

不同有机物添加方式下水稻对干旱胁迫的响应^①

夏扬¹, 秦江涛^{1,3}, 朱晓军², 胡锋¹, 张斌³, 李辉信^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江苏省质量监督检验研究院, 南京 210029;

3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 采用室内土培试验, 研究了在不同有机质(半腐解水稻秸秆和腐熟猪粪)表施和混施添加模式下, 水稻生长和主要抗旱生理生化指标对干旱胁迫的响应。结果表明: ①干旱胁迫下水稻株高降低、分蘖数减少, 根系则表现出主根伸长、支根增多、根表面积和根体积增加; 秸秆表施和猪粪混施可明显改善水稻的生长和根系形态, 而秸秆混施和猪粪表施的改善作用不显著; ②干旱胁迫下叶片叶绿素含量显著降低, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)活性均显著下降, 秸秆表施和猪粪混施能够在一定程度上抑制这种下降幅度。

关键词: 水稻; 秸秆; 猪粪; 干旱胁迫

中图分类号: S511

干旱缺水是世界农业面临的重大问题之一, 据估计干旱造成的农业损失可与其他所有胁迫导致的损失总额相当^[1]。水稻是我国主要的粮食作物, 其播种面积和总产量分别占全国粮食作物的 30% 和 45%。水稻淹水栽培耗水量惊人, 可高达 6000 ~ 9000 m³/hm²左右^[2], 稻作区灌溉用水量占农业用水总量的 60% 以上^[3-4]。由此可见, 发展水稻的节水栽培模式是节水农业的重中之重, 而对水稻抗旱的生理机制和适应性的研究也日益引起重视。当前, 对于水稻抗旱性的研究日趋深入, 对水稻叶片、根系生长特征、光合速率、叶绿素荧光参数、抗氧化酶系统活性、脱落酸含量等作物生长状况和生理生化指标在干旱胁迫下的响应进行了大量研究^[5-9]。

稻田秸秆还田以及有机肥的施用对维持土壤肥力、保持稻田生态系统的稳定性具有重要意义, 而且秸秆覆盖常常用来作为减少田间水分蒸发损失的重要措施之一^[10-11]。此前的研究报道较少涉及有机物质输入模式下水稻生长和生理生化性状对干旱胁迫的响应。本试验采用室内土培试验, 在不同有机质(半腐解水稻秸秆和腐熟猪粪)表施和混施添加模式下, 对比研究了水稻生长和主要抗旱生理生化指标对干旱胁迫的响应, 目的在于阐明干旱对水稻根系发育和地上部分生长的影响, 比较有机物输入对水稻抗旱性状的影响, 以期对水稻抗旱栽培模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

供试土壤取自南京市板桥镇的水稻田, 土壤有机质含量 21.5 g/kg, 全 N 1.64 g/kg, 有效 N 93.4 mg/kg, 有效 P 8.7 mg/kg, pH 5.5。土壤风干去除杂物过 5 mm 筛, 每个盆钵加入土壤 2.5 kg, 于装盆前(移栽前 2 ~ 3 天)加入 N、P、K 肥作基肥, 具体为尿素、磷酸二氢钠、氯化钾, 施肥量分别为 N 0.18 g/kg, P₂O₅ 0.12 g/kg 和 K₂O 0.13 g/kg(均以干土重计), 同时添加有机物料, 具体为干重 50 g 半腐熟的水稻秸秆和腐熟的猪粪分别表施和混施于土壤中。风干的秸秆和猪粪分别含 N 5.7 和 28.9 g/kg, 含 P₂O₅ 2.3 和 9.5 g/kg, 含 K₂O 10.5 和 24.3 g/kg。

供试水稻为扬稻 4 号 (*Oryza sativa*, L.CV), 于 2007 年 3 月在南京农业大学人工气候室内(温度为 28°C ± 2°C; 相对湿度为 60% ± 5%)进行土培试验。水稻种子经 1.6% 甲醛水溶液消毒 15 min 后, 用蒸馏水冲洗干净, 置恒温箱 25°C 浸种 48 h, 后滤去水分在 30°C ~ 35°C 进行催芽, 待根长约 1 cm, 芽长约 0.5 cm 时, 选取生长一致的秧苗, 移栽入装有土的塑料盆钵(高 40 cm, 内径 30 cm)中进行土培, 每个盆钵移入 3 棵幼苗, 同时设不添加有机物的对照处理, 每处理设 3 个重复。

水稻移栽后的前 15 天, 各处理均采用淹水栽培,

①基金项目: 国家 863 计划节水农业重大专项 (2002AA2Z4331) 资助。

* 通讯作者 (huixinli@njau.edu.cn)

作者简介: 夏扬 (1979—), 男, 江苏高邮人, 硕士研究生, 主要从事植物干旱生理生态研究。E-mail: xyzhxjc@yahoo.com.cn

以保证秧苗成活。此后除淹水对照 (F) 外, 对其他处理进行干旱胁迫 (NF), 具体水分控制以连续干旱 9 天为一个干旱周期, 每个干旱周期结束后对各处理进行统一复水, 加水至土壤表层水深 0.5 cm, 开始下次干旱胁迫周期。在水稻分蘖初期 (移栽后 30 天) 和后期 (移栽后 60 天) 分别测量水稻株高和分蘖数; 在水稻拔节孕穗期开始阶段 (移栽后 60 天, 第 6 个干旱周期) 对各处理统一复水后每隔 3 天采取水稻叶片测定叶绿素含量和酶活性, 连续监测一个干旱胁迫周期 (9 天), 直至下次复水。第 6 个干旱周期内各处理的土壤含水量变化见表 1 (FDR 埋于土壤 10 cm 处, 连续监测)。

表 1 第 6 个干旱周期内各处理的土壤体积含水量 (%)

Table 1 Water volume contents under different treatments in 6th drought period

处理	干旱天数 (天)				
	0	3	6	9*	12
F**	100	100	100	100	100
NF	100	77.4	61.7	44.5	77.1
NF+Ss	100	85.8	71.4	57	84.5
NF+Sm	100	78.0	63.0	45.0	78.5
NF+Ps	100	82.1	68.3	49.7	82.3
NF+Pm	100	77.0	61.0	43.0	77.8

* 第 9 天后复水; **: F 为淹水对照, NF 为干旱胁迫处理, 其中 Ss、Sm、Ps 和 Pm 分别表示秸秆表施、秸秆混施、猪粪表施以及猪粪混施, 下同。

1.2 水稻生长形态指标测定

采用冲洗法对根系进行取样, 根系指标测定使用根系分析仪 (WinRHIZO 2003b) 进行分析处理, 测定项目包括总根长、不定根数、最长根、根系表面积、根体积。

在水稻分蘖初期 (移栽后 30 天) 和后期 (移栽后 60 天) 分别测量水稻株高和分蘖数。

1.3 水稻叶片叶绿素含量测定

叶绿素含量测定参照 Wellburn 和 Lichtenthaler^[12] 的方法, 取新鲜第二片完全展开叶约 3 cm 长的中段叶片 0.2 g 剪成 <0.1 mm 的细丝置于 20 ml 的酒精、丙酮和水 (1:4.5:4.5) 的混合溶液内浸提, 避光浸泡至发白 (约 12 h), 取 2 ml 稀释 5 倍, 混匀, 于 663 nm 及 645 nm 下比色。

1.4 水稻叶片酶活性测定

将 0.2 g 鲜叶剪碎, 放入预冷的研钵中, 分别加入 60 mg PVP (聚乙烯基吡咯烷酮) 和 1 ml 提取液研磨成匀浆。超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的提取液为 100 mmol 的磷酸钾盐缓冲液 (pH 7.8)、

0.1 mmol EDTA 和 0.1% Triton X-100。

总 SOD 活性根据 Giannopolitis 和 Ries^[13] 的方法以抑制 NBT 光化学的能力来衡量。每 3 ml 反应液包含了 50 mmol 磷酸钾盐缓冲液 (pH 7.8)、14 mmol 钾硫酸、75 μmol NBT、0.1 μmol EDTA、50 μmol 酶液和 2 μmol 核黄素, 控温控光反应 20 min, 以不加酶液的反应液为对照, 在 560 nm 波长下进行比色。IU 的 SOD 定义为导致 NBT 光还原速率抑制 50% 所需要的酶活性。

CAT 的活性通过测定 H₂O₂ 在 240 nm 波长下的降解速度来计算^[14]。每 3 ml 反应液包含了 50 mmol 磷酸钾盐缓冲液 (pH 7.0)、12.5 mmol H₂O₂ 和 20 μl 酶液。IU 的 CAT 定义为降解 H₂O₂ 1 μmol/min 所需酶的总量。

过氧化物酶 (POD) 活性测定采用 Braber^[15] 的方法。根据 470 nm 下吸光度的增加来计算。每 3 ml 反应液包含了 50 mmol 磷酸钾盐缓冲液 (pH 7.0)、20 mmol 愈创木酚、64.7 mmol H₂O₂ 和 20 μl 酶液。以每分钟 OD₄₇₀ 增加 0.01 为 1 个酶活单位, 酶活性以 U/mg Protein 表示。

1.5 数据统计分析

数据分析采用 Excel 和 SPSS 软件, 作图采用 Excel 完成。显著性分析用 Duncan 检验完成, 所有的测定数据重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 水稻株高、分蘖及根系形态

从图 1 和图 2 可以看出, 不同处理对干旱胁迫下水稻株高和分蘖数的影响。无论 30 天和 60 天, 淹水对照 (F) 的水稻株高和分蘖数显著高于干旱胁迫处理 (NF)。总体上, 相对于淹水对照处理, 水稻株高和分蘖数在所有干旱胁迫处理中都在一定程度上降低。

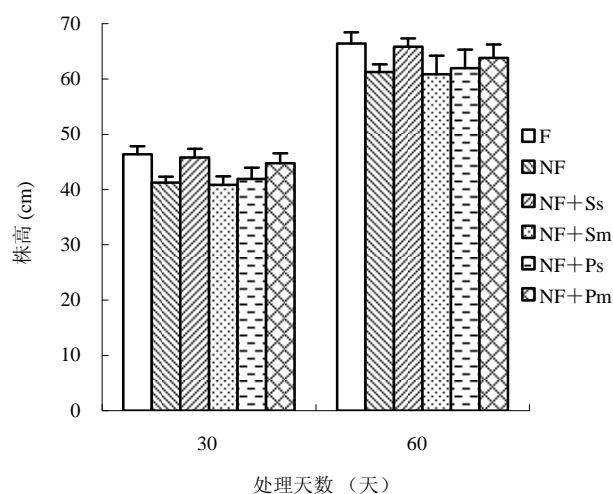


图 1 不同处理对水稻株高的影响

Fig. 1 Rice heights under different treatments

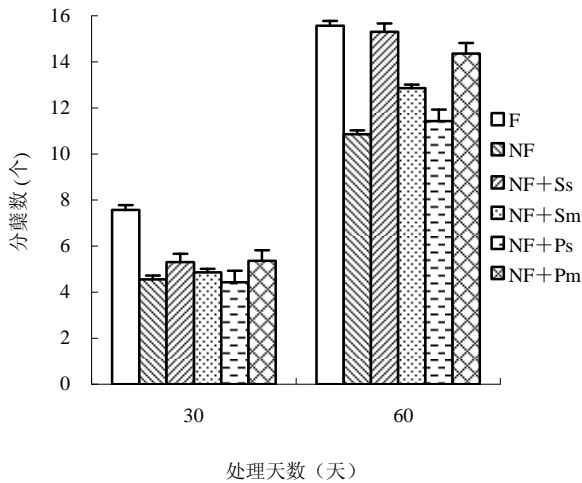


图 2 不同处理对水稻分蘖数的影响

Fig. 2 Tillering number of rice cultivated under different treatments

两个不同生育阶段的水稻株高在不同处理中的趋势大致相同, 施用有机物料的干旱胁迫处理与不施用有机物料的干旱胁迫处理 (NF) 相比, 水稻株高有增高的趋势, 其中稻草表施干旱胁迫 (NF + Ss) 和猪粪混施干旱胁迫 (NF + Pm) 处理水稻株高增高的趋势比较明显, 在 30 天和 60 天的监测结果均显示, NF+Ss 处理的水稻株高显著大于 NF 处理 ($p < 0.05$), 并与 F 处理接近。

较之于株高, 干旱胁迫对水稻分蘖数的影响更为明显 (图 2)。移栽 30 天后的测定结果表明, 虽然所有干旱胁迫处理的分蘖数均显著低于淹水对照 (F), 但施用有机物料的干旱胁迫处理与 NF 处理相比, 水稻分蘖数有增加的趋势。移栽 60 天的测定结果则发生了比较明显的变化, NF + Ss 和 NF + Pm 两个处理的水稻分蘖数显著高于 NF 处理, 并与淹水对照 (F) 差异不明显。这是因为 NF 处理下, 水稻植株的生长因水分胁迫造成的影响在后续生长中没有得到恢复, 对于猪粪混施 (NF + Pm) 处理而言, 主要是因为随作物生长期的延长, 猪粪对土壤肥力的影响开始显现出来; 而秸秆表施 (NF + Ss) 下, 水稻植株的生长只是在生长前期被延迟了, 随着生长时间的推移, 生长指标并未受到根本性的影响, 加之生育中后期半腐解秸秆养分的释放可促进作物的生长, 使得秸秆表施可以在一定程度上缓解水分胁迫, 减少旱作对植株生长的不利影响。虽然秸秆和猪粪均能提高土壤肥力, 但秸秆表施 (NF + Ss) 对水分的保持作用, 使得其对于干旱胁迫的抵抗能力强于猪粪混施 (NF + Pm) 处理。此前的大田研究结果表明半腐解秸秆覆盖旱作和裸地旱作水稻生育前期植株个体生长受到一定的抑制, 表现为分蘖发

生时间推迟、数量少、叶片变小、叶面积小, 且半腐解秸秆覆盖旱作水稻的水分供应不足, 抑制腋芽的萌发, 造成分蘖发生数低, 只有水作水稻的 50% 左右; 但生育中后期, 随着半腐解秸秆养分的释放, 土壤供肥能力提高, 有利于水稻植株的生长发育和高位分蘖的发生与成穗^[16]。本文试验结果与此前相关研究的结果相吻合^[11,17]。

对比移栽 30 天和 60 天的水稻株高和分蘖数测定结果可以看出, 随着生长时间的推移, 不同有机物质及其不同施用方式对水稻生长存在不同的影响。秸秆表施的效果明显优于猪粪表施; 而秸秆混施的效果则不如猪粪混施。秸秆表施主要是减少了土壤水分的蒸发损失, 减轻了控水条件下干旱胁迫对水稻生长的影响; 而猪粪混施则主要是提高了土壤肥力, 从而促进水稻植株生长和抗水分胁迫能力。鉴于秸秆混施与猪粪混施所表现出来的差异, 在实际生产中应该针对不同有机肥类型, 注意调整施用时间和施用方式。

相对于淹水种植, 干旱胁迫处理下水稻的根系生长的各项指标对于干旱胁迫发生了不同程度的响应。为了缓解水分胁迫, 缺水条件下水稻的根系必然向深层土壤生长, 以获取更多的水分。从表 2 可以看出, 干旱胁迫处理中水稻的总根长、不定根数、最长根、根表面积、根体积均大于淹水处理。NF + Ss 和 NF + Pm 处理中, 根表面积和根体积显著大于 NF 处理, 最长根却显著小于 NF 处理, 而不定根数和总根长没有显著差异。这可能是因为秸秆覆盖不仅有利于保持土壤水分, 而且增加了有机质的输入, 改善了土壤结构, 降低了土壤体积质量 (容重), 促进了根系的扩展延长; 而猪粪混施提高了土壤肥力, 并同时改善了土壤结构, 所以在根表面积、根体积等指标上的表现均优于 NF 处理。这表明秸秆覆盖和猪粪混施促进了干旱胁迫条件下水稻根系的发育。

植物对缺水的适应方式是植物抗旱特性的重要组成部分^[18]。普遍认为, 水分少时, 为避免水分胁迫, 根系生长加快, 分配到根系的同化物增多, 地上部生长则受到抑制, 使得根冠比增大^[19]。本试验中, 水稻在控水条件下地上部的株高和分蘖均受到不同程度的影响, 而根系则表现出主根伸长、支根数增多、根表面积和根体积增大等现象, 这正是植株对水分胁迫的适应表现。

2.2 水稻叶片叶绿素含量

干旱胁迫处理中, 供试水稻叶片的叶绿素含量随着干旱天数的增加而下降。胁迫 3 天后叶绿素 a、叶绿素 b 的含量与淹水对照相比显著下降 (图 3, 图 4); 随着干旱胁迫天数的进一步增加, 处理 6 天和 9 天后

表 2 不同处理对单株水稻根系生长的影响

Table 2 Root growth of rice cultivated under different treatments

处理	最长根 (cm)	不定根数 (条)	总根长 (m)	根表面积 (cm ²)	根体积 (cm ³)
F	41.2 c	13.7 c	76.50 c	76.3 d	0.52 c
NF	52.6 a	18.4 a	83.68 a	167.4 c	1.98 b
NF+Ss	46.3 b	19.4 a	85.79 a	221.5 b	2.37 a
NF+Sm	51.2 a	17.6 a	83.50 a	169.9 c	1.92 b
NF+Ps	47.6 b	15.9 b	81.68 b	171.5 b	2.01 b
NF+Pm	42.3 c	18.3 a	84.79 a	266.3 a	2.47 a

注：同列内字母不同表示差异显著（邓肯法， $p < 0.05$ ）。

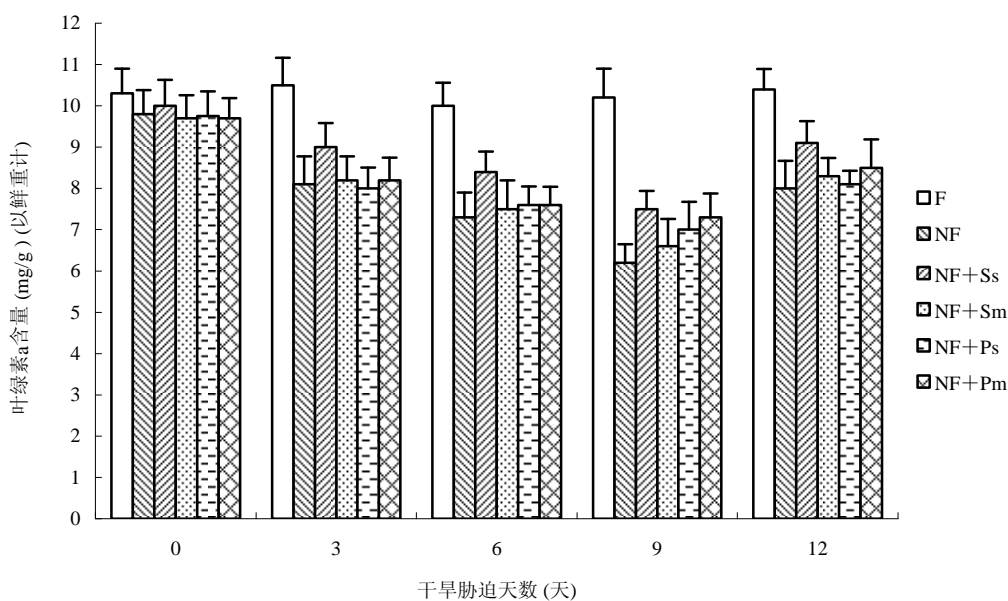


图 3 不同处理对水稻叶绿素 a 含量的影响

Fig. 3 Contents of CHI a of rice cultivated under different treatments

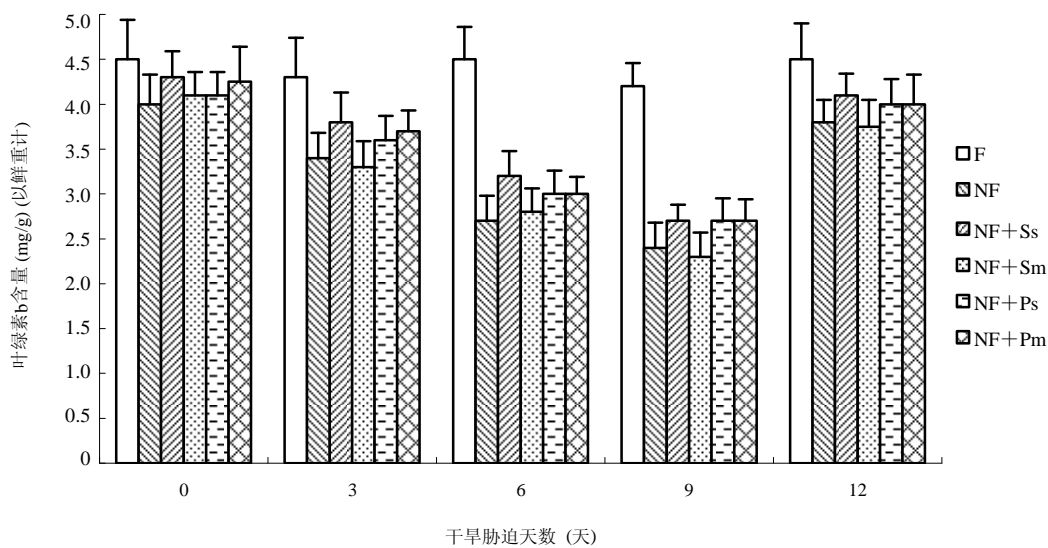


图 4 不同处理对水稻叶绿素 b 含量的影响

Fig. 4 Contents of CHI b of rice cultivated under different treatments

叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 的含量持续严重下降；复水 3 天后，各胁迫处理均有所回升，但还未增加到淹水对照水平。干旱胁迫处理中，NF+Ss 和 NF+Pm 处理在整个胁迫周期内均能减缓叶绿素含量的下降程度。

通常认为干旱影响光合作用主要是通过气孔限制和非气孔限制两个因素造成的。干旱明显降低了植株的净光合速率^[20-21]，使叶绿体超微结构损坏，叶绿素降解，从而含量降低^[22-23]，干旱还可降低光合酶 RuBP 羧化酶和碳酸酐酶等活性。大多报道也表明干旱胁迫下水稻叶片叶绿素含量下降，但也有与此结果相

反的报道^[24]，这可能与 N 肥利用有关，相关机理还需进一步研究。

2.3 水稻叶片酶活性

水稻叶片中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性随干旱胁迫天数的增加而呈下降趋势 (图 5)。干旱 3 天后，干旱胁迫各处理的测定结果显著低于淹水对照。干旱 6 天和 9 天后，对干旱胁迫各处理进行比较发现，NF+Ss 和 NF+Pm 处理能减缓 SOD 活性下降程度。复水 3 天后，各胁迫处理中 SOD 活性有所回升，但仍显著低于淹水对照。

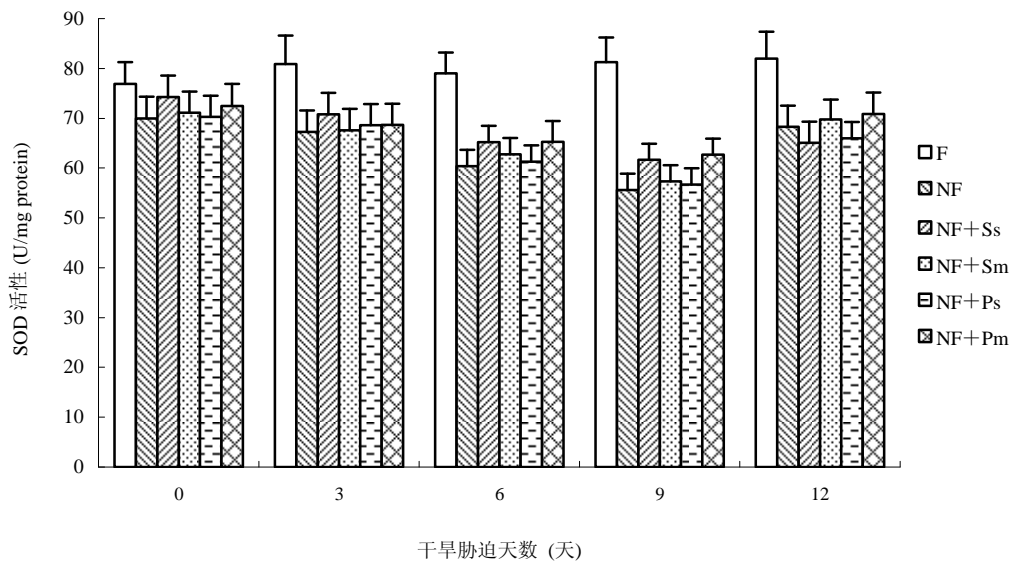


图 5 不同处理对水稻 SOD 活性的影响

Fig. 5 SOD activity of rice cultivated under different treatments

从图 6 和图 7 可以发现过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 活性的变化趋势与 SOD 类似。本试验中 3 种酶活性的测定结果在数值上与此前的相关研究存在差异^[9]，这可能主要是水稻品种的差异导致的。此前的研究表明干旱胁迫条件下不同水稻品种叶片内酶活性的变化存在较大差异^[25]。李长明等^[25]发现，干旱胁迫条件下，水稻抗旱性强弱与叶片的 SOD 和 CAT 活性的升高呈正相关，抗旱性强的品种，其 SOD 和 CAT 活性有随含水量降低而升高的趋势。卢少云等^[26]的研究认为耐旱品种水稻在干旱初期或轻度水分胁迫下具有更大幅度提高保护酶活性的能力，不耐旱品种酶活性提高较少或降低；严重水分胁迫下两类品种水稻保护酶活性均降低，而耐旱性越差的品种，降低的幅度越大。

20 世纪 80 年代以来，许多学者对干旱胁迫下植物体内抗氧化内源保护系统进行了大量的深入研究，

并确定它是由酶促防御系统和非酶促防御系统组成；前者有 SOD、POD、CAT，后者为非酶促性的活性氧清除剂 (抗氧化剂)，如维生素 E (VE)、抗坏血酸 (AsA)、谷胱甘肽 (GSH)、类胡萝卜素 (Car)、甘露醇等，它们协同作用抵抗干旱胁迫诱导的氧化伤害。在水分胁迫较轻的情况下，水稻体内启动抗氧化酶系统，通过 SOD 清除由碳同化受阻在强光下形成的超氧阴离子，产生的 H_2O_2 可以由 POD 和 CAT 进一步解毒形成 H_2O ，以减轻自由基对植株的伤害。

本试验结果表明干旱胁迫下 SOD 活性显著降低。此前 Gogorcena^[27]的研究表明干旱胁迫下豌豆植株的 SOD 活性显著下降；在大田对水稻干旱胁迫下的研究也得出相近的结论^[28]。但与此相反，也有的研究表明干旱胁迫下植物体内 SOD 活性反而上升^[29-30]。Zheng 和 Han^[31]在 1997 年的研究结果表明不同品种的大豆在干旱胁迫下 POD 活性也表现出不同的变化趋

势，抗旱品种植株体内含量升高，而对于干旱敏感的品种 POD 活性则显著降低。本试验中，SOD、POD 及 CAT

活性在干旱胁迫下均呈下降趋势，表明所选用的水稻品种对干旱胁迫较为敏感。

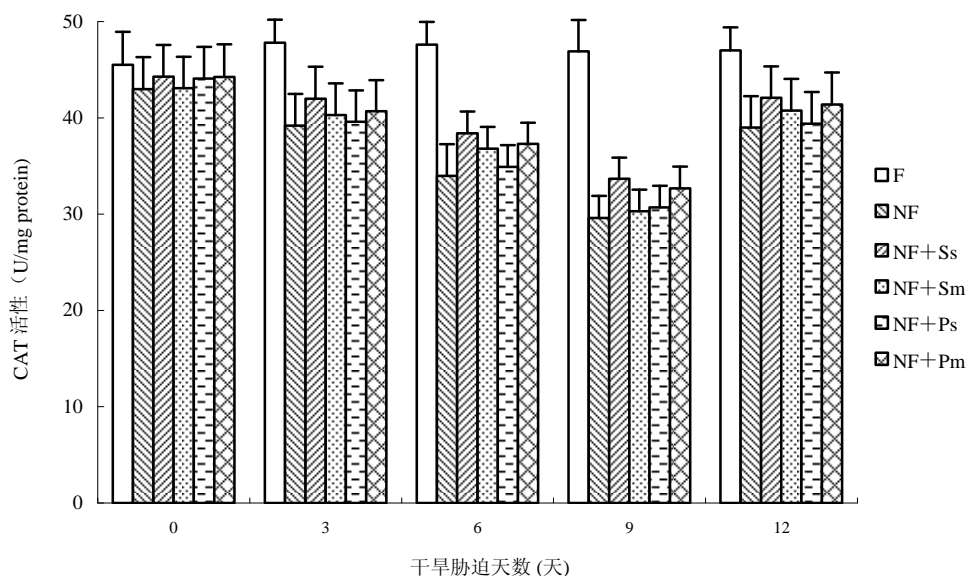


图 6 不同处理对水稻 CAT 活性的影响

Fig. 6 CAT activity of rice cultivated under different treatments

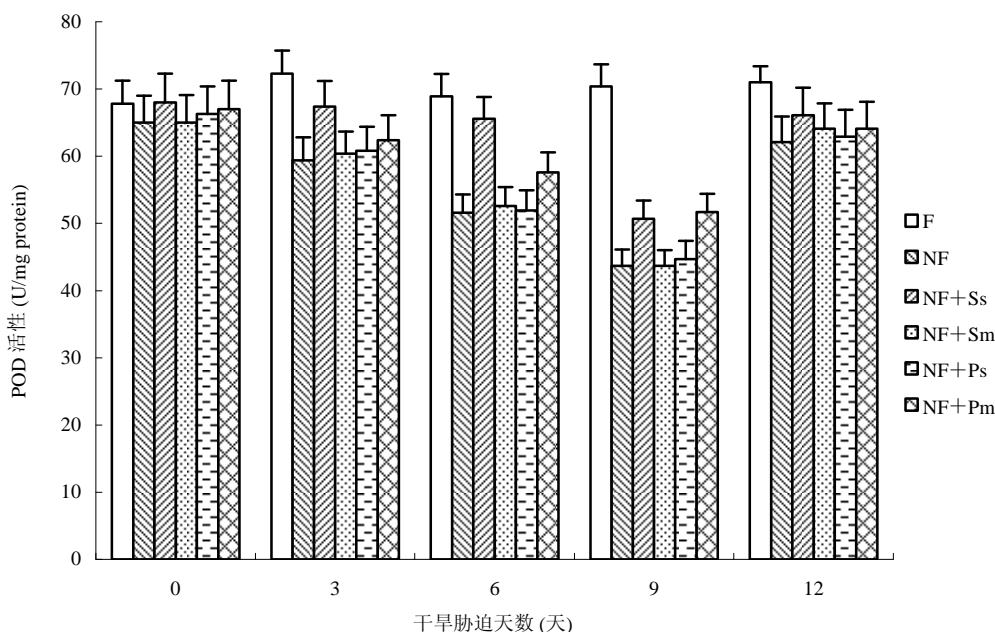


图 7 不同处理对水稻 POD 活性的影响

Fig. 7 POD activity of rice cultivated under different treatments

3 小结

(1) 干旱胁迫下水稻株高降低、分蘖数减少，根系则表现出主根伸长和支根增多，秸秆表施和猪粪混施可明显改善水稻的主要农艺性状，而秸秆混施和猪粪

表施在本试验中无明显作用。

(2) 干旱胁迫下水稻叶片叶绿素含量显著降低，SOD、POD 及 CAT 活性也均呈下降趋势，秸秆表施和猪粪混施能够在一定程度上抑制这种下降的幅度。

(3) 水稻生长发育是水、肥多因子交互作用的结果, 如何通过施用有机物料和肥料, 提高水稻的抗旱胁迫能力、发挥水肥耦合作用, 是水稻节水栽培体系中的重要环节, 今后应加强这方面的研究。

参考文献:

- [1] 卜庆雁, 周晏起. 果树抗旱性研究进展. 北方果树, 2001(6): 1-3
- [2] 梁永超, 胡锋, 杨茂成, 朱遐亮, 王广平, 王永乐. 水稻覆膜旱作高产节水机理研究. 中国农业科学, 1999, 32(1): 26-32
- [3] 金千瑜, 欧阳由南. 我国发展节水型稻作的若干问题探讨. 中国稻米, 1999(1): 9-12
- [4] 占新春, 张培江, 吕凯. 水稻节水栽培. 安徽农业科学, 2005, 33(11): 2011, 2031
- [5] 梁芳. 水分胁迫下杂交稻幼苗体内脯氨酸积累对膜脂过氧化的影响. 湘潭师范学院学报 (自然科学版), 2001, 23(3): 83-86
- [6] 肖用森, 王正直, 郭绍川. 渗透胁迫下稻苗体内游离脯氨酸积累与膜脂过氧化的关系. 武汉植物研究, 1996(4): 16-20
- [7] 张燕之, 周毓珩, 曾祥宽, 邹吉承, 王昌华, 王辉, 曹炳晨, 刘宛. 不同类型稻抗旱性鉴定指标研究. 沈阳农业大学学报, 2002, 33 (2): 90-93
- [8] Medrano H, Escalona JM, Bota J, Gulias J, Flexas J. Regulation of photosynthesis of C3 plant in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 2002, 89: 895-905
- [9] Liang YC, Hu F, Yang MC, Yu JH. Antioxidative defenses and water deficit-induced oxidative damage in rice (*Oryza sativa* L.) growing on non-flooded paddy soils with ground mulching. *Plant and Soil*, 2003, 257: 407-416
- [10] 黄新宇, 徐阳春, 沈其荣, 周春霖, 尹金来, Dittert K. 不同地表覆盖旱作水稻和水作水稻水分利用效率的研究. 水土保持学报, 2003 (17): 140-143
- [11] Qin JT, Hu F, Zhang B, Wei ZG, Li HX. Role of straw mulching in non- continuously flooded rice cultivation. *Agriculture Water Management*, 2006, 83: 252-260
- [12] Wellbum AR, Lichtenthaler H. Formulae and program to determine total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents // *Systema C. Advances in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff: Dr. W Junk Publisher, The Hague/Boston/Lancaster, 1984, II (1): 9-12
- [13] Giannopolitis CN, Rirs SK. Superoxide dismutases: Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.*, 1977, 59: 309-314
- [14] Havir EA, McHale NA. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiol.*, 1987, 84: 450-455
- [15] Braber JM. Catalase and peroxidase in primary bean leaves during development and senescence. *Z pflanzenphysiol*, 1980, 97: 135-144
- [16] 盛海君, 周春霖, 沈其荣, 徐阳春, 封克. 秸秆覆盖下旱作水稻的生长发育特征研究. 中国水稻科学, 2004, 18(1): 53-58
- [17] Qin JT, Hu F, Li HX, Huang FQ, Huang HX. Effects of rice crop cultivation under aerobic condition mulched with straw on water use efficiency and agronomic traits of rice. *Rice Science*, 2006, 13(1): 59-66
- [18] 王韶唐. 植物生理生化进展(2). 北京: 科学出版社, 1983: 60-65
- [19] Malik RS, Dhankar JS, Turner NC. Influence of soil water deficits on root growth of cotton seedlings. *Plant and Soil*, 1979, 53:109-115
- [20] 戴新宾, 翟虎渠, 张红生. 土壤干旱对水稻叶片光合速率和碳酸酐酶活性的影响. 植物生理学报, 2000, 26(2): 133-136
- [21] 胡继超, 姜东, 曹卫星, 罗卫红. 短期干旱对水稻叶水势、光合作用及干物质分配的影响. 应用生态学报, 2004, 15(1): 63-67
- [22] 孙骏威, 杨勇, 黄宗安, 金松恒, 蒋德安. 聚乙二醇诱导水分胁迫引起水稻光合下降的原因探讨. 中国水稻科学, 2004, 18(6): 539-543
- [23] 卢少云, 郭振飞, 彭新湘, 黎用朝, 李宝盛, 李明启. 水稻幼苗叶绿体保护系统对干旱的反应. 热带亚热带植物学报, 1999, 7(1): 47-52
- [24] 范晓荣, 沈其荣, 崔国贤, 徐国华. 旱作水稻内源激素变化及其与水稻形态和生理特性的关系. 土壤学报, 2002, 39(2): 206-213
- [25] 李长明, 蔡锡贵. 水稻抗旱机理研究. 西南农业大学学报, 1993, 15(5): 409-413
- [26] 卢少云, 郭振飞, 彭新湘, 李宝盛, 李明启, 黎用朝. 干旱条件下水稻幼苗的保护酶活性及其与耐旱性关系. 华南农业大学学报, 1997, 18(4): 21-25
- [27] Gogorcena Y, Iturbe-Ormaetxe I, Escuredo PR, Becana M. Antioxidant defenses against activated oxygen in pea nodules subjected to water stress. *Plant Physiol.*, 1995, 108: 753-759
- [28] Boo YC, Jung J. Water deficit-induced oxidative stress and antioxidative defenses in rice plants. *Plant Physiol.*, 1999, 155: 255-261
- [29] Kocsy G, Galiba G, Sutka J. In vitro system to study salt and drought tolerance of wheat. *Acta Hort*. 1991, 289: 235-236
- [30] Pastori GM, Trippi VS. Antioxidative protection in a drought-resistant maize strain during leaf senescence. *Physiol. Plant*, 1993, 87: 227-231
- [31] Zheng YZ, Han YH. Effect of high temperature and/or drought stress on the activities of SOD and POD of intact leaves in two soybean cultivars. *Soybean Genet. Newslett*, 1997, 24: 39-40

Responses to Drought Stress of Rice with Different Organic Matter Placement

XIA Yang¹, QIN Jiang-tao^{1,3}, ZHU Xiao-jun², HU Feng¹, ZHANG Bin³, LI Hui-xin¹

(1 *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*

2 *Jiangsu Provincial Supervising & Testing Research Institute of Products Quality, Nanjing 210029, China;*

3 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)*

Abstract: Through pot experiment, applying different organic fertilizers in two ways, i.e., mulching on soil surface and incorporated with soil, the growth and physiological characters of rice were studied under drought stress condition. The results indicated that: (1) plant height and tillering number decreased, and root length, root surface area, root volume and rootlet number increased under drought stress; straw mulched on surface soil and pig manure mixed in soil could improve the growth and morphological property of rice root, while straw mixed in soil and pig manure mulching had no significant effects; (2) the contents of chlorophylls and the activities of SOD, POD and CAT decreased significantly under drought stress, and straw mulching on surface soil and pig manure mixed in soil could restrain these decreases.

Key words: Rice, Straw, Pig manure, Drought stress