

冬油菜季氮肥减量对后茬夏玉米氮素供应与产量的影响

杨 勤^{1, 2, 4}, 赵 前^{1, 2}, 田效琴^{1, 2, 4}, 李 卓^{1, 2, 4*}, 刘永红^{1, 2}, 李 伟³

(1. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066; 2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 四川 成都 610066; 3. 四川华标检测技术有限公司, 四川 成都 611731; 4. 粮油作物绿色种质创新与遗传改良四川省重点实验室, 四川 成都 610066)

摘 要: 为研究油菜-玉米轮作制度下冬油菜季氮肥减量对后茬夏玉米氮素供应与产量的影响, 以川油 36 和仲玉 3 号为试验材料, 前茬冬油菜设置常规施氮量减量 40% (108 kg/hm²)、常规施氮量减量 20% (144 kg/hm²) 和常规施氮量 (180 kg/hm²) 3 个氮肥处理, 分别命名为 N1、N2 和 N3 处理, 于 2018 ~ 2019 和 2019 ~ 2020 年 2 个生长季节分别进行试验。结果表明, 后茬夏玉米季土壤 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层中碱解氮含量均随冬油菜季氮肥减量而下降, 尤其在 0 ~ 20 cm 土层中, N1 处理的碱解氮含量显著低于 N2 和 N3 处理, 而 N2 和 N3 处理之间差异不显著。玉米植株氮素积累量随冬油菜季施氮量的减少而减少, 各处理间差异显著, 而氮素向籽粒的转移率呈上升趋势。玉米籽粒氮素积累量和产量以 N2 和 N3 处理较高, 2018 ~ 2019 年 N2 处理籽粒氮素积累量较 N1 和 N3 处理分别显著高出 6.43% 和 3.95%, 产量显著高出 8.28% 和 4.72%; 2019 ~ 2020 年 N2 和 N3 处理籽粒氮素积累量较 N1 处理分别显著高出 5.73% 和 7.94%, 产量显著高出 14.27% 和 15.89%。当冬油菜在常规施氮量减量 20% 的处理下, 可实现油菜-玉米轮作系统周年减氮增效, 同时有效提高玉米籽粒对氮肥的利用。

关键词: 冬油菜; 夏玉米; 施氮量; 氮素利用

氮肥作为作物生长所需氮素的重要来源, 在农作物的生产管理中十分重要, 合理使用氮肥是农作物获得高产量的关键措施。据报道, 氮肥对我国粮食产量的贡献率为 40% ~ 60%^[1]。然而, 在我国作物生产上, 人们为了片面追求作物产量盲目使用大量氮肥, 每年氮肥使用量是全球氮肥使用量的 35% 以上, 成为全球最大的氮肥消费国^[2-7]。氮肥的过量施用并未带来作物产量的持续增长, 反而导致作物产量不再增加, 甚至减产^[8]。此外, 长期大量施用氮肥会导致土壤氮素在根区以下土层的无效积累, 成为重要污染源, 严重影响生态环境^[9-12]。故此, 在作物生产中, 合理的氮肥管理策略是农业生态建设和农业生产中亟待解决的问题。

冬油菜-夏玉米轮作体系是西南旱地新两熟模

式, 也是旱作农田主要栽植模式, 研究冬油菜-夏玉米轮作系统下周年减氮增效可为西南旱地冬油菜-夏玉米新两熟模式下周年氮肥管理策略提供理论参考。因此, 本文通过 2 年大田试验, 打破单一作物下的减氮增效研究, 在该区典型冬油菜-夏玉米轮作模式下, 探讨冬油菜季氮肥减量对夏玉米季土壤氮素、玉米氮素吸收利用及产量的影响, 明确冬油菜季氮肥减量下夏玉米季增产增效的内部机制。通过对比各处理间的经济效益, 明确冬油菜-夏玉米轮作模式下周年最佳施氮量, 为该地区冬油菜-夏玉米轮作系统施氮管理策略提供理论参考和现实依据, 在不影响效益的前提下为实现可持续发展农业和保护生态环境奠定基础。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验于 2018 年 10 月 ~ 2019 年 9 月和 2019 年 10 月 ~ 2020 年 9 月 2 个生长季节在四川省农业科学院简阳基地 (北纬 30° 16' 26.32", 东经 104° 26' 30.38") 进行, 油菜-玉米轮作, 该地区属于亚热带湿润季风气候区, 气候温暖、四季分明、无霜期长、雨量充沛、日照较少, 年平均温

收稿日期: 2021-08-31; 录用日期: 2021-10-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200703); 四川省中央引导地方科技发展专项 (2020ZYD029); 现代农业学科建设推进工程项目 (2021XKJS007); 四川省科技计划项目 (2021YFYZ0005)。

作者简介: 杨勤 (1981-), 副研究员, 本科, 主要研究方向为作物栽培。E-mail: 877021266@qq.com。

通讯作者: 李卓, E-mail: lizhuo_2000@sina.com。

度约 17.1 ℃；年无霜期大于 300 d。年总降水量约 882.9 mm，雨量主要集中在 7 ~ 8 月，约占全年降水量的一半；试验区土壤为紫色土。

供试油菜为川油 36，第一年于 2018 年 10 月初播种，2019 年 5 月初收获，全生育期 210 d；供试夏玉米为仲玉 3 号，于 2019 年 6 月初播种，2019 年 9 月底收获，全生育期 110 d。第二年油菜于 2019 年 10 月初播种，2020 年 5 月初收获，全生育期 210 d，玉米于 2020 年 6 月初播种，2020 年 9 月底收获，全生育期 110 d。

前茬冬油菜试验采用完全随机区组设计，在油菜季设置 3 个氮处理（108、144、180 kg/hm²），对应记作 N1、N2、N3，3 次重复，除氮肥外，磷、钾肥的施用量在所有处理中均相同：P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²。试验用肥分别选用尿素（N 46%）、过磷酸钙（P₂O₅ 12%）和氯化钾（K₂O 60%）作为肥源。磷钾肥作基肥一次性施入，氮肥按基肥：基肥 = 7:3 分别施入。单个小区面积为 20 m²（4.0 m × 5.0 m）。

后茬夏玉米季在播种时施 N 270 kg/hm²、P₂O₅ 135 kg/hm² 和 K₂O 150 kg/hm²。在试验过程中，所有的田间管理，包括除草剂施用和病虫害防治，都遵循当地的方法。在这 2 个生长季节，均未出现明显的杂草、病虫害等问题。

1.2 指标测定

土壤碱解氮：油菜收获后玉米播种前用土钻

采用五点取样法对试验田块耕作层土壤进行分层（0 ~ 20、20 ~ 40 cm）取样，将新鲜土壤带到实验室，混合后获得复合样品并进行筛分，采用碱解扩散法测定土壤碱解氮^[13]。

产量测定：成熟时按处理小区单独收获，全区测产。

植株全氮含量：采用半微量凯氏定氮法测定。

1.3 有关参数的计算

氮素转移效率 (%) = 籽粒积累氮量 / 植株吸氮量 × 100。

1.4 统计分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 冬油菜季不同施氮量对夏玉米季土壤碱解氮含量的影响

如图 1 所示，油菜季施氮量对夏玉米各土层土壤碱解氮含量均有明显影响。在 2 个生长季节夏玉米播种前，土壤 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层中碱解氮含量均随冬油菜季氮肥减量而下降，尤其在 0 ~ 20 cm 土层中，N1 处理的碱解氮含量显著低于 N2 和 N3 处理，而 N2 和 N3 处理之间差异不显著。在 20 ~ 40 cm 土层，各施氮处理间差异不显著。

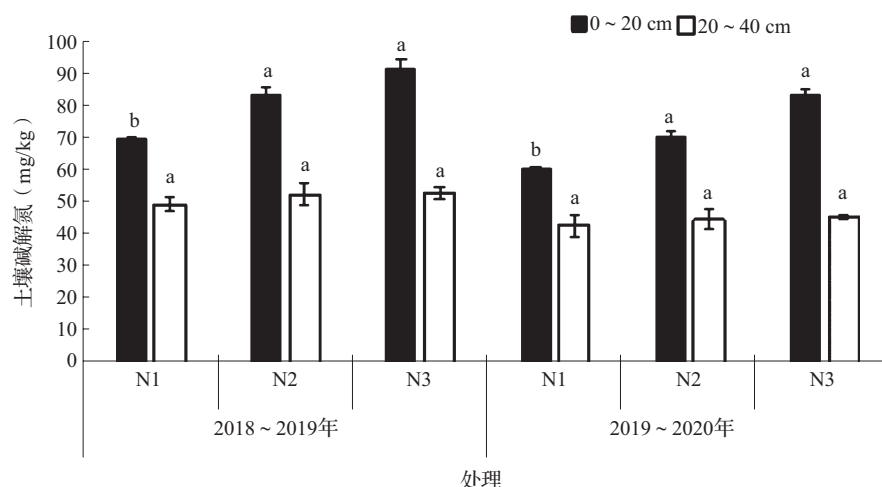


图 1 冬油菜不同施氮量对后茬夏玉米生长季土壤碱解氮含量的影响

注：柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 冬油菜不同施氮量对后茬夏玉米氮素积累与利用的影响

从表 1 可以看出，随着冬油菜施氮量的减少，

夏玉米的植株氮素积累量递减。其中，N3 和 N2 处理显著高于 N1 处理。在 2018 ~ 2019 年生长季节，N2 和 N3 处理比 N1 处理下的植株氮素积累量分别

增加了 13.26% 和 19.32%；在 2019 ~ 2020 年生长季节，N2 和 N3 处理比 N1 处理分别增加了 13.04% 和 18.92%。

冬油菜施氮量对后茬夏玉米籽粒氮素积累量也有明显影响，且趋势与植株氮素积累量基本相似。在 2018 ~ 2019 年生长季节，N2 处理显著高于 N1、N3 处理，N2 处理比 N1 和 N3 处理的籽粒氮素积累量分别增加了 6.43% 和 3.95%；在 2019 ~ 2020 年生长季节，N2、N3 处理显著高于 N1 处理，但 N2、N3 处理间的差异不显著，N2 和 N3 处理比 N1 处理

分别增加了 5.73% 和 7.94%。

从植株氮向籽粒中转移的效率来看，随着施氮量的减少，冬油菜的氮素转移效率呈升高的趋势，N1 处理显著高于其它 2 个处理。其中，在 2018 ~ 2019 年生长季节，N2 处理下的氮转移效率比 N1 处理下降了 6.01%，N3 处理下比 N1 处理下降 14.26%；在 2019 ~ 2020 年生长季节，N2 处理下的氮转移效率比 N1 处理下降了 5.88%，N3 处理下比 N1 处理下降了 8.66%。

表 1 不同冬油菜施氮量对后茬夏玉米氮素积累与利用的影响

处理	植株氮素积累量 (kg/hm ²)		籽粒氮素积累量 (kg/hm ²)		氮素转移效率 (%)	
	2018 ~ 2019 年	2019 ~ 2020 年	2018 ~ 2019 年	2019 ~ 2020 年	2018 ~ 2019 年	2019 ~ 2020 年
N1	197.02c	185.30c	131.20c	114.11b	66.6a	61.2a
N2	223.15b	209.46b	139.64a	120.65a	62.6b	57.6b
N3	235.08a	220.35a	134.34b	123.17a	57.1c	55.9b

注：同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.3 冬油菜不同施氮量对后茬夏玉米产量的影响

从表 2 可以看出，2 个生长季节的产量数据均显示，冬油菜 N1 处理后茬夏玉米的产量最低，且 3 个处理下产量差距明显。在 2018 ~ 2019 年生长季节，N2 处理下的产量最高；而在 2019 ~ 2020 年生长季节，N3 处理下的籽粒产量最高，但 N3 与 N2 处理之间差异并不显著。说明前茬作物的适宜氮肥施用量对后茬作物的产量有促进作用。

随着油菜季施氮量的减少，夏玉米的产量有一个下降的趋势。2018 ~ 2019 年生长季节中，N2、N3 处理的产量分别比 N1 处理显著增加了 8.28% 和 4.72%；2019 ~ 2020 年生长季节中，N2、N3 处理产量分别比 N1 处理显著增加了 14.27% 和 15.89%。

表 2 不同冬油菜施氮量对后茬夏玉米产量的影响
(kg/hm²)

处理	2018 ~ 2019 年产量	2019 ~ 2020 年产量
N1	7066.67c	6191.25b
N2	7652.08a	7074.98a
N3	7400.00b	7175.00a

2.4 冬油菜与夏玉米周年效益分析

不难发现，夏玉米的产量在 N2、N3 处理间差异并不显著 (2019 ~ 2020 年)，甚至 N2 处理显著高于 N3 处理 (2018 ~ 2019 年)。在前茬油菜施氮量保持在 144 kg/hm² 时，玉米的产量也能达到一个相对较高的水平。前茬油菜施氮量超过 144 kg/hm² 时，玉米各项指标的改善越发不明显。

本研究中，前茬冬油菜为增密减氮试验，在前茬试验中，我们发现种植密度和氮肥用量显著影响油菜产量和产量构成，增密减氮既可以实现油菜高产，促进氮素向籽粒分配转移，减少氮素流失，在保护生态环境的同时，有效提高氮肥利用效率。结合前茬冬油菜试验，我们发现冬油菜在施氮量为 144 kg/hm²、密度 30 × 10⁴ 株/hm² (油菜季密度 3) 时达到最高产量，且对后茬夏玉米也起到较好的增产促进作用，在保护生态环境的同时，有效提高氮肥利用效率。

根据周年效益分析 (表 3)，周年平均利润最高的为 N2 处理，每公顷利润可达 25805.44、25115.44 元，在考虑环境问题以及周年利润的情况下，建议冬油菜季适当提高种植密度以减少氮肥用量，实现油菜 - 玉米轮作模式下的周年高产高效。

表 3 冬油菜 – 夏玉米轮作模式下的周年效益分析 (元/hm²)

处理	成本	油菜产值		玉米产值		平均利润
		2018 ~ 2019 年	2019 ~ 2020 年	2018 ~ 2019 年	2019 ~ 2020 年	
N1 (油菜季密度 1)	1197.75	7340.00	6056.00			19357.05
N1 (油菜季密度 2)	1317.75	9356.00	7304.00	14133.34	12382.50	20929.05
N1 (油菜季密度 3)	1437.75	9996.00	9048.00			22061.05
N1 (油菜季密度 4)	1557.75	11104.00	8836.00			22449.05
N2 (油菜季密度 1)	1283.25	9460.00	7528.00			22579.44
N2 (油菜季密度 2)	1403.25	11224.00	8884.00	15304.16	14149.96	24079.44
N2 (油菜季密度 3)	1523.25	12884.00	10796.00			25805.44
N2 (油菜季密度 4)	1643.25	12412.00	10008.00			25115.44
N3 (油菜季密度 1)	1368.75	10340.00	8428.00			23274.63
N3 (油菜季密度 2)	1488.75	12052.00	9604.00	14800.00	14350.00	24658.63
N3 (油菜季密度 3)	1608.75	12580.00	9812.00			24966.63
N3 (油菜季密度 4)	1728.75	12388.00	9484.00			24646.63

注：成本仅考虑氮肥与种子，其中氮肥 2.375 元/kg，油菜种子 8 元/100 g（按 15 × 10⁴ 株/hm² 使用 200 g 种子计算），玉米种子 3 元/100 g（按 1 hm² 使用 2000 g 种子计算）；玉米籽粒 2 元/kg，油菜籽粒 4 元/kg；油菜季密度 1、2、3、4 分别为 15、22.5、30、37.5 万株/hm²。

3 讨论

前人研究表明，在小麦 – 玉米轮作制度下，玉米季施氮量对后茬小麦季土壤的氮素状况影响显著，随着玉米季施氮量的增加，小麦季土壤中的硝态氮含量也明显递增^[14]。也有研究表明，随着玉米季施氮量的增加后茬冬小麦各生育期土壤全氮含量逐渐增加，且植株地上部氮素积累量也呈增加趋势^[15]。本研究发现，后茬玉米季土壤碱解氮含量随冬油菜季氮肥施用量的增加同样也呈增加趋势，尤其当施氮量达到 144 和 180 kg/hm² 时，土壤 0 ~ 20 cm 土层的碱解氮含量增加显著，导致氮素在后茬玉米季土壤中的大量积累，这与前人的研究相似。由此说明，在冬油菜季采用增密减氮的研究条件下，增加密度的同时，将氮肥用量减少 20%（144 kg/hm²）时仍然可使后茬夏玉米季土壤维持较高肥力水平。

本试验还表明，随着油菜季施氮量的增加，夏玉米植株的氮素吸收量和籽粒氮素积累量均有所增加，且植株氮素吸收量对冬油菜施氮量的敏感性比籽粒氮素积累量要高。随着油菜季施氮量的增加，氮素转移效率出现降低趋势，当冬油菜季施氮量达到 144 kg/hm² 水平时，籽粒氮素积累量增加幅度变小，说明较多氮肥施用容易引起植株对氮素的奢侈

性吸收，而奢侈吸收的氮素较多累积于非经济产量的部位^[16-17]。因此，适当减少氮肥用量更有助于促进氮素向籽粒的分配转移，同时有效提高氮肥利用效率。此外，本研究也表明，随着油菜季施氮量的增加，后茬夏玉米的产量也基本呈上升趋势，但油菜施氮量为 144、180 kg/hm² 时玉米产量差异不明显，甚至油菜施氮量为 144 kg/hm² 时玉米产量更高，这可能与土壤肥力和籽粒氮素积累量有关。

4 结论

前茬试验已经表明，在前茬冬油菜保持在施氮量为 144 kg/hm²、密度为 30 × 10⁴ 株/hm² 的水平下可达到最高产量。本次试验发现，在前茬冬油菜保持在施氮量为 144 kg/hm² 时，后茬玉米因土壤氮素水平的提高，促进了籽粒氮素积累量，从而提高了产量。结合冬油菜 – 夏玉米周年轮作年平均利润，在考虑环境问题以及周年利润的情况下，建议冬油菜季可将氮肥减量 20%，依然能实现冬油菜 – 夏玉米的周年增产增效。

参考文献：

[1] 赵秉强. 绿色高效肥料成为农业重要基石 [J]. 中国农资, 2020, 511 (17): 4.
[2] 王启现, 王璞, 刘岩一, 等. 夏玉米施氮量对后茬冬小麦土壤氮素供应与利用的影响 [J]. 华北农学报, 2006, 21(1):

- 110–114.
- [3] 全星星, 张洪生, 杨锦忠, 等. 玉米季施氮量对后茬冬小麦氮素供应和产量的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28 (3): 171–174.
- [4] 翟中兵, 吴海亚, 刘诗晴, 等. 不同施氮量对稻板茬油菜产量和经济效益的影响 [J]. 农业科技通讯, 2012 (3): 63–65.
- [5] 符小文, 张永杰, 杜孝敬, 等. 麦-豆轮作体系周年施氮量对夏大豆氮素利用及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (3): 453–460.
- [6] 王梦飞, 郭庆瑞, 郭凤琴. 密度与氮肥施用量对高寒区玉米产量的影响 [J]. 山西农业科学, 2011, 39 (5): 425–427.
- [7] 张顺涛, 鲁剑巍, 丛日环, 等. 油菜轮作对后茬作物产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (14): 2852–2858.
- [8] 姚姣. 不同施氮量对作物产量及土壤氮素含量的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [9] Clagnan E, Rolfe S A, Thornton S F, et al. Nitrogen transformation processes and gaseous emissions from a humic gley soil at two water filled pore spaces [J]. Soil & Tillage Research, 2020, 198: 104543.
- [10] Chen S A, Lin B W, Li Y Q, et al. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China [J]. Geoderma, 2020, 357: 113937.
- [11] Gulati R D, Donk E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state of the art review [J]. Hydrobiologia, 2002, 478: 73–106.
- [12] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2006 (2): 30–33.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 王启现, 王璞, 王秀玲, 等. 黄淮海平原玉米施氮量对后茬小麦土壤剖面硝态氮和产量的影响 [J]. 生态学报, 2006, 25 (7): 217–222.
- [15] 全星星, 张洪生, 杨锦忠, 等. 玉米季施氮量对后茬冬小麦氮素供应和产量的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28 (3): 171–174.
- [16] Zebarth B J, Paul J W, Younie M, et al. Fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in high-fertility environment based on preside dress soil nitrate test [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32: 2721–2739.
- [17] Ren T, Liu B, Lu J, et al. Optimal plant density and N fertilization to achieve higher seed yield and lower N surplus for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Research, 2017, 204: 199–207.

Effect of reduced nitrogen applied to winter rape on the nitrogen supply and grain yield of the following summer maize

YANG Qin^{1, 2, 4}, ZHAO Qian^{1, 2}, TIAN Xiao-qin^{1, 2, 4}, LI Zhuo^{1, 2, 4*}, LIU Yong-hong^{1, 2}, LI Wei³ (1. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu Sichuan 610066; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Southern Hill Areas, Chengdu Sichuan 610066; 3. Sichuan Huabiaoce Testing Technology Co. Ltd., Chengdu Sichuan 611731; 4. Environment-friendly Crop Germplasm Innovation and Genetic Improvement Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: In order to study the effect of nitrogen (N) fertilizer application rates in winter rape season on N supply and yield of summer maize under rape-maize rotation system, Chuanyou 36 and Zhongyu 3 were used as experimental materials, and three N fertilizer treatments: 40% reduction in conventional nitrogen application rate (108 kg/hm²), 20% reduction in conventional nitrogen application rate (144 kg/hm²) and conventional nitrogen application rate (180 kg/hm²), named as N1, N2 and N3, respectively, were carried out in the winter rape growing season of 2018 ~ 2019 and 2019 ~ 2020. The results showed that the alkaline N content in 0 ~ 20 and 20 ~ 40 cm soil layers of the following summer maize season decreased with the nitrogen reduction in the winter rape season, especially in 0 ~ 20 cm soil layer. The alkaline N content of N1 treatment was significantly lower than that of N2 and N3 treatments, while the difference between N2 and N3 treatments was not significant. The amount of N accumulation in maize plants decreased with nitrogen reduction in winter rape season, and there were significant differences among the treatments, while the transfer rate of nitrogen to the grain showed an upward trend. The amount of N accumulation in maize grain and yield were higher those in N2 and N3 treatments. In 2018 ~ 2019, the amount of N accumulation of N2 was significantly higher than that of N1 and N3 treatments by 6.43% and 3.95%, and yield was significantly higher by 8.28% and 4.72%, respectively. In 2019 ~ 2020, the amount of N accumulation of N2 and N3 treatments were significantly higher than that of N1 treatment by 5.73% and 7.94%, and yield were significantly higher by 14.27% and 15.89%, respectively. When the nitrogen application rate was 20% reduction in the conventional nitrogen application rate in winter rape season, the annual nitrogen reduction and efficiency increase of the rape-maize rotation system could be achieved, and the N utilization by the maize grain could be effectively improved.

Key words: winter rape; summer maize; nitrogen application rate; nitrogen utilization