

用¹⁵N示踪研究灌溉水平和氮磷配比对砂地 小麦生长和氮素平衡的影响

张起刚 王声斌 彭根元 江荣凤

(中国农业大学基础科技学院,北京 100094)

摘要: ¹⁵N示踪研究证明,在不同灌溉水平下,在细质砂土上,增施磷肥可以大幅度提高小麦单位面积穗数、穗粒数和产量。并可以促进小麦对N素的吸收,提高肥料N利用率,降低肥料N损失率,促进营养物质的运输和转化,但是小麦的千粒重和含N量则随之下降。增施磷肥的效果大于增施N肥。在中等灌溉水平下,每公顷施纯N 204 kg,施P₂O₃ 180 kg,可以实现砂地小麦高产高效的统一。

关键词: 冬小麦; 细质砂土; 灌溉水平; 氮磷配比; ¹⁵N示踪

中图分类号: S274.1

该项研究于1992~1993年在河北省大名县黄河故道细质砂土上进行,历史上黄河五次改道经过大名。由于长期冲积、淤积形成了大片细质砂土,占大名县耕地面积的40%以上,砂层深厚、土壤贫瘠。长期以来,当地农民又保持着“大水漫灌”和“重氮轻磷”的水肥管理习惯,造成养分失调,水肥大量浪费,大部分农田长期处在中低产水平。而在国内,关于细质砂土合理水肥调控的研究报道甚少。为了改变砂质农田低产面貌和农民不合理的水肥管理习惯,我们在研究了细质砂土理化特性的基础上,针对生产中存在的主要问题,开展了对不同灌溉条件下,砂地小麦水分调控和养分调控之间的关系的研究。其中利用¹⁵N示踪技术,着重研究了不同灌溉水平和不同氮磷配比对砂地小麦生长发育和养分吸收的影响,以便为灌溉条件不同的砂地小麦实现经济合理施肥,提供可靠的理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料 供试土壤为石灰质细质砂土,pH8.0~8.3,小麦品种为冬小麦“鲁麦15”,1992-10-08播种,1993-06-07收获。前茬为夏播花生。0~20 cm供试土壤的有机质含量为7.25 g·kg⁻¹,全N为0.32 g·kg⁻¹,碱解N为35.5 mg·kg⁻¹,速效磷3.5 mg·kg⁻¹,速效钾45.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计 试验采用田间小区和微区相结合的方法。田间小区试验设三个灌溉水平,高灌水平(简称“高灌”)小麦一生灌7次水,包括分蘖水、冻水、返青水、起身水、孕穗水、扬花水、灌浆水。中灌水平(简称“中灌”)灌四次水,包括冻水、起身水、孕穗水、灌浆水。低灌水平(简称“低灌”),只灌两次水,分别为起身水和孕穗水,每次灌溉均用水表测量,灌水量为0.05方·m⁻²。由于播种前天然降水12 mm,因此各处理均未灌底墒水。此外,在小麦生育期内还有三次较大的降雨,分别是抽穗期(25.6 mm),灌浆初期(16.6 mm),蜡熟期(23.3 mm),从

收稿日期:1995-07-10

小麦出苗到第二年春天小麦起身,5个月的时间里,总降雨量只有32.9 mm,其中最大的一次降雨(11月7日)为6.5 mm。三个灌溉水平分别按裂区设计,在每一个灌溉水平中又设三个施氮水平,即 N_0 ,不施氮; N_1 ,施N 20.43 $g \cdot m^{-2}$; N_2 ,施N 33.75 $g \cdot m^{-2}$ 。设三个磷水平,即 P_0 ,不施磷; P_1 ,施 P_2O_5 18.0 $g \cdot m^{-2}$; P_2 ,施 P_2O_5 36.0 $g \cdot m^{-2}$ 。共计有9个不同的氮磷组合,分别记为 $N_0P_0, N_0P_1, N_0P_2, N_1P_0, N_1P_1, N_1P_2$ 和 N_2P_0, N_2P_1, N_2P_2 。每个组合重复4次,共有108个小区。微区试验只设高灌和低灌两个灌溉水平,每个灌溉水平有五个不同氮磷组合,分别为 $P_0N_1, P_1N_1, P_2N_1, P_1N_2, P_2N_2$ 。重复三次,共有30个微区。微区由镀锌铁皮制成,长、宽各为25 cm,深40 cm,面积为0.06252 m^2 。微区置入小区之中,每个灌溉水平的灌溉次数,灌水量和氮磷施用量,按单位面积计算与小区完全相同。磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 含量12%)小区和微区均全部作底肥一次施入。氮肥分别作底肥、二棱期(起身期)追肥和药隔期追肥三次施入。所不同的是,微区二棱期追肥施用的是 ^{15}N 标记的碳酸氢铵(^{15}N 丰度为10.0%),而其他施用的均为普通碳酸氢铵和尿素。小区试验分别在返青期、拔节期、收获期取样考苗、考种和测产,而微区试验只在收获期一次取样考种,并分别测定小麦籽粒、营养体(包括茎、叶、鞘和穗轴、颖壳等)和耕层土壤(0~40 cm)的含氮量和 ^{15}N 丰度。全N分析采用凯氏半微量定N法, ^{15}N 分析采用质谱法,由中国农业科学院原子能应用研究所质谱分析室完成。

2 结果与分析

2.1 在不同灌溉水平下,不同氮磷组合对小麦生长发育和产量的影响

2.1.1 对小麦生长发育的影响 小区试验在小麦拔节期取样考苗的结果(表1)表明,在同一氮磷组合不同灌溉水平之间,植株的株高、单株茎数、次生根数和单株干重均表现出高灌>中灌>低灌。这说明在细质砂土上,充足的土壤水分可以明显的促进小麦前期营养体的生长发育。同时,在同一灌溉水平不同氮磷组合之间,小麦上述的各项性状又均随着施磷量的增高而增高,特别在低灌条件下,磷肥的促进效应表现尤为显著。而增施N肥的效应,只是

表1 不同灌溉水平下,不同氮、磷配比对小麦生长的影响(拔节取样)

Table 1 Effect on the growth of wheat under different irrigation and fertilizer application jointing stage

灌溉水平 Irrig. level		茎数·株 ⁻¹ Stem·plant ⁻¹			根数·株 ⁻¹ Root·plant ⁻¹			干重·株 ⁻¹ D. W, g·plant ⁻¹			株高/cm Plant height			
		N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2	
		高灌	P_0	4.0	4.8	5.7	8.9	11.2	12.7	9.0	10.3	12.0	29.8	30.2
H*	P_1	5.7	6.1	6.8	13.0	15.3	15.8	14.8	17.4	18.0	25.7	36.6	39.5	
	P_2	5.7	6.4	7.0	15.1	16.2	16.6	16.8	18.1	18.5	34.4	38.6	39.6	
中灌	P_0	4.6	5.8	5.1	8.5	9.7	10.3	8.3	10.8	9.6	27.4	29.6	30.0	
	M	P_1	5.4	6.5	6.5	13.4	14.3	15.0	14.0	15.4	17.5	33.6	34.8	35.7
	P_2	6.9	7.0	7.4	14.6	15.2	15.8	15.8	17.1	17.8	34.9	37.5	37.8	
低灌	P_0	4.3	4.0	4.1	7.7	7.8	7.4	7.5	7.6	7.4	27.2	28.3	27.9	
	L	P_1	5.0	5.3	4.2	10.6	9.7	10.9	9.0	9.5	9.5	32.0	32.6	33.4
	P_2	5.2	5.4	5.2	13.0	13.2	13.0	12.1	12.5	12.5	32.7	35.3	34.1	

* H: There are seven times irrigation during wheat growth.

M: There are four times irrigation during wheat growth.

L: There are two times irrigation during wheat growth.

N_0 : No N, N_1 : applied N 20.43 $g \cdot m^{-2}$, N_2 : applied N 33.75 $g \cdot m^{-2}$

P_0 : No P_2O_5 , P_1 : applied P_2O_5 18.0 $g \cdot m^{-2}$, P_2 : applied P_2O_5 36.0 $g \cdot m^{-2}$

在高灌条件下，才有明显的促进效果，而在低灌和缺磷的条件下，大量增施 N 肥(如 P₀N₂)反而对小麦苗期的生长发育有抑制作用。由此可见，在灌溉条件不足的缺磷的细质沙土上，增施磷肥是促进小麦生长发育的关键因素。

2.1.2 对小麦产量性状和产量的影响 从表 2 可以明显看出，由于灌溉水平和氮磷组合不同，小麦各产量性状和产量对灌水和施肥的反应也不相同。第一，单位面积穗数：在施肥的各个氮磷组合中，均表现出高灌>中灌>低灌，特别是在高氮高磷的组合中，其差异尤为显著。

表 2 在不同灌溉水平下，增施氮、磷肥效应的差异

Table 2 Difference of adding N and P fertilizer under different irrigation level

处 理 Treatment	穗数 Ear No.	t test	千粒重/g DW of 1 000 grains	t test	粒数·穗 ⁻¹ Grain No. ·ear ⁻¹	t test	籽粒产量/g·m ⁻² Grain yield	t test		
高 灌	H P ₀	498	b	B	49.0	a	A	21.9	b	B
	P ₁	728	a	A	42.6	b	B	23.8	a	A
	P ₂	752	a	A	41.4	b	B	23.8	a	A
	N ₀	632	b		44.3	a		21.7	b	B
	N ₁	648	ab		44.5	a		24.3	a	AB
	N ₂	699	a		44.2	a		23.5	a	A
中 灌	M P ₀	493	b	B	47.6	a	A	20.9	b	B
	P ₁	634	a	A	45.3	b	B	24.4	a	A
	P ₂	654	a	A	43.8	c	B	23.9	a	A
	N ₀	567	a		46.8	a		22.1	b	B
	N ₁	607	a		44.8	b		23.5	a	A
	N ₂	607	a		45.1	b		23.7	a	A
低 灌	L P ₀	465	b	B	45.3	a	A	20.1	b	B
	P ₁	576	a	A	44.2	b	B	23.7	a	A
	P ₂	607	a	A	41.7	c	B	24.3	a	A
	N ₀	535	a		44.1	a		21.9	b	B
	N ₁	553	a		44.2	a		22.9	ab	B
	N ₂	559	a		42.8	b		23.4	a	A
高 灌	H	660	a	A	44.3	ab		23.2	a	A
中 灌	M	594	b	AB	45.6	a		23.1	a	A
低 灌	L	549	c	B	43.7	b		22.8	a	A

* P₀' : 是 P₀N₀、P₀N₁、P₀N₂ 的平均值。P₀' is average of P₀N₀、P₀N₁ and P₀N₂
 P₁' : 是 P₁N₀、P₁N₁、P₁N₂ 的平均值。P₁' is average of P₁N₀、P₁N₁ and P₁N₂
 P₂' : 是 P₂N₀、P₂N₁、P₂N₂ 的平均值。P₂' is average of P₂N₀、P₂N₁ and P₂N₂
 N₀' : 是 P₁N₀、P₁N₀、P₂N₀ 的平均值。N₀' is average of P₁N₀、P₁N₁ and P₂N₀
 N₁' : 是 P₀N₁、P₁N₁、P₂N₁ 的平均值。N₁' is average of P₀N₁、P₁N₁ and P₂N₁
 N₂' : 是 P₀N₂、P₁N₂、P₂N₂ 的平均值。N₂' is average of P₀N₂、P₁N₂ and P₂N₂

这说明高肥处理只有在高灌条件下，才能充分发挥其肥效，而在严重缺肥的条件下，灌溉的作用会大大缩小。另外，在同一灌溉水平下，氮和磷的效应也有明显不同，增施磷肥对提高单位面积穗数的作用明显地超过增施 N 肥，特别在低灌条件下表现尤为突出(表 2)。P₁' 和 P₂' 各组合平均单位面积穗数与 P₀' 组合相比，其差异均达到极显著水平，但是 N₁' 和 N₂' 各组合与 N₀' 组合相比，除高灌以外，在中灌和低灌水平下，其差异均不显著。第二，千粒重：在高灌、中灌和低灌处理中，千粒重均随着磷肥施用量的增加而降低，其中在中灌和低灌水平中，增施 N 肥也有类似效应，但增施磷肥的效应显著的大于增施 N 肥(表 2)，例如在高灌

处理中,随施磷量增高,千粒重大幅度下降, P_0' 分别比 P_1' 和 P_2' 提高 15.0% 和 18.4%, 其差异均达到极显著水平。但是随着施 N 量的增高,如 N_0' , N_1' 和 N_2' 之间,千粒重几乎无差异。千粒重的变化与单位面积穗数的变化几乎呈完全相反的趋势。这可能是由于小麦群体大量增加导致田间蒸腾耗水量和耗肥量大幅度增加的缘故。第三,穗粒数:在各个氮磷组合中,三个灌溉水平之间差异均未达到 5% 的显著水平(表 2)。这是由于在小麦穗粒数形成的关键时期,各灌溉处理均获得了充足的水分供应的缘故。但在同一灌溉水平下,增施磷肥和氮肥,穗粒数均有不同程度增加,其中以增施磷肥的效应最明显。特别是在中灌和低灌条件下, P_1' 和 P_2' 各个组合的穗粒数与 P_0' 的差异,均达到了极显著水平。第四,籽粒产量:小麦籽粒产量是上述各产量性状综合作用的结果,在各个氮磷组合中均表现出高灌 > 中灌 > 低灌,说明充足的土壤水分有利于小麦的营养生长和产量形成^[1,2]。另外,在各个灌溉水平中,增施磷肥均可以大幅度提高小麦的产量,如 P_1' 和 P_2' 各组合与 P_0' 的产量差异均达到极显著的水平。但是增施 N 肥的增产效应则相对较小,特别是在低灌条件下, N_0' , N_1' , N_2' 组合之间产量差异均不显著。最终的产量结果表明,在高灌、中灌和低灌三种不同灌溉水平下,最高产量的氮磷组合分别为 P_1N_2 , P_1N_1 和 P_2N_1 , 这说明在高灌条件下适当增施 N 肥和在低灌条件下适当增施磷肥均可以获得较大的增产效果。但是统计分析又表明(表 2),在各灌溉水平中, P_1' 和 P_2' , N_1' 和 N_2' 各组合之间,小麦产量的差异均不显著,因此在本试验条件下,从高产高效的角度考虑,各灌溉水平的氮磷组合均应以 P_1N_1 为最佳。产出和投入的经济效益分析结果也证明了这一点。在三种灌溉条件下和 N 和 P 组合均以 P_1N_1 的产投比最高,而且中灌和低灌的各 N、P 产投比大于高灌处理,分别 3.94 和 3.88 和 3.64,同时中灌的小麦产量又比低灌提高 17.2%, 因此,采用中等灌溉水平和 P_1N_1 氮磷组合,应是砂地小麦实现高产高效统一的最佳选择。

2.2 在不同灌溉水平下,不同氮磷组合对小麦氮素吸收、分配和氮素平衡的影响

2.2.1 小麦对氮素的吸收和标记肥料 N 的氮素平衡 从表 3 可以明显看出,在各个氮磷组合中,除严重缺磷的 P_0N_1 处理之外,小麦对总 N 量(包括土壤 N 和肥料 N)的吸收,高灌均显著的超过低灌处理,统计分析表明,两者差异均达到显著和极显著水平。说明土壤中磷素不足,灌溉的作用也会缩小。另外,从表 2 还可以看出,在 N 素水平相同的条件下,同一灌溉处理中,无论是高灌还是低灌,小麦对 N 素的吸收均随着施磷量的增加而增多^[1,5]。如 P_1N_1 和 P_2N_1 处理分别在高灌条件下比 P_0N_1 处理提高了 47.1% 和 89.1%。在低灌条件分别提高了 28.7% 和 68.0%, 这说明增施磷肥可以大大促进小麦对 N 素的吸收。同样小麦对 ^{15}N 标记的二棱期追肥的吸收,也表现出同样的规律,随着施磷量的增加,肥料 N 吸收率逐渐增加,损失率逐渐降低。但是在同一施磷水平下,随着施 N 量的增高,则表现出完全相反的规律,即肥料 N 吸收率下降,损失率增加。另外,从标记肥料 N 的损失和在土壤中的残留来看,除 P_0N_1 组合外,在其他各个氮磷组合中,高灌水平下肥料 N 的损失量都大大小于低灌处理,但在土壤中的残留量却比低灌明显增加,其差异均达到极显著水平。这充分说明,增施磷肥和增加灌溉不仅能促进小麦对 N 素的吸收,提高肥料 N 利用率,减少肥料 N 损失,而且还可以促进土壤对肥料 N 的固定。

2.2.2 对小麦籽粒和麦草中 N 素含量和分配的影响

 从表 4 可以明显看出以下几点:

①在缺磷的 P_0N_1 组合中,植株吸收的总 N 量和标记肥料 N 量,在籽粒中的分配比例,高灌比低灌分别提高了 7.3 和 12.5 个百分点,这表明在缺磷的细质砂土中,增加灌溉可以

表 3 不同氮磷组合和不同灌溉水平下小麦对 N 素吸收吸收和标记 N 素平衡

Table 3 The nitrogen of wheat uptake and ¹⁵N balance under different irrigation level and fertilizer application (mg. N/M. P)

处 理 Treatment	吸收总 N 量 Total N	t test	吸收 ¹⁵ N 量 Nff	t test	吸收率 ¹⁵ N U. R (%)	¹⁵ N 损失量 ¹⁵ N Loos	t test	损失率 ¹⁵ N L. R (%)	¹⁵ N 残留量 ¹⁵ N Residue	¹⁵ N 残留率 ¹⁵ N R. R (%)
P ₀ N ₁ 高灌 H	1 299.6	a	152.6	a	31.9	219.3	a	45.8	106.8	12.3
低灌 L	1 243.1	a	143.1	a	29.9	211.7	a	44.2	123.9	25.9
P ₁ N ₁ 高灌 H	1 911.1	A	241.0	a	50.3	150.0	B	31.3	87.7	18.4
低灌 L	1 600.2	B	216.0	b	44.3	202.0	A	41.6	68.8	14.1
P ₁ N ₂ 高灌 KH	1975.9	a	320.6	A	48.0	219.3	B	32.8	128.4	19.2
低灌 L	1 789.4	b	269.2	B	40.3	303.3	A	45.4	95.9	14.3
P ₂ N ₁ 高灌 H	2 351.0	A	277.0	A	56.8	148.7	B	30.5	60.8	12.7
低灌 L	2 089.4	B	237.5	B	48.7	183.9	A	37.7	66.3	13.6
P ₂ N ₂ 高灌 H	2 123.4	A	361.6	a	54.1	181.8	B	27.2	125.0	18.7
低灌 L	1 340.8	B	322.9	b	48.3	247.2	A	37.0	93.6	14.7

* Ndff; Nitrogen derived from ¹⁵N-fertilizer. M. P; Microplot (微区) U. R%; Uptake rate L. R%; Loos rate R. R%; Residue rate.

表 4 不同灌溉水平下,不同氮磷组合小麦籽粒与麦草中 N 素含量与分配

Table 4 N content and partition in grains and straw of wheat under different irrigation and fertilizer application

处 理 Treatment	总 N 分配% Total N partition		标记肥料 N 分配% ¹⁵ N-N partition		含 N 量 mg·g ⁻¹ N content	
	籽粒 Grains	麦草 Straw	籽粒 Grains	麦草 Straw	籽粒 Grains	麦草 Straw
P ₀ N ₁ 高灌 H	74.7	25.3	80.7	19.3	27.6	5.61
低灌 L	67.4	32.6	68.2	31.8	30.4	7.71
P ₁ N ₁ 高灌 H	73.9	26.1	77.3	22.7	24.6	5.18
低灌 L	73.1	26.9	78.5	21.5	26.4	6.08
P ₁ N ₂ 高灌 H	70.6	29.4	76.6	23.4	25.8	5.67
低灌 L	74.3	26.3	78.6	21.4	26.7	6.99
P ₂ N ₁ 高灌 H	73.2	26.8	69.7	30.3	21.4	4.22
低灌 L	73.7	26.3	80.0	20.0	22.9	4.72
P ₂ N ₂ 高灌 H	74.7	25.3	78.5	21.5	26.6	5.81
低灌 L	70.9	29.9	76.9	23.1	28.9	6.94

明显的促进麦草中的 N 素向籽粒运输和再分配。

②在低灌条件下,小麦吸收的总 N 量和标记肥料 N 量在麦草中的分配比例均随着施磷量的增高而逐步降低,这说明在水分供应不足的条件,增施磷肥可以促进麦草内的 N 素向籽粒运输和分配。

③在同一氮磷组合中,小麦籽粒和麦草的含 N 量,高灌均小于低灌处理。另外,各个氮磷组合之间籽粒和麦草的含 N 量均随着施磷量的增加而下降,这是由于增加灌溉和增施磷肥不但促进了小麦对 N 素的吸收和积累,而且大幅度提高了小麦籽粒和麦草的干物质产量,由于干物质的增长幅度大于 N 素积累的幅度,从而造成单位重量干物质中 N 的含量下降。前人的许多研究,也曾得出类似的结果^[4~6]。但是小麦籽粒和麦草中 N 的浓度均随着施

N量的增加而增高^[2,3]。

3 结论

①在缺磷的细质砂土上,磷肥是影响小麦生长的第一营养元素,增施磷肥,提高磷肥的施用比例,适当控制N肥的用量,可以明显促进小麦前期分蘖和根系的生长发育,提高小麦的干、鲜重,增强小麦的抗旱能力。

②在不同灌溉水平下,增施磷肥均可以大幅度提高小麦单位面积穗数、穗粒数和小麦的产量,但千粒重却随之下降。增施磷肥的效果大大超过增施N肥。

③提高灌溉水平或增施磷肥可以促进小麦营养物质的运输和再分配,提高小麦对肥料N利用率,减少肥料N损失,促进了土壤对肥料N的固定。但是小麦籽粒和麦草中的含N量均随施磷量增高有不同程度的下降。

④在细质砂土上,在中等灌溉水平下, P_1N_1 氮磷组合产投比最高,可以实现小麦高产与高效的统一。若以此为基础,在灌溉条件较好的地区,适当增加N肥用量,在灌溉条件较差地区,适当增加磷肥用量,还可以获得更高的产量结果。

参 考 文 献

- 1 Fjell D I et al. Nitrogen and phosphorus requirements of different wheat planttypes under dryland and irrigation conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 1984, 7(9): 1289~1302
- 2 Morgan J A. Interaction of water supply and nitrogen in whet. *Plant Physiology*, 1984, 76: 112~117
- 3 Munyinda K et al. Utilization of ^{15}N -Urea fertilizer by irrigated wheat in Zambia. *Plant and Soil*, 1988, 109~205
- 4 张起刚. 应用 ^{15}N 和 ^{32}P 示踪研究不同程度干旱胁迫对小麦生长和养分吸收的影响. *核农学通报*, 1993, 14(5): 228~233
- 5 张起刚. 细质砂土上增施磷肥对小麦生长及N素吸收的影响. *核农学报*, 1994, 8(3): 159~166
- 6 华才宇. N, P配比对比冬小麦籽粒品质的影响. *西北农业学报*, 1992, 1(7): 78~80

Study on Effect of Wheat Growth and N Balance under Different Irrigation and Fertilizer Application Using ^{15}N Tracer

Zhang Qigang Wang Shengbin Peng Genyuan Jiang Rongfeng

(College of Fundamental Sciences & Technology, CAU, Beijing 100094)

Abstract: This study was carried out in fine sandy soil in Daming County of Hebei Province from 1992~1993. By increasing irrigation times and adding P fertilizere in sandy soil, the growth and development of tillering and secondary roots of wheat are promoted greatly, the grain yield of wheat and plant recovery of fertilizer N increased, the loss of fertilizer N decreased and the nutrient movement and transformation were stimulated plant responded to P fertilizer more significantly than to N fertilizer in fine sandy soil. The results also show that application of N at $204 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and P_2O_5 at $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ could gain both high yield and high efficiency at middle irrigation level.

Key words: fine sandy; winter wheat; irrigation level; N, P ratio; ^{15}N tracer