

· 调查报告与分析 ·

高温作业机体汗、尿及其中元素代谢分析*



霍冰清¹, 唐咏梅¹, 刘为甜^{1,2}, 李军³, 王茜¹, 宁鸿珍¹

【摘要】目的 了解在不同高温温度条件下劳动时机体通过汗、尿中消耗的水和矿物质的变化情况。**方法** 于2014年6—7月选取河北省唐山某钢铁公司钢铁高温作业工人226人进行汗、尿收集及元素测定, 用体重差法估计出汗量。**结果** 湿球黑球温度指数(WBGT)30~43℃高温作业环境下, 机体工间汗、尿排出总量为(3 560±550)mL, 其中出汗量占86.5%; 机体汗中钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜和硒浓度分别为(174.4±39.6)、(1 229.2±264.2)、(33.4±6.6)、(6.0±1.11)mg/L和(310.0±60.8)、(290.2±68.4)、(29.9±6.20)、(6.3±1.5)μg/L; 高温作业时机体钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜、硒通过汗、尿排出的总量分别为(586.5±136.9)、(3 982.1±831.0)、(164.9±25.4)、(61.2±12.7)mg和(962.9±210.8)、(1 046.7±269.6)、(112.4±26.3)、(38.0±10.5)μg。钾、钠、钙、铁、锌、铜的主要丢失途径不随温度变化, 汗中排出量分别占总排出量的81%~96%, 而镁在尿中排出占总排出量70%; 硒的汗中排出, 30~34℃作业时占总量36.5%, 35~39℃和40~43℃时占总量的58.9%和67.0%。**结论** 高温作业机体出汗量及汗中元素的丢失量随温度升高而增多, 同时尿排出减少; 汗液是水和钾、钠、钙、铁、锌、铜以及>35℃时硒消耗的主要途径。

【关键词】 高温作业; 机体; 水; 矿物质; 代谢

中图分类号:R 134+3 文献标志码:A 文章编号:1001-0580(2018)04-0567-04 DOI:10.11847/zgggws1108382

Sweat- and urine-related water and mineral metabolism among workers with occupational heat exposure

HUO Bing-qing*, TANG Yong-mei, LIU Wei-tian, et al (*School of Public Health, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei Province 063000, China)

【Abstract】 Objective To examine water and mineral metabolism related to sweatiness and urination among workers under various levels of occupational heat exposure. **Methods** Sweat and urine samples were collected among 226 workers engaged in operations in heat environment in an iron steel company in Tangshan city between June and July 2014. The amount of sweat and urine were measured and mineral elements in sweat and urine samples were detected. Sweat amount of the workers was estimated by measuring body weight before and after working. **Results** The total sweat and urine excretion for all the participants was 3 560 ± 550 ml and 86.5 % of the excretion was via sweating during a work shift under the workplace temperature of 30 – 43 °C measured with the wet bulb globe temperature (WBGT). In sweat excretion, the concentration was 174.4 ± 39.6 mg/L for potassium (K), 1 229.2 ± 264.2 mg/L for sodium (Na), 33.4 ± 6.6 mg/L for calcium (Ca), 6.0 ± 1.11 mg/L for magnesium (Mg), 310.0 ± 60.8 μg/L for iron (Fe), 290.2 ± 68.4 μg/L for zinc (Zn), 29.9 ± 6.2 μg/L for copper (Cu), and 6.3 ± 1.5 μg/L for selenium (Se). The total mineral excretion via sweat and urine for a participant during a work shift was 586.5 ± 136.9 mg for K, 3 982.1 ± 831.0 mg for Na, 164.9 ± 25.4 mg for Ca, 61.2 ± 12.7 mg Mg, 962.9 ± 210.8 μg for Fe, 1 046.7 ± 269.6 μg for Zn, 112.4 ± 26.3 μg for Cu, and 38.0 ± 10.5 μg for Se, respectively. The excretions of K, Na, Ca, Fe, Zn, and Cu were mainly via sweat (81 % – 96 % of total excretion) and did not varied with the change of workplace temperature, but the excretion of Mg was mainly via urine (70 % of total excretion). The excretion of Se via sweat differed by the change of workplace temperature, with the proportions for total excretion of 36.5 %, 58.9 %, and 67.0 % under the workplace temperature of 30 – 34 °C, 35 – 39 °C, and 40 – 43 °C, respectively. **Conclusion** During working under high temperature, the excretion of sweat and mineral elements increase with the rise of workplace temperature but the urine discharge decreases, and excretions of body fluid, minerals such as K, Na, Ca, Fe, Zn, and Cu, and Se (under the workplace temperature of > 35 °C) are mainly via sweating.

【Key words】 working in hot environment; body; water; mineral; metabolism

机体在高温条件下劳动, 为维持正常体温而大量排汗^[1], 并随着汗液蒸发丢失大量的矿物质, 同时尿量及其矿物质丢失也发生变化^[2-3]; 而如果水分及元素补充不足或过多, 都会使机体适应性变化超过正常限度, 对机体健康状况产生不良影响, 甚至引起疾病的发生^[4-5]; 调查和分析目前高温生产环境下不同作业温度机体水和无机盐的丢失和变化尤为重要。本研究于2014年6—7月对唐山某钢铁公司高温作业工人226人机体的汗、尿及其中元素的代谢进行调查, 并分析不同作业温度水分及元

素的消耗和浓度变化。现将结果报告如下。

1 对象与方法

1.1 对象 2014年6—7月, 从河北省唐山某钢铁公司的炼钢车间和轧钢车间选取高温作业工人226人(包括炉前工22人、炼钢工94人、轧钢工32人、精整工40人、天车工38人), 并在同一车间选取非高温作业的备品工39人。根据劳动强度分级(physical activity level, PAL)^[6], 高温工人中、重等体力劳动各

* 基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(11276906D)
作者单位: 1. 华北理工大学公共卫生学院, 河北 唐山 063000; 2. 北京通州梨园卫生院; 3. 唐山钢铁集团有限责任公司医院
作者简介: 霍冰清(1993—), 女, 河北石家庄人, 本科在读, 研究方向: 人群营养。
通信作者: 唐咏梅, E-mail: youmeitang@sina.com
数字出版日期: 2017-11-24 10:14
数字出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1234.R.20171124.1014.014.html>

占 39.4 %、60.6 %，非高温工人全部为中等强度劳动。

1.2 环境气象条件测试 用热指数仪(型号 QT36, 美国 Quest 公司)测定工人作业场所湿球黑球温度指数(wet bulb globe temperature index, WBGT 指数)[7]。

1.3 样本收集 用小烧杯收取工人额前和前胸后背的汗液,加适量草酸,移入棕色瓶;用体重差法[8]测量工间排汗量,体重用电子称(型号 TCS-150, 上海亚津电子科技有限公司生产)测量,精确度 5 g,排汗量(体重差)=工前体重-工后体重+工间摄入前后体重-工间排泄前后体重。用加草酸的广口塑料瓶收集工间尿液,量筒测量总尿液量,移入棕色瓶。样本均置冰壶中保存运送,-20℃冰箱储存。

1.4 矿物质测定 用 7500 a 型电感耦合等离子体质谱法(inductively-coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-MS)测定汗、尿中钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜、硒的浓度;ICP 购自美国 Agilent 公司,矿物质标准液购于国家标准物质研究中心;测定相对标准偏差(relative standard deviation, RSD%)均<5%。

1.5 统计分析 资料数据用 Excel 2003 建立数据库,利用 SPSS 13.0 统计软件进行 2 组间比较的 *t* 检

验,多组比较采用方差分析和 *q* 检验。*P*<0.05 差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 不同作业温度下机体汗、尿排出情况(表 1)

WBGT 30~43℃的高温作业环境下,机体工间汗、尿排出总量为(2 150~5 110)mL,平均(3 560±550)mL,其中工间出汗量(1 513~4 932)mL,平均(3 078±662)mL,尿液量(0~950)mL,平均(482±205)mL,出汗量占汗、尿总量的 86.5 %;重体力劳动下 30℃~、35℃~和 40~43℃机体的汗或尿排出量均有差别(均 *P*<0.05),随着作业环境 WBGT 指数升高,机体出汗量增多而尿液量逐渐减少。20~25℃的非高温作业情况下,机体工间汗、尿排出总量为(1 177~2 459)mL,平均(1 764±285)mL,工间出汗量(122~1 797)mL,平均(699±350)mL,尿液量(634~1 606)mL,平均(1 065±272)mL,尿液量占汗尿总量的 60.4 %。同等中体力劳动情况下,高温工人工间出汗量高于非高温作业工人,而工间尿液量低于非高温工人,均 *P*<0.05。

表 1 高温作业期间机体汗、尿排出情况

WBGT(℃)	PAL	人数	工间汗液		工间尿液	
			$\bar{x} \pm s(\text{mL})$	%	$\bar{x} \pm s(\text{mL})$	%
30~34	中	89	2 489±315 ^a	79.4	645±124	20.6
	重	14	3 003±143	83.5	592±151	16.5
35~39	重	85	3 253±414 ^b	89.7	375±160 ^c	10.3
40~43	重	38	4 091±275 ^{ce}	93.1	302±157 ^{cd}	6.9
20~25	中	39	699±350	39.6	1 065±272 ^a	60.4

注:20~25℃为非高温作业;与 20~25℃比较,a *P*<0.01;与 30~34℃重体力作业比较,b *P*<0.05,c *P*<0.01;与 35~39℃重体力作业比较,d *P*<0.05,e *P*<0.01。

2.2 高温作业机体无机盐汗、尿代谢情况

2.2.1 高温作业机体汗、尿无机盐浓度的变化(表 2、3)

高温作业时机体汗中常量元素钾、钠、钙、镁以及微量元素铁、锌、铜和硒的平均浓度分别为(174.4±39.6)mg/L、(1 229.2±264.2)mg/L、(33.4±6.6)mg/L、(6.0±1.11)mg/L和(310.0±60.8)μg/L、(290.2±68.4)μg/L、(29.9±6.2)μg/L和(6.3±1.5)μg/L。中体力劳动水平下,机体高温作业汗中钾、钠、钙、镁、铁、锌和铜浓度高于非高温作业,而汗中硒浓度低于非高温作业,均 *P*<0.05;重体力高温作业时,机体汗中钾、锌浓度 35~39℃组高于 30~34℃组,钠、钙、镁和硒浓度 35~39℃组高于 30~34℃和

40~43℃组,均 *P*<0.05,而铁、铜浓度没有变化。高温作业时机体尿中常量元素钾、钠、钙、镁以及微量元素铁、锌、铜和硒平均浓度分别为(117.8±31.0)mg/L、(501.1±161.6)mg/L、(131.3±43.6)mg/L、(86.8±30.2)mg/L和(68.6±21.5)μg/L、(322.8±93.7)μg/L、(41.5±22.3)μg/L和(39.5±15.6)μg/L;中体力劳动水平下,机体高温作业尿中钾、钠、铁浓度低于非高温作业,而尿中锌浓度高于非高温作业,均 *P*<0.05;重体力高温作业机体尿中钙浓度随温度的升高逐渐增大,铁浓度 30~34℃组和 35~39℃组高于 40~43℃组,均 *P*<0.05,而尿中钾、钠、镁、锌、铜和硒浓度在不同作业温度比较尚无改变。

表 2 高温作业机体汗液无机盐浓度变化($\bar{x} \pm s$)

WBGT(℃)	PAL	人数	常量元素(mg/L)				微量元素(μg/L)			
			钾	钠	钙	镁	铁	锌	铜	硒
30~34	中	89	179.4±31.7	1 200.3±178.5	31.5±5.9	5.6±1.1	321.9±59.2	267.5±70.7	28.7±5.2	5.5±1.1
	重	14	151.0±12.8	1 067.2±64.4	31.4±4.6	5.1±0.7	279.3±16.7	274.3±32.2	28.0±3.0	5.5±0.9
35~39	重	85	175.9±42.1	1 323.1±338.1 ^d	36.3±7.1 ^c	6.6±1.0 ^d	311.1±61.9	310.7±62.7	31.4±6.6	7.1±1.6 ^d
40~43	重	38	168.1±44.8	1 146.5±143.3 ^f	31.9±4.1 ^f	5.8±0.9 ^{ef}	290.8±62.6	303.4±76.5	30.3±6.7	6.4±1.0 ^{de}
20~25	中	39	145.4±57.5 ^b	788.8±303.5 ^b	23.6±12.3 ^b	4.2±3.6 ^b	134.9±44.4 ^b	197.0±61.8 ^b	22.2±7.7 ^b	7.3±2.4 ^b

注:20~25℃为非高温作业;与 20~25℃作业比较,a *P*<0.05,b *P*<0.01;与 30~34℃重体力作业比较,c *P*<0.05,d *P*<0.01;与 35~39℃重体力作业比较,e *P*<0.05,f *P*<0.01。

表 3 高温作业机体尿液无机盐浓度变化($\bar{x} \pm s$)

WBGT(℃)	PAL	人数	常量元素(mg/L)				微量元素(μg/L)			
			钾	钠	钙	镁	铁	锌	铜	硒
30~34	中	89	118.1±32.4	536.5±201.7	109.5±33.6	95.3±29.7	76.3±18.5	321.1±108.9	46.0±31.9	40.1±16.1
	重	14	116.6±35.0	459.2±156.5	92.7±21.4	77.6±26.6	76.4±33.7	335.8±131.7	39.9±12.2	40.3±15.6
35~39	重	85	118.6±28.5	473.5±109.5	145.2±39.9 ^b	82.9±32.1	65.2±21.7	319.2±72.2	38.9±10.2	37.4±11.7
40~43	重	38	115.8±32.9	495.1±142.3	165.2±44.4 ^{bc}	78.8±23.7	55.3±11.1 ^{bd}	330.3±82.2	37.6±11.8	42.2±20.4
20~25	中	39	204.3±51.4 ^a	911.3±195.0 ^a	111.3±48.8	88.6±28.7	154.5±42.8 ^a	246.4±79.5 ^a	41.7±21.2	41.3±15.3

注: 20~25℃为非高温作业;与20~25℃作业比较, a $P<0.05$;与30~34℃重体力作业比较, b $P<0.01$;与35~39℃重体力作业比较, c $P<0.05$, d $P<0.01$ 。

2.2.2 高温作业机体汗、尿无机盐排出量的变化(表4、5)

高温作业时机体工间钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜、硒,通过汗、尿排出的总量分别为(419.0~1 041.7)mg、(2 756.1~6 787.6)mg、(108.1~226.7)mg、(38.4~91.1)mg、(641.9~1 920.8)μg、(452.0~1 965.3)μg、(60.1~191.1)μg、(27.3~50.3)μg,平均为(586.5±136.9)mg、(3 982.1±831.0)mg、(164.9±25.4)mg、(61.2±12.7)mg、(962.9±210.8)μg、(1 046.7±269.6)μg、(112.4±26.3)μg、(38.0±10.5)μg;这些元素的汗中排出量分别为(528.0±146.8)mg、(3 724.8±876.1)mg、(101.0±23.6)mg、(18.4±4.8)mg、(927.7±208.6)μg、(888.1±274.6)μg、(91.5±25.7)μg、(19.1±6.0)μg,尿中排出量分别为(58.5±15.8)mg、(257.3±124.9)mg、(63.9±17.2)mg、(42.8±15.1)mg、(35.2±14.4)μg、(158.6±50.8)μg、(20.9±13.2)μg、18.9±7.4 μg。中体力劳动时非高温作业与高温作业比

较,以及重体力劳动的高温作业30~34℃、35~39℃和40~43℃之间比较,机体工间汗中钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜、硒排出量均随WBGT指数的升高而逐渐增多,而同时尿中这些元素排出量下降,各温度组排出量差别检验均 $P<0.05$ 。高温作业机体各元素的汗、尿丢失途径分析,钾、钠、钙、铁、锌、铜汗中排出量分别占总排出量的81%~96%,但镁在尿中排出占总排出量70%;硒在不同作业温度丢失途径不同,30~34℃作业时中、重体力劳动机体硒通过汗、尿的总排出量分别为(37.1±9.1)μg和(39.3±2.3)μg,其中尿中排出量分别占64.7%和55.8%,35~39℃和40~43℃时机体汗、尿中硒总排出量分别为(38.2±11.0)μg和(39.3±14.1)μg,其中汗中排出量分别占58.9%和67.0%。非高温作业时机体尿中各元素排出均占汗尿中总排出量的60%~97%。

表 4 高温作业机体汗中常量元素排出情况($\bar{x} \pm s$, mg)

WBGT(℃)	PAL	人数	汗钾	尿钾	汗钠	尿钠	汗钙	尿钙	汗镁	尿镁
30~34	中	89	438.7±66.8	73.0±11.8	2 929.5±244.9	348.1±142.4	77.1±13.4	69.2±21.8	13.6±2.0	57.5±11.9
	重	14	468.1±42.9	64.8±4.7	3 284.9±368.1	273.2±80.9	93.3±12.6	55.3±8.0	15.0±1.8	43.3±9.7
35~39	重	85	560.1±101.9 ^c	49.9±7.3 ^c	4 197.4±697.5 ^c	197.7±36.2 ^c	115.1±15.6 ^c	61.6±10.4 ^b	21.5±2.1 ^c	33.7±4.8 ^c
40~43	重	38	687.2±172.5 ^{cd}	41.6±9.0 ^{cd}	4 692.4±529.4 ^{cd}	171.8±38.2 ^{cd}	128.2±15.9 ^{cd}	59.7±9.5	23.8±3.3 ^{cd}	28.5±5.2 ^{cd}
20~25	中	39	128.5±20.1 ^a	204.8±35.9 ^a	619.5±85.2 ^a	955.2±184.0 ^a	19.2±9.3 ^a	106.7±33.0 ^a	3.1±1.5 ^a	86.0±17.5 ^a

注: 20~25℃为非高温作业;与20~25℃作业比较, a $P<0.01$;与30~34℃重体力作业比较, b $P<0.05$, c $P<0.01$;与35~39℃重体力作业比较, d $P<0.01$ 。

表 5 高温作业机体汗中微量元素排出情况($\bar{x} \pm s$, μg)

WBGT(℃)	PAL	人数	汗铁	尿铁	汗锌	尿锌	汗铜	尿铜	汗硒	尿硒
30~34	中	89	773.4±101.9	47.9±10.5	657.8±173.1	197.4±57.6	70.7±11.8	28.2±17.4	13.1±2.9	24.0±7.9
	重	14	837.6±36.9	41.8±8.1	828.7±94.0	171.8±17.3	83.6±4.3	22.6±4.3	17.4±2.2	21.9±2.9
35~39	重	85	988.0±98.3	27.5±8.1 ^b	985.3±116.4 ^c	134.0±13.7 ^c	99.8±11.3 ^c	16.3±3.0 ^c	22.5±3.6 ^c	15.7±3.1 ^c
40~43	重	38	1 187.4±229.1 ^{cd}	20.1±3.6 ^{cd}	1 232.1±270.7 ^{cd}	117.9±14.7 ^{cd}	124.3±26.3 ^{cd}	13.6±3.5 ^{cd}	26.3±4.2 ^c	13.0±2.0 ^{cd}
20~25	中	39	105.1±324.9 ^a	155.2±24.3 ^a	160.0±31.1 ^a	244.1±48.1 ^a	18.4±5.7 ^a	44.5±14.6 ^a	6.2±1.6 ^a	41.4±11.5 ^a

注: 与非高温作业比较, a $P<0.01$;与30~34℃重体力高温作业比较, b $P<0.05$, c $P<0.01$;与35~39℃重体力高温作业比较, d $P<0.01$ 。

3 讨 论

机体在高温环境下劳动,主要靠大量出汗蒸发散热来维持机体热平衡,水的消耗增加;2007 年 Sawka 等^[8]报道不同运动项目出汗情况,机体在热环境下运动时出汗量为 0.5~2.0 L/h。2008 年 Graham 等^[9]报道了 29 名健康男性体力劳动者在 30~35℃ 环境下工作时出汗量为 0.1~1.0 L/h。目前高温判定标准是按照环境 WBGT 指数,用热指数仪测定,中国 WBGT ≥ 25 ℃ 为高温作业^[10-12];也建议用体重差估测出汗量用于工间水分补充的参照。钢铁高温作业是高温作业主要群体之一,本研究分析钢铁作业机体在环境 WBGT 指数 30~43℃ 条件下,工间出汗量为 1 513~4 932 mL,平均出汗量为 3 078 mL,占汗尿排出总量的 79.3%;有报道重体力劳动情况下呼吸气中的水量为 1 000 mL^[11],可见出汗仍是目前高温作业水分丢失的主要途径水分以汗液为主要丢失途径,并随温度升高出汗量增多同时尿量减少。对非高温作业分析,尿液仍为自然环境下劳动机体水分丢失的主要途径。

高温环境作业机体出汗同时导致矿物质大量丢失,因此工间应以食物、出汗量较多时以含盐饮品及时补充,但补充量需要适宜。因此,需要探讨中国人群不同作业温度条件下无机盐的丢失变化情况。1998 年李玉玖等^[13]报道鞍山钢铁 69 名工人在摄氏 28~43℃ 条件下劳动时,其钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜的工间汗中排出量分别为 392、3 772、62、18、0.94、0.79 和 0.08 mg,尿中排出量分别为 42、184、97、42、0.03、0.17 和 0.03 mg,大量排汗是无机盐丢失的主要途经;本研究分析与之比较,目前作业环境下,工人工间随汗排出的钾,钙,镁,锌,铜增加,钠,铁减少,汗液不是镁和硒的主要丢失途径。

目前中国还缺少高温作业汗液矿物质浓度变化的报道。本研究 30~43℃ 钢铁高温作业时随着作业温度升高,机体汗中铁、铜浓度没有变化,其它元素浓度有增高趋势,但钾、锌浓度到 >40℃ 以及钠、钙、镁和硒浓度在 35~40℃ 之间时无明显变化。2007 年 Montain 等^[14]对 1 名女性和 6 名男性在 27℃ 环境下运动汗液中无机盐的研究报道,汗中钙、镁、铜的浓度分别为 16 $\mu\text{g/mL}$, 1 265 ng/L, 80 ng/L。本研究 30~34℃ 钢铁高温作业时中、重劳动强度无差别,汗中钙、镁、铜平均浓度为 31 mg/L、5.3 mg/L、28 $\mu\text{g/L}$,均高于国外研究。2007 年 Brice 等^[15]对 10 名男性 (28 $\pm$ 3)℃ 环境下慢跑汗中钠、钾的研究

报道,汗液中钠、钾的浓度分别为 (711 $\pm$ 45) mg/L、(474 $\pm$ 196) mg/L; Montain^[14]报道汗中钠、钾的浓度为 863 $\mu\text{g/mL}$, 222 $\mu\text{g/mL}$ 。本研究 30~34℃ 钢铁高温作业时中、重强度劳动汗中钠平均浓度为 1 200 mg/L、1 067 mg/L,钾平均浓度为 179 mg/L、151 mg/L,汗中钾浓度低于国外研究,而汗中钠浓度高于国外水平。Sawka^[8]报道汗液钠浓度 230~1 600 mg/L,而本研究平均钠浓度 1 067~1 323 mg/L 汗液,可能原因一是汗钠的浓度个体变异较大,另一是中国人盐摄入量普遍较高,会导致观察到的汗钠浓度较高,所以在制定推荐量时不宜依此建议过高的盐推荐量。

参考文献

- [1] Armstrong LE, Klau JF, Ganio MS, et al. Accumulation of 2H₂O in plasma and eccrine sweat during exercise-heat stress[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 108(3): 477–482.
- [2] Chivere TD, Kenefick RW, Cheuvront SN, et al. Effect of heat acclimation on sweat minerals[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(5): 886–891.
- [3] Lee DP, Kennedy AD, O'Neal EK, et al. Global untargeted metabolic profiling of human sweat from exercising men and women[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2011, 8(1): 1–2.
- [4] 李瑞芳,孙建妮,张萍,等.高温作业工人高血压患病及影响因素分析[J]. *中国公共卫生*, 2009, 7(25): 818–820.
- [5] Gomes EC, Stone V, Florida-James G. Investigating performance and lung function in a hot, humid and ozone-polluted environment[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 110(1): 199–205.
- [6] 孙长颢. 营养与食品卫生学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 73.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 934–2008. 高温作业环境气象条件测定方法[S]. 2008: 1–10.
- [8] Sawka MN, Burke LM, Eichner ER, et al. Exercise and fluid replacement[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2007, 39(2): 377–390.
- [9] Graham PB, Vernica SM. Sweat rate and sodium loss during working in the heat[J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2008, 3: 1–6.
- [10] Bates GP, Miller VS. Sweat rate and sodium loss during work in the heat[J]. *J Occup Med Toxicol*, 2008, 3(1): 4–4.
- [11] 宁鸿珍,关维俊,任磊,等.煤矿井下工人营养与水盐代谢的研究[J]. *中国工业医学*, 2002, 15(5): 280–281.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 4200–2008. 高温作业分级[S]. 2008: 1.
- [13] 李玉玖,祖国栋,杨军,等.高温作业工人维生素 B₁、B₂、C 及无机盐营养状况的研究[J]. *中国公共卫生*, 1998, 14(8): 468–470.
- [14] Montain SJ, Cheuvront SN, Lukaski HC. Sweat mineral-element responses during 7 h of exercise-heat stress[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2007, 17(6): 574–582.
- [15] Appenzeller BM, Schummer C, Rodrigues SB, et al. Determination of the volume of sweat accumulated in a sweat-patch using sodium and potassium as internal reference[J]. *Journal of Chromatography B*, 2007, 852(1-2): 333–337.

收稿日期: 2015-11-02

(吴少慧编校)