

# 辽宁中部地区水稻节水灌溉控水指标试验研究

张旭东<sup>1</sup>, 迟道才<sup>1</sup>, 蔡亮<sup>2</sup>, 邵恩博<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省水利水电科学研究院, 沈阳 110003)

**摘要:**于2009年在辽宁省灌溉试验中心站设置了4种不同的节水灌溉控水指标进行试验, A为湿润灌溉, B和E分别为浅湿干I和II, 对照CK为浅湿灌溉。结果表明: 灌水下限指标对水稻株高的影响在插秧77天后呈显著水平, 对分蘖的动态变化影响较小; 土壤水吸力为250~400 kPa的灌水下限使水稻在拔节孕穗期和抽穗开花期遭受水分亏缺, 造成了千粒重减轻、每穗粒数和实粒数降低; 灌水上限设置过低则会增加灌水次数。在产量上A、B比CK分别减产17.7%和14.1%, E增产10.2%, 综合分析A的灌溉水利用效率最高, B为较易推广的水稻节水灌溉模式。

**关键词:** 水稻; 控水指标; 节水灌溉

中图分类号: S275 文献标识码: A

## Experimental Study on Soil Water Control Criteria for Rice Water saving Irrigation in Middle Liaoning

ZHANG Xu dong<sup>1</sup>, CHI Dao cai<sup>1</sup>, CAI Liang<sup>2</sup>, TAI En bo<sup>2</sup>

(1. College of Water Resource, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866;

2. Liaoning Water Conservancy and Hydropower Science Research Institute, Shenyang 110003)

**Abstract:** Four different upper and lower irrigation limit experiments of rice were conducted in 2009 at Center Station of Irrigation Experiment in Liaoning, in which A was moisture condition, B was shallow wet dry I, E was shallow wet dry II and CK was shallow wet, respectively. The results showed that the effects of lower limit on crop height was distinct after 77 days after transplanting, while a bit smaller influence on dynamic of tiller. The paddy enduring the water deficit in the period of jointing booting and sprouting boom resulted in total grain number and filled grain number per panicle significantly fell down and 1000 grain weight reduced considerably because the lower criteria of soil water potential was 250~400 kPa. Among the four treatments, the products of A and B reduced 17.7% and 14.1% than CK, while E increased 10.2%.; A has the maximum irrigation water productivity, B was the better one which may be the popular mode to popularize in irrigation district.

**Key words:** rice; soil water control criteria; water saving irrigation

节水灌溉是在正常条件下节水且保证农作物稳产、高产所采用的适时适量的灌水方式, 其重点在于在满足农作物生长发育的基础上, 调控作物耗水变化过程, 在获得高产的同时实现节水<sup>[1]</sup>。目前, 根据试验研究和实践经验, 我国各地已建立了许多节水高产的稻田水分管理模式。以辽宁为例, 从节水的效果和田间供水量由多到少的变化来看, 水稻的节水灌溉模式经历了深水淹灌-浅水灌溉-浅湿灌溉-浅湿干-湿润灌溉(返

青后田间不建立水层)等一系列发展过程。浅湿灌溉自20世纪80年代就在辽宁得以大面积推广, 浅湿灌溉的浅湿是对土壤水分状况而言, 即每隔一定时间, 约3、5日到10余日灌水一次, 使浅水与湿润周期性反复的一种灌水方法。浅湿干灌溉技术是朱庭芸<sup>[2]</sup>、迟道才<sup>[3]</sup>等在浅湿的理论基础上进一步发展而来, 和前者的区别在于稻田的灌水下限不同, 浅湿干可以在非需水关键期达到饱和含水率以下, 而浅湿灌溉则要求在整个生

收稿日期: 2010-12-02

基金项目: 辽宁省超级稻节水高产土壤水分能量调控标准 20082122。

作者简介: 张旭东(1979), 男, 讲师, 在读博士, 主要研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: zxxddd@126.com。

通讯作者: 迟道才(1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事灌溉排水与节水灌溉机理研究。E-mail: daocaichi@vip.sina.com。

育阶段稻田的土壤水分状况始终是饱和的。90年代他们又提出了适于低洼涝渍田块的湿润灌溉,其特点是在水稻返青以后是田间土壤水分始终在饱和含水率以下,即在田间不建立水层,类似于控制灌溉<sup>[4]</sup>。实现这些稻田水分状况调节的灌溉技术是间歇灌溉,其内涵是交替、间歇灌水和促控结合,其要点是适时晒田。

在这些节水灌溉技术中,灌溉的控水指标是至关重要的,因为它不仅关系到灌溉用水量的多少,也关系到对水稻生长状态的调控以及产量的形成。如果下限设置过低,会引起田面干裂而使水肥流失,渗漏量加大,甚至减产;如果将稻田适宜水分限制在一个较小的范围内,则会导致每次的灌溉定额过小、灌水次数过多,不利于灌溉用水管理,甚至会产生灌水不均匀、田间水利用系数降低、渠系水利用系数降低等问题<sup>[5]</sup>。因此,随着节水高效农业的进一步发展,需要对水稻节水灌溉的控水指标做深入研究,进一步挖掘水稻的节水增产潜力,为水稻节水灌溉技术的推广提供科学准确的依据。

## 1 试验材料和方法

试验于2009年在辽宁省灌溉试验中心站(东经123°31',北纬42°09',海拔高度47m)进行,该站位于石佛寺水库下游,为平原地带,属温带大陆性季风气候。2009年5-9月内积温3128.6℃,日平均最高温度26.5℃,日平均最低温度14.8℃,日照时数1287.8h,日照时数百分率60.1%,降雨量414.6mm。试验区的土壤为多年生水稻土,干密度为1.5g/cm<sup>3</sup>。

试验在无底测坑内进行,每个测坑的净面积为7.5m×8

表1 水稻各处理灌溉控水指标

处理	分蘖前期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期		黄熟期	
	上限/cm	下限/kPa	上限/cm	下限/kPa	上限/cm	下限/kPa	上限/cm	下限/kPa	上限/cm	下限/kPa
A 湿润灌溉	0	250~400	0	250~400	0	250~400	0	250~400	0	250~400
B 浅湿干I	3	250~400	3	250~400	3	250~400	3	250~400	3	250~400
E 浅湿干II	3	0	2	15~30	2	15~30	2	15~30	2	15~30
CK 对照(浅湿)	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0

注:表中上限控水指标表示水层;下限表示土壤水分吸力,250~400kPa相当于80%的 $\theta_s$ ,15~30kPa相当于90%的 $\theta_s$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对生理生态指标的影响

从图1可以看出,各处理的株高在插秧后20d内变化较为缓慢,这段时间主要是秧苗的返青期(16d);然而,从插秧后20d到90d内这段时间,株高几乎呈线性增加的趋势,该段时间涵盖了分蘖、拔节孕穗、抽穗开花等生育阶段;90d后进入乳熟期,水稻株高基本上变化不大。从各处理株高差异的显著性来看,插秧后77d以内(除在29d时)所有处理的株高差异不明显( $<0.01$ ),而插秧77d后,株高的差异达到了0.01显著性水平,这都说明不同的灌水模式对水稻株高是具有一定的影响,特别是对株高的最大值影响较大。在29d时,处理A、B的株高显著高于处理E和CK;而在77d以后,情况则相反,E和CK显著高于处理A、B,分析原因主要是这是处理A、B分蘖前期的灌水下限较低(250~400kPa),非饱和的土壤水分状况使

m,深2m,测坑之间用26cm厚钢筋混凝土砌筑,隔断了水分的水平运移,各测坑均设有水表进行计量。试验设4个处理,每个处理3次重复,各处理随机排列。返青期为了保苗活苗,灌水上限为3cm,下限为饱和含水率;分蘖末期为了控制无效分蘖,各处理均进行晒田。对照CK为普通的浅湿灌溉,分蘖前期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、黄熟期设置不同的灌溉控水指标(表1);灌溉时均采用交替、间歇的灌水方法,每次灌水自然落干,到下限即灌水,灌水定额按表1的控水指标用文献[2]中提供的方法计算。

水稻供试品种为辽粳9号,种植密度与当地水稻种植密度一致。5月19日插秧,6月4日开始分蘖,拔节孕穗期为6月25日至7月31日共37天,抽穗开花期为8月1日至8月17日共12天,8月18日进入乳熟期,8月30日进入黄熟期,9月20日收获。每个测坑在20cm处理设水银负压计,用以观测土壤水分能量;土壤水分特征曲线则由20cm处的原状土在室内测定,采用广泛应用的Van Genuchten模型拟合:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m}$$

式中: $S_e$ 为有效饱和度; $h$ 为土壤基质势; $m$ ; $n$ 和 $m$ 为形状系数, $n$ 取1.1997, $m = 1 - 1/n$ ; $a$ 为与进气吸力有关的参数,取2.9139; $\theta$ 、 $\theta_r$ 和 $\theta_s$ 分别为土壤含水率、残留土壤含水率和饱和土壤含水率,后者分别取0.2762、0.4338。

按灌溉试验规范对株高和分蘖数进行定株观测,为了减少误差,对每个测坑重复观测5次,取其平均值作该次测定的值。收获后任取3穴进行考种,每个测坑单独收获并分别计算产量。

稻田土壤得到较好的空气交换,根系供氧充足,从而促进的株高的生长。而拔节孕穗和抽穗开花期250~400kPa的灌溉下限,则使土壤含水量不足,满足不了需水关键期水稻对水分的强烈需求,抑制了株高的增长,最终导致最大株高显著降低。

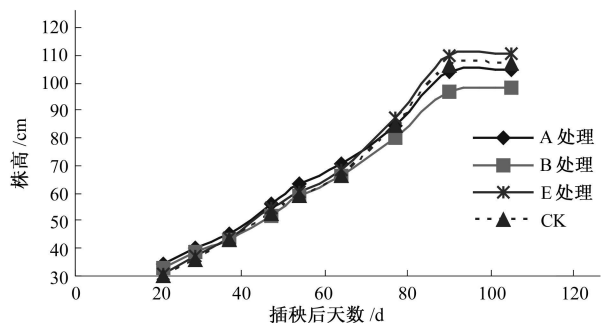


图1 各处理株高的动态变化

从图2可以看出,水稻插秧后16d即进入分蘖期,各处理

的分蘖数迅速增加,分蘖结束时,处理 A、B 的分蘖数大于处理 E 和对照 CK,但差异不明显,经 F 检验可知,只有在插秧 24 d 时达到了 0.1 水平的差异。这与处理 A、B 分蘖前期灌水下限低,田间无水层时间长,此时白天地温上升快,有效地促进了分蘖有关;根据统计,该阶段处理 A、B 的无水层时间为 11~12 d,而处理 E 和 CK 的无水层时间为 9~10 d,无水层时间短灌水次数则相应增加,另外本试验采用的是抽取地下水进行管道灌溉,出水口的温度为 10.7~10.9℃,这样的水温对水稻而言偏低,灌水频率的增加则不利于分蘖,因此,处理 E 和 CK 的分蘖较慢。

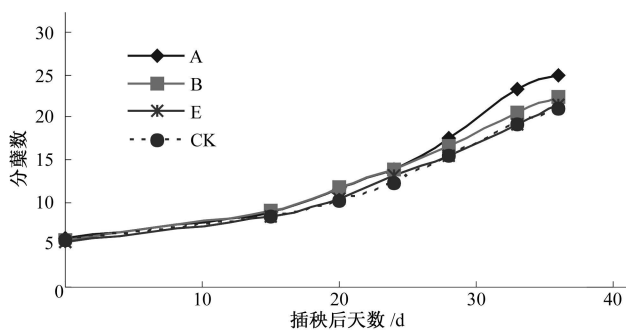


图 2 各处理分蘖数的动态变化

## 2.2 不同处理对产量及其结构的影响

本试验通过不同的灌溉控水指标对水稻的水分状况进行调节,改变水稻农田小气候,进而影响了水稻的生长发育、生理活动,最终结果体现在水稻的产量上。由表 2 可知,处理 A、B 分别减产 17.7% 和 14.1%,而处理 E 增产 10.2%。进行 3 重复的单因素方差分析表明,4 种灌水模式的穗长、每穴有效穗数的差异不显著;每穗粒数、每穗实粒数达到了 0.05 水平的显著差异;而千粒重和平均产量则达到了 0.01 水平的极显著差异。处理 A、B 的平均产量以及产量结构中的各项指标均小于处理 E 和 CK,主要是拔节孕穗期和抽穗开花期的较低的土壤水分控制下限导致的。对此前人<sup>[2,3]</sup>做了大量的试验研究,均表明该生育阶段是水稻的需水关键期,供水不足对产量的形成影响较大。进一步分析发现,需水关键期的水分亏缺使水稻的千粒重减轻、每穗粒数和实粒数降低进而导致减产的。处理的 E 的产量最高,表明了土壤水吸力为 15~30 kPa 的灌水下限并没有使水稻的产量受到影响,并且土壤短暂的非饱和状态起到了一定的气体交换作用,使根部的生长环境得到改善,对产量的形成是有利的。

表 2 水稻各处理产量结构

处理	穗长/ mm	每穗 粒数/ 粒	每穗 实粒数/ 粒	千粒重/ g	每穴平 均有效 穗数/穗	平均产量/ (15 kg· hm <sup>-2</sup> )
A	169.52	127.85	125.88	23.42	17.22	467.25
B	167.27	122.30	120.86	22.76	15.44	488.08
E	176.66	139.74	134.23	24.27	15.78	626.14
CK	171.53	139.07	135.99	25.03	14.67	568.36

## 2.3 不同灌溉模式下的灌溉水利用效率和灌溉定额

从灌溉用水量来看,如图 3 所示,处理 A、B、E 比对照 CK

都有一定程度的节水,其节水的程度分别为:68%,55%,6%。处理 A 最节水是因为在返青期以后,稻田几乎不建立水层,大大减少了棵间蒸发和渗漏量;处理 B 比处理 E 节约了一半的灌溉用水量,首先如前所述,处理 B 的无水层时间大于 E,其次是当计划湿润层的土壤水吸力处于 30~430 kPa 时,土壤表层土较干,抑制了棵间蒸发速率;而处理 E 当土壤水吸力到达 15~30 kPa 即灌水,此时表土还较湿,对棵间蒸发速率的影响比较微弱。而且,处理 B 的灌水上限比 E 高 1 cm,下限却比 E 低,说明灌水下限指标由 15~30 kPa 降低到 250~400 kPa 节水量非常明显,而灌水上限指标由 2 cm 增加到 3 cm 对稻田的用水量几乎没有影响。和灌溉用水量相反,灌溉水的利用率则是 A 最高,B、E 次之,CK 最低,分别提高了 1.64、0.94、0.17 倍。

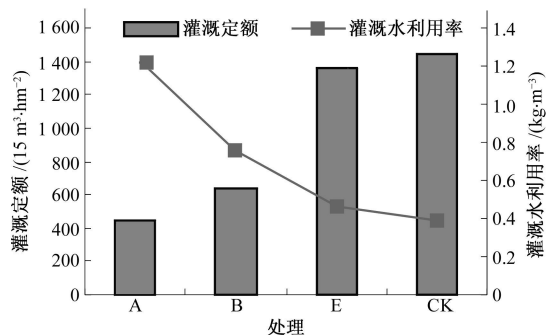


图 3 各处理的灌溉定额和灌溉水利用率

## 3 结论和讨论

试验结果表明,水稻的节水潜力是非常大的。在 2009 年的气候条件下,将水稻秧田的灌溉定额压缩在 7500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 以下(处理 A 为 7005 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 是可能的,但是要在一定程度上牺牲产量,即减产 17.7%,这个结果和 B. A. M. Bouman 在国际水稻研究所进行了 3 年试验结果基本一致,即在雨季好气灌溉(湿润灌溉)比淹灌产量低 22%<sup>[6]</sup>。处理 E 表现出了 10.2% 的增产,表明在水稻在完成分蘖后短期的非饱和和土壤水分条件对增产具有良好的作用,这和迟道才在沈阳农业大学灌溉试验场盆栽的试验结果一致<sup>[3]</sup>。对于下限相同的处理 A 和处理 B 来说,整个生育期 3 cm 水层的上限比饱和但无水层的上限每亩地多灌溉用水 90 m<sup>3</sup>,水稻的产量差异不大,但是从分蘖以后到生育期结束这段时间,处理 A 要小水勤灌,每个处理平均需灌 6 次水,处理 B 只需灌水 3 次,每次加大灌水定额即可,灌水次数只是处理 A 的 1/2,省工省力。因此灌水上限设置过低,无疑会增多灌水次数,对于目前灌区一家一户种植水稻的模式来说,处理 B 的模式更易于为农民接受,便于推广。

因此,如果对水资源不足又必须满足一定的播种面积的灌区来说,应该采用模式 A 或 B,其中 B 的工作量少,农民易于接受。如果水资源相对充足,则应以高产为目标采用灌溉模式 E。设计试验方案时,为了着重研究灌水的上下限,使各处理的灌水模式简单明了,易于推广,所以在处理 A、B、E 各生育阶段设置了相同的灌水指标。如果根据水稻生育期的需水规律在不同的生育阶段制定不同的灌水上、下限,则有可能出现更加节水增产的灌溉模式,应该对此进行进一步的研究。

(下转第 20 页)

距离大于 23.7 m 时, 地表层  $f_c$  值之间不存在空间相关关系, 在这种情况下不同空间点上  $f_c$  值可以看做是相互独立的随机变量; 犁底层  $f_c$  具有中等的空间相关性, 其随机部分与空间自相关引起的空间变异性程度相差无几。当  $h=0$  时,  $\gamma(0)=C_0=0.02$ , 显示出一定数量的块金方差, 这主要来自测量误差, 故在试验中应尽量完善设备, 以减小块金方差的影响; 变差函数的基台值为 0.26, 模拟方差模型所得到的方差值与经典统计分析中的方差值基本相同。犁底层  $f_c$  空间分布相关距离为 17.2 m。当  $h=0$  时,  $\gamma(0)=C_0=0.12$ , 显示出较大的块金方差, 基台值为 0.21, 小于经典统计分析中的方差值, 表明整个田块的空间尺度不足以来反映和描述犁底层  $f_c$  的空间变异性。

### 2.3 地表层与犁底层稳渗率 $f_c$ 的空间分布

根据所得到的变异函数模型图, 应用相应的 Kriging 法进行最优内插, 绘制了  $f_c$  的等值分布图(见图 3)。

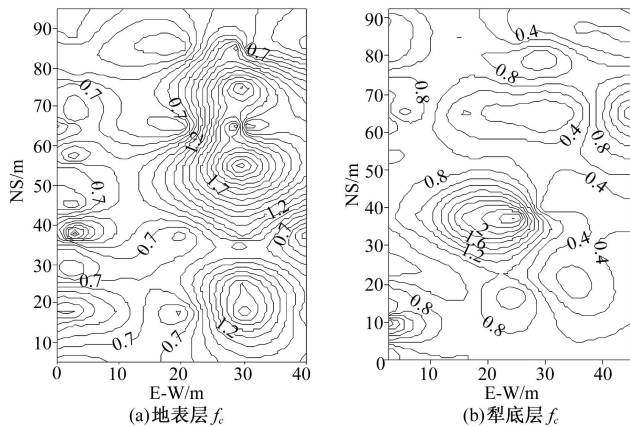


图 3 稳渗率空间等值分布图

Fig. 3 Spatial distribution of  $f_c$

从图 3 可以看出, 地表层与犁底层土壤均有较好的垂向透水性能, 但地表层土壤垂向透水性能较犁底层土壤垂向透水性能为好。土壤的成层性和大孔隙性是黄土地区土壤的特性之一, 其入渗规律有着自身的重要特点。下层土的存在会对入渗过程产生阻水与减渗作用。两个层面土壤  $f_c$  值总体上均为南侧较北侧高, 东侧较西侧高, 中间区域较四周区域高, 西北角区域  $f_c$  值相对最低; 也就是说, 就整个田块来说垂向透水性能均为南侧较北侧好, 东侧较西侧好, 中间区域较四周区域好, 西北角区域的垂向透水性能最差。分析其原因, 主要是由于土壤局部含沙量的不同, 南侧和西侧的含沙量相对要高于北侧和东侧的含沙量, 而含沙量较高的土壤其内部颗粒的稳定性比含沙量

低的土壤由胶聚作用形成团聚体的稳定性小, 土壤较为松散, 持水性较差, 这样水分入渗的速度就快, 另外试验区中间有一片小树林, 由于其根系对土壤的疏松, 使得土壤孔隙较为发育, 而西北角区域  $f_c$  值较低是因为该处有一个进出的小门, 这就造成了来往的试验人员及农机的来回压实, 使该区域土壤密度增大, 垂向透水性能较差。

### 3 结 语

通过禹城市农田土壤稳渗率  $f_c$  的空间分布研究, 可以得到以下认识:

(1) 从经典统计学分析结果来看, 地表层与犁底层土壤稳渗率均为中等变异, 服从对数正态概率分布; 犁底层稳渗率空间变异性较地表层稳渗率空间变异性显著。

(2) 地统计学分析结果表明, 两个层面土壤稳渗率都表现出明显的空间相关性, 较好地拟合了地统计模型。应用球状变差函数模型模拟了两个层面土壤稳渗率的空间变异结构, 拟合模型得到的方差值与试验结果的统计值基本相近, 地表层土壤稳渗率空间相关距离为 23.7 m, 犁底层土壤稳渗率空间相关距离为 17.2 m。在极限距离内, 土壤稳渗率的随机性和结构性并存。

(3) 根据拟合变差函数模型的参数, 利用 Kriging 最优内插估值方法绘制了该农田地块稳渗率的等值线图。

#### 参考文献:

- [1] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 土壤肥料, 2002, (1): 8-14.
- [2] 王永东, 李廷轩. 不同尺度下低山茶园土壤钾素含量空间变异特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 309-314.
- [3] Campbell LB. Spatial Variation of Sand Content and pH within Single Contiguous Delineation of two Soil Mapping Units [J]. Soil Sci. Am. J. 1978, (42): 460-464.
- [4] Burgess T M, Webster R. Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties: I. The Semi Variogram and Punctual Kriging. II. Block Kriging[J]. Soil Sci, 1980, (31): 315-341.
- [5] Hillel D. Research in Soil Physics: a Review[J]. Soil Sci, 1991, 151: 30-34.
- [6] 胡克林, 李保国, 陈 研. 表层土壤饱和和导水率的空间变异对农田水分渗漏的影响[J]. 水利学报, 2006, (10): 1217-1223.
- [7] 侯景儒, 黄竟先. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 331-357.

(上接第 17 页)

#### 参考文献:

- [1] 水利农村水利司, 中国灌溉排水技术开发培训中心. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [2] 朱庭芸. 水稻高产高效益灌溉原理与方法[M]. 北京: 辽宁科学技术出版社, 1994.
- [3] 迟道才, 王殿武. 北方水稻节水理论与实践[M]. 北京: 中国农业

科学技术出版社, 2003.

- [4] 彭世彰, 徐俊增, 黄 乾, 等. 水稻控制灌溉模式及其环境多功能性[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, (10): 443-445.
- [5] 李远华, 张祖莲, 赵长友, 等. 水稻间歇灌溉的节水增产机理研究[J]. 中国农水水利水电, 1998, (11): 12-15.
- [6] B A M Bouman, S Peng, A R Castaneda, et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems[J]. Agric. Water Manage, 2005, 74, 87-105.