

灌溉方式与有机无机氮配施对 水稻土壤微生物活性的影响

刘宇锋^{1,2} 邓少虹¹ 梁燕菲¹ 李伏生¹

1. 广西大学农学院, 南宁 530005; 2. 广西农业科学院水稻研究所, 南宁 530007

摘要 通过盆栽试验, 研究常规灌溉(flooding irrigation, FIR)、控制灌溉(controlled irrigation, CIR)和间歇灌溉(intermittent irrigation, IIR)等3种灌溉方式和不同比例有机氮和无机氮(F1:60%无机N+40%有机N; F2:80%无机N+20%有机N; F3:100%无机N)配施对孕穗期、抽穗期、乳熟期水稻土壤酶(转化酶、脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶)活性以及微生物(细菌、放线菌、真菌)数量和微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)含量的影响。结果表明:各处理从孕穗期至抽穗期土壤酶活性、微生物数量以及MBC和MBN均不同程度提高,并达到峰值,而从抽穗期至乳熟期则逐步下降;CIR和IIR处理土壤酶活性、微生物数量以及MBC和MBN一般高于FIR处理;有机氮和无机氮肥配施土壤酶活性、微生物数量、MBC和MBN一般高于单施无机N肥,且高有机肥比例的F1处理效果更为明显。因此,在有机无机氮配施F1处理条件下,节水灌溉方式(CIR和IIR)能有效地提高水稻土壤微生物活性。

关键词 灌溉方式; 有机无机氮比例; 土壤酶活性; 土壤微生物数量; 土壤微生物量; 水稻土

中图分类号 S 154.36 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2012)04-0428-08

土壤微生物和酶是土壤生态系统中最活跃的组分,可以促进土壤有机质矿化和养分(C、N、P)的循环与转化,能较敏感地反映土壤环境的变化情况^[1-2]。灌溉和施肥会影响土壤微生物活性,如Wang等^[3]发现,在同一灌水方式下,轻度缺水土壤微生物数量占有一定的优势,交替1/2根系灌水根系两侧土壤微生物数量分布均匀。余江敏等^[4]认为,根区局部灌溉能创造良好的土壤生物环境,促进微生物的代谢和繁殖,提高土壤中微生物数量。一般情况下,土壤干旱时,土壤酶活性下降,重新湿润时又能稍许提高酶活性^[1,5],但土壤过湿或土壤含水量减少时,酶活性都会减弱^[6]。Li等^[7]发现,分根区交替灌溉湿润区土壤的过氧化氢酶、脲酶及转化酶活性提高。但是有关水稻节水灌溉方式如控制灌溉和间歇灌溉对土壤微生物活性的影响研究较少。有机氮和无机氮肥配施不仅直接影响土壤微生物数量、活性和群落结构,而且通过影响作物生长,间接地影响土壤微生物群落结构^[8-10],有关研究报

道较多,但是不同灌溉方式与有机氮和无机氮肥配施结合对水稻土微生物活性的影响研究并不多见。笔者在不同有机氮和无机氮肥配施条件下,研究控制灌溉和间歇灌溉对水稻土酶活性、微生物数量和微生物量碳和氮的影响,以探索节水灌溉模式下水稻土微生物活性变化规律,为水稻灌溉方式调整和改善农田土壤生态环境提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

盆栽试验在广西大学农学院温网室内进行。供试土壤为第四纪红色粘土发育水稻土,风干后,粉碎过10 mm筛,称取9.0 kg于盆钵(上部直径30 cm,下部直径20 cm,高21 cm)中。供试土壤pH值为6.01,有机质6.17 g/kg,碱解氮81.2 mg/kg(1 mol/L NaOH碱解扩散法),速效磷42.8 mg/kg(0.5 mol/L NaHCO₃法),速效钾60.9 mg/kg(1 mol/L中性NH₄Ac法)。供试水稻品种为三系

收稿日期: 2011-11-29

基金项目: 广西自然科学基金项目(2011GXNSFB01830)和广西研究生教育创新计划项目(2009105930901D011)

刘宇锋, 博士研究生, 助理研究员. 研究方向: 植物营养生理与水肥利用理论与技术. E-mail: liuyufeng@gxu.edu.cn

通讯作者: 李伏生, 教授. 研究方向: 植物营养与水肥利用理论与技术. E-mail: zhenz@gxu.edu.cn

粳型杂交水稻组合特优 63。

1.2 试验方法

试验设 3 种灌溉方式和 3 种有机氮和无机氮比例,完全方案设计,共 9 个处理,每个处理重复 12 次,共 108 盆,随机区组排列。

1) 灌水方式。①常规灌溉(FIR),除分蘖末期晒田和黄熟期自然落干以外,其他各生育期盆内土壤均保持浅水层(40~60 mm)。②控制灌溉(CIR),各生育期灌水后实行无水层灌溉模式,分蘖前期、中期、后期和拔节孕穗前期、后期及抽穗开花期和乳熟期土壤含水率下限分别为土壤饱和含水率的 70%、75%、70%、70%、75%、80% 和 70%,上限为土壤饱和含水率,分蘖末期晒田,黄熟期自然落干。③间歇灌溉(IIR),返青期保持 20~60 mm 水层,分蘖末期晒田,水稻黄熟期自然落干,其余时期采用薄水层(5~10 mm)与无水层相间的灌水方式。试验期间按上述不同处理灌水要求进行控水,用量筒量取各处理灌水量,其中 CIR 和 IIR 处理用 ML2x 型土壤水分快速测定仪测定 0~10 cm 土层土壤相对含水率,确定灌水时间和灌水量。

2) 有机氮和无机氮比例。F1:60%无机 N+40%有机 N;F2:80%无机 N+20%有机 N;F3:100%无机 N。氮肥施用量以总 N 用量计算,N 按 0.15 g/kg 土施入, P_2O_5 和 K_2O 用量按 $m_N : m_{P_2O_5} : m_{K_2O} = 3 : 2 : 3$ 比例配施。N 肥由尿素(N 的质量分数为 46.6%)与生物有机肥按比例提供;P 肥以 $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ (以 P_2O_5 计的质量分数为 56.3%)形式提供;K 肥以 KCl(以 K_2O 计的质量分数为 63.1%)形式提供,化学肥料均为分析纯。有机肥为山东省寿光市沃野化工有限公司生产的豆粕有机肥,该有机肥主要原料为动植物残体,含豆粕、骨粉、鱼粉、HR568-2 菌种等有效成分,按农业部颁布有机肥料测定国家标准(NY525-2002)测定其组分,其水分质量分数 21.45%,pH 值 6.0,有机质 218.31 g/kg,全氮 17.97 g/kg,全磷 66.17 g/kg,全钾 5.50 g/kg。P、K 肥与有机肥全部作基肥施用,其中 60%无机 N 作基肥施用,其余 40%无机 N 分别在分蘖期和孕穗期各按 20%量追施。

水稻于 2011 年 4 月 2 日播种,水稻催芽露白后,培育至 3 叶 1 心期,选取长势基本一致幼苗进行移栽,4 月 26 日移栽至盆钵。水稻苗每盆 2 穴,每穴 1 株,移栽深度 2~3 cm。水稻秧苗移栽前所有

盆内土壤均保持浅水层(20~30 mm)。不同灌水处理从 5 月 7 日水稻秧苗返青后进行,7 月 22 日水稻开始黄熟后结束,7 月 28 日全部收获完毕,全生育期 117 d,试验期间其他农业管理措施一致。

1.3 测定项目与方法

1) 土壤样品采集。分别在 6 月 23 日(孕穗期)、7 月 9 日(抽穗期)、7 月 18 日(乳熟期)采集土样。每次采样时间为灌水处理后第 2 天的 08:00 至 11:00,分别采集不同处理土壤 0~16 cm 水稻土层土壤,各处理每次采样 3 盆,同一盆土壤采样后混合均匀,封口袋密封保存。土壤微生物量 C 和 N、微生物数量测定用新鲜土壤;其他土壤样品避光自然风干 7 d,过 0.1 mm 筛,4 °C 密封保存后进行土壤酶活性测定。

2) 土壤酶活性测定。土壤转化酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,土壤脲酶活性用苯酚钠比色法测定,土壤酸性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定和土壤脱氢酶活性用 2,3,5-三苯基氯化四唑(TTC)比色法测定^[11]。其中土壤转化酶活性以 24 h 蔗糖转化成葡萄糖的质量(mg)定义为 1 个酶活性单位, U_1 ;土壤脲酶活性以每 100 g 干土 3 h 尿素生成 NH_4^+-N 的质量(mg)定义为 1 个酶活性单位, U_2 ;土壤酸性磷酸酶活性以每 100 g 土生成苯酚质量(mg)定义为 1 个酶活性单位, U_3 ;土壤脱氢酶以 30 °C,6 h TTC 还原成三苯基甲腈质量(μg)定义为 1 个酶活性单位,定义为 U_4 。

3) 土壤微生物数量测定。土壤微生物数量用稀释平板测数法分别测定细菌、真菌与放线菌数量,分别采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养细菌,改良高氏 1 号培养基培养放线菌,马丁-孟加拉红培养基培养真菌^[12];其中细菌培养采用 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 稀释浓度培养,放线菌采用 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 稀释浓度培养,真菌采用 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 稀释浓度培养,30 °C 培养 2、5、7 d 后分别计数细菌、放线菌、真菌菌落数。使用 XK97-A 型菌落计数器(江苏新康)进行菌落计数,每克土壤样品所含的菌数=同一稀释浓度 3 次重复的菌落平均数 $\times 10 \times$ 稀释倍数。

4) 土壤微生物量 C 和 N 测定。微生物量 C 用氯仿熏蒸 K_2SO_4 提取- $KMnO_4$ 容积分析法测定^[13],微生物量 N 用氯仿熏蒸 K_2SO_4 提取-全 N 法测定^[14],使用 AA3 型连续流动化学分析仪(SEAL, GRE)测定微生物全 N 含量。

1.4 统计分析

方差分析用 SPSS15.0 软件中通用线性模型单因变量法进行分析,包括灌溉方式、有机氮和无机氮比例以及灌溉方式×有机氮和无机氮比例交互作用。多重比较用 Duncan's 法,小写字母不同者表示差异显著($P<0.05$),字母相同者表示不显著。

2 结果与分析

2.1 对水稻土壤酶活性的影响

灌溉方式与有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期土壤转化酶活性(表 1)有极显著性影响($P<0.01$),灌溉方式×有机氮和无机氮比例仅对抽穗期采样土壤转化酶活性有极显著性影响。与 FIR 相比,3 个采样时期 CIR 和 IIR 转化酶活性分别增加 125.9% 和 106.8%,71.9% 和 30.4%,110.7% 和 53.7%;与单施无机 N(F3)相比,有机氮和无机氮配施处理(F1 和 F2)土壤转化酶活性分别提高 62.6% 和 28.2%,32.3% 和 11.2%,35.0% 和 11.9%。

灌溉方式对 3 个时期采样土壤脲酶活性有极显著性影响(表 1),而有机氮和无机氮比例和灌溉方式×有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期脲酶活性的影响不明显($P>0.05$)。3 个采样时期 CIR 和 IIR 土壤脲酶活性较 FIR 分别增加 43.0% 和 12.0%,100.8% 和 43.8%,166.4% 和 97.4%;F1 和 F2 脲酶活性较 F3 一般提高。

灌溉方式与有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期土壤酸性磷酸酶活性(表 2)有显著性影响。3 个采样时期 CIR 和 IIR 处理酸性磷酸酶活性较 FIR 分别上升 17.1% 和 13.1%,28.7% 和 22.0%,39.6% 和 18.9%;孕穗期和抽穗期采样 F1 和 F2 土壤酸性磷酸酶活性较 F3 分别提高 41.9% 和 14.6%,12.0% 和 7.6%,而乳熟期采样土壤分别下降 32.7% 和 13.1%。灌溉方式与有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期土壤脱氢酶活性的影响极显著,而灌溉方式×有机氮和无机氮比例仅对孕穗期采样土壤脱氢酶有显著性影响。与 FIR 相比,3 个采样时期 CIR 和 IIR 土壤脱氢酶活性分别增加 31.8% 和 10.3%,18.5% 和 4.9%,13.7% 和 5.3%;

与 F3 相比,F1 和 F2 土壤脱氢酶活性分别提高 15.1% 和 9.3%,14.2% 和 5.3%,16.0% 和 8.7%。各处理水稻土壤 4 种酶活性均从孕穗期到抽穗期增加,而抽穗期到乳熟期则下降(表 1 和表 2)。

2.2 对水稻土壤微生物数量的影响

1)细菌。灌溉方式与有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期土壤细菌数量有极显著性影响($P<0.01$),而灌溉方式×有机氮和无机氮比例仅对抽穗期采样土壤细菌数量的影响极显著(表 3)。与 FIR 相比,3 个采样时期 CIR 和 IIR 处理土壤细菌数分别增加 47.5% 和 27.1%,27.8% 和 26.4%,168.5% 和 80.7%;与 F3 相比,F1 和 F2 处理土壤细菌数分别增加 29.5% 和 10.0%,28.9% 和 14.0%,64.9% 和 42.2%。

2)放线菌。表 3 表明,灌溉方式与有机氮和无机氮比例对乳熟期采样土壤放线菌数量的影响显著($P<0.05$),灌溉方式×有机氮和无机氮比例对孕穗期和乳熟期土壤放线菌数量的影响显著。孕穗期和抽穗期采样 CIR 和 IIR 土壤放线菌较 FIR 分别下降 17.2% 和 30.5%,16.7% 和 30.7%,乳熟期采样分别增加 6.5% 和 41.7%;孕穗期和抽穗期采样 F1 和 F2 处理土壤放线菌较 F3 分别减少 40.6% 和 7.9%,35.9% 和 0.3%,而乳熟期采样增加 38.5% 和 41.0%。

3)真菌。灌溉方式与有机氮和无机氮比例对 3 个采样时期土壤真菌数量的影响显著($P<0.05$),而灌溉方式×有机氮和无机氮比例仅对孕穗期土壤真菌数量有显著影响(表 3)。3 个时期 CIR 和 IIR 处理土壤真菌数量较 FIR 分别减少 23.3% 和 6.1%,34.0% 和 15.2%,34.0% 和 15.2%;孕穗期和抽穗期采样 F1 和 F2 土壤真菌数量较 F3 分别增加 43.4% 和 9.3%,44.4% 和 15.8%,乳熟期采样 F1 土壤真菌数量较 F3 处理增加 7.9%,而 F2 较 F3 减少 5.3%。FIR 处理土壤真菌数量从抽穗期至乳熟期却没有下降,这可能与 FIR 处理长时间保持水层,土壤处于厌氧状态,土壤真菌生存环境没有明显变化有关。各处理土壤细菌、放线菌和真菌数量从孕穗期到抽穗期增加,而从抽穗期到乳熟期降低(表 3)。

表 1 灌溉方式与有机氮和无机氮比例对土壤转化酶和脲酶活性的影响¹⁾

Table 1 Effect of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on soil invertase and urease activities

IM	R	转化酶/U ₁ Invertase			脲酶/U ₂ Urease		
		孕穗期	抽穗期	乳熟期	孕穗期	抽穗期	乳熟期
		Booting stage	Heading stage	Milky stage	Booting stage	Heading stage	Milky stage
FIR	F1	4.19±0.33 bc	10.34±0.06 ef	7.10±0.06 de	391.72±33.93 d	410.51±57.95 e	266.60±48.05 de
	F2	2.60±0.57 c	9.48±0.52 f	5.36±0.01 ef	368.10±20.20 d	432.21±20.46 e	177.73±11.09 e
	F3	2.65±0.71 c	7.28±0.42 g	4.96±0.95 f	351.26±10.34 d	451.50±61.37 e	167.28±18.48 e
CIR	F1	8.62±1.84 a	18.69±0.52 a	13.06±2.33 a	567.53±77.78 a	974.64±39.78 a	624.68±51.75 a
	F2	6.53±0.36 ab	14.14±0.23 b	11.20±0.28 ab	532.14±77.78 ab	880.62±75.00 ab	554.10±40.66 ab
	F3	6.17±0.18 ab	13.75±0.78 bc	10.33±0.44 b	489.53±30.30 abc	743.20±44.32 bc	450.48±68.94 bc
IIR	F1	8.11±2.41 a	12.95±0.35 c	9.50±0.54 bc	413.12±23.26 cd	535.88±10.23 de	410.35±73.92 bc
	F2	7.37±0.44 a	11.67±0.34 d	8.04±0.13 cd	389.52±3.37 d	673.29±9.10 cd	326.72±73.93 cd
	F3	4.04±0.11 bc	10.70±0.57 de	7.69±0.26 cd	441.46±50.46 bcd	651.59±3.41 cd	470.47±99.80 bc
P							
IM		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
R		<0.01	<0.01	<0.01	0.37	0.56	0.09
IM×R		0.26	<0.01	0.85	0.38	0.06	0.10

1)IM:灌溉方式 Irrigation method; P:显著性检验 Significance test; R:有机氮和无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N; FIR:常规灌溉 Flooding irrigation; CIR:控制灌溉 Controlled irrigation; IIR:间歇灌溉 Intermittent irrigation; F1:60%无机 N+40%有机 N 60% inorganic N+40% organic N; F2:80%无机 N+20%有机 N 80% inorganic N+20% organic N; F3:100%无机 N 100% inorganic N; 表中数值为平均值±标准差(n=3),同一列不同字母表示差异显著(P<0.05),下表同。Mean±standard deviation (n=3). Different letters at the same column mean significance at P<0.05 level. The same as below.

表 2 灌溉方式与有机氮和无机氮比例对土壤酸性磷酸酶和脱氢酶活性的影响

Table 2 Effect of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on soil acid-phosphatase and dehydrogenase activities

IM	R	酸性磷酸酶/U ₃ Acid-phosphatase			脱氢酶/U ₄ Dehydrogenase		
		孕穗期	抽穗期	乳熟期	孕穗期	抽穗期	乳熟期
		Booting stage	Heading stage	Milky stage	Booting stage	Heading stage	Milky stage
FIR	F1	1.02±0.18 ab	1.90±0.11 cd	1.22±0.04 cd	7.41±0.07 f	20.63±0.26 b	12.66±0.11 c
	F2	0.72±0.04 cd	1.78±0.04 d	1.14±0.06 d	7.11±0.06 g	18.36±0.26 cd	12.05±0.22 de
	F3	0.63±0.08 d	1.67±0.04 d	0.91±0.02 e	6.59±0.06 i	17.34±0.29 d	11.00±0.03 f
CIR	F1	1.09±0.07 a	2.46±0.14 a	1.72±0.09 a	9.61±0.06 a	23.29±0.22 a	14.65±0.16 a
	F2	0.89±0.05 bc	2.30±0.06 ab	1.50±0.04 b	9.41±0.07 b	22.52±0.41 a	13.58±0.16 b
	F3	0.81±0.02 cd	2.11±0.06 bc	1.34±0.02 c	8.80±0.02 c	20.93±1.20 b	12.37±0.05 cd
IIR	F1	1.01±0.05 ab	2.21±0.23 ab	1.53±0.08 b	8.61±0.06 d	21.17±0.21 b	13.38±0.36 b
	F2	0.92±0.03 abc	2.23±0.11 ab	1.23±0.03 cd	7.81±0.06 e	19.15±0.03 c	12.50±0.02 c
	F3	0.77±0.08 cd	2.08±0.14 bc	1.12±0.04 d	6.87±0.16 h	18.73±0.57 c	11.72±0.21 e
P							
IM		0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
R		<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
IM×R		0.51	0.67	0.18	<0.01	0.23	0.12

表 3 灌溉方式与有机氮和无机氮比例对土壤细菌、放线菌和真菌数量的影响

Table 3 Effect of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on the number of bacteria, actinomycetes and fungi in soil

IM	R	细菌/($\times 10^5$ /g) Bacteria			放线菌/($\times 10^5$ /g) Actinomycetes			真菌/($\times 10^2$ /g) Fungi		
		孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky stage
FIR	F1	11.65 \pm 1.34 ef	29.95 \pm 0.78 de	7.80 \pm 0.71 cde	4.65 \pm 0.49 abc	6.22 \pm 1.38 a	7.76 \pm 0.20 a	7.84 \pm 0.23 a	12.17 \pm 0.71 a	7.84 \pm 0.23 a
	F2	14.80 \pm 1.56 fg	26.30 \pm 1.70 e	6.10 \pm 0.57 de	3.85 \pm 0.21 bc	4.16 \pm 0.88 ab	5.19 \pm 0.11 ab	5.17 \pm 0.71 bc	10.17 \pm 0.23 bc	6.67 \pm 0.01 b
	F3	8.20 \pm 0.42 g	26.40 \pm 2.97 e	5.00 \pm 0.99 e	2.00 \pm 0.00 c	1.66 \pm 0.71 b	5.50 \pm 0.70 ab	3.50 \pm 0.24 d	9.50 \pm 0.24 cd	7.17 \pm 0.23 ab
CIR	F1	21.25 \pm 1.06 a	46.25 \pm 1.48 a	21.05 \pm 1.06 a	8.30 \pm 1.41 a	6.38 \pm 1.18 a	5.47 \pm 0.86 ab	4.83 \pm 0.71 bcd	9.00 \pm 0.00 d	5.00 \pm 0.95 c
	F2	17.65 \pm 1.06 b	38.60 \pm 1.13 b	18.00 \pm 0.42 ab	4.00 \pm 1.41 bc	5.99 \pm 1.43 a	4.31 \pm 2.48 ab	4.50 \pm 1.17 bcd	6.50 \pm 0.24 e	4.50 \pm 0.24 c
	F3	16.60 \pm 1.27 bc	34.15 \pm 5.16 bcd	14.00 \pm 5.23 bc	2.80 \pm 0.71 bc	5.01 \pm 0.66 ab	3.25 \pm 0.39 b	3.34 \pm 0.47 d	5.50 \pm 0.24 f	4.67 \pm 0.00 c
IIR	F1	16.25 \pm 0.64 bc	37.20 \pm 1.98 bc	13.00 \pm 5.23 bc	6.50 \pm 1.96 ab	6.06 \pm 0.23 a	7.34 \pm 0.28 a	5.50 \pm 0.24 bc	10.84 \pm 0.23 b	7.67 \pm 0.00 ab
	F2	14.80 \pm 1.56 cd	35.35 \pm 1.20 bcd	12.15 \pm 2.62 bcd	3.65 \pm 0.49 bc	5.42 \pm 0.59 ab	3.20 \pm 0.93 b	4.17 \pm 0.71 cd	9.00 \pm 0.47 d	6.83 \pm 0.71 ab
	F3	13.15 \pm 0.92 de	31.95 \pm 0.92 cd	9.00 \pm 0.99 cde	2.35 \pm 1.91 c	2.99 \pm 0.66 ab	3.32 \pm 1.31 b	5.83 \pm 0.71 b	7.17 \pm 0.23 e	6.17 \pm 0.23 b
P										
IM		<0.01	<0.01	<0.01	0.32	0.25	0.04	0.02	<0.01	<0.01
R		<0.01	<0.01	<0.01	0.13	0.12	0.05	<0.01	<0.01	0.02
IM \times R		0.69	<0.01	0.24	0.04	0.28	0.02	<0.01	0.15	0.87

表 4 灌溉方式与有机氮和无机氮比例对土壤微生物量碳、氮的影响

Table 4 Effect of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on soil microbial biomass C and N

IM	R	微生物量碳/(mg/kg) Microbial biomass C			微生物量氮/(mg/kg) Microbial biomass N		
		孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky stage
FIR	F1	123.0 \pm 8.1 de	465.3 \pm 54.7 c	336.0 \pm 33.7 bc	29.6 \pm 1.8 bc	64.0 \pm 3.0 b	39.7 \pm 1.3 bc
	F2	114.8 \pm 1.3 ef	293.1 \pm 18.0 d	275.3 \pm 4.7 c	30.7 \pm 1.6 bc	51.2 \pm 0.0 cde	36.3 \pm 0.5 de
	F3	107.8 \pm 3.1 f	267.6 \pm 53.0 d	257.9 \pm 7.1 c	22.7 \pm 0.6 c	55.0 \pm 2.4 cde	36.2 \pm 2.0 de
CIR	F1	188.7 \pm 10.4 a	599.6 \pm 26.7 ab	429.5 \pm 80.8 b	31.8 \pm 7.8 bc	74.5 \pm 6.2 a	46.0 \pm 2.7 a
	F2	151.2 \pm 3.5 b	649.4 \pm 15.4 ab	528.8 \pm 50.3 a	33.9 \pm 5.6 b	55.9 \pm 3.5 bcde	42.0 \pm 1.5 bc
	F3	136.6 \pm 7.2 c	633.8 \pm 47.4 ab	353.9 \pm 29.8 bc	34.5 \pm 2.5 b	56.9 \pm 2.0 bed	41.3 \pm 0.7 bc
IIR	F1	134.1 \pm 1.9 cd	530.6 \pm 5.0 bc	349.3 \pm 51.8 bc	30.2 \pm 0.9 bc	63.4 \pm 5.0 bc	42.7 \pm 1.0 b
	F2	125.1 \pm 1.0 cde	576.3 \pm 50.2 abc	315.5 \pm 42.8 c	28.8 \pm 0.8 bc	59.9 \pm 0.6 bc	39.1 \pm 0.5 cd
	F3	118.8 \pm 1.3 ef	678.5 \pm 10.0 a	319.3 \pm 2.1 c	47.0 \pm 4.5 a	48.3 \pm 3.8 e	35.2 \pm 0.6 e
P							
IM		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.08	<0.01
R		<0.01	0.69	0.05	0.17	<0.01	<0.01
IM \times R		<0.01	0.01	0.06	<0.01	0.03	0.30

2.3 对水稻土壤微生物量碳、氮的影响

表4表明,灌溉方式对3个采样时期MBC的影响极显著($P < 0.01$),有机氮和无机氮比例对孕穗期和乳熟期采样土壤MBC的影响显著,灌溉方式 \times 有机氮和无机氮比例对孕穗期和抽穗期采样土壤MBC的影响极显著。与FIR处理相比,水稻孕穗、抽穗和乳熟期CIR和IIR土壤MBC分别增加27.5%和9.4%,83.5%和74.0%,51.0%和13.2%;与F3相比,F1和F2处理均在一定程度上提高土壤MBC。

灌溉方式对孕穗期和乳熟期采样土壤MBN的影响极显著($P < 0.01$),有机氮和无机氮比例对抽穗期和乳熟期采样土壤MBN的影响极显著,灌溉方式 \times 有机氮和无机氮比例对孕穗期和抽穗期采样土壤MBN的影响显著(表4)。3个采样时期CIR和IIR土壤MBN较FIR分别增加13.2%和9.5%,8.2%和0.8%,20.7%和27.7%;F1和F2土壤MBN较F3分别增加13.9%和4.2%,28.5%和6.2%,13.6%和1.8%。各处理土壤MBC和MBN从孕穗期到抽穗期增加,而从抽穗期到乳熟期降低(表4)。

3 讨论

作物生长旺盛时期根系分泌物增多,微生物代谢活动增强,因而土壤酶活性增强^[15-16]。展茗等^[17]研究认为,不同稻作灌溉模式下,MBC受水稻生育期的影响较大。时亚南等^[18]研究室内恒温培养下不同施肥处理水稻土壤MBC变化发现,MBC呈现先上升后下降的趋势,但是峰值出现时间有所不同。由于抽穗期是水稻生长旺盛时期,因而本试验该时期各处理4种土壤酶活性和3种微生物数量最高,随着水稻植株衰老,至乳熟期3种微生物数量和4种酶活性则下降。此外,此时期各处理土壤MBC和MBN含量也高。这表明,试验各处理土壤酶活性、土壤微生物数量与MBC、MBN与水稻生命活动强弱相关,受水稻生长阶段影响。

3.1 灌溉方式对土壤微生物活性的影响

土壤转化酶对土壤中碳循环有重要作用^[19],脲酶活性高低常被用来评价土壤供氮能力大小^[20],酸性磷酸酶活性是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标^[21]。土壤脱氢酶是表征微生物活性的重要酶类之一,其活性大小主要取决于土壤微生物的新陈代谢状态强弱^[22],在一定含水量范围内,脲酶、酸

性磷酸酶和脱氢酶活性随土壤含水量增加而增加^[23-24],但是土壤水分过多也会影响土壤酶活性和微生物数量。本试验中,在孕穗、抽穗和乳熟期,CIR、IIR处理土壤转化酶活性较对照FIR处理提高30.4%~125.9%;土壤脲酶活性增加12.0%~166.4%;就土壤酸性磷酸酶活性而言,CIR、IIR处理在孕穗、抽穗期较对照FIR处理增加7.6%~41.9%,而在乳熟期其活性有所下降;与对照FIR相比较,CIR、IIR处理土壤脱氢酶活性提高5.3%~16.0%。这表明,控制灌溉和间歇灌溉处理条件下土壤4种酶活性高于常规灌溉,说明节水灌溉方式可以提高水稻土壤酶活性。余江敏等^[4]研究认为,固定部分根区灌溉和分根区交替灌溉玉米土壤细菌、真菌和放线菌的数量高于常规灌溉处理。本试验发现,CIR、IIR处理细菌数量在孕穗、抽穗和乳熟期较对照FIR增加26.4%~168.5%;乳熟期放线菌数量分别提高6.5%和41.7%;而对3个生育期真菌数均有不同程度下降,这表明,有机无机肥配施比单纯使用无机肥有利于增加土壤细菌和放线菌等微生物数量,从而提高土壤酶活性、MBC和MBN,本研究结果与先前报道基本一致。土壤微生物量是评价土壤微生物参与土壤中C、N物质转化循环能力的重要指标^[25]。土壤微生物量C可以反映土壤微生物量的重要指标^[21]。土壤微生物量N是作物生长可利用N的重要来源^[26]。金兰淑等^[27]认为,节水灌溉方式有利于土壤MBC的提高。由于本试验CIR土壤含水量在70%~80%饱和含水量范围内变化,IIR土壤含水量在饱和土壤含水率以下,而FIR土壤长期处于饱和状态,因此3个时期CIR和IIR处理微生物量C和N高于FIR处理9.4%~83.5%,这说明节水灌溉CIR、IIR处理可以提高水稻土壤微生物量。

3.2 有机无机氮比例对土壤微生物活性的影响

张奇春等^[28]通过水稻长期肥料试验认为,施用有机肥较单施化肥明显提高水稻土壤脲酶、酸性磷酸酶的活性以及微生物量碳含量。本试验中,有机无机氮比例F1、F2水平土壤转化酶活性较对照F3水平提高11.2%~62.6%;土壤脲酶活性增幅不明显;与F3水平相比较,F1、F2水平土壤酸性磷酸酶活性在孕穗、抽穗期增加7.6%~41.9%;土壤脱氢酶活性提高5.3%~16.0%。这说明,在一定范围内,提高有机氮在总肥料中的比例,能显著提高土壤酶的活性。余江敏等^[4]研究认为,灌溉方式相同的

条件下,60%化肥+40%有机肥施肥处理较其他施肥处理能显著提高土壤细菌、真菌和放线菌数量。本试验研究中有有机无机氮比例 F1、F2 水平较对照 F3 水平,在孕穗、抽穗和乳熟期明显提高土壤细菌数量 10.0%~64.9%;与 F3 水平相比较,虽然 F1、F2 水平在孕穗、抽穗期对土壤放线菌数量有所下降,但在乳熟期却明显增加;F1、F2 水平在孕穗、抽穗期土壤真菌数较对照 F3 处理增加 9.3%~44.4%。F1、F2 水平 MBC 在 3 生育期较对照 F3 处理小幅增加,MBN 提高 1.8%~28.5%,这表明有机无机肥配施提高水稻土微生物活性,增加了土壤微生物量。因此,在有机氮和无机氮配施条件下,节水灌溉方式(CIR 和 IIR)能有效地提高水稻土壤微生物活性。

参 考 文 献

- [1] PIMENTAL D, STACHOW U, TAKACS D A, et al. Conserving biological diversity in agricultural/forest systems[J]. *Biosphere*, 1992, 42: 354-362.
- [2] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中作用[J]. *土壤学报*, 1983, 20(4): 413-417.
- [3] WANG J F, KANG S Z, LI F S, et al. Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil microorganism and maize growth[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302: 45-52.
- [4] 余江敏, 李伏生, 韦彩会, 等. 根区局部灌溉对有机无机肥配施土壤微生物和玉米水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 63-69.
- [5] 薛丽华, 王志敏, 郭志伟, 等. 麦田不同灌水处理对土壤酶活性时空分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 228-232.
- [6] 王波, 邓艳萍, 肖新, 等. 不同节水稻作模式对土壤理化特性和土壤酶活性影响研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 219-222.
- [7] LI F S, YU J M, NONG M L, et al. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 231-239.
- [8] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1120-1130.
- [9] 江雪飞, 喻子牛, 张翅, 等. 脂肪酸甲酯和活菌计数法检测氯磺隆对土壤微生物群落结构的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29(4): 465-468.
- [10] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 45(1): 116-121.
- [11] 李振高, 骆永明, 腾应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 397-413.
- [12] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 80-83.
- [13] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-704.
- [14] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen, a rapid direct extraction method to measure microbial nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 827-842.
- [15] 唐塘. 干旱和氮肥处理对灌浆期水稻茎鞘非结构性同化物积累的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(11): 2686-2689.
- [16] 柴强, 黄高宝, 黄鹏. 供水及间甲酚对小麦间作蚕豆土壤微生物多样性和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1624-1628.
- [17] 展茗, 曹湊贵, 江洋, 等. 不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳变化动态[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2010-2016.
- [18] 时亚南, 张奇春, 王光火, 等. 不同施肥处理对水稻土微生物生态特性的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 33(5): 551-556.
- [19] 孙颖, 赵晓会, 和文祥, 等. 绿肥对土壤酶活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(3): 115-119.
- [20] 唐海滨, 廖超英, 刘莉丽, 等. 蔬菜大棚土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤养分的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 165-168, 179.
- [21] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 1-7.
- [22] 兰宇, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期不施肥棕壤玉米地酶活性的时空变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1197-1204.
- [23] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
- [24] 李成芳, 曹湊贵, 徐拥华, 等. 稻鸭与稻鱼生态系统土壤微生物量 N 和土壤酶活性动态[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3905-3912.
- [25] 赵利梅, 吴良欢, 李永山, 等. 水稻强化栽培对稻田土壤生物学特性的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 24(2): 321-325.
- [26] 马维娜, 杨京平, 汪华. 不同水分模式分次施氮对水稻根际土壤微生物生态效应的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 33(2): 184-189.
- [27] 金兰淑, 郑佳, 徐慧, 等. 施氮及灌溉方式对玉米地土壤硝化潜势及微生物量碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 218-220, 226.
- [28] 张奇春, 王雪芹, 时亚南, 等. 不同施肥处理对长期不施肥区稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 118-123.

Effects of irrigation method and combined application of organic and inorganic N on microorganism activity of paddy soil

LIU Yu-feng^{1,2} DENG Shao-hong¹ LIANG Yan-fei¹ LI Fu-sheng¹

1. *College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530005, China;*

2. *Rice Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*

Abstract The activities of invertase, urease, acid-phosphatase and dehydrogenase, the number of bacteria, actinomycetes and fungi and the contents of microbial biomass C and N (MBC and MBN) in soils sampled at the booting, heading and milky stages of rice were investigated using pot experiment under three irrigation methods including controlled irrigation (CIR), intermittent irrigation (IIR), flooding irrigation (FIR) under three ratios of organic to inorganic nitrogen (N) such as 60% inorganic N+40% organic N (F1), 80% inorganic N+20% organic N (F2), 100% inorganic N (F3). Results showed that the enzymatic activity, the number of microorganism and the contents of MBC and MBN in soils were increased from booting to heading stages with a peak of increase at the heading stage and decreased from the heading to milky stages. Comparing with FIR treatment, CIR and IIR treatments generally increased the enzymatic activity, the number of microorganism and the contents of MBC and MBN in soils. Combined application of organic and inorganic N generally had higher enzymatic activity, the number of microorganism and contents of MBC and MBN in soils than those of only inorganic N. F1 treatment had high organic fertilizer proportion. Thus water-saving irrigation method (CIR and IIR) could effectively enhance the microorganism activity of paddy soil under combined application of organic and inorganic N, F1 treatment.

Key words irrigation method; ratio of organic to inorganic N; soil enzymatic activity; soil microorganism number; soil microbial biomass; paddy soil

(责任编辑:陆文昌)