

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.022

控制排水条件下冬小麦水位生产函数的试验研究

孙 涛¹, 俞双恩^{1,2}, 何妙妙¹, 孙天录³

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 中卫市南山台电力灌溉管理站, 宁夏 中卫 755000)

摘要: 为了研究冬小麦地下水埋深与产量的关系, 以地下水的降落速度与适宜埋深作为冬小麦排水的调控指标, 在蒸渗测坑内进行冬小麦水位调控试验, 通过理论分析和数值计算, 建立了排水条件下冬小麦水位生产函数。考虑到根层土壤含水量与地下水位的耦合作用对冬小麦产量的影响, 提出了用土壤含水量作为修正系数的控制排水条件下冬小麦的水位生产函数。函数求解结果表明: 在涝渍条件下, 冬小麦各生育阶段受涝渍影响程度由大到小顺序为: 拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、分蘖期; 受旱情况下, 冬小麦各生育阶段受旱敏感指数由大到小顺序为: 抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖期、乳熟期。

关键词: 冬小麦; 水位生产函数; 土壤含水量修正; 农田排水; 控制排水

中图分类号: S512.1+1 S274.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)06-0708-05

作物水位生产函数是反映作物产量随水位变化规律的函数, 是进行农田控制排水最为基本也最为重要的函数。开展此类问题的试验研究, 对于指导农田控制排水^[1-4]或节水灌溉^[5-11]实践、提高农田水分利用率, 具有重要的指导意义。本文以冬小麦作为供试作物, 研究不同地下水埋深条件下的产量情况, 进而建立小麦水位生产函数。

1 试验研究方法

1.1 试验区基本情况

冬小麦的水位控制试验于 2009 年 11 月至 2010 年 6 月在河海大学高效灌排重点实验室生态试验场蒸渗测坑内进行。该试验场所在的江宁校区属于亚热带湿润季风气候区, 多年平均降雨量为 1 021.3 mm, 多年平均蒸发量为 900 mm 左右, 多年平均气温为 15.7℃, 最高气温 43.0℃, 最低气温 -14.0℃, 无霜期 237 天。一年中温差较大, 四季分明, 降雨丰沛, 全年降雨日数 120 天左右, 其中汛期(5—9 月)降雨量占年均雨量的 60% 以上。

蒸渗测坑内的土壤为黏壤土, 由当地土分层回填密实, 已经过 4 个年度的水旱轮作。经测定, 0~30 cm 土壤田间持水量为 25.28%, 土壤密度为 1.46 g/cm³, 总孔隙度为 44.97%, pH 值为 6.97, 土壤有机质质量分数为 2.40%、全氮质量比为 0.9048 g/kg、速效氮质量比为 27.65 mg/kg、土壤全磷质量比为 0.32 g/kg, 土壤速效磷质量比为 12.5 mg/kg。

1.2 试验处理方案

按照 SL 13—2004《灌溉试验规范》^[12]中划分作物生育阶段的标准, 将冬小麦划分为 6 个生育阶段, 分别为出苗越冬期(11 月 12 日—2 月 10 日)、返青分蘖期(2 月 11 日—3 月 8 日)、拔节孕穗期(3 月 9 日—4 月 20 日)、抽穗开花期(4 月 21 日—5 月 8 日)、乳熟期(5 月 9 日—5 月 29 日)和黄熟期(5 月 29—6 月 6 日)。试验分别在分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期进行农田水位控制试验, 各处理设计及控水时段见表 1, 每个处理设 3 个重复。

1.3 观测设备及方法

冬小麦的控水试验在 32 个蒸渗测坑中进行, 每个测坑的规格为长 2.5 m、宽 2.0 m、深 2.0 m, 测坑分南北

收稿日期: 2010-11-22

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD11B06) 国家自然科学基金(50839002)

作者简介: 孙涛(1987—), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要从事水土资源规划与管理研究。E-mail: sotall@126.com

表 1 冬小麦水位控制试验处理设计及控水时段

Table 1 Design and periods of water level control test on winter wheat

处理编号	控制水位/mm				控水起止时间
	返青分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	
1	50(1 d) ~ - 200(5 d)	< - 800	< - 1 000	< - 1 000	3 月 27 日—4 月 1 日
2	- 100(5 d) ~ - 400(5 d)	< - 800	< - 1 000	< - 1 000	3 月 27 日—4 月 5 日
3	- 100(5 d) ~ - 600(5 d)	< - 800	< - 1 000	< - 1 000	3 月 27 日—4 月 5 日
4	< - 400	100(1 d) ~ - 400(5 d)	< - 1 000	< - 1 000	4 月 8—13 日
5	< - 400	- 200(3 d) ~ - 600(5 d)	< - 1 000	< - 1 000	4 月 8—15 日
6	< - 400	- 200(3 d) ~ - 800(5 d)	< - 1 000	< - 1 000	4 月 8—15 日
7	< - 400	< - 800	100(1 d) ~ - 400(5 d)	< - 1 000	4 月 21—26 日
8	< - 400	< - 800	- 200(3 d) ~ - 600(5 d)	< - 1 000	4 月 21—28 日
9	< - 400	< - 800	- 200(3 d) ~ - 800(5 d)	< - 1 000	4 月 21—28 日
10	< - 400	< - 800	< - 1 000	100(1 d) ~ - 400(5 d)	5 月 20—25 日
11	< - 400	< - 800	< - 1 000	- 200(3 d) ~ - 600(5 d)	5 月 20—27 日
12	< - 400	< - 800	< - 1 000	- 200(3 d) ~ - 800(5 d)	5 月 20—27 日
对照组	< - 400	< - 800	< - 1 000	< - 1 000	

注 50 mm(1 d) ~ - 200 mm(5 d)表示保持 50 mm 水位 1 d 后,5 d 内水位降到 - 200 mm(水位正值表示地上水位,负值表示地下水位)。

两排布置,一排 16 个,中间设有地下廊道,廊道东面有地下设备间,地上有长 18.0 m、宽 7.0 m、高 3.0 m 的两节大型电动活动雨棚。每个测坑都与地下设备间的一个水柱连通,便于控制测坑内的地下水位。

a. 地下水位观测.每天上午 8 00、下午 5 00 观测地下水位深度,当天上午的观测值低于或接近下限值(≤50 mm)时当天按处理要求灌水至上限。

b. 灌水量的观测.田面有水层时,记录灌水前后水层深度,两者之差即为灌水量。田面无水层时,记录灌溉水量。

c. 排水量的观测.雨后若测桶水层超过处理要求的上限时按照处理要求进行排水,记录排水前后的水层深度,之差即为排水量。

d. 土壤水分观测.控水期间每天 9 00 左右用 TDR 观测分层土壤含水量,观测水位,控水结束后,隔 5 d 观测 1 次。

2 冬小麦水位生产函数模型

2.1 模型的构建

冬小麦生长过程中,如果田间地下水位始终保持在小麦适宜生长的范围内,则不会产生水分胁迫,理论上讲冬小麦产量应该达到最高。然而在实际农业生产过程中,由于连续降雨过多或者一段时间内降水不足,则可能使麦田地下水位高于或者低于适宜埋深,从而导致小麦因涝、渍、旱的影响而减产。若把涝、渍、旱的变化看作一个连续的过程,以麦田地下水位作为控制指标,建立其与小麦产量的函数关系,把这种函数关系称为水位生产函数。

冬小麦在不同的生育期受涝渍或受旱对最终产量的影响是不同的,在某一生育阶段受涝渍或受旱,不仅影响该阶段的生长发育,而且对以后的生育阶段的生长都有不同程度的影响。连乘形式的函数能反映出这种滞后效应,以第 i 生育阶段农田水位大于该生育阶段适宜水位上限 $H_{\max}$ 的累积值 $SFW_{i,H_{\max}}$ 作为衡量该阶段涝渍灾害程度的指标,以第 i 生育阶段农田水位小于该生育阶段适宜水位下限 $H_{\min}$ 的累积值 $SEW_{i,H_{\min}}$ 作为衡量该阶段受旱程度的指标,以这两项指标为自变量,建立作物相对产量 R_y 与涝、渍、旱的灾害程度关系的阶段水位生产函数模型^[13]：

$$R_y = \frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n f_i(SFW_{i,H_{\max}}, SEW_{i,H_{\min}})$$

(1)

以冬小麦相对产量 R_y 为因变量,各生育阶段 $SFW_{i,H_{\max}}$ 和 $SEW_{i,H_{\min}}$ 为自变量,可以构造如式(2)所示的冬小麦水位生产函数表达式：

$$R_y = \frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n [(1 + SFW_{i,H_{\max}})^{-\eta_i} (1 + SEW_{i,H_{\min}})^{-\theta_i}]$$

(2)

式中： Y_m ——适宜水位条件下冬小麦最高产量， kg/hm^2 ； Y ——冬小麦的实际产量， kg/hm^2 ； η_i —第 i 阶段冬小麦涝渍敏感指数； θ_i ——第 i 阶段冬小麦受旱敏感指数。

2.2 模型的修正(考虑土壤含水量)

式(2)只考虑了地下水位的高低对冬小麦产量的影响,事实上,就水管理而言,冬小麦产量不仅与地下水埋深有关而且与根层土壤含水量也有关系.当地下水位高于适宜埋深上限,而根系层土壤含水量较低时,其渍害程度就会降低,否则渍害就会加重.当地下水位低于适宜埋深下限,而根系层土壤含水量较高时,冬小麦一般不会产生缺水胁迫,否则就会受旱.因此,在建立冬小麦水位生产函数时应考虑进行根层土壤含水量的修正.

考虑根系层土壤含水量对冬小麦生产的影响,在式(2)的基础上构建式(3)：

$$R_y = \frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n [k_i(1 + SFW_{i,H_{\max}})^{-\eta_i}\lambda_i(1 + SEW_{i,H_{\min}})^{-\theta_i}]$$

(3)

其中

$$k_i = \begin{cases} \ln\left(1 + \frac{\zeta_{cl}}{\zeta_i}\right) / \ln 101 & \zeta_i > \zeta_{cl} \\ 1 & \zeta_i \leq \zeta_{cl} \end{cases}$$

(4)

$$\lambda_i = \begin{cases} \ln\left(1 + \frac{\zeta_i}{\zeta_{cl}}\right) / \ln 101 & \zeta_i < \zeta_{cl} \\ 1 & \zeta_i \geq \zeta_{cl} \end{cases}$$

(5)

式中： k_i ——小麦在第 i 生育阶段内某一时段受涝渍时的土壤含水量修正系数； λ_i ——小麦在第 i 生育阶段内某一时段受旱时的土壤含水量修正系数； ζ_i ——第 i 生育阶段 0 ~ 30 cm 深度实测平均土壤含水量； ζ_{cl} ——适宜土壤含水量,取田间持水量的 80%。

3 冬小麦水位生产函数模型参数求解

3.1 试验数据的整理

根据各生育阶段地下水位观测资料,经计算,各生育阶段 $SFW_{i,H_{\max}}$ 和 $SEW_{i,H_{\min}}$ 值见表 2. 根据各生育阶段根层土壤含水量的观测数据,经计算,各生育阶段土壤含水量修正系数见表 3.

表 2 各生育阶段 $SFW_{i,H_{\max}}$ 和 $SEW_{i,H_{\min}}$ 计算值

		Table 2 Calculated results of $SFW_{i,H_{\max}}$ and $SEW_{i,H_{\min}}$ at growth stages								cm/d
处理编号	返青分蘖期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期			
	$SFW_{1,H_{\max}}$	$SEW_{1,H_{\min}}$	$SFW_{2,H_{\max}}$	$SEW_{2,H_{\min}}$	$SFW_{3,H_{\max}}$	$SEW_{3,H_{\min}}$	$SFW_{4,H_{\max}}$	$SEW_{4,H_{\min}}$		
1	121.6	31.6	2.3	0.0	3.5	18.4	0.0	172.0		
2	64.9	27.1	3.2	8.0	1.2	25.8	0.0	173.6		
3	78.5	5.2	23.6	0.0	0.0	16.2	0.0	143.3		
4	13.5	265.8	401.6	0.0	42.3	12.5	0.0	138.8		
5	16.5	301.1	205.0	0.0	53.8	3.5	0.0	129.5		
6	0.0	346.5	166.2	0.0	25.5	18.1	0.0	156.4		
7	0.0	378.3	0.0	0.0	560.6	0.0	0.0	4.8		
8	23.1	338.2	1.3	4.2	362.4	0.0	0.0	60.7		
9	27.4	253.4	3.4	0.0	366.0	0.0	21.7	57.0		
10	21.3	336.9	4.2	21.9	4.9	40.1	469.7	24.3		
11	25.3	316.1	0.9	0.0	13.3	26.3	154.2	23.4		
12	4.3	395.7	2.3	35.6	0.0	71.5	276.1	30.7		
对照组	38.2	173.2	50.5	33.5	26.3	16.7	0.0	73.7		

3.2 模型参数的确定

采用多元线性回归法求解式(2)和式(3)的敏感指数. 具体过程如下：

对式(2)和式(3)线性化,即对式(2)和式(3)两边取自然对数,得：

$$\ln R_y = - \sum_{i=1}^n \eta_i \ln(1 + SFW_{i,H_{\max}}) - \sum_{j=1}^n \theta_j \ln(1 + SEW_{j,H_{\min}})$$

(6)

$$\ln R_y = - \sum_{i=1}^n \eta_i \ln(1 + SFW_{i,H_{\max}}) + \sum_{i=1}^n k_i - \sum_{j=1}^n \theta_j \ln(1 + SEW_{j,H_{\min}}) + \sum_{i=1}^n \ln \lambda_i$$

(7)

表 3 土壤含水量修正系数

Table 3 Correction coefficients of soil water content

处理编号	返青分蘖期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期	
	k_1	λ_1	k_2	λ_2	k_3	λ_3	k_4	λ_4
1	0.928	0.962	0.966	1.000	0.950	1.000	1.000	1.000
2	0.956	0.967	0.989	0.979	0.977	0.999	1.000	1.000
3	0.948	0.971	0.991	1.000	0.955	0.983	1.000	1.000
4	0.948	0.973	0.942	1.000	0.947	0.974	1.000	1.000
5	0.939	0.974	0.976	1.000	0.961	0.989	1.000	1.000
6	1.000	0.965	0.981	1.000	0.961	0.992	1.000	1.000
7	1.000	0.964	1.000	0.994	0.941	1.000	1.000	1.000
8	0.945	0.963	0.977	0.981	0.975	1.000	1.000	1.000
9	0.943	0.965	0.974	1.000	0.970	1.000	1.000	1.000
10	0.934	0.970	0.979	0.978	0.965	0.982	0.924	1.000
11	0.935	0.974	0.980	1.000	0.975	0.997	0.974	1.000
12	0.943	0.959	0.973	0.985	1.000	0.983	0.995	1.000
对照组	0.950	0.956	0.965	0.985	0.974	0.933	1.000	1.000

在不考虑土壤含水量修正系数和考虑土壤含水量修正系数两种情况下,筛选适当的产量和各阶段的 $SFW_{i,H}$ 和 $SEW_{i,H}$ 值以及土壤含水量修正系数分别代入式(6)(不考虑土壤含水量修正系数)和式(7)(考虑土壤含水量修正系数),经过回归分析,得出相应参数见表 4。不考虑土壤含水量修正系数的情况下,复相关检验 $R^2 = 0.719$,显著性检验 $F = 13.74 > F_{0.05}(8,3) = 8.85$;考虑土壤含水量修正系数的情况下,复相关检验 $R^2 = 0.761$,显著性检验 $F = 15.77 > F_{0.05}(8,3) = 8.85$,因此可以认为上述回归方程是显著的。

表 4 冬小麦水位生产函数模型参数

Table 4 Parameters of water-level production function for winter wheat

生育期	η		θ	
	考虑土壤含水量修正系数	不考虑土壤含水量修正系数	考虑土壤含水量修正系数	不考虑土壤含水量修正系数
分蘖期	0.009 143	0.001 891	0.003 251	0.026 571
拔节孕穗期	0.037 878	0.026 066	0.019 456	0.056 227
抽穗开花期	0.026 192	0.019 458	0.011 336	0.059 515
乳熟期	0.016 782	0.012 347	0.007 161	0.009 732

冬小麦水位生产函数式(6)各生育阶段敏感指数结果表明,在涝渍条件下和受旱情况下,冬小麦各生育阶段受涝渍和受旱影响程度由大到小顺序均为 拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、分蘖期。经土壤含水量修正后的冬小麦生育阶段水位生产函数式(7)各生育阶段敏感指数大小顺序有所变化,在涝渍条件下,冬小麦各生育阶段受涝渍影响程度由大到小顺序为 拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、分蘖期。受旱情况下,冬小麦各生育阶段受旱敏感指数由大到小顺序为 抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖期、乳熟期。

4 结 语

在雨水比较多的南方地区,由于降雨的时程分布不均,冬小麦的涝、渍、旱往往是一个动态变化的过程,在排水条件下,地下水位能较好地反映冬小麦涝、渍、旱的变化状态。水位生产函数既反映了作物产量对农田地下水位的响应关系,又反映了作物各生育阶段对地下水位的敏感程度。考虑土壤含水量修正系数的冬小麦水位生产函数,更加真实地反映了根层土壤含水量与地下水位的耦合作用对作物最终产量的影响。通过排水条件下冬小麦水位生产函数的试验研究,可以得出结论 冬小麦拔节孕穗期、抽穗开花期对涝渍和受旱比较敏感,乳熟期和分蘖期对涝渍和受旱的敏感程度相对较低。这一结果与前人的涝渍研究和受旱研究的成果基本一致^[14]。

参考文献：

[1] 陈晓东,寇传和. 水田控制排水技术的环境效益初探[J]. 节水灌溉,2006(4) :32-36. (CHEN Xiao-dong,KOU Chuan-he. Preliminary study on the environment benef it of controlled drainage technology in paddy field[J]. Water Saving Irrigation,2006(4) :32-36. (in Chinese))

[2] 刘建刚,罗纳,贾忠华. 银南灌区控制排水实施效果分析[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1) :40-43. (LIU Jian-gang,LUO Wan,JIA Zhong-hua. Implementation effect analysis of controlled drainage in Yinnan Irrigation District[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1) :40-43. (in Chinese))

- [3] 殷国玺,张展羽,郭相平,等.地控控制排水对氨质量浓度和排放量影响的试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):21-24. (YIN Guo-xi,ZHANG Zhan-yu, GUO Xiang-ping, et al. Experiment study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 21-24. (in Chinese))
- [4] 殷国玺,张展羽,邵光成.农田地控控制排水对排水水中磷质量浓度的影响[J].水利水电科技进展,2006,26(4):24-26. ((YU Shuang-en,ZHANG Zhan-yu,SHAO Guang-cheng. Effect of controlled drainage from field surface on concentration of phosphor discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 24-26. (in Chinese))
- [5] 俞双恩,张展羽.江苏省水稻高产节水灌溉技术体系研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(6):30-34. (YU Shuang-en,ZHANG Zhan-yu. Technical system of water-saving irrigation for rice planting in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(6): 30-34. (in Chinese))
- [6] 李远华.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [7] 朱成立,邵孝侯,彭世彰,等.冬小麦水分胁迫效应及节水高效灌溉指标体系[J].中国农村水利水电,2003(11):22-24. (ZHU Cheng-li,SHAO Xiao-hou,PENG Shi-zhang, et al. Research on soil-water stress effect and high-efficiency water-saving[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(11): 22-24. (in Chinese))
- [8] 黄修桥,李英能,顾宇平,等.节水灌溉技术体系与发展对策的研究[J].农业工程学报,1999,15(1):124-129. (HUANG Xiu-qiao,LI Ying-neng, et al. Study on technical system and development measures of water-saving irrigation [J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(1): 124-129. (in Chinese))
- [9] 卯智,崔远来,李新健.我国南方水稻水分生产函数试验研究[J].水利学报,1994(9):21-31. (MAO Zhi,CUI Yuan-lai. Study of water production function for rice in south China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(9): 21-31. (in Chinese))
- [10] AYARS J E,CHRISTEN E W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 128-139.
- [11] WESSTROM I,MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 229-240.
- [12] SL 13—2004 灌溉试验规范
- [13] 俞双恩.以农田水位为调控指标的水稻田间灌排理论研究[D].南京:河海大学,2008.
- [14] 冯绍元,罗遵兰,左海萍.河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].灌溉排水学报,2005,24(4):58-61. (FENG Shao-lan,LUO Zun-lan,ZUO Hai-ping. The study of water product function of winter wheat in Hebei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 58-61. (in Chinese))

Experimental study of water-level production function for winter wheat under controlled drainage conditions

SUN Tao¹, YU Shuang-en^{1,2}, HE Miao-miao¹, SUN Tian-lu³

- (1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
3. Nanshantai Electric Power Irrigation Management Center of Zhongwei City, Zhongwei 755000, China)

Abstract : In order to investigate the relationship between the groundwater depth and yield of winter wheat, a water level control test on the winter wheat was carried out in evaporation-infiltration test pits, based on control indices including the descending velocity and the suitable depth of the groundwater. Through theoretical analysis and numerical calculation, the water-level production function for the winter wheat under drainage conditions was developed. With consideration of the coupling effect of the root-soil water content and the groundwater level on the yield of the winter wheat, the water-level production function for the winter wheat under controlled drainage conditions was established, with the soil water content considered to be the correction coefficient. The results show that under the waterlogging conditions, the growth periods of the winter wheat diminish in the following order: the jointing and booting stage, the sprouting and blooming stage, the milky ripe stage, and the tillering stage; and under the drought conditions, the growth periods of the winter wheat diminish in the following order: the sprouting and blooming stage, the jointing and booting stage, the tillering stage, and the milky ripe stage.

Key words : winter wheat; water-level production function; correction of soil water content; farmland drainage; controlled drainage