

施肥和降水年型对土壤供水量和大豆水分利用效率的影响

邹文秀¹, 韩晓增¹, 江 恒^{1,2}, 杨春葆¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态国家重点实验室, 海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:基于中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站的长期定位试验, 利用海伦站内气象数据和中子仪测定的土壤水分数据, 分析了丰水年(2006)、平水年(2008)和枯水年(2001和2004)条件下的无肥(CK)、化肥(NP)和化肥+有机肥(NPM)处理对大豆耗水量、土壤供水量和大豆水分利用效率的影响。从4 a的平均值分析, 大豆耗水强度最大时期为开花-鼓粒期。施肥增加了大豆的耗水量, 与CK相比, NP和NPM的耗水量分别增加了0.92%和2.21%, 其中施肥增加大豆耗水量的效应在枯水年表现得更为显著。大豆消耗的水分除了大气降水以外, 还有土壤供水量, 在降水最为缺乏的大豆鼓粒-成熟期, 与CK相比, NP和NPM土壤供水量分别增加了11.72%和23.48%。在观测的4 a中, 大豆水分利用效率均表现为CK < NP < NPM, 而在不同降水年型中大豆水分利用效率有随降水增多而降低的趋势。因此在研究区域可以通过有机肥的施用调控土壤的供水能力, 来缓解季节性降水缺乏带来的干旱胁迫, 进而提高大豆的水分利用效率, 达到充分利用土壤水分资源的目的。

关键词:大豆; 施肥; 土壤供水量; 水分利用效率; 降水缺乏

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9841(2012)02-0224-08

Soil Water Supply and Water Use Efficiency of Soybean Affected by Fertilization and Precipitation Patterns

ZOU Wen-xiu¹, HAN Xiao-zeng¹, JIANG Heng^{1,2}, YANG Chun-bao¹

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, Heilongjiang; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the long-term field experiments located in Hailun agricultural ecology station of Chinese Academy of Sciences, meteorological data and soil water content monitored by neutron probe were used to analyze the effect of different fertilizer treatments including no fertilizer(CK), chemical fertilizer(NP) and chemical fertilizer plus organic matter(NPM), on water consumption, soil water supply and water use efficiency(WUE) under rainy year(2006), normal year(2008) and drought years(2001 and 2004). Water consumption rate of soybean reached the peak at flowering-podding stage in views of four years' observation. Total water consumption of soybean was increased under fertilizer treatments, compared with CK, NP and NPM were increased by 0.92% and 2.21%, respectively, and this effect was more significant in drought years. Soil water supply was another important resource for water consumption of soybean with exception of precipitation. The precipitation from podding to mature was the lowest among whole growth period, and soil water supply of NP and NPM were increased by 11.72% and 23.8%, respectively. The WUE of soybean was showed in the order of CK < NP < NPM regardless of precipitation patterns, and increasing trend of WUE of soybean was observed with the decreasing of precipitation. Therefore, utilization of organic fertilizer can effectively regulate soil water supply, alleviate the drought stress result from seasonal precipitation, enhance soybean WUE, and make full use of soil water resource.

Key words: Soybean; Fertilization; Soil water supply; Water use efficiency; Precipitation deficiency

东北黑土区是我国大豆的主产区, 稳定和提高该地区大豆产量对于保障我国的粮食安全具有重要意义。水分是东北黑区农业生态系统中作物生产的主要限制因子^[1]。大气降水是该地区土壤水分主要来源, 大气降水的多少决定了水分在土壤中

的运移和储存^[2]。然而降水是不可调控自然因子之一。因此, 很多学者以盆栽试验为基础, 模拟不同降水量对大豆生物量、产量、品质和生理特性的影响^[3-5]。当土壤水分过多时会引起根系缺氧, 造成根部伤害, 从而限制植株高度, 降低叶面积和产

收稿日期: 2011-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(40971152, 41101208); 国家重点基础研究发展计划(2011CB100506)。

第一作者简介: 邹文秀(1982-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农田土壤水分研究。E-mail: zouwenxiu@hotmail.com。

通讯作者: 韩晓增(1957-), 男, 研究员, 主要从事土壤生态方面的研究工作。E-mail: xzhan@neigae.hrb.ac.cn。

量^[6]。大豆生育期干旱胁迫也会造成产量降低^[7-8]。但是,上述研究均基于室内模拟研究,均没有考虑到自然土壤对水分的调控能力。

东北黑土区属于“雨养农业”,旱作作物的水分供需决定于大气降水和土壤水分的供给,在一般年份大气降水可以满足作物对低水平水分的需求,土壤水分可以起到调节作用^[9],但是如何挖掘土壤水资源的供水潜力是目前研究的重点。对东北黑土区的研究表明,在一般年份肥料的施用能够显著提高大豆的耗水量和水分利用效率^[10],在干旱年份肥料的施用显著提高了土壤的供水量,其中以有机肥的效果最为明显^[11]。但是上述研究只是基于 1 a 的观测试验,缺乏对多年数据的统计分析和不同降水年型的考虑。因此,该研究基于长期定位试验,分析了不同降水年型对大豆耗水,土壤供水和大豆水分利用效率的影响。旨在为东北黑土区大豆的水分和养分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站水肥耦合试验场进行,海伦站地处黑土区中部,地势平坦,属于温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季,年平均气温 1.5℃,极端最高温度为 37℃,极端最低温度为 -39.5℃,年降水量为 500~600 mm,主要集中在 7~9 月,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数为 2 600~2 800 h,无霜期为 125 d。土壤类型为中厚层黑土,是在第四纪形成的黄土状母质上发育起来的地带性土壤,质地以粘性土为主,土壤物理性粘粒大于 60%,土壤固相比大于 50%,土壤膨胀性大于 25%,土体结构致密,渗透能力弱,毛管水运移速率较慢,土壤持水能力和保水能力较强,储水库容较大。地下水埋深 20~30 m。

1.2 试验设计

试验供试土壤为典型黑土,开垦前为草甸草原植被,开垦历史为 100 a 左右,前 60 a 不施肥,接下来 20 a 左右开始施用农家肥,后 20 a 施用化学肥料。1993 年将农田设为 3 个肥料处理分别为 CK(无肥区,不施用任何肥料),NP(化肥区,N:150 kg·hm⁻²,P₂O₅:75 kg·hm⁻²),NPM(化肥+有机肥区,N:150 kg·hm⁻²,P₂O₅:75 kg·hm⁻²,有机肥 3 000 kg·hm⁻²),小区面积为 50.4 m²,完全随机排列,4

次重复。该研究以 2001~2008 年的时段为研究对象,根据作物轮作制度的要求,种植大豆的年份有 2001、2004、2006 和 2008 年。化学肥料作为基肥播种时施入,有机肥(腐熟猪粪)在前一年秋天翻地时施入。将大豆的生长期划分为 4 个阶段,即播种-出苗期,出苗期-花期,开花期-鼓粒期,鼓粒期-成熟期。

1.3 测定项目与方法

分别在大豆的初花期,盛花期,结荚期和鼓粒期取样并测定其株高和生物量。株高采用直尺进行测量,植株地上生物量在烘箱内首先 105℃ 杀青 30 min,然后再将烘箱温度调至 80℃,烘至恒重。大豆成熟以后每个小区取 2 m²,进行测产,然后折算为公顷产量。

在作物生育期间(5~10 月),每 5 d 用中子仪(CNC503DR,中国)测定土壤体积含水量,土层依次为 10、20、30、40、50、70、90、110、130、150 和 170 cm。根据韩晓增等^[1]对海伦地区黑土农田水分动态特征的研究,作物耗水量的计算采用如下公式:

$$ET = P \pm \Delta W \quad (1)$$

式中, ΔW 为观测期始、末土体储水量的差值(mm); P 为降水量(mm); ET 为耗水量(mm)。根据王会肖等^[12]对作物水分利用效率的研究和研究区域的农田水分特征,该地区水分利用效率的计算可以采用如下公式:

$$WUE = GY/ET = GY/(P - \Delta W) \quad (2)$$

式中, GY 为产量(kg·hm⁻²)。大豆耗水强度的计算可以采用如下公式:

$$WCR = ET/D \quad (3)$$

式中 WCR 为耗水强度(mm·d⁻¹), ET 为耗水量(mm), D 为大豆生育时段内的天数。耗水模数的计算可以采用如下公式:

$$WCM = 100 \times ET_i/ET_w \quad (4)$$

式中 WCM 是耗水模数(%), ET_i 是大豆某一生育时期的耗水量(mm), ET_w 为大豆全生育时期耗水量(mm)。土壤供水量的计算采用如下公式:

$$SWS = SW_i - SW_{i+1} \quad (5)$$

式中 SWS 为土壤供水量(mm), SW_i 为大豆某一生育时期开始时的土壤储水量(mm), SW_{i+1} 为大豆相应生育时期末期时的土壤储水量(mm)。

气象数据来自于中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站内的气象观测场。

1.4 数据分析

采用 SPSS 13.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 试验年份大气降水特征

1958~2008年间大气降水的月平均值见图1, 大气降水在年内呈单峰曲线分布, 即大气降水集中在作物生长季的5~9月。1958~2008年间全年大气降水的平均值为538 mm, 其中87.7%发生

在作物生长季内。试验年份2008、2006、2004和2001年的年内降水分布与多年(1958~2008)降水分布相似。2008、2006、2004和2001年的年降水量分别是531、589、308和276 mm, 根据乔樵等^[12]对东北黑土区降水年型的划分, 与1958~2008年的年平均降水量相比, 2008年属于平水年, 2006年属于丰水年, 2004和2001年均属于苦水年。

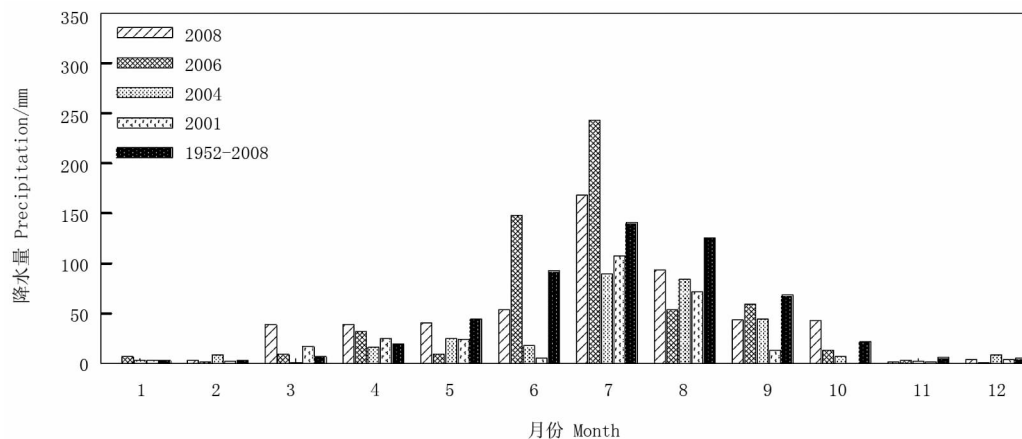


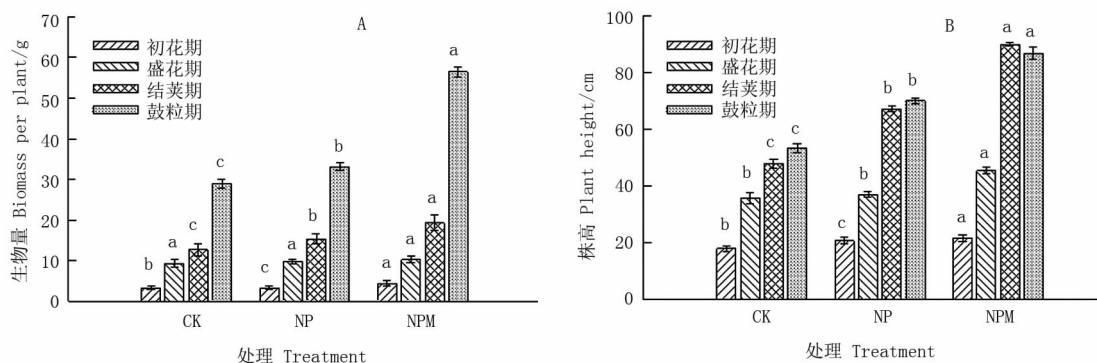
图1 试验年份内大气降水分布

Fig. 1 The distribution of precipitation in observation year

2.2 不同施肥管理对大豆的生物量和株高的影响

由图2A可知, 与CK相比, 在初花期、盛花期、结荚期和鼓粒期, NP的生物量分别增加了2.59%, 3.82%, 20.75%和14.53%, NPM的生物量分别增加了36.61%, 9.61%, 52.75%和95.39%。方差分析结果显示大豆的盛花期, CK、NP和NPM对生物量影响的差异不显著($P > 0.05$), 随着大豆生育时期的推进到了大豆结荚期和鼓粒期, 与CK相比, NP和NPM显著增加了大豆生物量($P < 0.05$)。说明肥料的施用能够显著地促进大豆个体的生长发育。

不同施肥管理方式影响了大豆不同生育时期的株高(图2B)。与CK相比, 在初花期、盛花期、结荚期和鼓粒期, NP的株高分别增加了14.81%, 3.74%, 40.56%和31.25%, 而NPM的株高分别增加了20.37%, 27.10%, 88.11%和62.50%。方差分析结果显示在大豆的盛花期NPM株高显著高于NP, 但是NP与CK之间差异不显著, 而在大豆的结荚期和鼓粒期各处理之间差异均达显著水平($P < 0.05$)。说明有机肥的施用在大豆生长中后期对株高起到了显著的促进作用。



图中数据为4 a 平均值; 柱形图中同一生育时期不同小写字母代表大豆的生物量或者株高在0.05水平上差异显著。

Values are the average of 2008, 2006, 2004 and 2001; Different letters of the same growth stage are significantly different at 0.05 probability level.

图2 不同施肥管理方式对大豆生物量和株高的影响

Fig 2 Effect of different fertilization treatments on biomass and plant height of soybean

2.3 大豆生育时期耗水特征

经过对 4 a 大豆耗水特征的分析得到东北黑土区大豆全生育时期的平均耗水强度为 2.84 mm·d⁻¹ (表 1)。从每个处理耗水强度的 4 a 平均值分析得

到,大豆的耗水强度最大时期在开花-鼓粒期,CK、NP 和 NPM 分别为 3.92、3.89 和 3.73 mm·d⁻¹,该时期大豆处于由营养生长向生殖生长过渡阶段,光合作用、呼吸作用和物质运输转化都迅速达到高

表 1 不同施肥管理方式下大豆耗水特征

Table 1 The characteristics of water consumption of soybean under different fertilization treatments							
年份 Years	项目 Items	处理 Treatments	播种-出苗期 Sowing-Seedling	出苗-开花期 Seedling-Flowering	开花-鼓粒期 Flowering-Podding	鼓粒-成熟期 Podding-Maturity	全生育期 Whole period
2001	耗水量 ET/mm	CK	45.70 ± 3.15 a	30.46 ± 3.60 b	162.83 ± 3.87 b	57.91 ± 2.43 b	296.90 ± 5.49 b
		NP	34.70 ± 5.81 b	43.63 ± 2.74 a	171.80 ± 2.30 a	53.46 ± 2.09 b	303.59 ± 2.71 b
		NPM	44.79 ± 3.18 a	30.97 ± 2.93 b	154.96 ± 3.56 c	81.47 ± 3.85 a	312.19 ± 8.12 a
	耗水强度 WCR/mm·d ⁻¹	CK	2.69 ± 0.49 a	1.02 ± 0.12 b	2.86 ± 0.07 b	1.61 ± 0.07 b	2.12 ± 0.04 b
		NP	2.04 ± 0.34 b	1.45 ± 0.09 a	3.01 ± 0.04 a	1.48 ± 0.06 b	2.17 ± 0.02 b
		NPM	2.63 ± 0.19 a	1.03 ± 0.10 b	2.72 ± 0.06 c	2.26 ± 0.11 a	2.23 ± 0.03 a
	耗水模数 WCM/%	CK	15.39	10.26	54.84	19.50	—
		NP	11.43	14.37	56.59	17.61	—
		NPM	14.35	9.92	49.64	26.10	—
2004	耗水量 ET/mm	CK	13.88 ± 2.45 c	56.47 ± 2.20 a	192.53 ± 2.25 a	80.33 ± 2.14 a	343.20 ± 0.44 b
		NP	19.57 ± 1.18 b	52.29 ± 1.69 a	193.87 ± 3.34 a	81.01 ± 1.81 a	346.74 ± 1.60 b
		NPM	27.81 ± 1.46 a	53.09 ± 5.76 a	194.93 ± 4.21 a	80.11 ± 1.64 a	355.95 ± 7.20 a
	耗水强度 WCR/mm·d ⁻¹	CK	0.82 ± 0.14 c	1.88 ± 0.07 a	3.38 ± 0.04 a	2.23 ± 0.06 a	2.45 ± 0.003 b
		NP	1.15 ± 0.07 b	1.74 ± 0.06 a	3.40 ± 0.06 a	2.25 ± 0.05 a	2.48 ± 0.01 b
		NPM	1.64 ± 0.09 a	1.77 ± 0.19 a	3.42 ± 0.07 a	2.23 ± 0.05 a	2.54 ± 0.03 a
	耗水模数 WCM/%	CK	4.04	16.45	56.10	23.40	—
		NP	5.64	15.08	55.91	23.36	—
		NPM	7.81	14.91	54.76	22.51	—
2006	耗水量 ET/mm	CK	18.58 ± 2.17 a	95.74 ± 1.65 b	279.06 ± 2.36 a	142.65 ± 2.06 a	536.03 ± 5.73 a
		NP	19.73 ± 1.67 a	98.20 ± 1.48 b	278.58 ± 1.16 a	142.46 ± 3.01 a	538.96 ± 4.67 a
		NPM	20.97 ± 3.08 a	102.71 ± 2.54 a	272.01 ± 2.26 b	145.70 ± 2.85 a	541.39 ± 5.52 a
	耗水强度 WCR/mm·d ⁻¹	CK	1.09 ± 0.13 a	3.19 ± 0.05 b	4.90 ± 0.04 a	3.96 ± 0.06 a	3.83 ± 0.04 a
		NP	1.16 ± 0.10 a	3.27 ± 0.05 b	4.89 ± 0.02 a	3.96 ± 0.08 a	3.85 ± 0.03 a
		NPM	1.23 ± 0.18 a	3.42 ± 0.08 a	4.77 ± 0.04 b	4.05 ± 0.08 a	3.87 ± 0.04 a
	耗水模数 WCM/%	CK	3.47	17.86	52.06	26.61	—
		NP	3.66	18.22	51.69	26.43	—
		NPM	3.87	18.97	50.24	26.91	—
2008	耗水量 ET/mm	CK	35.51 ± 1.68 a	68.27 ± 2.14 b	258.74 ± 2.23 a	37.30 ± 2.47 c	399.82 ± 2.17 a
		NP	40.96 ± 1.31 a	71.33 ± 197 ab	243.26 ± 3.19 b	45.10 ± 1.95 b	400.64 ± 2.49 a
		NPM	34.62 ± 1.83 a	73.05 ± 2.74 a	227.73 ± 3.72 c	65.91 ± 2.14 a	401.30 ± 3.34 a
	耗水强度 WCR/mm·d ⁻¹	CK	2.09 ± 0.10 a	2.28 ± 0.07 b	4.54 ± 0.04 a	1.04 ± 0.07 c	2.86 ± 0.02 a
		NP	2.41 ± 0.08 a	2.38 ± 0.07 ab	4.27 ± 0.06 b	1.25 ± 0.05 b	2.86 ± 0.02 a
		NPM	2.04 ± 0.11 a	2.44 ± 0.09 a	4.00 ± 0.07 c	1.83 ± 0.06 a	2.87 ± 0.02 a
	耗水模数 WCM/%	CK	8.88	17.07	64.71	9.33	—
		NP	10.22	17.80	60.72	11.26	—
		NPM	8.63	18.20	56.75	16.42	—

同列的不同小写字母代表各处理在 ($P < 0.05$) 的水平上差异显著。下同。

ET,WCR and WCM represented water consumption,water consumption rate and water consumption model,respectively; Values in the same column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level. The same below.

峰,同时也是产量形成的关键时期,耗水模数为49.64%~64.71%。其次是鼓粒-成熟期,CK、NP和NPM 4 a 平均耗水强度分别为2.21、2.24和2.59 mm·d⁻¹,此阶段是大豆籽粒形成的关键时期,大豆生长发育情况决定了每荚粒数、百粒重、蛋白质和脂肪的含量,此时大豆耗水特征为生理耗水和生态耗水同时存在,耗水模数为12.23%~26.03%。出苗-开花期,大豆处于营养生长时期,生长旺盛,对水分需求较大,CK、NP和NPM 4 a 平均耗水强度分别为2.09、2.21和2.17 mm·d⁻¹,耗水模数为10.96%~17.69%。播种-出苗期,地表覆盖度较小,大部分土壤处于裸露状态,CK、NP和NPM 4 a 平均耗水强度分别为1.67、1.69和1.88 mm·d⁻¹,耗水模数为4.07%~13.72%。

从整个生育期的耗水量来看(4 a 平均值),与CK相比,NP和NPM的耗水量分别增加了0.92%和2.21%。施肥增加大豆耗水量在降水较少的年份表现比较显著,在2001和2004年有机肥的施用均显著增加大豆的耗水量。

大豆不同生育时期的耗水规律受生育时期内降水分配的影响较大。对大豆不同生育阶段耗水量和耗水强度与时段降水量做相关性分析(图3),结果不同时段耗水量与降水量呈极显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.96$),耗水强度与降水量呈显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.86$),说明降水的多少和降水的分配显著地影响了大豆的耗水量和耗水强度。

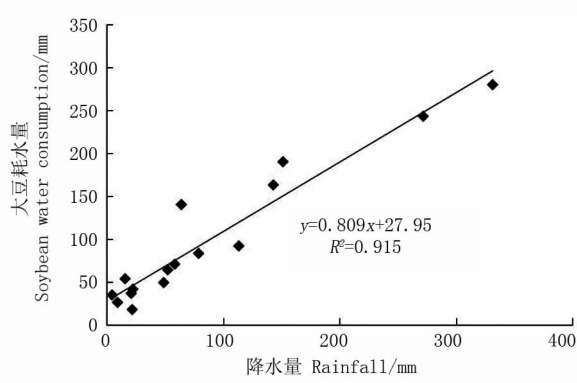


图3 大豆耗水量、耗水强度与降水量的相关性分析

Fig. 3 The relationship between both soybean water consumption and soybean water consumption rate, and rainfall during growing seasons

2.4 大豆不同生育时期土壤供水特征

如表2所示,在降水较少的年份或大豆生长的某个生育时期降水缺乏,土壤将供给储存的水分为大豆吸收利用。不同处理在相同年份内表现出了相似的土壤供水特征。在丰水年(2006),虽然全生育期降水量为591 mm,但只有9.5 mm降水发生在播种-出苗阶段,远远没有满足大豆此阶段对水分的需求,土壤提供“土壤水库”中的水分以满足此阶段大豆出苗和生长对水分的需求,表现在播种-出苗阶段CK、NP和NPM的土壤的供水量分别为9.08、10.23和11.47 mm,占阶段耗水量比例分别为48.87%、51.84%和54.70%;出苗-鼓粒阶段的降雨量占全生育期降水量的85.77%,能够满足此阶段大豆对水分的需求,盈余的降水储存在土壤中供大豆继续生长利用;到了鼓粒-成熟期,由于前期土壤含水量较高,土壤中的水分被大量消耗。在平水年(2008),全生育降水量为400 mm,但是68.7%的降水发生在开花-鼓粒期,导致大豆在生长发育前期降水不足,例如在播种-出苗阶段CK、NP和NPM土壤供水量占耗水量的比例分别为40.02%、47.99%和38.47%。而在枯水年(2001和2004),除了在2004年播种-出苗阶段降水量基本满足大豆耗水需求以外,在2001年大豆全生育期和2004年的出苗-成熟阶段土壤供水在大豆的耗水中均占有一定的比例。例如在2001年大豆出苗-开花的关键阶段,田间水分消耗的84%~89%以上来自于土壤供水,在2004年大豆出苗-开花阶段土壤供水量占田间耗水的比例也达到了69%以上。

在东北黑土区大豆生育前期降水缺乏,在观测的4 a内播种-出苗阶段降水平均缺乏量为11.9 mm,在出苗-开花阶段降水平均缺乏量为14.77 mm,而在大豆开花以后降水相对集中,土壤水分略有盈余,降水缺乏最多的是在鼓粒-成熟期,平均降水缺乏量为45.19 mm。肥料的施用能够增加土壤的供水量(表2),特别是在降水最为缺乏的鼓粒-成熟期,用以缓解降水缺乏对大豆生长的限制。从4 a土壤供水量的平均值分析,与CK相比,NP和NPM土壤供水量分别增加了11.72%和23.48%。

2.5 水分利用效率

不同的施肥管理方式和降水年型均对大豆的水分利用效率均具有一定的影响(图4)。化肥和有机肥的施用提高了大豆的水分利用效率。从4a的平均值分析,与CK相比,NP和NPM大豆水分利用效率分别提高了7.25%和34.63%。方差结果显示有机肥的施用显著提高了大豆的水分利用效率,而除2004年外,化肥处理和无肥处理之间的差异并不

显著。在不同的降水年型下大豆的水分利用效率差异较大,总体上表现为丰水年大豆的水分利用效率要明显小于平水年和枯水年。在丰水年(2006年)大豆水分利用效率为 $3.03\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ (3个处理的平均值,下同),而在平水年(2008年)大豆的水分利用效率提高到 $5.50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,在干旱年份(2004年)大豆的水分利用效率达到了最大值($6.30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)。

表2 不同施肥管理方式下种植大豆土壤供水特征

Table 2 The characteristics of soil water supply in soybean planted under different fertilization treatments

年份	项目	处理	播种-出苗期	出苗-开花期	开花-鼓粒期	鼓粒-成熟期	全生育期	
Years	Items	Treatments	Sowing-Seedling	Seedling-Flowering	Flowering-Podding	Podding-Maturity	Whole period	
2001	阶段降水 Rainfall/mm	—	22.70	4.80	143.20	52.60	223.30	
	土壤供水 SWS/mm	CK	−23.00 ± 3.15 b	−25.66 ± 3.60 a	−19.63 ± 3.88 b	−5.31 ± 2.42 a	−73.60 ± 5.49 a	
		NP	−12.00 ± 5.81 a	−38.83 ± 2.74 b	−28.60 ± 2.30 c	−0.86 ± 2.08 a	−80.29 ± 2.71 a	
		NPM	−22.09 ± 3.18 b	−26.17 ± 2.93 a	−11.757 ± 3.56 a	−28.87 ± 3.85 b	−88.89 ± 5.67 b	
	土壤供水/耗水 SWS/ET/%	CK	−50.33	−84.24	−12.06	−9.17	−24.79	
		NP	−34.58	−89.00	−16.65	−1.60	−26.45	
		NPM	−49.32	−84.50	−7.59	−35.44	−28.47	
	2004	阶段降水 Rainfall/mm	—	22.15	16.00	151.45	79.10	268.70
		土壤供水 SWS/mm	CK	8.27 ± 2.45 a	−40.47 ± 2.20 a	−41.08 ± 2.25 a	−1.23 ± 2.13 a	−74.50 ± 0.43 a
NP			2.58 ± 1.18 b	−36.29 ± 1.69 a	−42.42 ± 3.34 a	−1.91 ± 1.81 a	−78.04 ± 1.59 a	
NPM			−5.66 ± 1.50 c	−37.09 ± 5.76 a	−43.48 ± 4.21 a	−1.01 ± 1.79 a	−87.25 ± 4.92 b	
土壤供水/耗水 SWS/ET/%		CK	—	−71.67	−21.34	−1.53	−21.71	
		NP	—	−69.40	−21.88	−2.35	−22.51	
		NPM	−20.36	−69.86	−22.31	−1.27	−24.51	
2006		阶段降水 Rainfall/mm	—	9.50	113.60	331.40	64.30	518.80
		土壤供水 SWS/mm	CK	−9.08 ± 2.17 a	17.86 ± 1.65 a	52.34 ± 2.36 b	−78.35 ± 2.06 a	−17.23 ± 5.73 a
	NP		−10.23 ± 1.69 a	15.40 ± 1.48 a	52.82 ± 1.16 b	−78.16 ± 3.01 a	−20.16 ± 4.67 a	
	NPM		−11.47 ± 3.08 a	10.89 ± 2.54 b	59.39 ± 2.26 a	−81.40 ± 2.85 a	−22.59 ± 5.52 a	
	土壤供水/耗水 SWS/ET/%	CK	−48.87	—	—	−54.92	−3.21	
		NP	−51.84	—	—	−54.86	−3.74	
		NPM	−54.70	—	—	−55.87	−4.17	
	2008	阶段降水 Rainfall/mm	—	21.30	58.60	271.80	49.15	400.85
		土壤供水 SWS/mm	CK	−14.21 ± 1.68 a	−9.67 ± 2.14 a	13.06 ± 2.23 c	11.85 ± 2.47 a	1.03 ± 2.16 a
NP			−12.66 ± 1.31 a	−12.73 ± 1.97 ab	28.65 ± 3.19 b	−3.05 ± 1.95 b	0.21 ± 2.49 a	
NPM			−13.32 ± 1.82 a	−14.45 ± 2.74 b	44.07 ± 3.72 a	−16.76 ± 2.14 c	−0.45 ± 3.34 a	
土壤供水/耗水 SWS/ET/%		CK	−40.02	−14.16	—	—	—	
		NP	−47.99	−17.84	—	−6.76	—	
		NPM	−38.47	−19.78	—	−25.43	−0.11	

表中 SWS 代表土壤供水量,SWS/ET 代表土壤供水量与耗水量的比值。同一年份处理间不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著。

SWS and SWS/ET represented soil water supply and soil water supply/water consumption, respectively.

Treatments in the same year with different small letters indicate significant difference at 0.05 probability level.

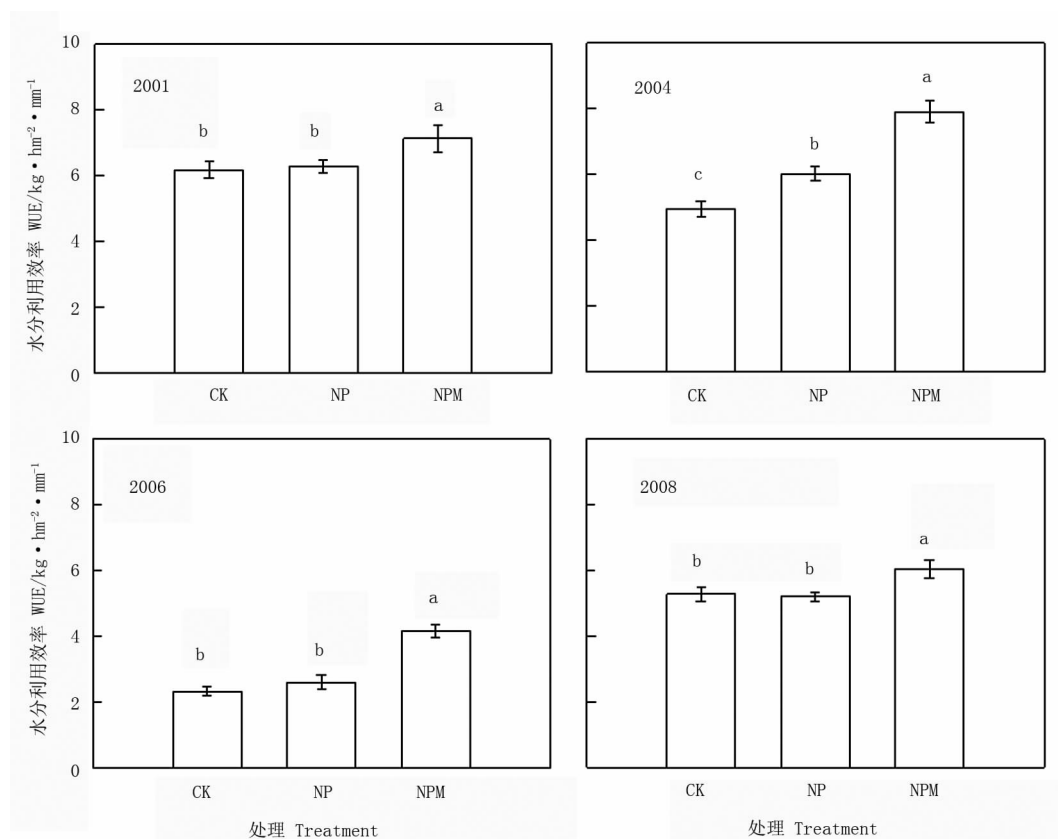


图4 不同施肥管理方式对大豆水分利用效率的影响

Fig. 4 Effect of different fertilization treatments on water use efficiency of soybean

3 结论与讨论

水分和养分是影响大豆生长发育的2个重要因子,它们之间的关系比较复杂,并具有协同效应。增水能够增加肥料的增产效应,增肥能够增加水分的增产效应。在降水一定的情况下,肥料的施用增加了大豆的株高和生物量,各处理之间的差异在大豆结荚期和鼓粒期达到了显著水平。

东北黑土区是“雨养农业”,大气降水是土壤水分的主要来源,但是大气降水在作物生长季内的分布不均是导致土壤水分出现季节性缺乏的主要原因^[13-14]。施肥可以缓解干旱胁迫对作物生长的影响,化肥和有机肥施用可以明显提高植物水势,植物水分有效性相应增加^[15]。在研究区域内干旱年份肥料,特别是有机肥的施用能够通过促进作物对土壤水分的吸收利用来缓解干旱的影响^[11]。在该研究中肥料的施用增加了大豆的耗水量,大豆消耗的水分除了降水以外,“土壤水库”水分的供应也是一个重要来源。研究发现在大豆生长发育期间降水最为缺乏的时期是鼓粒-成熟期,其次是出苗-开

花阶段和播种-出苗阶段,而在大豆开花阶段,降水略显盈余。在不同降水年型的降水缺乏时期,肥料的施用通过增加大豆植株对土壤中水分的利用,即提高土壤的供水量,来缓解降水的缺乏。其中有机肥的施用在充分利用“土壤水库”中的水分方面发挥了更重要的作用。

肥料的施用可以提高作物的水分利用效率。李生秀等^[16]研究发现,在干旱条件下,施肥可以促进作物根系发育,增加根系摄取转运土壤水分的能力,扩大作物觅取水分和养分的土壤空间,进而提高作物的蒸腾量和水分利用效率。在该研究中,与无肥相比,化肥和有机肥的施用均提高了大豆的水分利用效率。不同降水年型大豆的水分利用效率总体上表现为丰水年要明显低于平水年和枯水年。因此,在干旱年份或者某个干旱时期,合理施用肥料能显著增加大豆根系对土壤中储存水分的利用,缓解降水不足给大豆生产带来的威胁,在增加大豆产量的同时,提高大豆的水分利用效率。

参考文献

- [1] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态

- 平衡特征研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(4): 252-255. (Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Research of feature of the dynamic balance on the soil moisture in farmland of black soil in Hailun district[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003, 19(4): 252-255.)
- [2] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇, 等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 199-121. (Men K, Zhang X Y, Sui Y Y, et al. The crop yield and water use efficiencies under different water and fertilizer conditions in the field of Black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 199-121.)
- [3] 裴宇峰, 韩晓增, 祖伟, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响 I. 水氮耦合对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2005, 24(2): 106-111. (Pei Y F, Han X Z, Zu W, et al. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on growth and develop of soybean I. effect of water and nitrogen fertilizer coupling on yield and quality of soybean[J]. Soybean Science, 2005, 24(2): 106-111.)
- [4] 韩晓增, 裴宇峰, 王守宇, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响 II. 水氮耦合对大豆生理特征的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(2): 103-108. (Han X Z, Pei Y F, Wang S Y, et al. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on growth and develop of soybean II. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on physiological characteristics of soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(2): 103-108.)
- [5] 闫春娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 水钾耦合对干物质积累和产量的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(6): 862-867. (Yan C J, Han X Z, Wang S Y, et al. Effect of water-potassium coupling on dry matter accumulation and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(6): 862-867.)
- [6] Sorte N V. Effect of water logging on soybean critical growth stages[J]. Journal of Soils and Crops, 1995, 5: 141-144.
- [7] 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, 22(4): 269-272. (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, 22(4): 269-272.)
- [8] 谢甫绶, 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. Influence of drought on growth and yield soybeans at different growth stages[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1994, 25(1): 13-16)
- [9] 孟凯, 隋跃宇, 张兴义. 松嫩平原黑土区农业水分供需状况分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2000, 316(3): 228-231. (Men K, Sui Y Y, Zhang X Y. Analysis of agriculture water supply and consumption in black soil region of Songnen plain[J]. System Sciences and Comprehensive in Agriculture, 2000, 16(3): 228-231.)
- [10] 李良皓, 韩晓增, 李海波, 等. 黑土区不同施肥对大豆耗水量及水分利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 601-605. (Li L H, Han X Z, Li H B, et al. Effect of different fertilizer rates on water consumption and WUE of soybean at black soil region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 601-605.)
- [11] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 干旱条件下黑土农田水分特征研究[J]. 中国农业生态学报, 2009, 17(4): 677-680. (Zou W X, Han X Z, Wang S Y, et al. Black soil field water characteristics in dry years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 677-680.)
- [12] 乔樵, 沈善敏, 周绍权. 东北北部黑土水分状况之研究 I. 黑土水分状况的基本特征及其与成土过程的关系[J]. 土壤学报, 1963, 11(2): 143-158. (Qiao Q, Shen S M, Zhou S Q. Study on soil water status of black soil in northeast China I. The characteristics of soil water of black soil and relationship with soil forming process[J]. Acta Pedologica Sinica, 1963, 11(2): 143-158.)
- [13] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水利科学研究进展, 2000, 11(1): 110-115. (Wang H X, Liu C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advance in Water Science, 2000, 11(1): 110-115.)
- [14] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇, 等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 11-14. (Men K, Zhang X Y, Sui Y Y, et al. Black soil water characteristic in Hailun, Heilongjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(1): 11-14.)
- [15] 刘思春, 张一平, 高俊凤, 等. 不同肥力水平下土壤-植物-大气连续体水势温度效应研究[J]. 西北农业学报, 1996, 5(4): 49-53. (Liu S C, Zhang Y P, Gao J F, et al. A study on the temperature effect of water potential in soil-plant-atmosphere continuum under different fertility conditions[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 1996, 5(4): 49-53.)
- [16] 李生秀, 李世君, 高亚清, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38-46. (Li S X, Li S J, Gao Y Q, et al. The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994, 12(1): 38-46.)