

滴灌水氮对土壤残留有效氮及玉米产量的影响^①

戚迎龙¹, 史海滨^{1*}, 王成刚¹, 赵靖丹¹, 王宁²

(1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要: 通过大田试验研究膜下滴灌施用不同水氮对玉米产量及收获后土壤残留有效氮的影响, 寻求适宜的水氮耦合量, 为达到高产、高效与低土壤氮损失量、残留量相协调的目标提供初步理论。结果表明: 1 351 ~ 1 465 m³/hm² 的低灌水量不能有效发挥氮对产量的贡献。灌水 1 400 ~ 1 800 m³/hm²、施氮 280 ~ 290 kg/hm² 时水对产量提升速度最快而与氮无协同增产效应。灌水 1 800 ~ 2 100 m³/hm²、施氮 250 ~ 280 kg/hm² 能获得比较高的产量和水氮协同增产效应。收获后 1 m 土层有效氮分布为由浅向深逐层减少, 不同水氮施用量主要影响 40 ~ 100 cm 的残留量。施氮量增加, 有效氮残留量增大, 用量 240 kg/hm² 以内残留量增长缓慢, 继续施氮增长迅速。1 351 ~ 1 465 m³/hm² 的低灌水量下肥料氮转化为土壤氮少, 残留有效氮少。1 802 ~ 2 071 m³/hm² 的灌水量促进肥料氮向土壤氮转化, 随水迁移增大了 40 ~ 100 cm 土壤有效氮。灌水量达 2 197 ~ 2 315 m³/hm² 后, 1 m 土层有效氮残留量减少、深层损失量增大。优选水氮耦合量包含于近似椭圆的区域, 交集区灌水 2 016 ~ 2 100 m³/hm², 施氮 228 ~ 250 kg/hm² 可作为松辽平原到内蒙古高原过渡地带膜下滴灌种植玉米的适宜水氮耦合量。

关键词: 膜下滴灌; 水氮耦合; 土壤; 玉米产量; 有效氮; 氮残留

中图分类号: S275.6; S158.3

灌水和施肥相对于自然降雨和土壤基础养分来说, 既是单独的主要人为调控因子, 也同时存在着相互作用、相互影响。刘文兆等^[1]认为寻求适宜的水肥投入水平是水肥耦合的关键, 研究得到“水肥优化耦合区域”。薛亮等^[2]研究水肥异区隔沟交替灌溉下水、氮互作效应, 指出并不是灌水量和施肥量越多越好, 并得到了高产条件下最佳水氮配比。陈林等^[3]通过不同水氮耦合下耕层土壤 6 种形态氮变化研究得到了最佳的灌水量和施氮量管理模式。康金花等^[4]研究表明不同肥料造成根区土壤环境、微生物的组成和数量不同, 从而使不同时期各处理土壤有效氮含量不同。侯振安等^[5]研究了棉花膜下滴灌条件的土壤水、盐、养分运移与调控, 提出最佳水肥耦合量。朱兆良和张福锁^[6]研究化肥氮的基本去向, 认为随着施氮量的增加, 作物吸收量、残留量、进入环境氮化物量均增加, 氮肥的环境风险增大。

产量提升关系到经济收入, 是农户最重要的考虑因素, 而科技人员在以产量提升为预期效果的基础上, 环境效应及水肥高效利用也是关键, 协调二者矛

盾的研究既是重点, 也是热点。以松辽平原向内蒙古高原的过渡平原地带为气候、地域背景, 综合考虑膜下滴灌水氮一体化施用条件下不同组合用量对玉米产量及土壤有效氮残留量的影响效应来探讨较优水氮耦合量的研究未见报道, 故本研究尝试以玉米为种植作物, 依托滴灌为灌水追肥的技术措施进行大田试验, 初步提出较适宜的水氮施用区间, 以期为膜下滴灌水肥耦合效应的研究及随水一体化施肥技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田选在科尔沁左翼中旗, 121°08' ~ 123°32'E, 43°32' ~ 44°32'N。地处通辽市东端, 大兴安岭东南边缘, 西辽河北岸, 是松辽平原向内蒙古高原的过渡地带, 气候、水文特征既有两大地形区域的共性, 又有自身的特点。当地属北温带大陆性季风气候, 多年平均气温 5.2 ~ 5.9℃, 最高气温 40.9℃, 最低气温 -33.9℃, 日照 2 884.8 ~ 2 802.1 h, 日均气温 5℃ 以

基金项目: “十二五”农村领域国家科技支撑计划项目(2014BAD12B03)和水利部科技推广计划项目(NSK2014S1)资助。

* 通讯作者(shi_haibin@yahoo.com.cn)

作者简介: 戚迎龙(1988—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤水氮环境及节水灌溉新技术研究。E-mail: hhhtqyl@foxmail.com

上持续时期 188 天, 大于 10℃ 的积温 3 042.8 ~ 3 152.4℃; 最大冻土深 180 cm, 无霜期 150 ~ 160 天; 多年平均年降水量 342.0 mm, 蒸发量 2 027 mm, 按降雨量划分属半干旱区。2014 试验年播种至收获全生育期降雨量 227.4 mm, 是偏干旱的平水年。

1.2 供试土壤

供试土壤为栗钙土, 按照美国制土壤质地分类法分别为 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 砂质黏壤土, 40 ~ 60 cm 砂质黏土, 60 ~ 80、80 ~ 100 cm 壤质砂土。1 m 土层土壤基本理化性质: 体积质量 1.54 g/cm³、田间持水率 23.08%、电导率(EC)值 119.74 μS/cm、pH 8.95、有机质 14.56 g/kg、全氮 0.81 g/kg、全磷 0.772 g/kg、全钾 31.48 g/kg、碱解氮 47.8 mg/kg、有效磷 1.82 mg/kg、速效钾 98.8 mg/kg。

1.3 试验设计

供试玉米品种为京科 968, 出苗至成熟 128 天。种植方式为 35 cm 小行距偏心播种, 宽行 85 cm, 形成的种植单元为一条滴灌带灌溉两行玉米, 所占延米宽为 1.2 m, 试验处理均为 3 个种植单元。灌水工程为覆膜滴灌, φ16 mm 滴灌带铺设在地膜下, 灌水量采用旋翼式数字水表记录。磷肥钾肥施用量、病虫害及农机农艺配套措施均采用当地常规方式。基肥氮使用一体化农机施入, 追氮肥方式为先在施肥罐中充分溶解尿素, 得到酰胺态氮水溶液, 通过水压差随灌水滴施于膜下根区。试验灌水量按土壤含水率占田间持水率百分比的上下限不同设低中高水。施氮梯度按 192、240、288 kg/hm² 设低中高氮, 共计 9 个组合处理及 1 个对照, 3 次重复, 共 30 个小区, 每个小区面积为 132 m²。具体方案见表 1。

表 1 膜下滴灌玉米水氮耦合试验方案
Table 1 Test scheme of water-nitrogen coupling effect on maize in condition of film mulch and drip

处理	灌水量(m ³ /hm ²)			施氮量(kg/hm ²)				
	占田持比例		灌水总量	农机施肥	滴灌施肥			施氮总量
	拔节前	拔节后			播种	拔节期	大喇叭口期	
CK	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W1N1	60% ~ 80%	55% ~ 80%	1 350.935	57.60	53.76	53.76	26.88	192.00
W1N2			1 174.583	72.00	67.20	67.20	33.60	240.00
W1N3			1 464.881	86.40	80.64	80.64	40.32	288.00
W2N1	65% ~ 85%	60% ~ 85%	1 802.425	57.60	53.76	53.76	26.88	192.00
W2N2			2 070.743	72.00	67.20	67.20	33.60	240.00
W2N3			1 940.121	86.40	80.64	80.64	40.32	288.00
W3N1	75% ~ 95%	70% ~ 95%	2 197.069	57.60	53.76	53.76	26.88	192.00
W3N2			2 299.141	72.00	67.20	67.20	33.60	240.00
W3N3			2 315.058	86.40	80.64	80.64	40.32	288.00

1.4 样品采集与测定分析

收获测产人工考种, 每个小区沿滴灌带取 10 m 调查行距、株距、果穗总数, 得到公顷株数、有效穗数。每个小区随机选取 10 穗玉米, 游标卡尺测量穗长、穗宽、秃尖长, 人工计数每穗粒数, 脱粒后随机取 5 组百粒称重。采用环刀法分层取土测定土壤体积质量, 表层 0 ~ 20 cm 剖面取 5 个重复环刀点, 20 ~ 100 cm 各剖面取 3 个重复点。土壤取样位置为平行于滴灌带的玉米行间, 收获后每个小区随机选 3 个样点, 20 cm 为一层取 1 m 深的土壤样品。采用碱解扩散法^[7-8]测定土壤有效氮。为防止临近处理水肥侧渗, 每个试验处理设 3 条滴灌带为 3 个种植单元, 两边为保护行, 监测和取样均采用中单元。数据处理采用 SigmaPlot 12.0 与 Excel 2007 软件。文中字母无特殊说明 Y 代表产量, W、N 数字组合代表处理, 其余字母为计量单位或统计学数值表示方式。

2 结果与分析

2.1 水、氮对收获后土壤有效氮残留量的影响

土壤有效氮也称水解氮, 能反映土壤近期内氮素供应情况, 包括硝态氮及铵态氮组成的无机矿物态氮和比较简单易水解的有机态氮^[7-8]。本年度施用于土壤的肥料氮经过玉米吸收利用及其他损失后, 残留累积于土壤中, 下年度连作种植玉米仍然会继续施用氮肥, 前人研究表明残留肥料氮被后茬作物吸收的相对数量很低, 随施氮量的增加, 氮肥的环境风险增大^[6]。因此探讨收获后的土壤残留有效氮可作为不同水氮影响土壤环境效应的其中一个评价指标。各土层有效氮残留量(kg/hm²)计算方法为土层土壤有效氮比例含量(mg/kg) × 土层土壤体积质量(g/cm³) × 土层厚度(0.2 m) × 每公顷土地的面积(10 000 m²) × 10⁻³。1 m 深土壤有效氮残留总量为

5 层分量求和。

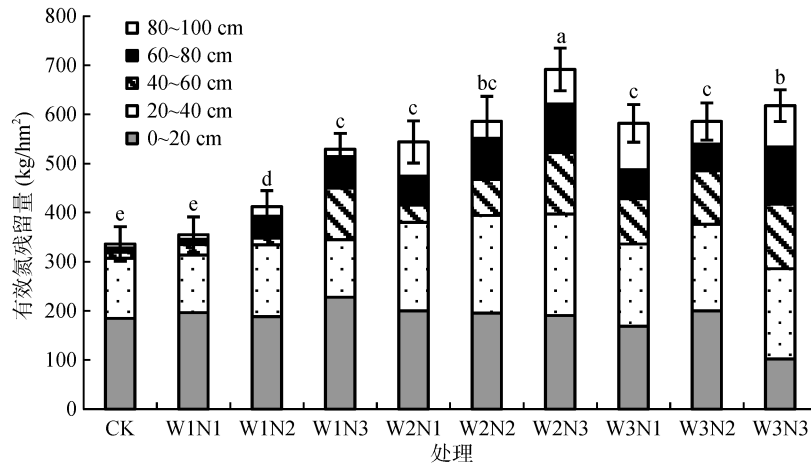
2.1.1 不同土层有效氮分布及变异性 由表 2 平均有效氮残留量及图 1 各处理不同土层的分布可以看出表层含量较大, 0~20、20~40 cm 明显高于其他土层, 各土层平均含量分别为 185.56、161.46、71.97、59.81、45.17 kg/hm², 垂直分布由浅至深呈降低趋势, 20~100 cm 4 层占 0~20 cm 的百分比分别是 88.09%、39.27%、32.86%、24.96%, 与前人的研究成果^[4]类似。从表 2 不同土层有效氮变异系数(计算样本为相应土层的所有水氮处理土壤有效氮残留量数

据, 公式为标准差/平均值)来看, 相对与 40~100 cm 的 3 层土壤, 浅层 0~20、20~40 cm 有效氮虽然含量较高, 但变异性低, 说明不同水氮量对收获后浅层土壤有效氮影响小, 灌水施氮对于浅层土壤的影响经历生育期土壤与大气氮交换、作物吸收、灌溉及降雨对有效氮的迁移等因素, 残留量趋同, 较小的差异仅表现为 0~20 cm 土层 3 个施氮水平的平均有效氮残留量随着灌溉水平的提升而降低。因而水氮用量不同造成收获后 1 m 深土壤有效氮残留量的不同主要是由 40~100 cm 土层差异引起的。

表 2 不同土层有效氮的变异性
Table 2 The variability of available nitrogen in different soil layers

土层 (cm)	土壤体积质量 (g/cm ³)	平均比例含量 (mg/kg)	平均含量 (kg/hm ²)	标准差 (kg/hm ²)	变异系数
0~20	1.36	68.10	185.56	32.86	0.18
20~40	1.45	55.69	161.46	33.74	0.21
40~60	1.52	23.67	71.97	47.25	0.66
60~80	1.71	17.47	59.81	34.48	0.58
80~100	1.72	13.13	45.17	32.38	0.72

注: 表中有效氮数据通过相应土层所有水氮处理有效氮取平均值得到。



(图中小写字母不同表示各处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 收获后各土层土壤有效氮残留量

Fig. 1 The residual quantity of available nitrogen in each soil layer after maize harvest

2.1.2 不同水氮施用量对土壤有效氮残留量的影响

各灌溉水平下, 1 m 土层有效氮总残留量均随着施氮量的增加而增大(图 1), 且施氮 192 kg/hm² 增至 240 kg/hm² 的残留有效氮增大均小于 240 kg/hm² 增至 288 kg/hm², 可见施氮量对土壤有效氮的影响是在一定范围内增长缓慢, 超过后残留有效氮迅速增长, 一定程度反映出作物吸收土壤氮的减少, 进入土壤环境氮的增大。前人研究也表明施氮量在一定范围内, 春玉米收获后硝态氮累积量不显著, 超过一定限度后即显著增大^[9]。与本试验结果对比, 硝态氮是有

效氮的组成部分, 其含量作为有效氮的“子集”, 残留累积量有相似规律。施氮 192 kg/hm² 时土壤有效氮残留量随着灌水量的增加而增大。施氮 240 kg/hm² 及 288 kg/hm² 时随着灌水量的增加先增大后减少。同一灌溉水平下不同施氮处理取平均, 得到有效氮残留量 $W1 < W2$, $W2 > W3$, 即随灌水量的增加 1 m 土层有效氮总残留量的整体变化趋势是先增大后减小, 原因是表层土经过生育各种因素影响, 有效氮含量已趋同, 而提高灌溉水平增加了土壤氮向下迁移量, 即在表层趋同的条件下, 下层注入的迁移量的增加使得 1

m 深土层总的有效氮残留量增加,另外一个原因是低灌溉水平下肥料氮转化成土壤氮的过程受到抑制,灌水量少肥料氮积累在表层其挥发量相应较大。虽然低灌溉水平下 1 m 土壤氮残留量较低,但代价是作物能有效利用土壤氮的减少和表层土壤氮向外“逃逸”出环境的氮量增加,所以低水和不同施氮量的组合是较差水氮用量耦合方式。灌溉量由中水提至高水时,1 m 土层内残留量降低,随水迁移至 1 m 以下的土壤氮量增大,即增大了水分携带土壤氮进入较深土层的环境风险。对于硝态氮,研究表明^[10-11]玉米 0~80 cm 土体根重比例达 95% 以上,1 m 以下不足 1%,玉米收获后 90 cm 能作为硝态氮淋溶损失的下边界,超过此深度土壤氮有更大的淋溶风险。

2.2 水、氮对玉米产量的影响

2.2.1 单因素影响效应的对比 为探讨灌水量、施氮量的单因子效应,将 9 个 W×N 组合处理按照灌水量、施氮量水平划分为处理组,形成 W1、W2、W3

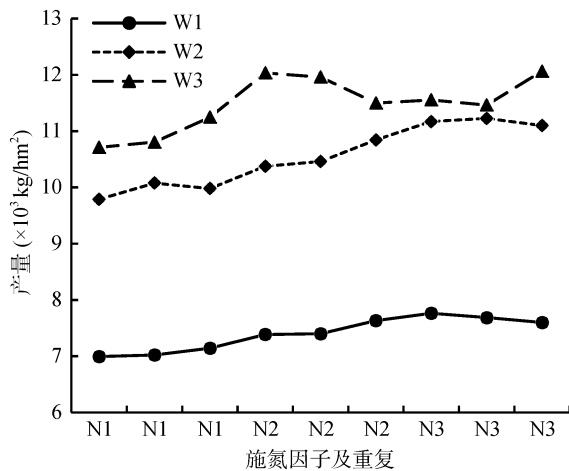


图 2 不同灌水量水平的产量分布

Fig. 2 Yield distribution due to differing levels of irrigation quantity

三个水因子处理组或者 N1、N2、N3 氮因子处理组。计算产量差与 LSR 值比较,大于相应的 LSR 值表征差异达到对应显著水平^[12]。水处理组平均产量差 $Y_{W3}-Y_{W2} = 924.05 > LSR_{(p=2, \alpha=0.01, df=16)} = 282.79$, $Y_{W2}-Y_{W1} = 3155.60 > LSR_{(p=2, \alpha=0.01, df=16)} = 282.79$, $Y_{W3}-Y_{W1} = 4079.65 > LSR_{(p=3, \alpha=0.01, df=16)} = 297.17$, 水处理组差异都达到极显著水平。氮处理组 $LSR_{(p=2, \alpha=0.05, df=16)} = 205.42 < Y_{N3}-Y_{N2} = 226.71 < LSR_{(p=2, \alpha=0.01, df=16)} = 282.79$, $Y_{N2}-Y_{N1} = 646.76 > LSR_{(p=2, \alpha=0.01, df=16)} = 282.79$, $Y_{N3}-Y_{N1} = 873.46 > LSR_{(p=3, \alpha=0.01, df=16)} = 297.17$ (产量差单位均为 kg/hm²) N3 对比 N1 和 N2 对比 N1 均达 1% 显著水平,而 N3 对比 N2 仅为 5% 显著水平。由以上统计结果及产量分布(图 2、3),水、氮单因素都是随着施用水平提升,对产量表现出显著的正效应,且相邻梯度产量差随施用水平的升高而降低,可体现出单因素对产量均呈现报酬递减效应。相对不同施氮水平,不同灌溉水平之间的产量间隔更大,对产量变动幅度的影响水>氮。

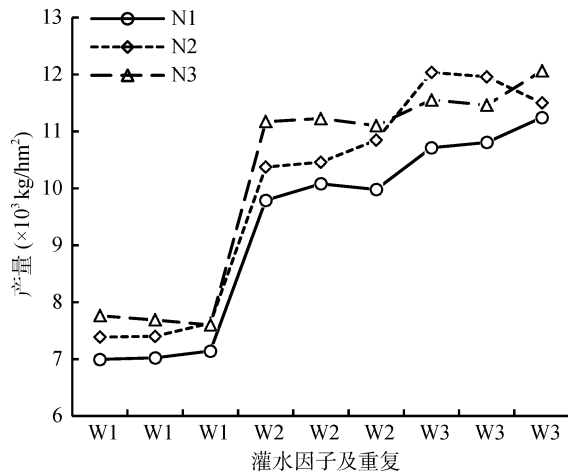


图 3 不同施氮量水平的产量分布

Fig. 3 Yield distribution due to differing levels of nitrogen rate

2.2.2 水氮互作的产量效应 通过柱状图 4 直观对比不同水氮处理玉米产量,总趋势表现为产量随水氮投入量的增加而增大,但增产程度随二因素投入量的增加而减小。水氮处理 W3N2 产量最高,但与 W3N3 无显著差异,W2N3 次之并与 W3N1 差异不显著。产量逆次序表现为(W3N2、W3N3)>(W2N3、W3N1)>W2N2>W2N1>(W1N3、W1N2)>W1N1。W1 灌溉水平下,施氮量由 N1 提升至 N2 增产明显,再次提升至 N3 时,产量无显著提升,即低灌溉水平下,配施一定量的氮肥可小幅度提高产量,但总体产量水平低,施氮量由中氮至高氮产量无显著增加,不能有效地发挥出氮肥对产量的贡献能力。初步认为水氮对产量较大的响应能力发生在二因素中高水平区域。

如图 5 所示 1 区:施氮 280~290 kg/hm² 时,随灌水 1400 m³/hm² 增至 1800 m³/hm² 过程,产量等值线沿灌水方向最密集,灌水提升产量速度最快,是水对产量影响最敏感的区域,但此区域在施氮量方向上几乎没有产量梯度差,无互作效应。2 区:“绝对”高产发生在高水×(高氮~中氮)区,但图中最高的水氮投入下,产量等值线明显变宽,单位水氮投入的增产能力很低,水氮互作效应明显减弱,且在很高的灌溉量下,随着施氮水平的降低,互作效应减弱并消失。3 区:中等偏低施氮水平下,随灌水量增加,产量等值线逐渐变密,但施氮对产量几乎没有效果。4 区:水氮均处于最低值时,虽产量增长迅速,但影响过程很短且产量很低。由以上对比分析,水氮协同互作效

应较高(二因素施用量增加均能引起产量的提升,且提升速度较快),同时能获得较高产量的水氮施用区域为 5 区 灌水 1 800~2 100 m³/hm²、施氮 250~280 kg/hm²。

2.2.3 基于频数分析的水氮置信区间 利用水氮-产量试验数据,得到灌水量和施氮量对玉米产量的回归方程见式(1):

$$Y = -9\ 150.678 + (7.544 \times W) + (68.689 \times N) + (0.005\ 39 \times WN) - (0.001\ 30 \times W^2) - (0.156 \times N^2), R^2 = 0.939 \quad (1)$$

灌水量单位 m³ 和施氮量单位 kg 不同,通过离差标准化,对具体数据作线性变换统一量纲,使水、氮二因素不同数值均在区间[0, 1] 内,得到的同量纲回归方程如式(2):

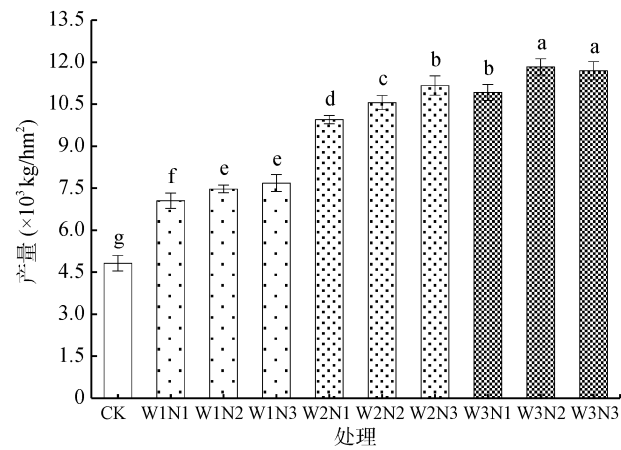


图 4 不同水氮组合处理对玉米产量的影响

Fig. 4 The effect of the different soil water and nitrogen treatments on yield of maize

$$Y = 6\ 582.799 + (6\ 299.081 \times W) + (1\ 465.261 \times N) + (589.757 \times WN) - (1\ 691.301 \times W^2) - (1\ 434.075 \times N^2), R^2 = 0.939 \quad (2)$$

对水氮码值在 [0, 1] 内等步长划分为 7 个水平 (0.00、0.17、0.33、0.50、0.67、0.83、1.00) 组合可得到超过本试验平均产量 9 815.097 kg/hm² 的方案共 23 套,占全部方案的 46.94%,对灌水量和施氮量不同水平进行频数统计分析^[12],得到灌水 2 015.912~2 167.937 m³/hm²、施氮 227.875~253.546 kg/hm² 有 95% 的概率能获得超过 9 815.097 kg/hm² 的玉米产量(表 3)。

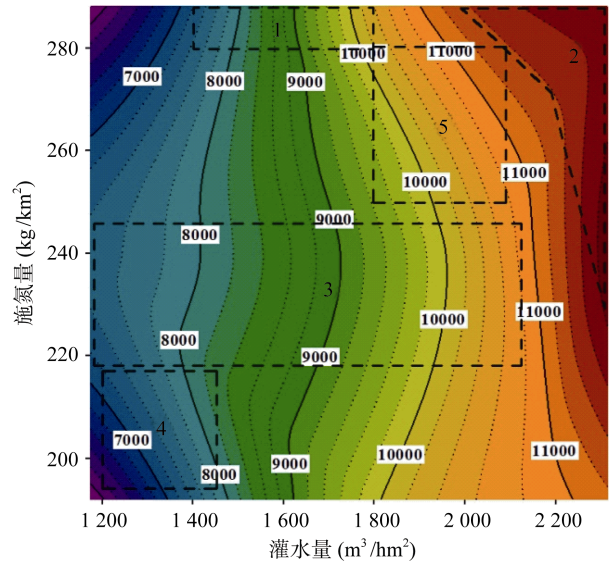


图 5 水氮交互-玉米公顷产量等值线图

Fig. 5 Water and nitrogen interaction-contour map of maize yield

表 3 玉米产量大于平均值的因子取值频数分布及配比方案
Table 3 Factor value of the frequency distribution and proportion plan with grain yield surpass average

水平编码	灌水		施氮	
	频数	频率(%)	频数	频率(%)
0.00	0	0.00	3	13.04
0.17	0	0.00	3	13.04
0.33	0	0.00	3	13.04
0.50	2	8.70	4	17.39
0.67	7	30.43	4	17.39
0.83	7	30.43	3	13.04
1.00	7	30.43	3	13.04
总次数	23		23	
编码加权均值	0.804 3		0.507 4	
标准误	0.034 0		0.068 2	
正态离差	1.959 96		1.959 96	
95% 置信区间	0.737 7~0.871 0		0.373 7~0.641 1	
配比方案	2 015.912~2 167.937 m ³ /hm ²		227.875~253.546 kg/hm ²	

2.3 适宜的水氮耦合区域

本次试验无显著差异的两个最高产量处理是 W3N2 及 W3N3,施用区间为水 2 299~2 315 m³/hm²、氮

240~288 kg/hm²。水氮对产量互作效应较高的施用区间为水 1 800~2 100 m³/hm²、氮 250~280 kg/hm²。残留有效氮的环境风险较低的处理是 W2N1 及 W2N2,

施用区间为水 1 802 ~ 2 070 m³/hm²、氮 192 ~ 240 kg/hm²。高于试验平均产量的水氮 95% 置信区间水 2 016 ~ 2 168 m³/hm²、氮 228 ~ 254 kg/hm²。在此以散点图形象表达不同的水氮用量耦合区域的边界点如图 6 所示。刘文兆等^[1]考虑了水肥对玉米产量和水分利用效率的两项影响指标,在水肥投入的二维平面下解析出了玉米优化水肥耦合区域是一个椭圆域。而本次研究基于产量及残留氮的环境效应下其不同耦合用量同样包含在一个近似椭圆的区域内,虽然椭圆域内 16 个边界点无公共交集,但椭圆中心区域水 2 016 ~ 2 100 m³/hm²、氮 228 ~ 250 kg/hm² 耦合量在达不到试验最高产量的情况下能兼顾其他三方面的影响效应。

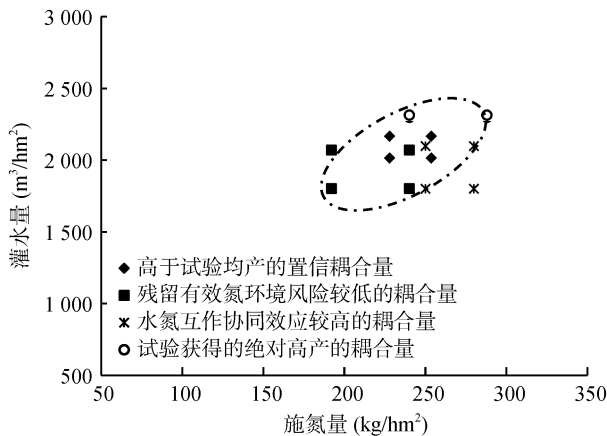


图 6 水氮耦合区域边界点图形表达

Fig. 6 Area of water and nitrogen coupling with graphical representation

3 讨论与结论

3.1 讨论

本试验结果单因素对玉米产量的影响灌水>施氮,对比前人研究成果,有学者认为施氮作用大于灌水^[3,13],也有学者认为灌水作用大于施氮^[14-15],其灌溉及施肥方式有隔沟交替灌溉施肥、铺管地面灌溉与人工撒肥、膜下滴灌一体化灌溉施肥、盆栽玉米人工灌水及施肥。所在地理位置有杨凌农业示范区、河套灌区以及黑龙江半干旱区。由此分析,本试验结论与前人研究的异同可能与灌溉施肥方式和地域气候的不同有关。还可能因为本试验年降雨量少,相对而言更能突出灌溉水的影响效应。不同研究人员对水氮因子设计水平用量及间距不同,建模分析结果也不同,水氮效应的大小具有相对性^[16]。对于土壤氮的残留积累和迁移,国内外学者研究^[17-24]更多的是土壤无机氮,其中的硝态氮一直成为研究热点,主要因为硝态氮很容易被作物吸收而又容易随水迁移,而本试验研究了土壤有效氮的残留和分布,是考虑到有效氮包

含无机态氮与较简单且易水解有机态氮^[7-8],农业系统错综复杂,易水解的有机氮也可能存在残留积累与迁移损失,从研究角度,深入探讨某一离子态氮具有重大意义,但面对诸多不确定变量因子作用下的作物-土壤系统,通过对包含多种形态氮,且能表征土壤近期氮供应能力的土壤有效氮探讨分析,能更简单有效地提出合理的水氮施用量。基于本研究与前人研究成果的异同及研究过程中的不足,需要做的进一步研究有:探讨水氮对产量及收获后土壤残留有效氮的影响还需细化因子水平,做连续长期试验,分析不同水文年的异同;化验土壤各种形态氮,分别探讨水氮对各种土壤氮的影响,再进行综合评价;本试验适宜水氮耦合量是对各较优影响效应取交集得到的,还可采用专家打分制,得到不同影响效应的权重值来确定。

3.2 结论

1) 膜下滴灌种植玉米收获后土壤有效氮残留量垂直分布为:表层残留量大,由浅至深呈逐渐减少,占 0 ~ 20 cm 土层残留量的比例分别为 88.09%、39.27%、32.86%、24.96%。播种至成熟期间玉米吸收、灌溉降雨、大气氮交换使得浅层有效氮趋同,不同水氮施用量对收获后 0 ~ 40 cm 土层残留量影响小。

2) 玉米收获后 1 m 土层有效氮总残留量随施氮量的增加而增大,施氮量少于 240 kg/hm² 范围内增长缓慢,超过后增长迅速,肥料氮用量增加到一定程度会使得土壤环境氮残留量增大而玉米吸收利用量减少。生育期 1 802 ~ 2 071 m³/hm² 的灌溉量增大了土壤有效氮,促进了肥料氮向土壤氮转化的过程,降低了因低灌水量 (1 351 ~ 1 465 m³/hm²) 导致肥料氮聚集在表层土壤的挥发损失量。灌水量提高至 2 197 ~ 2 315 m³/hm² 后,土壤氮随大量灌水迁移至深层,1 m 土层内总残留量减少、损失量增大。

3) 在当地典型地域及气候条件下,膜下滴灌种植玉米水和氮的投入均能增产,并均对产量有报酬递减效应,单因素施用水平的变动引起产量改变的敏感性水>氮。生育期灌水量在 1 351 ~ 1 465 m³/hm² 以内会降低肥料氮向土壤氮的转化量,不能有效发挥肥料氮对产量的贡献。灌水提升产量速度最快但与氮肥无协同效应的耦合量为施氮 280 ~ 290 kg/hm²、灌水 1 400 ~ 1 800 m³/hm²。大量水氮投入虽能获得高产,但增产能力太低,互作效应弱。水氮协同互作效应较高且能获得较高产量的耦合量为灌水 1 800 ~ 2 100 m³/hm²、施氮 250 ~ 280 kg/hm²。基于水氮-产量回归方程的频数分析结果为:灌水 2 016 ~ 2 168 m³/hm²、施氮 228 ~ 254 kg/hm² 有 95% 的概率能获得超过 9 815 kg/hm²

的玉米产量。

4) 在松辽平原到内蒙古高原过渡地带采用膜下滴灌种植玉米,能协调获得较高产量、较高互作效应与收获后土壤残留有效氮环境风险较低之间相互矛盾的适宜水氮耦合量为:灌水量 $2\ 016 \sim 2\ 100\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量 $228 \sim 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

- [1] 刘文兆, 李玉山, 李生秀. 作物水肥优化耦合区域的图形表达及其特征[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 1-3
- [2] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94
- [3] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同水氮耦合管理下耕层土壤的氮动态[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 459-468
- [4] 康金花, 黄子蔚. 滴灌随水施肥对土壤有效氮动态的影响[J]. 干旱区研究, 2005, 22(2): 270-273
- [5] 侯振安, 龚江. 干旱区滴灌棉花土壤水、盐、养分运移与调控[M]. 陕西: 西北农林科技大学出版社, 2013: 114-120
- [6] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 57-63, 69-72
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-41, 56-58
- [8] 张韞. 土壤·水·植物 理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 59-61
- [9] 蒋会利, 温晓霞, 廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 237-241
- [10] 王激清, 刘社平, 韩宝文. 施氮量对冀西北春玉米氮肥利用率和土壤硝态氮时空分布的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 138-143
- [11] 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氮的时空动态与残留[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1 620-1 625
- [12] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 92-96, 248-252
- [13] 李楠楠, 张忠学. 黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 88-90
- [14] 仲爽, 李严坤, 任安, 等. 不同水肥组合对玉米产量与耗水量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(2): 44-47
- [15] 闫建文. 盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014: 84-85
- [16] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220-224
- [17] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: Sources, factors and mitigating strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 64(3): 237-256
- [18] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil[J]. Plant and soil, 1986, 93(3): 333-345
- [19] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 灌溉与降水对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 71-74
- [20] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 270-277
- [21] 李云, 刘炜, 王朝辉, 等. 不同作物对旱地农田残留硝态氮的利用差异[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3 788-3 796
- [22] 苗艳芳, 李生秀, 徐晓峰, 等. 冬小麦对铵态氮和硝态氮的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 564-574
- [23] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88-96
- [24] 丁燕, 杨宪龙, 同延安, 等. 小麦-玉米轮作体系农田氮素淋失特征及氮素表现平衡[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 88-96

Effects of Water and Nitrogen on Maize Yield and Soil Residual Available Nitrogen Through Mulched Drip Irrigation

QI Yinglong¹, SHI Haibin^{1*}, WANG Chenggang¹, ZHAO Jingdan¹, WANG Ning²

(1 *Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;*

2 *Institute of Water Conservancy Science of Inner Mongolia Municipality, Hohhot 010020, China*)

Abstract: The field experiments were conducted to study the effect of different water and nitrogen application on maize yield and soil residual available nitrogen through mulched drip irrigation. The main objective was to determine the suitable application amount of water and nitrogen to develop a preliminary theory for the harmonious target of high yield, high efficiency, low nitrogen residues and low loss of nitrogen. Results showed that the low irrigation ($1\ 351 - 1\ 465\ \text{m}^3/\text{hm}^2$) cannot effectively increase the role of nitrogen fertilizer on the yield of maize. Combined application of $280 - 290\ \text{kg}/\text{hm}^2$ of nitrogen with irrigation of $1\ 400 - 1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ led to the fastest increase in maize yield, but without synergistic effects of water with nitrogen on the yield. Combined irrigation of $1\ 800 - 2\ 100\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ with $250 - 280\ \text{kg}/\text{hm}^2$ of nitrogen obtained relatively higher yield and high synergistic effects of water with nitrogen on the yield. The residue of available nitrogen decreased from the shallow to the deep layer in the profile of $0 - 100\ \text{cm}$ after harvest, and the quantity of water and nitrogen applied mainly affected the residue of available nitrogen in the layer of $40 - 100\ \text{cm}$. The residue of available nitrogen increased with the increasing nitrogen fertilizer. When the application rate was about $240\ \text{kg}/\text{hm}^2$, the quantity of residual available nitrogen increased slowly. The residue of available nitrogen increased rapidly when the fertilizer increased to above $240\ \text{kg}/\text{hm}^2$. The low irrigation ($1\ 351 - 1\ 465\ \text{m}^3/\text{hm}^2$) decreased the conversion of fertilizer nitrogen to soil nitrogen and quantity of nitrogen residue. Enhancing the irrigation amount to $1\ 802 - 2\ 071\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ promoted the conversion of nitrogen fertilizer to the soil nitrogen and increased the available nitrogen. When the irrigation reached about $2\ 197 - 2\ 315\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, the nitrogen migration with water in soil profile increased and reached to deep layer of $> 1\ \text{m}$. The quantity of optimization of water and nitrogen coupling were in an approximate ellipse area. The irrigation of $2\ 016 - 2\ 100\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ with nitrogen of $228 - 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$ in intersection area can be used as suitable amount for planting maize under mulched drip irrigation in the transition from Song-liao Plain to the Inner Mongolia Plateau.

Key words: Mulched drip irrigation; Water-nitrogen coupling; Soil; Maize yield; Available nitrogen; Nitrogen residual