

# 儿童时期恒牙釉质显微硬度及微观结构研究

顾起弘<sup>1,2</sup> 姜文敬<sup>3</sup> 刘一静<sup>1,2</sup> 刘玲<sup>1,2</sup> 高黎<sup>1,2</sup>

1. 郑州大学第一附属医院儿童口腔科, 郑州 450052;

2. 郑州大学口腔医学院, 郑州 450000;

3. 郑州市人民医院口腔科, 郑州 450000

**[摘要]** **目的** 通过研究儿童时期不同萌出阶段的恒牙釉质显微硬度及微观结构, 为儿童龋病早期预防提供参考。**方法** 收集并筛选出因正畸拔除的前磨牙45颗, 按照萌出时间将前磨牙分为A(萌出0~1年)、B(萌出1~3年)、C(萌出3~5年)组; 另外筛选出因阻生拔除且未萌出的第三磨牙为对照组; 每组15颗。制备样本, 分别采用维氏显微硬度仪、扫描电镜及电子探针测定釉质表面显微硬度、微观结构及微量元素成分。**结果** 与对照组相比, 随萌出时间增加, A、B、C组釉质显微硬度增强, 表面孔状结构明显减少, 表层钠、镁元素含量减少, 氟元素含量增加( $P<0.05$ )。**结论** 萌出不同阶段恒牙的釉质显微硬度、微观结构存在差别; 萌出1年内牙齿存在明显的龋易感风险, 应做好早期预防。

**[关键词]** 儿童; 年轻恒牙; 釉质; 萌出后成熟; 微观结构

**[中图分类号]** R788 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025.2025161



本文链接 开放科学标识码

## Research on the microhardness and microstructure of permanent tooth enamel in childhood

Gu Qihong<sup>1,2</sup>, Jiang Wenjing<sup>3</sup>, Liu Yijing<sup>1,2</sup>, Liu Ling<sup>1,2</sup>, Gao Li<sup>1,2</sup>

1. Dept. of Pediatric Dentistry, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Stomatology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 3. Dept. of Stomatology, Zhengzhou People's Hospital, Zhengzhou 450000, China

Correspondence: Gao Li, E-mail: gaolidoc@126.com

**[Abstract]** **Objective** Through the investigation of the microhardness and microstructure of permanent tooth enamel at various eruption stages during childhood, this research offers references for the early prevention of childhood dental caries. **Methods** Forty-five premolars extracted due to orthodontic reasons were collected and screened. These premolars were divided into three experimental groups according to the time since eruption: Group A (erupted for 0–1 year), Group B (erupted for 1–3 years), and Group C (erupted for 3–5 years). Additionally, the third molars that were extracted due to impaction and had not erupted were selected as the control group, with 15 teeth in each group. Samples were prepared, and the surface microhardness, microstructure, and elemental composition of the enamel were measured using Vickers microhardness tester, scanning electron microscope, and electron probe, respectively. **Results** Compared with that in the control group, the microhardness of enamel in groups A, B, and C increased with prolonged eruption time, the surface porosity structure decreased considerably, the contents of Na and Mg on the surface decreased, and that of F increased ( $P<0.05$ ). **Conclusion** The microhardness and microstructure of enamel in permanent teeth at different stages vary. Permanent teeth are at a substantially higher risk of caries within one year after eruption, and early prevention should be emphasized.

**[Key words]** children; immature permanent teeth; enamel; post-eruptive maturation; microstructure

**[收稿日期]** 2025-04-20; **[修回日期]** 2025-07-21

**[第一作者]** 顾起弘, 硕士, E-mail: 17638231752@163.com

**[通信作者]** 高黎, 主任医师, 博士, E-mail: gaolidoc@126.com

釉质是牙齿最外层的坚硬结构, 主要由羟磷灰石晶体构成。尽管釉质的主体矿化过程在牙齿

萌出前已基本完成,但在萌出后釉质仍会经历进一步的成熟,表面的物理化学性质会持续发生变化<sup>[1-3]</sup>。这种在牙齿萌出过程中釉质组织结构的变化被称为萌出后成熟现象(post-eruptive maturation)。这种成熟现象促进了釉质的不断矿化和强化,在预防龋齿的发生和发展中发挥着关键作用<sup>[4]</sup>。

年轻恒牙从萌出到发育需经过3~5年<sup>[5]</sup>。在牙齿萌出及成熟过程中不同时间釉质微观结构的理化性能不同,抗龋能力也就存在差异。口腔医生如何根据牙齿萌出时间评估其抗龋能力,并选择更加合适的预防策略对于临床有着重要意义。本研究旨在通过显微硬度仪、扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)及电子探针等技术手段,检测并分析儿童时期不同萌出时间的年轻恒牙釉质的表面显微硬度(surface micro-hardness, SMH)、表面形态及化学元素,以获取不同发育阶段年轻恒牙的微观结构信息,为儿童时期龋病早期预防提供依据。

## 1 材料和方法

本研究已获得郑州大学第一附属医院科研项目伦理审查委员会通过,伦理审查编号:2022-KY-0295-002。

### 1.1 样本预备

收集并筛选郑州大学第一附属医院口腔颌面外科门诊2020年1月—2022年6月因正畸需要而拔除的前磨牙。要求儿童身体健康,年龄10~18岁,且前磨牙萌出时间可以确定为10~12岁,并签署拔牙知情同意书。本研究根据儿童年龄、牙齿萌出情况、影像学检查、牙根长度及病历资料确定前磨牙的萌出时间,并根据前磨牙萌出时间分为A、B、C 3个实验组,分别对应萌出0~1年(牙齿萌出中,咬合未建立,牙根形成2/3)、1~3年(牙齿萌出后期,咬合建立,牙根接近形成,根尖孔较大)、3~5年(牙齿萌出完成,牙根完全形成)。

Cardoso等<sup>[6]</sup>发现第三磨牙和前磨牙的SMH之间差异无统计学意义,因此,本研究收集并筛选郑州大学第一附属医院口腔颌面外科门诊2020年1月—2022年6月因阻生拔除的第三磨牙作为对照组。要求第三磨牙未萌出、牙根形成约1/3。

离体牙纳入标准:放大镜下检查牙齿釉质表面无外形缺损、无发育性异常。最终获得前磨牙

45颗(A、B、C组各15颗),下颌第三磨牙15颗。

采用金刚砂片(Fraunfeld公司,瑞士)在每颗牙冠颊面中1/3切取3 mm×3 mm×2 mm大小的釉质块样本,除颊侧釉质面外其他区域指甲油封闭。样本置于去离子水中备用。

### 1.2 SMH测定

样本制备完成后,每组中随机选取5个样本,采用维氏显微硬度仪(INNOVATEST FALCON-507,铁诺集团,荷兰)测定SMH。使用50 g负荷维氏钢锥持续作用于样本表面20 s,使其形成压痕,通过分析系统测量压痕两对角线的长度,计算机自动计算硬度值。

### 1.3 釉质表面形态的SEM观察及X射线能谱元素分析

每组随机选取5个样本,乙醇脱水,真空镀金,采用SEM(Zeiss Supra 55,卡尔蔡司公司,德国)测定4组样本釉质表面的形态,并进行分析比较。同时采用SEM配置的X射线能谱分析仪在1 000倍下随机打5个点,定点检测各组样本表面钙、磷、钠、镁和氟5种元素水平(重量百分比)。

### 1.4 电子探针检测釉质表面下元素含量

每组随机选取5个样本,采用电子探针(JEO-LJXA-8100,电子株式会社,日本)测定釉质表面下50、100 μm处钙、磷、钠、镁、氟5种元素含量(重量百分比)。具体方法:在工作电压15 kV下,以样本釉质表面作为起始点,沿与其垂直的方向向内进行测定,每隔50 μm测定1个点,直至釉质表面下100 μm处。

### 1.5 统计学分析

采用SPSS 21.0软件进行统计分析。4组样本SMH及钙、磷、钠、镁、氟元素含量数据用均数±标准差表示,采用单因素方差分析4组样本SMH及各元素含量,组间比较采用LSD法,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

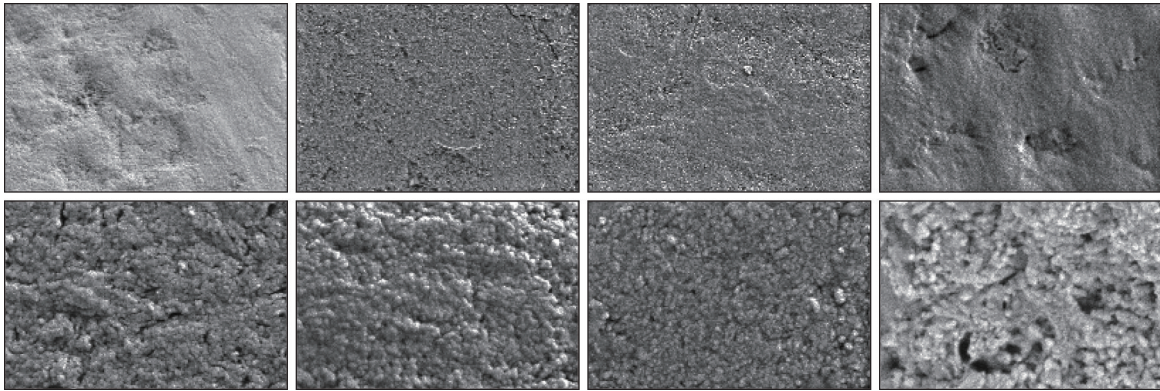
### 2.1 SMH测定结果

随萌出时间的增加,SMH值呈逐年增加的趋势:对照组和A组、B组、C组样本的SMH分别为(258.61±51.62)、(350.16±8.52)、(368.88±6.64)、(414.98±5.6) HV,差异有统计学意义( $F=63.112$ ,  $P<0.05$ )。组间比较结果显示,3个实验组SMH均高于对照组,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.2 SEM结果

SEM结果显示A组釉质表面较光滑,可见少量潜在的托姆斯突凹陷,孔内有散在矿化物沉积,偶见灶性孔。B组和C组釉质表面光滑,未见微灶

孔。对照组釉质表面不光滑,可见大量托姆斯突凹陷,许多圆形、凹坑状的灶性孔,直径为10~15 μm (图1)。



从左至右依次为A、B、C和对照组。上: ×10 μm; 下: ×1 μm。

图 1 4组样本表面SEM图

Fig 1 SEM images of the sample surfaces of the four groups

### 2.3 电子探针及X射线能谱结果

#### 2.3.1 4组样本化学元素分析

A、B、C和对照组釉质表层及剖面钙、磷、钠、镁、氟5种化学元素含量结果见表1~4。在萌出0~1年后,釉质各深度间钙、磷、氟元素的分布较为均匀,其含量比较差异均无统计学意义(P>0.05);钠、镁元素含量随釉质表层下深度增加逐渐降低,差异有统计学意义(P<0.05)。在萌出1~3年后,釉质各深度间钙、磷、钠、镁元素的分布较为均匀,其含量比较差异均无统计学意义(P>

0.05);氟元素含量随深度增加逐渐降低,差异有统计学意义(P<0.05)。在萌出3~5年后,釉质各深度间钙、磷、钠、镁元素的分布较为均匀,其含量比较差异均无统计学意义(P>0.05);氟元素含量随深度增加逐渐降低,差异有统计学意义(P<0.05)。在对照组釉质各深度间钙、磷、氟元素含量分布较均匀,其含量比较差异均无统计学意义(P>0.05);釉质表层钠、镁元素含量最高,而在表层以下50 μm和100 μm处的含量相对较低,且与表层相比差异具有统计学意义(P<0.05)。

表 1 萌出0~1年釉质表层及各深度下化学元素含量比较

Tab 1 Comparison of chemical element content in enamel surface and at various depths for teeth erupted for 0-1 year

深度	钙	磷	钠	镁	氟
表层	64.87±0.26	30.98±0.19	1.31±0.10	0.39±0.06	2.38±0.19
50 μm	64.66±0.24	31.11±0.18	0.89±0.09	0.35±0.06	2.53±0.17
100 μm	64.88±0.27	30.90±0.20	0.77±0.10	0.34±0.06	2.28±0.19
P值	0.572	0.444	0.001*	0.024*	0.315

注: \*为差异有统计学意义, P<0.05。

表 2 萌出1~3年釉质表层及各深度下化学元素含量比较

Tab 2 Comparison of chemical element content in enamel surface and at various depths for teeth erupted for 1-3 year

深度	钙	磷	钠	镁	氟
表层	65.37±0.83	30.79±0.63	0.67±0.32	0.23±0.20	2.73±0.56
50 μm	66.10±0.73	31.17±0.57	0.59±0.26	0.17±0.02	1.83±0.47
100 μm	63.48±0.69	32.13±0.58	1.29±0.30	0.37±0.19	0.56±0.54
P值	0.580	0.077	0.052	0.354	0.007*

注: \*为差异有统计学意义, P<0.05。

表 3 萌出3~5年釉质表层及各深度下化学元素含量比较

Tab 3 Comparison of chemical element content in enamel surface and at various depths for teeth erupted for 3-5 year

深度	钙	磷	钠	镁	氟
表层	68.21±0.73	29.53±0.59	0.59±0.25	0.17±0.17	2.65±0.41
50 μm	65.82±0.69	31.41±0.55	0.72±0.25	0.42±0.17	1.24±0.42
100 μm	64.98±0.70	30.84±0.58	1.14±0.30	0.40±0.20	1.22±0.55
P值	0.075	0.131	1.000	0.248	0.014*

注: \*为差异有统计学意义,  $P < 0.05$ 。

表 4 对照组釉质表层及各深度下化学元素含量比较

Tab 4 Comparison of chemical element content in enamel surface and at various depths in the control group

深度	钙	磷	钠	镁	氟
表层	62.62±0.99	33.66±0.77	0.96±0.39	0.68±0.26	2.03±0.70
50 μm	61.09±0.91	33.87±0.71	0.62±0.37	0.53±0.24	2.28±0.66
100 μm	59.76±0.99	34.82±0.79	0.68±0.41	0.32±0.26	3.08±0.74
P值	0.051	0.216	0.040*	0.046*	0.232

注: \*为差异有统计学意义,  $P < 0.05$ 。

2.3.2 4组样本不同深度元素含量比较

在釉质表层, A、B、C组釉质钙、磷、钠、镁和氟元素含量分别与对照组相应元素含量比较, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 在釉质表层下 50 μm

和 100 μm, A、B、C组和对照组4组样本钙、磷、钠、镁和氟元素含量比较, 差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ ) (图 2~4)。

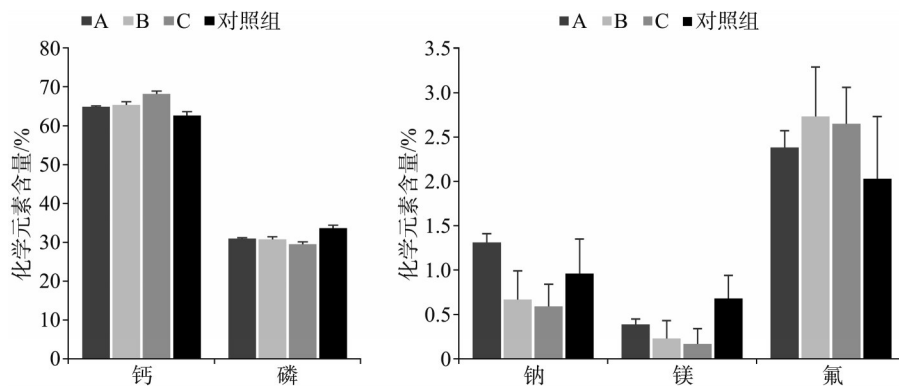


图 2 4组釉质表层化学元素含量比较

Fig 2 Comparison of the chemical element content in the enamel surface layer among the four groups

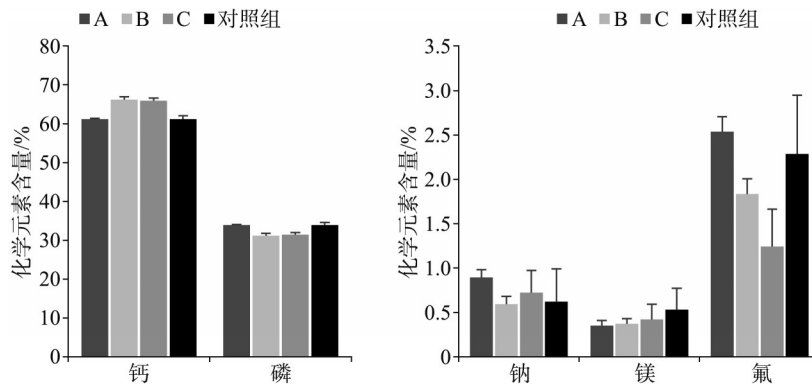


图 3 4组釉质表层下 50 μm处化学元素含量比较

Fig 3 Comparison of the chemical element content at 50 μm depth beneath the enamel surface layer among the four groups

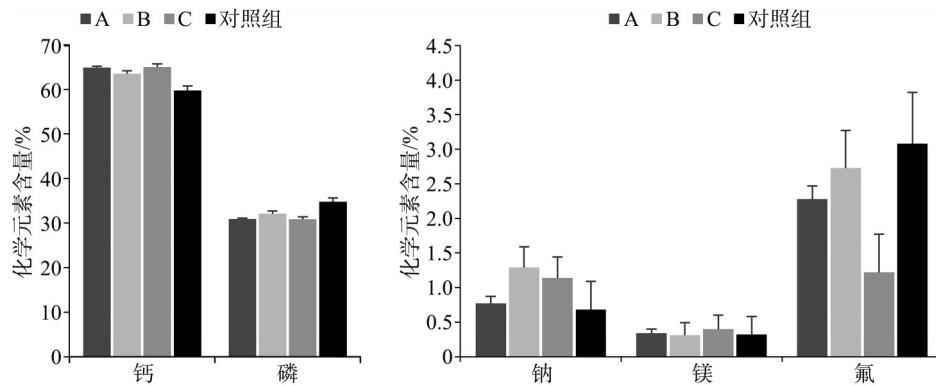


图 4 4组釉质表层下 100 μm 处化学元素含量比较

Fig 4 Comparison of the chemical element content at 100 μm depth beneath the enamel surface layer among the four groups

### 3 讨论

“萌出后成熟现象”表明，釉质表面的化学和物理性质在年轻恒牙萌出后会显著变化。这些变化通常表现为钙、磷、氟和氯含量的增加，碳酸根离子 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 含量的减少，釉质通透性的降低，有机物含量的减少，以及无机物比重的增加。这些改变促进了釉质硬度和抗酸性的增强<sup>[7-8]</sup>。Driessens 等<sup>[9]</sup>对 2 个萌出中的第三磨牙、2 个萌出半年的前磨牙、2 个萌出 3 年半的前磨牙和 1 个未萌出的前磨牙研究后发现，釉质表面成熟后转变为含钠和镁极少的磷酸钙盐，呈现羟磷灰石的低溶解度；而这个机制起作用约需半年时间。目前关于“萌出后成熟现象”的研究极少，而该研究中样本量较少，样本的时间点过于固定，研究方法较单一。牙萌出是一个复杂的过程，因此，釉质在牙齿萌出后不同发育阶段的结构变化仍需进一步探究。

出龈后的牙齿萌出包括萌出期和萌出后期。正常情况下恒牙在牙根发育 2/3 时开始临床萌出，此后，牙根继续形成，牙齿殆向生长，直至建立咬合接触，这个阶段就是萌出期。大部分年轻恒牙萌出后达咬合平面需 7~12 个月，也就是萌出期一般接近 1 年。达到咬合平面后牙根尚未完全形成，根尖孔呈喇叭口状，一般萌出 3 年牙根尖部才完全形成<sup>[5]</sup>。年轻恒牙发育要经过 3~5 年才达到与成人相似。因此，本研究根据萌出阶段分为萌出 1 年内、1~3 年、3~5 年，并结合咬合情况、牙根发育情况及病历资料进一步进行筛选；同时根据临床前磨牙存在着较多萌出时间及发育异常的现象<sup>[10-11]</sup>，本研究要求所获取的所有离体前磨牙萌出时间为 10~12 岁，并排除发育异常牙齿，以确保纳

入牙在实验分组时间内。

本研究根据儿童年龄、牙齿萌出情况、影像学检查、牙根长度及病历资料确定前磨牙的萌出时间，并根据前磨牙萌出时间将前磨牙分为 A、B、C 组，分别对应萌出 0~1 年、1~3 年、3~5 年。对于前磨牙萌出时间，主要依靠儿童年龄，同时结合牙龄：牙齿萌出情况（是否建立咬合）、影像学检查、牙根发育及以往病历辅助确定。对于无法确定萌出时间及家长回顾与辅助确定结果出入较大的牙齿予以排除，确保所纳入牙齿严格控制

在分组时间内。釉质成熟过程中羟磷灰石晶体逐渐增大，晶体结构变得更加致密，釉质的渗透性也随之降低。研究<sup>[12]</sup>表明，牙齿萌出后，其表面电阻会随着萌出时间的延长而显著增加，这与釉质表面孔隙率的降低密切相关。Brudevold 等<sup>[13]</sup>通过碘渗透实验也证实了牙齿萌出后釉质表面通透性的降低。釉质形态变化也可以通过 SEM 得到进一步验证<sup>[14-15]</sup>。本研究利用 SEM 观察到，未萌出的牙齿釉质表面存在大量圆形或近圆形的微孔；萌出 0~1 年的牙齿，其釉质表面的微孔数量显著减少，且微孔的深度和宽度均小于未萌出的牙齿。相比之下，萌出 1~3 年和 3~5 年的牙齿，其釉质表面则显得光滑，几乎无微孔。这些结果与国内外相关研究<sup>[16-17]</sup>一致，表明新萌出的牙齿表面较为粗糙且多孔，晶体间间隙较大。这种结构特点使得新萌出的牙齿渗透性强，对酸的抵抗力较弱，容易发生脱矿，因此在牙齿萌出后应尽早采取龋齿预防措施<sup>[18]</sup>。

牙齿的显微硬度是其机械性能的重要指标，不仅反映了釉质的硬度，还体现了矿物质含量及屈服强度和抗拉强度等机械性能的整体表现<sup>[19]</sup>。在釉质“萌出后成熟”过程中，时间是影响其表面物理化学性质变化的关键因素。正常情况下，

釉质与唾液中的钙、磷酸盐和氟离子发生置换反应,促进釉质表面的矿物质沉积;同时,釉质表面不断积累氟化物和其他离子,变得更加坚硬,孔隙率降低,龋齿风险也随之减小<sup>[20]</sup>。本研究结果显示,随着萌出时间的增加,釉质的显微硬度显著提高,而未萌牙和萌出0~1年的牙齿硬度相对较低,这与Palti等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。萌出1年后釉质显微硬度的显著变化,也提示这一阶段是萌出后再矿化的重要阶段。

釉质的无机成分主要由含有钙和磷酸盐离子的磷灰石晶体组成。在“萌出后成熟”过程中,其化学元素及晶体结构会持续发生变化。本研究对4组样本的釉质表层钙含量进行分析,结果显示,随着萌出时间的增加,釉质表层钙含量呈现增加的趋势,而磷含量则呈现相反的趋势。釉质其他化学元素的含量变化在其成熟过程中也起着重要作用,影响着釉质的抗酸能力。其中,氟离子与釉质表面结合,形成更耐酸的氟羟磷灰石或氟磷灰石,降低晶体的溶解度,从而增强釉质的抗龋性<sup>[22]</sup>。相反,钠和镁与表面溶解度增加相关,可能会使釉质更容易患龋<sup>[23-24]</sup>。Uysal等<sup>[25]</sup>也指出釉质表面钠、镁含量与溶解度有关。本研究结果显示:未萌牙和萌出0~1年钠、镁含量高于1~3年和3~5年,而氟含量与之相反。笔者推测:未萌牙和萌出0~1年的釉质表面溶解度明显高于萌出1~3年和3~5年的牙齿。在此期间,牙齿可能尚未与对颌牙齿建立咬合接触,缺乏自洁作用,因此龋齿更容易发生<sup>[26]</sup>。

本研究发现,随着萌出时间的变化,釉质表层钙、磷、钠、镁和氟元素的含量差异有统计学意义,而釉质表层下50、100 μm这些元素的含量差异无统计学意义,这可能表明一方面表层釉质反应活跃,不断进行脱矿与再矿化反应;另一方面也说明表层釉质受口腔环境的影响大,“萌出后成熟现象”可能更表现在釉质表层。在釉质成熟过程中,氟的变化非常明显,它可以置换出釉质羟磷灰石晶体中的羟基,从而影响釉质的理化性质:氟磷灰石比羟磷灰石具有更强的抗酸性和耐磨性,这也可以解释1~3年和3~5年样本的SMH较高<sup>[22]</sup>。

综上所述,儿童时期萌出1年内的恒牙与萌出后期恒牙及成熟恒牙相比,釉质钙、磷、氟含量低,钠和镁含量高,SMH低,提示这个萌出时期的牙齿溶解度较高,抗酸能力较弱。因此,儿童时期是龋齿预防的关键时期,尤其是恒牙萌出1年

内更应重视龋病预防。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

### [参考文献]

- [1] ten Bosch JJ, Fennis-le Y, Verdonschot EH. Time-dependent decrease and seasonal variation of the porosity of recently erupted sound dental enamel *in vivo*[J]. J Dent Res, 2000, 79(8): 1556-1559.
- [2] Wada K, Ijbara M, Salim NA, et al. Three-dimensional microscopic comparison of wear behavior between immature and mature enamel: an *in vitro* study[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 40.
- [3] La Fontaine A, Zavgorodniy A, Liu H, et al. Atomic-scale compositional mapping reveals Mg-rich amorphous calcium phosphate in human dental enamel[J]. Sci Adv, 2016, 2(9): e1601145.
- [4] Philip N. State of the art enamel remineralization systems: the next frontier in caries management[J]. Caries Res, 2019, 53(3): 284-295.
- [5] 葛立宏. 儿童口腔医学[M]. 5版. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- [6] Ge LH. Children's dentistry[M]. 5th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020.
- [7] Cardoso CA, Magalhães AC, Rios D, et al. Cross-sectional hardness of enamel from human teeth at different post-eruptive ages[J]. Caries Res, 2009, 43(6): 491-494.
- [8] Amaechi BT, Phillips TS, Evans V, et al. The potential of hydroxyapatite toothpaste to prevent root caries: a pH-cycling study[J]. Clin Cosmet Investig Dent, 2021, 13: 315-324.
- [9] Carvalho TS, Lussi A. Age-related morphological, histological and functional changes in teeth[J]. J Oral Rehabil, 2017, 44(4): 291-298.
- [10] Driessens FC, Heijligers HJ, Borggreven JM, et al. Post-eruptive maturation of tooth enamel studied with the electron microprobe[J]. Caries Res, 1985, 19(5): 390-395.
- [11] 王蕊, 张慧, 姜文敬, 等. 111颗早萌恒牙临床资料分析[J]. 河南医学研究, 2021, 30(6): 994-997.
- [12] Wang R, Zhang H, Jiang WJ, et al. Clinical data analysis of 111 prematurely erupted permanent teeth[J]. Henan Med Res, 2021, 30(6): 994-997.
- [13] Koc N, Ballikaya E, Cehreli ZC. Prevalence of premature eruption and agenesis of premolars in Turkish chil-

- dren: a retrospective study[J]. *J Clin Pediatr Dent*, 2021, 45(1): 58-62.
- [12] Kataoka S, Sakuma S, Wang J, et al. Changes in electrical resistance of sound fissure enamel in first molars for 66 months from eruption[J]. *Caries Res*, 2007, 41(2): 161-164.
- [13] Brudevold F, Aasenden R, Bakhos Y. A preliminary study of posteruptive maturation of teeth in situ[J]. *Caries Res*, 1982, 16(3): 243-248.
- [14] Arnold WH, Gaengler P. Quantitative analysis of the calcium and phosphorus content of developing and permanent human teeth[J]. *Ann Anat*, 2007, 189: 183-190.
- [15] De Menezes Oliveira MA, Torres CP, Gomes-Silva JM, et al. Microstructure and mineral composition of dental enamel of permanent and deciduous teeth[J]. *Microsc Res Tech*, 2010, 73(5): 572-577.
- [16] Fejerskov O, Josephsen K, Nyvad B. Surface ultrastructure of unerupted mature human enamel[J]. *Caries Res*, 1984, 18(4): 302-314.
- [17] Shaik I, Dasari B, Shaik A, et al. Functional role of inorganic trace elements on enamel and dentin formation: a review[J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2021, 13(Suppl 2): S952-S956.
- [18] Al-Samadani KH, Ahmad MS. Prevalence of first permanent molar caries in and its relationship to the dental knowledge of 9-12-years old from jeddah, kingdom of Saudiarabia[J]. *ISRN Dent*, 2012: 391068.
- [19] Azadi P, Sarlak H, Nourmohammadi S. Comparing enamel microhardness in deciduous teeth with primary carious lesions after applying three fluoride containing materials *in vitro*[J]. *J Arak Univ Med Sci*, 2021, 24(2): 256-267.
- [20] Lynch RJ. The primary and mixed dentition, post-eruptive enamel maturation and dental caries: a review[J]. *Int Dent J*, 2013, 63(Suppl 2): 3-13.
- [21] Palti DG, Machado MA, Silva SM, et al. Evaluation of superficial microhardness in dental enamel with different eruptive ages[J]. *Braz Oral Res*, 2008, 22(4): 311-315.
- [22] Lidman GY, Larionov PM, Savchenko SV, et al. Laser-induced fluorescence and X-ray spectral analysis of carious process in hard dental tissues[J]. *Bull Exp Biol Med*, 2010, 149(3): 373-376.
- [23] Chen H, Czajka-Jakubowska A, Spencer NJ, et al. Effects of systemic fluoride and *in vitro* fluoride treatment on enamel crystals[J]. *J Dent Res*, 2006, 85(11): 1042-1045.
- [24] Featherstone JD, Mayer I, Driessens FC, et al. Synthetic apatites containing Na, Mg, and CO<sub>3</sub> and their comparison with tooth enamel mineral[J]. *Calcif Tissue Int*, 1983, 35(2): 169-171.
- [25] Uysal T, Amasyali M, Ozcan S, et al. Demineralization properties of newly erupted and mature premolars around orthodontic brackets: an *in-vivo* study[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2010, 137(5): 582.e1-e6; discussion 582-583.
- [26] Flemming J, Hannig C, Hannig M. Caries management-The role of surface interactions in de- and remineralization-processes[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(23): 7044.

(本文编辑 李彩)