

王肖凤,汪吴凯,夏方招,等.水分管理对再生稻稻米品质的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(2):103-111.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.011

水分管理对再生稻稻米品质的影响

王肖凤,汪吴凯,夏方招,孙亚婷,戴泽彰,郑祥波,杨特武,姚璇

华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070

摘要 为探究不同水分管理方式对再生稻稻米品质的影响,以湖北省推广品种两优 6326 为试验材料,在头季种植过程中设置常规水层灌溉和干湿交替灌溉 2 种水分管理方式,检测不同水分条件下再生稻稻米加工品质、外观品质、食味品质、营养品质和卫生安全品质。结果显示:与干湿交替灌溉相比,常规水层灌溉条件下头季稻米的糙米率、精米率、整精米率分别显著增加了 3.78%、4.45%、13.03%,再生季稻米的糙米率、精米率、整精米率分别显著增加了 1.63%、1.26%、8.03%,垩白度显著降低了 14.9%。而不同水分管理方式下再生稻稻米食味品质没有显著差异。另外,常规水层灌溉条件下再生季稻米中铁(Fe)含量显著增加了 127.41%,再生稻植株对铁元素吸收的变化很可能影响了一些重金属在再生稻稻米中的积累。综上,常规水层灌溉比干湿交替灌溉条件下再生稻稻米的加工品质、外观品质、营养品质更好,说明常规水层灌溉有利于提高再生稻稻米品质。

关键词 再生稻;水分管理;常规水层灌溉;干湿交替灌溉;稻米品质;重金属含量

中图分类号 S 511.507 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0103-09

水稻是重要的粮食作物之一,世界上超过 50% 的人以大米为主粮^[1]。现在人们对优质稻米的需求日益升高,因此,为了保障粮食安全,不仅要增加水稻产量,也要提高稻米品质。再生稻是利用头季收割后倒桩上存活的休眠芽萌发成为再生蘖,而后抽穗成熟再收获一季的水稻种植模式^[2]。再生稻种植模式节省人工、肥料、农药,以及具有增产、增收、米质优、绿色等优点^[3],同时再生稻的稻米品质好,符合消费者对优质大米的要求。

稻米品质包括加工品质、外观品质、蒸煮食味品质、营养品质和安全品质等方面评价指标^[4]。加工品质直接影响商品价值,世界每年碾磨过程中损失的稻米有 2 600 亿 t,加工品质好可以减少成熟后研磨加工过程中的损失,增加整精米产量^[5]。研究表明,外观品质的垩白度和加工品质密切相关,稻米垩白部分淀粉结构排列不整齐且有间隙,垩白籽粒容易有裂纹、易碎,因此稻米加工品质会受到影响^[6]。近年来稻米的蒸煮食味和营养品质、安全品质也受到了人们的重视,蒸煮食味和营养品质评价指标主要有淀粉黏度特征值、蛋白质含量、直链淀粉含量、

胶稠度、营养元素含量等,安全品质主要考察的是重金属元素含量^[7]。

稻米品质受遗传因素和环境因子的共同调控,水分是影响稻米品质的重要环境因子之一^[8]。Xu 等^[9]研究发现,水稻移栽后 23~24 d 开始轻度干湿交替灌溉(-15 kPa)使得扬稻 6 号、早优 8 号的整精米率增加,垩白度降低,微量元素含量减少,砷含量减少,镉含量不变。周婵婵等^[10]以粳稻品种沈稻 47 和优 586 为研究材料,发现与浅水层灌溉和浅湿灌溉相比,轻干湿交替灌溉条件使稻米的最高黏度、最终黏度和崩解值增加,消减值减少,改善了稻米的食味品质。罗炳顺等^[11]研究表明半量灌溉条件下稻米整精米率和蛋白质含量显著高于常规水层灌溉。张皓政等^[12]发现轻干湿交替灌溉条件下东农 425 和松粳 6 号的糙米率、整精米率和直链淀粉含量显著高于常规水层灌溉,垩白粒率低于常规水层灌溉。在半干旱地区,与干湿交替灌溉相比,常规水层灌溉能够提高巴基斯坦水稻 Super Basmati、Basmati 2000 和 Shaheen Basmati 稻米的糙米率、精米率、整精米率,降低 Super Basmati 稻米的垩白

收稿日期:2020-08-16

基金项目:华中农业大学自主创新基金项目(2662018JC050);国家重点研发计划专项(2017YFD0301402)

王肖凤,E-mail:18838916907@163.com

通信作者:姚璇,E-mail:xuanyao@mail.hzau.edu.cn

粒率,说明在半干旱地区常规水层灌溉条件下的稻米品质优于干湿交替灌溉^[13]。

目前,关于水分管理措施影响稻米品质的研究较多,主要集中在常规水层灌溉、干湿交替灌溉等水分条件对稻米品质的影响,但是不同水分管理方式对再生稻稻米品质的影响还少有报道。孙亚婷等^[14]研究发现,常规水层灌溉和干湿交替灌溉条件下头季稻的产量无显著差异,而常规水层灌溉条件下再生季的产量显著增加了8.9%,说明常规水层灌溉条件下再生稻产量更高。但是,常规水层灌溉和干湿交替灌溉水分管理对再生稻稻米品质的影响还不清楚。本研究以湖北省推广面积较大的再生稻品种两优6326为材料,比较常规水层灌溉和干湿交替灌溉条件下再生稻的稻米品质,为探寻适合再生稻生产的灌溉方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种与试验处理

试验于2018年再生稻再生季节(3—10月)在湖北省黄冈市蕲春县赤东镇酒铺村试验基地进行。试验田土壤的基本理化性质为:pH值5.09,有机质28.5 g/kg,全氮2.2 g/kg,速效磷16.2 mg/kg,速效钾158.3 mg/kg。供试品种为两系杂交籼稻两优6326,为鄂东南地区再生稻主推品种之一。3月20日播种,4月25日移栽,株行距为13.3 cm×30 cm,双本栽。

本试验采取随机区组设计,每个小区面积为40 m²(5 m×8 m),3次重复。试验设置2个头季稻水分管理方式:常规水层灌溉(continuous flooding, CF)和干湿交替灌溉(alternate wetting and drying, AWD);CF为除分蘖末期进行1次排水晒田外,头季保持水层(3~5 cm);AWD为除头季移栽至返青田间保持浅水层外,其余时期采用AWD,即自浅水层自然落干到土壤水势达-15 kPa时,灌水至形成浅水层,再自然落干至土壤水势达-15 kPa,如此循环。在AWD处理小区安装土壤负压计监测15 cm深处土壤水势,每天12:00记录水势,当读数达到阈值时,灌3~5 cm水层。再生季水分管理为从头季收获后开始保持浅水层至收获前1周。

头季施氮肥200 kg/hm²,于移栽前1 d(基肥)、移栽后7 d(分蘖肥)和幼穗分化期(穗肥)施入,比例

为4:3:3;磷肥(P 40 kg/hm²),作基肥一次性施入;钾肥(K 60 kg/hm²),作基肥一次性施入。再生季肥料管理包括头季齐穗后15 d施入N 75 kg/hm²和K 60 kg/hm²;头季收割后3 d内施入N 75 kg/hm²。以上氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(46.4%N)、过磷酸钙(12% P₂O₅)和氯化钾(60% K₂O)。头季成熟期收获方式为人工收获,留茬高度为40 cm。头季和再生季生育期内病虫害防治按一般高产田管理进行。

1.2 稻米加工品质和外观品质测定

水稻收获、脱粒、晒干并室内贮藏3个月后,参照中华人民共和国国家标准GB/T17891—1999《优质稻谷》测定稻米糙米率、精米率、整精米率。采用万深SC-E大米外观品质检测及稻米品质判定仪测定稻米垩白度、垩白粒率、透明度。

1.3 稻米淀粉黏滞特性

参照国标NY/T 1753—2009,采用澳大利亚Newport Scientific仪器公司生产的Super3型RVA仪(Rapid Viscosity-Analyzer)快速测定淀粉谱黏滞特性,用TCW(Thermal Cycle for Widows)配套软件分析淀粉黏滞性。

1.4 稻米蒸煮与营养品质测定

参照国标GB/2905—1982,用消煮法测定稻米粗蛋白含量。稻米直链淀粉含量参照国标GB/T 15683—1995方法测定。参照国标GB/T 22294—2008方法测定稻米胶稠度。参照国标GB/5009.268—2016方法,检测整精米中微量元素和重金属元素含量。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel统计,用GraphPad软件的t-test和ANOVA方法进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 再生稻各生育期气象数据比较

如表1所示,2018年移栽至齐穗期日均温为24.7℃,齐穗期至齐穗后15 d日均温为28.8℃,齐穗后15 d至成熟期日均温为30.9℃,成熟期至再生季齐穗期日均温为29.2℃,再生季齐穗期至再生季成熟期日均温为21.5℃。移栽至齐穗期降雨量为305.6 mm,齐穗期至齐穗后15 d降雨量为61.3 mm,齐穗后15 d至成熟期降雨量为32.2 mm,成熟

表 1 2018 年再生稻各生育期气象数据

Table 1 The meteorological data during ratoon rice growing periods in 2018

气象指标 Meteorological indicator	移栽—齐穗 Transplanting- Heading	齐穗—齐穗后 15 d Heading-15 days after heading	齐穗后 15 d—成熟 15 days after heading- Maturation	成熟—再生季齐穗 Maturation-Heading in ratoon season	再生季齐穗—再生季成熟 Heading in ratoon season-Maturation in ratoon season
日均温/℃ Daily mean temperature	24.7	28.8	30.9	29.2	21.5
日最低温/℃ Daily minimum temperature	21.4	26.0	26.5	25.4	17.3
日最高温/℃ Daily maximum temperature	28.8	32.9	37.0	34.6	27.1
降雨量/mm Precipitation	305.6	61.3	32.2	39.8	38.6
日均辐射/ (MJ/(m ² ·d)) Daily mean radiation	14.3	16.6	22.6	18.6	13.0

期至再生季齐穗期降雨量为 39.8 mm,再生季齐穗期至再生季成熟期降雨量为 38.6 mm。

2.2 不同水分管理方式对稻米加工品质的影响

由表 2 可知,在常规水层灌溉条件下,再生季稻米的糙米率(79.7%)显著高于头季(74.8%),再生季稻米的精米率(70.4%)显著高于头季(64.2%),再生季稻米的整精米率(66.8%)显著高于头季(51.1%)。在干湿交替灌溉条件下,再生季稻米的糙米率(76.8%)显著高于头季(73.6%),再生季稻米的精米率(67.4%)显著高于头季(63.4%),再生季稻米的整精米率(59.1%)显著高于头季(47.3%)。可见,2 种不同水分管理方式下再生季稻米的加工

品质均比头季稻米好。

不同水分管理方式下,头季稻米的糙米率、精米率、整精米率存在显著差异。与干湿交替灌溉条件相比,常规水层灌溉条件下糙米率显著增加 3.78%,精米率显著增加 4.45%,整精米率显著增加 13.03%。不同水分管理方式对再生季稻米的糙米率、精米率、整精米率有影响,常规水层灌溉条件下的再生季稻米的糙米率比干湿交替灌溉条件下显著增加 1.63%,精米率显著增加 1.26%,整精米率显著增加 8.03%。可见,常规水层灌溉条件下的再生稻米加工品质比干湿交替灌溉条件下

表 2 不同水分管理方式下再生稻加工品质

Table 2 Processing quality of ratoon rice under different water managements

生长季 Growing season	水分管理 Water management	糙米率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head milled rice rate
头季 Main crop	CF	74.8±0.005c	64.2±0.003c	51.1±0.003c
	AWD	73.6±0.004d	63.4±0.001d	47.3±0.006d
再生季 Ratoon crop	CF	79.7±0.002a	70.4±0.001a	66.8±0.003a
	AWD	76.8±0.003b	67.4±0.001b	59.1±0.003b

注:标以不同小写字母的值在 0.05 水平差异显著。CF:常规水层灌溉;AWD:干湿交替灌溉。下同。Note: Values followed by letters are significantly different at 0.05 probability level. CF:Continuous flooding;AWD:Altemate wetting and drying. The same as follows.

2.3 不同水分管理方式对稻米外观品质的影响

如表 3 所示,常规水层灌溉条件下,再生季稻米的垩白度(2.513%)显著低于头季(7.863%),再生季稻米的垩白粒率(0.603%)显著低于头季(3.597%),再生季稻米的透明度(1 级)显著优于头

季(2 级)。干湿交替灌溉条件下,再生季稻米的垩白度(2.953%)比头季(7.717%)显著降低,再生季稻米的垩白粒率(0.520%)比头季(2.973%)显著降低,再生季稻米的透明度(1 级)比头季(2 级)好。可见,2 种不同水分管理方式下再生季稻米外观品质

均优于头季稻米。

2种水分管理方式下头季稻米的垩白度、垩白粒率、透明度无显著差异,头季稻米的垩白度均符合优质籼米三级标准(垩白度 $\leq 8.0\%$)。2种水分管理方式下再生季稻米的垩白粒率、透明度无明显差异,但是常规水层灌溉条件下再生季稻米的垩白度

(2.513%)显著低于干湿交替灌溉(2.953%),降低了14.9%(表3),然而水分条件没有改变再生季稻米的优质大米等级,2种水分管理方式下的再生季稻米垩白度符合优质籼米二级标准(垩白度 $\leq 5.0\%$)。可见,常规水层灌溉较干湿交替灌溉条件下的再生季稻米垩白度更低,外观品质更好。

表3 不同水分灌溉方式下再生稻外观品质

Table 3 Appearance quality of ratoon rice under different water managements

生长季 Growing season	水分管理 Water management	垩白度/% Chalkiness degree	垩白粒率/% Chalkiness grain rate	透明度 Transparency
头季 Main crop	CF	7.863 \pm 0.451a	3.597 \pm 0.271a	2
	AWD	7.717 \pm 0.267a	2.973 \pm 0.223a	2
再生季 Ratoon crop	CF	2.513 \pm 0.048c	0.603 \pm 0.153b	1
	AWD	2.953 \pm 0.148b	0.520 \pm 0.196b	1

2.4 不同水分管理方式对稻米 RVA 谱特征值的影响

稻米 RVA 谱特征值是稻米食味品质的表征。如表4所示,再生季稻米的崩解值显著低于头季稻米,再生季稻米的消减值显著高于头季稻米,再生季稻米糊化温度显著低于头季稻米。不同水分

管理方式下,头季稻米的峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、消减值、糊化温度无显著差异,再生季稻米的也无显著差异(表4)。可见,生长季对于再生稻稻米的淀粉黏滞特性有显著影响,2种水分管理方式下的再生稻稻米的淀粉黏滞特性没有显著差异。

表4 不同灌溉方式下再生稻 RVA 谱特征值

Table 4 RVA profile characteristics of ratoon rice under different water managements

生长季 Growing season	水分管理 Water management	峰值黏度/ (mPa·s) Peak viscosity	热浆黏度/ (mPa·s) Hot viscosity	崩解值/ (mPa·s) Breakdown	最终黏度/ (mPa·s) Final viscosity	消减值/ (mPa·s) Setback	糊化温度/℃ Pasting temperature
头季 Main crop	CF	4 446 \pm 37.9ab	2 027 \pm 7.5ab	2 419 \pm 34.3a	2 941 \pm 11.0a	-1 505.0 \pm 29.9a	78.58 \pm 0.28a
	AWD	4 548 \pm 122.1a	2 096 \pm 37.3a	2 453 \pm 86.1a	3 008 \pm 37.9a	-1 540.0 \pm 90.2a	78.05 \pm 0.25a
再生季 Ratoon crop	CF	3 537 \pm 1.2c	1 702 \pm 31.9c	1 873 \pm 31.4b	2 951 \pm 43.6a	-6 24.3 \pm 43.0b	75.17 \pm 0.42b
	AWD	3 644 \pm 114.8bc	1 756 \pm 42.6bc	1 887 \pm 75.1b	2 992 \pm 66.0a	-6 51.7 \pm 48.8b	74.58 \pm 0.67b

2.5 不同水分管理方式对稻米蒸煮和营养品质的影响

稻米蒸煮和营养品质主要包括蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度。蛋白质含量低,食味品质好,直链淀粉含量低,稻米黏度大。再生季稻米蛋白质含量(CF:5.56%,AWD:5.14%)显著低于头季(CF:7.84%,AWD:7.59%),再生季稻米直链淀粉含量(CF:15.07%,AWD:15.57%)高于头季(CF:12.15%,AWD:12.87%)。

常规水层灌溉和干湿交替灌溉条件下头季稻米的蛋白质含量无显著差异,常规水层灌溉条件下(12.15%)和干湿交替灌溉条件下(12.87%)的直链淀粉含量无显著差异,常规水层灌溉条件下的胶稠度(86.87 mm)低于干湿交替灌溉(108.3 mm),但是无显著差异。不同水分条件下再生季稻米的粗蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度亦无显著差异(表5)。可见,2种水分管理方式下再生稻稻米蒸煮食味品质没有显著变化。

表5 不同水分灌溉方式下再生稻蒸煮和营养品质

Table 5 Cooking and nutritional quality of ratoon rice under different water managements

生长季 Growing season	水分管理 Water management	粗蛋白质含量/% Protein content	直链淀粉含量/% Amylose content	胶稠度/mm Gel consistency
头季 Main crop	CF	7.84 \pm 0.48a	12.15 \pm 0.01b	86.67 \pm 12.91a
	AWD	7.59 \pm 0.12a	12.87 \pm 0.35b	108.30 \pm 7.06a
再生季 Ratoon crop	CF	5.56 \pm 0.26b	15.07 \pm 0.37ab	74.67 \pm 2.19a
	AWD	5.14 \pm 0.49b	15.57 \pm 0.05a	78.00 \pm 5.29a

水稻籽粒中微量元素的类型和含量是评价营养品质的指标之一。水分条件可以通过改变土壤中微量元素的价态影响水稻对微量元素的吸收与转运。如图 1 所示,常规水层灌溉条件下再生季稻米的铁元素含量(19.88 mg/kg)比干湿交替灌溉条件下(8.74 mg/kg)显著增高 127.41%,而 2 种水分条件下再生季稻米中镁、钠、钾、钙、锰、锌元素的含量无显著差异。可见,与干湿交替灌溉相比,常规水层灌

溉增加了再生季稻米的营养元素含量,改善了营养品质。

2.6 不同水分管理方式对稻米重金属含量的影响

由图 2 可知,与干湿交替灌溉相比,常规水层灌溉条件下的再生季稻米中铬(Cr)、镍(Ni)、镉(Cd)、钴(Co)、铅(Pb)含量增加,其中铬(Cr)含量显著增加 91.38%,镍(Ni)含量显著增加 74.96%,钴(Co)含量显著增加 35.70%,而镉(Cd)、铅(Pb)含量的差

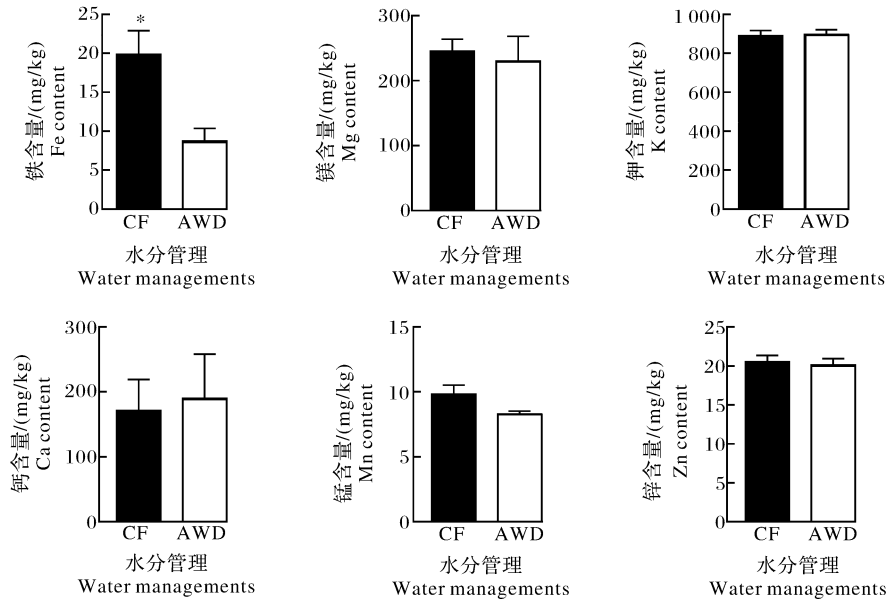


图 1 不同水分方式下再生季稻米营养元素含量

Fig.1 Content of nutrient elements in ratoon rice grain under different water managements

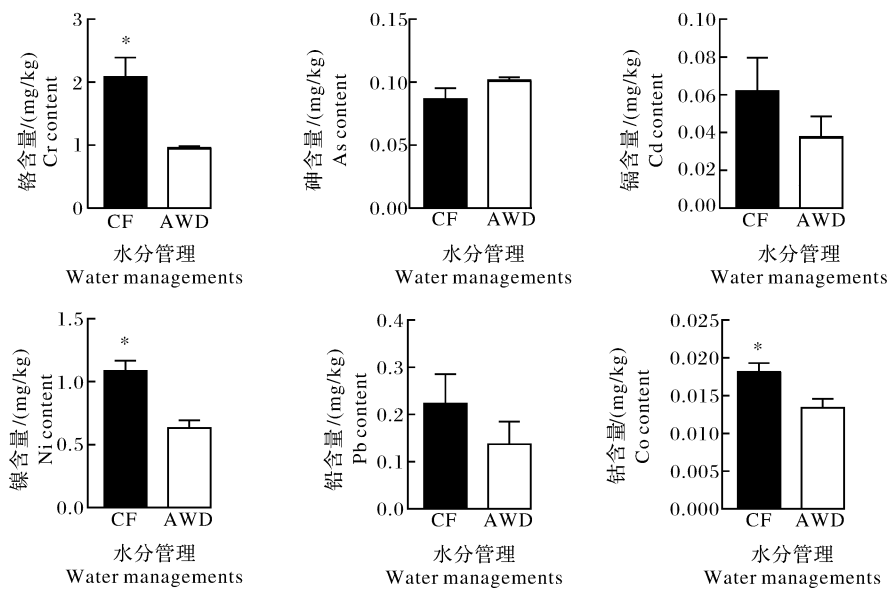


图 2 不同水分方式下再生季稻米重金属元素含量

Fig.2 Content of heavy metal elements in ratoon rice grain under different water managements

异未达到显著水平。另外,2种水分管理方式下再生季稻米中砷(As)的含量无显著差异。常规水层灌溉条件下再生季稻米的铅(Pb)含量(0.22 mg/kg)略微超过国家食品安全标准($Pb \leq 0.2$ mg/kg),而干湿交替灌溉条件下再生季稻米的铅(Pb)含量没有超标。常规水层灌溉条件下稻米的铬(Cr)含量(2.08 mg/kg)超过国家食品安全标准($Cr \leq 1$ mg/kg),而干湿交替灌溉条件下的铬(Cr)含量没有超标。2种水分条件下再生季稻米的镉(Cd)、砷(As)含量均没有超过国家食品安全标准($As \leq 0.2$ mg/kg, $Cd \leq 0.2$ mg/kg)。

3 讨论

3.1 常规水层灌溉条件下再生稻加工品质和外观品质更好

水分管理是重要的栽培管理措施,不同水分条件下稻米品质表现出差异^[15]。不同水分管理方式影响水稻稻米品质已经受到了越来越多的关注。吕银斐等^[16]研究表明,与常规水层灌溉相比,干湿交替灌溉条件下稻米精米率和整精米率显著增高,垩白度和垩白粒率显著降低。潘圣刚等^[17]研究表明,干湿交替灌溉条件下稻米糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量较常规水层灌溉无显著差异,胶稠度显著增加。王春歌等^[18]研究发现轻干湿交替灌溉条件下,水稻淀粉的晶型没有发生改变,淀粉短链部分所占比例增加,中长链和直链淀粉含量减少,最高黏度、热浆黏度和崩解值略高,一定程度上提升了稻米口感。刘凯等^[19]研究了结实期土壤水分和灌溉方式对水稻产量与品质的影响及其产生原因,发现轻干湿交替灌溉条件下稻米最高黏度和崩解值显著提高,垩白度和消减值显著降低,提高了稻米的外观和食味品质,而重干湿交替灌溉使稻米品质变差。轻干湿交替灌溉条件下,结实期籽粒乙烯释放速率降低,灌浆中后期籽粒中蔗糖合酶、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶、淀粉合酶和淀粉分支酶活性增加,从而影响外观和食味品质。田玉聪等^[20]研究了气象条件对再生稻米的影响,发现头季播种-始穗期降水量与再生稻糙米糙米率呈显著正相关,头季齐穗-成熟期降水量与再生稻糙米糙米率、精米率呈显著正相关,与蛋白质含量、直链淀粉含量无显著相关性。头季水分充足有利于提高再生稻的加工品质,但不影响食

味品质。

本研究结果表明,头季常规水层灌溉条件下再生稻头季和再生季的稻米糙米率、精米率、整精米率显著高于干湿交替灌溉;常规水层灌溉条件下的再生季稻米垩白度显著低于干湿交替灌溉。这些结果显示常规水层灌溉方式有利于提高再生稻的加工品质和外观品质,说明再生稻头季的水分条件对再生稻稻米品质有较大影响,与田玉聪等^[20]的研究结果相符。另外,杨建昌^[7]、吕银斐等^[16]、王春歌等^[18]研究发现干湿交替灌溉条件下杂交中稻的稻米品质更好。可能是因为杂交中稻和再生稻生育时期不同,中稻一般5月初播种,灌浆期在8、9月份,再生稻一般3月下旬播种,再生稻灌浆期在7、8月份,受高温影响较大,应深水保穗。因此,常规水层灌溉可能更能保证头季稻灌浆的需水条件,降低高温对主季和再生季稻米品质的影响。常规水层灌溉条件下,无论是再生稻的产量还是品质都优于干湿交替灌溉^[14],说明常规水层灌溉是更适宜再生稻生产的主季水分管理方式。

3.2 不同水分条件影响再生稻稻米重金属的积累

镉(Cd)、砷(As)、铬(Cr)、铅(Pb)、镍(Ni)等重金属具有生物毒性,其中铬(Cr)、镉(Cd)、砷(As)是已知的致癌物质。它们来源于矿石开采、电镀等工业活动,工业废水的任意排放严重污染环境。随着环境污染的加重,水稻的重金属污染问题日益突出,稻米中积累的重金属会进入食物链,从而影响人们的身体健康^[21]。稻米对重金属的吸收受遗传和环境的影响,与水稻栽培时的水分管理关系密切^[22]。水分管理方式能够通过改变土壤的pH和氧化还原电位影响镉(Cd)、砷(As)、铬(Cr)在籽粒中的积累^[23]。Norton等^[24]研究表明,常规水层灌溉条件下水稻籽粒中砷(As)的含量显著增加,镉(Cd)的含量显著减少。Xiao等^[25]研究发现,不加入铬(Cr)的土壤在不同水分管理方式下中稻中浙优1号精米中Cr的含量差异不显著;在铬(Cr)含量为200 mg/kg和400 mg/kg的土壤条件下,常规水层灌溉条件下精米中铬(Cr)含量显著降低。Wan等^[26]研究发现,在酸性土壤中,常规水层灌溉条件下准两优608的籽粒中铅(Pb)含量显著高于干湿交替灌溉,而在弱碱性土壤中,2种水分管理方式下籽粒中铅(Pb)含量无显著差异。

本研究发现,在常规水层灌溉条件下,在湖北省

蕲春地区种植的再生稻品种两优 6326 再生季稻米中除砷 (As) 以外, 铬 (Cr)、镍 (Ni)、镉 (Cd)、钴 (Co)、铅 (Pb) 的含量高于干湿交替灌溉, 且铬 (Cr)、镍 (Ni)、钴 (Co) 的含量显著增加 (图 2)。另外, 我们还发现与干湿交替灌溉相比, 常规水层灌溉条件下再生季稻米中铁 (Fe) 的含量显著升高 (图 1)。水稻中铁 (Fe) 的吸收与转运受其本身价态的影响, Fe^{3+} 在土壤中溶解度低, 而 Fe^{2+} 溶解度高, 植物主要吸收 Fe^{2+} 。土壤中铁 (Fe) 的价态受土壤氧化还原状态的影响^[27]。Slamet-Loedin 等^[28]认为灌水后土壤环境从有氧条件变为无氧条件, Fe^{3+} 被还原为可溶性的 Fe^{2+} , 因此, 常规灌溉条件下有更多的 Fe^{2+} 供植物吸收。值得注意的是, 有研究表明铁 (Fe) 的价态变化会影响重金属的积累。李义纯等^[29]研究发现 FeSO_4 处理增加了糙米中镉 (Cd) 的含量, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 处理减少了糙米中镉 (Cd) 的积累, 说明 Fe^{2+} 更有利于水稻对重金属镉 (Cd) 的吸收。常规水层灌溉条件下土壤氧化还原电位低, 当铁氧化物被还原后, 产生更多的 Fe^{2+} , 溶解度增大, 减少了对重金属的吸附, 重金属会被释放到土壤中^[30]。因此, 常规水层灌溉很可能是通过改变土壤氧化还原状态, 产生更多可供再生稻植株吸收的 Fe^{2+} , 使得再生稻稻米的铁 (Fe) 含量升高。而且, 由于 Fe^{3+} 的相对减少, 铁氧化物对重金属的吸附能力减弱, 导致再生稻植株更容易吸收一些重金属, 积累于再生稻稻米中。

参考文献 References

- [1] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 等. 水稻超高产栽培研究与探讨[J]. 中国稻米, 2012(1): 5-18. ZHANG H C, DAI Q G, HUO Z Y, et al. Cultivation technology and discussion for super high yield of rice[J]. China rice, 2012(1): 5-18(in Chinese).
- [2] 武茹, 王姣梅, 夏胜明, 等. 长江中下游地区杂交中稻再生稻品种适应性的综合评价与筛选[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 19-27. WU R, WANG J M, XIA S M, et al. Comprehensive evaluation and screening of adaptability of mid-season hybrid rice ratooning varieties in the middle-lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 19-27(in Chinese with English abstract).
- [3] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路[J]. 作物学报, 2016, 42(3): 313-319. PENG S B. Dilemma and way-out of hybrid rice during the transition period in China[J]. Acta agronomica sinica, 2016, 42(3): 313-319 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张宏路, 朱安, 胡昕, 等. 稻田常用节水灌溉方式对水稻产量和米质影响的研究进展[J]. 中国稻米, 2018, 24(6): 12-16. ZHANG H L, ZHU A, HU X, et al. Research progress on effects of common water saving irrigation methods in paddy field on rice yield and quality[J]. China rice, 2018, 24(6): 12-16 (in Chinese with English abstract).
- [5] SREENIVASULU N, BUTARDO V M J, MISRA G, et al. Designing climate-resilient rice with ideal grain quality suited for high-temperature stress[J]. Journal of experimental botany, 2015, 66(7): 1737-48.
- [6] LANNING S B, SIEBENMORGEN T J, COUNCE P A, et al. Extreme nighttime air temperatures in 2010 impact rice chalkiness and milling quality[J]. Field crops research, 2011, 124: 132-136.
- [7] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36-46. YANG J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization[J]. Scientia agricultura sinica, 2011, 44(1): 36-46(in Chinese with English abstract).
- [8] 黎用朝, 李小湘. 影响稻米品质的遗传和环境因素研究进展[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(z1): 58-62. LI Y C, LI X X. Advances in studies on genetic and environmental factors influencing rice grain quality[J]. Chinese journal of rice science, 1998, 12(z1): 58-62(in Chinese with English abstract).
- [9] XU Y, GU D, LI K, et al. Response of grain quality to alternate wetting and moderate soil drying irrigation in rice[J/OL]. Crop science, 2019, 59(3): 1261 [2020-08-16]. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.11.0700>.
- [10] 周婵婵, 黄元财, 贾宝艳, 等. 施氮量和灌溉方式的交互作用对东北粳稻稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 357-367. ZHOU C C, HUANG Y C, JIA B Y, et al. Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain quality of Japonica rice in Northeast China[J]. Chinese journal of rice science, 2019, 33(4): 357-367 (in Chinese with English abstract).
- [11] 罗炳顺, 潘圣刚, 林青山, 等. 灌溉模式对华南广适型超级稻产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(6): 208-212. LUO B S, PAN S G, LIN Q S, et al. Effects of irrigation mode on yields, grain qualities and water use efficiency in South China extensive-adaptation super rice[J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2012, 27(6): 208-212 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张皓政. 不同灌溉方式下氮肥施用量对寒地粳稻氮代谢及产质量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. ZHANG H Z. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism, yield and quality of cold-region rice under different irrigation methods [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).

- [13] JABRAN K, RIAZ M, HUSSAIN M, et al. Water-saving technologies affect the grain characteristics and recovery of fine-grain rice cultivars in semi-arid environment[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2017, 24(14): 12971-12981.
- [14] 孙亚婷. 水氮处理对再生稻产量的影响及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. SUN Y T. Effects of water and nitrogen management on the grain yield of ratoon rice and the related mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019(in Chinese with English abstract).
- [15] 蔡一霞. 土壤水分对稻米品质形成的影响及其机理[D]. 扬州: 扬州大学, 2004. CAI Y X. Effect of soil moisture on the development of rice quality and its mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004(in Chinese with English abstract).
- [16] 吕银斐, 任艳芳, 刘冬, 等. 不同水分管理方式对水稻生长、产量及品质的影响[J]. *天津农业科学*, 2016, 22(1): 106-110. LYU Y F, REN Y F, LIU D, et al. Effect of different water managements on growth, grain yield and quality of rice[J]. *Tianjin agricultural sciences*, 2016, 22(1): 106-110(in Chinese with English abstract).
- [17] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 283-289. PAN S G, CAO C G, CAI M L, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2009, 15(2): 283-289(in Chinese with English abstract).
- [18] 王春歌, 韩进华, 黄建, 等. 不同水肥处理对南粳 9108 产量和淀粉结构的影响[J]. *农业工程*, 2018, 8(9): 115-118. WANG C G, HAN J H, HUANG J, et al. Effects of different water fertilizer treatments on yield and starch structure of Nanjing 9108[J]. *Agricultural engineering*, 2018, 8(9): 115-118(in Chinese with English abstract).
- [19] 刘凯, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期土壤水分和灌溉方式对水稻产量与品质的影响及其生理原因[J]. *作物学报*, 2008, 34(2): 268-276. LIU K, ZHANG H, ZHANG S F, et al. Effects of soil moisture and irrigation patterns during grain filling on grain yield and quality of rice and their physiological mechanism[J]. *Acta agronomica sinica*, 2008, 34(2): 268-276(in Chinese with English abstract).
- [20] 田玉聪, 段门俊, 朱杰, 等. 气象条件对优质再生稻米形成的影响[J]. *作物杂志*, 2020(3): 125-131. TIAN Y C, DUAN M J, ZHU J, et al. Effects of meteorological conditions on formation of high quality ratoon rice[J]. *Crops*, 2020(3): 125-131(in Chinese with English abstract).
- [21] 邓思涵, 陈聪颖, 严冬, 等. 水稻重金属污染及其阻控技术研究[J]. *中国水稻*, 2019, 25(4): 27-30. DENG S H, CHEN C Y, YAN D, et al. Study on heavy metal pollution in rice and its control techniques[J]. *China rice*, 2019, 25(4): 27-30(in Chinese with English abstract).
- [22] LIINQUIST B A, ANDERS M M, ADVIENTO-BORBE M A A, et al. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems[J]. *Global change biology*, 2015, 21(1): 407-417.
- [23] WANG M, YANG Y, CHEN W. Manganese, zinc, and pH affect cadmium accumulation in rice grain under field conditions in southern China[J]. *Journal of environmental quality*, 2018, 47(2): 306-311.
- [24] NORTON G J, TRAVIS A J, DANKU J M C, et al. Biomass and elemental concentrations of 22 rice cultivars grown under alternate wetting and drying conditions at three field sites in Bangladesh[J]. *Food and energy security*, 2017, 6(3): 98-112.
- [25] XIAO W, YE X, YANG X, et al. Effects of alternating wetting and drying versus continuous flooding on chromium fate in paddy soils[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2015, 113: 439-445.
- [26] WAN Y, HUANG Q Q, CAMARA A Y, et al. Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 228: 360-369.
- [27] DE L J, MCLAUGHLIN M J, HETTIARACHCHI G M, et al. Cadmium solubility in paddy soils: effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions[J]. *The science of the total environment*, 2011, 409(8): 1489-1497.
- [28] SLAMET-LOEDIN I H, JOHNSON-BEEBOUT S E, IMPA S, et al. Enriching rice with Zn and Fe while minimizing Cd risk[J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6: 121[2020-08-16]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00121>.
- [29] 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 等. 硫酸亚铁和硝酸铁施用对根系土壤-水稻系统中镉转运的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 5143-5150. LI Y C, CHEN Y, TANG M D, et al. Effects of ferrous sulfate and ferric nitrate on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. *Environmental science*, 2020, 41(11): 5143-5150(in Chinese with English abstract).
- [30] YAMAGUCHI N, NAKMURA T, DONG D, et al. Arsenic release from flooded paddy soils is influenced by speciation, Eh, pH, and iron dissolution[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(7): 925-932.

Effects of water management on grain quality of ratooning rice

WANG Xiaofeng, WANG Wukai, XIA Fangzhao, SUN Yating,
DAI Zezhang, ZHENG Xiangbo, YANG Tewu, YAO Xuan

College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Liangyou 6326 as one of the promotion varieties in Hubei Province was used to analyze the effects of water management on grain quality of the ratoon rice. Two different water managements including continuous flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) were applied in the main season. Milling quality, appearance quality, eating and nutritional quality, and health and safety quality of the ratoon rice was assessed under CF and AWD conditions. Under CF condition, the brown rice rate, milled rice rate and head rice rate of the main crop was significantly increased by 3.78%, 4.45%, and 13.03%, respectively. The brown rice rate, milled rice rate and head rice rate of the ratoon crop under the CF condition were 1.63%, 1.26% and 8.03% higher than those under the AWD condition, whereas the chalkiness rate of the ratoon crop was 14.9% lower than that under the AWD condition. No significant difference was found in the eating quality of the ratoon crop under the two different conditions. The Fe content of the ratoon crop was significantly increased by 127.41% under the CF condition compared with that under AWD condition. The change of the Fe uptaking in the ratoon rice plants under the CF condition may result in the accumulation of several heavy metals in grains of the ratoon rice. The ratoon rice has better milling quality, appearance quality and nutritional quality under the CF condition, indicating that the CF condition in main season helps to improve grain quality of the ratoon rice.

Keywords ratoon rice; water management; continuous flooding(CF); alternate wetting and drying (AWD); rice grain quality; heavy metal content

(责任编辑:张志钰)