

# 蚯蚓对土壤中有有机化学成分组成的影响

刘殿锋<sup>1,2</sup>, 连 宾<sup>3,\*</sup>, 吴春昊<sup>1</sup>

(1. 濮阳职业技术学院 生物工程系, 河南 濮阳 457000; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;  
3. 南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023)

**摘 要:** 蚯蚓是最为重要的土壤动物之一, 不仅可以改良土壤结构和肥力, 还能促进土壤矿物风化。为研究蚯蚓风化土壤矿物的机理, 弄清蚯蚓对土壤中有有机化学成分的影响, 我们以甲醇为浸提剂浸提蚯蚓处理过的土壤和无蚯蚓的土壤, 对提取物硅烷化衍生处理后, 用 GC-MS 进行了分析。结果发现无论是蚯蚓处理过的土壤还是无蚯蚓的土壤, 提取物中种类最多的化学物质是烃类, 其次是酯类; 腈类种类虽非常少, 但相对含量却非常高。蚯蚓处理的土壤与无蚯蚓的土壤二者之间有机化学成分确实有很大的不同: 从蚯蚓处理过的土壤中共发现了 22 种特有成分, 从无蚯蚓的土壤中共发现了 26 种特有成分。虽然蚯蚓处理的土壤和无蚯蚓的土壤均检测到了微量的有机酸, 但无论是酸的种类还是数量二者间均无明显差异。另外, 检测结果也未发现铁载体。因此, 蚯蚓诱导的微生物对土壤矿物的风化应该是在土壤矿物局部区域发挥作用, 其风化机理用连宾的综合效应假说解释更为合理。

**关键词:** 蚯蚓; 土壤提取物; 化学组成; GC-MS

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)03-0318-11 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.03.006

蚯蚓是最为重要的土壤动物之一, 被称为土壤和生态系统的“工程师”<sup>[1-2]</sup>, 在促进土壤的物质循环和能量传递, 改善土壤结构, 增加土壤肥力, 促进作物生长等许多方面发挥着重要作用<sup>[3-5]</sup>。早在 1881 年, 英国科学家达尔文曾经进行了“蚯蚓与土壤形成”的关系研究, 认为蚯蚓在改良土壤结构和肥力方面有重要作用, 称它为“农业的犁手”和“改良土壤的能手”<sup>[6]</sup>。

蚯蚓能够增加土壤肥力, 其中最重要的原因之一是它可以活化土壤的矿物元素, 特别是它可以促进矿物中的钾释放<sup>[7-9]</sup>。Basker 等人 1992 年的研究表明: 蚯蚓处理 21 天后土壤代换钾含量显著提高<sup>[10]</sup>。蚯蚓之所以能够提高土壤中代换性钾含量, 应该是它风化土壤中含钾矿物的结果<sup>[6, 8-9, 11-13]</sup>。然而, 我们目前对蚯蚓风化土壤矿物的机理还不是特别清楚。

土壤矿物之所以能被蚯蚓风化, 除一些物理因素(如蚯蚓砂囊对矿物的摩擦)外, 最重要的应该是土壤矿物颗粒周围的化学物质的影响<sup>[14]</sup>。土壤中

除矿物成分外, 还有许多有机化学成分。这些成分围绕或粘附在土壤矿物颗粒上, 不可避免地会对矿物的风化产生重要影响<sup>[15]</sup>。蚯蚓在土壤中的活动, 如取食、排泄、掘穴等, 都可能会改变土壤中的这些有机化学成分<sup>[16]</sup>。然而目前我们对因蚯蚓导致的土壤有机化学成分改变并不清楚。为弄清蚯蚓对土壤中有有机化学成分的影响, 我们对蚯蚓处理的土壤和无蚯蚓土壤中的有机化学成分进行了提取和分析, 以期了解蚯蚓风化土壤矿物的机理奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验所用蚯蚓为赤子爱胜蚓 *Eisenia foetida* (品种: 大平二号)。饲养蚯蚓的土壤采自中国河南濮阳市卫河路北段, 采样深度在表层 40 cm 以下。用 X-射线衍射仪(XRD, Rigaku, D/MAX-2200)分析土壤的矿物组成, 结果如下: 石英 Quartz(44.6%), 钠长石 Na-Feldspar(35.3%), 方解石 Calcite(5.0%), 绿泥石 Chlorite(2.6%), 伊利石 Illite(7.9%), 硬石

收稿日期: 2015-09-04; 改回日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1204405, 41173091); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2012GGJS-284)。

第一作者简介: 刘殿锋(1975-)男, 博士, 主要研究方向为生物地质学。E-mail: hn\_ldf@126.com。

\* 通讯作者: 连宾(1964-)男, 博士, 教授, 主要研究方向为地质微生物。E-mail: bin2368@vip.163.com。

膏 Anhydrite (4.6%); 用 X 荧光光谱仪 (XRF, Axios, PW4400) 分析土壤的元素组成, 结果如下:  $\text{SiO}_2$  (68.86%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10.43%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3.29%),  $\text{MgO}$  (1.55%),  $\text{CaO}$  (5.139%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.791%),  $\text{K}_2\text{O}$  (2.026%),  $\text{MnO}$  (0.0549%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.1183%),  $\text{TiO}_2$  (0.512%),  $\text{LOI}$  (6.23%)。

### 1.2 饲养实验

将实验用的土壤分成两组: 一组加入蚯蚓; 一组不加蚯蚓。每组均设置三个生物学重复。加蚯蚓的三个土壤样品编号分别为: ES1、ES2、ES3; 不加蚯蚓的三个土壤样品编号分别为: OS1、OS2、OS3。

饲养蚯蚓时, 首先将 1 300 g 含水量 30% 的土壤置于直径约 35 cm、高约 40 cm 的杂物桶, 然后放入 30 条蚯蚓, 在温度 26 °C、空气相对湿度 80% 的条件下饲养 28 天。饲养过程中土壤干燥时补入适量灭过菌的超纯水, 除此之外不补加任何物质。对照组除不加蚯蚓外, 其余处理条件完全相同。

### 1.3 土壤有机物的提取

参照文献用甲醇提取法提取土壤中的有机物<sup>[17-18]</sup>, 详细步骤如下: 将土壤样品自然风干, 研细后过 60 目筛。取 60 g 过筛后的土壤样品用 250 mL 甲醇进行提取。提取液经旋转蒸发仪 55 °C 减压浓缩, 定容至 5 mL。

### 1.4 土壤提取物的 GC-MS 分析

为检测出土样中的不易挥发成分, GC-MS 分析前先将土壤提取物进行硅烷化衍生处理: 取适量土壤提取物置于 1.5 mL 离心管, 在通风橱中挥发干甲醇。加入足量无水  $\text{CaCl}_2$ , 75 °C 放置 1 h 使提取物彻底干燥。每份样品加入 250  $\mu\text{L}$  硅烷化试剂 (BSTFA: 吡啶=5:1), 75 °C 衍生化 1.5 h。

用 Thermo Scientific™ ISQ 单四极杆气质联用仪 (气相: TRACE 1300, 质谱: ISQ) 测定土壤提取物化学组分。电子轰击 (EI) 源, 轰击电压为 70 eV, 扫描范围为  $M/Z$  30-650, 扫描速度为 0.4 s 扫全程。载气为氦气, 流量为 1 mL/min, 进样量为 1  $\mu\text{L}$ 。毛细管柱为 TG-5<sup>ms</sup> (30 m×0.25 mm×0.25  $\mu\text{m}$ ), 进样口温度为 280 °C。测定程序: 初始柱温 60 °C, 保持 1 min; 以 10 °C/min 升温至 180 °C, 保持 1 min; 再以 15 °C/min 升温至 280 °C, 保持 15 min。去溶剂保留时间为 4 min。最后, 根据 NIST11 质谱数据库分析不同土壤的提取物化学组分, 并用峰面积归一化法计算各组分相对百分含量。

## 2 结果

### 2.1 土壤提取物的 GC-MS 分析结果

蚯蚓处理的土壤样品 ES1、ES2、ES3 与无蚯蚓的 3 个土壤样品 OS1、OS2、OS3 甲醇提取物的 GC-MS 总离子图如图 1 所示。排除溶剂峰影响, 通过数据工作站 NIST 11 标准质谱图库自动检索被分析组分的质谱, 并对检索结果进行人工核对。通过工作站数据处理系统, 用峰面积归一化法对各组分进行了相对定量分析, 结果见表 1 和表 2。

蚯蚓处理的土壤样品 ES1 共检测出 41 种有机物, ES2 共检测出 37 种有机物, ES3 共检测出 40 种有机物。蚯蚓处理的 3 个土壤样品 ES1、ES2、ES3 共检测出 65 种有机物。

无蚯蚓的土壤对照样品 OS1 共检测出 44 种有机物, OS2 共检测出 40 种有机物, OS3 共检测出 42 种有机物。无蚯蚓的 3 个土壤样品 OS1、OS2、OS3 共检测出 69 种有机物。

土壤提取物中化学物质的类别分布如表 3 所示。从表 3 可以看出, 无论是蚯蚓处理的土壤还是无蚯蚓的土壤, 提取物中烃类最多 (以烷烃为主), 占提取物中化学物质种类总数的 50% 左右。土壤提取物中化学物质种类较多的其次是酯类, 占总种类数的 13.6%~17.5%。

从峰面积相对含量上看, ES1 提取物中相对含量较高的化学物质有: Oleanitrile (23.46%)、Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester (9.62%)、Benzaldehyde, 2,5-dimethyl- (9.59%)、9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (6.77%)、Methyl stearate (6.55%)、Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)- (6.15%)。

ES2 提取物中相对含量较高的化学物质有: Oleanitrile (58.36%)、Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester (5.32%)、Methyl stearate (4.11%)、9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (3.63%)、Benzaldehyde, 2,5-dimethyl- (3.52%)、Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)- (2.75%)。

ES3 提取物中相对含量较高的化学物质有: Oleanitrile (27.47%)、9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (7.67%)、Benzaldehyde, 2,4-dimethyl- (7.41%)、Methyl stearate (7.35%)、Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester (7.26%)、Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethyl-

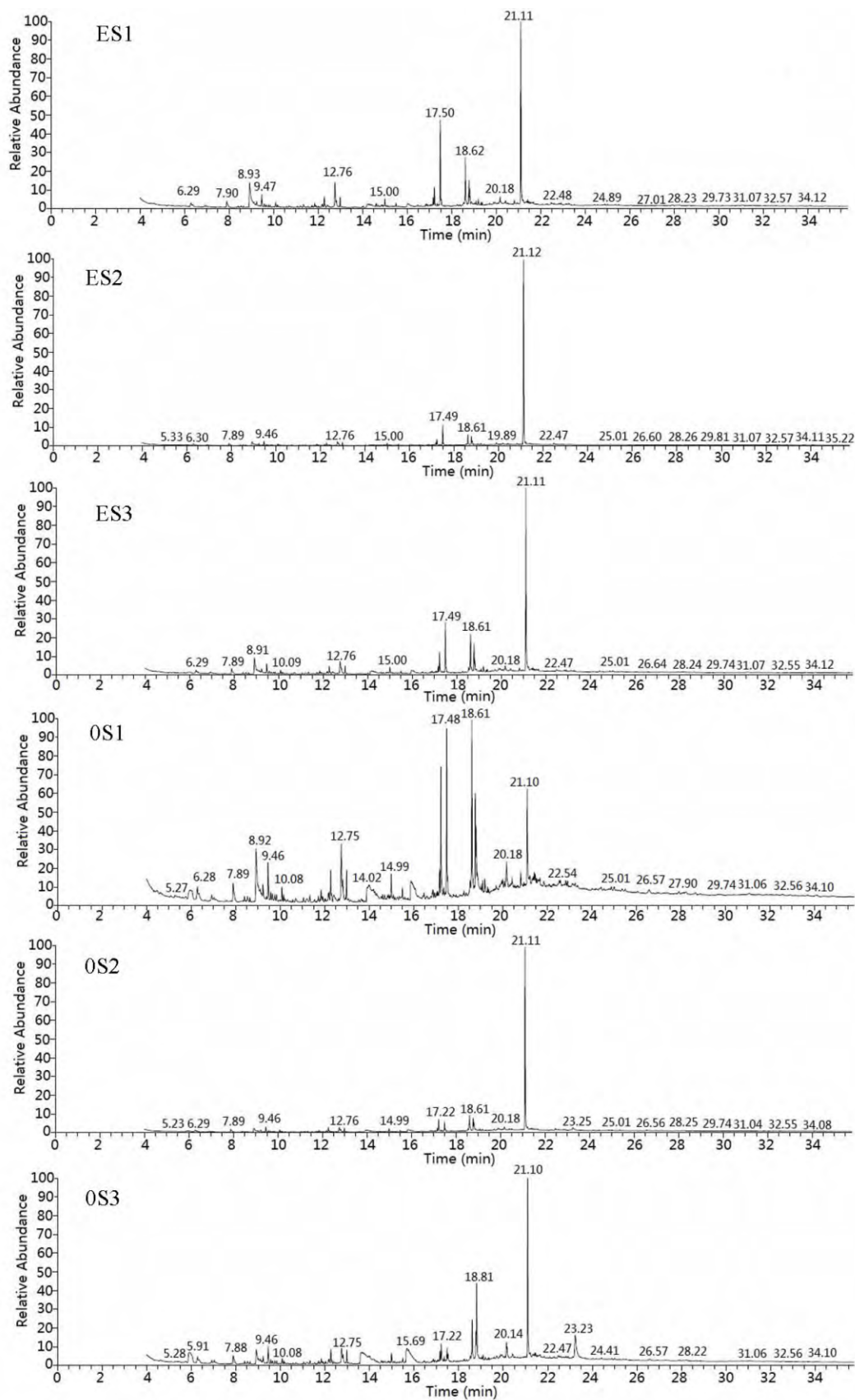


图1 土壤样品 ES1、ES2、ES3、OS1、OS2、OS3 提取物的总离子图

Fig.1 Total ion chromatograms for the extracts from the soils ES1 , ES2 , ES3 , OS1 , OS2 and OS3

表1 摇养蚯蚓土壤 ES1、ES2 和 ES3 提取物中有机成分的 GC-MS 分析结果

Table 1 Organic components identified in the extracts from the soils ES1, ES2 and ES3 by GC-MS

序号	化合物名称	化学式	相对含量/%		
			ES1	ES2	ES3
1	1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>31</sub> N	2.17	0.45	3.05
2	Hexadecanoic acid, methyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	3.88	2.65	4.29
3	Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	6.55	4.11	7.35
4	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	6.77	3.63	7.67
5	Phenol, 2,2'-methylenebis [6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-	C <sub>23</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.71	0.36	0.52
6	Tetradecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	0.34	0.69	0.21
7	Eicosane, 2-methyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	4.31	1.30	1.69
8	Tridecane, 2-methyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	1.25	0.86	1.04
9	Undecane, 2,6-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0.32	0.27	0.34
10	Undecane, 4,7-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0.55	0.58	2.03
11	Silane, cyclohexyldimethoxymethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> Si	1.65	1.25	1.63
12	Benzoic acid, 3,5-dimethyl-, methyl ester	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0.42	0.26	0.41
13	Dodecane, 2,6,11-trimethyl	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	2.90	1.83	4.16
14	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	2.02	0.51	1.15
15	Heptadecane, 2,6,10,15-tetramethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	0.38	0.42	0.43
16	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	0.78	0.71	0.26
17	Benzenepropanoic acid, 3,5-bis (1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>28</sub> O <sub>3</sub>	9.62	5.32	7.26
18	Tetratetracontane	C <sub>44</sub> H <sub>90</sub>	0.40	0.47	0.58
19	Phenol, 2,4-bis (1,1-dimethylethyl)-	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	6.15	2.75	4.77
20	Pyrido [2,3-b]pyrimido [4,5-d]thiophen-4 (3H)-one, 3-amino-9-methoxymethyl-2,7-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub> S	0.66	0.37	0.78
21	Oleanitrile	C <sub>18</sub> H <sub>33</sub> N	23.46	58.36	27.47
22	1,4-Dihydrophenacetic acid, 3,5-di-t-butyl-, ethyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	1.39		
23	2-Benzofurancarboxylic acid, 2,4,5,6,7,7a-hexahydro-4,4,7a-trimethyl-, methyl ester, cis-	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O <sub>3</sub>	0.54		0.29
24	3 (N,N-dimethylmyristylam monio)propanesulfonate	C <sub>19</sub> H <sub>41</sub> NO <sub>3</sub> S	1.90		
25	5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid, phenylmethyl ester, (all-Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	0.52		
26	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro (4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione	C <sub>17</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	0.29		
27	7-Hexadecenal, (Z)-	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O	1.11		
28	9,12,15-Octadecatrienoic acid, 2,3-bis [(trimethylsilyl)oxy]propyl ester, (Z,Z,Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>52</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>2</sub>	0.28		
29	Benzaldehyde, 2,5-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	9.59	3.52	
30	Benzene, 1,3-bis (1-methylpropyl)-	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	0.41		
31	Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	0.26	1.78	
32	Edulan II	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O	0.77		
33	Hentriacontane	C <sub>31</sub> H <sub>64</sub>	2.04		
34	Heptadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	0.94		1.37
35	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	0.54		
36	Nonadecane, 2-methyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	1.36		
37	Octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	0.40		0.56
38	Octadecane, 6-methyl-	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	0.35		0.35
39	Pentadecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	0.29		0.26
40	tert-Hexadecanethiol	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> S	0.28		
41	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	1.47	1.15	
42	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>		0.21	
43	2-methylhexacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>		0.39	0.47

续表 1

序号	化合物名称	化学式	相对含量/%		
			ES1	ES2	ES3
44	3-Hexanamine, 3-ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>19</sub> N		0.72	
45	Benzyl chloride	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> Cl		0.31	0.95
46	Decane, 3,7-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>		0.41	
47	Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>		0.67	
48	Eicosane, 7-hexyl-	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>		0.59	
49	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>		0.56	
50	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>		0.28	
51	Octasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13,15,15-hexadecamethyl-	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>7</sub> Si <sub>8</sub>		0.2	
52	Oxalic acid, 6-ethyloct-3-yl isohexyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>4</sub>		0.19	
53	Stearyltrimethylammonium chloride	C <sub>21</sub> H <sub>46</sub> ClN		0.88	
54	Trimethyl (2,6-ditert-butylphenoxy)silane	C <sub>17</sub> H <sub>30</sub> OSi		1.02	1.33
55	1,3-Dioxolane, 4,5-dimethyl-2-phenyl-	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>			0.97
56	1-Nonadecanamine, N,N-dimethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>45</sub> N			2.56
57	2-Isopropyl-5-methyl heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O			0.22
58	2-methyloctacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>			0.6
59	9-octadecenoic acid, 2,2,2-trifluoroethyl ester	C <sub>20</sub> H <sub>35</sub> F <sub>3</sub> O <sub>2</sub>			0.54
60	Benzaldehyde, 2,4-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O			7.41
61	cis-11-Eicosenoic acid	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>			1.84
62	Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>			0.26
63	Heptasiloxane, hexadecamethyl-	C <sub>16</sub> H <sub>48</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>7</sub>			0.3
64	Hexadecane, 2,6,11,15-tetramethyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>			2.16
65	Hexadecanenitrile	C <sub>16</sub> H <sub>31</sub> N			0.48

ethyl)-(4.77%)。

OS1 提取物中相对含量较高的化学物质有: Methyl stearate(10.31%)、9-Octadecenoic acid(Z), methyl ester(9.68%)、Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester(7.78%)、Benzaldehyde, 2,4-dimethyl-(7.34%)、Hexadecanoic acid, methyl ester(7.32%)、1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-(5.85%)。

OS2 提取物中相对含量较高的化学物质有: Oleanitrile(43.41%)、Methyl stearate(6.49%)、9-Octadecenoic acid(Z), methyl ester(6.3%)、Hexadecanoic acid, methyl ester(4.16%)、1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-(3.67%)、Benzaldehyde, 2,4-dimethyl-(3.33%)。

OS3 提取物中相对含量较高的化学物质有: Oleanitrile(15.09%)、1,3-Difluorobenzene, 4-benzoyloxy-2-trimethylsilyl-(10.82%)、1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-(9.71%)、1-Undecanamine, N,N-dimethyl-(7.16%)、9-Octadecenamamide,(Z)-(6.64%)、Benzyl

chloride(5.57%)。

从上述结果看,土壤提取物中烃的种类虽然最多,但相对含量较高的并不多;腈类化学物质种类非常少,主要是油酸腈 Oleanitrile,但相对含量却非常高;除腈之外,相对含量较高的化学物质还有酯、醛、酚等种类的物质。

## 2.2 土壤样品之间提取物化学物质种类的比较分析

蚯蚓处理的 3 个土壤样品之间提取物化学组分的重叠情况如图 2 左图所示。从图上可以看出,土壤样品之间共有的组分占有很高的比例: ES1 和 ES2 有 24 种化学成分相同; ES1 和 ES3 有 26 种化学成分相同; ES2 和 ES3 有 24 种化学成分相同。样品两两之间共有的化学成分均占每个土壤提取物化学成分总数的 50% 以上。3 个蚯蚓处理的土壤样品共有的成分为 21 种,也占到每个土壤提取物化学成分总数的 50% 左右。

无蚯蚓的 3 个土壤样品之间提取物化学组分的重叠情况如图 2 的右图所示。3 个样品之间共有化

表 2 摇无蚯蚓土壤 0S1、0S2 和 0S3 提取物中有机成分的 GC-MS 分析结果

Table 2 Organic components identified in the soil extracts, including 0S1, 0S2 and 0S3, by GC-MS

序号	化合物名称	化学式	相对含量/%		
			0S1	0S2	0S3
1	1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>31</sub> N	5.85	3.67	9.71
2	Hexadecanoic acid, methyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	7.32	4.16	3.06
3	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	9.31	6.30	5.12
4	Eicosane, 2-methyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	2.34	1.11	2.17
5	Silane, cyclohexyldimethoxymethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> Si	1.84	1.33	1.74
6	Dodecane, 2,6,11-trimethyl	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	3.00	1.80	4.50
7	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	1.61	1.20	0.33
8	Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>28</sub> O <sub>3</sub>	7.78	2.80	2.22
9	Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	5.46	3.11	3.57
10	Oleanitrile	C <sub>18</sub> H <sub>33</sub> N	5.13	43.41	15.09
11	Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	0.95	0.71	0.87
12	Benzyl chloride	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> Cl	2.58	1.16	5.57
13	Octadecane, 6-methyl-	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	0.36	0.30	0.37
14	Nonadecane, 2-methyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	1.08	0.41	0.33
15	Benzaldehyde, 2,4-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	7.34	3.33	3.52
16	Undecane, 2,6-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0.34	0.24	0.36
17	Pentadecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	0.30	0.24	0.30
18	Octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	0.37	0.59	0.42
19	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione	C <sub>17</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	0.56	0.41	0.53
20	8-Isopropenyl-1,3,3,7-tetramethyl-bicyclo[5.1.0]oct-5-en-2-one	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O	0.40	0.30	0.28
21	Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	10.31	6.49	
22	1,2-Propanediol, 3-(tetradecyloxy)-	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> O <sub>3</sub>	1.59		
23	1,3-Dioxolane, 4,5-dimethyl-2-phenyl-	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	0.93		
24	1,4-Dihydrophenacetic acid, 3,5-di-tert-butyl-, ethyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	1.43		1.33
25	17-Pentatriacontene	C <sub>35</sub> H <sub>70</sub>	0.32		
26	1H-Indene-1,3-dione, 2-[(1,1-dimethylethyl)phenyl]methylene-	C <sub>20</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	0.64		
27	2-methylhexacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	1.07	0.93	
28	1,1'-(4-Methyl-1,3-phenylene)bis[3-(5-benzyl-1,3,4-thiadiazol-2-yl)urea]	C <sub>27</sub> H <sub>24</sub> N <sub>8</sub> O <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	0.37		
29	Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	1.81	1.37	
30	Eicosane, 7-hexyl-	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	0.60		
31	Etilefrine	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub>	4.92		
32	Hentriacontane	C <sub>31</sub> H <sub>64</sub>	2.54		
33	Heptadecanenitrile	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> N	0.55		
34	N-Methyl-N-benzyltetradecanamine	C <sub>22</sub> H <sub>39</sub> N	2.67		2.43
35	Nonane, 4,5-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	0.42		
36	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	0.81		
37	Octadecane, 2-methyl-	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	0.46	3.04	
38	Octasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13,15,15-hexadecamethyl-	C <sub>16</sub> H <sub>50</sub> O <sub>7</sub> Si <sub>8</sub>	0.32		0.45
39	Octatriacontyl pentafluoropropionate	C <sub>41</sub> H <sub>77</sub> F <sub>5</sub> O <sub>2</sub>	0.68		
40	Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-	C <sub>23</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.77		
41	Tetratetracontane	C <sub>44</sub> H <sub>90</sub>	0.29		
42	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	1.73	0.22	
43	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	0.54		0.40

续表 2

序号	化合物名称	化学式	相对含量/%		
			OS1	OS2	OS3
44	Heptasiloxane ,hexadecamethyl-	C <sub>16</sub> H <sub>48</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>7</sub>	0.29	0.27	
45	1-Decanol ,2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O		0.22	
46	3 (N ,N-dimethylmyristylam monio )propanesulfonate	C <sub>19</sub> H <sub>41</sub> NO <sub>3</sub> S		2.92	
47	9 ,12 ,15-Octadecatrienoic acid 2- [(trimethylsilyl )oxy ]1- [(trimethylsilyl )oxy ]methyl ]ethyl ester ,(Z ,Z ,Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>52</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>2</sub>		0.28	
48	9-Octadecenamamide ,(Z)-	C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> NO		2.10	6.64
49	Dodecane ,4 ,6-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>		0.20	0.54
50	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>		1.03	1.31
51	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>		0.28	
52	Hexanedioic acid ,mono (2-ethylhexyl )ester	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>4</sub>		0.32	
53	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>		0.27	0.73
54	Oxalic acid ,6-ethyloct-3-yl isohexyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>4</sub>		0.19	0.23
55	Pyrido [2 ,3-b ]pyrimido [4 ,5-d ]thiophen-4 (3H)-one ,3-amino-9-methoxymethyl-2 ,7-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub> S		0.36	
56	Trimethyl (2 ,6 ditert.-butylphenoxy )silane	C <sub>17</sub> H <sub>30</sub> OSi		1.16	
57	Trimethylsilyl propaneperoxoate	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub> Si		0.28	0.66
58	Undecane ,4 ,7-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>		1.49	2.02
59	1 ,3-Difluorobenzene ,4-benzyloxy-2-trimethylsilyl-	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> F <sub>2</sub> OSi			10.82
60	1-Undecanamine ,N ,N-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>29</sub> N			7.16
61	Benzaldehyde ,2 ,5-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O			0.59
62	cis-10-Nonadecenoic acid	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>			1.27
63	Decane ,3 ,7-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>			0.58
64	Diazene ,dimethyl-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>			0.35
65	Dodecane ,1-chloro-	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> Cl			0.25
66	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>			0.27
67	Hexadecane ,2 ,6 ,11 ,15-tetramethyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>			0.43
68	Oleic acid ,eicosyl ester	C <sub>38</sub> H <sub>74</sub> O <sub>2</sub>			0.70
69	Tridecane ,2-methyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>			0.81

表 3 土壤提取物中化学物质类别统计

Table 3 Classification statistics for chemical components in the soil extracts

土壤 编号	化学物质类别														
	烃类	酯类	酚类	醛类	酮类	腈类	杂环类	胺类	硅烷	硫醇类	盐类	有机酸	醇类	氮烯类	酰胺类
ES1	22	7	2	2	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0
ES2	20	6	2	1	0	1	1	2	3	0	1	0	0	0	0
ES3	19	7	2	1	0	2	2	2	3	0	0	1	1	0	0
OS1	23	6	2	0	3	2	1	2	3	0	0	0	2	0	1
OS2	19	8	1	1	2	1	1	2	3	0	1	0	1	0	0
OS3	21	7	1	2	2	1	0	4	2	0	0	1	0	1	0

学组分的情况和蚯蚓处理的土壤样品类似。OS1 和 OS2 有 26 种化学成分相同; OS1 和 OS3 有 24 种化学成分相同; OS2 和 OS3 有 27 种化学成分相同。3 个土壤样品共有的化学成分有 20 种。总体上看 和

蚯蚓处理的土壤样品提取物化学组分的重叠情况类似 样品两两之间共有的化学成分均占每个土壤提取物化学成分总数的 50% 以上 ,3 个土壤样品共有的化学组分占到每个土壤提取物化学成分总数

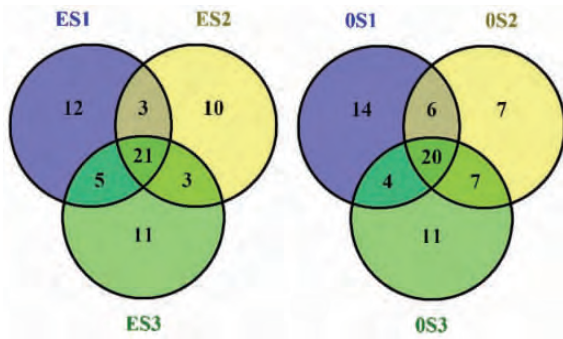


图2 饲养蚯蚓3个土壤样品提取物组分的重叠情况(左图)和无蚯蚓的3个土壤样品提取物组分的重叠情况(右图)  
Fig.2 Number of chemical components overlapped in different comparisons. Left figure is diagram according to the components in the soils treated with earthworms, and right figure is according to the components in the control group

的50%左右。

为分析蚯蚓处理对土壤中化学成分的影响,将蚯蚓处理的3个土壤样品 ES1、ES2、ES3 所有检测出的65种成分(编号: ES1-3)和无蚯蚓的3个土壤样品 OS1、OS2、OS3 所有检测出的69种成分(编号: OS1-3)进行比较分析,结果如图3所示。从图中可以看出,两组土壤中检测出的相同成分有43种,蚯蚓处理的土壤特有成分有22种(表4),无蚯蚓的土壤特有成分有26种(表4)。蚯蚓处理的土壤特有成分包括: 烃类8种(36.36%),酯类5种22.73(%) ,胺类2种(9.09%) ,杂环类1种(4.55%) ,醇类1种(4.55%) ,硫醇类1种(4.55%) ,醛类1种(4.55%) ,盐类1种(4.55%) ,腈类1种(4.55%) ,有机酸1种(4.55%) ;无蚯蚓的土壤特有成分包括: 烃类9种(34.62%) ,酯类5种(19.23%) ,醇类

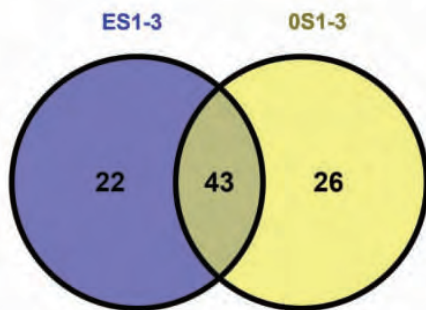


图3 蚯蚓处理的3个土壤样品 ES1、ES2、ES3 所有检测出的成分(编号: ES1-3)和无蚯蚓的3个土壤样品 OS1、OS2、OS3 所有检测出的成分(编号: OS1-3)之间的重叠情况  
Fig.3 Number of chemical components overlapped in the soils treated with earthworms( ID: ES1-3) and control group ( ID: OS1-3)

3种(11.54%) ,胺类3种(11.54%) ,酮类2种(7.69%) ,酰胺类1种(3.85%) ,氮烯类1种(3.85%) ,腈类1种(3.85%) ,有机酸1种(3.85%) 。

将蚯蚓处理的3个土壤样品共有的21种组分与无蚯蚓的3个土壤样品共有的20种组分进行比较,结果发现二者有11种化学成分相同;另外,发现Tetradecane, 2,6,10-trimethyl-, Benzoic acid, 3,5-dimethyl-, methyl ester-, Heptadecane, 2,6,10,15-tetramethyl-, Pentadecane等4种成分是蚯蚓处理土壤的特有成分, 8-Isopropenyl-1,3,3,7-tetramethyl-bicyclo[5.1.0]oct-5-en-2-one 是无蚯蚓的土壤特有成分。

### 3 讨论

蚯蚓是世界上最有利的动物之一,它通过取食、消化、排泄(蚯蚓粪)、分泌(粘液)和掘穴等活动对土壤过程的物质循环和能量传递作贡献<sup>[4]</sup>。大量研究表明:蚯蚓对土壤矿物的风化还有明显促进作用<sup>[6,8-9,11-13]</sup>。蚯蚓之所以能促进土壤矿物的风化,与多种因素有关,如蚯蚓砂囊对矿物的摩擦、消化液腐蚀及土壤微生物的风化等,其中蚯蚓诱导的土壤微生物风化可能发挥了主要作用。蚯蚓能引起土壤微生物群落的改变<sup>[7]</sup>,土壤微生物群落改变后其代谢产物也会随之发生变化,从而造成土壤中化学物质的种类发生变化,而这些化学物质中的一些成分可能是影响土壤矿物风化的重要因素。从我们的实验结果看,蚯蚓处理的土壤与无蚯蚓的土壤二者之间化学成分确实有很大的不同,如蚯蚓处理的土壤共发现了22种特有成分,无蚯蚓的土壤特有成分有26种。

微生物风化石物的机理目前有多种观点,如酸解、酶解、螯合作用、胞外多糖形成等<sup>[19]</sup>。大部分研究者认为,酸的溶解作用是生物促进岩石和矿物风化的重要途径<sup>[20]</sup>,还有些学者认为微生物产生的铁载体可以螯合矿物中的铁、钾、钙等多种金属离子,从而破坏矿物的晶格结构,加速矿物的分解<sup>[21-22]</sup>。从我们对土壤的检测结果看,蚯蚓处理的土壤和无蚯蚓的土壤均检测到了微量有机酸,但二者间无论是酸的种类还是数量均无明显差异;另外,检测出的化学组分并没有发现铁载体。上述结果说明微生物分泌的有机酸和铁载体量应该非常少,用我们的检测方法无法检测出。蚯蚓诱导的微生物对土壤



表4 蚯蚓处理的土壤和无蚯蚓的土壤检测出的特有化学成分  
**Table 4 Chemical components included exclusively in the extracts from the soils treated with earthworms and the control group**

序号	蚯蚓处理的土壤 ES1、ES2 和 ES3 中特有成分		无蚯蚓的土壤 OS1、OS2 和 OS3 中特有成分	
	化合物名称	化学式	化合物名称	化学式
1	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	Nonane, 4,5-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
2	Tetradecane, 2,6,10-trimethyl-	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	Octadecane, 2-methyl-	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
3	Heptadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	17-Pentatriacontene	C <sub>35</sub> H <sub>70</sub>
4	Heptadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>
5	Benzene, 1,3-bis(1-methylpropyl)-	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	Dodecane, 4,6-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
6	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
7	Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	Dodecane, 1-chloro-	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> Cl
8	2-methyloctacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
9	Benzoic acid, 3,5-dimethyl-, methyl ester	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1,3-Difluorobenzene, 4-benzyloxy-2-trimethylsilyl-	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> F <sub>2</sub> OSi
10	2-Benzofurancarboxylic acid, 2,4,5,6,7,7-hexahydro-4,7a-trimethyl-, methyl ester, cis-	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O <sub>3</sub>	Octatriacontyl pentafluoropropionate	C <sub>41</sub> H <sub>77</sub> F <sub>5</sub> O <sub>2</sub>
11	5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid, phenylmethyl ester (all-Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	Trimethylsilyl propaneperoxoate	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub> Si
12	9,12,15-Octadecatrienoic acid, 2,3-bis[[trimethylsilyl]oxy]propyl ester (Z,Z,Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>52</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>2</sub>	9,12,15-Octadecatrienoic acid, 2-[[trimethylsilyl]oxy]-1-[[trimethylsilyl]oxy]methyl ethyl ester (Z,Z,Z)-	C <sub>27</sub> H <sub>52</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>2</sub>
13	9-octadecenoic acid 2,2,2-trifluoroethyl ester	C <sub>20</sub> H <sub>35</sub> F <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Hexanedioic acid, mono(2-ethylhexyl) ester	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>4</sub>
14	3-Hexanamine, 3-ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>19</sub> N	Oleic acid, eicosyl ester	C <sub>38</sub> H <sub>74</sub> O <sub>2</sub>
15	1-Nonadecanamine, N,N-dimethyl-	C <sub>21</sub> H <sub>45</sub> N	N-Methyl-N-benzyltetradecanamine	C <sub>22</sub> H <sub>39</sub> N
16	Edulan II	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O	9-Octadecenamamide (Z)-	C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> NO
17	tert-Hexadecanethiol	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> S	1-Undecanamine, N,N-dimethyl-	C <sub>13</sub> H <sub>29</sub> N
18	7-Hexadecenal (Z)-	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O	Etilefrine	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub>
19	Stearyltrimethylammonium chloride	C <sub>21</sub> H <sub>46</sub> ClN	1,2-Propanediol, 3-(tetradecyloxy)-	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> O <sub>3</sub>
20	2-Isopropyl-5-methyl heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
21	Hexadecanenitrile	C <sub>16</sub> H <sub>31</sub> N	1H-Indene-1,3-dione, 2-[[1,1-dimethylethyl]phenyl]methylene-	C <sub>20</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>
22	cis-11-Eicosenoic acid	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	8-Isopropenyl-1,3,3,7-tetramethyl-bicyclo[5.1.0]oct-5-en-2-one	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O
23			1,1'-(4-Methyl-1,3-phenylene) bis[3-(5-benzyl-1,3,4-thiadiazol-2-yl)urea]	C <sub>27</sub> H <sub>24</sub> N <sub>8</sub> O <sub>2</sub> S <sub>2</sub>
24			Heptadecanenitrile	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> N
25			Diazene, dimethyl-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>
26			cis-10-Nonadecenoic acid	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>

矿物的风化应该是在土壤矿物局部区域发挥作用,有机酸和铁载体在土壤矿物局部区域的高浓度导致了矿物的风化<sup>[23-24]</sup>。风化的机理用连宾的综合假说更为合理:微生物在生长过程中通过分泌大量的胞外多糖,使微生物细胞能固着在矿物颗粒表面而形成细菌-矿物复合体。复合体内的微环境与周围环境有较大差别,如有机酸、铁载体等微生物

代谢产物的浓度较高,溶液粘度较大,pH 值较低等;酸解、络解、酶解、碱解、荚膜吸收以及氧化还原作用等机制一种或多种共同发挥作用,促进了微生物对矿物溶蚀作用的进行;随着溶蚀作用的进行,促使部分被侵蚀的矿物颗粒晶格发生变形或崩解,而半径较小的离子(如氢离子等)可能使其变形加剧,导致矿物中钾等一些离子的释放;细菌对钾等

一些离子的主动吸收促进离子进一步释放,而矿物中离子的释放则会进一步加剧矿物的崩解<sup>[24-26]</sup>。

## 4 结 论

1) 无论是蚯蚓处理过的土壤还是无蚯蚓的土壤,甲醇提取物中烃类和酯类两类化学成分最为丰富。

2) 在蚯蚓处理的土壤与无蚯蚓的土壤中均检测出大量的特有化学成分,二者之间有机化学成分有很大的不同。

3) 蚯蚓诱导的微生物对土壤矿物的风化应该是在土壤矿物局部区域发挥作用,其风化机理用连宾的综合效应假说解释更为合理。

## 参 考 文 献

- [1] Kooch Y, Jalilvand H. Earthworms as ecosystem engineers and the most important detritivores in forest soils[J]. Pak J Biol Sci, 2008, 11(6): 819-825.
- [2] Ayuke F O, Brussaard L, Vanlauwe B, et al. Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48(1): 53-62.
- [3] Bhadauria T, Saxena K G. Role of earthworms in soil fertility maintenance through the production of biogenic structures[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2010, 2010: 1-7.
- [4] Tian G, Olimah J A, Adeoye G O, et al. Regeneration of earthworm populations in a degraded soil by natural planted fallows under humid tropical conditions[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64(1): 222-228.
- [5] Tomati U, Galli E. Earthworms, soil fertility and plant productivity[J]. Acta Zoologica Fennica, 1995, 196: 11-14.
- [6] Edwards C A, Bohlen P J. Biology and Ecology of Earthworm[M], London: Chapman & Hall, 1996.
- [7] Liu D, Lian B, Wang B, et al. Degradation of potassium rock by earthworms and responses of bacterial communities in its gut and surrounding substrates after being fed with mineral[J]. PLoS ONE, 2011, 6(12): e28803.
- [8] Carpenter D, Hodson M E, Eggleton P, et al. Earthworm induced mineral weathering: Preliminary results[J]. Eur J Soil Biol, 2007, 43(Supplement 1): S176-S183.
- [9] Suzuki Y, Matsubara T, Hoshino M. Breakdown of mineral grains by earthworms and beetle larvae[J]. Geoderma, 2003, 112(1-2): 131-142.
- [10] Basker A, Macgregor A N, Kirkman J H. Influence of soil ingestion by earthworms on the availability of potassium in soil: an incubation experiment[J]. Biol Fert Soils, 1992, 14(4): 300-303.
- [11] Carpenter D, Hodson M E, Eggleton P, et al. The role of earthworm communities in soil mineral weathering: a field experiment[J]. Mineral Mag, 2008, 72(1): 33-36.
- [12] Needham S J, Worden R H, McIlroy D. Animal-sediment interactions: the effect of ingestion and excretion by worms on mineralogy[J]. Biogeosciences, 2004, 1(2): 113-121.
- [13] 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 142-153.
- [14] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. 中国科学 地球科学, 2014, 44(6): 1107-1116.
- [15] Abdulla H. Bioweathering and biotransformation of granitic rock minerals by actinomycetes[J]. Microbial Ecology, 2009, 58(4): 753-761.
- [16] Kogel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry[J]. Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde, 2008, 171(1): 61.
- [17] 李勇, 黄小芳, 丁万隆, 等. 不同土壤提取物对人参种子生长的化感效应及其化学组成[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1173-1178.
- [18] 陈长宝, 王艳艳, 刘继永, 等. 人参根际土壤中化感物质鉴定[J]. 特产研究, 2006, 28(2): 12-14.
- [19] Lian B, Wang B, Pan M, et al. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus* [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(1): 87-98.
- [20] Uroz S, Calvaruso C, Turpault M P, et al. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms[J]. Trends in Microbiology, 2009, 17(8): 378-387.
- [21] Buss H L, Lüttge A, Brantley S L. Etch pit formation on iron silicate surfaces during siderophore-promoted dissolution[J]. Chemical Geology, 2007, 240(3-4): 326-342.

- [22] Liermann L J, Kalinowski B E, Brantley S L. *et al.* Role of bacterial siderophores in dissolution of hornblende [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64( 4) : 587-602.
- [23] Drever J I, Vance G F. Role of soil organic acids in mineral weathering processes [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1994: 138-161.
- [24] 何琳燕, 张垠, 盛下放, 等. 一株产铁载体细菌的筛选及其与云母的相互作用 [J]. *高校地质学报*, 2012, 18( 1) : 117-124.
- [25] 连宾, 傅平秋, 莫德明, 等. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应 [J]. *矿物学报*, 2002, 22( 2) : 179-183.
- [26] 莫彬彬, 连宾. 长石风化作用及影响因素分析 [J]. *地学前缘*, 2010 ( 3) : 281-289.

## Effect of Earthworms on Organic Chemical Components of Soil

LIU Dianfeng<sup>1 2</sup>, LIAN Bin<sup>3</sup>, WU Chunhao<sup>1</sup>

( 1. Department of Bioengineering, Puyang Vocational & Technical Institute, Puyang 457000, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Earthworms are one of the most important groups of soil animals. They not only can improve soil structure and fertility, but also promote the weathering of soil minerals. To investigate the effect of earthworms on organic chemical components of soil and illuminate the mechanisms of weathering soil minerals by earthworm, we extracted organic compounds by solvent methanol from the soils treated with earthworms, and then characterized the organic components of soil extracts using GC-MS after silylation derivatization. Results showed that hydrocarbons were the most abundant components among all extract, followed by esters. There were very few kinds of nitrile in the extract, but with high contents. There were 22 exclusive components in the soils treated with earthworms and 26 exclusive components in control group. Small amounts of organic acids were found in the two kinds of soils, but there were no significant differences in the kinds and contents of the organic acids between the soils treated with earthworms and the control. In addition, none of siderophores were found in all soils. Based on above results, we speculate that the bioweathering of soil minerals, by microorganisms induced by earthworms, occurs on the local region of minerals, and its mechanisms may be explained by Lian's the combined effect hypothesis.

**Key words:** earthworm; soil extract; chemical component; GC-MS