东北农业科学　2025,50(5):26-32
Journal of Northeast Agricultural Sciences　DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2025.05.004

不同秸秆还田条件下水分调控对水稻产量及土壤肥力的影响

马　巍,孙一楠,柏程瀚,王斯文,刘晓亮,杨永志,孙　琪,侯立刚,刘　亮*
(吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)水稻研究所/农业农村部盐碱土改良与利用(东北内陆)重点实验室,吉林 公主岭 136100)

摘　要:为探究不同秸秆还田条件下水稻分蘖后期和拔节孕穗期水分调控对水稻产量和土壤肥力的影响,以“吉粳830”为试验材料,采用裂区试验设计,主区为不同秸秆处理方式:无秸秆还田(A_1)和秸秆全量还田(A_2)处理,副区为水分调控处理:轻度控水(WP_1,Ψsoil=0 kPa)、中度控水(WP_2,Ψsoil=-15 kPa)、中重度控水(WP_3,Ψsoil=-30 kPa)、重度控水(WP_4,Ψsoil=-45 kPa)、常规淹水(CK)处理。结果表明,秸秆全量还田条件下,分蘖后期水分调控A_2-WP_3处理产量最高,较A_2-CK增产22.5%;拔节孕穗期水分调控A_1-WP_4处理产量较A_1-CK下降了32.2%,A_2-WP_4处理产量较A_2-CK下降了19.8%,分蘖后期水分调控秸秆腐解率高于拔节孕穗期,而适度水分调控可有效提高土壤养分的供应能力。综合考虑各因素,秸秆全量还田条件下结合分蘖后期中重度控水(WP_3,Ψsoil=-30 kPa)可实现水稻产量提升、地力培育与秸秆高效腐解的协同作用。

关键词:水稻;水分调控;秸秆还田;土壤肥力
中图分类号:S511.07;S141.4　**文献标识码**:A　**文章编号**:2096-5877(2025)05-0026-07

Effects of Water Regulation under Different Straw Return Conditions on Rice Yield and Soil Fertility

MA Wei, SUN Yi'nan, BAI Chenghan, WANG Siwen, LIU Xiaoliang, YANG Yongzhi, SUN Qi, HOU Ligang, LIU Liang*
(*Rice Research Institute of Jilin Academy of Agricultural Sciences*(*Northeast Agricultural Research Center of China*)/*Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Reclamation and Utilization in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gongzhuling* 136100, China)

Abstract: Aimed to investigate the effects of water regulation under straw return conditions on rice yield and soil fertility. A field experiment was conducted using the rice variety “Jijing 830” in a split-plot design. The main plots consisted of two straw management practices: no straw return (A_1) and full straw return (A_2). The subplots comprised five water regulation treatments: mild water control (WP_1, Ψsoil = 0 kPa), moderate water control (WP_2, Ψsoil = -15 kPa), moderate-severe water control (WP_3, Ψsoil = -30 kPa), severe water control (WP_4, Ψsoil = -45 kPa), and a conventional flooding treatment (CK) as the control. The results showed that the A_2-WP_3 yielded the highest, with a 22.5% increase compared to the A_2-CK at the late tillering stage. In contrast, at the jointing-booting stage, the A_1-WP_4 and A_2-WP_4 resulted in yield reductions of 32.2% and 19.8%, respectively, compared to their corresponding CK. The straw decomposition rate was higher when water regulation was applied at the late tillering stage than at the jointing-booting stage. Furthermore, appropriate water regulation effectively enhanced the supply capacity of soil nutrients. In comprehensive consideration of all factors, the integration of full straw return with moderate-severe water control (WP_3, Ψsoil = -30 kPa) at the late tillering stage can synergistically achieve increased rice yield, improved soil fertility, and enhanced straw decomposition efficiency.

Key words: Rice; Water regulation; Straw return; Soil fertility

收稿日期:2025-09-24
基金项目:吉林省科技发展计划项目(20220202025NC);国家重点研发计划项目(2023YFD2301602)
作者简介:马　巍(1984-),男,副研究员,主要从事水稻逆境生理与抗逆栽培技术研究。
通信作者:刘　亮,E-mail: ul2n@163.com

作物秸秆富含植物生长所需的碳、氮、磷、钾等营养元素[1],是宝贵的农业资源,利用潜力巨大。水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要的粮食作物,每年水稻种植过程中产生的秸秆约为2亿t[2]。水稻收获后将秸秆直接还田,不仅能有效补充土壤有机质、提高养分供应水平,还能增加土壤微生物数量、提高微生物活力,增强土壤碳、氮循环能力,形成良性微生态系统,是实现稻田地力提升、促进资源循环利用的重要措施[3]。

秸秆腐解过程包含较长的物质转化期,养分释放速率和微生物活动强度高度依赖于田间水分条件[4]。若水分过度饱和,还田秸秆处于厌氧环境,往往造成腐解缓慢、有机酸类抑制物质积累的问题;若土壤过于干燥,微生物活动受到抑制,则秸秆腐解效率降低[5]。因此秸秆还田条件下的水分调控是影响水稻产量形成和资源利用效率的核心要素。研究表明,适度的控水灌溉能够优化水稻根系分布,增强植株光合能力,调节干物质分配,显著提高水分利用效率,构建良好的"源-库-流"关系,提高籽粒产量[6-7]。在秸秆还田条件下,适宜的水分环境能够加速秸秆中有机质的分解和养分的释放,提高土壤供肥能力,而秸秆腐解释放的有机酸、溶解性碳和活性养分能够调节根际微环境,促进水稻对水分和养分的吸收与利用[8]。合理的水分调控还可改善土壤通气性,抑制甲烷等温室气体排放,具有重要的生态效益[9]。此外,秸秆还田能够提高土壤保水能力、改善调蓄功能,在一定程度上增强了水稻植株对水分调控的响应能力[10]。

目前,已有研究分别从水分调控或秸秆还田方式的角度出发,分析其对水稻产量和土壤理化性质的影响[11-12],但多数研究仅侧重于单因素作用效果的研究[13-15],而针对水分调控对水稻产量提升、地力培育与秸秆高效腐解的协同作用尚未形成统一认识。本研究以"吉粳830"为试验材料,在不同秸秆还田条件下基于不同水分调控处理设置试验,系统分析水分调控对水稻产量构成和土壤肥力的综合影响,旨在为构建秸秆还田与节水灌溉协同增效的水稻栽培模式提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点与供试品种

试验于2023-2024年在吉林省农业科学院水稻研究所南崴子水稻试验基地(43°28′ N、124°45′ E,海拔185 m)进行。年平均气温5.6 ℃,年有效积温2 980 ℃·d左右,年平均降水量594.8 mm。供试土壤全氮含量1.53 g/kg,速效磷含量59.36 mg/kg,速效钾含量88.85 mg/kg,C/N 10.79 g/kg,有机质含量28.54 g/kg,pH值7.79。供试水稻品种"吉粳830"。

1.2　试验设计

采用盆栽的方式进行试验,桶直径30 cm,高36 cm,每盆装土19 kg。采用裂区试验设计,主区为秸秆还田处理,分别为无秸秆还田(A_1)与秸秆全量还田(A_2)处理。秸秆全量还田处理:6月10日移栽时,称取52.5 g(7 500 kg/hm^2)风干秸秆并剪成1~2 cm小段装入纱网袋内,埋深15 cm。副区为5个水分处理:轻度控水(WP_1),土壤水势为0 kPa(土壤为饱和无水层);中度控水(WP_2),土壤水势为-10 kPa;中重度控水(WP_3),土壤水势为-20 kPa;重度控水(WP_4),土壤水势为-30 kPa和常规淹水(CK)处理。每个处理5个重复,共50盆,每盆3穴,每穴3株。盆栽中埋入真空表型负压式土壤湿度计(NC8X318)监控水稻根部土壤水势(陶土头中部埋深至距土表10 cm处)。移栽后采用淹水处理,分别在分蘖后期和拔节孕穗期开始前3 d排出多余水分进行水分调控,每日9:00、12:00、15:00记录水势数据并及时补水。达到设定水势后各处理的相对含水量和绝对含水量见表1,保持水势5 d,水分调控结束后复水至5 cm水层。乳熟末期至完熟期排水晒田。全生育期每盆施尿素(N 46%)1.792 g、磷酸二铵(P_2O_5 46%、N 18%)1.113 g、硫酸钾(K_2O 50%)1.366 g;磷酸二铵全部作为底肥在装土灌水后施用;硫酸钾分两次施入,底肥和穗肥各施用一半;尿素底肥、分蘖肥、穗肥分别施用0.456、0.668、0.668 g。其他管理措施按常规栽培管理进行。

表1　各处理的相对含水量及绝对含水量

Table 1 Relative and absolute water content of soil moisture control

处理 Treatment	相对含水量/% Relative water content	绝对含水量/% Absolute water content
WP_1	33.1	6.287
WP_2	27.6	5.244
WP_3	23.0	4.370
WP_4	19.2	3.648

1.3　测定项目与方法

1.3.1　产量构成因素测定

待水稻成熟后,每个处理选取具有代表性的9穴进行考种,人工调查每穴穗数、千粒重、一次

枝梗数、一次枝梗实粒数、一次枝梗空秕粒、二次枝梗数、二次枝梗实粒数、二次枝梗空秕数。并计算一次枝梗结实率和二次枝梗结实率。计算公式为：

$$一、二次枝梗结实率=\frac{\sum_{i=1}^{n}F_i}{\sum_{i=1}^{n}(F_i+U_i)}\times 100\%$$

式中，F_i为第i个一、二次枝梗实粒数；U_i为第i个一、二次枝梗空秕粒数；n为稻穗一、二次枝梗数。

1.3.2 土壤肥力测定

水稻全部收获后，分别将各处理0~20 cm表层土壤进行取样混匀，混匀后每个处理保留500 g用于土壤理化指标测定，全氮含量利用凯氏定氮仪测定[16]，碱解氮含量采用碱解扩散法测定，有机质含量检测方法依据NY/T1121.6-2006、速效磷检测方法依据NY/T1121.7-2014、速效钾含量检测方法依据LY/T1234-2015进行。

1.3.3 秸秆当季腐解率测定

水稻收获后，将各处理埋入的装有秸秆的纱网袋取出，用自来水进行冲洗，将泥土等异物冲洗干净，然后将其置于烘箱中，70 ℃烘干至恒重，称量剩余秸秆干重后，采用失重率法计算秸秆腐解率。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理；使用SPSS 26进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量形成及其构成因素的影响

2.1.1 不同秸秆还田条件下分蘖后期水分调控对水稻产量及其构成因素的影响

由表2可知，在秸秆全量还田条件下，A_2-WP_3处理每穴穗数最多，较A_2-CK增加2.6%。而A_2-WP_1每穴穗数最少，较A_2-CK减少了16.3%，且显著低于A_2-CK、A_2-WP_3和A_2-WP_4处理。A_2-WP_3处理千粒重虽高于其他各处理，但处理间差异不显著。除A_2-WP_3处理产量高于A_2-CK外，其他处理的产量均显著低于A_2-CK，A_2-WP_3处理较A_2-CK产量增加了22.5%。表明在秸秆全量还田方式下，中重度水分调控有利于水稻产量的提高。而在相同水分调控下，A_2-WP_4处理产量较A_1-WP_4处理增加10.0%，说明秸秆全量还田能够缓解极端水势条件下对产量的影响。

由表2还可以看出，无秸秆还田方式的最高产量出现在A_1-CK，而秸秆全量还田方式的最高产量则出现在A_2-WP_3，说明秸秆全量还田方式下，适度的水分调控可缓解水势降低带来的负效应，有利于产量提高。

表2 不同秸秆还田条件下分蘖后期水分调控对水稻产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of water regulation under different straw return conditions at the late tillering stage on rice yield and its components

处理 Treatment	每穴穗数 Panicles per hill	一次枝梗结实率/% Primary branch fruiting rate	二次枝梗结实率% Secondary branch fruiting rate	千粒重/g 1000-grain weight	产量/t·hm^{-2} Yield
A_1-CK	14.63±0.82a	95.11±1.05a	94.20±1.01a	20.98±1.26b	8.33±1.45a
A_1-WP_1	13.17±0.88b	94.82±2.66a	93.01±3.46a	21.49±2.62ab	7.60±1.32a
A_1-WP_2	14.05±2.63ab	96.96±0.43a	93.56±1.94a	23.41±6.79a	7.84±0.38a
A_1-WP_3	12.64±0.71b	96.44±0.66a	92.30±2.04a	20.67±2.91b	6.57±0.83b
A_1-WP_4	10.92±0.42b	95.96±1.15a	91.27±2.17a	21.94±6.25ab	5.72±1.68b
A_2-CK	14.34±0.58a	96.95±0.31a	92.18±1.91a	22.89±6.39a	7.08±0.28a
A_2-WP_1	12.00±0.54b	96.79±0.74a	91.27±1.86a	22.49±3.79a	6.56±1.60b
A_2-WP_2	12.58±1.01ab	97.06±0.18a	94.97±1.28a	22.03±5.78a	6.56±2.89b
A_2-WP_3	14.71±0.52a	95.98±1.11a	92.50±1.03a	24.04±8.03a	8.67±4.46a
A_2-WP_4	13.46±1.83a	95.82±2.33a	92.40±2.92a	22.00±3.61a	6.29±1.48b

注：数据为2023年与2024年平均值。小写字母不同表示差异显著(P<0.05)，下同。

Note: The data represent the mean of data in 2023 and 2024. Different lowercase letters indicate significant differences(P<0.05), the same below.

2.1.2 不同秸秆还田条件下拔节孕穗期水分调控对水稻产量形成的影响

由表3可知，在无秸秆还田条件下，处理间水稻每穴穗数、一次枝梗数量和产量均随土壤水势的降低呈下降趋势，表明拔节孕穗期水分调控严重抑制了水稻产量的形成。在相同水分处理条件

表3　不同秸秆还田条件下拔节孕穗期水分调控对水稻产量形成的影响

Table 3 Effects of water regulation under different straw return conditions at the jointing-booting stage on rice yield

处理 Treatment	每穴穗数 Panicles per hill	一次枝梗数量/个 Primary branch number per panicle	二次枝梗数量/个 Secondary branch number per panicle	千粒重/g 1000-grain weight	产量/t·hm^{-2} Yield
A_1-CK	16.38±0.95a	10.85±0.43a	14.78±0.81ab	22.91±8.31a	8.22±0.67a
A_1-WP_1	16.09±1.01a	10.37±0.39ab	16.96±2.71a	21.37±2.40a	7.08±0.80b
A_1-WP_2	15.22±0.51ab	9.59±0.48bc	11.19±0.31b	20.66±4.34a	7.16±0.75b
A_1-WP_3	15.51±2.21ab	9.72±1.14abc	12.98±2.44ab	21.00±6.04a	5.96±1.30c
A_1-WP_4	13.75±1.01b	8.85±0.23c	13.33±2.73ab	20.17±6.06a	5.57±0.39c
A_2-CK	16.26±1.01a	10.79±0.18a	20.35±0.93a	21.51±3.83a	8.00±0.65a
A_2-WP_1	14.34±0.83b	10.56±0.88a	17.21±2.64ab	21.23±1.91a	7.50±0.70a
A_2-WP_2	14.08±1.01b	9.75±0.62a	16.49±3.33ab	20.56±1.54a	7.32±0.68a
A_2-WP_3	13.46±0.68b	10.15±0.08a	14.80±1.47b	21.61±2.27a	6.47±0.30b
A_2-WP_4	13.87±0.43b	10.03±0.57a	14.14±2.54b	21.51±3.21a	6.42±0.08b

下,A_2-CK处理二次枝梗数量较A_1-CK处理提高了37.7%,说明秸秆全量还田有助于水稻二次枝梗发育;在拔节孕穗期无秸秆还田条件下随着土壤水势的降低水稻产量下降幅度较大,A_1-WP_4处理产量较A_1-CK下降了32.2%。而在秸秆全量还田条件下水稻产量降低幅度较小,A_2-WP_4处理产量较A_2-CK降幅为19.8%,表明在拔节孕穗期土壤水势过低会严重抑制水稻产量形成,而秸秆全量还田可在一定程度上缓解由水分缺失带来的不利影响。

2.2　不同处理对土壤养分含量的影响

2.2.1　不同秸秆还田条件下分蘖后期水分调控对土壤养分含量的影响

由表4可知,在无秸秆还田条件下,处理间土壤的全氮含量和碱解氮含量均随土壤水势的降低而呈下降趋势。A_1-WP_1处理的全氮、碱解氮、速效钾含量显著高于A_1-WP_2、A_1-WP_3和A_1-WP_4处理。而在秸秆全量还田条件下A_2-WP_1处理的全氮、有机质、碱解氮和速效磷含量均显著高于A_2-CK、A_2-WP_2、A_2-WP_3和A_2-WP_4处理,表明秸秆还田条件下适宜的水分调控可有效提高土壤养分的供应能力,而过度水分调控会对养分有效性产生抑制作用。

2.2.2　不同秸秆还田条件下拔节孕穗期水分调控对土壤养分含量的影响

由表5可知,在秸秆全量还田条件下,A_2-WP_1处理的土壤有机质含量显著高于A_2-CK处理,而A_2-WP_2、A_2-WP_3和A_2-WP_4处理显著低于A_2-CK处

表4　不同秸秆还田条件下分蘖后期水分调控对土壤养分含量的影响

Table 4 Effects of water regulation under different straw return conditions on soil nutrient content at the late tillering stage

处理 Treatment	全氮含量/g·kg^{-1} Total nitrogen	有机质含量/g·kg^{-1} Soil organic matter	碱解氮含量/mg·kg^{-1} Available nitrogen	速效磷含量/mg·kg^{-1} Available phosphorus	速效钾含量/mg·kg^{-1} Available potassium
A_1-CK	2.00±0.02a	36.71±0.11c	149.95±1.63a	51.60±0.54b	157.80±3.06a
A_1-WP_1	1.99±0.01a	37.79±0.34b	149.00±0.66a	52.46±0.25ab	152.03±2.69b
A_1-WP_2	1.95±0.02b	41.28±0.45a	146.28±1.14b	46.50±1.05c	136.51±0.76c
A_1-WP_3	1.91±0.03c	26.79±0.35e	143.48±1.86c	42.37±0.89d	136.93±4.88c
A_1-WP_4	1.57±0.01d	35.57±0.33d	117.46±0.44d	53.85±1.11a	135.61±2.67c
A_2-CK	1.95±0.02b	31.25±0.35cd	146.26±1.43b	52.37±0.75b	141.83±3.35b
A_2-WP_1	2.09±0.08a	43.21±0.61a	156.62±5.44a	54.33±1.29a	139.83±2.99b
A_2-WP_2	1.92±0.01bc	30.97±0.47d	144.05±0.8bc	51.93±0.98b	152.75±2.87a
A_2-WP_3	1.85±0.03c	32.11±0.42c	138.81±1.98c	51.63±0.87b	157.73±2.41a
A_2-WP_4	1.86±0.02c	36.08±0.54b	139.81±1.56c	43.26±1.06c	142.12±3.02b

表5 不同秸秆还田条件下拔节孕穗期水分调控对土壤养分含量的影响

Table 5 Effects of water regulation under different straw return conditions on soil nutrient content in the jointing-booting stage

处理 Treatment	全氮含量/g·kg^{-1} Total nitrogen	有机质含量/g·kg^{-1} Soil organic matter	碱解氮含量/mg·kg^{-1} Available nitrogen	速效磷含量/mg·kg^{-1} Available phosphorus	速效钾含量/mg·kg^{-1} Available potassium
A_1-CK	1.86±0.02c	36.87±0.36a	139.85±0.85c	52.18±0.60a	150.5±0.44c
A_1-WP_1	1.91±0.01b	33.68±0.36b	143.02±0.78b	48.83±0.62b	151.7±3.24c
A_1-WP_2	2.01±0.03a	32.48±0.64d	150.62±2.06a	50.62±1.27a	167.66±2.83a
A_1-WP_3	1.97±0.02a	34.66±0.37b	147.95±1.93a	50.99±1.23a	156.48±0.22b
A_1-WP_4	2.01±0.02a	34.77±0.51b	150.32±1.53a	46.65±0.90c	139.65±2.50d
A_2-CK	2.02±0.02a	33.23±0.64b	151.04±1.31a	48.26±1.31b	147.41±3.31a
A_2-WP_1	1.93±0.01c	36.33±0.51a	145.05±1.01b	45.10±1.31c	131.45±5.38c
A_2-WP_2	1.89±0.01d	31.52±0.37c	141.66±0.24c	51.54±1.27a	151.78±3.33a
A_2-WP_3	1.87±0.01d	27.52±0.14d	140.31±0.30c	44.41±1.37c	145.36±2.95ab
A_2-WP_4	2.00±0.01b	30.86±0.42c	149.64±0.59a	43.77±0.68c	139.23±2.89b

理，说明秸秆全量还田条件下，适度水分调控有利于土壤有机质的积累。A_2-WP_2处理速效磷含量最高，显著高于A_2-CK处理，而A_2-WP_1、A_2-WP_3、A_2-WP_4处理显著低于A_2-CK处理，表明适度水分调控可提高磷素有效性，而过低的水势可能影响磷素供应。

2.3 不同生育时期水分调控对还田秸秆腐解率的影响

由表6可知，水稻秸秆腐解率在不同生育时期和不同水分调控处理下存在显著差异。分蘖后期进行水分调控，A_2-WP_4和A_2-WP_3处理的秸秆腐解率显著高于A_2-CK处理；拔节孕穗期进行水分调控，A_2-WP_4处理的秸秆腐解率最高，A_2-WP_3处理次之，均显著高于A_2-WP_1和A_2-CK处理。在相同处理条件下，分蘖后期进行水分调控的秸秆腐解率均高于拔节孕穗期进行水分调控。

表6 水稻不同生育时期水分调控对还田秸秆腐解率的影响

Table 6 Effects of water regulation at different growth stages of rice on straw decomposition rate

处理 Treatment	秸秆腐解率 Rice straw decomposition rate	
	分蘖后期 Late tillering stage	拔节孕穗期 Jointing-booting stage
A_2-CK	60.93±1.55c	59.68±1.81c
A_2-WP_1	64.48±0.42bc	63.33±0.42b
A_2-WP_2	65.57±1.18bc	65.13±1.05ab
A_2-WP_3	68.50±0.79ab	67.09±1.01a
A_2-WP_4	70.52±0.53a	68.00±0.22a

3 讨 论

3.1 不同秸秆还田条件下水分调控对水稻产量及构成因素的影响

水稻产量由结实率、有效穗数、千粒重等因素决定，受水分供应和土壤环境的调控。抽穗期水分调控能够显著影响灌浆期水稻植株干物质的分配，进而对结实率、千粒重和产量产生影响[7-8]。本研究发现，分蘖后期进行水分调控A_2-WP_3处理的千粒重显著高于A_2-CK，表明秸秆还田条件下分蘖后期进行水分调控(Ψsoil=-30 kPa)有利于提高籽粒充实度。牛同旭等[17]研究发现，在秸秆还田条件下，分蘖期浅水灌溉能够显著提升整精米率，与本研究结果一致。本研究还发现，在无秸秆还田条件下拔节孕穗期进行水分调控，水稻每穴穗数、一次枝梗数量和产量均随土壤水势的降低呈下降趋势，表明在水稻拔节孕穗期不宜进行水分调控，此阶段土壤水势过低会严重影响水稻产量。同时发现，随着土壤水势的降低，秸秆全量还田各处理水稻产量下降幅度要小于无秸秆还田处理，表明秸秆全量还田可在一定程度上缓解由水分缺失对水稻产量带来的不利影响。

3.2 不同秸秆还田条件下水分调控对土壤肥力与秸秆腐解率的影响

土壤肥力是水稻高产稳产的基础，而秸秆腐解率直接影响土壤养分的释放和循环[18]。水分调控通过影响土壤水分状况[19-20]、微生物活性和秸秆分解速率[14]，进而调节土壤养分供应及秸秆腐解过程。研究结果表明，分蘖后期进行水分调控，A_1-WP_1处理和A_2-WP_1处理土壤中的全氮、有

机质和碱解氮含量高于其他水分调控处理,表明分蘖后期轻度控水有利于土壤养分积累,而过度控水可能通过影响微生物活性进而影响土壤中养分的转化。本研究还发现,拔节孕穗期进行水分调控A_2-WP_2处理速效磷含量最高,推测该处理条件下土壤湿度增加了土壤微生物的活性,进而影响土壤的速效磷含量。而A_2-WP_4处理的速效磷含量最低,说明土壤水分供应不足,微生物活动受到抑制,有机磷的矿化作用减弱,导致速效磷供应减少。而在相同处理条件下,分蘖后期进行水分调控的秸秆腐解率均高于拔节孕穗期进行水分调控,说明提前进行水分调控更有利于水稻秸秆的腐熟。

4　结　论

在秸秆全量还田条件下对水稻关键生育期进行水分调控,有利于水稻产量和土壤肥力的提升。分蘖后期进行水分调控A_2-WP_3处理水稻产量最高,较对照增产22.5%;拔节孕穗期进行水分调控导致水稻产量下降,而秸秆全量还田可缓解减产幅度。提前进行水分调控可加快水稻秸秆腐熟。

参考文献:

[1] 周鸣铮.土壤肥力概论[M].杭州:浙江科学技术出版社,1985:118-154.
ZHOU M Z. Introduction to soil fertility[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1985: 118-154. (in Chinese)

[2] 闫雷,李思莹,孟庆峰,等.秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(12):58-67.
YAN L, LI S Y, MENG Q F, et al. Effects of straw returning and organic fertilizer on soil aggregation in black soil region[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(12): 58-67. (in Chinese)

[3] 谭德水,金继运,黄绍文,等.灌淤土区长期施钾对作物产量与养分及土壤钾素的长期效应研究[J].中国生态农业学报,2009,17(4):625-629.
TAN D S, JIN J Y, HUANG S W, et al. Long-term effects of potassium application on crop yield, nutrient uptake and soil potassium in irrigation-siltation soil region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 625-629. (in Chinese)

[4] 郝翔翔,杨春葆,苑亚茹,等.连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2013,29(35):263-269.
HAO X X, YANG C B, YUAN Y R, et al. Effects of continuous straw returning on organic carbon content in black soil aggregates and soil fertility[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(35): 263-269. (in Chinese)

[5] 侯淑艳,窦森,刘建新,等.温度对玉米秸秆腐解期间腐殖质消长动态的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):87-92.
HOU S Y, DOU S, LIU J X, et al. Effects of temperature on humus dynamics during corn straw decomposition[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 87-92. (in Chinese)

[6] 李强,窦森,焦云飞,等.不同秸秆还田模式对黑土物理性质及玉米产量的影响[J].东北农业科学,2022,47(4):52-56,69.
LI Q, DOU S, JIAO Y F, et al. Effects of different straw returning patterns on physical properties of black soil and maize yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(4): 52-56, 69. (in Chinese)

[7] 韩延如,宁万光,史洪中,等.土壤水分对水稻籽粒相对充实度的影响及其与产量的关系[J].江苏农业科学,2015,43(9):93-96.
HAN Y R, NING W G, SHI H Z, et al. Effects of soil moisture on relative plumpness of rice grains and its relationship with yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(9), 93-96. (in Chinese)

[8] 杨晓龙,汪本福,陈亮,等.抽穗期干旱对水稻生理性状和产量的影响[J].中国稻米,2015,21(4):138-141,146.
YANG X L, WANG B F, CHEN L, et al. Effects of drought at heading stage on physiological traits and yield of rice[J]. China Rice, 2015, 21(4): 138-141, 146. (in Chinese)

[9] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙港流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013,39(9):1687-1692.
NIE Z J, CHEN Y Q, ZHANG J S, et al. Winter wheat yield and water use efficiency under different drip irrigation regimes in Heilonggang watershed[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1687-1692. (in Chinese)

[10] 王双菊.秸秆还田条件下潜水埋深对土壤水分及蒸发的影响[D].扬州:扬州大学,2013:45.
WANG S J. Effects of groundwater depth on soil moisture and evaporation under straw returning conditions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013: 45. (in Chinese)

[11] HILLIER J, HAWES C, SQUIRE G, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2009, 7(2): 107-118.

[12] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):60-67.
XIE W Y, FAN G S, ZHOU H P, et al. Effects of straw returning methods on yield and water use efficiency of dryland maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60-67. (in Chinese)

[13] 刘卉,周清明,黎娟.秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究进展[J].中国农学通报,2017,33(32):53-57.
LIU H, ZHOU Q M, LI J. Research progress on effects of straw returning on soil improvement and crop growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(32): 53-57. (in Chinese)

[14] 倪国荣，涂国全，魏赛金，等. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(1)：149-154.
NI G R, TU G Q, WEI S J, et al. Effects of straw returning with decomposing inoculant on rhizosphere soil microorganisms, enzyme activities and yield of late rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 149-154. (in Chinese)

[15] 汪成忠，胡永红，周翔宇，等. 水稻秸秆还田对崇明盐碱地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 干旱区资源与环境，2016，30(8)：132-138.
WANG C Z, HU Y H, ZHOU X Y, et al. Effects of rice straw returning on soil enzyme activities and microbial population in Chongming saline-alkali soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 132-138. (in Chinese)

[16] 王磊，李艳红，袁婕. 全自动凯氏定氮仪测定干旱区土壤中全氮含量[J]. 中国无机分析化学，2014，4(3)：31-34.
WANG, L., LI, Y. H., YUAN, J. Determination of total nitrogen in arid region soil by automatic Kjeldahl nitrogen analyzer[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2014, 4(3): 31-34. (in Chinese)

[17] 牛同旭，郑桂萍，李志彬，等. 秸秆还田对粳稻垦粳5号产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学，2021，49(3)：72-77.
NIU T X, ZHENG G P, LI Z B, et al. Effects of straw returning on yield and quality of japonica rice Kenjing 5[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(3): 72-77. (in Chinese)

[18] 汤宏，沈健林，张杨珠，等. 秸秆还田与水分调控对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(1)：240-246.
TANG H, SHEN J L, ZHANG Y Z, et al. Effects of straw returning and water regulation on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 240-246. (in Chinese)

[19] 汪妮娜，黄敏，陈德威，等. 不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J]. 热带作物学报，2013，34(9)：1650-1656.
WANG N N, HUANG M, CHEN D W, et al. Effects of water stress at different growth stages on root growth and yield of rice [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(9): 1650-1656. (in Chinese)

[20] 赵俊芳，杨晓光，陈斌，等. 不同灌溉处理对旱稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象，2004，25(4)：44-48.
ZHAO J F, YANG X G, CHEN B, et al. Effects of different irrigation treatments on root growth and water use efficiency of upland rice[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25(4): 44-48. (in Chinese)

(责任编辑：范杰英)

(上接第14页)

LI S, HAN W, ZHANG K, et al. The effects of different tillage methods on the physical properties of brown soil in Western Liaoning and the distribution of corn roots[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(6): 101-106. (in Chinese)

[25] 崔正果，李秋祝，张玉斌，等. 玉米秸秆全量粉碎耕翻还田条件下播种深度与镇压强度对玉米出苗率的影响[J]. 东北农业科学，2018，43(6)：16-19.
CUI Z G, LI Q Z, ZHANG Y B, et al. Effects of sowing depth and rolling intensity on maize emergence under full pulverization and incorporation of maize straw[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(6): 16-19. (in Chinese)

(责任编辑：范杰英)