

•运动人体科学•

湿热环境下运动对人体血尿素、血乳酸和电解质的影响

吴潇男^{1,3}, 林建棣¹, 曲平¹, 包瀛春², 孟苏萍¹

(1.军事体育进修学院, 广东 广州 510500; 2.第二军医大学, 上海 200438;
3.西安通信学院, 陕西 西安 710706)

摘 要: 通过对湿热环境下机体血液成分变化特点的实验, 试图揭示湿热环境下运动的身体适应, 为训练提供相应的理论依据。随机抽取某大学男生 30 名, 平均年龄(21.3±1.1)岁。实验选择第二军医大学湿热环境训练实验室, 环境温度控制在 39℃, 相对湿度为 80%。实验历时 9 d, 分为测试阶段和训练阶段: 测试阶段在训练前、后 1 d 分别进行 12 min 功率自行车测试, 2 次测试前、后经上肢静脉取血(在肛温指标测试后即刻进行); 训练阶段周期为 7 d, 运动负荷为: 踏步机徒手踏步 15 min, 艾威 BC4730-52 型功率自行车无阻力运动 15 min, 艾威 BC8500 型功率自行车调至 10LEVEL-280WATT/H 运动 15 min。结果显示: 与第 1 次、第 2 次测试前相比, 2 次测试后血清尿素(BU)、乳酸(La)、[K⁺]和[Ca²⁺]均显著升高($P<0.05$), [Cl⁻]显著下降($P<0.05$); [Na⁺]在第 2 次测试后显著升高($P<0.05$)。经过 7 d 热习服训练, 第 2 次测试前较第 1 次测试前相比, BU 和 [Na⁺]显著升高($P<0.05$), La 浓度显著下降($P<0.05$); 第 2 次测试后同第 1 次测试后相比, BU、[Na⁺]、[K⁺]和[Ca²⁺]显著升高($P<0.05$)。结果表明: 经过 7 d 间断性反复热暴露运动后, 机体蛋白质代谢供能有所回降; La 清除能力得到提高; 血液电解质各项指标发生不同程度变化, 但均处于正常生理范围及人体耐受范围内; 且运动能力及自我感受得到改善, 说明习服训练有利于机体新的热反应动力定型建立。

关 键 词: 运动生物化学; 湿热环境; 运动; 血清; 热应激; 热习服

中图分类号: G804.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2012)05-0135-05

Effects of exercising in a hot and humid environment on blood urea, blood lactic acid and electrolyte of the human body

WU Xiao-nan^{1,3}, LIN Jian-di¹, QU Ping¹, BAO Ying-chun², MENG Su-ping¹

(1.Physical Education of PLA, Guangzhou 510500, China; 2.Second Military Medical University, Shanghai 200438, China; 3.Xi'an Communication Institute of PLA, Xi'an 710706, China)

Abstract: The authors tried to reveal the adaptation of the body exercising in a hot and humid environment through an experiment studying the characteristics of changing of blood constituents of the body in a hot and humid environment, so as to provide corresponding theoretical criteria for training. The authors selected 30 males students with an average age of (21.3±1.1) randomly from a university. The experiment was done in the hot and humid environment training laboratory of Second Military Medical University, where the ambient temperature was controlled to 39℃, the relative humidity was 80%. The experiment lasted 9 d, which were divided into a testing stage and a training stage; at the testing stage, a 12 min speed bike test was run 1 d before and after training respectively; before and after the two tests, venous blood was taken from upper limbs (immediately after rectal temperature index was tested); the cycle of the training stage is 7 d, the exercising loads were 15 min of hand free walking on a treadmill, 15 min of resistance free exercising on a model BC4730-52 EVERE speed bike, 15 min of exercising on a model

收稿日期: 2011-11-16

基金项目: 国家社科基金军事学项目(10GJ163-031)。

作者简介: 吴潇男(1983-), 女, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 运动人体科学。通讯作者: 林建棣教授。

BC8500 EVERE speed bike which was adjusted to 10LEVEL-280WATT/H. The results showed the followings: as compared with the results before the first and second tests, blood urea (BU), lactic acid (La), $[K^+]$ and $[Ca^{2+}]$ after the two tests increased significantly ($P<0.05$), $[Cl^-]$ decreased significantly ($P<0.05$); $[Na^+]$ increased significantly ($P<0.05$) after the second test; after 7 days of heat acclimatization training, as compared with the results before the first test, BU and $[Na^+]$ before the second test increased significantly ($P<0.05$), La concentration decreased significantly ($P<0.05$); as compared with the results after the first test, BU, $[Na^+]$, $[K^+]$ and $[Ca^{2+}]$ after the second test increased significantly ($P<0.05$). The results indicated the followings: after 7 d of intermittent, repeated heat exposure exercising, the body's protein metabolism and energy supply decreased somewhat; La removing ability was enhanced; various indexes in blood electrolyte changed to different extents, but they were all in range of normal physiology and the range tolerable to the human body; and the exercising ability and self perception were improved, which indicates that heat acclimatization training is conducive for the body to establish a new dynamic stereotype of thermal reaction.

Key words: sports biochemistry; hot and humid environment; exercising; serum; heat stress; heat acclimatization

众所周知, 维持体液和电解质平衡对机体健康状况以及运动能力的发挥至关重要。近年来, 关于湿热环境下运动对机体水盐代谢平衡的影响, 主要通过汗液和细胞外液成分及丢失量进行研究; 对于血液中电解质浓度的变化研究, 主要集中在不同补液成分与补液量对机体血浆电解质浓度的影响^[1-2]以及血浆容积与电解质关系^[3]等方面。人体长时间在热环境下着防护装备(实际上相当于处在高热高湿环境之下)进行作业, 可导致中暑等意外事件发生。有文献表明, 高热高湿环境下进行运动训练可有效提高机体热负荷耐受能力^[4]。另外, 我国诸如南海等特殊的高温高湿地区, 人们在进入该环境作业之前, 如何进行高温高湿习服锻炼, 值得研究。因此, 本研究借助国内先进的湿热环境训练实验室, 根据国人体质特点, 综合分析热应激、热习服训练前后血液 BU(血清尿素)、La(乳酸)及电解质的变化特点及其机制, 试图揭示湿热环境下运动机体的习服规律。对机体适应不良环境, 保持正常生活和作业能力具有重要意义, 也为大规模科学高效的习服训练提供相应的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验对象与方法

随机抽取某大学 30 名男性志愿者, 平均年龄为 (21.3 ± 1.1) 岁, 平均体重为 (64.0 ± 7.6) kg, 身体健康, 无习服训练经验、无重大疾病史。所有对象均知情同意并签署知情同意书。

实验历时 9 d, 均在湿热环境实验室进行。实验分为测试阶段和训练阶段: 测试阶段为第 1 天和第 9 天, 均进行 12 min 功率自行车测试(要求进入湿热室后静坐 10 min, 艾威 BC8500 型功率自行车调至 10LEVEL-280WATT/H 运动 12 min), 每次总热暴露时

间为 22 min; 训练阶段为第 2~8 天(要求进入湿热室后静坐 10 min, 踏步机徒手踏步 15 min, 艾威 BC4730-52 型功率自行车无阻力运动 15 min, 艾威 BC8500 型功率自行车调至 10LEVEL-280WATT/H 运动 15 min), 每次总热暴露时间为 55 min。

为确保受试者在实验过程中的安全性, 防止热应激环境下的热损伤发生, 在整个实验过程中不仅采取循序渐进的训练原则, 而且还通过训练后的肛温值及自我感受询问来监控训练负荷, 判断受试者的生理安全状况。根据中国人体质特点, 严格按照杜桂仙等[5]提出的生理耐受上限肛温值 38.9 °C, 来指导受试者调控运动负荷。

1.2 场地与设施

选择第二军医大学湿热环境训练实验室, 模拟环境实验室面积 123 m²、层高 3 m, 可同时容纳 40 人训练。环境制热采用地面、墙体电加热辐射与顶部光照的方法, 设计最高温度为 46 °C, 多处分层温度探测器可控制环境温度稳定在设定范围内。环境加湿由电锅炉将蒸汽从管道输送至实验室, 根据传感器显示的湿度, 通过阀门调节可控制实验室湿度, 设计最大湿度为 90%。常温环境由 3 台 4 匹空调将环境温度精确控制在 20 °C。实验室内安装有 CO₂报警探测、环境气体交换和室内气体对流装置等, 配有休息室和医疗护理室。实验过程中环境温度控制在 39 °C, 相对湿度为 80%。

1.3 数据采集和统计学处理

2 次测试前(在常温安静状态下)、后(在肛温指标测试后即刻)经上肢静脉取血, 第二军医大学长征医院实验诊断科进行血液指标检测。实验数据采用 SPSS19.0 软件包进行处理, 肛温、功率自行车里程采用均值配对 *t* 检验比较差异, 血尿素、血乳酸和电解质采用重复测量资料的方差分析比较差异, 计量数据

均以 $\bar{x} \pm s$ 表示, $P < 0.05$ 水平为具有显著性差异。

2 结果及分析

2.1 肛温、功率自行车里程及自我感受

测试过程中, 监测到的个人肛温最高值是在第 1

次测试后, 为 $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 低于生理耐受上限。同第 1 次测试相比, 经过 7 d 的热习服训练, 第 2 次测试后肛温值有所下降, 自行车里程数升高, 且差异均具有显著性 ($P < 0.05$); 与热习服训练前相比, 除口渴感觉增加 2 人外, 其它不良感觉基本消失(见表 1)。

表 1 测试阶段肛温、自行车里程 ($\bar{x} \pm s$) 及自我感觉描述

| 指标 | 肛温/ $^{\circ}\text{C}$ | 自行车里程/km | 自我感受人数 | | | | | | | |
|---------|------------------------|----------------------|--------|----|----|----|----|----|----|--------|
| | | | 口渴 | 头疼 | 头晕 | 耳鸣 | 胸闷 | 心悸 | 烦躁 | 四肢无力发酸 |
| 第 1 次测试 | 38.14 ± 0.18 | 5.95 ± 0.45 | 6 | 0 | 12 | 5 | 12 | 5 | 2 | 15 |
| 第 2 次测试 | $37.48 \pm 0.23^{1)}$ | $6.38 \pm 0.51^{1)}$ | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

1)与第 1 次测试相比 $P < 0.05$

2.2 血清 BU、La、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 、 $[\text{Cl}^-]$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]$ 变化

两次测试前、后血清 $\alpha(\text{BU})$ 、 $\rho(\text{La})$ 、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 、 $[\text{Cl}^-]$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]$ 变化如表 2 所示, 同测试前相比, 第 1 次测试后血清 $\alpha(\text{BU})$ 、 $\rho(\text{La})$ 、 $[\text{K}^+]$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]$ 显著性升高 ($P < 0.05$); $[\text{Na}^+]$ 和 $[\text{Cl}^-]$ 有所下降, 其中 $[\text{Cl}^-]$ 与测试前相比, 差异具有显著性, $P < 0.05$ 。第 2 次测试后与当天测试前相比, 除 $[\text{Cl}^-]$ 显著性下降外($P < 0.05$); $\alpha(\text{BU})$ 、 ρ

(La)、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]$ 均显著性升高($P < 0.05$)。

热习服训练后血清 $\alpha(\text{BU})$ 、 $\rho(\text{La})$ 、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 、 $[\text{Cl}^-]$ 、 $[\text{Ca}^{2+}]$ 变化如表 2 所示, 经过 7 d 热习服训练, 第 2 次测试前较第 1 次测试前相比, $\alpha(\text{BU})$ 和 $[\text{Na}^+]$ 显著性升高 ($P < 0.05$); $\rho(\text{La})$ 显著性下降($P < 0.05$)。第 2 次测试后较第 1 次测试后相比, $\alpha(\text{BU})$ 、 $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{K}^+]$ 、 $[\text{Ca}^{2+}]$ 均显著性升高($P < 0.05$)。

表 2 血尿素、血乳酸和电解质变化 ($\bar{x} \pm s$) 比较

| 测试时间 | $\alpha(\text{BU}) / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\rho(\text{La}) / (\text{mg} \cdot \text{dL}^{-1})$ | $[\text{Na}^+] / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $[\text{K}^+] / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $[\text{Cl}^-] / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $[\text{Ca}^{2+}] / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ |
|----------|---|--|---|--|---|--|
| 第 1 次测试前 | 5.91 ± 1.09 | 29.80 ± 6.93 | 141.10 ± 1.49 | 3.87 ± 0.27 | 100.00 ± 1.20 | 2.37 ± 0.09 |
| 第 1 次测试后 | $6.06 \pm 1.14^{1)}$ | $84.77 \pm 24.99^{1)}$ | 140.93 ± 1.41 | $3.97 \pm 0.16^{1)}$ | $98.97 \pm 1.43^{1)}$ | $2.44 \pm 0.08^{1)}$ |
| 变化率/% | 2.54 | 184.46 | -0.12 | 2.58 | -1.03 | 2.95 |
| 第 2 次测试前 | $6.36 \pm 1.08^{1)}$ | $25.53 \pm 2.83^{1)}$ | $141.77 \pm 1.59^{1)}$ | 3.99 ± 0.24 | 100.07 ± 1.53 | 2.36 ± 0.12 |
| 第 2 次测试后 | $6.51 \pm 1.12^{2)3)}$ | $86.40 \pm 23.08^{2)}$ | $142.40 \pm 1.45^{2)3)}$ | $4.18 \pm 0.22^{2)3)}$ | $99.03 \pm 1.61^{2)}$ | $2.54 \pm 0.10^{2)3)}$ |
| 变化率/% | 2.36 | 238.43 | 0.44 | 4.76 | -1.04 | 7.63 |

1)与第 1 次测试前比较 $P < 0.05$; 2)与第 2 次测试前比较 $P < 0.05$; 3)与第 1 次测试后比较 $P < 0.05$

3 讨论

3.1 湿热环境下运动, 肛温、功率自行车里程及自我感受调查情况

机体体温在一定范围内通过自动调节产热和散热的过程保持相对恒定, 是维持正常生命活动和生理过程的必要条件。人体在安静状态下, 对体温调节的极限为气温 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 85%或气温 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 50%^[6]。在本实验设计中, 受试者在环境温度 $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 80%的实验室内进行 12 min 的功率自行车测试, 机体产热和外界环境热辐射超过了人体体温的调节极限, 再加上空气中的湿度基本达到饱和状态且室内几乎无空气流动, 使得汗液蒸发受阻, 多经汗孔排出, 形成汗珠覆盖在体表、丢失。首次热暴露后测得受试者平均肛温高达 $38.14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 部分受试者出现

口渴、头疼、头晕、耳鸣、胸闷、心悸、烦躁、四肢无力发酸等不适反应。提示, 机体处于湿热环境下, 虽然因环境高温分泌大量汗液, 但多为无效性汗分泌, 不利于机体散热, 在劳动、训练过程中更应该注重运动负荷的控制, 避免体内过度热积蓄, 造成严重的病理性热负荷。

肛温值作为评价热习服效果的敏感生理指标, 可以有效地反映机体核心温度, 在研究湿热环境对人体的影响时被国内外学者广泛采用。Chinevere TD 等^[7]研究表明, 经过 10 d 的热习服训练后, 机体核心温度与训练前相比显著下降。Kampmann B 等^[8]研究表明, 热习服后显著下降的肛温值有效地减少了生理热紧张程度。本实验结果显示, 经过 7 d 的热习服训练, 受试者的肛温较第 1 次测试后相比, 下降值差异具有显

著性,且在相同湿热环境下的运动能力明显提高,12 min 功率自行车记录里程数显著增加,受试者主诉不适感明显发生改善,是机体经过热习服训练后适应环境的良好表现。

3.2 热应激运动对血清 BU、La、 $[Na^+]$ 、 $[K^+]$ 、 $[Cl^-]$ 和 $[Ca^{2+}]$ 的影响

高温高湿是运动员训练比赛、军人作战训练以及特殊环境作业人员不可避免的环境条件,如何克服和适应高温高湿环境是提高运动员训练水平和竞赛成绩、军人和特殊环境作业人员体能及作业能力与工作效率的关键技术之一,其中机体水盐代谢变化是其制约的重要因素之一。水盐代谢的平衡是机体内稳态平衡的重要基础,对保证机体内各种生命活动的正常运行具有极其重要的作用。A Muñoz 等^[9]的实验结果显示,长距离运动后血液 La、 $[Na^+]$ 、精氨酸加压素(AVP)浓度显著性升高, $[Cl^-]$ 和 $[Ca^{2+}]$ 显著性下降;但与完成运动设计的动物相比,因力竭退出的动物血液中,除了有更高 La、 $[Na^+]$ 、AVP 和更低的 $[Cl^-]$ 外, $[Ca^{2+}]$ 也显著升高。房晓等^[10]研究报道,湿热环境下运动并于次日清晨空腹取血,习服组和未习服组血清 $[Na^+]$ 均有所升高。Barr SI 等^[11]报道,长时间处于高温下运动,机体在不饮水的情况下,血浆 $[Na^+]$ 、醛固酮浓度显著升高;随意饮用含 Na^+ 的饮料或水,血浆 $[Na^+]$ 则显著下降。在运动过程中当液体补充与体液丢失基本相等时,血清 $[Na^+]$ 会发生明显下降^[11-12],而未补充液体或补充液体总量小于体液流失时,血液中 $[Na^+]$ 则显著性升高^[13-15],且在湿热环境下运动,血浆 $[Na^+]$ 变化也存在同样特点^[11]。

本实验测试过程中无任何液体摄入,无尿液、粪便排出。测试结果显示,第 1 次测试后血清 $[K^+]$ 和 $[Ca^{2+}]$ 及代谢产物显著性升高, $[Cl^-]$ 显著性降低, $[Na^+]$ 变化不显著。其中, $[Na^+]$ 保持相对稳定可能是机体各种调节机制共同作用的结果。在湿热环境中训练,伴随机体大量出汗丢失部分 Na^+ ;汗液是一种低渗性液体,随出汗量增加,机体缺水导致血浆晶体渗透压升高、循环血量减少,双重强化的抗利尿激素(ADH)使肾脏对水的重吸收增加,血浆渗透压有所回降。

BU 是蛋白质及其组成成份氨基酸分解代谢的最终产物。在蛋白质分解代谢中,蛋白质被分解为氨基酸,经脱氨基作用形成氨在肝脏中被结合生成尿素,这是人体内清除多余氮的最重要途径。同时,BU 是体内含量最高的非蛋白质含氮物质。血 BU 指标经常和肌酐联合使用鉴别诊断疾病,如心脏代偿失调、脱水、蛋白分解增加、肾性高尿素血症等。在运动生理学领域常用来评定运动员身体机能和运动负荷的重要指标,在运动训练中有广泛的应用。在热应激研究方面,

伊长荣等^[16]研究表明,急性热暴露会使蛋白质分解代谢加强。邱仞之等^[17]研究表明,热环境下性激素分泌增加,但热应激体力负荷导致血清睾酮(testosterone, T)含量和 T/C 比值明显下降。T 为同化激素、皮质醇(cortisol, C)为异化激素,高温活动强度和体力消耗很大,分解代谢显著增强,而合成代谢远不能满足分解代谢,导致机体蛋白质分解代谢加强。本实验结果显示血清中显著升高的 BU 浓度也证明了这一观点。

3.3 热习服训练对血清 BU、La、 $[Na^+]$ 、 $[K^+]$ 、 $[Cl^-]$ 和 $[Ca^{2+}]$ 的影响

热习服(heat acclimatization)是指对热环境不适者反复暴露于高温环境,通过调整机体相关生理代偿能力,使生理性热紧张状态获得暂时改善,对热耐受能力提高的现象^[6]。近年来,锻炼促进热习服的研究受到关注,锻炼因子中要有热刺激,才能使机体对热产生特异性习服反应^[18]。Hyypä S 等^[19]研究表明,补充葡萄糖-电解质等渗液执行 2 周的热习服训练后,血浆容积(PV)开始恢复、La 峰值有所下降、血浆中 $[Na^+]$ 和 $[Cl^-]$ 逐步升高。Michael I 等^[3]报道,热习服后膨胀的 PV 与血浆蛋白质和 Na^+ 含量的增加密切相关。本研究结果显示,训练第 7 d 结束后再次测试,血清 $[Na^+]$ 较当天测试前和第 1 次测试后均显著升高。提示,可能是热习服训练后机体的良性反应,有助于 PV 的增加,从而改善皮肤和骨骼肌的血流量,增加体表散热能力和运动能力^[20]。

文献报道,经过连续 10 d 热习服训练后,机体汗腺功能明显发生适应性改善,出汗率显著性增加^[21],热习服训练后汗液中离子流失量明显下降^[22]。本文结果表明,经过 7 d 的热习服训练后再次测试,血浆 $[K^+]$ 和 $[Ca^{2+}]$ 较当天测试前和第 1 次测试后均显著性升高, $[Cl^-]$ 虽较第 2 次测试前显著性下降,但下降幅度与第 1 次测试后基本持平($[Cl^-]$ 第 1 次测试后下降 1.03%,第 2 次测试后下降 1.04%)。提示,热习服训练后,随着出汗量的明显增加,汗液中离子浓度却逐渐减少,可能是习服训练促使机体相关生理功能适应性调整,以保持体液离子浓度、维持血浆容积稳定,是机体适应热负荷和运动负荷的良好反应。习服训练后,血清中 BU 浓度虽较当天测试前及第 1 次测试后均有显著性升高,但较第 1 d 测试后升高幅度却有所下降(BU 第 1 次测试后升高 2.54%,第 2 次测试后升高 2.36%)。表明,经过 7 d 热习服训练,机体能量代谢逐渐趋于平稳,蛋白质消耗量有所回降。血清 La 浓度在第 2 次测试前、后较第 1 次测试前、后升高幅度较大(La 第 1 次测试后升高 184.46%,第 2 次测试后升高 238.43%),但第 2 次测试前 La 浓度较第 1 次测试前显著性降低,

两次训练后 La 浓度差异不显著。表明, 热习服训练改善了机体的有氧代谢能力, 在运动恢复期加速了乳酸的清除速率, 同时也增强了湿热环境下运动的糖酵解供能能力, 是机体适应特殊环境运动的良好表现。热应激和热习服均受下丘脑-垂体-肾上腺皮质系统、交感神经-肾上腺髓质系统和肾素-血管紧张素-醛固酮系统的调节。但是湿热环境下运动, 对机体血清 BU、La 和电解质的调节机制是复杂而又综合的, 还有待于在细胞分子水平上进行深入研究。

参考文献:

- [1] Vrijens D M, Rehrer N J. Sodium-free fluid ingestion decreases plasma sodium during exercise in the heat[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(6): 1847-1851.
- [2] Anastasiou C A, Kavouras S A, Arnaoutis G, et al. Sodium replacement and plasma sodium drop during exercise in the heat when fluid intake matches fluid loss[J]. *Journal of Athletic Training*, 2009, 44(2): 117-123.
- [3] Lindinger M I, McCutcheon L J, Ecker G L, et al. Heat acclimation improves regulation of plasma volume and plasma Na⁺ content during exercise in horses[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 88(3): 1006-1013.
- [4] 邱仞之, 伍超英, 胡德泉, 等. 高湿热锻炼的生理特征和习服效果评价[J]. *第一军医大学学报*, 1992, 12(1): 24-27.
- [5] 杜桂仙. 热环境劳动的生理上限[J]. *中国人民解放军军事医学科学院*, 1985(4): 375-378.
- [6] 吕永达, 霍仲厚. 特殊环境生理学[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2003: 67-79.
- [7] Chivevere T D, Kenefick R W, Cheuvront S N, et al. Effect of heat acclimation on sweat minerals[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2008, 40(5): 886-891.
- [8] Kampmann B, Bröde P, Schütte M, Griefahn B. Lowering of resting core temperature during acclimation is influenced by exercise stimulus[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 104(2): 321-327.
- [9] Muñoz A, Riber C, Trigo P, et al. Muscle damage, hydration, electrolyte balance and vasopressin concentrations in successful and exhausted endurance horses[J]. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 2010, 13(2): 373-379.
- [10] 房晓, 张雷, 邓元, 等. 湿热生理习服训练对运动后血清钾、钠浓度及白细胞计数的影响[J]. *第二军医大学学报*, 2010, 31(10): 1105-1107.
- [11] Barr S I, Costill D L, Fink W J. Fluid replacement during prolonged exercise: effects of water, saline, or no fluid[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1991, 23(7): 811-817.
- [12] McConell G K, Burge C M, Skinner S L, et al. Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise[J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1997, 160: 149-156.
- [13] Greenleaf J E, Brock P J. Na⁺ and Ca²⁺ ingestion: plasma volume-electrolyte distribution at rest and exercise[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1980, 48(5): 838-847.
- [14] Montain S J, Coyle E F. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1992, 73(4): 1340-1350.
- [15] Powers S K, Lawler J, Dodd S, et al. Fluid replacement drinks during high intensity exercise: effects on minimizing exercise induced disturbances in homeostasis[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1990, 60(1): 54-60.
- [16] 伊长荣, 余红, 杨昌林, 等. 急性热暴露对人体氨基酸代谢影响的初步研究[J]. *中国应用生理学杂志*, 1992, 8(2): 188-189.
- [17] 邱仞之, 万为人. 高温体力负荷时过热人体内分泌系统周围腺体几种激素的变化[J]. *中国病理生理杂志*, 1995, 11(1): 58-61.
- [18] 邱仞之. 环境高温与热损伤[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2000: 96-97.
- [19] Hyypää S, Saastamoinen M, Pösö A R. Restoration of water and electrolyte balance in horses after repeated exercise in hot and humid conditions[J]. *Equine Veterinary Journal*, 1996(22): 108-112.
- [20] Geor R J, McCutcheon L J, Lindinger M I. Adaptations to daily exercise in hot and humid ambient conditions in trained thoroughbred horses[J]. *Equine Veterinary Journal*, 1996, 22: 63-68.
- [21] Buono M J, Numan T R, Claros R M, et al. Is active sweating during heat acclimation required for improvements in peripheral sweat gland function?[J]. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 2009, 297(4): 1082-1085.
- [22] McCutcheon L J, Geor R J, Ecker G L, et al. Equine sweating responses to submaximal exercise during 21 days of heat acclimation[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 87(5): 1843-1851.