

孙丽静,蒋益成. 岭南不同园林植物根区土壤微生物功能多样性季节动态变化[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):478-483.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.138

岭南不同园林植物根区土壤微生物 功能多样性季节动态变化

孙丽静¹, 蒋益成²

(1. 广东科贸职业学院, 广东广州 510430; 2. 四川农业大学旅游学院, 四川成都 611830)

摘要:利用 Biolog 微平板法研究岭南不同园林植物(草本、灌木和乔木)根区土壤微生物多样性群落特征及其季节动态。结果表明,植物根区土壤略显酸性,季节间 pH 值大小依次为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季,差异不显著;不同类型植物根区土壤养分含量排序基本为草本 > 灌木 > 乔木,不同季节根区土壤养分含量基本表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季;土壤微生物群落代谢颜色变化率(AWCD)随季节呈先增加后降低趋势,表现为草本 > 灌木、乔木;土壤微生物对不同种类碳源的利用强度存在较大差异,碳水化合物和羧酸类碳源是不同园林植物土壤微生物的主要碳源,其次为氨基酸类、酚酸类和聚合物类,胺类碳源的利用率最低;土壤微生物群落的物种丰富度以草本最高,灌木次之,乔木最低,随季节呈先增加后降低趋势。主成分分析结果表明,从 31 个因素中提取的在碳源利用中起主要贡献作用的是胺类和氨基酸类碳源;相关性分析表明,土壤养分和土壤 pH 值与微生物群落功能多样性密切相关,其中土壤 pH 值对土壤微生物群落功能多样性贡献为负,土壤养分对土壤微生物群落功能多样性贡献为正,这是造成园林植物土壤微生物群落多样性和根区土壤微生物群落功能多样性季节差异的主要原因。

关键词:园林植物;土壤微生物;群落多样性;季节动态;主成分分析;相关分析

中图分类号: S154.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0478-06

岭南是指中国南方五岭之南地区,相当于现在广东、广西海南全境,以及湖南、江西等省的部分地区,现在提及“岭南”一词时,常特指广东、广西和海南三省(区)^[1-2]。岭南属东亚季风气候区南部,濒临海洋,具有热带、亚热带季风海洋性气候特点,以高温多雨为主要特征,太阳辐射量较多,光照时间较长,植物资源丰富,其中不乏具有良好观赏价值的园林植

物种类^[2-3]。在岭南地区的城市生态环境中,园林绿化植物作为城市-自然-景观复合生态系统的一部分,在减少阳光辐射、吸尘、增大空气湿度、净化空气、调节气候、改善城市生态环境等方面有着重要的作用^[4]。土壤养分影响着土壤的透水性、保墒性、缓冲性、耕性、通气状况和土壤温度等,其含量高低是表征土壤肥力高低的重要指标之一^[5-6];土壤微生物参与土壤有机碳分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程,土壤微生物群落结构组成及活性变化是衡量土壤质量、维持土壤肥力和作物生产力的一个重要指标^[7-8]。受技术和方法的限制,以往的研究多侧重于对园林植物根际微生物数量等方面,而表现土壤微生物在组成和区系上的变化,还要结合土壤微生物多样性的研究。Biolog 为功能微生物群落变化较为敏感的指标,广泛应用于评价土壤微生物群落的功能多

收稿日期:2016-03-16

基金项目:国家教育部、财政部关于“高等职业学校提升专业服务产业发展能力”园林工程技术专业建设项目[编号:教职成厅函(2011)71号]。

作者简介:孙丽静(1981—),女,河南南阳人,硕士,讲师,主要研究方向为园林植物应用及森林培育。E-mail:Leejing_sun@163.com。

of human activities [J]. Environmental Geology, 1997, 29(3): 246-252.

[2] Sin S N, Chua H, Lo W, et al. Assessment of heavy metal cations insediments of Shing Mun River, Hong Kong [J]. Environment International, 2001, 26(5/6): 297-301.

[3] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P. Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(6): 831-840.

[4] 周美荣, 孙振江, 申晓强. 蚯蚓粪的研究及应用[J]. 山西农业科学, 2012, 40(8): 921-924.

[5] 柏彦超, 周雄飞, 汪孙军, 等. 牛粪经蚯蚓消解前后理化性质的比较研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(10): 135-137.

[6] 宋忠俭, 赵海涛, 钱晓晴. 蚯蚓消解畜禽粪便生态资源化利用探析[J]. 现代农业科技, 2012(23): 228-230.

[7] 王凤艳. 蚯蚓粪对土壤的影响[J]. 吉林农业, 2005(10): 25.

[8] 裴庆海. 蚯蚓粪的优点、作用和对土壤的影响[J]. 农村实用科技信息, 2005(10): 18.

[9] 张洪钦, 董廷涛. 蚯蚓粪改良老化土壤效果好[J]. 技术与市场, 2004(1): 29.

[10] Arancon N Q, Edwards C A, Babenko A, et al. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39(1): 91-99.

[11] Zaller J G. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2): 191-199.

样性, Biolog - ECO 微平板技术可以用于估价土壤微生物群落代谢多样性和功能多样性^[9]。本研究以岭南的主要城市园林植物根际土壤为研究对象, 分析岭南地区(主要是广东省和广西壮族自治区)不同园林植物土壤养分和土壤微生物多样性、季节性差异, 对该区域不同园林植物的管理提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岭南属东亚季风气候区南部, 具有热带、亚热带季风海洋性气候特点, 岭南的大部分属亚热带湿润季风气候, 雷州半岛、海南岛和南海诸岛属热带气候。北回归线横穿岭南中部, 高温多雨为其主要气候特征, 太阳辐射量较多, 光照时间较长, 夏季以南至东南风为主, 风速较小; 冬季大部分地区以北至东北风为主, 风速较大; 春秋季为交替季节, 风向不如冬季稳定。因全年气温较高, 加上雨水充沛, 所以园林植物茂盛, 四季常青, 百花争艳, 各种园林植物资源丰富^[1-2]。

1.2 样品采集

2015 年 7 月中旬至 9 月中旬, 对岭南的广州市、佛山市、韶关市、南宁市、柳州市和桂林市园林植物根际土壤取样, 每个城市草本、灌木和乔木分别取 5 种代表植物并标记, 每个样品重复取样 3 次, 为了保证取样的一致性, 取样时间保持在每天 10:00 点左右(消除温度对土壤微生物的影响), 采用四分法取样(保留 1 kg), 取样深度为 0~20 cm, 混合土样(除去表层的枯落物层)。所取样品分为 2 个部分, 一部分鲜土现场过 2 mm 筛后于 4℃ 保温冰箱保存, 另一部分带回实验室风干后去除杂质, 对其养分和有效养分进行测定。

1.3 土壤养分的测定

取经自然风干 20 d 的土壤样品, 去除植物根系等杂物过 2 mm 筛。土壤 pH 值采用电极电位法测定(2.5:1 水土质量比浸提液); 土壤电导率采用电导法测定; 容重和孔隙度采用环刀法测定; 有机碳含量采用重铬酸钾 - 外加热法测定; 全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定; 有效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提 - 钼锑抗比色法测定; 有效氮含量采用 NaOH - H₃BO₃ 法测定; 有效钾含量采用乙酸铵浸提 - 火焰光度计法^[5-6]测定。

1.4 颜色变化率和微生物多样性测定

取 4℃ 保存的新鲜土样, 过 2 mm 筛后, 用 Biolog 法测定微生物代谢能力。在无菌条件下, 将新鲜的表层和次表层土壤样品等体积混匀, 称取相当于烘干质量 10 g 的土壤, 用 0.85% NaCl 无菌溶液稀释至 3 倍质量, 接种于 Biolog - Eco 微孔板中, (25±1)℃ 暗箱培养。在温育过程中, 每隔 24 h 用酶标仪在 590 nm 下读取吸光度, 采用 Biolog - Eco 温育 72 h 测定的数据进行多样性分析, 温育 120 h 测定的数据用于碳源利用强度和主成分分析。

土壤微生物群落利用碳源的整体能力用 Biolog - Eco 微平板板孔平均颜色变化率(AWCD)表示:

$$AWCD = \sum (C_i - R_i) / n。$$

式中: C_i 为每个有培养基孔在 590 nm 的吸光度; R_i 为对照孔的吸光度; n 为培养基孔数, Biolog - Eco 板 $n = 31$; 对 $(C_i - R) < 0$ 的孔, 计算中记为 0, 即 $(C_i - R) \geq 0$ 。

土壤微生物群落功能多样性分析采用 Shannon - Wiener 指数、Simpson 指数、丰富度指数和 McIntosh 指数表征^[10-11], 计算 Simpson 指数时, 将数据扩大 1 000 倍:

$$\begin{aligned} \text{McIntosh 指数} &= \sqrt{(\sum n_i \cdot n_i)}; \\ H &= - \sum P_i (\ln P_i)。 \end{aligned}$$

式中: n_i 为第 i 个培养基孔数; P_i 为第 i 孔的相对吸光度与所有整个微平板的相对吸光度总和的比值, 计算公式:

$$\begin{aligned} P_i &= (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i); \\ D_s &= 1 - \sum P_i。 \end{aligned}$$

式中: D_s 为优势度指数; S 为被利用碳源的总数(吸光度 ≥ 0.25 所有微孔的总和)。

主成分分析采用培养 96 h 后的光密度值, 提取 2 个主因子进而分析不同园林植物土壤利用碳源的结构。

1.5 统计分析

利用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件对数据进行整理、分析。

2 结果与分析

2.1 园林植物土壤养分季节变化

由表 1 可见, 不同园林植物根区土壤 pH 值及养分的季节变化差异较为显著。具体而言, 土壤 pH 值的变化范围在 6.14~7.02 之间, 春季和夏季不同园林植物根区土壤 pH 值大体排序为乔木 > 草本 > 灌木, 秋季和冬季园林不同植物根区土壤 pH 值排序基本为乔木 > 灌木 > 草本, 而不同季节根区土壤 pH 值平均值基本为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, 季节之间差异不显著; 土壤有机碳含量的变化范围在 15.01~19.23 g/kg 之间, 不同园林植物根区土壤有机碳含量基本排序为草本 > 灌木 > 乔木, 而不同季节根区土壤有机碳含量基本排序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 季节之间差异均显著 ($P < 0.05$); 土壤全氮含量的变化范围在 0.97~1.23 g/kg 之间, 不同园林植物根区土壤全氮含量基本排序为草本 > 灌木 > 乔木, 而不同季节根区土壤全氮含量排序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 其中春季和冬季之间差异不显著; 土壤全磷含量的变化范围在 0.86~0.98 g/kg 之间, 没有明显的变化趋势, 季节之间差异并不显著; 土壤碱解氮含量的变化范围在 35.61~46.12 mg/kg 之间, 不同园林植物根区土壤碱解氮含量基本排序为草本 > 灌木 > 乔木, 而不同季节植物根区土壤碱解氮含量排序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 其中春季和冬季之间差异不显著; 土壤速效磷含量的变化范围在 26.87~36.14 mg/kg 之间, 不同园林植物根区土壤速效磷含量排序基本为草本 > 灌木 > 乔木, 而不同季节根区土壤速效磷含量平均值基本排序为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 其中春季和秋季之间差异不显著。

2.2 土壤微生物群落代谢平均颜色变化率

平均颜色变化率(AWCD)是判断土壤微生物群落利用碳源能力的重要指标之一, 代表土壤微生物的代谢活性, 是土壤微生物活性及群落功能多样性的重要指标。对不同季节土壤样品 Biolog - Eco 板温育 72 h 的 AWCD 进行方差分析(图 1), 结果显示, 不同园林植物根区土壤 AWCD 的变化趋势受季节影响明显, 3 类园林植物根区土壤微生物活性变化趋势一致, 由春季到冬季均表现出先升高再降低趋势, 以夏季土壤

表 1 园林植物土壤养分季节动态

季节	类别	pH 值	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)
春季	草本	6.52 ± 0.69	18.03 ± 2.36	1.15 ± 0.23	0.93 ± 0.08	41.03 ± 3.69	36.14 ± 2.51
	灌木	6.14 ± 0.35	16.52 ± 1.58	1.03 ± 0.14	0.92 ± 0.06	38.29 ± 4.52	30.47 ± 1.56
	乔木	7.02 ± 0.65	16.39 ± 2.04	0.98 ± 0.16	0.95 ± 0.13	37.13 ± 2.78	28.36 ± 1.74
	平均值	6.56 ± 0.57a	16.98 ± 1.68c	1.05 ± 0.17c	0.93 ± 0.10a	38.82 ± 3.24c	31.66 ± 1.86b
	F 值	36.78	42.57	39.14	29.47	35.23	43.56
夏季	草本	6.23 ± 0.35	19.23 ± 2.14	1.23 ± 0.23	0.98 ± 0.05	46.12 ± 4.56	35.69 ± 2.36
	灌木	6.21 ± 0.26	18.45 ± 2.15	1.15 ± 0.15	0.95 ± 0.09	42.38 ± 5.13	32.14 ± 2.14
	乔木	6.53 ± 0.31	18.17 ± 1.37	1.13 ± 0.17	0.97 ± 0.08	43.14 ± 3.68	30.37 ± 2.37
	平均值	6.33 ± 0.28a	18.62 ± 1.89a	1.17 ± 0.19a	0.97 ± 0.07a	43.88 ± 4.23a	32.73 ± 2.27a
	F 值	26.78	34.19	53.12	61.78	42.17	35.88
秋季	草本	6.35 ± 0.14	18.36 ± 2.68	1.19 ± 0.25	0.96 ± 0.16	43.56 ± 3.84	33.15 ± 3.25
	灌木	6.38 ± 0.16	17.52 ± 3.14	1.05 ± 0.16	0.95 ± 0.13	40.23 ± 5.12	31.98 ± 3.01
	乔木	6.47 ± 0.19	17.14 ± 3.03	1.07 ± 0.18	0.94 ± 0.12	39.17 ± 4.17	28.37 ± 2.47
	平均值	6.40 ± 0.16a	17.67 ± 2.57b	1.10 ± 0.19b	0.95 ± 0.14a	40.99 ± 4.03b	31.17 ± 2.68b
	F 值	43.74	35.02	41.47	35.69	43.55	31.79
冬季	草本	6.37 ± 0.16	17.23 ± 1.56	1.09 ± 0.23	0.89 ± 0.09	39.56 ± 3.14	33.14 ± 3.07
	灌木	6.46 ± 0.23	15.36 ± 2.03	1.02 ± 0.26	0.91 ± 0.13	35.61 ± 2.78	26.87 ± 2.01
	乔木	6.79 ± 0.18	15.01 ± 1.78	0.97 ± 0.18	0.86 ± 0.14	36.03 ± 2.13	27.03 ± 3.41
	平均值	6.54 ± 0.24a	15.87 ± 2.14d	1.03 ± 0.22c	0.89 ± 0.12a	37.07 ± 2.98c	29.01 ± 2.85c
	F 值	35.41	42.68	31.66	52.41	38.77	35.43

注:同列数据后不同小写字母分别表示同因素不同水平在 0.05 水平上差异显著。下表同。

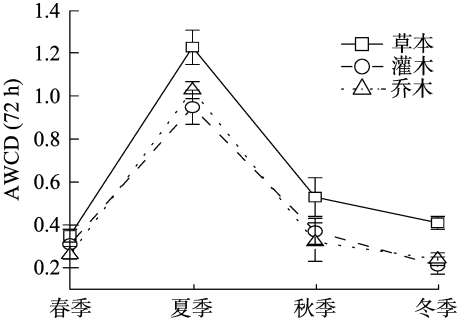


图1 园林植物根际土壤微生物群落代谢季节颜色变化

微生物的 AWCD 最高,不同园林植物根区土壤微生物平均 AWCD 排序为草本>灌木>乔木,局部有所波动。

2.3 土壤微生物对碳源利用强度

土壤微生物多样性反映群落总体的变化,但未能反映微生物群落代谢的详细信息。根据不同园林植物土壤微生物碳源利用情况,综合考虑其变化趋势,选取光密度增加较快的 120 h 的 AWCD 评价碳源利用强度。按照化学基团的性质将 Biolog-Eco 微孔板上的 31 种碳源分成 6 类:氨基酸类、碳水化合物类、羧酸类、聚合物类、胺类、酚酸类,6 类碳源均呈现出随着培养时间的延长,微生物利用碳源的量逐渐增加的趋势。不同园林植物土壤微生物对 6 种不同碳源的利用率排序草本>灌木>乔木(表 2)。对氨基酸类利用率变化范围为 0.41~0.92,不同类型植物间利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节对氨基酸类利用率排序为秋季>夏季>春季>冬季,其中夏季和秋季差异不显著;对碳水化合物类利用率变化范围在 0.61~1.32 之间,不同类型植物间利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节利用率排序为夏季>秋季>春季>冬季,其中夏季和秋季差异不显著;对羧酸类利用率变化范围在 0.85~1.56 之间,不同类型植物间利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节对羧酸类利用率排序为夏季>秋

季、春季>冬季,其中春季和秋季差异不显著;对聚合物类利用率变化范围在 0.37~0.63 之间,不同类型园林植物对聚合物类利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节利用率排序为夏季>秋季>春季>冬季,季节间差异均达显著水平($P<0.05$);对胺类利用率变化范围为 0.16~0.26,不同类型园林植物对胺类利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节对胺类利用率排序为夏季>秋季>春季>冬季,但季节间差异不显著;对酚酸类利用率变化范围在 0.47~0.68 之间,不同类型园林植物对酚酸类利用率排序为草本>灌木>乔木,不同季节对酚酸类利用率排序为夏季>秋季>春季>冬季,季节间差异不显著。

2.4 园林植物根际土壤微生物群落多样性

从表 3 可知,不同类型园林植物 Simpson 指数基本排序为草本>灌木>乔木,不同季节 Simpson 指数排序为夏季>秋季>春季>冬季,其中夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$),春季和冬季差异均不显著;不同类型园林植物 Shannon-Wiener 指数排序为草本>灌木>乔木,不同季节 Shannon-Wiener 指数排序为夏季>秋季>春季>冬季,其中夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$),春季和冬季差异不显著;丰富度指数排序为草本>灌木>乔木,季节间丰富度指数排序为夏季>秋季>春季>冬季,其中夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$),春季和冬季差异不显著;McIntosh 指数在不同植物类型间差异排序为草本>灌木>乔木,McIntosh 指数在不同季节间排序为夏季>秋季>春季>冬季,其中夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$),春季和冬季差异不显著。

2.5 碳源利用类型的主成分分析

为了进一步了解不同园林植物根区土壤微生物群落功能的差异,对 31 种碳源的利用情况进行主成分(PC)分析(PCA),采用培养 120 h 时间点的数据,提取出 4 个主成分(表 4),主成分 1、主成分 2 分别能解释变量方差的 65.326%、

表 2 土壤微生物对碳源利用强度

季节	类别	氨基酸类	碳水化合物类	羧酸类	聚合物类	胺类	酚酸类
春季	草本	0.65 ± 0.06	0.92 ± 0.23	1.24 ± 0.36	0.52 ± 0.06	0.24 ± 0.06	0.58 ± 0.13
	灌木	0.51 ± 0.09	0.68 ± 0.18	1.15 ± 0.45	0.48 ± 0.09	0.19 ± 0.03	0.56 ± 0.16
	乔木	0.49 ± 0.08	0.61 ± 0.19	1.03 ± 0.32	0.43 ± 0.05	0.16 ± 0.05	0.51 ± 0.14
	平均值	0.55 ± 0.07b	0.74 ± 0.21b	1.14 ± 0.36b	0.47 ± 0.07c	0.20 ± 0.04a	0.55 ± 0.15b
	F 值	36.59	38.14	56.23	48.74	32.59	51.03
夏季	草本	0.92 ± 0.13	1.32 ± 0.32	1.56 ± 0.36	0.63 ± 0.13	0.26 ± 0.06	0.68 ± 0.23
	灌木	0.72 ± 0.16	1.05 ± 0.16	1.23 ± 0.59	0.58 ± 0.06	0.23 ± 0.05	0.62 ± 0.15
	乔木	0.65 ± 0.08	0.87 ± 0.34	1.10 ± 0.47	0.54 ± 0.08	0.21 ± 0.03	0.61 ± 0.17
	平均值	0.76 ± 0.09a	1.08 ± 0.28a	1.30 ± 0.42a	0.58 ± 0.07a	0.23 ± 0.04a	0.64 ± 0.16a
	F 值	26.95	35.14	28.17	42.16	35.84	29.89
秋季	草本	0.85 ± 0.15	1.13 ± 0.68	1.32 ± 0.25	0.59 ± 0.16	0.24 ± 0.03	0.63 ± 0.16
	灌木	0.83 ± 0.12	1.05 ± 0.54	1.07 ± 0.36	0.51 ± 0.13	0.21 ± 0.06	0.61 ± 0.15
	乔木	0.71 ± 0.11	0.91 ± 0.41	1.02 ± 0.45	0.47 ± 0.17	0.22 ± 0.04	0.58 ± 0.19
	平均值	0.80 ± 0.13a	1.03 ± 0.35a	1.14 ± 0.34b	0.52 ± 0.15b	0.22 ± 0.05a	0.61 ± 0.17ab
	F 值	39.88	52.07	48.32	44.17	35.18	42.06
冬季	草本	0.53 ± 0.09	0.83 ± 0.35	1.05 ± 0.23	0.43 ± 0.09	0.21 ± 0.05	0.52 ± 0.16
	灌木	0.43 ± 0.08	0.71 ± 0.41	0.98 ± 0.51	0.39 ± 0.12	0.18 ± 0.03	0.49 ± 0.13
	乔木	0.41 ± 0.15	0.63 ± 0.25	0.85 ± 0.42	0.37 ± 0.16	0.16 ± 0.05	0.47 ± 0.09
	平均值	0.46 ± 0.14c	0.72 ± 0.33b	0.96 ± 0.33c	0.40 ± 0.13d	0.18 ± 0.04a	0.49 ± 0.18c
	F 值	26.98	27.84	31.25	36.77	42.03	35.84

表 3 不同园林植物土壤微生物群落功能多样性指数

季节	类别	Simpson 指数	Shannon – Wiener 指数	丰富度指数	McIntosh 指数
春季	草本	0.941 ± 0.056	3.724 ± 0.085	17.11 ± 3.25	0.856 ± 0.061
	灌木	0.903 ± 0.023	3.523 ± 0.065	15.23 ± 2.14	0.813 ± 0.053
	乔木	0.853 ± 0.041	3.510 ± 0.071	15.00 ± 1.37	0.625 ± 0.044
	平均值	0.899 ± 0.016c	3.586 ± 0.072c	15.78 ± 2.34c	0.765 ± 0.051c
	F 值	35.16	29.48	31.54	41.79
夏季	草本	0.986 ± 0.051	3.862 ± 0.035	18.35 ± 1.56	0.923 ± 0.069
	灌木	0.953 ± 0.068	3.721 ± 0.046	17.23 ± 2.35	0.856 ± 0.084
	乔木	0.921 ± 0.026	3.653 ± 0.058	16.13 ± 1.25	0.823 ± 0.035
	平均值	0.953 ± 0.035a	3.745 ± 0.051a	17.23 ± 1.68a	0.867 ± 0.061a
	F 值	28.59	35.77	31.43	43.77
秋季	草本	0.953 ± 0.076	3.813 ± 0.063	18.69 ± 2.10	0.902 ± 0.025
	灌木	0.921 ± 0.064	3.621 ± 0.061	16.25 ± 2.69	0.814 ± 0.063
	乔木	0.879 ± 0.053	3.547 ± 0.057	15.13 ± 3.15	0.703 ± 0.071
	平均值	0.918 ± 0.061b	3.660 ± 0.058b	16.69 ± 2.58b	0.806 ± 0.061b
	F 值	38.94	43.65	49.17	35.18
冬季	草本	0.921 ± 0.035	3.685 ± 0.039	16.58 ± 1.36	0.752 ± 0.052
	灌木	0.905 ± 0.061	3.497 ± 0.085	15.36 ± 2.14	0.687 ± 0.061
	乔木	0.863 ± 0.054	3.412 ± 0.075	14.19 ± 3.15	0.613 ± 0.078
	平均值	0.896 ± 0.061c	3.531 ± 0.062c	15.38 ± 2.41c	0.684 ± 0.071d
	F 值	39.58	25.13	42.17	35.42

表 4 主成分提取的方差分析

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	23.568	65.326	65.326
2	5.621	17.289	82.615
3	3.258	9.523	92.138
4	1.354	7.862	100.000

17.289%,前3个主成分累积贡献率达到92.138%,因此第1、第2、第3为本研究所要解释的主成分。
主成分分析结果显示31个碳源在3个主成分上的载荷

值,初始载荷因子反映主成分与碳源利用的相关系数,载荷因子越高表示碳源对主成分的影响越大。由表5可知,与第1主成分具有较高相关性的碳源有24种,其中羧酸类化合物有6种,多聚化合物有3种,碳水化合物有8种,芳香化合物有1种,氨基酸有4种,胺类化合物有2种。第2主成分利用碳水化合物4种,氨基酸1种,共5种碳源。在主成分分离中起主要贡献作用的是胺类、氨基酸类碳源。
2.6 土壤养分与微生物多样性之间的相关性
土壤养分为土壤微生物的重要碳源和氮源,土壤养分与

表 5 31 种碳源的主成分载荷因子

碳源类型	PC1	PC2
吐温-40(多聚化合物)	0.563	0.153
吐温-80(多聚化合物)	0.238	0.337
α -环糊精(多聚化合物)	0.746	0.538
苯基乙胺(胺类化合物)	0.924	0.624
腐胺(胺类化合物)	0.995	0.178
2-羟基苯甲酸(芳香化合物)	0.563	0.269
4-羟基苯甲酸(芳香化合物)	0.578	0.589
D-葡萄糖胺酸(羧酸类化合物)	0.337	0.637
丙酮酸甲酯(羧酸类化合物)	0.296	0.057
γ -羟基丁酸(羧酸类化合物)	0.398	0.335
衣康酸(羧酸类化合物)	0.457	0.329
α -丁酮酸(羧酸类化合物)	0.698	0.574
D-苹果酸(羧酸类化合物)	0.542	0.639
D-半乳糖醛酸(羧酸类化合物)	0.431	0.036
L-精氨酸(氨基酸)	0.974	0.956
L-天门冬酰胺酸(氨基酸)	0.982	0.523
L-苯基丙胺酸(氨基酸)	0.893	0.856
L-丝氨酸(氨基酸)	0.912	0.903
L-苏氨酸(氨基酸)	0.856	0.874
葡萄糖-L-谷氨酸(氨基酸)	0.887	0.902
糖原(碳水化合物)	0.814	0.723
D-纤维二糖(碳水化合物)	0.378	0.326
α -D-乳糖(碳水化合物)	0.562	0.154
β -甲基-D-葡萄糖苷(碳水化合物)	0.425	0.322
D-木糖(碳水化合物)	0.639	0.187
i-赤藓糖醇(碳水化合物)	0.552	0.234
D-甘露醇(碳水化合物)	0.697	0.015
N-乙酰基-D-葡萄糖胺(碳水化合物)	0.385	0.196
葡萄糖-1-磷酸(碳水化合物)	0.426	0.237
D,L- α -磷酸甘油(碳水化合物)	0.593	0.226
D-半乳糖酸- γ -内酯(碳水化合物)	0.423	0.563

微生物群落多样性的相关性分析表明,不同季节土壤微生物群落功能多样性各指标与土壤 pH 值之间存在负相关关系,

与土壤养分等均呈正相关关系(表 6)。不同季节土壤微生物群落功能多样性各指标基本与土壤有效养分呈显著或极显著正相关,夏季相关系数最高,冬季相关系数最低。由此可见,土壤养分和土壤 pH 值与微生物群落功能多样性密切相关,其中土壤 pH 值对土壤微生物群落功能多样性贡献为负,土壤养分对土壤微生物群落功能多样性贡献为正,这是造成土壤微生物群落多样性的差异,而土壤养分是土壤微生物的主要养分来源,这也造成园林植物根区土壤微生物群落功能多样性季节差异。

3 讨论与结论

平均颜色变化率(AWCD)是反映土壤微生物活性,即利用单一碳源能力的一个重要指标,在一定程度上反映土壤中微生物种群的数量和结构特征。AWCD 越大,表明细菌密度越大、活性越高,反之,表明细菌密度越小、活性越低^[11]。分析不同季节土壤微生物群落的代谢活性发现,不同园林植物根区土壤微生物活性呈现一致的变化趋势,在整个培养过程中,灌木和乔木土壤微生物对 Biolog-Eco 板中碳源的利用能力明显低于草本,可能是由于草本植物土壤中存在与 Biolog-Eco 板中碳源物质高度协调的微生物(其养分含量较高),能充分利用板中的碳源,供微生物利用的碳源种类和数量逐渐增加,微生物的数量也随之增加。土壤微生物活性与季节有一定关系,土壤微生物群落代谢活性的高峰均出现在夏季,到秋季活性又降低,这与前人的研究结果^[12-13]一致。原因在于夏季温度升高,降水量增多,植物生长旺盛,植物残体和根系分泌物数量都很多,使得进入土壤的新鲜有机物质质量显著增加,这大大刺激了土壤微生物的生长和繁殖,进而代谢活性显著提高^[14]。在秋季,土壤水分含量有所降低,随着植物继续生长,根系需要从土壤中吸收大量的养分,进而减少了对土壤微生物养分的供应,一方面使微生物的繁殖受到一定的影响^[15],另一方面使微生物的代谢活性也有所降低。在相同季节,土壤微生物活性不同,这可能与供试土壤本身的生

表 6 土壤养分与微生物多样性指数之间相关性

季节	项目	相关系数					
		pH 值	有机碳含量	全氮含量	全磷含量	碱解氮含量	速效磷含量
春季	Simpson 指数	-0.236	0.523 *	0.639 *	0.036	0.694 **	0.723 **
	Shannon-Wiener 指数	-0.158	0.147	0.156	0.158	0.712 **	0.814 **
	丰富度指数	-0.369	0.639 *	0.763 **	0.569 *	0.536 *	0.521 *
	McIntosh 指数	-0.532 *	0.713 **	0.821 **	0.347	0.899 **	0.623 *
夏季	Simpson 指数	-0.599 *	0.886 **	0.721 **	0.638 *	0.912 **	0.845 **
	Shannon-Wiener 指数	-0.452	0.792 **	0.632 *	0.514 *	0.874 **	0.876 **
	丰富度指数	-0.631 *	0.753 **	0.641 *	0.410	0.703 **	0.912 **
	McIntosh 指数	-0.603 *	0.824 **	0.789 **	0.315	0.712 **	0.763 **
秋季	Simpson 指数	-0.236	0.699 **	0.563 *	0.217	0.524 *	0.566 *
	Shannon-Wiener 指数	-0.159	0.524 *	0.236	0.699 **	0.752 **	0.633 *
	丰富度指数	-0.369	0.321	0.546 *	0.521 *	0.634 *	0.714 **
	McIntosh 指数	-0.567 *	0.716 **	0.869 **	0.302	0.810 **	0.566 *
冬季	Simpson 指数	-0.302	0.663 *	0.574 *	0.247	0.356	0.654 *
	Shannon-Wiener 指数	-0.105	0.724 **	0.769 **	0.387	0.588 *	0.698 **
	丰富度指数	-0.736 **	0.512 *	0.635 *	0.169	0.697 **	0.712 **
	McIntosh 指数	-0.366	0.301	0.264	0.516 *	0.736 **	0.365

注:“*”“**”分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。

态条件有关^[13,16]。与乔木相比,草本形成了较和谐、平衡的微生态环境,而且人为干扰少,植被种类丰富,每年产生大量凋落物,丰富了微生物所需的营养物质来源,因而其土壤微生物活性明显高于乔木和灌木。本研究土壤中微生物对不同种类碳源的利用强度存在较大差异,土壤微生物群落代谢活性较低,碳源利用能力相对较弱,草本土壤微生物群落对 6 类碳源的利用率最高,灌木居中,乔木最低。总体而言,碳水化合物和羧酸类碳源是不同园林植物土壤微生物的主要碳源,其次为氨基酸类、酚酸类和聚合物类,胺类碳源的利用率最低。

丰富度指数和多样性指数可以反映土壤微生物群落利用碳源类型的差异。Shannon 多样性指数反映土壤微生物群落物种变化度和差异度,指数值越大,表示微生物能够利用的碳源种类越多^[14]。Mc-Intosh 指数反映群落的物种均一性,一般物种数(能被利用的碳源数)越多,某些优势明显(碳源利用强度大)物种群落的 McIntosh 指数越大。Simpson 指数可以反映土壤微生物群落中最常见物种的碳源嗜好。Shannon 均匀度指数是通过 Shannon 多样性指数计算出来的均度,包含 2 个因素:其一是种类数,即丰富度;其二是种类中个体分布的均匀性。种类数越多,多样性越大;同样,种类之间个体分配的均匀性增加也会使多样性提高^[14,17]。根据培养 96 h 时的 AWCD 计算土壤微生物群落的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、丰富度指数和 McIntosh 指数。较高的 Shannon-Wiener 指数代表微生物种类多且分布均匀,该值以草本最高,表明草本植物的土壤微生物群落种类最多且较均匀,园林植物土壤微生物群落不同季节的功能多样性指数均在夏季最高,秋季次之,春季和冬季最低,并且春季和冬季差异不显著。

碳源利用类型的主成分分析结果表明,园林植物根区土壤微生物群落代谢功能多样性有显著差异,受影响最大的碳源主要是羧酸类和聚合物类,而这些碳源与根系分泌物关系密切,说明羧酸类和聚合物类的根系分泌物对微生物群落功能有较大影响^[13,16]。根系分泌物起到直接或间接的作用,这些物质对微生物和植株具有自毒作用而导致其积累。土壤养分和土壤 pH 值与微生物群落功能多样性密切相关,其中土壤 pH 值对土壤微生物群落功能多样性贡献为负,土壤养分对土壤微生物群落功能多样性贡献为正,这是造成园林植物土壤微生物群落多样性差异的重要原因,而土壤养分是土壤微生物的主要养分来源,这也是造成园林植物根区土壤微生物群落功能多样性季节差异的主要原因。

参考文献:

- [1] 吴大荣,瞿燕. 浅谈岭南园林植物特色[J]. 中国园林,2003,19(7):70-73.
- [2] 谢晓蓉. 岭南园林植物景观研究[D]. 北京:北京林业大学,2005.
- [3] 翁殊斐,洪家群. 广州园林植物造景的岭南特色初探[J]. 广东

园林,2003(2):26-28,25.

- [4] 王蕾,王志,刘连友,等. 城市园林植物生态功能及其评价与优化研究进展[J]. 环境污染与防治,2006,28(1):51-54.
- [5] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. Ecology, 1996, 77(2): 364-374.
- [6] John R, Dalling J W, Harms K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(3): 864-869.
- [7] Fierer N, Jackson J A, Vilgalys R, et al. Assessment of soil microbial community structure by use of taxon-specific quantitative PCR assays[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(7): 4117-4120.
- [8] Torsvik V, Øvreås L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems[J]. Current Opinion in Microbiology, 2002, 5(3): 240-245.
- [9] Yao H Y, Jiao X D, Wu F Z. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under protected cultivation on soil microbial community diversity[J]. Plant and Soil, 2006, 284(1/2): 195-203.
- [10] Hill G T, Mikowski N A, Aldrich-Wolfe L, et al. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 25-36.
- [11] Kandeler F, Kampichler C, Horak O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 23(3): 299-306.
- [12] Smit E, Leeftang P, Gommans S, et al. Diversity and seasonal fluctuations of the dominant members of the bacterial soil community in a wheat field as determined by cultivation and molecular methods[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(5): 2284-2291.
- [13] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(3): 626-631.
- [14] Lupwayi N Z, Rice W A, Clayton G W. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1733-1741.
- [15] Torsvik V, Øvreås L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems[J]. Current Opinion in Microbiology, 2002, 5(3): 240-245.
- [16] Bossio D A, Scow K M, Gunapala N, et al. Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipid fatty acid profiles[J]. Microbial Ecology, 1998, 36(1): 1-12.
- [17] Jangid K, Williams M A, Franzluebbers A J, et al. Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(11): 2843-2853.