

水肥互作对小麦—玉米周年产量及水分利用率的影响

武继承^{1,2},杨永辉^{1,2},郑惠玲³,潘晓莹^{1,2}

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所,河南 郑州 450002;
2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站,河南 原阳 453514; 3. 河南省土壤肥料站,河南 郑州 450008)

摘要:为探明小麦—玉米周年水肥利用效率,在通许县壤质潮土区开展了小麦—玉米周年水肥一体化研究,氮(N)肥设置0、180、90+90、135+45、270、135+135、360、180+180、180+90+90 kg/hm² 8种运筹模式,灌水(W)量设置225、450、675 m³/(hm²·次)3个水平,以期为粮食高产和水肥高效利用提供科学依据。结果表明,水肥一体化对小麦、玉米的生长发育具有积极效果,与不施肥的相应对照相比,小麦株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒质量以及玉米穗行数、行粒数、穗粗、穗长、5穗籽粒质量和百粒质量均有所增加,其中小麦各生育性状以N₁₈₀₊₉₀₊₉₀-W₆₇₅处理表现最好,玉米各生育性状总体以N₁₈₀₊₁₈₀-W₆₇₅处理表现最好。在同等氮肥用量的情况下,分期施肥处理的产量和灌水利用率均高于一次性施肥处理。其中,小麦产量和小麦—玉米综合产量的变化趋势一致,均以N₁₈₀₊₉₀₊₉₀-W₆₇₅处理最高,分别较相应对照增产25.42%和28.43%;玉米产量则以N₁₈₀₊₁₈₀-W₆₇₅处理最高,较相应对照增产33.21%。在不考虑土壤水和降水的情况下,小麦、玉米和小麦—玉米综合的灌水利用率均以小灌水量最高,其中小麦和小麦—玉米综合的灌水利用率分别较对照提高0.75~3.40 kg/m³和1.13~6.14 kg/m³;玉米灌水利用率除N₁₈₀₊₁₈₀-W₄₅₀处理较对照有所减少外,其他处理较对照提高1.72~11.14 kg/m³。

关键词:小麦;玉米;产量;水分利用;水肥一体化

中图分类号: S512.1; S143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)07-0067-06

Effects of Water-Fertilizer Interaction on Yield and Anniversary Water Use Efficiency of Wheat and Corn

WU Jicheng^{1,2}, YANG Yonghui^{1,2}, ZHENG Huiling³, PAN Xiaoying^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural sciences, Zhengzhou 450002, China;
2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China;
3. Station of Henan Soil and Fertilizer, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: In order to study the anniversary water and fertilizer use efficiency of wheat and corn, the experiment of water and fertilizer interaction in wheat-corn cropping system was carried on the loamy soil in Tongxu county, which included kinds of fertilizer(N) application models(0, 180, 90+90, 135+45, 270, 135+135, 360, 180+180, 180+90+90 kg/ha) and three irrigation(W) levels(225, 450, 675 m³/ha per time), so as to provide scientific basis for high grain yield and efficient utilization of water and fertilizer. The results showed that the integrated management of water and fertilizer had a positive role on growth and development of wheat and corn. Compared with the corresponding control, the plant height, ear

收稿日期:2014-12-20
基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划(2013BAD07B07-6, 2013AA102904-2);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077);河南省重点科技攻关计划项目(142102110067)
作者简介:武继承(1965-),男,河南通许人,研究员,博士,主要从事节水农业、农业生态和土壤肥料方面的研究。
E-mail:wujc2065@126.com

length, number of grains per spike, spikelets and 1 000-grain-weight of wheat, and the rows per ear, grain number per row, ear diameter, ear length, grain-weight of five ears and 100-grain-weight of corn increased, the best for wheat was the treatment with basal fertilizer of 180 kg/ha plus twice topdressing of 90 kg/ha and irrigation of 675 m³/ha per time ($N_{180+90+90}-W_{675}$), and the best for corn was the treatment with basal fertilizer of 180 kg/ha plus once topdressing of 180 kg/ha and irrigation of 675 m³/ha per time ($N_{180+180}-W_{675}$). Under the same N fertilizer application amount, the yield and irrigation use efficiency of the treatments with split fertilization were higher than that of the treatments with one-time fertilization. At the same time, the yield of wheat had the same change tendency as the comprehensive yield of wheat-corn, the treatment $N_{180+90+90}-W_{675}$ had the highest wheat yield and comprehensive yield of wheat and corn, which increased by 25.42% and 28.43% respectively compared to the corresponding control. For corn, the treatment $N_{180+180}-W_{675}$ had the highest yield, which increased by 33.21% compared to the corresponding control. Without consideration of soil water and precipitation, the irrigation use efficiency of wheat, corn and wheat-corn were the highest under the small irrigation volume, compared with the corresponding control, which increased by 0.75—3.40 kg/m³ and 1.13—6.14 kg/m³ respectively; except the treatment with 180 kg/ha basal fertilizer plus once topdressing of 180 kg/ha and irrigation of 450 m³/ha per time, the irrigation use efficiency of corn increased by 1.72—11.14 kg/m³ compared with the corresponding control.

Key words: wheat; corn; yield; water use efficiency; water and fertilizer integrated management

河南省是农业大省,又是水资源严重缺乏的省份,人均水资源量仅 412 m³,地下水漏斗面积约占平原面积的 20%,常年缺水量 50 亿 m³;灌水利用系数仅 0.52 左右,水分利用率仅 1.0 ~ 1.2 kg/m³^[1]。因此,提高水分利用率是解决水资源供需矛盾的重要途径。单独灌水或施用氮肥对小麦均具有明显增产效果^[2],而水肥一体化对作物产量和水分利用率具有重要作用。李开峰等^[3]研究表明,小麦产量在土壤水分田间持水量的 75%、纯氮用量为 360 kg/hm² 时最高,土壤水分超过田间持水量的 75% 时产量降低。赵淑章等^[4]、孔东等^[5]研究水氮运筹与强筋小麦产量和品质的关系发现,于拔节期和开花期配施水、氮小麦产量表现最佳。顾国俊等^[6]研究发现,高氮条件下灌拔节水+灌浆水或灌拔节水均可实现水肥高效耦合。王小燕等^[7]探讨水氮互作对小麦旗叶光合特性、籽粒产量、氮素利用率和水分利用率的影响时发现,高产条件下施纯氮 240 kg/hm² 并灌底墒水、拔节水和开花水的处理籽粒产量、水分利用率和氮肥利用率较好。姚战军等^[8]研究发现,在基施 60% 氮肥条件下,以灌拔节水+孕穗水并于孕穗期追施 40% 氮肥处理的产量表现最好。李绍飞等^[9]比较 6 种不同水肥耦合节水灌溉条件下冬小麦的生长、田间耗水、土壤含水量、产量及水分利用效率等发现,灌水越多,耗水量、耗水强度越大,施肥量增加,耗水量下降;相同灌水条件下,施肥越多,产量越高;产量以高水中肥最佳,水分利用效率则以中量灌水最好。翟军海等^[10]研究了补充

灌水与施氮肥及秸秆覆盖对冬小麦生长和产量的影响,表明施氮肥对冬小麦生长发育和产量的促进作用最明显,单独覆盖秸秆或补充灌水基本无效甚至出现负作用。王德权等^[11]研究表明,小麦光合特性和水分利用效率在灌溉量 5 550 m³/hm² 条件下显著高于其他水肥处理。上述研究大多集中于小麦水肥一体化的增产效果方面,而目前关于小麦—玉米周年水肥技术的研究十分缺乏^[12-13]。为此,探讨了水氮互作对小麦—玉米周年产量及水分利用率的影响,旨在为粮食高产和水肥高效利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验在河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所通许县节水农业试验示范基地进行,土壤为壤质潮土,土壤耕层含有机质 15.6 g/kg、水解氮 75.8 mg/kg、速效磷 18.5 mg/kg、速效钾 89.4 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 3 个灌溉(W)水平:225、450、675 m³/(次·hm²),分别于拔节期和灌浆期各进行 1 次灌溉;氮(N)肥设置 4 个水平 8 种运筹方式,分别为:0(对照)、180、135+135、180+180、360、180+90+90、135+45、270 kg/hm²(表 1)。氮肥 1 次施肥为底施;与磷(P₂O₅, 90 kg/hm²)、钾(K₂O, 90 kg/hm²)肥一同施入;氮肥 2 次施肥为底施+拔节期或灌浆期追施;氮肥 3 次施肥为底施+拔节期追施+灌浆

期追施。小麦生育期和玉米生育期水肥管理一致。

表 1 水肥一体化试验设计

灌水量/[m ³ /(次·hm ²)]				氮肥施用量/(kg/hm ²)				
225	0	180	135 + 135	180 + 180	360	180 + 90 + 90	135 + 45	270
450	0	180	135 + 135	180 + 180	360	180 + 90 + 90	135 + 45	270
675	0	180	135 + 135	180 + 180	360	180 + 90 + 90	135 + 45	270

1.3 测定项目与方法

小麦、玉米收获后进行考种,小麦株高和穗长、玉米穗粗和穗长采用精度为 1 mm 的卷尺进行测量;小麦小穗数、穗粒数、不孕小穗数及玉米穗行数、行粒数采用人工查数测定;小麦千粒质量和玉米 5 穗籽粒质量、百粒质量采用精度为 0.01 g 的电子天平称量。收获时以小麦每小区收获 4 m² 产量记产,玉米以每小区 3 行玉米产量记产,将其折合成每公顷产量。并计算灌水利用率,灌水利用率 = 产量/灌水量。

1.4 数据处理

试验数据应用 DPS 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 水肥互作对小麦、玉米生长及产量构成因素的影响

由表 2 可知,与对照(CK1、CK2、CK3)相比,同灌溉条件下,施用氮肥处理小麦株高分别较其相应对照增加 2.82 ~ 14.95 cm、5.54 ~ 15.71 cm、7.64 ~ 20.13 cm,以 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理最高, N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理次之, N₁₃₅₊₁₃₅ - W₂₂₅ 处理最低;施用氮肥处理小麦穗长分别较其相应对照增加 0.52 ~ 1.40 cm、1.21 ~ 2.21 cm、0.73 ~ 1.30 cm,以 N₂₇₀ - W₄₅₀ 处理最长,达 8.48 cm,其次为 N₂₇₀ - W₆₇₅ 处理;施用氮肥处理小麦小穗数分别较其相应对照增加 0.52 ~ 1.59 个、1.31 ~ 2.00 个、1.07 ~ 2.31 个,以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理最多,达 17.67 个,其次为 N₁₃₅₊₁₃₅ - W₆₇₅ 处理;施用氮肥处理的小麦不孕小穗数分别较相应对照减少 0.65 ~ 1.61 个、0.64 ~ 2.27 个、0.22 ~ 1.53 个,其中 N₂₇₀ - W₄₅₀ 处理的不孕小穗数最少, N₁₈₀ - W₄₅₀ 处理次之;施用氮肥处理小麦穗粒数分别较其相应对照增加 6.21 ~ 11.09 粒、5.98 ~ 10.29 粒、6.68 ~ 10.56 粒,以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理最多, N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理次之;施用氮肥处理小麦千粒质量分别较其相应对照增加 2.8 ~ 5.6 g、3.2 ~ 6.0 g、2.6 ~ 5.0 g,以 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 和 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理最高,其次为 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₄₅₀ 处理。相同氮肥施用量情况下,小麦株高、穗长、小穗数、穗粒数及千粒质量总体均随灌水量的增加呈上升趋势,且所有施肥处

理上述指标均高于对照,不孕小穗数总体低于对照。综合分析,以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理最优, N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理次之。

表 2 不同水肥处理对小麦生长及产量构成因素的影响

处理	株高/ cm	穗长/ cm	小穗数/ 个	不孕小 穗数/个	穗粒数	千粒质 量/g
N ₀ - W ₂₂₅ (CK1)	56.40	6.74	15.18	3.55	26.09	39.6
N ₀ - W ₄₅₀ (CK2)	56.99	6.27	15.14	3.50	28.29	40.4
N ₀ - W ₆₇₅ (CK3)	56.04	7.03	15.36	2.91	29.55	41.8
N ₁₈₀ - W ₂₂₅	62.53	7.29	15.70	2.90	32.30	43.0
N ₁₈₀ - W ₄₅₀	64.14	7.62	16.45	1.27	34.27	43.8
N ₁₈₀ - W ₆₇₅	68.99	8.07	16.54	1.38	36.23	44.4
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₂₂₅	61.34	7.32	16.36	2.18	37.18	43.4
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₄₅₀	65.22	7.48	16.75	2.25	38.58	44.4
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₆₇₅	63.68	7.80	17.25	2.17	38.17	45.0
N ₂₇₀ - W ₂₂₅	66.27	8.14	16.20	2.00	32.73	42.4
N ₂₇₀ - W ₄₅₀	66.28	8.48	16.63	1.23	35.69	43.6
N ₂₇₀ - W ₆₇₅	68.39	8.33	17.18	1.55	38.82	45.2
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₂₂₅	59.22	7.76	16.43	2.65	34.53	44.0
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₄₅₀	62.53	7.84	16.92	2.67	36.33	44.0
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₆₇₅	65.64	7.97	17.50	1.63	39.31	45.2
N ₃₆₀ - W ₂₂₅	64.46	7.26	16.40	1.94	33.29	44.2
N ₃₆₀ - W ₄₅₀	65.71	7.66	17.00	2.23	36.31	44.4
N ₃₆₀ - W ₆₇₅	66.42	7.88	16.43	2.69	37.46	45.2
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₂₂₅	71.35	7.91	16.77	2.31	36.46	44.8
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₄₅₀	72.70	8.12	17.14	2.29	38.50	44.6
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₆₇₅	76.17	7.76	17.23	2.31	39.38	46.8
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₂₂₅	67.58	7.68	16.36	2.55	36.55	45.2
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₄₅₀	72.59	7.86	16.71	2.86	38.07	46.4
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₆₇₅	75.32	7.94	17.67	2.33	40.11	46.8

从表 3 可以看出,不同水肥处理对玉米生长及其产量构成因素具有积极影响。同灌溉量条件下,施用氮肥处理玉米穗粗分别较其相应对照增加 0.16 ~ 2.58 cm、0.82 ~ 2.54 cm、0.58 ~ 2.26 cm,以 N₂₇₀ - W₂₂₅ 处理最大,达 15.04 cm,其次为 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理;施用氮肥处理玉米穗长分别较其相应对照增加 0.74 ~ 4.12 cm、1.04 ~ 3.32 cm、0 ~ 3.40 cm,以 N₁₃₅₊₁₃₅ - W₆₇₅ 处理最长,达 14.80 cm,其次为 N₃₆₀ - W₂₂₅ 处理;施用氮肥处理玉米穗行数分别较其相应对照增加 0.4 ~ 1.2 行、0.4 ~ 1.6 行、0 ~ 0.2 行,以 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理最多,为 15.6 行,其次为 N₂₇₀ - W₄₅₀ 处理;施用氮肥处理行粒数分别较其相应对照增加 4.1 ~ 10.5 粒、1.0 ~ 5.2 粒、3.8 ~ 9.2 粒,以 N₂₇₀ - W₆₇₅ 处理最多,其次为 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理;

施用氮肥处理 5 穗籽粒质量分别较其相应对照增加 66 ~ 231 g、77 ~ 210 g、166 ~ 251 g,以 $N_{270} - W_{675}$ 处理最大,其次为 $N_{135+45} - W_{675}$ 处理;施用氮肥处理百粒质量分别较其相应对照增加 4.3 ~ 5.7 g、2.5 ~ 4.1 g、2.6 ~ 4.2 g,以 $N_{180+180} - W_{675}$ 处理最大,其次

为 $N_{180+90+90} - W_{450}$ 和 $N_{180+90+90} - W_{675}$ 处理。相同氮肥施用量情况下,各指标表现不一,没有明显的规律。综合分析,以 $N_{180+180} - W_{675}$ 处理最优, $N_{180+90+90} - W_{675}$ 处理次之。

表 3 不同水肥处理对玉米生长及产量构成因素的影响

处理	穗粗/ cm	穗长/ cm	穗行 数	行粒 数	5 穗籽粒 质量/g	百粒质 量/g
$N_0 - W_{225}$ (CK1)	12.46	10.36	13.6	22.3	416	24.1
$N_0 - W_{450}$ (CK2)	12.26	10.78	13.6	26.2	427	26.1
$N_0 - W_{675}$ (CK3)	12.66	11.40	14.4	25.0	438	26.2
$N_{180} - W_{225}$	13.90	12.50	14.8	26.4	482	28.8
$N_{180} - W_{450}$	13.48	11.82	14.6	27.2	504	29.4
$N_{180} - W_{675}$	13.62	13.40	14.8	29.4	612	29.8
$N_{135+45} - W_{225}$	13.95	13.55	14.8	27.3	596	28.4
$N_{135+45} - W_{450}$	13.48	13.36	14.4	30.2	604	29.3
$N_{135+45} - W_{675}$	13.92	13.56	14.8	30.2	674	28.8
$N_{270} - W_{225}$	15.04	13.8	14.4	28.3	575	28.7
$N_{270} - W_{450}$	13.08	13.38	15.2	31.0	579	28.6
$N_{270} - W_{675}$	13.54	14.22	14.4	34.2	689	29.1
$N_{135+135} - W_{225}$	14.02	13.34	14.6	31.4	642	28.8
$N_{135+135} - W_{450}$	14.80	14.10	14.0	32.2	584	29.7
$N_{135+135} - W_{675}$	13.24	14.80	14.6	32.4	629	29.6
$N_{360} - W_{225}$	12.84	14.48	14.0	32.8	647	29.2
$N_{360} - W_{450}$	13.28	13.30	14.4	29.6	585	29.1
$N_{360} - W_{675}$	14.90	14.20	14.8	28.8	604	29.8
$N_{180+180} - W_{225}$	12.82	11.10	14.4	27.8	509	29.8
$N_{180+180} - W_{450}$	13.22	13.76	14.4	31.4	599	30.1
$N_{180+180} - W_{675}$	14.92	13.90	15.6	32.0	647	30.4
$N_{180+90+90} - W_{225}$	12.62	12.06	14.4	29.0	598	29.1
$N_{180+90+90} - W_{450}$	14.40	11.90	14.4	29.9	637	30.2
$N_{180+90+90} - W_{675}$	14.40	11.40	14.8	33.0	644	30.2

2.2 水肥互作对小麦、玉米产量和灌水利用率的影响

从表 4 可以看出,水肥处理对小麦、玉米产量均具有促进作用。水肥处理小麦产量分别较其相应对照 (CK1、CK2、CK3) 增产 9.94% ~ 19.84%、11.56% ~ 24.2%、12.2% ~ 25.42%,3 种灌溉量下均以 $N_{180+90+90}$ 处理效果最佳,其次为 $N_{180+180}$ 、 $N_{135+135}$ 处理;在相同氮肥施用量情况下,分期施肥处理的增产幅度高于一次性施肥,其中氮肥施用量 360 kg/hm² 情况下,3 次施肥高于 2 次施肥。水肥处理玉米产量分别较其相应对照 (CK1、CK2、CK3) 增产 34.38% ~ 53.64%、27.14% ~ 41.87%、20.48% ~ 33.21%,以 $N_{180+180}$ 处理效果最佳,其次为 $N_{180+90+90}$ 、 N_{360} 处理,说明玉米对氮肥的需求量较高;在相同氮肥施用量情况下,分期施肥处理的增产幅度高于一次性施肥,但氮肥施用量 360 kg/hm² 情况下,与小麦不同的是 2 次施肥高于 3 次施肥,说明玉米前期需肥量较大,后期追肥增产效果不明显。水

肥处理小麦、玉米综合产量分别较其相应对照 (CK1、CK2、CK3) 增产 20.86% ~ 32.99%、18.85 ~ 31.26%、16.16% ~ 28.43%,与小麦产量趋势一致,以 $N_{180+90+90} - W_{675}$ 处理效果最佳,其次为 $N_{180+180} - W_{675}$ 、 $N_{180+90+90} - W_{450}$ 处理;在相同氮肥施用量情况下,分期施肥处理的增产幅度高于一次性施肥。说明,分期施肥与补充灌溉相结合的水肥一体化模式更有利于实现增产增效。

在不考虑土壤水分和降水的情况下,小麦灌水利用率以小灌水量处理最高,与相应对照 (CK1、CK2、CK3) 相比,分别提高 1.70 ~ 3.40 kg/m³、1.02 ~ 2.13 kg/m³、0.75 ~ 1.55 kg/m³。玉米灌水利用率也以小灌水量处理较高,与相应对照相比,除了 $N_{180+180} - W_{450}$ 处理外,其他处理分别增加 7.14 ~ 11.14 kg/m³、3.14 ~ 4.55 kg/m³ (除 $N_{180+180}$ 处理较对照减少 0.63 kg/m³)、1.72 ~ 7.29 kg/m³。小麦、玉米综合灌水利用率与玉米表现趋势一致,与相应对照相比,分别增加 3.88 ~ 6.14 kg/m³、1.86 ~ 3.09

kg/m³、1.13 ~ 2.00 kg/m³。在相同氮肥施用量情况下,分期施肥处理的灌水利用率均高于一次性施肥,在氮肥施用量 360 kg/hm² 情况下,小麦及小麦和玉米综合灌水利用率总体均表现为 3 次施肥高于 2 次

施肥,玉米则表现为 2 次施肥高于 3 次施肥。
由此可见,分期施肥与补充灌溉相结合的水肥一体化模式不仅能够实现增产,同时也可以实现节水增效。

表 4 不同水肥处理对小麦—玉米周年产量及灌水利用率的影响

处理	小麦			玉米			小麦 + 玉米		
	产量/ (kg/hm ²)	较相应 CK ± %	灌水利用 率/(kg/m ³)	产量/ (kg/hm ²)	较相应 CK ± %	灌水利用 率/(kg/m ³)	产量/ (kg/hm ²)	较相应 CK ± %	灌水利用 率/(kg/m ³)
N ₀ - W ₂₂₅ (CK1)	7 713.0		17.14	6 231.0		20.77	13 944.0		18.59
N ₀ - W ₄₅₀ (CK2)	7 914.0		8.79	6 946.5		11.58	14 860.5		9.91
N ₀ - W ₆₇₅ (CK3)	8 260.5		6.12	7 573.5		8.42	15 834.0		7.04
N ₁₈₀ - W ₂₂₅	8 479.5	9.94	18.84	8 373.0	34.38	27.91	16 852.5	20.86	22.47
N ₁₈₀ - W ₄₅₀	8 829.0	11.56	9.81	8 832.0	27.14	14.72	17 661.0	18.85	11.77
N ₁₈₀ - W ₆₇₅	9 268.5	12.20	6.87	9 124.5	20.48	10.14	18 393.0	16.16	8.17
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₂₂₅	8 686.5	12.62	19.30	8 982.0	44.15	29.94	17 668.5	26.71	23.56
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₄₅₀	8 991.0	13.61	9.99	9 174.0	32.07	15.29	18 165.0	22.24	12.11
N ₁₃₅₊₄₅ - W ₆₇₅	9 400.5	13.80	6.96	9 426.0	24.46	15.71	18 826.5	18.90	8.37
N ₂₇₀ - W ₂₂₅	8 482.5	9.98	18.85	8 796.0	41.17	29.32	17 278.5	23.91	23.04
N ₂₇₀ - W ₄₅₀	8 848.5	11.81	9.83	8 995.5	29.50	14.99	17 844.0	20.08	11.90
N ₂₇₀ - W ₆₇₅	9 385.5	13.62	6.95	9 370.5	23.73	10.41	18 756.0	18.45	8.34
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₂₂₅	8 845.5	14.68	19.66	8 886.0	42.61	29.62	17 731.5	27.16	23.64
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₄₅₀	9 015.0	13.91	10.02	9 240.0	33.02	15.40	18 255.0	22.84	12.17
N ₁₃₅₊₁₃₅ - W ₆₇₅	9 666.0	17.01	7.16	9 448.5	24.76	10.50	19 114.5	20.72	8.50
N ₃₆₀ - W ₂₂₅	8 755.5	13.52	19.46	9 147.0	46.80	30.49	17 902.5	28.39	23.87
N ₃₆₀ - W ₄₅₀	9 280.5	17.27	10.31	9 243.0	33.06	15.41	18 523.5	24.65	12.35
N ₃₆₀ - W ₆₇₅	9 438.0	14.25	6.99	9 535.5	25.91	10.60	18 973.5	19.83	8.43
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₂₂₅	8 971.5	16.32	19.94	9 573.0	53.64	31.91	18 544.5	32.99	24.73
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₄₅₀	9 321.0	17.78	10.36	9 855.0	41.87	10.95	19 176.0	29.04	12.78
N ₁₈₀₊₁₈₀ - W ₆₇₅	9 784.5	18.45	7.25	10 089.0	33.21	11.21	19 873.5	25.51	8.83
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₂₂₅	9 243.0	19.84	20.54	9 190.5	47.50	30.64	18 433.5	32.20	24.58
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₄₅₀	9 829.5	24.20	10.92	9 676.5	39.30	16.13	19 506.0	31.26	13.00
N ₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W ₆₇₅	10 360.5	25.42	7.67	9 975.0	31.71	11.08	20 335.5	28.43	9.04

3 结论与讨论

不同补充灌溉与氮肥运筹模式对小麦、玉米生长发育及产量、灌水利用率具有积极影响。小麦株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒质量以及玉米穗行数、行粒数、穗粗、穗长、5 穗籽粒质量和百粒质量均有明显改善,其中小麦各生育性状以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 和 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理表现较好,玉米各生育性状表现不一,没有明显的规律,综合分析也以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 和 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理表现较好。与不施肥对照相比,小麦、玉米、小麦—玉米综合产量较对照分别提高 9.94% ~ 25.42%、20.48% ~ 53.64%、16.16% ~ 32.99%。其中小麦产量和小麦—玉米综合产量均以 N₁₈₀₊₉₀₊₉₀ - W₆₇₅ 处理最高,分别为 10 360.5 kg/hm² 和 20 335.5 kg/hm²,两者变化趋一致,在相同氮肥施用量情况下,分期施肥处理的增产幅度高于一次性施肥,3 次施肥高于 2 次

施肥;玉米产量以 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₆₇₅ 处理最高,达 10 089.0 kg/hm²,较相应对照提高 33.21%。除 N₁₈₀₊₁₈₀ - W₄₅₀ 处理玉米的灌水利用率较相应对照有所降低外,其余水肥处理小麦、玉米和小麦—玉米综合的灌水利用率分别比相应对照提高 0.75 ~ 3.40 kg/m³、1.72 ~ 11.14 kg/m³、1.13 ~ 6.14 kg/m³,且均以小灌水量处理最高。这与王林权等^[14]中、高水量一次性施肥效果较差,基肥 + 追肥则可显著提高小麦籽粒产量的结果相一致;与李绍飞等^[9]不同水肥耦合节水灌溉条件下,灌水量越多,耗水量、耗水强度越大,施肥量增加耗水量下降,相同灌水条件下,施肥越多,产量越高的结果吻合;与顾国俊等^[6]高氮条件下拔节水 + 灌浆水或拔节水均可实现水肥高效耦合的结果相吻合。综上所述,分期施肥与补充灌溉相结合的水肥一体化模式不仅能够实现增产,同时可以实现节水增效。

参考文献:

- [1] 郑惠玲. 测墒补灌与氮肥运筹方式配合对不同小麦品种水肥利用的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2014.
 - [2] 张凤翔, 周明耀, 徐华平, 等. 水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(2): 22-24.
 - [3] 李开峰, 张富仓, 祁有玲, 等. 根区水肥空间耦合对冬小麦生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3154-3160.
 - [4] 赵淑章, 季书勤. 水氮运筹与强筋小麦产量和品质关系研究[J]. 土壤肥料, 2005(6): 23-26.
 - [5] 孔东, 晏云, 段艳, 等. 不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 36-40.
 - [6] 顾国俊, 季仁达, 吴传万. 水肥耦合对小麦产量的影响研究[J]. 园艺与种苗, 2012(1): 11-13.
 - [7] 王小燕, 王东, 于振文. 水氮互作对小麦旗叶光合特性、籽粒产量及氮素和水分利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 17-22.
 - [8] 姚战军, 张永刚. 水氮运筹对小麦光合作用及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 58-59.
 - [9] 李绍飞, 王仰仁, 孙书洪, 等. 不同节水灌溉方案对冬小麦用水效率及效益的影响[J]. 节水灌溉, 2011(3): 1-5, 8.
 - [10] 翟军海, 凌莉, 高亚军, 等. 补充灌溉、氮素营养与秸秆覆盖对冬小麦生长及产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 130-132.
 - [11] 王德权, 马忠明, 杨蕊菊, 等. 水肥耦合条件下间作小麦光合特性的响应[J]. 中国农学通报, 2009, 25(15): 215-218.
 - [12] 武继承, 杨永辉, 郑惠玲, 等. 不同水分条件对小麦—玉米两熟制作物生长和水分利用的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(1): 126-130.
 - [13] 刘作新, 郑昭佩, 王建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 540-544.
 - [14] 王林权, 孙春梅, 邢维芹, 等. 冬小麦拔节期追肥与土壤湿度的生物效应[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 38-42.
-
- (上接第56页)
- [3] 伍应德. 基于生态环境的贵州喀斯特山区现代农业发展模式探讨[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 246-249.
 - [4] 邓朝义, 方仕能, 黄勇. 贵州特有种种子植物无籽刺梨形态特征研究及分类学订正[J]. 种子, 2009, 28(9): 62, 68.
 - [5] 郑元, 辛培尧, 高健, 等. 无籽刺梨的研究与应用现状及展望[J]. 贵州林业科技, 2013, 41(2): 62-64.
 - [6] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 42-48.
 - [7] Yang H, Hu J W, Huang X F, et al. Risk assessment of heavy metals pollution for Rosa sterilis and soil from planting bases located in Karst areas of Guizhou province[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 700: 475-481.
 - [8] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
 - [9] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
 - [10] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.
 - [11] 陈博, 任艳芳, 段建军, 等. 贵州铜仁主要烟区植烟土壤有效态微量元素含量及评价[J]. 西北农业学报, 2012, 21(7): 107-111.
 - [12] 王男麒, 彭良志, 淳长品, 等. 赣南柑桔园背景土壤营养状况分析[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 1-4.
 - [13] 唐将, 李勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 473-478.
 - [14] 罗昭标, 王木荣, 陈瑾, 等. 资溪县植烟土壤养分状况及相互关系研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(2): 42-45.
 - [15] 张强, 魏钦平, 刘惠平, 等. 苹果园土壤养分与果实品质关系的多元分析与优化方案[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1654-1661.
 - [16] Cole C V. Hydrogen and calcium relationships of calcaireous soil[J]. Soil Science, 1957, 83(2): 141-150.
 - [17] Thomas S J. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper and zinc[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(2): 367-373.
 - [18] Page E R. Studies in soil and plant manganese[J]. Plant and Soil, 1962, 17(1): 99-108.
 - [19] 陈朝阳. 南平市植烟土壤 pH 状况及其与土壤有效养分的关系[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 149-153.
 - [20] 黄建凤. 影响土壤有效硼含量的因素研究[J]. 现代农业科技, 2008(9): 108, 111.
 - [21] 郑长训, 朱喜梅, 孙笑梅, 等. 河南省土壤有效硼的含量与硼肥的合理施用[J]. 河南农业科学, 1998(3): 25-27.
 - [22] 王静. 矿质营养对桔梗生长及有效成分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
 - [23] 关博谦. 重庆市烤烟关键性元素调控研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
 - [24] 安德艳, 艾复清. 铜仁地区植烟土壤类型及肥力分析[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(6): 126-129, 133.
 - [25] 周国兰, 赵华富, 王校常, 等. 贵州茶园土壤养分调查分析[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(8): 116-120.
 - [26] 吴中营, 王东升, 张四普, 等. 河南省3个梨主产区果园土壤养分分析[J]. 河南农业科学, 2013, 42(11): 60-63.