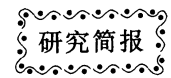


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.00729



## 长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究

邹娟<sup>1</sup> 鲁剑巍<sup>1,\*</sup> 陈防<sup>2</sup> 李银水<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070; <sup>2</sup>中国科学院武汉研究所 / 武汉植物园, 湖北武汉 430074

**摘要:** 总结近年来在长江流域冬油菜主产区进行的 74 个田间试验结果, 分析目前条件下油菜氮磷钾肥的偏生产力、农学效率、肥料表观利用率、生理效率及肥料对油菜产量的贡献率。结果表明, 油菜农学效率分别为  $6.2 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ 、 $6.3 \text{ kg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  和  $2.6 \text{ kg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ ; 表观利用率为 N 34.0%、 $\text{P}_2\text{O}_5$  17.4% 和  $\text{K}_2\text{O}$  36.9%, 生理利用率为  $18.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ 、 $35.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  和  $9.1 \text{ kg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ , 氮磷钾肥对油菜籽产量的贡献率分别为 41.9%、21.4% 和 11.5%。研究结果显示, 试验条件下长江流域油菜的肥料利用率较低, 生产上需同时解决油菜高产及肥料利用效率提高的问题。

**关键词:** 油菜; 肥料利用率; 氮; 磷; 钾

## Status of Nutrient Use Efficiencies of Rapeseed in the Yangtze River Basin

ZOU Juan<sup>1</sup>, LU Jian-Wei<sup>1,\*</sup>, CHEN Fang<sup>2</sup>, and LI Yin-Shui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; <sup>2</sup>Botanical Garden of Wuhan / Wuhan Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Nutrient use efficiency is an important index not only for fertilizer recommendation on the field scale but also for forecasting fertilizer demand on the regional and national scales, however, exact nutrient use efficiencies of rapeseed in the Yangtze River Basin have not been well known yet. In this paper, data from 74 field experiments were collected and used for analysis and evaluation of partial factor productivity (PFP), agronomic efficiency (AE), apparent recovery efficiency (RE), physiological efficiency (PE), and fertilizer contribution index of rapeseed. The results indicated that AE averaged  $6.2 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ ,  $6.3 \text{ kg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ , and  $2.6 \text{ kg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ , respectively. RE averaged N 34.0%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  17.4%, and  $\text{K}_2\text{O}$  36.9%, respectively. The averages of PE were  $18.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ ,  $35.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ , and  $9.1 \text{ kg kg}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ . The contribution of N, P and K fertilizer to rapeseed yield was 41.9%, 21.4%, and 11.5%, respectively. It was concluded that nutrient use efficiencies of rapeseed in the Yangtze River Basin were low. Thus, rapeseed yield and nutrient use efficiencies should be improved simultaneously to ensure sustainability for rapeseed production.

**Keywords:** Rapeseed; Nutrient use efficiency; Nitrogen; Phosphorus; Potassium

肥料利用率是反映作物、土壤、肥料之间关系的动态参数, 也是衡量肥料施用是否合理的一项重要指标。它受到土壤肥力、施肥技术、作物品种、土壤水分、气候因子、栽培管理措施等诸多因素的影响<sup>[1]</sup>。大范围的肥料利用率一般来自两种渠道, 一是地区化肥施用量和粮食产量的数据, 二是汇总大量的田间试验结果<sup>[2-3]</sup>。目前, 多数研究都是根据田间试验的结果汇总而来的。由于田间试验受土壤、水分、气候等多种条件的影响, 因此, 不同地区、不同作物肥料利用率大田试验结果相差较大, 需要汇总大量试验结果。1992 年朱兆良<sup>[4]</sup>总结了 782 个田间试验数据, 结果表明主要粮食作物的氮肥利用率变化在 28%~41% 之间, 平均为 35%。1998 年朱兆良<sup>[5]</sup>进一步指出当时

的主要粮食作物氮肥利用率为 30%~35%, 磷肥利用率为 15%~20%, 钾肥利用率为 35%~50%。张福锁等<sup>[6]</sup>对 2000—2005 年的试验结果分析发现, 目前主要粮食作物(水稻、小麦和玉米)氮肥利用率变幅在 10.8%~40.5%, 平均 27.5%; 磷肥利用率变幅在 7.3%~20.1%, 平均为 11.6%; 钾肥利用率变幅 21.2%~35.9%, 平均为 31.3%。闫湘等<sup>[3]</sup>对 2002—2005 年的 165 个田间试验结果统计指出, 我国水稻、小麦和玉米氮肥当季利用率在 8.9%~78.0% 之间, 平均 28.7%; 磷肥当季利用率在 3.0%~49.3% 之间, 平均 13.1%; 钾肥当季利用率在 4.5%~82.8% 之间, 平均 27.3%。上述研究主要以水稻等主要粮食作物为对象, 对油菜的肥料利用率现状鲜见报道。本文通过对近年来冬油

本研究由国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BADA4B08), 国家现代农业(油菜)产业技术体系专项经费资助项目(nycytx-005), 教育部新世纪人才项目(NCET-07-0345)和国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(Hubei-35)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 鲁剑巍, E-mail: lujianwei@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: zoujuan@webmail.hzau.edu.cn, Tel: 027-61379276

Received(收稿日期): 2010-06-04; Accepted(接受日期): 2011-01-06.

菜主产区大量田间试验数据的总结分析,在明确目前长江流域氮磷钾硼肥施用对油菜产量及经济效益的基础上<sup>[7]</sup>,探讨油菜的肥料利用效率,为油菜种植中科学的养分管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

2004—2007 连续 3 个年度,在长江流域冬油菜主产区的湖北、四川、江苏、江西、浙江、重庆、安徽、贵州、河南和湖南 10 个省(市)布置油菜氮磷钾肥田间肥效试验 74 个,其中湖北 48 个,河南 2 个,其余 7 省(市)各 3 个,每个试验点进行 1 年的肥效试验。供试田块中 40 个试验田土壤为水稻土,31 个为潮土,3 个为紫色土,耕作层土壤 pH 4.6~7.9,含有机质 10.7~57.4 g kg<sup>-1</sup> (平均 27.2 g kg<sup>-1</sup>)、全氮 0.4~3.4 g kg<sup>-1</sup> (平均 1.5 g kg<sup>-1</sup>)、碱解氮 49.4~217.0 mg kg<sup>-1</sup> (平均 113.5 mg kg<sup>-1</sup>)、速效磷 1.9~50.6 mg kg<sup>-1</sup> (平均 16.0 mg kg<sup>-1</sup>)、速效钾 32.3~320.2 mg kg<sup>-1</sup> (平均 111.6 mg kg<sup>-1</sup>)、有效硼 0.1~1.4 mg kg<sup>-1</sup> (平均 0.4 mg kg<sup>-1</sup>)。供试油菜品种为当地推广种植的双低(低芥酸、低硫甙)甘蓝型品种,包括华油杂 4 号、华油杂 6 号、华油杂 9 号、华油杂 12、华双 5 号、中油杂 11、中双 9 号、中双 10 号、德油 5 号和油研 10 号。试验前茬作物为水稻或棉花。

### 1.2 试验设计

试验设计及肥料用量见表 1。小区面积 20 m<sup>2</sup>,3 次重复。磷肥和硼砂全部作基肥在油菜移栽时施用,氮、钾肥分 3 次施用,基肥占 60%,苗肥(约移栽后 50 d)和薹肥(约移栽后 90 d)各占 20%。供试肥料品种分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)、硼砂(含 B 11%)。其他生产管理措施均采用当地常规管理方法。

表 1 试验处理及肥料用量

Table 1 Experimental treatments and the rates of N, P, K, and B fertilizers (kg hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	硼砂 Borax
NPKB	180	90	120	7.5
PKB	0	90	120	7.5
NKB	180	0	120	7.5
NPB	180	90	0	7.5

### 1.3 分析方法

油菜成熟后,从各小区随机取样 6 株,待风干后分成籽粒、茎秆和角壳,分别称重,磨细过 0.5 mm 筛,供分析测定用。籽粒产量以各小区实收计量,茎秆及角壳产量由取样植株茎秆、角壳与籽粒的比例计算得出。将油菜地上部各部分以浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化后,用流动注射分析仪(FIAstar5000,瑞典)测 N 和 P,火焰光度计测 K<sup>[15]</sup>。按常规法测定土壤基本农化性状<sup>[10]</sup>。土壤 pH 按水土比 2.5 :

1.0, pH 计测定;采用重铬酸钾容量法测有机质;半微量开氏法测全氮;0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测速效磷;1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测速效钾;沸水浸提-姜黄素比色法测土壤有效硼。

### 1.4 计算参数及方法

参考 Cassman<sup>[8]</sup>、Fageria 和 Baligar<sup>[9]</sup>及彭少兵等<sup>[10]</sup>方法,用以下参数来表征肥料的利用效率。

氮肥偏生产力(partial factor productivity from applied N, PFP<sub>N</sub>, kg kg<sup>-1</sup> N),指投入的单位肥料氮所能生产的作物籽粒产量,即 PFP<sub>N</sub>=Y/F, Y 为施氮后所获得的作物产量, F 代表施氮量。

氮肥农学效率(agronomic efficiency of applied N, AE<sub>N</sub>, kg kg<sup>-1</sup> N),指单位施氮量所增加的作物籽粒产量,即 AE<sub>N</sub>=(Y-Y<sub>0</sub>)/F, Y 为施氮后所获得的作物产量, Y<sub>0</sub> 为不施氮条件下作物的产量, F 代表施氮量。

氮肥表观利用率(apparent recovery efficiency of applied N, RE<sub>N</sub>, %),反映作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率,即 RE<sub>N</sub>=(U-U<sub>0</sub>)/F, 其中 U 为施氮后作物收获时地上部的吸氮总量, U<sub>0</sub> 为未施氮时作物收获期地上部的吸氮总量, F 代表施氮量。

氮肥生理利用率(physiological efficiency of applied N, PE<sub>N</sub>, kg kg<sup>-1</sup> N),是作物地上部每吸收单位肥料中的氮所获得的籽粒产量的增加量: PE<sub>N</sub>=(Y-Y<sub>0</sub>)/(U-U<sub>0</sub>)

同理,分别计算磷、钾肥利用效率。

同时计算肥料贡献率和地力贡献率,

肥料贡献率(fertilizer contribution rate, FCR, %)=(施肥区产量-不施肥区产量)/施肥区产量×100

地力贡献率(soil contribution rate, SCR, %)=不施肥区产量/施肥区产量×100

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对油菜产量的影响

表 2 结果说明,与缺素处理相比,氮磷钾及硼配合施用处理油菜各部位生物量增加明显。以油菜籽为例, NPKB 处理菜籽产量在 1 222~4 732 kg hm<sup>-2</sup> 之间,平均为 2 654 kg hm<sup>-2</sup>, PKB、NKB 和 NPB 处理菜籽产量平均分别为 1 541、2 086 和 2 347 kg hm<sup>-2</sup>。可见,油菜施用氮、磷和钾肥的平均增产率分别为 1 113、568 和 307 kg hm<sup>-2</sup>,增产率分别为 72.2%、27.2%和 13.1%。

### 2.2 施肥对油菜养分吸收的影响

表 3 显示,施氮明显提高油菜各部位 N 素含量;施用磷、钾肥后油菜各部位相应养分含量亦呈上升趋势,其中籽粒 P 含量、茎秆及角壳 K 含量随磷、钾肥施用增加幅度达到显著水平。

养分积累量为养分含量与生物量的乘积。施用氮、磷及钾肥后油菜各部位生物量及相应养分含量均有明显增加,故油菜各部位养分积累量亦随氮、磷及钾肥施用呈现显著增加趋势(表 4)。

表 2 不同施肥处理油菜各部位产量  
Table 2 Seed, stem and pod yields of rapeseed in different treatments (kg hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	籽粒 Seed		茎秆 Stem		角壳 Pod	
	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
NPKB	1222-4732	2654±693 a	1039-6913	3678±1235 a	1036-3963	2139±769 a
PKB	344-3062	1541±587 d	396-4034	2102±872 d	272-2524	1225±496 d
NKB	294-3827	2086±654 c	267-5450	2737±978 c	275-3529	1715±689 c
NPB	956-4087	2347±662 b	777-5794	3154±1152 b	722-5155	1894±681 b

同一指标以不同小写字母的值在 P<0.05 水平下差异显著。

Valued within a column followed by different small letters are significantly different at P<0.05.

表 3 施肥对油菜各部位氮磷钾养分含量的影响  
Table 3 Effect of fertilization on N, P, and K contents of rapeseed (%)

养分 Nutrient	处理 Treatment	籽粒 Seed		茎秆 Stem		角壳 Pod	
		范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
N	NPKB	2.86-4.35	3.59±0.34 a	0.30-1.34	0.52±0.18 a	0.28-1.59	0.74±0.26 a
	PKB	2.28-4.18	3.30±0.45 b	0.29-1.13	0.43±0.15 b	0.30-1.17	0.59±0.18 b
P	NPKB	0.51-0.91	0.71±0.09 a	0.01-0.17	0.06±0.04 a	0.01-0.37	0.11±0.07 a
	NKB	0.34-0.97	0.65±0.14 b	0.01-0.14	0.05±0.03 a	0.01-0.31	0.09±0.06 a
K	NPKB	0.26-1.43	0.82±0.18 a	0.18-5.28	1.96±0.78 a	1.53-4.39	2.78±0.64 a
	NPB	0.50-1.35	0.80±0.17 a	0.12-3.31	1.54±0.76 b	0.44-3.68	2.51±0.64 b

表 4 施肥对油菜各部位氮磷钾养分吸收量的影响  
Table 4 Effect of fertilization on N, P, and K uptake of rapeseed (kg hm<sup>-2</sup>)

养分 Nutrient	处理 Treatment	籽粒 Seed		茎秆 Stem		角壳 Pod		总计 Total	
		范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
N	NPKB	42.5-160.2	94.8±24.4 a	5.1-75.3	19.0±10.0 a	4.5-39.5	15.8±7.9 a	53.2-219.7	129.6±34.8 a
	PKB	11.4-113.3	51.4±22.2 b	1.3-31.8	9.4±5.5 b	1.1-19.7	7.4±4.2 b	14.3-142.0	68.2±29.2 b
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NPKB	14.8-74.1	43.5±12.4 a	0.6-21.3	4.8±3.5 a	0.4-29.3	5.4±4.7 a	16.7-109.2	53.7±16.4 a
	NKB	2.4-75.6	31.4±12.6 b	0.2-13.5	3.5±2.7 b	0.1-15.4	3.6±2.8 b	2.8-89.9	38.7±16.6 b
K <sub>2</sub> O	NPKB	8.0-48.0	25.9±7.7 a	6.5-179.9	86.4±41.6 a	27.5-186.4	69.9±25.5 a	54.3-339.1	182.2±61.4 a
	NPB	8.0-40.0	22.2±6.6 b	4.5-131.9	59.7±36.9 b	11.1-112.0	55.1±21.9 b	35.4-269.8	137.0±57.0 b

2.3 油菜肥料利用效率

2005—2007 年长江流域 74 个油菜肥效试验氮磷钾肥偏生产力、农学效率、肥料表观利用率、生理利用率及肥料贡献率和地力贡献率见表 5。从表中可以看出, 氮、磷和钾肥平均偏生产力分别为 14.7 kg kg<sup>-1</sup> N、29.5 kg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 22.1 kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O; 平均农学效率分别为 6.2 kg kg<sup>-1</sup> N、6.3 kg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 2.6 kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O; 氮、磷和钾肥平均表观利用率为 34.0%、17.4% 和 36.9%; 氮、磷和钾肥平均生理利用率分别为 18.5 kg kg<sup>-1</sup> N、35.5 kg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 9.1 kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O。氮、磷和钾素肥料贡献率分别是 41.9%、21.4% 和 11.5%; 相应的地力贡献率分别是 58.1%、78.6% 和 88.5%。

2.4 肥料表观利用率

肥料偏生产力(PFP)、农学效率(AE)、表观利用率(ARE)及生理利用率(PE)是从不同角度描述作物对肥料养分的利用效率, 其内涵及应用对象常常不同。RE 能很好

地反映作物对化肥养分的吸收状况, 是我国学术界和政府关注的焦点<sup>[6]</sup>。由表 5 可知, 不同试验点的氮、磷和钾肥表观利用率差异较大, 其中氮肥表观利用率最小值为 0, 最大值为 82.6%; 磷肥表观利用率最小值为 0, 最大值为 56.4%; 钾肥表观利用率最大值可达 100%, 最小值与氮、磷一样, 为 0。分别将氮、磷和钾肥表观利用率划分为 7 个等级, 计算每个等级下氮、磷和钾肥表观利用率的样本百分比, 进一步了解目前油菜肥料表观利用率的样本分布频率(图 1)。从分布频率图可以看出, 74 个试验点中, 氮肥表观利用率处于 30%~40% 的样本有 19 个, 占总数 26%; 磷肥表观利用率小于 5% 的样本最多, 占总数 24%; 7 个等级中, 钾肥表观利用率大于 60% 的分布频率最高, 为 19%。另外, 从图 1 也可以看出, 氮及钾肥表观利用率小于 30%、磷肥表观利用率小于 15% 的试验样本均占到总样本的 40% 以上, 说明目前条件下油菜肥料利用率较低。

表 5 油菜施肥增产量、增产率及肥料利用效率  
Table 5 Yield response to fertilization and fertilizer efficiency in rapeseed

参数 Parameter	平均 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	下四分位点 Lower quartile	中值 Med.	上四分位点 Upper quartile	最大值 Max.
N							
偏生产力 PFP ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	14.7	3.9	6.8	12.0	14.5	16.6	26.3
农学效率 AE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	6.2	3.6	1.1	3.5	5.1	8.0	15.8
表观利用率 ARE (%)	34.0	16.7	0.0	22.0	33.0	42.5	82.6
生理利用率 PE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	18.5	7.8	0.0	14.1	17.5	21.9	49.1
肥料贡献率 FCR (%)	41.9	19.0	7.5	26.5	42.9	58.1	76.0
地力贡献率 SCR (%)	58.1	19.0	24.0	41.9	57.1	73.5	92.5
$\text{P}_2\text{O}_5$							
偏生产力 PFP ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	29.5	7.7	13.6	24.1	28.9	33.3	52.6
农学效率 AE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	6.3	5.5	0.0	2.6	4.6	8.0	26.3
表观利用率 ARE (%)	17.4	13.4	0.0	6.3	15.8	25.0	56.4
生理利用率 PE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	35.5	26.5	0.0	16.4	33.3	48.3	137.1
肥料贡献率 FCR (%)	21.4	20.8	0.0	9.8	17.5	30.3	75.9
地力贡献率 SCR (%)	78.6	20.8	24.1	69.7	82.5	90.2	100.0
$\text{K}_2\text{O}$							
偏生产力 PFP ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	22.1	5.8	10.2	18.0	21.7	25.0	39.4
农学效率 AE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	2.6	2.0	0.0	1.1	2.2	3.3	8.4
表观利用率 ARE (%)	36.9	26.6	0.0	16.0	34.5	56.4	100.0
生理利用率 PE ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	9.1	12.1	0.0	2.4	5.8	11.3	81.1
肥料贡献率 FCR (%)	11.5	8.6	0.0	6.1	11.3	15.8	40.7
地力贡献率 SCR (%)	88.5	8.6	59.3	84.2	88.7	93.9	100.0

PFP: partial factor productivity; AE: agronomic efficiency; ARE: apparent recovery efficiency; PE: physiological efficiency; FCR: fertilizer contribution rate; SCR: soil contribution rate.

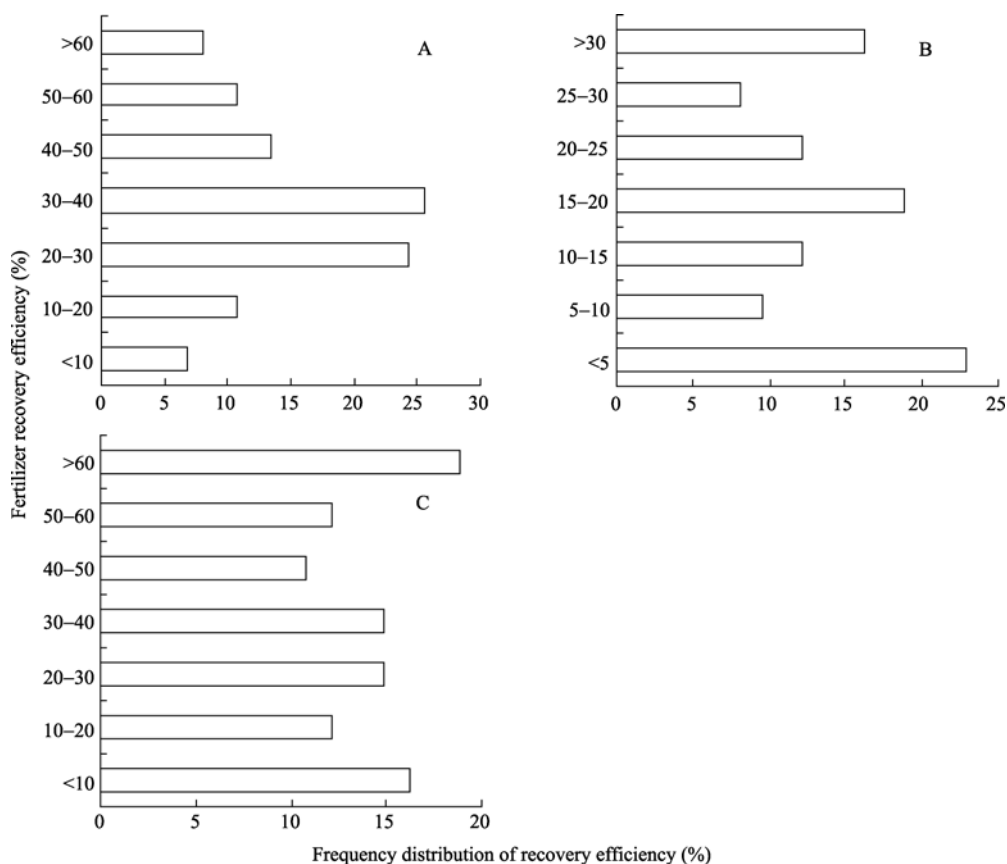


图 1 油菜不同试验点肥料表观利用率分布频率

Fig. 1 Frequency distribution of fertilizer apparent recovery efficiencies (ARE) in rapeseed  
A: 氮肥表观利用率; B: 磷肥表观利用率; C: 钾肥表观利用率。A: ARE<sub>N</sub>; B: ARE<sub>P</sub>; C: ARE<sub>K</sub>.

### 3 讨论

本研究中不同试验点油菜肥料利用率的变异较大, 其影响因素较多, 如土壤肥力状况、油菜品种、气候因子等。产量效应的结果已表明, 油菜施肥的增产效果与其相应的土壤养分含量有关, 即菜籽增产幅度随土壤速效养分含量的升高而降低<sup>[7]</sup>, 油菜肥料利用率亦与其土壤养分含量呈负相关关系(限于篇幅, 结果未在文中列出)。

从平均水平看, 试验条件下长江流域油菜的肥料利用率(表观利用率)分别为 N 34.0%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 17.4%和 K<sub>2</sub>O 36.9%, 此结果与 20 世纪 90 年代前我国主要粮食作物的肥料利用率相近(表 6), 但与近年的有关结果相比, 本研

究中所求得的油菜肥料利用率要稍高于水稻、小麦和玉米等粮食作物的肥料利用率。分析其原因主要是与禾本科作物相比, 单位面积上油菜对氮、磷、钾养分的需求量较高<sup>[11]</sup>; 以及本研究中 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 施用量分别为 180、90 和 120 kg hm<sup>-2</sup>, 要略低于上述研究中粮食作物的施肥量, 而肥料利用率随施肥量的增加呈下降趋势<sup>[11,12]</sup>。尽管油菜的肥料利用率(RE)高于水稻、小麦和玉米的氮、磷和钾肥利用率, 但在偏生产力、农学效率及生理利用率方面, 油菜均明显低于水稻等粮食作物。以农学效率为例, 本研究中油菜的农学效率分别为 6.2 kg kg<sup>-1</sup> N、6.3 kg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 2.6 kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, 远低于当前水稻的农学效率 10.4 kg kg<sup>-1</sup> N、9.0 kg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 6.3 kg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, 这与油菜收获指数低有关<sup>[13]</sup>。

表 6 油菜与我国主要粮食作物肥料利用率的比较  
Table 6 NPK nutrient efficiencies in rapeseed compared with those in rice, wheat and maize in China

作物 Crop	试验年度 Year	试验数 No.	农学效率 AE (kg kg <sup>-1</sup> )			表观利用率 ARE (%)			资料来源 Data source
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
油菜 Rapeseed	2005-2007	74	1.1-15.8 (6.2) <sup>2)</sup>	0-26.3 (6.3)	0-8.4 (2.6)	0-82.6 (34.0)	0-56.4 (17.4)	0-100.0 (36.9)	This study
粮食作物 <sup>1)</sup> Food crop	Before 1990	782	—	—	—	30-35	15-20	35-50	Zhu <sup>[4-5]</sup>
粮食作物 <sup>1)</sup> Food crop	2000-2005	1333	9.4	7.9	5.8	10.8-40.5 (27.5)	7.3-20.1 (11.6)	21.2-35.9 (31.3)	Zhang et al. <sup>[6]</sup>
粮食作物 Food crop	2002-2005	165	11.3	8.5	7.5	8.9-78.0 (28.7)	3.0-49.3 (13.1)	4.5-82.8 (27.3)	Yan X et al. <sup>[3]</sup>

<sup>1)</sup> 粮食作物主要包括水稻、小麦和玉米; <sup>2)</sup> 括号内为均值。

<sup>1)</sup> Including rice, wheat and maize; <sup>2)</sup> Data in parentheses are mean values. AE: agronomic efficiency; ARE: apparent recovery efficiency.

表 7 为不同文献来源的油菜氮素利用率结果, 由于本研究中 NPKB 氮肥用量高于文献的氮肥用量, 所以本研究的油菜氮肥利用率均明显低于文献的研究结果, 其中 NPKB 处理每千克氮素增产的油菜籽少 2.6~9.6 kg, 氮素表观利用率低 9.2~45.2 个百分点。结果说明长江流域油菜的肥料利用率总体水平较低, 且本研究中的肥料利

用率是在试验条件下得到的, 就目前的施肥和管理水平来看, 农户条件下的肥料利用率和田间试验条件相比还要低。以氮素为例, 农民习惯处理氮素表观利用率仅 25.3% (数据未发表), 比试验条件下 NPKB 处理氮肥表观利用率低约 10 个百分点, 这与朱兆良<sup>[4]</sup>、张福锁等<sup>[6]</sup>关于农户条件和试验条件下肥料利用率比较的结果一致。

表 7 油菜氮素利用率的比较  
Table 7 Comparison of N nutrient efficiencies in rapeseed

氮肥用量 N rate (kg hm <sup>-2</sup> )	农学效率 AE (kg kg <sup>-1</sup> N)	表观利用率 ARE (%)	生理利用率 PE (kg kg <sup>-1</sup> N)	资料来源 Data source
180	6.4	34.0	18.4	This study
75	10	44	22	Hocking et al. <sup>[14]</sup>
75	16	80	21	Hocking et al. <sup>[15]</sup>
75	16	74	23	Hocking et al. <sup>[15]</sup>
100	9	50	17	Smith et al. <sup>[16]</sup>

缩写同表 5。Abbreviations as in Table 5.

以上结果表明, 尽管油菜肥料利用率略高于近年在粮食作物上的研究结果, 但与澳大利亚等国相比, 仍有较大的差距。要提高我国油菜肥料利用率可以从以下几个方面进行即根据土壤肥力状况及油菜对养分的需求规律, 在充分利用土壤养分基础上, 合理施肥, 以减少肥料的损失; 氮磷钾及中微量元素肥料配合施用; 氮肥深施及分次施用; 施用缓/控释肥等。在实际生产中哪些措施能

在提高油菜产量及施肥经济效益的基础上提高油菜肥料利用率, 需进一步的田间试验来验证。

### References

- [1] Ju X-T(巨晓棠), Zhang F-S(张福锁). Thinking about nitrogen recovery rate. *Ecol Environ* (生态与环境), 2003, 12(2): 192-197 (in Chinese with English abstract)

- [2] Chen T-B(陈同斌), Zeng X-B(曾希柏), Hu Q-X(胡清秀). Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties in China. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 2002, 57(5): 531–538 (in Chinese with English abstract)
- [3] Yan X(闫湘), Jin J-Y(金继运), He P(何萍), Liang M-Z(梁鸣早). Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2008, 41(2): 450–459 (in Chinese with English abstract)
- [4] Zhu Z-L(朱兆良). Fertilizer fate and N management in agroecosystem. In: Zhu Z-L(朱兆良), Wen Q-X(文启孝), eds. Nitrogen in Soil of China (中国土壤氮素). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. pp 228–245 (in Chinese)
- [5] Zhu Z-L(朱兆良). The status problems and countermeasure of nitrogen fertilizer application in China. In: Li Q-K(李庆逵), Zhu Z-L(朱兆良), Yu T-R(于天仁), eds. Fertilizer Issues of Sustainable Agriculture Development in China (中国农业持续发展中的肥料问题). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. pp 38–51 (in Chinese)
- [6] Zhang F-S(张福锁), Wang J-Q(王激清), Zhang W-F(张卫峰), Cui Z-L(崔振岭), Ma W-Q(马文奇), Chen X-P(陈新平), Jiang R-F(江荣风). Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2008, 45(5): 915–924 (in Chinese with English abstract)
- [7] Zou J(邹娟), Lu J-W(鲁剑巍), Chen F(陈防), Li Y-S(李银水). Effect of nitrogen, phosphorus, potassium and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River Basin. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(1): 87–92 (in Chinese with English abstract)
- [8] Cassman K G, Peng S, Olk D C, Ladha J K, Reichardt W, Dobermann A, Singh U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Res*, 1998, 56: 7–39
- [9] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. *J Plant Nutr*, 2003, 26: 1315–1333
- [10] Peng S-B(彭少兵), Huang J-L(黄见良), Zhong X-H(钟旭华), Yang J-C(杨建昌), Wang G-H(王光火), Zou Y-B(邹应斌), Zhang F-S(张福锁), Zhu Q-S(朱庆森), Buresh R, Wittl C. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(9): 1095–1103 (in Chinese with English abstract)
- [11] Orlovius K. Oilseed rape. In: Kirbky E A ed. Fertilizing for High Yield and Quality, Bulletin 16. IPI, Basel. 2003
- [12] Jensen L S, Christensen L, Mueller T, Nielsen N E. Turnover of residual <sup>15</sup>N-labelled fertilizer N in soil following harvest of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant Soil*, 1997, 190: 193–202
- [13] Dreccer M F, Schapendonk A H C M, Slafer G A, Rabbinge R. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. *Plant Soil*, 2000, 220: 189–205
- [14] Hocking P J, Stapper M. Effects of sowing time and nitrogen fertilizer on canola and wheat, and nitrogen fertilizer on Indian mustard: II. Nitrogen concentrations, N accumulation, and N fertilizer use efficiency. *Aust J Agric Res*, 2001, 52: 635–644
- [15] Hocking P J, Randall P J, DeMarco D. The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen, and nitrogen effects on yield components. *Field Crops Res*, 1997, 54: 201–220
- [16] Smith C J, Wright G C, Woodrooffe M R. The effect of irrigation and nitrogen fertilizer on rapeseed (*Brassica napus*) production in south-eastern Australia: II. Nitrogen accumulation and oil yield. *Irrigr Sci*, 1988, 9: 15–25