

脱硫石膏对碱化土壤团聚体特征的影响

张峰举^{1,2}, 许 兴^{1*}, 肖国举²

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 宁夏 银川 750021)

摘 要: 为探明脱硫石膏对碱化土壤物理结构性质的影响, 采用田间试验的方法, 研究了不同脱硫石膏施用量对碱化土壤团聚数量、大小、稳定性及有机无机复合体组分的影响。结果表明, 耕作层施用脱硫石膏 4 a 后, 与 CK 相比, 机械稳定性团聚体(DR0.25)含量提高 22.69%~45.29%、水稳定性团聚体(WR0.25)数量提高 126.59%~304.70%、团粒平均重量直径(MWD)值提高 2.63%~10.46%, 团粒几何平均直径(GMD)值提高 7.98%~19.01%, 且土壤团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数(ELT)和分形维数 D 值均随脱硫石膏用量增加而明显降低。同时, 脱硫石膏的施用显著降低了水分散复合体(G₀)含量、提高了钠质分散复合体(G₁)含量。总之, 脱硫石膏施用主要通过 Ca²⁺ 直接参与土壤有机无机复合体的形成, 而显著改良碱化土壤的团聚体组成与稳定性状。

关键词: 碱化土壤; 脱硫石膏; 土壤团聚体; 有机无机复合体

中图分类号: S156.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0108-07

Influence of flue gas desulphurization gypsum on characteristics of soil aggregates in sodic soil

ZHANG Feng-ju¹, XU Xing^{1*}, XIAO Guo-ju²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Research and Development Center of New Technology Application, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To investigate the influence of flue gas desulphurization gypsum(FGDG) on the physical properties of sodic soil, a field experiment was conducted to study the effects of the different dosage of FGDC on the aggregation and stability of soil aggregates. The results indicated that compared to the control, content of aggregates above 0.25 mm by dry and wet sieving (DR0.25 and WR0.25), aggregate mean mass diameter(MWD), and geometric mean diameter (GMD) in 0~20 cm sodic soil layer increased by the range of 2.69%~45.29%, 126.59~304.70%, 2.63%~10.46%, and 7.98%~19.01%, respectively, by adding FGDP. Meanwhile, DR0.25, MWD, and GMD increased significantly with the increasing FGDC rate, and the fractal dimensions of FGDC treatment were significantly lower than the control in 0~20 cm soil layer. In 0~20 cm soil layer, the aggregate destruction (PAD) and unstable aggregate index (ELT) were significantly reduced as FGDC rate increased. In addition, concentration of Ca²⁺ bridges compound particles (G₁) was increased for amelioration with FGDC, which may be associated with the promotion effect of organic molecules (OM) attached to clay (Cl) and polyvalent cations (P) (Cl-P-OM). Futher, concentration of the water solubility composite particles (G₀) in all FGDC treatments was significantly lower than the control. It is concluded that the FGDC contributed to the formation of organic-inorganic compound particles, which significantly improved the content and stability of aggregates in sodic soil.

Keywords: sodic soil; flue gas desulphurization gypsum; soil aggregates; organic-inorganic compound particles

土壤团聚体作为土壤肥力的重要物质基础, 在调节土壤养分、水分、气体的保持和供应、维持土地生产力方面具有重要作用, 是反映土壤物理性质和结构状况的重要指标之一^[1]。团聚体数量多少在一定程度上反映了土壤供储养分能力的高低, 其分布和空间排列方式决定了土壤孔隙的分布和连续性,

收稿日期: 2012-05-31
基金项目: 宁夏回族自治区科技兴农项目(2011023); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAC02B04)
作者简介: 张峰举(1977—), 男, 宁夏海原人, 博士研究生, 主要从事盐碱地改良研究工作。E-mail: tonyzj@163.com。
* 通信作者: 许 兴(1959—)男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事逆境植物生理生态与盐碱地改良方面教学科研工作。E-mail: xuxing-science@126.com。

进而决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度^[2-3]。土壤团聚体稳定性在调节土壤肥力、维持土地生产力方面具有重要作用,而且与土壤的抗蚀能力及环境质量有密切关系^[4-6],土壤碱化最为明显的特征就是土壤团粒结构的破坏与消失造成的土壤物理性质恶化,如何改善碱化土壤物理性状成为碱土改良研究的重要内容^[7]。

利用石膏改良碱化土壤是世界公认方便有效的方法,其原理就是用石膏溶解产生 Ca^{2+} 离子置换土壤碱土胶体上交换性 Na^+ 离子,在水的作用下将被置换的钠盐从土壤中淋洗从而降低了土壤碱化度、总碱度并改善土壤物理性质以达到改良目的。近年来研究确定,燃煤电厂烟气脱硫石膏主要成份为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,且富含植物生长所必需的 S、Ca、Si 等元素,能够替代天然石膏改良碱化土壤,且具有改良成本低廉的特点^[8]。李焕珍等在我国沈阳市康平县进行了试验发现脱硫石膏大大降低了土壤中的 pH 值、ESP、可溶性 Na^+ ^[9]。吕二福良研究得出随着土壤碱化度的升高,脱硫石膏的改良效率显著提高,碱化度越高,提高的幅度越大^[10]。张峰举等在碱化盐土的研究表明,脱硫石膏施用能够有效降低土壤容重,提高土壤入渗率,促进了盐分离子淋洗^[11]。近年来,国内外学者对脱硫石膏改良碱化土壤作了大量研究,主要集中在脱硫石膏对土壤化学性质的改良以及改良后的生物效应等方面^[12-13],对于改良土壤的物理性状变化研究文献较少,本研究通过田间试验,主要研究施用不同量的脱硫石膏在历经 4 a 后土壤团聚体特征的变化情况,旨在揭示脱硫石膏对碱化土壤物理性状及土壤结构特征的影响,为脱硫石膏改良盐碱化土壤提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在宁夏平罗县西大滩盐碱地改良试验基地,位于东经 $106^{\circ}13' \sim 106^{\circ}26'$,北纬 $38^{\circ}45' \sim 38^{\circ}55'$,属典型的北温带大陆性气候,年平均气温 8.50°C ,多年平均降水量 180 mm,主要集中在 7—9 月。试验区平均海拔 1 100 m,地势平缓低洼,境内分布有典型的龟裂碱土(俗称白僵土)。土壤碱化度普遍在 20% 以上,pH 值 9 以上;土壤有机质和含盐量低,质地粘重,湿时吸水膨胀泥泞不易透水,干时收缩板结,严重影响植物的生长发育。

田间试验小区安排在新开垦的重度碱化荒地上,改良前 0~20 cm 土层土壤容重 $1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤机械组成粘粒含量 40.41%、粉粒含量 32.42%、

砂粒含量 27.17%,为壤质粘土;土壤 pH 值 8.98,碱化度 35.6%,全盐含量 $3.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $8.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $26.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $12.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $170.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

脱硫石膏施用量设 5 个处理,分别为 CK ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 T_1 ($11.25 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 T_2 ($22.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 T_3 ($33.75 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 T_4 ($45.00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),每处理 5 次重复,共计 25 个试验小区,田间试验采用单因素拉丁方设计。小区长 6 m,宽 5 m,面积 30 m^2 ,小区间距 1 m,保护行宽度 4 m。2009 年 11 月将脱硫石膏按照试验设计一次性均匀施于地表,深翻旋耕约 20 cm 使其与耕层土壤充分混匀后灌冬水 1 次,灌水量 $900 \sim 1\,050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。之后每年 4 月中旬人工开沟种植油葵(品种为 KWS203),8 月中旬收获。播种量 $7.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 50 cm,株距 30 cm。播种前施入磷酸二铵 $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为底肥,油葵生育期灌水 3 次,每次 $900 \sim 1\,050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,追施尿素 3 次,每次 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2009—2012 年连续进行定位观测。

1.3 供试脱硫石膏成份

脱硫石膏来源于宁夏马莲台火电厂,在自然状态下呈现为土黄色吸湿性粉末,pH 值 7.09,含水量 10.1%, CaSO_4 含量 92.1%。

1.4 土壤样品采集

2012 年油葵收获后,按照“S”多点等量采样法采集土壤混合样品,采样深度 0~20 cm,采样量 2 kg 左右,自然风干后除去石粒和动植物残体,并将大土块按自然裂痕掰为 1 cm^3 左右小团块备用。

1.5 测定方法

非水稳定性团聚体测定采用干筛法,取风干土取样 1.0 kg (精确至 0.01 g),使其通过一套直径 20 cm,孔径由上到下顺序为 10、7、5、3、2、1、0.5 mm 和 0.25 mm 的筛组,筛组上方带盖防止振动洒落,下方有底盒收集 $<0.25 \text{ mm}$ 粒级土样。每次取 200 g 土样置于最上层筛子,用振荡式机械筛分仪在最大功率下振荡 2 min 过筛,分别得到 >10 、 $10 \sim 7$ 、 $7 \sim 5$ 、 $5 \sim 3$ 、 $3 \sim 2$ 、 $2 \sim 1$ 、 $1 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$ 和 $<0.25 \text{ mm}$ 的各级土壤团粒,最后将各级筛网上的土样分别收集称量,计算出各级干筛团聚体占土样总量的百分率^[14]。

水稳性团聚体测定采用湿筛法^[14],由干筛求得各级别团聚体的质量比,按比例配成 50 g 风干土样。将称量配好的土样的土样小心地放入 1 000 mL

平口沉降筒中,用洗瓶沿筒壁徐徐加水,直至土样逐渐达到饱和状态后等待 10 min。橡皮塞塞紧沉降筒口,上、下倒转沉降筒,反复 10 次。之后将沉降筒倒放在水桶内由上而下固定的孔径为 5、3、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛上,迅速拔出橡皮塞使沉降桶打开,轻轻晃动沉降筒,使之既不接触筛网,也不离开水面。当粒径 >0.25 mm 的团聚体全部沉到上部的套筛中时,在水中用手堵住筒口,将沉降筒连同筒中的悬浮液一起取出,弃去悬浮液。然后在水中慢慢提起筛子,再下降,升降幅度为 3~4 cm(注意上层的筛子不能露出水面),反复 10 次后提出套筛,将筛组拆开,留在各级筛子上的团聚体用细水流通过漏斗洗入铝盒,低温烘箱烘干并在空气中平衡 2 h 后称量计算湿筛的各级团聚体占土样总量的百分含量。

土壤有机无机复合体测定采用胶散分组法^[15],称取过筛的风干土 40.0 g 置于 1 000 ml 高型烧杯中,加蒸馏水配置成不超过 40 g·L⁻¹的悬液,搅起杯底土壤后上下搅拌悬液 1 min,在规定时间内(根据温度查表)0.5 min 用虹吸管从 10 cm 深度吸取小于 10 μm 复合体,加水至刻度重复虹吸至悬浊液接近澄清,分离出 G₀ 组复合体,然后滴加盐酸重复 G₀ 组提取步骤,提出 G_{0-a}组复合体,计算时 G₀ 组与 G_{0-a} 组合并计算为 G₀。接着用氯化钠溶液淋洗,重复 G₀ 组提取步骤提取 G₁ 组复合体。最后将剩余土壤研磨后倒回烧杯,重复 G₀ 组提取步骤提取 G₂ 组复合体。将所有虹吸出来的 G₀、G₁ 和 G₂ 悬浊液分别收

集在一起,加数滴 CaCl 使土壤颗粒快速聚沉,在 50℃~60℃烘干称重,换算成占风干土重的百分数。

土壤容重、pH 值、全盐含量、有机质含量、碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量采用常规方法;土壤机械组成测定采用比重计法,土壤阳离子交换量和交换性钠离子含量测定分别采用乙酸铵交换法和醋酸铵-氢氧化铵火焰光度法,由土壤阳离子交换量和交换性钠离子含量计算出土壤碱化度^[15]。

1.6 数据处理

利用各粒级团聚体数据,计算 >0.25 mm 团聚体 R_{0.25}、团粒平均重量直径 MWD、团粒几何平均直径 GMD、土壤团聚体破坏率 PAD、不稳定团粒指数 ELT 和分形维数 D,具体计算公示采用 Tyler 和杨培岭推导的公式^[16-17]。

试验所得数据采用 Excel 2003 进行数据处理、绘制图表,DPS3.01 统计分析软件进行单因素方差分析,处理间多重比较采用 Duncan's 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 脱硫石膏对 >0.25 mm 的土壤团聚体数量的影响

由表 1 可见,田间试验历经 4 a 后,由干筛法得到各处理及土层土壤机械稳定性 >0.25 mm 团聚体(DR_{0.25})含量为 33.02%~62.22%,施用脱硫石膏明显提高了碱化土壤中 DR_{0.25}含量。

表 1 不同脱硫石膏处理下 >0.25 mm 机械稳定性(DR_{0.25})和水稳定性(WR_{0.25})团聚体含量
Table 1 Aggregates (>0.25 mm) content for different rate of FGDG application by dry and wet sieving under

指标 Index	处理 Treatments	土层 Depth/cm		
		0~20	20~40	40~60
机械稳定性团聚体 DR _{0.25} /%	CK	37.60±1.23d	38.65±1.23b	34.59±1.18a
	T ₁	46.13±1.12c	40.98±0.05ab	35.94±1.23a
	T ₂	51.40±0.98bc	43.59±0.18a	38.55±1.24a
	T ₃	54.36±1.60b	42.84±0.17a	38.85±2.05a
	T ₄	62.22±1.22a	43.73±0.12a	38.16±0.94a
水稳定性团聚体 WR _{0.25} /%	CK	8.01±0.35c	4.56±1.46b	3.15±0.34a
	T ₁	18.15±2.57b	4.47±0.09b	1.04±0.75a
	T ₂	23.52±0.40b	4.19±0.08b	2.61±1.76a
	T ₃	28.39±2.77a	5.29±1.44ab	4.50±0.25a
	T ₄	32.42±0.59a	7.48±0.62a	4.32±0.56a

在 0~20 cm 土层中,施用脱硫石膏 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理土壤 DR_{0.25} 较对照(CK)提高 22.69%、29.92%、32.61%和 45.29%,T 处理与 CK 间差异显著(P<0.05),且随着脱硫石膏施用量增加,DR_{0.25}

含量呈现增加趋势,T₄ 处理 DR_{0.25} 含量最大,与 T₁、T₂、T₃ 相比具有显著性差异(P<0.05)。在 20~40 cm 土层内,施用脱硫石膏 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理土壤 DR_{0.25} 含量较 CK 亦有不同程度的增加(P<0.05),

除 T1 处理与 CK 差异不明显之外, T₂、T₃ 和 T₄ 处理土壤 DR_{0.25} 较 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 这说明 0 ~ 20 cm 耕层施用脱硫石膏后, 部分脱硫石膏可在水、耕作等因素的作用下对 20 ~ 40 cm 土壤产生改良作用。然而, 对于 40 ~ 60 cm 土层, 施用脱硫石膏处理土壤 DR_{0.25} 与对照 (CK) 间无显著性的差异, 说明耕层施用脱硫石膏对于深层土壤改良作用有限。总体来看, 施用脱硫石膏有效增加了碱化土壤 DR_{0.25} 含量, 且脱硫石膏用量越大 DR_{0.25} 含量越多。

施用脱硫石膏改良碱化土壤明显提高了土壤水稳定性团聚体 (WR_{0.25}) 的含量。由表 1 可见, 在 0 ~ 20 cm 土层, 施用脱硫石膏 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理下土壤 WR_{0.25} 较 CK 提高 126.59%、193.63%、254.391% 和 304.70%, T₁、T₂、T₃、T₄ 处理土壤 WR_{0.25} 与 CK 间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 且随脱硫石膏施用量增加 WR_{0.25} 呈递增趋势。而在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层内, 施用脱硫石膏 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理土壤 WR_{0.25} 含量较 CK 差异不显著 ($P > 0.05$), 说明脱硫石膏施用在短期内对非耕层土壤水稳定性团聚体影响有限。

2.2 脱硫石膏对土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径的影响

脱硫石膏均提高了干筛和湿筛分离的土壤团聚

体的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)。由图 1 可见, 0 ~ 20 cm 土层各处理土壤机械稳定性 (干筛) 团聚体 MWD 和 GMD 值大小顺序均为: T₄ > T₃ > T₂ > T₁ > CK, T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理土壤 MWD 值较 CK 提高了 2.63%、5.04%、7.08% 和 10.46%, 土壤 GMD 值较 CK 提高了 7.98%、14.10%、25.20% 和 19.01%。数据方差分析说明, 在 0 ~ 20 cm 土层, T₄ 处理土壤 MWD 较 CK 差异显著 ($P < 0.01$), 其余处理均较 CK 差异不显著, 而土壤 GMD 值除 T₁ 处理较 CK 差异不显著外, 其它处理均与 CK 相比差异著 ($P < 0.01$)。另外, 随着土层的加深, 各处理土壤机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 值逐渐变小, 在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层, 各处理土壤 MWD 和 GMD 值差异不显著。由图 2 可见, 0 ~ 20 cm 土层施用脱硫石膏处理土壤水稳定性 (湿筛) 团聚体 MWD 和 GMD 值均大于 CK, 并呈现随着脱硫石膏施用量的增加而增加趋势。数据分析说明 T₃ 和 T₄ 处理土壤 MWD 值较 CK 显著提高 16.82% 和 18.17%, GMD 值较 CK 显著提高 18.35% 和 20.72% ($P < 0.050$)。同时, 在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层, 各处理水稳定性团聚体的 MWD 和 GMD 值差异不显著, 没有明显的变化规律, 说明施用脱硫石膏对耕层以下土壤团聚体的作用有限。

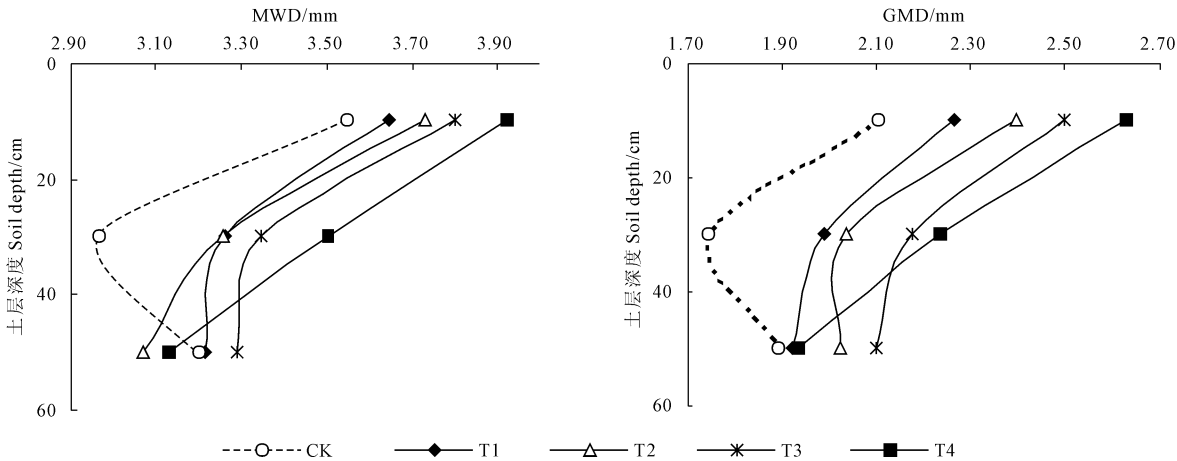


图 1 不同脱硫石膏处理干筛团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)

Fig.1 MWD and GMD of dry sieving for different rate of FGDS

2.3 脱硫石膏对土壤团聚体稳定性的影响

由 > 0.25 mm 土壤团聚体数量、平均重量直径和几何平均直径等团聚体状况指标来看, 各个处理土壤水稳定性团聚体 WR_{0.25} 含量为 1.04% ~ 32.42%, 远小于机械稳定性团聚体 DR_{0.25} 含量的最小值 56.44%, 且各处理机械性稳定性团聚体 MWD 和 GMD 值高于水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值, 说明供试碱化土壤的土壤团聚体主要以机械稳定性团聚

体为主, 但脱硫石膏施用对土壤团聚体稳定性产生明显的作用。由图 3 可见, 脱硫石膏的施用明显降低了土壤团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (ELT), 且 PAD 和 ELT 随脱硫石膏用量增加而均呈降低的趋势。在 0 ~ 20 cm 土层, 各脱硫石膏处理 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 的 PAD 值较 CK 低 18.04%、24.46%、30.92% 和 30.80% ($P < 0.05$), ELT 值较 CK 低 10.14%、15.51%、20.38%、24.41 ($P < 0.05$)。随着

土壤加深、各处理土壤团聚体破坏率和不稳定团粒指数不断增大,且各处理间差异变小,也说明脱硫石膏没有对 20 cm 以下土层土壤团聚体的稳定性产生

明显影响,这与脱硫石膏施用时仅与 0~20 cm 土层混合因素有关。

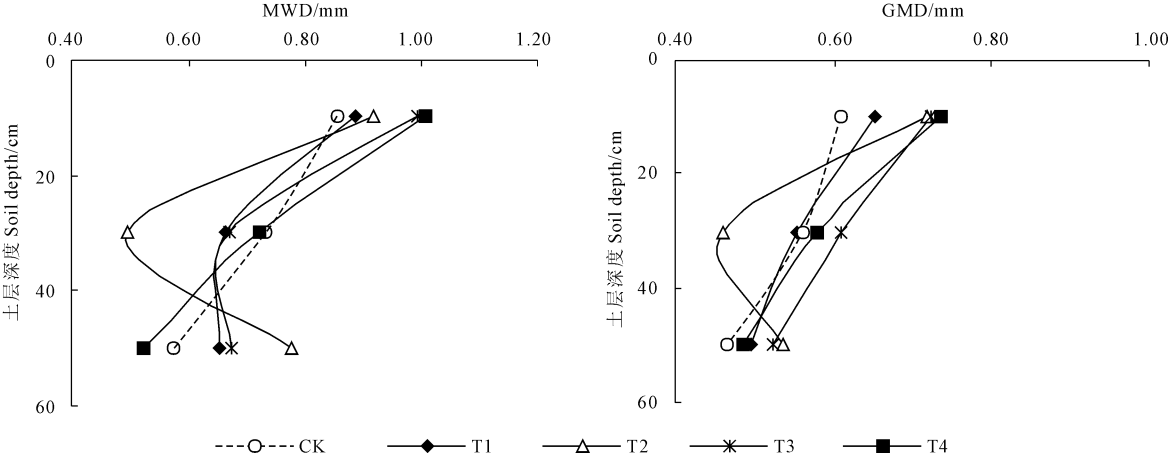


图 2 不同脱硫石膏处理湿筛团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)
Fig.2 MWD and GMD of wet sieving for different rate of FGDG

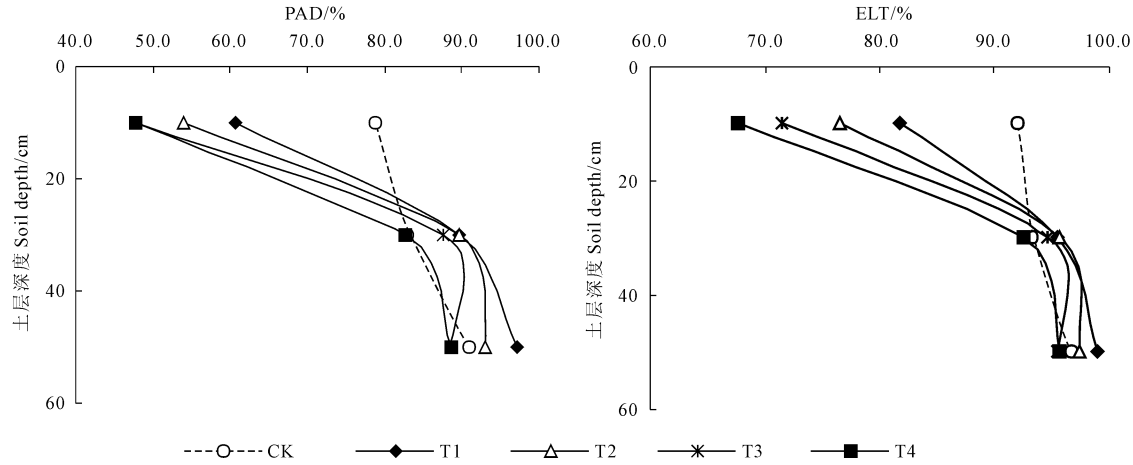


图 3 不同脱硫石膏处理湿筛团聚体下团聚体破坏率(PAD)及不稳定团粒指数(ELT)
Fig.3 PAD and ELT of wet sieving for different rate of FGDG

2.4 脱硫石膏对土壤团聚体分维特征的影响

从图 4(a)可以看出,随着土层加深,土壤机械稳定性团聚体的分形维数 D 值增大;在 0~20 cm 土层,脱硫石膏施用降低了分形维数 D 值,脱硫石膏施用处理 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 的分形维数 D 值较 CK 分别降低了 2.24%、3.15%、5.11%、和 4.52%,且呈现随脱硫石膏用量增加而降低的趋势。分形维数 D 值数据结果表明,土层越深分形维数 D 值越大、变化范围越小。在 0~20 cm 土层 D 值变化范围为 2.41~2.53,20~40 cm 为 2.49~2.62,40~60 cm 为 2.55~2.59,说明施用脱硫石膏只对耕层土壤团聚体产生了重要影响。图 4(b)显示,各处理水稳定性团聚体的分形维数与机械稳定性团聚体的分形维数一样,呈现出随着土层加深而增大的趋势,不同的

是,施用脱硫石膏各处理随土层加深,D 值显示出倒‘L’字形下降趋势,而 CK 呈现出直线型下降趋势。数据分析显示,在 0~20 cm 土层 CK 土壤 D 值最大为 2.96,脱硫石膏施用最大量 T₄ 最小为 2.82,呈现出随脱硫石膏用量增加而降低的趋势;而在 20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层,D 值明显变大,未呈现出随脱硫石膏用量增加而变化趋势,进一步印证了脱硫石膏对施用层土壤团聚产生的重要影响。

2.5 脱硫石膏对土壤有机无机复合体的影响

不同脱硫石膏施用量下 0~20 cm 土层土壤有机无机复合体结果表明(表 2):施用脱硫石膏处理显著降低了水溶解性 G₀ 组复合体百分含量(P<0.05),提高了钙镁离子为键桥的 G₁ 组复合体百分含量与 CK 相比,施用脱硫石膏 T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理

G₀ 组复合体分别降低了 - 22. 3%、- 30. 1%、- 49. 8%和 - 48. 5%; G₁ 组复合体较 CK 分别提高了 5. 11%、8. 58%、13. 21%和 13. 62%, 并且处理与对照间差异显著($P < 0. 05$)。然而, CK 处理土壤 G₂

组复合体和残渣的含量与施用脱硫石膏各处理均无显著性的差异, 这样的结果说明了脱硫石膏溶解产生的钙离子直接参与了 G₁ 组复合体的形成。

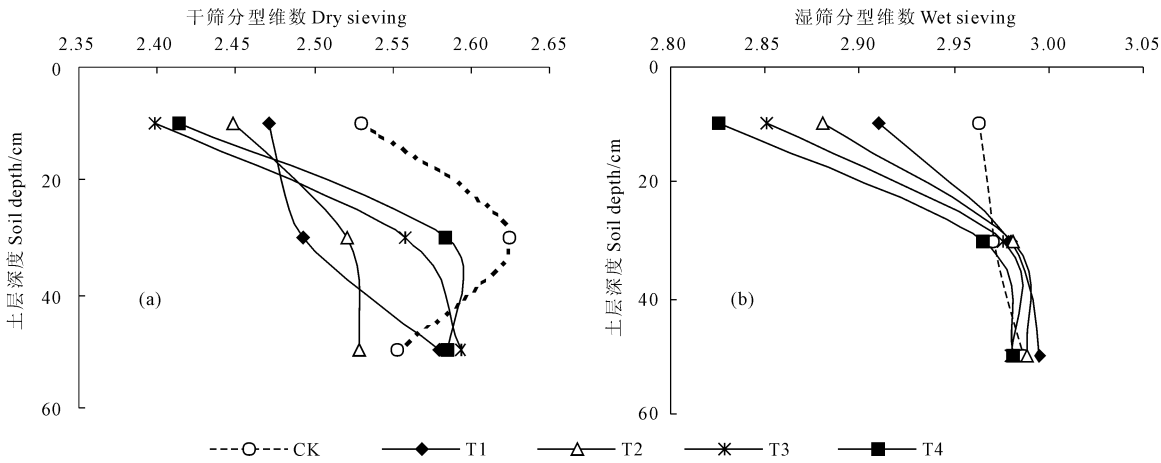


图 4 不同脱硫石膏处理土壤团聚体分形维数
Fig.4 Fractal dimension of soil aggregates for different rate of FG DG

表 2 不同脱硫石膏处理土壤各组有机无机复合体含量变化

Table 2 Concentrations of organic-inorganic compound particles for different rateof FG DG

处理 Treatment	G ₀ 组复合体/%	G ₁ 组复合体/%	G ₂ 组复合体/%	残渣/%	合计/%
CK	34.3 ± 1.20a	0.8 ± 0.18d	6.5 ± 0.82a	58.4 ± 0.32a	100.0
T ₁	25.1 ± 0.46b	5.9 ± 0.32c	7.0 ± 0.34a	62.0 ± 0.18a	100.0
T ₂	20.2 ± 0.87c	9.0 ± 0.61b	7.9 ± 0.18a	62.8 ± 0.22a	100.0
T ₃	17.2 ± 0.18d	11.4 ± 0.38a	8.5 ± 0.76a	63.0 ± 0.42a	100.0
T ₄	17.7 ± 0.28d	11.7 ± 0.84a	8.0 ± 0.63a	62.6 ± 0.37a	100.0

3 讨 论

大于 0.25 mm 的土壤团聚体数量、MWD、GMD、PAD 和 ELT 常常作为评价土壤团聚体状况的重要指标。DR_{0.25}、WR_{0.25}、MWD、GMD 值越大表示土壤的团聚度越高,团聚体稳定性就越强,土壤结构性能就越好;相反 PAD 和 ELT 越大,说明土壤退化程度增加,团聚体稳定性能降低,物理结构恶化^[18-19]。已有研究表明,聚丙烯酰胺(PAM)、有机肥等物料的施用能增加微团聚体的团聚性能,促进土壤团聚体的稳定性^[20-21]。本文研究结果显示,与 CK 相比,施用脱硫石膏各处理耕层土壤 DR_{0.25} 数量提高 22.69% ~ 45.29%, WR_{0.25} 数量提高 126.59% ~ 304.70%, MWD 值提高 2.63% ~ 10.46%, GMD 值提高 7.98% ~ 19.01%, 且土壤团聚体 PAD 值和 ELT 值均呈现出随脱硫石膏用量增加而明显降低的趋势,说明脱硫石膏施用不仅促进了碱化土壤团聚体形成、增加了团聚体数量,而且有利于提高土壤结构

体的稳定性,改善土壤物理结构性能。研究表明,脱硫石膏施用处理土壤渗透性能是对照的 4.1 倍^[11], 其因就在于脱硫石膏显著改良了土壤的团聚体组成与稳定性状,使其形成较好的团粒结构,从而改善了土壤的渗透性能。

土壤作为一种分散多孔介质,表现出明显的分形特征,粒径分布分形维数为土壤结构的评价提供了一个新指标^[22]。Castrignano 等运用分形理论和地统计学对土壤团聚体进行分析发现,土壤团聚体分形维数 D 值越大,则团聚体的分散度越大,土壤质地越黏重,通透性越差,土壤涵蓄水分与供应作物所需水分的能力也越差^[23]。已有的研究表明,土壤分形维数与土壤大团聚体含量有显著的正相关关系,大团聚体含量越高,分形维数越低^[24-25]。本文研究结果表明,随着脱硫石膏施用量的增加,0 ~ 20 cm 土层内土壤结构的分形维数大小顺序为 T₁ > T₂ > T₃ > T₄ > CK, 且与 CK 差异明显,分形维数能较好地描述碱化土壤团聚体分布,且能够反映出不同脱硫石

膏施用量下团聚体的变化。

土壤团聚体形成的微团聚体理论认为土壤有机无机复合体是土壤团聚体形成的重要机制和物质基础^[1,26]。在粘粒含量较高的土壤中,微团聚体形成主要依靠粘粒通过多价金属阳离子连接、吸附极性有机分子,形成配位络合物和有机无机复合体,含 Ca^{2+} 的土壤改良剂如石灰和石膏等的施用对增加团聚体数量具有重要作用^[27-29]。本研究采用胶散分组法分离土壤有机无机复合体结果表明,脱硫石膏的施用显著降低了水分散复合体(G_0)含量,提高了以钙镁离子为键桥的钠质分散复合体(G_1)含量。由此说明脱硫石膏溶解产生 Ca^{2+} 在替换碱化土壤胶体吸附的 Na^+ 和 Mg^{2+} 同时,直接参与了粘粒与土壤有机质之间阳离子桥的构建,促进由粘粒(C)、多价阳离子(P)和有机分子(OM)构成有机无机复合体(C-P-OM)形成,这些复合体又进一步结合形成大团聚体,从而提高了团聚体的数量和稳定性。因此,脱硫石膏产生的钙离子直接参与土壤有机无机复合体的形成是碱化土壤团粒结构改善的重要机理。

4 结 论

1) 脱硫石膏能显著改良碱化土壤的团聚体组成与稳定性状。通过对 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量、MWD和GMD等土壤团聚体稳定性等参数分析表明,脱硫石膏改良碱化土壤有利于提高土壤机械稳定性和水稳定性团聚体结构水平,增加土壤团粒结构稳定性,改善土壤物理结构状况,脱硫石膏施用量越大效果越明显。但是,脱硫石膏对土壤团聚体的改良作用在其混合层要比中低土层明显。

2) 脱硫石膏直接参与土壤有机无机复合体的形成是碱化土壤团聚体组成与稳定性状改善的重要机理。脱硫石膏的施用显著降低了水分散复合体(G_0)含量,但显著提高了以钙镁离子为键桥的钠质分散复合体(G_1)含量。

参 考 文 献:

- [1] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [2] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11: 199-238.
- [3] 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.
- [4] 杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等.不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2010,24(1): 252-256.
- [5] 任镇江,罗友进,魏朝富.农田土壤团聚体研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(2): 1101-1105.
- [6] 薛少平,朱琳,姚万生,等.麦草覆盖与地膜覆盖对旱地可持

- 续利用的影响[J].农业工程学报,2002,18(6): 71-73.
- [7] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, et al. Amelioration strategies for sodic soil: a review[J]. Land Degradation & Development, 2001, 12(4): 357-386.
- [8] 蓝佩玲,廖新荣,李淑仪,等.燃煤烟气脱硫副产物在酸性土上的农用价值与利用原理[J].生态环境,2007,16(4): 1135-1138.
- [9] 李焕珍,徐玉佩,杨伟奇,等.脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J].生态学杂志,1999,18(1): 25-29.
- [10] 吕二福良,乌力更.石膏不同施用方法改良碱化土壤效果浅析[J].内蒙古农业大学学报,2003,24(4): 130-134.
- [11] 张峰举,肖国举,罗成科,等.脱硫石膏对次生碱化盐土的改良效果[J].河南农业科学,2012, (2): 49-53.
- [12] 肖国举,罗成科,白海波,等.脱硫石膏改良碱化土壤种植水稻施用量研究[J].生态环境学报,2009,18(6): 2376-2380.
- [13] 李凤霞,杨涓,许兴,等.烟气脱硫废弃物在盐碱地土壤改良中的应用研究进展[J].土壤,2010,42(3): 352-357.
- [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,1983: 62-126.
- [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,2000: 25-38, 70-106, 152-196.
- [16] 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): 1896-1899.
- [17] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [18] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等.土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J].土壤学报,2001, (1): 51-53.
- [19] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010, 30(4): 1035-1041.
- [20] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等.土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J].土壤学报,2001, (1): 51-53.
- [21] 贾玲侠,李绍才,赵秀兰,等.PAM特性参数对土壤团聚体稳定性的影响[J].东北水利水电,2006, (4): 59-63.
- [22] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010, 30(4): 1035-1041.
- [23] Castrignano A, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73(1): 13-18.
- [24] 吴承祯,洪伟.不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J].土壤学报,1999,36(2): 162-167.
- [25] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8): 1513-1520.
- [26] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
- [27] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(4): 434-438.
- [28] Chan K Y, Heenan D P. Lmie-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1841-1844.
- [29] Armstrong A S B, Tanton T W. Gypsum applications to aggregated saline sodic clay top soils[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 43(2): 249-260.