第 1 章　热应激与热紧张

第 1 节　炎热环境中人体的生理应激反应

气温(Ta)和气湿(Tw)、气流(V)的综合影响,可引起人体过热的环境,称为热环境。太阳辐射或在劳动环境中存在的热源放出的辐射热，除直接作用于人体外，还可使周围物体加热，再以辐射、传导、对流散热等方式作用于人体，因而太阳辐射和热辐射是热环境中的重要致热因素。劳动环境中,Ta 超过 32℃,炎热地区超过 35℃,或 Ta在 30℃以上、相对湿度(RH)超过 80%，或辐射热强度超过 4.1841 J(1 cal)/cm^2·min，或通风不良而存在的热源散热量超过 83.7 kJ/m^2·min ，都属于高温劳动范畴。高温劳动时，由于强烈的肌肉活动大量产热，必须加强散热才能维持人体的热平衡。但炎热的外环境使机体散热困难，甚至被迫接受大量的外加热(辐射热、对流热),可引起一系列的生理应激反应，主要表现为体温调节、水盐代谢和心血管系统、消化系统、神经内分泌系统等方面的变化。这些方面的变化在一定范围内是人体对高温劳动的代偿性反应，如果热负荷超过机体调节适应的限度，则将影响人体的健康，甚至引起中暑等热性疾病。

(一)热平衡与热交换

1 热平衡　常温下(15～20℃)轻体力活动的人，每小时需向外环境散热 418.4～627.6 kJ 在 Ta35℃重劳动时，总散热量需增加 1倍。环境 Ta 过高或过低都不利于体温调节和保持热平衡。日光照射的辐射获热平均为 627.6～1 255.2 kJ/h；内源性代谢的产热强度随体力活动强度而增加，最短时间内的最大产热量可达 4 184～11 297 kJ/h 以上。人体与环境之间的热交换可以热平衡公式表示：M ± C ± R − E = ± S。M 为人体基础代谢 + 劳动代谢产热量,C 为对流和传导散热量（Ta 低于体温为负值，反之为正值）,R 为辐射散热量（同前),E 为蒸发散热量,S 为热平衡值〔各项单位为 J/cm^2·min 或 J/cm^2·h,体表面积(m^2) 用许文生公式计算〕正常条件下，S=0;如 S>0,体温将上升,S<0,体温将下降。

2. 热交换　辐射、对流、蒸发是机体体表与环境热交换的主要方式，而机体体温调节主要是在体表和体核之间进行、机体代谢产生的热仅极小部分经传导散热，绝大部分经血液循环带至体表散发。人体中细胞间热传导的热迁移率 HK = hk(Tc − $\bar{T}$s)A，血液热对流的热对流率 Hd = Qs·Pb·Cb (Tc − $\bar{T}$s)A。式中 hk 是组织传导的热迁移系数,Tc 是中心温度,$\bar{T}$s 是平均皮温,A 是热迁移的体表面积,Qs 是单位时间到达皮肤的血流，Pb是血液密度,Cb 是血液比热。Hk 和 Hd 之和是从核心到外周的总热迁移率。 Ta 在 30℃以下，轻劳动的人 1 昼夜约散热 10 460 kJ,主要通过辐射散热 45%，对流和传导散热 30%,蒸发散热仅 25%,多为潜汗蒸发，

需要全本请访问 www.ertongbook.com

是体液从皮肤毛细血管渗透到表皮，每日约 300 ml，经汗腺分泌的汗液 100 ml，是谓“不显性出汗”,连同肺和呼吸道蒸发约 700 ml,每天总蒸发体水量为 1 000 ml，基本上是单纯性失水。当 Ta 接近或超过皮肤温度(32～35℃) 时，便不能藉辐射和对流散热，热空气可以对流热作用于体表，通过血液循环加热全身；高热的周围物体以辐射热作用于体表和组织深部，对人体也是一种辐射获热，其加热作用更强、更快。机体受热时汗腺的分泌活动加强，汗分泌量大大增加,是谓‘显性出汗”,高者每天可达 10 L 以上，此时汗蒸发便成为人体散热维持热平衡的主要方式。在皮肤温度 34℃时，体表每蒸发 1L 汗液可散热 2 439 kJ，约等于极强体力活动 1 h 所产生的热量。人体汗腺有 200～500万个，大量出汗时，汗腺每天可产生为其容积约 250 倍的分泌量。最大出汗量可达 4 L/h,所以出汗是对抗高热最有效的生理机理。但汗液的蒸发作用受 Ta、Tw、V 所制约,其中 RH 的高低尤为重要。在干热有风的条件下，汗的有效蒸发率可达80% ；而在湿热风小的条件下，汗的有效蒸发率常在 50% 以下。故在沿海湿热气候条件下，分泌的汗量可比蒸发的汗量大，因为体表的生理饱和差小，汗液难于蒸发，往往成汗珠而流失，为“无效性汗分泌”，机体失水多却起不到应有的蒸发散热作用，由于皮肤潮湿使角质层渍汗而膨胀，阻碍汗腺孔的正常泌汗功能，即使 Ta 不太高也可引起机体热调节紧张。邱仞之和罗爱存在吐鲁蕃戈壁观察到干热沙漠气候条件下，由于汗液蒸发充分，多为“有效出汗”，蒸发散热作用强，且无过多水分丢失，因而人体能耐受很高的干热气候。但空气的冷却力有一定的限度，在有利于汗液蒸发达到最大值的条件下，每 h 散热的上限为 2 720 kJ。Ta 略低于皮肤温度时,V 可促进蒸发和对流散热，如风速 V)由 1 m/s 增至 3 m/s,增加 2 m/s 使对流散热量增加 40.5%(劳动)和 57.0%(安静),超过这个限度,如 V 由 3 m/s 增至 5 m/s ,对流散热量只增加 22.6% 当 Ta 高于皮肤温度并在高湿条件下，则 V 的冷却作用甚微 当 V所促进的蒸发散热量小于 V 对人体的加热作用时，热气流引起对流获热，反而加重机体的热蓄积。人体只有 75% 的体表面积参与辐射和对流热交换，衣着在降低环境和皮肤表面热交换中的作用按有关劳动和穿着服装类型、隔热性能不同有很大差异。服装的隔热值（或称保暖值）用 clo 表示，即每 h 每 m^2 面积散热4.1841 J所要求的温差(℃/J·m^2·h),1clo 即为 Ta 21℃、RH50%、V＜0.1 m/s 安静坐位劳动时保持平均皮肤温度 33℃所穿衣服的隔热值，可依公式计算:1clo = 5.56×($\bar{T}s$ - Ta)/0.75M - Ia。5.56为导热系数 J/℃·m^2·h),$\bar{T}s$ 为平均皮肤温度(℃),Ta 为室内气温(℃),M为产热量(kJ/m^2·h),0.75 为机体产热有 75% 通过皮肤散发,Ia 为空气层的隔热值,当V＜0.1 m/s时为 0.14℃/J·m^2·h。服装的隔热值还可用直接估计法，根据 clo 值与厚度呈线性函数关系,1 cm 厚相当于 1.57 clo ,服装厚度 =(人体着装后的外围 - 裸体围)÷2π;也可按服装重量与 clo值的线性关系,一般每 kg 服装的隔热值约 0.35 clo。

（二）对生理反应的影响

1.体温调节　人体在中枢神经系统和内分泌的调控下，通过心血管系统、皮肤、汗腺和内脏等组织器官的协同作用，维持着产热和散热的动态平衡。在高温下劳动，人体的体温调节主要受气象条件和劳动强度的复合影响，气象因素中以 Ta 和热辐射起主要作用，机体这些内外环境的热应激，激发了参与体温调节的各个系统的生理应激反应。首先，热刺激皮肤温热感受器,感受器由兴奋而转化为神经冲动,能以 0.7 m/s 的速度把信号传至下丘脑体温调节中枢；同时，外环境的附加热和劳动时机体产生的热使血液加温，通过血液循环直接加热视前区——下丘脑前区(POAH) 中枢温热感受器（下丘脑前区存在热敏神经元、冷敏神经元和不敏感神经元），此时热敏神经元放电频率明显增加，冷敏神经元则明显减少，导致散热中枢兴奋，引起心

输出量增加，内脏血管收缩，皮肤血管扩张和汗腺分泌增强等反应；同时产热中枢受到抑制而减少产热，使体温保持在正常范围。脑下垂体、中脑、脊髓中也有温度感受细胞，有人提出大静脉壁和肌纤维中也有。中枢神经系统的其他部位，主要是脑干和脊髓也有发出体温调节反应的能力。热敏神经元的感受'温阈'在37℃左右，该阈值称为体温调定点。当皮肤受到过热刺激时，调定点下移，中枢温度在36.6℃即可出汗。但体温调节恒定的能力有一定的限度，安静状态时，体温调节的极限为Ta 31℃、RH 85%，或Ta 38℃、RH 50%；在从事大强度的军事劳动或受到强烈的热辐射时，体温调节的极限还要大大降低。如果机体产热和接受外界附加热之和超过了机体的散热能力和空气的冷却力时，即造成体内蓄热或过热，出现不同程度的体温升高。因此，体温升高是体温调节紧张的重要标志。在体力劳动后，体温升高1℃以内（肛温低于38.5℃或口温低于37.4℃）可认为是正常范围的波动，有利于人体的散热。一般休息30min体温即可恢复。如超过正常范围，则表示机体过热。通常当环境Ta超过35℃，尤其是38℃时，体温超过正常范围的人数就增多。体温过热将破坏机体内环境的稳定，影响体力劳动能力。因此，在确定人体热负荷的最高耐受值时，一般以体温作为人体耐热阈的生理指标。许多学者提出了从身体不同部位测定人体的中心体温。口温一般比肛温低0.3～0.5℃，体力活动后低1.1(0.8～1.3)℃。肛温（直肠温度）是安静时的最高温度，但必须把传感器插入肛门7～8 cm，才能测得真正的直肠温度。有人主张测食道温度，较低部位的食道温度接近心脏温度，且较稳定。耳鼓膜温度接近脑下垂体温度，当外耳道封闭严密时，能测得准确的体温，它较肛温低。鼻咽腔温度近似颅底温度。我国能生产上述几种数字测温计。杜桂仙等提出，体力劳动的生理安全上限值口温为37.4℃、肛温为38.5℃，耐受上限值分别为37.8℃和38.9℃，而耐受极限值口温为38.3℃、肛温为39.4℃。当肛温高达39.5℃以上时，便预示出汗率和皮肤传热量不再上升，将面临生理危象或生理功能受损。热环境下静态受热的耐受肛温较低，有人认为是38.4～38.6℃。而长跑、马拉松等剧烈运动时，肛温常达到40～41℃，甚至42.5℃，并不一定发生生理危象或中暑。故根据活动强度不同，体温在37～40℃可认为是适当的。研究证明，体力活动使体温升高2.5℃左右，对大多数人机体功能影响不明显，机体还有许多有利的变化，如白细胞增高，网状内皮系统功能包括吞噬作用、抗体生成、肝脏解毒作用等增强，若代谢不过大，还能加速组织物质交换和提高机体抵抗力。肌肉温度升高在一定范围内也伴有功能提高，能以更快速度和更大力量收缩，提高体力活动能力。邱仞之等报告，热应激引起人体肛温达38.5℃时，血浆中分子物质明显增加，而过氧化脂质——丙二醛（MDA）含量明显降低；小鼠热暴露时，体内抗氧化酶活性（谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶，即GSHpx和SOD）活性随肛温升高而增加，肛温39～40℃时活力最高，超过40℃时酶活力有下降趋势。大鼠热暴露100 min肛温升高2.5℃左右时，胸腺、脾脏重量高于对照组，自身花环升高2倍多，而抗体生成细胞（OD）值变化不大；小鼠腹腔巨噬细胞Fc受体阳性率（%）、巨噬细胞吞噬阳性率和吞噬指数显著增高，而T淋巴细胞酯酶染色阳性细胞（$ANAE^+$）变化不大，其中点状颗粒型明显降低，而散状颗粒型明显增高。但小鼠热暴露60 min肛温升高不到2.5℃，上述指标变化恰明显低于对照组。高温对免疫功能的反应具有明显的时相性，热强度过高和受热时间过久引起体温过高时，会呈现免疫功能失调，免疫抑制加深。皮肤温度是反映高温气象条件对人体综合作用和体温调节的敏感指标，一般比较稳定，躯干为31～34℃，四肢较低，相差不超过4℃。高温劳动时，体内产生的热量由血液传至体表，皮下血管反射性扩张，周围血流量增多，流速加大，皮肤温度升高。皮肤温度与环境温度差增大，有利于辐射、传导、对流散热。

如外界 Ta 过高和辐射热的直接作用使皮肤温度迅速升高，则皮肤散热作用势必减弱；如皮肤温度升高到接近或高于血液和内脏温度时，则体热放散受阻。通常平均皮肤温度超过 34℃时，就会产生过热感。由于汗液蒸发和 V 影响可冷却体表，此时皮肤温度便不能真正反映机体的热负荷状况。体温的动态变化可显示体温调节的强度和机体的总热负荷状况。如高温下穿戴 NBC(核、生物、化学）防护服进行军事活动，短时间内皮肤温度迅速升高至接近体温，并与体温并行地变动，这时的体温就完全反映机体的热负荷状况。如穿着冷却服（液冷、气冷或干冰等）进行大强度军事劳动时，体温可升至 38.5℃以上，而平均皮肤温度降至 29～30℃，除自感“稍热”外，余无不适感。所以人体受热时的耐受能力，不仅取决于体内的热负荷状况，在很大程度上取决于体表的热负荷状况。因此，有人主张用平均体温 37.7℃为生理安全上限，以 38.5～38.8℃和相应的积热指数（body heat storage index－BHSI)272.0～355.6 kJ/m^2，或生理紧张指数（physiological strain index－PSI)4.5 作为人体耐热极限的客观指标。生理紧张指数 3.0～3.6 为热习服战士的耐受上限。在穿不透气防护服作业时，蒸发散热作用失效，皮肤温度升高可超过肛温，以致在接近衰竭状态时肛温和心率尚在耐受上限以内，此时可按平均皮肤温度上升与肛温相交点为耐受上限。我们在 Ta 31.7～34.3℃、黑球温度(Tg)35.6～42.9℃高温下观察防化兵作业，结果防化兵只能耐受 30～44 min 行程 2.3～4.1 km，即达到热负荷限度，此时肛温 39.62℃、平均皮肤温度 37.51℃、平均体温 38.93℃、积热指数 338.5 kJ/m^2、心率 159 b/min、出汗量0.956 L(相当于 1.4～1.8 L/h)、生理紧张指数 4.8，肛温和平均体温仍分别比平均皮肤温度高 2.11℃和 1.42℃。 [平均皮肤温度(℃)＝0.07 额温＋0.05 手背温＋0.5 胸温 ＋0.18 股温 ＋0.20 腓温(5 点法)；平均体温(℃)＝0.67 肛温＋0.33 平均皮肤温度；积热指数(kJ/m^2)＝ 体重(kg)×0.83／体表面积(m^2)×平均体温增值（℃)×4.1841；生理紧张指数＝最终心率(b/min)/100＋ 肛温增值 ℃)＋出汗率(L/h)]。

2.水盐代谢 热环境中劳动时，由于排汗可丧失大量水分，每人每天出汗量 4～8 L，高者在 10 L 以上。我军报告，普通行军出汗量每 h 为 0.6～0.7 L，烈日下行军最高每 h 可超过 1.5～2.0 L。出汗量的多少主要取决于热强度和劳动强度的高低；同样热强度和劳动强度时，湿度越大，出汗越多。故出汗量可作为人体受热程度和劳动强度的综合指标。出汗率超过 0.26 L/h 是人体水亏空的阈值，我国劳动者在热环境中从事体力劳动 4 h 出汗量的生理安全上限为 3.6 L，3 h 以上最大劳动强度的出汗率不超过 1.1 L/h，1 个劳动日出汗量 6 L 为生理最高限度。汗液是由汗腺自动分泌的液体，汗腺由交感神经受下丘脑发汗中枢控制，为胆碱能性器官，并受醛固酮和抗利尿素所制约。 Ta 增高是刺激汗腺分泌的重要因素，它对下丘脑发汗中枢的驱动因素（driving factor）主要是加温血液的直接影响，或反射性刺激皮肤感受器。汗液是低渗性液体，固体成分占 0.3%～0.8% 。其中电解质占绝大部分，主要是氯化钠(0.1%～0.5%）和多种常量、微量元素；还有蛋白质和生物活性物质（水溶性维生素、17 酮类固醇等)，以及与血液化学成分相同的物质(尿素氮、氨氮、肌酐氮、葡萄糖、乳酸等)。我军热区战士夏季训练时每 L 汗液中平均钠浓度为 87(64～112)mmol，氯为 85(71～107)mmol，钾为 6.8(5.2～10.0)mmol，钙为 1.6(1.2～2.4)mmol，镁为 0.4(0.1～1.1)mmol，磷为 0.9(0.4～1.5) mmol；汗液中微量元素铁为 13.9 μmol/L 铜 12.3 μmol/L，锌 44.0 μmol/L，锰 469 nmol/L，铬 41.3 nmol/L，钴 53.6 nmol/L，钼 0.67 nmol/L，镍 0.23 μmol/L，钒 0.52 μmol/L，锶 0.89 μmol/L，硼 12.1 μmol/L，钛 0.36 μmol/L，镉 22.3 nmol/L ，铅 1.12 μmol/L。汗液还含有碘、硒、氟、铝等。高温下穿着全身式防毒服作业时，全身汗液中钠、

钾、钙、镁、铁、铜、锌浓度则分别为 113.0、12.3、0.8、0.9、0.027、0.005 和 0.035 mmol/L；每 L 汗液中氨基酸总量为 10 855 μmol，其中必需氨基酸占 21%，非必需氨基酸占 79%，前者以赖氨酸最高为 1 039 μmol，蛋氨酸最低为 50 μmol，后者以丝氨酸最高为 2 774 μmol，胱氨酸最低仅 5 μmol 维生素 B_1、B_2、C 分别为 452、312 和 3 330 μg/L。通常热强度或出汗量越高，汗盐浓度越高。热习服后汗中上述成分浓度绝大多数有明显降低。我军战士夏季行军汗盐浓度波动于0.08%～0.63%之间，其摄盐量一般为 10～20 g/d，高温军事劳动日的排盐量可达 20～25 g，甚至 30～40 g。机体在水盐丢失的同时，通过神经、内分泌的调节来保持水盐代谢平衡，其调节器官主要是肾脏。肾血流量减少和少尿是急性热应激的早期反应。高温下劳动，水分主要经汗腺排出，经肾脏排出量则由平时占 50%～75%而降为 10%～15%。通过饮水补充失水的调节机理是：①钠离子－渗透压－后叶加压素通路(SOV)；②肾素－血管紧张素Ⅱ－醛固酮通路(RAA)。SOV 和 RAA 受血浆容量和钠浓度的改变而发生反应，血管紧张素Ⅱ可降低调节分泌后叶加压素和摄取饮水皮层感受器的刺激阈。由于出汗丢失的水分比盐分多，可导致高渗性脱水，使血浆渗透压升高，刺激位于下丘脑的渗透压感受器，引起视上核和室旁核分泌抗利尿素，通过下丘脑－垂体束神经纤维输送至垂体后叶，垂体后叶贮存的抗利尿素就释放至血液，作用于肾脏远曲小管和收集管上皮细胞的受体，激活细胞膜上的腺苷酸环化酶，使 ATP 分解成 cAMP，通过 cAMP 从而加强了肾小管对水分的重吸收；同时，升高的渗透压和组织外液容量的减少都可刺激下丘脑的饮水中枢，传至大脑皮层产生口渴感而主动饮水，使渗透压和血容量得以恢复。大量出汗和脱水缺盐等减少细胞外液容量的因素，使循环血量减少，肾动脉压下降，入球动脉被牵引程度减弱，球旁细胞增强肾素的分泌，引起血浆血管紧张素Ⅱ浓度升高，刺激肾上腺皮质球状带分泌醛固酮；高热引起动脉压下降以及高温、强烈辐射热对机体的直接刺激，均可引起醛固酮分泌增加。醛固酮分泌可能受垂体控制。人体分泌的醛固酮，在 Ta41 ℃时比常温下要高 10倍，醛固酮使肾小管对钠重吸收和水重吸收，降低汗液中钠离子的浓度，起到保钠排钾（对唾液腺和胃肠道具有同样作用）和增强抗利尿素对肾小管的作用，但不能防止丧失铜和锌。大量出汗时每天可丢失钾超过 100 mmol，尿钾排出量比常温下增加 2 倍多。缺钾引起醛固酮分泌减少，又可使钠的排出量增加。醛固酮通过 Na^+-K^+-ATP 酶，还可能通过调节细胞膜钠、钾通路，调控尿中钠、钾含量。目前还证明，高温劳动时，心房肌细胞分泌的心钠肽(ANF）可直接控制肾小管对电解质的重吸收。机体对水盐代谢的调节有一定限度。当 24 h 尿量少于 800 ml，尿盐低于 5 g 或 8 h 劳动尿盐低于 2 g，清晨第 1 次尿盐浓度低于 2 g/L，则表示补水不够、体内缺盐。程素琦等报告，高温体力活动时，单凭口渴感饮水只能饮进排汗失去水分的一半左右，所以劳动后常引起体重减轻和不同程度的脱水。当体重因失水而下降 0.5%～1%时，便刺激饮水。失水不应超过体重的 1.5%。机体失水达原体重 2%以上时，即为脱水，并有口渴感。

3.心血管系统　在热环境里劳动，循环系统处于高度紧张状态。机体为适应散热和供氧的双重需要，体温调节中枢在内、外热刺激的作用下，引起皮肤血管的交感神经活动减弱，内脏血管的交感神经活动增强，其支配心脏的神经末梢释放儿茶酚胺类物质（肾上腺素、去甲肾上腺素、多巴胺等）作用于心脏的 β-感受器，使腺苷酸环化酶活力增强，心肌细胞的 cAMP 增加。因此，皮肤血管网高度扩张，手部温度 28～35℃时，皮肤血流量为 1～4 ml/s·100 cm^3（组织），达 45℃时，血流量可增至 30～35 甚至 75 ml/s·100 cm^3（组织）。此时，内脏血管收缩，血液重新分配，循环血量仍相对不足；心脏活动增强，心肌收缩频率和强度增加，糖原分解加快，使心

需要全本请访问 www.ertongbook.com

肌生能和耗能都加强，心肌氧耗量增加，提高了心输出量，使大量血液流入体表。皮肤小动脉和小静脉之间有血管球状结构，管径可在 0～70 μm 变动，热刺激时皮肤血流量可达 4.2 L/min，甚至达 6～11 L/min，体内蓄热通过血液迅速向体外发散。高温下汗腺活动增强，并释放激肽原酶，将血浆 α_2－球蛋白中的激肽原转变为缓激肽，其舒血管作用也是皮肤血管网扩张的重要原因。当口温升高 0.9℃时，平均心输出量增加 60%，其中一半以上流经皮肤血管网。因而高温劳动时，心脏收缩的强度、频率、每搏输出量和每分输出量都增加。心输出量取决于心率和每搏输出量。热环境劳动时常因热作用使每搏输出量增加受到限制，心输出量主要靠增加心脏搏动次数来补偿。心率的增加是由于外周温热感受器和控制心脏活动的神经元间的神经反射作用，中枢温热感受器和血液温度对心脏的影响也可使心率加快，且与热强度、劳动强度直接相关，故心率是评价机体对热环境劳动心血管系统紧张程度的重要指标。机体单纯受热时，心率增加平均为 20%～40%，而高温和热辐射可增强劳动对心血管系统的影响。如夏季强行军时，心率可超过 160～170 b/min，冲锋演习可达 180～200 b/min。心率很高时，由于舒张期缩短和冠脉流量不能满足心肌活动需要，特别是出汗量超过 4L 的强劳动，则会引起血液浓缩和粘稠度增高，每搏输出量将更加降低，以致心输出量反而降低。在高温作用下，末梢血管紧张度降低，血压稍降。高温劳动的血压变化，则视体力活动的升压因素对高温的降压因素的拮抗结果而定。强体力活动超过高温作用，则收缩压升高，舒张压变化不大或稍下降，因而脉压趋向增加。高温劳动时，如心率和收缩压显著升高，是机体不适应的表现。高温劳动强度过大或时间过长，使体温过度升高、血压下降，反射性引起心率显著加快。由于静脉回流减少，中心血管和心脏充盈降低，使每搏输出量减少，以致血压不能恢复，表明血压已低至不能继续劳动的水平。动物实验表明，体温达 41℃ 时，心肌收缩力受抑制；超过 42℃，心输出量突然锐降，引起急性循环衰竭和组织缺氧。人体受高温作用后，心电图显示心肌相对缺氧、T 波倒置、S－T 段压低，偶可见 P 波增宽、P－R 间期延长、T 波和 R 波电压增高以及室性期外收缩等。我军战士在热区夏季行军 4 h 后，心电图单极心前导联的 S－T 段普遍有轻度压低现象。长期在热环境里劳动，心脏经常处于紧张状态，久之可使心脏引起生理性肥大，心电图显示窦性心动过缓或过速、窦性心律不齐等，单极心前导联的 S－T 段普遍有轻度压低，高血压患病率在 10% 左右。心血管系统的反应性变化是机体调节的重要环节。因而高温劳动时应恰当掌握劳逸节律，保护心血管系统的适应能力。杜桂仙等指出，通常心率应保持在生理安全上限 145 b/min 以下，活动停止后 1 min 和 5 min 应分别降至 125 和 100 b/min；耐受上限为 162 b/min，此时机体已处于不适应状态，应适当减轻体力活动强度；耐受极限为 174 b/min 则应暂停体力活动，并增加休息次数和时间。此外，直立姿势和肌肉活动无力时，下肢血液缺乏，静脉回流减少，限制了心输出量，易引起眩晕和昏厥；活动后静坐位休息时，血液阻留下肢，减少静脉回流，反射引起心率加快，可发生恢复期 3 min 心率超过 1 min 心率 10 b/min 以上的“反常恢复曲线”，是恢复不良的反映。

4. 消化系统　热应激时，交感肾上腺系统广泛兴奋，消化系统功能呈抑制反应。王汉章等实验证明，高温环境具有强烈抑制胃运动的作用，主要是刺激中枢交感神经抑制了胃运动；同时，血乳酸含量的明显增加，也是高温抑制胃运动的原因之一。由于血液重分配，引起消化道贫血；而大量排汗和氯化物的损失，使血液中形成胃酸所必需的氯离子储备量减少。因此，高温劳动时消化道分泌减弱，唾液、肠液，尤其是胃液分泌减少，分泌的潜伏期延长而分泌期缩短；唾液淀粉酶、胰酶、肠酶活性和胃液酸度（游离酸与总酸）降低，胃粘液蛋白减少；胃的收缩

和蠕动减弱，对固体食物排空减慢，对水排空加速；小肠运动抑制，吸收营养物质（如糖、蛋白质等）的速度减慢；同时，口渴、脱水抑制食欲中枢和大量饮水冲淡胃液等，都可引起高温劳动者的食欲减退和造成消化不良，以致胃肠道疾患的发病率增高。我们的实验表明，高温体力活动时饮 0.1%盐水达到出汗量的 70% 左右，劳动后唾液分泌量减少 11%，唾液淀粉酶活性单位升高 269% ；而饮等量淡水时则相反，唾液分泌量升高 23%，淀粉酶活性则下降 57%。

5. 呼吸功能与能量代谢　热环境里劳动应激反应，引起呼吸频率和肺通气量增高，以利于气体交换和肺蒸发散热。Ta 25～35℃时，能量代谢略降 超过 35℃时，能量代谢随 Ta 增高而增高。当肛温从 37℃增至 42℃时，肛温每升高 1℃，代谢率增加 10%～20%。汪济民等报道，在 Td 27℃ 和 Td 45℃条件比较，在安静状态时肺呼吸量增高 14.3%，轻级运动增高 10.4%，中级运动只增加 4.6% 而肛温每上升 1℃，代谢率热率约增加 10%.

6. 神经内分泌系统　神经内分泌系统调控着机体内环境及其与外环境的统一。热应激时，机体通过神经活动和激素分泌而产生调温效应，内分泌活动也可对下丘脑体温调节中枢发挥负反馈调节作用。在高温、热辐射环境里劳动时，中枢神经系统先兴奋、后抑制，或因缺氧使皮质功能发生改变，或因体温调节中枢兴奋而产生负诱导使其他中枢抑制过程加强。动物实验可见，随着体温升高，神经兴奋性突触后电位的幅度明显减弱，体温 37℃时刺激神经元的膜电位为 241.50 n V,39 ℃时降至 157.00 n V,41 ℃降为 95.70 n V 同时神经突触反射的潜伏期越加延长，兴奋性持续下降，当抑制过程占优势，条件反射的潜伏期延长，味觉敏感阈增高；在体温调节障碍发生之前，视分析器的敏感性就下降，视觉－运动反应的潜伏期随环境温度升高和热暴露时间延长而延长，且恢复也较慢。因此，可出现注意力不集中，测验错误次数增多，肌肉活动能力降低，动作的准确性和协调性差，反应迟钝和疲乏、失眠等现象，并容易引起意外伤害事故。在热区强度训练、作业，尤其在战斗应激影响下，有的人可引起心理和精神创伤。轻度为感情易激动，复杂记忆力下降，睡眠障碍；严重时头痛、沮丧，甚至丧失劳动、作战能力，应就地休息，采用说服、鼓励等心理疗法，一般可以康复。热应激时，下丘脑－垂体－肾上腺皮质系统功能增强，促肾上腺皮质素释放激素（CRH）增加，刺激脑垂体加速分泌促肾上腺皮质激素（ACTH）进入血循环，使肾上腺皮质加速合成和分泌糖皮质类固醇和盐皮质类固醇激素 同时，肾素－血管紧张素 Ⅱ－醛固酮系统被激活。热体力负荷时肛温达 39℃和心率达 175 b/min以上时，血清皮质醇(CS)和醛固酮 (ALD)分别增高 57.6%和 138.6%。有的报告高温作业者尿中 17 羟皮质酮 (17－OKC) 和 17－酮类固醇(17－KS)含量显著升高。皮质醇可增强机体对各种有害刺激的适应力和抵抗力，因而糖皮质类固醇激素分泌增加，对提高机体的热适应和热耐受起着极重要作用；醛固酮的增加主要是血管紧张素 Ⅱ和 ACTH 升高所致，同时糖皮质类固醇激素增加，可使醛固酮代谢清除率明显减少。醛固酮也是急性热应激和热习服的重要指标。垂体－甲状腺系统功能具有明显的季节性变化，高温抑制促甲状腺素（TSH）分泌，夏季血清甲状腺激素分泌降低；高温体力劳动后，血清三碘甲腺原氨酸(T_3)含量升高 50% 以上，而甲状腺素(T_4) 变化甚少，T_4/T_3 比值降低，是热体力应激导致机体内环境失稳的反映，加速了蛋白质的分解代谢，引起氧耗量和产热量的增加，它可能主要作用于细胞的产能体系，特别是线粒体形成 ATP 的氧化磷酸化过程。热劳动时垂体－性腺轴的变化与肾上腺皮质激素的变化相反，血清睾酮(T)含量和 T/CS 比值分别下降 30.9% 和 53.7%，表明这种应激强度的体力消耗大，分解代谢显著增强，而合成代谢远不能满足分解代谢，也是体力和耐力明显下降的主要内分泌指标，与血清 T_3 的变化有相似的意义。急性热暴露时交感肾上腺髓质系

统功能加强，慢性热衰竭时肾上腺髓质激素儿茶酚胺（CA）不足，故 CA 是热应激的主要指标，是促进热习服的重要机理，其抗热应激作用可能与维持心血管对 CA 的反应性有关，CA 大部分分解代谢为香草扁桃酸（VMA）经尿排出，热习服后尿中 VMA 适度增加，可能是机体得到适度调整的适应性变化。热应激可增加抗利尿素（ADH）的合成和分泌，血浆中肾上腺素、去甲肾上腺素、儿茶酚胺、5－羟色胺（5－HT）、前列腺素 E（PGE）和生长激素升高。但长期高温作用下，生长激素分泌减少，催乳激素、性激素则增加，故热带居民身材比较矮小，性成熟较一般地区为早。

7. 血液　Harrison 指出，热应激时血容量反应取决于皮肤温度和中心体温，皮肤温度升高则血容量减少，血浆中蛋白质含量也减少。在补水充分时，热暴露后迅速引起血液稀释；不补水时，则可引起进行性血液浓缩，红细胞、血红蛋白和红细胞压积容量增高，血液粘稠度增加；血浆总蛋白和白蛋白、球蛋白浓度增高，而 γ－球蛋白明显降低；白细胞主要是中性粒细胞增多，嗜酸性细胞明显下降，这是热应激使垂体－肾上腺系统功能亢进所致。热应激还可引起血钾、钠、氯和血小板减少，乳酸和丙酮酸及其比值、酮体、β－羟丁酸、甘油和游离脂肪酸含量增高，血液碱储备和 pH 值降低，从而引起代谢性酸中毒；短期热暴露，血糖和血钙增高，长期则下降。动脉血氧饱和度可减少 25%，静脉血氧饱和度则较高，显示氧的供应、利用率或递送能力低下。机体受热后如血液浓缩超过 2%～4%时，肝脏相对缺血、缺氧，肝细胞膜通透性增加，肝功能降低引起血清胆固醇酶比值降低，并抑制肝糖元合成。当肛温达 39.4～40.1℃时，血清转氨酶（SGOT、SGPT）乳酸脱氢酶（LDH）、磷酸肌酸激酶（CPK）都增高。此外，醛缩酶（ALD）和 α1－抗胰酶等在机体受热后也有不同程度的增高。机体在热应激（炎症、感染、创伤等）过程中发生的神经内分泌系统，免疫功能和代谢变化，称为急相反应 ácute phase response APR），同时急相反应蛋白（APRPs）增加。吴杨等实验证明，在热应激 3h 时，这类由肝脏细胞合成的糖蛋白，包括血清 α－抗胰蛋白（α－AT）、α－酸性糖蛋白（α－AGP）、铜蓝蛋白（CP）、触珠蛋白（HP）和纤维粘连蛋白（Fn）含量均显著增加（$P<0.01$）而转铁蛋白（Tr）变化不大，是否与热应激口温始终未＞37.8℃有关尚待继续观察。以上提示 APRPs 前 5 项作为高温作业者健康监护，作为非特异性的中暑先兆或中暑的指标是可取的。

8. 泌尿系统　热环境下肾血流量平均减少 51%，肾小球滤过率下降 21%，对尿素、菊淀粉、对氨基马尿酸盐（PAH）清除率明显下降；如在热环境里体力活动时，还可以进一步下降。尤柯等报告，沙漠夏季负重行军，血清 β_2－微球蛋白（β_2－MG）升高非常显著，血清 β_2－MG 是反映肾小球功能的敏感指标，其浓度增高证实了高温劳动时肾小球滤过率降低和肾血流量减少。肾脏是机体调节酸碱平衡的重要器官，主要通过吸收钠和排出酸性物质来调节，当 1 个劳动日出汗量达 5L 以上时，可丢失水和电解质，引起酸碱平衡失稳，并且组织缺氧，乳酸增多，碱贮备下降，酸性物质排出减少，而引起代谢性酸中毒。由于尿液浓缩，尿量减少，肾脏负荷很重，以及高热状态对氧的需要增加等，均可导致肾缺氧，有时可出现轻度肾功能不全，尿中有蛋白、管型、酮体、红细胞、白细胞乃至发生血尿。

（第一军医大学　邱仞之）

第 2 节　未习服男子干热暴露时的热调节反应

随着沙漠开发和边防需要，国外频繁的沙漠战争，对沙漠生存和活动的研究日益受到广泛关注。70 年代初期，我们在新疆戈壁研究了干热气候对劳动生理的影响和吐鲁蕃地区夏季防暑的卫生调查。本实验观察了未习服男子突然暴露于干热环境中的应激反应，为在干热环境生存和活动累积研究资料。受试者为 12 名健康男子，在南方亚热带湿热地区居住 3 年以上，平均年龄 22.2 ± 0.6 岁，身高 172.1 ± 3.8 cm ，体重 63.3 ± 4.1 kg，体表面积 1.708 ± 0.067 m^2。全部实验于 4 月进行，此时受试者尚未自然热习服。干热应激条件为人工热室干球温度(Td) 42.0 ± 0.3℃ 、Tw 23.5 ± 0.2℃ 、黑球温度(Tg) 46.5 ± 0.3℃ 、RH 17 ± 4% 、三球温度指数(WBGT) 30.0℃ 、V 0.14～0.80 m/s。受试者于饭后 1 h ,饮水 350 ml(1 瓶汽水),穿的确良单军服（未戴帽）坐位热暴露 2.5 h ,于受热 15 和 120 min 时分别踏车 5 min ,功率为 100 W。于热暴露前和受热终测定肛温 (Tr),股温 (Tt)和胸、前臂、小腿腓侧 3 点皮肤温度,心率(HR) ,出汗量(SV) ,握力(Grip) 和视反应时(visual reaction time, VRT)。 用 TH－1 型 PN 结数字显示测温计测定体温，测肛温的传感器插入肛门 7.5～8.0 cm 心率用 DS－51 型数字显示仪(日本)测定 出汗量用体重差法,人体称感量 1 g，用握力计和视反应时测定仪测定握力和视反应时；计算平均皮肤温度($\bar{T}s$= 胸 0.50 + 前臂 0.14 + 腓 0.36),平均体温($\bar{T}b$ = $\bar{T}s$ 0.2 + Tr 0.8),积热指数〔body heat storage index, BHSI(kJ/m^2) = 体重(kg) × 0.83 ／体表面积(m^2) ×平均体温增值(℃) × 4.1841 ，体表面积按许文生氏公式计算〕和生理紧张指数〔physioligical strain index, PSI ＝心率或脉率终值(b/min) /100 ＋肛温增值(℃/h) + 出汗率(kg/h)〕。

(一)干热应激的生理变化

未习服组青年男子暴露于干热环境 2.5 h，呈现明显的热应激反应，Tr、Tt、$\bar{T}s$ 和 $\bar{T}b$ 分别增高 0.67、1.57、1.61 和 0.86℃ ($P<0.01$),HR 增高 20.4b/min($P<0.01$)，Tr 与 $\bar{T}s$ 甚为接近。热终 Tr 和 $\bar{T}b$ 比 $\bar{T}s$ 分别高 4.39℃ 和 3.51℃ ,而增值分别低 0.94℃ 和 0.75℃ (表 1－2－1)。Tr 超过 38℃ 者占 50% ,最高为 38.85℃ 。HR 增值在 10 b/min 以上者占 2/3,最高 HR 为 136 b/min ,增值 48 b/min。但 SV 仅 0.733 ± 0.124 kg ,相当于 0.293 kg/h；出汗占体重比值 1.16% ,预先饮水 350 ml ,占 SV 的 47.8%。BHSI 124.1 ± 50.7 kJ/m^2 ,最高为 214 kJ/m^2 ,PSI 为 1.5 ± 0.3,最高为 2.2。

表 1－2－1　干热暴露前、后体温和心率的变化($\bar{x} \pm s$)

干热暴露	Tr(℃)	Tt(℃)	$\bar{T}s$(℃)	$\bar{T}b$ (℃)	HR(b/min)
前	37.35 ± 0.24	32.76 ± 0.70	32.02 ± 0.33	36.28 ± 0.20	73.3 ± 12.3
后	38.02 ± 0.32**	34.33 ± 0.49**	33.63 ± 0.59**	37.14 ± 0.32**	93.7 ± 16.6*

** $P<0.01$, * $P<0.05$,干热暴露前、后比

(二)干热暴露的工作效率

表 1－2－2 中干热暴露终，视反应时延长 22 ms，差异非常显著($P<0.01$)；左手握力降

低 5.3%，右手握力降低 3.0%，热前左手握力比右手低 12.2%，热后低 14.3%（$P<0.05$）。

表 1-2-2 干热暴露前、后视反应时和握力的变化（$\bar{x} \pm s$）

干热暴露	视反应时 (ms)	握力(kg)	
		左手	右手
前	176±20	32.3±5.4	36.8±7.5
后	198±23**	30.6±4.6	35.7±5.5#

** $P<0.01$，干热暴露前后比；# $P<0.05$，左右手比

吐鲁蕃戈壁和腾格里沙漠夏季平均 Ta 29～30 ℃以上，极端最高 Ta 达到 39～42℃，Tg 达到 38～55℃，而 RH 可低于 20%～30%。参照 Wells 沙漠环境热强度参数，本实验设计的干热强度除 Tg 尚可提高外，基本属于高干热气候。干热对人体的影响是高温生理学研究的重要方面，在干热环境中，Td、Tg 与生理变化相关最密切，而 Tw 及其占 70% 比重的 WBGT 相关较差。受试者在干热暴露 2.5 h 与吐鲁蕃戈壁习服男子 4 h 铲土机作业的生理变化近似；比 Rowell 在干热环境（Td 48.4℃、Tw 25.6℃、Tg 48.0℃、V 0.75 m/s）观察踏车运动 70 min 的 Tr、Ts、HR 和 SV 与我们在同等 Td 而 RH 为 60% 时坐位热暴露 2 h 的 Tr 和 HR 低得多。说明干热体力活动和湿度较高时热调节负荷增强。Pandolf 报告，在干热环境下中年人比青年人运动效率高，Tr、$\bar{T}$s 低，SV 大，中年人这种体温调节优势与其有氧代谢能力较大有关。Wells 比较了未习服、习服和习服健全（长跑运动员）3 组男子对沙漠环境的反应，在 Td 39.7℃、Tw 19.9℃、Tg 43℃干热气候下休息和运动各 40 min，结果不论休息还是运动，未习服组运动率最低，Tr、$\bar{T}$s 和 HR 最高，习服健全组则相反，而习服组介于其间。可见体力锻炼和干热习服有助于改善热调节和心血管反应。Кузнец 报告，静止热负荷限度 Tr 为 38.4～38.6℃。Афанасьева 用 $\bar{T}$b 38.5～38.8℃、HR 114～130 b/min 和相应的积热值 670～837 kJ 作为热负荷限度的指标，本实验个别受试者 Tr 达到 38.85℃，HR 达到 136 b/min；$\bar{T}$b 都接近热负荷限值范围，但相应的积热值仅 63～338 kJ，与先前防化兵热负荷限度的结果——高 $\bar{T}$b 低积热值呈相似趋势。全部受试者的 BHSI 都未达到耐受限度 272 kJ/m^2；PSI 虽都超过舒适环境的温热上限 1，由于 SV 不大，与 BHSI 同样，尚低于热习服战士耐受上限 3.0～3.6。对干热生理的研究目的，不仅是为了认识干热环境对人体影响的机理，而且是要使在干热环境中能更安全而有效地工作。因此，采用最简易的视反应时和握力来评价人的精神和体力进行工效学分析。通常环境温度对脑、体工作效率的影响不一致或不明显，它受到技术熟练程度和主观因素影响较大。本实验干热暴露 2.5 h 对视反应时和握力则呈一致的降低，只是对视反应时和左手握力影响更为严重。

（第一军医大学　朱受成　邱仞之）

第 3 节　干热气候下铲土机作业的生理评价

吐鲁蕃盆地夏季异常干热。6～8 月太阳辐射极为强烈，总辐射达 500～600 cal/cm^2·d。

月平均 Ta超过 30℃,极端最高 Ta均在 40℃以上,戈壁滩地表温度高于 75℃，沙漠下垫面接近沸点。最小 RH 低于 5%～13%，年降水量平均 19 mm，蒸发量达 2 395 mm。5～7月风力最大在 8～10 级以上。1974 年在戈壁滩烈日下观察了铁道兵构筑铁路路基的铲土机驾驶员在不同热强度下作业时的生理反应，以探讨驾驶员的热负荷状况和外环境评价指标。受检对象为 25 名男性战士，年龄21～28 岁，身体健康，平均身高 169 cm，体重 55 kg，体表面积 1.58 m^2，原籍东南诸省，进疆半年以上。作业时穿旧军服，驾驶员舱顶覆盖芦席，双侧车门敞开。每班作业连续驾驶 4 h，地面为砂砾碎石，坑洼不平。8 月 22～24 日共观察 5个作业班(2 个上午班、3 个下午班)，共 30 人次。测定生理指标包括体温、脉搏、出汗量、主观感觉。作业前，于饭后半小时静坐 3～5 min 测定；作业后，立即测脉搏，以后再测体温及其他项目。体温测舌下温，脉搏数同侧腕部，出汗量用体重差法（磅称感量 25 g)。根据以上资料计算热负荷、生理紧张指数(PSI)和积热指数(BHSI)。气象因素包括 Td、Tw、V、Tg 和热辐射。测定仪器装置于现场距地面 1 m 高处，每 60 min 观测 1 次，并换算校正有效温度、WBGT、热强度指数和干湿球指数。

（一）热强度

各班作业时的热强度见表 1－3－1。上午作业班 Ta较低，Td 自 33℃增至 39℃，Tg 自 44℃ 增至53℃ 午后作业班 Ta 高，Td 在 39～42℃之间，Tg 为 52～57℃。RH 午后比午前低。驾驶舱温接近 Td(±1℃）。

表 1－3－1 驾驶铲土机作业时的气象条件及其综合指标

班别	日期	Td (℃)	最高 Ta (℃)	Tg (℃)	辐射热 (cal/cm^2·min)	Tw (℃)	RH (%)	V (m/s)	校正有效温度	WBGT (℃)	干湿球指数 (℃)	热强度指数
1	8月22日上午	35.3	39.0	48.2	1.5	19.7	20	1.3	29.4	27.0	22.0	79.4
2	8月23日上午	36.0	39.0	48.4	1.4	23.0	31	1.3	30.5	29.4	25.0	93.3
3	8月22日下午	39.3	40.5	52.6	1.5	21.6	18	1.3	31.0	29.6	24.3	95.2
4	8月23日下午	40.3	41.0	52.7	1.4	22.5	19	1.3	31.5	30.3	25.2	98.4
5	8月24日下午	41.4	42.0	55.3	1.6	21.2	8	0.5	31.8	30.0	24.2	116.6

（二）生理反应与主观感觉

在干热气候下劳动可见到明显的热应激反应（表 1－3－2)。表现为体温升高，脉搏加快，出汗率增高，PSI超过 1.0，BHSI为 88～134 kJ/m^2。热强度越高，生理指标变化越大，并呈现一个明显的界限。例如，Td为 35～36℃、Tg 为 48～48.5℃时，1 班作业后体温平均值升高 0.13～0.17℃，半数受检者体温无改变，脉搏平均值增加 7～10 b/min，作业前、后差别无显著性意义($P>0.05$)。当 Td 温度超过 39℃、Tg超过 52.6℃时，体温、脉搏变化较大，将近一半的受检者体温增值超过 0.5℃，最多超过 0.9℃，作业结束时肛温超过38℃者占 50%，最高为 38.6℃，超过正常生理变异范围，机体有热蓄积（$P<0.01$)。脉搏增值超过 10 b/min 者占 72%，最多者超过 38b/min，差别非常显著($P<0.01$)。但脉搏终值仅 110 b/min，出汗率尚不到 0.5 L/h，PSI和 BHSI等均还在生理耐受限度以内。表 1－3－3 为每班作业时的平均进出

需要全本请访问 www.ertongbook.com

水量。饮水量、出汗量、体重下降程度同环境温度成正比。如上午作业 4 h 出汗量不超过 1.2 L,下午则在 1.6～1.9 L 以上,经统计分析 t 值为 2.264 和 3.247，差别显著和非常显著($P<0.05$ 和 <0.01)。此外,对 6 名受检者观察了次日晨间体重恢复情况，平均负 0.23 kg(1 增、2 平、3 减），说明经过夜间休息和补充后仍负水债，机体消耗未能充分恢复。作业时平均尿量不算低,但个体差异大,有的尿量不到 10 ml/h,甚至无尿。主诉主要是口渴、多汗、无力、头晕、胸闷、心慌、头痛和耳鸣等。环境 Td 超过 39℃时，不适感明显增多且加重。

表 1-3-2 驾驶铲土机作业人员的生理变化

班别	观察人数	Td (℃)	体温(℃)		脉搏(b/min)		出汗率 (g/h)	热负荷 (kJ/h)	PSI	BHSI (kJ/m^2)
			作业终值 ($\bar{x}\pm s$)	作业期增值 ($\bar{x}\pm s_E$)	作业终值 ($\bar{x}\pm s$)	作业期增值 ($\bar{x}\pm s_E$)	($\bar{x}\pm s$)			
1	6	35.3	36.6±0.51	0.13±0.061	84±22	10.0±5.27	291±166	711	1.3	88
2	6	36.0	36.5±0.39	0.17±0.090	87±14	7.3±2.94	299±236	728	1.4	92
3	7	39.3	36.9±0.57	0.50±0.064	95±12	18.6±4.35	399±111	971	1.6	134
4	4	40.3	36.9±0.82	0.35±0.100	109±9	12.8±1.25	476±28	1159	1.8	117
5	7	41.4	36.8±0.57	0.33±0.064	89±12	19.3±2.87	484±91	1180	1.6	117

表 1-3-3 驾驶铲土机作业时的平均进出水量和体重变化

班别	观察人数	饮水量 (ml)	尿量(ml)		出汗量 (g)	体重下降数 (kg)	饮水量为出汗量百分比(%)	体重下降百分比 (%)
			总量	每 h 量				
1	6	534	180	45	1 163	1.343	46	2.4
2	6	459	51	13	1 194	1.254	42	2.3
3	7	576	179	45	1 594	1.773	30	3.2
4	4	950	125	31	1 900	2.023	50	3.7
5	7	810	204	51	1 934	2.139	42	3.9
平均值		673	148	37	1 557	1.706	42	3.1

人体出汗是对抗高热的最有效办法。尤其是 Ta 超过 33℃时,机体通过辐射、对流、传导散热的能力越来越小乃至不可能，此时机体唯一的散热途径就有赖于汗液蒸发。然而汗液蒸发量的大小与环境空气中湿度的大小密切相关，湿度越大，汗液蒸发率越小。所以高湿是发生中暑的重要因素。RH45% 增至 85%,相当于 Ta 升高 10℃，机体的耐热时间缩至 1/2～2/3。吐鲁蕃戈壁气候极为干热，作业时平均 RH 小于 20%,受检者 4 h 出汗量不超过 2 L(机体缺水在 2.5 L 以内不会降低出汗率,故并非出汗率下降所致),皮肤干燥,看不到显性出汗,热蓄积不大，说明汗液蒸发散热作用很充分。本实验可见，对干热气候已初步适应的人，在 Td 35～40℃的干热环境中驾驶铲土机，每天 4 h 的作业量是可行的；为了进一步改善热应激生理功能，减轻失水引起体重过于下降，并使每天尿量保持在 800 ml 以上，作业中饮水量应增加 1

倍，要少量多次饮水，避免暴饮 当 Td 达到 42℃ ，或 Tg 56℃ ，或校正有效温度 32℃ 、WBGT 31℃、热强度指数 120 时，宜加强医学观察和预防措施，必要时停止午间作业或采取短时间轮流作业。对于尚未适应的人，宜逐步加大作业强度，避免午间劳动，充分注意水盐补充。

（第一军医大学　　邱仞之　　罗爱存）

第 4 节　夏季戈壁负荷行军的热应激反应

为查明夏季戈壁负荷行军热应激反应，为部队进行卫勤保障提供科学依据，于 1991 年夏季（ 7月 19～23 日）对驻戈壁某部进行了现场调查。实验场地为甘肃武威腾格里沙漠边缘戈壁地带，现场 Td 32.0(23.2～41.0)℃ , RH 28.7(12.0～40.0)% , V 0.5～1.0 m/s。30 名健康男战士，年龄 20.2±1.3岁，身高 168.4±5.2 cm，体重 57.3±5.3 kg。每日行军 3h，时速 5.0 km/h，负重 16 kg，自由饮水，每行军 1 h休息 10 min ，历时 4 天(d)。于每日行军前、后各测 1 次即刻脉搏(15×4) 每日行军前、后各称量体重 1 次，行军期间采用定量饮水，并记录行军期间排尿量，用体重差法计算出汗量；体温用口温表测每日行军前、后 5 min 口腔温度，换算为肛温(Tr) ；用 707－1 型半导体温度计测量 4 点平均皮肤温度，$\bar{T}s=0.3$胸 $+0.3$ 上臂 $+0.2$ 股 $+0.2$ 小腿，再计算平均体温($\bar{T}b$)，饮水量、尿量和汗、尿无机盐排出量用常规法。综合热应激指数 $=0.01$ 心率增值(b/min) + 平均体温增值(℃) $+0.1$ 出汗量(g/min) + 积热量(kcal/kg) ，积热量(S) $=0.83W、\triangle\bar{T}b/W$(kcal/kg)。血液动力学二指标用 XG－3 型血液循环自动测试仪测定。疲劳试验用安菲莫夫校字表在统一指导语下进行带抑制试验 5 min ，统计阅字数及错误率。情感指标按 WHO 核心指标标准方法收集。用生化法测定 24 h 尿香草扁桃酸(VMA)，用放射免疫分析法测定尿皮质醇(CS)。

(一)心率、出汗量和体温

表 1－4－1、1－4－2 可见，第 1 d 行军 4项指标变化幅度较大，以后呈减小趋势。相应的综合热应激指数以第 1d 最高为 1.56±0.29 ；第 2～4d 分别为 1.33±0.41、1.15±0.17 和 0.95±0.22。

表 1－4－1　4 d行军前、后心率、出汗量的变化($\bar{x}\pm s$)

行军时间	人数	心　率(b/min)			出汗量(g/min)
		行军前	行军后	差值	
第 1 d	15	79.47±8.12	124.40±10.48	44.39**	11.73±1.90
第 2 d	15	84.53±12.27	123.40±14.00	38.87**	9.26±2.86
第 3 d	15	80.80±8.84	116.53±8.00	35.73**	8.16±1.77
第 4d	15	80.80±8.84	101.33±9.03	20.53**	7.85±1.98

** $P<0.01$，行军前、后比

表 1-4-2 4 d行军前后肛温、平均体温的变化($\bar{x} \pm s$)

行军时间	人数	肛温(℃)			平均体温(℃)		
		行军前	行军后	差值	行军前	行军后	差值
第 1 d	15	36.85±0.26	37.02±0.23	0.17	36.23±0.26	35.89±0.23	-0.34**
第 2 d	15	36.56±0.25	36.68±0.19	0.12	36.59±0.19	36.34±0.31	-0.25*
第 3 d	15	37.04±0.28	37.10±0.30	0.06	35.60±0.24	35.49±0.20	-0.11
第 4 d	15	37.31±0.20	37.33±0.02	0.29	36.40±0.26	36.32±0.29	-0.08

** $P<0.01$, * $P<0.05$,行军前、后比(下同)

(二)血液动力学

行军 3 h后，脉率、每搏量、每分心输出量、心脏指数等各指标变化均有统计学意义（表 1-4-3)。随着平均 Ta的升高，脉率、每搏量、每分心输出量，心脏指数、总周围阻力、全血粘度也升高,与 Ta 呈正相关。微循环平均滞留时间、微循环半更新时间与之相关不显著。

表 1-4-3 行军前、后血液动力学的变化($n=29, \bar{x} \pm s$)

指　　标	行军前	行军后
脉率(b/min)	78.53±8.12	120.55±14.55(即刻)**
	78.53±8.12	86.36±11.28(恢复期)**
每搏量 ml/min)	75.09±15.05	82.90±12.60*
每分心输出量(L/min)	6.01±1.11	6.61±1.17*
心脏指数(L/min·m^2)	3.86±0.73	4.27±0.71*
动脉压差(kPa)	5.25±0.76	4.84±0.71*
总周围阻力(dyn·s/cm^{-3})	1 439.66±214.79	1 630.21±261.96**
有效血容量 (L)	4.14±0.49	3.86±0.57*
全血粘度 cp)	3.82±0.77	4.23±0.61*
微循环平均滞留时间 (s)	20.30±3.04	18.71±2.83*
微循环半更新时间 (s)	14.10±1.84	12.93±1.88*
左心喷血阻抗(dyn·s/cm^{-3})	6 087.18±56.25	6 249.87±50.65**

(三)水盐的丢失

4 d行军中,以第 1 d 出汗量,饮水量最多,尿量较少,与第 4 d相比,出汗量多 698.6 g、饮水量多 612.8 g;尿量变化不显著 (表 1-4-4)。第 1 d 行军 3 h 汗盐排出量比第 4 d 高 973.3 mg/L ,尿盐无显著变化(表 1-4-5)。

表 1-4-4　行军 3 h 的出汗量、尿量与饮水量($n=30, \bar{x} \pm s$)

行军时间	出汗量(g)	尿量(g)	饮水量(g)
第 1 d	2 111.3±336.79	115.8±63.00	1 096.9±374.66
第 2 d	1 468.0±302.46	123.2±71.29	655.9±259.57
第 3 d	1 667.0±505.30	151.1±90.97	777.2±443.28
第 4 d	1 412.7±350.13△△	141.3±47.45	484.1±244.56△△

△△ $P<0.01$,与第 1d 比(下同)

表 1-4-5　行军 3 h 的汗、尿无机盐排出量($n=8, \bar{x} \pm s$)

行军时间	汗盐排出量(mg/L)	尿盐排出量(mg/3 h)
第 1 d	2 952.0±439.00	1 879.4±581.28
第 2 d	2 737.6±496.09	2 668.8±1322.01
第 4 d	1 978.7±300.66△△	1 629.9±691.78

(四)疲劳试验

行军第 1d 阅字速度减慢，错误率升高最为明显($P<0.05$),以后 3 d 逐渐改善(表 1-4-6).

表 1-4-6　不同行军日安菲莫夫试验结果比较

时间	人数	阅字数($\bar{x} \pm s$)	错误率
基础值	30	1 382.23±326.28	0.94
第 1 d	15	1 259.21±281.09	1.91
第 2 d	15	1 280.13±274.06	1.84
第 3 d	15	1 352.04±317.38	1.21
第 4 d	15	1 438.68±312.91	1.06

(五)情感调查

行军 4d 后,各情感指标均较行军前降低,尤以 T、D、A、C 4 项指标差异显著 (表 1-4-7)。

表 1-4-7　行军 4 d 前、后情感指标变化($n=30, \bar{x} \pm s$)

情感指标	基础值	行军 4d 后
T(紧张)	19.88±5.01	14.28±5.81**
D(忧郁)	35.60±10.25	25.55±10.45**
A(愤怒)	29.60±7.91	20.76±7.89**
C(迷糊)	14.80±4.39	11.83±4.71*
V(精力充沛)	25.87±6.71	25.00±7.48
F(疲乏感)	17.60±5.27	15.62±6.61

** $P<0.01$, * $P<0.05$　,与基础值比(下同)

（六）24 h 尿 VMA 及 CS

表 1－4－8可见，24 h尿 VMA 以行军第 2 d升至最高，与基础值比差异显著（$P<0.05$），CS 于第 1、2 d 也较高，但以后都呈下降趋势。

表 1－4－8　不同行军日 24 h 尿 VMA 及 CS 的变化（$n=27, \bar{x}\pm s$）

行军时间	VMA(μmol/24 h)	CS(μg/24 h)
基础值	25.49±15.89	58.30±17.93
第 1 d	31.49±11.38	72.16±18.02
第 2 d	56.15±33.23*	63.38±15.89
第 3 d	41.92±15.80	60.10±15.99
第 4 d	36.81±10.25	58.50±17.47

夏季戈壁负荷行军对人是强应激刺激，初进入戈壁行军前 2 d 尤其明显。飞行员热负荷生理安全限的综合热应激指数为 3.40。则 4 d 行军综合热应激指数分别为生理安全限的 46%、39%、34%、28% ，均属轻度热应激，但以前 2 d 较强。行军 4 d 随着应激程度的降低，生理、内分泌应激反应趋于平缓下降；疲劳趋于恢复，工作能力增强；情感症状得以改善。因此，对初进入戈壁干热环境行军的人员应注意早期强烈的应激反应，要循序渐进的安排适应性锻炼，以防止强烈应激引起的病理性反应。

（兰州军区医研所　张雪玲　顾　锐　苏军华　李等松　王全清　史培才）

第 5 节　戈壁沙漠夏季负荷行军人体内分泌系统的变化

为研究部队进入戈壁沙漠后人体内分泌系统的变化规律，于 1988 年 8 月在腾格里沙漠对某部负荷行军人员进行 20 项内分泌指标检测。35 名连队指战员，年龄 20.3(18～25) 岁，身高 168.7(159～180.1)cm，体重 59.7(47.0～70.5)kg，经体检均健康。在进入沙漠前（对照日）抽取空腹静脉血、收集 24 h 尿。在对照日及对照日前受试人员参加部队正常训练。行军日经 1 h 乘汽车进入沙漠后，以 5 人为 1 小组，每间隔 10 min 分批出发负荷 15 kg行军，行军 50 min，休息 10 min，行军速度为 8 km/h，每日行军 30 km。进入沙漠第 4 d(试验日)负荷行军 30km 时，在试验现场抽取静脉血(空腹)，并收集试验日 24 h 尿，血样当即分离血清，用冰壶送到实验室置低温冰箱保存待测。尿样以浓盐酸防腐，随时送检。用放射免疫法测定血促甲状腺(TSH)，甲状腺素(T_4)，三碘甲腺原氨酸(T_3)、生长激素(GH)、胰岛素(INS)、皮质醇(CS)、醛固酮(ALD)、血浆肾素活性(PRA)、血管紧张素Ⅱ(AⅡ)、促性腺激素(FSH、LH)、泌乳素(PRL)、睾酮(T)和 β_2－微球蛋白(β_2－MG)；用生化法测定血糖(GS)及 24 h 尿香草扁桃酸(VMA)、17 酮类固醇(17－KS)、儿茶酚胺(CA)、肾上腺素(E)和去甲肾上腺素(NE)。放免药盒由中国原子能科学研究院等单位提供，用 FJ－2008 型全自动放射免疫计数器测试。对照

日与试验日为晴天。对照日 Ta 26.7℃，RH 37.7% 试验日 Ta 29.8℃，平均地面沙温 42℃。进入沙漠后试验日前 3 d 的气象情况与试验日基本相同。

（一）垂体－甲状腺轴及其他代谢性激素和血糖的变化

戈壁沙漠夏季负荷行军对人是强烈应激。表 1－5－1 可见，生长激素（GH）的分泌在试验日较对照日显著升高（$P<0.01$），生长激素作为一种应激激素分泌明显增加，可能与下丘脑在应激下大量释放生长激素释放因子有关。甲状腺是人体新陈代谢的主要调节器官，其主要生理作用是促进机体的代谢速率和氧的消耗，产生热量。在戈壁沙漠夏季负荷行军条件下，血清 T_4 及 TSH 浓度均比对照日显著上升，提示甲状腺功能的增强与垂体 TSH 分泌增加有关。T_3 变化不明显，可能与 T_4 转变成 T_3 的过程受抑制有关。血糖是提供人体应激时所需能量的物质基础，胰岛素和甲状腺激素是调节人体能量代谢的重要激素，对于成年人来说，生长激素在调节能量代谢方面也具有重要作用。在进入沙漠第 4 d 负荷行军中血糖较对照日明显降低，T_4 和 GH 较进入沙漠前显著上升，提示戈壁沙漠负荷行军劳动强度大，代谢率高，能量消耗多。生长激素分泌增多。可促使肝糖元转变为葡萄糖，以适应机体在急性应激下能量代谢的需要。

表 1－5－1 垂体－甲状腺轴、代谢性激素及血糖（$\bar{x}\pm s_E$）

项　目	对照日	试验日	P 值
TSH(μu/ml)	2.91±0.16	4.82±0.34	<0.001
T_4(μg/dl)	6.66±0.30	8.49±0.35	<0.001
T_3(ng/ml)	1.08±0.04	1.13±0.04	>0.05
INS(μu/ml)	19.78±0.95①	20.00±1.06	>0.05
GH(ng/ml)	7.41±0.60	12.55±1.34	<0.01
GS(mg/dl)	101.11±2.82	67.65±4.41	<0.001

①检测 34人，余均为 35人

（二）肾上腺皮质、髓质激素及其代谢产物的变化

皮质醇是人体的主要糖皮质激素，其分泌受下丘脑促肾上腺皮质激素释放激素（CRH）和垂体促肾上腺皮质激素（ACTH）的调节，组成下丘脑一垂体一肾上腺皮质轴，在各种应激刺激下，该轴的活性增强，以参加机体的应激反应，对机体起着重要的保护作用。在进入沙漠第 4 d 负荷行军中 CS 较对照日显著升高（$P<0.001$），提示肾上腺皮质功能明显增强。肾上腺髓质激素儿茶酚胺（CA）包括肾上腺素（E）和去甲肾上腺素（NE）。由嗜铬细胞释放的 CA 仅极小部分不经代谢而由尿排出，大部分 CA 在体内经降解代谢，最后转变为 VMA 由尿排出。Usdin 认为，任何应激刺激均可使体内 CA 分泌量增加。试验日 24 h 尿 CA、E、NE 和 VMA 均较对照日明显增加，提示肾上腺髓质功能亦明显增强（表 1－5－2）。Selye 认为，应激是交感神经一肾上腺髓质、下丘脑一垂体一肾上腺皮质广泛活动的结果。

需要全本请访问 www.ertongbook.com