

不同煤基复混肥对复垦土壤有机碳及碳库管理指数的影响

樊晓东¹, 刘冰², 孟会生¹, 洪坚平^{1*}, 张杰¹

(1.山西农业大学 资源与环境学院, 山西 太谷 030801;

2.太原市园林绿化工程质量监督站, 太原 030012)

摘要:【目的】揭示不同煤基复混肥对复垦土壤有机碳库的作用机制。【方法】采用田间试验方法, 以长治市襄垣县采煤塌陷区复垦 4 a 的土壤为研究对象, 研究了煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 分别在 90、135、180、225 kg/hm² 施氮量下对复垦土壤各形态有机碳量及碳库管理指数的影响。【结果】随着煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 施氮量的增加, 复垦土壤总有机碳和各活性有机碳量显著增加 ($P<0.05$), 其中活性有机碳组分质量分数表现为中活性有机碳>高活性有机碳, 而且煤基复混肥 II 的效果要明显高于煤基复混肥 I。煤基复混肥 II 处理与不施肥处理相比, 土壤总有机碳量、水溶性有机碳量、微生物量碳量、总活性有机碳量分别提高 13.94%~40.84%、76.44%~266.12%、77.98%~185.37%、31.45%~97.53%; 与普通复混肥处理相比分别提高 2.10%~22.96%、73.27%~101.22%、17.54%~88.46%、30.65%~45.19%。施氮量为 135 kg/hm² 的煤基复混肥 II 处理最有利于复垦土壤碳库管理指数的提高, 与不施肥处理和普通复混肥处理分别提高 306.12%和 125.31%。【结论】施氮量为 135 kg/hm² 的煤基复混肥 II 对复垦土壤有机碳及碳库管理指数提升效果最好。

关键词: 煤基复混肥; 复垦土壤; 土壤总有机碳; 活性有机碳; 碳库管理指数

中图分类号: S158.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019115

樊晓东, 刘冰, 孟会生, 等. 不同煤基复混肥对复垦土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 75-81.

FAN Xiaodong, LIU Bing, MENG Huisheng, et al. The Effects of Coal-derived Compound Fertilizers on Soil Carbon and Its Formations in Reclaimed Soil in Coal Mining Areas [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 75-81.

0 引言

【研究意义】随着我国经济的不断发展, 煤炭资源的需求也快速增长。然而, 在开采煤矿过程中却产生了大量的风化煤、煤泥、粉煤灰等工矿废弃物^[1], 这些工矿废弃物的积累, 不仅浪费土地资源和污染环境, 而且利用率极低。不仅如此, 矿区土壤还存在结构性不良、肥力低下、土壤质量降低等问题^[2]。因此, 对矿区复垦土壤的质量恢复成为重中之重。利用工矿废弃物开发的复混肥来恢复复垦土壤质量也成为当前的发展方向^[3-4]。【研究进展】复混肥对土壤生态和植物生长均有显著效果, 其中含腐殖酸的复混肥具有改良土壤、增进肥效、刺激生长、促进抗逆、改善品质的五大作用^[5-6]。孙腾飞^[7]、郭汉清等^[8]研究表明,

施用煤基复混肥可明显提高复垦土壤养分、改良土壤性状。用来评价土壤恢复效果必不可少的是土壤总有机碳^[9-10], 而土壤活性有机碳可以反映土壤有机质的有效组分的变化^[11]。为了能够表征土壤碳库的短期变化特征和反映外界管理措施对土壤碳库的影响, 土壤碳库管理指数最为关键^[12]。【切入点】目前关于煤基复混肥的关注多集中在提升复垦土壤肥力上, 在复垦土壤上的应用及其对有机碳及碳库管理指数影响的研究是鲜有报道, 故从该方面开展研究。【拟解决的关键问题】为此, 基于山西省襄垣县洛江沟采煤塌陷区长期定位试验, 研究煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 在不同施氮量下对复垦土壤有机碳及碳库管理指数的影响, 明确不同煤基复混肥对复垦土壤有机碳库的变化规律, 为建立农田可持续土壤管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验以山西省长治市襄垣县王桥镇洛江沟村采煤塌陷区复垦 4 a 的土壤为研究对象, 试验区地理坐

收稿日期: 2019-07-09

基金项目: 山西省晋中市科技重点研发计划项目 (Y182012); 山西省重点研发项目 (201603D21110-5)

作者简介: 樊晓东 (1994-), 男, 山西吕梁人。硕士研究生, 主要从事矿区土壤复垦研究。E-mail: 18404983124@163.com

通信作者: 洪坚平 (1959-), 男, 浙江绍兴人。教授, 博士生导师, 博士, 主要从事矿区土壤复垦及农业废弃物资源利用等方面的研究。

E-mail: hongjpsx@163.com

标为东经 112°42′—113°14′, 北纬 36°23′—36°44′之间。属暖温带大陆性季风气候, 平均气温 8~9 ℃, 四季分明, 7—9 月气候最高, 平均达 23.4 ℃, 年平均降水量 532.8 mm, 全年无霜期一般为 166 d 左右。

试验区塌陷前土地平整, 土壤肥力较高, 塌陷后土壤变成了旱薄地, 土地生产力严重下降。复垦的土地均采用混推的模式。复垦土壤类型为石灰性褐土。基本性状: 有机质量 3.76 g/kg、全氮量 0.28 g/kg、全磷量 0.41 g/kg、碱解氮量 26.88 mg/kg、有效磷量 3.42 mg/kg、速效钾量 90.12 mg/kg。

1.2 供试材料

供试玉米品种为大丰 30, 种植制度是一年一熟, 玉米生育期降水量为 615.1 mm, 全生育期无灌溉, 山西大丰种业有限公司生产, 生育期 150 d。供试肥料为普通复混肥料: N、P₂O₅、K₂O 质量比为 25:10:10, 山西烨丰化肥有限公司生产; 煤基复混肥 I: 利用煤泥、风化煤和尿素、过磷酸钙、硫酸钾按照一定的比例复合而成, N、P₂O₅、K₂O 质量比为 25:10:10, 有机质量 26.65%; 煤基复混肥 II: 利用煤泥、腐殖酸和尿素、过磷酸钙、钾矿粉按照一定的比例复合而成, N、P₂O₅、K₂O 质量比为 25:10:10, 有机质量 25.12%。生产的煤基复混肥 I、II 均符合有机-无机复混肥料标准 (GB18877—2009)。2 种煤基复混肥的重点差异在于煤基复混肥 I 是风化煤配制而成, 而煤基复混肥 II 是腐殖酸配制而成。

1.3 试验设计

本试验采用完全随机设计, 共设 10 个处理, 分别为不施肥处理 (CK), 普通复混肥料 (CF, 施氮量 135 kg/hm²)、煤基复混肥 I 设 4 个处理, 施氮量 90 kg/hm² (CCF1)、施氮量 135 kg/hm² (CCF2)、施氮量 180 kg/hm² (CCF3)、施氮量 225 kg/hm² (CCF4), 煤基复混肥 II 设 4 个处理, 施氮量 90 kg/hm² (SH1)、施氮量 135 kg/hm² (SH2)、施氮量 180 kg/hm² (SH3)、施氮量 225 kg/hm² (SH4), 每个处理重复 3 次, 共 30 个小区, 小区面积为 100 m² (10 m×10 m)。所有肥料于 2017 年 4 月 27 日作为底肥一次性施入土壤中, 4 月 28 日播种, 种植密度为 60 000 株/hm², 同年 9 月 28 日收获。

1.4 样品采集及处理

在玉米收获后, 采集土壤表层 0~20 cm 的样品。采集的土壤样品, 一份于冰箱低温保存, 用于测定土壤微生物量碳和水溶性有机碳, 另一份混匀后风干, 剔除石子、动植物残体等异物后研磨, 过筛 (1 mm 和 0.149 mm), 进行其他指标的测定。

1.5 测定项目与方法

采用重铬酸钾容量法-外加热法^[13]测定土壤有机

碳; 采用 Mn (III)-焦磷酸比色法^[14]测定土壤水溶性有机碳; 采用 CHCl₃ 熏蒸-K₂SO₄ 浸提-重铬酸钾氧化法^[15]测定土壤微生物量碳, 换算系数取值 0.38。

采用 KMnO₄ 氧化法^[15]测定土壤活性有机碳。且本试验选取 KMnO₄ 溶液的物质的量浓度分别为 33、167 和 333 mmol/L, 其中被 333 mmol/L 氧化所得的活性有机碳为总活性有机碳, 被 33 mmol/L 氧化所得的活性有机碳为高活性有机碳, 被 167 和 33 mmol/L 氧化所得的活性有机碳量之差为中活性有机碳^[15]。

土壤碳库管理指数的计算: 以不施肥土壤 (CK) 作为参考土壤。

土壤碳库管理指数 (CPMI, %) = 碳库指数 (CPI) × 碳库活度指数 (AI) × 100, (1)

碳库指数 (CPI) = 样品总碳量 (g/kg) / 参考土壤总碳量 (g/kg), (2)

碳库活度指数 (AI) = 样品碳库活度 (A) / 参考土壤碳库活度 (A), (3)

碳库活度 (A) = 土壤活性有机碳量 (g/kg) / 土壤非活性有机碳量 (g/kg), (4)

土壤非活性有机碳量 (g/kg) = 土壤总有机碳量 (g/kg) - 土壤活性有机碳量 (g/kg)。 (5)

1.6 数据分析

采用 Microsoft Excel 软件对数据进行整合, 用 SPSS 统计软件对数据进行方差分析, 用新复极差法 (Duncan) 检验处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 2 种煤基复混肥对复垦土壤有机碳的影响

2 种肥料不同施氮量处理对复垦土壤总有机碳的影响研究如表 1 所示。由表 1 可知, 煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理与 CK 相比均差异性显著, 较 CK 提高 14.54%~45.22%、13.94%~40.84%; 与普通复混肥处理相比, 除 CCF1、SH1 和 SH4 处理外, 其余处理均差异性显著, 煤基复混肥 I 处理、煤基复混肥 II 处理较普通复混肥处理提高了 4.52%~26.78%、2.1%~22.96%。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出, 对于 CCF1、CCF2 和 CCF3 处理的总有机碳量差异性不显著, 而 CCF4 处理的总有机碳量最高, 分别比 CCF1、CCF2 和 CCF3 处理高 21.3% ($P<0.05$)、7.52% ($P<0.05$) 和 8.48% ($P<0.05$); 从煤基复混肥 II 4 种处理中可以看出, SH2 处理的总有机碳量最高, 分别比 SH1、SH3 和 SH4 处理高 23.6% ($P<0.05$)、7.61% ($P<0.05$) 和 20.44% ($P<0.05$)。

煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理对复垦土壤水溶性有机碳的影响与 CK 相比均差异性显著, 分别较 CK 提高 63.52%~145.6%、76.44%~266.12%;

与普通复混肥处理相比，除 CCF1、CCF4 和 SH1 处理外，其余处理均差异显著，分别较普通复混肥处理提高 2.02%~34.98%、73.27%~101.22%。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出，CCF2、CCF3 处理的水溶性有机碳量最高，分别比 CCF1 和 CCF4 处理高

47.1%~50.19%和 29.58%~32.31%；而从煤基复混肥 II 4 种处理中可以看出，SH3、SH4 处理的水溶性有机碳量最高，分别比 SH1、SH2 处理高 98.71%~107.5%和 11.21%~16.13%。

表 1 2 种煤基复混肥下复垦土壤总有机碳、水溶性有机碳、微生物碳、总活性有机碳及不同组分活性有机碳

Table 1 Total organic carbon, water-soluble organic carbon, microbial carbon, total labile organic carbon and labile organic carbon of different components of reclaimed area under two kinds of coal-derived compound fertilizers

处理 Treatments	总有机碳 Total organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon/ (mg·kg ⁻¹)	微生物碳 Microbial carbon/ (mg·kg ⁻¹)	高活性有机碳 Highly labile organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	中活性有机碳 Mid-labile organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	总活性有机碳 Total labile organic carbon/ (g·kg ⁻¹)
CK	5.02±0.60d	157.9±13.0e	59.04±2.11d	0.535±0.07c	1.14±0.04d	2.83±0.59d
CF	5.75±0.22c	287.3±30.3d	89.40±1.68c	0.525±0.09c	1.90±0.13b	3.85±0.35c
CCF1	6.01±0.34bc	258.2±61.3d	123.05±6.13b	0.671±0.19b	1.64±0.56c	3.90±0.39c
CCF2	6.78±0.42b	387.8±18.5c	158.6±5.69a	0.634±0.02b	1.82±0.12b	4.89±0.38b
CCF3	6.72±0.10b	379.0±10.7c	163.4±9.56a	0.692±0.13a	2.74±0.28a	5.09±0.91b
CCF4	7.29±0.63a	293.1±33.0cd	132.39±8.67b	0.713±0.04a	1.87±0.18b	4.89±0.36b
SH1	5.72±0.48c	278.6±24.7d	105.08±3.23c	0.590±0.05b	1.70±0.33c	3.72±0.62c
SH2	7.07±0.47a	497.8±35.5ab	128.78±7.19b	0.717±0.03a	2.09±0.21b	5.59±0.23a
SH3	6.57±0.38b	578.1±37.1a	168.48±8.86a	0.542±0.02c	1.44±0.22c	5.03±0.25b
SH4	5.87±0.34c	553.6±66.7a	139.24±8.97b	0.407±0.12d	1.56±0.16c	3.81±0.42c

注 同列数据后不同小写字母表示差异显著性 ($P<0.05$)。下同。

Note Different lowercase letters after data in the same column in the table indicate significant difference at 0.05 level ($P<0.05$). The same below.

煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理对复垦土壤微生物碳的影响与 CK 相比均差异显著，分别比 CK 提高 108.42%~176.76%、77.98%~185.37%；与普通复混肥处理相比，除 SH1 处理外，其余处理均差异显著，分别比普通复混肥处理提高 37.64%~82.77%、17.54%~88.46%。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出，CCF2、CCF3 处理的微生物碳量最高，分别比 CCF1、CCF4 处理高 28.89%~32.79%和 19.8%~23.42%；从煤基复混肥 II 4 种处理中可以看出，SH3 处理的总有机碳量最高，分别比 SH1、SH2 和 SH4 处理高 60.34% ($P<0.05$)、30.83% ($P<0.05$) 和 21.01% ($P<0.05$)。

总活性有机碳及其组分可以反映土壤质量的变化，并且与土壤生物、化学和物理性质密切相关，是土壤质量良好的评价指标^[16-17]。煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理对复垦土壤总活性有机碳的影响与 CK 相比均差异性显著，分别比 CK 提高 37.81%~79.86%、31.45%~97.53%；与普通复混肥处理相比，除 CCF1 和 SH1、SH4 处理外，其余处理均差异性显著，分别比普通复混肥处理提高 1.3%~32.21%、30.65%~45.19%。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出，CCF3 处理的总活性有机碳量最高，分别比 CCF1、CCF2、CCF4 处理高 30.51%、4.09%和 4.09%，且仅与 CCF1 处理差异性显著；而从煤基

复混肥 II 4 种处理中可以看出，SH2 处理的总活性有机碳量最高，分别比 SH1、SH3 和 SH4 处理高 50.27% ($P<0.05$)、11.13% ($P<0.05$) 和 46.72% ($P<0.05$)。

煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理下 2 种土壤活性有机碳量均随施氮量增加而先增加后减少，其变化趋势基本与土壤总活性有机碳量一致。煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理与 CK 相比，显著影响高活性有机碳和中活性有机碳量，分别提高 18.5%~33.27%、1.31%~34.02%和 43.86%~140.35%、26.32%~83.33%，以中活性组分提高幅度最大。与普通复混肥处理相比，煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 处理对复垦土壤高活性有机碳量分别提高 20.76%~35.81%、3.24%~36.57%；而对中活性有机碳量的影响，仅 CCF3 处理对其显著提高。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出，CCF3 处理的高活性有机碳、中活性有机碳量均最高；而从煤基复混肥 II 4 种处理可以看出，SH2 处理的高活性有机碳、中活性有机碳量最高。总体而言，各活性组分表现为中活性有机碳>高活性有机碳。

2.2 2 种煤基复混肥对复垦土壤碳库管理指数的影响

2 种煤基复混肥不同用量对复垦土壤碳库管理指数的影响如表 2 所示，由表 2 可知，煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 不同施氮量处理与 CK 相比均差异显著，比 CK 提高 71.69%~223.77%、64.29%~306.13%；

与普通复混肥处理相比, CCF3、SH2、SH3 处理差异性显著, 分别比普通复混肥处理提高 79.62%、125.31%和 84.62%。从煤基复混肥 I 4 种处理中可以看出, CCF3 处理的碳库管理指数最高, 分别比 CCF1、CCF2 和 CCF4 处理高 88.58%、19.4%和 40.98%; 从煤基复混肥 II 4 种处理可以看出, SH2 处理的碳库管理指数最高, 分别比 SH1、SH3 和 SH4 处理高 147.2% ($P<0.05$)、22.05% ($P<0.05$) 和 142.19% ($P<0.05$)。

表 2 2 种煤基复混肥下复垦土壤碳库管理指数

Table 2 Carbon pool management index of reclaimed area under two kinds of coal-derived compound fertilizers

处理 Treatments	非活性有机碳 Non-labile organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳库活度 (A)	碳库指数 (CPI)	碳库管理指数 (CPMI)
CK	2.19 $\pm$ 0.12a	1.29 $\pm$ 0.37d	1.00 $\pm$ 0.01c	100.00e
CF	1.90 $\pm$ 0.03b	2.03 $\pm$ 0.15c	1.15 $\pm$ 0.04c	180.25cd
CCF1	2.11 $\pm$ 0.21ab	1.85 $\pm$ 0.13c	1.20 $\pm$ 0.05bc	171.69d
CCF2	1.89 $\pm$ 0.02b	2.59 $\pm$ 0.08bc	1.35 $\pm$ 0.06b	271.17bc
CCF3	1.63 $\pm$ 0.22c	3.12 $\pm$ 0.12b	1.34 $\pm$ 0.08b	323.77b
CCF4	2.40 $\pm$ 0.24a	2.04 $\pm$ 0.14c	1.45 $\pm$ 0.01a	229.65c
SH1	2.00 $\pm$ 0.01ab	1.86 $\pm$ 0.03c	1.14 $\pm$ 0.01c	164.29d
SH2	1.48 $\pm$ 0.34c	3.78 $\pm$ 0.75a	1.41 $\pm$ 0.09a	406.13a
SH3	1.54 $\pm$ 0.49c	3.28 $\pm$ 0.58b	1.31 $\pm$ 0.08ab	332.77b
SH4	2.06 $\pm$ 0.06ab	1.85 $\pm$ 0.06c	1.17 $\pm$ 0.01bc	167.69d

3 讨论

有机碳作为评价土壤肥力的基础指标之一, 其质量分数取决于有机碳输入和矿化分解之间的动态平衡^[18], 土壤碳库管理指数可以一定程度上反映土壤有机碳的质量, 其值越大, 表示有机碳越易被微生物分解和被植物吸收利用, 碳库活度和质量也就越高^[19-20]。研究表明, 不同工矿固体废弃物作为肥料组分可有效提高土壤肥力^[21], 煤基复混肥的施入就成为影响土壤有机碳量的重要因素。

本研究表明, 施煤基复混肥 I 和煤基复混肥 II 均能显著促进复垦土壤总有机碳的累积。与不施肥和与施普通复混肥处理相比, 煤基复混肥 I 处理的土壤总有机碳量提高 45.22%和 26.78%, 煤基复混肥 II 处理提高 40.48%和 22.96%, 这与 2 种煤基复混肥的组成成分风化煤、腐殖酸有关。一方面, 复垦土壤有机质等养分量背景值低下, 风化煤、腐殖酸本身特性是有机质量高, 施入复垦土壤之后可以直接增加土壤中有机质质量分数; 另一方面, 风化煤、腐殖酸等有机物料的加入, 使作物另一方面有机物料促进作物生长, 使作物残茬和根系分泌物增加, 进而增加土壤有机质的输入^[22]。就煤基复混肥 I 4 种处理中, 施氮量 225 kg/hm^2 的煤基复混肥 I 处理的总有机碳量最高, 有研究表明, 风化煤施用量在 27 000 kg/hm^2 范围。复垦土壤有机质的量随着风化煤施用量的增加而增加^[23]。在煤基复混肥 II 4 种处理中, 施氮量 135 kg/hm^2 的煤基复混肥 II 处理的总有机碳量最高, 总有机碳量呈先增加后减少趋势, 有研究表明土壤碳排放量受土壤含氮

量的影响, 其顺序为低氮>高氮>中氮, 因此可能导致在施氮量水平为 90、225 kg/hm^2 时, 土壤碳排放增高而减少土壤有机质的质量分数^[24]。

研究表明, 与不施肥和与施普通复混肥处理相比, 施煤基复混肥 I 和煤基复混肥 II 均能显著促进复垦土壤水溶性有机碳、微生物量碳、活性有机碳及其高活性有机碳、中活性有机碳组分的累积, 而且煤基复混肥 II 的总体提升效果要明显高过煤基复混肥 I。一方面, 煤基复混肥 I 所含的风化煤成分中腐殖酸量非常高, 但是自然条件下, 风化煤中的腐殖酸一般都与钙、镁、铁、铝等形成不溶性物质^[25], 直接应用的效果比较差, 必须通过微生物将其转化加以辅助才能发挥风化煤的作用效果^[26]。而煤基复混肥 I 含有煤泥、风化煤有机物料, 通过促进复垦土壤中团粒结构的形成, 增加土壤保水性、透水性、透气性等, 进而可能促进微生物的生长繁殖, 使微生物在分解作用时释放更多的水溶性有机碳。复垦土壤活性有机碳组分的增加与郭军玲等^[27]研究结果类似, 可能是由于微生物对有机物分解和转化作用的加快, 而分解的有机物及腐解物中含有多种活性碳组分, 同时根系分泌的活性碳组分也增加, 从而明显提高其质量^[28-29]。另一方面, 煤基复混肥 II 含有的腐殖酸成分对复垦土壤结构的稳定性、水气渗透能力和田间持水率等具有良好的调节作用, 能够改善土壤物理性质^[30], 而且腐殖酸作为微生物活性的催化剂, 可以大大提高微生物活性, 从而促进微生物将碳源转化为水溶性有机碳, 腐殖酸含有醌等功能基团, 其施用可以增加植物的新陈代谢等功能^[31], 从而促进植物根系生长分泌水溶性有机碳。

而且由于腐殖酸拥有的孔隙结构和酸性含氧官能团丰富等特性,从而有助于腐殖酸对土壤中活性碳源的吸附和对氧化物、有机物等物质发生络合作用,形成稳定的化学和生物学性质的络合物^[32],进而增加复垦土壤中活性有机碳组分的质量分数。有研究表明^[33],腐殖化的土壤有助于提高其活性有机碳组分质量分数,这与本研究结果类似。

碳库管理指数作为反映土壤质量变化的可靠指标。本研究中,与不施肥处理和施普通复混肥处理相比,各处理对复垦土壤碳库管理指数的影响差异显著,其中施氮量 135 kg/hm^2 的煤基复混肥 II 处理最有利于复垦土壤碳库管理指数的提高,与不施肥处理和普通复混肥处理分别提高 306.12% 和 125.31%。曾骏等^[34]的研究结果表明,施有机肥或有机无机肥配合施用均较不施肥或单施化肥显著提高土壤碳库管理指数,本研究结论与其类似。从土壤碳库管理指数的计算公式可知,无论是土壤有机碳的上升还是土壤活性有机碳的上升均可导致土壤碳库管理指数的上升^[35],且非活性有机碳的下降可导致土壤碳库管理指数的上升,由土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳量分析可得施氮量 135 kg/hm^2 的煤基复混肥 II 处理最高。

4 结 论

随着煤基复混肥 I、煤基复混肥 II 施氮量的增加,复垦土壤总有机碳和各活性有机碳量显著增加 ($P<0.05$),其中活性有机碳组分量表现为中活性有机碳>高活性有机碳,而且煤基复混肥 II 的效果要明显高于煤基复混肥 I。煤基复混肥 II 处理与不施肥处理相比,土壤总有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、总活性有机碳的量分别提高 13.94%~40.84%、76.44%~266.12%、77.98%~185.37%、31.45%~97.53%;与普通复混肥处理相比总有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、总活性有机碳分别提高 2.1%~22.96%、73.27%~101.22%、17.54%~88.46%、30.65%~45.19%。 135 kg/hm^2 的煤基复混肥 II 处理最有利于复垦土壤碳库管理指数的提高,与不施肥处理和普通复混肥处理分别提高 306.12% 和 125.31%。总体看来,施氮量为 135 kg/hm^2 的煤基复混肥 II 对复垦土壤有机碳及碳库管理指数提升效果最好。

参考文献:

[1] 刘雪冉. 矿区复垦土壤压实特征及蘑菇料施用改良效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
LIU Xueran. The soil compaction special features in reclaimed area and improving results by using mushroom[D]. Tai 'an: Shandong Agricultural University, 2010.

[2] HENEGHAN L, MILLER S P, BAER S G, et al. Integrating soil ecological knowledge into restoration management[J]. Restoration Ecology, 2008, 16(4): 608-617.
[3] 刘洋, 洪坚平, 郭汉清, 等. 施用煤基复混肥对复垦土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(11): 1 786-1 790.
LIU Yang, HONG Jianping, GUO Hanqing, et al. Effects of applying coal-derived compound fertilize on soil nutrients, enzyme activities and corn yield in reclaimed soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 1 786-1 790.
[4] 乔志伟, 李金岚, 洪坚平, 等. 矿区塌陷复垦地土壤养分及酶活性的变化[J]. 山西农业科学, 2011, 39(1): 38-42.
QIAO Zhiwei, LI Jinlan, HONG Jianping, et al. Soil nutrients and enzyme activity changes in core-mining subsidence area[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(1): 38-42.
[5] 范海荣, 华璐, 王学江. 城市垃圾堆肥及其复混肥对草坪草生长及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 188-192.
FAN Hairong, HUA Luo, WANG Xuejiang. Effects of municipal waste compost and its compound fertilizers on grass and soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 188-192.
[6] 王敏, 刘永民. 腐殖酸强化脱硫石膏改良油污盐碱土壤的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 131-133, 139.
WANG Min, LIU Yongmin. Effect of humic acid on improving oil contaminated saline-alkali soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 131-133, 139.
[7] 孙腾飞. 煤基复混肥与不同肥料配施对复垦土壤性质及玉米产量的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016.
SUN Tengfei. Effects of coal-derived compound fertilizer and different fertilizer application on soil properties and yield of maize in reclaimed land[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016.
[8] 郭汉清, 谢英荷, 洪坚平, 等. 煤基复混肥对复垦土壤养分、玉米产量及水肥利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 213-218.
GUO Hanqing, XIE Yinghe, HONG Jianping, et al. Effects of coal-derived compound fertilizer on soil nutrient, corn yield and water and fertilizer use efficiency in reclaimed area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 213-218.
[9] 薛薏, 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): 1 458-1 464.
XUE Sha, LIU Guobin, PAN Yanping, et al. Evolution of soil labile organic matter and carbon management index in the artificial robinia of loess hilly area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(4): 1 458-1 464.
[10] 周国模, 姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 68-70, 83.
ZHOU Guomuo, JIANG Peikun. Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(6): 68-70, 83.
[11] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
SHEN Hong, CAO Zhihong, HU Zhengyi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. Chinese

- Journal of Ecology, 1999, 18(3): 32-38.
- [12] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155(1): 399-402.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] 于荣, 徐明岗, 王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料, 2005(2): 49-52.
- YU Rong, XU Minggang, WANG Boren. Study on methods for determining labile organic matter of soils[J]. Soils and Fertilizers, 2005(2): 49-52.
- [15] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- LIN Xiangui. Principles and methods of soil microbiology research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [16] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
- XU Minggang, YU Rong, WANG Boren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 723-729.
- [17] 贾俊香, 谢英荷. 生物炭对采煤塌陷复垦区土壤养分与酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 88-91.
- JIA Junxiang, XIE Yinghe. Effects of biochar on soil nutrient and enzyme activity from coal mining subsidence reclamation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 88-91.
- [18] 李廷亮, 李顺, 谢英荷, 等. 不同施肥措施对晋南旱塬麦田土壤碳氮变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 43-49.
- LI Tingliang, LI Shun, XIE Yinghe, et al. Effect of different fertilizations patterns on soil carbon and nitrogen changes of dryland wheat field in southern Shanxi of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 43-49.
- [19] 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.
- HAN Xinhui, TONG Xiaogang, YANG Gaihe, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 223-229.
- [20] 梁利宝, 冯鹏艳, 许剑敏. 施肥对采煤塌陷复垦土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 45-51.
- LIANG Libao, FENG Pengyan, XU Jianmin. Efficacy of fertilization in improving soil aggregation, carbon and nitrogen in soil reclaimed from subsided areas caused by coal mining[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 45-51.
- [21] 许继飞, 康振中, 赵吉, 等. 煤基固废与牲畜粪便固态发酵基料改良沙土的研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 160-166.
- XU Jifei, KANG Zhenzhong, ZHAO Ji, et al. The amelioration of sandy soil using the solid fermentation mixture of the based-coal solid waste and the livestock excrement[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 160-166.
- [22] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(5): 780-786.
- HOU Xiaojing, YANG Jinsong, ZHAO Man, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon in coastal saline soil region[J]. Soil, 2014, 46(5): 780-786.
- [23] 李永青. 风化煤施用对露天煤矿区复垦土壤性质的影响[D]. 太原: 山西大学, 2009.
- LI Yongqing. Effects of weathered coal on soil properties in open-cast mine area[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2009.
- [24] 张蕊. 滩地杨树林土壤呼吸对模拟氮沉降与淹水的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- ZHANG Rui. Response of soil respiration of poplar forest in beach to simulated nitrogen deposition and flooding[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [25] 尹玉英, 沈幅范. 如何利用不与氨水反应的风化煤制造腐植酸铵[J]. 化学通报, 1975, 38(3): 18-20.
- YIN Yuying, SHEN Guofan. How to make ammonium humate from weathered coal that does not react with ammonia[J]. Chemical Bulletin, 1975(3): 18-20.
- [26] 张昕, 林启美, 赵小蓉. 风化煤的微生物转化: III. 预处理对其影响(续完)[J]. 腐植酸, 2003(1): 7-11.
- ZHANG Xin, LIN Qimei, ZHAO Xiaorong. The weathering of coal are: III. The influence of pretreatment (XuWan)[J]. Journal of Humic Acid, 2003(1): 7-11.
- [27] 郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐土有机碳和活性碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1 290-1 299.
- GUO Junling, JIN Hui, GUO Caixia, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1 290-1 299.
- [28] 高继伟, 谢英荷, 李廷亮, 等. 不同培肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 6-12.
- GAO Jiwei, XIE Yinghe, LI Tingliang, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon activity following remediation of a coal tailing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 6-12.
- [29] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1 223-1 228.
- WANG Shuolin, YANG Yanju, WANG Gailan, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic carbon in cinnamon soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1 223-1 228.
- [30] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1 282-1 289.
- CHEN Yiqun, DONG Yuanhua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 1 282-1 289.
- [31] 马斌, 刘景辉, 张兴隆. 褐煤腐殖酸对旱作燕麦土壤微生物量碳、氮、磷含量及土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2015(5): 134-140.
- MA Bin, LIU Jinghui, ZHANG Xinlong. Effects of applying brown coal humic acid on soil enzyme activity and microbial biomass C, N and P content of oat in dry farming[J]. Crops, 2015(5): 134-140.
- [32] 陶雪, 杨琥, 季荣, 等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用

- [J]. 土壤, 2016, 48(1): 1-11.
- TAO Xue, YANG Hu, JI Rong, et al. Stabilizers and their applications in remediation of heavy metal-contaminated soil[J]. Soil, 2016, 48(1): 1-11.
- [33] 路丹, 何明菊, 区惠平, 等. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1 144-1 150.
- LU Dan, HE Mingju, OU Huiping, et al. Effects of tillage patterns on the labile organic carbon components, organic carbon mineralization and humus characteristics in paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1 144-1 150.
- [34] 曾骏, 郭天文, 于显枫, 等. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 812-815.
- ZENG Jun, GUO Tianwen, YU Xianfeng, et al. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 812-815.
- [35] 孔樟良. 利用方式转变对水稻土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 371-377.
- KONG Zhangliang. Effects of land use change on labile organic carbon and carbon management index of paddy soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 371-377.

The Effects of Coal-derived Compound Fertilizers on Soil Carbon and Its Formations in Reclaimed Soil in Coal Mining Areas

FAN Xiaodong¹, LIU Bing², MENG Huisheng¹, HONG Jianping^{1*}, ZHANG Jie¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Taiyuan Landscape Construction Quality Supervision Station Shanxi Academy of Forestry Sciences, Taiyuan 030012, China)

Abstract: 【Background】Economic booming in China over the last two decades has escalated its demand for mineral resources and the exploitation and mining of coal has generated a huge amount of industrial and mining wastes such as weathered coal, coal slime and fly ashes. Accrual of these wastes not only took lands and contaminated environment, it also destructed soil structure and deteriorated soil quality. Compared to long-term cultivated soil, soil in coal mining areas is characterized by poor structure, low fertility and lack of microorganisms. Therefore, turning these wastes to useful soil amendment is important in developing sustainable economy. 【Objective】The purpose of this paper is to investigate the efficacy of using compound fertilizers derived from these wastes to restore soil quality in coal mining areas. We compared the efficacy of two such compound fertilizers used with different fertilizations to improve total soil organic carbon and carbon formation in a reclaimed coal mining soil. 【Method】Field experiment was conducted in a coal mining-induced subsided area which has been under reclamation for four years at Xiangyuan County, Changzhi City in Shanxi province. Coal-derived compound fertilizer I and II were used with four nitrogen fertilizations: 90 kg/hm², 135 kg/hm², 180 kg/hm² and 225 kg/hm² to study their combined effects on total soil organic carbon and carbon formation (carbon pools). 【Result】With the application of either of the two compound fertilizers increasing, the content of total organic carbon and active organic carbon in the reclaimed soil increased significantly; the content of moderately active carbon was higher than the content of highly active fraction. The compound fertilizer II was more effective than compound fertilizer I in boosting soil carbon increase ($P<0.05$). Compared with the control without compound fertilization, amending the soil with Compound fertilizer II increased total soil organic carbon, water-soluble organic carbon, microbial carbon and total active organic carbon by 13.94%~40.84%, 76.44%~266.12%, 77.98%~185.37% and 31.45%~97.53% respectively, while compared with fertilization with conventional compound fertilizer, the associated increase was 2.1%~22.96%, 73.27%~101.22%, 17.54%~88.46% and 30.65%~45.19% respectively. Compound fertilizer II coupled with 135kg/hm² of nitrogen fertilization was most effective to improve soil carbon pool, increasing by 306.12% and 125.31% compared to that without nitrogen fertilization and that with conventional compound fertilization respectively. 【Conclusion】Amending soil with the two coal-derived compound fertilizers both increased soil organic carbon, and the most effective fertilization was coupling the compound fertilizer II with a nitrogen application of 135 kg/hm². The results presented in this paper have wide application for using coal-derived compound fertilizers to reclaim soils affected by coal mining.

Key words: Coal-derived compound fertilizer; soil reclamation; total soil organic carbon; labile organic carbon; carbon pool management index

责任编辑: 陆红飞