植物营养与肥料学报 2009,15(5):1122-1129
Plant Nutrition and Fertilizer Science

氮、磷、钾对湿害胁迫下甘蓝型油菜产量的影响

丛 野[1],李艳君[2],周灿金[2],邹崇顺[1],张学昆[1*],廖 星[1*],张春雷[1]
(1 中国农业科学院油料作物研究所,湖北武汉 430062;2 武穴市大金镇农技推广服务中心,湖北武穴 435400)

摘要:对甘蓝型油菜品种中双 10 号和中油杂 5 号苗期进行水淹处理模拟湿害胁迫,运用"3414"肥料效应田间试验方案,研究湿害胁迫下施肥量对油菜产量的影响。结果看出,施氮、磷、钾肥对湿害胁迫下的油菜产量性状有重要影响。灰色关联分析表明,施氮量与每角粒数、单株角果数和一次分枝数、二次分枝数和主花序长呈显著正相关;施磷量与单株角果数和每角粒数呈显著正相关;施钾量与每角粒数、千粒重和主花序长有呈显著正相关的趋势。湿害胁迫下,保证中等水平的磷肥和钾肥,增施氮肥可显著提高油菜的单产、投产比和经济效益。通过建立肥效与产量间的效应函数方程,在湿害危害严重的油菜种植地区,适宜肥料用量为 N 267 kg/hm^2、P_2O_5 120 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2。

关键词:油菜;氮、磷、钾肥;湿害;"3414"试验方案;灰色关联分析;产量
中图分类号:S634.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2009)05-1122-08

Effect of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) under the waterlogging stress

CONG Ye[1], LI Yan-jun[2], ZHOU Can-jin[2], ZOU Chong-shun[1], ZHANG Xue-kun[1*], LIAO Xing[1*], ZHANG Chun-lei[1]
(*1 Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Science, Wuhan 430062, China;*
2 Agricultural Extension Services Centre of Dajin Town, Wuxue, Hubei 435400, China)

Abstract: Two rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties (Zhongshuang No.10 and Zhongyouza No.5) were used to study the effects of application of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizers on yield in rapeseed under the waterlogging stress. The plant was submerged at the seedling stage to mimic the condition of waterlogging. The experiment was replicated two times with "3414" design. The results showed that N, P and K fertilization significantly affected yield traits in rapeseed under the waterlogging stress. The grey relational analysis showed that N application rate was positively correlated with the number of seed per pod, siliques per plant, primary branches, secondary branches and the length of raceme. The P application rate was positive correlated with the number of siliques per plant and seed per pod. And K application rate was positive correlated with the number of seed per pod, 1000-seed weight and the length of raceme. The results indicated that the ensuring middle level of P and K fertilization, enhanced nitrogen fertilization can significantly increase the yield of rapeseed and the cost value ratio and economic benefits under waterlogging stress. By establishing the fertilizer response equations, the optimum fertilizer applicant of rapeseed under the waterlogging stress were as N 267 kg/ha, P_2O_5 120 kg/ha, K_2O 120 kg/ha.

Key words: rapeseed; nitrogen, phosphorus, potassium fertilizers; waterlogging; "3414" fertilizer effect experiment; grey relational analysis; yield

油菜是我国最重要的油料作物之一,产量和播种面积均居世界首位。与国外的旱地油菜不同,我国油菜主要为长江流域的水稻轮作冬油菜。与白菜、芥菜型油菜相比,甘蓝型油菜产量和抗菌核病具

收稿日期:2008-08-26　　**接受日期**:2008-12-25
基金项目:国家科技支撑计划(2009BADA8B00,200900003986)资助。
作者简介:丛野(1984—),男,辽宁丹东人,硕士研究生,主要从事油菜分子育种工作。E-mail:run9574@163.com
* **通讯作者** Tel:027-86824573,027-86814009;E-mail:seedcq@263.net,liaox@oilcrops.cn

有显著优势，但耐湿性相对较差[1]。生长过程中，秋季和春季气候湿润多雨，加之水稻田地下水位较高，容易田间积水造成油菜湿害，成为我国特有的自然灾害，常年发生面积一般达 133 万多公顷（主要分布在四川、重庆、湖北、湖南、安徽、江苏等省），占总面积 20% 以上[2]。湿害可造成油菜根际缺氧，糖酵解、乙醇发酵和乳酸发酵产生的乙醇、乳酸、氧自由基等有害物质对细胞形成伤害，使光合作用下降，生长受阻，造成油菜株高、茎粗、根粗、根长、绿叶数、叶面积、干重、有效分枝数、单株角果数和粒数大幅下降，子粒减产 17%～42.4%[3-5]。

氮、磷、钾等主要营养元素对油菜的单产和品质具有十分重要的影响，合理的肥料配比和用量是油菜高产的基本保证。目前，已有研究表明，正常的灌溉条件下，氮、磷、钾对作物的产量性状有显著影响，合理配比氮、磷、钾肥能大幅度提高生物学产量，增加有效分枝和角果数量，对千粒重影响不明显[6]。多数研究认为，氮、磷是影响产量的主要因素，磷是植物重要的组成成分，以多种方式参与植物体内的各种生物化学过程，对作物生长发育、生理代谢、产量和品质都起到重要的作用[7]。有研究表明，干旱等胁迫下，合理的肥料配比会显著减少灾害损失[8-12]。但肥料对湿害胁迫下的油菜产量有何影响，还没有相应的报道。本试验通过研究肥料调控优化对湿害胁迫下油菜产量的影响，研究湿害条件下提高油菜产量和经济效益的适宜肥料用量，为湿害胁迫下的油菜抗灾减灾提供依据。

1　材料与方法

试验设在湿害较重的双季稻地区湖北省武穴市进行，试验田前作为双季早稻和晚稻。土壤类型为砂壤土，肥力中等，有机质含量 17.6 g/kg、pH 值 6.21、碱解氮 186 mg/kg、有效磷 19.3 mg/kg、速效钾 39 mg/kg、有效硼 0.36 mg/kg、有效锌 1.62 mg/kg、有效铜 331 mg/kg、有效硫 30.5 mg/kg、有效硅 39.03 mg/kg、有效钼 32.14 mg/kg、有效铁 125.14 mg/kg。供试油菜（*Brassica napus* L.）品种为中双 10 号（Zhongshuang No.10），为湖北省主推品种；中油杂 5 号（Zhongyouza No.5）为当地新引进示范的品种，均由中国农业科学院油料作物研究所选育并提供。

试验当地高产水平的最佳施肥量，采用农业部推荐的‘3414’最优回归设计肥效试验方案[13-14]，设氮、磷、钾 3 个因素，不施肥、低量、适量、过量 4 个施肥水平，共 14 个处理，见表 1。每个处理重复 2 次，每小区 15m^2。所用肥料为尿素（含 N 46%，湖北宜昌产），过磷酸钙（含 P_2O_5 12%，湖北省荆门产），氯化钾（含 K_2O 60%，加拿大产）；因不考虑硼肥影响，各处理统一施用优质硼砂 15 kg/hm^2。

油菜采用育苗移栽方式进行栽培管理。2006 年 9 月 16 日播种育苗，10 月 20 日移栽，移栽密度为每公顷 10 万株。油菜返青后，及时施基肥（氮肥按总施肥量的 60%，磷、钾 100% 与硼砂混合拌匀作基

表 1　油菜‘3414’实验方案

Table 1　Designs of the program of“3414”fertilizer experiment on rapeseed

编号 Code	处理 Treatments	水平 Levels N	P	K	肥料用量 Rates of fertilizers (kg/hm^2) N	P_2O_5	K_2O
1	$N_0P_0K_0$	0	0	0	0	0	0
2	$N_0P_2K_2$	0	2	2	0	112.5	112.5
3	$N_1P_2K_2$	1	2	2	112.5	112.5	112.5
4	$N_2P_0K_2$	2	0	2	225	0	112.5
5	$N_2P_1K_2$	2	1	2	225	56.25	112.5
6	$N_2P_2K_2$	2	2	2	225	112.5	112.5
7	$N_2P_3K_2$	2	3	2	225	168.75	112.5
8	$N_2P_2K_0$	2	2	0	225	112.5	0
9	$N_2P_2K_1$	2	2	1	225	112.5	56.25
10	$N_2P_2K_3$	2	2	3	225	112.5	168.75
11	$N_3P_2K_2$	3	2	2	337.5	112.5	112.5
12	$N_1P_1K_2$	1	1	2	112.5	56.25	112.5
13	$N_1P_2K_1$	1	2	1	112.5	112.5	56.25
14	$N_2P_1K_1$	2	1	1	225	56.25	56.25

肥点穴埋施)，1月5日，氮肥按总施肥量的40%撒施追施苔肥。根据当地秋冬雨季特点，于11月10日开始进行水淹湿害处理，厢沟水面保持在厢面下1cm，模拟湿害胁迫15 d后及时排水[15]。按照刘后利的方法[16]调查油菜的农艺性状和产量性状并按照农业部测土配方施肥技术规范测定土壤各项指标[13]。

采用DPS V8.01专业版计算氮、磷、钾与产量性状的关联度[17-18]；根据吴志勇等[19]和凌新军等[20]的方法建立肥效与产量间的数学模型。

2 结果与分析

2.1 各施肥处理对水淹处理后油菜产量的影响

试验表明，各施肥处理2个品种的农艺性状和产量比对照都有不同程度的改善和增加(表2)。在2种元素施用量相同的条件下，适当增施第3种元素都有明显的增产效果。如磷、钾用量相同的条件下，中双10号处理11($N_3P_2K_2$)比处理2($N_0P_2K_2$)增

表2 不同处理对油菜产量性状的影响

Table 2 Effect of different treatment on yield traits of rapeseed

品种 Variety	处理 Treat.	株高 PH (cm)	分枝长 BH (cm)	主花序长 LR (cm)	一次分枝 PB (No./plant)	二次分枝 SB (No./plant)	主花序角果数 NRP (No./plant)	单株角果数 SP (No./plant)	每角粒数 SPP (No./plant)	千粒重 1000-seed wt. (g)	产量 Yield (kg/hm^2)	全生育期 TM (d)	菌核病 SS 病株率 RDP (%)	菌核病 SS 病情指数 DI
中双10号 Zhongshuang No.10	1	161	71	53	4.3	0	61	157	17.8	3.43	693.3	229	11.88	6.94
	2	157	67	61	5.0	0	54	157	21.2	3.43	843.5	229	12.05	7.74
	3	179	87	553	4.6	0	79	206	22.6	3.51	1540.1	229	13.60	6.33
	4	164	81	51	6.3	0.7	71	211	22.3	3.36	1183.4	229	13.30	7.50
	5	167	80	52	6.0	2.0	67	249	22.8	3.51	1870.1	230	13.30	6.67
	6	173	64	60	7.0	7.0	77	281	23.0	3.88	2010.2	229	8.91	7.50
	7	172	66	57	8.3	2.0	74	306	22.5	3.81	2116.8	230	10	3.75
	8	161	76	48	6.0	0.7	80	239.9	22.6	3.43	1240.1	230	13.3	7.50
	9	168	71	55	5.7	1.3	163	242	23.1	3.51	1943.4	230	9.30	5.83
	10	163	76	55	5.0	0.7	66	272	22.7	3.51	2116.8	230	6.45	4.03
	11	168	69	63	6.0	3.0	80	244	22.8	3.81	2050.1	231	11.05	6.58
	12	180	75	53	7.0	2.0	71	233	21.7	3.66	1633.4	231	9.09	6.82
	13	174	78	54	5.3	1.7	69	252	22.5	3.51	1650.2	230	11.10	5
	14	195	80	61	8.0	2.0	63	264	22.0	3.28	1656.8	230	7.09	2.27
中油杂5号 Zhongyouza No.5	1	162	67	31	3.6	0	72	159	19.8	3.43	643.4	229	7.57	5.69
	2	182	80	52	6.0	0.7	70	180	20.6	3.36	803.4	230	8.86	6.42
	3	147	69	52	4.3	2.0	65	249	20.2	3.28	1576.8	230	9.80	7.87
	4	184	73	65	6.0	2.0	83	212	21.2	3.51	1203.5	231	14.29	8.12
	5	116	74	56	6.0	0	74	259	21.5	3.51	1860.2	229	9.62	7.50
	6	168	82	50	6.7	0	89	284	22.5	3.51	2083.5	231	11.42	8.33
	7	182	81	58	8.3	1.7	78	310	22.5	3.51	2190.2	229	5.30	3.33
	8	184	82	54	6.7	0	72	204	21.3	3.43	1283.4	230	9.50	8.25
	9	201	87	74	6.5	1.5	70	278	21.3	3.43	2006.7	229	10	2.50
	10	182	83	56	7.5	0.7	76	289	22.4	3.66	2196.8	231	9.76	5.88
	11	170	66	62	6.3	4.0	69	306	22.2	3.36	2116.8	229	15.62	8.93
	12	181	69	64	4.0	1.0	85	231	22.5	3.36	1510.1	229	9.65	7.35
	13	138	53	55	4.3	0	68	243.6	21.8	3.28	1656.8	230	16.70	9.83
	14	154	72	54	5.0	0	71	220.3	22.7	3.51	1743.5	229	11.80	4.41

注(Note)：PH—Plant height；BH—Branch height；LR—Length of raceme；PB—No. of primary branches；SB—No. of secondary branches；NRP—No. of raceme pod；SP—Siliques per plant；SPP—Seed per pod；TM—Total Maturity；SS—No. of plants infected by *Sclerotinia sclierotiorm*；RDP—Rate of disease plants；DI—Disease index；The same symbols were used for other tables.

产 1206.6 kg/hm²,增幅达 143.06%;中油杂 5 号相应增产 1313.4 kg/hm²,增幅 163.48%。从处理 4 与处理 7 两个处理来看,在氮、钾用量相同条件下,中双 10 号处理 7($N_2P_3K_2$)比处理 4($N_2P_0K_2$)增产 933.45 kg/hm²,增幅达 78.88%;中油杂 5 号相应增产 986.7 kg/hm²,增幅达 81.99%。在氮、磷用量相同条件下,中双 10 号处理 10($N_2P_2K_3$)比处理 8($N_2P_2K_0$)增产 876.75 kg/hm²,增幅达 70.70%;中油杂 5 号相应增产 913.35 kg/hm²,增幅达 71.17%。

对氮、磷、钾和产量进行灰色关联分析表明,与产量的关联度为氮 > 磷 > 钾,其中氮与产量的相关系数为 0.7589,达到极显著水平;磷与产量的相关系数为 0.5672 达到显著水平;钾的相关系数为 0.5063,与产量的关系不显著。说明氮对 2 种油菜的增产效果最为明显,磷次之,钾作用最小。

2.2　湿害胁迫下各施肥量与产量性状的关联度及相关性

对 2 品种施肥量与产量性状进行关联度分析(表 3)看出,9 种产量性状指标与施氮量的关联度从大到小依次是:一次分枝数 > 单株角果数 > 二次分枝数 > 分枝部位 > 主花序长 > 每角粒数 > 株高 > 千粒重 > 主花序角果数。相关分析结果表明,施氮量与每角粒数($r = 0.7726$)、单株角果数($r = 0.7699$)、一次分枝数($r = 0.6744$)均达到极显著水平;施氮量与二次分枝($r = 0.6286$),与主花序长($r = 0.5723$)达到显著水平,说明施氮量与这些指标呈显著正相关。

与施磷量的关联度从大到小依次是:单株角果数 > 一次分枝数 > 主花序长 > 株高 > 每角粒数 > 千粒重 > 分枝部位 > 主花序角果数 > 二次分枝数。施磷量与单株角果($r = 0.6092$)、每角粒数($r = 0.5349$)均呈显著正相关。

与施钾量的关联度从大到小依次是:单株角果数 > 一次分枝数 > 二次分枝数 > 主花序长 > 千粒重 > 每角粒数 > 分枝部位 > 株高 > 主花序角果数。施钾量与每角粒数、千粒重、主花序长和单株角果数的相关系数接近显著水平,但仍未达到显著水平。

上述结果看出,油菜在湿害胁迫条件下施氮肥可以增加每角粒数、单株角果数、一次分枝数、二次分枝数和主花序长;施磷肥能增加单株角果数和每角粒数。施钾有提高每角粒数、千粒重、主花序长和单株角果数的趋势。单株角果数、千粒重和每角粒数对甘蓝型油菜产量起很大作用[21],故在湿害胁迫下对油菜施肥应着重考虑以上因素。在湿害胁迫下,应保证中等水平的磷肥和钾肥,增施氮肥可降低湿害对油菜产量的损失。生产中为减少氮肥的流失,应采用深施的方式,以提高氮肥利用率。

表 3　产量性状与各肥料的关联度和相关系数

Table 3　Grey correlations and correlation coefficients between yield traits and fertilizers

肥料 Fertilizer	项目 Item	株高 PH	分枝部位 BH	主花序长 LR	一次分枝数 PB	二次分枝数 SB	主花序角果数 NRP	单株角果数 SP	每角粒数 SPP	千粒重 1000-seed wt
N	关联度 G(1, n)	0.652	0.6621	0.6592	0.7153	0.6676	0.6483	0.7013	0.6539	0.6495
	相关系数 CC	0.1861	0.2616	0.5723*	0.6744**	0.6286*	0.3662	0.7699**	0.7726**	0.5183
P_2O_5	关联度 G(1, n)	0.6499	0.6435	0.6544	0.6562	0.5795	0.6382	0.6752	0.6471	0.6447
	相关系数 CC	0.1977	0.0383	0.3735	0.4722	0.3020	0.1848	0.6092*	0.5349*	0.4125
K_2O	关联度 G(1, n)	0.6407	0.6441	0.6521	0.6601	0.6545	0.631	0.6692	0.6459	0.6499
	相关系数 CC	0.0346	0.1484	0.4674	0.3164	0.3965	−0.0906	0.4577	0.4946	0.4919

注(Note):G (1, n)—Grey correlations;CC—Correlation coefficients. *, ** indicate significant at 5% and 1% levels, respectively. $r_{0.05} = 0.5324$; $r_{0.01} = 0.6614$

2.3　肥料效应方程建立

经一元二次模型拟合,所有效应函数方程的 $F > F_{0.05}$,呈显著水平,说明处理间有差异,方程拟合较好(图 1)。根据各氮、磷、钾肥料间数学一元二次方程可以得出,本次试验田如果继续增加氮、磷、钾肥的施用,油菜产量可能会下降。另外,我们根据各肥料的施肥模型用偏导方式得到各肥料最大施肥量、最大产量以及最佳施肥量和最佳产量(表 4)。

2.4　“3414”油菜处理经济效益分析

肥料的经济效益分析(未考虑其他因素)看出,中双 10 号和中油杂 5 号获得最高收入都为处理 10($N_2P_2K_3$),产值分别为 10584 和 10984 元/hm²;纯收

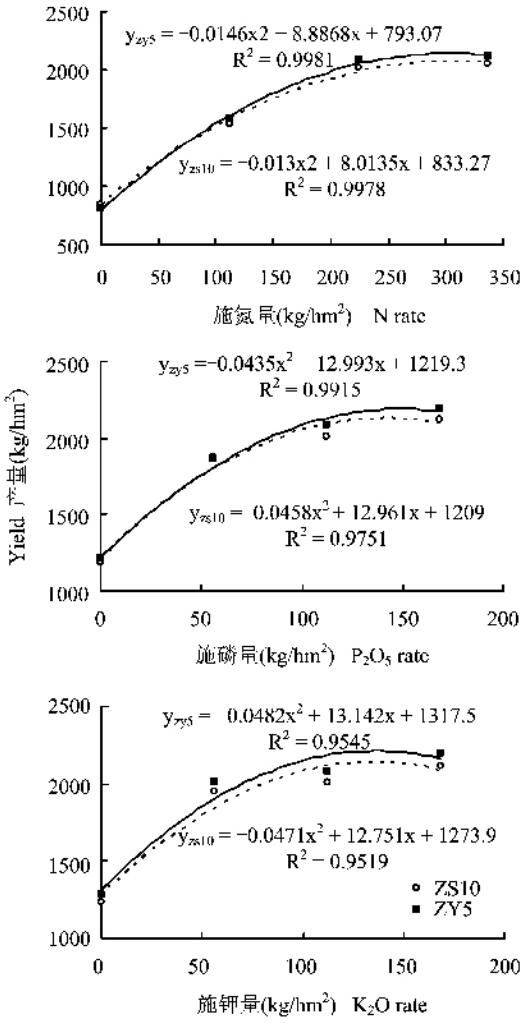

图1 不同氮、磷、钾施用量对油菜产量的影响

Fig.1 Effects of different N(a), P(b), K(c) application rates on yield of rapeseed

[ZS10—中双10号 Zhongshuang No.10；ZY5—中油杂5号 Zhongyouza No.5]

入为7721和8121元/hm²(表5)。产量大于2000 kg/hm²的处理分别为处理6($N_2P_2K_2$)、7($N_2P_3K_2$)、10($N_2P_2K_3$)、11($N_3P_2K_2$)，氮、磷、钾都在适量以上水平，它们的纯收入和投产比相对较大，在生产中应考虑以上施肥配比。

表5还看出，从投入和产出比例考虑，中双10号和中油杂5号产投比最高的分别为处理12($N_1P_1K_2$)和13($N_1P_2K_1$)，其次是处理13 $N_1P_2K_1$和处理9 $N_2P_2K_1$，但其产值都比较小，纯收入相对也少，生产中不应考虑。从处理2($N_0P_2K_2$)、3($N_1P_2K_2$)、6($N_2P_2K_2$)的投产比看出，随着氮素的增加纯收入和投产比显著增加，但提高氮肥用量(处理11，$N_3P_2K_2$)时，又显著下降，说明适量氮肥在油菜湿害胁迫下的投入对经济效益起至关重要的作用。因此，在油菜湿害地区适当增加氮肥用量，适施磷、钾肥，以期望得到较高的产量与经济效益。

根据效应方程并综合中双10号与中油杂5号的产量和经济效益，在湿害胁迫下，的最佳施肥量分别为N 267、P_2O_5 120、K_2O 120 kg/hm²。优化施肥后，中双10号的产量可达2130 kg/hm²，投肥产出为4177元/hm²，投产比达到1.47，纯收入为7744元/hm²；中油杂5号的产量可达2200 kg/hm²，投肥产出为4727元/ hm²，投产比达到1.62，纯收入为8194元/ hm²。

3 讨论

有关施肥对油菜的影响报道较多，李银水等[22]认为，氮肥是影响油菜产量的主要因子，合理施用氮肥，能显著提高油菜产量，过量会制约油菜高产水平

表4 油菜肥料效应方程及相应的推荐用量

Table 4 Fertilizer response equations and recommended fertilizer application for rapeseed

品种 Variety	肥料效应方程 Fertilizer response equation	r	肥料 Fertilizer	最大施肥量 Max. fertilization rate	最大产量 Max. yield	最佳施肥量 Optimum fertilization rate	最佳产量 Optimum yield
				(kg/hm²)			
中双10号 Zhongshuang No.10	$Y = 833.27 + 8.0135x - 0.013x^2$	0.9989**	N	308.21	2068.20	266.67	2045.77
	$Y = 1209 + 12.961x - 0.0458x^2$	0.9884*	P_2O_5	141.50	2125.96	125.56	2114.33
	$Y = 1273.9 + 12.751x - 0.0471x^2$	0.9774*	K_2O	135.36	2136.89	124.96	2131.80
中油杂5号 Zhongyouza No.5	$Y = 793.07 + 8.8868x - 0.0146x^2$	0.9990**	N	304.34	2145.39	267.36	2125.41
	$Y = 1219.3 + 12.993x - 0.0435x^2$	0.9960**	P_2O_5	149.34	2189.52	132.56	2177.27
	$Y = 1317.5 + 13.142x - 0.0482x^2$	0.9930**	K_2O	136.33	2213.31	126.16	2208.33

注(Note)：*，**表示5%和1%显著水平。计算采用的价格(元/kg)为油菜子5、N 5.4、P_2O_5 7.3、K_2O 4.9。下同。*，** indicate significant at 5% and 1% levels, respectively. The price of rapeseed and fertilizer (Yuan/kg) are rapeseed 5, N 5.4, P_2O_5 7.3, K_2O 4.9. The same symbols was used for table 5.

表 5 “3414”油菜处理经济效益

Table 5　Effects of different treatments of program“3414”fertilizer experiment applied on economics of rapeseed

品种 Variety	编号 Code	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm²)	产值 Income	成本 Input	纯收入 Net profit	投肥产出 Income by fertilizer input	投产比 Cost value ratio
				(Yuan/hm²)				
中双 10 号 Zhong-shuang No.10	1	$N_0P_0K_0$	693.30	3467	0	3467	0	—
	2	$N_0P_2K_2$	843.45	4217	1373	2845	-621.75	-0.45
	3	$N_1P_2K_2$	1540.05	7700	1980	5720	2253.91	1.14
	4	$N_2P_0K_2$	1183.35	5917	1766	4151	684.32	0.39
	5	$N_2P_1K_2$	1870.05	9350	2177	7174	3707.20	1.70
	6	$N_2P_2K_2$	2010.15	10051	2587	7464	3997.07	1.54
	7	$N_2P_3K_2$	2116.80	10584	2998	7586	4119.70	1.37
	8	$N_2P_2K_0$	1240.05	6200	2036	4164	697.82	0.34
	9	$N_2P_2K_1$	1943.40	9717	2312	7405	3938.95	1.70
	10	$N_2P_2K_3$	2116.80	10584	2863	7721	4254.70	1.49
	11	$N_3P_2K_2$	2050.05	10250	3195	7056	3589.24	1.12
	12	$N_1P_1K_2$	1633.35	8167	1569	6598	3131.04	2.00
	13	$N_1P_2K_1$	1650.15	8251	1704	6547	3080.04	1.81
	14	$N_2P_1K_1$	1656.75	8284	1901	6383	2916.32	1.53
中油杂 5 号 Zhong-youza No.5	1	$N_0P_0K_0$	643.35	3217	0	3217	0	—
	2	$N_0P_2K_2$	803.40	4017	1373	2645	-572.25	-0.42
	3	$N_1P_2K_2$	1576.80	7884	1980	5904	2687.41	1.36
	4	$N_2P_0K_2$	1203.45	6017	1766	4251	1034.57	0.59
	5	$N_2P_1K_2$	1860.15	9301	2177	7124	3907.45	1.80
	6	$N_2P_2K_2$	2083.50	10418	2587	7830	4613.57	1.78
	7	$N_2P_3K_2$	2190.15	10951	2998	7953	4736.20	1.58
	8	$N_2P_2K_0$	1283.40	6417	2036	4381	1164.32	0.57
	9	$N_2P_2K_1$	2006.70	10034	2312	7722	4505.20	1.95
	10	$N_2P_2K_3$	2196.75	10984	2863	8121	4904.20	1.71
	11	$N_3P_2K_2$	2116.80	10584	3195	7389	4172.74	1.31
	12	$N_1P_1K_2$	1510.05	7550	1569	5981	2764.29	1.76
	13	$N_1P_2K_1$	1656.75	8284	1704	6580	3362.79	1.97
	14	$N_2P_1K_1$	1743.45	8717	1901	6816	3599.57	1.89

的发挥；刘后利[16]指出，磷在油菜生长发育中，主要是对能量传递体系起介质的作用；钾对油菜体内各种重要的酶类起到活化剂作用；郭庆元等[23]研究表明，油菜氮、磷、钾配合施用的增产效果主要是以增加分枝和角果数来实现的。但是，研究水分胁迫下肥料效应主要是水稻[12, 24]、小麦[11]、玉米[9]等粮食作物，而且多为在干旱胁迫下的肥料效应研究，对湿害胁迫条件下的肥料调控优化研究尚不多见。

灾害胁迫下，肥料对产量形成有显著的影响。郑爱泉等[8]报道，合理施用氮肥可以减少干旱胁迫对作物造成的危害和损失，对其生长、氮代谢、光合作用和水分状况等方面都会产生影响；张立新等[9]认为，水分胁迫下，施用氮肥能显著提高硝酸还原酶活性及脯氨酸、甜菜碱和可溶性蛋白质含量，改善氮代谢，钾肥对受水分胁迫的夏玉米表现出比氮肥更突出的效果。灾害胁迫下，缺磷会造成光合碳固定率即光合速率的降低，进而影响产量[10]。张蕊等[11]指出，在水分胁迫条件下，磷作为一种营养元素，能显著促进小麦的根系发育，改善植株的水分状况，增加束缚水的含量，提高膜的稳定性和耐脱水能力及渗透能力，提高小麦的水分利用效率；朱维琴等[12]研究表明，干旱逆境下水稻茎叶均以积累 K^+ 为主要的无机渗透调节物质，适度供氮有利于相同水分条件下水稻体内 K^+ 的积累进而提高其无机渗透调节能力和水稻产量。

本研究在湿害胁迫条件下对氮、磷、钾进行调控优化，油菜的产量可达 2100 kg/hm²，比对照增产 2 倍，而且投肥产出达到 4000 元/hm² 以上，表明合理

配施氮、磷、钾肥，有利于提高油菜产量和经济效益，这与前人研究基本一致。但湿害胁迫下的氮肥适宜肥料用量，比正常的灌溉条件下[25]的施氮量要多，可能是湿害造成油菜根际缺氧，糖酵解、乙醇发酵和乳酸发酵产生的乙醇、乳酸、氧自由基等有害物质对细胞形成伤害。水分胁迫改变了氮素在植物体内的分配模式，降低氮肥的利用效率，同时水分过多会造成氮肥通过 NO_3^--N 淋失、NH_3 挥发与反硝化等严重损失。通过适量增加氮的施用量，可提高油菜的氮代谢和光合作用，有利于油菜生长和产量提高。

参考文献：

[1] Ashraf M, Mehmood S. Effects of waterlogging on growth and some physiological parameters of four *Brassica* species [J]. Plant Soil, 1990, 121(2): 203-210.

[2] 李翠金. 中国暴雨洪涝灾害的统计分析[J]. 灾害学, 1996, 11(1): 59-63.
Li C J. A statistical analysis of the storm flood disasters in China [J]. J. Catastrophol., 1996, 11(1): 59-63.

[3] Leul M, Zhou W J. Alleviation of waterlogging damage in winter rape by application of uniconazole: Effects on morphological characteristics, hormones and photosynthesis [J]. Field Crops Res., 1998, 59: 121-127.

[4] Gutierrez B F H, Lavado R S, Porcelli C A. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rapeseed [J]. Field Crops Res., 1996, 47: 175-179.

[5] Zhou W J, Lin X Q. Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Res., 1995, 44: 103-110.

[6] 李志玉，廖星，涂学文，等. 氮、磷、钾、硼配合对油菜品种产量、品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2003, (6): 33-37.
Li Z Y, Liao X, Tu X W *et al*. Effect on N, P, K and B application on yield, quality of rape cultivars [J]. Hubei Agric. Sci., 2003, (6): 33-37.

[7] 周建新，罗敏. 氮、磷、钾、硼肥不同配方对油菜产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2002, (1): 58-60.
Zhou J X, Luo M. The effects of different formulations of nitrogen, phosphorus, potassium, boron on yield in rapeseed [J]. Farm. Cultiv., 2002, (1): 58-60.

[8] 郑爱泉，候熠，李琪，等. 水分胁迫下氮素对作物生长及代谢的影响[J]. 陕西农业科学, 2008, (1): 75-77.
Zheng A Q, Hou Y, Li Q *et al*. Effect of nitrogen on crop growth and metabolism under the waterlogging stress [J]. Shanxi Agric. Sci., 2008, (1): 75-77.

[9] 张立新，李生秀. 水分胁迫下氮、钾对不同基因型夏玉米氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 554-560.
Zhang L X, Li S X. Effects of application of N and K fertilizers on nitrogen metabolism of two genetype varieties of maize under water-stressed condition[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 554-560.

[10] Sawada S, Tgarashi T, Miyachi S. Effects of phosphate nutrition on photosynthesis, starch and total phosphorus levels in single rooted leaf of dwarf bean[J]. Photosynthetica, 1983, 17: 484-490.

[11] 张蕊，张富平，郝艳丽. 水分胁迫条件下磷素营养对小麦抗旱影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(11): 3313-3314.
Zhang R, Zhang F P, Hao Y L. Research progress in the effect of phosphorus nutrition on wheat drought resistance under water stress [J]. J. Anhui Agric. Sci, 2007, 35(11): 3313-3314.

[12] 朱维琴，吴良欢，陶勤南. 氮营养对干旱逆境下水稻体内可溶性渗透调节物质的影响[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(5): 479-484.
Zhu W Q, Wu L H, Tao Q N. Effects of nitrogen nutrition on soluble osmotica in rice plants in response to drought stress [J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2003, 29(5): 479-484.

[13] 高祥照，马常宝，杜森. 测土配方施肥技术[M]. 北京：中国农业出版社, 2005. 30-60.
Gao X B, Ma C B, Du S. The technology of soil- testing and fertilizer-applying prescription [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 30-60.

[14] 王兴仁，张福锁. 现代肥料试验设计[M]. 北京：中国农业出版社, 1996. 168-190.
Wang X R, Zhang F S. Modern fertilizers experimental design [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996. 168-190.

[15] 张学昆，陈洁，王汉中，等. 甘蓝型油菜耐湿性的遗传差异鉴定[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(2): 204-208.
Zhang X K, Chen J, Wang H Z *et al*. Genetic difference of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2007, 29(2): 204-208.

[16] 刘后利. 实用油菜栽培学[M]. 上海：上海科学技术出版社, 1987. 251-256, 571-574.
Liu H L. Practical cultivation of rapeseed [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987. 251-256, 571-574.

[17] 武兰芳. 玉米主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 玉米科学, 1997, 5(1): 72-75.
Wu L F. Grey correlative degree analysis of main agronomic traits of maize hybrid [J]. Maize Sci., 1997, 5(1): 72-75.

[18] 刘唐兴，官春云. 油菜倒伏指数和茎杆生化成分及农艺性状的灰色关联分析[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30(2): 152-156.
Liu T X, Guan C Y. Grey relation analysis between lodging index and biochemistry components of stem, agronomic characteristics in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2008, 30(2): 152-156.

[19] 吴志勇，闫静，施维新，等. "3414"肥料效应试验的设计与统计分析[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(1): 135-141.
Wu Z Y, Y J, S W X *et al*. The design and statistic analysis of effect experiment of fertilizer "3414" [J]. Xinjiang Agric. Sci., 2008, 45(1): 135-141.

[20] 凌新军. 油菜"3414"肥料效应田间试验报告[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(10): 236-238.
Lin X J. The report of experiment of fertilizer "3414" [J]. Anhui A-

gric. Sci., 2007, 13(10): 236-238.

[21] 张锦芳,蒲晓斌,李浩杰,等. 不同来源甘蓝型油菜主要农艺性状与常量的相关分析[J]. 西南农业学报,2007,20(4): 587-590.
Zhang J F, Pu X B, Li H J *et al*. Correlation analysis between major agronomic characters and yield per plant in rapeseed (*Brassica napus* L.) from different sources [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2007,20(4): 587-590.

[22] 李银水,鲁剑巍,邹娟,等. 湖北省油菜氮肥效应及推荐用量研究[J]. 中国油料作物学报,2008,30(2): 218-223.
Li Y S, Lu J W, Zou J *et al*. Study on effect of nitrogen application and recommendation of optimal N application for rapeseed in Hubei [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2008,30(2): 218-223.

[23] 郭庆元,李志玉,涂学文. 我国南方红黄壤地区优质油菜营养特性与施肥研究. Ⅱ. 红壤区稻田双低油菜中双 7 号高产施肥[J]. 中国油料作物学报,2001,23(1): 51-55.
Guo Q Y, Li Z Y, Tu X W. Plant nutritional aspects and effects of fertilizer application in rapeseed in red-yellow soil of south China. Ⅱ. Fertilizer application of double-low rapeseed cultivar, Zhongshuang No.7 in red paddy soil [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2001, 23(1): 51-55.

[24] 宋娜,郭世伟,沈其荣. 不同氮素形态及水分胁迫对水稻苗期水分吸收、光合作用及生长的影响[J]. 植物学通报,2007,24(4): 477-483.
Song N, Guo S W, Shen Q R. Effects of different nitrogen forms and water stress on water absorption, photosynthesis and growth of *Oryza* sativa seedlings [J]. Chin. Bull. Bot., 2007, 24(4): 477-483.

[25] 汪瑞清,杨国正,陆丽娟,等. 氮、磷、钾镁硫混合施用对油菜产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2008,30(2): 212-217.
Wang R Q, Yang G Z, Lu L J *et al*. Nutrients effect of N, P, K, Mg and S on yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2008, 30(2): 212-217.