

黑土区不同施肥对大豆耗水量及水分利用效率的影响

李良皓^{1,2}, 韩晓增^{1,2*}, 李海波², 宋 春²

(1.东北农业大学 资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2.中国科学院 东北地理与农业生态研究所,黑龙江 哈尔滨 150081)

摘 要:在北部黑土区设计了不同的施肥处理,研究了氮磷钾不同配比对大豆耗水量和水分利用效率的影响及其相互关系。结果表明:施肥可显著提高大豆水分利用效率,在不同的肥料配比中,当满足大豆对磷钾的需求时,大豆的耗水量、水分利用效率随施氮量的增加而增加;当满足大豆对氮钾的需求时,随着施磷量的增加,大豆耗水量、水分利用效率则表现出抛物线型变化;而当满足大豆对氮磷的需求时,随着施钾量的增加,耗水量表现出抛物线型变化。耗水量与产量之间呈显著正相关关系,而水分利用效率则与产量呈极显著正相关关系。

关 键 词: 氮磷钾肥;耗水量;水分利用效率;大豆;黑土区

中图分类号: S565.101 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2009)03-0601-05

水资源亏缺是世界各国普遍面临的问题,而我国人口众多,耕地较少,水资源更加匮乏^[1]。在水资源日益紧缺的今天,我国节约用水的重点无疑应当摆在农业用水上^[2]。农业高效用水已成为当今世界关注的焦点问题,发展节水农业,是维持或提高农作物产量的重要措施。研究^[3-5]证实:作物充分利用环境水与最大限度地节约本身用水相结合是实现作物高效用水的基本途径,其本质就是提高水分利用效率。关于作物水分利用效率即作物产量和水分消耗之间的定量关系长期以来成为人们的研究热点^[6],研究的主要目的是谋求如何最有效地利用水分,即以最低限度的用水获取最大的产量或收益,这也是我国北方农业生产中的高效利用水资源,持续提高土地生产力的核心问题。

黑土区属旱作“雨养农业”区,大气降水是土壤水分的唯一来源,大气降水只有转化成土壤水分后才能被作物利用^[6]。黑土土壤水库作用很强,毛管水运移速率较慢,土壤持水能力和保水能力强。尤其是农田黑土,其上层疏松、下层紧实的土体结构有利于土壤水分储存及作物需水和土壤供水。黑土农田除少数水稻和蔬菜作物外,其它作物的灌溉面积不足万分之一。所以,以肥调水成为了黑土农田提高水分利用效率的关键。目前,有学者^[7-11]研究了黑土区不同轮作方式、不同耕作措施、不同养分水平下的作物水分利用效率,但对不同肥料配比对作物水分利用效率的影响研究较少,本文研究了在无灌溉的情况下,不同施肥处理对大豆耗水量及水分利用效率的影响,为黑土农田水分的研

究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理

试验设 6 个 N 水平,5 个 P 水平,4 个 K 水平的不完全处理,共 14 个处理,见表 1。每个处理设 4 次重复,共 56 个小区。小区面积 30m²。

表 1 试验处理及施肥量

Table 1 Experiment treatments and rates

处理编号 Treatment	施肥量 Fertilizer dosage (kg hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1、N0P0K0	0	0	0
2、N1P2K2	30	60	48
3、N2P2K2	45	60	48
4、N3P2K2	60	60	48
5、N4P2K2	75	60	48
6、N5P2K2	90	60	48
7、N2P1K2	45	30	48
8、N2P3K2	45	90	48
9、N2P4K2	45	120	48
10、N3P3K2	60	90	48
11、N2P2K0	45	60	0
12、N2P2K1	45	60	24
13、N2P2K3	45	60	72
14、N3P3K3	60	90	72

1.2 试验地点与方法

试验设在中国东北黑土区北部的黑龙江省嫩江县,地处 N 49°10',E125°16',海拔高度 267m。年平均气温 -0.5~0.5℃,最高气温 36~38℃,最低气温 -40~-44℃,≥10℃活动积温 2000~2200℃,无霜期

收稿日期:2007-12-18; 修订日期:2008-05-12
基金项目:国家重点基础研究发展计划(2005CB121103)和黑龙江省科技计划项目(GB06B107-2)资助
作者简介:李良皓(1984-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事黑土生态研究。E-mail: lilianghao1984@yahoo.com.cn
* 通讯作者:

110~120 d。年降水量 500~550 mm，主要集中在 5~8 月。供试土壤为农田黑土，土壤物理性质见表 2。供试大豆为北疆九 1 号，大豆生育期降水量为 193.4mm。

表 2 嫩江农田黑土物理性状

Table 2 Physical properties of farmland black soil in Nenjiang region					
土层深度	容重	毛管含水量	饱和含水量	田间持水量	饱和导水率
Depth	Bulk density	Capillary Water content	Saturated water content	Field capacity	Saturated hydraulic conductivity
(cm)	(g cm ⁻³)	(%)	(%)	(%)	(mm min ⁻¹)
0~14	0.96	45.79	56.52	27.03	0.3062
14~26	1.33	40.50	44.97	35.10	—
26~60	1.39	43.76	45.60	35.38	—

2007 年大豆生育期开始和大豆成熟时，测定 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~70、70~90、90~110cm 共 8 个土层的土壤水分含量，测定方法采用烘干称重法，根据结果计算大豆生育期 0~110cm 土层耗水量。

根据农田水分平衡方程，忽略地表径流(该区地势平坦，无径流)、土壤水分下渗(黑土无渗漏)和地下水的补给(该地区平均地下水埋深在 20m 以下)，该地区无灌溉，农田蒸散量的计算如下：

$$ET=P-\Delta W \tag{1}$$

式中 ET 为农田蒸散量，包括土壤表面蒸发耗水和作物蒸腾耗水，即作物耗水量(mm)，P 为降水量(mm)，ΔW 为 110cm 土层土壤水分变化量(mm)，作物水分利用效率方程：

$$WUE=Y/ET \tag{2}$$

式中，WUE 为作物水分利用效率 (kg hm⁻² mm⁻¹)，Y 为单位面积作物产量 (kg hm⁻²)。

大豆成熟后，每个小区取 2 m² 采样，进行测产，重复三次。数据用 SAS9.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对大豆耗水量的影响

如表 3 所示，由于时逢早年，大豆耗水量总体较低，较正常平水年大豆耗水量^[2]低 180 mm 左右，在不同施肥配比条件下大豆耗水量有一定变化，最高为处理 12(N2P2K1)，比无肥处理增加 5.15%；最低为处理 9(N2P4K2)，比无肥处理减少 2.41%。处理 3(N2P2K2)、处理 5(N4P2K2)、处理 7(N2P1K2)、处理 12(N2P2K1)耗水量较大，处于高耗水水平；处理 4(N3P2K2)、处理 6(N5P2K2)、处理 8(N2P3K2)、处理 10(N3P3K2)、处理 11(N2P2K0)、处理 13(N2P2K3)、处理 14(N3P3K3)耗水量适中，处于中等耗水水平；处理 1(N0P0K0)、处理 2

(N1P2K2)、处理 9(N2P4K2)耗水量较少，处于低耗水量水平。

表 3 不同 NPK 用量大豆耗水量(mm)

处理	耗水量(mm)	比无肥(%)
Treatment	Water consumption	Increasing with no fertilizer
1 N0P0K0	269.3	100.00
2 N1P2K2	269.1	99.95
3 N2P2K2	277.6	103.08
4 N3P2K2	275.4	102.27
5 N4P2K2	280.0	103.98
6 N5P2K2	277.0	102.87
7 N2P1K2	281.9	104.68
8 N2P3K2	275.1	102.16
9 N2P4K2	262.8	97.59
10 N3P3K2	276.5	102.70
11 N2P2K0	272.1	101.05
12 N2P2K1	283.1	105.15
13 N2P2K3	269.5	100.10
14 N3P3K3	275.7	102.39

通过将 14 个处理的耗水量划分成三个水平可以看出，低氮肥施入，以及过量磷肥施入大豆的耗水量均较少，施肥水平在 N3 的处理其耗水量较适中，而耗水量较多的处理，磷钾肥施入量较适中，除处理 5(N4P2K2)耗水量较多外，其它施氮量较高的处理(处理 6、处理 10、处理 14)耗水量均适中，表明耗水量与施氮量并非呈简单线性关系。

2.2 施肥和大豆耗水量的关系

2.2.1 氮肥对大豆耗水量的影响 对不同施氮处理(处理 1~6)的耗水量进行分析，得到施氮量变化对大豆耗水量的影响，结果见图 1(a)。当满足大豆对磷钾肥的需要时，大豆耗水量随施氮量的增加而增加。施氮量在 0~90kg hm⁻² 范围内，大豆耗水量呈上升趋势，但并未达到最大值。对两者进行方程拟合，得到大豆耗水量与施氮量的关系：

$$y=268.27+0.1737x-0.0007x_2 \quad (R^2=0.6858)$$

相关性达到显著水平(P<0.05)，对方程进行求导，当施氮量为 124kg hm⁻² 时，大豆耗水量达到最大值 279.0mm，但由于施氮量过高影响大豆出苗及生长，单位面积产量降低从而影响耗水量，所以 >90kg hm⁻² 的施氮量与耗水量的关系未必遵循上面所拟合的方程，此方程仅能表示施氮量 0~90kg hm⁻² 时与大豆耗水量的关系。根据方程，在此试验中，当施氮量为 90kg hm⁻²，大豆耗水量为 278.2mm。

2.2.2 磷肥对大豆耗水量的影响 对不同施磷处理(处理 1、3、7、8 和 9)的耗水量进行分析，得到施磷量变化对大豆耗水量的影响，结果见图 1(b)。当满足大豆对氮钾肥的需要时，施磷量在 0~30kg hm⁻² 范围内，大豆

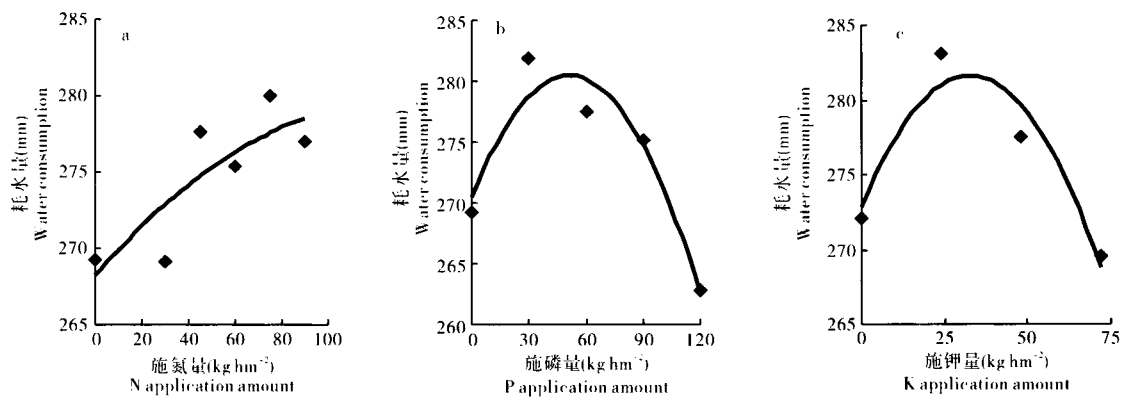


图 1 施氮量(a)、施磷量(b)、施钾量(c)与大豆耗水量的关系
Fig.1 Relationship between water consumption and N,P and K application amount

耗水量随施磷量的增加而增大,但当施磷量超过 30kg hm⁻²时,耗水量不再增大,而是随磷肥用量的继续增加而逐渐下降,这可能是因为磷素在大豆植株体内含量过高,会过度加大植株的呼吸强度,引起养分过度消耗,不利于植株正常生长,导致大豆需水量降低;另一原因可能是能量消耗过大,导致光能利用率降低,不利于干物质积累,大豆耗水量降低。大豆耗水量与施磷量的关系符合一元二次方程,进行方程拟合,得到大豆耗水量与施磷量的关系:

$y=270.41+0.3913x-0.0038x^2$ ($R^2=0.9179$)

相关性达到极显著水平($P<0.01$)。对此方程进行求导,当施磷量为 51kg hm⁻²时,大豆耗水量达到最大值 280.5 mm。

2.2.3 钾肥对大豆耗水量的影响 对处理 11、处理 12、处理 3、处理 13 的大豆耗水量进行分析,得到施钾量变化对大豆耗水量的影响,结果见图 1(c)。当满足大豆对氮磷肥的需要时,施钾量在 0~24 kg K₂O hm⁻² 范围内大豆耗水量随施钾量的增加而增加,但当施钾量超过 24 kg K₂O hm⁻²时,耗水量不再增大,而是随钾肥用量的继续增加而逐渐下降,其原因是钾可以调节气孔的开闭,保卫细胞 K⁺ 浓度高,导致渗透压增高,气孔随之张开,增强光合作用,同时也增强了蒸腾作用,进行方程拟合,得到大豆耗水量与施钾量的关系:

$y=272.81+0.5405x-0.0083x^2$ ($R^2=0.9092$)

相关性达到显著水平 ($P<0.05$)。对此方程进行求导,当施钾量为 32kg hm⁻² 时,大豆耗水量达到最大值 281.6mm。

2.3 施肥对大豆水分利用效率的影响

2.3.1 不同 NPK 用量大豆水分利用效率 如图 2 所示,由于时逢早年,大豆水分利用效率总体较往年高。处理 14(N3P3K3)、处理 8(N2P3K2)水分利用效率明显高于其它处理,其中最高的为处理 14,表明在 NPK 施

用量均较高时,能够得到较高的水分利用效率;处理 1(N0P0K0)、处理 2(N1P2K2)、处理 7(N2P1K2)、处理 11(N2P2K0)水分利用效率较低,其中处理 1(无肥)最低,表明施肥均提高了大豆的水分利用效率。对不同施肥配比下大豆水分利用效率进行差异显著性分析,发现处理 14 与处理 1、处理 2、处理 7、处理 11 的差异达显著水平($P<0.05$);处理 8 与处理 1、处理 7 水分利用效率达显著水平。

施肥增加大豆水分利用效率 11.89%~45.97%,变异幅度较大,这表明不同施肥用量对大豆水分利用效率影响较大。

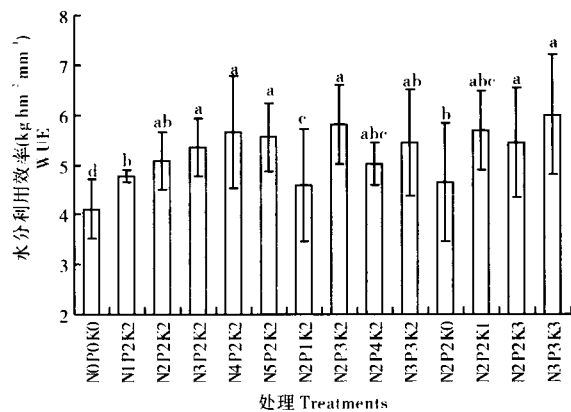


图 2 不同 NPK 用量大豆水分利用效率
Fig.2 Effect of different N, P and K rates on WUE of soybean

2.3.2 氮肥对大豆水分利用效率的影响 对不同施氮处理(处理 1~6)的大豆水分利用效率进行分析,得到施氮量变化对大豆水分利用效率的影响,结果见图 3(a),当满足大豆对磷钾肥的需要时,水分利用效率在一定范围内随施氮量的增加而增加。施氮量从 0 增至 90kg hm⁻²时,水分利用效率上升,并未达到最大值。对两者进行方程拟合,得到水分利用效率与施氮量的关系:

$y=4.0816+0.0285x-0.001x^2$ ($R^2=0.9807$)

相关性达到极显著水平 ($P<0.01$),对方程进行求

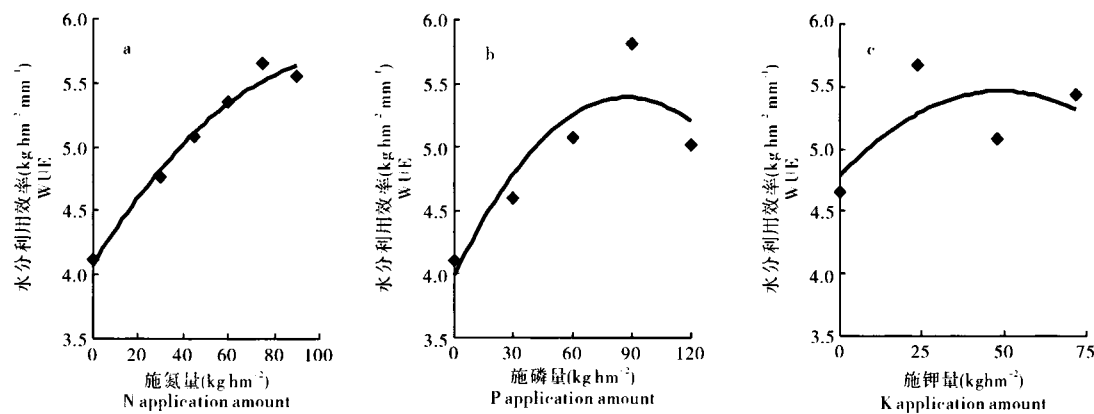


图 3 施氮量(a)、施磷量(b)和施钾量(c)与水分利用效率的关系
Fig.3 Relationship between WUE and N,P and K application amount

导,当施氮量为 142kg hm⁻²时,水分利用效率达到最大值 6.11kg hm⁻² mm⁻¹,>90kg hm⁻²的施氮量与水分利用效率的关系并不遵循上面所拟合的方程,此方程仅能表示施氮量 0~90kg hm⁻²时与水分利用效率的关系。根据方程,在此试验中,当施氮量为 90kg hm⁻²时,水分利用效率为 5.84kg hm⁻² mm⁻¹。

2.3.3 磷肥对大豆水分利用效率的影响 对不同施磷处理(处理 1、3、7、8 和 9)的大豆水分利用效率进行分析,得到施磷量变化对大豆水分利用效率的影响,结果见图 3(b)。当满足大豆对氮钾肥的需要时,大豆水分利用效率随施磷量的变化而变化。施磷量在 0~90kg hm⁻²范围内,大豆水分利用效率随施磷量的增加而增大,而当施磷量超过 90kg hm⁻²时,水分利用效率则随磷肥用量的继续增加而逐渐下降。对方程进行拟合,得到大豆水分利用效率与施磷量的关系:

$$Y=3.9885+0.032x-0.0002x^2 \quad (R^2=0.817)$$

相关性达到显著水平 ($P<0.05$)。对此方程进行求导,当施磷量为 80kg hm⁻²时,水分利用效率达到最大值 5.27kg hm⁻² mm⁻¹。

2.3.4 钾肥对大豆水分利用效率的影响 对不同施钾处理(处理 11、12、3 和 13)的大豆水分利用效率进行分析,如图 3(c)所示,在满足大豆氮磷肥需求的情况下,施用钾肥能够增加大豆水分利用效率。相对而言,本试验中处理 12 的 K1 水平水分利用效率最高,比处理 11 增加了 22.1%。水分利用效率与施钾量相关性并未达到显著水平。

2.4 产量和耗水量和水分利用效率的关系

2.4.1 产量和耗水量的关系 对各处理大豆耗水量与产量进行分析,结果见图 4(a),大豆产量与耗水量的关系符合一元二次回归方程:

$$y=-44539+321.7x-0.5618x^2 \quad (R^2=0.2971)$$

相关性达到显著水平 ($P<0.05$),对此方程进行求导,当

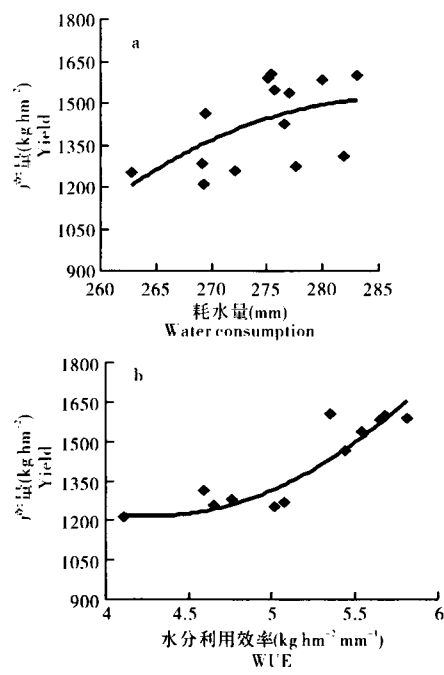


图 4 耗水量(a)、水分利用效率(b)与大豆产量的关系
Fig.4 Relationship between yield of soybean and water consumption and WUE

耗水量为 286.3mm 时,产量达到最大值 1514.3kg hm⁻²。这与吉林省农业科学院土壤肥料耕作栽培研究所的研究^[12]结果相一致,即田间耗水量增加,产量相应增加。由图 1 可知,通过本肥料试验,耗水量最大能够达到 281.6mm,此时产量为 1501.8kg hm⁻²。

2.4.2 产量和水分利用效率的关系 对不同施肥处理大豆的产量与水分利用效率进行分析,结果见图 4(b),大豆产量与水分利用效率呈极显著正相关 ($R^2=0.8345, P<0.01$),获得最大产量同时水分利用效率也最大。

3 小结

在大田条件下,作物田间耗水量和产量受许多因素的影响,因而作物产量、耗水量和水分利用效率之间并不呈简单的线性关系。

(1)自然降水条件下黑土区不同施肥处理对大豆水分利用起调节作用,施肥能够提高水分利用效率。在 $0\sim 90\text{kg hm}^{-2}$ 施氮量的范围内,当满足磷钾的需求时,耗水量和水分利用效率均随施氮量的增加而增加;当满足氮钾的需求时,施磷量与耗水量、水分利用效率关系均呈一元二次方程,施磷量为 51kg hm^{-2} 时耗水量最大,而当施磷量为 80kg hm^{-2} 时,则水分利用效率最大,耗水量先于水分利用效率达到最大值;当满足氮磷的需求时,施钾量与耗水量关系呈一元二次方程,施钾量为 32kg hm^{-2} 时耗水量最大。

(2)在本试验各个施肥处理中, N3P3K3 处理水分利用效率最大,而耗水量适中,对农业高效用水起到积极作用。

(3)耗水量与产量呈显著正相关。而水分利用效率与产量则呈极显著正相关,产量与水分利用效率可同时达到最大。

参考文献:

[1] 高明,王子芳,魏朝富等.重庆水资源的农业利用及节水农业的发

展对策[J].西南农业大学学报(自然科学版),2004,26(6):727-734.

[2] 吴大付,杨文平.提高作物水分利用率的探讨[J].河南科技学院学报(自然科学版),2005,33(2):1-3.

[3] 张正斌,徐萍,董宝娣,等.水分利用效率—未来农业研究的关键问题[J].世界科技研究与发展,2005,27(1):52-61.

[4] 高延军,张喜英,陈素英,等.冬小麦品种间水分利用效率的差异及其影响因子分析[J].灌溉排水学报,2004,23(5):45-49.

[5] 段爱旺.水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J].灌溉排水学报,2005,24(1):8-11.

[6] 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.

[7] 周有才,赵洪书.松嫩平原土壤水分动态研究[J].土壤学报,1979,16(3):302-305.

[8] 王建国著.松嫩平原农业生态系统研究[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1996.

[9] 孟凯,张兴义,隋跃宇.农田黑土水分调节能力分析[J].中国生态农业学报,2001,9(1):46-48.

[10] 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):199-201.

[11] 孟凯,张兴义.东北黑土区作物水分利用效率的研究[J].生态农业研究,1999,7(2):32-35.

[12] 董钻著.大豆产量生理[M].北京:中国农业出版社,2000.

Effect of Different Fertilizer Rates on Water Consumption and WUE of Soybean at Black Soil Region

LI Liang-hao¹, HAN Xiao-zeng^{1,2*}, LI Hai-bo², SONG Chun²

(1. College of Resource & Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin, 150030, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, 150081, China.)

Abstract: An experiment with different NPK dosages was performed on the black soil aiming to study the effect on water consumption and water use efficiency (WUE) of soybean. The results showed that fertilizer application could significantly increase WUE of soybean. Of all the treatments adopted, when P and K fertilizers met needs, water consumption and WUE increased with the N fertilizer increasing. In contrast, when N and K fertilizers met needs the amount of P fertilizer showed a parabolic relationship with water consumption and WUE. And when N and P fertilizers met needs K fertilizer showed a parabolic relationship with water consumption. In addition, significantly positive correlations were observed between water consumption and yield of soybean, and between WUE and the yield.

Key words: Fertilizer N,P and K; Water consumption; Water use efficiency; Soybean; Black soil region