

# 施肥促进作物水分利用机理及 对产量影响的研究

张岁岐 李秧秧

中国科学院  
(水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
水利部

**摘要** 在田间及盆栽试验条件下,以小麦为主要实验材料,研究了干旱下无机营养与作物产量、生长、水分利用效率及抗旱性的关系。结果表明:旱地施肥明显提高了作物产量和水分利用效率,但干旱程度明显影响了肥效的发挥;不同营养元素对作物抗旱性的影响并不相同,氮、钾营养主要通过增强作物的渗透调节和气孔调节改善作物的抗旱性,而磷营养则明显改善了作物抗旱性。最后,从作物水分关系、气孔反应、渗透调节、地上地下关系等方面对施肥提高作物产量、水分利用效率和改善抗旱性的原因进行了分析。

**关键词** 无机营养 水分利用效率 产量 改善

## Study on Effects of Fertilizing on Crop Yield and Its Mechanism to Raise Water Use Efficiency

Zhang suiqi Li Yangyang

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi. 712100)

**Abstract** The relationship between fertilizing and yield, growth, water use efficiency and drought—resistance of wheat were studied under field and pot conditions. The result indicated that crop yield and water use efficiency were obviously raised by fertilizing, but the benefits of fertilizing was affected by drought extent; the effects of different nutrition element on crop drought—resistance were varied, nitrogen and potassium nutrition can increase crop adaptation to drought by the strengthen of osmotic adjustment and stomatal adjustment, but phosphorus nutrition can remarkably improve drought—resistance. In finally, the reason that fertilizing improve crop drought—resistance and raise crop yield and water use efficiency were discussed from crop water relationship, stomatal responses, osmotic adjustment, relation between shoot and root.

**Key words** fertilizing yield water use efficiency improvement.

本项试验研究于中科院宁夏固原生态站田间试验场和陕西杨陵水保所盆栽试验场内进行,

以小麦为主要试验材料。试验设计、测试方法、品种选用及肥料施用等详见九份具体试验报告或论文。下面主要就 1991~1994 年取得的试验结果作一概括介绍。

1 旱地施肥增产的生理生态依据

这一部分工作在结合调查研究和总结已获成果基础上,主要在宁夏固原田间试验条件下进行。固原属于典型的半干旱区,试验期间年平均降水量 398mm。试验地土壤为黄绵土,土壤肥力较低,0~20cm 耕层有机质 0.95%,全氮 0.076%,碱解氮 6.78mg/100g 土,速效磷 3.5mg/kg。试验主要获得以下结果。

1.1 化肥在当前旱地增产中的地位

在旱作条件下,综合应用化肥、有机肥、耕作及覆盖等技术于春小麦生产栽培之中,以求明确各种技术因素在增产中的主次作用。三年试验结果表明:化肥在综合增产中的贡献占 50%,有机肥占 30%,耕作与覆盖占 20%,证明了化肥在当前旱地增产中占主导地位。

1.2 旱地施用化肥增产和提高水分利用效率的原因分析

(1)营养促进地上部快速生长,扩大了叶面积,使蒸腾量增加,蒸发量相对减少,从而降低了蒸发/蒸腾比,在总耗水量增加不大的情况下,显著提高了水分利用的效率。综合在低产条件下所进行的 6 个田间试验,共 20 年次的试验资料(表 1),高肥处理与低肥处理相比,产量平均提高 57%,WUE 提高 49%,而耗水量仅增加了 8%。

表 1 旱地施肥对春小麦产量(Y),耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)的影响(固原)

施用化肥水平 有效量 kg/hm <sup>2</sup>	Y		ET		WUE	
	kg/hm <sup>2</sup>	%	hm <sup>2</sup>	%	kg/(mm·hm <sup>2</sup> )	%
低肥 0~30	1065.0	100	256	100	4.155	100
	7230~1656.0		241~276		3~6	
高肥 60~135	1671	157	269	108	6.21	149
	1323.0~3262.5		252~290		5.25~11.25	

(2)促进了光合作用,增大了单叶水分利用效率,这主要是由于施肥对光合速率的促进作用大于水分散失的增加。干旱施肥叶片具有较高的净光合速率和较小的气孔导度,表明其失水相对小,而光合产物积累多(表 2、表 3)。

表 2 不同营养水平和土壤干旱对净光合速率的影响(固原) (mg·co<sub>2</sub>/h·dm<sup>2</sup>)

毛管最大持水量的 %	施 肥	不施肥	差 值
55	18.93±0.15	10.74±0.20	8.19**
45	13.16±0.47	8.98±0.82	4.73**
35	10.25±0.10	8.43±0.10	1.27**
22	4.38±0.40	4.18±0.18	0.20**

表 3 不同施肥处理对叶片气孔导度和净光合速率的影响(杨陵)

毛管最大持水量 %	施 肥		不 施 肥	
	净光合速率 (mg·co <sub>2</sub> /h·dm <sup>2</sup> )	气孔导度 (cm/s)	净光合速率 (mg·co <sub>2</sub> /h·dm <sup>2</sup> )	气孔导度 (cm/s)
70	13.52±0.73	2.03±0.06	10.08±0.10	1.88±0.05
35	10.25±0.10	0.48±0.02	8.98±0.82	1.25±0.04
22	4.38±0.40	0.15±0.01	4.18±0.18	0.42±0.01

(3)施肥后促进了根系扩展,增加了对土壤储水的利用程度。但在一般情况下增加的幅度不

大,只有在增产十分显著的情况下才有明显的增加。

表4 不同水分条件下氮素营养对春小麦水分关系的影响

土壤含水量 毛管持水量的%	LN $\Phi_w$	Rwc	膜透性	自由水	束缚水	
LN	30	-8.5±0.1	91.7±1.55	8.58±0.48	48.46±1.95	26.37±1.33
	50	-7.5±0.3	96.6±0.35	8.33±0.25	52.39±1.53	24.18±1.51
	70	-4.4±0.4	97.3±0.1	6.48±0.04	58.38±1.81	19.67±2.88
MN	30	-8.8±0.2	94.8±0.78	9.64±0.29	47.07±0.58	28.74±0.63
	50	-6.8±0.3	95.5±0.81	8.09±0.26	57.37±2.49	20.0±2.16
	70	-4.3±0.3	96.5±0.49	5.92±0.24	63.89±1.61	14.5±1.47
HN	30	-10.3±0.2	94.6±0.74	10.61±0.80	—	—
	50	-6.6±0.2	94.4±0.52	7.40±0.15	—	—
	70	-3.5±0.9	97.3±0.99	6.53±0.22	—	—

注:LN 低氮,MN 中氮,HN 高氮,表5~7同。

(4)关于施肥对作物生理抗旱性的影响是一个较为复杂的问题。根据试验资料,在氮磷1:1的配比下,施肥处理较先表现出较强的渗透调节能力和积累较多的脯氨酸,叶片保水能力增强。干旱时,施肥处理叶片水势下降幅度大,气孔导度小,根冠值变小,吸水不易满足失水的需要,因而对干旱更为敏感。故认为施肥在一定程度上可以改变作物对干旱的某些生理适应性,而有利于作物抵御干旱,但并不能明显提高作物自身耐旱性,从而主要由此途径消除干旱对作物产量的不利影响。然而,在干旱条件下不同营养元素对作物抗旱性的影响既有共同点,又有不同点。下面主要介绍这方面的研究结果。

## 2 不同营养元素对作物抗旱性和水分利用的影响及作用机理

### 2.1 氮素营养对作物抗旱性和水分利用的影响及作用机理

主要进行的工作有三方面:(1)盆栽实验,主要研究了氮素营养与春小麦生理抗旱性和水分利用的关系。(2)田间小区试验,研究了不同底墒和施氮水平冬小麦群体生长动态和光合作用的变化。(3)大田水肥关系试验,研究了春小麦对灌水和施氮的田间反应。研究结果表明:

(1)氮肥对作物体内水分状况的影响与作物的供水状况有关(表4)。正常供水和中度干旱下,氮素水平对叶水势( $\psi_w$ )和相对含水量(RWC)并未产生明显影响,但减少了叶片的束缚水含量,增加了自由水含量;严重干旱下,施氮处理的 $\psi_w$ 明显降低,膜透性增大,束缚水和自由水含量与对照相比,相差不大。干旱条件下,施氮明显提高了春小麦的渗透调节能力。因而施氮对作物水分状况在一定程度上的改善主要来源于氮素营养增加了小麦的代谢活性和提高了渗透调节能力,而不依赖于对耐旱性的提高和一定的旱生性状。缺氮植株则主要依赖旱生性状来增加对干旱条件的适应。

(2)干旱下施氮在一定程度上增强了气孔的调节能力(表5)。

供水充足和中度干旱下,施氮与不施氮处理的气孔导度(Gs)差异不显著。严重干旱下,施氮处理的Gs明显降低,说明施氮减少了单位面积的水分散失,增加了气孔对干旱反应的敏感性。

(3)干旱条件下,施氮明显提高了单叶的净光合作用速率(表5)。这种净光合作用速率的增加主要来源于其叶肉细胞光合活性的提高。

(4)施氮增加了叶面积,促进了地上部和根的生长,但使根/冠比下降(表6)。这在某种程度上增加了叶片的蒸腾失水,不利于作物维持水分。

表 5 不同水分条件下施氮对春小麦叶片气孔导度  $G_s(\text{cm/s})$   
净光合作用速率  $P_n(\text{mg}\cdot\text{CO}_2/\text{h}\cdot\text{cm}^2)$

土壤含水量 (毛管持水量%)	LN		MN		HN	
	$G_s$	$P_n$	$G_s$	$P_n$	$G_s$	$P_n$
30	$0.38\pm0.007$	6.41	$0.27\pm0.05$	8.54 9.97	$0.29\pm0.04$	10.95
50	$0.45\pm0.05$	6.27	$0.45\pm0.07$	17.08	$0.51\pm0.07$	10.35
70	$1.19\pm0.08$	16.48	$1.28\pm0.09$		$1.09\pm0.07$	14.81

表 6 不同水分条件下施氮对春小麦根/冠比的影响

土壤含水量 (毛管持水量%)	LN		MN		HN	
	根 重	根/冠	根 重	根/冠	根 重	根/冠
30	$1.26\pm0.006$	$0.18\pm0.003$	$1.30\pm0.04$	$0.085\pm0.007$	$1.40\pm0.02$	$0.069\pm0$
50	$1.30\pm0.12$	$0.12\pm0.02$	$1.45\pm0.07$	$0.074\pm0.009$	$1.55\pm0.07$	$0.062\pm0.007$
70	$1.41\pm0.12$	$0.10\pm0.006$	$1.68\pm0.09$	$0.08\pm0.005$	$1.60\pm0.10$	$0.061\pm0.001$

(5) 无论是正常供水还是干旱条件下,春小麦施氮均有增产作用且提高了群体的水分利用效率(表 7)。但严重干旱下,处理间无显著差异。这说明在严重干旱条件下,水分不足成为主要的限制因素,增施氮肥起不到应有的增产作用。

表 7 不同水分条件下施氮增加春小麦产量和 WUE 的效应

土壤含水量 (毛管持水量%)	LN		MN		HN	
	Y	WUE	Y	WUE	Y	WUE
30	$3.29\pm0.35\text{ b}$	$0.88\pm0.1\text{ b}$	$5.32\pm0.92\text{ a}$	$1.08\pm0.12\text{ a}$	$5.77\pm0.5\text{ a}$	$0.996\pm0.11\text{ a}$
50	$3.38\pm0.25\text{ c}$	$0.72\pm0.04\text{ c}$	$6.31\pm0.4\text{ b}$	$0.91\pm0.09\text{ b}$	$9.96\pm0.09\text{ a}$	$1.12\pm0.07\text{ a}$
70	$3.93\pm0.60\text{ c}$	$0.52\pm0.08\text{ c}$	$6.29\pm0.35\text{ b}$	$0.68\pm0.04\text{ b}$	$7.94\pm0.59\text{ a}$	$0.81\pm0.09\text{ a}$

(6)田间小区试验证实:氮素和底墒对冬小麦群体结构和单叶光合速率有明显调控作用。氮肥对小麦不同生育期单叶光合速率的影响要明显大于底墒对光合的效应。增施氮肥和改善底墒加剧了光合的“午睡”程度,不过氮肥和高底墒大大有利于光合“午睡”之后的回升,改善底墒对缓解光合“午睡”的效应要大于氮肥的效应。在一日之中,高氮、高底墒处理的同化产物积累较多。

(7)用六个灌溉水平(0,30,60,90,180,360mm)模拟不同的降雨年型,附设四种氮肥水平,在生育期内降水 167mm 的情况下,发现施肥 280.0kg/hm<sup>2</sup>,灌水 360mm 时,春小麦产量最高(5 628.0kg/hm<sup>2</sup>),WUE 则以施肥 280.5kg/hm<sup>2</sup>,灌水 90mm 为最高(13.32kg/mm·hm<sup>2</sup>)。施氮明显提高了小麦的 WUE,且对产量的效应要大于灌水的效应。

以上结果表明,氮素营养主要通过增大蒸腾/蒸发比,以及增强作物的渗透调节和气孔调节能力,促进同化产物的积累等增加作物对干旱的适应性,从而使作物的产量和水分利用效率得以提高。

2.2 磷素营养对作物抗旱性和水分利用的影响及作用机理

关于磷素营养对作物抗旱性和水分利用的影响主要进行了二方面的研究:①盆栽实验,目的在于通过研究磷素营养对作物(春小麦)水分关系、光合作用、蒸腾作用、耗水、WUE 等某些生理生态因子的影响,阐明磷素营养提高作物抗旱性的作用机理。②特殊的土培实验装置,研究了磷素营养对冬小麦根系某些生理特性和根水势、根呼吸速率、比表面积等的影响。两方面的工

作有助于我们从整体水平上探讨磷肥促进作物水分利用的机理和对产量的影响。研究结果如下:  
(1)水分胁迫下,施磷提高了春小麦叶片的水势,增加了叶片的渗透调节能力和膜稳定性,增大了束缚水含量,但对自由水含量影响不大(表 8)。说明磷肥可改善作物的水分状况。其中,依靠束缚水含量的增加而使得耐旱性提高是磷肥改善作物水分状况的一个重要原因。

(2)气孔阻力日变化曲线说明:正常供水和中度干旱下,施磷降低了气孔阻力。严重干旱下,

除下午 2.00~6.00 这段时间外,施磷也降低了气孔阻力。看来施磷一方面增大了叶片的气孔导度,使蒸腾失水增加,另一方面,一定条件下又增加了气孔对干旱反应的敏感性,有利于维持较好水分状况。

(3)施磷提高了春小麦叶片单叶的净光合速率(图 1)。其原因主要源于施磷对叶片叶肉细胞光合活性的促进,这从施磷对叶绿素含量,  $P_n$ -PFD 曲线及  $CO_2$  补偿点的影响即可反映出。在土壤含水量为毛管持水量的 75%~30%时,施磷分别使叶绿素含量增加了 32%~11%,同时,使春小麦对光能的利用更加充分,施磷也使春小麦的  $CO_2$  补偿点降低。在土壤含水量为毛管持水量的 30%,施磷使  $CO_2$  补偿点降低了近 5mg/kg。

表 8 土壤水分和施磷对春小麦水分关系的影响

土壤含水量 (毛管持水量%)	+F					-F				
	$\psi_w$	$\Delta\psi$	渗透性	自由水	束缚水	$\psi_w$	$\Delta\psi$	渗透性	自由水	束缚水
30	8.7±0.1	5.17±0.1	14.23±0.454	48.53±0.6	24.25±1.20	9.3±0.1	3.66±0.1	15.84±0.188	47.35±1.56	21.43±0.76
50	6.2±0.2	2.46±0.1	9.63±0.370	51.53±0.17	16.62±0.20	7.1±0.3	1.89±0.1	11.66±0.932	61.15±0.12	15.09±1.21
75	2.7±0.1	0.79±0.2	7.16±0.346	70.54±0.38	17.95±0.38	2.7±0.3	1.05±0.1	7.29±1.315	69.88±0.49	14.40±1.12

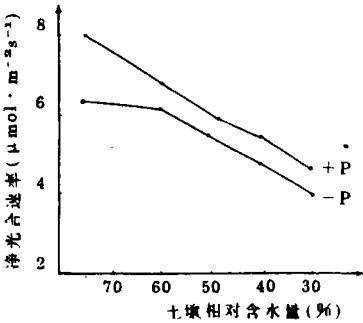


图 1 土壤水分和磷素营养对春小麦光合速率的影响

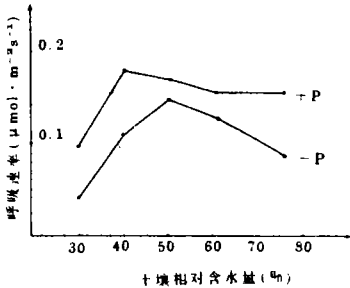


图 2 土壤水分和磷素营养对春小麦叶片呼吸速率的影响

(4)无论在何种干旱程度下,施磷处理的暗呼吸速率均高于不施磷处理(图 2)。施磷增强了叶片的呼吸作用。

(5)施磷对冬小麦根系生长有很大影响。干旱下磷素营养对根生长的促进作用明显大于对地上部的促进作用,并可提高根系比表面积、降低根系呼吸速率、增加根水势,从而促进根系对水分和营养物质的吸收利用,使植株体内的水分状况得以改善,因而在一定程度上,提高了作物的抗旱性。

(6)施磷使春小麦群体的水分利用效率明显提高(表 9)。虽然施磷增加了叶面积和单位面积的蒸腾失水,从而使耗水量增加,但对同化作用和生长过程的促进作用更大,从而使施磷植株有较高的产量和 WUE。在构成产量的诸因素中,磷对穗粒数的影响程度要大于对千粒重的影响,因此不同水分条件下,磷肥对产量的促进作用,主要依赖对穗粒数的增加程度。

表 9 土壤水分和磷素营养对春小麦水分利用效率的影响

土壤含水量 (毛管持水量%)	+P			-P		
	产 量	耗水量	WUE	产 量	耗水量	WUE
30	1.02±0.127	2.01±0.12	0.51±0.061	0.61±0.08	1.78±0.04	0.34±0.039
50	2.49±0.317	4.53±0.29	0.55±0.014	1.42±0.146	2.91±0.21	0.49±0.042
75	4.91±0.375	7.59±0.59	0.62±0.009	2.18±0.066	5.27±0.15	0.41±0.009

从以上结果可以看出:施磷明显改善了干旱条件下春小麦的水分状况,提高了春小麦的抗旱性。原因在于施磷改进了根系的生理状况,促进了根系生长,维持了地上地下部生长的平衡和吸水、失水间的平衡,同时,提高了束缚水含量,增强了细胞膜稳定性、叶片保水能力及渗透调节能力等。施磷通过本身的营养作用及对作物水分关系的改善,使光合机构在较好的水分条件下运转,因而增加了叶片净光合速率,促进了同化产物的运输,使产量和水分利用效率得以提高。

2.3 钾素营养对作物抗旱性和水分利用的影响及作用机理

钾素营养与作物抗旱性的关系及对水分利用和产量影响的研究愈来愈受到人们的重视,我们以小麦、玉米和谷子等作物为盆栽实验材料,研究了钾素营养对作物水分关系和光合作用等的影响,以期为旱地施用钾肥提供理论根据。研究结果初步表明:

2.3.1 干旱下施钾在一定程度上可改善作物的水分关系 施钾玉米的水势和相对含水量分别高出不施钾玉米 0.14Mpa 和 8%左右。同时,施钾也提高了作物的渗透调节能力,这在小麦、玉米和谷子上都得到验证。钾对作物渗透调节能力的提高主要依赖对渗透调节物质脯氨酸、可溶性糖和 K<sup>+</sup> 等的提高,特别是脯氨酸。

2.3.2 K<sup>+</sup> 在气孔调节中起着十分重要的作用 施钾使作物的气孔调节明显增强。高钾降低了气孔密度,改变了气孔形状(减少了保卫细胞的平均长度,使宽度增加),并增强了根系的透水力,因而可以维持较高的水势和对干旱反应的敏感性。

2.3.3 干旱条件下,高钾使作物(冬小麦)体内的硝酸还原酶活性明显增强。

2.3.4 水分胁迫下,高钾植株具有较高的净光合速率(表 10) 高钾增加了气孔导度,改善了叶肉细胞光合活性,使气孔和非气孔因素对光合作用的限制减小,因而提高了净光合速率。

表 10 不同水分和钾肥处理对冬小麦净光合速率和气孔导度的影响

处理	净光合速率 Pn ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度 Gs ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
+KW	6.78	96.41
+KW	5.39	51.86
+KD	5.66	56.96
+KD	3.68	36.45

总之,良好的钾素营养改善了作物的水分关系,提高了作物的渗透调节和气孔调节能力,增强了硝酸还原酶的活性,使干旱对光合机构的损伤降低,因而也提高了净光合作用速率。

综上所述,旱地施用氮、磷、钾肥有其合理的生理生态基础。主要表现在:合理的氮、磷、钾营养均在一定程度上改善了作物的水分关系;均可以提高作物的渗透调节和气孔调节能力;均可以提高作物的净光合作用速率;均可以提高单叶及群体的水分利用效率;均可以增加作物产量。此外,由于元素的不可替代性,使各元素可能通过特殊的机制增强作物的抗旱性和对水分的利用。如高磷钾营养均可以通过增大根冠比增加根系的吸水,而高氮营养就无此作用;高钾植株在水分胁迫下可以累积脯氨酸而氮磷则不能;高磷营养可同时提高植株的抗旱和耐旱能力,而高氮则不

利于耐旱等。

以上研究结果提示我们,在旱地农业实践中,可以通过合理的施用氮、磷、钾肥来改善作物体内的水分关系,增强作物的抗旱性和对水分的利用,从而取得较高的产量和最佳的经济效益。通过上述研究确立的一些优化的水肥关系耦合模式已在固原和渭北旱塬农业生产中推广应用,取得了良好的经济效益。此外,我们正在探索磷素营养提高作物抗旱性的生化机制以及将  $K^+$  与一些螯合剂螯合,作为一种新型的抗蒸腾剂用于旱地农业生产中,以充分发挥磷钾肥的抗旱增产作用。

\* 参与部分研究的还有梁银丽、徐萌、张春雷、刘忠民;山仑、陈培元对本工作进行了指导。

#### 参考文献

- 1 徐萌,山仑.无机营养对春小麦抗旱适应性的影响.植物生态学与地植物学学报,1991,79~87
- 2 张岁岐,山仑.氮素营养对春小麦抗旱适应性及水分利用的影响.水土保持研究,1995,31~35
- 3 梁银丽,陈培元.土壤水分和磷营养对小麦根系生长生理特性的影响.西北植物学报,1994,14(5)56~60
- 4 李秧秧.钾营养对玉米抗旱性的影响.华北农学报,1993,8(4),94~98
- 5 李秧秧,上官周平,陈培元.快速干旱下钾对玉米叶片光合作用的影响.西北农业学报,1993,2(3)48~52
- 6 上官周平,李英,陈培元等.氮肥和底墒对小麦同化产物累积与运转的调节效应模型.西北农业学报,1994,3(2)63~68.