

王雨晴,和江鹏,乔赵崇,等. 碳水耦合作用对土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(5):199-204.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.05.032

碳水耦合作用对土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响

王雨晴,和江鹏,乔赵崇,赵海超,黄智鸿,卢海博

(河北北方学院/河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室,河北张家口 075000)

摘要:为了研究碳水耦合作用对土壤活性有机碳(LOC)组分及碳库管理指数的影响,通过有机碳含量高(H,4.0%)、中(M,2.0%)、低(L,0.5%)3个水平和含水量高(70%~80%)、中(50%~60%)、低(30%~40%)3个水平,进行室内裂区设计模拟培养试验,分析其活性有机碳含量和碳库指数的变化。结果表明:碳水耦合条件下总活性有机碳(TLOC)含量在16.79~20.36 mg/kg之间,在高碳条件下占比最低,随着土壤水分的增加呈上升趋势,随着土壤有机碳(SOC)含量的增加而下降;高活性有机碳(H-LOC)含量在0.21~1.44 g/kg之间,在高碳低水条件下占比最高,随土壤水分和SOC含量的增加均呈上升趋势;中活性有机碳(M-LOC)含量在2.71~5.18 g/kg之间,随土壤水分的增加而上升,随SOC含量增加而下降。随着培养时间的延长,土壤TLOC含量和低活性有机碳(L-LOC)含量均呈先升后降趋势,土壤M-LOC含量在低碳高水处理呈波动式上升趋势,其他处理均呈波动式下降趋势,H-LOC含量在高碳条件下呈下降趋势,其他处理呈上升趋势。H-LOC的碳库管理指数(CPMI)在18.02~264.28之间,中水低碳条件下最高,低水中碳条件下最低;M-LOC的CPMI在25.43~206.35之间,中水低碳条件下最高,低水中碳条件下最低。

关键词:碳水耦合;土壤;活性有机碳;碳库管理指数

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)05-0199-06

碳、水循环是能量循环的核心,两者不是彼此孤立而是密切联系的生态学过程,其间耦合关系的研究是碳水管理的重点之一^[1]。土壤是陆地上最大的有机碳库^[2],土壤有机碳(soil organic carbon,简称SOC)是生物生长的养分源泉和微生物的能量来源^[3]。总有机碳(total organic carbon,简称TOC)含量不能表征土壤质量提高或降低的程度^[4],其含量是有机化合物输入和输出间循环平衡的结果。活性有机碳是含碳的化学组分,在TOC中占比小,但可快速降解并参与土壤养分循环,对碳输入高度响应,被称为SOC变化的敏感指标^[5],通常用易氧化有机碳(labile organic carbon,简称LOC)、微生物量碳(microbial biomass carbon,简称MBC)、颗

粒有机碳(particle organic carbon,简称POC)和溶解性有机碳(dissolved organic carbon,简称DOC)等的含量表示。Logninow等根据不同浓度高锰酸钾(33、167、333 mmol/L)氧化的有机碳含量,将其分成高、中、低3种级别^[6]。根据土壤有机碳的不同活性,Blair等提出土壤碳库管理指数(carbon pool management index,简称CPMI),其不仅是评价LOC的指标还是引起SOC含量变化的重要依据,有助于土壤质量的改善^[7-11]。水分是植物生长的必需要素,土壤水是水资源相互转化的纽带,在形成、转化与消耗中不可缺少,能被植物直接吸收利用^[12]。前人大多是将碳水耦合分开研究,其对土壤质量影响的研究相对较少^[13]。本研究以碳水耦合作用为研究对象,采用室内模拟方法,分析SOC组分和CPMI变化,以期为提高土壤肥力做出理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料处理

1.1.1 不同有机碳含量土壤培肥试验 试验在2019年5—11月进行,土壤类型为沙壤土,选择有机碳含量14.7%、氮(N)含量0.42%、磷(P₂O₅)含

收稿日期:2021-05-04

基金项目:河北省教育厅重大项目(编号:ZD2019097);河北省现代农业产业技术体系(编号:HBCT2018020203);河北北方学院博士基金(编号:12995543)。

作者简介:王雨晴(1997—),女,河北承德人,硕士研究生,主要从事农业资源利用研究。E-mail:3542354349@qq.com。

通信作者:赵海超,博士,副教授,主要从事生态学研究。E-mail:haichaozhao19@163.com。

量 0.22% 的腐熟牛粪堆肥,设计不同有机肥施用量使土壤有机碳含量分别为 0.5% (低碳)、2.0% (中碳)、4.0% (高碳),每个处理 3 次重复,在温室培育 6 个月,获得含有不同有机碳含量的土壤^[14]。

1.1.2 碳水耦合试验 选择“1.1.1”节中获得的土

壤进行碳水耦合室内培养,按土壤含水量 30% ~ 40%、50% ~ 60%、70% ~ 80% 等 3 个梯度培养 6 个月,间隔 15 d 称质量法补充水分,使水分梯度一致,用风干后的土壤测定 SOC 组分,以低碳低水处理为参照计算土壤碳库管理指数(表 1)。

表 1 供试土壤碳水耦合室内培养试验设计

指标	处理								
	低碳低水	低碳中水	低碳高水	中碳低水	中碳中水	中碳高水	高碳低水	高碳中水	高碳高水
含水量(%)	30~40	50~60	70~80	30~40	50~60	70~80	30~40	50~60	70~80
有机碳含量(%)	0.50±0.01	0.50±0.01	0.50±0.01	2.00±0.02	2.00±0.02	2.00±0.02	4.00±0.02	4.00±0.02	4.00±0.02

1.2 样品分析方法

LOC 用 KMnO_4 氧化法^[15]测定:称取 0.015 g 土样(碳含量 ≈ 15 mg)于 100 mL 离心管中,加入 25 mL KMnO_4 ^[9],以 250 r/min 振荡 1 h,然后在 2 000 r/min 下离心 5 min,取上清液用去离子水按 1:250 稀释^[9],在 565 nm 下测定吸光度,通过计算空白与土壤样品的吸光率之差算出 KMnO_4 浓度的变化,得出活性有机碳含量(1 mmol/L KMnO_4 消耗 9 mg 碳)。选择的 KMnO_4 浓度分别为 33、167、333 mmol/L,即高活性有机碳^[3](highly labile organic carbon,简称 H-LOC)、中活性有机碳^[3](moderately labile organic carbon,简称 M-LOC)、低活性有机碳(lowly labile organic carbon,简称 L-LOC)。能被 33 mmol/L KMnO_4 氧化的有机碳称为 H-LOC^[3];能被 167 mmol/L KMnO_4 氧化且不能被 33 mmol/L KMnO_4 氧化的有机碳称为 M-LOC^[3];能被 333 mmol/L KMnO_4 氧化且不能被 167 mmol/L KMnO_4 氧化的有机碳称为 L-LOC^[3];能被 333 mmol/L KMnO_4 氧化的为总活性有机碳(total labile organic carbon,简称 TLOC),不能被 333 mmol/L KMnO_4 氧化的有机碳称为非活性有机碳(non-labile organic carbon,简称 N-LOC)^[3]。

土壤碳库管理指数计算如下^[16]:

碳库指数^[15](CPI) = 样品总有机碳含量(mg/kg)/参考样品总有机碳含量(mg/kg)。

碳库活度^[15](A) = 活性有机碳含量(g/kg)/非活性有机碳含量(g/kg)。

碳库活度指数(AI) = 碳库活度/参考土壤碳库活度^[15]。

根据上述参数可得碳库管理指数(CPMI) = $\text{CPI} \times \text{AI} \times 100$ ^[3]。

溶解性总氮(total dissolved nitrogen,简称 TDN)

含量用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[17]测定;溶解性总磷(total dissolved phosphorus,简称 TDP)含量采用过硫酸钾氧化法^[9]测定;土壤有机碳(soil organic matter,简称 SOC)含量用重铬酸钾容量法-外加热^[3]测定;无机磷(inorganic phosphorus,简称 IP)含量测定采用钼锑分光光度法^[3];氨氮(ammonia nitrogen,简称 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量用纳氏比色法^[3]测定;土壤微生物量碳、微生物量氮(microbial biomass nitrogen,简称 MBN)、微生物量磷(microbial biomass phosphorus,简称 MBP)含量的测定均采用三氯甲烷熏蒸浸提法^[16]测定。

2 结果与分析

2.1 碳水耦合条件对土壤活性有机碳组分含量变化的影响

如图 1 所示,碳水耦合作用下土壤 TOC 含量在 19.21 ~ 43.44 g/kg 之间,TLOC 含量在 16.79 ~ 20.36 g/kg 之间,在高碳(SOC 含量 4.0%)条件下占比最高,在低碳(SOC 含量 0.5%)条件下占比最低;土壤 H-LOC 含量在 0.21 ~ 1.44 g/kg 之间,占 SOC 含量的 1.08% ~ 3.43%,在高碳低水(相对含水率 30% ~ 40%)条件下占比最高,在低碳高水(相对含水率 70% ~ 80%)条件下占比最低;土壤 M-LOC 含量在 2.71 ~ 5.18 g/kg 之间,占 SOC 含量的 9.86% ~ 15.94%,在高碳中水(相对含水率 50% ~ 60%)条件下占比最高,在中碳(SOC 含量 2.0%)低水条件下占比最低;土壤 L-LOC 含量在 16.49 ~ 18.92 g/kg 之间,占 SOC 含量的 31.41% ~ 78.71%,在高碳低水条件下占比最高,在中碳低水条件下占比最低;土壤 N-LOC 含量在 1.46 ~ 27.60 g/kg 之间,占 SOC 含量的 5.35% ~ 56.26%,在高碳高水条件下占比最高,在低碳中水条件下占

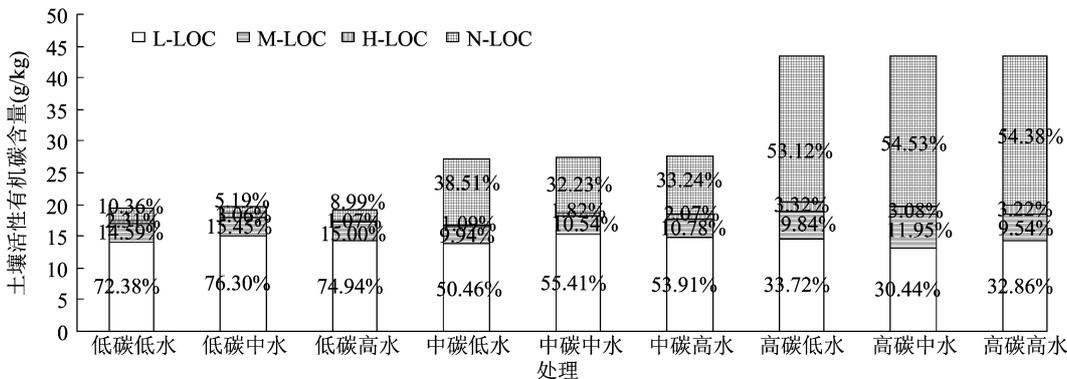
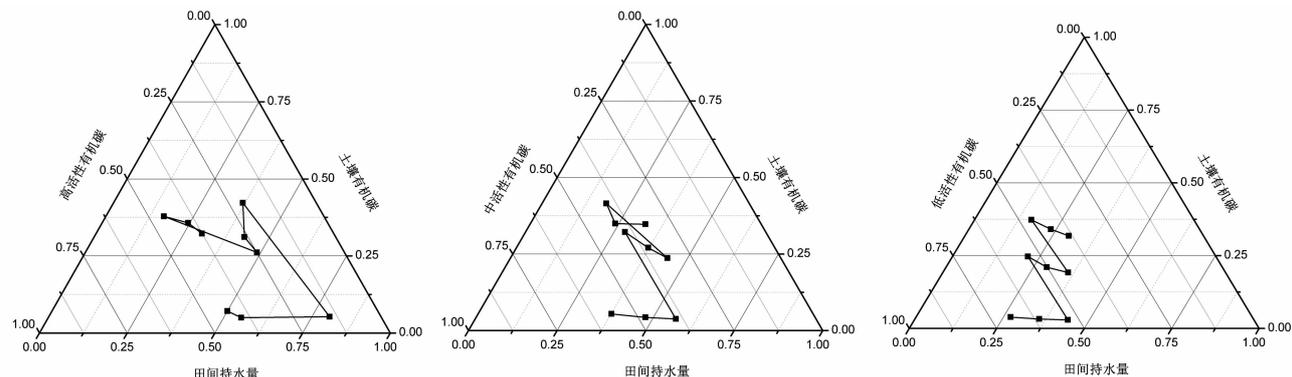


图1 碳水耦合条件下土壤活性有机碳组分含量变化

比最低。可见随碳含量上升,土壤 L-LOC 含量占 SOC 含量的比例下降,土壤 N-LOC 含量占 SOC 含量比例上升。随着土壤水分含量的增加,土壤活性有机碳组分比例上升。

M-LOC 含量随着田间持水量及土壤有机碳含量的上升而下降;L-LOC 含量随着田间持水量及土壤有机碳含量的上升而上升。可见碳水不仅单方面影响而且共同影响着土壤活性有机碳各组分的变化。

如图 2 所示,H-LOC 含量随着田间持水量的上升而下降,随着土壤有机碳含量的上升而上升;



右侧斜边为不同活性有机碳组分含量(共 8 个单元格, 低活性有机碳每个单元格为 2.00 g/kg, 中活性有机碳每个单元格为 0.75 g/kg, 高活性有机碳每个单元格为 0.20 g/kg); 左侧斜边为土壤有机碳含量(共 8 个单元格, 每个单元格为 12.50 g/kg); 底边为田间持水量(共 8 个单元格, 每个单元格为 12.50%)

图2 碳水耦合条件对土壤 LOC 含量的动态变化

2.2 碳水耦合条件对土壤活性有机碳含量动态变化的影响

如图 3 所示,在碳水耦合条件下土壤 TLOC 含量随着培养时间的延长高碳中水处理呈先降后升再降的变化趋势,高碳高水处理呈先升后降再升的变化趋势,低碳中水呈先降后升再降趋势,其他处理均呈先升后降的趋势,在 135 d 时达到最高值。土壤 L-LOC 含量随着培养时间的延长各处理均呈先升后降的趋势,高碳低水处理在 62 d 达到最高值,高碳高水处理在 175 d 达到最高值,其他处理均在 135 d 达到最高值,175 d 时在高、中碳条件下随着水分的降低呈下降趋势。M-LOC 含量随着培养时间的延长,低碳高水处理呈波动式上升趋势,其他处理均呈波动式下降趋势;175 d 时低碳高水处

理 M-LOC 含量最高,中碳低水 M-LOC 含量最低。高碳处理土壤 H-LOC 含量随着培养时间的延长,呈波动式下降趋势,其他处理均呈波动式上升趋势;175 d H-LOC 含量低碳中水最高,低碳高水处理最低。总体来看,在 TOC 含量较高的条件下土壤中活性有机碳含量较高,特别是 H-LOC 含量明显增高,作为土壤微生物的主要能量来源,在培养过程中被微生物降解,而在中、低 TOC 含量的条件下,土壤中微生物能够降解 TOC 向 TLOC 转化,随着培养时间的延长 TLOC 进一步向 H-LOC 转化,使 H-LOC 含量在培养后期呈上升趋势。高水条件下微生物活性强对活性有机碳含量影响较大,低水条件对活性有机碳影响较弱,因此高碳低水在 62 d 时 TLOC 和 L-LOC 含量出现峰值。

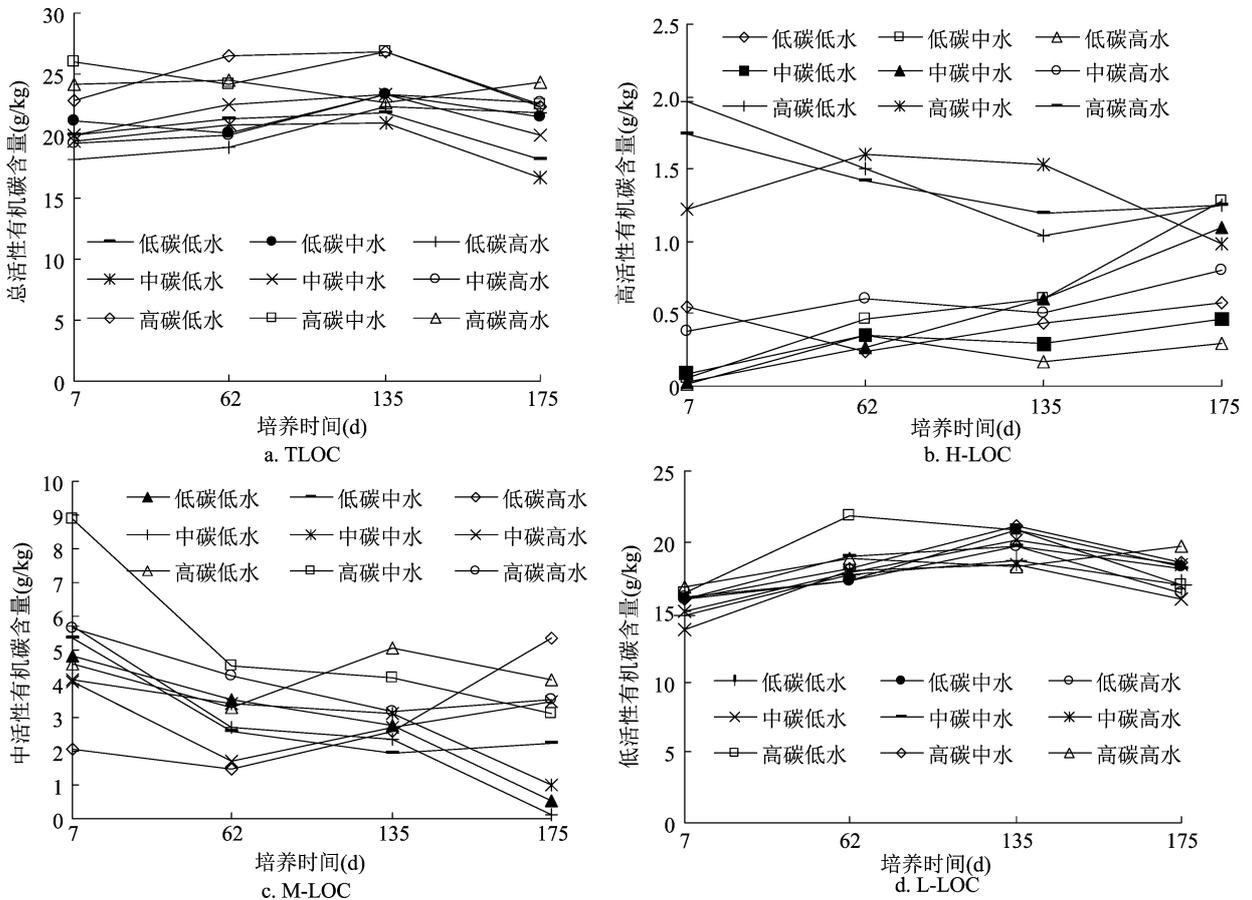


图3 碳水耦合条件下土壤活性有机碳含量的动态变化

2.3 碳水耦合条件对土壤碳库管理指数的影响

碳库管理指数(CPMI)、碳库活度指数(AI)、碳库活度(A)及碳库指数(CPI)相关联,AI和CPMI是土壤碳库变化的量化依据。如表2所示,低碳低水、低碳中水、低碳高水总活性有机碳碳库管理指数分别为100.00、209.83、118.75,中活性有机碳碳库管理指数分别为100.00、206.35、115.64,高活性有机碳碳库管理指数分别为100.00、264.28、

53.38。以上结果表明随着水分含量的增加土壤碳库管理指数降低,低碳中水处理有利于提高碳库管理指数^[3]。各含水量条件下中碳处理高活性有机碳碳库管理指数分别为18.02、35.96、39.73,结果显示随着水分含量增加碳库管理指数明显上升。TLOC的CPMI在20.40~209.83之间,中碳、高碳的CPMI均低于100。土壤高活性有机碳的CPMI在18.02~264.28之间,低碳中水的CPMI最高,中碳低

表2 碳水耦合条件下碳库指数、碳库活度、活度指数、碳库管理指数

处理	CPI	总活性有机碳			中活性有机碳			高活性有机碳		
		A	AI	CPMI	A	AI	CPMI	A	AI	CPMI
低碳低水	1.00	8.43	1.00	100.00	1.44	1.00	100.00	0.22	1.00	100.00
低碳中水	1.00	17.68	2.10	209.83	2.98	2.06	206.35	0.59	2.64	264.28
低碳高水	1.00	10.01	1.19	118.75	1.67	1.16	115.64	0.12	0.53	53.38
中碳低水	1.42	1.57	0.19	26.45	0.26	0.18	25.43	0.03	0.13	18.02
中碳中水	1.42	2.05	0.24	34.51	0.33	0.23	32.21	0.06	0.25	35.96
中碳高水	1.42	1.95	0.23	32.81	0.32	0.22	31.93	0.06	0.28	39.73
高碳低水	2.21	0.82	0.10	21.51	0.19	0.13	28.38	0.06	0.28	61.93
高碳中水	2.21	0.78	0.09	20.40	0.22	0.15	33.59	0.06	0.25	56.00
高碳高水	2.21	0.78	0.09	20.45	0.18	0.12	26.89	0.06	0.27	58.73

水的 CPMI 最低,且仅低碳中水的 CPMI 大于 100。土壤中活性有机碳的 CPMI 在 25.43 ~ 206.35 之间,低碳中水的 CPMI 最高,中碳低水的 CPMI 最低。可见与低碳低水相比,低碳中水能提高 CPMI,低碳高水只能提高总活性有机碳和中活性有机碳碳库管理指数。主要是因为低碳环境下 TLOC 占比大,进而提高 CPMI,此外 TLOC 占比小,则 CPMI 降低。CPMI 提高表明了土壤质量的改善、土壤肥力的提高以及土壤利用效率的增加,能更好地反映土壤问题。

3 讨论

3.1 碳水耦合对土壤活性有机碳组分的影响

土壤有机碳是植物、微生物生命活动的必需要素,SOC 是陆地上储藏的最大有机碳库^[3],TLOC 在 SOC 中占比很小,但极大地影响着土壤养分的转化

供应。土壤有机碳的总量与活性受土壤中输入的不同碳水耦合强度所影响,从而影响着土壤 TLOC。如表 3 所示,低活性有机碳含量与 MBN 呈极显著正相关关系,与 SOC 含量具有显著相关关系^[3],中活性有机碳含量与含水量呈显著正相关关系,高活性有机碳与 MBN、SOC 含量呈显著正相关关系,结果表明随有机碳和水分含量的增加,能加剧养分转化,活性有机碳含量升高,与乔赵崇的研究结果^[3]一致。较之低碳,高、中碳施肥量高,促使微生物量增多,从而土壤碳库总量升高^[3],进而导致土壤活性有机碳含量较高^[17]。高水、中水环境与低水环境相比,含水量增加,土壤营养盐加速溶解^[3],微生物量增多导致土壤活性有机碳含量较高^[18]。在农业生产上应有有机无机肥配施^[19],并适量灌溉,贫瘠土壤应充分灌溉并增施有机肥;若要肥沃土壤应保持高碳中水环境,这也能提高土壤的保肥能力。

表 3 土壤活性有机碳含量与碳库管理指数、土壤理化性状的相关性

指标	相关系数								
	MBC 含量	MBN 含量	MBP 含量	含水量	SOC 含量	TDP 含量	无机磷含量	TDN 含量	氮氮含量
低活性有机碳含量	0.634 *	0.908 **	0.411	0.651 *	0.650 *	0.638 *	0.556	0.552	0.720 *
中活性有机碳含量	0.515	0.358	0.154	0.654 *	0.234	0.367	0.378	0.131	0.396
高活性有机碳含量	0.310	0.761 *	0.506	0.018	0.636 *	0.577	0.570	0.544	0.283

注: **、* 分别表示在 0.01、0.05 水平上显著相关。下表同。

3.2 碳水耦合对土壤碳库管理指数的影响

碳库管理指数是反映土壤供肥能力的重要指标。如表 4 所示,总、中活性有机碳的 CPMI 与 SOC、TDP、无机磷、TDN 含量呈显著负相关关系,其原因可能是沙壤土有大孔隙、营养成分转化快^[3],CPMI 增加,加速营养物质转化,导致土壤养分降低,从而土壤中的无机磷、TN 含量下降^[20]。碳水耦合下 TLOC 和 CPMI 的研究表明,施用有机肥结合灌溉可使 SOC 含量上升,但施肥会使 CPMI 呈下降趋势,这与沈宏等的研究结果^[21-22]不同。沙壤土保水保肥能力差,增施有机肥能有效降低土壤孔隙度及

养分的转化速率,降低土壤的 CPMI。水分是增强微生物活性的条件之一,促进有机碳向活性有机碳转化,可使地力肥沃、土壤保蓄力增强。乔赵崇研究表明,碳水耦合能改善土壤质量,故高碳高水 SOC 及 TLOC 含量要高于低碳和中碳,低碳 CPMI 高于中碳、高碳。低碳低水条件下 SOC、TLOC 含量均低于中碳和高碳^[3]。随着土壤经济效益的升高,有机肥的投入成反比,对于低碳低水的沙壤,应增施有机肥、多次少量灌水,降低土壤 CPMI,防止土壤养分及水分流失,有机与无机肥配合施用,提高土壤碳库水平^[23]。

表 4 土壤活性有机碳和碳库管理指数与土壤理化性状的相关性

指标	相关系数								
	MBC 含量	MBN 含量	MBP 含量	含水量	SOC 含量	TDP 含量	无机磷含量	TDN 含量	氮氮含量
总活性有机碳 CPMI	-0.184	-0.055	-0.547	0.053	-0.791 *	-0.678 *	-0.683 *	-0.724 *	-0.422
中活性有机碳 CPMI	-0.154	-0.010	-0.499	0.048	-0.752 *	-0.637 *	-0.641 *	-0.693 *	-0.400
高活性有机碳 CPMI	-0.070	0.253	-0.202	-0.055	-0.453	-0.337	-0.348	-0.408	-0.290

4 结论

土壤高活性有机碳含量在 0.21 ~ 1.44 g/kg 之间, 占土壤有机碳含量 1.08% ~ 3.43%; 总活性有机碳含量在 16.79 ~ 20.36 mg/kg 之间, 在高碳(SOC, 4.00%)条件下有机碳含量占比最低。在碳水耦合条件下随着培养时间的延长, 土壤活性有机碳和低活性有机碳含量大体上均呈先升后降趋势; 土壤中活性有机碳含量在低碳高水处理呈波动式上升趋势, 其他处理均呈波动式下降趋势, 培养 135 d 时出现最高值; 高活性有机碳含量在高碳条件下呈波动式下降趋势, 其他处理呈波动式上升趋势。高水条件下微生物活性强对活性有机碳含量影响较大, 因此高碳低水在 62 d 时活性有机碳和低活性有机碳含量出现峰值。

不同碳水耦合条件下土壤活性有机碳的 CPMI 在 20.40 ~ 209.83 之间, 低碳中水最高, 高碳中水最低; 土壤高活性有机碳的 CPMI 在 18.02 ~ 264.28 之间, 低碳中水最高, 中碳低水最低; 土壤中活性有机碳的 CPMI 在 25.43 ~ 206.35 之间, 低碳中水的 CPMI 最高, 中碳低水 CPMI 最低。高碳中水条件有利于提高土壤供肥能力, 田间应根据土壤有机碳含量调控水分灌溉量, 从而提高土壤肥力。

参考文献:

[1] 马龙龙, 杜灵通, 丹 杨, 等. 基于 CiteSpace 的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5441 - 5449.

[2] 刘 楠, 韩进斌, 赵建儒, 等. 五台山高山林线典型植被土壤有机碳特征[J]. 土壤, 2019, 51(5): 970 - 978.

[3] 乔赵崇. 农艺措施对冀西北坝上土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[D]. 张家口: 河北北方学院, 2020.

[4] 曹 培, 徐 莹, 朱 杰, 等. 不同种植模式对稻田土壤活性有机碳组分及产量的短期影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2788 - 2798.

[5] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 252 - 259.

[6] Logninow W, Wisniewski W, Gonet S S, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20: 47 - 52.

[7] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459 - 1466.

[8] 李肖肖. 旱改水整治对农田土壤环境的短期影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.

[9] 乔赵崇, 王炯琪, 赵海超, 等. 种植模式对冀西北坝上土壤活性有机质和碳库管理指数的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1139 - 1146.

[10] 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.

[11] Cavalcante D M, de Castro M F, Chaves M T L, et al. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105668.

[12] 张军红, 吴 波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J]. 中国水土保持, 2012(2): 40 - 43.

[13] 刘 帅. 土壤氨气及温室气体排放和有机碳库对农业管理措施的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

[14] 李瑞鑫. 不同农艺措施对冀北坝上土壤溶解性有机质组分特征的影响[D]. 张家口: 河北北方学院, 2019.

[15] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155: 399 - 402.

[16] 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.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25 - 96.

[18] 胡雪寒, 刘 娟, 姜培坤, 等. 亚热带森林转换对不同粒径土壤有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1485 - 1493.

[19] 张秀芝, 高洪军, 彭 畅, 等. 等氮量投入下有机无机肥配施对玉米产量及氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 123 - 127.

[20] 徐明岗, 于 荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459 - 465.

[21] 沈 宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 206.

[22] 王 晶, 朱 平, 张 男, 等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 394 - 397.

[23] 潘丹丹. 土壤生态系统对典型有机肥的响应及机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.