



就海拔下降后的运动能力何时达到顶峰问题而言,最佳运动能力应该在高原训练后的第9天~第23天出现,但有许多观点与此不同。

就如所有的适应机制一样,目前,我们还不是非常清楚高原训练中、后的机制,也没有非常精确研究证明高原的效果如何产生。如果把血红蛋白总量和浓度的改变以及正常缓冲能力的提高考虑进去的话,以经验为主的确定比赛时间段是可以被认可的。因为,在耐力运动员中红细胞的更新比少训练或不训练的运动员更快,所以在高原训练结束4~8周后红细胞正常数目总量应该重新确立。从这里可以得出结论:从生理学角度看,最佳运动能力阶段不应该超过4周。

通过笔者的研究可见,高原训练后机体的生理顶峰可以在第10~15天之间看到。尽管在接下来的10天中,在科学理论上推断运动能力会下降,但还没有实验来证明。

#### 4 结论

4.1 一般而言,高原训练和平原训练的区别为:训练效果只存在于高原而不存在于平原;训练效果存在于高原和平原,但

高原训练的有效性或无效性表现的更加明显。

4.2 高原训练的一般作用是消除或减少最大负荷时机体氧运输的限制因素,更有效地增强15~30 min或长时间训练负荷下心血管和氧运输的能力。

4.3 高原训练的最佳效果与“自体血液回输”效果相同。

4.4 对划船运动员高原训练的研究发现,氧运输能力或最大摄氧量可提高300~400 ml/min,这将导致运动员的最大摄氧量在平平时增加高于6.0 l/min,这与划船功率提高15~25 watt(增加3~5%)相符。

4.5 由于血红蛋白浓度的特殊适应性使血容量增加约400~600 ml是有可能的。

4.6 一个更高的血液循环量意味着更快速的血液循环转换量,这样不仅可以增加肺组织的氧摄取量,同时通过延长与周围组织接触时间来提高组织的供氧量。

4.7 缺氧刺激的线粒体氧应激代谢是否可以增强低氧下运动员的适应能力需进一步的探讨。

## 高原训练个性化监控的探索

陆一帆 (北京体育大学教授)

**作者简介:**北京体育大学运动生理学博士,教授。从2002年开始担任中国国家游泳队科研保障组组长。目前主要从事高原训练的研究与应用,运动医务监督、机能评定及疲劳状态监控。

**关键词:**高原训练;个性化;监控

### Personalized Monitoring in Altitude Training

LU Yi-fan (Beijing University of Sport, Beijing, China)

#### 1 高原训练和低氧训练的研究进展

##### 1.1 高原训练概述

高原训练经历了几十年的研究与应用,在训练方法及实施形式上不断改进、更新提高。由最初的传统高原训练,到后来的仿高原训练(模拟高原训练),包括高住高训(living high-training high HiHi)、高住低训(living high-training low, HiLo)、高住高练低训(living high-exercise high-training low, HiHiLo)、低住高练(living low-exercise high, LoHi)间歇性低氧训练(intermittent hypoxic training, IHT)等多种方式。不同高原训练方式均在其优缺点,但实质上都是让运动员接受运动和缺氧的双重刺激,产生强烈的生理应激,以调动机体的潜力,为运动能力的提高奠定生物学基础。

##### 1.2 机体在器官、系统(生理生化)水平对高原训练的适应

在实践中,高原训练的安排是很复杂的,除了缺氧对人体产生的各种影响之间的平衡以外,高原训练的高度、内容、负荷、经验、高原滞留时间、营养补充、水分摄取、医务监督、辅助训练,高原训练前后的训练内容和负荷结构,会到平原后到比赛时间的间隔,以及运动项目之间的差异、高原环境的差异等各种因素也会影响到高原训练的成

效(冯连世,1999;胡扬,2001),以至于这种方法的效果一直争论不已。

运动员进行高原训练初期,机体会对高原的低氧环境产生一定的应激反应,但对于大多数运动员来说,各系统紊乱程度较轻,持续时间不长,很快会围绕着缺氧而建立起一系列复杂的代偿性生理机制(即生物适应性),使各系统达到新的平衡,即高原习服。在这个过程中,组织、细胞对氧和能量的利用效率是低氧训练时器官、系统乃至整个机体机能活动发生适应性改变的核心。高原训练对有氧代谢的提高有积极地作用,其机制可能是高原训练可改善心脏功能及提高RBC和Hb水平,有利于氧的传送;同时红细胞内2,3-二磷酸甘油酸(2,3-diphosphoglycerate, 2,3-DPG)浓度增加及骨骼肌毛细血管数量和形态的改善,有利于氧的释放和弥散,从而导致机体的最大摄氧量增加;另外,高原训练可使骨骼肌线粒体氧化酶活性升高,导致机体利用氧的能力及氧化磷酸化能力增加。

##### 1.3 机体在细胞、分子水平对高原训练的适应

细胞培养证实,低氧可以激活HIF-1, HIF-1再与EPO基因增强子序列结合而促进其转录(Semenza et al, 1992). HIF-1表达于哺乳动物所有组织,包括骨骼肌(Wiener et al, 1996)。



HIF-1 的促转录活性是诱导诸多基因表达的关键, 这些基因包括糖酵解酶、VEGF、GLUT-1 等等。这说明 HIF-1 是细胞氧感受系统的重要组成部分 (Bunn et al,1996), HIF-1 升高, 进而改善氧的运输能力 (Wenger et al,1997); VEGF 表达升高, 诱导新血管的生成 (Forsythe et al,1996); 糖酵解酶的激活使糖的氧化增加, 从而使氧的利用率增加 (Wenger et al,1997), 还可减小低氧暴露对于组织生长和体重的不利影响 (Yu et al,1999)。这些研究说明, HIF 的激活改善了氧的运输和利用, 底物的氧化和组织生长, 使机体产生适应性变化, 从而影响运动能力 (Wilmore et al, 1994)。

## 2 高原训练效果的个体差异及相关影响因素 (高原训练个性化监控的可能指标)

### 2.1 铁缺乏 (iron deficiency)

### 2.2 HIF-1(hypoxia-induced factor-1,低氧诱导因子-1)

HIF-1 转录系统是低氧反应基因表达的主要调节者, 机体组织对低氧张力产生局部和系统的适应反应, 主要是由于 HIF-1 诱导一些相关基因的表达, 最终维持机体氧平衡, 以适应低氧环境。

### 2.3 EPO (Erythropoietin,促红细胞生成素)

EPO 的生物学效应主要是促进骨髓造血祖细胞分化, 有核红细胞分裂, 巨幼红细胞成熟并释放, 加强铁的摄取, 加快血红蛋白的合成。低氧 (或高原应激) 是 EPO 分泌的主要原因。

### 2.4 aHIF(natural antisense transcripts of hypoxia-inducible factors 1 alpha,HIF-1 $\alpha$ 天然反义转录本)

1999 年, Thrash-Bingham 和 Tartof 利用差异显示技术, 逆转录 PCR, RNA 酶保护试验以及 DNA 测序法, 首次在肾透明细胞癌中发现了一种反义 RNA, 它可以与 HIF-1  $\alpha$  mRNA 3' - 非翻译区特异互补结合, 并命名为 aHIF。他们认为 aHIF 介导的基因沉默是基因表达的一种新的调控方式, aHIF 参与 HIF-1 形成与降解的反馈调节。

### 2.5 网织红细胞 (reticulocyte,Ret)

有研究指出, 未成熟网织红细胞 (IRF-M+H) 和网织红细胞成熟指数 (RMI) 为低氧训练早期敏感指标, 并与 Hb 变化存在一定关联性, 提示 IRF-M+H、RMI 联合 Hb 可作为低氧训练预测和评价的指标, 并认为 IRF-M+H 水平的不同变化导致了 Hb 的个体差异。

### 2.6 红细胞生成 (erythropoiesis)

高原训练能够提高血容量 (包括红细胞容量和血浆容量), 而有数据显示血容量与  $VO_2\max$  显著相关。不同项目的运动员进行中等高度的高原训练可以改善其有氧运动能力, 因为低氧训练可以增加血红蛋白总量。

### 2.7 新细胞溶解 (neocytolysis)

高原训练后血红蛋白总量和红细胞总量的变化存在个体差异还有一些原因是在一些运动员, 从回到平原到检测血红蛋白总量的几天里, 会出现温和的新红细胞溶解现象 (neocytolysis)。

## 2.8 动脉血氧饱和度 ( $SaO_2$ ) 和脉搏血氧饱和度 ( $SpO_2$ )

动脉血氧饱和度 ( $SaO_2$ ) 指动脉血氧含量和血容量的百分比, 反映 Hb 与氧气结合的能力, 与血氧分压密切相关。脉搏血氧饱和度 ( $SpO_2$ ), 由于它和  $SpO_2$  显著相关 (相关系数为 0.90~0.98), 有研究表明  $SpO_2$  可以真实的反应动脉血液中的血氧饱和度, 故监测  $SpO_2$  可以反映血液的氧合程度。

### 2.9 $VO_2\max$

运动员耐低氧的能力存在个体差异, 从而直接影响到高原训练的效果。高原训练回到平原后的运动能力存在显著个体差异, 这种个体差异可能由遗传因素造成的。遗传因素决定了机体对低氧的适应性, 从而导致了低氧适应中 EPO 的分泌、红细胞和血红蛋白的生成及回到平原运动能力改善存在个体差异。某些遗传因子 (如 EPO、HIF-1 等) 可以作为衡量高原训练回到平原后运动能力变化敏感性标记。

## 3 高原训练个性化监控研究存在的问题

### 3.1 受试者的严格监控

有研究表明, 损伤或感染时炎症因子 (如 IL-1) 可抑制 EPO 对于低氧暴露的升高反应, 说明损伤或者感染的存在会影响高原训练诱导的红细胞的生成作用。从性别上, 对高原训练的适应性差别很大, 这增加了组内的变异程度, 对结果的解释可能增加了难度。

### 3.2 测量信度

进行统计时, 除使用经典统计方法计算 P 值外, 同时引入医学中最重要的测量信度概念——TE (typical error), 它主要反映重测信度, 即观察值重复测量的重现程度。

### 3.3 “引导期”训练

Stray-Gundersen 等让大学生运动员进行 2 周平原系统训练后, 再进行 4 周训练  $VO_2\max$  没有相应升高 ( $64 \pm 0.8 \sim 64 \pm 0.8$  ml/kg/min), 并形象的将高原训练前的系统训练成为“引导期 (lead-in phase)”。

### 3.4 TRIMPS

训练冲量 (training impulse, TRIMP) 是指训练量与训练强度的乘积 (TRIMP is defined as training volume x training intensity and is specific to endurance training as it uses heart rates or heart rate zones)。班尼斯特 (Banister) 指出 Trimp 可以区分为 3 种: Basic、TRIMP method TRIMP training zone method 和 Session RPE method, 分别计算有氧运动总的 TRIMPS, 有氧运动不同强度区间的 TRIMPS 和力量训练总的 TRIMPS。

### 3.5 补铁及红细胞生成指标

铁是红细胞生成最重要的营养因素, 足够的铁储备是机体血液学指标对高原训练适应的必要条件。高原训练时, 铁的需求增加 (Hb、Mb 的合成所需) 而失去过多 (通过汗液、肾脏排出而胃肠的吸收减少), 铁动员加速, 即使铁储备在正常范围, 也可能存在铁动员不能满足血红蛋白合成的需要 (有数据显示, 健康运动员进行中等强度高原训练 Hb 每周增长 1%)。我们在“引导期”训练开始即给受试者补充



铁剂（一直到高原训练结束）。

### 3.6 EPO分泌的昼夜节律

EPO的生物学(chronobiology)研究还发现,EPO的分泌可能还存在月节律和年节律的变化,这方面的变化更是凤毛麟角,仍需要深入探究,因为这种变化会对数据的分析和解释会产生影响。

### 3.7 机能状态与竞技状态(运动能力)的区别和联系——对机能指标进行积分

运动能力是“点”,机能能力是“面”,运动能力是机能能力积累的结果,而且随着“训练-疲劳-恢复”过程的循环,机能能力也会随之出现“低-高-低-高”的周期性变化,每一次循环和周期性变化都是螺旋式上升和波浪式前进的过程。机能状态积累到一定程度就会出现运动能力的高峰。

### 3.8 白细胞基因表达在运动员机能监控中应用的可能性

运动应激可引起免疫系统的类炎症反应(inflammation-like reaction),包括促炎症反应和抗炎症反应。两者的平衡依赖于运动的强度和持续时间。急性力竭运动引起暂时性免疫功能下降,而中等强度运动则有抗炎症效果从而增强机体的抗感染能力。

白细胞参与了集体的免疫和炎症反应,所以密切关注白细胞的变化将有助于加强高原训练期间免疫机能监控以及深入了解机体对低氧反应和适应的规律和机制。

## 4 高原训练的训练学及生理学特征

### 4.1 我国高原训练的相关研究和分布

首先,高原训练的研究所涉及内容受体育科学、运动实践以及相邻学科发展的制约。其次,关于高原训练的研究所涉及项目来看,在发表的高原训练的文章中直接涉及运动项目的文章为221篇,占发表总篇数的45%,它涉及了23个运动项目。

### 4.2 目前高原训练尚存在的问题

(1)国内的高水平游泳教练员在高原训练方面都积累了丰富的实践经验,但在文献资料中都缺乏对高原训练负荷特征的系统研究。

(2)目前的文献多是从生理和生化角度,对高原训练的负荷进行评定,缺乏从训练学角度,对高原训练的负荷特征进行分析。

(3)所查阅的国内外高原训练学的研究,大都是运用文献资料对某一训练手段进行分析,系统的研究和追踪较少,也缺乏有关训练学数据的收集和应用。

### 4.3 我国游泳运动员高原训练的手段和常用模式

目前高水平游泳运动员赛前高原训练主要自由4种模式,包括3-3-3模式(即上高原前三周平原训练、3周高原训练和下高原后3周参加比赛,以下同)、3-4-3模式、3-3-1模式和3-3-2模式。

#### (1) 整个赛前高原训练9周的负荷特征

通过亲自跟踪国家游泳队中长距离游泳组,详细记录了赛前九周高原训练的负荷量和不同强度对应下的负荷量的变

化情况,上高原前三周的水上总负荷量为181 100 m,高原期间三周的水上总负荷量为176350米和下高原后三周的水上总负荷量为135 900 m。将整个高原训练的上高原前、高原期间、下高原后的3个不同阶段共分为9周。

#### (2) 高原训练对重点运动员比赛成绩的作用

从整个高原训练的训练表现来看,在每一周的1 500 m有氧能力测试和7×200 m递增负荷试验中,改名运动员的血乳酸-速度曲线均出现了左移,说明该运动员通过赛前高原训练,训练能力有了明显的提高,最终实现了提高比赛成绩的目的。

#### (3) 高原训练的负荷评定

##### a) 心肺功能的指标的应用及评定

①心率:到高原初期,由于高原氧分压减少,动脉氧分压、血氧饱和度降低引起交感神经兴奋,以及心每搏输出量减少等现象,HR略有升高是正常的,大约持续5天左右,随后下降低于高原初期水平,逐步趋向稳态。②最大摄氧量( $VO_2max$ )在高原训练实践中应用及评定: $VO_2max$ 是反映肌肉利用氧的能力和人体有氧运动能力的一项关键指标,它是对运动史心肺功能状况综合评定的一项参数。高原训练期间 $VO_2max$ 表现为持续下降,表明运动员的心肺功能对高原低氧环境没有很好的适应,训练负荷应严格控制。

##### b) 血常规指标

从目前研究来看,在高原训练期间Hb、RBC、HCT的变化对运动员的营养状况及技能状况的评估有着重要的意义。它能将氧气运输到组织中,同时又能将代谢产物运送到肺部排出体外,反映了机体的有氧代谢水平。

##### c) 高原训练期间生化指标的监测及评定

①尿素氮的应用及评定:尿素氮是评定运动员对训练负荷的反应及疲劳状况的敏感指标。训练负荷大,机体分解代谢旺盛,蛋白质分解增多,尿素氮值增加明显,反之增加不明显。②肌酸激酶(CK)的应用及评定:肌酸激酶96%存在于人体的骨骼肌中,是关系到短时间激烈运动时快速合成ATP、运动后ATP恢复的重要代谢酶,它与运动时和运动后能量平衡及转移有密切关系。在平原环境下,安静时人体的血乳酸浓度为1 mmol/L左右,在高原,由于低氧环境的刺激,肾上腺素敏感性增强,糖酵解代谢旺盛,安静时血乳酸浓度稍高于平常值。训练中和训练后的血乳酸浓度对评定训练负荷强度的大小,对运动员身体机能状况的影响是非常重要的。高原环境下由于低氧因素的影响使得训练控制的难度增大,各单一生理、生化指标的测试对评定运动负荷的适宜程度及运动员机能状况有一定的局限性。要做到综合评定就必须考虑到各生化指标的独立性、关联性、相互参考性、进行纵向比较。

另外,在高原训练期间进行生理机能评定,还应将运动员上高原前的生理机能指标和高原训练时的指标进行纵向比较,综合分析,才能更客观准确地评定运动员的机能状态。

#### (4) 游泳运动高原训练实践中存在及需要解决的问题

力量与速度损失的问题、陆上周期性训练的问题、柔性联系问题、游泳高原训练基地的高度问题、对游泳高原训练过程的多学科科学监控问题、我国高原训练基地科研保障问题、高原训练期间运动员的文化学习问题。



## 5 结论

5.1 游泳运动员赛前通过适宜的高原训练可有效提高专项竞技能力和运动成绩。赛前高原训练的关键在于负荷量度的把握和复合节奏的安排。

5.2 上高原前三周准备训练的主要目的是通过较大的水上负荷提高有氧耐力,为高原训练做好体能准备。负荷节奏呈现

先波浪式上升后波浪式下降的特点。

5.3 高原期间的主要训练目的是在保持运动员的有氧能力基础上,提高运动员耐受乳酸和乳酸峰值的能力。加强义务监督,科学客观的评定运动员的训练情况。

5.4 下高原后的主要训练目的是通过整合前阶段训练所获得的有效效应,为运动员参加比赛创造有利条件。

# 关于高原训练中若干问题的思考

胡扬 (北京体育大学科研中心教授)

**作者简介:** 1999年3月获得日本筑波大学博士学位。现任北京体育大学教授。主要研究方向为运动分子生物学,低氧训练生理、生化学。

**关键词:** 高原训练; 问题; 思考

## On Some Issues Relating to Altitude Training

HU Yang (Beijing University of Sport, Beijing, China)

### 1 高原训练的有效性

通过对肯尼亚(海拔2 000 m)、墨西哥(海拔2 300 m)、埃塞俄比亚(海拔2 500 m)等地进行高原训练运动员的调查,不难发现高原训练对运动能力的提高作用是不可否认的。例如,在1992年巴塞罗那奥运会上,共有20名赖在肯尼亚(12人)、墨西哥(4人)、埃塞俄比亚(4人)等国家的运动员在田径比赛中进入前8名;而在1996年亚特兰大奥运会上,又有肯尼亚(17人)、墨西哥(4人)、埃塞俄比亚(4人)等国家的运动员公25人在田径比赛中进入前8名。并且,这些国家的运动员在上述两次奥运会上共获得400 m跑、800 m跑、3 000 m障碍跑、马拉松跑等项目中的8枚奖牌;到2000年悉尼奥运会埃塞俄比亚运动员在包含1 500 m跑、5 000 m跑、10 000 m跑等比赛项目中获得8枚奖牌,肯尼亚获得7枚奖牌的好成绩,其中包括6枚金牌(埃塞俄比亚4枚,肯尼亚2枚)。在此届奥运会上,日本女运动员高桥尚子也是通过在美国科罗拉多高原训练基地(海拔2 300 m~2 600 m)进行2个月的训练获得马拉松跑冠军的。2004年雅典奥运会,中国运动员邢慧娜通过在青海多巴进行高原训练取得女子10 000 m跑金牌。由此可见,在现代体育比赛中,高原训练已经成为一种重要的方式,许多运动员都是通过高原训练在世界大赛中取得了显著的成绩。

### 2 高原训练的多样性

高原训练的实质就是利用高原缺氧(而不是低氧)环境加强运动员某些方面的胜利机能,为运动能力的提高奠定生物学基础。因此,从理论上说只要是在低氧环境下训练均可达到高原训练的效果。

实际上,利用自然或人工低氧环境进行训练,提高运动员体能的方法均可称为低氧训练。从广义上看,低氧训练应包括高原训练(high altitude training)、高住高训(living high-training high HiHi)、高住低训(living high-training low,

HiLo)、高住高练低训(living high-exercise high-training low, HiHiLo)、低住高练(living low-exercise high,LoHi)间歇性低氧训练(intermittent hypoxic training,IHT)等多种方式。由于高原训练有着雄厚的研究和应用基础,而且其他的低氧训练方法又是从高原训练发展而来的,因此可以将低氧训练的概念定义为:利用人工低氧进行训练,提高运动员体能的方法,范畴仅限于HiHi、HiLo、HiHiLo、LoHi和IHL。

#### 2.1 高住低训

HiLo由美国学者Levine与1991年提出,英文是living high-training low的缩写。直译过来就是高住低训。原意是让运动员居住在高原(高住),训练在平原或较低高度的地方低训)。让运动员“高住”的目的是通过低氧暴露提高机体运输和利用氧气的能力,“低住”的目的是为了解决运动员在高原训练中运动量和强度无法保证,骨骼肌工作能力下降等问题。由于科学技术的进步,现在已经可以用分子筛/膜制作人工常压低氧环境来替代高原环境,运动员居住的是人工低氧环境,训练在平原。目前,世界上有很多运动员用HiLo来提高比赛成绩。如美国著名中长跑运动员,世界1 500 m、3 000 m、5 000 m跑记录创造者Suzy favor Hamiltom;美国优秀男子长跑运动员For Salazar;世界纪录创造者,美国著名男子游泳运动员Ed Moses;世界著名铁人三项运动员Michellie Jones。

#### 2.2 低住高训

LoHi是让运动员在相当于2 500 m左右高度的低氧环境中运动数小时,训练、居住在常氧环境,如此连续进行数周。在LoHi实施过程中,运动员既要接受低氧环境下空气中低氧含量低引起的绝对缺氧刺激,又要接受运动负荷时引起的相对缺氧刺激,这种双重的缺氧刺激会导致机体产生强烈的缺氧应激反应,有利于运动能力的提高。而且LoHi还能避免低氧环境不利于运动后疲劳恢复的特点。