

职业危害因素暴露与男性煤矿从业人员促甲状腺激素与甲状腺激素水平的关联

戴颖诗¹, 陈颖君¹, 罗颖琪¹, 刘燕辉¹, 蒋柳权², 杨帆², 刘改生², 陈青松¹

1. 广东药科大学公共卫生学院, 广东 广州 510310

2. 西山煤电(集团)有限责任公司职业病防治所, 山西 太原 030053

摘要:

[背景] 甲状腺激素对正常发育至关重要, 也是生理系统正常运作所必需的。目前关于甲状腺的研究主要聚焦在生活行为因素对甲状腺功能异常的影响, 聚焦甲状腺激素水平的影响因素的探究较少, 尤其是职业危害因素, 应予以进一步研究。

[目的] 调查职业危害因素暴露与男性煤矿从业人员促甲状腺激素(TSH)和甲状腺激素水平的关联。

[方法] 采用横断面设计的研究方法, 选取 2023 年于西山煤电(集团)有限责任公司职业病防治所参与健康体检、符合纳入排除标准的 12 564 名职业工人作为研究对象。采用自行设计的问卷收集所有研究对象的基本信息、职业史、生活行为习惯等信息, 通过职业健康体检和工作场所职业危害因素检测资料, 获取研究对象的身高、体重、甲状腺功能检查结果和职业危害因素暴露情况。本研究采用广义线性回归分析各职业危害因素与 TSH 和甲状腺激素水平的关联。

[结果] 12 564 名男性煤矿从业人员三碘甲腺原氨酸(T₃)、甲状腺素(T₄)、游离三碘甲腺原氨酸(FT₃)、游离甲状腺素(FT₄)和 TSH 水平的 $M(P_{25}, P_{75})$ 分别为 1.16(1.03, 1.29) ng·mL⁻¹、7.70(6.70, 8.90) μg·dL⁻¹、3.63(3.40, 3.84) pg·mL⁻¹、1.19(1.08, 1.30) ng·dL⁻¹ 和 1.93(1.36, 2.78) μIU·mL⁻¹。甲状腺激素异常总检出率为 2.83%, 其中亚临床甲状腺减退症的患病率最高(1.83%), 其次为甲状腺功能亢进症(0.37%)、甲状腺功能减退症(0.32%)、亚临床甲状腺功能亢进症(0.31%)。调整混杂因素后, 广义线性回归模型显示, 长工时工作人群的 T₃、FT₃ 水平更高, β (95%CI) 分别为 0.011(0.003~0.019)、0.038(0.019~0.057); 夜班工作人群的 TSH 水平升高, 而 FT₄ 水平降低, β (95%CI) 分别为 0.171(0.016~0.326)、-0.012(-0.019~-0.006); 煤尘暴露人群的 T₃、T₄ 水平降低, β (95%CI) 分别为 -0.022(-0.037~-0.008)、-0.320(-0.434~-0.207); 噪声暴露人群的 T₄、FT₄ 水平降低, β (95%CI) 分别为 -0.102(-0.166~-0.038)、-0.020(-0.027~-0.013)。

[结论] 煤矿从业人员 TSH 与甲状腺激素水平基本处于正常值参考范围内, 异常率较低。长工时工作、夜班工作、煤尘、噪声等职业危害因素与男性煤矿从业人员 TSH 和甲状腺激素水平相关。煤矿企业应合理安排工作时间、科学优化夜班排班制度、加强煤尘和噪声防护措施, 促进职业健康, 保障煤矿从业人员的身体健康。

关键词: 煤矿从业者; 促甲状腺激素; 甲状腺激素; 职业危害因素

Thyroid-stimulating hormone and thyroid hormone levels in association with occupational hazards in male coal miners DAI Yingshi¹, CHEN Yingjun¹, LUO Yingqi¹, LIU Yanhui¹, JIANG Liuquan², YANG Fan², LIU Gaisheng², CHEN Qingsong¹ (1. School of Public Health, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou, Guangdong 510310, China; 2. Xishan Coal Electricity (Group) Corporation Occupational Disease Prevention and Control Institute, Taiyuan, Shanxi 030053, China)

Abstract:

[Background] Thyroid hormones are crucial for development and proper functioning of human physiological systems. Current research on the thyroid mainly focuses on the impacts of lifestyle factors on thyroid dysfunction, while less attention is paid to the factors affecting thyroid hormone levels, especially occupational hazards, which warrants further investigation.

[Objective] To investigate the associations between occupational hazard exposure and thyroid-stimulating hormone (TSH) and thyroid hormone levels in male coal mine workers.



DOI 10.11836/JEOM24376

基金项目

广州市科技计划项目(2025A03J3722)

作者简介

戴颖诗(1998—), 女, 硕士生;

E-mail: daiyingshi729@163.com

通信作者

陈青松, E-mail: qingsongchen@aliyun.com

刘改生, E-mail: xszslgs@163.com

作者中包含编委会成员 有

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-07-03

录用日期 2025-02-18

文章编号 2095-9982(2025)04-0459-08

中图分类号 R13

文献标志码 A

► 本文链接、作者贡献申明

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24376

► 引用

戴颖诗, 陈颖君, 罗颖琪, 等. 职业危害因素暴露与男性煤矿从业人员促甲状腺激素与甲状腺激素水平的关联 [J]. 环境与职业医学, 2025, 42(4): 459-466.

Funding

This study was funded.

Correspondence to

CHEN Qingsong, E-mail: qingsongchen@aliyun.com

LIU Gaisheng, E-mail: xszslgs@163.com

Editorial Board Members' authorship Yes

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2024-07-03

Accepted 2025-02-18

► Link to this article, author contribution statement

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24376

► To cite

DAI Yingshi, CHEN Yingjun, LUO Yingqi, et al. Thyroid-stimulating hormone and thyroid hormone levels in association with occupational hazards in male coal miners[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(4): 459-466.

[Methods] A cross-sectional study design was adopted. A total of 12 564 workers who participated in the occupational health check-ups at the Xishan Coal Electricity (Group) Corporation Occupational Disease Prevention and Control Institute in 2023 and met the inclusion and exclusion criteria were selected as research subjects. A self-designed electronic questionnaire was used to collect basic information, occupational history, and lifestyle habits of all study subjects. Height, weight, thyroid function test results, and occupational hazard exposure of the study subjects were obtained through occupational health examinations and routine workplace occupational hazard detection records. Generalized linear regression was used to analyze the associations between occupational hazard exposure and the levels of TSH and thyroid hormones.

[Results] The median (P_{25} , P_{75}) levels of triiodothyronine (T3), thyroxine (T4), free triiodothyronine (FT3), free thyroxine (FT4), and TSH in the included 12 564 male coal mine workers were 1.16 (1.03, 1.29) ng·mL⁻¹, 7.70 (6.70, 8.90) μg·dL⁻¹, 3.63 (3.40, 3.84) pg·mL⁻¹, 1.19 (1.08, 1.30) ng·dL⁻¹, and 1.93 (1.36, 2.78) μIU·mL⁻¹, respectively. The overall abnormality rate of thyroid hormones was 2.83%, with the highest rate for subclinical hypothyroidism (1.83%), followed by hyperthyroidism (0.37%), hypothyroidism (0.32%), and subclinical hyperthyroidism (0.31%). After adjustment for confounding factors, the generalized linear regression model showed that long working hours were associated with higher levels of T3 and FT3, with β (95%CI) values of 0.011 (0.003, 0.019) and 0.038 (0.019, 0.057) respectively. Night shift work was linked to increased TSH levels and decreased FT4 levels, with β (95%CI) values of 0.171 (0.016, 0.326) and -0.012 (-0.019, -0.006) respectively. Coal dust exposure was associated with decreased levels of T3 and T4, with β (95%CI) values of -0.022 (-0.037, -0.008) and -0.320 (-0.434, -0.207) respectively. Noise exposure was related to decreased levels of T4 and FT4, with β (95%CI) values of -0.102 (-0.166, -0.038) and -0.020 (-0.027, -0.013) respectively.

[Conclusion] The TSH and thyroid hormone levels of coal miners are mostly within the normal reference ranges, with a low abnormality rate. Long work hours, night shift work, coal dust, and noise are associated with the levels of TSH and thyroid hormone levels in the male miners. Coal companies should reasonably arrange working hours, optimize the night shift scheduling system, and enhance protection against coal dust and noise to promote occupational health and safeguard the physical health of miners.

Keywords: coal miner; thyroid-stimulating hormone; thyroid hormone; occupational hazard

甲状腺激素由甲状腺产生, 该腺体由滤泡组成, 通过对糖蛋白甲状腺球蛋白中的酪氨酸残基进行碘化合成甲状腺激素^[1]。促甲状腺激素(thyroid stimulating hormone, TSH)由垂体前叶分泌, 以响应循环中甲状腺激素的反馈^[2]。甲状腺激素对正常发育至关重要, 也是生理系统正常运作所必需的。遗传因素是甲状腺功能的主要决定因素^[3], 但许多其他因素也会影响甲状腺功能。有研究指出, TSH 和甲状腺激素会受到吸烟、体质指数(body mass index, BMI)、碘、高氯酸盐、重金属等生活方式因素和环境污染物的影响^[2]。目前国内外甲状腺激素相关研究主要集中在老年人^[4]、妊娠期妇女^[5]、2 型糖尿病患者^[6]等处于特殊生理状态的群体, 而关注职业人群甲状腺激素水平的研究较少。

随着健康中国发展战略的不断推进, 职业健康促进逐渐成为行业关注焦点。煤矿工人由于其工作的特殊性, 长期面临粉尘、噪声、高强度工作负荷等诸多职业健康危害因素。因此, 他们不仅成为职业健康管理重点人群, 同时也是国内外职业健康研究的热点群体。有动物研究报道, 噪声暴露可能是甲状腺功能的一个危险因素^[7]。除了动物研究外, 一项人群研究结果也表明, 有噪声暴露的生产车间工人的甲状腺异常患病率相较于办公室职员更高, 尽管这种差异不具有统计学意义^[8]。一项临床回顾性观察研究发现, 长期暴露在煤尘环境中的矿工面临着较高的结节性甲状腺疾

病患病风险^[9]。然而, 目前国内关于甲状腺的研究主要聚焦在生活行为因素对甲状腺功能异常的影响, 聚焦甲状腺激素水平的影响因素探究较少, 尤其是职业危害因素。因此, 本研究依托广东药科大学联合西山煤电(集团)有限责任公司职业病防治所建立的煤矿工人慢性病队列, 旨在了解煤矿从业人员 TSH 与甲状腺激素水平, 并分析职业危害因素暴露与其的内在关联, 为该职业人群健康促进提供科学建议。

1 对象与方法

1.1 研究对象

本研究采用横断面设计的研究方法, 依托广东药科大学联合西山煤电(集团)有限责任公司职业病防治所建立的职业工人慢性病队列, 使用 2023 年职业健康体检数据以及现场调研收集的问卷信息进行分析。本研究方案经广东药科大学附属第一医院伦理委员会审查批准, 批件号: 医伦审【2024】KT 第(98)号, 所有研究对象均签署了知情同意书。

1.1.1 纳入排除标准 纳入标准: ①男性且年龄≥18 岁; ②工龄≥1 年; ③已正式在煤矿企业就职或从煤矿企业退休; ④无精神疾病以及遗传病史。

排除标准: ①目前正在服用影响甲状腺功能的药物; ②有甲状腺切除术史或患有甲状腺结节; ③问卷调查数据缺失; ④职业危害因素暴露数据缺失。

1.1.2 样本量估计 样本量估计基于计量资料的横断面研究设计,公式(1)如下:

$$n = \left(\frac{Z_{1-\alpha/2} \times \sigma}{\delta} \right)^2 \quad (1)$$

式中: n 为样本量, δ 为容许误差, σ 为总体标准差的估计值, $Z_{1-\alpha/2}$ 为显著性检验的统计量,可查 z 值表得到。在本研究中,标准差 σ 参考国内某省健康体检中心调查的男性游离甲状腺素(free thyroxine, FT4)水平,数值为 $1.43 \text{ ng} \cdot \text{dL}^{-1}$ ^[10],将 I 类错误概率 α 定为 0.05 (双侧),则 $Z_{1-\alpha/2}=1.96$,将为容许误差 δ 定为 3%。将上述指标代入公式得 $n \approx 8729$ 人。考虑到误差等问题,另外加上 10%,至少纳入研究对象 9602 名。本研究最终纳入研究对象 12564 名。

1.2 研究方法

1.2.1 资料收集 依托职业健康检查对研究对象进行问卷调查。采用本课题组自行设计的《煤矿工人职业健康调查问卷》,收集研究对象的基本信息、职业史、日常生活行为方式。个体的基本信息包括年龄、性别、民族、婚姻状况、教育程度、家庭人均收入等,职业史包括工作单位、工作年限、长工时工作、夜班工作,日常生活行为方式包括吸烟情况、饮酒情况、饮茶情况、体育锻炼情况等。本问卷的 Cronbach's α 系数为 0.702,具有较好的信度。本问卷经多位专家评审与修改,确保了问题的合理性与全面性,具有良好的内容效度。

将 BMI 划分为 4 组:低体重($<18.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),正常($18.5 \sim 23.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),超重($24.0 \sim 27.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),肥胖($\geq 28.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。吸烟状态分为 3 组:不吸烟(从不吸烟或累计吸烟量少于 100 支)、已戒烟(曾经吸烟但已停止吸烟半年及以上)、吸烟(累计吸烟量超过 100 支,且目前仍在吸烟)。饮酒状态分为 3 组:不饮酒(从不饮酒或过去 1 年内每周饮酒 <1 次)、已戒酒(曾经饮酒但已停止饮酒半年及以上)、饮酒(过去 1 年内每周饮酒 ≥ 1 次)。喝茶者为过去一年内,每周至少喝 2 次茶。体育锻炼者为过去一周内,参与了持续时长不少于 10 min 的中等或高强度体育活动,或累计进行了不少于 30 min 的低强度体育活动。根据世界卫生组织和国际劳工组织的最新职业暴露评估,长工时工作定义为周工作时间 $>40 \text{ h}$ ^[11]。

本研究中,根据职业健康检查机构提供的相关职业病危害接触情况,参考 GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分:化学有害因素》、GBZ/T 229.4—2012《工作场所职业病危害作业分级 第 4 部分:噪声》,结合 2023 年研究对象所在工作场

所的职业危害因素检测资料,将噪声检测结果 $\geq 80 \text{ dB}$ 定义为噪声暴露,煤尘检测结果 $\geq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 定义为煤尘暴露。

1.2.2 职业健康检查与实验室检测 由职业健康检查机构按照 GBZ 188—2014《职业健康监护技术规范》对研究对象进行职业健康检查。于研究对象来院体检的当日上午,使用一次性真空采血管(EDTAK2 抗凝管)抽取空腹静脉血 5 mL,室温静置 30 min,置于低速台式冷冻离心机以 $1790 \times g$ 的重力加速度离心 10 min,分离血浆。采用西门子 ADVIA Centaur XP 全自动化学发光免疫分析仪(西门子医学诊断股份有限公司,德国)及原装配套试剂检测。

1.2.3 TSH 和甲状腺激素水平正常值参考范围 参照试剂说明书,本实验室的参考区间为 TSH: $0.35 \sim 5.50 \text{ } \mu\text{IU} \cdot \text{mL}^{-1}$,三碘甲腺原氨酸(triiodothyronine, T3): $0.6 \sim 1.81 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$,甲状腺素(thyroxine, T4): $4.3 \sim 12.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$,游离三碘甲腺原氨酸(free triiodothyronine, FT3): $2.3 \sim 4.2 \text{ pg} \cdot \text{mL}^{-1}$,FT4: $0.89 \sim 1.76 \text{ ng} \cdot \text{dL}^{-1}$ 。

1.3 质量控制

在问卷设计时,确保问题表述简明清晰,避免歧义或模糊不清,以提高被调查者的理解度和回答准确度。同时,设置重复性问题以检查问卷质量,并使用逻辑和验证规则,确保参与者的回答符合逻辑和实际情况。开展调查前,对调查人员进行严格的培训与考核,以统一资料采集标准。结合面对面调查的方式,由问卷调查员一对一地进行询问并填写,确保高回收率和数据的完整性。对问卷调查收集的数据进行清洗和整理,检查数据的完整性、一致性和准确性,排除不合格数据,确保数据的质量。

血液样本收集时,提前向患者明确饮食、用药等注意事项,采血人员规范操作,使用合格器具,精准标注样本信息。运输与保存需依据样本特性,利用冷链设备维持适宜温度,严格遵循保存期限。检测环节,定期校准仪器,采用优质试剂,依标准流程操作,对检测结果进行双人复核,确保样本质量与检测结果的准确性。

1.4 统计学分析

采用 SPSS 25.0 软件对数据进行分析。对计量指标进行 Kolmogorov Smirnov 检验(正态性检验),不符合正态分布,采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 做统计描述。单因素分析采用 Mann-Whitney U 检验(两组比较)或 Kruskal-Wallis H 检验(多组比较),比较不同一般情况、职业危害因素组间 TSH 和甲状腺激素水平的差异。在单因素分析基础上进行广义线性回归分析,以 TSH 和甲状腺

激素水平为结局变量, 计算各职业危害因素的 β 值及其 95%可信区间(confidence interval, CI)。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 男性煤矿从业人员一般情况比较

本研究纳入分析的 12564 名煤矿从业人员均为男性, 年龄的 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 37.00(33.00, 47.00) 岁, 在当前岗位工龄的 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 11.50(6.50, 17.00) 年, 汉族占比高达 99.35%, BMI 的 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 25.56(23.33, 27.94) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 大专/本科及以上学历者占比 53.69%, 每月人均收入以 ≤ 3000 元、3001~6000 元为主, 占比分别为 41.86%和 36.55%, 已婚者占比 90.01%。有吸烟、饮酒、饮茶习惯的人数分别为 7129 人(56.74%)、7348 人(58.48%)、4419 人(35.17%), 仅有 2558 人(35.17%)有体育锻炼的习惯。

男性煤矿从业人员 T3、T4、FT3、FT4 和 TSH 水平的 $M(P_{25}, P_{75})$ 分别为 1.16(1.03, 1.29) $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、7.70

(6.70, 8.90) $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ 、3.63(3.40, 3.84) $\text{pg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、1.19(1.08, 1.30) $\text{ng}\cdot\text{dL}^{-1}$ 和 1.93(1.36, 2.78) $\mu\text{IU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。本研究中甲状腺功能检查结果的总异常率为 2.83%, 甲状腺功能亢进症患病率为 0.37%, 亚临床甲状腺功能亢进症患病率为 0.31%, 甲状腺功能减退症患病率为 0.32%, 亚临床甲状腺功能减退症患病率为 1.83%。

T3 水平在民族、BMI、教育程度、吸烟情况、饮酒情况、喝茶习惯、体育锻炼情况不同分组间的差异具有统计学意义($P<0.05$); T4 水平在 BMI、教育程度、吸烟情况、饮酒情况、体育锻炼情况不同分组间的差异具有统计学意义($P<0.05$); FT3 水平在 BMI、教育程度、婚姻状况、吸烟情况、喝茶习惯、体育锻炼情况不同分组间的差异具有统计学意义($P<0.05$); FT4 水平在教育程度、每月人均收入、婚姻状况、吸烟情况、饮酒情况、喝茶习惯不同分组间的差异具有统计学意义($P<0.05$); TSH 水平在 BMI、婚姻状况、吸烟情况、喝茶习惯不同分组间的差异具有统计学意义($P<0.05$), 见表 1。

表 1 男性煤矿从业人员不同人口学特征组间 TSH 和甲状腺激素水平的比较 [$n=12564, M(P_{25}, P_{75})$]
Table 1 Comparison of TSH and thyroid hormone levels in male coal miners grouped by demographic characteristics [$n=12564, M(P_{25}, P_{75})$]

人口学特征	<i>n</i> (%)	T3/($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	T4/($\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$)	FT3/($\text{pg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	FT4/($\text{ng}\cdot\text{dL}^{-1}$)	TSH/($\mu\text{IU}\cdot\text{mL}^{-1}$)
民族						
汉族	12482(99.35)	1.16(1.03,1.29)	7.70(6.70,8.90)	3.63(3.40,3.84)	1.19(1.08,1.30)	1.93(1.08,2.78)
其他民族	82(0.65)	1.13(0.94,1.24)	7.55(5.90,8.83)	3.66(3.42,3.89)	1.23(1.12,1.31)	1.97(1.32,2.75)
<i>Z</i>		-2.234	-1.462	-1.112	-1.59	-0.104
<i>P</i>		0.025	0.144	0.266	0.112	0.917
BMI						
低体重	171(1.36)	1.10(0.98,1.24)	8.00(6.98,9.40)	3.51(3.25,3.78)	1.21(1.11,1.31)	1.79(1.33,2.59)
正常	3822(30.42)	1.14(1.02,1.27)	7.80(6.70,9.00)	3.61(3.38,3.81)	1.19(1.08,1.30)	1.87(1.31,2.68)
超重	5487(43.67)	1.15(1.03,1.28)	7.60(6.60,8.80)	3.63(3.40,3.84)	1.19(1.08,1.30)	1.94(1.36,2.80)
肥胖	3084(24.55)	1.18(1.05,1.32)	7.75(6.70,9.00)	3.66(3.42,3.87)	1.19(1.09,1.30)	2.03(1.43,2.88)
<i>H</i>		80.606	34.377	51.534	3.424	47.138
<i>P</i>		<0.001	<0.001	<0.001	0.331	<0.001
教育程度						
小学及以下	139(1.11)	1.20(1.07,1.32)	7.80(6.60,9.10)	3.53(3.31,3.81)	1.14(1.05,1.22)	1.82(1.21,2.85)
初中	1533(12.20)	1.16(1.03,1.29)	7.60(6.40,8.70)	3.56(3.32,3.78)	1.14(1.05,1.25)	1.88(1.31,2.74)
高中/中专	4146(33.00)	1.18(1.05,1.31)	7.70(6.60,8.90)	3.64(3.42,3.85)	1.17(1.07,1.29)	1.94(1.36,2.81)
大专/本科及以上学历	6746(53.69)	1.14(1.02,1.27)	7.80(6.70,8.90)	3.64(3.40,3.85)	1.21(1.11,1.32)	1.94(1.37,2.77)
<i>H</i>		58.339	20.375	71.745	292.439	4.673
<i>P</i>		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.197
每月人均收入/元						
≤ 3000	5259(41.86)	1.16(1.03,1.30)	7.70(6.70,8.90)	3.62(3.39,3.84)	1.18(1.08,1.30)	1.93(1.36,2.77)
3001~6000	4592(36.55)	1.15(1.02,1.28)	7.70(6.70,8.90)	3.64(3.40,3.84)	1.19(1.09,1.31)	1.93(1.36,2.76)
6001~10000	1946(15.49)	1.17(1.04,1.30)	7.70(6.60,8.90)	3.63(3.41,3.84)	1.18(1.08,1.30)	1.96(1.35,2.83)
≥ 10000	767(6.10)	1.15(1.02,1.29)	7.70(6.70,9.00)	3.64(3.40,3.86)	1.19(1.09,1.31)	1.92(1.34,2.76)
<i>H</i>		7.829	0.838	3.907	18.558	1.096
<i>P</i>		0.050	0.840	0.272	<0.001	0.778

续表 1

人口学特征	<i>n</i> (%)	T3/(ng·mL ⁻¹)	T4/(μg·dL ⁻¹)	FT3/(pg·mL ⁻¹)	FT4/(ng·dL ⁻¹)	TSH/(μIU·mL ⁻¹)
婚姻状况						
未婚	818(6.51)	1.15(1.02,1.27)	7.90(6.80,8.90)	3.65(3.44,3.86)	1.22(1.11,1.32)	2.09(1.45,2.94)
已婚	11 309(90.01)	1.16(1.03,1.29)	7.70(6.60,8.90)	3.63(3.39,3.84)	1.18(1.08,1.30)	1.93(1.35,2.76)
其他	437(3.48)	1.16(1.03,1.30)	7.80(6.80,8.90)	3.58(3.36,3.83)	1.20(1.09,1.33)	1.90(1.38,2.89)
<i>H</i>		1.199	3.899	10.508	33.825	10.313
<i>P</i>		0.549	0.142	0.005	<0.001	0.006
吸烟						
否	2 416(19.23)	1.12(0.99,1.24)	7.60(6.50,8.70)	3.56(3.32,3.81)	1.18(1.08,1.30)	2.10(1.48,3.03)
已戒烟	3 019(24.03)	1.18(1.06,1.31)	7.70(6.70,8.80)	3.65(3.42,3.85)	1.17(1.07,1.28)	2.04(1.41,2.94)
是	7 129(56.74)	1.16(1.03,1.30)	7.80(6.70,9.00)	3.64(3.41,3.85)	1.20(1.09,1.31)	1.84(1.31,2.64)
<i>H</i>		155.910	32.610	75.878	50.026	137.503
<i>P</i>		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
饮酒						
否	4 636(36.90)	1.18(1.05,1.31)	8.00(6.80,9.20)	3.63(3.39,3.84)	1.17(1.08,1.28)	1.91(1.33,2.75)
已戒烟	580(4.62)	1.17(1.04,1.31)	7.90(6.80,9.10)	3.60(3.37,3.81)	1.18(1.06,1.28)	1.91(1.38,2.84)
是	7 348(58.48)	1.14(1.02,1.27)	7.60(6.50,8.70)	3.63(3.40,3.84)	1.20(1.09,1.31)	2.02(1.41,2.91)
<i>H</i>		115.492	135.150	4.412	59.926	2.969
<i>P</i>		<0.001	<0.001	0.110	<0.001	0.227
喝茶						
否	8 145(64.83)	1.16(1.03,1.29)	7.80(6.70,8.90)	3.64(3.40,3.85)	1.18(1.08,1.30)	1.94(1.37,2.81)
是	4 419(35.17)	1.15(1.03,1.28)	7.70(6.60,8.90)	3.61(3.39,3.83)	1.20(1.09,1.31)	1.90(1.35,2.73)
<i>Z</i>		-2.606	-1.119	-3.413	-3.947	-2.281
<i>P</i>		0.009	0.263	0.001	<0.001	0.023
体育锻炼						
否	10 006(64.83)	1.16(1.04,1.30)	7.80(6.70,8.90)	3.64(3.41,3.85)	1.19(1.08,1.30)	1.94(1.35,2.78)
是	2 558(35.17)	1.13(1.00,1.26)	7.60(6.60,8.80)	3.59(3.36,3.82)	1.19(1.08,1.31)	1.93(1.36,2.78)
<i>Z</i>		-7.918	-3.581	-6.027	-1.058	-0.442
<i>P</i>		<0.001	<0.001	<0.001	0.290	0.658

2.2 男性煤矿从业人员职业危害因素比较

本研究中有 8 119 名(64.62%)煤矿从业人员存在长工时工作,6 798 名(54.11%)需要上夜班,部分研究对象有噪声的暴露史(49.86%),而煤尘的暴露比例则较低(7.99%)。

男性煤矿从业者的 T3、FT3、TSH 水平在是否长工

时工作的组间差异具有统计学意义($P<0.05$),T4、FT3、FT4、TSH 水平在是否夜班工作的组间差异具有统计学意义($P<0.05$),T3、T4、FT3、FT4 水平在是否煤尘暴露的组间差异具有统计学意义($P<0.05$),T4、FT3、FT4 水平在是否噪声暴露的组间差异具有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

表 2 男性煤矿从业人员不同职业危害因素组间 TSH 和甲状腺激素水平的比较 [$n=12\,564$, $M(P_{25}, P_{75})$]

职业危害因素	<i>n</i> (%)	T3/(ng·mL ⁻¹)	T4/(μg·dL ⁻¹)	FT3/(pg·mL ⁻¹)	FT4/(ng·dL ⁻¹)	TSH/(μIU·mL ⁻¹)
长工时工作						
否	4 445(35.38)	1.15(1.03,1.29)	7.70(6.70,8.90)	3.60(3.37,3.82)	1.19(1.09,1.31)	1.97(1.39,2.83)
是	8 119(64.62)	1.16(1.03,1.29)	7.70(6.60,8.90)	3.64(3.41,3.85)	1.19(1.08,1.30)	1.91(1.34,2.75)
<i>Z</i>		-2.087	-0.461	-5.364	-1.569	-2.820
<i>P</i>		0.037	0.645	<0.001	0.117	0.005
夜班工作						
否	5 766(45.89)	1.15(1.03,1.28)	7.80(6.70,9.00)	3.62(3.39,3.83)	1.20(1.10,1.31)	1.90(1.35,2.70)
是	6 798(54.11)	1.16(1.03,1.29)	7.70(6.60,8.90)	3.64(3.40,3.85)	1.18(1.07,1.29)	1.96(1.37,2.85)
<i>Z</i>		-1.372	-2.758	-3.064	-8.037	-3.292
<i>P</i>		0.170	0.006	0.002	<0.001	0.001

续表 2

职业危害因素	<i>n</i> (%)	T3/(ng·mL ⁻¹)	T4/(μg·dL ⁻¹)	FT3/(pg·mL ⁻¹)	FT4/(ng·dL ⁻¹)	TSH/(μIU·mL ⁻¹)
煤尘暴露						
否	11 560(92.01)	1.16(1.03,1.29)	7.80(6.70,8.90)	3.62(3.39,3.84)	1.19(1.09,1.30)	1.94(1.36,2.78)
是	1 004(7.99)	1.15(1.02,1.27)	7.40(6.30,8.60)	3.69(3.45,3.88)	1.16(1.05,1.28)	1.89(1.35,2.75)
<i>Z</i>		5.143	46.396	29.352	26.895	0.189
<i>P</i>		0.023	<0.001	<0.001	<0.001	0.664
噪声暴露						
否	6 299(50.14)	1.15(1.02,1.28)	7.80(6.80,9.00)	3.59(3.32,3.82)	1.21(1.11,1.32)	1.91(1.37,2.72)
是	6 265(49.86)	1.16(1.03,1.29)	7.70(6.60,8.90)	3.64(3.41,3.85)	1.18(1.08,1.29)	1.94(1.35,2.79)
<i>Z</i>		2.398	21.499	20.553	97.219	0.052
<i>P</i>		0.122	<0.001	<0.001	<0.001	0.820

2.3 职业危害因素与 TSH 和甲状腺激素水平的关联

广义线性回归分析结果显示,在完全调整模型(模型 3)中,长工时工作人群的 T3、FT3 水平更高,β 分别为 0.011(95%CI: 0.003~0.019)、0.038(95%CI: 0.019~0.057);夜班工作人群的 FT4 水平更低,而 TSH 水平更高,β 分别为-0.012(95%CI: -0.019~-0.006)、0.171(95%CI: 0.016~0.326);有煤尘暴露人群的 T3、T4 水平更低,β 分别为-0.022(95%CI: -0.037~-0.008)、-0.320(95%CI: -0.434~-0.207);有噪声暴露人群的 T4、FT4 水平更低,β 分别为-0.102(95%CI: -0.166~-0.038)、-0.020(95%CI: -0.027~-0.013)。通过模型比对,发现调整混杂因素后,长工时工作与 T3、FT3 水平的关联性稍有增强;夜班工作与 FT4、TSH 水平的关联性有所下降,与 T4、FT3 水平在调整中逐渐失去关联性;煤尘暴露与 T3 水平的关联性稍有增强,与 T4 水平的关联性有所下降,与 FT3、FT4 水平在调整中逐渐失去关联性;噪声暴露与 T4、FT4 水平的关联性有所下降,与 FT3 水平在调整中逐渐失去关联性,见表 3。

表 3 职业危害因素与 TSH 和甲状腺激素水平的关联 [β (95%CI)]

Table 3 Relationships of occupational hazards with TSH and thyroid hormone levels [β (95%CI)]

组别	模型1	模型2	模型3
长工时工作			
T3	0.009(0.001~0.017)*	0.010(0.002~0.018)*	0.011(0.003~0.019)*
T4	0.017(-0.046~0.080)	0.026(-0.036~0.089)	0.043(-0.020~0.105)
FT3	0.035(0.018~0.053)*	0.036(0.019~0.054)*	0.038(0.019~0.057)*
FT4	-0.004(-0.011~0.003)	-0.005(-0.011~0.002)	-0.003(-0.010~0.004)
TSH	-0.017(-0.172~0.139)	-0.006(-0.161~0.150)	-0.022(-0.178~0.135)
夜班工作			
T3	0.003(-0.005~0.010)	-0.001(-0.009~0.006)	-0.002(-0.010~0.006)
T4	-0.083(-0.143~-0.023)*	-0.092(-0.152~-0.032)*	-0.058(-0.120~0.004)
FT3	0.017(0.001~0.034)*	0.016(-0.001~0.032)	0.006(-0.013~0.025)
FT4	-0.021(-0.028~-0.015)*	-0.017(-0.023~-0.010)*	-0.012(-0.019~-0.006)*
TSH	0.190(0.040~0.339)*	0.176(0.025~0.327)*	0.171(0.016~0.326)*

续表 3

组别	模型1	模型2	模型3
煤尘			
T3	-0.018(-0.032~-0.004)*	-0.020(-0.034~-0.006)*	-0.022(-0.037~-0.008)*
T4	-0.399(-0.509~-0.288)*	-0.397(-0.507~-0.287)*	-0.320(-0.434~-0.207)*
FT3	0.048(0.014~0.081)*	0.045(0.011~0.078)*	0.035(-0.001~0.069)
FT4	-0.026(-0.038~-0.014)*	-0.024(-0.036~-0.012)*	-0.010(-0.022~0.003)
TSH	0.001(-0.274~0.275)	-0.005(-0.281~0.270)	-0.072(-0.356~0.213)
噪声			
T3	0.007(-0.001~0.015)	0.003(-0.005~0.010)	0.006(-0.002~0.014)
T4	-0.139(-0.199~-0.079)*	-0.161(-0.221~-0.100)*	-0.102(-0.166~-0.038)*
FT3	0.032(0.014~0.051)*	0.024(0.005~0.043)*	0.017(-0.002~0.037)
FT4	-0.025(-0.032~-0.019)*	-0.024(-0.031~-0.018)*	-0.020(-0.027~-0.013)*
TSH	0.084(-0.065~0.233)	0.079(-0.074~0.231)	0.056(-0.104~0.217)

[注]*: $P<0.05$; 模型 1: 不调整协变量; 模型 2: 调整年龄、民族、BMI、教育程度、每月人均收入、婚姻状况、吸烟、饮酒、喝茶、体育锻炼; 模型 3: 调整模型 2+职业危害因素。

3 讨论

本研究通过对 2023 年于西山煤电(集团)有限责任公司职业病防治所接受甲状腺功能检测的 12 564 名男性煤矿从业人员的检测结果进行分析,发现该职业人群 T3、T4、FT3、FT4 和 TSH 水平基本处于正常值参考范围内,异常情况较少。甲状腺激素检测结果的总异常率为 2.83%,其中亚临床甲状腺减退症的患病率最高(1.83%),其次为甲状腺功能亢进症(0.37%)、甲状腺功能减退症(0.32%)、亚临床甲状腺功能亢进症(0.31%)。这一结果明显低于上海地区政府机关、高校、科研院所及其他企业单位所报道的甲状腺功能异常率(5.50%)^[12]。同时,本研究中各类型的甲状腺功能异常情况患病率亦低于一项基于北京社区人群的甲状腺功能障碍患病率结果^[13]。考虑“健康工人效应”,该职业人群的年龄 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 37.00(33.00, 47.00)岁,正处于中青年时期,机体生理状况较好。此外,煤矿从业人员上岗前需通过岗前体检,并且在岗期间定期接受年度体检,只有健康状况符合工作要求者才能继续工作,因此该人群本身具有较高的健康水平^[14]。

研究表明,身体活动与甲状腺功能的变化密切相关^[15],其可能通过脂肪代谢和影响肾上腺素的分泌从而调节甲状腺激素的水平^[16]。煤矿从业人员的工作通常以体力劳动为主,相较于以久坐为主的办公室人群,其身体代谢率较高,脂肪代谢较快,能量消耗大,因此甲状腺功能异常发生率较低。

本研究单因素分析结果发现,男性煤矿从业者的 T3、FT3、TSH 水平在是否长工时工作组间存在差异。回归分析进一步指出,长工时工作人群的 T3、FT3 水平升高,而在其他激素中并未观察到关联情况。有学者研究发现长工时工作与甲状腺功能减退症发生风险相关^[17-18],但该研究关注的是甲状腺功能障碍而非具体激素水平。目前长工时工作影响甲状腺功能的潜在机制尚不清楚。有几项流行病学研究表明,长工时工作引起的慢性应激反应可能在生物学机制中起重要作用^[19-20]。长时间的高强度工作导致身体处于持续应激的状态,下丘脑-垂体-甲状腺(hypothalamic-pituitary-thyroid, HPT)轴的调节失衡,促使 TSH 释放激素分泌增加,进而刺激垂体分泌更多的 TSH, TSH 作用于甲状腺,促进甲状腺激素的合成与分泌,使得 T3、FT3 水平升高^[21]。然而,这种升高可能是身体的一种代偿性反应。

由于睡眠/觉醒周期的改变会影响人体的生物功能、生理-心理状况、生活质量以及工作效率,夜班工作已是公认的人体压力源^[22]。本研究发现,夜班工作人群的 TSH 水平升高,而 FT4 水平降低。Leso 等^[23]关于轮班和夜班工作与甲状腺激素变化和疾病发展之间的关联性研究也发现了类似的结果,夜班工作与 TSH 浓度升高之间呈正相关。Khosravipour 等^[24]关于长期职业性共同暴露于电磁场、噪声和轮班工作与甲状腺激素水平的关系研究发现,与固定白班的工人相比,轮班工人的 T4 水平显著降低,而一般情况下, T4 和 FT4 两者的变化趋势具有一致性。夜班工作扰乱人体正常的生物钟节律,而甲状腺激素的分泌具有明显的昼夜节律性^[25],生物钟的紊乱影响了 HPT 轴的正常调节,导致甲状腺激素分泌异常^[26]。在正常睡眠期间,人体通常会抑制 TSH 的分泌,但当个体经历夜间睡眠剥夺,比如从事夜间工作的人群,其 TSH 的分泌活动并不受抑制,仍持续进行。因此,相较于夜间睡眠正常的人群,因夜间工作等原因导致睡眠剥夺的人群,其早晨血浆中的 TSH 水平更高^[27]。

煤尘是煤矿工人职业健康风险中最重要的因素。本研究单因素结果发现,男性煤矿从业者的 T3、T4、

FT3、FT4 水平在是否煤尘暴露组间存在统计学差异。回归分析进一步指出,煤尘暴露人群的 T3、T4 水平降低。Wang 等^[28]对中国山西省西山某煤田采掘工作面、走向工作面、岩石巷道和回风巷道的煤尘进行组分分析发现,地下煤尘中存在砷和汞的异常富集。砷、汞等重金属是干扰甲状腺正常功能的环境毒素。Kim 等^[29]基于美国国家健康与营养检查调查(National Health and Nutrition Examination Survey, NHANES) 2007—2012 年的数据,研究金属混合物以及单个金属与甲状腺激素水平之间的关联性,研究结果显示,砷暴露与 T3、T4 水平呈负相关关系,这一结论与本研究的煤尘暴露观察结果相似。砷作为一种已知的内分泌干扰化学物质,能够抑制甲状腺过氧化物酶(thyroid peroxidase, TPO)的活性, TPO 在甲状腺激素合成过程中起关键作用,负责催化碘离子氧化以及酪氨酸碘化,而砷对 TPO 活性的抑制会严重干扰这一关键步骤,最终阻碍甲状腺激素的合成过程^[30]。Chen 等^[31]同样依托 NHANES 数据库,利用 2007—2008 年的数据对甲状腺激素与铅、汞和镉暴露的关系进行调查研究,研究结果显示,血液中汞含量与 T3、T4 和 FT3 呈负相关。金属汞除了能够影响 TPO 活性外^[32],还能抑制参与甲状腺激素代谢的脱碘酶,脱碘酶活性被抑制后,甲状腺激素的代谢途径受阻, T4 向具有生物活性的 T3 转化减少,同时甲状腺激素的清除也可能受到影响,进而导致甲状腺激素水平降低^[33]。

本研究单因素分析结果发现,男性煤矿从业者的 T4、FT3、FT4 水平在是否噪声暴露组间存在统计学差异。回归分析进一步指出,噪声暴露人群的 T4、FT4 水平升高。本研究结果与一项在火力发电厂男性工人中为期四年的重复测量研究结果相似,长期噪声暴露会导致 T3 和 T4 水平的降低^[34]。目前,这种关联背后的生物学机制尚不完全清楚。有学者提出噪声暴露可能通过下丘脑的兴奋性激活间接影响甲状腺功能,也可能通过甲状腺结构的变化直接影响甲状腺功能^[24]。然而,这些影响的具体分子过程仍不清楚。

本研究存在一定的局限性:①本研究为横断面调查设计,无法确定因果关系。②研究依赖于受试者回顾性提供的信息,结果存在一定的回忆偏移。③碘摄入量是影响甲状腺激素水平的重要因素,但在本研究,并未对研究对象的碘摄入量进行精确测量。

综上所述,男性煤矿从业人员 TSH 与甲状腺激素异常检出率较低,长工时工作、夜班工作、煤尘、噪声等职业危害因素与其甲状腺激素水平存在关联,这为

煤矿行业的职业健康管理和从业人员的健康防护提供了参考。企业应合理安排工作时间,避免过长工时,优化夜班排班制度,确保员工有足够的休息和恢复时间,改进矿井通风系统,提供个人防护用品,减少有害物质的暴露,定期提供健康检查,及时发现和干预甲状腺功能异常,预防相关疾病的发生和发展。

参考文献

- [1] CITTERIO C E, TARGOVNIK H M, ARVAN P. The role of thyroglobulin in thyroid hormonogenesis[J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2019, 15(6): 323-338.
- [2] LEKO M B, GUNJAČA I, PLEIĆ N, et al. Environmental factors affecting thyroid-stimulating hormone and thyroid hormone levels[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(12): 6521.
- [3] KUŠ A, CHAKER L, TEUMER A, et al. The genetic basis of thyroid function: novel findings and new approaches[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2020, 105(6): 1707-1721.
- [4] TAN K, ZHANG Q, WANG Y, et al. Associations between per- and polyfluoroalkyl substances exposure and thyroid hormone levels in the elderly[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 920: 170761.
- [5] INOUE K, RITZ B, ANDERSEN S L, et al. Perfluoroalkyl substances and maternal thyroid hormones in early pregnancy; findings in the Danish national birth cohort[J]. *Environ Health Perspect*, 2019, 127(11): 117002.
- [6] BIRCK M G, ALMEIDA-PITITTO B, JANOVSKY C C P S, et al. Thyroid-stimulating hormone and thyroid hormones and incidence of diabetes: prospective results of the Brazilian longitudinal study of adult health (ELSA-BRASIL)[J]. *Thyroid*, 2022, 32(6): 694-704.
- [7] ABABZADEH S, RAZAVINIA F S, ESLAMI FARSAANI M, et al. Effect of short-term and long-term traffic noise exposure on the thyroid gland in adult rats: a sexual dimorphic study[J]. *Horm Mol Biol Clin Investig*, 2020, 42(1): 29-35.
- [8] VELJOVIĆ V, JOVANOVIĆ J, RADEVIĆ L, et al. Early detection of thyroid disease in workers professionally exposed to noise through preventive medical check-ups[J]. *Acta Med Medianae*, 2010, 49(3): 45-49.
- [9] ZHAO F, ZHANG H, REN D, et al. Association of coal mine dust lung disease with Nodular thyroid disease in coal miners: a retrospective observational study in China[J]. *Front Public Health*, 2022, 10: 1005721.
- [10] SONG Q, CHEN X, SU Y, et al. Age and gender specific thyroid hormones and their relationships with body mass index in a large Chinese population[J]. *Int J Endocrinol Metab*, 2019, 17(1): e66450.
- [11] RUGULIES R, SORENSEN K, DI TECCO C, et al. The effect of exposure to long working hours on depression: a systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury[J]. *Environ Int*, 2021, 155: 106629.
- [12] 吴玉梅, 刘春兴. 上海地区 32745 例体检人群甲状腺功能检测结果分析[J]. *海南医学*, 2020, 31(3): 299-301.
- WU Y M, LIU C X. Analysis of thyroid function in 32745 subjects for health-care examination in Shanghai[J]. *Hainan Med J*, 2020, 31(3): 299-301.
- [13] HUANG X, ZHANG X, ZHOU X, et al. Prevalence of thyroid dysfunction in a Chinese population with different glucose intolerance status: a community-based cross-sectional study[J]. *Diabetes Metab Syndr Obes*, 2020, 13: 4361-4368.
- [14] WILCOSKY T, WING S. The healthy worker effect. Selection of workers and work forces[J]. *Scand J Work Environ Health*, 1987, 13(1): 70-72.
- [15] TIAN L, LU C, TENG W. Association between physical activity and thyroid function in American adults: a survey from the NHANES database[J]. *BMC Public Health*, 2024, 24(1): 1277.
- [16] ZHANG S Y, HU X Q, XIANG C, et al. Physical activity affects dysthyreosis by thyroid hormones sensitivity: a population-based study[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2024, 15: 1418766.
- [17] LEE Y, LEE W, KIM H R. Long working hours and the risk of hypothyroidism in healthy Korean workers: a cohort study[J]. *Epidemiol Health*, 2022, 44: e2022104.
- [18] LEE Y K, LEE D E, HWANGBO Y, et al. Long work hours are associated with hypothyroidism: a cross-sectional study with population-representative data[J]. *Thyroid*, 2020, 30(10): 1432-1439.
- [19] DESCATHA A, SEMBAJWE G, PEGA F, et al. The effect of exposure to long working hours on stroke: a systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury[J]. *Environ Int*, 2020, 142: 105746.
- [20] KIVIMÄKI M, JOKELA M, NYBERG S T, et al. Long working hours and risk of coronary heart disease and stroke: a systematic review and meta-analysis of published and unpublished data for 603, 838 individuals[J]. *Lancet*, 2015, 386(10005): 1739-1746.
- [21] MIZOKAMI T, LI A W, EL-KAISSI S, et al. Stress and thyroid autoimmunity[J]. *Thyroid*, 2004, 14(12): 1047-1055.
- [22] FISCHER F M, SILVA-COSTA A, GRIEP R H, et al. Working Time Society consensus statements: psychosocial stressors relevant to the health and well-being of night and shift workers[J]. *Ind Health*, 2019, 57(2): 175-183.
- [23] LESO V, VETRANI I, SICIGNANO A, et al. The impact of shift-work and night shift-work on thyroid: a systematic review[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(5): 1527.
- [24] KHOSRAVIPOUR M, GHARAGOZLOU F, KAKAVANDI M G, et al. Association of prolonged occupational co-exposures to electromagnetic fields, noise, and rotating shift work with thyroid hormone levels[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 270: 115837.
- [25] KALSBECK A, FLIERS E. Daily regulation of hormone profiles[M]//KRAMER A, MERROW M. Circadian Clocks. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 185-226.
- [26] ORTIGA-CARVALHO T M, CHIAMOLERA M I, PAZOS-MOURA C C, et al. Hypothalamus-pituitary-thyroid axis[J]. *Compr Physiol*, 2016, 6(3): 1387-1428.
- [27] IKEGAMI K, REFETTOFF S, VAN CAUTER E, et al. Interconnection between circadian clocks and thyroid function[J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2019, 15(10): 590-600.
- [28] WANG C, ZENG F, XU C, et al. Anomalous enrichment of as and hg in underground coal dust: a case from Xishan coalfield, Shanxi Province, North China[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(15): 13884-13898.
- [29] KIM K, ARGOS M, PERSKY V W, et al. Associations of exposure to metal and metal mixtures with thyroid hormones: results from the NHANES 2007-2012[J]. *Environ Res*, 2022, 212(Pt C): 113413.
- [30] PALAZZOLO D L, JANSEN K P. The minimal arsenic concentration required to inhibit the activity of thyroid peroxidase activity in vitro[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2008, 126(1/3): 49-55.
- [31] CHEN A, KIM S S, CHUNG E, et al. Thyroid hormones in relation to lead, mercury, and cadmium exposure in the National Health and Nutrition Examination Survey, 2007-2008[J]. *Environ Health Perspect*, 2013, 121(2): 181-186.
- [32] GHOSH N, BHATTACHARYA S. Thyrotoxicity of the chlorides of cadmium and mercury in rabbit[J]. *Biomed Environ Sci*, 1992, 5(3): 236-240.
- [33] SOLDIN O P, O'MARA D M, ASCHNER M. Thyroid hormones and methylmercury toxicity[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2008, 126(1/3): 1-12.
- [34] KHOSRAVIPOUR M, KAKAVANDI M G, NADRI F, et al. The long-term effects of exposure to noise on the levels of thyroid hormones: a four-year repeated measures study[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 792: 148315.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)