

农田水位与施氮对拔节孕穗期受涝后冬小麦的调控效应

何平如^{1,2} 俞双恩^{1,2} 丁继辉^{1,2} 马韬^{1,2} 戴妍^{1,2} 李金刚^{1,2}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098;

2. 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 为探明拔节孕穗期受涝后农田水位与施氮对冬小麦生长、产量、籽粒品质、水氮利用及氮磷负荷的调控效应, 于2020—2021年在南京市江宁区开展测坑种植试验。以冬小麦品种“扬麦25”为试验材料, 在冬小麦拔节孕穗期受涝后设置高、中、低3个农田水位(即受涝1 d后农田水位3 d内降至-40、-60、-80 cm)和低、中、高3个施氮量(160、190、220 kg/hm²), 以不受涝且常规施氮190 kg/hm²处理作为对照。结果表明, 涝渍条件下, 冬小麦株高、干物质质量、产量、水分利用效率、籽粒粗蛋白含量、籽粒赖氨酸含量均随农田水位的降低和施氮量的增加而逐渐增大, 氮肥偏生产力随农田水位的降低和施氮量的减小而逐渐增大, 总氮、总磷等污染物负荷随着农田水位的降低而逐渐增大。与对照处理相比, 试验设计农田水位下, 增施氮肥(220 kg/hm²)可以缓解涝渍对冬小麦植株的不良影响, 促进冬小麦干物质质量和产量分别增加4.76%~23.81%、2.75%~9.19%; 中、高农田水位下氮肥减施(160 kg/hm²)导致冬小麦分别减产2.20%和14.00%, 水分利用效率分别下降4.55%和9.74%; 低农田水位可以降低因氮肥减施导致的减产效应, 使得冬小麦产量和氮肥偏生产力分别提高3.98%、23.49%。农田水位越高, 其控水期间综合涝渍程度越大, 对应产量越低。此外, 短期内涝对提高籽粒粗蛋白含量具有积极效应, 与对照处理相比, 各处理对应粗蛋白含量提高11.50%~20.21%。综上, 以高产、高效、减污、提质为目标, 建议冬小麦拔节孕穗期5 cm水层受涝1 d后, 农田水位3 d内降至-80 cm, 施氮量为220 kg/hm²。研究结果可为中国南方以及类似易涝易渍农业区冬小麦种植及涝渍灾害修复提供理论依据。

关键词: 冬小麦品质; 涝渍胁迫; 农田水位; 排水; 面源污染; 调控效应

中图分类号: S512; S276 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)07-0373-13

OSID:



Regulation Effects of Farmland Water Level and Nitrogen Application on Winter Wheat after Waterlogging at Jointing and Booting Stage

HE Pingru^{1,2} YU Shuang'en^{1,2} DING Jihui^{1,2} MA Tao^{1,2} DAI Yan^{1,2} LI Jin'gang^{1,2}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Jiangsu Province Engineering Research Center for Agricultural Soil-Water Efficient Utilization, Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 210098, China)

Abstract: The planting experiment was conducted from 2020 to 2021 in the lysimeters at Jiangning District of Nanjing City to investigate the effects of farmland water level and nitrogen fertilization regulations on winter wheat growth, yield, grain quality, water and nitrogen utilization, nitrogen and phosphorus load after the winter wheat suffered from waterlogging during the jointing and booting stage. Winter wheat variety “Yangmai 25” was chosen as the experimental material, after the winter wheat suffered from waterlogging during the jointing and booting stage, three high, middle and low farmland water level (the farmland water level down to -40 cm, -60 cm, -80 cm in 3 days after the 1 day waterlogging) and three low, middle and high nitrogen application rates (160 kg/hm², 190 kg/hm², 220 kg/hm²), as well as a control group with non-waterlogging and the nitrogen of 190 kg/hm² were set in the experiment. The results indicated that the winter wheat plant height, aboveground dry matter, yield, water use efficiency, grain crude protein content and grain lysine content were gradually increased

收稿日期: 2024-01-16 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879074、52309046、52109051)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(B230201053)和江苏省水利科技项目(2021062、2020048)

作者简介: 何平如(1994—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: hepingru68@163.com

通信作者: 丁继辉(1984—),男,高级实验师,主要从事节水灌溉理论研究, E-mail: dingjihui@hhu.edu.cn

with the decrease of farmland water level and nitrogen application rate. Partial factor productivity of nitrogen was increased gradually with the decrease of farmland water level, while decreased with the increase of nitrogen application rate. The total nitrogen, total phosphorus, and other pollutant loads were increased gradually with the decrease of farmland water level. Compared with the control treatment, the increase of nitrogen fertilizer (220 kg/hm^2) could alleviate the effect of waterlogging stress, and promote the increase of winter wheat aboveground dry matter and yield by 4.76% ~ 23.81% and 2.75% ~ 9.19%, respectively. The reduction of nitrogen fertilizer (160 kg/hm^2) made the winter wheat yield at the medium and high farmland water level decreased by 2.20% and 14.00%, respectively, and the corresponding water use efficiency was decreased by 4.55% and 9.74%, respectively. The low farmland water level could decrease the yield reduction effect due to the nitrogen reduction, which increased the yield and nitrogen partial factor productivity of winter wheat by 3.98% and 23.49%, respectively. The higher the farmland water level was, the greater the comprehensive waterlogging degree during the water control period was, and the lower the yield was. In addition, short-term waterlogging had a positive effect on increasing the crude protein content of grains, as the crude protein content of each treatment was increased by 11.50% ~ 20.21% compared with that of the control treatment. Aiming at high yield, high efficiency, pollution reduction and quality improvement, it was recommended that the farmland water level should be lowered to -80 cm in 3 days after the winter wheat suffered from waterlogging with 5 cm water layer for 1 day at winter wheat jointing and booting stage, and the nitrogen application rate should be 220 kg/hm^2 . The research results can provide a theoretical basis for the winter wheat planting and waterlogging disasters restoration in southern China and similar waterlogging-prone agricultural areas.

Key words: winter wheat quality; waterlogging stress; farmland water level; drainage; non-point source pollution; regulating effects

0 引言

江苏省是我国小麦的主产区之一,小麦种植以稻茬小麦为主,小麦拔节孕穗期(3—4月)雨量充沛,导致涝渍灾害频发,尤其在沿江麦区1961—2010年间春季湿渍灾害频率高达60%^[1]。此外,该区域水系丰富,地下水位偏高,农田土壤长期处于水分接近饱和的状态,加上实行稻麦两熟轮作制,前茬水稻收获后土壤质地黏重且通气性差,加重了渍害灾情^[2]。在春季连阴雨时,经常发生内涝和渍害,如果排水措施不当,冬小麦生长期内会遭受严重的涝渍胁迫,造成减产甚至绝收。此外,农田排出的涝水携带的化肥、农药及其他污染物,通过排水系统进入地表和地下水体,成为农业面源污染的重要途径之一^[3]。冬小麦农田涝渍发生后在规定时间内将农田水位调节到适当的深度并采取合理的施肥措施,对高效用水、减少氮素流失和促进作物生长具有重要意义。

涝渍胁迫持续时间是决定涝渍灾害程度的一个关键因素。涝渍胁迫持续时间越长,对作物产量影响越大^[4]。研究发现小麦涝渍胁迫持续10 d左右,减产率达20%以上,涝渍持续10~15 d,减产率达40%~50%,持续20~30 d,减产率最高可达80%^[5]。王宏杰等^[6]探究了小麦不同持续时期水分胁迫解除后的生理恢复情况,发现水分胁迫解除后3 d,涝害6 d处理的净光合速率得到恢复,与对

照处理(CK)表现一致,而涝害9 d处理的旗叶净光合速率与CK差异显著,仅恢复至CK的86.3%。小麦受涝渍后作物处在不利的生长环境下,在及时排除涝渍和科学施肥的条件下,不利环境造成的非正常生长状态趋于正常,可能使作物产量和品质仍然能达到理想状态。但目前渍水条件下追施氮肥对冬小麦产量、品质的影响结果不一致,有学者发现渍水胁迫下增施氮肥具有明显的增产作用^[7],且氮的缓解效应明显优于磷和钾^[8],但有学者指出在渍水条件下增施氮肥降低了产量^[9]。此外,渍水胁迫对冬小麦品质的影响结果也不一致,有研究表明逆境胁迫降低了冬小麦籽粒中粗淀粉含量,却提高了籽粒中粗蛋白含量^[10-11];但有研究表明涝渍条件下小麦籽粒蛋白质含量均显著降低^[9],直链淀粉含量显著增加^[12]。

目前,国内外针对冬小麦缺水胁迫的研究较多,而针对冬小麦涝渍胁迫的研究较少^[13]。部分学者研究易涝易渍地区冬小麦适宜的农田水位^[14-15]及耐涝时间^[16],但针对冬小麦拔节孕穗期受涝渍后农田水位和氮肥交互作用研究鲜有报道。此外,江苏省小麦受前茬收获时间以及气候、地理条件等诸多因素的影响,小麦受涝害情况及氮肥施用技术方面的问题还有待进一步解决。因此,本研究拟通过农田水位和氮肥调控测坑试验,研究冬小麦拔节孕穗期受涝渍时不同农田水位及施氮量对冬小麦生长、产量、品质变化规律的影响,同时探究在不同排水措

施下水氮利用效率及地下水氮磷流失情况,以期为南方冬小麦排水和施肥决策提供理论参考,以提高南方冬小麦产量、品质、作物水氮利用效率及减少面源污染等。

1 材料与方 法

1.1 研究区与试验地概况

试验在江苏省南京市河海大学江宁校区节水园(31°54'N,118°46'E,海拔13 m)进行。试验区属于亚热带季风湿润性气候,年平均气温15.7℃,年平均降雨量1 021.3 mm,3—4月降雨量80 mm左右,5—8月降雨量高达190 mm。年蒸发量900 mm,年日照时数2 212.8 h,平均无霜期237 d。园区有32个蒸渗测坑,试验共用20个蒸渗测坑,每个测坑长×宽×深为2.5 m×2.0 m×2.0 m,测坑分南北2排布置,每排10个,各测坑由水泥墙面和钢板相隔,表面均涂有沥青防止渗漏。中间设

地下廊道及地下设备间,各测坑在地表均配有流量计和电磁阀,接入自动灌溉系统可控制灌水量,有底测坑底部为40 cm厚的砂砾石,可通过集水暗管和节制阀调节排水,如图1所示。各测坑土壤条件和播前地下水位基本保持一致,按完全随机试验安排测坑。测坑内土壤质地为黏土,0~60 cm深度内土壤容重为1.47 g/cm³,土壤质量饱和含水率为30.61%,田间持水率为28.13%(质量含水率),播前土壤初始质量含水率为25.00%。土壤有机质质量比3.53 g/kg,全氮质量比0.58 g/kg,全磷质量比0.44 g/kg,全钾质量比16.52 g/kg,速效氮质量比38.27 mg/kg,速效磷质量比5.27 mg/kg,速效钾质量比146 mg/kg。2020—2021年冬小麦全生育期内有效降水量为393.2 mm(图2a),各处理冬小麦关键生育期农田水位变化详见图2b(图中虚线位置处为冬小麦在拔节孕穗期受涝时间,下同)。

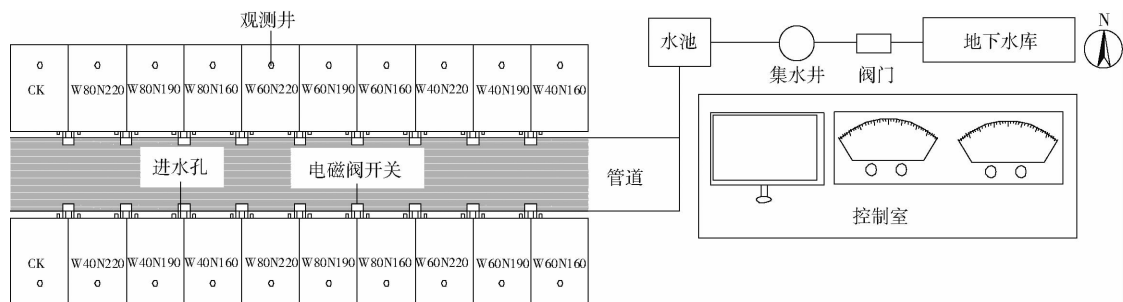


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Test device diagram

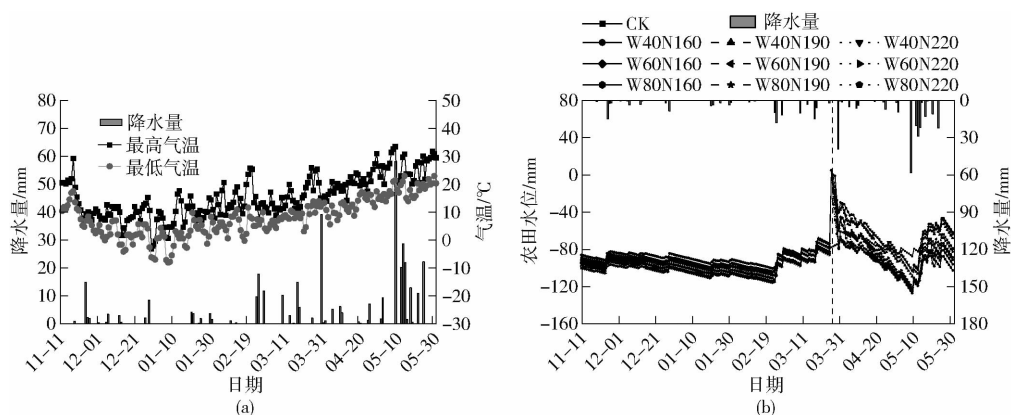


图2 冬小麦生育期降水量、最高最低气温及农田水位变化

Fig. 2 Precipitation, maximum and minimum temperature and variation of farmland water level during winter wheat growth period

1.2 试验设计及过程

冬小麦于2020年11月18日播种,2021年6月1日收获。供试小麦品种为“扬麦25”,播前进行翻耕,耕翻深度为25~30 cm,后将种子和肥料进行均匀撒播,播量为225 kg/hm²(5.396×10⁶粒/hm²),小麦播种后将秸秆覆在地表,秸秆还田量为4 000 kg/hm²,秸秆

长度为5~15 cm,随后将秸秆腐熟剂均匀撒施在秸秆上,采用河南省沃宝生物科技有限公司生产的秸秆腐熟剂,腐熟剂菌属包括芽孢杆菌、木霉菌、酵母菌等,有效菌种大于1×10¹⁰个/g,秸秆腐熟剂施用量为30 kg/hm²。

在冬小麦拔节孕穗期(2021年3月27日)进行

控水处理,冬小麦受涝1次,各处理淹水深度控制在5 cm左右,淹水控制时间为1 d,之后3 d内将农田水位分别降至-40 cm(W40)、-60 cm(W60)及-80 cm(W80),之后使其自然消退。试验设置3个施氮水平,施氮量分别为160 kg/hm²(N160)、190 kg/hm²(N190)和220 kg/hm²(N220)。基肥采用复合肥(N、P₂O₅、K₂O比例为15:15:15),各处理基肥施氮量、施磷量和施钾量均为120 kg/hm²。追肥采用尿素(46%N)并分两次进行,返青分蘖期各处理施氮量均为20 kg/hm²,拔节孕穗期低、中、高施氮量分别为20、50、80 kg/hm²。同时设定对照处理(CK),为不涝不渍不灌溉处理,其农田水位始终低于-80 cm,施氮量为190 kg/hm²。每个试验处理设置2次重复,共20个小区。小麦生育期内严格控制病虫害和杂草的出现。

1.3 测定指标

1.3.1 株高和干物质量

待冬小麦出苗后,在各小区分别选取连续6株具有代表性的冬小麦植株挂牌观测,自返青期开始每间隔7 d记录作物株高。在每个小区内自返青期开始每间隔7 d随机选取4株具有代表性的冬小麦植株,从茎基部与地上部分分离,采样后分离植株各器官,根系选取0~10 cm土层的主根并冲水洗净,之后将各器官分别放入105℃恒温箱中杀青30 min,于75℃干燥至质量恒定,称量各部分干质量并计算干物质量。应用Logistic曲线^[17]对不同处理株高和干物质量进行拟合。

1.3.2 产量

在冬小麦成熟期,采取单打、单晒、实收测量各小区的冬小麦产量。选择有代表性的样方进行考种,考种主要指标为有效穗数、单穗粒数和千粒质量等。

1.3.3 水分利用效率和氮肥偏生产力

水分利用效率(WUE, kg/m³)^[17]和氮肥偏生产力(PFPN, kg/kg)计算式为

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

$$PFPN = Y/TN \quad (2)$$

式中 Y ——冬小麦实际产量, kg/hm²

ET ——作物全生育期内累积耗水量, m³/hm²

TN ——作物全生育期施氮量, kg/hm²

1.3.4 冬小麦耗水量

作物耗水量通过水量平衡法得到,计算公式为

$$ET = P_y + U + I - D - R + \Delta W \quad (3)$$

式中 P_y ——有效降雨量, mm

U ——地下水补给量, mm

I ——灌水量, mm

D ——排水量, mm

R ——地表径流量, mm

ΔW ——试验初期和试验末期0~100 cm土层土壤水分的变化量, mm

由于试验区进行控制排水,无地表径流,取 $R=0$;由于在有底测坑中进行试验,不存在地下水补给,取 $U=0$ 。本文试验田水量平衡方程为

$$ET = P_y + I - D + \Delta W \quad (4)$$

1.3.5 排水中氮、磷含量

在排水过程中,每排50 L取1次地下水样。水样取后可保存于低温冰箱内,并在24 h内进行分析。采用纳氏试剂光度法^[18]测定氨氮(NH₄⁺-N, μg/mL)含量、紫外分光光度法^[19]测定硝氮(NO₃⁻-N, μg/mL)含量、碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定总氮(TN, μg/mL)含量和钼酸铵分光光度法测定总磷(TP, μg/mL)含量,测定仪器为VIS分光光度计(UAA 2103004型,上海美谱达仪器有限公司)。

1.3.6 冬小麦籽粒品质

冬小麦收获后随机选取部分样品进行品质测定,采用酸解法-DNS测定植物总淀粉含量,采用单波碘显色法测定植物直链淀粉含量,采用索氏抽提法测定植物粗脂肪含量,采用茚三酮比色法测定赖氨酸含量。

1.3.7 冬小麦综合涝渍程度

考虑到南方地区春季连阴雨使冬小麦连续受涝渍的情况,以地面水累积淹水深度(SFW, cm)作为指标来衡量冬小麦受涝程度;以地下水埋深50 cm作为标准,控水阶段超标水位累积值(SEW₅₀, cm)作为指标来衡量冬小麦受渍程度,以综合涝渍指标(SFEW, cm)衡量冬小麦涝渍连续情况下的综合涝渍程度。SFW^[20]、SEW₅₀^[21]和SFEW计算式为

$$SFW = \sum_{j=1}^m h_j \quad (5)$$

$$SEW_{50} = \sum_{i=1}^n (d_i + 50) \quad (6)$$

$$SFEW = W \cdot SFW + SEW_{50} \quad (7)$$

式中 m ——受涝时间, d

h_j ——淹水第 j 天的平均地面水深度, cm

n ——受渍时间, d

d_i ——渍水阶段内第 i 天的农田水位, -50 cm ≤ d_i ≤ 0 cm

W ——作物涝害权重系数

W 和SFEW可按文献[21-22]进行推导。作物相对产量 R_y 计算式为

$$R_y = \frac{Y_s}{Y_0} \quad (8)$$

式中 Y_s ——涝渍处理冬小麦产量, kg/hm^2

Y_0 ——CK 处理冬小麦产量, kg/hm^2

单纯受渍时, R_y 与 SEW_{50} 关系式为

$$R_y = 1 - \alpha_0 SEW_{50} \quad (9)$$

涝渍连续时, R_y 与 SEW_{50} 关系式为

$$R_y = A_K - \alpha_K SEW_{50} \quad (10)$$

式中 α_0 、 α_K 、 A_K ——回归参数

以单纯受渍为基准, 将式(7)中 $SFEW$ 代替式(9)中 SEW_{50} , 有

$$R_y = 1 - \alpha_0 (W \cdot SFEW + SEW_{50}) \quad (11)$$

式(10)等于式(11), 得

$$W = \frac{1 - A_K}{\alpha_0 SFEW} + \frac{\alpha_K - \alpha_0}{\alpha_0 SFEW} SEW_{50} \quad (12)$$

$$SFEW = \frac{1 - A_K}{\alpha_0} + \frac{\alpha_K}{\alpha_0} SEW_{50} \quad (13)$$

1.3.8 农田水位与气象观测

在每个蒸渗测坑的中间设置地下水位观测井, 自冬小麦播种后每天 08:00 读取各个测坑中水位, 在涝渍和排水期间, 直接记录灌溉水量和排水水量。采用位于园区内的自动气象站测定相关气象要素, 具体包括降水量、大气温度、相对湿度、风速和太阳辐射等, 每 1 h 采集并记录 1 次。

1.3.9 熵权 TOPIS 法综合评价

以高产、高效、减污、提质为优化目标, 选取干物质质量和实际产量表示作物产量指标, 选取 WUE 和 PFPN 表示效率指标, 选取排水中总氮、总磷浓度表

示污染物指标, 选取粗蛋白含量和赖氨酸含量表示冬小麦籽粒品质指标^[23-24], 参照缪子梅等^[25]研究采用熵权 TOPIS 法进行方案的综合评价。

1.4 数据分析

利用 SPSS 24.0 在 $P < 0.05$ 水平上对冬小麦及排水的相关指标进行单因素方差分析, 并通过方差分析探究农田水位(W)、施氮量(N)及两因素交互对各指标的显著性影响。采用 Origin 9.0 绘图, 采用 SPSSAU 进行熵权 TOPIS 分析。

2 结果与分析

2.1 农田水位与施氮对冬小麦株高和干物质质量的影响

如图 3 所示, 在相同农田水位下, 冬小麦株高和干物质质量均随施氮量的增加而逐渐增大; 在相同施氮水平下, 冬小麦株高和干物质质量随农田水位的降低而逐渐增大。受涝处理中, 以 W80N220 处理的冬小麦株高和干物质质量最大。各涝渍处理对应冬小麦株高相对 CK 处理降低 0.96% ~ 7.37%, 这表明冬小麦拔节孕穗期受涝会阻碍冬小麦后续的营养生长。涝渍条件下, 与施氮量 190 kg/hm^2 相比, 增加 18.75% 施氮量, 冬小麦成熟期株高和干物质质量分别增加 1.70% ~ 4.04%、6.36% ~ 19.28%, 减少 18.75% 施氮量, 冬小麦成熟期株高和干物质质量分别减小 0.65% ~ 1.40%、4.22% ~ 21.36%。涝渍条

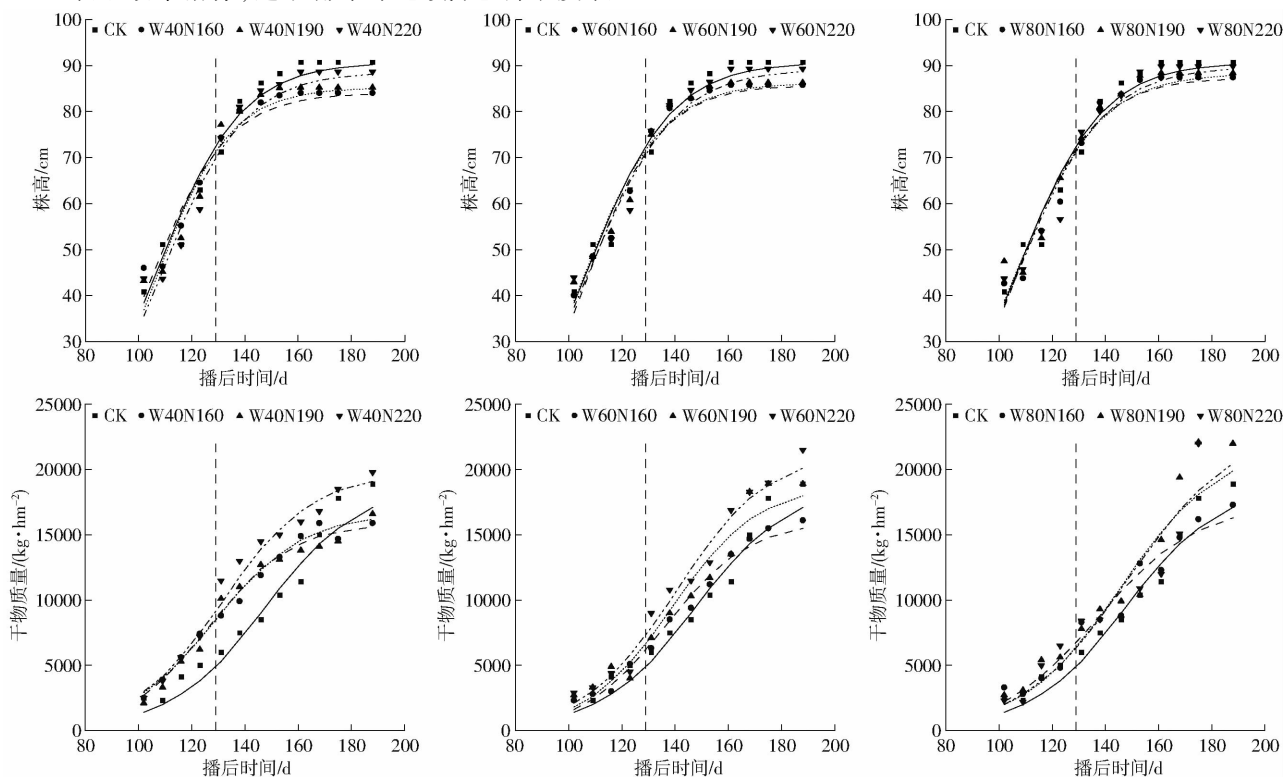


图 3 株高、干物质质量随播后时间变化曲线

Fig. 3 Changes of plant height, dry matter accumulation with days after sowing

件下,与高农田水位相比,中农田水位对应冬小麦成熟期株高和干物质质量分别增加 0.65% ~ 2.01%、1.26% ~ 13.86%,低农田水位对应冬小麦成熟期株高和干物质质量分别增加 1.34% ~ 4.01%、8.81% ~ 32.53%。与 CK 处理相比,试验设计农田水位下,增施氮肥可以缓解涝渍对冬小麦植株的不良影响,促进冬小麦干物质质量增加 4.76% ~ 23.81%。

由表 1 中 Logistic 函数拟合可知,各涝渍处理冬小麦株高快速增长开始时间 t_1 与 CK 处理差异

不大,冬小麦株高快速增长结束时间 t_2 和持续时间 GT 随施氮量的增大和农田水位的降低而增大。各涝渍处理干物质质量快速积累开始时间 t_1 、结束时间 t_2 、积累速率最快时间 t 及持续时间 GT 均小于 CK 处理(W80N220 除外),但均随施氮量的增大和农田水位的降低而增大。在 W40、W60 水平下 GT 较 CK 处理减小,但在 W80 水平下较 CK 处理增大。此外,干物质质量快速积累速率 V_m 随施氮量的增加而提高。

表 1 冬小麦株高、干物质质量与播种后时间的 Logistic 函数拟合

Tab.1 Logistic function fitting of winter wheat plant height, dry matter and days after sowing

指标	农田水位	施氮量	t_1/d	t_2/d	t/d	V_m	GT/d	回归方程	R^2	
株高	W40	N160	84	123	107	1.43 cm/d	39	$H = 84.06(1 + 1147.684e^{-0.068t})^{-1}$	0.921	
		N190	87	124	104	1.51 cm/d	37	$H = 85.25(1 + 1834.931e^{-0.071t})^{-1}$	0.927	
		N220	88	129	108	1.42 cm/d	41	$H = 88.69(1 + 1024.455e^{-0.064t})^{-1}$	0.916	
	W60	N160	88	125	106	1.52 cm/d	37	$H = 85.75(1 + 1915.208e^{-0.071t})^{-1}$	0.949	
		N190	85	125	105	1.45 cm/d	39	$H = 86.31(1 + 1135.462e^{-0.067t})^{-1}$	0.928	
		N220	86	129	107	1.38 cm/d	42	$H = 89.31(1 + 773.317e^{-0.062t})^{-1}$	0.874	
	W80	N160	87	126	106	1.49 cm/d	39	$H = 87.43(1 + 1370.863e^{-0.068t})^{-1}$	0.925	
		N190	85	127	106	1.39 cm/d	42	$H = 88.38(1 + 786.783e^{-0.063t})^{-1}$	0.920	
		N220	86	128	107	1.39 cm/d	42	$H = 89.88(1 + 766.213e^{-0.062t})^{-1}$	0.921	
	CK	N190	86	128	107	1.43 cm/d	42	$H = 90.75(1 + 843.811e^{-0.063t})^{-1}$	0.921	
	干物质质量	W40	N160	106	147	127	250 kg/(hm ² ·d)	41	$B = 15920.50(1 + 3282.341e^{-0.064t})^{-1}$	0.987
			N190	106	150	128	250 kg/(hm ² ·d)	44	$B = 16552.08(1 + 2194.321e^{-0.060t})^{-1}$	0.976
N220			109	154	132	280 kg/(hm ² ·d)	45	$B = 19787.28(1 + 2345.311e^{-0.059t})^{-1}$	0.980	
W60		N160	116	157	137	250 kg/(hm ² ·d)	42	$B = 16068.53(1 + 5454.357e^{-0.063t})^{-1}$	0.988	
		N190	117	160	139	290 kg/(hm ² ·d)	43	$B = 18903.51(1 + 4769.909e^{-0.061t})^{-1}$	0.953	
		N220	118	164	141	310 kg/(hm ² ·d)	46	$B = 21491.23(1 + 3026.790e^{-0.057t})^{-1}$	0.981	
W80		N160	113	162	137	230 kg/(hm ² ·d)	49	$B = 17346.49(1 + 1650.359e^{-0.054t})^{-1}$	0.963	
		N190	121	171	146	290 kg/(hm ² ·d)	50	$B = 22120.61(1 + 2278.721e^{-0.053t})^{-1}$	0.939	
		N220	123	175	149	290 kg/(hm ² ·d)	53	$B = 23410.09(1 + 1708.477e^{-0.050t})^{-1}$	0.895	
CK		N190	124	171	148	260 kg/(hm ² ·d)	47	$B = 18912.28(1 + 3887.341e^{-0.056t})^{-1}$	0.966	

注: t_1 和 t_2 分别为株高/干物质快速增长开始时间和结束时间; t 为株高/干物质增长速率最快时间; V_m 为株高增长最大速率 (cm/d) 或干物质质量增长最大速率 (kg/(hm²·d));GT 为株高/干物质快速增长持续时间; H 为冬小麦株高 (cm), B 为干物质质量 (kg/hm²)。

2.2 农田水位与施氮量对冬小麦产量及水氮利用效率的影响

由表 2 可知,农田水位和施氮量及二者的交互对冬小麦实际产量及增产率均有极显著性影响 ($P < 0.01$),农田水位和施氮量对冬小麦有效穗数、单穗粒数、千粒质量有显著性影响 ($P < 0.05$),但两因素交互对有效穗数、单穗粒数、千粒质量无显著性影响。在相同农田水位下,籽粒产量随施氮量的增加逐渐增大;在相同施氮水平下,籽粒产量随农田水位的降低逐渐增大。当施氮量为 160 kg/hm² 时,高农田水位和中农田水位对应冬小麦籽粒产量较 CK 处理分别减小 14.00% 和 2.20%,而低农田水位对应冬小麦籽粒产量较 CK 处理反而增加 3.98%。当施氮量为 220 kg/hm² 时,各涝渍处理对应冬小麦产量较

CK 处理提高 2.75% ~ 9.19%。在相同农田水位下,有效穗数、单穗粒数、千粒质量均随施氮量的增加逐渐增大;在相同施氮水平下,有效穗数、单穗粒数随农田水位的降低逐渐增大,千粒质量随农田水位的降低逐渐减小。与 CK 处理相比,各涝渍处理对应有效穗数降低,但单穗粒数和千粒质量增加。

试验在冬小麦拔节孕穗期通过灌水模拟农田涝渍,由于灌水前各处理田间状况基本保持一致,农田水位、施氮量及二者的交互对灌水量无显著性影响 ($P > 0.05$)。由于在播种期和返青分蘖期施肥保持一致,施氮量仅在排水后存在差异,施氮量、农田水位与施氮量交互对排水量无显著性影响 ($P > 0.05$)。农田水位对排水量有极显著影响 ($P < 0.01$),在相同施氮水平下,排水量随农田水位的降

表 2 各试验处理冬小麦产量及产量构成因素
Tab.2 Winter wheat yield and yield components for treatment

农田水位	施氮量	有效穗数/(穗·m ⁻²)	单穗粒数	千粒质量/g	实际产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/%
W40	N160	(622.72 ± 56.64) ^c	(42.00 ± 3.37) ^c	(47.89 ± 1.43) ^{abc}	(5 068.1 ± 68.9) ^g	-14.00
	N190	(656.02 ± 37.37) ^{bc}	(43.47 ± 1.87) ^{bc}	(49.06 ± 1.31) ^a	(6 011.6 ± 111.8) ^{def}	-0.80
	N220	(673.80 ± 43.69) ^{abc}	(44.88 ± 4.95) ^{abc}	(49.61 ± 1.98) ^a	(6 226.7 ± 246.9) ^{cde}	2.75
W60	N160	(656.48 ± 18.40) ^{bc}	(43.77 ± 2.30) ^{bc}	(46.19 ± 1.14) ^{bcd}	(5 926.9 ± 24.8) ^f	-2.20
	N190	(675.00 ± 64.55) ^{abc}	(45.23 ± 0.91) ^{abc}	(48.21 ± 1.29) ^{ab}	(6 104.7 ± 256.4) ^{def}	0.74
	N220	(682.78 ± 21.20) ^{ab}	(46.33 ± 2.37) ^{ab}	(47.29 ± 1.87) ^{abcd}	(6 543.6 ± 146.6) ^{ab}	7.98
W80	N160	(675.00 ± 32.35) ^{abc}	(46.32 ± 1.73) ^{ab}	(45.03 ± 2.84) ^d	(6 301.3 ± 147.9) ^{bcd}	3.98
	N190	(690.00 ± 43.77) ^{ab}	(46.50 ± 3.24) ^{ab}	(47.13 ± 1.75) ^{abcd}	(6 388.9 ± 184.6) ^{abc}	5.43
	N220	(707.22 ± 32.66) ^{ab}	(47.93 ± 2.25) ^a	(47.33 ± 3.34) ^{abcd}	(6 617.0 ± 61.6) ^a	9.19
CK	N190	(725.00 ± 22.80) ^a	(43.73 ± 0.21) ^{bc}	(45.41 ± 1.07) ^{cd}	(6 060.0 ± 60.0) ^{def}	0
	W	*	**	**	**	**
F	N	*	*	*	**	**
	W × N				**	**

注:同列数字后不同字母表示显著性差异($P < 0.05$), * 表示差异达到显著水平($P < 0.05$), ** 表示差异达到极显著水平($P < 0.01$), 下同。

低逐渐增加。由表 3 可知,农田水位对耗水量没有显著性影响($P > 0.05$),但施氮量及两因素交互对耗水量产生显著性影响($P < 0.05$),在相同农田水位下,除 W40N160 处理,耗水量随着施氮量的增加逐渐减小。农田水位和施氮量对各处理土壤储水变化量、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(PFPN)均有极显著性影响($P < 0.01$)。在相同农田水位下,除 W40N160 处理外,储水变化量随施氮量的增加而增大。在相同施氮量下,储水变化量随农田水位的降低

逐渐增大。在相同农田水位下,随着施氮量的增加,WUE 逐渐增大而 PFPN 逐渐减小;在相同施氮水平下,WUE 和 PFPN 均随着农田水位的降低而逐渐增大。与 CK 处理相比,减施氮肥导致高、中、低农田水位水分利用效率分别下降 9.74%、4.55% 和 0.65%,但提高氮肥偏生产力 -0.94%、16.15% 和 23.49%。增施氮肥导致高、中、低农田水位水分利用效率分别提高 8.44%、10.39% 和 20.78%,但氮肥偏生产力下降 11.12%、6.60% 和 5.56%。

表 3 各试验处理对应耗水量、水分利用效率及氮肥偏生产力

Tab.3 Water consumption, water use efficiency and partial factor productivity of nitrogen fertilizer for treatments

农田水位	施氮量	灌水量/mm	排水量/mm	储水变化量/mm	耗水量/mm	WUE/(kg·m ⁻³)	PFPN/(kg·kg ⁻¹)
W40	N160	(110 ± 0) ^b	(53 ± 3) ^e	(86.35 ± 6.34) ^a	(363.85 ± 3.34) ^{de}	(1.39 ± 0.03) ^e	(31.68 ± 0.43) ^d
	N190	(115 ± 5) ^{ab}	(55 ± 5) ^{de}	(38.55 ± 4.38) ^d	(414.65 ± 5.62) ^a	(1.45 ± 0.05) ^{de}	(31.64 ± 0.59) ^d
	N220	(115 ± 5) ^{ab}	(59 ± 3) ^{cde}	(75.55 ± 6.06) ^{ab}	(373.65 ± 14.06) ^{cde}	(1.67 ± 0.10) ^{bc}	(28.30 ± 1.12) ^f
W60	N160	(120 ± 0) ^a	(64 ± 0) ^{bed}	(44.47 ± 29.95) ^{cd}	(404.73 ± 29.95) ^{abc}	(1.47 ± 0.11) ^{de}	(37.04 ± 0.16) ^b
	N190	(115 ± 5) ^{ab}	(66 ± 2) ^{bc}	(48.87 ± 2.30) ^{cd}	(393.33 ± 5.30) ^{abcd}	(1.55 ± 0.07) ^{cd}	(32.13 ± 1.35) ^d
	N220	(115 ± 5) ^{ab}	(71 ± 1) ^b	(52.13 ± 0.43) ^{bcd}	(385.07 ± 3.57) ^{abcde}	(1.70 ± 0.05) ^b	(29.74 ± 0.67) ^e
W80	N160	(115 ± 5) ^{ab}	(84 ± 14) ^a	(12.50 ± 19.78) ^e	(411.70 ± 28.78) ^{ab}	(1.53 ± 0.08) ^{cde}	(39.38 ± 0.92) ^a
	N190	(115 ± 5) ^{ab}	(91 ± 1) ^a	(35.18 ± 8.64) ^d	(382.02 ± 14.64) ^{bcd}	(1.68 ± 0.08) ^{bc}	(33.63 ± 0.97) ^e
	N220	(115 ± 5) ^{ab}	(87 ± 3) ^a	(64.35 ± 16.48) ^{abc}	(356.85 ± 24.48) ^c	(1.86 ± 0.12) ^a	(30.07 ± 0.28) ^e
CK	N190	(0 ± 0) ^c	(0 ± 0) ^f	(0.84 ± 0.10) ^e	(392.36 ± 0.10) ^{abcd}	(1.54 ± 0.02) ^{cd}	(31.89 ± 0.38) ^d
	W		**	**		**	**
F	N			**	*	**	**
	W × N			**	**		**

2.3 农田水位与施氮量对排水中氮、磷负荷的影响

氮、磷负荷由排水中氮、磷浓度及排水量计算得到。由于排水前各试验处理施肥模式保持一致,由表 4 可知,施氮量对排水中氮、磷负荷没有显著性影响($P > 0.05$),农田水位及两因素交互对排水中氮、磷负荷有极显著影响($P < 0.01$)。在相同施氮量

下,随农田水位的降低,排水量逐渐增大(表 3),氮、磷负荷增大,其中低农田水位下排水中总氮、总磷、氨氮、硝氮负荷较中农田水位分别增大 24.83% ~ 40.52%、19.3% ~ 39.29%、22.33% ~ 38.22%、22.54% ~ 37.88%,较高农田水位分别增大 50.00% ~ 69.89%、48.00% ~ 62.50%、47.37% ~

表4 各试验处理排水中总氮、总磷、氨氮、硝氮负荷

Tab. 4 Total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen load in drainage for treatments

农田水位	施氮量	总氮负荷	总磷负荷	氨氮负荷	硝氮负荷
W40	N160	(0.445 ± 0.025) ^e	(0.0023 ± 0.0001) ^d	(0.154 ± 0.009) ^e	(0.212 ± 0.012) ^e
	N190	(0.462 ± 0.042) ^{de}	(0.0024 ± 0.0002) ^d	(0.160 ± 0.015) ^{de}	(0.220 ± 0.020) ^{de}
	N220	(0.496 ± 0.055) ^{cde}	(0.0025 ± 0.0001) ^{cd}	(0.171 ± 0.009) ^{cde}	(0.236 ± 0.012) ^{cde}
W60	N160	(0.538 ± 0.001) ^{bcd}	(0.0028 ± 0.0001) ^{bc}	(0.186 ± 0.0001) ^{bcd}	(0.256 ± 0.0001) ^{bcd}
	N190	(0.554 ± 0.017) ^{bc}	(0.0028 ± 0.0001) ^{bc}	(0.191 ± 0.006) ^{bc}	(0.264 ± 0.008) ^{bc}
	N220	(0.596 ± 0.008) ^b	(0.0031 ± 0.0001) ^b	(0.206 ± 0.003) ^b	(0.284 ± 0.004) ^b
W80	N160	(0.756 ± 0.118) ^a	(0.0036 ± 0.0006) ^a	(0.244 ± 0.041) ^a	(0.336 ± 0.056) ^a
	N190	(0.731 ± 0.025) ^a	(0.0037 ± 0.0000) ^a	(0.264 ± 0.003) ^a	(0.364 ± 0.004) ^a
	N220	(0.744 ± 0.008) ^a	(0.0039 ± 0.0001) ^a	(0.252 ± 0.009) ^a	(0.348 ± 0.012) ^a
CK	N190	(0.000 ± 0.000) ^f	(0.0000 ± 0.0000) ^e	(0.000 ± 0.000) ^f	(0.000 ± 0.000) ^f
F	W	**	**	**	**
	N				
	W × N	**	**	**	**

65.00%、47.46% ~ 65.45%。排水中氮负荷以硝氮为主。由于未进行地表排水,各试验处理对应地下排水负荷中总氮、总磷负荷分别为 0.445 ~ 0.756 kg/hm² 和 0.0023 ~ 0.0039 kg/hm²。

2.4 农田水位与施氮量对冬小麦籽粒品质的影响

由图4(图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$))可知,农田水位、施氮量及两因素交互对籽粒直链淀粉、粗脂肪、粗蛋白、赖氨酸含量均产生极显著影响($P < 0.01$)。与CK处理相比,各涝渍处理对应籽粒粗蛋白含量提高 11.50% ~ 20.21%,直链淀粉含量和赖氨酸含量分别下降 2.82% ~ 50.28%、3.43% ~ 34.35%。在相同农田水位下,直链淀粉含量随施氮量的增加逐渐减小(W80)或先增大后减小(W40、W60);粗脂肪含量在高农田水位下随施氮

量的增加逐渐增加,而在中、低农田水位下随施氮量的增加而逐渐减小;粗蛋白含量和赖氨酸含量随施氮量的增加逐渐增大。在相同施氮水平下,直链淀粉、粗脂肪含量随农田水位的降低先增加后减小,粗蛋白、赖氨酸含量随农田水位的降低逐渐增加。各涝渍处理中,W80N220处理粗蛋白含量和赖氨酸含量最高。

2.5 综合涝渍指标与产量关系构建及熵权 TOPIS 法方案优选

根据邵光成等^[22]点绘的单纯受渍下冬小麦 R_y 与 SEW_{50} 的关系曲线,求得关系模型为: $R_y = 1 - 0.0012SEW_{50}$ 。在本试验中,当 SFW 为 5 cm 时,在施氮量分别为 160、190、220 kg/hm² 下可点绘出涝渍连续情况下冬小麦 R_y 与 SEW_{50} 的关系曲线,并分别求得关

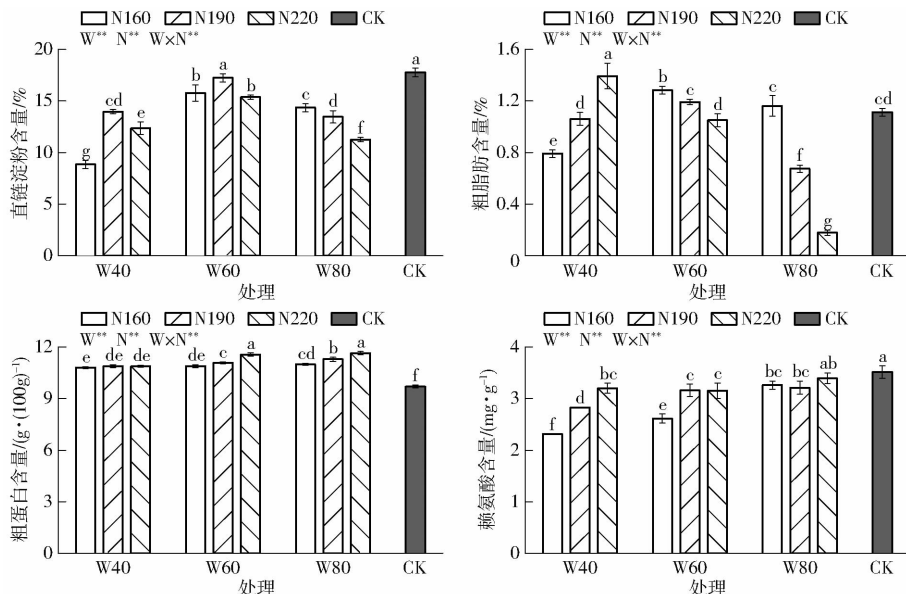


图4 冬小麦籽粒中直链淀粉、粗脂肪、粗蛋白、赖氨酸含量

Fig. 4 Contents of amylose, crude fat, crude protein and lysine in grains of winter wheat

系模型为: 在 N160 下, $R_y = 1.1524 - 0.0011SEW_{50}$, $R^2 = 0.98$, $W = -27.21 - 0.0036SEW_{50}$, $SFEW = -136.07 + 0.98SEW_{50}$; 在 N190 下, $R_y = 1.131 - 0.0008SEW_{50}$, $R^2 = 0.97$, $W = -23.39 - 0.0571SEW_{50}$, $SFEW = -116.96 + 0.71SEW_{50}$; 在 N220 下, $R_y = 1.1379 - 0.0006SEW_{50}$, $R^2 = 0.97$, $W = -24.63 - 0.0929SEW_{50}$, $SFEW = -123.13 + 0.54SEW_{50}$ 。通过关系模型计算 SFEW, 结果见表 5。淹水后 3 d 内控制的农田水位越高, 其控水期间 SFEW 越大。SFEW 在 W60 和 W80 水平下均小于 0, 表明与 CK 处理相比, W60 和 W80 水平对作物产生水分补偿效应, 从而促进了冬小麦增产。

表 5 各试验处理冬小麦综合涝渍指标

Tab. 5 Comprehensive waterlogging index of winter wheat for treatments

处理	SFW/cm	SEW ₅₀ /cm	W	SFEW/cm
W40N160	5	294.50	-28.04	90.17
W40N190	5	180.30	-34.55	22.54
W40N220	5	195.85	-51.95	34.51
W60N160	5	148.05	-27.64	-19.42
W60N190	5	148.50	-31.88	-10.89
W60N220	5	118.23	-35.61	-59.76
W80N160	5	114.50	-27.48	-62.41
W80N190	5	100.00	-29.94	-35.18
W80N220	5	75.00	-32.33	-78.66

注: 在淹水 1 d 后排水条件下, SFEW 为正值代表涝渍对作物产生胁迫效应, SFEW 为负值代表涝渍对作物产生水分补偿效应。

表 6 熵权 TOPIS 法综合评价结果

Tab. 6 Comprehensive evaluation results of entropy weight TOPIS method

处理	高产		高效		减污		提质		综合得分 指数	排序
	干物质量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·m ⁻³)	FPFN/ (kg·kg ⁻¹)	总氮负荷/ (kg·hm ⁻²)	总磷负荷/ (kg·hm ⁻²)	粗蛋白含量/ (g·(100g) ⁻¹)	赖氨酸含量/ (mg·g ⁻¹)		
W40N160	15 920.50	5 068.1	1.39	31.68	0.445	0.002 3	10.76	2.30	0.288	10
W40N190	16 552.08	6 011.6	1.45	31.64	0.462	0.002 4	10.85	2.82	0.317	9
W40N220	19 787.28	6 226.7	1.67	28.30	0.496	0.002 5	10.84	3.19	0.412	5
W60N160	16 068.53	5 926.9	1.47	37.04	0.538	0.002 8	10.85	2.60	0.336	8
W60N190	18 903.51	6 104.7	1.55	32.13	0.554	0.002 8	11.04	3.15	0.361	6
W60N220	21 491.23	6 543.6	1.70	29.74	0.596	0.003 1	11.52	3.14	0.434	3
W80N160	17 346.49	6 301.3	1.53	39.38	0.756	0.003 6	10.95	3.25	0.356	7
W80N190	22 120.61	6 388.9	1.67	33.63	0.731	0.003 7	11.24	3.20	0.420	4
W80N220	23 410.09	6 617.0	1.86	30.07	0.744	0.003 9	11.60	3.38	0.459	2
CK	18 912.28	6 060.0	1.54	31.89	0	0	9.65	3.50	0.624	1

3 讨论

大量研究表明涝渍胁迫导致植株生物量、株高及产量下降^[14,26-29], 但有研究表明短期内涝对提高植物光合能力有积极作用^[23], 冬小麦在短期内涝(3d)后可以迅速恢复, 施用过量追肥后, 植株甚至表现出旺盛的营养生长^[5]。此外, 部分研究发现该

不同施氮水平对应的综合涝渍指标与产量关系及表达式见图 5, 结果表明各试验处理产量与 SFEW 呈负相关关系, 此外, 在相同综合涝渍指标下, 产量随施氮量的增加而增加。

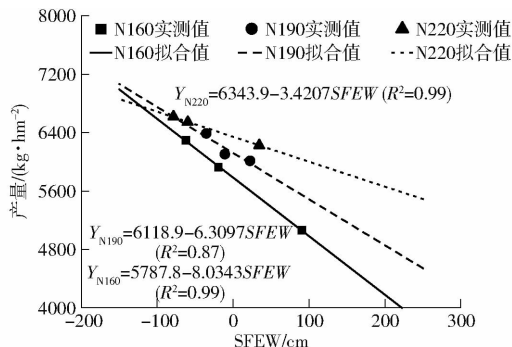


图 5 不同施氮水平下 SFEW 与产量关系

Fig. 5 Relationship between SFEW and yield under different nitrogen application levels

以高产、高效、减污、提质为优化目标, 采用熵权 TOPIS 法优选出拔节孕穗期涝渍后适宜的农田水位及施氮量。表 6 结果表明, CK 处理最优, 其次为 W80N220 处理。因此, 为减轻农田涝渍危害, 南方冬小麦在拔节孕穗期受涝后, 避免地表排水, 宜在 3 d 内通过地下排水将农田水位控制在 -80 cm 以下, 并追施氮肥 80 kg/hm² (冬小麦整个生育期施氮量为 220 kg/hm²), 可在保证冬小麦产量的同时, 提高冬小麦籽粒品质和水氮利用效率, 并减少农田排水中的氮磷负荷。

阶段渍水导致小麦营养元素缺乏, 但对产量影响较小^[30-31]。ZHANG 等^[32]发现, 与非淹水对照组相比, 淹水棉花的生物量和叶面积都有所增加。本研究结果与 ZHANG 等^[32]相似, 试验发现各涝渍处理冬小麦成熟期株高较 CK 处理降低 0.96% ~ 7.37%, 但部分涝渍处理的干物质量和产量均较 CK 处理分别增大 4.76% ~ 23.81%、0.14% ~ 9.19%。

适当补充氮肥是促进涝渍条件下冬小麦生长和产量提高的有效措施^[32-35]。拔节期淹水后基施氮肥可能通过淋溶或反硝化途径损失殆尽,根层土壤氮素的供应量降低^[34],增施氮肥可以改善渍害环境下小麦植株氮素吸收状况,提高植株叶绿素含量和增强植株的光合作用,增强渍害胁迫下土壤碳氮代谢相关酶活性,提高植株抗氧化酶活性并减少植株活性氧积累^[2]。本研究中冬小麦株高、干物质量、产量、有效穗数、单穗粒数及千粒质量均随施氮量的增加逐渐增大,施氮量为 220 kg/hm² 时各生长及产量指标均达到最大值,与 ZHANG 等^[15] 和 DING 等^[26] 研究中涝渍区冬小麦的适宜施氮量为 225 kg/hm² 这一结果较为一致。CUI 等^[36] 发现,与非淹水条件相比,涝渍后农田水位在 3 d 内降至 -40 cm 处理冬小麦产量降低,本研究结果与之相似,W40N190 处理较 CK 处理产量降低。本试验中株高、干物质量、产量、有效穗数、单穗粒数均随农田水位的降低而逐渐增大,低农田水位(农田水位 3 d 内降至 -80 cm)对应作物生长及产量指标达到最大值,与吴启侠等^[16] 建议在江汉平原内涝后 3 d 内将地下水位排至 -70 cm 这一结果较为一致。此外,拔节孕穗期是小麦生长关键生育期,与有效穗数和单穗粒数的形成密切相关。SHAO 等^[37] 指出,拔节孕穗期淹水处理显著降低了有效穗数和单穗粒数。本研究中,各涝渍处理相对 CK 处理有效穗数降低,但单穗粒数和千粒质量增加,可能是由于拔节期涝渍胁迫导致小麦茎蘖数下降^[29],各涝渍处理有效穗数降低,群密度减小后,单株作物营养与光照更加充足,使得单穗粒数和千粒质量增加。

农田耗水量包括植物实际蒸腾耗水量和棵间蒸发造成的水分损失。顾南等^[38] 发现华北平原浅埋区地下水埋深 0.5 m 和 1.0 m 对应的小麦蒸散量分别为 510.50 mm 和 499.33 mm,本研究中 2020—2021 年处理的耗水量范围为 352.85 ~ 411.70 mm。试验发现 PFPN 随着施氮水平的提高而逐渐降低,这表明过量施氮不利于提高氮肥偏生产力。在相同农田水位下,各处理的水分利用效率随施氮量的增加而增加,这表明增加施氮量使得冬小麦植株水分利用效率提高。在相同施氮水平下,WUE 和 PFPN 在低农田水位下达到最大值。农田排水中的氮负荷与排水中的氮浓度和排水量直接相关。景卫华等^[39] 研究表明氮排放总量取决于排水总量而不是排水中的氮浓度。本研究中,农田排水量随农田水位的降低而增加,导致排水中总氮、总磷、氨氮、硝氮负荷均随农田水位的降低而增加。部分研究发现,由于反硝化作用农田内涝后土壤硝态氮浓度显著下

降,铵态氮浓度显著上升^[28]。而本研究中淹水时间仅为 1 d,排水中氮污染负荷仍以硝氮为主。此外,各试验处理的基肥和返青分蘖肥保持一致,仅排水后拔节孕穗期的追肥施氮量不同,追肥对排水中氮、磷负荷无显著性影响。

小麦籽粒蛋白质、淀粉、氨基酸含量及其组分平衡程度决定小麦品质^[24]。在本试验中,与 CK 处理相比,各涝渍处理对应籽粒粗蛋白含量上升 11.50% ~ 20.21%,直链淀粉含量和赖氨酸含量分别下降 2.82% ~ 50.28% 和 3.43% ~ 34.35%,这与姜向阳^[11] 研究结果一致。姜向阳^[11] 研究发现,渍水处理降低了籽粒粗淀粉含量,提高了粗蛋白含量。此外,针对涝渍条件下施肥对作物品质的影响,南镇武等^[23] 研究表明,籽粒中蛋白质含量和氨基酸含量随施氮量的增加而增加,籽粒淀粉含量和粗脂肪含量随施氮量的增加而下降。本试验研究结果与之相似,籽粒中粗蛋白含量和赖氨酸含量随施氮量的增加和农田水位的降低逐渐增大,直链淀粉含量随施氮量的增加有逐渐减小的趋势,直链淀粉含量和粗脂肪含量随农田水位的降低先增大再减小。原因可能在于农田水位越高,作物受涝渍程度越大,因涝渍胁迫引起冬小麦籽粒中蛋白质含量的升高和淀粉含量的降低^[24]。

施氮量增加和农田水位降低有助于冬小麦植株生长发育、增加产量并提升籽粒品质,但增施氮肥导致 PFPN 降低^[32,35],且农田水位的降低会引起排水量的增加,从而导致农田氮磷等污染物负荷的增加^[40]。因此,本研究采用熵权 TOPIS 法基于多个目标进行了综合评价,研究结果表明冬小麦拔节孕穗期涝渍后适宜的农田水位为受涝 1 d 后 3 d 内农田水位降至 -80 cm,冬小麦整个生育期适宜施氮量为 220 kg/hm²,与吴启侠等^[16] 在江汉平原和 DING 等^[26] 在扬州的研究结果较为一致。

4 结论

(1) 冬小麦成熟期株高、干物质量随农田水位降低和施氮量增加而逐渐增大。涝渍条件下增施氮肥可以促进作物营养生长,与 N190 相比,N220 水平下冬小麦株高和干物质量分别增加 1.70% ~ 4.04%、6.36% ~ 19.28%。农田水位越低,其控水期间综合涝渍程度越小,中、低农田水位下株高和干物质量比高农田水位分别增加 0.65% ~ 4.01%、1.26% ~ 32.53%。

(2) 产量和 WUE 随农田水位的增大和施氮量的增加逐渐增大,PFPN 随农田水位的增大而逐渐增大但随施氮量的增加逐渐减小。增施氮肥可缓解

涝渍减产效应,中、高农田水位下,氮肥减施导致冬小麦减产和 WUE 下降,而低农田水位可以降低氮肥减施对产量的不利影响,促进冬小麦增产和 PFPN 提高。

(3)在相同施氮量下,随着农田水位降低,排水量逐渐增大,增大了氮、磷污染物负荷,但地下排水负荷中各处理总氮、总磷负荷仅为 0.445 ~ 0.756 kg/hm²、0.002 3 ~ 0.003 9 kg/hm²。

(4)涝渍胁迫能改善冬小麦籽粒品质,与 CK 处理相比,各涝渍处理直链淀粉和赖氨酸含量分别下

降 2.82% ~ 50.28%、3.43% ~ 34.35%,但粗蛋白含量上升 11.50% ~ 20.21%。涝渍条件下,粗蛋白含量和赖氨酸含量随施氮量的增加和农田水位的降低而逐渐增大。

(5)以高产、高效、减污、提质为优化目标,采用熵权 TOPIS 法进行优选,建议我国南方典型涝渍区冬小麦拔节孕穗期受涝后 3 d 内将农田水位降至 -80 cm,冬小麦整个生育期适宜施氮量为 220 kg/hm²,可在保证冬小麦产量、品质的同时提高水氮利用效率,并减轻氮、磷负荷。

参 考 文 献

- [1] 吴洪颜,张佩,徐敏,等. 长江中下游地区冬小麦春季涝渍害灾损风险时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1152 - 1158.
WU Hongyan, ZHANG Pei, XU Min, et al. Spatial-temporal variations of the risk of winter wheat loss suffered from spring waterlogging disaster in the middle and lower Yangtze River reaches[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1152 - 1158. (in Chinese)
- [2] 高敬文,苏瑶,沈阿林. 渍害胁迫下小麦生长的响应机理及调控措施研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4321 - 4330.
GAO Jingwen, SU Yao, SHEN Alin. Research progress of the response mechanism of wheat growth to waterlogging stress and the related regulating managements[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4321 - 4330. (in Chinese)
- [3] 邹家荣,贾忠华,朱卫彬,等. 平原河网地区稻麦轮作农田排水与氮素流失特征研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 321 - 330.
ZOU Jiarong, JIA Zhonghua, ZHU Weibin, et al. Characteristics of drainage and nitrogen losses from rice-wheat rotation fields in plain river network area of Eastern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 321 - 330. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 俄有浩,霍治国. 长江中下游地区暴雨特征及洪涝淹没风险分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 1053 - 1062.
E Youhao, HUO Zhiguo. Rainstorm characteristics and flood inundation risk in the middle-lower reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4): 1053 - 1062. (in Chinese)
- [6] 王宏杰,李文阳,邵庆勤,等. 灌浆期涝害对小麦旗叶光合特性影响及降渍恢复效应[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 460 - 466.
WANG Hongjie, LI Wenyang, SHAO Qingqin, et al. Effect of waterlogging on photosynthetic characteristics of wheat flag leaves during grain filling and recovery effect of water stress relief[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 460 - 466. (in Chinese)
- [7] WU J D, LI J C, WEI F Z, et al. Effects of nitrogen spraying on the post-anthesis stage of winter wheat under waterlogging stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36: 207 - 216.
- [8] 邹娟,朱建强,吴启侠,等. 薹花期不同地下水水位对油菜产量及养分吸收的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4666 - 4669.
ZOU Juan, ZHU Jianqiang, WU Qixia, et al. Effects of water table during bud-blooming period on rapeseed yield and nutrient uptake[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(19): 4666 - 4669. (in Chinese)
- [9] 范雪梅,姜东,戴廷波,等. 花后干旱或渍水逆境下氮素对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 71 - 77.
FAN Xuemei, JIANG Dong, DAI Tingbo, et al. Effects of nitrogen on grain yield and quality in wheat grown under drought or waterlogging stress from anthesis to maturity[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 71 - 77. (in Chinese)
- [10] ALGHORY A, YAZAR A. Evaluation of net return and grain quality characteristics of wheat for various irrigation strategies under the Mediterranean climatic conditions[J]. Agric. Water Manag., 2018, 203: 395 - 404.
- [11] 姜向阳. 冬小麦花后涝渍胁迫对籽粒产量、品质的影响及生理生态基础[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
JIANG Xiangyang. Effects of post-anthesis waterlogging stress on grain yield, grain quality of winter wheat and physiological basis[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [12] 兰涛,姜东,谢祝捷,等. 花后土壤干旱和渍水对不同专用小麦籽粒品质的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 193 - 196.
LAN Tao, JIANG Dong, XIE Zhujie, et al. Effects of post-anthesis drought and waterlogging on grain quality traits in different specialty wheat varieties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 193 - 196. (in Chinese)
- [13] NOIAJUNIOR R S, ASSENG S, GARCIA-VILA M, et al. A call to action for global research on the implications of waterlogging for wheat growth and yield[J]. Agric. Water Manag., 2023, 284: 108334.

- [14] 吴启侠, 朱建强, 程伦国, 等. 基于地下水埋深的江汉平原冬小麦防涝渍排水指标确定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 121-127.
WU Qixia, ZHU Jianqiang, CHENG Lunguo, et al. Determination of groundwater depth-based drainage index against waterlogging and submergence for winter wheat in Jianghan Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 121-127. (in Chinese)
- [15] 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]. Agric. Water Manag., 2018, 208: 307-317.
- [16] 吴启侠, 朱建强, 杨威, 等. 小麦对渍涝的响应及排水指标确定[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 91-98.
WU Qixia, ZHU Jianqiang, YANG Wei, et al. Response of wheat to waterlogging and determination of drainage index[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 91-98. (in Chinese)
- [17] 何平如, 张富仓, 范军亮, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花生长、品质及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 39-46.
HE Pingru, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of soil moisture regulation on growth, quality and water use of cotton under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 39-46. (in Chinese)
- [18] WU H Z, CAO A E. Preparation and adding methods of Nessler's reagent having effects on determination of water quality ammonia nitrogen[J]. Advances in Environmental Technologies, 2013, 726-731: 1362-1366.
- [19] KISHIMOTO N, SOMIYA I, TANIYAMA R. Improved ultraviolet spectrophotometric method for determination of nitrate in natural waters[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2002, 2(2): 213-221.
- [20] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳, 等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报, 1999, 30(3): 72-75.
SHEN Rongkai, WANG Xiugui, ZHANG Yufang, et al. A study on the drainage index for combined control of surface and subsurface waterlogging[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(3): 72-75. (in Chinese)
- [21] 汤广民. 以涝渍连续抑制天数为指标的排水标准试验研究[J]. 水利学报, 1999, 30(4): 26-30.
TANG Guangmin. Experimental study on drainage standard[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(4): 26-30. (in Chinese)
- [22] 邵光成, 俞双恩, 刘娜, 等. 以涝渍连续抑制天数为冬小麦排水指标的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 56-60.
SHAO Guangcheng, YU Shuang'en, LIU Na, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 56-60. (in Chinese)
- [23] 南镇武, 梁斌, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对冬小麦籽粒品质的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 162-167.
NAN Zhenwu, LIANG Bin, LIU Shutang, et al. Effect of long-term fertilization on grain quality of winter wheat[J]. Acta Agricultural Borealis Sinica, 2015, 30(4): 162-167. (in Chinese)
- [24] 刘春奎, 李紫琳, 胡承孝, 等. 叶面喷施钼锌肥对冬小麦籽粒品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(6): 59-67.
LIU Chunkui, LI Zilin, HU Chengxiao, et al. Effect of spraying Mo and Zn fertilizer to leaves on grain quality of winter wheat[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2023, 51(6): 59-67. (in Chinese)
- [25] 缪子梅, 李竞春, 陈栋. 基于熵权 TOPSIS 模型评价涝渍条件下冬小麦水位管理方案[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1306-1311.
MIAO Zimei, LI Jingchun, CHEN Dong. Evaluation of water level management plan of winter wheat under waterlogging conditions based on entropy weighted TOPSIS model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(12): 1306-1311. (in Chinese)
- [26] DING J F, LIANG P, GUO D S, et al. Remedial application of urea eliminates yield losses in wheat waterlogged during stem elongation[J]. Agriculture, 2020, 10(1): 23.
- [27] DEICHMANN M M, ANDERSEN M N, THOMSEN I K, et al. Impacts of controlled drainage during winter on the physiology and yield of winter wheat in Denmark[J]. Agric. Water Manag., 2019, 216: 118-126.
- [28] HUANG C, GAO Y, QIN A Z, et al. Effects of waterlogging at different stages and durations on maize growth and grain yields[J]. Agric. Water Manag., 2022, 261: 107334.
- [29] 肖梦华, 俞双恩, 胡秀君. 涝渍胁迫对冬小麦生长因子变化的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 33-39.
XIAO Menghua, YU Shuang'en, HU Xiujun. Effect of water-logging stress on growth factor change of winter wheat in southern area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(9): 33-39. (in Chinese)
- [30] WOLLMER A C, PITANN B, MUHLING K H. Nutrient deficiencies do not contribute to yield loss after waterlogging events in winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Annals of Applied Biology, 2018, 173: 141-153.
- [31] HOSSAIN M A, ARAKI H, TAKAHASHI T. Poor grain filling induced by waterlogging is similar to that in abnormal early ripening in wheat in Western Japan[J]. Field Crops Research, 2011, 123(2): 100-108.
- [32] ZHANG Y J, LI Y, LIANG T T, et al. Field-grown cotton shows genotypic variation in agronomic and physiological responses to waterlogging[J]. Field Crops Res., 2023, 302: 109067.
- [33] WANG H M, LIU X Y, YANG P, et al. Potassium application promote cotton acclimation to soil waterlogging stress by regulating endogenous protective enzymes activities and hormones contents[J]. Plant Physiol. Bioch., 2022, 185: 336-343.
- [34] 甄城, 漆栋良, 徐茵, 等. 拔节期淹水与施氮量互作对春玉米生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊1): 1-5.
ZHEN Cheng, QI Dongliang, XU Yin, et al. Interactive effects of nitrogen rate and waterlogging at the jointing stage on growth and yield of spring maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Supp. 1): 1-5. (in Chinese)
- [35] GUO W Q, LIU R X, ZHOU Z G, et al. Waterlogging of cotton calls for caution with N fertilization[J]. Acta. Agric. Scand.

- B-S P. , 2010, 60: 450 – 459.
- [36] CUI J T, SHAO G C, KEABETSWE L, et al. Gas exchange traits, growth and yield attributes in winter wheat under waterlogging stress during anthesis[J]. *Int. J. Agric. Biol.* , 2020, 24: 179 – 187.
- [37] SHAO G C, LAN J J, YU S E, et al. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51: 429 – 437.
- [38] 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)
- [39] 景卫华, 罗纨, 温季, 等. 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析[J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1140 – 1146.
JING Weihua, LUO Wan, WEN Ji, et al. Analysis on the effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1140 – 1146. (in Chinese)
- [40] 罗纨, 王嘉诚, 贾忠华, 等. 稻麦轮作高标准农田控制排水对排水与氮素输出削减效果模拟[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 272 – 279, 311.
LUO Wan, WANG Jiacheng, JIA Zhonghua, et al. Simulation of effect of controlled drainage on reducing drainage and nitrogen output from high standard farmland in rice and wheat rotation area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 272 – 279, 311. (in Chinese)

(上接第 356 页)

- [50] SUN S K, WANG Y B, ENGEL B A, et al. Effects of virtual water flow on regional water resources stress: a case study of grain in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 871 – 879.
- [51] WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497 – 498: 1 – 9.
- [52] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 88 – 96.
GAO Zhanyi. Technical achievement and prospect in irrigation scheme development and management in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 88 – 96. (in Chinese)
- [53] 王玉宝, 吴楠, 张富尧, 等. 基于三维水足迹模型的农业用水可持续性评估[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 287 – 295.
WANG Yubao, WU Nan, ZHANG Fuyao, et al. Assessment of agricultural water sustainability based on 3D water footprint model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 287 – 295. (in Chinese)
- [54] WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 324 – 333.
- [55] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1059 – 1069.
ZHUO La, LI Meng, WU Pute, et al. Assessment of crop related physical – virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1059 – 1069. (in Chinese)
- [56] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. *水利学报*, 2020, 51(10): 1189 – 1198.
CAO Xinchun, CUI Simeng, WU Mengyang, et al. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(10): 1189 – 1198. (in Chinese)
- [57] WU S, BEN P, CHEN D, et al. Virtual land, water, and carbon flow in the inter-province trade of staple crops in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling* , 2018, 136: 179 – 186.
- [58] HALL J W. Socio-hydrology in perspective—circa 2018[J]. *Water Resour. Res.* , 2019, 55(3): 1776 – 1777.
- [59] TANG Y H, LUAN X B, SUN J X, et al. Impact assessment of climate change and human activities on GHG emissions and agricultural water use[J]. *Agr. Forest Meteorol.* , 2021, 296: 108218.
- [60] XU Z, CHEN X, LIU J, et al. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO₂ nexus across metacoupled systems [J]. *Nat. Commun.* , 2020, 11(1): 5837.
- [61] DANG Q, LIN X, KONAR M. Agricultural virtual water flows within the United States[J]. *Water Resour. Res.* , 2015, 51(2): 973 – 986.
- [62] D'ODORICO P, CHIARELLI D D, ROSA L, et al. The global value of water in agriculture[J]. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 2020, 117(36): 21985 – 21993.
- [63] SIVAPALAN M, BLÖSCHL G. Time scale interactions and the coevolution of humans and water[J]. *Water Resour. Res.* , 2015, 51(9): 6988 – 7022.
- [64] WU X D, GUO J L, LI C H, et al. Global socio-hydrology: an overview of virtual water use by the world economy from source of exploitation to sink of final consumption[J]. *J. Hydrol.* , 2019, 573: 794 – 810.