

脑卒中后偏瘫足下垂患者廓清障碍的步态特征分析

张洪宇 夏清 魏露 杜玲玲 沈新培 王修敏 曹晓光

安徽医科大学附属合肥医院, 合肥市第二人民医院康复医学科, 合肥 230000

通信作者: 夏清, Email: xiaqing233921@yeah.net

【摘要】 目的 运用三维步态系统观察脑卒中后偏瘫足下垂患者的廓清策略。**方法** 选取脑卒中后偏瘫足下垂患者 30 例作为观察组, 另选取 30 例健康者作为对照组。采用三维动作捕捉系统观察并比较观察组和对照组的最小足廓清 (MTC) 及其变异性, 绘制摆动相足趾运动轨迹, 并对脑卒中后偏瘫足下垂患者的步态参数与 MTC 的相关性进行分析。**结果** 观察组偏瘫侧和非偏瘫侧的 MTC 分别为 (12.01 ± 3.36) mm 和 (22.38 ± 5.51) mm, 均显著小于对照组的 (26.94 ± 3.08) mm, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。观察组偏瘫侧和非偏瘫侧的 MTC 变异性均显著大于对照组, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。观察组偏瘫侧的 MTC 和 MTC 变异性与组内非偏瘫侧比较, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。观察组偏瘫侧的 MTC 与其步速、步长、摆动相百分比、最大伸髋角度、最大屈膝角度、最大踝背屈角度、膝关节和踝关节的关节活动范围 (ROM) 均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。**结论** 脑卒中后偏瘫足下垂患者廓清能力显著下降, 步行稳定性降低, 需要针对髋、膝、踝等多个因素进行干预, 以减轻其廓清障碍程度。

【关键词】 脑卒中; 足下垂; 三维步态; 足廓清

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.03.003

Analysis of the gait of stroke survivors with foot drop

Zhang Hongyu, Xia Qing, Wei Lu, Du Lingling, Shen Xinpei, Wang Xiumin, Cao Xiaoguang

Department of Rehabilitation Medicine, The Affiliated Hefei Hospital of Anhui Medical University, The Second People's Hospital of Hefei, Hefei 230000, China

Corresponding author: Xia Qing, Email: xiaqing233921@yeah.net

【Abstract】 Objective To observe the clearance strategies of hemiplegic stroke survivors with foot drop. **Methods** Thirty hemiplegic stroke survivors with foot drop formed the observation group and 30 healthy counterparts constituted the control group. A three-dimensional motion capture system was used to observe and compare the minimum toe clearance (MTC) and its variability between the two groups to draw the motion trajectory of the toe in the swing phase of their gaits. The gait parameters were correlated with the toe clearance. **Results** The average MTC of the observation group subjects on both the hemiplegic and non-hemiplegic side (12.01 ± 3.36 and 22.38 ± 5.51 mm) was significantly smaller than the control group's averages. The variability of their MTCs on both sides was also significantly greater. Clearance on the hemiplegic side was significantly less and its variability was significantly greater. Among the observation group, MTC on the hemiplegic side was positively correlated with walking speed, step length, swing phase percentage, maximum angle of hip extension, maximum angle of knee flexion, maximum angle of ankle dorsiflexion, and the range of motion of the knee and ankle joints. **Conclusions** Hemiplegic stroke survivors with foot drop walk unstably with little toe clearance. It is necessary to intervene at the hip, knee and ankle to improve their obstacle clearance.

【Key words】 Stroke; Foot drop; Gait; Toe clearance

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.03.003

研究表明, 脑卒中后至少 20% 的患者存在足下垂现象^[1], 而足下垂不仅会使其患侧下肢不能有效地摆动离地面, 还会致使患者出现廓清障碍^[2]。研究认为, 最小足廓清 (minimum toe clearance, MTC) 是与跌倒风险高度相关的关键性指标, 是指在步态周期中, 摆动相

足趾离地面的垂直最短距离, 且此时可出现摆动足的最大前进速度。MTC 作为一种步态变量, 与步行的机制紧密相关, 大多数患者发生跌倒是由于摆动腿足趾与地面或其他物体的接触而发生的, 而当 MTC 降为 0 时, 则会发生足-地接触事件^[3]。目前的研究多采用

MTC 来预测偏瘫患者的跌倒风险^[4-5],但未进一步明确 MTC 与时空参数和摆动相下肢各关节角度的相互关系,也缺乏对足下垂患者 MTC 变异性的定量研究,至于足下垂患者的廓清能力更是鲜见报道。本研究运用三维步态分析系统从运动学角度分析脑卒中后偏瘫足下垂患者廓清障碍的步态特征,旨在为临床上足下垂患者的干预措施设计提供参考,帮助其更好地改善步行功能,降低跌倒风险。

资料与方法

一、研究对象与分组

入选标准:①符合《中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018》^[6]和《中国脑出血诊治指南 2019》^[7]修订的脑卒中诊断标准,并经头颅 CT 或 MRI 检查证实;②均伴有足下垂步态,且为单侧发病;③经改良的 Ashworth 肌张力分级,偏瘫侧下肢肌张力≤1+级;④下肢运动功能 Brunnstrom 分期≥Ⅲ期;⑤无需他人或辅助器具帮助下,可独立、安全行走≥10 m;⑥签署知情同意书,且本研究通过医院伦理委员会审查(2021-科研-008)。

排除标准:①生命体征不稳定或伴有明显认知障碍,简易精神状态检查表(minimum mental state examination, MMSE)<24 分,视听理解障碍,无法配合完成检测;②伴有其他引起步行功能减退或导致足下垂的疾病,如脊髓损伤、关节畸形、骨折、周围神经损伤等;③双侧发病;④病历资料不全或依从性差。

选择 2019 年 11 月至 2021 年 3 月在合肥市第二人民医院康复医学科住院且符合上述标准的脑卒中后偏瘫足下垂患者 30 例,其中男 19 例,女 11 例;左侧偏瘫 16 例,右侧偏瘫 14 例。另选取与观察组年龄、性别相近的健康受试者 30 例作为对照组,其中男 19 例,女 11 例。2 组受试者的性别、平均年龄、平均身高、平均体重等一般资料组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),详见表 1。

二、实验方法

采用英国 Charnwood Dynamics 公司生产的 Codamotion 三维动作捕捉系统,该系统包括 4 台 CX1 捕捉器、下肢步态套件、标定枪。按照模板穿戴下肢套件,分别位于双侧髌前上棘、大腿外正中线和小腿外正中线、双侧外踝、双侧足趾(第五跖骨头);标定枪标记双侧髌前上棘、双侧股骨内外侧髁、双侧踝内外侧髁和空间静态点。标记枪放置规范和数学模型的可靠性已被证实^[8]。保证实验室安静、无干扰、温度适宜,向受试者详细介绍测试过程、注意事项并予以示范,嘱受试者以自然状态裸足行走数次。在受试者熟悉流程后正式开始采集,每例受试者至少采集 8 次,由配套的三维步态分析软件进行数据处理,选取最佳的 3 个步态周期的三维模型作为步态参数数据,30 个步态周期作为 MTC 和 MTC 的变异性数据(图 1)。正常步态在空间和时间上趋于对称,未区分明显的优势侧与非优势侧,故对照组(健康受试者)均选取右侧下肢数据^[9]。

表 1 2 组受试者的一般资料

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	平均身高 (cm, $\bar{x}\pm s$)	平均体重 (kg, $\bar{x}\pm s$)	病变性质(例)		偏瘫侧(例)	
		男	女				脑出血	脑梗死	左	右
观察组	30	19	11	51.97±12.62	166.7±6.78	67.33±7.70	14	16	16	14
对照组	30	19	11	53.17±7.12	165.3±7.02	65.17±7.51	-	-	-	-

注:-为健康受试者无疾病相关数据



注:a 为步态采集实验室,走道两侧上方均有捕捉动作的光学高清摄像头;b 为步态参数采集,受试者已在治疗师辅助下穿戴好下肢套件

图 1 三维步态动作捕捉系统采集步态参数示意图

三、观察指标

1.足廓清指标:①MTC——对照组 MTC 即摆动相足趾离地面的垂直最短距离;观察组采用双外踝相遇时刻(即双足在前进方向 X 轴相同时刻)足趾的 Z 坐标作为 MTC^[10-11];②MTC 变异系数(coefficient of variation,CV):变异系数=标准差/均值×100%^[12];③足趾摆动相垂直运动轨迹:摆动相足趾的 Z 轴变化轨迹。

2.时空参数:包括步速、步长、步频、摆动相百分比。

3.摆动相下肢关节运动学参数:包括髋关节、膝关节、踝关节矢状面关节活动范围(range of motion of joint, ROM)、最大屈髋和伸髋角度、最大屈膝和伸膝角度、最大踝背屈和踝跖屈角度。

四、统计学分析

应用 SPSS 26.0 版统计软件对本研究所得数据进行分析,计数资料采用频率进行描述, χ^2 检验进行比较;使用 Shapiro-Wilk 法对定量资料进行正态性检验,计量资料以($\bar{x}\pm s$)表示,组内比较采用配对 t 检验,组间比较采用独立样本 t 检验。皮尔逊相关系数用于评估 MTC 与下肢运动学参数之间的相关性。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、2 组受试者的 MTC 和 MTC 变异性比较

观察组偏瘫侧和非偏瘫侧的 MTC 和 MTC 变异性与对照组比较,差异均有统计学意义($P<0.05$),而观察组偏瘫侧的 MTC 和 MTC 变异性与组内非偏瘫侧比较,差异均有统计学意义($P<0.05$),详见表 2。

表 2 2 组受试者步行中的 MTC 和 MTC 变异性比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	MTC(mm)	MTC 变异性(%)
对照组	30	26.94±3.08	10.93±1.48
观察组			
偏瘫侧	30	12.01±3.36 ^a	46.77±8.66 ^a
非偏瘫侧	30	22.38±5.51 ^{ab}	21.39±5.76 ^{ab}

注:与对照组比较,^a $P<0.05$;与组内偏瘫侧比较,^b $P<0.05$

二、2 组受试者足趾摆动相的垂直运动轨迹

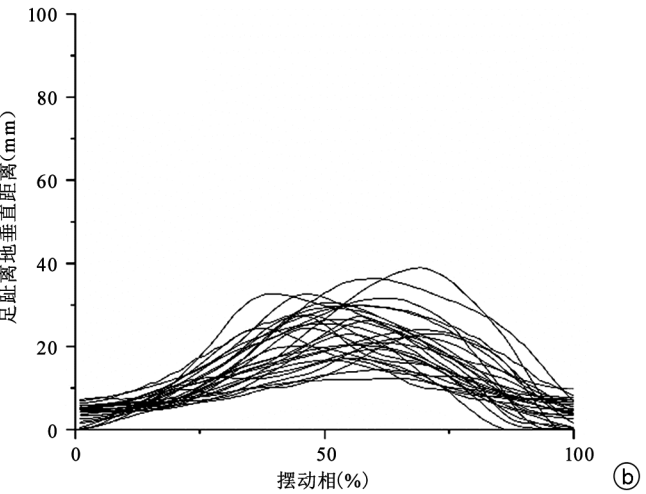
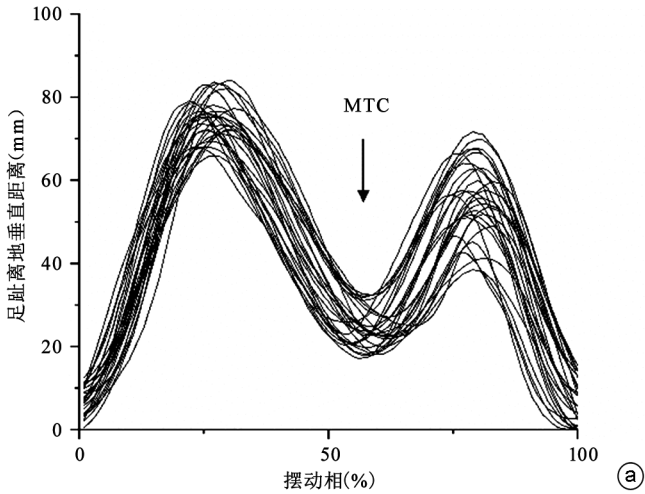
对照组(a)和观察组(b)受试者摆动相的足趾垂直运动轨迹见图 2。

三、观察组偏瘫侧 MTC 与其步态参数的相关性

经相关性分析,观察组偏瘫侧的 MTC 与其步速、步长、摆动相百分比、最大伸髋角度、最大屈膝角度、最大踝背屈角度,膝关节、踝关节 ROM 呈显著正相关($P<0.05$);但与步频、最大屈髋角度、最大伸膝角度、踝跖屈角度,髋关节 ROM 无显著相关性($P>0.05$),详见表 3。

表 3 观察组偏瘫侧 MTC 与其步态参数的相关性分析

步态参数	$\bar{x}\pm s$	相关系数(r)	P 值
步速(m/s)	0.34±0.12	0.394	0.031
步长(m)	0.27±0.09	0.392	0.032
步频(steps/min)	68.88±12.23	0.182	0.335
摆动相百分比(%)	37.32±6.54	0.548	0.002
髋关节 ROM(°)	23.09±2.85	-0.079	0.679
最大屈髋(°)	30.18±3.17	0.275	0.141
最大伸髋(°)	-7.09±2.73	0.402	0.028
膝关节 ROM(°)	29.28±4.79	0.496	0.005
最大屈膝(°)	31.52±4.15	0.643	<0.01
最大伸膝(°)	2.24±2.02	0.147	0.439
踝关节 ROM(°)	11.62±2.70	0.692	<0.01
最大踝背屈(°)	-1.37±2.79	0.625	<0.01
最大踝跖屈(°)	-13.00±2.36	-0.051	0.790



注:a 为对照组摆动相足趾垂直运动轨迹,b 为观察组偏瘫侧摆动相足趾垂直运动轨迹;对照组(健康受试者)的摆动相足趾垂直运动轨迹呈“双峰样”,MTC 出现在摆动相的 50~55%;而观察组(足下垂患者)的摆动相足趾垂直运动轨迹低平,“双峰样”轨迹消失

图 2 摆动相足趾运动轨迹

讨 论

本研究结果显示,观察组偏瘫侧和非偏瘫侧的 MTC 与对照组比较,均显著减小,该结果提示,脑卒中后偏瘫足下垂患者的廓清能力显著下降。如图 2 所示,正常人摆动相足趾运动轨迹呈“双峰样”,其中“波谷”即为 MTC,足下垂患者足趾的“双峰样”运动轨迹消失。这与 Lauren 等^[13]的研究结果一致,即偏瘫患者摆动相足趾离地距离的“局部最小值”缺失。有研究将脑卒中后偏瘫足下垂患者步行过程中摆动期双外踝相遇时的足趾离地高度设为足廓清高度,此时的髌关节至足趾距离(在没有髌关节抬高的情况下)最短,髌部和足趾在同一个平面上,可作为计算肢体缩短和代偿运动影响的理想时机^[10,14]。正常人在相同环境中的步态在一定程度上可精确地重复,即使在轻微扰动的环境下也可保持稳定。

本研究中,观察组偏瘫侧和非偏瘫侧的 MTC 变异性均显著高于对照组,该结果提示,脑卒中偏瘫足下垂患者的步态重复性减小、不稳定性增加,且非偏瘫侧由于步行稳定性的改变而发生了一定程度的代偿,考虑可能与肌肉力量下降、肌肉张力增加和肌肉激活时间不规则等因素导致下肢控制能力的降低有关。有研究证实,脑卒中后偏瘫足下垂患者的运动感觉控制出现错误,其足趾触地的次数增加,跌倒风险也明显增大^[15]。

本研究结果还显示,脑卒中后偏瘫足下垂患者偏瘫侧的 MTC 与其步速、步长、摆动相百分比、最大伸髌、屈膝角度、踝背屈角度、膝关节和踝关节 ROM 均呈正相关。有研究发现,脑卒中后足下垂患者的髂腰肌和踝跖屈肌募集程度减弱,肌张力发生改变,偏瘫侧下肢向前推进力不足,常造成足下垂患者步速降低和步长减小,由此可以认为,肌肉活动所引发的运动学改变会影响摆动相下肢的轨迹,这可能是 MTC 降低的原因之一^[16]。本课题组认为,足下垂患者在摆动过程中缺乏控制平衡的能力,难以单腿负重,摆动相时间相对缩短,足廓清动作无法充分完成,从而导致了 MTC 的降低。

既往研究表明,廓清障碍可能主要是由踝关节的异常所引起的^[17]。有研究运用三维步态量化了踝足矫形器(ankle-foot orthosis, AFO)对偏瘫患者廓清策略的影响,证实了 AFO 可显著增加 MTC,增加其步行的稳定性、步态速度和效率^[18]。然而膝关节屈曲减少是脑卒中后偏瘫足下垂患者使用 AFO 后的负面效应,这可能是由于 AFO 纠正了足下垂,而踝关节背屈充分后,患者就不需要更多地弯曲膝关节来缩短肢体,因为用较少的屈膝即可达到相同的足廓清。研究发现,偏

瘫患者通常伴有膝关节僵直步态(stiff knee gait, SKG),表现为膝关节屈曲减少甚至过伸,肢体缩短的程度显著减少,抑制足廓清的充分完成,这与我们的研究结果相符合^[19]。

有研究发现,髌关节的屈伸在摆动相也发挥重要作用,偏瘫后会改变髌腰肌神经肌肉的疲劳性,干扰髌关节远端的控制,最大髌外展角度的减小会导致下肢被动拉长,从而限制了 MTC^[20]。本课题组推测,脑卒中后偏瘫足下垂患者的髌屈曲角度的减小会影响肢体的缩短,然而研究结果却显示,偏瘫侧的 MTC 与其髌关节的屈曲无显著相关性,这可能是由于脑卒中后偏瘫足下垂患者发生了骨盆上提、髌关节的抬高以及髌外展等代偿性运动所致。这种肢体缩短与代偿运动之间的关系与国外的研究基本一致^[9],即骨盆、髌关节抬高的程度与肢体的缩短呈负相关。因此,本课题组认为,廓清障碍是由髌、膝、踝多个关节的改变所引起的,仅针对单个关节的干预措施(如 AFO)可能无法有效地阻止所有跌倒的发生,因此针对髌、膝、踝多个关节的综合干预措施可能会更有效地改善廓清障碍。

综上所述,脑卒中后偏瘫足下垂患者的廓清能力显著下降,步行不稳定性增加,而摆动期足趾垂直运动轨迹可直观反映足下垂患者的廓清障碍,且 MTC 的降低是髌、膝、踝关节等多个因素共同作用的结果。MTC 与步态参数的相关性有助于识别足下垂患者廓清障碍的影响因素,可为临床康复提供依据。脑卒中后偏瘫足下垂患者廓清策略代偿机制复杂,下肢各关节冠状面、水平面角度和骨盆运动特征的变化对足廓清的影响还有待后期的研究来进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Martin KD, Polanski W, Schackert G, et al. New therapeutic option for drop foot with the ActiGait peroneal nerve stimulator-a technical note[J]. World Neurosurg, 2015, 84(6): 2037-2042. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.06.074.
- [2] 励建安.脑卒中中的步态异常和治疗对策[J].中华全科医师杂志, 2005, 4(12): 715-717.
- [3] Winter DA. Foot trajectory in human gait: a precise and multifactorial motor control task[J]. Phys Ther, 1992, 72(1): 45-53; discussion 54-46. DOI: 10.1093/ptj/72.1.45.
- [4] Rosenblatt NJ, Bauer A, Grabiner MD. Relating minimum toe clearance to prospective, self-reported, trip-related stumbles in the community[J]. Prosthet Orthot Int, 2017, 41(4): 387-392. DOI: 10.1177/0309364616650085.
- [5] Carter SC, Batavia MZ, Gutierrez GM, et al. Joint movements associated with minimum toe clearance variability in older adults during level overground walking[J]. Gait Posture, 2020, 75: 14-21. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.09.025.
- [6] 彭斌, 吴波. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018[J]. 中华神经科杂志, 2018, 51(9): 666-682. DOI: ZHSJ.0.2018-09-005.

- [7] 中华医学会神经病学分会.中国脑出血诊治指南(2019)[J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(12): 994-995-996-997-998-999-1000-1001-1002-1003-1004-1005. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2019.12.003.
- [8] Sharpe T, Malone A, French H, et al. Effect of flip-flops on lower limb kinematics during walking: a cross-sectional study using three-dimensional gait analysis[J]. Ir J Med Sci, 2016, 185(2): 493-501. DOI:10.1007/s11845-016-1421-y.
- [9] Balaban B, Tok F. Gait disturbances in patients with stroke[J]. PM R, 2014, 6(7): 635-42. DOI:10.1016/j.pmrj.2013.12.017
- [10] Mukaino M, Ohtsuka K, Tanikawa H, et al. Clinical-oriented three-dimensional gait analysis method for evaluating gait disorder[J]. J Vis Exp, 2018, (133): 10.3791/57063. DOI:10.3791/57063
- [11] Matsuda F, Mukaino M, Ohtsuka K, et al. Biomechanical factors behind toe clearance during the swing phase in hemiparetic patients[J]. Top Stroke Rehabil, 2017, 24(3): 177-182. DOI: 10.1080/10749357.2016.1234192.
- [12] Rumble DD, Hurt CP, Brown DA. Step-by-step variability of swing phase trajectory area during steady state walking at a range of speeds[J]. PLoS One, 2018, 13(1): e0191247. DOI: 10.1371/journal.pone.0191247.
- [13] Benson LC, Cobb SC, Hyngstrom AS, et al. A principal components analysis approach to quantifying foot clearance and foot clearance variability[J]. J Appl Biomech, 2019, 35(2): 116-122. DOI: 10.1123/jab.2018-0187.
- [14] Pongpipatpaiboon K, Mukaino M, Matsuda F, et al. The impact of ankle-foot orthoses on toe clearance strategy in hemiparetic gait: a cross-sectional study[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 41. DOI:10.1186/s12984-018-0382-y.
- [15] Rand TJ, Wurdeman SR, Johanning JM, et al. Increased minimum toe clearance variability in patients with peripheral arterial disease[J]. Med Eng Phys, 2015, 37(12): 1141-1145. DOI:10.1016/j.medengphys.2015.09.009.
- [16] Balasubramanian CK, Bowden MG, Neptune RR, et al. Relationship between step length asymmetry and walking performance in subjects with chronic hemiparesis[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2007, 88(1): 43-49. DOI:10.1016/j.apmr.2006.10.004.
- [17] Rozanski GM, Huntley AH, Crosby LD, et al. Lower limb muscle activity underlying temporal gait asymmetry post-stroke[J]. Clin Neurophysiol, 2020, 131(8): 1848-1858. DOI:10.1016/j.clinph.2020.04.171.
- [18] 王俊棠. 畸形踝关节托对脑损伤致足下垂及足内翻偏瘫患者的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2006, 28(7): 486-487.
- [19] 杨年峰. 人体运动协调规律及其参数化描述[D]. 北京: 清华大学, 2001.
- [20] Hyngstrom AS, Onushko T, Heitz RP, et al. Stroke-related changes in neuromuscular fatigue of the hip flexors and functional implications[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2012, 91(1): 33-42. DOI:10.1097/PHM.0b013e31823caac0.

(修回日期:2022-01-22)

(本文编辑:阮仕衡)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊对来稿中统计学处理的有关要求

1. 统计研究设计:应交代统计研究设计的名称和主要做法。如调查设计(分为前瞻性、回顾性或横断面调查研究);实验设计(应交代具体的设计类型,如自身配对设计、成组设计、交叉设计、析因设计、正交设计等);临床试验设计(应交代属于第几期临床试验,采用了何种盲法措施等)。主要做法应围绕4个基本原则(随机、对照、重复、均衡)概要说明,尤其要交代如何控制重要非试验因素的干扰和影响。

2. 资料的表达与描述:用 $(\bar{x} \pm s)$ 表达近似服从正态分布的定量资料,用 $M(Q_R)$ 表达呈偏态分布的定量资料;用统计表时,要合理安排纵横标目,并将数据的含义表达清楚;用统计图时,所用统计图的类型应与资料性质相匹配,并使数轴上刻度值的标法符合数学原则;用相对数时,分母不宜小于20,要注意区分百分率与百分比。

3. 统计分析方法的选择:对于定量资料,应根据所采用的设计类型、资料所具备的条件和分析目的,选用合适的统计分析方法,不应盲目套用 t 检验和单因素方差分析;对于定性资料,应根据所采用的设计类型、定性变量的性质和频数所具备的条件以及分析目的,选用合适的统计分析方法,不应盲目套用 χ^2 检验。对于回归分析,应结合专业知识和散点图,选用合适的回归类型,不应盲目套用简单直线回归分析,对具有重复实验数据的回归分析资料,不应简单化处理;对于多因素、多指标资料,要在一元分析的基础上,尽可能运用多元统计分析方法,以便对因素之间的交互作用和多指标之间的内在联系进行全面、合理的解释和评价。

4. 统计结果的解释和表达:当 $P < 0.05$ (或 $P < 0.01$)时,应说明对比组之间的差异有统计学意义,而不应说对比组之间具有显著性(或非常显著性)的差别;应写明所用统计分析方法的具体名称(如:成组设计资料的 t 检验、两因素析因设计资料的方差分析、多个均数之间两两比较的 q 检验等),统计量的具体值(如 $t = 3.45$, $\chi^2 = 4.68$, $F = 6.79$ 等),应尽可能给出具体的 P 值(如 $P = 0.0238$);当涉及到总体参数(如总体均数、总体率等)时,在给出显著性检验结果的同时,再给出95%可信区间。