



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

引用本文:

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 503–510.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响

李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 李成芳

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 447–454 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0015>

氮肥利用率测定规范化探讨

田昌玉, 林治安, 赵秉强, 车升国, 孙文彦, 李志杰

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0025>

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>

间作促进作物磷吸收的氮素调控效应

钱韩玲, 朱启林, 周龙, 龙光强, 汤利

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 471–479 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0108>

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 503–510.

CAI Yuan-yuan, WANG Rui-qi, WANG Li-li, et al. Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 503–510.



开放科学 OSID

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛^{1,2}, 王瑞琪^{1,2}, 王丽丽², 刘惠芬^{1*}, 杨殿林², 谭炳昌^{2*}

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:合理施肥是保证作物高产、减少面源污染的重要措施,以华北平原为研究区域,基于7个长期施肥试验,探讨不同施氮量及施肥模式(不施肥CK、化肥NPK、有机肥M、有机无机配施NPKM)对作物产量及氮肥利用率的影响。结果表明,作物产量与施肥量之间整体呈抛物线趋势,作物产量最高值均出现在NPKM处理。不同施肥模式对作物产量有一定影响,NPKM与NPK处理小麦产量无显著差异,且显著高于M、CK处理;NPKM、NPK、M处理玉米产量无显著差异,均显著高于CK处理。氮肥利用率随着施氮量增加呈下降趋势,不同施肥模式对氮肥利用率有一定影响,小麦季NPKM与NPK处理氮肥利用率无显著差异,且高于M处理,玉米季NPKM、NPK、M处理之间氮肥利用率均无显著差异。综合分析施氮量与有机肥替代率两因素对小麦产量的影响,在华北平原,利用有机肥替代化肥潜力可观,且不会显著降低作物产量,甚至增产,但为避免显著减产,在考虑提高有机肥替代率时,需要满足总施氮量的需求。

关键词:氮肥;有机无机配施;氮肥利用率;作物产量

中图分类号:S14

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)04-0503-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0254

Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain

CAI Yuan-yuan^{1,2}, WANG Rui-qi^{1,2}, WANG Li-li², LIU Hui-fen^{1*}, YANG Dian-lin², TAN Bing-chang^{2*}

(1. College of Agronomy and Resource Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Appropriate fertilization is an important component for ensuring high crop yields and avoiding the disadvantages of non-point source pollution. We used the North China Plain as the study area and seven long-term experiments to investigate how different nitrogen application rates and fertilization modes (no fertilizer CK, fertilizer NPK, organic fertilizer M, organic-inorganic combined application NPKM) would affect crop yield and the efficient use of nitrogen. We found that there was a parabolic trend between crop yield and fertilization amount. The highest crop yield appeared in the combined application of organic and inorganic fertilizers and different fertilization modes affected crop yield. We found no significant difference between NPKM and NPK treatments for wheat yield, with both higher than with M and CK treatments. For maize crops, there was no significant difference in crop yield between NPKM, NPK and M although they had significantly higher yields than with CK treatment. The nitrogen utilization rate decreased with higher nitrogen application and fertilization modes had certain effects on nitrogen utilization rates. We found no significant difference in nitrogen use efficiency between NPKM and

收稿日期:2018-09-28 录用日期:2019-02-26

作者简介:蔡媛媛(1994—),女,天津人,硕士研究生,从事作物生长环境研究。E-mail:cy114525@126.com

*通信作者:刘惠芬 E-mail:paula913@126.com;谭炳昌 E-mail:tanbch@163.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015)

Project supported: Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS(CAAS-XTCX2016015)

<http://www.aed.org.cn>

NPK treatment for wheat, but they were higher than with M treatment. There was no significant difference in nitrogen use efficiency between NPKM, NPK and M for maize. This comprehensive analysis of the effects of nitrogen application rate and fertilizer replacement ratio on wheat yield showed that, in the North China Plain, there was great potential to replace chemical fertilizers with organic fertilizers. This replacement would not significantly decrease crop yields, and possibly led to higher yields than with purified fertilizer. However, in order to avoid a significant decrease in crop yields, total N input should be determined when replacing chemical fertilizer with organic fertilizer.

Keywords: nitrogen fertilizer; organic-inorganic combined application; nitrogen use efficiency; crop yield

氮肥是作物生长所需氮素的重要来源,合理的氮肥施用是作物获得较高目标产量的关键措施。据报道,化肥对我国粮食产量的贡献率为40%左右^[1]。然而在实际生产中过度施用化肥会造成以下的弊端:一是导致作物产量不再增加,甚至出现产量、质量下降现象^[2];二是部分氮肥会残留在土壤中导致硝酸盐增加,造成土壤污染加重^[3-5];三是过多的硝酸盐逸散到大气中,造成大气污染及臭氧层破坏^[6];四是硝酸盐渗入地下对地下水造成污染,使水体富营养化^[5,7-8]。

2015年2月,原农业部制定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》^[9],方案明确力争到2020年,在保障粮食安全的前提下实现化肥用量零增长。由于化肥的大量使用,我国氮肥利用率从20世纪80年代的60%降至21世纪初的30%,随后利用率虽呈现缓慢上升^[10],但仍然低于国际平均水平^[11]。因此提高化肥利用率是实现化肥使用量零增长目标的必由之路,其中利用有机肥代替化肥是重要措施之一。有机肥资源统计结果表明,我国有机肥料产量每年约57亿 t^[12]。利用好有机肥资源,对于降低化肥使用、提高养分利用率至关重要。然而,我国对有机肥资源的利用率较低^[13],研究发现,与单纯施用化肥相比,有机无机配施增产效果不一,从增产128%到减产22%不等^[14],因此,有机无机合理配施方案的确定成为农业生产中的关键问题。

华北平原是我国重要的商品粮产区,而长期定位

试验在研究养分循环对作物产量的作用时比短期试验更具优势,能反映氮素残留对农作物产量与氮素利用率的影响。因此,本研究以华北平原为研究对象,利用长期试验,研究不同施氮量以及施肥模式对作物产量与氮素利用率的影响,为提出合理的有机无机配施方案提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取华北平原7个具有代表性的长期试验点,基本信息见表1。试验设置CK(对照)、NPK(纯化肥)、NPKM(有机无机配施)、M(纯有机肥)4个处理。部分长期试验中由于土壤不缺钾,只设置NP处理,也将其等同于NPK处理。

1.2 长期试验监测结果统计

对长期试验当季、全年施氮量,小麦、玉米产量以及氮肥利用率进行整理和归纳,如表2所示。

1.3 数据处理

利用Microsoft Excel 2010对试验数据进行整理分析,利用Origin 9.1进行方差分析、方程拟合以及绘图。

2 结果与分析

2.1 当季施氮量对作物产量的影响

由图1可知,作物产量与施氮量间呈抛物线趋势。随着施氮量的增加,小麦产量在施肥处理中均符

表1 长期试验研究区基本概况

Table 1 Basic information of the long-term experimental study area

地点 Location	年均温度 Average annual temperature/℃	年均降雨量 Average annual rainfall/mm	耕作年限 Tillage age	土壤类型 Soil type	土壤有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	pH	处理 Treatments	耕作制度 Farming system
北京市昌平区	11	600	16	均壤质褐潮土	11.7	0.64	8.7	CK,NPK,NPKM	小麦-玉米
天津市武清区	12	607	33	重壤质潮土	17.6	10.6	5.7	CK,NPK,NPKM	小麦-玉米
河北省辛集市	13	447	20	壤质潮土	8.7	0.48	8.3	NPK,NPKM	小麦-玉米
河北省衡水市	13	530	35	潮土	11.5	0.51	8.0	CK,NPK,NPKM,M	小麦-玉米
山东省禹城市	13	570	24	轻壤质潮土	4.0	0.57	8.5	CK,NPK,NPKM,M	小麦-玉米
河南省封丘县	14	615	27	潮土	10.1	0.45	8.7	CK,NPK,NPKM,M	小麦-玉米
江苏省徐淮地区	14	860	31	沙壤质潮土	10.8	0.66	8.0	CK,NPK,NPKM,M	小麦-玉米

表2 长期试验地施氮量、作物产量及氮肥利用率统计

Table 2 Statics of N application, crop yields and N use efficiency of the long-term experimental sites

试验点 Sites	处理 Treatments	土壤全氮 Soil TN/ g·kg ⁻¹	年均施氮量 Annual average N application/kg·hm ⁻²			小麦季有机肥 替代率 Organic fertilizer ratio in wheat season/%	年均产量 Annual average yield/ kg·hm ⁻²		年均氮肥利用率 Average annual nitrogen use efficiency/%	
			小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	总计 Total application		小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
北京市 昌平区	CK	0.73	0	0	0	—	605	1878		
	NPK	0.78	150	150	300	0	3530	4831	52	35
	NPKM	0.86	364	150	514	59	4022	5379	25	41
	1.5NPKM(1.5倍有机肥)	0.87	474	150	624	68	3391	5082	19	38
	NPKS(S:秸秆)	0.83	171	0	171	12	3509	4901	46	
天津市 武清区	CK	1.03	0	0	0	—	1658	2482		
	NPK	1.26	285	210	495	0	4960	6450	31	34
	NM	1.33	414	210	624	31	5045	6520	22	34
	NS	1.21	296	226	522	4	3122	4395	13	15
	NGM(GM:绿肥)	1.21	377	302	679	24	4029		17	
河北省 辛集市	NPK	1.08	225	225	450	0	6615	7688		
	NPKS	1.05	328	225	553	31	6788	7766		
河北省 衡水市	CK	0.72	0	0	0	—	962	2573		
	N1P1(低量NP)	0.78	45	45	90	0	2734	4404	106	72
	N1P1S1(低量NP+低量秸秆)	0.80	60	45	105	32	2691	4643	71	82
	N1P1S2(低量NP+中量秸秆)	0.81	74	45	119	48	2943	4843	62	90
	N1P1S3(低量NP+高量秸秆)	0.82	104	45	149	65	2971	4899	42	92
	N2P2(中量NP)	0.78	90	90	180	0	3877	5437	87	57
	N2P2S1(中量NP+低量秸秆)	0.79	105	90	195	19	3901	5358	71	55
	N2P2S2(中量NP+中量秸秆)	0.82	119	90	209	32	3877	5641	60	61
	N2P2S3(中量NP+高量秸秆)	0.83	149	90	239	48	4086	5596	48	60
	N3P3(高量NP)	0.79	180	180	360	0	4825	6161	58	35
	N3P3S1(高量NP+低量秸秆)	0.83	195	180	375	10	4681	6209	50	36
	N3P3S2(高量NP+中量秸秆)	0.82	209	180	389	19	4846	6325	47	37
	N3P3S3(高量NP+高量秸秆)	0.82	239	180	419	32	4981	6560	41	39
	CK	0.59	0	0	0	—	1836	4245		
	NPK1(常量化肥)	0.79	206	206	412	0	5864	7827	52	31
山东省 禹城市	NPK2(高量化肥)	0.85	413	413	826	0	5798	7858	26	16
	M1(常量有机肥)	1.21	206	206	412	100	4803	8133	39	33
	NPK1M1(常量施肥)	0.99	206	206	412	50	5660	8433	50	36
	NPK2M2(高量施肥)	1.56	413	413	826	50	5560	8797	24	20
	CK	0.42	0	0	0	—	524	925		
	NPK	0.51	150	150	300	0	4772	6984	76	71
河南省 封丘县	M	0.71	150	150	300	100	3730	6574	57	66
	0.5M+0.5NPK(0.5倍有机肥)	0.61	150	150	300	50	4684	6887	74	70
江苏省 徐淮地区	CK	0.66	0	0	0	—	1406	2865		
	NPK	0.90	150	150	300	0	5568	6752	75	46
	M	1.33	178	178	356	100	3176	5985	26	31
	NPKM	1.44	328	328	656	54	6401	7450	39	25

注:氮肥利用率=(施肥处理地上部氮总量-不施肥处理地上部氮总量)/当季施氮量×100%。

Note: Nitrogen use efficiency=(Total nitrogen amount of the upper part of crop for the fertilizer treatment-Total nitrogen amount of the upper part of crop for the non-fertilizer treatment)/Total nitrogen application for the crop season×100%.

合一元二次方程的先增后降趋势。当有机无机配施氮施入量约为 $330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量达到 $6800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 峰值(图 1a)。与小麦产量的变化趋势类似,当有机无机配施氮施入量约为 $410 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米产量达到约 $8800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 峰值(图 1b)。

2.2 当季施氮量对作物氮肥利用率的影响

总体而言,小麦与玉米的氮肥利用率均随着施氮量的增加而降低(图 2)。小麦季氮肥利用率最高值出现在 NPK 处理,氮施入量约为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦氮肥利用率达到峰值 105.6% (图 2a)。与小麦氮肥利用率的变化趋势类似,玉米季氮肥利用率最高值出现在 NPKM 处理,氮施入量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米氮肥利用率达到峰值 91.9% (图 2b)。

2.3 不同施肥模式对作物产量及氮肥利用率的影响

不同施肥模式对小麦产量的影响差异显著,其

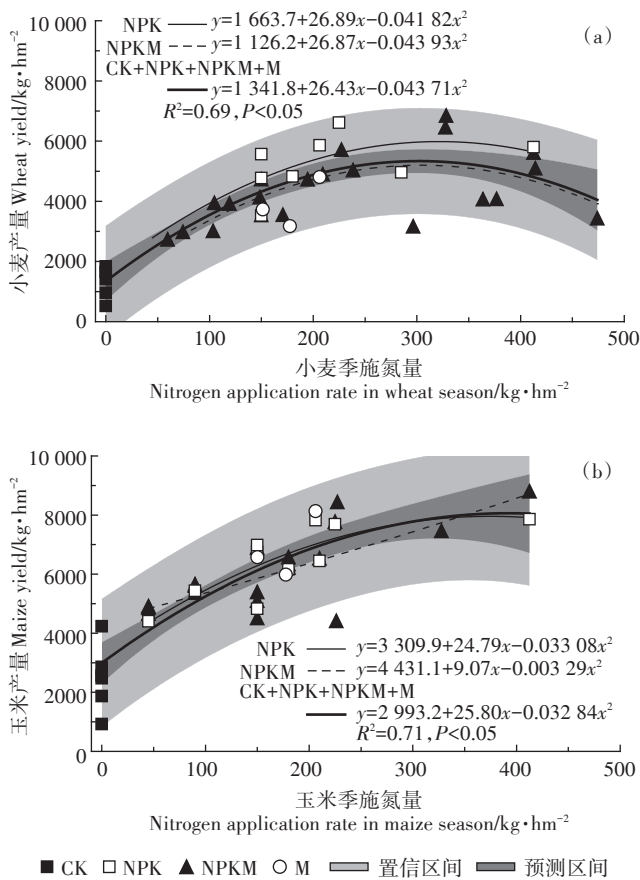


图1 作物产量与当季施氮量的关系

Figure 1 Relationship between crop yield and nitrogen application rate

中 NPK 处理与 NPKM 处理小麦产量无显著差异,均显著高于 M 和 CK 处理, M 与 CK 处理之间无显著差异。M、NPK 与 NPKM 处理玉米产量无显著差异,均显著高于 CK 处理(图 3a)。作物氮肥利用率对不同施肥模式的响应与产量对施肥模式的响应一致。NPK 与 NPKM 处理小麦氮肥利用率无显著差异,显著高于 M 处理;该三个处理玉米的氮肥利用率无显著差异(图 3b)。

2.4 年均施氮量对土壤全氮含量及氮固持率的影响

随着施氮量的增加,土壤总氮含量呈渐近线增加趋势,预测最高含量为 $1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4a)。另外,随着施氮量的增加,土壤氮固持率降低(图 4b)。

2.5 作物产量与当季施氮量及有机肥比例的关系

本研究长期试验的玉米季中设置有机无机配施处理较少,因此仅分析小麦季不同施氮量与有机肥比例对小麦产量的影响。根据施氮量、有机施氮量的比例以及小麦产量数据(表 2),利用非线性拟合方法拟合产量与该两影响因素的关系($R^2 = 0.57$),得到公式

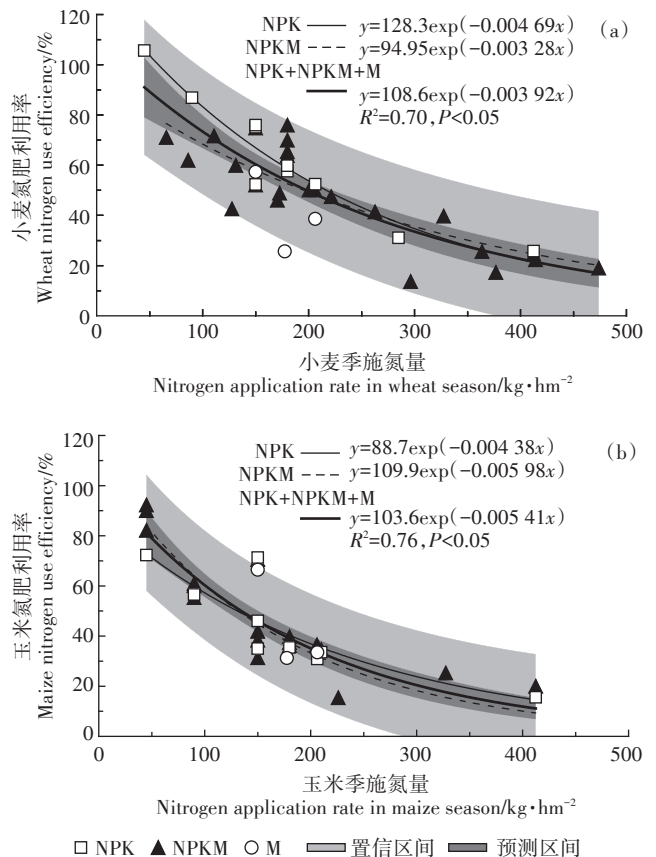
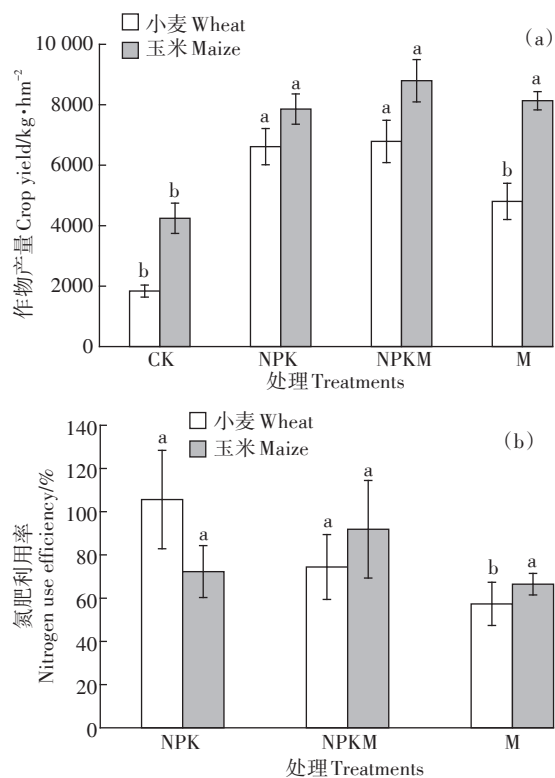


图2 作物氮肥利用率与当季施氮量的关系

Figure 2 Relationship between crop nitrogen use efficiency and nitrogen application rate



同种作物不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Different letters for the same crop indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$)

图3 不同施肥模式对作物产量和氮肥利用率的影响

Figure 3 Effects of different fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency

如下:

$$y = -0.024 \times [x_1 \times \exp(0.003 \times x_2)]^2 + 19.4 \times [x_1 \times \exp(0.003 \times x_2)] + 1205 \quad (1)$$

式中: y 表示产量; x_1 表示施氮量; x_2 表示有机肥比例。图5为施氮量和有机肥替代率两参数对产量影响的三维图。总体而言,当有机无机的配比比例固定时,产量随着施氮量的增加呈现先增后降的趋势。不同配比比例的产量峰值相同,但随着有机肥替代率的增加,产量峰值对应的施氮量增大。

另根据拟合公式(1),可以得到不同施氮量以及有机肥替代率情境下的产量响应(表3)。从表3可知,要达到小麦高产(5100 kg·hm⁻²以上),最低需氮量为300 kg·hm⁻²,在此水平上,小麦产量随有机肥替代率的升高而略有降低,有机肥替代率50%时,小麦仅减产1.5%。当施氮量高于300 kg·hm⁻²,有机无机配比的产量高于施用纯化肥处理。施氮量低于300 kg·hm⁻²,如200 kg·hm⁻²,有机肥替代率为10%~30%时,小麦减产不显著。

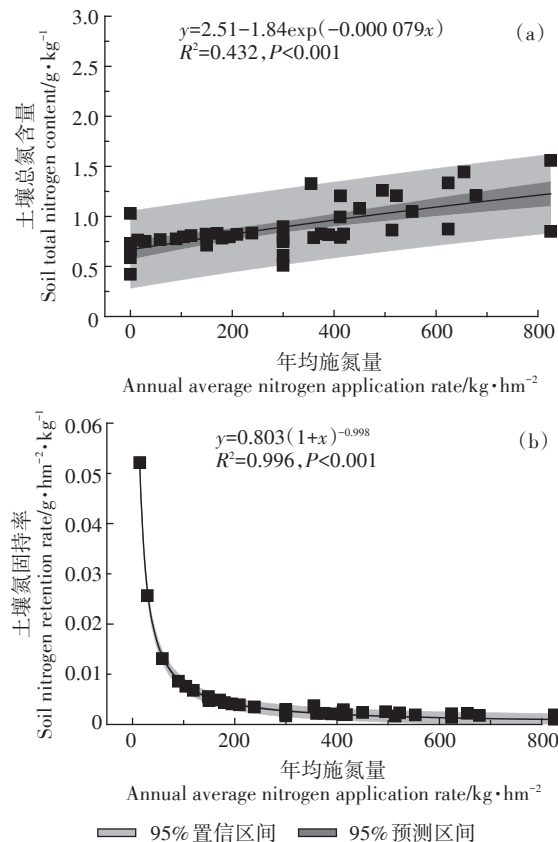


图4 年均施氮量与土壤全氮含量(a)和氮固持率(b)的关系

Figure 4 Relationship between soil total nitrogen content(a), nitrogen retention rate(b) and annual average nitrogen application

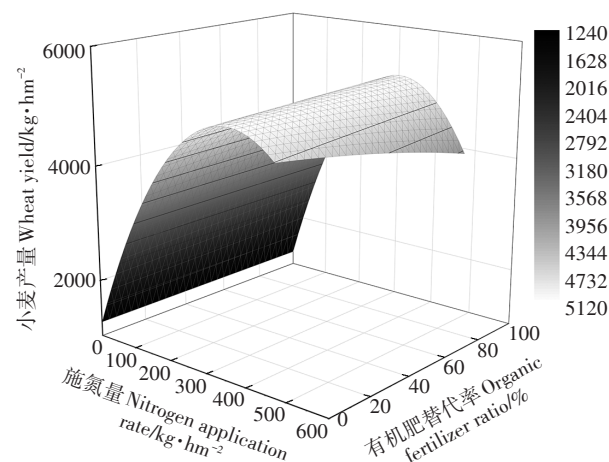


图5 产量对施氮量与有机肥替代率的响应图

Figure 5 Response of yield to nitrogen application rate and organic fertilizer ratio

3 讨论

3.1 施肥量对产量与氮肥利用率的影响

本研究发现,作物产量随着施氮量的增加呈先增后降的抛物线趋势,与先前研究结果^[15-16]一致;另外,

表3 施氮量与有机肥替代率对小麦产量的影响

Table 3 Effect of nitrogen application rate and organic fertilizer ratio on the wheat yield

总施氮量 Total nitrogen application/ kg·hm ⁻²	有机肥替代率 Organic fertilizer ratio/%	化肥施氮量 Fertilizer nitrogen application rate/ kg·hm ⁻²	产量 Yield/ kg·hm ⁻²	产量变幅 Change rate of yield/%
200	0	200	4710	0
	10	180	4651	-1.3
	20	160	4591	-2.5
	30	140	4529	-3.9
	40	120	4465	-5.2
	50	100	4401	-6.6
250	0	250	5039	0
	10	225	5002	-0.7
	20	200	4961	-1.6
	30	175	4916	-2.5
	40	150	4867	-3.4
	50	125	4815	-4.5
300	0	300	5134	0
	10	270	5134	0
	20	240	5126	-0.2
	30	210	5110	-0.5
	40	180	5088	-0.9
	50	150	5059	-1.5
350	0	350	4994	0
	10	315	5046	1.0
	20	280	5085	1.8
	30	245	5112	2.3
	40	210	5128	2.7
	50	175	5135	2.8
400	0	400	4620	0
	10	360	4738	2.6
	20	320	4838	4.7
	30	280	4920	6.5
	40	240	4988	7.9
	50	200	5041	9.1

作物当季氮肥利用率随施氮量增加而降低,与张福锁等^[17]研究结果一致。但是在相同施氮量条件下,本研究的氮肥利用率高于张福锁等^[17]的研究,这可能与研究持续时间有关。本研究使用长期试验数据,长期试验下不施肥处理使土壤养分不断消耗,客观上造成不施肥处理下多年平均产量低于短期试验。而张福锁等^[17]的研究是依据2~4年的田间试验得出的结论,未施肥处理下,土壤养分消耗程度低于长期试验^[17]。因此根据氮肥利用率的计算方法,基于长期试验的研究结果会高于短期试验的结果。

作物产量随施氮量增加呈抛物线变化趋势以及当季氮肥利用率随氮施入量的增加而降低的现象是多方面造成的:

(1)土壤氮素存在饱和现象,不能随着施氮量的增加而无限增加。土壤肥力指标中包括土壤养分(有机质、全氮等)储量指标,土壤中含有过多的有机质或全氮,虽然可以增加土壤对养分的吸收,增加土壤氮素含量,但同时由于大部分氮素是以有机质形式赋存于土壤中,尽管土壤可以通过矿物吸附、土壤团聚体以及生化等途径保护有机质,但保护能力有限,因此有机质在土壤中存在饱和现象^[18-19]。本研究的结果显示,土壤总氮含量随着年均施氮量的增加呈渐近线增加(图4a),但氮固持率随之降低(图4b),表现出土壤氮饱和的现象。

(2)作物产量不会随土壤供氮量的增加而持续增加。土壤供氮量过高,导致植物体内可能积累过量的硝酸盐、亚硝酸盐等^[20],提高病虫害的发生机率并使作物减产,另外也加重作物倒伏发生^[21];供氮量过高也会导致营养阶段疯长,不利于养分向籽粒的转移^[22]。

(3)土壤中的NO₃-N含量增高,会造成耕地板结、土壤酸化^[23],增加土传病害,进一步降低作物产量。

3.2 施肥模式对产量与氮肥利用率的影响

3.2.1 单施有机肥对产量与氮肥利用率的影响

本研究单施有机肥的处理为动物粪便或堆肥。使用堆肥后,小麦季施氮量为150、178、206 kg·hm⁻²,对应的产量为3730、3176、4803 kg·hm⁻²(图1a),氮肥利用率分别为57%、26%、39%(图2a),不论产量还是利用率均显著低于化肥处理与有机无机配施处理(图3);玉米季施氮量为150、178、206 kg·hm⁻²,对应的产量为6574、5985、8133 kg·hm⁻²(图1b),氮肥利用率分别为66%、31%、33%(图2b)。不论产量还是氮肥利用率都与化肥处理和有机无机配施处理无显著差异(图3),与郁洁等^[24]、张树清等^[25]的研究结果一致。

3.2.2 有机无机配施对作物产量与氮肥利用率的影响

合理的有机无机配施一方面满足当季作物对养分的需求,另一方面通过提高土壤有机质含量改善土壤理化性质与微生物群落结构,提高土壤肥力^[26-28]。

长期试验的研究结果也表明,有机无机肥的配合施用能稳定提高作物产量与氮肥利用率(图3)。本研究进一步综合施氮量与有机肥替代率两因素,得到小麦产量对该两因素变化的响应。结果显示,当总施氮量低于300 kg·hm⁻²时,有机肥替代率30%情境不会显著降低作物产量,但当替代率超过30%,有机无

机配施产量显著低于纯化肥处理。当总施氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,替代率增至 50% 也不会导致显著的产量降低。当施氮量高于 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,有机肥替代处理产量高于纯化肥处理(表 3)。因此,在当前常规施氮量的处理下,华北平原地区有机肥替代化肥的潜力可观,但需要满足总施氮量的要求。

4 结论

(1)华北平原小麦、玉米产量与施氮量之间的影响关系呈现抛物线趋势,产量最高值均出现在有机无机肥配施处理。随着当季施氮量增加,小麦、玉米氮肥利用率总体呈现下降的趋势。

(2)有机无机配施在保持华北平原小麦、玉米高产方面具有可行性,且潜力可观,但在提高有机肥替代率时,需满足总施氮量的要求。

参考文献:

- [1] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等.中国化学肥料发展及其对农业的作用[J].土壤学报,2008,45(5):852-864.
SHI Yuan-liang, WANG Ling-li, LIU Shi-bin, et al. Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 852-864.
- [2] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [3] 黄国勤,赵其国.中国典型地区轮作休耕模式与发展策略[J].土壤学报,2018,55(2):283-292.
HUANG Guo-qin, ZHAO Qi-guo. Mode of rotation/fallow management in typical areas of China and its development strategy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 283-292.
- [4] 张国,逯非,赵红,等.我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J].农业环境科学学报,2017,36(5):981-988.
ZHANG Guo, LU Fei, ZHAO Hong, et al. Residue usage and farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 981-988.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(19): 3041-3046.
- [6] 刘新宇.华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系化肥氮后效及去向量化研究[D].保定:河北农业大学,2010.
LIU Xin-yu. Nitrogen fertilizer residual effect and its fate in winter wheat-summer maize rotations in North China Plain[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [7] Liu J G, Diamond J. Revolutionizing China's environmental protection [J]. *Science*, 2008, 319(5859): 37-38.
- [8] Bouwman A F. Surface N balances in agricultural crop production systems in China for the period 1980-2015[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 304-315.
- [9] 农业部.到2020年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL].(2015-02-17). http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
Ministry of Agriculture. Zero growth action plan for fertilizer use by 2020[EB/OL]. (2015-02-17). http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
- [10] 颜晓元,夏龙,逯超,等.面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J].中国科学院院刊,2018,33(2):177-183.
YAN Xiao-yuan, XIA Long-long, TI Chao-pu, et al. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 177-183.
- [11] Lassaletta L, Billen G, Garnier J, et al. Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): e095007.
- [12] 牛新胜,巨晓棠.我国有机肥料资源及利用[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1462-1479.
NIU Xin-sheng, JU Xiao-tang. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [13] 许有尊.秸秆还田及有机肥对水稻生长和氮肥利用率影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
XU You-zun. Studies on effects of residue retain and organic fertilizer on grain yield and nitrogen use efficiency[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [14] 张昊青.黄土高原旱地麦田有机无机配施减氮增效作用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Hao-qing. Reducing nitrogen fertilization rate and improving winter wheat yield through a combination of manure and chemical fertilizer in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [15] 于飞,施卫明.近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
YU Fei, SHI Wei-ming. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [16] 巨晓棠.氮肥有效率的含义及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.
JU Xiao-tang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio: Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921-933.
- [17] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.

- [18] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2):155-176.
- [19] Tan B C, Fan J B, He Y Q, et al. Possible effect of soil organic carbon on its own turnover: A negative feedback[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69:313-319.
- [20] 张北赢, 陈天林, 王 兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11):182-187.
ZHANG Bei-ying, CHEN Tian-lin, WANG Bing. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11):182-187.
- [21] 杨和川, 陈留根, 秦裕营, 等. 不同氮肥处理对水稻生理效应及产量的影响[J]. 北方农业学报, 2018, 46(2):37-40.
YANG He-chuan, CHEN Liu-gen, QIN Yu-ying, et al. Effects of different nitrogen fertilizer treatments on physiological effects and yield of rice[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, 46(2):37-40.
- [22] 苏建党. 探讨过量施用化肥的危害及应对措施[J]. 农业与技术, 2016, 36(6):49.
SU Jian-dang. Discuss the hazards of excessive application of chemical fertilizers and countermeasures[J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(6):49.
- [23] 于广武, 姚恒俊, 齐长明, 等. 肥料施用中的问题及平衡施肥[J]. 中国农资, 2006(11):88-89.
YU Guang-wu, YAO Heng-jun, QI Chang-ming, et al. Problems in fertilizer application and balanced fertilization[J]. *China Agricultural Materials*, 2006(11):88-89.
- [24] 郁 洁, 蒋 益, 徐春森, 等. 不同有机无机肥配施对麦稻生长及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1293-1302.
YU Jie, JIANG Yi, XU Chun-miao, et al. Effects of combined application of inorganic and organic fertilizers on growth and nitrogen uptake of wheat and rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(6):1293-1302.
- [25] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6):116-123.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6):116-123.
- [26] 刘红江, 郭 智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配施比例对稻季CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5):808-814.
LIU Hong-jiang, GUO Zhi, ZHANG Li-ping, et al. Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH₄ and NO₂ emissions in paddy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5):808-814.
- [27] 罗健航, 赵 营, 任发春, 等. 有机无机肥配施对宁夏引黄灌区露地菜田土壤氨挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4):75-81.
LUO Jian-hang, ZHAO Ying, REN Fa-chun, et al. Effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization in open vegetable field of the Yellow River irrigation region in Ningxia[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2015, 33(4):75-81.
- [28] 高 伟, 李明悦, 高宝岩, 等. 有机无机肥料配合施用对设施黄瓜产量、氮素累积及硝酸盐淋溶的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(4):188-193.
GAO Wei, LI Ming-yue, GAO Bao-yan, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and nitrate accumulation of cucumber and nitrate leaching under greenhouse condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4):188-193.