

高原习服青年的体能刻画分型及其与血常规、血液生化指标的关联研究

付磊^{1,2,3}, 关家伟^{2,3}, 白骏北⁴, 毛忠⁵, 王艳², 何昆仑^{2,3}, 石金龙^{2,3}

¹解放军医学院, 北京 100853; ²解放军总医院医学创新研究部, 北京 100853; ³医疗大数据应用技术国家工程研究中心, 北京 100853; ⁴北京市体育科学研究所, 北京 100075; ⁵陆军第957医院高原呼吸心肾内科, 西藏阿里 859000

摘要:背景 高原低压、缺氧环境是天然的体能训练场, 习服训练前后体能可发生显著变化。目前尚无针对高原习服的个体体能量化标准, 针对性指导开展科学训练存在较大局限性。目的 基于测试数据对高原习服青年个体体能进行精准分型, 探究不同体能维度与血常规、生化指标的关联, 为优化高原体能训练指导策略提供科学参考。方法 选取世居平原的健康男性青年, 从低海拔(1 300 m)进驻高原(3 000 ~ 3 500 m)训练。在低海拔及高原习服6个月后, 检测10项体能指标(握力、3 000 m跑、立定跳远等)及23项血液指标。通过相关性分析($|r| > 0.45$, $P < 0.001$)聚类, 将高原体能划分为7个维度: 上肢力量、下肢爆发力、心肺耐力、力量耐力、灵敏综合、柔韧性和协调性。基于百分位数评分法(前5%为10分, 后5%为0分)对个体进行体能刻画分型, 并比较各维度优秀组(前10%)与普通组(后10%)的血液指标差异。结果 共纳入198例健康男性青年, 平均年龄(20.18 ± 1.53)岁。高原习服后体能变化: 下肢爆发力(立定跳远提高5%)、上肢力量(握力提高3%)及协调性(六边形跳时间减少7.5%)显著提升($P < 0.001$), 而心肺耐力(3 000 m跑时间提高5.4%)、力量耐力(俯卧撑降低8.3%)和灵敏综合(T型跑时间提高16.4%)显著下降($P < 0.001$)。体能分型分布: 上肢力量型23例(9%)、下肢爆发力型26例(10.2%)、心肺耐力型39例(15.3%)、力量耐力型39例(15.3%)、灵敏型37例(14.5%)、柔韧型47例(18.4%)和协调综合型44例(17.3%)。血液指标差异: 上肢力量优秀组的肌酐(creatinine, CRE)、乳酸脱氢酶(lactic dehydrogenase, LDH)、 α -羟丁酸脱氢酶(α -hydroxybutyric dehydrogenase, α -HBDH)显著高于普通组($q < 0.05$); 下肢爆发力优秀组中肌酸激酶(creatine kinase, CK)、 α -HBDH、LDH和中性粒细胞数目显著增高且显著高于普通组($q < 0.05$); 心肺耐力优秀组平均红细胞血红蛋白浓度(mean corpuscular-hemoglobin concentration, MCHC)显著高于普通组($q < 0.05$); 灵敏综合优秀组 α -HBDH显著升高($q < 0.05$); 力量耐力优秀组CK、 α -HBDH和LDH显著升高($q < 0.05$), 嗜酸性粒细胞百分比、嗜酸性粒细胞数目显著减少($q < 0.05$); 协调综合型优秀组中肌酸激酶同工酶(creatine kinase isoenzymes, CK-MB)和CRE显著高于普通组($q < 0.05$)。柔韧性型血生化和血常规均无显著差异。结论 本研究提出了数据驱动的体能刻画评估方法, 将高原体能细化分解为7个维度, 建立了包含血液指标差异的个体化分型模型, 可为高原体能训练科学指导和作业任务强度分配提供合理化建议, 拓展了高原体能量化评估研究领域。

关键词:高原; 体能; 刻画; 分型; 血液指标

中图分类号: R82; R595; R195

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)09-0861-08

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.23120703

引用本文: 付磊, 关家伟, 白骏北, 等. 高原习服青年的体能刻画分型及其与血常规、血液生化指标的关联研究 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (9): 861-868.

Physical fitness of plateau-acclimatized youth and its association with blood routine and biochemical indicators

FU Lei^{1,2,3}, GUAN Jiawei^{2,3}, BAI Junbei⁴, MAO Zhong⁵, WANG Yan², HE Kunlun^{2,3}, SHI Jinlong^{2,3}

¹Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; ²Medical Innovation Research Department of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ³National Engineering Research Center for Medical Big Data Application Technology, Beijing 100091, China; ⁴Beijing Municipal Institute of Sports Science, Beijing 100075, China; ⁵High Altitude Respiratory Cardiac and Renal Medicine Department of PLA 957 Hospital, Ali 859000, the Tibet Autonomous Region, China

Corresponding author: SHI Jinlong. Email: jinlong301@foxmail.com

Abstract: Background The low-pressure, hypoxic environment of high-altitude areas serves as a natural physical training ground, where significant changes in physical fitness occur before and after acclimatization training. Currently, there is no standardized quantitative criterion for individual physical fitness during high-altitude acclimatization, which presents considerable limitations in providing targeted guidance for scientific training. **Objective** To conduct precise classification of individual physical

收稿日期: 2024-12-07

第一作者: 付磊, 在读硕士. Email: 376119350@qq.com

通信作者: 石金龙, 博士, 高级工程师. Email: jinlong301@foxmail.com

fitness in acclimatized youth at high altitudes based on test data, explore the correlations between different physical fitness dimensions and routine blood as well as biochemical indicators, and provide a scientific reference for optimizing guidance strategies for high - altitude physical training. **Methods** A cohort of healthy male youth residing in low-altitude areas (1 300 m) was recruited. Participants underwent training at high altitude (3 000 - 3 500 m). Ten physical fitness tests (e.g., grip strength, 3 000-m run, standing long jump) and 23 blood indicators (hematology and biochemistry) were assessed pre-departure and after 6 months of acclimatization. Seven dimensions were identified via correlation analysis ($|r| > 0.45$, $P < 0.001$) and physiological rationale: upper-body strength, lower-body power, cardiorespiratory endurance, strength endurance, agility, flexibility, and coordination. Individual scores per dimension were calculated using percentile-based grading (top 5%=10 points; bottom 5%=0 points). Participants were classified into types based on their dominant dimension. Superior (top 10%) and inferior (bottom 10%) groups within each dimension were compared for blood indicators. Statistical significance was set at $q < 0.05$ after Bonferroni correction. **Results** A total of 198 healthy young males were selected, with an average age of (20.18±1.53) years. Participants were classified into seven fitness types: upper-body strength (n=23), lower-body power (n=26), cardiorespiratory endurance (n=39), strength endurance (n=39), agility (n=37), flexibility (n=47), and coordination (n=44). Significant changes in physical fitness were observed after high-altitude acclimatization: improvements in lower-body power (+5% in standing long jump, $P < 0.001$), upper-body strength (+3% in grip strength, $P < 0.001$), and coordination (-7.5% in hexagon jump time, $P < 0.001$) contrasted with declines in cardiorespiratory endurance (+5.4% in 3 000 m run time, $P < 0.001$), strength endurance (-8.3% in push-up count, $P < 0.001$), and agility (+16.4% in T-test time, $P < 0.001$). Comparative analysis of blood biomarkers between superior (>90%) and inferior (<10%) groups within each dimension revealed dimension-specific differences, upper-body strength showed significant elevations in creatinine (CRE), lactate dehydrogenase (LDH), and α -hydroxybutyrate dehydrogenase (α -HBDH) ($q < 0.05$); lower-body power demonstrated increased creatine kinase (CK), α -HBDH, LDH, and neutrophil count ($q < 0.05$); cardiorespiratory endurance exhibited higher mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC) ($q < 0.05$); agility displayed elevated α -HBDH ($q < 0.05$); strength endurance presented increased CK and α -HBDH with concurrent reductions in eosinophil percentage and count ($q < 0.05$); coordination showed higher CK isoenzyme (CK-MB) and CRE ($q < 0.05$); while flexibility exhibited no significant differences. **Conclusion** This study proposes a data-driven method for characterizing and evaluating physical fitness, which refines plateau physical fitness into 7 dimensions and establishes an individualized typing model incorporating differences in blood indicators. It can provide rational suggestions for scientific guidance of plateau physical fitness training and intensity allocation of operational tasks, and expand new fields in the research on quantitative evaluation of plateau physical fitness.

Keywords: plateau; physical fitness; characterization; classification; blood index

Cited as: Fu L, Guan JW, Bai JB, et al. Physical fitness of plateau-acclimatized youth and its association with blood routine and biochemical indicators[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(9): 861-868.

体能是以人体能量代谢活动为基础, 通过神经肌肉系统表现出来的运动能力, 是运动员完成高水平竞技以及军人完成作战任务的基础。高原具有低压、缺氧、高紫外线等特点, 严重影响青年机体的生理功能和有氧能力, 进而影响体能成绩和军事作业效能^[1-2]。有针对性地开展抗缺氧、抗严寒及增强耐力的体能训练, 可有效促进个体体能素质与战术能力的恢复。同时高原是天然的训练场, 为运动员的呼吸和血液系统水平以及肌肉抗损伤能力提升提供条件, 强化了运动员的体能, 在游泳、中长跑等项目中取得显著效果^[3-4]。

目前对高原体能的研究主要集中在不同海拔地区对体能的影响、运用不同指标评价运动能力^[5]、适应性训练、促进高原习服与提高作业能力^[6]、高原环境提升运动员体能训练^[4]以及高原体能训练易发伤病及预防等方面^[7], 针对有氧、无氧以及肌肉力量和耐力等进行分型评估, 探索不同维度的精细评价^[8]目前也有报道, 但尚未形成系统化、精细化的评估技术方法。

本文提出一种基于数据驱动的精刻画评估

模式, 即: 基于运动训练成绩建立精细化的分类分型, 实现对个体体能的细粒度评估, 用于指导进一步的科学训练和针对性的强化提高, 为高原体能训练科学指导和作业任务强度分配提供合理化建议; 同时比较同一体能分型优秀和普通两组青年血生化和血常规指标差异, 为开展高原条件下机体变化研究奠定理论基础。

1 对象和方法

1.1 研究对象

本研究以世居平原男性青年为研究对象, 纳入标准: (1)18~25岁; (2)身体健康; (3)世居平原。排除标准: 向上三代内有藏族、塔吉克族等高原适应族群血统。本研究经解放军总医院医学伦理委员会批准(批号: 伦审第S2020-515-01号)。

1.2 体能测试及血常规、血生化检测

所有研究对象从低海拔地区(海拔1 300 m)赴高原(海拔为3 000~3 500 m)训练, 出发前一周内及进入高原训练6个月习服后进行抽血和体能测试, 检查血常规、血生化指标。体能测试项目基

于实际条件、《军事体育训练大纲》以及《国民体质测定标准》等选择,主要包括3 000 m跑(有氧能力)、俯卧撑(力量耐力)、T型跑(协调与灵敏综合)、握力(最大力量)、胸前跪抛球(上肢爆发力)、立定跳远(下肢水平方向爆发力)、垂直纵跳(下肢垂直方向爆发力)、30 m冲刺(速度)、坐位体前屈(柔韧性)以及六边形跳(协调性)共10项指标。晨起空腹采血后正常进餐,餐后2 h采取相同顺序进行体能测试,其中有氧耐力测试(3 000 m跑)在第二天单独进行,相关测试均由运动及临床专业人员完成。本研究通过统一食谱和定时供餐控制饮食变量。

血常规、生化等检查为空腹采集静脉血,抗凝管存储全血标本,采用迈瑞BC7500、希森美康XN2000全自动血液分析仪完成血常规检测;促凝管全血标本凝血后分离血清,经迈瑞BS2000和罗氏cobas 6000全自动生化分析仪进行血生化检测。

1.3 高原青年体能维度及分型方法

体能维度分型依据:(1)通过计算10项体能测试指标的皮尔逊相关系数,筛选出相关性系数 $|r| > 0.4$ 且 $P < 0.001$ 的指标组合。(2)高原习服后变化一致性,纳入维度内的指标需在高原习服后呈现同步变化趋势(如同为显著提升或下降),表明其对低氧环境的适应性响应一致。(3)运动生理学与训练常识支持,维度划分需符合运动生理机制(如心肺耐力依赖有氧代谢系统)及军事体能训练共识(如爆发力、耐力分属独立维度)。按照上述标准将10项指标聚合成若干维度。

个体体能评分标准:针对高原环境下每一个体的10项体能测试指标,按照百分位数分段法进行分数制定,即前5%排名为10分,后5%排名为0分,中间90%人群分数按照各体能单项成绩相同组间差进行分段式评分,以每个维度内体能测试评分的平均值作为该维度的体能水平。依据单项测试成绩制定高原体能测试评分表,若某一维度的计算得分大于7分,则将该个体划入该维度对应的体能分型。若个体的多个维度计算得分均大于7分,则该个体具备多种体能分型的能力特征,可同时归入多种体能分型。

1.4 生理指标差异分析

为进一步解析高原体能与血液学指标的相关性,探索可能的生理机制,研究依据各体能维度成绩的百分位数将受试者划分为(>90%)、良好组(10%~90%)和普通组(<10%),重点比较同一体能维度中优秀组与普通组的血生化及血常规指标差

异。所有单项指标均通过01标准化消除量纲差异,算法定义为:

$$x' = (x - \min(X)) / (\max(X) - \min(X))$$

对时间计量型指标(3 000 m跑、30 m冲刺、T型跑)赋予负系数,因时间缩短代表成绩提升;对于含多指标的复合维度(如上肢力量、下肢爆发力),采用加权综合得分公式计算:

$$\text{上肢力量} = \text{握力} + \text{胸前跪抛球}$$

$$\text{下肢爆发力} = \text{立定跳远} + \text{垂直纵跳} - 30 \text{ m冲刺}$$

1.5 统计分析

所有数据分析在R软件(v4.4.0)中完成,关键程序包包括effsize(v0.8.1,效应量计算)、stats(v4.4.0,假设检验)及rstatix(v0.7.2,多重比较校正)。高、低海拔体能比较采用配对样本检验,计量资料符合正态分布进行 t 检验,数据以均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示;非正态分布进行Mann-Whitney U 检验,数据以中位数及四分位间距 $[M(IQR)]$ 表示。利用cor函数计算体能测试指标间Spearman相关性; $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。针对各体能维度下优秀组(>90%)与普通组(<10%)的生理指标差异,组间比较依据数据分布特性选择检验方法:若两样本均符合正态分布且方差齐性(通过 F 检验验证),采用独立样本 t 检验;否则采用Mann-Whitney U 检验。同一体能维度内所有生理指标的原始 P 值进行Bonferroni校正,校正后显著性阈值设为 $q < 0.05$ 。效应量计算遵循学科规范: t 检验结果报告Cohen's d , Mann-Whitney U 检验结果报告Cliff's Delta。

2 结果

2.1 研究对象基本特征

本研究选取198例男性青年,均为汉族,平均年龄(20.18 ± 1.53)岁,平均身高(173.99 ± 5.80) cm。

2.2 高、低海拔体能测试成绩差异

对高、低海拔同一队列的青年体能测试成绩进行比较,结果见表1。与低海拔相比,进入高原6个月后立定跳远、垂直纵跳距离增高($P < 0.001$),握力、胸前跪抛球距离更大,3 000 m跑、T型跑时间增长($P < 0.001$),六边形跳所需时间减少,俯卧撑个数降低($P < 0.001$),差异具有统计学意义。30 m冲刺、坐位体前屈无显著变化($P > 0.05$)。

2.3 高原体能测试成绩的相关性分析

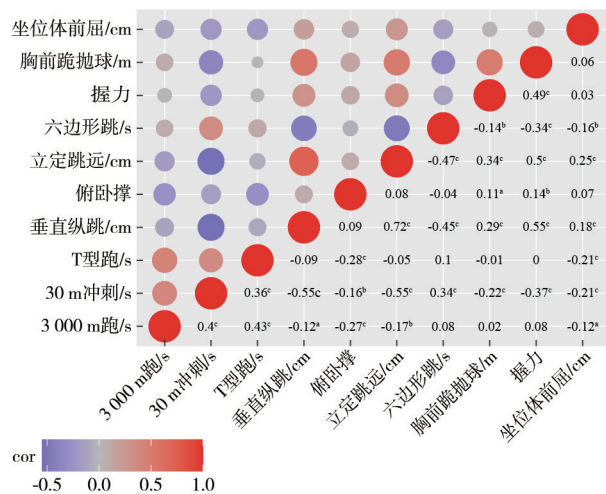
图1所示的相关性分析结果,各项体能成绩之间存在如下显著关联:立定跳远、垂直纵跳、六

表1 高、低海拔环境下同一青年体能测试成绩的比较

Tab. 1 Comparison of physical fitness test results of the same young adults in high- and low-altitude environments

指标	低海拔	高海拔	Z/t值	P值
3 000 m跑/[s, <i>M(IQR)</i>]	795.00(760.00 ~ 820.00)	838.00(809.75 ~ 860.00)	-9.19	7.65e-19
握力/[kg, <i>M(IQR)</i>]	44.65(40.20 ~ 49.50)	45.75(42.42 ~ 50.70)	-4.773	4.28e-06
俯卧撑[个, <i>M(IQR)</i>]	60.00(49.00 ~ 80.75)	55.00(46.25 ~ 69.50)	4.053	1.16e-06
T型跑/[s, <i>M(IQR)</i>]	10.61(10.06 ~ 11.11)	12.35(11.84 ~ 13.04)	-11.75	7.36e-32
胸前跪抛球/[m, <i>M(IQR)</i>]	3.90(3.60 ~ 4.20)	4.30(4.06 ~ 4.60)	-10.97	1.13e-26
立定跳远/[cm, $\bar{x} \pm s$]	208.47±20.89	225.31±19.52	-18.4	4.63e-44
30 m冲刺/[s, <i>M(IQR)</i>]	4.64(4.47 ~ 4.78)	4.67(4.48 ~ 4.87)	-1.543	1.23e-01
六边形跳/[s, <i>M(IQR)</i>]	16.97(15.54 ~ 18.49)	15.70(14.72 ~ 16.92)	7.896	6.02e-16
垂直纵跳/[cm, <i>M(IQR)</i>]	38.45(34.82 ~ 42.60)	42.85(38.90 ~ 47.15)	-8.257	1.50e-16
坐位体前屈/[cm, <i>M(IQR)</i>]	9.50(2.92 ~ 14.30)	8.55(3.08 ~ 14.53)	1.074	1.07e-01

边形跳与30 m冲刺三者呈现高度协同性($|r|=0.47 \sim 0.69$, $P < 0.001$), 其共同依赖下肢磷酸原供能系统与快肌纤维的快速动员能力, 在低氧环境中形成无氧代谢适应性协同; 握力与胸前跪抛球显著正相关($r=0.47$, $P < 0.001$), 体现静力性握持稳定性为动力性投掷爆发力提供生物力学基础的功能整合; 3 000 m跑与T型跑呈中度负相关($r=-0.47$, $P < 0.001$), 揭示心肺耐力与灵敏素质在高原环境下的生理性拮抗; 而坐位体前屈无显著相关指标(最高 $|r|=0.23$), 证实柔韧性作为独立生理维度的特异性, 该结果符合运动链理论对关节活动度与其他素质解耦的预期^[9]。



^a $P < 0.05$, ^b $P < 0.01$, ^c $P < 0.001$ 。

图1 体能测试指标间Spearman相关性

Fig. 1 Spearman correlation analysis between physical fitness test indicators

2.4 高原青年体能分型及刻画

高原青年体能划分为共得到7个维度, 对应7类体能分型, 包括上肢力量型(握力、胸前跪抛球)、下肢爆发力型(立定跳远、垂直纵跳、30 m冲

刺)、心肺耐力型(3 000 m跑)、力量耐力型(俯卧撑)、灵敏综合型(T型跑)、柔韧型(坐位体前屈)和协调型(六边形跳)。其中, 六边形跳反映了下肢力量、协调性等体能情况^[10], 这里将其单独列为一个维度和体能分型。

各项体能评分标准如表2所示, 根据体能维度评分大于7分的青年划分为相应的类型标准。对198例青年进行分型后, 分型结果为上肢力量型23例(9%)、下肢爆发力型26例(10.2%)、心肺耐力型39例(15.3%)、力量耐力型39例(15.3%)、灵敏型37例(14.5%)、柔韧型47例(18.4%)和协调综合型44例(17.3%)。对于单个青年, 从体能的7个维度对其全面刻画(图2), 实现了个体化的体能分型。

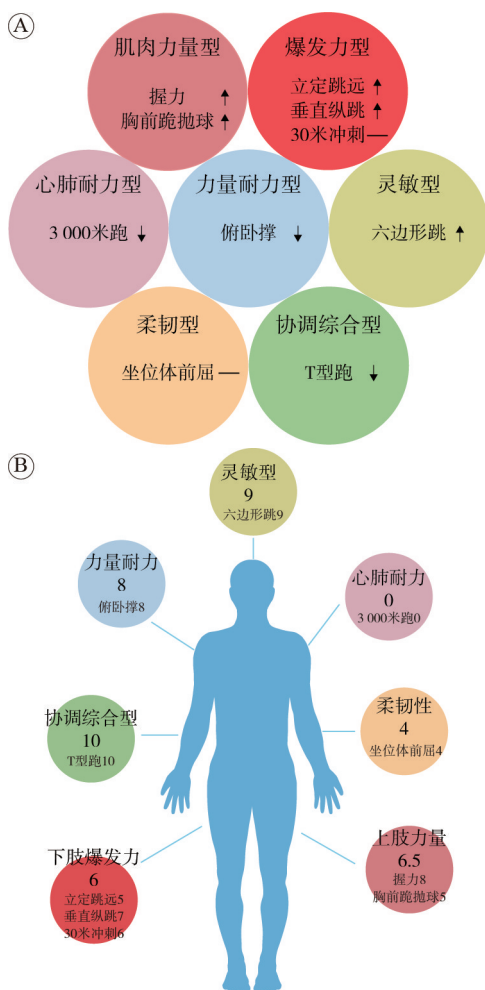
2.5 各体能维度优秀组、普通组血生化和血常规差异分析

上肢力量优秀组的肌酐(creatinine, CRE)、乳酸脱氢酶(lactic dehydrogenase, LDH)、 α -羟丁酸脱氢酶(alpha-hydroxybutyric dehydrogenase, α -HBDH)高于普通组(图3A); 下肢爆发力优秀组中肌酸激酶(creatine kinase, CK)、 α -HBDH和LDH显著高于普通组($q < 0.05$); 灵敏综合优秀组 α -HBDH显著升高($q < 0.05$, 图3E); 力量耐力优秀组CK、 α -HBDH和LDH显著升高($q < 0.05$, 图3F); 协调综合优秀组中肌酸激酶同工酶(CK-MB)和CRE显著高于普通组($q < 0.05$, 图3D); 以上各组差异均有统计学意义。各体能维度优秀组、普通组血常规差异分析结果见图4。与普通组相比, 优秀组下肢爆发力组中性粒细胞数目显著增高($q < 0.05$, 图3B); 心肺耐力优秀组平均红细胞血红蛋白浓度(mean corpuscular-hemoglobin concentration, MCHC)显著高于普通组($q < 0.05$, 图3C); 与普通组相比, 力量耐力优秀组中嗜酸性粒细胞百分比、嗜酸性粒

表 2 3 000 ~ 3 500 m 高原体能测试评分表

Tab. 2 Scale of 3 000 - 3 500 m plateau physical fitness test score

分 数	心肺耐力	上肢力量		力量耐力	下肢爆发力			协调性	灵敏综合	柔韧性
	3 000 m 跑	握力(kg)	胸前跪 抛球(m)	俯卧撑 (个)	垂直纵跳 (cm)	立定跳 远(cm)	30 m 冲刺	六边形跳	T 型跑	坐位体前 屈(cm)
10	≤12'48"	≥59.3	≥5.15	≥86	≥54.2	≥262	≤4"20	≤13"02	≤11"07	≥20.6
9	12'49"-13'4"	56.8-59.2	4.98-5.14	79-85	51.9-54.1	255-261	4"21-4"30	13"03-13"70	11"08-11"41	17.7-20.5
8	13'5"-13'21"	54.3-56.7	4.81-4.97	73-78	49.6-51.8	248-254	4"31-4.40	13"71-14"38	11"42-11"76	14.8-17.6
7	13'22"-13'38"	51.8-54.2	4.64-4.80	67-72	47.3-49.5	240-247	4"41-4"51	14"39-15"07	11"77-12"11	11.8-14.7
6	13'39"-13'55"	49.3-51.7	4.47-4.63	61-66	45-47.2	232-239	4"52-4"62	15"08-15"76	12"12-12"46	8.8-11.7
5	13'56"-14'12"	46.8-49.2	4.31-4.46	55-60	42.6-44.9	224-231	4"63-4"73	15"77-16"45	12"47-12"81	5.8-8.7
4	14'13"-14'29"	44.3-46.7	4.15-4.30	49-54	40.3-42.5	216-223	4"74-4"84	16"46-17"14	12"82-13"16	2.8-5.7
3	14'30"-14'46"	41.9-44.2	3.99-4.14	43-48	38-40.2	208-215	4"85-4"95	17"15-17"82	13"17-13"51	-0.1-2.7
2	14'47"-15'03"	39.4-41.8	3.82-3.98	27-42	35.7-37.9	200-207	4"96-5"05	17"83-18"50	13"52-13"86	-3--0.2
1	15'04"-15'20"	37-39.3	3.65-3.81	31-36	33.4-35.6	193-199	5"06-5"15	18"51-19"18	13"87-14"20	-5.9--3.1
0	>15'20"	<37	<3.65	<31	<33.4	<193	>5"15	>19"18	>14"20	<-5.9



A 展示 7 个体能维度下和低海拔相比高海拔下体能的差异; B 对单个个体进行体能刻画。数字表示青年各体能维度评分; 箭头向上表示和低海拔相比, 高海拔体能显著提高; 箭头向下表示体能显著降低; 横线表示体能无显著变化。

图 2 高原环境下青年体能刻画

Fig. 2 Physical fitness description of the youth in plateau environment

细胞数目显著减少($q < 0.05$, 图 3F); 上述差异均有统计学意义。柔韧性型优秀组和普通组血生化及血常规差异均无统计学意义($q > 0.05$)。

3 讨论

平原个体进入低压、缺氧的高原环境后, 其生理功能, 特别是心肺功能以及对氧的摄取、运输和利用能力, 会发生显著的适应性改变, 进而深刻影响其体能表现^[11-12]。这种改变是机体应对环境压力、维持内稳态的核心机制。长期暴露在高海拔地区会诱导红细胞生成, 作为代偿性适应以提升携氧能力^[13]。本研究基于对高、低海拔环境下同一青年群体体能测试成绩的系统比较及指标间相关性分析, 成功地将高原青年的体能特征细化为 7 个独立维度(上肢力量、下肢爆发力、心肺耐力、力量耐力、灵敏综合、柔韧性、协调性)。这些维度所呈现的差异化变化模式(如部分力量指标与协调性提升, 心肺耐力与力量耐力下降)反映了高原环境适应过程中的核心生理挑战与可能的适应性优势。

3.1 高原体能分型模型对高原应用具有重要价值

本研究提出的基于 7 个体能维度的精细刻画分型方法, 成功应用于 198 例高原习服青年, 描绘出该群体在高海拔低压缺氧环境下的体能特征图谱。通过对全体受试者进行个体化体能维度评分, 我们获得了各体能分型在人群中的具体分布, 这一群体分型数据揭示了体能优势的多样性, 高原青年群体在 7 个体能维度上均存在表现突出者。尽管

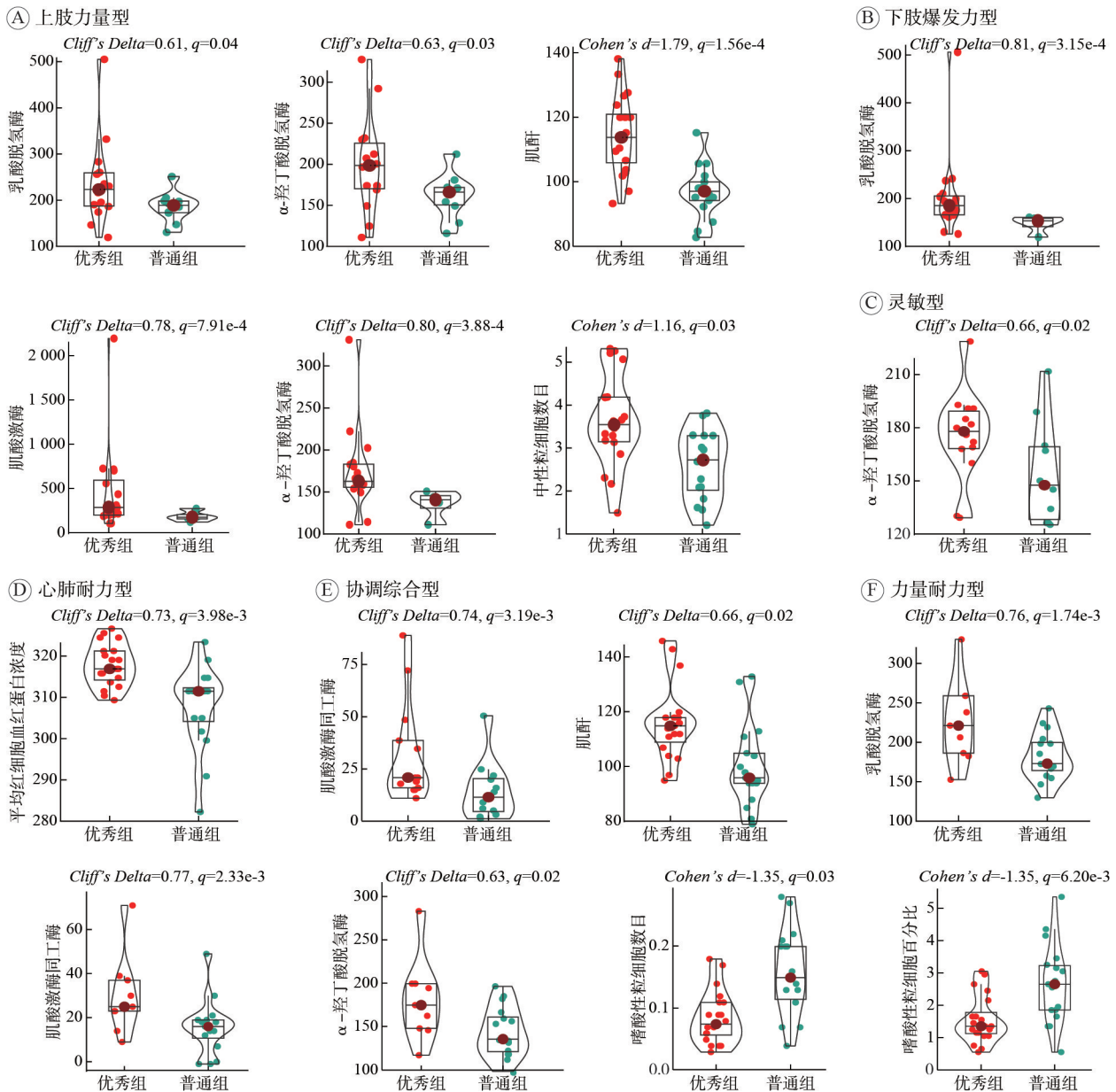


图3 各体能维度优秀、普通组血生化和血常规比较

Fig. 3 Comparison of blood biochemistry between excellent and normal groups with different physical fitness dimensions

心肺耐力整体下降, 但仍有约19.7%(39例)的个体表现优秀; 力量耐力虽显著下降, 但其优秀组比例亦达19.7%(39例)。这提示即使在面临普遍挑战的维度, 个体间仍存在显著差异和适应性潜力。同时, 协调综合型和下肢爆发力型相对较高的优秀比例, 与高原习服后其提升的趋势相符。

这种基于群体分型数据的精细刻画, 为高原条件下体能相关岗位的科学适配提供了重要量化依据。根据个体所属的主要体能分型(如灵敏型、下肢爆发力型、心肺耐力型), 将其优先分配至最能发挥其高原环境下相对体能优势的岗位。体能分型结果清晰指出了个体青年在高海拔环境下的

相对强项与短板, 为制定个性化的高原体能维持与强化方案提供了明确方向。例如, 对于心肺耐力维度得分较低的青年, 训练计划应着重提升其高原环境下的有氧代谢效率和抗疲劳能力; 对于协调性维度得分高但上肢力量维度得分低的青年, 可在保持其协调优势的同时, 针对性加强上肢力量训练以弥补短板。

3.2 高原环境下体能维度表现出了差异化的变化和表现模式

高原习服6个月后, 青年群体上肢力量、下肢爆发力及协调性显著提升, 这一现象源于高原低空气阻力环境与机体深度生理适应的协同作用。

低空气密度(尤其在海拔2 000 m以上区域)显著降低了投掷(如胸前跪抛球)与跳跃类项目(立定跳远、垂直纵跳)需克服的空气阻力,为爆发力表现提供了物理优势^[14-15]。同时,低压缺氧环境触发机体多系统代偿反应:肺通气量增加、基础代谢率上升(伴随体重下降趋势)及心血管调节增强,初期可能引发肌肉流失,但长期习服后通过神经肌肉激活效率提升与代谢适应性调整,结合规范化的营养保障与训练管理,成功维持并强化了肌肉力量指标(握力、立定跳远等)。协调综合型(六边形跳)的显著提升是一个重要的发现。该测试要求快速的方向转换、精准的步法控制和良好的神经肌肉协调性。成绩的提升表明,高原习服过程可能有助于改善或维持神经对肌肉的精确控制能力和肢体动作的协调效率。这种提升可能与高原环境对神经系统的特定刺激、或前述下肢力量的增强(为协调动作提供了更稳固的动力基础)有关。这一结果明确提示,在适宜的条件下,高原环境本身并不必然损害,甚至可能有助于提升青年人群的神经肌肉协调能力。

高原低氧环境下心肺耐力与力量耐力的下降是机体氧代谢失衡的直接体现。心肺耐力(3 000 m跑)的显著降低源于最大摄氧量的刚性限制^[16]。高原氧气分压降低导致肺泡气体交换效率下降,即使机体通过MCHC以提升单位携氧效率,仍无法克服氧气摄取与运输的系统性瓶颈。力量耐力的衰减则暴露了无氧代谢链的应激性代偿与失衡。低氧环境抑制有氧恢复能力,迫使机体强化糖酵解供能,表现为:能量底物消耗加速,无氧酶活性亢进,LDH、 α -HBDH等标志物升高,提示糖酵解途径过度激活;肌肉组织应激加剧,表现为CK-MB升高,暗示肌肉微损伤风险^[17-18],而MCHC与嗜酸性粒细胞降低则指向缺氧引发的代谢-免疫调控的改变。综上,高原环境通过限制有氧代谢上限直接削弱心肺耐力,加剧力量耐力的代谢压力与疲劳积累。提升高原耐力表现需优先夯实有氧基础,优化氧利用效率以支撑无氧代谢需求。

3.3 体能分型与血常规生化指标的关联一定程度上深化了对高原体能分型机制的理解

结合血常规与生化指标的差异分析,本研究揭示了不同体能优势群体在高原低氧环境下的生理适应特征。这种关联性分析深化了对分型机制的理解并为高原体能训练提供了一定的启示。

血液指标差异反映体能分型特异性代谢特征。

上肢力量优秀组CRE、LDH及 α -HBDH显著升高,提示其依赖磷酸肌酸-糖酵解代谢的高效供能模式。肌酐作为磷酸肌酸代谢产物,其高水平反映肌肉高强度收缩的能量需求,而LDH(催化丙酮酸-乳酸转化)与 α -HBDH(支链氨基酸代谢关键酶)的同步升高(上肢力量、下肢爆发力及力量耐力优秀组普遍存在),佐证了无氧代谢的优先激活。下肢爆发力优秀组的CK升高,进一步凸显爆发性动作对磷酸原系统(ATP-CP)的强依赖性^[19-21]。心肺耐力优秀组的MCHC显著增高,表明红细胞携氧能力精细化调控是耐力素质的生理基础^[22],与单纯红细胞数量增加不同,MCHC提升通过优化血红蛋白携氧效率,在低氧环境下实现更高氧运输效能^[23]。下肢爆发力优秀组中性粒细胞计数的升高,则可能与爆发性运动诱导的微损伤修复有关^[24],中性粒细胞作为炎症初期应答者,参与清除受损组织并启动再生。

从关联性分析中得到对高原训练实践的启示。各体能维度优秀组普遍升高的 α -HBDH和LDH,可作为高原低氧代谢的特征性标志物。 α -HBDH催化 α -酮丁酸转化为 α -羟丁酸,其活性增强提示机体通过加速支链氨基酸分解代偿能量短缺。这为高原训练中按体能维度定制营养干预(如支链氨基酸补充)提供了靶点。心肺耐力优秀组的MCHC升高,提示在高原训练中可适当补充铁代谢与血红蛋白合成相关营养(如监测血清铁蛋白、维生素B12)。上肢力量与下肢爆发力优秀组CRE、CK等肌肉损伤标志物升高,提示需在训练周期中关注生理性代谢增强与病理性负担的区分,避免肾脏负荷过重和心肌损伤^[25-26]。力量耐力优秀组嗜酸性粒细胞减少与爆发力组中性粒细胞增多的现象,则提示在训练中需要注意抑制过度炎症(如进行冷疗、训练前后的热身和训练)并避免过度的耐力训练后可能导致的免疫稳态的紊乱。

3.4 研究局限和未来方向

本研究在高原体能刻画评估分型和血液指标关联上具有创新性,但也存在以下局限:(1)样本量较小且单一化:研究仅纳入198例世居平原男性青年,样本规模不足以全面代表高原习服人群的多样性。未来研究应纳入更大样本(如500例以上),覆盖多民族、性别和年龄段群体(如女性或高原世居青年),以验证分型模型的普适性。(2)研究时间点和变量控制不足:研究仅在两个时间点(低海拔出发前和习服6个月后)进行数据收集,未能捕捉

高原适应过程中的动态变化(如习服初期或长期变化)。研究虽通过统一食谱控制饮食,统一体能训练项目时间控制训练因素影响,但未考虑个体代谢差异、睡眠或心理因素等混杂变量。未来应设计纵向研究,跟踪多个时间点(如习服1个月、3个月、6个月和12个月),以量化高原适应的动态轨迹。同时,应整合更多变量(如睡眠质量、心理应激等)进行多因素分析。(3)血常规和血生化分析对体能分型机制的解析能力有限,未来需结合多组学技术(如代谢组学、蛋白组学)进一步探索分型特异的分子网络,并通过干预实验验证关键指标(如MCHC、CK-MB)对体能表现的预测价值。

作者贡献 石金龙:指导开展数据分析及论文修改;何昆仑:提出研究选题并设计研究方案;付磊、关家伟:负责数据分析和论文写作;白骏北:负责体能测试和相关知识解释;毛忠、王艳:协助样本采集。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

数据共享声明 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取。

参考文献

- Bilo G, Caravita S, Torlasco C, et al. Blood pressure at high altitude: physiology and clinical implications [J]. *Kardiol Pol*, 2019, 77 (6): 596-603.
- 冯恩志, 杨生岳. 我国高原军事体力作业能力评价及劳动强度分级的研究进展 [J]. *西北国防医学杂志*, 2013, 34 (2): 155-158.
- 彭剑华, 唐玉成, 俞金刚, 等. 高水平中长距离游泳运动员赛前高原体能训练实证研究 [J]. *中国体育科技*, 2022, 58 (8): 15-21.
- 胡扬, 包大鹏. 从优秀耐力运动员的适应性变化探讨“高住低训”的最佳模式 [J]. *体育科学*, 2006, 26 (11): 96.
- 李鹏, 谢慎威, 向彬, 等. 应用不同指标评价常驻高原军人有氧运动能力的适宜性比较 [J]. *第三军医大学学报*, 2020, 42 (6): 588-593.
- 李贺宾. 适应性体能训练对平原驻防武警部队适应高原执勤任务的重要性研究 [J]. *体育科技文献通报*, 2017, 25 (6): 94-97.
- 李林锋, 文建, 王宁, 等. 高原某部队军事训练伤的调查分析与运动康复建议 [J]. *陆军军医大学学报*, 2023, 45 (7): 720-724.
- Ulrich S, Schneider SR, Bloch KE. Effect of hypoxia and hyperoxia on exercise performance in healthy individuals and in patients with pulmonary hypertension: a systematic review [J]. *J Appl Physiol*, 2017, 123 (6): 1657-1670.
- Wilke J, Schleip R, Yucesoy CA, et al. Not merely a protective packing organ? A review of *Fascia* and its force transmission capacity [J]. *J Appl Physiol*, 2018, 124 (1): 234-244.
- Paoule K, Madole K, Garhammer J, et al. Reliability and validity of the T-test as a measure of agility, leg power, and leg speed in college-aged men and women [J]. *J Strength Cond Res*, 2000, 14 (4): 443.
- Gaur P, Prasad S, Kumar B, et al. High-altitude hypoxia induced reactive oxygen species generation, signaling, and mitigation approaches [J]. *Int J Biometeorol*, 2021, 65 (4): 601-615.
- Dunham-Snary KJ, Wu DC, Sykes EA, et al. Hypoxic pulmonary vasoconstriction [J]. *Chest*, 2017, 151 (1): 181-192.
- Richalet JP, Hermand E, Lhuissier FJ. Cardiovascular physiology and pathophysiology at high altitude [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2024, 21 (2): 75-88.
- Almeida F, Padial P, Bonitch-Góngora J, et al. Effects of power-oriented resistance training during an altitude camp on strength and technical performance of elite judokas [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 606191.
- 于长文. 高原训练对青年女排运动员体能测试水平的影响 [J]. *辽宁体育科技*, 2008, 30 (2): 42-43.
- 李国政. 高原训练前后优秀赛艇运动员微循环指标与身体机能指标变化规律的研究 [D]. 西安: 西安体育学院, 2017.
- Zakalskiy A, Stasyuk N, Gonchar M. Creatinine deiminase: characterization, using in enzymatic creatinine assay, and production of the enzyme [J]. *Curr Protein Pept Sci*, 2019, 20 (5): 465-470.
- Yang Q, Zhang M, Sun P, et al. Cre/CysC ratio may predict muscle composition and is associated with glucose disposal ability and macrovascular disease in patients with type 2 diabetes [J]. *BMJ Open Diabetes Res Care*, 2021, 9 (2): e002430.
- 崔赛嘉, 田亚平, 陈卉宁, 等. 健康人群急进高原前后血生化免疫检测分析 [J]. *标记免疫分析与临床*, 2024, 31 (7): 1183-1188.
- Chernozub A, Potop V, Korobeynikov G, et al. Creatinine is a biochemical marker for assessing how untrained people adapt to fitness training loads [J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9137.
- Stajer V, Vranes M, Ostojic SM. Correlation between biomarkers of creatine metabolism and serum indicators of peripheral muscle fatigue during exhaustive exercise in active men [J]. *Res Sports Med*, 2020, 28 (1): 147-154.
- Lippi G, Salvagno GL, Danese E, et al. Variation of red blood cell distribution width and mean platelet volume after moderate endurance exercise [EB/OL]. <https://doi.org/10.1155/2014/192173>.
- 杨蕾, 余川维, 舒潇. 关于力竭运动对红细胞影响的综述 [J]. *四川体育科学*, 2008, 27 (3): 44-46.
- Lippi G, Schena F, Salvagno GL, et al. Foot-strike haemolysis after a 60-km ultramarathon [J]. *Blood Transfus*, 2012, 10 (3): 377-383.
- Saks V, Favier R, Guzun R, et al. Molecular system bioenergetics: regulation of substrate supply in response to heart energy demands [J]. *J Physiol*, 2006, 577 (Pt 3): 769-777.
- Ekun OA, Emiabata AF, Abiodun OC, et al. Effects of football sporting activity on renal and liver functions among young undergraduate students of a Nigerian tertiary institution [J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 2017, 3 (1): e000223.

(责任编辑: 孙菲)