·农业水土工程·

秸秆或粉煤灰添加对砂姜黑土持水性及小麦抗干旱胁迫的影响

王擎运[1,2]，何咏霞[1]，陈　景[1]，孔海燕[1]，柴如山[1]，查　伟[1]，
郜红建[1※]，马东豪[2]，张佳宝[2]

（1. 安徽农业大学资源与环境学院农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室，合肥 230036；
2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室，南京 210008）

摘　要：针对黄淮海平原典型中低产土壤砂姜黑土黏粒含量较高，土壤有效水分库容较低，严重限制作物生产的现状，该文采用盆栽试验，研究了不同外源改性物料的添加对土壤持水性能及小麦生理的影响，以期获得农田水分管理过程中的关键参数。盆栽试验设置常规氮磷钾（control，CK），常规氮磷钾配施下的添加秸秆（straw returning，SR）、秸秆碳（straw carbon，SC）和粉煤灰（fly ash，FA）处理，维持土壤相对含水率在 80%，培育小麦至抽穗期，开展为期 10 d 的干旱胁迫试验。结果显示 SR 和 SC 处理提高了土壤持水能力，且处理间的差异较小；FA 处理因其表面富含大量疏水性结晶矿物，土壤相对含水率下降较快，迟效水含量显著低于其余处理，但土壤速效水含量显著提高。不同改性措施均有提高小麦叶片相对含水率，减轻干旱胁迫的趋势，但在极端干旱胁迫下，FA 处理叶片相对含水率不仅明显低于其余处理，且作物体内积累大量丙二醛、过氧化氢等有害物质。田间管理中砂姜黑土相对含水率应维持在 38%（SR）、36.5%（SC）和 24.5%（FA）以上，当土壤相对含水率低于 30.78%（SC）、28.43%（SR）和 22.5%（FA）时将会对作物生理产生不可逆的伤害。鉴于秸秆优良的保水性能，粉煤灰“富水，不保水”的特性，秸秆与粉煤灰的配合施用将利于砂姜黑土的改良。相关机制值得进一步研究。

关键词：土壤；水分；干旱；砂姜黑土；改良；水分特征；作物生理
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.02.012
中图分类号：S156　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-6819(2020)-02-0095-08

王擎运，何咏霞，陈　景，孔海燕，柴如山，查　伟，郜红建，马东豪，张佳宝. 秸秆或粉煤灰添加对砂姜黑土持水性及小麦抗干旱胁迫的影响[J]. 农业工程学报，2020，36(2)：95－102.　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.02.012 http://www.tcsae.org

Wang Qingyun, He Yongxia, Chen Jing, Kong Haiyan, Chai Rushan, Zha Wei, Gao Hongjian, Ma Donghao, Zhang Jiabao. Effects of straw or fly ash addition on water holding capacity of typical Shajiang black soil and drought stress tolerance in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 95－102. (in Chinese with English abstract)　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.02.012　http://www.tcsae.org

0　引　言

中国砂姜黑土面积约 4×10^6 hm^2，广泛分布于黄淮海地区，以淮北平原分布面积最大，是该区域面积最大的中低产田土壤[1-3]。该类型土壤黏粒质量分数较高（>30%），土壤水分有效库容较小，且因黏土矿物以 2:1 型的蒙脱石为主，易发生湿胀干缩行为[3-5]。土壤改良的关键在于质地及结构改善，有效提升土壤水养库容。淮北平原是中国重要粮食作物冬小麦和夏玉米的主产区之一。该区域气候属于典型温带季风气候，年均降雨量约 850 mm，远低于年均蒸发量 1500 mm，且降雨主要集中于 7－9 月，难以满足冬小麦正常生长需求[6]。因此，合理改善土壤结构，调控土壤水分是提升典型砂姜黑土质量，实现冬小麦稳产、增产的关键。

针对砂姜黑土属性障碍因子特征，除需加强水分管理外，一般通过粉煤灰、秸秆碳等改良剂的添加，或以秸秆还田的方式增施有机肥来实现该类型土壤结构的改善、保水抗旱能力的提升。中国是燃煤大国，粉煤灰产量较高，生态环境压力较大[7-8]。粉煤灰的农田施用不仅有助于减轻环境污染，还能促进农田地力的提升[9-11]。相关研究发现粉煤灰表面富含大量结晶型二氧化硅，相互间键合能力较弱，可有效抑制土壤黏粒间的复合，降低黏土毛管孔隙的百分含量，提升土壤水分的有效库容[10-12]。秸秆碳中惰性碳含量较高，比表面积较大且含有大量磷、钾养分元素，其在农田土壤中的施用可为土壤微生物提供有效活动场所，促进养分循环与有机质累积，进而达到土壤结构改善，水养有效库容提升的效果[3,13]。秸秆还田因促进土壤有机质累积，土壤结构改善，农田养分平衡，实现资源化再利用且易于推广，而受到国内外学者的普遍关注[1,14]。上述大量研究结果表明相关改良剂在农田土壤质量，有效水养库容及作物产量提升中起到重要作用，但针对土壤水分特征变化与作物需水响应过程的联合研

收稿日期：2019-11-06　　修订日期：2019-12-30
基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFD0300801，2018YFD0800301）；土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金（Y20160014）；耕地培育技术国家工程实验室开放基金（201705）；省级大学生创新创业训练计划项目（201810364201）
作者简介：王擎运，副教授，博士，主要从事中低产田障碍因子消减机理研究。Email：qywang@ahau.edu.cn
※通信作者：郜红建，教授，博士，主要从事农业资源高效利用与地力提升相关研究。Email：hjgao@ahau.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

究却很少开展，这在一定程度上限制了农田水分管理的精准调控。

基于以上认识，本文以典型砂姜黑土为研究对象，采用盆栽试验，选取冬小麦水分需求较大的抽穗期，分析不同物料的添加对土壤持水特征及小麦干旱胁迫响应的影响。以期获得砂姜黑土在不同改良剂作用下作物需水的关键参数，为该类型农田土壤改良以及农田土壤灌溉、水分的精准调控提供支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

小麦盆栽试验设置于安徽农业大学农萃园，所用耕层（0～20 cm）土壤及玉米秸秆均于 2017 年 10 月玉米收获后采集于安徽农业大学皖北综合试验站（117°4′E，33°41′N）。安徽农业大学皖北综合试验站位于安徽省宿州市埇桥区国家现代农业示范区。该区域年平均气温 15 ℃，年均降雨量 850 mm，分布不均且主要集中于夏季。当地土壤类型为砂姜黑土，采用冬小麦、夏玉米一年两熟轮作制。土壤样本带回实验室自然风干后过 5 mm 孔径的筛备用；经测定耕层土壤田间持水量为 32%，pH 值为 7.46，有机质为 23.80 g/kg，全氮为 0.97 g/kg，碱解氮、有效磷和速效钾质量分数分别为 60.43、25.26 和 226.30 mg/kg。玉米秸秆样品在 80 ℃ 条件下烘干至恒质量，并剪至长度不超过 2.00 cm。玉米秸秆碳购置于南京三聚生物质新材料科技有限公司（江苏 南京），粉煤灰由国电宿州第二热电有限公司（安徽 宿州）提供。粉煤灰碱解氮、有效磷和速效钾质量分数分别为 2.39、32.01 和 216.51 mg/kg；秸秆碳碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别为 37.79、376.49 和 2483.03 mg/kg。

小麦盆栽试验正式开始于 2018 年 3 月，设置 4 个处理：常规氮磷钾（control，CK）、常规氮磷钾配施下的秸秆还田（straw returning，SR）、添加秸秆碳（straw carbon，SC）和粉煤灰（fly ash，FA）处理，每个处理重复 3 次。试验用盆材质为聚氯乙烯，盆直径 30 cm，高 35 cm，下设漏水孔。每盆装土 30 kg。粉煤灰（FA）及秸秆碳（SC）用量按土壤质量的 3.00% 计算，0.9 kg/盆（45×10^3 kg/hm^2）；玉米秸秆添加量参照皖北地区小麦季玉米秸秆还田量，约 0.12 kg/盆（SR，6×10^3 kg/hm^2）。化肥施用量参照农田常规施用量（N：225 kg/hm^2、P_2O_5：120 kg/hm^2、K_2O：60 kg/hm^2），分别为 2.38 g/盆（N）、1.27 g/盆（P_2O_5）和 0.64 g/盆（K_2O）。磷肥、钾肥扣除粉煤灰和秸秆碳中的养分后作为基肥一次性施入；60%氮肥做基肥，40%的氮肥待盆栽试验正式开始 1 个月后随灌溉水追施于土壤中。鉴于秸秆碳速效钾含量较高，SC 处理不施钾肥。改良材料、玉米秸秆、基肥与土壤混合均匀后，一同填于盆中。

盆栽试验过程中定期（第 30 天、第 60 天）取出少量玉米秸秆，用去离子水清洗后在 80 ℃条件下烘干至恒质量，以用于基本理化性质测试。2018 年 3 月中旬采用常规方法将小麦种子（烟农“19”）催芽后移植于盆栽土壤中。每盆小麦播种量约 10 株。前期采用称质量法维持土壤相对含水率在 80%，待作物生长至抽穗期（6 月初）停止浇水，随后开展为期 10 d 的自然干旱胁迫试验，试验期间采用称质量法测定土壤含水率。干旱胁迫试验期间采集小麦叶片保存于−80 ℃冰箱中，用于生理生化指标的测定。

1.2 测试方法

土壤基本理化性质测定[15]：pH 值采用电位计法测定，土水质量比为 1:2.5；碱解氮采用碱解扩散法测定；有效磷采用碳酸氢钠溶液浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾采用乙酸铵浸提，火焰光度计法测定；全氮和有机质分别采用半微量凯氏定氮法和丘林法测定。土壤容重及田间持水量采用环刀法（威尔克斯法）测定。

作物生理指标测定[16]：剪取健壮小麦叶片于硬质石英管中，用蒸馏水浸泡 8 h 后于 105 ℃条件下杀青，并在 75 ℃烘干至恒质量，前后质量用于计算小麦叶片相对含水率（%），计算公式如下：

$$\text{叶片相对含水率}(\%)=(W_f-W_d)/(W_t-W_d)\times100$$

式中 W_f 为采取叶片鲜质量，g；W_t 为叶片饱和吸水后的湿质量，g；W_d 为叶片烘干后的干质量，g。

气孔导度采用光合测定仪 LI-6400XT（美国 LI-COR）于晴朗天气 09:00－11:00 测定；脯氨酸（proline，PRO）采用磺基水杨酸浸提，酸性茚三酮显色法测定；可溶性蛋白（soluble protein，SPR）含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定；丙二醛（malonaldehyde，MDA）采用硫代巴比妥酸法测定；过氧化氢（H_2O_2）含量采用分光光度法测定。抗氧化酶系活力测定：过氧化氢酶（catalase，CAT）采用紫外吸收法测定；超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）采用氮蓝四唑法测定；过氧化物酶（peroxidase，POD）采用愈创木酚法测定；抗坏血酸氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）和谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase，GR）等酶活性均参照李合生等[16]的方法进行测定。过氧化氢含量和抗氧化酶系活力所需试剂盒由南京建成生物工程研究所提供。

改性物料微观形态表征：采用 Hitachi S-4800 型（日本日立）单束扫描电镜对样品进行观察，扫描成镜成像电压为 3.0 kV，最高分辨率可达 1 nm。分别在放大倍数为 1 000、10 000 和 45 000 倍下采集样品图像信息。

改性物料晶型结构分析（X 衍射分析）：采用 CW-1Y 型（北京普析）X 射线衍射仪。工作条件为：石墨单色器，铜靶（X 射线波长λ=1.540 6 nm），管压 36.0 kV，管流 20.0 mA，连续扫描角度 2θ（θ 为入射 X 射线与相应晶面的夹角）为 5°～80°，步长 0.02°/步，扫描速度 4°/min。

1.3 数据分析

数据及图表处理采用 Microsoft Excel 2007 和 Origin 8.0。数据依托 SPSS 17.0 软件，采用 LSD 法进行多重比较，检验不同处理间的差异。

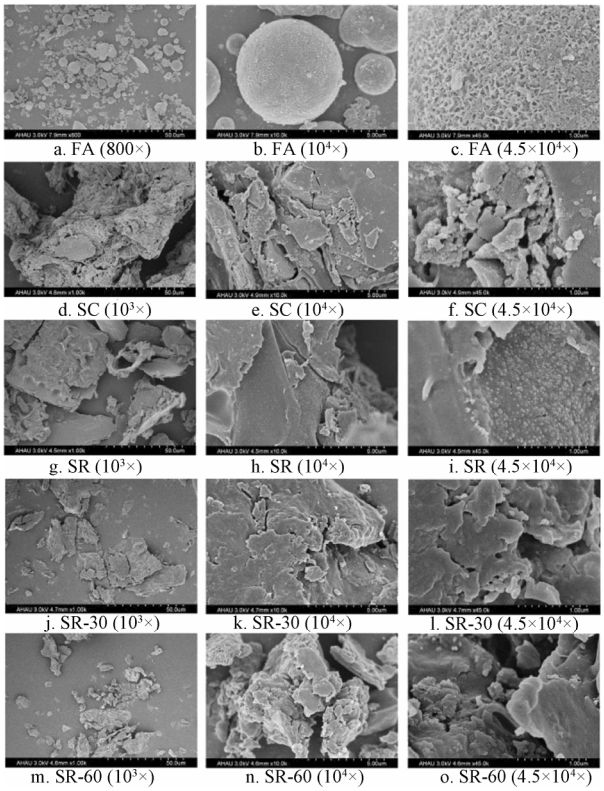
2 结果与分析

2.1 粉煤灰、秸秆碳及秸秆微观形貌特征

图 1a～图 1c 显示粉煤灰主要以直径 2.5 μm 的多孔

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

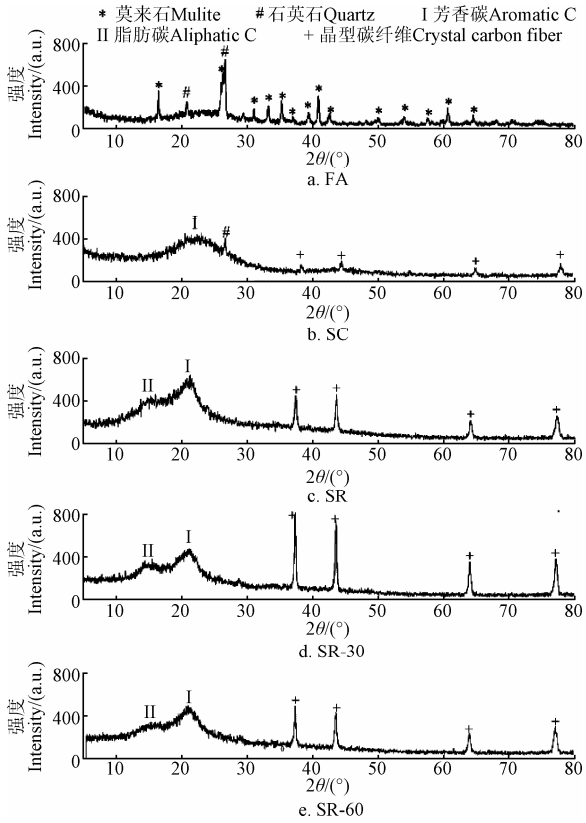
球形颗粒存在，表面富含大量毛管孔隙；玉米秸秆碳（图 1d～图 1f）呈块状，其体积与粉煤灰相比较大，但可视性毛管孔隙相对较少。秸秆（图 1g～图 1o）与秸秆碳表观较为相似，随着腐解时间的延续呈现破碎化的趋势。



注：FA 为粉煤灰；SC 为玉米秸秆碳；SR 为玉米秸秆；SR-30 为腐解 30 d 的玉米秸秆；SR-60 为腐解 60 d 的玉米秸秆。下同。
Note: FA is fly ash; SC is maize straw carbon; SR is maize straw; SR-30 is maize straw rotted for 30 days; SR-60 is maize straw rotted for 60 days. Same as below.

图 1　粉煤灰、玉米秸秆碳和玉米秸秆的微观形貌特征
Fig.1　Micromorphology characteristics of fly ash, maize straw carbon, and maize straw observed by SEM

X 射线衍射图谱显示粉煤灰（图 2a）矿物结晶度较高，主要以石英和莫来石为主。秸秆（图 2c）及秸秆腐解产物（图 2d～图 2e）均含有芳香碳、脂肪碳及低结晶度的纤维碳。秸秆碳（图 2b）与秸秆相比芳香碳保持较好峰型，脂肪碳峰消失；低结晶度纤维碳依然存在，但峰高降低较为明显。

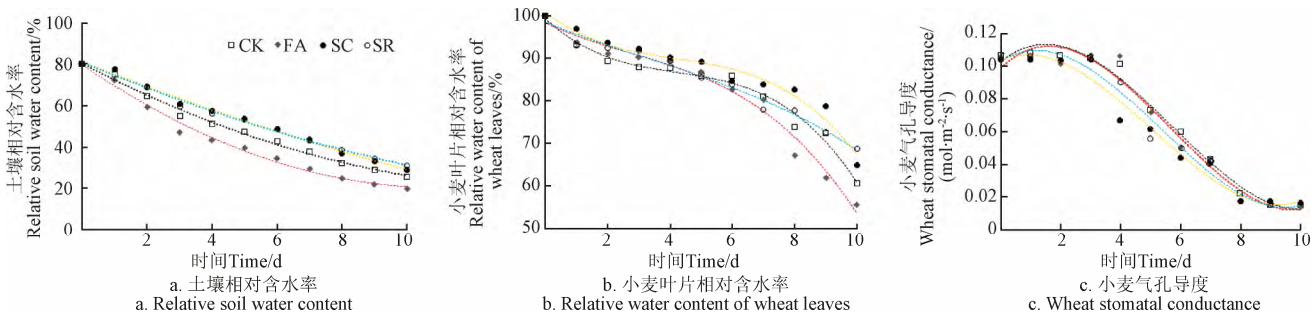


注：θ 为入射 X 射线与相应晶面的夹角。
Note: θ is angle between incident X-ray and corresponding crystal plane.

图 2　粉煤灰、秸秆碳和秸秆的 X 射线衍射图谱
Fig.2　X-ray diffraction patterns of fly ash, maize straw carbon, and maize straw

2.2　不同改性措施下土壤的持水特征

选择小麦生长需水量较大的抽穗期开展为期 10 d 的干旱胁迫试验。图 3a 显示土壤相对含水率随干旱胁迫时间增加而呈明显下降趋势，不同改良剂处理间的差异较大。秸秆及秸秆碳处理土壤相对含水率变化差异较小，均明显高于对照，粉煤灰处理下的土壤相对含水率低于对照。



注：气孔导度单位以 H_2O 计；干旱胁迫试验为期 10 d，且初始土壤相对含水率为 80%。
Note: Stomatal conductance is based on H_2O; Drought stress experiment lasted for 10 days, and initial relative soil water content was 80%.

图 3　土壤相对含水率、小麦叶片相对含水率和气孔导度对干旱胁迫的响应
Fig.3　Response of relative soil water content, relative water content of wheat leaves, and stomatal conductance to drought stress

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

经拟合土壤相对含水率变化符合一元二次方程（表1），即在干旱胁迫期间（0~10 d），土壤相对含水率随着干旱胁迫时间（x）的增加呈规律性下降（R^2≥0.97）。方程的一阶导数的绝对值反映了在不同干旱胁迫时间(x)下土壤相对含水率下降程度的大小。干旱胁迫期间（0～10 d）土壤相对含水率呈明显下降趋势，且处理间有明显的差异。依据一阶导数可发现干旱胁迫初期（0 d）不同改性处理土壤相对含水率下降速率（一阶导数绝对值）呈 FA（10.84）> CK（8.19）>SR（6.50）>SC（6.12），大小、趋势均明显不同于极端干旱胁迫下（10 d）的土壤相对含水率下降速率（SC（4.31）>SR（3.47）>CK（2.64）>FA（0.96））。结合土壤相对含水率（图 3a）可发现 SR 和 SC 处理的土壤保水能力相对较强，而 FA 处理则相对加速了土壤水的流失。

2.3 不同改性措施下小麦叶片相对含水率对干旱胁迫的响应

小麦叶片相对含水率（图 3b）呈现先迅速降低，随后缓慢下降，再迅速下降的趋势。前期（＜5 d），不同改性处理下的叶片相对含水率均明显高于对照，但在后期各处理差异较大，呈现 SC>SR>CK>FA 的趋势。SR 和 SC 处理与 CK 相比都提高了叶片相对含水率，而 FA 处理则在干旱胁迫后期显著降低了叶片相对含水率。

拟合结果（表 1）显示干旱胁迫下小麦叶片相对含水率与干旱胁迫时间的变化关系符合一元三次方程。该方程一阶导数绝对值用来表示叶片相对含水率下降速率大小，其随着干旱胁迫时间（x）的增加呈现先减小再增大的趋势。一阶导数结果显示 FA 处理率先（第 2.75 天）达到叶片相对含水率下降速率的最小值。此时（2.75 d），FA 处理对应的土壤相对含水率为 53.81%，与 CK（50.48%）相差较小，但明显低于 SC（56.81%）和 SR（60.79%）处理。

2.4 不同改性措施对干旱胁迫下小麦气孔导度的影响

图 3c 结果显示经过 10 d 的干旱胁迫，小麦气孔导度与叶片相对含水率变化规律差异较大，总体呈相反规律，即先增加，再迅速降低，最终停止下降并趋于平衡。FA 处理与 CK 相比对小麦气孔导度影响较小，SR 处理下的小麦气孔导度明显低于 CK，但高于 SC 处理。

干旱胁迫下小麦气孔导度随着干旱胁迫时间的变化规律经一元三次方程拟合达到极显著相关（表 1）。拟合方程的一阶导数绝对值呈现先减小、后变大、再次降低并趋向于 0 的变化规律。x_1、x_3 分别代表小麦气孔导度最大、最小（气孔关闭）时的时间节点，而一阶导数绝对值最大时则代表气孔导度下降速率最大时对应的时间节点（x_2）。结果显示（表 1）土壤相对含水率 $S(x_1)$ 为 63.56%～75.69%时叶面气孔导度达到最大；土壤相对含水率 $S(x_2)$ 为 36.56%～51.53%的情况下气孔导度下降速率最大，而低于 30% 时气孔导度则不再发生变化。经过不同的改性处理，各临界点土壤相对含水率的变化总体呈现 FA 略低于 CK，明显低于 SC 和 SR 处理。当小麦叶片气孔彻底关闭时各处理土壤相对含水率 $S(x_3)$ 分别为 23.92%（CK）、22.55%（FA）、30.78%（SC）和 28.43%（SR）。

表 1 干旱胁迫下土壤相对含水率、叶片相对含水率和气孔导度随干旱胁迫时间变化的方程拟合

Table 1 Equation fitting on changes of relative soil water content, relative water content of wheat leaves and stomatal conductance with drought stress time

依变量 Dependent variable	处理 Treatment	方程 Equation	R^2	x_1/d	$S(x_1)$/%	x_2/d	$S(x_2)$ /%	x_3/d	$S(x_3)$/%
土壤相对含水率 Relative soil water content (S)	CK	S= 0.23x^2-8.19x+80.34	0.99**	-	-	-	-	-	-
	FA	S= 0.49x^2-10.84x+79.87	0.99**	-	-	-	-	-	-
	SC	S= 0.09x^2-6.12x+81.03	0.99**	-	-	-	-	-	-
	SR	S= 0.15x^2-6.50x+80.93	0.99**	-	-	-	-	-	-
叶片相对含水率 Relative water content of leaves (l)	CK	l= -0.10x^3+1.31x^2-6.71x+99.30	0.98**	-	-	4.26	50.48	-	-
	FA	l= -0.06x^3+0.47x^2-3.48x+98.32	0.98**	-	-	2.75	53.81	-	-
	SC	l= -0.08x^3+1.06x^2-5.57x+100.78	0.97**	-	-	4.22	56.81	-	-
	SR	l= -0.02x^3+0.18x^2-3.02x+98.46	0.98**	-	-	3.36	60.79	-	-
小麦气孔导度 Wheat stomatal conductance (Ws)	CK	Ws= 0.000 3x^3-0.005 6x^2+0.014 7x+0.102 9	0.99**	1.49	68.74	6.22	40.12	10.95	23.92
	FA	Ws= 0.000 4x^3-0.006 3x^2+0.017 3x+0.099 1	0.97**	1.62	63.56	5.25	36.56	8.88	22.55
	SC	Ws= 0.000 3x^3-0.004 7x^2+0.007 6x+0.103 8	0.97**	0.88	75.69	5.22	51.53	9.56	30.78
	SR	Ws= 0.000 3x^3-0.005 4x^2+0.011 5x+0.103 1	0.98**	1.18	73.47	6.00	47.41	10.82	28.43

注：**，P<0.01；x 为干旱胁迫时间，d；x_1 为小麦气孔导度最大对应的时间，d；x_2 为小麦叶片相对含水率和气孔导度下降速率最大时的时间，d；x_3 为小麦气孔导度最小时的时间，d；样本数为 11。

Note: **, P < 0.01; x is drought stress, d; x_1 is time corresponding to maximum stomatal conductance of wheat, d; x_2 is time corresponding to maximum decline rate of relative water content and stomatal conductance of wheat leaves, respectively, d; x_3 is the time when wheat stomatal conductance ceases to decline, d; sample size is 11.

2.5 干旱胁迫对小麦生理调节物质及相关辅酶的影响

经过一定时期的干旱胁迫（表 2），第 8 天与第 3 天相比，小麦叶片中脯氨酸（proline，PRO）和过氧化氢（hydrogen peroxide，H_2O_2）含量累积较为明显，可溶性蛋白（soluble protein，SPR）和丙二醛（malonaldehyde，MDA）含量变化相对较小。在不同的改性措施下，PRO 含量和 SPR 含量均无明显差异。常规氮磷钾配施下的 FA 处理随着干旱胁迫时间的增加更易于提高叶片 MDA 和 H_2O_2 含量。值得注意的是在干旱胁迫下叶片中 H_2O_2 含量变化与 MDA 相比要敏感的多。在干旱胁迫 3 d，FA 和 CK 处理叶片 H_2O_2 含

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量有明显的累积特征；干旱胁迫 8 d，FA 处理叶片 H_2O_2 含量要显著高于干旱胁迫初期（3 d）及 CK 和 SR 处理。

作物体内活性氧的累积受到抗氧化酶系统的调控。表 2 结果显示，干旱胁迫 3 d 后叶片超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（peroxidase，POD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）活性在处理间差异不显著（P＞0.05），但在强烈干旱胁迫下（8 d）FA 处理的 SOD、POD 和 CAT 酶活性要显著高于其余处理（P＜0.05）。尽管干旱胁迫初期（3 d）叶片中抗坏血酸氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）和谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase，GR）活性在处理间的变化无明显规律，但随着干旱胁迫时间增加，FA 处理叶片 APX、GR 酶活力要显著高于其余处理。经过干旱胁迫和不同改性处理，叶片抗氧化酶活性变化与小麦叶片 H_2O_2 累积特征一致。

2.6　不同改性措施下土壤的水分特征曲线

土壤相对含水率与小麦气孔导度间的协同关系能较好地反应土壤水有效性[17]。依据水分特征曲线的变化特征可将土壤水划分为速效水、缓效水和迟效水。干旱胁迫初期（图 4），土壤相对含水率下降较快，但土壤气孔导度并未发生太大变化，土壤水主要以速效水的形式存在；随后则出现水分下降缓慢，但气孔导度快速下降的现象，作物吸水存在一定困难，土壤水主要以缓效水的形式存在。当气孔导度低于 0.02 mol/(m^2·s) 时，土壤相对含水率的下降则不会造成气孔导度太大的变化，土壤水主要以迟效水的形式存在。

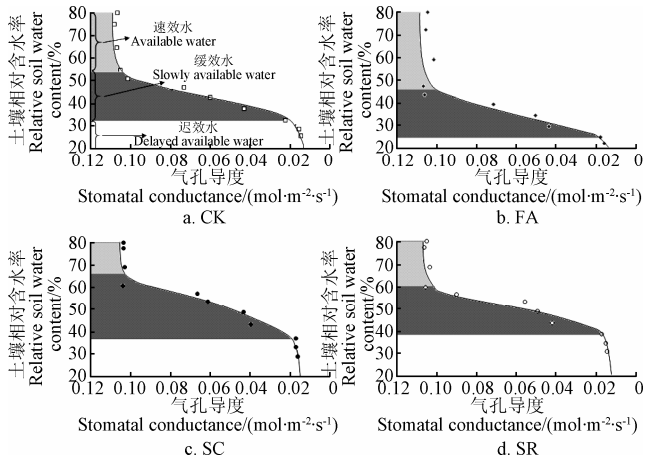
表 2　干旱胁迫对小麦生理调节物质及相关辅酶的影响

Table 2　Effects of drought stress on physiological accommodation substances and relevant coenzymes of wheat

指 标 Index	第 3 天　Day 3				第 8 天　Day 8			
	CK	FA	SC	SR	CK	FA	SC	SR
脯氨酸 /(μg·g^{-1})	20.16±2.17a	19.85±5.11a	23.49±9.95a	32.27±14.10a	46.87±30.98a	37.65±21.19a	58.22±43.08a	63.01±40.51a
可溶性蛋白 /(mg·g^{-1})	2.41±0.07a	2.51±0.07a	2.52±0.06a	2.52±0.06a	2.37±0.47a	1.85±0.69a	2.53±0.29a	2.25±0.36a
丙二醛 /($10^{-2}\mu$mol·g^{-1})	2.37±0.75a	1.80±0.40a	1.67±0.22a	2.21±0.53a	2.25±0.24a	2.24±0.26a	1.72±0.26b	1.72±0.35ab
过氧化氢 /(mmol·g^{-1})	38.10±5.08a	37.31±5.13a	31.42±5.19ab	29.61±2.20b	37.10±5.59b	59.58±10.78a	41.73±26.03ab	34.52±2.55b
超氧化物歧化酶 /(U·mg^{-1})	108.3±6.9a	106.1±3.7a	103.9±5.7a	109.4±4.6a	113.2±10.6bc	152.4±4.1a	111.6±4.7c	123.2±4.7b
过氧化物酶 /(U·mg^{-1})	16.79±0.87a	15.88±0.98a	15.68±0.37a	16.22±0.96a	16.47±0.47bc	22.37±0.94a	15.83±0.54c	17.51±0.57b
过氧化氢酶 /(U·mg^{-1})	38.38±1.73a	37.38±1.05a	36.70±0.87a	36.19±1.19a	38.96±1.47bc	54.14±1.04a	37.20±1.06c	41.82±1.05b
抗坏血酸氧化酶 /(U·mg^{-1})	3.63±0.85b	5.04±0.63ab	5.08±0.42a	4.73±1.43ab	3.26±1.56b	7.09±1.61a	3.53±0.55b	2.53±1.12b
谷胱甘肽还原酶 /(10^{-4}U·g^{-1})	3.51±1.16ab	2.82±1.24b	5.92±1.09a	4.75±2.54ab	4.44±1.88ab	8.01±1.91a	2.86±2.60b	6.40±2.24ab

注：同天各处理间的不同小写字母代表在 5%水平差异显著；酶指标均以蛋白质计。

Note: Different lowercase letters represent significant difference at 5% level among treatments on same day; enzyme index is calculated based on protein.



注：图中散点为实测值，实线为趋势线。

Note: Dotted line is measured value and solid line is trend line.

图 4　干旱胁迫下土壤相对含水率与气孔导度间的关系

Fig.4　Relationships between relative soil water content and stomatal conductance under drought stress

土壤速效水（图 4）占土壤相对含水率（速效水占比）的 33.8%～53.9%，高于缓效水占比（21.6%～28.0%）和迟效水占比（FA 24.5%、SC 36.5%、SR 38.2%）。土壤缓效水和速效水累积占比可达 75%，且以速效水为主。经过不同改性措施土壤速效水呈现 SC<SR<CK<FA，与土壤缓效水和迟效水的变化规律相反。FA 与 CK 相比，可提高土壤速效水占比 9.1%，降低土壤迟效水占比（7.3%），对土壤缓效水的影响相对较小。SC、SR 处理与 CK 相比均明显降低了土壤速效水占比（5.0%～12.0%），但提高了缓效水（1.2%～5.7%）和迟效水（4.7%～6.4%）的占比。其中以 SC 表现较为明显，降低土壤速效水占比 12.0%，提升土壤缓效水和迟效水占比分别为 5.7% 和 6.4%。

3　讨　论

砂姜黑土是一种典型变性土，田间持水量约为 32%，这要明显低于相同区域潮土的田间持水量（50%～70%）。由于该类型土壤富含大量黏粒，拥有大量的毛管孔隙，土壤水有效性较低[3,17-18]，因此，该类型土壤障碍因子的消减关键之一在于土壤有效水分库容的提升。

秸秆、生物质炭及粉煤灰是目前较为常见的土壤改良剂。相关研究认为秸秆碳及秸秆还田处理均会提高土

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

壤持水性能[3, 14]，这与先前研究结果较为一致[19]。由于秸秆还田促进砂姜黑土有机质累积需要较长时间，短期内对土壤结构及持水性能的影响主要与其腐解及半腐解产物有关[14,20-21]。秸秆及其腐解产物与秸秆碳相比除了含有相似的晶型物质外（图 1a），还富含大量烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羧基碳[21]，但 2 类物质对土壤持水性能的影响并无差异。这可能是玉米秸秆腐解或碳化过程中依然保持了原有的孔隙结构。粉煤灰与秸秆碳相比同属惰性改性物质，但前者与后者对土壤持水性能的影响有着截然不同的效果。虽然粉煤灰颗粒表面含有大量毛管孔隙，但显著降低了土壤的持水性能。一方面与其表面的晶型矿物有关，晶型二氧化硅和莫来石均具有明显的疏水特征；另一方面有研究表明粉煤灰表面微小的毛管孔隙并非有效孔隙。Lu 等[3]研究结果显示粉煤灰有效孔隙主要分布于 1～10 μm 之间，而生物碳有效孔隙则主要分布在<1 μm，>10 μm 范围内。粉煤灰与秸秆碳相比含有持水较强的毛管孔隙明显偏少。

冬小麦抽穗期生长旺盛，对水分的需求较大，而这一时期降雨量往往偏少，极易发生干旱现象[6]。本研究结果发现小麦在抽穗期随着干旱胁迫时间的增加叶片相对含水率和土壤相对含水率均有明显的下降，但叶片相对含水率的下降速率呈先减少后增加的趋势，而气孔导度则呈现先增加后减少的规律，最终不再发生变化（图 3c）。这表明作物应对干旱胁迫时有明显的自我调节功能，干旱胁迫初期作物通过开放气孔增加吸水能力，随之选择性关闭气孔减少叶面水分的蒸腾；在极端干旱的情况下，作物将关闭气孔，进而失去自我调节能力，并有可能对作物产生不可逆的伤害[22-23]。

作物抗干旱胁迫的自我调节能力在细胞膜渗透压调节物质（如脯氨酸等）、过氧化物及相关有害物质清除系统辅酶的变化上得到了进一步验证。脯氨酸是作物受到干旱胁迫，维持细胞膜内外渗透压平衡的重要调节物质；可溶性蛋白主要与细胞膜的损伤、相关物质溶出有关；丙二醛、过氧化氢的积累则对作物有较大的伤害，其含量高低是反应干旱胁迫程度大小的重要指标[24-25]。干旱胁迫在造成作物体内活性氧累积的同时，也会受到抗氧化酶系的调控。在超氧化物歧化酶的作用下活性氧快速歧化为 H_2O_2 和 O_2，最终在过氧化物酶和过氧化氢酶的进一步催化作用下形成 H_2O[24-25]。抗坏血酸过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶则主要催化作用于叶绿体内的活性氧。随着干旱胁迫时间的增加，典型膜渗透调节物质脯氨酸和有害物质过氧化氢含量均有明显累积（表 2）。其中，过氧化氢的累积特征与抗氧化酶含量变化规律较为一致。

不同的改性措施明显缓解了干旱对作物的胁迫。在轻度干旱胁迫作用下，秸秆、秸秆碳和粉煤灰处理均提高了小麦叶片相对含水率，且此时抗干旱调节物质和相关辅酶含量均与对照无明显差异；当遭遇极端干旱胁迫时，秸秆及秸秆碳处理小麦叶片相对含水率依然高于对照，明显不同于粉煤灰处理下的小麦叶片相对含水率的变化特征。粉煤灰处理下的小麦叶片相对含水率下降较快，含量明显低于对照，且丙二醛、过氧化氢含量及抗氧化酶系的活性均显著高于其余处理。其中丙二醛含量的增加，说明植物细胞膜质过氧化程度高，细胞膜受到的伤害严重[24-25]，即表明在粉煤灰处理下小麦经过极端干旱胁迫，其生理已经受到不可逆的伤害。

土壤水分调节关键在于明确作物需水与土壤水有效性间的耦合关系。该类型土壤速效水和缓效水累积占比可达 75%（图 4），且以速效水为主。这与先前的研究结果“典型砂姜黑土结构段孔隙（大孔隙）、毛管孔隙含量较高，而中度孔隙相对较少”是一致的[19]。存在于大孔隙的速效水活性虽然较高，但很容易在干旱胁迫下因蒸腾、蒸发作用迅速流失，而存在于毛管孔隙的迟效水则因土壤吸力较大而有效性较低[3,19]。该类型土壤缓效水含量较低，土壤的抗旱性能相对较弱。在不同改性措施下，秸秆、秸秆碳提高了土壤缓效水和迟效水占比，尤其是迟效水占比，这与粉煤灰处理的变化规律是相反的。经粉煤灰处理小麦气孔关闭时土壤相对含水率与迟效水相差较小，而其余处理下此临界含水率则低于土壤迟效水含量约 8%（图 4 与表 1）。部分迟效水对作物依然有效，但在粉煤灰的作用下明显消失。典型砂姜黑土黏粒含量较高，且以蒙脱石为主。蒙脱石是一种典型 2:1 型黏土矿物，层与层含有较多的疏水性的硅氧键[3,18]。因此，该类型土壤毛管孔隙主要由黏粒间的孔隙和层间纳米空隙（层间距 d<1.0 nm）组成。由于粉煤灰含有相对较少的有效毛管孔隙，且颗粒表面矿物结晶度较高，粉煤灰的添加有可能破坏黏土矿物间的内聚力，使土壤变得更为分散，进而显著降低了土壤毛管孔隙的百分含量。

综合以上研究结果，添加 3%的秸秆碳和粉煤灰并不足以改变土壤机械组成，主要通过其自身性质及其与土壤黏土矿物间的相互作用影响土壤水的有效性。在相关文献及田间长期定位田间试验结果均显示长期秸秆还田可提高土壤田间持水量总量的 10%左右[14,19]。秸秆还田对土壤水的影响不仅局限于毛管孔隙，对速效水影响同样不容忽视。从实际生产角度土壤水分应不低于缓效水的含量，即秸秆、秸秆碳、粉煤灰处理土壤相对含水率应分别维持在 38%、36.5%和 24.5%以上（图 4）；当土壤相对含水率低于 30.78%（SC）、28.43%（SR）和 22.5%（FA）时（表 1），小麦气孔将完全关闭，对作物生理产生不可逆的伤害。由于秸秆与秸秆碳显著提升了毛管孔隙含量，增强了保水能力，而粉煤灰处理因明显降低毛管孔隙分布呈现富水（提高有效性）不保水的现象，粉煤灰与秸秆、秸秆碳的有机组合将更适应于土壤结构改善，水养增容的生产需求。相关机制值得进一步研究。

4 结 论

基于砂姜黑土黏粒含量较高，土壤有效水库容较小的现状，采用盆栽模拟试验研究了秸秆（SR）、秸秆碳（SC）和粉煤灰（FA）的施用对砂姜黑土水分特征及小麦生理的影响，研究结果显示：

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1）秸秆及秸秆碳的施用增强了土壤的持水性能，提高了土壤缓效水和迟效水占比；粉煤灰处理降低了土壤迟效水占比，提高了土壤速效水占比，在干旱胁迫下土壤水的下降速率明显高于对照及秸秆、秸秆碳处理。

2）在轻度干旱胁迫下，小麦叶片相对含水率均高于对照，作物体内脯氨酸、丙二醛和过氧化物清除辅酶活性均无显著差异。随着干旱胁迫的进一步加剧，秸秆和秸秆碳处理叶片相对含水率下降有明显增加的趋势，但依然高于对照；粉煤灰的添加则造成叶片相对含水率明显低于对照处理，并积累大量丙二醛、过氧化氢，作物生理受到不可逆伤害。

从实际生产角度上，秸秆、秸秆碳、粉煤灰处理土壤相对含水率应分别维持在 38%、36.5%和 24.5%以上，当土壤相对含水率低于 30.78%（SC）、28.43%（SR）和 22.5%（FA）时将会对作物生理产生不可逆的伤害。

由于秸秆与秸秆碳显著提升了毛管孔隙含量，有较强保水能力，而粉煤灰处理因明显降低毛管孔隙分布呈现富水（提高有效性）不保水的现象，粉煤灰与秸秆、秸秆碳的有机组合将更适应于土壤结构改善，水养增容的生产需求。相关机制值得进一步研究。

[参　考　文　献]

[1] 曾希柏，张佳宝，魏朝富，等. 中国低产田状况及改良策略[J]. 土壤学报，2014，51(4)：675－682.
Zeng Xibai, Zhang Jiabao, Wei Chaofu, et al. The status and reclamation strategy of low-yield fields in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 675－682. (in Chinese with English abstract)

[2] 张佳宝，林先贵，李晖. 新一代中低产田治理技术及其在大面积均衡增产中的潜力[J].中国科学院院刊，2011，26(4)：375－382.
Zhang Jiabao, Lin Xiangui, Li Hui. A new generation of controlling technology for the medium and low-yield fields and its potential in large-area balanced grain production increase[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(4): 375－382. (in Chinese with English abstract)

[3] Lu Shenggao, Sun Fangfang, Zong Yutong. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol)[J]. Catena, 2014, 114: 37－44.

[4] Liu Liangwu. Formation and evolution of Vertisols in Huaibei Plain[J]. Pedosphere, 1991, 1(1): 3－15.

[5] Boivin P, Garnier P, Tessier D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1145－1153.

[6] Sun Hongyong, Shen Yanjun, Yu Qiang, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat–summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139－1145.

[7] Usmani Z, Kumar V, Gupta P, et al. Enhanced soil fertility, plant growth promotion and microbial enzymatic activities of vermicomposted fly ash[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 10455.

[8] Li Jing, Zhuang Xinguo, Querol X, et al. A review on the applications of coal combustion products in China[J]. International Geology Review, 2018, 60(5/6): 671－716.

[9] Ciecko Z, Zolnowski A C, Madej M, et al. Long-term effects of hard coal fly ash on selected soil properties[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, 24(5): 1949－1957.

[10] Shaheen S M, Hooda P S, Tsadilas C D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements. A review[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 145: 249－267.

[11] Skousen J, Yang J E, Lee J S, et al. Review of fly ash as a soil amendment[J]. Geosystem Engineering, 2013, 16(3): 249－256.

[12] Lim S S, Choi W J, Chang S X, et al. Soil carbon changes in paddy fields amended with fly ash[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 245: 11－21.

[13] Hong Can, Su Yuan, Lu Shenggao. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30547－30556.

[14] Zhao Huili, Shar A G, Li Shuo, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 178－186.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，1999.

[16] 李合生，孙群，赵世杰，等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2000.

[17] Braudeau E, Frangi J P, Mohtar R H. Characterizing non-rigid aggregated soil-water medium using its shrinkage curve[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 359－370.

[18] Shi Fugang, Zhang Congzhi, Zhang Jiabao, et al. The changing pore size distribution of swelling and shrinking soil revealed by nuclear magnetic resonance relaxometry[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1): 61－69.

[19] 王擎运，陈景，杨远照，等. 长期秸秆还田对典型砂姜黑土胀缩特性的影响机制[J]. 农业工程学报，2019，35(14)：119－124.
Wang Qingyun, Chen Jing, Yang Yuanzhao, et al. Effect mechanism of long-term straw returning on shrinkage characteristic in typical Shajiang black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 119－124. (in Chinese with English abstract)

[20] 王擎运，杨远照，徐明岗，等. 长期秸秆还田对砂姜黑土矿质复合态有机质稳定性的影响[J]. 土壤学报，2019，56(5)：1－12.
Wang Qingyun, Yang Yuanzhao, Xu Minggang, et al. Effects of long-term straw returning on stability of mineral-complexed organic matter in Shajiang black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1－12. (in Chinese with English abstract)

[21] Chen Xi, Mao Alice, Zhang Yajie, et al. Carbon and nitrogen forms in soil organic matter influenced by incorporated wheat

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and corn residues[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 63(4): 377－387.

[22] Thapa S, Reddy S K, Fuentealba M P, et al. Physiological responses to water stress and yield of winter wheat cultivars differing in drought tolerance[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2018, 204(4): 347－358.

[23] Saeidi M, Abdoli M. Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(4): 885－898.

[24] 张军，吴秀宁，鲁敏，等. 拔节期水分胁迫对冬小麦生理特性的影响[J]. 华北农学报，2014，29(1)：129－134.
Zhang Jun, Wu Xiuning, Lu Min, et al. Changes of physiological parameters in jointing stage of winter wheat under water stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(1): 129－134. (in Chinese with English abstract)

[25] 周静，张仁陟. 不同耕作措施下春小麦应对干旱胁迫的生理响应[J]. 干旱区研究，2010，27(1)：39－43.
Zhou Jing, Zhang Renzhi. Physiological response of spring wheat to drought stress under different cultivation measures[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(1): 39－43. (in Chinese with English abstract)

Effects of straw or fly ash addition on water holding capacity of typical Shajiang black soil and drought stress tolerance in wheat

Wang Qingyun[1,2], He Yongxia[1], Chen Jing[1], Kong Haiyan[1], Chai Rushan[1], Zha Wei[1], Gao Hongjian[1※], Ma Donghao[2], Zhang Jiabao[2]

(1. *Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei* 230036, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China)*

Abstract: Shajiang black soil is a typical middle and low production soil in Huang-Huai-Hai Plain. Crop production has been seriously restricted due to the high clay contents and low available water capacity of Shajiang black soil, this paper studied the effects of different modified materials on soil water holding capacity and wheat physiology of anti-drought stress by wheat pot experiment carried out in March 2018, in order to provide technical supports for farmland water managements. According to local field fertilization and water management modes, 4 treatments were designed in wheat pot experiment: chemical NPK fertilizer (CK), chemical NPK fertilizer with maize straw returning (SR), chemical NPK fertilizer with maize straw carbon (SC), and chemical NPK fertilizer with fly ash (FA). Referring to conventional amount of applying fertilizer in northern farmland in Anhui province, the application amounts of chemical fertilizer were 225 kg/hm^2 (N), 120 kg/hm^2 (P_2O_5), and 60 kg/hm^2 (K_2O), respectively, and the application amounts of fly ash, maize straw carbon, and maize straw returning to field were 45×10^3 kg/hm^2, 45×10^3 kg/hm^2 and 6×10^3 kg/hm^2, respectively. As for wheat pot experiment, in each pot, about 10 wheat seeds were transplanted into 30 kg soil after accelerating seeds germination. Soil relative water content was maintained at 80% field capacity until heading stage. When wheats grew up to the heading stage, irrigation stopped and then a drought stress experiment was carried out for 10 days. Wheat leaves collected regularly were stored at -80 ℃ so as to determine wheat physiological and biochemical index. The results showed that both SC and SR improved soil water holding capacity, but both was not significantly different. Owing to the abundance of large amount of hydrophobic crystal minerals like the crystallographic silicon dioxide in the surface of fly ashes, FA had a fast decrease in relative soil water content. The delayed water content of FA was significantly lower than the other treatments, while the available water content was significantly improved. What's more, different modification materials all had the tendency to increase saturated water content and alleviate the impairments of wheat leaves caused by drought stress. Under mild drought stress, the saturated water content of wheat leaves was higher than that of the control group, but no significant difference was found in the contents of proline (PRO), malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide (H_2O_2) and peroxide scavenging coenzyme in the wheats among the four treatments. However, under extreme drought stress, not only was FA significantly lower than the other treatments in wheat leaves saturated water content, but also FA treatments accumulated more harmful substances like MDA and H_2O_2 in wheats, which could lead to irreversible damages to wheat physiological conditions. In conclusion, the relative water content of Shajiang black soil was suggested to keep above 38% (SR), 36.5% (SC) and 24.5% (FA), respectively. The plant physiology would get irreversible damage if relative soil water content was under 30.78% (SC), 28.43% (SR) and 22.5% (FA), respectively. Because straws have better performance in holding water by significantly improving the content of soil capillary pore, and fly ashes can do better in providing more available water for soil in spite of holding water poorly, combined application of straws and fly ashes will be conducive to the improvement of Shajiang black soil. Relevant mechanism need to be furtherly studied.

Keywords: soils; moisture; drought; Shajiang black soil; improvement; water characteristic; plant physiology

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net