

## 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

周婵婵<sup>1</sup> 黄元财<sup>1</sup> 贾宝艳<sup>1</sup> 王岩<sup>1</sup> 李瑞峰<sup>1</sup> 王术<sup>1,\*</sup> 冯跃<sup>2</sup> Fugen Dou<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 沈阳农业大学 农学院/农业部东北地区作物栽培科学观测实验站, 沈阳 110866; <sup>2</sup> 中国水稻研究所, 杭州 311401; <sup>3</sup> 德州农工大学 农业生命研究中心, 美国 德克萨斯州 博蒙特, 77713; \*通讯联系人, E-mail: swang123@syau.edu.cn)

### Effect of Interaction Between Nitrogen Rate and Irrigation Regime on Grain Quality of *japonica* Rice in Northeast China

ZHOU Chanchan<sup>1</sup>, HUANG Yuancai<sup>1</sup>, JIA Baoyan<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, LI Ruifeng<sup>1</sup>, WANG Shu<sup>1,\*</sup>, FENG Yue<sup>2</sup>, Fugen DOU<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> College of Agronomy, Shenyang Agricultural University/Northeastern Crop Cultivation Science Observation and Experiment Station in Shenyang, Ministry of Agriculture, P. R. China, Shenyang 110866, China; <sup>2</sup> China National Rice Research Institute, Hangzhou 311401, China; <sup>3</sup> Texas A&M AgriLife Research Center, 1509 Aggie Dr., Beaumont, Texas 77713, USA; \*Corresponding author, E-mail: swang123@syau.edu.cn)

**Abstract:** 【Objective】The objective of this study is to elucidate the effects of nitrogen rates and irrigation regimes and their interactions on grain quality of rice. 【Method】Two rice cultivars, Shendao 47 (an inbred *japonica* cultivar) and Jingyou 586 (a hybrid *japonica* combination), were grown in pots. Four irrigation regimes, continuous flooded (CF), shallow-wet irrigation (SWI), alternate wetting and moderate drying (WMD) and alternate wetting and severe drying (WSD), and two nitrogen (N) rates, normal amount of N (NN, 180 kg/hm<sup>2</sup>), and high amount of N (HN, 220 kg/hm<sup>2</sup>), were designed during the whole growing season. 【Result】The interactions between N rates and irrigation regimes significantly affected grain quality of rice. The milling quality, appearance quality, nutrition quality and cooking and eating quality were better under WMD regime regardless of N rate. Under the NN treatment, the WSD regime decreased head rice rate, gel consistency, the peak viscosity and breakdown but increased the percentage of chalky grain and chalkiness, amylose content and setback as compared with the CF regime. Under the HN treatment, the grain quality of rice was slightly better under the WSD regime than under the CF regime, however, the differences in grain quality between the two irrigation regimes were not significant. The effects of irrigation regimes on total amino acid concentrations varied with N rates and cultivars. Under the NN rate, the WMD regime increased the total amino acid concentrations of both rice cultivars; under the HN rate, the WSD regime significantly increased the total amino acid concentrations of Shendao 47, while Jingyou 586 had higher total amino acid concentrations, and the concentrations of essential and non-essential amino acids followed the same trend as those of total amino acids. 【Conclusion】The WMD improved grain quality of the rice cultivars. To achieve high rice quality, the combinations between WMD and NN, and between WMD and HN were recommended for inbred rice Shendao 47 and hybrid rice Jingyou 586, respectively.

**Key words:** rice; irrigation regime; nitrogen fertilizer; grain quality

**摘 要:** 【目的】探讨不同灌溉方式和氮肥对水稻品质的影响及其互作效应。【方法】以常规粳稻沈稻 47 和杂交粳稻粳优 586 为材料, 进行防雨棚盆栽试验, 设置浅水层灌溉、浅湿灌溉、轻干湿交替灌溉和重干湿交替灌溉 4 种灌溉方式及正常施氮(normal nitrogen, NN, 180 kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(high nitrogen, HN, 220 kg/hm<sup>2</sup>) 2 种氮肥水平, 研究不同肥水处理对稻米品质的影响。【结果】灌溉方式和施氮量对稻米品质有明显的互作效应, 在正常施氮和高氮水平下, 稻米的加工品质、外观品质、营养品质和蒸煮食味品质均以轻干湿交替灌溉为佳。正常施氮水平下, 重干湿交替灌溉下稻米的整精米率、胶稠度、最高黏度和崩解值低于浅水层灌溉, 而其垩白度、垩白粒率、直链淀粉含量及消减值却高于浅水层灌溉。高氮水平下, 重干湿交替灌溉处理的加工品质、外观品质、营养品质和蒸煮食味品质优于浅水层灌溉, 但二者间差异不显著。灌溉方式对氨基酸的影响因施氮量和品种的不同而存在差异。常规施氮水平下, 轻干湿交替灌溉显著提高了稻米的总氨基酸含量; 高氮水平下, 重干湿交替灌溉显著提高了沈稻 47 的氨基酸总量, 而粳优 586 总氨基酸含量则在轻干湿交替灌溉处理下取得较高值, 必需氨基酸和非必需氨基酸含量与总氨基酸含量趋势一致。【结论】轻干湿交替灌溉方式可以改善稻米品质。在本研究条件下, 沈稻 47 和粳优 586 分别以轻干湿交替灌溉和施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 和施氮量为 220 kg/hm<sup>2</sup> 时, 米质较好。

**关键词:** 水稻; 灌溉方式; 氮肥; 稻米品质

中图分类号: S143.1; S511.071

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)04-0357-11

收稿日期: 2019-01-28; 修改稿收到日期: 2019-02-28。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300104)。

稻米品质是一个综合性状,包括加工品质、外观品质、蒸煮食味品质及营养品质几个方面的指标,是品种遗传特性与环境因素共同作用的结果<sup>[1]</sup>。在影响稻米品质的环境因素中,水分和氮素是调控稻米品质形成的两大重要因素。因此,明确氮肥水平和土壤水分对水稻品质的影响及水氮的互作效应,可以为生产上水稻优质高产栽培技术提供理论依据。关于施氮水平和土壤水分对水稻品质的影响,国内外已有相关研究<sup>[1-4]</sup>。刘凯等<sup>[5]</sup>研究认为,结实期土壤水势为-25 kPa时,稻米的最高黏度和崩解值提高,垩白度和消减值显著降低,稻米品质有所改善;但当土壤水势保持在-60~-40 kPa时整精米率、最高黏度和崩解值显著降低,垩白度显著提高,对胶稠度、直链淀粉含量和蛋白质含量影响较小。郭晓红等<sup>[6]</sup>指出,抽穗前进行-10~-8 kPa的间歇控水处理,可以显著提高稻米的整精米率和蛋白质含量,减少垩白粒率和直链淀粉含量。蔡一霞等<sup>[7]</sup>研究表明,结实期水分胁迫可提高精米中蛋白质含量。Toristuka等<sup>[8]</sup>认为,随着全球气候变暖,通过深水栽培来减轻高温对稻米品质造成损害的研究已成为日本科研工作者研究的热点。Hayashi等<sup>[9]</sup>、Chiba等<sup>[10]</sup>研究指出保持10 cm水层栽培可以抑制垩白的发生,提高稻米品质。关于氮肥对稻米品质的影响比较一致的结论为施氮量增加可以提高稻米的整精米率和蛋白质含量,而对垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量和胶稠度的影响结论尚不一致<sup>[11-14]</sup>。纵观前人的研究发现,就氮肥或土壤水分单一因素对稻米品质的影响已作了大量研究,且多集中于南方籼稻和北方常规粳稻,但目前国内外关于水分和氮肥协同对稻米品质,尤其是北方杂交粳稻品质及氨基酸含量影响的研究报道较少。本研究以常规粳稻沈稻47和杂交粳稻粳优586为供试材料,研究了不同灌溉方式和施氮量的交互作用对东北粳稻主要稻米品质性状及氨基酸含量的影响,以期对东北地区水稻优质生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2016年在沈阳农业大学教学科研基地采用盆栽方式进行,在伸缩式防雨棚中人工严格控水,晴天时打开防雨棚。盆栽土壤取自水稻田,土壤质地为中壤土,地力中等,耕作层含有机质26.91 g/kg,全氮1.22 g/kg,速效氮85.59 mg/kg,速效磷40.84 mg/kg,速效钾91.35 mg/kg, pH值为6.8。

供试材料为常规粳稻沈稻47和杂交粳稻粳优586。4月17日播种,5月25日移栽,每盆栽2穴,每穴1苗。

### 1.2 试验设计

试验设为土壤水分和施氮量两因素随机试验。用30 cm(底径)×35 cm(口径)×28 cm(高)的白色塑料盆钵进行盆栽,每盆装过筛的耕作层土壤16 kg。返青活棵后进行4种灌水方式处理:浅水层灌溉(continuous flooded, CF),全生育期保持浅水层(1~2 cm),收获前一周自然落干;浅湿灌溉(shallow-wet irrigation, SWI),移栽后10 d内保持浅水层,10 d后当土壤自然落干至土壤水势为-5~0 kPa时,灌水1~2 cm,保持土壤水分处于饱和状态,在生育期间如此循环;轻干湿交替灌溉(alternate irrigation with wetting and moderate drying, WMD),移栽后10 d内保持浅水层,10 d后当土壤自然落干至土壤水势为-15 kPa时,灌水1~2 cm,在生育期间如此循环;重干湿交替灌溉(alternate irrigation with wetting and severe drying, WSD),移栽后的10 d内保持浅水层,10 d后当土壤自然落干至土壤水势为-30 kPa时,灌水1~2 cm,在生育期间如此循环,土壤水势变化见图1。每种灌溉方式下设2种施氮(尿素)量处理,即正常施氮(NN, 180 kg/hm<sup>2</sup>, 每盆1.4 g 纯N)和高氮(HN, 220 kg/hm<sup>2</sup>, 每盆1.8 g N)。氮肥运筹按照5:3:2于移栽前1 d、移栽后7 d和穗分化期施用。各种方式下磷、钾肥处理均一致,移栽前施用磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾),折合P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为90 kg/hm<sup>2</sup>和K<sub>2</sub>O 75 kg/hm<sup>2</sup>。每个处理20盆,共320盆。在SWI、WMD和WSD处理的盆内安装土壤水分张力计(中国科学院南京土壤研究所生产,每4盆1支)监测土壤水分。每天7:00-8:00、11:00-12:00和16:00-17:00分别记录土壤水分张力计读数,当读数低于设定值时,浇水调节到设定值。

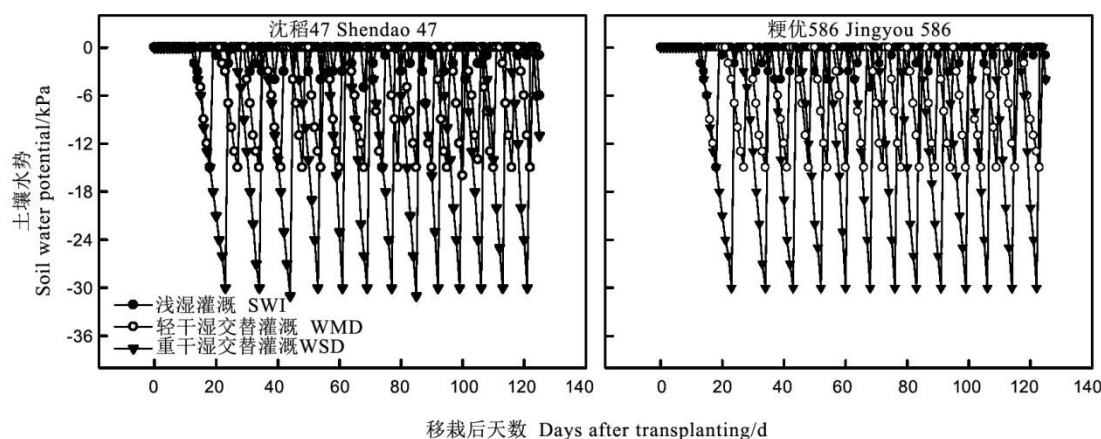
### 1.3 测定内容与方法

#### 1.3.1 稻米主要品质指标

水稻成熟后,剔除生长不正常植株盆钵,每处理收9盆,每3盆一起混合脱粒,风干并存放3个月,用于米质测定。测定前各处理统一用NP-4350型风选机等风量风选。糙米率、精密率、整精米率、垩白粒率、垩白度、胶稠度等品质性状的测定方法参照中华人民共和国国家标准《GB/T1789-1999优质稻谷》;精米中粗蛋白质含量和直链淀粉含量用FOSS-TECATOR公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec 1241 grain analyzer)测定。

#### 1.3.2 稻米中氨基酸含量

用日立L-8800全自动氨基酸分析仪测定氨基



SWI—浅湿灌溉; WMD—轻干湿交替灌溉; WSD—重干湿交替灌溉。

SWI, Shallow-wet irrigation; WMD, Alternate irrigation with wetting and moderate drying; WSD, Alternate irrigation with wetting and severe drying.

图1 不同施氮量和灌溉方式处理下沈稻47和粳优586的土壤水势

Fig. 1. Soil water potential of Shendao 47 and Jingyou 586 under various nitrogen and irrigation treatments.

酸含量。

### 1.3.3 稻米淀粉黏滞性

采用澳大利亚Newport Scientific仪器公司生产的RVA(Rapid Visco Analyzer)及TCW(Thermal Cycle for Windows)配套软件测定分析淀粉黏滞特性。测定按照美国谷物化学协会(AACC)规程(1995-61-02)(米粉含水量为12.00%,样品量为3.0000 g,蒸馏水为25.0000 g)进行。在搅拌中,缸内具体温度变化过程如下:50℃下保持1 min,以11.84℃/min的速率上升到95℃(3.8 min)并保持2.5 min,再以同等速率下降到50℃(3.8 min),50℃下保持1.4 min。搅拌器的转动速率起始10 s为960 r/min,之后保持在160 r/min。

稻米RVA特征值主要用最高黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值(最高黏度-热浆黏度)、消减值(最终黏度-最高黏度)、峰值黏度时间、起始糊化温度等来表示,单位为cP(centipoises)。

### 1.4 数据分析

用 SAS 9.4 软件统计分析数据, SigmaPlot 12.5绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量和灌溉方式对稻米碾磨品质的影响

方差分析表明,糙米率、精米率和整精米率在品种、灌溉方式(糙米率除外)间存在极显著差异,且各指标在品种×氮肥水平(糙米率除外)、品种×灌溉方式(糙米率)、氮肥水平×灌溉方式及品种×氮肥水平×灌溉方式互作条件下也达到显著差异(表1)。施氮量对稻米碾磨品质的影响因灌溉方式的不同

而异,或灌溉方式对稻米碾磨品质的影响因施氮量的不同而异。灌溉方式和氮肥水平对加工品质的影响因品种而异,正常施氮水平下,与浅水层灌溉相比,浅湿灌溉和轻干湿交替灌溉提高了沈稻47的糙米率、精米率和整精米率,但各处理间没有明显差异,重干湿交替灌溉显著降低了沈稻47的精米率和整精米率;轻干湿交替和重干湿交替灌溉显著提高了粳优586的精米率和整精米率。高氮水平下,浅湿灌溉、轻干湿交替灌溉和重干湿交替灌溉处理的糙米率、精米率和整精米率显著高于淹水灌溉,但浅湿灌溉、轻干湿交替灌溉和重干湿交替灌溉处理间无显著差异,两品种趋势一致。在各氮肥水平下,沈稻47的糙米率、精米率和整精米率均以浅湿灌溉或轻干湿交替灌溉最高,而粳优586以轻干湿交替最高。由表1还可以看出,同一灌溉方式下增施氮肥有利于提高稻米的整精米率。

### 2.2 施氮量和灌溉方式对稻米外观品质的影响

两品种稻米粒长/粒宽在各处理组间均无显著差异(表2)。氮肥水平和灌溉方式对垩白粒率和垩白度存在着显著的互作效应,不同灌溉方式下稻米垩白粒率和垩白度的变化因氮肥水平的不同而异。正常施氮水平下,与浅水层灌溉相比,浅湿灌溉显著降低了沈稻47的垩白粒率,其他处理间无显著差异。高氮水平下,浅湿灌溉、轻干湿交替灌溉和重干湿交替灌溉下沈稻47的垩白粒率显著降低。两种施氮水平下,轻干湿交替灌溉均显著降低了粳优586的垩白粒率,浅湿灌溉、重干湿交替灌溉和常规灌溉间无显著差异。与浅水层灌溉相比,重干湿交替灌溉在正常施氮水平下使稻米的垩白度有所提高,而在高氮水平下使其垩白度有所降低;轻干

表 1 施氮量和灌溉方式对稻米碾磨品质的影响

Table 1. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on rice grain milling quality.				%
品种 Cultivar	处理 Treatment	糙米率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head rice rate
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	81.83 a	74.35 a	67.81 b
	NN-SWI	82.41 a	75.56 a	69.91 a
	NN-WMD	81.95 a	74.75 a	68.14 ab
	NN-WSD	81.71 a	70.41 b	59.85 c
	HN-CF	80.54 b	66.99 c	54.08 d
	HN-SWI	82.34 a	75.51 a	69.14 ab
	HN-WMD	82.02 a	75.31 a	69.01 ab
	HN-WSD	81.87 a	74.69 a	67.71 b
	平均值 Mean	81.84 B	73.45 B	65.71 B
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	82.28 abc	73.15 cd	64.92 bc
	NN-SWI	81.29 c	72.01 d	63.36 c
	NN-WMD	82.88 ab	75.23 ab	69.21 a
	NN-WSD	82.86 ab	75.40 ab	69.36 a
	HN-CF	81.84 bc	74.31 bc	66.31 b
	HN-SWI	83.24 a	75.72 ab	69.04 a
	HN-WMD	83.08 a	76.04 a	69.68 a
	HN-WSD	82.40 abc	74.47 bc	68.54 ab
	平均值 Mean	82.49 A	74.55 A	67.56 A
方差分析 Analysis of variance				
品种 Cultivar (C)		**	**	**
施氮量 Nitrogen rate (N)		ns	ns	*
灌溉方式 Irrigation regime (I)		ns	**	**
C×N		ns	**	**
C×I		ns	**	**
N×I		*	**	**
C×N×I		*	**	**

CF—浅水层灌溉; SWI—浅湿灌溉; WMD—轻干湿交替灌溉; WSD—重干湿交替灌溉; NN—中氮; HN—高氮; 不同大小写字母分别表示品种间和同一品种不同处理间在0.05水平上差异显著; \*表示在0.05 水平显著, \*\*表示0.01水平显著; ns表示在0.05水平不显著。下同。

CF, Continuous flooded; SWI, Shallow-wet irrigation; WMD, Alternate irrigation with wetting and moderate drying; WSD, Alternate irrigation with wetting and severe drying; NN, Normal amount of nitrogen; HN, High amount of nitrogen. Values followed by different uppercase and lowercase letters mean significant difference at 0.05 level among varieties or treatments for a given variety, respectively; \*Significant at 0.05 level; \*\*Significant at 0.01 level; ns, Not significant at 0.05 level. The same as below.

湿交替灌溉显著降低了稻米的垩白度, 两品种趋势一致。在各氮素水平下, 两品种稻米的垩白粒率和垩白度均以轻干湿交替灌溉处理最低。在各处理组合中, 沈稻47的垩白粒率和垩白度均以NN+WMD或HN+WMD最低, 粳优586则以HN+WMD最低。表2显示, 同一灌溉方式下, 增施氮肥有利于降低稻米的垩白度。

2.3 施氮量和灌溉方式对稻米营养品质的影响

稻米蛋白质和各种氨基酸含量是评价稻米营养品质的主要指标。通过比较不同水肥处理下精米中蛋白质含量可知, 同一灌溉方式处理下, 增施氮肥有利于提高精米中蛋白质含量; 在两种氮肥水平下, 沈稻47在重干湿交替灌溉处理下精米中蛋白质含量均高于相同氮素处理下的其他水分处理, 但与轻干湿交替灌溉间的差异未达到统计显著水平; 无论是在正常施氮水平或是高氮水平下, 粳优586在轻干湿交替灌溉处理下精米中蛋白质含量均高于相同氮素处理下的其他水分管理, 但与重干湿交替灌溉间的差异未达到统计显著水平(表3)。从总趋势来看, 干湿交替灌溉处理条件下两个供试品种的总

蛋白含量均有明显升高。

方差分析表明, 氨基酸总量、必需氨基酸和非必需氨基酸在氮肥水平和灌溉方式间存在极显著差异, 且在品种×氮肥水平、品种×灌溉方式、氮肥水平×灌溉方式及品种×氮肥水平×灌溉方式互作条件下均达到显著差异。从表3可以看出, 施氮量和灌溉方式对氨基酸总量、必需氨基酸和非必需氨基酸总量的影响趋势基本一致。正常施氮水平下, 与浅水层灌溉相比, 轻干湿交替灌溉显著提高了氨基酸、必需和非必需氨基酸总量, 但与重干湿交替灌溉处理差异不显著, 两供试品种趋势一致; 高氮水平下, 重干湿交替灌溉处理显著提高了沈稻47精米中氨基酸、必需和非必需氨基酸总量, 而粳优586在轻干湿交替灌溉处理下显著高于其他水分处理。此外, 在同一灌溉方式下, 增施氮肥明显提高两供试品种精米中氨基酸、必需和非必需氨基酸总量。

施氮水平和灌溉方式对水稻精米中7种必需氨基酸的影响结果见表4。除蛋氨酸外, 精米中其他6种必需氨基酸含量在施氮水平和灌溉方式间存在极显著差异, 且灌溉方式和施氮量对精米中缬氨

表 2 施氮量和灌溉方式对稻米外观品质的影响

Table 2. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on rice grain appearance quality.

品种 Cultivar	处理 Treatment	粒长/宽 Grain length/width	垩白粒率 Chalky grain rate/%	垩白度 Chalkiness/%
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	1.98 a	5.24 bc	1.89 b
	NN-SWI	1.97 a	3.51 d	1.84 b
	NN-WMD	1.99 a	4.80 bcd	0.92 e
	NN-WSD	2.02 a	5.76 b	2.11 a
	HN-CF	2.07 a	7.18 a	1.54 c
	HN-SWI	1.99 a	4.11 cd	1.13 d
	HN-WMD	1.99 a	4.60 bcd	0.93 e
	HN-WSD	2.01 a	5.08 bc	1.04 d
	平均值 Mean	2.00 B	5.04 B	1.43 B
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	2.05 a	16.54 ab	4.15 a
	NN-SWI	2.05 a	16.12 b	3.54 b
	NN-WMD	2.08 a	14.39 c	3.19 bc
	NN-WSD	2.06 a	17.41 ab	4.17 a
	HN-CF	2.08 a	17.77 a	3.25 bc
	HN-SWI	2.07 a	16.69 ab	3.46 b
	HN-WMD	2.07 a	14.17 c	2.84 c
	HN-WSD	2.06 a	16.39 ab	3.21 bc
	平均值 Mean	2.06 A	16.19 A	3.48 A
方差分析 Analysis of variance				
品种 Cultivar (C)		*	**	**
施氮量 Nitrogen rate (N)		ns	ns	**
灌溉方式 Irrigation regime (I)		ns	**	**
C×N		ns	ns	ns
C×I		ns	**	**
N×I		ns	**	*
C×N×I		ns	ns	*

表 3 施氮量和灌溉方式对稻米蛋白质和总氨基酸含量的影响

Table 3. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on rice grain protein contents and total amino acid concentrations.

品种 Cultivar	处理 Treatment	蛋白质含量 Protein contents	总氨基酸含量 Total amino acid	必需氨基酸含量 Essential amino acid	非必需氨基酸含量 Non-essential amino acid
		%	concentrations/(mg g <sup>-1</sup> )	concentrations/(mg g <sup>-1</sup> )	concentrations/(mg g <sup>-1</sup> )
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	6.33 e	60.76 f	18.43 d	42.33 f
	NN-SWI	6.93 d	66.09 e	20.25 c	45.84 e
	NN-WMD	7.30 bc	72.19 bc	21.93 b	50.26 bc
	NN-WSD	7.47 b	69.84 cd	20.97 bc	48.87 cd
	HN-CF	7.00 cd	68.88 d	20.83 bc	48.05 d
	HN-SWI	7.47 b	69.31 d	21.38 bc	47.93 d
	HN-WMD	7.90 a	73.04 b	21.45 b	51.60 b
	HN-WSD	8.17 a	81.12 a	24.45 a	56.68 a
	平均值 Mean	7.33 B	70.15 A	21.21 A	48.94 A
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	6.83 d	58.87 f	17.61 e	41.26 f
	NN-SWI	7.50 bc	64.33 e	19.37 d	44.96 e
	NN-WMD	7.80 b	70.09 cd	21.25 c	48.84 c
	NN-WSD	7.60 bc	70.78 cd	21.23 c	49.54 c
	HN-CF	7.27 c	68.26 d	21.28 c	46.98 d
	HN-SWI	7.60 bc	72.33 c	22.15 c	50.19 c
	HN-WMD	8.27 a	80.81 a	24.80 a	56.00 a
	HN-WSD	8.13 a	76.92 b	23.48 b	53.44 b
	平均值 Mean	7.63 A	70.30 A	21.40 A	48.90 A
方差分析 Analysis of variance					
品种 Cultivar (C)		**	ns	ns	ns
施氮量 Nitrogen rate (N)		**	**	**	**
灌溉方式 Irrigation regime (I)		**	**	**	**
C×N		*	**	**	*
C×I		ns	**	*	**
N×I		ns	*	*	*
C×N×I		*	**	**	**

表4 施氮量和灌溉方式对稻米必需氨基酸含量的影响

Table 4. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on essential amino acid concentrations in rice grains.								mg/g
品种 Cultivar	处理 Treatment	苏氨酸含量 Thr content	缬氨酸含量 Val content	蛋氨酸含量 Met content	异亮氨酸含量 Ile content	亮氨酸含量 Leu content	苯丙氨酸含量 Phe content	赖氨酸含量 Lys content
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	1.77 d	4.57 c	1.12 a	1.77 e	3.28 e	3.14 d	2.77 c
	NN-SWI	1.96 cd	4.74 c	1.23 a	1.94 cde	3.66 d	3.49 bc	3.23 b
	NN-WMD	2.26 b	5.13 b	1.17 a	2.19 ab	4.19 b	3.85 ab	3.13 bc
	NN-WSD	2.11 bc	5.12 b	1.30 a	2.07 bc	3.84 bcd	3.43 cd	3.10 bc
	HN-CF	2.07 bc	5.21 b	1.12 a	2.00 bcd	3.74 cd	3.60 bc	3.11 bc
	HN-SWI	2.1b c	5.09 b	1.23 a	2.12 abc	4.03 bc	3.59 bc	3.23 b
	HN-WMD	2.17 bc	5.11 b	1.36 a	1.80 de	4.13 b	3.63 bc	3.24 b
	HN-WSD	2.59 a	5.62 a	1.20 a	2.32 a	4.79 a	4.16 a	3.76 a
	平均值 Mean	2.13 B	5.07 A	1.22 A	2.03 B	3.96 B	3.61 A	3.20 A
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	1.76 d	4.27 e	1.22 a	1.68 d	3.15 d	2.93 e	2.59 d
	NN-SWI	2.13 c	4.64 d	1.18 a	1.80 d	3.45 d	3.28 d	2.90 c
	NN-WMD	2.16 c	5.01 cd	1.17 a	2.08 c	4.10 c	3.66 bc	3.06 bc
	NN-WSD	2.24 bc	4.96 cd	1.33 a	2.10 c	4.04 c	3.55 cd	3.02 bc
	HN-CF	2.07 c	5.21 abc	1.17 a	2.22 bc	4.10 c	3.52 cd	2.99 bc
	HN-SWI	2.21 c	5.08 bc	1.36 a	2.15 c	4.32 bc	3.83 abc	3.20 bc
	HN-WMD	3.07 a	5.42 ab	1.25 a	2.60 a	4.89 a	4.07 a	3.50 a
	HN-WSD	2.50 b	5.54 a	1.28 a	2.38 b	4.56 b	3.96 ab	3.26 ab
	平均值 Mean	2.27 A	5.02 A	1.25 A	2.13 A	4.08 A	3.60 A	3.06 B
方差分析 Analysis of variance								
品种 Cultivar (C)		**	ns	ns	**	*	ns	*
施氮量 Nitrogen rate (N)		**	**	ns	**	**	**	**
灌溉方式 Irrigation regime (I)		**	**	ns	**	**	**	**
C×N		ns	*	ns	**	**	ns	ns
C×I		*	ns	ns	**	ns	ns	ns
N×I		ns	**	ns	*	ns	*	ns
C×N×I		**	ns	ns	**	**	*	ns

Thr, Threonine; Val, Valine; Met, Methionine; Ile, Isoleucine; Leu, Leucine; Phe, Phenylalanine; Lys, Lysine.

酸、异亮氨酸和苯丙氨酸的影响存在着显著的互作效应。在正常施氮水平下，与浅水层灌溉相比，轻干湿交替灌溉显著提高了精米中苏氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸的含量，但与重干湿交替灌溉处理没有显著差异，两品种趋势一致；高氮水平下，重干湿交替灌溉显著提高了沈稻47精米中除蛋氨酸外其他6种必需氨基酸的含量，除异亮氨酸和亮氨酸外，其余必需氨基酸含量在常规灌溉、浅湿灌溉和轻干湿交替灌溉处理间差异不显著；与浅水层灌溉相比，轻干湿交替灌溉显著提高了粳优586精米中的苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸的含量，但两者在缬氨酸含量上的差异未达显著水平。蛋氨酸在不同处理间差异不显著。此外，增施氮肥有利于提高各必需氨基酸的含量。

由表5可知，水肥处理对两个品种精米中各非必需氨基酸含量影响显著，且氮肥水平、灌溉方式和品种3个因素间存在着不同程度的互作效应，施

氮水平与灌溉方式两因素间在天门冬氨酸、丝氨酸和酪氨酸上的互作效应均达极显著水平。常规施氮水平下，与常规灌溉相比，轻干湿交替灌溉显著提高了水稻精米中10种非必需氨基酸的含量，但与重干湿交替灌溉间差异不显著，两品种趋势一致；高氮水平下，重干湿交替灌溉显著提高了沈稻47精米中除天门冬氨酸外其余9种非必需氨基酸含量，轻干湿交替灌溉显著提高了粳优586精米中10种非必需氨基酸的含量，但与重干湿交替灌溉处理没有显著差异(天门冬氨酸、谷氨酸和甘氨酸除外)。此外，在同一灌溉方式下，各非必需氨基酸含量随着施氮量增加而增加。在各处理组合中，沈稻47精米中各非必需氨基酸含量以HN+WSD最大，粳优586以HN+WMD或HN+WSD最大。

**2.4 施氮量和灌溉方式对蒸煮食味品质的影响**

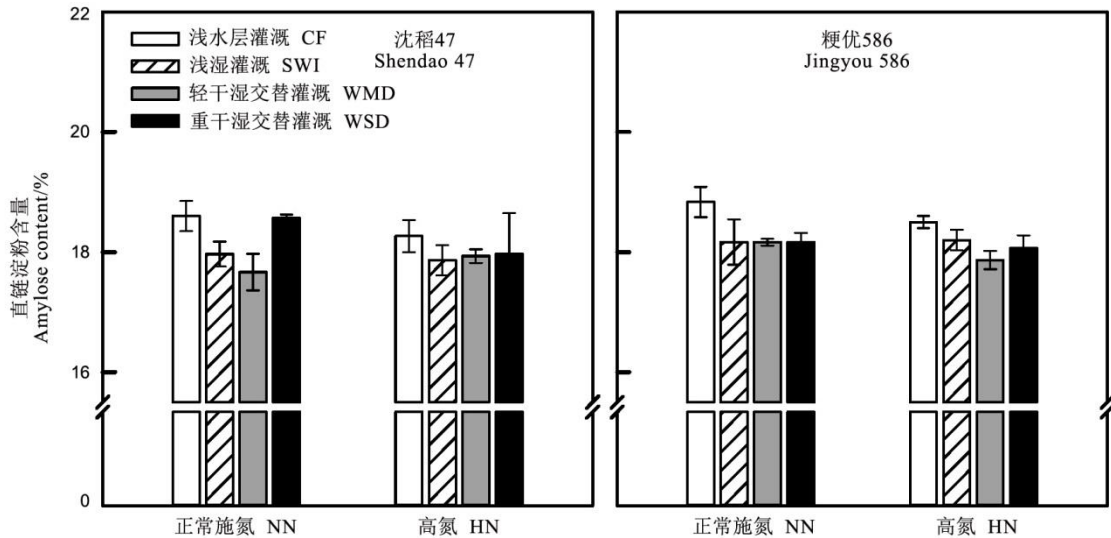
**2.4.1 对稻米直链淀粉含量的影响**

图2为两供试品种在不同氮肥水平和灌溉方式处理下直链淀粉含量的变化。从图中可以看出，灌

表 5 施氮量和灌溉方式对稻米非必需氨基酸含量的影响

Table 5. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on non-essential amino acid concentrations in rice grain. mg/g											
品种	处理	天门冬氨酸含量	丝氨酸含量	谷氨酸含量	甘氨酸含量	丙氨酸含量	半胱氨酸含量	酪氨酸含量	组氨酸含量	精氨酸含量	脯氨酸含量
Cultivar	Treatment	Asp content	Ser content	Glu content	Gly content	Ala content	Cys content	Tyr content	His content	Arg content	Pro content
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	4.82 d	2.62 d	9.24 e	2.35 d	2.77 e	6.56 a	4.57 d	0.96 c	4.52 e	3.92 d
	NN-SWI	5.29 c	2.87 cd	10.28 d	2.65 c	3.15 d	6.38 a	4.66 cd	0.98 bc	4.97 d	4.62 c
	NN-WMD	5.95 b	2.95 cd	11.64 b	2.84 bc	3.54 b	6.45 a	4.91 bcd	1.33 a	5.62 c	5.04 c
	NN-WSD	5.74 b	3.01 c	10.91 c	2.73 bc	3.31 bcd	6.56 a	4.81 bcd	1.05 bc	5.52 c	5.24 c
	HN-CF	6.00 b	3.53 b	10.27 d	2.99 b	3.33 bcd	5.96 b	5.08 b	1.17 abc	4.97 d	4.75 c
	HN-SWI	5.66 b	2.91 cd	10.85 c	2.66 c	3.24 cd	5.89 b	4.96 bc	1.20 ab	5.39 c	5.17 c
	HN-WMD	5.86 b	3.97 a	11.57 b	2.87 bc	3.48 bc	5.77 b	5.02 b	1.15 abc	6.09 b	5.83 b
	HN-WSD	6.71 a	3.62 b	12.94 a	3.26 a	3.89 a	5.99 b	5.55 a	1.31 a	6.45 a	6.95 a
	平均值 Mean	5.75 A	3.19 A	10.96 B	2.79 A	3.34 A	6.19 A	4.99 A	1.14 A	5.44 A	5.19 A
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	4.54 e	2.76 b	9.21 e	2.33 f	2.85 d	6.19 ab	4.38 d	0.87 d	4.21 d	3.93 e
	NN-SWI	5.04 d	2.83 b	10.34 d	2.43 ef	3.34 c	6.01 b	4.82 c	0.92 cd	4.75 c	4.48 de
	NN-WMD	5.45 c	2.98 b	11.13 c	2.79 cd	3.39 bc	6.15 ab	5.24 ab	1.08 bc	5.24 bc	5.41 abc
	NN-WSD	5.53 c	2.97 b	11.26 c	2.63 de	3.36 bc	6.71 a	5.00 bc	1.08 bc	5.41 b	5.58 ab
	HN-CF	5.44 c	2.92 b	10.48 d	2.54 def	3.29 c	5.94 b	5.18 ab	1.14 ab	5.15 bc	4.90 cd
	HN-SWI	5.57 c	3.46 a	11.45 c	2.91 bc	3.54 bc	6.46 ab	5.15 ab	1.22 ab	5.24 bc	5.19 bc
	HN-WMD	6.61 a	3.60 a	13.71 a	3.33 a	4.02 a	6.08 b	5.20 ab	1.34 a	6.25 a	5.88 a
	HN-WSD	6.25 b	3.50 a	12.24 b	3.06 b	3.83 ab	6.54 ab	5.39 a	1.24 ab	5.99 a	5.41 abc
	平均值 Mean	5.55 B	3.13 A	11.23 A	2.75 A	3.45 A	6.26 A	5.05 A	1.11 A	5.28 B	5.10 A
方差分析 Analysis of variance											
品种 Cultivar (C)		**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
施氮量 Nitrogen rate (N)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
灌溉方式 Irrigation regime (I)		**	**	**	**	**	*	**	**	**	**
C×N		Ns	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	*
C×I		*	*	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	*
N×I		**	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
C×N×I		**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	**

Asp, Asparagine; Ser, Serine; Glu, Glutamine; Gly, Glycine; Ala, Alanine; Cys, Cystine; Tyr, Tyrosine; His, Histidine; Arg, Arginine; Pro, Proline.



CF, Continuous flooded; SWI, Shallow-wet irrigation; WMD, Alternate irrigation with wetting and moderate drying; WSD, Alternate irrigation with wetting and severe drying; NN, Normal amount of nitrogen; HN, High amount of nitrogen.

图 2 施氮量和灌溉方式对稻米直链淀粉含量的影响

Fig. 2. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on amylose content in milled rice.

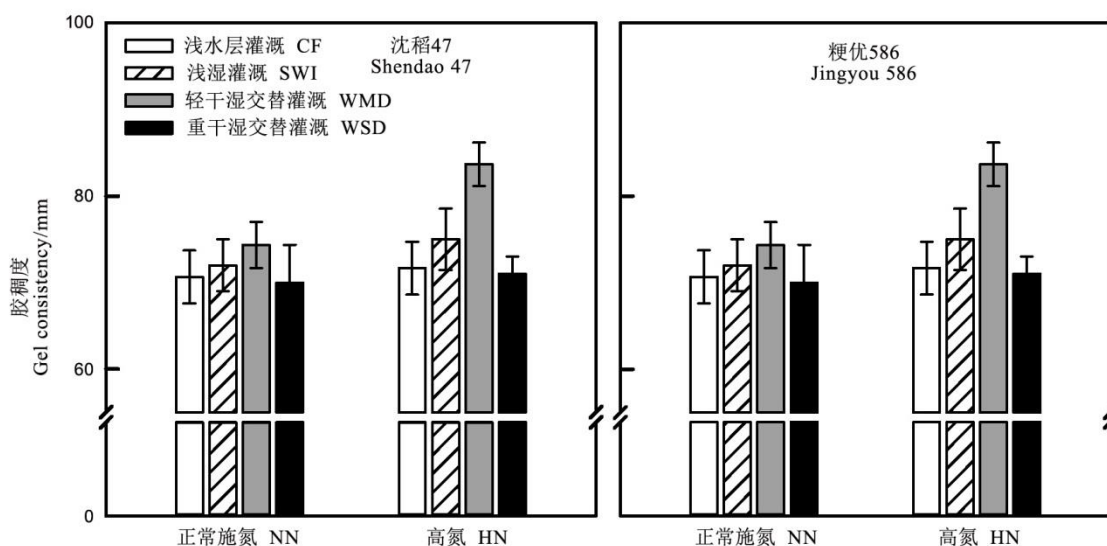
溉方式对稻米直链淀粉含量影响较小。在正常施氮水平下，浅水层灌溉显著提高了稻米直链淀粉含量（沈稻47重干湿交替灌溉处理除外），其他土壤水分处理间无显著差异，两品种趋势一致；在高氮水平下，水分胁迫处理的直链淀粉含量有所降低，但各灌溉方式处理间均未达到显著水平，两品种趋势一

致。此外，在同一灌溉方式处理下，两供试品种的直链淀粉含量均随着施氮量增加而减少。

2.4.2 对稻米胶稠度的影响

图 3 为两种氮肥水平下两个供试品种在不同灌溉方式处理下稻米胶稠度的变化。在正常施氮水平下，与浅水层灌溉处理相比，水分胁迫处理提高





CF, Continuous flooded; SWI, Shallow-wet irrigation; WMD, Alternate irrigation with wetting and moderate drying; WSD, Alternate irrigation with wetting and severe drying; NN, Normal amount of nitrogen; HN, High amount of nitrogen.

图3 施氮量和灌溉方式对稻米胶稠度的影响

Fig. 3. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on gel consistency of milled rice.

了稻米的胶稠度,但各处理间差异不显著;在高氮水平下,轻干湿交替灌溉显著提高了稻米的胶稠度,其他处理间差异不显著,两品种趋势一致。从总的趋势来看,在各氮素水平下,稻米的胶稠度均以轻干湿交替灌溉处理的最高。从图3还可见,同一灌溉方式处理下,增施氮肥有利于提高胶稠度。

#### 2.4.3 对稻米淀粉 RVA 谱特征参数的影响

统计分析表明,稻米淀粉 RVA 谱特征值最高黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值、消减值均于品种间、施氮量间、灌溉方式间差异达极显著水平,且在品种×氮肥水平×灌溉方式互作效应上差异达显著水平(表6)。说明淀粉 RVA 谱特征值受到品种、氮肥水平和灌溉方式的明显影响。随土壤水势的降低,在同一施氮水平下,两品种的最高黏度、最终黏度和崩解值呈先增后减的趋势,消减值的绝对值呈先减后增趋势,而热浆黏度和起始糊化温度无明显变化规律。在同一施氮水平下,与浅水层灌溉相比,轻干湿交替灌溉处理显著增加了最高黏度、最终黏度和崩解值,同时显著降低了消减值。同一灌溉方式处理下,增施氮肥降低了最高黏度、热浆黏度、最终黏度和崩解值,增加了消减值。

### 3 讨论

水、肥在水稻生长发育过程中是相互影响和制约的两个因子,两者的协调作用影响水稻的生理特性,进而影响水稻的产量和品质。如何减少水稻灌

溉用水,高效利用氮肥来获得高产优质稻米的理论和技术已有较多报道<sup>[1-4]</sup>,但多集中在单因子效应方面,有关水分与氮肥协同作用于米质的研究较少,且结论不一。张自常等<sup>[15]</sup>研究表明,在中氮和高氮水平下,轻干湿交替灌溉显著提高了稻米的整精米率、崩解值和外观品质,在中氮水平下,重干湿交替灌溉的稻米品质低于常规灌溉,而在高氮水平下,重干湿交替灌溉的稻米品质高于常规灌溉,但两者间差异不显著。蔡一霞等<sup>[16]</sup>指出,正常施氮水平下,轻度水分胁迫使整精米率有所提高,但显著增加了稻米的垩白度和垩白粒率,高氮水平下,轻度水分胁迫可以改善稻米品质,然而,无论在何种氮素水平下,水分胁迫对直链淀粉含量无明显影响,但提高了粗蛋白含量。李国生等<sup>[17]</sup>研究认为,在各种氮肥水平下,稻米的加工品质、外观品质和食味品质均以土壤轻度落干处理较高,在低氮水平下,土壤重度落干降低了稻米的加工品质、外观品质和食味品质,但增施氮肥有“以肥补水”的效应,可降低干旱胁迫对稻米品质造成的损失。本研究结果表明,在正常施氮和高氮水平下,稻米的加工品质和外观品质均以轻干湿交替灌溉处理的较高或较优。在正常施氮水平下,重干湿交替灌溉处理降低了稻米的加工品质和外观品质,但在高氮水平下,重干湿交替灌溉与常规灌溉相比,加工品质和外观品质有所改善,糙米率、精米率、整精米率提高,垩白粒率和垩白度降低。表明灌溉方式和施氮量对稻米品质的影响有明显的互作效应。



表 6 施氮量和灌溉方式对稻米淀粉 RVA 谱特征值的影响  
Table 6. Effect of nitrogen rates and irrigation regimes on RVA profile characteristics value of rice starch.

品种 Cultivar	处理 Treatment	最高黏度 PV/cP	热浆黏度 TV/cP	最终黏度 FV/cP	崩解值 BD/cP	消减值 SB/cP	起始糊化温度 PaT/℃
沈稻 47 Shendao 47	NN-CF	2839 cd	1648 a	2899 b	1191 f	60 b	70.5 b
	NN-SWI	2977 b	1677 a	2914 b	1300 cd	-63 e	71.0 b
	NN-WMD	3034 a	1478 d	2987 a	1556 a	-47 d	71.2 ab
	NN-WSD	2829 de	1524 cd	2740 d	1305 bc	-89 f	71.2 ab
	HN-CF	2746 f	1582 b	2810 c	1164 f	64 b	71.0 b
	HN-SWI	2782 ef	1559 bc	2860 bc	1223 ef	78 a	71.3 ab
	HN-WMD	2885 c	1528 cd	2891 b	1357 b	6 c	71.5 ab
	HN-WSD	2780 ef	1492 d	2858 bc	1288 de	78 a	72.0 a
	平均值 Mean	2859 B	1561 B	2870 B	1298 A	10.8	71.2 A
粳优 586 Jingyou 586	NN-CF	3013 bc	1875 cd	3142 bc	1138 ab	129 c	69.5 a
	NN-SWI	3039 b	1950 ab	3176 ab	1089 bc	137 c	70.2 a
	NN-WMD	3100 a	1956 a	3209 a	1144 a	109 e	70.2 a
	NN-WSD	2976 c	1887 cd	3112 c	1089 bc	136 c	69.6 a
	HN-CF	2711 f	1845 d	2952 e	866 e	241 a	69.4 a
	HN-SWI	2876 de	1900 bc	3040 d	976 d	164 b	70.2 a
	HN-WMD	2917 d	1837 de	3023 d	1080 bc	106 e	69.9 a
	HN-WSD	2833 e	1788 e	2953 e	1045 c	120 d	69.7 a
	平均值 Mean	2933 A	1880 A	3076 A	1053 B	143 A	69.8 B
方差分析 Analysis of variance							
品种 Cultivar (C)		**	**	**	**	**	**
施氮量 Nitrogen rate (N)		**	**	**	**	**	ns
灌溉方式 Irrigation regime (I)		**	**	**	**	**	**
C×N		**	ns	**	*	**	ns
C×I		**	**	**	**	**	ns
N×I		ns	ns	ns	ns	**	ns
C×N×I		**	**	*	**	**	ns

PV, Peak viscosity; TV, Trough viscosity; FV, Final viscosity; BD, Breakdown; SB, Setback; PaT, Pasting temperature.

稻米蛋白质富含赖氨酸和其他必需氨基酸，被称为人类有益的植物蛋白，是重要的营养品质之一，当前衡量和评价稻米营养品质的指标主要包括蛋白质含量及其氨基酸组成<sup>[18]</sup>。本研究表明，增施氮肥有利于水稻籽粒蛋白质和氨基酸的积累，但灌溉方式效应因品种和施氮水平不同而不同，正常施氮水平下，轻干湿交替显著提高了两供试品种稻米的蛋白质及氨基酸含量，但与重干湿交替灌溉处理间差异不显著；高氮水平下，重干湿交替灌溉显著提高了沈稻 47 精米中蛋白质和氨基酸含量，粳优 586 在轻干湿交替灌溉处理下精米中蛋白质和氨基酸含量取得较高值，且各氨基酸组分表现趋势一致，这可能与水分胁迫后籽粒灌浆过程中碳氮代谢发生变化有关<sup>[19]</sup>。Wakamatsu 等<sup>[20]</sup>研究指出，稻米蛋白质含量与垩白呈负相关，且已有研究表明，籽粒中 SS 和 ADPGase 活性直接影响淀粉的合成速率和最终合成量，正常施氮水平下，轻干湿交替灌溉下籽粒中 SS 和 ADPGase 的活性下降<sup>[19,21-22]</sup>，从而

削弱了籽粒淀粉合成，导致转移到籽粒中的碳水化合物减少(粒重明显降低)，因此，以干质量为基数的轻干湿交替灌溉处理蛋白质占籽粒总质量的相对比例仍要高于常规灌溉；高氮水平下，水稻植株含氮量较高<sup>[24]</sup>，籽粒与叶片间氮素位势升高，水分胁迫促进了茎鞘和叶片中的氮向籽粒转运，增加了籽粒中的氮素积累量，从而促进了籽粒中蛋白质的积累，所以重干湿交替灌溉处理的蛋白质含量高于常规灌溉处理。另外，许多研究报道<sup>[23-24]</sup>，稻米蛋白质含量及其组分影响稻米的蒸煮食味品质，随着蛋白质含量的增加，米饭变硬，食味变差。本研究结果表明，水分胁迫对水稻籽粒蛋白质含量及氨基酸含量的影响因品种和施氮水平的不同而异，且同一灌溉方式条件下，增施氮肥增加稻米蛋白质及氨基酸含量。因此，本研究表明，可通过适度调节施氮量和土壤水分调节蛋白质的积累，从而达到在不影响米饭食味的目的下，提高稻米的营养品质。

蒸煮食味品质是稻米的重要品质性状，直链淀

粉含量、胶稠度和淀粉 RVA 谱特性是评价稻米蒸煮食味品质的重要指标。据报道<sup>[25-26]</sup>, 直链淀粉含量高, 胶稠度短, 米饭干燥无光泽, 硬而松散, 口感差; 而峰值黏度高、崩解值大、消减值小, 稻米食味好。以往的研究表明, 肥水处理对稻米的直链淀粉含量、胶稠度和淀粉 RVA 谱特性有一定的调控作用<sup>[15-17, 27-28]</sup>。由此可见, 从施氮水平和灌溉方式研究反映稻米蒸煮食味品质理化指标的变化, 对于改善稻米的食味品质具有一定的指导意义。本研究表明, 无论在何种氮肥水平下, 常规灌溉处理的直链淀粉含量最高, 其他水分胁迫处理对精米中直链淀粉含量无显著影响。在正常施氮和高氮水平下, 稻米的胶稠度, 最高黏度和崩解值, 以轻干湿交替灌溉显著高于或优于常规灌溉, 而其消减值却显著低于常规灌溉。在正常施氮水平下, 重干湿交替灌溉处理的上述的理化指标劣于常规灌溉; 在高氮水平下, 重干湿交替灌溉的稻米食味品质优于常规灌溉。说明灌溉方式和施氮量对稻米食味品质的影响存在着显著的互作效应, 但二者间的互作效应存在着品种间的差异。因此, 在优质米生产上, 应针对不同品种采取不同的肥水管理措施, 以此获得高产优质的效果。综上所述, 在本研究条件下, 沈稻 47 以轻干湿交替灌溉和施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理可以获得优质的效果; 而粳优 586 以轻干湿交替灌溉和施氮量为 220 kg/hm<sup>2</sup> 处理的稻米品质较为理想。

对于干湿交替灌溉可以改善稻米品质的机制, 目前尚不清楚。Yang 等<sup>[29]</sup>研究指出, 轻干湿交替灌溉提高了 SuS、AGP、STS 和 SBE 等籽粒中蔗糖-淀粉代谢途径的关键酶活性, 且上述各酶活性与稻米品质呈显著正相关, 由此可以推测, 轻干湿交替灌溉条件下, 影响籽粒淀粉合成速率和积累量的关键酶活性的提高, 可能是稻米品质改善的重要原因。张自常等<sup>[15]</sup>、李国生等<sup>[17]</sup>还观察到, 在轻干湿交替灌溉或适度土壤落干条件下, 水稻的根系氧化力增强, 根系伤流液中的 IAA、Z+ZR 和 ABA 显著增加, 从而保护了颖花的育性, 促进了颖花的分化和胚乳的发育, 进而改善稻米品质。说明轻干湿交替灌溉处理可以提高根系活力, 增加根系细胞分裂素含量, 促进水稻地上部与地下部协调发展, 进而改善稻米品质。然而, 有关干湿交替灌溉方式下氮素营养对稻米品质的作用机理, 有待深入研究。

#### 4 结论

灌溉方式和施氮量对稻米品质的影响具有显著的互作效应。无论在何种氮素水平下, 稻米品质

均以轻干湿交替灌溉较优。在正常施氮水平下, 稻米的加工品质、外观品质, 胶稠度、最高黏度、崩解值, 以重干湿交替灌溉劣于或低于常规灌溉, 而直链淀粉含量和消减值却高于常规灌溉。在高氮水平下, 重干湿交替灌溉的上述各稻米品质指标高于或优于常规灌溉, 因此, 在土壤干旱条件下, 可以通过增施适量氮肥来减轻土壤供水不足对稻米品质的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Z C, Zhang S F, Yang J C, Zhang J H. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation. *Field Crops Res*, 2008, 108 (1): 71-81.
- [2] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 曾建敏, 徐波, 彭少兵, Buresh R J. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 123-132.  
He F, Huang J L, Cui K H, Zeng J M, Xu B, Peng S B, Buresh R J. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on rice yield and quality. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(1): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, Xu K, Dai Q G, Wei C X, Zhou G S, Huo Z Y. Effects of nitrogen level on structure and physicochemical properties of rice starch. *Food Hydroc*, 2017, 65: 525-532.
- [4] Zheng J L, Chen T T, Wu Q, Yu J M, Chen W, Chen Y L, Siddique K. H. M., Meng W Z, Chi D C, Xia G M. Effect of zeolite application on phenology, grain yield and grain quality in rice under water stress. *Agri Water Manag*, 2018, 206: 241-251.
- [5] 刘凯, 张耗, 张慎凤, 王志琴, 杨建昌. 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. *作物学报*, 2008, 34(2): 268-276.  
Liu K, Zhang H, Zhang S F, Wang Z Q, Yang J C. Effects of soil moisture and irrigation patterns during grain filling on grain yield and quality of rice and their physiological mechanism. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(2): 268-276. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭晓红, 郑桂萍, 殷大伟, 张淼淼, 赵洋, 吕艳东. 抽穗前水分供应对寒地水稻品质的影响. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 40-46.  
Guo X H, Zheng G P, Yin D W, Zhang M M, Zhao Y, Lv Y D. Effects of before-heading water supply on quality of rice in cold regions. *Bull Soil Water Conser*, 2012, 32(2): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [7] 蔡一霞, 王维, 朱庆森. 水分胁迫对水稻籽粒蛋白质积累及营养品质的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 536-543.  
Cai Y X, Wang W, Zhu Q S. Effects of water stress on nutrient quality and accumulation of protein in rice grains. *J Plant Ecol*, 2007, 31(3): 536-543. (in Chinese with English abstract)
- [8] Toristuka S. Improvement of the rice grain quality in Koshihikari by deep flood-irrigation at the tilling stage along with the combination of fish product. [http://www.pref.shiga.lg.jp/g/nogyo/k\\_seika/23/files/07.pdf](http://www.pref.shiga.lg.jp/g/nogyo/k_seika/23/files/07.pdf). (in

- Japanese)
- [9] Hayashi M, Sugiura K, Kuno C, Endo I, Tanaka Y, Yamauchi A. Reduction of rice chalky grain by deep and permanent irrigation method; effect on growth and grain quality of rice. *Plant Prod Sci*, 2011, 14: 282-290.
  - [10] Chiba M, Terao T, Watanabe H, Matsumura O, Takahashi Y. Improvement in rice grain quality by deep-flood irrigation and its underlying mechanisms. *Jpn Agric Res Qual*, 2017, 51(2): 107-116.
  - [11] 高辉, 马群, 李国业, 杨雄, 李雪侨, 殷春渊, 李敏, 张庆, 张洪程, 戴其根, 魏海燕. 氮肥水平对不同生育类型粳稻米蒸煮食味品质的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4543-4552.  
Gao H, Ma Q, Li G Y, Yang X, Li X Q, Yin C Y, Li M, Zhang Q, Zhang H C, Dai Q G, Wei H Y. Effect of nitrogen application rate on cooking and eating qualities of different growth-development types of japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(21): 4543-4552. (in Chinese with English abstract)
  - [12] Gu J F, Chen J, Chen L, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C. Grain quality changes and responses to nitrogen fertilizer of japonica rice cultivars released in the Yangtze River Basin from the 1950s to 2000s. *Crop J*, 2015, 2015, 3(4): 285-297.
  - [13] Leesawatwong M., Jamjod S., Kuo J., Dell B., Rerkasem B. Nitrogen fertilizer increases seed protein and milling quality of rice. *Cereal Chem*, 2005, 82(5): 588-593.
  - [14] 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 章秀福. 施氮量和移栽密度对超高产水稻中早 22 产量和品质的影响. *中国水稻科学*, 2008, 22(5): 507-512.  
Xu C M, Wang D Y, Shao G S, Zhang X F. Effects of transplanting density and nitrogen fertilizer rate on yield formation and grain quality of super high yielding rice Zhongzao 22. *Chin J Rice Sci*, 2008, 22(5): 507-512. (in Chinese with English abstract)
  - [15] 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 王志琴, 杨建昌. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响. *作物学报*, 2013, 39(1): 84-92.  
Zhang Z C, Li H W, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(1): 84-92. (in Chinese with English abstract)
  - [16] 蔡一霞, 王维, 朱智伟, 张祖建, 郎有忠, 朱庆森. 结实期水分胁迫对不同氮肥水平下水稻产量及其品质的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1201-1206.  
Cai Y X, Wang W, Zhu Z W, Zhang Z J, Lang Y Z, Zhu Q S. Effects of water stress during grain filling period on rice grain yield and its quality under different nitrogen levels. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(7): 1201-1206. (in Chinese with English abstract)
  - [17] 李国生, 王志琴, 袁莉民, 刘立军, 杨建昌. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量和品质的交互影响. *中国水稻科学*, 2008, 22(2): 161-166.  
Li G S, Wang Z Q, Yuan L M, Liu L J, Yang J C. Coupling effects of soil moisture and nitrogen nutrient during grain filling on grain yield and quality of rice. *Chin J Rice Sci*, 2008, 22(2): 161-166. (in Chinese with English abstract)
  - [18] Yuan L, Zhang Z C, Cao X C, Zhu S C, Zhang X, Wu L H. Responses of rice production, milled rice quality and soil properties to various nitrogen inputs and rice straw incorporation under continuous plastic film mulching cultivation. *Field Crops Res*, 2014, 155: 164-171.
  - [19] 宁慧峰, 崔嘉欣, 刘浩, 孙景生. 灌溉方式和施氮量对水稻产量和品质的影响. *灌溉排水学报*, 2017, 36(12): 1-7.  
Ning H F, Cui J X, Liu H, Sun J S. Effects of irrigation patterns and nitrogen rate on grain yield and quality of rice. *J Irrig Drain*, 2017, 36(12): 1-7. (in Chinese with English abstract)
  - [20] Wakamatsu K, Sasaki O, Uezono I, Tanaka A. Effects of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice under high-temperature conditions. *Jpn J Crop Sci*, 2008, 77: 424-433.
  - [21] 蔡一霞, 王维, 朱庆森. 水分胁迫对水稻籽粒蛋白质积累及营养品质的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 536-543.  
Cai Y X, Wang W, Zhu Q S. Effects of water stress on nutrient quality and accumulation of protein in rice grains. *J Plant Ecol*, 2007, 31(3): 536-543. (in Chinese with English abstract)
  - [22] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, Zhu Q S, Liu L J. Activities of enzymes involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling. *Field Crops Res*, 2003, 81: 69-81.
  - [23] Balindong J L, Ward R M, Liu L, Rose T J, Pallas L A, Ovenden B W, Snell P J, Waters D L E. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality. *J Cereal Sci*, 2018, 79: 35-42.
  - [24] Martin M, Fitzgerald M A. Proteins in rice grains influence cooking properties. *J Cereal Sci*, 2002, 36: 285-294.
  - [25] Zhou C C, Huang Y C, Jia B Y, Wang Y, Wang Y, Xu Q, Li R F, Wang S, Dou F G. Effects of cultivar, nitrogen rate, and planting density on grain quality of rice. *Agronomy-Basel*, 2018, 8(11): 246.
  - [26] 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 高明尉, Anna McClung. 稻米淀粉 RVA 谱特征与食用品质的关系. *中国农业科学*, 1998, 31(3): 25-29.  
Shu Q Y, Wu D X, Xia Y W, Gao M W, McClung A. The relationship between RVA profile character rice starch and eating quality in *Oryza sativa* L. *Sci Agric Sin*, 1998, 31(3): 25-29. (in Chinese with English abstract)
  - [27] 寇洪萍, 王伯伦, 王术, 吕军, 张城. 不同氮素水平下水分处理对北方粳稻蒸煮品质的影响. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(5): 481-484.  
Kou H P, Wang B L, Wang S, Lv J, Zhang C. Effect of different irrigation treatments at different N levels on cooking qualities of northern rice. *J Jilin Agric Univ*, 2003, 25(5): 481-484. (in Chinese with English abstract)
  - [28] Pan S G, Cao C G, Cai M L, Wang J P, Wang R H, Zhai J, Huang S Q. Effects of irrigation regime and nitrogen management on grain yield, quality and water productivity in rice. *J Food Agric Environ*, 2009, 7(2): 559-564.
  - [29] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, Zhu Q S, Liu L J. Activities of enzymes involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling. *Field Crops Res*, 2003, 81: 69-81.