绿肥和凹凸棒添加对黄河故道潮土土壤结构和碳氮含量的影响

杨 苏[1,2], 李传哲[1], 徐 聪[1], 吴 迪[1], 汪吉东[1], 张永春[1], 艾玉春[1], 李辉信[2]

(1. 农业农村部 江苏耕地保育科学观测试验站/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210095; 2. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: [目的] 探究绿肥秸秆和凹凸棒添加对黄河故道潮土壤结构和碳氮含量的影响,为科学评价凹凸棒对农田土壤健康的可持续发展和绿肥秸秆的资源化利用提供理论参考。[方法] 设置 6 个处理:对照(CK)、蚕豆秸秆 10 g/kg(B)、黑麦草秸秆 10 g/kg(R)、凹凸棒土 16 g/kg(A)、凹凸棒配施蚕豆秸秆(AB)、凹凸棒配施黑麦草秸秆(AR),采用 SPSS 统计、Origin 整合进行数据分析。[结果] 经过 120 d 室内培养发现:添加绿肥秸秆和凹凸棒均能改善土壤结构、增加碳氮含量,其中 A,AB 处理主要增加大团聚体(>0.25 mm)含量,而 AR 处理主要增加微团聚体(0.053~0.25 mm)含量,与 CK 相比,A,AB,AR 处理降低土壤三相结构距离 50.8%~55.6%,增加了土壤持水量 16.0%~19.2%。单施绿肥秸秆和单施凹凸棒对土壤有机碳、全氮的增量为 0.38~1.99 g/kg 和 0.12~0.49 g/kg,二者配施对土壤有机碳、全氮和微生物量氮的增量比单施绿肥分别高 0.86~3.23 g/kg,0.29~0.44 g/kg 和 0.3~21.6 mg/kg,且蚕豆配施效果优于黑麦草配施。[结论] 配施可以结合秸秆易分解、养分丰富和凹凸棒土较大比表面积的优势,在改良土壤结构,缓解养分释放,增强土壤固存养分能力等方面具有较大优势,其中蚕豆秸秆 10 g/kg 配施凹凸棒 16 g/kg 对改良黄河故道土壤砂性结构,提高土壤碳氮含量效果最佳。

关键词: 作物秸秆; 凹凸棒; 配施; 土壤结构; 碳氮含量

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2020)02-0199-06 **中图分类号**: S158.3

文献参数: 杨苏, 李传哲, 徐聪, 等. 绿肥和凹凸棒添加对黄河故道潮土土壤结构和碳氮含量的影响[J]. 水土保持通报,2020,40(2):199-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.029; Yang Su, Li Chuanzhe, Xu Cong, et al. Effects of adding straw and attapulgite on soil structure and carbon and nitrogen contents of old Yellow River course [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(2):199-224.

Effects of Adding Straw and Attapulgite on Soil Structure and Carbon and Nitrogen Contents of Old Yellow River Course

Yang Su[1,2], Li Chuanzhe[1], Xu Cong[1], Wu Di[1], Wang Jidong[1], Zhang Yongchun[1], Ai Yuchun[1], Li Huixin[2]

(1. *Agricultural Science and Technology Research Institute of Agricultural and Rural Sciences, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*; 2. *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of adding green manure straw and attapulgite soil on the soil structure and carbon and nitrogen content of the fluvo-aquic soil of the old Yellow River course were studies, in order to provide a theoretical reference for scientific evaluation of attapulgite soil for the sustainable development of farmland soil health and the utilization of green manure straw. [Methods] We set up 6 treatments: control (CK), broad bean straw 10 g/kg (B), ryegrass straw 10 g/kg (R), attapulgite 16 g/kg (A), attapulgite broad bean straw (AB) and attapulgite combined with ryegrass straw (AR), and analyzed the effects of treatments by SPSS statistics and Origin. [Result] After 120 days of indoor cultivation, we found that adding green manure straw and attapulgite soil could improve soil structure and increase carbon and nitrogen

收稿日期:2019-09-20 **修回日期**:2019-11-12

资助项目:江苏省农业科技自主创新项目"粮食主产区耕地保育与质量提升综合解决方案"(CX(17)-1001); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800301); 国家甘薯产业技术体系(CARS-10-B9); 江苏省重点研发项目(BE2019378)

第一作者:杨苏(1994—),女(汉族),山东省烟台市人,硕士研究生,研究方向为土壤改良。Email:2017103075@njau.edu.cn。

通讯作者:汪吉东(1979—),男(汉族),湖北省黄石市人,博士,副研究员,主要从事土壤肥力提升相关研究。Email:jdwang66@163.com。

content, in which A and AB treatments mainly increased the content of large aggregates (>0.25 mm), and AR treatments mainly increased the content of micro-aggregates (0.053~0.25 mm). Compared with CK, A, AB, and AR treatments reduced the soil three-phase structure distance by 50.8% to 55.6%, and increased soil water holding capacity by 16.0% to 19.2%. The increase of soil organic carbon and total nitrogen with single application of green manure straw and single attapulgite soil was 0.38~1.99 g/kg and 0.12~0.49 g/kg. The combined application of the two fertilizers could greatly improve soil organic carbon, total nitrogen and microbial biomass nitrogen than single application of green manure. The increase rate was 0.86~3.23 g/kg, 0.29~0.44 g/kg and 0.3~21.6 mg/kg higher than that of single application of green manure, respectively. The combined effect on broad bean was better than that of ryegrass. [Conclusion] Combined application can take full advantages of easy decomposition of straw, rich nutrients, and large specific surface area of attapulgite, which has great advantages in improving soil structure, mitigating nutrient release, and enhancing soil solid nutrient capacity. Among them, proportion of 10 g/kg of broad bean straw 10 and 16 g/kg of attapulgite had the best effect in improving the soil sandy structure and increasing soil carbon and nitrogen content in the old course of the Yellw River.

Keywords: crop straw; attapulgite; combined application; soil structure; carbon and nitrogen content

黄河故道潮土是由于黄河改道后的冲积物发育而来,系黄淮海平原江苏和山东的地带性土壤,分布面积为 2.50×10^6 hm^2,占江苏省总面积的 40.7%。该类型土壤具有砂性重、腐殖质含量低、土壤结构差漏水漏肥严重[1]等特点,黄河故道区也是江苏重要的中低产田分布区和粮食主产区。土壤重要的功能是协调水、肥、气、热等功能,这与土壤的结构优劣有关。团聚体、持水量和土壤三相均是显示土壤物理结构的重要指标,团聚体是土壤结构的基本单元[1],对土壤物理结构的稳定性及保水保肥能力至关重要[1],土壤持水量是表征土壤储水能力的重要指标[1],土壤三相比是指土壤中的气相、固相和液相所占的比例,对于土壤硬度、透水性和保水性有很大的影响。土壤肥力是决定作物产量的关键因素,碳氮是土壤培肥的关键,这是因为碳氮是维持作物生长和微生物生命活动的主要营养元素,调控土壤养分循环,也是评价土壤肥力的重要指标,因此增加土壤碳氮含量是培肥潮土的关键。种植绿肥和施用土壤调理剂是土壤改良的重要途径。已有研究[1]表明,在淡灰钙土上施用蚕豆秸秆,既能增加土壤养分贮量,又能提高养分供应水平。黑麦草秸秆配施尿素有利于提高紫潮泥土双季稻氮肥的利用率,增加水稻产量[1]。凹凸棒又称坡缕石或坡缕缟石,是一种具链层状结构的含水富镁铝硅酸盐黏土矿物,在我国资源丰富,价格低廉,因其含有丰富的微量元素、矿质营养元素和较大的比表面积(9.6~36.0 m^2/g)而备受关注。凹凸棒与土壤混合后,不仅能起到保水的作用,还能增加土壤中大粒径团聚体含量,发挥保肥的作用,满足作物对多种养分的需求。袁惠君[2-3]等通过凹凸棒对灌淤土养分含量及小麦生长影响的分析表明,凹凸棒能提高土壤的养分和水分含量,提高小麦的出苗率和分蘖数。目前关于绿肥秸秆还田或添加凹凸棒增加土壤持水量[4],提高大团聚体含量[5]的研究较多,但有关黄河故道土壤的相关结构改良及有机质提升等相关研究尚不多,且将绿肥秸秆与凹凸棒配合施用,对黄河故道潮土的改良效果如何更鲜有报道。因此,本研究针对黄河故道土壤固有的结构差及有机质含量低等问题,设置了单独添加绿肥秸秆凹凸棒以及二者配施等处理,从土壤物理结构和碳氮含量等角度入手,探究其对于协调潮土水肥气热的影响,以期为科学评价凹凸棒对农田土壤健康的可持续发展和绿肥秸秆的资源化利用提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 供试土样

本试验为土培试验,供试土壤类型为潮土,取自江苏省盐城市滨海县界牌镇黄河湾绿色科技有限公司试验基地,试验基地(北纬 33°43′,东经 119°37′)属北温带,气候温和,地势较高,降雨充沛,雨热同季,常年平均气温 14.1 ℃,平均降雨量为 942.6 mm。供试土壤基本理化性质为:pH 值 8.1,有机质 4.2 g/kg,全氮 0.22 g/kg,全磷 0.50 g/kg,有效磷 2.63 mg/kg,速效钾 63.3 mg/kg,初始田间持水量为 32.8%。根据国际制土壤质地分类标准,黏粒含量为 3.04%,粉粒含量为 11.69%,砂粒含量为 85.28%,属于壤质沙土。

1.2 试验设计

本试验为室内培养试验,通过前期培养试验发现凹凸棒添加量为 16 g/kg 时,对玉米有较好的促生效果和土壤结构改良作用,因此共设置 6 个处理,分别为对照(CK)、蚕豆秸秆 10 g/kg(B)、黑麦草秸秆 10 g/kg(R)、添加凹凸棒 16 g/kg(A)、凹凸棒 16 g/kg 配施蚕豆秸秆 10 g/kg(AB)、凹凸棒 16 g/kg 配施黑

麦草秸秆 10 g/kg(AR),供试土壤类型为潮土(表 1),所用土壤为 0—20 cm 的表层土壤,过 2 mm 筛备用。试验开始前将供试土壤与添加物混合均匀放入盆钵中,为防止土壤从盆钵底部露出,在每个盆钵底部放置一个 100 目的圆形网筛,目的是保证水能通过而土壤不能通过。每盆(直径 16 cm 高 12.5 cm)装土重折合为风干土 1 kg,于 25 ℃下培养 120 d,每个处理 3 个重复,每 40 d 采用完全破坏性取样一次,共取样 3 次,54 个盆钵,于 2018 年 4 月 18 日布置试验,3 次取样时间分别为:2018 年 5 月 28 日、7 月 7 日和 8 月 16 日。于 2018 年 7 月 16 日在江苏省农科院进行,培养期间采用称重法每周补水一次,使土壤含水量保持在田间持水量的 60%。

表 1　物料养分含量

添加物料	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	有机碳 SOC/(g·kg^{-1})	C/N
凹凸棒	0.12	0.96	0.167	2.18	18.2
蚕豆秸秆	21.5	3.31	28.5	393	17.9
黑麦草秸秆	7.60	1.96	39.5	287	37.8

1.3　土壤样品采集

土壤样品采用完全破坏性取样,样品进行风干后用于水稳性团聚体和持水量的测定,磨碎过筛后用于土壤有机质、全氮、碱解氮的测定,用环刀取原状土用于土壤三相的测定,鲜样存于 4 ℃冰箱,用于土壤微生物量碳氮的测定。

1.4　测定项目及方法

土壤水稳性团聚体的测定采用湿筛法、田间持水量的测定采用威尔科克斯法[6],有机质采用重铬酸钾—外加热法、碱解氮采用碱解扩散法、全氮采用凯式定氮法、微生物量碳氮采用氯仿熏蒸法,土壤三相采用 DIK-1150 土壤三相仪测定。

$$STPSD=\{(X_g-50)^2+(X_g-50)(X_y-25)+(X_y-25)^2\}^{0.5}$$

式中:STPSD 为土壤三相结构距离;X_g 为固相体积百分比(>25%);X_y 为液相体积百分比(>0)。

最大持水量的测定:用环刀取土,带回实验室,在环刀下垫一张滤纸,用橡皮筋固定在环刀上,将环刀放到盘子里,向盘中倒水,没过滤纸即可,隔天将环刀中的土壤去除,放在已知重量的铝盒中称重,得到最大持水量的土壤质量 W_1,之后将铝盒盖打开,放在 105 ℃烘箱中烘干至恒重,称重记为 W_2。

最大持水量(质量含水量)$=W_1-W_2/W_2$

1.5　数据分析

数据处理采用 Excel,SPSS 25.0,Origin 2018 进行数据处理和分析,用 SPSS 25.0 进行数据方差显著性检验,多重比较采用 Duncan 法,平均值在 $p<0.05$ 水平下才具有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　不同处理对土壤物理结构的影响

2.1.1　水稳性团聚体　无论单独添加绿肥秸秆和凹凸棒还是配施均可增加>0.25 mm,0.053~0.25 mm 粒径团聚体含量(图 1),其中<0.053 mm 粒径团聚体占主要部分,在 45%~57%范围内,>0.25 mm 粒径团聚体占 0.47%~3.65%,0.053~0.25 mm 粒径团聚体占 29.93%~49.41%。A 处理对增加>0.25 mm 粒径团聚体含量发挥主导作用,BR 处理中>0.25 mm 粒径团聚体含量比 AR 高 1.49%。

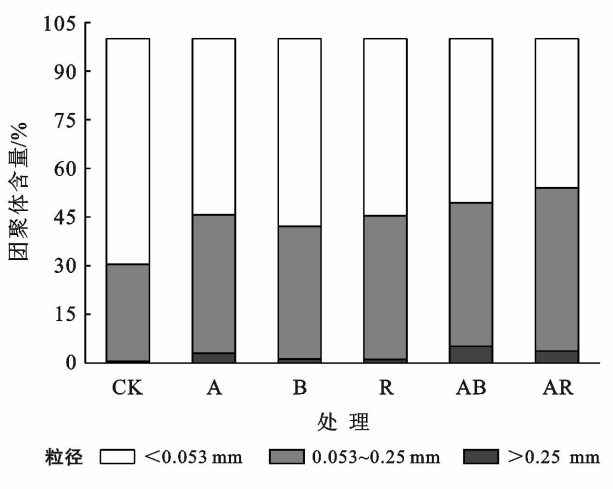
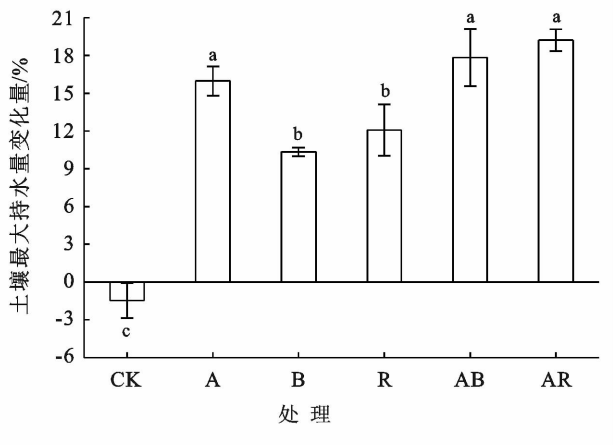


图 1　不同粒径水稳性团聚体含量

2.1.2　土壤最大持水量　经过 120 d 的培养试验发现,CK 最大持水量降低,而其他处理均增加,增幅为 10.3%~19.2%,表明添加绿肥秸秆、凹凸棒以及二者配施均会增加土壤最大持水量,具体表现为:AR>AB>A>R>B,且 A,AB,AR 处理土壤最大持水量显著高于 B,R 处理,A,AB 和 AR 处理间差异不显著(图 2)。



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2　不同处理土壤最大持水量变化

2.1.3 土壤三相 将土壤三相作为一个有机整体置于二维三系图中分析土壤结构，可直观看出不同处理土壤三相比的变化情况以及向理想结构逼近的趋势。STPSD 代表土壤三相结构距离，土壤三相结构越接近理想状态（固相 50%，液相 25%，气相 25%），STPSD 值越接近 0。从图 3 可以看出，各处理的土壤三相均分布于理想状态的左侧，表明气相和固相是改良黄河故道地区土壤结构的主要因素。其中 B，R 处理会增加土壤液相比，减少气相比，而 A，AB，AR 处理会减少气相比，增加固、液比。培养 120 d 后，土壤三相结构距离比 CK 低 24.97%～55.49%（表 2），A，AB，AR 处理土壤三相结构距离为 7.69，6.97 和 7.72，显著低于其他处理，表现出明显的结构改善趋势，表明添加凹凸棒对调节土壤三相比发挥主导作用。

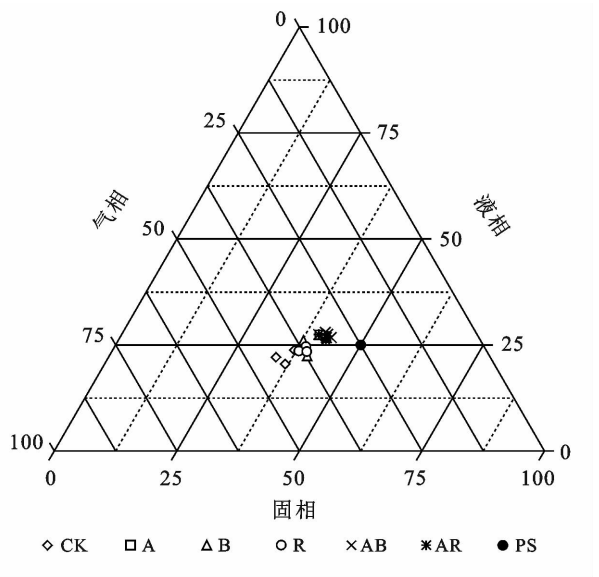


图 3 各处理土壤三相分布

表 2 土壤三相结构距离

处理	A	B	R	AB	AR	CK
STPSD	7.69±0.64[a]	11.8±0.64[b]	11.6±0.99[b]	6.97±0.60[a]	7.72±0.77[a]	15.7±1.58[c]

2.2 土壤有机碳含量

培养期间土壤有机碳呈先上升后下降的趋势，添绿肥秸秆和凹凸棒培养 40 d，80 d 和 120 d 有机碳含量分别为 2.57～4.38 g/kg，2.69～6.65 g/kg，2.73～6.80 g/kg（图 4）。但随培养时间的延长，有机碳的变化趋势不同，具体表现为：培养 40 d，B＞R＞AB＞AR＞A；培养 80 d，R＞B＞AR＞AB＞A；培养 120 d，AR＞AB＞R＞B＞A，表明培养初期绿肥秸秆快速分解，对于土壤有机碳的提升发挥主导作用，而配施可缓解养分的释放，使有机碳含量在培养后期优于其他处理。

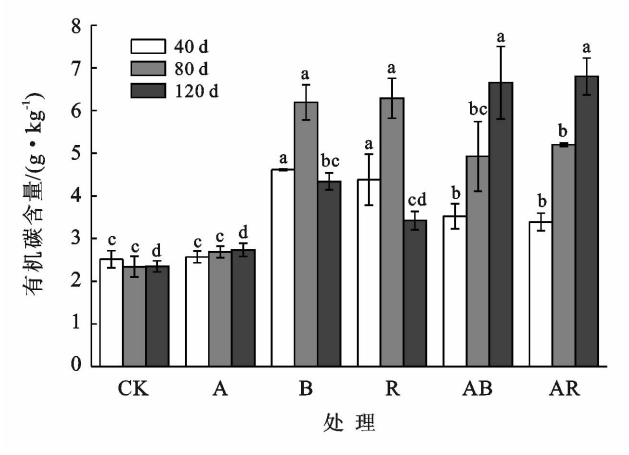


图 4 不同处理的土壤有机碳含量

2.3 土壤微生物熵

微生物熵是土壤微生物量碳与土壤有机碳的比值（MBC/SOC），微生物熵增加时，表明土壤碳素处于累积状态[7]。从图 5 可以看出，土壤微生物熵在整个培养期间呈先增加后降低的趋势，三个培养期土壤微生物熵分别为 4.34%～7.37%，6.16%～8.48% 和 4.96%～7.19%，于培养的第 80 d 达到最大值。

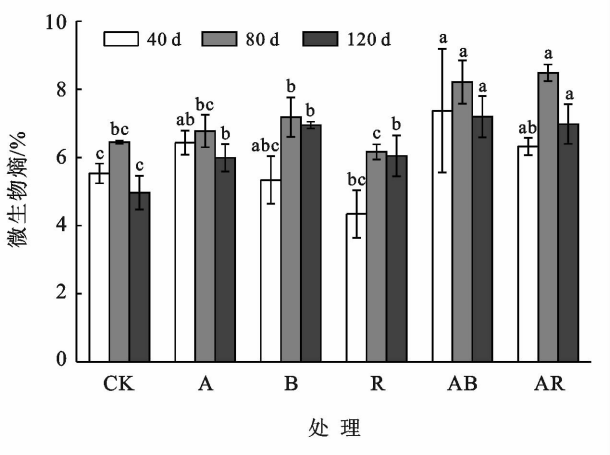


图 5 各处理的土壤微生物熵

配施对土壤微生物熵的增加幅度分别为 14.3%～33.3%，27.3%～31.5% 和 40.4%～44.9%，绿肥秸秆和凹凸棒土对土壤微生物熵的增加幅度为3.8%～20.6%，5.1%～11.9% 和 20.6%～39.9%，表明随培养时间的延长，配施土壤碳素累积速度逐渐加快，且增加效果优于绿肥秸秆和凹凸棒，但 AB，AR 处理间无显著差异。

2.4 土壤全氮、碱解氮、微生物量氮

土壤全氮、碱解氮和微生物量氮对外源添加物的

响应不同(表 3),培养 120 d,土壤全氮和微生物量氮总体呈增加的趋势,而土壤碱解氮呈先上升后下降的趋势。具体表现为全氮:AB>AR>B>R>A>CK,碱解氮:B>AB>AR>R>A>CK,土壤微生物量氮:AB>B>AR>R>A>CK。配施对全氮的增加效果优于其他处理,且 AB 处理比 AR 处理高 0.02~0.06 g/kg,B 和 R 处理在培养初期对碱解氮和微生物量氮的增加优于配施。

表 3　各处理土壤不同形态氮的含量

处理编号	全氮/(g·kg^{-1})			碱解氮 AN/(mg·kg^{-1})			微生物量氮 MBN/(mg·kg^{-1})		
	40 d	80 d	120 d	40 d	80 d	120 d	40 d	80 d	120 d
CK	0.22±0.01^{d}	0.21±0.011^{d}	0.23±0.03^{d}	9.81±1.23^{c}	9.06±0.61^{c}	8.8±0.94^{c}	3.53±0.59^{d}	13.4±1.82^{d}	9.54±1.15^{c}
A	0.32±0.03^{c}	0.3±0.007^{c}	0.35±0.01^{d}	10.1±0.94^{c}	13.8±0.35^{c}	16.6±0.61^{b}	9.96±1.52^{c}	34.8±0.21^{c}	16.6±1.51^{c}
B	0.45±0.07^{b}	0.45±0.02^{b}	0.72±0.08^{b}	23.9±0.61^{a}	33.5±0.94^{a}	24.1±1.28^{a}	24.3±1.34^{a}	35.3±2.18^{c}	28.3±3.79^{b}
R	0.35±0.01^{c}	0.33±0.005^{c}	0.63±0.09^{c}	24.7±0.94^{a}	32.2±1.28^{a}	23.1±0.94^{a}	15.23±0.76^{bc}	48.7±0.77^{b}	30.8±3.14^{b}
AB	0.57±0.01^{a}	0.64±0.002^{a}	1.07±0.09^{a}	17.9±0.35^{b}	24.9±0.61^{b}	23.9±0.61^{a}	19.1±1.08^{b}	66.4±3.28^{a}	38.2±5.71^{a}
AR	0.53±0.02^{a}	0.62±0.010^{a}	1.01±0.06^{a}	18.9±1.23^{b}	24.7±0.94^{b}	23.1±0.94^{a}	14.9±1.94^{c}	57.4±4.06^{a}	28.0±1.99^{b}

3　讨 论

团聚体是土壤结构的基本单元,不同粒径团聚体的含量可以决定土壤侵蚀、压实、板结等程度,是评价土壤结构的重要指标之一[8-9]。土壤中大团聚体含量越高,土质越疏松,容重越小,土壤储存与供给作物所需水分的能力越强[10]。本试验的研究结果显示,添加绿肥秸秆及配施均可增加>0.25 mm 粒径团聚体含量,但配施效果优于单独添加绿肥处理,且蚕豆秸秆配施对于增加>0.25 mm 粒径团聚体含量效果优于黑麦草配施。这主要是因为配施能更有利于形成有机无机复合胶体,增加土壤黏结力和团聚性,而蚕豆秸秆属于豆科作物,碳氮比低,相比于禾本科的黑麦草秸秆腐解快,养分释放快,能快速形成腐殖质结合凹凸棒形成大团聚体,改善土壤结构。

三相比是指土壤中固相、液相和气相所占的比例,对调节土壤的水、肥、气、热具有重要作用[11-12],本研究中,配施显著改善了土壤三相比,增加固相比,减少气相比,降低土壤三相结构距离。这是由于凹凸棒会使土壤颗粒表面形成一层保护膜,减少外界作用力对土壤结构的破坏,其较大的比表面积能吸附水分子,增加土壤持水量[13],降低土壤三相结构距离,使土壤三相结构向理想状态趋近。而绿肥会使土壤形成腐殖质,促进矿质胶体结合,增强土壤抗外界干扰的能力[14],配施可结合二者的优势,达到改善土壤三相结构的作用。

土壤有机质多少是反映土壤肥力高低的重要指标[15-16],微生物熵表示土壤将有机碳转化为微生物量碳的效率[17],反映土壤有机质的动态变化。单施绿肥培养前期,微生物熵显著高于配施,且蚕豆对碳氮的增加效果优于黑麦草,这是由于在适宜条件下作物秸秆进入土壤后在微生物的作用下会迅速分解释放养分,增加土壤有机碳含量[18],蚕豆属于豆科作物,碳氮比低,易被微生物利用,分解释放养分增加土壤养分含量;黑麦草属于禾本科作物,碳氮比高,养分释放较慢,而凹凸棒会减少秸秆与土壤的接触面积,缓解养分的释放,导致培养前期有机碳含量低,随培养时间的延长,配施会增加土壤中大团聚体含量,减少绿肥与空气的接触面积,减少微生物对养分的获取,降低自身的矿化消耗,使培养后期配施效果优于单施,这与薄国栋[10]、王恩姮[13]等人的研究结果一致。但随培养时间延长,微生物熵呈下降趋势,表明培养时间过长会导致土壤碳素亏缺。这由于微生物利用完外源添加物的养分后,为维持自身的生长繁殖会从土壤中吸收养分,加快土壤有机碳的矿化分解,导致有机碳降低。但也有研究表明绿肥还田对土壤有机碳的固存无显著影响,甚至有降低的趋势[19-20],他们认为激发效应加速了土壤自身碳库的矿化,使出大于入,有机碳含量降低。在整个培养期间土壤微生物熵的变化范围在 4.97%~8.48%,远超过马征等人关于不同保水剂对山东沙壤微生物熵的范围 0.53%~1.64%[21],这可能与供试土壤类型及极低的有机碳背景值有关。

绿肥秸秆还田能够显著降低土壤氮的损失,本试验结果显示,无论单施还是配施均会增加土壤全氮的含量,且配施处理增氮效果优于其他各处理,这是由于绿肥自身含有丰富的养分,还田能够将土壤中的无机氮转化为有机氮调节矿质氮的固持转化,使土壤中的氮素以稳定的形态固存于土壤中,蚕豆秸秆碳氮比为 17.9,氮含量高,对于增加土壤氮素发挥主要作用,而黑麦草秸秆纤维素含量高,纤维素分解菌为厌氧菌,在分解后期才能产生,因此分解速度比蚕豆秸秆

慢，对土壤氮素的增加效果弱于蚕豆秸秆。凹凸棒土的施用增加了土壤团聚性，使其形成一层保护膜，减少土壤表面与空气的接触，降低氮的损耗。碱解氮和微生物量氮是能被作物直接吸收利用的有机态氮，碱解氮可表征土壤氮素的供应情况，而微生物量氮表征土壤微生物对氮素的固持能力，碱解氮、微生物量氮在培养期间呈先上升后下降的趋势，在培养 80 d 时达到最大值。单施绿肥有利于增加土壤速效氮，而配施有利于增加土壤全氮，这是由于秸秆在酶的作用下会快速分解释放养分，提供有机态氮供微生物利用，培养后期由于养分不足，出现微生物与土壤争氮现象，使微生物固氮能力下降，而配施凹凸棒会形成一层保护膜，减缓绿肥中养分的消耗。

4 结 论

(1) 蚕豆 10 g/kg 配施凹凸棒 16 g/kg 对于改良黄河故道粉砂质土壤物理结构效果最佳，主要表现为：与同时期 CK 相比，>0.25 mm 粒径团聚体增加 4.67%，土壤最大持水量增加 17.8%，土壤三相结构距离降低，STPSD 值为 6.97。

(2) 无论单施或配施均会提高碳氮含量，有机碳和全氮增量分别为 0.33～4.45 g/kg 和 0.12～0.84 g/kg。在培养前期单施绿肥对土壤速效养分的增加发挥主导作用，而在培养后期配施能够缓解养分释放，减少碳氮损失，对土壤养分的固存能力优于单施，且蚕豆配施效果优于黑麦草配施。综上所述蚕豆 10 g/kg 配施凹凸棒 16 g/kg 对黄河故道地区土壤的改良效果最佳，对提升黄河故道潮土肥力，改良其结构具有指导意义。

[参 考 文 献]

[1] 杨红善，刘瑞凤，张俊平，等. PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响 [J]. 水土保持学报，2005，19(3)：38-41.

[2] 胡涛，钱运华，金叶玲，等. 凹凸棒土的应用研究[J]. 中国矿业，2005(10)：73-76.

[3] 黎珊，戴红旗，孔泳，等. 凹凸棒土的应用研究进展[J]. 化工进展，2013，32(12)：2934-2939.

[4] 佘晓云，王亚菲，石岩. 凹凸棒土石保水剂对旱地小麦生长发育的影响[J]. 耕作与栽培，2017(4)：1-3.

[5] 杨婷，吴军虎. 凹凸棒土对土壤团粒结构及水力参数的影响[J]. 干旱地区农业研究，2017，35(6)：46-51.

[6] 高肖彦，刘廷玺，段利民，等. 科尔沁沙丘—草甸田间持水量的综合测定与影响[J]. 干旱区研究，2016，33(6)：1336-1344.

[7] Bajgai Y, Kristiansen P, Hulugalle N, et al. Soil organic carbon and microbial biomass carbon under organic and conventional vegetable cropping systems in an Alfisol and a Vertisol [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(1):1-15.

[8] Lal R, Lal L, Lal S K L. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century [J]. Soil Science, 2000, 165(3):191-207.

[9] 王丽，李军，李娟，等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报，2014，25(3)：759-768.

[10] 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.

[11] Unger, Paul W. Overwinter changes in physical properties of no-tillage soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(3):778.

[12] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(10):1495-1505.

[13] 张丽，张中东，郭正宇，等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报，2015，35(1)：102-106，117.

[14] 王恩姮，陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤三相比与速效养分的影响[J]. 水土保持学报，2007，21(4)：98-102.

[15] Cong Tu, Jean B. Ristaino, Shuijin Hu. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 38(2):247-255.

[16] 郑昭佩，刘作新，魏义长，等. 水肥管理对半干旱丘陵区土壤有机质含量的影响[J]. 水土保持学报，2002，16(4)：102-104.

[17] 臧逸飞，郝明德，张丽琼，等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报，2015，35(5)：1445-1451.

[18] 戴志刚，鲁剑巍，李小坤，等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报，2010，26(6)：272-276.

[19] Christopher Poeplau, Don Axel. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops: A meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200:33-41.

[20] Buysse P, Roisin C, Aubinet M. Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: Impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 167:52-59.

[21] 马征，董晓霞，张柏松. 不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J]. 中国土壤与肥料，2018(5)：122-128.