

控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究

彭世彰^{1,2}, 徐俊增^{1,2}, 黄 乾^{2,3}, 吴宏霞²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学节水研究所, 南京 210098;
3. 山东省水利科学研究所, 济南 250013)

摘 要: 根据现场试验资料, 分析了晚稻叶片水平的水分利用效率的日变化与全生育期变化, 叶片的水分利用效率与气孔导度及外界影响因子包括光合有效辐射、土壤水分、叶气温差等的相互关系。结果表明: 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率在较高土壤水分时与对照处理差别不明显, 适度土壤水分调控可以获得较高的水分利用效率; 全生育期水稻叶片的水分利用效率随土壤水分变化而波动, 过高过低的土壤水分均不利于水分利用效率的提高; 叶片的光合速率、蒸腾速率与水分利用效率均随气孔导度的增加表现出先增后减的变化规律。水稻叶片的水分利用效率影响因素分析显示: 水分利用效率随叶气温差、二氧化碳浓度和空气湿度的增加而增加; 有利于获得较高水分利用效率的气孔导度、光合有效辐射、空气温度和土壤水分范围分别是 $200 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $400 \sim 900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $28 \sim 34^\circ\text{C}$ 和 $85\% \sim 90\%$ 的土壤饱和含水率。

关键词: 水分利用效率; 水稻; 控制灌溉

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)11-0047-06

彭世彰, 徐俊增, 黄 乾, 等. 控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 47- 52.

Peng Shizhang, Xu Junzeng, Huang Qian, et al. Experimental study on leaf water use efficiency of paddy rice under controlled irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 47- 52. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

研究表明干旱胁迫条件下, 植物叶片气孔会发生不均匀关闭, 气孔阻力增加, 一定程度上影响作物的光合速率与蒸腾速率。并且蒸腾速率随气孔导度的下降而直线下降, 光合速率则在水分胁迫较轻时下降缓慢, 到达一定程度后迅速下降^[1-3]。山仑等研究认为^[4,5]干旱胁迫对禾谷类作物生理功能的影响顺序依次为: 细胞扩张、气孔运动、蒸腾作用、光合作用和光合产物的运输与分配。这种规律为田间水分的高效利用提供了理论依据, 一些基于适度水分亏缺的节水灌溉模式如亏缺灌溉、调亏灌溉等被提出并应用于指导田间灌溉^[3,6]。控制灌溉是一种水稻无水层灌溉模式, 已经在中国的许多稻区大范围应用与推广。选择控制灌溉条件下水稻叶片的水分利用效率 WUE_L (Leaf Water Use Efficiency) 为研究对象, 揭示土壤水分调控条件下叶片的水分利用效率的变化规律及其与影响因素间的关系, 阐述水稻控制灌溉节水高产的生物学机理, 有助于丰富水稻节水灌溉的理论体系, 为控制灌溉土壤水分调控指标的优选提供依据。

1 试验材料与方法

试区位于江西省余江县境内(北纬 $28^\circ 15'$, 东经 $116^\circ 55'$), 为典型的中亚热带低丘陵地区。年平均温度 $17.2 \sim 18.1^\circ\text{C}$, 大于 10°C 积温 5627.6°C , 无霜期 262.1 d, 年均日照 1852.4 h , 日照时数百分率 42%, 太阳辐射

$452.59 \text{ kJ}/\text{cm}^2$, 年降水量 1752.1 mm 。试验区土壤类型为潴育性水稻土, 属沙壤土, 土壤母质以近代河流冲积沉积物为主。0~ 10、10~ 20、20~ 30 和 30~ 40 cm 各层土壤饱和含水率分别为 55.51%、40.97%、41.72% 和 39.12%。

试验设 2 个处理, 处理 1 为浅水灌溉(简称常灌), 处理 2 采用控制灌溉(简称控灌), 即返青期间保持 5~ 25 mm 的水层和黄熟期自然落干以外, 其他各生育期灌水后均不建立水层, 土壤含水率上限为饱和含水率, 各生育期土壤含水率下限分别取饱和含水率的 70%、65%、60%、70%、75%、80% 和 70% 的组合, 灌水上限为 100% 土壤饱和含水率。各处理设 3 次重复计 6 个小区, 小区面积为 150 m^2 , 按顺序排列。试验晚稻品种为“晚粳 923”, 2003 年 7 月 23 日插秧, 10 月 30 日收割, 本田生育期为 100 d。

在无水层情况下, 利用 Mpk1t 快速便携式测墒仪测定土壤含水率 (θ)。每 5 d 选择晴天的 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00, 利用 CID 公司生产的 CI-301PS 型便携式光合测定系统测定各生育期功能叶片的蒸腾速率 (E)、光合速率 (P)、气孔导度 (C)、光合有效辐射 (PAR)、空气温度 (T_a) 以及叶片温度 (T_l)、二氧化碳浓度 (C_0) 等。

叶片水平的水分利用效率按 $WUE_L = P/E$ 计算^[7,8], 用来表征植物叶片单位的蒸腾耗水产生的光合作用, 从作物叶片角度反映了单位蒸腾耗水的生产效率。

2 叶片水平的水分利用效率变化规律

2.1 叶片水平的水分利用效率日变化规律

水稻叶片水平的水分利用效率总体上午较高, 下午较低(图 1)。在生育前期, 降雨较多, 土壤水分较高(8 月

收稿日期: 2005-11-21 修订日期: 2006-06-06

基金项目: 863 计划节水农业重大专项课题(2002AA2Z4331)

作者简介: 彭世彰(1959-), 男, 上海人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事节水灌溉理论与技术研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: szpeng@hhu.edu.cn

31 日, 土壤含水率占饱和含水率的 94.3%), 处理间差别并不明显, 呈现出相同的变化规律。后期土壤水分控制效果明显(9 月 23 日, 土壤含水率占饱和含水率的 83.1%), 处理间差异比较明显, 控灌水稻叶片水分利用

效率除了在 8:00 低于对照处理之外, 其他时刻均高于对照处理。表明适度土壤水分控制可以在减小植株叶片蒸腾尤其是奢侈蒸腾的同时较小的影响叶片的光合速率, 进而提高了叶片的水分利用效率。

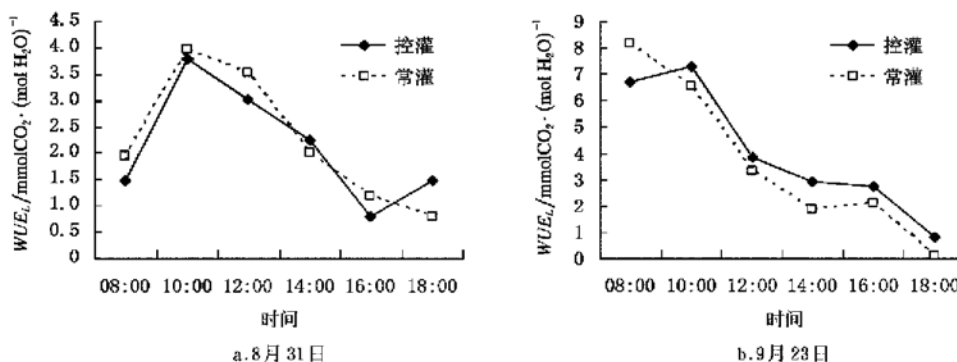


图 1 水稻叶片水平的水分利用效率日变化规律

Fig. 1 Diurnal variation of water use efficiency at rice leaf level

2.2 叶片水平的水分利用效率全生育期变化规律

以水稻叶片最易发生水分胁迫的正午 12:00~14:00 为例, 分析控制灌溉叶片水平水分利用效率的变化规律及土壤水分变化的影响。

如图 2 所示, 12:00 处理间水分利用效率差别不明显, 互有高低; 14:00 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率高于对照处理的水稻, 这与控制灌溉条件下水稻叶片自身的气孔调节有关。在蒸腾最为旺盛的午后 14:00, 土壤水分供应成为植株蒸腾的限制因素, 气孔部分关闭, 气孔导度下降, 首先限制蒸腾速率, 光合速率影响较小, 则叶片的水分利用效率有所提高。

控制灌溉水稻叶片的水分利用效率随土壤水分的

同步变化规律显示: 随土壤相对含水率(占饱和含水率的百分比)的变化, 叶片的水分利用效率出现一定的波动。以 12:00 为例, 在土壤水分较高时, 叶片蒸腾充分, 奢侈蒸腾严重, 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率较低; 随土壤水分较低时, 水分利用效率有所提高; 在灌水之后由于蒸腾速率的反弹, 水分利用效率出现较大的降低。14:00 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率相对比较稳定, 随土壤水分的变化幅度不大。

以全生育期 14:00 各次观测结果为例, 分析控制灌溉水分调控条件下气孔及其外界因素对水稻叶片的水分利用效率的影响。

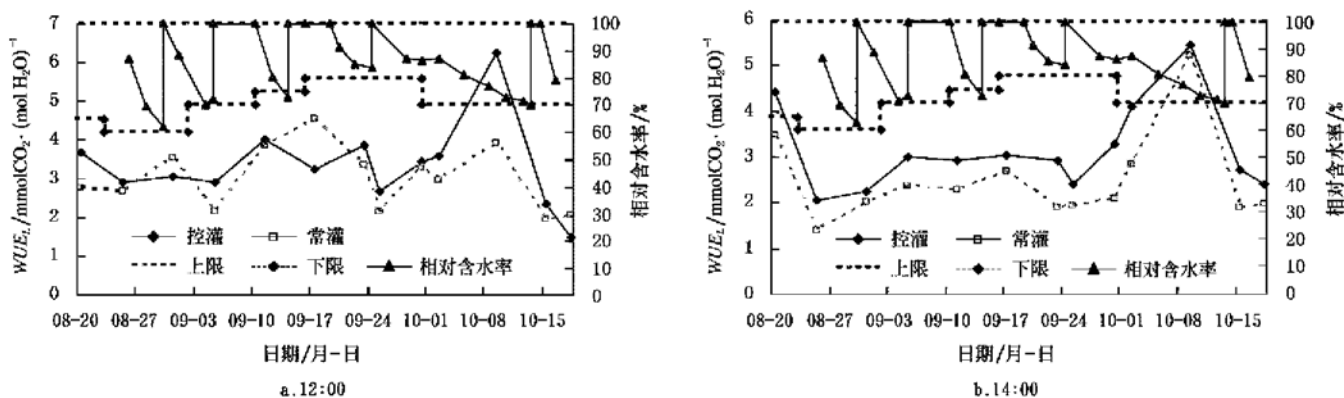


图 2 全生育期水稻叶片水平的水分利用效率变化规律

Fig. 2 Variation of water use efficiency at rice leaf level in the growth season

3 气孔导度对叶片水平的水分利用效率影响

3.1 对光合速率与蒸腾速率的影响

气孔是光合作用中 CO_2 的入口和蒸腾过程中水蒸汽的出口, 气孔导度对光合速率与蒸腾速率的影响十分显著^[3,8]。控制灌溉水稻叶片蒸腾速率和光合速率随气

孔导度的增加均表现为二次曲线的变化规律(图 3)。在气孔导度较小的阶段, 蒸腾速率与光合速率均随气孔导度的增加而增加, 但当气孔导度达到一定值之后, 气孔导度的增加伴随着蒸腾速率与光合速率的不同程度的降低。光合速率、蒸腾速率与气孔导度之间的关系分别为 $y = 0.04265 + 0.07639x - 0.000109x^2$ ($R =$

0.5047, $F = 21.6604$, $p < 0.01$) 和 $y = 0.1233 + 0.02149x - 0.000026x^2$ ($R = 0.3768$, $F = 52.8264$, $p < 0.01$), 达到峰值的气孔导度分别为 350 和 413 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 维持较高光合与蒸腾速率的气孔导

度范围分别为 250~400 和 300~500 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 过高与过低的气孔导度均不利于水稻叶片的光合与蒸腾速率, 并且维持较高光合速率的气孔导度范围略低于维持较高蒸腾速率的气孔导度范围。

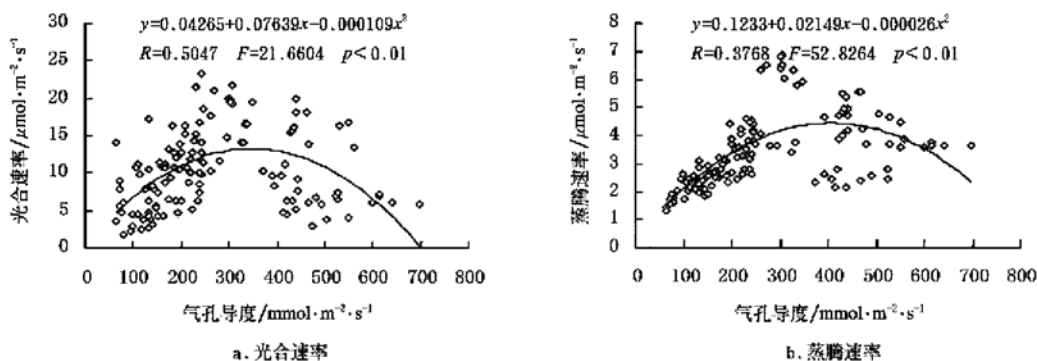


图 3 气孔导度对光合速率与蒸腾速率的影响

Fig. 3 Effects of stomata conductance on net photosynthesis rate and transpiration rate

3.2 对叶片水平的水分利用效率的影响

气孔导度的变化通过影响叶片的光合速率与蒸腾速率, 对叶片的水分利用效率有较大的影响(图 4)。与气孔导度对光合速率与蒸腾速率的影响分析一致, 二者之间呈现 $y = 1.8974 + 0.009134x - 0.000015x^2$ ($R = 0.3464$, $F = 7.9679$, $p < 0.01$) 的关系。在气孔导度较低时, 随气孔导度的增加, 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率增大, 当气孔导度大到一定范围后, 水分利用效率随气孔导度增加而减小, 达到峰值的气孔导度为 305 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 保持较高水分利用效率的理想气孔导度范围为 200~350 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此范围略低于保持较高光合速率与蒸腾速率的气孔导度范围。

因此, 适度的土壤水分调控, 在一定的气孔导度下降范围内, 最先影响蒸腾速率, 在一定程度限制水稻植株奢侈蒸腾的同时较小地影响光合速率, 获得更高的水分利用效率。这从水稻叶片气孔调节角度揭示了水稻控制灌溉节水高产的机理。

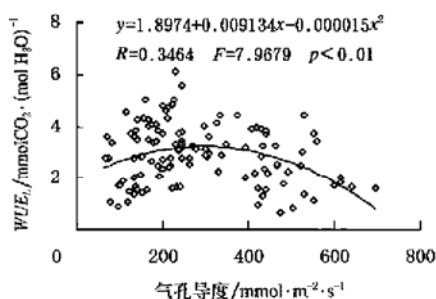


图 4 气孔导度对 WUE_L 的影响

Fig. 4 Relationship between stomata conductance and leaf water use efficiency of rice

4 环境因子对水分利用效率的影响

4.1 光合有效辐射的影响

辐射是植物光合作用与植物蒸腾的原动力。在水分

充足的条件下, 通常认为气孔导度与光合速率先是随辐射的增加而增加, 达到一定程度之后不再增加, 而蒸腾速率持续增加, 最大水分利用效率出现在适当的辐射条件下^[9-11]。分析控制灌溉水稻叶片的水分利用效率随光合有效辐射 PAR 的变化规律可以发现(图 5): 在 PAR 较低的情况下, 叶片的水分利用效率随 PAR 的增加而增加, 二者之间呈现 $y = 4.4231 + 0.004889x - 0.0000035x^2$ ($R = 0.4241$, $F = 9.5411$, $p < 0.01$) 的关系, 在 PAR 达到 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到最大值, 此后随 PAR 的增加水分利用效率不再增加, 而有一定程度的减小, 并且在 PAR 达到 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后减小幅度明显增加。原因在较高辐射时气孔开度加大的同时, 蒸腾速率的增加速度超过光合速率的增加, 同时过高辐射时由于存在高饱和差与光抑制, 光合速率甚至出现一定的降低, 导致水分利用效率降低。

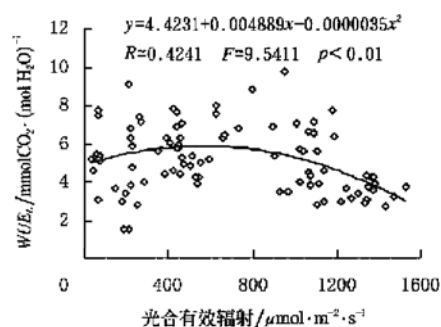


图 5 光合有效辐射对 WUE_L 的影响

Fig. 5 Relationship between rice leaf water use efficiency and photosynthesis available radiation

4.2 空气温度的影响

植物叶片生理活动存在一个较为适宜的温度范围^[11-13], 一般认为籼稻叶片光合作用最适宜的温度范围是 25~35℃^[13]。分析控制灌溉水稻叶片的水分利用效率随空气温度的变化规律(图 6)认为: 水分利用效率

与空气温度之间呈现 $y = -10.2690 + 0.8216x - 0.01270x^2$ ($R = 0.2524$, $F = 3.5061$, $p < 0.05$) 的关系, 获得最高水分利用效率的空气温度约为 32.3°C , 水分利用效率较高的空气温度范围是 $28\sim 34^\circ\text{C}$, 过高与过低的温度都会导致水分利用效率的降低。这与过高和过低的温度会导致光合作用酶活性的降低有关。

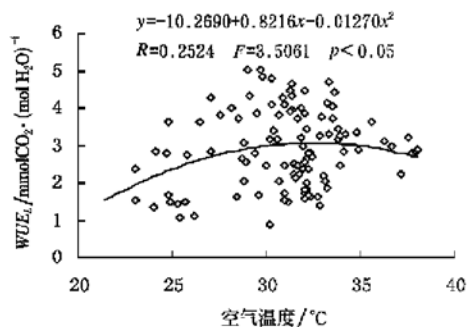


图6 空气温度对 WUE_L 的影响

Fig. 6 Relationship between rice leaf water use efficiency and air temperature

4.3 叶气温差的影响

叶气温差是指叶片温度相对于空气温度的增减值, 与叶片的能量与水分平衡有关, 与气孔导度、蒸腾以及光合作用之间有较强的关系^[14, 15], 对水分利用效率有较强的影响。从叶气温差与水稻叶片的水分利用效率的关系分析(图7)可以得知: 在叶气温差较低的时候, 叶片充分蒸腾降低叶片温度, 此时蒸腾耗水量较大, 蒸腾水的水分利用效率相对较低; 此后随叶气温差的增加水分利用效率逐渐提高, 在 $0\sim 2^\circ\text{C}$ 范围内一直保持较高。回归分析显示水分利用效率与叶气温差之间关系为 $y = 3.0957 + 0.3275x - 0.06250x^2$ ($R = 0.4305$, $F = 12.5199$, $p < 0.01$), 在叶气温差为 2.6°C 时达到最大值, 此后又有所降低, 但由于观测数据叶气温差集中在 2°C 以下, 下降的效果并不明显。

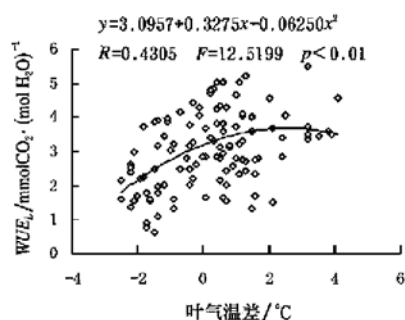


图7 叶气温差对 WUE_L 的影响

Fig. 7 Relationship between leaf water use efficiency and leaf-air temperature differences

4.4 空气湿度的影响

空气湿度的加大降低了空气饱和差, 叶片的蒸腾速率降低, 而通常认为湿度的变化对光合速率影响较小, 水分利用效率会有所提高^[16, 17]。控制灌溉水稻叶片的水分利用效率与空气湿度的关系(图8)显示: 随空气湿

度的增加, 叶片的水分利用效率呈缓慢增加趋势, 空气湿度过高时增加趋势有所降低甚至有所减小, 二者之间呈现 $y = -9.0099 + 0.419076x - 0.003552x^2$ ($R = 0.3836$, $F = 9.9219$, $p < 0.01$) 的关系, 水分利用效率最大时的空气相对湿度为 60% 。空气湿度较低时, 随空气湿度的增加叶片的水分利用效率增加, 原因在于湿度增加时空气饱和差降低导致植株蒸腾降低, 而空气湿度较高时增加趋势有所降低甚至出现一定减小, 原因在于较高的湿度往往对应于较高云量和较低的辐射, 对光合作用产生了较大的限制。

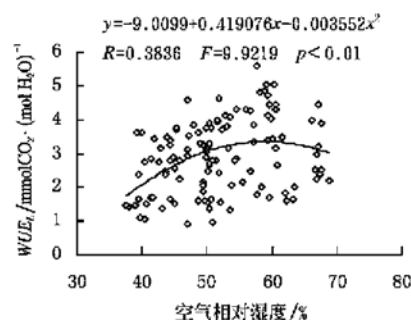


图8 空气湿度对 WUE_L 的影响

Fig. 8 Relationship between rice leaf water use efficiency and air humidity

4.5 二氧化碳浓度的影响

已有研究认为二氧化碳浓度增加会导致光合速率的增加和蒸腾速率的减小, 将会明显提高叶片的水分利用效率^[11, 12, 18]。实测二氧化碳浓度与水稻叶片的水分利用效率的关系(图9)显示: 随二氧化碳浓度的增加, 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率有所增加, 两者之间呈现 $y = 1.129606 + 0.005587x$ ($R = 0.2081$, $F = 5.1096$, $p < 0.05$) 的直线关系, 增加趋势并不显著。原因在于大田条件下水稻叶片的光合与蒸腾受到诸多相互影响因素的影响。

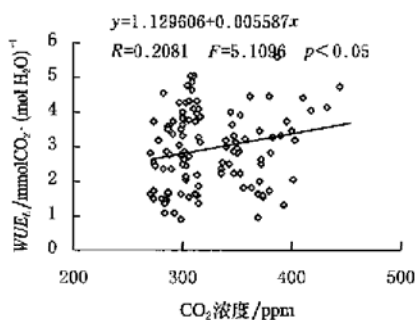


图9 二氧化碳浓度对 WUE_L 的影响

Fig. 9 Relationship between rice leaf water use efficiency and concentration of carbon dioxide

4.6 土壤水分的影响

土壤水分通过影响植物叶水分状况和土壤供水能力影响叶片的气孔调节、蒸腾以及光合, 从而影响叶片的水分利用效率^[10-12, 18]。控制灌溉水稻叶片的水分利用效率随土壤相对含水率(指占饱和含水率的百分比)

的变化规律(图 10)显示: 土壤水分较低时, 叶片通过调节自身气孔开度限制蒸腾, 同时较低的气孔导度会对光合作用产生限制, 导致水分利用效率不高; 随土壤水分的增加, 叶片的水分利用效率有所增加, 二者之间呈现 $y = -27.5078 + 0.7039x - 0.004058x^2$ ($R = 0.3867$, $F = 0.6154$, $p = 0.56$) 的关系, 水分利用效率达到最大值的相对土壤含水率为 86.7%; 土壤水分继续增加, 植株蒸腾不再受到土壤供水能力的限制, 气孔开度较大, 叶片充分蒸腾, 水分利用效率由于奢侈蒸腾的加剧再次有所降低。从叶片水分利用效率的角度来看, 水稻适宜的土壤含水率为饱和含水率的 85%~90% 左右。

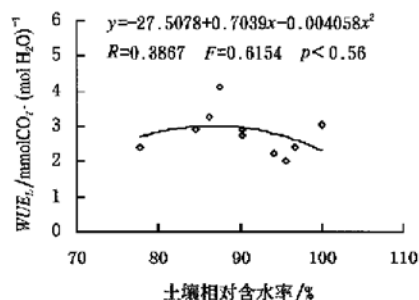


图 10 土壤相对含水率对 WUE_L 的影响

Fig. 10 Relationship between rice leaf water use efficiency and soil moisture

5 结 论

1) 控制灌溉水稻叶片的水分利用效率在较高土壤水分时与对照差别不明显, 适度土壤水分控制可以获得较高的水分利用效率;

2) 全生育期控制灌溉水稻叶片的水分利用效率随土壤水分变化而波动, 过高过低的土壤水分均不利于叶片水分利用效率的提高;

3) 控制灌溉水稻叶片的光合速率、蒸腾速率与水分利用效率均随气孔导度的增加表现出先增后减的变化规律, 维持较高蒸腾速率、光合速率和水分利用效率的气孔导度范围逐渐减小, 分别为 200~350、250~400 和 300~500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

4) 控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析显示: 一定范围内, 水分利用效率随叶气温差、二氧化碳浓度和空气湿度的增加而增加; 有利于获得较高水分利用效率的光合有效辐射、空气温度和土壤水分范围分别是 400~900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、28~34℃和 85%~90% 的土壤饱和含水率。

由于田间试验中对外部条件无法实现控制, 有关指

标如辐射等的变化较为剧烈, 水分利用效率与影响因素之间的关系比较离散。因此控制性试验与田间试验相结合, 开展研究将更能说明水分调控条件下气孔调节以及外界影响因素与水分利用效率之间的关系。

[参 考 文 献]

- [1] Turner N C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agricultural Water Management, 1990, 17: 59-73.
- [2] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 82-87.
- [3] 吕金印, 山 仑, 高俊凤. 非充分灌溉及其生理基础[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1512-1517.
- [4] 山 仑, 张岁岐. 节水农业及其生物学基础[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 1-6.
- [5] 山 仑. 节水农业与作物高効用水[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 1-5.
- [6] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. 水利学报, 2001, (5): 80-86.
- [7] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. CO_2 浓度、氮和水分对春小麦光合、蒸散及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 387-393.
- [8] 王会肖, 刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高効利用的试验研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1632-1636.
- [9] 郑有义, 万长建, 颜景义, 等. 小麦的水分利用效率及其最优化问题[J]. 中国农业气象, 1997, 18(4): 13-17.
- [10] 朱 林, 许 兴. 植物水分利用效率的影响因子研究综述[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 204-209.
- [11] 张岁岐, 山 仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
- [12] Liukang Xu. Crop evapotranspiration, photosynthesis and water use efficiency as effected by environmental variables [D]. University of California, Davis USA, 2000: 24-45.
- [13] 潘瑞炽. 水稻生理[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 64-66.
- [14] 康绍忠, 蔡焕杰, 张富仓, 等. 节水农业中作物水分管理基本理论的探讨[J]. 水利学报, 1996, (5): 9-18.
- [15] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽. 控制灌溉气孔导度变化规律试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 1-5.
- [16] 姚素梅, 康跃虎, 刘海军, 等. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦光合作用的日变化研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 16-19.
- [17] 黄占斌, 山 仑. 不同供水条件下作物水分利用效率和光合速率日变化的时段性假期机理研究[J]. 华北农学报, 1999, 14(1): 47-52.
- [18] 施建忠, 王天铎, 李临颖. 环境因子对小麦叶片水分利用效率影响的实验研究和数值模拟[J]. 植物学报, 1994, 36(12): 940-946.

Experimental study on leaf water use efficiency of paddy rice under controlled irrigation

Peng Shizhang^{1,2}, Xu Junzeng^{1,2}, Huang Qian^{2,3}, Wu Hongxia²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water-Saving Irrigation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shandong Water Conservancy Research Institute, Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the field experiment, the diurnal variation of the leaf water use efficiency of late rice under controlled irrigation was demonstrated, as well as the variation in the whole growing season. Relationships between leaf water use efficiency of rice and stomatal conductance and environmental factors including soil moisture and air temperature were analyzed. Difference of leaf water use efficiency between controlled irrigation and the check is not significant. Moderate soil moisture control can raise leaf water use efficiency. Within the whole growth season, leaf water use efficiency varied with soil moisture, much higher and lower soil moisture go against the elevation of leaf water use efficiency. With the increase of stomatal conductance, net photosynthesis rate, transpiration rate and leaf water use efficiency increased, but decreased when the stomatal conductance is too high. Influence factor analysis shows that leaf water use efficiency increased with the elevation of leaf-air temperature difference, carbon dioxide concentration and air humidity. To maintain high leaf water use efficiency, optimal scope of stomatal conductance, photosynthesis available radiation, air temperature and soil moisture are $200 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \sim 900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $28 \sim 34^\circ\text{C}$ and $85\% \sim 90\%$ of saturated soil moisture, respectively.

Key words: water use efficiency; paddy rice; controlled irrigation