网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.014

灾害性天气下秸秆还田与施肥对水稻生理性青枯病的影响

赵庆雷,杨军,刘奇华,姜绪,孙召文
(养分资源高效利用全国重点实验室/山东省农业科学院 湿地农业与生态研究所,山东 济南 250100)

[摘 要] 【目的】研究灾害性气象条件下不同秸秆还田方式和化肥投入水平对水稻生理性青枯病发病特征的影响,以探明秸秆还田、施肥与水稻生理性青枯病发生的关系。【方法】以 2013 年开始的长期定位试验田为研究区域,以"水稻-小麦"轮作制度为基础,采用裂区试验设计,设秸秆全量还田与秸秆移除 2 个因素,每个因素下设 5 个施肥水平(常规施肥量、常规施肥量 85%、常规施肥量 70%、常规施肥量 50%、不施肥),共计 10 个处理,测定试验田 2019—2021 年水稻孕穗中后期至成熟期气象特征,统计 2021 年 10 月上旬水稻青枯病发生 2 d 后不同处理的青枯病丛发病率和株发病率,在水稻收获后测定了不同处理的土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量以及水稻产量、千粒质量以及品质(糙米率、精米率和整精米率),并对水稻青枯病发病率与施肥量、土壤肥力水平以及水稻产量和品质的相关性进行分析。【结果】2021 年 10 月上旬发生的青枯病是水稻灌浆期 3 次持续性低温天气综合作用所致。相同的秸秆还田方式下,水稻青枯病丛发病率和株发病率均随着化肥投入量的提高而增大,其中常规施肥量+秸秆全量还田处理的水稻青枯病丛发病率和株发病率分别高达 64.44%和 60.33%。相同的化肥投入水平下,秸秆还田处理青枯病丛发病率、株发病率和土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量以及水稻产量较秸秆移除处理明显升高;相同的秸秆还田方式下,水稻千粒质量、糙米率、精米率和整精米率均随着化肥施用水平的提高先升高后降低。水稻青枯病发病率与施肥量、土壤肥力水平均呈显著或极显著正相关关系,水稻产量与青枯病发病率呈极显著正相关关系,千粒质量、糙米率、精米率、整精米率与水稻青枯病发病率均呈极显著负相关关系。【结论】在面临灾害性气象条件时,高土壤肥力水平、高化肥投入量更易诱发水稻青枯病,秸秆还田降低了水稻对青枯病的抗性,青枯病降低了稻谷的加工品质。

[关键词] 水稻;生理性青枯病;秸秆还田;化肥施用量;土壤肥力水平
[中图分类号] S435.111.3+1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0135-08

Effects of straw returning and fertilization on physiological bacterial wilt of rice under severe weather

ZHAO Qinglei, YANG Jun, LIU Qihua, JIANG Xu, SUN Zhaowen
(*State Key Laboratory of Nutrient Use and Management/Institute of Wetland Agriculture and Ecology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong* 250100, *China*)

Abstract: 【Objective】 The effects of different straw returning methods and fertilizer input levels on the pathogenic characteristics of rice physiological bacterial wilt were studied under disastrous meteorological conditions. The relationship between straw returning, fertilization and the occurrence of physiological bacterial wilt in rice was investigated. 【Method】 With a long-term positioning experimental field established in 2013 as the research site, this experiment was based on a rice-wheat rotation system and employed

[收稿日期] 2024-12-06 [修回日期] 2025-02-26
[基金项目] 山东省重点研发计划项目(2019GSF109078);山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2021A34);山东省现代农业产业技术体系项目(SDAIT-17-09)
[作者简介] 赵庆雷(1982—),男,山东东阿人,副研究员,主要从事水稻高效栽培技术研究。E-mail:zqlok_193@163.com

a split-plot design. Two factors were set: full return of straw and straw removal, and five fertilization levels were set for each factor: conventional fertilization amount, 85% of conventional fertilization amount, 70% of conventional fertilization amount, 50% of conventional fertilization amount, and no fertilization, totaling 10 treatments. The meteorological characteristics of the experimental field from the middle and late booting stage to the maturity stage of rice in 2019—2021 were measured. After the occurrence of rice bacterial wilt in early October 2021, the disease incidence rate under different treatments was recorded two days after the occurrence. After the rice harvest, the contents of soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium, as well as the yield, 1000-grain mass and quality (brown rice rate, milled rice rate and whole milled rice rate) of rice under different treatments were determined. The correlation between the incidence of rice bacterial wilt and fertilization amount, soil fertility level, rice yield and quality was analyzed.【Result】 The bacterial wilt that occurred in early October 2021 was caused by the comprehensive effect of three consecutive periods of low-temperature weather during the grain-filling stage of rice. Under the same straw returning mode, the cluster incidence rate and plant incidence rate of bacterial wilt increased with the increase of fertilizer input. Under conventional fertilizer application and total straw returning treatment, the cluster incidence rate and plant incidence rate of bacterial wilt were as high as 64.44% and 60.33%, respectively. Under the same fertilizer input level, the cluster incidence rate and plant incidence rate of bacterial wilt, soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus, available potassium contents and rice yield of straw returning treatments were significantly increased compared with straw removal treatments. Under the same straw returning mode, 1000-grain mass, brown rice rate, milled rice rate and whole milled rice rate all increased first and then decreased with the increase of fertilizer application level. The incidence of rice bacterial wilt was significantly positively correlated with the fertilizer application amount and the soil fertility level, the rice yield was significantly positively correlated with the incidence of bacterial wilt, and the 1 000-grain mass, the brown rice rate, the milled rice rate and the whole milled rice rate were significantly negatively correlated with the incidence of rice bacterial wilt.【Conclusion】 Under disastrous meteorological conditions, high soil fertility and fertilizer input were more likely to induce rice bacterial wilt. Straw returning reduced rice resistance to bacterial wilt, and bacterial wilt reduced the rice processing quality.

Key words: rice; physiological bacterial wilt; straw returning to the field; fertilizer application rate; soil fertility level

生理性青枯病是水稻生产中的常见病害，多发生于水稻灌浆期和秧苗期，严重威胁水稻安全生产。灌浆期水稻发病后全株叶片萎蔫内卷，茎秆干瘪收缩，整株呈青灰色，一般在2～3 d死亡，可造成结实率和千粒质量显著下降，轻者减产10%～20%，重者减产超过30%[1]。有报道显示，青枯病由水稻生理性失水所致[2]，而低温、强降水[3]、干热风[4]等极端气候条件易诱发水稻青枯病，但对极端气候因素诱发水稻青枯病的机理尚缺乏系统研究。因此，研究明确诱发水稻青枯病的具体灾害性气象条件，并在灾害来临时采取切实有效的措施以提高水稻对生理性青枯病的抗性是当前迫切需要解决的问题。

据报道，耕作制度、栽种方式、水肥管理、品种等均会影响水稻对青枯病的抗性[2,4-7]。免耕制度的推广与实施会造成耕层变薄，水稻根系分布浅，面临灾害性气象条件时更易遭受伤害发生青枯病[2]。与插秧相比，直播稻、抛秧稻的扎根较浅，水分吸收、运输能力较差，更易诱发青枯病[5]。在水稻灌浆期，长期缺水会导致耕层与犁底层断裂，中断水分传输途径，造成稻株因缺水而青枯，易发生青枯病[4]。有研究显示，有机肥施入不足，氮肥施入过多或施入过迟的田块易发生青枯病[6]。研究还发现，不同水稻品种对青枯病的抗性主要与其生育后期根系活力有关，根系活力越高的水稻对青枯病抗性越强，反之越弱[7]。

目前已有的关于水稻生理性青枯病的研究多是生产经验的总结，缺乏对其影响机理的系统分析，对灾害性气象条件下不同秸秆还田方式和化肥投入水

平如何影响水稻青枯病的发生及其发病机理鲜见报道。本研究采用秸秆还田与施肥长期定位试验，研究了灾害性气象条件下不同秸秆还田方式与化肥投入水平对灌浆期水稻生理性青枯病发生的影响，以探明水稻青枯病的发病规律及发病机理，为水稻生理性青枯病的有效防控以及稻麦秸秆还田与化肥施用技术的改进提供依据。

1　材料与方法

1.1　材　料

试验地点位于山东省农业科学院湿地农业与生态研究所济宁综合试验基地（35°19′N，116°37′E），地处鲁中南泰沂蒙山麓倾斜平原与鲁西南黄泛平原交接洼地的中心地带。该区属暖温带季风气候，年平均气温 13～14 ℃，年降水量 600～800 mm，年日照时数 2 391.4 h，无霜期 200 d。供试土壤为砂姜黑土，是由南四湖沉积物经脱沼泽作用而形成。供试水稻品种为圣稻 18。

1.2　试验设计

长期定位试验始于 2013 年，以“水稻-小麦”轮作制度为基础，采用裂区设计，设秸秆全量还田与秸秆移除 2 个因素，每个因素下设 5 个施肥水平，共计 10 个处理，分别为：常规施肥＋秸秆全量还田（HN1）；常规施肥量 85%＋秸秆全量还田（HN2）；常规施肥量 70%＋秸秆全量还田（HN3）；常规施肥量 50%＋秸秆全量还田（HN4）；不施肥＋秸秆全量还田（HN0）；常规施肥＋秸秆移除（N1）；常规施肥量 85%＋秸秆移除（N2）；常规施肥量 70%＋秸秆移除（N3）；常规施肥量 50%＋秸秆移除（N4）；不施肥＋秸秆移除（N0）。小区面积 24 m^2（4 m×6 m），每个处理 3 次重复。各处理小区单排单灌，中间设灌排水沟，小区分设两边，小区之间及小区与灌排水沟之间筑埂 30 cm，并包膜以防串灌。秸秆全量还田处理方法为：在水稻和小麦收获后，将作物秸秆全部粉碎至 5 cm 以下后原位翻耕还田，翻耕深度为 15 cm 左右；秸秆移除处理方法为：在水稻和小麦收获后，将作物地上部秸秆全部移出试验田。

水稻常规施肥量为：N 276 kg/hm^2，P_2O_5 135 kg/hm^2，K_2O 78 kg/hm^2，其中氮肥分别作为基肥、返青肥、分蘖肥和穗肥分 4 次施入，秸秆全量还田处理和秸秆移除处理中氮肥作为基肥、返青肥、分蘖肥和穗肥的施用比例分别为 3∶2∶2.5∶2.5 和 2∶2.5∶3∶2.5；磷肥全部用作基肥施用；钾肥作为基肥和穗肥各施用 50%。小麦常规施肥量为：N 276 kg/hm^2，P_2O_5 67.5 kg/hm^2，K_2O 59 kg/hm^2，其中氮肥作为基肥和返青分蘖肥各施用 50%，磷肥和钾肥全部作为基肥施入。水稻和小麦其他管理措施按常规进行。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*气象资料*　2019－2021 年水稻孕穗中期至成熟期的气象资料采自山东省农业科学院湿地农业与生态研究所济宁综合试验基地自建气象站。

1.3.2　*水稻青枯病发病率*　2021 年 10 月上旬，水稻青枯病发生 2 d 后调查青枯病丛发病率和株发病率。调查方法为：在每小区随机选取 3 点，每点调查 30 丛，分别记录发病丛数、每丛株数和发病株数，计算丛发病率和株发病率。

丛发病率＝发病丛数/调查总丛数×100%；

株发病率＝发病株数/调查总株数×100%。

1.3.3　*土壤肥力水平*　2021 年水稻收获后，在土壤翻耕前采集土样，用土钻按照五点取样法的要求，每小区取一个混合样，土层深度为 0～20 cm，测定土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量，测定方法参见《土壤农化分析》[8]。

1.3.4　*水稻产量及其构成因素和加工品质*　2021 年水稻收获后，在每个小区随机选取 3 穴，齐根割断，测定水稻生物量，具体方法见文献[9]。每小区随机选取 40 穴，调查丛穗数，每小区实割 5 m^2 测定水稻产量。在测产完成后，测定水稻千粒质量、糙米率、精米率和整精米率，具体方法见文献[10]。

1.4　数据处理与分析

采用 Excel 2013 软件进行数据整理和作图，用 SPSS 21.0 软件进行数据统计分析。用 Duncan’s 新复极差法进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　水稻孕穗中后期至成熟期温光条件及降水量的变化

2019－2021 年水稻孕穗中后期至成熟期气象特征见图 1。由图 1 可知，2021 年 8 月中旬至 10 月下旬有 3 次持续时间较长的降温过程，分别为 8 月 27 日至 9 月 7 日、9 月 25 日至 9 月 29 日、10 月 3 日至 10 月 7 日。2021 年 8 月 27 日至 9 月 7 日平均气温为 21.92 ℃，较 2019 年和 2020 年同期分别下降 7.39% 和 20.06%；平均最高气温为 24.77 ℃，较 2019 年和 2020 年同期分别下降 20.80% 和 25.18%；平均最低气温与往年同期差异不大。2021 年 8 月 27 日至 9 月 7 日累计降水量为 171.40 mm，

较 2019 年和 2020 年同期分别增加了 171.4 和 162 mm;平均日照时数为 55.70 h,较 2019 年和 2020 年同期分别减少 55.05 和 38.40 h。

2021 年 9 月 25 日至 9 月 29 日平均气温为 20.21 ℃,较 2019 年和 2020 年同期分别下降 3.06%和 7.61%;平均最高气温为 23.81 ℃,较 2019 年和 2020 年同期分别下降 20.96%和 12.47%;平均最低气温与往年同期无明显差异。2021 年 9 月 25 日至 9 月 29 日累计降水量为 91.40 mm,较 2019 年和 2020 年同期分别增加 91.40 和 84.70 mm;平均日照时数为 10.00 h,较 2019 年和 2020 年同期分别减少 33.75 和 26.10 h。

2021 年 10 月 3 日至 10 月 7 日,平均气温由 27.22 ℃骤降至 13.81 ℃,降温幅度为 13.41 ℃,此次降温过后水稻出现青枯病症状并快速死亡。2019 年和 2020 年同期也各有一次降温过程,分别为 2019 年 10 月 3 日至 10 月 6 日,平均气温由 21.26 ℃骤降至 9.95 ℃,降温幅度为 11.31 ℃;2020 年 10 月 1 日至 10 月 5 日,平均气温由 22.04 ℃骤降至 11.34 ℃,降温幅度为 10.7 ℃。与 2021 年相比,2019 年和 2020 年降温幅度相近,且平均气温低值更低,但水稻均未出现青枯病症状。

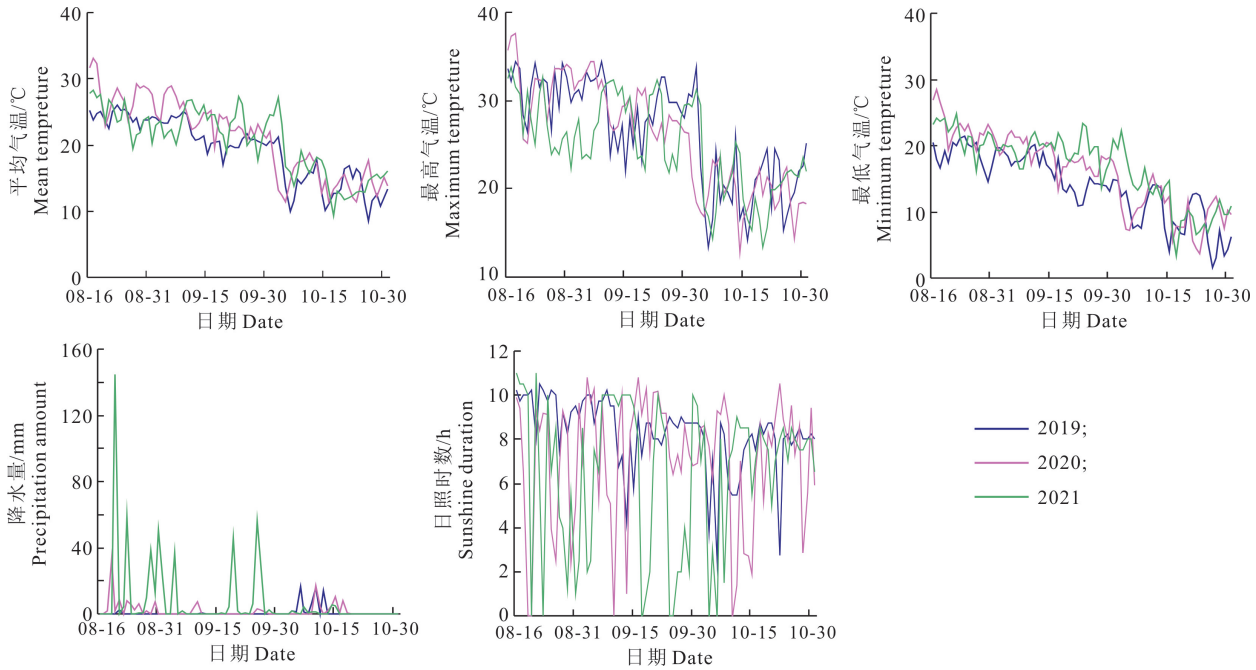


图 1 2019—2021 年 8 月中旬至 10 月下旬温光条件及降水特征

Fig. 1 Temperature and light conditions and precipitation characteristics from mid-August to late October during 2019—2021

2.2 秸秆还田与施肥对水稻青枯病发病率的影响

由表 1 可知,不同秸秆还田方式与施肥水平对水稻青枯病发病率影响显著。相同的秸秆还田方式下,水稻青枯病丛发病率和株发病率均随着化肥投入量的提高而增大,其中常规施肥处理(HN1 和 N1)发病率均最高,其中处理 HN1 丛发病率和株发病率分别高达 64.44%和 60.33%;其次为常规施肥量 85%处理(HN2 和 N2),其中处理 HN2 丛发病率和株发病率较 HN1 分别降低 50.00%和 77.08%;再次为常规施肥量 70%处理(HN3 和 N3);常规施肥量 50%+秸秆全量还田处理(HN4)丛发病率和株发病率均较低,分别为 3.33%和 0.57%;常规施肥量 50%+秸秆移除处理(N4)和无肥处理(HN0 和 N0)均未发病。在相同的化肥投入水平下(无肥处理除外),秸秆还田处理青枯病丛发病率和株发病率均明显高于秸秆移除处理,其中处理 HN2 丛发病率和株发病率较 N2 分别提高了 107.07%和 101.60%。

2.3 秸秆还田与施肥对土壤肥力水平的影响

表 2 为不同秸秆处理与施肥水平下土壤肥力水平的变化。表 2 显示,经过 8 年的长期定位试验,秸秆还田与施肥对土壤肥力水平产生了明显影响。相同的秸秆还田方式下,土壤有机质含量均随着化肥施用量的提高而增大,其中处理 HN0、N4 和 N0 土壤有机质含量较试验前有所降低,其余处理均较试验前显著提升。相同的化肥投入水平下,秸秆还田处理土壤有机质含量较秸秆移除处理明显提升,提升幅度最高达 19.28%。除了处理 HN1、N1 和

HN2 土壤速效氮含量较试验前有所提升，其余处理较试验前明显降低；相同化肥投入水平下，秸秆还田处理土壤速效氮含量较秸秆移除处理总体显著提升，提升幅度最高达 24.31%。除了处理 HN0、N4 和 N0 土壤速效磷含量较试验前有所降低，其余处理均较试验前明显提升；相同化肥投入水平下，秸秆还田处理土壤速效磷含量较秸秆移除处理总体显著提升，提升幅度最高达 14.40%。所有处理土壤速效钾含量均较试验前有所提升；相同的化肥投入水平下，秸秆还田处理土壤速效钾含量较秸秆移除处理总体显著提升，提升幅度最高达 28.24%。

表 1　不同秸秆还田方式与施肥水平下水稻青枯病的发病率

Table 1　Incidence of bacterial wilt in rice under different straw treatments and fertilization levels　%

处理 Treatment	丛发病率 Clump incidence	株发病率 Strain incidence	处理 Treatment	丛发病率 Clump incidence	株发病率 Strain incidence
HN1	64.44±3.95 a	60.33±2.12 a	N1	55.00±0.96 b	53.23±4.47 a
HN2	32.22±3.27 c	13.83±0.41 b	N2	15.56±0.91 d	6.86±0.41 bc
HN3	25.00±2.89 c	6.80±0.18 bc	N3	10.00±1.57 de	3.35±0.44 c
HN4	3.33±0.00 ef	0.57±0.10 c	N4	0.00±0.00 f	0.00±0.00 c
HN0	0.00±0.00 f	0.00±0.00 c	N0	0.00±0.00 f	0.00±0.00 c

注：HN1. 常规施肥＋秸秆全量还田；HN2. 常规施肥量 85%＋秸秆全量还田；HN3. 常规施肥量 70%＋秸秆全量还田；HN4. 常规施肥量 50%＋秸秆全量还田；HN0. 不施肥＋秸秆全量还田；N1. 常规施肥＋秸秆移除；N2. 常规施肥量 85%＋秸秆移除；N3. 常规施肥量 70%＋秸秆移除；N4. 常规施肥量 50%＋秸秆移除；N0. 不施肥＋秸秆移除。表中数据为“平均数±标准误”。同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下表同。

Note：HN1. Conventional fertilization＋straw full return to the field；HN2. 85% of conventional fertilization＋full straw return；HN3. 70% of conventional fertilization＋full straw return；HN4. 50% of conventional fertilization＋full straw return；HN0. No fertilization＋full straw return；N1. Conventional fertilization＋straw removal；N2. 85% of conventional fertilization＋straw removal；N3. 70% of conventional fertilization＋straw removal；N4. 50% of conventional fertilization＋straw removal；N0. No fertilization＋straw removal. Data are‘mean±SE’. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments（$P<0.05$）. The same below.

表 2　不同秸秆还田方式与施肥水平下的土壤肥力水平

Table 2　Soil fertility levels under different straw treatments and fertilization levels

处理 Treatment	有机质含量/（g·kg^{-1}） Organic matter content	速效氮含量/（mg·kg^{-1}） Alkaline N content	速效磷含量/（mg·kg^{-1}） Available P content	速效钾含量/（mg·kg^{-1}） Available K content
试验前 Before experiment	18.80	72.98	23.46	135.00
HN1	23.25±0.76 a	107.67±2.42 a	44.81±0.61 a	201.33±0.88 a
HN2	21.89±0.74 a	81.01±1.54 c	39.09±0.93 b	196.67±1.03 a
HN3	22.52±0.46 a	67.92±1.00 d	35.37±0.50 c	172.67±0.87 b
HN4	19.77±0.52 bc	57.45±0.50 e	25.19±0.57 e	166.67±0.54 c
HN0	17.23±0.16 de	25.40±1.69 g	18.60±0.70 g	162.33±0.82 cd
N1	21.39±0.46 ab	93.53±1.60 b	39.17±0.49 b	157.00±1.41 de
N2	19.23±0.43 c	65.17±1.65 d	35.29±0.44 c	154.00±1.42 e
N3	18.88±0.18 cd	55.20±1.23 ef	31.58±0.43 d	144.33±1.21 f
N4	18.47±0.35 cd	50.73±0.62 f	22.07±0.81 f	145.33±2.37 f
N0	16.18±0.41 e	27.38±1.45 g	18.26±0.48 g	158.33±2.84 de

2.4　秸秆还田与施肥对水稻产量及其构成因素和加工品质的影响

表 3 显示，相同的秸秆还田方式下，水稻丛穗数、产量和生物量均随着化肥施用水平的提高而增大。相同的化肥投入水平下，秸秆还田处理水稻的丛穗数、产量和生物量均明显高于秸秆移除处理，其中处理 HN3 水稻的丛穗数、产量和生物量较 N3 分别提高 24.73%，17.88%和 30.78%。相同的秸秆还田方式下，稻谷千粒质量、糙米率、精米率和整精米率均随着化肥施用水平的提高总体先增加后降低。

2.5　水稻青枯病发病率、产量与施肥量及土壤肥力水平的相关性

由表 4 可知，水稻青枯病发病率与施肥量、土壤肥力水平均呈显著或极显著正相关关系。在所有指标中，与青枯病发病率相关性最强的为土壤速效氮含量，其与青枯病丛发病率和株发病率的相关系数分别达 0.918 和 0.838；其次为土壤速效磷含量，其与青枯病丛发病率和株发病率的相关系数分别达 0.882 和 0.752；与青枯病丛发病率和株发病率相关性最弱的为土壤速效钾含量。水稻产量、生物量与

施肥量及土壤肥力水平均呈显著或极显著正相关关系。在所有指标中,施肥量与水稻产量和生物量的相关系数较高,分别为 0.931 和 0.942;其次为土壤速效磷和土壤速效氮含量,其中土壤速效磷含量与产量和生物量的相关系数分别为 0.888 和 0.965,土壤速效氮与水稻产量和生物量的相关系数分别为 0.884 和 0.952;与水稻产量和生物量相关性最弱的为土壤速效钾含量。

表 3 不同秸秆还田方式与施肥水平下水稻产量及其构成因素和加工品质

Table 3 Yield component factors and rice processing quality characteristics under different straw treatment methods and fertilization levels

处理 Treatment	丛穗数/穴$^{-1}$) Clump panicles	千粒质量/g 1 000-grain mass	糙米率/% Brown rice rate	精米率/% Milled rice rate	整精米率/% Head rice rate	产量/(t·hm^{-2}) Yield	生物量/(g·穴$^{-1}$) Biomass
HN1	12.78±0.28 a	25.38±0.10 f	81.08±0.17 de	66.58±0.12 e	65.86±0.35 e	9.37±0.25 a	71.53±3.49 a
HN2	11.67±0.25 b	26.29±0.07 e	82.47±0.14 bc	68.50±0.25 d	67.61±0.33 cd	8.68±0.25 ab	61.77±1.27 bc
HN3	10.39±0.24 cd	27.94±0.12 c	83.56±0.13 ab	71.69±0.06 b	68.44±0.18 c	7.91±0.19 bc	60.04±2.12 bc
HN4	8.61±0.16 e	29.02±0.09 b	84.31±0.06 a	72.50±0.27 a	70.67±0.30 a	6.48±0.19 e	42.36±1.35 de
HN0	6.17±0.34 f	28.14±0.10 c	83.89±0.82 a	72.42±0.04 a	70.03±0.06 ab	3.47±0.21 f	25.90±0.50 f
N1	10.89±0.05 c	25.38±0.12 f	80.89±0.33 e	66.56±0.18 e	65.69±0.19 e	8.09±0.17 bc	64.61±0.48 b
N2	10.06±0.05 d	26.61±0.07 e	82.17±0.37 cd	68.36±0.26 d	67.36±0.32 d	7.56±0.07 cd	55.25±0.03 c
N3	8.33±0.42 e	27.44±0.08 d	83.44±0.16 ab	69.69±0.14 c	68.33±0.32 cd	6.71±0.26 de	45.90±0.54 d
N4	8.00±0.14 e	28.28±0.09 c	83.75±0.08 ab	71.50±0.25 b	69.72±0.26 ab	6.25±0.49 e	38.15±1.52 e
N0	6.17±0.14 f	29.53±0.13 a	83.11±0.12 abc	71.03±0.14 b	69.53±0.19 b	3.30±0.12 f	25.88±1.46 f

表 4 水稻青枯病发病率、产量与施肥量及土壤肥力水平的相关性

Table 4 Correlation of rice bacterial wilt incidence, yield with fertilizer application rate and soil fertility level

项目 Item	施肥量 Fertilizing amount	有机质含量 Organic matter content	速效氮含量 Alkaline N content	速效磷含量 Available P content	速效钾含量 Available K content
丛发病率 Clump incidence	0.771**	0.779**	0.918**	0.882**	0.641**
株发病率 Strain incidence	0.676**	0.623**	0.838**	0.752**	0.483*
产量 Yield	0.931**	0.777**	0.884**	0.888**	0.468*
生物量 Biomass	0.942**	0.862**	0.952**	0.965**	0.536*

注:** 表示相关关系达极显著水平($P<0.01$),* 表示相关关系达显著水平($P<0.05$)。下表同。

Note: ** means extremely significant correlation($P<0.01$), * means significant correlation($P<0.05$). The same below.

2.6 水稻青枯病发病率与产量及加工品质的相关性

从表 5 可以发现,水稻产量、加工品质与青枯病发病率均呈极显著相关关系。丛穗数、产量、生物量与水稻青枯病丛发病率和株发病率均呈极显著正相关关系。千粒质量、糙米率、精米率和整精米率与水稻青枯病发病率均呈极显著负相关关系。

表 5 水稻青枯病发病率与产量及加工品质的相关性

Table 5 Correlation of rice bacterial wilt incidence with yield and processing quality

项目 Item	丛穗数 Clump panicles	千粒质量 1000-grain mass	糙米率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head rice rate	产量 Yield	生物量 Biomass
丛发病率 Clump incidence	0.861**	−0.850**	−0.779**	−0.847**	−0.876**	0.790**	0.840**
株发病率 Strain incidence	0.730**	−0.829**	−0.803**	−0.855**	−0.830**	0.621**	0.719**

3 讨 论

低温等灾害性气象因子是造成水稻青枯死亡的直接原因,也是诱发水稻青枯病的主要因素。本研究中,2019 至 2021 年 10 月上旬试验田水稻均经历了强降温过程,3 次降温过程降温幅度相近,降温过程中 2019 和 2020 年平均气温最低值均低于 2021 年,但 3 年中只有 2021 年出现水稻青枯病。这是由于 2021 年 8 月下旬至 9 月下旬曾出现 2 次持续时间较长的强降温过程,期间低温、强降水和少光照交织在一起,造成水稻根系活力下降[11-12],抗冷害能力降低[13],而 2019 和 2020 年仅在 10 月上旬出现了 1 次强降温天气。因而 2021 年 10 月上旬出现的青枯病应是水稻灌浆期 3 次灾害性天气叠加作用的结果。

本研究中,2021 年 9 月下旬出现强降雨天气,期间平均气温由 27.25 ℃降至 17.72 ℃,随后气温骤升至 27.22 ℃,气温波动幅度大,降雨前后气温变

化呈典型的深“V”型，随后水稻在 10 月上旬降温后出现了严重的青枯死亡。这是由于降温后快速回温形成了剧烈的温差，导致水稻根系可溶性糖、游离氨基酸等含量下降[14]，根系质膜和液泡膜 ATP 酶活性降低[15]，根系水分、养分传输能力快速下降[16]，从而降低了根系活力；此外，剧烈升温使得水稻叶片蒸腾作用提升，而此时根系吸水能力减弱，造成水稻植株水分代谢失衡，水稻植株因生理性缺水而萎蔫[17]，导致青枯病发生[18]。本研究中，2021 年水稻灌浆期前 2 次降温过程最低气温与 2019 和 2020 年同期相比并无明显差异，且第 3 次降温过程中最低气温高于往年同期水平，这说明并非只有极端的低温条件才能诱发青枯病，只要低于适宜的水稻生长温度，就能引发水稻低温伤害[6]，而水稻青枯病的发生不仅与低温的最低值有关，还与低温的持续时间有关，因为水稻根系活力的降低幅度与低温持续时间成正比[19]。

本研究中，水稻青枯病丛发病率和株发病率与施肥量、土壤肥力指标均呈极显著正相关关系。这说明高施肥量、高土壤肥力水平会降低水稻对青枯病的抗性。这可能有以下几方面的原因：一是施肥量大、肥力水平高的土壤，表层土壤养分含量高，因而水稻根系多分布于土壤表层，根系下扎较浅，而根系是水稻最早感知逆境胁迫的器官[20]，齐穗后稻株不再发生新根[21]，抗冻性更弱；而施肥量小、土壤肥力水平较低的土壤，表层土壤养分含量相对较低，水稻为获取满足自身生长所需的养分，根系下扎更深，广度更大，遭遇冷害时根系抗冻性相对更强。二是施肥量大的处理中氮肥施用水平较高，而过量施氮会降低植物的抗逆性[22]。三是施肥量大、土壤肥力水平高的田块，水稻地上部生长群体生物量相对更大，水稻植株因蒸腾作用而散失的水分较大，水稻也更易因生理性失水而青枯死亡[23]。

本研究表明，相同化肥投入水平下，秸秆还田加重了水稻青枯病的发生程度，这可能是由于连续秸秆还田改善了表层土壤供肥能力和肥力水平，影响了水稻根系下扎的深度与广度，降低了水稻植株抗寒能力，这与李明桃[4]的研究报道中将秸秆还田作为预防水稻青枯病的措施不一致，这可能与二者秸秆还田后翻耕深度、配套的水稻栽植方式及水肥管理措施不同有关。本研究中，秸秆还田后翻耕深度只有 15 cm 左右，长期操作降低了耕层深度，限制了水稻根系下扎深度和广度，降低了水稻根系的抗冻性。因此，为了提高水稻对青枯病的抗性，一方面要增大秸秆还田后土壤的翻耕深度，防止耕层深度随秸秆还田年限的延长而变浅，促进养分在耕层土壤均匀分布；另一方面随着秸秆还田年限的延长和土壤供肥能力的增强，要及时减量施肥。

本研究中，水稻青枯病发病率与千粒质量、糙米率、精米率、整精米率均呈极显著负相关关系，这是由于水稻青枯死亡后，灌浆终止，稻谷饱满度下降[24]，千粒质量降低，最终导致加工品质变差。这说明水稻青枯死亡后不但会影响产量，还会影响稻谷加工品质和商品价值。本研究中，水稻青枯病发病率与产量、生物量均呈极显著正相关关系，这似乎与水稻青枯死亡后灌浆终止降低稻谷饱满度，进而影响稻谷产量的事实不符。这是由于水稻产量受多方面因素的影响，其中施肥量和土壤肥力水平是水稻产量形成的主要影响因素，而施肥量大、土壤肥力水平高的处理不但提高了水稻产量和生物量，也加重了水稻青枯病的发生。本研究中，青枯病发生在水稻灌浆末期，对产量的影响相对较小。水稻青枯病发病率与产量的相关关系是由施肥量、土壤肥力水平和青枯病的发生时期共同影响所致。

4　结　论

2021 年山东稻区水稻青枯病由灌浆期 3 次低温灾害天气叠加作用诱发，低温最低值与低温持续时间均与青枯病的发生密切相关。在面临灾害性气象条件时高土壤肥力水平、高化肥投入量更易诱发水稻青枯病。秸秆还田配施化肥加重了水稻青枯病的危害程度，水稻青枯病降低了稻谷的加工品质。

[参考文献]

[1] 钱德花. 水稻青枯病发病原因及防治对策[J]. 现代农业科技，2012(15)：95，97.
QIAN D H. Causes and control countermeasures of rice bacterial wilt[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2012(15)：95，97.

[2] 钱珊，朱洪艳，范立志. 水稻穗期生理性青枯病的发生原因及控制措施[J]. 植物医生，2009，22(6)：9-10.
QIAN S，ZHU H Y，FAN L Z. Causes and control measures of physiological bacterial wilt in rice heading stage[J]. Plant Doctor，2009，22(6)：9-10.

[3] 黄向荣，刘暮莲，庞韶玲. 合浦县 2012 年水稻青枯病发生原因分析及防控措施[J]. 广西植保，2013，26(2)：26-27.
HUANG X R，LIU M L，PANG S L. Cause analysis and control measures of rice bacterial wilt in Hepu County in 2012[J]. Guangxi Plant Protection，2013，26(2)：26-27.

[4] 李明桃. 水稻青枯病的发生原因及其预防措施探析[J]. 农业灾害研究，2013，3(1)：7-9.

LI M T. Exploration on causes and precaution of rice bacterial wilt[J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2013,3(1):7-9.

[5] 王友如,徐玉芳,纪效艳. 稻麦连作田水稻生理性青枯病发生原因及防治对策[J]. 现代农业科技,2010(8):201,203.
WANG Y R,XU Y F,JI X Y. Causes of physiological bacterial wilt of rice in rice-wheat continuous cropping field and its control measures[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2010(8):201,203.

[6] 程玲娟,何兴武,姜华. 水稻灌浆结实期青枯原因分析及防御措施[J]. 生物灾害科学,2013,36(1):82-85.
CHENG L J,HE X W,JIANG H. The analysis of the reason and defense on bacterial wilt at rice grain-filling stage[J]. Biological Disaster Science,2013,36(1):82-85.

[7] 肖浩永. 宁波市晚稻生理性青枯病的调查研究[J]. 浙江农业科学,2000,41(4):178-181.
XIAO H Y. Investigation on physiological bacterial wilt of late rice in Ningbo City[J]. Journal of Agricultural Science,2000,41(4):178-181.

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press,2000.

[9] 张凤哲,谢立勇,赵洪亮,等. 大气 CO_2 浓度升高条件下施加生物炭对水稻生物量分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(6):929-937.
ZHANG F Z,XIE L Y,ZHAO H L,et al. Synergistic effects of biochar application and elevated atmospheric CO_2 concentration on rice biomass allocation and yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2021,27(6):929-937.

[10] 吴玉红,王吕,崔月贞,等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(11):1926-1937.
WU Y H,WANG L,CUI Y Z,et al. Rice yield,quality,and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2021,27(11):1926-1937.

[11] 吴立群,蔡志欢,张桂莲,等. 低温对不同耐冷性水稻品种秧苗生理特性及根尖解剖结构的影响[J]. 中国农业气象,2018,39(12):805-813.
WU L Q,CAI Z H,ZHANG G L,et al. Effects of low temperature on physiological characteristics of rice seedlings with different cold tolerance and anatomical structure of root tip[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2018,39(12):805-813.

[12] 夏全超,张玉霞,孙明雪,等. 施磷深度对低温胁迫苜蓿根颈糖类物质含量及抗寒性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(11):53-60.
XIA Q C,ZHANG Y X,SUN M X,et al. Effects of phosphate fertilizer application depth on carbohydrate content and cold resistance of alfalfa root crown under low temperature stress[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2022,50(11):53-60.

[13] 黄奇娜,江苏,汪利民,等. 低温胁迫后水分对水稻幼苗根系活力和水孔蛋白相关基因表达的影响[J]. 中国水稻科学,2022,36(4):367-376.
HUANG Q N,JIANG S,WANG L M,et al. Effects of moisture content on root vigor and the expression of aquaporin-related genes in rice seedlings under low temperature stress[J]. Chinese Journal of Rice Science,2022,36(4):367-376.

[14] 蒋铮,肖娟,张子良,等. 短期夜间增温对亚高山针叶林云杉幼苗根系分泌物速率和化学成分的影响[J]. 生态学报,2018,38(9):3086-3096.
JIANG Z,XIAO J,ZHANG Z L,et al. Effects of night-time warming on the rates and main chemical components of root exudates produced by *Picea asperata* seedlings in subalpine coniferous forests[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3086-3096.

[15] 陈亚华,沈振国,刘友良. 低温、高 pH 胁迫对水稻幼苗根系质膜、液泡膜 ATP 酶活性的影响[J]. 植物生理学报,2000,26(5):407-412.
CHEN Y H,SHEN Z G,LIU Y L. Effects of chilling and high pH stresses on the ATPase activities of plasma membrane and tonoplast vesicles isolated from rice (*Oryza sativa* L.) roots[J]. Acta Photophysiologica Sinica,2000,26(5):407-412.

[16] 王红妮,王学春,陶诗顺,等. 低温潜沼性逆境下不同耐受能力水稻根系动态变化[J]. 生态学报,2016,36(19):6235-6245.
WANG H N,WANG X C,TAO S S,et al. The law of root changing of different rice varieties with different tolerance capacity under low temperature and gleization soil environment[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(19):6235-6245.

[17] REDMAN R S,KIM Y O,WOODWARD C J D A,et al. Increased fitness of rice plants to abiotic stress via habitat adapted symbiosis: a strategy for mitigating impacts of climate change[J]. PLoS ONE,2011,6(7):e14823.

[18] 万靓军,霍中洋,张洪程,等. 水稻生理性青枯病的发生与防治初探[J]. 安徽农业科学,2004,32(4):682-683,744.
WAN L J,HUO Z Y,ZHANG H C,et al. Preliminary research on rice straight head occurrence and control[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2004,32(4):682-683,744.

[19] 宋广树,孙蕾,杨春刚,等. 吉林省水稻幼苗期低温处理对根系活力的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(3):33-37.
SONG G S,SUN L,YANG C G,et al. The effect of low temperature treatment on root activity in rice seedling period in Jilin Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(3):33-37.

[20] 刘莹,盖钧镒,吕彗能. 作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2003,4(3):265-269.
LIU Y,GAI J Y,LU H N. Advances of the relationship between crop root morphology and tolerance to antibiotic stress[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2003,4(3):265-269.

[21] 江保春. 水稻青枯病防治方法[J]. 农民致富之友,2017(20):43.
JIANG B C. Rice bacterial wilt control method[J]. Friends of Farmer Wealth,2017(20):43.

(下转第151页)

蛋白对土荆芥化感胁迫的缓解效应[J]. 中国农业科学，2015，48(10)：1962-1970.
HU Z L，WANG Y N，MA D W，et al. Mitigation effects of exDNA and extracellular proteins from maize root border cells on allelopathic stress of *C. ambrosioides*[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(10)：1962-1970.

[15] 马春红，李秀丽，董文琦，等. HMC 毒素诱导玉米同核 C、N 细胞质细胞凋亡的荧光显微观察[J]. 中国农业科学，2011，44(9)：1823-1829.
MA C H，LI X L，DONG W Q，et al. Detection of apoptosis in homocaryon with C and N cytoplasm of maize induced by helminthosporium maydis race C(HMC) toxin[J]. Scientia Agricultura Sinica，2011，44(9)：1823-1829.

[16] QIAO Y X，ZHANG Y P，ZHANG H X，et al. Developmental characteristics and cinnamic acid resistance of root border cells in cucumber and figleaf gourd seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture，2013，12(11)：2065-2073.

[17] 马金虎，杨文秀，孙亮亮，等. 紫茎泽兰提取物对 3 种杂草的化感胁迫作用[J]. 生态学报，2018，38(10)：3514-3523.
MA J H，YANG W X，SUN L L，et al. Physiological mechanisms of the allelochemical stress to three weed species caused by *Eupatorium adenophorum* extracts[J]. Acta Ecologica Sinica，2018，38(10)：3514-3523.

[18] 李忠光，龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进[J]. 云南植物研究，2005，27(2)：211-216.
LI Z G，GONG M. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant[J]. Plant Diversity，2005，27(2)：211-216.

[19] HAWES M C，GUNAWARDENA U，MIYASAKA S，et al. The role of root border cells in plant defense[J]. Trends in Plant Science，2000，5(3)：128-133.

[20] 邢承华，张淑娜，吴坤，等. 边缘细胞对水稻生长和细胞壁组分的影响及其与耐铝性的关系[J]. 作物学报，2012，38(5)：880-886.
XING C H，ZHANG S N，WU K，et al. Effects of root border cells on root growth and cell wall polysaccharide contents in rice seedlings and their relation to aluminum tolerance[J]. Acta Agronomica Sinica，2012，38(5)：880-886.

[21] 何兵，汪利沙，王亚男，等. 土荆芥挥发油对豌豆根边缘细胞的诱导和胁迫作用[J]. 生态环境学报，2013，22(6)：991-995.
HE B，WANG L S，WANG Y N，et al. Induced and stress effects of volatile oil from *Chenopodium ambrosioide* L. on root border cells of pea[J]. Ecology and Environmental Sciences，2013，22(6)：991-995.

[22] 李荣峰，蔡妙珍，刘鹏，等. 植物根边缘细胞的抗逆性研究进展[J]. 广西植物，2007，27(3)：497-502.
LI R F，CAI M Z，LIU P，et al. The stress response and resistance of root border cells in plants[J]. Guihaia，2007，27(3)：497-502.

[23] 张永平，付玲，包颖，等. 高等植物根系边缘细胞的抗逆性研究进展[J]. 北方园艺，2017(24)：189-193.
ZHANG Y P，FU L，BAO Y，et al. Research on stress response and resistance of root border cells in higher plants[J]. Northern Horticulture，2017(24)：189-193.

[24] 蔡妙珍，王宁，王志颖，等. 边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响[J]. 生态学报，2012，32(3)：915-922.
CAI M Z，WANG N，WANG Z Y，et al. The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls[J]. Acta Ecologica Sinica，2012，32(3)：915-922.

[25] 李宏鑫. 纳米氧化硅缓解镉对豌豆生长胁迫伤害的机制[D]. 山西太谷：山西农业大学，2023.
LI H X. Mechanism of nano-silica to alleviate the damage of cadmium on pea growth stress[D]. Taigu，Shanxi：Shanxi Agricultural University，2023.

[26] 王鹏，杨奥军，冯志进，等. 外源 5-ALA 对干旱胁迫下玉米幼苗生长的缓解效应及抗氧化酶基因表达的影响[J]. 干旱地区农业研究，2022，40(4)：1-9.
WANG P，YANG A J，FENG Z J，et al. Effects of exogenous 5-ALA on growth of maize seedlings and expression of antioxidant enzyme genes under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2022，40(4)：1-9.

[27] 李荣峰，蔡妙珍，刘鹏，等. 边缘细胞对大豆根尖铝毒害的缓解效应[J]. 作物学报，2008，34(2)：318-325.
LI R F，CAI M Z，LIU P，et al. Border cells alleviating aluminum toxicity in soybean root tips[J]. Acta Agronomica Sinica，2008，34(2)：318-325.

（责任编辑：屈李纯）

（上接第 142 页）

[22] 葛阳，王升，万修福，等. 施氮对中药材抗逆性影响及机制[J]. 中国中药杂志，2021，46(8)：1901-1909.
GE Y，WANG S，WAN X F，et al. Effects and mechanisms of nitrogen application on stress resistance of Chinese materia medica[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2021，46(8)：1901-1909.

[23] 徐青山，黄晶，孙爱军，等. 低温影响水稻发育机理及调控途径研究进展[J]. 中国水稻科学，2022，36(2)：118-130.
XU Q S，HUANG J，SUN A J，et al. Effects of low temperature on the growth and development of rice plants and the advance of regulation pathways：a review[J]. Chinese Journal of Rice Science，2022，36(2)：118-130.

[24] 蔡志欢，张桂莲. 水稻低温冷害研究进展[J]. 作物研究，2018，32(3)：249-255.
CAI Z H，ZHANG G L. Research progress of low temperature and chilling injury of rice[J]. Crop Research，2018，32(3)：249-255.

（责任编辑：李小平）