

· 主编导读 ·

本期主要围绕生物基化学品、微生物代谢、工业酶、基因操作工具、生物活性材料、生物反应器和生物-无机材料等方面的文章内容进行导读。

生物基化学品

长链二元酸是含有 10 个或以上碳原子的直链芳香族饱和二元羧酸，是重要的精细化工中间体。凯赛生物等企业已经实现了生物法长链二元酸的工业化生产并具有较强的市场竞争力，国内长链二元酸的总产能已经达到 10 万 t 以上。张全等^[1]总结了催化油脂法、化学合成法和生物发酵法制备长链二元酸的工艺路径，着重介绍了生物发酵法生产长链二元酸的技术进展，包括长链二元酸的生物合成途径、可合成长链二元酸的微生物菌株、高产长链二元酸的菌株创制，最后概述了工业生产规模上长链二元酸的生产成本、产酸水平和分离提取工艺，其中分离提取效率对制备聚合级的长链二元酸至关重要。长链二元酸未来发展的方向是用可再生原料替代烷烃，真正实现该产品的“碳中和”生物制造。

1,5-戊二胺可以与二元羧酸缩合生成生物基聚酰胺 PA5X，也可以转化为生物基聚氨酯前体五亚甲基二异氰酸酯 PDI，是一种重要的材料化学品。赖氨酸脱羧酶催化赖氨酸转化为 1,5-戊二胺的摩尔转化率比较高，但该酶在实际反应过程中存在易受环境因素影响、活性不高、结构不稳定等问题。刘思敏等^[2]总结了赖氨酸脱羧酶的作用机理、分子改造技术及固定化策

略的研究进展，并从高性能赖氨酸脱羧酶的挖掘、高效赖氨酸脱羧酶理性设计、自组装蛋白纳米结构等方面展望了未来的研发方向。由于目前葡萄糖发酵法生产赖氨酸已经达到很高的水平，构建葡萄糖发酵法直接生产 1,5-戊二胺的菌种，实现发酵法生产 1,5-戊二胺也是一个重要的发展方向。

L-高丝氨酸及其衍生物 (O-乙酰-L-高丝氨酸和 O-琥珀酰-L-高丝氨酸) 不仅是合成多种 C4 化合物的前体，还可以合成 L-甲硫氨酸等含硫氨基酸与 L-草铵膦等含磷氨基酸，因而其生物合成近年来受到广泛关注。L-高丝氨酸是 L-苏氨酸的前体，理论上以 L-苏氨酸高产菌株为基础进行改造，即可获得 L-高丝氨酸高产菌株。牛坤等^[3]从底物摄取、关键节点碳流分配改造、辅酶 NADPH 的循环供应以及目标产物的外运出等方面，对大肠杆菌发酵法生产 L-高丝氨酸及其衍生物的代谢途径及改造策略进行了系统的梳理和总结。目前，L-高丝氨酸产量最高超过 80 g/L，O-乙酰-L-高丝氨酸产量最高超过 60 g/L，O-琥珀酰-L-高丝氨酸产量最高超过 100 g/L，均达到了可工业化生产的水平。

L-半胱氨酸和 L-甲硫氨酸等含硫氨基酸的高效生物合成，是生物制造领域的一个挑战。L-半胱氨酸的合成主要分为碳代谢和硫同化两个部分。在碳代谢途径中，葡萄糖首先生成

L-丝氨酸，之后生成 L-半胱氨酸的重要前体物质 O-乙酰丝氨酸。O-乙酰丝氨酸可通过硫酸盐同化途径和硫代硫酸盐同化途径生成 L-半胱氨酸，后者能耗更低。显而易见，碳代谢和硫同化这两个模块的适配程度对 L-半胱氨酸的生物合成效率具有重要影响。张博等^[4]提出了碳模块和硫模块协同输出控制的策略，结合系统代谢工程改造，将重组大肠杆菌生产 L-半胱氨酸的产量提高至 12 g/L，具有较好的工业应用潜力。

L-(+)-酒石酸是一种重要的羟基羧酸类螯合剂，在食品、医药、化工及纺织等领域具有广泛的应用，目前工业上采用顺式环氧琥珀酸水解酶水解环氧琥珀酸二钠盐的方式制备获得。由于环氧琥珀酸来自化石资源，研究者希望采用葡萄糖为原料来生产 L-(+)-酒石酸。从葡萄糖发酵生产 L-(+)-酒石酸，主要研究集中在提高其前体物质 5-酮基-D-葡萄糖酸的产量，但对 5-酮基-D-葡萄糖酸转化为 L-(+)-酒石酸的研究比较少，推测这一过程是由转酮醇酶和酒石酸半醛脱氢酶完成的。王剑峰等^[5]对一个来自大肠杆菌的转酮醇酶进行定点饱和突变和组合突变，提升其对非磷酸化底物的反应活性；最后获得了一个比野生型比酶活提高近 10 倍的突变体，可以催化 5-酮基-D-葡萄糖酸与非磷酸化乙醇醛合成酒石酸半醛，摩尔转化率达到 55%，为进一步探索葡萄糖发酵生产 L-(+)-酒石酸提供了新酶资源。

对香豆酸 (*p*-coumaric acid) 又名羟基肉桂酸，可以在苯丙氨酸解氨酶和肉桂酸羟化酶的催化下由苯丙氨酸生成，也可以在酪氨酸解氨酶的催化下直接由酪氨酸生成，后者路线短，但由于酪氨酸解氨酶的活性较低且不耐受高底

物浓度，因此效率不高。黄雅文等^[6]报道了两个黄杆菌来源的酪氨酸解氨酶，它们的最适温度和最适 pH 相同，但顺天黄杆菌 (*Flavobacterium suncheonense*) 来源的 Fs-TAL 活性是柱状黄杆菌 (*Flavobacterium columnare*) 来源的 Fc-TAL2 活性的 5 倍。作者进一步发现 Fs-TAL 可以在全细胞催化条件下将酪氨酸转化为对香豆酸，产率为 68%，为对香豆酸以及下游产物的生物合成提供了新酶资源。

微生物代谢

聚酮合成途径和非核糖体合成途径是微生物合成次级代谢产物的主要途径，因此可以基于聚酮合成途径和非核糖体合成途径来发掘新的微生物天然活性产物。张丽影等^[7]采用 I 型聚酮合成酶和非核糖体多肽合成酶基因的引物，对所保存的 77 株海洋微生物进行筛选，获得了一株对多种病原微生物具有良好拮抗效果的贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*)，并证明其代谢产物中含有聚酮类化合物 macrolactin A。作者发现该菌的代谢产物对黄瓜枯萎病具有保护作用，是新型生防菌剂的潜在候选者。

纳他霉素是一种多烯大环内酯类抗真菌剂，广泛应用于食品防腐与医药领域。催化合成纳他霉素的是 I 型聚酮合酶，包含有 12 个功能模块，以乙酰辅酶 A、丙二酰辅酶 A 和甲基丙二酰辅酶 A 为底物催化合成大环内酯骨架结构，再经后修饰生成纳他霉素。孔德真等^[8]以纳他霉素产生菌——褐黄孢链霉菌为对象，研究了乙酰辅酶 A、丙二酰辅酶 A 和甲基丙二酰辅酶 A 这 3 种纳他霉素生物合成的直接前体的供给对纳他霉素产量的影响，发现强化乙酸回流生

成乙酰辅酶 A 和甲基丙二酰辅酶 A 合成途径, 可以显著提高纳他霉素的发酵产量, 两条途径协同强化还可以进一步提高纳他霉素的发酵产量, 可为构建纳他霉素工业高产菌株提供参考。

杀虫剂、杀菌剂和除草剂在农业生产中发挥着重要作用, 但多数杀虫剂、杀菌剂和除草剂由于其高毒性、高残留, 也对生态环境造成了严重影响。由烟碱改造修饰制备的新烟碱类化合物, 具有广谱性、环境友好性、多功能性、低毒等优势, 因此被广泛用于种子处理、土壤处理及叶面喷洒等方面。陈星茹等^[9]围绕新烟碱类杀虫剂的微生物菌株资源, 总结了微生物降解新烟碱类杀虫剂的代谢机制及其多样性, 可为建立或筛选安全可控的新烟碱类杀虫剂的高效转化体系提供参考。

茶叶经微生物发酵后可以增加很多微生物代谢产物, 这些代谢产物可以赋予茶新的风味。细菌、酵母菌、霉菌和药食用真菌等都可用于茶叶发酵, 改善茶叶的品质。在细菌发酵茶中, 乳酸杆菌使用较多。茶叶中的单宁酸对细菌有较强的抑制作用, 但很多在细胞壁中含有二氨基庚二酸肽聚糖的乳酸杆菌可以耐受单宁酸。李瑞丽等^[10]以红茶加工过程中产生的碎茶为原料, 利用一株棒状乳杆菌对红茶汤进行发酵, 分析了不同发酵阶段红茶汤中的挥发性香气成分、还原糖、游离氨基酸、有机酸等含量的变化, 发现香气成分丰度显著增加, 且主要香气组分结构发生改变, 对乳酸菌发酵茶饮料的品质控制具有一定的参考意义。

工业酶

β -葡萄糖苷酶是纤维素降解酶系的重要组

成部分, 广泛用于葡萄酒酿造、食品加工、生物质燃料生产和农业生产等领域, 耐高温 β -葡萄糖苷酶用途尤为广泛。 β -葡萄糖苷酶在真核生物、细菌、古菌中广泛存在, 其中古菌来源的 β -葡萄糖苷酶的最适反应温度更高, 稳定性也更强, 但来源于 GH3 家族的 β -葡萄糖苷酶报道较少。刘鑫涵等^[11]报道了一个源自嗜热古菌 (*Infirmifilum uzonense*) 的 GH3 家族的 β -葡萄糖苷酶基因。表征结果显示, 该酶在 80 °C 处理 2 h 后仍能保持 85% 以上的酶活力, 且对硝基苯- β -D-吡喃葡萄糖苷 (pNPG) 和对硝基苯- β -D-吡喃木糖苷 (pNPX) 均有很高的水解能力, 是一个稳定性优良的高温酸性双功能酶, 具有良好的工业应用前景。

普鲁兰酶能够高效水解淀粉分子中的 α -1,6-葡萄糖苷键, 这一键型虽然只占淀粉中糖苷键的 6% 左右, 却使淀粉分子形成非常复杂的分支链状结构, 导致淀粉水解率降低。因此, 普鲁兰酶可以提高淀粉的利用率。黄婷婷等^[12]系统地介绍了普鲁兰酶的基因来源、异源表达、表达系统优化以及酶分子改造等方面的研究进展, 并指出未来需要着重解决普鲁兰酶性能不佳、产酶水平低、成本高等不足, 为普鲁兰酶的推广应用奠定基础。

海藻糖酶可以将由两个葡萄糖分子以 α, α -1-1 糖苷键构成的海藻糖水解释为葡萄糖, 在工业发酵中可以降低残糖, 提高目标产品得率。工业发酵大多数在偏酸性条件下进行, 因此筛选在酸性条件下具有较高活性的海藻糖酶具有重要意义。高涵等^[13]从杓兰果胶杆菌 (*Pectobacterium cypripedii*) 中克隆了其海藻糖酶基因 *PCTre*, 并在大肠杆菌中进行了表达、纯化和表征。结

果显示该酶能够较好地耐受 pH 4.0 的弱酸环境以及 20% (V/V) 的乙醇浓度, 具有一定的工业应用潜力。

很多体外酶催化反应需要 ATP 来提供能量, 直接添加 ATP 的方式不经济, 需要构建 ATP 的再生系统。目前已报道的 ATP 再生系统主要基于乙酸激酶、丙酮酸激酶和聚磷酸激酶, 其中聚磷酸激酶能以无机聚磷酸盐为磷酸供体, 将 ADP 转化为 ATP。由于无机聚磷酸盐容易制备、价格低廉, 因此依赖于聚磷酸激酶的 ATP 再生系统具有广泛用途。目前聚磷酸激酶的主要底物是价格较高的长链无机聚磷酸盐, 如果能够获得对价格低廉的短链无机聚磷酸盐具有催化活性的聚磷酸激酶, 就可以拓展其在 ATP 再生系统方面的用途。黄欣等^[14]报道了一个来源于泗阳鞘氨醇杆菌的聚磷酸激酶 (PPK2), 在大肠杆菌中重组表达、纯化和表征后, 该酶可以用于丙谷二肽生物合成过程中的 ATP 再生, 达到与直接添加 ATP 类似的效果, 可用于依赖于 ATP 的生物催化反应体系的 ATP 再生。

血液和尿液中的肌酐水平是指示肾脏问题、甲状腺功能障碍和肌肉疾病的重要临床指标, 对肌酐水平进行快速准确的测定具有重要临床意义。目前临床上采用肌酐酶、肌酸酶、肌氨酸氧化酶和过氧化物酶的级联酶促反应来测定肌酐浓度, 其中肌酸酶由于活性较低, 是整个反应体系的限速酶。卞佳豪等^[15]采用半理性设计策略对产碱杆菌属 (*Alcaligenes* sp.) 来源的肌酸酶活性进行改造。首先模拟其三维结构, 然后通过计算分析和蛋白质三维结构分析, 挑选出多个突变热点, 进而对突变热点进行饱和突变筛选及有序重组, 最后获得的五点突变酶的

比活力相较于野生型提升了 2 倍以上, 证明了这种半理性设计策略在改造酶方面的有效性。

基因操作工具

基于 CRISPR 的基因编辑系统已经在生物体内得到广泛的应用, 但是仍有某些宿主细胞由于同源重组或非同源末端连接能力较低而无法修复断裂的 DNA, 使得 CRISPR-Cas9 和 CRISPR-Cas12a 系统在这些细胞中较难发挥作用。近年来, 研究者在微生物体内相继鉴定出多种 CRISPR 系统相关的转座元件, 这类元件依靠转座酶可将 DNA 有效和有针对性地整合到基因组中, 无需借助同源重组或非同源末端连接。这些元件的发现促进了转座酶和 dCas9 人工融合策略的发展, 为基因编辑工具的开发带来了新的思路。宁书晴等^[16]介绍了近年发现的 CRISPR 系统相关的转座元件, 总结了这类转座元件与 CRISPR-Cas 系统在结构和功能上的相似特征, 以及用转座酶-dCas9 系统进行大片段基因操作的相关进展, 有望实现复杂的基因编辑。

黑曲霉是一种被广泛地应用于生产酶制剂和有机酸的重要工业菌种, 对黑曲霉基因组进行高效编辑的技术, 对提高黑曲霉的改造效率十分重要。申玉玉等^[17]基于黑曲霉中具有复制起始功能的 AMA1 (autonomously maintained in *Aspergillus*) 片段, 发展了一种基于 CRISPR/Cas9 技术的高效无选择标记的基因编辑方法, 利用 5S rRNA 启动子启动 sgRNA 的高效表达, 构建了一个基于 AMA1 复制起始片段的 sgRNA 和 Cas9 共表达质粒, 采用同源臂长度仅为 20 bp 的无选择标记供体 DNA 进行基因编辑时, 基因

编辑效率达到 100%，为黑曲霉基因改造提供了高效的工具。

生物活性材料

肽链长度不超过 7 个氨基酸的肽一般称为超短肽，这类肽往往具有更好的组织渗透性、生物相容性以及更低的免疫原性，在化妆品领域具有重要用途。由于超短肽的分子量比较小，一般无法直接进行重组表达。赵晨等^[18]具有刺激胶原蛋白产生特性的三肽 GHK 和具有抗炎以减缓胶原蛋白降解特性的四肽 GQPR 为对象，利用滚环扩增来生成不同长度的串联重复基因片段，经肠激酶和胰蛋白酶酶切后，获得超短肽 GHK 和 GQPR 混合物，可作为活性成分直接添加于化妆品中，也可进一步分离纯化，为超短肽的制备提供了一种新方法。

粘合材料尤其是水下粘合材料，作为一种先进的功能材料，在伤口愈合等生物医药领域和下水管道涂层、船舶修复等海洋工业领域均有极其重要的应用。海洋生态系统中有 5 000 多种生物可以分泌具有较强水下粘附能力的粘胶蛋白，如藤壶、贻贝、海星、盘管虫、沙堡蠕虫和牡蛎等，为开发仿生粘合材料提供了灵感与思路。与常规粘附剂相比，海洋生物粘附剂无毒、可生物降解、附着力强，其最重要的特点是能在不同湿度下保持稳定的粘结能力。藤壶分泌的藤壶胶可以在水下牢固地附着在不同表面特性的基底材料上，其粘附过程研究较多，但水下粘附机制尚未完全阐明。王绪霞等^[19]综述了藤壶胶的水下粘附机理、粘胶蛋白的特点、获取方式及应用，对水下粘附剂的开发具有一定的参考价值。

生物反应器

用于好氧发酵的大规模发酵罐的放大方法始终是发酵工程领域的一个挑战。红霉素是典型的高耗氧型次级代谢发酵产物，谭鑫等^[20]采用时间常数法和 CFD 数值模拟验证相结合的方法，设计了 500 m³ 超大规模红霉素通风发酵罐。作者首先在 50 L 发酵罐中测定、计算得出了发酵罐的氧供应时间常数，然后基于时间常数法和经验关联式理性设计大规模发酵罐的搅拌桨叶组合方式，并通过经验方式和 CFD 两种方法验证发现，500 m³ 大规模发酵罐的氧供应时间常数和 50 L 发酵罐基本一致，实际发酵验证结果也表明 500 m³ 发酵罐的这种设计能够满足红霉素发酵的需要，为大规模发酵罐的设计提供了一种可用的方法。

生物-无机材料

近年来多个研究采用纳米材料和异养微生物结合的方式来进行人工光合作用，例如将硫化镉 (CdS) 纳米粒子改造非光合细菌热醋穆尔氏菌 (*Moorella thermoacetica*)，光激发 CdS 后产生光生电子-空穴对，使 CdS-*M. thermoacetica* 系统可以利用光将二氧化碳还原为乙酸^[21]。但是 CdS 等纳米粒子对异养微生物生长代谢的影响研究较少。王杰等^[22]研究了 CdS 纳米粒子对大肠杆菌生长的影响，并测定了一些代谢物浓度的变化。结果发现，光照条件下硫化镉可以促进大肠杆菌的生长，分裂蛋白基因表达上调，且三羧酸循环关键酶基因表达上调，提示半导体光生电子可以促进大肠杆菌的生长和代谢。进一步的研究，希望能够阐明大肠杆菌到底是

如何利用光生电子的。

近年来,将生物酶以有机-无机杂化纳米花形式制备成固定化酶受到了广泛关注。纳米花的形成主要是利用生物酶、金属阳离子与磷酸根阴离子,通过自组装形成具有类似天然花卉形态结构的复合体,在生物催化、传感器制备、生物医药等领域具有较大的应用潜力。过氧化氢酶的主要作用是催化过氧化氢分解为水和氧气,在食品、医疗、纺织等领域的应用过程中,由于过氧化氢酶无法回收再利用,导致成本较高。庞焦等^[23]尝试以酶-无机杂化纳米花形式制备成固定化过氧化氢酶并进行酶学性质研究,发现以 Ca^{2+} 作为自组装诱导剂,可将源自枯草芽孢杆菌 168 的过氧化氢酶以酶-无机杂化纳米花形式制备成固定化酶,具有较好的稳定性和重复利用性,为固定化过氧化氢酶的绿色高效制备和在工业上的大规模应用提供了一种新的技术可能。

硒 (Se) 作为一种微量元素对生物体非常重要,关于富硒植物和富硒酵母的研究较多,其中酵母对硒的富集能力较强,但存在含硒化合物组成不确定、硒生物利用率较低的问题。韩丽婕等^[24]采用提高培养基中亚硒酸钠 (Na_2SeO_3) 浓度的方法来驯化蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 的耐受能力,有效提高了胞内有机硒合成速率。采用异养培养方式,蛋白核小球藻细胞干重超过 100 g/L,有机硒含量达到 1.2 mg/kg,这两个指标较文献相比均有大幅度提高,为小球藻富硒产品的开发奠定了基础。

REFERENCES

- [1] 张全, 文志琼, 张霖, 等. 长链二元酸发酵菌种创制和工艺研究进展. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4420-4431.
- Zhang Q, Wen ZQ, Zhang L, et al. Strain engineering and fermentation technology for production of long-chain dicarboxylic acid: a review. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4420-4431 (in Chinese).
- [2] 刘思敏, 齐海山. 赖氨酸脱羧酶分子改造及固定化合成 1,5-戊二胺研究进展. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4403-4419.
- Liu SM, Qi HS. Molecular engineering and immobilization of lysine decarboxylase for synthesis of 1,5-diaminopentane: a review. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4403-4419 (in Chinese).
- [3] 牛坤, 高利平, 葛丽蓉, 等. 大肠杆菌代谢工程改造合成 L-高丝氨酸及其衍生物研究进展. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4385-4402.
- Niu K, Gao LP, Ge LR, et al. Advances in the biosynthesis of L-homoserine and its derivatives by metabolic engineering of *Escherichia coli*. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4385-4402 (in Chinese).
- [4] 张博, 陈开, 杨辉, 等. 基于碳硫模块平衡策略的大肠杆菌高产 L-半胱氨酸菌株构建. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4567-4586.
- Zhang B, Chen K, Yang H, et al. Construction of an L-cysteine hyper-producing strain of *Escherichia coli* based on a balanced carbon and sulfur module strategy. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4567-4586 (in Chinese).
- [5] 王剑峰, 李文英, 辛振麒, 等. 大肠杆菌转酮醇酶分子改造及催化酒石酸半醛合成. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4615-4629.
- Wang JF, Li WY, Xin ZQ, et al. Molecular engineering of transketolase from *E. coli* and tartaric semialdehyde biosynthesis. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4615-4629 (in Chinese).
- [6] 黄雅文, 江小龙, 陈五九, 等. 高活性酪氨酸解氨酶的表征及其在对香豆酸生物合成中应用. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4553-4566.
- Huang YW, Jiang XL, Chen WJ, et al. Characterization of highly active tyrosine ammonia lyase and its application in biosynthesis of *p*-coumaric acid. Chin J Biotech, 2022, 38(12): 4553-4566 (in Chinese).
- [7] 张丽影, 刘骏锋, 董极靓, 等. 基于 *PKS* 和 *NRPS* 基因的海洋来源抗病原菌活性菌株筛选及其代谢产物活性分析. 生物工程学报, 2022, 38(12): 4520-4535.
- Zhang LY, Liu JF, Dong JL, et al. Screening of marine resistant strain based on *PKS* and *NRPS* genes and the

- activity of its metabolites. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4520-4535 (in Chinese).
- [8] 孔德真, 李浩, 李晓杰, 等. 基于前体供给途径遗传改造提高褐黄孢链霉菌纳他霉素的产量. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4644-4657.
- Kong DZ, Li H, Li XJ, et al. Engineering the precursor supply pathway in *Streptomyces gilvosporeus* for overproduction of natamycin. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4644-4657 (in Chinese).
- [9] 陈星茹, 方诗琦, 万爽, 等. 可降解新烟碱类杀虫剂微生物及其代谢途径的研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4462-4497.
- Chen XR, Fang SQ, Wan S, et al. Microorganisms capable of degrading neonicotinoids and their metabolic pathways: a review. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4462-4497 (in Chinese).
- [10] 李瑞丽, 刘宜锋, 骆伟博, 等. 棒状乳杆菌 FZU63 发酵对红茶汤风味品质改善的作用. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4731-4743.
- Li RL, Liu YF, Luo WB, et al. Effect of *Lactobacillus coryniformis* FZU63 on the flavor quality of black tea beverage. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4731-4743 (in Chinese).
- [11] 刘鑫涵, 沈风飞, 石鹏君, 等. 嗜热古菌 *Infirmifilum uzonense* 来源的双功能高温 β -葡萄糖苷酶 IuBgl3 的原核表达及酶学性质分析. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4644-4657.
- Liu XH, Shen FF, Shi PJ, et al. Expression and characterization of a bifunctional thermal β -glucosidase IuBgl3 from thermophilic archaeon *Infirmifilum uzonense*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4644-4657 (in Chinese).
- [12] 黄婷婷, 张玉华, 段绪果. 普鲁兰酶的异源表达、结构解析及分子改造研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4432-4448.
- Huang TT, Zhang YH, Duan XG. Advances in heterologous expression, structural elucidation and molecular modification of pullulanase. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4432-4448 (in Chinese).
- [13] 高涵, 龚劲松, 汪子凯, 等. 杓兰果胶杆菌海藻糖酶的克隆表达及应用. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4658-4668.
- Gao H, Gong JS, Wang ZK, et al. Cloning, expression and properties of trehalase from *Pectobacterium cypripedii*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4658-4668 (in Chinese).
- [14] 黄欣, 李益民, 杜聪, 等. 来源于泗阳鞘氨醇杆菌的聚磷酸激酶的克隆表达及在 ATP 再生系统中的应用. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4669-4680.
- Huang X, Li YM, Du C, et al. Expression of polyphosphate kinase from *Sphingobacterium siyangensis* and its application in ATP regeneration system. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4669-4680 (in Chinese).
- [15] 卜佳豪, 郝俊尧, 杨广宇. 半理性设计提高产碱杆菌 KS-85 来源的肌酸酶催化活性. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4601-4614.
- Bian JH, Hao JY, Yang GY. Improving the activity of creatinase from *Alcaligenes* sp. KS-85 through semi-rational design. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4601-4614 (in Chinese).
- [16] 宁书晴, 巫欣欣, 罗云孜. CRISPR 相关转座元件的研究及应用进展. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4371-4384.
- Ning SQ, Wu XX, Luo YZ. Recent advances in CRISPR-related transposable elements. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4371-4384 (in Chinese).
- [17] 申玉玉, 陈忠秀, 陈杰, 等. 一种高效无选择标记的黑曲霉基因组编辑方法. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4744-4755.
- Shen YY, Chen ZX, Chen J, et al. An efficient marker-free genome editing method for *Aspergillus niger*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4744-4755 (in Chinese).
- [18] 赵晨, 李端华, 李进军, 等. 分子串联重复策略用于制备超短肽. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4587-4600.
- Zhao C, Li DH, Li JJ, et al. Molecular tandem repeat strategy for production of ultrashort peptides. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4587-4600 (in Chinese).
- [19] 王绪霞, 张龙雨, 王磊, 等. 藤壶附着机理及其粘胶蛋白的研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4449-4461.
- Wang XX, Zhang LY, Wang L, et al. The adhesion mechanism of barnacle and its cement proteins: a review. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4449-4461 (in Chinese).
- [20] 谭鑫, 李超, 郭美锦. 用于红霉素生产的 500 m³ 生物反应器的理性设计. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4692-4704.

- Tan X, Li C, Guo MJ. Rational design of a 500 m³ fermenter for erythromycin production by *Saccharopolyspora erythraea*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4692-4704 (in Chinese).
- [21] Sakimoto KK, Wong AB, Yang P. Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar-to-chemical production. *Science*, 2016, 351(6268): 74-77.
- [22] 王杰, 杨悦, 崔岱宗, 等. 外源 CdS 纳米粒子对大肠杆菌生长的影响. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4681-4691.
- Wang J, Yang Y, Cui DZ, et al. Effect of exogenous CdS nanoparticle on the growth of *Escherichia coli*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4681-4691 (in Chinese).
- [23] 庞焦, 姜梦彤, 刘羽欣, 等. 过氧化氢酶-无机杂化纳米花的制备及催化特性. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4705-4718.
- Pang J, Jiang MT, Liu YX, et al. Preparation and catalytic properties of catalase-inorganic hybrid nanoflowers. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4705-4718 (in Chinese).
- [24] 韩丽婕, 王伟良, 万民熙, 等. 定向驯化对异养蛋白核小球藻硒的耐受性及富集能力的影响. *生物工程学报*, 2022, 38(12): 4756-4764.
- Han LJ, Wang WL, Wan MX, et al. Effects of directional adaptation on selenium tolerance and accumulation of heterotrophic *Chlorella pyrenoidosa*. *Chin J Biotech*, 2022, 38(12): 4756-4764 (in Chinese).

(本文责编 郝丽芳)