

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.23.028

## 基于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案对美白效果及釉质保护指标的影响

吴月凡

(浙江大学医学院附属口腔医院放射科·浙江大学口腔医学院·浙江省口腔疾病临床医学研究中心·全省口腔生物医学重点实验室, 浙江 杭州 310000)

**[摘要]**目的 分析基于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案对美白效果及釉质保护指标的影响。方法 选取2024年3月-2025年1月浙江大学医学院附属口腔医院口腔科收治的60例需行牙齿美白治疗的患者为研究对象,采用随机数字表法分为对照组( $n=30$ )、观察组( $n=30$ )。对照组采用传统标准化美白方案,观察组采用基于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案,比较两组美白效果、釉质保护指标、牙齿敏感情况、不良反应发生情况。结果 观察组治疗后着色改善率、 $L^*$ 值、 $\Delta E$ 值均优于对照组( $P<0.05$ );观察组牙釉质厚度变化量、釉质脱矿率均低于对照组( $P<0.05$ );观察组治疗后VAS评分、敏感发生率均低于对照组( $P<0.05$ );两组不良反应发生率比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。结论 基于放射影像量化的个性化牙齿美白方案能够确保美白效果,减少釉质损伤,降低牙齿敏感发生率。

**[关键词]** 放射影像量化分析;显微CT;牙齿美白;釉质保护

**[中图分类号]** R781

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1004-4949(2025)23-0111-04

## Effect of Personalized Tooth Whitening-enamel Protection Protocol Based on Radiographic Image Quantification on Whitening Efficacy and Enamel Protection Indicators

WU Yuefan

(Department of Radiology, Stomatological Hospital of Zhejiang University School of Medicine•Zhejiang University School of Stomatology•Zhejiang Clinical Medical Research Center of Oral Diseases•Zhejiang Key Laboratory of Oral Biomedical Research, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

**[Abstract]****Objective** To analyze the effect of personalized tooth whitening-enamel protection protocol based on radiographic image quantification on whitening efficacy and enamel protection indicators. **Methods** A total of 60 patients requiring tooth whitening treatment admitted to the Department of Stomatology, Stomatological Hospital of Zhejiang University School of Medicine from March 2024 to January 2025 were selected as the research subjects, and they were divided into the control group ( $n=30$ ) and the observation group ( $n=30$ ) by the random number table method. The control group received the traditional standardized whitening protocol, and the observation group received the personalized tooth whitening-enamel protection protocol based on radiographic image quantification. The whitening efficacy, enamel protection indicators, tooth sensitivity and adverse reactions were compared between the two groups. **Results** After treatment, the discoloration improvement rate,  $L^*$  value and  $\Delta E$  value of the observation group were better than those of the control group ( $P<0.05$ ). The change in enamel thickness and enamel demineralization rate of the observation group were lower than those of the control group ( $P<0.05$ ). The VAS score and sensitivity incidence rate of the observation group after treatment were lower than those of the control group ( $P<0.05$ ). There was no statistically significant difference in the incidence of complications between the two groups ( $P>0.05$ ). **Conclusion** The personalized tooth whitening-enamel protection protocol based on radiographic image quantification can ensure whitening efficacy, reduce enamel damage, and decrease the incidence of tooth sensitivity.

**[Key words]** Radiographic image quantification; Micro-CT; Tooth whitening; Enamel protection

第一作者: 吴月凡(1993.3-), 男, 安徽铜陵人, 本科, 技师, 主要从事口腔放射方向的工作

牙齿美白 (tooth whitening) 作为改善牙齿着色, 维护牙齿美学的核心手段, 已成为临床需求增长最快的口腔诊疗项目之一<sup>[1]</sup>。目前临床主流美白方案以过氧化氢、过氧化脲等氧化剂为核心, 通过氧化分解牙本质小管内色素实现美白效果, 但传统标准化美白方案存在显著局限性<sup>[2]</sup>。现有研究多聚焦于美白剂成分改良, 虽能在一定程度上缓解釉质损伤, 但未从“个体化评估”角度解决根本问题, 缺乏对患者牙齿解剖结构的量化分析, 导致方案调整仍依赖临床经验, 且缺乏精准性<sup>[3]</sup>。显微CT作为高分辨率放射影像技术, 可实现牙齿三维结构的无创量化: 其空间分辨率达10~20  $\mu\text{m}$ , 能精准测量牙釉质厚度、计数牙本质小管开放数量, 为个体化方案制定提供客观解剖学依据<sup>[4, 5]</sup>。基于此, 本研究创新性地将显微CT影像量化分析与美白方案设计相结合, 构建“釉质厚度-小管开放数量→美白剂浓度-作用时间”的关联模型, 定制个性化治疗方案, 旨在分析基于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案对美白效果及釉质保护指标的影响, 现报道如下。

## 1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2024年3月-2025年1月浙江大学医学院附属口腔医院口腔科收治的60例需行牙齿美白治疗的患者为研究对象, 采用随机数字表法分为对照组 ( $n=30$ ) 与观察组 ( $n=30$ )。对照组男14例, 女16例; 年龄22~58岁, 平均年龄 ( $38.51 \pm 8.21$ ) 岁; 着色类型: 外源性着色18例 (烟渍8例、茶渍10例), 内源性轻度四环素牙12例; 着色程度 (Vitapan比色板): 1级 (轻度) 12例, 2级 (中度) 15例, 3级 (重度) 3例; 牙釉质厚度0.80~2.00 mm, 平均牙釉质厚度 ( $1.21 \pm 0.33$ ) mm; 牙本质小管开放数量10~20个, 平均牙本质小管开放数量 ( $15.21 \pm 4.35$ ) 个。观察组男13例, 女17例; 年龄21~59岁, 平均年龄 ( $39.24 \pm 7.83$ ) 岁; 着色类型: 外源性着色17例 (烟渍7例、茶渍10例), 内源性轻度四环素牙13例; 着色程度: 1级13例, 2级14例, 3级3例; 牙釉质厚度0.81~2.50 mm, 平均牙釉质厚度 ( $1.11 \pm 0.22$ ) mm; 牙本质小管开放数量8~20个, 平均牙本质小管开放数量 ( $14.82 \pm 4.51$ ) 个。两组性别、年龄、着色类型、着色程度、牙釉质厚度、牙本质小管开放数量比较, 差异无统计学意

义 ( $P>0.05$ ), 有可比性。所有患者及家属均知情同意, 且自愿参与并签署知情同意书。

1.2 纳入与排除标准 纳入标准: ①年龄18~60岁, 因牙齿着色需行美白治疗; ②口腔卫生良好; ③未接受过既往牙齿美白治疗, 近3个月内无牙体修复史; ④能配合完成显微CT检查及4周治疗随访。排除标准: ①牙釉质发育异常、牙本质暴露; ②存在牙髓病变或既往根管治疗史; ③处于妊娠、哺乳期女性; ④对过氧化氢过敏者; ⑤存在严重系统性疾病影响口腔黏膜及牙齿矿化者; ⑥无法配合保持口腔清洁的患者。

## 1.3 方法

1.3.1 对照组 采用传统标准化美白方案: ①隔湿: 用棉卷、吸唾器隔离目标牙, 涂抹牙龈保护剂 (美国3M ESPE公司, 国械注进20163141995, 型号: Clinpro™ XT Varnish) 保护牙龈黏膜; ②美白剂涂抹: 将35%过氧苯甲酰凝胶 (美国Ultradent公司, 国械注进20183142365, 型号: Opalescence Boost) 均匀涂抹于牙面 (厚度0.5 mm), 使用LED冷光仪 (美国Dentsply Sirona公司, 国械注进20173141356, 型号: Beyond® Polus) 进行光照, 波长为460~480 nm, 激活20 min; ③治疗频率: 2次/周, 共治疗4周, 共治疗8次。

1.3.2 观察组 采用基于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案: 显微CT影像采集与量化分析: 两组均于治疗前、治疗4周后进行: ①扫描范围: 选取患者上颌右侧第一磨牙、下颌左侧第一磨牙 (无龋坏、无充填体) 作为目标牙, 因该部位牙齿解剖结构典型, 且为美白治疗的主要评估牙位; ②参数测量: 由2名高年资口腔放射科医师 (工作年限 $\geq 8$ 年) 采用ImageJ软件独立分析影像: 牙釉质厚度: 测量牙合面中点、颊面中点、舌面中点3个位点, 取平均值; 牙本质小管开放数量: 在牙本质浅层 (距釉牙本质界50  $\mu\text{m}$ 处) 选取3个1 mm<sup>2</sup>区域, 计数开放小管数量, 取平均值。治疗方案: ①个性化参数制定: 根据术前显微CT量化结果, 采用以下标准调整美白剂浓度与作用时间: 低风险组 (牙釉质厚度 $\geq 1$  mm或牙本质小管开放数量 $\leq 20$ 个/mm<sup>2</sup>): 使用30%过氧苯甲酰凝胶, 作用时间22 min; 中风险组 (牙釉质厚度0.8~1 mm或牙本质小管开放数量21~30个/mm<sup>2</sup>): 使用25%过氧苯甲酰凝胶, 作用时间18 min; 高风险组 (牙釉质厚度 $< 0.8$  mm或牙本质小管开放数量 $> 30$ 个/mm<sup>2</sup>): 使用15%过

氧苯甲酰凝胶，作用时间10 min；观察组中低风险组12例、中风险组15例、高风险组3例；②治疗操作：隔湿、光照激活、术后护理及治疗频率均同对照组保持一致（2次/周，共治疗4周）。

#### 1.4 观察指标

1.4.1评估两组美白效果 采用Vitapan比色板评估着色程度改善率（改善 $\geq 1$ 级为有效）；采用分光光度计测量CIELAB色彩空间参数：L\*值（亮度，数值越高越亮白）、 $\Delta E$ 值（治疗前后色差， $\Delta E > 3.3$ 为肉眼可察觉的美白效果）。

1.4.2评估两组釉质保护指标 采用牙釉质厚度变化量及釉质脱矿率进行评估。牙釉质厚度变化量=（治疗4周后牙釉质厚度-治疗前牙釉质厚度）/治疗前牙釉质厚度 $\times 100\%$ 。

1.4.3评估两组牙齿敏感情况 于治疗期间每周采用VAS评分（0分无敏感，10分剧烈敏感）进行评估，记录平均评分及敏感发生率（VAS $\geq 2$ 分为

敏感）。

1.4.4记录两组不良反应发生情况 记录治疗期间牙龈刺激、牙面划伤、轻微牙龈发红等不良反应。

1.5 统计学方法 采用SPSS 26.0统计学软件进行数据分析，计数资料以 $[n(\%)]$ 表示，行 $\chi^2$ 检验；计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示，行 $t$ 检验；等级数据采用秩和检验法； $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 两组美白效果比较 观察组治疗后着色改善率、L\*值、 $\Delta E$ 值均优于对照组（ $P < 0.05$ ），见表1。

2.2 两组釉质保护指标比较 观察组牙釉质厚度变化量、釉质脱矿率均低于对照组（ $P < 0.05$ ），见表2。

2.3 两组牙齿敏感情况比较 观察组治疗后VAS评分、敏感发生率均低于对照组（ $P < 0.05$ ），见表3。

表1 两组美白效果比较 $[n(\%), \bar{x} \pm s]$

组别	<i>n</i>	着色改善率	L* 值		$\Delta E$ 值
			治疗前	治疗4周后	
对照组	30	26 (86.67)	72.52 $\pm$ 3.14	81.81 $\pm$ 3.28*	8.22 $\pm$ 1.14
观察组	30	27 (90.00)	73.11 $\pm$ 2.85	83.23 $\pm$ 3.56*	8.51 $\pm$ 1.25
统计值		$\chi^2=52.308$	$t=12.857$	$t=14.215$	$t=39.370$
<i>P</i>		0.000	0.000	0.000	0.000

注：与同组治疗前比较，\* $P < 0.05$ 。

表2 两组釉质保护指标比较 $[\bar{x} \pm s, n(\%)]$

组别	<i>n</i>	牙釉质厚度 (mm)		牙釉质厚度变化量 (mm)	釉质脱矿率
		治疗前	治疗4周后		
对照组	30	1.20 $\pm$ 0.30	1.05 $\pm$ 0.30*	-0.15 $\pm$ 0.04	7 (23.33)
观察组	30	1.10 $\pm$ 0.20	1.02 $\pm$ 0.20*	-0.08 $\pm$ 0.03	1 (3.33)
统计值		$t=1.633$	$t=0.568$	$t=8.000$	$\chi^2=5.192$
<i>P</i>		0.821	0.000	0.000	0.000

注：与同组治疗前比较，\* $P < 0.05$ 。

表3 两组牙齿敏感情况比较 $[\bar{x} \pm s, n(\%)]$

组别	<i>n</i>	VAS 评分 (分)	敏感发生率
对照组	30	3.81 $\pm$ 1.12	11 (36.67)
观察组	30	1.22 $\pm$ 0.54	2 (6.67)
统计值		$t=12.058$	$\chi^2=8.538$
<i>P</i>		0.000	0.003

2.4 两组不良反应发生情况比较 两组均未出现牙龈刺激、牙面划伤等严重不良反应；对照组出现轻微牙龈发红1例（治疗后24 h自行缓解），不良反应发生率为3.33%（1/30）。两组不良反应发生率比较，差异无统计学意义（ $\chi^2=1.017$ ， $P=0.313$ ）。



### 3 讨论

牙齿着色不仅影响口腔美学,还可能导致患者社交自信下降<sup>[6]</sup>。目前临床应用的漂白方案以过氧化氢类氧化剂为主,传统牙齿漂白方案的核心矛盾在于效能与安全的失衡:为追求理想漂白效果,临床常采用高浓度过氧化氢(35%),但该浓度会通过两种机制损伤釉质<sup>[7]</sup>。放射影像量化分析(显微CT)的创新价值在于解剖量化可视化、风险分层个体化,既避免过度治疗导致的损伤,又防止治疗不足导致的影响。

本研究结果显示,观察组治疗后着色改善率、L\*值、ΔE值均优于对照组( $P<0.05$ )。其机制在于:低风险组采用30%过氧化氢,22 min作用时间能够确保氧化剂充分渗透;中高风险组虽降低浓度,但通过优化光照激活时间、术后含氟护理,弥补了浓度降低的效能损失,提高了美白效果<sup>[8]</sup>。观察组牙釉质厚度变化量、釉质脱矿率均低于对照组( $P<0.05$ )。其核心原因是:高风险组采用15%过氧化氢,浓度降低60%,能够减少对羟基磷灰石晶体的溶解作用,作用时间缩短了10~18 min,减少了氧化剂与釉质的接触时间,从而降低脱矿风险<sup>[9]</sup>;同时动态调整机制,能够避免持续损伤;而对照组固定为35%浓度,即使含氟成分也无法完全抵消高浓度氧化剂的长期损伤,故脱矿率达23.33%<sup>[10]</sup>。观察组敏感发生率(6.67%)低于对照组(36.67%),且治疗后VAS评分低于对照组( $P<0.05$ )。关键在于放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案与牙齿解剖结构的适配:牙本质小管开放数量多的患者采用低浓度,减少了氧化剂的渗透量,降低了牙髓神经刺激;釉质薄的患者缩短作用时间,能够避免氧化剂快速穿透至牙本质浅层<sup>[11, 12]</sup>。两组不良反应发生率比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),这提示两种方案均具有较好的安全性,但放射影像量化的牙齿美白-釉质保护个性化方案的安全性更优<sup>[13]</sup>。观察组无不良反应发生,主要得益于浓度梯度调整降低了化学刺激,15%~30%的过氧化氢浓度范围较传统35%浓度更温和,减少了对牙龈、牙体组织的刺激;个性化方案基于解剖量化指标制定,避免了因个体差异导致的局部药物蓄积,降低了黏膜刺激风险<sup>[14, 15]</sup>。

综上所述,基于放射影像量化分析(显微CT)的牙齿美白-釉质保护个性化方案,通过精准测量牙釉质厚度、牙本质小管开放数量,实现

美白剂浓度与作用时间的分层调整,可在保证美白效果的同时,有效减少釉质脱矿与牙齿敏感,实现“低刺激-高效能”的治疗目标。

### [参考文献]

- [1]张冰洁,伍丹妮,苏柏华.冷光美白联合渗透树脂治疗氟牙症患者着色效果的观察[J].口腔疾病防治,2018,26(9):564-568
- [2]刘冰,陈菲,戚戈,等.不同酸碱度、含氟情况和过氧化脲含量的美白剂对牙齿硬度和漂白功效的影响[J].中国医药导报,2025,22(17):152-156.
- [3]何静妮.冷光美白处理在牙齿美白中的效果[J].医学美容,2024,33(10):12-15.
- [4]韩静,丁宇堃,范晶,等.2.9%过氧化氢牙贴临床美白效果及安全性评价[J].中国病案,2023,24(10):110-112.
- [5]彭宇,李梦园,陈霞.Beyond冷光美白技术联合渗透树脂在氟斑牙前牙美学修复中的应用[J].中国美容医学,2023,32(9):140-144.
- [6]于阳阳,刘荣,夏霏,等.运用HSB模型评价冷光美白对氟斑牙色相、饱和度及亮度的影响及相关性研究[J].中国美容医学,2023,32(8):151-155.
- [7]宋陈元,周琴,徐玲.上海地区口腔住院医师规培学员对牙齿冷光美白治疗的认知及应用情况调查[J].口腔颌面修复学杂志,2024,25(1):45-50.
- [8]乔翰,吴孟轩,刘子航,等.口腔护理产品美白功效测试实验室方法进展[J].日用化学工业(中英文),2024,54(10):1260-1267.
- [9]蒋汶静,郭慧芳.冷光美白联合渗透树脂对氟斑牙的美白效果研究[J].中国美容医学,2024,33(7):140-143.
- [10]陈芮娟,孙环宇,沈晓峰.冷光美白技术对人牙釉质硬度和表面结构的影响[J].口腔医学,2011,31(3):169-170.
- [11]安海燕.Beyond牙齿冷光美白诊室法与家庭法治疗变色牙的疗效对比观察[J].临床合理用药杂志,2015(26):122-122,123.
- [12]于小雪.Beyond冷光美白联合ICON渗透树脂在氟斑牙患者前牙美学修复中的应用效果及牙齿敏感度的影响[J].医学美容,2024,33(16):95-98.
- [13]邵丹.冷光美白技术治疗变色牙齿的研究进展[J].医学美容,2024,33(12):195-198.
- [14]王晓灵,张博学,程绰约,等.美白牙贴洁白牙齿的有效性和安全性临床观察[J].现代口腔医学杂志,2005,19(6):584-587.
- [15]孙世英,刘念,杨典,等.牙膏美白功效方法及标准现状研究[J].轻工标准与质量,2025(4):33-35.

收稿日期: 2025-11-10 编辑: 朱思源