



## 半湿润偏旱区水肥耦合对大豆产量的影响

张洁<sup>1,2</sup>, 田文仲<sup>1,2</sup>, 黄向荣<sup>3</sup>, 郭建秋<sup>1</sup>, 丁志强<sup>1,2</sup>, 李俊红<sup>1,2</sup>, 李林<sup>1</sup>,  
李芳<sup>1,2</sup>, 常丽丹<sup>1</sup>, 亢江飞<sup>1</sup>, 姚宇卿<sup>1,2</sup>, 吕军杰<sup>1,2</sup>

(1. 洛阳市农林科学院, 河南洛阳 471023; 2. 中国农科院 洛阳旱农试验基地,  
河南洛阳 471023; 3. 洛阳市种子管理站, 河南洛阳 471023)

**摘要** 以洛阳市农林科学院长期定位 14 a(2004 年始)的水肥耦合试验为平台,于 2017—2020 年连续 4 a 采用二次饱和 D—最优试验设计,对大豆产量及成产因素进行测定分析。探明半湿润偏旱区不同降水年景下大豆对水肥耦合的响应,为实现大豆增产及水分利用提供理论依据。结果表明:在大豆生育期干旱发生不同的 4 a,2017 年苗期—花期,2018 年荚期,2019 年盛花期,2020 年鼓粒期,大豆的产量趋势一致,同一年度产量随灌水量的增加而增加,在本试验条件下大于 383 mm 灌水能打破干旱的约束,可满足大豆的生长,使产量显著增加;氮肥对产量的影响较平缓,大体趋势是升—降—升—降,以  $N_{90}$  达最大值。磷肥对产量影响更平缓,趋势与氮肥一致,4 个年度以  $P_{84}$  产量最高。3 个因素影响大小为水>氮肥>磷肥。有效荚数对水肥的响应较敏感,百粒质量对水肥的响应较平稳。不同年景不同时期的干旱对大豆产量的影响要素不同,盛花期的干旱对有效荚数影响较大,荚期干旱对百粒质量影响最大,鼓粒期对产量影响较小;生产上应重视大豆花期和荚期的水分供应。

**关键词** 水肥耦合;大豆;产量;成产因素

大豆是中国重要的粮油饲兼用作物,在农业和工业生产中占据着重要地位<sup>[1]</sup>。近 2 a,在新冠肺炎疫情反复和国际环境不确定的背景下,大豆和油料作物的进口受到冲击,安全风险进一步加大。想要扭转大豆、油料作物依赖进口的局面,就必须扩大大豆和油料作物种植生产,提高自给率。

大豆是黄淮海区的主要作物之一,常年种植面积在 270 万至 750 万  $hm^2$ ,占全国大豆种植面积的 30%~60%;产量在 20 亿至 50 亿 kg,约占中国大豆总产的 35%左右,是仅次于东北的第二大豆主产区<sup>[2]</sup>。大豆是典型的短日照作物,多数品种对生长季节的光照长度非常敏感,一个品种很难适应不同纬度的种植要求。‘洛豆 1 号’是洛阳市农林科学院选育的高产、多抗大豆新品种,2006 年以‘徐豆 9 号’为母本、‘周豆 11 号’为父本选育的新品种。2017 年经河南省农作物品种审定委员会审定,审定编号为豫审豆 2017001<sup>[3]</sup>。

豫西位于黄土高原东南缘,属暖温带半湿润

偏旱气候区,由于受季风气候的影响,降水量年际间变化波动较大,且降水季节分布不均,60%~80%的降雨集中在 7—9 月,大豆生长季节虽雨水偏多,但干旱时有发生,不同年份干旱发生的时期不同,干旱是制约大豆增产的主要因素之一。在大豆生长过程中,不同生育期干旱对产量的影响不同,郝瑞莲等<sup>[4]</sup>对夏大豆的研究表明,结荚至鼓粒期>开花至结荚期>鼓粒至成熟>分枝至开花期>幼苗至分枝期;谢甫绶等<sup>[5]</sup>指出,大豆开花初期受旱其减产幅度比鼓粒期大;邹文秀等<sup>[6]</sup>研究认为,结荚期干旱是造成大豆减产的原因。大豆生长对氮肥的需求量较高,主要来源为生物固氮、土壤氮素和氮肥,仅靠土壤氮素和生物固氮的供给不能满足大豆对高产的营养需要<sup>[7]</sup>。磷素是大豆生长发育中的重要元素,适宜施磷能提高大豆的产量和品质<sup>[8-9]</sup>,施用磷肥能使作物提前开花,促进早熟<sup>[10]</sup>。大豆产量的形成是大豆的遗传特性和水、肥、气、热、光等外在环境因素综合作用

收稿日期:2022-11-28 修回日期:2023-03-14

基金项目:国家科技支撑计划(2007BAD88B02-04);国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B07);国家重点研发计划重点专项(2018YFD0300707);洛阳市乡村振兴专项(2202024A)。

第一作者:张洁,女,副研究员,研究方向土壤肥料及早作农业。E-mail:z13683793366@126.com

的结果<sup>[1]</sup>,水肥是最易被人们控制的因素,中国自“八五”计划以来,将“旱地农田水肥交互作用及耦合模式研究”作为重点攻关专题,通过多学科联合攻关,取得重要的结论和成绩<sup>[11-13]</sup>,近年来水肥耦合的研究又在有限灌溉、保护地等以及农作物和经济作物展开,为农业生产提供了科学的水肥利用模型和指导。水肥耦合对大豆生长发育影响的研究较少,也仅局限在水氮互作对大豆产量的影响,基本上以 1 a 或 2 a 试验为例而得出结论<sup>[14-18]</sup>,长期定位研究水肥交互作用下的动态变化尚未见报道,本试验以洛阳市农林科学院长期定位(2004 年始)的水肥耦合试验为平台,2017—2020 年连续 4 a 研究不同水肥和不同年景大豆产量和成产因素的表现,为充分发挥新品种的增产潜力和推广提供栽培技术参考。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于洛阳市,该区年均辐射量 491.5 kJ/cm<sup>2</sup>,年均气温 14 ℃,日平均温度超过 10 ℃ 的时间约 210 d,积温达 4 000 ℃,年蒸发量 1 872.1 mm,多年平均降水量 637.1 mm。试验在洛阳市农林科学院防雨棚内进行,小区为 1 m×2 m 的无底型水泥池,池两侧覆有防水膜,遇雨盖棚。土壤为褐土,耕层体积质量为 1.53 g/cm<sup>3</sup>,土壤耕层有机质 15.8 g/kg,pH 8.1,碱解氮(N) 62.7 mg/kg,速效磷(P) 10.4 mg/kg,速效钾(K) 166.0 mg/kg。

试验期间 2017—2020 年大豆生育期降水量与常年降水量(364.3 mm)相比(图 1),2017 年(315 mm)和 2020 年(228.1 mm)年较低,2018 年(410.8 mm)和 2019 年(437.2 mm)年较高;降水量极不均匀,且受降水量的时效性和多少的影响,不同年份大豆生育期干旱的时期和程度不同。2017 年苗期—花期,2018 年荚期,2019 年盛花期,2020 年鼓粒期。试验期间气温与光照均比常年略高,无极端天气出现。

### 1.2 试验设计与方法

试验始于 2004 年,已持续进行 18 a。试验包含 3 个因素,即灌水量(代码为 A)、施氮量(代码为 B)与施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)量(代码为 C),因素 A 以洛阳 20 a(1971—1999 年)的降雨量为依据,以每月占年平均降雨量的加权值进行分配,每月均有灌水,具体试验方案见表 1。供试大豆品种为‘洛豆

1 号’,播种日期为 6 月 10 日—14 日,收获日期为 10 月 6 日—10 日,种植密度 18.75 万株/hm<sup>2</sup>。供试肥料:氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 13%),肥料作基肥一次性施入。前茬作物为冬小麦‘洛旱 7 号’。

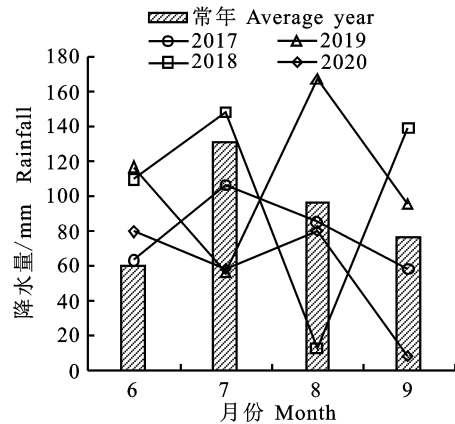


图 1 试验年度大豆生育期降水量

Fig. 1 Rainfall during soybean growth period in the test year

### 1.3 测定指标

产量及主要成产因素:大豆籽粒完全成熟后,按小区单收单计产,并测定百粒质量,随机取 10 株调查有效荚数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对大豆产量的影响

4 a 各处理大豆产量表现趋势基本一致(表 2),即随灌水量的增加而增加。以灌水 383 mm 平水为界可分为 3 个水平,小于 383 mm 为欠水,大于 383 mm 为丰水,均为丰水>平水>欠水,且产量差异显著,而同一灌水水平之间产量差异不显著。说明在本试验条件下,大豆对水分的敏感性大于肥料,这与希克斯等<sup>[19]</sup>和韩晓增等<sup>[20]</sup>的研究一致;4 个年度丰水处理的产量一致;平水处理 2017 年和 2020 年处理间产量大小顺序相同,而 2018 年和 2019 年不同,欠水 3 个处理 4 a 间除 2019 年外,其他年度均表现相同。说明大豆的生长不仅受各处理的试验小环境影响,大环境影响也很大<sup>[21]</sup>,水和肥的交互是复杂的,年际间因气候不同水肥的响应亦不同。

从 4 a 大豆产量平均值看,产量分 6 个梯度,产量差异显著,以水分为主导因素。在水分和磷肥相同的情况下,丰水(处理 4 和 6)和欠水(处理 3 和 5)N 肥高的产量高,平水(处理 9 和处理 10)

表 1 试验设计方案  
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	试验设计 Experimental design			试验水平 Treatment level						
	$x_1$ (水分) Irrigation volume	$x_2$ (氮肥) Nitrogen application	$x_3$ (磷肥) Phosphorus application	年灌水量/mm Annual irrigation volume	A		B		C	
					大豆生育期 灌水量/mm Irrigation volume	代码 Code	施氮量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Nitrogen application	代码 Code	施磷量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Phosphorus application	代码 Code
1	0	0	2	600	383	W <sub>383</sub>	53	N <sub>53</sub>	112	P <sub>112</sub>
2	0	0	-2	600	383	W <sub>383</sub>	105	N <sub>105</sub>	0	P <sub>0</sub>
3	-1.414	-1.414	1	423	270	W <sub>270</sub>	15	N <sub>15</sub>	84	P <sub>84</sub>
4	1.414	-1.414	1	777	496	W <sub>496</sub>	15	N <sub>15</sub>	84	P <sub>84</sub>
5	-1.414	1.414	1	423	270	W <sub>270</sub>	90	N <sub>90</sub>	84	P <sub>84</sub>
6	1.414	1.414	1	777	496	W <sub>496</sub>	90	N <sub>90</sub>	84	P <sub>84</sub>
7	2	0	-1	850	542	W <sub>542</sub>	53	N <sub>53</sub>	28	P <sub>28</sub>
8	-2	0	-1	350	223	W <sub>223</sub>	53	N <sub>53</sub>	28	P <sub>28</sub>
9	0	2	-1	600	383	W <sub>383</sub>	105	N <sub>105</sub>	28	P <sub>28</sub>
10	0	-2	-1	600	383	W <sub>383</sub>	0	N <sub>0</sub>	28	P <sub>28</sub>
11	0	0	0	600	383	W <sub>383</sub>	53	N <sub>53</sub>	56	P <sub>56</sub>

表 2 不同试验年份大豆产量变化  
Table 2 Changes in soybean yield across different experimental years kg/hm<sup>2</sup>

处理 Treatment	年份 Year				平均 Average
	2017	2018	2019	2020	
N <sub>53</sub> P <sub>112</sub> W <sub>383</sub>	1 398 c	1 404 c	1 521 c	1 994 c	1 579 c
N <sub>53</sub> P <sub>0</sub> W <sub>383</sub>	1 452 c	1 350 c	1 433 c	1 976 c	1 553 c
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	810 ef	908 e	1 050 d	1 253 f	1 005 e
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	2 535 b	2 205 b	2 249 b	3 027 b	2 504 b
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	977 de	1 061 de	798 de	1 421 ef	1 064 e
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	2 798 ab	2 363 b	2 415 ab	3 204 b	2 695 b
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>542</sub>	2 904 a	2 672 a	2 697 a	3 530 a	2 951 a
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>223</sub>	564 f	561 f	714 e	443 g	571 f
N <sub>105</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	1274 cd	1 298 c	1 098 d	1 827 cd	1 374 d
N <sub>0</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	1 340 c	1 202 cd	1 443 c	1 554 de	1 385 d
N <sub>53</sub> P <sub>56</sub> W <sub>383</sub>	1 335 c	1 203 cd	1 521 c	1 650 de	1 427 cd

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

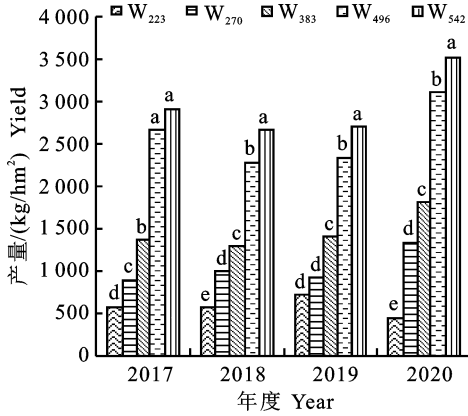
Note: Different lowercase letters indicate significant difference( $P < 0.05$ ). The same below.

则相反,平水两个处理是氮肥施用量的两个极端,产量波动较大,但同一灌水水平间产量无差异;在水分和 N 水平相同情况下(处理 1、2、11),不同施磷量间呈现  $P_{112} > P_0 > P_{56}$ ,产量无差异。不施磷处理产量高的原因是大豆生长发育进程较晚,避开了不利因素,成熟晚。

2.1.1 大豆产量对灌水的响应 大豆生长需水量较多,生产 1 kg 大豆籽粒,耗水量达 2 kg<sup>[19]</sup>。在一定的水分范围内(300 mm~700 mm)随着耗

水量增加产量明显增加,二者极显著相关,干旱或水分过多均导致产量降低<sup>[18,20]</sup>。灌水量对大豆产量的影响见图 2,大豆产量随灌水量的增加而升高,2017 年产量差异达显著水平,其他年度产量差异达极显著水平。灌水量 5 水平 4 a 平均产量由小到大为 570.5 kg/hm<sup>2</sup>、1 034.2 kg/hm<sup>2</sup>、1 463.6 kg/hm<sup>2</sup>、2 599.2 kg/hm<sup>2</sup> 和 2 950.4 kg/hm<sup>2</sup>,产量变化总体一致,灌水量从 223 mm 到 383 mm 直线上升,383 mm 到 496 mm 产量陡

然上升,增产幅度较大,而后增加缓慢,说明在本试验条件下大于 383 mm 灌水能打破干旱的约束,可满足大豆的生长,增产显著。



柱形图上不同字母表示各处理间存在显著差异( $P < 0.05$ )。下同

Different letters on the column bar indicate significant differences between the treatments( $P < 0.05$ ). The same below

图 2 不同灌水量大豆产量的变化  
Fig. 2 Changes of soybean yield under different irrigation amounts

2.1.2 大豆产量对氮肥的响应 大豆生长对氮肥的需求量较高,在一定施氮范围内随着施氮量的增加产量随之增加,施氮量高于某值时产量增加不明显<sup>[14-15]</sup>。4 个年度不同施氮大豆产量差异均达显著水平,2020 年产量差异达极显著。从图 3 看,氮肥对产量的影响较平缓,大体趋势是升一降一升一降,以  $N_{90}$  产量最高。

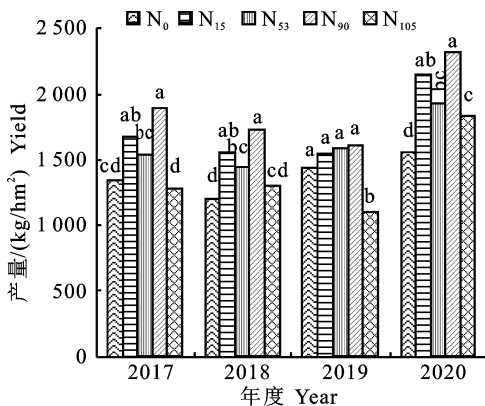


图 3 不同施氮量大豆产量的变化  
Fig. 3 Changes of soybean yield under different nitrogen fertilizer amounts

2.1.3 大豆产量对磷肥的响应 磷素是大豆生长发育中的重要元素,适宜施磷能提高大豆的产量和品质。从图 4 可见,磷肥对产量影响更平缓,

4 个年度大豆产量差异仅 2019 年未达显著,其他年份均差异显著,均以  $P_{84}$  产量最高。3 个因素对产量影响表现为水 > 氮肥 > 磷肥,与郭亚芬等<sup>[16]</sup>和王景伟等<sup>[17]</sup>研究结论一致。

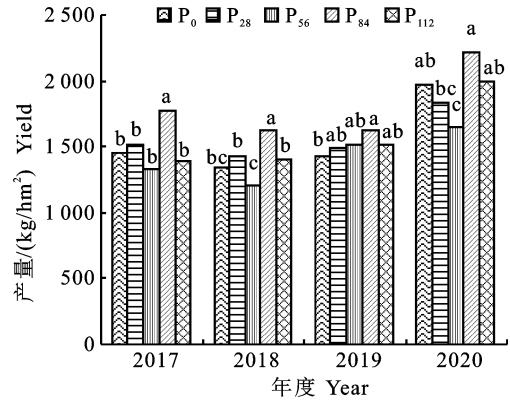


图 4 不同施磷量大豆产量的变化  
Fig. 4 Changes of soybean yield under different phosphorus fertilizer amounts

2.2 不同处理对大豆主要成产因素的影响

2.2.1 对有效荚数的影响 4 个试验年度有效荚数的变化见表 3。每个年度有效荚数差异均达极显著水平,年度间表现稍有不同,但总体仍以水分为主导因素。2017 年因前期干旱严重,其他生育期均有轻微干旱发生,有效荚数分为 3 级,即丰水 > 平水 > 欠水;其他年份因干旱时期不同为多级表现。4 a 平均值有效荚数与灌水量水平一致,分为 5 级,随灌水量的增加而增加,且差异显著。有效荚数不同年度平均,表现为 2020 年(33.4) > 2018 年(26.8) > 2019 年(25.1) > 2017 年(24.8),说明盛花期的干旱对有效荚数影响较大。这与孙海锋等<sup>[22]</sup>研究一致,生产上应重视大豆花期前的水分供应。

灌水量对大豆有效荚数的影响见图 5,各年度有效荚数随灌水量的增加而升高且差异显著。氮肥对大豆有效荚数的影响见图 6,随施氮量增加呈升一降一升一降的变化趋势,各年度最高有效荚数略有不同,2017 年和 2019 年以  $N_{15}$  最高,而 2018 年和 2020 年以  $N_{90}$  最高,说明有效荚数的多少不仅受水肥影响,受当年的气候影响也很大;2020 年有效荚数差异显著而其他年度无差异。磷肥对大豆有效荚数的影响较平缓(见图 7),有效荚数 2020 年以  $P_{112}$  最高且水平间差异显著,其他年份均以  $P_{84}$  最高且无差异。前期干旱对有效荚数影响较大,水分为主要限制因素,肥料效应不明显。



表 3 试验期间不同处理大豆有效荚数的变化

Table 3 Changes of effective pod number of soybean under different treatments during experiment

处理 Treatment	年份 Year				平均 Average
	2017	2018	2019	2020	
N <sub>53</sub> P <sub>112</sub> W <sub>383</sub>	24.0 b	23.3 cd	26.5 b	36.7 c	27.6 c
N <sub>53</sub> P <sub>0</sub> W <sub>383</sub>	24.6 b	24.8 cd	24.6 bc	30.7 cde	26.1 c
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	17.1 c	20.6 de	20.5 cd	23.8 f	20.5 d
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	34.3 a	33.0 ab	33.7 a	42.8 b	36.0 b
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	15.4 c	25.0 cd	17.4 de	26.7 ef	21.1 d
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	34.2 a	37.5 a	33.3 a	49.4 a	38.6 ab
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>542</sub>	35.1 a	35.8 a	34.6 a	52.4 a	39.5 a
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>223</sub>	13.0 c	16.8 e	15.0 e	14.6 g	14.8 e
N <sub>105</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	25.5 b	26.9 bc	22.6 bcd	33.8 cd	27.2 c
N <sub>0</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	25.3 b	25.0 cd	24.3 bc	28.4 def	25.7 c
N <sub>53</sub> P <sub>56</sub> W <sub>383</sub>	24.7 b	26.4 cd	23.4 bc	28.1 def	25.7 c
平均 Average	24.8	26.8	25.1	33.4	27.5

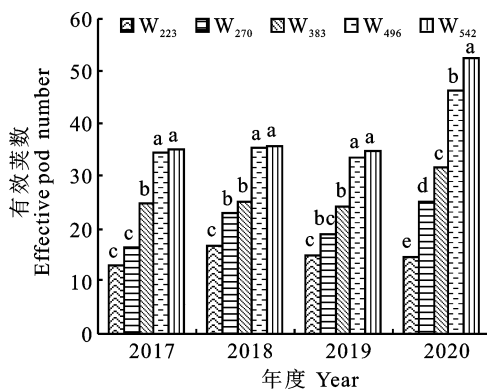


图 5 不同灌水量大豆有效荚数的变化

Fig. 5 Changes of effective pod number of soybean under different irrigation amount

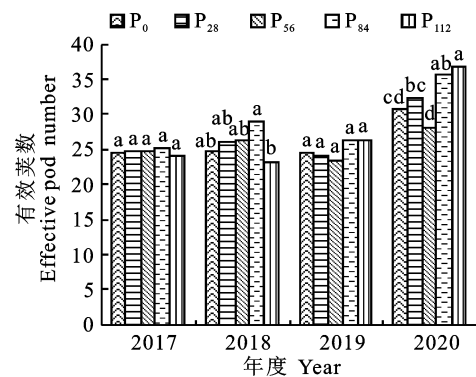


图 7 不同施磷量大豆有效荚数的变化

Fig. 7 Changes of effective pod number of soybean with different phosphorus application rates

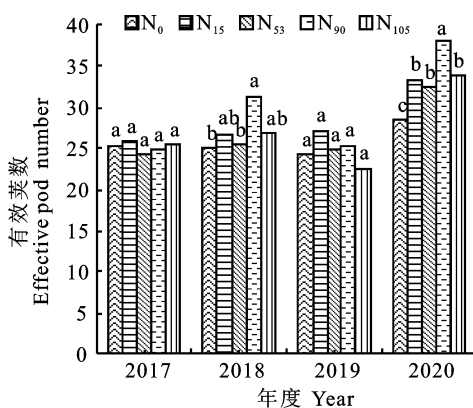


图 6 不同施氮量大豆有效荚数的变化

Fig. 6 Changes of effective pod number of soybean under different nitrogen application rates

2.2.2 对百粒质量的影响 4 个年度百粒质量的表现见表 4, 每个年度的百粒质量与灌水量不一致, 方差分析显示百粒质量差异均达极显著水平; 多重比较表明每个年度表现不同。从 4 a 平均值结果看, 丰水处理的百粒质量较高, 灌水最小水平的百粒质量最小, 而其他处理则无规律, 说明百粒质量受水肥共同的影响, 百粒质量对水、氮肥和磷肥的响应不敏感。不同年度百粒质量平均 2017 年(23.0 g) > 2019 年(21.0 g) > 2020 年(18.9 g) > 2018 年(16.7 g), 2018 年荚期干旱对百粒质量影响最大, 2020 年鼓粒期干旱对百粒质量影响次之, 2017 年因前期干旱有效荚数少, 百粒质量最高, 说明荚期干旱对百粒质量影响大, 大豆生育期应注意荚期水分的补充。

表 4 试验期间不同处理大豆百粒质量变化

Table 4 Changes of 100 seed mass of soybean under different treatments during the test

处理 Treatment	年份 Year				平均 Average
	2017	2018	2019	2020	
N <sub>53</sub> P <sub>112</sub> W <sub>383</sub>	22.1 cd	15.8 de	21.5 abc	16.9 e	19.1 ef
N <sub>53</sub> P <sub>0</sub> W <sub>383</sub>	22.1 cd	17.4 abc	22.7 a	19.9 abc	20.5 bc
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	20.6 d	16.1 cd	19.0 e	17.8 de	18.4 fg
N <sub>15</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	25.1 ab	17.9 ab	21.2 abcd	20.6 ab	21.2 ab
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>270</sub>	23.3 bc	16.2 cd	18.8 e	20.4 abc	19.7 cde
N <sub>90</sub> P <sub>84</sub> W <sub>496</sub>	25.0 ab	18.3 a	21.8 abc	20.0 abc	21.3 ab
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>542</sub>	25.9 a	18.2 a	22.4 a	21.3 a	21.9 a
N <sub>53</sub> P <sub>28</sub> W <sub>223</sub>	21.7 cd	14.5 e	20.8 bcd	13.6 f	17.7 g
N <sub>105</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	22.3 cd	17.1 abcd	19.8 de	18.5 cde	19.4 de
N <sub>0</sub> P <sub>28</sub> W <sub>383</sub>	22.7 bcd	16.7 bcd	22.3 ab	19.5 abcd	20.3 bcd
N <sub>53</sub> P <sub>56</sub> W <sub>383</sub>	21.8 cd	15.9 de	20.6 cd	19.1 bcd	19.4 def
平均 Average	23.0	16.7	21.0	18.9	19.9

### 3 讨论

水肥是影响大豆生长发育的主要因素,二者相互作用共同对作物产量产生影响<sup>[23]</sup>。大多数旱棚试验和盆栽试验的结果都表明,水分是作物增产的第一限制因子<sup>[11-13]</sup>。4 a 试验结果表明,3 因素影响表现为水>氮肥>磷肥,大豆产量随灌水量的增加而升高,383 mm 到 496 mm 产量增产幅度较大,而后增加缓慢,说明在本试验条件下大于 383 mm 灌水能打破干旱的约束,可满足大豆的生长,使产量显著增加。氮肥对产量的影响较平缓,大体趋势是先升后降,以 N<sub>90</sub> 达最大值。磷肥对产量影响更平缓,4 个年度以 P<sub>84</sub> 产量最高。水分与磷肥、氮肥的耦合效应有待进一步研究。

有效荚数对水肥的响应与产量一致,表现为水>氮肥>磷肥,其中水肥对百粒质量影响较小。长期定位水肥试验的实施,以及试验条件的限制,试验小区对大气候的响应更敏感。不同年景不同时期的干旱对大豆产量的影响因素不同,盛花期的干旱对有效荚数影响较大,荚期干旱对百粒质量影响最大。‘洛豆 1 号’在此试验条件下仍有较高的产量,说明该品种抗逆性较强,生产上除常规的病虫害预防外,应重视大豆花期和荚期的水分供应。

#### 参考文献 Reference:

[1] 何艳琴,闫晓燕,吴存祥,等. 中国大豆新品种动态[M]. 北

京:中国农业科学技术出版社,2013.

HE Y Q, YAN X Y, WU C X, *et al.* Dynamics of New Soybean Varieties in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2013.

[2] 李卫东,张孟臣. 黄淮海夏大豆及品种参数[M]北京:中国农业科学技术出版社,2006.

LI W D, ZHANG M CH. Huang Hai Hai Xia Soybean and Its Variety Parameters[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006.

[3] 郭建秋,常丽丹,马雯,等. 高产抗病大豆新品种洛豆 1 号的选育[J]. 中国种业, 2017(4): 56-57.

GUO J Q, CHANG L D, MA W, *et al.* Breeding of a new soybean variety Luodou 1 with high yield and disease resistance[J]. *China Seed Industry*, 2017(4): 56-57.

[4] 郝瑞莲,张全民,韩英,等. 土壤水分胁迫对夏大豆养分吸收及产量影响的研究[J]. 大豆通报, 1998(4): 12.

HAO R L, ZHANG Q M, HAN Y, *et al.* Effects of soil water stress on nutrient uptake and yield of summer soybean in China[J]. *Soybean Bulletin*, 1998(4): 12.

[5] 谢甫缙,董钻,孙艳环,等. 不同生育期干旱对大豆生长和产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(1): 13-16.

XIE F T, DONG Z, SUN Y H, *et al.* Effects of drought at different growth stages on soybean growth and yield [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1994, 25(1): 13-16.

[6] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 黑土区不同水分处理对大豆产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 68-73.

ZOU W X, HAN X Z, JIANG H, *et al.* The effect of water levels on yield and water use efficiency of soybean in north-east black soil region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 30(6): 68-73.

[7] 严君,韩晓增,王守宇,等. 不同施氮量及供氮方式对大豆

- 根瘤生长及固氮的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(1): 75-79.
- YAN J, HAN X Z, WANG SH Y, *et al.* Effects of different N supply levels and methods on nodule growth and nitrogen fixation in soybean [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(1): 75-79.
- [8] 王旭明, 张 铮, 史刚荣, 等. 磷营养和土壤含水量对大豆光合特性的交互影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 31(3): 225-228
- WANG X M, ZHANG ZH, SHI G R, *et al.* Interaction of phosphorus concentration and soil moisture on photosynthetic traits in soybean plants[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 31(3): 225-228.
- [9] 孙铭婕, 诸葛玉平, 娄燕宏, 等. 追施磷肥对大豆产量及养分富集特性的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(4): 20-24
- SUN M J, ZHUGE Y P, LOU Y H, *et al.* Effects of phosphate fertilizer topdressing on yield and nutrient enrichment of soybean[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(4): 20-24.
- [10] 司玉坤, 齐 欣, 武庆慧, 等. 氮磷肥用量对豫中地区大豆产量、干物质及经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 30-34
- SI Y K, QI X, WU Q H, *et al.* Nitrogen and phosphorus fertilizer rate affect yield, dry matter and economic benefits of soybean in central Henan[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(15): 30-34
- [11] 高亚军, 李生秀. 北方旱区农田水肥效应分析 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 76-81.
- GAO Y J, LI SH X, Analysis of the effect of water and fertilizer on crop production in farmland of arid zone in northern China[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(7): 76-81.
- [12] 肖自添, 蒋卫杰, 余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. 作物杂志, 2007(6): 18-22.
- XIAO Z T, JIANG W J, YU H J. Research progress on coupling effect of water and fertilizer in crops[J]. *Crops*, 2007(6): 18-22
- [13] 于亚军, 李 军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220-224.
- YU Y J, LI J, JIA ZH K, *et al.* Research progress of water and fertilizer coupling on dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 220-224.
- [14] 王 柏, 王梦雪, 滕 云, 等. 东北半干旱区大豆水肥耦合效应试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 86-89.
- WANG B, WANG M X, TENG Y, *et al.* Experimental research of the different water-fertilizer combination of soybean in northeast semiarid area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 86-89.
- [15] 孙云岭, 杨树青, 刘德平, 等. 水肥互作对大豆产量及氮肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 81-86.
- SUN Y L, YANG SH Q, LIU D P, *et al.* Impact of water-fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of soya bean[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10): 81-86.
- [16] 郭亚芬, 滕 云, 张忠学, 等. 东北半干旱区大豆水肥耦合效应试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2005, 26(4): 405-411
- GUO Y F, TENG Y, ZHANG ZH X, *et al.* Study on couple effect of water and fertilizer of soybean in northeast semiarid area [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2005, 26(4): 405-411.
- [17] 王景伟, 朱铁林, 王海泽. 水肥耦合对大豆生长发育的正交设计实验研究[J]大豆通报, 2007(6): 17-20.
- WANG J W, ZHU T L, WANG H Z, *et al.* Study of orthogonal design on water and fertilizer coupling on the growth of soybean[J]. *Soybean Bulletin*, 2007(6): 17-20.
- [18] 张丽华, 赵洪祥, 谭国波, 等. 水肥耦合对大豆光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(2): 268-271.
- ZHANG L H, ZHAO H X, TAN G B, *et al.* Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2010, 29(2): 268-271.
- [19] 希克斯 D R, 钱葭圭, 余建章, 等. 大豆形态生理与育种 [M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- HICKS D R, QIAN J G, YU J ZH, *et al.* Morphological Physiology and Breeding of Soybean[M]. Beijing: Agricultural Press, 1984.
- [20] 韩晓增, 乔云发, 张秋英, 等. 不同土壤水分条件对大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2003, 11(4): 267-272.
- HAN X Z, QIAO Y F, ZHANG Q Y, *et al.* Effects of various soil moisture on the yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2003, 11(4): 267-272.
- [21] 张 洁, 丁志强, 李俊红, 等. 水肥对大豆叶绿素荧光动力学参数及其产量的影响[J]. 土壤与作物, 2013, 2(3): 122-124.
- ZHANG J, DING ZH Q, LI J H, *et al.* Effect of water and fertilizer coupling on chlorophyll fluorescence characters and yield in soybean[J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(3): 122-124.
- [22] 孙海锋, 战 勇, 林海容, 等. 花期干旱对不同基因型大豆叶绿素荧光特性的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 56-59.
- SUN H F, ZHAN Y, LIN H R, *et al.* Response of chlorophyll fluorescence to drought stress at flowering in different soybeans[J]. *Soybean Science*, 2008, 27(1): 56-59.
- [23] 张秋英, 刘晓冰, 金 剑, 等. 水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 83-84.
- LIU Q Y, LIU X B, JIN J, *et al.* Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield/quality of soybean[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1): 83-84.

## Effect of Water-Fertilizer Coupling on Soybean Yield in Semi-Humid to Semi-Arid Region

ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, TIAN Wenzhong<sup>1,2</sup>, HUANG Xiangrong<sup>3</sup>, GUO Jianqiu<sup>1</sup>,  
DING Zhiqiang<sup>1,2</sup>, LI Junhong<sup>1,2</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, LI Fang<sup>1,2</sup>, CHANG Lidan<sup>1</sup>,  
KANG Jiangfei<sup>1</sup>, YAO Yuqing<sup>1,2</sup> and LÜ Junjie<sup>1,2</sup>

(1. Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang Henan 471023, China;

2. Luoyang Arid Agricultural Experiment Base, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Luoyang

Henan 471023, China; 3. Luoyang Seed Management Station, Luoyang Henan 471023, China)

**Abstract** Based on the long-term water-fertilizer coupling experiment conducted by the Luoyang Academy of Agricultural and Forestry Sciences for 14 years (from 2004), the quadratic saturation D-optimal experimental design was used for four consecutive years from 2017 to 2020 to analyze the soybean yield and its yield components. This study aimed to provide a theoretical foundation for increasing soybean yields and efficiently managing water resources in semi-humid to semi-arid regions. The results showed that consistent trends in soybean yield over the four years, with higher irrigation levels leading to increased yields during different growth stages. Under the experimental conditions, irrigation exceeding 383 mm alleviated drought constraints, promoting soybean growth and significantly increasing yields. Nitrogen fertilizer exhibited a relatively gentle effect on yield, generally following an increase-decrease-increase-decrease patterns, with the maximum yield achieved at  $N_{90}$ . Phosphate fertilizer also had a mild effect on yield, typically following an increase-decrease-increase-decrease pattern, with the highest production observed at  $P_{84}$ . The influence of the three factors ranked as water > nitrogen fertilizer > phosphorus fertilizer. The influence of three factors was water > nitrogen fertilizer > phosphorus fertilizer. The effective pod number proved to be sensitive to the effect of water and fertilizer, while the effect of water and fertilizer on 100-seed mass remained stable. Different years and growth stages of drought had varying effects on soybean yield. Drought during full flowering stage had a greater effect on the number of effective pods, while drought during the pod stage had the greatest effect on 100-grain mass. Drought during bulging stage had a little effect on yield; in practical production, special attention should be paid to providing the adequate water during flowering and pod stages of soybean growth.

**Key words** Water-fertilizer combination; Soybean; Yield; Yield component factor

**Received** 2022-11-28

**Returned** 2023-03-14

**Foundation item** National Science and Technology Support Plan (No. 2007BAD88B02-04); National Grain High Yield Science and Technology Project (No. 2011BAD16B07); National Key R&D Plan (No. 2018YFD0300707); Luoyang Rural Revitalization Project (No. 2202024A).

**First author** ZHANG Jie, female, associate research fellow. Research area: soil fertilizer and dry farming. E-mail: z13683793366@126.com

(责任编辑:郭柏寿 Responsible editor: GUO Baishou)