

沈玥, 宋放, 陈爽, 等. 喷施除草剂对橘园土壤及果实品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(5): 98-107.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.05.013

## 喷施除草剂对橘园土壤及果实品质的影响

沈玥<sup>1</sup>, 宋放<sup>2</sup>, 陈爽<sup>1</sup>, 李红飞<sup>1</sup>, 郭慧芸<sup>1</sup>, 潘志勇<sup>1</sup>

1. 华中农业大学园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉430070;  
2. 湖北省农业科学院果树茶叶研究所, 武汉430064

**摘要** 为研究3种常用除草剂(草甘膦异丙胺盐、草铵膦、精喹禾灵)对橘园土壤理化性质、土壤根际微生物及果实品质的影响,以20年生温州蜜柑结果树为对象,检测喷施除草剂前后土壤理化性质、土壤根际微生物及果实品质等指标的变化。结果显示:喷施草甘膦异丙胺盐导致橘园土壤酸化,而喷施草铵膦或精喹禾灵对土壤pH无显著影响;喷施3种除草剂均导致土壤容重增加,且对土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脲酶及蔗糖酶活性有不同程度的激活作用;喷施3种除草剂对土壤有机质、土壤碱解氮和速效钾、速效磷等养分含量无显著影响;喷施3种除草剂导致土壤微生物群落组成显著变化和根际微生物多样性下降,导致土壤放线菌门、酸杆菌门等微生物相对丰度下降以及蓝细菌门等微生物相对丰度上升;喷施3种除草剂均导致果实单果质量、可溶性固形物、维生素C含量下降、可滴定酸含量上升并推迟了果皮转色。研究结果表明,施用除草剂对橘园土壤生态及果实品质有显著不利影响,应客观认识除草剂的作用并合理施用除草剂。

**关键词** 温州蜜柑; 除草剂; 土壤; 微生物; 果实品质

**中图分类号** S666.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)05-0098-10

杂草防治是橘园土壤管理的重要环节。尽管人工除草是最环保的举措,但由于农村劳动力短缺、人工成本高、除草效率低等,生产上普遍通过喷施除草剂来除草<sup>[1]</sup>。然而除草剂是一类有毒性的有机污染物,且所喷施的除草剂仅有一小部分能被植物吸收,绝大部分会流失并进入土壤,造成环境污染,同时威胁人畜安全<sup>[2]</sup>。生产上常用的除草剂有草甘膦及其衍生物、草铵膦以及精喹禾灵等。草甘膦对1年生及多年生禾本科杂草均有防除作用<sup>[3]</sup>;草铵膦是一种广谱触杀型有机磷除草剂,其毒性低、活性高、易降解,具有较强的环境相容性和植物广谱性<sup>[4]</sup>;精喹禾灵是一种主要用于大豆、油菜等作物的除草剂,目前也有部分葡萄园、柑橘园用于防治禾本科杂草<sup>[5]</sup>。

施用除草剂会影响柑橘等作物的正常生长和抗性。张岳<sup>[6]</sup>发现施用20%和30%的草甘膦水剂均会影响柑橘毛细根生长,导致柑橘树易被病原真菌感染,从而使受药柑橘树更易感砂皮病;马小煊等<sup>[7]</sup>研究发现叶片喷施草甘膦对柑橘嫩梢有毒副作用,造成嫩梢嫩叶发黄甚至枯死,易形成丛生状芽和扭曲

针形叶,导致幼果脱落;钟德志<sup>[8]</sup>将80倍10%草甘膦水剂液误喷在温州蜜柑上导致全树叶片脱落,且次年春天抽生的新梢短小、新叶成扭曲针状叶。施用除草剂也会影响土壤的理化性质,如导致土壤含水量下降和容重上升<sup>[9]</sup>、土壤有机质含量降低和土壤肥力下降<sup>[10]</sup>、土壤碱解氮等氮素下降或流失<sup>[11]</sup>。

土壤微生物对土壤腐殖质形成、有机质分解、土壤肥力保持以及作物生长发育具有重要作用<sup>[12]</sup>,其中土壤细菌、放线菌和真菌等微生物的数量与土壤养分状况密切相关<sup>[13]</sup>。研究发现施用除草剂会影响土壤微生物的丰度及多样性。邹亚丽等<sup>[14]</sup>于苹果园分别施用2种盐剂草甘膦,发现土壤真菌数量显著增加,而放线菌数量显著降低,细菌总量则无明显变化。倪福乐等<sup>[15]</sup>发现200~500倍不同浓度的草甘膦均能显著降低盆栽砂糖橘的根际真菌、放线菌、细菌的丰度。Druille等<sup>[16]</sup>发现施用草甘膦导致包括伯克霍尔德菌属、假单胞菌属、丛枝菌根真菌和固氮根瘤菌属等植物有益微生物的丰度及多样性下降。姚斌等<sup>[17]</sup>发现,土壤微生物的数量及多样性均随喷施阿

收稿日期:2022-06-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1000102);国家柑橘产业技术体系建设专项(CARS-26)

沈玥, E-mail: 920034691@qq.com

通信作者:潘志勇, E-mail: zypan@mail.hzau.edu.cn

特拉津除草剂浓度及次数的增加而降低。但也有研究表明草甘膦处理对板栗根际土壤细菌群落多样性无显著影响<sup>[18]</sup>。

综上,施用除草剂会对土壤理化性质和作物生长发育带来较大负面影响,但在柑橘等果树作物上尚缺乏系统研究,尤其是关于除草剂对土壤微生物的影响还不清晰甚至有一定争议。因此,本研究以柑橘主栽品种温州蜜柑为材料,调查了田间条件下草甘膦异丙胺盐、草铵膦及精喹禾灵等3种常用除草剂的施用对土壤理化性质、土壤微生物及果实品质的影响,旨在为客观认识除草剂的作用、科学施用除草剂提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与处理

选择华中农业大学柑橘试验基地温州蜜柑(国庆1号 *Citrus unshiu* Marc.cv.Guoqing No.1)结果树16株,树龄20 a, 树体长势一致。该地块5 a内未施用供试除草剂。将此16株供试植株随机分为对照组及T1、T2、T3共4组,每组4棵树。对照组采用人工刈割除草,处理组分别喷施3种不同的除草剂。T1为喷施0.5%草甘膦异丙胺盐(商品名:农达;农药登记证号:PD73-88)、T2为喷施0.5%草铵膦(商品名:焚草;农药登记证号:PD20171993)、T3为喷施0.2%精喹禾灵(商品名:精禾草克;农药登记证号:PD20095860)。遵循组间统一施药原则,自2021年4月1日首次施药后,每当杂草生长至出现第3片真叶或生长长度近3 cm时喷施除草剂<sup>[19]</sup>,直至果实成熟。本试验分别在4月1日、5月12日、5月29日、6月16日、7月3日、8月1日、8月22日、9月29日、10月4日、11月13日共施药10次。

### 1.2 土壤理化指标检测

于喷施除草剂后0 d、盛花期、坐果期、转色期4个时期随机选择每棵植株的4个不同方位,取表层土(0~10 cm)土样并将来自同一植株的土样混合作为1个样品<sup>[20]</sup>,利用电位法测土壤pH<sup>[21]</sup>,经典环刀法测土壤容重<sup>[21]</sup>。

果实成熟后沿树体滴水线取表层土壤(0~10 cm)。利用苯酚钠法测土壤脲酶活性,3,5-二硝基水杨酸法测土壤蔗糖酶活性,硝基酚比色法测土壤酸性和碱性磷酸酶活性<sup>[23]</sup>,重铬酸钾容量法-外加热法测土壤有机质含量,碱解-扩散法测土壤碱解氮含量,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测土壤速效磷含量,乙

酸铵交换-火焰光度法测土壤速效钾含量<sup>[24]</sup>。

### 1.3 土壤微生物检测

分别取每棵柑橘树滴水线附近0~10 cm表层土壤或根际土壤,将同一棵树4个不同方位的采样点的土样均匀混合为1个样品。使用OMEGA土壤DNA试剂盒(M5635-02)提取土壤总基因组DNA(Omega Bio-Tek, Norcross, GA, USA),使用NanoDrop NC2000分光光度计测量提取的土壤DNA的质量和浓度(Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)。利用正向引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGCAGCA-3')和反向引物806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')PCR扩增细菌16S rRNA基因的V3-V4区域,送上海派森诺公司使用Illumina NovaSeq测序。使用QIIME2和R(3.2.0)进行序列数据分析。随后利用QIIME2中的ASV表计算ASV水平的 $\alpha$ 多样性指数(Shannon多样性指数)以调查群落物种丰富度和多样性等,并可可视化箱线图;基于Bray-Curtis度量和UniFrac距离度量进行 $\beta$ 多样性分析,以调查样本中微生物群落的结构变化,并通过主坐标分析(PCoA)进行可视化。

### 1.4 果实产量和品质检测

果实达到可食用品质后(11月25日)采样,每棵树在树冠外围随机采集5个果实,施药和对照每个处理均为4棵树,每个处理各20个果实。利用电子天平称取单果质量;利用\*cm-5色彩色差仪(美能达,日本)测定果皮的亮度值( $L^*$ )、红绿值( $a^*$ )、黄蓝值( $b^*$ ),并根据色差综合指标色差值的正负( $CCI=1000 \times a^*/(L^* \times b^*)$ )评价转色情况,CCI为负值代表蓝绿色程度高,为正值则表示果皮偏向红色<sup>[25]</sup>;每个处理的20个果实随机分为4份,每份5个果实均取一半果肉榨汁并混匀过滤,将滤液稀释50倍后滴于手持式数量测糖仪(0-53% PAL-1,日本 Atago 公司)监测点并直接读出果肉的可溶性固形物含量和可滴定酸含量<sup>[26]</sup>;用草酸-二氯酚靛酚滴定法<sup>[27]</sup>测定维生素C含量。

### 1.5 数据分析

运用Excel 2019和SPSS进行数据统计及分析,采用Duncan's多重比较法进行差异显著性分析。

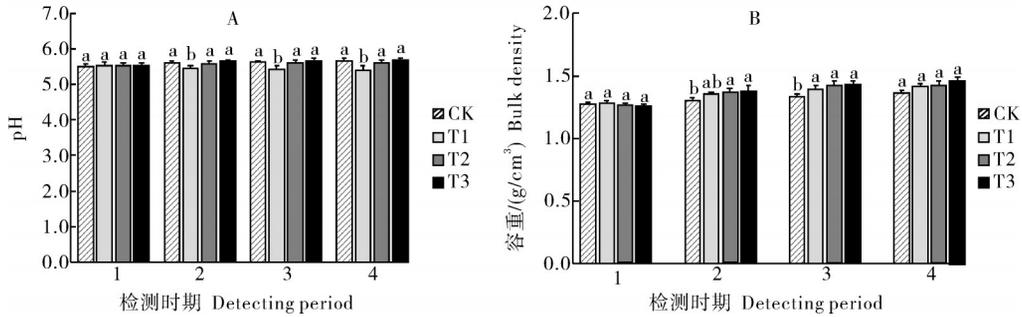
## 2 结果与分析

### 2.1 喷施不同除草剂对橘园土壤理化性质的影响

分别检测喷施除草剂0 d、盛花期、坐果期、转色期的橘园的土壤pH及容重(图1)。结果表明:喷施

草甘膦异丙胺盐(T1)导致树体滴水线附近表层土壤pH显著降低,而喷施草铵膦(T2)或精喹禾灵(T3)对土壤pH无显著影响(图1A);经3种除草剂分别处

理后表层土的容重总体均呈上升趋势,其中T2和T3处理中坐果期的土壤容重显著增加,而T1对土壤容重的影响不显著(图1B)。



CK: 对照,人工除草 Blank control, manual weeding; T1: 喷施0.5% 草甘膦异丙胺盐 Spray 0.5% N-(phosphonomethyl) glycine; T2: 喷施0.5% 草铵膦 Spray 0.5% glufosinate-ammonium; T3: 喷施0.2% 精喹禾灵 Spray 0.2% quizalofop; 1. 喷施除草剂0 d; 2. 盛花期 Flowering period; 3. 坐果期 Fruiting period; 4. 转色期 Color changing period. 下同。The same as follows.

图1 施用不同除草剂对橘园土壤pH(A)和容重(B)的影响

Fig.1 The effects on pH(A) and bulk density(B) in citrus orchards after spraying different herbicides

喷施除草剂后柑橘果实成熟期的土壤酶活性检测结果(图2)显示:T1处理导致4种土壤酶活性显著上升;T2处理导致土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和脲

酶活性显著上升,而对蔗糖酶的活性无显著影响;T3处理显著提高了土壤碱性磷酸酶和脲酶活性,显著降低蔗糖酶活性,但对酸性磷酸酶活性的影响不显著。

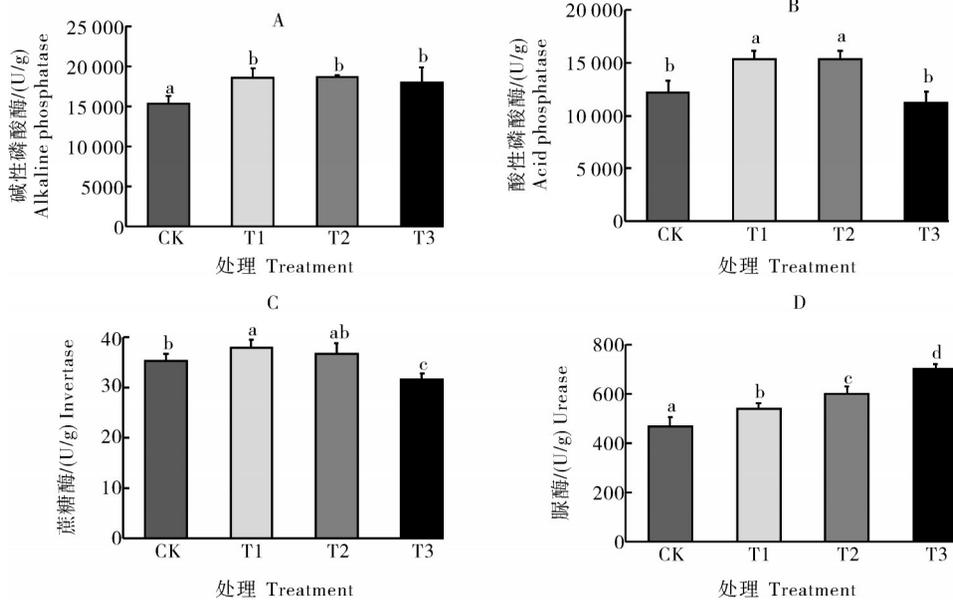


图2 施用不同除草剂对橘园土壤酶活的影响

Fig.2 The effects on soil enzyme activity of 0-10 cm soil layer after spraying different herbicides

检测结果(图3)显示,喷施3种除草剂对土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量均无显著影响。

### 2.2 喷施不同除草剂对橘园土壤及根际微生物的影响

用Shannon指数表征土壤微生物的α多样性(图4A),结果显示:喷施3种除草剂不同程度降低了土壤微生物的Shannon指数(图4A)但均未达到显著水平( $P>0.05$ )。该结果说明除草剂处理并未

显著影响橘园土壤微生物的α多样性。用PCoA(principal coordinates analysis)主坐标分析表征土壤微生物的β多样性(图4B),探究不同处理组间微生物的组成差异,发现4个处理的样本聚集在一起,且各处理间距离远、无任何交叉,说明喷施除草剂的3个处理组与对照以及不同处理组间,其土壤微生物群落相似性很高,且3种除草剂对土壤微生物群落产生了明显的分离,使得其组成有显著差异。

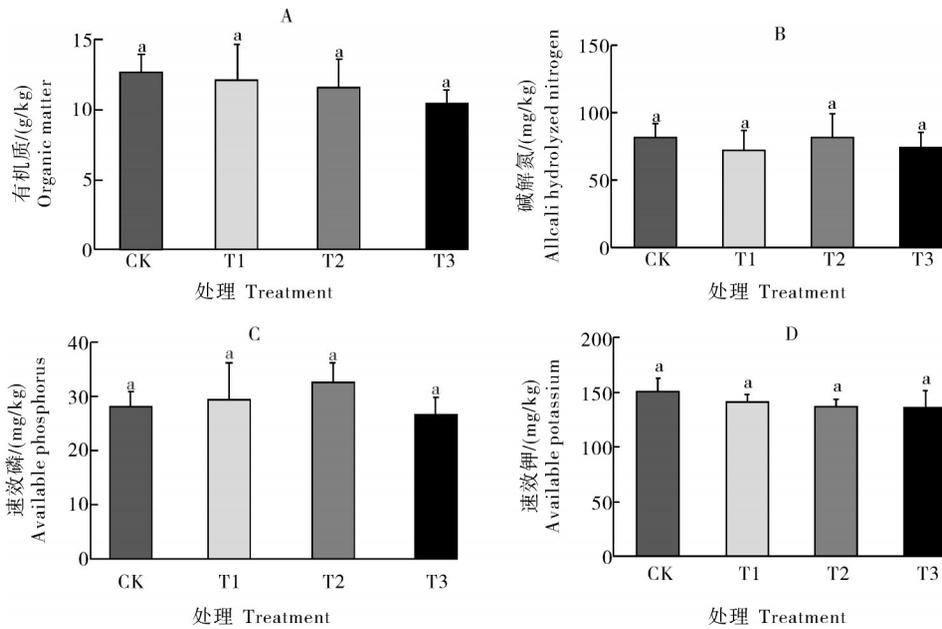
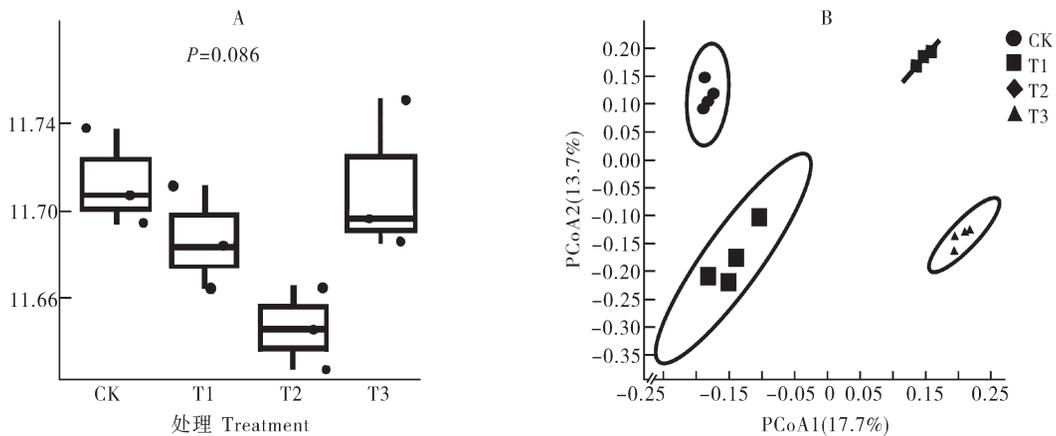


图3 施用不同除草剂对橘园土壤养分的影响

Fig.3 The effects on soil nutrient elements content of 0-10 cm soil layer after spraying different herbicides



Shannon(A)指数表征微生物 $\alpha$ 多样性;主坐标分析PCoA(B)表征土壤微生物 $\beta$ 多样性,其中不同分组的样本用不同形状的点代表,各样本点越接近,说明各样本物种组成越相似。下同。Shannon(Fig.A) indices characterize microorganisms  $\alpha$  diversity; Principal coordinate analysis PCoA(Fig.B) characterizes soil microorganisms  $\beta$  diversity, in which the samples in different groups are represented by points of different shapes. The closer the sample points are, the more similar the species composition of each sample is. The abscissa and ordinate represent the relative distance, which has no practical significance. The same as follows.

图4 喷施除草剂对橘园土壤微生物的影响

Fig.4 The effects on soil microbial diversity in citrus orchard after spraying different herbicides

进一步分析各样品组的微生物优势物种在门水平和属水平上的相对丰度差异,结果显示,除草剂处理组与对照组在门水平上相对丰度差异显著的微生物分别是:酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、蓝细菌门(Cyanobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)和匿杆菌门(Latescibacteria)(表1)。其中T1导致酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)和匿杆菌门(Latescibacteria)相对丰度显著下降;T2导致酸杆菌门

(Acidobacteria)和匿杆菌门(Latescibacteria)相对丰度显著下降、蓝细菌门(Cyanobacteria)相对丰度显著上升;T3导致酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度显著下降。除草剂处理组与对照组在属水平上相对丰度差异显著的微生物共有24个(表2),包括分枝杆菌属(*Mycobacterium*)、热酸菌属(*Acidothermus*)、游动放线菌属(*Actinoplanes*)、克洛氏菌属(*Crossiella*)、假诺卡氏菌属(*Pseudonocardia*)等。

表1 柑橘土壤微生物相对丰度有显著差异的菌门  
Table 1 The relative abundance of soil microbial on phylum level has significant difference with CK in citrus orchard after spraying herbicides

细菌门类 Name of bacteria	相对丰度 Relative abundance			
	CK	T1	T2	T3
酸杆菌门 Acidobacteria	10.797 5±0.432 0b	12.455 5±1.706 9a	8.339 4±0.590 3c	9.182 3±0.419 8c
放线菌门 Actinobacteria	31.337 8±1.055 4ab	28.140 1±3.296 3c	34.057 0±0.805 2a	30.828 4±0.410 2bc
蓝细菌门 Cyanobacteria	0.849 5±0.282 9b	0.749 9±0.259 5b	3.354 6±0.490 8a	0.690 4±0.106 6b
厚壁菌门 Firmicutes	4.907 2±0.243 1a	3.775 7±0.226 9b	4.378 1±0.373 4ab	4.391 4±0.665 2ab
匿杆菌门 Latescibacteria	0.562 2±0.125 3a	0.264 6±0.028 3b	0.149 1±0.043 4 c	0.173 1±0.029 3ab

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same as follows.

表2 柑橘土壤微生物相对丰度有显著差异的菌属  
Table 2 The relative abundance of soil microbial on genus level has significant difference with CK in citrus orchard after spraying herbicides

细菌名称 Name of bacteria	相对丰度 Relative abundance			
	CK	T1	T2	T3
Subgroup_7	0.979 1±0.055 4b	1.407 6±0.387 2a	0.780 9±0.047 7bc	0.635 3±0.075 9c
Subgroup_6	3.043 2±0.226 1a	4.077 4±0.359 7b	2.265 8±0.185 8c	2.713 6±0.184 4b
<i>Mycobacterium</i>	1.029 3±0.082 2a	0.867 2±0.057 6b	0.799 1±0.100 9b	0.615 9±0.066 8c
<i>Acidothermus</i>	1.396 2±0.150 4b	1.022 8±0.290 6c	2.340 3±0.122 9a	1.599 8±0.186 1b
<i>Pseudarthrobacter</i>	0.351 3±0.043 1a	0.012 5±0.004 1c	0.176 3±0.021 3b	0.009 5±0.017 2c
<i>Actinoplanes</i>	0.891 5±0.202 4b	1.104 1±0.182 3b	0.951 2±0.046 4b	1.336 4±0.068 5a
<i>Crossiella</i>	0.069 8±0.018 3c	0.137 5±0.132 3bc	0.543 3±0.099 1a	0.253 4±0.049 9b
<i>Pseudonocardia</i>	0.591 8±0.101 5c	0.770 1±0.167 1b	1.088 1±0.081 5a	0.812 4±0.056 3b
MB_A2_108	1.127 0±0.338 0a	0.510 7±0.081 3b	0.681 0±0.050 2b	0.723 6±0.723 6b
<i>Solirubrobacter</i>	1.250 2±0.104 1c	1.623 4±0.267 7b	2.000 1±0.060 5a	1.771 4±0.110 9ab
<i>Chryseolinea</i>	0.240 7±0.028 8b	0.408 3±0.037 8a	0.104 1±0.025 7c	0.085 4±0.021 0c
<i>Flavobacterium</i>	0.084 3±0.018 8b	0.089 2±0.018 6b	0.058 0±0.019 2b	0.394 2±0.030 7a
A4b	0.493 7±0.047 7b	0.681 0±0.068 0a	0.240 8±0.075 7c	0.364 8±0.012 5d
SBR1031	0.816 3±0.109 3a	0.694 2±0.115 0a	0.318 6±0.050 3c	0.479 0±0.032 6b
<i>Bacillus</i>	0.906 1±0.074 3a	0.367 1±0.188 9c	0.615 3±0.118 4b	0.535 1±0.081 8bc
<i>Chloroplast</i>	0.684 0±0.285 4b	0.446 2±0.446 2b	1.745 1±0.186 0a	0.555 5±0.138 0b
<i>Bacillus</i>	0.906 1±0.074 5a	0.367 1±0.188 9c	0.188 9±0.118 4b	0.118 4±0.081 8bc
<i>Gemmatimonas</i>	1.372 0±0.175 0c	1.546 8±0.237 6bc	1.790 5±0.164 6ab	1.958 0±0.040 4a
<i>Latescibacteria</i>	0.560 9±0.125 8a	0.252 9±0.029 4b	0.146 6±0.040 9b	0.171 6±0.030 5b
<i>Singulisphaera</i>	0.310 9±0.046 3b	0.280 5±0.089 7b	0.588 4±0.160 2a	0.416 3±0.071 1b
Biri41	0.528 3±0.123 7b	0.892 0±0.330 8a	0.428 0±0.075 0b	0.530 3±0.095 2b
<i>Haliangium</i>	1.598 6±0.094 1b	1.428 8±0.169 2b	1.164 2±0.108 0c	1.886 5±0.068 3a
<i>Massilia</i>	1.988 4±0.478 6a	0.445 6±0.135 2c	0.872 5±0.064 0b	0.416 6±0.063 8 c
Ellin6067	1.141 7±0.114 9a	1.232 2±0.291 9a	0.870 4±0.076 8b	1.093 9±0.085 9ab

本研究同时检测了喷施除草剂对橘园根际微生物多样性的影响(图5)。结果显示:与CK相比,T1根际土壤微生物的Shannon指数显著降低(图5A),但T2、T3与CK均无显著差异。这说明T1处理显著降低了橘园根际微生物的 $\alpha$ 多样性,而T2、T3对其无显著影响。基于PCoA的根际微生物 $\beta$ 多样性分析表明,处理组与对照组间有交叉,处理组间也有

交叉,说明T1、T2、T3处理组与CK组的根际微生物群落组成无差异(图5B)。

### 2.3 喷施不同除草剂对柑橘产量及品质的影响

如图6所示,与对照组相比,T1和T3组的单果质量分别降低了16.72%和28.8%,均呈极显著差异,而T2无显著差异(图6A)。施用除草剂对果实可食率(图6B)、亮度值( $L^*$ )(图6C)均无显著影响;且仅有T3显著降低黄蓝值( $b^*$ ),T1、T2对黄蓝值无影

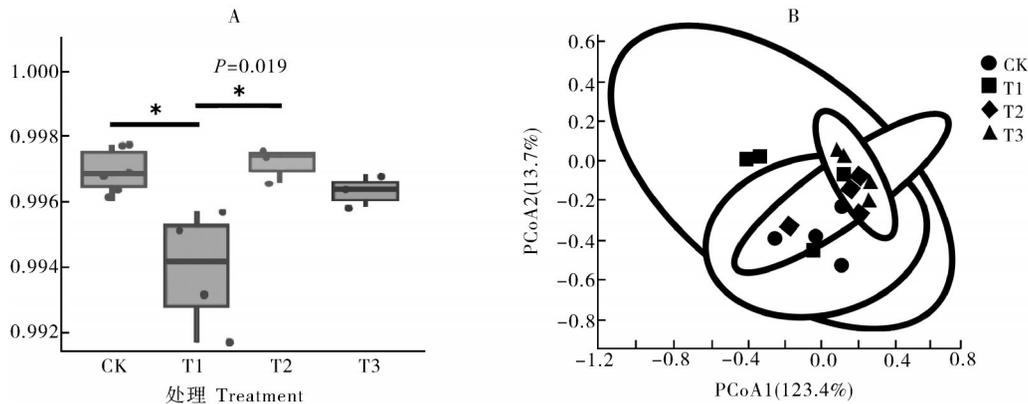
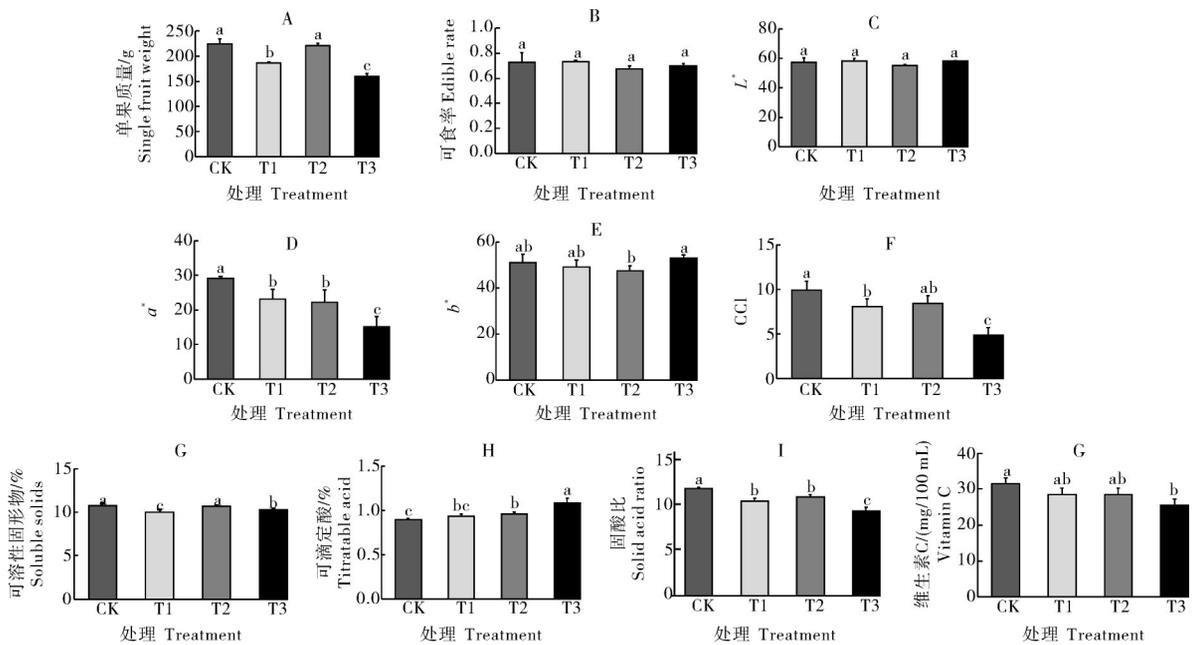


图5 喷施除草剂对橘园根际微生物多样性的影响

Fig.5 The effects on rhizosphere soil microorganisms diversity in citrus orchard after spraying different herbicides

响(图6E)。而果皮红绿值( $a^*$ )(图6D)和色差综合指标色差值(CCI)(图6F)在施用了除草剂后均有不同程度的降低,且T3下降最多,说明施用除草剂导致果皮转色不同程度受阻。T1和T3处理均导致果实可溶性固形物含量显著降低(图6G),从对照的10.6%分别降低至9.7%和10.3%,而T2与对照无

显著差异;T1、T2和T3处理均显著提高了果实可滴定酸含量(图6H),分别由对照的0.89%提高至0.94%、0.96%和1.14%;施用不同除草剂使果实固酸比显著降低(图6I)。仅T3处理显著降低了果实维生素C含量(图6J),由31.37 mg/100 mL下降至25.49 mg/100 mL。



A:单果质量; B:可食率; C:亮度值( $L^*$ ); D:红绿值( $a^*$ ); E:黄蓝值( $b^*$ ); F:综合指标色差值(CCI); G:可溶性固形物含量; H:可滴定酸含量; I:固酸比; J:维生素C含量。A:Per fruit weight; B:Edible rate; C: Peel brightness( $L^*$ ); D: $a^*$ ; E: $b^*$ ; F:CCI; G:Soluble solids content; H:Titratable acid; I:Soluble solids to acidity ratio; J:Vitamin C.

图6 喷施除草剂对柑橘产量及品质的影响

Fig.6 The effects on fruit production and quality after spraying different herbicides

### 3 讨论

本研究发现喷施精喹禾灵和草铵膦导致土壤容重显著增加,而喷施草甘膦异丙胺盐对土壤容重的影响较小(图1)。由于土壤容重增加代表土壤团粒结合得更为紧密,透气性减弱<sup>[28]</sup>,这意味着喷施精喹

禾灵和草铵膦这2种除草剂可能会导致土壤板结。喷施草铵膦和精喹禾灵对土壤pH无明显影响,但喷施草甘膦降低了橘园土壤pH(图1),导致土壤酸化,这与前人研究结果基本一致<sup>[29]</sup>。这可能是因为,一方面草甘膦异丙胺盐本身呈酸性,其水溶液pH值为

1.0~1.9,按照田间指导用量稀释200倍后pH值仍为4.34;另一方面,草甘膦异丙胺盐含有3个可电离的活泼氢,在土壤中极易形成钠盐、铵盐或异丙胺盐,水解后其pH值可进一步降低<sup>[30]</sup>,从而导致土壤酸化。前人研究发现施用阿特拉津、二氯喹啉酸等除草剂会导致土壤养分供应能力下降,主要表现为有机质、速效磷、碱解氮和速效钾含量的下降<sup>[31]</sup>,但本研究发现喷施3种除草剂对以上土壤养分均无显著影响(图3),这可能与本研究所用的除草剂类型或试验的土壤性质与前人不同有关。本研究发现喷施3种除草剂对土壤酶活性有不同程度的激活作用,这与前人的研究结果相一致<sup>[32]</sup>;但也有研究发现氯嘧磺隆等除草剂会抑制土壤脲酶、磷酸酶等土壤酶的活性<sup>[33]</sup>;这说明除草剂对土壤酶活的影响比较复杂,可能受到多种因素,诸如作物和土壤类型、施药浓度、气候的影响<sup>[34]</sup>。

前人研究表明,施用除草剂会导致土壤微生物丰度及多样性普遍降低<sup>[35]</sup>。本研究发现喷施3种除草剂对橘园土壤微生物的 $\alpha$ 多样性无明显影响(图4),这意味着土壤本身可能具有缓冲效应,能使土壤微生物的总体丰度在一段时间内不发生显著改变<sup>[36]</sup>。但施用除草剂显著改变了土壤微生物的组成,导致酸杆菌门(Acidobacteria)等菌门的相对丰度显著下降,蓝细菌门(Cyanobacteria)的相对丰度显著上升(表1)。该结果意味着除草剂可能抑制乃至杀死了某些土壤微生物,而另一些耐除草剂强的土壤微生物有所增长。例如,喷施除草剂导致酸杆菌(Acidobacteria)、放线菌(Actinobacteria)等植物生长有益菌和厚壁菌门(Firmicutes)等生防菌的相对丰度显著下降(表1),这可能会影响土壤碳、氮等养分的释放<sup>[37]</sup>以及植物的正常生长发育和抗逆性等<sup>[38]</sup>。有意思的是,与土壤微生物相反,根际微生物的 $\alpha$ 多样性即总丰度普遍下降,而群落组成没有变化(图5)。这可能是由于植物根系倾向于募集对其有益的土壤微生物<sup>[35]</sup>,因此,根际微生物的组成相对稳定,但是由于土壤有益微生物可能受到了除草剂的抑制,使得其总丰度下降。

本研究中喷施除草剂显著降低了柑橘单果质量,导致果实转色延迟、酸度增加和维生素C含量降低(图6)。这与前人报道的施用除草剂减少了玉米的产量<sup>[39]</sup>,降低了葡萄的可溶性固形物、维生素C和花青苷含量<sup>[40]</sup>的结果一致。这可能是由于一方面除

草剂影响了土壤理化性质及微生物,从而一定程度上限制了植物根系对土壤养分的吸收<sup>[41]</sup>;另一方面,除草剂可阻断植物光合作用的电子传递而抑制光合作用<sup>[42]</sup>,进而影响植株生长和果实产量及品质的形成<sup>[43]</sup>。

综上,在土壤肥力适中的温州蜜柑园中多次喷施草甘膦异丙胺盐等除草剂影响了橘园土壤容重、pH值及酶活等土壤理化性质,导致土壤有益微生物的多样性与丰度下降,最终导致果实产量和品质的下降。本研究主要调查了温州蜜柑在华中地区黄棕壤背景下除草剂对土壤理化性质和果实品质的影响,对橘园除草剂的科学施用具有一定的指导意义,但除草剂在不同柑橘品种和不同土壤背景下对橘园土壤和果实品质的影响仍需进一步探讨。

## 参考文献 References

- [1] 黄俊源,陆成确,黄运鹏,等. 柑桔园六旋翼油动无人机喷雾作业效果[J]. 中国南方果树, 2021, 50(6): 32-36. HUANG J Y, LU C Q, HUANG Y P, et al. Spray effect of six-rotor oil-powered uav in citrus orchard[J]. South China fruits, 2021, 50(6): 32-36(in Chinese with English abstract).
- [2] PINDADO J O, PÉREZ P R M. Estimation of measurement uncertainty of pesticides, polychlorinated biphenyls and polyaromatic hydrocarbons in sediments by using gas chromatography-mass spectrometry[J]. Anal Chim Acta, 2012, 724: 20-29.
- [3] 于惠林,贾芳,全宗华,等. 施用草甘膦对转基因抗除草剂大豆田杂草防除、大豆安全性及杂草发生的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1166-1177. YU H L, JIA F, QUAN Z H, et al. Effects of glyphosate on weed control, soybean safety and weed occurrence in transgenic herbicide-resistant soybean[J]. Scientia agricultura sinica, 2020, 53(6): 1166-1177(in Chinese with English abstract).
- [4] 贾芳,陈景超,崔海兰,等. 玉米田两种阔叶杂草苍耳和藜对草铵膦敏感性测定[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(3): 518-524. JIA F, CHEN J C, CUI H L, et al. Sensitivity of two broadleaf weeds *Xanthium sibiricum* and *Chenopodium album* to glufosinate in corn fields[J]. Chinese journal of biological control, 2021, 37(3): 518-524(in Chinese with English abstract).
- [5] 李鑫,安艳,李慧,等. 10%精喹禾灵乳油对甘草田杂草防除效果及安全性[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 219-223. LI X, AN Y, LI H, et al. Weed control and safety of quizalofop-P-ethyl 10% EC for licorice farmland[J]. Plant protection, 2018, 44(6): 219-223(in Chinese with English abstract).
- [6] 张岳. 柑橘砂皮病化学防治技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019. ZHANG Y. Study on chemical control technology of Diaporthe Citri[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马小焕,彭良志,曹立,等. 不同除草剂对清家脐橙夏梢的毒害

- 作用[J]. 果树学报, 2011, 28(1): 92-96. MA X H, PENG L Z, CAO L, et al. Toxic effects of herbicides on young summer shoots of Seike navel orange (*Citrus sinensis*) [J]. Journal of fruit science, 2011, 28(1): 92-96 (in Chinese with English abstract).
- [8] 钟德志. 柑桔园使用草甘膦应注意药害[J]. 江西果树, 1999(1): 36. ZHONG D Z. The use of glyphosate in citrus orchard should pay attention to drug damage[J]. Jiangxi fruit, 1999(1): 36 (in Chinese).
- [9] FRIMPONG J O, OFORI E S K, YEBOAH S, et al. Evaluating the impact of synthetic herbicides on soil dwelling macrobes and the physical state of soil in an agro-ecosystem[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2018, 156: 205-215.
- [10] 齐月, 李俊生, 闫冰, 等. 化学除草剂对农田生态系统野生植物多样性的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(2): 228-236. QI Y, LI J S, YAN B, et al. Impact of herbicides on wild plant diversity in agro-ecosystems: a review [J]. Biodiversity science, 2016, 24(2): 228-236 (in Chinese with English abstract).
- [11] 丁洪, 郑祥洲, 雷俊杰, 等. 除草剂对尿素氮在土壤中转化的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 551-554. DING H, ZHENG X Z, LEI J J, et al. Effects of herbicides on transformation of urea nitrogen in vegetable plantation soil [J]. Ecology and environmental sciences, 2012, 21(3): 551-554 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈汝, 王海宁, 姜远茂, 等. 不同苹果砧木的根际土壤微生物数量及酶活性[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 2099-2106. CHEN R, WANG H N, JIANG Y M, et al. Rhizosphere soil microbial quantity and enzyme activity of different apple rootstocks [J]. Scientia agricultura sinica, 2012, 45(10): 2099-2106 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张晓荣, 段广德, 郝龙飞, 等. 氮沉降和接种菌根真菌对灌木铁线莲非结构性碳水化合物及根际土壤酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 171-178. ZHANG X R, DUAN G D, HAO L F, et al. Responses of the non-structural carbohydrates and rhizosphere soil enzymes of *Clematis fruticosa* to nitrogen deposition and inoculation mycorrhizal fungi [J]. Journal of Nanjing Forestry University (natural sciences edition), 2022, 46(1): 171-178 (in Chinese with English abstract).
- [14] 邹亚丽, 呼丽萍, 邓霏, 等. 2种盐剂草甘膦对果园土壤微生物量碳氮和微生物数量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(9): 151-153. ZOU Y L, HU L P, DENG F, et al. Effects of glyphosate with two different salts on soil microbe carbon/nitrogen and number of soil microorganism of apple orchard [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2019, 47(9): 151-153 (in Chinese with English abstract).
- [15] 倪福乐, 彭晶晶. 草铵膦对盆栽砂糖橘土壤微生物数量的影响[J]. 农村实用技术, 2019(7): 47-49. NI F L, PENG J J. Effects of glufosinate on the number of microorganisms in potted tangerine soil [J]. Practical technology in rural areas, 2019(7): 47-49 (in Chinese).
- [16] DRUILLE M, CABELLO M N, GARCÍA P, et al. Glyphosate vulnerability explains changes in root-symbionts propagules viability in pampean grasslands [J]. Agric Ecosyst Environ, 2015, 202(1): 48-55.
- [17] 姚斌, 徐建民, 高鹤, 等. 阿特拉津除草剂对土壤微生物生态特征的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 46-49. YAO B, XU J M, SHANG H, et al. Study on ecological effect of atrazine on soil microbial activity [J]. Journal of soil water conservation, 2005, 19(3): 46-49 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吴静, 陈岩岩, 叶项宇, 等. 除草剂草甘膦对板栗根际土壤微生物多样性的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(3): 161-167. WU J, CHEN Y Y, YE X Y, et al. Effects of herbicide glyphosate on microbial diversity in *Castanea mollissima* rhizosphere soil [J]. Non-wood forest research, 2019, 37(3): 161-167 (in Chinese with English abstract).
- [19] 高梅, 代梦媛, 邓剑川, 等. 8种除草剂对云南蓖麻田间杂草防除及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2391-2397. GAO M, DAI M Y, DENG J C, et al. Effects of 8 herbicides on control of weeds in yunnan castor (*Ricinus communis* L.) fields and its production characters [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2021, 34(11): 2391-2397 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王学求, 张必敏, 于学峰, 等. 金矿立体地球化学探测模型与深部钻探验证[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 869-885. WANG X Q, ZHANG B M, YU X F, et al. Three-dimension geochemical patterns of gold deposits: implications for the discovery of deep-seated orebodies [J]. Acta geoscientica sinica, 2020, 41(6): 869-885 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张玉革, 李甜, 冯雪, 等. 尿素氮添加对黑钙土酸化速率及酸中和容量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 172-180. ZHANG Y G, LI T, FENG X, et al. Effects of urea nitrogen addition on acidifying rates and acid neutralizing capacity of a chernozem [J]. Chinese journal of soil science, 2022, 53(1): 172-180 (in Chinese with English abstract).
- [22] 崔耀华, 石永祥, 朱梦晗. 谷物与土壤容重的测量[J]. 中国计量, 2014(3): 99-100. CUI Y H, SHI Y X, ZHU M H. Measurement of grain and soil bulk density [J]. China metrology, 2014(3): 99-100 (in Chinese).
- [23] 王少先. 施肥对稻田湿地土壤碳氮磷库及其相关酶活变化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. WANG S X. Effects of Fertilization on soil C, N & P pools and its involved enzyme activity in paddy wetland ecosystems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [24] 杨德海, 赵伟金, 谢益燕, 等. 大理州植烟土壤理化性状与烟叶化学成分相关性分析[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 97-103. YANG D H, ZHAO W J, XIE Y Y, et al. Correlation analysis between soil physicochemical properties and chemical components of flue-cured tobacco leaves in Dali [J]. soil and fertilizer sciences in China, 2022(1): 97-103 (in Chinese with English abstract).
- [25] 姜启航. 套袋对柚果实类胡萝卜素代谢和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. JIANG Q H. Studies on the effects of bagging on carotenoid biogenesis and quality of pummelo fruits [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [26] 黄振东, 王鹏, 徐建国, 等. 浙东地区‘红美人’杂柑果实品质与土壤和叶片养分的关系[J]. 果树学报, 2020, 37(1): 88-97. HUANG Z D, WANG P, XU J G, et al. Relationship between fruit quality and nutrients in soil and leaves of ‘Hongmeiren’ citrus hybrid cultivated in eastern Zhejiang Province [J]. Journal of

- fruit science, 2020, 37(1): 88-97 (in Chinese with English abstract).
- [27] 袁芳, 李丽, 黄秋婵, 等. 预处理对超声波渗糖制备芒果果脯品质的影响[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 35-39. YUAN F, LI L, HUANG Q C, et al. Effect of pretreatment on quality of preserved mango prepared by ultrasonic sugar infiltration [J]. China condiment, 2019, 44(10): 35-39 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘阳, 王全九, 缙丽娜, 等. 透气隔水埋体对土壤水分入渗与溶质运移的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 152-157. LIU Y, WANG Q J, GOU L N, et al. Effect of air-permeable and water-proof buried body on soil water infiltration and solute transport [J]. Journal of soil and water conservation, 2020, 34(4): 152-157 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王淑楠, 任浦慧, 解静芳. 除草剂草甘膦和氯磺隆对植物毒性效应的研究进展[J]. 山西农业科学, 2020, 48(10): 1693-1700. WANG S N, REN P H, XIE J F. Research progress on toxicity effects of herbicides glyphosate and chlorsulfuron [J]. Journal of Shanxi agricultural sciences, 2020, 48(10): 1693-1700 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张娟. 低价磷酸盐对铜绿微囊藻生长的影响[D]. 南京: 南京大学, 2011. ZHANG J. The effect of reduced phosphorus on the growth of *Microcystis aeruginosa* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [31] 黄小辉. 江西省双季稻区氮磷肥和除草剂二氯喹啉酸的农艺效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. HUANG X H. Exploring the agronomic effect of nitrogen and phosphorus fertilizers and herbicide quinclorac in the double-season rice region of Jiangxi Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [32] 呼蕾, 和文祥, 王旭东, 等. 草甘膦的土壤酶效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 680-685. HU L, HE W X, WANG X D, et al. Effect of glyphosate on soil enzyme [J]. Journal of agro-environment science, 2009, 28(4): 680-685 (in Chinese with English abstract).
- [33] 王鑫宏, 许艳秋, 邓铁柱, 等. 氯嘧磺隆对3种土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005(S1): 70-72. WANG X H, XU Y Q, DENG T Z, et al. Effects of chlorimuron-ethyl on the enzyme activity in soil [J]. Journal of agro-environmental science, 2005(S1): 70-72 (in Chinese with English abstract).
- [34] 林晓燕, 王祎, 赵宇华, 等. 苯噻磺隆对淹水稻田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(1): 109-113. LIN X Y, WANG W, ZHAO Y H, et al. Isolation, identification and characteristics of bensulfuron-methyl-degrading bacteria and effects of bensulfuron-methyl on soil microbial ecology [J]. Journal of Zhejiang University (agriculture and life sciences edition), 2008, 34(1): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陈隆升, 陈永忠, 彭映赫, 等. 草甘膦对油茶林土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 湖南林业科技, 2015, 42(4): 32-35. CHEN L S, CHEN Y Z, PENG Y H, et al. Effect of glyphosate on number of soil microbial and enzyme activity of *Camellia* forest [J]. Hunan forestry science & technology, 2015, 42(4): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- [36] 方圆, 王妮, 姚晓东, 等. 我国北方温带草地土壤微生物群落组成及其环境影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 142-150. FANG Y, WANG W, YAO X D, et al. Soil microbial community composition and environmental controls in northern temperate steppe of China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(1): 14-150 (in Chinese with English abstract).
- [37] 吕剑, 李金武, 郁继华, 等. 不同地表覆盖方式对松花菜土壤温度、产量和水分利用的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1941-1951. LÜ J, LI J W, YU J H, et al. Effects of different surface covering methods on soil temperature, yield and water utilization of loose-curd cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis L.) [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2021, 35(8): 1941-1951 (in Chinese with English abstract).
- [38] ZHAO K, LI J, ZHANG X Y, et al. Actinobacteria associated with *Glycyrrhiza inflata* Bat. are diverse and have plant growth promoting and antimicrobial activity [J/OL]. Scientific reports, 2018, 8(1): 13661 [2022-06-04]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32097-8>.
- [39] 牛兴奎. 除草剂、种衣剂对玉米产量、品质和根际环境的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007. NIU X K. Effects of herbicides and seedcoating on yield and quality of maize and the root environment [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [40] 谭伟, 梁婷, 杜远鹏, 等. 除草剂对巨峰葡萄果实品质的影响[J]. 中国果树, 2014(3): 63-64, 77. TAN W, LIANG T, DU Y P, et al. Effect of herbicides on fruit quality of Macrosyn grapes [J]. China fruits, 2014(3): 63-64, 77 (in Chinese).
- [41] 彭志芸, 吕旭, 伍杂日曲, 等. 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤氮素供应及直播稻产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(1): 45-56. PENG Z Y, LÜ X, WU Z R Q, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on soil nitrogen supply and yield of direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation [J]. Journal of Zhejiang University (agriculture and life sciences edition), 2022, 48(1): 45-56 (in Chinese with English abstract).
- [42] VIVANCOS P D, DRISCOLL S P, BULMAN C A, et al. Perturbations of amino acid metabolism associated with glyphosate-dependent inhibition of shikimic acid metabolism affect cellular redox homeostasis and alter the abundance of proteins involved in photosynthesis and photorespiration [J]. Plant physiology, 2011, 157(1): 256-268.
- [43] 刘玉凤, 李天来, 焦晓赤, 等. 短期夜间亚低温及恢复对番茄光合作用和蔗糖代谢的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(4): 683-691. LIU Y F, LI T L, JIAO X C, et al. Effects of short-term sub-low night temperature treatment and recovery on the photosynthesis and sucrose-metabolizing of tomato leaves [J]. Acta horticulturae sinica, 2011, 38(4): 683-691 (in Chinese with English abstract).

## Effects of herbicide spraying on soil and fruit quality in citrus orchards

SHEN Yue<sup>1</sup>, SONG Fang<sup>2</sup>, CHEN Shuang<sup>1</sup>, LI Hongfei<sup>1</sup>, GUO Huiyun<sup>1</sup>, PAN Zhiyong<sup>1</sup>

1. *Key Laboratory of Horticultural Plant Biology/College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Institute of Fruit and Tea, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China*

**Abstract** The effects of three commonly used herbicides including glyphosate isopropylamine, glufosinate, and quizalofop-*p*-ethyl on the physicochemical properties of soil, rhizosphere microorganisms in soil and fruit quality in citrus orchards were investigated. The 20-year-old satsuma mandarin fruit trees were used to detect the changes of physicochemical properties of soil, the diversity of rhizosphere microorganisms in soil and fruit quality. The results showed that the spraying of glyphosate isopropylamine led to soil acidification, while the spraying of glufosinate or quizalofop-*p*-ethyl had no significant effect on soil pH. The spraying of the three herbicides increased the bulk weight of soil and somehow activated acid phosphatase, alkaline phosphatase, urease and sucrase in soil. None of the three herbicides had effect on the nutrient content of organic matter, soil alkaline nitrogen, available potassium and available phosphorus in soil. Spraying the three herbicides led to significant changes of microbial community composition in soil and the decrease in diversity of microbial rhizosphere, resulting in a decrease in the relative abundance of microorganisms including Acidobacteria and Actinobacteria, and an increase in the relative abundance of microorganisms such as Cyanobacteria phylum. The spraying of three herbicides resulted in a decrease in the weight of single fruit and the content of soluble solids, vitamin C, and an increase in the content of titrable acid, and the delayed change of peel color. It is indicated that the spraying of herbicides had significant adverse effects on the ecology of soil and the fruit quality in orange orchards. It will provide a theoretical basis for understanding the function of herbicides objectively and advocating less spraying of herbicides in citrus orchards.

**Keywords** satsuma mandarin; herbicide; soil; microorganism; fruit quality

(责任编辑:张志钰)