

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20160717

· 中日合作项目——“北方农业循环型系统设计与评价”专栏 ·

# 氮肥减量及秸秆替代过量氮肥下冬小麦/ 夏玉米轮作体系氮素淋失风险研究\*

杨晓梅<sup>1</sup>, 尹昌斌<sup>1\*</sup>, 李贵春<sup>2</sup>, 南云不二男<sup>3</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 日本国际农林水产业研究中心, 日本筑波 305-8686)

**摘要** 针对过量施用氮肥和地下水硝酸盐超标的现状, 探索减量施氮、秸秆替代过量氮肥下土壤氮素的淋失风险, 以期降低氮素淋失风险提供科学依据。通过在河北省徐水县进行连续4年的冬小麦—夏玉米轮作体系田间定位试验, 分析耕作(少耕和常规耕作)、施氮量(无机氮0、200和300 kg/hm<sup>2</sup>)和秸秆(还田、不还田)等措施对作物收获后土壤无机氮累积、土壤—作物体系氮平衡状况以及冬小麦和夏玉米产量的影响。结果表明, 小麦收获后, 过量施氮处理0~100 cm土壤硝态氮累积量显著高于其它处理, 高达221 kg/hm<sup>2</sup>, 过高的土壤残留硝态氮增加玉米高温多雨季氮素淋洗风险。3年氮平衡累积量比较显示, 过量施氮、少耕/常规耕作减量施氮秸秆还田3处理的氮平衡值无显著性差异, 以少耕减量施氮秸秆还田最低, 为236 kg/hm<sup>2</sup>, 过量施氮处理最高, 为281 kg/hm<sup>2</sup>, 三者均显著高于少耕/常规耕作减量施氮秸秆不还田处理。冬小麦—夏玉米轮作体系氮平衡值与0~100 cm土层的土壤无机氮、土壤硝态氮累积量呈显著正相关, 说明氮素大量盈余会导致0~100 cm土壤剖面无机氮大量累积, 尤其是硝态氮大量累积。少耕和常规耕作减量施氮秸秆还田处理的冬小麦、夏玉米产量与过量施氮无显著差异。综合考虑土壤无机氮累积量、氮平衡值和作物产量, 少耕或者常规耕作下, 可以利用秸秆氮替代过量无机氮, 降低氮素淋洗风险。

**关键词** 冬小麦 夏玉米 氮平衡 硝态氮累积 产量 淋洗风险

中图分类号: S512.1<sup>+1</sup>; S513; S157 文献标识码: A 文章编号: 1005-9121 [2016]07-0116-07

## 0 引言

从20世纪70年代初期以来, 我国农业生产的化肥投入, 尤其是氮肥投入, 迅速增加, 到2014年, 全国化肥投入量(折纯量)为5996万t, 氮肥投入量(折纯量)为2393万t。一是由于相比牛粪等有机肥提供缓效养分, 化肥为作物提供速效养分, 能迅速提高作物产量, 如王祖力、肖海峰(2008)分析化肥施用与粮食产量增长的关系发现, 1978~2006年间化肥投入对粮食产量增长的贡献率达56.81%, 认为化肥是粮食生产投入要素中贡献最大的要素<sup>[1]</sup>; 二是改革开放带来的农业劳动力机会成本增加, 畜禽粪便等有机肥施用操作复杂、劳动力投入多, 化肥投入逐渐替代有机肥投入; 三是国家制定并实行了一系列的惠农富农强农的农业直接补贴政策来保障国家粮食安全, 一定程度地刺激了农民加大化学品投入的积极性<sup>[2]</sup>。尽管作物正常生长发育依赖于充足的养分, 但是氮肥过量施用会降低氮肥利用率, 造成土壤—作物系统氮素盈余, 并主要残留在土壤中<sup>[3]</sup>, 导致氮素累积与淋洗, 进一步增加地下水污染的风险, 这些问题得到人们越来越多地关注<sup>[4-5]</sup>, 尤其是冬小麦—夏玉米体系中氮淋洗损失主要发生在雨季夏玉米生长期<sup>[6]</sup>。华北地区是中国玉米和小麦重要的生产基地, 为中国提供42%的玉米产量和79%的小麦产量<sup>[7]</sup>。然而, 华北粮食高产区每年氮肥施用量通常超过500 kg/hm<sup>2</sup>, 单季作物的氮肥施用量超过300 kg/hm<sup>2</sup>的

收稿日期: 2016-04-10

作者简介: 杨晓梅(1988—), 女, 山东荣成人, 博士生。研究方向: 农业经济管理。\*通讯作者: 尹昌斌(1968—), 男, 安徽桐城人, 博士、研究员、博士生导师。研究方向: 农业经济管理、农业区域发展、农业清洁生产。Email: yinchangbin@caas.cn

\*资助项目: 国家“十二五”科技支撑项目“山地丘陵区空心村整治关键技术集成示范”(2014BAL01B03)

农田也到处可见<sup>[8]</sup>, 极大地超过当地粮食生产所需氮量, 不可避免地降低氮素利用效率, 增加氮素淋洗风险, 导致华北农区地下水硝酸盐含量超过饮用水限制标准的比例达 50%<sup>[9]</sup>。从中国的粮食生产和环境承载力两方面考虑, 朱兆良推荐单季施氮量控制在 150~180 kg/hm<sup>2</sup> 作为氮肥合理施用量, 可根据实际情况适当增减<sup>[10]</sup>。由此可见, 单季过量施氮量较推荐施氮量一般至少高出 100 kg/hm<sup>2</sup>。因此, 研究设立两个假设: 一是减去过量无机氮, 二是利用秸秆氮替代过量无机氮, 探查氮素淋洗风险及对作物产量的影响。

土壤—作物系统氮平衡状况与生态环境安全紧密相关, 氮平衡通常用来评估耕地的氮淋洗风险<sup>[11]</sup>, 而氮盈余 (投入氮—作物输出氮) 可用来衡量该系统的氮平衡值<sup>[3]</sup>。然而, 目前多数研究集中在氮素施用量对冬小麦—夏玉米轮作体系的氮平衡和作物产量的影响研究, 很少评估秸秆氮替代过量无机氮对冬小麦—夏玉米轮作体系氮平衡的影响。文章以河北省冬小麦—夏玉米轮作体系为研究对象, 研究少耕、常规耕作下减量施氮或秸秆替代过量氮肥对氮平衡、冬小麦和夏玉米收获后无机氮累积及作物产量的影响, 以期减少氮肥施用和降低氮素淋洗的可能性提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2011 年 10 月至 2015 年 9 月在河北省徐水县 (37.8°N, 114.7°E) 开展, 耕作制度为冬小麦—夏玉米轮作。该地区属暖温带半湿润半干旱季风气候, 平均海拔 50.1 m, 年平均气温 12℃, 最高月份 (7 月) 为 28.9℃, 最低月份 (1 月) 为 -7.5℃。该地区年平均降水量 500.5 mm, 70% 以上的降水量主要集中在 6~9 月。供试土壤为潮褐土, 质地为轻壤土。试验开始前土壤耕层 0~20 cm pH 值 7.5, 有机碳含量 11.5 g/kg, 全氮 1.1g/kg, 铵态氮 5.9 mg/kg, 硝态氮 14.3 mg/kg, 速效磷 17.1 mg/kg, 速效钾 134.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

表 1 表示耕作措施、施氮量、秸秆还田为试验的 3 个因素, 试验小区设计为随机区组设计, 面积为 4 m×5 m, 3 次重复。试验开始前, 小区四周用防水塑料布隔开, 埋深 1 m。少耕 (MT) 处理土壤不进行任何翻耕、犁耙, 在地表 10cm 深度挖沟播种小麦, 常规耕作 (FT) 小麦地进行土壤翻耕, 作业深度为 20 cm, 随后整地、播种小麦。小麦季不施氮肥 (N 0)、减量施氮 (N 200)、过量施氮 (N 300) 处理施纯氮分别为 0、200、300 kg/hm<sup>2</sup>。玉米季各处理等量施氮, 施纯氮 100 kg/hm<sup>2</sup>。秸秆不还田处理将夏玉米秸秆全部移出试验地, 秸秆还田处理在 2011 年和 2012 年从玉米秸秆出售商购买玉米秸秆还田, 还田秸秆含氮量为 100 kg/hm<sup>2</sup>, 2013 年和 2014 年采用试验区玉米秸秆原地还田, 玉米秸秆均为粉碎至 3~4 cm 左右的小段, 少耕处理秸秆还田为小麦播种后平铺到地表, 常规耕作秸秆还田为旋耕机旋耕整地令玉米秸秆与土壤充分混合还田。小麦生长期按当地农民灌溉时间进行定量灌溉, 平均每次灌溉量约为 50 mm, 根据实际情况而定。玉米生长期主要靠天然降雨。供试小麦品种为保麦 9 号, 2011 年各小区小麦播种量为 275 kg/hm<sup>2</sup>, 2012~2014 年均均为 300 kg/hm<sup>2</sup>。供试玉米品种为苏老三, 各小区玉米定植 6 行, 每行 20 株, 共 120 株玉米。无机肥为“撒可富”复合肥 (N: P: K/18: 22: 6), 减量施氮区的底肥为纯氮、五氧化二磷、氧化钾 130、159 和 43 kg/hm<sup>2</sup>, 冬小麦返青期追施尿素 (N: 46%) 为纯氮 70 kg/hm<sup>2</sup>; 过量施氮区的底肥为纯氮、五氧化二磷、氧化钾 150、159 和 43 kg/hm<sup>2</sup>, 冬小麦返青期追施尿素 (N: 46%) 为纯氮 150 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 样品采集与测定

小麦收获后随机采集长度 1 m 的 6 份小麦样品, 经过称重去掉最大值和最小值后剩余 4 份小麦样品进行考种, 籽粒、秸秆经自然风干后 80℃ 烘干 24 h 计产, 并粉碎、保存以备测试。夏玉米收获后各小区随机采集 10 株, 籽粒经自然风干后 80℃ 烘干 24 h 计产, 秸秆鲜样在 105℃ 下杀青 30 min 后, 80℃ 烘干至恒重称重。2015 年 6 月冬小麦和 9 月夏玉米收获后, 按照对角线取 3 点, 以 20 cm 为 1 层, 采集 0~100 cm 土壤剖面土样, 同层次土样混合, 以作测试土样。植株全氮用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 凯氏定氮法。土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用 12.0 g 新鲜土样, 100 mL 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提, 全自动流动分析仪测定,

表 1 试验因素和因素水平

1. 耕作措施	
少耕 MT	耕作土壤不进行任何翻耕、犁耙, 在地表 10cm 深度挖沟播种小麦
常规耕作 FT	翻耕土地播种小麦
2. 无机氮施用量	
不施氮肥	N 0
施用 200 kg/hm <sup>2</sup>	N 200 (减量施氮)
施用 300 kg/hm <sup>2</sup>	N 300 (过量施氮)
3. 秸秆施用	
秸秆不还田	- R
秸秆还田	+ R (2011 年和 2012 年从玉米秸秆出售商购买玉米秸秆为小麦田进行秸秆还田, 还田秸秆含纯氮 100 kg/hm <sup>2</sup> , 2013 年和 2014 年采用试验区玉米秸秆原地还田, 还田秸秆含氮量以实际原地还田秸秆含氮量计算)
4. 玉米生长期施肥管理	玉米种植期间各处理施用等量氮肥 (纯氮 100 kg/hm <sup>2</sup> ) 且小麦秸秆就地还田
5. 小麦生长期管理	以 2011~2012 年小麦季施氮量 (化肥氮 + 秸秆氮) 为例 (kg/hm <sup>2</sup> )
MT N 0 + R	100 少耕不施氮秸秆还田
FT N 0 + R	100 常规耕作不施氮秸秆还田
MT N 200 + R	300 少耕减量施氮秸秆还田 (其中, 秸秆氮 100 kg/hm <sup>2</sup> )
MT N 200 - R	200 少耕减量施氮秸秆不还田
FT N 200 + R	300 常规耕作减量施氮秸秆还田
FT N 200 - R	200 常规耕作减量施氮秸秆不还田
FT N 300 - R	300 常规耕作过量施氮秸秆不还田

注: 秸秆氮为还田秸秆所含氮量

同时测定土样含水量。

#### 1.4 计算公式

氮平衡值 = 投入氮 (无机氮、秸秆氮) - 作物 (籽粒、秸秆) 携出氮

#### 1.5 数据统计分析

利用 Excel 2003 进行数据处理和绘制图表, 利用 SPSS 19.0 对试验数据进行差异显著性检验。

## 2 结果

### 2.1 无机氮累积

#### 2.1.1 硝态氮累积

图 1A 表明, 2015 年 6 月小麦收获后, 常规耕作过量施氮秸秆不还田 (FT N 300 - R) 处理 0~100cm 土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量明显高于其它处理, 高达 221 kg/hm<sup>2</sup>, 20~40cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积最高, 少耕/常规耕作减量施氮秸秆还田 (MT N 200 + R、FT N 200 + R) 处理与少耕/常规耕作减量施氮秸秆不还田 (MT N 200 - R、FT N 200 - R) 处理 0~100cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量变化趋势基本一致, 随土层深度增加而逐渐下降, 没有 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 过量累积, 说明过量施用无机氮肥导致小麦收获季土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 残留量增加。图 1B 表明, 尽管玉米季各处理等量施氮, 冬小麦季施氮处理仍然影响下茬玉米土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。玉米收获后, FT N 300 - R 处理除了表层 0~20cm 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量略低于 MT N 200 + R 外, 其余各层均高于其它处理, 0~100cm 土层土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 总累积量与冬小麦收获后相近, 但在 0~40cm 降低, 在 40~80cm 增加, 在 60~80cm 出现 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积峰, 这表明小麦季过量施氮土壤残留的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 经过玉米季有向深层土壤迁移的趋势。MT N 200 + R 处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 主要存在 0~40cm, FT N 200 + R 处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 主要存在 0~60cm, 二者在 0~100cm 各层土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量高于 MT N 200 - R 和 FT N 200 - R, 且高于冬小麦收获后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量。

2.1.2 铵态氮累积

图 2A 表明, 小麦收获后, FT N 300 - R 处理在 40 ~ 80cm 土层土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 累积量高于其它处理, 其余各层受施肥影响较小, 与其它处理相近。玉米收获后 (图 2B), 除不施肥两处理, 其它处理在 0 ~ 100cm 土层土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 累积量差异较小, 总累积量为 FT N 300 - R 处理最高。

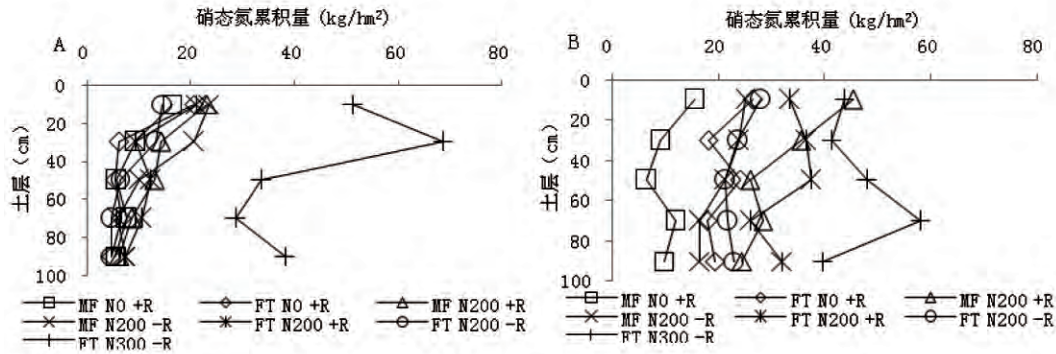


图 1 2015 年 6 月冬小麦收获后 (A) 和 2015 年 10 月夏玉米收获后 (B) 0 ~ 100 cm 土层土壤硝态氮累积量

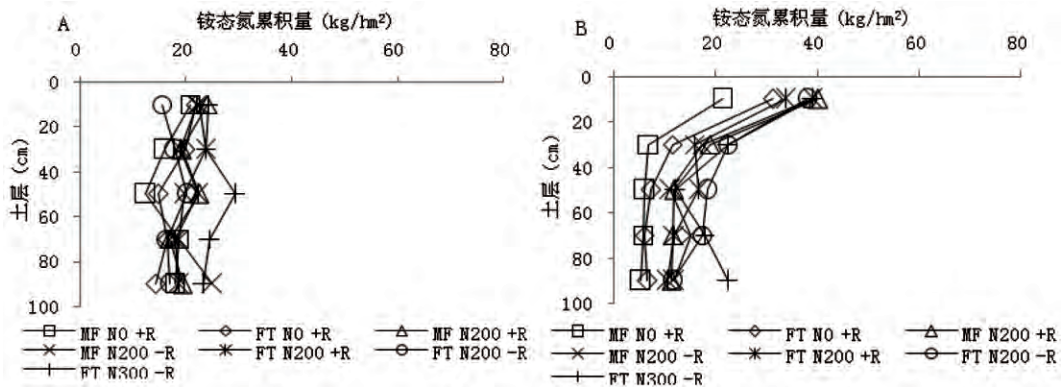


图 2 2015 年 6 月冬小麦收获后 (A) 和 2015 年 10 月夏玉米收获后 (B) 0 ~ 100 cm 土层土壤铵态氮累积量

2.2 氮平衡值

从 2011 年 10 月开展试验, 为降低过去施肥对试验可能产生的影响, 该文从 2012 年 10 月小麦播种期开始进行数据分析。表 2 可看出除少耕和常规耕作不施氮秸秆还田 (MT N 0 + R 和 FT N 0 + R) 处理氮平衡值为负值, 其它处理均为正值, 说明仅施用秸秆作为肥料不足以提供作物生长所需氮素。3 年氮素总平衡值为 FT N 300 - R > FT N 200 + R > MT N 200 + R > FT N 200 - R > MT N 200 - R。MT N 200 - R 处理氮平

表 2 2012 ~ 2015 年冬小麦—夏玉米轮作体系土壤氮素平衡状况分析

处理	小麦季氮投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )		小麦季氮输出量 (kg/hm <sup>2</sup> )		玉米季氮投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )		玉米季氮输出量 (kg/hm <sup>2</sup> )		氮平衡值 (kg/hm <sup>2</sup> )
	无机氮	秸秆氮	籽粒	秸秆	无机氮	秸秆氮	籽粒	秸秆	
MT N 0 + R	0	212	177	48	300	48	191	162	-18c
FT N 0 + R	0	220	182	47	300	47	192	173	-26c
MT N 200 + R	600	263	433	115	300	115	259	234	236a
MT N 200 - R	600	0	389	116	300	116	220	210	81b
FT N 200 + R	600	269	413	105	300	105	254	243	260a
FT N 200 - R	600	0	364	103	300	103	216	206	114b
FT N 300 - R	900	0	438	121	300	121	244	237	281a

注: 数值后不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05)

衡值仅为 81 kg/hm<sup>2</sup>，显著低于 FT N 300 - R 处理的 281 kg/hm<sup>2</sup>。同样地，FT N 200 - R 处理氮平衡值为 114 kg/hm<sup>2</sup> 显著低于 FT N 300 - R 处理。MT N 200 + R 和 FT N 200 + R 处理的氮平衡值同 FT N 300 - R 处理无显著性差异，说明过量施用氮肥和以秸秆还田替代过量氮肥均可增加冬小麦—夏玉米轮作体系氮素盈余。

2.3 氮平衡值与土壤无机氮和硝态氮累积量的关系

经过 4 年冬小麦—夏玉米轮作，将 3 年氮平衡值与试验结束（玉米收获）时的土壤无机氮和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积量进行相关性分析，图 3 可见，氮平衡值与玉米收获后 0 ~ 100 cm 土壤剖面无机氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积量均呈显著正相关（R<sup>2</sup> = 0.812 和 R<sup>2</sup> = 0.802，P < 0.05）。图 3A 和图 3B 表明氮平衡值每增加 100 kg/hm<sup>2</sup>，0 ~ 100cm 土壤剖面无机氮的累积量增加 54 kg/hm<sup>2</sup>，NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的累积量增加 39.6 kg/hm<sup>2</sup>。

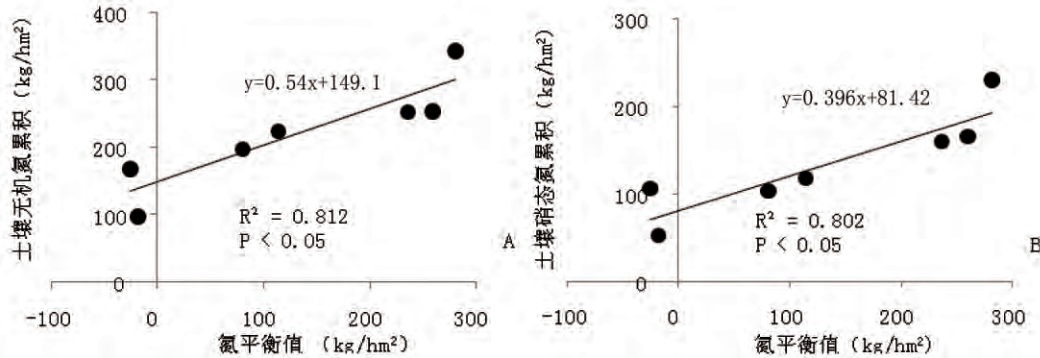


图 3 氮平衡值与 0 ~ 100cm 土壤剖面无机氮和硝态氮累积量的关系

2.4 小麦产量

表 3 可见，2012 ~ 2013 年，FT N 300 - R，MT N 200 + R，FT N 200 + R，MT N 200 - R 和 FT N 200 - R 5 个处理的小麦产量无显著性差异。2013 ~ 2014 年，FT N 200 - R 处理小麦产量显著低于 MT N 200 + R、FT N 200 + R，与 FT N 300 - R 无显著性差异。2014 ~ 2015 年，FT N 300 - R 处理小麦产量显著高于 MT N 200 - R 和 FT N 200 - R，但与 MT N 200 + R，FT N 200 + R 无显著性差异。3 年小麦产量表明过量施氮秸秆不还田和减量施氮秸秆还田冬小麦产量没有显著性差异，说明少耕和常规耕作措施下，减少施用化肥氮，利用秸秆氮替代过量化肥氮可以维持冬小麦高产。

2.5 玉米产量

玉米季各处理施氮量均为纯 N 100 kg/hm<sup>2</sup>。尽管玉米季施肥量一致，但 2013 ~ 2015 年 3 年玉米产量均为小麦季不施肥秸秆还田 MT N 0 + R 和 FT N 0 + R 处理最低，说明前茬小麦季的施肥措施会持续影响后茬玉米生长。图 2A、图 3A 中得出小麦季过量施肥处理 FT N 300 - R 在玉米播种前土壤残留无机氮累积量高于其它处理，在施肥一致下，其玉米产量与 MT N 200 + R、FT N 200 + R、MT N 200 - R 和 FT N 200 - R 处理却无显著性差异，这可能是由于玉米季施纯氮 100 kg/hm<sup>2</sup> 足够满足玉米生长需要，且 FT N 200 + R 和 MT N 200 + R 分别在 2014 年、2015 年取得最高产量，可能是前茬小麦季玉米秸秆还田经小麦和玉米两季分解提供氮素。

表 3 2012 ~ 2015 年冬小麦产量 kg/hm<sup>2</sup>

处理	2012 ~ 2013	2013 ~ 2014	2014 ~ 2015
MT N 0 + R	3 748 ± 539b	3 497 ± 412c	2 763 ± 155d
FT N 0 + R	3 843 ± 272b	4 378 ± 529c	3 221 ± 148d
MT N 200 + R	5 785 ± 367a	7 608 ± 348a	6 521 ± 499ab
MT N 200 - R	5 658 ± 228a	6 920 ± 176ab	5 957 ± 112bc
FT N 200 + R	5 521 ± 177a	7 461 ± 150a	6 489 ± 228ab
FT N 200 - R	5 396 ± 45a	6 370 ± 548b	5 783 ± 265c
FT N 300 - R	5 909 ± 415a	7 172 ± 340ab	6 689 ± 93a

注：同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著（P < 0.05）

表 4 2013 ~ 2015 年夏玉米产量 kg/hm<sup>2</sup>

处理	2013	2014	2015
MT N 0 + R	6 104 ± 1078	5 999 ± 456b	6 408 ± 620b
FT N 0 + R	6 131 ± 659	5 930 ± 861b	6 337 ± 393b
MT N 200 + R	7 521 ± 650	7 587 ± 235ab	8 382 ± 736a
MT N 200 - R	7 133 ± 75	6 780 ± 636ab	7 239 ± 492ab
FT N 200 + R	6 907 ± 394	8 188 ± 181a	7 961 ± 517ab
FT N 200 - R	6 696 ± 319	7 168 ± 981ab	7 232 ± 772ab
FT N 300 - R	7 023 ± 106	7 876 ± 468ab	8 146 ± 661a

注：同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著（P < 0.05），无小写字母表示处理间无显著性差异

### 3 讨论

(1) 一般认为, 土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  残留越多, 其向下淋洗损失风险越大<sup>[12]</sup>。该研究表明, 常规耕作过量施氮秸秆不还田处理增加冬小麦收获后 0~100cm 土层无机氮累积量, 且以  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为主, 当夏季玉米生长期间降雨较多有助于土壤残留  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  向土壤深层移动, 氮素淋洗损失风险很增高<sup>[13]</sup>。并发现, 该处理会持续影响后茬玉米季土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积, 且深层土壤比表层土壤累积量高, 可能与玉米吸收表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、部分径流损失、但更多氮素被雨水冲刷到深层土壤有关。

与过量施氮不同, 少耕/常规耕作减量施氮秸秆还田处理在总氮投入量与过量施氮相同情况下, 并未增加小麦收获季土壤残留  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量, 而是增加玉米收获季土壤残留  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量, 说明还田玉米秸秆在小麦季可能较少腐解, 在高温多雨的玉米季土壤微生物加速秸秆腐解, 提高玉米季土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量, 因此利用玉米秸秆替代过量无机氮一定程度上缓解小麦收获后土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积风险, 并为玉米生长提供缓效养分。此外, 这两个处理的 0~40cm 土层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量较高, 可能是还田秸秆在一定程度上减轻降雨对地表的冲刷, 使  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  可以更多的保留在表层土壤上, 进而也表明秸秆还田替代无机氮可降低氮素淋洗损失风险。王伟等 (2015)<sup>[14]</sup> 利用设施菜田研究秸秆还田对番茄生长期  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  淋溶的影响, 也表明秸秆还田可降低硝态氮淋溶量。田路园等 (2015)<sup>[15]</sup> 通过室内土柱淋溶试验得出秸秆还田配施一定氮肥有利于抑制氮素的淋失。

(2) 秸秆替代过量无机氮在冬小麦—夏玉米轮作体系中的氮平衡的研究很少, 该研究仅考虑以施入氮减去作物携出氮得出冬小麦—夏玉米轮作体系氮平衡值。除不施氮肥处理外, 少耕减量施氮秸秆还田三年累积氮平衡值 (盈余) 最低, 这与作物高产携出大量氮素有关。过量施氮处理的氮平衡值最高, 氮素大量盈余可导致土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  大量累积<sup>[16-17]</sup>, 这与该研究得出的氮平衡值与土壤无机氮累积、土壤硝态氮累积显著正相关性一致, 过量施用氮肥导致土壤中剩余的氮素大幅度增加, 尤其是易被淋洗的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  大量增加, 为氮素向下淋溶提供了基础。

(3) 2012~2013 年和 2013~2014 年, 过量施氮小麦产量与少耕、常规耕作减量施氮秸秆不还田处理无显著性差异, 而 2014~2015 年过量施氮小麦产量显著高于少耕、常规耕作减量施氮秸秆不还田处理。但与少耕、常规耕作减量施氮秸秆还田处理相比, 2012~2015 年, 三者小麦、玉米产量均无显著性差异, 说明利用秸秆氮替代过量无机氮即可减少氮肥施用量又可使冬小麦—夏玉米轮作体系维持高产, 这可能是相对于单施氮肥, 秸秆还田减少氮素损失<sup>[18]</sup>、为土壤微生物提供充足的碳源, 在配施氮肥情况下, 有效地协调土壤氮素的固持与供应状态<sup>[19]</sup>, 实现作物稳产、增产。

### 4 结论

过量施氮可维持作物高产, 却显著增加土壤氮素累积和氮平衡值, 氮素淋失风险最高; 与过量施氮相比, 减量施氮而不增施秸秆, 虽然可显著降低氮平衡值, 降低氮素累积和损失风险, 但不能维持作物长期稳产; 在减量施氮的基础上利用秸秆替代过量无机氮, 既能保证作物不减产, 一定程度减少氮平衡值, 还可降低小麦季土壤 0~100cm 土层的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积量, 能够降低玉米季氮素淋洗风险, 具有较好的农业生产效益和环境效益。

### 参考文献

- [1] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析. 农业经济问题, 2008, (8): 65~68
- [2] 张锋. 中国化肥投入的面源污染问题研究. 南京: 南京农业大学, 2011
- [3] Leach K. A, Roberts D. J, Swain D. L. Assessment and Improvement of the Efficiency of Nitrogen Use in Clover Based and Fertilizer Based Dairy Systems. 2. Beyond Benchmarking to Internal System Components. Biological Agriculture & Horticulture, 2002, 20 (2): 157~174
- [4] 曹仁林, 贾晓葵. 我国集约化农业中氮污染问题及防治对策. 土壤肥料, 2001, (3): 3~6
- [5] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境. 季国亮. 《氮素循环与农业和环境》专辑——氮素循环与农业和环境学术讨论会论文集. 北

- 京: 科学出版社, 2001, 3~11
- [6] 袁锋明, 陈子明, 姚造华, 等. 北京地区潮土表层中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的转化积累及其淋洗损失. 土壤学报, 1995, (4): 388~398
- [7] 杜森. 华北地区节水农业发展现状及对策. 中国农技推广, 2013, (6): 43~44
- [8] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 过量施用氮肥和不合理的氮肥施用方法是氮肥引起环境污染的根源. 周卫, 梁国庆, 李书田. 青年学者论土壤与植物营养科学—第七届全国青年土壤暨第二届全国青年植物营养科学工作者学术讨论会论文集. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 151~154
- [9] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China. Agriculture Ecosystems & Environment, 1996, (3): 223~231
- [10] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, (1): 1~6
- [11] Sieling K, Kage H. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape-winter wheat-winter barley rotation. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 115 (s 1-4): 261~269
- [12] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响. 土壤学报, 2013, (3): 564~573
- [13] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析. 中国农业大学, 2014
- [14] 王伟, 梁斌, 康凌云, 等. 氮素供应与秸秆还田对设施菜田土壤硝态氮淋溶的动态影响. 水土保持学报, 2015, (4): 61~65
- [15] 田路园, 邹雨坤, 李光义, 等. 秸秆还田氮肥不同配施比例在土壤中的淋失研究. 热带作物学报, 2015, (7): 1207~1212
- [16] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 等. 不同栽培模式对小麦—玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, (6): 991~997
- [17] 张宏, 周建斌, 王春阳, 等. 不同栽培模式及施氮对玉米—小麦轮作体系土壤肥力及硝态氮累积的影响. 中国生态农业学报, 2010, (4): 693~697
- [18] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响. 作物学报, 2015 (1): 160~167
- [19] Makumba W, Akinnifesi F K, Janssen B, et al. Optimization of Nitrogen released and immobilization from soil-applied prunings of Sesbania sesban and maize stover. Scientific Research & Essays, 2007, (9): 400~407

## EFFECTS OF REDUCING NITROGEN APPLICATION AND REPLACING PART OF NITROGEN FERTILIZER BY CROP RESIDUE ON NITROGEN LEACHING IN WINTER WHEAT – SUMMER CORN SYSTEM

Yang Xiaomei<sup>1</sup>, Yin Changbin<sup>1\*</sup>, Li Guichun<sup>2</sup>, Chien Hsiaoping<sup>3</sup>, Nagumo Fujio<sup>3</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Tsukuba 305-8686, Japan)

**Abstract** There is a growing concern about excessive nitrogen and excessive level of nitrate in groundwater in China. A four-year study in Xushui, Hebei, China was conducted in a winter wheat and summer corn cropping system to compare the effects of soil tillage (minimum tillage without ploughing, full tillage), application of cornstalk residue (none – R, turning back + R) and three N rates (0, 200 and 300 kg N/hm<sup>2</sup> as mineral nitrogen) applied to winter wheat on the yield of wheat and subsequent corn, the N balance and the inorganic N accumulation, and then to investigate the possibility of the residue replacing some rate of mineral N in case of N leaching. Moreover, the same rate of mineral N (100 kg/hm<sup>2</sup>) was applied to all plots for the corn. The results showed that the soil nitrate nitrogen accumulation (221 kg/hm<sup>2</sup>) in full tillage with 300 kg N/hm<sup>2</sup> (FT N300 – R) after wheat harvest was significantly higher than that in the other treatments, the excess nitrogen may increase the risk of nitrogen leaching. The three-year nitrogen balance value in the millage tillage or full tillage with 200 kg N/hm<sup>2</sup> and residue turning back (MT N200 + R, FT N200 + R) were not significant. Furthermore, there was significantly positive relationship between nitrogen balance value and nitrate nitrogen accumulated in 0–100cm soil profile, it meant the greater the N balance value, the more the amount of nitrate nitrogen accumulated. In addition, the yields of wheat and corn in MT N200 + R and FT N200 + R were not significantly different with those in FT N300 – R. It indicated that using residue nitrogen as part of mineral nitrogen in the treatment of reducing the rate of nitrogen (200 kg N/hm<sup>2</sup>) could not only maintain the crop yield and reduce N balance value, but also significantly reduce nitrate nitrogen accumulation after wheat harvest, and hence reduce the risk of N leaching.

**Keywords** winter wheat; summer corn; nitrogen balance; nitrate nitrogen accumulation; yield; N leaching risk