

高海拔地区居民心电图特征的研究进展

王超^{1,2} 张先军² 谢清梦² 李丹² 陈宽琴² 李凤¹ 余思芸¹ 曾健¹ 刘建^{2,3}

(1. 西南交通大学附属医院 成都市第三人民医院老年医学国际医疗中心, 四川 成都 610031; 2. 理塘县人民医院 康南急救中心, 四川 甘孜藏族自治州 624300; 3. 西南交通大学附属医院 成都市第三人民医院放射科, 四川 成都 610031)

【摘要】 目前高海拔环境对区域内居民心电图的影响无系统全面的阐述, 是医学研究的热点。长期生活在高海拔地区, 人体会通过心血管、呼吸、代谢、神经等方面的生理性变化来适应环境变化。这些适应性的生理变化会使其心电图与平原地区居民的心电图表现不同, 主要表现为 P 波形态改变、QRS 波群电轴右偏、右心室肥大、右束支传导阻滞、ST-T 段改变、QT 间期延长等。影响这些心电图特征的因素包括遗传适应性、海拔高度、个体差异等。目前的研究仍存在方法学的局限性, 未来人工智能技术在心电分析中的应用有望早期识别这些心电图特征。

【关键词】 心电图; 高海拔; 心血管系统; 缺氧; 人工智能

【DOI】10. 16806/j. cnki. issn. 1004-3934. 2024. 11. 015

Electrocardiographic Characteristics of Residents in High Altitude Areas

WANG Chao^{1,2}, ZHANG Xianjun², XIE Qingmeng², LI Dan², CHEN Kuanqin², LI Feng¹, YU Siyun¹, ZENG Jian¹, LIU Jian^{2,3}

(1. *Department of Geriatrics and International Medical Center, The Affiliated Hospital of Southwest Jiaotong University, The Third People's Hospital of Chengdu, Chengdu 610031, Sichuan, China*; 2. *Litang County People's Hospital, Kangnan Emergency Center, Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture 624300, Sichuan, China*; 3. *Department of Radiology, The Affiliated Hospital of Southwest Jiaotong University, The Third People's Hospital of Chengdu, Chengdu 610031, Sichuan, China*)

【Abstract】 At present, there is no systematic and comprehensive elaboration of the effect of high-altitude environment on the electrocardiography (ECG) of regional residents, which is a hot spot of medical research. Living at high altitude for a long time, the human body adapts to environmental changes through physiological changes in cardiovascular, respiratory, metabolic and neurological aspects. These adaptive physiological changes will cause the ECG to appear different from those of residents in plain areas, mainly in the form of altered P-wave morphology, rightward deviation of the QRS wave electrical axis, right ventricular hypertrophy manifestations, right bundle-branch block, ST-T wave alterations and prolongation of the QT interval. The factors affecting these ECG features include genetic adaptation, altitude and individual differences. Current studies still have methodological limitations, and the future application of artificial intelligence techniques in ECG analysis is expected to identify these ECG features at an early stage.

【Keywords】 Electrocardiography; High altitude; Cardiovascular system; Hypoxia; Artificial intelligence

高海拔地区由于大气压力降低, 氧气含量减少。在这里生活的居民, 最大摄氧量及动脉氧分压较在平原生活的居民低, 从而使血氧饱和度下降, 为适应低压低氧环境, 这里的居民会产生一系列包括心血管、呼吸、代谢、神经等方面的生理性变化。众所周知, 心电图在诊断及预测心律失常方面具有重要作用, 由于这些适应高海拔地区生活的生理性变化, 使这里的居民在心电图上表现出特定的模式和表现^[1-2], 与长期生活在平原居民的心电图特点不同。现探讨高海拔

地区居民心电图变化的研究现状, 鉴别心电图生理性改变, 全面地认识心电图的特征, 以及这些变化可能对心血管疾病的潜在影响。

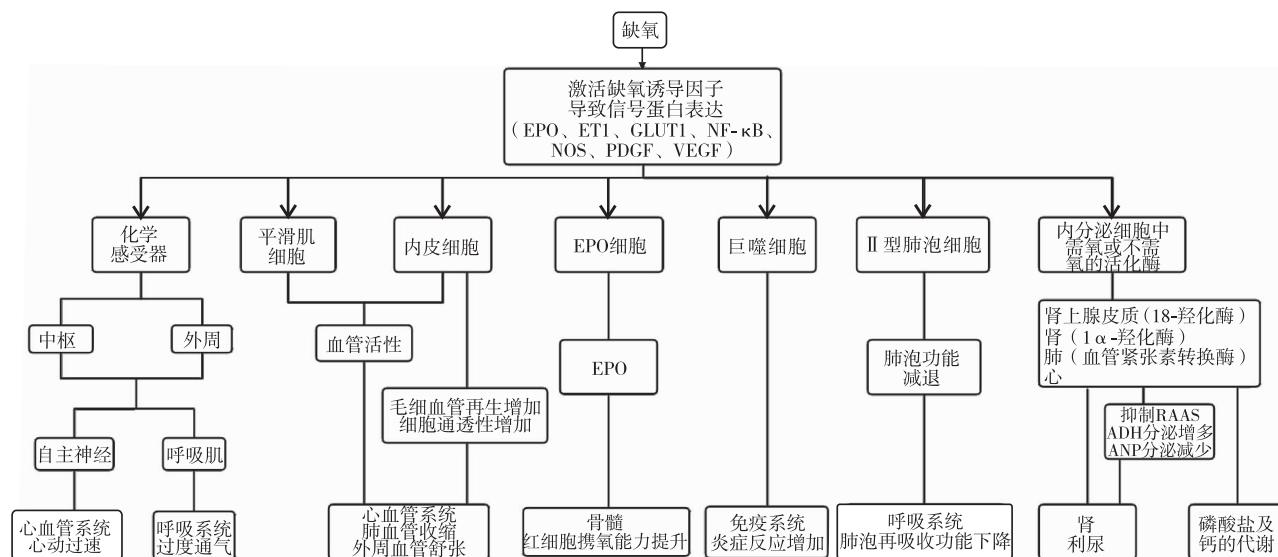
1 高海拔地区的定义

明确区分中海拔地区、高海拔地区、极高海拔地区和极端高海拔地区是很重要的。虽然无统一定义, 但研究人员通常把海拔 2 500 m 作为高海拔地区的标准。小于这个高度被认为是中海拔地区, 3 500 ~ 5 500 m 是极高海拔地区, 5 500 m 以上是极端高海拔地区^[3]。

2 高海拔地区人体出现的生理性反应

缺氧的生理影响既往已通过使用低气压缺氧(使用高海拔环境或低气压室)或常压缺氧(通过呼吸缺氧气体)的方法研究过。当两种方法的动脉氧分压相同时,实验方法之间未观察到生理上的显著差异^[4]。在急性缺氧(数小时内)情况下,会激活各种因子的表达,导致缺氧诱导因子的持续生成。缺氧诱导因子又参与了缺氧生理反应的信使和激素的表达^[5]。此外,

缺氧也可通过激活或抑制离子通道来直接影响细胞功能^[6],还可通过延髓产生对心脏的影响。血管对缺氧的反应是可变的,这取决于作用的部位。缺氧引起肺血管中的血管收缩和外周循环中的血管舒张。随着长时间缺氧暴露(几天到几周),身体逐渐发生适应性反应。这些综合反应(图 1)可持续为所有细胞提供足够的氧气^[7-9]。



注: EPO, 促红细胞生成素; ET1, 内皮素 1; GLUT1, 葡萄糖转运体 1; NF- κ B, 核因子 κ B; NOS, 一氧化氮合酶; PDGF, 血小板生长因子; VEGF, 血管内皮生长因子; RAAS, 肾素-血管紧张素-醛固酮系统; ADH, 抗利尿激素; ANP, 心房利尿钠肽。

图 1 高海拔缺氧地区对人体的生理影响

3 高海拔环境对自主神经的影响

在高海拔环境中,因为低氧会激活身体的适应性反应,对自主神经系统有显著的影响。自主神经系统主要分为交感神经系统和副交感神经系统,主要影响心率和心律^[10]。低氧环境时身体会通过激活交感神经系统来增加氧气的摄取和利用率^[2],心脏输出量在进入高原初期会增加,心率明显上升,但每搏输出量在短期内可能不会改变或略有下降。随着适应过程的进行,每搏输出量可能会回归到正常水平或略低于正常水平^[11]。尽管交感神经系统在高海拔环境中起主导作用,副交感神经系统仍然发挥着调节作用。特别是在剧烈运动时,副交感神经系统的激活可减慢心率,从而增加心脏舒张周期,改善心肌的血液灌注。自主神经系统通过调节心率变异性对心电图产生影响^[12]。心率变异性反映了心电图上 RR 间期的逐跳变化,是自主神经在心率调节中的活动指标^[12]。通过分析心率变异可了解自主神经系统对心脏的影响^[13]。此外,通过心电图数据来确定心率变异性从而评估自主神经系统,可反映出交感神经和副交感神经的活性^[14]。在高海拔环境中,心率变异性可能会降

低^[1,15],这反映了交感神经活动的增加和副交感神经活性的减少。长时间自主神经系统的失衡,可能导致致命的心律失常^[16]。在长期居住在高海拔地区的人群中,自主神经系统可能会发生适应性变化。例如,一些高海拔地区居民可能会产生更有效的氧气利用机制,从而减少对交感神经系统激活的依赖^[1]。

4 高海拔环境对心血管系统的影响

在高海拔地区低氧环境会导致肺血管收缩、肺动脉压上升^[1]。然而,这种肺动脉高压通常是轻度的,并且在长期居住高海拔地区的人群中,肺动脉压保持在一个相对稳定的水平^[11]。心脏可能会发生结构性改变,如右心室肥大,以适应增加的肺循环负荷。为适应氧气供应的减少,身体可能会通过增加血红蛋白含量和改善氧气的利用效率来提高氧气输送能力^[11,17-18]。但过度的红细胞生成可导致血液黏度增加、血栓形成、肺动脉高压和心力衰竭^[19-20]。心电图是检测和监测心血管疾病的重要工具,因为心电图波形的变化可反映心脏的功能紊乱、冠状动脉疾病和结构的重塑^[21]。高海拔环境使心血管系统的变化会导致心电图的改变。心血管系统在维持心脏正常节律

和功能方面起着至关重要的作用,这一点在心电图中得到了反映^[22]。例如,左心室肥大等情况也会导致心电图发生变化,从而凸显出心脏结构变化与心电活动之间的相互作用^[23]。同样在高海拔地区右心室肥大也会使心电图出现特定的右心室肥大的表现^[1,24]。随着心血管系统变化,主要心电图特征也会明显增加,这凸显了心血管健康与心电图结果之间的关联^[25]。总之,高海拔地区心血管系统的变化可通过各种机制引起心电图的变化。了解心血管系统与心电图变化之间的关系有助于早期识别心血管系统的改变。

5 影响高海拔地区居民心电图特征的因素

导致高海拔地区与平原地区居民心电图表现不同的因素有很多,并不是单一存在的。不同民族群体可能对高海拔环境有不同的遗传适应性。例如,藏族人群可能通过遗传适应性表现出对低氧环境的更高耐受性。与健康藏族人群相比,随着汉族人群在高海拔地区居住时间的增加,心电图提示右心室肥大的发生率增高^[26]。有研究^[15]发现从高海拔地区迁移到较低海拔地区的人群中 QTc 间期分散度与右心室肥大有关,这可能是由于机体在高海拔地区的生活经历对心脏结构和功能产生了长期影响。随着海拔的升高,发现异常心电图的概率也在增加。这意味着更高的海拔水平对心脏的结构产生更大的影响^[26]。此外,年龄、性别、生活方式、不同民族群体的心血管疾病患病率及文化背景等因素也影响心电图表现的异常^[1,19]。进一步的研究可能有助于更深入地理解这些差异的潜在机制。

6 高海拔地区居民心电图的特征

6.1 高海拔地区成年居民心电图的特征

6.1.1 P 波

P 波形态可能会改变^[1,3,11],尤其是在导联 II、III 和 aVF 中^[27],这反映了右心房的负荷或体积增加。但 2018 年的一项研究^[28]显示,土耳其 80 例中海拔(1 600 m)居民的平均最大 P 波持续时间为 106 ms,至少为 78 ms,与平原地区居民相比无统计学差异。这可能是由于海拔高度未达到高海拔。

6.1.2 PR 间期

从目前的报告中提示 PR 间期在高海拔地区居民及平原居民中无显著性差异^[28],但现有的研究较少。

6.1.3 QRS 波群电轴

心电图常显示出右轴偏移,即 QRS 波群的电轴向右偏移^[1-2,11]。有研究^[29]报告,在秘鲁海拔 4 500 m 的 25 例成年男性中,平均 QRS 波群电轴在 $+105^{\circ} \sim +125^{\circ}$,而在与之匹配的 300 例平原居民中,电轴平均在 $+30^{\circ} \sim +55^{\circ}$ 。Raynaud 等^[30]也报告了在玻利维亚 4 780 m 高海拔的 15~40 岁居民的 QRS 电轴,有证据

表明男性($+105^{\circ}$)高于女性($+73^{\circ}$)。此外,还报告了在高海拔地区居民电轴右偏较少,平均 QRS 电轴为 $+70^{\circ}$ 。这表明,越高的海拔越有可能出现更大的 QRS 电轴右偏^[1]。

6.1.4 QRS 波群时限及右束支传导阻滞

根据 Akcay^[28]的研究,中海拔土耳其人群的平均 QRS 波群时限为 (94.2 ± 14.0) ms。不完全右束支传导阻滞在高海拔地区居民中发生率为 8.5%~29.1%,但完全右束支传导阻滞不常见^[3,27]。

6.1.5 右心室肥大的心电图表现

肺动脉压增高使右心室负荷长期增加导致右心室肥大,心电图上可能表现为 V_1 导联中 R 波振幅的增加,以及 S 波在 V_5 或 V_6 导联的深度增加^[24]。

6.1.6 QT 间期

QT 间期会有延长的情况^[1,9,24-25,28],特别是在高海拔地区生活的孕妇,由于对低氧环境的生理反应可能会有更长的 QT 间期^[31],QTc 离散度也会增加,QTc 离散度是指不同导联上 QTc 间期的最大值和最小值之差,表明心肌复极化的不均匀性增加。QT 间期和 QTc 离散度的延长可能与心律失常的风险增加有关^[10]。Fuenmayor 等^[32]发现,委内瑞拉高海拔地区居民 QTc 间期显著延长,且随海拔高度的增加而增加 [$1\ 600\text{ m}(363\text{ ms}), 3\ 500\text{ m}(389\text{ ms}), P < 0.001$]。

6.1.7 ST-T 段

ST-T 段代表心室复极,ST 段变化虽然在健康个体中不常见,但在高海拔环境下,部分个体可能会出现 ST 段下降或抬高,这可能与心肌缺血有关。T 波可能会出现倒置,尤其是在胸前导联中^[1-2,8],可能与右心室负荷增加或右心室肥大有关^[1],有时也与高海拔肺水肿相关^[2]。

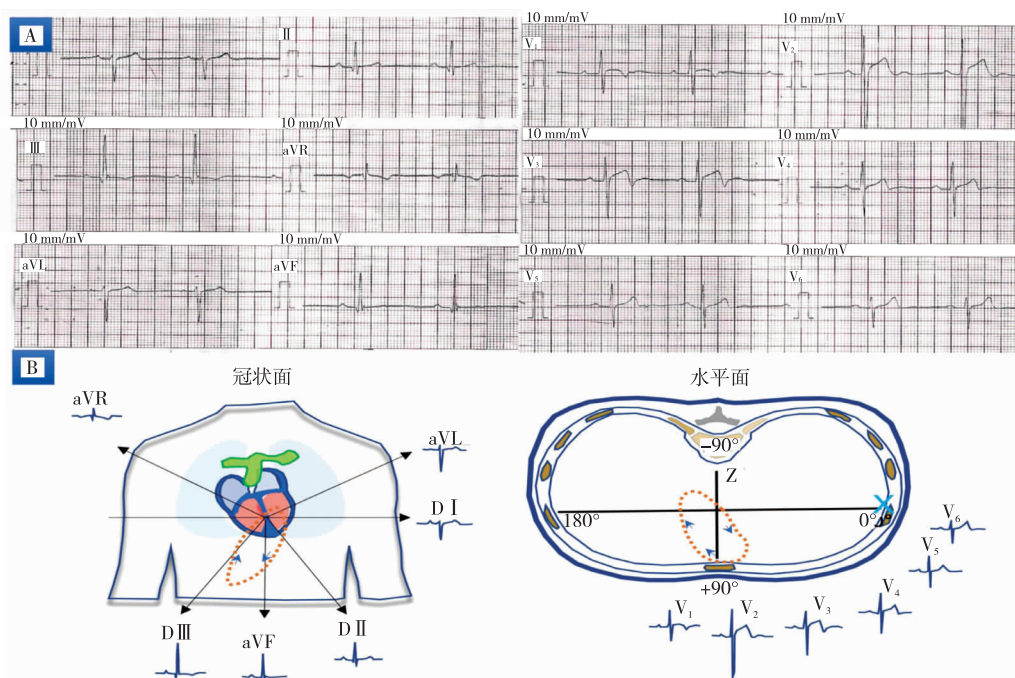
6.2 高海拔地区儿童心电图的特征

高海拔地区儿童的心电图特征与传统观点相反。研究^[33]发现,在高海拔地区生活的儿童并未显示出右心室优势的心电图模式。高海拔地区儿童的心电图模式与平原地区的儿童相似,这可能反映了高海拔低氧环境对心脏发育的影响较小。但这些发现可能不适用于所有高海拔地区的儿童,特别是那些具有不同遗传背景、社会经济状况和迁移习惯的儿童^[17,33]。因此,未来的研究需在更广泛的儿童群体中进行,以便更好地理解高海拔环境对儿童心电图特征的影响。

值得注意的是,在平原地区无症状的心电图异常往往和性别、年龄、心血管疾病风险因素和心/脑血管疾病的病史显著相关^[34]。但在高海拔地区大多数心电图异常在高海拔是良性的,不代表心血管疾病风险增加^[35]。近期一项研究^[36]提示,未发现高海拔与心律失常之间存在统计学上显著的因果关系。尽管这项研究未发现

高海拔与心律失常之间的显著联系,但这并不意味着二者之间无生物学上的联系或其他潜在的关联。但有理由认为低氧使交感神经活性增加可能诱发心律失常^[37]。未来需更多的研究和不同的方法来进一步探索

二者之间的关系。图 2 显示了一位来自秘鲁高海拔地区成年女性的心电图和心电向量图^[2]。



注:图为永久居住在海拔 3 259 m 安第斯地区(秘鲁冈卡约市)的 1 例 50 岁健康女性(体重 63 kg,身高 1.50 m,体表面积 1.62 m²)的心电图及心电向量图。A 为十二导联心电图,提示窦性心律,QRS 波群电轴右偏,心室肥大表现;B 为心电向量图,显示最大向量向右前方向偏移,提示 A 型右心室肥大表现。在冠状面最大 QRS 波群电轴约为 120°;在水平面最大向量指向 V₁ 导联。

图 2 正常高海拔地区居民心电图和心电向量图例

7 研究方法和局限性

目前大多数研究高海拔地区居民心电图变化的方法包括横断面研究、病例对照研究和队列研究。这些研究面临的局限性包括样本量大小不够、研究设计的多样性不足、混杂因素的控制不足以及缺乏长期随访数据^[2,26,28,31,38-39],未来的研究需采用更严格的研究设计,考虑多种因素的影响并进行长期跟踪。

8 未来展望

心电图是临床上诊断疾病和评价心脏及全身状态最常用的工具之一^[21,40]。高海拔地区居民的心电图由于多种因素的影响不同于平原地区。比如 V₃ 导联的 S 波振幅和 V₁~V₃ 导联的负 T 波是与高海拔藏族人群肺动脉高压诊断相关的独立因素^[39]。此外,随着越来越多的人从平原到高海拔地区探险和徒步旅行,出现了大量的急性高原病患者,这些患者的心电图也有鲜明的特征,早期识别有助于诊断及治疗^[41]。然而专业医务人员需结合肉眼观察和丰富的个人经验出具心电图报告,耗费大量时间和精力且无法保证稳定的准确性。结合人工智能的心电分析技术应运而生,未来人工智能心电分析技术,通过更多的前瞻性验证和深度学习,将有助于彻底改变基于心电图的

临床疾病监测和管理策略^[40-44]。特别是在高原地区,人工智能可及早地发现由于高海拔环境导致的身体状态发生改变引起的心电图表现,为疾病的诊断提供可靠的依据,并及早地发现疾病^[45-46]。

9 结论

高海拔地区居民与平原居民的心电图参数存在显著差异,这些差异可能与高海拔环境引起的身体生理适应性变化有关。了解这些心电图变化对于评估高海拔地区居民的血管健康状况具有重要意义,并可能对预防和治疗心血管疾病提供指导。本综述讨论的信息有助于目前理解高海拔环境对心脏电活动和相应的生理适应的长期影响。未来结合人工智能的心电分析技术可更好、准确地发现有意义的心电图特征,为高海拔地区居民的健康提供更好的保障。

参考文献

- [1] Parodi JB, Ramchandani R, Zhou Z, et al. A systematic review of electrocardiographic changes in healthy high-altitude populations [J]. Trends Cardiovasc Med, 2023, 33(5):309-315.
- [2] Ramchandani R, Zhou Z, Parodi JB, et al. A systematic review of electrocardiographic changes in populations temporarily ascending to high altitudes [J]. Curr Probl Cardiol, 2023, 48(5):101630.
- [3] Márquez MF. Editorial commentary: the heart at high altitude [J]. Trends

- Cardiovasc Med, 2023, 33(5):316-318.
- [4] Saugy JJ, Schmitt L, Hauser A, et al. Same performance changes after live high-train low in normobaric vs. hypobaric hypoxia[J]. *Front Physiol*, 2016, 7:138.
 - [5] Semenza GL. Regulation of oxygen homeostasis by hypoxia-inducible factor 1[J]. *Physiology (Bethesda)*, 2009, 24:97-106.
 - [6] Sommer N, Strielkov I, Pak O, et al. Oxygen sensing and signal transduction in hypoxic pulmonary vasoconstriction[J]. *Eur Respir J*, 2016, 47(1):288-303.
 - [7] Luks AM, Beidleman BA, Freer L, et al. Wilderness Medical Society clinical practice guidelines for the prevention, diagnosis, and treatment of acute altitude illness: 2024 update[J]. *Wilderness Environ Med*, 2024, 35(1-suppl):2S-19S.
 - [8] Wehrli JP, Hallén J. Linear decrease in $\dot{V}O_{2\max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2006, 96(4):404-412.
 - [9] Richalet JP, Lhuissier FJ. Aging, tolerance to high altitude, and cardiorespiratory response to hypoxia[J]. *High Alt Med Biol*, 2015, 16(2):117-124.
 - [10] Fonfara S, Casamian-Sorrosal D, Sundermeyer J, et al. Variations in heart rate and rhythm of harbor seal pups during rehabilitation[J]. *Marine Mammal Sci*, 2015, 31(3):998-1013.
 - [11] Naeije R. Physiological adaptation of the cardiovascular system to high altitude[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2010, 52(6):456-466.
 - [12] Nicolini P, Ciulla MM, de Asmundis C, et al. The prognostic value of heart rate variability in the elderly, changing the perspective: from sympathovagal balance to chaos theory[J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2012, 35(5):622-638.
 - [13] Nayak SK, Bit A, Dey A, et al. A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal[J]. *J Healthc Eng*, 2018, 2018:6920420.
 - [14] Kasahara Y, Yoshida C, Saito M, et al. Assessments of heart rate and sympathetic and parasympathetic nervous activities of normal mouse fetuses at different stages of fetal development using fetal electrocardiography[J]. *Front Physiol*, 2021, 12:652828.
 - [15] Tuncer M, Gunes Y, Guntekin U, et al. Association of increased QTc dispersion and right ventricular hypertrophy[J]. *Med Sci Monit*, 2008, 14(2):CR102-CR105.
 - [16] Lotufo PA, Valiengo L, Benseñor IM, et al. A systematic review and meta-analysis of heart rate variability in epilepsy and antiepileptic drug[J]. *Epilepsia*, 2012, 53(2):272-282.
 - [17] Hurtado A, Escudero E, Pando J, et al. Cardiovascular and renal effects of chronic exposure to high altitude[J]. *Nephrol Dial Transplant*, 2012, 27(suppl 4):iv11-iv16.
 - [18] Ostadal B, Kolar F. Cardiac adaptation to chronic high-altitude hypoxia: beneficial and adverse effects[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2007, 158(2-3):224-236.
 - [19] León-Velarde F, Richalet JP. Respiratory control in residents at high altitude: physiology and pathophysiology[J]. *High Alt Med Biol*, 2006, 7(2):125-137.
 - [20] Richalet JP, Hermand E, Lhuissier FJ. Cardiovascular physiology and pathophysiology at high altitude[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2024, 21(2):75-88.
 - [21] Winslow RL, Granite S, Jurado C. WaveformECG: a platform for visualizing, annotating, and analyzing ECG data[J]. *Comput Sci Eng*, 2016, 18(5):36-46.
 - [22] Kestenbaum B, Rudser KD, Shlipak MG, et al. Kidney function, electrocardiographic findings, and cardiovascular events among older adults[J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2007, 2(3):501-508.
 - [23] Agarwal R, Light RP. Determinants and prognostic significance of electrocardiographic left ventricular hypertrophy criteria in chronic kidney disease[J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2011, 6(3):528-536.
 - [24] Coustet B, Lhuissier FJ, Vincent R, et al. Electrocardiographic changes during exercise in acute hypoxia and susceptibility to severe high-altitude illnesses[J]. *Circulation*, 2015, 131(9):786-794.
 - [25] Denes P, Garside DB, Lloyd-Jones D, et al. Major and minor electrocardiographic abnormalities and their association with underlying cardiovascular disease and risk factors in Hispanics/Latinos (from the Hispanic Community Health Study/Study of Latinos)[J]. *Am J Cardiol*, 2013, 112(10):1667-1675.
 - [26] Aryal N, Weatherall M, Bhatta YK, et al. Electrocardiography in people living at high altitude of Nepal[J]. *Heart Asia*, 2017, 9(1):48-53.
 - [27] Windsor JS, Rodway GW, Montgomery HE. A review of electrocardiography in the high altitude environment[J]. *High Alt Med Biol*, 2010, 11(1):51-60.
 - [28] Akçay M. The effect of moderate altitude on Tp-e interval, Tp-e/QT, QT, cQT and P-wave dispersion[J]. *J Electrocardiol*, 2018, 51(6):929-933.
 - [29] Penaloza D, Gamboa R, Marticorena E, et al. The influence of high altitudes on the electrical activity of the heart. Electrocardiographic and vectorcardiographic observations in adolescence and adulthood[J]. *Am Heart J*, 1961, 61:101-115.
 - [30] Raynaud J, Valeix P, Drouet L, et al. Electrocardiographic observations in high altitude residents of Nepal and Bolivia[J]. *Int J Biometeorol*, 1981, 25(3):205-217.
 - [31] Batmaz G, Aksoy AN, Aydın S, et al. QT interval changes in term pregnant women living at moderately high altitude[J]. *Niger J Clin Pract*, 2016, 19(5):611-615.
 - [32] Fuenmayor AJ, Stock FU, Fuenmayor AC, et al. QT interval and final portion of T wave: measurements and dispersion in infants born at high altitude[J]. *Int J Cardiol*, 2002, 82(2):123-126.
 - [33] Huicho L, Niermeyer S. Cross-sectional study of electrocardiographic pattern in healthy children resident at high altitude[J]. *Am J Phys Anthropol*, 2007, 133(2):879-886.
 - [34] Yu L, Ye X, Yang Z, et al. Prevalences and associated factors of electrocardiographic abnormalities in Chinese adults: a cross-sectional study[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2020, 20(1):414.
 - [35] Dixit Y, Abraham D, Prasad V. Relevance of asymptomatic electrocardiographic abnormalities at high altitude[J]. *J Assoc Physicians India*, 2020, 68(4):39-42.
 - [36] Jiang Y, Ping J, Lu H, et al. Associations between high-altitude adaptation and risk of cardiovascular diseases: a bidirectional Mendelian randomization study[J]. *Mol Genet Genomics*, 2023, 298(5):1007-1021.
 - [37] Luks AM, Hackett PH. Medical conditions and high-altitude travel[J]. *N Engl J Med*, 2022, 386(4):364-373.
 - [38] Halperin BD, Sun S, Zhuang J, et al. ECG observations in Tibetan and Han residents of Lhasa[J]. *J Electrocardiol*, 1998, 31(3):237-243.
 - [39] Dong R, Liang Y, Ni M, et al. Electrocardiogram parameters associated with the diagnosis of pulmonary hypertension in high-altitude Tibetan populations: a retrospective single-centre study[J]. *Heart Lung Circ*, 2024, 33(2):240-250.
 - [40] Sterling M, Huang DT, Ghorani B. Developing a new computer-aided clinical decision support system for prediction of successful postcardioversion patients with persistent atrial fibrillation[J]. *Comput Math Methods Med*, 2015, 2015:527815.
 - [41] Hou J, Wang P, Yang H, et al. New characteristics in ECG induced by ultra-high altitude hypoxia[J]. *Biomed Signal Process Control*, 2023, 85:104987.
 - [42] Liu Y, Liu J, Qin LLC, et al. A deep learning-based acute coronary syndrome-related disease classification method: a cohort study for network interpretability and transfer learning[J]. *Applied Intelligence*, 2023, 53(21):25562-25580.
 - [43] Saikumar K, Rajesh V. A machine intelligence technique for predicting cardiovascular disease (CVD) using Radiology Dataset[J]. *Int J Syst Assur Eng*, 2024, 15(1):135-151.
 - [44] Lillo-Castellano JM, González-Ferrer JJ, Marina-Breyse M, et al. Personalized monitoring of electrical remodelling during atrial fibrillation progression via remote transmissions from implantable devices[J]. *Europace*, 2020, 22(5):704-715.
 - [45] Porumb M, Stranges S, Pescapè A, et al. Precision medicine and artificial intelligence: a pilot study on deep learning for hypoglycemic events detection based on ECG[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):170.
 - [46] Kwon JM, Cho Y, Jeon KH, et al. A deep learning algorithm to detect anaemia with ECGs: a retrospective, multicentre study[J]. *Lancet Digit Health*, 2020, 2(7):e358-e367.

收稿日期: 2024-04-11