

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.002

姜振萃, 闵炬, 陆志新, 等. 机械起垄侧条施肥对大白菜产量和氨挥发的影响. 土壤, 2020, 52(1): 10–15

## 机械起垄侧条施肥对大白菜产量和氨挥发的影响<sup>①</sup>

姜振萃<sup>1,2</sup>, 闵炬<sup>1</sup>, 陆志新<sup>3</sup>, 路广<sup>3</sup>, 纪荣婷<sup>1,2</sup>, 王远<sup>1</sup>, 施卫明<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 江苏省宜兴市蔬菜办公室, 江苏宜兴 214206)

**摘要:** 通过两年田间试验, 探究大白菜机械起垄侧条施肥合适的垄宽, 并进一步研究在最适垄宽下该技术对大白菜产量、经济效益和氨挥发损失的影响。第一年试验设置 4 个处理: 机械宽垄侧条施肥习惯施氮量处理(N480+MW)、机械宽垄侧条施肥减氮 30% 处理(N340+MW)、机械窄垄侧条施肥减氮 30% 处理(N340+MN)、人工宽垄习惯施氮量处理(N480+HW), 第二年选用 55 cm 宽垄设置 4 个处理: 人工起垄不施化肥氮处理(N0+HW)、人工起垄习惯施氮量处理(N480+HW)、人工起垄减氮 30% 处理(N340+HW)和机械起垄侧条施肥减氮 30% 处理(N340+MW)。研究表明: 55 cm 宽垄比 30 cm 窄垄种植可以提高大白菜产量 15.4% ~ 17.8%, 在 55 cm 宽垄种植模式下机械起垄侧条施肥技术可以在减肥 30% 基础上获得最高生物产量、商品产量和净经济效益, 分别为 78.5 t/hm<sup>2</sup>、43.2 t/hm<sup>2</sup> 和 30 959 元/hm<sup>2</sup>。与 N480+HW、N340+HW 和 N0+HW 处理相比, N340+MW 处理生物产量分别增加 8.8%、15.2% 和 58.3%, 商品产量分别增加 7.4%、16.4% 和 50.1%。与 N480+HW 相比, N340+MW 和 N340+HW 处理的净收益分别增加了 40.8% 和 1.3%。N340+MW 处理大白菜生长季累积氨挥发损失为 30.0 kg/hm<sup>2</sup>, 与 N340+HW 和 N480+HW 处理相比显著降低 51.1% 和 70.5%。综合研究表明, 机械起垄侧条施肥技术可以实现大白菜种植的减施增效, 提高蔬菜生产的经济效益。

**关键词:** 机械起垄; 侧条施肥; 经济效益; 氨挥发; 大白菜

中图分类号: S43.1 文献标志码: A

## Effects of Mechanical Ridging and Lateral and Band Fertilization on Yield and Ammonia Volatilization in Chinese Cabbage Production

JIANG Zhencui<sup>1,2</sup>, MIN Ju<sup>1</sup>, LU Zhixin<sup>3</sup>, LU Guang<sup>3</sup>, JI Rongting<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>, SHI Weiming<sup>1\*</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Yixing Vegetable Office in Jiangsu Province, Yixing, Jiangsu 214206, China*)

**Abstract:** A consecutive two-year field experiments were carried out to study the effects of mechanical ridging and lateral and band fertilization on the yield and ammonia volatilization in Chinese cabbage production. In 2015, four treatments were designed: Mechanical wide ridging (55 cm) and lateral and band high N fertilization (N480 g/hm<sup>2</sup>+MW), mechanical wide ridging and lateral and band low N fertilization (N340 g/hm<sup>2</sup>+MW), mechanical narrow ridging (35 cm) and lateral and band low N fertilization (N340 g/hm<sup>2</sup>+MN), artificial wide ridging and lateral and band higher N fertilization (N480 g/hm<sup>2</sup>+HW). In 2016, four treatments were designed with wide ridging: Artificial ridging without N fertilization (N0+HW), artificial ridging with high N fertilization (N480+HW), artificial ridging with low N fertilization (N340+HW), mechanical ridging and lateral and band low N fertilization (N340+MW). The results showed that the N340+MW treatment had the highest yield of 78.5 t/hm<sup>2</sup>, commercial yields of 43.20 t/hm<sup>2</sup> and net profit of 30 959 yuan/hm<sup>2</sup>, Compared with N480+HW, N340+HW and N0+HW treatments, the N340+MW treatment increased the yield by 8.8%, 15.2% and 58.3% respectively, and increased the commercial yields by 7.4%, 16.4% and 50.1% respectively. Compared with the treatment of N480+HW, the net economic profit of N340+MW and N340+HW were increased by 40.8% and 1.3%, respectively. The ammonia volatilization was 30.0 kg/hm<sup>2</sup> in N340+MW treatment, compared with N340+HW and N480+HW treatments, which was significantly decreased by 51.1% and 70.5%, respectively. Therefore, the technology of mechanical ridging and lateral and band fertilization can significantly reduce N fertilizer input and improve cabbage yield, thus can achieve the balance between economic and environmental benefits in Chinese cabbage production.

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801100)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1005)资助。

\* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 姜振萃(1992—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: zcjiang@issas.ac.cn

**Key words:** Mechanical ridge; Lateral fertilization; Economic benefit; Ammonia volatilization; Chinese cabbage

蔬菜种植产业在我国迅速发展。2014 年全国蔬菜播种面积为 2 140 万  $\text{hm}^2$ ，占农作物总播种面积的 12.94%，总产量达 76 005 万 t。太湖流域蔬菜地面积约为 5.53 万  $\text{hm}^2$ ，占该区域旱地面积的 20.2%。蔬菜产业高投入高产出的密集型生产特点，导致蔬菜生产过程中需要大量的肥料和劳动力投入。山东设施蔬菜年平均施氮量达到 1 351  $\text{kg}/\text{hm}^2$  (以纯氮量计，下同)<sup>[1]</sup>，太湖地区菜地每季蔬菜作物氮肥施用量为 600 ~ 750  $\text{kg}/\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>，周年施氮量高达 1 800 ~ 2 250  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ，是该地区稻麦轮作体系施氮量 500 ~ 600  $\text{kg}/\text{hm}^2$  的 3 倍 ~ 4 倍<sup>[3]</sup>。施入土壤中的化肥氮仅 10% ~ 18% 被蔬菜作物吸收利用，远低于我国水稻氮肥利用率(28.3%)，大量化肥氮损失对环境造成严重威胁<sup>[4-5]</sup>。众多研究认为，菜地周边地下水硝酸盐超标率 35%，氨氮超标率为 8%；氨挥发是菜地土壤氮素损失的重要途径，氨挥发损失量一般可占施氮量的 24%<sup>[6-7]</sup>。有研究表明，氮肥起垄条施可以提高氮利用率、增加作物产量并减少氮肥环境损失，且不同垄宽对作物产量也有显著影响<sup>[8-12]</sup>。氮肥条施管理措施在露天菜地化肥减施增效上应用潜力巨大，但对劳动力需求增多，与农村劳动力日益匮乏的现状相冲突。在日本等农业发达国家，农业机械化高度发展，而国内适用于蔬菜作物的机械化技术相对短缺。为发展资源节约、环境友好的现代农业，我国农业部提出推广机械深施等技术。在日本广泛应用的机械起垄侧条施肥技术，是用侧条施肥机械将肥料一次集中施于作物根系一侧 5 ~ 8 cm

深处，使肥料呈条状集中而不分散，形成一个贮肥库逐渐释放供给作物生育需求。然而，该技术在我国蔬菜生产体系应用的适应性、经济和环境效应如何尚不清楚。为此，本研究以我国大面积栽培的蔬菜品种大白菜为供试蔬菜作物，通过连续两年的田间试验，研究机械起垄侧条施技术在太湖地区大白菜生产中合适的垄宽和该垄宽下对大白菜产量、经济效益和氨挥发的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地及供试作物

试验分别于 2015 年和 2016 年的 9—12 月在位于太湖地区的江苏省宜兴市周铁镇中悦路农场进行。该地区位于中纬度地区，属湿润的北亚热带季风气候区，平均气温 15 ~ 17℃，多年平均降雨量为 1 181 mm。试验地为传统的露天蔬菜种植区，其 0 ~ 20 cm 土壤理化性质见表 1。供试作物大白菜 (*Brassica rapa pekinensis*) 品种为改良青杂三号，青岛国际种苗有限公司生产，适宜秋天露天种植。

### 1.2 试验处理及管理

2015 年田间试验设置 2 个垄宽水平，分别为 35 cm (N) 和 55 cm (W)；2 种起垄施肥方式，分别为机械起垄侧条施 (M) 和人工起垄撒施 (H，传统施肥方式)；2 个施化肥氮水平，分别为习惯施氮量和减氮 30%，各处理施氮量见表 2。每个处理 3 次重复，随机区组排列。

表 1 试验地点耕层土壤理化性质

Table 1 Physiochemical properties of experimental soils

全氮(g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH	EC( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
0.99	35.9	2.06	149	104	6.49	124.2

表 2 试验区蔬菜作物施氮量(N,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ )

Table 2 Fertilizer application rates of vegetable crops in the experimental site

年份	处理	基肥氮		追肥氮	总化肥氮	总氮
		有机肥	化肥			
2015	N480+HW	120	280	200	480	600
	N480+MW	120	280	200	480	600
	N340+MW	120	140	200	340	460
	N340+MN	120	140	200	340	460
2016	N480+HW	120	280	200	480	600
	N340+HW	120	140	200	340	460
	N340+MW	120	140	200	340	460
	N0+HW	120	0	0	0	120

2016 年田间试验在垄宽 55 cm 基础上, 设置了 4 个处理: 人工起垄不施化肥氮处理(N0+HW)、人工起垄习惯施氮量处理(N480+HW, 传统施肥方式)、人工起垄减氮 30% 处理(N340+HW)和机械起垄侧条减氮 30% 处理(N340+MW)。每个处理 3 次重复, 随机区组排列。

两年的基施氮肥均为复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 含量为 10-10-10), 各处理有机肥、磷肥和钾肥用量相同, 整地时每公顷撒施 5 450 kg 有机肥, 折合纯氮 120 kg/hm<sup>2</sup>, 翻耕入土, 低肥处理和不施肥对照处理分别以基肥形式增施钙镁磷肥 117 kg/hm<sup>2</sup> 和 234 kg/hm<sup>2</sup>, 增施硫酸钾 28 kg/hm<sup>2</sup> 和 56 kg/hm<sup>2</sup>。各小区田间水分管理和病虫害防治等与当地农民传统方法相同。大白菜莲座期各小区人工追施 1 次尿素, 用量为纯氮 200 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 植株样品的采集及测定

收获时大白菜每小区全部称重计产, 即生物产量; 以叶球紧密包裹部分为大白菜商品部分, 每小区全部商品部分称重计商品产量。

采集植株地上部鲜样, 105℃ 杀青 30 min, 然后 70℃ 下烘至恒重后称干重; 全氮用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 自动定氮仪(BUCHI 399)测定<sup>[13]</sup>。

### 1.4 土壤氮挥发的采集及测定

采用 PVC 管双层海绵吸收-通气法测定土壤氮挥发<sup>[14]</sup>。土壤氮挥发的采集于施肥后立即开始, 次日早晨 8:00 取样, 每天 1 次, 1 周后, 采样时间调整为 7 天 1 次。收集的海绵用 1.0 mol/L KCl 溶液浸提自动定氮仪(BUCHI 399)测定。持续采集和测定直至施氮处理与不施化肥氮处理的氮挥发通量无差异时为止。

### 1.5 统计分析

试验数据采用 Excel 2007、SPSS 11.5 等软件进行统计分析, 采用 LSD 方法分析数据间的差异显著性(显著水平  $P<0.05$  和  $P<0.01$ )。

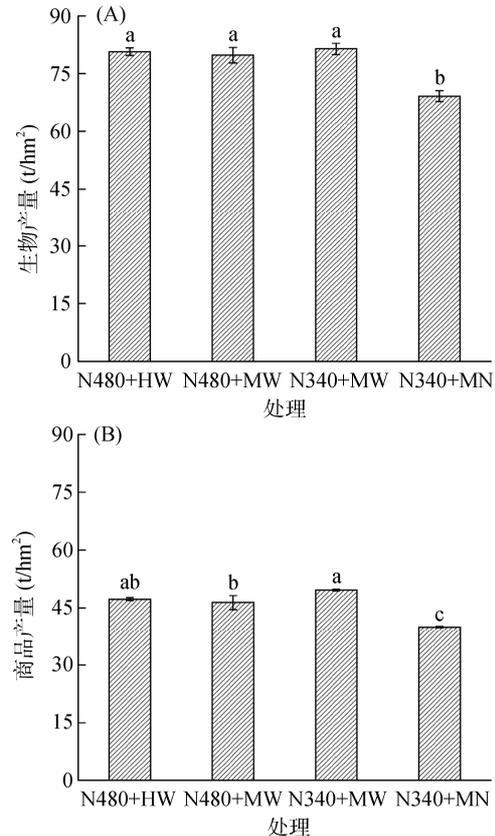
## 2 结果分析

### 2.1 不同垄宽处理对大白菜生物产量和商品产量的影响

从图 1A 可以看出, 3 组 55 cm 宽垄处理的大白菜生物产量都显著高于 35 cm 窄垄处理, 同等施肥量条件下 55 cm 宽垄种植模式可以显著提高大白菜产量 15.4%。与农户传统习惯施肥处理(N480+HW)相比, 机械起垄侧条施肥技术可以在减少 30% 化肥氮(N340+HW)的基础上保证大白菜产量构成。综合以上结果, 可以初步判定机械起垄侧条施肥技术适用于太湖地区露天大白菜生产, 55 cm 垄宽为当地最适生

产参数。

从图 1B 可以看出, 3 组 55 cm 宽垄处理的大白菜商品产量显著高于 35 cm 窄垄处理; 同等施肥量下, 55 cm 宽垄种植模式可以显著提高大白菜商品产量 24.2%, 在保证商品产量不降低的情况下, 机械起垄侧条施肥技术可以减少 30% 化肥氮的使用, 结果与生物产量数据相一致。



(图中小写字母不同表示垄宽和施肥量处理之间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同)

图 1 不同垄宽处理大白菜的生物产量及商品产量  
Fig.1 Biomass and economic yields of Chinese cabbage under different treatments

### 2.2 适宜垄宽下不同氮肥处理对大白菜生物产量和商品产量的影响

从图 2A 可以看出, 与不施化肥对照处理(N0+HW)相比, 增施化肥可以显著增加大白菜生物产量 27.5 ~ 36.8 t/hm<sup>2</sup>( $P<0.05$ )。与农户传统施肥处理(N480+HW)相比, 减施 30% 化肥氮处理(N340+HW)生物产量降低 7.1%, 而同样减施 30% 化肥氮的机械起垄侧条施肥处理(N340+MW)产量增长 8.8%。

从图 2B 还可以看出, 与不施化肥氮对照处理(N0+HW)相比, 增施化肥可以显著增加大白菜商品产量 14.6 ~ 21.7 t/hm<sup>2</sup>( $P<0.05$ )。与农户传统施肥处理(N480+HW)相比, 减施 30% 化肥氮处理(N340+HW)

商品产量降低了 5.0%，而同样减施 30% 化肥氮的机械起垄侧条施肥处理(N340+MW)商品产量增长了 13.6%。表明机械起垄侧条施肥技术可以在保证产量的基础上实现太湖地区露天大白菜生产的化肥减施。

### 2.3 不同氮肥处理对大白菜经济效益的影响

由表 3 可以看出，在大规模种植条件下，与传统人工种植方式相比，机械起垄侧条施肥可显著降低生产成本，与农户传统施肥处理(N480+HW)相比，减施 30% 化肥氮的机械起垄侧条施肥处理(N340+MW)每公顷减少肥料成本投入 3 594 元，每公顷减少劳动力成本投入 1 600 元，在降低生产成本的同时获得了最大商品产量，产值最高，纯利润增加了 58.3%，实现了太湖地区露天大白菜生产体系的减施增效。

### 2.4 不同氮肥处理对氮肥表观利用率的影响

根据公式，化肥氮素表观利用率(%)=(施化肥氮小区地上部吸氮量-不施化肥氮小区地上部吸氮量)/施氮量×100，计算不同处理化肥氮表观利用率。结果(图 3)表明：N480+HW 处理化肥氮素表观利用率为 8.39%，与之相比，N340+HW 处理化肥氮素表观利用率增加了 24.8%；N340+MW 化肥氮素表观利用率最高为 15.1%，比 N480+HW 处理增加了 79.3%，表明机械起垄侧条施肥技术可以显著提高化肥氮素

表观利用率，减少氮素的环境损失。

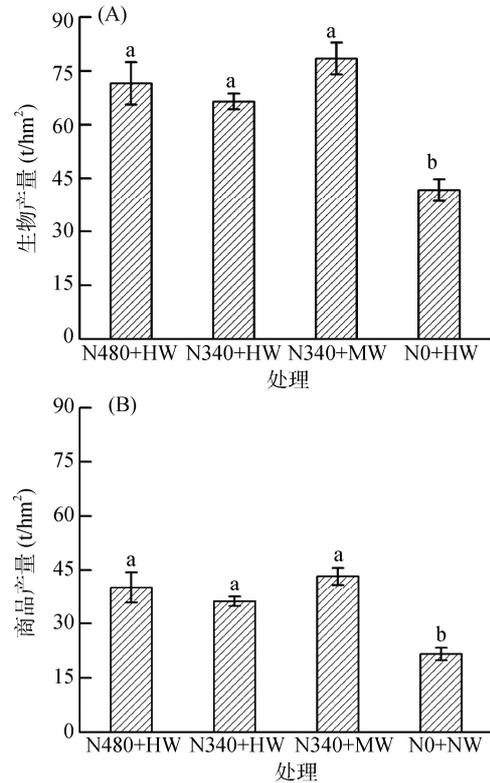


图 2 不同氮肥处理大白菜的生物产量及商品产量  
Fig. 2 Biomass and economic yields of Chinese cabbage under different treatments

表 3 不同处理的经济效益比较  
Table 3 Comparison of economic profits of different treatments

处理	肥料费(元/hm <sup>2</sup> )	机械费(元/hm <sup>2</sup> )	人工费(元/hm <sup>2</sup> )	产值(元/hm <sup>2</sup> )	纯利润(元/hm <sup>2</sup> )	增收(%)
N480+HW	22 473	-	3 600	45 627	19 554	-
N340+MW	18 879	2 000	-	51 838	30 959	58.3
N340+HW	18 879	-	3 600	43 324	20 844	6.6
N0+HW	10 153	-	3 600	25 848	12 095	-38.1

注：有机肥价格(含 N 22 g/kg)0.6 元/kg，化肥价格(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=10-10-10)4 元/kg，钙镁磷肥价格(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>120 g/kg)1 元/kg，硫酸钾价格(含 K<sub>2</sub>O 500 g/kg)4 元/kg；大白菜售价 1.2 元/kg；人工费每天 100 元。

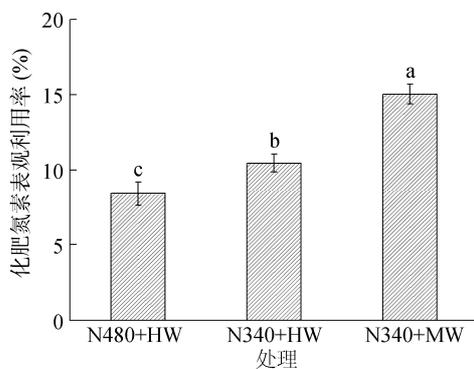


图 3 不同处理化肥氮素表观利用率  
Fig. 3 Efficiencies of nitrogen fertilizer under different treatments

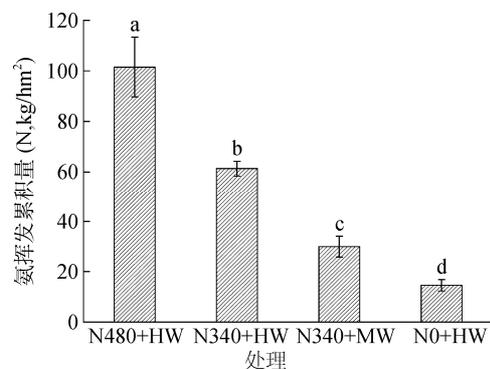


图 4 不同处理氨挥发  
Fig. 4 Ammonia volatilization under different treatments

## 2.5 不同氮肥处理对氨挥发损失的影响

由图 4 可知, 与不施化肥氮对照处理(N0+HW)相比, 施用化肥氮处理的土壤氨挥发累积量显著增加 15.4 ~ 86.9 kg/hm<sup>2</sup>(以纯氮量计), 农民传统施肥方式处理(N480+HW)氨挥发损失量为 101.5 kg/hm<sup>2</sup>, 占总施氮量的 16.9%; 减施 30% 化肥氮处理(N340+HW)处理的氨挥发损失为 61.3 kg/hm<sup>2</sup>, 比 N480+HW 处理减少氨挥发损失 40.2 kg/hm<sup>2</sup>, 表明减少施肥量可显著降低太湖地区蔬菜体系的氨挥发损失; 而减施 30% 化肥氮的机械起垄侧条施肥处理(N340+MW)氨挥发较 N480+HW 和 N340+HW 处理分别降低了 70.5% 和 51.1%, 表明机械起垄侧条施技术可显著降低太湖地区蔬菜体系的氨挥发损失。

## 3 讨论

### 3.1 垄宽对大白菜生物产量和商品产量的影响

本试验在太湖地区露天栽培条件下进行, 与 35 cm 窄垄相比, 55 cm 宽垄种植模式下大白菜的生物产量和商品产量显著提高。有研究表明, 长期宽垄种植的水稻土其土壤有机碳含量高于窄垄种植水稻土, 长期宽垄耕作改变了稻田土壤有机碳分布格局, 改善了土壤理化性质及其生态效应, 增加了稻田土壤有机碳储量<sup>[15]</sup>。另一方面根区土壤温度控制着作物根系的代谢和生长, 同时影响作物根系的养分吸收, 进而影响作物地上部的各种生理活动<sup>[16]</sup>, 是制约冬季蔬菜生产的重要环境因素。刘炜等<sup>[17]</sup>研究表明, 根区高温能促进根系伸长。改变栽培垄宽度能够影响作物根区温度, 进而改变根区热效应, 影响作物生长<sup>[18]</sup>。宽垄对于高温和低温环境下土壤缓冲能力优于窄垄, 蓄热保温能力强, 窄垄种植产量较低可能是由于根区环境不稳定, 根区遭受温度胁迫造成的<sup>[19]</sup>。

### 3.2 机械起垄侧条施肥对大白菜产量和经济效益的影响

本试验秋季露天大白菜在农民习惯施肥(氮肥 480 kg/hm<sup>2</sup>)下生物产量为 71.8 t/hm<sup>2</sup>, 直接减少 30% 化肥氮使用即撒施氮肥 340 kg/hm<sup>2</sup>, 大白菜产量达 66.5 t/hm<sup>2</sup>, 两者之间的产量在统计上没有显著差异, 说明在该地区的蔬菜生产中存在一定的化肥减量空间。但是从绝对值来看, 直接减少 30% 化肥氮使用有减产风险, 降低大白菜产量和经济效益, 在实际生产中不易被农户接受。采用机械起垄侧条施肥, 化肥氮使用量比习惯施氮量减少 30% 后, 产量可达 78.4 t/hm<sup>2</sup>, 大白菜产量进一步提高, 表明机械起垄侧条施肥能实

现露天菜地生产体系减施增效, 这与其他作物体系的研究结果类似。一方面这是因为机械起垄侧条施肥技术降低了肥料与土壤的接触面积, 有助于减少铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)固定的绝对量, 保证了大白菜营养生长中期的矿化氮供应。机械起垄侧条施肥围绕施肥带形成高浓度活动态营养元素“源”, 几乎可以保证整个营养生长期。另一方面由于撒施时地面肥料分布不均, 使作物产量不均匀, 收获时成熟度不一致, 降低了大白菜产量和品质。太湖地区露天菜地大白菜生长季中减施 30% 化肥氮的机械起垄侧条施肥处理(N340+MW)的化肥氮当季表观利用率最高, 表明在 N340+MW 处理土壤中施入的氮肥被作物充分吸收利用, 转化为自身产量。

机械起垄侧条施处理可显著降低生产成本。一方面 N340+MW 处理较农民习惯生产方式(N480+HW)减少 30% 化肥氮的使用, 减少肥料成本的投入; 另一方面随着经济社会发展, 农村劳动力资源严重匮乏, 人工生产成本日益增加, 机械起垄侧条施肥技术为农业生产机械化提供了保障, 可以更快更好地完成农业生产工作, 降低对劳动力的依赖, 减少生产过程中的成本投入。N340+MW 处理可以显著提高肥料利用率, 在降低肥料投入的同时商品产量较 N480+HW 和 N340+HW 处理显著提高, 增加生产收入, 获得最大经济收益。

### 3.3 机械起垄侧条施肥对氨挥发的影响

不施化肥氮处理(N0+HW)的大白菜, 在生长期内土壤氨挥发损失为 14.6 kg/hm<sup>2</sup>, 化肥氮的施入显著增加土壤的氨挥发损失(图 4)。农民传统种植方式(N480+HW)下, 土壤氨挥发损失为 101.5 kg/hm<sup>2</sup>, 与之相比, N340+MW 处理可减少土壤 70.5% 氨挥发损失。杨淑莉等<sup>[20]</sup>研究也表明, 氮肥在土壤中的位置对氨挥发损失的影响非常显著, 氮素深施可有效抑制氨挥发损失。这是由于条施覆土会增加土壤中的氨气向大气扩散的阻力<sup>[21]</sup>, 同时也会增加土壤颗粒对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和氨的吸持, 因此条施覆土能够显著降低土壤氨挥发<sup>[22]</sup>。在大田作物生产中, 氮肥条施可显著减少 27% ~ 90% 的氨挥发损失。不同试验地的气候条件是造成氨挥发排放差异显著的重要原因<sup>[23]</sup>。温度和土壤湿度是影响农田氨挥发损失的主要途径, 华北地区夏玉米生长季和南方地区水稻生长季都是一年中水热资源最丰富的时期, 该气候条件对施入土壤的氮肥转化为氨进而排放到空气中有极大的促进作用, 故而在该时期采用氨挥发减排措施控制氨挥发的效果

最好, 部分地区氨挥发排放可减少 90%<sup>[24]</sup>。

#### 4 结论

机械起垄侧条施肥技术在露天大白菜种植上, 适宜的垄宽为 55 cm, 该垄宽种植可显著提高大白菜的生物产量和商品产量。与人工传统施肥方式相比, 机械起垄侧条施肥可减少大白菜 30% 化肥氮投入, 且可提高 8.8% 生物产量和 13.8% 商品产量, 增加 58.3% 经济效益。此外, 机械起垄侧条施肥技术可显著减少菜地氨挥发损失。

#### 参考文献:

- [1] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
- [2] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83: 73-84.
- [3] Xing G X, Shi S L, Shen G Y, et al. Nitrous oxide emissions from paddy soil in three rice-based cropping systems in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64: 135-143.
- [4] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077.
- [5] 张绪美, 沈文忠, 胡青青. 太仓市郊大棚菜地土壤盐分累积与分布特征研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 987-991.
- [6] 闵炬, 陆扣萍, 陆玉芳, 等. 太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水质调查[J]. 土壤, 2012, 44(2): 213-217.
- [7] Min J, Lu K P, Sun H J, et al. Global warming potential in an intensive vegetable cropping system as affected by crop rotation and nitrogen rate. *Clean - Soil, Air, Water*, 2016, 44: 1-9.
- [8] 刘波, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同栽培模式及施氮方式对油菜产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3551-3560.
- [9] 温樱, 王东. 底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1387-1393.
- [10] 张岳芳, 周炜, 王子臣, 等. 氮肥施用方式对油菜生长季氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1690-1696.
- [11] 刘敏, 张翀, 何彦芳, 等. 追氮方式对夏玉米土壤 N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 19-29.
- [12] 傅国海, 杨其长, 刘文科, 等. 根区温度对设施作物生理生态影响的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2016, (10): 20-27.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 北方冬小麦 / 夏玉米轮作体系土壤 NH<sub>3</sub> 挥发的原位测定[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 359-365.
- [15] 唐晓红, 罗友进, 任振江, 等. 长期垄作稻田腐殖质稳定碳同位素丰度( $\delta^{13}\text{C}$ )分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 985-991.
- [16] 冯玉龙, 姜淑梅. 根系温度对甜椒生理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(4): 308-311.
- [17] 刘炜, 杨君林, 许安民, 等. 不同根区温度对冬小麦生长发育及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 197-201.
- [18] 傅国海, 杨其长, 刘文科. 日光温室土垄蓄热保温性能提升的构建参数研究[J]. 山东农业科学, 2015, 47(9): 42-45.
- [19] 傅国海, 杨其长, 刘文科, 等. SRSC 垄宽和垄高对日光温室甜椒生长及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(9): 1344-1348.
- [20] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 415-421.
- [21] Sommer S G, Schjoerring K, Denmead O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 82: 557-622.
- [22] Soares J R, Cantarella H, Menegale M L. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 82-89.
- [23] 王齐, 师春娟. 草坪生态系统中氨挥发研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(4): 80-84.
- [24] 张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1194-1201.