

DOI: 10.5846/stxb201211211644

靳正忠, 雷加强, 徐新文, 李生字. 沙土微生物多样性与土壤肥力质量的咸水滴灌效应. 生态学报, 2014, 34(13): 3720-3827.

Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y. Effect of the saline water irrigation on soil microbial diversity and fertility quality in the Tarim desert highway shelter forest land. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3720-3827.

沙土微生物多样性与土壤肥力质量的咸水滴灌效应

靳正忠*, 雷加强, 徐新文, 李生字

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:采用 Biolog-eco 法、PLFA 法和 PCR-DGGE 法, 对塔里木沙漠公路防护林中不同矿化度滴灌水作用下的土壤微生物多样性进行了研究, 利用土壤综合肥力指数 (IFI) 定量评价了土壤综合肥力质量, 分析了土壤肥力质量与土壤微生物的关系。结果表明: 滴灌水条件下, 土壤微生物的多样性 (碳源代谢、遗传基因和脂肪酸种类) 差异明显, 而高矿化度滴灌水条件下土壤微生物活性较低。IFI 值在不同矿化度灌水的林地间差异极显著, 在不同土层间差异显著; IFI 值随灌水矿化度升高而减小; 0—5 cm 表层土壤的 IFI 值明显小于其下层的土壤。土壤微生物代谢多样性和脂肪酸多样性指数与土壤 IFI 值存在乘幂函数关系, 而土壤微生物遗传多样性指数与 IFI 值有多项式关系, 对土壤肥力质量起着明显的正向贡献。

关键词: 风沙土; 咸水滴灌; 微生物多样性; 土壤质量

Effect of the saline water irrigation on soil microbial diversity and fertility quality in the Tarim desert highway shelter forest land

JIN Zhengzhong*, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, LI Shengyu

Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China

Abstract: Investigations of soil microbial diversities in the Tarim desert highway shelter forest lands drip-irrigated with saline water with methods of Biolog-eco, PLFA and PCR-DGGE, and evaluation of the soil fertility qualities using integrated fertility index (IFI) method, were conducted in this work; the relationship between soil microbial diversity and IFI values were also revealed. The main results are below: (1) Notable differences on diversities of carbon metabolism, genetic gene and fatty acid were found among the sandy soils drip-irrigated with different saline water ($F > F_{0.05}$); The water with higher mineralization reduced the soil microbial activity. (2) The notably significant differences of soil IFI values were found among the forest lands with different plantation times ($F > F_{0.01}$); Meanwhile, the vertical variation of IFI values at the different soil layers were also markable ($F > F_{0.05}$), the value at 0—5 cm was the least, and the IFI value decreased with increase of mineralization of the saline water. (3) There were power function relationships between the soil IFI values and the soil microbial diversities of carbon mechanism, fatty acid, but polynomial relationship existed in the IFI value and the soil microbial genetic gene. So, microbe population would contribute greatly to increase soil fertility in the Tarim desert highway shelter forest lands under saline water drip-irrigation.

Key Words: sandy soil; drip-irrigation with saline water; microbial diversity; soil quality

土壤肥力质量评价是对土壤内部物理、化学和生物学属性变化的总体描述^[1], 森林土壤肥力质量

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41030530, 41101248); 中国科学院西部博士专项资助 (XBBS200905)

收稿日期: 2012-11-21; 网络出版日期: 2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinzz@ms.xjb.ac.cn

评价对了解林地土壤质量状况有重要意义^[2],常用的土壤质量定量评价方法是土壤肥力综合指标评价法^[3]。土壤微生物量和代谢功能的变化可作为监测土壤质量短期和长期变化的敏感指标^[4]。高质量的土壤有稳定的微生物群落组成和良好的微生物活性^[5]。土壤微生物是表征土壤质量最有潜力的敏感性指标^[6],研究土壤质量演变中微生物多样性的响应是必要的。

“塔里木沙漠公路防护林生态工程”位于塔克拉玛干沙漠腹地,对塔里木沙漠公路的安全运行提供重要保障。然而,高温、高盐碱、多风沙等恶劣自然条件对防护林构成巨大威胁,在这种背景下,揭示咸水滴灌条件下防护林内风沙土肥力质量演变趋势以及微生物的响应规律,可为塔里木沙漠公路防护林生态工程的可持续发展提供理论指导。

有关干旱区土壤微生物与土壤质量方面的研究较多,研究认为微生物是沙漠生态系统林地土壤有效氮的重要来源^[7],人工植被建立后微生物推动着土壤肥力水平向较高方向发展^[8]。邵玉琴等^[9]、王志等^[10]、曹成有等^[11]分别在内蒙古库布齐沙漠油蒿地、毛乌素沙地南缘半流动沙地改良的麻黄地、科尔沁沙地流动沙丘种植小叶锦鸡儿林地中,对土壤微生物与土壤质量关系进行了研究,发现沙漠栽种固沙植物后,固沙植物根系产生的代谢产物为微生物提供了丰富营养,促进根际微生物发育;根际微生物代谢活动影响着植物和土壤间养分吸收传递,对风沙土形成有促进作用^[12]。

可见,前人围绕干旱区土壤微生物开展了大量研究,但多集中于干旱与半干旱区沙地免灌林地和淡水灌溉林地,关于极端干旱区的相关研究较少,而有关咸水滴灌条件下防护林风沙土肥力质量评价方面的研究更为鲜见。

因此,本研究以不同滴灌用水下林地风沙土为研究材料,通过探讨林地土体条件对微生物的影响,阐明防护林地土壤微生物与土壤肥力质量演变的互馈关系,最后揭示塔里木沙漠公路防护林地土壤微生物多样性对土壤质量演变的响应规律。

1 研究方法

1.1 试验设计与采样

塔克拉玛干沙漠腹地的自然环境极为严酷,气候极端干燥、地表水资源匮乏、地下水矿化度高、风沙活动强烈、土壤贫瘠。塔里木沙漠公路防护林位于塔克拉玛干沙漠腹地,于 2005 年建成,全长 446 km,林带宽度 72—78 m,总面积 312835 hm²,主栽树种有梭梭、沙拐枣和怪柳,株行距 1 m×1 m。

2012 年 7 月中旬,在塔里木沙漠公路防护林区,控制防护林其它条件(地貌类型、配置方式、灌水周期、滴头间距等)基本一致的前提下,设置林龄相同(2003 年定植)、滴灌水矿化度不同的防护林地样地(2003 年定植)(表 1)。分 0—5 cm (D₁)、5—15 cm (D₂)、15—30 cm (D₃)、30—50 cm (D₄) 4 个深度,采集防护林地土壤。

表 1 不同矿化度滴灌水林地简况

Table 1 The forest lands drip-irrigated with saline waters

样地编号 Plot number	水源井号 Well number	矿化度值/(g/L) Mineralization value	沙漠公路里程数 Mileage of the desert highway
S ₁	6	23.80	140 km+470 m
S ₂	13	18.10	168 km+800 m
S ₃	15	13.99	176 km+000 m
S ₄	16	8.90	184 km+500 m
S ₅	18	5.75	277 km+500 m
S ₆	50	2.58	318 km+100 m

1.2 采样方法

采样时紧贴防护林木根部^[13]。同一样地随机设置 5 个平行采样点(重复 5 次),不同样点的同层土样弃去植物残体,过 2 mm 筛后混和均匀,装入对

应编号的无菌样品袋,迅速放入-4℃车载冰箱并运回实验室。用于理化性质、生物量和酶活性测定的样品实验室风干;用于分析风沙土微生物多样性的样品在-20℃冰箱保存,四周内分析完毕。

1.3 测定方法

(1) 土壤微生物群落多样性

采用 BIOLOG-ECO 法:包括配制缓冲液、获得提取液、接种、培养、测定等步骤^[14]。

聚合链式反应-变性梯度凝胶电泳 (PCR-DGGE) 法:包括土壤 DNA 提取、PCR 扩增、变性梯度凝胶电泳、割胶回收、DGGE 图谱分析和 DNA 克隆及序列分析^[15]。

磷脂脂肪酸分析 (PLFA) 法:微生物 PLFA 分析包括脂肪酸提取、甲酯化和鉴定等步骤^[16]。

(2) 土壤理化性质

土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮用高氯酸-硫酸消化法,速效氮用碱解蒸馏法,全磷用硫酸-高氯酸-氢氟酸溶-钼锑抗比色法,有效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,全钾用硫酸-高氯酸-氢氟酸溶-火焰光度法,速效钾用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法。

土壤含水量用烘干法,容重用环刀法,比重用比重瓶法,总孔隙度由容重和比重计算得出^[17]。土壤颗粒组成用马尔文激光粒度仪。

(3) 土壤微生物生物量

土壤微生物生物量采用熏蒸浸提的方法。其中微生物量碳采用熏蒸提取-容量分析法,微生物量氮采用熏蒸提取-茚三酮比色法,微生物量磷采用熏蒸提取-全磷测定法^[18]。

(4) 土壤酶活性

土壤酶活性测定用常规化学分析方法,其中蛋白酶、纤维素酶、蔗糖酶、磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶比色法,过氧化氢酶采用滴定法^[19]。

1.4 数据分析方法

BIOLOG 代谢:孔的平均颜色变化率 AWCD = $\sum (C - R)/n$,对于不同类型培养基 n 值不同,这里 n 值为 31^[20]。

PLFA 图谱:利用 GC-MS 确定脂肪酸种类,借助 STATISTICA6.0 软件,对脂肪酸图谱进行方差分析。

DGGE 指纹图谱:利用 Bio-Rad 公司的凝胶成像系统 (Quantity One 4.4.1, Bio-Rad, USA),进行条带判读、迁移率、强度和面积计算。

多样性指数:采用 Shannon-Wiener 多样性指数公式,即 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln p_i$, $E_H = H/H_{\max} = H/\ln S$,土壤

微生物碳源代谢、脂肪酸和 DNA 片段多样性用多样性指数 (H)、丰度 (S) 和均匀度 (E_H) 表示。

土壤微生物的差异性:通过 DPS9.5 统计软件中的方差分析及其多重比较 (LSD 法),揭示不同林地土壤微生物多样性的差异显著性。

1.5 土壤肥力质量评价方法

土壤肥力是土壤物理、化学和生物性质的综合反映,本研究选择各肥力因子在 0—5 cm、5—15 cm、15—30 cm、30—50 cm (不同土层数据为 3 次重复的均值) 的测定值为评价指标的原始数据,采用主成分分析 (PCA) 的方法,建立了塔里木沙漠公路防护林地土壤肥力质量综合评价指标体系,土壤物理性质包括:容重、含水量和中值粒径;化学性质包括养分因子 (有机质、全量氮、磷、钾和速效氮、磷、钾) 和盐分因子 (pH 值、全盐和阳离子交换量 CEC),生物学性质包括微生物多样性指数 (碳源代谢、脂肪酸和 DNA 片段种类)、土壤酶活性 (过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶、纤维素酶、蔗糖酶和蛋白酶) 和微生物生物量 (生物量碳、氮和磷)。

土壤肥力质量综合指数 (IFI) 是土壤各指标因子的综合。由于土壤肥力因子变化具有连续性质,故各评价指标采用连续性质的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性 (表 1),确定隶属度函数分布的升降性。对于土壤容重、pH 值、电导率和全盐含量,采用降型分布函数,即:

$$F(X_{ij}) = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

而对土壤含水量、孔隙度及其它各项化学因子和生物因子,采用升型函数,即:

$$F(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (2)$$

式中, $F(X_{ij})$ 表示各肥力因子的隶属度值, X_{ij} 表示各肥力因子值, $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ 分别表示第 i 项肥力因子中的最大值和最小值。

由于土壤肥力质量的各个因子状况与重要性不同,通常用权重系数表示各因子的重要性程度。确定各单因素的权重是综合评价的关键问题,以往研究中多采用人为打分来确定,为了避免受人为主观影响,本研究用 SPSS 软件多元统计分析中的主成分分析法来计算各因子方差,通过计算各个公因子方差占公因子方差总和的百分数,将公因子方差转换为 0—1 的数值,作为单项评价指标的权重值 W_i 。

根据加乘法,对各个肥力指标值进行乘法合

成,计算不同防护林地土壤肥力的综合指标值 (IFI)^[21]: $IFI = \sum [W_i \times F(X_{ij})]$, 式中 W_i 表示各肥力因子的权重向量(表 3); $F(X_{ij})$ 表示各肥力因子的隶属度值。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物多样性

由表 2 看出,随着滴灌水矿化度的增大,土壤微生物的碳源代谢多样性指数、遗传基因多样性指数和脂肪酸多样性指数均有所减小。方差分析及多重比较后发现,遗传基因多样性指数 H 和丰富度 S 在不同滴灌水林地土壤之间的差异达到极显著水平

($F > F_{0.01}$); 表征碳源代谢的 AWCD 值、多样性指数 H 和丰富度指数 S 则在不同土壤间的差异达到显著水平($F > F_{0.05}$); 而脂肪酸多样性指数 H 、丰富度指数 S 和均匀度指数 E_H 以及遗传基因均匀度指数 E_H 在不同土壤间的差异未达到显著水平($F < F_{0.05}$)。可见,就滴灌水矿化度对土壤微生物的影响而言,对遗传基因多样性的影响最大,碳源代谢多样性次之,脂肪酸多样性最小;表征土壤微生物遗传基因和脂肪酸种类分布的均匀度指数受滴灌水矿化度的影响不明显。因此,高矿化度滴灌水作用下的防护林地土壤微生物的代谢活性较低,遗传基因和脂肪酸种类较为单一。

表 2 不同林地土壤微生物多样性指数的变化 ($n=5$, Mean \pm SE)

Table 2 Soil microbial diversities of the forest lands

样地 Plot	碳源代谢 Carbon mechanism			遗传基因 Genetic gene			脂肪酸 Fatty acid		
	AWCD	H	S	H	S	E_H	H	S	E_H
S ₁	0.66±0.07a	2.85±0.23a	21.75±2.84a	0.82±0.07A	12.34±1.61A	0.25±0.02a	1.30±0.35a	20.08±1.83a	0.33±0.05a
S ₂	0.86±0.11b	3.14±0.47b	25.75±3.16b	0.87±0.06A	12.96±1.80A	0.29±0.04a	1.47±0.38a	21.69±2.48a	0.41±0.08ab
S ₃	0.88±0.08b	3.20±0.35b	27.13±3.60c	1.00±0.06A	14.25±2.57A	0.39±0.04b	1.51±0.33ab	23.5±5.07ab	0.39±0.09a
S ₄	0.93±0.09bc	3.24±0.39b	27.88±2.82c	1.34±0.32B	20.25±3.18B	0.50±0.11c	1.65±0.60b	25.75±2.56b	0.55±0.15bc
S ₅	0.96±0.12c	3.26±0.44b	28.63±4.58c	1.78±0.54C	35.00±5.34C	0.48±0.10c	1.73±0.75bc	30.01±4.91c	0.58±0.11c
S ₆	1.03±0.13d	3.59±0.45c	29.13±4.22c	2.43±0.47D	41.75±5.9D	0.63±0.13d	1.86±0.92c	32±8.42c	0.57±0.14c
F	4.62*	3.96*	4.17*	9.72**	8.66**	2.80	0.97	1.18	0.75

显著性检验中采用最小显著性差异法, F 检验, $n=5$; F 值后面的符号“**”和“*”分别表示在 0.01 和 0.05 的显著水平上差异明显; 数值后的不同大、小字母分别表示两数值差异极显著和显著(其它图表相同)

2.2 土壤肥力质量评价

由图 1 可以看出,随着滴灌水矿化度的减小,土壤综合肥力质量表征指数 IFI 值明显升高 ($F =$

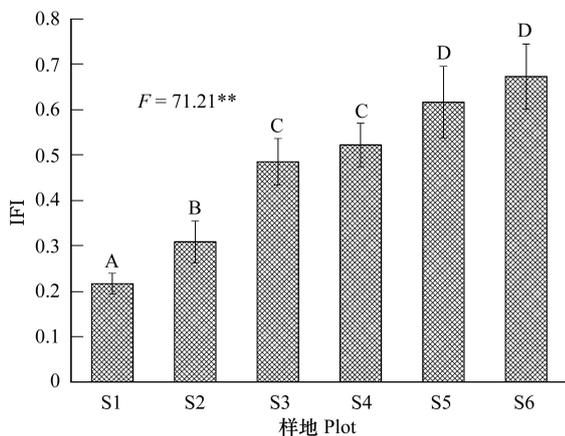


图 1 不同灌水条件下土壤肥力质量

Fig.1 Soil fertility qualities in different forest lands under different saline waters

$71.21 > F_{0.01}$)。滴灌水矿化度值为 23.8 g/L (S₁) 时,林地土壤综合肥力指数 IFI 值小于 0.25; 在 18.10 g/L (S₂) 时,IFI 值略大于 0.3; 当矿化度值为 13.99 g/L (S₃) 时,IFI 值接近 0.5; 当矿化度值为 5.75 g/L (S₅) 时,IFI 值大于 0.6; 而矿化度值为 2.58 g/L (S₆) 时,IFI 值超过 0.65,为 S₂ 时的 2 倍多。由此可见,高矿化度滴灌水不利于土壤肥力质量提高。

由图 2 可以看出,土壤肥力质量在不同土层间的垂直差异明显 ($F = 3.138 > F_{0.05}$)。各土层 IFI 值大小为 $D_3 > D_4 > D_2 > D_1$ 。表层 0—5 cm (D₁) 的 IFI 值最小,小于 0.3,与其它土层的差异在 0.01 的统计学显著水平上差异显著。而 5—15 cm (D₂)、15—30 cm (D₃) 和 30—50 cm (D₄) 的 IFI 值差异不大,介于 0.5—0.55 之间。

2.3 土壤微生物多样性与土壤肥力质量的关系

表征土壤微生物碳源代谢活性的 AWCD 值与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在幂函数关系,函数式

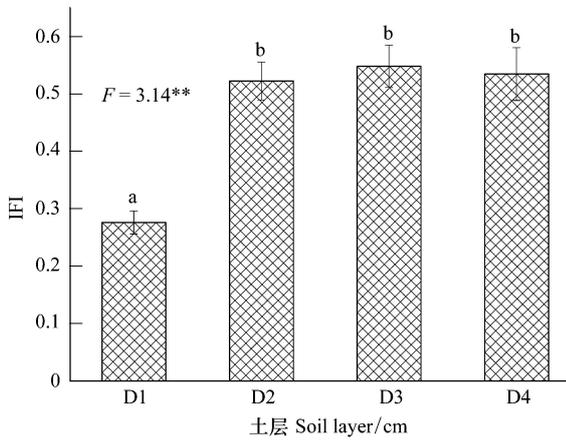


图2 不同土层土壤肥力质量

Fig.2 Soil fertility qualities in different soil layers

为 $Y = 0.56X^{0.66}$, 决定系数 R^2 值为 0.82 (图3)。即土壤碳源代谢活性升高, 土壤肥力指数以乘幂函数形式增大。

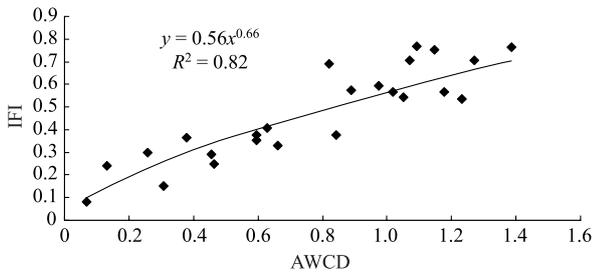


图3 土壤微生物代谢多样性与土壤肥力质量的关系

Fig.3 Relationship of soil microbial mechanism diversity and soil fertility quality

由图4可知, 土壤微生物脂肪酸多样性指数 H 与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在幂函数关系, 函数式为 $Y = 2 \times 10^{-7} X^{15.35}$, 决定系数 R^2 值为 0.889。表明土壤肥力指数 IFI 值随着土壤脂肪酸多样性指数 H 的增大而呈幂函数形式提高。

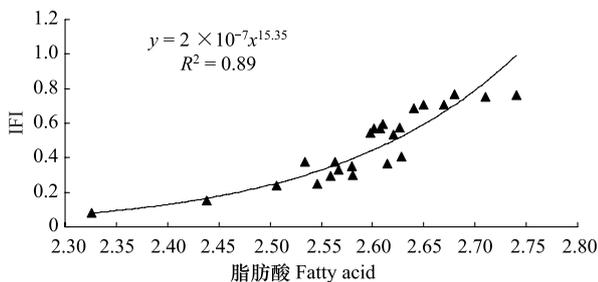


图4 土壤微生物脂肪酸多样性与土壤肥力质量的关系

Fig.4 Relationship of soil microbial fatty acid diversity and soil fertility quality

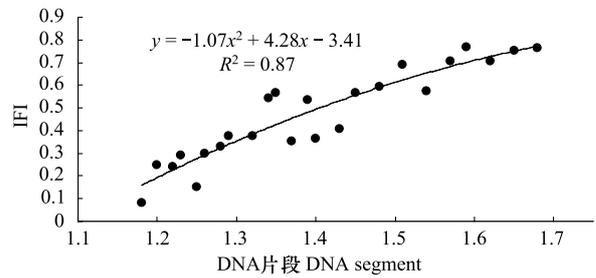


图5 土壤微生物遗传多样性与土壤肥力质量的关系

Fig.5 Relationship of soil microbial genetic diversity and soil fertility quality

由图5可知, 土壤微生物 DNA 片段多样性指数 H 与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在多项式关系, 函数式为 $Y = 1.07X^2 + 4.28X - 3.41$, 决定系数 R^2 值为 0.866。表明土壤肥力指数 IFI 值随着土壤 DNA 片段多样性指数 H 的增大而呈多项式函数的形式提高。

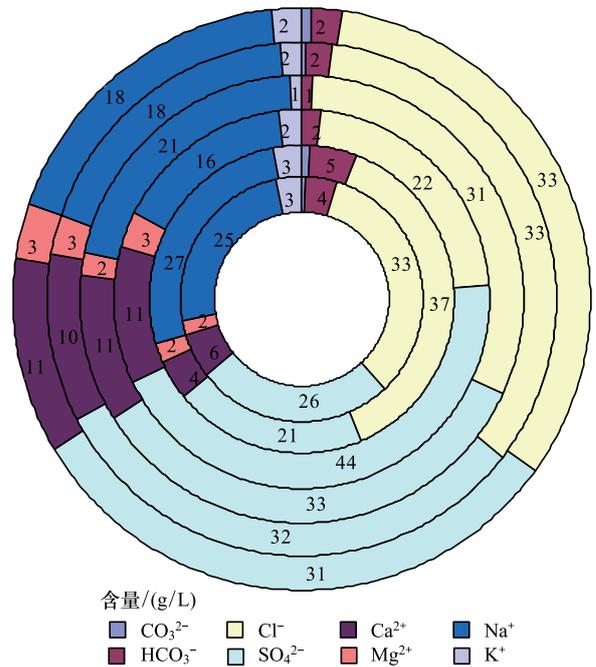


图6 不同矿化度滴灌水作用下土壤溶液中8大盐分离子含量

Fig.6 Contents of salt ions in the soil water solution under different saline water

图中数字表示对应盐分离子在全盐中的含量百分比; 圆环图中由内向外依次为土壤样品 S_6 、 S_5 、 S_4 、 S_3 、 S_2 、 S_1 ; 字母 A、B、C、D、E、F、G、H 分别代表 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+

2.4 土壤盐分组成特征

由图6可知, 塔里木沙漠公路防护林地土壤全盐中8大离子组成具有明显特征, 含量大小基本表

现为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{CO}_3^{2-}$, 其中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 3 种离子在全盐中的含量之和大于 80%, 而 CO_3^{2-} 在全盐中的含量百分比最小, 小于 1%。说明塔里木沙漠公路防护林地土壤中的盐分类型是以 Na^+ - Cl^- - SO_4^{2-} 类型为主。随滴灌水矿化度增大, 土壤全盐含量明显增大, 同时, 土壤中 SO_4^{2-} 离子增大, 而 Na^+ 和 Cl^- 含量有所降低。

3 讨论与结论

3.1 土壤微生物多样性的滴灌水矿化度效应

本研究中所采集的土壤样品均采自于防护林木非根际区, 因此植物对土壤盐分含量的影响可不考虑, 土壤盐分含量主要取决于滴灌水盐分含量, 与滴灌水矿化度有关^[22]。

本研究发现, 不同矿化度滴灌水作用下, 塔里木沙漠公路防护林地土壤微生物多样性差异显著, 表明滴灌水矿化度对土壤微生物的效应明显。滴灌水矿化度值大, 土壤溶液中盐分含量高, 土壤微生物所受盐胁迫程度大, 微生物种群多样性下降, 微生物活性降低。这是因为, 土壤盐分积累不仅会直接影响土壤微生物的活性, 还会通过改变土壤理化性质间接影响土壤微生物生存环境, 从而导致土壤微生物种群、数量及活性发生变化^[23]。土壤盐分积累会对土壤养分的有效性造成影响, 如 Ca^{2+} 的大量累积会增加对磷的固定, 导致磷的有效性降低^[24]; 而土壤养分是土壤微生物生存的物质基础, 土壤养分的丰富程度和成分决定了微生物的种类、数量和活性大小^[25]。因此, 滴灌水矿化度增大, 土壤通透性变差, 不利于微生物存活。由此可见, 在塔里木沙漠公路防护林地, 土壤微生物的功能多样性、遗传多样性和种类多样性具有明显的滴灌水矿化度效应。

3.2 咸水滴灌条件下土壤肥力演变规律

随着滴灌水矿化度的减小, 土壤综合肥力质量指数 IFI 值明显升高, 二者存在明显负相关关系。因此, 高矿化度滴灌水不利于土壤肥力质量提高。这是由于, 高矿化度滴灌水会使土壤积累大量盐分, 不仅造成土壤物理性质变差, 容重增大, 同时不利于土壤养分的正常周转和速效养分的形成, 最后导致土壤板结, 结构性变差, 养分水平低下, 生物活性不足, 土壤质量严重下降^[26]。

土壤肥力质量在不同土层间的垂直差异明显。

这是由于表层土盐分含量较高, 土壤板结现象突出; 同时, 表层土受沙尘暴影响, 发育原始的流动风沙土较多, 直接造成土壤肥力水平低于其下层土^[27]。总体来讲, 不同咸水灌溉下, 塔里木沙漠公路防护林地土壤肥力质量的空间垂直分异主要来源于表层土。

顾峰雪等^[28]指出, 在极端干旱的塔克拉玛干沙漠腹地, 利用咸水灌溉建立人工植被后促进了风沙土的成土发育, 使土壤内部发生了显著变化, 土壤物理、化学性质得到改善, 肥力提高, 这种变化是随着植被建立时间的延长而逐渐增大。王志等^[10]对毛乌素沙地南缘改良 4a 的麻黄地土壤理化性质作了研究后认为, 定植 4a 的麻黄地土壤养分含量与半流动沙地比大幅提高。曹成有等^[11]发现科尔沁沙地流动沙丘上建立人工小叶锦鸡儿后土壤理化性质改善, 随着林龄的增长土壤酶活性逐渐提高。可见, 与无灌溉条件类似, 在人工咸水滴灌条件下人工植被的恢复与建设有益土壤养分水平和生物活性的提高。可能是由于林木定植后, 高林龄的防护林地林木较为高大, 枝叶茂密, 相比幼龄林地, 减少了进入林地表层的客沙量, 同时林木根系逐渐发达, 根际分泌物对土壤生物繁殖有促进作用。

3.3 咸水滴灌条件下土壤微生物与土壤肥力质量的关系

微生物是土壤肥力形成的重要基础, 由于微生物的存在, 才使土壤中天然的与人工施入的营养物质由无效态向有效态转化成为可能。土壤生态系统的功能主要由土壤微生物机制所控制, 土壤微小变动会引起微生物多样性变化^[29]。土壤微生物群落变化可作为土壤肥力状况的重要生物学指标, 其变化有赖于土壤的肥力水平和环境状况^[30]。

在咸水滴灌作用下, 塔里木沙漠公路防护林地土壤微生物碳源代谢多样性与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在幂函数关系, 即土壤碳源代谢活性升高, 土壤肥力指数以乘幂函数形式增大。土壤微生物脂肪酸多样性与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在幂函数关系, 表明土壤肥力指数 IFI 值随着土壤脂肪酸多样性指数的增大而呈幂函数形式提高。土壤微生物 DNA 片段多样性指数与土壤综合肥力指数 IFI 值之间存在多项式关系, 表明土壤肥力指数 IFI 值随着土壤 DNA 片段多样性指数的增大而呈多项式函数的形式提高。

因此,矿化度值较低的滴灌水可避免土壤积盐、板结硬化,有利于土壤团粒结构形成和养分积累,微生物活性增强,对于风沙土壤养分的循环转化利用及其质量状况的改善有一定促进作用,可作为实践中灌溉水选择的参考依据。

References:

- [1] Anton M B, Christian M, Andrea R. Ecological classification and assessment concepts in soil protection. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 62: 211-229.
- [2] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek, D F. Defining soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1994.
- [3] Sun B, Zhou S L, Zhao Q J. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 2003, 115: 85-99.
- [4] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 801-808.
- [5] Giuliano B, Rosaria D, Vincenzo A, Manuela C, Lucia C, Rossana M, Gerardo P, Flora A. R, Rosalia S, Riccardo S, Maria A. R, Astolfo Z. Assessing soil quality under intensive cultivation and tree orchards in Southern Italy. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(3): 184-194.
- [6] Liu Z F, Fu B J, Liu G H, Zhu Y G. Soil quality: concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901-910.
- [7] Schaeffer S M, Billings S A, Evans R D. Responses of soil nitrogen dynamics in a Mojave desert ecosystem to manipulations in soil carbon and nitrogen availability. *Oecologia*, 2003, 134: 547-553.
- [8] Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y, Fan J L, Zhao S F. Characteristics of the soil microbial population in forest land irrigated with saline water in the desert area. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(2): 107-115.
- [9] Shao Y Q, Zhao J. Vertical distributions in number of soil microorganism in stabilized sand dune with *Artemisia ordosica* in the Hobq of Inter-mongol. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2000, 31(2): 198-200.
- [10] Wang Z, Peng R Y, Wang L, Liu L Y. Studies on soil properties of aeolian sandy land improvement and utilization in south edge of Musu desert. *Journal of Soil Water Conservation*, 2006, 20(2): 14-17.
- [11] Cao C Y, Jiang D M, Quan G J, Geng L, Cui Z B, Luo Y M. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin sandy land. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(6): 108-112.
- [12] Guo K, Dong X J, Liu Z M. Characteristics of soil moisture content on sand dunes in Mu Us sandy grassland: Why *Artemisia ordosica* declines old fixed sand dunes. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 275-279.
- [13] Liu J J, Fang S Z, Xie B D, Hao J J. Effects of bio-mulching on rhizosphere soil microbial population, enzyme activity and tree growth in poplar plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1204-1210.
- [14] Calbrix R, Laval K, Barray S. Analysis of the potential functional diversity of the bacterial community in soil: a reproducible procedure using sole carbon-source utilization profiles. *European Journal of Soil Biology*, 2005, 41(2): 11-20.
- [15] Duan X J, Min H. Diversity of microbial genes in paddy soil stressed by cadmium using DGGE. *Environmental Science*, 2004, 25(5): 122-126.
- [16] Robert P, Larkin C, Wayne H. Effect of swine and dairy manure amendments on microbial communities in three soils as influenced by environmental conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43: 51-61.
- [17] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Soil physical and chemical properties analysis. Shanghai: Science and Technology Press in Shanghai, 1978.
- [18] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil Microbial Biomass Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 55-88.
- [19] Guang S Y. Soil Enzyme and Its Methodology. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [20] Calbrix R, Laval K, Barray S. Analysis of the potential functional diversity of the bacterial community in soil: a reproducible procedure using sole-carbon source utilization profiles. *European Journal of Soil Biology*, 2005, 41: 11-20.
- [21] Zhang D H, Ye Z F. The effects of rotating plantation on the soil fertility of forest and the growth of stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 10-15.
- [22] Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y, Zhao S F. Effects of drip irrigation water with different salinity on soil microbes in Tarim desert highway forest. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(7): 183-187.
- [23] Zhang X J, Liu J H, Li L J, Duan Y K, Wang Z G, Su S H. Effects of different conservation tillage on soil microbes quantities and enzyme activities in dry cultivation. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3): 542-546.
- [24] Kirk J L, Beaudette L A, Hart M, Moutoglou P, Klironomos J N, Lee H, Trevors J T. Methods of studying soil microbial diversity. *Journal of Microbiological Methods*, 2004, 58, 169-188.
- [25] Yu H Y, Li T X. Evolution of salt accumulation greenhouse soil in Liaoning province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 80-83.
- [26] Wall D H, Virginia R A. Control on soil biodiversity: insights

- from extreme environments. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13: 137-150.
- [27] Lei J Q, Li S Y, Jin Z Z, Fan J L, Wang H F, Fan D D, Zhou H W, Gu F, Qiu Y Z, Xu Bo. Comprehensive eco-environmental effects of the shelter-forest ecological engineering along the Tarim Desert Highway. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(Supp. II): 190-202.
- [28] Gu F X, Pan X L, Pan B R, Wen Q K. Changing of eolian soil fertility in central Taklimakan Desert under impact of artificial vegetation. *Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1179-1188.
- [29] Zhang H B, Duan C Q, Qu L H. Culture independent methods for studies on microbial ecology of soils. 2003, 22(5): 131-136.
- [30] Wang Y, Han B, Shi Z Q, Shao G Q, Jiang X D, Ning T Y, Jiao N Y, Li Z J. Effects of conservation tillage on soil microbial characters and soil enzyme activities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 120-122.
- (3): 275-279.
- [13] 刘久俊, 方升佐, 谢宝东, 郝娟娟. 生物覆盖对杨树人工林根际土壤微生物、酶活性及林木生长的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1204-1210.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京:气象出版社, 2006. 55-88.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京:农业出版社, 1986.
- [21] 张鼎华, 叶章发. 杉木、马尾松轮作对林地土壤肥力和林木生长的影响. *林业科学*, 2001, 37(5):10-15.
- [22] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 李生宇, 赵思峰. 不同矿化度滴灌水对沙漠公路防护林土壤微生物的效应分析. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(7): 183-187.
- [23] 张星杰, 刘景辉, 李立军, 段宇坤, 王智功, 苏顺和. 保护性耕作方式下土壤养分、微生物及酶活性研究. *土壤通报*, 2009, 40(3):542-546.
- [25] 余海英, 李廷轩. 辽宁设施栽培土壤盐分累积变化规律研究. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 80-83.
- [27] 雷加强, 李生宇, 靳正忠, 范敬龙, 王海峰, 范冬冬, 周宏伟, 谷峰, 邱永志, 许波. 塔里木沙漠公路防护林生态工程的综合生态环境效应. *科学通报*, 2008, 53(Supp. II): 190-202.
- [28] 顾峰雪, 潘晓玲, 潘伯荣, 文启凯. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被土壤肥力变化. *生态学报*, 2002, 22(8): 1179-1188.
- [29] 张汉波, 段吕群, 屈良鹤. 非培养方法在土壤微生物生态学中的应用. *生态学杂志*, 2003, 22(5):131-136.
- [30] 王芸, 韩宾, 史忠强, 邵国庆, 江晓东, 宁堂原, 焦念元, 李增嘉. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4):120-122.
- 参考文献:**
- [6] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-910.
- [9] 邵玉琴, 赵吉. 内蒙古库布齐沙带东段油蒿固定沙丘土壤微生物数量的垂直分布研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2000, 31(2): 198-200.
- [10] 王志, 彭茹燕, 王蕾, 刘连友. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 14-17.
- [11] 曹成有, 蒋德明, 全贵静, 耿莉, 崔振波, 骆永明. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 108-112.
- [12] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点——兼论老固定沙丘上油蒿衰退原因. *植物生态学报*, 2000, 24