

引用格式:

孙园园, 张桥, 孙永健, 殷尧翥, 刘芳艳, 马鹏, 马均. 秸秆还田与水氮管理对水稻氮素利用及土壤理化性质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 65–74.

SUN Y Y, ZHANG Q, SUN Y J, YIN Y Z, LIU F Y, MA P, MA J. Effects of straw returning and water-nitrogen management on nitrogen utilization of rice and soil physicochemical properties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(1): 65–74.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 秸秆还田与水氮管理对水稻氮素利用及土壤理化性质的影响

孙园园<sup>1,2,3</sup>, 张桥<sup>1,2</sup>, 孙永健<sup>1,2\*</sup>, 殷尧翥<sup>1,2</sup>, 刘芳艳<sup>1,2</sup>, 马鹏<sup>1,2</sup>, 马均<sup>1,2</sup>

(1.四川农业大学水稻研究所, 四川 温江 611130; 2.作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 温江 611130; 3.中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072)

**摘要:** 在川西平原稻油轮作典型的砂质壤土区, 设置不同秸秆还田方式(堆腐还田和直接还田)、灌溉方式(淹灌和有氧灌溉)和施氮水平(0、75、150、225 kg/hm<sup>2</sup>)的 3 因素裂区试验, 分析秸秆还田与水氮管理对水稻氮素利用特征与土壤理化性质的影响。结果表明: 秸秆还田与水氮管理对主要生育时期水稻氮素积累、结实期(抽穗和成熟期)氮素转运与利用、稻谷产量及成熟期稻田耕层(0~20 cm)土壤脲酶活性、铵态氮和硝态氮质量分数均存在显著或极显著的互作效应; 秸秆堆腐还田对水稻氮素利用和产量及土壤理化性质的调控作用显著高于秸秆直接还田的, 同一水氮管理下, 成熟期植株和籽粒氮积累量分别提高了 9.7%~32.9%和 7.5%~45.3%, 增产 7.3%~18.5%, 各生育期的平均土壤脲酶活性提高 4.8%~9.7%; 同一秸秆还田和施氮量处理下, 相比于淹灌处理, 有氧灌溉能不同程度的提高产量和氮肥表观利用率, 并能提高多数处理的氮肥农学利用率、土壤铵态氮和硝态氮质量分数及脲酶活性; 同一秸秆还田和灌溉方式, 随着氮肥用量的增加, 水稻氮肥表观利用率、农学利用率、产量、各器官(除 2017 年成熟期的穗外)和植株的氮素积累量及抽穗至成熟期茎鞘的氮素转运量、转运率、贡献率、土壤脲酶活性和硝态氮质量分数均先增加, 施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup>时最高, 继续增加施氮量, 这些指标反而降低。本研究条件下, 油菜秸秆堆腐还田和有氧灌溉与配施 150 kg/hm<sup>2</sup>氮肥的综合管理模式可有效增强结实期土壤耕层脲酶活性, 提高植株氮素积累量、结实期茎鞘的氮素转运量和转运率, 从而促进水稻产量及氮肥利用率的同步提高。

**关键词:** 水稻; 稻油轮作; 秸秆还田; 水氮管理; 氮素利用; 土壤理化性质

中图分类号: S511.2<sup>+</sup>10.62; S511.2<sup>+</sup>10.71 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2022)01-0065-10

### Effects of straw returning and water-nitrogen management on nitrogen utilization of rice and soil physicochemical properties

SUN Yuanyuan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qiao<sup>1,2</sup>, SUN Yongjian<sup>1,2\*</sup>, YIN Yaozhu<sup>1,2</sup>, LIU Fangyan<sup>1,2</sup>, MA Peng<sup>1,2</sup>, MA Jun<sup>1,2</sup>

(1.Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China; 2.Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Wenjiang, Sichuan 611130, China; 3.Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the effects of straw returning and water-nitrogen management on nitrogen utilization of rice and soil physicochemical properties. Three factors split plot experiment was set up in the typical sandy loam area of rice-rape rotation in the Western Sichuan Plain: the main plot were two straw returning ways(composted

收稿日期: 2020-07-01

修回日期: 2022-01-17

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2018YFD0301202); 四川省科技支撑计划项目(2020YJ0411); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重点实验室 2018-重点-05-01); 四川省学术和技术带头人培养支持经费(川人社办发[2016]183 号)

作者简介: 孙园园(1981—), 女, 山东烟台人, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源高效利用研究, [ytyy21@163.com](mailto:ytyy21@163.com); \*通信作者, 孙永健, 博士, 教授, 主要从事水稻机械化轻简高效栽培和水稻水肥耦合理论与技术研究, [yongjians1980@163.com](mailto:yongjians1980@163.com)

straw and direct straw returning); the split plot were two ways of irrigation(flooded irrigation and aerobic irrigation); and the split-split plot were four N application rates(0, 75, 150, 225 kg/hm<sup>2</sup>). The results showed that straw returning and water and N management had significant interaction on N accumulation in rice at main growth stage, N translocation and utilization at filling stage(heading and maturity stage), rice yield and urease activity, mass fractions of ammonium and nitrate N of surface soil(0-20 cm) at maturity stage. The effects of composted straw returning on N utilization, yield of rice and soil physicochemical properties were significantly higher than those of direct straw returning. Under the same water-nitrogen management, compared with direct straw returning treatments, the N accumulation of plants and grains increased by 9.7%-32.9% and 7.5%-45.3%, respectively, the yields of rice increased by 7.3%-18.5%, and the average soil urease activities increased by 4.8%-9.7% of each growth period in composted straw returning treatments. Under the same straw returning and N application rate treatments, aerobic irrigation could increase the yields and N apparent use efficiency to different degrees, and increase the N agronomic use efficiency, soil ammonium and nitrate N mass fractions and urease activities of most treatments compared with flooded irrigation treatments. Within the same straw returning and irrigation methods, with the increase of N application rates, the N apparent and agronomic use efficiencies, yield, N accumulations of each organ(except for mature spike in 2017) and plant of rice, and the rice stem- sheath N translocation amount and efficiency, contribution rate, soil urease activity and nitrate N mass fraction from heading to maturation stages of rice increased first, these indexes were the highest when the N application rate was 150 kg/hm<sup>2</sup>, and then these indexes decreased over the N application rate increase. Under the conditions of this study, the combined management mode of composted rape straw returning, aerobic irrigation and combined application of 150 kg/hm<sup>2</sup> N fertilizer could effectively enhance soil urease activity, N accumulation and N translocation amount and efficiency of stem-sheath during filling stage, which promoted the simultaneous improvement of high yield and N use efficiency.

**Keywords:** rice; rice-rape rotation; straw returning; water and N management; N utilization; soil physicochemical properties

作物秸秆中富含碳、氮等营养元素, 秸秆还田可提高土壤养分, 降低碳氮比<sup>[1]</sup>, 还能有效调节土壤墒情, 改善物理性状, 对促进水肥资源的高效利用及农业可持续发展成效显著<sup>[2]</sup>。如何高效利用作物秸秆, 减小秸秆的负面效应, 发挥前茬作物秸秆对后茬作物生长发育的促进作用, 前人对堆腐还田、促腐还田和直接还田等多种方式进行了大量的研究: 油菜秸秆堆腐发酵还田可提高土壤肥力, 但前茬油菜秸秆若不能高效利用, 则会抑制植物幼苗根系生长, 并对环境造成污染<sup>[3-4]</sup>; 秸秆还田配套合理的氮肥运筹可显著提高稻谷产量与氮肥利用率及稻米品质<sup>[5-7]</sup>; 水资源时空分布不均、水肥管理不合理会导致水稻肥水利用效率低、化肥面源污染日趋加重等<sup>[8-9]</sup>; 合理的水氮管理方式可显著提高水肥的利用效率<sup>[5,8-11]</sup>。但在秸秆还田的方式与水氮管理对水稻各时期的氮素吸收利用及土壤理化性质的影响研究较少。

四川盆地作为油-稻轮作的主要地区, 秸秆资源丰富, 但存在水源不足、时空分布不均、肥料施用不合理、中低产田比例大等突出问题, 如何在研究区域范围内合理有效的利用油菜秸秆资源, 开展不同秸秆还田处理下水氮耦合对水稻氮素利用与土壤理化性质影响的研究很有必要。本研究中, 设

不同秸秆还田方式、灌溉方式、氮肥运筹 3 因素裂区试验, 探索秸秆还田下合理的水肥配施高产高效的栽培技术, 以期水稻提质、丰产、绿色高效的生产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2017、2018 年分别在四川农业大学水稻所温江试验农场、眉山市东坡区现代农业产业园试验基地进行。供试水稻品种为宜香优 2115(籼型三系杂交稻, 生育期 150~154 d)。水稻均于 4 月 23 日播种, 旱育秧, 人工单株移栽(秧龄 40 d), 行株距为 33.3 cm×16.7 cm。前茬作物均为油菜。2017、2018 年秸秆还田量分别为 10 340.0、11 180.0 kg/hm<sup>2</sup>。试验田 0~20 cm 土层土壤的理化性质列于表 1。各处理小区间用塑料薄膜包埂, 小区面积为 15.60 m<sup>2</sup>。

试验采用 3 因素裂区设计, 3 次重复。主区设堆腐还田(A<sub>1</sub>)和直接还田(A<sub>2</sub>)共 2 种秸秆还田方式。按照文献[12]的方法进行堆腐还田: 将油菜秆粉碎、铺堆、泼洒腐熟剂、覆膜密封, 堆腐 8 d 秸秆呈深褐色腐烂状态时视为秸秆腐熟; 水稻栽插前用旋耕机(1GQN-180)整平田面后, 人工将腐熟的油菜秸秆均匀抛撒到小区厢面上。直接还田即油菜机械化收

割同时秸秆切碎还田, 泡田后用旋耕机整平田面。裂区设淹灌(W<sub>1</sub>)和有氧灌溉(W<sub>2</sub>)共 2 种灌溉方式: 淹灌为移栽后田面保持 1~3 cm 水层, 收获前 7 d 自然落干; 有氧灌溉即秧苗返青后各生育阶段均以达到土壤水势为-25 kPa 时进行灌溉。裂区设 0、75、150、225 kg/hm<sup>2</sup> 共 4 种施氮水平, 分别记为 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>。其中基肥占 40%, 于移栽前 1 d 施用;

蘖肥占 30%, 于移栽后 7 d 施用; 穗肥占 30%, 于倒四叶、倒二叶分次等量施用。磷、钾肥均作基肥施用, 施用量分别为 90 kg/hm<sup>2</sup>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、150 kg/hm<sup>2</sup>(K<sub>2</sub>O)。试验共 16 个处理: A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>。

表1 试验田土壤的理化性状

Table 1 Physicochemical properties of soil in the experiments of different years

年份	全氮质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效养分质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )			pH
			N	P	K	
2017	1.17±0.9	19.3±1.7	91.3±5.0	31.3±1.1	86.3±3.8	6.40±0.2
2018	1.81±1.2	24.8±1.2	112.5±7.0	22.8±0.9	107.1±6.2	5.90±0.2

## 1.2 测定项目与方法

### 1.2.1 水稻氮含量测定及计产

分别于拔节期、抽穗期及成熟期按各小区取代表性植株 6 穴, 分茎鞘、叶片和穗 3 部分烘干至恒重后粉碎, 用 FOSS-8400 定氮仪测定氮含量。按王海月等<sup>[13]</sup>的方法, 计算上述各生育时期氮素积累量、抽穗至成熟期氮素转运量、转运率和贡献率及氮肥利用效率。各小区实收计产。

### 1.2.2 土壤脲酶和硝态氮及铵态氮测定

分别于分蘖盛期(移栽后 25 d)、拔节、抽穗和成熟期各小区按照 5 点取样法取耕层(0~20 cm)土样。按照胡乃娟等<sup>[14]</sup>的方法测定土壤脲酶活性; 按照赵春江<sup>[15]</sup>的方法测定土壤铵态氮(氯化钾浸提-靛酚蓝比色法)和硝态氮含量(还原蒸馏法)。

## 1.3 数据分析

采用 Excel 2010 和 DPS 6.5 进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 供试水稻的氮素利用特征和稻田土壤理化性质及其方差分析结果

由表 2 可知, 秸秆还田、灌溉方式、施氮量各因素处理下各指标均存在显著差异。除氮素籽粒生产效率外, 各指标均表现为 A<sub>1</sub> 的显著高于 A<sub>2</sub> 的, W<sub>2</sub> 的显著高于 W<sub>1</sub> 的; 除氮素收获指数、氮素籽粒生产效率(随着施氮量的增加显著降低)和成熟期土壤铵态氮(随着施氮量的增加而增加)外, 随施氮量的增加, 各指标均先增加, N<sub>2</sub> 的最高, 后再继续增加施氮量, 各指标降低。综合各因素整体来看, 油菜秸秆堆腐还田、有氧灌溉与配施 150 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥的综合管理模式在水稻产量、氮素利用及土壤理化性质方面表现最优。

表2 秸秆还田和水氮管理下的水稻产量和氮素利用特征及稻田土壤理化性质

Table 2 The rice yield, N utilization and soil physicochemical properties with straw returning and water and N management patterns

处 理	抽穗至成熟期氮素转运量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		稻谷产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素收获 指数/%	氮素籽粒生产 效率/(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥表现 利用率/%	土壤铵态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤脲酶活性/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )
	茎鞘	叶片							
A <sub>1</sub>	17.71a	36.44a	9575.0a	71.70a	60.10b	43.77a	11.18a	22.41a	3.11a
A <sub>2</sub>	14.03b	35.56b	8581.0b	70.04b	63.64a	42.42b	11.01b	21.91b	2.84b
W <sub>1</sub>	14.70b	34.09b	8923.6b	70.34b	62.56a	41.97b	11.08b	21.81b	2.89b
W <sub>2</sub>	17.04a	37.91a	9232.4a	71.40a	61.18b	44.22a	11.18a	22.51a	3.05a
N <sub>0</sub>	8.15d	23.84c	7635.5d	72.95a	72.93a		10.16c	19.00b	1.92c
N <sub>1</sub>	12.59c	33.54b	8753.3c	72.80a	61.58b	49.48a	10.88b	21.57b	2.89b
N <sub>2</sub>	23.71a	44.59a	10 313.0a	68.18b	57.28c	50.33a	11.34b	25.77a	3.61a
N <sub>3</sub>	19.03b	42.04a	9610.2b	69.55b	55.70d	29.48b	12.14a	22.30ab	3.47a

同一因素内同列数据后不同字母示各处理间在 0.05 水平上的差异有统计学意义。

从各因素处理对水稻产量、氮素利用特征及土壤理化指标的交互效应分析结果(表3)可知,秸秆还田、灌溉方式及施氮量对所测水稻各指标和成熟期

土壤理化指标均存在显著或极显著的影响,且3因素的互作效应达显著或极显著水平。

表3 秸秆还田和水氮管理对水稻产量和氮素利用特征及土壤理化指标的影响及交互效应分析结果

Table 3 Analysis result of variance for rice yield, N utilization and soil physicochemical properties with straw returning and water and N management patterns

处理	F 值								
	茎鞘氮素 转运量	叶片氮素 转运量	稻谷产量	氮素收获 指数	氮素籽粒 生产效率	氮肥表观 利用率	土壤铵态氮	土壤硝态氮	土壤 脲酶活性
秸秆还田(A)	34.56*	3.60*	153.42**	667.35**	386.93**	4.62*	25.61**	53.01**	6.60*
灌溉方式(W)	263.80**	100.68**	66.16**	4.95*	13.16*	3.84*	31.15**	31.06**	4.60*
施氮量(N)	1150.10**	938.90*	520.95**	45.10**	115.94**	65.91**	15.36**	947.79**	129.39**
A×W	124.89**	1.73	0.34	4.16*	0.77	11.18*	79.29**	7.05*	3.10*
A×N	3.50*	52.68**	19.38**	26.48**	14.74**	4.95*	19.44**	0.44	2.47
W×N	25.72**	15.13**	6.70*	3.32*	2.45*	2.92*	50.30**	24.22**	3.58*
A×W×N	28.31**	51.77**	9.70*	8.23**	3.55*	2.67*	96.21**	21.66**	3.89*

“\*\*”“\*”分别示在0.05和0.01水平上的差异有统计学意义。

## 2.2 秸秆还田和水氮管理对水稻主要生育时期氮素积累的影响

由表4、表5可知,与A<sub>2</sub>相比,除拔节和抽穗期叶片与抽穗期植株的A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>及2017年成熟期叶片的A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>外,相同水氮管理下,A<sub>1</sub>的各生育期植株及其各部位的氮素积累均不同程度提高,成熟期植株和穗部籽粒的氮积累量分别提高了9.7%~32.9%和7.5%~45.3%;同一秸秆还田和施氮量处理

下,除2017年抽穗期A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>外,W<sub>2</sub>的各生育时期植株氮素积累量均不同程度的高于W<sub>1</sub>的;除2018年成熟期穗的A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>外,同一秸秆还田和灌溉方式内,施氮处理各生育期主要营养器官氮积累量均显著高于N<sub>0</sub>的,且除2017年成熟期穗的A<sub>1</sub>W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>外,各器官氮素积累量均先随施氮量的增加而增加,N<sub>2</sub>的最高,再继续提高施氮量,氮素积累量反而减少。

表4 2017年秸秆还田和水氮管理下的水稻各生育期的氮素积累量

Table 4 The N accumulation at different growth stages of rice under straw returning and water and N management in 2017 kg/hm<sup>2</sup>

处理	茎鞘氮素积累量			叶片氮素积累量		
	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(15.9±0.6)d	(25.6±0.8)d	(17.1±0.9)d	(28.7±1.3)d	(36.4±2.0)d	(13.8±0.6)d
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(23.0±0.9)c	(35.7±1.0)c	(21.4±0.5)c	(47.4±2.5)c	(53.6±2.3)c	(19.3±0.9)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(31.4±1.5)a	(48.4±3.2)a	(25.7±3.8)a	(62.4±3.1)a	(70.6±3.0)a	(29.7±1.4)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(28.5±0.9)b	(43.1±3.7)b	(25.0±2.2)b	(55.2±2.5)b	(61.3±3.3)b	(22.4±1.2)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(18.7±0.5)c	(27.7±1.6)d	(17.7±0.9)d	(35.6±2.0)d	(32.5±2.0)d	(13.5±0.8)d
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(27.2±1.4)b	(37.2±2.3)c	(22.5±1.1)c	(57.2±2.4)c	(55.4±2.7)c	(18.4±0.8)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(34.9±1.8)a	(54.2±1.8)a	(30.1±1.6)a	(70.4±3.7)a	(78.9±3.3)a	(32.1±1.6)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(34.3±1.9)a	(45.5±2.1)b	(27.3±1.3)b	(66.9±3.3)b	(72.0±2.9)b	(23.1±1.5)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(9.9±1.0)d	(20.5±1.2)d	(15.3±0.8)c	(25.0±1.5)d	(32.6±1.8)d	(10.5±0.5)d
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(18.5±1.3)c	(30.4±1.7)c	(19.3±0.9)b	(42.9±2.4)c	(40.8±1.9)c	(16.6±0.9)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(28.3±2.1)a	(40.7±2.1)a	(23.5±1.2)a	(56.8±2.6)a	(65.9±3.2)a	(22.2±1.1)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(22.8±2.8)b	(35.9±2.2)b	(23.3±1.1)a	(54.0±2.2)b	(57.8±2.7)b	(18.3±0.6)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(12.1±0.4)d	(22.8±1.4)d	(16.5±0.9)d	(29.7±2.7)d	(40.2±1.9)d	(12.3±0.6)d
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(21.2±0.9)c	(32.7±1.9)c	(20.3±1.2)c	(44.0±2.3)c	(54.3±2.8)c	(19.0±0.5)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(32.0±1.5)a	(48.4±2.5)a	(23.3±1.1)a	(63.3±3.5)a	(69.3±3.7)a	(23.6±1.2)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(27.2±1.7)b	(42.5±2.3)b	(22.6±1.3)b	(50.2±2.2)b	(60.5±3.0)b	(20.3±1.1)b

表4(续)

处理	kg/hm <sup>2</sup>				
	穗氮素积累量		植株氮素积累量		
	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(12.7±0.5)d	(79.0±3.9)c	(44.5±2.1)d	(74.7±3.4)d	(109.9±4.8)d
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(23.5±1.2)c	(107.7±4.9)b	(70.4±3.3)c	(112.9±5.5)c	(148.4±6.9)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(30.0±1.5)a	(120.0±5.8)a	(93.8±4.6)a	(149.0±6.9)a	(175.3±8.7)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(26.7±1.3)b	(117.5±6.6)a	(83.8±4.3)b	(131.2±5.8)b	(164.9±9.2)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(13.5±0.7)d	(86.6±4.5)c	(54.4±2.9)d	(73.8±3.9)d	(117.8±5.7)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(28.5±1.5)c	(134.8±6.4)a	(84.4±4.4)c	(121.1±5.2)c	(175.6±9.9)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(32.6±1.3)a	(126.8±5.3)b	(105.3±4.9)a	(165.7±6.4)a	(189.0±7.7)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(29.4±1.6)b	(126.8±4.9)b	(101.2±5.2)b	(146.9±6.7)b	(177.2±8.6)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(10.7±0.3)d	(62.1±3.3)c	(35.0±1.5)d	(63.9±3.4)d	(87.8±5.1)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(18.8±0.6)c	(88.6±4.1)b	(61.4±3.0)c	(90.0±5.5)c	(124.5±5.9)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(26.6±1.1)a	(104.9±6.2)a	(85.2±4.3)a	(133.1±6.7)a	(150.6±7.0)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(24.4±1.2)b	(103.2±5.5)a	(76.8±4.0)b	(118.0±6.0)b	(144.8±7.4)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(11.4±0.6)d	(69.5±3.7)c	(41.8±2.2)d	(74.3±3.5)d	(98.3±5.5)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(19.2±1.0)c	(92.8±5.1)b	(65.1±2.9)c	(106.2±6.0)c	(132.1±6.3)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(31.1±1.2)a	(108.7±5.4)a	(95.3±4.7)a	(148.9±6.9)a	(155.6±6.7)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(24.0±1.3)b	(102.7±4.9)a	(77.4±4.0)b	(126.9±5.8)b	(150.7±7.7)a

同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在 0.05 水平上的差异有统计学意义。

表5 2018年秸秆还田和水氮管理下的水稻各生育期的氮素积累量

Table 5 The N accumulation at different growth stages of rice under straw returning and water and N management in 2018 kg/hm<sup>2</sup>

处理	茎鞘氮素积累量			叶片氮素积累量		
	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
	A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(14.4±0.5)d	(28.2±1.1)c	(17.7±0.9)c	(37.4±2.0)c	(36.4±1.9)d
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(25.0±1.3)c	(38.4±1.7)b	(23.9±1.1)b	(57.8±3.4)b	(53.6±2.6)c	(20.1±1.0)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(35.3±1.8)a	(57.2±2.4)a	(30.9±1.6)a	(76.0±3.5)a	(70.6±3.4)a	(33.8±1.5)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(30.5±1.7)b	(52.5±2.5)a	(29.7±1.4)a	(70.9±2.9)a	(61.3±2.9)b	(30.3±1.7)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(19.8±1.0)c	(29.2±1.3)d	(19.0±1.1)d	(35.4±2.9)d	(32.5±1.7)d	(15.1±0.6)d
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(28.0±1.6)b	(39.1±2.0)c	(25.6±1.3)c	(59.8±3.2)c	(55.4±2.6)c	(22.8±1.2)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(38.1±2.1)a	(66.1±3.1)a	(33.6±1.7)a	(84.1±4.4)a	(78.9±4.0)a	(34.7±1.8)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(36.9±2.0)a	(53.6±2.6)b	(31.2±1.5)b	(74.3±3.8)b	(72.0±3.1)b	(30.9±1.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(11.4±0.5)d	(23.0±1.2)d	(17.3±1.0)c	(35.8±1.8)d	(32.6±1.9)d	(10.2±0.6)d
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(19.4±1.1)c	(33.5±1.5)c	(23.6±1.1)b	(46.9±2.2)c	(40.8±1.8)c	(19.5±1.0)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(33.4±1.4)a	(48.2±2.3)a	(28.8±1.3)a	(71.2±3.4)a	(65.9±2.7)a	(27.8±1.3)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(23.1±1.3)b	(41.6±2.2)b	(25.4±1.4)b	(63.6±2.7)b	(57.8±3.0)b	(25.1±1.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(13.2±0.8)d	(26.3±1.4)c	(17.5±0.9)d	(44.2±2.5)d	(40.2±1.8)d	(14.9±0.8)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(24.1±1.0)c	(34.7±1.3)b	(24.5±1.2)c	(57.4±3.0)c	(54.3±2.4)c	(22.2±1.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(35.7±1.8)a	(52.5±2.5)a	(30.1±1.4)a	(79.7±3.7)a	(69.3±3.2)a	(29.7±1.2)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(30.4±1.4)b	(49.1±2.6)a	(27.0±1.2)b	(69.3±3.5)b	(60.5±3.5)b	(28.5±1.7)a

  

处理	穗氮素积累量		植株氮素积累量		
	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
	A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(14.2±1.9)d	(84.1±3.8)c	(49.5±2.1)d	(79.9±3.8)d
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(24.5±1.1)c	(114.7±5.5)b	(77.5±3.3)c	(120.7±5.9)c	(158.6±8.8)b
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(38.2±2.3)a	(134.1±7.0)a	(103.5±4.8)a	(171.3±9.0)a	(198.8±10.2)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(35.1±1.9)b	(128.9±7.1)a	(92.5±5.0)b	(158.5±8.1)b	(189.0±9.9)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(17.2±1.5)d	(87.5±4.4)c	(57.5±2.9)d	(81.8±3.8)d	(121.6±7.1)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(29.9±1.7)c	(116.0±4.9)b	(91.1±4.4)c	(128.9±5.9)c	(164.4±7.9)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(42.6±2.0)a	(141.8±6.5)a	(115.7±5.2)a	(192.9±9.4)a	(210.0±11.2)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(37.3±1.8)b	(138.6±6.9)a	(102.6±5.3)b	(165.1±7.8)b	(200.6±12.3)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(11.4±0.6)d	(68.9±4.5)c	(38.6±2.0)d	(70.2±4.6)d	(96.4±5.0)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(19.8±1.1)c	(90.0±5.6)b	(68.6±3.3)c	(100.2±5.8)c	(133.2±7.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(33.2±1.6)a	(124.7±6.0)a	(94.3±4.1)a	(152.6±8.1)a	(181.3±9.5)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(30.0±1.4)b	(119.1±6.4)a	(82.3±4.0)b	(135.2±6.9)b	(169.6±9.1)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(15.4±0.9)d	(75.8±4.5)b	(44.7±2.7)d	(85.8±5.3)d	(108.2±4.8)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(21.0±1.0)c	(87.2±5.1)b	(75.0±3.5)c	(113.1±6.2)c	(133.9±6.6)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(40.0±2.1)a	(125.2±5.5)a	(98.9±5.5)a	(172.1±6.0)a	(185.0±9.9)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(30.8±1.6)b	(123.7±5.6)a	(91.2±4.8)b	(149.2±6.9)b	(179.2±10.2)a

同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在 0.05 水平上的差异有统计学意义。

### 2.3 秸秆还田和水氮管理对水稻结实期氮素转运的影响

从表6和表7可知,除A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>和A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>外,相同水氮管理A<sub>1</sub>的抽穗至成熟期水稻茎鞘氮素转

运量、转运率均高于A<sub>2</sub>的,相同施氮量处理的A<sub>1</sub>的W<sub>1</sub>的抽穗至成熟期水稻茎鞘氮素贡献率均高于A<sub>2</sub>的;而相同水氮管理下抽穗至成熟期水稻叶片的氮素转运率和贡献率则多为A<sub>2</sub>的高于A<sub>1</sub>的。各秸

表6 2017年秸秆还田和水氮管理下的水稻抽穗至成熟期的氮素转运状况

Table 6 The N translocation from heading to maturity stages of rice under straw returning and water and N management in 2017

处理	氮素转运量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		氮素转运率/%		氮素贡献率/%	
	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(8.5±0.8)d	(22.6±0.6)d	(33.3±1.8)d	(62.2±5.6)b	(10.8±1.4)d	(28.6±0.9)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(14.3±0.3)c	(34.3±1.7)c	(40.1±2.2)c	(64.0±8.5)a	(13.3±0.9)c	(31.9±4.9)b
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(22.7±0.1)a	(41.0±3.2)a	(46.9±0.3)a	(58.0±16.1)c	(18.9±1.6)a	(34.2±10.2)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(18.1±1.0)b	(38.9±4.4)b	(42.0±2.7)b	(63.5±17.8)a	(15.5±3.2)b	(33.2±9.7)ab
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(10.0±0.5)d	(19.1±1.2)d	(36.0±3.1)c	(58.5±4.2)b	(11.5±0.8)c	(22.0±1.6)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(14.7±0.9)c	(37.1±0.8)c	(39.6±3.5)b	(66.8±5.8)a	(10.9±1.4)d	(27.6±5.3)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(24.1±1.2)a	(46.8±1.9)b	(44.4±7.4)a	(59.3±9.2)b	(19.0±6.4)a	(36.9±12.4)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(18.2±2.1)b	(48.9±3.0)a	(40.0±7.2)b	(67.9±13.9)a	(14.4±5.9)b	(38.6±14.0)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(5.3±0.2)d	(22.2±0.9)d	(25.6±6.8)c	(67.9±8.3)a	(8.5±0.2)c	(35.7±4.3)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(11.1±0.6)c	(24.2±2.4)c	(36.4±5.0)b	(59.4±7.4)b	(12.3±1.6)b	(27.4±2.2)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(17.2±1.2)a	(43.6±4.1)a	(42.2±11.0)a	(66.2±16.0)a	(16.4±7.3)a	(41.6±7.3)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(12.6±0.9)b	(39.5±4.7)b	(34.9±10.0)b	(68.4±19.6)a	(12.5±6.0)b	(38.6±11.0)ab
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(6.2±0.5)d	(27.9±1.2)d	(27.3±2.3)d	(64.9±6.6)b	(13.4±1.2)c	(40.1±5.8)ab
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(12.4±0.7)c	(35.3±2.9)c	(37.9±8.2)c	(66.4±9.0)b	(9.0±2.2)d	(38.0±3.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(25.2±2.2)a	(40.2±0.8)b	(52.0±10.9)a	(65.9±11.8)b	(23.2±4.7)a	(42.1±12.3)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(19.8±2.3)b	(45.7±4.8)a	(46.7±13.7)b	(69.4±16.9)a	(18.4±2.8)b	(37.4±6.0)b

同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在0.05水平上的差异有统计学意义。

表7 2018年秸秆还田和水氮管理下的水稻抽穗至成熟期的氮素转运状况

Table 7 The N translocation from heading to maturity stages of rice under straw returning and water and N management in 2018

处理	氮素转运量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		氮素转运率/%		氮素贡献率/%	
	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片	茎鞘	叶片
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(10.5±0.4)b	(23.7±1.2)b	(37.3±2.1)b	(63.1±2.9)a	(12.5±0.6)b	(28.1±1.2)b
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(14.6±0.5)b	(37.7±2.2)a	(37.9±2.0)b	(65.2±3.3)a	(12.7±0.5)b	(32.9±1.6)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(26.3±1.3)a	(42.2±2.5)a	(45.3±2.4)a	(55.3±2.8)b	(19.4±0.8)a	(31.3±1.6)ab
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(22.8±1.2)a	(40.6±2.8)a	(42.6±2.6)a	(57.2±2.8)b	(17.4±0.5)a	(31.7±1.7)ab
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(10.2±0.5)c	(20.3±1.3)c	(36.9±2.0)b	59.4±3.0	(11.6±0.6)b	(26.2±1.3)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(13.5±0.7)c	(37.0±2.3)b	(36.5±1.9)b	63.8±3.3	(11.6±0.5)b	(31.9±1.6)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(32.5±2.3)a	(49.5±2.7)a	(49.6±2.6)a	59.8±3.4	(22.7±1.1)a	(35.2±2.0)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(22.4±1.4)b	(43.4±2.4)ab	(41.7±2.1)ab	59.3±3.0	(15.9±1.2)b	(31.5±1.1)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(5.7±0.2)b	(25.6±1.6)b	(24.5±1.1)b	(71.3±3.5)a	(10.3±0.2)b	37.2±1.7
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(9.9±0.4)b	(27.4±1.4)b	(29.4±1.7)ab	(58.4±2.8)b	(11.0±0.5)ab	30.4±1.6
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(19.4±1.2)a	(43.4±2.4)a	(39.4±2.3)a	(60.8±3.4)b	(15.2±0.7)a	35.7±1.5
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(16.2±0.7)a	(38.5±2.1)a	(37.3±2.3)a	(60.4±3.5)b	(14.1±0.8)a	33.4±1.9
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(8.8±0.4)b	(29.3±1.3)c	(33.2±1.9)bc	(69.0±3.8)a	(11.6±0.7)b	38.6±2.0
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(10.2±0.5)b	(35.3±1.7)b	(29.4±1.6)c	(62.4±2.4)b	(11.8±0.6)b	40.7±2.3
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(22.3±1.2)a	(50.0±2.6)a	(44.2±2.3)a	(62.5±3.1)ab	(17.9±0.8)a	40.5±2.2
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(22.1±1.1)a	(40.8±1.9)b	(42.4±2.0)ab	(59.6±2.5)b	(17.5±0.6)a	33.3±1.8

同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在0.05水平上的差异有统计学意义。

秆还田处理下,  $W_2$  的茎鞘和叶片氮素转运量及转运率的平均值均大于  $W_1$  的。相同秸秆还田和灌溉方式内, 抽穗至成熟期茎鞘的氮素转运量、转运率和贡献率均先随施氮量的增加而增大,  $N_2$  的最大, 之后继续增加施氮量, 这些指标又变小。

## 2.4 秸秆还田和水氮管理对水稻产量及氮素利用特征的影响

由表 8 可知, 稻谷产量以秸秆堆腐还田下有氧灌溉与施氮量  $150 \text{ kg/hm}^2$  处理的最高; 与  $A_2$  相比, 同一水氮管理下  $A_1$  增产 7.3%~18.5%; 同一秸秆还田和施氮量处理下,  $W_2$  的产量不同程度的高于  $W_1$

的; 同一秸秆还田和灌溉方式内, 产量均先随施氮量的增加而增加,  $N_2$  的最高, 再继续提高施氮量, 产量又减少; 除  $N_2$  和  $A_2W_2N_0$  的氮素收获指数外, 同一水氮管理下  $A_1$  的氮素收获指数、氮肥表观利用率(NPE)、氮肥农学利用率(NAE)均高于  $A_2$  的; 除  $A_2W_1N_3$  的 NAE 外, 同一秸秆还田和施氮量处理下, 与  $W_1$  相比,  $W_2$  不同程度地提高了 NPE 和 NAE; 同一秸秆还田和灌溉方式内, 随施氮量的增加 NPE 和 NAE 先增加, 以  $N_2$  的最大, 再增加施氮量反而会导致 NPE 和 NAE 的显著下降, 也会导致氮素干物质及氮素籽粒生产效率不同程度的下降。

表8 秸秆还田和水氮管理下的水稻产量和氮素利用特征

处理	稻谷产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	氮素收获 指数/%	氮素干物质生产 效率/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮素籽粒生产 效率/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮肥表观 利用率/%	氮肥农学 利用率/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$A_1W_1N_0$	(7765.6±105.3)d	(72.3±0.8)ab	(106.6±1.2)a	(68.9±0.7)a		
$A_1W_1N_1$	(8986.8±119.4)c	(74.4±0.8)a	(100.1±0.7)b	(60.1±1.0)b	(49.0±1.4)a	(16.3±0.9)b
$A_1W_1N_2$	(10 866.1±97.2)a	(67.9±3.1)c	(102.6±1.5)ab	(58.1±2.4)b	(49.5±2.0)a	(20.7±0.7)a
$A_1W_1N_3$	(9929.6±153.1)b	(69.6±2.7)bc	(99.2±2.4)b	(56.0±1.8)c	(28.5±1.5)b	(9.6±1.2)c
$A_1W_2N_0$	(8047.7±77.3)d	(72.7±1.6)b	(104.8±3.5)a	(67.2±0.4)a		
$A_1W_2N_1$	(9372.8±140.1)c	(79.2±2.7)a	(87.7±1.2)c	(59.2±1.3)b	(51.6±3.4)a	(17.7±0.5)b
$A_1W_2N_2$	(11 396.1±201.2)a	(67.3±0.9)c	(99.4±0.6)ab	(57.1±4.8)b	(53.2±4.5)a	(22.3±1.1)a
$A_1W_2N_3$	(10 235.5±107.7)b	(70.2±2.2)bc	(95.8±2.7)b	(54.2±1.5)c	(30.8±2.1)b	(9.7±1.4)c
$A_2W_1N_0$	(7240.3±56.7)c	71.1±1.5	(122.6±1.1)a	(78.6±4.1)a		
$A_2W_1N_1$	(8189.7±120.3)b	69.8±1.0	(101.2±1.4)b	(64.1±3.2)b	(47.7±1.0)a	(12.7±0.6)a
$A_2W_1N_2$	(9372.0±99.1)a	69.0±3.0	(100.8±2.5)b	(57.9±1.2)c	(48.6±2.5)a	(14.2±0.3)a
$A_2W_1N_3$	(9038.4±167.1)a	68.6±2.2	(98.7±0.9)b	(56.8±1.9)c	(28.5±2.7)b	(8.0±0.7)b
$A_2W_2N_0$	(7488.2±66.2)c	(75.7±2.1)a	(114.9±2.0)a	(77.0±0.7)a		
$A_2W_2N_1$	(8463.9±97.0)b	(67.8±0.9)b	(107.4±1.4)b	(62.9±1.0)b	(49.6±1.7)a	(13.0±1.1)a
$A_2W_2N_2$	(9617.9±110.3)a	(68.5±1.5)b	(104.9±3.6)b	(56.0±3.2)c	(50.0±2.4)a	(14.2±1.4)a
$A_2W_2N_3$	(9237.4±142.2)a	(69.8±2.3)b	(100.9±1.1)c	(55.8±3.6)c	(30.1±3.5)b	(7.8±0.9)b

表中数据为 2017 年和 2018 年试验数据的平均值; 同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在 0.05 水平上的差异有统计学意义。

## 2.5 秸秆还田和水氮管理对土壤脲酶活性的影响

由表 9 可知, 除  $A_1W_2N_2$  外, 同一秸秆还田和水氮管理下, 土壤脲酶活性均随水稻生育进程的推进先增加, 在拔节期达到最高点, 随后又逐渐下降; 除  $A_2W_1N_2$  和  $A_2W_2N_0$  外, 同一水氮管理和生育期内,  $A_1$  的土壤脲酶活性均高于  $A_2$  的, 各生育期  $A_1$  的平均土壤脲酶活性较  $A_2$  的提高了 4.8%~9.7%, 尤其以成熟期  $A_1$  的平均土壤脲酶活性显著高于  $A_2$  的

(表 2)。从不同灌溉方式来看, 在抽穗和成熟期, 施氮处理( $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ )的  $W_2$  的平均脲酶活性分别较  $W_1$  的增加 7.5% 和 7.6%。同一秸秆还田和灌溉方式及生育期内, 在分蘖盛期和拔节期, 除  $A_1W_2N_3$  外, 土壤脲酶活性均随施氮量的增加呈不同程度的增加趋势; 而抽穗和成熟期, 脲酶活性先随施氮量的增加而增加, 以  $N_2$  的最高, 继续增加施氮量脲酶活性反而降低。

表9 秸秆还田和水氮管理下稻田土壤的脲酶活性

Table 9 The soil urease activities of rice under straw returning and water and N management

处理	脲酶活性 mg/(g·d)			
	分蘖盛期	拔节期	抽穗期	成熟期
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(1.81±0.3)c	(2.48±0.2)c	(2.25±0.2)d	(2.01±0.2)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(3.12±0.6)b	(3.63±0.3)b	(2.97±0.3)c	(2.90±0.3)b
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(3.49±0.3)a	(4.19±0.3)a	(3.82±0.4)a	(3.60±0.5)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(3.54±0.4)a	(4.26±0.5)a	(3.50±0.2)b	(3.48±0.5)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(1.74±0.4)c	(2.48±0.7)b	(2.46±0.2)c	(1.96±0.3)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(2.75±0.7)b	(3.46±0.6)b	(3.37±0.4)b	(3.22±0.4)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(3.48±0.5)a	(3.94±0.5)a	(3.96±0.3)a	(3.90±0.2)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(3.47±0.3)a	(4.01±0.3)a	(3.89±0.3)a	(3.80±0.2)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(1.52±0.4)c	(2.18±0.3)c	(2.06±0.3)d	(1.90±0.2)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(2.72±0.8)b	(3.19±0.5)b	(2.83±0.2)c	(2.70±0.3)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(3.50±0.5)a	(4.12±0.2)a	(3.68±0.2)a	(3.33±0.2)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(3.52±0.4)a	(4.13±0.3)a	(3.37±0.5)b	(3.20±0.4)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(1.91±0.3)c	(2.36±0.3)c	(2.23±0.3)c	(1.80±0.3)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(2.66±0.5)b	(3.25±0.4)b	(3.15±0.5)b	(2.75±0.4)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(3.22±0.5)a	(3.91±0.3)a	(3.70±0.4)a	(3.60±0.4)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(3.27±0.4)a	(3.98±0.5)a	(3.62±0.3)a	(3.40±0.3)a

表中数据为2018年的试验数据;同一灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在0.05水平上的差异有统计学意义。

表10 秸秆还田和水氮管理下稻田土壤的铵态氮和硝态氮质量分数

Table 10 The mass fractions of soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N of rice under straw returning and water and N management

处理	铵态氮质量分数				硝态氮质量分数			
	分蘖盛期	拔节期	抽穗期	成熟期	分蘖盛期	拔节期	抽穗期	成熟期
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(9.2±0.5)b	(11.1±0.3)d	(32.1±1.3)d	(10.1±0.3)d	(14.6±0.8)c	(24.0±1.5)c	(13.0±0.3)c	(17.8±1.2)c
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(9.3±0.6)b	(12.0±0.6)c	(36.0±1.8)c	(10.8±0.3)c	(19.9±2.0)b	(26.1±0.3)b	(18.1±0.4)b	(22.1±1.0)b
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(10.4±0.7)a	(13.4±0.3)b	(38.8±2.2)b	(11.4±0.4)b	(25.2±1.3)a	(27.4±1.1)b	(22.9±1.0)a	(25.8±1.4)a
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(10.7±0.4)a	(14.0±0.7)a	(44.0±3.2)a	(12.2±0.5)a	(26.1±0.9)a	(29.2±2.0)a	(18.7±1.2)b	(22.3±0.7)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(8.7±0.2)c	(10.2±0.4)d	(35.3±2.0)c	(10.2±0.3)c	(17.5±1.0)c	(24.1±0.3)c	(16.2±0.6)d	(20.0±0.5)c
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(10.1±0.5)b	(12.5±0.2)c	(36.7±2.1)c	(11.1±0.2)b	(20.6±0.7)b	(27.0±0.6)b	(18.6±0.5)c	(22.2±0.6)b
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(10.4±0.3)ab	(13.8±0.6)b	(39.0±1.7)b	(11.5±0.2)b	(24.7±2.1)a	(27.8±0.5)b	(23.7±0.7)a	(26.6±1.0)a
A <sub>1</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(10.9±0.4)a	(14.8±0.2)a	(42.6±2.0)a	(12.3±0.4)a	(25.7±1.1)a	(29.6±1.2)a	(21.0±1.0)b	(22.4±0.6)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(7.4±0.2)c	(8.8±0.5)c	(31.6±2.3)c	(10.1±0.3)c	(14.4±0.5)c	(22.4±0.7)c	(12.1±0.4)c	(17.6±1.0)c
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(8.5±0.4)b	(10.9±0.5)b	(33.9±2.4)bc	(10.7±1.0)b	(19.9±0.6)b	(25.6±1.4)b	(16.2±0.6)b	(21.2±0.5)b
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(8.9±0.3)b	(12.4±0.7)a	(36.0±2.2)b	(11.4±0.7)a	(20.3±0.5)b	(25.7±1.6)b	(22.2±0.7)a	(25.0±0.6)a
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(9.8±0.5)a	(12.8±0.6)a	(40.7±2.0)a	(11.6±0.4)a	(25.6±1.0)a	(28.3±2.0)a	(16.2±0.5)b	(22.0±1.2)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(7.7±0.4)c	(10.0±0.2)c	(32.4±2.4)c	(9.9±0.2)c	(16.1±0.3)d	(23.1±1.0)d	(12.4±0.3)d	(19.5±0.4)c
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(8.9±0.5)b	(10.9±0.5)b	(34.9±2.2)bc	(10.8±0.4)b	(20.2±0.5)c	(25.6±2.2)c	(17.5±0.4)c	(21.6±1.3)b
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(10.3±0.3)a	(13.3±0.5)a	(36.1±1.7)b	(11.7±0.6)a	(22.6±1.1)b	(27.0±0.5)b	(22.2±1.0)a	(26.2±0.4)a
A <sub>2</sub> W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(10.4±0.6)a	(13.4±0.6)a	(40.4±2.0)a	(12.1±0.5)a	(25.2±1.2)a	(28.2±0.3)a	(19.6±0.7)b	(22.1±1.1)b

表中数据为2017年和2018年试验数据的平均值;同一秸秆还田和灌溉方式内同列数据后不同字母示不同施氮处理间在0.05水平上的差异有统计学意义。

## 2.7 秸秆还田和水氮管理对稻田土壤铵态氮的影响

从表10可知,同一秸秆还田和水氮管理下,稻田土壤铵态氮质量分数随水稻生育进程的推进

## 2.6 秸秆还田和水氮管理对稻田土壤硝态氮的影响

由表10可知,随水稻生育进程的推进,同一秸秆还田与水氮管理下,稻田土壤硝态氮质量分数从分蘖盛期到拔节期升高,随后到抽穗期下降,到成熟期又有所升高,在拔节期达到最高值。同一水氮管理和生育期内,A<sub>1</sub>的土壤硝态氮质量分数均高于A<sub>2</sub>的,不同生育期A<sub>1</sub>的平均土壤硝态氮质量分数提高了2.3%~10.0%,且以抽穗期提高的最多。从不同灌溉方式来看,除分蘖盛期的A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>和A<sub>1</sub>W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>及分蘖盛期和拔节期的A<sub>2</sub>W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>外,同一秸秆还田和施氮量及生育期内,W<sub>2</sub>的土壤硝态氮质量分数均高于W<sub>1</sub>的。就施氮量而言,同一秸秆还田和灌溉方式及生育期内,分蘖盛期和拔节期的土壤硝态氮质量分数随施氮量的增加而增加,而抽穗和成熟期的土壤硝态氮质量分数变化趋势与铵态氮的不同,土壤硝态氮质量分数先随施氮量的增加而增后,以N<sub>2</sub>的最大,继续增加施氮量,硝态氮质量分数反而降低。

先增加,在抽穗期均达到最高点,随后又下降。除A<sub>2</sub>W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>外,同一水氮管理和生育期内,A<sub>1</sub>的土壤铵态氮质量分数均高于A<sub>2</sub>的,不同生育期A<sub>1</sub>的平



均土壤铵态氮质量分数较  $A_2$  的提高了 1.6%~11.1%，且以分蘖盛期提高的最大，成熟期提高的最小。从不同灌溉方式来看，除分蘖盛期和拔节期的  $A_1W_1N_0$ 、抽穗期的  $N_3$  和成熟期的  $A_2W_1N_3$  外，同一秸秆还田和施氮量及生育期内， $W_2$  的土壤铵态氮质量分数均高于  $W_1$  的。就施氮量而言，同一秸秆还田和灌溉方式内，水稻各生育期稻田土壤铵态氮质量分数均随施氮量的增加而不同程度的增加。

### 3 结论与讨论

合理的水氮管理可有效提高水稻主要生育时期叶片、茎鞘、穗部氮素的积累，提高对氮素的吸收利用<sup>[5,16]</sup>，且节水灌溉条件下氮肥的施用利于根系对耕层土壤水分的利用，提高水肥利用效率<sup>[17]</sup>。何虎等<sup>[18]</sup>和徐国伟等<sup>[19]</sup>研究表明，在一定的施氮范围内，秸秆还田结合实地氮肥运筹模式，利于产量及氮肥利用效率的协同提高。本研究中，秸秆还田方式与水氮管理对水稻氮素利用特征存在显著或极显著的影响。在不同秸秆还田方式下，水分和氮素互作能有效促进水稻对氮素的吸收、积累和转运；各秸秆还田处理下， $W_2$  的植株各器官氮素积累、茎鞘和叶片氮素转运量及转运率的平均值均大于  $W_1$  的，表明在秸秆还田下，有氧灌溉可促进植株对氮素的吸收，提高水稻抽穗前氮素积累，促进结实期氮素向穗部的转运，提高氮素收获指数，确保养分以满足群体库容和籽粒充实度。

王麒等<sup>[20]</sup>研究表明，秸秆还田下不同程度增施氮素可提高植株氮素积累。本研究中，与不施氮处理相比，秸秆堆腐还田配施合理的氮肥可显著提高水稻各生育时期叶、茎鞘、穗的氮素积累，且除 2017 年成熟期叶片的  $A_2W_2N_1$  外，均高于秸秆直接还田的。秸秆堆腐还田有利于秸秆中速效养分的释放，并有助于水稻对秸秆中养分的吸收与利用，因此，相对于直接还田处理，秸秆堆腐还田的水稻群体构建(叶片增大、有效分蘖数增多、茎秆粗壮等)增大，地上部干物质积累相对较大，在秸秆处理间植株氮含量差异不显著的基础上，也直接促使植株氮素积累提高，这进一步补充和完善了笔者前期的研究结果<sup>[1,2,6,12]</sup>。相对于直接还田处理，秸秆堆腐还田显著提高了抽穗期到成熟期的叶片、茎鞘各营养器官氮素的转运量，并增加了叶片与茎鞘氮素总转运

量，促进了穗部氮素积累；但植株群体构建叶片较大，使氮素在叶片中滞留的较多，导致多数堆腐还田处理的叶片氮素转运率低于直接还田处理的。此外，2 年的施氮积累有差异，但变化趋势一致，主要原因可能是 2 年试验地点和基础地力不同，且因气候因素的影响，水稻对温光的利用效率不同，导致了生育期植株的各器官氮素积累、分配、转运及生产效率的差异。

作物生长与土壤环境密不可分，而秸秆还田可对土壤温度、湿度、容重和团粒结构等物理特性产生影响，还可影响土壤中氮、磷、钾及有机质的含量<sup>[21-23]</sup>。在秸秆还田下，由于秸秆腐熟使土壤微生物大量繁殖及秸秆养分大量释放到土壤中<sup>[24-25]</sup>，并通过土壤耕作方式<sup>[26]</sup>、水旱轮作模式<sup>[27]</sup>等管理措施，可有效提高土壤有机质、降低耕层容重，增加不同耕层(0~5 cm 与 5~15 cm)土壤的含水量，提高速效养分含量，达到改善土壤理化性质，提高土壤肥力的目的。本研究中，除  $A_2W_1N_2$  和  $A_2W_2N_0$  外，同一水氮管理和生育期内，秸秆堆腐还田的土壤脲酶活性均高于秸秆直接还田的，各生育期秸秆堆腐还田的平均土壤脲酶活性较秸秆直接还田的提高了 4.8%~9.7%，尤其以成熟期秸秆堆腐还田的平均土壤脲酶活性显著高于秸秆直接还田处理的。

本研究中，同一秸秆还田和施氮量及生育期内，多数有氧灌溉处理的土壤铵态氮和硝态氮质量分数高于淹水灌溉处理的，成熟期有氧灌溉处理的平均土壤铵态氮和硝态氮质量分数均显著高于淹水灌溉处理的。其原因可能是淹水灌溉使土壤长期处于密闭状态，影响土壤环境和秸秆腐解所致<sup>[28]</sup>。本研究中，随着施氮量的增加，除  $A_1W_2N_3$  外，土壤脲酶在分蘖盛期和拔节期呈递增趋势；在抽穗期和成熟期则先增加，在施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup> 时最高，继续增加施氮量脲酶活性又反而降低。表明在秸秆堆腐还田处理下，有氧灌溉与适宜施氮量配施能更好地协调产量与氮肥生理利用效率，改善土壤理化性质，实现水稻高产与氮肥高效利用的目的。

稻油轮作种植制度下，油菜秸秆堆腐还田与水氮管理可提高水稻氮肥利用效率，改善土壤理化性质。本研究条件下，油菜秸秆堆腐还田、有氧灌溉与配施 150 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥，可有效提高植株结实期氮素积累量、转运量及转运率，增强水稻结实期土壤

耕层脲酶活性,从而促进水稻产量及氮肥利用率的同步提高。

#### 参考文献:

- [1] 严奉君,孙永健,马均,等.不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J].中国水稻科学,2015,29(1):56-64.
- [2] 严奉君,孙永健,马均,等.秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):23-35.
- [3] KOUSTERNA E. The effect of covering and mulching on the temperature and moisture of soil and broccoli yield[J]. Acta Agrophysica, 2014, 21(2): 165-178.
- [4] SU W, LU J W, WANG W N, et al. Influence of rice straw mulching on seed yield and nitrogen use efficiency of winter oilseed rape(*Brassica napus* L.) in intensive rice-oilseed rape cropping system[J]. Field Crops Research, 2014, 159: 53-61.
- [5] 孙永健,马均,孙园园,等.水氮管理模式对杂交水稻冈优527群体质量和产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):2047-2061.
- [6] 严奉君,孙永健,马均,等.灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟特征及水稻氮素利用的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(11):1435-1444.
- [7] YAN F J, SUN Y J, XU H, et al. Effects of wheat straw mulch application and nitrogen management on rice root growth, dry matter accumulation and rice quality in soils of different fertility[J]. Paddy and Water Environment, 2018, 16(3): 507-518.
- [8] WANG Z Q, ZHANG W Y, BEEBOUT S S, et al. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2016, 193: 54-69.
- [9] WANG Q, WANG S. Effects of nitrogen amount on yield and nutrient absorption of cold land japonica rice under the condition of straw returning[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 737: 325-331.
- [10] SUN Y J, SUN Y Y, YAN F J, et al. Coordinating postanthesis carbon and nitrogen metabolism of hybrid rice through different irrigation and nitrogen regimes[J]. Agronomy, 2020, 10: 1187.
- [11] SUREKHA K, KUMARI A P P, REDDY M N, et al. Crop residue management to sustain soil fertility and irrigated rice yields[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 67(2): 145-154.
- [12] 殷尧翥,郭长春,孙永健,等.稻油轮作下油菜秸秆还田与水氮管理对杂交稻群体质量和产量的影响[J].中国水稻科学,2019,33(3):257-268.
- [13] 王海月,郭长春,孙永健,等.缓释氮肥减量配施和株距对机插杂交水稻氮素利用的影响[J].中国水稻科学,2018,32(4):374-386.
- [14] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等.秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.
- [15] 赵春江.数字农业信息标准研究——作物卷[M].北京:中国农业出版社,2004.
- [16] 孙永健,孙园园,刘树金,等.水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J].作物学报,2011,37(12):2221-2232.
- [17] SHARMA B D, KAR S, CHEEMA S S. Yield, water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter wheat[J]. Fertilizer Research, 1990, 22(2): 119-127.
- [18] 何虎,吴建富,曾研华,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):811-820.
- [19] 徐国伟,吴长付,刘辉,等.麦秸还田及氮肥管理技术对水稻产量的影响[J].作物学报,2007,33(2):284-291.
- [20] 王麒,王术.秸秆还田下氮肥施用量对东农428水稻叶片生长及根系形态的影响[J].沈阳农业大学学报,2014,45(4):469-472.
- [21] 高亚军,黄东迈,朱培立,等.稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对氮素肥力的影响[J].土壤学报,2000,37(4):456-463.
- [22] 路文涛,贾志宽,张鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):522-528.
- [23] 李红,周连第,张有山,等.秸秆还田对土壤蓄水保肥及作物产量的影响[J].中国农村水利水电,2002(1):36-38.
- [24] 宫亮,孙文涛,王聪翔,等.玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J].玉米科学,2008,16(2):122-124.
- [25] 王应,袁建国.秸秆还田对农田土壤有机质提升的探索研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2007,27(6):120-121.
- [26] 李凤博,牛永志,高文玲,等.耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J].土壤通报,2008,39(3):549-552.
- [27] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):587-594.
- [28] YAN F J, SUN Y J, HUI X, et al. The effect of straw mulch on nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use in hybrid rice[J]. Paddy and Water Environment, 2019, 17(1): 23-33.

责任编辑:邹慧玲

英文编辑:柳正