高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

糖与非芳香氨基酸的协同增强发光

陈　翔，张　强，阴卓颉，袁望章
（上海交通大学化学化工学院，化学生物协同物质创制全国重点实验室，
变革性分子前沿科学中心，上海市电气绝缘与热老化重点实验室，上海 200240）

摘要　以甜奶粉相较于普通奶粉所表现出的显著发光增强现象为切入点，结合组分解析与模型重组，揭示了蔗糖与酪蛋白间的协同增强发光效应及其发射特征的变化规律．通过进一步简化模型，构建糖-非芳香氨基酸掺杂体系，发现糖类（如蔗糖、糖苷）与非芳香氨基酸（如赖氨酸、丝氨酸）之间存在普遍的协同增强发光效应．实验结果表明，该协同效应可显著提高发光强度与量子产率（如，糖苷-丝氨酸体系量子产率提升超过30倍），并延长部分体系的磷光寿命．机理分析与理论计算揭示，糖与非芳香氨基酸复合后，分子间相互作用显著增强，促进了电子的空间离域及分子构象刚性化，协同提高了簇发射种的激发与发射效率，从而显著提升发光性能，为开发新型高效发光材料提供了理论基础与实践前景．

关键词　糖；非芳香氨基酸；协同增强发光；室温磷光
中图分类号　O621　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20250400

Synergistic Luminescence Enhancement Between Sugars and Nonaromatic Amino Acids

CHEN Xiang，ZHANG Qiang，YIN Zhuojie，YUAN Wangzhang*
（*School of Chemistry and Chemical Engineering*，*State Key Laboratory of Synergistic Chem-Bio Synthesis*，
Frontiers Science Center for Transformative Molecules，*Shanghai Key Lab of Electrical Insulation and Thermal Aging*，
Shanghai Jiao Tong University，*Shanghai* 200240，*China*）

Abstract　Inspired by the markedly stronger luminescence of sweet milk powder relative to regular pure milk powder，the synergistic luminescence enhancement effect and associated changes in photophysical properties were systematically investigated through compositional analysis and model reconstruction. Sugar-nonaromatic amino acid doped systems were subsequently constructed，demonstrating a universal synergistic luminescence enhancement effect between sugars（*e.g.*，sucrose，glucoside）and nonaromatic amino acids（*e.g.*，lysine，serine）. Experimental results demonstrate that this synergistic effect significantly amplifies luminescence intensity and efficiency（*e.g.*，the quantum yield of the glycoside-serine doped system increased by over 30-fold），and also prolongs the phosphorescence lifetime in some cases. Mechanistic analyses combined with theoretical calculations reveal that mixing sugars with nonaromatic amino acids strengthens intermolecular interactions，promotes through-space electron delocalization，and rigidifies conformations. This cooperation enhances both excitation and radiative transition efficiencies of the emissive species，boosting overall luminescent performance. Collectively，these findings provide valuable mechanistic insight and design guidelines for the development of novel luminescent materials based on simple bio-derived components.

Keywords　Sugar；Nonaromatic amino acid；Synergistic luminescence enhancement；Room temperature

收稿日期：2025-12-26. 网络首发日期：2026-02-06.
联系人简介：袁望章，男，博士，研究员，主要从事非典型发光材料方面的研究．E-mail: wzhyuan@sjtu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金（批准号：U22A20250，52473185）资助．
Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.U22A20250，52473185).

phosphorescence

由于缺乏典型的共轭发色团，非芳香氨基酸长期被普遍认为不发光．对于其单分子而言，电子高度局域，且分子内旋转与振动易于耗散激发态能量，因此在稀溶液中几乎不发光[1]．然而，近期研究表明，许多常见的非芳香氨基酸及其多肽在高浓度溶液或固态条件下可呈现本征可见光发射[2~4]．这种现象通常被归因于簇聚诱导发光(Clustering-triggered emission，CTE)机制．具体而言，当分子聚集时，其结构中的非典型生色团(如氨基、羰基、羟基)通过空间相互作用产生电子云重叠，并伴随构象刚化，从而产生新的发光通道[5~10]．单晶结构分析进一步证实了这种聚集态下的“三维空间共轭”效应，即分子簇内存在显著的空间电子耦合．因此，非芳香氨基酸簇在紫外激发下可发生辐射跃迁，产生可见光发射，甚至在某些体系中可观察到室温磷光(RTP)[11]．上述研究拓展了人们对生物大分子自发荧光的认识．通常，蛋白质的本征荧光主要来源于色氨酸、酪氨酸等芳香残基，但已有研究证实，蛋白质固体或多肽聚集形成高度有序的β-折叠结构时，即使完全不含芳香基团，也能产生可见荧光，其中，牛血清白蛋白晶体和类淀粉蛋白纤维的本征发光现象即为代表性实例[12~17]．因此，深入研究非芳香氨基酸的发光机制，有望进一步阐明细胞自发光的来源，并为开发生物相容性优良的新型发光材料奠定基础．

然而，大多数非芳香氨基酸的发光效率(Φ)极低，往往不足1%，这严重制约了基于此类氨基酸的新型发光材料的开发．鉴于此，近年来，科研人员尝试了多种策略以增强其发光性能[2,18~21]．但现有策略主要通过影响分子聚集或构建聚合物与超分子体系来改善其发光，尚未形成面向非芳香氨基酸、可用于构筑高效发光材料的通用分子设计策略．更为重要的是，非芳香氨基酸Φ值较低的根本原因尚未完全阐明，对于其发光中心的形成、电子离域及弛豫过程的理解仍显不足．此外，已有研究指出，用于生物成像和化学传感的非典型发光材料往往需要远高于传统荧光探针的使用浓度(可达千倍)，这严重制约了其实用性[2]．因此，无论是出于提升非典型发光材料实用性能的考量，还是深入探究其发光机制的需求，开发非芳香氨基酸高效发光体系的通用策略已成为当务之急．

鉴于对非芳香氨基酸发光机制的理解尚不充分且现有发光增强策略存在局限，本课题组致力于探索新的发光增强途径．在研究中，我们意外观察到添加蔗糖(Suc)的奶粉样品(甜奶粉)在紫外激发下呈现出明显强于普通奶粉的发光及余辉寿命．经初步排查，排除了外源染料或添加剂干扰，提示该增强效应可能源于糖类与乳品天然成分之间的内在相互作用．考虑到奶粉中富含蛋白质及其衍生组分(如肽段、氨基酸)，而糖类则含有大量羟基等可形成氢键并调控电子结构的官能团，两类天然产物之间可能存在尚未充分认识的协同作用，从而影响分子聚集状态及激发态过程．基于上述推测，本文围绕乳制品中主要天然组分与糖类共存条件下的发光特性开展了系统研究，以阐明其发光增强机制．

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

酪蛋白(Cas)，生化试剂，上海源叶生物科技有限公司；*L*-丝氨酸(Ser)、苏氨酸(Thr)、蔗糖(Suc)和β-甲基葡萄糖苷(MGlu)，分析纯(纯度>99%)和赖氨酸盐酸盐(LysHCl，分析纯，纯度>98%)，东京化成工业(TCI)有限公司；纯水(电导率约为1.08 μS/cm)，杭州娃哈哈集团有限公司；海藻酸钠(SA，优级纯)、阳离子交换树脂IR120(优级纯)、甘氨酸(Gly)、丙酮(色谱纯，纯度99.5%)、甲醇(色谱纯，纯度99.9%)、乙醇(色谱纯，纯度99.9%)、乙腈(色谱纯，纯度99.9%)、二氯甲烷(色谱纯，纯度99%)、乙醚(分析纯，纯度99%)、1,2-二氯乙烷(分析纯，纯度99%)、乙酸(色谱纯，纯度>99%)、乙酸乙酯(分析纯，纯度>99.5%)和四氢呋喃(色谱纯，纯度99.8%)，上海泰坦科技股份有限公司；雀巢甜奶粉，雀巢(中国)有限公司；光明纯奶粉，上海光明乳业股份有限公司；安佳纯奶粉，上海恒天然商贸有限公司；所有用于光致发光测试的化学品在使用前均通过重结晶和柱层析纯化．

Avance III HD DRX-500M型核磁共振波谱仪(NMR)和D8 VENTURE CMOS Photon II型单晶X射线衍射仪，铜靶辐射源($K\alpha$射线波长0.154178 nm)，瑞士Bruker公司；FLS1000型稳态/瞬态荧光光谱仪，英国Edinburgh公司，测试温度通常为298或77 K，配备PMT900检测器；QM/TM/IM型高级荧光稳态瞬

态测试系统[配备积分球(SPEKTRON-R98, φ=80 mm)], 美国PTI公司; Quantaurus-QY Plus型量子产率测试系统, 日本Hamamatsu Photonics公司; Lambda 750 s型紫外-可见分光光度计(UV-Vis), 美国PerkinElmer公司; α7sII型单反相机, 日本Sony公司.

1.2 实验过程

1.2.1 掺杂样品的制备 按比例称量样品一(蛋白质或氨基酸)和样品二(Suc或MGlu)于20 mL样品瓶中, 加入5 mL水在25 ℃下搅拌12 h, 随后在30 ℃真空烘箱内完全干燥. 同时, 为方便对比, 单独的样品一与样品二也进行相同操作.

1.2.2 海藻酸钠掺杂薄膜的制备 首先对海藻酸钠(SA)进行纯化, 先将10 g SA溶于1 L水中得到均匀溶液, 然后加入100 g强酸型阳离子交换树脂. 将SA水溶液与离子交换树脂作用24 h以去除杂质, 过滤后得到SA溶液. 用25% NaOH水溶液调pH为8, 随后加10倍无水乙醇将SA沉淀出来, 分别用80%, 90%酒精和无水乙醇洗涤, 最后将样品冷冻干燥, 得到SA纯品. 称量200 mg待掺杂样品并用5 mL水配置成浓度为40 mg/mL的溶液. 随后, 在多个样品瓶中分别称量160 mg提纯后的SA, 加入5 mL水后搅拌(转速160 r/min). 随后按相应比例用移液枪吸取掺杂样品溶液并加入SA溶液, 继续搅拌12 h. 随后倒入模具, 置于35 ℃真空烘箱干燥48 h, 最后从模具中剥离掺杂薄膜并置于低温干燥条件下保存.

2 结果与讨论

2.1 甜奶粉较纯奶粉的发光增强现象

不同品牌奶粉具有相似的本征光致发光行为(图S1,见本文支持信息), 并普遍表现出超长室温磷光(p-RTP)特征[22]. 然而, 相较于纯奶粉, 甜奶粉在多个激发波长(λ_{ex}分别为254, 312和365 nm)下的p-RTP显著增强, 尤其在312 nm紫外光激发下, 其延迟发射更强且余辉可持续约10 s, Φ也均高于纯奶粉(图S2,见本文支持信息). 对多个品牌奶粉的系统对比进一步表明, 甜奶粉中的发光增强现象具有普遍性.

甜奶粉与纯奶粉的主要区别在于额外添加了Suc. 配料表中仅含生牛乳和Suc的甜奶粉同样表现出较强发射, 提示Suc可能是增强发光的关键因素. 为验证上述推测, 按甜奶粉中Suc的实际含量制备了添加Suc的牛奶冻干样品, 并与纯牛奶冻干样品的光物理性质进行对比. 结果表明, 引入Suc可显著提升体系的发光性能, 主要体现在Φ值的提高和余辉寿命的延长(图S3,见本文支持信息). 光谱分析显示, 添加Suc的复合样品主发射峰发生蓝移, 说明原有发光中心的构成或比例可能发生改变, 或体系中产生了新的发射源.

考虑到蛋白质, 特别是酪蛋白(Cas)在牛奶及奶粉本征发光中的重要作用[23], 选取Cas作为研究模型, 考察其与Suc共存条件下光物理性质的变化. 首先, 制备了纯Cas冻干样品和按甜奶粉中Suc比例配制的Cas-Suc复合冻干样品. 结果显示, Suc的引入显著提升了Cas的发光性能: 复合样品相较于纯Cas, 表现出更高的发光亮度、更鲜明的发光颜色及更长的磷光寿命[图1(A)]; 磷光余辉寿命从Cas的约22 ms延长至268 ms[图1(D)], 实现磷光显著增强; 其Φ值提高了近3倍[图1(E)]; 此外, 复合样品的发射光谱在400~450 nm区域的强度显著增强, 峰形出现微幅调整, 提示体系中可能存在新的或显著强化的发射中心, Suc很可能参与构建新的激发态耦合或聚集态发光中心[图1(B)和(C)]. 可见, Suc的引入对Cas的聚集态发光特性具有显著调控作用.

2.2 Suc增强Ser光致发光现象与机理

Suc对蛋白质发光的增强效应促使我们进一步考察了其对氨基酸发光的影响. 鉴于氨基酸作为蛋白质的基本结构单元, 其结构多样性可能带来不同的发光响应, 因此, 初步筛选了几种代表性氨基酸与Suc进行复合. 其中, 丝氨酸复合体系(Ser-Suc)在发光增强方面表现最为突出[图2(A)], 因而选其作为代表样品开展系统研究. 结果表明, 按摩尔比1∶1复合并经冷冻干燥获得的Ser-Suc样品, 其Φ值显著高于两种单一组分[图2(C)], 相较于Ser提升近20倍; 经压片处理后, 样品在312 nm紫外光激发

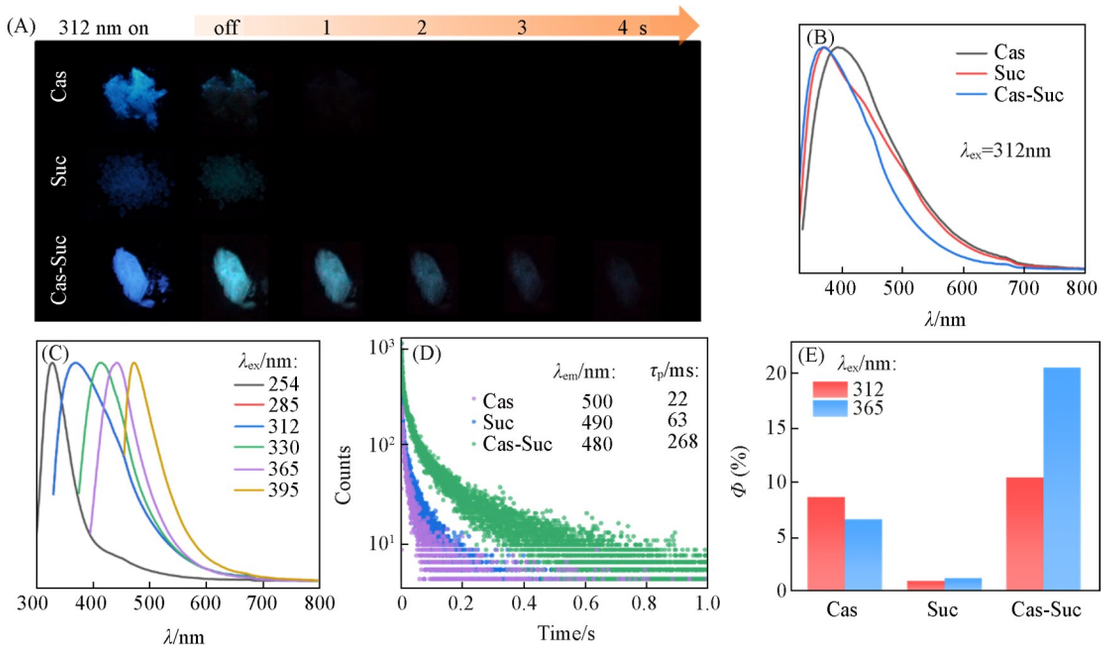

Fig. 1 Luminescent photographs(A) and prompt emission spectra(B) of Cas, Suc and Cas-Suc mixture solids with or without 312 nm UV irradiation, normalized prompt emission spectra of Cas-Suc mixture solids with different λ_{ex}(C), lifetime decay profiles of Cas, Suc and Cas-Suc mixture solids(D), Φ values of Cas, Suc and Cas-Suc mixture solids with 312 and 365 nm UV excitation(E)

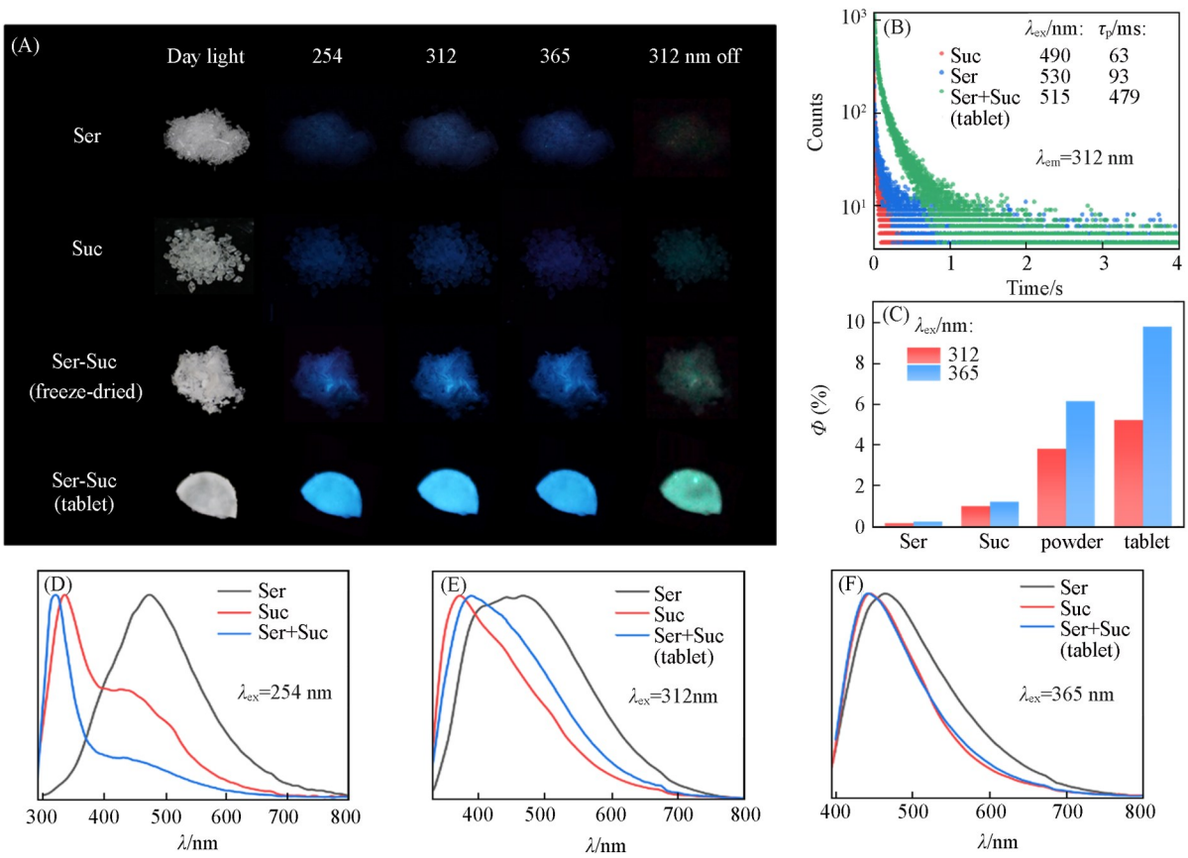

Fig. 2 Photographs of freeze-dried powders and tablets of Ser, Suc and their mixture under room light and varying UV lights or after ceasing of 312 nm UV irradiation(A), lifetimes(B) and Φ values(C) of Ser, Suc and their mixture solids with 312 or 365 nm UV excitation, normalized prompt emission spectra of Ser, Suc and their mixture tablets with 254(D), 312(E) and 365 nm(F) UV irradiations

下的τ_p延长至479 ms[图2(B)]，远高于单组分体系；同时，复合体系的发射光谱与单组分明显不同，主发射峰发生偏移，峰形亦有所变化[图2(D)~(F)]，这一系列现象与CTE机制的特征高度吻合．压片过程进一步增强了Ser与Suc之间的分子间作用，促进富电子单元的簇聚与簇生色团构象刚性化，有效抑制非辐射跃迁，从而显著提高Φ值．

在此基础上，进一步通过溶剂缓慢挥发法制备了Ser-Suc复合晶体，并进行了单晶X射线衍射测试，但仅解析得到单一组分的晶体结构信息．基于此，Ser-Suc复合晶体更可能为局部有序/无序共存的复合体系，而非形成具有长程有序排列的共晶结构．随后对其进行光致发光、^{1}H NMR、SEM及EDS表征(图S4，见本文支持信息)．在不同紫外光激发下，复合晶体均表现出显著强于单组分的发光强度．^{1}H NMR结果显示，复合样品仅呈现Ser与Suc信号的简单叠加，未见新化学位移，表明发光增强并非由化学反应引起，而是源于组分间的物理相互作用．SEM/EDS表征揭示，Ser与Suc在复合晶体中分散均匀．上述结果表明，Ser与Suc在晶态复合物中通过紧密排列与分子间相互作用，在保持原有化学结构的前提下显著增强了发光性能，该协同效应突显了非共价相互作用在调控发光行为中的重要作用．

2.3 糖与非芳香氨基酸协同增强发光现象及机理

为明确糖与氨基酸间的协同作用机制，选用结构更简洁且性质稳定的非还原性单糖苷(MGlu)与Ser构建模型体系．相较于结构复杂以及反应活性较高的糖类，MGlu更具代表性，且在温和条件下不易与氨基酸发生化学反应，有利于分析其协同发光行为背后的分子间相互作用．图3(A)表明，在不同波长紫外光激发下，复合样品(MGSer)均呈现显著增强的发光性能，且对组分比例变化敏感(图S5，见本文支持信息)．在312 nm波长激发下，复合样品的τ_p明显延长，且摩尔比1∶5的MGSer体系较摩尔比1∶1的体系具有更长的τ_p[图3(B)]．复合样品的Φ值亦随比例变化而改变，最高可提升至约20%[图3(C)]．上述结果表明，复合组分间的相互作用可直接影响激发态光物理过程，从而实现对非芳香体系发光性能的有效调控．UV-Vis吸收光谱对比显示，复合体系的吸收峰发生明显红移，400 nm以上的吸收显著增强并延伸至约600 nm[图3(D)]，这可能归因于空间电子离域拓展或电荷转移(CT)，导致激发态能级下降，使复合体系较单一组分更易被激发，为其优异的发光性能提供了合理解释．

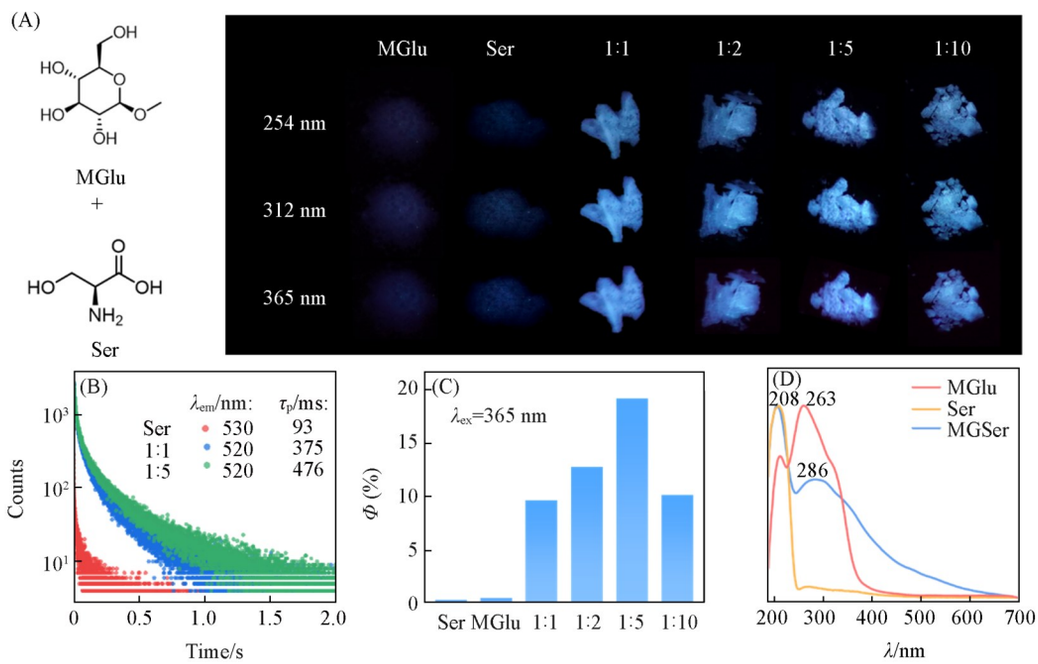

Fig. 3 Photographs of MGlu, Ser and their mixture solids at different ratios under varying UV irradiations (A), lifetimes of Ser and MGSer mixture(molar ratio: 1:1 and 1:5) solids under 312 nm UV excitation (B), Φ values of MGlu, Ser and their varying mixture solids with 365 nm UV excitation(C), UV-Vis absorption spectra of MGlu, Ser and MGSer solids(D)

为进一步阐明糖和氨基酸协同增强发光的机制，以MGlu，Ser及1∶1 MGSer为模型，进行了理论计算与轨道分析，比较了三者的静电势分布与激发态性质．理论计算所需的结构均从单晶结构中选取，MGSer混合模型采用分子构象优化得到(图S6和表S1，见本文支持信息)．MGlu二聚体中电子分布均匀，电荷主要集中在羟基的氧原子周围，而Ser二聚体则表现出显著的电荷极化，电子集中于羧酸负离子(COO^-)区域，正电荷则分布于质子化氨基(NH_3^+)上[图4(A)]．MGSer体系的静电势分布呈现出两者的复合特征：MGlu的“富电子氧簇”结构可在一定程度上缓解Ser体系的电荷极化，使整体电子分布更趋均衡．激发态轨道分析进一步揭示了复合体系在发光性能上的结构基础[图4(B)]．MGlu二聚体主要表现为局域激发(LE)态，空穴与电子分布空间重叠大，但电子离域程度有限，激发态能隙大，因而在固态仅呈现出弱蓝紫色发光．Ser二聚体则具有一定CT态特征，激发态能隙降低，但空穴-电子重叠度极低(振子强度f=0.0002)，激发效率低[24]．相比之下，MGSer体系兼具LE与CT的优势：空穴与电子波函数重叠增强，f提升至0.0128；CT特性有效降低了能隙(λ=331 nm)，显著提升了激发效率．此外，Ser的分子内极化特性促进了MGlu分子内及分子间的电荷迁移，进一步增强了空间电子离域．上述协同效应使MGSer体系在激发态同时兼具低能隙与高f，为实验中观察到的增强吸收与发射行为提供了合理解释．

考虑到非共价相互作用(NCI)在协同效应中的潜在贡献，对比分析了三者的NCI网络[图4(C)]．与MGlu和Ser相比，MGSer体系呈现更为丰富且连续的空间NCI网络，表明其具有更强的簇聚倾向和更高的构象稳定性，有利于激发态稳定的及辐射跃迁过程[25,26]．类似现象亦可在Ser-Suc复合体系中观察到(图S7，见本文支持信息)．综合激发态轨道行为与分子间NCI分析，MGSer体系通过LE-CT态协同、增强的空间电子离域以及构象刚性提升，实现了协同增强发光效应．而当Ser占比过高时，MGSer

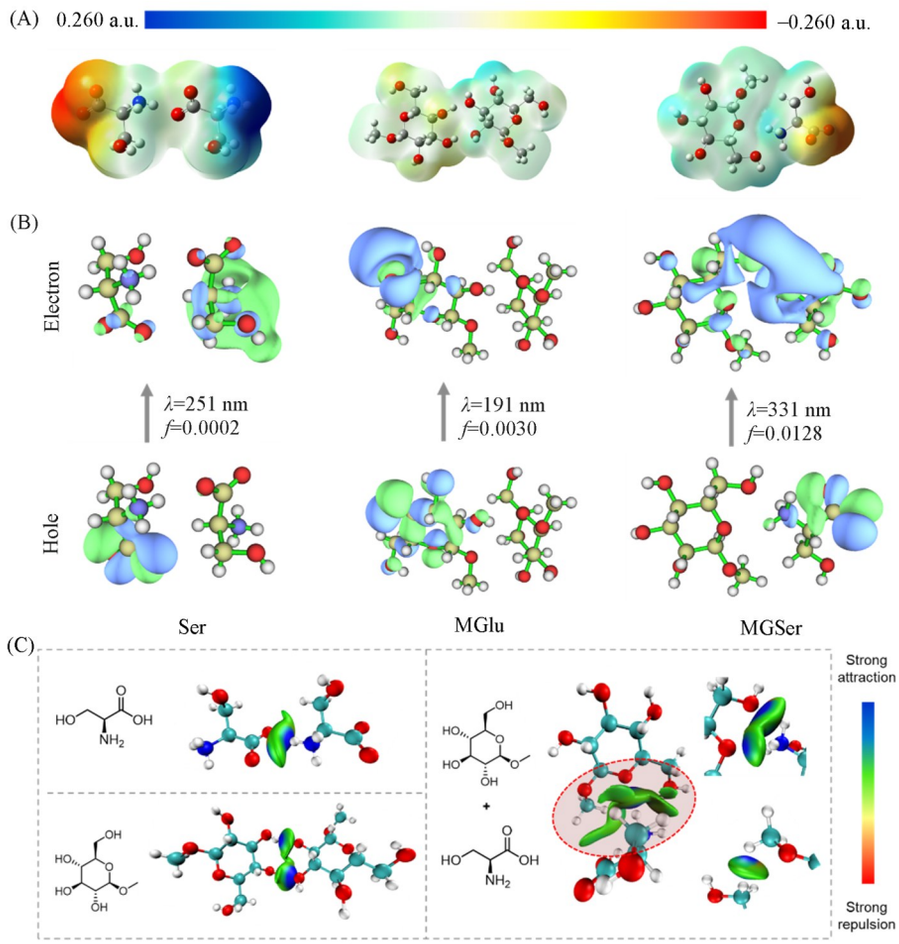

Fig. 4 Molecular electrostatic potential at the isodensity surface(A), NTO and properties of S_0-S_1(B) and noncovalent interactions plots(C) of Ser, MGlu and MGSer

体系中CT态的占比进一步增加，导致振子强度下降并削弱分子间相互作用，使激子更易通过非辐射跃迁耗散能量．因此，随着Ser比例持续提高，MGSer的Φ值与τ_p呈现先升后降的变化趋势．

除Ser外，苏氨酸(Thr)、甘氨酸(Gly)和赖氨酸盐酸盐(LysHCl)与MGlu构建的复合体系同样表现出发光增强效应，Φ值均有不同程度提升(图5)．其中，MGlu与LysHCl摩尔比为1∶1的复合样品(MGLys)在365 nm紫外光激发下的Φ高达20.9%．这些协同体系不仅提升了Φ值，还展现出显著的激发波长依赖性和氨基酸种类调控性．上述结果表明，非芳香氨基酸与糖之间的协同效应具有普遍性．这种可调控且显著增强的发光行为，不仅为非典型发光材料的发光机制提供了有力支持，也凸显其在构建高效、可调发光材料方面的潜在应用价值．

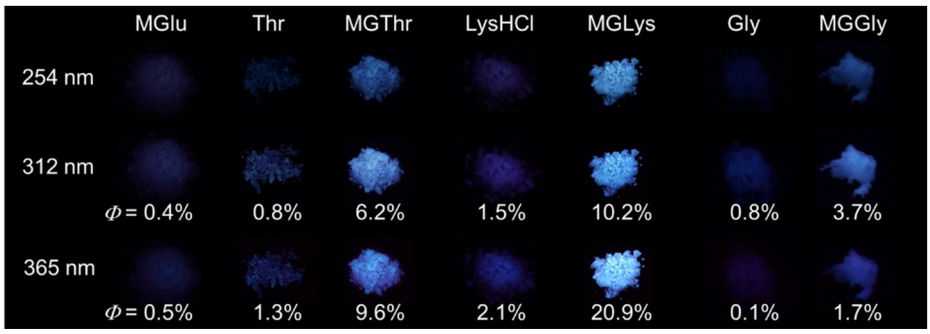

Fig. 5　Photographs and Φ values of varying solids under different UV excitations

2.4　材料应用

鉴于糖-非芳香氨基酸体系展现出的高效、可调发光及p-RTP发射特性，初步探索了其在信息加密与防伪识别方面的应用潜力．如图6(A)所示，以MGLys与MGSer粉末分别填充“GLU”和“SER”区域构建“GLUCOSERINE”图案，在312 nm紫外光照射下整体呈蓝白色发光，停止照射后仅“GLU SER”区域显现绿色余辉，实现了激发响应型信息编码．类似地，图6(B)展示了防伪图案设计：MGLys填充“手电”图案及“CTE”字母，MGSer填充“光斑”区域．紫外照射时整个图案明亮发光，停止激发后仅MGLys区域保留p-RTP发射，实现隐性图案转换，体现出协同体系在多模态发光加密方面的优势．此外，将该协同体系拓展至多糖基底，验证其构筑功能材料的适用性．如图6(C)所示，LysHCl掺杂的SA薄膜同样呈现出发光增强与显著p-RTP发射，表明该协同效应不仅存在于小分子复合体系，在柔性聚合物材料中亦具有良好适用性，展示出其在柔性防伪膜及可穿戴发光器件等领域的应用前景．

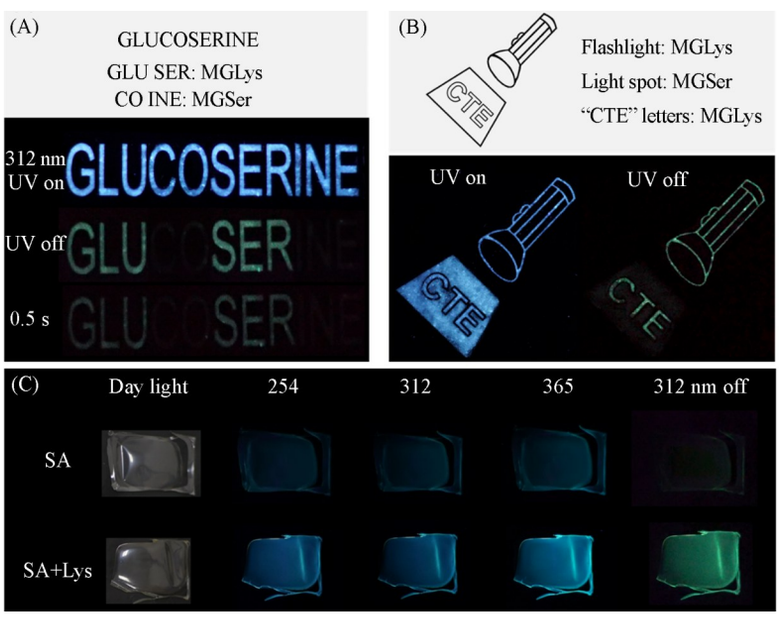

Fig. 6　Demonstration of information encryption(A) and anticounterfeiting(B) applications based on the glucoside-amino acid system, luminescent photographs of SA and lysine-doped SA films(C)

3 结　　论

以甜奶粉较纯奶粉表现出的优异发光性能(Φ和τ_p显著提高)为切入点，揭示了糖-非芳香氨基酸体系中普遍存在的协同增强发光效应．通过对甜奶粉样品的成分分析与实验验证，明确了Suc是诱导发光增强的关键因素．进一步以Cas-Suc体系为模型，证实单纯物理复合即可引起显著的发光增强及发射特征调控．在此基础上，将模型简化为糖(Suc和MGlu等)与非芳香氨基酸(Ser和Lys等)的掺杂体系，实验证明此类体系普遍呈现协同增强发光行为，如MGlu-Ser体系的Φ值提升超30倍，τ_p延长5倍．系统实验与理论计算结果表明，该协同效应源于糖与非芳香氨基酸间增强的分子间相互作用，有效促进了空间电子离域和分子构象刚性，从而提高了簇生色团的激发与辐射跃迁效率，显著提升整体Φ．这为理解和设计新型有机发光材料提供了新的思路．

支持信息见http: //www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20250400.

参　考　文　献

[1] Chen X., Luo W., Ma H., Peng Q., Yuan W. Z., Zhang Y., *Sci. China Chem.*, **2018**, *61*(3), 351—359
[2] Li Q., Wang X., Huang Q., Li Z., Tang B. Z., Mao S., *Nat. Commun.*, **2023**, *14*(1), 409
[3] Arnon Z., Kreiser T., Yakimov B., Brown N., Aizen, R., Shaham-Niv S., Makam P., Qaisrani M., Poli E., Ruggiero A., Slutsky I., Hassanali A., Shirshin E., Levy D., Gazit E., *iScience*, **2021**, *24*(7), 102695
[4] Li X., Liu X., Lv Y., Zhang Z., Chen K., Chu B., Sun J. Z., Zhang H., Zhang X., Tang B. Z., *Mater. Horiz.*, **2025**, *12*(16), 6195—6201
[5] Liu Y., Li C., Qin Y., Cheng Y., Zhang J., Zhao Y., Wu T., He C., Xu C., Wang Q., Zhao Z., Tang B. Z., *Transformative Chem.*, **2025**, *1*(1), e70003
[6] Wang Y., Zhao Z., Yuan W. Z., *ChemPlusChem*, **2020**, *85*(5), 1065—1080
[7] Zhang J., Xiong Z., Zhang H., Tang B. Z., *Nat. Commun.*, **2025**, *16*(1), 3910
[8] Zhang X., Bai Y., Deng J., Zhuang P., Wang H., *Aggregate*, **2024**, *5*(3), e517
[9] Chen X., Hu C., Wang Y., Li T., Jiang J., Huang J., Wang S., Dong W., Qiao J., *Adv. Sci.*, **2024**, *11*(1), 2304946
[10] He Y., Feng W., Qiao Y., Tian Z., Tang B. Z., Yan H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, *62*(48), e202312571
[11] Tang S., Yang T., Zhao Z., Zhu T., Zhang Q., Hou W., Yuan W. Z., *Chem. Soc. Rev.*, **2021**, *50*(22), 12616—12655
[12] Wang Q., Dou X., Chen X., Zhao Z., Wang S., Wang Y., Sui K., Tan Y., Gong Y., Zhang Y., Yuan W. Z., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*(36), 12667—12673
[13] Pinotsi D., Grisanti L., Mahou P., Gebauer R., Kaminski C. F., Hassanali A., Kaminski Schierle G. S., *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, *138*(9), 3046—3057
[14] Apter B., Lapshina N., Barhom H., Fainberg B., Handelman A., Accardo A., Diaferia C., Ginzburg P., Morelli G., Rosenman G., *Crystals*, **2020**, *10*(8), 668
[15] Jong K. H., Azar Y. T., Grisanti L., Stephens A. D., Jones S. T. E., Credgington D., Kaminski G., Hassanali A., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2019**, *21*(43), 23931—23942
[16] Zhao W., Gao M., Kong L., Yu S., Zhao C., Chen C., *Biomacromolecules*, **2024**, *25*(3), 1897—1905
[17] Zhang Z., Zhu L., Feng J., Zhang H., Zhang X., Sun J. Z., Tang B. Z., *Mater. Chem. Front.*, 2023, *7*(4), 713—719
[18] Cadeddu M., Carboni D., Stagi L., Malfatti L., Casula M. F., Caboi F., Innocenzi P., *Macromolecules*, **2024**, *57*(2), 514—527
[19] Ma Y., Zhang H., Wang K., Cao D., Wang K., Guan R., Zhou C., *Spectrochim. Acta A*, **2021**, *254*(5), 119604
[20] Zhang Q., Zhao Z., Yang G., Li A., Cui Y., Cai Y., Yin Z., Tan Y., Zhou C., Peng Q., Yuan W. Z., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, *35*(27), 2423603
[21] Zeng L., Zhu Z., Mo R., Li W., Xu W., Tian D., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *460*(15), 141452
[22] Lü B., Gao Q., Li P., Chen M., Shi M., Chen G., Hao X., Peng F., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, *10*(41), 15629—15637
[23] Chen X., Zhang Q., Yin Z., Duan J., Yuan W. Z., *Aggregate*, **2026**, *7*(1), e70260
[24] Geng L., Wang K., Sun R., Li C. T., Li X. R., Zhang M., Yu M. H., Chang Z., Bu X. H., *CCS Chemistry*, **2025**, *7*(2), 1416—1428
[25] Chen Z., Shi J., Zhou Y., Zhang P., Liang G., *Chin. Chem. Lett.*, **2025**, *36*(5), 110629
[26] Li F. S., Jiang K., Tong X. Y., Wu Y. J., Lin H. W., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*(6), 20240545(李逢时，蒋凯，童鑫园，武永健，林恒伟. 高等学校化学学报，**2025**，*46*(6)，20240545)

(Ed.: Y, K, V)