

氮肥对麦-玉轮作体系产量和氮肥效率的影响

席吉龙¹, 李永山¹, 王珂¹, 杨娜¹, 郝佳丽¹, 张建诚^{1*}, 武雪萍²

(1. 山西省农业科学院棉花研究所, 山西 运城 044000;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为了评价氮肥周年运筹对冬小麦-夏玉米连作体系产量和氮肥效率的影响, 为合理利用氮肥提供科学依据。2015~2017年在山西运城通过田间小区试验研究不同施氮肥水平下两季作物氮肥配比对小麦-玉米轮作体系中产量、干物质积累及养分利用效率的影响。试验设置3个周年氮肥投入水平(300、450、600 kg/hm²), 3种小麦玉米氮肥分配比例(4:6、5:5、6:4), 共9个处理。结果表明: 冬小麦、夏玉米单季作物产量均以450 kg/hm²水平最高, 且施肥量过多均不利于单季作物粒重的增加。周年作物产量以中氮水平450 kg/hm²下氮肥按5:5分配在麦、玉两季时产量最高; 随着施肥量的增加作物生物量、植株总吸氮量不断增加, 而氮素利用效率、氮素吸收效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力反而降低。氮肥利用率以施氮450 kg/hm²水平最高, 且在中高氮水平下, 氮肥一半或重施在小麦上, 更有利于作物周年生物量的增加和作物氮素吸收与利用。综合考虑产量和氮肥利用效率, 在本试验条件下, 周年施氮以450 kg/hm²而且小麦玉米分配比例为5:5效果最佳。

关键词: 冬小麦-夏玉米轮作; 周年氮肥运筹; 产量; 氮肥利用效率; 分配比例

氮素在作物产量和品质形成中起着关键作用^[1]。氮肥是粮食增产的主要肥力因素, 对粮食产量增加的贡献率达40%左右, 粮食产量的提高往往依靠氮肥大量投入^[2]。目前, 我国氮肥施用量过大, 导致资源浪费、环境恶化及肥料利用率明显下降, 氮肥利用率已由20世纪末的35%, 下降到目前的27%^[3-5]。因此, 氮肥的合理施用成为农业高产高效和可持续发展的必然要求^[6]。前人研究多集中于施肥量、施肥时期以及施肥方式对单季作物的影响^[7-12], 两季作物间氮肥分配比例对轮作体系中作物生长发育、产量品质形成及养分利用效率的影响也有报道^[6, 13-14]。但把冬小麦、夏玉米轮作种植体系作为整体, 来统筹考虑周年适宜施氮量与配比模式的研究较少, 为此, 本文以山西省运城市冬小麦-夏玉米轮作体系为对象, 研究在不同施氮肥水平下两季作物氮肥配比对轮作体系中干物质积累、产量及养分利用效率的影响, 以期为该体系的氮肥合理施用与高产高效生产提供科学

依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验位于山西省农业科学院棉花研究所牛家凹农场, 试验地属半干旱温带大陆性气候。年均气温在12.6℃左右, 年均降水量498 mm, 全年降雨集中在夏秋季(6~9月), 无霜期212 d。土壤类型为壤质褐土, 播前土壤有机质含量为12.14 g/kg, 全氮为0.95 g/kg, 有效磷为15.4 mg/kg, 速效钾为181 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验时间为2015年10月至2017年6月, 种植体系为冬小麦和夏玉米一年两熟轮作, 供试冬小麦品种为晋麦84, 夏玉米品种为郑单958。冬小麦于每年10月播种, 次年6月收获, 夏玉米于6月播种, 当年10月收获。试验设置3个氮肥投入水平(每年300、450、600 kg/hm²)和3种冬小麦夏玉米两季间的氮肥分配比例(4:6、5:5、6:4), 共9个处理(表1)。田间随机排列, 重复3次。小区面积为20 m²(长5 m×宽4 m)。试验中氮肥为尿素(N 46%), 冬小麦季氮肥的70%于播种前底施, 剩余30%于拔节期追施; 夏玉米季60%的

收稿日期: 2018-04-19; 录用日期: 2018-07-07

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划(2015BAD22B03-04)。

作者简介: 席吉龙(1963-), 男, 山西省新绛县人, 副研究员, 本科, 主要从事作物栽培技术研究。E-mail: shxj1963@163.com。

通讯作者: 张建诚, E-mail: zhangjc@126.com。

氮肥做底肥施入, 剩余 40% 的氮肥于大喇叭口期追施。各处理施用的磷肥均为重过磷酸钙 (P₂O₅ 46%), 冬小麦施磷肥 (P₂O₅) 180 kg/hm², 夏玉米施磷肥 (P₂O₅) 90 kg/hm², 全部底施。

表 1 不同处理氮肥用量 (kg/hm²)

处理	全年施氮量	冬小麦	夏玉米
N1	300	120	180
N2	300	150	150
N3	300	180	120
N4	450	180	270
N5	450	225	225
N6	450	270	180
N7	600	240	360
N8	600	300	300
N9	600	360	240

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品获取干物质积累量

小麦成熟期随机取 10 株植株, 玉米成熟期随机取 5 株, 测量干物质质量。将成熟期小麦和玉米按籽粒和茎叶两部分器官分样称量并粉碎, 用于植株氮素含量的测定。

1.3.2 氮素养分含量测定

将植株样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法制备待测液, 采用凯氏定氮法测定全氮含量^[15]。

1.3.3 相关指标计算方法^[14]

植株氮素总积累量 (kg/hm²) = Σ 植株各器官干重 × 氮含量

氮素利用效率 (kg/kg) = 籽粒重 / 植株氮素总积累量

氮素吸收效率 (kg/kg) = 植株氮素总积累量 /

施氮量

氮素收获指数 = 籽粒氮素积累量 / 成熟期植株氮素总积累量

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮作物产量 / 施氮量
 氮肥利用率 (%) = (施氮区吸氮量 - 不施氮区吸氮量) / 施氮量 × 100

1.3.4 计产与考种

冬小麦成熟期调查各处理穗数, 成熟时各小区收割 2 m² (1 m × 2 m), 脱粒晒干, 折算成实际产量 (kg/hm²), 同时每小区取 10 株代表性植株进行室内考种, 调查穗部性状, 并测定其每穗粒数和粒重。夏玉米每小区收 30 株折算实际产量。同时每小区取 5 株, 用以考察产量构成。

1.4 数据处理与统计

试验数据采用 Excel 2007 进行计算处理, 采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行统计分析, 用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 显著性检验水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 周年氮肥统筹对作物产量及其构成因素的影响

2.1.1 周年氮肥统筹对产量的影响

由表 2 可知, 中量施氮各处理 (N4、N5、N6) 下冬小麦的产量最高, 两年平均来看, 比低量施氮处理 (N1、N2、N3) 提高了 3.75%, 比高量施氮处理 (N7、N8、N9) 提高了 3.28%。在中氮水平下, 以 N5 处理, 即麦、玉两季氮肥分配比例为 5:5 时冬小麦的产量最高, 且在 2016 ~ 2017 年度, 产量达 7 892 kg/hm², 显著高于 N4 和 N6。在低氮

表 2 不同氮肥处理的作物产量 (kg/hm²)

处理	2015 ~ 2016 年			2016 ~ 2017 年		
	冬小麦	夏玉米	周年总产量	冬小麦	夏玉米	周年总产量
N1	6 565 c	9 973 ab	16 538 bc	7 202 d	9 110 b	16 313 bc
N2	6 683 c	9 698 c	16 381 cd	7 492 bc	8 721 bc	16 213 bc
N3	6 712 b	9 312 cd	16 024 ef	7 683 ab	8 721 c	16 216 bc
N4	6 844 ab	10 100 a	16 944 ab	7 669 b	9 348 b	17 018 ab
N5	6 938 a	10 337 a	17 276 a	7 892 a	9 596 ab	17 488 a
N6	6 900 a	9 892 b	16 793 ab	7 483 c	9 798 a	17 281 a
N7	7 003 a	8 794 d	15 797 f	7 264 d	8 769 bc	16 034 c
N8	6 751 b	9 514 cd	16 265 de	7 233 d	9 508 ab	16 742 b
N9	6 740 b	9 900 b	16 640 bc	7 156 d	9 795 a	16 951 b

注: 小写字母表示在 5% 水平上的差异显著性。下同。

水平下,冬小麦产量随着小麦季氮肥分配比例的增加而增加,以麦、玉两季分配比例为6:4时最高。在高氮水平下,产量随着小麦季氮肥分配比例的增加而降低,以麦、玉两季分配比例为4:6时最高。

同样,夏玉米的产量也以中量施氮水平下最高,较高肥处理平均增加4.69%,较低肥处理平均增加6.73%。周年中氮水平下,两年度有所不同,2015~2016年度N5产量最高,达10337 kg/hm²,2016~2017年度N6产量最高,达9798 kg/hm²。在低氮水平下,麦、玉两季氮肥分配比例为4:6时,夏玉米产量最高,在高氮水平下,麦、玉两季氮肥分配比例为6:4夏玉米产量最高。

总体来看,中量施氮处理可明显提高冬小麦和夏玉米的周年总产量,且当麦、玉两季分配比例为5:5时周年总产量最高,即冬小麦和夏玉米的年均施氮量均为225 kg/hm²,是冬小麦-夏玉米

一年两熟轮作体系增产效果最好的周年氮肥管理方式。

2.1.2 周年氮肥统筹对产量构成因素的影响

从表3可以看出,冬小麦成穗数随着小麦季施氮量的增加而增加,两年均以N9处理最多,N1最少;小麦穗粒数在低氮和中氮水平,随着小麦季施氮量的增加而增加,高氮水平下反之,穗粒数随着小麦季施氮量的增加而减少,综合两年的结果,小麦季施氮量在225~270 kg/hm²时最有利于冬小麦穗粒数的增加。小麦千粒重在年度和处理间的变化不尽一致,2015~2016年度,中氮>低氮>高氮,中氮比低氮平均高0.18 g,比高氮平均高0.45 g;2016~2017年度,低氮>中氮>高氮,低氮比中氮平均高1.36 g,比高氮平均高2.52 g,在低氮和中氮水平下,均是麦、玉两季氮肥分配比例为5:5时千粒重最高。

表3 不同氮肥处理的产量构成因素

年份	处理	冬小麦			夏玉米		
		穗数 (10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	穗数 (穗/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	百粒重 (g)
2015 ~ 2016	N1	488 d	35.8 c	37.78 a	64 750 ab	509.9 ab	31.77 ab
	N2	536 c	36.2 c	38.29 a	65 250 ab	494.7 b	31.39 b
	N3	577 b	38.6 a	36.63 b	62 500 b	479.4 b	30.83 b
	N4	591 b	37.3 ab	36.65 b	66 500 ab	524.3 a	32.18 ab
	N5	597 ab	37.9 a	38.94 a	67 750 a	519.9 a	32.51 a
	N6	604 ab	38.3 a	37.65 ab	67 500 a	510.7 ab	32.82 a
	N7	602 ab	38.3 a	37.95 a	64 000 ab	529.1 a	31.72 ab
	N8	617 a	37.9 ab	37.24 b	66 750 a	523.4 a	31.98 ab
	N9	629 a	37.6 ab	36.69 b	62 250 b	518.3 a	32.08 ab
2016 ~ 2017	N1	492 d	38.7 b	37.61 ab	63 000 b	479.6 ab	34.58 ab
	N2	530 c	39.9 b	38.32 a	66 750 a	469.3 b	33.89 b
	N3	571 bc	39.3 b	37.72 a	62 250 b	455.1 b	34.36 ab
	N4	585 bc	40.4 b	36.08 ab	62 250 b	497.8 a	35.73 a
	N5	590 b	41.6 ab	37.10 ab	67 750 a	493.1 a	33.90 b
	N6	598 b	42.8 a	36.40 ab	66 000 ab	484.5 a	35.16 ab
	N7	615 ab	41.0 ab	36.09 ab	62 750 b	502.6 a	34.43 ab
	N8	618 ab	40.8 b	35.20 b	62 750 b	496.9 a	34.01 b
	N9	627 a	40.2 b	34.82 b	66 250 a	482.1 a	34.95 ab

玉米穗数中氮水平高于低氮和高氮,在同一周年氮肥水平下,麦、玉两季氮肥分配比例为5:5时玉米穗数最高;玉米穗粒数的大小为高氮>中氮>低氮,在同一周年氮肥水平下,玉米穗粒数随着玉米季施氮肥量的减少而减少。玉米百粒重平均值中氮>高氮>低氮,低氮水平下,N1处理最高;高氮水平下,N9处理最高;中氮水平下,两年规律不同。可见,施氮量过多不利于玉米百粒重的提高。

2.2 周年氮肥统筹对作物生物量的影响

表4可以看出,冬小麦和夏玉米生物量基本随着各自单季施氮肥量的增加而增加,平均值呈现高肥>中肥>低肥的规律。在周年低氮水平下,周年生物量N1>N2>N3;中氮水平下,周年生物量N6处理最大;高氮水平下,周年生物量在年度和处理间的差异不尽一致,2015~2016年度N8最大,2016~2017年度N9最大。可见,在中、高氮水平下,氮肥一半或重施在小麦上,有利于作物周年生物量的增加。

表 4 不同氮肥处理的干物质质量

(kg/hm²)

处理	2015 ~ 2016 年			2016 ~ 2017 年		
	冬小麦	夏玉米	周年	冬小麦	夏玉米	周年
N1	14 698 e	22 656 b	37 355 b	15 895 f	21 690 d	37 585 e
N2	15 014 e	20 879 c	35 893 c	16 228 e	21 110 d	37 338 e
N3	16 197 d	19 868 d	36 065 c	17 198 d	19 580 e	36 778 e
N4	17 251 bc	23 646 ab	40 897 b	17 458 d	23 189 bc	40 647 d
N5	17 763 bc	22 972 b	40 735 b	19 326 c	22 788 c	42 115 cd
N6	18 368 b	22 887 b	41 254 b	20 470 b	21 777 d	42 247 c
N7	18 542 b	24 017 a	42 558 ab	20 543 b	23 729 a	44 272 ab
N8	19 884 a	23 223 ab	43 107 a	20 937 b	23 206 b	44 143 b
N9	19 783 a	22 777 b	42 560 ab	21 778 a	23 021 bc	44 799 a

2.3 周年氮肥统筹对作物氮素吸收与利用的影响

表 5 可以看出, 两年度高氮水平下各处理的作物地上部全年总吸氮量较中氮水平下的相应处理提高, 平均增幅为 4.8%, 中氮较低氮平均增幅为 15%。而氮素利用效率、氮素吸收效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力为高氮 < 中氮 < 低氮, 这 4 个指标高氮较中氮减幅分别为 8.7%、21.4%、9.6% 和 28.1%, 中氮较低氮减幅分别为 8.5%、23.3%、4.1% 和 29.8%。两年度氮肥利用率中氮水平下的

相应处理最高, 分别较高氮和低氮提高 14.5% 和 15.4%。低氮水平下, 植株总吸氮量、氮素吸收效率和氮肥利用率, 这 3 个指标, 2015 ~ 2016 年度以 N1 处理最大, 2016 ~ 2017 年度以 N2 最大, 氮素利用效率和氮素收获指数这两个指标 2015 ~ 2016 年度以 N2 处理最大, 2016 ~ 2017 年度以 N1 最大, 氮肥偏生产力两年度均以 N1 处理最大; 中氮水平下, 2015 ~ 2016 年度, 植株总吸氮量、氮肥吸收效率和氮肥利用率以 N4 处理最高,

表 5 不同氮肥处理的氮素吸收与利用

年份	处理	植株总吸氮量 (kg/hm ²)	氮素利用效率 (kg/kg)	氮素吸收效率 (kg/kg)	氮素 收获指数	氮肥利用率 (%)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
2015 ~ 2016	N1	475.9 d	34.75 a	1.59 a	0.74 a	33.72 b	55.13 a
	N2	469.5 d	34.89 a	1.57 ab	0.74 a	31.61 cd	54.60 ab
	N3	469.9 d	34.10 ab	1.57 b	0.73 ab	31.72 c	53.42 b
	N4	548.7 b	30.88 c	1.22 c	0.70 bc	38.67 a	37.66 cd
	N5	545.0 bc	31.70 b	1.21 cd	0.71 b	37.84 ab	38.39 c
	N6	535.6 c	31.36 bc	1.19 d	0.71 b	35.74 b	37.32 d
	N7	568.9 ab	27.77 d	0.95 e	0.63 d	32.36 bc	26.33 f
	N8	576.2 a	28.23 cd	0.96 e	0.63 cd	33.58 bc	27.11 ef
	N9	560.6 ab	29.68 cd	0.93 e	0.66 c	30.98 d	27.73 e
2016 ~ 2017	N1	493.0 c	33.09 a	1.64 b	0.74 a	33.78 cd	54.38 a
	N2	500.9 c	32.37 ab	1.67 a	0.72 ab	36.41 b	54.05 a
	N3	498.0 c	32.56 a	1.66 ab	0.73 ab	35.42 bc	54.05 a
	N4	569.2 b	29.90 bc	1.26 d	0.71 b	39.44 a	37.82 c
	N5	574.0 ab	30.47 b	1.28 c	0.70 bc	40.51 a	38.86 b
	N6	570.9 b	30.27 b	1.27 cd	0.69 c	39.83 a	38.40 bc
	N7	601.3 a	26.67 d	1.00 e	0.61 e	34.94 c	26.72 e
	N8	604.1 a	27.71 cd	1.01 e	0.64 d	35.41 bc	27.90 de
	N9	594.3 a	28.52 c	0.99 e	0.65 d	33.77 d	28.25 d

氮素利用效率、氮素收获指数和氮肥偏生产力这 3 个指标以 N5 最高, 2016 ~ 2017 年度, 氮素收获指数以 N4 处理最高, 植株总吸氮量、氮肥利用率、氮素利用效率、氮素吸收效率和氮肥偏生产力均以 N5 最高; 高氮水平下, 两年度规律相同, 植株总吸氮量、氮素吸收效率、氮肥利用率以 N8 处理最高, 氮素利用效率、氮素收获指数和氮肥偏生产力均以 N9 最高。可见, 随着周年施肥量的增加, 氮

肥一半或重施在小麦上, 有利于周年作物氮素吸收与利用。

3 讨论

作物生长发育往往受水、肥、气、热及栽培管理措施等因素的影响, 在气候条件和栽培管理措施相对一致的情况下, 肥料投入的多少是影响作物产量的关键因素^[16], 现代农业生产高投入高产出的

管理模式, 虽然获得了较高的作物产量, 但其造成的浪费和对环境的破坏, 使得人们不得不从生态的角度重新审视农田氮素的合理作用^[15]。在肥料投入量一定的条件下, 如何分配麦、玉两季施氮比例同样会影响氮肥效益的发挥。

本研究结果表明在不同氮肥总量下, 不同氮肥分配影响冬小麦-夏玉米轮作产量、生物量、作物氮素吸收与利用效率。单季作物和周年作物产量均以中氮(施肥量为 450 kg/hm²)水平最高, 冬小麦产量两年度分别在 N7 和 N5 即小麦季施肥量为 240 和 225 kg/hm²时达到最高; 小麦季施肥量在 225 ~ 270 kg/hm²时最有利于冬小麦穗粒数的增加, 夏玉米产量两年度分别在 N5 和 N6 处理即玉米季施肥量为 225 和 180 kg/hm²时达到最高, 且施肥量过多均不利于单季作物粒重的增加。施氮肥对单季作物产量影响与前人的研究结果基本一致^[17-21], 单季作物年度间差异由年度间气候和前茬作物肥料投入的后效差异引起, 有研究表明^[22-23], 同等施氮水平下小麦季残留在土壤中的氮肥总量明显高于玉米季, 夏玉米季施入的氮肥损失较冬小麦季严重, 在不同施氮水平下小麦季氮肥残留对玉米季是否有促进作用, 这还需要进一步的研究。周年作物产量以中氮水平下 N5 处理(即氮肥平均分配在麦、玉两季时)产量最高, 周年总施氮量与刘海忠等^[24]研究结果一致, 在低氮水平下(施肥量为 300 kg/hm²)氮肥重施在玉米上(玉米 60%), 在高氮水平下(施肥量为 600 kg/hm²)氮肥重施在小麦上(小麦 60%), 有利于周年作物产量的提高, 薛泽民等^[13]在山西临汾研究结果表明, 在总氮量控制的条件下, 冬小麦季施氮 231 kg/hm²(N 55%)、夏玉米季施氮 189 kg/hm²(N 45%)能获得轮作的最大产量, 这与本研究结果相似。在总氮控制下研究麦、玉分配比还要重视单季作物的氮肥基追比, 本研究依据当地施肥与灌溉条件, 设计小麦季氮肥基追比为 7:3, 且追施氮肥后移到拔节期, 有利于玉米秸秆的腐熟, 使小麦苗期生长健壮, 减少中期分蘖增多, 调控小麦群体, 形成高产合理的产量结构, 提高氮肥利用率。这与董印丽等^[25]对小麦玉米轮作秸秆还田改变了土壤碳氮比, 小麦季氮肥基追比由 3:7 调节为 6:4, 追施氮肥执行“前氮后移”的结论一致。

本研究表明, 随着施肥量的增加作物生物量、植株总吸氮量不断增加, 而氮素利用效率、氮素收

获指数、氮肥偏生产力却降低, 氮肥利用率中氮最高。可见, 过高的施用氮肥并不利于作物对氮肥的吸收利用。在中、高氮水平下, 氮肥一半或重施在小麦上, 有利于作物周年生物量的增加和作物氮素吸收与利用。庄振东^[23]的研究表明, 施氮肥对小麦的增产效应优于玉米, 且小麦季和玉米季氮肥吸收利用明显不同, 玉米季吸收的氮素 18.7% ~ 25.5% 来自氮肥, 小麦季 29.1% ~ 46.4% 来自氮肥, 说明小麦对氮肥的吸收利用效果要优于玉米。巨晓棠等^[26]的研究也表明, 冬小麦比夏玉米对氮肥的反应更敏感, 氮肥的分配应以冬小麦为主, 夏玉米为辅。其原因可能是小麦、玉米植物根系、植物生理及营养器官和籽粒吸收的氮素比例不同。因此在小麦-玉米轮作体系中, 使用氮肥应两作统筹合理配置, 即要考虑小麦玉米总产量、植株总吸氮量和氮素利用效率, 还要兼顾土壤氮素平衡和土壤肥力的变化。

4 结论

冬小麦、夏玉米单季作物产量均以 450 kg/hm²水平最高, 且施氮量过多均不利于单季作物粒重的增加。周年作物产量以中氮水平 450 kg/hm²下氮肥按 5:5 分配在麦、玉两季时产量最高; 随着施肥量的增加作物生物量、植株总吸氮量不断增加, 而氮素利用效率、氮素吸收效率、氮素收获指数、氮肥偏生产力反而降低。氮肥利用率以施氮 450 kg/hm²水平最高, 且在中、高氮水平下, 氮肥一半或重施在小麦上, 更有利于作物周年生物量的增加和作物氮素吸收与利用。综合考虑产量和氮肥利用效率, 在本试验条件下, 周年施氮以 450 kg/hm², 而且小麦、玉米分配比例为 5:5 效果最佳。

参考文献:

- [1] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中的化肥氮去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334-340.
- [2] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [3] 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.
- [4] 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(4): 915-924.
- [5] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(4):

- 782-786.
- [6] 陈祥, 同延安, 杨倩. 氮磷钾平衡施肥对夏玉米产量及养分吸收和累积的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2008, (6): 19-22.
- [7] 武际, 郭熙盛, 王文军, 等. 磷钾肥配合施用对玉米产量及养分吸收的影响 [J]. 玉米科学, 2006, 14 (3): 147-150.
- [8] 刘小虎, 邢岩, 赵斌, 等. 施肥量与肥料利用率关系研究与应用 [J]. 土壤通报, 2012, (1): 131-135.
- [9] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期不同施肥制度对玉米产量和品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, 37 (5): 711-716.
- [10] 冯金凤. 肥料运筹对小麦产量品质及茎秆维管束的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [11] 陈现勇. 高肥条件下施肥量和密度对冬小麦群体质量、产量和品质的调控效应 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [12] 陈远学, 陈晓辉, 唐义琴, 等. 不同氮用量下小麦/玉米/大豆周年体系的干物质积累和产量变化 [J]. 草业学报, 2014, 23 (1): 73-83.
- [13] 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 [J]. 中国土壤与肥料, 2012, (1): 59-63.
- [14] 王永华, 黄源, 辛明华, 等. 周年氮磷钾配施模式对砂姜黑土麦玉米轮作体系籽粒产量和养分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (6): 1031-1046.
- [15] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 373-376.
- [16] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响 [J]. 华北农学报, 2016, 31 (1): 232-238.
- [17] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22 (7): 1122-1128.
- [18] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响 [J]. 作物学报, 2006, 32 (4): 484-490.
- [19] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响 [J]. 作物学报, 2013, 39 (4): 704-711.
- [20] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27 (1): 197-204.
- [21] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 852-860.
- [22] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1 (2): 80-87.
- [23] 庄振东. 冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥去向及平衡状况研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [24] 刘海忠, 王保强, 武玉华, 等. 小麦、夏玉米两茬秸秆还田不同耕作方式施肥技术研究 [J]. 河北农业大学学报, 2004, 27 (3): 7-9.
- [25] 董印丽, 李振峰, 王若伦, 等. 华北地区小麦、玉米两季秸秆还田存在问题及对策研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 159-163.
- [26] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (11): 1361-1368.

Effect of nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in winter wheat-summer maize rotation system

XI Ji-long¹, LI Yong-shan¹, WANG Ke¹, YANG Na¹, HAO Jia-li¹, ZHANG Jian-cheng^{1*}, WU Xue-ping² (1. Cotton Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Yuncheng Shanxi 044000; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to evaluate the effects of nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency for realizing the rational use of fertilizer, the experiment was conducted to study the effects of nitrogen amount and ratios on yield, dry matter accumulation and nitrogen use efficiency in winter wheat-summer maize rotation system in Yuncheng, South Shanxi Province. Three total nitrogen amounts (300, 450 and 600 kg/hm²) and three nitrogen distribution ratios in winter wheat and summer maize (4:6, 5:5 and 6:4) were used in 2015 to 2017. Highest yield were gained at 450 kg/hm² for winter wheat and summer maize in their single growth seasons, and excess nitrogen decreased grain weight. The highest total yields in the year was gained at 450 kg/hm² with 5:5 nitrogen distribution ratio between winter wheat and summer maize. Dry matters and total nitrogen absorption increased, and nitrogen use efficiency, nitrogen absorption efficiency, nitrogen harvest index and nitrogen partial factor productivity decreased with nitrogen increase. The highest nitrogen use efficiency was gained at 450 kg/hm² with 5:5 or 6:4 nitrogen distribution ratio between winter wheat and summer maize. It is suggested applying N 450 kg/hm² with 5:5 nitrogen distribution ratio between winter wheat and summer maize would gain the highest yield and higher nitrogen use efficiency.

Key words: wheat-summer maize rotation; annual nitrogen; yield; nitrogen use efficiency; ratio