

doi: 10.11838/sfsc.20150618

土壤添加不同颗粒组成沸石粉对玉米生长及养分吸收的影响

王甲辰, 左 强, 邹国元, 宫延刚, 陈延华, 王美菊, 孙建科, 王 嵘, 李 妮

(北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097)

摘 要: 采用土柱试验, 研究不同颗粒组成的沸石粉添加到 0~20 cm 砂壤土耕层对玉米生长、养分累积的影响, 为改良沙地提供理论依据。本研究共设 8 个处理: CK0: 不施肥 + 0 g 沸石粉体 (简称粉体); CK: 施肥 + 0 g 粉体; A: 施肥 + 8 g 粉体 a; B: 施肥 + 8 g 粉体 b; C: 施肥 + 8 g 粉体 c; D: 施肥 + 8 g 粉体 d; E: 施肥 + 8 g 粉体 e; F: 施肥 + 8 g 粉体 f。结果表明, 处理 A、B、C、D、E、F 与 CK 之间的玉米株高均不存在差异; 但其生物量均高于 CK, 粉体颗粒构成中 < 0.002 mm 的含量最高的两个处理 E、F 达显著水平, 分别比 CK 高 71.36% 和 63.69%。结果还表明, 生物量与不同粉体颗粒 5 个粒级分布的百分比 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 即 0.05~0.25 mm、0.02~0.05 mm、0.01~0.02 mm、0.002~0.01 mm、< 0.002 mm 百分率之间存在多元回归方程 $Y = 3.69 - 0.050 6x_1 + 0.082 5x_2 - 0.093 4 x_3 - 0.009 44 x_4 + 0.064 86 x_5$, 表明了玉米生长与颗粒组成之间的密切关系; 方程系数表明生物量与细小颗粒含量呈极强的正相关, 而与粗颗粒含量呈负相关。与 CK 处理相比, 加粉体处理 A、B、C、D、E、F 均促进了氮和钾的吸收, 但只有处理 F 对氮的吸收以及 E 和 F 处理对钾的吸收达显著水平。显著促进吸收的氮量达 74.52%、钾量分别达 63.39% 和 63.62%, 而对磷没有显著促进作用。由此可以推论, 在此土壤条件下, 只有沸石粉体粘粒级颗粒含量高于 39% 时才显著促进玉米生长发育以及增加植株对氮、钾的吸收和利用。

关键词: 土柱模拟; 沸石粉; 颗粒组成; 耕层; 土壤改良

中图分类号: S156; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2015) 06-0108-07

土壤肥力包括水、肥、气、热, 而质地对调节这四大因素起着至关重要的作用^[1-2]。它对土壤的持水、保肥特征起着关键作用^[3-5]。小颗粒组成的土壤比表面积和孔度较大, 持水、保肥能力强, 从而可以减小土壤养分向下淋溶损失^[3]。提高粗质土壤生产力和肥料利用率的传统措施是增施有机肥^[6-9]和有机无机肥料相结合^[10-11], 而忽略了调整土壤颗粒组成这一重要手段。由于有机肥在粗质土壤中分解迅速, 很难对土壤结构改善起到持续作用^[12], 所以改良土壤质地是改变土壤肥力的根本措施^[13-14], 于是人们开展了采用粉煤灰^[15-18]、生物炭^[19-20]、硅藻土^[21-22]、生物聚合物^[23]和沸石等措施来改良粗质土壤。但综合考虑改良效果、资源丰缺、成本、有害物质含量^[24]

等影响因素, 天然沸石作为一组铝硅酸盐多微孔矿物以其独特的理化性质使其具备土壤修复剂、肥料添加剂和 (或) 养分载体并在农业领域受到越来越多的关注^[25-26]。沸石加入土壤的作用主要表现在: ①疏松土壤、中和土壤酸性、保持土壤水分^[27-29]; ②能有效地控制肥料中铵态氮和钾的释放, 从而延长养分在土壤中的保留时间^[30-34]; ③使土壤离子交换容量提高, 而且沸石本身也含有作物需要的微量养分^[27,35]; ④抑制土壤和肥料中有害物质向作物的转移, 有利于作物品质的改善^[36]。但在众多研究中还缺乏不同沸石体粒级组成对养分吸附-解吸、保水, 对土壤理化性质、养分固持、作物吸收累积和淋洗影响的研究, 这关系到是否采用了适当的沸石粉体材料并加以高效利用, 同时也指导沸石粉体生产企业生产高效沸石粉体土壤改良剂以及机械制造厂商提供先进的加工机械。本研究是利用相同材质, 同样添加剂量, 但不同颗粒组成粉体添加到砂壤土耕层, 研究它们对玉米生长发育和 N、P、K 养分吸收累积的影响及本质, 为沙地改良选用高效沸石粉体材料提供理论和实践依据。

收稿日期: 2014-08-25; **最后修订日期:** 2014-12-13

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设“盆栽观赏植物长效追肥制备及应用示范”(KJCX20140412); 北京市农委科技支农项目“番茄、芹菜高产高效水肥一体化技术集成与示范”(20130108)。

作者简介: 王甲辰 (1965-), 男, 河北定州人, 博士, 研究员, 主要从事土壤改良和功能肥料研发。E-mail: hbwjc@tom.com。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

肥料种类：尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 14%)、硝酸钾 (K₂O 44.5%)。

试验地点和供试作物：试验在北京市农林科学院植物营养与资源研究所温室内开展。供试作物为玉米 (*Zea mays* L)，品种为京科 389。

沸石：来自河北灵寿县斜发沸石。粒级如表 1。

表 1 沸石颗粒组成分布 (%)

粉体代号	x ₁ 0.05 ~ 0.25 mm	x ₂ 0.02 ~ 0.05 mm	x ₃ 0.01 ~ 0.02 mm	x ₄ 0.002 ~ 0.01 mm	x ₅ <0.002 mm
a	30.6	28.09	2.28	28.00	11.03
b	6.71	24.84	14.86	37.16	16.43
c	6.09	17.49	15.24	39.61	21.57
d	3.44	32.38	23.29	24.66	16.23
e	4.18	15.53	9.40	29.14	41.75
f	0.25	22.80	20.88	16.16	39.91

注：粒径采用 Topsize 激光粒度仪测定。颗粒组成分布是把测定的粉体所有粒径占总体积百分率微分，按照表中粒径段体积百分率积分而得。因颗粒密度相同，所以代表不同粒级分布重量百分比。

供试土壤：土壤取自北京市大兴区长子营镇牛坊村果园树间，潮土，其土壤理化性质见表 2、表 3。

表 2 土壤颗粒组成 (%)

土壤质地	0.25 ~ 2.00 mm	0.05 ~ 0.25 mm	0.02 ~ 0.05 mm	0.002 ~ 0.02 mm	<0.002 mm
砂壤土	2.59	79.53	8.00	2.00	7.88

表 3 土壤理化性质

有机质 (%)	全氮 (%)	有效磷 (P mg/kg)	速效钾 (K mg/kg)	pH 值
0.51	0.04	8.89	155	7.24

试验装置：主体为 10 cm × 100 cm 的 PVC 管，顶端再加装高 6 cm、外径 15 cm PVC 管用于保护灌水 (图 1)。8 个为一排，两排并列于固定铁架上。管底端固定 0.074 mm 的尼龙网用于漏水，下接漏斗，多余液体顺漏斗流出。

1.2 试验设计和方法

试验设 8 个处理，具体内容见表 4。

土柱设计：把直径 × 长度为 10 cm × 100 cm 的 PVC 管分成两段，0 ~ 20 cm 进行设定的处理，往下

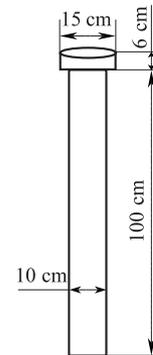


图 1 试验用 PVC 管结构示意图

80 cm 全部装原供试砂壤土。在底部漏斗出口接塑料瓶收集淋溶液。在顶端保护套管处灌水。1 m 土柱装土量：5 cm × 5 cm × 3.14 × 100 cm × 1.3 g/cm³ = 10.2 kg，管上端 0 ~ 20 cm 土壤模拟土壤耕层，装土约 2 kg。装盆时一个人操作，另一人做辅助，以保持土柱装土均匀。所有处理随机排列，3 次重复。

装柱：把 PVC 管下口用尼龙网包住，把 8 kg 土分层计量装到管子距最上缘 26 cm 处，按处理把 2 kg 土、肥料、粉体混匀，再均匀装入剩下的 26 cm 中，剩下上端 6 cm 空间用于保护灌水。

播种：2014 年 3 月 1 日播种，在每个管子中距边界 3 cm 对称播种 2 穴 2 粒玉米种子，最终定植 2 株。

表4 试验方案

代号	处理
CK0	管中0~20 cm 土壤既不添加粉体, 也不添加肥料
CK	管中0~20 cm 土壤不添加粉体, 添加尿素0.65 g、过磷酸钙1.43 g 和硫酸钾0.6 g
A	管中0~20 cm 土壤添加 a 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g
B	管中0~20 cm 土壤添加 b 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g
C	管中0~20 cm 土壤添加 c 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g
D	管中0~20 cm 土壤添加 d 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g
E	管中0~20 cm 土壤添加 e 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g
F	管中0~20 cm 土壤添加 f 粉体 8 g、尿素 0.65 g、过磷酸钙 1.43 g 和硫酸钾 0.6 g

注: 粉体代号和颗粒组成见表1。沸石加入量参照参考文献 [37] 的粉体剂量 2 g/kg 土壤。由于本研究测试的粉体材料相对较粗, 为保证试验成功率, 添加量调整到 4 g/kg 土壤。

浇水: 试验共浇水 4 次。第一次在播种前 1 d 即 2 月 30 日灌水 500 mL, 第二次全部出苗后 3 月 7 日浇 2 000 mL 水; 3 月 17 日浇水 1 000 mL; 3 月 27 日浇水 1 000 mL。

1.3 测定项目和方法

株高和生物量: 分别在 3 月 17 日、3 月 24 日、

3 月 31 日和 4 月 9 日测量植株株高, 4 月 9 日测定收获期地上生物量。

植株氮、磷、钾养分测定: 植株干样研磨过 0.25 mm 筛, 用万分之一天平称量, 采用 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮, 凯氏定氮法测全氮, 钼锑抗比色法测全磷, 火焰光度计法测全钾^[38]。

1.4 数理统计分析

数据处理采用 Excel 2010 并作图, 数据统计分析采用 SPSS 19.0 统计分析软件的方差分析和多元回归方法。P < 0.05 表示差异显著, P < 0.01 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同颗粒组成粉体对株高的影响

由图 2 可知, 从 3 月 1 日播种算起到 3 月 24 日玉米生长长势缓慢, 可能由于温室温度相对较低引起。从图 2 还可见, 在第一次测量时, 虽然施肥处理 (CK、A、B、C、D、E、F) 中 E 和 F 处理的株高最高, 但与其他处理差异不显著, 而与 CK0 的差异达显著水平。这可能是这两个处理沸石粉体中 < 0.002 mm 的含量最高, 显著影响了玉米的营养状况。后两次的调查株高结果与第一次的差异趋势相同, 但是第 4 次 (收割期) 所有施肥处理均显著高于对照 (CK0) 不施肥处理, 而施肥处理之间没有差异, 说明添加沸石粉并没有对玉米株高产生明显的影响。

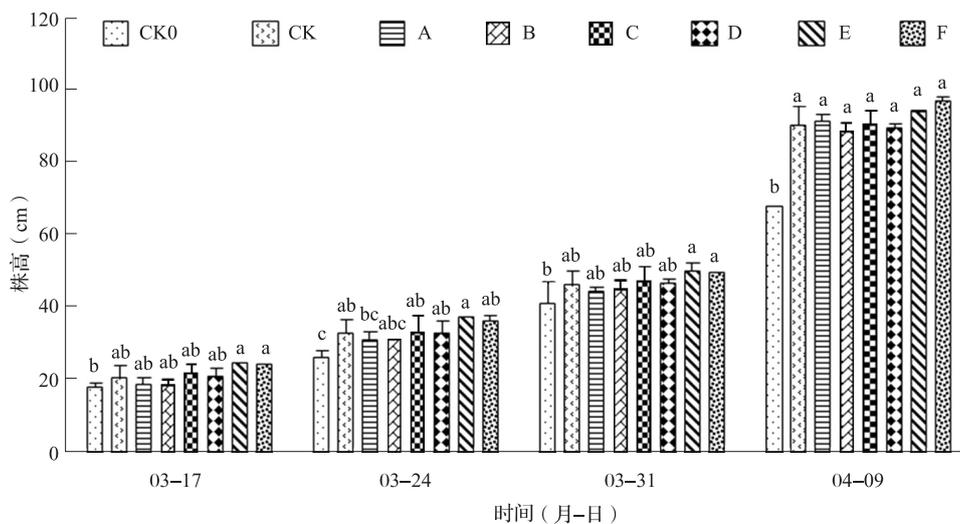


图 2 不同处理不同时间玉米株高

注: 图柱上小写字母不同表示处理间差异显著。下同。

2.2 不同颗粒组成粉体对地上部生物量的影响

从图 3 可见, 施肥处理 CK、A、B、C、D、E、

F 的地上生物量均显著高于不施肥处理 CK0, 说明肥料在低肥力砂壤土的作用十分显著。而在施肥处

理中, 虽然添加粉体处理间地上生物量差异不显著, 但处理 A、B、C、D、E、F 均高于只施肥处理 CK, 而处理 E 和 F 却与 CK 处理的差异达显著水平。这不仅说明了添加沸石粉可以起到显著促进生长作用, 而且也说明不是任意的沸石粉的添加都能够起到显著的增产作用。

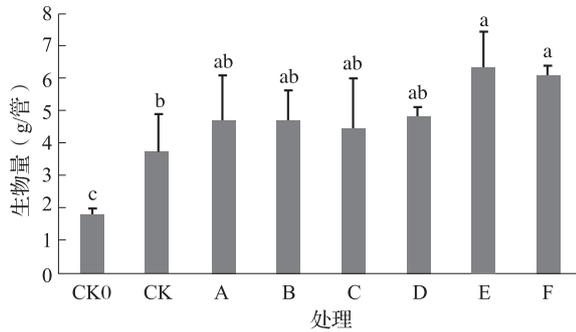


图 3 不同处理玉米植株的地上部生物量

由生物量与 5 个粒径分布做多元回归方程: $Y = 3.69 - 0.050 6x_1 + 0.082 5x_2 - 0.093 4 x_3 - 0.009 44 x_4 + 0.064 86 x_5$, 回归方程总检验 $P = 0.010$, 小于 0.05, 达到显著性水平, 所以回归方程成立。同时对回归系数进行偏方差分析, $P_0 = 0.002$ 、 $P_1 = 0.024$ 、 $P_2 = 0.016$ 、 $P_3 = 0.018$ 、 $P_4 = 0.036$ 、 $P_5 = 0.004$, 均小于 0.05, 所以该回归方程的回归系数也成立。从方程的回归系数可见, 对于较粗颗粒的 x_1 、 x_3 和 x_4 呈现负相关, 其含量越多, 生物量就越低。而对于 x_5 均是粘粒级颗粒, 对于本试验所用的土壤具有较好的改良作用。可以提高土壤肥力, 促进作物生长。处理 E 和 F 这两部分含量最高, 也是比 CK 处理的生物量显著增产的主要原因。通过计算, 处理 A、B、C、D、E 和 F 地上生物量分别比 CK 高 27.37%、28.00%、20.05%、

31.17%、71.36% 和 63.69%。说明沸石粉有助于植株的生长发育, 提高玉米生物量的累积, 不同粒级组成的沸石粉产生的效果不同。

2.3 不同颗粒组成粉体对植株氮、磷、钾含量和累积的影响

由表 5 可见, 施肥处理 (CK、A、B、C、D、E、F) 间 N、P、K 植株养分含量不存在显著差异。而 N 含量均比不施肥处理高, 但只有 A、C、F 处理达显著水平, 说明这两种粉体促进了 N 的吸收。不施肥处理植株的 P 含量明显高于施肥处理, 这可能是施肥后促进作物生长的稀释作用所致。由于不施肥处理 N 相对缺乏, 而有效 P 和速效 K 相对较高, 造成了 P 在植株中的累积, K 在植株体内以离子形态存在, 它可能根据需求进行调配, 所以在 CK0 处理中的 P 含量显得较高。由于基础土壤中速效 K 含量较高, 所有处理均没有差异。

表 5 植株全氮、磷、钾含量 (%)

处理	氮含量	磷含量 (P)	钾含量 (K)
CK0	1.28 ± 0.23 b	0.38 ± 0.02 a	4.34 ± 0.34 a
CK	1.86 ± 0.41 ab	0.29 ± 0.05 b	4.33 ± 0.31 a
A	1.97 ± 0.13 a	0.29 ± 0.06 b	4.43 ± 0.18 a
B	1.84 ± 0.27 ab	0.30 ± 0.02 b	4.45 ± 0.16 a
C	1.95 ± 0.40 a	0.29 ± 0.05 b	4.49 ± 0.37 a
D	1.85 ± 0.53 ab	0.25 ± 0.07 b	4.19 ± 0.34 a
E	1.46 ± 0.05 ab	0.25 ± 0.02 b	4.11 ± 0.35 a
F	2.08 ± 0.24 a	0.25 ± 0.05 b	4.33 ± 0.36 a

从表 6 可见, 虽然施肥施粉体处理 (A、B、C、D、E、F) 与施肥不施粉体处理 (CK) 的 N、K 养分累积量均有所增加, 但只有 F 处理显著增加

表 6 不同处理植株地上部养分累积

处理	养分累积量 (mg/管)			比对照增加 (%)		
	N	P	K	N	P	K
CK ₀	22.52 ± 3.33c	6.71 ± 0.69b	76.95 ± 8.03c	-68.64	-40.06	-51.67
CK	71.83 ± 37.36b	11.19 ± 5.51ab	159.22 ± 51.85b	0.00	0.00	0.00
A	91.33 ± 21.25ab	13.40 ± 3.48a	206.42 ± 53.14ab	27.16	19.80	29.65
B	85.38 ± 4.46ab	14.00 ± 2.72a	209.56 ± 34.61ab	18.88	25.13	31.62
C	86.08 ± 35.52ab	12.63 ± 4.12ab	195.26 ± 52.33ab	19.84	12.85	22.64
D	88.98 ± 22.55ab	12.00 ± 3.03ab	202.00 ± 37.41ab	23.88	7.22	26.89
E	92.36 ± 15.06ab	15.69 ± 2.98a	260.15 ± 49.53a	28.59	40.19	63.39
F	125.35 ± 15.38a	14.98 ± 3.29a	260.51 ± 8.15a	74.52	33.84	63.62

了 N 累积量以及 E、F 处理显著增加了 K 的累积量, 而其他添加粉体处理均没有达到显著水平。与 CK 相比, 所有添加粉体处理对 P 的累积影响均没有达到显著水平。这表明, 粉体的添加对于 N 和 K 的累积量影响较大, 而对于 P 的影响较小, 说明粉体调节 N 和 K 能力强过 P。从结果还可以推断, 只有合适的粉体才能明显增加植株对 N、K 的吸收累积。从结果还可见, 显著增加的 N 累积量最高达到 74.52%, 其他处理也从 18.88% 到 28.59%; 显著增加的 K 的累积量达到 63.39% 和 63.62%, 其他处理只有 22.64% ~ 31.62%。

3 讨论

沸石粉体添加到土壤尤其是砂壤土耕层显著提高作物产量和肥料利用率, 这与参考文献 [30 ~ 34] 的结论相一致。但本研究并非所有处理都起显著作用, 换言之就是效率有高有低。只有小于 0.002 mm 含量高于 39% 的粉体处理 E 和 F 才达到显著水平。这个结果完全符合本研究的初衷和假设, 也表明, 忽略颗粒组成这个重要因素会影响沸石粉体土壤改良功效; 同时, 本研究的结果还可启发农业生产上应用沸石粉体的加工企业, 要根据研究发现调整粉体生产工艺, 使之成为高效的土壤改良剂。而相关机械制造业也要加大研发力度, 生产出低耗能、廉价的粉体。

由于添加的沸石粉总量只有 4‰, 传统认为靠粘粒补充到土壤中能够改善土壤质地, 提高土壤保肥力。但经计算, 处理 E 和 F 粘粒含量由原土的 78.8 g/kg 分别增加到 80.5 和 80.4 g/kg, 对质地没有实质性的改变, 也不可能靠机械的加入这些沸石粉体就能够明显促进作物生长和养分利用。但跨越学科查看粉体领域文献发现, 与大颗粒相比, 所加入的小于 0.002 mm 的颗粒主要在粉体磨细过程中产生粉碎机械力化学效应。存在不饱和程度更大的高活性表面和高能量在表面贮存, 因此, 它们具有与周围物质间发生更强烈反应的补偿趋势。同时, 导致天然沸石物理化学性质发生变化。主要表现在吸附能力和离子交换能力^[39]。由此可推断, 加入的粉体尤其是小于 0.002 mm 含量最多的处理 E 和 F 的颗粒存在巨大的表面活性、高表面能、高的吸附能力和离子交换能力。与本研究结果结合判断, 这些小颗粒对 NH_4^+ 和 K^+ 机械力化学效应作用比较显著, 所以促进了作物有效利用和生长。今后需要

研究添加不同颗粒组成沸石粉阳离子交换量对氮素形态转化的影响。

不施肥处理植株的 P 含量显著高于施肥的所有处理, 这个结果与宁运旺等^[40]在甘薯和王秀荣等^[41]在大豆上的试验结果相一致。目前没有查阅到其具体的生理机理, 但王秀荣给出了“可能是由于缺素条件下植株体内的离子平衡被打乱所造成”。而在本研究中, 由于供试土壤速效 K 含量较高, 有效 P 的含量也相对较高, 但 N 却匮乏, 所以施肥处理尤其是 N 的添加促使了玉米植株正常生理代谢, 使植株生物量累积较快, 这样稀释了吸收到植株体内的 P, 所以施肥处理显著低于不施肥处理的 P 含量。

从沸石粉 5 个颗粒组成粒级与生物量的多元回归方程 $Y = 3.69 - 0.0506x_1 + 0.0825x_2 - 0.0934x_3 - 0.00944x_4 + 0.06486x_5$ 可见, 生物量与较大颗粒级 x_1 、 x_3 和 x_4 成负相关而与最小颗粒 x_5 成正相关的结果可以从前人研究土壤结果中得到证实^[42], 而与 x_2 也存在正相关难以理解。但是因为沸石粉体的多微孔且不同于一般土壤颗粒。从文献 [43] 可见, 虽然该文献采用的沸石颗粒非常粗, 即细沸石 1.0 ~ 3.2 mm, 中沸石 4.0 ~ 10 mm 和粗沸石 8 ~ 5 mm, 同时吸附容量与颗粒大小无关, 但吸附量却存在明显差异。是否 x_2 粒级对养分的吸附 - 解吸有特殊的作用, 从而影响了作物对养分的吸收以及促进了玉米的生长值得研究。同时, 不同颗粒组成粉体对养分的吸附 - 解吸期待研究。

由于采用的是 PVC 管土柱培养, 管的体积较小, 空间和提供的养分不能满足玉米完成生育期, 所以只能生长 40 d 左右。今后需要利用大装置或在田间进一步验证和充实。同时, 今后还不局限于砂壤, 针对不同质地土壤实际状况与沸石粉体颗粒组成有机结合, 最重要的目的是如何提高土壤肥力和土地的生产力以及减少肥料淋洗对环境的污染。

在市场上购买的常见的 6 种粉体价格从 300 ~ 1800 元/t 不等, 每公顷添加 10.4 t, 花费 3120 ~ 15600 元/hm², 尤其是 e 和 f 粉体属于较贵的产品, 增加了生产成本。但一旦施加, 粉体长期起作用, 所以在经济上可行。本研究较理想的处理增加 N 和 K 的吸收 74.52% 和 63.62%, 由此推断, 相应减少了养分在土壤中残留和淋洗对环境造成的污染, 有利于环境保护。

4 小结

在砂壤土中添加沸石粉体能起到促进玉米生长和养分吸收作用,但不是任意颗粒组成的粉体能够有显著效果,只有颗粒组成中小于0.002 mm的粒级(粘粒级)含量大于39%的粉体改良效果显著。

小于0.002 mm的粒级含量超过39%的沸石粉显著促进了玉米对氮和钾的吸收,而对磷的效果不明显。

参考文献:

- [1] 姚军, 张有山. 土壤质地类型与其基础肥力相关性 [J]. 北京农业科学, 1998, 16 (4): 33-34.
- [2] 余学祥, 吴锦松. 安庆市耕地土壤质地概况及其对土壤肥力的影响 [J]. 安徽农学通报, 2006, 12 (12): 111-113.
- [3] 王小彬, 蔡典雄, 张志田, 等. 土壤颗粒大小对水、肥保持和运移的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15 (1): 64-68.
- [4] 王玉, 张一平. 壤土不同粒级组分 K^+ 吸附研究 [J]. 土壤学报, 2001, 38 (2): 241-247.
- [5] Zheng Z, Pwerent L E, MacLeod J A. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in gleysolic soils [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, 83 (4): 395-403.
- [6] 白雪峰, 王国晨, 刘洋, 等. 草炭改土对风沙土水分状况的影响 [J]. 辽宁农业科学, 2004, (4): 50-52.
- [7] 王秋杰, 陈赞, 王恒宇, 等. 开封沙区土壤培肥措施的研究 [J]. 土壤肥料, 1992, (4): 5-8.
- [8] Yang Y G, He Z L, Stoffella P J, et al. Leaching behavior of phosphorus in sandy soils amended with organic material [J]. Soil Science, 2008, 173 (4): 257-265.
- [9] Eyheraguibe B, Silvestre J, Morard P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize [J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (10): 4206-4212.
- [10] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term effect of compost and inorganic fertilizer on activities of carbon-cycle enzymes in aggregates of an intensively cultivated sandy loam [J]. Soil Use and Management, 2012, 28 (3): 347-360.
- [11] 陈兵林, 周治国. 有机无机肥配施与棉花持续高产优质高效 [J]. 中国棉花, 2004, 31 (3): 2-5.
- [12] Neufeldt H, Resck D V S, Ayarza M A. Texture and land-use effects on soil organic matter in cerrado oxisols, central Brazil [J]. Geoderma, 2002, 107: 151-164.
- [13] Suzuki S, Noble A D, Ruaysoongnern S, et al. Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in Northeast Thailand [J]. Arid Land Research and Management, 2007, 21 (1): 37-49.
- [14] Bigelow C A, Bowman D C, Cassel D K. Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green rootzones [J]. Crop Science, 2004, 44 (3): 900-907.
- [15] 赵亮, 唐泽军, 刘芳. 粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验 [J]. 环境科学学报, 2009, 9: 1951-1957.
- [16] Yunusa I A M, Manoharan V, Odeh I O A, et al. Structural and hydrological alterations of soil due to addition of coal fly ash [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11 (3): 423-431.
- [17] 刘莉, 杨尽, 苏小丽. 粉煤灰在土壤改良中的机理研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (31): 17512-17513, 17525.
- [18] Tejasvi A, Kumar S. Impact of fly ash on soil properties [J]. National Academy Science Letters-India, 2012, 35 (1): 13-16.
- [19] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil [J]. Soil Science, 2009, 174 (2): 105-112.
- [20] Philip G, Oguntunde M F, Ayodele E, et al. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil [J]. Biol Fertil Soils, 2004, 39: 295-299.
- [21] Aksakal E L, Angin I, Oztas T. Effects of diatomite on soil physical properties [J]. Catena, 2012, 88 (1): 1-5.
- [22] Aksakal E L, Angin I, Oztas T. Effects of diatomite on soil consistency limits and soil compactibility [J]. Catena, 2013, 101: 157-163.
- [23] Patil S V, Salunke B K, Patil C D, et al. Studies on amendment of different biopolymers in sandy loam and their effect on germination, seedling growth of *Gossypium herbaceum* L [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 163 (6): 780-791.
- [24] Singh R P, Gupta A K, Ibrahim M H, et al. Coal fly ash utilization in agriculture: its potential benefits and risks [J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2010, 9 (4): 345-358.
- [25] Rehakova M, Cuvanova S, Dzivak M, et al. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type [J]. Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 2004, 8 (6): 397-404.
- [26] McGilloway R L, Weaver R W, Ming D W, et al. Nitrification in a zeoponic substrate [J]. Plant Soil, 2003, 256 (2): 371-378.
- [27] 张莉, 赵保卫, 李瑞瑞. 沸石改良土壤的研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37 (1): 40-43.
- [28] Saadat S, Sepaskhah A R, Azadi S. Zeolite effects on immobile water content and mass exchange coefficient at different soil textures [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2012, 43 (22): 2935-2946.
- [29] 陈燕霞, 唐晓东, 游媛, 等. 石灰和沸石对酸化菜园土壤改良效应研究 [J]. 广西农业, 2009, 40 (6): 700-704.
- [30] Baninasab B. Effects of the application of natural zeolite on the growth and nutrient status of radish (*Raphanus sativus* L.)

- [J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2009, 84 (1): 13-16.
- [31] Ippolito J A, Tarkalson D D, Lehrsch G A. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth [J]. Soil Science, 2011, 176 (3): 136-142.
- [32] Tsadilas C D, Argyropoulos G. Effect of clinoptilolite addition to soil on wheat yield and nitrogen uptake [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37: 2691-2699.
- [33] Aghaalikhani M, Gholamhosseini M, Dolatabadian A, et al. Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2012, 58 (10): 1149-1169.
- [34] Ramesh K, Reddy D D, Biswas A K, et al. Zeolites and their potential uses in agriculture [J]. Advances in Agronomy, 2011, 113: 215-236.
- [35] 李长洪, 李华兴, 张新明. 天然沸石对土壤及养分有效性的影响 [J]. 土壤与环境, 2000, 9 (2): 163-165.
- [36] Xardalias C, Kalavrouziotis I K, Koukoulakis P, et al. The effect of zeolites on heavy metal phytoavailability to raphanus sativus, l. in the presence of sludge [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2013, 22 (8): 2344-2349.
- [37] 刘秀梅, 冯兆滨, 张树清, 等. 纳米-亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中 C、N、P 含量与分布的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (1): 57-63.
- [38] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] 丁浩, 邢峰, 冯乃谦. 天然沸石搅拌磨湿法细磨中机械力化学效应的研究 [J]. 矿产综合利用, 2000, 6: 27-31.
- [40] 宁运旺, 马洪波, 许仙菊, 等. 氮磷钾缺乏对甘薯前期生长和养分吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (3): 486-495.
- [41] 王秀荣, 曾秀成, 王文明, 等. 缺素培养对大豆养分含量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2011, 32 (4): 31-34, 46.
- [42] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究 [J]. 土壤学报, 2000, 37 (1): 85-94.
- [43] 温东辉, 唐孝炎, 马倩如. 天然沸石铵吸附容量研究 [J]. 环境科学研究, 2003, 16 (2): 31-34.

Effects of adding different particle composition of zeolite to soil on the growth and nutrient uptake of corn

WANG Jia-chen, ZUO Qiang, ZOU Guo-yuan, GONG Yan-gang, CHEN Yan-hua, WANG Mei-ju, SUN Jian-ke, WANG Rong, LI Ni (Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Controlled-release Fertilizer Center of Engineering and Technological Research of Beijing, Beijing 100097)

Abstract: In order to provide theoretical basis of scientific and effective utilization zeolite resource on improving sand land and environmental protection, the effects of adding different particle composition of zeolite to plough layer of sandy loam soil on corn (*Zea mays* L) growth, NPK absorption were studied in this research. PVC tube with 100 cm long and 10 cm in diameter was adopted to simulate sandy soil column in this experiment with 8 treatments; CK0: No fertilizer + 0 g zeolite powder; CK: Fertilizer + 0 g zeolite powder; A: Fertilizer + 8 g zeolite powder a; B: Fertilizer + 8 g zeolite powder b; C: Fertilizer + 8 g zeolite powder c; D Fertilizer + 8 g zeolite powder d; E: Fertilizer + 8 g zeolite powder e; F: Fertilizer + 8 g zeolite powder f. Original soil was added in the lower 80 cm pipe layer and the soil mixed fertilizer or zeolite was added in upper 20 cm pipe layer. Before sowing, the soil columns were irrigated with 500 mL tap water, and during the growing period, they were irrigated 3 times which were 2 000, 1 000, 1 000 mL respectively. Results showed that: Although there were no differences for plant heights with treatments A, B, C, D, E, F comparing with CK, but their shoot biomasses were higher than that of CK, and the treatments E and F which with the highest particle content in <0.002 mm were significantly higher than that of CK by 71.36% and 63.69% respectively. The results also showed that there was a multiple regression relationship between biomasses and 5 particle composition distributions x_1 , x_2 , x_3 , x_4 and x_5 which express the percentage of 0.05~0.25 mm, 0.02~0.05 mm, 0.01~0.02 mm, 0.002~0.01 mm and <0.002 mm of powders, which was $Y = 3.69 - 0.050 6x_1 + 0.082 5x_2 - 0.093 4 x_3 - 0.009 44 x_4 + 0.064 86 x_5$. This equation showed that there was a close relationship between the corn biomasses and particle composition. These coefficients indicated that the biomasses had the strong positive correlation with fine particles, and negative correlation with the coarse particles. Comparing with CK, all treatments of adding powder A, B, C, D, E, F had improved N, K absorption, but only the improved N absorptions for treatment F and improved K for treatments E and F got significant levels, which were improved by 74.52%, 63.39% and 63.62%, respectively. There was no influence on P absorption by adding powder. This could be concluded that in this soil condition, only the zeolite powder which clay particle content exceed 39% in the composition could significantly improve corn growth, and increase N, K uptake and utilization.

Key words: soil column simulation; zeolite powder; particle composition; plough layer; soil improvement