

长期施肥对潮土不同层次活性有机质及碳库管理指数的影响

张玉军^{1,2}, 黄绍敏³, 李斌⁴, 龙潜¹, 姜桂英¹, 申凤敏¹, 刘世亮¹

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 2. 郑州市城市园林科学研究所, 郑州 450051;

3. 河南农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 4. 河南省农业厅中药材生产技术服务中心, 郑州 450008)

摘要: 为探索长期不同施肥下潮土不同土层活性有机质和碳库管理指数变化特征, 选取不施肥对照(CK)、单施氮磷钾肥(NPK)、NPK 配施有机肥(NPKM)和 NPK 配施秸秆还田(NPKS)4 个典型施肥处理, 测定并分析土壤高、中、低活性有机质含量以及碳库管理指数(CMI)变化特征。结果表明: 各处理土壤有机质含量均随土层加深而降低, 且处理间差异随土层深度缩小。施肥处理相对不施肥对照(CK)均明显提升了不同土层的有机质含量, 以 NPKM 处理最高, 达到 13.91~33.55 g/kg。各处理以非活性和低活性有机质为主, 且其比例随着土层加深而增加, 其中 CK 处理比例最高, 分别为 35.6%~56.6% 和 17.7%~50.7%。施肥处理对土壤 CMI 均有提高, 在 0—40 cm 土层, NPKS 的高活性 CMI 最高, 分别为 149.54, 147.01, 237.65; 而在 40—60 cm 土层, 以 NPKM 处理的高、中活性 CMI 最高, 达到 237.65, 537.67。综上所述, 各处理土壤有机质和活性有机质含量均随土层加深而降低, 且处理间差异随土层深度缩小; 氮磷钾配施有机肥提升总有机质及活性有机质处理效果最佳。在上层土层(0—40 cm)氮磷钾配施秸秆有助于提升高、中活性有机质的碳库管理指数; 而在下层土层(40—60 cm)则以氮磷钾配施有机肥最优。整体来看, NPK 配施有机肥(NPKM)对土壤的肥力提升效果最好, NPK 配施秸秆还田(NPKS)次之。

关键词: 长期施肥; 不同土层; 活性有机质; 碳库管理指数

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0160-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.024

Effects of Long-term Fertilization on the Labile Organic Carbon and Carbon Pool Management Index at Different Layers in Fluvo-aquic Soil

ZHANG Yujun^{1,2}, HUANG Shaomin³, LI Bin⁴, LONG Qian¹,

JIANG Guiying¹, SHEN Fengmin¹, LIU Shiliang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002;

2. Zhengzhou Institute of Urban Landscape and Architecture, Zhengzhou 450051; 3. Institute of Plant Nutrition,

Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002; 4. Chinese Medicine

Production Technology Service Center, Agriculture Department of Henan Province, Zhengzhou 450008)

Abstract: Based on a long-term experiment, the effects of different fertilization on labile organic matter (LOM) and carbon management index (CMI) in different soil layers were explored. Four typical fertilization treatments were selected as: (1) No fertilizer (CK); (2) mineral nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK); (3) NPK plus manure (NPKM); (4) NPK plus straw (NPKS). The highly, moderately and lowly LOM and CMI were measured and analyzed. The results showed that the soil organic matter (SOM) content and its difference among treatments were decreased with increment of soil depth. Compared with CK, the SOM content under the treatments with fertilizer was significantly higher, and the highest one was under NPKM with 13.91 ~ 33.55 g/kg. The Non-LOM and lowly LOM accounted for the major part of the total SOM, and the proportion increased with depth. CK showed the highest proportion with 35.6% ~ 56.6% and 17.7% ~ 50.7%, respectively. The CMI increased under the fertilization treatments, and varied among soil layers. At 0—40 cm, the CMI of highly and moderately LOM under NPKS was obviously higher than that under the other treatments as 149.54, 147.01, 237.65, respectively. The CMI under NPKM was the highest at 40—60 cm as 237.65, 537.67, respectively. In sum, the SOM and LOM content and their difference among treatments decreased with increment of soil depth. The fertilization improved SOM and LOM

收稿日期: 2018-11-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300803); 国家自然科学基金项目(41401327); 中国农业科学院开放基金项目(2015Y)

第一作者: 张玉军(1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事城市土壤质量评价与绿地生态修复研究。E-mail: 1041101979@qq.com

通信作者: 姜桂英(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤肥力与营养调控研究。E-mail: jgy9090@126.com

刘世亮(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤肥力与营养调控研究。E-mail: shlliu70@163.com

content, and the optimum one was NPKM. The CMI of highly and moderately LOM was higher under NPKS at upper layer (0—40 cm), and which was higher under NPKM at below layer (40—60 cm). Generally, the soil fertility was improved under NPKM, and followed by NPKS.

Keywords: long-term fertilization; different soil layers; labile organic matter; carbon management index

土壤有机质对表征土壤肥力特征有着重要的意义,土壤有机质是矿化分解和合成的平衡结果,土壤有机质的变化很难在短时间内表现出来,但是,土壤有机质包含不同的组分,而且不同组分的活性不同,对外界的反应差异较大,所以有学者^[1-3]将土壤有机质区分为全量和活性2个部分来研究。其中土壤活性有机质受土壤微生物活动影响强烈,是土壤微生物活动能源,也是供应植物养分最直接的组分^[4]。土壤活性有机质作为表征土壤物质循环特征、土壤潜在生产力以及土壤管理措施引起的土壤有机质变化的早期指标^[5]。Loginow等^[6]通过高锰酸钾的方法将土壤中易氧化有机质区分为高、中、低3种活性有机质,根据3种活性有机质含量变化来表征有机质有效组分的变化状况;Lefroy等^[2]和Blair等^[7]在此基础上进一步研究并提出了碳库管理指数的概念(carbon management index, CMI)。CMI由人为影响下土壤碳库指标和土壤碳库活度两方面的内容组成,能够更全面地反映外界条件变化对土壤有机质性质的影响^[8]。不同的施肥措施是土壤的有机质变化的主要因素,不同的有机物料对土壤的有机质含量以及碳库管理指数高低的影响不同,有机肥对提高土壤有机质有显著作用^[9-11]。已有研究^[12-13]表明,土壤肥力达到一定水平或有机质含量超过一定数量后,秸秆还田量与土壤有机质两者之间不完全呈正相关。邱莉萍等^[14]研究发现,不同的土地利用方式下,土壤有机质、3种活性有机质含量均随土层的加深而逐渐降低。大量的研究者对不同土壤类型、施肥模式、耕作方式下土壤有机碳活性及碳库管理指数做了深入的研究,但对潮土不同土层的长期施肥模式下土壤活性有机碳及碳库管理指数的研究少有报道。本研究以河南原阳潮土长期定位试验为依托,探讨不同施肥条件下,不同土层的土壤活性有机质的变化特征及对碳库管理指数的响应特征,为优化北方旱地潮土土壤培肥管理及生态系统碳库变化和相应的生态效应评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究以代表北方旱地的“国家肥力与肥力效益监测基地”河南原阳潮土长期定位试验为依托。试验地点位于原阳县河南省农业科学院河南现代农业开发基地(34°47' N, 113°40' E),属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,光照充足,年平均气温 14.5 °C,年均降水量 615 mm,年蒸发量 1 450 mm,年均日照时间 2 324 h。试验地土壤为潮土,成土母质为黄河冲积物。初始耕层(0—

20 cm)土壤理化性质为:土壤有机质(SOM)含量 10.1 g/kg,全氮含量 0.65 g/kg,碱解氮含量 76.6 mg/kg,全磷含量 0.64 g/kg,有效磷含量(P₂O₅) 7.7 mg/kg,全钾含量 16.9 g/kg,速效钾含量(K₂O) 65 mg/kg, pH 8.3。

1.2 试验设计

试验始于 1990 年,共设 11 个施肥处理,每个处理 3 次重复,随机排列,小区面积 43 m²。本研究选取其中 4 个典型处理:(1)不施肥对照(CK);(2)单施氮、磷、钾肥(NPK);(3)NPK 配施有机肥(NPKM);(4)NPK 配施秸秆还田(NPKS)。小麦季肥料用量为 N 165 kg/hm², P₂O₅ 82.5 kg/hm², K₂O 82.5 kg/hm²,氮肥按 60%基肥和 40%追肥施用,磷、钾肥均作基肥施用;玉米季肥料用量为 N 187.5 kg/hm², P₂O₅ 93.75 kg/hm², K₂O 93.75 kg/hm²。氮肥为尿素、磷肥为普通过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%左右),钾肥为氯化钾(K₂O 为 60%计算);NPK、NPKM 和 NPKS 处理为等氮量设置,其中,NPKM 处理无机氮:有机肥氮为 3:7,其有机肥施用量依当年有机肥含氮量和含水量计算得到,其中主要年份选择为牛粪,每年秋季小麦播种前底施。除 NPKS 处理,其他处理的作物秸秆在收获后移出。NPKS 处理的小麦和玉米秸秆均在收获后粉碎全部还田,并根据秸秆还田带进土壤氮素量差额部分用尿素补充。种植制度为小麦—玉米轮作。

1.3 样品采集与测定

2016 年 6 月小麦收获后采集 0—10, 10—20, 20—40, 40—60 cm 的不同土层土壤,每个小区按五点法采样获混合样品,土样风干后过筛(60 目)测定总有机碳和活性有机碳含量。

土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定。活性有机质测定方法和碳库管理指数计算方法均参考徐明岗等^[8]的方法。活性有机质的测定是选取 33, 167, 333 mmol/L KMnO₄ 提取土壤有机质,将有机质分区为 3 组,分别称其为高活性有机质(HLOM)、中活性有机质(MLOM)和低活性有机质(LLOM),不被 KMnO₄ 氧化的为非活性有机质(NLOM)。碳库管理指数(CMI)是用碳库指数(CPI)、碳库活度(L)和活度指数(LI)来计算,其具体公式为:

碳库指数(CPI) = 样品总有机质含量(g/kg) / 参照土壤总有机质含量(g/kg)

碳库活度(L) = 样品中的活性有机质(LOM) / 样品中的非活性有机质(NLOM)

活度指数(LI) = 样品的不稳定性(L) / 对照的不稳定性(L₀)

$$CMI = CPI \times LI \times 100$$

式中: CPI 为施肥措施对土壤有机质的影响,其参照土壤为对照处理土壤;L 为土壤碳的不稳定性;LI 为碳损失及其对稳定性的影响;CMI 为综合反映人为影响下土壤碳库指标和土壤碳库活度两方面对土壤有机质性质的影响。

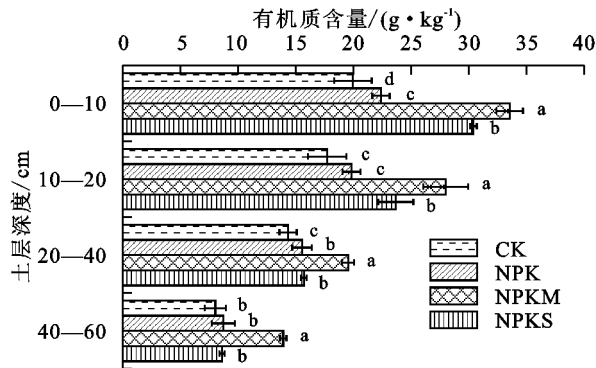
1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 DPS 7.05 软件进行数据统计与分析,LSD 法进行方差分析,采用 Origin 8.5 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤有机质含量的变化

由图 1 可知,土壤有机质含量总体随土层增加而降低。0—10 cm 土层,NPK、NPKM 和 NPKS 处理的有机质含量显著高于 CK 处理,以 NPKM 处理最高为 33.55 g/kg;10—20 cm 土层,NPKM 和 NPKS 有机质含量显著高于 CK 和 NPK 处理;20—40 cm 土层,NPKM 处理有机质含量最高,达到 19.54 g/kg,但 NPK 和 NPKS 处理间差异不显著;40—60 cm 土层,NPKM 处理的有机质含量显著高于其他处理,为 13.91 g/kg,而其他 3 个处理间差异不显著。总体上,土壤有机质含量总体随土层增加而降低,且处理间差异随土层深度而缩小;在不同土层中,均以 NPKM 处理有机质含量最高。



注:不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同处理土壤不同层次有机质含量

2.2 不同土层土壤活性有机质含量的变化

由图 2 可知,土壤活性有机质含量总体表现为高活性有机质(HLOM) < 中活性有机质(MLOM) < 低活性有机质(LLOM)。土壤的高活性有机质在不同土层呈现先增加后降低的趋势,其中 10—20 cm 的含量最高。在 0—10,10—20 cm,3 个施肥处理高活性有机质含量显著高于 CK,且它们之间差异不显著;其中 10—20 cm 中 NPKM 处理在数值上最高达 3.90 g/kg。20—40 cm 土层,NPKM 和 NPKS 处理间差异不显著,且均显著高于 CK 和 NPK 处理。40—60 cm 土层各处理高活性有机质含量均最低,但仍以 NPKM 显著高于其他处理,达到 0.96 g/kg。整体上,不同土层中 NPKM 处理对土壤高活性土壤有机质的提高效果最好。除 NPKM 处理的中

活性有机质随土层加深逐渐降低,其他 3 个处理均呈先升高后降低趋势。0—10 cm 土层,4 个处理间差异显著,且以 NPKM 处理含量最高,为 8.20 g/kg。10—20 cm 土层,NPKM 和 NPKS 显著高于 NPK 和 CK 处理,但二者间差异不显著,NPKS 处理数值略高,为 7.13 g/kg。20—40,40—60 cm 土层,NPKM 显著高于其他处理,分别为 4.94,2.89 g/kg,且 NPK 和 NPKS 处理差异不显著。总体来看,施肥处理对土壤中活性有机质的含量提升幅度较大,其中 NPKM 处理的提升效果最明显。低活性有机质含量随土层加深呈先降低后略升高趋势。0—10 cm 土层各处理低活性有机质含量最高,且处理间差异显著,其中 NPKM 处理显著高于其他处理,为 17.73 g/kg。10—20 cm 土层,则以 NPKM 和 NPKS 处理显著高于其他处理,且二者间差异不显著。20—40 cm 土层,NPKM 处理显著高于其他处理,为 7.22 g/kg,但 NPKS 与 NPK 处理差异不显著。40—60 cm 土层,各处理间差异与 10—20 cm 土层类似。总体来说,各处理低活性有机质含量在表层差异较大,随土层加深处理间差异在缩小,但均以施肥处理含量显著高于不施肥对照。

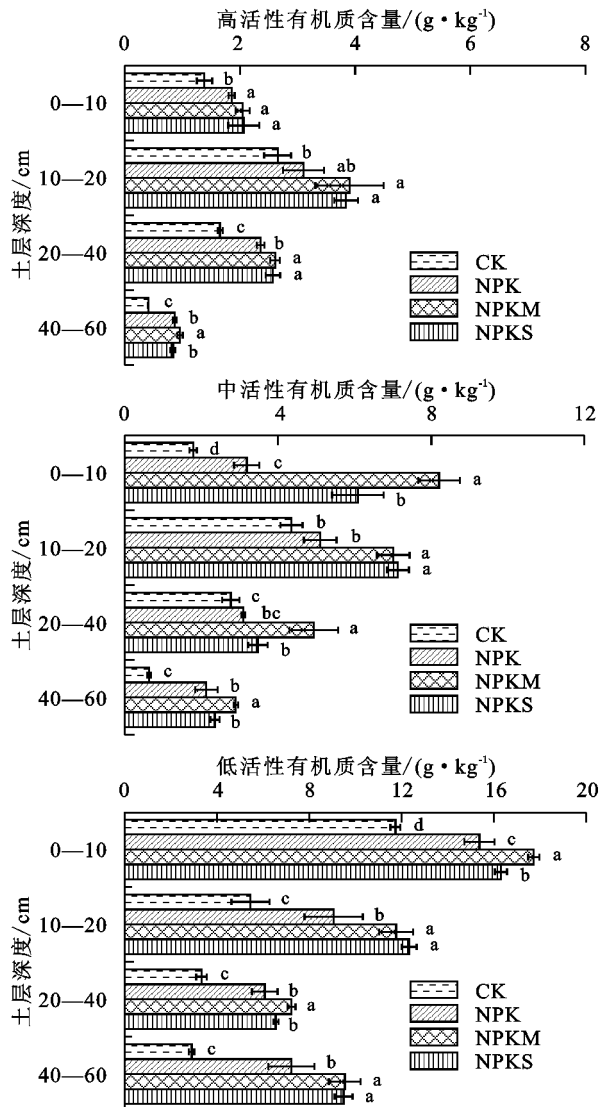


图 2 不同处理不同土层高活性、中活性和低活性有机质含量

2.3 不同土层的不同活性组分分布比例

由图3可知,整体来看,不同施肥处理的土壤有机质活性组分比例在不同土层分布有明显差异。在0—10 cm土层中,各处理以低活性有机质为主,其中NPK处理的低活性有机质比例最高,达到56.0%。NPKM和NPKS处理低活性有机质相对其他2个处理较低,中活性有机质比例增加,达到18.7%和15.8%,施有机肥处理土壤活性有机质部分由低活性向中活性进行转变。在10—20 cm土层中,土壤非活性有机质含量相对增加,

且以CK处理比例最高,达到49.6%。各处理低活性有机质部分相对0—10 cm均降低。在20—40 cm土层中,各处理非活性有机质比例进一步增加,仍以CK处理比例最高,到达58.7%,其他处理非活性有机质比例相差不大。但在40—60 cm土层,除CK处理外,其他处理的非活性有机质比例下降,而低活性有机质比例上升,以NPK处理的低活性有机质比例最高,达到61.7%。总体上,在0—40 cm,随着土层加深非活性有机质和低活性有机质比例在增加,其中以不施肥对照比例最高。

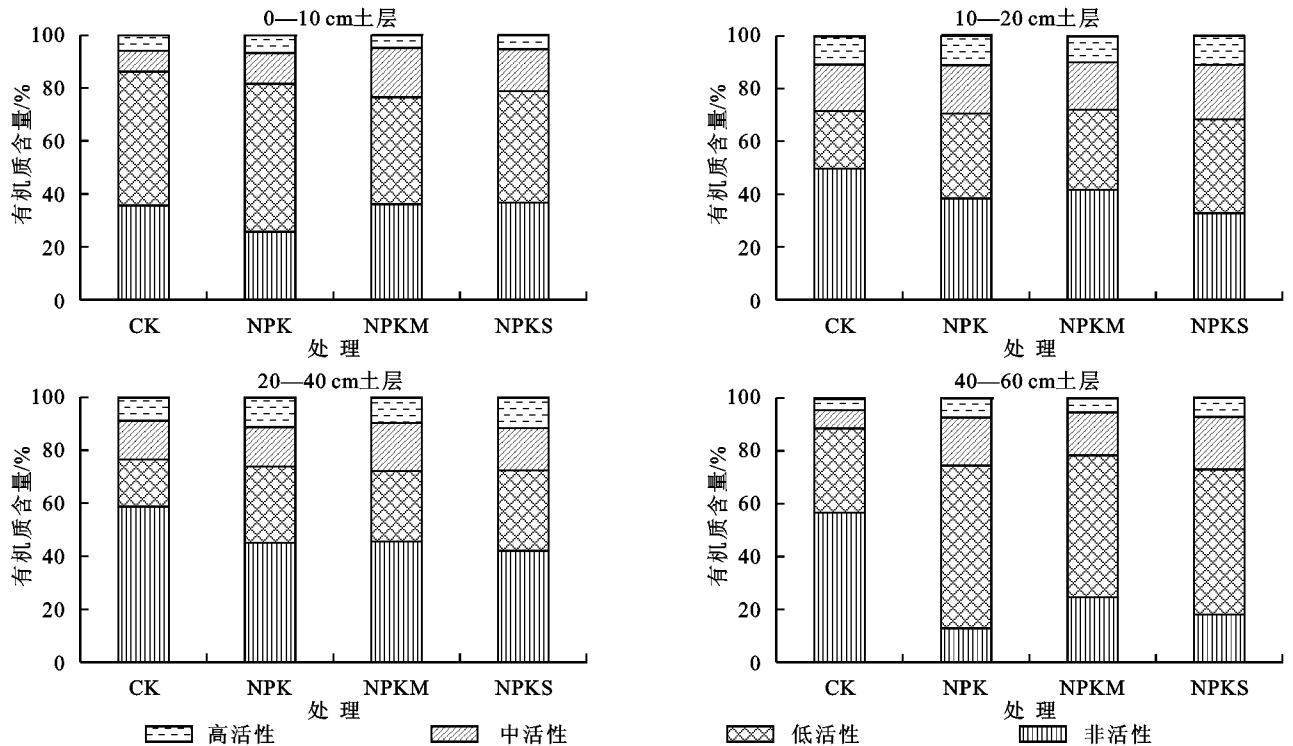


图3 不同处理不同土层活性有机质组分比例

2.4 不同施肥措施对不同土层土壤碳库管理指数的影响

从表1可以看出,在不同土层,相对CK处理,其他处理的碳库指数(CPI)均大于1,且均以NPKM处理的CPI数值最高。说明施肥有利于提升土壤不同层次有机质含量,且以有机无机配施效果最佳。

高、中、低活性有机质碳库管理指数(CMI),除0—10 cm土层,其他土层均呈现为低活性>中活性>高活性。各处理高活性有机质CMI基本随土层加深而增大,在0—40 cm土层均以NPKM和NPKS处理明显高于NPK和CK处理,而在40—60 cm土层,NPKM处理最高,为237.65。各处理中活性有机质CMI随土层基本呈先降低后升高,在40—60 cm土层CMI最高。除10—20 cm土层外,其他土层,均以NPKM的中活性有机质CMI最高,其中以0—10 cm最高,达到554.65。低活性有机质CMI与高活性有机质CMI类似,各处理随土层深度加深而增高,但不同土层处理间变化各异。在0—10,40—60 cm土层,NPK处理低活性有机质CMI明

显高于其他处理,分别为172.34和932.25;10—20 cm土层则以NPKS最高,20—40 cm土层NPKM和NPKS高于NPK处理。整体来看,在高、中、低活性有机质CMI中,表现为低活性>高活性>中活性。40—60 cm土层中,高、中活性有机质的CMI均为NPKM处理的最大,分别达到237.65和537.67,低活性有机质的CMI为NPK处理最大,为932.25。

3 讨论

土壤有机质受施肥影响明显,本研究发现,不同的施肥措施对土壤的有机质均有不同程度的提高,NPK配施有机肥(NPKM)和NPK配施秸秆还田(NPKS)对不同土层的有机质提升效果明显,随着土层的加深,NPKM的效果显著大于NPKS田的效果。大量研究^[15-16]也证明,施有机肥及有机无机配施对土壤有机质的提升效果明显。梁尧等^[17]和张玉军等^[18]研究发现,作物秸秆处理高于粪肥处理,有机肥显著增加土壤有机质含量,本研究与之一致。本研究结果表明,连续小麦—玉米轮作28年后,与不施肥处理相

比,不同施肥处理的土壤活性有机质含量明显提高,NPKM 处理最显著,NPKS 也表现出较好的效果。何翠翠等^[19]和杨永辉等^[20]研究发现,有机无机配施对土壤活性有机质提高最显著,这与本研究一致。土壤活性有机质整体随土层的加深呈下降趋势,40—60 cm 土层中出现低活性有机质高于 20—40 cm 的现象,这可能是因为上层根系和土壤生物分泌及其残体中的活性成分较多;而下层土壤活性有机质由于淋溶

作用,活性有机组分随水分进入下层土壤^[21]。本研究发现,不同的施肥处理对土壤有机质中活性部分均有不同程度的提高;在不同土层,对土壤有机质活性部分的提高程度也不相同;不施肥或仅施 NPK 的土壤总有机质含量升高主要是其提高了土壤非活性有机质的含量。徐明岗等^[8]和宇万太等^[21]研究发现不施肥或单施化肥,土壤总有机质含量稍有增加,但活性有机质含量明显降低,本研究结果与其一致。

表 1 不同施肥措施对土壤碳库管理指数的影响

土层深度/cm	处理	碳库指数 CPI	高活性有机质			中活性有机质			低活性有机质		
			碳库活度 L	活度指数 LI	碳库管理指数 CMI	碳库活度 L	活度指数 LI	碳库管理指数 CMI	碳库活度 L	活度指数 LI	碳库管理指数 CMI
0—10	CK	1.00	0.07	1.00	100.00	0.10	1.00	100.00	1.43	1.00	100.00
	NPK	1.12	0.09	1.22	136.46	0.17	1.69	189.58	2.19	1.54	172.34
	NPKM	1.68	0.07	0.88	147.12	0.32	3.30	554.65	1.12	0.79	132.19
	NPKS	1.52	0.07	0.98	149.54	0.25	2.55	388.76	1.16	0.81	123.69
10—20	CK	1.00	0.18	1.00	100.00	0.33	1.00	100.00	0.44	1.00	100.00
	NPK	1.12	0.19	1.06	118.10	0.35	1.06	119.13	0.84	1.89	211.91
	NPKM	1.58	0.16	0.92	145.40	0.33	1.02	161.98	0.72	1.63	257.71
	NPKS	1.34	0.19	1.10	147.01	0.43	1.32	176.92	1.09	2.44	326.70
20—40	CK	1.00	0.13	1.00	100.00	0.24	1.00	100.00	0.30	1.00	100.00
	NPK	1.09	0.18	1.37	148.54	0.25	1.04	112.51	0.64	2.12	230.10
	NPKM	1.36	0.15	1.18	160.94	0.34	1.41	192.72	0.59	1.94	264.70
	NPKS	1.10	0.20	1.50	164.32	0.28	1.19	129.92	0.72	2.37	260.22
40—60	CK	1.00	0.05	1.00	100.00	0.08	1.00	100.00	0.56	1.00	100.00
	NPK	1.09	0.11	2.05	222.96	0.32	3.80	412.90	4.84	8.58	932.25
	NPKM	1.74	0.07	1.37	237.65	0.26	3.10	537.67	2.18	3.86	670.65
	NPKS	1.07	0.11	1.99	214.00	0.38	4.43	475.79	3.05	5.41	581.16

王改玲等^[22]和张贵龙等^[23]研究发现,施肥基础上秸秆还田和有机无机配施能提高土壤碳库管理指数,本研究结果与其一致。本研究发现,在不同的土层,NPKM 处理和 NPKS 处理对不同活性有机质的 CMI 影响不同,在 0—40 cm 土层,NPKS 对高、中活性 CMI 的提高最大;在 40—60 cm 土层,NPKM 对高、中活性 CMI 的提高最大。低活性有机质因为成分更复杂,需要进一步研究。这也说明施肥对不同土层有机质组分分布产生了很大影响。

4 结论

不同施肥措施对不同土层的土壤有机质均有一定程度提高,有机质含量随土层增加而降低,其中 NPKM 效果最好;0—60 cm 土层,NPKM 整体对高、中、低活性有机质的提升效果最好。随着土层加深非活性有机质和低活性有机质比例在增加,其中以不施肥对照比例最高。在 0—40 cm 土层,NPKS 对提升高、中活性有机质的碳库管理指数效果最好,40—60 cm 土层,NPKM 对高、中活性有机质的碳库管理指数的提升效果最好。整体来看,NPKM 更有利于土壤总有机质和不同活性有机质含量及碳库管理指数的提升。

参考文献:

- [1] 徐明岗,于荣,王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料,2000(6):3-7.
- [2] Lefroy B R D, Blair C, Strong M W. Changes in organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance [J]. Plant and Soil,1993,155(1/2): 399-402.
- [3] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 273-284.
- [4] 文炯,罗尊长,李明德,等. 土壤活性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 湖南农业科学,2009(1):57-60.
- [5] 吴小丹,蔡立湘,鲁艳红,等. 长期不同施肥制度对红壤性水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 中国农学通报,2008,24(12):283-288.
- [6] Loginow 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(1): 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] 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.
- [9] 张玉军,董士刚,刘世亮,等.不同有机物料对土壤基本化学性质及可溶性有机碳氮的影响[J].*中国农学通报*,2017,33(29):116-123.
- [10] 杨滨娟,黄国勤,兰延,等.施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].*应用生态学报*,2014,25(10):2907-2913.
- [11] 汪吉东,张永春,俞美香,等.不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及pH值的影响[J].*江苏农业学报*,2007,23(6):573-578.
- [12] 蔡太义,黄会娟,黄耀威,等.不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].*自然资源学报*,2012,27(6):964-974.
- [13] 肖小平,唐海明,聂泽民,等.冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J].*中国生态农业学报*,2013,21(10):1202-1208.
- [14] 邱莉萍,张兴昌,程积民.土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J].*中国环境科学*,2009,29(1):84-89.
- [15] 许晶晶,郝明德,赵云英.黄土高原旱地小麦氮磷钾与有机肥优化配施试验[J].*干旱地区农业研究*,2009,27(3):143-147.
- [16] 高翔,沈阿林,寇长林,等.秸秆还田对小麦玉米轮作田土壤有机碳质量的影响[J].*河南农业科学*,2012,41(9):63-67.
- [17] 梁尧,韩晓增,宋春,等.不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J].*中国农业科学*,2011,44(17):3565-3574.
- [18] 张玉军,董士刚,刘世亮,等.有机物替代部分化肥对土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].*河南农业科学*,2018,47(1):43-47.
- [19] 何翠翠,王立刚,王迎春,等.长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J].*土壤学报*,2015,52(1):194-202.
- [20] 杨永辉,武继承,丁晋利,等.长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J].*农业机械学报*,2017,48(9):173-182.
- [21] 宇万太,赵鑫,马强,等.长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J].*土壤通报*,2008,39(3):539-544.
- [22] 王改玲,李立科,郝明德.长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J].*植物营养与肥料学报*,2017,23(1):20-26.
- [23] 张贵龙,赵建宁,宋晓龙,等.施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2012,18(2):359-365.
- (上接第159页)
- [16] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].*生态学报*,2014,34(17):4829-4838.
- [17] 张杰,黄金生,刘佳,等.秸秆、木质素及其生物炭对潮土CO₂释放及有机碳含量的影响[J].*农业环境科学学报*,2015,34(2):401-408.
- [18] 陈颖,刘玉学,陈重军,等.生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J].*应用生态学报*,2018,29(1):314-320.
- [19] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟.生物质炭对土壤有机质活性的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(2):127-131.
- [20] 韩新辉,佟小刚,杨改河,等.黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J].*农业工程学报*,2012,28(12):223-229.
- [21] 高伟,杨军,任顺荣.长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(6):1465-1470.
- [22] 丁瑞霞,王维钰,张青.两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].*中国生态农业学报*,2017,25(8):1106-1118.
- [23] 顾美英,唐光木,葛春辉,等.不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J].*中国生态农业学报*,2016,24(4):489-498.
- [24] 刘昊,曹国军.不同农业废弃物还田对土壤碳排放及碳固定的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(3):239-243.
- [25] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].*草业学报*,2018,27(5):42-53.
- [26] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review [J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1): 1-18.
- [27] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [28] Mitchell P J, Simpson A J, Soong R, et al. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81(2): 244-254.