

锶的生物学作用及富锶牛奶开发研究进展

张养东¹, 栾庆刚², 李建立², 郑楠¹, 赵圣国¹, 王加启^{1*}

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193) (2. 山东得益乳业股份有限公司, 山东淄博 255086)

摘要: 骨骼健康伴随人的整个生命周期, 自出生起至生命终止, 人的一生都需要通过补钙来维护骨骼健康, 同样, 作为有益骨骼健康的锶也是如此, 能够影响人的整个生命周期。锶是人体的一种必需微量元素, 具有促进成骨和抑制骨吸收、提高心肌功能和促进血管再生、杀菌消炎和抗氧化等多种生物学作用。锶有助于强壮骨骼, 预防和治疗骨质疏松和骨折、缓解高血压等疾病。锶在自然界中分布广泛, 但在我国各地区分布极不均衡, 锶含量低的地区, 建议在饮食中及时补充锶元素。该文综述了锶的基本特性、摄入方式及安全性, 锶的生物学作用, 锶的代谢及其与钙的关系, 中老年人的基础性疾病, 以及富锶牛奶开发的可行性, 以期为提高我国人民的骨骼健康水平提供饮食参考。

关键词: 锶; 钙; 生物学作用; 骨质疏松; 高血压; 富锶牛奶

文章编号: 1673-9078(2026)4-337-344

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0112

Biological Functions of Strontium and Development of Strontium-enriched Milk

ZHANG Yangdong¹, LUAN Qinggang², LI Jianli², ZHENG Nan¹, ZHAO Shengguo¹, WANG Jiaqi^{1*}

(1. Institute of Animal Science of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

(2. Shandong Deyi Dairy Products Co. Ltd., Zibo 255086, China)

Abstract: Bone health is vital throughout the life cycle of an individual. From birth to death, calcium remains essential to maintain bone health. Similarly, strontium, another element essential to bone health, plays a role across all stages of the human lifespan. As an essential trace element in the human body, strontium has various biological effects, such as promoting bone formation, inhibiting bone resorption, improving myocardial function, and promoting vascular regeneration, as well as bactericidal, anti-inflammatory, and antioxidant functions. Strontium helps strengthen bones, prevent and treat osteoporosis and fractures, and alleviate conditions such as hypertension. Strontium is widely distributed in nature, but its distribution across China is highly uneven. Individuals in areas with low strontium content should supplement their dietary intake of strontium in a timely manner. This study reviews the basic characteristics, intake methods, safety, biological functions, and metabolism of strontium, its relationship with calcium, underlying diseases of middle-aged and elderly individuals, as well as the feasibility of developing strontium-enriched milk. The purpose of this study is to provide a dietary reference for improving the bone health of Chinese people.

Key words: strontium; calcium; biological function; osteoporosis; high blood pressure; strontium-enriched milk

引文格式:

张养东, 栾庆刚, 李建立, 等. 锶的生物学作用及富锶牛奶开发研究进展[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 337-344.

ZHANG Yangdong, LUAN Qinggang, LI Jianli, et al. Biological functions of strontium and development of strontium-enriched milk [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 337-344.

收稿日期: 2025-01-23; 修回日期: 2025-03-18; 接受日期: 2025-03-26
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1301000); 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-36)
作者简介: 张养东 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 奶牛营养与牛奶品质调控, E-mail: zhangyangdong@caas.cn
通讯作者: 王加启 (1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 奶牛营养与牛奶质量安全, E-mail: jiaqi wang@vip.163.com

锶 (Strontium, Sr) 是一种碱土金属阳离子, 在自然界中广泛存在, 是人体必需的微量元素之一^[1]。锶对人体的功能主要是与骨骼的形成密切相关, 是人体骨骼及牙齿的正常组成部分。近年来的研究表明, 锶具有促进成骨和抑制骨吸收^[2]、杀菌消炎和抗氧化^[3-5]、增强心脏功能和促进血管再生^[6]、修复神经损伤^[7]、提高繁殖性能^[8]、促进葡萄糖代谢^[9]等多种生物学作用。

目前, 锶已广泛应用于预防龋齿^[10]、牙病治疗^[11]、骨质疏松^[12]、骨移植^[13]等方面。随着我国人民生活水平的提高, 人们越来越重视自身和家庭的健康水平, 骨骼健康就是其中重要的一方面。青少年阶段, 骨骼处于生长发育期, 是人体骨量积累的关键阶段; 中老年阶段, 人体骨量逐渐减少, 易发生骨质疏松, 甚至骨折。日常饮食中补充锶, 能够促进青少年的骨量积累, 强壮骨骼^[14]; 缓解或预防中老年人的骨质疏松^[12]、高血压^[5]等疾病, 提升健康水平。

近年来,人们逐渐认识到补充锶元素对身体健康,尤其是骨骼健康的重要性,陆续开发了富锶小白菜、富锶黑木耳、富锶功能盐等多种富锶产品。与其他富锶产品相比,富锶牛奶含有优质、易消化的蛋白质、脂肪等营养物质^[15-20],能够实现锶、钙、磷等多种矿物元素同步补充^[21,22],具有较高的生物安全性;此外,牛奶作为人们的日常消费品和主要营养品,消费量大,补锶更方便快捷,因此,富锶牛奶是人们理想的补锶方式。论文综述了锶的基本特性、摄入方式和安全性,锶的生物学作用,锶的代谢及其与钙的关系,中老年人的基础性疾病,富锶牛奶开发的可行性,为有效提高我国人民的骨骼健康水平提供饮食参考。

1 锶的基本特性、摄入方式及安全性

锶，银白色至淡黄色碱土金属元素，与钙同属周期表中 IIA 族元素，相对原子质量 87.62，离子状态为 Sr^{2+} ，易与水和酸作用而放出氢，锶与钙相同，都属于亲骨型元素。锶在岩石和土壤中以硫酸盐和碳酸盐矿物的形式大量存在，即天青石 (SrSO_4) 和锶矿 (SrCO_3)，天然锶有 4 个稳定同位素， ^{88}Sr (83%)、 ^{86}Sr (10%)、 ^{87}Sr (7%) 和 ^{84}Sr ($<1\%$)^[23]。锶广泛分布于人体组织中，骨骼是其最大的“储存库”，其中约 99% 的锶以 Sr^{2+} 离子形式存在^[14]。

镉主要通过水和饮食获得^[24]。通过 2019~2020 年对我国 314 个城市的公共饮用水样本分析表明, 镉的质量浓度范围为 0.005~3.11 mg·L⁻¹, 平均值为 0.360 mg·L⁻¹; 不同地区镉质量浓度差异显著, 北高南低, 其中我国东南人口稠密地区的镉含量仅为 0.029 9~0.196 mg·L⁻¹^[25]。河北承德地区的叶菜类、根茎类、果实类、大田作物、水果类富镉能力强弱依次为: 小白菜、土豆、豆角、芝麻、栗子, 其中镉含量最高的为小白菜, 达到 26.6 mg·kg⁻¹^[26]。荷斯坦奶牛所产牛奶中的镉含量为 0.25~0.70 mg·L⁻¹^[27,28], 镉含量与奶牛养殖地区镉含量密切相关。

目前,世界卫生组织还没有建立饮用水中锑的标准值^[29]。我国在“GB8537-2018《食品安全

国家标准《饮用天然矿泉水》”中规定锶的界限值为 $\geq 0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [30]。锶在饮水中安全范围很宽,最高允许限值推荐为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [31]。

2 锶的生物学作用

锶具有促进成骨和抑制骨吸收、提高杀菌消炎和抗氧化性能、增强心脏功能和促进血管再生、修复神经损伤、提高精子质量和胎儿生长性能、促进葡萄糖代谢等多种生物学功能,具体见图1。



图 1 锶的生物学作用

Fig.1 Biological role of strontium

2.1 促进成骨和抑制骨吸收

锶在骨生长等方面有积极作用，可助力骨健康，摄入适量的锶能够增强骨的强度和功能。一是促进骨相关干细胞的分化。锶通过早期改善自噬和晚期激活蛋白激酶 B/哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (Protein Kinase B/Mammalian Target of the Rapamycin, Akt/mTOR) 信号通路，促进卵巢切除大鼠骨髓间充质干细胞 (Ovariectomized-Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells, OVX-BMSCs) 的成骨分化和骨质疏松性骨缺损的骨再生^[32]。锶通过钙感应受体 (Calcium Sensing Receptor, CaSR)/Janus 激酶 2 (Janus Kinase 2, JAK2) 信号转导与转录激活因子 3 (Signal Transducer and Activator of Transcription 3, STAT3) 信号通路，促进骨质疏松大鼠骨髓间充质干细胞成骨分化^[33]。锶通过刺激典型 Wnt/ β -catenin 信号通路促进人牙周韧带干细胞 (Human Periodontal Ligament Stem Cells, hPDLSC) 的增殖和成骨作用^[34]。锶能够促进人上颌窦膜干细胞 (Human Maxillary Sinus Membrane Stem Cells, hMSMSCs) 的增殖和活性，增强碱性磷酸酶 (Alkaline Phosphatase, ALP) 分泌，上调骨相关基因表达，增强骨钙素表达和细胞外钙结节的形成，促进成骨分化^[35]。锶通过激活非规范 Wnt 信号和调节缺陷

性分配 (Partitioning Defective, Par) 复合物的表达和分布, 调节干细胞进行不对称细胞分裂以平衡干细胞繁殖和成骨分化, 即上调 S 期和 G2/M 期细胞的数量来维持细胞周期中更多的细胞, 其中一个子细胞保持干性, 而另一个子细胞增强成骨分化^[36]。二是促进成骨细胞 (Osteoblast) 的分化和基质矿化。锶能够提高组织非特异性碱性磷酸酶 (Tissue-Nonspecific Alkaline Phosphatase, TNAP) 活性, 增加基质矿化; 上调 90% 的转录因子 7 (Transcription Factor 7, Sp7) 和骨钙蛋白 (Osteocalcin, OCN) 的 mRNA 表达水平, 提高 Runt 相关转录因子 2 (The Transcription Factor Runt-Related Protein 2, Runx2) mRNA 和蛋白水平^[37]。锶通过调节成骨细胞骨保护素 (Osteoprotegerin, OPG)/核因子 κ B (Nuclear Factor-KappaB, NF- κ B) 配体的受体激活剂 (The Receptor Activator of NF- κ B Ligand, RANKL) 的表达, 促进成骨细胞分化和矿化, 抑制骨细胞凋亡^[2]。锶通过细胞外调节蛋白激酶 (Extracellular Signal-Regulated Kinase, ERK) 信号通路, 抵消地塞米松对成骨的抑制作用, 促进成骨分化和基质矿化^[38]。锶能够促进 MC3T3-E1 前成骨细胞 (Pre-Osteoblasts) 的黏附、扩散和增殖, 提高成骨活性^[39]。三是促进软骨细胞 (Chondrocyte) 的增殖。锶通过转化生长因子 β 1 (Transforming Growth Factor β 1, TGF- β 1) 引导信号传导蛋白——SMAD3 (Small Mother Against Decapentaplegic Family Member 3, SMAD3) 磷酸化来促进增殖和抑制奶牛原代软骨细胞分化^[40]。锶能够上调大鼠软骨细胞中胶原蛋白 II、性别决定区 Y 框蛋白 9 (Sry-Box9, Sox9) 和聚集蛋白 (Aggrecan, ACAN) 基因, 下调白介素 1 β (Interleukin-1beta, IL-1 β) 基因, 还能拮抗 IL-1 β 对软骨细胞的分解代谢作用^[41]。锶预处理的滑膜间充质干细胞衍生外泌体 (Synovial Mesenchymal Stem Cells-Derived Exosomes, Sr-SMSC-EXOs) 还能够减轻软骨细胞铁凋亡 (Ferroptosis)^[42]。四是抑制破骨细胞 (Osteoclast) 的功能。NF- κ B/RANKL 信号通路在破骨细胞生成的调控中起着关键作用, 锶通过抑制 RANKL 诱导的肿瘤抑制因子 38 (Tumor Suppressor 38, p38) 和 NF- κ B 通路的激活抑制破骨细胞^[43]。锶还能够抑制骨质疏松雌性大鼠胫骨破骨细胞的骨溶解作用^[44]。此外, 锶能够通过影响年轻雄性大鼠的肠道微生物群来改善骨量^[14], 但具体作用机制有待进一步研究。

2.2 提高杀菌消炎和抗氧化性能

锶能够提高杀菌作用, 减轻骨骼等部位的炎症反应, 提高抗氧化性能。一是杀菌作用。体外试验表明,

10 和 100 mmol·L⁻¹ Sr(OH)₂ 对链球菌 (*Streptococcus*)、放线菌 (*Actinomycetes*) 等有害菌均有较强的杀菌作用^[3]。锶钛氧 (Sr-Ti-O) 能够有效抑制金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)、大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、牙龈紫色杆菌 (*Porphyromonas gingivalis*) 等种植体周围炎症相关细菌的生长^[45]。二是减轻骨炎症反应。锶通过抑制成纤维细胞样滑膜细胞的衰老和增强自噬, 减轻骨关节炎^[4]。锶能够降低基质金属蛋白酶 (Matrix Metalloproteinases, MMPs) 表达, 促进 IL-1 β 存在或不存在时大鼠软骨细胞中胶原蛋白 II、聚集蛋白和蛋白聚糖 (Proteoglycans, PG) 的合成; 减弱 IL-1 β 诱导的 β -连环蛋白的增加, 减轻炎症反应^[46]。锶通过抑制 M1 极化、促进 M2 极化来调节巨噬细胞功能状态, 缓解种植体骨与自体骨愈合过程中的炎症反应^[47]。锶通过调节 TGF- β 1/NF- κ B 信号通路, 减轻 IL-1 β 诱导的人髓核细胞功能障碍^[48]。三是减轻其他炎症反应。锶通过 TOLL 样受体 4 (Toll-Like Receptors4, TLR4) / 髓样分化因子 88 (Myeloid Differentiation Factor 88, MyD88) / NF- κ B 通路, 减少脂多糖 (Lipopolysaccharide, LPS) 诱导的促炎细胞因子的产生, 从而对牛瘤胃上皮细胞产生抗炎作用^[49]。利用 *Suaeda monoica* 植物提取物合成的锶纳米颗粒具有较强的抗炎和抗感染作用^[50]。四是提高抗氧化性能。锶能够提高小鼠体内的抗氧化酶活性, 降低氧化损伤程度, 增加细胞的能量代谢, 改善机体的氧化应激状态^[5]; 锶能够通过降低活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 水平、减少炎症和促进微血管生成来促进伤口愈合^[51]。

2.3 增强心脏功能和促进血管再生

锶能够缓解高血压, 有效提高心肌功能, 促进血管再生。锶通过抑制 NF- κ B 经典通路, 减少血管细胞黏附分子-1 (Vascular Cell Adhesion Molecule-1, VCAM-1)、细胞间黏附分子-1 (Intercellular Cell Adhesion Molecule-1, ICAM-1) 等炎症介质的产生, 减轻血管壁损害, 延缓幼年自发性高血压大鼠 (Spontaneously Hypertensive Rats, SHR) 血压升高, 减小血压波动^[52]。锶能够减轻心肌梗死小鼠心肌缺血/再灌注 (I/R) 诱导的功能恶化和瘢痕形成; 在体外实验中, 锶离子能够增强心肌细胞活力和刺激血管生成^[6]。锶能够有效促进中性粒细胞向 N2 表型极化, 缓解炎症, 促进血管生成和组织再生^[53]。锶通过激活 ERK1/2 信号通路, 提高钛材料与人脐静脉内皮细胞 (Human Umbilical Vein Endothelial Cells, HUVEC) 的生物相容性和血管新生能力^[54]。锶还能有效促进内皮细胞血管化^[55]。

2.4 修复神经损伤

锶能够修复神经损伤,缓解炎症,提高婴儿注意力。锶能够缓解高脂肪饮食(High-Fat Diet, HFD)诱导的神经炎症,减少海马中炎症因子的表达,显著减弱HFD诱导的小胶质细胞和星形胶质细胞的活化;还能防止突触超结构损伤,修复海马损伤^[7]。42 d时母乳中的锶与8月龄婴儿的注意力($P=0.043$)和心理发展指数评分(Mental Development Index, MDI)($P=0.015$)呈正相关^[56]。

2.5 提高精子质量和胎儿生长性能

锶能够提高精子质量,促进胎儿的生长发育。锶能够显著提高大鼠睾酮水平和精子质量,改善睾丸标记酶和睾酮标记基因水平^[8]。母乳中锌和锶在正常水平内的相对较高质量浓度与母乳喂养新生儿的较高生长速率有关^[57];锶质量浓度与胎儿(主要为男性)生长之间存在潜在的关联,妊娠3个月尿液中锶水平每增加一倍,妊娠24、31、37周时胎儿生长参数和出生尺寸指标的变化百分比分别为:股骨长5.09%~8.23%,胎儿体质量估算值7.57%~11.53%,腹围6.56%~10.42%,头围6.25%,出生体质量5.15%~7.85%,出生长度5.71%~9.39%^[58]。

2.6 促进葡萄糖代谢

锶能够增强糖尿病患者的保护作用,促进胰岛素的释放。较高的血浆锶水平与较低的2型糖尿病(Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM)和糖耐量受损(Impaired Glucose Regulation, IGR)发生率相关,这可能与锶潜在的抗氧化、抗炎和抗脂肪作用有关^[9]。当单个胰岛灌注含 Sr^{2+} 的培养基时,葡萄糖刺激的 β 细胞的节律性活动与搏动性胰岛素释放相对应^[59]。含羞草(*Mimosa pudica*)介导的锶纳米颗粒能够抑制 α -淀粉酶等碳水化合物消化酶的活性,缓解葡萄糖的释放,起到抗糖尿病的作用^[60]。

3 锶的代谢及其与钙的关系

锶主要通过消化道吸收,绝大部分在骨骼中沉积,主要通过肾脏、粪便排泄。锶在人体内吸收部位为空肠,吸收时需要骨化三醇(维生素D3的活性代谢产物)和 Ca^{2+} 的帮助,通过肠上皮钙通道(Epithelial Calcium Channel 2, ECaC2)转运体完成^[61]。由于锶的分子量大约是钙的2倍,细胞对锶的转运较慢,因此其吸收率通常只有钙的60%~70%^[62]。

锶能够促进钙的吸收和排泄。锶能够提高大鼠血清钙水平,且随锶水平的增加呈剂量依赖

性^[14]。锶能够通过腺苷高半胱氨酸水解酶样蛋白2(Adenosylhomocysteine Hydrolase-Like Protein 2, AHCYL2)、TGF- β 2和胆固醇侧链切割酶(Cholesterol Side-Chain Cleavage Enzyme, CYP11A1)等提高牛瘤胃上皮细胞内 Ca^{2+} 水平^[63]。锶能够增加成年雄性大鼠尿钙排泄量,但是不同水平的锶并不影响钙在肾脏中的保留^[64],这可能是因为锶能够在肠道吸收阶段促进钙的吸收,在肾脏促进钙的排泄。

4 中老年人的代谢性疾病

中老年人由于机体衰老等因素,使得自身分解代谢降低,合成代谢增高,容易患有骨质疏松、高血压和糖尿病等代谢性疾病。骨质疏松是一种代谢性骨病,在细胞水平上,由于破骨细胞骨吸收未被成骨细胞骨形成所补偿,导致骨骼变得脆弱^[65],增加骨折的风险,特别是髌部骨折,显著影响发病率、死亡率和生活质量^[66]。绝经后女性和老年男性的骨质疏松症发病率均随年龄增长而增加,其中雌激素缺乏以及由此导致的继发性甲状旁腺功能亢进,再加上维生素D(Vitamin D, VD)和钙摄入不足,是骨质疏松症发展的关键因素^[65]。经期正常妇女体内雌激素通过抑制IL-1、肿瘤坏死因子(Tumor Necrosis Factor, TNF)以及随后的巨噬细胞集落刺激因子(Macrophage Colony-Stimulating Factor, M-CSF)、RANKL和IL-6的释放,刺激由成骨细胞谱系细胞分泌的NF- κ B配体——RANKL拮抗剂——OPG的产生,减少破骨细胞的分化,从而促进破骨细胞的凋亡,抑制破骨细胞的生成;同时,激活Wnt信号通路促进成骨,上调骨形态蛋白(Bone Morphogenetic Protein, BMP)信号通路促进间充质干细胞由成骨前细胞向成骨细胞而非脂肪细胞分化;但是绝经后妇女雌激素缺乏,导致骨吸收和骨形成不耦合,造成骨质流失,容易形成骨质疏松^[67]。雌激素对男性骨骼也具有关键性的作用^[68],此外,多达一半的男性骨质疏松症有继发原因,例如过度饮酒和长期使用糖皮质激素等^[69]。心血管疾病包括高血压、动脉粥样硬化等疾病,都与血管内皮的完整与功能被破坏有密切的关系。血管损伤、内皮功能障碍、炎症、氧化应激等均能够引起高血压^[70]。细菌和病毒感染、环境压力均会降低血管舒张物质——一氧化氮(Nitric Oxide, NO)的生物利用度,损伤内皮连接,增加大分子的渗透性,导致含胆固醇脂蛋白在内皮下积聚,引发动脉粥样硬化^[71]。血管内皮功能障碍也是糖尿病患者心血管损伤的首要因素^[72]。由此可见,锶能够通过多种生物学作用在分子水平上预防或缓解骨质疏松、心血管疾病等多个中老年人的代谢性疾病。

5 富锶牛奶开发的可行性

通过对我国 314 个城市的公共饮用水样本分析表明,老年人饮用水中锶水平与骨密度呈显著正相关,但我国锶分布不均匀,东南部人口稠密地区的锶含量较少^[25],建议在日常饮食中补充锶元素。目前,化学合成物质——雷奈酸锶(Strontium Ranelate)通过影响骨代谢来保护骨骼健康,但它是处方药,并且使用量较大($2\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$),因此开发富锶食品,通过日常饮食来维持骨骼和心血管健康是较为温和的补充方式;目前,我国开发了多种多样的富锶农副产品,例如富锶小白菜^[26]、富锶黑木耳^[73]、富锶功能盐^[74],但是这些产品只能单一的补充锶元素,不能补充与锶有密切代谢关系的钙磷元素。

富锶牛奶不仅含有丰富的锶元素,还含有优质的钙、磷、VD,以及蛋白质、脂肪、乳糖等其他营养物质,如图 2 所示,与其他富锶食品相比,富锶牛奶的开发具有以下优点:一是多种矿物元素同步补充。牛奶中含有丰富的矿物质和微量元素,其中钙 $1\ 050\sim 1\ 190\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 磷 $870\sim 980\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 钾 $1\ 580\sim 1\ 650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 钠 $370\sim 390\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 锌 $3.37\sim 3.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21];并且牛奶中酪蛋白胶束中的丝氨酸残基通过与 68% 钙和 47% 磷酸盐离子络合形成稳定的复合物^[22],使得钙磷更易于被肠道吸收;因此,富锶牛奶能够同时实现锶、钙、磷三种矿物元素的补充。二是牛奶中含有易于消化的营养物质。牛奶中乳蛋白分为乳清蛋白(Whey Proteins)和酪蛋白(Casein)^[15],并且乳蛋白的消化率($86.1\%\sim 90.8\%$)要显著高于植物类($65.1\%\sim 85.1\%$)和昆虫类蛋白($63.6\%\sim 69.5\%$)的消化率^[16];牛奶中 98% 的乳脂肪以甘油三酯形式储存于乳脂肪球内^[17],乳脂肪球由磷脂、胆固醇、糖基化蛋白质和各种脂质等组成的乳脂球膜(Milk Fat Globule Membrane, MFGM)包裹^[18];乳脂肪提供的能量和乳脂肪球膜提供的脂溶性活性物质对新生儿的生存至关重要^[19];三是高生物安全性。虽然在胃肠道吸收过程中,钙、锶会相互影响,但能保证钙、锶按照一定比例吸收,确保人体内钙与锶的比例不会失衡。四是高消费量。与富锶黑木耳^[73]、富锶功能盐^[74]等其他富锶食品相比,牛奶作为日常营养必需品,消费量大,富锶牛奶补锶效果会更显著。

本课题组杨继勇^[28]研究发现,在奶牛日粮中添加 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干物质(DM)的氯化锶与雷奈酸锶均能够有效提高牛奶中锶的含量,与对照组相比分别提高了 0.568 和 $0.461\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;并且日粮中添加锶对奶牛生产性能、瘤胃发酵指标、血液生理生化指标均无显著影

响。Huang 等^[8]研究发现,锶显著提高大鼠的精子浓度、精子活力,改善睾丸标记酶和睾酮标记基因水平,改变大鼠的肠道菌群。Xi 等^[14]进一步研究发现,锶是调节骨转换和维持骨平衡的关键生物活性元素,锶能够通过调控年轻雄性大鼠的肠道微生物群,减少骨质流失,并认为锶在避免骨量不足引起的老年骨科疾病方面具有很大的潜力。

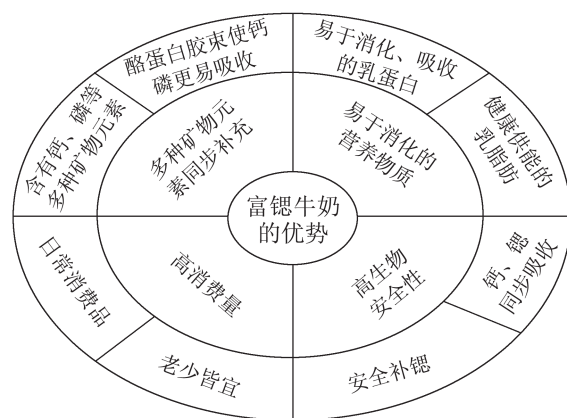


图 2 富锶牛奶的优势

Fig.2 Advantages of strontium-rich milk

6 结论与展望

锶具有强壮骨骼、预防和治疗骨质疏松、缓解高血压等多种生物学作用。由于我国居民锶摄入水平较低、中老年人骨质疏松问题日趋严重,建议在日常饮食中补充锶元素。富锶牛奶含有易于消化的营养物质、丰富的矿物质和微量元素,具有较高的生物安全性,能够同时补充锶、钙、磷和 VD 等,因此,富锶牛奶是一种优质的、高生物安全性的补锶食品。未来的研究应该集中在:(1)深入研究富锶牛奶在维持骨骼、心血管健康方面的主要作用机理;(2)深入研究富锶牛奶中锶、钙、磷的适宜含量比;(3)开发面向青少年、中老年等不同人群的富锶牛奶产品。

参考文献

- [1] YOU J, ZHANG Y, ZHOU Y. Strontium functionalized in biomaterials for bone tissue engineering: a prominent role in osteoimmunomodulation [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 6(10): 928799.
- [2] WANG B, GUO H, GENG T, et al. The effect of strontium ranelate on titanium particle-induced periprosthetic osteolysis regulated by WNT/ β -catenin signaling *in vivo* and *in vitro* [J]. Bioscience Reports, 2021, 41(1): BSR20203003.
- [3] ALSHAMMARI H, NEILANDS J, SVENSÄTER G, et al. Antimicrobial potential of strontium hydroxide on bacteria associated with peri-implantitis [J]. Antibiotics (Basel), 2021, 10(2): 150.
- [4] LIAO B, DING M, WANG Y, et al. Strontium ion attenuates

- osteoarthritis through inhibiting senescence and enhancing autophagy in fibroblast-like synoviocytes [J]. Molecular Biology Reports, 2023, 50(2): 1437-1446.
- [5] 林好滨,辛志明,夏瑜鸿,等.饮水锶对高血压小鼠抗氧化功能的影响[J].营养学报,2023,45(5):460-464.
- [6] XING M, JIANG Y, BI W, et al. Strontium ions protect hearts against myocardial ischemia/reperfusion injury [J]. Science Advances, 2021, 7(3): eabe0726.
- [7] WANG S, ZENG F, MA Y, et al. Strontium attenuates hippocampal damage via suppressing neuroinflammation in high-fat diet-induced NAFLD mice [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(12): 10248.
- [8] HUANG X, GAO Y, ZHANG Y, et al. Strontium chloride improves reproductive function and alters gut microbiota in male rats [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 13922.
- [9] CHEN L, GUO Q, WANG Q, et al. Association between plasma strontium, a bone-seeking element, and type 2 diabetes mellitus [J]. Clinical Nutrition, 2020, 39(7): 2151-2157.
- [10] 董昕玥,张晓明,刘念,等.锶元素促成骨机制及在口腔再生医学中的应用研究进展[J].中国医药科学,2024,14(3):37-40.
- [11] 宫敬禹,张红,舒盈盈,等.含氯化锶脱敏糊剂对牙本质小管的封堵效果及生物安全性评价[J].口腔材料器械杂志,2022,31(3): 174-179.
- [12] 何柳柳,卢丽清,万宁,等.抗骨质疏松药物治疗原发性骨质疏松症有效性的网状Meta分析[J].中国医院药学杂志,2024,44(9): 1048-1055.
- [13] 刘利君.锶掺杂氮化碳纳米片促骨再生作用及机制研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [14] XI X, GAO Y, WANG J, et al. Strontium chloride improves bone mass by affecting the gut microbiota in young male rats [J]. Frontiers in Endocrinology, 2023, 14: 1198475.
- [15] MUDGIL P, ALMAZROUI M, REDHA A A, et al. Cow and camel milk-derived whey and casein protein hydrolysates demonstrated effective antifungal properties against selected Candida species [J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(3): 1878-1888.
- [16] KOMATSU Y, TSUDA M, WADA Y, et al. Nutritional evaluation of milk-, plant-, and insect-based protein materials by protein digestibility using the INFOGEST digestion method [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(5): 2503-2513.
- [17] THUM C, ROY N C, EVERETT D W, et al. Variation in milk fat globule size and composition: A source of bioactives for human health [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 63(1): 87-113.
- [18] WILMOT L, MILLER C, PATIL I, et al. The relevance of a potential bioactive ingredient: The milk fat globule membrane [J]. Journal of Dairy Science, 2025, 108(4): 3109-3134.
- [19] MAHESHWARI A, MANTRY H, BAGGA N, et al. Milk Fat Globules: 2024 Updates [J]. Newborn (Clarksville). 2024, 3(1): 19-37.
- [20] BOURLIEU C, MICHALSKI M C. Structure-function relationship of the milk fat globule [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2015, 18(2): 118-127.
- [21] WALTHER B, GUGGISBERG D, BADERTSCHER R, et al. Comparison of nutritional composition between plant-based drinks and cow's milk [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 988707.
- [22] CROSS K J, HUQ N L, REYNOLDS E C. Casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate nanocomplexes: a structural model [J]. Biochemistry, 2016, 55(31): 4316-4325.
- [23] 蔡悦.锶同位素地层学新方法探究[J].高校地质学报,2024, 30(3):253-268.
- [24] RU X, YANG L, SHEN G, et al. Microelement strontium and human health: comprehensive analysis of the role in inflammation and non-communicable diseases (NCDs) [J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1367395.
- [25] PENG H, YAO F, XIONG S, et al. Strontium in public drinking water and associated public health risks in Chinese cities [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(18): 23048-23059.
- [26] 郭颖超,孙志辉,刘卫,等.承德地区富锶土壤与农作物锶含量特征[J].矿产勘查,2023,14(7):1289-1296.
- [27] AMALFITANO N, PATEL N, HADDI M L, et al. Detailed mineral profile of milk, whey, and cheese from cows, buffaloes, goats, ewes and dromedary camels, and efficiency of recovery of minerals in their cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(11): 8887-8907.
- [28] 杨继勇.氯化锶和雷奈酸锶对瘤胃发酵参数及奶牛生产性能的影响[D].北京:中国农业科学院,2023.
- [29] Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum [S]. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [30] 《食品安全国家标准饮用天然矿泉水》(GB8537-2018)《食品安全国家标准包装饮用水生产卫生规范》(GB19304-2018)发布[J].饮料工业,2018,21(3):1.
- [31] 陶勇,许凤文,曹生宏,等.饮用水中锶卫生标准的研制[J].中国公共卫生,2000,7:39.
- [32] ZHANG X, CUI J, CHENG L, et al. Enhancement of osteoporotic bone regeneration by strontium-substituted 45S5 bioglass via time-dependent modulation of autophagy and the Akt/mTOR signaling pathway [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2021, 9(16): 3489-3501.
- [33] REN W H, XIN S, YANG K, et al. Strontium-doped hydroxyapatite promotes osteogenic differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells in osteoporotic rats through the CaSR-JAK2/STAT3 signaling pathway [J]. Advanced NanoBiomed Research, 2022, 2(9): 2200018.
- [34] SUN T, MA D, SONG Y, et al. Effects of 0.01 mM strontium on human periodontal ligament stem cell osteogenic differentiation via the Wnt/ β -catenin signaling pathway [J]. The Journal of International Medical Research, 2025, 53(2): 3000605251315024.
- [35] ZHANG Z, GONG N, WANG Y, et al. Impact of strontium, magnesium, and zinc ions on the *in vitro* osteogenesis of maxillary sinus membrane stem cells [J]. Biological Trace Element Research, 2025, 203(4): 1922-1933.
- [36] LI Y, YUE J, LIU Y, et al. Strontium regulates stem cell fate during osteogenic differentiation through asymmetric cell division [J]. Acta

- Biomaterialia, 2021, 119: 432-443.
- [37] HAYANN L, DA ROCHA V F, CÂNDIDO M F, et al. A nontoxic strontium nanoparticle that holds the potential to act upon osteocompetent cells: An *in vitro* and *in vivo* characterization [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2024, 112(9): 1518-1531.
- [38] AIMAITI A, WAHAFU T, KEREMU A, et al. Strontium ameliorates glucocorticoid inhibition of osteogenesis via the ERK signaling pathway [J]. Biological Trace Element Research, 2020, 197(2): 591-598.
- [39] ZHANG Y, LIU L, LI M, et al. Dose-dependent enhancement of *in vitro* osteogenic activity on strontium-decorated polyetheretherketone [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 3063.
- [40] LIU S, SHEN B, LOOR J J, et al. Strontium regulates the proliferation and differentiation of isolated primary bovine chondrocytes via the TGF β /Smad pathway [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 925302.
- [41] HU P, DU J, ZHANG S, et al. Oral administration of strontium gluconate effectively reduces articular cartilage degeneration through enhanced anabolic activity of chondrocytes and chondrogenetic differentiation of mesenchymal stromal cells [J]. Biological Trace Element Research, 2020, 193: 422-433.
- [42] YUAN W, LIU J, ZHANG Z, et al. Strontium-Alix interaction enhances exosomal miRNA selectively loading in synovial MSCs for temporomandibular joint osteoarthritis treatment [J]. International Journal of Oral Science, 2025, 17(1): 6.
- [43] HUANG D, ZHAO F, GAO W, et al. Strontium-substituted sub-micron bioactive glasses inhibit osteoclastogenesis through suppression of RANKL-induced signaling pathway [J]. Regenerative Biomaterials, 2020, 7(3): 303-311.
- [44] FERNANDES E OLIVEIRA H F, ADDISON O, YOGUI FC, et al. Strontium-containing mineralized phospholipid coatings improve osseointegration in osteoporotic rats [J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2025, 113(1): e37782.
- [45] ALSHAMMARI H, NEILANDS J, JEPPESEN C S, et al. Antimicrobial potential of strontium-functionalized titanium against bacteria associated with peri-implantitis [J]. Clinical and Experimental Dental Research, 2024, 10(4): e903.
- [46] YU H, LIU Y, YANG X, et al. The anti-inflammation effect of strontium ranelate on rat chondrocytes with or without IL-1 β *in vitro* [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2022, 23(3): 1-10.
- [47] XU A T, XIE Y W, XU J G, et al. Effects of strontium-incorporated micro/nano rough titanium surfaces on osseointegration via modulating polarization of macrophages [J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2021, 207: 111992.
- [48] SUN R, ZHU J, SUN K, et al. Strontium ranelate ameliorates intervertebral disc degeneration via regulating TGF- β 1/NF- κ B axis [J]. International Journal of Medical Sciences, 2023, 20(13): 1679-1697.
- [49] TAN P, YANG J, YI F, et al. Strontium attenuates LPS-induced inflammation via TLR4/MyD88/NF- κ B pathway in bovine ruminal epithelial cells [J]. Biological Trace Element Research, 2024, 202(9): 3988-3998.
- [50] HARSHINI S, SHANMUGAM R, GOVINDHARAJ S. Green synthesis of mimosa pudica-mediated strontium nanoparticles and its anti-inflammatory activity [J]. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 2024, 16(Suppl 2): S1335-S1339.
- [51] HAN C, ZHANG M, XU S, et al. Strontium ranelate-loaded human hair keratin-hyaluronic acid hydrogel accelerates wound repair with anti-inflammatory and antioxidant properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281(Pt 4): 136536.
- [52] 李牧, 杨佳琳, 杨庭树, 等. 微量元素锶对幼年自发性高血压大鼠血压升高的预防作用及其作用机制探讨[J]. 现代生物医学进展, 2012, 12(12): 2259-2264.
- [53] LI T, HE H, YANG Z, et al. Strontium-doped gelatin scaffolds promote M2 macrophage switch and angiogenesis through modulating the polarization of neutrophils [J]. Biomaterials Science, 2021, 9(8): 2931-2946.
- [54] CHENG B, CHEN Q Y, ZHANG X, et al. Improved biocompatibility and angiogenesis of the bone titanium scaffold through ERK1/2 Signaling mediated by an attached strontium element [J]. Biological Trace Element Research, 2024, 202(4): 1559-1567.
- [55] CHENG D, DING R, JIN X, et al. Strontium ion-functionalized nano-hydroxyapatite/chitosan composite microspheres promote osteogenesis and angiogenesis for bone regeneration [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2023, 15(16): 19951-19965.
- [56] JIA K, WANG S, DAI Q, et al. Breast-milk rubidium and other trace elements are associated with neurocognitive development in infants at age of 8 months [J]. The Journal of Nutrition, 2022, 152(6): 1507-1514.
- [57] ITO A, FUJITA Y, WADA Y, et al. A relatively higher concentration of zinc and strontium within normal levels in breast milk is associated with higher growth rates among breastfed neonate [J]. Journal of Iwate Medical Association, 2020, 72(5): 205-215.
- [58] GANG H, ZUO J, JIA Z, et al. Trimester-specific urinary strontium concentrations during pregnancy and longitudinally assessed fetal growth: findings from a prospective cohort [J]. The Journal of Nutrition, 2024, 154(1): 224-232.
- [59] HELLMAN B, GYLFE E, BERGSTEN P, et al. Oscillatory signaling and insulin release in human pancreatic β -cells exposed to strontium [J]. Endocrinology, 1997, 138(8): 3161-3165.
- [60] VALLINAYAKI K N, SHANMUGAM R. Evaluation of antidiabetic activity and cytotoxic effect of strontium nanoparticles synthesized using mimosa pudica [J]. Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences, 2024, 16(Suppl 2): S1340-S1344.
- [61] 杨继勇, 张养东, 郑楠, 等. 锶元素的生物学功能及其在人体内的代谢研究进展[J]. 中国食物与营养, 2022, 28(9): 50-56.
- [62] 张骏, 尤奇, 邹刚, 等. 锶元素在骨组织工程研究中的应用与进展[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(18): 2936-2940.
- [63] TAN P, ZHAO C, DONG Y, et al. A network pharmacology and multi-omics combination approach to reveal the effect of strontium on Ca²⁺ metabolism in bovine rumen epithelial cells [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24: 9383.

- [64] WALKER D, GARDNER M T, DENNIS H, et al. A simple assessment of the effect of strontium on the urinary excretion of calcium in Sprague Dawley rats [J]. *Urolithiasis*, 2023, 51(1): 53.
- [65] FÖGER-SAMWALD U, DOVJAK P, AZIZI-SEMRAD U, et al. Osteoporosis: pathophysiology and therapeutic options [J]. *EXCLI Journal*, 2020, 19: 1017-1037.
- [66] HARRIS K, ZAGAR C A, LAWRENCE K V. Osteoporosis: common questions and answers [J]. *American Family Physician*, 2023, 107(3): 238-246.
- [67] WANG L T, CHEN L R, CHEN K H. Hormone-related and drug-induced osteoporosis: a cellular and molecular overview [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(6): 5814.
- [68] VILAC T, EASTELL R, SCHIN M. Osteoporosis in men [J]. *The Lancet. Diabetes & Endocrinology*, 2022, 10(4): 273-283.
- [69] BANDEIRA L, SILVA B C, BILEZIKIAN J P. Male osteoporosis [J]. *Archives of Endocrinology and Metabolism*, 2022, 66(5): 739-747.
- [70] CAMARGO L L, RIOS F J, MONTEZANO A C, et al. Reactive oxygen species in hypertension [J]. *Nature Reviews. Cardiology*, 2025, 22(1): 20-37.
- [71] HENEIN M Y, VANCHERI S, LONGO G, et al. The role of inflammation in cardiovascular disease [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(21): 12906.
- [72] ZHANG M, LIU Y, LIU Y, et al. Retinoic acid improves vascular endothelial dysfunction by inhibiting PI3K/AKT/YAP-mediated ferroptosis in diabetes mellitus [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2025, 31(2): 140-152.
- [73] 孙娅,解修超,王昌钊,等.黑木耳富锶菌株的筛选及锶在胞内物质中的分布[J].*核农学报*,2023,37(12):2417-2423.
- [74] 苏鑫,赖冬梅,周源,等.自贡地下卤水制备富锶功能盐工艺研究[J].*无机盐工业*,2024,56(3):45-50.