

矿粮复合区煤累积对土壤团粒结构的影响

聂小军, 刘祥, 孙迎涛, 谢放放, 和靖, 高爽

(河南理工大学资源环境与城乡规划系, 河南 焦作 454000)

摘要: 为理解煤对土壤结构的影响, 以土壤煤累积现象普遍的焦作矿粮复合区为研究区, 选取3种不同程度的煤累积土壤(低累积、中累积和高累积)为研究对象, 不含煤的土壤为对照, 通过测定0—40 cm土层深度范围的水稳性团聚体组成, 并采用分形维数(D)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和大团聚体破坏率(PAD)作为团粒结构的评价指标, 探讨煤累积对土壤团聚体组成与稳定性的影响。结果表明: 煤在土壤中累积可以促进水稳性微团聚体向大团聚体转化, 降低团聚体的分形维数, 提高团聚体稳定性。深层(20—40 cm)土壤水稳性大团聚体含量的增幅高于表层(0—20 cm)土壤。土壤团聚体稳定性随着煤累积程度的增高表现出先增加后降低的趋势。土壤团聚体的稳定性主要取决于 >2 mm粒级水稳性团聚体的含量。总体上, 煤在土壤中的累积改善了土壤的团粒结构性状。此外, 根据本研究结果, 研究区长期运煤、堆煤、洗煤和矿井水灌排等活动导致的“黑土”现象并不能视作煤污染。

关键词: 矿粮复合区; 团聚体; 煤累积土壤; 分形维数

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0169-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.027

Effect of Coal Accumulation on Soil Aggregate Structure in the Mine-crop Overlapped Zone

NIE Xiaojun, LIU Xiang, SUN Yingtao, XIE Fangfang, HE Jing, GAO Shuang

(Department of Resources Environment and the Management of

Urban and Rural Planning, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000)

Abstract: In order to understand the effect of coal accumulation on soil structure, three different levels of coal accumulation soils samples (low accumulation, moderate accumulation and high accumulation) were collected from the Jiaozuo mine-crop overlapped zone, and the coal-free soil was taken as the control. Soil samples were collected in the 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm and 30—40 cm soil layers. Water-stable aggregate fractions were measured, and fractal dimension (D), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and macroaggregate destruction rate (PAD) were used as evaluation indicators to evaluate the effects of coal on the composition and stability of soil aggregates. The results showed that coal accumulation in the soils promoted the transformation of soil water stable microaggregates to macroaggregates, reduced the D value and increased soil aggregate stability. The increase amplitude of water stable macroaggregate content in deep soil layer (20—40 cm) was higher than that in surface soil layer (0—20 cm). Soil aggregate stability showed a trend of increase firstly and then decrease with the increasing of coal accumulation. It was also found that soil aggregate stability depended mainly on the content of water stable aggregates that greater than 2 mm. Our results suggested that coal accumulation in soils obviously improved soil structure. In addition, according to the results of this study, the “black soils” phenomenon due to long-term transportation, dumpling and washing of coal and mine water drainage and irrigation in the study area should not be considered as coal pollution.

Keywords: mine-crop overlapped zones; soil aggregates; coal-rich soil; fractal dimension

自工业革命以来,世界各地广泛使用煤已有近 170 年的历史,煤可通过不同方式被沉积到世界许多地方的土壤中,尤其是重污染区,诸如矿粮复合区。我国是产煤大国,煤炭资源分布区与粮食主产区交错叠合形成的矿粮复合区占我国耕地总面积的比例高达 42.7%^[1],已成为一种重要的地理空间。在矿粮复合区中,由于洗煤、堆煤和矿井水灌溉等人为原因,使煤在进入土壤后不断进行累积,形成一种特殊的“黑土”,其对土壤质量造成的影响如何?亟需探讨!事实上,有关煤对农田土壤影响的关注由来已久,但绝大多数见诸于社会媒体的新闻曝光,揭露煤炭产业活动导致的煤尘污染及含煤矿井水排放等事件对农田土壤的污染以及对作物、蔬菜等的危害。例如,2011 年 8 月 7 日《经济半小时》聚焦山西多地洗煤厂大量排污,土地被污染无法耕种;人民网北京 2013 年 5 月 17 日电,甘肃省甘谷县磐安镇居民长期受到大唐甘谷电厂煤尘污染问题,使附近的庄稼受到严重的污染,农作物产量大幅度降低。煤对农田污染的定性很大程度上取决于煤中硫分和重金属含量以及作物和土壤对煤的响应。硫分和重金属含量高的煤进入农田会严重影响作物的生长,造成土壤酸化、重金属污染、地下水污染和农产品安全等生态环境问题,可定性为煤污染。但是,由于中国多数煤矿区煤的硫分和重金属含量低,如果这类煤进入农田并在土壤中累积,不加区别地认为是煤污染,是不科学的。为此,需要通过开展煤累积对土壤质量影响的相关研究来对此现象进行科学定性,这对于我国矿粮复合区的生态文明建设和社会稳定具有重要的现实意义。

土壤团聚体是土壤团粒结构的基本单元,其基本特性是决定土壤侵蚀、压实和板结等物理过程与作用的重要指标之一,更是评价土壤肥力和土壤质量的关键指标^[2-3]。影响土壤团聚体的因素很多,目前研究较多的影响因素为田间管理^[4-5]、土地利用变化^[6-7]、土壤侵蚀^[8-9]、植被^[10-11]和微生物^[12]等。然而,关于土壤中的煤累积这一典型人为干扰因素对土壤团聚体的影响却鲜有报道。本研究选择团聚体这一关键土壤质量指标,以煤炭开采历史悠久和煤累积现象普遍的焦作矿粮复合区为研究区,系统评价煤累积土壤的团聚体组成、分形维数以及团聚体稳定性,探讨煤累积对农田土壤结构的影响,以期对矿粮复合区耕地保护和生态文明建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焦作矿粮复合区位于河南省西北部(34.08°—35.05°N,112.53°—113.63°E),地处太行山南麓,地

貌为山前冲(洪)积平原。气候类型为大陆性季风气候,年均降水量 700 mm,年蒸发量 1 700~2 000 mm,年均气温 14.2~14.8℃。研究区为我国采煤历史最悠久的矿区之一,具有近 120 年的无烟煤开采历史;同时,该区位于河南省粮食主产区范围内,矿粮复合生产的特征极为典型,复合区面积高达 230 km²。在长期的煤炭开采历史中,由于矿井水灌排、运煤和堆煤等人为活动,导致煤在研究区土壤中呈现不同程度的累积。特别是利用含煤矿井水灌溉农田的活动极为普遍。经调查,灌溉历史最长的已经高达 57 年。区内土地利用类型主要为耕地,土壤类型以石灰性褐土为主(CaCO₃:12%,pH 8.10),土壤质地为粉壤土(砂粒、粉粒、黏粒含量百分比分别为 17%,72%,11%),作物轮作为小麦(*Triticum aestivum* L.)—玉米(*Zea mays* L.)。

1.2 采样方法

2016 年 10 月开展田间调查与实验室重金属含量测试,电镜扫描(FEI Quanta 250 FEG-SEM,美国)与能谱分析(INCA-ENERAGY 250,德国)发现:(1)研究区生产的煤种为优质低硫无烟煤,且重金属含量低,煤累积土壤的重金属含量也低,均不超国家土壤质量二级标准(表 1);(2)研究区土壤中的煤主要存在于 0—40 cm 土层范围内,粒径以 8.5~250 μm 居多。因此,在研究区内初选 5 块煤累积程度不同的农田土壤,同时选取不含煤的农田土壤作为对照(CK)。供试煤累积土壤与 CK 的类型和质地(土壤类型为石灰性褐土,质地为粉壤土)、田间管理(灌溉 5~6 次/年,施 N 肥 510 kg/(hm²·a),P₂O₅ 225 kg/(hm²·a),K₂O 105 kg/(hm²·a)、作物轮作(小麦—玉米)及秸秆还田等背景条件一致。为定量煤在土壤中的累积程度,利用 MAT 253 质谱仪(美国)对所选择的 5 个煤累积区土壤(0—40 cm)进行碳稳定同位素测定,根据测定的 δ¹³C 值,建立同位素质量平衡方程来计算煤源有机碳与植物源有机碳的比例,并考虑土壤总有机碳含量,最终根据煤源有机碳的含量(面积浓度)划分土壤中的煤累积程度^[13]。最终,从 5 块初选的煤累积土壤中遴选出 3 块不同程度的煤累积土壤:低累积区、中累积区和高累积区土壤。低、中、高累积区土壤的 δ¹³C 和煤源碳的含量(面积浓度)见表 2。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{coal}} \cdot f_{\text{C-coal}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} \cdot f_{\text{C-plant}} \quad (1)$$

$$\text{C-coal} = \text{TOC} \cdot f_{\text{C-coal}} \quad (2)$$

式中:δ¹³C_{sample} 为煤累积土壤总有机碳的 δ¹³C 值(‰);δ¹³C_{coal} 为研究区煤源有机碳的 δ¹³C 值,为(-24.5±0.17)‰;δ¹³C_{plant} 为研究区植物源有机碳的 δ¹³C 值(‰),在本研究中,该值采用与煤累积区相同土层深

度的对照区土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰); $f_{\text{C-coal}}$ 和 $f_{\text{C-plant}}$ 分别为煤源碳与植物源有机碳的比例(‰); C-coal 和 TOC 分别为煤累积土壤的煤源有机碳和总有机碳含量(kg/m^2)。

表 1 研究区无烟煤硫分和重金属含量以及煤累积土壤的重金属含量

项目	S/ %	土壤重金属含量/(mg · kg ⁻¹)							
		Pb	Zn	Ni	Cu	As	Cr	Cd	Hg
无烟煤	0.69	34	55	42	45	13	ND	ND	ND
煤累积土壤	—	27	67	54	37	12	59	ND	ND
国家标准*	0.50~0.90	600	300	90	100	20	250	0.6	1

注:无烟煤 $n=10$;煤累积土壤 $n=66$; * 表示煤硫分国家标准为 GB/T 15224.2—2004;重金属含量标准参照土壤环境质量标准 GB 15618—2008($\text{pH}>7.5$);ND 表示未检出。

表 2 供试土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 与煤源碳含量

处理	总有机碳/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\delta^{13}\text{C}/$ ‰	煤源有机碳在总 有机碳中的占比/%	煤源有机碳/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
CK	6.5	-21.180	0	0
低累积区土壤	10.7	-22.609	42	4.5
中累积区土壤	29.8	-24.303	92	27.3
高累积区土壤	55.8	-24.464	96	53.7

于 2017 年 5 月小麦收获期后,对 CK 与遴选出的低、中、高累积区进行土壤样品采集。在每个样区随机选取 3 个样点作为重复,每个样点分层采集 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 的土层土样,将土样装入硬质塑料盒中带回实验室,在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。将原状土样沿自然裂隙掰成直径为 1 cm 左右的小块,剔除其中较大的植物残体和小石块,放在室内自然风干。

1.3 样品测定

土壤团聚体组成含量采用干筛法和湿筛法测定^[14]。干筛法具体步骤为:将取回风干好的土样分多次置于孔径次序递次为 2,1,0.5,0.25 mm 的套筛顶部。加盖、摇动套筛,收集各孔径筛子上的团聚体,称量并记录备用。湿筛法的具体步骤为:将干筛后得到的样品按比例配制 180 g,置于依次叠好的孔径为 2,1,0.5,0.25,0.053 mm 的套筛上。将组筛置于土壤团聚体分析仪上的振荡架上,以 30 次/min 的频率振荡 60 min(振荡过程中筛组上缘部分不得低于水面),将各级筛上的团聚体转移到铝盒中(粒径 <0.053 mm 的团聚体通过孔径为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,然后转移到铝盒中),置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘干箱中,烘 72 h,称重并记录。

1.4 数据分析

本研究利用湿筛法获得的水稳性团聚体组分含量来计算团聚体分形维数、平均重量直径和几何平均粒级,综合干筛法与湿筛法得到的团聚体组分含量来计算团聚体的破坏率。

土壤团聚体分形维数(D)的计算采用杨培岭等^[15]的分形维数计算方法,其计算公式为:

$$(3-D)\lg \frac{Md_{i,i+1}}{Md_{\max}} = \lg \frac{W_{(r<Md_{i,i+1})}}{W_0}$$

(3)

式中: D 为分形维数; $Md_{i,i+1}$ 为两筛分粒级的平均粒径; $Md_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径; $W_{(r<Md_{i,i+1})}$ 为土粒直径小于 $Md_{i,i+1}$ 的累积质量; W_0 土壤各粒级质量的总和。利用该模型,分别以 $\lg \frac{W_{(r<Md_{i,i+1})}}{W_0}$ 和 $\lg \frac{Md_{i,i+1}}{Md_{\max}}$ 为纵、横坐标,通过回归分析(本研究中 $R^2>0.97$)确定土壤团聚结构的分形维数。

平均重量直径(MWD,mm)与几何平均粒级(GMD,mm)采用 Kemper 等^[16]提出的公式来计算:

$$\text{MWD} = \sum_i^n (\omega_i \times x_i)$$

(4)

$$\text{GMD} = \exp \left(\sum_i^n (\omega_i \times \ln x_i) \right)$$

(5)

式中: ω_i 为每一粒级团聚体的重量百分比(‰); x_i 为每一粒级团聚体的平均直径(mm)。

大团聚体破坏率(PAD,‰)的计算公式为:

$$\text{PAD} = \frac{(\text{DR}_{>0.25\text{ mm}} - \text{WR}_{>0.25\text{ mm}})}{\text{DR}_{>0.25\text{ mm}}} \times 100\%$$

(6)

式中: $\text{DR}_{>0.25\text{ mm}}$ 为干筛法获得的 >0.25 mm 团聚体的重量百分比(‰); $\text{WR}_{>0.25\text{ mm}}$ 为湿筛法获得的 >0.25 m 水稳性团聚体的重量百分比(‰)。

试验数据采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析。低、中、高累积区与对照区间的各指标均值差异采用 ONE-ANOVA 单因素方差分析来进行,在 $P<0.05$ 显著性水平上认为均值具有显著性差异。采用 Person 相关分析检验各指标之间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成与分形特征

土壤团聚体的水稳性是表征土壤结构稳定性的一个重要方面,通常用水稳性团聚体的数量和分布状况来评价。水稳性团聚体根据粒径大小分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)。其中,大团聚体的数量是判定土壤持水性、通透性和抗蚀能力等结构特性的一个重要指标^[3]。本研究中,CK 在 0—10,10—20 cm 表土层中的水稳性团聚体主要组分为 $>2,2\sim0.25$ mm 粒级大团聚体,含量分别为

45%~60%和 29%~35%;在 20—30 cm 土层中的水稳性团聚体主要组分为 2~0.25 mm 粒级大团聚体(49%),而在 30—40 cm 土层中为 2~0.25 mm 粒级大团聚体(43%)与 <0.053 mm 粒级微团聚体(30%)。相较于 CK,煤累积土壤的水稳性团聚体组成表现出明显的不同(图 1)。具体为:

(1)水稳性团聚体主要组分方面,从图 1c 可以看出,20—30 cm 土层中煤累积土壤的水稳性团聚体主要组分为 >2 mm(39%~58%)与 2~0.25 mm(27%~40%)粒级大团聚体,明显不同于 CK 的水稳性团聚体主要组分(2~0.25 mm 粒级)。从图 1d 可以看出,30—40 cm 土层中煤累积土壤的水稳性团聚体主要组分为 2~0.25 mm 粒级大团聚体(38%~49%),也明显不同于 CK 的水稳性团聚体主要组分(2~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级)。

(2)与 CK 相比,煤累积土壤的水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量在不同土层变化不同。0—10,20—30 cm 土层中,低、中、高累积区的水稳性大团聚体含量均显著增加($P<0.05$);而在 10—20,30—40 cm 土层中,低、中累积区的水稳性大团聚体含量显著增加($P<0.05$),

但高累积区的水稳性大团聚体含量显著降低(10—20 cm, $P<0.05$)与变化不明显(30—40 cm, $P>0.05$)。总体上,除了高累积区 10—20 cm 的土层例外,煤累积土壤在 0—40 cm 土层内的水稳性大团聚体含量均表现出不同程度的增加。与 CK 相比,深土层(20—40 cm)水稳性大团聚体含量的增幅为 9%~28%,高于表土层(0—20 cm)水稳性大团聚体含量的增幅(2%~12%)。此外也发现,4 个土层中不同程度煤累积土壤的水稳性大团聚体含量之间关系均表现出一致的变化趋势,即中累积区>低累积区>高累积区。

研究表明,煤在土壤中的累积可以促进水稳性大团聚体的发育,但随着煤累积程度的增加,当煤累积程度过高时反而不利于水稳性大团聚体的发育。李华等^[17]也报道了相似的结果。该研究发现,风化煤复垦黄土高原露天煤矿区退化土地可以明显提高土壤的水稳性团聚体含量。从图 1 也可看出,相较于 CK,各土层煤累积土壤的水稳性大团聚体组分所发生的变化与微团聚体组分变化趋势相反,进一步指出煤在土壤中累积促进水稳性大团聚体发育的原因,即细小煤粒进入土壤后促使土壤微团聚体向大团聚体转化。

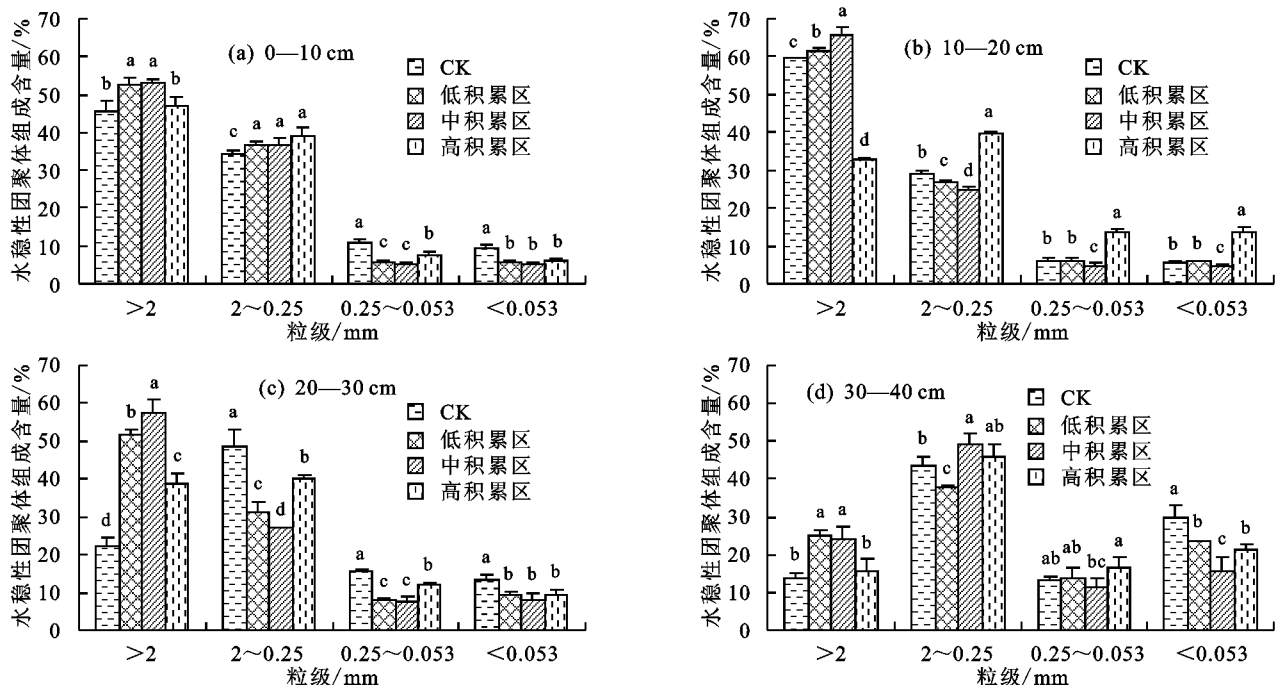


图 1 煤累积土壤的水稳性团聚体组成

2.2 土壤团聚体分形特征

土壤团聚体是土壤胶粒与有机、无机物质复合作用下多级聚合过程的产物,具有明显的几何分形特征,因此可以用团聚体分形维数(D)客观反映土壤团粒结构的性状。 D 值越小,土壤越疏松多孔,结构性与水土保持功能越强;反之, D 值越大,土壤的结构性与水土保持功能越差^[18]。由图 2 可知,相较于 CK,除了高累积区

10—20 cm 土层的团聚体 D 值增加外,不同程度煤累积土壤的团聚体 D 值均表现出不同程度的降低,尤其是在 0—10,30—40 cm 土层中降低显著($P<0.05$),表明煤累积可以改善土壤的团粒结构。

相关分析得知,CK 与煤累积土壤的水稳性大团聚体含量与 D 值均呈极显著负相关(图 3)。丁文峰等^[18]也报道过类似结果,表明土壤水稳性大团聚体

含量的变化是影响团聚体分形维数的重要因素,即水稳性大团聚体含量越高,分形维数越小。根据前文所述煤累积导致的水稳性大团聚体含量变化,并据此相关关系,可以很好地解释煤累积土壤的分形维数变化。此外,该结果也证实了 Young 等^[19]的研究发现,即分形维数可以反映团聚体组分的分布状态。

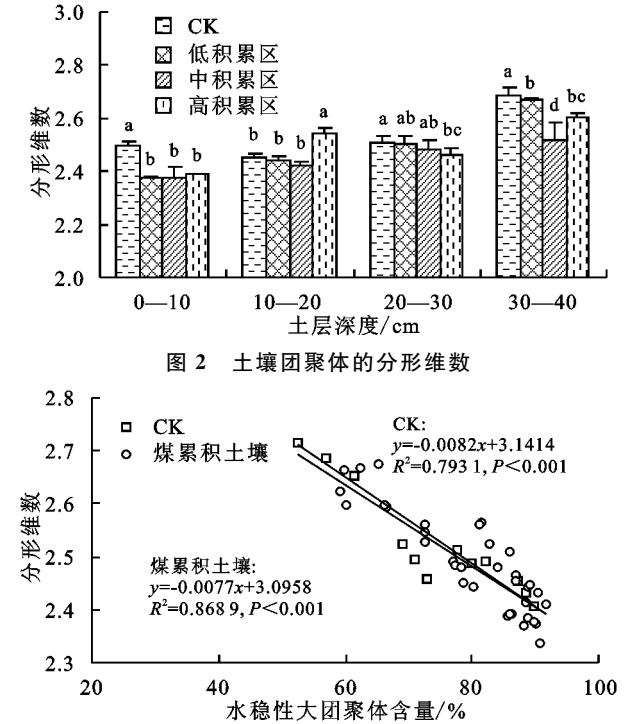


图 2 土壤团聚体的分形维数

2.3 土壤团聚体稳定性

平均重量直径(MWD)、几何平均粒径(GMD)和大团聚体破坏率(PAD)反映土壤颗粒的团聚化程度,是表征土壤团聚体稳定性的常用指标。MWD 和 GMD 值越大,土壤颗粒的团聚度越高,团聚体稳定性越强;与之相反,PAD 值越小,则土壤颗粒的团聚度越高,团聚体稳定性越强^[20]。由图 4 可知,总体上,煤累积土壤的 MWD 和 GMD 值相较于 CK 呈不同程度的增加(除了高累积区 10—20 cm 土层),表明煤在土壤中的累积可以提高土壤颗粒的团聚化程度,从而提高团聚体的稳定性。比较低、中、高累积区土壤的 MWD 和 GMD 值,发现不同土层的 MWD 和 GMD 值均随着煤累积程度的增加而表现出先增加后降低的趋势,表明过高度度的煤累积会降低土壤颗粒的团聚化程度和团聚体的稳定性。煤累积土壤的 PAD 值变化相反于 MWD 和 GMD 值的变化,它们之间呈极显著负相关(图 4c,表 2),这同样表明煤累积以及累积程度对土壤颗粒团聚化程度与团聚体稳定性的影响。

此外,PAD 值在高累积区 10—20 cm 的土层中相较于 CK 显著增加($P < 0.05$,图 4c),这可很好地

解释前文所述“高累积区 10—20 cm 土层水稳性大团聚体含量降低”的结果。究其原因,是因为在降雨或灌溉后,10—20 cm 土层中水分饱和和状态维持的时间较长,在此条件下,高累积区较多的游离态细小煤颗粒会充填较多的土壤大孔隙,额外增加土壤小孔隙的数量,使得土壤总孔隙度增加。因此,土壤水对大团聚体浸泡一分散的破坏作用强,从而降低水稳性大团聚体的含量。

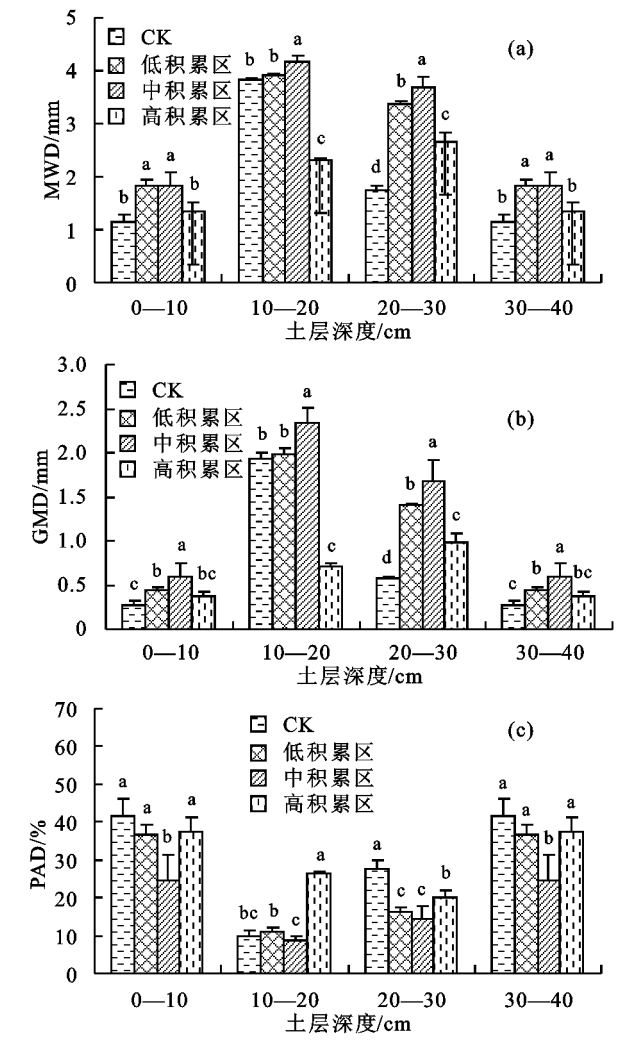


图 4 土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均粒径(GMD)和大团聚体破坏率(PAD)

2.4 土壤团聚体稳定性与团聚体组分之间的关系

相关检验(表 3)表明,煤累积土壤与 CK 的 MWD、GMD 值均与 >2 mm 的水稳性团聚体组分含量呈极显著正相关,与 <1 mm 的各粒径水稳性团聚体组分含量呈极显著负相关。相反,煤累积土壤与 CK 的 PAD 值均与 >2 mm 的水稳性团聚体组分含量呈极显著负相关,与 <1 mm 的各粒径水稳性团聚体组分含量呈极显著正相关。此外,煤累积土壤与 CK 的 MWD、GMD 和 PAD 值均与 2~1 mm 的水稳性团聚体组分含量不相关,表明土壤团聚体稳定性主要取决于 >2 mm 粒级的水稳性大团聚体。

表 3 土壤团聚体稳定性与团聚体组分之间的 Person 相关检验

项目	土壤团聚体 稳定性	>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	MWD	GMD	PAD
CK	MWD	0.999**	-0.295	-0.681**	-0.985**	-0.877**	-0.875**	1.000	0.983**	-0.964**
	GMD	0.982**	-0.265	-0.704**	-0.975**	-0.916**	-0.835**	0.983**	1.000	-0.939**
	PAD	-0.952**	0.086	0.499**	0.923**	0.769**	0.966**	-0.964**	-0.939**	1.000
煤累积土壤	MWD	0.999**	-0.101	-0.712**	-0.927**	-0.905**	-0.908**	1.000	0.977**	-0.930**
	GMD	0.974**	-0.047	-0.668**	-0.904**	-0.913**	-0.899**	0.977**	1.000	-0.926**
	PAD	-0.914**	-0.149	0.445**	0.793**	0.951**	0.982**	-0.930**	-0.926**	1.000

注:CK 的 $n=12$;煤累积土壤的 $n=36$; * * 表示各指标间在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

3 讨论

中国的矿粮复合区分布面积大,煤累积现象普遍。本研究首次系统探讨煤累积对土壤团聚体的影响,结果表明,一定程度的煤累积对土壤团粒结构的发育有利,但煤累积程度过高时又会对土壤团粒结构产生不利的影响。团粒结构是农业土壤最理想的结构,其形成机制表现为有机—无机物质复合的多级黏结团聚。土壤团粒结构的形成需要具备 2 个条件:胶结物质和成型动力。作为农田而言,耕作、干湿交替和生物作用等都可作为土壤团粒结构的成型动力。因此,在不缺少成型动力的基础上,团粒结构的形成主要取决于胶结物质的多少。土壤中的胶结物质可以分为有机胶体(有机质)和无机胶体(铝硅酸盐黏粒、碳酸钙等)2 大类。煤作为一种惰性有机质,当其进入土壤中会充当稳定的有机胶体,不像植物源有机质会被土壤微生物过快分解。同时,进入土壤中的煤颗粒细小,并伴生伊利石、高岭石、蒙脱石和绿泥石等黏土类矿物,因此表现出比表面大、亲水性强、表面负电性强等胶体特性^[21-22]。此外,尽管煤抗生物分解的能力强,但在土壤中长期受到水热条件的变化,仍然会受到一定程度的分解,从而转化成胶体特性更为突出的活性有机质^[23]。由于这些胶体特性,煤在土壤中累积能够结合更多土壤自身胶粒上的吸附点位(如碳酸钙、铁铝氧化物、腐殖质和钙镁等交换性阳离子),从而促进土壤胶体复粒的形成与发育,这可能是本研究中煤累积土壤水稳性大团聚体含量增加及团聚体稳定性增强的主要原因。但是,当煤在土壤中的累积程度过高时,水稳性大团聚体含量与团聚体稳定性降低,这主要归因于过多的煤使得土壤胶体双电层之外额外形成由煤粒组成的负电荷排斥层,它会通过静电斥力破坏土壤胶体复粒结构,也会通过阳离子吸附竞争的形式夺取土壤胶体上的吸附性阳离子,从而加剧团聚体解体。

一般来说,30—40 cm 的土层是农田土壤的犁底层,土体紧实,作物根系与微生物数量少,不是有机质分解与腐殖化的主要发生层。本研究中,大团聚体含量与团聚体分形维数的变化表明,煤累积明显改善

30—40 cm 的土壤结构,这种变化可以为土壤微生物营造更好的生境,从而促进有机质的腐殖化,增加土壤肥力的持续供应能力。此外,该种变化也会增加深土层的水分储量,有利于土壤的水分保持。

目前有关土壤团聚体稳定性的研究中,很多研究^[24-25]利用>0.25 mm 的水稳性团聚体含量来对土壤团聚体的稳定性进行评价。根据本研究发现,2~0.25 mm 粒径范围内的水稳性团聚体组分并不利于土壤团聚体的稳定性。因此,利用>0.25 mm 水稳性团聚体含量评价土壤团聚体稳定性过于笼统,不利于团聚体稳定性的科学评价。

4 结论

(1)煤在土壤中累积可以促进水稳性微团聚体向大团聚体转化,降低团聚体的分形维数,提高团聚体稳定性。深层(20—40 cm)土壤水稳性大团聚体含量的增幅高于表层(0—20 cm)土壤。

(2)土壤水稳性大团聚体含量和团聚体稳定性随煤累积程度的增高表现出先增加后降低的趋势。

(3)>0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量的变化是影响土壤团聚体分形维数的重要因素。土壤团聚体的稳定性主要取决于>2 mm 粒级水稳性团聚体的含量。

综合前期对焦作矿粮复合区无烟煤硫分、重金属含量及土壤中重金属含量等背景资料的调查以及本研究对煤累积土壤团聚体的评价,认为研究区长期运煤、堆煤、洗煤和矿井水灌排等活动导致的“黑土”现象并不能视作煤污染。希望研究者开展更多的相关研究,为我国矿粮复合区的耕地保护、生态文明建设与社会稳定提供科学依据。

参考文献:

[1] 胡振琪,李晶,赵艳玲. 矿产与粮食复合主产区环境质量和粮食安全的问题、成因与对策[J]. 科技导报 2006,24(3):21-24.

[2] 蔡立群,齐鹏,张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(2):141-145.

[3] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at

- several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2):133-149.
- [4] 薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 182-189.
- [5] Nouwakpo S K, Song J L, Gonzalez J M. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178:65-71.
- [6] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):340-347.
- [7] 李娟, 韩露昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):248-253.
- [8] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3):489-498.
- [9] Li G L, Fu Y, Li B Q, et al. Micro-characteristics of soil aggregate breakdown under raindrop action[J]. *Catena*, 2017, 162:354-359.
- [10] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6):177-182.
- [11] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [12] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9):1625-1632.
- [13] Ussiri D A N, Lal R. Method for determining coal carbon in the reclaimed minesols contaminated with coal[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1):231-237.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627-633.
- [15] 杨培岭, 罗远培, 石元春, 等. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [16] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[C]// Klute, A. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, Madison, 1986:425-442.
- [17] 李华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5):1752-1756.
- [18] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. *地理研究*, 2002, 21(6):700-706.
- [19] Young I M, Crawford J W, Rappoldt C. New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61:33-45.
- [20] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):211-216.
- [21] 闵凡飞, 赵晴, 李宏亮, 等. 煤泥水中高岭土颗粒表面荷电特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2):284-290.
- [22] 杨静, 李福勤, 邵立南, 等. 矿井水中悬浮物特征及其净化关键技术[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(3):458-460.
- [23] 刘平, 张强, 程滨, 等. 电厂煤粉尘沉降特征及其对周边土壤主要性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(5): 21-24.
- [24] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179:71-81.
- [25] 朱秋丽, 王纯, 严锦华, 等. 施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4):191-197.
- (上接第109页)
- [13] 张兴玲, 胡夏嵩. 青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 185-188.
- [14] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(8):1405-1410.
- [15] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10):2041-2045.
- [16] 李进林, 韦杰. 三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):229-233.
- [17] 黎娟娟, 韦杰, 李进林, 等. 紫色土坡耕地土质埂坎分层入渗试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4):69-74.
- [28] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2018, 166:124-133.
- [19] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4):610-614.
- [20] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J]. *公路工程*, 2006, 31(2):14-17.
- [21] 余沛, 柴寿喜, 王晓燕, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的加筋效应及工程应用问题[J]. *天津城建大学学报*, 2010, 16(3):161-166.