

DOI: 10.5846/stxb201405090925

罗慧, 刘水, 李伏生. 不同灌水施肥策略对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响. 生态学报, 2014, 34(18): 5266-5274.

Luo H, Liu S, Li F S. Effect of different irrigation and fertilization strategies on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5266-5274.

不同灌水施肥策略对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响

罗 慧, 刘 水, 李伏生*

(广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 根区局部灌溉形成一个土壤水分分布不均匀的环境, 影响了土壤微生物量和酶活性。为探明这种影响, 在 2 种灌水水平 (正常灌水和轻度缺水) 和 2 种有机无机 N 肥配施 (单施无机 N 肥和有机无机 N 肥配施) 下, 以常规灌溉 (CI) 为对照, 研究分根区交替灌溉 (AI) 和固定部分根区灌溉 (FI) 对土壤微生物量 C (MBC)、微生物量 N (MBN) 和酶活性的影响。与 CI 相比, AI 提高拔节期土壤 MBC 和抽雄期土壤脲酶活性, 但是降低大喇叭口期土壤 MBC 以及拔节期和抽雄期土壤 MBN 和拔节期土壤脲酶活性; FI 增加抽雄期土壤转化酶活性, 但是降低大喇叭口期土壤 MBC 和可溶性碳 (DOC) 以及 3 个时期土壤 MBN。与正常灌水相比, AI 下轻度亏水增加拔节期和抽雄期土壤 DOC, 但是降低大喇叭口期土壤 MBC 和拔节期土壤 MBN。与单施无机 N 肥相比, AI 下有机无机 N 肥配施增加拔节期土壤 DOC、MBN 和过氧化氢酶活性, 而 FI 下则降低大喇叭口期土壤 MBC 和转化酶活性。因此, 在轻度缺水和有机无机氮配施条件下, 分根区交替灌溉可以提高玉米拔节期土壤微生物量碳和可溶性碳。

关键词: 分根区交替灌溉; 轻度亏水; 有机无机 N 比例; 有机碳组分; 酶活性

Effect of different irrigation and fertilization strategies on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity

LUO Hui, LIU Shui, LI Fusheng*

College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China

Abstract: Partial root-zone irrigation creates a heterogeneous soil moisture distribution that may affect soil microbial biomass and enzyme activity. In order to understand such effect, a pot experiment was conducted to investigate the effects of alternate partial root-zone irrigation (AI) and fixed partial root-zone irrigation (FI) on soil microbial biomass C (MBC), microbial biomass N (MBN) and enzyme activity when conventional irrigation (CI) as the control, under two irrigation levels (normal irrigation and mild water deficit) and two ratios of inorganic to organic N (only inorganic N and combined application of inorganic and organic N fertilizers). Compared to CI, AI increased soil MBC at the jointing stages and urease activity at the tasselling stage, but reduced soil MBC at the bell-mouthed stage, MBN at the jointing and tasselling stages and urease activity at the jointing stage. FI enhanced soil invertase activity at the tasselling stage, but reduced soil MBC and dissolved oxidized C (DOC) at the bell-mouthed stage and MBN at the three stages. Compared to normal irrigation, mild water deficit increased soil DOC at the jointing and tasselling stages, but reduced soil MBC at the bell-mouthed stage and MBN at the jointing stages under AI. Compared to only inorganic N, combined application of inorganic and organic N fertilizers increased soil DOC, MBN and catalase activity at the jointing stage under AI, but it reduced soil MBC and invertase activity at the bell-mouthed stage under FI. Therefore, alternate partial root-zone irrigation increased soil microbial

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1033004); 国家 863 计划 (2011AA100504); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05070403)

收稿日期: 2014-05-09; **修订日期:** 2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenz@gxu.edu.cn; lpfu6@163.com

biomass C and dissolved C at the jointing stage under mild water deficit and combined application of inorganic and organic N fertilizers.

Key Words: alternate partial root-zone irrigation; mild water deficit; ratio of organic to inorganic N; organic carbon fraction; enzyme activity

土壤微生物量对提高土壤自然肥力和保护生态环境有重要的理论意义,可用土壤微生物量碳(MBC)与微生物量氮(MBN)表征。土壤 MBC 是土壤有机质转化和分解的直接作用者,且在土壤主要养分的转化中起主导作用,被认为是土壤有机碳的灵敏指示因子^[1]。土壤 MBN 大小决定于该土壤 N 素肥力的高低,是土壤有效态氮重要来源^[2-3]。一般来说,微生物量碳或氮高,土壤质量较高,反之亦然^[4]。张海燕等^[5]研究表明,土壤微生物量与土壤有机质、全氮、全磷、速效钾和碱解氮呈显著或极显著正相关关系。薛菁芳等^[6]结果表明,土壤 MBC 和 MBN 与全 C 和全 N 均呈极显著相关,可以作为指示土壤肥力的重要指标。

土壤酶参与土壤中元素循环与许多重要生物化学过程,与土壤质量密切相关。土壤酶活性的高低可反映土壤生物活性、生化反应强度、以及土壤肥力状况^[7]。脲酶是对矿质肥料-N 素的转化作用具有重大影响,其活性与土壤供 N 能力有着密切的关系,对施入土壤中尿素的利用率影响很大^[8]。过氧化氢酶可表征土壤氧化过程的强度,其活性与好氧微生物数量、土壤肥力有密切的关系^[9]。转化酶活性与土壤中腐殖质、水溶性有机质和黏粒含量与微生物数量呈正相关,可表征土壤熟化程度和肥力水平^[10]。

根区局部灌溉是一种节水灌溉技术,包括分根区交替灌溉(AI)与部分根区固定灌溉(FI)(或称部分根干燥技术),因形成了一个土壤水分分布不均匀的环境,影响作物水分和养分利用效率,且增产调质。如 Hu 等^[11]研究发现,AI 和 FI 的灌水量为常规灌溉的 70%,玉米水分利用效率和氮素利用效率都有所提高;杨启良等^[12]结果表明,交替沟灌增大根系与冠层水导,提高根系对水肥的吸收利用和传输效率,使得植株氮含量较高,产量较大;王同朝等^[13]研究表明,采用时空交替灌溉方式:拔节期充分补灌(田间持水量的 80%)和抽穗期补灌量适度减少(田

间持水量的 65%),有利于夏玉米产量和土壤水分高效利用的同步提升。

有机无机肥配施改善土壤物理性状,增强土壤生物学活性。如李花等^[14]研究表明,有机无机肥配施显著提高土壤养分含量,同时提高土壤微生物量碳、氮和酶活性;刘益仁等^[15]研究发现,化肥配施中高量有机肥有利于改善土壤微生物学特性;王庆等^[16]结果表明,化肥适度减量和配施有机肥增加土壤微生物量,有利于提高土壤肥力。近年来,有关根区局部灌溉以及根区局部灌溉与有机无机肥配施相结合对土壤微生物量和酶活性的研究也有报道。如刘水等^[17]研究表明,与常规灌溉相比,轻度缺水时拔节期-抽雄期进行分根区交替灌溉的玉米总干物质量增加 23.2%—27.4%,水分利用效率提高 23.3%—26.7%,微生物量碳增加。Li 等^[18]结果表明,分根区交替灌溉能提高其湿润区土壤过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性。本文旨在有机无机氮肥配施下,进一步研究不同灌溉方式及水平对土壤微生物量氮、氮和酶活性的影响,探讨根区局部灌溉和有机无机氮肥配施下玉米土壤微生物量和酶活性变化规律,揭示土壤肥力和土壤微环境变化情况,为受区域性、季节性干旱制约生产的玉米调整灌水和施肥策略和改善农田土壤生态环境提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验在广西大学教学基地网室进行,供试土壤采自本校教学基地第四纪红色黏土发育的赤红土(典型强淋溶土,FAO-UNESCO 系统),经风干、碾碎,过 5 mm 孔径的筛,其土壤质地是重黏土,田间持水量为 30% θ_j (质量百分数),pH 值 6.2,有机碳(C) 8.53 g/kg,碱解氮(N) 85.0 mg/kg(1.0 mol/L NaOH 碱解扩散法),速效磷(P) 44.3 mg/kg(0.5 mol/L NaHCO₃法)和速效钾(K) 159.0 mg/kg(1.0 mol/L 中性 NH₄Ac 法)。供试玉米品种为正大 619。

1.2 试验方法

试验设 3 种灌溉方式,即常规灌溉(CI,每次对全部土壤均匀灌水)、分根区交替灌溉(AI,交替对 1/2 区域土壤灌水)和固定部分根区灌溉(FI,固定对 1/2 区域土壤灌水),土壤采集时 AI 处理取样前最后一次灌水区域称为湿润区(Wet),非灌水区域称为干燥区(Dry),FI 处理灌水区域为湿润区(Wet),非灌水区域为干燥区(Dry);2 种灌水水平,即正常灌水(70%—80% θ_f , W_1)和轻度缺水(60%—70% θ_f , W_2);以及 2 种有机无机氮比例,即 100% 无机 N(F_1)和 70% 无机 N+30% 有机 N(F_2)。各处理均施纯 N 0.15 g/kg 土,无机 N 肥为尿素(分析纯,含 N 46%),有机 N 肥用生物有机肥(含 N 2.82%、含 P_2O_5 0.46%、含 K_2O 7.06%)供给,其用量以含 N 量计算。各处理均施 P_2O_5 0.075 g/kg 土和 K_2O 0.15 g/kg 土,磷肥用磷酸二氢钾(分析纯,含 P_2O_5 52.2%),钾肥用磷酸二氢钾(含 K_2O 34.6%)和氯化钾(分析纯,含 K_2O 60%)。所有肥料在装盆时全部作基肥施入。试验按完全方案设计,共 12 个处理,每个处理重复 3 次,共 36 桶,随机区组排列。

试验在聚乙烯塑料桶(高 23 cm、直径 30 cm)中进行,所有处理桶中间均用塑料膜隔开,以阻止两边水分交换。每桶两边各装入 7 kg 土,共 14 kg 土。播种前保持土壤水分含量为 80% θ_f 。2010 年 4 月 2 日每桶播 5 粒已催芽露白的玉米种子在塑料膜隔开处,4 月 18 日进行间苗,每盆在塑料薄膜中央保留 1 株长势均匀玉米苗。控水前所有处理均采用常规灌溉方式灌水,并保持土壤含水率在 70%—80% θ_f 。5—6 片叶时(5 月 1 日)对供试玉米进行控水处理后,CI 处理用称盆质量法确定各水肥处理每次灌水量,而 AI 和 FI 处理每次灌水量则为相应 CI 处理灌水量的 70%^[19]。每次灌水用量筒量取灌水量,并记录各处理每次灌水量。试验于 6 月 6 日(播后 62 d)结束。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤采集与预处理

试验分 3 次采集土样,采样时间分别为 5 月 12 日(播后 40 d、拔节期)、5 月 24 日(播后 52 d、大喇叭口期)、6 月 5 日(播后 64 d、抽雄期),每次采样时间为灌水后第 2 天上午。采土前用采土区土壤擦拭土钻 1—2 次,分别在湿润区和干燥区 3 点采集 1—

15 cm 土层土壤,充分混匀,每次采样 150 g 左右。一部分装入保鲜袋,于冰箱 4℃ 下保存用于土壤微生物量碳和氮等测定,同时用烘干法测定土壤含水率;另一部分带回室内自然风干 1 周,磨碎,过 20 目筛,用于土壤酶活性测定,同时测定风干土壤含水率,以便计算每克干土中酶活性。

1.3.2 土壤微生物量碳和氮

土壤微生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸、0.5 mol/L 硫酸钾浸提,浸提液采用浓硫酸重铬酸钾氧化、硫酸亚铁滴定法测定^[20]。MBC = $Ec/0.38$,式中 Ec 为熏蒸土样有机碳量与未熏蒸土样有机碳量之差,mg/kg;0.38 为氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳被浸提出来的比例。可溶性碳(DOC)的测定是未熏蒸土样用硫酸钾浸提,然后浸提液用浓硫酸重铬酸钾氧化、硫酸亚铁滴定法测定其有机碳量^[20]。

土壤微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸—过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定^[20],结果以每千克干土中 MBN 的毫克数表示。MBN = $En/0.45$,式中 En 为熏蒸土样氮量与未熏蒸土样氮量之差,mg/kg;0.45 为熏蒸杀死的微生物中的氮被浸提出来的比例。

1.3.3 土壤酶活性

土壤脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定^[21],转化酶或蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[21],以及过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定^[21]。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel2007 和 SPSS13.0 软件进行分析。多重比较用 Duncan 法,处理之间字母不同表示差异显著($P < 5\%$),处理之间字母相同或没有标字母均表示差异不显著($P > 5\%$)。

2 结果与分析

2.1 微生物量碳

表 1 表明,与 CI 相比,拔节期仅 F_2W_2 下 AI 土壤 MBC 增加 56.1%—59.5%,大喇叭口期仅 F_1W_2 下 AI-D 和 FI-D 和 F_2W_2 下 AI 土壤 MBC 显著降低,而抽雄期各处理土壤 MBC 之间的差异均不显著。拔节期和抽雄期 W_2 时土壤 MBC 与 W_1 之间差异不显著,而大喇叭口期 F_1FI-D 和 F_2AI-W 下 W_2 土壤 MBC 比 W_1 分别降低 38.2% 和 44.3%。此外,相同水分条件下,3 个时期 F_2 与 F_1 之间土壤 MBC 差异均不显著。

表 1 灌溉方式及水平 and combined application of organic to inorganic N on soil microbial biomass carbon and nitrogen and dissolved organic carbon

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌溉方式 Irrigation method	微生物量 C Microbial biomass carbon/(mg/kg)			可溶性 C Dissolved organic carbon/(mg/kg)			微生物量 N Microbial biomass N/(mg/kg)		
		拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage
F ₁	W ₁	143.9±8.2b	205.1±18.4ab	219.5±22.7	207.0±9.8abcd	196.7±1.5ab	107.7±3.5abcd	59.7±1.8ab	29.3±4.6def	37.3±2.1a
		188.8±25.0ab	206.8±11.7ab	175.0±28.2	219.5±17.4abc	216.7±11.6a	92.2±6.6abcd	39.5±4.2defgh	42.5±3.5ab	21.0±3.4efgh
		153.3±25.1b	188.7±33.8abcd	167.6±23.9	193.7±6.5abcd	181.0±16.6abc	101.7±12.4abcd	48.6±1.9cd	31.7±2.7cdef	22.0±1.2efgh
	W ₂	156.6±25.8b	201.5±4.7ab	181.5±32.5	142.2±16.7d	122.8±20.7c	81.2±10.0abcd	29.5±2.7hi	24.0±0.2ef	24.2±2.1defgh
		222.3±24.4ab	221.2±19.8a	182.6±31.1	176.4±27.6bcd	156.7±14.8abc	113.3±17.5abc	36.4±3.8efgh	44.5±0.8a	30.5±3.5abcde
		172.0±15.6ab	218.9±9.3a	200.9±10.9	170.3±10.7bcd	191.6±8.8ab	107.3±7.4abcd	45.1±3.0cde	27.2±0.4def	27.5±1.9bcdefg
F ₂	W ₁	218.2±27.2ab	136.3±21.1bcde	176.4±25.3	204.0±23.7abcd	180.6±20.4abc	102.6±14.8abcd	20.3±2.1i	21.5±3.1f	14.8±1.2h
		219.5±38.7ab	182.0±22.7abcde	193.9±23.7	169.8±6.8bcd	141.5±24.6bc	113.0±15.7abc	21.5±2.5i	22.4±0.6f	18.0±1.0gh
		169.7±18.8ab	124.5±19.8cde	207.3±20.6	154.3±11.6cd	143.7±27.6bc	78.4±15.5bcd	21.1±4.2i	25.3±4.9def	27.8±3.9abcdef
	W ₂	179.2±14.7ab	180.3±19.1abcde	212.9±22.1	219.0±22.4abc	170.4±4.1abc	89.6±8.0abcd	42.5±1.5def	35.0±0.9abcd	33.0±2.7abcd
		158.6±20.1b	210.9±14.9a	214.1±9.7	226.4±9.4ab	203.1±16.4ab	116.6±9.4ab	64.5±1.2a	42.2±4.0ab	37.0±2.5ab
		192.8±22.1ab	176.4±13.1abcde	198.4±15.3	222.9±26.3abc	221.3±8.1a	73.2±8.6cd	34.6±2.1fgh	33.4±2.4bcde	27.2±1.8cdefg
W ₂	CI	207.3±12.7ab	213.4±1.9a	216.5±32.2	193.6±22.1abcd	169.7±19.1abc	67.2±7.6d	39.9±3.3defg	40.6±3.2abc	28.5±0.7abcdef
		155.9±16.5b	196.6±30.8abc	211.1±22.7	185.4±24.1abcd	155.5±23.4abc	96.8±14.0abcd	30.1±4.5ghi	25.8±1.5def	25.5±4.1defg
		170.7±11.6ab	227.1±17.4a	211.6±16.4	204.6±19.8abcd	205.5±22.6ab	100.2±10.3abcd	45.6±3.5cde	31.9±3.3cdef	28.8±4.9abcdef
	AI-D	156.2±19.9b	201.0±12.1ab	215.1±20.1	211.7±14.7abcd	179.1±14.0abc	121.1±11.4a	52.6±0.6bc	31.3±2.6cdef	36.0±4.4abc
		243.9±14.4a	113.9±29.7e	172.6±26.6	210.9±20.4abcd	159.0±25.8abc	93.8±14.3abcd	34.9±1.6fgh	31.7±3.4cdef	15.0±1.2h
		249.1±28.8a	118.9±19.9de	224.5±29.0	249.3±22.9a	176.3±14.9abc	88.6±15.8abcd	30.0±2.4ghi	23.1±1.9ef	19.9±0.6fgh
W ₂	FI-D	144.4±16.0b	173.3±4.1abcde	179.3±29.9	188.5±29.2abcd	138.6±19.2bc	82.3±5.3abcd	29.5±4.2hi	28.2±3.5def	24.0±1.4defgh
		160.2±20.9b	194.4±21.3abc	188.9±36.3	238.8±4.1ab	146.7±19.6bc	114.6±17.0ab	47.0±3.9cd	29.9±3.6def	35.6±3.8abc

表中数值为平均值±标准误,同一列处理间字母不同者表示差异显著($P<0.05$),处理间字母相同或没有标字母均表示差异不显著($P>0.05$); F₁: 100%无机 N; F₂: 70%无机 N+30%有机 N; W₁: 正常灌水; W₂: 轻度缺水; CI: 常规灌溉; AI-D: 分根区交替灌溉-干燥区; FI-D: 固定部分根区灌溉-湿润区; FI-W: 固定部分根区灌溉-干燥区; FI-W: 固定部分根区灌溉-湿润区

2.2 可溶性碳

表 1 表明,与 CI 相比,大喇叭口期仅 F_1W_1 下 FI-D 和抽雄期仅 F_2W_1 下 AI 土壤 DOC 显著减少。相同灌溉方式和施肥条件下,3 个时期 W_2 土壤 DOC 与 W_1 之间的差异不显著,而拔节期和抽雄期 F_2AI-W 下 W_2 土壤 DOC 比 W_1 增加。此外,拔节期仅 W_2AI-W 下 F_2 土壤 DOC 比 F_1 增加 46.8%。

2.3 土壤微生物量氮

表 1 表明,与 CI 相比,拔节期和抽雄期 AI 和 FI 土壤 MBN 大多数显著降低,大喇叭口期 F_1W_1 下 AI-D 和 FI-W 的土壤 MBN 分别增加 45.3% 和 51.9%,而 F_2W_1 下 FI 土壤 MBN 降低 24.4%—38.9%。与 W_1 相比,拔节期 CI 和 F_1AI 下 W_2 土壤 MBN 显著降低,大喇叭口期和抽雄期 W_2 土壤 MBN 多数差异不显著。相同水分条件下,拔节期仅 W_2AI-D 下 F_2 土壤 MBN 比 F_1 增加 71.9%,而大喇叭口期和抽雄期 F_2 与 F_1 之间土壤 MBN 差异不显著。

2.4 土壤酶活性

表 2 表明,与 CI 相比,拔节期 F_2W_1 下 AI 土壤脲酶活性显著降低;抽雄期 F_2AI 下,土壤脲酶活性均增加;拔节期 F_2AI 下 W_2 土壤脲酶活性比 W_1 显著增加 28.5%—29.1%。其他条件下及大喇叭口期和抽雄期 W_2 与 W_1 之间脲酶活性差异不显著。

与 CI 相比,抽雄期 F_1W_1 下 FI-W 土壤转化酶活性显著增加(表 2)。相同灌溉方式和施肥条件下,3 个时期 W_2 土壤转化酶活性与 W_1 之间的差异均不显著。与 F_1 相比,大喇叭口期 W_1FI-D 下 F_2 土壤转化酶活性降低 13.2%。

3 个时期不同灌水处理土壤过氧化氢酶活性之间的差异不显著(表 2)。与 F_1 相比,拔节期 CI 和 W_2AI-W 下 F_2 土壤过氧化氢酶活性显著增加。

3 讨论

3.1 灌溉方式及水平对土壤微生物量碳、氮和酶活性的影响

本研究表明,分根区交替灌溉(AI)提高玉米拔节期土壤微生物量碳(MBC);玉米抽雄期 F_2AI 下,土壤脲酶活性增强; W_2 的 AI-W 下 F_2 土壤过氧化氢酶活性显著增加。这与 Li^[18] 等结果相似,可能是 AI 形成一个土壤水分分布不均匀,干湿交替,通气良好的环境,导致有机质矿化,促进了微生物生长。Wang

等^[22] 结果表明,不同灌水方式下,交替 1/2 根系灌水使根系区土壤处于交替干燥与湿润中,既提供生命活动所需的水分,又使土壤孔隙处于良好的通气条件,为土壤微生物提供有益的生存条件。Borken 等^[23] 研究表明,经过干湿交替后土壤有机碳矿化速率增加。原因可能是干湿交替破坏土壤团聚体结构,引起裂解^[24],及干燥引起微生物死亡增加了可用碳源;且土壤重新湿润后微生物数量和活性增加,加速有机碳的矿化速率^[25]。本研究发现 FI 降低大喇叭口期土壤 MBC 和可溶性碳(DOC),拔节期和抽雄期土壤 MBN;与 CI 相比,仅抽雄期 F_1W_1 下 FI-W 土壤转化酶活性增加。可能是 FI-D 区域由于长期干旱处理,土壤水分亏缺严重,严重影响了微生物正常活动^[26]。本研究发现拔节期和抽雄期 AI 处理土壤微生物量 N(MBN) 大多数显著降低,而土壤脲酶活性增强,其原因有待进一步研究。

合理灌溉能提高土壤酶活性,土壤水分过多或过低均不利于土壤微生物生长和繁衍,造成土壤酶活性降低。周礼恺的^[10] 结果表明,土壤湿度适宜或较高时,土壤脲酶活性相应提高,而灌水量过大、土壤湿度过高时,脲酶活性减弱。朱同彬等^[27] 结果表明,与较低水分状况相比,过高水分状况会显著抑制土壤脲酶与过氧化氢酶活性。本试验表明, W_2 比 W_1 能增强土壤脲酶活性,说明轻度亏水有利于增强土壤脲酶活性。

3.2 有机无机 N 配施对土壤微生物量碳、氮和酶活性影响

有机无机肥配施不仅能减量施用化肥,防止高量化肥危害生态环境,还为土壤微生物提供丰富的营养源,明显增加土壤微生物量、呼吸量,又影响群落结构,对细菌、真菌、放线菌也有不同程度影响,同时改善土壤物理结构,使土壤疏松多孔,增加土壤透气性,为土壤微生物的生存和繁殖提供了良好的外界条件。刘苗等^[28] 研究表明,施肥显著提高玉米根际土壤微生物数量,在玉米各生育期内不同菌种的平均数量均以有机肥配施化肥的处理最高。李桂花等^[29] 认为,有机肥或秸秆还田可为土壤微生物提供碳源,对土壤微生物生长和繁殖产生显著正影响。大量研究表明,有机无机肥配施能增加土壤微生物量碳和氮,增强酶活性。刘畅等^[30] 结果表明,有机无机肥配施能在一定程度上促进稻田土壤碳、

表 2 灌溉方式及水平和有机无机 N 配施对土壤酶活性的影响

Table 2 Effect of irrigation method and level and combined application of organic to inorganic N on soil enzyme activity

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌水水平 Irrigation level	灌溉方式 Irrigation method	脲酶 Urease/($\mu\text{g NH}_3\text{-N/g}$)			转化酶 Invertase/($\text{mg g}^{-1} 24\text{h}^{-1}$)			过氧化氢酶 Catalase/($\text{ml-0.02 mol/L ml KMnO}_4/\text{g}$)		
			拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed stage	抽雄期 Tasselling stage
F ₁	W ₁	CI	797.5±17.4abc	814.6±50.3	785.0±28.6	6.1±0.05ab	7.3±0.18abc	7.3±0.26bcd	1.63±0.11d	1.94±0.06	2.31±0.25
		AI-D	796.5±15.1abc	898.8±70.7	740.4±50.7	5.9±0.23ab	7.2±0.34abc	7.2±0.17bcd	1.68±0.04cd	1.98±0.17	1.91±0.09
		AI-W	758.6±10.7abc	891.0±51.2	736.0±46.2	6.1±0.43ab	6.7±0.26bc	7.9±0.29abcd	1.64±0.07d	1.91±0.15	1.99±0.12
		FI-D	746.6±61.5bcd	938.4±40.2	786.2±60.7	5.9±0.14ab	7.6±0.13a	7.1±0.24cd	1.81±0.08abcd	1.93±0.28	2.00±0.12
		FI-W	712.6±72.8cde	871.5±24.8	860.8±19.2	6.0±0.20ab	7.6±0.08ab	8.4±0.19a	1.78±0.04abcd	2.04±0.09	1.99±0.13
		CI	811.4±21.6abc	916.3±5.3	796.0±47.6	6.5±0.27a	7.2±0.14abc	7.5±0.22bcd	1.70±0.06cd	2.14±0.12	2.25±0.18
F ₂	W ₂	AI-D	806.6±16.3abc	823.8±71.7	789.0±68.3	6.3±0.21a	7.2±0.02abc	7.6±0.19abcd	1.72±0.15bcd	1.99±0.10	1.87±0.08
		AI-W	820.0±26.4abc	784.8±82.4	739.4±45.3	6.2±0.37ab	7.3±0.57abc	7.3±0.35bcd	1.69±0.07cd	1.95±0.12	1.90±0.18
		FI-D	790.8±12.2abc	778.6±32.7	843.4±23.1	5.9±0.19ab	6.7±0.12c	7.5±0.42abcd	1.87±0.03abcd	1.93±0.09	2.01±0.19
		FI-W	788.4±19.5abc	763.0±14.0	864.5±10.1	6.2±0.03ab	7.3±0.15abc	8.0±0.31ab	1.84±0.01abcd	1.90±0.07	2.11±0.15
		CI	827.2±8.2abc	813.4±70.0	776.9±69.0	6.1±0.42ab	6.9±0.49abc	7.5±0.39abcd	1.98±0.07ab	2.34±0.13	2.21±0.12
		AI-D	649.5±12.9de	782.2±69.3	786.4±6.4	5.3±0.09b	7.1±0.33abc	7.9±0.12abcd	1.93±0.10abc	2.03±0.21	2.25±0.13
F ₂	W ₁	AI-W	638.2±19.3e	783.7±79.6	856.1±66.4	6.2±0.30ab	6.9±0.26abc	7.9±0.03abc	1.89±0.06abcd	2.03±0.10	2.21±0.18
		FI-D	869.7±10.0a	891.5±14.7	834.9±21.0	6.0±0.24ab	6.6±0.20c	7.2±0.26bcd	2.00±0.07a	2.16±0.19	2.25±0.03
		FI-W	869.7±4.1a	756.9±82.8	706.6±44.5	6.3±0.23a	6.7±0.11bc	7.3±0.40bcd	1.92±0.09abc	2.11±0.17	2.26±0.09
		CI	770.1±50.4abc	926.9±44.7	793.2±63.0	6.4±0.27a	6.9±0.17abc	7.3±0.29bcd	2.04±0.05a	2.26±0.04	2.17±0.06
		AI-D	838.3±15.2ab	873.7±73.5	834.2±42.7	6.2±0.23ab	6.7±0.41bc	7.4±0.35bcd	1.92±0.07abc	2.01±0.07	2.04±0.12
		AI-W	820.0±20.8abc	860.5±62.1	822.8±93.2	6.5±0.29a	6.8±0.15abc	7.5±0.06abcd	1.97±0.08ab	2.07±0.16	2.13±0.13
F ₂	W ₂	FI-D	788.4±58.3abc	923.8±25.7	739.0±54.8	6.1±0.09ab	7.1±0.21abc	7.0±0.27d	1.93±0.10abc	2.00±0.13	2.17±0.11
		FI-W	756.7±42.4abc	888.4±27.5	690.2±56.8	5.9±0.30ab	7.4±0.13abc	7.4±0.08bcd	1.92±0.10abc	2.05±0.11	2.29±0.13

表中数值为平均值±标准误,同一列处理间字母不同者表示差异显著(P<0.05),处理间字母相同或没有标字母均表示差异不显著(P>0.05)

氮的固定与积累。彭娜等^[31]结果表明,有机无机肥配施有利于土壤有机碳和活性有机碳的积累。李娟等^[32]结果也表明,长期有机无机肥料配施可提高土壤微生物量碳氮、脲酶活性。魏猛等^[33]研究表明,有机无机配施能够显著提高土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶的活性。Chang 等^[34]发现,与单施化肥相比,施用有机肥可以提高土壤有机质、全氮、微生物数量和酶活性。本研究也发现,在相同水分条件下,拔节期 W_2AI-D 下 F_2 土壤 MBN 比 F_1 显著增加以及 W_2AI-W 下 F_2 土壤 DOC 比 F_1 显著增加;与 F_1 相比,拔节期 W_2AI-W 下 F_2 土壤过氧化氢酶活性显著增加。

可见在 W_2 和 AI 条件下,有机无机氮肥配施有利于拔节期土壤微生物量 N 和可溶性 C 的提高,能增强过氧化氢酶活性。

4 小结

(1) 与常规灌溉 (CI) 相比,分根区交替灌溉 (AI) 提高拔节期土壤微生物量碳 (MBC) 和抽雄期土壤脲酶活性,但是降低大喇叭口期土壤 MBC 及拔节期和抽雄期土壤微生物量 N (MBN) 和拔节期土壤脲酶活性;固定部分根区灌溉 (FI) 增加抽雄期土壤转化酶活性,但是降低大喇叭口期土壤 MBC 和可溶性碳 (DOC) 以及 3 个时期土壤 MBN 。

(2) 与正常灌水相比, AI 下轻度亏水增加拔节期和抽雄期土壤 DOC ,但是降低大喇叭口期土壤 MBC 和拔节期土壤 MBN 。

(3) 与单施无机 N 肥相比, AI 下有机无机 N 肥配施拔节期增加土壤 DOC 、 MBN 和过氧化氢酶活性, FI 下有机无机 N 肥配施降低大喇叭口期土壤 MBC 和转化酶活性。

因此,在轻度缺水和有机无机氮配施条件下,分根区交替灌溉可以提高玉米拔节期土壤微生物量碳和可溶性碳。

References:

- [1] Yu S, Li Y, Wang J H, Che Y P, Pan Y H, Li Z G. Study on the soil microbial biomass as a bioindicator of soil quality in the red earth ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36 (3): 413-422.
- [2] Bonde T A, Schnürer J, Rosswall T. Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20 (4): 447-452.
- [3] Zhou J B, Li S H, Chen Z J. Soil microbial biomass nitrogen and its relationship to uptake of nitrogen by plants. *Pedosphere*, 2002, 12 (3): 251-256.
- [4] Sun B, Zhao Q G, Zhang T L, Yu S. Soil quality and sustainable environment III: Biological indicators of soil quality evaluation. *Soils*, 1997, 29 (5): 225-234.
- [5] Zhang H Y, Xiao Y H, Zhang X D, Li J, Xi L M. Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility Properties. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (3): 422-425.
- [6] Xue J F, Gao Y M, Wang J K, Fu S F, Zhu F C. Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (2): 247-250.
- [7] Li J, Zhao B Q, Li X Y, Jiang R B, So H B. Changes of soil microbial properties affected by different long-term fertilization regimes. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32 (4): 891-899.
- [8] Wang D M, Wang C Z, Han X R, Zhang X D, Zou D Y, Liu X H. Effects of long-term application of fertilizers on some enzymatic activities in brunisolic soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (2): 263-267.
- [9] Fan J, Hao M D. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the loess plateau I. Effect of crop rotation and continuous planting on soil enzyme activities. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (1): 9-13.
- [10] Zhou L K. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1987.
- [11] Hu T T, Kang S Z, Li F S, Zhang J H. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize. *Agricultural Water Management*, 2009, 96 (2): 208-214.
- [12] Yang Q L, Zhang F C, Liu X G, Ge Z Y. Effects of different furrow irrigation patterns, water and nitrogen supply levels on hydraulic conductivity and yield of maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (1): 15-21.
- [13] Wang T C, Li X Y, Du Y Y, Li Q, Bai R X, Guan X K. Effects of tempo-spatial alternate furrow irrigation on farmland moisture and yield formation in summer maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28 (4): 115-122.
- [14] Li H, Ge W J, Ma X X, Li Q H, Ren W D, Yang X Y, Zhang S L. Effects of long-term fertilization on carbon and nitrogen and enzyme activities of soil microbial biomass under winter wheat and summer maize rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (5): 1140-1146.
- [15] Liu Y R, Yu J, Li X, Xu Y C, Shen Q R. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbiological characteristics in a wheat rice rotation system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (5): 989-994.
- [16] Wang Q, Hai J B, Yue Z N, Men Q. Effects of chemical fertilizer

- reduction on soil microbiological and microbial biomass in wheat field. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(3): 484-487.
- [17] Liu S, Li F S, Wei X H, Nong M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on maize water use and soil microbial biomass carbon. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 71-77.
- [18] Li F S, Yu J M, Nong M L, Kang S Z, Zhang J H. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2): 231-239.
- [19] Liang J H, Li F S, Tang M, Feng Y. Effects of alternate partial root-zone irrigation on water and nitrogen utilization of pot-grown sweet corn. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 68-72.
- [20] Lu R K. *Analysis Methods of Soil and Agrochemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] Guan S Y, Zhang D S, Zhang Z M. *Soil Enzyme and its Research Methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [22] Wang J F, Kang S Z, Li F S, Zhang F C, Li Z J. Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil microorganism and maize growth. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 45-52.
- [23] Yu J M, Li F S, Wei C H, Li Z Y. Effect of partial root-zone irrigation on soil micro-organism and maize water use under combined application of organic and inorganic fertilizers. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 63-69.
- [24] Borken W, Davidson E A, Savage K, Gaudinski J, Trumbore S E. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1888-1896.
- [25] Denef K, Six J, Paustian K, Merckx R. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry - wet cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2145-2153.
- [26] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 789-805.
- [27] Zhu T B, Zhuge Y P, Liu S J, Lou Y H. Effects of different fertilizer treatments and water regimes on soil enzyme activities. *Shandong Agricultural Sciences*, 2008, (3): 74-78.
- [28] Liu M, Sun J, Li L J, Liu J H, Zhang X J. Effect of fertilizer treatments on soil microbe amount and nutrition content in rhizosphere of silage maize. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 816-820.
- [29] Li G H. Effect of organic amendments and chemical fertilizer on soil microbial activity, biomass and community structure. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 204-208.
- [30] Liu C, Tang G Y, Tong C L, Xia H A, Jiang P, Lin Y H. Evolvement characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in subtropical paddy field ecosystem under different fertilization practices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1489-1493.
- [31] Peng N, Wang K F, Xie X L, Wang K R. Effects of long-term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers on basic physical and chemical properties in paddy soils. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (2): 6-10.
- [32] Li J, Zhao B Q, Li X Y, So H B. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144-152.
- [33] Wei M, Zhuge Y P, Lou Y H, Liu F, Liu A H. Effects of fertilization on *Xanthoceras sorbifolia* Bunge growth and soil enzyme activities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 237-240.
- [34] Chang E H, Chung R S, Tsai Y H. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 132-140.

参考文献:

- [1] 俞慎, 李勇, 王俊华, 车玉萍, 潘映华, 李振高. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. *土壤学报*, 1999, 36(3): 413-422.
- [4] 孙波, 赵其国, 张桃林, 俞慎. 土壤质量与持续环境: III. 土壤质量评价的生物学指标. *土壤*, 1997, 29(5): 225-234.
- [5] 张海燕, 肖延华, 张旭东, 李军, 席联敏. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨. *土壤通报*, 2006, 37(3): 422-425.
- [6] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 付时丰, 祝凤春. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨. *土壤通报*, 2007, 38(2): 247-250.
- [7] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, So H B. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 891-899.
- [8] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 张旭东, 邹德乙, 刘小虎. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响. *土壤通报*, 2006, 37(2): 263-267.
- [9] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 9-13.
- [10] 周礼恺. *土壤酶学*. 北京: 科学出版社, 1987.
- [12] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 戈振扬. 沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 15-21.
- [13] 王同朝, 李小艳, 杜园园, 李仟, 白如轩, 关小康. 时空交替间隔灌溉对夏玉米田水分和产量形成的影响. *华北农学报*, 2013, 28(4): 115-122.
- [14] 李花, 葛玮健, 马晓霞, 黎青慧, 任卫东, 杨学云, 张树兰.

- 小麦-玉米轮作体系长期施肥对壤土微生物量碳、氮及酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1140-1146.
- [15] 刘益仁, 郁洁, 李想, 徐阳春, 沈其荣. 有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 989-994.
- [16] 王庆, 海江波, 岳忠娜, 门倩. 化肥减量对麦田土壤微生物量及微生物区系的影响. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 484-487.
- [17] 刘水, 李伏生, 韦翔华, 农梦玲. 分根区交替灌溉对玉米水分利用和土壤微生物量碳的影响. 农业工程学报, 2012, 28(8): 71-77.
- [19] 梁继华, 李伏生, 唐梅, 冯毅. 分根区交替灌溉对盆栽甜玉米水分及氮素利用的影响. 农业工程学报, 2006, 22(10): 68-72.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] 余江敏, 李伏生, 韦彩会, 李志军. 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. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 64-69.
- [27] 朱同彬, 诸葛玉平, 刘少军, 娄燕宏. 不同水肥条件对土壤酶活性的影响. 山东农业科学, 2008, (3): 74-78.
- [28] 刘苗, 孙建, 李立军, 刘景辉, 张星杰. 不同施肥措施对玉米根际土壤微生物数量及养分含量的影响. 土壤通报, 2011, 42(4): 816-820.
- [29] 李桂花. 不同施肥对土壤微生物活性、群落结构和生物量的影响. 中国农学通报, 2010, 26(14): 204-208.
- [30] 刘畅, 唐国勇, 童成立, 夏海鳌, 蒋平, 林蕴华. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1489-1493.
- [31] 彭娜, 王开峰, 谢小立, 王凯荣. 长期有机无机肥配施对稻田土壤基本理化性状的影响. 中国土壤与肥料, 2009, (2): 6-10.
- [32] 李娟, 赵秉强, 李秀英, So H B. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.
- [33] 魏猛, 诸葛玉平, 娄燕宏, 刘飞, 刘安辉. 施肥对文冠果生长及土壤酶活性的影响. 水土保持学报, 2010, 24(2): 237-240.