

沙漠腹地咸水滴灌林地土壤养分、微生物量和酶活性的典型相关关系*

靳正忠^{1, 2} 雷加强¹ 徐新文¹ 李生字¹ 范敬龙¹ 赵思峰³ 周宏伟⁴
谷峰⁴ 邱永志⁴ 许波⁴

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

(4 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000)

摘要 鉴于塔里木沙漠公路防护林所处环境条件和管理模式的特殊性及在南疆社会、经济发展中的重要性, 试验选择四种不同矿化度 (2.58、5.75、8.90、13.99 g L⁻¹) 水滴灌的防护林地, 采集 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 四层土样为研究材料, 主要采用典型相关分析法, 对防护林地土壤养分因子、微生物量因子和酶活性因子中每两组变量间的相关性进行了分析。结果表明: 三组变量土壤养分、微生物量、酶活性中, 每两者之间均有显著的典型相关变量存在, 而且基本能够代表变量总体相关信息; 土壤养分与土壤微生物量的相关性主要由养分中的全氮、速效氮、有机质、全磷含量和土壤微生物量中的放线菌数量、微生物量碳和微生物量磷引起的; 土壤养分与土壤酶活性的相关性主要由土壤有机碳、速效钾含量与土壤过氧化氢酶、磷酸酶活性的相关性引起; 土壤微生物量与土壤酶活性的相关性主要由土壤微生物量磷、微生物量氮与土壤蔗糖酶、磷酸酶活性的相关性引起; 滴灌水矿化度对塔里木沙漠公路防护林地土壤养分和微生物量的效应明显, 高矿化度水不利于土壤养分积累和微生物生存。

关键词 沙漠公路; 防护林地; 土壤养分; 土壤微生物量; 土壤酶活性; 典型相关

中图分类号 S714 **文献标识码** A

森林生态系统中几乎所有的有机物质和生物元素循环均是在微生物群落及其分泌的酶的作用下进行的, 土壤生态系统的微生物群落的种类、数量、微生物量和酶活性强烈影响着生态系统的养分循环。

典范相关分析是研究两组变量之间相关系数的一种统计方法, 可以计算变量组间相互独立的相关系数, 同时建立相应的线性组合方程, 能够揭示两组变量间的线性关系, 深刻反映两组变量间的相关情况^[1], 在植物群落研究中已广泛应用^[2]。

塔里木沙漠公路南北贯通塔克拉玛干沙漠, 属世界上穿越流动沙漠最长的等级公路, 是南疆油气开发、交通和经济的命脉^[3]。然而公路沿线强烈的风动力条件、流动性的地表特征和松散的地层结构构成的风沙环境对公路运行造成严重危害^[4]。所以, 为确保沙漠公路的畅通, 沿线建成了沙漠公路防护林带。然而, 塔克拉玛干沙漠腹地缺少人工植

被生长所需的地上水资源, 只能采用就近抽取地下水咸水灌溉林地, 但沙漠公路沿线不同地段地下水矿化度不同, 可能造成林地土壤养分、微生物量和酶活性存在变化规律, 该方面的研究未见报道。

为此, 本文选择不同矿化度滴灌水作用下的塔里木沙漠公路防护林地土壤为研究材料, 运用典范相关分析法揭示土壤养分、微生物量和酶活性三组典型变量的关系, 以阐明以风沙土为主的沙漠公路防护林地土壤养分与生物因子的互变关系及对滴灌水矿化度的响应, 为干旱区生态恢复与重建提供有益资料。

1 研究区概况

1.1 研究区自然环境特征

采样点在塔克拉玛干沙漠腹地地下水矿化度差异明显的几个沙漠公路防护林地 (表 1), 这里自

* 中国科学院重要方向项目 (KZCX3-SW-342)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (200821163)、新疆维吾尔自治区重大科技专项 (200733144-3) 和国家自然科学基金项目 (4070101Q、40701098) 资助

作者简介: 靳正忠 (1979-), 男, 甘肃环县人, 博士研究生, 主要从事土壤微生物生态学研究, 发表论文 10 余篇

收稿日期: 2007-09-30; 收到修改稿日期: 2008-06-22

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。沙漠公路沿线沙丘形态复杂多样,既有高度达 50 m 以上的纵向复合沙垄,也有高度不足 1 m 的新月形沙丘,次级沙丘覆盖率达 60% 以上,分布于高大复合沙垄间的小沙丘年移动量在 15 m 以上;沙漠公路沿线土壤以风沙土为主,自然植被贫乏,盖度极低^[5]。

表 1 水源井概况

Table 1 Basic conditions of water source wells

井号 Well number	沙漠公路里程数 Mileage of the desert highway	井深 Depth of water well (m)	矿化度 Mineralization degree (g L ⁻¹)
15	176 km + 000 m	80	2.58
16	179 km + 800 m	80	5.75
18	189 km + 200 m	80	8.90
50	318 km + 100 m	120	13.99

1.2 沙漠公路防护林的建设管理模式

以耐干旱、耐盐碱的沙拐枣、柽柳、梭梭三种灌木作为防护林建设树种,配置方式为行间混交,株行距 1 m × 1 m,林带宽度 72~78 m,灌溉方式为滴灌,灌溉周期为 10 d,灌水定额 450 m³ hm⁻²,滴头间距 1.5 m,滴灌用水为矿化度约 2~30 g L⁻¹的地下水, pH 8.13,施肥在 6~8 月进行,每月一次,以浴水施肥为主,施肥量控制在 10~15 g 株⁻¹。

1.3 数据分析方法

借助于 DPS 统计分析软件,在简单相关分析的基础上,选择典型相关分析法,用以找出土壤养分、微生物量和酶活性每两类指标的线性组合函数^[6,7]:

$$U = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_pX_p \quad (1)$$

$$V = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \dots + b_qY_q \quad (2)$$

其中 a_1, a_2, \dots, a_p 和 b_1, b_2, \dots, b_q 为待定系数,使 U 和 V 有最大相关系数,即“典范相关系数 (Canonical correlation coefficient)”,度量两个线性函数间的联系强度,揭示了“两组”指标间的内部联系,两组指标可不同。因此,这里土壤养分指标为第一类变量,包括有机碳含量 (X_1)、有机质含量 (X_2)、全氮含量 (X_3)、全磷含量 (X_4)、全钾含量 (X_5)、速效氮含量 (X_6)、有效磷含量 (X_7) 和速效钾含量 (X_8); 土壤微生物量指标为第二类变量,包括细菌数量 (Y_1)、放线菌数量 (Y_2)、真菌数量 (Y_3)、微生物量碳 (Y_4)、微生物量氮 (Y_5) 和微生物量磷 (Y_6); 土壤酶活性指标为第三类变量,包括过氧化氢酶活性 (Z_1)、磷酸酶活性 (Z_2)、脲酶活性 (Z_3)、纤维素酶活性 (Z_4)、蔗糖酶活性 (Z_5) 和蛋白酶活性 (Z_6)。

2 研究方法

2.1 采样方法

在立地条件、树龄大小、周围树种类型、灌水时间、距离滴头位置、植株间距等条件基本一致的情况下,选取滴灌水矿化度不同的防护林地作为采样点,采样点对应的水源井的基本情况见表 1。于各林地中间平坦地随机选取受干扰很小的 5 个点,用直径为 5 cm 的钢质土钻取出 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 深度范围内的土样,弃去植物残体过 2 mm 筛,各样地不同取样点的同层土样混合均匀后立即装入对应编号的样品袋密封,用于养分、酶活性测定的室内风干,分析土壤微生物量的置于 4℃ 的冰箱保存。

2.2 指标测定与分析方法

土壤微生物数量测定采用稀释平板法^[8],其中细菌用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌用高氏一号培养基,真菌用加入孟加拉红的马铃薯葡萄糖培养基。

土壤养分测定采用常规方法^[9],其中有机碳和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⁻¹ 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 NH₄OA c 浸提-火焰光度法。

土壤酶活性测定采用常规方法^[10],蛋白酶 (甘氨酸 μg g⁻¹ 干土)、纤维素酶 (葡萄糖 mg 10 g⁻¹ 干土)、蔗糖酶 (葡萄糖 mg g⁻¹ 干土)、磷酸酶 (酚 mg 100 g⁻¹ 干土)、脲酶 (NH₃-N mg μg⁻¹ 干土) 和过氧化氢酶 (KMnO₄ ml g⁻¹ 干土) 分别采用茚三酮、3,5-二硝基水杨酸、3-氨基-5-硝基水杨酸、4-氨基安替比林-铁氰化钾、苯酚钠-次氯酸钠比色法;过氧化氢酶高锰酸钾滴定法。

土壤微生物生物量均采用熏蒸浸提的方法^[11],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。

3 结果与分析

3.1 土壤养分与土壤微生物量的典型相关关系

从表 2 知,在养分和微生物量的相关性矩阵中,真菌数量与有机质含量有最大的正相关,相关系数

为 0.93 放线菌数量与速效氮、有效磷和全氮含量有较大的正相关, 相关系数分别为 0.90、0.87 和 0.83 可见放线菌对氮素和磷素活化作用较明显; 另外, 微生物量碳、微生物量氮和微生物量磷分别与有机质含量、全氮含量和全磷含量有较显著的正相关, 表明有机质、全氮和全磷含量的提高会加速微生物量的积累。总体而言, 在微生物量因子中, 微生物量碳和放线菌数量与 8 种养分因子的相关系数 r 绝对值之和较大, 其相关性最密切, 但和其余微生物量因子的差异并不明显; 而在养分因子中, 全氮和速效氮与 6 种微生物量因子的相关系数 r 之和较大, 其相关性密切, 但与有机质、全磷、速效钾、有效磷含量的这种相关性大小差异很小, 与有机碳含量差异明显。说明在微生物量因子中, 未看到影响养分的主导因子; 而各养分因子对微生物量的影响不同, 氮素作用突出。

由表 3 知, 养分与微生物量的 6 个典型相关系数中, 前两个经卡方检验后达到了极显著, 前两个

相关系数包含的相关信息占两组变量间总相关信息的 96.64%。因此, 分析它们典型变量的系数可反映两组变量间的主要相关信息。分析第一对典型变量的构成 (表 4) 可知, U_1 中以 X_3 (全氮) 和 X_6 (速效氮) 的系数较大, V_1 中 Y_4 (微生物量碳) 的系数明显大于其他微生物因子, 说明第一对典型变量的相关主要是由全氮、速效氮含量与微生物量碳的相关性引起的。 U_2 中以 X_2 (有机质) 和 X_4 (全磷) 的系数较大, V_2 中以 Y_2 (放线菌数量) 和 Y_6 (微生物量磷) 的系数较大, 说明第二对典型变量的相关主要是由有机质、全磷含量与放线菌数量和微生物量磷的相关性引起的。

综合前两对典型变量的分析结果看出, 塔里木沙漠公路防护林地养分和微生物量两组变量间的相关主要是由养分中的全氮、速效氮、有机质、全磷含量和微生物量中的放线菌数量、微生物量碳和微生物量磷引起的, 这与简单相关分析结果基本一致 (表 2)。

表 2 养分因子与微生物量因子间的简单相关

Table 2 Simple correlation between nutrient factors and microbial biomass factors

	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi	微生物量碳 Microbial biomass C	微生物量氮 Microbial biomass N	微生物量磷 Microbial biomass P	r 绝对值之和 Sum of absolute value for r
有机碳 Organic C	0.150	-0.155	0.540	0.180	0.317	-0.005	1.346
有机质 Organic matter	0.498	0.571	0.930	0.833	0.825	0.732	4.389
全氮 Total N	0.649	0.828	0.727	0.778	0.840	0.805	4.628
全磷 Total P	0.538	0.794	0.613	0.801	0.690	0.848	4.285
全钾 Total K	0.655	0.780	0.363	0.570	0.303	0.592	3.262
速效氮 Available N	0.686	0.897	0.631	0.777	0.595	0.861	4.447
有效磷 Available P	0.639	0.867	0.400	0.772	0.503	0.770	3.951
速效钾 Available K	0.683	0.720	0.607	0.670	0.696	0.645	4.020
r 绝对值之和 Sum of absolute value for r	4.498	5.611	4.811	5.380	4.769	5.257	

表 3 养分因子与微生物量因子典型相关系数的卡方检验

Table 3 Chi square test of canonical correlation coefficient between nutrient factors and microbial biomass factors

典型向量 Typical vector	典型相关系数 λ_i Canonical correlation coefficient λ_i	特征根 λ_i^2 Eigenvalue λ_i^2	卡方值 χ^2 Chi square value χ^2	自由度 Freedom degree	显著水平 α Significant level α	累积贡献率 $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$ Accumulative contribution ratio $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$
1	1.000	1.000	126.518	48	0.000	0.789
2	0.996	0.992	60.052	35	0.005	0.178
3	0.947	0.896	24.047	24	0.459	0.029
4	0.806	0.649	9.487	15	0.851	0.004
5	0.710	0.504	3.711	8	0.882	0.001
6	0.549	0.302	0.897	3	0.826	0.000

注: 卡方检验的临界值为 $\chi^2_{0.05}$, 下同 Note: The critical value of chi square test is $\chi^2_{0.05}$. The same below

表 4 养分与微生物量的前两对典型变量的构成

Table 4 Composition of the first two pair canonical variables for nutrient and microbial biomass

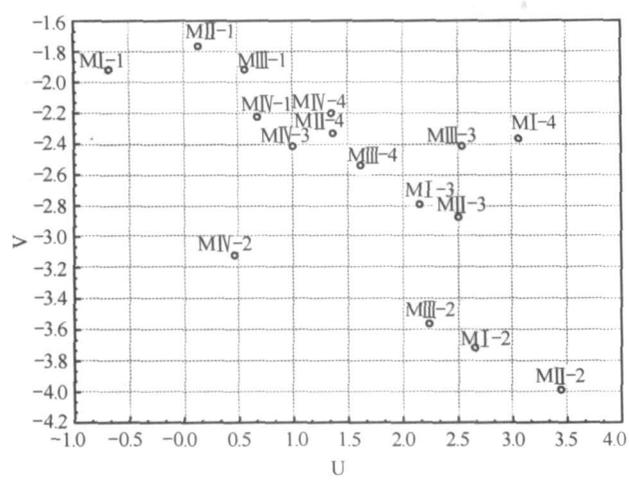
$$U_1 = 0.081X_1 - 0.360X_2 - 0.540X_3 + 0.398X_4 + 0.034X_5 + 0.522X_6 + 0.356X_7 + 0.112X_8$$

$$V_1 = 0.222Y_1 + 0.399Y_2 + 0.367Y_3 - 0.643Y_4 - 0.297Y_5 + 0.395Y_6$$

$$U_2 = 0.270X_1 + 0.578X_2 + 0.484X_3 - 0.534X_4 + 0.149X_5 + 0.215X_6 + 0.040X_7 - 0.062X_8$$

$$V_2 = -0.262Y_1 + 0.585Y_2 - 0.474Y_3 + 0.500Y_4 + 0.334Y_5 + 0.056Y_6$$

由图 1可知,不同矿化度滴灌水作用下的不同土层养分和酶活性在土壤养分综合因子 U 和土壤酶活性综合因子 V 中的表现值大小呈现一定的规律,随着滴灌水矿化度的增大, U 值有减小的趋势,而 V 值在不同矿化度间无明显变化规律。就不同土层而言, 5~ 15 cm(M II) 有较大的 U 值,而 0~ 5 cm(M I) 的 V 值最大。



图中序号 MI、MII、MIII、MIV 表示滴灌水矿化度分别为 2.58、5.75、8.90、13.99 g L⁻¹ 的防护林土壤,数字 1、2、3、4 分别表示 0~5、5~15、15~30、30~50 cm 的土层。下同 The ordinal numbers of MI, MII, MIII and MIV represent the soils with the mineralization values of irrigation water of forest land 2.58, 5.75, 8.90 and 13.99 g L⁻¹ respectively. The numbers of 1, 2, 3 and 4 represent the soil layers 0-5, 5-15, 15-30 and 30-50 cm.

3.2 土壤微生物量与土壤酶活性的典型相关关系

从表 5 知,在微生物量因子和酶活性因子的相关性矩阵中,磷酸酶活性与放线菌数量和微生物量碳、蔗糖酶活性与微生物量磷有较大的正相关,相关系数分别为 0.827、0.823 和 0.829,而过氧化氢酶活性与微生物量氮、纤维素酶活性与微生物量氮和微生物量磷、蔗糖酶活性与微生物量氮间也有明显的正相关。总体来看,在微生物量因子中,微生物量磷和微生物量氮与 6 种土壤酶活性因子的相关系数 r 绝对值之和较大,其相关性最为密切,但与其微生物量因子的差异较明显;而在酶活性因子中,磷酸酶活性与 6 种微生物量因子的相关系数 r 之和最大,其相关性密切,与其酶活性因子的差异明显,蛋白酶活性与微生物量的关系不大,而各养分因子中的微生物量磷和氮对于酶活性的作用较为突出。

由表 6 知,微生物量与土壤酶活性的 6 个典型相关系数中,第一个经卡方检验后达到了极显著,第一个包含的相关信息占两组变量间总相关信息的 86.26%。因此,对第一对典型变量的系数进行分析可反映两组变量间的主要相关信息。分析该对典型变量的构成(表 7)可知, U 中以 Y₆(微生物量磷)和 Y₅(微生物量氮)的系数较大于其他养分因子, V 中以 Z₂(磷酸酶活性)和 Z₅(蔗糖酶活性)的系数较大于其他酶活性因子,说明第一对典型变量的相关主要是由微生物量磷、微生物量氮与蔗糖酶、磷酸酶活性的相关性引起的,这与简单相关分析结果基本一致(表 5)。

表 5 微生物量因子与酶活性因子间的简单相关

Table 5 Simple correlation between microbe quantity factors and activity of enzyme factors

	过氧化氢酶 Catalase	磷酸酶 Phosphatase	脲酶 U rease	纤维素酶 Celhlase	蔗糖酶 Invertase	蛋白酶 Protease	r 绝对值之和 Sum of absolute value for r
细菌 Bacteria	0.335	0.523	-0.102	0.247	0.446	0.433	2.086
放线菌 Actinomycetes	0.552	0.827	-0.255	0.563	0.651	0.104	2.953
真菌 Fungi	0.609	0.702	-0.213	0.541	0.554	0.119	2.738
微生物量碳 Microbial biomass C	0.378	0.823	-0.363	0.485	0.588	0.001	2.637
微生物量氮 Microbial biomass N	0.744	0.667	-0.196	0.742	0.796	0.217	3.362
微生物量磷 Microbial biomass P	0.708	0.776	-0.278	0.799	0.829	0.036	3.426
r 绝对值之和 Sum of Absolute value for r	3.328	4.318	1.407	3.376	3.863	0.910	

表 6 微生物量因子与酶活性因子典型相关系数的卡方检验

Table 6 Chi square test of canonical correlation coefficient between microbial biomass and enzyme activity

典型向量 Typical vector	典型相关系数 λ_i Canonical correlation coefficient λ_i	特征根 λ_i^2 Eigenvalue λ_i^2	卡方值 χ^2 Chi square value χ^2	自由度 Freedom degree	显著水平 α Significant level α	累积贡献率 $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$ Accumulative contribution ratio $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$
1	0.994 2	0.988 4	66 583.6	36	0.001 4	0.862 6
2	0.939 5	0.882 7	25 270.4	25	0.447 3	0.124 3
3	0.760 0	0.577 6	7 974.3	16	0.949 6	0.012 3
4	0.530 8	0.281 7	2 007.2	9	0.991 4	0.000 8
5	0.181 5	0.032 9	0 153.0	4	0.997 2	0.000 0
6	0.022 5	0.000 5	0 001.8	1	0.966 3	0.000 0

表 7 微生物量与酶活性的第一对典型变量的构成

Table 7 Composition of the first pair of canonical variables form microbial biomass and enzyme activity

$$U = -0.238Y_1 - 0.187Y_2 + 0.066Y_3 - 0.398Y_4 + 0.505Y_5 + 0.701Y_6$$

$$V = -0.338Z_1 + 0.745Z_2 - 0.067Z_3 - 0.103Z_4 + 0.556Z_5 - 0.083Z_6$$

由微生物量与酶活性的典型变量排序图可知, 滴灌水矿化度越小, 微生物量综合因子 U 值有增大趋势, 而酶活性综合因子 V 值无明显的变化规律。总体上看, 微生物量综合因子 U 和土壤酶活性综合因子 V 在 5~ 15 cm 土层有较大值, 15~ 30 cm 土层次之, 而在 0~ 5 cm 表层其值明显偏小。

碳含量均有较大的正相关。总体而言, 各养分因子与微生物量因子均存在正相关关系, 在酶活性因子中, 与养分因子相关系数 r 绝对值之和的大小顺序为: 过氧化氢酶 > 磷酸酶 > 纤维素酶 > 蔗糖酶 > 脲酶 > 蛋白酶, 前四种酶活性差异不大, 明显大于后两种酶活性; 而在养分因子中, 有机碳含量与各酶活性因子的相关系数绝对值之和最大, 但与其余养分因子的差异并不明显。可见, 有机碳含量提高对土壤酶活性全面增强有促进作用, 过氧化氢酶活性大小取决于氮素含量。

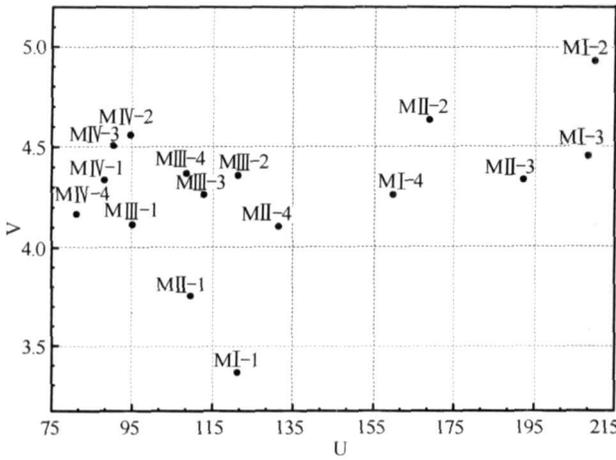


图 2 土壤微生物量因子与土壤酶活性因子的典型变量排序
Fig. 2 Canonical variable ordination of microbial biomass and soil enzyme activity

3.3 土壤养分与土壤酶活性的典型相关关系

从表 8 可知, 在养分因子和酶活性因子的相关性矩阵中, 过氧化氢酶活性与全氮含量有最大的正相关系数 (0.810), 与速效氮也有较大的正相关系数 (0.740); 磷酸酶活性与有机碳含量、纤维素酶活性与有机碳和有机质含量以及蔗糖酶活性与有机

由表 9 知, 养分与酶活性的 6 个典型相关系数中, 第一个卡方检验后达到极显著, 包含的相关信息占两组变量总相关信息 74.82%。因此, 对第一对典型变量系数分析可基本反映这两组变量间的主要相关信息。分析该对典型变量的构成 (表 10) 可知, U 中以 X_1 (有机碳含量) 和 X_8 (速效钾含量) 的系数大于其他养分因子, V 中以 Z_1 (过氧化氢酶活性) 和 Z_2 (磷酸酶活性) 的系数大于其他酶活性因子, 说明第一对典型变量的相关主要是由有机碳、速效钾含量与过氧化氢酶、磷酸酶活性的相关性引起的, 这与简单相关分析结果一致 (表 8)。

由图 3 可知, 随着滴灌水矿化度的增大, U_1 和 V_1 呈现有规律的减小, 而 U_2 和 V_2 呈有规律的增加, 在图 3A 左下方集结, 在图 3B 右上方集结, 考虑两图坐标值的正负, U_1 与 U_2 , V_1 与 V_2 的变化趋势是相反的, 即随着滴灌水矿化度的增大, 综合养分因子 U_1 和综合酶活性因子有减小趋势, 而 U_2 则有增大趋

表 8 养分因子酶活性因子间的简单相关

Table 8 Simple correlation between nutrient factors and activity of enzyme factors

	过氧化氢酶 Catalase	磷酸酶 Phosphatase	脲酶 Urease	纤维素酶 Cellulase	蔗糖酶 Invertase	蛋白酶 Protease	r 绝对值之和 Sum of absolute value for r
有机碳 Organic C	0.678	0.722	0.236	0.745	0.649	0.063	3.092
有机质 Organic matter	0.358	0.554	0.342	0.847	0.564	0.047	2.712
全氮 TotalN	0.809	0.590	0.226	0.608	0.472	0.035	2.740
全磷 TotalP	0.571	0.562	0.242	0.342	0.525	0.540	2.784
全钾 TotalK	0.438	0.352	0.061	0.297	0.471	0.408	2.027
速效氮 Available N	0.738	0.605	0.005	0.482	0.576	0.323	2.730
有效磷 Available P	0.391	0.384	0.472	0.339	0.142	0.440	2.167
速效钾 Available K	0.682	0.623	0.391	0.682	0.609	0.012	3.000
r 绝对值之和 Sum of absolute value for r	4.665	4.392	1.975	4.342	4.008	1.869	

表 9 养分因子酶活性因子典型相关系数的卡方检验

Table 9 Chi-square test of Canonical correlation coefficient between soil nutrients and activities of soil enzymes

典型向量 Typical vector	典型相关系数 λ_i Canonical correlation coefficient λ_i	特征根 λ_i^2 Eigenvalue λ_i^2	卡方值 χ^2 Chi square value χ^2	自由度 Freedom degree	显著水平 α Significant level α	累积贡献率 $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$ Accumulative contribution ratio $\lambda_i / \sum \lambda_i^2$
1	0.997	0.994	95.257	48	0.000	0.748
2	0.977	0.954	48.858	35	0.060	0.197
3	0.962	0.925	24.384	24	0.440	0.049
4	0.854	0.730	8.297	15	0.911	0.006
5	0.5764	0.3322	1.8720	8	0.9847	0.0003
6	0.3505	0.1229	0.3276	3	0.9548	0.0000

表 10 土壤养分与土壤酶活性的第一对典型变量的构成

Table 10 Composition of the first pair of canonical variables for soil nutrient and enzyme activity

$$U = 0.61X_1 + 0.105X_2 - 0.209X_3 + 0.265X_4 + 0.0445X_5 + 0.394X_6 - 0.201X_7 - 0.546X_8$$

$$V = 0.624Z_1 - 0.556Z_2 - 0.189Z_3 - 0.420Z_4 + 0.045Z_5 - 0.296Z_6$$

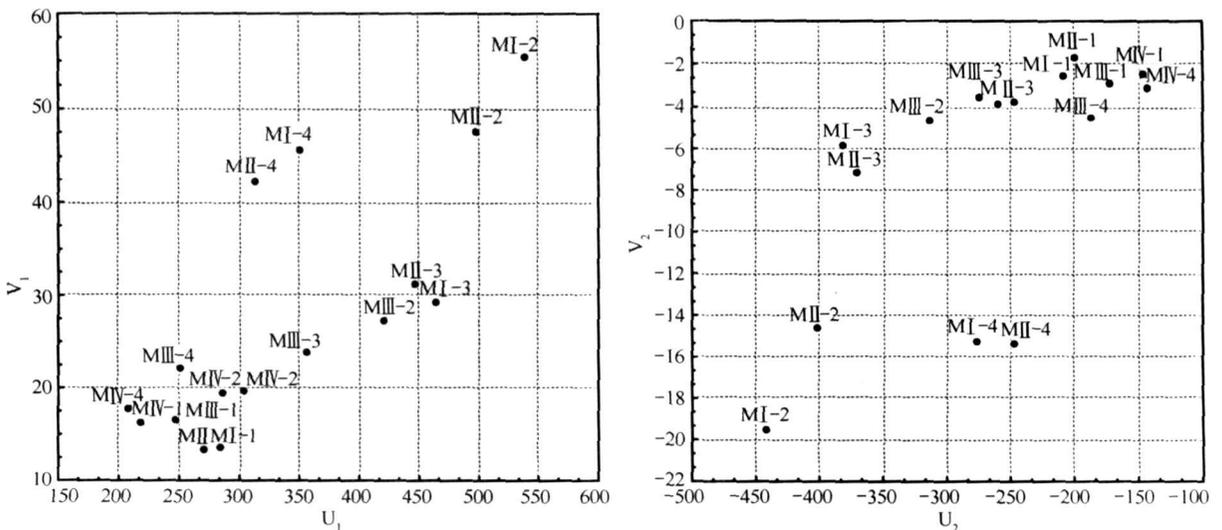


图 3 土壤养分因子与土壤酶活性因子的典型变量排序

Fig 3 Canonical variable ordination of soil nutrients and enzyme activity

势,这可能与 U_1 和 U_2 所代表的土壤肥力水平高低有关^[2]。就不同土层而言,微生物量综合因子 U 值在 5~15 cm 土层最大,0~5 cm 表层次之,而酶活性因子 V 值在不同土层的差异不明显,这与前述排序图变化规律基本一致。

4 结论与讨论

4.1 土壤养分与土壤微生物量、酶活性的关系

在土壤养分因子中,有机质是最重要的土壤肥力成分^[12],氮、磷、钾素是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素,氮、磷是许多森林土壤限制植物生长的重要元素^[13,14]。因此,森林土壤养分的活化是提高土壤肥力的关键。土壤养分是土壤微生物生存的物质基础,其丰富度和成分决定了微生物的种类、数量、生物量、土壤酶活性大小等;土壤微生物量碳、氮、磷被认为是土壤活性养分的储存库,是植物生长可利用养分的重要来源^[15,16]。土壤酶促进土壤有机质分解、合成及物质循环,酶促反应强度体现土壤酶的活性^[17]。可见,生物学性质(主要包括微生物数量、生物量和酶活性)对土壤养分的转化和供应起重要作用^[18,19]。

本研究认为,塔里木沙漠公路防护林地土壤养分和土壤微生物量间的相关主要由养分中的全氮、速效氮、有机质、全磷含量和微生物量中的放线菌数量、微生物量碳和微生物量磷引起;而土壤养分与土壤酶活性间的相关性主要由有机碳、速效钾含量与过氧化氢酶、磷酸酶活性的相关性引起。可见,土壤氮素与微生物量关系密切,有机碳含量提高促进酶活性的全面增强,过氧化氢酶活性取决于土壤氮素含量。可能与这几种土壤生物活性因子在土壤养分转化利用中的重要作用有关,土壤微生物量碳和氮是土壤有效碳和氮的重要来源。过氧化氢酶可促进土壤中化合物的氧化,防止过氧化氢毒害,反映了土壤微生物活动的强度。土壤有机磷转化受多种因子制约,尤其是磷酸酶,可加速有机磷脱磷速度。放线菌在土壤中分布广泛,喜热耐干,适宜中性、微碱性,通气良好的土壤,主要分解难分解物质^[20,21]。塔里木沙漠公路防护林地土壤以风沙土为主,灌水含盐量大,土壤碱性,利于放线菌的繁殖,所以放线菌在防护林地土壤养分转化利用中的作用突出。

4.2 土壤微生物量与土壤酶活性的关系

土壤微生物与土壤酶的关系是林地土壤研究的重点^[22]。同时,土壤酶主要来源于土壤微生物和

植物根系的分泌物。细菌、真菌和放线菌等是土壤生态系统中土壤酶活性的重要来源。土壤酶对环境条件的变化十分敏感,是土壤生物活性较为稳定和灵敏的一个指标^[23]。

本研究认为,土壤微生物量与土壤酶活性间的相关性主要是由微生物量磷、微生物量氮与蔗糖酶、磷酸酶活性的相关性引起,可能与蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起重要作用,而磷酸酶能加速土壤有机质的脱磷速度,提高磷的有效性有关^[24]。这两种酶活性的提高增加了土壤微生物可利用的氮素和磷的有效含量,从而增加了养分活性库微生物量氮和磷。

4.3 滴灌水矿化度对林地土壤养分和生物活性的效应

由图 4 可知,四种矿化度地下水全盐含量与防护林地土壤全盐含量有较好相关性($R^2 = 0.9788$),即地下水矿化度增大,防护林地土壤盐分含量提高,滴灌水矿化度对塔里木沙漠公路防护林地土壤养分和微生物活性产生效应。这是由于土壤盐分变化导致土壤环境酸碱性改变,土壤养分的存在状态、转化和有效性受土壤 pH 的影响;同时,不同种类微生物适宜生存的土壤环境有差异,真菌适宜酸性森林土壤,细菌和放线菌在中性、偏碱性环境中较易存活^[7]。为说明这种效应的真实性,在 4 种矿化度不同的滴灌水作用下的防护林地,选择主要的防护林树种梭梭(*Haloxylon*),对其生长指标测量后发现,株高、冠幅、地径、基部分支、地上鲜生物量随灌水矿化度降低有所增加或增大(表 11),滴灌水矿化度对土壤中植物可利用养分含量产生了影响,导致其长势出现差异。然而,上文相关分析未看出滴灌水矿化度对土壤酶活性因子有明显的效应,反映了当前塔里木沙漠公路防护林地土壤酶活性大小的主要影响因子并非土壤含盐量,可能与土壤颗粒大小、植物根系、土壤无机和有机成分密切相关^[25]。

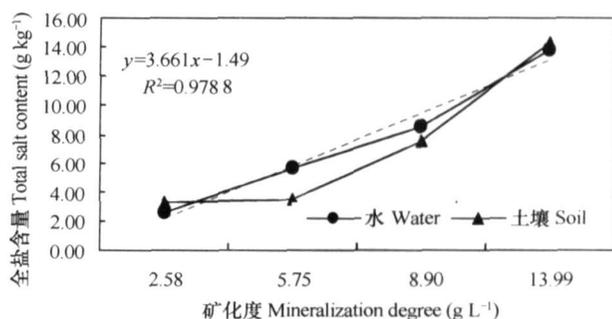


图 4 不同滴灌水含盐量与土壤含盐量的关系

Fig 4 Relationship between irrigation water and soil in salt contents

表 11 不同矿化度滴灌林地林木生长指标

Table 11 Tree growth indexes of forest land drip-irrigated with different salt content water

滴灌水矿化度 Mineralization of irrigation water (g L ⁻¹)	株高 Plant height (cm)	冠幅 Crown width (cm)	地径 Ground diameter (cm)	基部分枝 Basal branch	地上鲜生物量 Ground fresh biomass (kg)
2.58	195.2	212.4 × 198.4	3.5	4.6	12.0
5.75	187.4	166.3 × 140.3	3.4	4.2	11.2
8.90	158.3	154.7 × 134.8	2.5	3.0	9.7
13.99	153.4	146.6 × 155.7	2.4	2.6	9.1

典型相关分析法为研究两组变量关系的一种常用统计方法,本文尝试用于揭示塔里木沙漠公路防护林地土壤养分与生物活性因子的关系,可为干旱区生态恢复与重建提供土壤微生物学资料,但在塔里木沙漠公路所处的极端特殊环境下,如能将气象因子和林木生理指标结合起来,可能使典型相关分析法在探索流动沙漠腹地人工植被土壤肥力变化规律方面应用价值更大。

参考文献

- [1] 唐启义,冯明光.实用统计分析及其DPS数据处理系统.北京:科学出版社,2002 Tang Q Y, Feng M G. Practical Statistics Analysis and DPS Data Processing System (In Chinese). Beijing: Science Press, 2002
- [2] 李跃林,李志辉,彭少麟,等.典范相关分析在枝树人工林地土壤酶活性与营养元素关系研究中的应用.应用与环境生物学报,2002,8(5):544~549 Li Y L, Li Z H, Peng S L, et al. Application of canonical correlation analysis in the relation between soil enzyme activities and nutrient elements in *acacia* plantation soils (In Chinese). Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(5): 544~549
- [3] 王雪芹,雷加强.塔里木沙漠公路风沙危害评估指标体系.干旱区地理,1999,22(1):81~87. Wang X Q, Lei J Q. Assessment indicators of drifting sand hazard along Tarin Desert Highway, Xinjiang (In Chinese). Arid Land Geography, 1999, 22(1): 81~87
- [4] 徐新文,李丙文,王晓静.塔克拉玛干沙漠腹地沙地咸水灌溉(技术)研究.科学通报,2006,51(增刊):133~136. Xu X W, Li B W, Wang X J. Progress in study on irrigation practice with saline groundwater on sand lands of Taklimakan Desert hinterland (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Suppl): 133~136
- [5] 李生宇,李红忠,雷加强.塔克拉玛干沙漠不同立地条件下咸水滴灌苗木的生长差异.水土保持学报,2004,18(3):118~122 Li S Y, Li H Z, Lei J Q. Analysis of growth differences of seedlings irrigated with high degree of mineralization water (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 118~122
- [6] 唐启义,冯明光著. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析 & 数据挖掘. 北京: 科学出版社, 2007 768~768. Tang Q Y, Feng M G. eds. DPS Data Processing System-Experimental Design Statistical Analysis and Data Mining (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007. 768~768
- [7] 滕应,黄昌勇,骆永明,等.重金属复合污染下红壤微生物活性及其群落结构的变化.土壤学报,2005,42(5):819~828. Teng Y, Huang C Y, Luo Y M, et al. Changes in microbial activities and its community structure of red earths polluted with mixed heavy metals (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 819~828
- [8] 中国科学院南京土壤研究所微生物室编著.土壤微生物研究法.北京:科学出版社,1985 85~176. Department of Microorganism, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Research Method of Soil Microorganism (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 85~176
- [9] 中国科学院南京土壤研究所编著.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Analytical Methods of Soil Physical and Chemical Properties (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [10] 关松荫.土壤酶及其研究法.北京:农业出版社,1986. Guang S Y. Soil Enzyme and Its Methodology (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [11] 吴金水,林启美,黄巧云,等著.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. Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil Microbial Biomass Methods and Application (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006. 55~88
- [12] Schroth G, Sinclair F L. Trees, Crops and Soil Fertility. Oxford: Oxford University Press, 2003. 77~91
- [13] Atwell P M, Adams M A. Nutrient cycling in forests (Tansley Review No 50). New Phytol, 1993, 124: 561~582
- [14] Kellogg L E, Brilgham S D. Phosphorus retention and movement across an ombrotrophic to minerotrophic peatland gradient. Biogeochemistry, 2003, 63: 299~315
- [15] 薛莲,刘国彬,戴全厚,等.不同植被恢复模式对黄土陵区侵蚀土壤微生物量的影响.自然资源学报,2007,22(1):20~27. Xue S, Liu G B, Dai Q H, et al. Effect of different vegetation restoration models on soil microbial biomass in eroded hilly loess plateau (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 20~27
- [16] 周丽霞,丁明懋.土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用.生物多样性,2007,15(2):162~171. Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health (In Chinese). Biodiversity Science, 2007, 15(2): 162~171

- [17] 于海霞, 戴伟, 夏良放, 等. 亚热带不同人工林对土壤酶活性及其动力学特征的影响. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 114~118. Yu H X, Dai W, Xia L F, *et al* Effects of different plantations on the activity of soil enzymes and their kinetic characteristics in subtropical zone (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 114~118
- [18] Moscatelli M C, Fonck M, Angelis P D, *et al* Mediterranean natural forest living at elevated carbon dioxide. Soil biological properties and plant biomass growth. Soil Use Management, 2001, 17: 195~202
- [19] 姚拓, 龙瑞军, 师尚礼, 等. 高寒草地不同扰动生境土壤微生物氮素生理群数量特征研究. 土壤学报, 2007, 44(1): 122~129. Yao T, Long R J, Shi S L, *et al* Populations of soil nitrogen bacteria groups in Alpine steppe of different disturbed habitats in Tianzhu (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 122~129
- [20] 许光辉, 郑洪元主编. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986. Xu G H, Zheng H Y, eds Manual of Analytical Methods for Soil Microorganisms (In Chinese). Beijing Agriculture Press, 1986
- [21] Wang M, Chen J K, Li B. Characterization of bacterial community structure and diversity in rhizosphere soils of three plants in rapidly changing salt marshes using 16S rDNA. Pedosphere, 2007, 17(5): 545~556
- [22] 谭周进, 肖启明, 祖智波. 旅游踩踏对张家界国家森林公园土壤微生物区系及活性的影响. 土壤学报, 2007, 44(1): 184~187. Tan Z J, Xiao Q M, Zu Z B. Effect of recreation activities on soil microflora and activities in Zhangjiajie National Forest Park (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 184~187
- [23] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 7~11. Geng Y Q, Bai C X, Zhao T R, *et al* Soil enzyme activity and its relationship with the soil fertility in Badaling Mountain Area of Beijing (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 7~11
- [24] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction. Soil Tillage Research, 1995, 35: 53~68
- [25] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987. 167~180. Zhou L K. Soil Enzymology (In Chinese). Beijing Science Press, 1987. 167~180

CANONICAL CORRELATIONS OF SOIL NUTRIENTS, MICROBIAL BIOMASS AND ENZYME ACTIVITY OF FOREST LAND DRIP-IRRIGATED WITH SALINE WATER IN THE HINTERLAND OF TAKLMAKAN DESERT

Jin Zhengzhong^{1,2} Lei Jiaqiang¹ Xu Xinwen¹ Li Shengyu¹ Fan Jinglong¹ Zhao Sifeng³ Zhou Hongwei⁴
Gu Feng⁴ Qiu Yongzhi⁴ Xu Bo⁴

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830001, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Agricultural College of Shihhotze University, Shihhotze Xinjiang 832003, China)

(4 Tarim Branch, PetroChina Company Limited, Kule, Xinjiang 841000, China)

Abstracts In view of the particularity of the environmental conditions and management model of the Tarim desert highway shelter forest and the important roles of the forest in development of the socio-economy of South Xinjiang, an experiment was carried out using sampled soils from four layers, 0~5 cm, 5~15 cm, 15~30 cm, 30~50 cm, in the forest lands drip-irrigated with ground water 2.58, 5.75, 8.90 and 13.99 g L⁻¹ in mineralization degree, respectively. Results show that there are obvious canonical correlation variables between soil nutrient, microbe quantity and enzyme activity, which basically represents general correlation between variables; the correlation between soil nutrients and soil microbial biomass is mainly attributed to total N, available N, organic matter, total P of nutrient factors and actinomycetes quantity, microbial biomass C and microbial biomass P, while the correlation between soil nutrients and soil enzyme activity is to organic carbon, available K of soil nutrient factors and catalase activity, phosphatase activity of soil enzyme activity factors, and the correlation between soil microbial biomass and soil enzyme activity is to microbial biomass P, microbial biomass N, invertase activity and phosphatase activity of soil enzymes. Moreover, vertical differences between these three groups of comprehensive factors were found. So, the effects of mineralization degree of ground water used as irrigation water on soil nutrients and microbial biomass in the Tarim desert highway shelter forest land are remarkable, and ground water high in mineralization degree goes against soil nutrient accumulation and microbe survival.

Key words Desert highway Shelter forest land Soil nutrient Soil microbial biomass Soil enzyme activity; Canonical correlation