

DOI:10.11686/cyxb2025236

http://cyxb.magtech.com.cn

刘娜娜, 刘艳梅, 杨航宇, 等. 种植作物对土壤草甘膦农药的降解效应研究. 草业学报, 2026, 35(5): 175—184.

LIU Na-na, LIU Yan-mei, YANG Hang-yu, *et al.* The degradation effects of soil glyphosate pesticide by plant crops. Acta Praticulturae Sinica, 2026, 35(5): 175—184.

种植作物对土壤草甘膦农药的降解效应研究

刘娜娜^{1,2}, 刘艳梅^{1,2*}, 杨航宇^{3*}, 张媛琦^{1,2}, 李堃^{1,2}

(1. 天水师范大学生物工程与技术学院, 甘肃 天水 741001; 2. 甘肃省高校农业微生物重点实验室, 甘肃 天水 741001; 3. 甘肃林业职业技术大学林业工程学院, 甘肃 天水 741020)

摘要: 草甘膦已成为全球使用量最大和使用范围最广的除草剂之一, 但其过度使用会威胁生态环境, 如何降解土壤中草甘膦农药残留已成为人类面临的重大难题之一。本试验以大豆、油菜、野豌豆、二月兰、葱和板蓝根 6 种植物为研究对象, 测定其生长 45 和 90 d 后对两种浓度草甘膦(0.05 和 0.25 mg·kg⁻¹) 的降解效应, 并用土壤微生物量碳氮和土壤酶活性表征其对土壤的修复效应。结果表明: 生长 45 d 后, 草甘膦浓度为 0.05 mg·kg⁻¹ 时, 油菜、大豆和野豌豆对草甘膦的降解率分别为 49.1%、48.4% 和 48.1%; 草甘膦浓度为 0.25 mg·kg⁻¹ 时, 降解率分别为 66.9%、61.2% 和 62.2%, 其他植物对草甘膦的降解率影响效果不理想; 大豆和野豌豆可显著提高草甘膦残留土壤的微生物量碳氮含量($P < 0.05$), 表明其可促进土壤微生物的繁衍; 大豆和野豌豆可显著提高草甘膦残留土壤的 β -葡萄糖苷酶、 β -半乳糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、N-乙酰-氨基半乳糖苷酶和土壤碱性磷酸酶活性。表明其可促进土壤碳、氮、磷元素的循环, 其他植物对草甘膦残留土壤的微生物量碳氮和酶活性影响效果不显著。因此, 果树行间种植大豆和野豌豆可通过促进微生物的繁衍, 加速土壤营养元素的循环, 进而降解土壤草甘膦农药的残留, 达到改良土壤质量的效果。

关键词: 种植作物; 草甘膦农药; 降解效应; 微生物量; 酶活性

The degradation effects of soil glyphosate pesticide by plant crops

LIU Na-na^{1,2}, LIU Yan-mei^{1,2*}, YANG Hang-yu^{3*}, ZHANG Yuan-qi^{1,2}, LI Kun^{1,2}

1. School of Biological Engineering and Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China; 2. Gansu University Key Laboratory of Agricultural Microbiology, Tianshui 741001, China; 3. College of Forestry Engineering, Gansu Forestry Voctech University, Tianshui 741020, China

Abstract: Glyphosate has become one of the most widely used herbicides globally in both application and coverage, but its excessive poses threatens the ecological environment. How to degrade the glyphosate residues in soil has become one of the major challenges facing humanity. To degrade the soil glyphosate with different concentrations (0.05 and 0.25 mg·kg⁻¹), six plants (i. e., *Glycine max*, *Brassica napus*, *Vicia sepium*, *Orychophragmus violaceus*, *Allium fistulosum*, and *Radix isatidis*) acted as research subjects. The degradation ratio, soil microbial biomass carbon and nitrogen, and soil enzyme activities were measured after 45 and 90 days of plant growth to evaluate their remediation effect. The results showed that: *B. napus*, *G. max* and *V. sepium* had significant degradation effects on glyphosate in soil ($P < 0.05$). After growing for 45 days, the degradation rates of *B. napus*, *G. max* and *V. sepium* were 49.1%, 48.4% and 48.1% at the glyphosate concentration of 0.05 mg·kg⁻¹,

收稿日期: 2025-06-16; 改回日期: 2025-08-08

基金项目: 天水师范大学研究生创新引导项目(TYCX2455, TCXM2537)和甘肃省重点研发计划-农业领域(25YFNE002)资助。

作者简介: 刘娜娜(2000—), 女, 甘肃通渭人, 在读硕士。E-mail: lnn29726@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lym-781118@163.com; yhy-780601@163.com

respectively, and 66.9%, 61.2% and 62.2% at the glyphosate concentration of 0.25 mg·kg⁻¹, respectively. The effects of other plants on the degradation rate of glyphosate are not satisfactory. *G. max* and *V. sepium* could significantly increase the microbial biomass carbon and nitrogen in glyphosate-contaminated soil ($P < 0.05$), indicating that they can promote the growth and reproduction of soil microorganisms; *G. max* and *V. sepium* significantly increased the activities of β -glucosidase, β -galactosidase, N-acetyl-glucosaminidase, N-acetyl-galactosaminidase, and soil alkaline phosphatase in glyphosate-contaminated soil. This suggests that they can enhance soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling, the effects of other plants on the microbial biomass carbon and nitrogen, as well as the enzyme activities in the glyphosate-residual soil, were not significant. Therefore, planting *G. max* and *V. sepium* between rows of fruit trees could promote microbial reproduction, accelerate soil nutrient cycling, further degrade soil glyphosate pesticide residues, and improve soil quality.

Key words: plant crops; glyphosate pesticide; degradation effect; microbial biomass; enzyme activity

草甘膦(N-膦酸甲基甘氨酸)作为一种广谱灭生性除草剂,其具有高效除杂、低毒、广谱、易降解等特点,在全球农业生产中得到了广泛应用^[1]。2019年,草甘膦的全球使用量达73.84万t,占全球农药使用量的17%,全球林业和果园生态系统使用面积超过40亿km²^[2],且我国草甘膦使用量占全球使用量的7.4%^[3]。然而,草甘膦的过量使用已导致土壤中残留大量草甘膦及其主要代谢物——氨基甲基膦酸(aminomethylphosphonic acid, AMPA),其积累会引起作物基因突变和生态环境破坏^[4]。Tong等^[5]的研究表明,由于茶园中长期施用草甘膦,茶树(*Camellia sinensis*)的根、茎、叶均能检测到草甘膦含量。近年来,我国各地区果蔬、草药、茶叶等农产品检测出农残超标的现象层出不穷^[6-8],农残会对包括人类在内的生物产生毒害作用^[9]。密切接触草甘膦会产生DNA损伤,影响胎儿发育,使胎儿畸形或产生生育缺陷^[10-12]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)于2017年将草甘膦归类为“人类可能致癌物”^[13]。此外,不仅在土壤和水体等环境中检测到草甘膦,而且在美国纽约的宠物猫和狗的尿液中也普遍存在^[14]。因此,草甘膦对人类和动植物健康及生态环境潜在的危害需引起人们的高度重视。

种植作物可通过光合作用固定碳源,并且能够吸收和转化环境中的污染物,其因成活率高、种植和养护简单而成为生态修复中的优选物种^[15]。李兆君等^[16]研究表明,植物通过直接吸收有机污染物、产生根系分泌物和根际微生物降解有机污染物;汪建飞等^[17]研究表明,杂交苏丹草(*Sorghum bicolor*×*S. sudanense*)可有效降解、吸收滴滴涕及其主要降解产物;张淑琴^[18]研究发现,月季(*Rosa chinensis*)根系分泌物可有效降解有机氯农药,并改变土壤微生物的种群数量及群落结构,进而改善土壤质量。因此,探索种植作物对土壤草甘膦的降解效果,有望为土壤草甘膦残留问题提供一种绿色、可持续的解决方案,而目前关于种植作物对土壤草甘膦农药降解的研究及生态修复效应鲜见报道。

土壤微生物直接参与多种生物化学活动,对土壤养分转化循环及生物分解发挥极其重要的作用^[19],其能将土壤中的有机质组分转化并增加自身的微生物量。土壤微生物量不仅是有机物质和养分循环的动力,也是植物营养物质的贮藏库^[20]。土壤酶主要来自动植物和微生物残体分解以及它们的代谢分泌物,参与土壤中的物质转化和能量转移,是重要的养分和环境指标^[21]。土壤 β -葡萄糖苷酶和 β -半乳糖苷酶参与土壤有机质矿化分解过程,乙酰氨基葡萄糖苷酶和乙酰氨基半乳糖苷酶与土壤氮素循环有关^[22],碱性磷酸酶可以促进土壤有机磷转化为植物生长可吸收的营养^[23],其可表征土壤碳氮磷循环。土壤微生物量和酶活性可敏感指示土壤健康程度,是衡量土壤肥力最为重要的指标之一。

鉴于此,本试验以西北地区几种田间常见种植作物为研究对象,评价种植作物对果园土壤草甘膦的降解效果及土壤质量的变化,进而筛选具有降解草甘膦污染的理想植物,为我国农田土壤修复及净化提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

盆栽土样于 2023 年 9 月取自天水市秦州区果园,其草甘膦含量为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,人工去除枯枝落叶后将土样按 $2 \text{ kg} \cdot \text{盆}^{-1}$ 装入直径为 10 cm 的塑料花盆中,共 56 盆。随机分为两组,分别按 0.05 和 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦加入花盆土壤。将筛选的西北地区几种田间常见种植作物野豌豆(*Vicia sepium*)、油菜(*Brassica napus*)、板蓝根(*Radix isatidis*)、二月兰(*Orychophragmus violaceus*)、大豆(*Glycine max*)和葱(*Allium fistulosum*)的种子分别播种到花盆土壤中,每盆 10 粒种子,每组处理 4 个重复,共 48 个处理,以未播种的花盆土为对照。室内光照生长 45 和 90 d 采集土样,生长期保持 $60\% \sim 70\%$ 的土壤水分含量。

1.2 草甘膦农药残留及土壤特性指标的测定

1.2.1 土壤理化性质的测定 采集地点土壤的有机质、全氮、速效氮、全磷、全钾含量和 pH 分别采用重铬酸钾容量法—外加热法^[24]、半微量凯氏法^[24]、碱解扩散法^[24]、高氯酸-硫酸-钼锑抗比色法^[24]、火焰光度计(M410,英国 SHERWOOD 公司)法^[24]和酸度计[FE28,梅特勒托利多仪器(上海)有限公司]法^[24]测定,其含量分别为 $9.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $164.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $12.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 7.45。

1.2.2 土壤草甘膦农药残留的测定方法 根据标准 HJ 1055-2019^[25] 先取 10 g 样品加入 50 mL 磷酸钠和柠檬酸钠混合液进行超声提取 30 min,用高速离心机 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min 后,取上清液过滤后用盐酸调节 pH 至 9,再用 50 mL 正己烷萃取两次,取 1 mL 净化后的水溶液加入 0.12 mL 四硼酸钠溶液和 0.2 mL 9-芴甲基氯甲酸酯溶液,常温下用振荡器(ZHWY-2102c,上海智诚分析仪器制造有限公司)混匀衍生 4 h,用 $0.22 \mu\text{m}$ 针式过滤器($0.22 \mu\text{m} \times 13 \text{ mm}$,PTFE 材质,上海楚定分析仪器有限公司)过滤后待测。使用高效液相色谱设置 254 nm 激发波长和 301 nm 发射波长,并按 $1 \sim 5 \mu\text{L}$ 进样量进样,流动相 A(乙腈)和流动相 B(磷酸溶液)分别按 35% 和 65% 梯度洗脱 20 min。

草甘膦降解率(Q)计算公式为:

$$Q(\%) = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100$$

式中: C_0 为草甘膦的初始浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_t 为草甘膦的最终浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.2.3 土壤特性指标的测定 土壤微生物量碳和氮含量采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提后分别用重铬酸钾氧化滴定法^[26]和凯氏定氮法^[27]测定。土壤 β -葡萄糖苷酶、 β -半乳糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶和N-乙酰-氨基半乳糖苷酶活性采用 96 微孔酶标板荧光分析法^[28]测定,用 Thermo 多功能酶标仪(INFINITE 200 PRO,奥地利)设置 365 nm 激发波长和 450 nm 检测波长检测样品荧光,其单位为 $\text{mmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤碱性磷酸酶(alkaline phosphatase)活性用对硝基酚磷酸钠比色法^[29]测定。

1.3 数据处理

通过 Excel 整理数据后,使用 SPSS 27.0 软件对植物类型以及不同浓度草甘膦对农药残留土壤的降解率、微生物量和酶活性进行单因素方差分析,并将不同植物和不同浓度草甘膦降解残留土壤后对土壤微生物碳氮和酶活性的影响进行多因素方差分析, $P < 0.05$ 表示处理间差异显著。用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 种植作物对土壤草甘膦农药残留的降解率分析

供筛选的 6 种植物对土壤草甘膦均有一定的降解作用(图 1)。草甘膦浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,大豆、油菜、野豌豆、二月兰、板蓝根和葱 6 种植物生长 45 和 90 d 后均对土壤草甘膦有降解效果,其中,45 d 后油菜、大豆和野豌豆的降解效果较好,降解率分别为 49.1%、48.4% 和 48.1%,且与对照间差异显著($P < 0.05$);草甘膦浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,6 种植物生长 45 和 90 d 后均对土壤草甘膦有降解效果,其中,45 d 后油菜、野豌豆和大豆的降解效果较好,降解率分别达到 66.9%、61.2% 和 62.2%,且与对照间差异显著($P < 0.05$);可见,无论 0.05 还是 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦,大豆、野豌豆和油菜均对草甘膦农药有一定的降解效果。

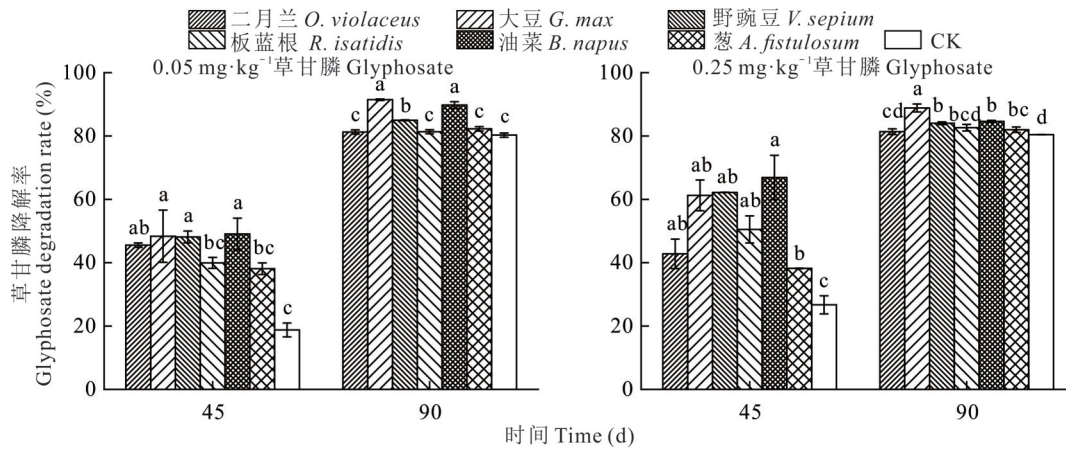


图1 种植作物对土壤草甘膦的降解效果

Fig. 1 Degradation effects of plant crops on soil glyphosate

不同小写字母表示同一时间不同种植作物间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 误差为标准误。Different lowercase letters indicate significant differences among different plant crops at the same time at the $P < 0.05$ level, the error represents the standard error.

2.2 种植作物对草甘膦残留土壤的微生物量碳氮的影响

供筛选的6种植物降解土壤草甘膦后均可提高土壤的微生物量碳含量(图2)。0.05 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 大豆、野豌豆、油菜和板蓝根可提高土壤微生物量碳含量, 分别为168.42、163.16、147.37和126.32 mg·kg⁻¹, 且与对照间差异显著($P < 0.05$); 0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 与对照相比, 6种作物均可显著提高土壤的微生物量碳含量($P < 0.05$)。可见, 无论是0.05还是0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 大豆和野豌豆均可显著提高草甘膦残留土壤的微生物量碳含量。

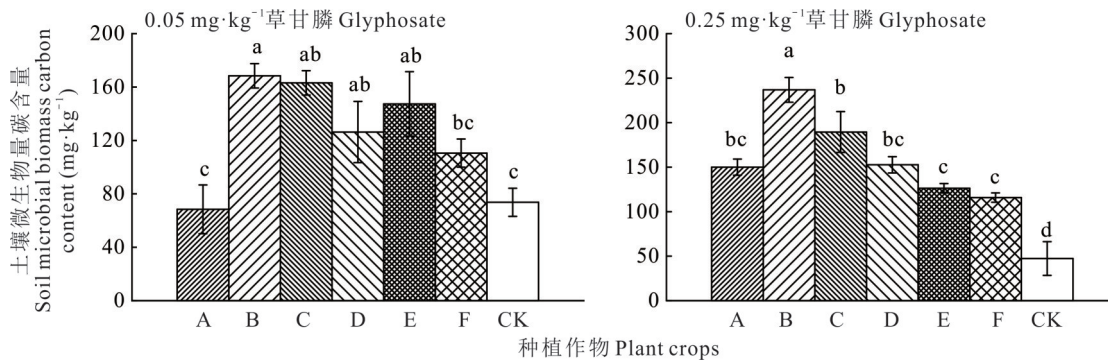


图2 种植作物对草甘膦残留土壤微生物量碳的影响

Fig. 2 The effects of plant crops on microbial biomass carbon in glyphosate-residual soil

A: 二月兰 *O. violaceus*; B: 大豆 *G. max*; C: 野豌豆 *V. sepium*; D: 板蓝根 *R. isatidis*; E: 油菜 *B. napus*; F: 葱 *A. fistulosum*. 下同 The same below. 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同。Different lowercase letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level, the same below.

供筛选的6种植物降解土壤草甘膦后, 仅大豆、野豌豆和葱可提高土壤的微生物量氮含量(图3)。0.05 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 大豆和野豌豆可提高土壤的微生物量氮含量, 分别为189.85和72.64 mg·kg⁻¹, 且与对照间差异显著($P < 0.05$); 0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 大豆和野豌豆均可显著提高土壤的微生物量氮含量, 且与对照间差异显著($P < 0.05$)。可见, 无论是0.05还是0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下, 大豆和野豌豆均可显著提高草甘膦残留土壤的微生物量氮含量。

对降解草甘膦后土壤微生物量碳氮的多因素分析结果表明, 植物类型和草甘膦农药浓度均显著影响草甘膦残留土壤的微生物量碳氮含量($P < 0.05$), 且草甘膦的浓度和植物类型对土壤微生物量碳存在显著的互作关系($P < 0.001$, 表1)。

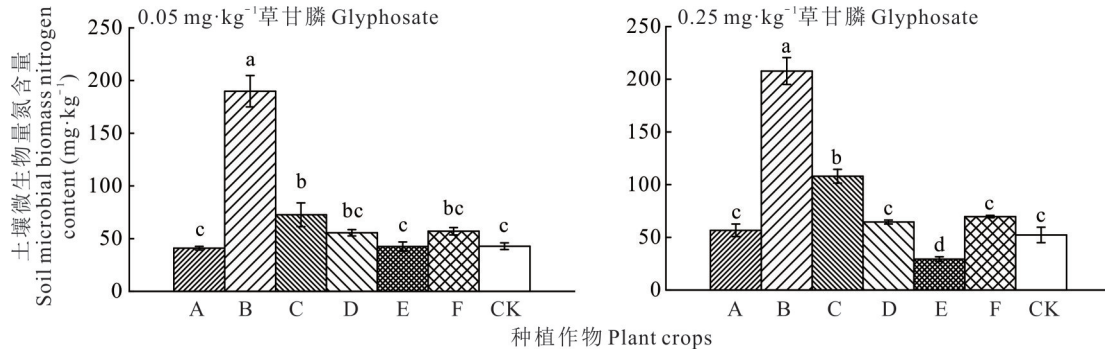


图 3 种植作物对草甘膦残留土壤微生物量氮的影响

Fig. 3 The effects of plant crops on microbial biomass nitrogen in glyphosate-residual soil

表 1 种植作物降解草甘膦后对土壤微生物量碳氮影响的多因素分析

Table 1 Multifactorial analysis of plant crops on soil microbial carbon and nitrogen after the degradation of glyphosate

指标 Index	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value
土壤微生物量碳 Soil microbial biomass carbon	植物类型 Plant type	64642.85	6	10773.81***	15.51
	农药浓度 Pesticide concentration	4327.15	1	4327.15*	6.23
	植物类型×农药浓度 Plant type×pesticide concentration	28956.41	6	4826.07***	6.95
土壤微生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen	植物类型 Plant type	113048.91	6	18841.49***	124.50
	农药浓度 Pesticide concentration	1619.20	1	1619.20**	10.70
	植物类型×农药浓度 Plant type×pesticide concentration	1860.65	6	310.11ns	2.05

、**和*分别表示显著性水平为 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ ，ns 表示不显著。, **, * represent significance levels of $P < 0.001$, $P < 0.01$, $P < 0.05$, respectively, and ns indicates not significant.

2.3 种植作物对草甘膦残留土壤的酶活性影响

供筛选的 6 种植物降解土壤草甘膦后均可提高土壤的 β -葡萄糖苷酶活性(图 4)。0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦处理下,种植大豆、油菜、野豌豆和板蓝根的土壤 β -葡萄糖苷酶活性较高,分别为 58.20、29.83、25.28 和 25.03 $\text{mmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,均与对照间差异显著($P < 0.05$);0.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦处理下,大豆、油菜、葱、二月兰和野豌豆也可提高土壤 β -葡萄糖苷酶活性,且均与对照间差异显著($P < 0.05$)。可见,无论是 0.05 还是 0.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦处理下,大豆、油菜和野豌豆均可显著提高草甘膦残留土壤的 β -葡萄糖苷酶活性。

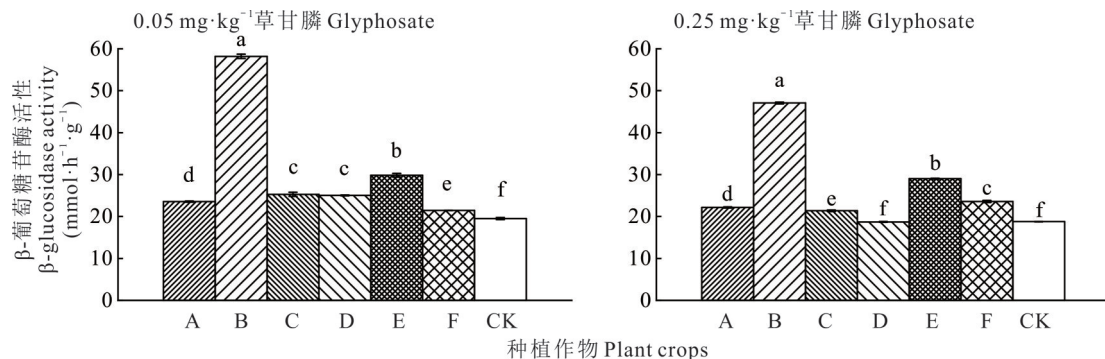


图 4 种植作物对草甘膦残留土壤 β -葡萄糖苷酶活性的影响

Fig. 4 The effects of plant crops on β -glucosidase activity in glyphosate-residual soil

供筛选的6种植物降解土壤草甘膦后仅大豆和野豌豆可提高土壤的 β -半乳糖苷酶活性(图5)。0.05 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,种植野豌豆、葱和大豆的土壤 β -半乳糖苷酶活性较高,其值分别为22.30、12.26和12.22 mmol·h⁻¹·g⁻¹,均与对照间差异显著($P < 0.05$);0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,种植野豌豆、大豆和二月兰的土壤 β -半乳糖苷酶活性较高,且与对照间差异显著($P < 0.05$)。可见,无论是0.05还是0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,野豌豆和大豆均可显著提高草甘膦残留土壤的 β -半乳糖苷酶活性。

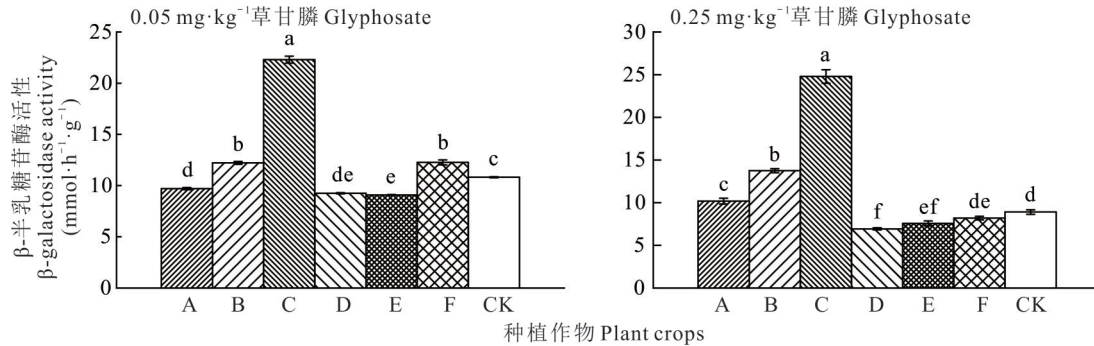


图5 种植作物对草甘膦残留土壤 β -半乳糖苷酶活性的影响

Fig. 5 The effects of plant crops on the β -galactosidase activity in glyphosate-residual soil

大豆和葱降解土壤草甘膦后均可提高土壤N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶活性(图6)。0.05 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,种植大豆的土壤N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶活性最高,为17.89 mmol·h⁻¹·g⁻¹,且与对照间差异显著($P < 0.05$);0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,大豆和葱2种植物均可提高土壤的N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶活性,且与对照之间差异显著($P < 0.05$)。可见,无论是0.05还是0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,大豆均可提高草甘膦残留土壤的N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶活性。

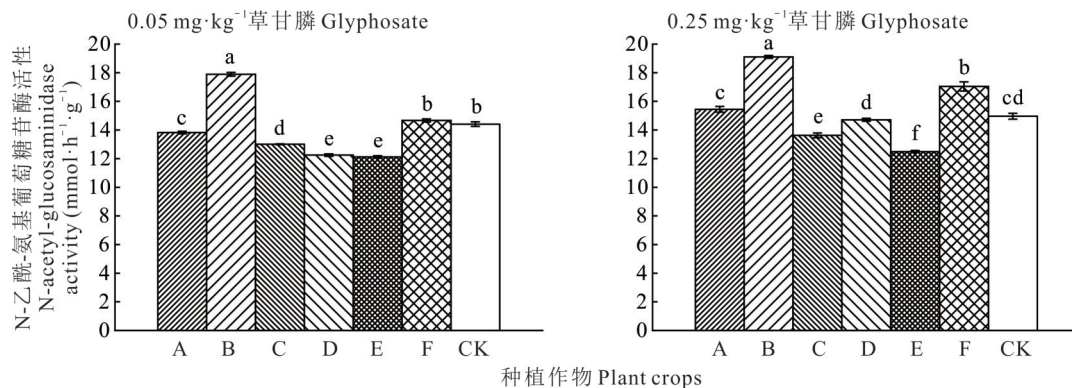


图6 种植作物对草甘膦残留土壤N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶活性的影响

Fig. 6 The effects of plant crops on the N-acetylglucosaminidase activity in glyphosate-residual soil

供筛选的6种植物降解0.05 mg·kg⁻¹草甘膦后仅大豆和葱可显著提高土壤N-乙酰-氨基半乳糖苷酶活性(图7),分别为47.91和44.24 mmol·h⁻¹·g⁻¹,且与对照间差异显著($P < 0.05$);0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,与对照相比,种植大豆、葱、野豌豆、板蓝根和二月兰均可显著提高土壤N-乙酰-氨基半乳糖苷酶活性($P < 0.05$)。可见,无论是0.05还是0.25 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,大豆和葱均可显著提高草甘膦残留土壤的N-乙酰-氨基半乳糖苷酶活性。

供筛选的6种植物降解土壤草甘膦后均可提高土壤碱性磷酸酶活性(图8)。0.05 mg·kg⁻¹草甘膦处理下,种植野豌豆、大豆、板蓝根、二月兰、葱和油菜的土壤碱性磷酸酶活性较高,其值分别为1.27、1.10、0.75、0.64、0.62

和 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 均与对照间差异显著 ($P < 0.05$); $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦处理下, 大豆、油菜、二月兰、野豌豆、板蓝根和葱这 6 种植物均可提高土壤的碱性磷酸酶活性, 其中大豆和野豌豆的土壤碱性磷酸酶活性较高, 且与对照间差异显著 ($P < 0.05$), 二月兰、油菜、板蓝根和葱的碱性磷酸酶活性高于对照但差异不显著。可见, 无论是 0.05 还是 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草甘膦处理下, 大豆和野豌豆均可显著提高草甘膦残留土壤的碱性磷酸酶活性。

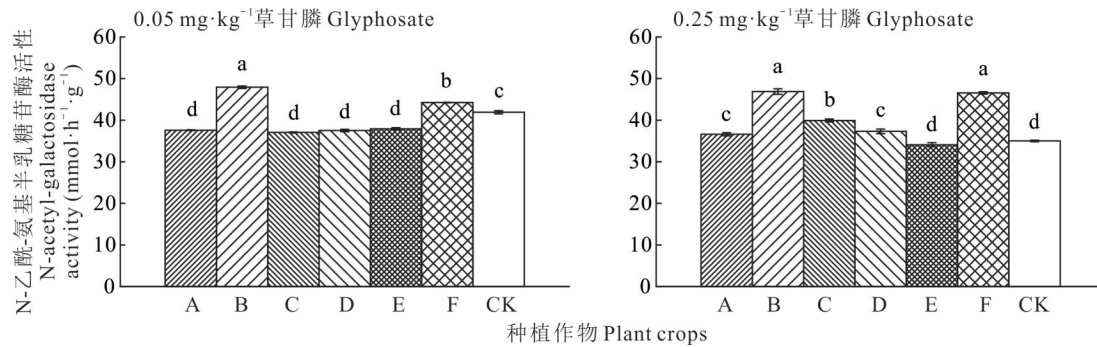


图 7 种植作物对草甘膦残留土壤 N-乙酰-氨基半乳糖苷酶活性的影响

Fig. 7 The effects of plant crops on the N-acetyl-galactosidase activity in glyphosate-residual soil

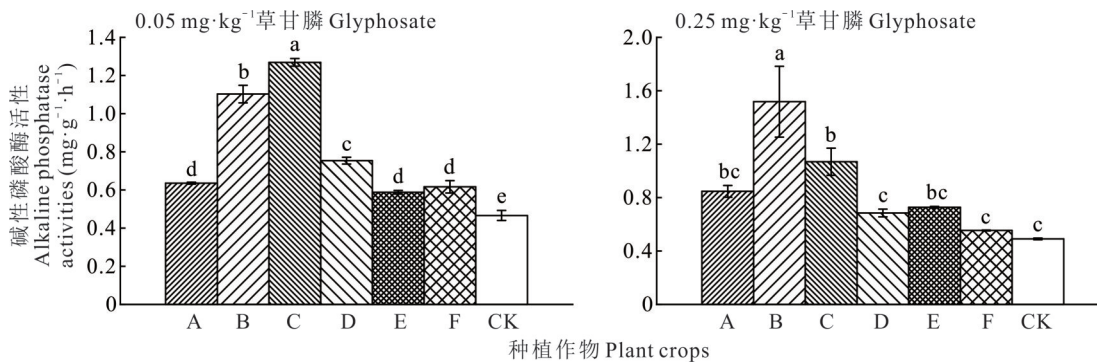


图 8 种植作物对草甘膦残留土壤碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 8 The effects of plant crops on the alkaline phosphatase activity in glyphosate-residual soil

3 讨论

本研究发现, 供筛选的大豆、油菜、野豌豆、葱、板蓝根和二月兰均对土壤草甘膦农药具有一定的降解作用, 其中大豆和野豌豆的降解效果较好。刘健等^[30]的研究表明, 大豆可促进土壤中石油烃污染物的去除; 李兆君等^[16]研究表明, 豆科植物通过根瘤和菌根可降解土壤的四氯乙烯污染物。大豆和野豌豆可降解土壤草甘膦农药残留, 其原因可能为: 大豆和野豌豆作为豆科植物, 由于根瘤菌的作用, 对草甘膦表现出较强的耐药性, 与它们共生的根瘤菌能打断草甘膦的碳磷键生成代谢中间产物肌氨酸, 并以其为磷源供自身生长所需, 从而实现了对草甘膦的生物降解^[31]; 此外, 根瘤和菌根可促进大豆和野豌豆的生长, 这些豆科植物在生长过程中释放根系分泌物等化学物质(酶类、糖类、醇类和酸类), 这些物质与微生物协同作用, 促进土壤草甘膦的降解^[32], 进而改善土壤质量。

土壤微生物量碳氮对环境因子变化和人为活动干扰十分敏感, 因此常被作为土壤质量变化的重要评价指标^[33]。本研究发现, 大豆、野豌豆降解土壤草甘膦后可提高土壤的微生物量碳氮, 这与前人的研究结果相似^[15, 18, 33]。张淑琴^[18]的研究发现, 月季根系分泌物降解根际土壤有机氯农药后, 可提高土壤的微生物量碳氮; 张博文等^[15]研究发现, 豆科植物紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 可改良土壤性状, 使土壤微生物量增加; 孙广东^[34]的研究表明, 黑麦草 (*Lolium perenne*) 根系分泌的有机物可以作为污染物降解菌生长和长期存活的碳源和氮源, 刺激好氧微生物的生长和活性, 从而提高土壤的微生物量。可见, 大豆和野豌豆可以提高草甘膦残留土壤的微生物量, 其原因可能是豆科植物的根瘤菌通过固氮活动增加了土壤的 N 素来源, 促进了土

壤的各种物质循环和养分供应^[35],为土壤微生物提供直接的营养来源,进而提高土壤的微生物量碳氮;豆科植物可能与根瘤菌共生形成根瘤促进土壤中磷的高效吸收,并通过根瘤菌的共生固氮过程从而提高根系的生物固氮量^[36],进一步提高土壤的微生物量碳氮。

土壤酶参与土壤中的物质转化和能量转移,是评价土壤肥力和土壤质量状况的重要指标^[21]。本研究发现,大豆、野豌豆和葱降解土壤草甘膦后,可提高土壤的 β -葡萄糖苷酶、 β -半乳糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、N-乙酰-氨基半乳糖苷酶和土壤碱性磷酸酶活性,表明这些植物可以促进土壤的碳氮磷循环。张淑琴^[18]的研究发现,月季根系分泌物降解根际土壤有机氯农药后,土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性提高;胡颖槟等^[23]研究发现,长期生草栽培可提高参与土壤碳和氮养分循环的蔗糖酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和蛋白酶活性。可见,大豆和野豌豆提高草甘膦残留土壤的酶活性,其原因可能是豆科植物种植后引入了一些微生物(根瘤菌等)并且自身分泌一些有机物,降解土壤草甘膦农药残留,使得土壤环境和养分条件更有利于微生物的活性^[23],从而提高土壤酶活性,促进土壤碳氮磷循环,改善了土壤肥力。总之,豆科植物可降解土壤草甘膦农药残留,并提高土壤微生物数量和活性,加速土壤养分循环和能量转化,进而提高土壤质量。

4 结论

本研究表明:油菜、大豆和野豌豆可显著降解土壤草甘膦农药残留($P < 0.05$);植物种植45 d后,草甘膦浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,油菜、大豆和野豌豆对土壤草甘膦的降解率分别为49.1%、48.4%和48.1%;草甘膦浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其降解率分别为66.9%、61.2%和62.2%。大豆根系发达,根瘤菌数量较多,且植株生物量较大,可能在单位时间内对草甘膦的降解量相对于植株矮小的野豌豆较大;野豌豆虽然也是豆科植物,但因其多为野生,植株相对矮小,生物量较小,根瘤菌数量可能也相对较少,其对草甘膦的降解效率可能低于大豆。植物种植90 d后,6种作物对土壤草甘膦的降解效果部分显著。大豆和野豌豆可显著提高草甘膦残留土壤的微生物量碳氮含量($P < 0.05$),表明其有利于草甘膦残留土壤的微生物繁衍;此外,大豆、野豌豆和葱可提高土壤的 β -葡萄糖苷酶、 β -半乳糖苷酶、N-乙酰-氨基葡萄糖苷酶、N-乙酰-氨基半乳糖苷酶和土壤碱性磷酸酶活性,表明其可促进草甘膦残留土壤的碳、氮、磷元素循环;其他植物对草甘膦残留土壤微生物量碳氮和酶活性的影响部分不显著。可见,大豆和野豌豆能显著降解土壤的草甘膦农药,且可提高草甘膦残留土壤的微生物量碳氮和酶活性,表明其可改良土壤质量。因此,建议果园适当混作大豆和野豌豆以有效降低土壤草甘膦农药残留,进而提高土壤质量,促进果树健康生长,为生产绿色环保有机果品提供保障。

参考文献 References:

- [1] Wang B. Screening, identification and key substance analysis of glyphosate degrading bacteria. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
王冰. 草甘膦降解菌的筛选、鉴定及关键物质分析. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [2] Maggi F, Cecilia D L, Tang F H M, *et al.* The global environmental hazard of glyphosate use. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137–167.
- [3] Liu T, Jiang H Z, Zhang H S, *et al.* Research progress on animals toxicity of glyphosate. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(7): 3026–3033.
刘田, 江海圳, 张海森, 等. 草甘膦动物毒性的研究进展. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(7): 3026–3033.
- [4] Zhang Y, Dai Q H, Yan Y J, *et al.* Research progress on the impact of glyphosate herbicide application on soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 7–13.
张友, 戴全厚, 严友进, 等. 施用草甘膦除草剂对土壤质量影响的研究进展. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 7–13.
- [5] Tong M M, Gao W J, Jiao W T, *et al.* The uptake, translocation, metabolism and distribution of glyphosate in non-target tea plant (*Camellia sinensis* L.). *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2017, 65(35): 7638–7646.
- [6] Hu L, He W X, Wang X D, *et al.* Effect of glyphosate on soil enzyme. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 680–685.
呼蕾, 和文祥, 王旭东, 等. 草甘膦的土壤酶效应研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4): 680–685.

- [7] Liu R J, Zhao Y, Wang Y H, *et al.* Research progress of organophosphorus pesticide residues status and removal methods. *The Food Industry*, 2019, 40(9): 299–302.
刘仁杰, 赵悦, 王玉华, 等. 有机磷农药残留现状及去除方法的研究进展. *食品工业*, 2019, 40(9): 299–302.
- [8] Zuo J H. Comparative study on the value of atropine and pralidoxime in pre-hospital emergency treatment of organophosphorus pesticide poisoning (SAOPP). *Cardiovascular Disease Electronic Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2020, 8(16): 177–178.
左继华. 对比研究阿托品、解磷定院前急救有机磷农药中毒(SAOPP)的价值. *中西医结合心血管病电子杂志*, 2020, 8(16): 177–178.
- [9] Tarazona J V, Court-Marques D, Tiramani M, *et al.* Glyphosate toxicity and carcinogenicity: a review of the scientific basis of the European Union assessment and its differences with IARC. *Archives of Toxicology*, 2017, 91(8): 2723–2743.
- [10] George J, Prasad S, Mahmood Z, *et al.* Studies on glyphosate-induced carcinogenicity in mouse skin: A proteomic approach. *Journal of Proteomics*, 2010, 73(5): 951–964.
- [11] Myers J P, Antoniou M N, Blumberg B, *et al.* Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: a consensus statement. *Environmental Health*, 2016, 15(1): 19.
- [12] Chirakkara R A, Cameselle C, Reddy K R. Assessing the applicability of phytoremediation of soils with mixed organic and heavy metal contaminants. *Reviews in Environmental Science and Bio-technology*, 2016, 15(2): 299–326.
- [13] Cindy P, Martin P. The impact and toxicity of glyphosate and glyphosate-based herbicides on health and immunity. *Journal of Immunotoxicology*, 2020, 17(1): 163–174.
- [14] Roos A J D, Aaron B, Rusiecki J A, *et al.* Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the agricultural health study. *Environmental Health Perspectives*, 2005, 113(1): 49–54.
- [15] Zhang B W, Li F P, Xu Y L. The improvement effects of 10 herbaceous plants on soil of stony mining spoils. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 286–290.
张博文, 李富平, 许永利. 10 种草本植物对石矿迹地土壤的改良效果. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 286–290.
- [16] Li Z J, Ma G R. The mechanism of phytoremediation of soil contaminated by organic pollutants. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 436–439.
李兆君, 马国瑞. 有机污染物污染土壤环境的植物修复机理. *土壤通报*, 2005, 36(3): 436–439.
- [17] Wang J F, Xing S Z, Duan L Z, *et al.* Effects using hybrid sudan grass (*Sorghum bicolor*×*S. sudanense*) to remediate DDT and its main degradation product in contaminated soil. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(6): 77–80.
汪建飞, 邢素芝, 段立珍, 等. 杂交苏丹草修复 DDT 及其主要降解产物污染土壤效果研究. *草业学报*, 2006, 15(6): 77–80.
- [18] Zhang S Q. Study on degradation of organochlorine pesticides in rhizosphere soil of garden plants by root exudates. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(1): 145–153.
张淑琴. 月季根系分泌物促进根际土壤有机氯农药降解研究. *环境科学与技术*, 2022, 45(1): 145–153.
- [19] Liu H L. Effects of glyphosate-resistant transgenic soybean on soil microbe and enzyme activity. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
刘慧璐. 抗草甘膦转基因大豆对土壤微生物和酶活性的影响. 太原: 山西大学, 2019.
- [20] Peng N N. Divergence of soil microbial biomass carbon and nitrogen and its influencing factors in Chongming Dongtan wetland. Shanghai: East China Normal University, 2022.
彭娜娜. 崇明东滩湿地土壤微生物生物量碳氮分异及影响因素分析. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [21] Lin J J, Zhu B, Cheng W X. Decadally cycling soil carbon is more sensitive to warming than faster-cycling soil carbon. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4602–4612.
- [22] Cheng F, Peng X B, Zhao P, *et al.* Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling mountains. *PLoS One*, 2013, 8(6): e67353.
- [23] Hu Y B, Liang C F, Jin J, *et al.* Effects of long-term sod cultivation on Chinese hickory plantation soil fungal community and enzyme activities. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2945–2954.
胡颖槟, 梁辰飞, 金锦, 等. 长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响. *环境科学*, 2023, 44(5): 2945–2954.
- [24] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil chemical analysis and environmental monitoring. Beijing: China Land Press, 2008.
杨剑虹, 王成林, 代亭林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.

- [25] Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment. Determination of glyphosate in soil and sediment-high performance liquid chromatography: HJ 1055-2019. Jiangsu: China Environmental Publishing Group, 2019.
生态环境部南京环境科学研究所. 土壤和沉积物 草甘膦的测定 高效液相色谱法: HJ 1055-2019. 江苏: 中国环境出版集团, 2019.
- [26] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [27] Brookes P C, Landman A, Pruden G J, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method for measuring microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17(6): 837–842.
- [28] Steinweg M J, Dukes S J, Wallenstein D M. Modeling the effects of temperature and moisture on soil enzyme activity: Linking laboratory assays to continuous field data. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55(1): 85–92.
- [29] Bai D S, Wang Y W, Yang X, *et al.* Effects of long-term (10 years) remediation of *Caragana* on soil enzyme activities, heavy metals, microbial diversity and metabolic spectrum of coal gangue. *Ecological Engineering*, 2022, 181(1): 106679.
- [30] Liu J, Li Y L, Ke L. Effects of maize and soybean phytoremediating petroleum polluted acid soil. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 300–304.
刘健, 李妍丽, 柯林. 玉米和黄豆对酸性土壤中石油的去除效果. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 300–304.
- [31] Liu C M, McLean P A, Sookdeo C C, *et al.* Degradation of the herbicide glyphosate by members of the family rhizobiaceae. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(6): 1799–1804.
- [32] Zhang F J, He J, Lü C W, *et al.* Accumulation of aged HCH-DDT by corn (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) roots from soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1265–1272.
张福金, 何江, 吕昌伟, 等. 作物根系对土壤中老化 HCH-DDT 的富集作用. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7): 1265–1272.
- [33] Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89–96.
徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89–96.
- [34] Sun G D. Biological characteristics and biodegradation of organochlorine pesticides in contaminated soils. Beijing: Tsinghua University, 2015.
孙广东. 有机氯农药污染土壤生物学特性及降解效应研究. 北京: 清华大学, 2015.
- [35] Kong P J, Zheng J, Luan L, *et al.* Effects of different types of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization and maize yield in upland red soil. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 6047–6057.
孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响. *环境科学*, 2021, 42(12): 6047–6057.
- [36] Liu Y L, Qian H Y, Zhang X, *et al.* Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth, N bio-fixation, and phosphorus uptake of legume crop. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1761–1767.
刘云龙, 钱浩宇, 张鑫, 等. 丛枝菌根真菌对豆科作物生长和生物固氮及磷素吸收的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1761–1767.