

· 综述 ·

我国食品镍污染及膳食暴露风险评估的研究进展

韩俊德^{1,2}, 吴茵茵¹ 综述, 周标² 审校

1. 杭州师范大学公共卫生学院, 浙江 杭州 311121; 2. 浙江省疾病预防控制中心, 浙江 杭州 310051

摘要: 随着新兴产业和工业化进程加快, 我国土壤镍污染日益严重, 食品成为人体镍的主要暴露来源。我国食品镍污染水平总体上在经济发达地区较高。不同食品种类中, 谷物类、豆类和水产类食品的镍含量和检出率相对较高。我国目前采用的镍膳食暴露风险研究方法相对保守, 主要采用点评估、简单分布和概率评估等方法计算居民每日暴露量, 并用危害指数法量化累积暴露风险。研究发现居民膳食摄入镍在低龄人群和极端情况(高消费或高污染)下仍存在一定的风险, 且农村人口的致癌风险高于城市人口。本文检索中国知网、PubMed等数据库自建库至2023年的文献, 对我国食品中镍的污染现状和居民膳食暴露风险评估的研究进展进行综述, 为今后食品中镍的暴露及风险评估研究提供参考。

关键词: 镍; 重金属; 膳食暴露; 风险评估

中图分类号: R155.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-5087 (2023) 12-1048-05

Nickel contamination status in food and dietary exposure assessment: a review

HAN Junde^{1,2}, WU Yinyin¹, ZHOU Biao²

1. School of Public Health, Hangzhou Normal University, Hangzhou, Zhejiang 311121, China;

2. Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310051, China

Abstract: With the rapid development of emerging industries and industrialization in China, soil nickel contamination has become a serious concern, with food being the primary source of nickel exposure to the human body. The level of nickel contamination in food is generally higher in developed regions of China. Among different food categories, grains, legumes and aquatic products exhibit relatively higher nickel content and detection rates. Currently in China, the methods for studying nickel dietary exposure risk are relatively conservative, primarily employing point assessment, simple distribution and probability assessment to calculate daily exposure levels among residents and quantifying cumulative exposure risks using the hazard index method. It is found that there is still a certain risk of dietary nickel among residents with younger age groups and under extreme conditions of high consumption or high pollution. Additionally, the cancer risk among the rural population is higher than that among the urban population. This article reviews the research progress on the current status of nickel contamination in Chinese food and the assessment of dietary exposure risk for residents, based on literature from databases such as CNKI and PubMed up to 2023, aiming at providing a reference for future research into nickel exposure and risk assessment in food.

Keywords: nickel; heavy metal; dietary exposure; risk assessment

含镍工业废水及化石燃料的排放, 电子产品等新型工业废弃物的堆积使土壤镍水平升高, 《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤中镍元素点位超标率高达 4.8%^[1]。WANG 等^[2]对工业区周边居民的膳食暴露风险评估研究显示, 饮用水和 7 种食物中的镍均存在不同程度的超标。食品可能成为

镍的主要暴露来源, 并且镍在谷物、蔬菜和水产品等不同食品中的检出存在差异^[3-5]。研究表明, 镍的暴露对肾功能、生殖系统和免疫系统会造成不良影响^[6]。部分国际机构将镍及其化合物列入致癌物清单^[7]。本文通过检索中国知网、PubMed 等数据库自建库至 2023 年发表的相关文献, 对我国不同地区及不同种类食品中镍的检出情况及居民膳食暴露风险进行综述, 为今后食品中镍的暴露及风险评估研究提供参考。

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2023.12.008

作者简介: 韩俊德, 硕士研究生在读

通信作者: 周标, E-mail: bzhou@cdc.zj.cn

1 食品中镍的污染现状

1.1 谷物及其制品镍污染

我国谷物类食品镍含量的平均值为 0.520 mg/kg^[8], 总体检出率在 50.00% 以上^[3, 9-10]。在各种谷物类食品中, 小米的镍含量最高。2016 年, 王彩霞等^[11] 对陕西省农贸市场、超市等流通环节的市售谷物类食品进行采样检测, 结果显示, 镍含量平均值为 0.410 mg/kg, 含量从高到低依次为小米 (0.960 mg/kg)、小麦粉 (0.140 mg/kg)、大米 (0.120 mg/kg) 和玉米 (0.054 mg/kg)。在该研究中, 检出最大值 (3.30 mg/kg) 的样本来自小米, 且小米中镍的超标率为 6.25%。

从区域分布上看, 小麦中镍的污染水平在经济发达地区较高。2017—2018 年顾丰颖等^[3] 调查结果显示, 我国小麦的镍含量平均值为 0.225 mg/kg, 各主要产区小麦的镍含量在 0.100~0.300 mg/kg 之间, 其中南方冬麦区 (江苏、四川、安徽) 的小麦中镍超标率为 3.44%, 含量平均值 (0.331 mg/kg) 高于其他产区。YANG 等^[12] 2016 年检测北方冬麦区的陕西省宝鸡市小麦的镍含量, 范围为 0.012~0.350 mg/kg, 平均值为 0.090 mg/kg, 低于成都市市售面粉中镍含量平均值 0.423 mg/kg^[13]。

大米中镍的污染与小麦存在相似的区域分布趋势。三大水稻优势产区中, 长江中下游产区的水稻 (大米) 镍含量较东北平原、东南沿海等地区较高。曹珍珍等^[14] 2015 年调查镍含量最大值 6.000 mg/kg 检出自长江中下游产区 (湖南、四川、江西、湖北、江苏和安徽), 且该产区水稻镍平均值 (0.540 mg/kg) 高于东北平原 (黑龙江、吉林和辽宁; 0.460 mg/kg) 和东南沿海产区 (浙江、广西; 0.350 mg/kg)。

关于区域分布的趋势, 也有研究发现北方地区谷物中的镍含量相对南方地区更高。2022 年对全国居民食品重金属监测显示, 谷物类食品中的镍含量在东北、中部、西北、北方沿海和南方沿海地区分别为 1.250、0.580、0.500、0.230 和 0.210 mg/kg^[15], 但该文未明确列出谷物类食品的构成, 无法明确是否与南北方谷物类食品种类差异有关。

1.2 水产品镍污染

我国水产品镍含量平均值为 1.220 mg/kg^[8]。水产品中镍检出率一般较高, 南方的水产品中镍含量比北方低。浙江省绍兴市市售动物性水产制品中的镍含量平均值为 0.142 mg/kg^[16], 广东省深圳市市场采集的水产品中镍含量平均值为 0.185 mg/kg^[17], 均低于山东省莱州湾采集水产品的 0.882 mg/kg^[18]。SUN

等^[15] 研究结果显示, 东北和中部地区贝类中的镍含量平均值分别为 0.600 mg/kg 和 0.740 mg/kg, 高于北方沿海和南方沿海的 0.430 mg/kg 和 0.410 mg/kg。但也有研究结果显示北方的水产品中镍含量较低, 如陕西省市售水产品镍含量平均值为 0.096 4 mg/kg, 检出率为 50.45%^[5]。

环境污染可能导致不同生态系统中的水产品镍含量存在差异, 淡水水产品较海水水产品镍含量更高。龚立科等^[19] 对杭州市 11 种水产品的检测结果显示, 淡水鱼类镍含量平均值 (0.034 1 mg/kg) 高于海水鱼类 (0.025 8 mg/kg), 淡水虾类 (0.057 7 mg/kg) 高于海水虾类 (0.043 6 mg/kg), 淡水贝类 (0.878 mg/kg) 高于海水贝类 (0.338 mg/kg)。在同种生态系统中, 贝类生物的镍含量比鱼类高。刘立婷等^[20] 对广州市市售水产品镍含量监测显示, 镍含量平均值最高的河蚌 (3.830 mg/kg) 比最低的鲈鱼 (0.030 mg/kg) 高出 127 倍, 镍含量平均值最低的花螺 (0.120 mg/kg) 比鱼类中最最高的小黄鱼 (0.070 mg/kg) 还高。

1.3 蔬菜镍污染

我国蔬菜中的镍含量平均值为 0.270 mg/kg^[8], 南方经济发达地区蔬菜中的镍含量比北方高。陕西省市售蔬菜镍含量平均值为 0.069 mg/kg, 检出率为 50.00%^[10]。2015—2016 年河南省洛阳市市售蔬菜的镍含量平均值为 0.067 mg/kg, 检出率为 83.00%^[4]。2016—2018 年江西省市售蔬菜的镍含量平均值为 0.140 mg/kg^[21], 检出率为 92.60%, 高于上述北方地区。2016—2018 年莎娜等^[22] 检测内蒙古马铃薯的镍含量平均值为 0.073 mg/kg, 低于江西省市售块根块茎类食品的镍含量平均值 0.160 mg/kg^[21]。与谷物类食品一样, 区域分布的趋势也存在中部地区和北方地区比南方高的现象。2022 年 SUN 等^[15] 研究显示, 南方沿海、西北、北方沿海、中部和东北部地区的蔬菜中镍含量分别为 0.060、0.080、0.090、0.090、0.140 mg/kg, 但蔬菜类食品的构成不明。

豆类由于对镍具有更强的富集能力, 其镍含量较其他种类蔬菜更高。2014 年整合 29 项关于我国消费者镍的膳食暴露风险评估研究, 结果显示豆类中的镍含量平均值为 8.270 mg/kg^[8]。李莲芳等^[23] 对吉林省四平设施土壤及蔬菜的重金属污染调查发现, 豆角中的镍含量平均值为 0.662 mg/kg, 远高于叶菜类 (0.146 mg/kg) 和其他果蔬类 (0.147 mg/kg)。但在 2015—2016 年洛阳市市售蔬菜的重金属含量调查中^[4], 鳞茎类蔬菜的镍含量平均值 (0.130 mg/kg) 比豆类 (0.077 mg/kg) 高。

1.4 其他类食品镍污染

相对于谷物、蔬菜和水产品,水果、乳及乳制品等类型食品中的镍含量较低。2014年陕西省市售食品水果中的镍含量平均值为0.071 mg/kg,检出率为48.28%^[10]。草莓的镍含量较高,2022年调查显示草莓中镍含量平均值为0.166 mg/kg^[24],高于我国水果中镍含量平均值0.100 mg/kg^[8]。我国乳及乳制品中镍检出率差异较大。2021年国家食品安全风险评估中心的马兰等^[25]检测不同地区市售液态乳发现,华南地区样品中未检出镍,西北地区样品则全部检出,含量范围为0.670~7.410 μg/kg。

由于镍在不同营养级间可能存在生物稀释作用^[15],鲜肉中的镍含量相对于谷物类食品更低。陕西省市售肉类中的镍检出率为28.83%,镍含量平均值为0.063 mg/kg,低于谷物类的0.210 mg/kg^[10]。各类肉及肉制品中,肝肾的镍含量较鲜肉更高。江西省食品镍含量监测发现,禽畜肝肾中的镍含量平均值为0.180 mg/kg,高于禽畜肉的0.068 mg/kg^[26]。

2 镍的膳食暴露风险评估

我国居民对谷物、蔬菜类食品的日常消费量相对较大,一般作为镍膳食暴露的主要来源。镍的暴露风险评估先通过模型计算居民的每日镍暴露量(estimated daily intake, EDI),再采用累积评估法计算在某种暴露途径或人群中镍的暴露风险。在暴露量计算上分为点评估、简单分布和概率模型^[27]。

2.1 点评估和简单分布

点评估是较为经典的暴露模型,将食品中镍含量和食品日均消费量相乘再除以居民体重计算暴露量,在化学污染物暴露评估中广泛应用^[28]。王增焕等^[29]通过点评估发现,华南沿海地区7~10岁人群因食用翡翠贻贝摄入镍的最高EDI为0.004 79 mg/(kg 体重·d),远低于2005年世界卫生组织(WHO)限定的每日耐受量(tolerable daily intake, TDI)0.012 mg/(kg 体重·d)^[30],因此不存在暴露风险。点评估方法简单,便于实施,但由于结果误差较大,需要结合简单分布进行描述。

简单分布是在点评估法的基础上,分别使用不同点值(如百分位数)代入点评估计算公式进行分析,可以观察到不同消费或污染情况下的暴露情况,较点评估更为全面。点评估和简单分布通常应用于初步的风险评估,如评估结果低于推荐值则无需进一步分析。陕西省居民的暴露风险评估采用简单分布法计算暴露量,结果显示在镍含量平均值的暴露下,居民每日

暴露量为 2.17×10^{-3} mg/(kg 体重·d),镍含量为第95百分位数的偏高消费下为 11.24×10^{-3} mg/(kg 体重·d),均未超过WHO限定的TDI,其中谷物的贡献率最大,约占整体贡献量的80%^[11]。实际的居民膳食暴露情况具有复杂性,点评估法和简单分布对于膳食暴露的分布描述较保守^[31],在暴露风险值超过或接近于每日允许摄入量(allowable daily intake, ADI)时需要进行概率评估。

2.2 概率评估

概率评估法通常基于蒙特卡洛模拟,分别从镍的污染数据和消费量数据中随机抽取值来获得暴露量的概率分布区间,较点评估法和简单分布对暴露风险值的评估更精确。顾丰颖等^[3]采用概率评估法、美国环境保护署(US Environmental Protection Agency, USEPA)暴露剂量-反应外推模型法的非致癌物模型评价我国小麦中的镍暴露风险,结果显示,3个不同产区的成人和儿童摄入小麦导致镍的非致癌风险个人平均年风险(R^*)的平均值范围分别为 $3.73 \times 10^{-9}/a \sim 6.68 \times 10^{-9}/a$ 和 $9.01 \times 10^{-9}/a \sim 1.61 \times 10^{-8}/a$,所有模拟值均低于国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)推荐的最大可接受年风险 $5 \times 10^{-5}/a$ 。

我国的概率评估模型开发有一定进展。曹珍珍等^[14]对我国水稻的膳食风险评估中,中国农业科学院开发的RAMA模型被应用于评价镍的膳食暴露风险,结果显示,我国除2~11岁儿童外,大部分消费人群的平均暴露量为1.350~2.990 μg/(kg 体重·d),第97.5百分位数暴露量为6.500~10.640 μg/(kg 体重·d),低于WHO推荐的TDI。总危害指数(hazard quotient, HQ)法结果显示,年龄越低,暴露风险越大。

2.3 累积风险评估

由于某些重金属间存在共同毒性机制,镍和其他重金属共同评估。不同重金属的健康参考值不同,因此在方法上大多采用USEPA健康风险手册提供的HQ法量化累积风险。HQ法采用EDI与参考剂量的比值判断是否存在暴露风险。WANG等^[8]利用14个省份的食品中镍含量数据计算9组不同食品、4个不同人群(2~3岁儿童、4~17岁儿童、成年男性和成年女性)的EDI和总HQ值,结果显示,在消费量为第95百分位数时的成年男性、女性和4~17岁儿童及消费量为平均值的2~3岁儿童的总HQ值均大于1,存在暴露风险。

此外,暴露边界法(margin of exposure, MOE)也常应用于镍的累积风险评估。刘立婷等^[20]使用

MOE 法评估广州市居民摄入水产导致的镍非致癌风险, 结果显示, 11 种水产品中风险最高的扇贝 MOE 值为 7.93×10^{-7} , 远小于 1, 提示食用扇贝导致镍暴露的风险在可接受范围内。

2.4 致癌风险

镍在饮食暴露中以总镍的形式出现^[31], 其单质及化合物(羰基化物及硫化物)被列为致癌物^[7]。但由于镍的致癌机制尚不明确, 对镍的致癌风险评估的研究相对较少, 通常采用 USEPA 暴露剂量-反应外推模型评估。江西省市售食品中镍的暴露评估显示居民在平均摄入量和高摄入量(第 95 百分位数)下, 平均个人致癌年风险分别为 $3.09 \times 10^{-5}/a$ 和 $1.09 \times 10^{-4}/a$ ^[26]; 与 ICRP 推荐的最大可接受年风险水平 $5.0 \times 10^{-5}/a$ 相比, 在平均摄入量下不存在致癌风险, 高摄入量的风险值是推荐标准的 2.18 倍。王彩霞等^[10]采用相同的模型计算陕西省居民经膳食摄入的镍的致癌风险, 结果显示, 平均摄入量下致癌风险为 $2.60 \times 10^{-5}/a$, 高摄入量下致癌风险为 $1.34 \times 10^{-4}/a$, 其中在各种消费条件下, 农村人口经膳食暴露的镍致癌风险均比城市人口更高。

3 小结

我国食品镍污染水平总体上在经济发达地区较高, 可能与南方地区新兴工业发达导致土壤受到镍的污染有关。从食品种类来看, 小米、贝类和豆类对镍的富集能力较强, 镍含量相对于其他谷物类和蔬菜类食品更高, 而水果类、乳制品和肉类的镍检出率及含量较谷物类、蔬菜类和水产品更低。由于镍的理化特性及在食品中的存在形式, 高营养级禽畜类动物的鲜肉中镍的含量较谷物类更低, 存在生物稀释现象^[15]。

在镍的暴露风险评估中, 点评估和简单分布由于操作相对简便, 易于实施, 应用范围较广; 概率评估能通过蒙特卡洛抽样模拟得到相对接近实际情况的分布区间。膳食摄入镍在低龄人群和极端情况(高消费或高污染)下仍存在一定的风险, 且农村人口的致癌风险高于城市人口。我国目前采用的镍膳食暴露风险评估方法相对保守, 今后对于高风险人群的评估需要进行内暴露监测等更精确的方法。

参考文献

[1] 中华人民共和国生态环境部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [R/OL]. [2023-10-27]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.

[2] WANG Y, CAO D Y, QIN J Q, et al. Deterministic and probabi-

listic health risk assessment of toxic metals in the daily diets of residents in industrial regions of northern Ningxia, China [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2023, 201 (9): 4334-4348.

[3] 顾丰颖, 丁雅楠, 朱金锦, 等. 我国小麦镍的污染调查及健康风险评估 [J]. *核农学报*, 2022, 36 (12): 2447-2454.

[4] 常晓歌, 龚进国, 胡寅瑞. 2015—2016 年洛阳市市售蔬菜中铅、镉、汞、砷、铬、镍含量分析 [J]. *河南预防医学杂志*, 2019, 30 (5): 351-354, 357.

[5] 程国霞, 郭蓉, 王彩霞, 等. 陕西省市售水产品中重金属污染状况及安全评价 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2016, 26 (22): 3313-3316.

[6] LIANG Y P, PAN Z P, ZHU M Z, et al. Exposure to essential and non-essential trace elements and risks of congenital heart defects: a narrative review [J/OL]. *Front Nutr*, 2023, 10 [2023-10-27]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1121826>.

[7] World Health Organization. List of classifications-IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans [EB/OL]. [2023-10-27]. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>.

[8] WANG W, ZHANG Z H, YANG G L, et al. Health risk assessment of Chinese consumers to nickel via dietary intake of foodstuffs [J]. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2014, 31 (11): 1861-1871.

[9] 任韧, 龚立科, 王姝婷, 等. 杭州产大米中重金属污染状况调查及暴露风险评估 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2020, 30 (12): 1516-1519, 1528.

[10] 王彩霞, 胡佳薇, 程国霞, 等. 陕西省食品中镍含量调查分析与健康风险评估 [J]. *卫生研究*, 2016, 45 (6): 993-997.

[11] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估 [J]. *卫生研究*, 2016, 45 (1): 35-38, 44.

[12] YANG W X, WANG D, WANG M K, et al. Heavy metals and associated health risk of wheat grain in a traditional cultivation area of Baoji, Shaanxi, China [J/OL]. *Environ Monit Assess*, 2019, 191 (7) [2023-10-27]. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7534-9>.

[13] WANG R, ZHONG B F, PI L, et al. Concentrations and exposure evaluation of metals in diverse food items from Chengdu, China [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2018, 74 (1): 131-139.

[14] 曹珍珍, 牟仁祥, 曹赵云, 等. 我国三大优势产区水稻重金属镍含量调查与膳食风险评估 [J]. *农产品质量与安全*, 2017 (2): 21-26.

[15] SUN S, ZHANG H J, LUO Y, et al. Occurrence, accumulation, and health risks of heavy metals in Chinese market baskets [J/OL]. *Sci Total Environ*, 2022, 829 [2023-10-27]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154597>.

[16] 樊伟, 王晶, 王若燕, 等. 绍兴市市售动物性水产制品有毒重金属污染调查 [J]. *预防医学*, 2018, 30 (8): 837-840.

[17] RAO M T, LI X Y, XU X Q, et al. Trace elements in aquatic products from Shenzhen, China and their implications for human exposure [J/OL]. *Sci Total Environ*, 2023, 885 [2023-10-27]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163726>.

[18] LIU B L, LV L Y, AN M, et al. Heavy metals in marine food web

- from Laizhou Bay, China: levels, trophic magnification, and health risk assessment [J/OL]. *Sci Total Environ*, 2022, 841 [2023-10-27]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156818>.
- [19] 龚立科, 王姝婷, 薛鸣, 等. 杭州市售水产品中有害元素污染状况及膳食暴露风险评估 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2022, 32 (17): 2132-2137.
- [20] 刘立婷, 陈希超, 于云江, 等. 广州市售水产品中重金属健康风险评价及消费建议 [J]. *环境与健康杂志*, 2019, 36 (8): 731-735.
- [21] 王艳敏, 周鸿, 熊丽, 等. 2016—2018年江西省居民膳食食品中镍污染状况调查 [J]. *实验与检验医学*, 2021, 39 (1): 208-210, 218.
- [22] 莎娜, 刘广华, 张福金, 等. 内蒙古马铃薯重金属时空分布特征及其膳食暴露评估 [J]. *农产品质量与安全*, 2021 (1): 42-50.
- [23] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39 (6): 2936-2943.
- [24] YANG Y F, ZHANG H, QIU S Y, et al. Risk assessment and early warning of the presence of heavy metal pollution in strawberries [J/OL]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2022, 243 [2023-10-27]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114001>.
- [25] 马兰, 赵馨, 尚晓虹, 等. 我国市售液态乳中15种元素含量特征分析及风险评估 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2021, 33 (3): 325-331.
- [26] 王艳敏, 周鸿, 熊丽, 等. 江西省食品中镍含量调查与健康风险评估 [J]. *现代预防医学*, 2020, 47 (15): 2724-2728.
- [27] 鄢正红, 于艳新, 丁爱中, 等. 重金属健康风险暴露评估研究进展 [J]. *弹性体*, 2014, 24 (3): 84-88.
- [28] 吴晓丽, 赵毕, 齐小娟, 等. 食品中化学污染物风险评估方法研究进展 [J]. *预防医学*, 2020, 32 (7): 682-685.
- [29] 王增焕, 林钦, 王许诺, 等. 华南沿海贝类产品重金属元素含量特征及其安全性评价 [J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20 (6): 923-929.
- [30] World Health Organization. Nickel in drinking-water [R]. Geneva: WHO, 2021.
- [31] 吴永宁, 刘沛, 孙金芳, 等. 膳食暴露评估技术与总膳食研究 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 35.

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2023-10-27 本文编辑: 徐文璐

(上接第1047页)

- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 2020年我国儿童青少年总体近视率为52.7% 近视低龄化问题仍突出 [EB/OL]. [2023-10-25]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-07/13/content_5624709.htm.
- [3] LIU X N, NADUVILATH T J, WANG J, et al. Sleeping late is a risk factor for myopia development amongst school-aged children in China [J/OL]. *Sci Rep*, 2020, 10 (1) [2023-10-25]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74348-7>.
- [4] 高华, 易波, 张琰, 等. 宁波市初中学生近视流行现状调查 [J]. *预防医学*, 2021, 33 (5): 522-525, 528.
- [5] 黄坤, 李秀红. 青少年近视的影响因素研究进展 [J]. *预防医学*, 2020, 32 (6): 578-582.
- [6] 张洁婷, 焦璨, 张敏强. 潜在类别分析技术在心理学研究中的应用 [J]. *心理科学进展*, 2010, 18 (12): 1991-1998.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 《儿童青少年近视防控适宜技术指南(更新版)》及解读 [EB/OL]. [2023-10-25]. <https://www.nhc.gov.cn/jkj/s5899tg/202110/65a3a99c42a84e3f8a11f392d9fea91e.shtml>.
- [8] 张丹青. 儿童青少年身体活动与其学业成绩和学业压力的相关研究 [D]. 上海: 上海体育学院, 2020: 17.
- [9] 徐燕, 叶剑, 孙强, 等. 重庆市城区小学生近视及影响因素分析 [J]. *中国实用眼科杂志*, 2014, 32 (4): 517-520.
- [10] LI M, WANG W, ZHU B, et al. A latent class analysis of student eye care behavior: evidence from a sample of 6-17 years old in China [J/OL]. *Front Public Health*, 2022, 10 [2023-10-25]. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.914592>.
- [11] TANITO M, OBANA A, GOHTO Y, et al. Macular pigment density changes in Japanese individuals supplemented with lutein or zeaxanthin: quantification via resonance Raman spectrophotometry and autofluorescence imaging [J]. *Jpn J Ophthalmol*, 2012, 56 (5): 488-496.
- [12] ZHANG Y, HAO J, CAO K, et al. Macular pigment optical density responses to different levels of zeaxanthin in patients with high myopia [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2022, 260 (7): 2329-2337.
- [13] NOMI Y, IWASAKI-KURASHIGE K, MATSUMOTO H. Therapeutic effects of anthocyanins for vision and eye health [J/OL]. *Molecules*, 2019, 24 (18) [2023-10-25]. <https://doi.org/10.3390/molecules24183311>.
- [14] GONZÁLEZ-PADILLA E, A. DIAS J, RAMNE S, et al. Association between added sugar intake and micronutrient dilution: a cross-sectional study in two adult Swedish populations [J]. *Nutr Metab (Lond)*, 2020, 17 (1): 1-13.
- [15] GAO F, LI P, LIU Y Q, et al. Association study of the serum 25 (OH) D concentration and myopia in Chinese children [J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100 (26) [2023-10-25]. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000026570>.
- [16] 胡佳, 丁子尧, 韩迪, 等. 苏州市中小学生学习近视的影响因素分析 [J]. *预防医学*, 2021, 33 (3): 241-245.
- [17] MU J, ZENG D, FAN J, et al. Epidemiological characteristics and influencing factors of myopia among primary school students in southern China: a longitudinal study [J/OL]. *Int J Public Health*, 2023, 68 [2023-10-25]. <https://doi.org/10.3389/ijph.2023.1605424>.

收稿日期: 2023-09-15 修回日期: 2023-10-25 本文编辑: 徐文璐