

# 苄嘧磺隆对水稻田土壤微生物群落功能多样性的影响

张雯雯<sup>1,2</sup>, 徐 军<sup>2</sup>, 董丰收<sup>2</sup>, 刘新刚<sup>2</sup>, 向文胜<sup>1</sup>, 郑永权<sup>2\*</sup>

(1.东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 2.中国农业科学院植物保护研究所, 农业部作物有害生物综合治理重点实验室, 北京 100193)

**摘 要:**采用 BIOLOG 碳源底物利用法研究了不同浓度苄嘧磺隆(空白对照  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、田间最大推荐剂量  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10 倍田间最大推荐剂量  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )对水稻田土壤微生物群落功能多样性的影响。对 BIOLOG 微平板每孔颜色平均变化率(AWCD 值)的分析结果表明,低浓度苄嘧磺隆会提高微生物的碳源利用能力,高浓度苄嘧磺隆表现抑制作用,且随着时间延长,苄嘧磺隆对微生物的促进和抑制作用逐渐消失。施药后 96 h 水稻田土壤微生物群落功能多样性指数(Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数)的数据分析结果表明,苄嘧磺隆会导致水稻田土壤微生物群落的碳源利用能力集中、可利用碳源种类数减少以及碳源利用程度下降。对水稻田土壤微生物群落主成分分析结果表明,苄嘧磺隆改变了水稻田土壤微生物的群落结构,但随着时间延长,苄嘧磺隆对水稻田土壤微生物群落结构的影响逐渐消失。

**关键词:**苄嘧磺隆;微生物群落; BIOLOG; 功能多样性; 水稻田土壤

中图分类号: X503.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)09-1749-06 doi:10.11654/jaes.2014.09.012

## Responses of Microbial Community Functional Diversity to Bensulfuron-methyl in Paddy Soil

ZHANG Wen-wen<sup>1,2</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, DONG Feng-shou<sup>2</sup>, LIU Xin-gang<sup>2</sup>, XIANG Wen-sheng<sup>1</sup>, ZHENG Yong-quan<sup>2\*</sup>

(1.College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2.State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** A laboratory incubation study was conducted to ascertain the effects of bensulfuron-methyl on soil microbial community functional diversity in a paddy soil. Bensulfuron-methyl was applied to soil at three rates: 0 (control),  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  dry weight soil (the maximum recommended field rate) and  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  dry weight soil (ten-fold of the maximum recommended field rate). Soil microbial community functional diversity indexes with potential as bioindicators of soil health were measured using BIOLOG Ecoplates at different times after herbicide application. The average well color development (AWCD) indicated that the carbon source substrates utilization ability of microbial communities were enhanced at low application rates but inhibited at high application rates. However, bensulfuron-methyl did not show significant difference from the control soils as exposure time increased. At 96 h, Shannon index, Simpson index and McIntosh index showed that bensulfuron-methyl significantly decreased utilization ability and efficiency of carbon substrates, and number of utilizable carbon substrate species by the microbial communities. Principal component analysis (PCA) indicated the soil microbial community structure was shifted by bensulfuron-methyl application, but recovered at the end of experiment. These results suggest that bensulfuron-methyl application shifts the soil microbial community structure and function, but they tend to recover as time extends.

**Keywords:** bensulfuron-methyl; microbial community; BIOLOG; functional diversity; paddy soil

苄嘧磺隆(Bensulfuron-methyl)是 20 世纪 80 年代中期美国杜邦公司开发的一种新型磺酰胺类除草剂,具有高效、广谱、低毒及低用量等优点,是我国水

稻田中使用面积广、时间长、用量大的除草剂之一。由于在土壤中少量磺酰胺类除草剂残留就可对后茬敏感作物产生药害,其对土壤微生物的安全性引起了普遍关注<sup>[1-2]</sup>。关于除草剂苄嘧磺隆的研究,国内外的报道主要侧重于它的化学水解、光解以及在土壤中的吸附和微生物降解等方面<sup>[3-6]</sup>。土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的部分,在推动土壤物质转换、能量流动和生物地化循环中起着重要作用<sup>[7]</sup>。许多土壤微生物指标如土壤微生物量、酶活性和微生物群落结构多样

收稿日期: 2014-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(31000863, 31171879); 公益性行业(农业)科研专项(201203098)

作者简介: 张雯雯(1989—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 从事农药环境安全性评价研究。E-mail: zhangwenwen419@126.com

\* 通信作者: 郑永权 E-mail: zhengyongquan@ippcaas.cn

性与功能多样性的变化都能反映出土壤质量和健康状况<sup>[8]</sup>。因此,研究除草剂苄嘧磺隆对农田土壤微生物的影响具有重要意义。本文首次从微生物功能多样性变化的角度,探讨了苄嘧磺隆对水稻田土壤微生物的生态毒理影响,以期对稻田土壤农药污染的风险评估和苄嘧磺隆的合理使用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 药剂与仪器

苄嘧磺隆标准品(纯度 96.8%,北京 Dikma 技术公司);丙酮(北京化工试剂公司)和氯化钠(国药集团化学试剂有限公司)均为分析纯;超纯水(Mill-Q 超纯水)

BIO-TEK Elx808 读数仪(Biolog, Hayward, CA, USA);XW-80A 漩涡混合器(美国 Scientific industries 公司);TG16-WS 台式快速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司);HY-5 回旋振荡器(常州国华电器);KQ-500B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验设计

供试土壤样品采自北京海淀区上庄农场两年内未施用农药的水稻田表层土(0~15 cm),供试土壤为粉砂质壤土,其理化性质如下:粘粒 3.78%,粉砂 62.21%,砂粒 34.01%,有机质 15.27 g·kg<sup>-1</sup>,氨态氮 7.00 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮 19.18 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 30.93 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 165.20 mg·kg<sup>-1</sup>,pH8.19。从 5 个不同的点采集土样,混匀,过 2 mm 筛,于 25 °C 黑暗培养 10 d,使其含水量保持 40%左右。称取相当于 150 g 干重的土样,加两个不同浓度的丙酮稀释的苄嘧磺隆,使其在土样中的量分别为田间最大推荐剂量(0.4 mg·kg<sup>-1</sup> 干土, T1)和 10 倍田间最大推荐剂量(4 mg·kg<sup>-1</sup> 干土, T10),以仅加丙酮的处理为对照(CK),涡旋混匀,每个处理 3 个重复,采用差减法补充水分以保证含水量稳定。置于 25 °C 培养,分别于第 1、14、28、42 d 采样测定。

#### 1.2.2 土壤微生物群落功能多样性测定

称 10 g 干重的新鲜土样加入 250 mL 三角瓶中,加入 90 mL 灭菌的 0.85% NaCl 溶液,在 25 °C、200 r·min<sup>-1</sup> 条件下黑暗振荡 60 min,静置 30 min,然后按照逐步稀释法得 10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup> 梯度液,将 10<sup>-3</sup> 稀释液接种到 BIOLOG ECO 微平板中,每孔 150 μL,每个样品 3 个重复,于恒温箱 25 °C 培养,每隔 24 h 用 BIO-TEK Elx808 读数仪读取 590 nm 吸光值<sup>[9]</sup>。

### 1.2.3 数据处理

(1)AWCD 值,平均每孔颜色变化率。计算方法:AWCD=Σ(A-A<sub>CK</sub>)/31。A 为各反应孔的吸光值,A<sub>CK</sub> 为对照孔的吸光值。

(2)土壤微生物群落功能多样性分析。土壤微生物群落功能多样性以 Shannon、Simpson 和 McIntosh 3 种指数来表征:Shannon 指数用于评估丰富度,计算公式为  $H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$ ,P<sub>i</sub> 为第 i 孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率;Simpson 指数用于评估常见种优势度,计算公式为  $D = 1 - \sum (P_i)^2$ ,P<sub>i</sub> 为第 i 孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率;McIntosh 指数是基于群落物种多维空间距离的多样性指数,为一致性的量度,计算公式为  $U = \sqrt{\sum (n_i^2)}$ ,n<sub>i</sub> 为第 i 孔的相对吸光值。

(3)主成分分析用来评估苄嘧磺隆对土壤微生物群落结构的影响。数据的显著性差异采用 SAS 9.1 进行方差分析(ANOVA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 苄嘧磺隆对土壤微生物群落代谢活性的影响

不同时间施用不同浓度的苄嘧磺隆后水稻田土壤微生物的 AWCD 值(土壤微生物群落代谢活性)的变化如图 1 所示。施药后第 1 d,温育 96 h 后 T1 和 T10 的 AWCD 值显著高于 CK(P<0.01),表明施用苄嘧磺隆会提高微生物的碳源利用能力;施药后第 14 d,T1 比 CK 高出 24%,T10 显著低于 CK,说明随着时间延长低浓度苄嘧磺隆使土壤微生物保持较强的代谢活性,高浓度苄嘧磺隆对微生物利用碳源的能力表现为抑制作用;施药后第 28 d,T1 比 CK 高出 14%,T10 与 CK 无显著差异,说明随时间延长低浓度苄嘧磺隆对微生物的刺激作用逐渐减弱,高浓度苄嘧磺隆对微生物利用碳源能力的抑制作用逐渐消失;施药后第 42 d,T1 和 T10 与 CK 均无显著差别,表明随时间延长除草剂苄嘧磺隆对土壤微生物代谢活性的影响逐渐消失。

### 2.2 苄嘧磺隆对土壤微生物群落功能多样性的影响

苄嘧磺隆对土壤微生物群落功能多样性指数的影响均采用 96 h 数据进行分析。

Shannon 指数反映微生物群落物种变化度和差异度,受样本总数、拟种数和均匀度影响<sup>[10]</sup>。通常,物种数多且较均匀的群落,Shannon 指数较高。应用于 BIOLOG 生态板时,Shannon 指数越高表示微生物利用的碳源种类越多。施药后第 1 d,T1 的 Shannon 指

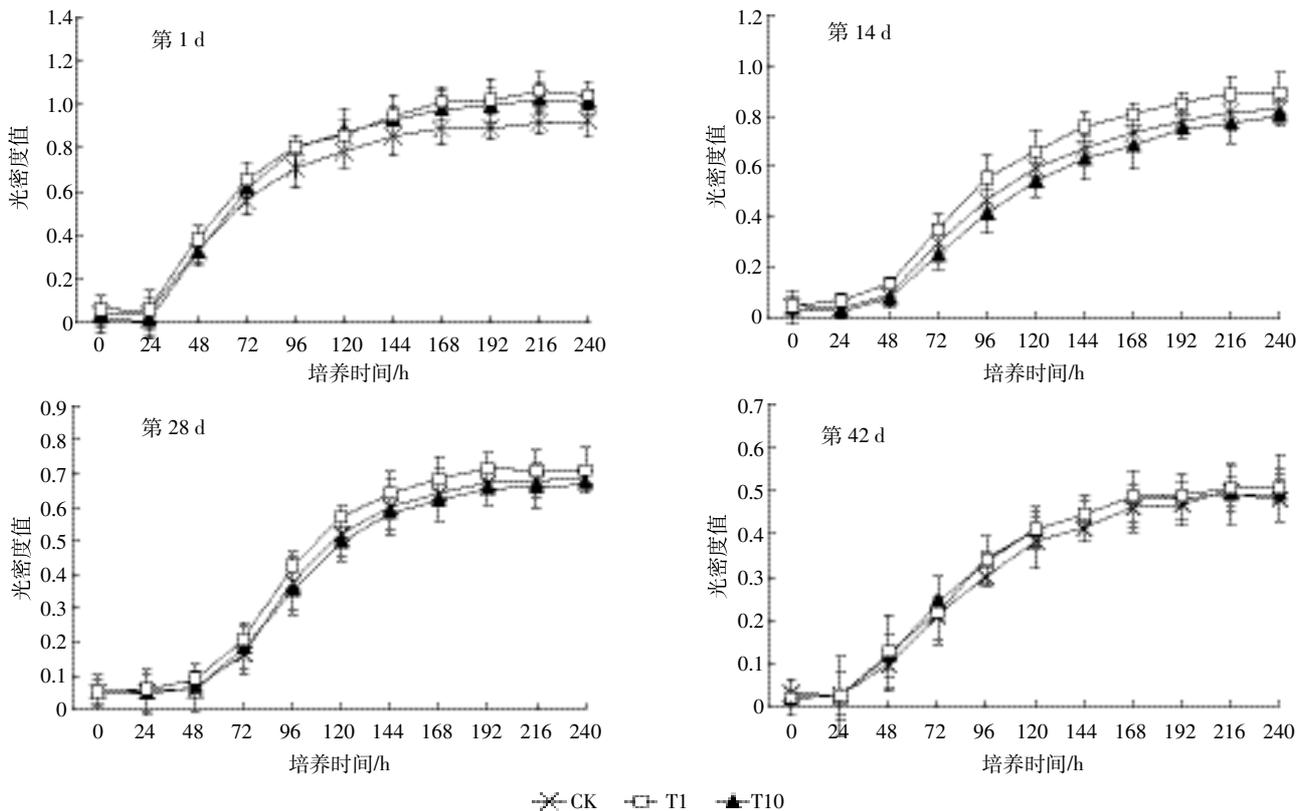


图 1 不同时间施用苄嘧磺隆后土壤中 AWCD 值的变化( $n=3$ )

Figure 1 Average well color development (AWCD) of soil samples collected at different times after addition of bensulfuron-methyl. Mean values ( $n=3$ ) $\pm$ S.D.

数显著偏高, T10 与 CK 无显著差异, 说明低浓度苄嘧磺隆可提高微生物碳源利用能力。施药后第 14 d, T1 的 Shannon 指数与 CK 无显著差异, T10 的 Shannon 指数显著偏低, 说明低浓度苄嘧磺隆对微生物碳源利用能力的促进作用消失, 高浓度苄嘧磺隆可降低微生物碳源利用能力。施药后第 28 d 和第 42 d, T1 和 T10 均表现出 Shannon 指数显著下降, 说明苄嘧磺隆会造成土壤微生物群落可利用碳源种类数下降(图 2A)。

Simpson 指数较多反映微生物群落中最常见物种, 用于评估常见种优势度, Simpson 指数越高, 说明群落集中性越高, 即多样性程度越低<sup>[11]</sup>。应用于 BIOLOG 生态板时, Simpson 指数越高, 表示微生物利用的碳源种类越集中, Simpson 指数越低, 微生物可利用的碳源种类数越多。施药后第 1 d 和第 14 d, T1 的 Simpson 指数明显比 CK 低, T10 与 CK 均无显著差异, 说明低浓度苄嘧磺隆可提高微生物碳源利用能力, 微生物可利用碳源种类数增多, 这与 AWCD 值和 Shannon 指数的结果一致。施药后第 28 d, T10 的 Simpson 指数显著高于 CK, 说明高浓度苄嘧磺隆会导致微生物碳源利用能力集中, 微生物可利用的碳源

种类数量减少。施药后第 42 d, T1 的 Simpson 指数显著高于 CK, 表示低浓度苄嘧磺隆也会导致微生物碳源利用能力集中(图 2B)。

McIntosh 指数是基于微生物群落物种多维空间上 Euclidian 距离的多样性指数, 一般物种数越多, 某些优势明显物种群落的 McIntosh 值大<sup>[12]</sup>。应用于 BIOLOG 生态板时, McIntosh 指数能反映碳源利用种类数量的大小, 并能区分不同的碳源利用程度, 若碳源利用种类数量相同, 则碳源利用程度越大, McIntosh 指数越大。由图 2C 可知, 施药后第 1 d, T1 的 McIntosh 指数显著偏高, T10 与 CK 均无显著差异, 说明低浓度的苄嘧磺隆可提高微生物碳源利用程度。施药后第 14 d, T1 的 McIntosh 指数与 CK 均无显著差异, T10 的 McIntosh 指数显著偏低, 说明高浓度的苄嘧磺隆显著降低微生物的碳源利用程度。施药后第 28 d, T1 和 T10 的 McIntosh 指数与 CK 均表现出显著下降, 说明随着培养时间的延长, 低浓度的苄嘧磺隆也降低了微生物碳源利用程度。施药后第 42 d, T1 与 CK 无显著差异, 说明随时间延长苄嘧磺隆对微生物群落的影响消失。

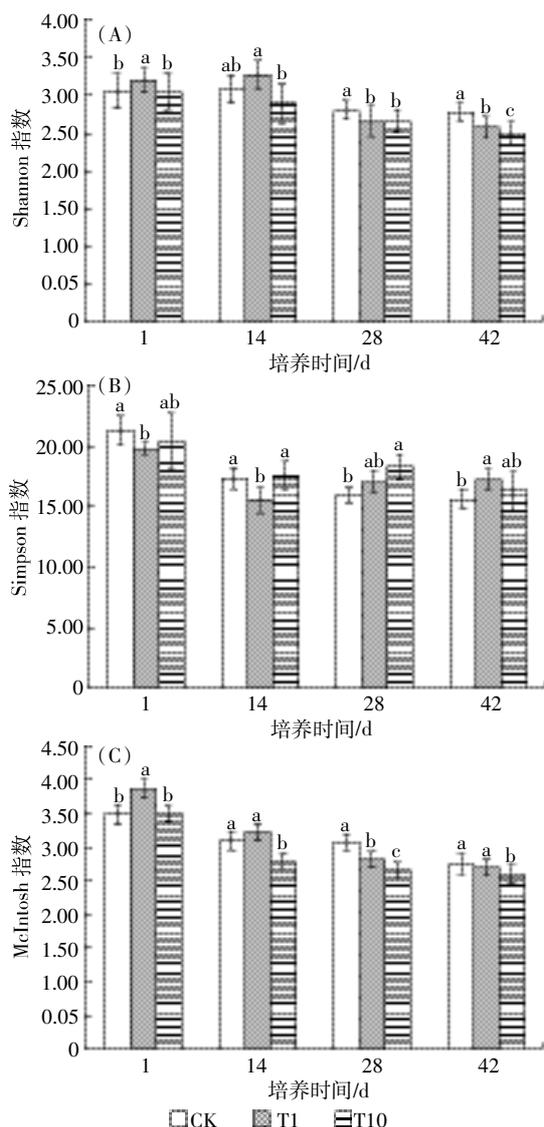


图2 苄嘧磺隆对土壤微生物 Shannon 指数(A)、Simpson 指数(B)和 McIntosh 指数(C)的影响( $P < 0.05$ )

Figure 2 Effects of bensulfuron-methyl on Shannon index (A), Simpson index (B) and McIntosh index (C) of soil microbes. Mean values ( $n=3$ )  $\pm$  S.D. ( $P < 0.05$ )

综合 3 个多样性指数结果可见,施用苄嘧磺隆会导致水稻田土壤微生物群落的碳源利用能力集中、可利用碳源种类数减少、碳源利用程度下降。

### 2.3 苄嘧磺隆对土壤微生物碳源利用特征主成分分析的影响

采用各处理 96 h 数据从总体上对微生物碳源利用特征进行主成分分析得出:第一主成分(PC1, 反应微生物信息量最多)和第二主成分(PC2, 反应微生物信息量第二多)的方差贡献率分别为 65.11% 和 6.69%, 累计方差贡献率 72.06%(图 3)。

施药后第 1 d, PC1 各处理差异不显著, PC2 能较好区分 CK 和 T1, 说明施用苄嘧磺隆会影响土壤微生物群落碳源利用能力, 且低浓度处理较早发生变化, 但是由于 PC2 的贡献率较低, 所以苄嘧磺隆对微生物群落结构的影响较小。施药后第 14 d, PC1 各处理差异不显著, PC2 能较好区分 CK 和 T1、T10, 说明随时间延长, 高浓度苄嘧磺隆会引起微生物碳源利用能力发生变化。施药后第 28 d, PC1 和 PC2 能较好地将 CK 与其他两个处理区分开, 说明苄嘧磺隆对微生物碳源利用能力的影响仍存在, 但低浓度影响力开始减弱。施药后第 42 d, PC1、PC2 均无法区分 CK 和 T1, PC1 能够较好区分 CK 和 T10, 但不如施药后第 28 d 的区分显著, 说明苄嘧磺隆对土壤微生物的碳源利用能力的影响逐渐减弱。主成分分析结果表明, 除草剂苄嘧磺隆改变了水稻田土壤微生物的群落结构, 但随时间延长高浓度处理土壤的微生物群落结构与对照土壤的差异逐渐减小, 低浓度处理恢复到对照水平。

### 3 讨论

土壤是作物生长重要的基质。就目前的技术水平而言, 喷施时高达 80% 左右的农药进入环境特别是土壤中; 而用于土壤处理或茎叶处理时, 杀虫剂、杀菌剂和大部分除草剂则会直接或间接施入土壤中。因此长期大量重复使用农药不仅会对后茬作物产生药害, 而且破坏了土壤生态系统和资源的可持续利用性<sup>[13]</sup>。本实验中, 对 AWCD 指数分析结果显示, 低浓度苄嘧磺隆促进了微生物利用碳源的能力, 而高浓度苄嘧磺隆对微生物利用碳源的能力则表现出抑制作用, 与丁草胺对水稻田土壤微生物影响的研究结果一致<sup>[14]</sup>。向月琴等研究发现多菌灵(施用量  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )也会导致土壤微生物群落的 AWCD 值降低<sup>[15]</sup>。

对土壤微生物群落功能多样性指数 Shannon 指数的分析结果显示, 苄嘧磺隆会导致微生物群落可利用碳源种类数显著下降。该结果与张倩茹等的研究结果类似, 他们发现硫酸铜及硫酸铜-乙草胺复合物均会导致黑土土壤微生物群落的 Shannon 指数显著下降<sup>[16]</sup>。本研究中对 Simpson 指数的分析结果表明, 施用苄嘧磺隆引起微生物碳源利用能力集中, 导致微生物可利用碳源种类数减少, 与百菌清对土壤微生物群落 Simpson 指数影响的研究结果一致<sup>[17]</sup>。这可能是由于苄嘧磺隆会对土壤中某些功能菌群产生毒害作用, 致使可利用的碳源种类减少。Gigliotti 等<sup>[18]</sup>证实了施

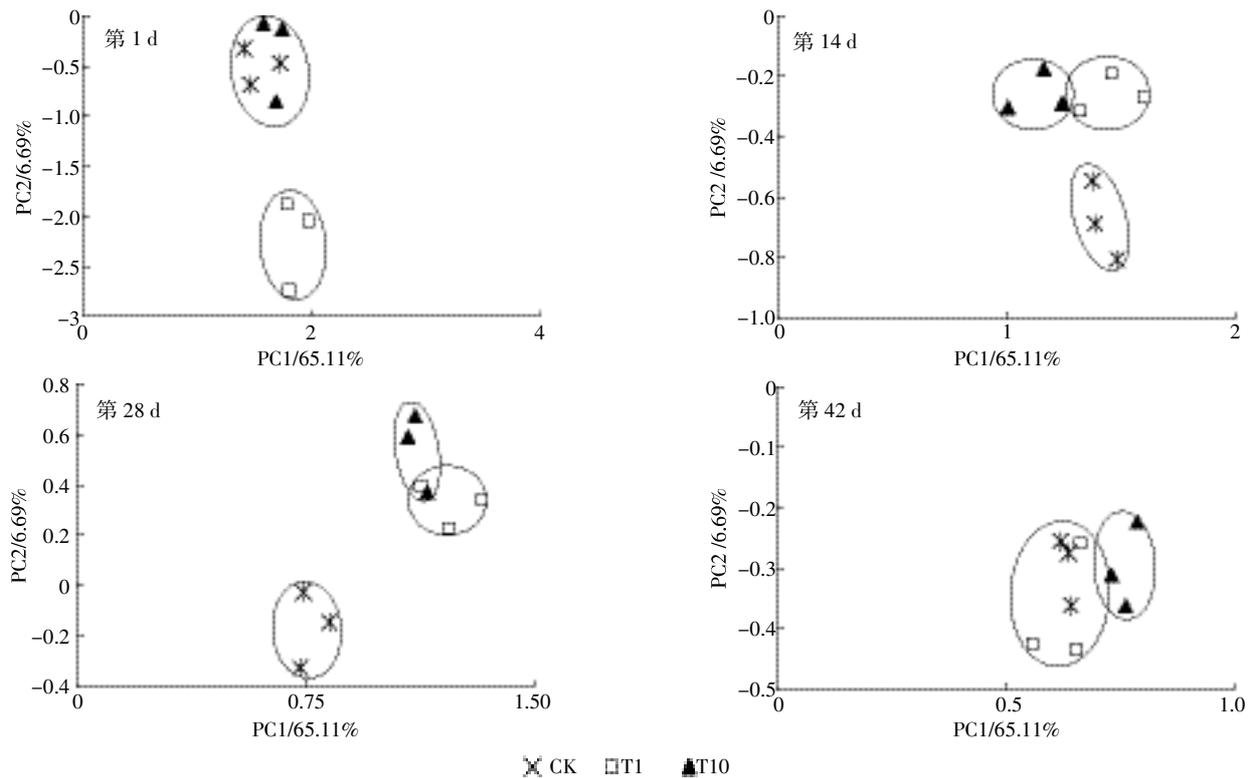


图3 施用苄嘧磺隆后不同采样时间碳源利用特征主成分分析

Figure 3 Principal component analysis (PCA) of carbon source utilization patterns at different sampling times following addition of bensulfuron-methyl

用高剂量苄嘧磺隆且时间较长的处理条件下,土壤的硝化作用会被显著抑制。Saeki 等<sup>[9]</sup>研究结果也表明施用推荐剂量和 10 倍推荐量的苄嘧磺隆都显著抑制土壤中硝酸铵的转化作用。对 McIntosh 指数的分析表明,施用苄嘧磺隆显著降低了微生物群落对碳源的利用程度,张倩茹等也发现硫酸铜能显著降低黑土微生物群落的 McIntosh 指数<sup>[16]</sup>,Fang 等<sup>[20]</sup>同样证实了施用毒死蜱会造成 McIntosh 指数下降,说明微生物群落利用碳源程度显著降低。

本研究主成分分析结果表明,施用苄嘧磺隆改变了水稻田土壤微生物的群落结构,但是低浓度处理可以较快恢复到对照水平。林晓燕等采用 DGGE(变性梯度凝胶电泳)分子指纹技术探索发现,低浓度苄嘧磺隆处理土样中微生物群落结构之间差异较小<sup>[21]</sup>。盛宇等采用磷脂脂肪酸(PLFA)分析法证实了氯嘧磺隆显著改变了大豆田土壤微生物群落结构<sup>[22]</sup>。综合前人对苄嘧磺隆以及其他农药的研究和本文对苄嘧磺隆的研究结果可见,苄嘧磺隆会影响水稻田土壤微生物群落的碳源利用能力,并且改变微生物群落结构,但是这种影响是短暂的,随时间延长,微生物群落结构及其功能一般能得到恢复。

#### 4 结论

通过研究除草剂苄嘧磺隆对水稻田土壤微生物群落功能多样性的影响可以得出以下结论:

(1)低浓度苄嘧磺隆会提高水稻田土壤微生物群落碳源利用能力,高浓度表现抑制作用,随时间延长苄嘧磺隆对水稻田土壤微生物群落代谢活性的影响逐渐消失。

(2)施用苄嘧磺隆会导致水稻田土壤微生物群落的碳源利用能力集中、可利用碳源种类数减少、碳源利用程度下降。

(3)除草剂苄嘧磺隆会改变水稻田土壤微生物的群落结构,但随时间延长其对微生物群落结构影响会逐渐减弱至消失。为更有效、准确地获得除草剂苄嘧磺隆对微生物群落结构和功能的影响,还需要将该方法与其他分析方法如 PLFA 或 DGGE 技术等相结合进行更深入的研究。

(4)除草剂苄嘧磺隆在土壤中的降解动态与土壤微生物群落结构和功能多样性之间的关系及其对水稻田土壤中利用特异性碳源的功能微生物菌群的影响也有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 苏少泉. 我国除草剂造成作物的药害与预防[J]. 现代农药, 2006, 5(4):1-5.  
SU Shao-quan. Crop injury from herbicide and its prevention in China [J]. *Modern Agrochemicals*, 2006, 5(4):1-5.
- [2] 肖春玲, 邹小明, 王安萍, 等. 苄嘧磺隆对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(5):133-136.  
XIAO Chun-ling, ZOU Xiao-ming, WANG An-ping, et al. Effect of bensulfuron methyl on paddy soil microbial and enzyme activities [J]. *Journal of Jinggangshan University (Natural Science)*, 2010, 31(5):133-136.
- [3] 叶发兵, 黄春保, 熊绪杰, 等. 三种土壤矿物对苄嘧磺隆的吸附研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(3):485-489.  
YE Fa-bing, HUANG Chun-bao, XIONG Xu-jie, et al. Study on adsorption of bensulfuron-methyl by three kinds of soil minerals [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(3):485-489.
- [4] El-ghamery A, Xu J, Huang C, et al. Microbial response to bensulfuron-methyl treatment in soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(1):136-139.
- [5] 谢晓梅, 廖敏, 黄昌勇, 等. 除草剂苄嘧磺隆对稻田土壤微生物活性和生物化学特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(1):67-72.  
XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUANG Chang-yong, et al. Effect of bensulfuron-methyl on soil microbial activity and biochemical characteristics in paddy [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(1):67-72.
- [6] 张松柏, 张德咏, 罗香文, 等. 一株降解苄嘧磺隆光合细菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 生态环境, 2008, 17(5):1774-1777.  
ZHANG Song-bai, ZHANG De-yong, LUO Xiang-wen, et al. Isolation and identification of bensulfuron methyl degrading strain PSB07-6 and its degradation characteristics [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5):1774-1777.
- [7] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(9):8-14.  
YUAN Ying-hong, FAN Hong-bao, LI Hui-xin, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microorganism in a Chinese fir plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(9):8-14.
- [8] Muoz-leoz B, Ruiz-romera E, Antig Edad I, et al. Tebuconazole application decreases soil microbial biomass and activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10):2176-2183.
- [9] Buyer J S, Drinkwater L E. Comparison of substrate utilization assay and fatty acid analysis of soil microbial communities [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1997, 30(1):3-11.
- [10] 徐秋芳, 姜培坤, 邬奇峰, 等. 集约经营板栗林土壤微生物量碳与微生物多样性研究[J]. 林业科学, 2007, 43(3):15-19.  
XU Qiu-fang, JIANG Pei-kun, WU Qi-feng, et al. Effects of intensive management on soil microbial biomass and functional diversity in castanea mollissima stands [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(3):15-19.
- [11] Staddon W, Duchesne L, Trevors J. Microbial diversity and community structure of postdisturbance forest soils as determined by sole-carbon-source utilization patterns [J]. *Microbial Ecology*, 1997, 34(2):125-130.
- [12] 徐秋芳, 姜培坤, 陆贻通. 不同施肥对雷竹林土壤微生物功能多样性影响初报[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(5):548-552.  
XU Qiu-fang, JIANG Pei-kun, LU Yi-tong. Soil microbial diversity with different fertilizer types and rates in a *Phyllostachys praecox* stand [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(5):548-552.
- [13] Bending G D, Lincoln S D, Edmondson R N. Spatial variation in the degradation rate of the pesticides isoproturon, azoxystrobin and diflufenican in soil and its relationship with chemical and microbial properties [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(2):279-287.
- [14] 张仕颖, 夏运生, 肖炜, 等. 除草剂丁草胺对高产水稻土微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5):815-819.  
ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, XIAO Wei, et al. Effects of butachlor on the functional diversity of microbial communities in high-yield paddy soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5):815-819.
- [15] 向月琴, 高春明, 庞国辉, 等. 土壤中多菌灵的降解动态及其对土壤微生物群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2008, 41(4):699-704.  
XIANG Yue-qin, GAO Chun-ming, PANG Guo-hui, et al. Degradation dynamics of carbendazim in soil and its effects on soil microbial community diversity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 41(4):699-704.
- [16] 张倩茹, 周启星, 张惠文. 乙草胺与硫酸铜对黑土微生物的复合生态影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4):826-831.  
ZHANG Qian-ru, ZHOU Qi-xing, ZHANG Hui-wen. Combined ecological effects of acetochlor and copper sulphate on microorganisms in phaeozem [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):826-831.
- [17] 郝乙杰, 向月琴, 方华, 等. 百菌清在土壤中的降解及对土壤微生物多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1672-1676.  
HAO Yi-jie, XIANG Yue-qin, FANG Hua, et al. Degradation of chlorothalonil in soil and its effects on soil microbial diversity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1672-1676.
- [18] Gigliotti C, Allieve L, Salardi C, et al. Microbial ecotoxicity and persistence in soil of the herbicide bensulfuron-methyl [J]. *Journal of Environmental Science & Health Part B*, 1998, 33(4):381-398.
- [19] Saeki M, Toyota K. Effect of bensulfuron-methyl (a sulfonyleurea herbicide) on the soil bacterial community of a paddy soil microcosm [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40(2):110-118.
- [20] Fang H, Yu Y, Chu X, et al. Degradation of chlorpyrifos in laboratory soil and its impact on soil microbial functional diversity [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3):380-386.
- [21] 林晓燕. 苄嘧磺隆降解菌的分离鉴定特性研究及生态学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
LIN Xiao-yan. Isolation, identification and characteristics of bensulfuron-methyl degrading bacteria and effects of bensulfuron-methyl on soil microbial ecology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [22] 盛宇, 徐军, 刘新刚, 等. 氯嘧磺隆对土壤微生物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2992-2996.  
SHENG Yu, XU Jun, LIU Xin-gang, et al. Effects of chlorimuron-ethyl on soil microbial community structure in soybean field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2992-2996.