

不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性

谢钧宇^{1, 2}, 曹寒冰¹, 孟会生¹, 郭彦涵¹, 洪坚平¹, 张杰¹, 李云霄¹, 李廷亮¹

(1.山西农业大学资源与环境学院,山西 太谷 030801;2.土壤环境与养分资源山西省重点实验室,太原 030031)

摘要: 土壤团聚体的数量和质量直接影响着土壤性质和有机碳固存。研究不同施肥措施及施肥年限对采煤塌陷区复垦土壤团聚体的重量分布比例及其稳定性的影响,可为该区农业生产和土壤质量提升提供科学依据。采集复垦 6,11 年定位试验不同施肥处理耕层(0—20 cm)土样,选取不施肥(CK)、平衡施氮磷钾化肥(NPK)、单施有机肥(M)、有机无机肥配施(MNPK)4 个处理,利用干筛法和湿筛法获得 4 种粒径的团聚体/粉黏粒组分(> 2,0.25~2,0.053~0.25,< 0.053 mm),用>0.25 mm 团聚体的含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、团聚体破坏率(PAD)和土壤不稳定团粒指数(E_{LT})表示团聚体的稳定性,同时测定土壤有机碳含量。结果表明:施肥年限较施肥措施对土壤团聚体的含量及稳定性产生了更显著的影响。干筛条件下,施肥 6,11 年均显著降低了各处理 0.053~0.25 mm 团聚体和< 0.053 mm 组分的含量,降幅分别为 68.39%~87.37%,69.63%~78.32%(6 年)和 90.01%~93.68%,78.29%~83.93%(11 年);湿筛条件下,施肥 11 年显著提高了各处理> 2 mm 团聚体的含量,增幅达 473.35%~645.16%,但是显著降低了 0.053~0.25 mm 团聚体的含量,降幅为 43.67%~57.54%。土壤团聚体的稳定性也随着施肥年限的增加而逐渐增强,表现为 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 和 MWD 值呈增加趋势,而 PAD 和 E_{LT} 值呈降低趋势。土壤有机碳含量与 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、MWD 水稳性呈极显著正相关关系,而与 PAD 和 E_{LT} 呈极显著负相关关系。本研究表明,该区域连续培肥 11 年提高了土壤大团聚体的含量而伴随着微团聚体含量的显著减少,导致土壤结构越来越稳定。这对于提高采煤塌陷区复垦土壤肥力、改善土壤结构产生了良好的效果。

关键词: 复垦土壤; 施肥; 土壤团聚体; 稳定性; 团聚体破坏率

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)03-0274-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.041

Effects of Different Fertilization Regimes and Fertilization Ages on Size Distribution and Stability of Soil Aggregates

XIE Junyu^{1, 2}, CAO Hanbing¹, MENG Huisheng¹, GUO Yanhan¹,

HONG Jianping¹, ZHANG Jie¹, LI Yunxiao¹, LI Tingliang¹

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

2.Shanxi Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030031)

Abstract: The quantity and quality of soil aggregates directly affect soil properties and soil organic carbon (SOC) sequestration. This study investigated effects of various fertilization regimes and fertilization ages on the distribution and stability of dry aggregates and water-stable aggregates, aiming at providing a scientific basis for improving agricultural production and soil quality in long-term reclaimed areas, Shanxi Province, China. Surface soil samples of 0-20 cm horizons under different fertilization regimes were collected from 6-years and 11-years reclaimed areas, respectively. There are 4 different fertilization treatments (no fertilizer (CK), chemical fertilizer with nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK), organic manure alone (M), and chemical fertilizer combined with manure (MNPK)). All samples were separated into four aggregate-size fractions (>2, 0.25~2, 0.053~0.25 and <0.053 mm) by dry sieving and wet sieving methods. The >0.25 mm aggregate content ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), proportion of aggregate destruction (PAD) and unstable soil aggregate index (E_{LT}) were used to indicate the stability of aggregates. The SOC content in the bulk soil was determined. The fertilization age had a more significant effect on the distribution and stability of soil aggregates than the fertilization regime. Under the dry sieving condition, the distribution of 0.053~0.25 mm and <0.053 mm fractions in each treatment was reduced significantly at both fertilization

收稿日期:2019-11-07
资助项目:国家自然科学基金项目(41807102,U1710255-3,41401342);土壤环境与养分资源山西省重点实验室开放基金项目(2019003);山西省优秀博士来晋工作奖励项目(SXYBKY201805);山西农业大学科技创新基金(青年科技创新)项目(2019004)
第一作者:谢钧宇(1989—),女,山西忻州人,博士,讲师,主要从事土壤肥力研究。E-mail: xjy890621@163.com
通信作者:李廷亮(1982—),男,山西大同人,博士,教授,主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail: litingliang021@126.com

ages, with a decrease of 68.39%~87.37%, 69.63%~78.32% (6-years) and 90.01%~93.68%, 78.29%~83.93% (11-years); under the wet sieving condition, the distribution of >2 mm fraction increased significantly by 473.35%~645.16%, but the distribution of 0.053~0.25 mm fraction was significantly decreased by 43.67%~57.54% after 11-years reclamation. The stability of soil aggregates was also gradually enhanced with the increase of fertilization ages, showing that the distribution of $DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$ and MWD had an increasing trend, but the PAD and E_{LT} had a decreasing trend. SOC content showed an extremely significant positive correlation with the $DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$ and $MWD_{water-stable}$, but an extremely significant negative correlation with PAD and E_{LT} . It was concluded that the SOC content in the study area increased significantly after 11 years of consecutive fertilization, resulting in a more and more stable soil structure. It was conducive to improve stability of aggregates in this reclaimed area.

Keywords: reclaimed soil; fertilization; soil aggregates; stability; proportion of aggregate destruction

土壤团聚体作为土壤结构的基本构成单位,与土壤渗水性、透气性以及有机质储存和供应矿质养分的能力等有着密切关系,直接或间接影响土壤肥力和作物产量^[1]。以 0.25 mm 为界,将土壤团聚体分为 > 0.25 mm 的大团聚体和 < 0.25 mm 的微团聚体。通常 >0.25 mm 的团聚体($R_{0.25}$)是较理想的团聚体,它的保肥保水能力以及通气性均较好^[2]。但是容易忽略其他粒径团聚体的信息,因此也用平均重量直径(MWD)、团聚体破坏率(PAD)以及土壤不稳定团粒指数(E_{LT})等指标来描述团聚体的分布特征及其稳定性^[3]。土壤团聚体的粒径大小和数量分布受农田耕作措施、种植历史、施肥年限、施肥水平、土壤性质、气候条件、作物体系等因素的影响。不同类型的土壤上团聚体形成与稳定机制对土壤结构改良的作用不同^[1-7]。Chai 等^[4]在荒漠土上研究表明,连续 22 年施有机肥显著减少了大团聚体(> 2 mm)的含量;然而 Li 等^[5]认为,长期增施有机肥对潮土中 > 2 mm 粒径的团聚体含量无显著影响;但是柳开楼等^[1]在红壤旱地上研究认为,26 年连续平衡施用氮磷钾化肥(NPK)和有机无机肥配施(MNPK)均显著提高了大团聚体(> 1 mm)的含量,却显著降低了微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)的含量,且这 2 个处理均显著增强了土壤团聚体的稳定性。但是在潞育型水稻土^[6]和潮褐土^[7]上研究均发现,长期施化肥对土壤团聚体的稳定性无显著影响。还有研究^[8]指出,施有机肥增加了土壤中分散性黏粒的含量,进而显著降低了干筛团聚体的稳定性^[8]。另外,李小刚^[9]在甘肃灌区灰钙土上研究发现,黏粒含量对土壤团聚体的形成起关键作用。Zhang 等^[10]证实碳酸钙显著影响壤土团聚体的稳定性;Huang 等^[11]通过 21 年定位试验报道,有机质对红壤性水稻土团聚体的稳定性具有重要的作用。由此可见,有关不同施肥措施及施肥年限对土壤团聚体的大小分布及其稳定性影响的研究虽然很多,但是结论并不一致,因此,有必要针对性地开展系统研究。

山西是我国煤炭资源极为丰富、开采量比例最大的省份之一,常年原煤产量占全国的 25%以上。改革开放以来,山西累计生产原煤近百亿 t,导致 108 000 hm²的耕地遭到破坏(山西省发改委 2015)。因此,将破坏的土地复垦和重新利用,改善生态环境,缓解人地矛盾,实现区域生产和资源可持续利用成为山西的当务之急。在复垦过程中,通常是将表层土壤与底层土壤混合整平,甚至重新堆垫,造成土壤肥力低下,突出表现为有机碳养分含量低;土壤质地不良,结构性差。研究不同施肥措施及施肥年限对采煤塌陷区复垦土壤团聚体的粒径大小分布及其稳定性特征的影响,对于改良土壤结构、提高土壤质量、保证作物高产稳产,实现人与自然和谐发展具有重要意义。有关不同施肥措施及施肥年限下采煤塌陷区复垦土壤团聚体分布及其稳定性的研究仅有少量报道。何冰等^[12]的研究结果表明,连续 4、8 年单施有机肥均有利于提高复垦土壤 1~2 mm 机械稳定性团聚体的含量和团聚体的稳定性;李建华等^[13]认为,连续 8 年施用高量有机肥和无机肥可以显著提高 1~2、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体的含量,且显著降低了团聚体的分形维数。采煤塌陷区复垦土壤作为一种受人为干扰较多的土壤,目前的研究缺乏对机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的分布特征及其稳定性的综合分析。因此,本研究以 6 年、11 年的定位采煤塌陷区复垦土壤为对象,分析机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的大小分布及其稳定性对不同施肥措施及施肥年限的响应,以期提升该区域土壤肥力和合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验设计

试验地位于山西襄垣县(36°28'11.95"N, 113°00'52.57"E),属潞安集团五阳煤矿井田范围,煤矿开采导致地面沉陷后地形呈马鞍状,最大落差为 4~5 m,马鞍状峰距为 150~180 m,水浇地变成了旱薄地,土地生产力严重下降。属于低山黄土丘陵区,平

均海拔 980 m,暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,年平均气温9.5 ℃,年均降水量 532.8 mm,无霜期 160 d。该试验始于 2008 年,采用混推复垦的方式,即挖深点浅、就地平整。试验区土壤为石灰性褐土,黄土母质,质地是粉质壤土(粉粒:55%,砂粒:30%,黏粒:15%)。种植

作物为春玉米,播种密度为 60 000 株/hm²。每年 5 月左右播种,10 月左右收获,玉米秸秆全部还田。从 2013 年开始进行第 6 年复垦,2018 年开始进行第 11 年复垦。不同施肥年限各施肥处理下 0—20 cm 土层土壤的基本理化性状见表 1。

表 1 不同施肥年限各施肥处理下耕层土壤的基本理化性状

施肥 年限/a	处理	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0	生土	8.02	6.14	0.89	2.01	106.85
	CK	8.40	11.40	1.09	5.40	131.28
6	NPK	7.99	10.71	1.06	22.03	310.38
	M	8.22	13.76	1.20	37.83	212.69
	MNPK	8.27	15.21	1.08	80.53	294.10
	CK	8.33	10.86	1.03	3.35	98.71
11	NPK	8.00	12.08	1.35	12.58	228.97
	M	8.35	13.23	1.48	19.15	180.12
	MNPK	8.46	15.82	1.28	37.22	245.25

试验共设 7 个处理,本研究选取其中的 4 个处理:不施肥(CK);平衡施用氮磷钾化肥(NPK);单施有机肥(M);有机无机肥配施(MNPK)。其中,供试有机肥为完全腐熟的鸡粪,有机质含量为 25.8%,氮(N)含量为 1.68%,磷(P₂O₅)含量为 1.54%,钾(K₂O)含量为 0.82%。每个处理设置 3 次重复,采用完全随机排列。小区面积为 50 m²(10 m×5 m)。各施肥处理的总养分投入量相同,具体施肥量见表 2。

表 2 不同施肥处理的肥料用量

处理	单位:kg/hm ²			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥
对照(CK)	0	0	0	0
化肥(NPK)	201.5	184.8	98.4	0
有机肥(M)	0	0	0	12 000
有机肥+化肥(MNPK)	100.8	92.4	49.2	6 000

1.2 采样与分析

玉米收获前(2018 年 9 月 28 日)用环刀采集 0—20 cm 土层原状土壤,每个小区采集 5 个样点,然后混合成 1 个样品,同时采集未复垦的生土作为复垦土壤肥力提升程度的对比标准。将采集的原状土样带回实验室后,沿土壤结构小心地掰成<1 cm 的土块,剔除动植物残体及石块,过 8 mm 筛后,于通风干燥处风干,装入塑封袋中备用。

此外,玉米收获后,用土钻(高度为 20 cm,内径为 2.5 cm)采集每个小区 0—20 cm 土层样品 10 钻,混合后装入塑封袋中带回实验室,在阴凉通风处自然风干,并且剔除石块、动植物残体等肉眼可见杂物,研磨后过 0.15 mm 筛,采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机碳含量。

机械稳定性团聚体分级采用沙维诺夫干筛

法^[14]:称取 200 g 过 8 mm 筛的风干土样于 2 mm 筛上,同时下置 1,0.5,0.25,0.053 mm 孔径的土壤筛,干筛 5 min 后,得到>2,1~2,0.5~1,0.25~0.5,0.053~0.25 mm 粒径的土壤团聚体和<0.053 mm 的粉黏粒组分,称重,装入塑封袋中备用。为了方便和湿筛结果进行对比,将 1~2,0.5~1,0.25~0.5 mm 这 3 个粒径的土壤团聚体合并成为 0.25~2 mm 的土壤团聚体。

水稳性团聚体的测定采用 Elliott^[15]提出的方法:称取 50 g 过 8 mm 筛的风干土样于 2 mm 筛上,同时下置 0.25,0.053 mm 孔径的 2 个筛子,然后将整套筛子慢慢地放到装满 2/3 蒸馏水的桶中,浸泡 5 min,上下振荡 5 min,振幅为 3 cm,将各个筛子中的土样洗至已知重量的铝盒中,于 50 ℃烘至恒重,冷却后称重,即得到> 2,0.25~2,0.053~0.25 mm 粒径的土壤团聚体和<0.053 mm 粉黏粒组分的质量,装入塑封袋中备用。

1.3 数据处理与统计分析

>0.25 mm 的机械稳定性团聚体(DR_{0.25})的含量、>0.25 mm 的水稳性团聚体(WR_{0.25})的含量、平均重量直径(MWD)、团聚体破坏率(PAD)、土壤不稳定团粒指数(E_{LT})^[3]以及土壤水稳性团聚体稳定性变化的敏感性指标(SI)^[16]的计算公式分别为:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$
(1)

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$
(2)

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$
(3)

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$
(4)

$$E_{LT} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\%$$

(5)

$$SI = \frac{\text{变量最大值} - \text{变量最小值}}{\text{变量最小值}}$$

(6)

式中: w_i 为第*i*个粒径团聚体质量所占的百分含量(%); x_i 为第*i*个粒径团聚体的平均直径(mm); W_T 为供试土壤的总质量(g)。

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理, SPSS 18.0 软件进行相关性分析, SAS 8.0 软件进行方差分析, Origin 8.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的分布比例

干筛条件下,施肥措施及施肥年限下土壤团聚体分布比例的两因素方差分析结果(表 3)显示,施肥措施仅显著影响>2, 0.25~2 mm 土壤团聚体的分布比例,而施肥年限对各粒径机械稳定性团聚体及粉黏粒组分(<0.053 mm)的分布比例产生了显著影响,且施肥措施和施肥年限的交互效应对>2, 0.25~2 mm 土壤团聚体的分布比例也产生了显著影响。

分析不同施肥措施下复垦土壤机械稳定性团聚体的分布比例(表 3)发现,连续施肥 6 年,各处理均以> 2 mm 或 0.25~2 mm 团聚体的分布比例最高,占总量的 43.35%~54.70%;其次是<0.053 mm 组分,占 0.84%~1.08%;而 0.053~0.25 mm 团聚体的分布比例最少,仅占 0.40%~1.07%。同 CK 相比,长期施化肥(NPK)对>2, 0.25~2 mm 团聚体的分布比例无显著影响。单施有机肥(M)显著提高>2 mm 团聚体的分布比例,达 11.83%,却显著降低 0.25~2 mm 团聚体的分布比例,达 10.55%。有机无机肥配施(MNPK)显著提高了 0.25~2 mm 团聚体的分布比例,达 10.85%。施肥 11 年,各处理均以>2 mm 团聚体的分布比例最高,占总量的 68.49%~92.33%;其次为 0.25~2 mm 团聚体,占 6.10%~30.11%;再次是<0.053 mm 组分,占 0.62%~0.83%;而 0.053~0.25 mm 团聚体的分布比例最少,占 0.20%~0.35%(表 3)。同 CK 相比,NPK 处理显著降低>2 mm 团聚体的分布比例达 12.99%,但是显著提高 0.25~2 mm 团聚体的分布比例,大约是 CK 的 3 倍。M 和 MNPK 处理均显著降低>2 mm 团聚体的分布比例,降幅达 14.41%~25.82%,却显著提高 0.25~2 mm 团聚体的分布比例,增幅达 221.83%~393.84%。

湿筛条件下,施肥措施及施肥年限下土壤团聚体分布比例的两因素方差分析结果(表 3)显示,施肥措

施并没有影响各粒径团聚体及粉黏粒组分的分布比例,而施肥年限对各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的分布比例产生了显著影响。

比较不同施肥年限对土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体分布特征的影响(表 3)发现,随着施肥时间的延长,各处理中 0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分的分布比例均呈降低的趋势。

干筛条件下,同 0 年相比,连续 6 年施肥显著降低了各处理下> 2, 0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分的分布比例,降幅分别为 29.35%~72.14%(CK), 31.78%~81.94%(NPK), 21.00%~83.01%(M), 36.49%~87.37%(MNPK),而显著提高 0.25~2 mm 的分布比例,增幅为 81.23%~124.59%;连续 11 年施肥,CK、NPK 和 M 处理均显著提高>2 mm 团聚体的分布比例,增幅达 15.75%~35.25%,却显著降低了 0.25~2 mm 比例(除 M 处理外),降幅达 19.45%~74.97%;而且 4 个处理均显著降低 0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分的分布比例,降幅分别为 90.01%~93.68%和 78.29%~83.93%(表 3)。

湿筛条件下,施肥 6 年 CK 处理中>2 mm 团聚体的分布比例是 0 年的 3 倍,NPK 处理显著降低 0.053~0.25 mm 团聚体的分布比例达 49.00%;同 0 年相比,施肥 11 年显著提高了所有处理中>2 mm 团聚体的分布比例,增幅达 473.35%~645.16%,但是显著降低了 0.053~0.25 mm 团聚体的分布比例,降幅为 43.67%~57.54%(表 3)。

因此,无论在干筛还是湿筛条件下,随着施肥年限的延长,>2 mm 团聚体的数量呈增加趋势,而 0.053~0.25 mm 团聚体的数量呈降低趋势。

2.2 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的稳定性指标

施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、MWD、PAD 和 E_{LT} 值的两因素方差分析结果(表 4)显示,施肥措施仅显著影响了 MWD_{机械稳定性}值,而施肥年限对表征团聚体稳定性的各指标均产生了显著的影响,且施肥措施和施肥年限的交互效应仅对 MWD_{机械稳定性}值产生了显著的影响。

分析不同施肥措施下土壤团聚体的稳定性(图 1)发现,同 CK 相比,施肥 6 年,M 处理显著提高了 MWD_{机械性}值达 3.95%。施肥 11 年,NPK、M 和 MNPK 处理均显著降低了 MWD_{机械稳定性}值,降幅达 5.67%~11.01%,且以 MNPK 处理的降幅最大(图 1C)。

比较不同施肥年限下土壤团聚体的稳定性(图 1)发现,干筛条件下,随着施肥时间的延长,各处理的 $DR_{0.25}$ 值呈逐渐增高的趋势(图 1A),MWD 值呈先降低后增高的趋势(图 1C)。

表 3 不同施肥措施及施肥年限下土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的分布特征

筛分 方法	年限/ a	粒径/ mm	团聚体分布/%				Y(df=2)	T(df=3)	Y×T(df=6)
			CK	NPK	M	MNPK			
干筛	0	>2	68.27±5.78b	68.27±5.78b	68.27±5.78b	68.27±5.78a	* *	* *	* *
	6		48.23±5.54cC	46.57±2.44cBC	53.93±4.02cA	43.35±2.16bC			
	11		92.33±2.74aA	80.34±4.31aB	79.02±1.82aB	68.49±3.36aC			
	0	0.25~2	24.36±4.51b	24.36±4.51b	24.36±4.51b	24.36±4.51b	* *	* *	* *
	6		49.35±1.40aB	51.54±2.44aAB	44.14±2.70aC	54.70±2.08aA			
	11		6.10±2.76cC	18.46±2.50cB	19.62±1.70bB	30.11±3.39bA			
	0	0.053~0.25	3.18±0.99a	3.18±0.99a	3.18±0.99a	3.18±0.99a	* *	ns	ns
	6		1.07±0.26b	0.57±0.12b	0.54±0.10b	0.40±0.06b			
	11		0.35±0.05c	0.20±0.03b	0.30±0.05b	0.20±0.03b			
	0	<0.053	3.88±0.38a	3.88±0.38a	3.88±0.38a	3.88±0.38a	* *	ns	ns
	6		1.08±0.28b	0.86±0.09b	0.84±0.27b	1.09±0.06b			
	11		0.83±0.05b	0.76±0.09b	0.83±0.06b	0.62±0.06c			
湿筛	0	>2	6.23±0.47c	6.23±0.47b	6.23±0.47b	6.23±0.47b	* *	ns	ns
	6		20.84±3.96b	21.66±1.62ab	11.84±1.61b	10.75±1.56b			
	11		46.42±0.97a	36.85±2.40a	43.86±1.49a	35.72±1.49a			
	0	0.25~2	48.51±4.80a	48.51±4.80a	48.51±4.80ab	48.51±4.80ab	* *	ns	ns
	6		50.06±7.69a	54.65±6.32a	57.91±5.40a	62.61±4.06a			
	11		33.08±3.54a	44.93±3.69a	35.70±4.47b	40.55±2.88b			
	0	0.053~0.25	22.42±3.32a	22.42±3.32a	22.42±3.32a	22.42±3.32a	* *	ns	ns
	6		18.25±3.07ab	11.43±3.92b	17.29±3.18ab	14.21±2.85ab			
	11		9.52±0.28b	9.72±0.57b	11.21±1.75b	12.63±1.43b			
	0	<0.053	22.84±1.68a	22.84±1.68a	22.84±1.68a	22.84±1.68a	* *	ns	ns
	6		10.85±1.44a	12.26±1.05a	12.97±2.83a	12.43±1.79a			
	11		10.98±0.42a	8.50±0.58a	9.24±0.77a	11.10±0.90a			

注:不同大写字母表示相同施肥年限内不同处理之间存在显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示同一处理下不同施肥年限之间存在显著差异($P<0.05$);Y为施肥年限;T为施肥处理;Y×T为施肥年限与施肥处理的交互效应;* *为 $P<0.01$;ns为不显著。下同。

同 0 年相比,施肥 6 年和 11 年均显著增加了各处理下 $DR_{0.25}$ 值,增幅分别为 5.35%~5.92%(6 年)和 6.26%~6.67%(11 年)(图 1a)。但是,施肥 6 年显著降低了各处理的 $MWD_{机械稳定性}$ 值,降幅达 4.19%~9.83%,而施肥 11 年显著提高了各处理的 $MWD_{机械稳定性}$ 值,增幅达 3.88%~16.46%(图 1c)。

湿筛条件下,随着施肥时间的延长,各处理的 $WR_{0.25}$ (图 1b)、 $MWD_{水稳性}$ 值(图 1d)均呈增加趋势,且 $MWD_{水稳性}$ 值以施肥 11 年的效果更佳。 PAD 值(图 1e)和 E_{LT} 值(图 1f)呈下降趋势。

同 0 年相比,施肥 6 年和 11 年各处理均显著增加了 $WR_{0.25}$ 和 $MWD_{水稳性}$ 值,其中 $WR_{0.25}$ 的增幅分别为 27.40%~39.40%(6 年)和 39.32%~49.38%(11 年)(图 1b), $MWD_{水稳性}$ 值的增幅分别为 29.20%~

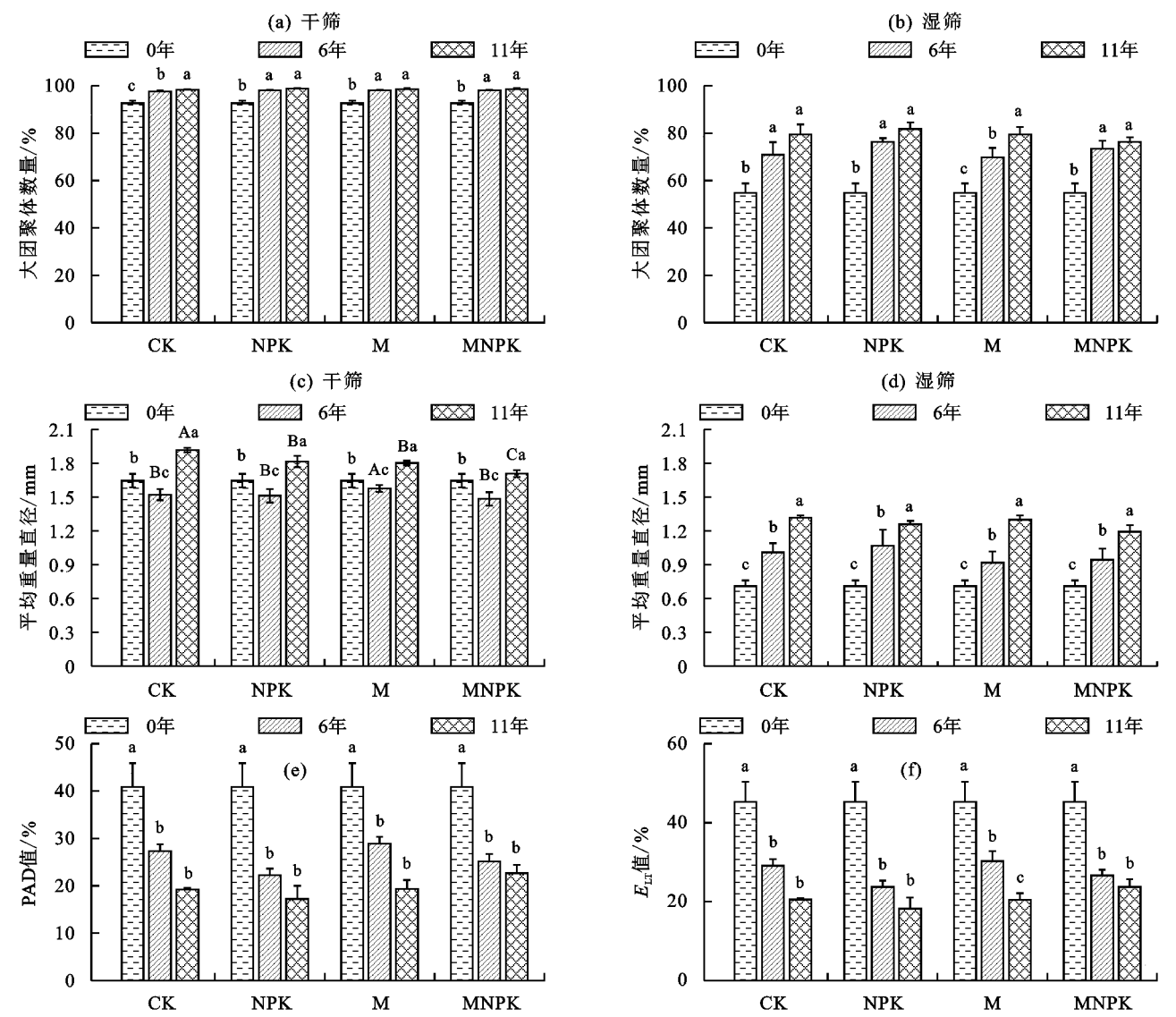
50.42%(6 年)和 67.88%~85.52%(11 年)(图 1d)。但是各处理均显著降低 PAD 和 E_{LT} 值,其中 PAD 值的降幅分别为 29.34%~45.66%(6 年)和 44.57%~57.84%(11 年)(图 1e), E_{LT} 值的降幅分别为 33.14%~47.65%(6 年)和 47.56%~59.73%(11 年)(图 1f)。

2.3 复垦土壤团聚体敏感性分析

分析复垦土壤水稳性团聚体稳定性指标的敏感性发现(表 5),连续 6 年和 11 年施肥,均以 PAD 的敏感性最高,约为 0.30。施肥 6 年, E_{LT} 、 MWD 和 $DR_{0.25}$ 分别比 PAD 降低 6.67%,46.67%和 70.00%;施肥 11 年, E_{LT} 、 MWD 和 $DR_{0.25}$ 分别比 PAD 降低 3.23%,64.52%,77.42%。因此, PAD 是描述耕层土壤水稳性团聚体稳定性特征的最佳指标。

表 4 施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 PAD 和 E_{LT} 值的两因素方差分析结果

项目	$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$	$MWD_{机械稳定性}$	$MWD_{水稳性}$	PAD	E_{LT}
Y(df=2)	* *	* *	* *	* *	* *	* *
T(df=3)	ns	ns	* *	ns	ns	ns
Y×T(df=6)	ns	ns	* *	ns	ns	ns



注:不同大写字母表示相同施肥年限内不同处理之间存在显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示同一处理下不同施肥年限之间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的稳定性

表 5 复垦土壤水稳性团聚体稳定性指标的敏感性分析

施肥年限/a	WR _{0.25}	MWD	PAD	E _{LT}
6	0.01	0.16	0.30	0.28
11	0.07	0.11	0.31	0.30

2.4 不同施肥措施及施肥年限下土壤有机碳含量

施肥措施及施肥年限下土壤有机碳(SOC)含量的两因素方差分析结果(表 6)显示,施肥措施和施肥年限均对 SOC 含量产生了显著影响,且施肥措施和施肥年限的交互效应对 SOC 含量也产生了显著的影响。

分析不同施肥措施下 6,11 年 SOC 含量发现(图 2),同 CK 相比,施肥 6 年,NPK 处理显著降低了 SOC 含量达 6.02%,M 及 MNPK 处理均显著提高了 SOC 含量,增幅达 20.74%~33.34%。施肥 11 年,各处理均显著提高了 SOC 含量,且以 MNPK 处理效果更显著,增幅达 11.23%~45.61%。

比较不同施肥年限下 SOC 含量的变化(图 2)发

现,同 0 年相比,施肥 6 年和 11 年均显著提高了 SOC 含量,增幅分别为 74.53%~147.83%(6 年)和 77.02%~157.76%(11 年)。由此可见,有机无机肥配施对 SOC 的增幅效果最明显,且培肥时间越久,土壤肥力提升效果更明显。

表 6 施肥措施及施肥年限下土壤有机碳含量的两因素方差分析结果

差异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	临界值
Y	122.628	2	61.314	12542.400	* *	3.403
T	16.922	3	5.641	1153.867	* *	3.009
Y×T	9.781	6	1.630	333.467	* *	2.508

2.5 不同施肥年限土壤有机碳含量与各稳定性指标之间的关系

分析不同施肥年限 SOC 含量与各稳定性指标之间的关系(表 7)发现,施肥 6 年和 11 年,SOC 含量与 DR_{0.25}、WR_{0.25} 和 MWD_{水稳性} 之间均呈极显著正相关关

系,但是它与 PAD 和 E_{LT} 之间均互呈极显著负相关关系,与 $MWD_{机械稳定性}$ 之间均无关系。由此可见,随着 SOC 含量的增加, >0.25 mm 团聚体的数量增多,土壤结构趋于稳定,有利于提升土壤肥力。

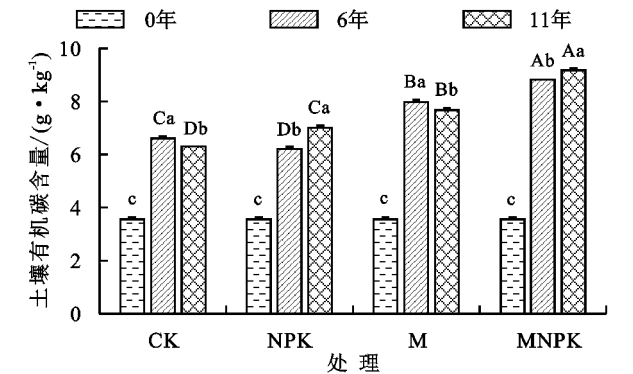


图 2 不同施肥措施及施肥年限下土壤有机碳含量

3 讨论

3.1 施肥措施和施肥年限对土壤团聚体分布比例的影响

土壤团聚体对于提升土壤结构的稳定性、增加土壤养分含量、促进微生物活动、提高土壤肥力等方面具有至关重要的作用^[17]。本研究结果显示,施肥年限较施肥措施对土壤团聚体数量的影响更显著。随着施肥

年限的增加,无论在干筛还是湿筛条件下,各处理大团聚体(>2 mm)的含量呈增加的趋势,微团聚体($0.053\sim0.25$ mm)的含量呈降低的趋势(表 3)。这与李倩倩等^[3]的研究结果一致,与施加生物炭 2 年相比,生物炭施入土壤 5 年后,干筛团聚体的数量呈降低的趋势。Six 等^[18]也曾指出,大团聚体数量的增加伴随着小团聚体数量的减少。因为随着施肥年限的延长,一方面提高了作物产量,增加了作物残茬还田量,有助于土壤中有機物质和矿质养分含量的累积,从而为植物根系的生长创造了良好的生态环境,有利于增加根系分泌物的含量^[17];另一方面,是因为这些根系残茬不仅为土壤中微生物的生长提供了有利的环境,还为它们补充了丰富的碳源物质,从而促进了微生物的繁殖^[19],增强了微生物的活性,促进了真菌菌丝生长,进而提高腐殖质含量。同时在微生物的驱动下,加速了有机物料的分解,产生了大量的多糖、木质素和蛋白质等不同种类的有机物质^[20],加之植物根系的“席垫”作用^[19],这些物质作为土壤中重要的有机胶结剂,它们将微团聚体、黏土矿质颗粒和粉砂黏粒粘结在一起,形成了有利于土壤结构稳定的大团聚体^[2]。

表 7 不同施肥年限土壤有机碳含量与各稳定性指标之间的关系

施肥年限/a	指标	SOC	$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$	$MWD_{机械性}$	$MWD_{水稳性}$	PAD	E_{LT}
6	SOC	1	0.82**	0.74**	-0.11	0.71**	-0.70**	-0.74**
	$DR_{0.25}$	0.82**	1	0.77**	-0.38	0.68**	-0.70**	-0.77**
	$WR_{0.25}$	0.74**	0.77**	1	-0.20	0.88**	-0.99**	-1.00**
	$MWD_{机械稳定性}$	-0.11	-0.38	-0.2	1	0.12	0.17	0.20
	$MWD_{水稳性}$	0.71**	0.68**	0.88**	0.12	1	-0.88**	-0.88**
	PAD	-0.70**	-0.70**	-0.99**	0.17	-0.88**	1	0.99**
	E_{LT}	-0.74**	-0.77**	-1.00**	0.20	-0.88**	0.99**	1
11	SOC	1	0.78**	0.74**	-0.06	0.76**	-0.71**	-0.74**
	$DR_{0.25}$	0.78**	1	0.89**	0.54*	0.92**	-0.85**	-0.89**
	$WR_{0.25}$	0.74**	0.89**	1	0.48*	0.96**	-1.00**	-1.00**
	$MWD_{机械稳定性}$	-0.06	0.54*	0.48*	1	0.52*	-0.45	-0.48*
	$MWD_{水稳性}$	0.76**	0.92**	0.96**	0.52*	1	-0.94**	-0.96**
	PAD	-0.71**	-0.85**	-1.00**	-0.45	-0.94**	1	1.00**
	E_{LT}	-0.74**	-0.89**	-1.00**	-0.48*	-0.96**	1.00**	1

3.2 施肥措施和施肥年限对土壤团聚体稳定性指标的影响

土壤结构的稳定性还受土壤团聚体胶结剂的种类和培肥时间的影响。通常,粒径 >0.25 mm 的团聚体($DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$)是较理想的团聚体。一般来说,它的含量越高,土壤的结构和性质越好^[2]。 MWD 值也是反映土壤团聚体稳定性的一个关键指标,其值越大,说明土壤团聚体的团聚程度越高,稳定性越强^[6]。此外,PAD和 E_{LT} 值亦能够很好地反映土壤团聚体稳定性,其值越大,表示土壤团聚体的稳定性越差,土壤退化程度

越高;反之则表示土壤结构越稳定^[3]。本研究结果表明,长期不同施肥较 CK 处理对土壤团聚体的稳定性指标影响较小(表 4,图 1),但是随着施肥年限的增加,土壤团聚体的稳定性逐渐增强,表现为 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 和 MWD 值呈增加趋势,而 PAD 和 E_{LT} 值呈降低趋势(图 1)。这是因为随着施肥年限的延长,通过提高作物产量增加了作物残茬投入到土壤中的有机物质含量。也有研究^[21]报道因为团聚体在遇水湿润的过程中,因孔隙中的空气受压缩后便会膨胀以至破碎,正是因为土壤有机物质的吸水能力远大于土壤矿物质的吸水能力,可以有

效地减缓水分的湿润速率,从而提高了土壤团聚体的稳定性,这也就从另一方面解释了土壤团聚体的稳定性随着施肥年限的增加而增加的原因。

本研究结果还发现, $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 和 $MWD_{\text{水稳性}}$ 值之间均互呈极显著正相关关系,且同 PAD 和 E_{LT} 值之间均互呈极显著负相关关系(表 7)。说明土壤团聚体的稳定性越强, MWD 值越大, >0.25 mm 团聚体的数量越多,致使团聚体的 PAD 和 E_{LT} 值越小。反之,土壤结构越不稳定,越容易遭到破坏,形成的小颗粒越多,导致大团聚体的数量减少, MWD 值减小,反而 PAD 和 E_{LT} 值增大,稳定性变差。与本研究一致,刘梦云等^[16]的研究结果显示, MWD 值与 PAD 值之间呈极显著负相关关系。

3.3 土壤有机碳与团聚体稳定性的关系

有机碳对土壤团聚体的形成起着重要的作用。本研究结果显示, SOC 含量与 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 和 $MWD_{\text{水稳性}}$ 值之间呈极显著正相关关系,与 PAD 和 E_{LT} 值之间呈极显著负相关关系,但与 $MWD_{\text{机械稳定性}}$ 值无显著关系(表 7)。说明 SOC 含量越高, >0.25 mm 团聚体的数量就越多,土壤团聚体的水稳性越强,土壤结构越稳定,反之亦然。这与安艳等^[22]在黑垆土上的研究结果一致,即施用生物质炭后降低了 0—10 cm 土层土壤机械稳定性团聚体的稳定性。复垦过程刺激了土壤中微生物的分解,加速了土壤有机质的矿化,而碳源补充不足是导致团聚体稳定性降低的主要原因。加之该区域属大陆性季风气候,降雨主要集中在 6—9 月,强烈的雨水冲刷后,加大了土壤颗粒之间的分散程度,使土壤黏结力下降,降低了土壤团聚体的稳定性,加剧了水土流失的风险。

本研究结果表明,施有机肥,尤其是有机无机肥配施,不仅能够补充土壤有机碳含量(图 2),而且有助于增加土壤中大团聚体的数量及其水稳性(表 7),是改善采煤塌陷区复垦土壤结构、培肥地力和保证作物稳产高产的有效途径。这一方面是因为有机肥中含有多糖、脂肪酸以及芳香族化合物,它们与土壤矿物颗粒结合后形成化学性质较为稳定的矿质结合态有机碳^[23];另一方面,植物的根系和菌丝数量有利于大团聚体的形成,而有机肥可以通过提高作物根部真菌的繁殖能力^[24],进而增加团聚体对有机碳的物理保护作用,两方面共同促进了 SOC 含量的提升。Six 等^[18]曾指出,在以 2:1 型黏土矿物为主的土壤上,有机质是最主要的胶结剂。本研究所在区域的土壤为褐土,黏土矿物以 2:1 型水云母和蛭石为主,伴有少量的蒙脱石和高岭石^[25]。因此, SOC 对土壤团聚体的稳定性贡献非常明显。综合本试验的结果,连续 11 年施肥对于培肥采煤塌陷区复垦土壤地力、提高团聚体稳定性产生了良好的效果。

4 结论

通过 6,11 年复垦定位试验表明,随着施肥年限的增加,无论在干筛还是湿筛条件下,各处理中大团聚体(>2 mm)的含量呈增加的趋势,伴随着微团聚体($0.053\sim0.25$ mm)含量的减少。土壤团聚体的稳定性逐渐增强,表现为 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 和 MWD 值呈增加趋势,而 PAD 和 E_{LT} 值呈降低趋势。且 PAD 值是描述耕层土壤水稳性团聚体稳定性特征的最佳指标。土壤有机碳含量与 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、 $MWD_{\text{水稳性}}$ 呈极显著正相关关系,而与 PAD 和 E_{LT} 呈极显著负相关关系,说明有机碳含量越高,土壤结构越稳定。同时也说明有机碳是本研究所在区域土壤团聚体形成的主要胶结物质。综上,供试条件下,连续 11 年施肥对于培肥地力、提高团聚体稳定性产生了良好的效果。

参考文献:

- [1] 柳开楼,黄晶,张会民,等.长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J].土壤学报,2018,55(2):443-454.
- [2] 李文军,杨基峰,彭保发,等.施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):4007-4015.
- [3] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等.生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J].环境科学,2019,40(7):3388-3396.
- [4] Chai Y J, Zeng X B, E S Z, et al. Response of soil organic carbon and its aggregate fractions to long term fertilization in irrigated desert soil of China [J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(12):2758-2767.
- [5] Li P P, Han Y L, He J Z, et al. Soil aggregate size and long-term fertilization effects on the function and community of ammonia oxidizers [J]. Geoderma,2019,338(15):107-117.
- [6] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤学报,2015,52(4):828-838.
- [7] 刘振东,李贵春,周颖,等.无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2239-2245.
- [8] Munkholm L J, SchjØnning P, Debosz K, et al. Aggregate strength and mechanical behavior of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments [J]. European Journal of Soil Science,2002,53(1):129-137.
- [9] 李小刚.甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究[J].土壤学报,2000,37(2):263-270.
- [10] Zhang S L, Wang R J, Yang X Y, et al. Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol [J]. Science Reports,2016,6(1):e39107.

- 178:304-313.
- [14] 李辉,柴守玺,常磊,等.西北半干旱区秸秆带状覆盖对土壤水分及马铃薯产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):148-156,256.
- [15] 邱野,王瑄.耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):128-137.
- [16] 韩文霆,王玄,孙瑜.喷灌水量分布动态模拟与均匀性研究[J].农业机械学报,2014,45(11):159-164,200.
- [17] Li J S. Increasing crop productivity in an eco-friendly manner by improving sprinkler and micro-irrigation design and management: A review of 20 years' research at the IWHR, China [J]. Irrigation and Drainage,2017,67(1):97-112.
- [18] Ortiz J N, Tarjuelo J M, Juan J A D. Effects of two types of sprinklers and height in the irrigation of sugar beet with a centre pivot [J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2012,10(1):251-263.
- [19] Sanchez I, Zapata N, Faci J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: I. Irrigation performance and soil water recharge in alfalfa and maize [J]. Agricultural Water Management, 2010,97:1571-1581.
- [20] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.
- [21] 田慎重,王瑜,宁堂原,等.转变耕作方式对长期旋免耕农田土壤有机碳库的影响[J].农业工程学报,2016,32(17):98-105.
- [22] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等.耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):264-270.
- [23] 张丽华,李军,贾志宽,等.渭北旱塬保护性耕作对冬小麦一春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J].应用生态学报,2011,22(7):1750-1758.
- [24] Liu H J, Yu L, Luo Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes [J]. Agricultural Water Management,2011,98:483-492.
- [25] Shiva K J, Tefo S R, Wang G, et al. Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2019,217:292-302.
- [26] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2031-2037.
- [27] 朱忠锐,范永申,段福义,等.喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):174-178.
- (上接第281页)
- [11] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China [J]. Geoderma,2010,154(3/4):364-369.
- [12] 何冰,李廷亮,栗丽,等.采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J].水土保持学报,2018,32(4):184-196.
- [13] 李建华,李华,郜春花,等.长期施肥对晋东南矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].华北农学报,2018,33(5):188-194.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [15] 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.
- [16] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.
- [17] Xie J, Peng B, Wang R, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthroso [J]. European Journal of Soil Science,2018,69:555-567.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [19] 李婕,杨学云,孙本华,等.不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.
- [20] 李映强,曾觉延.不同耕作制下水稻土有机物质变化及其团聚作用[J].土壤学报,1991,28(4):404-409.
- [21] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I: Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science,2016,67(1):11-21.
- [22] 安艳,姬强,赵世翔,等.生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J].环境科学,2016,37(1):293-300.
- [23] 谢钧宇,彭博,王仁杰,等.长期不同施肥对壤土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1-11.
- [24] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms [J]. Plant Soil, 2007,300(2):9-20.
- [25] 吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2006.