

施用不同改良材料对黄土区空心村复垦土壤结构和有机质含量的影响

刘哲^{1,2,3,4}, 王欢元^{1,2,3,4}, 孙婴婴^{1,2,3,4}, 孙增慧^{1,2,3,4}, 张瑞庆^{1,2,3,4}

(1.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;

2.自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710021; 3.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710021; 4.陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075)

摘要: [目的] 解决黄土区空心村废弃宅基地复垦土壤结构不良, 肥力低下的严重问题, 为空心村复垦土壤的质量提升提供理论依据。[方法] 选取 6 种不同改良材料处理进行了 5 a 的田间定位试验, 分析了对照(CK)、熟化剂(TM)、粉煤灰(TF)、有机肥(TO)、熟化剂+粉煤灰(TMF)、熟化剂+有机肥(TMO)、粉煤灰+有机肥(TFO)处理对复垦土壤结构稳定性和有机质含量的改善效应。[结果] 与对照处理相比, 长期施用不同改良材料后空心村复垦土壤有机质含量明显增加, 促使水稳性微团聚体(<0.25 mm)胶结形成水稳性大团聚体(>0.25 mm), 水稳性大团聚体含量均呈增加趋势。在 0—15 cm 土层, TM, TF, TO, TMF, TMO, TFO 处理下水稳性大团聚体含量分别比 CK 处理增加了 328.2%, 130.0%, 87.8%, 81.1%, 36.7%, 12.2%。TF, TO, TMF, TMO, TFO 处理显著增加了土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)值, 降低了不稳定团粒指数(E_{LT})、分形维数(D) ($p < 0.05$)。土壤有机质含量与 MWD, GMD, >2 mm 粒级水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系, 与 E_{LT} , D , <0.25 粒级水稳性微团聚含量呈极显著负相关。其中, 粉煤灰+有机肥处理下空心村复垦土壤的水稳性大团聚体和有机质含量最高, 土壤结构稳定性提升效果最好。[结论] 在黄土区空心村废弃宅基地复垦土壤整治中, 粉煤灰+有机肥的有机无机结合处理是黄土区空心村复垦土壤结构改善和肥力提升适宜的改良措施。

关键词: 空心村; 宅基地复垦土壤; 改良材料; 土壤水稳性团聚体; 团聚体稳定性; 土壤有机质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0016-09

中图分类号: S156.2, S158.5

文献参数: 刘哲, 王欢元, 孙婴婴, 等. 施用不同改良材料对黄土区空心村复垦土壤结构和有机质含量的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 16-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.003; Liu Zhe, Wang Huanyuan, Sun Yingying, et al. Effects of different amendment materials on reclaimed soil structure and organic matter content of hollow village in loess region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 16-24.

Effects of Different Amendment Materials on Reclaimed Soil Structure and Organic Matter Content of Hollow Village in Loess Region

Liu Zhe^{1,2,3,4}, Wang Huanyuan^{1,2,3,4}, Sun Yingying^{1,2,3,4}, Sun Zenghui^{1,2,3,4}, Zhang Ruiqing^{1,2,3,4}

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi

710075, China; 2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering,

the Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Institute of Land Engineering and

Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China;

4. Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: [Objective] The poor structure and low fertility of reclaimed soil of abandoned homesteads in hollow villages in the loess area were addressed in order to provide a theoretical basis for improving the quality of reclaimed soils. [Methods] The effects of six different treatments of modified materials on

收稿日期: 2022-01-26

修回日期: 2022-03-14

资助项目: 陕西省土地工程建设集团内部科研项目“不同有机物料处理下土壤团聚体稳定性的内力作用机制”(DJNY2020-25); 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2022-15, DJNY2022-35, DJTD-2022-5), 陕西地建—西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金资助项目(2021WHZ0092)

第一作者: 刘哲(1987—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事土壤质量提升及水资源高效利用研究。Email: liuzhel68@126.com。

structural stability and soil organic matter (SOM) of a reclaimed soil were compared with a control (CK) treatment in a five-year field experiment. The modified materials treatments were maturing agent (TM), fly ash (TF), organic fertilizer (TO), maturing agent + fly ash (TMF), maturing agent + organic fertilizer (TMO), and fly ash + organic fertilizer (TFO). [Results] SOM content was significantly increased (compared with CK) after the application of the different modified materials that promoted the cementation and aggregation of water-stable microaggregates (<0.25 mm) into water-stable macroaggregates (>0.25 mm). The content of water-stable macroaggregates showed an increasing trend. In the 0—15 cm soil layer, the contents of water-stable macroaggregates under TM, TF, TO, TMF, TMO, and TFO were increased by 328.2%, 130.0%, 87.8%, 81.1%, 36.7%, and 12.2%, respectively, compared with CK. Moreover, the application of the TF, TO, TMF, TMO, and TFO treatments significantly increased the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates, while the unstable-aggregate index (E_{LT}) and fractal dimension (D) were decreased ($p < 0.05$). SOM content was significantly positively correlated with MWD, GMD, and >2 mm water-stable aggregates, and significantly negatively correlated with the E_{LT} , D , and water-stable microaggregates. In particular, reclaimed soil under TFO had the highest content of SOM and water-stable macroaggregates, and the best effect on improving soil structural stability. [Conclusion] Using a combination of organic fertilizer and fly ash is an appropriate practice to improve reclaimed soil structure and fertility of abandoned homesteads in hollow villages in the loess region.

Keywords: hollow village; homestead reclamation soil; modified materials; soil water-stability aggregate; aggregate stability; soil organic matter

黄土塬区面临着生态条件脆弱、耕地面积减少、耕地后备资源匮乏、人地矛盾加剧的现实问题,伴随着城镇化、工业化进程的快速推进实施,农村青壮年劳动力大量迁移城市,造成农村废弃空心化现象更加严重,使得大量的废弃宅基地资源闲置浪费^[1-3]。而且农村宅基地建设普遍存在“建新不拆旧”,不断占用优质耕地向外围扩展,农村人口转移减少而宅基地规模却扩大的不良态势,形成了村庄新房建设规模不断扩大,村内宅基地废弃闲置的农村空心化的普遍现象,造成了大量耕地资源的破坏占用以及优质土地资源的闲置浪费,严重威胁着耕地资源的保护与区域粮食安全,成为限制美丽乡村建设和统筹城乡高质量发展面临的主要瓶颈^[4-6]。对此,结合黄土区人地矛盾不断加剧,当地对于废弃宅基地进行土地复垦的需求增大的需求,深入推进空心村土地综合整治,开展废弃宅基地复垦对于新时期城乡一体化高质量发展、实行耕地“占补平衡”、保障国家粮食安全、缓解区域人地矛盾具有迫切的战略意义^[6-8]。空心村复垦土壤主要来源于废弃宅基地的老墙土。由于老墙土受到自然和人为因素的共同影响,多为常年没有耕种的生土,缺乏耕作土壤自然的功能与属性,其物理结构不良和土壤肥力低下严重,极大地限制了空心村复垦土壤产能和健康可持续发展,亟需改善宅基地复垦土壤的结构性能与肥力特性,提高复垦土壤的产能^[9-10]。

土壤团聚体的数量和结构不仅是影响土壤侵蚀、板结、紧实状况等结构状况的重要指标,而且在供储

土壤养分、调节土壤持水能力、维持土地生产力方面发挥着关键作用,是能很好地评价土壤肥力特性和环境质量变化的关键指标^[11-13]。相比于非水稳性团聚体,水稳性团聚体在维持土壤结构稳定性、抗侵蚀性、土壤养分保持方面发挥着更为重要的作用^[14-15]。研究发现,有机质含量的提升与水稳性团聚体数量和稳定性的提升有着直接的关系。因此,施用土壤改良材料可有效地增加土壤的有机质含量,促进土壤团聚体的胶结团聚与结构稳定性的提升,改善复垦土壤肥力和抗侵蚀能力^[16-17]。粉煤灰是燃煤电厂排出的粉状固体残渣,具有发达的比表面积和多级孔隙,含有丰富的黏土颗粒和 Al_2O_3 , Fe_2O_3 等氧化物,可显著提高土壤颗粒间的相互吸附和团聚能力,增强土壤保水保肥能力^[18-19]。硫酸亚铁熟化剂在改善土壤结构的同时,降低土壤 pH 值,也可用作肥料,对植物的吸收起着重要促进作用^[20]。有机肥富含有机质和多种营养物质,可有效改善土壤肥力和结构,提高土壤生产力,保持土壤健康和作物产量的可持续性^[21-22]。因此,通过应用不同的土壤改良材料对空心村复垦土壤进行熟化和改良,增强复垦土壤结构稳定性和肥力特性,使其迅速恢复其耕作土壤的功能和性质具有现实意义和紧迫性。然而,目前关于空心村整治主要集中在整治潜力评估、演变规律、区域宏观整治模式、调控政策等方式上,这些对空心村废弃宅基地整治有着重要意义^[23-25],但空心村复垦土壤作为区域补充耕地资源的关键举措,对于分析不同土壤改良材料对复垦土

壤结构改善和稳定性提升的研究较少。为此,本文以黄土塬区空心村复垦土壤为研究对象,对比研究不同改良材料处理对复垦土壤结构及有机质含量的影响,评估不同改良材料施入后复垦土壤有机质含量与水稳性团聚体各指标间的相关关系,以期筛选出适宜空心村土壤改良的适宜材料,为改善空心村复垦土壤结构,提高复垦土壤肥力和抗侵蚀性提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 空心村土地复垦方式及试验区概况

空心村复垦土壤改良长期定位试验小区依托自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室,布设于陕西省富平县中试基地(34°42'N,109°12'E),该研究区属于渭北黄土塬区,气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温为 12.2℃,年平均降水 533.2 mm,年光能辐射总量为 567.06 kJ/cm²,四季分明。试验小区建于 2015 年 6 月 15 日,空心村废弃宅基地复垦土壤为土地整治项目的老墙土进行回填,回填深度为 30 cm,剔除宅基地复垦老墙土中的瓦砾、石块等杂质后,通过添加土壤改良材料对复垦土壤进行熟化和结构改良,以满足小麦、玉米等粮食作物的正常生长。

复垦土壤主要为黄土母质发育而成,试验开始前 0—30 cm 复垦土壤基础理化指标如下。pH 值(1:2.5 水土质量比)为 8.5,土壤质地为粉壤土(美国制),其中黏粒(<0.002 mm)含量为 10.15%,粉粒(0.05~0.002 mm)含量为 77.82%,砂粒(0.05—2 mm)含量为 12.65%,有机质含量为 4.4 g/kg,土壤全氮含量为 0.15 g/kg,有效磷含量为 70.4 mg/kg,速效钾 61.3 mg/kg。土壤容重为 1.40 g/cm³,>2,1~2,0.5~1,0.25~0.5 和 <0.25 mm 粒级水稳性团聚体的比例分别为 0.67%,0.84%,1.67%,3.55%,93.27%。综上所述,空心村废弃宅基地复垦土壤主要以黄土母质的老墙土为主,土壤肥力和结构较差。

1.2 试验设计

空心村复垦土壤长期定位田间改良试验开始于 2015 年 6 月。依据还田改良材料的特性调查和已发表文献分析,针对复垦土壤存在的问题,本文采用粉煤灰、有机肥(腐熟鸡粪)和硫酸亚铁(FeSO₄)作为复垦土壤改良材料,粉煤灰中环境污染指标 As, Hg, Cu, Pb, Zn, Cd 的含量分别为 13.59, 0.10, 91.6, 22.72, 57.81, 0.06 mg/kg,符合土壤环境质量评价标准(GB15618-2008)。本试验采用随机区组田间试验设计,共设置 7 种处理,分别为熟化剂(TM)、粉煤灰(TF)、有机肥(TO)、熟化剂+粉煤灰(TMF)、熟化剂

+有机肥(TMO)、粉煤灰+有机肥(TFO)、无改良材料添加对照(CK)处理,每种处理设置 3 个重复,每个处理小区为 2 m×2 m 的正方形田块,共计 21 个小区,每个小区中间设有 80 cm 宽的隔离带。作物种植制度为冬小麦—夏玉米轮作的两年三熟制度,供试冬小麦在 10 月中旬播种,播种量为 220.5 kg/hm²,第二年 5 月下旬收获,品种为长武 134。夏玉米 6 月上中旬播种,播种密度为 2.65×10⁵ 株/hm²,10 月上旬收获,品种为先玉 958。采用人工播种的方式,播种前所有处理撒施复合肥 1 500 kg/hm²,复合肥中氮磷钾含量分别为 15%,10%,20%,然后将 6 种不同处理的改良材料均匀地撒施在土壤表面,通过人为耕作的方式将不同的改良材料均匀拌入到 0—30 cm 的空心村复垦土壤中,每种试验处理一次性施入土壤改良材料,7 种处理化肥用量、浇水量、病虫害防治等其他管理措施与水平保持一致,具体土壤改良材料处理及用量见表 1。

表 1 空心村复垦土壤改良试验设计

序号	处理	改良材料	施用量/(t·hm ⁻²)
1	CK	对照(无添加)	0.0
2	TM	熟化剂(硫酸亚铁)	0.6
3	TF	粉煤灰	45
4	TO	有机肥(腐熟鸡粪)	30
5	TMF	熟化剂+粉煤灰	(0.6+45)
6	TMO	熟化剂+有机肥	(0.6+30)
7	TFO	粉煤灰+有机肥	(45+30)

1.3 测定指标及计算方法

供试土样于 2020 年 5 月下旬冬小麦收获后,分 0—15 cm 和 15—30 cm 两个土层分别采集测定土壤团聚体的原状土样和测定土壤有机质含量的混合土样,每个处理分 3 个重复进行取样,土壤团聚体采用不锈钢铝盒进行保存,运输过程中尽量避免对土壤团聚体结构的影响。带回实验室自然风干后,原状土样按照土样自然裂痕轻轻掰成 10 mm 左右的小土块,剔除石块等杂质后备用,进行土壤水稳性团聚体、有机质等指标的检测。土壤容重采用环刀法测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定^[26]。0—15 cm 和 15—30 cm 两个土层土壤水稳性团聚体分布与大小采用湿筛法测定^[27],团聚体结构稳定性指标平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD),土壤不稳定团粒指数(E_{LT})和分形维数(D)详细计算见公式(1)—(4)和相关的参考文献计算分析^[28-30]。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (2)$$

$$E_{LT} = \frac{M_T - R_{0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

1.4 数据统计分析

通过 SigmaPlot12.5 软件进行图形绘制,采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对所有试验数据进行统计和方差分析,采用 LSD 法进行不同处理间多重比较($p < 0.05$)。

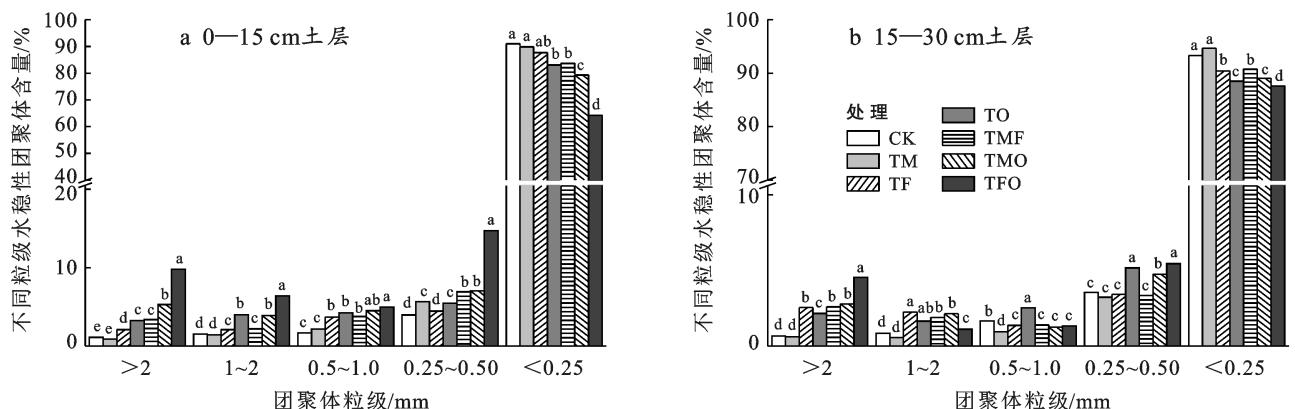
2 结果与分析

2.1 改良材料对复垦土壤水稳性团聚体分布的影响

水稳性团聚体是评价土壤结构稳定性和抗侵蚀能力的重要指标,其数量和分布状况能很好地反映土壤结构和土壤质量的变化^[31]。与对照处理相比,长期施用不同改良材料处理后 0—15 cm 和 15—30 cm 土层复垦土壤水稳性团聚体分布状况发生了显著变化(图 1)($p < 0.05$)。在 0—15 cm 深度土层,各改良材料对复垦土壤的水稳性大团聚体(> 0.25 mm)含量呈增加趋势。其中除熟化剂(TM)处理外,粉煤灰(TF)、有机肥(TO)、熟化剂+粉煤灰(TMF)、熟化剂+有机肥(TMO)、粉煤灰+有机肥(TFO)相比于

对照(CK)处理均显著增加了 $> 2, 1 \sim 2, 0.5 \sim 1$ mm 粒级水稳性团聚体的含量,尤其是 > 2 mm 粒级水稳性团聚体的数量增加最为明显(图 1a)。TF, TO, TMF, TMO, TFO 处理下 > 2 mm 粒级水稳性团聚体分别比 CK 处理增加了 88.1%, 194.5%, 203.7%, 376.2%, 781.7%, 水稳性大团聚体含量呈现出 TFO (35.8%) $>$ TMO (20.7%) $>$ TO (16.9%) $>$ TMF (16.3%) $>$ TF 处理(12.3%) $>$ TM 处理(10.1%) $>$ CK 处理(9.0%)的大小顺序,水稳性大团聚体分别比对照处理增加了 328.2%, 130.0%, 87.8%, 81.1%, 36.7%, 12.2%, 增幅最大为 328.2%。总体来看,6 种不同改良材料处理均增加了空心村复垦土壤的水稳性大团聚体的含量,促进了水稳性微团聚体(< 0.25 mm)向水稳性大团聚体(> 0.25 mm)的团聚胶结,其中 TFO 处理对于增加的水稳性大团聚体的效果最好, TMO, TO 和 TMF 处理的效果次之, TF 和 TM 处理的效果不是很显著。

在 15—30 cm 深度土层,与 CK 处理相比,水稳性团聚体变化呈现出与 0—15 cm 土层相似的趋势, TF, TO, TMF, TMO, TFO 处理均显著增加了 $> 2, 1 \sim 2$ mm 粒级水稳性团聚体的含量,降低了水稳性微团聚体的含量(图 1b)($p < 0.05$)。其中 TF, TO, TMF, TMO, TFO 处理后 > 2 mm 粒级水稳性团聚体分别比 CK 处理增加了 130.3%, 94.5%, 133.9%, 151.4%, 309.2%, TFO 处理对于水稳性大团聚数量的增加最为显著。相比于 0—15 cm 土层,随着土层深度的增加,15—30 cm 土层水稳性大团聚体数量呈现出逐步降低的趋势。



注:小写字母表示不同改良材料处理下差异显著性($p < 0.05$),下同。

图 1 长期施用不同改良材料处理下不同土层各粒级水稳性团聚体含量

2.2 改良材料对复垦土壤水稳性团聚体结构的影响

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、不稳定团粒指数(E_{LT})、分形维数(D)是反映土壤团

团聚体结构几何形状和结构稳定性的重要指标,研究表明 MWD, GMD 值越高, E_{LT} , D 值越小, 团聚体的结构稳定性越好, 土壤结构越好^[32-33]。与 CK 处理相

比,施用不同改良材料处理后,TF,TO,TMF,TMO,TFO 处理下 MWD,GMD 值呈显著增加的趋势, D , E_{LT} 值呈显著减小的趋势($p < 0.05$),TM 处理对团聚体稳定性指标影响不显著(表 2)。在 0—15 cm 深度土层,TF,TO,TMF,TMO,TFO 处理下 MWD 值分别比 CK 处理增加了 6.19%,27.66%,22.16%,49.71%,125.96%,GMD 值分别比 CK 处理增加了 4.09%,12.46%,9.34%,19.82%,49.15%, E_{LT} 值分别比 CK 处理减小了 1.35%~29.5%, D 值分别比 CK 处理减小了 0.76%~4.35%,TF,TO,TMF,TMO,TFO 处理均不同程度地改善了团聚体的团聚能力,增强了复垦土壤的结构稳定性和抗侵蚀的能力,其中 TFO 处理对团聚体结构稳定性的改善效果最佳。在 15—30 cm 深度土层,与 CK 处理相比,TF,TO,TMF,TMO,TFO 处理下 MWD,GMD, D , E_{LT} 值也呈现出显著的改善效应($p < 0.05$)。通过团聚体稳定性指标数据来看,相比于 0—15 cm 土层,15—30 cm 深度土层水稳性团聚体结构稳定性呈现出减小的趋势,这可能与 0—15 cm 土层土壤有机质含量较高有关。

表 2 施用不同有改良材料对水稳性团聚体稳定性指标的影响

土层/cm	处理	MWD/mm	GMD/mm	$E_{LT}/\%$	D
0—15	对照(CK)	0.35 ^d	0.28 ^c	91.01 ^a	2.97 ^a
	熟化剂(TM)	0.32 ^d	0.28 ^c	89.87 ^{ab}	2.99 ^a
	粉煤灰(TF)	0.38 ^c	0.29 ^{bc}	87.69 ^b	2.97 ^a
	有机肥(TO)	0.45 ^c	0.31 ^b	83.08 ^b	2.95 ^b
	熟化剂+粉煤灰(TMF)	0.43 ^c	0.31 ^b	83.72 ^b	2.95 ^b
	熟化剂+有机肥(TMO)	0.53 ^b	0.34 ^b	79.31 ^b	2.92 ^b
	粉煤灰+有机肥(TFO)	0.80 ^a	0.42 ^a	64.17 ^c	2.84 ^c
15—30	对照(CK)	0.30 ^c	0.27 ^c	93.28 ^a	2.99 ^a
	熟化剂(TM)	0.29 ^c	0.26 ^c	94.66 ^a	2.99 ^a
	粉煤灰(TF)	0.39 ^b	0.29 ^b	90.43 ^b	2.96 ^b
	有机肥(TO)	0.37 ^b	0.29 ^b	88.50 ^{bc}	2.97 ^b
	熟化剂+粉煤灰(TMF)	0.39 ^b	0.29 ^b	90.77 ^b	2.96 ^b
	熟化剂+有机肥(TMO)	0.39 ^b	0.29 ^b	89.07 ^b	2.96 ^b
	粉煤灰+有机肥(TFO)	0.48 ^a	0.30 ^a	87.58 ^c	2.93 ^c

2.3 改良材料对复垦土壤有机质含量的影响

施用不同改良材料后空心村复垦土壤 0—15 cm 和 15—30 cm 土层土壤有机质含量整体均呈现出增加的趋势(图 2)。在 0—15 cm 土层,TF,TO,TMF,TMO,TFO 处理下土壤有机质含量分别比 CK 增加了 9.6%,79.0%,90.0%,61.4%,120.1%,131.7%,表明不同改良材料对复垦土壤有机质含量均具有重要的提升作用。不同改良材料处理对复垦土壤 0—15 cm 土层有机质含量的提升呈现出 TFO

> TMO > TO > TF > TMF > TM > CK 的大小顺序,添加有机肥处理的 TO,TMO,TFO 处理能够显著提升复垦土壤的有机质含量($p < 0.05$),其中 TFO 处理最有利于土壤有机质含量的提升。在 15—30 cm 深度土层中,显著性分析结果表明,TO,TMF,TMO,TFO 处理均显著提高了土壤有机质含量($p < 0.05$),TM,TF 处理对土壤有机质含量的提升差异不显著,其中 TFO 处理对复垦土壤有机质含量的提升效果最为明显。

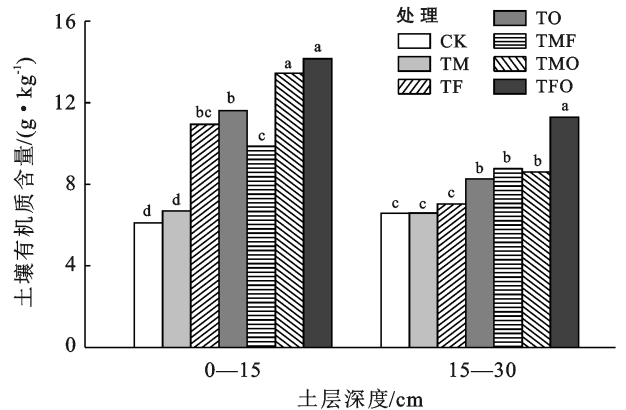


图 2 施用不同改良物料对土壤有机质含量的影响

2.4 改良材料对复垦土壤容重和含水量的影响

施用不同改良材料后复垦土壤 0—15 cm 和 15—30 cm 土层土壤容重显著降低($p < 0.05$)(图 3a)。在 0—15 cm 土层,TF,TO,TF,TO,TF,TO,TF,TO 处理下土壤容重较 CK 分别降低了 5.71%,7.74%,8.57%,8.69%,8.79%和 9.13%,说明不同改良材料对复垦土壤容重都有一定的降低作用。但由于改良材料特性不同,对复垦土的疏松效果不同,复垦土壤的容重表现为: TFO > TMO > TO > TF > TMF > TM > CK 的大小趋势。有机—无机改良材料组合可有效降低复垦土壤容重,TFO 处理下的容重最小为 1.19 g/cm³。在 15—30 cm 土层,通过方差分析,不同改良材料对复垦土壤容重的影响呈现出与 0—15 cm 土层容重相似的下落趋势。

施用不同改良材料后 0—15 cm 和 15—30 cm 土层复垦土壤含水量显著增加($p < 0.05$),且两个土层含水量的变化规律基本相似,大小顺序为: TFO > TMO > TMF > TO > TF ≈ TM > CK(图 3b)。在 0—15 cm 土层,TF,TO,TF,TO,TF,TO,TF,TO 处理下土壤含水量较 CK 分别增加 13.5%,13.8%,21.4%,21.9%,32.4%和 38.3%。TMO 和 TFO 对复垦土壤含水量的提高效果较好,土壤质量含水量分别为 17.4%和 18.2%。综上所述,与 CK 相比,不同改良

材料施用是提高土壤有机质含量、促进了团聚体形成和稳定的同时,增加了水分滞留和传输,有利于保持

更多的水分,其中,有机无机改良材料组合的 TFO 和 TMO 处理有利于保持更多的土壤水分。

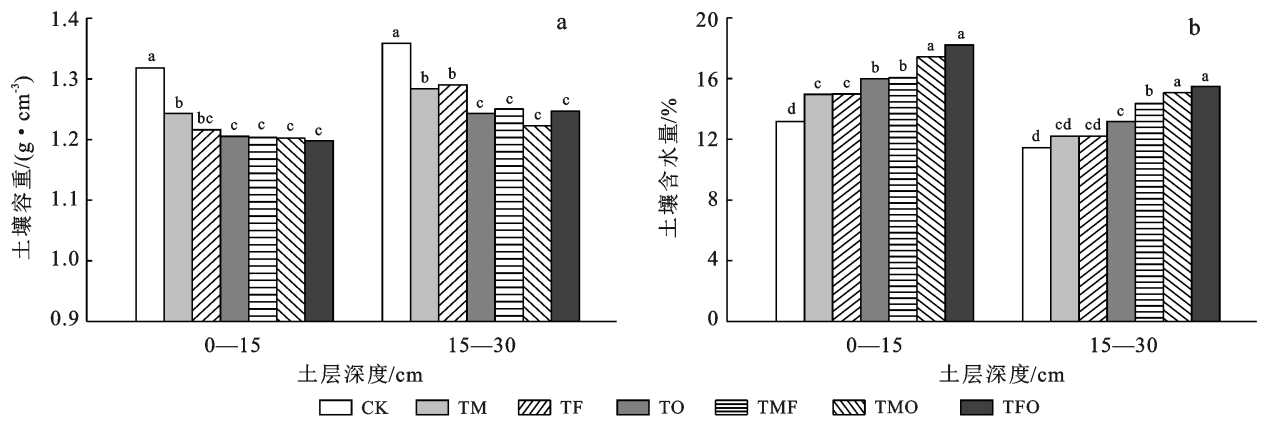


图3 施用不同改良物料对土壤容重和含水量的影响

2.5 土壤有机质及水稳性团聚体各参数间相关性分析

为进一步探明6种不同改良材料处理后复垦土壤各参数之间的相关性,本文对有机质及不同粒级水稳性团聚体各参数之间的相关关系进行了回归分析(表3)。由表3可知,土壤有机质含量与MWD, GMD, >2 mm粒级水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系,与 E_{LT} , D , <0.25 mm粒级水稳性微团聚含量呈极显著负相关关系,说明土壤有机质是影响土壤水稳性团聚体形成及其结构稳定性的重要因素,有机质含量越高,会促进水稳性大团聚体的形成,土壤的结构

稳定性越强。 >2 , $1\sim2$, $0.5\sim1$ mm粒级水稳性团聚体含量与MWD, GMD值呈显著正相关,与 E_{LT} , D 值呈极显著负相关关系; <0.25 mm水稳性团聚体与MWD, GMD值呈极显著负相关,与 D 值呈显著正相关,这些说明较大粒级水稳性团聚体含量的增加,有助于促进土壤团聚体结构稳定性的提升。综上所述, TM, TF, TO, TMF, TMO, TFO改良材料处理在促进空心村复垦土壤有机质含量增加的同时,能够有效地促进水稳性大团聚体的团聚形成与结构稳定性的提升,尤其是TFO处理是改善空心村复垦土壤结构特性、培肥地力和增强抗侵蚀性的最佳处理。

表3 土壤有机质及水稳性团聚体各参数间相关性分析

指标	SOM/ ($g \cdot kg^{-1}$)	WMD/ mm	GMD/ mm	$E_{LT}/\%$	D	粒级/mm				
						>2	$1\sim2$	$0.5\sim1$	$0.25\sim0.5$	<0.25
SOM	1									
MWD	0.717 7**	1								
GMD	0.696 0**	0.979 8**	1							
E_{LT}	-0.694 8**	-0.936 4**	-0.981 4**	1						
D	-0.700 3**	-0.992 6**	-0.954 0**	0.900 1**	1					
>2	0.731 6**	0.984 6**	0.945 7**	-0.894 8**	-0.993 5**	1				
$1\sim2$	0.594 9*	0.814 0**	0.883 5**	-0.888 1**	-0.763 9**	0.759 6**	1			
$0.5\sim1$	0.545 0	0.852 2*	0.898 0*	-0.925 6**	-0.819 0**	0.808 0**	0.660 2**	1		
$0.25\sim0.5$	0.552 1	0.472 7	0.570 8	-0.674 4**	-0.416 7	0.423 4	0.713 8*	0.519 0	1	
<0.25	-0.694 8**	-0.936 4**	-0.981 4**	1.000 0	0.900 1**	-0.894 8**	-0.888 1**	0.674 4**	-0.925 6**	1

注:①SOM为土壤有机质;WMD为平均重量直径;GMD为几何平均直径; E_{LT} 为不稳定团粒指数;②*为显著性水平 $p<0.05$;**为显著性水平 $p<0.01$ 。

3 讨论

3.1 长期施用改良材料对空心村复垦土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响

土壤有机质、氧化物和黏粒是土壤团聚体形成与

稳定的主要胶结物质,对土壤团聚体的数量、大小分布及结构稳定性起着重要作用^[34]。有机肥、熟化剂(硫酸亚铁)、粉煤灰等土壤改良材料单独或者结合还田施用后,能够有效地改善土壤有机质的含量,其转化分解过程中形成的胶结物质有助于土壤团聚体的

胶结团聚,对于团聚体的大小、分布状况及结构稳定性有明显的影[12,35]。本研究中,相比于CK处理,除熟化剂(TM)处理外,粉煤灰(TF)、有机肥(TO)、熟化剂+粉煤灰(TMF)、熟化剂+有机肥(TMO)、粉煤灰+有机肥(TFO)均显著增加了复垦土壤 $>2, 1\sim 2$ mm粒级水稳性团聚体的含量,降低了 <0.25 mm水稳性微团聚体的含量($p<0.05$),其中 >0.25 mm水稳性大团聚体含量呈现出TFO>TMO>TO>TMF>TF>TM>CK的大小顺序,粉煤灰+有机肥结合处理对空心村复垦土壤水稳性大团聚体含量的增加最为明显,熟化剂+粉煤灰、熟化剂+有机肥、有机肥处理的改善效果次之,单施熟化剂和粉煤灰处理对水稳性大团聚体的改善效果不是很显著。董少文等研究表明由于粉煤灰具有发达的比表面积和多级孔隙,富含黏粒及 Al_2O_3, Fe_2O_3 等氧化物,施入土壤后能明显增强土壤颗粒间的相互吸附与团聚能力,增加土壤保水保肥能力,降低土壤容重[36-37]。硫酸亚铁熟化剂对北方土壤的碱性具有一定的改善作用,同时可以疏松土壤,增加土壤的保水性,改善土壤结构[38-39]。有机肥输入土壤腐解产生的多糖、腐殖质等胶结物质,能进一步促进土壤颗粒的团聚和微团聚体向大团聚体的堆叠胶结,增加水稳性大团聚体的数量和土壤的结构稳定性,增加土壤持水性能[40-41]。本研究结果显示,粉煤灰+有机肥和熟化剂+有机肥的有机无机结合处理相比于单施有机肥处理,对复垦土壤有机质含量的改善效果更明显,分析主要原因可能是在相同有机肥施用量的情况下,粉煤灰+有机肥和熟化剂+有机肥处理分别增加了粉煤灰和硫酸亚铁土壤改良剂的施用,有机无机的组合施用使得复垦土壤颗粒相互作用时,土壤酶活性、根系等作物残留量、微生物数量、矿物种类、孔隙结构等因素相互影响,使得在改善土壤有机质含量方面表现出一定的差异[39,42-44]。由于粉煤灰发达的比表面积和多级孔隙,富含黏粒和氧化物,能够显著地促进复垦土壤团聚体形成与稳定,增加土壤的蓄水保墒能力;加之硫酸亚铁熟化剂也具有良好的改善土壤理化性状、增加土壤酶活性的作用,从而促进了作物根系的生长和土壤微生物的活性的提升,进而增加了由于土壤中微生物活性提高而形成腐殖物和作物根系等残留物、有机肥分解产生如多糖、蛋白质、木质素等不同种类有机质的数量,因此,粉煤灰+有机肥和熟化剂+有机肥的有机无机结合处理提升复垦土壤有机质的程度高于单施有机肥处理,这与高志香等[39], Singh等[42], Rauteray等[43]的研究结果相似,他们的研究表明,粉煤灰、硫酸亚铁土壤无机改良剂与有机肥配合施用下

土壤有机质含量要明显高于单施有机物料处理。同样,这也与本研究中的团聚体稳定性指标相似,TF, TO, TMF, TMO, TFO处理下MWD, GMD值整体呈现出显著增加的趋势, D, E_{LT} 值呈现出显著减小的趋势($p<0.05$),其中6种改良材料处理中TFO和TMO处理下的团聚体稳定性指标最好,其中粉煤灰+有机肥(TFO)的结合处理对空心村复垦土壤团聚体结构稳定性的改善效果最好,是提高复垦土壤团聚体数量和结构稳定性的最佳途径。此外,粉煤灰+有机肥组合处理还显著降低了复垦土壤容重,增加了土壤水分入渗,提高了土壤的蓄水保墒能力, Singh等[42]和魏俊岭等[44]的研究结果也表明粉煤灰与有机物料或者配方施肥处组合施用,可以有效地降低土壤容重,增加了水分稳定入渗速率和持水能力。

3.2 改良材料施用对复垦土壤有机质及各参数间相关性分析

不同改良物料还田施用是提高复垦土壤有机质的重要来源,有机肥、熟化剂(硫酸亚铁)、粉煤灰等土壤改良材料单独或者结合还田施用后,能够提高土壤的肥力水平,促进作物的生物量的提高,增大植物残体和根系进入土壤的归还量,从而提高了土壤有机质含量[33]。本研究中,施用不同改良材料后复垦土壤0—15 cm和15—30 cm土层土壤有机质含量均呈现出整体增加的趋势。在0—15 cm深度土层中, TM, TF, TO, TMF, TMO, TFO处理下土壤有机质含量分别比CK处理增加了9.6%, 79.0%, 90.0%, 61.4%, 120.1%, 131.7%,表明不同改良材料对复垦土壤有机质含量的提升均具有作用,但由于不同改良材料自身的理化特性不同以及对复垦土壤的微生物活性的影响过程差异,导致对于复垦土壤有机质含量的改善效应的不同。其中粉煤灰+有机肥(TFO)的提升效果最佳,熟化剂+有机肥(TMO)、有机肥(TO)处理次之,这与粉煤灰和有机肥的养分含量及结构状况有着直接的关系,粉煤灰发达的比表面积和多级孔隙使其具有很好的保肥特性,加之有机肥本身就富含有机物质和多种营养元素,所以粉煤灰+有机肥(TFO)的有机无机结合对有机质的改善效果最为显著。张旭辉等[45]的研究表明,有机质的累积量与0.25~2 mm粒级团聚体的含量有着密切的关系,团聚体的粒级越大有机碳的含量越高。粉煤灰+有机肥(TFO)处理显著地提高了0.25~2 mm粒级团聚体的含量,这对于土壤有机质含量的提升也有着重要的促进作用。这与雷娜等[20],任顺荣等[46]的研究结果相似,雷娜等[20]研究表明腐熟的鸡粪有机肥和无机改良材料粉煤灰的复合还田能显著地提高土壤肥力水平。空心

村复垦土壤各参数之间的相关性分析结果表明,土壤有机质含量与MWD,GMD, $>2\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体含量呈极显著正相关,与 $E_{\text{LT}},D,<0.25$ 粒级水稳性微团聚体含量呈极显著负相关, $>2,1\sim 2,0.5\sim 1\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体含量与团聚体稳定性指标MWD和GMD值呈显著相关关系,说明土壤有机质的含量影响着土壤团聚体的胶结团聚与结构稳定性^[27,47],外源改良材料的还田施用促进了空心村复垦土壤有机质的含量的提高,为土壤中小颗粒的团聚胶结创造了良好的条件,有助于水稳性微团聚体通过有机质的黏合团聚形成水稳性大团聚体,进而增强了土壤的结构稳定性和抗侵蚀性。

4 结论

通过综合对比分析,施用不同改良材料5 a后空心村复垦土壤有机质含量均呈现增加趋势,其中粉煤灰+有机肥的结合处理对0—15 cm土层有机质的提升效果最好,增幅达131.7%。随着有机质含量的提升,不同改良材料处理促进了水稳性微团聚体向水稳性大团聚体($>0.25\text{ mm}$)的胶结团聚,0—15 cm土层水稳性大团聚体含量呈现出TFO>TMO>TO>TMF>TF>TM>CK处理的大小顺序,粉煤灰+有机肥处理的增幅最大为328.2%。团聚体结构稳定性指标MWD,GMD, D,E_{LT} 值整体得到改善,复垦土壤水稳性大团聚体数量和结构稳定性得到提高。6种不同改良材料处理中,粉煤灰+有机肥的有机无机结合处理是空心村复垦土壤最适宜的改良材料,二者结合使用可以有效地增强空心村复垦土壤结构稳定性和抗侵蚀性,提高土壤肥力。

[参 考 文 献]

- [1] 刘彦随,刘玉.中国农村空心化问题研究的进展与展望[J].地理研究,2010,29(1):35-42.
- [2] Liu Yansui, Li Jintao, Yang Yuanyuan. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation [J]. Land Use Policy, 2018,74:5-14.
- [3] Huang Fang, Wang Ping. Vegetation change of ecotone in west of Northeast China plain using time-series remote sensing data [J]. Chinese Geographical Science, 2010,20(2):167-175.
- [4] 刘彦随,刘玉,翟荣新.中国农村空心化的地理学研究 with 整治实践[J].地理学报,2009,64(10):1193-1202.
- [5] 胡智超,彭建,杜悦悦,等.基于供给侧结构性改革的空心村综合整治研究[J].地理学报,2016,71(12):2119-2128.
- [6] 李娟,韩霁昌,陈超,等.山地丘陵区不同土地利用方式对空心村整治还田土壤团聚体特征的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):174-181.
- [7] 姜绍静,罗洋.空心村问题研究进展与成果综述[J].中国人口·资源与环境,2014,24(6):51-58.
- [8] Liu Yansui. Introduction to land use and rural sustainability in China [J]. Land Use Policy, 2018,74:1-4.
- [9] 黄耀华,王侃,苏婷婷,等.重庆农村土墙型复垦宅基地土壤肥力特征及改造利用研究[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(1):33-39.
- [10] 刘子骁,邓良基,周伟,等.有机物料对宅基地复垦土壤培肥效果评价[J].土壤,2019,51(4):672-681.
- [11] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011,161(3/4):182-193.
- [12] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):159-165.
- [13] 刘哲,韩霁昌,孙增慧,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究砂姜黑土添加秸秆后团聚体有机碳变化规律[J].农业工程学报,2017,33(14):179-187.
- [14] Blanco-Moure N, Moret-Fernández D, López M. Dynamics of aggregate destabilization by water in soils under long-term conservation tillage in semiarid Spain [J]. Catena, 2012,99:34-41.
- [15] 王勇,姬强,刘帅,等.耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1365-1373.
- [16] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005,124(1/2):3-22.
- [17] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.
- [18] 孙红娟,曾丽,彭同江.粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J].材料导报,2021,35(3):3010-3015.
- [19] Parab N, Sinha S, Mishra S. Coal fly ash amendment in acidic field: Effect on soil microbial activity and onion yield [J]. Applied Soil Ecology, 2015,96:211-216.
- [20] 雷娜,陈田庆,董起广,等.空心村整治还田材料土壤培肥效果分析[J].水土保持学报,2018,32(4):222-226.
- [21] 邱吟霜,王西娜,李培富,等.不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(6):182-189.
- [22] Liu Zhe, Han Jichang, Sun Zenghui, et al. Long-term effects of different planting patterns on greenhouse soil micromorphological features in the North China Plain [J]. Scientific Reports, 2019,9:2200.
- [23] 尹娟,邱道持,潘娟.基于XF-GF空间合成技术的农村居民点复垦潜力分析:以潼南县双江镇双林村为例[J].

- 农机化研究, 2011, 33(11): 5-9.
- [24] 崔宝敏. 天津市“以宅基地换房”的农村集体建设用地流转新模式[J]. 中国土地科学, 2010, 24(5): 37-40.
- [25] 冯巍仑, 李裕瑞, 刘彦随. 基于微观视角的农村转型发展评价及对策探析: 以河南省获嘉县楼村为例[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(2): 133-137.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [28] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对塿土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [29] Liu Zhe, Sun Zenghui, Wang Huanyuan, et al. Effects of straw decomposition on aggregates composition and aggregate-associated organic carbon in different mineral types of soil [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18(5): 6511-6528.
- [30] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [31] Wang Yong, Ji Qiang, Liu Shuai, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31: 1365-1373.
- [32] 刘哲, 孙增慧, 吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1119-1128.
- [33] Wang F, Ya Tong, Js Z, et al. Effects of various organic materials on soil aggregate stability and soil microbiological properties on the Loess Plateau of China [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(4): 162-168.
- [34] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [35] Lei Na, Han Jichang, Mu Xingmin, et al. Effects of improved materials on reclamation of soil properties and crop yield in hollow villages in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2374-2380.
- [36] 董少文, 马淑花, 初茉, 等. 粉煤灰基土壤调理剂作用下盐碱土壤微观结构变化规律[J]. 过程工程学报, 2022, 22(3): 357-365.
- [37] 米美霞, 陈玉鹏, 武小钢, 等. 粉煤灰和蚯蚓粪施用对土壤蒸发的影响[J]. 节水灌溉, 2021(11): 25-31.
- [38] 张露, 魏静. 不同还田材料对空心村整治后土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 74-78.
- [39] 高志香, 李希来, 张静, 等. 不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土壤活性和理化性质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1748-1756.
- [40] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715-722.
- [41] 槐圣昌, 刘玲玲, 汝甲荣, 等. 增施有机肥改善黑土物理特性与促进玉米根系生长的效果[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 40-46.
- [42] Singh J S, Pandey V C, Singh D P. Coal fly ash and farmyard manure amendments in dry-land paddy agriculture field: effect on N-dynamics and paddy productivity [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(2): 133-140.
- [43] Rautaray S K, Ghosh B C, Mittra B N. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(3): 275-283.
- [44] 魏俊岭, 金友前, 郜红建, 等. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 965-971.
- [45] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-19.
- [46] 任顺荣, 邵玉翠, 杨军. 宅基地复垦土壤培肥效果研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 78-81.
- [47] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 657-666.