文章编号:1000-7601(2019)02-0172-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.25

浅埋滴灌水氮运筹对春玉米产量及水分利用效率的影响

李 雪[1,2],尹光华[1],马宁宁[1],谷 健[1,3],王士杰[1,2]

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所,辽宁 沈阳 110016;2.中国科学院大学,北京 100049;3.辽宁省农业科学院,辽宁 沈阳 110161)

摘 要:采用二因素二次饱和 D-最优设计,于 2016-2017 年在辽西半干旱区移动遮雨棚内进行了水氮精量控制试验,设灌溉量和施氮量 2 个因素,灌溉量分别设 145.4、271.7、348.2、436.2 mm 4 个水平,施氮量分别设 0、84.6、136.1、195.0 kg·hm^{-2} 4 个水平,共 6 个处理。试验分析了水氮交互作用对春玉米产量和水分利用效率的影响,建立了产量回归模型。研究结果表明:浅埋滴灌条件下,灌溉量在 145.4~350.5 mm 时,春玉米产量随灌溉量的增加而增高至 11 005.60 kg·hm^{-2};灌溉量在 350.5~436.2 mm 时,产量随灌溉量的增加而降低至 10 730.09 kg·hm^{-2};施氮量在 0~146.9 kg·hm^{-2} 时,产量随施氮量的增加而增高至 10 983.19 kg·hm^{-2},施氮量在 146.9~195.0 kg·hm^{-2} 时,产量随施氮量的增加而降低至 10 862.39 kg·hm^{-2}。灌溉量因素的影响大于施氮量,水氮之间有明显的正向交互效应,当灌溉量为 373.1 mm,施氮量为 165.6 kg·hm^{-2} 时产量最高。作物耗水量在拔节-抽雄期和灌浆-收获期较大,分别为 115.64、127.50 mm;水分利用效率随灌溉量的增加呈逐渐降低趋势,降低幅度达到 52.21%,随着施氮量的增加则呈先升高后降低趋势,增幅为 14.73%~20.08%;其中处理 6(灌溉量 348.2 mm,施氮量 195.0 kg·hm^{-2})最利于水分利用效率的提高。综合产量和水分利用效率两方面的因素,初步建立了春玉米浅埋滴灌水氮施用优化模式,参数组合为灌溉量 348.2 mm、施氮量 165.6 kg·hm^{-2}。

关键词:浅埋滴灌;水氮运筹模式;春玉米;产量;水分利用效率;辽西半干旱区

中图分类号:S513 **文献标志码**:A

Effects of water and nitrogen management on yield and water use efficiency of spring maize under shallow-buried drip irrigation

LI Xue[1,2], YIN Guang-hua[1], MA Ning-ning[1], GU Jian[1,3], WANG Shi-jie[1,2]

(1. *Institute of Applied Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang*, *Liaoning* 110016, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *Liaoning Academy of Agricultural Sciences*, *Shenyang*, *Liaoning* 110161, *China*)

Abstract: A two-factor quadratic saturation D-optimum design was used to carry out water and nitrogen precisely controlled experiment in a mobile shelter in semi-arid area of western Liaoning Province during 2016 to 2017. There were two factors, irrigation and nitrogen (N) applications. The irrigation rates were 145.4, 271.7, 348.2 and 436.2 mm, and the nitrogen application rates were 0, 84.6, 136.1 and 195.0 kg·hm^{-2}, respectively, and there were totally 6 treatments. The effects of water and N interaction on yield and water use efficiency were analyzed and a regression model for yield was established. The results showed that the yield of spring maize increased to 11 005.60 kg·hm^{-2} with the increase in water when the irrigation quantity was between 145.4~350.5 mm, and it decreased to 10 730.09 kg·hm^{-2} with the increase of water when the irrigation quantity was 350.5~436.2 mm. When the amount of nitrogen was 0 to 146.9 kg·hm^{-2}, the yield increased to 10 983.19 kg·hm^{-2} with the increase in N application. When the amount of N was 146.9 to 195.0 kg·hm^{-2}, the yield reduced to 10 862.39 kg·hm^{-2} with the increase in N application. The effect of irrigation was greater than that of N application, there was an obvious posi-

收稿日期:2018-02-23 **修回日期**:2019-03-04

资助项目:国家“十三五”重点研发专项课题(2017YFD0300700);国家“十二五”科技支撑计划子课题(2013BAD05B07、2013BAD07B03);国家公益性行业(农业)专项课题(201303125-9)

作者简介:李雪(1992-),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向为节水农业。E-mail:437968165@qq.com

通信作者:尹光华(1972-),男,甘肃天水人,研究员,主要从事节水农业方面的研究。E-mail:ygh006@163.com

tive interaction effect between the two factors, when the irrigation was 373.1 mm and the N application was 165.6 kg · hm^{-2}, the yield reached the highest. Crop water consumptions were greater in the jointing-tasseling and the filling-harvesting periods, which were 115.64 mm and 127.50 mm, respectively. Water use efficiency decreased with the increase in irrigation, and decreased up to 52.21%. However, water use efficiency increased first and then decreased with the increase in N application, and it increased in 14.73%~20.08%. Treatment 6 (irrigation volume 348.2 mm, N application 195.0 kg · hm^{-2}) was most conducive to the improvement of water use efficiency. Based on the results of both yield and water use efficiency, the suitable water-N application pattern for shallow-buried drip irrigation of spring maize was established and the optimum parameters of irrigation amount was 348.2 mm and N application rate was 165.6 kg · hm^{-2}.

Keywords: shallow-buried drip irrigation; water and N management model; spring maize; yield; water use efficiency; semi-arid area of western Liaoning Province

辽西半干旱区地域辽阔,土地和光热资源丰富,是辽宁省重要的商品粮与经济作物生产基地[1]。但该地区干旱少雨,水资源不足,水土流失和风蚀严重,耕地质量相对较差,耕地中绝大部分是旱地,有效灌溉面积为 36.96 万 hm^2,仅占耕地面积的 20.62%[2]。因此,研发新型高效节水灌溉技术,发展节水农业势在必行。

浅埋滴灌是一种新型的滴灌节水技术,是将滴灌带或滴灌毛管掩埋到地表下 3~5 cm 的一种节水灌溉技术[3]。与常规沟灌相比,浅埋滴灌灌溉定额为 2 908.0 m^3 · hm^{-2}时,可节水 30%,籽粒产量仅下降 3.4%,而水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高 22.1%和 27.5%[4]。而与传统地表滴灌技术相比,浅埋滴灌可使玉米产量和水分利用效率分别提高 11.75%和 16%[5]。与膜下滴灌相比,浅埋滴灌技术避免了地膜残留造成的"白色污染"问题[6]。然而,也有学者研究发现,浅埋滴灌技术大多数在大田中进行,受自然降水的影响,灌水量难以精确掌控,而且目前研究的作物大多为牧草、番茄、棉花等经济作物,对大田粮食作物的研究较少[7]。

由于膜下滴灌、地下滴灌和传统地表滴灌在实际应用中均存在着一定的问题,近几年浅埋滴灌技术开始成为新的滴灌技术研究热点。该技术能够解决膜下滴灌"残膜污染"的环境问题和传统地表滴灌蒸发大、铺设困难的问题,是未来滴灌技术的发展趋势[5]。

目前,浅埋滴灌技术的研究主要集中在作物的生长、产量和水分利用效率等方面。梅园雪等[8]研究了内蒙古通辽市玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益,发现与全膜覆盖、半膜滴灌、管灌和漫灌种植模式相比,浅埋滴灌种植模式在保苗效果、籽粒品质、平均产量、成本投入、纯效益等方面的综合表现最好。郭金路等[4]在辽西半干旱区研究了浅埋滴灌不同灌水量对春玉米生长及产量的影响,得出适宜的灌溉定额范围为 2 908.0~3 816.4 m^3 · hm^{-2};李媛媛等[9]在内蒙古通辽的试验研究得出该地区春玉米适宜的灌水量为 39 mm;徐杰等[10]研究了迷宫式滴灌和新型滴灌(自流插入式滴灌管)在不同埋设深度下对春玉米生长的影响,结果表明埋深 5 cm 的产量和水分利用效率均最高;王建东等[5]定量分析了地表、膜下、浅埋 3 种滴灌模式田间水热环境、产量差异,认为浅埋滴灌有效降低了滴灌带附近温度,玉米产量和水分利用效率显著高于地表滴灌;焦炳忠等[11]研究了不同滴灌模式对地膜玉米生长及水分利用效率的影响,发现无论是产量还是水分利用效率,均表现为:膜下浅埋>露地浅埋>膜下滴灌。浅埋滴灌技术既可实现对农业水资源高效利用的目的,同时又是一项绿色环保型技术,是未来半干旱区农业节水技术发展的一个重要方向,亟待深入系统地研究其节水机理调控,建立实用化技术模式,进而大面积推广应用。本研究以浅埋滴灌春玉米为研究对象,采用移动式遮雨棚水分精量控制试验方式,分析水氮交互作用对产量和水分利用效率的影响,建立产量回归模型,探究浅埋滴灌水氮优化运筹方案,以便为辽宁西部半干旱地区浅埋滴灌技术在田间的应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况与材料

试验于 2016-2017 年在辽西半干旱区典型区域——阜新蒙古族自治县进行。该县位于 121°01′E~122°56′E、41°41′N~42°56′N,平均海拔 235 m。试验区年平均气温7.2℃,年际变化在 5.8~8.1℃,春玉米生育期平均气温为 20.2℃,年日照时数为2 865.5 h,10℃以上积温3 298.3℃,无霜期 144 d,年均降水量 493.1 mm,年均蒸发量 1 847.6 mm。土壤为沙壤土,耕层容重1.44 g · cm^{-3},田间持水量 23%,pH 值

6.15,有机质 18.00 g·kg^{-1},全氮 1.28 g·kg^{-1},碱解氮 92.15 mg·kg^{-1},速效钾 201.43 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

试验在移动式遮雨棚内进行,棚内设置试验微区,每个微区面积为 1.3 m×2 m=2.6 m^2,微区四周以 80 cm 深防水树脂薄膜相隔,防止土壤水分和养分的侧渗。采用二因素二次饱和 D-最优设计(见表 1),设灌溉量和施氮量 2 个因素,灌溉量分别设 145.4、271.7、348.2、436.2 mm 4 个水平,施氮量分别设 0、84.6、136.1、195.0 kg·hm^{-2} 4 个水平,共 6 个处理,重复 3 次。选用的氮肥为尿素(含 N 46.4%),播种时沟施总氮量的 30%,在拔节期和抽雄期随滴灌等量追施剩余氮肥。灌溉采用浅埋滴灌方式,各处理不同生育期灌溉方案见表 2。播种前人工微喷灌,使 0~20 cm 土层含水量为田间持水量的 70%。玉米品种为裕丰 303,每个微区种植 2 垄,每垄 2 行,每行 4 株,共 16 株。2016 年于 5 月 1 日播种,9 月 25 日收获;2017 年于 5 月 21 日播种,10 月 9 日收获。滴灌带为新疆天业公司生产的内镶式薄壁滴灌带,滴头间距 30 cm,管径 16 mm,滴头流量 1.38 L·h^{-1},滴灌带铺设于两窄行之间,表面覆土 3~5 cm,应用小型抽水泵恒定低压定量滴灌。

表 1 试验因子水平及编码值

Table 1 Code level of experimental factors

处理 Treatment	编码值 Coded value		实际用量 Actual count	
	灌溉量 X_1 Irrigation volume/mm	施氮量 X_2 N application rate /(kg·hm^{-2})	灌溉量 Irrigation volume/mm	施氮量 N application rate /(kg·hm^{-2})
1	−1	−1	145.4	0
2	1	−1	436.2	0
3	−1	1	145.4	195.0
4	−0.1315	−0.1315	271.7	84.6
5	1	0.3945	436.2	136.1
6	0.3945	1	348.2	195.0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 采用烘干法测定:分别于播种前、各生育阶段末及收获后用土钻取土,取土深度为 140 cm,共 7 层,每层 20 cm,在 105℃烘箱内烘干至恒重,用重量含水量法计算土壤含水量。

1.3.2 作物耗水量 玉米生育期耗水量采用水量平衡方程计算[12]:

$$ETa = P + C + I - R - Dw - \Delta S \quad (1)$$

式中,ETa 为作物耗水量(mm);P 为降雨量(mm);C 为地下水毛管上升水量(mm);I 为灌水量(mm);R 为地表径流量(mm);Dw 为深层渗漏量(mm);ΔS 为取土时间段内土壤水分的变化量(mm)。由于试验在移动式遮雨棚内进行,灌水方式为滴灌,所以公式中 Pr、Rr、Dw 可忽略不计,又因试验地地下水埋深大于 8 m,所以 Cr 也可以忽略不计。

1.3.3 产量及其构成要素 成熟期取微区中间 2 行玉米,称其鲜重,晾晒风干后考种,用谷物水分测定仪(PM8188)测籽粒含水量,折算为公顷籽粒产量。

1.3.4 水分利用效率 水分利用效率(WUE)按公式(2)进行计算:

$$WUE = Y/ETa \quad (2)$$

式中,WUE 为水分利用效率(kg·hm^{-2}·mm^{-1}),Y 为籽粒产量(kg·hm^{-2}),ETa 为生育期耗水量(mm)。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行整理和计算,SPSS 19.0 统计分析软件进行显著性分析($P<0.05$),采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对产量的影响

2.1.1 产量模型的建立 利用 2016 年、2017 年 2 a 的产量平均结果,以二次最优设计进行回归模拟,得到产量(Y)与灌溉量(X_1)、施氮量(X_2)的回归模型:

表 2 浅埋滴灌各处理作物生育期灌溉实施方案

Table 2 Implementation plan of shallow-buried drip irrigation treatments throughout the crop growth period

处理 Treatment	出苗-拔节期 Seeding-jointing		拔节-抽雄期 Jointing-tasselling		抽雄-灌浆期 Tasselling-filling		灌浆-收获期 Falling-havesting	
	灌水次数 No. of irrigation	灌水量/mm Volume	灌水次数 No. of irrigation	灌水量/mm Volume	灌水次数 No. of irrigation	灌水量/mm Volume	灌水次数 No. of irrigation	灌水量/mm Volume
1	1	27.6	2	39.8	1	32.0	2	45.9
2	2	82.9	3	119.5	2	96.0	3	137.8
3	1	27.6	2	39.8	1	32.0	2	45.9
4	2	51.6	2	74.4	2	59.8	2	85.9
5	2	82.9	3	119.5	2	96.0	3	137.8
6	2	66.2	3	95.4	2	76.6	3	110.0

$$Y = 10\,855.786 + 705.961X_1 + 502.915X_2 + 336.628X_1X_2 - 831.653X_1^2 - 496.310X_2^2 \quad (3)$$

模型相关系数 $R^2 = 0.86$,T 检验结果为:$F = 11.07$,$P < 0.05$,说明回归模型能很好地模拟产量与水氮之间的关系,拟合度较高,能够客观反映灌水量、施氮量与产量之间的关系。

2.1.2　模型的产量效应分析

(1) 主因子效应分析　由于模型中的灌溉量和施氮量二因子均已进行过无量纲化处理,且各一次项系数与交互项、平方项的回归系数间都是不相关的,所得偏回归系数已标准化,故其回归系数绝对值的大小可直接反映灌溉量 X_1 和施氮量 X_2 对产量 Y 的影响程度。产量模型中一次项系数均为正数,且 X_1 系数大于 X_2 系数,说明灌溉量和施氮量对产量的提高均有促进作用,灌溉量对产量的影响大于施氮量;交互项 X_1X_2 的系数为正,说明水氮产生正交互效应,对产量的提高有相互促进作用;二次项系数中,X_1^2、X_2^2 的系数均为负值,说明在试验范围内,产量随着灌溉量或施氮量的提高有最大值,呈开口向下的抛物线型变化趋势。

(2) 单因子效应分析　根据二因素回归模型,可分别得到灌溉量和施氮量对产量的单因子效应模型式(4)和式(5):

灌溉量:$Y = 10\,855.786 + 705.961X_1 - 831.653X_1^2$　(4)

施氮量:$Y = 10\,855.786 + 502.915X_2 - 496.310X_2^2$　(5)

根据回归子模型分别作出水、氮二因素对产量的单因子效应图,如图 1。由图 1 可知,灌溉量和施氮量对产量均有明显影响,产量随二者的增加均呈先升高后降低的变化趋势,产量达到最高点时灌溉量和施氮量的编码值分别为 0.424 和 0.507,相对应的实际值为 350.5 mm 和 146.9 kg · hm^{-2}。

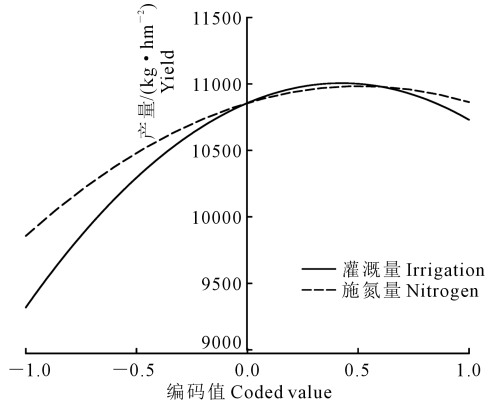


图 1　灌溉量和施氮量对产量的单因子效应

Fig.1　Sole effect of water and N application on yield

(3) 交互效应分析　由图 2 可知,在试验编码值范围内,当灌溉量固定在某一水平时,产量随施氮量的增加先增高后降低;当施氮量固定在某一水平时,产量随灌溉量的增加也呈先增加后降低趋势。随着灌溉量的增加,产量达到最高点的施氮量不同,当灌溉量最低($X_1 = -1$)时,产量达到最高点的施氮量为 0.168 水平,即 113.9 kg · hm^{-2},此时产量为 9 332.10 kg · hm^{-2};当灌溉量为 0 水平时,施氮量提高到 0.507 水平,产量可达最高 10 983.19 kg · hm^{-2}。同样,当施氮量较低时,较低的灌溉量就可以使产量达到最高,施氮量提高时,只有适量提高灌溉量,才能使产量达到最高点。

由图 2 还可以看出,灌溉量与施氮量两因子同时变化对产量的影响比单因子影响更剧烈。当灌溉量最低,施氮量为零($X_1 = -1$, $X_2 = -1$)时,产量最低,仅为 8 655.57 kg · hm^{-2},随着灌溉量和施氮量的同时增加,产量迅速提高,如当 $X_1 = -0.5$,$X_2 = -0.5$ 时,产量增高到 10 003.51 kg · hm^{-2},若仅提高施氮量($X_1 = -1$,$X_2 = -0.5$),产量为 9 277.24 kg · hm^{-2},仅提高灌溉量($X_1 = -0.5$,$X_2 = -1$),产量为 9 833.31 kg · hm^{-2}。当 $X_1 = 0$,$X_2 = 0$ 时,产量增加到 10 855.79 kg · hm^{-2},高于单独提高灌溉量或施氮量时的产量。当 $X_1 = 0.5$,$X_2 = 0$ 时,产量达到 11 000.85 kg · hm^{-2},当 $X_1 = 0$,$X_2 = 0.5$ 时,产量达到 10 983.17 kg · hm^{-2},同时增加灌溉量和施氮量($X_1 = 0.5$,$X_2 = 0.5$),产量增高到 11 212.39 kg · hm^{-2}。随着灌溉量和施氮量的继续增加,产量有所降低,当灌溉量、施氮量达到本试验范围内最大值($X_1 = 1$,$X_2 = 1$)时,产量下降到 11 073.33 kg · hm^{-2}。

可见,在浅埋滴灌春玉米的实际生产中,氮肥的施用量要根据灌溉量而定,同样,灌溉量也要结合施氮量而确定。灌溉量和施氮量不足无法达到高

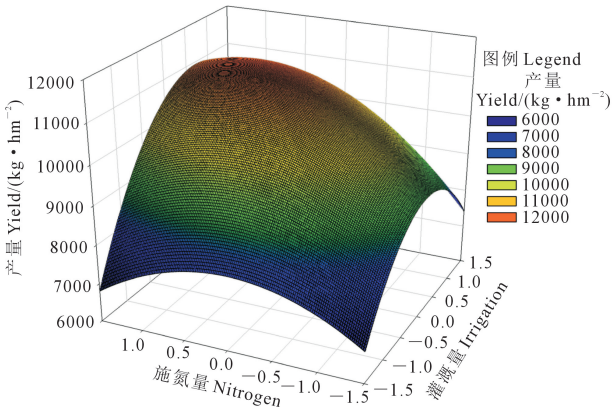


图 2　水氮处理产量的交互效应

Fig.2　Combined effect of water and nitrogen on yield

产,灌溉量和施氮量过多不仅会造成水肥资源的浪费,也会降低产量。只有适宜的水、氮用量配合应用,才能充分发挥两者的交互耦合作用,获得最高产量,实现水肥资源的高效利用。

2.1.3 产量模型寻优结果 用模型(3)分别对 X_1、X_2 求偏导数,并令其等于 0,经运算整理得出最高产量的优化方案

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X_1} = 705.961 + 336.628X_2 - 1663.306X_1 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X_2} = 502.915 + 336.628X_1 - 992.620X_2 = 0 \quad (7)$$

当 $X_1 = 0.566$,$X_2 = 0.699$ 时,即灌溉量为 373.1 mm,施氮量为 165.6 kg · hm^{-2} 时,产量最高,为 11 231.16 kg · hm^{-2}。

2.2 水氮互作对耗水量的影响

由表 3 可知,浅埋滴灌不同处理玉米各生育阶段耗水量均随灌水量的增加而显著增加。各处理阶段耗水量均表现为拔节-抽雄期和灌浆-收获期较高,出苗-拔节期和抽雄-灌浆期较低。在出苗-拔节期,灌水量低的处理 1、处理 3 与灌水量高的处理 2、处理 5 耗水量差异显著。到了拔节-抽雄期,耗水量显著提高,处理 3 与处理 2、处理 6 差异显著,其余处理间差异不显著。在抽雄-灌浆期,处理 1 与处理 2、处理 5 差异显著,其余处理间差异不显著。灌浆-收获期各处理间耗水量差异均不显著。

从耗水强度来看,高灌溉量的处理 2 耗水强度最大,低灌溉量的处理 1、处理 3 耗水强度小。不同处理玉米耗水强度均在出苗-拔节期最低,处理 2 在拔节-抽雄期最高,而其余处理在抽雄-灌浆期最高。分析其原因,可能是由于本试验在遮雨棚内实施,无自然降水,玉米生长初期,灌溉水和底墒水较充足,进入生长后期,由于灌溉量和施氮量较低,处理 1 受到干旱胁迫,且不施氮使作物生长受到抑制,导致耗水强度最高时期提前[9]。

从耗水模系数来看,不同生育期各处理玉米的耗水模系数差异均不显著,在出苗-拔节期和抽雄-灌浆期较低,拔节-抽雄期和灌浆-收获期较高。

2.3 水氮互作对水分利用效率的影响

由表 4 可知,灌溉量最高、施氮量最低的处理 2 耗水总量最大,灌溉量最低、施氮量最高的处理 3 耗水总量最低。水分利用效率总体上表现为随着灌溉量的增大而降低。灌溉量最低的处理 1 和处理 3 水分利用效率较灌溉量高的处理 2、处理 5、处理 6 显著提高,处理 2、处理 5、处理 6 之间水分利用效率差异不显著,说明增加灌溉量对水分利用效率的提高有抑制作用;相同施氮量条件下,处理 2 水分利用效率较处理 1 降低 52.21%。在相同的灌溉量条件下,水分利用效率表现为处理 3 较处理 1 提高 14.73%,处理 5 较处理 2 提高 20.08%,说明适当提高施氮量,对水分利用效率的提高有促进作用。而高施氮量的处理 6 与中等施氮量的处理 5 相比,灌溉量减小但水分利用效率提高却不显著,说明施氮量过高不利于水分利用效率的提高,施氮量对于水分利用效率的作用存在适宜范围。结合产量分析,处理 6(灌溉量 348.2 mm,施氮量 195.0 kg · hm^{-2})产量最高,显著高于其余处理,而水分利用效率仅显著低于产量最低的处理 1 和处理 3,高于处理 2、处理 5,与处理 4 相比降低不显著,为各处理中的较优选择。综合产量模型寻优结果,当灌溉量为373.1 mm,施氮量为 165.6 kg · hm^{-2}时,产量达到最高,此时灌溉量与处理 6 相近,施氮量高于处理 5,低于处理 6,因此认为,最高产量模型的水分利用效率介于处理

表 3 不同水氮处理玉米生育期耗水特征

Table 3 Water consumption characteristics of maize growing period under different treatments

处理 Treatment	出苗-拔节期 Seeding-jointing			拔节-抽雄期 Jointing-tasselling			抽雄-灌浆期 Tasselling-filling			灌浆-收获期 Falling-havesting		
	CA /mm	CD /(mm · d^{-1})	CP /%	CA /mm	CD /(mm · d^{-1})	CP /%	CA /mm	CD /(mm · d^{-1})	CP /%	CA /mm	CD /(mm · d^{-1})	CP /%
1	25.37b	0.73b	14.64a	71.52ab	2.55ab	35.81a	38.16b	2.24b	20.03a	92.01a	2.24a	48.30a
2	111.67a	2.79a	22.48a	126.41a	4.51a	24.43a	119.41a	7.02a	24.46a	146.11a	3.56a	28.64a
3	34.456b	0.86b	16.58a	47.71b	1.70b	25.76a	66.38ab	3.90ab	35.86a	68.57a	1.67a	36.12a
4	65.42ab	1.64ab	20.46a	82.58ab	2.95ab	26.19a	79.70ab	4.69ab	24.96a	89.19a	2.18a	28.39a
5	102.11a	2.55a	23.26a	103.48ab	3.70ab	23.58a	103.15a	6.07a	23.72a	129.57a	3.16a	29.45a
6	57.05ab	1.43ab	14.29a	115.64a	4.13a	29.03a	98.87ab	5.82ab	24.64a	127.50a	3.11a	32.05a

注:CA 为耗水量;CD 为耗水强度;CP 为耗水模系数。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: CA: Water consumption; CD: Water consumption intensity; CP: Water consumption percentage. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

表 4　不同水氮处理的水分利用效率

Table 4　Water use efficiency of maize under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm^{-2})	耗水总量/mm Water consumption	水分利用效率 WUE /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})
1	7042.19±92.30d	203.46±29.36e	36.26±5.77ab
2	8553.99±342.31b	503.61±48.41a	17.33±1.98d
3	7893.90±81.17c	192.74±16.60e	41.60±3.77a
4	9029.43±118.61b	316.90±13.29d	28.61±1.48bc
5	9109.50±14.90b	438.32±11.43abc	20.81±0.50cd
6	10204.17±214.58a	399.05±11.10bc	25.58±0.39cd

5 与处理 6 之间,与处理 6 差异不显著,且较处理 6 可节约氮肥,有利于环境保护。结合处理 6 的灌溉量与最高产量模型的施氮量,当灌水量为 348.2 mm,施氮量为 165.6 kg·hm^{-2}时,理论产量为 11 206.72 kg·hm^{-2},为最高产量的 99.8%,可节水 7.2%。所以,在本试验条件下,滴灌 348.2 mm,施氮 165.6 kg·hm^{-2}的水氮组合是适宜的浅埋滴灌水氮运筹模式。

3　讨论与结论

李金琴等[13]研究发现,浅埋滴灌与膜下滴灌在灌水量相同时产量相当,比常规管灌节水 32.29%。焦炳忠等[11]研究表明,在扬黄灌区的灌水量相同时,浅埋滴灌较地表滴灌玉米早出苗 1~2 d,产量提高 8.3%,WUE 提高了 7.4%。根据本研究模型模拟结果,当灌溉量为 373.1 mm,施氮量为 165.6 kg·hm^{-2}时,浅埋滴灌春玉米产量可达到 11 231.16 kg·hm^{-2}。据白伟等[14]研究表明,本研究的试验区多年的玉米平均单产仅为 6 000 kg·hm^{-2}。可见,利用浅埋滴灌的灌溉施氮方式,不仅可以达到节水节氮的目的,提高对水分的利用效率,又能实现产量的显著提高,甚至翻倍,因而本研究结果对辽西地区玉米节水增产具有重要的指导意义。同时,本研究也发现,水与氮均为影响作物产量的重要因素,灌溉量的影响程度大于施氮量,水氮互作对玉米产量有显著的影响,产量随灌溉量和施氮量的提高均呈开口向下的抛物线趋势。这可能是由于施肥量过高会造成土壤干旱胁迫程度的增加[15],对作物造成伤害甚至烧苗,出现土壤盐渍化等生态问题[16]。适当增加灌溉量有利于作物干物质的积累,促进产量的提高[17],过度灌水使得硝态氮淋溶而在 1 m 土层中的残留较少,致使作物可利用的氮素紧缺[18],还可能会造成根系局部淹水,通气性降低,使根系的有氧呼吸受到抑制,从而影响作物的生长发育,最终导致产量的降低[19]。

李文惠等[20]研究发现,膜下滴灌玉米阶段耗水量表现为生育前期较少,中期缓慢增加,灌浆期迅速上升的趋势,抽雄-灌浆期耗水强度最大。黄鹏飞等[21]认为,交替地下滴灌春玉米拔节-抽雄期耗水量最大,抽雄-灌浆期耗水强度最高。而李曙光等[22]认为,玉米各生育期的耗水量、耗水模数总体呈拔节期、抽雄期高,苗期、灌浆期低的变化趋势,耗水强度表现为抽雄期> 拔节期> 灌浆期> 苗期。本研究发现,浅埋滴灌不同处理阶段耗水量均表现为拔节-抽雄期和灌浆-收获期较高,出苗-拔节期和抽雄-灌浆期较低。耗水强度最大值出现在灌浆-收获期。同时,在浅埋滴灌条件下,春玉米生育期的耗水量和耗水强度均随灌水量的增加而增大,适当减少施氮量可以降低生育期的耗水量,该耗水特性对浅埋滴灌春玉米不同生育期的灌水量和施氮量具有指导意义。

本研究发现,水分利用效率随着灌水量的增加呈逐渐降低的趋势,而随着施氮量的增加,水分利用效率呈先升高后降低的趋势。这与王鹏勃等[23]研究结果一致。施肥量过低或过高均不利于植物对水分的吸收和利用[24]。当施氮量过高时,作物根区养分浓度较高,不利于作物根部吸收水分[25]。

综上所述,灌溉量和施氮量单因子对产量提高均有促进作用。在试验因子取值范围内,产量随着灌溉量、施氮量二因素用量的增加表现为先提高后降低的变化趋势,灌溉量在 145.4~350.5 mm 时,春玉米产量随着灌溉量的增加而增高,灌溉量在 350.5~436.2 mm 时,产量随着灌溉量的增加而降低;施氮量在 0~146.9 kg·hm^{-2}时,产量随施氮量的增加而增高,施氮量在 146.9~195.0 kg·hm^{-2}时,产量随施氮量的增加而降低,灌溉量对产量的影响大于施氮量。不同处理的阶段耗水量均表现为拔节-抽雄期和灌浆-收获期较高,出苗-拔节期和抽雄-灌浆期较低,耗水强度最大值出现在灌浆-收获期。耗水量和耗水强度均随灌水量的增加而增大。不同生育阶段各处理的耗水模系数差异不显著。水分利用效率随灌溉量增加呈逐渐降低的变化趋势,而

随着施氮量增加则呈现为先升高后降低的趋势,其中处理 6(灌溉量 348.2 mm,施氮量 195.0 kg·hm^{-2})为试验条件下水分利用效率的最优处理。在提高辽西半干旱地区浅埋滴灌春玉米生产中,施氮量 165.6 kg·hm^{-2},播种期沟施 30%,剩余氮肥在拔节期和抽雄期等量滴灌追施;灌溉量为 348.2 mm,分苗期 2 次,拔节期 3 次,抽雄期 2 次,灌浆期 3 次滴灌的方式,是同步实现节氮、节水、增产的浅埋滴灌水氮运筹措施。由于本试验在移动遮雨棚内开展,试验所得结论对于田间应用具有一定局限性,下一步的研究拟将遮雨棚内试验与大田试验相结合,建立适宜于大田实际应用的可操作性强的浅埋滴灌水氮运筹模式。

参 考 文 献:

[1] 冯良山,孙占祥,郑家明,等.辽西风沙半干旱区旱作农田水资源研究[J].土壤通报,2008,39(1):25-28.

[2] 孙占祥,刘武仁,来永才.东北农作制[M].北京:中国农业出版社,2010:22-23.

[3] 谷健,尹光华,郭金路,等.一种玉米浅掩式地表滴灌装置:中国,CN201621357165.5[P].2017-06-30.

[4] 郭金路,谷健,尹光华,等.辽西半干旱区浅埋式滴灌对春玉米耗水特性及产量的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2514-2520.

[5] 王建东,张彦群,龚时宏,等.覆膜浅埋滴灌技术模式田间应用试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(11):1-5.

[6] Yang N, Sun Z X, Feng L S, et al. Plastic film mulching for water-efficient agricultural applications and degradable films materials development research[J]. Advanced Materials and Manufacturing Processes,2015,30(2):143-154.

[7] 张松,李和平,郑和祥,等.毛乌素沙地地埋滴灌对紫花苜蓿生长指标的影响[J].节水灌溉,2016,(8):113-116.

[8] 梅园雪,冯玉涛,冯天骄,等.玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J].玉米科学,2018,26(1):98-102.

[9] 李媛媛,杨恒山,张瑞富,等.浅埋滴灌条件下不同灌水量对春玉米干物质积累与转运的影响[J].浙江农业学报,2017,29(8):1234-1242.

[10] 徐杰,李从锋,孟庆锋,等.苗期不同滴灌方式对东北春玉米产量和水分利用效率的影响[J].作物学报,2015,41(8):1279-1286.

[11] 焦炳忠,孙兆军,韩磊,等.扬黄灌区浅埋式滴灌对地膜玉米生长及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2016,(6):24-27.

[12] 郭元裕.农田水利学[M].北京:中国水利水电出版社,1997:39.

[13] 李金琴,王宇飞,侯旭光,等.不同节水种植模式对玉米产量的影响[J].北方农业学报,2017,45(4):30-34.

[14] 白伟,孙占祥,郑家明,等.辽西地区不同种植模式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响[J].作物学报,2014,40(1):181-189.

[15] 范雯雯,王志强,林同保,等.不同土壤肥力下旱后复水对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2010,30(2):362-365.

[16] 饶碧玉,罗绍芹,吴占景,等.水肥耦合对当归产量和品质的影响效应研究[J].中国农学通报,2012,28(34):274-278.

[17] Zhang B, Li F M, Huang G, et al. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area[J]. Agricultural Water Management,2006,79(1):28-42.

[18] 赵建华,樊廷录,王淑英,等.施氮与灌水对河西制种玉米产量及水氮利用效率的影响[J].核农学报,2016,30(5):997-1004.

[19] Christiane F, Trevor G, Sergey S. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of Lucerne (*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery[J]. Plant and Soil, 2005, 270(1): 31-45.

[20] 李文惠,尹光华,谷健,等.膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J].生态学杂志,2015,34(12):3397-3401.

[21] 黄鹏飞,尹光华,谷健,等.交替地下滴灌对春玉米产量和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2016,27(8):2507-2512.

[22] 李曙光,田德龙,梁建财.西辽河平原玉米节水型灌溉条件下需水量研究[J].中国农村水利水电,2015,(2):81-85.

[23] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2):314-323.

[24] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.

[25] 张富仓,高月,焦婉如,等.水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J].农业机械学报,2017,48(3):270-278.