

草甘膦降解菌的筛选及鉴定

王冰¹, 姚敦跳¹, 赵悦², 刘仁杰^{1*}

[1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 长春 130118; 2. 内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司, 呼和浩特 011500]

摘要: **目的** 筛选草甘膦降解菌, 并对该菌株进行菌种鉴定。**方法** 以降解率为指标进行初筛, 经梯度驯化后计算降解速率和半衰期, 选取降解能力最佳的菌株 T6, 并对菌种进行形态学、生理生化特性以及分子生物学鉴定。**结果** 菌株 T6 经鉴定为植物乳杆菌, 在以草甘膦为唯一碳源的培养基中, 24 h 降解率达 27.51%, 降解速率常数为 0.0192 h^{-1} , 半衰期为 36.10 h, 降解作用良好。**结论** 筛选出一株分解草甘膦农残效果较好的菌株, 经鉴定为植物乳杆菌。本研究为开发利用微生物降解草甘膦等农药残留的研究提供一定的理论支持。

关键词: 草甘膦; 降解; 农药残留; 微生物

Screening and identification of glyphosate degrading bacteria

WANG Bing¹, YAO Dun-Tiao¹, ZHAO Yue², LIU Ren-Jie^{1*}

[1. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Inner Mongolia Mengniu Dairy Industry (Group) Co., Ltd., Hohhot 011500, China]

ABSTRACT: Objective To screen glyphosate pesticide residue degrading bacteria and identify the strain. **Methods** Preliminary screening was performed based on the degradation rate index, and the degradation rate and half-life were calculated after gradient acclimation. The strain T6 with the best degradation ability was selected, and the strain was subjected to morphological, physiological and biochemical characteristics and molecular biology identification. **Results** Strain T6 was identified as *Lactobacillus plantarum*. In the medium with glyphosate as the sole carbon source, the degradation rate reached 27.51% within 24 hours, the degradation rate constant was 0.0192 h^{-1} , the half-life was 36.10 h, and the degradation effect was good. **Conclusion** A strain with good effect on decomposing pesticide residues of glyphosate is screened out, and it is identified as *Lactobacillus plantarum*. The results of this study provide some theoretical support for the development and utilization of microbial degradation of glyphosate and other pesticide residues.

KEY WORDS: glyphosate; degradation; pesticide residues; microorganisms

0 引言

草甘膦属有机磷类农药, 是一种广谱灭生性除草剂, 可以除去一年生或多年生恶性杂草, 因具有高效、低毒、廉价等特点而广泛应用于农业领域, 现已成为全球生产和使用量最大的除草剂^[1-3]。土壤中残留有机磷农药常常会导致环境污染及果蔬种植的二次污染, 最终导致农产品农药残

留, 引发食品安全问题^[4-5]。近年来研究表明, 草甘膦不仅在土壤和植物内停留时间较长, 还会诱导疾病和种系突变的跨代遗传, 对哺乳动物有致癌、致畸风险^[6-7]。BOTTEN 等^[8]发现在哥伦比亚森林中, 草甘膦在植物组织中保留了 12 年之久。FERREIRA 等^[9]测定 41 名葡萄牙儿童(2~13 岁)尿液, 草甘膦检出率为 95.1%。ZHAO 等^[10]通过动物实验证明, 0.5%草甘膦的蒸馏水会干扰小鼠的昼夜节律系统, 并减

*通信作者: 刘仁杰, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全。E-mail: lrjem@126.com

*Corresponding author: LIU Ren-Jie, Ph.D, Associate Professor, Jilin Agricultural University, No.2888, Xincheng Road, Nanguan District, Changchun 130118, China. E-mail: lrjem@126.com

弱睾丸激素的合成, 从而导致雄性和雌性小鼠的生育能力下降。随着时代的发展, 人们对食品安全越发重视, 因此研究如何安全有效去除有机磷农药污染势在必行。

微生物可以将农药残留转化分解, 且具有降解效率高、速度快、范围广等特点^[11]。目前, 研究发现对有机磷农药具有降解作用的微生物种类主要包括细菌、真菌、放线菌、藻类等^[12]。熊慧等^[13]从天然湖泊底泥中筛选出 1 株高效除磷的芽孢杆菌, 其在高磷水体中除磷作用显著; 贺望兴等^[14]从茶园草甘膦污染土壤中筛选出 1 株降解菌株, 经鉴定为微球菌属; 张慧芳等^[15]从草甘膦农药污染的环境分离筛选到 2 株降解草甘膦的菌株 B-1 和 Y-1, 分别为越南伯克氏菌和硝基还原假单胞菌, 由此可见, 微生物降解作为处理农药残留的有效方法而备受关注。自然界存在很多耐受草甘膦的菌群, 仍然需要对草甘膦降解菌投入更多的研究和开发, 以期筛选出高效稳定的降解菌株。本研究从喷洒过草甘膦农药的土壤中分离和梯度筛选微生物菌株, 以期获得可以在以草甘膦为唯一碳源的培养基中生长、且具有较高降解草甘膦能力的菌株, 为微生物降解有机磷农药的研究提供理论基础和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验试剂

30% (m/m) 草甘膦溶液(江苏好收成韦恩农化股份有限公司); MRS 液体培养基、MRS 固体培养基(青岛海博生物技术有限公司); $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ (分析纯, 无锡市亚泰联合化工有限公司); $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司); $NaNO_3$ (分析纯, 天津市永大化学试剂有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 降解菌株的筛选及分离

将 10 g 土壤置于 100 mL 含 2% (V/V) 草甘膦的筛选培养基中, 37 °C 培养 2 d, 摇匀后取 20 mL 上层悬浮液加至 100 mL 含 2% (V/V) 草甘膦的新鲜培养基中, 37 °C 继续培养 2 d, 重复 3 次后于 MRS 培养基中划线分离, 得到单一菌落^[16-17]。

1.2.2 梯度筛选

将初筛得到的菌株, 接种于含 3% (V/V) 草甘膦农药的筛选培养基中, 重复活化 3 次后接种于含 4% (V/V) 草甘膦的筛选培养基中, 重复活化 3 次后接种于含 5% (V/V) 草甘膦的筛选培养基中, 于 37 °C 培养 24 h, 重复 3 次后接入含有 6% (V/V) 草甘膦的筛选培养基中, 重复操作 3 次, 将得到的菌株保藏备用。

1.2.3 菌株鉴定

观察筛选到的草甘膦降解菌的菌落形态, 并进行革兰氏染色、镜检。依据《伯杰细菌鉴定手册》^[18]及《乳酸

细菌分类鉴定及实验方法》^[19]进行生理生化特性鉴定; 提取菌株 DNA, 进行分子生物学鉴定^[20]。

1.2.4 菌株生长曲线的绘制

将活化好的最优菌株接种到 MRS 液体培养基中, 接种量为 2%, 37 °C 培养 24 h, 分别在 0、2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24 h 测定吸光值 $OD_{600\text{ nm}}$, 以 MRS 液体培养基调零, 绘制生长曲线。

1.2.5 菌株降解曲线的绘制

配制草甘膦浓度为 80 mg/L 的 MRS 液体培养基, 以 5% (V/V) 接菌量接种植物乳杆菌 T6, 37 °C 恒温培养, 分别于 0、3、6、9、12、15、18、21、24 h 测定样品的总磷及无机磷含量, 由此计算有机磷含量, 以 MRS 培养基为对照, 绘制降解曲线。

1.2.6 草甘膦测定

草甘膦含量的测定采用磷钼蓝分光光度法^[21]。以磷酸二氢钾为标准品, 分别配制成浓度为 0、50、100、150、200、250 $\mu\text{g/mL}$ 的工作液, 于 890 nm 处测定 OD 值, 以磷酸根含量为横坐标、吸光度值为纵坐标绘制磷酸根标准曲线。

以蒸馏水为空白对照测定总磷及无机磷, 将测得的吸光度值分别代入回归方程, 计算得到的样品中总磷含量减去无机磷的含量即为样品中有有机磷的含量。

1.2.7 降解率、降解速度常数及半衰期

草甘膦降解率^[22,24]的计算方法见公式(1)。

$$Q = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q 为草甘膦降解率, %; C_0 为草甘膦的初始浓度, mg/L; C_t 为培养结束后培养基中残留的草甘膦含量, mg/L。

将初筛选得到的菌株以接种量 10% (V/V) 接种到含 6% (V/V) 草甘膦的基础盐培养基中(终体积为 5 mL), 充分混匀后, 置于 37 °C 培养箱中培养 24 h 后, 检测草甘膦的残留含量, 以不含草甘膦的基础培养基为空白对照, 每个样品重复 3 次, 依据公式计算菌株对草甘膦降解速率常数及半衰期, 由此筛选降解能力最强菌株^[25]。动力学方程见公式(2)和(3)。

$$C_t = C_0 e^{-Kt} \quad (2)$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / K \quad (3)$$

其中: C_t 为 $t=24$ h 草甘膦浓度, mg/L; C_0 为初始草甘膦浓度, mg/L; K 为降解速率常数, h^{-1} ; t 为反应时间, h; $t_{1/2}$ 为半衰期, h。

2 结果与分析

2.1 降解菌株的分离筛选

通过筛选共得到 12 株菌株, 分别命名为 T1、T2、T3, ..., T12, 各菌株对草甘膦的降解率结果见表 1。由结果

可知,在 4%的草甘膦培养基中,各菌株的降解能力在 3.46%~27.51%之间,其中降解能力最好的菌株为 T2、T6、T7,降解率分别为 21.19%、27.51%及 18.48%。由此初步断定 T2、T6 和 T7 具有相对较强的降解草甘膦的能力。

表 1 草甘膦降解菌的初筛
Table 1 Preliminary screening of glyphosate degradation bacteria

编号	降解率/%	编号	降解率/%
T1	8.26±1.43	T7	18.48±0.92
T2	21.19±0.84	T8	10.57±0.80
T3	9.02±1.15	T9	13.5±0.79
T4	3.46±0.51	T10	5.17±0.81
T5	6.25±1.28	T11	6.33±1.08
T6	27.51±1.25	T12	6.07±1.46

注:数据以平均值±标准偏差表示。

2.2 梯度筛选

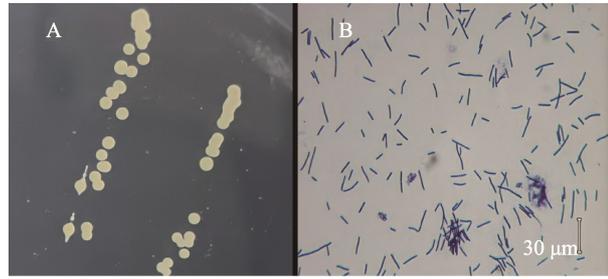
自然界中存在多种耐受草甘膦的菌种,且不同菌属对草甘膦有不同法降解效能^[26]。为提高降解菌的农药耐受程度和分解能力,有必要对初筛得到的菌种进行进一步的梯度驯化筛选。将筛选的降解菌株分别梯度接种于 6%(V/V)草甘膦的筛选培养基,培养 24 h 后测定草甘膦含量并计算 K 值,由表 2 得知培养 24 h 时,T2、T6、T7 对草甘膦的降解速率分别为 0.0164、0.0192、0.0175 h^{-1} ,半衰期分别为 42.27、36.10、39.61 h。由此得出,菌株 T6 对草甘膦的降解能力优于 T2 及 T7,故选取菌株 T6 作为供试菌株。

表 2 接种不同菌株的筛选培养基中草甘膦的降解动力学参数
Table 2 Degradation kinetic parameters of glyphosate in filter medium inoculated with different bacteria

菌株	降解速率常数 K/h^{-1}	相关系数 r^2	半衰期 $t_{1/2}/\text{h}$
T2	0.0164	0.9704	42.27
T6	0.0192	0.9761	36.10
T7	0.0175	0.9609	39.61
对照	0.0079	0.9723	87.74

2.3 菌株 T6 的生理生化鉴定结果

对 T6 进行形态学观察及革兰氏染色,见图 1。在 MRS 固体培养基上 37 °C 培养 24 h 后,菌落呈乳白色,为光滑扁平圆形,直径约 1.0 mm,边缘整齐,不透明。在光学显微镜下观察,菌体为革兰氏阳性菌,呈杆状,两端圆润、无荚膜和芽孢。菌株的接触酶实验结果为阴性,初步鉴定为乳杆菌属(*Lactobacillus*)。



注: A 图为培养基中的菌落形态; B 图为革兰氏染色后菌株形态。

图 1 菌株 T6 的形态特征

Fig.1 Morphological characteristics of T6

生理生化特性鉴定结果如表 3 所示。综合形态特征、生理生化特性和 16SrDNA 序列分析结果,鉴定菌株 T6 为植物乳杆菌种(*Lactobacillus plantarum*)。植物乳杆菌是自然界中具有降解有害物质的菌种之一。实验中 T6 能在只有草甘膦作为碳源的培养基上正常生长,证明了该菌具有一定的降解草甘膦能力^[16]

表 3 菌株 T6 的生理生化特性

Table 3 Physiological and biochemical characteristics of T6

项目	结果	项目	结果	项目	结果
革兰氏染色	+	甲基红	-	明胶液化	-
V-P	-	硫化氢	-	吲哚	-
柠檬酸盐	-	淀粉水解	-		

注:“+”表示结果呈阳性,“-”表示结果呈阴性。

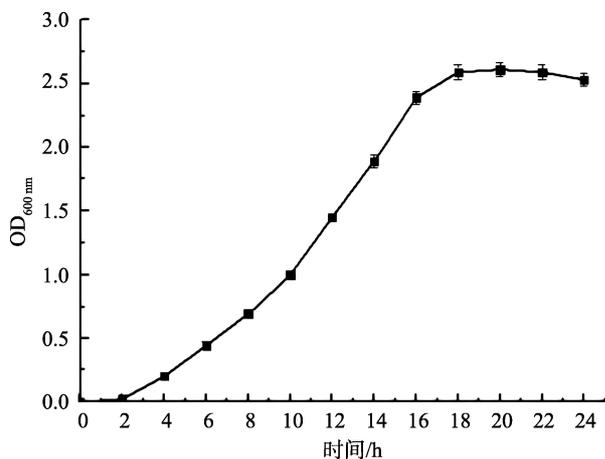
2.4 分子生物学鉴定结果

对菌株 T6 进行 16SrRNA 基因序列测定,结果可知其片段长度为 1438 bp。利用 Blast 程序以及 NCBI (<https://www.uniprot.org/database/DB-0028>)中核苷酸数据进行比对分析。菌株 T6 的 16SrRNA 基因序列与 NCBI 中已报道的基因序列相似性高达 99%,由此确定菌株 T6 为植物乳杆菌属。

2.5 生长曲线绘制

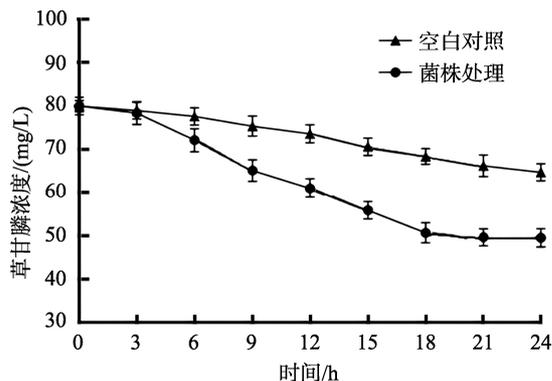
通过测定 MRS 发酵液 0、2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24 h 时 $\text{OD}_{600\text{nm}}$,得到植物乳杆菌 T6 在 24 h 内的生长曲线,如图 2 所示。

在 0~4 h 时,OD 值低于 0.2,植物乳杆菌 T6 生长速度缓慢,为生长延缓期;4~18 h 期间 MRS 培养基菌株增殖速度最快、代谢旺盛,为植物乳杆菌 T6 对数生长期;在 18 h 时 MRS 培养基 OD 值最高达到最高点;18~24 h 期间 OD 值变化稳定,植物乳杆菌 T6 生长曲线较为平稳,18~24 h 为植物乳杆菌 T6 的生长稳定期。

图 2 植物乳杆菌 T6 生长曲线($n=3$)Fig.2 Growth curve of *Lactobacillus plantarum* T6 ($n=3$)

2.6 降解曲线的绘制

测定不同时间培养液中的草甘膦浓度, 确定 T6 对草甘膦的降解情况, 绘制的降解曲线如图 3 所示。

图 3 植物乳杆菌 T6 的降解曲线($n=3$)Fig.3 Degradation curve of *Lactobacillus plantarum* T6 ($n=3$)

由图 3 可知, 未接种植物乳杆菌 T6 的空白组草甘膦浓度随着时间延长而缓慢下降。加入植物乳杆菌 T6 后, 0~3 h 期间, 草甘膦浓度变化不明显, 因为植物乳杆菌 T6 在草甘膦培养基中处于迟缓期, 适应培养环境, 同时为细胞的大量分裂繁殖合成必要的物质; 3~18 h 草甘膦浓度持续下降, 说明植物乳杆菌 T6 处于生长对数期, 繁殖较快, 降解草甘膦效率较高; 18~24 h, 草甘膦浓度下降减缓, 可能是由于 T6 进入稳定和衰亡期, 由于营养物质的消耗以及代谢废物及草甘膦本身的毒性^[27], 对降解菌起一定的毒害作用, 从而明显抑制菌株的生长, 导致降解率的下降。

3 结论与讨论

现代经济的飞速发展, 人们的衣食住行已离不开农药化肥, 随之而来的农药残留污染备受人们关注。自然界中存在

的丰富的微生物种质资源中, 人们逐渐认识乳酸菌, 尤其在传统发酵食品的研究与开发中, 其益生保健功能在维护人体健康方面起着巨大的作用^[28]。将乳酸菌应用于农药残留降解, 具有重大应用价值和市场前景。迟涛等^[29]研究发现, 乳酸菌能降解低温发酵酸菜中的有机磷农药, 但是降解的速率不同, 可能是由于温度、环境、pH 以及微生物的菌群变化等因素协同作用的结果。据 BO 等^[30]报道, 酸奶加工过程中, 有机磷农药含量随着发酵时间的延长逐渐降低, 表明乳酸菌在生长繁殖的过程中, 不仅能产生有益的功能性成分, 同时还可以分解有害的物质, 一举两得。还有研究表明^[31], 微生物降解有机磷农药过程中起到关键作用的是微生物分泌的降解酶系。在降解过程中有机磷农药吸附于微生物的细胞膜表面, 进入细胞膜后迅速与降解酶结合, 产生反应而分解^[32]。本研究筛选出降解草甘膦效果较好的菌株 T6, 通过形态学和生理生化鉴定以及 16SrRNA 基因序列比对鉴定为植物乳杆菌, 丰富了农残降解的微生物菌种, 在修复环境、消除污染、保护人民身体健康等方面具有一定的应用价值。另外, 所筛选出的植物乳杆菌 T6 还需在乳酸发酵方面开展系列研究, 其发酵特性、分解产物、应用效果和范围有待于进一步确定。

参考文献

- [1] 苏少泉. 草甘膦述评[J]. 农药, 2005, (4): 145-149.
SU SQ. Glyphosate review [J]. Agrochemicals, 2005, (4): 145-149.
- [2] 高万君, 李叶云, 侯如燕. 茶叶中草甘膦残留现状与对策[J]. 中国茶叶, 2021, 43(4): 20-24.
GAO WJ, LI YY, HOU RY. Status and countermeasures of glyphosate residue in tea [J]. China Tea, 2021, 43(4): 20-24.
- [3] 王芳, 杨广学. 草甘膦毒性的临床研究进展[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(2): 175-179.
WANG F, YANG GX. Advance on clinical study of glyphosate toxicity [J]. J Environ Occup Med, 2018, 35(2): 175-179.
- [4] VEIGA F, ZAPATA J, MARCOS M, et al. Dynamics of glyphosate and aminomethyl phosphonic acid in a forest soil in Galicia, north-west Spain [J]. Sci Total Environ, 2001, 271(1-3): 135-144.
- [5] 邓晓, 武春媛, 李怡, 等. 土壤微生物种群与酶活性对草甘膦和草甘膦胁迫响应的差异[J]. 农药, 2019, (8): 580-583.
DENG X, WU CY, LI Y, et al. Differences in the stress responses of soil microbial populations and enzyme activities to glufosinate-ammonium and glyphosate [J]. Agrochemicals, 2019, (8): 580-583.
- [6] KUBSAD D, NILSSON EE, KING SE, et al. Assessment of glyphosate induced epigenetic transgenerational inheritance of pathologies and sperm epimutations: Generational toxicology [J]. Sci REP-UK, 2019, (9): 6372.
- [7] MARÍA M, MILESI, VIRGINIA L, et al. Perinatal exposure to a glyphosate-based herbicide impairs female reproductive outcomes and induces second-generation adverse effects in Westar rats [J]. Arch Toxicol, 2018, 92(8). DOI: 10.1007/s00204-018-2236-6
- [8] BOTTEN N, WOOD L, WERNER J. Glyphosate remains in forest plant tissues for a decade or more [J]. Forest Ecol Manag, 2021, 493. DOI: 10.1016/J.FORECO.2021.119259
- [9] FERREIRA C, DUARTE S, COSTA E, et al. Urine biomonitoring of glyphosate in children: Exposure and risk assessment [J]. Environ Res, 2021, 198: 111294.

- [10] ZHAO L, ZHANG J, YANG L, *et al.* Glyphosate exposure attenuates testosterone synthesis via NR1D1 inhibition of StAR expression in mouse Leydig cells [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 785(4): 147323.
- [11] CLAUDIA T, OSCAR M, JULIETA F, *et al.* Towards sustainable maize production: Glyphosate detoxification by *Azospirillum* sp. and *Pseudomonas* sp. [J]. *Crop Prot*, 2015, 77: 102–109.
- [12] 段海明. 毒死蜱降解细菌的筛选、降解特性及其固定化研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
DUAN HM. Isolation, degradation characteristics and immobilization of chlorpyrifos degrading bacteria [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011.
- [13] 熊慧, 张雅婷, 羊晨, 等. 高效除磷菌的筛选与培养条件优化[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(12): 125–130.
XIONG H, ZHANG YT, YANG C, *et al.* Screening and optimization of culture conditions of high efficient phosphorus removal organism [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 43(12): 125–130.
- [14] 贺望兴, 杨普香, 石旭平, 等. 一株茶园草甘膦降解菌的筛选与鉴定[J]. *蚕桑茶叶通讯*, 2018, (2): 35–38.
HE WX, YANG PX, SHI XP, *et al.* Screening and identification of a glyphosate degrading bacteria in tea garden [J]. *Newsl Seric Tea*, 2018, (2): 35–38.
- [15] 张慧芳, 冉梦兰, 汪倩, 等. 草甘膦微生物降解菌株的筛选及其生物学特性[J]. *贵州农业科学*, 2015, 43(10): 111–115, 118.
ZHANG HF, RAN ML, WANG Q, *et al.* Screening and biological characteristics of strains with degrading glyphosate capacity [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2015, 43(10): 111–115, 118.
- [16] 叶明, 陈九山, 姚晓庆. 一株草甘膦降解菌分离鉴定及其降解特性研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(3): 39–41.
YE M, CHEN JS, YAO XQ. Isolation and identification of a glyphosate-degrading strain and its degradation characteristics [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 32(3): 39–41.
- [17] 何裕建, 闫玉, 吴丽. 一种草甘膦降解菌的特性: 中国, CN111304109A [P]. 2020.
HE YJ, YAN Y, WU L. Characteristics of a glyphosate-degrading bacterium: China, CN111304109A [P]. 2020.
- [18] R.E.布坎南. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
BUCHANNA RE. *Bergey's handbook of bacterial identification* [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [19] 凌代文, 东秀珠. 乳酸细菌分类鉴定及实验方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
LING DW, DONG XZ. *Classification and identification of lactic acid bacteria and experimental methods* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998.
- [20] 金迅. 消减枸杞常用有机磷农药残留的益生菌筛选及其代谢研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
JIN X. Screening of probiotics for degradation of organophosphorus pesticides in wolfberry and the study of its metabolism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [21] 桑宏庆, 于天宇. 磷钼蓝分光光度法测定果蔬中有机磷农药[J]. *饮料工业*, 2010, 13(8): 39–43.
SANG HQ, YU TY. Phosphomolybdenum blue spectrophotometric determination of organophosphorus pesticides in fruits and vegetables [J]. *Beverage Ind*, 2010, 13(8): 39–43.
- [22] 全鑫, 周春雨, 范婕妤, 等. 草甘膦高效降解菌的筛选鉴定及降解特性研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2010, 47(4): 921–925.
QUAN X, ZHOU CY, FAN JY, *et al.* Isolation, identification and characterization of a highly efficient glyphosate degrading strain [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci Ed)*, 2010, 47(4): 921–925.
- [23] TOPP E, MULBRY WM, ZHU H, *et al.* Characterization of striazine herbicide metabolism by a *Nocardioides* sp. isolated from agricultural soils [J]. *Appl Environ Microb*, 2000, 10(2): 59–63.
- [24] 高鹏, 韩金志, 陆兆新, 等. 广谱抗菌乳酸菌的分离鉴定及细菌素的提取和纯化[J]. *食品科学*, 2016, (11): 160–166.
GAO P, HAN JZ, LU ZX, *et al.* Isolation and identification of lactic acid bacterial strain with broad-spectrum antibacterial activity and extraction and purification of bacteriocin produced by it [J]. *Food Sci*, 2016, (11): 160–166.
- [25] 孔志明. 环境毒理学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2017.
KONG ZM. *Environmental toxicology* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2017.
- [26] 王军华, 王易芬, 陈蕾蕾, 等. 除草剂草甘膦微生物降解技术研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4): 8–12.
WANG JH, WANG YF, CHEN LL, *et al.* Research progress on microbial degradation technology of herbicide glyphosate [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2016, 44(4): 8–12.
- [27] 朱玉, 于中连, 林敏. 草甘膦生物抗性和生物降解及其转基因研究[J]. *分子植物育种*, 2003, (4): 435–441.
ZHU Y, YU ZL, LIN M. Bioresistance or biodegradation of glyphosate and construction of transgenic plants [J]. *Mol Plant Breeding*, 2003, (4): 435–441.
- [28] 丁武蓉. 青藏高原传统发酵牦牛奶中乳酸菌多样性及其益生功能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
DING WR. *Biodiversity and probiotic properties of lactic acid bacteria from spontaneously fermented yak milk in the Qinghai-Tibetan plateau* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [29] 迟涛, 方泉景, 郑愉润, 等. 低温发酵条件下乳酸菌对发酵酸菜体系中有机磷农药降解作用[J]. *中国乳品工业*, 2015, 43(9): 15–18.
CHI T, FANG JQ, ZHENG YR, *et al.* Effect of lactic acid bacteria on the degradation of organophosphorus pesticides at low temperature in pickled Chinese cabbage [J]. *China Dairy Ind*, 2015, 43(9): 15–18.
- [30] BO S, RICKARD W, JOHAN O, *et al.* W1771 effect of eight weeks of treatment with probiotic yoghurt on irritable bowel syndrome symptoms-A randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *Gastroenterology*, 2008, 134(4). DOI: 10.1016/S0016-5085(08)63325-9
- [31] 段晓霞. 产碱性磷酸酶乳杆菌的筛选、酶学性质及降解有机磷作用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
DUAN XX. Study on screening, enzymatic properties and degradation of organophosphorus by *Lactobacillus alkaline* phosphatase [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [32] XIONG P, TIANHENG X, HAOYU X, *et al.* Characterization and genome functional analysis of the DDT-degrading bacterium *Ochrobactrum* sp. DDT-2 [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 592: 593–599.

(责任编辑: 郑丽王欣)

作者简介



王冰, 硕士, 主要研究方向为食品安全与控制。
E-mail: 6648971@163.com

刘仁杰, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全。
E-mail: lrjem@126.com