

水氮耦合对油菜生长及氮肥利用效率的影响

张 赛, 王龙昌, 陈 娇, 石 超

(西南大学农学与生物科技学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400716)

摘 要:在油菜种植主产区, 定量研究了不同水分管理和氮素施入对油菜生长和氮肥利用的影响, 为油菜高产高效生产科学施肥提供理论依据。于2015—2017年度在重庆西南大学日光温室开展油菜水肥耦合效应盆栽试验, 比较高水 W1(90%田间持水量)、中水 W2(70%田间持水量)、低水 W3(50%田间持水量)三个水分梯度和高氮 N1(150%常规施氮量)、中氮 N2(100%常规施氮量)、低氮 N3(50%常规施氮量)三个氮肥水平共9个处理对油菜产量、生长性状、氮素吸收和氮肥利用率的影响。结果表明:油菜株高、茎粗、叶片数、有效分枝数对水分因素不敏感, 主要受氮素影响。本试验中当土壤含水量达到田间最大持水量的90%, 施氮量才对根系形态特征指标、根系干物质质量产生影响。水氮因素对土壤的全氮含量影响不显著, 主要影响作物的全氮含量, 作物氮含量随着施氮量的增加而增加, 随着土壤含水量的增加则呈下降趋势;油菜产量在不同施氮水平下差异不显著, 随着土壤含水量的增加呈增加趋势。氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理利用率均随着施氮量的减少而增加, 同一施氮水平下随着土壤含水量的增加而增加。综合考虑, 本研究中最优水氮组合为 W1N3, 即灌水水平控制在田间持水量的90%、施氮量为 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词:油菜; 水氮耦合; 生长性状; 氮素吸收; 氮肥利用率

中图分类号:S634.3 **文献标志码:**A

Effect of coupled irrigation and nitrogen on growth and nitrogen use efficiency of rapeseed

ZHANG Sai, WANG Longchang, CHEN Jiao, SHI Chao

(College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400716, China)

Abstract: In main rapeseed growing regions, the effects of different water management and nitrogen (N) application on growth and N utilization of brassica napus was studied in order to provide theoretical basis for scientific fertilization of rapeseed for high yield and efficiency. A pot experiment on coupled effect of water and fertilizer of rapeseed in solar greenhouse of Southwest University in Chongqing in 2015–2017. The yield, growth characters, N uptake, and N utilization of rapeseed were compared with treatments of three water and three N fertilizer levels. The results showed that the plant height, stem thickness, leaf number, and effective branching number were not sensitive to moisture factors, but were significantly affected by N. When soil moisture reached a high level of 90% of field water capacity, nitrogen only affected the characteristics of root morphology and the quality of root. The more N applied, the more aboveground and underground dry matter accumulated in a certain range, but after the application of a certain amount of N fertilizer these indicators showed a decrease. The effects of water and nitrogen on the total N content of soil was not significant. The N content of crops increased with the increase in nitrogen application, but decreased with the increase in soil water content. The yield of *Brassica napus* showed no significant difference with different N application levels, and increased with the increase of soil water content. The apparent utiliza-

收稿日期:2018-12-11

修回日期:2019-10-31

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503127);国家自然科学基金项目(31271673, 31700364, 31871583);西南大学博士基金项目(SWU116073)

作者简介:张赛(1987-), 山西运城人, 讲师, 博士, 研究方向为农业生态与可持续发展。E-mail:532875132@qq.com

通信作者:王龙昌, 教授, 博士研究生导师, 主要从事农业生态与可持续发展研究。E-mail:wanglec2003@163.com

tion rate of N fertilizer, partial productivity of N fertilizer, agronomic efficiency of N fertilizer, and physiological utilization of N fertilizer increased with the decrease in N application, and with the increase in soil water content at the same N application level. In this study, the optimal combination of water and N was W1N3; the irrigation level controlled 90 % of the water in the field and the N application rate was $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: rapeseed; irrigation and nitrogen coupling; growth traits; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency

据统计,全国 2013 年化肥施用量 5 912 万 t(折纯),农作物每 666.7 m^2 化肥用量 21.9 kg,而世界平均水平仅仅只有 8 kg,中国是美国的 2.6 倍,是欧盟的 2.5 倍;当季氮肥利用率只有 30%~35%,而美欧可以达到 50%~60%。科学施肥是保证作物稳产高产、减少环境污染破坏的重要前提。在化肥使用量零增长行动方案等政策主导下,化肥消费量持续下降,然而由于近年来不合理施用化肥尤其是重氮肥轻磷钾肥、重化肥轻有机肥、重大量元素肥料轻中微量元素肥料的“三重三轻”做法,导致氮肥的利用率普遍不高。氮肥施入农田后的去向基本有 3 个:被作物吸收即氮肥的当季利用率、残留在土壤中以及通过不同机制和途径损失。氮肥施用量的确定应采用宏观控制与微观调节的方式^[1],即宏观控制施氮量与土壤-植株测试推荐施氮量相结合。宏观控制施氮量是指在特定地区、一定的种植制度下,施氮量应该有一个范围,这个范围对目前农户盲目过量施氮具有重要的指导意义。根据文献资料显示,西南地区油菜(*Brassica napus* L.)施氮量在 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,平均可以达到 $2\ 001 \sim 2\ 087 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量水平,地上部分干重可达 $7\ 042 \sim 7\ 422 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[2-3]。实行宏观控制施氮量对油菜生产上大面积将氮肥用量降低到适宜的范围具有重要的现实意义。同时,通过土壤-植株测试进行推荐施氮,在目前的小规模经营体系下由于各个地块的差异而引起的肥力不同,可实现氮肥的精确调控。水氮耦合是水分和氮肥相互作用、共同影响作物生长发育及氮肥利用效率的现象^[4]。国内外学者围绕水肥耦合对作物的生长进行了广泛而深入的研究并最终提出了“以肥调水、以水促肥”的观点^[5-8],但是大多数集中在地上部分^[9],缺乏对地上和地下部分的系统研

究,从土壤-作物系统整体出发研究氮素的吸收转移较为鲜见。因此,在当今倡导化肥使用量零增长大背景下,通过水氮耦合微观控制实验,探讨不同水氮组合下油菜生长及氮素吸收利用规律,为西南地区油菜栽培管理实现氮肥的精确调控提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采取盆栽方式,供试作物为油菜,供试土壤来源于西南大学教学试验农场 0~20 cm 土层(2015—2016 年度)和 2 号温室水槽内 0~20 cm 土层(2016—2017 年度),土壤类型均属于旱地紫色土,田间持水量为 31%。设置水分梯度 3 个(田间持水量的 90%、70%、50%,分别用 W1、W2、W3 表示),氮肥水平 3 个(正常施氮量的 150%、100% 和 50%,分别用 N1、N2、N3 表示),共 10 个处理,分别为 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3、CK(田间持水量的 70%+不施肥),每个处理重复 3 次。在整个试验时期,通过称重法来监测和控制水分含量。试验盆钵由 PVC 管制成,圆柱形,高 20 cm,直径 15 cm,每个盆钵装过 5 mm 筛的风干土样 4 kg,具体施肥方案如表 1,氮、磷、钾的施用量以干土计算。肥料在油菜移栽之前和土壤混匀后装盆,提前一天浇透水。每盆移栽 1 株油菜,总共 120 盆。

1.2 指标测定

在油菜苗期、蕾薹期、角果期和成熟期分别测定其株高、茎粗、地上及地下干物质积累;油菜根系生长动态变化,包括根长、根直径、根体积和根表面积等指标以及油菜植株各部位和土壤的全 N 含量。在油菜每个关键生育期取植株 3 株,从基部剪断,将

表 1 2015—2017 年油菜盆栽试验土壤基础含氮量及施肥水平

Table 1 The initial nitrogen content and fertilizer level of the soil in experiment during 2015 to 2017

年度 Year	油菜 品种 Rapeseed varieties	基础土样全氮含量 N content of basic soil samples/(g · kg ⁻¹)	施 N 量(折纯) N (putty)/(g · kg ⁻¹)			施 P 量(折纯) P (putty)/(g · kg ⁻¹)	施 K 量(折纯) K (putty)/(g · kg ⁻¹)
			高氮水平 High	中氮水平 Medium	低氮水平 Low		
2015-2016	94005	1.01	0.25(0.12)	0.16(0.08)	0.08(0.04)	0.12	0.16
2016-2017	中双 11	0.595	0.36	0.24	0.12	0.12	0.16

注:括号内的施氮量数据表示蕾薹期追肥量。

Note: The data of nitrogen application in brackets indicated the top dressing amount of rapeseed at the bud period.

全部土壤反复过 2 mm 筛,挑出根系,把挑出的根连同附着于根上的土壤用水浸泡,轻轻振荡,20 min 后过 1 mm 筛,并把筛上的根系冲洗干净。所有根系先用根系扫描仪分析,然后将作物地上部分和根系分别在 105℃ 杀青 30 min,60℃ 下烘干,称干重后缩分研磨,过 0.15 mm 筛备用。土壤风干保存备用。其中植株和土壤全氮含量采用凯氏定氮仪测定。

1.3 数据处理^[2,10]

(1) 植株氮总累积量 U ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = [根系生物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 根系氮素含量 (%) + 茎秆生物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 茎秆氮素含量 (%) + 角果皮生物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 角果皮氮素含量 (%) + 籽粒生物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 籽粒氮素含量 (%)]

(2) 氮素收获指数 NHI ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 籽粒吸氮量 / 植株总吸氮量

(3) 收获指数 HI ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 籽粒产量 / 植株总产量

(4) 氮肥偏生产力 PFN = Y/F , 指单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量。

(5) 氮肥农学效率 AE_N ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = $(Y - Y_0)/F$, 指单位施氮量所增加的作物籽粒产量。

(6) 氮肥表观利用率 RE_N (%) = $(U - U_0)/F \times 100$, 反映了作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率。

(7) 氮肥生理利用率 PE_N ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = $(Y - Y_0)/(U - U_0)$, 是指作物每吸收单位肥料的氮所获得的

籽粒产量的增加量。

(8) 氮肥利用率 NUE (%) = 植株氮吸收量 / (施氮量 + 初始土壤含氮量) × 100%

(9) 增产率 (%) = $(Y - Y_0)/Y_0 \times 100$

式中, Y 表示施氮后所获得的籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), Y_0 表示不施氮条件下籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F 代表施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), U 表示施氮下作物收获期植株总吸氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), U_0 表示不施氮条件下的植株总吸氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。不同处理的油菜生长性状及全 N 含量的差异性采用一维方差分析。所有数据处理在 SPSS 17.0 和 Excel 2007 中完成统计分析与制图。

2 结果与分析

2.1 油菜生长性状与产量

2.1.1 不同水氮处理对油菜单株产量的影响 图 1 显示在盆栽试验条件下,油菜单株产量对水氮因素的响应规律在两个年度试验中表现基本一致,即随着土壤水分的增加呈增加趋势,在同一水分梯度下受施氮水平的影响差异不显著,说明水氮处理对油菜产量的影响在年度间具有较好的重演性。第二年的单株产量低于第一年的数据,究其原因可能是因为第一年油菜施肥采取的基肥+追肥方式,第二年采取一次性施肥,施肥总量虽然保持一致,但是由于肥料的有效性有限,导致两年的产量不一致。下文主要取 2015—2016 年度的数据作进一步分析。

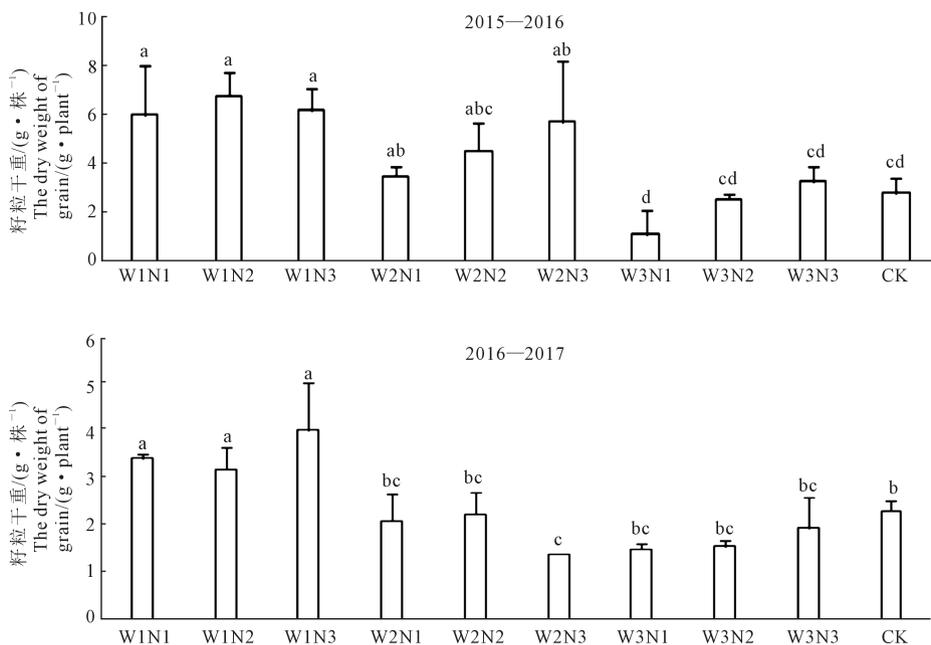


图 1 水氮耦合对油菜单株产量的影响

Fig.1 Effect of coupled irrigation and nitrogen on yield of rapeseed (*Brassica napus* L.)

与对照 CK 相比(表 2),当土壤处于中等水分条件下产量会随着施入氮肥的增加而增加,但是高、中、低氮水平的产量差异并不显著,说明此时各处理的氮肥均充足,而土壤水分是油菜增产的限制因素;再增加土壤水分含量时,增产率可以达到 114.43%~144.11%;而减少土壤水分时,高氮条件下显著降低产量 60.82%。收获指数 HI 和氮素收获指数 NHI 随着施氮量的增加呈下降趋势,随土壤含水量增加呈增加趋势。植株氮总累积量与施氮量和土壤含水量均呈正相关关系。因此,施肥过多不仅肥料利用

率低,而且易造成营养器官比例加大,生物产量增加,油菜虽然可以获得较大的干物质和氮素累积,但不能适时向生殖器官转移,产量降低。

2.1.2 不同水氮处理下油菜生长性状动态变化

图 2 对油菜苗期、蕾薹期、角果期和成熟期的株高、茎粗进行测定分析发现,在不同生育期株高、茎粗均随着施氮量的增加而增加,而同一施氮水平下株高和茎粗随土壤含水量的增减无显著变化。因此,水氮因素对油菜株高、茎粗的影响主要以氮素为主。

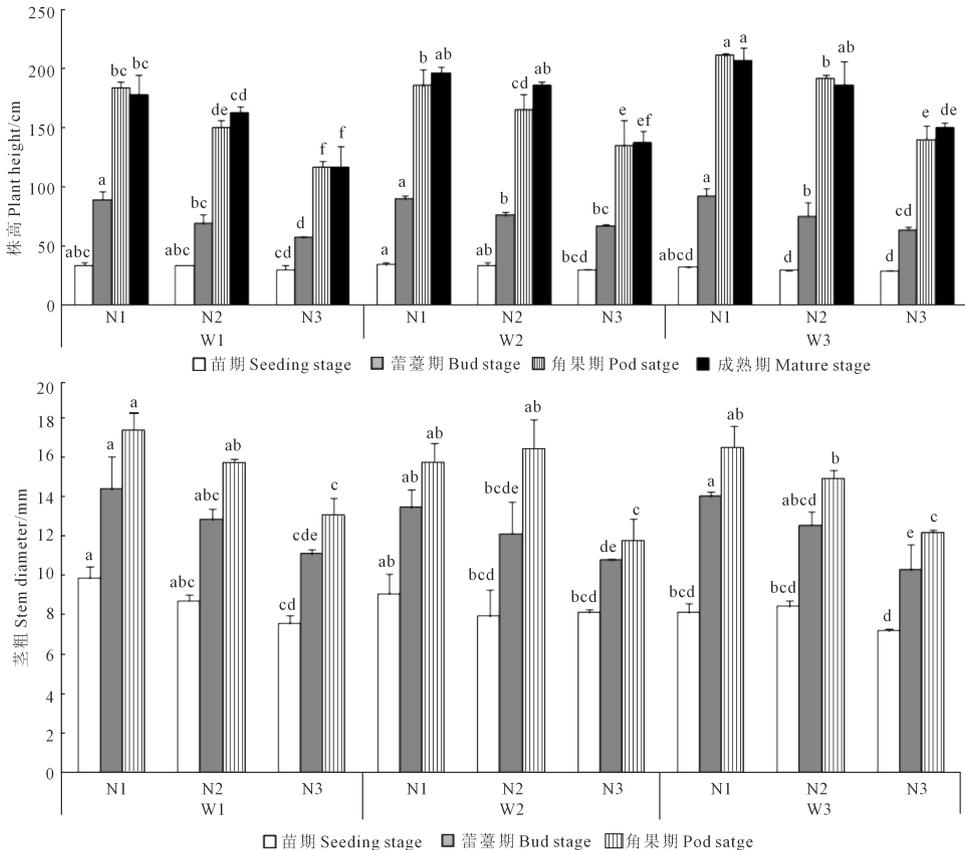
表 2 不同水氮处理下油菜收获指数及增产率

Table 2 Harvest index and production increase rate under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	收获指数 HI/(kg·kg ⁻¹)	植株氮总累积量 Total N accumulation in plants/(kg·hm ⁻²)	氮素收获指数 NHI/(kg·kg ⁻¹)	增产率 Rate of growth/%
W1N1	1784.01a	0.112	405.82	0.233	114.43
W1N2	2031.00a	0.108	372.90	0.290	144.11
W1N3	1850.01a	0.133	234.55	0.383	122.36
W2N1	1044.99ab	0.091	378.60	0.158	25.60
W2N2	1347.99abc	0.098	375.54	0.213	62.02
W2N3	1712.01ab	0.150	257.31	0.356	105.77
W3N1	326.01d	0.048	277.03	0.069	-60.82
W3N2	765.99cd	0.082	210.79	0.205	-7.93
W3N3	981.99cd	0.107	249.55	0.212	18.03
CK	831.99cd	0.117	82.15	0.445	0.00

注:产量换算按照本区域的常规种植密度 30 万株·hm⁻²[11]。

Note: Yield conversion was based on the conventional planting density of 300 000 plants·hm⁻² in the region.



注:不同小写字母表示同一生育期内不同水氮处理下各指标的差异达到显著水平,下同。

Note: Different lowercase letters denote significant difference between treatments at 5% probability level. The same below.

图 2 油菜株高、茎粗对不同水氮的响应

Fig.2 The response of height and stem diameter to different water and nitrogen

表3分析了油菜不同生育期的叶片数与有效分枝数受水氮因素的影响,结果显示随着生育期的推进,水氮对叶片数量的影响程度增强,苗期各处理下叶片数没有显著差异,到了蕾薹期时优先在低水低氮处理显著下降,角果期时同一水分梯度下低氮处理显著低于中、高氮处理。因此,叶片数量在油菜生长后期时容易因施氮不足导致其数量显著减少。有效分枝数随施氮量的减少而减少,二次有效分枝数表现更为显著。

综上所述油菜株高、茎粗、叶片数、有效分枝数对水分因素不敏感,主要受氮素影响。

2.1.3 油菜不同生育期的根系特征 由表4可知,各处理下油菜的根长和根表面积差异不大,根直径和根体积在油菜的生育后期差异开始显著,表现为随着土壤含水量的下降而下降,随着施氮量的减少而下降。通过对油菜成熟期的根系形态指标进行显著性检验发现,根直径和根体积在高水管理下随着施氮量的增加而增加;但是中等水分和低水分情况下各施氮量对它们几乎没有影响。因此,当土壤含水量达到较高水平时,本实验中达到田间最大持水量的90%,施氮量才对根系形态特征指标产生影响。

2.2 油菜植株与土壤全氮含量变化

由图3看出,油菜不同器官的含氮量依次为根 $10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,茎 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,籽粒 $40\sim 60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,蕾 $70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。苗期施氮量和土壤水分管理对茎、叶含氮量的影响较大,但是对根的影响不大。蕾薹期低氮处理下根的氮含量有了明显下降,中高氮差异不明显;水分管理差异不显著。花果期和成熟期低水管理下促进了氮素营养的吸收。随着施氮量减少各器官全氮含量呈现减少趋势。

图3显示不施肥处理(CK)的油菜各部位全氮含量均为最低,而低水分高氮肥处理(W3N1)的均最高。在同一水管理下,各器官的全氮含量均随着施氮量的增加而增加,尤其在角果皮部位各处理均达到显著水平。在籽粒上,除了低水分下的不同

氮肥达到显著水平外,高水分和中水分下高、中氮的处理差异不显著。因此,解除了水分胁迫后,当氮肥达到中等水平后,油菜的籽粒对氮素的吸收趋于饱和,不会随着氮肥的增施而增多。但是角果皮的吸收氮素能力还在增加,但最终并没有转移到籽粒上去。

土壤含氮量的变化规律为:苗期不同处理下土壤含氮量差异不大(图4)。蕾薹期时由于追肥土壤含氮量在不同氮肥梯度下呈现由高到低的趋势,但是土壤水分管理对土壤含氮量的影响不大。花果期时土壤含氮量差异又变得不显著。成熟期时不施肥处理(CK)的土壤含氮量最低,其他处理间土壤含氮量差异不显著。总体来看,各个处理下土壤含氮量的差异不显著,那么可以肯定的是大量的氮肥都被吸收到植株体内了。

2.3 油菜氮肥利用情况

由表5可以看出,氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理利用率均与施氮量呈负相关关系,与土壤含水量呈正相关。W1N3和W2N3表现出较高的氮肥利用效率,其中氮肥表观利用率在W2N3处理下最大,氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理利用率均在W1N3处理下最大。因此,从氮肥利用效率角度来看,W1N3处理最优,W2N3次之。根据氮肥农学效率、氮肥生理利用率和氮肥表观利用率的计算公式推导,可以得出氮肥表观利用率=氮肥农学效率/氮肥生理利用率 $\times 100$ 。在计算氮肥生理利用率的时候,大多学者只考虑了地上部分植株的吸氮量,忽略了根系部分的吸氮,而根系作为植株的一部分,在计算氮肥生理利用率的时候应该考虑进去,不然会造成氮肥生理利用率的高估,进而导致氮肥表观利用率偏低。

因此,本实验条件下施氮水平对土壤全氮含量的影响不大,结合图2分析可以得出:土壤施氮水平主要影响作物的全氮含量,进而可能影响作物的一系列生理生化指标及品质。

表3 油菜叶片数、有效分枝数受水氮因素的影响

Table 3 The influence of different water and nitrogen on the number of leaves and effective branches

处理 Treatment	叶片数 Leaf number			成熟期 Maturation stage	
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bud stage	角果期 Siliquing stage	一次有效分枝数 Available primary branches	二次有效分枝数 The second effective branch number
W1N1	14.33a	24.00ab	52.67ab	9.00a	12.33a
W1N2	13.50a	25.00ab	48.67ab	7.67ab	12.33a
W1N3	15.33a	23.67ab	24.00cd	7.33ab	6.00bc
W2N1	15.00a	25.00ab	55.33a	9.33a	8.00b
W2N2	13.00a	25.67a	44.00ab	7.67ab	5.33bc
W2N3	13.50a	24.00ab	22.33d	7.00ab	2.67c
W3N1	12.67a	25.67a	37.33bc	7.33ab	9.00ab
W3N2	14.00a	23.33ab	41.00ab	6.33b	5.33bc
W3N3	11.50a	21.67b	18.67d	6.00b	3.00c

表 4 油菜不同生育期根系形态特征对水氮因素的影响

Table 4 The influence of the root morphological characteristics of different water and nitrogen

根系形态指标 Root morphological index	处理 Treatment	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bud stage	角果期 Siliquing stage	成熟期 Maturation stage	
根长/cm Root length	W1	N1	636.56ab	1021.60b	1607.13bcd	1100.55b
		N2	935.49a	1238.00ab	2059.30ab	1070.60b
		N3	733.42ab	1699.08a	1818.59bcd	1690.32ab
	W2	N1	308.68b	1080.20ab	1314.68d	1414.86ab
		N2	554.61ab	1704.70a	2040.19abc	1711.09ab
		N3	432.66b	1401.12ab	2458.33a	1210.01ab
	W3	N1	411.67b	1484.95ab	1622.94bcd	1663.63ab
		N2	305.26b	1319.70ab	1475.63cd	1461.30ab
		N3	359.89b	1254.06ab	1664.67bcd	2043.94a
根表面积/cm ² Root surface area	W1	N1	280.23a	341.34ab	482.33a	448.44ab
		N2	279.37a	304.06ab	423.66ab	492.19a
		N3	237.91ab	388.90a	373.99abc	369.60ab
	W2	N1	123.77bc	340.31ab	311.67bc	422.65ab
		N2	192.72abc	372.00ab	411.94ab	460.78a
		N3	135.28bc	349.99ab	431.45ab	367.80ab
	W3	N1	168.31abc	281.43ab	299.00bc	410.66ab
		N2	101.52c	311.72ab	248.93c	320.76b
		N3	122.94bc	255.80a	316.60bc	418.51ab
根直径/mm Root diameter	W1	N1	1.40a	1.10a	0.96a	1.39ab
		N2	1.01a	0.79b	0.66bc	1.56a
		N3	1.01a	0.73bc	0.65bc	0.70c
	W2	N1	1.25a	1.03a	0.75b	1.04abc
		N2	1.23a	0.70bc	0.64bc	0.89abc
		N3	1.06a	0.80b	0.56c	1.03abc
	W3	N1	1.28a	0.60c	0.59c	0.80c
		N2	1.37a	0.78b	0.54c	0.73c
		N3	1.21a	0.65bc	0.60c	0.65c
根体积/cm ³ Root volume	W1	N1	9.83a	9.29a	11.52a	16.22ab
		N2	6.94ab	5.98cd	7.07b	18.95a
		N3	6.20ab	7.10bc	6.14bc	6.54cd
	W2	N1	4.13b	8.57ab	5.89bc	11.55bc
		N2	6.02ab	6.47bc	6.63b	10.11bcd
		N3	3.62b	6.99bc	6.03bc	9.20bcd
	W3	N1	5.64ab	4.26d	4.39bc	8.37cd
		N2	3.37b	5.94cd	3.34c	5.78cd
		N3	3.60b	4.16d	5.00bc	6.90cd

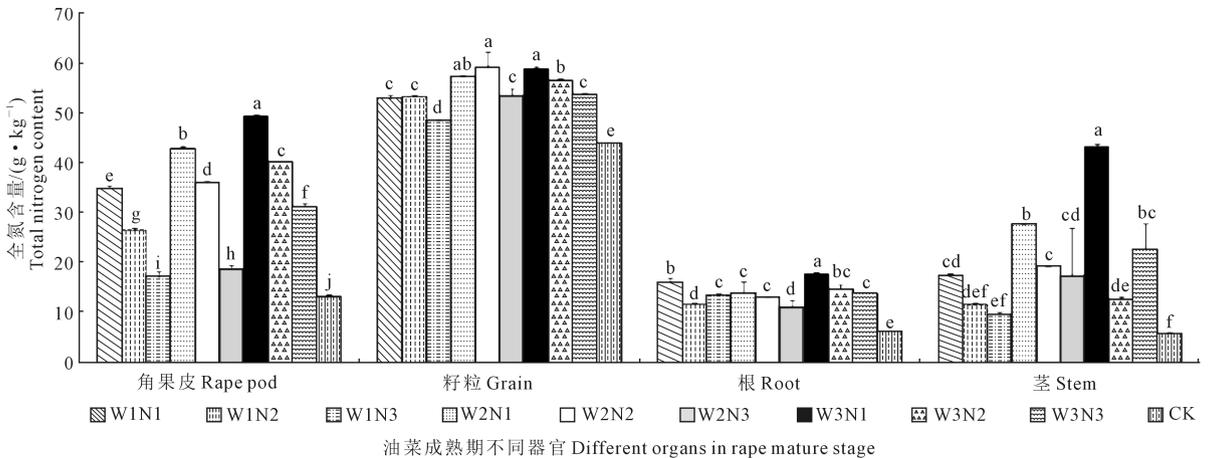


图 3 油菜不同器官全氮含量受水肥因素的影响

Fig.3 The influence of nitrogen content in different part of plant with water and nitrogen

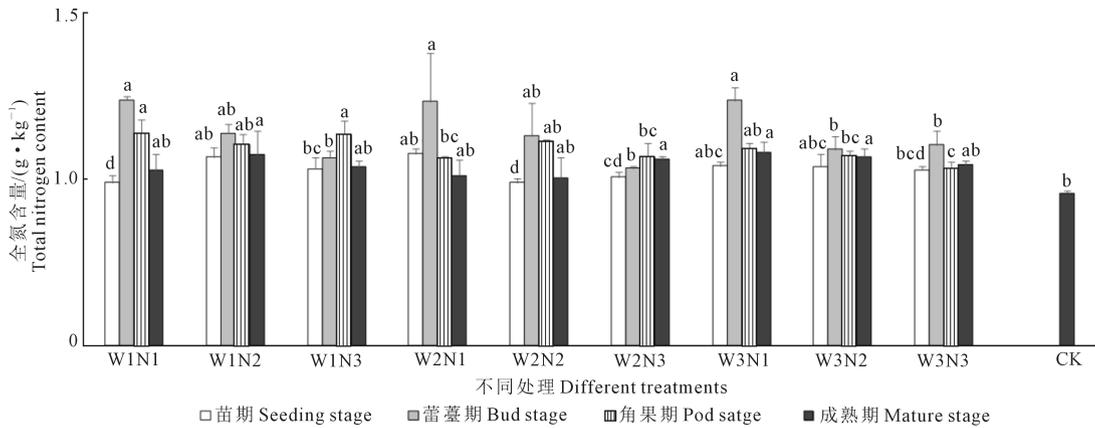


图4 油菜整个生育期内土壤全氮含量的动态变化

Fig.4 The variation of total soil nitrogen content during the whole growth period of rapeseed

表5 油菜氮肥利用效率

Table 5 Nitrogen use efficiency of rapeseed

处理 Treatment	氮素利用率 NUE/%	氮肥表观利用率 RE _N /%	氮肥偏生产力 PFP _N /(kg · kg ⁻¹)	氮肥农学效率 AE _N /(kg · kg ⁻¹)	氮肥生理利用率 PE _N /(kg · kg ⁻¹)
W1N1	52.41	159.05	8.77	4.68	2.94
W1N2	52.78	214.31	14.97	8.84	4.12
W1N3	36.72	224.67	27.27	15.01	6.68
W2N1	48.89	145.68	5.14	1.05	0.72
W2N2	53.15	216.26	9.94	3.80	1.76
W2N3	40.29	258.23	25.24	12.97	5.02
W3N1	35.77	95.76	1.60	-2.49	-2.60
W3N2	29.83	94.82	5.65	-0.49	-0.51
W3N3	39.07	246.79	14.48	2.21	0.90
CK	14.39	-	-	-	-

3 讨论

3.1 油菜生长性状及产量受水氮因素的影响特性

(1)刘波等^[12]研究表明油菜叶片数和叶面积在中、低氮(0~180 kg · hm⁻²)水平时显著减少,高氮(240~300 kg · hm⁻²)水平下无明显差异。也就是说油菜的生长发育性状指标在一定氮素范围内与施氮量呈正相关,这在本研究中也得到了验证。本研究中油菜株高、茎粗、叶片数、有效分枝数对水分因素不敏感,主要受氮素影响。其中叶片数量在油菜生长后期时容易因施氮不足导致其数量显著减少,有效分枝数随施氮量的减少而减少,二次有效分枝数表现更为显著。只有在土壤含水量较高时,施氮量才会对根系产生影响,包括根系形态特征和根系干物质质量,即油菜根系的影响表现为水分作用>氮素作用。石小虎^[13]在水氮供应对番茄根系的影响研究上也得到类似的结论,但刘世全等^[14]对小南瓜根系的研究结果则是氮素作用>水分作用。这可能由于作物类型和施肥方式的不同导致。生物量的积累不是随着施氮量的增加而无限增加,

在一定范围内施氮越多地上及地下干物质积累越多,但是超过某一氮肥用量后则表现为下降。赵国莘等^[15]在盆栽油菜苗期的研究中也得出一致的结论,并给出了最优组合为水分含量控制在田间持水量的80%、施氮量为0.24 g · kg⁻¹。本研究中W1N2处理下地上及根系干物质质量积累均达到最大。

吕丽华等^[16]研究表明在供水条件较差时,水分是肥效发挥的限制因素,增施氮肥对增产无效甚至引起产量的降低。本研究结果也表明,在低水分条件下增加氮肥投入造成减产7.93%~60.82%,氮肥用量越多减产越多。当土壤含水量达到较高水平时,施氮量才对根系形态特征指标、根系干物质质量产生影响;且对地上部分的生物量的影响也是随着土壤含水量的增加而增强。进一步说明了肥效的发挥需要水分作为条件,当水分达到一定程度时才能实现水肥的高效利用。

(2)宋燕燕等^[17]在盆栽条件下得出与不施氮相比,施氮显著提高了油菜植株各器官的氮含量,刘波等^[12]研究结果指出渍水处理明显抑制了冬油菜氮素养分的吸收,说明土壤含水量增加不利于植

株养分的吸收,这跟本文的研究结果一致,即油菜植株氮含量随着施氮量的增加而增加,随着土壤含水量的增加则呈下降趋势。油菜产量随着土壤含水量的增加呈增加趋势,但是在不同施氮水平下差异不显著。以往的研究结论均证明增施氮肥有利于产量的提高,而本研究结论与其不一致,究其原因可能是在温室盆栽条件下,光照不足等原因导致油菜植株吸收的养分没有最终形成产量,收获指数偏低,平均 $0.11 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而田间栽培下重庆地区冬油菜的收获指数通常为 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [2]。

3.2 不同水氮处理下油菜氮肥利用率

氮肥利用效率随着施氮量的减少而增加,同一施氮水平下随着土壤含水量的增加而增加。这一结论在高娜等 [18] 的研究中也得到了验证。与以往的研究相比,本研究得出的氮肥利用率(氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理利用率)除了氮肥表观利用率外均在正常范围内(表 6),但是氮肥生理利用率略微偏低,究其原因一方面是因为其他学者在计算氮肥生理利用率时未考虑根系部分造成该指标一定的高估,另一方面是因为本实验条件为盆栽,与大田相比植株生长受到一定程度的限制,产量与收获指数明显偏低。根据文献资料显示,西南地区油菜施氮量在 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,平均可以达到 $2\ 001 \sim 2\ 087 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量水平 [2-3],本研究条件下产量普遍低于平均水平。卢杨 [19] 在盆栽试验下得出的氮肥生理利用率也同

样偏低(表 6)。氮肥表观利用率是指投入单位氮被作物吸收的情况,主要反映作物对肥料中氮的吸收能力,却不能反映作物吸收的氮与作物经济产量之间的关系。本研究中氮肥表观利用率远远高于其他学者的研究结果,说明在本研究中油菜对肥料氮的吸收能力很强。

4 结 论

1) 油菜生长性状受水肥因素的影响表现为:油菜株高、茎粗、叶片数、有效分枝数对水分因素不敏感,主要受氮素影响。本实验中,当土壤含水量达到田间最大持水量的 90%,施氮量才对根系形态特征指标、根系干物质质量产生影响;且对地上部分的生物量的影响也是随着土壤含水量的增加而增强。综合考虑本研究中最优水氮组合为 W1N3,即灌水水平控制在田间持水量的 90%,施氮量为 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2) 油菜土壤-作物吸氮量及产量受水氮因素的影响表现为:在盆栽试验条件下水氮因素对土壤的全氮含量影响不显著,主要影响作物的全氮含量。作物氮含量与施氮量呈正相关关系,而与土壤含水量呈负相关;油菜产量在不同施氮水平下差异不显著,随着土壤含水量的增加呈增加趋势。

3) 油菜氮肥利用效率受水氮因素的影响表现为:氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理利用率均与施氮量呈负相关,与土壤含水量呈正相关。

表 6 不同试验条件下油菜氮肥利用率比较

Table 6 Comparison of nitrogen fertilizer utilization ratio in rapeseed under different test conditions

区域 Region	氮肥表观利用率 $RE_N/\%$	氮肥偏生产力 $PPF_N/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	氮肥农学效率 $AE_N/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	氮肥生理利用率 $PE_N/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	数据来源 Data sources
本研究 This study	94.82~258.23	1.6~27.27	1.05~15.01	0.72~6.68	本文 This paper
长江流域 Yangtze river basin	3.9~82.6	6.8~26.3	1.1~15.8	5.5~49.1	[2]
湖北 Hubei	18.8~46.5	-	2.2~9.6	18.37	[20]
湖北 Hubei	34.1~54.2	8.4~19.4	7.8~14.4	23.55	[12]
江西 Jiangxi	17.2~40.7	-	3.8~10.5	22.51	[21]
四川 Sichuan	34.61~60.22	15.61~18.92	7.34~10.88	20.50	[22]
河北 Hebei	31.28~62.27	-	1.5~92.48	4.80	[19]

注:黑体字部分表示在 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 常规施氮量水平下,根据氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥生理利用率三者关系推导得出。

Note: The bold part showed that at the conventional nitrogen application level of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, PE_N could be derived according to the relationship among RE_N , AE_N and PE_N .