DOI：10.11766/trxb201805210207

氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响*

张伟纳[1] 刘宇娟[1] 董 成[1] 谢迎新[1†] 马冬云[1] 赵 旭[2†] 岳艳军[3] 王晨阳[1] 郭天财[1]

（1 河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心/河南粮食作物协同创新中心，郑州 450002）

（2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008）

（3 河南心连心化肥有限公司，河南新乡 453730）

摘 要 为探究适宜于黄淮潮土区的合理氮肥运筹方式，为中国化肥施用量零增长目标提供理论依据和技术支撑，在黄淮潮土农田定位试验地研究了氮肥运筹对冬小麦/夏玉米产量、氮肥利用率及经济效益的影响。试验设置4种氮肥运筹方式：基施控失尿素（T1）、基施普通尿素+追施普通尿素（T2）、基施控失尿素+追施普通尿素（T3）和基施普通尿素+追施控失尿素（T4），各氮肥运筹方式均包含0、80、160和240 kg·hm^{-2}（以N计，下同）4个施氮水平。结果表明，随施氮量增加，平均单季籽粒产量、周年产值及周年纯效益均表现为先增加后降低趋势，而氮肥利用效率则表现为逐渐降低趋势，其中以160 kg·hm^{-2}时效果较优。T1处理小麦季籽粒产量、周年产量、周年产值及周年纯经济效益均显著高于其他3个处理。效益分析表明，虽然T1处理在等氮条件下氮肥投入成本相对较高，但其较其他氮肥运筹减少了追肥人工成本，加之该处理产量相对较高，最终该处理纯效益相对较高。结合施氮量与产量曲线方程，在160～173 kg·hm^{-2}施用范围内一次性基施控失尿素符合当前研究地区农村劳动力缺乏的实际情况，且能保证产量收益。

关键词 控失尿素；冬小麦；夏玉米；产量；氮肥利用率；经济效益

中图分类号 S512；S513 **文献标识码** A

冬小麦/夏玉米周年轮作是黄淮平原典型的作物种植制度。氮肥施用，尤其是氮肥的合理施用是提高小麦、玉米等作物产量的重要因素[1]。氮肥用量和施肥方式对小麦、玉米产量及氮肥利用率均有重要影响[2-3]。2015年统计数据显示，中国化肥施用量已达6.023×10^7 t，其中，氮肥用量达2.362×10^7 t，占化肥总量39.2%[4]。然而，中国化肥施用量持续增加，特别是氮肥的过量施用并未显著增加作物经济产量[5-7]，且导致一系列问题出现，如氮肥利用率持续下降[7-8]、地下水污染加重[9]，进而可能加重对农田生态系统的环境威胁[10]。

国际肥料工业协会根据化肥制造工艺分为缓释肥（如脲甲醛等）和控释肥（控释尿素、控失尿

* 河南心连心化肥有限公司科研合作项目（Y141240001）、国家重点研发计划项目（2016YFD0300400）和“十二五”国家科技支撑计划项目（2015BAD26B00）共同资助 Supported by the Cooperation Project of Henan Xinlianxin Fertilizer Co. Ltd.（No. Y141240001），the National Key Research and Development Program of China（No. 2016YFD0300400）and the National Science and Technology Support Project of China（No. 2015BAD26B00）

† 通信作者Corresponding author，E-mail：xieyingxin@tom.com; zhaoxu@issas.ac.cn

作者简介：张伟纳(1992—)，女，河南漯河人，硕士研究生，主要从事作物栽培与耕作技术研究。E-mail：zhangweina0305@163.com

收稿日期：2018-05-21；收到修改稿日期：2018-08-15；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2018-09-11

素等），控释肥料是指能减缓或控制养分释放速度的新型肥料，而控失肥则是通过内置包裹型材料控制肥效损失的一种新型缓释肥料，广义上而言，缓释肥料是控释肥料一种[11]。多数研究表明，缓/控释氮肥的施用对增加农作物经济产量、提高氮肥利用率和降低环境污染具有明显效果[12-14]。然而，有关缓/控释氮肥的应用报道不尽相同。有研究认为，在保证总氮情况下，控释尿素与普通尿素配施显著提高作物产量和氮肥利用率[15]。相反的研究则认为，在等氮量供应条件下，一次性施用控释尿素较分期施用普通尿素可显著提高作物产量[16-17]。此外，也有因氮肥种类不同而导致减施效果存在明显差异的报道，如孙晓等[18]研究认为，与常规施肥（225 kg·hm^{-2}）相比，普通尿素减施20%可导致春玉米减产，而控释尿素减施20%则可增加作物产量、提高氮肥利用率和经济效益。此外，有关控释尿素与普通尿素的运筹方式的报道认为，基施控释氮肥与拔节期追施普通尿素可显著提高小麦产量和氮肥农学效率[19]。总体而言，不同的氮肥运筹方式对作物产量和氮肥利用效率均有显著影响[13,16-19]，但目前黄淮小麦/玉米轮作区尚缺乏对氮肥运筹方式的系统研究，且前人的研究报道不一致也将影响该区氮肥的合理施用，致使该区氮肥的盲目施用等不合理现象屡见不鲜。

为此，本文结合当前黄淮冬小麦/夏玉米典型轮作种植区实际生产中所应用的主要氮肥类型、施氮方式及氮肥用量，通过连续两周年的氮肥运筹田间定位试验，研究冬小麦/夏玉米高产栽培的氮肥施用技术，以期为该地区农田氮肥优化管理和化肥零增长目标实现提供一定的理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年10月—2017年10月在位于黄淮典型冬小麦/夏玉米轮作种植区的河南省封丘县中国科学院封丘农业生态实验站（34°01′ N，114°45′ E）进行。该站位于河南省东北部，新乡市东南隅，属暖温带大陆性季风气候，年平均气温14 ℃；降水量分布不均匀，多集中在6—8月。2015—2016年冬小麦/夏玉米生育期降水量为676.8 mm，2016—2017年冬小麦/夏玉米生育期降水量为501 mm，无霜期214 d，日照时数1 928.5 h。本试验连续2个轮作周期逐月降水量和温度见图1。试验地土壤为黄河沉积物上发育的砂质潮土，其0～20 cm耕层有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为11.2 g·kg^{-1}、0.79 g·kg^{-1}、36.1 mg·kg^{-1}、10.5 mg·kg^{-1}、92.1 mg·kg^{-1}，pH为8.30。

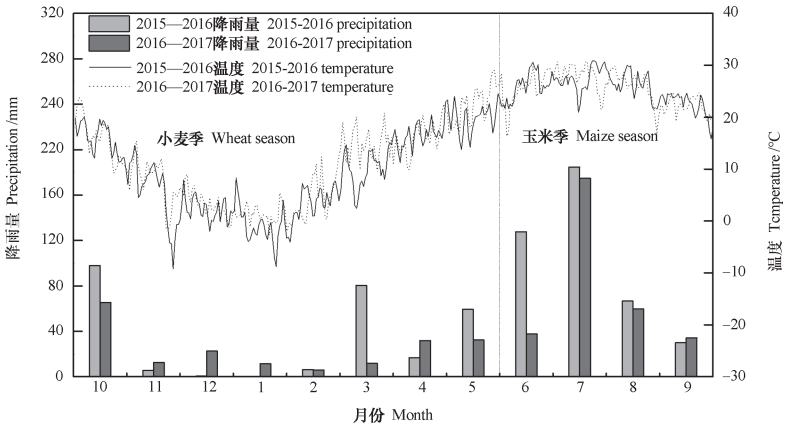

图1 2015—2017连续2个冬小麦/夏玉米轮作逐月降雨量和日平均温度变化

Fig. 1 Monthly rainfall and daily temperature during the 2 wheat/maize rotation cycles from 2015 to 2017

1.2 试验材料与设计

试验供试作物为国审冬小麦品种豫麦49-198和国审夏玉米品种郑单958。氮肥品种为控失尿素（总氮大于等于43.2%，为内质包裹型新型缓释尿素，专利号ZL201210392722.7；Loss control urea；简称LCU）和普通尿素（Urea）两种，均由河南心连心化肥有限公司提供。施氮量设0、80、160和240 kg·hm^{-2}（以N计，下同）四个水平。

两个冬小麦和夏玉米作物季氮、磷、钾肥施用量相同。氮肥施用每季均按照6∶4基追比例进行：基肥在播种前撒施土壤表面，然后翻入土壤耕层15～20 cm处；追肥冬小麦季在拔节期，夏玉米季在大喇叭口期，追施方式分别为冬小麦撒施加灌水，夏玉米穴施加灌水。磷、钾肥分别按照P_2O_5 150 kg·hm^{-2}和K_2O 90 kg·hm^{-2}用量作为基肥一次性施用。各试验小区氮肥运筹方式和施氮量水平详见表1。所有试验处理均设置3次重复，随机排列，各小区面积为16 m^2。试验各小区四周水泥浇筑以阻止小区间水肥互串。试验区其他管理与当地一致。

表1　试验方案

Table 1　Experiment scheme

氮肥运筹 N application (mode and rate)	氮肥用量 N application rate /(kg·hm^{-2})	施氮方式 N application method
CK	0	不施氮 No nitrogen application control
T1	80，160，240	控失尿素一次性基肥 Single basal application of Loss control urea (LCU)
T2	80，160，240	普通尿素60%基肥，40%追肥 Split basal and topdressing applications of urea at the ratio of 6∶4
T3	80，160，240	控失尿素60%基肥，普通尿素40%追肥 Basal application of LCU and topdressing of urea at the ratio of 6∶4
T4	80，160，240	普通尿素60%基肥，控失尿素40%追肥 Basal application of urea and topdressing of LCU at the ratio of 6∶4

1.3　测定项目与方法

地上植株样品分籽粒和秸秆（冬小麦为茎秆、叶和颖壳，夏玉米分茎秆和叶）部位分开置于烘箱中于105℃杀青30 min，80℃烘干至恒重，称重。样品粉碎后采用凯氏定氮法测定全氮含量。

于冬小麦、夏玉米成熟期各试验小区单打单收，经烘干后按照13%标准水分含量计算籽粒和秸秆产量。

1.4　数据处理

氮肥农学效率(kg·kg^{-1})=（施氮区每季产量—不施氮区每季产量）/施氮量

累积氮肥农学效率(kg·kg^{-1})=（施氮区累积产量—不施氮区累积产量）/累积施氮量

累积氮素吸收效率(kg·kg^{-1})=施氮区累积地上部吸氮量/累积施氮量

经济效益核算：肥料成本按照尿素1 800 yuan·t^{-1}，控失尿素2 500 yuan·t^{-1}，磷肥P_2O_5 3 000 yuan·t^{-1}，钾肥K_2O 3 200 yuan·t^{-1}计算；籽粒产量收益根据当年市场价格计算，2015—2016年和2016—2017年冬小麦价格分别为2.4 yuan·kg^{-1}和2.5 yuan·kg^{-1}，夏玉米分别价格为1.4 yuan·kg^{-1}和1.7 yuan·kg^{-1}；每季作物追肥劳动力按当地平均劳动力水平420 yuan·hm^{-2}计算；其他投入包括种子、农药、整地、播种、灌溉、收获等每季作物按2 600 yuan·hm^{-2}计算。

采用Microsoft Excel 2 013处理试验数据，SPSS 19.0对数据进行单因素方差分析，并采用最小显著差异（LSD）法比较不同处理间的差异性，Origin Pro 8.0绘图。图表中的不同小写字母表示处理间差异达P<0.05显著水平。

2　结　果

2.1　氮肥运筹对冬小麦/夏玉米产量及氮肥效率的影响

两年作物产量存在年际变异（表2）：2016—2017年冬小麦/夏玉米各施氮处理的产量及氮肥利用率较2015—2016年高。160～240 kg·hm^{-2}等量施氮水平下，冬小麦/夏玉米两年产量均表现为T1优于T2、T3、T4，且在施氮量为160 kg·hm^{-2}下产量最高。与T2～T4相比，2015—2016年和2016—2017年T1小麦产量增产率分别高出1.4%～4.6%和 9.3%～22.4%，玉米产量增产率分别高出3.1%～10.7%和 5.6%～18.5%。从2年4季平均数据

来看，随着施氮量增加，作物平均产量均表现为先升高后降低趋势，两年度氮肥运筹方式间产量均以T1处理相对较高。

冬小麦/夏玉米各季氮肥农学效率随着施氮量的增加呈下降趋势（表2）。施氮量为160 kg·hm^{-2}和240 kg·hm^{-2}时，T1较T2、T3和T4高，两年累积氮肥农学效率也表现为相同规律（表3）。2016—2017年度的作物氮肥农学效率较2015—2016年度高，这主要与连续两年不施氮对照处理下土壤氮损耗有关。

年份、施氮量和氮肥运筹三因素分析结果表明（表2），年份和施氮量是影响作物产量和氮肥农学效率的重要影响因素，对冬小麦夏玉米均有显著影响；氮肥运筹方式仅对生育期相对较长的冬小麦有重要影响，而对生育期相对较短的夏玉米影响不显著。

表2 氮肥运筹对冬小麦/夏玉米产量和氮肥效率的影响

Table 2 Effects of nitrogen application (mode and rate) on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat / summer maize

年份 Year	氮肥运筹 N operation	施氮量 N rate/ (kg·hm^{-2})	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
			产量 Yield /(kg·hm^{-2})	增产率 Increasing Ratio/%	AE /(kg·kg^{-1})	产量 Yield/ (kg·hm^{-2})	增产率 Increasing Ratio/%	AE/ (kg·kg^{-1})
2015—2016	CK	0	5 320c	–	–	6 766c	–	–
	T1	80	6 463ab	21.5	16.9a	9 347b	38.1	35.4a
		160	6 725a	26.4	8.8c	10 736a	58.7	24.8b
		240	6 648ab	25.0	5.5de	10 292ab	52.1	14.7cd
	T2	80	6 429ab	20.8	13.9b	9 740ab	44.0	37.2a
		160	6 482ab	21.8	7.3cd	10 016ab	48.0	20.3bcd
		240	6 286ab	18.2	5.2de	9 797ab	44.8	11.9d
	T3	80	6 348ab	19.3	12.9b	9 719ab	43.6	36.9a
		160	6 524ab	22.6	7.3cd	10 141ab	49.9	21.1bc
		240	6 269ab	17.8	4.0e	9 813ab	45.0	12.7cd
	T4	80	6 126b	15.2	12.0b	9 953ab	47.1	39.8a
		160	6 650ab	25.0	8.3c	10 531ab	55.6	23.5b
		240	6 215ab	16.8	3.7e	10 260ab	51.6	14.6cd
2016—2017	CK	0	2 898d			5 943e		
	T1	80	7 223abc	149.2	47.9a	10 906d	83.5	62.0a
		160	7 785a	168.6	30.5b	12 843a	116.1	43.1b
		240	7 400abc	155.3	18.8c	11 561bcd	94.5	23.4c
	T2	80	6 925bc	139.0	50.3a	11 484bcd	93.2	69.3a
		160	7 136abc	146.2	26.5b	12 116ab	103.9	38.6b
		240	6 973bc	140.6	17.0c	11 637bcd	95.8	23.7c
	T3	80	6 846bc	136.2	49.3a	11 540bcd	94.2	70.0a
		160	7 515ab	159.3	28.9b	12 512a	110.5	41.1b
		240	7 309abc	152.2	18.4c	11 719bc	97.2	24.1c
	T4	80	6 720c	131.9	47.8a	11 046cd	85.9	63.8a
		160	7 360abc	154.0	27.9b	11 745bc	97.6	36.3b
		240	7 233abc	149.6	18.1c	11 568bcd	94.6	23.4c

续表

年份 Year	氮肥运筹 N operation	施氮量 N rate/ (kg·hm^{-2})	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
			产量 Yield /(kg·hm^{-2})	增产率 Increasing Ratio/%	AE /(kg·kg^{-1})	产量 Yield/ (kg·hm^{-2})	增产率 Increasing Ratio/%	AE/ (kg·kg^{-1})
2016—2017	平均Mean	80	6 635b	79.1	31.4a	10 467c	66.2	51.8a
		160	7 022a	90.5	18.2b	11 330a	80.0	31.1b
		240	6 792b	84.4	11.3c	10 831b	60.1	18.6c
	T1		7 041a	91.0	21.4a	10 948a	58.1	33.9a
	T2		6 705b	81.1	20.0a	10 798a	71.6	33.5a
	T3		6 802b	84.6	20.1a	10 907a	73.4	34.3a
	T4		6 717b	82.1	19.6a	10 851a	72.1	33.6a
变异来源 (*P*) Source of variance (*P*)								
年份 Year			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
氮肥运筹 Application (mode and rate)			0.010	0.013	0.072	0.764	0.566	0.954
施氮量 Rate			0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
年份×氮肥运筹 Year× Mode			0.630	0.297	0.429	0.040	0.040	0.183
年份×施氮量 Year× Rate			0.224	0.049	0.000	0.243	0.110	0.000
氮肥运筹×施氮量 Mode× Rate			0.761	0.804	0.593	0.042	0.107	0.319
年份×氮肥运筹×施氮量 Year×Mode× Rate			0.886	0.890	0.262	0.933	0.889	0.963

注：AE, 农学效率；数据后不同字母分别表示同年度同列不同处理间差异显著(P<0.05) 。下同 Note : AE, Agronomic efficiency; Different letters after data in the same column mean significant difference between treatments in the same year at 0.05 level. The same below

随施氮量增加，各氮肥运筹方式下冬小麦/夏玉米作物累积氮素吸收量（两年4季）均表现出先增加后降低趋势，而氮肥农学效率和氮素吸收效率则显著降低（表3）。每季160 kg·hm^{-2}施氮水平（4季总用量640 kg·hm^{-2}）下，T1累积氮素吸收量最高，且其氮肥农学效率和氮素吸收效率也显著高于T2、T3和T4。

2.2　不同氮肥运筹模式下经济效益

相同氮肥运筹方式下，两年度N 160 kg·hm^{-2}周年产量和产值及纯效益均优于其他施氮处理（表4）。160～240 kg·hm^{-2}等量施氮水平下，尽管T1氮肥运筹方式肥料成本较高，但因其节省了追肥人工成本，并取得相对较高的周年产量和产值，使得两年度T1纯经济效益均高于T2、T3和T4，且在施氮量160 kg·hm^{-2}时达到最大。

2.3　产量与施氮量的关系

相同氮肥运筹方式下，对两年冬小麦、夏玉米平均产量与施氮量间的关系进行一元二次方程拟合，结果发现（表5），氮肥运筹方式T1下施氮量为169 kg·hm^{-2}时小麦产量较高（7 518 kg·hm^{-2}），施氮量为173 kg·hm^{-2}时玉米产量最高（11 757 kg·hm^{2}）。

3　讨　论

通常情况下，随着氮肥用量增加作物产量呈现逐渐增加的趋势，但在超过一定施氮量后产量增长缓慢或不再增加[20]。当前，有关北方小麦/玉米轮作体系氮肥最佳用量的研究，结果不尽相同。薛泽民等[21]在晋南地区小麦/玉米轮作田间试验研究认为，总氮量控制在420 kg·hm^{-2}情况下，小麦施氮231 kg·hm^{-2}和玉米施氮189 kg·hm^{-2}时可获得周年轮作最高产量。茹淑华等[22]在河北山前平原连续种植6年小麦/玉米定位试验结果表明，小麦最佳施氮量为250 kg·hm^{-2}，玉米最佳施氮量为180 kg·hm^{-2}。本研究中，随着施氮量增加，连续4季作物产量均呈现先增加后缓慢降低趋势，一次性基施控失尿素160 kg·hm^{-2}可起到控量节本、增产

表3 氮肥运筹对冬小麦夏玉米两周年累积氮肥效率的影响（2015—2017年）

Table 3 Effects of nitrogen application (mode and rate) on accumulative nitrogen use efficiency of winter wheat and summer maize in 2015—2017

氮肥运筹 N operation	总施氮量 N rate/(kg·hm^{-2})	氮素吸收 N uptake/(kg·hm^{-2})	NAE/(kg·kg^{-1})	NUE/(kg·kg^{-1})
CK	0	495g	–	–
T1	320	851f	39.1b	2.55a
	640	1 088a	26.8c	1.80b
	960	1 016cde	15.6e	1.06de
T2	320	809f	41.8a	2.67a
	640	1 027bcd	23.2d	1.61c
	960	968e	14.3e	1.04e
T3	320	827f	42.3a	2.65a
	640	1 046ab	24.6d	1.65c
	960	989cde	14.8e	1.15d
T4	320	824f	40.4ab	2.68a
	640	1 034bc	24.0d	1.63c
	960	983de	14.9e	1.05de

注：NAE, 氮肥农学效率；NUE, 氮素吸收效率 Note: NAE, Nitrogen agronomic efficiency; NUE, Nitrogen use efficiency

稳产以及提高氮素利用率的作用。一次性基施控失尿素实现氮肥减量稳产的可能原因如下：一是与控失肥本身在生产过程中添加“控失剂”有关，控失剂遇水形成一张“网”，养分被“锁”在土壤中，防止肥料流失，能供应作物全生长生育期内所需养分[23]；二是与播种前控失尿素一次性深施（15～20 cm）减少氮素损失有关[24]。本研究适宜施氮量略低于前人关于该区适宜氮肥用量的报道[25]，分析原因可能与试验环境、播种时期、氮肥种类以及氮肥运筹方式不同有关。

氮肥利用率的提高是降低农业生产投入和农田面源污染的重要举措，而缓/控氮肥适宜的运筹方式可以起到提高作物氮肥利用率的作用[25-26]。梁熠等[26]认为，在总施氮225 kg·hm^{-2}时控释尿素基施(60%)+尿素追施(40%)处理春玉米的农学效率高于一次性全部基施控释尿素处理。周丽平等[14]认为，一次性施用控失尿素的氮肥利用率较一次性施用普通尿素高。陈祥等[27]研究认为，50%基施+50%返青期追施尿素的氮肥利用率明显高于“一炮轰”传统施肥。于淑芳等[16]在山东恒台小麦玉米轮作试验研究认为，在80%正常施氮量下一次性基施控释尿素（小麦168 kg·hm^{-2}和玉米180 kg·hm^{-2}）可明显提高氮肥农学利用率和偏生产力。然而，也有减施10%控失尿素处理可显著降低农学效率、偏生产力的相反报道[28]。本研究中，随施氮量增加，累积氮肥利用率呈降低趋势，且在等量氮肥供应水平下施用控失尿素可明显提高氮肥利用率和氮素吸收效率，特别是在160 kg·hm^{-2}施氮水平下控失氮肥一次性基肥深施更有利于提高氮肥利用率和作物产量，说明基施控失尿素可能有利于提高籽粒氮素吸收转运[29]，而分期施用普通尿素、基施控失尿素加追施普通尿素以及基施普通尿素加追施控失尿素处理在冬小麦/夏玉米生育后期籽粒器官所需氮素营养未被有效地吸收利用。

有研究指出，减量20%基施缓/控尿素不仅能提高氮肥利用率，还可维持作物高产，降低肥料成本和劳动力成本，增加纯效益[18]。本试验条件下，等量施氮160 kg·hm^{-2}时，2015—2016年纯效益为一次性基施控失尿素（T1处理）较高，尿素基施加控失尿素追施（T4处理）次之；2016—2017年T1处理周年产量、周年产值及纯效益同样均显著高于其他施氮方式处理。由于评价经济效益不能单从单季作物或者单个轮作作物，应至少2个

表4　氮肥施用经济效益

Table 4　Economic benefit analysis of nitrogen application (mode and rate)

年份 Year	氮肥运筹 N operation	施氮量 N rate/ (kg·hm^{-2})	周年产量 Annual yield /(kg·hm^{-2})	周年产值 Annual output /(yuan·hm^{-2})	肥料成本 Fertilizer cost /(yuan·hm^{-2})	追肥人工 Labor input /(yuan·hm^{-2})	其他投入 Other input /(yuan·hm^{-2})	纯效益 Income /(yuan·hm^{-2})
2015—2016	CK	0	12 085d	22 239d	3 086	0	8 400	10 753f
	T1	80	16 659abc	29 997abc	4 012	0	8 400	17 585ab
		160	17 460a	31 169a	4 938	0	8 400	17 831a
		240	16 939abc	30 363abc	5 864	0	8 400	16 099bcd
	T2	80	16 169bc	29 066bc	3 707	840	8 400	16 119bcd
		160	16 498abc	29 579abc	4 327	840	8 400	16 012bcd
		240	15 911c	28 563c	4 948	840	8 400	14 375de
	T3	80	16 067c	28 841c	3 890	840	8 400	15 711cde
		160	16 623abc	29 755abc	4 694	840	8 400	15 821cd
		240	16 081c	28 783c	5 497	840	8 400	14 046e
	T4	80	16 079c	28 638c	3 829	840	8 400	15 569cde
		160	17 181ab	30 703ab	4 572	840	8 400	16 891abc
		240	16 476ab	29 281bc	5 314	840	8 400	14 727de
2016—2017	CK	0	8 841f	17 348e	3 086	0	8 400	5 862e
	T1	80	18 129de	36 590cd	4 012	0	8 400	24 187cd
		160	20 629a	41 297a	4 938	0	8 400	27 959a
		240	18 962cd	38 155bc	5 864	0	8 400	23 891cd
	T2	80	18 409cde	36 835cd	3 707	840	8 400	23 888cd
		160	19 253bc	38 438bc	4 327	840	8 400	24 871bc
		240	18 609cde	37 214cd	4 948	840	8 400	23 026cd
	T3	80	18 386cde	36 733cd	3 890	840	8 400	23 603cde
		160	20 026ab	40 057ab	4 694	840	8400	26 123b
		240	19 028cd	38 195bc	5 497	840	8400	23 458cd
	T4	80	17 766e	35 578d	3 829	840	8400	22 509d
		160	19 104cd	38 365bc	4 572	840	8400	24 553bc
		240	18 801cd	37 748c	5 314	840	8400	23 194cd
	平均Mean	80	17 208c	32 785c	3 860			19 896b
		160	18 347a	34 620a	4 633			21 258a
		240	17 601b	33 538b	5 406			19 102b
	T1		18 130a	34 595a	4 938			21 259a
	T2		17 475b	33 283b	4 327			19 175b
	T3		17 702b	33 727b	4 694			19 794b
	T4		17 568b	33 386b	4 572			19 574b

表5 两年平均冬小麦/夏玉米产量与施氮量的关系

Table 5 Relationship between winter wheat and summer maize yield and nitrogen rate in two years

作物 Crops	氮肥运筹 N operation	产量—施氮量响应曲线 x, 施氮量; y, 籽粒产量 Quadratic response function of grain yield response to N rate x, N rate/(kg·hm^{-2}); y, grain yield/(kg·hm^{-2})	最高产量施氮量 N rate for maximum grain yield/(kg·hm^{-2})	最高产量 Maximum grain yield/ (kg·hm^{-2})	决定系数 Coefficient of determination, R^2
冬小麦 Winter wheat	T1	$y = -0.115\ 8x^2 + 39.25x + 4\ 193$	169	7 518	0.794**
	T2	$y = -0.107\ 3x^2 + 35.38x + 4\ 215$	165	7 131	0.748**
	T3	$y = -0.105\ 4x^2 + 35.84x + 4\ 183$	170	7 230	0.801**
	T4	$y = -0.101\ 4x^2 + 34.86x + 4\ 152$	172	7148	0.818**
夏玉米 Summer maize	T1	$y = -0.181\ 1x^2 + 62.68x + 6\ 333$	173	11 757	0.806**
	T2	$y = -0.18x^2 + 60.12x + 6\ 504$	167	11 524	0.766**
	T3	$y = -0.188\ 9x^2 + 62.747x + 6\ 470$	166	11 681	0.780**
	T4	$y = -0.170\ 7x^2 + 58.86x + 6\ 487$	172	11 560	0.811**

注：**表示相关性达到P=0.01极显著水平Note: "**" indicates that the correlation reaches P=0.01 extremely significant level

轮作周期以上进行评价[30]。因此，综合考虑两年的平均纯效益、不确定的地力因素、冬小麦夏玉米最佳经济施氮量、粮食价格及肥料价格，结合氮肥与产量模拟曲线方程，认为适合当前本地区的适宜施氮量在160 ~ 173 kg·hm^{-2}范围，施氮方式为一次性基施控失尿素处理。此外，考虑到当前农村劳动力向城市转移，农村仅剩下留守老人和妇女务农，以及新型农业经营主体的大量涌现，急需省时省力的简约化肥料施用技术[22]的时代背景，本研究在160 ~ 173 kg·hm^{-2}施氮范围内一次性基施控失尿素的施肥方式迎合了国家当前对农业的"两减"（减肥减药）中"减氮"目标，同时满足了农业对轻简化栽培技术的需求，具有一定的应用前景。

4 结 论

随施氮量增加，连续两周年冬小麦/夏玉米籽粒产量均呈先增加后缓慢降低的趋势，其中以160 ~ 173 kg·hm^{-2}一次性基施控失尿素处理增产增收效果最好。与农户习惯施肥（尿素一基一追）相比，一次性基施控失尿素主要通过节约施肥人工成本和小幅增加作物产量进而起到控量节本、增产增效及提高氮素利用率的作用，迎合当前提倡的轻简化施肥技术需求，可作为潮土区黄淮平原较适宜的集约化农田氮肥运筹方式。

参 考 文 献

[1] 裴瑞杰，袁天佑，王俊忠，等. 施用腐殖酸对夏玉米产量和氮效率的影响. 中国农业科学，2017，50（11）：2189—2198
Pei R J, Yuan T Y, Wang J Z, et al. Effects of application of humic acid on yield, nitrogen use efficiency of summer maize（In Chinese）. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50（11）: 2189-2198

[2] 靳海洋，谢迎新，刘园，等. 冬小麦上短控释期尿素的适宜施用量与施用方法研究. 植物营养与肥料学报，2016，22（2）：542—549
Jin H Y, Xie Y X, Liu Y, et al. Study on the suitable application rate and method of urea with short controlled-release period in winter wheat（In Chinese）. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22（2）: 542—549

[3] 纪德智，王端，赵京考，等. 不同氮肥形式对春玉米产量、土壤硝态氮及氮素利用的影响. 玉米科学，2015，23（2）：111—116，123
Ji D Z, Wang D, Zhao J K, et al. Effects of different nitrogen forms on spring maize yield, N use efficiency and soil nitrate nitrogen（In Chinese）. Journal of Maize Sciences, 2015, 23（2）: 111—116, 123

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2016. 北京：中国农业出版社，2016
National Bureau of Statistics of People's Republic of China. China statistical yearbook 2016（In Chinese）. Beijing: China Agriculture Press, 2016

[5] Zhao C S，Hu C X，Huang W，et al. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China. Journal of Soils and Sediments，2010，10（1）：9—17

[6] Wang Y C，Wang E L，Wang D L，et al. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2010，86（1）：105—119

[7] 杨宪龙，路永莉，同延安，等. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量. 生态学报，2014，34（21）：6115—6123
Yang X L，Lu Y L，Tong Y A，et al. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain，Shaanxi Province（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2014，34（21）：6115—6123

[8] 杨帆，孟远夺，姜义，等. 2013年我国种植业化肥施用状况分析. 植物营养与肥料学报，2015，21（1）：217—225
Yang F，Meng Y D，Jiang Y，et al. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013（In Chinese）. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2015，21（1）：217—225

[9] 戴健，王朝辉，李强，等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响. 土壤学报，2013，50（5）：956—965
Dai J，Wang C H，Li Q，et al. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2013，50（5）：956—965

[10] 巨晓棠，谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. 植物营养与肥料学报，2014，20（4）：783—795
Ju X T，Gu B J. Status-quo，problem and trend of nitrogen fertilization in China（In Chinese）. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2014，20（4）：783—795

[11] 刘宁，孙振涛，韩晓日，等. 缓/控释肥料的研究进展及存在问题. 土壤通报，2010，41（4）：1005—1009
Liu N，Sun Z T，Han X R，et al. Research progress and existing problems on slow/controlled release fertilizers（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2010，41（4）：1005—1009

[12] Zhang S G，Shen T L，Yang Y C，et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice. Journal of Environmental Management，2018，220（10）：191—197

[13] 侯红乾，冀建华，刘益仁，等. 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响. 土壤，2018，50（1）：43—50
Hou H Q，Ji J H，Liu Y R，et al. Effects of slow/controlled-release fertilizer on grain yield，N uptake and soil N balance in double Cropping rice（In Chinese）. Soils，2018，50（1）：43—50

[14] 周丽平，杨俐苹，白由路，等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响. 植物营养与肥料学报，2016，22（6）：1449—1457.
Zhou L P，Yang L P，Bai Y L，et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field（In Chinese）. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2016，22（6）：1449—1457

[15] 张小翠，戴其根，胡星星，等. 不同质地土壤下缓释尿素与普通尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响. 作物学报，2012，38（8）：1494—1503
Zhang X C，Dai Q G，Hu X X，et al. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures（In Chinese）. Acta Agronomica Sinica，2012，38（8）：1494—1503

[16] 于淑芳，杨力，张民，等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响. 农业环境科学学报，2010，29（9）：1744—1749
Yu S F，Yang L，Zhang M，et al. Effects of controlled-release urea on wheat-corn′s yield and soil nitrogen（In Chinese）. Journal of Agro-Environment Science，2010，29（9）：1744—1749

[17] 蒋迁，李磊，张凤路，等. 控失肥与普通化肥对夏玉米养分积累与生长发育的影响. 华北农学报，2016，31（4）：199—205
Jiang Q，Li L，Zhang F L，et al. Effects of loss control and conventional fertilizer on nutrient accumulation and growth and development（In Chinese）. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2016，31（4）：199—205

[18] 孙晓，景建元，吕慎强，等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果. 中国生态农业学报，2017，25（6）：848—855
Sun X，Jing J Y，Lü S Q，et al. Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands（In Chinese）. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2017，25（6）：848—855

[19] 白珊珊，万书勤，康跃虎，等. 不同控失肥对冬小麦产量和肥料农学效率的影响. 华北农学报，2017，32

（1）：149—155
Bai S S，Wan S Q，Kang Y H，et al. Effect of Different Loss-control fertilizers on winter wheat yield and agronomic nutrient efficiency（In Chinese）. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2017，32（1）：149—155

［20］ Zhang Y T，Wang H Y，Lei Q L，et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain. Science of the Total Environment，2018，550（7677）：1173—1183

［21］ 薛泽民，要娟娟，赵萍萍，等. 氮肥分配对冬小麦/夏玉米轮作产量和氮肥效率的影响. 中国土壤与肥料，2012（1）：59—63，102
Xue Z M，Yao J J，Zhao P P，et al. Influence of nitrogen fertilizer distribution on production and nitrogen use recovery within the rotation of winter wheat and summer maize（In Chinese）. Soil and Fertilizer Sciences in China，2012（1）：59—63，102

［22］ 茹淑华，张国印，孙世友，等. 施氮量对冬小麦—夏玉米轮作体系中土壤硝态氮分布和累积的影响. 华北农学报，2011，26（S2）：85—89
Ru S H，Zhang G Y，Sun S Y，et al. Effect of nitrogen application rate on nitrate nitrogen distribution and accumulation in soils in wheat-maize rotation system（In Chinese）. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2011，26（S2）：85—89

［23］ 裴亮，孙莉英，麦荣幸，等. 新型控失型肥料应用推广中存在的问题与对策研究. 环境科学与管理，2017，42（1）：87—90
Pei L，Sun L Y，Mai R X，et al. Problems and countermeasure for agricultural application of new Loss-controlled fertilizer（In Chinese）. Environmental Science and Management，2017，42（1）：87—90

［24］ 祁有玲，张富仓，李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响. 应用生态学报，2009，20（10）：2399—2405
Qi Y L，Zhang F C，Li K F. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake. Chinese Journal of Applied Ecology，2009，20（10）：2399—2405

［25］ Cui Z L，Zhang H Y，Chen X P，et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature，2018，555（7696）：363—366

［26］ 梁熠，康建宏，朱荣，等. 控释常规尿素配施对雨养区春玉米产量及氮素利用的影响. 水土保持学报，2017，31（6）：237—241，278
Liang Y，Kang J H，Zhu R，et al. Effects of mixed applying controlled–release urea and conventional urea on yield nitrogen utilization of spring maize in rain fed region（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2017，31（6）：237—241，278

［27］ 陈祥，同延安，亢欢虎，等. 氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响. 植物营养与肥料学报，2008，14（3）：450—455
Chen X，Tong Y A，Kang H H，et al. Effect of postponing N application on the yield，apparent N recovery and N absorption of winter wheat（In Chinese）. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2008，14（3）：450—455

［28］ 李志国，张润花，陈防，等. 控失尿素对水旱轮作下水稻产量和氮素利用效率的影响. 中国土壤与肥料，2018（1）：23—27
Li Z G，Zhang R H，Chen F，et al. Effect of controlled release urea combined application with common urea on yield and nitrogen utilization efficiency of rice in paddy-upland rotation（In Chinese）. Soil and Fertilizer Sciences in China，2018（1）：23—27

［29］ 王晓琪，朱家辉，陈宝成，等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响. 水土保持学报，2016，30（4）：178—182
Wang X Q，Zhu J H，Chen B C，et al. Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2016，30（4）：178—182

［30］ 陈素英，张喜英，邵立威，等. 华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较. 中国生态农业学报，2015，23（5）：535—543
Chen S Y，Zhang X Y，Shao L W，et al. A comparative study of yield，cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed condition in the North China Plain（In Chinese）. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2015，23（5）：535—543

Effect of Nitrogen Application on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat and Summer Maize in Fluvo-aquic Soil

ZHANG Weina[1]　LIU Yujuan[1]　DONG Cheng[1]　XIE Yingxin[1†]　MA Dongyun[1]　ZHAO Xu[2†]
YUE Yanjun[3]　WANG Chenyang[1]　GUO Tiancai[1]

（1 *College of Agronomy*，*Henan Agricultural University/National Engineering Research Center for Wheat/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops*，*Zhengzhou* 450002，*China*）

（2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*，*Institute of Soil Science*，*Chinese Academy of Sciences*，*Nanjing* 210008，*China*）

（3 *Henan Xinlianxin Fertilizer Co. Ltd*，*Xinxiang*，*Henan* 453730，*China*）

Abstract　【Objective】The aim of this study is to explore reasonable nitrogen (N) fertilizer management mode in Fluvo-aquic soil of the Huanghuai Plain, in an attempt to provide certain theoretical and technical basis for accomplishing the goal of zero growth in consumption of chemical fertilizer in China.【Method】A stationary field experiment was carried out in Fengqiu of Xinxiang, Henan Province, a typical grain crop growing region of China, from October 2015 to September 2017. Then experiment was designed to have four treatments on N fertilizer application, concerning mode, i.e. Treatment T1 (application of loss control urea once as basal), Treatment T2 (application of conventional urea split as basal and topdressing), Treatment T3 (application of loss control urea as basal and conventional urea as topdressing), and Treatment T4 (application of conventional urea as basal and loss control urea as topdressing), and four N application rates for each treatment, i.e. (0, 80, 160 and 240 $kg \cdot hm^{-2}$). All the treatments, except Treatment T1, received 60% the fertilizer as basal and 40% as topdressing at the jointing stage of winter wheat and at the flaring stage of summer maize.【Result】Results showed that average grain yield per crop, average annual yield, and average annual economic benefit increased first and then decreased with rising N application rate, but average nitrogen use efficiency (NUE) declined gradually all the way. Among the treatments, Treatment T1 160 $kg \cdot hm^{-2}$ in rate was the highest in yield and economic benefit. In addition, it was also found that Treatment T1 varied sharply from all the other three (T2, T3 and T4), which did not between themselves, in wheat grain yield, annual yield, annual crop output and annual economic benefit. Furthermore, analysis of the economic benefits of the two years showed that, Treatment T1 was lower in labor cost than all the others, the same in N application rate, because it saved the labor for topdressing, and moreover it was relatively high in yield. So among the treatments, Treatment T1 was relatively higher in, economic benefit.【Conclusion】Based on the equation of analog curve between yield and N rate, it is found that the application of loss control urea 160 ~ 173 $kg \cdot hm^{-2}$ in application rate, is relatively suitable to the studied area where rural labor is quite limited, and hence has a vast prospect of extrapolation.

Key words　Loss control urea; Winter wheat; Summer maize; Yield; Nitrogen use efficiency; Economic benefit

（责任编辑：陈荣府）