

·综述·

## 碳点在创面治疗中的应用研究进展

王鹏<sup>1</sup> 王光毅<sup>2</sup> 纪世召<sup>2</sup> 马建明<sup>1</sup> 汤焘<sup>2</sup><sup>1</sup>临汾市中心医院烧伤整形科,临汾 041000; <sup>2</sup>海军军医大学第一附属医院烧伤外科,

全军烧伤研究所,上海 200433

通信作者:汤焘,Email:drtangtao@hotmail.com

**【摘要】**慢性、感染性创面愈合一直是临床及科学研究方面引人关注的问题,其中细菌感染及氧化损伤是阻碍创面愈合的关键因素。碳点作为一种新型材料,由于其独特的物理化学性质及良好的生物安全性而备受关注。近年来,针对碳点抗菌性、抗氧化性、光致发光性的研究越来越广泛,碳点在慢性及感染性创面治疗中有巨大潜力。该文综述了碳点抗菌、抗氧化、监测创面感染状态 3 个方面的研究进展,并进一步探讨了其具体的作用机制、潜在研究方向及应用前景。

**【关键词】**伤口愈合; 抗菌药; 抗氧化剂; 碳点

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(81971836)

### Research advances on the application of carbon dots in wound treatment

Wang Peng<sup>1</sup>, Wang Guangyi<sup>2</sup>, Ji Shizhao<sup>2</sup>, Ma Jianming<sup>1</sup>, Tang Tao<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Burns and Plastic Surgery, Linfen Central Hospital, Linfen 041000, China; <sup>2</sup>Department of Burn Surgery, the First Affiliated Hospital of Naval Medical University, Burn Institute of PLA, Shanghai 200433, China

Corresponding author: Tang Tao, Email: drtangtao@hotmail.com

**【Abstract】**Chronic and infectious wound healing has always been an issue of concern in clinical and scientific research, in which bacterial infection and oxidative damage are the key factors hindering wound healing. Carbon dots, as a new material, has attracted much attention because of its unique physical and chemical properties and good biological safety. In recent years, the researches on the antibacterial property, antioxidant, and photoluminescence properties of carbon dots are more and more extensive and carbon dots have great potential in the treatment of chronic and infectious wounds. This paper reviews the research progress of carbon dots in three aspects: antibacterial, anti-oxidation and monitoring of wound infection are reviewed, and further discusses its specific mechanism, potential research direction, and application prospect.

**【Key words】**Wound healing; Anti-bacterial

agents; Antioxidants; Carbon dots

**Fund program:** General Program of National Natural Science Foundation of China (81971836)

慢性、感染性创面愈合一直是临床及科研方面引人关注的问题,其中细菌感染及氧化损伤是阻碍创面愈合的关键因素<sup>[1]</sup>。近年来,一类抗菌、生物相容性好的新型材料碳点在感染创面治疗方面的作用备受关注。碳点于 2004 年被首次报道,是碳材料家族中相对较新的成员,广义上是指尺寸 < 20 nm 的具有荧光性质的碳颗粒<sup>[2]</sup>。碳点主要包括石墨烯量子点、碳纳米点、碳量子点,其化学结构为 sp<sup>2</sup> 和 sp<sup>3</sup> 轨道杂化的碳结构,通常是球状结构,可以分为晶格明显的碳点和无晶格的碳点<sup>[3]</sup>。近年来研究者针对碳点结构的多样性,进行了一系列杂原子掺杂、表面功能化修饰,使其获得了较好的抗菌、抗氧化、光致发光特性,同时无论动物实验还是体外细胞实验,都证明了碳点有良好的生物相容性,将其用于治疗动物创面,取得了良好的效果<sup>[4]</sup>。本文从碳点抗菌、抗氧化、监测创面感染状态 3 个方面,对碳点在创面治疗中的研究进展进行了综述,并进一步探讨了其具体的作用机制、潜在研究方向及应用前景,为碳点这种新型材料的基础及临床研究提供思路。

### 1 碳点抗菌机制

目前报道的碳点抗菌机制主要有光动力作用、类过氧化物酶作用、机械/物理破坏作用、抑制细菌代谢作用等。

#### 1.1 光动力作用和类过氧化物酶作用

研究者以氧化石墨烯、壳聚糖为原料,通过水热法制备了一种壳聚糖功能化的石墨烯量子点,其可以通过光动力作用杀灭大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌,带正电荷的壳聚糖功能化的石墨烯量子点可通过静电作用捕获细菌,短期暴露在波长 450 nm 的可见光下会发生光化学转化,迅速产生活性氧和热量,对细菌外膜和内膜造成不可逆转的破坏,导致细胞质渗漏、细菌死亡;实验证明该石墨烯量子点具有良好的

DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210709-00242

本文引用格式:王鹏,王光毅,纪世召,等.碳点在创面治疗中的应用研究进展[J].中华烧伤与创面修复杂志,2022,38(7):697-704. DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210709-00242.

Wang P, Wang GY, Ji SZ, et al. Research advances on the application of carbon dots in wound treatment[J]. Chin J Burns Wounds, 2022, 38(7): 697-704. DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210709-00242.



在体生物安全性和较低的体外细胞毒性,可促进大鼠感染创面愈合<sup>[5]</sup>。研究者采用柠檬酸、1,5-二氨基萘为原料,通过热解法制备碳量子点,其在可见光的激发下也可以产生活性氧,对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌均表现出良好的抗菌活性<sup>[6]</sup>。研究者以石墨为原料,通过溶剂热法制备了具有类过氧化物酶作用的石墨烯量子点,将该石墨烯量子点与低浓度过氧化氢结合,形成一种抗菌体系,结果显示石墨烯量子点可以催化过氧化氢,分解生成具有较高抗菌活性的羟自由基,从而避免高浓度过氧化氢直接损伤组织,该体系对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌均表现出良好的抗菌活性,同时可有效促进大鼠感染创面愈合<sup>[7]</sup>。研究者以柠檬酸、甲酰胺为原料,通过热解法制备碳纳米点,将该碳纳米点与铂纳米粒子组合,设计出一种高效的具有底物特异性的类过氧化物酶,这种类过氧化物酶可催化过氧化氢产生具有抗菌活性的羟自由基,对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌有良好的杀灭作用,生物相容性好,对正常细胞无毒,且在体外溶血实验中显示出低溶血率,小鼠实验显示,这种类过氧化物酶可以催化小鼠酸性感染组织中的内源性过氧化氢,产生羟自由基,进而清除小鼠创面中耐甲氧西林金黄色葡萄球菌形成的生物膜,促进创面愈合<sup>[8]</sup>。

### 1.2 机械/物理破坏作用

细菌细胞壁或外膜负责维持细菌细胞形状,抵抗机械应力,调节渗透性。碳量子点造成细菌细胞壁或外膜物理/机械损伤,使细菌最终因细胞破裂而死亡。研究者以柠檬酸铵为原料,通过热解法合成无光毒性且不产生活性氧的亚精胺功能化的荧光碳量子点,该荧光碳量子点通过损伤细菌细胞膜,对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌和铜绿假单胞菌均表现出良好的抗菌活性,同时具有良好的生物相容性,可有效促进大鼠感染创面修复<sup>[9]</sup>。该研究团队通过更换原料、改进制备流程,以三盐酸亚精胺为原料,通过热解法制备了新型碳量子点,该碳量子点抗菌谱、MIC与亚精胺功能化的荧光碳量子点相似;体外细胞毒性、溶血、血凝、遗传毒性和氧化应激以及体内兔角膜形态和生理变化评价显示,该碳量子点具有良好的生物相容性,此外其可以有效治疗金黄色葡萄球菌导致的兔角膜深部感染。研究表明,该碳量子点表面的高正电荷对细菌细胞膜有很强的破坏作用,同时可暂时诱导角膜上皮细胞紧密连接的开放,从而对兔角膜炎有较强的抗菌治疗作用<sup>[10]</sup>。研究者以双季铵盐为原料,通过热解法制备的氮掺杂碳量子点能破坏金黄色葡萄球菌和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的细胞结构,但对大肠埃希菌无杀灭作用;研究显示该氮掺杂碳量子点抗菌机制可能是带正电荷的氮掺杂碳量子点与带负电荷的细菌结合后,锚定在细菌表面的某些特定位点上,破坏细菌细胞膜进行杀菌;小鼠感染创面实验显示,在治疗耐甲氧西林金黄色葡萄球菌感染的创面时,该氮掺杂碳量子点的疗效与万古霉素相同<sup>[11]</sup>。

### 1.3 抑制细菌代谢作用

一些功能化碳点可以通过抑制细菌代谢,从而杀死细菌。研究者采用柠檬酸、D-谷氨酸为原料,通过热解法制备

了D-谷氨酸功能化石墨烯量子点,该石墨烯量子点穿透细菌细胞膜后和MurD连接酶结合,抑制MurD连接酶催化肽聚糖合成,导致细菌细胞壁破坏、细胞质渗漏,最终导致细菌死亡,从而达到长效抗菌效果,其对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌均表现出良好的抗菌活性<sup>[12]</sup>。研究者以二甲基二烯丙基、氯化铵为原料,通过热解法合成了季铵盐化碳量子点,该碳量子点对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌均表现出良好的抗菌活性,体外细胞实验和动物实验均显示其具有良好的生物相容性,同时研究证明该碳量子点主要通过作用于革兰阳性菌的核糖体蛋白、革兰阴性菌的代谢相关蛋白,起杀菌作用,在混合细菌急性感染创面的大鼠中,创面愈合过程和创面渗出物在不同时间的细菌培养结果都显示,该碳量子点具有明显的抗感染作用,其效果与局部外用一定浓度的左氧氟沙星效果相同,同时该碳量子点可以明显降低大鼠的病死率,HE染色显示碳量子点干预14 d后,大鼠创面组织中的中性粒细胞基本消失,并形成明显结缔组织,而无碳量子点干预的大鼠创面的组织中仍有大量中性粒细胞,毛细血管扩张,并伴有组织失活<sup>[13]</sup>。

## 2 碳点抗氧化机制

目前研究显示碳点清除活性氧的机制主要有2个:(1)具有活性基团,如羟基、醛基、酮基、氨基、羧基、巯基、羰基、多不饱和键,其大多数可以作为质子供体,与活性氧反应后,将自由电子传递给构成C-C主链的碳点主体结构,随后,碳点可以通过释放酸性残基如碳酸盐和碳酸氢盐进一步自我降解<sup>[14]</sup>;(2)掺杂硒原子、铈原子,通过硒原子、铈原子的抗氧化性,起到清除活性氧的作用。

### 2.1 具有活性基团

研究者以枣蜜为原料合成了碳纳米点,首次报道了碳纳米点可以通过其具有的羟基、醛基和酮基等活性基团清除活性氧<sup>[14]</sup>。研究者以洋葱皮粉为原料通过微波法制备了碳纳米点,以叶黄素为原料通过水热法制备了碳纳米点,这2种碳纳米点均具有良好的水溶性和生物相容性,可被内吞进入细胞内,通过碳纳米点丰富的活性基团,如羟基和氨基,有效去除细胞内活性氧;以叶黄素为原料的碳量子点还富含不饱和和双键,这也是其具有超强还原性的原因<sup>[15-16]</sup>。研究者以大蒜为原料通过水热法制备了碳量子点,以黑大豆为原料通过热解法制备了碳量子点,这2种碳量子点均通过其具有的羧基、氨基和羟基等活性基团,表现出良好的活性氧清除活性<sup>[17-18]</sup>。研究者以葡萄糖、1,2-乙二胺和浓硝酸为原料,通过热解法合成了具有氨基、羟基、羰基的碳纳米点,证明该碳纳米点对活性氧的有效抑制浓度明显低于抗坏血酸,并且对超氧阴离子自由基有较强的清除作用<sup>[19]</sup>。研究者以青辣椒提取液为原料,通过微波法合成了具有羟基、羰基及不饱和和叁键的碳量子点,该碳量子点可以清除活性氧,同时也可能通过激活低氧诱导因子1来促进血管生成,并观察到其可以通过改变大鼠创面肉芽组织的分布和微血管的形成,从而促进大鼠创面愈合<sup>[20]</sup>。研究者以间苯二胺为原料,通过热解法

制备了具有羟基、不饱和双键的碳纳米点,该碳纳米点拥有抗氧化性能,能够有效地保护体外各种氧化应激下的细胞<sup>[21]</sup>。

## 2.2 掺杂硒原子、铈原子

研究者以柠檬酸、巯基乙胺、亚硒酸钠为原料,通过水热法制备了具有良好活性氧清除能力、生物相容性的具有巯基、同时掺杂硒原子的碳量子点,该碳量子点能穿透细胞膜,分布在细胞质中,可以提高活性氧清除效率,研究者认为该碳量子点对活性氧的清除作用可能是巯基和硒原子相互作用的结果<sup>[22]</sup>。研究者以柠檬酸、亚硒酸钠为原料,通过热解法制备了硒掺杂碳量子点,该碳量子点同样具有良好的抗氧化作用及生物相容性,可以保护大鼠星形胶质细胞和大鼠PC12细胞,免遭过氧化氢诱导的氧化损伤<sup>[23]</sup>。研究者以硝酸铈六水合物、柠檬酸为原料,通过水热法制备了铈掺杂碳量子点,其具有良好的水溶性、生物相容性,同时该碳量子点拥有丰富的铈离子,且三价铈离子明显多余四价铈离子,三价铈离子与活性氧作用后,转化成四价铈离子,从而起到清除羟自由基的作用<sup>[24]</sup>。

## 3 碳点光致发光作用

创面愈合过程复杂,很多生物化学反应和环境因素参与其中,pH值是反映创面愈合状态的重要指标。健康皮肤是微酸性的,感染后创面微环境pH值会偏碱性,为7~9<sup>[25-26]</sup>,早期识别感染有助于及时治疗。研究证实碳点光致发光作用的机制,是碳点表面氨基或羧基的质子化或去质子化<sup>[27]</sup>,可用于构建pH值检测系统。

研究者采用电解石墨棒制备石墨烯量子点,并采用紫外光照射后,该石墨烯量子点可根据创面pH值的改变显示出特定的颜色<sup>[28]</sup>。研究者以1,2,4-三氨基苯和氢氧化钠为原料,通过水热法合成了发橙色光的碳点,然后将这些碳点结合到纸上构建传感平台,传感平台在自然光照射下对pH值变化表现出良好的响应效果<sup>[29]</sup>。研究者以1,2,4-三氨基苯和尿素水溶液为原料,通过水热法合成了发橙色光的碳量子点,在可见光照射下,该碳量子点对pH值在5~9范围内的响应效果显著,将其与医用棉布通过氢键结合,得到碳量子点涂层织物,此涂层织物不仅具有良好的生物相容性、抗浸出性和良好的可逆性,且不易被血液污染、可以长期储存,从而可通过视觉反应定量测定pH值<sup>[30]</sup>。研究者以L-半胱氨酸为原料,通过水热法合成pH值敏感的碳量子点,用海藻酸钠水凝胶固定血红蛋白和pH值敏感的碳量子点,得到生物相容性好的掺杂碳量子点的海藻酸血红蛋白水凝胶,其中碳量子点可监测创面pH值、海藻酸钠水凝胶可触发止血、血红蛋白可引发芬顿反应起到杀菌作用,其可以有效促进金黄色葡萄球菌感染小鼠创面的愈合,并检测创面感染情况<sup>[31]</sup>。

## 4 总结与展望

碳资源丰富,价格低廉,碳点本质上是良性和无毒的,其应用于医学领域时间尚短,且目前主要集中于基础研究,尚

未应用于临床,但在抗菌性、抗氧化性、光致发光性等方面,都显示出无法替代的优势,进一步研究碳点的不同抗菌机制,抗菌效果的优劣,以及碳量子点不同的活性基团及其组合抗氧化性能的差异,是非常有必要的。可以尝试制备同时具有良好抗氧化性、抗菌性、光致发光性的碳点材料,将其与各种创面敷料相结合,应用于各类急慢性创面,如糖尿病性创面、骨髓炎创面、烧伤创面等的治疗及对创面感染的可视化监测;也可将碳量子点与植入物材料,如血管支架、人工假体等相结合,增加其应用范畴;甚至可以将碳点制成可以全身应用的药物,应用于感染性疾病、严重创伤等的治疗。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Wang SQ, Zheng H, Zhou L, et al. Nanoenzyme-reinforced injectable hydrogel for healing diabetic wounds infected with multidrug resistant bacteria[J]. *Nano Lett*, 2020, 20(7): 5149-5158. DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c1371.
- [2] Xu XY, Ray R, Gu YL, et al. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments[J]. *J Am Chem Soc*, 2004, 126(40): 12736-12737. DOI: 10.1021/ja040082h.
- [3] Cui L, Ren X, Sun MT, et al. Carbon dots: synthesis, properties and applications[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, 11(12): 3419. DOI: 10.3390/nano11123419.
- [4] Chahal S, Macairan JR, Yousefi N, et al. Green synthesis of carbon dots and their applications[J]. *RSC Adv*, 2021, 11(41): 25354-25363. DOI: 10.1039/d1ra04718c.
- [5] Mei L, Gao XR, Shi YM, et al. Augmented graphene quantum dot-light irradiation therapy for bacteria-infected wounds[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(36): 40153-40162. DOI: 10.1021/acsami.0c13237.
- [6] Nie XL, Jiang CY, Wu SL, et al. Carbon quantum dots: a bright future as photosensitizers for in vitro antibacterial photodynamic inactivation[J/OL]. *J Photochem Photobiol B*, 2020, 206: 111864(2020-03-23)[2021-07-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32247250/>. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2020.111864. [published online ahead of print].
- [7] Sun HJ, Gao N, Dong K, et al. Graphene quantum dots-band-aids used for wound disinfection[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6202-6210. DOI: 10.1021/nn501640q.
- [8] Liang MJ, Wang YB, Ma K, et al. Engineering inorganic nanoflares with elaborate enzymatic specificity and efficiency for versatile biofilm eradication[J]. *Small*, 2020, 16(41): e2002348. DOI: 10.1002/sml.202002348.
- [9] Li YJ, Harroun SG, Su YC, et al. Synthesis of self-assembled spermidine-carbon quantum dots effective against multidrug-resistant bacteria[J]. *Adv Healthc Mater*, 2016, 5(19): 2545-2554. DOI: 10.1002/adhm.201600297.
- [10] Jian HJ, Wu RS, Lin TY, et al. Super-cationic carbon quantum dots synthesized from spermidine as an eye drop formulation for topical treatment of bacterial keratitis[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 6703-6716. DOI: 10.1021/acsnano.7b01023.
- [11] Wang HJ, Song ZY, Gu JJ, et al. Nitrogen-doped carbon quantum dots for preventing biofilm formation and eradicating drug-resistant bacteria infection[J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2019, 5(9): 4739-4749. DOI: 10.1021/acsbmaterials.9b00583.
- [12] Xin Q, Liu Q, Geng LL, et al. Chiral nanoparticle as a new efficient antimicrobial nanoagent[J]. *Adv Healthc Mater*, 2017,

- 6(4): 1601011. DOI:10.1002/adhm.201601011.
- [13] Zhao CF, Wang XW, Yu LY, et al. Quaternized carbon quantum dots with broad-spectrum antibacterial activity for the treatment of wounds infected with mixed bacteria[J]. *Acta Biomater*, 2022, 138:528-544. DOI:10.1016/j.actbio.2021.11.010.
- [14] Das B, Dadhich P, Pal P, et al. Carbon nanodots from date molasses: new nanolights for the in vitro scavenging of reactive oxygen species[J]. *J Mater Chem B*, 2014, 2(39):6839-6847. DOI: 10.1039/c4tb01020e.
- [15] Bankoti K, Rameshbabu AP, Datta S, et al. Onion derived carbon nanodots for live cell imaging and accelerated skin wound healing[J]. *J Mater Chem B*, 2017, 5(32):6579-6592. DOI: 10.1039/c7tb00869d.
- [16] Yang D, Li L, Cao L, et al. Green synthesis of lutein-based carbon dots applied for free-radical scavenging within cells[J]. *Materials(Basel)*, 2020, 13(18):4146. DOI:10.3390/ma13184146.
- [17] Zhao SJ, Lan MH, Zhu XY, et al. Green synthesis of bifunctional fluorescent carbon dots from garlic for cellular imaging and free radical scavenging[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(31): 17054-17060. DOI:10.1021/acsami.5b03228.
- [18] Jia J, Lin B, Gao YF, et al. Highly luminescent N-doped carbon dots from black soya beans for free radical scavenging, Fe<sup>3+</sup> sensing and cellular imaging[J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2019, 211:363-372. DOI:10.1016/j.saa.2018.12.034.
- [19] Du FF, Shuang SM, Guo ZH, et al. Rapid synthesis of multifunctional carbon nanodots as effective antioxidants, antibacterial agents, and quercetin nanoprobables[J]. *Talanta*, 2020, 206:120243. DOI:10.1016/j.talanta.2019.120243.
- [20] Das B, Pal P, Dadhich P, et al. In vivo cell tracking, reactive oxygen species scavenging, and antioxidative gene down regulation by long-term exposure of biomass-derived carbon dots [J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2019, 5(1): 346-356. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.8b01101.
- [21] Gao J, Liu YF, Jiang B, et al. Phenylenediamine-based carbon nanodots alleviate acute kidney injury via preferential renal accumulation and antioxidant capacity[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(28): 31745-31756. DOI: 10.1021/acsami.0c05041.
- [22] Huang GJ, Lin YQ, Zhang LX, et al. Synthesis of sulfur-selenium doped carbon quantum dots for biological imaging and scavenging reactive oxygen species[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):19651. DOI:10.1038/s41598-019-55996-w.
- [23] Luo WQ, Wang YM, Lin F, et al. Selenium-doped carbon quantum dots efficiently ameliorate secondary spinal cord injury via scavenging reactive oxygen species[J]. *Int J Nanomedicine*, 2020, 15:10113-10125. DOI:10.2147/IJN.S282985.
- [24] Zhang MM, Zhao LL, Du FT, et al. Facile synthesis of cerium-doped carbon quantum dots as a highly efficient antioxidant for free radical scavenging[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(32):325101. DOI:10.1088/1361-6528/ab12ef.
- [25] Schneider LA, Korber A, Grabbe S, et al. Influence of pH on wound-healing: a new perspective for wound-therapy? [J]. *Arch Dermatol Res*, 2007, 298(9):413-420. DOI: 10.1007/s00403-006-0713-x.
- [26] Dargaville TR, Farrugia BL, Broadbent JA, et al. Sensors and imaging for wound healing: a review[J]. *Biosens Bioelectron*, 2013, 41:30-42. DOI:10.1016/j.bios.2012.09.029.
- [27] Gong XJ, Lu WJ, Liu Y, et al. Low temperature synthesis of phosphorous and nitrogen co-doped yellow fluorescent carbon dots for sensing and bioimaging[J]. *J Mater Chem B*, 2015, 3(33): 6813-6819. DOI:10.1039/c5tb00575b.
- [28] Yuan FL, Ding L, Li YC, et al. Multicolor fluorescent graphene quantum dots colorimetrically responsive to all-pH and a wide temperature range[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(27): 11727-11733. DOI: 10.1039/c5nr02007g.
- [29] Wang L, Li M, Li WT, et al. Rationally designed efficient dual-mode colorimetric/fluorescence sensor based on carbon dots for detection of pH and Cu<sup>2+</sup> ions[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng*, 2018, 6(10): 12668-12674. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b01625.
- [30] Yang P, Zhu ZQ, Zhang T, et al. Orange-emissive carbon quantum dots: toward application in wound pH monitoring based on colorimetric and fluorescent changing[J]. *Small*, 2019, 15(44): e1902823. DOI:10.1002/sml.201902823.
- [31] Zhang QC, Li ZQ, Zhang M, et al. Injectable in situ self-cross-linking hydrogels based on hemoglobin, carbon quantum dots, and sodium alginate for real-time detection of wound bacterial infection and efficient postoperative prevention of tumor recurrence[J]. *Langmuir*, 2020, 36(44): 13263-13273. DOI:10.1021/acs.langmuir.0c02219.

(收稿日期:2021-07-09)

## 《中华烧伤与创面修复杂志》第六届编辑委员会特约通讯员名单

按姓氏拼音排序

卞惠娟 陈 宾 陈 蕾 陈泽林 陈郑礼 褚志刚 邓 欢 丁华荣 丁玲涛 窦 懿  
 杜伟力 段伟强 樊桂成 樊 华 付妍婕 高欣欣 郭 菲 郭 峰 胡少华 黄广涛  
 黄晓琴 黄 勇 黄志锋 江 琼 江旭品 蒋南红 李海胜 李华涛 李 洁 李 科  
 李 娜 李伟人 李正勇 林佳佳 刘竣彰 刘名倬 刘 锐 刘腾飞 卢才教 罗锦花  
 罗鹏飞 苗盈盈 缪玉兰 彭 源 钱 卫 阮琼芳 舒 斌 宋 玫 苏琳琳 田 彭  
 王春华 王 峰 王洪瑾 王 坤 王亚荣 王燕妮 王 野 王玉振 王耘川 王志勇  
 温春泉 吴 英 肖 斌 肖海涛 谢春晖 薛 刚 杨 光 杨子晨 有传刚 张 琮  
 张 伟 章祥洲 赵筱卓 赵遵江 郑兴锋 朱美抒 朱志军