

华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系秋季一次基施牛粪氮素损失与利用研究

岳现录^{1,2}, 冀宏杰², 张认连², 林而达¹, 廖上强², 张维理^{2*}

(1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 为对我国华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系秋季一次基施有机肥的氮素环境效应提供评估依据, 本文分别在山东陵县和天津蓟县以不施肥、分次施用硫酸铵为对照, 对秋季一次基施牛粪的产量水平、氮素损失及利用等进行研究。其中, 山东陵县试验采用¹⁵N示踪技术。结果表明, 在冬小麦—夏玉米轮作周期施氮量为 N 300 和 N 450 kg/hm²条件下, 秋季一次基施牛粪¹⁵N损失率为 30%~38%, 与分次施用硫酸铵¹⁵N损失率无显著差异。牛粪氮施用 N 300 kg/hm²时, 损失量为 N 89 kg/hm²; 增施 50%牛粪氮, 氮损失量增加 91%。冬小麦、夏玉米收获后, 施牛粪处理 0—80 cm 土壤硝态氮含量在山东陵县分别为 N 38~40 和 18~23 kg/hm², 在天津蓟县 N 300 kg/hm²施氮条件下分别为 N 95 和 28 kg/hm², 均低于分次施用硫酸铵处理。长期施用有机肥农田, 秋季一次基施牛粪处理冬小麦、夏玉米子粒产量与分次施硫酸铵处理也无显著差异, 因此从环境角度分析, 秋季一次基施有机肥可继续应用和大力推广, 但施用量以不超过 N 300 kg/hm²为宜。

关键词: 华北平原; 冬小麦—夏玉米轮作; 牛粪; 基施; 氮肥损失

中图分类号: S44 13 S153 6 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2011)03-0592-08

Nitrogen loss and use efficiency of one time basal application of cattle manure in autumn to a winter wheat—summer maize cropping system on the North China Plain

YUE Xian lu^{1,2}, JI Hong jie², ZHANG Ren lian², LIN Er da¹, LIAO Shang qiang², ZHANG Wei li^{2*}

(1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China;

2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/

Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China)

Abstract: Cattle manure was applied to a winter wheat summer maize cropping system on the North China Plain in autumn as a single basal application (MOAA). In order to provide parameters for evaluation of environmental effects of MOAA, experiments employing no fertilizer application and split application of ammonium sulfate (SAAS) and MOAA as N 300 kg/ha were carried out in Ji county, Tianjin City, as N 300 and 450 kg/ha and was also adopted ¹⁵N tracer technology in Ling county, Shandong province, to study nitrogen (N) utilization and ¹⁵N loss. In the winter wheat summer maize cropping system, 30%—38% of the total manure ¹⁵N was lost which did not differ significantly from SAAS ¹⁵N loss. Manure N loss was N 89 kg/ha following N 300 kg/ha manure N application, and N loss sharply increased by 91% when manure N application increased by 50%. After winter wheat harvest, the amount of soil NO₃-N at 0—80 cm depths in MOAA was N 38—40 kg/ha in Ling county and N 95 kg/ha in Ji county, and decreased to N 18—23 and 18 kg/ha after summer maize harvest, respectively. In both instances, the values were lower than those of SAAS. In farmland with long term application of manure, there were

收稿日期: 2010-08-27 接受日期: 2011-01-14

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2006BAD05 B03); 中德合作项目 (BMBF FKZ: 0030800A—F); 中德合作项目 (2007DFA30850) 资助。

作者简介: 岳现录 (1973—), 男, 河北沙河市人, 博士, 研究方向为施肥模型、施肥与环境。Email: xylue@caas.ac.cn

* 通讯作者: Tel: 010-82108645 Email: wzhfan@caas.ac.cn

no significant differences in winter wheat and summer maize grain yields between MOAA and SAAS. From an environmental point of view, it is concluded that MOAA is an appropriate application but the amount of N should not exceed $N 300 \text{ kg/ha}$.

Key words: North China Plain; winter wheat-summer maize rotation; cattle manure; basal application; nitrogen loss

冬小麦-夏玉米轮作是华北地区主要粮食作物轮作方式。2008年该地区小麦、玉米播种面积分别占全国小麦、玉米种植面积的 51.1% 和 34.2%^[1]。近年来, 畜禽粪便在冬小麦-夏玉米轮作体系中有较大的投入。据调查, 有机肥氮在该轮作体系平均施用量已达 $N 68 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ ^[2], 以养殖业农户投入为主。随着养殖业的进一步发展, 畜禽粪便排放量还会进一步增大^[3], 由此造成有机肥氮素在该轮作体系的投入量还会增加。

冬小麦-夏玉米轮作体系一般采用秋季翻耕、夏季直播的耕作方式, 为节约劳动力成本和提高肥料利用效率, 投向该轮作体系的有机肥普遍在秋耕前作为基肥一次性施入。调查数据显示, 有机肥氮素在冬小麦季的平均投入量是夏玉米季的 7.6 倍^[4]。在冬季霜期较短、雨量丰富的欧洲, 秋季施用有机肥氮素损失率较高^[5-7], 利用效率较低^[8]; 为保护农业生态环境, 荷兰等许多国家已通过环境立法禁止农民在秋季施用液态畜禽粪便等有机肥。但在冬季寒冷干燥的华北平原, 影响氮素损失和利用的气候条件不同于欧洲, 秋季施用有机肥的氮素损失及利用也可能存在差异。如果在华北平原秋季一次基施有

机肥氮素损失率较低, 则会因其环境友好而较适宜推广应用。但目前在该区域内针对秋季一次基施有机肥方式下的氮肥损失及利用, 尤其在田间原位条件下采用 ^{15}N 示踪技术的研究尚未见报道。为此, 以占我国畜禽粪便氮排放量比例最高的牛粪^[9] 为研究对象, 通过跟踪 ^{15}N 标记牛粪在作物-土壤体系的去向, 研究秋季一次性基施有机肥氮素在冬小麦-夏玉米轮作体系的损失及利用效率, 为该施肥方式在华北平原的氮素环境效应提供评估依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

两个试验点均位于华北平原, 属暖温带半湿润半干旱季风气候。试验一布置在中国农业科学院山东陵县试验站 ($E 116^{\circ} 38'$, $N 37^{\circ} 20'$), 该农田长期施用化肥, 土壤类型为潮土, 质地为轻壤质, 无霜期为 208 d, 年均气温 12.9°C , 年均降水量 547.5 mm ; 试验二布置在天津蓟县杨辛庄村东 ($E 117^{\circ} 27'$, $N 39^{\circ} 59'$), 该农田近 5 年连续施用有机肥, 土壤类型为棕壤, 质地为轻壤质, 无霜期 195 d, 年均气温 11.5°C , 年均降水量 678.6 mm 。两试验点土壤基本性状见表 1。

表 1 供试土壤的基本性状

Table 1 Soil chemical properties in experimental sites

试验地点 Sites	土层深度 Depth (cm)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg/kg)	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (mg/kg)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)
山东陵县 Ling county Shandong	0-10	19.80	0.88	10.87	0.04	6.09
	10-20	13.28	0.75	6.77	0.22	5.33
	20-50	8.39	0.42	3.95	0.08	2.50
	50-80	5.89	0.35	2.83	0.13	2.51
天津蓟县 Ji county Tianjin	0-10	22.82	1.60	10.70	0.15	21.78
	10-20	13.60	1.34	6.62	0.31	8.79
	20-50	6.20	0.43	3.18	0.07	3.27
	50-80	6.49	0.24	3.59	0.02	3.88

1.2 ^{15}N 标记牛粪制备

用改进并含有 ^{15}N 标记硫酸铵的 Hogland 营养液砂培种植 ^{15}N 标记玉米; 然后将 ^{15}N 标记玉米和非标记玉米以氮含量 55:45 的比例混合饲喂一头 2 龄

黄牛, 并收集 ^{15}N 标记牛粪尿, 测得牛粪尿含 N 1.626%, ^{15}N 原子百分超为 8.044。

1.3 试验设计

1.3.1 秋季一次基施牛粪 ^{15}N 示踪试验 该试验在山

东陵县进行。供试作物为冬小麦(烟农 19)和夏玉米(郑单 958),供试肥料为¹⁵N标记牛粪、普通牛粪、¹⁵N标记硫酸铵(¹⁵N原子百分超为 10.03)和普通硫酸铵。试验设:不施肥(CK),牛粪 N 300 kg/hm²(M300),牛粪 N 450 kg/hm²(M450),硫酸铵 N 300 kg/hm²(F300),硫酸铵 N 450 kg/hm²(F450)共 5 个处理,3 次重复。其中牛粪为秋季一次基施;硫酸铵在冬小麦季分 3 次,在夏玉米季分 2 次施入(表 2)。

试验采用小区套微区方法。在小区(5 m×6 m)内设计微区(65 cm×65 cm),微区内施入¹⁵N标记肥料,微区以外小区其它部分施入等氮量未标记肥料,每个微区随机排列。设置微区时首先在田间原位挖 1 m 深(65 cm×65 cm)土柱,然后将相同规格 1.1 m 高的无底土柱桶(镀锌铁皮桶)自上而下套入土柱。土柱桶顶端高出地面 10 cm,防止微区内因灌溉、降水等导致¹⁵N流失。土柱桶与土柱间缝隙用原状土精细回填,防止¹⁵N随水分通过桶-土界面淋入深层。微区施入¹⁵N标记牛粪时,首先取部分微区表土与之充分混匀,然后散播于微区表面,

再分别通过纵横翻耕施入深层,以保证随后采集土样的代表性。

所有施用硫酸铵的小区或微区,在冬小麦播前施 P₂O₅ 60 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²;在夏玉米三叶期施 P₂O₅ 60 kg/hm², K₂O 150 kg/hm²;磷、钾肥为普通过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 50%)。冬小麦于 2007 年 10 月 30 日播种,2008 年 6 月 11 日收获。夏玉米于 2008 年 6 月 13 日播种,9 月 25 日收获。

1.3.2 秋季一次基施牛粪普通肥效试验 在天津蓟县进行。供试作物为冬小麦(北农 66)、夏玉米(郑单 958),供试肥料为普通牛粪和普通硫酸铵。试验共设 3 个处理:不施肥(CK);牛粪 N 300 kg/hm²(M300);硫酸铵 N 300 kg/hm²(F300),各处理 3 次重复。试验小区面积 3 m×10 m,随机区组排列。施用硫酸铵的小区施用磷、钾肥,施肥品种同 1.3.1,施肥时间及用量见表 2。冬小麦于 2007 年 10 月 10 日播种,2008 年 6 月 11 日收获;夏玉米于 2008 年 6 月 25 日播种,9 月 27 日收获。

表 2 不同处理在冬小麦-夏玉米轮作体系的氮肥施用时间及分次施用量(N kg/hm²)

Table 2 Rate and date of N application for each treatment during winter wheat and summer maize growing period

处理 Treatment	施氮水平 N level	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize	
		播前 Before sowing	返青期 Regreening stage	开花期 Anthesis stage	三叶期 3-leaf stage	十叶期 10-leaf stage
CK	0					
M300	300	300				
M450	450	450				
F300	300	45	60	45	75	75
F450	450	60	80	60	125	125

1.4 样品采集和测定

冬小麦、夏玉米收获后,每个小区和微区分别采集土样与植株样。土样分 0—10、10—20、20—50、50—80 cm 4 层,小区内按“S”型分 4 钻采集分层混合土样,微区内在冬小麦收获后分 2 钻、夏玉米收获后分 3 钻采集分层混合土样。微区采完土壤后,用与土钻同直径的 PVC 管插入采样孔底部,并把上部夯实。PVC 管高出表土 10 cm,顶端加盖以防表层¹⁵N 随灌溉或降雨流入深层,影响试验结果。植株样采集分为地上部秸秆和子粒两部分。

土样测定全氮和硝态氮,微区土样加测全氮¹⁵N 丰度;植株样测定全氮,微区植株样加测全氮¹⁵N 丰度。土壤和植株样全氮用凯氏定氮法测定,凯氏定氮消煮液再通过蒸馏酸化、浓缩,在河北省农林科学

院遗传生理研究所用 ZHT-03 质谱仪测定¹⁵N 丰度。土壤硝态氮用土水比为 1:5 的 2 mol/L KC 溶液浸提,用 FOSS 注射流动分析仪测定。

1.5 参数计算方法

作物吸收¹⁵N 标记肥料氮(N kg/hm²) = 植株全氮的¹⁵N 原子百分超 × 植株吸氮量(N kg/hm²) × 0.01;

氮肥回收率(%) = 作物吸收¹⁵N 标记肥料氮(N kg/hm²) / 小区施氮量(N kg/hm²) × 100

氮肥在土壤残留量(N kg/hm²) = 土壤全氮(N kg/hm²) × 土壤全氮的¹⁵N 原子百分超 × 0.01;

氮肥残留率(%) = 氮肥在土壤残留量(N kg/hm²) / 小区施氮量(N kg/hm²) × 100

氮肥损失量(N kg/hm²) = 小区施氮量(N

kg/hm^2) - 作物吸收肥料氮量 (N kg/hm^2) - 土壤残留氮 (N kg/hm^2);

氮肥损失率 (%) = $\frac{\text{氮素损失量} (\text{N kg/hm}^2)}{\text{小区施氮量} (\text{N kg/hm}^2)} \times 100$

差减法作物吸收肥料氮量 (N kg/hm^2) = 施氮区作物吸氮量 (N kg/hm^2) - 无氮区作物吸氮量 (N kg/hm^2);

氮肥表观利用率 (%) = $\frac{\text{差减法作物吸收肥料氮量} (\text{N kg/hm}^2)}{\text{小区施氮量} (\text{N kg/hm}^2)} \times 100$

试验数据采用 MP4.0 软件进行统计分析, 用 SigmaPlot10.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 秋季一次基施牛粪对作物产量的影响

山东陵县试验田属长期施用化肥的中低产田,

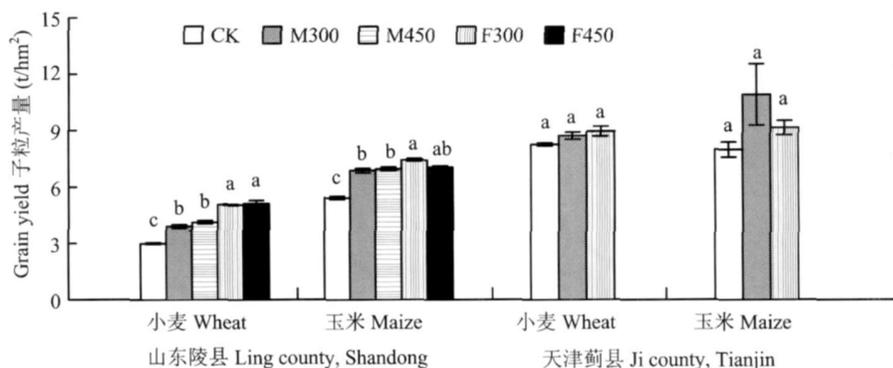


图 1 不同处理对冬小麦、夏玉米子粒产量的影响

Fig 1 Effect of different treatments on grain yield of winter wheat and summer maize

[注 (Notes): 不同字母表示同一地点同一作物的产量水平在不同处理间差异达 5% 显著水平
Different letters within the same crop and site indicate significant at 5% level among treatments.]

2.2 秋季一次基施牛粪氮素的损失

^{15}N 示踪试验(表 3)看出, 在冬小麦-夏玉米轮作周期, M300 处理 ^{15}N 损失量为 $\text{N } 89 \text{ kg/hm}^2$, 与 F300 处理相比无显著差异; M450 处理多施 50% 氮肥, ^{15}N 损失量却增加了 90%, 与 F450 处理 ^{15}N 损失量相等。表明在冬小麦-夏玉米轮作周期内相同施氮水平下, 一次基施牛粪氮的损失风险与分次施用硫酸铵氮的损失风险无显著区别, 并且施氮量增加比例低于环境风险放大比例。

在轮作周期内, M300 和 M450 处理的 ^{15}N 损失量约有 2/3 发生在冬小麦季, 1/3 发生在夏玉米季。冬小麦季 M300 处理的 ^{15}N 损失量为 $\text{N } 64 \text{ kg/hm}^2$, 是 F300 处理的 1.4 倍; 夏玉米季 M300 处理的 ^{15}N 损失量为 $\text{N } 25 \text{ kg/hm}^2$, 为 F300 处理的 69%。

施氮肥能显著增加冬小麦、夏玉米的子粒产量(图 1)。冬小麦 M300 处理子粒产量为 3.9 t/hm^2 , 与 CK 相比增产 30.5%, 但显著低于 F300 和 F450 处理。夏玉米子粒产量在各处理间也有类似规律, 但因为 F450 处理在夏玉米季施氮量较高 ($\text{N } 250 \text{ kg/hm}^2$) 导致其产量水平低于 F300 处理, 从而表现为与 M300、M450 处理无显著差异。

天津蓟县试验田属长期施用有机肥的高产田, 施肥对冬小麦、夏玉米的子粒产量无显著影响(图 1)。夏玉米季 F300 处理一个重复小区倒伏减产, 处理内产量变异较大导致处理间产量差异不显著。

以上结果表明, 秋季一次基施有机肥处理的冬小麦、夏玉米子粒产量在长期施用化肥的中低产田低于分次施用化肥的总产量水平, 在长期施用有机肥的高产田与分次施用化肥无显著差异。

2.3 秋季一次基施牛粪对土壤残留 ^{15}N 的影响

冬小麦、夏玉米收获后肥料 ^{15}N 在 0-80 cm 土层的残留量顺序为: M450 > M300 > F450 > F300 各处理间差异显著。两季轮作结束后, 牛粪 ^{15}N 在土壤残留率高达 49% ~ 53%, 而硫酸铵 ^{15}N 残留率仅为 28% ~ 30% (表 3)。这是因为硫酸铵氮素以矿质氮形态存在, 利用率较高, 导致其在土壤残留较低。有机肥氮在土壤中的高残留量不仅能增加土壤有机质含量, 而且还可贮备部分养分供下季作物吸收利用, 是提升农田地力水平的有效途径^[10]。

2.4 秋季一次基施牛粪氮素的 ^{15}N 回收率及表观利用率

2.4.1 ^{15}N 回收率 ^{15}N 示踪试验看出, 冬小麦、夏玉米轮作周期肥料 ^{15}N 回收率在不同处理间表现为 F300 > F450 > M300 > M450 (表 3)。冬小麦、夏玉米

表 3 不同处理¹⁵N标记肥料氮在冬小麦-夏玉米轮作周期内的损失、吸收和土壤残留Table 3 Effect of different treatments on ¹⁵N recovery and loss in winter wheat-summer maize rotation

生长季 Growing season	处理 Treatment	作物吸收氮 ¹⁵ N uptake		0-80 cm土壤残留氮 ¹⁵ N residue		氮损失 ¹⁵ N loss	
		吸收量	回收率	残留量	残留率	损失量	损失率
		N uptake (N kg/hm ²)	Recovery rate (%)	Residual amount (N kg/hm ²)	Residual rate (%)	Loss (N kg/hm ²)	Loss rate (%)
冬小麦 Wheat	F300	0.65 a	43.0 a	0.040 d	26.0 b	0.045 c	31.0 a
	F450	0.070 a	35.0 b	0.066 c	33.0 b	0.064 b	32.0 a
	M300	0.026 b	8.6 c	0.210 b	70.0 a	0.064 b	21.0 a
	M450	0.030 b	6.6 c	0.297 a	66.0 a	0.123 a	27.0 a
夏玉米 Maize	F300	0.069 a	46.0 a	0.085 d	30.0 b	0.036 b	24.0 b
	F450	0.077 a	31.0 b	0.133 c	27.0 b	0.106 a	42.0 a
	M300	0.026 b	8.7 c	0.159 b	53.0 a	0.025 b	8.3 b
	M450	0.030 b	6.7 c	0.221 a	49.0 a	0.046 b	10.0 b
轮作周期 Rotation Period	F300	0.134 a	45.0 a	0.085 d	28.0 b	0.081 b	27.0 a
	F450	0.147 a	33.0 b	0.133 c	30.0 b	0.170 a	38.0 a
	M300	0.052 b	17.0 c	0.159 b	53.0 a	0.089 b	30.0 a
	M450	0.059 b	13.0 d	0.221 a	49.0 a	0.170 a	38.0 a

注 (Notes): 同列数据后不同字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant among different treatments at 5% level

季, M300和 M450处理¹⁵N回收率均显著低于 F300和 F450处理; 两季轮作¹⁵N回收率在 M300处理为 17%, 在 F300处理则高达 45%, 可见在该轮作体系中化肥¹⁵N回收率远大于有机肥¹⁵N回收率。但 F300、F450处理夏玉米吸收的¹⁵N包括夏玉米当季施入的硫酸铵¹⁵N和冬小麦收获后残留于土壤的¹⁵N, 因此该结果高于夏玉米对¹⁵N的实际回收数值。

2.4.2 氮肥表观利用率 冬小麦、夏玉米轮作周期中, M300处理的氮肥表观利用率在山东陵县较低, 在天津蓟县较高; F300处理则正好相反(表 4)。表明秋季一次基施牛粪肥效在长期施用有机肥的农田较高, 在长期施用化肥的中低产田较低。在山东陵县, 冬小麦、夏玉米及其轮作周期内氮肥表观利用率不同处理间的顺序均为: F300 > F450 > M300 > M450, 并且 M300处理在两季轮作的氮肥表观利用率与 M450处理相比无显著差异, 均显著低于 F300处理(42.9%)。在天津蓟县, F300处理在两季轮作的氮肥表观利用率与 M300处理几乎相等(26%)。说明在冬小麦-夏玉米轮作周期, 有机肥利用效率在长期施用化肥的中低产田低于化肥利用效率, 在长期施用有机肥的高产田与化肥利用效率无显著差异。受夏季高温多雨气候条件影响, 牛粪氮在夏玉米季有更好的矿化条件, 在两个试验点, M300处理在夏玉米季氮肥表观利用率均大于其在冬小麦季氮肥表观利用率, 而表现出更好的后效。

3 讨论

试验表明, 秋季一次性基施牛粪, 在冬小麦-夏玉米轮作周期的氮素损失为 30%~38%, 其中约 2/3 的损失发生在冬小麦季。主要是牛粪施入农田后, 土-肥界面的铵态氮浓度和表土层 pH 均迅速增加, 导致在最初几天有机肥氮损失率较高、损失量大^[11]。Chantigny 等研究认为, 在加拿大魁北克省, 施入牧草田的猪粪尿铵态氮通过氨挥发途径损失主要发生在 9 d 内, 损失量达猪粪尿铵态氮总量的 40%, 其中前 2 d 的损失量占 9 d 内总损失量的 87.5%^[12]; 在德国免耕自然植被、黑燕麦农田施用猪粪尿 40~80 m³/hm² 条件下, 最初 20 h 内通过氨挥发途径损失猪粪尿氮量占全部猪粪尿氮损失量的 50% 左右^[13]。由此来看, 本试验牛粪氮在冬小麦季的损失量高于夏玉米季, 主要是有机肥施入农田后短期内大量铵态氮通过氨挥发途径损失引起的。

降雨条件是影响农田有机肥氮素流失的重要因素之一。Beckwith 等^[7]认为, 在冬季雨量丰富的英国, 9 月份施入农田的动物粪尿氮 (N 200 kg/hm²) 约有 20%~30% 通过淋溶径流损失, 施肥期如果推迟到 12 月或次年 1 月份, 则通过径流损失则可控制在 5% 以内。说明在英国秋季使用动物粪尿, 冬季通过径流损失的风险很高。德国^[14]等许多欧洲国家秋季施用有机肥氮损失研究也有类

表 4 不同处理对冬小麦-夏玉米轮作周期内的氮素吸收和氮肥表观利用率的影响

Table 4 Effects of treatments on N uptake and apparent N use efficiency by winter wheat and summer maize

地点 Site	生长季 Growing season	处理 Treatment	作物吸收氮 N uptake by crop (N kg/hm ²)	作物吸收肥料氮 Fertilizer N uptake by crop (N kg/hm ²)	氮肥表观利用率 ANUE (%)	
山东陵县 Ling county, Shandong	冬小麦 Winter wheat	CK	66.4 ^c			
		F300	135.9 ^a	69.4 ^a	46.2 ^a	
		F450	144.2 ^a	77.8 ^a	38.9 ^b	
		M300	88.5 ^b	22.1 ^b	7.4 ^c	
	夏玉米 Summer maize	CK	91.7 ^b			
		F300	150.9 ^a	59.2 ^a	39.4 ^a	
		F450	147.5 ^a	55.8 ^{ab}	22.3 ^b	
		M300	120.0 ^{ab}	28.3 ^b	9.4 ^c	
	轮作周期 Rotation period	CK	158.2 ^c			
		F300	286.7 ^a	128.6 ^a	42.9 ^a	
		F450	291.8 ^a	133.6 ^a	29.7 ^b	
		M300	208.5 ^b	50.4 ^b	16.8 ^c	
天津蓟县 Ji county, Tianjin	冬小麦 Winter wheat	CK	227.8 ^b			
		F300	267.9 ^a	40.1 ^a	26.7 ^a	
		M300	261.4 ^a	33.7 ^a	11.2 ^a	
		CK	123.7 ^a			
	夏玉米 Summer maize	F300	162.1 ^a	38.4 ^a	25.6 ^a	
		M300	168.2 ^a	44.4 ^a	14.8 ^a	
		轮作周期 Rotation period	CK	351.5 ^b		
		F300	430.0 ^a	78.5 ^a	26.2 ^a	
	M300	429.6 ^a	78.1 ^a	26.0 ^a		

注 (Notes): ANUE— Apparent nitrogen use efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平. Values followed by different letters are significant among different treatments at 5% level.

似结果, 并且有机肥氮损失量也普遍高于化肥氮损失量^[15]。本试验所在的华北平原, 冬季干旱少雨, 10月到次年 2 月累计降水量仅为 16.1 mm, 而同期欧洲 (以伦敦为例) 的总降水量高达 247.3 mm, 因此华北平原冬季基本无径流损失发生。但在华北平原, 小麦在越冬前普遍浇灌一次冻水 (本试验也浇灌一次冻水), 可能会导致少量有机肥氮素通过淋溶作用损失掉。与欧洲一些国家相比, 冬季无径流损失降低了华北平原秋季一次基施有机肥氮损失风险, 提高了秋季施用有机肥的可行性。

有机肥施入农田后, 土壤 NO_3^- -N 数量也会对环境产生潜在影响。山东陵县、天津蓟县两地, 冬小麦、夏玉米收获后土壤 NO_3^- -N (0—80 cm) 数量均表现为不施肥处理略低于秋季一次基施有机肥处理, 以分次施用化肥处理最高 (图 2)。冬小麦、夏玉米收获后, M300 处理 0—80 cm 土壤 NO_3^- -N 在天津蓟县分别为 $\text{N} 95.28 \text{ kg/hm}^2$, 是 F300 处理的 54% ~ 84%; 在山东陵县分别为 $\text{N} 36.18 \text{ kg/hm}^2$, 是 F300

处理的 40% ~ 70%。在后者试验点, M450 处理 0—80 cm 土壤 NO_3^- -N 在两季作物收获后分别为 $\text{N} 40.23 \text{ kg/hm}^2$, 仅为 F450 处理的 23% ~ 47%。这与许多研究结果类似^[16-17]。冬小麦或夏玉米收获后, 地表无植被覆盖, 而冬小麦收获后又处于高温多雨季节, 土壤 NO_3^- -N 遇降雨易通过径流或淋溶损失掉; 秋季一次基施牛粪, 土壤 NO_3^- -N 含量低于分次施用硫酸铵处理, 因而通过淋溶、径流损失的潜在风险较低。

作物产量受多种因素的影响, 其中施肥是重要的影响因素之一。本研究在长期施用有机肥的天津蓟县农田, 秋季一次基施牛粪与分次施用硫酸铵的产量水平无显著差异; 但在长期施用化肥的山东陵县中低产田, 前者产量水平显著低于后者。试验虽未设置一次基施有机肥与化肥的配施处理, 但诸多的长期定位试验表明有机无机配施的作物增产效果最佳^[18-19]。俄胜哲等^[20]对河西绿洲灌漠土 25 年的

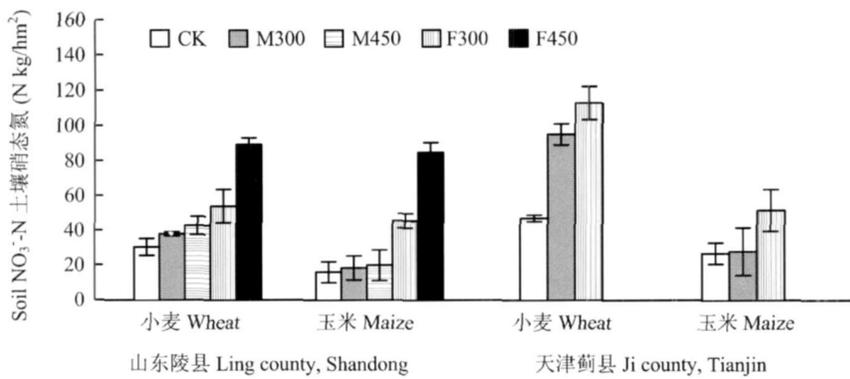


图 2 不同处理对冬小麦、夏玉米收获后 0—80 cm 土壤 NO₃-N 数量的影响

Fig 2 Effect of treatments on the status of soil NO₃-N at 0—80 cm soil depth after winter wheat and summer maize harvest

长期肥料定位试验的分析得出,有机无机配施冬小麦产量高达 6.25 t/hm²,是单施化肥产量的 1.13 倍,是单施有机肥产量的 1.78 倍;刘恩科等^[21]在北京昌平长期肥料定位试验站的研究表明,有机无机配施的夏玉米产量高达 7.95 t/hm²,是施化肥处理(NPK平衡施肥)的 1.07 倍。这是因为一方面有机肥含有大中微量元素等多种养分供作物吸收,能弥补一般化肥供养种类的不足;另一方面,有机无机配施能明显改善土壤质量^[22]。因此,根据已有的研究结果,在冬小麦、夏玉米轮作体系中,秋季一次基施有机肥再适量配施化肥,能达到较好的作物增产效果。

综上所述,在我国华北平原,秋季一次性基施有机肥氮素年度损失引起的环境风险与分次施用化肥无显著差异,并且在寒冷干旱的冬季无径流损失风险。因此从氮损失环境角度考虑,秋季一次基施有机肥方式可继续推广与应用,但用量以不超过 N 300 kg/hm² 为宜。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2009年[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009
National bureau of statistics of China. China statistical Yearbook—2009[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009
- [2] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦—夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684—697.
Zhao RF, Chen XP, Zhang FS. Nitrogen cycling and balance in winter wheat and summer maize rotation system in Northern China Plain[J]. Acta Pedol Sin, 2009, 46(4): 684—697
- [3] 赵青玲,杨继涛,李遂亮,等. 畜禽粪便资源化利用技术的现状及展望[J]. 河南农业大学学报, 2003, 37(2): 184—187.
Zhao QL, Yang JT, Li SL et al. The Present situation and Pros-

pect of resource technology on the feces of livestock and poultry [J]. J Henan Agric Univ, 2003, 37(2): 184—187.

- [4] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2005.
Wu SX. The spatial and temporal change of nitrogen and Phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: PhD dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [5] Kirchmann H, Easa JM, Morken J et al. Ammonia emissions from agriculture—Summary of the Nordic seminar on ammonia emission science and policy[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 1998, 51: 1—3
- [6] Chadwick DR, Martinez JM, MaolC et al. Nitrogen transformations and ammonia loss following injection and surface application of pig slurry: A laboratory experiment using slurry labelled with ¹⁵N—ammonium[J]. J Agric Sci, 2001, 136(2): 231—240
- [7] Beckwith CP, Cooper J, Smith KA et al. Nitrate leaching loss following application of organic manures to sandy soils in a table cropping I. Effects of application time, manure type, overwinter crop cover and nitrification inhibition[J]. Soil Use Manag, 1998, 14(3): 123—130
- [8] Jackson DR, Smith KA. Animal manure slurries as a source of nitrogen for cereals: effect of application time on efficiency[J]. Soil Use Manag, 1997, 13(2): 75—81.
- [9] 刘晓利,许俊香,王方浩,等. 我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 27—32
Liu XL, Xu JX, Wang FH et al. The resource and distribution of nitrogen nutrient in animal excretion in China[J]. J Agric Univ Hebei, 2005, 28(5): 27—32
- [10] 宇万太,姜子绍,马强,等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1057—1064.
Yu WT, Jiang ZS, Ma Q et al. Effects of application of manure on soil fertility[J]. Plant Nutr Fert Sci, 2009, 15(5): 1057—1064
- [11] Sommer SG, Sherlock RR. pH and buffer component dynamics

- in the surface layers of animal slurries J. *J. Agric. Sci.*, 1996, 127(1): 109-116
- [12] Chantigny MH, Rochette P, Angers D A et al. Ammonia volatilization and selected soil characteristics following application of anaerobically digested pig slurry J. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68(1): 306-312
- [13] PortQ, Aita Ç, Giacomini S J. Nitrogen loss by ammonia volatilization with the use of pig slurry in no till system J. *Pesq. Agropec. Bras.*, 2003, 38(7): 857-865.
- [14] Sjöling K, Günther-Borstel Q, Hanus H. Effect of slurry application and mineral nitrogen fertilization on N leaching in different crop combinations J. *J. Agric. Sci.*, 1997, 128(1): 79-86.
- [15] Bosshard Ç, Sørensen P, Frossard E et al. Nitrogen use efficiency of ¹⁵N-labelled sheep manure and mineral fertilizer applied to microplots in long term organic and conventional cropping systems J. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2009, 83(3): 271-287.
- [16] Daliparthi J, Herbert S J, Veneman L M. Dairy manure applications to alfalfa: Crop response, soil nitrate and nitrate in soil water J. *Agron. J.*, 1994, 86(6): 927-933.
- [17] Richards IR, Tumer I D, S Wallace P A. Manure and fertilizer contributions to soil mineral nitrogen and the yield of forage maize J. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 1999, 55(2): 175-185
- [18] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K et al. Yield trends and changes in soil organic C and available NPK in a long term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers J. *Field Crops Res.*, 2000, 68: 219-246
- [19] Jiang D, Hengsdijk H, Dai T B, de Boer W et al. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize system in Jiangsu, China J. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 25-32
- [20] 俄胜哲, 杨生茂, 郭永杰, 等. 长期施肥对河西绿洲灌漠土作物产量及土壤养分自然供给能力的影响 J. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 786-793
- [21] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响 J. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 789-794
- [22] E S Z, Yang S M, Guo Y J et al. Effects of long term fertilization on crop yield and indigenous soil nutrient supply in Hexi Oasis of Gansu Province J. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(4): 786-793
- [21] Liu EK, Zhao BQ, Hu CH et al. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility J. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(5): 789-794
- [22] Manna M Ç, Swarup A, Wanjari R H et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India J. *Field Crops Res.*, 2005, 93(2-3): 264-280