

# 激光联合氟化物治疗釉质脱矿的研究进展

陈毅莹 林秀娇 于皓

福建医科大学附属口腔医院修复科,福州 350002

通信作者:于皓,Email:haoyu-cn@hotmail.com



于皓

**【摘要】** 釉质脱矿常见于龋病、酸蚀症的早期阶段。目前,氟化物是治疗釉质脱矿最常用的药物,但其形成的氟化钙沉积物不耐磨,且在低pH环境中易溶解。近来,激光作为治疗釉质脱矿的新方法,已被证明其有效性。有学者认为联合应用激光与氟化物可进一步提高釉质抗脱矿能力,同时避免单纯激光或氟化物处理存在的问题,

产生更好的临床效果。本文重点阐述激光与氟化物联合应用以及激光使用方式对防治釉质脱矿效果的影响,并进一步展望激光与氟化物联合治疗的应用和研究前景。

**【关键词】** 激光; 氟化物; 联合应用; 釉质脱矿

**基金项目:** 国家自然科学基金(青年科学基金项目, 81200824);福建省科技计划(2019Y9030)

**引用著录格式:** 陈毅莹,林秀娇,于皓. 激光联合氟化物治疗釉质脱矿的研究进展[JOL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2022, 16(1):7-11.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2022.01.002

## Research progress of the effect of combined laser and fluoride application on treating enamel demineralization

Chen Yiyi, Lin Xiujiao, Yu Hao

Department of Prosthodontics, School and Hospital of Stomatology, Fujian Medical University, Fuzhou 350002, China

Corresponding author: Yu Hao, Email: haoyu-cn@hotmail.com

**【Abstract】** Enamel demineralization is common in the initial stage of caries and erosion. Fluoride is widely used in treating enamel demineralization. On the other hand, the deposits of calcium fluoride formed on the enamel has lower wear resistance and high dissolution rate in low-pH environment. Recently, laser has been demonstrated its effectiveness in inhibiting enamel demineralization. Furthermore, a preferable result might be achieved when laser is applied in combination with fluoride through improving the enamel resistance to demineralization, which could overcome the deficiencies of individual laser or fluoride application. This review focused on the effect of combined application of laser and fluoride on treating enamel demineralization and the usage of laser in resisting demineralization. Moreover, the application and research prospects of the combination of laser and fluoride were proposed.

eralization and the usage of laser in resisting demineralization. Moreover, the application and research prospects of the combination of laser and fluoride were proposed.

**【Key words】** Laser; Fluoride; Combined application; Enamel demineralization

**Fund programs:** National Natural Science Foundation of China(81200824); Science and Technology Planning Project of Fujian Province (2019Y9030)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2022.01.002

釉质脱矿是口腔酸性环境导致的牙釉质羟基磷灰石中钙、磷丢失的过程,常见于龋病和酸蚀症的早期阶段<sup>[1]</sup>。氟化物是治疗釉质脱矿最常用的药物,通过置换羟基使羟基磷灰石转变成氟磷灰石及在釉质表面形成氟化钙共同增强釉质抗脱矿能力,应用剂型包括含氟涂料、含氟凝胶、含氟泡沫等<sup>[2]</sup>。然而,氟化物的使用存在不足之处,如:应用氟化物后,一般要求患者30 min内禁止漱口及喝水、2~4 h内禁食,一定程度上影响患者的正常生活;此外,高剂量的氟化物摄入(每日摄氟量大于0.05 mg/kg)可能产生毒副作用(如氟牙症、氟骨症等)<sup>[3]</sup>;另一方面,氟化物不能完全抑制釉质脱矿,对咬合面脱矿的疗效较低<sup>[4-5]</sup>,因此寻找更佳的治疗釉质脱矿的方法一直是研究热点。近年来,激光治疗被证明可有效治疗釉质脱矿<sup>[6]</sup>,且与氟化物相比,其操作简便、操作过程中患者舒适度较好,治疗后无需患者配合禁食,更易被接受。亦有不少学者提出将氟化物与激光联合应用,二者在治疗釉质脱矿过程中可能产生协同作用,更有利于阻止相关疾病进展<sup>[7-9]</sup>。本文将重点阐述激光与氟化物联合应用,以及激光使用方式对防治釉质脱矿效果的影响,以期为临床防治釉质脱矿及合理使用激光提供理论依据和指导,并进一步展望激光与氟化物联合治疗的应用和研究前景。

### 一、激光的种类

用于治疗釉质脱矿的激光包括中红外激光和近红外激光。其中,中红外激光包括2.94 μm波长的

Er: YAG (erbium-doped yttrium aluminum garnet) 激光、2.78  $\mu\text{m}$  波长的 Er, Cr: YSGG (Erbium, chromium-doped yttrium, scandium, gallium and garnet) 激光和 9.3 ~ 10.6  $\mu\text{m}$  波长的  $\text{CO}_2$  (carbon dioxide) 激光; 近红外激光包括 1.06  $\mu\text{m}$  波长的 Nd: YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) 激光和 810 ~ 980 nm 波长的半导体 (diode) 激光<sup>[10]</sup>。

## 二、激光的使用

1. 激光的使用模式: 激光根据脉冲方式分为脉冲波模式 (pulsed-wave mode) 和连续波模式 (continuous-wave mode), 后者在治疗釉质脱矿中的使用较少<sup>[10]</sup>。脉冲波模式中, 每个脉冲时间包括脉冲宽度 (脉冲持续时间) 和脉冲间隙, 脉冲宽度允许激光能量在一定时间内输出, 而脉冲间隙则给予釉质一定的冷却时间。 $\text{CO}_2$  激光根据脉冲宽度又分为长脉冲模式 (脉冲宽度 > 10  $\mu\text{s}$ ) 和短脉冲模式 (脉冲宽度  $\leq 10 \mu\text{s}$ )<sup>[11]</sup>, 长脉冲模式由于在釉质表面积累更多能量, 易造成釉质表面裂纹, 而短脉冲模式有利于釉质表面热量快速消散, 不易损害釉质; 适当延长脉冲间隙亦可保证釉质表面热量散发, 减少损伤<sup>[12]</sup>。

2. 各类型激光参数的选择: Ramalho 等<sup>[13]</sup>总结了 Er: YAG 激光抑制釉质脱矿的参数, 指出采用 200 ~ 300 mJ、2 Hz 的参数组合时效果最佳。de Oliveira 等<sup>[14]</sup>比较了 Er, Cr: YSGG 激光不同功率和频率, 得出 0.5 W、30 Hz 的参数组合是抑制釉质脱矿的最佳参数。Esteves-Oliveira 等<sup>[15]</sup>对  $\text{CO}_2$  激光不同能量密度、脉冲宽度和照射时间进行对比, 得出使用参数为 226 Hz、3.2 W、5  $\mu\text{s}$ 、0.3 J/cm<sup>2</sup> 照射 9 s 时, 釉质抗酸防龋能力最强且产生表面裂纹最小。Chand 等<sup>[16]</sup>比较 Nd: YAG 激光不同参数组合发现, 采用参数为 0.6 W、60 mJ、14 J/cm<sup>2</sup> 时抑制釉质脱矿效果显著优于单纯氟化物。半导体 (diode) 激光的高功率 (15 和 16 Hz、5 和 7 W、30 ms、53 和 74 J/cm<sup>2</sup>) 和低功率 (连续波、30 mW、4.47 J/cm<sup>2</sup>) 模式均可有效抑制釉质脱矿<sup>[10]</sup>。上述激光中,  $\text{CO}_2$  激光被认为是最适合提高釉质耐酸性的激光类型<sup>[17]</sup>。

3. 激光探头的放置: 激光探头的放置可能影响激光发挥作用, 可分为接触模式 (contact mode) 和非接触模式 (non-contact mode)<sup>[10]</sup>。Nd: YAG 激光采用接触模式时容易损伤釉质表面, 使釉质表面产生裂纹<sup>[18]</sup>; 非接触模式中, 各类激光在研究中常规采用聚焦模式, 照射距离为 1 ~ 2 mm, Er: YAG 激光和  $\text{CO}_2$  激光也常采用散焦模式, 二者照射距离分别为 8 ~ 16 mm<sup>[13]</sup>

和 10 ~ 20 mm<sup>[6,12,19]</sup>。多数研究采用垂直激光照射, 但有研究指出垂直照射可能损伤激光探头, 为避免激光探头受反射射线的影响, 应将激光探头放置在与垂直方向形成 3° ~ 5° 的位置<sup>[20]</sup>。激光探头一般采用 1 ~ 2 mm/s 的速度来回“Z”型移动<sup>[12,21]</sup>, 照射时间一般根据光斑面积及治疗区域面积而定 (如: 当照射距离 10 mm, 光斑面积约 0.28 mm<sup>2</sup>, 治疗区域面积约 16 mm<sup>2</sup> 时, 建议照射时间 15 s), 保证激光能够均匀充分地照射釉质表面即可。

## 三、激光和氟化物联合应用防治釉质脱矿

尽管激光可产生与氟化物相似的防治牙釉质脱矿效果, 但仍易引起釉质表面损伤, 产生裂纹, 增加表面粗糙度<sup>[17,21]</sup>, 而与氟化物联合应用被认为可克服上述问题<sup>[7-9]</sup>。此外, 联合应用可减少釉质表面氟化钙小球沉积物在低 pH 环境中溶解、在牙刷刷磨作用下脱落等现象的发生, 具有更好的临床效果<sup>[9]</sup>。

1. 激光和氟化物联合应用防治釉质脱矿的原理: 根据现有激光和氟化物联合应用的相关研究, 激光与氟化物联合应用防治釉质脱矿的原理可能如下。

(1) 激光照射后氟化物吸收增加: 激光照射后在釉质结构中产生的微小孔隙有利于氟化物的沉积<sup>[22]</sup>, 或激光照射氟化物后加速氟化钙沉积<sup>[23]</sup>。

(2) 釉质表面形成氟化钙沉积物与激光照射后增加釉质晶体耐酸性二者效果的叠加: 激光照射可消除釉质中的碳酸盐杂质, 形成无碳羟基磷灰石使牙釉质酸溶性降低<sup>[24]</sup>。在酸侵蚀过程中, 酸离子首先会溶解氟化钙沉积层, 在釉质表面释放氟化物进一步形成氟羟基磷灰石, 氟羟基磷灰石和无碳羟基磷灰石的混合物, 可能使釉质具有更强的耐酸性<sup>[11]</sup>。

2. 激光和氟化物联合应用防治釉质脱矿的效果: 通常使用表面显微硬度 (surface microhardness)、表面丧失 (substance loss)、釉质表面钙离子溶出量、氟含量及扫描电镜 (SEM) 下的表面形貌变化等指标评估不同处理方式抑制釉质脱矿的有效性<sup>[10]</sup>。

(1) 表面显微硬度变化: 激光与氟化物联合应用可增加釉质表面显微硬度。Belcheva 等<sup>[12]</sup>将  $\text{CO}_2$  激光 (25 Hz、0.7 W、100  $\mu\text{s}$ 、5 J/cm<sup>2</sup>) 与酸化的磷酸氟化物 (acidulated phosphate fluoride, APF) 凝胶联合应用后, 牙釉质表面显微硬度比单纯使用 APF 凝胶处理时增加 28.3%; Jeng 等<sup>[25]</sup>联合应用  $\text{CO}_2$  激光和氟化钠后釉质耐磨性提高约 40%。激光与氟化物联合应用后形成的氟羟基磷灰石和无碳羟基磷灰石及氟化钙沉积物致密化可能会增加釉质表面显微硬度<sup>[11-12]</sup>。

(2)表面丧失变化:釉质表面丧失是釉质表面受损所致的,指牙釉质的表面丧失量,表面丧失减少意味着环境对釉质表面的破坏减少<sup>[1,5]</sup>。Ramalho等<sup>[11]</sup>采用原位试验的方法使用CO<sub>2</sub>激光(226 Hz、1 W、5 μs、0.3 J/cm<sup>2</sup>)与氟化钠凝胶[w(F<sup>-</sup>)=12 500×10<sup>-6</sup>]联合应用后,釉质表面丧失相较于单纯使用氟化钠凝胶处理减少3倍以上。Esteves-Oliveira等<sup>[9]</sup>将CO<sub>2</sub>激光(226 Hz、1 W、5 μs、0.3 J/cm<sup>2</sup>)与氟化钠溶液[w(F<sup>-</sup>)=500×10<sup>-6</sup>]联合应用后,几乎完全阻止了脱矿的进展,发生氟化钙沉积的釉质表面甚至超出原始的釉质平面。Esteves-Oliveira等<sup>[9]</sup>发现,经过3 d酸蚀循环后(使用pH为2.3的柠檬酸溶液浸泡牙釉质,每天6次,每次2 min)单纯氟化物组出现表面丧失,而激光与氟化物联合应用组在经过10 d的酸蚀循环后,表面仍无丧失。

(3)钙离子溶出量、氟含量变化:激光与氟化物联合应用可减少釉质表面的钙离子溶出量、增加釉质表面氟含量。Braga等<sup>[21]</sup>用Nd:YAG激光(10 Hz、1.0 W、100 μs、141.5 J/cm<sup>2</sup>)与APF凝胶联合处理牙釉质,其钙离子溶出量相较于单纯使用APF凝胶减少了20%。Moharam等<sup>[26]</sup>的研究中,联合应用组釉质表面氟含量是氟化物组的3倍。单纯使用氟化物时需在釉质表面停留2~6 h才能产生最佳效果,而激光与氟化物联合应用,可在激光照射后瞬间形成氟磷灰石,且联合应用可显著增加氟离子的摄取<sup>[27]</sup>。

(4)SEM下的表面形貌变化:经多次酸蚀循环后,激光和氟化物联合应用组氟化钙沉积物较单纯氟化物组多<sup>[6-7,9]</sup>,且联合应用组釉质表面未见典型酸蚀后蜂窝结构,呈现毛玻璃样结构<sup>[21]</sup>。激光高能量密度和长脉冲会导致釉质表面产生细小裂纹,且早期脱矿的釉质表面软化,与健康牙体组织相比,产生裂纹的可能性更高,而联合应用可减少釉质表面裂纹,使釉质表面更加光滑、均匀<sup>[28-29]</sup>。

(5)临床研究结论:江小川<sup>[30]</sup>采用Nd:YAG激光与多乐氟联合应用观察其临床疗效,2年后联合应用组龋病发病率为1.65%,显著低于多乐氟组和Nd:YAG激光组的4.39%和5.49%。Zezell等<sup>[31]</sup>探究Nd:YAG激光与APF联合应用的临床效果,观察1年后,联合应用组的龋病发病率下降39.2%。而Brandão等<sup>[32]</sup>采用CO<sub>2</sub>激光与APF联合应用18个月未发现二者的协同作用,但联合应用与单纯CO<sub>2</sub>激光应用均可有效预防龋病发生。

总之,激光与氟化物联合应用有利于增加釉质

表面显微硬度,抵抗酸性环境对釉质表面的侵蚀作用,降低钙离子溶出量,增加氟化物在釉质表面的沉积量,且可减少釉质表面裂纹产生,临床上取得良好疗效。尽管有研究认为激光与氟化物联合应用并无协同作用<sup>[32-33]</sup>,大部分文献仍支持二者联合应用可显著提高釉质的抗脱矿能力<sup>[7,11,16,34]</sup>,推测可能是激光类型、参数的选择及实验设计不同所致。

3.激光与氟化物联合应用的使用顺序对抑制釉质脱矿的影响:对于激光与氟化物联合时的使用顺序是否影响其抑制釉质脱矿的效果仍有争议。Zancopé等<sup>[35]</sup>比较先使用氟化物再进行激光照射、先进行激光照射再使用氟化物及二者同时使用等3种情况,发现抑制釉质脱矿能力并无显著差别。Rafiei等<sup>[17]</sup>的研究显示,先使用氟化物再使用激光时,表层的表面显微硬度低于先使用激光再使用氟化物,认为氟化物可能阻碍激光发挥热效应,影响二者协同作用。Mahmoudzadeh等<sup>[29]</sup>先使用氟化物再使用激光后观察到釉质表面比激光组更光滑、均匀;而先使用激光再使用氟化物,釉质表面裂纹并未减少。Braga等<sup>[21]</sup>的研究中,先使用氟化物再使用激光后,钙离子溶出量、釉质表面粗糙程度均低于先使用激光再使用氟化物。先使用氟化物再使用激光时可使氟化物形成速度加快、氟化钙沉积物更具抗酸耐磨性、釉质表面裂纹形成减少,但氟化物沉积可能阻碍激光发挥其抑制脱矿的作用,先使用激光再使用氟化物则可避免氟化物沉积阻碍激光发挥作用。

#### 四、总结与展望

目前,临床上单纯使用氟化物治疗釉质脱矿无法达到较佳效果,而使用激光具有操作简便、患者感觉舒适等优势。因此,激光与氟化物联合用于治疗釉质脱矿成为研究热点。本课题组认为,激光与氟化物联合应用可更有效控制釉质脱矿,促进氟化物吸收并使釉质具有更持久的抗酸性和更强的耐磨性,但激光的种类和使用方式、氟化物类型及二者联合应用时的使用顺序均可能影响其效果。

学者们通过采用不同类型及参数的激光与不同类型氟化物联合应用治疗釉质脱矿,旨在探索出更加合理的激光和氟化物组合及使用顺序。CO<sub>2</sub>激光是较受欢迎的激光,目前推荐选取能使釉质表面产生亚烧蚀的参数,以减少对釉质表面损伤。然而,激光与氟化物联合应用还存在许多问题值得进一步探索,笔者认为主要有以下几个方面:

1.对激光与氟化物联合应用顺序的探索:基于

目前研究结果,笔者建议临床上联合应用激光与氟化物时应视具体情况采用合适的使用顺序:若选择易在牙面产生裂纹的激光类型和参数时,建议采用先使用氟化物再使用激光的治疗顺序;若选择不易在牙面产生裂纹的激光类型和参数时,可采用先使用激光再使用氟化物的治疗顺序。另外,笔者认为还可尝试先用激光预处理牙釉质,再涂布氟化物,而后再次激光照射的治疗方案。该方案可能有利于激光加速氟化钙沉积物的形成,同时避免氟化物阻碍激光作用于釉质表面。但目前尚缺乏比较激光与氟化物不同使用顺序疗效差异的临床研究,笔者认为,通过临床研究筛选出特定的激光及氟化物联合应用的治疗方案具有重要意义。

2. 氟化物的类型可能影响联合应用的效果:有学者提出激光与中性氟化物(如氟化钠)的协同作用可能优于酸性氟化物(如APF)<sup>[36]</sup>。笔者认为,激光与不同类型氟化物联合应用的疗效差异值得深入探索。此外,激光与氟化物联合应用可能在细菌导致的釉质脱矿治疗中发挥更大优势。激光具有抑制细菌活性、破坏菌斑生物膜结构等特点<sup>[19,37]</sup>,可通过抑制细菌协同治疗釉质脱矿,在治疗细菌导致的釉质脱矿中激光与氟化物联合应用发挥的作用也值得深入探讨。总之,通过临床研究等方法制定出基于临床证据的治疗方案是将其运用于临床的前提。

随着激光治疗仪的普及,激光在临床上的应用越发广泛,除了氟化物,激光与酪蛋白磷酸肽-无定形磷酸钙联合应用也可显著提高脱矿釉质的显微硬度<sup>[38]</sup>。因此,口腔科医生应时刻关注激光在口腔领域的应用,掌握新的诊疗方案并充分发挥其作用。然而,激光使用成本较高,应选择合适的病例进行联合治疗,如:任何原因导致的不能(或需要较长时间)控制釉质脱矿的患者(贪食症、食欲减退或唾液流速低的患者,牙列过度拥挤进行邻面去釉治疗的患者等)。随着儿童正畸人群的增加,釉质脱矿的患病率显著增高,单纯应用氟化物易造成儿童患者恶心、不适等症状。理论上激光与氟化物联合应用可减少氟化物的使用剂量及就诊次数,这对提高儿童患者治疗过程的舒适性及配合度具有重要意义,但仍需要通过临床研究进一步探索。未来,在严格的适应证选择下,制定更加舒适、简便、有效的釉质脱矿治疗方案是该领域的研究方向。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- [1] Abou Neel EA, Aljabo A, Strange A, et al. Demineralization-remineralization dynamics in teeth and bone [J]. *Int J Nanomedicine*, 2016, 11:4743-4763. DOI:10.2147/IJN.S107624.
- [2] 应淑女,刘丽. 牙釉质再矿化材料的研究进展[J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2011, 5(1):94-99. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2011.01.016.
- [3] 杨凯,张绍伟,叶小明. 大鼠氟斑牙(含氟牙膏型)动物模型的建立及实验检测[J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2017, 11(4):204-210. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2017.04.003.
- [4] Azarsina M, Panahandeh N, Gholipour T, et al. The effect of titanium tetrafluoride treatment and the CO<sub>2</sub> laser on acid resistance of human enamel[J]. *J Lasers Med Sci*, 2019, 10(3):207-210. DOI:10.15171/jlms.2019.33.
- [5] Barber LR, Wilkins EM. Evidence-based prevention, management, and monitoring of dental caries[J]. *J Dent Hyg*, 2002, 76(4):270-275.
- [6] Paulos RS, Seino PY, Fukushima KA, et al. Effect of Nd:YAG and CO<sub>2</sub> laser irradiation on prevention of enamel demineralization in orthodontics: *In vitro* study[J]. *Photomed Laser Surg*, 2017, 35(5):282-286. DOI:10.1089/pho.2016.4235.
- [7] Serdar-Eymirli P, Turgut MD, Dolgun A, et al. The effect of Er, Cr:YSGG laser, fluoride, and CPP-ACP on caries resistance of primary enamel[J]. *Lasers Med Sci*, 2019, 34(5):881-891. DOI:10.1007/s10103-018-2667-6.
- [8] Pereira L, Joao-Souza SH, Bezerra S, et al. Nd:YAG laser irradiation associated with fluoridated gels containing photo absorbers in the prevention of enamel erosion[J]. *Lasers Med Sci*, 2017, 32(7):1453-1459. DOI:10.1007/s10103-017-2226-6.
- [9] Esteves-Oliveira M, Witulski N, Hilgers RD, et al. Combined tin-containing fluoride solution and CO<sub>2</sub> laser treatment reduces enamel erosion *in vitro* [J]. *Caries Res*, 2015, 49(6):565-574. DOI:10.1159/000439316.
- [10] Al-Maliky MA, Frentzen M, Meister J. Laser-assisted prevention of enamel caries: A 10-year review of the literature[J]. *Lasers Med Sci*, 2020, 35(1):13-30. DOI:10.1007/s10103-019-02859-5.
- [11] Ramalho KM, Eduardo CP, Heussen N, et al. Randomized in situ study on the efficacy of CO<sub>2</sub> laser irradiation in increasing enamel erosion resistance[J]. *Clin Oral Investig*, 2019, 23(5):2103-2112. DOI:10.1007/s00784-018-2648-y.
- [12] Belcheva A, El Feghali R, Nihtianova T, et al. Effect of the carbon dioxide 10,600 nm laser and topical fluoride gel application on enamel microstructure and microhardness after acid challenge: An *in vitro* study[J]. *Lasers Med Sci*, 2018, 33(5):1009-1017. DOI:10.1007/s10103-018-2446-4.
- [13] Ramalho KM, Hsu CYS, de Freitas PM, et al. Erbium lasers for the prevention of enamel and dentin demineralization: A literature review[J]. *Photomed Laser Surg*, 2015, 33(6):301-319. DOI:10.1089/pho.2014.3874.
- [14] de Oliveira RM, de Souza VM, Esteves CM, et al. Er, Cr:YSGG

- laser energy delivery: Pulse and power effects on enamel surface and erosive resistance[J]. *Photomed Laser Surg*, 2017, 35(11): 639-646. DOI:10.1089/pho.2017.4347.
- [15] Esteves -Oliveira M, Zezell DM, Meister J, et al. CO<sub>2</sub> laser (10.6 μm) parameters for caries prevention in dental enamel[J]. *Caries Res*, 2009, 43(4):261-268. DOI:10.1159/000217858.
- [16] Chand BR, Kulkarni S, Mishra P. Inhibition of enamel demineralisation using “Nd - YAG and diode laser assisted fluoride therapy”[J]. *Eur Arch Paediatr Dent*, 2016, 17(1):59-64. DOI:10.1007/s40368-015-0206-8.
- [17] Rafiei E, Fadaei Tehrani P, Yassaei S, et al. Effect of CO<sub>2</sub> laser (10.6 μm) and Remin Pro on microhardness of enamel white spot lesions[J]. *Lasers Med Sci*, 2020, 35(5): 1193-1203. DOI: 10.1007/s10103-020-02970-y.
- [18] de Moraes MCD, Freitas AZ, Aranha ACC. Progression of erosive lesions after Nd: YAG laser and fluoride using optical coherence tomography[J]. *Lasers Med Sci*, 2017, 32(1): 1-8. DOI:10.1007/s10103-016-2075-8.
- [19] Esteves -Oliveira M, El-Sayed KF, Dörfer C, et al. Impact of combined CO<sub>2</sub> laser irradiation and fluoride on enamel and dentin biofilm - induced mineral loss [J]. *Clin Oral Investig*, 2017, 21(4):1243-1250. DOI:10.1007/s00784-016-1893-1.
- [20] Bağlar S. Sub-ablative Er, Cr: YSGG laser irradiation under all-ceramic restorations: Effects on demineralization and shear bond strength[J]. *Lasers Med Sci*, 2018, 33(1):41-49. DOI:10.1007/s10103-017-2326-3.
- [21] Braga SRM, de Oliveira E, Sobral MAP. Effect of neodymium: yttrium-aluminum-garnet laser and fluoride on the acid demineralization of enamel[J]. *J Investig Clin Dent*, 2017, 8(1):1-6. DOI: 10.1111/jicd.12185.
- [22] El Assal DW, Saafan AM, Moustafa DH, et al. The effect of combining laser and nanohydroxy-apatite on the surface properties of enamel with initial defects[J]. *J Clin Exp Dent*, 2018, 10(5): e425-e430. DOI:10.4317/jced.54371.
- [23] Delbem ACB, Cury JA, Nakassima CK, et al. Effect of Er: YAG laser on CaF<sub>2</sub> formation and its anti-cariogenic action on human enamel: An *in vitro* study[J]. *J Clin Laser Med Surg*, 2003, 21(4):197-201. DOI:10.1089/104454703768247765.
- [24] Zuerlein MJ, Fried D, Featherstone JDB. Modeling the modification depth of carbon dioxide laser-treated dental enamel [J]. *Lasers Surg Med*, 1999, 25(4): 335 - 347. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9101(1999)25:4<335::AID-LSM8>3.0.CO;2-F.
- [25] Jeng YR, Lin TT, Huang JS, et al. Topical laser application enhances enamel fluoride uptake and tribological properties[J]. *J Dent Res*, 2013, 92(7): 655-660. DOI: 10.1177/0022034513488392.
- [26] Moharam LM, Sadony DM, Nagi SM. Evaluation of diode laser application on chemical analysis and surface microhardness of white spots enamel lesions with two remineralizing agents [J]. *J Clin Exp Dent*, 2020, 12(3):271-276. DOI:10.4317/jced.56490.
- [27] Takate V, Kakade A, Bheda P, et al. Assessment of inhibition of mineral loss from human tooth enamel by carbon dioxide laser and 1.23% acidulated phosphate fluoride [J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2019, 9(1): 47 - 54. DOI: 10.4103/jispcd. JISPCD\_333\_18.
- [28] Ahrari F, Mohammadipour HS, Hajimomenian L, et al. The effect of diode laser irradiation associated with photoabsorbing agents containing remineralizing materials on microhardness, morphology and chemical structure of early enamel caries [J]. *J Clin Exp Dent*, 2018, 10(10): e955 - e962. DOI: 10.4317/jced. 55059.
- [29] Mahmoudzadeh M, Rezaei-Soufi L, Farhadian N, et al. Effect of CO<sub>2</sub> laser and fluoride varnish application on microhardness of enamel surface around orthodontic brackets [J]. *J Lasers Med Sci*, 2018, 9(1):43-49. DOI:10.15171/jlms.2018.10.
- [30] 江小川. Nd:YAG激光联合氟化物涂膜防龋的临床疗效[J]. *新疆医学*, 2017, 47(3): 319-320+328. DOI: CNKI: SUN: XJYI. 0.2017-03-029.
- [31] Zezell DM, Boari HGD, Ana PA, et al. Nd: YAG laser in caries prevention: A clinical trial [J]. *Lasers Surg Med*, 2009, 41(1): 31-35. DOI:10.1002/lsm.20738.
- [32] Brandão CB, Corona SAM, Torres CP, et al. Efficacy of CO lasers in preventing dental caries in partially erupted first permanent molars: A randomized 18 - month clinical trial [J]. *Lasers Med Sci*, 2020, 35(5):1185-1191. DOI:10.1007/s10103-020-02967-7.
- [33] Molaasadollah F, Asnaashari M, Abbas FM, et al. *In vitro* comparison of fluoride gel alone and in combination with Er, Cr: YSGG laser on reducing white spot lesions in primary teeth [J]. *J Lasers Med Sci*, 2017, 8(4): 160 - 165. DOI: 10.15171/jlms. 2017.29.
- [34] Poosti M, Ahrari F, Moosavi H, et al. The effect of fractional CO<sub>2</sub> laser irradiation on remineralization of enamel white spot lesions [J]. *Lasers Med Sci*, 2014, 29(4): 1349 - 1355. DOI: 10.1007/s10103-013-1290-9.
- [35] Zancopé BR, Rodrigues LP, Parisotto TM, et al. CO<sub>2</sub> laser irradiation enhances CaF<sub>2</sub> formation and inhibits lesion progression on demineralized dental enamel: *In vitro* study [J]. *Lasers Med Sci*, 2016, 31(3): 539-547. DOI: 10.1007/s10103-016-1900-4.
- [36] Luk K, Niu JY, Gutknecht N, et al. Preventing enamel caries using carbon dioxide laser and silver diamine fluoride [J]. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*, 2021, 39(4): 297 - 302. DOI:10.1089/photob.2020.4894.
- [37] Luk K, Zhao IS, Yu OY, et al. Effects of 10, 600 nm carbon dioxide laser on remineralizing caries: A literature review [J]. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*, 2020, 38(2): 59-65. DOI: 10.1089/photob.2019.4690.
- [38] Khamverdi Z, Kordestani M, Panahandeh N, et al. Influence of CO<sub>2</sub> laser irradiation and CPP-ACP paste application on demineralized enamel microhardness[J]. *J Lasers Med Sci*, 2018, 9(2): 144-148. DOI:10.15171/jlms.2018.27.

(收稿日期:2021-10-27)

(本文编辑:王嫚)