

# 砂龄对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响

逢 蕾<sup>1,2,3</sup>, 路建龙<sup>1,3</sup>, 周茅先<sup>4</sup>, 肖洪浪<sup>2</sup>, 樊志龙<sup>1,3</sup>, 柴守玺<sup>3</sup>

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州财经大学, 甘肃 兰州 730101)

**摘要:** 以不同砂龄(砂田覆盖年限分别为 1、6、12、19 a 和 25 a)的砂田为研究对象,对砂田土壤混合层、根系密集层、淋溶层和钙积层的土壤微生物区系及影响土壤微生物的因素进行研究。结果表明:(1) 砂田土壤微生物组成中,以细菌为主,放线菌次之,真菌最少;随土壤剖面深度的增加,土壤微生物总数迅速减少,这主要是由于细菌数量迅速减少所致;受根系分布的影响,根系密集层的微生物数量高于只有少量根系分布的混合层。(2) 细菌和放线菌的数量在作物生长期高于作物非生长期,而真菌的数量则相反。(3) 细菌和真菌在砂龄约为 6~12 a 的砂田中最多,随砂田覆盖时间的增加,砂田逐渐老化,数量逐渐减少;而放线菌的数量反之,在砂龄约为 6~12 a 的砂田中最少,随砂田覆盖时间的增加而增加。(4) 砂田土壤微生物数量与土壤水分含量、pH 值和覆盖时间有很好的相关性,土壤养分中的全 C 含量是限制砂田土壤微生物数量的重要因子。

**关键词:** 干旱半干旱地区;砂田;不同覆盖年限;土壤微生物;环境因子

**中图分类号:** S154.3 **文献标志码:** A

## Effect of different gravel mulched years on soil microflora and physicochemical properties in gravel-sand mulched field

PANG Lei<sup>1,2,3</sup>, LU Jian-long<sup>1,3</sup>, ZHOU Mao-xian<sup>4</sup>, XIAO Hong-lang<sup>2</sup>, FAN Zhi-long<sup>1,3</sup>, CHAI Shou-xi<sup>3</sup>

(1. Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu 730101, China)

**Abstract:** Soil microflora and physicochemical properties at soil and gravel-sand mixed layer (SGSML), roots denseness layer (RDL), eluvial layer (EL) and Calcic horizon layer (CAL) in gravel-sand mulched field (GSMF) with different gravel mulched years (1, 6, 12, 19 a and 25 a respectively) were investigated. The results indicated that (1) Among the soil microorganisms of the GSMF, bacteria population was greatest, actinomycete was followed, and fungi was the least one. As the deeper of the soil profile, the soil microorganisms population was decreased rapidly that mainly result from rapidly decreasing of bacteria population. Soil microbial population in RDL was greater compared with that of SGSML with fewer roots due to effect of different crop roots distribution. (2) Population of bacteria and actinomycete in crop growth period was greater than that of the fallow season, while the fungi population in crop growth period was lower than that of the fallow season. (3) Bacteria and fungi population reached the maximum number when the gravel mulched with 6 a to 12 a. Bacteria and fungi population was decreased as increasing of gravel mulched years due to gradually aging of GSMF. The actinomycete population was the other way round. (4) Good correlation was found between soil microbial population of GSMF and soil water content, pH, gravel mulched years. Soil total C content was one of the important factors restricting the soil microbial developing.

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STIS-1427); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金课题(GSCS-2012-14); 国家自然科学基金(31560356)

作者简介: 逢蕾(1979—), 女, 山东诸城人, 博士, 副教授, 主要从事土壤微生物生态研究。E-mail: 125530457@qq.com。

通信作者: 柴守玺(1962—), 男, 甘肃会宁人, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事土壤微生物生态研究。E-mail: sxchai@126.com。

**Keywords:** arid and semi-arid area; gravel and sand mulched field (GSMF); different mulched year; soil microbe; environment factors

砂田是起源于甘肃兰州的微耕生态农田,距今已有四、五百年的历史<sup>[1]</sup>。在我国现主要集中分布在甘肃省中部地区,以及青海、新疆和宁夏的部分地区<sup>[2]</sup>,至今仍在生产中发挥作用,表现出了强大的生命力。随着现代机械工业的发展,砂田覆盖物的挖掘、砂田的铺设逐渐变得简单易行<sup>[3]</sup>,砂田的面积在不断扩大<sup>[4]</sup>。

自 20 世纪 50 年代至今,国内外研究人员在砂田结构<sup>[5]</sup>、土壤温度效应<sup>[6-7]</sup>、砂田耕作<sup>[8-9]</sup>、作物栽培<sup>[10]</sup>和育种<sup>[11-12]</sup>、土壤水分动态<sup>[5,13]</sup>与养分动态<sup>[1,14-16]</sup>、水土保持<sup>[17]</sup>、土壤理化性质<sup>[18]</sup>等方面进行了广泛深入的研究。近年来,砂田土壤微生物的研究逐渐受到人们的关注<sup>[1-2,19-28]</sup>,研究结果表明,砂砾石覆盖能显著提高微生物数量,增强酶活性<sup>[27]</sup>;砂田轮作可改善土壤微生物区系结构,增加土壤微生物多样性指数,增加细菌、放线菌数量及细菌数量与真菌数量比值(B/F),减少真菌数量;砂田连作使镰刀菌数量呈上升趋势,根际土壤微生物总生物量、细菌数量、放线菌数量和细菌/真菌的值呈下降趋势,而真菌数量逐年上升<sup>[24]</sup>;砂田土壤微生物数量与覆盖层的厚度和覆盖层砾石的粒径有关<sup>[20,26]</sup>。

关于砂田土壤微生物数量与砂田砂龄的相关性研究较少,为进一步研究砂田微生物区系特征,本试验以农户使用中的、不同使用年限(砂龄)的砂田为研究对象,对砂田不同剖面层次的土壤微生物区系及影响土壤微生物的因素进行研究,为干旱半干旱

地区砂田研究提供数据支撑,为砂田退化的预测提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验设在甘肃省兰州市皋兰县忠和乡崖川村(36°13'N,103°50'E)。试区年平均降水量为 263 mm(皋兰县 30 a 平均),最大年降水量 392.4 mm,最小年降水量 154.9 mm。降水的变率很大,70%的降雨分布在 5—9 月,冬季降水变率在 80%~120%之间,春季为 75%~100%,夏季和秋季为 36%~48%。海拔 1 800 m 左右。年平均气温为 7.1℃,月平均最低气温为 -9.1℃(1 月),月平均最高气温为 20.7℃(7 月), $\geq 0^\circ\text{C}$  的年积温 3 324.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温 2 798.3℃。年平均日照时数为 2 768.1 h。本区地带性土壤为灰钙土,黄土母质。土壤有机质含量 10~11 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.7~0.9 g·kg<sup>-1</sup>,全钾 19.8~21.0 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷 7~10 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 120~160 mg·kg<sup>-1</sup>。机械组成中粉砂粒占 60%左右,物理性粘粒只占 24%~35%,0~150 cm 土壤容重 1.20 g·cm<sup>-3</sup><sup>[29]</sup>。

### 1.2 试验设计

在甘肃省兰州市皋兰县忠和乡崖川村随机选取立地因子基本一致的砂田为研究对象。砂田覆盖年限(即砂龄)分别为 1、6、12、19 a 和 25 a,在作物生长季节(5 月)和作物非生长季节(11 月)各取样 1 次,重复 3 次。试验处理如表 1 所示。

表 1 不同处理编号

Table 1 Abbreviation of experimental treatments

取样时间 Sampling time	砂龄 Gravel mulched years/a				
	1	6	12	19	25
作物生长季节(5月) The growing season (May)	T <sub>S1</sub>	T <sub>S6</sub>	T <sub>S12</sub>	T <sub>S19</sub>	T <sub>S25</sub>
作物非生长季节(11月) Not growing season (November)	T <sub>W1</sub>	T <sub>W6</sub>	T <sub>W12</sub>	T <sub>W19</sub>	T <sub>W25</sub>

### 1.3 样品采集

在每块砂田中没有地膜覆盖的地方按蛇形取样法随机选取 5 个样点,用铲子扒开砂田表层覆盖的砾石,扫净土面。在每个取样点挖一个约 1.5 m 宽、1 m 深的剖面,观察面向阳。修好的土壤剖面用小土铲划分土壤发生层,分别命名为混合层(Soil and gravel-sand mixed layer,缩写为 SGSML)、根系密集层(Roots denseness layer,缩写为 RDL)、淋溶层(Eluvi-

ate layer,缩写为 EL)和钙积层(Calcium accumulation layer,缩写为 CAL)<sup>[5]</sup>。在各个土壤发生层取样,将 5 个样点采集的土样混匀为一个样品,一部分装入无菌袋中,带回实验室于 4℃ 保藏,用于微生物数量测定;另一部分风干保存,用于土壤理化性质测定。

### 1.4 土壤理化性质测定

按照常规方法测定土壤养分、水分和 pH 值<sup>[30]</sup>。全碳用重铬酸钾容量法测定;全 N 用半微量开氏法

测定;土壤含水量用烘干法测定;土壤 pH 值用电位法(水土比为 1:1)。重复三次。

1.5 土壤微生物数量测定

采用稀释平板涂抹培养计数法测定<sup>[31]</sup>。细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,放线菌采用改良的高氏一号培养基(每 300 mL 培养基中加 3% 重铬酸钾 1 mL),真菌采用 PDA 培养基(每 100 mL 培养基加 1% 链霉素溶液 0.3 mL)。

细菌选取稀释度为  $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$  的土壤悬浮液各 0.1 mL 接种于无菌的牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,恒温(28℃)培养 3 d,统计菌落数。真菌选取稀释度为  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$  的土壤悬浮液各 0.1 mL 接种于 PDA 培养基,恒温(28℃)培养 5 d 统计菌落数。放线菌选取稀释度为  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  的土壤悬浮液各 0.1 mL 接种于改良的高氏一号培养基,恒温(28℃)培养 7 d 统计菌落数。重复三次。

结果以每克干土所含菌数( $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )表示。每克干土中的菌数 =  $\frac{\text{菌落平均数} \times \text{稀释倍数}}{\text{干土 \%}}$

1.6 土壤微生物多样性计算

选用 Simpson 多样性指数、Shannon - Wiener 多样性指数和 Shannon 均匀度指数 3 种群落多样性指数作为研究群落物种数及其个体数和分布均匀程度的综合指标<sup>[21,23]</sup>。

Simpson 多样性指数 =  $1 - \sum n_i(n_i - 1) / N(N - 1)$

Shannon - Wiener 多样性指数 =  $-\sum P_i \ln P_i$

Shannon 均匀度指数 =  $(-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$

式中,  $n_i$  为第  $i$  个物种的个体数;  $N$  为群落中所有物种的个体数;  $P_i$  为第  $i$  种物种个体数占群体总个体数的比例;  $S$  为物种总数。

1.7 数据统计和分析

采集到的数据通过 Excel 2003 和 SPSS 21.0 进行统计分析和制图。

2 结果与分析

2.1 不同砂龄砂田土壤微生物总数及三大微生物类群的数量变化

从表 2 可知,砂田土壤微生物组成中,以细菌为主,放线菌次之,真菌最少。随土壤剖面深度的增加,土壤微生物总数迅速减少,这主要是由于细菌数量迅速减少所致。在细菌出现比例最高的土层,放线菌的比例最低,反之亦然,可见放线菌占土壤微生物总数比例的消长主要受细菌所占比例变化的影响。这与逢蕾等<sup>[20,26]</sup>的研究结果一致。生态环境中的土壤温度、水分等因素伴随着季节变化而变化,是影响土壤微生物数量的主要因素<sup>[30]</sup>。一般而言,土壤微生物的分布与土壤深度有关,在本研究中,砂田土壤微生物的分布也表现出了这样的趋势,随土层剖面深度的增加,微生物数量减少。另外,受根系分布的影响,根系密集层的微生物数量高于只有少量根系分布的混合层。

表 2 不同砂龄砂田土壤微生物总数及三大微生物类群数量

Table 2 Total amount of soil microbes and three microbial populations in different age of gravel - sand mulched field

处理 Treatment	土壤剖面 Soil profile	细菌 Bacteria		真菌 Fungi		放线菌 Actinomycete		微生物总数 Total number of microbe ( $\times 10^5$ )
		数量 Quantity ( $\times 10^5$ )	百分比 Percentage /%	数量 Quantity ( $\times 10^2$ )	百分比 Percentage /%	数量 Quantity ( $\times 10^4$ )	百分比 Percentage /%	
T <sub>S1</sub>	SGSML	27.73 aAαA	99.02	1.90 bA αA	0.01	2.74 bB γΓ	0.98	28.00
	RDL	8.83 bB εE	96.50	2.11 aA αA	0.02	3.20 aA γΓ	3.50	9.15
	EL	0.38 cC εE	75.39	0.78 cB βB	0.16	1.24 dD εE	24.60	0.50
	CAL	0.37 cC εE	61.66	0.62 cB βB	0.10	2.30 cC γΓ	38.33	0.60
	平均 Average	9.33	83.14	1.35	0.07	2.37	16.85	9.56
T <sub>S6</sub>	SGSML	4.62 dD δΔ	97.74	0.06 dD εE	0	1.07 cC δΔ	2.26	4.73
	RDL	53.23 aA βB	99.63	0.33 cC δΔ	0	1.96 bB δΔ	0.37	53.43
	EL	8.44 cC αA	95.65	0.97 aA βB	0.01	3.84 aA βB	4.35	8.82
	CAL	27.32 bB αA	98.58	0.61 bB βB	0	3.94 aA βB	1.42	27.71
	平均 Average	23.40	97.90	0.49	0	2.70	2.10	23.67
T <sub>S12</sub>	SGSML	26.82 bB βB	99.88	0.61 aA δΔ	0	0.31 cC εE	0.12	26.85
	RDL	37.98 aA γΓ	99.52	0.26 bB δΔ	0	1.84 aA δΔ	0.48	38.16
	EL	7.48 cC βB	97.80	0.23 bB γΓ	0	1.68 aA δΔ	2.20	7.65
	CAL	2.88 dD γΓ	96.22	0.27 bB γΓ	0.01	1.13 bB εE	3.78	2.99
	平均 Average	18.79	98.36	0.34	0	1.24	1.65	18.91

表 2 续

处理 Treatment	土壤剖面 Soil profile	细菌 Bacteria		真菌 Fungi		放线菌 Actinomycete		微生物总数 Total number of microbe ( $\times 10^5$ )
		数量 Quantity ( $\times 10^5$ )	百分比 Percentage /%	数量 Quantity ( $\times 10^2$ )	百分比 Percentage /%	数量 Quantity ( $\times 10^4$ )	百分比 Percentage /%	
T <sub>S19</sub>	SGSML	8.54 bB $\gamma\Gamma$	94.08	0.93 aA $\gamma\Gamma$	0.01	5.37 aA $\beta\beta$	5.92	9.08
	RDL	21.24 aA $\delta\Delta$	98.06	0.91 aA $\beta\beta$	0	4.21 bB $\beta\beta$	1.94	21.66
	EL	2.12 cC $\gamma\Gamma$	87.75	0.93 aA $\beta\beta$	0.04	2.96 cC $\gamma\Gamma$	12.25	2.42
	CAL	1.40 dD $\delta\Delta$	89.68	0.45 bB $\gamma\beta\Gamma$	0.03	1.61 dD $\delta\Delta$	10.31	1.56
	平均 Average	8.33	92.39	0.81	0.02	3.54	7.61	8.68
T <sub>S25</sub>	SGSML	1.73 cC $\epsilon\epsilon$	64.67	1.28 bA $\beta\beta$	0.05	9.45 aA $\alpha\alpha$	35.33	2.68
	RDL	72.47 aA $\alpha\alpha$	99.21	0.64 cB $\gamma\Gamma$	0	5.78 dC $\alpha\alpha$	0.79	73.05
	EL	0.73 dD $\delta\Delta$	51.92	1.34 abA $\alpha\alpha$	0.10	6.76 bB $\alpha\alpha$	48.08	1.41
	CAL	4.10 bB $\beta\beta$	86.33	1.48 aA $\alpha\alpha$	0.03	6.49 cB $\alpha\alpha$	13.67	4.75
	平均 Average	19.76	75.53	1.19	0.05	7.12	24.47	20.47
T <sub>W1</sub>	SGSML	11.34 aA $\beta\beta$	95.36	16.7 aA $\alpha\alpha$	0.14	5.50 aA $\alpha\alpha$	4.63	11.89
	RDL	10.91 bB $\alpha\alpha$	98.36	8.94 bB $\beta\beta$	0.08	1.81 bB $\alpha\alpha$	1.63	11.09
	EL	3.50 cC $\alpha\alpha$	98.54	6.99 dD $\beta\beta$	0.20	0.51 dD $\beta\beta$	1.44	3.55
	CAL	2.63 dD $\alpha\beta\text{AB}$	96.38	8.60 cC $\gamma\Gamma$	0.32	0.98 cC $\beta\beta$	3.59	2.73
	平均 Average	7.10	97.16	10.32	0.19	2.20	2.82	7.32
T <sub>W6</sub>	SGSML	3.76 aA $\delta\Delta$	97.33	0.46 dD $\epsilon\epsilon$	0.01	1.03 bA $\gamma\Gamma$	2.67	3.86
	RDL	1.63 dC $\epsilon\epsilon$	92.76	11.87 cC $\alpha\alpha$	0.68	1.26 aA $\beta\beta$	7.17	1.76
	EL	2.30 cB $\delta\Delta$	94.93	17.49 bB $\alpha\alpha$	0.72	1.21 abA $\alpha\alpha$	5.00	2.42
	CAL	2.53 bB $\beta\beta\Gamma$	95.90	22.09 aA $\alpha\alpha$	0.84	1.06 bA $\beta\beta$	4.02	2.64
	平均 Average	2.56	95.23	12.98	0.56	1.14	4.72	2.67
T <sub>W12</sub>	SGSML	13.21 aA $\alpha\alpha$	99.80	4.49 dD $\beta\beta$	0.03	0.38 bA $\delta\Delta$	0.29	13.25
	RDL	2.63 bB $\gamma\Gamma$	97.61	5.31 cC $\gamma\Gamma$	0.20	0.64 aA $\gamma\Gamma$	2.38	2.69
	EL	1.97 cC $\epsilon\epsilon$	99.76	7.04 bB $\beta\beta$	0.36	0.04 cB $\gamma\Gamma$	0.20	1.97
	CAL	2.50 bB $\beta\beta\Gamma$	98.38	11.84 aA $\beta\beta$	0.47	0.40 bA $\gamma\Gamma$	1.57	2.54
	平均 Average	5.08	98.89	7.17	0.27	0.37	1.11	5.11
T <sub>W19</sub>	SGSML	9.12 aA $\gamma\Gamma$	99.55	2.63 aA $\delta\Delta$	0.03	0.41 bB $\delta\Delta$	0.45	9.16
	RDL	7.81 bB $\beta\beta$	99.70	1.51 cB $\epsilon\epsilon$	0.02	0.23bcBC $\Delta$	0.29	7.83
	EL	2.78 cC $\gamma\Gamma$	99.60	1.73 bB $\delta\Delta$	0.06	0.11 cC $\gamma\Gamma$	0.39	2.79
	CAL	2.30 dD $\gamma\Gamma$	85.85	0.14 dC $\epsilon\epsilon$	0.01	3.79 aA $\alpha\alpha$	14.15	2.68
	平均 Average	5.50	96.18	1.50	0.03	1.14	3.82	5.62
T <sub>W25</sub>	SGSML	3.19 aA $\epsilon\epsilon$	90.80	3.60 aA $\gamma\Gamma$	0.10	3.23 aA $\beta\beta$	9.19	3.51
	RDL	2.78 bAB $\gamma\Gamma$	99.49	2.42 cC $\delta\Delta$	0.09	0.14 bB $\delta\Delta$	0.50	2.79
	EL	3.07 aBC $\beta\beta$	99.50	3.03 bB $\gamma\Gamma$	0.10	0.15 bB $\gamma\Gamma$	0.49	3.09
	CAL	2.81 bC $\alpha\alpha$	99.61	1.27 dD $\delta\Delta$	0.05	0.11 bB $\delta\Delta$	0.39	2.82
	平均 Average	2.96	97.35	2.58	0.09	0.91	2.64	3.05

注:表中英文字母表示砂田覆盖年限相同、土壤剖面深度不同时微生物数量的差异,希腊字母表示土壤剖面深度相同、覆盖年限不同时砂田在同一测定季节的微生物数量差异;小写字母和大写字母分别表示在 0.05 水平和 0.01 水平上差异显著;SGSML—砂田土壤混合层,RDL—根系密度层,EL—淋溶层,CAL—钙积层;下同。

Note: alphabets of English in the table mean value significant in the same mulched year but in the different soil profile depth of gravel – sand mulched field, alphabets of Greece in the table mean value significant in the same soil profile depth but in the different mulched year and in the same determined seasonal of gravel – sand mulched field; lowercase letters and capital letters indicate significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively; SGSML—soil and gravel – sand mixed layer, RDL—roots denseness layer, EL—eluviate layer, CAL—calcium accumulation layer; the same below.

不同砂龄的砂田,各处理土壤总细菌数量,在作物生长季节为  $T_{S6} > T_{S12} > T_{S25} > T_{S1} > T_{S19}$ ;在非作物

生长季节为  $T_{W1} > T_{W19} > T_{W12} > T_{W25} > T_{W6}$ 。在作物生长季节,砂田混合层的土壤细菌数量,处理  $T_{S1}$  最多,处理  $T_{S12}$  与处理  $T_{S1}$  相当,处理  $T_{S25}$  最少。推断这是由于砂龄为 1 a 的砂田,是翻新的老砂田(已老化失去生产价值的砂田,铲除表层旧砂,重新翻耕、施农家肥、压砂,有机肥主要施用于混合层),又休耕一年,使地力得到一定程度的恢复所致。砂田根系密集层和淋溶层的养分含量受外源肥料的影响较小,受作物根系生长的影响数量变动较大<sup>[2]</sup>。外源养分

和植物根系对钙积层的土壤影响较小,因此土壤中细菌的数量少且稳定。

放线菌参与有机物质的分解,主要分解纤维素等难分解的物质,甚至能分解形成土壤腐殖质等的最稳定有机化合物,分解氨基酸的作用比真菌更强。放线菌的数量也是随着土壤深度的增加而减少,在砂龄为 1 a 的砂田中,由于农家肥施入的时间较短,可供放线菌分解的物质相对较多,故混合层的放线菌数量较多。

表 3 不同砂龄砂田土壤细菌/真菌比较/ $\times 10^3$

Table 3 Comparison of soil bacteria/fungus in different age of gravel - sand mulched field

处理 Treatment	SGSML	RDL	EL	CAL	平均 Average
$T_{S1}$	14.59 Aa $\gamma\Gamma$	4.18 Bb $\gamma\Gamma$	0.49 cC $\gamma\Gamma$	0.60 cC $\beta\beta$	6.90 $\gamma\Gamma$
$T_{S6}$	77.00 Bb $\alpha A$	161.30 aA $\alpha A$	8.70 dC $\beta\beta$	12.00 cdC $\alpha A$	37.37 $\beta\beta$
$T_{S12}$	43.97 bcB $\beta\beta$	146.08 aA $\alpha A$	32.52 cBC $\alpha A$	10.67 dC $\alpha A$	54.86 $\alpha A$
$T_{S19}$	9.18 bBC $\gamma\Gamma$	23.34 aA $\beta\beta$	2.28 cD $\gamma Br$	3.11 cCD $\beta\beta$	10.34 $\gamma\Gamma$
$T_{S25}$	1.35 bB $\delta\Delta$	19.48 aA $\beta\beta$	0.54 Bb $\gamma\Gamma$	2.77 bB $\beta\beta$	4.01 $\gamma\Gamma$
$T_{W1}$	0.68 bB $\gamma\Gamma$	1.22 aA $\beta\beta$	0.50 bcB $\gamma\Gamma$	0.31 cB $\gamma\Gamma$	0.69 $\beta\beta\Gamma$
$T_{W6}$	8.17 aA $\alpha A$	0.14 bB a $\Gamma$	0.13 bB $\delta\Delta$	0.11 bB $\gamma\Gamma$	0.20 $\gamma\Gamma$
$T_{W12}$	2.94 aA $\beta\beta$	0.50 bB aB $\Gamma\Delta$	0.28 bB $\beta\beta$	0.21 bB $\gamma\Gamma$	0.71 $\beta\gamma$ B $\Gamma$
$T_{W19}$	3.47 cC $\beta\beta$	5.17 bB $\alpha A$	1.61 dD $\alpha A$	16.43 aA $\alpha A$	3.66 $\alpha A$
$T_{W25}$	0.89 bB $\gamma\Gamma$	1.15 Bb $\beta\beta$	1.01 bB $\beta\beta$	2.21 aA $\beta\beta$	1.15 $\beta\beta$

真菌分解土壤中的纤维素、木质素和果胶等植物残体,降解含 N 化合物而释放出氨,参与土壤有机质分解与腐殖质合成,直接影响到土壤肥力。如表 2 所示,砂田土壤真菌的数量,在作物生长季节高于非作物生长季节。一般认为,真菌型土壤是地力衰竭的标志<sup>[21]</sup>。土壤中真菌类微生物种类和数量增加,将使土壤向“真菌型”转变。保持较高的细菌/真菌的比值,是土壤健康的重要指标。如表 3 所示,在作物生长期,不同砂龄砂田土壤中细菌/真菌值为  $T_{S12} > T_{S6} > T_{S19} > T_{S1} > T_{S25}$ ,且由于作物根系的生长,分泌物的产生,根系组织的脱落,为微生物生长发育提供了条件,导致根系密集层的细菌/真菌值比其它剖面的值大。由此可推断,砂龄为 6 ~ 12 a 的砂田土壤微生物环境较好,最适于作物生长;砂龄为 1 a 的砂田,正处于土壤环境恢复期,故老砂田翻新是可行的。

### 2.2 不同砂龄砂田土壤微生物多样性分析

如表 4 所示,在作物生长期,不同砂龄砂田的土壤微生物的 Simpson 多样性指数为  $T_{S19} > T_{S12} > T_{S25} > T_{S1} > T_{S6}$ ,Shannon - Wiener 多样性指数为  $T_{S6} > T_{S1} > T_{S25} > T_{S12} > T_{S19}$ ,Shannon 均匀度指数  $T_{S6} > T_{S1} > T_{S25} > T_{S12} \approx T_{S19}$ 。表明,砂龄对砂田土壤微生物群落

功能结构方面有一定的影响。

表 4 不同砂龄砂田土壤微生物多样性分析

Table 4 Analysis of soil microbial diversity in different age of gravel - sand mulched field

处理 Treatment	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Shannon - Wiener 多样性指数 Shannon - Wiener diversity index	Shannon 均匀度指数 Shannon evenness index
$T_{S1}$	1.73 bcBC	0.32 abAB	0.03 aA
$T_{S6}$	1.62 aA	0.45 cdC	0.04 bC
$T_{S12}$	1.95 aA	0.11 dC	0.01 bC
$T_{S19}$	1.96 abAB	0.10 abcABC	0.01 abABC
$T_{S25}$	1.81 cC	0.29 aA	0.02 aAB
$T_{W1}$	0.02 dD	0.06 cdBC	0.00 bBC
$T_{W6}$	0.06 dD	0.14 bcdABC	0.01 abABC
$T_{W12}$	0.10 dD	0.22 dC	0.02 bC
$T_{W19}$	0.02 dD	0.07 cdC	0.01 bC
$T_{W25}$	0.11 dD	0.18 cdC	0.01 bC

注:不同小写字母和大写字母分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平上差异显著。

Note: different lowercase letters and capital letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively.

### 2.3 砂田土壤理化性质分析

从图 1 可知,砂田的土壤 pH 值呈强碱性,除了

砂龄为 1 a 的砂田的混合层土壤 pH 值未达到 9 以外,其它的砂田剖面的土壤 pH 值范围在 9.05 ~ 9.83 之间。砂龄为 6 a 的砂田,因其使用了农家肥的时间很短,导致混合层土壤 pH 值降低。相关分析表明,混合层的土壤 pH 值与覆盖年限呈极显著正相关,相关系数为 0.988 ( $P < 0.01$ ),与土壤含水量呈极显著负相关,相关系数为  $-0.848$  ( $P < 0.01$ ),与土壤的全碳含量、全氮含量和 C/N 无相关性,随覆盖时间的增加,砂田混合层的土壤 pH 值逐渐增加。根系密集层的土壤 pH 值与覆盖时间呈极显著正相关,相关系数为 0.790 ( $P < 0.01$ ),与土壤含水量呈极显著负相关,相关系数为  $-0.665$  ( $P < 0.01$ ),

与土壤的全碳含量正相关,相关系数为 0.212 ( $P < 0.05$ )。除砂龄为 1 a 的砂田以外,根系密集层的土壤 pH 值也是随覆盖时间的增加,土壤 pH 值逐渐增加。砂龄为 1 a 的砂田土壤 pH 值较高是因为该砂田是已经使用多年的老砂田,它的功能已基本丧失,在重新覆盖沙子、施用农家肥后,休耕了一年,在这期间,该田的部分功能逐渐恢复。根系密集层的土壤 pH 值随覆盖年限的增加,先降低后升高,这可能与植物的根量与植物根系分泌物有关,这还需要试验做进一步的验证。淋溶层和钙积层的土壤 pH 值受外界的影响较小。农家肥对土壤 pH 值的影响大于覆盖时间对土壤 pH 值的影响。

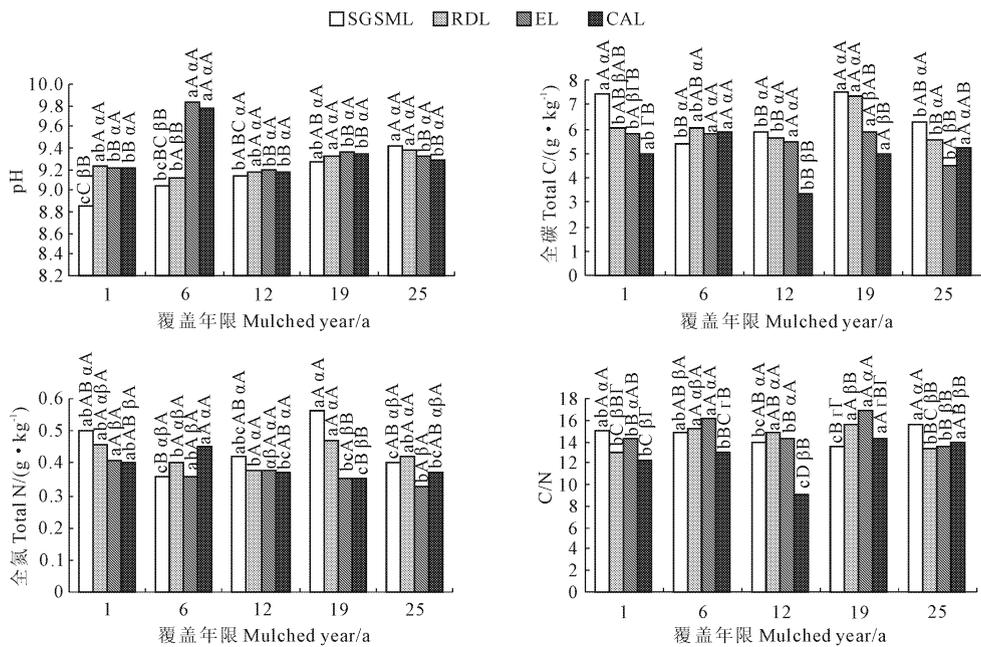


图 1 不同覆盖时间的砂田土壤化学性质比较

Fig.1 Compared with soil chemistry property in different mulched period of gravel - sand mulched field

砂田土壤施肥主要是在砾石覆盖层下深度为 20 cm 左右的土壤中,即在土壤的混合层中,受当地耕作习惯的影响,砂田铺成后不再施肥,仅在作物生长的位置穴施或条施少量化肥。深层土壤长年未受扰动,淋溶下来的氮肥也很少,因此根系密集层、淋溶层和钙积层的土壤有机质含量主要受植物根系的影响。在砂田的土壤剖面中,根系主要集中在根系密集层,约占总根量的 50% ~ 80%,淋溶层的根系数量次之,约占总根量的 15% ~ 30%,再次是混合层,根系数量约占总根量的 5% ~ 20%,钙积层的根系数量最少,约占总根量的 0 ~ 10%<sup>[7]</sup>。随土壤剖面深度的增加,根系数量下降,土壤全 C 和全 N 的含量下降。

土壤中有机质为微生物生长提供能源物质,土

壤中可被微生物利用营养的碳氮比(C/N)是表征土壤微生物生长是受 C 限制还是 N 限制的重要指标,影响微生物的群落结构。当  $C/N \geq 30:1$  时土壤微生物生长受氮源限制,当  $C/N \leq 20:1$  时土壤微生物生长受碳源限制,当 C/N 在 25:1 时对土壤微生物生长最有利。砂田土壤的 C/N 最高为 16.1:1,最低为 9.12:1,都远远低于 20:1,因此,砂田土壤微生物的生长主要受碳源的限制。C/N 在根系密集层与全碳含量正相关,相关系数为 0.611 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 土壤微生物数量与环境因子的关系

从表 5 可知,细菌数量与覆盖年限呈负相关,与土壤含水量呈极显著正相关;在混合层和淋溶层与土壤全碳的含量呈正相关,在其它土壤剖面中与全碳的含量无相关性;与全氮含量无相关性;与碳氮比

(C/N)也没有显著的相关关系;细菌数量在混合层和根系密集层中与土壤 pH 值呈极显著负相关,在淋溶层和钙积层中与土壤 pH 值呈极显著正相关。真菌数量除根系密集层外,也与覆盖时间呈负相关关系;在混合层、根系密集层和钙积层与土壤含水量呈极显著正相关,与淋溶层土壤含水量呈正相关;在淋溶层与全碳含量呈正相关;与土壤全氮的含量无相关性;与碳氮比(C/N)也没有显著的相关关系;在混合层,与土壤 pH 值呈极显著负相关,而在淋溶层和钙积层,则与土壤 pH 值呈显著正相关;在混合

层、淋溶层和钙积层,真菌的数量与细菌的数量呈极显著正相关。放线菌数量在混合层、根系密集层和淋溶层与覆盖时间呈极显著正相关;与土壤含水量呈负相关;在钙积层中与全碳的含量呈正相关;与土壤全氮的含量无相关性;与碳氮比(C/N)也没有显著的相关关系;在混合层和根系密集层中与土壤 pH 值呈极显著正相关;在根系密集层中与细菌的数量呈极显著负相关,在混合层中与真菌的数量呈显著负相关。

表5 砂田土壤微生物与环境因子的关系

Table 5 Relationship between gravel-sand mulched field soil microbe and environmental factors

土壤剖面 Soil profile	土壤微生物 Soil microbe	覆盖时间 Mulched year	水分 Moisture	全碳 Total C	全氮 Total N	C/N	pH	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actino- mycete
混合层 SGSML	细菌 Bacteria	-0.559*	0.711**	0.598*	0.267	0.244	-0.669**	1		
	真菌 Fungi	-0.607*	0.875**	0.276	0.194	-0.275	-0.675**	0.712**	1	
	放线菌 Actinomycete	0.785**	-0.669**	0.323	0.121	0.417	0.728**	-0.104	-0.602*	1
根系密集层 RDL	细菌 Bacteria	-0.861**	0.822**	-0.290	-0.083	-0.070	-0.856**	1		
	真菌 Fungi	0.573*	-0.217	-0.486	-0.238	-0.235	0.185	-0.095	1	
	放线菌 Actinomycete	0.744**	-0.554*	0.106	0.222	-0.381	0.958**	-0.695**	0.347	1
淋溶层 EL	细菌 Bacteria	-0.636*	0.799**	0.149	0.091	0.078	0.786**	1		
	真菌 Fungi	-0.282	0.540*	0.632*	0.039	0.524*	0.550*	0.734**	1	
	放线菌 Actinomycete	0.732**	-0.203	0.281	-0.238	0.401	0.292	-0.117	-0.191	1
钙积层 CAL	细菌 Bacteria	-0.685**	1.000**	0.150	0.354	-0.426	0.666**	1		
	真菌 Fungi	-0.291	0.879**	-0.018	0.260	-0.466	0.638*	0.879**	1	
	放线菌 Actinomycete	0.445	-0.093	0.588*	0.147	0.513	0.267	-0.093	-0.030	1

注:表中\*和\*\*分别表示在0.05水平和0.01水平上显著相关。

Note: \*, \*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

### 3 结 论

从土壤微生物组成来看,不同砂龄的砂田土壤中,三大微生物类群的组成仍以细菌为主,放线菌次之,真菌居于第三,可见细菌在土壤微生物组成中占绝对优势。一般而言,土壤微生物的分布与土壤深度有关,在本研究中,砂田土壤微生物的分布也表现出了这样的趋势,随土层剖面深度的增加,微生物数量减少。另外,受根系分布的影响,根系密集层的微生物数量高于只有少量根系分布的混合层。

土壤微生物组成中,细菌和真菌在砂田年龄约为6~12 a的砂田中最多,随砂田覆盖时间的增加,砂田逐渐老化,数量逐渐减少;而放线菌的数量反之,在砂龄约为6~12 a的砂田中最少,随砂田覆盖时间的增加而增加。砂龄为1 a的砂田情况比较特殊,由于其正处于土壤恢复期,故土壤微生物的数量介于6~12 a的中砂田和19~25 a的老砂田之间。

砂田真菌的数量随覆盖时间的增加而逐渐减少,因此能否将真菌作为研究砂田退化的指标,还有待于进一步研究。

随覆盖年份的增加,砂田的含水量呈先增加后降低的趋势,即在覆盖6~12 a间,土壤水分状况最佳<sup>[5]</sup>。土壤微生物的变化趋势与土壤含水量的变化趋势一致,说明土壤含水量是影响砂田微生物的主要因素。

在砂田中,土壤养分中的全C含量是限制微生物生长的因素之一。砂田土壤微生物数量与土壤pH值有很好的相关性。土壤含水量是影响土壤微生物区系的主要因素之一,砂田土壤的细菌和真菌数量与土壤含水量呈显著相关,而放线菌较适宜干燥的环境,其数量与土壤含水量呈负相关。在本研究中,土壤的碳氮含量都很低,受当地耕作习惯的影响,来自外源的养分也很少,因此土壤微生物与土壤含碳、氮量以及C/N的相关性较低。

## 参考文献:

- [1] 陈年来,刘东顺,王晓娟,等.甘肃砂田的研究与发展[J].中国瓜菜,2008,(2):29-31.
- [2] 逢 蕾.干旱半干旱地区砂田土壤微生物及酶活性研究[R].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2011.
- [3] 刘 畅,盛国成.1BFS-140型压砂田翻新施肥联合作业机的研发[J].农业机械,2014,(15):132-133.
- [4] Gan Yantai, Siddique K H M, Turner N C. Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, 118:429-476.
- [5] 逢 蕾,肖洪浪,路建龙,等.干旱半干旱地区砂田结构及水分特征[J].中国沙漠,2012,32(3):698-704.
- [6] 马忠明,杜少平,薛 亮.覆砂年限对砂田砂层质量、土壤水热状况及西瓜生长的影响[J].中国沙漠,2013,(5):1433-1439.
- [7] 杜少平,马忠明,薛 亮.不同覆膜方式对旱砂田西瓜土壤温度及产量和品质的影响[J].土壤通报,2011,(2):325-330.
- [8] 巴恩江.砂地老农向自然斗争的经验[J].中国农业科学,1951,(12):36-37.
- [9] 吕忠恕,陈邦瑜,田春如.甘肃砂田改良的一种方法[J].土壤学报,1958,6(1):65-69.
- [10] 傅亲民,王彩斌,刘生学.旱砂田宽膜覆盖籽瓜栽培技术土壤水温效应研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):97-103, 114.
- [11] 梁 权,杨继忠.甘肃砂田小麦育种研究[J].干旱地区农业研究,1995,13(1):41-44,13.
- [12] 刘东顺,杨万邦,赵晓琴,等.西北旱砂田西瓜抗旱性鉴定指标与方法初探[J].中国蔬菜,2008,(7):17-21.
- [13] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. Catena, 2003, 2: 105-127.
- [14] 王晓静,石 欣,赵银宝.宁夏不同压砂地龄土壤养分对西砂瓜品质的影响[J].北方园艺,2015,39(17):150-153.
- [15] 祝华明,王美琴,吴樟梅.施肥对红砂田有机质及土壤养分演变与作物产量的影响研究[J].土壤通报,1995,26(2):76-77.
- [16] 薛 亮,马忠明,杜少平.连作对砂田土壤质量及西瓜产量与品质的影响[J].甘肃农业科技,2011,(6):5-8.
- [17] 张小娟.兰州新区环境友好型土地利用与模式研究[D].长沙:湖南农业大学,2012.
- [18] 王 菲,王建宇,王幼奇.宁夏荒地压砂年限与土壤理化性质研究[J].北方园艺,2014,(13):181-185.
- [19] 赵亚慧,吴宏亮,康建宏,等.砂田轮作模式对土壤微生物区系的影响[J].安徽农业科学,2012,40(27):13273-13275,13278.
- [20] 逢 蕾,肖洪浪,谢忠奎,等.砂田不同覆盖方式对土壤微生物组成的影响[J].中国沙漠,2012,32(2):351-358.
- [21] 吴宏亮,康建宏,陈 阜,等.不同轮作模式对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(6):674-680.
- [22] 李 凯,吴宏亮,许 强,等.砂田轮作模式对土壤酶活性及微生物区系的影响[J].北方园艺,2014,38(18):185-189.
- [23] 张 娟.不同种植模式对砂田土壤微生物学性状及作物的影响[D].银川:宁夏大学,2014.
- [24] 李 凯.连作与轮作对砂田西瓜土壤微生物学性状及化学性状的影响[D].银川:宁夏大学,2015.
- [25] 逢 蕾,柴守玺,路建龙,等.干旱半干旱地区砂田土壤微生物区系研究[C]//中国作学会.中国作物学会 50 周年庆祝会暨 2011 年学术年会论文集.成都:中国作物学会,2011.
- [26] 逢 蕾,肖洪浪,路建龙,等.干旱半干旱地区砂田交界层土壤微生物区系研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):96-101.
- [27] 康恩祥,何宝林,刘晓伟,等.不同粒径砂砾石覆盖对砂田西瓜土壤微生物和酶活性的影响[J].长江蔬菜(学术版),2011,(24):52-54.
- [28] 赵亚慧,吴宏亮,康建宏,等.砂田不同轮作模式土壤理化及微生物学性状的研究[J].北方园艺,2012,36(18):190-193.
- [29] 谢忠奎.黄土高原荒漠草原区典型生态系统人工干预的水分效应研究[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2006.
- [30] 李 娟.长期不同施肥制度土壤微生物学特征及其季节变化[D].北京:中国农业科学院,2008.

## (上接第 102 页)

- [11] 李和平,李国振,田长彦,等.塔里木河孔雀河中下游地区棉花膜下滴灌节水技术研究[J].干旱地区农业研究,2006,23(3):82-84.
- [12] 高艳红,陈玉春,吕世华.灌溉方式对现代绿洲影响的数值模拟[J].中国沙漠,2003,23(1):90-94.
- [13] 王玉刚,肖笃宁,李 彦.三工河流域中上游绿洲土壤盐化的时空动态[J].中国沙漠,2008,28(3):478-484.
- [14] 兵团农二师三十二团史志编纂委员会.三十二团志[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1998.
- [15] 兵团农二师三十三团史志编纂委员会.三十三团志[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1997.
- [16] 史学斌,鲍忠文,杜虎林,等.塔里木河下游农田根灌与滴灌条件下土壤蒸发试验研究[J].节水灌溉,2012,6:17-21.
- [17] 李远华,段爱旺,蔡焕杰,等.SL13—2004灌溉试验规范[S].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [18] 张 丹,苏 涛,王鹏新.基于生物量的土壤水分动力学模型研究进展[J].干旱区研究,2011,28(2):235-241.
- [19] 胡顺军,宋郁东,周宏飞,等.塔里木盆地棉花水分利用效率试验研究[J].干旱地区农业研究,2002,20(3):66-70.
- [20] 陈 琳.黑土区水稻调亏灌溉模式的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [21] 陈佰鸿,曹建东,王利军,等.不同滴灌条件下土壤水分分布与运移规律[J].节水灌溉,2010,7:6-13.
- [22] 李 红.地下滴灌条件下土壤水分运动试验及数值模拟[D].武汉:武汉大学,2005.
- [23] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等.干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):127-133.