

控制性根系分区交替灌溉对玉米根区土壤微生物及作物生长的影响

王金凤¹, 康绍忠^{2,1}, 张富仓¹, 李志军¹

(¹西北农林科技大学 / 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; ²中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 【目的】研究不同的灌溉方法和灌水量对根区土壤微生物及作物生长的影响。【方法】利用盆栽试验对供试玉米采取3种灌水方式, 即常规全部根系区域灌水(常规)、固定1/2根系区域灌水(固定)和交替1/2根系区域灌水(交替)。每种灌水方式设3种供水水平: 充分灌水(充分)、轻度水分亏缺(轻度)、重度水分亏缺(重度)。测定土壤微生物数量、作物株高、茎粗及叶面积, 记录每次灌水量。【结果】在同一灌水方式下, 轻度的水分亏缺处理下土壤微生物数量占有一定的优势, 有时甚至高于充分灌水处理。交替1/2根系灌水根系两侧土壤微生物数量分布均匀。作物充分灌水时, 生长最旺盛, 轻度亏缺次之, 重度最次。【结论】轻度的水分亏缺能有效地改善土壤的水分、通气等条件, 从而有利于土壤微生物的繁殖。在不同灌水方式下, 由于交替1/2根系灌水使根系区土壤处于交替干燥和湿润, 在提供生命活动所需水分的同时, 使土壤孔隙处于良好的通气条件下, 为土壤微生物提供了有益的生存条件, 因此显示出其明显的优越性。充分灌水处理中, 常规方式灌水所得干物质量达到最大。交替灌充分灌水处理耗水与常规灌重度水分亏缺相近, 但其干物质量却相对常规灌增加了50%。交替灌的水分利用效率达到最优。

关键词: 灌水方式; 控制性根系分区交替灌溉; 水分亏缺; 土壤微生物; 玉米

Effects of Controlled Alternate Partial Rootzone Irrigation on Soil Microorganism and Growth of Maize

WANG Jin-feng¹, KANG Shao-zhong^{1,2}, ZHANG Fu-cang¹, LI Zhi-jun¹

(¹Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry / Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100; ²Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: 【Objective】The effects of soil microorganisms and growth of crop were investigated in a pot experiment of maize. 【Method】The irrigation treatments included: a. conventional irrigation, b. fixed partial rootzone irrigation, c. alternate partial rootzone irrigation. For each irrigation method, water was supplied by three levels: sufficient irrigation, milder deficiency irrigation, serious deficiency irrigation. The quantity of soil microorganism, plant height, stalk diameter, leaf area, dry biomass and irrigation amount were measured. 【Result】Under a milder deficiency irrigation level, plant soil microorganisms were not significantly inhibited, and their growth quantity was at times larger than sufficient irrigated treatment. The soil microorganisms distributed evenly under alternate partial rootzone irrigation. The plant grew very well under sufficient irrigation. The milder deficiency irrigation was slightly worse, but not significantly so. 【Conclusion】This suggests that the condition of soil water content and ventilation were ameliorated in the milder deficiency irrigation level. Soil microorganisms multiplied. Under alternate partial root zone irrigation, where soil was kept in alternately dry and moist conditions, soil was in a nicer ventilate state, which provided a beneficial condition for the soil microorganisms. Superiority of alternative irrigation was displayed in different irrigation ways. The largest dry biomass

收稿日期: 2005-10-31; 接受日期: 2006-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50339030)和国家自然科学基金项目(50579066)

作者简介: 王金凤(1981-), 女, 新疆玛纳斯人, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉及其对土壤环境影响。Tel: 029-87084978; E-mail: wangjinfeng1516@tom.com。通讯作者康绍忠(1962-), 男, 湖南桃源人, 教授, 研究方向为农业节水与水资源利用。Tel: 010-62737611; E-mail: kangshaohong@tom.com

was obtained under conventional irrigation. Under sufficient alternate irrigation and severely deficit conventional irrigation, conditions were the same, but the dry biomass under the former was increased by 50%, compared to the latter. The best water use efficiency was obtained under alternate irrigation.

Key words: Irrigation ways; Controlled alternate partial rootzone irrigation; Water deficient; Soil Microorganisms; Maize

0 引言

【本研究的重要意义】水是人类赖以生存和农业生产可持续发展的必不可少的重要资源之一。农业是水资源的用水大户，因此，对于中国这样的农业大国，发展节水农业势在必行。切实可行的节水灌溉方法可以提高水分利用效率，缓解中国水资源紧张的局面。

【前人研究进展】许多国内外专家、学者对此做了大量工作，相继提出限水灌溉 (limited irrigation)、非充分灌溉 (non-full irrigation)、局部根区干燥 (partial rootzone drying, PRD)、调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, RDI) 等节水理论。农民在实际生产中，为减少灌溉用水也采用了一些经验性的节水灌溉方法。在总结前人研究和农民生产经验的基础上，一种新的生物节水灌溉技术——控制性根系分区交替灌溉 (controlled alternate partial rootzone irrigation, APRI)^[1] 被系统地提出。该灌水技术人为保持根系活动层的土壤在水平或垂直剖面的某个区域干燥，使作物根系始终有一部分生长在干燥或较为干燥的土壤区域中，限制该部分的根系吸水，同时通过人工控制使根系在水平或垂直剖面的干燥区域交替出现，使干燥区的根系尤其是根尖产生水分胁迫信号 (ABA) 传递到保卫细胞，从而有效地调节气孔关闭。而处于湿润区的根系从土壤中吸收水分以满足作物的最小生命之需，使对作物的伤害保持在临界限度以内。同时由于表层土壤总是间歇性的处于干旱区，这样既可减少株间一直湿润时的无效蒸发损失和总的灌溉用水量，亦可降低土壤机械强度，改善土壤的通透性，促进根系的补偿生长，提高根系对水分、养分的利用率，提高矿质养分的有效性，以不牺牲作物的光合产物累积而达到节水的目的^[1]。控制性根系分区交替灌溉对作物根系生长发育及吸收功能、作物生长发育和水分生理状况以及作物产量与提高水分利用效率的等方面影响的研究已取得较大的进展^[2-8]。在这些成果的支持下，这一节水灌溉新技术已在实际生产中得到了广泛的推广和应用。控制性根系分区交替灌溉对调节作物生长的土壤水分环境和水分利用效率的提高有重要作用，必然对土壤的生物环境产生一定的影响。【本研究的切入点】

近些年来，许多学者就不同的施肥方法和施肥制度、不同的种植方式以及灌溉方式对土壤微生物的影响进行了大量的研究^[9-17]，但对控制性根系分区交替灌溉条件下土壤微生物数量以及分布特征的影响尚未见报道。

【拟解决的关键问题】本文旨在对控制性根系分区交替灌溉条件下土壤微生物的变化特征进行研究，探索该灌水技术条件下作物根系土壤微生物数量的变化和分布规律，为改善农田生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用玉米品种为户单 4 号。盆栽试验在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室遮雨棚下进行。供试土壤为西北农林科技大学节水灌溉试验站的塿土 (0~20 cm)，土壤经自然风干、磨细过 2 mm 筛。试验前土壤的基本理化性质为：pH 8.14、有机质含量 6.08 g·kg⁻¹、全氮 0.89 g·kg⁻¹、全磷 0.72 g·kg⁻¹、全钾 13.8 g·kg⁻¹、碱解氮 55.93 g·kg⁻¹、速效磷 8.18 g·kg⁻¹、速效钾 102.30 g·kg⁻¹，土壤质地为重壤土，土壤田间持水量 (θ_F) 为 24%。

1.2 试验处理和方法

2005 年 3~7 月进行控制性根系分区交替灌溉盆栽试验。试验共设 3 个灌水方式处理：(1) 常规灌水 (常规)；(2) 固定 1/2 根系区域灌水 (固定)，每次固定对一侧进行灌水，另一侧自始至终保持干燥；(3) 交替 1/2 根系区域灌水 (交替)，对根系两侧进行交替灌水。每种灌水方式均设 3 种灌水水平处理，苗期：充分灌水 (60%~80% θ_F)、轻度水分亏缺 (50%~60% θ_F)、重度水分亏缺 (40%~50% θ_F)；苗期以后：充分灌水 (70%~90% θ_F)、轻度水分亏缺 (60%~70% θ_F)、重度水分亏缺 (50%~60% θ_F)。试验共设 9 个处理，每个处理重复 5 次。

盆栽试验用高 27 cm，直径 26 cm 的塑料桶，桶底均匀钻通气孔 6 个。桶底铺有细砂，提供良好的通气条件。交替灌处理和固定灌处理的桶中央用塑料膜隔开，防止水分的侧渗。在膜上中部做了个“V”形缺口，用于播种玉米。每桶各放置长 20 cm，直径 20 mm 的 PVC 线管 2 个，用作灌水管，每个灌水管钻 4 排小

孔, 每排七个, 以确保灌水均匀。线管用小石子填充, 3 层窗纱包裹防止试验过程中泥沙堵塞灌水管。

将风干土壤混匀, 过 2 mm 筛, 以确保供试土壤中土壤微生物分布及其它土壤参数均匀一致。每千克土施纯氮 0.2 g, 即施尿素(分析纯) 0.43 g, 按 N : P₂O₅ 为 2 : 1 的比例施磷肥, 每千克地中施 P₂O₅ 0.1 g, 即施 KH₂PO₄ (分析纯) 0.19 g。每桶装土容重控制为 1.3 g·cm⁻³。在播种前将其灌至田间持水量。先将玉米在 24.5℃ 恒温培养箱中催芽, 2005 年 3 月 20 日播种, 每桶 1 粒。播种时对分根灌溉处理的玉米人为进行分根, 将催出的玉米须根均匀分置于桶中央隔膜的两侧, 确保根系初期分布均匀。自三叶期开始对供试玉米进行处理。在拔节后期、灌浆期和收获后对根区土壤微生物中的细菌、真菌和放线菌进行测定。自玉米三叶期始 6 天测定作物株高、茎粗及叶面积。利用 Type HH2 型土壤水分测定仪进行含水量的测定, 严格控制各处理土壤含水量, 当含水量降至或接近该处理水分下限即进行灌水, 用量筒精确量取所需水量, 灌水至该处理水分控制上限, 记录每次灌水量。固定灌左边为灌水区, 称湿润区, 右边为非灌水区, 称干燥区。将交替灌取样前最后一次灌水的一边称为湿润区, 另一边称为干燥区。

1.3 分析方法

土壤微生物数量采用固体平板法进行分离测定。细菌、真菌、放线菌分别用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏培养基和改良高氏 1 号培养基^[18, 19]培养。

首先将取土工具在采样点旁土壤中擦拭数次, 然后除去土壤表面的枯叶, 铲除表面 1 cm 左右的表土, 以避免地面微生物与土样混杂。最后向下取 0~15 cm 的土壤, 每个取土区域在 4 个点取土, 并于预先准备好的塑料布上, 剔除作物残根, 充分混合均匀后取适量土壤装于无菌自封袋, 样品取回, 当日分析, 否则放入 4℃ 冰箱内, 最迟不得超过 2 天, 以免微生物区系组成发生变化。同时, 取土样做土壤含水量测定, 计算水分系数, 以便换算成每克干土中含微生物的数量^[19]。

数据处理和分析采用 SAS8.1 软件。

2 结果与分析

土壤中所包含有 5 种较重要的微生物类群: 细菌、放线菌、真菌、藻类和原生动物。本文主要研究前 3 类。在任何土壤中都以细菌数量最多, 放线菌次之, 真菌再次之, 藻类, 原生动物等依次排列^[20]。本试验

进行 3 次取样, 测得所研究的三大微生物类群数量, 分别对不同时期的不同土壤微生物类群进行方差分析, 如表 1 所示。

2.1 不同灌溉处理对玉米根区土壤微生物数量的影响

2.1.1 细菌 在适当的通气土壤中, 细菌和真菌占优势, 反之, 在含氧气少或无氧的环境中, 细菌的生存优势就更加明显。最高的细菌密度出现在含水量相当高的地区。对于好氧细菌生命活动的最适水分田间持水量的 50%~75%^[21]。在各生育期内, 常规灌水方式中的轻度水分亏缺处理细菌数量显著高于充分灌水和重度水分亏缺。在拔节期, 轻度水分亏缺的细菌数目分别是充分灌水和重度水分亏缺处理下玉米根区的细菌数目的 2.46 和 2.50 倍; 在乳熟期分别为 1.63 和 1.77 倍; 在收获后分别为 1.54 和 1.93 倍。常规灌充分灌水处理由于含水量过高, 过量的水分限制了气体交换, 降低了可利用态氧气的供应, 造成了厌氧环境, 因此细菌的数目明显低于其它水分处理。固定灌水方式的细菌数量除拔节期充分灌水处理湿润区略高于干燥区, 拔节期和收获后的重度水分亏缺处理湿润区低于干燥区以外, 其余情况下湿润区细菌数量显著高于干燥区。由此可见, 长期干燥将抑制细菌的生长繁衍。交替灌水方式中, 拔节期充分灌水处理的湿润区细菌数量明显高于干燥区, 同期其余处理两侧没有显著差异; 乳熟期各处理和收获后充分灌水处理湿润区细菌数均明显高于干燥区, 可能由于细菌在此期间对水分变化敏感造成的结果; 收获后轻度水分亏缺处理两侧菌落数较均衡, 重度水分亏缺处理中湿润区明显低于干燥区。对于固定灌和交替灌的各个水分处理中, 轻度的水分亏缺对细菌的生长均有积极的影响作用。其原因是由于轻度的水分亏缺不仅可以提供生命活动所必须的水分, 而且可以有效的改善土壤的通气状况, 为微生物的生命活动提供了良好环境。对于同一灌水水平不同灌水方式处理中, 交替灌的土壤细菌数量占有很大的优势。其原因是交替灌这种灌水方式使根区土壤间歇地处于干燥状态, 而且自 4 月 23 日至 6 月 1 日, 平均 5 天即需交替灌水, 由于气温升高, 自 6 月 1 日期至收获后, 平均 2 天即需交替灌水, 频繁交替灌溉改善了土壤的孔隙结构, 因此能在相对高的含水量条件下有效地改善土壤的通气状况, 既不会由于长期缺水土壤干燥引起微生物的死亡, 又不会由于长期水分含量过高, 抑制好氧微生物的生命活动, 为细菌提供了有益的生存环境。在 3 次采样中, 各处理细菌

数量在乳熟期达到峰值，这是由于玉米处于生长高峰期，根系代谢旺盛，根系分泌物增多，灌溉频繁，土壤温度升高，有利于微生物的生长。

2.1.2 真菌 虽然利用稀释平板计数可认为真菌不是主要的土壤微生物类群，但实际上由于真菌的菌丝体粗大并成扩展网状物，它构成了微生物量的很大一部分。环境水分状况的改善有利于真菌数量的增加，因此在最适度水分以下的情况下，真菌的数量常常与水分成正相关。然而，真菌可以在相对半干旱的状态

下继续存在，而且它们在水分含量低的地区可以进行代谢活动。当水分过多时，好氧代谢所必需的氧气的扩散作用不能充分满足微生物的需要，真菌在其中是首先的受害者^[21]。在常规灌水方式下，拔节期轻度水分亏缺处理真菌数量最大，分别为充分灌水和重度水分亏缺处理的 2.0 倍和 1.5 倍；乳熟期充分灌水处理高于轻度水分亏缺和重度水分亏缺处理；收获后充分灌水处理和轻度水分亏缺处理差异不明显，但高于重度水分亏缺处理。纵观整个生育期，常规灌水各水分处

表 1 不同灌溉处理对玉米根区土壤微生物数量的影响

Table 1 Effect of different treatment on the quantity of main soil microorganism in the rootzone of maize

灌溉处理根区 The irrigation treatment of rootzone	细菌 Quantity of bacterium ($\times 10^7 \text{ g}^{-1}$)			真菌 Quantity of fungus ($\times 10^3 \text{ g}^{-1}$)			放线菌 Quantity of Actinomycete ($\times 10^6 \text{ g}^{-1}$)			三大菌总数 Total quantity ($\times 10^7 \text{ g}^{-1}$)		
	拔节期 Jointing stage	乳熟期 Mature stage	收获后 After harvest	拔节期 Jointing stage	乳熟期 Mature stage	收获后 After harvest	拔节期 Jointing stage	乳熟期 Mature stage	收获后 After harvest	拔节期 Jointing stage	乳熟期 Mature stage	收获后 After harvest
	常规充分 C-Su	1.62de	2.75d	2.16fg	2.36g	9.04a	5.28b	1.32bc	0.89gh	2.32cd	1.75de	2.84d
常规轻度 C-M	3.99ab	4.49b	3.32de	4.66cd	6.90bc	4.46bc	1.76a	3.44a	5.81a	4.16ab	4.83b	3.91de
常规重度 C-Se	1.59de	2.53d	1.73gh	3.08f	5.57cd	2.32d	0.51g	3.07ab	2.16cd	1.64de	2.84d	1.94gh
固定充分湿 F-Su-W	1.43de	5.00b	2.20f	3.78ef	5.96cd	2.78cd	0.78f	2.28c	3.11b	1.51de	5.23b	2.51f
固定充分干 F-Su-D	1.19e	2.25d	1.58h	3.32f	7.22b	5.11b	1.16cd	1.95cd	0.34g	1.31e	2.44d	1.61h
固定轻度湿 F-M-W	4.74a	4.67b	3.42cd	6.88a	2.65g	2.86cd	0.83f	1.65de	2.08cd	4.82a	4.84b	3.63cd
固定轻度干 F-M-D	1.80de	2.39d	2.07fg	4.45de	8.18ab	10.88a	0.87f	0.69gh	1.51ef	1.89de	2.46d	2.22fg
固定重度湿 F-Se-W	1.31e	3.53c	2.49f	3.72ef	5.02ef	5.07b	0.87f	0.49h	3.14b	1.40e	3.58c	2.80f
固定重度干 F-Se-D	2.08d	2.21d	2.91e	5.28bc	5.95cd	3.29bc	0.92ef	1.09fg	1.35f	2.18d	2.32d	3.04e
交替充分湿 A-Su-W	3.95b	4.94b	4.60a	6.98a	4.31ef	2.68cd	1.35b	1.57de	1.8def	4.08b	5.10b	4.77a
交替充分干 A-Su-D	3.00c	2.91cd	4.07b	5.66ab	3.06g	2.37d	1.67ab	1.85cd	2.28cd	3.17c	3.10cd	4.30b
交替轻度湿 A-M-W	3.99ab	5.79a	3.83bc	4.96bc	3.94fg	2.92cd	1.10d	1.46ef	2.64bc	4.10ab	5.94a	4.09bc
交替轻度干 A-M-D	3.28bc	4.29bc	3.58cd	5.25bc	5.24de	2.56cd	1.14cd	2.73b	1.54ef	3.39bc	4.57bc	3.74cd
交替重度湿 A-Se-W	2.01de	4.69b	2.06fg	5.59b	4.85ef	2.28d	1.09de	2.22c	2.19cd	2.12de	4.92b	2.28de
交替重度干 A-Se-D	1.06e	2.28d	3.27de	4.41de	4.04fg	4.42bc	0.88ef	1.44ef	2.24cd	1.15e	2.42d	3.49fg

分别对表中每一列数据进行方差分析， $P < 0.05$ ，同一列标有相同字母的两数间无差异。C. 常规灌水方式；F. 固定灌水方式；A. 交替灌水方式；Su. 充分灌水；M. 轻度水分亏缺；Se. 重度水分亏缺；W. 湿润区；D. 干燥区。下同

Means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ level in the same column. C. Conventional irrigation; F. Fixed partial rootzone irrigation; A. Alternate partial rootzone irrigation; Su. Sufficient irrigation; M. Milder deficiency irrigation; Se. Serious deficiency irrigation; W. Wet rootzone; D. Dry rootzone. The same as below

理的真菌总数均有先升高后降低的趋势。固定灌水方式中,各生育期真菌的最大值均在轻度水分亏缺处理中取得,不同的是拔节期在湿润区,乳熟期和收获后在干燥区。而且轻度水分亏缺处理根区两侧的真菌数目的差距有扩大的趋势,在拔节期干燥区真菌数目为湿润区的65%,乳熟期和收获后湿润区真菌数目有明显小于干燥区,分别为干燥区的32%和26%。交替灌处理中,拔节期重度水分亏缺处理湿润区高于干燥区,乳熟期充分灌水处理和轻度水分亏缺,收获后重度水分亏缺处理湿润区真菌数量均低于干燥区,其余处理两侧差异不明显。拔节期充分灌水处理处理真菌数量最大,分别是轻度水分亏缺和重度水分亏缺的1.24倍和1.27倍;乳熟期轻度水分亏缺处理明显高于其它处理,收获后交替灌水各处理真菌数量无明显差异。

2.1.3 放线菌 放线菌是处于简单细菌和真菌之间的过渡类群。放线菌在正常的生长环境中可以生长出孢子或营养菌丝,并且这两者都可以在琼脂培养基上长出菌落。因此平板计数会使放线菌数目偏高。和细菌相比,放线菌一般在湿润的地区比干旱的地区少。在渍水条件下,或在湿度高于微生物最适条件的地方,例如在田间持水量在85%~100%时,放线菌很少出现。这是一般的土壤放线菌需氧代谢的结果,并且当游离氧缺乏时,随之出现的是放线菌不能发育和扩展。在另一方面,放线菌受半干旱条件的影响不像细菌那样严重,在细菌不能忍受干旱条件而相对减少时,放线菌仍能保持很高的数量^[21]。在各生育期内常规灌轻度水分亏缺处理中放线菌的数目达到最大。比较常规灌的各种水分处理,轻度水分亏缺处理放线菌数目在整个生育期呈上升趋势,在收获后数目达到非常高的水平,分别为充分灌水和重度水分亏缺的2.51倍和2.69倍。由于固定灌使根系一侧长期处于干旱状态下,

抑制作物根系正常代谢,因此放线菌数目均较低。收获后固定灌湿润区的放线菌数目均比干燥区高,每种水分处理湿润区放线菌数目分别为干燥区的9.02,1.38和2.32倍。交替灌水处理中,除乳熟期的轻度水分亏缺处理湿润区低于干燥区,乳熟期的重度水分亏缺,收获后的轻度水分亏缺处理,湿润区高于干燥区的放线菌数量之外,其余交替灌各处理中两侧根系土壤中的放线菌分布均匀。

2.1.4 菌落总数 当放线菌和真菌数量很低时,细菌数量的变化成为影响微生物数量变化的主要原因。本试验研究中的土壤中可培养的3大微生物数量所占比例为:细菌85.1%~98.6%,放线菌1.4%~14.9%,真菌所占比例最小,不足0.1%。因此玉米根区微生物总数的变化趋势与细菌的相似,不再赘述。

2.2 不同灌溉处理对玉米生长和水分利用效率影响

不同灌溉处理条件下玉米收获后的干物质量,形态指标,包括株高、茎粗、叶面积及在全生育期内总耗水量和计算出的水分利用效率如表2所示。其中干物质为玉米收获后的测量数据。而玉米的形态指标则是在玉米抽雄、散粉时,所有叶片均已展开,玉米植株基本停止营养体的增长,进入生殖生长,植株已经定长的阶段的测量所得数据。

由表2可以看出常规充分灌水处理的各项指标均达到最优,但其水分利用效率却不容乐观。而交替灌的水分利用效率居于首位。以交替灌充分灌水处理为例,其灌水仅为全灌充分灌水处理的64%,但干物质总量仅减少25%。该处理的灌水量比常规灌重度水分亏缺处理还要低,但各项指标均优于常规灌的重度水分亏缺处理。交替灌各水分处理根系分布均匀,而固定灌由于右侧遭受水分胁迫,导致根系分布严重不均,必然影响冠的正常生长。

表2 不同灌溉处理对玉米生长和水分利用效率的影响

Table 2 The effect on growth and water use efficient of maize by different irrigation treatment

灌溉处理 Treatment	地上干物质 Shoot dry Biomass(g)	根干物质 Root dry biomass (g)			株高 Height (cm)	茎粗 Stalk dia. (cm)	叶面积 Leaf area (cm ²)	灌水量 Irrigation amount (kg)	WUE (g·kg ⁻¹)
		左侧 Left	右侧 Right	总量 Total					
常规充分 C-Su	122.46a			26.20a	143.55a	1.89a	4853.37a	45.38	3.28cd
常规轻度 C-M	70.28c			17.20cd	135.60ab	1.67b	3990.13ab	31.30	2.79de
常规重度 C-Se	59.28de			14.59d	126.10b	1.50cd	4431.25ab	29.35	2.52e
固定充分 F-Su	60.34d	17.36	2.45	19.81bc	128.10ab	1.50cd	3895.40bc	23.78	3.37bc
固定轻度 F-M	50.11f	12.92	2.34	15.26d	107.38cd	1.41d	3164.02cd	19.25	3.40bc
固定重度 F-Se	29.16g	11.39	2.15	13.54d	94.25cd	1.23e	2572.29d	16.04	2.66e
交替充分 A-Su	90.65b	10.73	9.83	20.56b	139.55ab	1.60bc	3852.62bc	28.83	3.86ab
交替轻度 A-M	70.13c	8.7	7.84	16.54cd	109.625c	1.43d	3634.40bc	21.29	4.07a
交替重度 A-Se	55.44e	8.03	7.29	15.32d	92.18d	1.25e	2629.37d	17.66	4.01a

3 讨论

控制性根系分区交替灌溉作为一种新型的生物节水的灌溉方法, 是一种在局部根系受旱时既能满足作物水分需求, 又能控制耗水的农田节水调控新思路, 是对目前常规灌溉技术的新突破^[22]。自提出以来, 从作物的生长发育, 生理生态到土壤水分、养分的运移规律进行了系统的研究, 但对于在该灌溉方式下对土壤微生物的影响还尚未研究。梁宗锁^[23]研究表明, 在相同的灌水量下, 采用隔沟交替灌的玉米干物质总量与常规灌水方式无明显差异, 但产量与水分利用效率却明显提高。杜太生等^[24]进行大田棉花试验也有类似结果。本试验研究结果与其一致。顾峰雪^[25]认为在植物生长旺盛期, 其根系土壤微生物将会显著增加。细菌数目在本试验能得到很好的验证, 其余两微生物的规律则不是很明显。王淑彬等^[26]通过稻田水旱轮作研究表明: 轮作区田块在夏作成熟期的细菌数量均高于连作, 真菌和放线菌的数量轮作方式比连作稍小。虽然这是土壤水分状况对微生物影响的研究, 但与本试验所研究的灌溉方式还有一定差距。由很多已有研究成果可知, 土壤微生物还与土壤营养、酸碱度、温度、渗透压有关。因此, 在没有充分分析土壤其它因子的前提下, 不能贸然下定论, 但此次试验为以后进一步研究奠定了基础。

4 结论

由于土壤微生物的生长与土壤的水分环境状况密切相关, 常规灌水方式不仅造成水资源的浪费, 而且过多的水分使根系区土壤游离态氧含量降低, 从而限制了土壤微生物的生存发展。固定灌水处理由于人为控制根系一侧始终干燥, 水分缺乏, 限制了根系区土壤微生物的均衡发展。控制性根系分区交替灌溉使根系土壤处于交替湿润干燥的状况, 不仅能够达到节水的效果, 而且可以有效地改善土壤的水分和通气状况, 使根系两侧土壤环境均得到改善, 对微生物的生长繁衍起到积极的促进作用。在不同的水分处理下, 适度的水分亏缺不仅不损害微生物的发展, 反而有促进的作用。

控制性根系分区交替灌溉能在不影响作物生长的情况下达到节水的目的, 且具有很强的可行性, 不失为一种科学高效的节水灌溉方法。

References

- [1] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 胡笑涛, 蔡焕杰. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. 干旱地区农业研究, 1997, 15 (1): 1-6.
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, Hu X T, Cai H J. The controlled alternative irrigation——A new approach for water saving regulation in farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 胡笑涛. 控制性交替灌溉技术的研究进展. 农业工程学报, 2001, 17(4): 1-5.
Song J S, Kang S Z, Cai H J, Hu X T. Review on research progress of controlled alternate irrigation techniques. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] 韩艳丽, 康绍忠. 控制性分根交替灌溉对玉米养分吸收的影响. 灌溉排水, 2001, 20(2): 5-7.
Han Y L, Kang S Z. Effects of controlled roots-divided alternative irrigation on nutrient uptake in maize. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(2): 5-7. (in Chinese)
- [4] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 张建华. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论与试验. 水利学报, 2001, (11): 80-86.
Kang S Z, Pan Y H, Shi P Z, Zhang J H. Controlled root-divided alternative irrigation——Theory and experiments. *Shuili Xuebao*, 2001, (11): 80-86. (in Chinese)
- [5] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 潘英华, 何立绩. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26-32.
Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 26-32. (in Chinese)
- [6] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响. 农业工程学报, 2000, 16(1): 39-43.
Pan Y H, Kang S Z. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternative furrow irrigation. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(1): 39-43. (in Chinese)
- [7] 杨秀英, 杜太生, 潘英华, 张虎如. 干旱沙漠绿洲区地膜玉米控制性隔沟交替灌溉节水技术研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 74-77.
Yang X Y, Du T S, Pan Y H, Zhang H R. Study on alternative furrow irrigation on film-mulched maize in desert oasis area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 74-77. (in Chinese)
- [8] Kang S Z, Zhang L, Hu X T, Li Z J, Jerie P. An improve water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Scientia Horticulturae*, 2001, 89: 257-267.
- [9] 马云华, 魏 珉, 王秀峰. 日光温室连作黄瓜根区微生物区系及酶活性的变化. 应用生态学报, 2004, 15: 1005-1008.
Ma Y H, Wei M, Wang X F. Variation of microflora and enzyme activity in continuous cropping cucumber soil in solar greenhouse. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2004, 15: 1005-1008. (in Chinese)
- [10] 沈 宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究. 应用生态学报, 1999, 10: 471-474.

- Shen H, Cao Z H, Xu B S. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10: 471-474. (in Chinese)
- [11] 岳进, 黄国宏, 梁魏, 焦志华, 梁战备, 王琛瑞, 史奕. 不同水分管理下稻田土壤CH₄和N₂O排放与微生物菌群的关系. *应用生态学报*, 2003, 14: 2273-2277.
- Yue J, Huang G H, Liang W, Jiao Z H, Liang Z B, Wang C R, Shi Y. Relationship between CH₄ and N₂O emissions and related microorganism populations in paddy soils under different water management regimes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14: 2273-2277. (in Chinese)
- [12] 高明, 周保同, 魏朝富, 谢德体, 张磊. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究. *应用生态学报*, 2004, 15: 1177-1181.
- Gao M, Zhou B T, Wei C F, Xie D T, Zhang L. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 1177-1181. (in Chinese)
- [13] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 李燕婷, 孙瑞莲, 朱鲁生, 徐晶, 王丽霞, 李小平, 张夫道. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系. *中国农业科学*, 2005, 38: 1591-1599.
- Li X Y, Zhao B Q, Li X H, Li Y T, Sun R L, Zhu L S, Xu J, Wang L X, Li X P, Zhang F D. Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 1591-1599. (in Chinese)
- [14] 张国红, 任华中, 高丽红, 张福垆, 曹之富, 张振贤. 京郊日光温室土壤微生物状况和酶活性. *中国农业科学*, 2005, 38: 1447-1452.
- Zhang G H, Ren H Z, Gao L H, Zhang F M, Cao Z F, Zhang Z X. The soil microbe populations and enzyme activities in helio-greenhouse of Beijing suburbs. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 1447-1452. (in Chinese)
- [15] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 845-854.
- [16] Garcia C, Roldan A, Hernandez T. Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil. *Geoderma*, 2005, 124: 193-202.
- [17] Steenwerth K L, Jacon L E, Calderon F J. Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1599-1611.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985: 54-59.
- The Nanjing Soil Graduate School of Chinese Academy of Sciences. *Methods of Soil Microorganism*. Beijing: Sciences Press, 1985: 54-59. (in Chinese)
- [19] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 80-83.
- Cheng L J, Xue Q H. *The Experimentation of Microbiology*. Xi'an: World Book Press, 2000: 80-83. (in Chinese)
- [20] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 177.
- Zhou Q Y, Gao T Y. *Microbiology of Environmental Engineering*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 177. (in Chinese)
- [21] 亚历山大. 广西农学院农业微生物学教研组译. 娄隆后校. 土壤微生物学导论. 北京: 科学出版社, 1983: 9-45.
- Alexander. Translated by Agricultural Microbiology Teaching and Research Group of Guangxi Agricultural College. Lou L H recensed. *Introduction of Soil Microbiology*. Beijing: Sciences Press, 1983: 9-45. (in Chinese)
- [22] 史文娟, 康绍忠. 控制性作物根系分区供水的节水机理及研究进展. *水科学进展*, 2001, 12(2): 270-275.
- Shi W J, Kang S Z. Water-saving mechanism and research advances in the control root-split alternative irrigation. *Advances in Water Science*, 2001, 12(2): 270-275. (in Chinese)
- [23] 梁宗锁. 分根区交替灌溉提高玉米水分利用率的生理学机制. 西北农林科技大学博士论文.
- Liang Z S. The physiological mechanism of enhance water use efficiency by control root-split alternative irrigation. Ph. D. Dissertation of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry. (in Chinese)
- [24] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 杨秀英. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2061-2068.
- Du T S, Kang S Z, Hu X T, Yang X Y. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2061-2068. (in Chinese)
- [25] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 杨玉锁. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被下土壤微生物的初步研究. *生物多样性*, 2000, 8(3): 297-303.
- Gu F X, Wen Q K, Pan B R, Yang Y S. A preliminary study on soil microorganisms of artificial vegetation in the center of Taklimakan Desert. *Chinese Biodiversity*, 2000, 8(3): 297-303. (in Chinese)
- [26] 王淑彬, 黄国勤, 李年龙, 刘隆旺. 稻田水旱轮作(第3年度)的土壤微生物效应. *江西农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 24(3): 320-323.
- Wang S B, Huang G Q, Li N L, Liu L W. The effects of paddy-upland rotation on microorganisms of soil (the third year). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition)*, 2002, 24(3): 320-323. (in Chinese)