



低压低氧环境下大强度训练对代谢能力及运动能力的影响

太获田 (日本国立体育与健康研究所生理学部教授)

作者简介: 2000年获荷兰阿姆斯特丹自由大学博士学位。日本国立体育与健康研究所教授,日本体育运动训练科学学会主席。多次应邀参加国际高原训练学术研讨会并做大会报告。主要研究领域为:高强度训练下心肺功能调整、有氧及无氧能量代谢;高原训练;游泳生理学。

关键词: 低压低氧; 代谢能力; 运动能力

Effects of High-Intensity Training Under Hypobaric Hypoxic Conditions on Metabolic and Capacity and Exercise Performance

Futoshi Ogita (Department of Physiological Sciences, National Institute of Fitness and Sports, Tokyo, Japan)

1 不同环境训练对有氧及无氧能力的影响

当前,很多项目的运动员包括马拉松都进行过高原训练。一般来说,当对高原环境适应之后,血红蛋白浓度和动脉氧饱和度会升高,从而导致最大氧转运能力提高,因此,人们期望通过高原训练使运动员的最大摄氧量和有氧耐力得到提高。但由于不同个体对低压低氧环境的适应能力不同,并不是所有高原训练都会取得成功。

1.1 持续性中等强度训练和间歇性大强度训练对有氧能力和无氧能力的影响

训练的主要目的是通过对无氧代谢和有氧代谢两大能量产生系统的改造,进而提高能量产生效率,从而提高运动能力。当前,人们普遍认为针对目标能量系统的训练刺激越大,相应代谢能力的提高就会越大。因此,训练计划设计最重要的一点就是如何通过训练使每个能量产生系统得到最大的刺激或者说承受最大的训练负荷。我们比较了持续性的中等强度训练(continuous training, CT)和间歇性的大强度训练(intermittent training, IT)这两种训练方式的训练效果,结果发现最大摄氧量均得到显著性提高,但CT组最大累积性氧亏(maximal accumulated O₂ deficit, MAOD)无显著性增加,而IT组则显著增加。这一结果提示,CT仅能提高有氧能力,但IT既能提高有氧能力又能提高无氧能力。

1.2 不同程度低压低氧环境下大强度游泳训练对无氧能力的影响

2~3 min的超大强度游泳训练,有氧和无氧供能受低压低氧程度的影响,大气压力越小,运动强度相应减小。在力竭性游泳训练中,随着大气压的增加有氧供能速率降低;在整个运动过程中尽管低压低氧导致运动强度降低且氧需求量降低,但对AOD和无氧供能速率无影响。

1.3 常压常氧(N)和低压低氧(H)环境下大高强度训练对代谢能力的影响

训练后,N组和H组VO₂max均显著增加,VO₂max增加率两组间无显著性差异。N组和H组MAOD均显著增加,但H组的MAOD增加率明显高于N组。结果提示低氧环境下的大强度训练不仅能提高最大摄氧量同时对于提高无氧能力有重要作用。

1.4 常压常氧(N)和低压低氧(H)环境下急速骑行训练对短时运动能力的影响

4周急速自行车骑行训练后,N组和H组的MAOD、

30 s全力往返跑总功均显著性增加;但最大输出功率仅在H组有显著性增加。这一结果提示低压低氧环境下训练对于改善短时急速骑行的能力有积极作用。

目前,尽管很多的研究均表明高原训练或低氧训练对于提高最大摄氧量和耐力有重要作用,但我们的研究结果提示高原训练或者低氧训练也可以作为提高无氧代谢能力和无氧运动能力的有效手段。

2 研究背景

在20世纪90年代,高原训练指的仅是“高住高训”一种训练方式。人们认为高原训练的效果主要体现在对高原环境适应和低氧环境下训练两方面。例如,随着高原下的持续的低氧暴露及对高原环境的适应,动脉O₂饱和度增加及红细胞增加导致动脉O₂浓度增加;低氧直接或间接通过中间代谢产物如NO、腺苷等造成血管舒张;血管内皮生长因子是调节血管生成的重要因子,而低氧是诱导血管内皮生长因子分泌的一个潜在因素。人们普遍认为VO₂max是评价有氧能力的一个有效指标,中等强度至高强度训练均可使VO₂max得到提高。那些对高原的生理学适应可以使氧转运能力提高,进而最大摄氧量提高。因此,高原训练实际就是高原环境结合运动训练,它主要用来提高VO₂max,提高有氧运动能力。

然而,也有许多研究报道尽管高原训练后血红蛋白浓度增加、动脉氧浓度增加,但VO₂max并未提高。原因可能是:(1)高海拔高原训练后线粒体氧化酶活性降低;(2)随着红细胞压积升高,心输出量降低;(3)低氧环境限制了训练强度,等等。所以说,高原训练能否提高最大摄氧量仍然是有争议的。

为了解决这些存在争议的问题,人们创造性地提出了“高住低练”、“低住高练”、“间歇性低氧训练”等模拟高原训练手段。这篇文章主要是对高原或低氧训练的热点问题进行了总结和讨论:(1)高原训练对提高代谢能力的作用;(2)低氧环境下大强度训练对能量代谢系统的影响;(3)低氧训练对代谢能力及无氧运动能力的影响。

3 高原训练对代谢能力及运动能力的影响

代谢能力是指通过有氧或无氧代谢过程高效率或大量的产生能量的过程,它是决定运动能力的一个重要因素。科学训练就是要通过合理制定训练计划从而有效提高代谢能力。

排除遗传、性别、年龄这些因素,训练强度、训练量、训练频率是影响训练效果的最主要因素。因此,有人认为训练强度越大、训练量越大,训练频率越高,代谢能

力的提高就越大。但实际上，这一说法前面的研究结果并不支持，原因是 VO_2max 的提高仅与训练强度呈正相关，而与训练量和训练频率无关（见图1）。我们认为要想代谢能力得到最大程度上的改善，合理设置训练强度并使目标能量代谢系统得到最大刺激是关键所在。

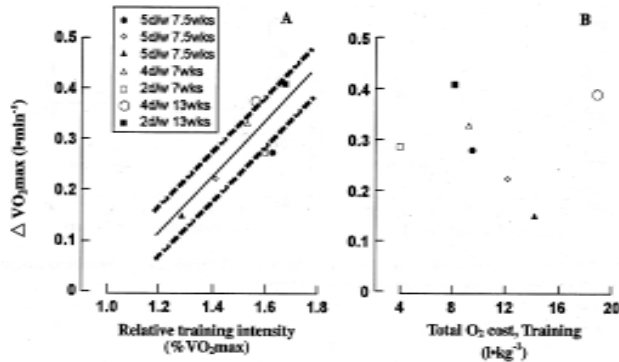


图1 A: 间歇训练与相对训练强度下最大摄氧量平均增加值之间的关系情况；实线部分通过最小二乘法计算获得；虚线±一个计算标准误。B: 训练的全部氧耗与最大摄氧量之间的关系情况

3.1 持续性中等强度训练和间歇性大强度训练对 VO_2max 和 MAOD 的影响

间歇性训练和持续性训练是较为受欢迎的两种训练方式。Tabata 对这两种不同的训练方式的训练效果进行了比较研究。中等强度的持续性 (CT) 训练安排：每节课 70% VO_2max 强度运动 60 min；大强度间歇性训练 (IT) 安排：170% VO_2max 强度运动 20 s，一共 7~8 组，每组间隔 10 s。两种训练方式一周训练 5 天，持续 6 周。训练后，CT 组 VO_2max 从 53 ml/kg·min 提高到 58 ml/kg·min，IT 组从 48 ml/kg·min 提高到 55 ml/kg·min（见图2）。CT 组 MAOD 无显著性增加，但 IT 组显著性增加，增加率为 28%。这些结果表明，CT 仅能提高有氧能力，但 IT 既能提高 VO_2max 又能提高 MAOD，即既能提高有氧能力又能提高无氧能力。我们认为这可能是由于强度不够大，导致中等强度的持续性训练不能提高无氧能力，而 IT 训练方式能够给机体最大程度的刺激，因而既提高了有氧能力又提高了

无氧能力。

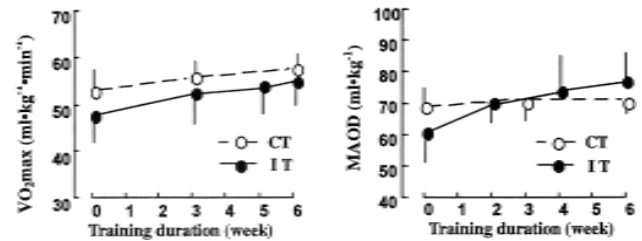


图2 中等强度下的持续性训练和高强度下的间歇性训练分别对最大摄氧量和最大累积氧亏的影响情况

3.2 不同程度低压低氧环境下大强度游泳训练对能量代谢的影响

VO_2max 会随着氧分压的降低而降低，另外一些研究表明低氧会导致运动时 O_2 吸收变慢。而在常氧和低氧环境下次极量运动时 VO_2 基本一样，这意味着低氧环境下运动 AOD 要高于常氧环境；且在低氧环境下次极量运动与在常氧下次极量运动比较，血液和骨骼肌乳酸浓度均显著升高而骨骼肌磷酸肌酸水平则显著降低。

另外，我们试图解释在不同低氧环境下进行 2~3 min 超大强度力竭性游泳训练有氧和无氧能量代谢特点。

VO_2max 随着大气压降低而显著降低。在平原期间平均 VO_2max 为 4.28 ± 0.53 L/min，模拟 800 m 海拔 (96% 大气压) 时 VO_2max 为 4.11 ± 0.49 L/min，模拟 1 600 m 海拔 (88% 大气压) VO_2max 为 76 ± 0.44 L/min，模拟 2 400 m 海拔 (85% 大气压) VO_2max 为 3.63 ± 0.44 L/min。

随着大气压降低，在超大强度游泳时水流速率会显著降低。但从水流速率估算得来的氧需求量与 VO_2max 下降程度比较无显著性差异（表 1）。这提示尽管低氧环境下由于 VO_2max 下降导致绝对训练强度降低，但游泳时相对强度并未降低。

不同海拔环境下，运动开始阶段 VO_2 快速增加并在 2 min 内到达一个平台（见图 3）。但是，每 30 s 的平均 VO_2 、 VO_2 峰值以及 AOU (accumulated O_2 uptake) 随着海拔升高而降低（见表 1）。并且不同海拔时， VO_2 峰值的下降程度与 VO_2max 的下降程度基本一致。因此，我们认为在整个超大

表 1 不同海拔情况下持续 2~3 min 的超大消耗运动时的运动时间、水流量、累积需氧量、累计摄氧量、累计氧亏情况表

指标	单位	平原	海拔 800m	海拔 1600m	海拔 2400m
运动时间	Min	2.26 ± 0.15	2.23 ± 0.13	2.27 ± 0.14	2.34 ± 0.24
水流量	$m \cdot s^{-1}$	1.25 ± 0.03	$1.23 \pm 0.02^{1)}$	$1.21 \pm 0.02^{1) 2)}$	$1.19 \pm 0.02^{1) 2) 3)}$
相对训练强度	% VO_2max	110 ± 7	111 ± 7	117 ± 11	115 ± 12
累积需氧量	l	10.67 ± 1.62	10.28 ± 1.97	10.02 ± 1.82	9.73 ± 1.98
累积摄氧量	l	7.30 ± 1.09	7.04 ± 1.11	6.88 ± 1.33	6.56 ± 1.15
累积氧亏	l	3.36 ± 0.74	3.24 ± 0.92	3.14 ± 0.55	3.17 ± 0.99
累积摄氧量比例 / 累积需氧量比例	%	68.5 ± 4.7	68.5 ± 4.2	68.6 ± 2.3	67.4 ± 5.7
累积氧亏比例 / 累积需氧量比例	%	31.5 ± 4.7	31.5 ± 4.2	31.4 ± 2.3	32.6 ± 5.7

1) 说明与正常条件下相比具有显著性差异 ($P < 0.05$)

2) 说明与海拔 800m 的情况相比具有显著性差异 ($P < 0.05$)

3) 说明与海拔 1600m 的情况相比具有显著性差异 ($P < 0.05$)

强度训练过程中 VO₂ 受低压低氧程度的直接影响。

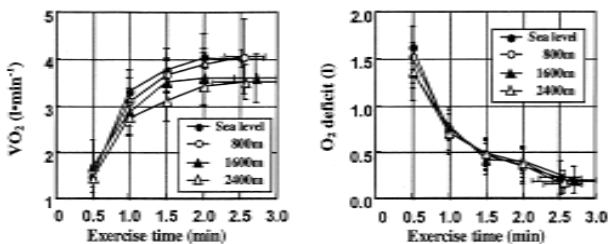


图3 正常调价下与缺氧状况下(海拔800 m、1600 m和2400 m)进行超大负荷游泳时, 间隔30 s 测量摄氧量与氧差的时间曲线

恰恰相反, 在不同海拔环境下 MAOD 无显著性差异, 每30 s 平均氧亏的变化趋势也基本一致(见图3)。Medb 也报道了类似的结果。这一现象提示超大强度下游泳训练时无氧代谢的能量释放速率与相对生理应激程度关系密切, 而与氧分压无关。目前, 相关机制还不清楚。

Weyand 报道60 s 急速跑能力不受低氧程度的影响, 尽管低氧环境下有氧输出功显著低于常氧环境。提示: 低氧环境下急速跑无氧代谢速率代偿性加快弥补了有氧供能的下降。

总的来说, 这些结果提示: 与常氧环境比较, 低氧环境下稍低强度的运动也能使无氧能量系统得到最大程度的刺激。而且在相同的绝对强度下, 低氧环境会使无氧能量系统动员更快。

3.3 不同训练方式(有氧训练和无氧训练)对 VO₂max 和 MAOD 的影响

我们在前面提到, 人们期望通过高原适应去提高 VO₂max 和有氧运动能力, 但这个目标并不一定能实现。原因有很多, 其中最主要的原因是低氧环境导致的对有氧代谢过程低强度的刺激。

值得注意的是, 尽管低氧环境下绝对运动强度降低导致氧需求量减少, 但不同低氧环境下 AOD 无显著变化。而且, 在与常氧环境相同的绝对强度下, 低氧环境中的运动会使无氧供能速率加快。根据“训练对某一能量代谢过程刺激越深, 相应代谢能力提高越大”这一理论, 低氧环境下训练会使无氧供能系统得到更大的刺激, 进而使无氧能力得到更有效的提高。实际上, 已有几项研究报道高原训练可显著提高无氧能力或大强度运动能力, 并认为无氧能力提高可能与肌肉对乳酸的缓冲能力提高有关。

为检验上述理论的正确性, 我们挑选了12名训练水平较高的男子游泳运动员, 根据训练水平分为两组, 随即指定一组为对照组(C)在平原训练, 另一组为低氧训练组(H)在模拟海拔1600 m和2400 m的低氧环境下训练。两组运动员都执行同一个训练计划包括三种类型的大强度间歇训练和耐力训练。1) 15次2 min OBLA, 休息15 s; 2) 2 min 50% VO₂max、3 min 100% VO₂max, 共5组, 中间不间断; 3) 20 s 170% VO₂max, 中间10 s 间歇, 至少8组。训练1)和2)在模拟1600 m的低压低氧环境下进行, 训练3)在模拟2400 m的低压低氧环境下进行。训练计划共3周, 每周训练5天, 每天2节课。训练前后均测试 VO₂max、

MAOD 以及100 m和200 m自由泳能力。3周训练结束, C组 VO₂max 从56 ml/kg·min 提高到62 ml/kg·min, H组从56 ml/kg·min 提高到63 ml/kg·min, 差异显著(见图4)。但两组 VO₂max 增加率均为12%, 无显著性差异。这一结果提示低氧训练并不能更大程度的提高 VO₂max, 同时也对高原训练有助于提高 VO₂max 这一理论提出了质疑。

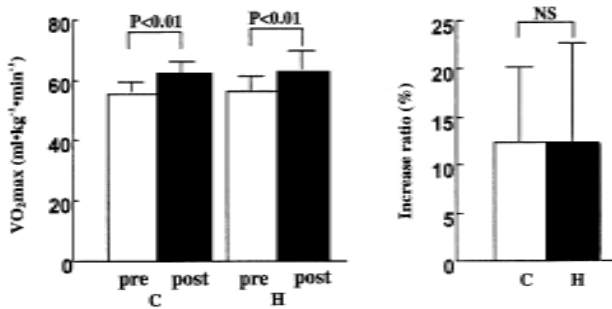


图4 对照组(C)与低氧组(H)训练前后最大摄氧量及两组最大摄氧量增加比例的对比情况

另外, C组平均MAOD从61 ml/kg·min 增加到70 ml/kg·min, H组从56 ml/kg·min 增加到72 ml/kg·min, 均有显著提高(见图5)。但H组MAOD增加率为29%, C组为14%, H组显著高于C组。因此, 我们认为: 低压低氧环境下足够大强度的训练对于提高无氧代谢能力更为有效。

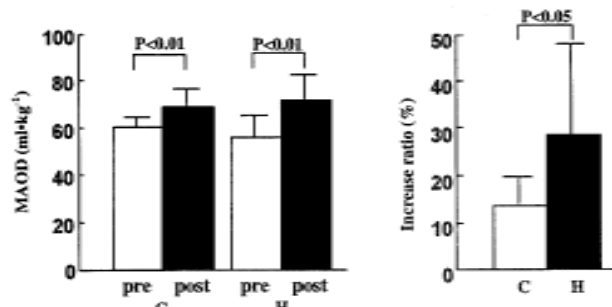


图5 对照组(C)与低氧组(H)训练前后最大累积氧亏及两组最大累积氧亏增加比例的对比情况

训练结束后, 两组运动员100 m和200 m游泳成绩均得到显著提高, 其中12个人中的10个达到个人最好成绩; 两组间的成绩提高程度无显著性差异(见表2)。但考虑到H组低氧训练前的成绩本来就很好, 为了达到C组同样的提高幅度, 其能量需求就相应更大, 这也可能导致了H组MAOD的显著升高。

以上研究结果提示: 常氧和低压低氧环境下大强度训练均能提高代谢能力和大强度下的运动能力, 但低氧环境下的大强度训练更有利于 MAOD 的提高, 而对 VO₂max 的帮助有限。

3.4 常压常氧(N)和低压低氧(H)环境下急速骑行对短时运动能力的影响

最近, 我们研究了低氧环境下自行车测功仪急速骑行对于代谢能力和大强度运动能力的影响。14名健康男性被随



表2 100m 和200m 游泳项目训练前后成绩对比情况

	对照组		低氧组	
	训练前	训练后	训练前	训练后
100m	56.92 ± 1.81	56.09 ± 1.71	55.86 ± 1.44	55.09 ± 1.71
200m	123.68 ± 2.62	121.26 ± 3.03	121.27 ± 2.27	119.27 ± 2.37

机分为两组，每组7人，一组在常压常氧环境中训练（C组），一组在低压低氧环境中训练（H组），模拟低压低氧对应的海拔高度为4000m。两组自行车测功仪急速骑行训练的计划一样：骑行强度约为平原上300%VO₂max强度，包括5s急速骑行、10s休息。一共5组，每节课2大组，每周训练4天，一共4周。

训练后，两组VO₂max没有显著提高，但MAOD和30s力竭性总功率均显著增加。这一结果提示无论是在低压低氧环境下还是在常压常氧环境下，这种急速骑行训练对于改善无氧能力和短时运动能力均有显著作用。Linossier报道类似的训

练手段能显著改善大强度下的运动能力如30s Wingate Test。而且在我们的研究中仅有H组最大输出功率有显著提高。这一新的训练方式—低压低氧下大强度急速骑行训练，也许为提高短时急速运动能力开辟了一条新的路径。

4 结论

虽然高原训练长久以来被用来提高VO₂max和耐力，但它也可以作为提高无氧代谢能力和无氧运动能力的一个新的有效手段。

去氢表雄脂酮在高原适应中的角色践的评定

郭家骅（台北市立体育学院教授）

作者简介：美国奥斯汀德州大学哲学博士，台北体育学院教授兼运动科学研究所所长。专长领域：运动对于预防II型糖尿病影响的机制研究；运动肥胖研究；运动与低糖对于糖类代谢的影响研究。

关键词：高原训练；适应；去氢表雄脂酮

Role of DHEA-S in Altitude Adaptation

KUO Chia-Hua(Taipei Physical Education College, Taipei)

1 前言

DHEA和硫酸盐衍生物DHEA-S是人类最丰富的类固醇。从Baltimore的纵向研究认为老化、死亡与低血清DHEA-S和高胰岛素水平相关(Roth et al., 2002)。尽管没有很好描绘DHEA-S的生理角色和生物活动，但是已有文献证明DHEA-S有对压力的缓冲能力(Cruess et al., 1999; Regelson et al., 1988; Grillon et al., 2005)，并且发现减小压力下的情况例如创伤和疾病(Gudemez et al., 2002; Straub et al., 2002)。此外，各种条件下外生的DHEA的支配导致的组织损伤提高了功能性恢复(Herbert et al., 1998; Malik et al., 2003)，暗示压力后组织修复的潜在活动。在这个研究中，研究了内生的DHEA-S对短期和长期高原生理运动的适应能力。确定了高、低DHEA-S组受试者的正常的登山效应，包括糖耐力的提高(Lee et al., 2003)，增加的HCT和红细胞生成(Berglund, 1992)和心肺功能的提高(Stray-Gundersen et al., 2001; Rodriguez et al., 1999)。

2 素材和方法

2.1 受试者

12名有登山经历的男性，参与了25天的登山运动，据他们在平原的血清DHEA-S水平分成较低水平（年龄：32.3 ±

2.2岁，DHEA-S: 1480 ± 248 ng/ml)和较高水平两组年龄：29.2 ± 1.9岁，DHEA-S: 3588 ± 590 ng/ml)。给受试者解释实验目的和方法，然后他们签了正式的同意意见。这个工作与Helsinki宣告的原则是一致的。台北体育学院人类学研究会(TPEC)同意了此研究的伦理道德性。

2.2 登山方案

25天的登山运动包括每天穿越台湾中央山脉(2000~3500m)的徒步旅行。最初徒步旅行的背包重量控制在0.3~0.33kg/kg体重。在白天的8h我们每5min用Polar心率表(Lake Success, NY, USA)记录徒步旅行强度。个人每天以最大心率的60%徒步将近8个小时。最大心率是在最大摄氧量测试中心率不能增加时记录的。计算团队跟随所有的受试者来确定在整个高原活动期间食物和水是充足供应的。下面提到的血测试在平原和高原的第三和第二十五天测试。最大摄氧量在平原时和高原后的第一天测试。

2.3 口服葡萄糖耐量实验(OGTT)和胰岛素浓度

测试程序是根据Lee等人描述的方法。在OGTT的那天，受试者在禁食一晚上后的早上6点告诉实验员。75g葡萄糖和500ml的纯净水一起饮用。在0、30、50和80min采集指血。用葡萄糖分析仪(Lifescan, California, USA)来分析葡萄糖浓度。采集指血200ul来做胰岛素确定。用