

利用多组学技术研究菌株 *Pseudomonas* sp. T4 对上海青营养品质的影响

李 越^{1,2}, 董春村², 许 多², 杨晨晔³, 李 勇², 余向阳^{1,2}

(1. 沈阳农业大学食品学院 沈阳 110866; 2. 省部共建国家重点实验室培育基地·江苏省食品质量安全重点实验室·江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所 南京 210014; 3. 江苏省农业科学院中心实验室 南京 210014)

摘 要: 以往菌剂开发多关注于作物产量及抗逆性,而忽略了对作物营养品质的影响。本文以从上海青根内分离出的 1 株假单胞菌 *Pseudomonas* sp. T4 为试材,通过盆栽试验测定菌株 T4 对上海青生物量累积、叶绿素相对含量及蛋白质、可溶性糖、矿质元素含量和指纹代谢图谱的影响。结果表明,接种 T4 可显著提高上海青生物量,根和茎叶鲜质量是未接种菌株 T4(对照)的 1.58 和 1.17 倍。生理指标分析发现,接种 T4 的上海青叶片叶绿素相对含量及蛋白质、可溶性糖含量较对照分别显著提高 19.49%、10.88% 和 69.12%。基于非靶向代谢组学分析,发现相比于对照,接种 T4 的处理显著提高上海青茎叶中泛醇、烟酰胺、4-吡哆酸及 4-吡哆醇等维生素含量,同时提高矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、木犀草素-4-*O*-葡萄糖苷和槲皮素-3, 4-二葡萄糖苷等类黄酮,以及棕榈油酸、油酸、亚麻酸等脂肪酸含量。基于离子组学分析,发现接种菌株 T4 的上海青中 K、Mg、Cu、Ba、B 等矿质元素含量显著提高,是对照的 1.06~1.48 倍。综上,菌株 T4 不仅可以显著提高上海青生物量,还可以显著改善其营养品质,本研究结果可为微生物菌剂的开发提供菌种资源和理论依据。

关键词: 上海青; 内生菌; 营养品质; 代谢组学; 生物量; 矿质元素

中图分类号: S634.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)08-037-08

Studying the effects of *Pseudomonas* sp. T4 on the nutritional quality of Shanghaiqing using multi-omics technologies

Li Yue^{1,2}, Dong Chuncun², Xu Duo², Yang Chenye³, Li Yong², Yu Xiangyang^{1,2}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base Jointly Built by Province and Ministry/The Key Laboratory for Food Quality and Safety of Jiangsu Province/Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 3. Central Laboratory, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In this study, a strain of *Pseudomonas* sp. T4, isolated from the root of Shanghaiqing, was used as the experimental material. Pot experiments were conducted to evaluate the effects of strain T4 on biomass accumulation, as well as the content of chlorophyll, protein, soluble sugar, mineral element, and the metabolic finger printing of Shanghaiqing. The results showed that inoculation with T4 significantly increased the biomass of Shanghaiqing, where the fresh mass of root and shoot were 1.58 and 1.17 times higher than those of the non-inoculated control, respectively. Physiological index analysis revealed that the content of chlorophyll, protein, and soluble sugar in the leaves of T4-inoculated Shanghaiqing were significantly increased by 19.49%, 10.88%, and 69.12% compared to the control, respectively. Non-targeted metabolomics analysis indicated that, compared with the control, T4 inoculation significantly increased the levels of vitamins (nicotinamide, 4-pyridoxic acid, and pyridoxine), flavonoids (cyanidin-3-*O*-glucoside, luteolin-4'-*O*-glucoside and quercetin-3, 4'-diglucoside), and fatty acids (palmitoleic acid, oleic acid, and linolenic acid) in the shoots. Ionomics analysis demonstrated that the content of mineral elements including K, Mg, Cu, Ba, and B in T4-treated Shanghaiqing were significantly increased, ranging from 1.06 to 1.48 times those of the control. In conclusion, strain T4 not only significantly en-

收稿日期: 2025-10-08; 修回日期: 2026-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(32272583)

作者简介: 李 越, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为农产品质量安全与营养分析。E-mail: lyue1105@163.com

通信作者: 李 勇, 男, 研究员, 主要从事农药残留风险控制研究。E-mail: liyong201508@jaas.ac.cn

杨晨晔, 女, 助理研究员, 主要从事农产品质量安全研究。E-mail: yangchenye@jaas.ac.cn

hances the biomass but also markedly improves the nutritional quality of Shanghaiqing. This study provides microbial resources and a theoretical basis for the development of microbial agents.

Key words: Shanghaiqing; Endophyte; Nutritional quality; Metabolomics; Biomass; Mineral element

上海青(*Brassica rapa* subsp. *chinensis*)作为十字花科芸薹属栽培变种,因其形态特征差异也常被称作小白菜、小油菜、塌棵菜等,在叶菜类蔬菜中为常见品种^[1]。上海青作为一种典型的速生型蔬菜,在合理密植下可以实现较高的单位面积产量,同时能够在不同气候和土壤条件下稳定生长^[2]。从营养价值上来看,上海青富含蛋白质、维生素C、维生素K、胡萝卜素、钙、铁及膳食纤维等营养成分,同时含有硫代葡萄糖苷、多酚等生物活性物质。这些成分不仅赋予上海青较高的抗氧化能力,还在抗炎及代谢调节方面表现突出,使其成为一种营养与保健功能兼具的蔬菜^[3]。除品种差异外,栽培方式也是影响青菜品质的重要因素之一,常见的栽培方式包括水肥一体化管理、合理密植、环境调控、直播与育苗移栽结合、农药施用、灌溉技术、无土栽培以及生物菌剂的使用等^[4]。值得注意的是,科研人员往往过多关注栽培技术对青菜生物量及口感的影响,而忽略了对其内在营养品质和安全性的影响。

植物各器官栖息着各类微生物群落,通过以营养交换、信号交流等方式与植物形成共生关系^[5]。一方面,植物共生菌可直接产生植物激素以调节植物生长,通过固定大气中的氮元素、溶解土壤中难溶性磷和分解含钾矿物等方式改善植物营养供应;另一方面,植物共生菌通过调节根际环境、植物生理代谢间接减轻或抑制植物病害程度,增强植物对干旱、盐碱地等逆境胁迫的抵御能力^[6]。研究表明,*Pseudomonas* sp. MET75 可通过分泌有机酸(如柠檬酸、葡萄糖酸)活化土壤中的难溶性磷,显著提高小白菜对磷的吸收效率,并促进小白菜中次生代谢物的合成^[7]。从兰花中分离出的内生真菌 *Anoectochilus* 和 *Ludisia* 可以促进植物生物量累积,并提高生物活性代谢物的含量^[8]。Zhou 等^[9]研究发现,间作洋葱可促进番茄根际 *Bacillus* 的定殖,并诱导番茄植株对黄萎病产生系统抗性。Szymanska 等^[10]研究发现,耐盐菌 *Pseudomonas stutzeri* ISE12 可激活其抗氧化防御系统并触发细胞壁重排,增强甘蓝型油菜对盐胁迫的耐受性。当前我国农用微生物资源的开发仍处于起步阶段,深入挖掘植物功能性共生菌的种质资源对实现农业可持续发展具有重要意义。

鉴于此,笔者以前期从上海青中分离出的内生

菌假单胞菌 *Pseudomonas* sp. T4 为研究对象,通过盆栽试验测定菌株 T4 对上海青生物量累积及叶绿素、蛋白质等含量的影响,并基于代谢组学和离子组学技术测定菌株 T4 对上海青小分子营养成分及矿物质含量的影响,以期对菌剂的开发与利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 菌液制备及盆栽处理

试验于 2024 年 8—12 月在江苏省农业科学院开展。

配制 Luria-Bertani 培养基(MDBio),于 121 °C 高压灭菌锅中灭菌 20 min。从 4 °C 冰箱中取出菌株 T4,在超净工作台上按 1% 的接种量接种于灭菌冷却后的 Luria-Bertani 液体培养基中,后置于台式摇床 200 r·min⁻¹、30 °C 条件下隔夜培养 16 h 形成菌悬液。在 5000 r·min⁻¹ 条件下离心 5 min,用 PBS 缓冲液清洗菌体,利用灭菌水调节菌悬液 OD₆₀₀=0.3,备用。

上海青种子购于青县兴运种业有限公司,挑选均匀一致且颗粒饱满的种子,表面消毒后,栽种于高温灭菌的蛭石中,用 Hoagland 营养液进行培养,生长室环境参数设置为光照度 190 μmol·m⁻²·s⁻¹、相对湿度 68%、恒温 28 °C、光照周期设置为 14 h 光照/10 h 黑暗。2 周后选取长势一致的上海青幼苗,将制备好的菌悬液以灌根的方式向每株上海青根部加入 1 mL,对照组不接菌,每组 30 株,3 次重复,继续培养 2 周后,收集上海青茎叶及根组织,用于测定营养品质指标、代谢组学分析及矿质元素含量测定,代谢组学和矿质元素样品储存在-80 °C 的冰箱中。

1.2 生理指标测定

使用叶绿素仪(TYS-4N)测定叶绿素相对含量。采用试剂盒测定蛋白质含量及可溶性糖含量。可溶性糖含量测定试剂盒(货号:ADS-W-TDX039)购于江苏晶美生物科技有限公司,蛋白质含量测定试剂盒(货号:A045-2)购于南京建城生物工程研究所。首先将新鲜上海青茎叶样品(0.5 g)用研磨机磨碎后与 PBS(1x)以 1:9(w/v)的比例混合。对样品在低温条件下提取,并以 3500 r·min⁻¹ 离心 10 min。根据试剂盒使用说明,取

上清液用于检测蛋白质及可溶性糖含量。

1.3 代谢组学测定

样品冷冻干燥后研磨成均匀粉末状,称取 0.1 g 样品于 10 mL 离心管中,加入 80% 甲醇 3 mL,放入高通量样品振荡仪振荡 10 min, 10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,吸取上清液过 0.22 μm 有机滤膜,装入进样瓶,每个样品 5 个平行。质控样本(QC)由每个样品提取液等量混合制备而成,待上机检测。

基于 LC-QTOF/MS (Shimadzu HPLC LC-20A, 日本岛津公司; Sciex Triple TOF 5600+, 美国 AB Sciex 公司)对样品代谢物进行检测,色谱柱为 Waters HSS T3 色谱柱(2.1 mm × 100 mm, 3.5 μm)。正离子模式下流动相 A 为含 0.1% HPLC 级甲酸(美国 Fisher 公司)的水溶液,负离子模式下流动相 A 为 5 mol·L⁻¹ 乙酸铵(上海安普),流动相 B 为 HPLC 级乙腈(德国 Meker 公司)。流动相梯度洗脱程序为: 0~3.0 min, 10% B; 3.0~21.0 min, 10% B 线性增加至 95% B; 28.0~34.0 min, 10% B。质谱质量扫描范围为 50~1000 m/z, 正、负电离模式的离子喷雾电压分别为 5500 V 和 -4500 V, 气帘气、雾化气(gas1)和加热气(gas2)的流动压力分别为 25、50 和 50 psi。碰撞能量(CE)分别为 30 V 和 -30 V。利用 MS-DIAL 软件对质谱数据进行分析,基于公开数据库及自建数据库,依据一级、二级质谱及保留时间等信息进行鉴定。采用主成分分析(PCA)研究 T4 菌株对上海青叶片指纹代谢图谱的影响,利用偏最小二乘法判别分析(PLS-DA, VIP>1)和 *t*-test 检验(*P*<0.05)进行差异代谢物筛选。

1.4 矿质元素含量测定

参照 GB 5009.268—2016 测定矿质元素含量,略有修改^[1]。100 μg·mL⁻¹ 元素标准溶液购买于国家标准物质研究中心。称取 0.1 g(精准至 0.01 g)样品于微波消解管中,加入 5 mL HPLC 级硝酸(国药集团化学试剂有限公司),置于预热消解仪中,100 °C 消解;冷却至常温后,加入 3 mL 30% H₂O₂(国药集团化学试剂有限公司),置于微波消解仪中消解;消解完成后于 150 °C 消解仪中赶酸 2 h,最后用去离子水定容至 25 mL,待上机测定。采用 ICP-AES (Plasma Quant 9100, 德国 Analytikjena 公司)测定样品中大量元素钾(K)、镁(Mg)、钙(Ca)、钠(Na)含量,采用 ICP-MS (NexION350L, 美国 PerkinElmer)测定样品中微量元素铝(Al)、铁(Fe)硼(B)、锌(Zn)、铜(Cu)、锰(Mn)、钡(Ba)、镓(Ga)含量。

2 结果与分析

2.1 上海青植株生长及生理指标的变化

由图 1 可知,接种菌株 T4 的上海青长势强于对照,茎叶和根生物量分别为 4.18 g 和 0.46 g,较对照分别显著提高 17.42% 和 58.62%,由此可以说明,菌株 T4 可以促进上海青生长。采收前,测定叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)为 51.68,显著高于对照 19.49%,表明菌株 T4 可有效提升上海青叶片的光合性能。接种菌株 T4 的上海青蛋白质、可溶性糖含量分别是 12.84 和 3.45 mg·g⁻¹,较对照分别显著提高 10.88% 和 69.12%。以上结果表明,菌株 T4 不仅可以提高上海青生物量,还可以改善其品质。

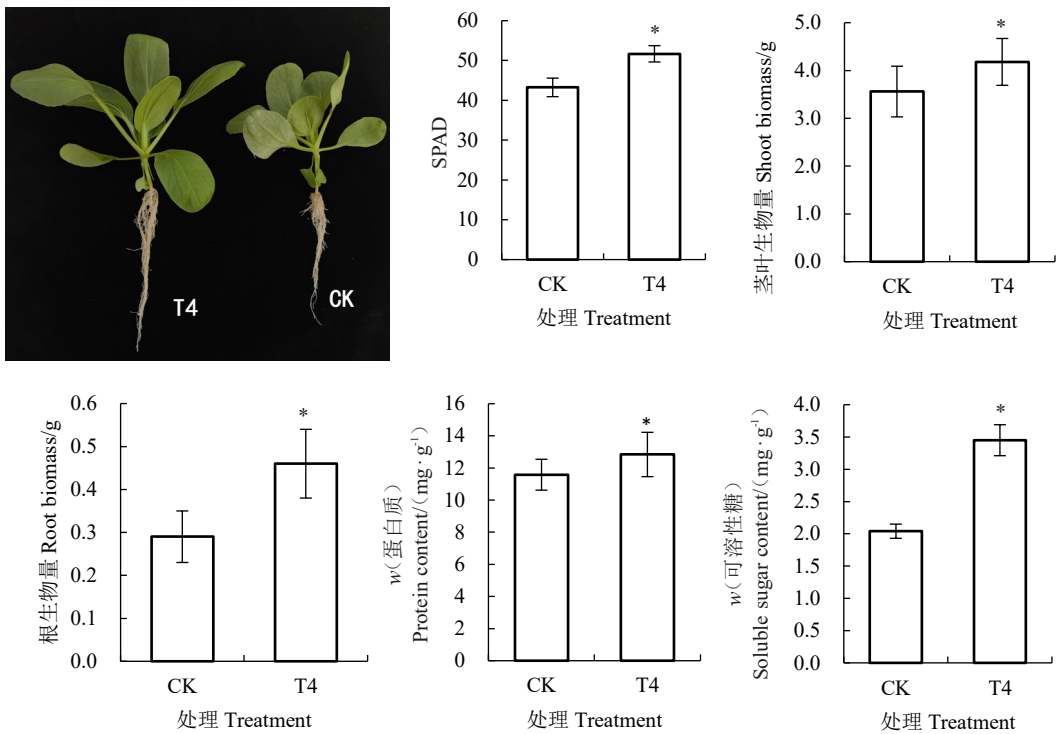
2.2 代谢组学分析

基于主成分分析发现,接种 T4 菌株可以明显改变上海青叶片指纹代谢图谱(图 2-A)。基于 *t*-test 检验(*P*<0.05)和 PLS-DA (VIP>1)共筛选出 87 种差异代谢物,主要包括氨基酸、有机酸、糖类、脂肪酸、核苷类、维生素、类黄酮、酚酸、激素、硫代糖苷、生物碱等,其中氨基酸类和黄酮类物质种类最丰富(图 2-B)。这些差异物质中,37 种代谢物含量显著升高,50 种代谢物含量显著降低(图 3)。含量显著升高的代谢物主要包括 11 种类黄酮、4 种维生素、9 种脂肪酸、7 种核苷,其中十五烷酸、棕榈油酸、壬二酸、烟酰胺、泛醇、吡啶-3-乙酰-L-苯丙氨酸含量增加最多,倍数变化超过 2 倍。含量显著下调的代谢物主要包括 12 种氨基酸类、6 种酚酸类、4 种糖类、4 种有机酸,其中含量降低较多的物质为鸟氨酸、矢车菊素-3-葡萄糖苷、柚皮素-7-O-葡萄糖苷、苏氨酸、赖氨酸、1H-吡啶-3-羧酸、吡啶-3-甲醛、4-甲氧基-1H-吡啶-3-甲醛。

利用 Metabo Analyst 软件进行代谢通路富集分析,发现接种菌株 T4 可显著影响上海青异喹啉生物碱生物合成(Impact=0.5)、苯丙氨酸代谢(Impact=0.43)、精氨酸和脯氨酸代谢(Impact=0.34)、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢(Impact=0.31)、精氨酸生物合成(Impact=0.25)、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢(Impact=0.20)、色氨酸代谢(Impact=0.18)、半乳糖代谢(Impact=0.17)等代谢途径(图 4)。

2.3 矿质元素含量分析

基于离子组学技术对上海青中 4 个大量元素及 8 个微量元素含量进行测定,结果(图 5)表明,大



注:*表示差异显著($P<0.05$)。下同。
 Note: * represents significant difference($P<0.05$). The same below.

图 1 菌株 T4 对上海青生长及生理指标的影响
 Fig. 1 Effects of strain T4 on the growth and physiology indexes of Shanghaiqing

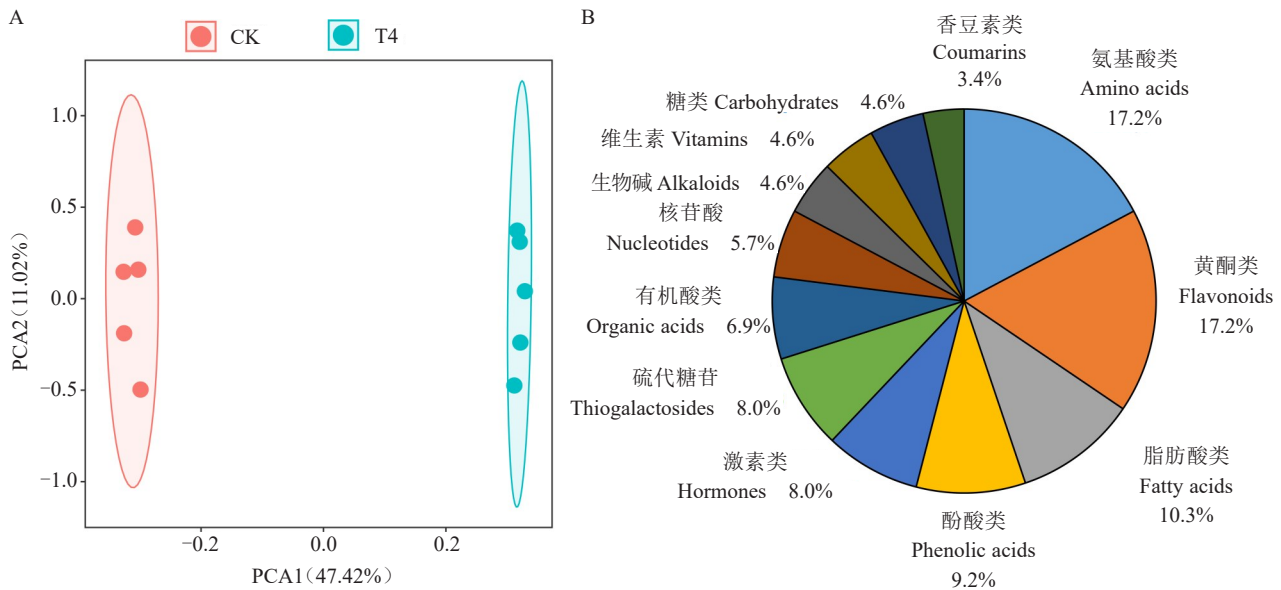


图 2 基于主成分分析的上海青指纹代谢图谱变化(A)和差异代谢物种类比例(B)
 Fig. 2 Metabolic fingerprint changes(A)and type proportion of differential metabolites(B)in Shanghaiqing based on principal component analysis

量元素中,菌株 T4 处理的茎叶中 K、Na、Mg 含量显著累积,分别是对照的 1.48、2.20 及 1.06 倍,而 Ca 元素含量显著降低,是对照的 0.91 倍;微量元素中, T4 处理的茎叶中 Ga、Cu、Ba、B 元素含量显著累

积,分别是对照的 1.19、1.17、1.16、1.11 倍,而 Fe、Al 元素含量显著降低,分别是对照的 0.61、0.70 倍。以上结果表明,接种菌株 T4 对上海青矿质元素的累积有较大影响。

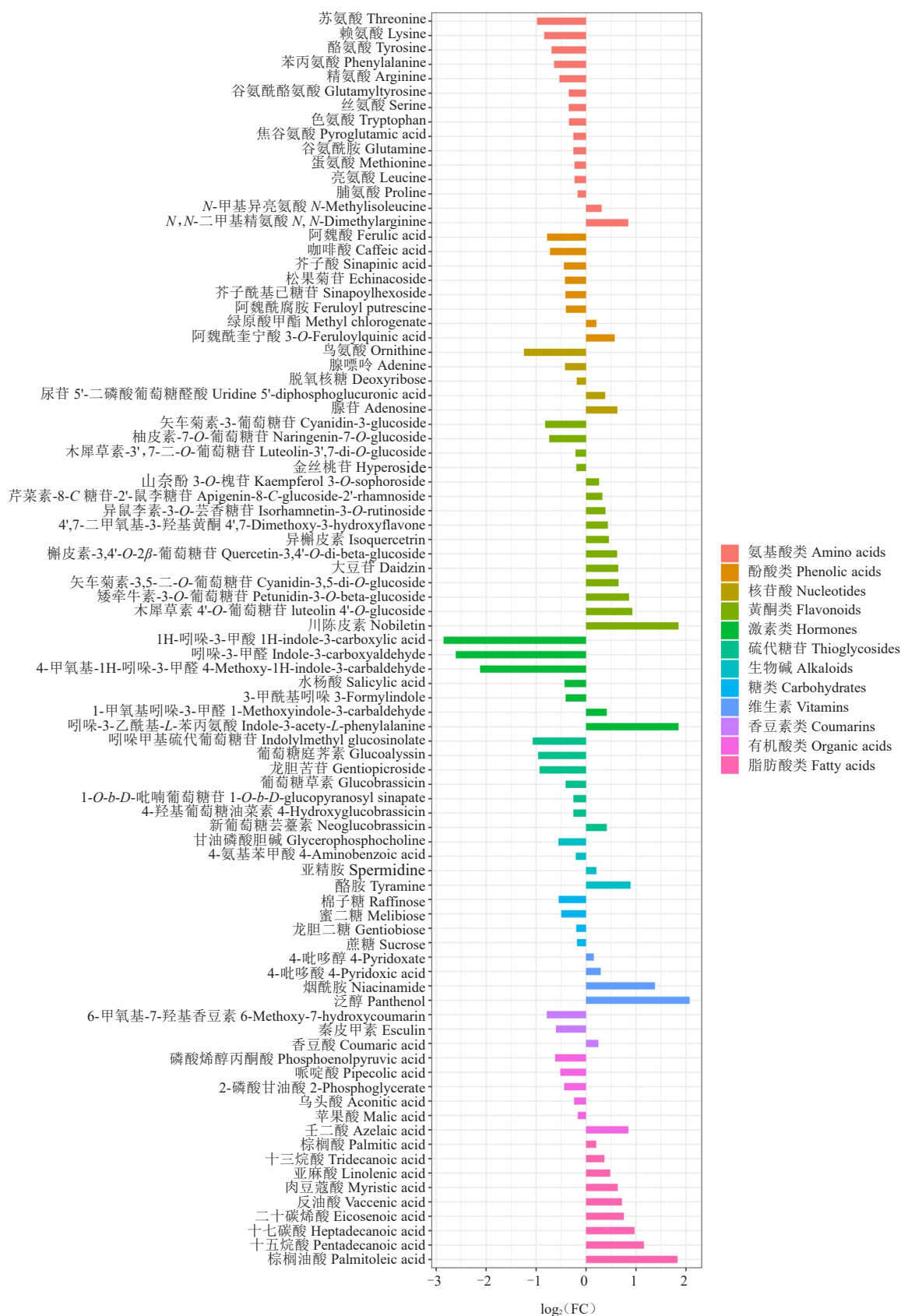


图3 不同处理的差异代谢物

Fig. 3 Metabolites of different treatments

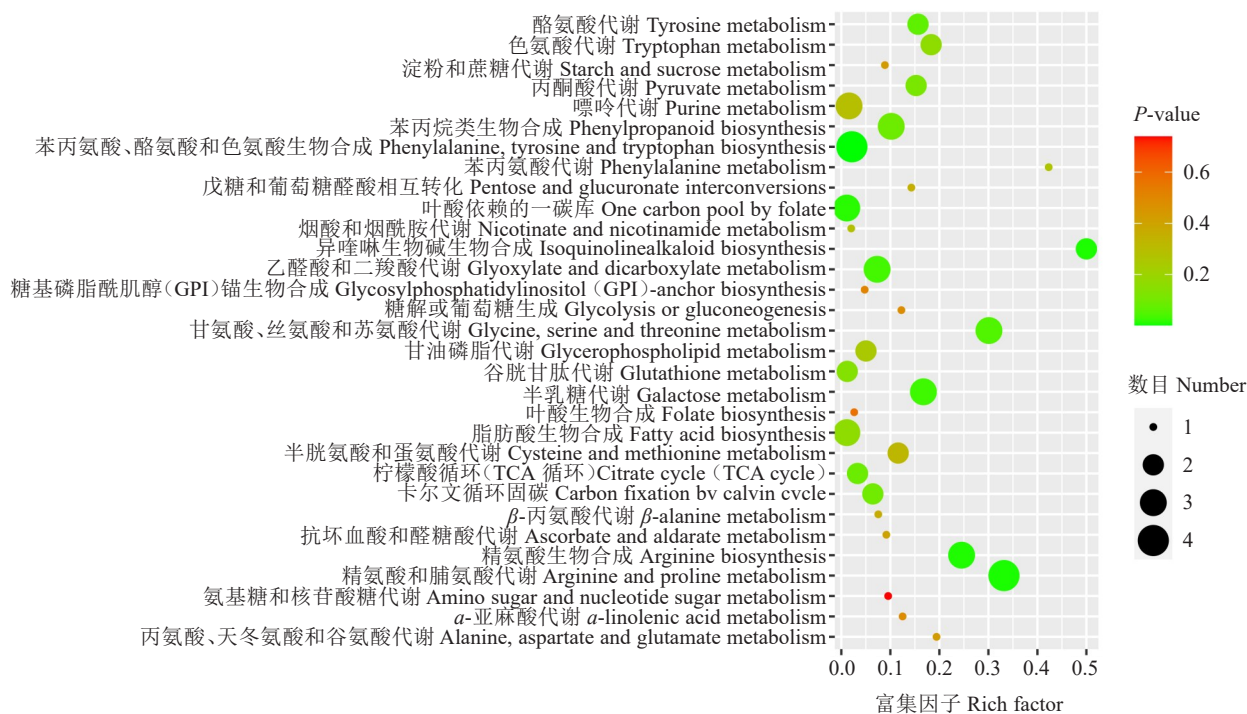


图 4 差异代谢物富集的代谢通路
Fig. 4 Metabolic pathways enriched for differential metabolites

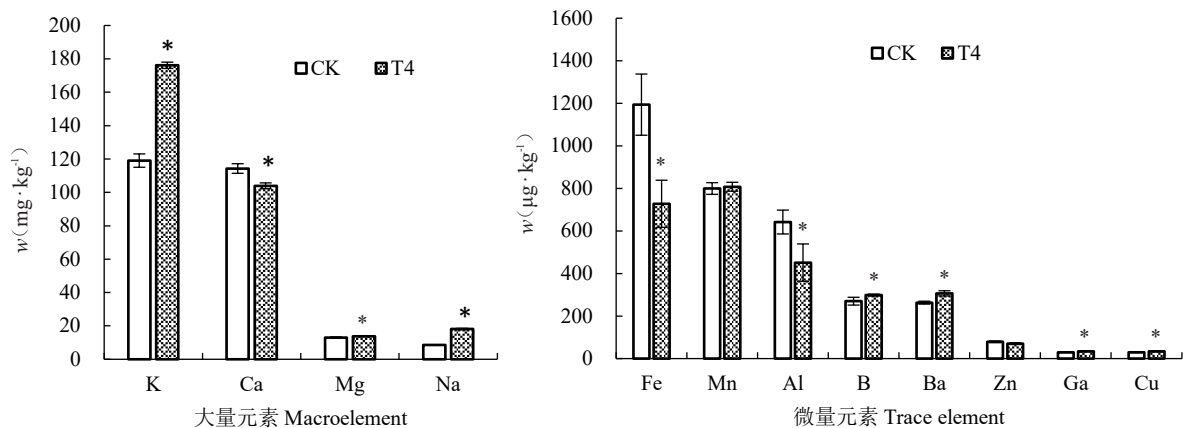


图 5 菌株 T4 对上海青矿质元素含量的影响
Fig. 5 Effects of strain T4 on the content of mineral elements in Shanghaiqing

3 讨论与结论

生物量与叶绿素含量是评价植物生长状况的核心指标^[12]。本研究发现,接种菌株 T4 显著提高了上海青的根茎生物量及叶片叶绿素相对含量,表明菌株 T4 可能通过改善宿主植物的光合机构功能,增强了光能捕获与转化效率,从而驱动了碳同化产物的积累^[13]。内生真菌 *Piriformospora indica* 通过提升叶绿素含量促进向日葵生长^[14],与笔者的研究

结果一致。此外,可溶性糖和蛋白质是衡量蔬菜品质的关键指标,也是植物体内碳氮代谢的直接产物^[15-16]。与对照相比,接种菌株 T4 显著提高上海青中蛋白质和可溶性糖含量。吕雅悠等^[17]用植物促生菌菌株 *Serratia plymuthica* A21-4 灌根处理辣椒,发现辣椒果实的蛋白质含量提高了 29.32%。Rho 等^[18]研究表明,内生菌 *Rhizobium* sp. PTD1、*Burkholderia* sp. WPB 可提高蜜脆苹果的可溶性糖含量。上述研究与本试验结果相符,共同证实了有益

微生物菌株在提升作物营养品质方面的巨大潜力。

维生素是植物生长发育及人类健康必需的微量营养素^[19]。代谢组学分析显示,T4 处理显著促进了上海青茎叶中泛醇(维生素 B5)、烟酰胺(维生素 B3)、4-吡哆酸及 4-吡哆醇(维生素 B6)的累积。在植物生理层面,这些维生素作为呼吸链的关键组分,不仅参与光磷酸化与氧化磷酸化过程,还通过调控次级代谢产物合成、介导逆境响应信号转导等途径,对植物生长发育发挥关键调节作用^[20-21]。特别是维生素 B6 家族化合物(如 4-吡哆酸和 4-吡哆醇),已被证实具有清除活性氧自由基的能力,能显著提升植物对低温、干旱及氧化损伤等非生物胁迫的耐受性^[22]。在人类营养层面,烟酰胺和泛醇在皮肤抗衰老及神经保护方面展现出积极效果^[23]。

脂肪酸是细胞膜结构完整性及植物抗逆屏障的关键成分^[24]。本研究发现,T4 处理诱导了上海青茎叶中 10 种脂肪酸的显著累积,涵盖不饱和脂肪酸(如棕榈油酸、油酸、亚麻酸)及特定的饱和脂肪酸(如十五烷酸、十七烷酸)。值得注意的是,尽管棕榈酸等长链饱和脂肪酸含量有所升高,但奇数碳链饱和脂肪酸(十五烷酸、十七烷酸)的富集更具营养学意义。长期以来,饱和脂肪酸常被视为健康风险因素,但近期研究表明,奇数碳链饱和脂肪酸与较低的 II 型糖尿病风险呈负相关^[25],而棕榈油酸等单不饱和脂肪酸则有助于改善胰岛素敏感性及血脂代谢^[26]。本研究结果表明,菌株 T4 优化了上海青茎叶组织中脂肪酸的结构组成,对其营养品质的提升具有重要意义。

多酚类物质是植物次生代谢的重要组成部分^[8]。代谢通路富集分析发现,菌株 T4 影响植物苯丙烷代谢途径,该途径是合成植物酚酸及类黄酮的重要通路。相比于对照,接种菌株 T4 的上海青中矮牵牛素-3-*O*- β -葡萄糖苷、木犀草素-4'-*O*-葡萄糖苷和 4,7-二甲氧基-3-羟基黄酮等多个类黄酮成分含量显著升高,而降低了阿魏酸、咖啡酸、芥子酸等酚酸成分。这表明菌株 T4 介导植物酚酸类物质的代谢重构^[27]。此外,矮牵牛素-3-*O*- β -葡萄糖苷、木犀草素-4-*O*-葡萄糖苷和 4,7-二甲氧基-3-羟基黄酮具有抗氧化、抗炎等基础活性,其中木犀草素在代谢性疾病领域中应用广泛^[28-29]。

氨基酸是蛋白质合成的基本单位,在植物生长过程中发挥着至关重要的作用^[30]。本研究发现,相较于对照,接种菌株 T4 的上海青中苏氨酸、赖氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸等多种游离氨基酸含量显著

降低。代谢通路富集分析显示,菌株 T4 显著影响了苯丙氨酸、精氨酸、脯氨酸及色氨酸等代谢途径。其中,亮氨酸是促进蛋白质合成的关键支链氨基酸;苏氨酸和赖氨酸参与植物防御蛋白的生物合成;而苯丙氨酸和酪氨酸则是类黄酮合成的核心前体,同时也为生物合成提供碳骨架^[31]。这些氨基酸含量的下降,很可能归因于其被大量调动用于蛋白质和类黄酮的合成与积累^[32]。此外,精氨酸作为植物体内富氮氨基酸,其含量的减少可能反映了植物在快速生长过程中对氮素代谢需求的增加^[33]。

矿质元素的均衡吸收对维持人体生理功能及预防疾病至关重要^[34]。基于离子组学技术的研究发现,接种菌株 T4 的上海青茎叶中 K、Mg、Cu、B 等必需营养元素显著累积。K 是植物生长发育必需的大量元素之一,能增强光合作用、提升抗逆性并调节水分与离子平衡^[35]。Mg 直接参与叶绿素合成及糖类转运,而 Cu 作为多种氧化酶的关键组分,不仅参与氮代谢与碳水化合物转化,还能保护光合色素结构的完整性^[35]。K、Mg、Cu 等元素含量的升高对人体健康也具有重要意义。K 元素的摄入有助于维持血压正常、增强免疫力、促进骨骼健康,Mg 元素有助于人体骨骼健康、维持酸碱平衡^[36]。

综上所述,笔者发现接种菌株 T4 的上海青可通过提高叶片光合作用效率促进生物量累积,同时提高茎叶中蛋白质和可溶性糖含量等品质指标。菌株 T4 可以重构上海青代谢指纹图谱,并促进茎叶累积多种维生素、有益脂肪酸,以及矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、木犀草素-4-*O*-葡萄糖苷和槲皮素-3,4-二葡萄糖苷等类黄酮。此外,菌株 T4 还显著促进茎叶中 K、Mg、Cu、B 等矿质元素含量显著提高。本研究揭示了菌株 T4 施用对上海青品质的影响,为蔬菜品质提升及菌剂开发与利用提供了数据支撑。

参考文献

- [1] 谢晶,张利平,苏辉,等.上海青蔬菜的品质变化动力学模型及货架期预测[J].农业工程学报,2013,29(15):271-278.
- [2] 王庆彬,刘治国,彭春娥,等.宛氏拟青霉提取物诱导小白菜抗低温胁迫的作用机理[J].核农学报,2022,36(2):473-480.
- [3] 刘雪松,李韞同,朱俊臻,等.外源核黄素处理对上海青采后品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2023,44(17):127-135.
- [4] 陈剑,齐文,蒋海凌,等.茭白叶堆肥对青菜生长、品质及土壤状况的影响[J].中国瓜菜,2022,35(12):71-77.
- [5] Biswas P R, Roy N, Ghosh S, et al. A review of molecular signaling and communication between root tissues and their endophytes[J]. Rhizosphere, 2025, 36: 101188.
- [6] 曹豪杰,彭涛,赵文远,等.植物根际促生菌研究与应用进展[J].

- 现代园艺, 2026, 49(1): 35-41.
- [7] 刘诚, 张钰, 余梦林, 等. 多功能菌株假单胞菌的溶磷和解磷效果及其应用[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 457-461.
- [8] Ye B, Wu Y, Zhai X, et al. Beneficial effects of endophytic fungi from the *Anoectochilus* and *Ludisia* species on the growth and secondary metabolism of *Anoectochilus roxburghii*[J]. ACS Omega, 2020, 5(7): 3487-3497.
- [9] Zhou X G, Zhang J Y, Khashi U R M, et al. Interspecific plant interaction via root exudates structures the disease suppressiveness of rhizosphere microbiomes[J]. Molecular Plant, 2023, 16(5): 849-864.
- [10] Szymanska S, Darowska G B, Tyburski J, et al. Boosting the *Brassica napus* L. tolerance to salinity by the halotolerant strain *Pseudomonas stutzeri* ISE12[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 163: 55-68.
- [11] GB 5009.268—2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [12] Li Y, Long L, Ge J, et al. Effect of imidacloprid uptake from contaminated soils on vegetable growth[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(26): 7232-7242.
- [13] 冯丽媛, 胡清霞, 宋萍, 等. 内生真菌联合接种对雷公藤生长及养分含量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(6): 63-71.
- [14] Shahabivand S, Parvaneh A, Aliloo A A. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* affected growth, cadmium partitioning and chlorophyll fluorescence of sunflower under cadmium toxicity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 496-502.
- [15] Song C, Ye X Y, Liu G Y, et al. Comprehensive evaluation of nutritional qualities of chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*) varieties based on multivariate statistical analysis[J]. Horticulturae, 2023, 9(12): 121264.
- [16] Tian Y, Zhou Y, Kriisa M, et al. Effects of fermentation and enzymatic treatment on phenolic compounds and soluble proteins in oil press cakes of canola (*Brassica napus*) [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135339.
- [17] 吕雅悠, 于迪, 丁方丽, 等. 促植物生长根际细菌 A21-4 对田间辣椒生长及根际土壤微生态环境的影响[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(1): 86-92.
- [18] Rho H M, Epps V V, Kim S H, et al. Endophytes increased fruit quality with higher soluble sugar production in honeycrisp apple (*Malus pumila*) [J]. Microorganisms, 2020, 8(5): 699.
- [19] Fitzpatrick T B. B vitamins: An update on their importance for plant homeostasis[J]. Annual Review of Plant Biology, 2024, 75: 67-93.
- [20] Liu M, Lu S. Plastoquinone and ubiquinone in plants: Biosynthesis, physiological function and metabolic engineering[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1898.
- [21] Asensi-Fabado M A, Munné-Bosch S. Vitamins in plants: Occurrence, biosynthesis and antioxidant function[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(10): 582-592.
- [22] Mascolo E, Verni F. Vitamin B6 and diabetes: Relationship and molecular mechanisms[J]. International journal of molecular sciences, 2020, 21(10): 3669.
- [23] 贾凯, 刘乃霞, 于钰, 等. 含有 B 族维生素复方制剂在面部年轻化中的应用[J]. 生物化工, 2024, 10(5): 12-15.
- [24] Li-Beisson Y H, Neunzig J, Lee Y S, et al. Plant membrane-protein mediated intracellular traffic of fatty acids and acyl lipids[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, 40: 138-146.
- [25] 夏琛, 崔心禹, 项婷, 等. 棕榈油酸功能的研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 39-43.
- [26] 王秀丽, 陈敏静, 孙君茂. 油菜品质特征对其价格的影响机制研究: 基于对 2021—2023 年长江流域油菜品质监测数据的分析[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(3): 791-797.
- [27] Hayasaka N, Shimizu N, Komoda T, et al. Absorption and metabolism of luteolin in rats and humans in relation to *in vitro* anti-inflammatory effects[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(43): 11320-11329.
- [28] Tsai J Y, Hsu H C, Tai C J, et al. 7,4'-dimethoxy-3-hydroxyflavone, a protease-activated receptor 4 (PAR4) inhibitor with antioxidant activity, ameliorates diabetic endothelial dysfunction[J]. British Journal of Pharmacology, 2025, 182(19): 4592-4610.
- [29] 杨萍, 刘军刚, 李学娟, 等. 木犀草素治疗炎症性疾病作用机制研究进展[J]. 中草药, 2025, 56(22): 8424-8435.
- [30] Huang R, Wang Z H, Wen W W, et al. Comprehensive dissection of variation and accumulation of free amino acids in tea accessions[J]. Horticulture Research, 2024, 11(1): uhad263.
- [31] Floe' H N L, Wessels A, Corrent E, et al. The relevance of functional amino acids to support the health of growing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2018, 245: 104-116.
- [32] Tashkandi M A, Jalal R S, Baz L, et al. Functional interpretation of cross-talking pathways with emphasis on amino acid metabolism in rhizosphere microbiome of the wild plant *Moringa oleifera* [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1814.
- [33] Bowne J B, Erwin T A, Juttner J, et al. Drought responses of leaf tissues from wheat cultivars of differing drought tolerance at the metabolite level[J]. Molecular Plant, 2012, 5(2): 418-429.
- [34] Razaque M S, Wimalawansa S J. Minerals and human health: From deficiency to toxicity[J]. Nutrients, 2025, 17(3): 454.
- [35] 赵露, 苑雪琪, 刘晨阳, 等. 白屈菜对根际土壤矿质元素吸收规律的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 49-53.
- [36] 朱瑞欣, 范志红, 林金雪娇. 水果摄入与骨骼健康[J]. 中国食物与营养, 2018, 24(1): 50-54.