



赵兰凤, 刘小锋, 官利兰, 等. 广东省不同区域菜园土壤微生物群落功能多样性比较[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(1): 54-59.

广东省不同区域菜园土壤微生物群落功能多样性比较

赵兰凤, 刘小锋, 官利兰, 程 根, 张新明

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】了解广东省不同区域菜园土壤微生物碳代谢功能群落结构的特点与差异。【方法】采用 Biolog 生态微平板方法分析广东的粤北、粤东、粤西和粤中 4 个不同区域菜园土壤微生物碳代谢群落结构。【结果和结论】4 个不同区域的土壤微生物平均颜色变化率(AWCD)、Shannon 指数、Simpson 指数、McIntosh 指数变化趋势均不同,反映微生物活性的 AWCD 表现为:粤北 > 粤东 > 粤西 > 粤中,表明不同区域菜园土壤微生物在碳源利用能力、微生物丰度等方面存在差异。4 个区域土壤微生物对 6 类 31 种碳源的利用程度存在差异;主成分分析显示,4 个区域土壤微生物代谢基质主成分 1 的贡献率为 54.76%,主成分 2 为 13.25%;主成分 1 载荷 0.18 以上的基质有 22 种,主成分 2 有 15 种;碳源在主成分分离中起主要贡献作用的是氨基酸类、羧酸类、酚类和碳水化合物类碳源。表明不同区域菜园土壤微生物群落碳源利用模式及代谢功能不同,即土壤微生物群落功能多样性有差异。

关键词:菜园土壤; 微生物群落; 功能多样性; Biolog 法

中图分类号:S154.3

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2015)01-0054-06

An comparative study on functional diversity of soil microbial community in vegetable garden soils from different regions of Guangdong Province

ZHAO Lanfeng, LIU Xiaofeng, GUAN Lilan, CHENG Gen, ZHANG Xinming

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To understand the characteristics and differences among the carbon catabolic diversities of vegetable garden soil microbes from the different regions of Guangdong Province. 【Method】The community structures of vegetable garden soil microbes in the northern, eastern, western and central regions of Guangdong Province(NR, ER, WR and CR) were analyzed using the Biolog Eco-Plate Method. 【Result and conclusion】There were different changing tendencies of the Average Well Color Development (AWCD), Shannon Index, Simpson Index and McIntosh Index in the four regions. The AWCD value, which directly reflected the microbial activities, was in the order of NR > ER > WR > CR, demonstrating the differences among the uses of carbon sources and abundance in vegetable garden soil microbes from the different regions. There were differences among utilization degrees of the 31 types, 6 classes of carbon sources by the vegetable garden soil microbes from the four regions. Through principal component analysis, it showed that the contribution rate of the PC1 of the metabolism substrates of vegetable garden soil microbes in the four regions was 54.76%, PC2 was 13.25%, and there were 22 types of metabolism substrates in PC1 with over 0.18 of load, but only 15 types in PC2. Amino acids, carboxylic acids, phenols and carbohydrates were the four main carbon sources separating the two principal component factors.

收稿日期:2014-01-26 优先出版时间:2014-12-02

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7671/j.issn.1001-411X.2015.01.010.html>

作者简介:赵兰凤(1978—),女,高级实验师,硕士, E-mail:lanfengzhao@scau.edu.cn; 通信作者:张新明(1965—),男,副教授,博士, E-mail:xmzhang@scau.edu.cn

基金项目:广东省科技计划项目(2012A020100004)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

In conclusion, the carbon source utilization modes and metabolic functions of the microbes among the vegetable garden soils from the four regions differ from each other, that is, there are different functional diversities of microbial community among the vegetable garden soils from the four regions under investigation.

Key words: vegetable garden soil; microbial community; functional diversity; Biolog method

生物多样性及其变化是全球变化研究的重要内容之一。人为活动已经使生物多样性大幅度下降,引起了人们的高度重视。土壤微生物是土壤有机质和养分转化、循环的动力,它们参与土壤有机质分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程。土壤微生物群落的组成与活性不仅在很大程度上决定了生物地球化学循环、土壤有机质的周转及土壤肥力和质量,也与植物的生产力有关^[1]。土壤微生物多样性研究主要包括遗传多样性、结构多样性和功能多样性,其中功能多样性是指微生物群落利用碳源的模式或作用的过程^[2]。Biolog分析被用作表征微生物群落的功能潜力,即被用于估计碳源利用模式等功能多样性^[3]。研究土壤微生物多样性可了解土壤微生物和土壤质量因环境条件的改变及人类对土壤的利用而发生的变化,为农业的可持续发展研究和生态环境的保护提供依据。Biolog生态微平板法是快速简便分析微生物群落功能多样性的方法^[4-6],本研究利用Biolog微平板鉴定系统对广东省有代表性的4个区域的菜园土壤微生物碳代谢功能群落结构进行分析,研究不同区域土壤微生物群落功能多样性差异

及其对碳源特异利用的情况。

1 材料与方法

1.1 材料

根据广东省不同地区温湿度条件和施肥管理情况不同,选择了粤东(梅州五华)、粤北(清远连州)、粤西(云浮罗定)和粤中(广州增城)4个区域,分别在上述4个典型县(市)采集3年以上连续种植蔬菜的菜地土壤样品,每个典型县(市)取0~20 cm土层的混合土样5个。种植蔬菜品种较多,主要有生菜、芥菜、油麦菜、青菜、藤菜、豆角、苦瓜、茄子等。复种指数高,1年3茬的种植模式占42%。经问卷调查,每年按666.7 m²施化肥氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)分别为29.60、30.44、29.41 kg;有机肥氮、磷、钾均值与化肥氮、磷、钾均值之比分别为0.38、0.22和0.21;总施肥量氮、磷、钾平均达到40.75、37.10和35.72 kg。不同地区养分投入量存在较大差异,云浮和梅州的有机养分投入量略高于清远、增城;化肥和总养分投入量均为:粤中>粤西>粤东>粤北。表1列出了4个典型区域土壤的主要理化性质。

表1 供试土壤基本理化性质

Tab. 1 Basic physicochemical properties of parent soils

区域	土壤质地	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	w (有机质)/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	w ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
					碱解氮	有效磷	速效钾
粤中	中壤土	75~172	14.2~24.2	4.94~6.02	57.8~105.9	28.9~132.5	39.4~196.6
粤西	重壤土	73~237	20.2~45.5	4.27~7.34	123.8~193.8	65.9~269.6	130.9~424.0
粤北	轻壤土-重壤土	71~256	15.0~44.2	5.76~7.01	90.4~187.3	46.0~107.5	28.0~210.9
粤东	中壤土-重壤土	144~240	15.3~39.0	6.48~7.33	65.2~160.4	56.7~195.5	39.4~193.7

1.2 方法

土壤细菌功能多样性分析采用Biolog Eco微平板法,具体操作以及多样性指数计算参见文献[3-4]。选取培养时间为72 h的 $D_{590\text{nm}}$ 计算微生物群落功能多样性指数、微生物利用碳源底物能力和碳源相对利用率,并进行微生物群落功能主成分分析。采用Excel2003和DPS 14.10^[7]统计软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 不同区域菜园土壤平均颜色变化率和多样性指数比较

4个不同区域菜园土壤微生物平均颜色变化率(AWCD)随培养时间的变化情况见图1。由图1可以看出,不同区域的AWCD值在24 h内升高幅度非常大,说明此时碳源开始被利用,且已经进入指数期,

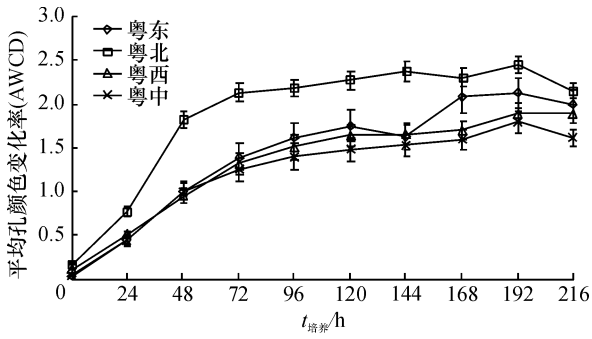


图1 不同区域菜园土细菌群落 AWCD 的变化

Fig. 1 Variations in AWCD of vegetable garden soil bacterial community over time in different regions

144 h 左右达到平稳状态. 不同区域土壤微生物 AWCD 值的变化速率和最终值以粤北最高, 粤东次之, 粤西和粤中微生物活性最低. 4 个区域土壤微生物 AWCD 值变化趋势不同, 表明了各个区域土壤微生物在碳源利用能力、微生物丰度等方面存在差异, 粤北地区土壤微生物群落的代谢最快、活性最强, 粤中地区土壤微生物群落代谢相对较慢、活性较弱, 可能与温湿条件、施肥和管理等因素有关, 微生物活性

受温度和水分的影响, 粤北地区由于昼夜温差较大、降雨量充沛, 为土壤微生物群落提供了良好的生态环境. 另外, 微生物受土壤环境条件的限制, 长期使用化肥严重影响土壤微生物活性, 据调查, 粤西和粤中地区化肥投入量显著高于粤东和粤北地区, 因此, 明显抑制了微生物的活性.

Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数的分析结果 (表 2) 表明, 粤北地区的土壤微生物 AWCD 值和 Shannon 指数显著高于其他 3 个区域, 粤中地区的 Simpson 指数显著低于其他 3 个区域, 粤北地区的 McIntosh 指数显著高于粤西地区和粤中地区, 与粤东地区差异不显著. 4 个区域的代谢多样性方差分析表明, 粤北地区的微生物活性、物种丰富度、优势度和均匀度均最高, 粤东地区次之, 粤中地区的微生物活性最低, 表明不同区域菜园土壤微生物对碳源利用有显著性差异, 说明不同区域菜园土壤由于温湿条件和施肥管理等不同其均匀度与群落丰富度、物种优势度之间有着不一致的现象.

表 2 不同区域菜园土微生物群落功能 AWCD 值和多样性指数比较¹⁾

Tab. 2 AWCD and diversity indexes of vegetable garden soil microbial community in different regions

区域	AWCD 值	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
粤东	1.62 ± 0.16b	7.24 ± 0.60b	46.01 ± 0.80a	11.26 ± 1.13ab
粤北	2.18 ± 0.10a	8.74 ± 0.23a	46.50 ± 1.23a	13.97 ± 0.69a
粤西	1.50 ± 0.14b	7.11 ± 0.44b	46.10 ± 0.72a	10.63 ± 1.04b
粤中	1.40 ± 0.14b	6.49 ± 0.50b	41.54 ± 1.38b	10.46 ± 0.97b

1) 表中数据为平均值 ± 标准误, 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法).

2.2 不同区域菜园土壤微生物碳源利用能力

Biolog Eco 微平板上含有 31 种碳源, 根据碳源官能团不同将其分为 6 类, 其中, 聚合物类 4 种, 碳水化合物类 10 种, 羧酸类 7 种, 氨基酸类 6 种, 胺类 2 种, 酚类 2 种. 4 个区域土壤微生物群落对 6 类碳源的相对利用率见图 2. 由图 2 可以看出, 菜园土壤微生物在碳源代谢方面优势群落依次为氨基酸类代谢群落、胺类代谢群落、羧酸类代谢群落, 对氨基酸类的利用程度较高, 对聚合物类的利用程度较低. 4 个不同区域菜园土壤微生物对 6 类碳源的利用程度存在差异, 同一区域对不同碳源的利用程度也有差异, 如: 粤东地区土壤微生物对羧酸类的利用程度最高, 相对利用率为 20.1%, 酚类最低, 为 13.2%; 粤中地区土壤微生物对氨基酸类的利用程度最高, 相对利用率为 20.6%, 对碳水化合物类利用最低, 为 12.4%.

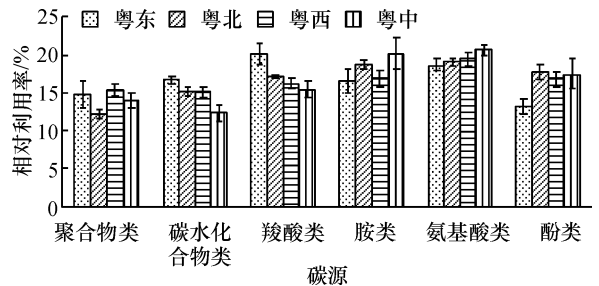


图 2 不同区域菜园土壤微生物群落对 Biolog 生态微平板中 6 类碳源的相对利用率

Fig. 2 Relative utilization ratios of 6 groups of carbon sources in Biolog-Eco-plate by vegetable garden soil microbes in different regions

不同区域对同一碳源的利用情况存在差异 (表 3), 粤北地区菜园土壤微生物对 6 类碳源的利用能力均高于其他 3 个区域, 且对羧酸类、氨基酸类和酚类的利用能力显著高于其他 3 个区域. 不同区

域对同一碳源利用程度的差异表明不同区域优势群落不同,这是由于各区域温湿条件和施肥制度不同,

导致优势群落有所不同,因此,各区域土壤微生物功能多样性也不同.

表3 菜园土微生物利用碳源底物能力比较¹⁾

Tab.3 Comparison of carbon substrate utilization by vegetable garden soil microbial community in different regions

区域	聚合物类	碳水化合物类	羧酸类	胺类	氨基酸类	酚类
粤东	1.19 ± 0.14a	1.57 ± 0.17ab	1.70 ± 0.15b	1.74 ± 0.24ab	1.84 ± 0.21b	1.37 ± 0.19b
粤北	1.51 ± 0.08a	1.92 ± 0.11a	2.13 ± 0.06a	2.35 ± 0.10a	2.39 ± 0.09a	2.19 ± 0.10a
粤西	1.37 ± 0.14a	1.36 ± 0.14b	1.47 ± 0.14bc	1.65 ± 0.22b	1.76 ± 0.15b	1.54 ± 0.18b
粤中	1.24 ± 0.13a	1.14 ± 0.16b	1.28 ± 0.12c	1.87 ± 0.24ab	1.82 ± 0.18b	1.49 ± 0.16b

1)表中数值为平均值 ± 标准误,同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法).

2.3 不同区域菜园土壤微生物群落功能主成分分析

由于土壤微生物群落代谢功能与环境因子有关,可将PCA分析后的主成分纳入到与环境因子(温湿条件和施肥管理制度)的相关分析中,其各自的载荷不同代表了各个区域菜园土微生物碳代谢的差异.前11个主成分占总变异的100%,包含了全部的变异信息.根据提取的主成分个数一般要求累计方差贡献率达到85%的原则^[8],共提取了5个主成分,累计贡献率达88.20%.其中第1主成分(PC1)的方差贡献率为54.76%,第2主成分(PC2)为13.25%.第3~5主成分贡献率均较小,分别为8.38%、8.00%和3.81%.选取前2个主成分进行分析,以PC1为横轴、PC2为纵轴,得到不同处理土壤微生物碳源利用的主成分分析图(图3).由图3可以看出,4个不同区域的土壤微生物在PC1轴和PC2轴上的得分系数有很好的分离,粤北地区在PC1轴上与其他3个区域的类群散点距离较大,粤中地区在PC2轴上与粤东地区和粤西地区差异较大,表明不同区域土壤微生物在碳源利用模式上有明显差异;粤东和粤西2个区域土壤微生物群落具有相似的碳源利用模式,土壤微生物群落代谢功能相似. Garland^[6]认为,各样本在空间位置上的不同是和碳源底物的利用能力相关联的,即各样本在PC空间轴坐标的差异与聚集在该PC轴上碳源的利用能力相关联.

Choi 等^[5]认为,主成分1和主成分2上大于0.18或小于-0.18的载荷系数可认为具有较高的载荷量.主成分分析中的载荷因子可反映不同区域菜园土壤微生物碳代谢的差异,绝对值越大表明该基质的影响越大.由表4可以看出,4个不同区域土壤微生物代谢基质主成分1载荷0.18以上的基质

表4 对主成分贡献大于0.18或小于-0.18的主要碳源
Tab.4 Main carbon sources on the contribution of principal components

碳源	PC1	PC2
丙酮酸甲酯	0.20	0.18
吐温40	0.19	0.09
吐温80	0.18	-0.13
α-环式糊精	0.18	0.07
肝糖	0.18	-0.06
D-纤维二糖	0.20	0.08
α-D-乳糖	0.15	-0.24
β-甲基-D-葡萄糖苷	0.20	-0.22
D-木糖	0.21	0.23
I-赤藻糖醇	0.19	-0.17
D-甘露醇	0.18	0.01
N-乙酰基-D-葡萄糖胺	0.11	-0.26
葡萄糖-1-磷酸盐	0.18	-0.08
D,L-α-甘油	0.19	-0.19
D-半乳糖醛酸	0.17	0.18
2-羟苯甲酸	0.20	0.17
4-羟基苯甲酸	0.22	-0.18
γ-羟基丁酸	0.02	0.37
衣康酸	0.19	0.04
α-丁酮酸	0.21	0.17
L-精氨酸	0.18	0.26
L-d-冬酰胺酸	0.19	0.24
L-苯基丙氨酸	0.21	0.09
L-丝氨酸	0.19	-0.23
L-苏氨酸	0.22	0.20
甘氨酸-L-谷氨酸	0.18	-0.23
苯乙胺	0.14	-0.23

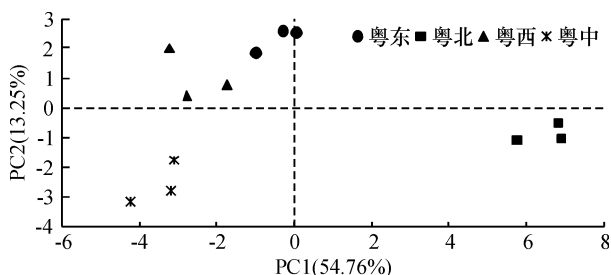


图3 不同区域菜园土壤微生物功能多样性主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of vegetable garden soil microbial community in different regions

有22种(其中碳水化合物类7种、氨基酸6种、聚合物类4种、羧酸类3种、酚类2种);主成分2 荷载0.18以上的基质有15种(其中碳水化合物类和氨基酸类各5种、羧酸类3种、酚类和胺类各1种).将每个主成分得分系数与6类碳源 $D_{590\text{nm}}$ 进行相关分析显示,6类碳源 $D_{590\text{nm}}$ 值与第1主成分得分系数均存在显著的正相关性($P < 0.05$),与除聚合物外的其他5类碳源存在极显著正相关($P < 0.01$),但与第2主成分无显著相关性.说明4个不同区域土壤微生物碳代谢功能群落结构的差异主要体现在主成分1 荷载因子高的碳源上.可见,在主成分分离中起主要作用的是氨基酸类、羧酸类、酚类和碳水化合物类碳源.上述结果表明,各区域土壤微生物在利用碳源的类型上是存在差异的,对碳源的利用有利于土壤微生物种群数量的提升,不同的碳源因子对土壤微生物群落功能的影响有显著差异,这是因为不同温湿度条件、管理方式和施肥制度的土壤中存在的碳源因子质与量是不同的^[9-11].

3 讨论与结论

AWCD 能够反映土壤微生物的代谢活性,是土壤微生物群落利用单一碳源能力的重要指标^[12].微生物对每种碳源的利用能力不同,导致微孔板上氧化剂颜色变化深浅不一,通过 AWCD 反映了土壤微生物利用碳源的能力和代谢活性大小,其值越高,土壤中微生物群落代谢活性也就越高^[13-14].粤北地区的土壤微生物 AWCD 显著高于其他3个区域,表明粤东、粤西、粤北和粤中4个不同地区的土壤微生物碳源利用能力差异很大,粤北地区的气候条件及施肥管理更适合微生物生长繁殖,使微生物群落代谢活性增加.其原因可能是微生物群落功能多样性受气候及施肥管理影响,因为粤北地区昼夜温差较大和降雨量充沛,施肥总量和化肥施用量显著低于其他3个区域,造成底物供给差异,使微生物群落活性和功能不同,影响土壤中一些微生物群落的生长繁殖和生理机能^[15-17],通过改变土壤微生物群落结构来提高土壤微生物群落代谢功能. Dilly 等^[18]的研究也表明在年均温和降雨量有差异的德国南、北、中部的秸秆腐解微生物群落表现出不同.

微生物群落在土壤中处于一个动态平衡,影响土壤的理化因子都会干扰土壤微生物群落的平衡从而影响土壤微生物的活性及其生态功能,进而影响土壤环境质量.多样性指数分析结果表明,粤北地区土壤微生物多样性指数均高于其他3个区域,

Shannon 指数显著高于其他3个区域,表明粤北地区的土壤微生物群落的物种丰富度优于其他3个区域;粤中地区的 Simpson 指数显著低于其他3个区域,说明粤中地区的土壤微生物群落的物种优势度最差,这可能与化肥施用量较大有关.由于微生物利用高 C/N 碳源,故其生长受氮素限制.

土壤微生物多样性反映了群落总体变化,但不能反映微生物群落代谢的详细信息,研究微生物对不同碳源利用能力的差异,有助于更加全面地了解微生物群落代谢功能特性^[19].对不同处理的 Biolog Eco 微平板上的6大类碳源利用能力分析可知,粤北地区的土壤微生物对酚类、羧酸类和氨基酸类的利用能力显著高于其他3个区域,说明不同地区土壤微生物的碳源利用能力差异较大,粤北地区的土壤微生物对碳源的利用能力较强,增强了土壤微生物群落代谢功能,这与 AWCD 和多样性指数的分析结果相一致.主成分分析结果表明,不同区域土壤微生物群落对碳源的代谢特征产生明显变异.

参考文献:

- [1] ZELLES L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: A review[J]. *Biol Fert Soils*, 1999, 29: 111-129.
- [2] 李玉新,赵忠,陈金良.沙棘林土壤微生物多样性研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2010, 38(8): 67-74.
- [3] GARLAND J L, MILLS A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 57: 2351-2359.
- [4] JEFFREY S B, DONALD D K. Microbial diversity in the rhizosphere of corn grown under conventional and low input systems[J]. *Appl Soil Ecol*, 1996, 5: 21-27.
- [5] CHOI K H, DOBBS F C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities [J]. *J Microbiol Methods*, 1999, 36(3): 203-213.
- [6] GARLAND J L. Analysis and interpretation of community-level physiological profiles in microbial ecology[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 1997, 24(4): 289-300.
- [7] TANG Q Y, ZHANG C X. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research [J]. *Insect Sci*, 2013, 20(2): 254-260.
- [8] HAO L R, FAN Y, HAO Z O, et al. Pragmatic statistic analysis of SPSS[M]. Beijing: China Water Power Press,

- 2002.
- [9] 陈皓文. 张家界、韶山和衡山空气微生物粒子沉降量分析[J]. 国土与自然资源研究, 2003(2):54-56.
- [10] 杨靖, 潘立勇, 韩炜. 空气微生物不同高度分布情况研究[J]. 环境科技, 2009, 22(6):50-53.
- [11] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 室外空气细菌群落特征研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(1):123-128.
- [12] ZABINSKI C A, GANNON J E. Effects of recreational impacts on soil microbial communities [J]. Environ Manage, 1997, 21(2):233-238.
- [13] KONOPKA A, OLIVER L, TURCO R F. The use of carbon substrate utilization patterns in environmental and ecological microbiology [J]. Microbiol Ecol, 1998, 35(2):103-115.
- [14] GARLAND J L. Analysis and interpretation of community-level physiological profiles in microbial ecology [J]. FEMS Microbiol Ecol, 1997, 24(4):289-300.
- [15] AVRAHAMI S, LIESACK W, CONRAD R. Effects of temperature and fertilizer on activity and community structure of soil ammonia oxidizers [J]. Environ Microbiol, 2003, 5(8):691-705.
- [16] TIAN G, BADEJO M, OKOH A, et al. Effects of residue quality and climate on plant residue decomposition and nutrient release along the transect from humid forest to Sahel of West Africa [J]. Biogeochem, 2007, 86(2):217-229.
- [17] THOMSEN I K, SCHJNNING P, JENSEN B, et al. Turn-over of organic matter in differently textured soils: II: Microbial activity as influenced by soil water regimes [J]. Geoderma, 1999, 89(3/4):199-218.
- [18] DILLY O, BLOEM J, VOS A, et al. Bacterial diversity in agricultural soils during litter decomposition [J]. Appl Environ Microbiol, 2004, 70(1):468-474.
- [19] LACOMBE S, BRADLEY R L, HAMEL C, et al. Do tree-based Intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities [J]. Agric, Ecosystems Environ, 2009, 131(1/2):25-31.

【责任编辑 周志红】

(上接第53页)

- [13] ITO K. Environmental factors influencing overwintering success of the golden apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae), in the northernmost population of Japan [J]. Appl Entomol Zool, 2002, 37(4):655-661.
- [14] MATSUKURA K, WADA T. Environmental factors affecting the increase of cold hardiness in the apple snail *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae) [J]. Appl Entomol Zool, 2007, 42(4):533-539.
- [15] TAKAHASHI K, SEKI M, NISHIDA H. Research for control of apple snail by rotary cultivator [J]. Jpn Soc Agric Mach, 2002, 64(6):76-81.
- [16] 叶建人, 冯永斌, 黄贤夫, 等. 化肥基施对水稻田福寿螺的影响 [J]. 植物保护, 2009, 35(1):152-154.
- [17] 董朝莉. 福寿螺的生物生态学特性及在广西的分布与危害现状研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2006.
- [18] 赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等. 福寿螺的过冷却研究 [J]. 生态学报, 2012, 32(5):1538-1545.
- [19] WATANABE T, TANAKA K, HIGUCHI H, et al. Emergence of the apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae), after irrigation in a paddy [J]. Appl Entomol Zool, 2000, 35(1):75-79.
- [20] TANAKA K, WATANABE T, HIGUCHI H, et al. Density-dependent growth and reproduction of the apple snail, *Pomacea canaliculata*: A density manipulation experiment in a paddy field [J]. Res Popul Ecol, 1999, 41(3):253-262.
- [21] PRASAD R, GANGALAH B, AIPE K C. Effect of crop residue management in rice-wheat cropping system on growth and yield of crops and on soil fertility [J]. Exp Agric, 1999, 35(4):427-435.
- [22] 高菊生, 曹卫东, 李东初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(16):4542-4548.
- [23] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10):1209-1216.
- [24] SEUFFERT M E, BURELA S, MARTIN P R. Influence of water temperature on the activity of the freshwater snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda: Ampullariidae) at its southernmost limit (Southern Pampas, Argentina) [J]. J Therm Biol, 2010, 35(2):77-84.
- [25] TEO S S. Evaluation of different duck varieties for the control of the golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) in transplanted and direct seeded rice [J]. Crop Prot, 2001, 20(7):599-604.
- [26] 秦钟, 方丽, 章家恩, 等. 不同控螺方式下稻田福寿螺种群的螺级结构及性比 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(3):452-459.

【责任编辑 霍欢】