

江浙油菜主产区冬油菜的区域适宜施氮量研究*

王 寅¹ 鲁剑巍^{1†} 李小坤¹ 任 涛¹ 丛日环¹ 姜丽娜² 张永春³

(1 华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

(2 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

(3 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘 要 2008–2009 年和 2009–2010 年, 在江苏、浙江两省油菜主产区布置 10 组冬油菜的氮肥用量田间试验, 研究施氮对产量、干重、氮素吸收累积及氮肥利用效率的影响, 通过肥效模型确定该区域油菜的适宜施氮量, 为农民合理施氮提供依据。结果表明, 冬油菜施氮的增产效果显著, 施氮 270 kg hm⁻² 时油菜产量达到最高的 2 581 kg hm⁻², 较无氮区对照平均增产 1 265 kg hm⁻², 增幅为 121%。施氮明显增加了油菜的地上部干重, 促进其对氮素的吸收和累积, 但过量施氮导致收获指数和氮素收获指数出现降低, 并导致氮肥利用效率的显著下降。各试验点油菜的适宜施氮量平均为 199 kg hm⁻², 此施氮量条件下不仅大幅减少氮肥投入, 还同时获得较高的区域产量水平和氮肥利用效率。分析认为, 当前江浙油菜主产区冬油菜推荐施氮 200 kg hm⁻², 不同地区和田块可根据实际情况进行微调。

关键词 油菜; 氮肥; 施肥效果; 适宜施氮量; 区域推荐施肥

中图分类号 S147.5 **文献标识码** A

中国是世界人口大国, 粮油安全关乎人民生活和国家稳定。在当前人增地减的严峻形势下, 化肥尤其是氮肥的施用极大提高了我国作物的单产水平, 保障了国家粮油安全^[1-2]。油菜是我国当前最重要的油料作物, 其生长发育对氮素十分敏感^[3-4]。充足的氮素供应可有效促进油菜光合作用^[5], 增加植株干物质累积和氮素吸收^[6-7], 利于增加分枝和角果而提高籽粒产量^[8-11]。过量施氮则会造作物贪青晚熟, 无益于增产还易引发环境风险^[12-13], 因此油菜的适宜施氮量研究非常重要。受土壤、环境和气候等因素影响, 不同地区油菜的适宜施氮量存在差异^[10]。李银水等^[6]通过湖北省 10 个大田试验发现油菜施氮 150 kg hm⁻² 时可获得较好的产量和氮肥利用效率(产量在 2 250 kg hm⁻² 左右), 聂泽民等^[14]研究显示洞庭湖平原油菜的适宜施氮量为 180 kg hm⁻² (产量在 3 500 kg hm⁻² 左右), 而 Boelcke 等^[15]在德国的研究表明油菜施氮应控制在 200 kg hm⁻² 以内(产量在 4 200 kg hm⁻² 左右)。

地处长江下游的江苏、浙江两省是我国重要的粮油产区, 油菜、水稻和小麦的种植面积广且产量水平高。2010 年江、浙两省的油菜单产平均为 2 260 kg hm⁻², 显著高于全国平均水平(1 775 kg hm⁻²), 较长江中游地区高出 36.3% (湖北、安徽、江西、湖南四省平均单产 1 658 kg hm⁻²)^[16]。但是该地区农民的化肥投入量也普遍偏高^[17], 如太湖流域稻-油轮作中农田周年氮素投入量接近 500 kg hm⁻², 氮素盈余超过 60%^[18], 而该地区作物的氮肥利用效率却非常低^[19]。农户调查结果显示江、浙两省农民油菜季平均施氮 227 kg hm⁻², 其中有 20% 超过 300 kg hm⁻², 最高甚至达到 400 kg hm⁻²^[20]。油菜季施氮过多会增加由于降雨径流而导致的氮素流失, 提高面源污染风险^[21]。当前农田过量施氮已给江浙地区的生态环境造成了严重影响^[22-23], 如 2007 年太湖流域蓝藻的大面积爆发, 因此当前农民“高氮、低效、高污染”的习惯施肥措施急需改变。目前该区域的作物施氮研究大多集中于水稻和小

* 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2010BAD01B05)、国家油菜产业技术体系建设专项(CARS-13)、中央高校基本科研业务费专项(2011PY156)和国际植物营养研究所合作项目(Hubei-35)资助

† 通讯作者, Tel: 027-61379276, E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 王 寅(1986—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为现代施肥技术。E-mail: wy1986410@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2013-02-04; 收到修改稿日期: 2013-05-19

麦^[22, 24-26],冬油菜的相关研究很少,难以有效地指导生产,而开展冬油菜推荐施氮研究对促进该区域农田系统的氮素科学管理和环境保护具有重要意义。为此,我们在江浙油菜主产区布置冬油菜的氮肥用量田间试验,研究施氮量对产量、干物质累积、氮素吸收累积及氮肥利用率的影响,揭示当前生产条件下该区域油菜的施氮效果。同时参照朱兆良先生的“区域平均适宜施氮量法”^[27-28]确定区域油菜适宜施氮量,以期当地油菜的合理施肥提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

2008 - 2009 年和 2009 - 2010 年在江苏和浙

江两省共布置 10 组冬油菜的氮肥用量田间试验,其中江苏省 3 组(2008 - 2009 年),浙江省 7 组(2008 - 2009 年 3 组,2009 - 2010 年 4 组)。试验区主要分布于苏南、浙北油菜主产区,该区域气候类型接近,种植结构相似,油菜生产中施氮量普遍偏高。各试验点具体位置和耕层土壤基本状况见表 1。供试油菜品种为华双 5 号(江苏省)和浙双 72(浙江省)。田间试验采用育苗移栽方式种植,移栽密度为 10.5 万株 hm^{-2} ,不同地区根据当地农民的油菜种植习惯安排试验进程。各试验点于当年 10 月上中旬播种育苗,11 月中旬进行移栽,次年 5 月中下旬收获。各试验田的前茬作物均为水稻。

表 1 各试验点位置和土壤基本状况

Table 1 Locations and basic soil properties of the field trial sites in main oilseed rape production areas of Jiangsu and Zhejiang provinces

年份 Year	地点 Location	pH	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	有效硼	
			(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	
2008 - 2009	江苏 Jiangsu	姜堰 Jiangyan (32°30'N, 120°07'E)	8.2	14.9	1.0	81.2	7.8	49.8	0.36
		句容 Jurong (32°01'N, 119°11'E)	8.0	12.4	0.8	77.6	9.8	39.8	0.39
		曲塘 Qutang (32°29'N, 120°20'E)	8.3	13.4	1.0	117.3	2.6	19.9	0.23
2008 - 2009	浙江 Zhejiang	长兴 Changxing (30°58'N, 119°51'E)	5.7	37.1	2.1	193.4	37.1	69.8	0.55
		林城 Lincheng (30°55'N, 119°47'E)	5.7	38.0	2.2	171.8	10.0	54.8	0.60
		彭城 Pengcheng (31°02'N, 119°59'E)	5.2	37.9	2.0	190.5	52.7	119.6	0.88
2009 - 2010	浙江 Zhejiang	富阳 Fuyang (29°58'N, 119°57'E)	5.0	35.6	1.8	151.8	37.1	62.7	0.65
		江山 Jiangshan (28°48'N, 118°43'E)	5.3	47.8	2.6	198.1	22.8	73.1	0.30
		平湖 Pinghu (30°42'N, 121°01'E)	6.1	37.4	1.6	154.1	36.3	108.7	1.13
		绍兴 Shaoxing (29°59'N, 120°36'E)	5.6	29.2	1.6	155.6	23.4	76.3	0.87

1.2 试验设计

田间试验设 5 个施氮水平,分别为 N 0、90、180、270、360 kg hm^{-2} ,以 N_0 、 N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 和 N_{360} 表示。各处理的磷、钾、硼养分用量保持一致,根据《中国主要作物施肥指南》^[29]确定,每 hm^2 施用量

分别为 90 $\text{kg P}_2\text{O}_5$ 、120 $\text{kg K}_2\text{O}$ 和 15 kg 硼砂。供试肥料品种分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)、硼砂(含 B 12%)。

磷肥和硼砂全部作基肥在油菜移栽前施用,

氮、钾肥的 60% 作基肥,越冬期和抽薹前期分别追施 20%^[29]。除施肥措施不同外,其他栽培方式和田间管理均与当地农民习惯保持一致。所有试验点均设 3 次重复,随机区组排列,小区面积 20 m²。

1.3 样品采集与分析

各试验点土壤及植物样品的采集和测定均用如下的统一方法进行。

土壤样品在油菜基肥施用前采集,以整个田块为采样单元均匀布点 15 个,取 0~20 cm 耕层土壤,实验室风干磨细过筛后供理化分析用。土壤基本理化性质按常规法测定^[30]:pH 按水土比 2.5:1,pH 计测定;有机质用重铬酸钾容量法;全氮用半微量开氏法-标准酸滴定;碱解氮用碱解扩散法-标准酸滴定;有效磷用 0.5 mol L⁻¹NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾用 1 mol L⁻¹NH₄OAc 浸提-火焰光度法;有效硼用热水浸提-姜黄素比色法。

油菜成熟期收获前对各试验点所有小区进行取样,每小区随机取样 6 株,网袋悬挂风干脱粒后,分别统计地上部的茎秆、角壳和籽粒质量。各部分样品经 60℃ 烘干磨细过筛后供养分测定用。植株样品养分采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮,流动注射分析仪(德国 SEAL,AA3)测定全氮含量^[30]。

收获时对各试验点所有小区进行单收单打,统计籽粒实产,并根据取样所得茎秆、角壳和籽粒的质量比推算其地上部总干重。

1.4 适宜施氮量的确定

分别利用线性加平台和一元二次肥效模型^[31]对油菜产量与氮肥用量进行拟合,确定田块适宜施氮量(The field-specific optimal N fertilizer application rate, FSONR)。其中一元二次模型以最经济施氮量作为适宜施氮量,线形加平台模型以拐点施氮量作为适宜施氮量(同时也是最经济施氮量),同时利用一元二次模型计算田块最高施氮量(The field-specific max N fertilizer application rate, FSMNR)。若肥效模型的相关系数未达到显著水平,则根据试验点各处理的产量表现结合经济效益确定适宜施氮量和最高施氮量。参照“区域平均适宜施氮量法”^[27],以 10 个田块适宜施氮量的平均值作为区域平均适宜施氮量(Regional mean optimal N fertilizer application rate, RMONR)。

线性加平台模型: $y = a + bx$ ($x < C$)

$$y = P \quad (x \geq C)$$

式中, y 为油菜产量(kg hm⁻²), x 为氮肥用量(kg hm⁻²), a 为截距, b 为回归系数, C 为直线与平台的

拐点, P 为平台产量(kg hm⁻²)。当 $b > P_x / P_y$ 时, C 即为推荐施氮量;当 $b \leq P_x / P_y$ 时,推荐施氮量为 0。

一元二次模型: $y = ax^2 + bx + c$

式中, y 为油菜产量(kg hm⁻²), x 为氮肥用量(kg hm⁻²), a 为二次回归系数, b 为一次回归系数, c 为截距。最高产量施肥量 $X_{\max} = -b / 2a$,经济施氮量 $X_e = [(P_x / P_y) - b] 2a$ 。推荐施肥计算中, P_x 为氮肥(N)价格, P_y 为油菜籽价格(2008-2009 年和 2009-2010 年油菜籽市场价格平均为 4.0 元 kg⁻¹,氮肥价格为 4.35 元 kg⁻¹ N)。

1.5 参数计算方法与数据统计分析

参照文献[32-33]用以下参数表征氮肥利用效率。

氮肥表观利用率(Apparent recovery efficiency of applied N, RE_N, %),反映作物对施入土壤中的肥料氮素的回收效率,即 $RE_N = (u - u_0) \times 100 / f$,其中 u 为施氮区作物收获时地上部的吸氮总量, u_0 为无氮区作物收获期地上部的吸氮总量, f 为氮肥施用量。

氮肥农学利用率(Agronomic efficiency of applied N, AE_N, kg kg⁻¹ N),指单位施氮量所增加的作物籽粒产量,即 $AE_N = (y - y_0) / f$,其中 y 为施氮区作物产量, y_0 为无氮区作物产量, f 为氮肥施用量。

氮肥偏生产力(Partial factor productivity from applied N, PFP_N, kg kg⁻¹ N),指投入单位肥料氮所生产的作物籽粒产量,即 $PFP_N = y / f$,其中 y 为施氮区作物产量, f 为氮肥施用量。

采用 Excel 软件计算试验数据,分别用 SAS 和 Excel 软件进行线性加平台和一元二次肥效模型的拟合。采用 DPS 软件进行统计分析,LSD 法检验 $p < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果

2.1 产量效应

表 2 显示,江浙油菜主产区冬油菜的产量水平整体上随施氮量增加而提高,在施氮 270 kg hm⁻² 时平均产量达到最高的 2 581 kg hm⁻²,相比 N₀ 处理平均增产 1 265 kg hm⁻²,增幅达 121%。施氮量超过 180 kg hm⁻² 后处理间的增产量和增幅均无明显差异(图 1),说明过量施氮无明显增产效果。

不同试验点油菜产量对氮肥用量的响应趋势不尽相同,长兴、富阳、江山和绍兴四个地区的 N₉₀

处理相比 N_0 处理有显著增产,施氮量继续增加后增产效果并无明显变化,而林城和彭城地区的油菜产量则随施氮量增加一直呈上升趋势。各试验点

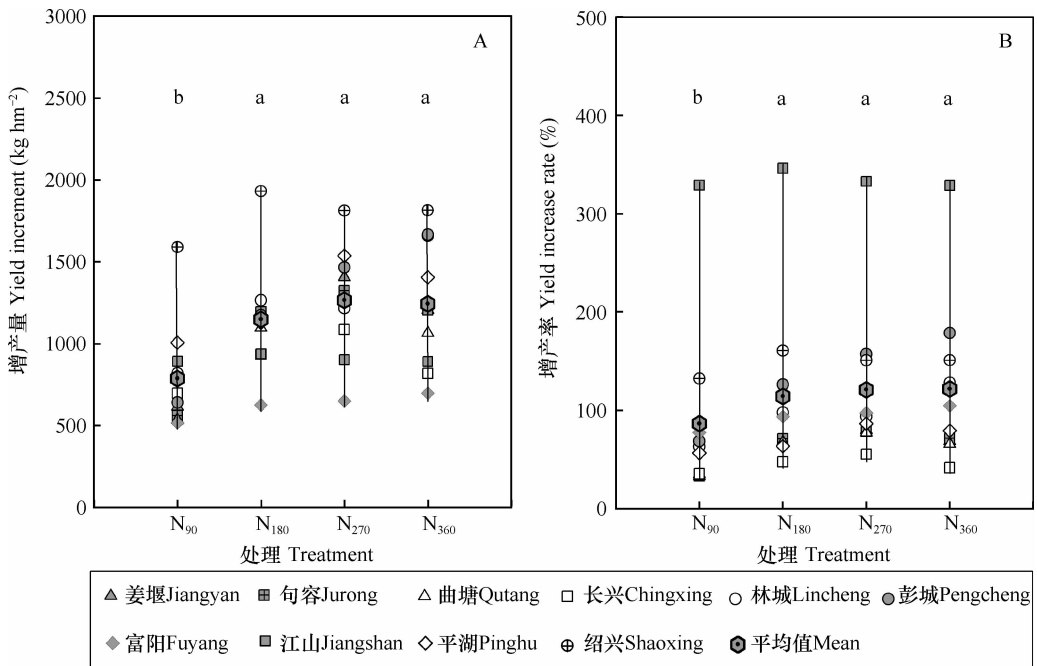
中以江山点增产效果最好,各施氮处理较无氮区对照增产均超过 300%,而长兴点增产效果较低,较无氮区对照增产最高未超过 60%。

表 2 施氮量对冬油菜产量的影响

Table 2 Responses of the winter oilseed rape to N application rate in yield

地点 Sites	产量 Seed yield (kg hm^{-2})				
	N_0	N_{90}	N_{180}	N_{270}	N_{360}
姜堰 Jiangyan	1 759 d	2 375 c	2 948 b	3 166 a	2 964 b
句容 Jurong	1 682 d	2 242 c	2 876 b	3 005 a	2 887 b
曲塘 Qutang	1 620 d	2 156 c	2 717 b	2 875 a	2 685 b
长兴 Changxing	1 963 b	2 660 a	2 898 a	3 050 a	2 781 a
林城 Lincheng	1 294 c	2 113 b	2 560 ab	2 510 ab	2 951 a
彭城 Pengcheng	931 d	1 571 c	2 106 b	2 396 ab	2 597 a
富阳 Fuyang	667 b	1 183 a	1 292 a	1 317 a	1 365 a
江山 Jiangshan	271 b	1 163 a	1 209 a	1 173 a	1 161 a
平湖 Pinghu	1 772 c	2 778 b	2 900 b	3 308 a	3 177 a
绍兴 Shaoxing	1 200 b	2 788 a	3 130 a	3 012 a	3 013 a
平均值 Mean	1 316 c	2 103 b	2 464 a	2 581 a	2 558 a

注:同一行中小写字母不同表示处理间差异显著($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between treatments ($p < 0.05$)



注:不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$),下同 Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($p < 0.05$). The same below

图 1 施氮量对冬油菜增产(A)和增产率(B)的影响

Fig. 1 Yield increment (A) and yield increase rate (B) as affected by N application rate for winter oilseed rape

2.2 地上部干重和收获指数

不施氮条件下冬油菜地上部干重平均为 5 057 kg hm⁻², 施氮显著提高植株地上部的干物质累积 (图 2)。各试验点油菜的地上部干重整体随施氮量增加而持续上升, N₃₆₀ 处理达到最高的 9 810 kg hm⁻²。与产量表现类似, 地上部干重在施氮超过 180 kg hm⁻² 后无明显变化。

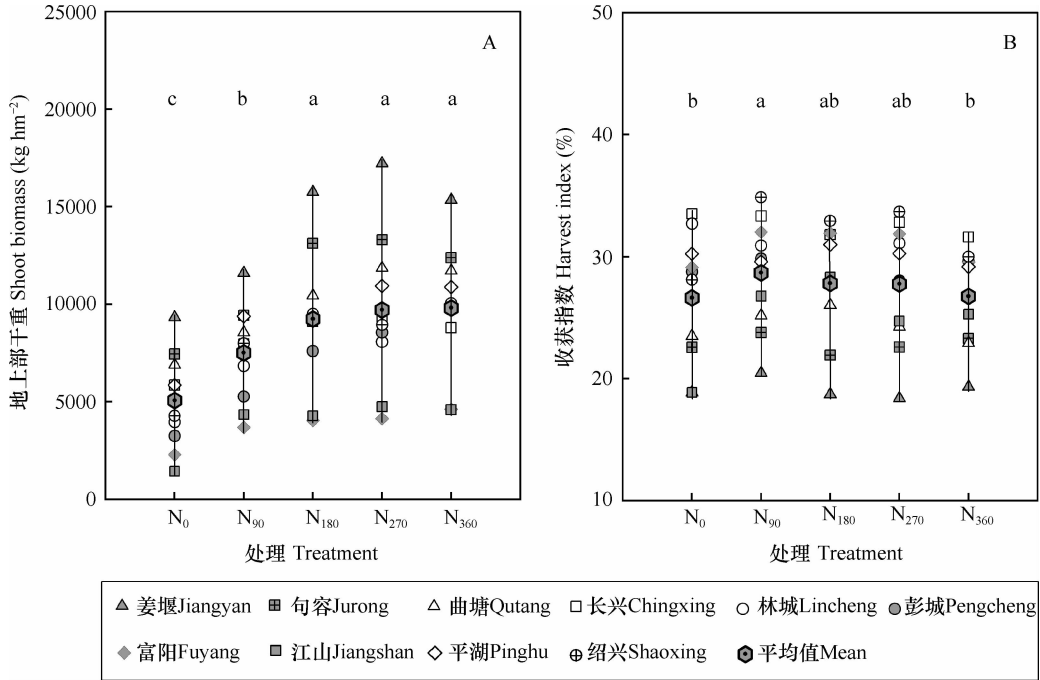


图 2 施氮量对冬油菜地上部干重(A)和收获指数(B)的影响

Fig. 2 Responses of the winter oilseed rape to N application rate in shoot biomass (A) and harvest index (B)

2.3 氮素的吸收和累积

油菜地上部不同器官的氮素含量不同, 籽粒明显高于茎秆和角壳 (图 3)。不施氮条件下茎秆、角壳和籽粒的氮素含量平均分别为 0.43%、0.52% 和 3.34%。施氮提高了各器官的氮素含量, 且随施氮量增加均呈明显的上升趋势, 在 N₃₆₀ 处理达到最高, 分别为 0.87%、1.04% 和 4.11%。不同器官的氮素含量对施氮的响应程度存在差异, 茎秆和角壳的氮素含量增幅最高均超过 100%, 而籽粒最高仅为 23%。

图 4 显示, N₀ 处理冬油菜地上部的氮素累积量平均为 63.2 kg hm⁻²。氮素累积随施氮量增加而显著提高, 在施氮 360 kg hm⁻² 时达到最高的 176.5 kg hm⁻², 较无氮区对照增加 179%, 而与 N₂₇₀ 处理无明显差异。油菜的氮素收获指数以 N₉₀ 处理最高, 平均为 73.3%, 而后则随施氮量增加呈下降趋势, 施

收获指数随施氮的变化趋势与地上部干重不同。施氮 90 kg hm⁻² 时, 收获指数较无氮区对照表现出显著提高, 平均达 28.7%, 而后随施氮量增加则呈下降趋势。收获指数在 N₃₆₀ 处理降至 26.7%, 与 N₀ 处理 (26.6%) 接近。说明适量施氮促进干物质向籽粒转移, 氮投入过多则呈现反作用。

氮 360 kg hm⁻² 时降至 62.1%。说明过量施氮导致植株非籽粒部分对氮素的过度吸收, 降低了氮素在籽粒的分配。

2.4 氮肥利用效率

通过计算表观利用率、农学利用率和偏生产力, 表征施氮对油菜氮肥利用效率的影响 (图 5)。氮肥表观利用率在施氮 90 kg hm⁻² 时最高, 平均为 46.9%, 其后随施氮量增加而降低, N₃₆₀ 处理降至 31.5%, 与 N₉₀ 处理相比有显著差异。N₉₀ 处理的氮肥农学利用率和偏生产力均显著高于其它施氮处理, 平均分别为 8.7 kg kg⁻¹ N 和 23.4 kg kg⁻¹ N, 而且随施氮量增加也均表现出显著的降低, 在 N₃₆₀ 处理分别降至最低的 3.5 kg kg⁻¹ N 和 7.1 kg kg⁻¹ N。说明过量施氮难以获得较高的氮肥利用效率, 兼顾产量和肥料效率应注意适量施氮。

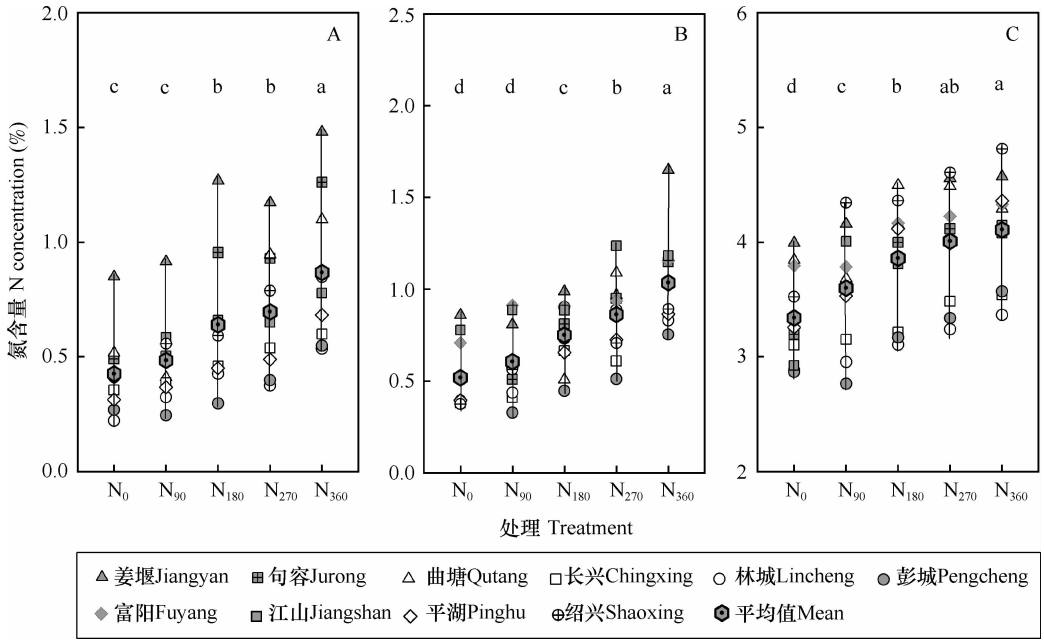


图 3 施氮量对冬油菜茎秆(A)、角壳(B)和籽粒(C)氮含量的影响

Fig. 3 Responses of the winter oilseed rape to N application rate in N concentrations in stem (A), in shell (B), and in seed (C)

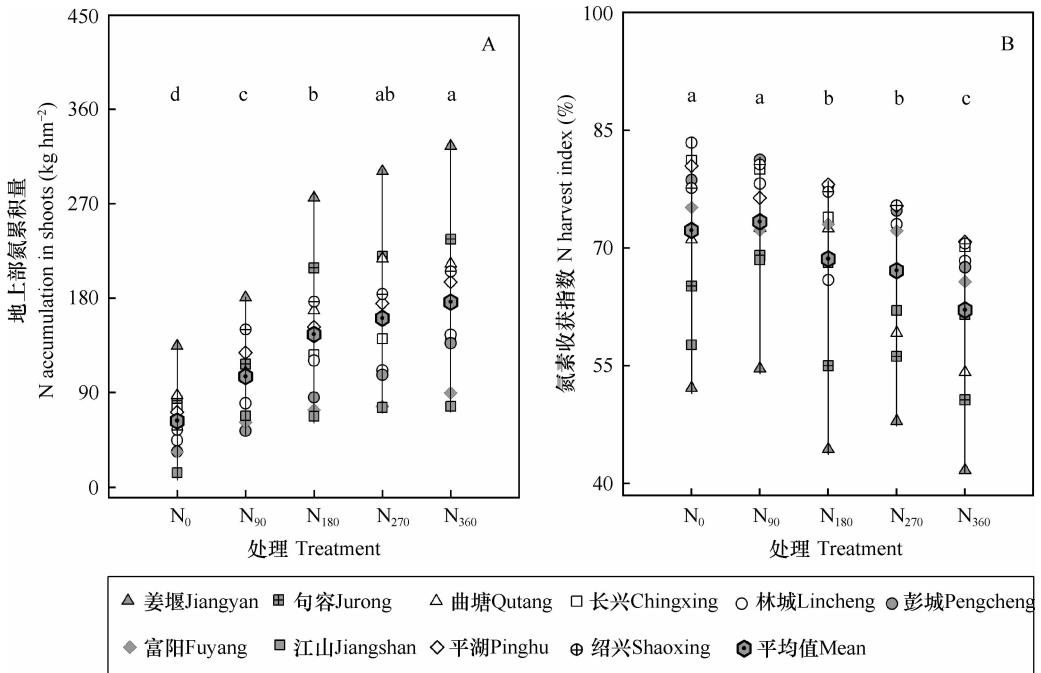


图 4 施氮量对冬油菜地上部氮累积量(A)和氮素收获指数(B)的影响

Fig. 4 Responses of the winter oilseed rape to N application rate in N accumulation in shoots (A) and N harvest index (B)

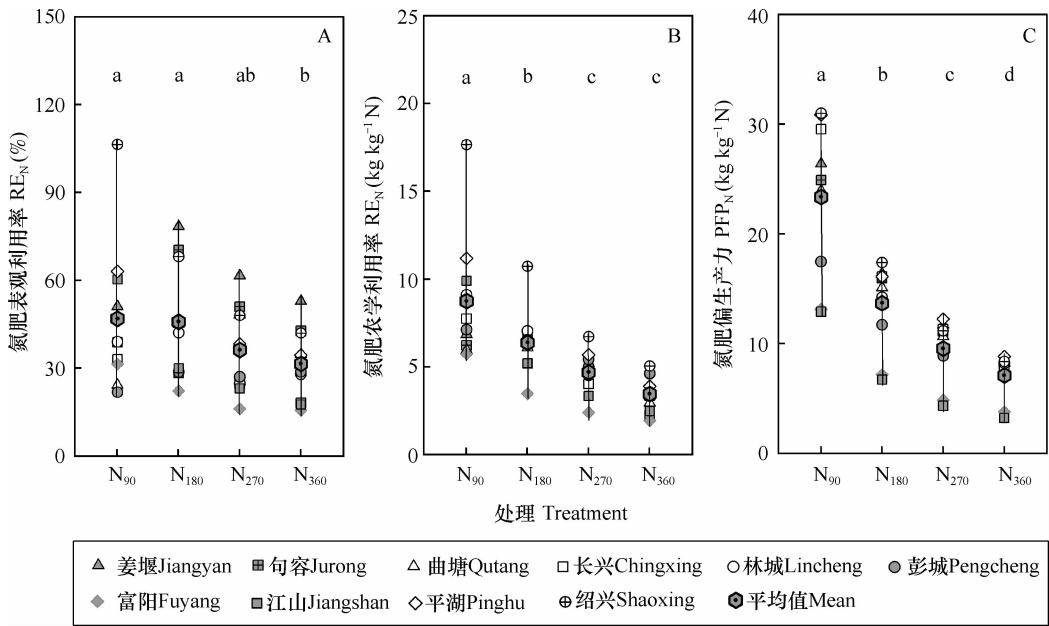


图5 施氮量对冬油菜氮肥表观利用率(A)、农学利用率(B)和偏生产力(C)的影响

Fig. 5 Responses of the winter oilseed rape to N application rate in RE_N (A), AE_N (B), and PFP_N (C)

2.5 江浙油菜主产区冬油菜的适宜施氮量

表3显示,各田块的适宜施氮量(FSONR)分布在90~318.5 kg hm⁻²之间,平均为199 kg hm⁻²,对应产量为1 163~3 271 kg hm⁻²,平均为2 602 kg hm⁻²。以199 kg hm⁻²作为区域平均适宜施氮量(RMONR),分别推算各试验点产量在1 209~3 149 kg hm⁻²之间,平均为2 539 kg hm⁻²,仅比各试验点FSONR的产量平均仅下降63 kg hm⁻²(降幅2.4%)。说明采用统一的推荐施氮量对该区域油菜的整体产量水平无明显影响,因此可采用该RMONR作为当前江浙油菜主产区冬油菜的推荐施氮量。当然,不同试验点采用FSONR和RMONR时的产量情况不尽相同,存在一定的浮动。

与各试验点的田块最高施氮量(FSMNR)相比,RMONR在减少92.9 kg hm⁻²的施氮量情况下产量降低了134 kg hm⁻²,即牺牲5%的产量而减少31.8%的氮肥投入。此外,对施氮量与地上部干重、收获指数、氮素累积量、氮素收获指数和氮肥利用效率等指标进行拟合(表4),除收获指数外均与施氮量有显著相关关系,而收获指数受施氮量的影响趋势也十分明显(图2)。拟合结果表明,RMONR条件下地上部干重和氮素累积量略低于FSMNR,但收获指数、氮素收获指数和氮肥利用效率均较高。说明在当前生产条件下大幅减少氮肥投入,不会对油菜的生长和产量造成显著的不利影响,还可显著提升氮肥利用效率,其作物生产和资源环境综合效

益非常明显。因此,降低江浙地区农民目前过高的习惯施氮量是合理和可行的。

3 讨论

3.1 江浙油菜主产区的冬油菜施氮效果和区域平均适宜施氮量

近年来,江浙地区冬油菜的区域施氮研究较少,在品种更新和施肥措施变化的情况下,当前油菜的施氮效果并不清楚。本研究显示,江浙油菜主产区冬油菜的施氮增产效果显著,说明氮素投入在油菜生产中非常重要。作物增产主要通过两个途径:在一定的收获指数水平上提高生物产量,或在一定的生物产量水平上提高收获指数^[34]。研究表明,施氮对油菜地上部的生物产量和收获指数均有影响,其中对生物产量的影响更显著,说明施氮主要通过大幅增加生物产量实现增产。施氮超过180 kg hm⁻²后油菜平均产量的增幅无明显提高,收获指数则下降,表明过量施氮造成油菜营养生长过剩而不利于干物质向籽粒的转移^[4]。施氮后油菜对氮素的吸收和累积大幅提高,籽粒中氮素的分配比例却在过量施氮时显著下降。这与李银水等^[6]的研究结果类似,一方面是由于过量施氮后非籽粒部分干重的增幅较高,另一方面是由于茎秆和角壳对氮素的过度吸收。氮肥利用效率是农业生产和科研中最受关注的问题^[33, 35],过量施氮显著降低了

表 3 江浙油菜主产区冬油菜的田块适宜施氮量、区域平均适宜施氮量与最高施氮量及相应的产量

Table 3 FSONR, RMONR, and FSMNR of winter oilseed rape and corresponding yields they may obtain in main production areas of Jiangsu and Zhejiang provinces

地点 Site	推荐施肥模型方程 Fertilization model equation	R^2	田块适宜施氮量		FSONR 的产量		区域平均适宜施氮量		RMONR 的产量		田块最高施氮量		FSMNR 的产量	
			FSONR (kg hm^{-2})	FSONR Yield at FSONR (kg hm^{-2})	FSONR Yield at FSONR (kg hm^{-2})	区域平均适宜 施氮量 RMONR (kg hm^{-2})	RMONR Yield at RMONR (kg hm^{-2})	RMONR Yield at RMONR (kg hm^{-2})	田块最高施氮量 FSMNR (kg hm^{-2})	FSMNR Yield at FSMNR (kg hm^{-2})				
姜堰 Jiayang	$y = 6.61x + 1766$ $y = 3065$ $x < 196.6$ $x \geq 196.6$	0.9843**	196.6	3065	199.0	3065	199.0	3065	280.5	3103				
句容 Jurong	$y = 6.63x + 1670$ $y = 2946$ $x < 192.4$ $x \geq 192.4$	0.9938**	192.4	2946	199.0	2946	199.0	2946	287.7	2995				
曲塘 Qutang	$y = 6.09x + 1616$ $y = 2780$ $x < 191.0$ $x \geq 191.0$	0.9831**	191.0	2780	199.0	2780	199.0	2780	277.5	2832				
长兴 Changxing	$y = -0.018x^2 + 8.66x + 1976$	0.9897**	212.7	3013	199.0	2995	199.0	2995	243.3	3030				
林城 Lincheng	$y = -0.011x^2 + 8.09x + 1364$	0.9417**	318.5	2827	199.0	2540	199.0	2540	367.9	2854				
彭城 Pengcheng	$y = 6.53x + 949$ $y = 2497$ $x < 237.1$ $x \geq 237.1$	0.9879**	237.1	2497	199.0	2497	199.0	2497	413.2	2619				
富阳 Fuyang	$y = 5.73x + 667$ $y = 1325$ $x < 114.7$ $x \geq 114.7$	0.9958**	114.7	1325	199.0	1325	199.0	1325	274.3	1390				
江山 Jiangshan	-	-	90.0	1163	199.0	1209	199.0	1209	239.1	1322				
平湖 Pinghu	$y = -0.018x^2 + 10.03x + 1835$	0.9530**	257.1	3271	199.0	3149	199.0	3149	288.2	3288				
绍兴 Shaoxing	-	-	180.0	3130	199.0	3130	199.0	3130	247.1	3293				
平均值 Mean			199.0	2602	199.0	2539	199.0	2539	291.9	2673				

**, $p < 0.01$, $n = 5$

表 4 江浙油菜主产区冬油菜在区域平均适宜施氮量和田块最高施氮量时的地上部干重、氮素累积及氮肥利用效率

Table 4 Shoot biomass, N accumulation, and N fertilizer use efficiency of winter oilseed rape subjected to RMONR and FSMNR in main production areas of Jiangsu and Zhejiang provinces

项目 Item	预测模型方程 Predicted model equation	R^2	区域平均适宜施氮量 RMONR	田块最高施氮量 FSMNR
地上部干重 Shoot biomass (kg hm^{-2})	$y = -0.0526x^2 + 31.93x + 5073$	0.9973**	9344	9911
收获指数 Harvest index (%)	$y = -0.00005x^2 + 0.016x + 26.9$	0.7173 ^{NS}	28.1	27.3
地上部氮累积量 N accumulation in shoots (kg hm^{-2})	$y = -0.0007x^2 + 0.562x + 62.7$	0.9961**	146.8	167.1
氮素收获指数 N harvest index (%)	$y = -0.0001x^2 - 0.001x + 72.7$	0.9486**	68.5	63.9
氮肥表观利用率 RE_N (%)	$y = -0.0001x^2 - 0.011x + 49.4$	0.9478**	43.2	37.7
氮肥农学利用率 AE_N ($\text{kg kg}^{-1} \text{N}$)	$y = 0.00003x^2 - 0.035x + 11.6$	0.9998**	5.8	3.9
氮肥偏生产力 PPFN ($\text{kg kg}^{-1} \text{N}$)	$y = 0.0002x^2 - 0.159x + 35.7$	0.9951**	12.0	6.3

** , $p < 0.01$, $n = 5$

油菜的各项氮肥利用效率,因此应适量施用氮肥。根据各施氮水平下产量、干物质和氮素累积及氮肥利用率的整体表现,可推断江浙油菜主产区冬油菜的氮肥适宜用量在 $180 \sim 270 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。通过肥效模型方程结果发现,10 个试验点的 RMONR 为 199 kg hm^{-2} ,符合各项农学指标的效应表现。

本研究 10 个试验点中,江苏省 3 个点产量水平高且较为接近,而浙江省各点间差异较大,如长兴点和江山点不施氮处理的产量相差超过 6 倍。作物产量表现受到各方面因素的综合作用,如品种、土壤状况、气候条件等^[2,7]。农田土壤状况极大地影响作物生长,富阳和江山点产量水平较低可能与其土壤 pH 偏低有较大关系。相比华双 5 号,相同施氮水平下浙双 72 的植株氮素水平较低(数据未显示),说明不同品种对氮素的响应可能存在差异。而且,不同地点土壤、气候等方面的差异也可能会影响品种的稳定性,使产量水平发生变化。不同试验点间产量水平及施氮效果的差异导致其 FSONR 相差较大,如林城点为 318.5 kg hm^{-2} ,而江山点为 90 kg hm^{-2} ,采用统一的 RMONR 可能会使两地区分别出现减产和减效的风险。因此,在 RMONR 基础上,个别地区应充分考虑基础产量水平和土壤条

件。尽管地区间、品种间的油菜产量存在差别,但各试验点的 FSONR 总体上符合正态分布趋势,因此相应的 RMONR 可以反映江浙油菜主产区当前的区域适宜施氮水平。

当前江浙地区农民高投入高产出的错误认识导致不少地区的油菜施氮仍高于本研究的 FSONR^[20],而且这种长期的过量施肥的惯性严重。本研究显示,相比 FSMNR,RMONR 以 5% 的产量损失节省了近 32% 的氮肥投入,同时显著提高了氮肥利用效率,说明在当前不影响整体产量水平的前提下,大幅减少农民施氮量是可行的。因而生产中应引导农民摒弃单纯以增产为目标的施氮方法,积极推广合理适量施氮理念以改变高产不高效的现状,实现产量、经济效益和肥料效率的同步优化。

3.2 “区域平均适宜施氮量法”在油菜方面的探索与应用

目前关于油菜氮肥推荐施用的研究较多,如李银水等^[36]通过拟合土壤氮素含量与适宜施氮量的关系,根据土壤氮素的丰缺状况进行适宜施氮量的推荐,而姜丽娜等^[37]认为可采用土壤全氮与有机质建立油菜测土施氮指标体系来进行测土推荐施氮,也有研究表明油菜植株氮素营养诊断法适用于油

菜的氮肥推荐施用^[38]。这些方法对促进油菜合理施氮均有重要作用,但均需要根据测试结果进行推荐。“区域平均适宜施氮量法”将推荐施氮从田块尺度提高到了区域尺度,其理论基础在于 RMONR 和区域内多数田块的 FSONR 差异不大,而产量-施氮量反应曲线在 FSONR 附近较为平缓,因此施氮量的小幅增减对产量影响不大^[27]。当前我国油菜种植区田块数量多而面积却普遍较小,采用测试推荐施氮方法的工作量非常巨大,而且油菜产区多为多熟制轮作,有限的茬口时间使测试工作难以及时有效^[27-28]。相比之下,区域平均适宜施氮量法更适合我国当前的农业生产实际,利于大范围推广,而该方法在水稻、小麦等作物的推荐施氮实践中已显示出良好效果^[26]。

本研究是运用“区域平均适宜施氮量法”在江浙地区油菜推荐施氮研究方面的初步探索。各试验点所在区域(苏南、浙北油菜主产区)的油菜种植习惯相似,农民习惯施氮量均普遍偏高,因此我们对该区域进行整合研究。基于“区域总量控制与田块适当调整相结合”的施肥理念^[27-28],结合本研究结果,我们推荐 200 kg hm⁻²作为江浙油菜主产区当前冬油菜的区域适宜施氮量,在此基础上可根据地区或农田具体状况进行适当微调。与朱兆良先生^[27]的研究相比,本研究涉及的区域和范围更广,不同试验点间产量的差异也相对较大。尽管个别地区的推荐施氮量精度会有所影响,但采用 RMONR 对于区域油菜生产的减氮保产增效表现出良好效果,说明“区域平均适宜施氮量法”在更大区域尺度具有一定的适用性。当然,该推荐施肥法在更大地区范围、更复杂土壤类型及产量差异明显的情况下的应用效果还需要进一步的研究与论证。

本研究中,我们主要根据施氮的产量效应选择肥效模型,以经济效益为标准确定 FSONR 而计算 RMONR。当前,由于农业生产中面源污染对生态环境的严重影响,环境效益也是备受关注的的一个重要方面^[21-23]。因此,今后的氮肥推荐施用研究中还应考虑将作物施氮环境效益作为推荐施氮的评价指标,通过对产量、经济效益、环境效益等因素的综合考虑,使推荐施肥量更为合理。

4 结 论

江浙油菜主产区冬油菜的施氮效果显著,产量、地上部干重和氮素累积量随施氮量增加均明显

上升,但过量施氮却导致收获指数、氮素收获指数和氮肥利用效率下降。该区域油菜的平均适宜施氮量为 199 kg hm⁻²,可在大幅减少氮肥投入情况下获得较高的区域产量水平和氮肥利用效率。当前江浙油菜主产区冬油菜生产中推荐施氮 200 kg hm⁻²,不同地区和田块可根据实际情况进行微调。

参 考 文 献

- [1] 金继运,李家康,李书田. 化肥与粮食安全. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601—609. Jin J Y, Li J K, Li S T. Chemical fertilizer and food security (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 601—609
- [2] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3997—4007. Wang W N, Lu J W, Li Y S, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997—4007
- [3] Holmes M R J. Nutrition of the oilseed rape crop. London, UK: Applied Science Publishers, 1980
- [4] 鲁剑巍. 油菜科学施肥技术. 北京: 金盾出版社, 2010. Lu J W. Scientific fertilization technology for oilseed rape (In Chinese). Beijing: God Shield Press, 2010
- [5] Gammelvind L H, Schjoerring J K, Mogensen V O, et al. Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Plant and Soil, 1996, 186: 227—236
- [6] 李银水,鲁剑巍,廖星,等. 氮肥用量对油菜产量及氮素利用效率的影响. 中国油料作物学报, 2011, 33(4): 379—383. Li Y S, Lu J W, Liao X, et al. Effect of nitrogen application rate on yield and nitrogen fertilization efficiency in rapeseed (In Chinese). Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(4): 379—383
- [7] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745—752. Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 745—752
- [8] 胡立勇,王维金,吴江生. 氮素对油菜角果生长及结角层结构的影响. 中国油料作物学报, 2002, 24(3): 29—32. Hu L Y, Wang W J, Wu J S. Effect of nitrogen levels on pod growth and structure of pod canopy in rapeseed (In Chinese). Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(3): 29—32
- [9] Ozer H. Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. European Journal of Agronomy, 2003, 19: 453—463
- [10] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 117: 80—108

- [11] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响. 作物学报, 2009, 35(1): 87—92. Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River basin (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 87—92
- [12] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境. 土壤学报, 2002, 39(增): 3—11. Zhu Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl): 3—11
- [13] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917): 1014—1015
- [14] 聂泽民, 唐海明, 聂丽群, 等. 移栽密度与施氮量对油菜生长发育和产量的影响. 湖南农业科学, 2012(3): 21—23. Nie Z M, Tang H M, Nie L Q, et al. Effect of different transplanting densities and nitrogen fertilizer rates on growth and yield of rape (In Chinese). *Hunan Agricultural Science*, 2012(3): 21—23
- [15] Boelcke B, Léon J, Schulz R R, et al. Yield stability of winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.) as affected by stand establishment and nitrogen fertilization. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1991, 167: 241—248
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2011. National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook* (In Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2011
- [17] 郑伟. 中国化肥施用区域差异及对粮食生产影响的研究. 北京: 中国农业大学, 2005. Zheng W. Regional difference analysis of China's fertilizer application and effect on grain production (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2005
- [18] 夏小江, 付伟, 朱利群, 等. 江苏太湖地区不同种植模式下肥料投入与养分平衡分析. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 18—23. Xia X J, Fu W, Zhu L Q, et al. Fertilizer application and nutrient balance under different cropping system in Taihu Lake region, Jiangsu (In Chinese). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(5): 18—23
- [19] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117—127
- [20] 徐华丽. 长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究. 武汉: 华中农业大学, 2012. Xu H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River Basin (In Chinese). Wuhan: Huzhong Agricultural University, 2012
- [21] 俞巧钢, 叶静, 马军伟, 等. 不同施氮水平下油菜地土壤氮素径流损失特征研究. 水土保持学报, 2011, 25(3): 22—25, 30. Yu Q G, Ye J, Ma J W, et al. Effects of different nitrogen applied levels on nitrogen runoff loss in oilseed rape fields (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 22—25, 30
- [22] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究. 土壤学报, 2007, 44(6): 1070—1075. Tian Y H, Yin B, He F Y, et al. Nitrogen loss with runoff in rice season in the Taihu Lake region, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1070—1075
- [23] 许朋柱, 秦伯强, Horst B, 等. 太湖上游流域农业土地的氮剩余及其对湖泊富营养化的影响. 湖泊科学, 2006, 18(4): 395—400. Xu P Z, Qin B Q, Horst B, et al. Nitrogen surplus of the upstream agricultural land of Lake Taihu and the eutrophication impact (In Chinese). *Journal of Lake Science*, 2006, 18(4): 395—400
- [24] 侯朋福, 李刚华, 张国发, 等. 养分管理方式对江苏常规粳稻产量和氮素利用率的影响. 土壤, 2012, 44(2): 218—224. Hou P F, Li G H, Zhang G F, et al. Effects of nutrient management manner on yield and nitrogen use efficiency for Jiangsu conventional Japonica rice (In Chinese). *Soils*, 2012, 44(2): 218—224
- [25] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究. 土壤, 2009, 41(3): 372—376. Yan J, Shen Q R, Yin B, et al. Effects of fertilizer N application rate on yields and use efficiencies in rice-wheat rotation system in Tai Lake region (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(3): 372—376
- [26] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应的研究. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 61—66. Yan J, Yin B, Zhang S L, et al. Studies on the nitrogen fertilizer application of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(1): 61—66
- [27] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1—4. Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 1—4
- [28] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778—783. Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778—783
- [29] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. Zhang F S, Chen X P, Chen Q. *Guidelines for China's main crop fertilization* (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2009
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [31] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409—413. Wang S R, Chen X P, Gao X Z, et al. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 409—413
- [32] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*, 1998, 56(1/2): 7—39
- [33] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的

- 研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095—1103. Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095—1103
- [34] 潘晓华, 邓强辉. 作物收获指数的研究进展. 江西农业大学学报, 2007, 29(1): 1—5. Pan X H, Deng Q H. Review on crop harvest index (In Chinese). *Acta Agricultural University Jiangxiensis*, 2007, 29(1): 1—5
- [35] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915—924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915—924
- [36] 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. 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 (In Chinese). *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2008, 30(2): 218—223
- [37] 姜丽娜, 王强, 单英杰, 等. 用土壤全氮与有机质建立油菜测土施氮指标体系的研究. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 203—209. Jiang L N, Wang Q, Shan Y J, et al. Research on nitrogen fertilizer recommendation indicator system establishment using soil tested total N and organic matter in rapeseed (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 203—209
- [38] 李银水, 余常兵, 廖星, 等. 三种氮素营养快速诊断方法在油菜上的适宜性分析. 中国油料作物学报. 2012, 34(5): 508—513. Li Y S, Yu C B, Liao X, et al. Applicability of three rapid methods of nitrogen nutrition diagnosis on rapeseed (In Chinese). *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2012, 34(5): 508—513

APPROPRIATE NITROGEN FERTILIZER APPLICATION RATE FOR WINTER OILSEED RAPE IN MAIN PRODUCTION AREAS OF JIANGSU AND ZHEJIANG PROVINCES

Wang Yin¹ Lu Jianwei^{1†} Li Xiaokun¹ Ren Tao¹ Cong Rihuan¹ Jiang Lina² Zhang Yongchun³

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

(2 Institute of Environmental Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

(3 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract A total of 10 groups of field trials on N fertilizer application rate for winter oilseed rape were conducted in the main production areas of Jiangsu and Zhejiang provinces in 2008 – 2009 and 2009 – 2010 to explore responses of the crop in seed yield, dry biomass, N uptake and accumulation, and N fertilizer use efficiency, for modeling of appropriate N fertilizer application rate under the current production condition. Results show that the crop responded significantly to N fertilization in seed yield. When 270 kg N hm⁻² was applied, the mean yield was increased by 1 265 kg hm⁻² or 121% over the control (treatment without N fertilization), reaching as high as 2 581 kg hm⁻². Nitrogen fertilization also improved considerably shoot biomass, N uptake and accumulation of the plant. However, excessive N fertilization led to decline in harvest index and N harvest index of the crop, and hence in the N fertilizer use efficiency. The regional mean optimal N fertilizer application rate (RMONR) was 199 kg hm⁻² under current production condition in our study. The use of the average may not only reduce by a large margin the use of N fertilizer, but also ensure a relatively higher regional rapeseed yield level and N fertilizer use efficiency level. Hence, the currently recommended N application rate, N 200 kg hm⁻², is appropriate and may be subject to slight adjustment in light of the specific conditions of a region or field.

Key words Oilseed rape; Nitrogen fertilizer; Fertilization effect; Optimal N fertilizer application rate; Regional recommended fertilization