

文章编号:1672-3317(2012)01-0127-05

阶段亏水条件下水稻产量及水分生产率的通径分析*

张旭东¹, 陈伟¹, 迟道才¹, 蔡亮², 邵恩博²

(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:以水稻辽星9号为材料,进行盆栽试验,测定了分蘖前、分蘖末、拔节孕穗、抽穗开花、乳熟5个生育阶段不同程度亏水下,水稻的有效穗数、穗长、每穗粒数、实粒数、千粒质量、总腾发量、最大分蘖数、收获时蘖数、株高、根干质量、茎干质量、叶干质量、产量。采用相关分析和通径分析的方法,计算了各指标对产量和水分生产率的相关系数、通径系数、决定系数和对回归方程估测可靠程度的总贡献,建立了各指标对产量和水分生产率的回归方程。结果表明,在阶段亏水条件下,水稻有效穗数、每穗粒数、实粒数的提高和协调有助于实现高产的目标;在提高水稻水分生产率的过程中,产量的直接作用大于总腾发量,同时,应充分考虑土壤水分状况对水稻有效穗数、每穗粒数、实粒数、收获时分蘖数、根干质量的调节和促控作用。

关键词:水稻;产量;水分生产率;通径分析

中图分类号: S274.1 **文献标志码:** A

张旭东,陈伟,迟道才,等. 阶段亏水条件下水稻产量及水分生产率的通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 127-131.

为了深入了解影响水稻产量和水分生产率的直接原因和间接原因,探索提高水稻水分生产率的灌水方式和土壤水分调控指标,在文献[3]关于水稻高产土壤水分能量标准的基础上,设置不同生育阶段不同水分亏缺程度的水稻盆栽试验,借助通径分析方法探讨在阶段亏水条件下,水稻有效穗数、穗长、每穗粒数、实粒数、千粒质量、总腾发量、最大分蘖数、收获时蘖数、株高、根干质量、茎干质量、叶干质量对产量和水分生产率的影响程度。以期为北方稻区生产实践中土壤水分的合理调控及水稻水分生产率的提高提供依据和理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验供试水稻品种为辽星9号,于2010年5月24日插秧,9月16日黄熟期结束,本田生育期共计114 d。试验于2010年在辽宁省灌溉试验中心站进行,该站位于新城子区黄家锡伯族乡,距离沈阳市区50 km,海拔47 m,站内水田耕作层土壤质地为粘壤土,土壤密度 1.5 g/cm^3 ,孔隙率为42.2%,肥力偏下,速效钾 81.04 mg/kg ,速效磷 18.27 mg/kg ,碱解氮 75.02 mg/kg ,全氮 1.07 g/kg ,有机质1.19%,pH值为7.5。

1.2 试验方法

采用盆栽试验,盆栽容器为塑料桶(高30 cm,内径30 cm),桶内用土取自大田,使用前过筛,除去土中小碎石、杂草及残根,每桶秤相同质量的筛后土及相同量的水,以均匀的速度顺、逆时针各搅拌100圈,静置1 d后进行水稻移栽,1穴3株,每盆1穴。盆栽设在电动不锈钢防雨棚下,周围为水稻试验小区和大田保护区。

在水稻的分蘖前期、分蘖末期、拔节孕穗、抽穗开花和乳熟5个生育阶段分别设置4种灌水处理,每处理3次重复,以不同的土壤水吸力下限作为灌水控制指标(表1)。根据安装在容器中的水银负压计测定土壤水吸力值,达到下限即灌水,每次灌1~2 cm。每天早晨08:00对处理的盆栽进行称量,测定其腾发量,称量精

* 收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室项目(2009S091); 辽宁省重大项目(2008NY01); 辽宁省自然科学基金项目(20082122)

作者简介: 张旭东(1979-),男,河南巩义人。讲师,博士生,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

度为 0.1 g。盆栽区东侧设自动气象观测设备,可测空气温度、湿度、降雨量、日照时数、风速、风向、气压及水面蒸发量(E601 蒸发皿)等。

参照当地农户的施肥标准进行施肥,底肥为尿素 112.5 kg/hm²,复合肥 450 kg/hm²,后追施分蘖肥尿素 300 kg/hm²,拔节肥尿素 150 kg/hm² 和穗肥尿素 60 kg/hm²。

1.3 试验指标

试验过程中定期测定株高和分蘖。试验结束时,地上、地下部分分开收获,地下部分用水冲洗干净,得到每盆的全根,地上部分用剪刀将茎、叶、穗剪开,分别装入纸袋,立即放入烘箱内 105 ℃ 杀青 30 min,然后 100 ℃ 烘至恒质量,得到每盆根、茎、叶的干质量。穗部自然晾干并进行考种。最终测得水稻的 13 个指标:有效穗数(x_1)、穗长(x_2)、每穗粒数(x_3)、实粒数(x_4)、千粒质量(x_5)、总腾发量(x_6)、最大分蘖数(x_7)、收获时蘖数(x_8)、株高(x_9)、根干质量(x_{10})、茎干质量(x_{11})、叶干质量(x_{12})、产量(y_1),并计算水稻的水分生产率(y_2)。

经认真甄别,共采用 33 组样本进行回归分析,以各处理所有重复的平均值作为统计指标进行通径分析。其中,水稻水分生产率(y_2)为水稻产量(y_1)与其全生育期总腾发量(x_6)之比。研究 y_1 时,以 $x_1 \sim x_{12}$ 为影响因素,研究 y_2 时,以 $x_1 \sim x_{12}$ 、 y_1 为影响因素。

各单项指标对自变量的单相关系数(r_{iy})、直接通径系数(P_{iy})和间接通径系数($r_{ij}P_{jy}$)参考了文献[7],用 Matlab(R2006a)编程计算实现。

2 结果与分析

2.1 阶段亏水条件下各指标相关性分析

各因素对产量和水分生产率的相关系数见表 2。由表 2 可知,在 12 个指标中,所有变量指标对产量 y_1 均呈正相关关系。其中, x_7 、 x_1 与 y_1 的相关系数分别为 0.672 和 0.670,呈极显著正相关; x_6 、 x_8 与 y_1 的相关系数分别为 0.606 和 0.558,呈显著正相关;说明最大分蘖数、有效穗数、总腾发量、收获时蘖数等指标的增大,均有利于产量的提高。

表 2 单项指标间相关系数及直接通径系数

变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	y_1	y_2
x_1	1													
x_2	-0.388	1												
x_3	-0.705a	0.612b	1											
x_4	-0.679a	0.656a	0.970a	1										
x_5	0.313	-0.127	-0.483	-0.466	1									
x_6	0.798a	-0.299	-0.494	-0.508b	0.267	1								
x_7	0.891a	-0.241	-0.579b	-0.528b	0.351	0.846a	1							
x_8	0.932a	-0.473	-0.727a	-0.735a	0.325	0.860a	0.879a	1						
x_9	0.383	-0.395	-0.454	-0.487	0.069	0.247	0.261	0.463	1					
x_{10}	0.533b	-0.267	-0.500b	-0.506b	0.265	0.584b	0.502b	0.698a	0.533b	1				
x_{11}	0.098	-0.096	-0.033	-0.088	-0.137	0.345	0.213	0.322	0.524b	0.288	1			
x_{12}	0.532b	-0.299	-0.408	-0.502b	0.177	0.500b	0.569b	0.557b	0.244	0.483	-0.008	1		
y_1	0.670a	0.201	0.016	0.033	0.126	0.606b	0.672a	0.558b	0.035	0.301	0.046	0.305	1	
y_2	0.027	0.540b	0.517b	0.549b	-0.114	-0.241	-0.021	-0.174	-0.219	-0.218	-0.293	-0.127	0.626a	1

注 a 表示相关性在 $P=0.05$ 水平上显著;b 表示相关性在 $P=0.01$ 水平上显著。下同。

对于水分生产率,考虑产量在内的 13 个影响指标, y_1 与 y_2 的相关系数为 0.626,呈极显著正相关; x_4 、 x_2 、 x_3 与 y_2 的相关系数分别为 0.549、0.540、0.517,呈显著正相关; x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 、 x_{12} 均与 y_2 呈负相关关系,但均没有达到显著水平。说明产量、实粒数、穗长、每穗粒数的增加能显著提高水稻的水分生产率。

2.2 各指标对产量的通径分析

由分析得自变量与产量 y_1 之间的线性回归方程为:

$$y_1 = -1.112 + 1.298x_1 + 0.143x_2 + 0.982x_3 + 0.130x_4 + 0.315x_5 - 0.082x_6 + 0.202x_7 + 0.181x_8 - 0.020x_9 + 0.113x_{10} - 0.034x_{11} - 0.031x_{12} \quad (1)$$

回归统计参数中, $F=23.684$, $R^2=0.934$, $P=3.329 \times 10^{-9} < 0.01$ 达到极显著,表明自变量对产量 y_1 的综合线性影响是极显著的,该通径分析是有意义的。表 3 为各指标对产量的直接作用和间接作用,从表 3 中的直接通径系数的绝对值可以看出,在 12 个指标中, x_3 、 x_1 、 x_4 、 x_8 、 x_7 对产量直接影响较大,然而,只有 x_1 对产量 y_1 的直接通径系数达到了极显著水平, x_3 、 x_4 、 x_7 、 x_{10} 、 x_{12} 对产量 y_1 的直接通径系数达显著水平,表明回归方程(1)不是最优的。通过计算,回归方程误差 e 的决定系数为 0.082,说明尚有一些因素未被考虑,需要指标更全的进一步试验研究。

表 3 各指标对产量的直接作用和间接作用分析

自变量	直接作用 (P_{y_i})	间接作用												
		总体	$\rightarrow x_1$	$\rightarrow x_2$	$\rightarrow x_3$	$\rightarrow x_4$	$\rightarrow x_5$	$\rightarrow x_6$	$\rightarrow x_7$	$\rightarrow x_8$	$\rightarrow x_9$	$\rightarrow x_{10}$	$\rightarrow x_{11}$	$\rightarrow x_{12}$
x_1	1.606a	-0.936		-0.028	-1.581	0.956	0.028	-0.170	0.612	-0.746	-0.042	0.225	-0.002	-0.187
x_2	0.072	0.129	-0.623		1.372	-0.924	-0.011	0.064	-0.165	0.379	0.044	-0.113	0.002	0.105
x_3	2.241b	-2.225	-1.133	0.044		-1.365	-0.043	0.106	-0.397	0.582	0.050	-0.212	0.001	0.143
x_4	-1.408b	1.440	-1.091	0.047	2.173		-0.042	0.109	-0.362	0.588	0.054	-0.214	0.002	0.176
x_5	0.090	0.036	0.503	-0.009	-1.083	0.656		-0.057	0.241	-0.260	-0.008	0.112	0.003	-0.062
x_6	-0.214	0.820	1.282	-0.022	-1.108	0.715	0.024		0.580	-0.688	-0.027	0.247	-0.008	-0.175
x_7	0.686b	-0.015	1.431	-0.017	-1.298	0.743	0.032	-0.181		-0.703	-0.029	0.212	-0.005	-0.199
x_8	-0.801	1.358	1.497	-0.034	-1.629	1.034	0.029	-0.184	0.603		-0.051	0.295	-0.008	-0.195
x_9	-0.111	0.145	0.615	-0.028	-1.017	0.686	0.006	-0.053	0.179	-0.371		0.226	-0.012	-0.086
x_{10}	0.423b	-0.123	0.856	-0.019	-1.122	0.713	0.024	-0.125	0.344	-0.558	-0.059		-0.007	-0.169
x_{11}	-0.024	0.070	0.158	-0.007	-0.074	0.123	-0.012	-0.074	0.146	-0.257	-0.058	0.122		0.003
x_{12}	-0.351b	0.656	0.855	-0.021	-0.915	0.707	0.016	-0.107	0.390	-0.446	-0.027	0.204	0.000	

计算各决定系数并按照绝对值大小进行排列,并分析 12 个自变量对回归方程估测可靠程度 R^2 总贡献,即计算 $r_{y_i}P_{y_i}$,见表 4。在表 4 中,决定系数最大的前 6 个是 $d_{y \cdot (3)(4)}$, $d_{y \cdot (1)(3)}$, $d_{y \cdot (3)}$, $d_{y \cdot (1)(4)}$, $d_{y \cdot (3)(8)}$, $d_{y \cdot (1)}$ 。12 个变量对回归方程的 R^2 的总贡献计算结果显示, x_1 , x_7 , x_8 和 x_{10} 的贡献较大。另外,通过对通径系数的显著性检验分析知, P_{y_i} 达到了极显著,因此可以粗略地认为在已按绝对值的大小,由大到小排列决定系数后,绝对值大于 $d_{y \cdot (1)}$ (2.580) 的决定系数为显著,小于 $d_{y \cdot (1)}$ 的为不显著。

表 4 各因子对产量决定系数和 R^2 总贡献排列

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	误差项
名称	$d_{y \cdot (3)(4)}$	$d_{y \cdot (1)(3)}$	$d_{y \cdot (3)}$	$d_{y \cdot (1)(4)}$	$d_{y \cdot (3)(8)}$	$d_{y \cdot (1)}$	$d_{y \cdot (1)(8)}$	$d_{y \cdot (4)}$	$d_{y \cdot (1)(7)}$	$d_{y \cdot (3)(7)}$	$d_{y \cdot (4)(8)}$	$d_{y \cdot (4)(7)}$	$d_{y \cdot e}$
决定系数	-6.119	-5.079	5.024	3.071	2.608	2.580	-2.397	1.982	1.964	-1.782	-1.656	1.020	0.082
因素	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	
变量对 R^2 总贡献	1.077	0.014	0.036	-0.046	0.011	-0.130	0.461	-0.446	-0.004	0.127	-0.001	-0.107	

根据以上 12 个指标对产量的通径分析发现:

1) x_3 和 x_4 共同对 y_1 的相对决定程度为 -6.119, x_1 和 x_3 共同对 y_1 的相对决定程度为 -5.079, 分别位于决定系数第一、二位,表明每穗粒数和实粒数、每穗粒数和有效穗数对产量的共同决定程度非常大。

2) x_1 对 y_1 的直接作用系数为 1.606, 决定系数为 2.580, 达显著水平, 同时考虑 x_1 对 R^2 的总贡献为 1.077, 为各指标对 R^2 总贡献之首; x_3 对 y_1 的直接作用系数为 2.241, 为直接作用绝对值中第一位, 决定系数为 5.024, 在决定系数中第三位; x_4 对 y_1 的直接作用系数为 -1.408, 为直接作用绝对值中第三位, 决定系数为 1.982, 在决定系数中第八位; 表明有效穗数 x_1 、每穗粒数 x_3 、穗粒数 x_4 是影响产量的重要指标。然而, x_3 、 x_4 对 R^2 的总贡献为较小, 分别为 0.036 和 -0.046, 主要是因为 x_3 、 x_4 和 y_1 之间的相关系数小, 仅为

0.016和0.033。

3) x_6 对 y_1 的直接作用系数较小为-0.214,间接作用系数很大为0.820,在 x_6 通过其他指标对 y_1 的间接中最大的是通过 x_1 对 y_1 的间接作用系数为1.282,而通过 x_3 对 y_1 的间接作用系数为-1.108,说明总腾发量 x_6 通过有效穗数 x_1 和穗粒数 x_3 对产量 y_1 的间接作用非常大。

4) x_1 和 x_3 各自对 y_1 的直接作用系数均较大,分别为1.606和2.241,但 x_1 通过 x_3 对 y_1 的间接作用系数为-1.581, x_3 通过 x_1 对 y_1 的间接作用系数为-1.133。这说明有效穗数 x_1 和穗粒数 x_3 对 y_1 的直接作用均为促进作用,二者均高,则产量较高,但各自通过对方向间接对产量却表现为抑制作用,说明二者难以共同提高,在追求高产时,二者之间需要寻找一个平衡点。 x_1 和 x_3 之间的简单相关系数为负值,也说明了这个问题。

5) x_4, x_6, x_8 对 y_1 的直接通径系数为负值,这有悖于常理,经分析是由于 x_4 与 x_3, x_8 与 x_1, x_8 与 x_7, x_6 与 x_8, x_6 与 x_7, x_6 与 x_1 的相关系数分别为0.970、0.932、0.879、0.860、0.846、0.798。这些变量内部很高的相关性,形成了共线作用,导致了 x_4, x_6, x_8 的偏回归系数为负值。

2.3 各指标对水分生产率的通径分析

由分析得13个自变量与水分生产率 y_2 之间的线性回归方程为:

$$y_2 = 0.523 + 0.018x_1 - 0.007x_2 + 0.040x_3 - 0.032x_4 + 0.0003x_5 - 0.873x_6 - 0.014x_7 - 0.031x_8 - 0.007x_9 + 0.001x_{10} - 0.008x_{11} - 0.009x_{12} + 0.988y_1 \quad (2)$$

回归统计参数中 $F=2689.44, R^2=0.9995, P=3.832 \times 10^{-23} < 0.01$ 达到极显著,表明自变量对水分生产率 y_2 的综合线性影响是极显著的,该通径分析是有意义的。通过计算,回归方程误差 e 的决定系数为0.063,说明尚有一些因素未被考虑,需要指标更全的进一步试验研究。根据13个指标对水稻水分生产率的通径分析发现:

1) y_1 和 x_6 共同对 y_2 的决定系数为-1.314,位于决定系数第一位; y_1, x_6 对 R^2 的贡献率为0.701、0.233,分别位于贡献率的第一、二位;在13个指标中, y_1 和 x_6 对 y_2 的直接影响是最大的。因此,产量和总腾发量的共同作用对水分生产率最为重要。这个结论比较明显,因为水分生产率就是二者的比值,从直接作用系数绝对值的大小可知, y_1 的直接作用大于 x_6 ,因此,对于提高水分生产率,首要的应该是提高产量,其次是减少腾发量,即降低真正耗水量。

2) x_6 和 y_1 对 y_2 的直接通径系数达极显著水平, $x_1, x_3, x_4, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}$ 对 y_2 的直接通径系数达显著水平, x_2, x_5, x_7, x_{11} 则不显著,表明回归方程(2)不是最优的。同时,在显著指标里, x_9 的绝对值最小, x_9 和 x_{10} 的回归方程系数也很小。因此,提高水分生产率除了应重视提高产量和减少耗水量以外,在土壤水分的调控的过程中,有效穗数 x_1 、每穗粒数 x_3 、实粒数 x_4 、收获时分蘖数 x_8 、叶干质量 x_{12} 对水分生产率的显著影响是应该考虑的。

3) 穗长 x_2 对 y_2 的直接作用较小为-0.008,而间接作用系数较大为0.548,并且 x_2 通过 x_6 和 y_1 对 y_2 的间接影响较大。实粒数 x_4 、根干质量 x_{10} 、茎干质量 x_{11} 的间接作用比直接作用大得多,因此在灌溉调控中应该注意这些指标的间接作用。

4) 其他12个因素通过 x_6 对 y_2 的间接作用系数绝对值均是最大的。其中, $x_7, x_8, x_1, y_1, x_{10}$ 的影响较大,而 x_2, x_5, x_9, x_{11} 却较小。这说明阶段亏水主要通过蒸发蒸腾调节了最大分蘖数 x_7 、收获前分蘖数 x_8 、有效穗数 x_1 、产量 y_1 和根干质量 x_{10} ,进而影响了水分生产率。对根、茎、叶的干物质来说,通过腾发量 x_6 对 y_2 的影响程度为:根>叶>茎。

5) 分析总腾发量 x_6 通过其他各因素对水分生产率 y_2 的间接作用,发现通过 y_1 的间接作用系数为0.680,其次是通过 x_1 的作用为0.164,通过 x_3 的间接作用-0.148,通过 x_8 的间接作用-0.138。因此,在提高水分生产率时,要特别注意运用灌溉手段调节土壤水分状况,通过蒸发蒸腾量的调节,进而促控水稻的有效穗数 x_1 、每穗粒数 x_3 、收获时分蘖数 x_8 等指标。

3 结 论

通过通径分析可知,有效穗数、每穗粒数、实粒数的提高和协调发展在提高产量的同时,也提高了水分生产率。关键在于如何应用好水稻促控理论,按照水稻的需水规律,用土壤水分状况调节水稻的农艺性状及生长指标,从而使二个目标同时实现。

参考文献:

- [1] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等. 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(3):239-242.
- [2] 迟道才,王瑄,张玉龙,等. 水稻节水高产灌溉模式及土壤水分能量调控标准研究[J]. 灌溉排水学报,2003,22(4):39-42.
- [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] 蔡甲冰,刘钰,许迪. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报,2008,39(1):83-90.
- [5] 郑健,蔡焕杰,王健,等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J]. 农业工程学报,2009,25(10):30-34.
- [6] 邢文刚,陈立娜,邵光成,等. 控制排水条件下水稻产量影响指标敏感性的通径分析[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):41-45.
- [7] 崔党群. 通径分析的矩阵算法[J]. 生物数学学报,1994,9(1):71-76.

Pathway Analysis of Rice Yield and Water Productivity Based on Water Deficit during Different Stages

ZHANG Xu-dong¹, CHEN Wei¹, CHI Dao-cai¹, CAI Liang², TAI En-bo²

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

2. Water Conservancy and Hydropower Science

Research Institute of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Pot experiments were conducted under different status of water deficit during different stages of rice whose breed was middle-season rice “Liao Xing No. 9”. Valid spikes, spike length, kernel number per spike, filled grains number, weight of 1000 grains, total evapotranspiration, maximum tillers number, tillers number at harvest time, plant height, root dry weight, stem dry weight, leaf dry weight, rice yield and water productivity were measured after different status of water deficit during five stages including tillering initial stage, tillering final stage, jointing stage, heading stage and milk maturity stage. Regression equations with the dependent variable was rice yield and water productivity influenced by indexes above were established, respectively; correlation coefficient, path coefficient, determination coefficient and the total contribution of R^2 represented the reliability of regression equation estimating between each index and rice yield or water productivity were calculated by correlation analysis and path analysis respectively. The results showed that the promotion and coordination of valid spikes, kernel number per spike and filled grains number based on water deficit during different stages were in favor of increasing yield. Therefore, regulation and promote control function of soil water on valid spikes, kernel number per spike, filled grains number, tillers number at harvest time and root dry weight should be serious consideration. The research provided a direction for improving water productivity of rice.

Key words: rice; yield; water productivity; path analysis