cotton varies with growth stage and plant organ. *Plant Sci.*, 1999, 142: 47~ 56
- [13] Hubick K, Farquhar G. Carbon isotope discrimination and the ratio of carbon gained to water lost in barley cultivars. *Plant Cell Environ.*, 1989, 12: 795~ 804
- [14] Brugnoli E, Farquhar G D. Photosynthetic fractionation of carbon isotopes. In: Leegood R C, Sharkey T D, Caemmerer S von. eds. *Photosynthesis: Physiology and Metabolism*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000, 352~ 434
- [15] Ismail A M, Hall A E. Inheritance of carbon isotope discrimination and water use efficiency in cowpea. *Crop Sci.*, 1993, 33: 498~ 503
- [16] Frank A B, Berdahl J D. Gas exchange and water relations in Diploid and Tetraploid Russian Wildrye. *Crop Sci.*, 2001, 41: 87~ 92
- [17] Hall A E, Richards R A, Condon A G, *et al.* Carbon isotope discrimination and plant breeding. *Plant Breeding Rev.*, 1994, 12: 81~ 113
- [18] Condon A G, Richards R A, Farquhar G D. Relationship between carbon isotope discrimination, water use efficiency and transpiration efficiency for dryland wheat. *Aust. J. Agric. Res.*, 1993, 44: 1 693~ 1 711

WATER USE EFFICIENCY OF UPLAND RICE AND CARBON ISOTOPE DISCRIMINATION

Zhao Bingzi Zhang Jiabao

(*State Experimental Station for Agror-Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fengqiu, Henan 453300, China*)

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

Motohiko Kondo Morihiko Maeda Yasuo Ozaki

(*National Agricultural Research Center, Tsukuba 305 8666, Japan*)

Abstract A pot experiment was conducted in a glasshouse to clarify and quantify the effect of soil water regimes on dry matter production, water use efficiency (*WUE*), and carbon isotope discrimination (*CID*) of different plant parts of upland rice (*Oryza sativa* L.) measured at the tillering and maturing stages, and to understand the relationship between *WUE* and *CID*. Three water regimes were imposed: saturated condition (W1), 70% of saturation moisture (W2), 40% of saturation moisture (W3). Results of the experiment showed that biomass accumulation decreased by 45% at the tillering stage, and by 16%~ 19% at the maturing stage with soil water regime changing from W1 to W2, and by 73% and by 55%~ 57% with soil water regime from W1 to W3. On the other hand, above ground dry matter based *WUE* (*WUE_A*) and total dry matter based *WUE* (*WUE_T*) increased with rising water stress by 0.07~ 0.28 g kg⁻¹ at the tillering stage, and by 0.07~ 0.45 g kg⁻¹ at the maturing stage. The values of *CID* of the plant varied from 17.0 to 20.6 with significant differences among plant parts, which can be lined in an order of root < recently fully expanded leaves < newest leaves < stem at the tillering stage, and an order of grain < root < stem < flag leaves at the maturing stage. The *CID* values of all the analyzed plant parts significantly decreased with rising water stress. A consistent negative relationship between the *CID* values of leaves and *WUE_A* (and *WUE_T*) was observed.

Key words Carbon isotope discrimination; Relationship; Soil water regimes; Upland rice; Water use efficiency