文章编号:1000-7601(2022)06-0090-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.06.10

地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆特性及水氮利用效率的影响

白芳芳[1,2],乔冬梅[1],李　平[1,4],齐学斌[1,3],
王和洲[1,5],郭　魏[1,3],韩　洋[1,2],赵宇龙[1,2]

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002;2.中国农业科学院研究生院,北京 100081;
3.农业部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室,河南 新乡 453002;4.中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站,河南 新乡 453002;5. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站,河南 商丘 476000)

摘　要:为揭示不同地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆过程和水氮利用效率影响,以夏玉米'怀玉 208'为试验材料,基于大型地中渗透仪,采用随机区组的试验方法,研究了地下水埋深(GW,2、3、4 m)和施氮量(N,300、240 kg · hm^{-2})对夏玉米籽粒灌浆过程和水氮利用效率的影响。结果表明:(1)各处理玉米百粒质量随花后天数呈"S"型曲线变化趋势。施氮量和地下水埋深均极显著影响玉米收获时的百粒质量,但二者交互作用不显著;地下水埋深相同时,施氮量为 300 kg · hm^{-2}玉米的百粒质量均显著高于施氮量为 240 kg · hm^{-2}玉米的百粒质量。(2)灌浆期各处理玉米籽粒灌浆速率均呈"抛物线"型变化趋势。Logistic 方程能很好地拟合各处理玉米籽粒灌浆过程。收获期玉米籽粒百粒质量与最大灌浆速率时的籽粒质量、玉米平均灌浆速率极显著正相关。地下水埋深和施氮量对玉米灌浆参数的影响具有显著交互作用。(3)施氮量和地下水埋深极显著影响玉米产量,其中 N300GW4 处理玉米产量最高,N240GW3 处理的产量最低。玉米产量与穗长、穗粗、百粒质量、穗行数、行粒数、穗粒数极显著正相关。(4)施氮量、地下水埋深及二者交互作用均极显著影响玉米氮肥偏生产力;施氮量极显著影响玉米水分利用效率,地下水埋深及二者交互作用对玉米水分利用效率影响不显著。N240GW4 处理玉米氮肥利用效率及水分利用效率均最高。综上可知,地下水埋深和施氮量对玉米水氮利用效率及灌浆过程交互作用显著,N240GW4 处理是本研究推荐的农业绿色高产生产模式。

关键词:地下水埋深;施氮量;灌浆;氮肥偏生产力;水分利用效率

中图分类号:S513　　**文献标志码**:A

Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency of summer maize

BAI Fangfang[1,2], QIAO Dongmei[1], LI Ping[1,4], QI Xuebin[1,3],
WANG Hezhou[1,5], GUO Wei[1,3], HAN Yang[1,2], ZHAO Yulong[1,2]

(1. *Farmland Irrigation Research Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Xinxiang*, *Henan* 453002, *China*;
2. *Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Xinxiang*, *Henan* 453002, *China*;
4. *Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Xinxiang*, *Henan* 453002, *China*;
5. *National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu*, *Shangqiu*, *Henan* 476000, *China*)

Abstract: The purpose of this experiment was to investigate the effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain-filling process and water and nitrogen use efficiency of summer maize. 'Huaiyu 208' was

收稿日期:2022-04-12　　**修回日期**:2022-06-07

基金项目:河南省科技攻关项目(212102110233);国家重点研发计划项目(2017YFD0800605);中央级公益性科研院所基本科研业务费(FIRI20210102);国家自然科学基金项目(51679241,51879268)

作者简介:白芳芳(1986-),女,河南原阳人,博士研究生,助理研究员,主要从事农业水资源与水环境方面的研究工作。E-mail:baiffang0921@163.com

通信作者:齐学斌(1963-),男,陕西户县人,研究员,主要从事农业水资源优化配置与水资源安全利用方面研究工作。E-mail:qxb6301@sina.cn

used as the experimental material. A two-factor experiment of groundwater depth and nitrogen application rate with randomized block test method was adopted based on a large-scale lysimeter. The experiment was conducted with groundwater depth (GW) of 2 m, 3 m and 4 m and nitrogen application rate (N) of 300 kg · hm^{-2} and 240 kg · hm^{-2}. Results showed that: (1) The 100-grain weight of summer maize under all treatments showed an S-shaped curve with the days after flowering. Both nitrogen application rate and groundwater depth significantly affected the 100-grain weight of summer maize, but the interaction between them was not significant. Under the same groundwater depth, the 100-grain weight of summer maize with nitrogen application rate of 300 kg · hm^{-2} was significantly higher than that with nitrogen application rate of 240 kg · hm^{-2}. (2) The grain filling rate of summer maize under different treatments showed a "parabolic" trend. Logistic equation fitted the grain filling process of each treatment well. The 100-grain weight of summer maize at harvest stage was significantly positively correlated with the grain weight at the maximum grain filling rate, and the average grain filling rate of summer maize. Groundwater depth and nitrogen application rate had a significant interaction effects on summer maize filling parameters. (3) Groundwater depth and nitrogen application rate had a significant interaction on summer maize yield, and N300GW4 treatment had the highest yield, while N240GW3 treatment had the lowest yield. The yield of summer maize was positively correlated with ear length, ear diameter, 100-grain weight, ear rows, grain numbers per row and grain numbers per spike. (4) Nitrogen application rate, groundwater depth and their interaction significantly affected the partial nitrogen productivity of summer maize. Nitrogen application rate significantly affected summer maize WUE, but groundwater depth and their interaction had no significant effect. Both the nitrogen use efficiency and WUE of summer maize under N240GW4 treatment were the highest. In conclusion, groundwater depth and nitrogen application rate had significant interaction on water and nitrogen use efficiency and grain filling process of summer maize. The N240GW4 treatment is the recommended agricultural green and high-yield production mode.

Keywords: groundwater depth; nitrogen application rate; grain filling; nitrogen partial productivity; WUE

华北地区是我国重要粮食生产基地,夏玉米种植面积占全国的 31.4%,产量占全国玉米产量的 30.1%[1]。在传统的农业生产中,由于片面追求高产,导致过量施肥现象普遍存在[2],进入农田环境的氮素导致了土壤酸化[3]、地下水硝酸盐污染[4]、温室气体排放加剧[5]等问题,严重影响区域农业经济和生态环境的可持续发展。因此,作物生产中减氮管理是提高氮肥利用效率、降低地下水硝酸盐污染风险和农田土壤温室气体排放的有效措施。地下水埋深对作物产量影响较大[6-7],同时影响氮素在土壤中的迁移和转换[8]。当地下水埋深位于 0.4 ~1.5 m 时,地下水对作物日需水量的贡献率超过 65%[9]。地下水埋深较浅时,作物生育期根系层下界面处具有明显的双向水量交换现象,作物腾发可部分地利用地下水及深层土壤水;而地下水埋深较深时,根系层下界面处土壤水分主要向下迁移。在华北地区,对应双向水量交换临界面的地下水埋深一般为 4 m[10],从盐渍化控制角度看,地下水埋深控制在 2.0 m 左右为宜[11]。灌浆期是夏玉米生长发育过程中的重要阶段,也是玉米品质和产量形成的关键时期[12]。本研究针对华北地区 2~4 m 地下水埋深开展田间小区试验,研究地下水埋深和施氮量对玉米灌浆过程和水氮利用效率的影响,这对于保障国家粮食安全和区域农田环境安全意义重大。

通过不同的农艺措施可以提高玉米百粒质量进而实现增产。例如覆膜可以提高灌浆速率,延长灌浆时间,显著增加玉米百粒质量和产量[13]。适宜的播期及品种可极显著影响玉米灌浆速率和成熟期百粒质量[14]。深松有利于提高玉米中后期灌浆速率,增加平均灌浆速率和最大灌浆速率,最终增加千粒质量,提高夏玉米产量[15]。适宜施氮措施可以延长灌浆持续期、提高灌浆参数,促进玉米产量的提高[16]。于宁宁等[17]研究指出,适当降低种植密度,减少化肥用量,能更有效促进夏玉米籽粒的后期灌浆,延长灌浆时间,促进植株干物质向籽粒转运,进而提高玉米品质和肥料利用率,增加净收益。方恒等[18]研究认为,施氮对玉米灌浆速率影响较大,适量施氮可提前达到玉米的最大灌浆速率,但施氮量过高则推迟到达最大灌浆速率的时间。当地下水埋深较小时,受强烈的毛管上升作用影响,通过土壤表层直接蒸发损失水分增加,故地下水补给也随着增加,因此,随着地下水埋深增加,作物耗水量减少[19],农业用水效率与灌溉水利用效率与地下水埋深密切相关,随着灌水量的增加,灌溉

水利用效率受地下水埋深的影响减小[20]。地下水埋深过浅会限制根系有氧呼吸,进而影响作物正常生长[21],且易引发土壤次生盐渍化[22-23]。因此,在区域灌水施肥决策时,应充分考虑地下水埋深对作物生长及水氮利用效率的影响。随着施氮量增加,夏玉米籽粒产量和土壤硝态氮残留量逐渐增大,水分利用效率呈先增大后减小趋势,氮肥偏生产力逐渐降低。故地下水埋深和施氮量是影响玉米灌浆及水氮利用效率的重要环境因素,关于地下水埋深和施氮量单因素对作物生长、产量影响的研究较多,但是关于地下水埋深和施氮量及二者交互作用对玉米灌浆特性及水氮利用效率的研究鲜有报道。为此,在地中渗透仪观测场开展田间小区试验,研究施氮量和地下水埋深对夏玉米产量、灌浆速率、灌浆参数及水氮利用效率的影响,并基于 Spearman 相关分析,分析产量及产量构成要素的相关关系,以期提出华北地区夏玉米绿色、稳产生产模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 6 月—2020 年 10 月在中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站大型地中渗透仪观测场(35°19′N、113°53′E,海拔 73.2 m)进行。试验区多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时间 2 398.8 h,多年平均降水量 588.8 mm,7—9 月降水量占全年降水量的 70%左右。土壤为粉砂壤土,0~20 cm 土层土壤体积质量为 1.42 $g \cdot cm^{-3}$,有机质 17.03 $g \cdot kg^{-1}$,全氮 0.44 $g \cdot kg^{-1}$,全磷 0.71 $g \cdot kg^{-1}$,速效钾 0.17 $g \cdot kg^{-1}$,电导率 447.33 $\mu S \cdot cm^{-1}$,土壤 pH 值为 9.42。

1.2 试验设计

供试夏玉米(*Zea mays* L.)品种为'怀玉 208',于 2019 年 6 月 8 日播种,9 月 24 日收获,全生育期 108 d;2020 年 6 月 10 日播种,9 月 23 日收获,全生育期 105 d,种植密度均为 66 699 株·hm^{-2}。试验采用随机区组设计,设置地下水埋深和施氮量 2 个因素,其中地下水埋深设 3 个水平,分别为 2 m(GW2)、3 m(GW3)、4 m(GW4),通过马氏瓶控制地下水位;施氮量设 2 个水平,分别为减氮 20%(纯氮 240 kg·hm^{-2},N240)、常规(纯氮 300 kg·hm^{-2},N300),共计 6 个处理,处理简称为 N240GW2、N240GW3、N240GW4、N300GW2、N300GW3、N300GW4,每个处理 4 个重复,共计 24 个小区,小区面积 4.5 m^2(1.5 m×3 m)。采用井水灌溉,每次灌溉前取水样检测水质,灌溉方式为畦灌。试验用肥为含氮量 46%的尿素、含 P_2O_5 量为 12%的过磷酸钙、含 K_2O 量为 50%硫酸钾,磷、钾肥均作为基肥一次性施入土壤,P_2O_5 施入量为 150 kg·hm^{-2},K_2O 施入量为 120 kg·hm^{-2};夏玉米氮肥以底肥和追肥 4∶6 的比例施入,底肥于玉米播种时施入,追肥于大喇叭口期撒施;其他田间管理措施与当地大田相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 *灌浆速率* 玉米吐丝后在每个小区选取长势一致的 10 棵植株进行标记,花后每隔 7 d 进行 1 次籽粒取样。选挂牌标记植株 1 株,果穗去除基部 5 环籽粒后,每行均匀取籽粒置于 105℃烘箱杀青 30 min,后在 75℃条件下烘干至恒质量,折算成百粒质量后计算出籽粒灌浆速率。

以开花至观测时的天数 t 为自变量,观测时玉米籽粒百粒质量 y 为因变量,用 Logistic 方程 $y=a/(1+be^{-ct})$ 拟合玉米籽粒灌浆过程,将实测数据代入 Logistic 方程可求出参数 a、b、c,其中 a 为最大百粒质量,b 为初始值、c 为灌浆速率参数。据此依据以下各式计算玉米灌浆特征参数[23]。

$$t_1 = \frac{\ln b - 1.317}{c} \tag{1}$$

$$t_2 = \frac{\ln b + 1.317}{c} \tag{2}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{3}$$

$$W_{max} = a/2 \tag{4}$$

$$G_{max} = aW_{max}/2 \tag{5}$$

$$D_{max} = \frac{\ln b}{c} \tag{6}$$

$$P = \frac{\ln 99b}{c} \tag{7}$$

$$G_{mean} = \frac{a}{P} \tag{8}$$

式中,t_1 为灌浆渐增期时间拐点(d);t_2 为灌浆快速增长结束期时间拐点(d),Δt 为快速灌浆期持续时间(d);G_{mean} 为玉米平均灌浆速率(mg·粒$^{-1}$·d^{-1});G_{max} 为玉米籽粒最大灌浆速率(mg·粒$^{-1}$·d^{-1});W_{max} 为玉米最大灌浆速率时籽粒质量(mg·粒$^{-1}$);D_{max} 为玉米灌浆速率达到最大的时间(d);P 为玉米灌浆持续时间(d)。

1.3.2 *考种* 成熟期每个小区收获 5 株玉米用于考种,考种指标主要有穗长、穗粗、轴粗、秃尖长、百粒质量、穗行数、行粒数、穗粒数。每个小区单独收获测产,用谷物测定仪测定各小区玉米籽粒含水率,根据 14%的标准含水率进行折算后计算产量,加上考种时所采获的 5 株籽粒质量,作为小区最后

的实际产量。

1.3.3　水分利用效率　玉米水分利用效率采用式(9)进行计算:

$$WUE = Y/ET \tag{9}$$

式中,WUE 为玉米水分利用效率($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$);$Y$ 为玉米籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$);ET 为玉米耗水量(mm),可采用式(10) 计算。

$$ET = I + P + G - D - R \pm \Delta W \tag{10}$$

式中,ET 为玉米生育期内耗水量(mm);I 为灌水量(mm);P 为田间有效降水量(mm);G 为地下水利用量(mm),由马氏瓶供水,记录历次补水量;D 为深层渗漏量(mm);R 为径流量(mm)。由于本试验在防雨棚下进行,且每个小区四周用钢筋混凝土隔开,故 P、R 忽略不计;由于每次灌水量较少,约 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$,故不易产生深层渗漏,因此 D 可忽略不计。ΔW 为玉米播种前土壤贮水量与收获后土壤贮水量差值(mm);单位面积土壤贮水量可按式(11) 计算:

$$W = \theta_m \times \rho_b \times h \times 0.1 \tag{11}$$

式中,θ_m 为土壤质量含水率(%);ρ_b 为土壤体积质量($g \cdot cm^{-3}$);h 为土层厚度(cm),本文按 200 cm 计算;0.1 为换算系数。

1.3.4　氮肥偏生产力

氮肥偏生产力采用式(12) 进行计算:

$$NPP = Y/N \tag{12}$$

式中,NPP 为氮肥偏生产力($kg \cdot kg^{-1}$);Y 为籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$);N 为施氮量($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.4　数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理和作图;使用 SPSS 19.0 对数据进行方差分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较和差异显著性检验($P<0.05$),图表中数据为平均值±标准差;利用 Curxpt 拟合 Logistic 方程。

2　结果与分析

2.1　地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆特征影响

2.1.1　夏玉米百粒质量　图 1 显示了各处理开花后不同时间玉米籽粒百粒质量变化。各处理玉米百粒质量随着花后时间进程呈“S”型曲线变化,不同时间各处理之间百粒质量差异不一致。开花后 7 d,2、4 m 地下水埋深条件下 N300 处理玉米百粒质量均高于 N240 处理;在 N300 施氮量下,GW2、GW3、GW4 处理玉米百粒质量差异显著,表现为 GW4>GW2>GW3,这可能是因为 GW4 处理受地下水补给较少,导致同期其土壤含水率低于 GW2 和 GW3 处理,土壤水分胁迫使其早于 GW2 处理和

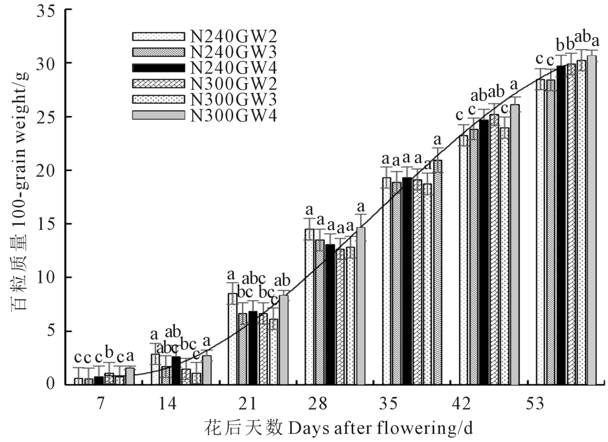

图 1　各处理玉米百粒质量随开花后时间变化

Fig.1　The change of 100-grain weight of summer maize after flowering under different treatments

GW3 处理进入生殖生长期;在施氮量 N240 水平下,GW2、GW3、GW4 处理差异均不显著($P>0.05$)。开花后 28 d 和 35 d,各处理之间百粒质量差异不显著,N300GW4 的百粒质量均最大。开花后 53 d 即成熟期,各处理百粒质量表现为 N300GW4(30.67 g)>N300GW3(30.26 g)>N300GW2(29.92 g)>N240GW4(29.71 g)>N240GW2(28.49 g)>N240GW3(28.41 g);地下水埋深相同时,N300 施氮水平玉米百粒质量均高于 N240 施氮水平,其中 N300 施氮水平下 GW2、GW3、GW4 处理百粒质量分别比 N240 施氮水平下相应地下水埋深高 5.00%、6.52%、3.21%;N240 水平下,GW4 处理的百粒质量显著高于 GW2 和 GW3 处理,其中 GW2 处理与 GW3 处理差异不显著;N300 水平下,GW4 处理的百粒质量显著高于 GW2 处理,但 GW2、GW4 处理与 GW3 处理间差异均不显著,这可能是因为充足的施氮量弥补了水分不足对玉米灌浆影响,同时 GW2 玉米处理贪青晚熟,营养物质向种子转移不足导致。

2.1.2　夏玉米灌浆速率　图 2 为各处理开花后不同时间玉米灌浆速率。由图 2 可知,各处理玉米籽粒灌浆速率变化趋势均呈“抛物线”型,说明灌浆速率呈“慢-快-慢”的变化趋势。花后不同时间,各处理玉米灌浆速率差异不一致。花后 7~14 d,相同地下水埋深下,N240 处理玉米的灌浆速率均大于 N300 处理,虽然 N240 处理晚于 N300 处理进入灌浆期,但减氮并未降低玉米灌浆速率,反而提高了灌浆前期的玉米灌浆速率;N240GW2 处理玉米灌浆速率除与 N240GW4 处理差异不显著外,均显著高于其他处理,说明充足的水分供应提高了 N240GW2 处理的灌浆速率。花后 21~28 d,各处理之间灌浆

速率无显著差异，除 N240GW4、N300GW2 处理外，其他处理玉米灌浆速率均达到最大值，各处理灌浆速率表现为 N240GW3（0.98 g·d^{-1}·100grain^{-1}）> N300GW3（0.95 g·d^{-1}·100grain^{-1}）> N300GW4（0.91 g·d^{-1}·100grain^{-1}）> N240GW4（0.89 g·d^{-1}·100grain^{-1}）> N240GW2（0.86 g·d^{-1}·100grain^{-1}）= N300GW2（0.86 g·d^{-1}·100grain^{-1}）。N240GW4、N300GW2 处理的灌浆速率均在花后 28～35 d 达到最大值，均为 0.92 g·d^{-1}·100 粒$^{-1}$。花后 42～53 d，N300GW3 处理玉米的灌浆速率最大，分别比 N240GW3、N300GW2、N300GW4 处理显著提高 37.5%、33.0%、38.2%；N240 施氮水平下各处理之间的灌浆速率差异不显著，说明此时期 N240 施氮水平下，地下水埋深对玉米灌浆后期灌浆速率影响不大。

2.1.3 *夏玉米籽粒灌浆参数* 由表 1 可知，Logistic 方程能很好地拟合各处理玉米籽粒灌浆过程（R^2 = 0.9936～0.9986）。在 N240 施氮水平下，玉米的灌浆渐增期时间拐点（t_1）表现为随地下水埋深的增加而增加，即地下水埋深越小，玉米越先进入灌浆渐增期；而在 N300 施氮水平下，GW4 处理最先进入灌浆渐增期，GW3 处理进入灌浆渐增期的时间最晚。玉米的灌浆快速增长期时间拐点（t_2）在不同施氮水平下随地下水埋深变化不一致；在 N240 施氮水平下，GW3 处理的玉米先进入灌浆快速增长期，GW4 处理进入灌浆快速增长期的时间最晚；而在 N300 施氮水平下，GW4 处理最先进入灌浆快速增长期，GW3 处理进入灌浆快速增长期的时间最晚。在 N300 施氮水平下，玉米的快速灌浆持续时间随地下水埋深的增加而增加；在 N240 施氮水平下，GW3 处理玉米的快速灌浆持续时间最短，GW2 处理玉米的快速灌浆持续时间最长。在 N240 施氮水平下，玉米平均灌浆速率随地下水埋深的增加而增加；在 N300 施氮水平下，GW3 处理玉米的平均灌浆速率最小，GW4 处理玉米的平均灌浆速率最大。在 N240 施氮水平下，玉米籽粒最大灌浆速率随地下水埋深的增加而增加；在 N300 施氮水平下，玉米籽粒最大灌浆速率随地下水埋深的增加而降低。玉米最大灌浆速率时籽粒质量整体上随地下水埋深的增加而增加，其中在 N240 施氮水平下，GW3 处理的玉米最大灌浆速率时籽粒质量最小。在 N240 施氮水平下，玉米灌浆速率达到最大的时间均随地下水埋深的升高而升高；在 N300 施氮水平下，GW3 处理玉米灌浆速率达到最大的时间最长，GW4 处理玉米灌浆速率达到最大的时间最短。在 N300 施氮水平下，GW3 处理的玉米灌浆持续时间最长为 66.630 d，而在 N240 施氮水平下，GW4 处理的玉米灌浆持续时间最长为 65.951 d。玉米的灌浆参数随地下水埋深和施氮量未表现出明显趋势。

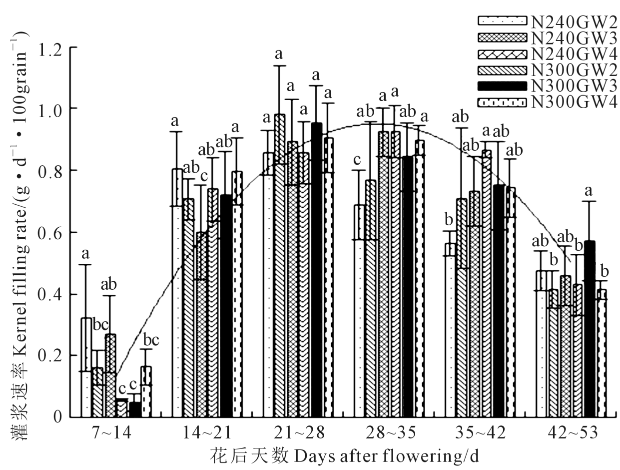

图 2 各处理玉米灌浆速率随开花后时间变化

Fig.2 The change of grain filling rate of summer maize after flowering under different treatments

表 1 各处理玉米籽粒灌浆特征参数

Table 1 Characters of summer maize grain filling parameters under different treatments

处理 Treatment	Logistic 方程 Logistic equation	R^2	t_1/d	t_2/d	Δt/d	G_{mean} /(mg·grain^{-1}·d^{-1})	G_{max} /(mg·grain^{-1}·d^{-1})	W_{max} /(mg·grain^{-1})	D_{max}/d	P/d
N240GW2	$y=29.109/(1+37.965e^{-0.125x})$	0.9918	18.526	39.562	21.036	4.428	9.112	145.545	29.044	65.742
N240GW3	$y=29.016/(1+66.249e^{-0.140x})$	0.9952	20.566	39.399	18.833	4.618	10.145	145.079	29.983	62.838
N240GW4	$y=31.025/(1+56.914e^{-0.131x})$	0.9986	20.805	40.919	20.114	4.704	10.157	155.123	30.862	65.951
N300GW2	$y=31.260/(1+71.614e^{-0.136x})$	0.9973	21.644	40.941	19.297	4.812	10.667	156.302	31.292	64.957
N300GW3	$y=31.531/(1+69.451e^{-0.133x})$	0.9936	22.047	41.910	19.863	4.732	10.453	157.656	31.979	66.630
N300GW4	$y=31.877/(1+46.109e^{-0.129x})$	0.9979	19.476	39.881	20.405	4.883	10.287	159.384	29.678	65.276

表 2 为各处理玉米产量、百粒质量与灌浆参数的 Spearman 相关分析结果。由表 2 可知，玉米产量与最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、百粒质量极显著正相关，相关系数均为 0.943；与快速增长期时间拐点（t_2）、玉米平均灌浆速率（G_{mean}）、玉米籽粒最大灌浆速率（G_{max}）、玉米灌浆持续时间（P）相关系数较高，但均不显著。玉米籽粒百粒质量与玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）极显著正相关，相关系数为 1.000，这主要是因为玉米最大灌浆速率时籽粒质量是玉米籽粒百粒质量的 1/2；玉米籽粒百粒质量、玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、籽粒最大灌浆速率（G_{max}）与玉米平均灌浆速率（G_{mean}）显著正相关，相关系数分别为 0.886、0.886、0.829，因此玉米平均灌浆速率对玉米成熟期百粒质量有重要影响，应从考虑如何提高玉米平均灌浆速率来提高玉米百粒质量，进而达到丰产目的。玉米的灌浆渐增期时间拐点（t_1）、灌浆速率达到最大的时间（D_{max}）、籽粒最大灌浆速率（G_{max}）与玉米快速增长期时间拐点（t_2）显著正相关，表明玉米的灌浆渐增期时间拐点（t_1）越大，玉米快速灌浆结束的越晚，同时灌浆速率达到最大的时间（D_{max}）越长，玉米籽粒最大灌浆速率（G_{max}）越大。在 N240 施氮水平下，玉米百粒质量与玉米快速增长期时间拐点（t_2）、玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、玉米灌浆持续时间（P）相关系数最高；在 N300 施氮水平下，玉米百粒质量与快速灌浆期持续时间（Δt）、玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）相关系数最高；因此 N300 施氮量下，地下水埋深主要是通过影响玉米快速灌浆期持续时间（Δt）来影响玉米百粒质量；在 N240 施氮水平下，地下水埋深主要是通过影响最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、玉米灌浆持续时间（P）来影响玉米百粒质量形成。地下水埋深相同时，N300 与 N240 施氮水平玉米百粒质量增加量与玉米快速增长期时间拐点（t_2）、玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、灌浆速率达到最大的时间（D_{max}）、玉米灌浆持续时间（P）的相关系数分别为 0.983、0.957、0.842、0.845，因此，增加施氮量主要是通过增大玉米玉米快速增长期时间拐点（t_2）、玉米最大灌浆速率时籽粒质量（W_{max}）、灌浆速率达到最大的时间（D_{max}）、玉米灌浆持续时间（P）来增加玉米百粒质量。

表 2　各处理玉米产量、百粒质量与灌浆参数的 Spearman 相关分析

Table 2　Spearman correlation analysis of summer maize yield, 100-grain weight and grain filling parameters under different treatments

指标 Index	t_1	t_2	Δt	G_{mean}	G_{max}	W_{max}	D_{max}	P	百粒质量 100-grain weight	产量 Yield
t_1	1									
t_2	0.829*	1								
Δt	−0.600	−0.086	1							
G_{mean}	0.371	0.543	−0.086	1						
G_{max}	0.771	0.829*	−0.371	0.829*	1					
W_{max}	0.314	0.657	0.257	0.886*	0.714	1				
D_{max}	1	0.829*	−0.600	0.371	0.771	0.314	1			
P	0.314	0.600	0.486	−0.029	0.086	0.371	0.314	1		
百粒质量 100-grain weight	0.314	0.657	0.257	0.886*	0.714	1.000**	0.314	0.371	1	
产量 Yield	0.257	0.600	0.371	0.771	0.543	0.943**	0.257	0.543	0.943**	1

注：* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平存在显著差异。下同。

Note: * and * * represent significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

2.2　地下水埋深和施氮量对夏玉米产量及其构成要素的影响

由表 3 可知，施氮量、地下水埋深及二者交互作用极显著影响玉米产量。其中 N300GW4 处理玉米的产量最高，N240GW3 处理的产量最低，N300GW4 处理玉米产量显著高于 N240GW2、N240GW3 和 N300GW2 处理，但与其他处理之间差异不显著。同时，地下水埋深相同时，N300 施氮水平玉米产量均高于 N240 施氮水平，其中 N300 施氮水平下 GW2、GW3、GW4 处理产量分别比 N240 施氮水平下相应地下水埋深高 0.35%、14.08%、2.60%；其中 N300GW3 处理显著高于 N240GW3 处理。当地下水埋深相同时，N300 施氮水平玉米的穗长显著大于 N240 施氮水平；在 2 个施氮水平下，均表现为 GW3 处理的穗长最短，其中 N240GW2、N240GW4 处理玉米的穗长显著大于 N240GW3 处理，N300 施氮水平下玉米穗长差异不显著。相同施氮量下，玉米穗粗均随地下水埋深的增加而增加，其中 N240GW4 处理显著高于 N240GW2 处理和 N240GW3 处理；在 N300 施氮水平下，各处理之间玉米穗粗无显著差

异。地下水埋深、施氮量及二者交互作用对玉米秃尖长均无显著影响,各处理玉米秃尖长差异不显著,不同施氮水平下玉米秃尖长随地下水埋深变化趋势不一致,N240 施氮水平下,玉米秃尖长随地下水埋深的增加而降低;N300 施氮水平下,玉米秃尖长在 GW4 处理下最大,GW3 处理下最小。地下水埋深和施氮量显著影响玉米百粒质量,但二者交互作用对其影响不显著。施氮量对玉米的穗行数有显著影响,但是地下水埋深及二者交互作用对玉米穗行数均无显著影响。其中,N300GW4 处理显著高于 N240GW3 处理,其余各处理之间无显著差异。施氮量极显著影响玉米的行粒数,但是地下水埋深及二者交互作用对玉米行粒数均无显著影响。地下水埋深相同时,N300 施氮水平玉米行粒数均高于 N240 施氮水平,其中 N300 施氮水平下 GW2、GW3、GW4 处理行粒数分别比 N240 施氮水平下相应地下水埋深显著高 7.14%、11.08%、5.25%;施氮量极显著影响玉米的穗粒数,地下水埋深显著影响玉米的穗粒数,但二者交互作用对玉米穗粒数无显著影响;地下水埋深相同时,N300 施氮水平玉米穗粒数均显著高于 N240 施氮水平,其中 N300 施氮水平下 GW2、GW3、GW4 处理穗粒数分别比 N240 施氮水平下相应地下水埋深高 15.01%、30.99%、12.54%;在 N300 和 N240 施氮水平下,穗粒数均表现为在 GW4 处理下最高。各处理玉米产量与产量构成要素的 Spearman 相关分析(表 4)进一步表明,穗长、穗粗、百粒质量、穗行数、行粒数、穗粒数极显著影响玉米产量,相关系数分别为 0.547、0.535、0.730、0.614、0.544、0.816。因此,地下水埋深和施氮量对玉米产量影响主要是通过对产量构成要素的影响体现出来的。

表 3 各处理玉米产量及产量构成要素

Table 3 Summer maize yield and yield components under different treatments

处理 Treatment	穗长 Ear length /cm	穗粗 Ear diameter /cm	秃尖长 Bald tip length /cm	百粒质量 100-grain weight/g	穗行数/行 Ear rows	行粒数/粒 Grain numbers per row	穗粒数/粒 Grain numbers per spike	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
N240GW2	14.60±0.29b	43.85±0.51b	1.43±0.33a	28.49±0.60c	14.5±1.73ab	32.67±2.0bc	451.5±44.03cd	8796.06±254.69b
N240GW3	13.83±0.46c	44.63±1.64b	1.10±0.81a	28.41±0.49c	14.25±1.26b	30.83±0.84c	413.00±40.63d	8009.56±192.23c
N240GW4	15.03±0.57b	47.15±1.43a	0.93±0.62a	29.71±0.34b	15.50±0.58ab	33.33±2.09ab	492.5±45.89bc	9073.98±374.17ab
N300GW2	16.20±0.0.27a	47.16±0.96a	0.98±0.67a	29.91±0.42b	15.50±1ab	35.00±0.72a	519.25±38.24ab	8826.63.±411.67b
N300GW3	15.90±0.61a	47.25±0.67a	0.63±0.52a	30.26±0.25ab	15.75±0.5ab	34.25±0.96ab	541.00±18.40ab	9137.08±170.05ab
N300GW4	16.50±0.34a	47.91±1.11a	1.08±0.79a	30.67±0.52a	16.00±0a	35.08±0.88a	554.25±11.32a	9310.16±227.04a
N	90.034**	23.519**	0.964	58.755**	5.838 *	20.512**	34.786**	15.812**
GW	8.353**	7.718**	0.555	11.269**	1.459	3.244	3.845*	9.508**
N×GW	1.021	2.751	0.603	1.987	0.486	0.902	2.113	8.297**

表 4 各处理玉米产量及产量构成要素 Spearman 相关分析

Table 4 Spearman correlation analysis of summer maize yield and yield components under different treatments

指标 Index	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	秃尖长 Bald tip length	百粒质量 100-grain weight	穗行数 Ear rows	行粒数 Grain numbers per row	穗粒数 Grain numbers per spike
产量 Yield	0.547**	0.535 * *	-0.052	0.730**	0.614**	0.544**	0.816**

2.3 地下水埋深和施氮量对夏玉米水氮利用效率的影响

由表 5 可知,地下水埋深和施氮量极显著影响玉米地下水利用量和总耗水量,但二者交互作用均不显著;地下水利用量占玉米生育期耗水量的 3.43%~9.77%;随着地下水埋深增加,地下水利用量逐渐降低,2 个施氮量条件下,不同地下水埋深处理之间地下水利用量均差异显著;在 GW2、GW3 处理下,N300 施氮水平处理地下水利用量均显著高于 N240 施氮水平;GW4 处理下,N300 施氮水平与 N240 施氮水平无显著差异。ΔW 为播前土壤贮水量与收获后土壤贮水量差值,地下水埋深和施氮量及二者交互作用均极显著影响玉米 ΔW。地下水埋深相同时,N300 施氮水平处理 ΔW 均显著高于 N240 施氮水平处理。地下水埋深相同时,N300 施氮水平处理总耗水量分别显著高于 N240 施氮水平。施氮量、地下水埋深及二者交互作用均极显著影响玉米氮肥偏生产力;其中 N240 施氮水平 GW2、GW3、GW4 处理玉米氮肥偏生产力分别比 N300 施氮水平玉米显著高 24.57%、9.57%、21.83%;N300 施氮量下,不同地下水埋深处理之间无显著差异;N240 施氮水平下,GW2、GW4 处理均显著高于 GW3 处理,N240GW4 处理的氮肥偏生产力最高。施氮量极显著影响玉米 *WUE*,地下水埋深及二者交互作用对玉米 *WUE* 影响不显著。其中,N300 施氮水平下不同地下水埋深处理之间玉米 *WUE* 无显著差异;N240 施氮水平下,GW4 处理显著高于 GW3 处理,其他处理之间差异不显著。综上可知,N240GW4 处理玉米氮肥利用效率及水分利用效率均最高,故 N240GW4 处理是本研究推荐的农业绿色高产生产模式。

表 5　各处理夏玉米水氮利用效率

Table 5　Water use efficiency and nitrogen use efficiency of summer maize under different treatments

处理 Treatment	总灌水量/mm Total irrigation water	地下水利用量/mm Groundwater utilization	ΔW/mm	总耗水量/mm Total water consumption	氮肥偏生产力 *NPP*	*WUE* /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})
N240GW2	270a	29.19±1.30b	4.55±1.41c	303.74±2.17c	36.65±1.06a	28.96±0.88ab
N240GW3	270a	17.05±0.95d	1.15±1.59c	288.19±0.64d	33.37±0.80b	27.79±0.63bc
N240GW4	270a	10.33±0.88e	24.76±11.59b	305.09±12.36c	37.81±1.56a	29.80±2.19a
N300GW2	270a	32.16±1.93a	26.85±5.30b	329.01±5.55b	29.42±1.37c	26.84±1.61c
N300GW3	270a	20.63±1.46c	57.80±4.11a	348.43±4.90a	30.46±0.57c	26.23±0.45c
N300GW4	270a	11.60±1.48e	56.47±3.11a	338.07±4.13b	31.03±0.76c	27.54±0.87bc
N		21.34**	253.16**	244.47**	164.33**	14.79**
GW		413.52**	38.63**	1.45	10.86**	3.49
N×GW		1.51	19.53**	17.63**	9.68**	0.17

3 讨　论

3.1　施氮量和地下水埋深对玉米百粒质量及灌浆参数影响

施氮量、灌水量、肥料类型、覆膜、种植密度等是影响玉米灌浆过程的重要因素[16, 24-26]。孙仕军等[27]研究表明,在地下水埋深 1~4 m 范围内,玉米百粒质量呈先降低后增加趋势,地下水埋深为 2.5~3 m 时,玉米百粒质量最低,地下水埋深 1 m 时,玉米百粒质量最大。本研究表明,施氮量和地下水埋深均极显著影响玉米百粒质量,但二者交互作用不显著;地下水埋深相同时,施氮量越高,玉米百粒质量越大,这与孙仕军等[27]研究相符。在 N300 施氮水平下,玉米百粒质量随地下水埋深增加而增加,这与佘映军等[28]研究相符,这可能是因为随着地下水埋深增加,包气带厚度增加,土壤中养分离子向下迁移路径变长,养分在根区积累,有利于玉米灌浆,故地下水埋深较大处理百粒质量较高;在 N240 施氮水平下,3 m 地下水埋深处理玉米的百粒质量最小,这与孙仕军等[27]研究相似,这主要是因为受包气带中土壤养分离子向下运移和地下水向上补给双重作用影响,一是因为 N240 施氮量下 3 m 地下水埋深处理作物根区养分离子的积累量比 4 m 地下水埋深处理少,二是因为地下水向上补给量没有 2 m 地下水埋深处理大,故 3 m 地下水埋深处理玉米百粒质量最低。较高的平均灌浆速率是获得高百粒质量的关键,增加施氮量可提高玉米籽粒的最大灌浆速率、灌浆速率最大时的生长量,增加灌浆期的持续时间,促进籽粒干物质的积累[17,29]。本研究表明,增加施氮量主要是通过增大玉米灌浆持续时间(P)、玉米最大灌浆速率时籽粒质量(W_{max})、灌浆速率达到最大的时间(D_{max})来增加玉米百粒质量,这与于宁宁等[17]研究一致;但当施氮量不同时,受地下水埋深和施氮量交互作用影响,玉米的灌浆渐增期时间拐点(t_1)、快速增长期时间拐点(t_2)、快速灌浆期持续时间(Δt)随地下水埋深变化趋势不一致。胡雨欣等[29]研究表明,灌溉提高了玉米花后百粒干质量、灌浆速率最大时的生长量(W_{max})和灌浆活跃期(P),进而提高了玉米产量和百粒质量。本研究得出,常规施氮量下,地下水埋深主要是通过影响玉米快速灌浆持续时间来影响玉米百粒质量;在 N240 施氮水平下,地下水埋深主要是通过影响最大灌浆速率时籽粒质量(W_{max})、玉米灌浆持续时间(P)来影响玉米百粒质量形成。关于地下水埋深对玉米灌浆参数的影响尚未有人研究,本研究丰富了地下水埋深对玉米灌浆特性影响理论。

3.2　施氮量和地下水埋深对玉米产量及水氮利用效率影响

水分和氮肥对小麦产量形成有重要影响,合理的水氮运筹可减少水的深层渗漏和氮淋失。在根系吸力和土壤水势共同作用下,包气带水分与地下水双向交换临界埋深一般为 4 m[10],故地下水埋深 4 m 内,地下水埋深对作物灌溉水利用效率和作物生长有重要影响。施氮量对玉米产量及产量构成要素均有影响,玉米产量随施氮量的增加呈先增加后减少趋势,适宜的施氮量有益于调控作物营养生长与生殖生长,防止贪青晚熟,实现优质高产[30-31]。本研究表明,施氮量对产量影响极显著,除了秃尖长,施氮量显著或极显著影响产量构成要素。这与付江鹏等[30]研究相符。孙仕军等[32]研究表明,玉米产量随地下水埋深的增加而减小,且当地下水埋深为 3 m 时玉米产量最低,导致产量差异的产量构成要素是穗粒数。刘战东等[33]研究表明,地下水埋深影响穗长、秃尖长、穗粒数、百粒质量及经济产量。本研究表明,N240 施氮水平下,地下水埋深为 3 m 时玉米产量和氮肥偏生产力最低,这与孙仕军等[32]研究一致,这主要是受包气带土壤养分离和盐分子双向运移及地下水向上补给共同作用的结果;百粒质量、穗粒数是玉米产量构成关键要素,这与杨飞等[34]研究结果相符;百粒质量与玉米产量极显

著正相关,这与刘战东等[33]研究结果相符。本研究中,在 N300 施氮水平下,玉米的产量和氮肥偏生产力随地下水埋深的增加而增加,这主要是因为地下水埋深大的处理中土壤养分离子向下运移路径较长,且受水分影响,向下运移较慢,在作物根区集聚较多;同时 2~4 m 地下水埋深范围内,地下水埋深对土壤养分离子影响大于对土壤水分影响。提高作物水氮利用效率是农业绿色可持续发展必然需求,控水、减氮是提高作物水氮利用效率的直接有效方式。本研究中,N240 施氮水平氮肥偏生产力显著高于 N300 施氮水平,这主要是因为氮肥报酬递减效应[35],即随着施氮量的增加,每单位纯氮投入带来的产量增加量(报酬)会逐步降低。受包气带毛细上升水补给影响,地下水埋深极显著影响作物地下水利用量,2~4 m 地下水埋深范围内,地下水利用量占玉米生育期耗水量的 3.43%~9.77%。不同施氮量下,地下水埋深对作物水氮利用效率影响不一致,这可能是因为玉米生长影响因素较多,土壤中关键养分离子含量、土壤水-热-盐、玉米本身的光合性能及其元素吸收转化能力差异有关,有待在后续研究中厘清此机理。

4 结 论

1)Logistic 方程能够很好地拟合各处理玉米籽粒灌浆过程;增加施氮量主要是通过增大玉米快速增长期时间拐点、玉米最大灌浆速率时籽粒质量、灌浆速率达到最大的时间、玉米灌浆持续时间来增加玉米百粒质量;N300 施氮量下,地下水埋深主要通过影响玉米快速灌浆持续时间进而影响玉米百粒质量;在 N240 施氮水平下,地下水埋深主要通过影响最大灌浆速率时籽粒质量、玉米灌浆持续时间进而影响玉米百粒质量形成。

2)N240GW4 处理玉米氮肥利用效率及水分利用效率均较高,故 N240GW4 处理是华北地区玉米推荐的农业绿色高产生产模式。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[2] HUANG P, ZHANG J B, XIN X L, et al. Proton accumulation accelerated by heavy chemical nitrogen fertilization and its long-term impact on acidifying rate in a typical arable soil in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(1): 148-157.

[3] 唐贤,梁丰,徐明岗,等.长期施用化肥对农田土壤 pH 影响的整合分析[J].吉林农业大学学报,2020,42(3):316-321.
TANG X, LIANG F, XU M G, et al. A meta-analysis of effects of long-term application of chemical fertilizer on pH of farmland soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2020, 42(3): 316-321.

[4] HUANG X Y, ZHANG D, ZHAO Z Q, et al. Determining hydrogeological and anthropogenic controls on N pollution in groundwater beneath piedmont alluvial fans using multi-isotope data[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2021, 229: 106844.

[5] 范靖尉,白晋华,任寰宇,等.减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J].中国农业气象,2016,37(2):121-130.
FAN J W, BAI J H, REN H Y, et al. Effects of reducing nitrogen and biochar application on CO_2 and N_2O emissions from summer maize-winter wheat field in North China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 121-130.

[6] ZHANG W C, ZHU J Q, ZHOU X G, et al. Effects of shallow groundwater table and fertilization level on soil physico-chemical properties, enzyme activities, and winter wheat yield[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 307-317.

[7] 张守军.地下水埋深对玉米生长及地下水补给的影响[J].人民黄河,2019,41(12):142-145,150.
ZHANG S J. Experimental study on effects of groundwater depth on corn growth index and groundwater level recharge under horizontal irrigation conditions[J]. Yellow River, 2019, 41(12): 142-145, 150.

[8] DRURY C F, TAN C S, WELACKY T W, et al. Reducing nitrate loss in tile drainage water with cover crops and water-table management systems[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(2): 587-598.

[9] RAMOS T B, SIMIONESEI L, JAUCH E, et al. Modelling soil water and maize growth dynamics influenced by shallow groundwater conditions in the Sorraia Valley region, Portugal[J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 27-42.

[10] 雷志栋,杨诗秀,倪广恒,等.地下水位埋深类型与土壤水分动态特征[J].水利学报,1992,(2):1-6.
LEI Z D, YANG S X, NI G H, et al. Water continuum feature in response to the type of groundwater level[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992,(2): 1-6.

[11] 孔繁瑞,屈忠义,刘雅君,等.不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2009,(5):44-48.
KONG F R, QU Z Y, LIU Y J, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009,(5): 44-48.

[12] 胡旦旦,李荣发,刘鹏,等.密植条件下玉米品种混播提高籽粒灌浆性能和产量[J].中国农业科学,2021,54(9):1856-1868.
HU D D, LI R F, LIU P, et al. Mixed-cropping improved on grain filling characteristics and yield of maize under high planting densities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1856-1868.

[13] 胡宇,梁烜赫,赵鑫,等.低温冷凉区覆膜玉米子粒灌浆速率和产量特征分析[J].玉米科学,2019,27(5):95-100.
HU Y, LIANG X H, ZHAO X, et al. Analysis of grain filling rate and yield characteristics of film-covered maize in cold climate areas[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 95-100.

[14] 徐田军,吕天放,赵久然,等.不同播期条件下黄淮海区主推夏播玉米品种籽粒灌浆特性[J].作物学报,2021,47(3):566-574.
XU T J, LYU T F, ZHAO J R, et al. Grain filling characteristics of summer maize varieties under different sowing dates in the Huang-Huai-Hai region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(3): 566-574.

[15] 孟战赢,李小东,郭党,等.耕作模式对夏玉米产量及灌浆特性的影响[J].作物研究,2019,33(1):9-14.
MENG Z Y, LI X D, GUO D, et al. Effects of tillage models on yield

of maize and grouting characteristics[J]. Crop Research, 2019, 33(1): 9-14.

[16] 付江鹏,贺正,贾彪,等.水肥一体化施氮水平对玉米籽粒灌浆和脱水过程的影响[J].中国农业气象,2019,40(12):772-782.
FU J P, HE Z, JIA B, et al. Effect of integrated fertilization level of water and fertilizer on maize grain filling and dehydration process[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(12): 772-782.

[17] 于宁宁,赵子航,任佰朝,等.综合农艺管理促进夏玉米氮素吸收、籽粒灌浆和品质提高[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):797-805.
YU N N, ZHAO Z H, REN B C, et al. Integrated agronomic management practices improve nitrogen absorption, grain filling and nutritional qualities of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 797-805.

[18] 方恒,李援农,谷晓博,等.覆膜与施氮组合下夏玉米籽粒灌浆过程拟合分析[J].农业机械学报,2018,49(8):245-252.
FANG H, LI Y N, GU X B, et al. Fitting and analysis of grain filling of summer maize under combination of film mulching and nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 245-252.

[19] 巴比江,郑大玮,卡热玛.哈木提,等.地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响[J].水土保持学报,2004,18(3):57-60,65.
BA B J, ZHENG D W, HAMUT K R M, et al. Influence of water table on spring maize soil water and crop yield[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(3): 57-60, 65.

[20] GAO X Y, HUO Z L, XU X, et al. Shallow groundwater plays an important role in enhancing irrigation water productivity in an arid area: the perspective from a regional agricultural hydrology simulation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 43-58.

[21] SOYLU M E, KUCHARIK C J, LOHEIDE S P. Influence of groundwater on plant water use and productivity: development of an integrated ecosystem - variably saturated soil water flow model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 198-210.

[22] ASKRI B, AHMED A T, ABICHOU T, et al. Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 81-90.

[23] ABLIZ A, TIYIP T, GHULAM A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 260.

[24] 龙玲,徐开未,胡月秋,等.密度对川中丘陵区春玉米籽粒灌浆及脱水特性的影响[J].南京农业大学学报,2021,44(1):42-49.
LONG L, XU K W, HU Y Q, et al. Effects of density on grain filling and dehydration characteristics of spring maize in hilly region of central Sichuan[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(1): 42-49.

[25] 王乐,康建宏,梁熠,等.控释/普通尿素配施对春玉米籽粒灌浆特性及产量的影响[J].核农学报,2018,32(10):2054-2061.
WANG L, KANG J H, LIANG Y, et al. Effect of controlled release and conventional urea fertilizer application on grain filling characteristics and yield of spring maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(10): 2054-2061.

[26] 张旭东.覆膜种植和施肥对半干旱地区资源高效利用及玉米生产持续性的影响机制[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
ZHANG X D. Influencing mechanism of mulch planting and fertilization on the efficient utilization of resources and maize production sustainability in semi-arid areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[27] 孙仕军,隋文华,陈伟,等.地下水埋深对辽宁中部地区玉米根系和干物质积累的影响[J].生态学杂志,2020,39(2):497-506.
SUN S J, SUI W H, CHEN W, et al. Effects of groundwater depth on root system and dry matter accumulation of maize in central Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 497-506.

[28] 佘映军,李平,杜臻杰,等.地下水埋深与控肥对夏玉米氮素吸收和产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):309-314.
SHE Y J, LI P, DU Z J, et al. Effects of different groundwater depth and fertilizer controlling on nitrogen uptake and yield of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 309-314.

[29] 胡雨欣,王桂阳,梁修仁,等.水分和施氮量对亚热带一年两作玉米灌浆及产量的影响[J].江苏农业科学,2020,48(15):99-105.
HU Y X, WANG G Y, LIANG X R, et al. Influences of water conditions and nitrogen amounts on grain filling characteristics and yield of double-cropped maize in subtropical area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(15): 99-105.

[30] 付江鹏,贺正,贾彪,等.滴灌施氮水平下玉米籽粒灌浆过程模拟[J].中国土壤与肥料,2020,(4):157-164.
FU J P, HE Z, JIA B, et al. Simulation of maize grain filling process under nitrogen drip irrigation[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020,(4): 157-164.

[31] 蔡晓,吴祥运,王东,等.水氮互作对滴灌夏玉米生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(6):33-42.
CAI X, WU X Y, WANG D, et al. Combined effects of water and nitrogen application on growth and water use of summer maize under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 33-42.

[32] 孙仕军,张岐,陈伟,等.地下水埋深对辽宁中部地区膜下滴灌玉米生长及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):170-175,182.
SUN S J, ZHANG Q, CHEN W, et al. Effects of groundwater depth on growth and yield of maize under mulched drip irrigation in the middle area of Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 170-175, 182.

[33] 刘战东,刘祖贵,俞建河,等.地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(7):617-624.
LIU Z D, LIU Z G, YU J H, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624.

[34] 杨飞,张振亚,刘馨月,等.氮肥运筹对滴灌夏玉米产量及产量构成因素的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2021,39(3):289-294.
YANG F, ZHANG Z Y, LIU X Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on summer maize yield and yield components under drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University (*Natural Science*), 2021, 39(3): 289-294.

[35] 戴健,王朝辉,李强,等.氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J].土壤学报,2013,50(5):956-965.
DAI J, WANG C H, LI Q, et al. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 956-965.