

陈思静, 杜爱林, 李伏生. 不同滴灌施肥处理对种植马铃薯土壤有机碳组分和酶活性的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3): 34-41.  
CHEN Sijing, DU Ailin, LI Fusheng. Effects of different drip fertigation treatments on organic carbon fraction and enzyme activity in potato-planting soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3): 34-41.

# 不同滴灌施肥处理对种植马铃薯土壤 有机碳组分和酶活性的影响

陈思静, 杜爱林, 李伏生  
(广西大学农学院, 广西南宁 530005)

**摘要:**【目的】获得种植马铃薯土壤有机碳库调控的水肥管理模式, 并揭示土壤酶活性对土壤有机碳组分和碳库管理指数 (Carbon pool management index, CPMI) 的影响。【方法】在南宁市防雨棚内进行 2 种滴灌灌水量水平 (高灌水量: 苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期土壤含水量分别保持在田间持水量的 60%~70%、70%~80%、75%~85% 和 50%~60%; 低灌水量: 苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期土壤含水量保持在田间持水量的 50%~60%、60%~70%、70%~80% 和 40%~50%) 和 3 种滴灌施肥比例 (NK<sub>100-0</sub>: N、K 肥以 100% 作基肥土施; NK<sub>70-30</sub>: N、K 肥以 70% 作基肥土施, 30% 作滴灌追肥; NK<sub>50-50</sub>: N、K 肥以 50% 作基肥土施, 50% 作滴灌追肥) 的田间试验。测定马铃薯收获后土壤总有机碳 (Total organic carbon, TOC)、可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC)、微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)、活性有机碳 (Labile organic carbon, LOC) 含量以及蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶活性, 计算碳库管理指数, 并分析土壤有机碳库组分含量和碳库管理指数与土壤酶活性之间的关系。【结果】滴灌灌水量显著影响土壤有机碳及其组分含量。相同施肥比例下, 高灌水量土壤有机碳及其组分含量、CPMI 和蔗糖酶活性较灌水量土壤高。高灌水量下, NK<sub>50-50</sub> 土壤 TOC 含量分别比 NK<sub>100-0</sub> 和 NK<sub>70-30</sub> 提高 15.2% 和 7.1%, NK<sub>50-50</sub> 土壤 LOC 含量较 NK<sub>100-0</sub> 增加 25.0%, 且高灌水量 NK<sub>50-50</sub> 处理土壤 TOC 和 LOC 含量显著高于其他处理。在相同滴灌灌水量下, 滴灌施肥比例对 3 种酶活性的影响不显著。土壤蔗糖酶活性以高灌水量 NK<sub>50-50</sub> 处理最高。高灌水量下 NK<sub>50-50</sub> 土壤碳库指数 (Carbon pool index, CPI) 和 CPMI 比 NK<sub>100-0</sub> 分别提高 15.1% 和 25.8%; 低灌水量下 NK<sub>50-50</sub> 土壤 CPI 和 CPMI 比 NK<sub>100-0</sub> 分别提高 12.6% 和 8.4%。所有处理土壤 CPI 和 CPMI 以高灌水量 NK<sub>50-50</sub> 处理较高。此外, 土壤 TOC、DOC 和 MBC 含量均与蔗糖酶活性呈极显著或显著正相关, 相关系数分别为 0.61、0.48 和 0.46。【结论】高灌水量 NK<sub>50-50</sub> 处理提高了土壤有机碳及其组分含量和蔗糖酶活性, 可作为马铃薯种植土壤有机碳库调控的水肥管理模式; 土壤 TOC、DOC 和 MBC 含量受到土壤蔗糖酶活性的影响。

**关键词:** 马铃薯; 滴灌施肥; 有机碳组分; 碳库管理指数; 土壤酶活性

中图分类号: S275.6; S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)03-0034-08

## Effects of different drip fertigation treatments on organic carbon fraction and enzyme activity in potato-planting soil

CHEN Sijing, DU Ailin, LI Fusheng  
(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

收稿日期: 2021-07-28 网络首发时间: 2022-03-08 13:01:36

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220304.1631.002.html>

作者简介: 陈思静, 硕士研究生, 主要从事水肥资源利用与环境方面的研究, E-mail: 3294992091@qq.com; 通信作者: 李伏生, 教授, 博士, 主要从事水肥资源利用与环境方面的研究, E-mail: 19880066@gxu.edu.cn

基金项目: 广西科技计划——基地和人才专项 (AD17195060)

**Abstract:** 【Objective】 The aim was to obtain a water and fertilizer management mode that regulates potato-planting soil organic carbon storage, and reveal the influence of soil enzyme activity on soil organic carbon fraction and carbon pool management index (CPMI). 【Method】 Field experiment was carried out in Nanning under the rain-shelter condition with two drip irrigation levels (high irrigation amount: Soil water content was maintained at 60%–70%, 70%–80%, 75%–85% and 50%–60% of field capacity at the seedling, tuber formation, tuber expansion and starch accumulation stages, respectively; Low irrigation amount: Soil water content was maintained at 50%–60%, 60%–70%, 70%–80% and 40%–50% of field capacity at the seedling, tuber formation, tuber expansion and starch accumulation stages, respectively) and three drip fertigation ratios (NK<sub>100-0</sub>: All N,K fertilizer were applied to soil as base fertilizer; NK<sub>70-30</sub>: 70% N,K fertilizer were applied to soil as base fertilizer and 30% as topdressing with drip fertigation; NK<sub>50-50</sub>: 50% N,K fertilizer were applied to soil as base fertilizer and 50% as topdressing with drip fertigation). The contents of total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC) and labile organic carbon (LOC) and the activities of sucrase, cellulase and catalase in the soils were measured after harvesting the potato. Then CPMI was calculated and the relationships of soil organic carbon fraction and CPMI with soil enzyme activities were analyzed. 【Result】 Drip irrigation amount affected organic carbon contents and components in the soils significantly. Under the same fertigation ratio, high irrigation amount had higher organic carbon contents and components, CPMI and sucrase activity in the soils than those of low irrigation amount. Under the high irrigation amount condition, NK<sub>50-50</sub> increased TOC content by 15.2% and 7.1% respectively compared with NK<sub>100-0</sub> and NK<sub>70-30</sub>, and NK<sub>50-50</sub> increased LOC content by 25.0% compared with NK<sub>100-0</sub>. Moreover, NK<sub>50-50</sub> of high irrigation amount treatment had significant higher contents of TOC and LOC than those of other treatments. Under the same drip irrigation amount, the effect of drip fertigation ratio on the activities of three enzymes was not significant. Among all treatments, NK<sub>50-50</sub> of high irrigation amount treatment had the highest sucrase activity. Compared with NK<sub>100-0</sub>, NK<sub>50-50</sub> increased soil CPI and CPMI by 15.1% and 25.8% respectively under the high irrigation amount condition, and NK<sub>50-50</sub> increased carbon pool index (CPI) and CPMI by 12.6% and 8.4% respectively under the low irrigation amount condition. Among all treatments, NK<sub>50-50</sub> of high irrigation amount treatment had higher CPI and CPMI. In addition, soil TOC, DOC and MBC were extremely significantly or significantly correlated with the sucrase activity (with correlation coefficients of 0.61, 0.48 and 0.46, respectively). 【Conclusion】 NK<sub>50-50</sub> of high irrigation amount treatment increases the contents of organic carbon and its components and sucrase activity in soil, and can be used as the water and fertilizer management mode regulating potato-planting soil organic carbon storage. Soil sucrase activity affects the contents of TOC, DOC and MBC.

**Key words:** Potato; Drip fertigation; Organic carbon component; Carbon pool management index; Soil enzyme activity

广西地处亚热带地区, 光热充沛, 11 月份晚稻收获后农田进入空窗期, 利用冬闲田发展马铃薯产业空间大。然而广西冬季雨水偏少, 灌水成为制约广西冬种马铃薯产业发展的条件之一。马铃薯实际生产中盲目灌水和过量施肥现象普遍存在, 而滴灌施肥可以根据作物需水需肥规律和土壤水分养分状况精确控制灌水量、施肥量和灌水施肥时间, 将水分养分直接供应到根区, 实现作物“按需灌水施肥”, 从而提高作物产量和水分养分利用效率<sup>[1]</sup>, 同时滴灌施肥也影响土壤碳组分, 因此, 研究合适的

滴灌施肥模式将为调控土壤碳库提供新的途径。目前常用土壤可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳、碳库管理指数等表征土壤碳库, 而水肥管理会影响土壤碳库和酶活性。有研究表明, 长期合理施肥显著提高土壤有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳含量及碳库管理指数<sup>[2]</sup>, 与传统施肥相比, 滴灌施肥增加各层次土壤易氧化有机碳和可溶性有机碳含量<sup>[3]</sup>。其他研究也发现, 滴灌施肥对提高土壤易氧化有机碳有积极的作用<sup>[4-6]</sup>。土壤水分含量影响土壤有机碳矿化速率和外界有机碳

分解速率<sup>[7]</sup>,从而使土壤有机碳的含量发生变化。俞华林等<sup>[8]</sup>发现,适量灌水会增加土壤有机碳含量,但少量或过量灌水降低土壤有机碳矿化速率。当土壤水分过量时,土壤透气性和土壤微生物生长环境变差,土壤中有机碳不易被土壤中的微生物分解,而外界的碳源则易被微生物降解腐烂成有机物质,原有的有机碳不会分解且外源有机碳增加,从而使土壤有机碳含量增加<sup>[9]</sup>。水肥管理也会影响土壤酶如蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶等酶活性,滴灌施肥有利于提高土壤中酶活性<sup>[10]</sup>,而土壤酶活性会影响土壤碳组分。研究发现,各种形态有机碳组分与土壤蔗糖酶和纤维素酶活性均呈显著的正相关关系<sup>[11]</sup>。

近年来国内外学者较多关注滴灌施肥对马铃薯生长、产量、品质和水分利用效率的影响,而滴灌灌水量和滴灌施肥比例协同作用对种植马铃薯土壤碳库管理指数的影响研究较少,且土壤酶活性如何影响土壤有机碳组分和碳库管理指数有待深入研究。因此,在南宁市防雨棚内开展不同滴灌灌水量和滴灌施肥比例的田间试验,通过测定马铃薯收获后土壤有机碳及活性组分和酶活性,计算土壤碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI),分析土壤有机碳组分和碳库管理指数与酶活性之间的关系,以获得种植马铃薯土壤有机碳库调控的水肥管理模式,并揭示土壤酶活性对土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

田间试验在南宁市广西大学校内移动防雨棚中进行,该移动棚通风、透光,可以保障作物生长期自然光照和温度,通过电控传感器在降雨时遮盖,非降雨时移开。供试土壤为赤红壤,pH6.60(水

土质量比 2.5:1.0, pH 计法),有机质 10.6 g·kg<sup>-1</sup>(重铬酸钾容量法-外加热法),全氮 0.99 g·kg<sup>-1</sup>(半微量开氏法),碱解氮 53.6 mg·kg<sup>-1</sup>(NaOH 碱解扩散法),速效磷 68.7 mg·kg<sup>-1</sup>[0.05 mol·L<sup>-1</sup> HCl-0.025 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提, 比色法],速效钾 217.9 mg·kg<sup>-1</sup>(1 mol·L<sup>-1</sup> 中性 NH<sub>4</sub>OAc 浸提, 火焰光度法),田间持水量 30.5%(环刀法),容重 1.4 g·cm<sup>-3</sup>(室内环刀法)<sup>[12]</sup>。供试马铃薯品种为费乌瑞它。

### 1.2 试验方法

依据马铃薯在不同时期的需水规律及前人研究结果<sup>[13-14]</sup>,试验设高、低 2 种滴灌灌水量,其中,高灌水量:苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期土壤含水量分别保持在田间持水量的 60%~70%、70%~80%、75%~85% 和 50%~60%;低灌水量:苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期土壤含水量分别保持在田间持水量的 50%~60%、60%~70%、70%~80% 和 40%~50%。设 3 种滴灌施肥比例,即 NK<sub>100-0</sub>:N、K 肥以 100% 作基肥土施,不追肥;NK<sub>70-30</sub>:N、K 肥以 70% 作基肥土施,30% 作滴灌追肥(苗期 7.5%,块茎形成期 15%,块茎膨大期 7.5%);NK<sub>50-50</sub>:N、K 肥以 50% 作基肥土施,50% 作滴灌追肥(苗期 12.5%,块茎形成期 25%,块茎膨大期 12.5%)。试验共设 6 个处理,具体如表 1 所示,每个处理重复 3 次,共 18 个小区,每小区面积 8.64 m<sup>2</sup>(3.6 m×2.4 m)。

各小区均施用化学肥料 N 150 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 300 kg·hm<sup>-2</sup>,以及堆沤后牛粪 15 t·hm<sup>-2</sup>。氮肥用尿素[w(N)为 46.4%],磷肥用钙镁磷肥[w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 18.0%],钾肥用硫酸钾[w(K<sub>2</sub>O)为 52.0%]。牛粪中养分:w(有机质)为 14.3%、w(N)为 0.76%、w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 0.85%、w(K<sub>2</sub>O)为 0.59%。牛粪和钙镁磷肥全部做基肥土施。灌溉方式采用地表滴灌,滴头流量一致,滴头

表 1 田间试验处理及 N、K 肥的基、追肥比例

Table 1 Treatments for field experiment and radio of base fertilizer and topdressing for N,K fertilizer

处理 Treatment	滴灌灌水量 Drip irrigation amount	滴灌施肥比例 Fertigation ratio	基肥/% Base fertilizer	追肥 Topdressing/%		
				苗期 Seedling stage	块茎形成期 Tuber formation stage	块茎膨大期 Tuber expansion stage
T1	高灌水量	NK <sub>100-0</sub>	100	0	0	0
T2	High irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	70	7.5	15	7.5
T3		NK <sub>50-50</sub>	50	12.5	25	12.5
T4		低灌水量	NK <sub>100-0</sub>	100	0	0
T5	Low irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	70	7.5	15	7.5
T6		NK <sub>50-50</sub>	50	12.5	25	12.5



设在马铃薯植株两侧,用水表计量灌水。N肥和K肥按上述施肥方式施用,事先按设计要求配好肥料溶液,通过滴灌带进行灌溉施肥,灌溉方法采用交替滴灌。

### 1.3 田间试验及管理

于2017年11月4日将沤熟牛粪施入试验小区,11月5日翻地,11月10日将部分尿素、钙镁磷肥以及硫酸钾作为基肥土施。11月11日切马铃薯块茎,每个种薯块茎留2~3个芽眼,用质量分数为0.5%的高锰酸钾溶液和丁硫克百威水溶液浸泡拌种后晾干,11月14日播种,12月4日移栽或补齐未发芽位置的马铃薯苗。用TRIME-PICO-IPH TDR水分测定仪(德国IMKO)测定土壤含水量,确保土壤含水量在试验设定范围内。12月6日施苗肥,12月11日进行第一次中耕培土。12月20日施块茎形成肥,12月25日进行第2次培土(培土到植株附近,芽块顶部到茎背顶部达到15~20 cm左右,做成梯形垄)。2018年1月4日,施块茎膨大肥,2月8日喷农药(棉铃虫核型多角体病毒,预防马铃薯晚疫病),试验于2018年3月5日收获马铃薯。

### 1.4 土壤样品采集与测定

于3月6日(马铃薯收获后次日)用5点法在马铃薯相邻植株中间采集0~20 cm耕作层土壤,将土样混匀,迅速运回实验室,部分新鲜土样过孔径2 mm筛网,除去根系、砂石等后,保存于4℃冰箱,直接用于土壤有机碳组分和酶活性的测定。剩余土样风干后过0.149 mm筛后进行土壤总有机碳含量的测定。

土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)含量用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定<sup>[12]</sup>;活性有机碳(Labile organic carbon, LOC)含量用浓度为333 mmol·L<sup>-1</sup>的高锰酸钾溶液氧化土样,并于565 nm下通过测定光密度得到<sup>[12]</sup>;微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量分别用三氯甲烷熏蒸和不用三氯甲烷熏蒸后,用浓度为0.5 mol·L<sup>-1</sup>硫酸钾溶液提取,采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定<sup>[12]</sup>。

土壤蔗糖酶活性用3,5-二硝基水杨酸溶液比色法测定,其活性以1 g干土1 d生成葡萄糖的质量(mg)表示;纤维素酶活性也用3,5-二硝基水杨酸溶液比色法测定,以1 g干土3 d生成葡萄糖的质量(mg)表示1个活性单位(U);过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,其活性以1 g干土消耗浓度为0.02 mol·L<sup>-1</sup>的KMnO<sub>4</sub>溶液体积(mL)表示,3种酶活性测定的具体操作步骤见《土壤酶及其研

究法》<sup>[15]</sup>。

土壤碳库指数(Carbon pool index, CPI)和碳库管理指数的计算参照杜爱林等<sup>[16]</sup>的方法进行。

### 1.5 数据统计分析

试验数据采用Excel 2016和SPSS 24.0软件进行分析。方差分析包括滴灌灌水量和滴灌施肥比例主效应,以及它们之间的交互效应。用Duncan's法对不同处理进行多重比较。用Pearson相关系数表示土壤总有机碳及其组分和碳库管理指数与酶活性之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥处理对土壤有机碳及其组分的影响

由表2方差分析可知,滴灌灌水量和滴灌施肥比例对土壤总有机碳(TOC)影响显著( $P < 0.05$ )。土壤TOC质量分数在5.46~7.12 g·kg<sup>-1</sup>之间。多重比较结果显示,相同滴灌施肥比例下,高灌水量土壤TOC含量显著高于低灌水量土壤。在高灌水量下,NK<sub>50-50</sub>施肥处理土壤TOC含量分别比NK<sub>100-0</sub>和NK<sub>70-30</sub>处理提高15.2%和7.1%。在低灌水量下,NK<sub>50-50</sub>施肥处理土壤TOC含量比NK<sub>100-0</sub>和NK<sub>70-30</sub>处理提高12.6%和9.8%。

滴灌灌水量和滴灌施肥比例对土壤活性有机碳(LOC)影响显著( $P < 0.05$ )(表2)。土壤LOC质量分数介于0.43~0.55 g·kg<sup>-1</sup>之间。NK<sub>50-50</sub>下,高灌水量土壤LOC含量显著高于低灌水量土壤。高灌水量下,NK<sub>50-50</sub>处理土壤LOC含量较NK<sub>100-0</sub>增加25.0%,且差异显著,而在低灌水量下,不同滴灌施肥比例土壤LOC含量之间的差异并不显著。

滴灌灌水量对于土壤可溶性有机碳(DOC)影响显著( $P < 0.05$ )(表2)。土壤DOC质量分数介于189.5~369.5 mg·kg<sup>-1</sup>之间。相同滴灌施肥比例下,高灌水量土壤DOC含量与低灌水量土壤之间的差异不显著,相同滴灌灌水量下,不同滴灌施肥比例土壤DOC含量之间的差异也不显著。低灌水量下,NK<sub>70-30</sub>土壤DOC含量比NK<sub>100-0</sub>高27.3%。

滴灌灌水量对土壤微生物量碳(MBC)影响显著( $P < 0.05$ )(表2)。土壤MBC质量分数在324.1~384.8 mg·kg<sup>-1</sup>之间。相同滴灌施肥比例下,高灌水量土壤MBC含量与低灌水量土壤MBC含量之间的差异不显著;相同滴灌灌水量下,不同滴灌施肥比例土壤MBC含量之间的差异也不显著。

此外,滴灌灌水量和滴灌施肥比例之间的交互作用对土壤TOC、LOC、DOC和MBC含量的影响均不显著( $P > 0.05$ )。T3处理土壤TOC和LOC含

表 2 不同处理对土壤有机碳及其组分的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of different treatments on soil organic carbon and its components

处理 Treatment	滴灌灌水量 Drip irrigation amount	滴灌施肥比例 Fertigation ratio	w/(g·kg <sup>-1</sup> )		w/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
			总有机碳 Total organic carbon(TOC)	活性有机碳 Labile organic carbon(LOC)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon(DOC)	微生物量碳 Microbial biomass carbon(MBC)
T1	高灌水量	NK <sub>100-0</sub>	6.18±0.15bc	0.44±0.03b	323.0±57.0ab	374.8±25.3ab
T2	High irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	6.65±0.24ab	0.49±0.01b	369.5±27.5a	384.8±20.3a
T3		NK <sub>50-50</sub>	7.12±0.24a	0.55±0.02a	328.7±14.8ab	370.6±3.1b
T4	低灌水量	NK <sub>100-0</sub>	5.46±0.15d	0.43±0.01b	189.5±49.8b	325.8±8.5b
T5	Low irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	5.60±0.16cd	0.44±0.01b	241.3±93.5ab	343.0±9.6ab
T6		NK <sub>50-50</sub>	6.15±0.18bc	0.47±0.01b	215.6±7.6ab	324.1±18.7b
显著性检验 (P值)	滴灌灌水量	Drip irrigation amount	0.004	0.008	0.011	0.005
Significance test (P value)	滴灌施肥比例	Fertigation ratio	0.001	0.003	0.626	0.567
	滴灌灌水量×滴灌施肥比例		0.674	0.125	0.979	0.975
	Drip irrigation amount × Fertigation ratio					

1) 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan's法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ , Duncan's test)

量相对较高, 而 T2 处理土壤 DOC 和 MBC 含量相对较高。在相同滴灌施肥比例下, 高灌水量土壤有机碳及其组分较灌水量土壤高。

## 2.2 不同水肥处理对土壤酶活性的影响

由表 3 方差分析可知, 滴灌灌水量对土壤蔗糖酶活性影响显著 ( $P < 0.05$ ), 但滴灌施肥比例和滴灌灌水量×滴灌施肥比例对土壤蔗糖酶活性的影响并不显著 ( $P > 0.05$ )。多重比较结果显示, NK<sub>100-0</sub> 和 NK<sub>50-50</sub> 下, 高灌水量土壤蔗糖酶活性较相应低灌水量土壤分别提高 18.9% 和 18.2%, 但差异不显

著。土壤蔗糖酶活性以 T3 处理较高。

滴灌灌水量、滴灌施肥比例以及滴灌灌水量×滴灌施肥比例对土壤纤维素酶和过氧化氢酶活性的影响均不显著 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。各处理土壤纤维素酶和过氧化氢酶活性之间的差异不显著。

## 2.3 不同水肥处理对土壤碳库管理指数的影响

由表 4 方差分析可知, 滴灌灌水量对土壤碳库指数影响显著 ( $P < 0.05$ ), 但对碳库管理指数 (CPMI) 影响不显著 ( $P > 0.05$ )。滴灌施肥比例对土壤 CPI 和 CPMI 影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。滴灌灌水量×滴灌

表 3 不同处理对土壤酶活性的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of different treatments on soil enzyme activity

处理 Treatment	滴灌灌水量 Drip irrigation amount	滴灌施肥比例 Fertigation ratio	蔗糖酶活性/(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	纤维素酶活性/U	过氧化氢酶活性/(mL·g <sup>-1</sup> )
			Sucrase activity	Cellulase activity	Catalase activity
T1	高灌水量	NK <sub>100-0</sub>	7.17±0.36ab	0.73±0.06a	0.45±0.03a
T2	High irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	7.29±0.14a	0.75±0.04a	0.47±0.03a
T3		NK <sub>50-50</sub>	7.39±0.24a	0.75±0.03a	0.46±0.02a
T4	低灌水量	NK <sub>100-0</sub>	6.03±0.56b	0.64±0.06a	0.39±0.06a
T5	Low irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	6.30±0.18ab	0.67±0.06a	0.45±0.04a
T6		NK <sub>50-50</sub>	6.25±0.44ab	0.66±0.03a	0.44±0.04a
显著性检验 (P值)	滴灌灌水量	Drip irrigation amount	0.003	0.062	0.311
Significance test (P value)	滴灌施肥比例	Fertigation ratio	0.799	0.906	0.602
	滴灌灌水量×滴灌施肥比例		0.969	0.999	0.873
	Drip irrigation amount × Fertigation ratio				

1) 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan's法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ , Duncan's test)

施肥比例对土壤 CPI 和 CPMI 均有显著影响 ( $P<0.05$ )。

在相同滴灌施肥比例下, 高灌水量土壤 CPI 和 CPMI 均高于低灌水量土壤。高灌水量下, NK<sub>50-50</sub> 施肥处理土壤的 CPI 和 CPMI 比 NK<sub>100-0</sub> 分别提高 15.1% 和 25.8%; 低灌水量下, NK<sub>50-50</sub> 施肥处理土壤的 CPI 和 CPMI 比 NK<sub>100-0</sub> 分别提高 12.6% 和 8.4%。土壤 CPI 和 CPMI 以 T3 处理最高。

## 2.4 土壤有机碳及其组分和碳库管理指数与酶活性之间的相互关系

土壤有机碳及其组分和碳库管理指数与酶活性之间的相关性分析结果如表 5 所示。土壤 TOC、DOC、MBC 和 CPI 均与蔗糖酶活性之间呈显著正相关 (相关系数分别为 0.61, 0.48, 0.46 和 0.60), 而土壤碳库指数与其他 2 种酶活性之间的相关性均不显著。

表 4 不同处理对土壤碳库管理指数的影响<sup>1)</sup>

Table 4 Effects of different treatments on soil carbon pool management index

处理 Treatment	滴灌灌水量 Drip irrigation amount	滴灌施肥比例 Fertigation ratio	碳库指数 Carbon pool index (CPI)	碳库管理指数 Carbon pool management index (CPMI)
T1	高灌水量	NK <sub>100-0</sub>	1.26±0.03bc	121.65±7.57b
T2	High irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	1.35±0.05ab	134.36±4.23b
T3		NK <sub>50-50</sub>	1.45±0.05a	153.04±5.71a
T4	低灌水量	NK <sub>100-0</sub>	1.11±0.03d	120.08±4.93b
T5	Low irrigation amount	NK <sub>70-30</sub>	1.14±0.03cd	122.43±4.23b
T6		NK <sub>50-50</sub>	1.25±0.04bc	130.19±2.63b
显著性检验 (P值)	滴灌灌水量 Drip irrigation amount		0.001	0.111
Significance test (P value)	滴灌施肥比例 Fertigation ratio		0.113	0.194
	滴灌灌水量×滴灌施肥比例 Drip irrigation amount × Fertigation ratio		0.000	0.001

1) 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ , Duncan's test)

表 5 土壤有机碳及其组分含量和碳库管理指数与酶活性的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analyses of soil organic carbon and fraction contents and carbon pool management index with enzyme activity

指标 Index	蔗糖酶 Sucrase	纤维素酶 Cellulase	过氧化氢酶 Catalase
总有机碳 Total organic carbon (TOC)	0.61**	0.24	0.33
活性有机碳 Labile organic carbon (LOC)	0.29	0.23	0.14
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (DOC)	0.48*	0.02	0.29
微生物量碳 Microbial biomass carbon (MBC)	0.46*	0.29	0.03
碳库指数 Carbon pool index (CPI)	0.60**	0.24	0.31
碳库管理指数 Carbon pool management index (CPMI)	0.23	0.24	0.20

1) “\*” 和 “\*\*” 分别表示达 0.05 和 0.01 水平的显著相关 ( $n=3$ , Pearson 法)

1) “\*” and “\*\*” indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively ( $n=3$ , Pearson method)

## 3 讨论与结论

本研究表明, 在相同滴灌灌水量下, 与 NK<sub>100-0</sub> 相比, NK<sub>50-50</sub> 和 NK<sub>70-30</sub> 滴灌施肥下的土壤 TOC、LOC 和 DOC 含量都有所提高。NK<sub>100-0</sub> 处理土壤总有机碳及其组分含量等都较低, 原因是该处理的肥料全部用作基肥施入土壤, 后期养分供应不足,

而且部分 N 肥易通过挥发或反硝化损失, 影响 N 肥施用效果。而 NK<sub>50-50</sub> 和 NK<sub>70-30</sub> 交替灌溉追施 N、K 肥使两侧根区土壤处于交替干燥和湿润状态, 在提供作物所需水分和养分的同时, 使根区土壤处于良好的通气状态, 为土壤微生物提供了有益的生存条件, 故交替滴灌施肥比例的增加有利于土壤有机碳组分的增加<sup>[17]</sup>; 再加上在马铃薯成熟期化



学 N、K 肥配施能够促进作物根系生长,通过增加地下生物量来提高土壤有机质含量,进而有助于有机碳及其组分的增加<sup>[18]</sup>。

本研究表明,滴灌灌水量对于土壤有机碳及其组分的影响都达到显著水平。在相同滴灌施肥比例下,高灌水量土壤 TOC、LOC、DOC 和 MBC 含量都高于低灌水量土壤。相关研究发现,土壤含水量从土壤含水量<50% 变成 50%~100% 时,土壤微生物活性通常会受到抑制,使土壤有机碳矿化分解缓慢,进而使土壤有机碳及其组分增加<sup>[19]</sup>。

土壤碳库管理指数作为反映土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标,与土壤有效碳的关系密切,可反映和评估土壤碳素动态变化<sup>[20]</sup>。土壤碳库管理指数可用于衡量土壤质量,CPMI 值越大,表明土壤质量越好<sup>[21]</sup>。本研究表明,在相同的灌水量下,NK<sub>50-50</sub> 施肥处理土壤的 CPI 和 CPMI 均高于 NK<sub>100-0</sub>,说明提高滴灌施肥比例会增加土壤 CPMI,这与滕秋梅等<sup>[22]</sup>和张鹏等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。说明适量 N、K 肥的加入可促进植物生长,增强土壤养分循环功能。究其原因,可能是 N、K 肥施入后主要提高的是 LOC 含量,导致碳库管理指数较高。凋落物和根系分泌物转化为有机质时,一部分有机质活化后为植物生长提供养分,一部分有机质转化为惰性碳库固存下来,这 2 个比例维持在一定范围内<sup>[24]</sup>。

土壤酶在土壤养分周转及土壤功能稳定中有重要作用。在影响土壤酶活性因子中,土壤水分对酶活性的影响具有异质性。本研究表明,土壤蔗糖酶活性在高灌水量下较高,说明灌水量的增加会提高土壤蔗糖酶活性,这与田幼华等<sup>[25]</sup>、高丽敏等<sup>[26]</sup>研究结果一致,但与万忠梅等<sup>[27]</sup>的研究结果相反,这可能是由于不同作物的需水量不同。而本研究结果可能是由于土壤水分的增加,加快了微生物胞外酶和底物的运输速率,可为酶促反应提供良好的反应环境,进而蔗糖酶和纤维素酶活性得到提高<sup>[28]</sup>。但滴灌施肥比例对土壤蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶活性的影响不显著,这与大多数研究结果并不相同。这可能是由于本研究是在相同的施肥量下,滴灌施肥比例对各种酶活性的影响较小;而大多数研究是通过设置不同的施肥梯度实现的。

蔗糖酶对蔗糖分解的催化作用具有专一性,能将土壤中蔗糖分子分解成果糖和葡萄糖,为土壤微生物提供营养物质,促进土壤有机碳积累与分解转化,从而直接或者间接地影响有机碳矿化过程<sup>[29]</sup>。本研究表明,土壤总有机碳与蔗糖酶活性呈极显著正相关,以往研究也有相似的结果<sup>[30]</sup>,说明土壤蔗

糖酶活性影响土壤有机碳的积累。本研究发现,土壤有机碳组分与纤维素酶和过氧化氢酶活性之间的关系不显著,然而,马瑞萍等<sup>[11]</sup>对黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究表明,土壤纤维素酶活性与各种组分有机碳之间的关系均呈显著正相关。张英英<sup>[31]</sup>研究发现,不同耕作措施下甘肃旱地农田 0~30 cm 土层土壤活性有机碳与纤维素酶和过氧化物酶活性之间的关系呈显著正相关,与本试验结果不同,可能是试验条件和土壤类型不同的原因所致。

综上所述,在高灌水量(苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期土壤含水量分别保持在田间持水量的 60%~70%、70%~80%、75%~85% 和 50%~60%) 和 NK<sub>50-50</sub> 施肥处理(N、K 肥以 50% 作基肥土施,50% 作滴灌追肥) 下土壤总有机碳及其组分、蔗糖酶活性和碳库管理指数较高,因此,高灌水量和 N、K 肥基、追肥比 50:50 处理为广西冬种马铃薯种植土壤有机碳库调控的水肥耦合模式。此外,土壤 TOC、DOC、MBC 含量和 CPI 均与蔗糖酶活性呈显著正相关,说明土壤蔗糖酶活性会影响土壤有机碳及其组分。

#### 参考文献:

- [1] 冯志文,万书勤,康跃虎,等.滴灌施肥条件下减量施肥对马铃薯田土壤养分积累及产量的影响[J].*节水灌溉*, 2019(8): 28-33.
- [2] 宇万太,柳敏,赵鑫,等.不同有机物料及其配施对潮棕壤轻组有机碳的动态影响[J].*土壤通报*, 2008, 39(6): 1307-1310.
- [3] 沈舒雨,王芳,南雄雄,等.氮磷养分配施对土壤碳氮特征及叶用枸杞生长的影响[J].*青海环境*, 2020, 30(1): 26-33.
- [4] 邓少虹,林明月,李伏生,等.施肥对喀斯特地区植草土壤碳库管理指数及酶活性的影响[J].*草业学报*, 2014, 23(4): 262-268.
- [5] 齐玉春,郭树芳,董云社,等.灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J].*中国农业科学*, 2014, 47(9): 1764-1773.
- [6] SINGH A, GULATI I J, CHOPRA R, et al. Effect of drip-fertigation with organic manures on soil properties and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) yield under arid condition[J]. *Annals of Biology*, 2014, 30(2): 345-349.
- [7] 缙倩倩,王国华,屈建军.农田土壤有机碳库研究述评[J].*中国农学通报*, 2017, 33(33): 107-114.
- [8] 俞华林,张恩和,王琦,等.灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J].*草业学报*, 2013, 22(3): 227-233.
- [9] 韩琳,张玉龙,金烁,等.灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J].*中国农业科学*, 2010,

- 43(8): 1625-1633.
- [10] 刘瑞, 王星辰, 束良佐, 等. 滴灌施肥条件下氮去向及其对土壤环境影响的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(15): 24-27.
- [11] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 104-113.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 史万恩. 滴灌条件下脱毒马铃薯灌溉制度试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5): 255-260.
- [14] 赵鸿, 任丽雯, 赵福年, 等. 马铃薯对土壤水分胁迫响应的研究进展[J]. *干旱气象*, 2018, 36(4): 537-543.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 杜爱林, 傅丰贝, 李伏生. 赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式研究[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(2): 14-20.
- [17] BICHARANLOO B, SHIRVAN M B, KEITEL C, et al. Rhizodeposition mediates the effect of nitrogen and phosphorous availability on microbial carbon use efficiency and turnover rate [J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107705. [2021-07-15]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107705>.
- [18] 王振龙, 包蕾, 葛新伟, 等. 有机滴灌肥对酿酒葡萄园土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 61-67.
- [19] YOON T K, NOH N J, HAN S, et al. Soil moisture effects on leaf litter decomposition and soil carbon dioxide efflux in wetland and upland forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1804-1816.
- [20] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465-473.
- [21] 钱虹宇, 周宏鑫, 罗原骏, 等. 土壤活性有机碳及碳库管理指数对高寒湿地退化的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2273-2282.
- [22] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 等. 桂北喀斯特山区不同植被类型土壤碳库管理指数的变化特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 422-433.
- [23] 张鹏, 钟川, 周泉, 等. 不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(8): 1163-1171.
- [24] 薛蕙, 刘国彬, 潘彦平, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(4): 1458-1464.
- [25] 田幼华, 吕光辉, 杨晓东, 等. 水盐胁迫对干旱区植物根际土壤酶活性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 158-163.
- [26] 高丽敏, 苏晶, 田倩, 等. 施氮对不同水分条件下紫花苜蓿氮素吸收及根系固氮酶活性的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(3): 130-136.
- [27] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 毛茛草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 5980-5986.
- [28] 杨雪艳, 蒋代华, 杨钙仁, 等. 甘蔗水肥一体化种植对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 889-896.
- [29] 崔东, 邓霞, 刘影, 等. 镰叶锦鸡儿湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指数的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 195-201.
- [30] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 等. 施用生物有机肥对黄瓜连作土壤有机碳库和酶活性的持续影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3147-3154.
- [31] 张英英. 不同耕作措施下旱作农田土壤活性有机碳组分与酶活性关系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.

【责任编辑 李晓卉】