

## 风沙土不同用量有机酸土壤调理剂应用效果综合评价

崔恒<sup>1, 2, 3</sup>, 包兴国<sup>1, 2, 3</sup>, 车宗贤<sup>1, 2, 3</sup>, 邵立明<sup>4</sup>, 曹卫东<sup>5</sup>,  
宝林<sup>6</sup>, 韩杰荣<sup>6</sup>, 张久东<sup>1, 2, 3\*</sup>

- (1. 甘肃省农业科学院土壤与肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 农业农村部甘肃耕地保育与农业环境科学观测实验站, 甘肃 武威 733017; 3. 国家土壤质量凉州观测实验站, 甘肃 武威 733017; 4. 同济大学固体废物处理与资源化研究所, 上海 200092; 5. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 6. 甘肃驰奈生物能源系统有限公司, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 针对西北风沙土保水保肥能力差的问题, 通过盆栽试验研究 4 个不同的有机酸土壤调理剂用量 (0、20、40、60 g/kg) 对西北障碍性土壤风沙土的水肥状况以及种植箭筈豌豆和玉米出苗率的影响, 应用方差分析和主成分分析进行综合评价, 为合理利用有机酸土壤调理剂改良风沙土理化性状提供理论基础。结果表明: 施用有机酸土壤调理剂可以显著提高风沙土中有效态及全量氮、磷、钾养分含量以及有效养分占比。60 g/kg 有机酸调理剂用量下种植箭筈豌豆和玉米, 土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量较未施用处理分别提高 167.01%、300.25%、74.32% 和 70.00%、212.84%、108.28%。作物生长期水分蒸发散失量随着土壤调理剂用量的提升不断降低。调理剂用量 60 g/kg 时, 种植箭筈豌豆和玉米的水分蒸发散失量较未施用调理剂处理分别显著下降 22.43% 和 32.42%。但两种作物出苗率均随调理剂用量的提高呈现先升高后降低的趋势, 且在调理剂用量为 20 g/kg 时达到峰值。土壤盐分测定结果也显示除钾、钙、镁离子等有益元素外, 钠离子和氯离子也随着调理剂用量的提升显著提高, 但全盐含量差异不显著。利用主成分分析对 15 个指标进行综合分析, 结果表明随着有机酸土壤调理剂用量的提升, 综合评分不断提高。因此, 风沙土上调理剂的最佳用量为 60 g/kg。

**关键词:** 风沙土; 有机酸土壤调理剂; 主成分分析

中国是世界上荒漠化最严重的国家之一<sup>[1]</sup>, 虽然近年来我国在荒漠化防治方面成绩斐然, 但我国仍有超过 37 万 km<sup>2</sup> 的沙漠化土壤亟待解决<sup>[2]</sup>。随着西部开发战略, 该问题也是西北地区亟待解决的核心生态环境问题<sup>[3]</sup>。而沙漠化土壤中风沙土发育程度较低导致土壤颗粒小、结构松散; 保水保肥能力差导致其肥力低下、水分缺失严重<sup>[4-5]</sup>。而传统对于风沙土的治理主要采用建立大型防护林带的方式, 但土质问题并没有改善<sup>[6]</sup>。已有研究表明多种土壤调理剂如生物质炭<sup>[7-8]</sup>、砒砂岩<sup>[9-10]</sup>、羧甲基纤维素钠<sup>[11]</sup> 均能有效地改善土壤本身的理化性

状, 从而提高其耕性。

另一方面, 据调查, 我国城市垃圾产量巨大, 餐厨垃圾占比过半, 年产超 5000 万 t<sup>[12-13]</sup>。远高于一般垃圾的有机质及水分含量, 使其具有极高的利用价值, 但也导致其处理难度大幅度提高。传统的发酵利用方式伴随酸性物质的累积降低主产物的产率<sup>[14]</sup>。但这些有机酸物质中高的有机物质含量可以提高风沙土壤肥力, 改善土壤理化性状, 酸性物质则可以降低风沙土较高的 pH, 改善土壤酸碱度的同时也可以提高土壤中养分的有效性, 是一种优质的土壤调理剂资源, 但目前关于此方面的研究较少。因此, 本文采用盆栽试验, 建立不同用量以餐厨垃圾为原料发酵后制备的有机酸土壤调理剂, 改良风沙土效果综合评价方程, 对应用效果进行综合评价。以期合理利用有机酸土壤调理剂改善风沙土理化性质, 提高其耕性提供理论支撑。

收稿日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-07-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1903700); 现代农业产业技术体系建设专项 (绿肥, CARS-22)。

作者简介: 崔恒 (1995-), 助理研究员, 硕士, 研究方向为植物营养与土壤培肥。E-mail: 249966314@qq.com。

通讯作者: 张久东, E-mail: 365122769@qq.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

盆栽试验在 2020 年甘肃省武威市白云村武威绿洲农业综合试验站 (38° 04' N, 102° 35' E) 进行。当地平均海拔 1504 m, 年平均温度 7.7 °C, 每年无霜期约 150 d, 年均降水量 170 mm。

### 1.2 供试材料

供试土壤为武威民勤风沙土, 土壤基础理化性状见表 1; 供试作物中玉米品种为先玉 335、箭筈豌豆品种为陇箭一号; 有机酸土壤调理剂由甘肃驰奈生物能源系统有限公司提供, 以餐厨垃圾作为原料, 55 °C 条件下高温厌氧发酵 3 d 后加工所得, 调理剂基础性状: pH 3.52, 总碳 12.5 g/L, 总氮 2965 mg/L, 总磷 242 mg/L, 总钾 1402 mg/L, 水溶性总盐 13.6 g/L; 主要有机酸为乳酸 114 mmol/L、乙酸 14 mmol/L、丙酸 1.6 mmol/L。

### 1.3 试验设计

试验为两种不同的种植作物以及 4 个不同调理剂用量的两因素多水平设计的盆栽试验, 有机酸调理剂共设置 4 个梯度: C0 (0 g/kg)、C1 (20 g/kg)、C2 (40 g/kg)、C3 (60 g/kg), 两种供试作物玉米和箭筈豌豆, 共计 8 个处理, 每个处理重复 3 次, 共计 24 盆。

每盆 (上直径 26 cm, 下直径 21 cm, 高 27 cm) 中风沙土为 10 kg, 化肥用量为 N 0.44 g/盆、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.55 g/盆, 在播种前一次性加入。每盆的调理剂用量从低到高分别为 0、200、400、600 g, 也在作物播种前一次性施入土壤。

试验于 4 月 26 日播种: 玉米 20 粒/盆、箭筈豌豆 30 粒/盆, 播种后第 16 d 统计出苗数, 然后将玉米间苗至 4 株/盆、箭筈豌豆 15 株/盆, 于玉米大喇叭口期统一收获。作物生长期内水分供给通过称重法, 每次加水至 12.5 kg, 用于后续水分蒸发散失量的计算。

表 1 土壤基础理化性状

土壤类型	pH	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	全盐 (%)
风沙土	8.3	17.9	5.1	128	2.46	0.017	0.035	2.04	0.16

### 1.4 测定项目与方法

水分蒸发散失测定采用称重法; 土壤样品通风阴干后过 1 mm 筛用于速效氮、磷、钾的测定, 过 0.149 mm 筛用于全量氮、磷、钾以及土壤有机质含量的测定, 测定方法采用鲍士旦<sup>[15]</sup>的测定方法。土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定; 土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定; 土壤碱解氮含量采用碱解-扩散法测定; 土壤全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 土壤全钾和速效钾含量采用火焰光度法测定。

### 1.5 计算与统计方法

采用 Excel 2016 及 SPSS 25.0 进行数据的汇总整理、分析以及单因素方差分析和 Duncan 法多重比较 ( $\alpha=0.05$ ); 用 Origin 2018 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同调理剂用量对作物种子出苗率的影响

从表 2 中可以看到, 不同的调理剂用量对作物出苗数影响不同。随着调理剂用量的提升, 无论是

箭筈豌豆还是玉米的出苗数均呈现先升高后下降的趋势, 在 C1 处理下出苗数最大。而调理剂用量对于箭筈豌豆出苗率影响更大, C3 处理下种子出苗数显著低于 C0、C1 处理, 两处理出苗数较 C3 处理分别提高 31.19%、32.81%; 但不同调理剂用量下玉米出苗数差异未达到显著水平。

### 2.2 不同有机酸土壤调理剂用量对作物生长期水分蒸发散失量的影响

从图 1 中可以看到, 在盆栽作物生长过程中水分的蒸发散失量呈现明显的规律性。无论是箭筈豌豆还是玉米, 水分蒸发散失量均随有机酸土壤调理剂用量的升高而降低。随着时间的延长, 其差异不断增大。从图 2 的水分蒸发散失总量柱状图可以明显看出, 当有机酸土壤调理剂用量超过 20 g/kg 时, C2、C3 处理的水分蒸发散失总量显著降低。调理剂用量为 60 g/kg 的条件下水分蒸发散失量最低, 在箭筈豌豆和玉米两种作物上相较于 C0 处理分别显著下降 22.43% 和 32.42%。说明有机酸土壤调理剂可以降低作物生长期内的水分蒸发散失, 提高土壤的保水性, 效果与有机酸土壤调理剂用量成正比。

表 2 不同有机酸土壤调理剂用量下作物种子出苗率

处理	箭筈豌豆		玉米	
	出苗数	出苗率 (%)	出苗数	出苗率 (%)
C0	26.67 ± 0.88a	88.89	18.67 ± 0.88a	93.33
C1	27.00 ± 2.08a	90.00	19.67 ± 0.33a	98.33
C2	22.00 ± 1.00ab	73.33	18.67 ± 0.33a	93.33
C3	20.33 ± 2.67b	67.78	18.00 ± 0.00a	90.00

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

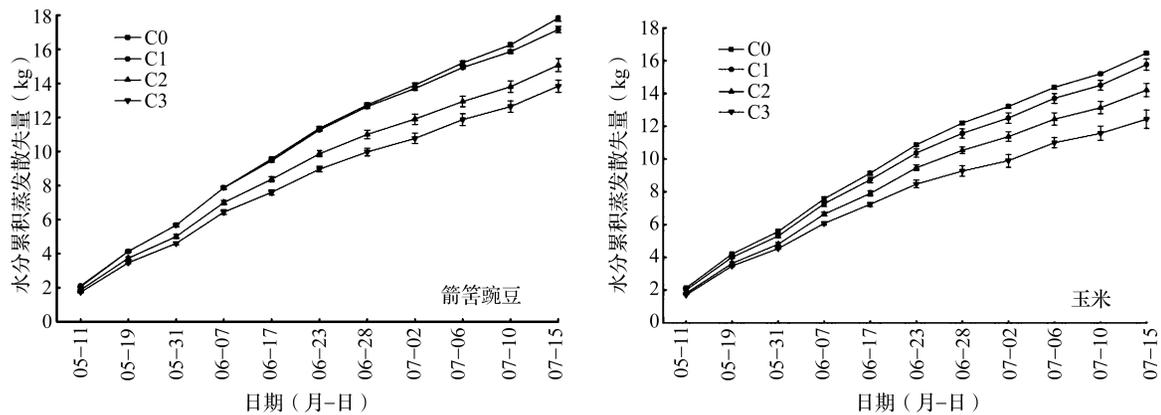


图 1 不同有机酸土壤调理剂用量下作物生长期水分累积蒸发散失量

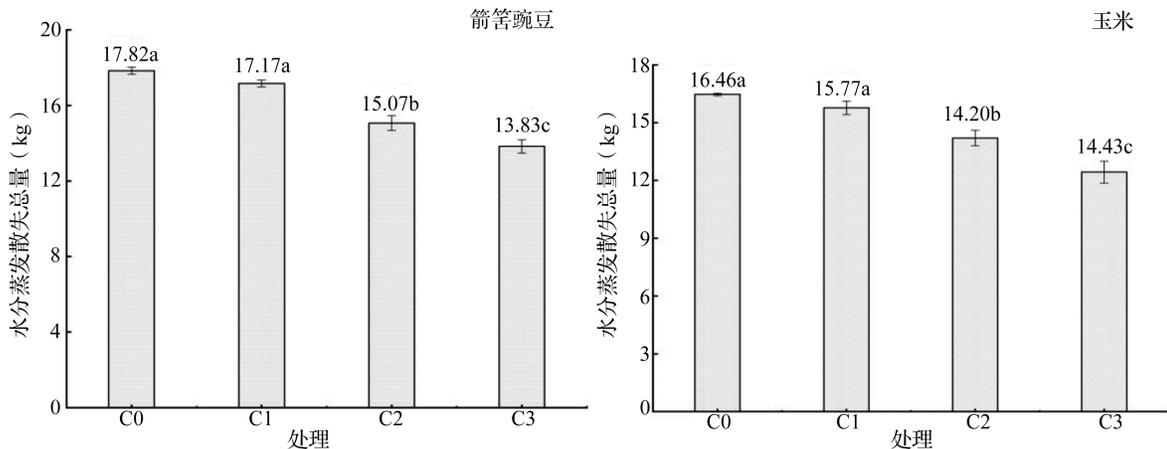


图 2 不同有机酸土壤调理剂用量下作物水分蒸发散失总量

注：图柱上不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

2.3 不同有机酸土壤调理剂用量下的土壤养分含量  
 由表 3 可见，施用土壤有机酸土壤调理剂可显著提高土壤肥力。对于速效养分而言，在两种作物上，土壤碱解氮、有效磷、速效钾的含量随着有机酸土壤调理剂用量提高不断提高。C3 处理下种植箭筈豌豆和玉米，3 种养分含量较未施用处理分别提高 167.01%、300.25%、74.32% 和 70.00%、212.84%、108.28%。对土壤有效磷的影响最大：玉米上，在试验所设处理梯度下，有机酸土壤调理剂用量每上升一

个梯度，有效磷含量均显著上升；箭筈豌豆上，当有机酸土壤调理剂用量高于 20 g/kg 时，有效磷含量提升也达到显著水平。碱解氮含量在 C2 处理基本达到峰值，继续提高有机酸土壤调理剂的用量，碱解氮含量则基本保持稳定状态。全量养分含量以全氮受影响最大，而土壤全钾含量则基本不随有机酸土壤调理剂用量的提升而改变。土壤有机质含量亦随着有机酸土壤调理剂用量的提升而呈现上升的趋势，但不同的处理之间差异不显著。

表 3 不同有机酸土壤调理剂用量下土壤养分含量

作物	处理	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	有机质 (g/kg)
箭筈 豌豆	C0	10.70 ± 2.08b	11.65 ± 0.32c	74.00 ± 5.77b	0.026 ± 0.003bc	0.041 ± 0.001a	1.97 ± 0.03a	4.82 ± 1.12a
	C1	16.70 ± 1.20ab	17.40 ± 1.86c	105.33 ± 8.95a	0.023 ± 0.001c	0.040 ± 0.001a	1.97 ± 0.03a	4.96 ± 0.92a
	C2	28.57 ± 5.47a	34.97 ± 1.69b	120.00 ± 9.07a	0.031 ± 0.001ab	0.048 ± 0.001a	2.01 ± 0.03a	4.92 ± 1.35a
	C3	28.57 ± 4.13a	46.63 ± 5.31a	129.00 ± 10.02a	0.036 ± 0.002a	0.046 ± 0.001a	1.84 ± 0.10a	5.92 ± 0.80a
玉米	C0	11.90 ± 1.20b	14.17 ± 0.75d	68.50 ± 7.79b	0.022 ± 0.001c	0.033 ± 0.001b	1.94 ± 0.00a	2.63 ± 0.12a
	C1	16.10 ± 1.04ab	20.90 ± 0.44c	72.33 ± 6.01b	0.026 ± 0.001bc	0.039 ± 0.003b	1.94 ± 0.00a	2.58 ± 0.18a
	C2	20.27 ± 2.37a	38.03 ± 0.73b	116.67 ± 8.95a	0.028 ± 0.002b	0.039 ± 0.004b	1.97 ± 0.07a	3.23 ± 0.60a
	C3	20.23 ± 1.17a	44.33 ± 2.46a	142.67 ± 18.62a	0.043 ± 0.002a	0.053 ± 0.002a	2.06 ± 0.02a	4.98 ± 0.38a

#### 2.4 不同有机酸土壤调理剂用量下土壤有效养分占全量养分比例

从表 4 可见,在不同的作物下,随着土壤调理剂用量的上升,氮、磷、钾元素的有效养分占比变化不尽相同。在箭筈豌豆上,磷钾元素有效养分占比随着有机酸土壤调理剂用量的提升而提高,磷占比的提升效果更明显,C3 处理较 C0 处理提高

264.18%;而碱解氮占全氮比例随着调理剂用量的提高出现先升高后下降的趋势;在 C2 处理下达到最大值,较 C0 处理提高 115.83%。在玉米上,随着调理剂用量的提升,氮、磷元素有效养分占比均出现先升高后下降的趋势,亦在 C2 处理下达到峰值;而钾元素有效养分占比则随着调理剂用量提升不断提高。

表 4 不同有机酸土壤调理剂用量下土壤有效养分占比 (%)

作物	处理	氮	磷	钾
箭筈 豌豆	C0	4.17 ± 0.67b	2.82 ± 0.11d	0.38 ± 0.03c
	C1	7.21 ± 0.69ab	4.30 ± 0.40c	0.53 ± 0.04b
	C2	9.00 ± 1.29a	7.28 ± 0.30b	0.60 ± 0.04ab
	C3	8.21 ± 1.71a	10.27 ± 0.31a	0.70 ± 0.02a
玉米	C0	5.48 ± 0.83ab	4.28 ± 0.35b	0.35 ± 0.04c
	C1	6.24 ± 0.64ab	5.40 ± 0.27b	0.41 ± 0.03bc
	C2	7.28 ± 0.83a	9.88 ± 1.13a	0.59 ± 0.06ab
	C3	4.69 ± 0.35b	8.43 ± 0.48a	0.69 ± 0.09a

#### 2.5 不同有机酸土壤调理剂用量下土壤盐分含量

从表 5 中可以看到,随着有机酸土壤调理剂用量的提高,土壤中硫酸根离子、钙离子、镁离子的含量无显著变化,但土壤中碳酸氢根离子、氯离子、钾离子以及钠离子含量随着有机酸土壤调理剂用量的提升基本呈提高的趋势。而 C1 处理离子含量与未施用有机酸土壤调理剂的 C0 处理基本持平或者略微上升。从全盐含量也可以看到 C0、C1 处理全盐含量基本持平,而 C2、C3 处理下全盐含量有提升趋势,但不同处理间全盐含量差异未达到显著水平。

#### 2.6 不同有机酸土壤调理剂用量效果综合评价(主成分分析)

对不同有机酸土壤调理剂用量下风沙土上种植的两种作物的碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、全氮、全磷、全钾、碳酸氢根、氯离子、硫酸根、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子、出苗数共计 15 个指标进行主成分分析。在玉米和箭筈豌豆上均提取出两个主成分,累积贡献率分别为 94.98% 和 91.56% (表 6),基本保留了原来指标的信息,因此可以用两主成分对不同有机酸土壤调理剂用量的效果进行可行性评价。载荷值的大小表示对应指标对相应主成分的影响的显著性,从载荷值表中可

表 5 不同有机酸土壤调理剂用量下土壤各离子及全盐含量

作物	处理	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (g/kg)	Cl <sup>-</sup> (g/kg)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (g/kg)	Ca <sup>2+</sup> (g/kg)	Mg <sup>2+</sup> (g/kg)	K <sup>+</sup> (g/kg)	Na <sup>+</sup> (g/kg)	全盐 (%)
玉米	C0	0.262 ± 0.017b	0.151 ± 0.027a	0.374 ± 0.070a	0.128 ± 0.025a	0.052 ± 0.009a	0.022 ± 0.003c	0.110 ± 0.009b	0.110 ± 0.012a
	C1	0.293 ± 0.009ab	0.148 ± 0.012a	0.392 ± 0.035a	0.113 ± 0.009a	0.051 ± 0.005a	0.024 ± 0.002bc	0.129 ± 0.005b	0.107 ± 0.003a
	C2	0.322 ± 0.005a	0.177 ± 0.021a	0.240 ± 0.048a	0.090 ± 0.010a	0.043 ± 0.006a	0.033 ± 0.003ab	0.163 ± 0.014ab	0.117 ± 0.012a
	C3	0.306 ± 0.005a	0.242 ± 0.048a	0.276 ± 0.062a	0.108 ± 0.017a	0.047 ± 0.005a	0.038 ± 0.004a	0.220 ± 0.034a	0.127 ± 0.015a
箭筈	C0	0.296 ± 0.009b	0.154 ± 0.006b	0.480 ± 0.083a	0.150 ± 0.012a	0.077 ± 0.012a	0.025 ± 0.007a	0.137 ± 0.028b	0.130 ± 0.011a
豌豆	C1	0.296 ± 0.018b	0.171 ± 0.016b	0.408 ± 0.050a	0.130 ± 0.010a	0.065 ± 0.011a	0.034 ± 0.003a	0.132 ± 0.012b	0.127 ± 0.007a
	C2	0.285 ± 0.019b	0.272 ± 0.029a	0.472 ± 0.035a	0.117 ± 0.007a	0.081 ± 0.006a	0.038 ± 0.004a	0.252 ± 0.017a	0.153 ± 0.003a
	C3	0.363 ± 0.021a	0.260 ± 0.021a	0.396 ± 0.123a	0.122 ± 0.029a	0.063 ± 0.011a	0.040 ± 0.004a	0.249 ± 0.014a	0.150 ± 0.010a

以看到：对于风沙土上种植玉米来说，对 PC1 贡献较大的是速效钾、有效磷、钾离子、钠离子、氯离子、全钾、碱解氮、有机质、全氮，对 PC2 贡献较大的是钙离子、镁离子、有机质、出苗数；对于风沙土上种植箭筈豌豆来说，对 PC1 贡献较大的是有效磷、碱解氮、速效钾、全氮、氯离子、钾离子、钠离子；对 PC2 贡献较大的是镁离子、硫酸根离子、全钾、全磷、碳酸氢根离子、有机质。

进一步根据所得主成分载荷值和特征值（表 7、8）可以得到主成分的特征向量，最终可以得到主成分的表达式如下：

玉米：

$$Y_1 = 0.266X_1 + 0.289X_2 + 0.292X_3 + 0.266X_4 + 0.262X_5 + 0.258X_6 + 0.269X_7 + 0.227X_8 + 0.270X_9 - 0.249X_{10} - 0.194X_{11} - 0.225X_{12} + 0.291X_{13} + 0.285X_{14} - 0.203X_{15}$$

$$Y_2 = -0.227X_1 - 0.077X_2 + 0.016X_3 + 0.260X_4 + 0.245X_5 + 0.222X_6 + 0.244X_7 - 0.376X_8 + 0.241X_9 + 0.232X_{10} + 0.473X_{11} + 0.384X_{12} - 0.027X_{13} + 0.117X_{14} - 0.260X_{15}$$

箭筈豌豆：

$$Y_1 = 0.297X_1 + 0.311X_2 + 0.292X_3 + 0.256X_4 + 0.287X_5 + 0.245X_6 - 0.200X_7 + 0.217X_8 + 0.286X_9 - 0.154X_{10} - 0.262X_{11} - 0.098X_{12} + 0.286X_{13} + 0.284X_{14} - 0.299X_{15}$$

$$Y_2 = -0.146X_1 + 0.017X_2 + 0.011X_3 - 0.284X_4 + 0.049X_5 + 0.325X_6 + 0.370X_7 - 0.342X_8 + 0.213X_9 + 0.419X_{10} - 0.146X_{11} + 0.492X_{12} + 0.004X_{13} + 0.206X_{14} - 0.096X_{15}$$

式中：Y1 和 Y2 分别表示各主成分，X1 ~ X15 分别代表碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、全氮、全磷、全钾、碳酸氢根、氯离子、硫酸根、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子和出苗数。

将不同主成分的贡献率作为分配系数，结合不

同的主成分表达式可以构建综合评价模型方程为：

玉米：

$$Y = 0.171X_1 + 0.214X_2 + 0.231X_3 + 0.252X_4 + 0.246X_5 + 0.239X_6 + 0.251X_7 + 0.116X_8 + 0.252X_9 - 0.157X_{10} -$$

表 6 主成分特征值、贡献率及累积贡献率

项目	玉米		箭筈豌豆	
	PC1	PC2	PC1	PC2
特征值 (%)	11.77	2.48	10.30	3.44
贡献率 (%)	78.45	16.53	68.66	22.90
累积贡献率 (%)	78.45	94.98	68.66	91.56

注：PC1 和 PC2 分别表示主成分 1 和主成分 2。下同。

表 7 风沙土玉米主成分载荷向量及特征系数

项目	载荷向量		特征系数	
	PC1	PC2	PC1	PC2
X1	0.913	-0.358	0.266	-0.227
X2	0.992	-0.121	0.289	-0.077
X3	1.000	0.025	0.292	0.016
X4	0.912	0.410	0.266	0.260
X5	0.900	0.385	0.262	0.245
X6	0.885	0.349	0.258	0.222
X7	0.923	0.384	0.269	0.244
X8	0.780	-0.592	0.227	-0.376
X9	0.925	0.379	0.270	0.241
X10	-0.854	0.366	-0.249	0.232
X11	-0.666	0.745	-0.194	0.473
X12	-0.771	0.604	-0.225	0.384
X13	0.998	-0.042	0.291	-0.027
X14	0.978	0.184	0.285	0.117
X15	-0.698	-0.410	-0.203	-0.260

$$0.074X_{11}-0.113X_{12}+0.224X_{13}+0.243X_{14}-0.202X_{15}$$

箭筈豌豆:

$$Y=0.237X_1+0.181X_2+0.203X_3+0.111X_4+0.208X_5+0.243X_6-0.052X_7+0.071X_8+0.245X_9-0.010X_{10}-0.213X_{11}+0.045X_{12}+0.197X_{13}+0.242X_{14}-0.227X_{15}$$

根据综合评价模型,不同处理综合评价得分如表9所示。在风沙土上种植的两种作物不同处理的得分均为C3>C2>C1>C0,得分随着有机酸土壤调理剂用量的提升而不断提高。

表8 风沙土箭筈豌豆主成分载荷向量及特征系数

项目	载荷向量		特征系数	
	PC1	PC2	PC1	PC2
X1	0.952	0.271	0.297	0.146
X2	0.997	0.032	0.311	0.017
X3	0.937	0.021	0.292	0.011
X4	0.820	-0.526	0.256	-0.284
X5	0.920	0.090	0.287	0.049
X6	0.786	0.603	0.245	0.325
X7	-0.641	0.686	-0.200	0.370
X8	0.695	-0.633	0.217	-0.342
X9	0.919	0.395	0.286	0.213
X10	-0.494	0.777	-0.154	0.419
X11	-0.841	-0.270	-0.262	-0.146
X12	-0.316	0.912	-0.098	0.492
X13	0.918	0.008	0.286	0.004
X14	0.913	0.382	0.284	0.206
X15	-0.959	-0.177	-0.299	-0.096

表9 各处理综合得分

处理	得分	
	玉米	箭筈豌豆
C0	-2.62	-2.58
C1	-1.92	-1.57
C2	0.97	1.69
C3	3.58	2.46

### 3 讨论

#### 3.1 有机酸土壤调理剂对土壤肥力的影响

风沙土发育程度较低,养分含量低;结构松

散,保水保肥能力差,无法满足作物生长需求是其作为障碍性土壤的主要原因<sup>[16]</sup>。已有研究表明,餐厨垃圾干物质主要以糖类、油脂及蛋白质等有机物为主,且有丰富的氮、磷、钾、钙等元素,有机酸土壤调理剂产品施入土壤后可以显著提高土壤中有效养分的含量<sup>[13, 17]</sup>。本研究也发现,风沙土施入有机酸土壤调理剂后,土壤养分含量显著上升,对土壤有效磷含量的提升尤为明显,这可能与供试土壤碱性较强,而有机酸土壤调理剂中累积的酸性物质降低土壤碱性,提高土壤中磷的有效性有关<sup>[18-19]</sup>。而两种不同类型的应试作物中以箭筈豌豆提升效果更优,可能与豆科作物固氮作用下高的氮碳比下微生物的活性更强有关<sup>[20]</sup>。土壤有机质含量也随着有机酸土壤调理剂用量的提高表现出提升的趋势。

#### 3.2 有机酸土壤调理剂对水分蒸发散失量的影响

本研究发现,风沙土施用餐厨垃圾制备的土壤有机酸土壤调理剂后,无论种植的作物是箭筈豌豆还是玉米,均可以显著地减少生长期内水分的蒸发散失总量,减少量随着有机酸土壤调理剂用量的上升不断提高。这可能与有机酸土壤调理剂中可以提高土壤水稳性团聚体质量分数和土壤的持水能力有关<sup>[21]</sup>。

#### 3.3 有机酸土壤调理剂对种子出苗率的影响

种子的萌发及出苗质量是决定后期生长发育的关键阶段<sup>[22]</sup>,有机酸土壤调理剂可以显著地提高土壤肥力、降低水分蒸发散失,但出苗率随着土壤有机酸土壤调理剂用量的提升出现先升高后下降的趋势,这可能与有机酸土壤调理剂的施用伴随着盐分的携入有关。而前人的研究也发现,高的盐分含量将显著地降低作物的出苗率,这可能与渗透胁迫、离子失衡及毒害作用密切相关<sup>[23-24]</sup>。但是并非盐分携入均会显现负面效应,有研究表明,作物对含盐量有一定的忍耐性,低浓度的盐溶液不会对盐穗木造成胁迫<sup>[25]</sup>,甚至有研究发现盐溶液在较低浓度条件下还可以促进作物出苗<sup>[26]</sup>,这与本研究的低浓度促进、高浓度抑制的结果一致。而从不同有机酸土壤调理剂用量下各盐基离子含量表中发现土壤中碳酸氢根离子、氯离子、钾离子以及钠离子含量提高趋势明显,这可能与有机酸土壤调理剂中除高量的有机质含量之外,还存在着诸多离子,如钾离子、钠离子、氯离子、硫酸根离子等有关<sup>[27]</sup>,而后续的主成分分析也可以发现,除了碱解氮、速效钾等养分含量之外,钾离子、钠离子、

氯离子、镁离子等均具有较高的载荷值,对应用效果的综合得分影响较大,但从全盐含量来看,全盐含量差异较小,且均未达到盐碱化土壤的水平。可能是风沙土本来就是一种障碍性土壤,土壤质量较差,导致在风沙土上种植的作物抗逆性较差。另一方面也可能与有机酸土壤调理剂施用于播种之前,而种子萌发期被认为是整个生活史中抗逆性最薄弱的时期,相对盐害率最大,导致出苗率较低<sup>[28-29]</sup>。但施用土壤有机酸土壤调理剂后,土壤理化性质均显著改善。利用主成分分析对各项指标进行综合分析也发现,随着调理剂用量的提高,综合评分不断提高。因此,将有机酸土壤调理剂施用时期后移,避开作物生长敏感期或者分次施用,减少萌发期盐分的携入,施用效果可能更好。

#### 4 结论

风沙土上施用调理剂可以显著地降低生育期内水分的蒸发散失,显著提高土壤中氮、磷、钾养分的含量,土壤有机质含量也有提高的趋势,应用效果在本试验所设梯度下与土壤有机酸的调理剂用量成正比,而两种作物又以箭筈豌豆的应用效果更佳。虽然随着调理剂用量的提高除有益元素含量提高外,还会携入钠离子、氯离子等有害离子,出苗率也出现先升高后降低的趋势,但利用主成分分析对15个指标进行综合分析,发现其综合评分还是随着调理剂用量的提高而提高。因此,应在高的调理剂用量下将有机酸土壤调理剂施用时期后移,避开作物生长敏感期或者分次施用,减少萌发期盐分的携入,施用效果可能更好。

#### 参考文献:

- [1] 崔向慧,卢琦. 中国荒漠化防治标准化发展现状与展望[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 913-919.
- [2] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析——以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048.
- [3] 沈亚楠,仇梦梦,岳耀杰. 中国北方土地沙漠化灾害危险性评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 174-184.
- [4] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等. 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 323-327.
- [5] Arthur E, Cornelis W, Razzaghi F. Compost amendment to sandy soil affects soil properties and greenhouse tomato productivity[J]. Compost Science & Utilization, 2012, 20(4): 215-221.
- [6] 李霞. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [7] 武梦娟,王桂君,许振文,等. 生物炭对沙化土壤理化性质及绿豆幼苗生长的影响[J]. 生物学杂志, 2017, 34(2): 63-67.
- [8] 张云舒,唐光木,葛春辉,等. 生物炭对灌耕风沙土土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 180-183.
- [9] 范陈斌,武苗苗,苏睿,等. 砒砂岩改良风沙土对2种引进植物生长和氮磷营养的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 228-234, 239.
- [10] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 77-86.
- [11] 喜银巧,赵英,李生宇. 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1401-1410.
- [12] Hamilton H A, Peverill M S, Mueller D B, et al. Assessment of food waste prevention and recycling strategies using a multilayer systems approach[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(24): 13937-13945.
- [13] 黄欣怡,张珺婷,王凡,等. 餐厨垃圾资源化利用及其过程污染控制研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(9): 2945-2951.
- [14] Wang H, Yang S H, Yang J P, et al. Temporal changes in soil bacterial and archaeal communities with different fertilizers in tea orchards[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2014, 15(11): 953-965.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [16] 喜银巧,赵英,董正武,等. 土壤调理剂改良风沙土的试验研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1075-1083.
- [17] 李丰杰,周丕生,李跃忠. 不同用量厨余垃圾堆肥对土壤理化性质的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(5): 92-98.
- [18] 孙桂芳,金继运,王玲莉,等. 低分子量有机酸类物质对红壤和黑土磷有效性影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1426-1432.
- [19] 张乃于,闫双堆,李娟,等. 低分子量有机酸对土壤磷组分影响的Meta分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2076-2083.
- [20] 惠竹梅,岳泰新,张振文. 行间生草葡萄园土壤微生物量与土壤养分的通径分析[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 969-974.
- [21] 王越,刘东明,侯佳奇,等. 餐厨垃圾制备的外源有机碳对土壤团聚体的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 166-173.
- [22] 曹玲,王艳芳,陈宝悦,等. 主要蔬菜作物耐盐性比较[J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 233-237.
- [23] 鲁艳,雷加强,曾凡江,等. NaCl处理对胡杨生长及生理生态特征的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 279-285.
- [24] 张晓晓,殷小琳,李红丽,等. NaCl胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7258-7265.

- [25] 冯肖莉, 樊寿德, 周莲洁, 等. 苗期盐穗木在不同盐浓度处理下的渗透和抗氧化系统 [J]. 干旱区研究, 2018, 35 (5): 1118-1128.
- [26] 郭彦, 杨洪双, 赵家斌. 混合盐碱对大豆种子萌发的影响 [J]. 种子, 2008, 27 (12): 92-94.
- [27] 李梦琪, 陈吕军. 餐厨垃圾发酵废液组分表征 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (2): 683-688.
- [28] Juan A, Pujo L, Jose F, et al. Recovery of germination from different osmotic conditions by four halophytes from southeastern Spain [J]. Annals of Botany, 2000, 85 (2): 279-286.
- [29] 王海莲, 王润丰, 刘宾, 等. 六个生长期高粱对 NaCl 胁迫的响应 [J]. 核农学报, 2020, 34 (7): 181-188.

### Comprehensive evaluation of different quantities of organic acid soil conditioner application in aeolian sandy soil

CUI Heng<sup>1, 2, 3</sup>, BAO Xing-guo<sup>1, 2, 3</sup>, CHE Zong-xian<sup>1, 2, 3</sup>, SHAO Li-ming<sup>4</sup>, CAO Wei-dong<sup>5</sup>, BAO Lin<sup>6</sup>, HAN Jie-rong<sup>6</sup>, ZHANG Jiu-dong<sup>1, 2, 3\*</sup> (1. Soil and Fertilizer and Water-saving Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070; 2. Gansu Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuwei Gansu 733017; 3. National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Liangzhou, Wuwei Gansu 733017; 4. Institute of Waste Treatment and Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092; 5. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 6. Gansu China Bioenergy System Limited Company, Lanzhou Gansu 730070)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor water and fertilizer retention ability of sandy soil in northwest China, a pot experiment was conducted to study the effects of organic acid soil conditioner on soil water and nutrient status and the emergence rates of common vetch and maize planted in aeolian sandy soil, a kind of barrier soil in northwest China, under four different conditioner dosages (0, 20, 40, 60 g/kg). The variance analysis and principal component analysis were used for comprehensive evaluation to provide theoretical basis for rational use of organic acid soil conditioners to improve the physical and chemical properties of aeolian sandy soil. The results showed that the contents of soil available and total nutrients and the proportion of available nutrients were significantly increased under the application of organic acid conditioner. The contents of soil hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium increased by 167.01%, 300.25%, 74.32% and 70.00%, 212.84%, 108.28%, respectively, when common vetch and maize were planted in aeolian sandy soil with 60 g/kg conditioner dosage rate. The total amount of water evaporation loss in crop growth period decreased with the increase of soil conditioner dosage. When the dosage of conditioner was 60 g/kg, the evaporation losses of common vetch and maize were significantly decreased by 22.43% and 32.42% compared with those without conditioner. However, the emergence rates of the two crops increased first and then decreased with the increase of conditioner dosage, and reached the peak when the conditioner dosage was 20 g/kg. The results of soil salt determination also showed that in addition to beneficial elements such as potassium, calcium and magnesium ions, sodium ions and chloride ions also increased significantly with the increase of conditioner dosage, but the difference in total salt content was not significant. The principal component analysis was used to conduct a comprehensive analysis of 15 indicators. The results showed that the comprehensive score increased with the increase of the dosage of organic acid soil conditioner. Therefore, the optimal dosage of conditioner on aeolian sandy soil was 60 g/kg.

**Key words:** aeolian sandy soil; organic acid soil conditioners; principal component analysis