

文章编号:0559-9350(2016)10-1260-09

覆膜旱作稻田水均衡及蒸腾耗水规律分析

石建初, 金欣欣, 李 森, 马雯雯, 左 强

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 水稻覆膜旱作(GCRPS)因具有显著的节水、增产效应而备受关注, 但有关覆膜旱作稻田的水均衡关系及蒸腾耗水规律仍然还难以被准确刻画。为此, 在湖北省十堰市开展了为期2年的田间试验, 并在水稻6个主要生育阶段内对3个灌溉水平(TPRPS, 传统淹水种植; GCRPS_{sat}, 薄膜覆盖并保持根区土壤接近饱和; GCRPS_{80%}, 薄膜覆盖并保持根区平均土壤含水量介于田持的80%~100%)、3个施氮水平(N0, 不施氮; N1, 150 kg N/hm²尿素; N2, 75 kg N/hm²尿素+75 kg N/hm²鸡粪)共9个处理进行了水量平衡和蒸腾耗水分析。试验研究结果表明: (1)在不减产甚至增产的情况下, 覆膜旱作不仅可以抑制深层渗漏与蒸发等非生理耗水, 同时还能减少蒸腾耗水, 节水效应非常显著, 尤其是GCRPS_{80%}; (2)水稻全生育期内的蒸腾耗水变化规律不受水分与氮素处理的影响, 总体均表现为生育前期较低, 盛期较高, 至扬花期达到峰值, 之后逐渐衰减; (3)最大分蘖期之前, 覆膜增温效应显著促进蒸腾耗水, 之后水分胁迫导致情形逆转; (4)扬花期之前, 与不施氮相比, 施氮可显著促进蒸腾耗水, 但两个施氮处理之间的蒸腾耗水差异不大。

关键字: 水稻覆膜旱作; 蒸腾; 水量平衡; 水分消耗

中图分类号: S278

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160115

1 研究背景

水稻是我国种植面积和产量最大的粮食作物之一, 多采用传统淹水种植方式(traditional paddy rice production system, TPRPS), 耗水量较大, 约占全国总用水量的54%、农业总用水量的65%^[1]。为了应对日益紧缺的水资源形势, 发展节水稻作生产体系已成为我国乃至世界其他主要水稻生产国农业可持续发展过程中的重要研究课题。迄今为止, 已相继涌现出控制灌溉、间歇灌溉、水稻覆盖旱作等多种水稻节水灌溉技术或方法^[1-2]。其中, 水稻覆盖旱作(ground cover rice production system, GCRPS)被认为是水资源紧缺地区实现节水、减排、增效和农业可持续发展的关键举措之一。由于具有显著的节水、省肥、增产等优势^[3-4], GCRPS已在我国东北、华中、华南等地区得到了广泛推广与应用^[5]。所谓水稻覆盖旱作, 是指在地表覆盖秸秆或厚度为5~7 μm的塑料薄膜, 水稻全生育期内不建立水层、生育中后期维持根系层土壤处于非饱和状态从而进行水稻生产的技术。鉴于生产实际中绝大多数都采用薄膜覆盖, 本文将研究对象确定为水稻覆膜旱作生产体系。

了解农田水均衡关系和作物耗水规律对于制定科学合理的灌溉制度、农业水资源规划与管理、节水效应及生态环境评估等都具有十分重要的意义。稻田水分消耗途径主要包括蒸发、蒸腾、深层渗漏、径流排水、土壤储水等几方面, 其中蒸腾属生理耗水, 其余可统称为生态耗水(非生理耗水), 相对于生理耗水而言常被归为无效耗水之列, 但仍与水稻生长环境密切相关。经过多年研究, 传统淹水稻田水均衡关系已基本清楚, 其生理耗水仅占20%~40%, 其余60%~80%则为生态耗水^[1,6]。水

收稿日期: 2015-01-27; 网络出版日期: 2016-05-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20160525.0849.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51139006, 51321001)

作者简介: 石建初(1978-)男, 湖南人, 副教授, 主要从事土壤物理与节水农业机理研究。E-mail: shijianchu@cau.edu.cn

通讯作者: 左强(1965-), 男, 湖北人, 教授, 主要从事土壤物理与节水农业机理研究。E-mail: qiangzuo@cau.edu.cn

稻覆膜旱作可抑制蒸发、减少深层渗漏，从而可大大降低稻田的生态耗水和灌溉用水量，其节水、增产特性已获得广泛关注，相关研究主要集中在灌溉用水量的减少和灌溉水利用效率的提高等方面^[7-9]，有关覆膜旱作稻田的水均衡关系及蒸腾耗水规律仍然还难以被准确刻画。已有部分研究学者曾开展过覆膜旱作水稻耗水规律的研究^[5,10]，但具有较明显的局限性。首先，其控制条件较为理想，水稻被种植在蒸渗仪或有底测坑之中，完全切断了根系层与下部土层之间的水力联系，从而忽略稻田深层渗漏。理论上，覆膜旱作确实会减少深层渗漏，但生产实际中，稻田深层渗漏几乎不可避免。显然，对于覆膜旱作条件下稻田深层渗漏的减少量及其产生的具体效应仍有必要定量评估。其次，已有研究并没有对蒸发和蒸腾予以区分，而是按两者之和进行统一估算。鉴于蒸腾才是水稻真实的生理耗水，只有掌握了蒸腾的变化情况才能真正了解覆膜旱作水稻的耗水规律，因此，应该分别测定或估算不同生育阶段稻田蒸发(包括水面蒸发和土面蒸发)和水稻蒸腾的变化规律。

综上，本文将通过布置田间试验，利用水量平衡原理，分析覆膜旱作稻田各水均衡因子之间的定量关系，探索作物的耗水规律，为制定合理的覆膜旱作稻田灌溉制度、评估覆膜旱作水稻生产体系的节水效应以及推广覆膜旱作水稻生产技术提供一定的科学依据。

2 材料与方方法

2.1 田间试验概况 田间试验于2013和2014年在湖北省十堰市房县农业局苗木场(北纬32°7'11"，东经110°42'45"，海拔450 m)进行。当地属亚热带季风性湿润气候，年平均气温14.2℃，日照时数1700~2000 h，无霜期210~240 d，降水量830 mm，雨日100~140 d。季节性缺水和早春低温是制约当地水稻生产的主要限制因素^[11]。试验区0~60 cm范围内的土壤可分为0~20 cm与20~60 cm两层，土壤质地及物理参数如表1所示，相关参数测定方法如下：容重采用环刀法测定；质地采用沉降法测定；饱和导水率采用渗透仪测定；土壤水分特征曲线采用砂箱法(低吸力，0~80 hPa)与压力膜仪法(高吸力，100~50000 hPa)测定；土壤水分特征曲线及非饱和导水率采用van Genuchten公式拟合^[12]，取基质势为-300 cm所对应的土壤含水量为田间持水量^[13]。

表1 试验区土壤质地及物理参数

土层深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	$\rho/(g/cm^3)$	$\theta_s/(cm^3/cm^3)$	$\theta_f/(cm^3/cm^3)$	$\theta_r/(cm^3/cm^3)$	$K_s/(cm/d)$	$\alpha/(1/cm)$	n
0~20	20.25	59.98	19.77	1.36	0.464	0.409	0.076	6.92	0.004	1.253
20~60	17.66	64.95	17.39	1.53	0.438	0.382	0.081	0.45	0.006	1.182

注： ρ 、 K_s 、 θ_s 、 θ_f 、 θ_r 分别表示土壤容重、饱和导水率、饱和含水量、田间持水量和残余含水量； α 、 n 均为水分特征曲线拟合参数。

试验共设置3个灌溉水平：TPRPS，除晒田期(最大分蘖期1周与收获期前2周)外保持小区田面水层介于2~5 cm之间；GCRPS_{sat}，薄膜覆盖，除晒田期外一直保持输水沟内水深介于10~15 cm之间(厢面无水层)，此时根区土壤接近饱和；GCRPS_{80%}，薄膜覆盖，分蘖中期之前水分控制与GCRPS_{sat}一致，之后当根区平均土壤含水量降为田间持水量的80%时开始灌水，灌满输水沟(厢面无水层)时停止灌水，其根区平均土壤含水量基本介于田间持水量的80%~100%之间。另外，在每种灌溉水平下再设置3个施氮水平：N0，不施氮；N1，150 kg N/ha(尿素)；N2，75 kg N/ha(尿素)+75 kg N/ha(鸡粪)。因此，田间试验共包括9个处理，各处理均设3次重复，共计27个小区，小区面积为9 m × 10 m = 90 m²，随机布置。为防止小区之间发生侧渗，在各小区四周均铺设80 cm深的防渗膜。通过机井利用浅层地下水实施灌溉。试验小区平面布置以及各灌溉处理如图1所示。

水稻秧苗移栽前2 d，对所有试验小区进行泡田整地，各小区周围筑宽15 cm的土坝，之后将每个小区田面分成5个长9.4 m、宽1.56 m的厢面，厢面与厢面之间留有宽15 cm、深15 cm的灌水沟(图1)，在剔除土坝所占的面积后，小区的净种植面积应为(9.0-0.3) × (10.0-0.3)=84.39 m²，灌水沟表面积应为84.39(净种植面积)-5 × 9.4 × 1.56(厢面面积)=11.07 m²。除氮素外，各小区其他肥料施用量一致：过磷酸钙375 kg/hm²(约45 kg P/hm²)，氯化钾90 kg/hm²(约45 kg K/hm²)，均一次性基施。施肥后

在覆膜处理小区的每个厢面上覆盖厚度为 5 μm 的塑料薄膜，幅宽 170 cm。

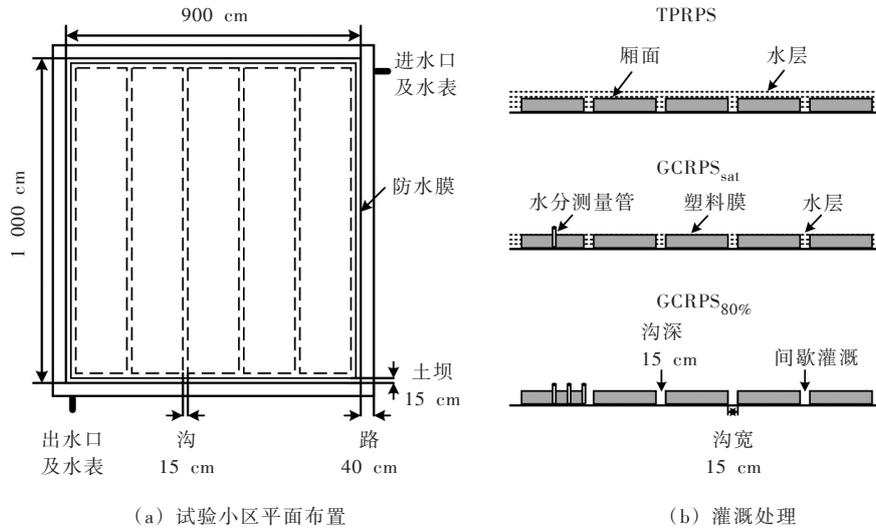


图1 试验小区平面布置和灌溉处理示意图

供试水稻品种为宜香 3 728，种植密度 26 cm \times 18 cm，每穴 2 株。2013 年，4 月 2 日播种育苗，4 月 28 日 2 叶 1 心时进行移栽，9 月 10 日（移栽后的第 135d，135DAT）收获。2014 年，4 月 5 日播种育苗，4 月 29 日进行移栽，9 月 19 日（143 DAT）收获。水稻全生育期内共分为分蘖中期、最大分蘖期、孕穗期、扬花期、乳熟期与成熟期 6 个主要生育阶段，2013 年分别对应 1–34、34–53、53–78、78–99、99–113、114–135 DAT，2014 年分别对应 1–34、34–51、51–78、78–99、99–121、122–143 DAT。水稻生长期病、虫、草害控制按照当地常规方法进行。

2.2 观测项目与估算方法

(1) 气象资料与地下水埋深。距试验区 30 m 安装有自动气象监测站 (WeatherHawk 500, Campbell Scientific, USA) 用以自动采集气温、湿度、风速、降雨、辐射等气象数据，各小区均埋设有直径 32 mm PVC 管制作的简易观测井以监测地下水位的变化情况。2013 年水稻生长季平均温度和光照分别为 22.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 9.4 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ ，2014 年为 21.3 $^{\circ}\text{C}$ 和 6.6 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ ，比 2013 年稍低，从而使得水稻晚收获 8d。受降雨和灌溉的影响，水稻生长季试验小区内地下水埋深在 40 ~ 70 cm 之间波动。

(2) 土壤含水量。所有覆膜小区均安装有长 1 m 的 Diviner 水分监测管，其中 GCRPS_{sat} 处理在厢面中心安装监测管 1 根，而 GCRPS_{80%} 处理从厢面中心至厢面边缘等间距安装监测管 3 根，采用水分测定仪 (Diviner 2000, Sentek, Australia) 测定剖面土壤含水量的变化情况，每 2 d (雨天除外) 1 次，测定深度分别为地表以下 5、15、25、35、45 和 55 cm。

(3) 灌溉量和排水量。在各小区进水口和排水口均安装有水表，用于记录灌溉量和排水量。淹水小区厢面及覆膜小区灌水沟内的不同位置处分别插有直尺 5 把 (精度 1 mm) 以监测水层厚度，从而控制灌溉或排水，使厢面或沟内水深达到或保持在适宜的水平。降雨后，当淹水小区厢面水层高度超过 10 cm 时，开始排水。覆膜小区降雨后的排水控制在两个生长季内略有差别：2013 年的排水标准为厢面无水；2014 年为了更好地利用雨水资源，当厢面水层厚度超过 1 cm 时才开始排水。

(4) 深层渗漏量。某时间段内各小区的深层渗漏量可计算如下：

$$D = \int_{T_0}^{T_1} q(t) dt \quad (1)$$

式中： D 为深层渗漏量，mm； T_0 和 T_1 分别表示均衡时段的开始与结束时间，d； $q(t)$ 为深层渗漏速率，mm/d，其中 t 表示时间，d。

为了充分考虑大孔隙 (防渗膜周边)、犁底层及土壤空间变异性的影响，采用以下方法测定、估算各处理条件下的深层渗漏速率。

饱和或近饱和阶段：包括 TPRPS 和 GCRPS_{sat} 处理非晒田阶段以及 GCRPS_{80%} 处理从移苗至分蘖中

期。插秧后 20 d 内, 当夜间无降雨、径流时, 每日 18:00 及次日 6:00 观测 TPRPS 处理厢面或 GCRPS 处理沟中水位, 获得各小区每日夜间的水位降低幅度(d_d , mm)。在水稻生长苗期, 夜间水面蒸发和植物蒸腾均十分微弱, 因此可根据夜间水位降低幅度来近似估算稻田的深层渗漏速率:

$$q(t) = \frac{d_d A_w}{\Delta t A_p} \quad (2)$$

式中: A_p 为小区净种植面积(即 84.39 m², 图 1); $\Delta t=0.5$ d; A_w 为水面面积, 对于 GCRPS 处理小区, 即为灌水沟面积(11.07 m²), 对于 TPRPS 处理小区, $A_w=A_p$ 。

由于监测获得的夜间水位变幅不大, 且每日测定值十分相近, 因此本文将移栽后 20 d 内测得的深层渗漏速率的平均值作为处于饱和或近饱和阶段各小区的日均深层渗漏速率。

非饱和阶段: 主要包括 TPRPS 和 GCRPS_{sat} 处理的晒田阶段以及 GCRPS_{80%} 处理分蘖中期之后。此阶段各处理根系层土壤处于非饱和状态, 深层渗漏速率会迅速降低, 其大小根据剖面实测含水量、采用达西定律进行估算^[14]。尽管 TPRPS 处理未监测土壤含水量, 但其动态变化基本与 GCRPS_{sat} 处理类似, 因而其晒田阶段每天的渗漏按 GCRPS_{sat} 处理的估算值予以近似。

(5) 蒸发量 E (mm)。蒸发只在非覆膜土壤表层(对 TPRPS 处理而言即为小区净种植面积 A_p , 对 GCRPS_{sat} 和 GCRPS_{80%} 处理而言则为灌水沟的表面积)发生, 可分为水面蒸发和土面蒸发两种类型, 地表积水时(TPRPS 处理淹水阶段、GCRPS_{sat} 和 GCRPS_{80%} 处理灌水沟中有水阶段)为水面蒸发, 地表裸露时(TPRPS 处理晒田阶段、GCRPS_{sat} 和 GCRPS_{80%} 处理灌水沟中无水阶段)为土面蒸发, 无论哪种蒸发, 其蒸发面完全相同, 但两者不可能同时发生, 即水面蒸发发生时不可能存在土面蒸发过程, 反之, 若有土面蒸发则无水面蒸发。水面和土面蒸发的测定或估算方法并不相同, 分别说明如下。

水面蒸发: 在水稻冠层下放置直径为 20 cm 的标准蒸发皿, 每天傍晚 18:00 记录蒸发皿内水位高度, 从而获得每日水面蒸发强度 $e_w(t)$ (mm/d)。于是, 各处理某时间段内的蒸发损失量 E 估算如下:

$$E = \int_{T_0}^{T_1} \frac{e_w(t) A_w}{A_p} dt \quad (3)$$

土面蒸发: 当非覆膜表层土壤处于非饱和状态时(如 TPRPS 和 GCRPS_{sat} 处理的晒田阶段、GCRPS_{80%} 处理沟中积水被蒸发殆尽时), 根据近地表的实测含水量采用达西定律估算土面蒸发强度 $e_s(t)$ (mm/d)。因晒田阶段各处理条件下的土壤水分变化过程很相似, 因此 TPRPS 与 GCRPS_{sat} 处理晒田阶段的 $e_s(t)$ 均近似为 GCRPS_{80%} 处理灌水沟中的估算值。由于土面蒸发和水面蒸发的蒸发面完全一致, 各处理的土面蒸发损失量同样采用式(3)进行估算, 只需将其中的 $e_w(t)$ 换为 $e_s(t)$ 即可。

(6) 蒸腾量。根据根系层土壤水量均衡计算水稻蒸腾耗水量如下:

$$T = I + P - R - D - E - \Delta W \quad (4)$$

式中: T 为水稻蒸腾量, mm; I 为灌水量, mm; P 为降雨量, mm; R 为地表径流排水量, mm; ΔW 为均衡时段始末根系层储水量的变化, mm(增加为正, 降低为负), 包括厢面或灌水沟的水层厚度变化以及根系层土壤含水量的变化。

(7) 模比系数。水稻各生育阶段蒸腾耗水量与全生育期总蒸腾耗水量的比值。

2.3 统计分析方法 本文数据采用 SPSS 18.0 统计分析, 通过 F 检验和最小二乘法(LSD)在 0.05 水平下进行数据间的差异显著性检验。

3 结果与讨论

3.1 土壤水分的动态变化 试验过程中, 各处理条件下水稻的最大扎根深度都不超过 40 cm, 因此, 本文将 0~40 cm 土层确定为根区(亦即水均衡区)。GCRPS_{80%} 处理各小区 3 个不同测量位置处的土壤含水量分布基本类似, 每次测量时同一深度处的含水量差异均小于 0.03 cm³/cm³, 因此, 本文不再分别展示不同位置处的土壤含水量剖面, 而主要探讨根区平均土壤含水量的变化规律。同一灌溉水平下, 3 个施氮处理的根区土壤水分动态以及平均含水量都非常相似, 没有显著差异, 因此本文将各灌

溉水平下3个氮素处理的根区土壤含水量分布进行平均并予以集中展示。

TPRPS、GCRPS_{sat}和GCRPS_{80%}处理0~40 cm土层平均含水量的动态变化如图2所示。其中，虚线表示0~40 cm土层平均田间持水量；DAT表示移栽后的天数。TPRPS处理条件下，除晒田期外，土壤都处于饱和状态。水稻全生育期内(晒田期除外)，GCRPS_{sat}处理条件下的根区平均土壤含水量达0.41 cm³/cm³，约为0~40 cm土层平均饱和含水量的87%左右；GCRPS_{80%}处理条件下的根区平均土壤含水量介于0.24和0.47 cm³/cm³之间，平均值为0.33 cm³/cm³，约为0~40 cm土层平均田间持水量的82%。

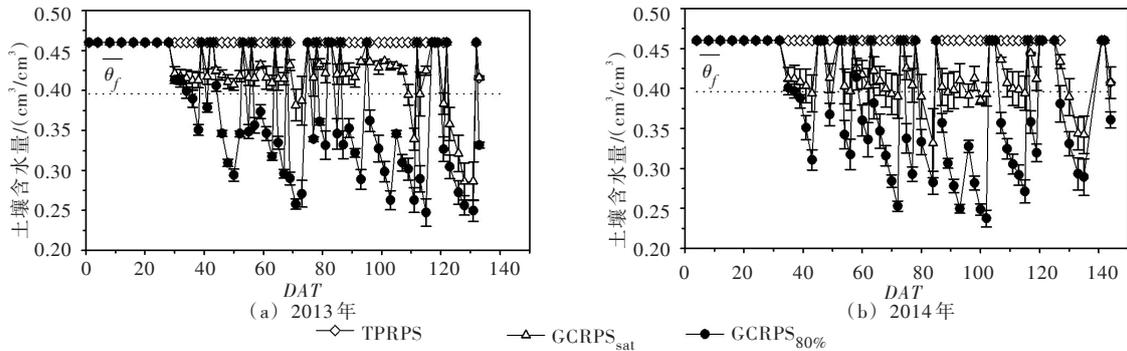


图2 水稻生长季TPRPS、GCRPS_{sat}(取样数N=9)与GCRPS_{80%}(N=9)处理条件下0~40 cm土层平均含水量的动态变化。

3.2 水均衡分析 试验结果表明，对于同一水分处理而言，除蒸腾耗水外，不同氮素处理间其他各项水均衡要素(非生理耗水)差别不大，因此为节省篇幅，以下仅以N1处理为例，对水稻生长季内水均衡各要素的整体情况做一简要分析，有关施氮处理对蒸腾耗水的影响将在下节阐述。2013及2014年N1处理不同灌溉控制条件下的水均衡情况如表2所示。

3.2.1 供水(包括降雨和灌溉) 2013年水稻全生育期内(从移栽至收获)共降雨638.0 mm，约一半(297 mm)分布于生长季中期，而2014年水稻全生育期内的降雨量仅602.0 mm，减少5.6%，约一半(279 mm)分布于生长季后期。降雨分别占TPRPS、GCRPS_{sat}和GCRPS_{80%}处理供水总量的45%以下、65%以上和80%以上。各水分处理两年间的灌溉量相差较小，但不同水分处理间的灌溉量却存在极显著差异(表2)。水稻全生育期内，TPRPS处理条件下的平均灌溉量为800.0 mm，是GCRPS_{sat}处理条件下的2.6倍(308.7 mm)、GCRPS_{80%}处理的6.3倍(126.5 mm)。

表2 TPRPS、GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理稻田水均衡要素及所占比例

水均衡要素	2013年(N1处理)						2014年(N1处理)						
	TPRPS		GCRPS _{sat}		GCRPS _{80%}		TPRPS		GCRPS _{sat}		GCRPS _{80%}		
	/mm	%	/mm	%	/mm	%	/mm	%	/mm	%	/mm	%	
供水	降雨量P	638.0	44.4	638.0	68.2	638.0	85.1	602.0	43.2	602.0	65.7	602.0	81.0
	灌水量I	802.5	55.6	302.3	31.8	112.3	14.9	797.5	56.8	315.1	34.3	140.7	19.0
		±55.2a		±44.1b		±7.0c		±68.4a		±15.3b		±1.8c	
储水量ΔW	-52.2	-3.6	-17.8	-1.9	-46.8	-6.2	-53	-3.8	-21.1	-2.3	-38.8	-5.2	
		±2.4a		±1.4b		±2.1a		±3.2a		±1.8c		±3.8b	
深层渗漏量D	631.3	43.8	165.8	17.6	53.2	7.1	609.3	43.5	187.5	20.4	93.4	12.6	
		±51.6a		±45.7b		±9.4b		±67.7a		±14.2b		±12.4b	
耗水	蒸发量E	136.6	9.5	23.4	2.5	14.8	2.0	132.3	9.5	22.7	2.5	14.4	1.9
			±3.2a		±0.4b		±0.1c		±1.4a		±0.4b		±0.1c
	径流排水量R	64.8	4.5	170.9	18.2	147.6	19.7	47.1	3.4	83.5	9.1	59.7	8.0
		±11.2b		±23.2a		±12.5a		±8.8b		±5.9a		±4.7b	
蒸腾量T	659.9	45.8	597.9	63.6	581.3	77.4	663.9	47.4	644.4	70.3	614.1	82.7	
		±16.1a		±30.8ab		±7.3b		±15.6a		±8.8ab		±14.3b	
供水(或耗水)合计	1440.5	100	940.3	100	750.3	100	1399.5	100	917.1	100	742.8	100	
		±55.2a		±44.1b		±7.0c		±68.4a		±15.3b		±1.8c	

注：“±”后面的数字为标准差，同一行的不同小写字母a、b、c表示处理间差异显著

3.2.2 耗水(包括土壤储水量变化、深层渗漏、蒸发、径流及蒸腾) 除径流外，其他水分消耗项在两个生长季内均比较接近，但水分处理对耗水过程的影响非常显著。从育苗至收获，各处理条件下0~40 cm根区

储水量均有所下降,但其降幅在总耗水量中所占比例都较低,小于7%。相对而言,TPRPS处理因厢面上有2~5 cm厚水层,收获前晒田使其储水量减少最多,GCRPS_{80%}处理因更低的土壤含水量控制下限其储水量减少次之,GCRPS_{sat}最小(表2)。水稻全生育期内,GCRPS_{sat}和GCRPS_{80%}处理条件下的深层渗漏均显著减少,仅为TPRPS处理条件下的28.5%与11.8%,渗漏量在总耗水量中所占比重也由43.7%分别降为19.0%和9.9%。另外,覆膜处理也极大程度地限制了蒸发,GCRPS_{sat}和GCRPS_{80%}处理条件下的平均蒸发量仅为23.1 mm与14.6 mm,尚不足TPRPS处理的18%。2013年,为保持覆膜处理(GCRPS_{sat}和GCRPS_{80%})厢面无积水,雨水被及时排出,其径流量是TPRPS处理的2~3倍。2014年水稻生长季后期,为充分利用天然降水,允许覆膜处理厢面上有1 cm厚水层,其径流损失减少为TPRPS处理的1~2倍。相对于TPRPS处理,GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下的蒸腾耗水也分别减少了6.1%和9.7%。

综上,虽然GCRPS处理的储水量有所下降,径流损失有所增大,但深层渗漏与蒸发损失因非饱和和土壤水分状况以及薄膜覆盖而显著降低,导致生态耗水大幅减少,其中GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下的生态耗水相对于TPRPS处理分别减少了57.2%与77.2%。除此之外,即使覆膜增温效应可促进水稻生长并增大其叶面积^[3],但水分胁迫致使单位叶面积蒸腾速率的下降幅度更大^[15],从而导致其生理耗水也有所减少。水稻全生育期内,GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下的总耗水量分别为928.7 mm与746.5 mm,相对于TPRPS处理条件下的1420.0 mm,分别减少了34.6%与47.4%,节水效果非常明显,尤其是GCRPS_{80%}。由于GCRPS处理条件下生理耗水的降低幅度远远小于生态耗水,生理耗水所占比重显著升高:在水稻全生育期内,TPRPS处理条件下的生理耗水仅占总耗水量的42.4%,其余的57.6%属生态耗水,这与已有的试验研究结果基本吻合^[1,6],而GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下生理耗水所占比例分别高达63.2%与77.4%。除了节水,已有大量相关研究结果业已表明,应用覆膜旱作技术不仅可实现稳产甚至还能增产^[3-4,8-9,15],而GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理间的产量并无显著差异^[16]。可见,在低温地区以及水资源紧缺地区,推广应用覆膜旱作技术是切实可行的,有利于节水、增产目标的实现。在水稻实践生产过程中,为了更高效地利用农业水资源,建议按照GCRPS_{80%}处理进行灌溉控制,即分蘖中期前保持沟中水深为10~15 cm,之后当根区平均土壤含水量达到田持的80%时实施灌溉,至输水沟中水位与厢面齐平时停止灌水即可。

3.3 蒸腾耗水规律 因不同处理条件下各生育阶段内水稻的蒸腾强度与蒸腾量在2013和2014年间无显著差异(表2),故本研究采用这两年的平均值对其蒸腾耗水规律进行分析。

3.3.1 不同生育阶段的蒸腾耗水 无论水分与氮素处理如何,水稻全生育期6个主要阶段内的蒸腾强度与蒸腾量均呈现出“低-高-低”的变化趋势,即随着水稻生育期的推进蒸腾耗水逐渐增强,在扬花期达到最大值后渐次衰减(图3),与多数研究结果一致^[17-18],但也有部分研究结果表明水稻在乳熟期的蒸腾耗水量最大^[19-20],这可能是由不同的水稻品种、种植季节(单季或双季稻)、气候条件以及灌溉管理方式所引起的。本田间试验条件下,8月中下旬为水稻乳熟期,较扬花期而言,此时气温较低,日照时数较短,不利于水稻蒸腾耗水。

对所有处理整体而言,孕穗、扬花和乳熟期是所选水稻品种在当地气候条件下的三个需水关键期,平均耗水量分别为141.1、150.6、122.9 mm,模比系数平均约23.6%、25.2%、20.6%,其占比高达70%左右(图3)。而分蘖中期之前,蒸腾较弱,各处理耗水量均不足全生育期总蒸腾量的十分之一。因此,无论采用何种灌溉、施氮水平或方式,满足水稻在孕穗期、扬花期以及乳熟期对水分的需求都至关重要。

3.3.2 水分处理对蒸腾耗水的影响 如2.2节所述,在N1处理条件下,覆膜旱作可减少水稻蒸腾耗水,尤其是GCRPS_{80%}处理,该结论同样适合于N0、N2处理。在N0处理条件下,GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理水稻全生育期内的蒸腾量分别为535.7 mm与530.5 mm,相对于TPRPS处理条件下的544.7 mm分别减少了1.6%与2.6%;而在N2处理条件下,GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下水稻全生育期内的蒸腾量分别为626.6 mm、602.9 mm,相对于TPRPS处理条件下的656.2 mm分别减少了4.5%与8.1%。在相同的氮素处理条件下,尽管各阶段覆膜处理中GCRPS_{80%}的蒸腾均略低于GCRPS_{sat},但两者间并无显著差异(图3)。

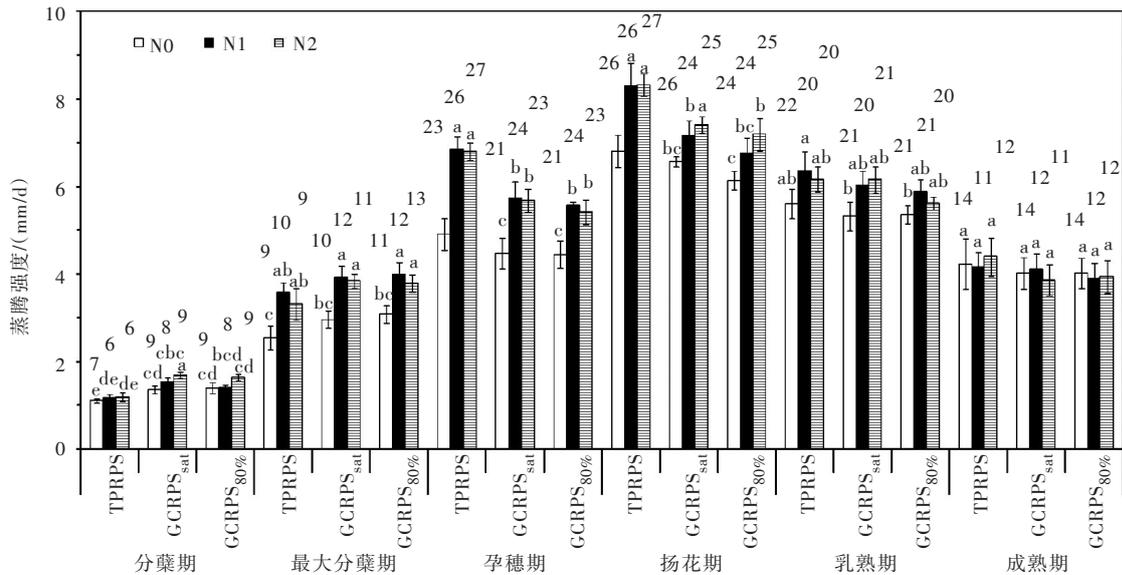


图3 不同水分(TPRPS, GCRPS_{sat}, GCRPS_{80%})与氮素(N0, N1, N2)处理条件下水稻各主要生育期内的蒸腾强度与模比系数(柱状图上方的数字, %)

另外, 图3还表明, 水分处理对水稻各生育期蒸腾耗水的影响程度不尽相同, 从而进一步导致各水分处理条件下的蒸腾模比系数存在较大差异。不同氮素处理条件下, 覆膜水稻(尤其是GCRPS_{80%})在最大分蘖期之前的蒸腾强度以及蒸腾量都明显高于淹水水稻, 但覆膜水稻全生育期内的总蒸腾量相对更小, 从而导致最大分蘖期前覆膜水稻的蒸腾模比系数更高(图3)。就本研究区域而言, 最大分蘖期前水稻常常遭遇低温灾害^[11], 通过覆膜可显著提高苗期水稻根区土壤(尤其是0~10 cm土层)温度, 从而促进水稻分蘖并增大叶面积^[3, 16, 21]。无论是GCRPS_{sat}还是GCRPS_{80%}, 苗期水稻根区土壤含水量都高于田持(图2), 几乎不会受到水分胁迫, 因此, 相对于TPRPS, 此时其较大的叶面积指数使得蒸腾耗水更强、模比系数更高。最大分蘖期之后, 覆膜增温效应逐渐减弱甚至消失^[21], 即使此时GCRPS处理条件下的叶面积指数仍然较高, 但水分胁迫对蒸腾耗水的抑制作用更强, 从而导致前期在蒸腾方面的领先优势逐渐丧失甚至出现比TPRPS更低的蒸腾强度与蒸腾量。因此, 在水稻生长发育中期(孕穗-扬花期), 各种氮素处理条件下覆膜水稻(尤其是GCRPS_{80%})的蒸腾强度以及蒸腾量都低于淹水水稻, 因其降低幅度比全生育期内总蒸腾量的降低幅度还大, 导致期间蒸腾模比系数相对于淹水水稻更小。乳熟期之后, 不同氮素处理条件下覆膜水稻的蒸腾强度、蒸腾量以及模比系数都与淹水水稻非常接近。

3.3.3 氮素处理对蒸腾耗水的影响 由于追肥较为困难, 覆膜稻田的肥料通常只能一次性基施, 此时, 过多的氮肥会造成水稻前期疯长、后期则营养不足^[4], 为了探索相关的解决方案, 本研究特设置不同的氮素处理, 相关研究结果已在其他论文中进行了比较详细的讨论^[16], 这里不再赘述。总体而言, 各试验小区基础土壤肥力较高(表层0~20 cm土壤有机质含量为13.9 g/kg, 全氮含量1.3 g/kg), 从而使得氮素处理间的差异并不十分明显, 但仍然产生了一定的效应, 具体分析如下。

扬花期之前, 在各种水分处理条件下, 相对于不施氮处理(N0), 施用尿素(N1)或尿素与鸡粪混施(N2)都会显著促进水稻生长^[16], 从而增大蒸腾耗水强度, 但N1与N2处理之间无显著差异(图3)。乳熟期, N1与N2处理条件下水稻蒸腾强度仍然比N0稍高, 但差异不显著。至成熟期, 氮素处理对水稻蒸腾的影响完全消失(图3)。全生育期内, TPRPS、GCRPS_{sat}与GCRPS_{80%}处理条件下, 相对于N0处理, 施氮处理(包括N1与N2)可分别提高水稻蒸腾量21.0%、16.4%、13.2%, 表明淹水种植条件下施用氮肥更有利于促进水稻蒸腾耗水。

4 结论

通过2年田间试验和水均衡方法, 系统分析了覆膜旱作水稻的蒸腾耗水规律, 主要结论如下:

(1)与传统淹水种植相比,在不减产甚至增产的情况下,覆膜旱作不仅可以大幅度减少深层渗漏与蒸发等生态耗水,还能减少蒸腾耗水,节水效应非常显著,尤其在GCRPS80%处理条件下,可节约灌溉用水量84.2%,其中生态耗水和非生态耗水分别减少77.2%和9.7%;(2)水稻全生育期内的蒸腾耗水变化规律不受水分与氮素处理的影响,总体呈现出生育前期较低-中期较高-后期逐渐衰减的趋势,孕穗、扬花、乳熟期为需水关键期,扬花期达到峰值;(3)最大分蘖期前,相对于传统淹水种植,覆膜增温效应显著提高水稻蒸腾强度,但之后,水分胁迫导致情形发生逆转,使得覆膜水稻的蒸腾显著下降。(4)扬花期前,相对于不施氮处理,施氮处理(施用尿素或尿素与鸡粪混合物)可显著促进水稻生理耗水,但之后两种施氮处理之间无显著差异。

参 考 文 献:

- [1] 司徒淞,王和洲,张薇.中国水稻节水若干问题的探讨与建议[J].灌溉排水,2000,19(1):30-33.
- [2] 陈婷婷,杨建昌.移栽水稻高产高效节水灌溉技术的生理生化机理研究进展[J].中国水稻科学,2014,28(1):103-110.
- [3] Tao H, Brueck H, Dittert K, et al. Growth and yield formation for rice (*Oryza sativa* L.) in the water saving ground cover rice production system (GCRPS)[J]. Field Crops Research, 2006, 95: 1-12.
- [4] Qu H, Tao H, Tao Y, et al. Ground cover rice production system increases yield and nitrogen recovery efficiency [J]. Agronomy Journal, 2012, 104(5):1399-1407.
- [5] 彭世彰,李荣超.覆膜旱作水稻蒸发蒸腾量计算模型研究[J].河海大学学报,2001,29(3):51-54.
- [6] Bouman B, Peng S, Castafieda A, et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems [J]. Agricultural Water Management, 2005, 74: 87-105.
- [7] 汪强,樊小林, Klaus D, 等.华南地区覆盖旱作水稻节水及其水分利用效率研究[J].灌溉排水学报,2007,26(4):89-92.
- [8] Xu G, Zhang Z, Zhang J, et al. Much improved water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49: 1527-1534.
- [9] Liu M, Lin S, Dannemann M, et al. Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales [J]. Field Crops Research, 2013, 150: 19-28.
- [10] 李荣超,彭世彰,王永乐,等.覆膜旱作水稻需水规律试验研究[J].灌溉排水,2000,19(3):24-28.
- [11] 沈康荣,汪晓春,刘军,等.水稻全程地膜覆盖湿润栽培法增产因子及关键栽培技术的研究[J].华中农业大学学报,1997,16(6):547-551.
- [12] vanGenuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [13] Romano N, Santini A. Water retention and storage: field water capacity[M]. Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser. No. 5. SSSA, Madison, WI. 2002.
- [14] Chen S, Liu C. Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies [J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 206-215.
- [15] Zhang Z, Zhang S, Yang J, et al. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation [J]. Field Crops Research, 2008, 108: 71-81.
- [16] Tao Y, Zhang Y, Jin X, et al. More rice with less water - evaluation on yield and resource use efficiency in ground cover rice production system with transplanting [J]. European Journal of Agronomy, 2015, 68: 13-21.
- [17] 王笑影,闻大中,梁文举.不同土壤水分条件下北方稻田耗水规律研究[J].应用生态学报,2003,14(6):925-929.
- [18] 路兴花,吴良欢,庞林江.不同土壤水分含量对水稻水分利用特征的影响[J].中国水稻科学,2009,23(2):186-190.
- [19] 程建平,曹湊贵,蔡明历,等.不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J].农业工程学报,2006,22(12):28-33.
- [20] Fan M, Lu S, Jiang R, et al. Long-term non-flooded mulching cultivation influences rice productivity and soil organic carbon[J]. Soil Use Management, 2012, 28(4): 544-550.
- [21] 马雯雯,金欣欣,石建初,等.基于CERES-Rice模型的覆膜旱作稻田增温效应的模拟[J].农业工程学报,2015,31(9):215-222.

Transpiration analysis based on water balance in a ground cover rice production system

SHI Jianchu, JIN Xinxin, LI Sen, MA Wenwen, ZUO Qiang

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Ground cover rice production system (GCRPS) has attracted great attention due to its contributions to both saving water and increasing yields. However, the water budget, especial for plant transpiration, in a GCRPS is still unclear. In this study, a two-year field experiment with nine treatments for three irrigation levels (TPRPS, traditional paddy rice production system; GCRPS_{sat}, keeping root zone average soil water content near saturated, and GCRPS_{80%}, keeping root zone average soil water content as 80%~100% of field water capacity) and three nitrogen levels (N0, without nitrogen; N1, 150 kg N/ha with urea; N2, 75 kg N/ha with urea and 75 kg N/ha with chicken manure) was conducted in Shiyan, Hubei province, China. The transpiration during the six main growth stages of rice was analyzed in detail using water balance method. The results showed that: (1) Both physiological transpiration and non-physiological water consumption such as deep drainage and evaporation were significantly limited under GCRPS especially GCRPS_{80%}, accompanied by similar or even higher yields; (2) Plant transpiration pattern was not affected significantly by water or nitrogen treatments during the entire growing season, and a “low-high-low” trend was found with a top at anthesis stage; (3) Plant transpiration was improved by the warming effect under GCRPS before max-tillering, and afterwards the situation was reversed due to water stress; (4) Plant transpiration was significantly enhanced by the application of urea or its mixture with chicken manure before anthesis stage, but significant difference was not found between these two nitrogen treatments.

Key words: ground cover rice production system; transpiration; water balance; water consumption

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 1259 页)

Effects of rainfall and underlying surface on sediment yield in the main sediment-yielding area of the Yellow River

LI Xiaoyu¹, LIU Xiaoyan², LI Zhuo¹

(1. Hydrology Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China;

2. Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Sediment yield of the Yellow River has obviously decreased in recent years, which had become a hot topic of general interest. In this study, basin area above Tongguan station was choose as the study region which natural sediment yield accounted for about 90% of the total sediment yield in the entire Yellow River basin. The rainfall-sediment correlation models was modified with the optimized rainfall indexes and model's function type, and then sediment reduction effects of both rainfall and underlying surface factors were analyzed by using the correlation models. The results show that the sediment reduction effect of the underlying surface has been getting larger and larger since 1980, especially in recent 10 years, taking the rainfall-sediment correlation of each branches during 1956 to 1975 as a benchmark. In recent 10 years, the rainfall was generally more plentiful than the average value of it in 1956-2014, and so the rainfall factor was not the reason of the sediment yield reduction of the Yellow River. The total sediment reductions due to the change of the underlying surface in 2005-2014 and 2010-2014 were separately 1387~1545 million t/a and 1570~1870million t/a.

Key words: Yellow River; main sediment-yielding area; precipitation; land surface; sediment reductions

(责任编辑: 李福田)