

# 不同栽培模式对冬小麦-夏玉米轮作系统产量、氮素累积和平衡的影响

杨晓卡 米慧玲 高韩钰 辛思颖 马文奇 魏 静\*

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000)

**摘 要** 以河北山前平原区秸秆还田条件下小麦-玉米轮作体系为研究对象,设置农民习惯、高产高效、再高产和再高产高效4个模式,通过定位试验探讨各栽培模式对3个轮作周期作物产量、土壤硝态氮累积量及氮平衡的影响.结果表明:小麦、玉米产量均以再高产模式最高,高产高效和再高产高效模式次之,均显著高于农民习惯模式;小麦季和玉米季氮肥利用效率(PFP)均以高产高效模式最高,显著高于其他模式;0~400 cm 土体硝态氮累积量在 768.4~1133.3 kg·hm<sup>-2</sup>之间,其中80%~85%累积在根下90~400 cm 土层;4种模式的土壤硝态氮均有明显向下淋移现象,120~150 cm 和 270~330 cm 处均出现了累积峰,以270~330 cm 土层硝态氮累积量最大;高产高效模式的土壤硝态氮含量整体水平平均低于其他模式,浓度基本维持在30 mg·kg<sup>-1</sup>以下,在一定程度上能有效缓解环境压力;冬小麦季0~90 cm 土体氮素盈余量均小于夏玉米季,并以高产高效模式的氮素表观损失量最低,显著低于其他模式.综合考虑产量、氮肥利用效率、硝态氮累积和氮平衡,以高产高效模式表现最优,但还有一定的提升空间.

**关键词** 冬小麦;夏玉米;产量;硝态氮;氮平衡

**Effects of different cultivation patterns on yield, nitrate accumulation and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system.** YANG Xiao-qia, MI Hui-ling, GAO Han-yu, XIN Si-ying, MA Wen-qi, WEI Jing (*College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China*).

**Abstract:** This study investigated the impacts of four cultivation patterns including farmer practice, high yield and high efficiency practice, super high yield practice, and super high yield and high efficiency practice on yields, soil nitrate and nitrogen (N) balances in 3 winter wheat-summer maize rotations with straw returning in Hebei Province. Results showed that the super high yield practice was identified with greatest winter wheat and summer maize yields, followed by high yield and high efficiency practice, and super high yield and high efficiency practice, which were all greater than that of farmer practice. The N use efficiency of high yield and high efficiency practice was significantly greater than the other cultivation patterns. The total nitrate accumulation in 0–400 cm soil of these cultivation patterns reached 768.4–1133.3 kg·hm<sup>-2</sup>, where 80%–85% of the accumulated nitrate were in 90–400 cm soil. Meanwhile, the nitrate leaching was observed in all cultivation patterns and nitrate accumulation peaks at 120–150 cm and 270–330 cm were found. Soil nitrate content of high yield and high efficiency practice was less than 30 mg·kg<sup>-1</sup> and generally lower than other cultivation patterns, which to some extent reduced the environmental risk. In addition, nitrate surplus in 0–90 cm soil during winter wheat season was lower than that during summer maize season, and the high yield and high efficiency practice had the lowest apparent nitrogen loss. Overall, the high yield and high efficiency practice was evaluated to be the best cultivation pattern in consideration of yield, nitrogen use efficiency and nitrate accumulation in soil, but there was still certain achievable improvement potential.

**Key words:** winter wheat; summer maize; yield; nitrate nitrogen; nitrogen balance.

本文由公益性行业(农业)科研专项(201103003)资助 This work was supported by the Scientific Research in the Public Interest (Agriculture) of China (201103003).

2015-12-16 Received, 2016-04-04 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weijing\_199@163.com

华北平原作为我国重要的粮食主产区之一,周年两熟的小麦-玉米轮作是该地区的主要种植方式.然而,集约化的农业在创造粮食高产的同时也带来了养分资源利用效率低以及环境污染等问题.陈新平等<sup>[1]</sup>对华北平原小麦-玉米轮作体系的研究结果表明,轮作体系化肥氮的平均用量达 550 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>.王智超<sup>[2]</sup>对近 10 年发表的有关土壤硝态氮累积的 100 余篇文献进行汇总,发现大田作物 0~100 cm 土层硝态氮累积量以华北平原最高,平均可达 200 kg N · hm<sup>-2</sup>.目前,在华北平原关于施肥<sup>[3-5]</sup>、作物种类、水分含量<sup>[5-7]</sup>、轮作方式<sup>[4,8]</sup>和耕作措施<sup>[7]</sup>等对土壤硝态氮累积的影响已有大量报道,而对多年定点的轮作体系下不同栽培模式对土壤氮素残留的影响研究报道较少.本文以河北山前平原区秸秆还田条件下冬小麦-夏玉米轮作体系为研究对象,探索不同栽培模式对作物产量和土壤硝态氮累积的影响,旨在为河北省的粮食安全和资源高效利用提供理论依据和技术支撑.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验于 2010 年 6 月—2013 年 10 月在河北省清苑县黄阡村进行.清苑县属暖温带大陆性季风气候,年均气温 12 ℃,年均降水量 550 mm.供试土壤为壤质潮土,播前土壤基本理化性质为:有机质 16.0 g · kg<sup>-1</sup>,全氮 0.8 g · kg<sup>-1</sup>,速效磷 13.2 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 96.7 mg · kg<sup>-1</sup>.

1.2 试验设计与管理措施

1.2.1 试验设计 试验共设置 4 种模式:农民习惯、高产高效、再高产和再高产高效.农民习惯模式是在调查当地农户习惯的各项生产管理措施上设置的;高产高效模式是在农民习惯模式的基础上,考虑能否通过对现有的技术进行优化组合,设计一个可以使产量提高 10%~15%、水肥利用效率提高 15%~20%的管理模式;再高产是集合农学家提出的各项

增产措施,不计一切环境代价,设计的一个可以使产量提高 30%~50%的管理模式;再高产高效是在再高产的基础上,使产量损失较小的情况下,通过优化水肥利用效率,最终使产量提高 30%~50%、水肥利用效率提高 30%~50%的集成方案.每种模式 4 次重复,小区面积 98 m<sup>2</sup>.

1.2.2 冬小麦栽培及水肥管理措施 2010—2011、2012—2013 年两季供试冬小麦品种为‘济麦 22’,2011—2012 年供试品种为‘石新 539’,播种日期分别为 2010 年 10 月 6 日、2011 年 10 月 8 日和 2012 年 10 月 7 日.秸秆全部还田,机械旋耕,除农民习惯外,其余 3 个模式整地后镇压.共灌溉 4 次,分别为蒙头水、越冬水、拔节水、灌浆水,灌溉量为 0.03~0.04 m<sup>3</sup> · m<sup>-2</sup>.磷、钾肥、微肥和有机肥全部基施,其中有机肥为羊粪;4 种模式氮肥在各时期分配比例不同:农民习惯模式基施 30%,返青期追施 70%;高产高效模式基施 40%,拔节期追施 60%;再高产模式基施 40%,拔节期追施 50%,开花期追施 10%;再高产高效模式基施 40%,拔节期追施 50%,开花期追施 10%.另外,再高产和再高产高效模式每年 5 月初和 5 月中下旬叶面喷施磷酸二氢钾,并于开花后第一周和第二周叶面喷施锌肥.具体种植和管理方式如表 1 所示.

1.2.3 夏玉米栽培及水肥管理措施 2011、2012 和 2013 年供试夏玉米品种均为‘郑单 958’,播种日期分别为 2010 年 6 月 15 日、2011 年 6 月 13 日和 2012 年 6 月 13 日.秸秆全部还田,机械旋耕.夏玉米于播种期、大喇叭口期分别灌溉一次,灌溉量为 0.03~0.04 m<sup>3</sup> · m<sup>-2</sup>.磷、钾肥全部基施;氮肥各时期分配比例为:农民习惯模式全部基施;高产高效模式基施 40%,大口期追施 60%;再高产模式基施 30%,大口期追施 50%,吐丝期追施 20%;再高产高效模式基施 30%,拔节期追施 50%,吐丝期追施 20%.具体种植方式如表 2 所示.

表 1 冬小麦各模式管理措施  
Table 1 Winter wheat management measure in each cultivation pattern

处理 Treatment	播种量 Sowing rate (kg · hm <sup>-2</sup> )	肥料投入量 Fertilizer application rate (kg · hm <sup>-2</sup> )					
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	ZnSO <sub>4</sub>	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer
I	225	270	75	75	0	0	—
II	225	195	90	60	0	0	—
III	210	300	180	150	15	3000	全部底施
IV	210	255	150	120	15	3000	全部底施

I: 农民习惯 Farmer practice; II: 高产高效 High yield and high efficiency practice; III: 再高产 Super high yield practice; IV: 再高产高效 Super high yield and high efficiency practice. — 未采取此措施 Did not take the measure. 下同 The same below.

表 2 夏玉米各模式管理措施  
Table 2 Summer maize management measure in each cultivation pattern

处理 Treatment	播种量 Sowing rate (kg · hm <sup>-2</sup> )	密度 Density (plants · hm <sup>-2</sup> )	肥料投入量 Fertilizer application rate (kg · hm <sup>-2</sup> )			
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	ZnSO <sub>4</sub>
I	60	60000	210	75	75	0
II	60	67500	180	67.5	90	0
III	60	78000	300	120	180	15
IV	60	75000	255	90	120	15

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品 试验前随机选取 3 点,采集 0~20 cm 土壤样品,测定土壤理化性状;小麦收获期以 30 cm 为一层,采集 90 cm 土样;玉米收获期以 30 cm 为一层,采集 210 cm 土样.2013 年夏玉米收获后,以每 30 cm 土体为一层,采集 0~400 cm 土壤样品.每小区采两个土钻混合为 1 个土样,分层制样.土壤样品冷冻后迅速带回实验室,用 1 mol · L<sup>-1</sup> KCl 浸提,流动分析仪测定.

1.3.2 植物样品 在收获期取植物样,样品分茎、叶、穗(小麦分穗轴和穗壳,玉米分苞叶和穗轴)、籽粒 4 部分,杀青 0.5 h,然后于 75 ℃烘干至恒量,称量磨细过 0.25 mm 筛,测定全氮含量.

1.3.3 产量测定 小麦季每小区选取 4 个 1 m<sup>2</sup> 面积,将穗剪下脱粒,称量;玉米季每小区选取 15 m<sup>2</sup> 面积,脱粒,称量.

表 3 不同栽培模式对冬小麦和夏玉米产量及氮肥利用效率的影响  
Table 3 Effects of different cultivation patterns on yield and N use efficiency of winter wheat and summer maize

年度 Year	处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat				夏玉米 Summer maize			
		籽粒产量 Grain yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	增产率 Yield increase rate (%)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg · kg <sup>-1</sup> )	增效 Synergy (%)	籽粒产量 Grain yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	增产率 Yield increase rate (%)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg · kg <sup>-1</sup> )	增效 Synergy (%)
2010—2011	I	7642c	—	28.3c	—	9988c	—	47.6b	—
	II	9223b	20.7	47.3a	67.1	10638b	6.5	59.1a	24.1
	III	9972a	30.5	33.2b	17.3	11622a	16.4	38.7d	-0.2
	IV	9358b	22.5	36.7b	29.7	10722b	7.3	42.1c	-0.1
2011—2012	I	7200c	—	26.7c	—	8353a	—	39.8b	—
	II	8088b	12.3	41.5a	55.5	9970b	19.7	55.4a	39.2
	III	8845a	22.9	29.5b	10.6	10961a	31.2	36.5c	-0.1
	IV	8292b	15.2	32.5b	21.9	10458ab	25.2	41b	0
2012—2013	I	4019c	—	14.9c	—	8093c	—	38.5b	—
	II	4543b	13.0	23.3a	56.4	9337b	15.4	51.9a	34.7
	III	4933a	22.7	16.4bc	16.4	10666a	28.4	35.6c	-5.7
	IV	4732ab	17.7	18.6b	24.6	9910ab	22.5	38.9b	1.0
平均 Average	I	6287c	—	23.3c	—	8811c	—	42.0b	—
	II	7285b	15.9	37.4a	60.5	9982b	13.3	55.5a	32.1
	III	7917a	25.9	26.4b	13.3	11083a	25.8	36.9c	-12.0
	IV	7461b	18.7	29.3b	25.8	10363b	17.6	40.6b	-3.0

每一年度同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference in the same year at 0.05 level. 下同 The same below.

1.4 数据处理

各指标计算公式如下:  
氮肥偏生产力 (PFP, kg · kg<sup>-1</sup>) = 产量/施氮量  
土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 积累量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g · cm<sup>-3</sup>) × 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量 (mg · kg<sup>-1</sup>) / 10  
植株氮积累量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = Σ 地上部各器官生物量 × 各器官氮含量  
籽粒吸氮量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = 籽粒生物量 × 籽粒氮含量

秸秆含氮量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = 植株氮积累量 (kg · hm<sup>-2</sup>) - 籽粒吸氮量 (kg · hm<sup>-2</sup>)

土壤氮素盈余量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = 生育期施氮量 + 上茬还田秸秆含氮量 + 土壤起始氮 + 大气氮沉降 - 籽粒携出氮量 - 秸秆携出氮量 - 收获后土壤残留氮

其中,大气氮沉降数据参考张颖等<sup>[9]</sup>的研究结果,其余数据均为实测.通过 SPSS 软件应用 LSD 法进行处理平均值间的方差分析和差异显著性检验 ( $\alpha=0.05$ ).

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对作物产量和氮肥利用效率的影响

由冬小麦 3 季平均产量 (表 3) 可以看出,高产高效、再高产和再高产高效 3 个模式较农民习惯平

均增产 15.9%、25.9% 和 18.7%，玉米季平均增产 13.3%、25.8% 和 17.6%，差异均达到显著水平。同时，再高产模式产量显著高于高产高效和再高产高效模式，而后 2 种模式的产量无显著差异。可见，集成优化现有技术的高产高效模式可以稳定实现增产 15% 的目标，但再高产和再高产高效模式没能实现 30% 的增产目标。另外，冬小麦、夏玉米产量年间差异很大，2012—2013 年冬小麦、夏玉米各处理产量均达最低，造成此差异的主要原因是气候问题。如 2013 年 5、6 月阴雨天较多，小麦花后灌浆不充分，导致收获时千粒重较低，仅 31.9 g；收获期又遭遇强风，冬小麦大面积倒伏，导致冬小麦严重减产。2013 年夏玉米在灌浆期遇到持续阴雨天气，使夏玉米产量受到了严重影响，所以，强降雨和大风等气候带来的作物产量受损问题是无法避免的，但是如何做好预防以减少气候因素带来的产量差异是以后应该考虑和解决的问题。

从氮肥偏生产力(PFP)来看，高产高效、再高产和再高产高效 3 个模式较农民习惯模式平均增效 60.5%、13.3% 和 25.8%，玉米季分别增效 32.1%、降低 12.0% 和降低 3%，均以高产高效模式增效最多，而再高产和再高产高效模式玉米季增效不显著，PFP 有时甚至低于农民习惯，增效出现负值。说明通过集成优化现有技术，可以大幅度提高养分利用效率。此外，由于气候问题，2012—2013 年间冬小麦、夏玉米各处理 PFP 也最低。

2.2 不同栽培模式对 0~400 cm 土壤硝态氮含量和累积量的影响

2.2.1 土壤硝态氮含量 由图 1 可以看出，0~100 cm 土层硝态氮含量较低，浓度基本维持在 15 mg·kg<sup>-1</sup> 以下，各处理间无显著性差异；100~200 cm 土层各处理硝态氮含量随土层深度的增加呈先增后减趋势，并在 120~150 cm 处出现累积峰，以再高产模式硝态氮含量最高，达 33.2 mg·kg<sup>-1</sup>，高产高效模式最低，约 19.9 mg·kg<sup>-1</sup>。200~350 cm 土层硝态氮含量也呈先增后减趋势，并于 270~330 cm

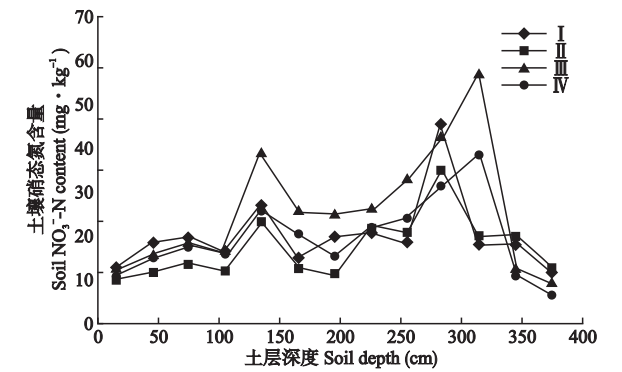


图 1 2013 年夏玉米成熟期土壤硝态氮含量  
Fig.1 Soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentrations at maturity stage of summer maize in 2013.  
I：农民习惯 Farmer practice；II：高产高效 High yield and high efficiency practice；III：再高产 Super high yield practice；IV：再高产高效 Super high yield and high efficiency practice. 下同 The same below.

处出现另一个累积峰，显著高于 120~150 cm 处的累积峰值，且仍以再高产模式最高，农民习惯和再高产高效模式次之，高产高效模式最低；350 cm 土层以下土壤硝态氮含量逐渐降低，到 400 cm 处硝态氮含量在 8 mg·kg<sup>-1</sup> 左右。高产高效模式各土层硝态氮含量与其余 3 个模式相比淋失现象不明显，浓度基本维持在 30 mg·kg<sup>-1</sup> 以下，故高产高效模式对环境是较友好的。

2.2.2 土壤硝态氮累积量 由表 4 可知，农民习惯、高产高效、再高产和再高产高效 4 个模式 0~400 cm 土层硝态氮总累积量分别为 890.1、768.4、1133.3、864.8 kg·hm<sup>-2</sup>，其中根区 0~90 cm 硝态氮累积量在 150 kg·hm<sup>-2</sup> 左右，且各模式均无显著差异。若将 0~90 cm 土层认为是根区层，90 cm 以下是根下层，则根下层的土壤硝态氮几乎无法被作物吸收利用，即淋洗损失。农民习惯、高产高效、再高产和再高产高效 4 个模式根下区 90~400 cm 土层硝态氮累积量分别为 717.5、648.0、974.4 和 717.9 kg·hm<sup>-2</sup>，占 0~400 cm 土层硝态氮累积量的 80%~85%，其中 270~400 cm 土层硝态氮累积量最大，占 0~400 cm 土层硝态氮累积量的 30% 以上。

对比 4 种栽培模式发现，在 90~180、180~270

表 4 不同栽培模式下土壤剖面硝态氮累积量  
Table 4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation in soil profile at different cultivation patterns (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil depth							
	0~90 cm	%	90~180 cm	%	180~270 cm	%	270~360 cm	%
I	172.7a	19.4	200.4b	22.5	200.8b	22.4	278.9b	31.3
II	120.4a	15.7	164.4c	21.4	183.7c	23.9	256.7c	33.4
III	158.9a	14	276.2a	24.4	285.3a	25.2	381.9a	33.7
IV	146.8a	17	212.2b	24.5	206.3b	23.9	277.9b	32.1

%：占 0~400 cm 比例 Percentage to 0~400 cm depth (%)。



表 5 不同栽培模式下 0~90 cm 土体的氮素平衡  
Table 5 Nitrogen balance in 0~90 cm soil horizon at different cultivation patterns (kg · hm<sup>-2</sup>)

年度 Year	处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
		氮输入 N input	氮输出 N output	氮素盈余 N surplus	氮输入 N input	氮输出 N output	氮素盈余 N surplus
2010—2011	I	447	297	150b	414	236	178b
	II	371	302	69c	394	239	155c
	III	601	434	167a	617	395	222a
	IV	515	371	144b	523	298	225a
2011—2012	I	469	298	181b	514	201	314c
	II	398	305	93c	468	204	264d
	III	706	427	279a	721	259	462a
	IV	569	381	188b	629	234	395b
2012—2013	I	461	285	176b	515	245	270b
	II	379	297	82c	479	252	225c
	III	595	379	216a	676	299	377a
	IV	536	323	213a	578	280	298b

和 270~360 cm 3 个土层中,硝态氮累积量均以再高产模式最高,显著高于其余 3 个模式,这与该处理氮肥投入量最高,超出了作物最大需氮量有关;高产高效模式累积量最低;而农民习惯和再高产高效模式无显著差异,说明硝态氮淋失量在很大程度上取决于施肥、灌溉时期等各项管理措施.因此,农民习惯施肥模式如何实现养分供应与作物需求在数量上匹配、时间上同步、空间上一致是当下急需解决的问题.

2.3 不同栽培模式对 0~90 cm 土体氮素平衡的影响

由氮素输入项(表 5)可以看出,施氮量、秸秆还田量和播前氮含量都起着重要作用,而仅秸秆还田量和播前氮含量之和已超过了作物吸氮量.从输出项来看,残留硝态氮随施氮量的增加而增加,而籽粒吸氮量并没有随施氮量的增加而增加.这从另一个侧面揭示了作物吸氮量的增加不仅与施氮量有关,还与施氮时期、灌水时期等管理模式有关.从氮素盈余量来看,冬小麦季氮素盈余量均小于夏玉米季,冬小麦季每年氮盈余量为施氮量的 70%~90%,夏玉米季每年氮盈余量在施氮量的 120%以上,这主要是硝态氮在冬小麦季累积,夏玉米季淋失的原因.

对比 4 种栽培模式可以发现,冬小麦和夏玉米季均以再高产模式氮素盈余最多,最高可达 462 kg · hm<sup>-2</sup>,主要是由于施氮量过高超过作物所需水平所致;农民习惯和再高产高效模式氮素盈余量无显著差异;高产高效模式氮素盈余量最低,显著低于其他模式,但还有一定的提升空间.2012 年夏玉米季和 2013 年夏玉米季氮素盈余量较多,与 2012 和

2013 年夏季降水偏多有关.

3 讨 论

周年两熟的小麦-玉米轮作是华北平原的主要种植方式,其过量的化肥投入在实现粮食高产的同时也带来了养分资源利用效率低以及环境污染等问题<sup>[10-12]</sup>.因此,如何在降低化肥投入情况下实现作物增产和养分增效成为人们关注的热点.已有不少研究从合理施肥<sup>[13]</sup>、优化养分管理<sup>[14]</sup>、栽培模式优化<sup>[15]</sup>等角度开展了研究.韩鹏辉<sup>[16]</sup>研究发现,通过改善施肥量、灌水量及种植方式能够对小麦和玉米产量产生一定影响.马迎辉<sup>[17]</sup>研究也发现,通过改变作物施肥和栽培管理方式,小麦玉米产量和养分利用效率均有不同程度的提高,既保证了粮食高产又节约了资源.本研究 4 种栽培模式的定位试验表明,在农民习惯模式的基础上,通过优化管理可以提高作物产量和养分利用效率.其中对现有技术进行优化组合的高产高效处理,不但减少了化肥养分投入量,还可以稳定实现增产增效 15%的目标.研究结果不但展示了该地区冬小麦、夏玉米减肥增效的巨大潜力,也给出了不同产量效率目标的优化管理途径,可以为该地区 2020 年实现化肥零增长提供借鉴.

研究表明,因灌溉不当或夏季集中降雨造成的土壤硝态氮淋失是我国华北平原氮损失的重要途径之一<sup>[18]</sup>.从环境安全角度出发,作物收获后土壤硝态氮残留越少越好,但实际上为了保证作物的正常生长,土壤硝态氮不可能无限制减少<sup>[19]</sup>.本研究中,高产高效模式 0~90 cm 硝态氮累积量最低为 120

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与欧盟规定大田作物收获后 0~90 cm 土壤硝态氮不超过  $90 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的标准<sup>[20]</sup> 相近, 避免了下茬作物生育期内氮大量淋失的可能, 其他模式根区 0~90 cm 硝态氮累积量为  $147 \sim 173 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 增加了下茬作物生育期内氮大量淋失的可能。此外, 本研究还发现, 农民习惯、高产高效、再高产和再高产高效 4 个模式根下区 90~400 cm 土层硝态氮累积量占 0~400 cm 土层硝态氮累积量的 80%~85%, 以再高产模式最高, 高产高效模式最低; 而农民习惯和再高产高效模式无显著差异, 说明硝态氮淋失量在很大程度上取决于施肥、灌溉时期等各项管理措施。本研究条件下 0~400 cm 土体硝态氮运移前锋到达 350 cm 处, 累积峰出现在 270~330 cm 处, 大量累积在土壤剖面中的硝态氮随灌溉或者降水而进入地下水的风险极大。这一问题应当引起足够的重视。

研究表明, 高产高效模式的氮肥利用效率最高、土壤硝态氮残留量最少、氮素盈余量也最少, 有利于维持土壤的氮素平衡, 而其余 3 种模式不利于维持土壤的氮素平衡。为了最大限度地减少硝态氮的淋失及其对环境的负面影响, 应综合考虑氮素的输入和输出情况, 在高产高效的基础上继续优化试验方案。另外, 综合土壤硝态氮与氮素盈余来看, 不论是冬小麦还是夏玉米, 高产高效模式氮素盈余最少, 硝态氮累积量也最少; 再高产模式氮素盈余最多, 硝态氮累积量也最多。刘瑞等<sup>[3]</sup> 研究也发现, 土壤表观氮素平衡和盈亏决定了土壤剖面硝态氮的累积状况, 所以土壤硝态氮累积与氮素盈余是互相印证的结果。

研究表明, 在高氮情况下, 若缺少水分, 氮肥的后效则无法发挥, 产量因受到水分的限制而无法提高; 而低氮情况下单靠补充水分, 产量受到氮肥的限制也无法提高; 当施氮和灌溉同时进行, 二者存在着明显的交互作用<sup>[21-26]</sup>。灌溉能显著提高氮的固定速率和矿化速率<sup>[27-28]</sup>。施氮量和灌水量共同影响了硝态氮向深层的淋失, 灌水次数是导致收获期 0~100 cm 土层硝态氮累积量变化的主导因素<sup>[7]</sup>。本文中 4 种栽培模式只针对肥料配比进行不同的设置, 并没有设置不同灌溉方式, 各个处理灌溉次数和灌水量相同。后期将进行水氮耦合方面的研究。这不仅可以完善本试验, 也对提高作物产量、节约水资源以及环境保护具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Chen X-P (陈新平), Zhang F-S (张福锁). Nutrient Resources Comprehensive Management Theory and Practice of Wheat-maize Rotation System. Beijing: China Agricultural University Press, 2006 (in Chinese)
- [2] Wang Z-C (王智超). Farmland Nitrate Nitrogen Accumulation and the Influence of Dry-wet Alternate Process. Master Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [3] Liu R (刘瑞), Dai X-L (戴相林), Zhou J-B (周建斌), et al. Relationship between accumulated nitrate nitrogen in soil profiles and apparent nitrogen budget in winter wheat fields under nitrogen fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(6): 1335-1341 (in Chinese)
- [4] Ye Y-L (叶优良), Li L (李隆). Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(1): 33-39 (in Chinese)
- [5] Pan X-L (潘晓丽). Effects of Irrigation and Fertilization on Water and Nitrogen Use of Intensive Wheat-maize Double Cropping System. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012 (in Chinese)
- [6] Yang R (杨荣), Su Y-Z (苏永中). Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(3): 1459-1469 (in Chinese)
- [7] Wang X-Y (王晓英), He M-R (贺明荣), Liu Y-H (刘永环), et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 685-693 (in Chinese)
- [8] Ju X-T (巨晓棠), Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁), et al. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35**(11): 1361-1368 (in Chinese)
- [9] Zhang Y (张颖), Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁), et al. Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1633-1639 (in Chinese)
- [10] Yang X-Q (杨新泉), Feng F (冯锋), Song C-Q (宋长青), et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2003, **9**(3): 373-376 (in Chinese)
- [11] Wu J-S (吴金水), Guo S-L (郭胜利), Dang T-H (党廷辉). Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(10): 2041-2049 (in Chinese)
- [12] Dana LD, Douglas LK, Dan BJ, et al. Nitrogen manage-

- ment strategies to nitrate leaching in tile-drained Mid-western soils. *Agronomy Journal*, 2002, **94**: 153–171
- [13] Wang L (王 蕾). Study on the Reasonable Fertilization of Wheat and Maize and Disciplinarian of Nutrient Movement in the Soil. Master Thesis. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [14] Sha Z-M (沙之敏), Bian X-J (边秀举), Zheng W (郑 伟), *et al.* Effects of optimum nutrient management on nutrient uptake and utilization of winter wheat in North China Plain. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(5): 1049–1055 (in Chinese)
- [15] Ma Y-H (马迎辉), Wang L-M (王玲敏), Ye Y-L (叶优良), *et al.* Effects of different cultivation management modes on dry matter accumulation, nitrogen uptake and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(10): 1282–1288 (in Chinese)
- [16] Han P-H (韩鹏辉). Soil and Crop Nutrient Characters in the Rotation System of Wheat and Maize under the Different Management Patterns. Master Thesis. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [17] Ma Y-H (马迎辉). Effect of Different Fertilization Management Modes on Nutrient Uptake, Dry Matter Accumulation and Yield of Winter. Master Thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [18] Chen X-P (陈新平), Zhang F-S (张福锁). Fertilization recommendation in continual agriculture. *Chemical Fertilizer Industry* (化肥工业), 1996, **23**(3): 7–10 (in Chinese)
- [19] Cui Z-L (崔振岭), Shi L-W (石立委), Xu J-F (徐久飞), *et al.* Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2071–2075 (in Chinese)
- [20] Huang Z-L (黄正来), Yao D-N (姚大年), Ma C-X (马传喜). Effects of nitrogen application on yield and quality traits of different wheat varieties. *Journal of Anhui Agricultural University* (安徽农业大学学报), 1999, **26**(4): 414–418 (in Chinese)
- [21] Shen R-K (沈荣开), Wang K (王 康). Field test and study on yield, water use and n uptake under varied irrigation and fertilizer in crops. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2001, **17**(5): 35–38 (in Chinese)
- [22] Men H-W (门洪文), Zhang Q (张 秋), Dai X-L (代兴龙), *et al.* Effects of different irrigation modes on winter wheat grain yield and water and nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2517–2523 (in Chinese)
- [23] Jiang D-Y (姜东燕), Yu Z-W (于振文), Xu Z-Z (许振柱). Effects of irrigation amount and nitrogen fertilization rate on wheat yield and soil nitrate content. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 364–368 (in Chinese)
- [24] Li S-J (李世娟). Nitrogen Fertilization Technique Research under Water Saving Cultivation of Winter Wheat. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2001 (in Chinese)
- [25] Zhao B-Z (赵炳梓), XU F-A (徐富安). Wheat yield and water-use efficiency as influenced by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer. *Soils* (土壤), 2003, **24**(2): 122–125 (in Chinese)
- [26] Zhang J (张 晶), Wang J-A (王姣爱), Dang J-Y (党建友), *et al.* Effect of water and fertilizer modes on yield, quality and HMW-GS expression in wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2011, **31**(5): 906–910 (in Chinese)
- [27] Mohamed ARA. Nitrogen accumulation, seed yield and water use of three grain legumes species grown under different water regimes. *Egyptian Journal of Agronomy*, 1999, **20**: 1–3
- [28] Wang X-Y (王小燕), Yu Z-W (于振文). Activities of enzymes related to nitrogenous metabolism and grain quality in wheat with different irrigation stage and rate. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2009, **29**(7): 1415–1420 (in Chinese)

---

作者简介 杨晓卡,女,1990年生,硕士研究生.主要从事水土资源与环境生态管理研究. E-mail: 1324689632@qq.com

责任编辑 张凤丽

---