5G Sub-6 GHz 频段下行电磁场暴露的甲状腺健康风险评估：剂量仿真研究

刘小草 李 静 苗 霞 高 鹏 张 伟 林加金

（空军军医大学预防医学系辐射防护医学教研室 特殊作业环境危害评估与防治教育部重点实验室 西安 710032）

摘要 甲状腺对射频电磁场较为敏感，儿童及青少年可能面临更高的暴露风险。本研究基于虚拟人体模型，采用时域有限差分法（Finite-difference time-domain，FDTD）剂量学仿真，量化评估5G Sub-6 GHz频段下行电磁场对不同年龄人群甲状腺的暴露剂量差异。选取Duke（34岁，成人）、Louis（14岁，青少年）和Dizzy（8岁，儿童）三个人体模型，在0.7~4.9 GHz频段内计算甲状腺组织比吸收率（Tissue specific absorption rate，TSAR）。激励源为45°极化平面波，入射方位角以15°为间隔进行360°扫描。通过方位角平均获得理想暴露的TSAR值，并依据国际非电离辐射防护委员会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection，ICNIRP）指南及国家标准GB 8702－2014限值推算安全阈值暴露场景下的剂量水平。结果显示：（1）甲状腺TSAR随入射方位角显著变化，正面入射（约180°）最高，背面入射（约0°）最低，极差约两个数量级；（2）在0.7~4.9 GHz范围内，甲状腺TSAR随频率升高呈总体下降趋势；（3）儿童甲状腺TSAR显著高于成人（高出8.0~11.1 dB），青少年次之（高出约6.0~9.0 dB）；（4）在ICNIRP限值条件下，TSAR峰值位于1.8~2.6 GHz，而在国家标准限值条件下，TSAR随频率升高单调下降。5G Sub-6 GHz频段下行电磁场对甲状腺的暴露剂量存在显著年龄差异，儿童为敏感人群。尽管新引入的高频段未构成显著新增风险，但建议在电磁辐射防护指南制定及基站选址中，优先考虑儿童、青少年等敏感人群的甲状腺保护。

关键词 5G Sub-6 GHz，甲状腺，射频电磁场暴露，风险评估，剂量仿真

中图分类号 Q64

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0015

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0015

引用该文：

刘小草, 李静, 苗霞, 等. 5G Sub-6 GHz频段下行电磁场暴露的甲状腺健康风险评估:剂量仿真研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2026, **44**(5): 050501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0015.

LIU Xiaocao, LI Jing, MIAO Xia, *et al*. Thyroid health risk assessment of 5G Sub-6 GHz downlink EMF exposure: a computational dosimetry study[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, **44**(5): 050501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0015.

基金资助：空军军医大学航空医学基金（2023JSYX35）

第一作者：刘小草，女，2004年6月出生，空军军医大学基础医学院学员，临床医学专业

通信作者：林加金，副教授，E-mail: 348068301@126.com

收稿日期：初稿 2026-01-27；修回 2026-05-26

Supported by the Air Force Medical University Aerospace Medicine Research Grant (2023JSYX35)

First author: LIU Xiaocao (female) was born in June 2004. Now she is an undergraduate student at Basic Medical Science Academy of Air Force Medical University, majoring in clinical medicine

Corresponding author: LIN Jiajin, associate professor, E-mail: 348068301@126.com

Received 27 January 2026; accepted 26 May 2026

Thyroid health risk assessment of 5G Sub-6 GHz downlink EMF exposure: a computational dosimetry study

LIU Xiaocao LI Jing MIAO Xia GAO Peng ZHANG Wei LIN Jiajin

(*Department of Radiation Protection Medicine, School of Preventive Medicine, Air Force Medical University, Ministry of Education Key Laboratory of Hazard Assessment and Control in Special Operational Environment, Xi'an 710032, China*)

ABSTRACT The thyroid gland is particularly sensitive to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMFs), with children and adolescents potentially facing higher exposure risks. This study employed finite-difference time-domain (FDTD) dosimetric simulations based on virtual human body models to quantitatively assess age-related differences in thyroid exposure doses from 5G Sub-6 GHz downlink electromagnetic fields. Three anatomical models were selected: Duke (34 years, adult), Louis (14 years, adolescent), and Dizzy (8 years, child). Tissue-specific absorption rate (TSAR) values for the thyroid were computed across the 0.7 – 4.9 GHz frequency range. The excitation source was configured as a 45° polarized plane wave, with azimuth angles scanned at 15° intervals over 360°. Azimuth-averaged TSAR values were obtained to represent idealized exposure conditions, and dose levels under safety threshold exposure scenarios were estimated according to the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) guidelines and the national standard GB 8702—2014. The results demonstrated that: thyroid TSAR varied substantially with incident azimuth angle, peaking at frontal incidence (~180°) and reaching minima at rear incidence (~0°), with an approximate two-order-of-magnitude difference between extremes; across the 0.7 – 4.9 GHz range, TSAR exhibited an overall decreasing trend with increasing frequency; thyroid TSAR was markedly elevated in children compared with adults (by 8.0 – 11.1 dB), with adolescents showing intermediate values (approximately 6.0 – 9.0 dB higher than adults); and under ICNIRP limit conditions, peak TSAR occurred at 1.8 – 2.6 GHz, whereas under national standard limit conditions, TSAR decreased monotonically with increasing frequency. These findings indicate significant age-related differences in thyroid exposure doses from 5G Sub-6 GHz downlink electromagnetic fields, identifying children as a sensitive population. Although newly introduced higher frequency bands do not appear to pose significant additional risks, it is recommended that age-specific exposure standards be considered in the development of electromagnetic radiation protection guidelines, and that base station siting strategies prioritize the protection of thyroid health in children and adolescents.

KEYWORDS 5G Sub-6 GHz, Thyroid gland, EMF exposure, Risk assessment, Computational dosimetry study

CLC Q64

流行病学研究表明，包括先天性甲状腺功能减退症、甲状腺炎及甲状腺功能亢进症在内的甲状腺相关疾病发病率呈上升趋势[1-2]。这一趋势在过去几十年间年轻人甲状腺癌发病率显著上升的数据中表现得尤为明显[3]。诸多研究指出，环境因素——尤其是源于人类活动并在环境中广泛存在的因素——对甲状腺功能具有显著且往往是不利的影响，从而可能诱发或加剧甲状腺疾病[4-5]。随着现代通信技术的飞速发展，射频电磁场（Radio frequency electromagnetic fields，RF-EMF）已成为环境中普遍存在的暴露因素，其对人类健康的潜在影响日益受到关注。尽管目前证据尚未证实低水平电磁场暴露存在明确的健康危害，但流行病学调查提示，环境RF-EMF暴露与头痛、焦虑、睡眠障碍等非特异性症状，以及潜在的肿瘤风险增加相关[6-8]。特别值得关注的是，甲状腺作为对电磁辐射敏感的内分泌器官，其功能易受到环境电磁场干扰，可能导致激素稳态失衡。现有流行病学证据显示，长期射频电磁场暴露与甲状腺癌发病风险升高存在显著关联[9]，且暴露强度、暴露时长等剂量指标与甲状腺功能异常程度呈正相关[10-11]。从生物学机制层面来看，动物实验为阐明RF-EMF干扰甲状腺功能的内在机理提供了重要支撑。相关实验证实，RF-EMF暴露可引起实验动物促甲状腺激素（TSH）、三碘甲状腺原氨酸（T3）及甲状腺素（T4）分泌紊乱，同时诱发甲状

腺组织病理形态改变，表现为滤泡细胞萎缩、形态异常及滤泡腔内胶体蓄积等特征[12-13]。此外，RF-EMF 暴露还可诱发甲状腺细胞凋亡，并上调机体氧化应激水平[14]，从组织、细胞及分子层面揭示了射频电磁场诱发甲状腺损伤的潜在作用通路。5G 通信技术（特别是 Sub-6 GHz 频段）的健康影响评估尚处于起步阶段。随着 5G 基础设施在中国、韩国等国家的迅速部署[15-16]，基站天线的日益普及使公众对潜在健康风险的担忧日益增加[17-20]。值得注意的是，基站发出的下行链路电磁辐射水平可能超过个人设备的上行信号[21]，其长期普遍性暴露特征使学校、医疗机构等敏感公共区域的建设选址备受关注。然而，当前针对 5G Sub-6 GHz 频段电磁辐射与甲状腺健康关联的研究仍存在明显空白，新频段下甲状腺的电磁暴露风险已成为亟待探究的公共卫生问题。现有剂量评估研究方法[22-23]未能充分考虑人群特征（如年龄差异）和频率特异性，难以真实反映不同人群的暴露特征与差异化频段使用模式，无法精准评估普通人群的实际健康风险[24-26]；通信行业通常通过与安全限值比较验证基站安全性[27-28]，而公共卫生领域更依赖实验和流行病学数据[6, 19]，这种差异凸显了评估方法学的持续争论[29]。

本研究旨在采用贴近现实的剂量计算方法，分析广泛使用的 5G Sub-6 GHz 基站下行电磁辐射的人群暴露情况，重点评估儿童、青少年和成人甲状腺的潜在风险，特别关注 5G Sub-6 GHz 频谱内新频段引入的影响。研究整合标准化评估技术，确保结果与国家电磁环境标准及国际非电离辐射防护委员会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection，ICNIRP）[30] 指南保持一致。本研究的总体目标是深入分析和探索公共通信基础设施的电磁暴露问题，为回应公众对通信辐射相关甲状腺健康问题的关切提供科学依据，特别关注未成年群体的甲状腺健康保护。

1 材料与方法

1.1 仿真场景

图 1 展示了基站下行辐射与人体耦合的仿真场景示意图。电磁波的极化方向和入射角度是决定人体内部（尤其是局部组织）电磁吸收剂量的关键因素。极化方向通常定义为电场矢量的方向。在现代移动通信技术中，基站天线主要采用双极化天线[31-33]。该类天线集成了两个相互正交的极化方向（通常相对于垂直方向偏转±45°），并支持双频段工作。与传统单极化天线相比，双极化天线具有减少天线数量、提高空间利用率及改善覆盖范围等优势[34-35]。

图 1 同时示意了极化方向与波入射方向之间的几何关系。在本研究的模型中，为简化对基站下行电磁波传播的模拟，将激励源设定为具有固定 45°线性极化角的单一平面波。坐标系定义如下：X 轴和 Y 轴位于地平面内，Z 轴垂直于地面（纵轴）。在此设置下，电场矢量的方向固定为 45°倾角（图中示意为 θ），以匹配平面波源的极化设置。入射方位角 φ 定义为物体正前方向与 x 轴正方向之间的夹角，该角度在 0°~360°范围内作为变量进行旋转扫描。此外，图 1 还示意了电磁场的方向。E 为电场，H 为磁场，K 为波的传播。

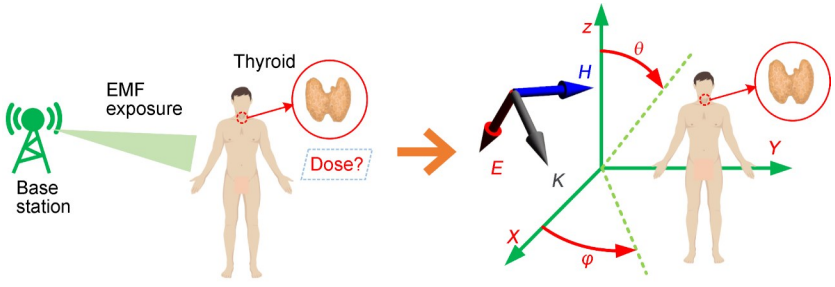

图 1 下行辐射与人体耦合的仿真场景

Fig.1 Simulation environment of downlink radiation coupled with human body

本研究利用 Sim4life 仿真平台（Zurich Medical Technology Co.，Ltd.，Switzerland）进行电磁剂量学计算。为了便于结果归一化与比较，入射电场强度设置为 1 V/m。计算域边界条件采用单轴完美匹配层（Uniaxial perfectly matched layer，UPML）以消除边界反射。全域仿真网格步长设置为 1 mm。仿真过程采用了图形处理器（Graphics processing unit，GPU）加速技术。

1.2 全身虚拟模型

为探究不同年龄组剂量的差异性，本研究选取了三个具有代表性的虚拟人体模型。其中，34岁的Duke模型用于代表成年组，14岁的Louis模型代表青少年组，8岁的Dizzy模型代表儿童组。所有模型均由Sim4life提供。在甲状腺解剖特征方面，Duke、Louis和Dizzy模型的甲状腺质量分别为21.2 g、11.4 g和4.4 g，这一变化符合不同年龄段人群的解剖学发育规律。图2展示了这三种虚拟人体的示意图，其年龄、身高、体重、身体质量指数（Body mass index，BMI）及像素间距等主要参数详见表1。

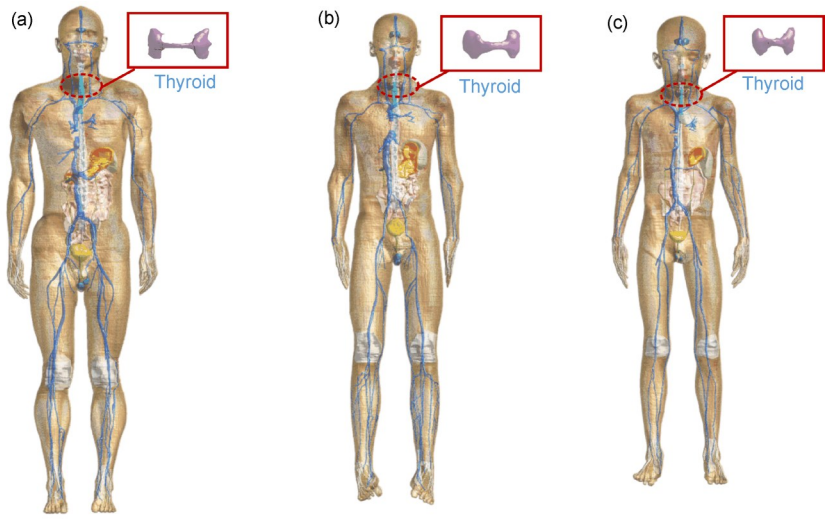

图 2 三种虚拟模型示意图：(a)Duke；(b)Louis；(c)Dizzy
Fig. 2 Schematic diagram of three virtual models: (a) Duke; (b) Louis; (c) Dizzy

表1 三种人体虚拟模型的主要参数
Table 1 Main parameters of the three human virtual models

模型姓名 Model name	代表群 Representative group	年龄 Age	身高 / m Height	体重 / kg Weight	BMI值 / (kg·m^{-2}) BMI value	像素间距 / mm Pixel spacing	甲状腺质量 / g Thyroid mass
杜克Duke	成人 Adult	34	1.77	70.2	22.4	0.5×0.5	21.2
路易斯Louis	青少年 Adolescent	14	1.68	49.7	17.6	0.5×0.5	11.4
迪齐Dizzy	儿童 Child	8	1.37	25.3	13.5	0.5×0.5	4.4

1.3 频率点和介质参数

当前国内的移动通信网络呈现出多代标准并存的格局。文献[31, 36]全面概述了国内目前2G至5G各制式的频段分配情况。基于此，本研究在仿真中选取了7个具有代表性的频率点进行分析，具体：代表5G低频段的0.7 GHz，代表2G/3G的0.9 GHz；代表4G的1.8 GHz和2.1 GHz；以及代表5G中高频段的2.6 GHz、3.5 GHz和4.9 GHz。仿真软件Sim4life集成了ITIS数据库功能，能根据激励频率自动更新模型中各生物组织的介电参数。

1.4 数值方法和基本剂量

本研究采用时域有限差分法（Finite-difference time-domain，FDTD），模拟了上述频率点下电磁辐射与人体的耦合过程及剂量分布。借助Sim4life生物电磁仿真平台，实现了在宽频范围内的生物电磁剂量精确模拟。比吸收率（Specific absorption rate，SAR）是本研究的核心剂量评估指标，定义为单位质量生物组织所吸收的电磁功率。根据评估范围的不同，SAR通常分为全身平均比吸收率（Whole-body average specific absorption rate，WBASAR）和组织比吸收率（Tissue specific absorption rate，TSAR）。Sim4life软件可以在结果分析中导出TSAR和WBASAR值。在本研究中，甲状腺的TSAR是关注的焦点。因此，定义甲状腺TSAR（Thyroid TSAR）来表示甲状腺的组织比吸收率。

1.5 归一化数据分析

鉴于不同入射方位角下的甲状腺及全身剂量可能存在显著差异，需基于各方位角的SAR值计算其平均值，以便进行标准化评估。各方位角下的平均SAR值计算见式（1）。

$$\mathrm{SAR}_{d,a}=\sum_{i=1}^{N}\mathrm{SAR}_{d,i}/N \tag{1}$$

式中：$\mathrm{SAR}_{d,a}$为一个周期内SAR的平均值，W/kg；$\mathrm{SAR}_{d,i}$为不同方向上的单个SAR值，W/kg；N为一个周期内的采样总数，本研究取24。

此外，为评估不同年龄组在相同频率下的剂量差异，本研究采用相对比较法，计算见式（2）。

$$\mathrm{RCC}_{\mathrm{SAR}}=10\lg\left(\frac{\mathrm{SAR}_{d,a}}{\mathrm{SAR}_{d,a,0}}\right) \tag{2}$$

式中：$\mathrm{RCC}_{\mathrm{SAR}}$为SAR值的相对比较系数，dB；$\mathrm{SAR}_{d,a}$为特定年龄组的平均SAR值，W/kg；$\mathrm{SAR}_{d,a,0}$为参考SAR值，W/kg，本研究特指成年组的SAR值。

1.6 暴露限值下的数据分析

射频电磁场公众暴露标准或指南的制定依据不尽相同，导致不同频点的暴露限值存在差异。依据ICNIRP 2020[30]和国家标准GB 8702－2014的规定[37]，公众全身暴露的功率密度限值参见图3。因此，在评估最大允许暴露水平下的剂量时，需参照这些标准规定的限值进行推算。为计算标准限值条件下的SAR值，可采用式（3）换算。

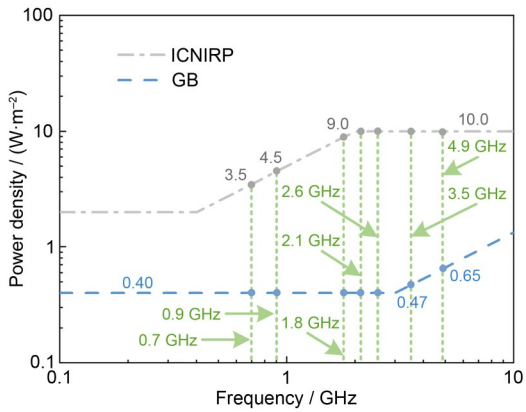

图3 公众暴露功率密度限值（彩色见网络版）
Fig.3 Power density limit values for public exposure (color online)

$$\mathrm{SAR}_{\mathrm{EL}}=\mathrm{SAR}_0\cdot\left(P_{\mathrm{L}}/P_0\right) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{SAR}_{\mathrm{EL}}$为根据标准限值推算得到的SAR值，W/kg；$\mathrm{SAR}_0$为原始激励电场强度（1 V/m）下仿真计算得到的SAR值，W/kg；P_{L}为图3所示的标准功率密度限值，W/m²；P_0为原始激励下的参考功率密度，取值1/754 W/m²。

2 结果与讨论

2.1 甲状腺TSAR随方位方向的变化

鉴于入射角度的变化可能对甲状腺TSAR产生显著影响，本研究以15°为间隔系统地改变入射方向，在24个不同方位角下采集了甲状腺TSAR数据。图4展示了三组模型甲状腺TSAR随方位角变化的趋势，并以2.1 GHz频率为例进行重点说明。观察结果显示，当电磁波从正面（约180°）入射时，甲状腺TSAR值显著较高；而当电磁波从背面（约0°）入射时，数值相对较低。总体而言，最高值与最低值之间相差约两个数量级。

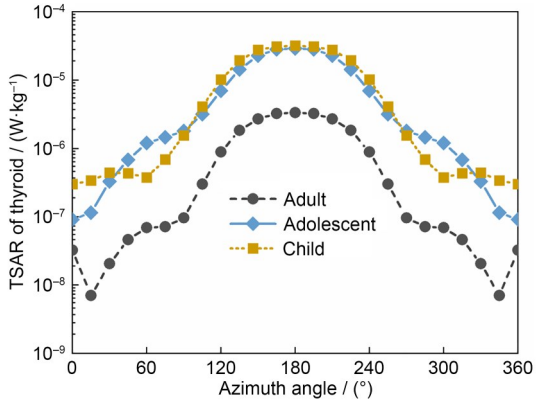

图4 三个组随方位角方向变化的甲状腺TSAR数据
Fig.4 The thyroid TSAR data for three groups with the azimuth direction

2.2 归一化评价结果

甲状腺TSAR和WBASAR的平均值通过式（1）计算得出，该结果综合了不同入射角度的影响。图5展示了在0.7~4.9 GHz频段内甲状腺TSAR的变化情况。观察结果显示，甲状腺TSAR值随频率的升高而呈现总体下降趋势。此外，研究还对比了不同年龄组在特定频率下的甲状腺TSAR值。图6给出了基于式（2）计算得到的相对比较系数（$\mathrm{RCC}_{\mathrm{SAR}}$）。数据表明，儿童和青少年的甲状腺TSAR值显著高于成人，高出范围在8.0~11.1 dB之间（即$\mathrm{RCC}_{\mathrm{SAR}}$值），这揭示了不同年龄组间TSAR剂量水平存在显著差异。具体而言，儿童的甲状腺TSAR值比青少年高出约1.0~2.6 dB，进一步凸显了年龄差异在吸收剂量上的显著差别。

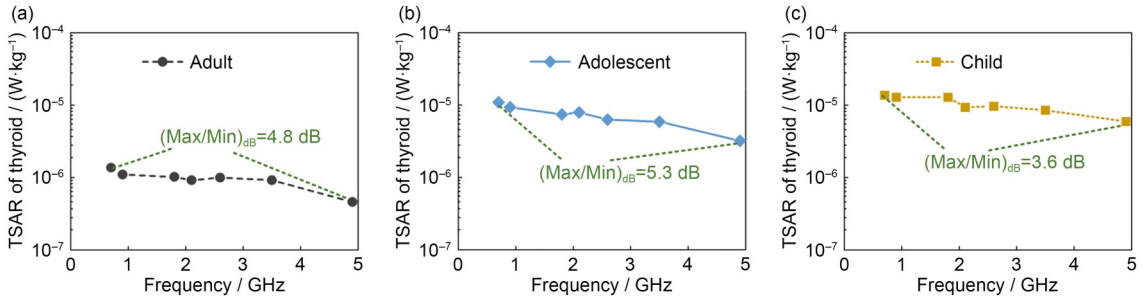

图 5 频率范围为0.7~4.9 GHz的甲状腺TSAR:(a)成人;(b)青少年;(c)儿童
Fig.5 Thyroid TSAR at frequencies of 0.7~4.9 GHz: (a) adult; (b) adolescent; (c) child

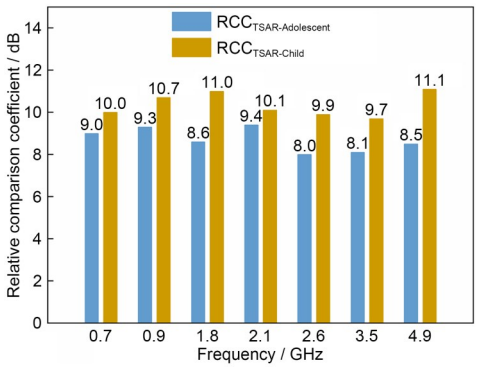

图 6 青少年和儿童相对成人的甲状腺TSAR相对比较系数(彩色见网络版)
Fig.6 Relative comparison coefficient of thyroid TSAR on adolescent and child relative to adult (color online)

采用类似的方法，本研究计算并比较了三个年龄组的全身平均比吸收率（WBASAR）。如图7所示，WBASAR值随频率的增加呈现逐渐下降的趋势。图8的数据进一步表明，与成人组相比，儿童和青少年的WBASAR相对值高出约0.4~3.7 dB。此外，儿童组的WBASAR比青少年组高出约1.4~1.6 dB。

此外，研究进一步对比分析了甲状腺TSAR与WBASAR。如图9所示，对比数据表明，成人组的比值始终低于100%的阈值。相反，青少年和儿童组的比值主要表现为超过这一基准，唯一的例外是青少年在4.9 GHz频率下的数据。

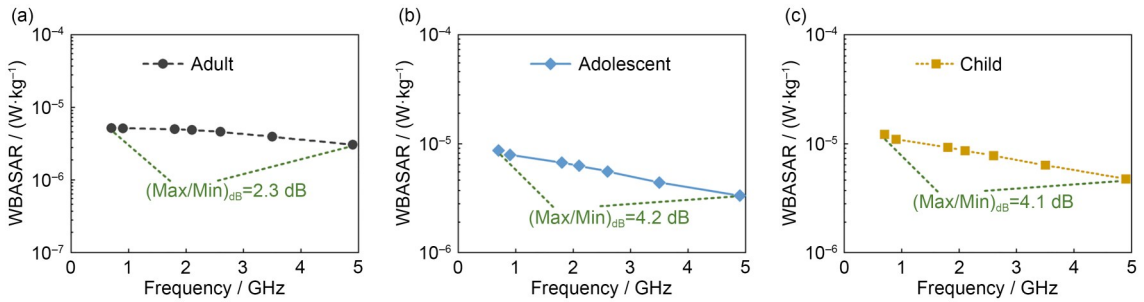

图 7 频率范围为0.7~4.9 GHz的WBASAR:(a)成人;(b)青少年;(c)儿童
Fig.7 WBASAR at frequencies ranging from 0.7 to 4.9 GHz: (a) adult; (b) adolescent; (c) child

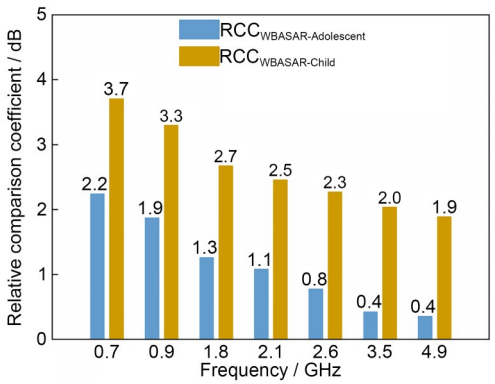

图 8 青少年和儿童WBASAR相对于成人的相对比较系数(彩色见网络版)
Fig.8 Relative comparison coefficient of WBASAR on adolescent and child relative to adult (color online)

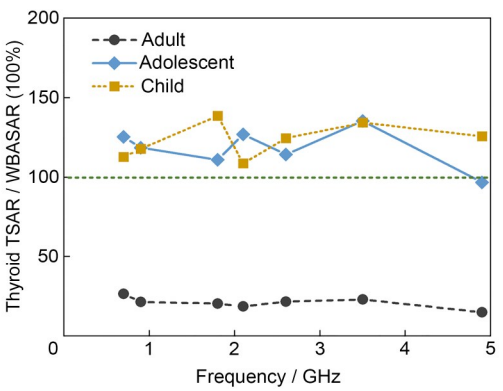

图 9 甲状腺TSAR值与WBASAR值的比较
Fig.9 Comparison between the thyroid TSAR value and the WBASAR value

2.3 暴露限值下的估计结果

在实际暴露评估分析中，必须将计算结果与既定标准和指南进行对比。本研究对甲状腺剂量值进行评估，以验证其是否低于图3所示的标准阈值限值。随后，利用式（3）所述方法推算了甲状腺TSAR值。图10显示，基于GB标准限值的甲状腺TSAR值随频率增加呈下降趋势。相反，基于ICNIRP指南的TSAR值呈现出相反的变化规律，即先随频率升高而增加，达到峰值后随频率升高而下降，如图11所示。其中，成人、青少年和儿童组的峰值频率分别为2.6 GHz、2.1 GHz和1.8 GHz。

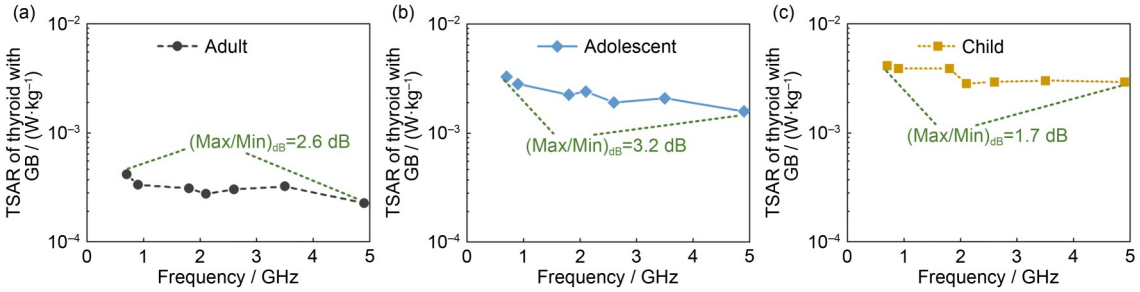

图10 GB暴露限值下的甲状腺TSAR
Fig.10 Thyroid TSAR under GB exposure limit

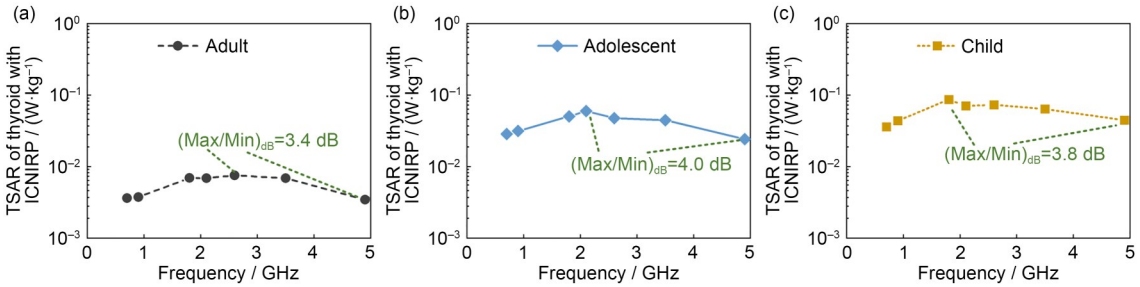

图11 ICNIRP暴露限值下的甲状腺TSAR
Fig.11 Thyroid TSAR under ICNIRP exposure limit

3 讨论

3.1 年龄因素引起的甲状腺剂量变异性

传统的人体生物电磁剂量评估[25, 38-39]通常以成年人为参考人群。IEEE [40] 和ICNIRP [30] 等组织制定的标准阈值主要基于对成年人的研究，这虽然满足了大多数职业群体的需求，但考虑到一般公众暴露环境的多样性，单一模型可能不足以进行全面的评估。以往在韩国和中国进行的研究通过评估不同人群，揭示了全身和脑部剂量的显著差异[21, 36, 41]。因此，本研究评估了三个不同年龄组，重点关注在国内主流双极化天线基站下行辐射下公众的甲状腺剂量。计算涵盖了极化条件、入射方向以及种群类型（包括普遍性参数与个体特异性特征）。图4的结果表明，甲状腺TSAR在360°入射角范围内变化了两个数量级，这证实了采用统计平均方法进行评估的必要性。此外，观察到了甲状腺剂量年龄相关性的两个显著方面。首先，从绝对值差异来看（图6），儿童和青少年的甲状腺TSAR比成人高出约8.0~11.1 dB，而其相对WBASAR值仅相差0.4~3.7 dB（图8）。这表明儿童接受的甲状腺暴露水平显著高于成人。此外，在青少年及儿童中，儿童的剂量值又高于青少年。其次，从相对比值来看（图9），成人的TSAR值明显低于WBASAR，而大多数儿童的TSAR值超过了WBASAR。剂量的这种变化可归因于不同年龄组之间的解剖学结构差异，以及射频电磁场与人体相互作用的具体物理机制。

综上所述，与成年人相比，未成年人表现出更高的甲状腺暴露水平，而该年龄组中的儿童则表现出最为明显的暴露。此外，儿童中TSAR与WBASAR的比值显著升高，提示甲状腺健康风险可能增加。这些发现强调了进行分年龄段暴露评估的必要性，并突显了儿童及青少年群体中甲状腺暴露升高的潜在健康风险。鉴于儿童及青少年

甲状腺对电磁辐射的潜在脆弱性，建议政策制定者考虑建立针对特定年龄的暴露标准，并在规划基站天线位置时，尽量使其远离儿童及青少年聚集场所。

3.2 Sub-6 GHz下较高频段的甲状腺风险

公众对5G sub-6 GHz频段（特别是2.6 GHz、3.5 GHz和4.9 GHz等新增频段）尤为关注。因此，评估在5G sub-6 GHz范围内使用上述频段的相关风险至关重要。参考以往的脑组织研究，建议将实际暴露强度的考量与相应的仿真计算相结合，以评估实际暴露水平。然而，由于采用了时分双工（Time-division duplex，TDD）技术，测量新频段的下行链路辐射面临一定挑战[42-43]。

本研究分别在归一化评估模式和暴露极限模式下进行了分析。归一化评估模式是为了在相同暴露值条件下对剂量值进行比对；暴露极限模式是在既定的标准和规范下，在不同频点处所允许的暴露极限值条件下对剂量值进行比对。由图5可见，在归一化评估下，甲状腺TSAR值随频率的降低而减小。在基于GB标准的评价中，甲状腺TSAR值随频率的增加而下降（图10）。然而，在基于ICNIRP指南的评估中，甲状腺TSAR值呈现先随频率增加而上升，随后下降的趋势，峰值出现在约1.8~2.6 GHz频率处（图11）。尽管峰值点存在波动，但均集中在1.8~2.6 GHz频段内。

这表明，从甲状腺组织剂量分析的角度来看，无论是归一化模式还是暴露极限模式，5G sub-6 GHz范围内的高频段（如2.6 GHz、3.5 GHz和4.9 GHz）对甲状腺组织均未构成显著风险。这一结论与大脑和生殖系统的风险评估结果相一致[36, 44]。然而，评估过程显示，依据国家标准得出的结果与国际准则存在一定差异：依据国家标准，潜在风险主要集中在sub-6 GHz通信的低频段；而依据ICNIRP指南，风险则集中在中频段。因此，基于频率分析，5G在sub-6 GHz下引入新的高频频段并不会对甲状腺造成显著的新增风险。

3.3 局限性和未来工作

本研究采用了Sim4Life平台中的Duke、Louis和Dizzy三款虚拟人体模型进行仿真。这些模型具有典型的代表性，其甲状腺质量分别为21.2 g、11.4 g和4.4 g，与人体解剖学的常规数据相符。因此，本研究计算所得的剂量具有较好的代表性。然而，考虑到人体甲状腺组织在解剖学上存在个体差异，这种解剖变异对剂量的影响有待进一步研究。

此外，建议结合实际暴露期间的电磁辐射水平测量结果进行人体剂量估算和风险评估[15]。然而，由于国内基站广泛采用TDD模式，难以准确区分天线下行与上行链路的辐射强度。此外，鉴于城市区域广阔且人口众多，开展大规模的数据测量面临巨大挑战。未来的研究有望通过采用更先进的测量技术和模拟手段，逐步解决这些局限性。

4 结论

本剂量学研究揭示了5G sub-6 GHz下行电磁场暴露对人群甲状腺功能的潜在健康风险。研究结果表明，甲状腺受照剂量受年龄因素显著影响，相较于成人，未成年人表现出更高的SAR值。尽管分析表明，基于甲状腺剂量评估，新引入的5G sub-6 GHz高频频段并未对甲状腺组织构成显著的新增风险，但不同年龄组间暴露水平的差异仍需引起足够重视。鉴于未成年人甲状腺对电磁辐射暴露的潜在脆弱性，建议政策制定者考虑制定分年龄段的暴露标准，并在5G基站天线的选址布局上采取战略性措施，使其远离儿童及青少年高度密集的居住区域。未来的研究应致力于改进暴露评估方法，纳入现实场景下的暴露测量，并有效应对5G网络中时分双工（TDD）技术带来的挑战。本研究为关于5G技术健康影响的持续讨论提供了科学依据，有助于制定更为完善的安全指南和公共政策。

作者贡献声明 刘小草负责原始数据收集、数据处理与分析及论文的撰写；苗霞、高鹏、张伟参与健康讨论的指导；李静负责研究思路设计；林加金负责仿真模拟及论文整体修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Razvi S, Korevaar T I M, Taylor P. Trends, determinants, and associations of treated hypothyroidism in the United Kingdom, 2005−2014[J]. Thyroid, 2019, **29**(2): 174-182. DOI: 10.1089/thy.2018.0251.

2 Leese G P, Flynn R V, Jung R T, *et al*. Increasing prevalence and incidence of thyroid disease in Tayside,

Scotland: the Thyroid Epidemiology Audit and Research Study (TEARS)[J]. Clinical Endocrinology, 2008, **68**(2): 311-316. DOI: 10.1111/j.1365-2265.2007.03051.x.

3 Vaccarella S, Lortet-Tieulent J, Colombet M, *et al*. Global patterns and trends in incidence and mortality of thyroid cancer in children and adolescents: a population-based study[J]. The Lancet Diabetes & Endocrinology, 2021, **9**(3): 144-152. DOI: 10.1016/S2213-8587(20)30401-0.

4 Xu J, Xu H L, Cao Y N, *et al*. The performance of deep learning on thyroid nodule imaging predicts thyroid cancer: a systematic review and meta-analysis of epidemiological studies with independent external test sets[J]. Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews, 2023, **17**(11): 102891. DOI: 10.1016/j.dsx.2023.102891.

5 Di Ciaula A, Bonfrate L, Noviello M, *et al*. Thyroid function: a target for endocrine disruptors, air pollution and radiofrequencies[J]. Endocrine, Metabolic & Immune Disorders – Drug Targets, 2023, **23**(8): 1032-1040. DOI: 10.2174/1871530321666210909115040.

6 Pall M L. Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression[J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2016, **75**: 43-51. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001.

7 Röösli M, Dongus S, Jalilian H, *et al*. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: a systematic review and meta-analysis on human observational studies[J]. Environment International, 2024, **183**: 108338. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108338.

8 Hardell L, Nilsson M. Summary of seven Swedish case reports on the microwave syndrome associated with 5G radiofrequency radiation[J]. Reviews on Environmental Health, 2025, **40**(1): 147-157. DOI: 10.1515/reveh-2024-0017.

9 Karipidis K, Baaken D, Loney T, *et al*. The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: a systematic review of human observational studies – Part II: Less researched outcomes[J]. Environment International, 2025, **196**: 109274. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109274.

10 Koshy G, Baby N, Mathew A. The effect of electromagnetic radiation due to mobile phone use on thyroid function in medical students studying in a medical college in South India[J]. Indian Journal of Endocrinology and Metabolism, 2017, **21**(6): 797. DOI: 10.4103/ijem.ijem_12_17.

11 Mortavazi S, Habibi A, Ghanbari Z, *et al*. Alteration of TSH and thyroid hormones following mobile phone use [J]. Journal of Natural Science, Biology and Medicine, 2009, **2**(1): 60-62. DOI: 10.4103/0976-9668.49095.

12 Alkayyali T, Ochuba O, Srivastava K, *et al*. An exploration of the effects of radiofrequency radiation emitted by mobile phones and extremely low frequency radiation on thyroid hormones and thyroid gland histopathology[J]. Cureus, 2021. DOI: 10.7759/cureus.17329.

13 Shaukat F, Tassaduq I, Irfan A. Effects of electromagnetic radiations on thyroid follicles of mice[J]. Medical Forum Monthly, 2014, **25**: 66-69.

14 Eşmekaya M A, Seyhan N, Ömeroğlu S. Pulse modulated 900 MHz radiation induces hypothyroidism and apoptosis in thyroid cells: a light, electron microscopy and immunohistochemical study[J]. International Journal of Radiation Biology, 2010, **86**(12): 1106-1116. DOI: 10.3109/09553002.2010.502960.

15 Xia J. China 5G: opportunities and challenges[J]. Telecommunications Policy, 2022, **46**(2): 102295. DOI: 10.1016/j.telpol.2021.102295.

16 Massaro M, Kim S. Why is South Korea at the forefront of 5G? Insights from technology systems theory[J]. Telecommunications Policy, 2022, **46**(5): 102290. DOI: 10.1016/j.telpol.2021.102290.

17 Kumar R, Geleta R, Pandey A, *et al*. Adverse effects of 5th generation mobile technology on flora and fauna: review study[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, **1099**(1): 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1099/1/012031.

18 Hinrikus H, Koppel T, Lass J, *et al*. Possible health effects on the human brain by various generations of mobile telecommunication: a review based estimation of 5G impact[J]. International Journal of Radiation Biology, 2022, **98**(7): 1210-1221. DOI: 10.1080/09553002.2022.2026516.

19 Russell C L. 5G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications[J]. Environmental Research, 2018, **165**: 484-495. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.016.

20 Sofri T, A Rahim H , Abdulmalek M, *et al*. Health effects

of 5G base station exposure: a systematic review[J]. IEEE Access, 2022, **10**: 41639-41656. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3139385.

21 Lee A K, Choi H D. Dosimetric assessment in the brain for downlink EMF exposure in Korean mobile communication networks[J]. Environmental Research, 2023, **234**: 116542. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116542.

22 Zou Y T, Wang D C, Cheng X Q, *et al*. Reference intervals for thyroid-associated hormones and the prevalence of thyroid diseases in the Chinese population [J]. Annals of Laboratory Medicine, 2021, **41**(1): 77-85. DOI: 10.3343/alm.2021.41.1.77.

23 Gavriloaia G, Serban G, Sofron E, *et al*. Evaluation of microwave electromagnetic field absorbed by human thyroid gland[C]//2010 IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Pitesti, Romania: IEEE, 2010: 43-46. DOI: 10.1109/SIITME.2010.5651818.

24 Panagopoulos D J, Johansson O, Carlo G L. Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic fields bioeffects[J]. PLoS One, 2013, **8** (6): e62663. DOI: 10.1371/journal.pone.0062663.

25 Taguchi K, Laakso I, Aga K, *et al*. Relationship of external field strength with local and whole-body averaged specific absorption rates in anatomical human models[J]. IEEE Access, 2018, **6**: 70186-70196. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2880905.

26 Asl J F, Larijani B, Zakerkish M, *et al*. The possible global hazard of cell phone radiation on thyroid cells and hormones: a systematic review of evidences[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26** (18): 18017-18031. DOI: 10.1007/s11356-019-05096-z.

27 Ramirez-Vazquez R, Escobar I, Vandenbosch G A E, *et al*. Measurement studies of personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields: a systematic review[J]. Environmental Research, 2023, **218**: 114979. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114979.

28 Ramirez-Vazquez R, Escobar I, Arribas E, *et al*. Systematic review of exposure studies to radiofrequency electromagnetic fields: spot measurements and mixed methodologies[J]. Applied Sciences, 2024, **14**(23): 11161. DOI: 10.3390/app142311161.

29 Nyberg N R, McCredden J E, Weller S G, *et al*. The European Union prioritises economics over health in the rollout of radiofrequency technologies[J]. Reviews on Environmental Health, 2024, **39**(1): 47-64. DOI: 10.1515/reveh-2022-0106.

30 Ziegelberger G, Croft R, Feychting M, *et al*. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health Physics, 2020, **118**(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.

31 Sun Y, Zhang J, Mei P, *et al*. Tri-band dual-polarized shared-aperture antenna arrays with wide-angle scanning and low profile for 5G base stations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, **72**(3): 2455-2467. DOI: 10.1109/TAP.2024.3358611.

32 Zhang Y, Zhang Y. Dual-band dual-polarized antenna using a simple radiation restoration and decoupling structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, **22**(4): 709-713. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3222863.

33 Zhu Y L, Tan Q Q, Fan K K. A low-profile dual-polarized magneto-electric dipole antenna for 5G applications[J]. Applied Sciences, 2023, **13**(1): 530. DOI: 10.3390/app13010530.

34 Gu W D, Zhang Y. A dual-band dual-polarized filtering antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, **23**(2): 533-537. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3329114.

35 Sathishkumar N, Natarajan R, Divya D, *et al*. A broadband dual-polarized antenna for 5G wireless communication systems[J]. Results in Optics, 2024, **15**: 100659. DOI: 10.1016/j.rio.2024.100659.

36 Lin J J, Ding G R, Liu X C, *et al*. Assessment of the potential threats to brain health posed by the radiation from 5G sub-6 GHz base stations in China using dosimetric methods[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, **31**(21): 31015-31027. DOI: 10.1007/s11356-024-33172-6.

37 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 电磁环境控制限值: GB 8702－2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Control limits for electromagnetic environment: GB 8702－2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

38 Massoudi H, Durney C H, Barber P W, *et al*. Postresonance electromagnetic absorption by man and animals[J]. Bioelectromagnetics, 1982, **3**(3): 333-339. DOI: 10.1002/bem.2250030305.

39 Durney C H. Electromagnetic dosimetry for models of

humans and animals: a review of theoretical and numerical techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 1980, **68**(1): 33-40. DOI: 10.1109/PROC.1980.11578.

40 Bailey W H, Bodemann R, Bushberg J, *et al*. Synopsis of IEEE std C95.1™-2019 "IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz" [J]. IEEE Access, 2019, **7**: 171346-171356. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2954823.

41 Calderón C, Castaño-Vinyals G, Maslanyj M, *et al*. Estimation of RF and ELF dose by anatomical location in the brain from wireless phones in the MOBI-kids study [J]. Environment International, 2022, **163**: 107189. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107189.

42 Mamane A, Fattah M, El Ghazi M, *et al*. 5G enhanced mobile broadband (eMBB): evaluation of scheduling algorithms performances for time-division duplex mode [J]. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2022, **16**(1): 120-131. DOI: 10.3991/ijim.v16i01.25941.

43 Lee J, Rim M, Kang C G. Decentralized slot-ordered cross link interference control scheme for dynamic time division duplexing (TDD) in 5G cellular system[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 63567-63579. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074176.

44 Lin J J, Li J, Ding G R. Absorption of 5G sub-6 GHz electromagnetic radiation from base station to male reproduction system[J]. International Journal of Radiation Biology, 2024, **100**(7): 1085-1092. DOI: 10.1080/09553002.2024.2347354.