

地下水埋深和施氮量对冬小麦灌浆  
及水氮利用的影响白芳芳<sup>1,2</sup>, 李平<sup>1</sup>, 乔冬梅<sup>1</sup>, 齐学斌<sup>1,3,4\*</sup>,  
郭魏<sup>1</sup>, 马灿灿<sup>1,2</sup>, 杜臻杰<sup>1</sup>

白芳芳

(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. 农业农村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)

**摘要:** 探讨地下水埋深和施氮量对华北地区冬小麦灌浆特性和水氮利用效率影响, 以百农 4199 为试验材料, 设置地下水埋深 (GW2: 2 m, GW3: 3 m, GW4: 4 m) 和施氮量 (N300: 纯氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>, N240: 纯氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>) 2 个因素, 评估地下水埋深和施氮量对冬小麦灌浆特性、产量形成及水氮利用效率等影响。结果表明: 小麦千粒质量与快速增长长期时间拐点、平均灌浆速率、灌浆持续时间显著正相关; 路径分析表明, 地下水埋深主要是通过影响小麦单株籽粒质量、穗数、穗粒数来影响产量的, 地下水埋深对产量影响的直接标准化路径系数为 0.334 ( $P < 0.05$ ), 施氮量主要是通过影响单株籽粒质量和穗数来间接影响产量; 地下水埋深相同时, N240 施氮水平氮肥偏生产力 *NPP* 和水分利用效率 *WUE* 均显著高于 N300 施氮水平。故建议地下水埋深大于 2 m 地区小麦高产和农业绿色可持续发展的施氮量为 240 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 冬小麦; 地下水埋深; 施氮量; 灌浆特性; 千粒质量; 产量; *WUE*; 氮肥利用效率

**中图分类号:** S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)12-1275-09

**Doi:** 10.3969/j.issn.1674-8530.22.0157

白芳芳, 李平, 乔冬梅, 等. 地下水埋深和施氮量对冬小麦灌浆及水氮利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(12): 1275-1283.

BAI Fangfang, LI Ping, QIAO Dongmei, et al. Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2022, 40(12): 1275-1283. (in Chinese)

Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain  
filling and water and nitrogen use efficiency of winter wheatBAI Fangfang<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, QIAO Dongmei<sup>1</sup>, QI Xuebin<sup>1,3,4\*</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, MA Cancan<sup>1,2</sup>, DU Zhenjie<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** In order to investigate the effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency of winter wheat in North China, taking Bai-

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-07-28; 网络出版时间: 2022-12-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20221214.1232.010.html>

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(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专项资金资助项目(FIRI20210102); 国家自然科学基金资助项目(51679241, 51779260, 51709265, 51879268)

第一作者简介: 白芳芳(1986—), 女, 河南原阳人, 助理研究员, 博士研究生(baifang0921@163.com), 主要从事农业水资源与水环境研究。  
通信作者简介: 齐学斌(1963—), 男, 陕西户县人, 研究员, 博士生导师(qxb6301@sina.cn), 主要从事农业水资源优化配置与水资源安全利用研究。

nong 4199 as experimental material, groundwater depth (GW2:2 m, GW3:3 m, GW4:4 m) and nitrogen application rate (N300: pure nitrogen: 300 kg/hm<sup>2</sup>, N240: pure nitrogen: 240 kg/hm<sup>2</sup>) were set to evaluate the effects of groundwater depth and nitrogen application rate on winter wheat yield formation, grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency. The results show that the 1 000-kernel weight of winter wheat is significantly positively correlated with turning point, the average grain filling rate and the grain filling duration. Path analysis show that groundwater depth mainly affects wheat yield by influencing grain weight per plant, spike number and kernels per spike, the direct standardized path coefficient of groundwater depth on yield is 0.334 ( $P<0.05$ ), and nitrogen application rate indirectly affects wheat yield by influencing grain weight per plant and spike number. At the same groundwater depth, *NPP* and *WUE* of N240 application rate are significantly higher than those of N300 application rate. Therefore, the nitrogen application rate of 240 kg/hm<sup>2</sup> is recommended for winter wheat high yield and green and sustainable agricultural development.

**Key words:** winter wheat; groundwater depth; nitrogen application rate; grain filling characteristics; 1 000-kernel weight; yield; *WUE*; nitrogen use efficiency

华北地区是中国重要粮食生产基地,2020年冬小麦产量占全国小麦产量的80.7%<sup>[1]</sup>.农业生产中片面追求高产,过量施肥现象普遍存在<sup>[2]</sup>.减氮是提高氮肥利用效率、降低地下水硝酸盐污染和农田土壤温室气体排放的有效措施<sup>[3]</sup>.地下水埋深影响氮素在土壤中的迁移和转换<sup>[4]</sup>,决定了土壤中有氧/无氧边界的深度和氧化还原水平<sup>[5]</sup>.灌浆是小麦产量形成的关键生育阶段,灌浆速率和灌浆时间影响籽粒库容的充实程度<sup>[6]</sup>.华北地区山前平原地下水埋深较深,部分地区达30~50 m,但是在豫东、鲁西南、山东滨州、河北沿海地区粮食主产区地下水埋深小于6 m<sup>[7]</sup>.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<sup>[8]</sup>.从盐渍化控制角度,地下水埋深控制在2.0 m左右为宜<sup>[9]</sup>.因此,文中针对华北地区2~4 m地下水埋深开展田间小区试验,研究施氮量和地下水埋深对小麦灌浆特性及水氮利用效率的影响对保障国家粮食安全意义重大.

适宜的施氮量可延长小麦灌浆活跃期,提高籽粒灌浆速率,对小麦千粒质量形成有利<sup>[10]</sup>.水氮耦合可通过优化灌浆过程提高冬小麦产量<sup>[11]</sup>.适度水分亏缺改善籽粒灌浆过程,增加了籽粒质量<sup>[12]</sup>.限水减氮可提高氮素利用效率,减少土壤硝态氮的淋失,维持表观氮素平衡<sup>[13]</sup>.灌溉水分利用效率与地下水埋深相关.不同地下水埋深,土壤水与地下水的交换量差异较大,地下水埋深3.0 m时,小麦蒸散发以消耗土壤水为主<sup>[14]</sup>.武朝宝<sup>[15]</sup>研究表明,地下水埋深影响小麦的水分生产率,0.5~3.0 m地下水埋深范围内,随着地下水埋深增加,小麦产量增加,水分生产效率也持续增加.地下水埋深过浅,小麦叶片中叶绿素量减少,导致叶绿素吸收辐射能进行光合

作用的能力下降,严重影响小麦产量<sup>[16-17]</sup>.因此,地下水埋深和施氮量是影响小麦生长发育的重要环境因素,关于地下水埋深和施氮量单因素对小麦生长、产量影响的研究较多,关于地下水埋深与施氮量交互作用对小麦灌浆过程及水氮利用效率的研究罕见.为此,在大型地中渗透仪观测场开展田间小区试验,评估地下水埋深和施氮量对冬小麦籽粒灌浆参数、产量形成及水氮利用效率影响,基于结构方程模型,分析地下水埋深和施氮量对小麦产量影响的具体路径,拟为确定小麦高效生产模式提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验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(113°53'E,35°19'N,海拔73.2 m)长期监测测坑进行,种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制,设置试验因素常年为地下水埋深和施氮量.试验地多年平均气温14.1℃,无霜期210 d,日照时间2 398.8 h,多年平均降雨量588.8 mm,降水量年际变化较大,丰水年与枯水年可相差3~4倍,7—9月降水量占全年降水量的70%左右,多年平均蒸发量2 000 mm.试验土壤为粉砂壤土,0~20 cm土层土壤容重为1.42 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为14.30 g/kg,全氮量为0.32 g/kg,全磷量为0.66 g/kg,速效钾量为0.19 g/kg,电导率为568.90 μS/cm,土壤pH值为9.13.

### 1.2 试验设计

供试冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为百农

4199.2020 年 10 月 20 日播种,2021 年 5 月 28 日收获,播种量为  $165 \text{ kg/hm}^2$ . 试验采用完全随机设计,设置地下水埋深和施氮量 2 个因素,地下水埋深设 3 个水平,分别为 2 m (GW2), 3 m (GW3), 4 m (GW4); 施氮量设 2 个水平,分别为减氮 20% (纯氮  $240 \text{ kg/hm}^2$ , N240)、农民常规 (纯氮  $300 \text{ kg/hm}^2$ , N300), 共计 6 个处理为 N240GW2, N240GW3, N240GW4, N300GW2, N300GW3, N300GW4, 每个处理 4 个重复, 共计 24 个小区, 小区面积为  $1.5 \times 3.0 \text{ m}^2$ . 采用马氏瓶人工控制地下水位, 根据 2 次水位差值计算历次地下水补给量. 用井水灌溉, 灌溉方式为地面灌; 用济南仁硕电子科技有限公司生产的土壤温湿度传感器在线监测 20 cm 土层土壤含水率; 结合 20 cm 土层土壤含水率、小区实际情况、作物缺水情况进行灌水. 试验用肥为含氮量为 46% 的尿素、含  $\text{P}_2\text{O}_5$  量为 12% 的过磷酸钙、含  $\text{K}_2\text{O}$  量为 50% 硫酸钾, 磷钾肥均一次性施入土壤,  $\text{P}_2\text{O}_5$  施入量为  $150 \text{ kg/hm}^2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  施入量为  $120 \text{ kg/hm}^2$ ; 冬小麦氮肥以底肥和追肥 6:4 的形式施入, 底肥于小麦播种时施入, 追肥于返青拔节期撒施, 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

在小麦开花期, 每个小区选择 200 个花期相同、长势一致、高度整齐、无病虫害发生的主茎穗进行挂牌标记. 自 2021 年 4 月 23 日 (花后第 7 天) 开始取样, 每 7 d 取样 1 次, 直至成熟. 每个小区取 10 穗挂牌标记小麦穗. 剥去全部籽粒测定鲜质量, 在  $105^\circ\text{C}$  杀青 15 min, 杀青后于  $75^\circ\text{C}$  烘干至恒质量, 称其干质量, 计算灌浆速率, 计算公式为

$$\text{灌浆速率} = \frac{\text{小麦千粒质量增加量}}{\text{灌浆间隔天数}}. \quad (1)$$

以开花至观测时的天数  $t$  为自变量, 观测时小麦籽粒千粒质量  $y$  为因变量, 用 Logistic 方程拟合小麦籽粒灌浆过程. Logistic 方程计算式为

$$y = a / (1 + b e^{-ct}). \quad (2)$$

将实测数据代入 Logistic 方程可求出参数  $a, b, c$ , 其中  $a$  为最大千粒质量,  $b$  为初始值,  $c$  为灌浆速率参数. 据此可以计算小麦灌浆特征参数, 计算式为

$$t_1 = \frac{\ln b - 1.317}{c}, \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{\ln b + 1.317}{c}, \quad (4)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (5)$$

$$W_{\max} = a/2, \quad (6)$$

$$G_{\max} = c W_{\max} / 2, \quad (7)$$

$$D_{\max} = \frac{\ln b}{c}, \quad (8)$$

$$P_d = \frac{\ln 99b}{c}, \quad (9)$$

$$G_{\text{mean}} = \frac{a}{P_d}, \quad (10)$$

式中:  $t_1$  为灌浆渐增期时间拐点, d;  $t_2$  为灌浆快速增长期时间拐点, d;  $\Delta t$  为快速灌浆期持续时间, d;  $G_{\text{mean}}$  为小麦平均灌浆速率,  $\text{mg}/(\text{粒} \cdot \text{d})$ ;  $G_{\max}$  为小麦籽粒最大灌浆速率,  $\text{mg}/(\text{粒} \cdot \text{d})$ ;  $W_{\max}$  为小麦最大灌浆速率时籽粒质量,  $\text{mg}/\text{粒}$ ;  $D_{\max}$  为小麦灌浆速率达到最大的时间, d;  $P_d$  为小麦灌浆持续时间, d.

#### 1.3.2 考种

成熟期收获 1 m 双行小麦用于考种 (穗数、穗长、穗粒数、单株生物量、单株籽粒质量、千粒质量), 每个小区单独收获测产. 用谷物测定仪测定各小区小麦籽粒含水率, 根据 13% 的标准含水率进行折算后计算产量. 收获指数计算公式为

$$HI = Y/B, \quad (11)$$

式中:  $Y$  为籽粒产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $B$  为地上部生物量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ .

#### 1.3.3 水分利用效率

水分利用效率计算公式为

$$WUE = Y/ET, \quad (12)$$

式中  $ET$  计算式为

$$ET = I + P_r + G - D - R \pm \Delta W, \quad (13)$$

其中:  $ET$  为生育期内总耗水量, mm;  $I$  为灌水量, mm;  $P_r$  为田间有效降水量, mm;  $G$  为地下水补给量, mm;  $D$  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, 且每个小区为单独测坑, 故  $P_r, R$  忽略不计; 每次灌水量较少, 约  $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 不易产生深层渗漏, 故  $D$  忽略不计;  $\Delta W$  为播前土壤贮水量与收获后土壤贮水量的差值, mm, 单位面积土壤贮水量计算式为

$$W = \theta_m \cdot \rho_b \cdot h \cdot 0.1, \quad (14)$$

式中:  $\theta_m$  为土壤质量含水率, %;  $\rho_b$  为土壤体积质量,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $h$  为土层厚度, cm, 通常按 200 cm 计算; 0.1 为换算系数.

#### 1.3.4 氮肥偏生产力

氮肥偏生产力计算公式为

$$NPP = Y/N, \quad (15)$$

式中: $N$  为施氮量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 籽粒千粒质量变化

图 1 为各处理小麦千粒质量  $K_w$  随开花后时间  $t$  变化情况,图中同一时间不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平差异具有统计学意义,下同。由图 1 可知,各处理小麦千粒质量随开花后时间变化趋势呈“S”形曲线。开花后 7 d,相同地下水埋深下处理 N300 小麦千粒质量高于处理 N240,其中处理 N300GW4 显著高于处理 N240GW2,其他处理之间差异均不具有统计学意义;相同施氮量下,小麦千粒质量随地下水埋深的增加而增加,N300 施氮水平下,处理 GW4 分别比处理 GW3, GW2 高 9.67%, 19.54%。N240 施氮水平下,处理 GW4 分别比处理 GW3, GW2 高 15.56%, 18.48%。开花后 14 d,各处理小麦千粒质量趋势同开花后 7 d 一致,但各处理增长速度不一,其中相同地下水埋深下 N240 施氮水平的增长速度分别大于 N300 施氮水平,虽然 N240 施氮水平进入灌浆时间较晚,但其灌浆速度较快。开花后 21 d,各处理小麦千粒质量大小趋势发生变化,其中在 GW2 地下水埋深下, N240 施氮水平小麦千粒质量高于 N300 施氮水平; GW3, GW4 地下水埋深下均为 N300 施氮水平小麦千粒质量高于 N240 施氮水平,说明在 GW2 地下水埋深下,此生育阶段高施氮量并未促进小麦灌浆。

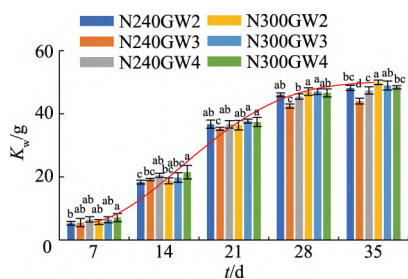


图 1 各处理小麦千粒质量随开花后时间变化  
Fig.1 Change of 1 000-kernel weight of winter wheat after flowering under different treatments

开花后 28 d,相同地下水埋深下, N300 施氮水平小麦千粒质量均大于 N240 施氮水平; N300 施氮水平下,小麦千粒质量均随地下水埋深的增加而减小; N240 施氮水平下,小麦千粒质量在处理 GW3 下最低。开花后 35 d,小麦千粒质量同开花后 28 d 一致,其中处理 N300GW2 与 N300GW3 之间差异不具有统计学意义,但与其他处理差异均具有统计学意

义; N240 施氮水平下,处理 GW2 和 GW4 小麦千粒质量显著高于 GW3。综上可知,高施氮量可提高小麦千粒质量;施氮量不同,小麦千粒质量随地下水埋深变化不一致,整体上地下水埋深越小,小麦千粒质量越大。

### 2.2 灌浆速率变化

图 2 为各处理小麦灌浆速率  $G$  随开花后时间  $t$  变化情况。由图可知,各处理小麦籽粒灌浆速率表现为“慢-快-慢”的变化趋势。花后 0—7 d,不同施氮量下各处理小麦灌浆速率均表现为随地下水埋深的增加而增加,其中处理 N300GW4 显著高于 N240GW2,其他各处理之间差异不具有统计学意义;相同地下水埋深下, N300 施氮水平小麦灌浆速率均高于 N240 施氮水平,但差异均不具有统计学意义。花后 7—14 d,在 GW2, GW3 地下水埋深下, N240 施氮水平小麦的灌浆速率均大于 N300 施氮水平; GW4 地下水埋深下, N300 施氮水平小麦的灌浆速率大于 N240 施氮水平; 2 个施氮量下,小麦灌浆速率均表现为随地下水埋深的增加而增加。花后 14—21 d,各处理小麦灌浆速率达到最大值,其中处理 N240GW2 冬小麦灌浆速率最高,显著高于 N300GW4,但其他各处理之间差异均不具有统计学意义。

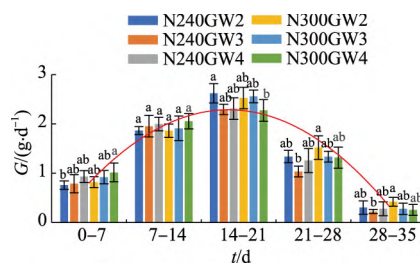


图 2 各处理小麦灌浆速率随开花后时间变化  
Fig.2 Change of filling rate of winter wheat after flowering under different treatments

开花后 21—28 d, N300 施氮水平下处理 GW2, GW3, GW4 小麦灌浆速率分别比 N240 施氮水平下对应处理高 11.97%, 22.54%, 4.37%; N300 施氮水平下,小麦灌浆速率随地下水埋深的增加而降低; N240 施氮水平下,处理 GW2 灌浆速率最高,处理 GW3 最低,但处理 GW2, GW3, GW4 之间差异均不具有统计学意义。花后 28—35 d,不同地下水埋深下,各处理小麦灌浆速率均表现为 N300 施氮水平高于 N240 施氮水平; N300 施氮量下,各处理小麦灌浆速率表现为随地下水埋深的增加而降低; N240 施氮水平下,处理 GW3 小麦灌浆速率最低。

### 2.3 籽粒灌浆参数变化

表 1 为各处理小麦籽粒灌浆特征参数.由表可知,Logistic 方程能很好地拟合小麦籽粒灌浆过程,决定系数  $R^2$  为 0.999 6~0.999 9.不同施氮量下,灌浆渐增期时间拐点  $t_1$  均表现为随地下水埋深的增加而降低,地下水埋深相同时,N300 施氮水平快速增长长期时间拐点  $t_2$  均大于 N240 施氮水平.不同施氮量下,快速灌浆期持续时间  $\Delta t$  随地下水埋深变化趋势一致,从大到小依次为处理 GW4,GW2,GW3;地下水埋深相同时,N300 施氮水平  $\Delta t$  均大于 N240 施氮水平,说明高施氮量延长了小麦快速灌浆时间.处理 GW3 和 GW4 下,N300 施氮水平平均灌浆速率  $G_{\text{mean}}$  均大于 N240 施氮水平;处理 GW2 下,N240 施氮水平  $G_{\text{mean}}$  比 N300 施氮水平高 1.42%.不同施氮量

下,小麦籽粒最大灌浆速率  $G_{\text{max}}$  均表现为随地下水埋深的增加而降低;处理 GW2 和 GW4 下,N240 施氮水平  $G_{\text{max}}$  均大于 N300 施氮水平;但是在 GW3 下,N300 施氮水平  $G_{\text{max}}$  比 N240 施氮水平高 4.97%.不同施氮量下,最大灌浆速率时籽粒质量  $W_{\text{max}}$  随地下水埋深变化趋势一致,从大到小依次为 GW2,GW4,GW3;N300 施氮水平下,处理 GW2,GW3,GW4 的  $W_{\text{max}}$  分别比 N240 施氮水平高 4.35%,1.35%,2.42%.N300 施氮水平下,灌浆速率达到最大的时间  $D_{\text{max}}$  随地下水埋深的增加而降低;N240 施氮水平下,小麦  $D_{\text{max}}$  从大到小依次为 GW2,GW4,GW3.N300 施氮水平下,小麦灌浆持续时间  $P_d$  从大到小依次为 GW2,GW4,GW3;N240 施氮水平下,小麦  $P_d$  从大到小依次为 GW4,GW2,GW3.

表 1 各处理小麦籽粒灌浆特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of winter wheat grain filling under different treatment

| 处理      | Logistic 方程                            | $R^2$   | $t_1/\text{d}$ | $t_2/\text{d}$ | $\Delta t/\text{d}$ | $G_{\text{mean}}/(\text{mg} \cdot (\text{粒} \cdot \text{d})^{-1})$ | $G_{\text{max}}/(\text{mg} \cdot (\text{粒} \cdot \text{d})^{-1})$ | $W_{\text{max}}/(\text{mg} \cdot \text{粒}^{-1})$ | $D_{\text{max}}/\text{d}$ | $P_d/\text{d}$ |
|---------|----------------------------------------|---------|----------------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|----------------|
| N240GW2 | $y = 48.954 / (1 + 41.669e^{-0.230x})$ | 0.999 9 | 10.484         | 21.930         | 11.446              | 1.353                                                              | 2.816                                                             | 24.477                                           | 16.207                    | 36.175         |
| N240GW3 | $y = 44.471 / (1 + 35.844e^{-0.235x})$ | 0.999 9 | 9.623          | 20.827         | 11.204              | 1.279                                                              | 2.614                                                             | 22.236                                           | 15.225                    | 34.772         |
| N240GW4 | $y = 48.263 / (1 + 27.973e^{-0.215x})$ | 0.999 8 | 9.373          | 21.631         | 12.258              | 1.308                                                              | 2.593                                                             | 24.132                                           | 15.502                    | 36.886         |
| N300GW2 | $y = 51.085 / (1 + 34.077e^{-0.212x})$ | 0.999 9 | 10.428         | 22.848         | 12.420              | 1.334                                                              | 2.709                                                             | 25.542                                           | 16.638                    | 38.305         |
| N300GW3 | $y = 49.965 / (1 + 32.678e^{-0.220x})$ | 0.999 8 | 9.878          | 21.869         | 11.992              | 1.358                                                              | 2.744                                                             | 24.983                                           | 15.874                    | 36.793         |
| N300GW4 | $y = 49.437 / (1 + 24.963e^{-0.209x})$ | 0.999 6 | 9.078          | 21.660         | 12.582              | 1.325                                                              | 2.587                                                             | 24.718                                           | 15.369                    | 37.319         |

### 2.4 产量、产量构成要素相关分析

表 2 为各处理小麦产量及产量构成要素,其中  $L$  为穗长, $K_s$  为穗粒数, $E_s$  为有效小穗数, $S_n$  为穗数, $B_p$  为单株生物量, $G_p$  为单株籽粒质量, $K_w$  为千粒质

量, $HI$  为收获指数, $Y$  为产量.由表 2 可知,施氮量和地下水埋深对小麦产量的影响在 0.01 水平下具有统计学意义,但二者交互作用对小麦产量影响不具有统计学意义.

表 2 各处理小麦产量及产量构成要素

Tab.2 Yield and yield components of winter wheat under different treatments

| 处理      | $L/\text{cm}$ | $K_s/\text{粒}$ | $E_s/\text{个}$ | $S_n/(10^4 \cdot \text{穗} \cdot \text{hm}^{-2})$ | $B_p/\text{g}$ | $G_p/\text{g}$ | $K_w/\text{g}$ | $HI$        | $Y/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ |
|---------|---------------|----------------|----------------|--------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|--------------------------------------|
| N240GW2 | 7.90±0.28 a   | 25±3a          | 20±1a          | 478±33.39ab                                      | 2.82±0.12a     | 1.34±0.13ab    | 48.20±0.83bc   | 0.48±0.03ab | 5280.42±22.69ab                      |
| N240GW3 | 6.91±0.47b    | 19±3b          | 18±2b          | 334±44.36d                                       | 2.22±0.14c     | 1.07±0.06c     | 44.02±0.93d    | 0.48±0.03ab | 4863.54±71.76d                       |
| N240GW4 | 7.46±0.31ab   | 21±3ab         | 18±1ab         | 346±32.74d                                       | 2.55±0.05b     | 1.13±0.06c     | 47.41±1.15c    | 0.44±0.03b  | 5002.50±22.69cd                      |
| N300GW2 | 8.00±0.40a    | 25±4a          | 20±1ab         | 515±32.72a                                       | 2.91±0.14a     | 1.44±0.08a     | 49.99±0.73a    | 0.50±0.03a  | 5419.38±277.92a                      |
| N300GW3 | 7.75±0.39a    | 22±2ab         | 18±2ab         | 452±38.78bc                                      | 2.70±0.21ab    | 1.24±0.04b     | 48.98±1.44ab   | 0.46±0.02ab | 5183.15±45.72bc                      |
| N300GW4 | 7.83±0.39a    | 21±2ab         | 19±1ab         | 405±20.75c                                       | 2.48±0.15b     | 1.12±0.04c     | 48.41±0.51bc   | 0.45±0.02ab | 5141.46±22.69bc                      |
| N       | 7.94 **       | 1.20           | 0.29           | 25.58 **                                         | 7.92 **        | 8.27 **        | 41.88 **       | 0.05        | 15.75 **                             |
| F 值 GW  | 5.42 **       | 5.74 **        | 3.49           | 28.67 **                                         | 18.63 **       | 31.46 **       | 14.11 **       | 4.17 *      | 17.66 **                             |
| N * GW  | 2.03          | 0.62           | 0.78           | 2.94                                             | 7.43 **        | 3.09           | 9.13 **        | 0.65        | 1.58                                 |

注:表中为各处理均值±标准差;同列不同小写字母及\*表示处理间在 0.05 水平差异具有统计学意义,\*\*表示在 0.01 水平差异具有统计学意义,下同

在 N300 施氮水平下,产量随地下水埋深的增加而降低,其中处理 N300GW2 显著大于 N300GW3,N300GW4,但是处理 N300GW3,N300GW4 之间差异不具有统计学意义;在 N240 施氮水平,产量随地下水埋深变化从大到小依次为处理 GW2,处理 GW4,处理 GW3,其中处理 GW2 显著大于 GW3,GW4,但

处理 GW3,GW4 之间差异不具有统计学意义.相同地下水埋深下,N300 施氮水平处理 GW2,GW3,GW4 小麦产量分别比 N240 施氮水平相应地下水埋深处理高 2%,7%,3%.

施氮量和地下水埋深对小麦穗长均具有极显著影响,但是二者交互作用对其无显著影响.相同地

下水埋深下, N300 施氮水平小麦穗长均高于 N240 施氮水平; 2 种施氮水平下, 均表现为在处理 GW2 下最高. 施氮量对小麦穗粒数无显著影响, 但地下水埋深对小麦穗粒数影响极显著, N300 施氮水平下, 穗粒数随地下水埋深的增加而降低, 但差异均不具有统计学意义; N240 施氮水平下, 处理 GW2 显著高于 GW3, 且处理 GW2 小麦穗粒数最大. 地下水埋深和施氮量及二者交互作用对小麦千粒质量和单株生物量影响极显著, 且二者大小趋势相同. 地下水埋深和施氮量极显著影响小麦穗数和单株籽粒质量, 但二者交互作用对其影响不具有统计学意义. 地下水埋深显著影响小麦收获指数, N300 施氮水平下, 处理 GW2 小麦收获指数最高, 且从大到小依次为处理 GW2, GW3, GW4, 但三者之间差异均不具有统计学意义; N240 施氮水平下, 处理 GW4 小麦收获指数最低, 三者之间差异均不具有统计学意义.

图 3 为产量构成要素对产量影响的结构方程模型分析. 由图 3 可知, 单株籽粒质量、穗数和穗粒数对产量均具有直接的正向效应, 其中穗数对产量的正向效应最大; 地下水埋深主要是通过影响小麦单株籽粒质量、穗数、穗粒数来影响产量的, 地下水埋深对产量影响的直接标准化路径系数为 0.334 ( $P < 0.05$ ), 施氮量主要是通过影响单株籽粒质量和穗数来间接影响产量.

表 3 为各处理小麦产量  $Y$ 、千粒质量与灌浆参数的相关分析结果. 由表可知, 小麦产量与快速增长期时间拐点  $t_2$ 、灌浆速率达到最大的时间  $D_{\max}$  极显著正相关, 与千粒质量、最大灌浆速率时籽粒质量  $W_{\max}$  显著正相关. 故小麦快速灌浆结束时间决定了小麦产量. 小麦千粒质量与最大灌浆速率时籽粒质量  $W_{\max}$  极显著正相关, 这主要由最大灌浆速率时籽粒质量  $W_{\max}$  计算公式决定的; 与快速增长期时间拐点  $t_2$ 、平均灌浆速率  $G_{\text{mean}}$ 、灌浆持续时间  $P_d$  呈显著正相关, 故可通过提高平均灌浆速率和灌浆持续时间来提高小麦千粒质量, 进而达到丰产目的.

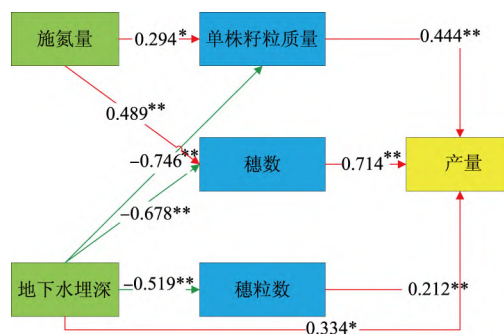


图 3 产量构成要素对产量影响的结构方程模型分析 ( $P_d = 0.469$ ,  $\chi^2/df = 0.956$ ,  $GFI = 0.973$ ,  $CFI = 1.004$ ,  $RMSEA = 0$ )

Fig.3 Structural equation model analysis of effect of nitrogen application rate and groundwater depth on winter wheat yield

表 3 各处理小麦产量、千粒质量与灌浆参数的相关分析

Tab.3 Correlation analysis of yield, 1 000-kernel weight and filling parameters of winter wheat under different treatments

| 指标    | $t_1$ | $t_2$     | $\Delta t$ | $G_{\text{mean}}$ | $G_{\text{max}}$ | $W_{\text{max}}$ | $D_{\text{max}}$ | $P_d$   | $K_w$   | $Y$ |
|-------|-------|-----------|------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------|---------|-----|
| $K_w$ | 0.366 | 0.910 *   | 0.697      | 0.824 *           | 0.436            | 0.999 * *        | 0.735            | 0.905 * | 1       |     |
| $Y$   | 0.682 | 0.945 * * | 0.415      | 0.786             | 0.651            | 0.884 *          | 0.920 * *        | 0.760   | 0.896 * | 1   |

## 2.5 冬小麦水氮利用效率

表 4 为各处理冬小麦水氮利用效率, 其中  $W_t$  为总灌水量,  $W_g$  为地下水利用量,  $\Delta W$  为播前土壤贮水量与收获后土壤贮水量的差值,  $W_s$  为总耗水量,  $NPP$  为氮肥偏生产力,  $WUE$  为水分利用效率. 由表 4 可知, 地下水埋深和施氮量对小麦地下水利用量和总耗水量影响极具有统计学意义; 地下水利用量占小麦生育期耗水量的 3.70% ~ 10.38%; 随着地下水埋深增加, 地下水利用量逐渐减少, 且不同地下水埋深之间差异具有统计学意义; 处理 GW2, GW3 下, N300 施氮水平地下水利用量均显著高于 N240 施氮水平. 地下水埋深和施氮量及二者交互作用均对小麦  $\Delta W$  影响极具有统计学意义;  $\Delta W$  均随地下水埋深的增加而增加, 处理 N240GW2 与 N240GW3

之间差异不具有统计学意义, 其余各处理之间差异均具有统计学意义. 地下水埋深相同时, N300 施氮水平总耗水量高于 N240 施氮水平. 施氮量和地下水埋深对小麦氮肥偏生产力和  $WUE$  影响极具有统计学意义, 但二者交互作用均不具有统计学意义; 其中 N240 施氮水平处理 GW2, GW3, GW4 小麦氮肥偏生产力分别比 N300 施氮水平小麦显著高 21.79%, 17.29%, 21.62%; 2 个施氮水平下, 处理 GW2 氮肥偏生产力均显著高于 GW3, GW4, 但是处理 GW3, GW4 之间差异不具有统计学意义. 小麦  $WUE$  均表现为随地下水埋深的增加而降低; 地下水埋深相同时, N240 施氮水平  $WUE$  均显著高于 N300 施氮水平. 故 N240 施氮量在保持较高的产量下, 水氮利用率均最高.

表 4 各处理冬小麦水氮利用效率

Tab.4 Water use efficiency and nitrogen use efficiency of winter wheat under different treatments

| 处理      | $W_r/\text{mm}$ | $W_g/\text{mm}$ | $\Delta W/\text{mm}$ | $W_s/\text{mm}$ | $NPP$       | $WUE/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$ |
|---------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| N240GW2 | 225a            | 23.49±1.26b     | 4.70±3.16e           | 253.20±4.15c    | 22.00±0.09a | 20.86±0.43a                                                 |
| N240GW3 | 225a            | 14.00±1.83d     | 6.99±1.00e           | 245.99±1.98c    | 20.26±0.30b | 19.77±0.37b                                                 |
| N240GW4 | 225a            | 8.82±0.84e      | 35.72±4.28d          | 269.54±3.63b    | 20.84±0.09b | 18.56±0.20c                                                 |
| N300GW2 | 225a            | 26.59±2.85a     | 46.57±6.15c          | 298.16±5.23a    | 18.06±0.93c | 18.18±1.08cd                                                |
| N300GW3 | 225a            | 17.40±1.58c     | 55.92±6.81b          | 298.32±8.38a    | 17.28±0.15d | 17.39±0.63de                                                |
| N300GW4 | 225a            | 9.46±1.42e      | 66.78±5.38a          | 301.24±4.62a    | 17.14±0.08d | 17.07±0.29e                                                 |
| N       | —               | 11.12 **        | 417.46 **            | 434.58 **       | 456.15 **   | 85.36 **                                                    |
| F 值     | GW              | —               | 167.77 **            | 60.82 **        | 14.73 **    | 21.99 **                                                    |
|         | N * GW          | —               | 1.50                 | 6.83 **         | 8.56 **     | 2.98                                                        |
|         |                 |                 |                      |                 |             | 2.28                                                        |

### 3 讨 论

#### 3.1 对小麦灌浆特性及产量影响

土壤肥力和土壤水分是影响小麦生长和灌浆的重要环境因子.本研究表明,高施氮量可提高小麦千粒质量,这与吴金枝等<sup>[18]</sup>研究结果一致,这主要是因为充足的氮素供应延长了快速灌浆期持续时间  $\Delta t$  和灌浆持续时间  $P_d$ .施氮量不同时,小麦千粒质量随地下水埋深变化不一致,整体上地下水埋深越小,小麦千粒质量越大,这是因为地下水埋深越小,地下水向上补给量越多,土壤含水率越高,小麦生长水分更加充足,灌浆速率较高.小麦籽粒灌浆过程主要分为渐增期、快速增长期、稳定增长期,而小麦灌浆籽粒干物质积累主要集中在快速增长期<sup>[19]</sup>.本研究表明,地下水埋深越大,小麦灌浆渐增期时间拐点  $t_1$  越小,说明快速灌浆开始的越早,这可能是因为作物利用地下水量较少,小麦受干旱胁迫,提前进入快速灌浆期.较高的平均灌浆速率是获得高千粒质量的关键,适宜的施氮量能延长小麦灌浆快速增长期,提高籽粒灌浆速率,对最终高的千粒质量形成有利.本研究表明,千粒质量与快速增长期时间拐点  $t_2$ 、平均灌浆速率  $G_{\text{mean}}$ 、灌浆持续时间  $P_d$  呈显著正相关,故可通过提高小麦平均灌浆速率和灌浆持续时间  $P_d$  来提高小麦千粒质量,进而达到丰产目的.适宜灌水量下,小麦产量随地下水埋深的增加而减少<sup>[20]</sup>.本研究表明,常规施氮量下小麦产量随地下水埋深的增加而降低,这与齐学斌等<sup>[20]</sup>的研究一致.如图 4 所示的路径分析表明,地下水埋深和施氮量主要是通过影响 pH 值和全氮、土壤硝态氮来间接影响产量;在 N240 施氮水平下,小麦产量从大到小依次为处理 GW2, GW4, GW3,这主要是因为处理 GW3 的 pH 值显著高于 GW3, GW4, pH 值影响作物对水分和养分吸收.

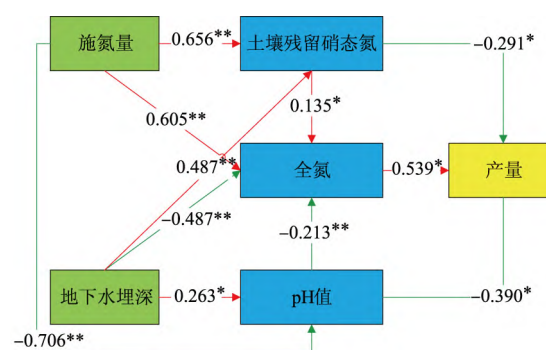


图 4 土壤性状对产量影响的结构方程模型分析 ( $P_d = 0.463$ ,  $\chi^2/\text{df} = 0.9439$ ,  $GFI = 0.999$ ,  $CFI = 1.002$ ,  $RMSEA = 0$ )

Fig.4 Structural equation model analysis of soil property on winter wheat yield

小麦产量随施氮量的增加呈先增加后减少的趋势,适宜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<sup>[21]</sup>.研究表明, N300 施氮水平小麦产量均高于 N240 施氮水平,但是仅在处理 GW2 下小麦产量差异具有统计学意义,其他 2 个地下水埋深下差异均不具有统计学意义;这可能是因为当施氮量超过  $275 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,小麦籽粒氮代谢酶活性降低<sup>[1]</sup>,故此时增加施氮量并未显著提高小麦产量.

#### 3.2 对冬小麦水氮利用效率影响

水分和施氮量是影响作物水氮利用效率的重要环境因素.当地下水埋深位于  $0.4 \sim 1.5 \text{ m}$  时,地下水对作物日需水量的贡献率超过  $65\%$ <sup>[22]</sup>.研究表明,  $2.0 \sim 4.0 \text{ m}$  地下水埋深范围内,地下水利用量占小麦生育期耗水量的  $3.73\% \sim 10.49\%$ ;随着地下水埋深增加,地下水利用量逐渐减少.2 个施氮量下,小麦 WUE 随地下水埋深的增加而降低;地下水埋深相同时, N240 施氮水平小麦 WUE 均高于 N300 施氮水平.过多的氮肥用量会导致作物肥料利用效率降低,多余的氮素残留在土壤当中,会造成地下水硝酸盐污染等风险<sup>[13]</sup>,因此,适当减少氮肥施用,同时

配合适宜的灌水量,会产生协同水肥耦合效应,小麦会达到高产优质高效的生产模式,减氮、控水是最直接提高水氮利用效率的方式.研究表明,N240 施氮水平小麦氮肥偏生产力均显著高于 N300 施氮水平,这与郭曾辉等<sup>[13]</sup>研究一致.这主要是因为氮肥报酬递减效应,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.因 N240 施氮水平小麦水氮利用效率较高,且地下水埋深大于 4.0 m 时,地下水对作物生长影响可忽略,故在地下水埋深大于 2.0 m 地区施纯氮 240 kg/hm<sup>2</sup>可行.受试验条件限制,本研究仅设置了施氮量和地下水埋深 2 个因素,未考虑灌水量对小麦生长及水肥利用效率的影响,今后试验中应添加灌水量试验因素,优化不同地下水埋深小麦种植区灌水量和施肥量,保障小麦优质高产安全生产.

## 4 结 论

1) 小麦千粒质量与快速增长长期时间拐点、平均灌浆速率、灌浆持续时间显著正相关.

2) 地下水埋深主要是通过影响小麦单株籽粒质量、穗数、穗粒数来影响产量的,地下水埋深对产量影响的直接标准化路径系数为 0.334 ( $P < 0.05$ ),而施氮量主要是通过影响单株籽粒质量和穗数来间接影响产量形成.

3) 地下水利用量占小麦生育期耗水量的 3.70%~10.38%;地下水埋深相同时,N240 施氮水平氮肥偏生产力  $NPP$  和水分利用效率  $WUE$  均显著高于 N300 施氮水平.

综上可知,在农民常规施氮量基础上减氮 20% 可行,在地下水埋深大于 2.0 m 地区小麦高产和农业绿色可持续发展的施氮量为 240 kg/hm<sup>2</sup>.

## 参考文献 (References)

- [ 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, 2021.
- [ 2 ] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [ 3 ] BHANDARI M, MA Y, MEN M X, et al. Response of winter wheat yield and soil N<sub>2</sub>O emission to nitrogen fertilizer reduction and nitrpyrin application in North China Plain[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2020, 51(4): 554–565.
- [ 4 ] TOLOMIO M, MAURIZIO B. Water table management to save water and reduce nutrient losses from agricultural fields: 6 years of experience in North–Eastern Italy[J]. Agricultural water management 2018, 201: 1–10.
- [ 5 ] DINSMORE K J, SKIBA U M, BILLET M F, et al. Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms[J]. Plant and soil, 2009, 318(1/2): 229–242.
- [ 6 ] 苗永杰, 阎俊, 赵德辉, 等. 黄淮麦区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系[J]. 作物学报, 2018, 44(2): 260–267.
- [ 7 ] MIAO Yongjie, YAN Jun, ZHAO Dehui, et al. Relationship between grain filling parameters and grain weight in leading wheat cultivars in the Yellow and Huai Rivers Valley[J]. Acta agronomica sinica, 2018, 44(2): 260–267. (in Chinese)
- [ 7 ] 陈飞, 丁跃元, 李原园, 等. 华北地区地下水超采治理实践与思考[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 191–198.
- [ 7 ] CHEN Fei, DING Yueyuan, LI Yuanyuan, et al. Practice and consideration of groundwater overexploitation in North China Plain[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2020, 18(2): 191–198. (in Chinese)
- [ 8 ] 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, 23(2): 1–6.
- [ 8 ] LEI Zhidong, YANG Shixiu, NI Guangheng, et al. Water continuum feature in response to the type of groundwater level[J]. Journal of hydraulic engineering, 1992, 23(2): 1–6. (in Chinese)
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 李彦旬, 王荣荣, 罗雪梅, 等. 减量施氮对滴灌春小麦籽粒灌浆特性和氮代谢酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(7): 794–801.
- [ 10 ] LI Yanxun, WANG Rongrong, LUO Xuemei, et al. Effect of reduced nitrogen application on grain filling characteristics and grain related enzyme metabolism of spring wheat under drip irrigation[J]. Journal of triticeae crops, 2019, 39(7): 794–801. (in Chinese)
- [ 11 ] 刘见, 宁东峰, 秦安振, 等. 黄淮南部平原喷灌冬小麦灌浆特性及水氮优化耦合研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 244–250.
- [ 11 ] LIU Jian, NING Dongfeng, QIN Anzhen, et al. Study

- on the grain filling characteristics and optimal water and nitrogen coupling of sprinkler-irrigated winter wheat in the southern regions of Huang Huai Plain[J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(1): 244–250. (in Chinese)
- [12] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat[J]. Agricultural water management, 2019, 213: 983–995.
- [13] 郭曾辉, 刘朋召, 雒文鹤, 等. 限水减氮对关中平原冬小麦氮素利用和氮素表观平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4359–4369.
- GUO Zenghui, LIU Pengzhao, LUO Wenhe, et al. Effects of water limiting and nitrogen reduction on nitrogen use and apparent balance of winter wheat in the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(12): 4359–4369. (in Chinese)
- [14] 顾南, 张建云, 刘翠善, 等. 地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 15–24.
- GU Nan, ZHANG Jianyun, LIU Cuishan, et al. An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2021, 48(4): 15–24. (in Chinese)
- [15] 武朝宝. 地下水埋深对作物产量与水分利用效率的影响及作物系数变化[J]. 地下水, 2011, 33(4): 20–23.
- WU Chaobao. Effect of groundwater depth on crop output & water-used efficiency and the change of crop coefficients[J]. Ground water, 2011, 33(4): 20–23. (in Chinese)
- [16] 方正武, 朱建强, 杨威. 灌浆期地下水位对小麦产量及构成因素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 72–74.
- FANG Zhengwu, ZHU Jianqiang, YANG Wei. Effects of water table during grain filling on wheat yield and its component [J]. Journal of irrigation and drainage, 2012, 31(3): 72–74. (in Chinese)
- [17] 吴启侠, 晏军, 朱建强, 等. 花后浅地下水埋深对小麦高光谱特征的影响及叶绿素估算模型[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 29–35.
- WU Qixia, YAN Jun, ZHU Jianqiang, et al. Effects of the depth of shallow groundwater table during post-anthesis stage on hyperspectral characteristics of winter wheat as well as model for predicting leaf chlorophyll content[J]. Journal of irrigation and drainage, 2018, 37(9): 29–35. (in Chinese)
- [18] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 264–271.
- WU Jinzhi, HUANG Ming, LI Youjun, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield, water use efficiency and planting profit in winter wheat in dryland [J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(5): 264–271. (in Chinese)
- [19] 吴启侠, 谭京红, 朱建强, 等. 花后渍水对不同耐渍型冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 74–81.
- WU Qixia, TAN Jinghong, ZHU Jianqiang, et al. Effects of waterlogging after anthesis on the grain filling characteristics of winter wheat with different waterlogging tolerances [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 74–81. (in Chinese)
- [20] 齐学斌, 李平, 亢连强, 等. 变饱和带条件下污水灌溉对土壤氮素运移和冬小麦生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1635–1645.
- QI Xuebin, LI Ping, KANG Lianqiang, et al. Impact of depth of groundwater table on nitrogen dynamics in soil under sewage irrigation [J]. Acta ecologica sinica, 2008, 28(4): 1635–1645. (in Chinese)
- [21] 王新媛, 赵思达, 郑险峰, 等. 秸秆还田和氮肥用量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5043–5053.
- WANG Xinyuan, ZHAO Sida, ZHENG Xianfeng, et al. Effects of straw returning and nitrogen application rate on grain yield and nitrogen utilization of winter wheat [J]. Scientia agricultura sinica, 2021, 54(23): 5043–5053. (in Chinese)
- [22] RAMOS T B, SIMIONESEI L, JAUCH E, et al. Modeling 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.

(责任编辑 徐云峰)