

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.007

张斯梅, 段增强, 顾克军, 等. 不同水稻灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸腐解特性及土壤养分的影响. 土壤, 2023, 55(4): 749–755.

不同水稻灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸腐解特性及土壤养分的影响^①

张斯梅^{1, 2, 3}, 段增强^{1*}, 顾克军², 张传辉², 许博²

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 南京 210014; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了探讨不同水稻灌溉模式和氮肥减量对还田小麦秸秆腐解特性及土壤养分的影响, 通过田间试验, 设置了水稻灌溉模式(常规灌溉, W1; 干湿交替灌溉, W2)和施氮水平(不施氮, N0; 常量施氮, N1; 减量 20% 施氮, N2)处理, 采用尼龙网袋法研究了不同处理下小麦秸秆腐解动态、养分释放规律及土壤养分含量。结果表明, 干湿交替灌溉和氮肥施用均可促进还田小麦秸秆的腐解, 减量 20% 施氮处理小麦秸秆累积腐解率低于常量施氮处理。相同施氮水平下, 干湿交替灌溉模式小麦秸秆碳与氮磷钾累积释放率高于常规灌溉模式; 与常量施氮相比, 减量 20% 施氮处理小麦秸秆碳与氮磷钾累积释放率降低。干湿交替灌溉和施氮使土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量提高, 而减量 20% 施氮对土壤养分含量的影响较小。综上所述, 干湿交替灌溉和氮肥施用促进了还田小麦秸秆腐解和养分释放, 有利于土壤养分提升; 而减量 20% 施氮对小麦秸秆腐解与养分释放以及土壤养分无明显影响。

关键词: 小麦秸秆; 干湿交替灌溉; 氮肥减量; 腐解; 土壤养分

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A

Effects of Different Rice Irrigation Patterns and Nitrogen Fertilizer Reduction on Decomposition Characteristics of Wheat Straw and Soil Nutrients

ZHANG Simei^{1, 2, 3}, DUAN Zengqiang^{1*}, GU Kejun², ZHANG Chuanhui², XU Bo²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the effects of different rice irrigation patterns and nitrogen reduction on the decomposition characteristics of wheat straw returned to field and soil nutrients, an experiment using nylon net bag was conducted with the treatments as follows: 1) rice irrigation patterns (conventional irrigation, W1; alternate wetting and moderate soil drying irrigation, W2); 2) nitrogen application levels (no nitrogen application, N0; conventional nitrogen application, N1; 20% reduction of conventional nitrogen application, N2). The decomposition and nutrient release of wheat straw and soil nutrient contents under different treatments were studied. The results show that both W2 and nitrogen application promote the decomposition of wheat straw returned to the field. N2 decreases the cumulative decomposition rate of wheat straw compared with N1. Under the same nitrogen application level, W2 increases the cumulative release rates of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium of wheat straw compared with W1. N2 decreases the cumulative release rate of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium of wheat straw compared with N1. W2 and nitrogen application increase the contents of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen and available phosphorus, while N2 has little effect on the contents of soil nutrients compared with N1. In conclusion, W2 and nitrogen application promote the decomposition and nutrient release of wheat straw returned to field, which is conducive to the improvement of soil nutrients, while N2 has no significant effect on the decomposition and nutrient release of wheat straw and

^①基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1002)和江苏省重点研发计划项目(BE2019377)资助。

* 通讯作者(zqduan@issas.ac.cn)

作者简介: 张斯梅(1981—), 女, 江苏赣榆人, 副研究员, 博士研究生, 主要从事作物栽培生理生态及秸秆资源化利用研究。E-mail: zhangsimei929@sina.com

soil nutrients.

Key words: Wheat straw; Alternate wetting and moderate soil drying irrigation; Nitrogen fertilizer reduction; Decomposition; Soil nutrients

多年来,氮肥投入一直是保证我国作物高产稳产的重要措施。为了追求作物的高产,农民常常加大氮肥使用量。在水稻生产中,氮肥过量施用不仅导致水稻贪青晚熟、籽粒充实度下降、病虫害加重等问题^[1],还使氮肥利用效率降低、农业面源污染加重^[2-3],严重制约了水稻的可持续生产^[4]。随着我国粮食产量的不断提高,农作物秸秆资源的产生量也呈增长的趋势。秸秆中含有氮、磷、钾等营养元素,是一种重要的养分资源。秸秆还田不仅能够使养分得以循环利用,还具有改善土壤结构、丰富土壤微生物多样性等作用^[5-9]。秸秆腐解与养分释放涉及复杂的生物学与非生物学过程,秸秆在土壤中的腐解与养分释放不仅与秸秆本身性质有关,也与土壤温度、水分状况、肥料施用等密切相关^[10]。水分灌溉模式、土壤氮素水平是影响还田秸秆腐解过程与养分释放规律的重要因素^[11-12]。

秸秆腐解过程可大致分为易矿化碳组分分解、半纤维素与纤维素分解、木质素分解 3 个阶段^[13],整体上呈现出前快后慢的腐解特征。前人研究结果显示,C/N 是影响秸秆中碳素和氮素释放的关键因子,秸秆 C/N>30 时土壤微生物对土壤氮素的固持作用增强,土壤有效氮水平下降^[14]。关于施氮对麦秸腐解的影响机制,有研究认为,外源氮投入使纤维素酶等水解酶活性提高而氧化酶活性下降,进而影响秸秆的腐解过程^[15-16];也有研究认为,氮肥施用使秸秆腐解前期乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性增加,加快了秸秆的腐解进程^[17]。前人关于水分管理对还田秸秆腐解的研究大多在盆栽模拟条件下开展,有关稻麦轮作系统中氮肥减量的研究主要关注其对作物生长、产量和氮素利用效率的影响,针对不同水稻灌溉模式和氮肥减量对还田小麦秸秆腐解特性影响的田间试验研究较少。本研究以小麦秸秆为材料,设置了不同的水稻灌溉模式和施氮水平处理,探讨水稻灌溉模式和氮肥减量对还田小麦秸秆腐解特性及土壤养分的影响,以期为稻麦轮作系统小麦秸秆还田利用与农业可持续生产提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2019 年 5—11 月在江苏省农业科学院试

验地进行,供试小麦和水稻品种为“宁麦 16”和“南粳 9108”。前茬小麦收获后秸秆全量还田,还田量约为 6 000 kg/hm²,秸秆中全碳、全氮、全磷和全钾的含量分别为 471.87、5.01、0.99 和 11.03 g/kg。试验开始前耕层土壤的有机质含量为 19.02 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 79.83、20.71 和 88.16 mg/kg。

试验设置 2 种水稻灌溉模式(常规灌溉, W1; 干湿交替灌溉, W2)和 3 个施氮水平(不施氮, 0 kg/hm², N0; 常量施氮, 300 kg/hm², N1; 减量 20% 施氮, 240 kg/hm², N2), 共 6 个处理, 随机区组设计, 重复 3 次, 采用尼龙网袋法研究还田小麦秸秆的腐解特性与养分释放规律。将采集到的小麦秸秆剪切成长为 5 cm 左右的小段, 称取 30 g 烘干小麦秸秆装入 100 目的尼龙网袋(网袋长 30 cm, 宽 20 cm), 封口, 水稻移栽前 1 d 埋入稻田, 每个小区埋 10 个网袋, 埋深 10 cm 左右。小区面积 20 m², 小区间筑埂并在埂上覆膜, 每个小区单独排灌。水稻常规灌溉模式为除分蘖末、拔节初排水搁田外, 从移栽到收获前 1 周一直保持 2~3 cm 水层; 水稻干湿交替灌溉模式为 2~3 cm 水层自然落干至灌水指标(土壤水势为(-15±5) kPa)时, 灌 2~3 cm 水层, 再落干, 再灌水, 如此循环直到收获前 1 周。供试氮肥为尿素(含 N 46%), 分基肥、分蘖肥和穗肥共 3 次施用, 基肥、分蘖肥与穗肥的比例为 3:3:4, 基肥于水稻移栽前 2 d 施用, 分蘖肥于移栽后 7 d 施用, 穗肥于倒 4 叶和倒 2 叶等量施用。磷肥(P₂O₅)施用量为 90 kg/hm², 全部作为基肥一次性施入。钾肥(K₂O)施用量为 120 kg/hm², 分基肥和穗肥两次施用。不施氮处理的小区, 磷肥和钾肥正常施用。其他管理措施按当地大面积生产进行。

1.2 样品采集与处理

分别于水稻分蘖期、孕穗期、抽穗期、灌浆期和成熟期取出埋入土层的还田小麦秸秆网袋, 经水洗净后烘干, 测定小麦秸秆干物质量。然后将小麦秸秆干样粉碎, 测定其养分含量。水稻收获后采用五点法采集土样, 混匀风干、过筛, 用于测定土壤养分含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 秸秆干物质量 从土壤中取出的小麦秸秆, 经去离子水洗净后, 烘干至恒重, 测定残余小麦秸秆的干物质量。

1.3.2 秸秆全碳和养分含量 小麦秸秆全碳、全氮、全磷和全钾含量的测定，分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度计法^[18]。

1.3.3 土壤养分含量 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量的测定采用土壤农化分析常规方法^[18]。

1.4 数据处理与分析

秸秆累积腐解率、碳(氮、磷、钾)累积释放率分别按下述公式^[19]进行计算：

$$\text{秸秆累积腐解率}(\%) = (M_0 - M_s) / M_0 \times 100$$

$$\text{秸秆碳(氮、磷、钾)累积释放率}(\%) = (M_0 \times C_0 - M_s \times C_s) / (M_0 \times C_0) \times 100$$

式中： M_0 为试验开始时加入的秸秆干物质量，g； M_s 为取样时的秸秆干物质量，g； C_0 为试验开始时秸秆的碳(氮、磷、钾)含量，mg/g； C_s 为取样时秸秆的碳(氮、磷、钾)含量，mg/g。

采用 Microsoft Excel 2016 进行试验数据的整理和计算，运用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行统计分析，使用 LSD 法进行多重比较(显著性水平为 $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸累积腐解率的影响

表 1 结果表明，灌溉模式对水稻整个生育期还田小麦秸秆累积腐解率的影响极显著，施氮水平显著影响水稻孕穗期后小麦秸秆累积腐解率，而灌溉模式和施氮水平的交互作用对水稻各生育期小麦秸秆累积腐解率的影响不显著。如图 1 所示，不同处理小麦秸秆的腐解动态一致，小麦秸秆累积腐解率表现为腐解前期上升较快，随后趋缓，水稻生长后期变化较小。

至水稻成熟期，各处理小麦秸秆累积腐解率达到了 47.64% ~ 60.84%。相同施氮水平下，干湿交替灌溉模式小麦秸秆累积腐解率高于常规灌溉模式，采用干湿交替灌溉模式促进了水稻分蘖期前小麦秸秆的腐解，说明灌溉模式对小麦秸秆腐解的影响主要体现在还田初期。两种水稻灌溉模式下，施氮处理水稻各生育期小麦秸秆累积腐解率均高于不施氮处理；至水稻成熟期，N1 处理小麦秸秆累积腐解率较 N0 处理显著提高，N2 处理小麦秸秆累积腐解率亦高于 N0 但差异不显著。与 N1 处理相比，N2 处理水稻各生育期小麦秸秆累积腐解率略有降低，差异未达显著水平。可见，还田小麦秸秆腐解总体上表现出前期快、后期慢的趋势，采用干湿交替灌溉模式和施用氮肥具有促进小麦秸秆腐解的作用，且小麦秸秆累积腐解率随着施氮水平的下降而降低。

2.2 不同灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸碳累积释放率的影响

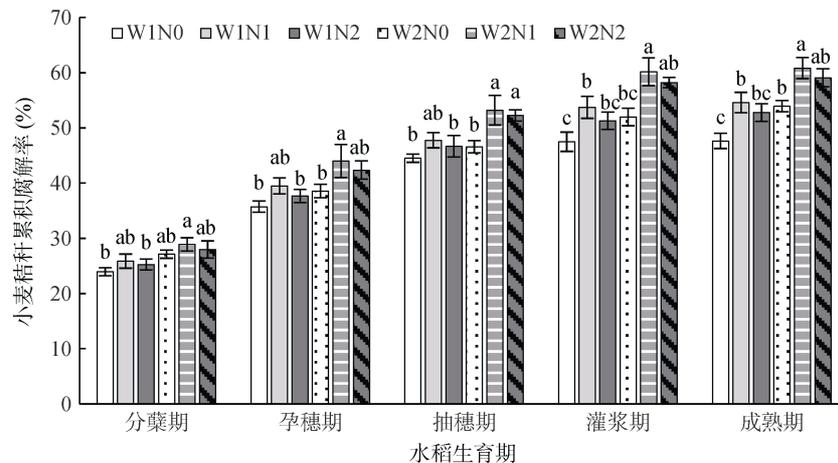
由表 2 可以看出，各处理小麦秸秆碳累积释放率的变化趋势相似，还田初期碳素释放较快，释放速率随水稻生育进程的推进而减缓，这与小麦秸秆的腐解

表 1 灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆累积腐解率影响的双因素方差分析结果

Table 1 Two-factor variance analysis of cumulative decomposition rates of wheat straw affected by irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
W	**	**	**	**	**
N	NS	*	**	**	**
W × N	NS	NS	NS	NS	NS

注：W 指灌溉模式，N 指施氮水平；*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著，NS 表示不显著。



(图中小写字母不同表示水稻同一生育期不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 1 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆累积腐解率的影响

Fig. 1 Cumulative decomposition rates of wheat straws under different irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

表 2 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆碳累积释放率的影响

Table 2 Carbon release rates of wheat straws under different irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

处理	小麦秸秆碳累积释放率(%)				
	分蘖期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
W1N0	29.87 b	43.03 b	44.89 b	47.43 b	50.59 c
W1N1	32.25 b	46.23 ab	50.97 ab	54.24 ab	58.80 ab
W1N2	30.72 b	45.39 b	49.91 b	52.12 b	55.70 bc
W2N0	36.12 ab	47.28 ab	49.80 b	52.11 b	55.01 bc
W2N1	39.34 a	52.70 a	56.15 a	59.02 a	63.13 a
W2N2	37.81 ab	51.00 ab	55.05 ab	57.00 ab	60.26 ab

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下表同。

过程基本一致。至水稻成熟期, 不同处理小麦秸秆碳累积释放率均达到 50% 以上。相同施氮水平下, 水稻各生育期干湿交替灌溉模式小麦秸秆碳累积释放率均高于常规灌溉模式, 其中 N1 施氮水平下水稻分蘖期不同灌溉模式间差异显著。两种水稻灌溉模式下, 施氮处理小麦秸秆碳累积释放率均高于不施氮处理; 其中干湿交替灌溉模式下, 水稻抽穗期、灌浆期

和成熟期 N1 处理小麦秸秆碳累积释放率较 N0 处理显著提高。同一水稻灌溉模式下, 水稻各生育期 N2 处理小麦秸秆碳累积释放率较 N1 处理有所降低, 差异未达显著水平。可见, 采用干湿交替灌溉模式和施用氮肥可使小麦秸秆碳累积释放率提高, 减量 20% 施氮对小麦秸秆碳累积释放率无明显作用。

2.3 不同灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸氮累积释放率的影响

由表 3 可知, 从水稻分蘖期到成熟期, 各处理还田小麦秸秆中的氮素释放规律相似。在相同的施氮水平下, 干湿交替灌溉模式水稻各生育期小麦秸秆氮累积释放率高于常规灌溉模式, 其中 N0 和 N1 施氮水平下水稻分蘖期和孕穗期灌溉模式间差异显著。两种水稻灌溉模式下, 不同施氮水平处理小麦秸秆氮累积释放率均表现为 $N1 > N2 > N0$, N1 和 N2 处理小麦秸秆氮累积释放率显著高于 N0 处理, N2 处理小麦秸秆氮累积释放率较 N1 处理有所降低但差异不显著。说明采用干湿交替灌溉模式和施氮可促进还田小麦秸秆中氮素的释放, 减量 20% 施氮对小麦秸秆氮累积释放率影响不大。

表 3 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆氮累积释放率的影响

Table 3 Nitrogen release rates of wheat straws under different irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

处理	小麦秸秆氮累积释放率(%)				
	分蘖期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
W1N0	19.51 d	26.92 d	27.68 d	29.15 c	30.09 c
W1N1	27.51 b	34.03 b	38.20 ab	40.75 ab	40.54 ab
W1N2	24.97 bc	32.50 bc	35.76 bc	38.01 b	39.09 b
W2N0	23.12 c	28.34 c	31.01 cd	31.68 c	33.22 c
W2N1	33.02 a	39.04 a	41.71 a	44.12 a	45.06 a
W2N2	30.06 ab	37.07 ab	40.41 ab	42.31 ab	43.23 ab

2.4 不同灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸磷累积释放率的影响

如表 4 所示, 还田小麦秸秆中磷素的释放规律与氮素相似。相同施氮水平下, 干湿交替灌溉模式小麦秸秆磷累积释放率较常规灌溉模式有所提高, 除 N1、N2 处理在水稻成熟期差异显著外, 其他差异均不显著。水稻常规灌溉和干湿交替灌溉模式下, 不同施氮水平处理小麦秸秆磷累积释放率均表现为 $N1 > N2 > N0$, 施氮处理小麦秸秆磷累积释放率高于 N0 处理, N2 处理小麦秸秆磷累积释放率低于 N1 处理, 但差异均不显著。总体上, 水稻灌溉模式和氮肥施用对小麦秸秆磷素的释放影响较小, 不同施氮水平间差异亦不明显。

2.5 不同灌溉模式和氮肥减量对还田麦秸钾累积释放率的影响

由表 5 结果可以看出, 不同灌溉模式和施氮水平下, 水稻分蘖期各处理小麦秸秆中的钾累积释放率已达 90% 以上, 分蘖期后小麦秸秆钾累积释放率变化幅度均较小。与常规灌溉模式相比, 干湿交替灌溉模式小麦秸秆钾累积释放率有所升高, 差异不显著。两种灌溉模式下, 不同施氮水平间的差异均未达显著水平。

2.6 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆还田下水稻产量的影响

表 6 结果显示, 不同处理水稻产量及其构成因素间存在差异。相同施氮水平下, 干湿交替灌溉模式水

表 4 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆磷累积释放率的影响
Table 4 Phosphorus release rates of wheat straws under different irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

处理	小麦秸秆磷累积释放率(%)				
	分蘖期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
W1N0	48.81 a	50.57 b	51.73 b	52.53 b	53.03 b
W1N1	50.07 a	53.30 ab	55.13 ab	56.24 ab	57.16 b
W1N2	49.93 a	52.47 ab	53.63 b	54.22 b	54.57 b
W2N0	51.36 a	55.06 ab	57.45 ab	60.14 ab	60.55 ab
W2N1	55.10 a	58.12 a	60.90 a	63.16 a	65.01 a
W2N2	53.48 a	55.97 ab	59.47 ab	61.44 ab	62.24 a

表 5 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆钾累积释放率的影响

Table 5 Potassium release rates of wheat straws under different irrigation patterns and nitrogen fertilizer reduction

处理	小麦秸秆钾累积释放率(%)				
	分蘖期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
W1N0	90.36 a	90.65 a	90.74 a	90.90 a	90.93 a
W1N1	91.47 a	91.69 a	91.84 a	92.01 a	92.06 a
W1N2	90.93 a	91.30 a	91.49 a	91.59 a	91.59 a
W2N0	92.59 a	92.77 a	92.83 a	92.91 a	92.95 a
W2N1	93.24 a	93.58 a	93.74 a	93.93 a	94.02 a
W2N2	92.66 a	92.98 a	93.18 a	93.34 a	93.34 a

表 6 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆还田下水稻产量及其构成因素的影响

Table 6 Yields and components of rice under different irrigation patterns and nitrogen reduction with wheat straw returning

处理	有效穗数 (10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
W1N0	227.45 c	117.17 b	93.06 a	25.84 a	5 652.63 c
W1N1	334.49 a	128.21 ab	91.33 a	24.80 b	9 122.54 ab
W1N2	320.18 ab	133.73 a	89.98 a	25.06 b	8 966.48 b
W2N0	226.93 c	117.99 b	94.22 a	26.07 a	6 071.94 c
W2N1	331.21 ab	133.80 a	92.51 a	25.04 b	9 890.18 a
W2N2	316.09 b	143.52 a	92.26 a	25.42 ab	9 751.50 ab

稻产量较常规灌溉模式不同程度地增加, N0、N1 和 N2 水平下增产幅度分别为 7.42%、8.41% 和 8.76%。进一步分析产量构成因素, 干湿交替灌溉虽使有效穗数降低, 但每穗粒数、结实率和千粒重均有所增加, 这是干湿交替灌溉处理使产量提高的主要原因所在。同一灌溉模式下, 施氮处理水稻产量显著高于不施氮处理, 减量 20% 施氮处理水稻产量略低于常量施氮处理, 但差异不显著。

2.7 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆还田下土壤养分的影响

小麦秸秆还田条件下, 灌溉模式和施用氮肥对稻田土壤养分含量产生了一定程度的影响(表 7)。采用

干湿交替灌溉模式, 土壤有机质、全氮和速效养分含量较常规灌溉模式增加, 其中 N1 和 N2 施氮水平下土壤碱解氮含量差异达显著水平。同一灌溉模式下, 施氮处理土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量高于 N0 处理, 而土壤速效钾含量低于后者, 其中土壤碱解氮含量差异达显著水平; N2 处理土壤速效钾含量较 N1 处理有所增加, 而土壤全氮、碱解氮和有效磷含量降低, 差异均未达显著水平。可见, 小麦秸秆还田下采用干湿交替灌溉模式和施用氮肥可提高土壤养分含量, 减量 20% 施氮对土壤养分含量的影响作用不明显。

表 7 不同灌溉模式和氮肥减量对小麦秸秆还田下土壤养分含量的影响

Table 7 Soil nutrient contents under different irrigation patterns and nitrogen reduction with wheat straw returning

处理	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
W1N0	17.44 a	1.09 b	88.85 c	18.60 b	91.25 ab
W1N1	17.91 a	1.37 ab	108.02 b	19.75 ab	82.52 b
W1N2	17.89 a	1.32 ab	105.99 b	19.33 ab	84.39 b
W2N0	17.76 a	1.21 b	95.97 c	18.84 ab	94.92 a
W2N1	18.02 a	1.50 a	119.70 a	20.02 a	86.21 ab
W2N2	18.05 a	1.46 a	116.17 a	19.48 ab	88.10 ab

3 讨论

本试验研究结果表明, 小麦秸秆腐解与养分释放的快速期集中在水稻分蘖期前, 这与以往关于秸秆腐解的研究结果^[20-22]相一致。戴志刚等^[23]室内培养试验结果表明, 小麦、水稻、油菜秸秆的腐解过程可分为腐解快速期、腐解减缓期和腐解缓慢期 3 个阶段。信彩云等^[24]大田试验研究显示, 小麦秸秆氮素和钾素平均释放速率的高峰在腐解前期, 腐解后期呈下降的趋势, 而磷素的平均释放速率变化不大。主要原因在于腐解前期秸秆中可溶性碳水化合物、氨基酸等易

分解物质迅速释放,为土壤微生物提供了碳源和养分来源,微生物数量增多且活性增强,秸秆分解速率较快^[25-26];随后腐解速率下降是由于秸秆中易分解物质基本释放完全,残余的木质素等难分解成分相对较为稳定,不易被土壤微生物利用^[11]。

针对水分管理方式或氮肥施用单一因素对秸秆腐解的影响,前人已开展了有关研究工作,且水分管理方式试验大多在盆栽条件下进行。陶玥玥等^[27]研究结果显示,湿润灌溉体系下还田小麦秸秆腐解率较常规灌溉体系增加。路平^[28]试验研究发现,施氮区还田小麦秸秆的累积腐解率略高于无氮区。曾莉等^[11]在潮土中的研究结果表明,施用氮肥可加速秸秆腐解和碳素释放,施氮量间秸秆腐解率无显著差异。本试验将水稻灌溉模式和施氮水平两个因素结合起来,在田间试验条件下研究了灌溉模式和氮肥减量对还田小麦秸秆腐解和养分释放特性的影响,研究结果应用于稻田的水分与养分管理,对于秸秆还田利用、氮肥合理减量、水分利用效率提高等具有重要意义。本研究中,干湿交替灌溉和氮肥施用表现出促进还田小麦秸秆腐解的作用,小麦秸秆累积腐解率随施氮量减少而降低。小麦秸秆碳素释放规律与其腐解过程基本一致,干湿交替灌溉和施氮可使小麦秸秆碳累积释放率提高,减量 20% 施氮处理小麦秸秆碳累积释放率较常量施氮处理略有降低。前人研究结果显示,还田小麦秸秆腐解过程中,氮素、磷素和钾素的释放规律有所不同,最终释放率表现为钾>氮>磷,其中钾素在两周内基本释放完成^[11, 23]。本研究中,腐解初期小麦秸秆中的钾素在短时间内快速释放,水稻分蘖期各处理小麦秸秆中的钾素累积释放率均达 90% 以上。钾素在小麦秸秆还田初期快速释放,是由于秸秆中的钾素主要以水溶态存在,易溶于水而迅速释放出来^[11]。干湿交替灌溉和施氮促进了小麦秸秆中氮素的释放,减量 20% 施氮处理小麦秸秆氮累积释放率略低于常量施氮处理。前人研究显示,湿润灌溉体系下还田小麦秸秆氮释放率较常规灌溉体系增加^[27],施氮区小麦秸秆中氮素累积释放率高于无氮区^[28],本研究结果基本一致。水稻生长前期小麦秸秆磷素的释放量大于后期,这是由于秸秆 60% 以上的磷素以离子态存在,易溶于水而逐渐释放,后期以有机态存在的磷素相对难以释放。本研究中,干湿交替灌溉和氮肥施用有利于小麦秸秆中磷素的释放,减量 20% 施氮处理小麦秸秆磷累积释放率较常量施氮处理有所降低,这与前人的研究结果^[27-28]吻合。

无论秸秆还田、水分管理还是氮肥施用,势必对

土壤养分状况产生影响。晏军等^[29]在苏北地区的试验结果显示,小麦秸秆还田后,水稻收获时常规施肥处理的土壤有机质、全氮含量高于化肥减量 20% 处理和不施肥对照。本研究中,干湿交替灌溉模式下土壤养分含量较常规灌溉模式提高,原因可能在于土壤干湿交替过程中通气状况改善、土壤温度升高,有利于秸秆腐解与养分释放以及土壤养分矿化,进而使土壤养分含量提升。减量 20% 施氮处理土壤全氮、碱解氮和有效磷含量较常量施氮处理有所降低,差异不显著。可见,干湿交替灌溉有利于小麦秸秆还田下土壤养分的提升,而减量 20% 施氮并不会对土壤养分状况产生明显影响。

4 结论

干湿交替灌溉和氮肥施用具有促进还田小麦秸秆腐解、碳和氮磷钾释放的作用,减量 20% 施氮对小麦秸秆腐解和养分释放的影响不大。采用干湿交替灌溉模式有利于提高小麦秸秆还田下土壤养分含量,减量 20% 施氮对土壤养分含量无明显影响。

参考文献:

- [1] 杨梢娜, 俞巧钢, 叶静, 等. 施氮水平对杂交晚粳“浙优 12”产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1120-1125.
- [2] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 988-995.
- [3] 杨静, 郭文圻, 杨文浩, 等. 紫云英翻压后稻田土壤可溶性有机氮迁移特性与损失风险[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 786-796.
- [4] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4542-4548.
- [5] Büchi L, Wendling M, Amossé C, et al. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 256: 92-104.
- [6] Su Y, Lv J L, Yu M, et al. Long-term decomposed straw return positively affects the soil microbial community[J]. Journal of Applied Microbiology, 2020, 128(1): 138-150.
- [7] 彭娜, 王开峰, 王凯荣, 等. 不同水分管理下施用稻草对土壤有机酸和养分有效性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 857-862.
- [8] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297-302.
- [9] 黄薇, 吴凉萍, 宋路遥, 等. 配施不同腐秆剂对还稻田麦秸秆腐解和水稻产量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 40-46.
- [10] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质

- 和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
- [11] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1565–1577.
- [12] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351–3360.
- [13] Tveit A, Schwacke R, Svenning M M, et al. Organic carbon transformations in high-Arctic peat soils: Key functions and microorganisms[J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(2): 299–311.
- [14] Christopher S F, Lal R. Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26(1): 45–64.
- [15] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: Implications for litter and soil organic matter decomposition[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(1): 1–15.
- [16] Riggs C E, Hobbie S E. Mechanisms driving the soil organic matter decomposition response to nitrogen enrichment in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 54–65.
- [17] Guo T F, Zhang Q, Ai C, et al. Nitrogen enrichment regulates straw decomposition and its associated microbial community in a double-rice cropping system[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1–12.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 黄菲, 刘言, 李继福, 等. 水旱轮作条件下还田秸秆腐解和养分释放特征研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(18): 54–60, 5.
- [20] Bonanomi G, Incerti G, Giannino F, et al. Litter quality assessed by solid state ^{13}C NMR spectroscopy predicts decay rate better than C/N and Lignin/N ratios[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 40–48.
- [21] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1179–1187.
- [22] Grandy A S, Salam D S, Wickings K, et al. Soil respiration and litter decomposition responses to nitrogen fertilization rate in no-till corn systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 35–40.
- [23] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276.
- [24] 信彩云, 马惠, 王瑜, 等. 水旱轮作条件下稻麦秸秆腐解规律研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(8): 75–78.
- [25] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188–199.
- [26] Powell J R, Levy-Booth D J, Gulden R H, et al. Effects of genetically modified, herbicide-tolerant crops and their management on soil food web properties and crop litter decomposition[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(2): 388–396.
- [27] 陶玥玥, 周新伟, 金梅娟, 等. 湿润稻作体系中还田小麦秸秆分解及土壤活性碳变化特征[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 94–101.
- [28] 路平. 还田麦秸腐解动态及其与施氮的关系[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [29] 晏军, 王伟义, 李斌, 等. 秸秆还田下化肥减施对苏北地区水稻产量与氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 74–82.