

氮肥类型对夏玉米及后作冬小麦产量与水、氮利用的影响

易镇邪^{1,2,3}, 王 璞^{2,3*}, 屠乃美¹

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094;
3. 中国农业大学农业部作物栽培学与耕作学重点实验室, 北京 100094)

摘 要: 研究了华北平原夏玉米季施用不同类型氮肥对当季与后作冬小麦及周年产量与水、氮利用的影响, 结果表明: (1) 随施氮量增大, 夏玉米产量、耗水量与水分利用效率(WUE)增大, 氮肥利用率(NUE)降低。夏玉米 WUE 与 NUE 受到氮肥类型的影响, WUE 以复合肥处理较大, NUE 以包膜尿素和复合肥较高, 且存在较明显的基因型差异, WUE 以郑单 958 较大, NUE 以农大 108 较大; (2) 夏玉米季施氮使冬小麦氮生理效率降低, 氮肥效率增大, 并显著影响冬小麦产量和 WUE, 但因夏玉米季品种、氮肥类型与施氮量不同而表现有差异。夏玉米季氮肥后效明显, 但氮肥类型间差异显著, 一般以尿素处理及包膜尿素与复合肥高 N 处理较大; (3) 夏玉米一冬小麦轮作制度下, 两季总产量、总氮素累积量、总耗水量及水、氮利用效率明显受到夏玉米季氮肥类型与施氮量的影响, 且受到夏玉米基因型的影响。

关键词: 夏玉米一冬小麦轮作制; 氮肥类型; 水分利用效率; 氮肥利用率; 氮肥后效
中图分类号: S 143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008) 02-0011-07

我国是世界上最大的化肥生产与消费国。目前, 我国各大作物生产上均存在氮肥超量施用问题。华北平原夏玉米一冬小麦轮作体系中, 氮肥超量施用现象十分普遍。1997 年的调查表明, 北京地区夏玉米田平均施 N 量为 256 kg/hm^2 。由于夏玉米季降水多而集中, 因此该季氮肥利用率仅 $16\%\sim 22\%$, 甚至有研究表明吴桥试区夏玉米氮肥利用率低者仅为 $3.5\%\sim 11.6\%$ 。氮肥超量施用导致了氮肥利用率的显著下降, 同时对生态环境造成了严重破坏。土壤一作物系统氮素损失的途径主要有: 硝态氮的淋洗, 氨挥发与硝化反硝化作用等。综合前人研究结果^[4~8]可知, 华北地区夏玉米一冬小麦轮作体系中, 氮素损失及对生态环境的破坏主要发生在夏玉米季。因此, 夏玉米的水、氮利用与氮素损失研究意义重大。

华北平原年降水 70% 以上集中在 6~9 月, 造成了夏玉米季氮素的大量淋失, 而如何减少氮素淋失, 必须着眼于整个夏玉米一冬小麦轮作周期。有研究表明, 夏玉米根系分布较冬小麦浅^[9], 冬小麦采用节水栽培模式可促进根系下扎, 开花期最大根深可超过 2 m, 因此冬小麦可以截获并利用夏玉米季淋溶到下层土体的肥料氮, 从而减少氮素淋失^[10], 提高氮素的周年利用率。由于夏玉米季无需

灌水, 因此在大田条件下进行的有关夏玉米水分利用效率的研究较少, 而有关夏玉米季氮肥类型对夏玉米一冬小麦周年产量与水、氮利用效率的研究更是鲜见报道, 因此, 本试验在冬小麦节水栽培条件下, 从不同类型玉米品种、不同类型氮肥、不同施氮量等角度出发, 对夏玉米、冬小麦及周年产量与水、氮利用情况进行了研究, 以期从夏玉米的施肥技术入手, 探索提高周年产量与资源利用效率的途径。现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 试验地自然条件

试验于 2004 年在中国农业大学吴桥实验站进行。实验站地处河北省沧州市吴桥县, 试验地位于 $37^{\circ}41'02''\text{N}$ 、 $116^{\circ}37'23''\text{E}$ 。夏玉米季试验 0~20、20~40 cm 土层基础地力: 有机质分别为 8.5、4.7 mg/g, 全 N 0.76、0.44 mg/g, Olsen P 14.05、5.22 mg/kg, 速效钾(K_2O , 1.0 mol/L NH_4Ac 法测定) 79.11、75.26 mg/kg。

2004 年全年降水 661.3 mm, 夏玉米生长季(6~9 月)降水 555.8 mm, 占全年的 84.0%, 其中 6~9 月分别为 190.7、259.8、70.1 和 35.2 mm, 分别占全年的 28.8%、39.3%、10.6%和 5.3%。从夏玉米

收稿日期: 2007-04-03; 修改日期: 2007-10-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(30471015, 30571089); 国家高技术研究发展计划(2006AA100202)
作者简介: 易镇邪(1975—), 男, 湖南冷水江市人, 讲师, 博士, 主要从事作物高产与资源高效利用研究。E-mail: yizhenxie@sina.com。
* 通讯作者: 王璞, E-mail: wangpu@cau.edu.cn
(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

各生育阶段来看,降水主要分布在播种至 9 叶展,达 50%以上,其次是 9 叶展至 12 叶展(大喇叭口期),吐丝之前达到 90%以上(表 1)。冬小麦季降水 76.4 mm,其中,播种~拔节 35.9 mm,拔节~开花 4.5 mm,开花~成熟 36.0 mm。

表 1 2004 年度夏玉米两品种各生育阶段的降水量
Table 1 Precipitation at different growth stages of two summer maize cultivars in 2004

品 种 Cultivar	播种~9 叶展 Sowing ~9leaf		9 叶展~12 叶展 9leaf ~12leaf		12 叶展~吐丝 12leaf ~silking		吐丝~乳熟 Silking ~dough		乳熟~成熟 Dough ~maturity		总计 Sum	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
郑单 958 ZD 958	266.7	52.20	133.3	26.09	66.5	13.02	21.0	4.11	23.4	4.58	510.9	100
农大 108 ND 108	266.7	51.02	133.3	25.50	84.5	16.17	3.0	0.57	35.2	6.73	522.7	100

1.2 试验材料与设计

夏玉米季试验共 3 因素、14 个处理,随机区组设计,3 次重复。处理及代号见表 2。3 种类型氮肥中,包膜尿素含 N 42%,由中国农业大学资源环境学院提供(自制);尿素含 N 46%,复合肥含 N、P₂O₅ 和 K₂O 均为 15%,均由市场购得。尿素 1/3 作基肥,2/3 于 10 叶期追施,包膜尿素与复合肥一次性基施。尿素与包膜尿素处理配施磷(P₂O₅)、钾(K₂O) 90 kg/hm²。郑单 958 种植密度为 7.5 万株/hm²,农大 108 为 6 万株/hm²,等行距(80 cm)条播,小区面积 33.6 m²,两品种均于 6 月 14 日免耕播

种,5 叶展定苗。郑单 958 于 8 月 9 日吐丝,9 月 28 日收获,生育期 106 d;农大 108 于 8 月 12 日吐丝,10 月 3 日收获,生育期 111 d。

冬小麦(农大 189)于 2004 年 10 月 19 日在原小区上播种(行距 15.3 cm),水肥管理统一采用节水栽培技术(吴桥模式)^[11],肥料(复合肥 750 kg/hm²,尿素 150 kg/hm²,硫酸锌 15 kg/hm²,土杂肥 15 t/hm²)底施,总施 N 量为 211.5 kg/hm²(土杂肥折算为纯 N 30 kg/hm²),春灌二水(拔节、开花期各 1 次,每次 75 mm);2005 年 4 月 10 日拔节,5 月 6 日开花,6 月 14 日收获,生育期 241 d。

表 2 夏玉米季试验处理及代号
Table 2 Treatments and their codes in summer maize

品 种 Cultivar	氮肥类型 Type of nitrogen fertilizer (NF)	施氮水平 Application rate of NF (kg/hm ²)	处理代号 Code of treatment	品 种 Cultivar	氮肥类型 Type of nitrogen fertilizer (NF)	施氮水平 Application rate of NF (kg/hm ²)	处理代号 Code of treatment
郑单 958 ZD 958	不施氮 Zero N	0	Z 0	农大 108 ND 108	不施氮 Zero N	0	N 0
	尿素 U	90	ZU 1		尿素 U	90	NU 1
		180	ZU 2			180	NU 2
	包膜尿素 CU	90	ZCU 1		包膜尿素 CU	90	NCU 1
		180	ZCU 2			180	NCU 2
	复合肥 CF	90	ZCF 1		复合肥 CF	90	NCF 1
		180	ZCF 2			180	NCF 2

Note: U: urea; CU: coated urea; CF: compound fertilizer

1.3 测定项目与方法

降水量数据来自实验站自有的小型气象观测站;

产量:夏玉米每小区测产 2 行(每行 5 m),称重测产,冬小麦每小区收割 2 个样方(各 2 m²)以折算实际产量。籽粒含水量均以 14%计。

干物质积累:分别于夏玉米 9 叶展、12 叶展、吐丝、乳熟、成熟及冬小麦拔节、开花与成熟等时期取植株样,将叶、茎鞘、穗等各部分分别装袋,于 105℃

下杀青 1 h,然后以 80℃烘至恒重;
全氮含量:采用半微量凯氏定氮法测定^[12];
土壤含水率:于植株取样的同时采集土样,每小区取 2 个样点,取土深度 1.2 m,20 cm 一层,装于塑料袋自封袋中带回室内,采用直接烘干法测定土壤含水率;
水分利用效率(kg/m³)=产量/耗水量;
氮生理效率(kg/kg)=生物量/作物吸氮量;
氮肥效率(kg/kg)=经济产量/当季施氮量;

氮肥利用率 (%) = (作物施氮处理吸氮量 - 不施氮处理吸氮量) / 施氮量 × 100;

夏玉米季施氮后效 (%) = (夏玉米季施氮处理的冬小麦吸氮量 - 夏玉米季不施氮处理的冬小麦吸氮量) / 夏玉米季施氮量 × 100;

周年水分利用效率(kg / m³) = 夏玉米与冬小麦总产量 / 总耗水量;

周年氮肥效率(kg / kg) = 夏玉米与冬小麦总产量 / 总施氮量;

夏玉米施氮总利用率 (%) = 夏玉米季氮肥利用率 + 夏玉米季施氮后效。

2 结果与分析

2.1 土壤水分动态

2.1.1 夏玉米季 夏玉米品种间、不同施氮处理间各生育时期土壤含水率存在一定差异,但两品种各施氮处理土壤含水率在各生育时期变化趋势一致,现以郑单 958 为代表考察夏玉米季土壤含水率变化情况,表 3 所列数据为各处理的平均值。

由于前茬冬小麦采用节水栽培模式,因此夏玉

米播种期土壤含水率较低,0~60cm 土层仅 10%左右,随土层加深含水率略有增大。由于播种至 9 叶展的大量降水,9 叶展各土层含水率均上升到接近或高于 21%,并呈现出上、下土层高中间低的趋势。12 叶展、吐丝期土壤含水率也维持在较高水平,土层间变化趋势与拔节期基本一致。吐丝至成熟期,各土层含水率大幅下降,上层土壤下降幅度大于下层,土层间呈现由上至下含水率上升的趋势。至成熟期,60cm 以上含水率量在 15%~16%,100~120cm 仍接近 21%。可见,9 叶展至吐丝期的降水量足以满足作物需要,能使土壤含水率一直维持在较高水平,而吐丝后降水剧减,而作物又需要大量水分,由此导致土壤含水率迅速下降。

2.1.2 冬小麦季 冬小麦数据亦为各处理的平均值(表 3)。由于灌底墒水,播种期各土层含水率均在 20%左右,此后逐渐降低。至成熟期,0~60cm 土层含水率均低于 10%,最高的是 100~120cm 土层,亦较播种期显著降低。可见,冬小麦节水栽培模式下,作物对土壤水分的利用极充分,这对水分利用效率的提高是有利的。

表 3 夏玉米与冬小麦生育季土壤含水率 (%)
Table 3 Water content in soil in different growth stages of summer maize and winter wheat

土层 Soil layer (cm)	夏玉米(郑单 958) Summer maize (ZD958)						冬小麦(农大 189) Winter wheat (ND189)		
	播种期 So wing	9 叶展 9teaf	12 叶展 12teaf	吐丝期 Silking	乳熟期 Dough	成熟期 Mat urity	播种期 So wing	开花期 Flowering	成熟期 Mat urity
0~20	10.6	22.91	20.09	22.36	18.73	15.41	20.30	18.95	8.80
20~40	8.9	21.02	19.53	21.20	18.46	15.07	20.10	18.25	8.03
40~60	10.7	21.10	18.86	21.26	18.56	15.64	19.85	16.19	9.19
60~80	12.9	20.86	21.58	21.22	19.03	17.19	19.31	14.92	11.84
80~100	15.7	21.61	21.77	21.70	20.78	18.84	20.24	16.48	14.19
100~120	18.4	23.14	23.25	23.57	22.56	20.95	22.53	19.80	18.08

2.2 产量与水分利用效率

2.2.1 夏玉米季 两品种施氮效应显著,除郑单 958ZU1 外各施氮处理较不施氮处理极显著增产,同时施氮量为 180kg / hm²(下称高 N)较 90kg / hm²(下称低 N)增产显著。两品种高 N 下均以复合肥处理产量最高,低 N 下略有差异。随施氮量增大,耗水量、水分利用效率(WUE)有增大趋势,郑单 958 表现较农大 108 明显。WUE 在氮肥类型间的差异,郑单 958 复合肥>尿素>包膜尿素,农大 108 处理间差异较小,以复合肥处理略大。夏玉米 WUE 具有明显基因型差异,各处理平均郑单 958 较农大 108 大 0.28kg / m³(表 4)。

2.2.2 冬小麦季 前季为郑单 958 时,尿素处理冬

小麦季产量表现低 N>高 N,且差异显著,另两种氮肥表现高 N>低 N,但差异不显著;耗水量均表现高 N>低 N>不施氮,施氮处理显著高于不施氮处理;不施氮处理 WUE 显著高于施氮处理,尿素低 N 处理显著高于高 N 处理,另两种氮肥高、低 N 间无显著差异(表 5)。

前季为农大 108 时,冬小麦季产量,NU1、NCU2 与 NCF2 等处理显著高于不施氮处理,3 种氮肥高、低 N 间产量表现与前季为郑单 958 的各施氮处理相同;耗水量、施氮与不施氮处理间差异不显著;施氮处理 WUE 一般均高于不施氮处理,NU1 显著高于其他处理,各类型氮肥高、低 N 间差异与产量表现一致。

可见,夏玉米季施氮处理对冬小麦产量与 WUE 影响显著,但因夏玉米季品种、氮肥类型与施氮量不同而表现有差异。前季为农大 108 的施氮处理,冬小麦季产量、WUE 均高于不施氮处理;前季

为郑单 958 时,施氮处理冬小麦季产量得到提高,但 WUE 降低;不同类型氮肥高、低 N 间的冬小麦季产量与 WUE 差异在品种间表现一致,尿素表现低 N > 高 N,包膜尿素与复合肥表现相反。

表 4 各氮肥处理下夏玉米产量、耗水量与水分利用效率

Table 4 Yield, water consumption (WC) and water use efficiency (WUE) of different treatments in summer maize							
处理 Treat ment	产量 Yield (kg/hm ²)	耗水量 WC (m ³ /hm ²)	水分利用效率 WUE (kg/m ³)	处理 Treat ment	产量 Yield (kg/hm ²)	耗水量 WC (m ³ /hm ²)	水分利用效率 WUE (kg/m ³)
Z 0	9508.5 d C	4406.6 b	2.16 c	N 0	7914.3 d C	4280.2 b	1.85 c
ZU 1	9875.4 cd BC	4442.9 b	2.22 b	NU 1	9085.6 bc AB	4582.6 a	1.98 b
ZU 2	10621.3 a A	4575.6 a	2.32 a	NU 2	9310.3 ab A	4646.9 a	2.00 b
ZCU 1	10102.9 bc AB	4589.5 a	2.20 b	NCU 1	8977.9 c AB	4577.5 a	1.96 b
ZCU 2	10573.0 a A	4674.7 a	2.26 ab	NCU 2	9326.7 ab A	4635.4 a	2.01 b
ZCF 1	10491.9 ab A	4466.3 b	2.35 a	NCF 1	9082.5 bc AB	4566.7 a	1.99 b
ZCF 2	10755.7 a A	4603.9 a	2.34 a	NCF 2	9496.4 a A	4570.0 a	2.08 a

注:不同小写字母表示达到 0.05 显著水平,不同大写字母表示达到 0.01 显著水平。下同。
Note : Data followed by different small and capital letters indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability level respectively . The same below .

表 5 各氮肥处理下冬小麦产量、耗水量与水分利用效率

Table 5 Yield, water consumption (WC) and water use efficiency (WUE) of different treatments in winter wheat							
夏玉米季 施氮处理 N treat ment in summer maize	产量 Yield (kg/hm ²)	耗水量 WC (m ³ /hm ²)	水分利用效率 WUE (kg/m ³)	夏玉米季 施氮处理 N treat ment in summer maize	产量 Yield (kg/hm ²)	耗水量 WC (m ³ /hm ²)	水分利用效率 WUE (kg/m ³)
Z 0	5900.0 bc	3376.1 c	1.75 a	N 0	5752.8 c	3596.8 ab	1.60 c
ZU 1	6285.2 a	3774.9 ab	1.66 b	NU 1	6310.6 a	3395.0 b	1.86 a
ZU 2	6008.1 b	3868.5 ab	1.55 c	NU 2	5925.8 bc	3746.8 a	1.58 c
ZCU 1	6043.0 b	3829.4 ab	1.58 c	NCU 1	5815.7 bc	3476.5 b	1.67 bc
ZCU 2	6114.2 ab	3903.4 a	1.57 c	NCU 2	6378.2 a	3671.7 a	1.74 b
ZCF 1	5934.3 bc	3831.6 ab	1.55 c	NCF 1	5850.9 bc	3554.3 ab	1.63 bc
ZCF 2	6043.2 b	3914.4 a	1.54 c	NCF 2	6075.2 b	3642.0 b	1.67 bc

2.3 氮素累积与氮利用效率

2.3.1 夏玉米季氮素累积与氮利用效率 两品种氮素累积量随施氮量增加而增加,3 种类型氮肥表现一致。低 N 条件下,氮肥利用率(NUE)在 42%~49%之间(ZU 90 除外),高 N 下在 24%~37%之间,施氮量增大导致两品种 NUE 均下降约 15 个百分点。与尿素相比,包膜尿素与复合肥利用率较高,郑单 958 低 N 与农大 108 高 N 下表现尤为明显(表 6)。

氮生理效率(NPE)反映作物吸氮量对生物产量的贡献大小,是衡量氮利用效率高低的重要指标之一。两品种不施氮时 NPE 在 105 kg/kg 左右,施氮使之显著下降,郑单 958 施氮处理在 89~94 kg/kg 之间,农大 108 施氮处理在 86~96 kg/kg 之

间,低 N 较高 N 略高。氮肥效率(NFE)反映作物当季施氮量对经济产量的贡献大小,用以衡量氮肥施用的经济效益高低。NFE 随施氮量增加显著下降,低 N 下,郑单 958 NFE 在 109~117 kg/kg 之间,以复合肥最大,尿素最小,而农大 108 在 100 kg/kg 左右,3 种氮肥之间差异极小;高 N 下,郑单 958 在 59 kg/kg 左右,农大 108 在 52 kg/kg 左右,氮肥类型间差异不大(表 6)。可见,从氮肥效率来看,郑单 958 低 N 下对氮肥类型较敏感,而农大 108 无论高 N 还是低 N 下对氮肥类型表现均较迟钝;氮肥效率具明显基因型差异,高 N 与低 N 下均以郑单 958 较高。

2.3.2 冬小麦氮素累积与夏玉米季的施氮后效 夏玉米季施氮对冬小麦氮素累积、氮生理效率与氮肥效率具有明显影响。冬小麦氮素累积量因夏玉米

季施氮而增大,除ZCU 1、ZCF 1 与NCU 1 外的其他夏玉米季施氮处理显著高于不施氮处理;冬小麦氮生理效率表现前季施氮处理低于不施氮处理,且前季高 N 处理低于低 N 处理,各类型氮肥表现一致;

氮肥效率表现前季施氮处理大于不施氮处理,高、低 N 处理间的差异与氮肥类型有关,尿素表现低 N > 高 N,另两种氮肥表现相反(表 7)。

表 6 夏玉米地上部氮素累积量与氮利用效率

Table 6 Shoot N accumulation amount (NAA) and nitrogen utilization efficiency in summer maize

处理 Treat ment	氮素累 积量 NAA (kg /hm ²)	氮肥利 用率 NUE (%)	氮生理效率 N physiological efficiency (kg /kg)	氮肥效率 N fertilizer efficiency (kg /kg)	处理 Treat ment	氮素累 积量 NAA (kg /hm ²)	氮肥利 用率 NUE (%)	氮生理效率 N physiological efficiency (kg /kg)	氮肥效率 N fertilizer efficiency (kg /kg)
Z 0	166.33 _c	—	106.48 _a	—	N 0	152.46 _c	—	103.86 _a	—
ZU 1	192.48 _b	29.06 _b	92.81 _b	109.73 _a	NU 1	195.14 _b	47.43 _a	93.38 _b	100.95 _a
ZU 2	209.63 _a	24.06 _b	91.09 _b	59.01 _b	NU 2	200.93 _b	26.93 _c	93.31 _b	51.72 _b
ZCU 1	204.22 _{ab}	42.10 _a	90.08 _b	112.25 _a	NCU 1	196.23 _b	48.63 _a	92.56 _b	99.75 _a
ZCU 2	214.44 _a	26.73 _b	89.13 _b	58.74 _b	NCU 2	219.33 _a	37.15 _b	86.47 _c	51.82 _b
ZCF 1	206.99 _{ab}	45.19 _a	92.55 _b	116.58 _a	NCF 1	195.53 _b	47.86 _a	96.03 _b	100.92 _a
ZCF 2	209.87 _a	24.19 _b	93.69 _b	59.75 _b	NCF 2	211.40 _{ab}	32.74 _b	89.49 _{bc}	52.76 _b

表 7 冬小麦氮素累积量、氮生理效率、氮肥效率与夏玉米季施氮后效

Table 7 N accumulation amount (NAA), N physiological efficiency (NPE) and N fertilizer efficiency (NFE) of winter wheat and aftereffect of nitrogen applied in summer maize season (ANS M)

夏玉米季 施氮处理 N treat ment in summer maize	氮素累 积量 NAA (kg /hm ²)	氮生理 效率 NPE (kg /kg)	氮肥 效率 NFE (kg /kg)	夏玉米季 施氮后效 ANS M (%)	夏玉米季 施氮处理 N treat ment in summer maize	氮素累 积量 NAA (kg /hm ²)	氮生理 效率 NPE (kg /kg)	氮肥 效率 NFE (kg /kg)	夏玉米季 施氮后效 ANS M (%)
Z 0	159.6 _b	82.3 _a	27.9 _a	—	N 0	147.2 _c	88.2 _a	27.2 _b	—
ZU 1	184.1 _a	74.1 _b	29.7 _a	27.1 _{9a}	NU 1	166.2 _{ab}	84.6 _{ab}	29.8 _a	21.1 _{2a}
ZU 2	182.2 _a	71.6 _b	28.4 _a	12.5 _{6c}	NU 2	177.2 _a	75.5 _c	28.0 _{ab}	16.6 _{9b}
ZCU 1	168.1 _b	77.7 _{ab}	28.6 _a	9.4 _{0d}	NCU 1	150.5 _c	85.2 _{ab}	27.3 _b	3.7 _{3d}
ZCU 2	186.8 _a	71.4 _b	28.9 _a	15.0 _{9b}	NCU 2	182.7 _a	77.9 _{bc}	30.2 _a	19.7 _{2a}
ZCF 1	161.3 _b	79.8 _{ab}	27.6 _a	2.0 _{5c}	NCF 1	162.2 _b	80.3 _{bc}	27.7 _b	16.6 _{4b}
ZCF 2	181.8 _a	73.6 _b	28.6 _a	12.3 _{0c}	NCF 2	170.9 _{ab}	80.1 _{bc}	28.7 _{ab}	13.1 _{7c}

夏玉米季氮肥在冬小麦季的后效显著,最大的是尿素低 N 处理(ZU 1、NU 1),在 20%以上,其次是包膜尿素高 N 处理(ZCU 2、NCU 2),再次是尿素高 N 处理(ZU 2、NU 2)。复合肥高 N 处理后效也较为可观,在 13%左右。包膜尿素与复合肥低 N 处理后效较低,一般在 10%以下(表 7)。

2.4 夏玉米—冬小麦周年水、氮利用

两季总产量ZCF 2 最高,其次是ZCU 2 与ZU 2,一般表现高 N > 低 N > 不施氮的趋势,同时夏玉米品种为郑单 958 的处理产量明显高于农大 108 处理;总氮素累积量与总耗水量均表现高 N > 低 N > 不施氮趋势;周年氮肥效率表现夏玉米不施氮 > 低 N > 高 N 趋势,夏玉米季为郑单 958 的略大于农大 108 各相应处理,两品种氮肥类型间差异都很小;夏玉米季为郑单 958 时,周年水分利用效率处理间差

异极小,夏玉米季为农大 108 时,施氮处理明显大于不施氮处理,尿素低 N > 高 N,另两种氮肥表现相反;夏玉米施氮总利用率,无论前季为何品种,低 N 下尿素最高,高 N 下包膜尿素最高(表 8)。

3 小结与讨论

3.1 氮肥类型与施氮量对夏玉米、冬小麦及周年产量与水、氮利用的影响

随施氮量增大,夏玉米产量、耗水量与 WUE 增大,NUE 降低。氮肥类型间 WUE 存在差异,郑单 958 复合肥 > 尿素 > 包膜尿素,农大 108 处理间差异较小,也以复合肥处理略大;施氮量由 90 kg /hm² 增大至 180 kg /hm²,两品种NUE 均下降约 15 个百分点。夏玉米 WUE 与 NUE 均具有明显基因型差异,WUE 以郑单 958 较大,而 NUE 以农大 108 较

大。包膜尿素与复合肥利用率较尿素高，郑单 958 现尤为明显。
施 N 90 kg /hm² 与农大 108 施 N 180 kg /hm² 时表

表 8 各氮肥处理下夏玉米—冬小麦周年产量与水、氮利用效率

Table 8 Total yield and annual water and nitrogen utilization efficiency in summer
maize winter wheat rotation system under different N fertilizer treatments

夏玉米季 施氮处理 N treat ment in summer maize	总产量 Total yield (kg /hm ²)	总氮素 累积量 Total NAA (kg /hm ²)	总耗水量 Total WC (m ³ /hm ²)	周年氮肥 效率 Annual NFE (kg /kg)	周年水分 利用效率 Annual WUE (kg /m ³)	夏玉米施氮总利用率 Total use efficiency of N applied in summer maize (%)
Z 0	15408. 3 _b	325. 2 _c	7782. 7 _b	72. 9 _a	1. 98 _a	—
ZU 1	16160. 6 _{ab}	376. 0 _b	8217. 8 _{ab}	53. 0 _b	1. 97 _a	56. 25 _a
ZU 2	16629. 4 _a	391. 9 _a	8444. 1 _a	42. 5 _c	1. 97 _a	36. 63 _c
ZCU 1	16145. 9 _{ab}	372. 3 _b	8418. 8 _a	53. 0 _b	1. 92 _a	51. 51 _{ab}
ZCU 2	16687. 2 _a	401. 2 _a	8558. 1 _a	42. 6 _c	1. 95 _a	41. 82 _c
ZCF 1	16426. 4 _a	368. 4 _b	8297. 9 _{ab}	54. 3 _b	1. 98 _a	47. 24 _b
ZCF 2	16798. 9 _a	391. 3 _a	8517. 9 _a	42. 9 _c	1. 97 _a	36. 33 _c
N 0	13667. 1 _c	299. 6 _d	7877. 0 _b	64. 6 _a	1. 74 _b	—
NU 1	15396. 2 _{ab}	361. 3 _{bc}	7977. 6 _{ab}	51. 1 _b	1. 93 _a	68. 54 _a
NU 2	15236. 1 _{ab}	378. 1 _b	8393. 7 _a	38. 9 _c	1. 82 _{ab}	43. 61 _d
NCU 1	14793. 0 _b	346. 8 _c	8054. 0 _{ab}	49. 1 _b	1. 84 _{ab}	52. 36 _c
NCU 2	15704. 9 _a	402. 0 _a	8307. 2 _a	40. 1 _c	1. 89 _a	56. 87 _{bc}
NCF 1	14933. 4 _{ab}	353. 7 _c	8120. 9 _{ab}	49. 3 _b	1. 84 _{ab}	60. 03 _b
NCF 2	15571. 6 _a	382. 3 _b	8212. 0 _{ab}	39. 8 _c	1. 90 _a	45. 92 _d

夏玉米季施氮对冬小麦产量与 WUE 影响显著,但因夏玉米季品种、氮肥类型与施氮量不同而表现有差异,前季为农大 108 时,冬小麦季产量和 WUE 均因施氮而提高,前季为郑单 958 时,施氮使冬小麦季产量提高,而 WUE 降低;不同类型氮肥高、低 N 处理间的冬小麦季产量与 WUE 差异在品种间表现一致,尿素表现低 N > 高 N,包膜尿素与复合肥表现高 N > 低 N。夏玉米施氮使冬小麦氮素累积量与氮肥效率提高,而氮生理效率降低。

氮肥类型与施氮量明显影响两季作物总产量、总氮素累积量、总耗水量及周年水、氮利用效率,同时也因夏玉米品种不同而表现出较大差异。总产量一般表现高 N > 低 N > 不施氮趋势;氮肥类型影响总产量,且在夏玉米季为农大 108 时表现较明显,高 N 下以包膜尿素处理较大,低 N 下以尿素处理较大;总氮素累积量与总耗水量均表现高 N > 低 N > 不施氮趋势,而周年氮肥效率表现不施氮 > 低 N > 高 N 趋势,且氮肥类型间差异小;周年水分利用效率,夏玉米季为郑单 958 的处理间差异较小,夏玉米季为农大 108 的施氮处理明显大于不施氮处理;夏玉米施氮总利用率,无论前季为何品种,低 N 下尿素最高,高 N 下包膜尿素最高。

3.2 夏玉米季施氮对冬小麦后效的氮肥类型间差异

夏玉米施氮在冬小麦季的后效显著,最大的是尿素低 N 处理(ZU 1、NU 1),其次是包膜尿素高 N 处理(ZCU 2、NCU 2),再次是尿素高 N 处理(ZU 2、NU 2),复合肥高 N 处理后效也较为可观。在 13% 左右,包膜尿素低 N 处理后效较低,在 3.7%~9.4% 之间。可见,夏玉米施氮对冬小麦的后效大小与氮肥类型有关。究其原因,应与 2004 年天气及各类型氮肥的特性有关。2004 年降水较多,且一半集中在 9 叶展以前,此时玉米植株尚小,对氮素需求不大,而研究表明尿素施入土壤后,一般 5~7 d 之内就转化成了硝态氮^[13~14],因此可以想见此阶段造成了尿素的大量淋失;包膜尿素与复合肥具有一定缓释作用,其低 N 处理较好地控制了肥料氮的下移,但在高 N 下,两者溶出氮素在土壤中浓度可能超过了某一限度,因此也造成了一定量的淋失。玉米根系较冬小麦浅,因此玉米季淋溶到根层以下的氮素可以被小麦根系吸收利用,也因此尿素处理及包膜尿素与复合肥高 N 处理对冬小麦的后效较为明显,而包膜尿素低 N 处理后效不甚明显。

提高夏玉米施氮对冬小麦的后效,也是一条提高夏玉米—冬小麦整个轮作周期的氮肥利用率的途径。研究^[13]表明,实行冬小麦节水栽培有利于提高

整个轮作周期的水、氮利用效率,其基本原理在于:华北平原降水多集中在夏玉米季,实行冬小麦节水栽培有利于腾出土壤贮水库容,在夏玉米生育期间雨季来临时接纳尽可能多的降水,避免径流造成水、氮损失,同时,节水栽培可促进冬小麦根系下扎,从而可以截获并利用夏玉米季淋溶到下层土体的肥料氮,由此达到提高周年水、氮利用效率的目的。

参 考 文 献:

[1] 赵久然,郭 强,郭景伦,等.北京郊区粮田化肥投入和产量现状的调查分析[J].北京农业科学,1997,(2):36—38.
[2] 李新慧.京郊粮田土壤氮素损失机制与提高氮肥利用率技术研究[J].北京土壤学会简讯,1999,2(5):5—8.
[3] 周顺利.高产条件下冬小麦、夏玉米氮营养特性的基因型差异及氮肥推荐[D].北京:中国农业大学,2000.
[4] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦/夏玉米轮作中NO₃⁻-N 在土壤剖面的累积及移动[J].土壤学报,2003,40(4):538—546.
[5] 周顺利,张福锁,王兴仁.土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏Ⅱ·夏玉米[J].生态学报,2002,22(1):49—53.
[6] Liang B C, MacKenzie A F. Changes of soil nitrate ⁻nitrogen and

denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils [J]. J of Environ Qual ., 1994,23(3):521—525.
[7] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.213—249.
[8] 邹国元,张福锁,陈新平,等.农田土壤硝化—反硝化作用与N₂O 的排放[J].土壤与环境,2001,10(4):273—276.
[9] 吴永成,周顺利,王志敏,等.华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J].生态学报,2005,25(7):1620—1625.
[10] 吴永成,周顺利,王志敏,等.节水栽培冬小麦对下层土壤残留氮素的利用[J].生态学报,2005,25(8):1869—1873.
[11] 李建民,王 璞,周殿玺,等.冬小麦节水高产栽培技术及其生理基础研究[A].李建民,周殿玺,王 璞,等.冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[C].北京:中国农业大学出版社,2000.1—16.
[12] 湖南农学院.作物栽培学实验指导[M].北京:农业出版社,1988.
[13] 邹国元,张福锁,李新慧.夏玉米生长期土壤氮素的硝化—反硝化作用研究[J].干旱地区农业研究,2002,20(1):30—34.
[14] 巨晓棠,张福锁.中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J].生态环境,2003,12(1):24—28.
[15] 李建民,周殿玺,王 璞,等.冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[M].北京:中国农业大学出版社,2000.

Effects of different types of nitrogen fertilizer on yield , water and nitrogen utilization of summer maize and its aftercrop winter wheat

Yi Zhen xie^{1,2,3}, WANG Pu^{2,3*}, TU Nai mei¹

(1. College of Agronomy , Hunan Agricultural University , Changsha 410128; 2. College of Agronomy and Biotechnology , China Agricultural University , Beijing 100094, China ; 3. Key Laboratory of Ministry of Agriculture for Crop Production and Farming System , China Agricultural University , Beijing 100094, China)

Abstract : This experiment was conducted to investigate the effects of different types of nitrogen fertilizer (NF) applied in summer maize season on yield , water and nitrogen utilization of summer maize and its aftercrop winter wheat in north China plain . The main results are as follows : (1) Yield , water consumption and water use efficiency (WUE) were increased by the increment of N application rate , while N use efficiency (NUE) was decreased . WUE and NUE of summer maize were affected by type of NF , WUE of compound fertilizer treatment was greater and NUE was improved by applying coated urea and compound fertilizer as compared to urea application , and clear genotype differences on WUE and NUE were observed , WUE of Zhengdan 958 and NUE of Nongda 108 were greater . (2) N physiological efficiency was decreased but NF efficiency was heightened in winter wheat by N application in summer maize , at the same time , yield and WUE of winter wheat were affected obviously , but the effects existed differences between different cultivars , types of NF and N rates . Evident aftereffect of NF applied in summer maize was observed in winter wheat , but the values were different among different types of NF . In common , aftereffects of urea treatments and 180kg /hm² treatment of coated urea and compound fertilizer were bigger . (3) In summer maize winter wheat rotation system , total yield , total N accumulation amount , total water consumption , WUE and NUE were affected evidently by types of NF and N rates in summer maize season , and they also were affected by genotype of summer maize .

Key words : summer maize winter wheat rotation system ; type of nitrogen fertilizer ; water use efficiency ; N use efficiency ; aftereffect of nitrogen fertilizer