

控释肥料在华北潮土小麦–玉米轮作体系中的施肥效应^①

梁 钢^{1,2}, 梁林洲¹, 董晓英¹, 沈仁芳^{1*}

(1 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; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:通过大田试验,研究了华北潮土区控释肥料对小麦–玉米轮作体系下作物产量、氮素平衡及土壤氮素残留的影响。结果表明:相比常规施肥处理(CK),减氮 20% 并配施 20% 控释肥处理(CRF20%)在玉米季的产量和总生物量都无显著下降,而在麦季时则有一定减产,但产量高于单一减氮 20% 处理(–N20%)。由于无需追肥,CRF20% 处理在玉米季的相对收益分别比 CK 和 –N20% 处理多 581 和 1 896 元/hm²,在麦季时则和 CK 处理基本持平。CRF20% 处理能减少氮素的盈余量,维持氮素输入和输出的表观平衡,特别是在玉米季中,氮素的盈余仅为 4.6 kg/hm²。同时,玉米–小麦季后 CRF20% 处理下的耕层土壤中可维持较高的氮素水平,减少氮素的损失。

关键词:小麦–玉米轮作;控释肥料;氮肥减施;经济收益;氮素平衡

中图分类号:S143.1

华北平原是我国重要的粮食生产基地,该区以夏玉米–冬小麦轮作为主。随着化肥工业的发展及农民对最大产量的追求,超量施肥的现象屡见不鲜。有调查发现该地区年度平均施氮量高达 545 kg/hm²,不仅肥料的利用率低下,还严重破坏了生态环境^[1–2],特别是氮素淋溶导致的地下水污染^[3],给农业可持续发展带来了很大的威胁。另外,该地区生产上主要采用基肥和追肥分次施用的氮肥施用模式^[5],对目前农村日益缺乏的劳动力来说是一种负担。

近年来控释肥料(controlled-release fertilizer, CRF)的良好效果被人们逐渐发掘出来,其能使养分释放变慢,肥效稳而持久,减少氮素挥发、淋失及反硝化脱氮损失,提高肥料利用率,满足作物生育期对养分的需求,减少施肥次数,节省劳动力^[6–7]。尽管国内外已在控释肥料的研究、开发和应用上取得了较大的进展,但目前控释肥的生产应用仍然有许多问题有待解决。特别是在我国农业发展的关键阶段,随着我国对农产品产量提升与质量保障的重视,以及对于环境友好型生产模式的要求,肥料的创新升级就显得更为重要^[8]。

目前控释肥已经在小麦、玉米生产上的应用有了

一定研究,通过控释肥的施用能在一定程度上减少化肥的施用,提高作物的产量^[9]。而如何让控释肥在华北小麦–玉米轮作体系中起到高效的作用更是亟需解决的问题。本研究根据实地的调查,结合当地的施肥情况,采取减氮同时配施一定比例控释肥的方法,通过对比不同施肥模式下作物的经济效益、肥料效益和环境效益,探索控释肥在华北潮土地区玉米–小麦轮作生产中一次性减氮施肥的效果。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验地位于河南省封丘县城关乡汪寨村(35.02°N, 114.43°E),该区为暖温带大陆性季风气候,年均气温 14℃,年均湿度 68%,年均降雨 656.3 mm,年蒸发量 1 748.4mm,6 至 9 月降水量最多,占全年降水的 70% 左右。试验区总面积 0.63 hm²,土壤类型为潮土。试验区土地利用类型为多年小麦–玉米轮作,试验前土壤的基本理化性质如表 1 所示。

供试的玉米品种为郑单 958,种植密度为 6.5 万株/hm²,小麦品种为矮抗 58。试验时间玉米季为 2013 年 6 月至 2013 年 9 月,麦季为 2013 年 10 至 2014 年 6 月。

①基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB127401)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX2-EW-N-08)资助。

* 通讯作者(rfshen@issas.ac.cn)

作者简介:梁钢(1989—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: liangg08@163.com

表 1 试验点土壤基本理化性质
Table 1 Basic properties of studied soils

pH	电导率(mS/cm)	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
8.07	2.14	10.1	84.5	9.04	140

1.2 试验设计与方法

试验设置 3 个施肥处理, 分别为: 常规施肥(CK)、减氮处理(-N20%)和控释肥处理(CRF20%, 即减氮 20%, 并用 20% 控释肥替代部分普通尿素), 其中 CK 和 -N20% 处理中施氮量的 20% 于作物拔节期作为追肥施用, CRF20% 处理的全部氮肥与磷钾肥一次性基肥施用。根据土壤的基础肥力, 设置玉米季和麦季的施肥量见表 2, 两季的施肥量相

同, 每个大区的面积约为 0.2 hm²。试验中所选用的控释肥由中国科学院南京土壤研究所研制, 为控释期 90 天的包膜尿素(其价格约为普通尿素的 4 倍, 因此配施比例选取为 20%)。其他肥料为复合肥(NPK 含量比为 15:15:15)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 607 g/kg)及普通尿素(N 含量 467 g/kg)。作物生产中的灌溉、除草、治虫等田间管理按照当地农民习惯进行。

表 2 试验所选用肥料及施肥量(kg/hm²)
Table 2 Fertilizer used in the experiment and it's consumption

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	复合肥	过磷酸钙	尿素	控释肥
CK	200(基)+50(追)	150	105	700	281	315.2	-
-N20%	160(基)+40(追)	150	105	700	281	206.5	-
CRF20%	160+40(控释肥)	150	105	700	281	119.6	86.9

玉米测产方法: 将每个大区从南到北分为 4 个小区, 每个小区随机采集 5 行, 每行 20 颗, 共 100 颗玉米, 脱粒烘干后进行产量统计; 每个小区随机取 10 株玉米植株, 粉碎烘干, 进行秸秆生物量统计。

小麦测产方法: 将每个大区从南到北分为 4 个小区, 每个小区随机取 5 个 4 m² 的样方, 共 20 个样点, 采集小麦完整植株, 脱粒后烘干, 分别对籽粒产量和秸秆生物量进行统计。

测产后分别从每个小区中取玉米、小麦的秸秆和籽粒样品进行全氮含量分析, 具体方法为: 秸秆和籽粒 105℃ 杀青 0.5 h 后于 70℃ 烘干至恒重, 粉碎均匀, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 进行消煮, 全自动定氮仪测量其全氮值。

麦季结束后, 将每个大区从南到北分为 4 个小区, 每个小区按 S 型取 5 点耕层(0~20 cm) 土壤样品, 混合均匀作为一个待测样品, 进行氮素水平分析, 土壤碱解氮和硝态氮测定参照鲁如坤的方法^[10]: 土样风干后, 碱解氮的测定选用碱解扩散法; 硝态氮测定选用 KCl 浸提, 元素分析仪自动检测。

1.3 数据处理及分析

氮素表观平衡 = N 投入量 - N 吸收量; 总收益 = 产值 - 肥料成本; 相对收益 = 总收益 - 追肥劳动力成本。

试验数据均采用 Excel 2003 软件进行处理, SPSS18.0 进行单因素方差分析和多重比较, Sigma Plot 12.5 进行作图。

2 结果与分析

2.1 三种施肥处理对小麦-玉米轮作体系产量的影响

从表 3 可以发现, 在玉米季, 与常规施肥处理(CK) 相比, -N20% 处理的籽粒、秸秆生物量和总生物量均显著下降, 分别下降了 10.2%、8.3% 和 9.0%; 而 CRF20% 处理在减氮 20% 后产量却没有显著的降低。CRF20% 处理与 CK 处理相比, 其籽粒、秸秆和总生物量仅分别下降了 1.4%、1.8% 和 1.7%, 与 -N20% 处理相比, 其产量显著增加。因此在玉米季用 20% 控释肥替代部分普通尿素能在减氮 20% 时维持较高的产量水平, 其原因可能是在 2 个氮素利用关键期(大喇叭口和抽雄), 控释肥释放的氮素能使土壤中硝态氮含量均高于同等施氮量下普通尿素处理^[11], 促进作物对养分的吸收。孙克刚等^[12]也在研究中发现控释尿素比普通尿素用量减少 1/3 纯氮量时, 小麦、玉米作物产量并不下降。而李伟等^[13]还发现施用控释肥后, 玉米的叶净光合速率、叶绿素含量以及硝酸还原酶活性均较高, 籽粒灌浆启动较快, 灌浆活跃期延长, 充分说明了控释肥的良好效应。

从表 3 中还可以看出, 在麦季, -N20% 处理的籽粒、秸秆生物量和总生物量与 CK 处理相比也都显著降低, 分别下降 10.0%、13.8% 和 12.5%。而

表 3 玉米和小麦的籽粒产量和生物量
Table 3 The grain yield and biomass of maize and wheat

处理	玉米季			麦季		
	籽粒产量 (kg/hm ²)	秸秆生物量 (kg/hm ²)	总生物量 (kg/hm ²)	籽粒产量 (kg/hm ²)	秸秆生物量 (kg/hm ²)	总生物量 (kg/hm ²)
CK	7 268 a	11 144 a	18 412 a	5 224 a	8 980 a	14 205 a
-N20%	6 524 b	10 224 b	16 748 b	4 703 b	7 733 b	12 435 b
CRF20%	7 163 a	10 944 a	18 107 a	4 896 ab	8 286 b	13 182 b

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著，下同。

CRF20% 处理的籽粒产量与 CK 处理比下降不显著，秸秆生物量和总生物量的下降显著，三者较 CK 处理分别下降了 6.3%、7.7% 和 7.2%，大于玉米季的下降幅度。而 CRF20% 处理下的麦季产量较 -N20% 处理没有显著提升。说明本次试验中的 CRF20% 处理在麦季的施肥效果没有玉米季明显，其原因可能是由于麦季的时间较玉米季长，控释肥的控释期不能延续小麦的整个生育期，前期肥料的投入损失较多。但是与 -N20% 处理相比，CRF20% 处理在同量施氮量下，产量仍有一定的提升，且不需追肥，简化了作物生产过程，仍有较好的应用价值。

2.2 三种施肥处理对小麦-玉米轮作体系氮素平衡的影响

表 4 为不同处理下玉米季和麦季的氮素利用情况和表观平衡水平。表 4 显示，在玉米季，不同施肥处理下的玉米籽粒和秸秆含氮量差异不大，均为 CK 处理略大于两个减氮 20% 的处理；CK 处理的氮吸

收总量最高，为 203 kg/hm²，CRF20% 处理的氮吸收总量为 195 kg/hm²，比 CK 处理仅降低了 3.7%，而 -N20% 处理的氮吸收总量降低显著，其值仅为 179 kg/hm²。由于不同处理氮素投入量不同，通过计算不同处理的氮素表观平衡值可以在一定程度上掌握作物生产中的环境风险。从表 4 的结果可以看出，玉米季，CK 处理的氮素表观平衡值为 47.0 kg/hm²，在 3 个处理中最高，说明在传统施肥模式下会残留较多氮素，对生态环境的风险较大；-N20% 处理由于减少了氮素的投入量，玉米收获后氮素的表观平衡值较普通施肥低，但该处理会使玉米的产量下降，效益降低，其可行性不大；而 CRF20% 处理氮表观平衡值仅为 4.6 kg/hm²，基本上达到了氮素输入和输出的表观平衡。司东霞等^[14]在研究控释肥在玉米上的应用时也发现选用聚酯包膜尿素可使氮素表观损失减少 19 kg/hm²，显示了控释肥的优越性。

表 4 玉米季和麦季氮素表观平衡分析
Table 4 Apparent equilibrium of nitrogen in maize season and wheat season

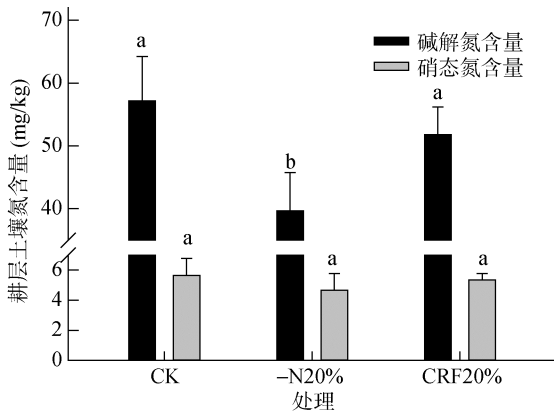
生长季节	处理	生物量(kg/hm ²)		N 含量(g/kg)		N 吸收量(kg/hm ²)		N 吸收总量 (kg/hm ²)	N 投入量 (kg/hm ²)	N 表观平衡 (kg/hm ²)
		籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆			
玉米季	CK	7 268	11 144	13.3	9.5	96.7 a	106 a	203 a	250	47.0
	-N20%	6 524	10 224	12.8	9.3	83.7 b	95.1 b	179 b	200	21.2
	CRF20%	7 163	10 944	12.9	9.4	92.7 a	103 ab	195 a	200	4.6
麦季	CK	5 224	8 980	19.2	10.7	100 a	96.4a	197 a	250	53.1
	-N20%	4 703	7 733	17.8	10.4	83.5 b	80.3 b	164 b	200	36.2
	CRF20%	4 896	8 286	18.5	10.6	90.6 b	87.7 ab	178 b	200	21.6

麦季的氮素平衡结果与玉米季相似，不同处理对小麦籽粒和秸秆氮含量影响都不大。氮素的吸收总量也是 CK 处理最大，达到了 197 kg/hm²，分别比 -N20% 和 CRF20% 处理高 16.8% 和 9.4%，且达到了 $P<0.05$ 显著性水平；而 CRF20% 处理下的氮吸收总量比 -N20% 处理高 14 kg/hm²，说明在等量氮素的施用下，添加一定比例的控释肥，能增加小麦的氮

素吸收量。从麦季的氮素表观平衡结果来看，3 个施肥处理麦季的氮表观平衡值从大到小分别为 CK、-N20% 和 CRF20%，其绝对值都高于玉米季，特别是 CRF20% 处理的麦季氮素表观平衡值为 21.6 kg/hm²，虽低于其他两个处理，但较玉米季明显增高。其主要原因可能是麦季时间长，小麦冬季生长缓慢，在生长前期氮素的吸收量较少，有较多的氮素损失。

2.3 三种施肥处理对小麦-玉米轮作体系耕层土壤氮含量的影响

三种处理下小麦收获期耕层土壤中的碱解氮和硝态氮含量如图 1 所示。CK 处理的耕层土壤碱解氮含量最高，为 57.2 mg/kg，因为该处理下氮肥的投入量最大，导致残留多。-N20% 处理的耕层土壤碱解氮含量为 39.7 mg/kg，其值比其他 2 个处理要显著降低，说明单独减少氮肥投入会导致土壤肥力水平的下降，影响后季作物的正常生产。而 CRF20% 处理下，经过一个年度的耕作，耕层土壤中的碱解氮含量为



(柱图上方不同小写字母表示不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著)

图 1 麦季后耕层土壤氮含量

Fig. 1 Nitrogen content in topsoil after wheat harvested

表 5 玉米季和麦季经济效益分析

Table 5 Economic benefits in maize season and wheat season

处理	玉米季				麦季			
	产值 (元/hm ²)	肥料成本 (元/hm ²)	总收益 (元/hm ²)	相对收益 (元/hm ²)	产值 (元/hm ²)	肥料成本 (元/hm ²)	总收益 (元/hm ²)	相对收益 (元/hm ²)
CK	14 537	4 092	10 445	9 445	13 061	4 092	8 969	7 969
-N20%	13 047	3 918	9 130	8 130	11 756	3 918	7 838	6 838
CRF20%	14 326	4 301	10 026	10 026	12 240	4 301	7 939	7 939

注：作物售价：玉米 2 元/kg，小麦 2.5 元/kg；肥料价格：尿素 1.6 元/kg，过磷酸钙 2.8 元/kg，复合肥 4 元/kg，控释肥 6 元/kg；追肥劳力成本：1000 元/hm²。相对收益=总收益-追肥劳动力成本。

由于 CRF20% 处理的施肥模式省去了追肥的步骤，因此降低了劳力成本。所以在对比不同处理收益时需要考虑追肥的劳动力成本。根据目前的经济发展水平以及劳动力的平均成本，本研究拟定的追肥劳动力成本为 1 000 元/hm²，从而计算得到除去追肥劳力之后的相对收益。从表 5 中可以看出，玉米季中 CRF20% 处理的相对效益最佳，为 10 026 元/hm²，比 CK 和 -N20% 处理分别多 581 和 1 896 元/hm²。而在麦季的相对收益中 CRF20% 处理和 CK 处理差异不大，都比 -N20% 处理大 1 100 元/hm² 左右，说明 CRF20% 处理下不会使得实际生产中的收益减少。

51.8 mg/kg，维持在 CK 处理水平。虽然其氮肥的施用量减少了 20%，但是用 20% 的控释肥代替部分普通尿素能很好地维持土壤中碱解氮水平，确保作物的正常生产条件。

在两季作物耕作后，耕层土壤中的硝态氮含量没有出现显著性变化，从绝对值来看，CK 处理下的耕层土壤中硝态氮含量最高，-N20% 处理下最低。控释肥能够使肥料呈现 S 型释放，在作物的生长期中更好地被作物吸收，减少肥料的损失，在减氮施肥下还能同时较好地维持耕层土壤中的氮素水平，减少氮素向下层土壤淋溶的风险，不仅可保证作物的正常生产，还降低施肥对生态环境的影响。

2.4 三种施肥处理对小麦-玉米轮作体系经济效益的影响

从表 5 可以看出，试验中 CK、-N20% 和 CRF20% 处理的肥料成本分别为 4 092、3 918 和 4 301 元。由于控释肥的价格较高，CRF20% 处理的肥料成本最高，这也是制约控释肥施用比例的一个重要因素。从总收益上来看，玉米季中 CK 处理最高，为 10 445 元/hm²，比 CRF20% 处理高 419 元/hm²，比 -N20% 处理高 1 315 元/hm²。在麦季的总收益中同样是 CK 处理最高，为 8 969 元/hm²，而 -N20% 和 CRF20% 处理下的总收益都比 CK 处理少 1 000 元/hm² 左右。

3 讨论与结论

3.1 控释肥在减氮下的稳产作用以及经济效益

控释肥作为新型肥料，因其独特的释放特性，已有越来越多的学者开始研究其在小麦和玉米生产中的应用效果。如汪强等^[15]发现在潮土区的小麦生产中，无机包膜缓/控释肥料与尿素基施相比能增产 10.03% ~ 11.17%；李丙奇等^[16]在潮土区进行田间试验，发现控释肥与其他肥料相比显著增加了玉米的产量，利润也是最高，同时减少了氮肥的施用量。而本次研究中得到 CRF20% 处理能够在减氮 20% 下在

玉米季中能维持常规产量,而在麦季中使得产量较 CK 处理有所下降,但相比同等氮肥施用量的 -20%N 处理,CRF20% 处理的增产效应还是比较明显的。在经济效益方面,控释肥配施下的一次施肥省去了追肥环节,在玉米季的相对效益大于常规施肥处理,在麦季也能够与常规施肥处理相持平。

在控释肥配比方面,李伟等^[17]发现在小麦生产中控释肥配比在 50% 时效果最佳,夏伟光等^[18]也同样发现冬小麦投入控释尿素和普通尿素 1:1 配比时产量和氮素利用最佳。而本次试验中考虑到了肥料成本,选用了 20% 的控释肥配施量,比较符合未来实际大田生产时的投入量,此配施量可能导致了麦季控释肥的稳产效果不理想。同时本次试验选取的控释肥的控释期为 90 天,符合整个玉米季的生长期,而小麦生长周期较长,且麦季时土壤温度较低,也会在一定程度上影响控释肥的养分释放效率,可能导致了其在麦季上的增产效应不如玉米季明显^[19]。由于在麦季 CRF20% 处理的稳产效果不是十分理想,在实际的生产中,可以改变氮肥的减施量及配施比,并通过选取控释期更长,释放更稳定的控释肥,以最终达到稳产、提高经济效益的目标。

3.2 控释肥提高氮素的利用效率,减少环境风险

廖松等^[20]通过采用电导法和好气培养连续取样法研究发现尿素包膜后显著抑制了其水解的速度,从而起到保肥的效果。在生产中使用控释肥,不仅仅能增加作物的经济效益,同时因为其肥效稳定而持久,能减少氮素挥发、淋失及反硝化脱氮损失,从而提高肥料利用率^[21]。有研究发现通过控释肥的配施在水稻生产中可以减少氮肥的施用,提高氮肥利用率以及氮收获指数^[22-23]。本研究发现在减氮 20% 时,通过配施 20% 控释肥,小麦-玉米轮作体系可获得氮素输入与输出更好的表现平衡水平,减少氮肥的损失,特别是在玉米季中使得氮素的盈余量仅为 4.6 kg/hm² (表 4),使得输入土壤中的氮素更好地以植物吸收的方式输出,确保土壤的氮素循环处于一个相对平衡稳定的水平。

于淑芳等^[24]在研究包膜控释尿素对小麦-玉米轮作的影响时,发现施用控释尿素能增加土壤耕层(0~20 cm)的氮素积累,减少氮素向土壤深层移动的数量。衣文平等^[25]的研究也发现,施用控释肥不仅可促进作物增产、氮肥利用率提高,还可使土壤中的硝态氮总累积量有一定提高。本研究则发现在减氮 20% 的情况下,20% 控释肥配施处理(CRF20%)的耕层土壤碱解氮含量显著高于单一减氮 20% 处理(-N20%),且与 CK 处理相比差异较小。由于 CRF20% 处理可

在耕层中维持较好的氮素水平,说明控释肥的施用使得氮素向下层土壤的迁移量减少,降低了浅层地下水氮素污染的风险。此外也有研究发现通过控释肥的配施还可以减少作物生长期 N₂O 排放^[26]。

3.3 研究结论和展望

本研究发现,在华北潮土区小麦-玉米轮作生产体系中,通过减氮 20% 并配施 20% 的控释肥,可在玉米季维持正常的产量水平,而在麦季中略有减量。减氮并配施控释肥的一次性施肥不仅减少了氮素投入量,还可使潮土区小麦-玉米轮作体系的氮素输入和输出更趋于表现平衡,同时较好地维持土壤耕层中的氮素水平,减少氮素向土壤下层的迁移,具有较好的环境效益,在大田生产中具有较好的应用前景,且符合我国肥料的发展方向^[27]。同时,控释肥配施下的一次施肥省去了追肥环节,减少了追肥的劳力投入,能获得较佳的经济效益。

本研究中的控释肥处理在麦季应用效果整体上不如在玉米季的突出,由此在选用控释肥时要注意其本身的性质,不能为了盲目追求氮素的效益而大量减少氮素的投入,导致作物的减产。在控释肥的生产上要提高制作的工艺,减少生产的成本,研制出控释期更长更稳定,适合不同作物和不同土壤类型的控释肥^[28-29]。总之,控释肥的一次性配施不仅能更好地满足作物对养分的需求,更重要的是其能降低肥料损失,维持土壤氮素平衡,提高肥料利用率,降低施肥的环境风险,值得在华北潮土区玉米-小麦轮作体系中推广应用。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 王鹏文,潘万博. 我国玉米发展现状和趋势分析[J]. 天津农学院学报, 2005, 12(3): 53-57
- [3] Dinnes D L, Karlen D L, Jaynes D B, et al. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 153-171
- [4] 廖志琴. 浅析我国农业劳动力缺失问题[J]. 农村经济与科技, 2013, 24(5): 43-44
- [5] 陈守伦,杜森,高祥照,等. 我国玉米施肥存在问题及建议[J]. 中国农技推广, 2001, 17(2): 34-35
- [6] Paramasivam S, Alva A. Leaching of nitrogen forms from controlled-release nitrogen fertilizers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1997, 28(17): 1 663-1 674
- [7] Shaviv A, Mikkelsen R. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize

- environmental degradation - A review[J]. Fertilizer research, 1993, 35(1): 1-12
- [8] 杜昌文, 周健民, 王火焰. 聚合物包膜肥料研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 725-730
- [9] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209-215
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [11] 任翠莲, 马银丽, 董娴娴, 等. 控释尿素对夏玉米产量、氮肥利用效率及土壤硝态氮的影响[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(2): 12-17
- [12] 孙克刚, 和爱玲, 胡颖, 等. 小麦-玉米轮作制下的控释肥肥效试验研究[J]. 土壤通报, 2010, 40(5): 1125-1129
- [13] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706
- [14] 司东霞, 崔振岭, 陈新平, 等. 不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1745-1751
- [15] 汪强, 李双凌, 韩燕来, 等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 693-696
- [16] 李丙奇, 刘小奇, 孙克刚, 等. 潮土区不同肥料配方一次性施肥对玉米产量和经济效益的影响[J]. 河南科学, 2011, 29(9): 1063-1065
- [17] 李伟, 李絮花, 董静, 等. 控释尿素与普通尿素配施在冬小麦上的最佳应用比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 629-635
- [18] 夏伟光, 武际, 高凤梅, 等. 控释尿素不同施用条件下冬小麦产量和氮素利用效应[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 33(1): 38-44
- [19] 陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释肥养分释放特性的研究[J]. 化肥设计, 2006, 44(2): 56-58
- [20] 廖松, 樊小林, 贺训平. 包膜控释尿素保肥供肥效果及其机理的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 13-17
- [21] Fernandez-Escobar R, Benlloch M, Herrera E, et al. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101(1): 39-49
- [22] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同施氮处理对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 618-622
- [23] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(06): 971-975
- [24] 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[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1744-1749
- [25] 衣文平, 孙哲, 武良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 687-693
- [26] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-534
- [27] 张夫道, 王玉军. 缓/控释 BB 肥是我国缓/控释肥料的发展方向[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(2): 8-10
- [28] Shaviv A, Raban S, Zaidel E. Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules[J]. Environmental science & technology, 2003, 37(10): 2251-2256
- [29] 吴欢欢, 李若楠, 张彦才, 等. 我国缓/控释肥料发展现状、趋势及对策[J]. 华北农学报, 2009, 24(B12): 263-267

Effects of Controlled-release Fertilizer on Wheat-maize Rotation System in Fluvo-aquic Soil in North China

LIANG Gang^{1,2}, LIANG Linzhou¹, DONG Xiaoying¹, SHEN Renfang^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of controlled-release fertilizer on crop yield, nitrogen balance and soil nitrogen residual of wheat-maize rotation system in Fluvo-aquic soil in North China. The results showed that the treatment with adding 20% controlled-release fertilizer / reducing 20% nitrogen fertilizer (CRF20%) could maintain maize yield and biomass compared to the conventional fertilization treatment (CK), decreased wheat yield and biomass, however, it was higher than the treatment of nitrogen reducing 20% (-N20%). Due to the elimination of top-dressing, and the CRF20% treatment got 581 and 1 896 Yuan RMB/hm² relative income higher than the CK and -N20% treatment in maize season, while in the wheat season the relative income of the CRF20% treatment and CK were nearly the same. The CRF20% treatment can reduce nitrogen surplus and maintain the apparent equilibrium between nitrogen input and output, especially in the maize season with a nitrogen surplus of only 4.6 kg/hm², thus it can maintain nitrogen in topsoil to reduce nitrogen loss into the environment.

Key words: Wheat-maize rotation; Controlled-release fertilizer; Reducing nitrogen fertilizer; Economic benefits; Nitrogen equilibrium