

麦秸预处理方式对黄绵土结构及低吸力段持水性的影响*

王增丽¹ 冯浩² 方圆¹

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

【摘要】 通过土柱模拟培养试验,对比研究秸秆经过粉碎、氨化预处理及与无机土壤改良剂(硫酸钙)混合配施对黄绵土结构及低吸力段持水特性的影响。结果表明,秸秆经粉碎、氨化预处理及与土壤改良剂配施后能显著提高土壤结构稳定性,降低土壤结构分形维数。其中粉碎氨化秸秆对提高土壤稳定性具有一定的迟效性。秸秆经过不同预处理后施入土壤使土壤孔隙连通性降低,并随着秸秆的分解得到改善。其中长秸秆对土壤孔隙连通性改善作用较粉碎秸秆差。试验表明,土壤团聚体分形维数与土壤结构评价指标均呈极显著负相关关系($P<0.01$),土壤团聚体分形维数 F_d 与低吸力段土壤孔隙分形维数 D_p 之间呈极显著直线相关关系,相关系数为 -0.80 。 F_d 与 D_p 两者结合分析可定量描述不同预处理秸秆对土壤结构、低吸力段持水特性的动态影响过程。

关键词: 秸秆 氨化 粉碎 土壤结构 持水性 分形维数

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0056-07

Effect of Pretreated Wheat Straw on Soil Aggregate and Water-holding Capacity within Low Suctions in Loess Soil

Wang Zengli¹ Feng Hao² Fang Yuan¹

(1. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water and Soil Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

A contrast study on effect of powdered, aminated straw with or without inorganic soil conditioner (calcium sulfate) on soil structure and water-holding capacity in low suction section was made through soil column incubation test. The results showed that the pretreated straw significantly improved soil structure stability, decreased soil structure fractal dimension. Therein the soil with comminuted and aminated straw had a slow acting to improve soil stability. Different pretreatment of straw mixed with soil could make soil porosity connectivity poor in the early stages, and then better with the straw decomposition later. Therein the soil with long straw always kept worse soil porosity than soils with the powdered straw. Furthermore there was a significantly linear correlation between soil aggregate fractal dimension and soil porosity fractal dimension in low suction section. That quantitatively explained the effect of the pretreated straw on soil structure and water-holding capacity in low suction section of soil.

Key words Straw, Amination, Comminution, Soil structure, Water-holding capacity, Fractal dimension

收稿日期: 2011-07-27 修回日期: 2011-10-10
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100503)、中央高校基本科研业务费专项资金项目和高等学校学科创新引智计划资助项目(111-2-16)
作者简介: 王增丽, 博士生, 主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: wangzengli1201@163.com
通讯作者: 冯浩, 研究员, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

引言

向土壤中添加有机物料能显著改善土壤结构,影响土壤水分的水力特征^[1~3]。农业生产中,秸秆作为一种特殊形态的可再生、易获取的有机物料,对其进行还田措施已成为改良土壤结构、维持土壤肥力的重要手段之一^[4~5],但土壤结构的改善不仅与输入有机物总量有关,还与秸秆的有机物组成和特征有关^[6]。禾本科作物秸秆改良土壤效果主要受其施入方式及深度、粉碎程度、C/N 比等因素的影响^[6~9],若对秸秆进行直接还田存在秸秆分解缓慢、易诱发病虫害、影响农机旋耕作业效率及下季作物生长等一些负面效应^[10~11]。

随着秸秆还田措施的推广,秸秆还田与其他土壤改良措施的交互作用得到关注。研究表明,黄绵土中施有高分子土壤改良剂聚丙烯酰胺(PAM)可提高土壤的持水性^[12],但再向土壤中添加有机物料后,微生物活动增强,加快了 PAM 在土壤中的分解速度,降低 PAM 的土壤改良效应,两者不宜同时施用^[13]。无机土壤改良剂中富含的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等高价金属离子,可促进土壤黏粒与有机质结合,形成稳定的土壤结构^[14]。在采用适当耕作方式的前提下,增加土壤有机质可促进土壤形成团聚体和提高土壤结构的稳定性^[15]。研究表明,工业固体废弃物(脱硫石膏)与有机物质混配施入土壤能降低土壤容重和全盐量,显著提高作物产量,两者混合施用存在正交互作用^[16]。尽管国内外有关秸秆还田对土壤结构、土壤肥力的影响研究较多,但大都是以秸秆直接覆盖还田后对土壤造成的影响进行研究,没有提出能够切实解决目前秸秆还田中存在问题的具体方案,也未提出能够最大效益发挥秸秆改良土壤作用的秸秆还田方式。

本文对秸秆进行粉碎、氨化处理,以达到施入土壤后秸秆分布均匀和降低秸秆 C/N 比的目的,并选取无机土壤改良剂(硫酸钙)进行混合配施,通过室内模拟对比试验,研究有机、无机改良剂混合配施后施入土壤对土壤结构与低吸力段土壤持水特性的影响。通过研究不同预处理的秸秆施入土壤后对土壤结构及水分特性的动态影响过程,为研究秸秆改良土壤结构的综合措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自西北农林科技大学安塞水土保持综合试验站基地 20~40 cm 深度土壤,土壤类型为黄绵土,质地为粉砂壤土。土壤砂粒、粉粒、黏粒含

量分别为 62.99%、28.70% 和 8.31%,有机碳含量为 0.174%。

供试土样风干后过 2 mm 筛备用。供试秸秆为上季风干小麦秸秆,秸秆 C/N 比为 94.73。无机土壤改良剂选用硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)试剂,纯度 99%,粉末状。

1.2 试验设计

试验前将麦秸粉碎至 1 mm 和 20 mm 两个水平备用。秸秆氨化处理参考毛华明^[17]方法,以水溶液形式加入占秸秆干质量 1.33% 的氮素(调整土壤 C/N 比为 25)、4% 的氢氧化钙(过量),溶液总质量为秸秆干质量的 30%,以喷洒方式与秸秆混合均匀后装入密闭塑料箱放入人工气候箱培养 6 d,控制温度为 35℃。试验处理设置见表 1。

表 1 试验处理设置
Tab. 1 Treatments of the incubation

处理代码	处理内容
CK	裸土
L	单施 20 mm 长秸秆
P	单施 1 mm 粉碎秸秆
P + Ia	粉碎秸秆 + 硫酸钙
PA	秸秆粉碎、氨化
PA + Ia	秸秆粉碎、氨化 + 硫酸钙
Ia	单施硫酸钙

其中,L、P、P + Ia、PA、PA + Ia 处理加入的秸秆质量均占总质量的 0.5% (相当于 7 500 kg/hm²),Ia 处理中无机土壤改良剂加入量为总质量的 0.1%。各处理土壤与秸秆混合均匀,然后按照 1.25 g/cm³ 的容重分层(每 5 cm 为一层)填装到内径 10 cm、高 12 cm 的 PVC 管中,管的底端用纱布封闭,土柱高度为 10 cm,各处理设 6 次重复。

1.3 测定项目与方法

装土结束后,土柱从底部进水浸湿至饱和状态。放置 12 h 后放入人工气候箱进行恒温培养,控制温度为 35℃,相对湿度为 70%。土柱含水率下限控制为田间持水率的 80% (以 CK 处理田间持水率进行换算),若低于此含水率,土柱进行饱和处理后放入人工气候箱继续培养。培养 8 周后,每处理取 3 个重复土柱进行采样,采用离心法测定土壤低吸力段水分特征曲线,同时以干-湿筛法测定土壤团聚体组成。剩余土柱继续在人工气候箱进行培养,16 周后对每处理进行采样,测定方法同上。参照文献[18~19]计算平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤团聚体分形维数、低吸力段土壤孔隙分形维数。

土壤团聚体分形维数 F_D 计算公式为

$$F_D=3-\frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(d_i^*/d_{\max}^*)}$$

(1)

式中 W_i ——粒径小于 d_i^* 的累积质量,g

W_0 ——土壤样品总质量,g

d_i^* ——相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 的平均直径,mm

$d_{\max}^*$ ——最大粒级的平均直径,mm

低吸力段土壤孔隙分形维数 D_p 满足

$$\frac{\theta}{\theta_s}=\left(\frac{\psi}{\psi_a}\right)^{D_p-3}$$

(2)

式中 θ ——土壤含水率,% ψ_a ——进气吸力,kPa

θ_s ——饱和含水率,%

ψ ——介质的基质吸力,kPa

本文土壤性状数值为各处理的算术平均值,采用 SPSS 15.0 软件对数据进行处理,利用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同预处理方式下土壤结构分析

2.1.1 水稳性团聚体分布

培养 8 周、16 周后各处理水稳性团聚体含量分布见表 2~3。由表 2 可知,经过 8 周培养,各处理(Ia 除外)均能提高土壤粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量,其中 P、P + Ia 处理粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量分别比 CK 增加 57.55% 和 56.06%,与 CK 差异显著。PA + Ia、PA 处理粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量分别比 CK 高 15.43% 和 8.83%,与 CK 未呈显著性差异。其中 P、P + Ia 处理中 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量分别比 CK 增加 60.56% 和 25.19%,与 CK 比较均达到显著性差异。由此可知,粉碎秸秆以及与土壤改良剂(石膏)混合措施能迅速提高土壤粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量;粉碎氨化秸秆以及与土壤改良剂(石膏)混合配施处理可提高粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量,但较未氨化处理提高幅度低,对土壤结构的即时改良作用较未氨化秸秆低,单独施用石膏对土壤的改善作用不明显。

比较培养期 8 周、16 周各处理粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量可知,随着进一步的培养,16 周后各处理粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈增加的趋势(L 处理除外),说明粉碎秸秆比长秸秆更能稳定改善土壤团粒结构。其中 L 处理培养 8 周、16 周时土壤粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量分别为 12.95% 和 12.59%,两培养时段内粒径大于 0.25 mm 团聚体含量基本持平,原因可能为长秸秆在前期单糖、多糖等易分解物质分解结束

后,难分解的纤维素、木质素对土壤结构的改良作用缓慢。培养 16 周后 P + Ia、P、PA + Ia、PA 处理粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量分别比 CK 增加 240.50%、217.76%、146.00% 和 124.87%,与 CK 比较均达到显著性差异。此外,PA、PA + Ia 处理分别较 8 周时各处理对应值增加 23.75% 和 27.65%。由此可知,秸秆进行氨化处理后对提高土壤粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量具有一定的迟效性。

表 2 8 周后水稳性团聚体质量分数

Tab.2 Fraction of water stable aggregate

after 8 weeks of incubation

%

处理	粒径/mm				
	>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
CK	0.44 ^{bc}	0.91 ^a	3.93 ^c	4.12 ^{ab}	90.60 ^{ab}
L	1.50 ^{abc}	1.42 ^a	3.74 ^c	6.29 ^a	87.05 ^{bcd}
P	1.98 ^{abc}	0.86 ^a	6.31 ^a	5.66 ^{ab}	85.19 ^d
P + Ia	3.35 ^a	1.10 ^a	4.92 ^b	5.30 ^{ab}	85.33 ^{cd}
PA	0.24 ^c	0.49 ^a	3.60 ^c	5.90 ^{ab}	89.77 ^{ab}
PA + Ia	2.99 ^{ab}	0.52 ^a	3.70 ^c	3.64 ^{ab}	89.15 ^{abc}
Ia	0.47 ^{bc}	0.42 ^a	3.06 ^c	3.23 ^b	92.82 ^a

注:同一列不同字母表示差异显著,下同。

表 3 16 周后水稳性团聚体质量分数

Tab.3 Fraction of water stable aggregate

after 16 weeks of incubation

%

处理	粒径/mm				
	>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
CK	0.28 ^b	1.62 ^b	2.13 ^d	1.60 ^c	94.37 ^a
L	4.55 ^a	2.59 ^b	3.07 ^{cd}	2.37 ^{bc}	87.41 ^b
P	4.97 ^a	6.57 ^a	3.98 ^{bc}	2.38 ^{bc}	82.11 ^c
P + Ia	5.59 ^a	3.84 ^{ab}	5.82 ^a	3.91 ^a	80.83 ^c
PA	2.49 ^{ab}	3.39 ^b	4.69 ^b	2.09 ^{bc}	87.34 ^b
PA + Ia	4.31 ^a	2.81 ^b	3.71 ^{bc}	3.01 ^{ab}	86.15 ^b
Ia	0.16 ^b	2.64 ^b	3.76 ^{bc}	1.60 ^c	91.84 ^a

2.1.2 团聚体评价指标及相关分析

土壤中粒径大于 0.25 mm 的团聚体质量分数 $R_{0.25}$ 被认为对土壤物理性质及营养条件具有良好的作用,具备农学和土壤改良性质,常作为土壤结构的评价指标之一。团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)参数能准确反映土壤团聚体的状态、分布状况和稳定性特征,MWD 值随大粒级团聚体含量的增加而增大,则说明团聚体稳定性较好;GMD 描述了主要粒级的分布,其值越大,团聚体含量在大粒级上的分布越多,孔隙度越好。各处理土壤评价指标见表 4。

表 4 土壤团聚体评价指标

Tab.4 Evaluation indexes of the water stable aggregate

处理	8 周后			16 周后		
	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$R_{0.25}$	MWD	GMD
	/%	/mm	/mm	/%	/mm	/mm
CK	9.40 ^{bc}	0.183 ^{bc}	0.146 ^{bc}	5.63 ^c	0.174 ^c	0.139 ^c
L	12.95 ^{ab}	0.219 ^{abc}	0.156 ^{abc}	12.59 ^b	0.340 ^{ab}	0.167 ^b
P	14.81 ^a	0.238 ^{ab}	0.162 ^{ab}	17.89 ^a	0.414 ^a	0.190 ^a
P + Ia	14.67 ^a	0.264 ^a	0.165 ^a	19.17 ^a	0.413 ^a	0.190 ^a
PA	10.23 ^{bc}	0.175 ^{bc}	0.145 ^c	12.66 ^b	0.290 ^b	0.164 ^b
PA + Ia	9.29 ^{bc}	0.236 ^{ab}	0.149 ^{bc}	13.85 ^b	0.340 ^{ab}	0.171 ^b
Ia	7.18 ^c	0.169 ^c	0.141 ^c	8.16 ^c	0.194 ^c	0.146 ^c

由表 4 可知,8 周时,L、P、P + Ia 处理 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 团聚体指标值均较 CK 高,说明不同处理方式的秸秆施入土壤后均可促进土壤形成团粒结构。其中 P + Ia 处理 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 值较 CK 分别增加 56.06%、44.26% 和 13.01%,且与 CK 差异呈显著性水平,P 处理能增加土壤 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD,且 $R_{0.25}$ 与 CK 差异达显著性水平,P、L 处理 MWD 较 CK 分别增加 30.05%、19.67%,与 CK 相比差异不显著。PA、PA + Ia 处理对 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 的作用不明显。

由 16 周各处理评价指标可知,16 周后各处理 (CK 除外) $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 指标均较 8 周时的各处理对应值大,秸秆的预处理方式对 MWD、GMD 指标间的影响差异降低。土壤中施入有机、无机改良剂均能有效提高土壤结构的稳定性。其中 P、P + Ia 处理 MWD 分别较 8 周时各对应值增加 73.95%、56.44%,PA、PA + Ia 处理 $R_{0.25}$ 和 MWD 分别较同期 CK 增加 124.87%、146.00% 和 66.67%、95.40%,但其增加幅度较 P、P + Ia 处理低。PA、PA + Ia 处理 MWD 分别较 8 周时增加 65.71%、53.85%,说明粉碎秸秆比长秸秆处理更易促进土壤形成团粒结构,提高土壤结构稳定性。对照 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 各指标值均较 8 周时对应值小。原因可能为土壤自身有机碳进行矿化分解导致了土壤团聚体含量降低,土壤结构稳定性变差。由此可知,对土壤进行有机物料补充、增施无机土壤改良剂措施能维持和改善土壤水稳性团聚体稳定性。

试验结果表明,长秸秆在易分解物质分解结束后,改良土壤结构作用缓慢,秸秆粉碎后施入土壤能稳定改善土壤结构,提高土壤结构的稳定性,配施硫酸钙可进一步促进土壤形成团粒结构,原因可能为粉碎秸秆在分解时产生的大量有机酸使土壤局部呈现酸性,在酸性环境中交换性 Ca^{2+} 的凝聚能力增

强,促进了土壤胶体凝聚和团粒结构的形成。在整个试验期内,粉碎氨化秸秆处理对 $R_{0.25}$ 的提高程度较未氨化秸秆低,原因可能为土壤中起胶结作用的粘粒含量较低,影响氨化秸秆对土壤结构的改良作用。

土壤团聚体分形维数 F_d 能定量反映团聚体含量对土壤结构稳定性的影响趋势,一般认为,其值越小,形成的土壤结构稳定性越高,反之,则越差。各处理 8 周、16 周后土壤结构分形维数见图 1。

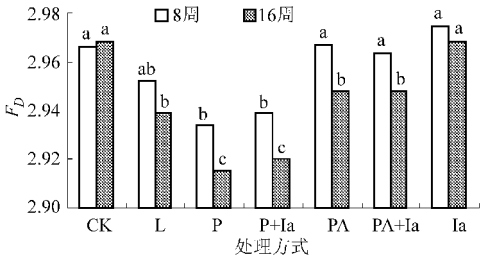


图 1 8 周、16 周培养期各处理土壤 F_d 值对比

Fig.1 F_d of straw of different periods under different straw utilization treatments

由图 1 可知,培养 8 周后,各处理 (Ia 处理除外) 土壤结构分形维数均较 CK 低,经过不同预处理的秸秆施入土壤后均可促进土壤形成团粒结构,提高土壤稳定性。其中 P、P + Ia 处理土壤团聚体分形维数较 CK 分别降低 1.40% 和 1.22%,与 CK 相比达到显著性差异。16 周后,P、P + Ia、PA、PA + Ia、L 处理土壤团聚体分形维数较 CK 分别降低 1.82%、1.63%、0.68%、0.68%、0.99%,与 CK 相比均达到显著性差异。其中,P、P + Ia 处理形成的土壤结构较其他处理稳定性高,PA、PA + Ia 处理形成的土壤结构稳定性较 P、P + Ia 处理低,分析原因可能与土壤原有 C、N 含量较低有关,即在土壤肥力较差的情况下,调节土壤 C/N 比对改善土壤结构作用不明显。单施无机土壤改良剂的处理 (Ia) 对降低土壤结构分形维数作用不明显,与 CK 相比无显著性差异。原因可能与土壤改良剂施用量较低,交换性 Ca^{2+} 数量较少,对土粒的凝聚能力较弱有关。

土壤团聚体评价指标 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 及团聚体分形维数 F_d 均能定量描述土壤结构的优劣,且各指标之间存在一定的相关关系,水稳性团聚体指标相关关系见表 5。

由表 5 可知, $R_{0.25}$ 与 MWD、GMD 相互呈正相关关系,相关系数分别为 0.86、0.95,MWD、GMD 均随土壤 $R_{0.25}$ 水稳性团聚体含量的增大而增大。土壤团聚体分形维数 F_d 与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 均呈极显著相关 ($p < 0.01$),相关系数分别为 -0.95、-0.89、-0.95,研究表明土壤团聚体分形维数 F_d 与土壤团聚体常规评价指标具有较高的相关性,能较好地描

表 5 团聚体评价指标相关系数
Tab.5 Correlation of evaluation indexes
of the soil aggregate

	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	F_D
$R_{0.25}/\%$	1			
MWD/mm	0.86**	1		
GMD/mm	0.95**	0.97**	1	
F_D	-0.95**	-0.89**	-0.95**	1

注：* * 表示极显著相关($p < 0.01$)。

述土壤结构。

2.2 预处理方式对低吸力段土壤持水性的影响

土壤最大有效水范围是指从田间持水率(FC)到凋萎湿度(PWP)。研究表明土壤的有效水并非

同等有效,土壤在低吸力(小于 0.1 MPa)段范围内的水分运动强烈,属于易效水部分,对植物具有较高的有效性^[20]。在有效水范围内根据其有效程度,以生长毛管联系断裂湿度(BCM)为界,黄绵土易效水范围为水势大于-78 kPa 的 FC—BCM 段。由 Gardner 提出的经验方程 $\theta = AS^{-B}$ 对试验不同培养期各处理在低吸力段土壤水分特征曲线进行拟合,方程中的参数 A 决定了曲线的持水能力,A 值越大,持水能力越强;参数 B 决定曲线的走向,表征土壤含水率随土壤水势降低而递减的快慢。拟合函数、不同吸力下土壤含水率、土壤孔隙分形维数见表 6、7。由表 6、7 可知,Gardner 模型可较好地拟合本试验各处理的土壤水分特征曲线测定结果。各处理回归曲线呈幂函数形式, R^2 检验均达到 0.98 以上。

表 6 培养 8 周后低吸力段持水曲线和模拟函数及分形维数
Tab.6 Soil water characteristics curve and pore fractal dimensions after 8 weeks of incubation

处理	吸力/kPa	水势/kPa						曲线模拟函数		孔隙分形 维数 D_p
		-10	-20	-30	-50	-60	-80	幂函数	R^2	
CK	41.73	26.44	20.98	18.32	15.45	14.54	13.21	$\theta = 59.055 S^{-0.3487}$	0.9904	2.652 ^{ab}
L	42.00	26.90	21.26	18.53	15.58	14.65	13.29	$\theta = 58.737 S^{-0.3392}$	0.9928	2.661 ^a
P	41.48	26.37	20.57	17.79	14.82	13.88	12.52	$\theta = 60.146 S^{-0.3581}$	0.9827	2.645 ^{ab}
P + Ia	41.17	27.04	20.85	17.91	14.79	13.81	12.40	$\theta = 64.147 S^{-0.3751}$	0.9802	2.625 ^{bc}
PA	42.15	26.75	20.80	17.96	14.92	13.97	12.59	$\theta = 61.627 S^{-0.3625}$	0.9866	2.638 ^{abc}
PA + Ia	42.77	26.71	20.65	17.76	14.69	13.73	12.33	$\theta = 62.850 S^{-0.3716}$	0.9827	2.626 ^{bc}
Ia	42.89	26.81	20.55	17.59	14.46	13.48	12.07	$\theta = 64.873 S^{-0.3837}$	0.9859	2.617 ^c

表 7 培养 16 周后低吸力段持水曲线和模拟函数及分形维数
Tab.7 Soil water characteristics curve and pore fractal dimensions after 16 weeks of incubation

处理	吸力 /kPa	水势/kPa						曲线模拟函数		孔隙分形 维数 D_p
		-10	-20	-30	-50	-60	-80	幂函数	R^2	
CK	41.21	26.06	20.80	18.23	15.43	14.55	13.25	$\theta = 55.122 S^{-0.3254}$	0.9767	2.657 ^c
L	42.47	25.71	20.38	17.79	14.99	14.10	12.80	$\theta = 55.647 S^{-0.3353}$	0.9823	2.665 ^c
P	43.17	25.89	20.99	18.56	15.90	15.05	13.79	$\theta = 52.010 S^{-0.3029}$	0.9793	2.697 ^a
P + Ia	42.43	26.28	21.12	18.58	15.82	14.93	13.64	$\theta = 54.345 S^{-0.3155}$	0.9855	2.685 ^{ab}
PA	43.09	26.47	21.35	18.83	16.07	15.19	13.90	$\theta = 54.030 S^{-0.3099}$	0.9832	2.691 ^{ab}
PA + Ia	42.65	26.19	20.95	18.39	15.60	14.71	13.41	$\theta = 54.990 S^{-0.3221}$	0.9898	2.678 ^{ab}
Ia	42.80	26.22	20.31	17.49	14.49	13.55	12.18	$\theta = 61.272 S^{-0.3686}$	0.9855	2.632 ^d

由表 6 可知,粉碎氨化秸秆、单施土壤改良剂、以及两者混合配施措施均可提高土壤饱和含水率上限。表明氨化后的秸秆、土壤改良剂均具有良好的亲水性。8 周时各处理土壤水分特征曲线拟合参数 A 从大到小依次为 Ia、P + Ia、PA + Ia、PA、P、CK、L。由此可知,粉碎秸秆比长秸秆更能提高土壤持水能力,粉碎秸秆与硫酸钙配施可进一步提升土壤持水

能力,两者可同时施用。由表 7 可知,土壤经过交替性膨胀、团聚、压实作用后,16 周时各处理土壤水分特征曲线发生变化,土壤水分特征曲线拟合参数 A 较 8 周时各对应值呈降低趋势,从大到小依次为 Ia、L、CK、PA + Ia、P + Ia、PA、P。其中 L 处理出现较大波动,这可能与秸秆在土壤中的分解速度随时间变化有关,其他处理土壤水分特征曲线拟合参数 A 顺

序基本不变。其中粉碎秸秆与土壤改良剂混合配施在 16 周时仍具有稳定的土壤持水能力。

分析 8 周、16 周不同土壤水吸力条件下土壤含水率可知,L 处理及 CK 在不同土壤水吸力条件下未具有较其他处理高的持水能力,土壤水分特征曲线拟合参数 A 值的大小并未准确反映各处理的土壤持水能力,通过 A 值分析各处理持水能力的大小存在一定的局限性。由此可知,各处理土壤持水能力差异要结合拟合参数 B 分析。由表 6、7 可知,各处理土壤水分特征曲线拟合参数 B 值分布于 0.3 ~ 0.4 之间,拟合参数 B 值随培养期的延长呈降低的趋势。说明各处理土壤水分特征曲线函数值随土壤水势降低的递减速度降低。其中 Ia 处理水分特征曲线拟合参数 B 值在 8 周、16 周时均为最大值,说明单施土壤改良剂土壤水分特征曲线函数值随土壤水势降低的递减速率最快。原因可能为石膏中的 Ca^{2+} 离子提高了土壤水分的极性,依靠水膜粘结作用土壤粘粒和阳离子团聚形成的团聚体水稳性较差,结构间的水分子链极易断裂释水。这也解释了 Ia 处理在具有较高持水能力的同时,其水稳性团聚体含量较低的原因,说明有机与无机土壤改良剂改良土壤作用机理不同。

由表 6 可知,各处理在培养 8 周时,土壤孔隙分形维数(D_p)均较 CK 低(L 处理除外),与 CK 差异不显著。表明秸秆施入土壤后,改变了土壤孔隙的分布状况,阻断土壤原孔隙的连通性,进而导致土壤孔隙连通性降低。L 处理具有较 CK 高的土壤孔隙分形维数,原因可能为麦秸在加入土壤后本身的孔状结构可作为土壤水分的通道,被认定为大孔隙,表征为其土壤孔隙分形维数显著高于其他处理。随着进一步的培养,培养 16 周时,土壤结构发生变化,施入土壤中的秸秆促进微生物活动,土壤孔隙的连通性得到改善,各处理(Ia 处理除外)呈现较 CK 高的孔隙分形维数,其中, P、PA、P + Ia、PA + Ia 处理土壤孔隙分形维数较 CK 分别增加 1.5%、1.28%、1.05% 和 0.79%,且与 CK 差异均呈显著性水平。L 处理 16 周时的土壤孔隙分形维数与 8 周时无明显变化,且与同期 CK 差异不显著,结合 2.1.1 节中两培养期内 L 处理 $R_{0.25}$ 指标相近,表明秸秆中单糖、多糖易分解物分解结束后,难分解的纤维素、木质素对改善土壤孔隙连通性作用不大。Ia 处理在整个培养期内对土壤孔隙的均匀性和连通性的影响为负值,其具体原因有待继续研究。

2.3 F_D 与 D_p 关系

分析各处理在低吸力段土壤孔隙分形维数与土壤团聚体分形维数的关系可知,两者之间呈极显著

相关关系,相关系数为 -0.80 。由图 2 可知, F_D 、 D_p 之间具有较强的线性相关性($R^2 = 0.6287$),回归分析式为

$$F_D = -0.5552D_p + 4.4291$$

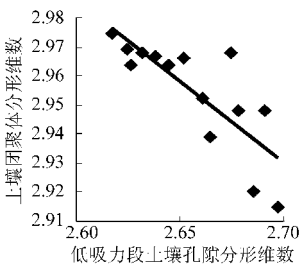


图 2 土壤团聚体分形维数与低吸力段孔隙分形维数关系图

Fig. 2 Relationship of F_D and D_p

由此可知,秸秆施入土壤后可促进降低土壤团聚体分形维数(F_D),提高土壤结构的稳定性,施入土壤前期存在减小土壤低吸力段孔隙分形维数(D_p)的趋势,随着进一步的培养,各处理土壤低吸力段土壤孔隙分形维数较 CK 高,且粉碎氮化秸秆及与土壤改良剂(硫酸钙)混合措施可显著促进土壤孔隙分布均匀性和连通性。

3 讨论

(1)土壤团聚体研究结果表明,粉碎秸秆及与无机土壤改良剂混合配施均可提高土壤 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 各项评价指标,改善土壤结构。粉碎氮化秸秆改善土壤作用具有一定的迟效性。就试验而言,调节秸秆 C/N 比对黄绵土结构影响不大,单独施用石膏对改善黄绵土结构未产生明显改良作用,分析原因可能与硫酸钙的用量较低,交换性 Ca^{2+} 的凝聚能力差、土壤粘粒含量较低有关。

(2)粉碎、氮化秸秆施入土壤能迅速提高土壤持水能力上限,提升土壤在低吸力段内持水能力,与土壤改良剂硫酸钙混合配施可进一步提升土壤持水能力,两者可同时施用。在整个培养期内,单施无机土壤改良剂可显著提高土壤持水能力上限,其所持土壤水分极易在低吸力段丧失。

(3)不同预处理的秸秆施入土壤后,在短期内降低了土壤孔隙的连通性,随着秸秆的分解可得到显著改善。长秸秆对土壤孔隙连通性改善作用较粉碎、氮化秸秆差。粉碎氮化秸秆与无机土壤结构改良剂混合配施措施改良土壤结构效果较优。有机物料秸秆施入土壤后对土壤孔隙的均匀性和连通性的影响较无机土壤改良剂大。整个试验期内,土壤团聚体分形维数、低吸力段土壤孔隙分形维数之间呈极显著相关关系,两者之间的关系可由线性函数关

系式表达。

4 结束语

秸秆经粉碎、氨化预处理后施入土壤能提高土

壤结构稳定性。秸秆施入土壤后对土壤孔隙连通性造成影响,粉碎秸秆对土壤孔隙连通性改善效果较长碎秸秆显著。该结果为探索一种最大效益发挥秸秆改良土壤作用的秸秆还田新方式提供了参考。

参 考 文 献

1 Alagoz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: a laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103 (2): 419 ~ 424.

2 杨志臣, 吕貽忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214 ~ 218.
Yang Zhichen, Lü Yizhong, Zhang Fengrong, et al. Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24 (3): 214 ~ 218. (in Chinese)

3 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 37 ~ 39.
Pan Yinghua, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Effects of polyacrylamide on soil hydrodynamic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19 (4): 37 ~ 39. (in Chinese)

4 Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004, 23 (6): 481 ~ 504.

5 Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinner F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem [J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22 (3): 195 ~ 204.

6 Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by drift spectra of soil particle fractions [J]. Geoderma, 2001, 99 (3 ~ 4): 245 ~ 260.

7 Cabiles D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing [J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98 (2): 211 ~ 216.

8 Tarafdar J C, Meena S C, Kathju S, et al. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition [J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37 (3): 157 ~ 160.

9 Tejada M, Hernandez M T, Garcia C. Soil restoration using composted plant residues: effects on soil properties [J]. Soil & Tillage Research, 2008, 102(1): 1 ~ 9.

10 李伟, 蔺树生, 谭豫之, 等. 作物秸秆综合利用的新技术[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 14 ~ 17.
Li Wei, Lin Shusheng, Tan Yuzhi, et al. Innovated techniques on comprehensive utilization of crop straw [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16 (1): 14 ~ 17. (in Chinese)

11 辜松, 刘立意, 小松崎将一, 等. 覆盖作物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 41 ~ 44.
Gu Song, Liu Liyi, Komatsuzaki Masakazu, et al. Effect of cover crops on soil physical properties and rotary tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (5): 41 ~ 44. (in Chinese)

12 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 土壤改良剂对黄绵土持水性能的改良效应研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 133 ~ 137.
Cao Lihua, Liu Heman, Zhao Shiwei. Improvement effects of soil amendments on soil water retention capacity in loess soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29 (1): 133 ~ 137. (in Chinese)

13 Caesar-Ton That T C, Busscher W J, Novak J M, et al. Effects of polyacrylamide and organic matter on microbes associated to soil aggregation of Norfolk loamy sand [J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40 (2): 240 ~ 249.

14 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224 ~ 228, 251.
Wang Zhen, Feng Hao. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (6): 224 ~ 228, 251. (in Chinese)

15 李爱宗, 张仁陟, 王晶. 耕作方式对黄绵土水稳定性团聚体形成的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 480 ~ 484.
Li Aizong, Zhang Renzhi, Wang Jing. Effect of tillage methods on the formation of water-stable aggregates in loess soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39 (3): 480 ~ 484. (in Chinese)

16 邵玉翠, 任顺荣, 廉晓娟, 等. 施用脱硫石膏与天然有机物混合改良剂对盐化潮土理化性质及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 285 ~ 289.
Shao Yucui, Ren Shunrong, Lian Xiaojuan, et al. Effects of soil combination amendments of gypsum and natural organic matter on chemical and physical properties of salinized fluvo-aquic soil and maize yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26 (7): 285 ~ 289. (in Chinese)

- 7 刘炜,常庆瑞,郭曼,等. 土壤导数光谱小波去噪与有机质吸收特征提取[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(1):100~104.
Liu Wei, Chang Qingrui, Guo Man, et al. Extraction of first derivative spectrum features of soil organic matter via wavelet de-noising [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(1):100~104. (in Chinese)
- 8 Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6): 1 282~1 285.
- 9 Galvão L S, Vitorello Í. Variability of laboratory measured soil lines of soils from Southeastern Brazil [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(2): 166~181.
- 10 张焕军,张柏,张渊智,等. 基于反射光谱特性的土壤分类研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(3):624~628.
Zhang Huanjun, Zhang Bo, Zhang Yuanzhi, et al. Soil taxonomy on the basis of reflectance spectral characteristics [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(3):624~628. (in Chinese)
- 11 张娟娟,田永超,朱艳,等. 不同类型土壤的光谱特征及其有机质含量预测[J]. 中国农业科学,2009,42(9): 3 154~3 163.
Zhang Juanjuan, Tian Yongchao, Zhu Yan, et al. Spectral characteristics and estimation of organic matter contents of different soil types [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9):3 154~3 163. (in Chinese)
- 12 张雪莲,李晓娜,武菊英,等. 不同类型土壤总氮的近红外光谱技术测定研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(4): 906~910.
Zhang Xuelian, Li Xiaona, Wu Juying, et al. Study on the determination of total nitrogen (TN) in different types of soil by near infrared spectroscopy (NIS) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4):906~910. (in Chinese)
- 13 李民赞. 基于可见光光谱分析的土壤参数分析[J]. 农业工程学报,2003,19(5):36~41.
Li Minzan. Evaluating soil parameters with visible spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5):36~41. (in Chinese)
- 14 刘飞,孙光明,何勇. 基于波长选择方法 Modeling Power 的黑木耳产地判别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(1): 62~65.
Liu Fei, Sun Guangming, He Yong. Geographical origin discrimination of *Auricularia Auricula* using variable selection method of modeling power [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1):62~65. (in Chinese)
- 15 褚小立,袁洪福,陆婉珍. 近红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用[J]. 化学进展,2004,16(4):528~542.
Chu Xiaoli, Yuan Hongfu, Lu Wanzhen. Progress and application of spectral data pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique [J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(4):528~542. (in Chinese)

(上接第 62 页)

- 17 毛华明,朱仁俊,冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸颗粒对泌乳牛生产性能的影响[J]. 云南农业大学学报,1999, 14(2):167~170.
Mao Huaming, Zhu Renjun, Feng Yanglian. Effects on the performances of Holstein cows fed pelleted barley straw treated with urea and calcium hydroxide [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1999, 14(2): 167~170. (in Chinese)
- 18 杨培岭,罗远培,石元春. 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):1 896~1 899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal features of soils characterized by the weight of particle size distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20):1 896~1 899. (in Chinese)
- 19 黄冠华,詹卫华. 土壤水分特征曲线的分形模拟[J]. 水科学进展,2002,13(1):55~60.
Huang Guanhua, Zhan Weihua. Modelling soil water retention curve with fractal theory [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 55~60. (in Chinese)
- 20 马爱生,刘思春,吕家珑,等. 黄土高原地区几种土壤的水分状况与能力水平[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(11):117~120.
Ma Aisheng, Liu Sichun, Lü Jialong, et al. Moisture characteristics and energy balance of several soils Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2005, 33(11): 117~120. (in Chinese)
- 21 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11): 60~67.
Xie Wenyan, Fan Guisheng, Zhou Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):60~67. (in Chinese)