

藏族的高原适应 ——西藏藏族生物人类学研究回顾

席焕久

辽宁医学院生物人类学研究所 锦州 121001

摘要: 藏族生活在具有世界屋脊之称的青藏高原, 特殊的生态环境和特殊的文化背景造就了藏族特殊的适应高原缺氧机制, 引起了国内外学者的广泛关注和浓厚的研究兴趣。本文根据国内外数据库的文献并结合我们的研究工作, 从高原适应的角度回顾了 30 多年藏族人类学研究。回顾显示, 藏族由于长期生活在高原缺氧的环境中, 不仅形态和机能发生了适应性变化, 而且体成分也表现出相应的变化, 体现了形态、机能和体成分的统一。这些变化是长期进化形成的, 与安第斯山人等有明显不同, 就是在同一高原生活的西藏、青海、四川、甘肃和云南的藏族乃至尼泊尔和印度藏族的体质也表现出地域差异, 这些差异的产生是多种因素所致, 两个关键性的基因是导致两大高原人口高原适应机制不同的最主要的原因。

关键词: 西藏; 藏族; 生物人类学; 适应; 高原

中图分类号: Q983; **文献标识码:** A; **文章编号:** 1000-3193(2013)03-0247-09

适应 (adaptation) 是生物界普遍存在的现象, 也是生命所特有的, 是在进化过程中形成的。高原适应是指世居的人群与动物发生的一种可遗传的, 而且具有遗传基础结构、功能和习惯特征, 因而能很好的在高原环境中生存繁衍的过程^[1]。人在长期适应过程中可引起形态、机能、代谢、免疫乃至基因的变化, 表现出人的差异, 因而人在高原缺氧这种极端环境中的适应就成为人类学研究的重大课题。藏族是我国的少数民族之一, 人口为 541.6 万 (2000 年统计), 聚集在世界上海拔最高 (平均 4000m 以上)、面积最大、形成最晚的世界屋脊 - 青藏高原, 分布在西藏自治区及青海省 (海北、海南、果洛、玉树藏族自治州和海西蒙古族藏族自治州)、甘肃省 (甘南藏族自治州和天祝藏族自治县)、四川省 (阿坝藏族羌族自治州, 甘孜藏族自治州, 木里藏族自治县) 和云南省 (迪庆藏族自治州) 等。此外, 藏族在尼泊尔、巴基斯坦、印度、不丹等国境内也有分布。藏族经历了长期的自然选择后表现出与平原人群显著不同的体质特征, 成为适应高原环境的特殊表现。藏族又因其特殊的文化、特殊的生活方式、特殊的生态环境, 特殊的适应高原缺氧特点而备受国内外关注。

本文根据 1982 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日期间的国内外文献, 就藏族高原适

收稿日期: 2013-05-15; 定稿日期: 2013-07-10

基金项目: 西藏藏族青少年人体组成成分特点及影响因素 (31040047); 西藏藏族青少年体质特征及影响因素的研究 (30270696); 西藏藏族群体分子遗传标记多态性的研究 (30570977)

作者简介: 席焕久 (1945-), 男, 硕士, 教授, 主要从事生物人类学研究。E-mail:huanjiuxi@163.com

应做一个初步回顾。需要指出的是，我们的工作一直在吴新智院士的关怀、支持和指导下完成的，借此机会向他表示衷心地感谢。他一直领导着我国的人类学研究，为我国解剖学和人类学的教学和科研，为世界人类学的发展，呕心沥血，做出了杰出贡献，受到同行们的衷心爱戴和尊敬。作为他的学生深受他的精神感染和熏陶，受益匪浅，在他 85 华诞之际，撰写此文表示对他的敬意，祝愿吴先生健康长寿。

1 藏族的形态学适应

长期在高原缺氧环境中生活，人的形态（如外表特征、身体线性尺度、骨的干骺融合时间等）会发生适应性变化。在中等海拔，青春期启动年龄相近，但持续时间较长，而高海拔地区，青春期启动明显晚，但比中等海拔高度和海平面高度持续时间长。持续在 4000m 以上生活会形成中等程度地减少儿童青少年的线性生长^[2]。阿坝藏族男女生身高增长速度高峰时间较当地汉族分别提前 1.4 岁和 0.5 岁。藏族学生进入青春期年龄早于当地汉族，2005 年调查发现，藏族学生生长发育指标均大于当地汉族^[3]。此外，藏族儿童青少年骨的干骺融合延迟，女性月经来潮时间晚。高海拔地区生活者坐高相对大，腿相对短，而躯干长差别不大^[4]。在安第斯山地区生活的人口所有的身体径线与肢体相对长度都随着海拔高度的梯度而变化。沿海个体较大，高原个体的肢体相对长但较小^[5]。从平原进入高原普遍都有体重减轻现象，低氧是体重减轻最充足的理由^[6]。

高原缺氧使胎儿在子宫内生长延迟。移居的汉族产妇，尤其是初产妇，高原分娩的新生儿体重低于世居藏族和平原汉族，胎盘系数显著高于世居藏族，说明环境影响胎儿宫内的生长发育^[7]。四川藏族（海拔 3100m）儿童比汉族儿童明显的高、胖^[8]。比较不同海拔高度（3521m, 970m 和 800m）印度的藏族的体测指标时发现，低海拔高度的藏族的体重高于高海拔地区^[9]。

藏族有明显的胸深（男）和明显的胸宽（女），这可能是对低氧的适应^[10]。Weinstein (2007) 对史前 Atacama 高原地区居民的胸部骨的研究发现，他们的胸骨长和宽、锁骨长和宽的值很大，肋骨的长度和面积很大而曲度最小，提示胸廓前后深内外宽，而低海拔地区居民则表现窄而浅的胸，表明高原缺氧作为环境压力塑造了安第斯山居民的生物学特征^[11]。

活检和电镜检查发现，登山探险者的肌横断面积减少 10%，肌纤维大小减少 20%（肌纤蛋白减少所致），肌的氧化能力减少 25%，说明暴露高原环境后，肌线粒体的供氧级别得到改善^[12]。经人大腿股外侧肌进行活体穿刺对高原缺氧状态下肌的超微结构和生物化学检查，发现低海拔藏族的线粒体体积 / 高峰氧耗的比值比尼泊尔藏族低^[13]。Gupta 等 (1992) 研究 Ladakhi 居民发现，喜马拉雅高原居民适应于高原缺氧。对 7 位当地高原居民活组织检查发现，小的肺动脉壁很薄并没有肺动脉肌性肥大或小动脉的肌化，但动物则无此变化^[14]。

对藏族移民牙的大小、形状、牙尖数、沟形的调查发现，藏族移民牙变小，第三磨牙发育不全，卡氏尖数减少明显，铲型齿退化为原始状态，某些特征类似高加索人和现代人，某些特征与蒙古人种类似，还有些特征类似土著人和化石人类^[15]。

2 藏族的机能适应

在人的机能适应方面, 往往从静息状态下通气功能, 缺氧时的通气反应, 氧饱和度和血红蛋白浓度等方面进行评价。藏族比汉族有较大的胸围和肺体积, 更大的肺活量, 肺容量及残气量, 更佳的睡眠质量, 更好的高海拔体力劳动表现和较低的血蛋白浓度^[16]。新生儿和 4 个月内的婴儿就具有很大的动脉血氧饱和度^[17]。脑颈内动脉血流速度在世居高原的藏族一直保持着对运动的反应, 在运动的高峰, 藏族保持着血流加快和增加对脑的氧供, 而汉族不能^[18]。藏族比汉族具有最大的氧摄取能力和运动时增加运输 O₂ 到工作肌肉的能力。

在运动状态, 藏族比汉族可获得更大的工作负荷和氧耗水平, 表现了更高的副交感和较高 β - 交感神经张力^[19]。静息状态时, 藏族的副交感神经占优势, 在中等海拔高度 (3700m) 急性缺氧状态下心率无明显影响, 即使长期在平原地区生活的藏族, 这种特点也不改变^[20], 但汉族则不能。

随着海拔高度升高血压异常率也增加。Baracco 等发现高原地区具有较低的血压和较高的空腹血糖水平^[21]。骨骼肌对慢性缺氧的适应包括增加了胰岛素的刺激从而加大了糖的摄取^[22]。刘兵柱等 (2002) 发现, 健康人进入高原地区 (海拔 2300m) 60 天后, 钠钾-ATP 酶、钙-ATP 酶和钙镁-ATP 酶三种酶活性与刚进入高原 36 小时相比明显降低, 而肌酸激酶活性却明显增加, 在到达中等海拔高原 14 天内, 2,3- 二磷酸葡萄糖脱氢酶可增加 20%^[23]。

3 藏族的体成分适应

Garruto (2003 年) 比较了藏族和汉族 (出生长在 3200m, 3800m 和 4300m 的青藏高原) 的 Hb 和 HCT, 在 3200m 时, 两组的 Hb 和 HCT 未发现差异, 但在 3800m 和 4300m 时, 两组的值都比 3200m 时的值高。13 岁以下无民族间差异, 而青少年和成人汉族的 Hb 和 HCT 都比藏族高^[24]。

藏族 7-18 岁学生的过重与肥胖日益增多^[25]。对西藏和尼泊尔居民的测量发现, BMI, 腰围和腰围 / 身高比值这三项指标随海拔升高而降低, 很可能是低温低氧产生直接的代谢分解作用所致^[26]。Tripathy (2007) 发现低海拔地区的藏族的上臂围高于高海拔地区。

高原环境比平原环境的居民有非常低的血浆总胆固醇、低密度脂蛋白水平, 而高密度脂蛋白水平只是略微偏低。在青春发育期藏族男性瘦素水平随年龄增长逐渐降低, 而女性相反^[27]。急性高原病患者肾素活性、血管紧张素 I、血管紧张素 II、醛固酮明显增高, 动脉血氧饱和度与血管紧张素 II 呈负相关^[28]。雄激素、雌激素、瘦素、生长激素等可调节脂肪质量、去脂肪质量和骨量变化。低氧往往增加了血液中激素的浓度, 无氧抑制了内分泌反应的各种成分^[29]。很多学者都认为, 在高原环境中, 瘦素水平的变化似乎是一种体能储存的标志, 可促进体能消耗, 减少食物摄取^[30]。动物实验也证实高原环境可降低

大鼠对蛋白质的食欲,从而影响其脂肪质量的获得,而瘦素可能是导致这种现象的原因^[31]。

高原缺氧影响水的分布,血管内的液体可转移到细胞间隙^[32]。高原居民体内水过多,瘦组织中的水过多是对新环境的适应性反应。

调查发现,西藏糖尿病患病率 6.8%,拉萨地区藏族的代谢综合征患病率为 29.3%,高血压 58.5%,糖耐量异常 37.8%,中心性肥胖 38%,糖尿病为 13%,脂肪肝发病率在 696 名干部中为 29.8%,藏族高于汉族,男高于女^[33],这些疾病都与体成分密切相关。

Ray(1998)曾研究通过空运和公路到达高原地区前后几天人的体成分变化,发现两组肱二头肌、肱三头肌皮褶厚度明显降低,而脐、髂前上棘皮褶厚度明显升高,这可能是在高原寒冷时体脂从外周向深部(躯干)转移所致^[34]。有人发现低海拔地区藏族的肱三头肌皮褶厚度大于高海拔地区^[35]。Meerson (1992)观察到,大鼠在 5000~7000m 高原生活 10 天,右心室重量增加,左心室蛋白合成轻度增加,右心室肌 RNA 增加 90%,左心室增加 60%^[36]。高原地区的过重与肥胖者(55.7%)明显大于低海拔地区(42.9%)^[37]。

4 藏族高原适应的相关基因

藏族的高原适应具有明显的遗传学基础。研究认为,藏族的线粒体与汉族不同,从而导致在高原缺氧状态下具有不同的遗传背景^[38]。位于青藏高原的西藏藏族与印度、尼泊尔藏族身高与体重相近,安第斯山一些国家儿童青少年生长发育指标也如此。这些相似性可能与共同的遗传基础有关。印度藏族后裔、西藏藏族和尼泊尔藏族就有相似的遗传背景^[9],因而表现出体质发育的相似性。

西藏高原居民特有的体质特征与特有的基因有关。在西藏、青海和云南不同的藏族的 ATP6、ATP8 和 Cytb 基因比较研究中发现,ATP6 基因可能存在适应性选择并随海拔高度增高,呈现出选择性增强趋势^[39]。一些学者发现,HIF1A-1 基因 C1772T, G1790A 和糖运 1 基因 GLUT1G+22999T, HIF-1 α 基因 G1790A 的基因多态性可能与高原缺氧适应有关^[40,41]。

近年来由于全基因组与外显子测序等研究方法和技术的进步以及全新的与之相匹配的统计策略的应用,藏族高原适应相关基因的研究取得突破性的进展,进行了内皮型一氧化氮合酶(eNOS 或 NOS3)基因,肾素-血管紧张素-醛固酮系统(RAS)相关基因,内皮素 1(ET-1)基因,谷胱甘肽硫转移酶(GST)基因,肺泡表面活性物质相关蛋白(SP-A)基因等高原低氧适应的相关基因的研究。发现脯氨酸羟化酶 2(proline hydroxylase 2, PHD2 又名 EGLN1)和过氧化物酶体增生物激活受体 A(peroxisome proliferator-activated receptor A, PPARA)可能参与了藏族的高原适应过程。内皮 PAS 蛋白 1(endothelial Per-Arnt-Sim domain protein 1), EPAS1, ANGPT1, FOXO1, RUNX1 等也参与了高原缺氧适应^[42]。EPAS1, EGLN1 和 PPARA 基因调节或由低氧诱导因子调节,主要控制红细胞生成和其他适应机能^[43]。PRKAA1, NOS2A 对人的呼吸生理过程起着重要作用。EPAS1 在藏族高原适应中起主要作用, EGLN1 作用虽不及 EPAS1,但也占有重要位置。此外, ANGPT1、FOXO1 和 RUNX1 也参与高原适应^[42,44],但也有 HIF 信号通路的作用。我们

对 EGLN1 基因多个 SNPs 位点分析中发现, rs480902 和 rs479200 位点的多态性与适应低氧环境有关。西藏人口 (Sherpa 地区) eNOS 的两个位点频率比低海拔地区高, 在与缺氧有关的 2 个基因 EPAS1 和 EGLN1 选择性扫描中发现了强信号, 这两个基因与非藏族的低海拔地区 (汉族与日本人) 明显的不同^[45,46]。

通过高海拔与低海拔人口基因组扫描筛查, 发现在几个染色体区有正向直接选择的证据, HIF(hypoxia inducible factor) 通路基因与高原适应有关, HIF 的调节基因 EGLN1 和 EPAS1 及 2 个 HIF 靶基因 PRKAA1 和 NOS2A 被认为是西藏 (EPAS1) 和安第斯山 (PRKAA1, NOS2A) 自然选择的候选基因。只有一个 HIF 通路基因 EGLN1 是西藏和安第斯山二个地区公共候选的, 这种遗传适应类型对西藏和安第斯山人口是独特的^[47]。

Laura, et al (2010) 在安第斯山和西藏人口中分别分辨出 38 和 14 个候选区域, 而且两地区候选基因区域不重叠, 最支持的候选者是 PRKAA1 和 NOS2A (安第斯山) 以及 EPAS1 (西藏), HIF-1a, EPAS-1 代表了青藏高原人口适应高原生活的最关键的基因^[48,49]。由于西藏与安第斯山人口基因的不同, 导致两地区人口高原适应差异。

最近研究揭示, HIF 氧信号通路是青藏高原人口强烈的正向选择目标, 而安第斯山人口却无类似的机制, 可能与居民的高原居住历史长短有关^[50]。青藏高原人类活动的时间早于安第斯山, 有更长的进化时间, 因而表现出比安第斯山居民具有更好的适应机制。

5 高原居民的差异

虽然都是高原永驻居民, 但不同高原上居住的居民的高原缺氧适应体质不同, 青藏高原、安第斯山和埃塞俄比亚的居民体质之间有很大的不同, 就是同在青藏高原的西藏、青海、甘肃、四川和云南的藏族也存在差异。

厄瓜多尔的高原地区与海滨地区比较研究表明, 生后 5 年内, 高原对塑造生长起较小作用^[51]。根据对 17~72 岁高原 (3150m) 出生长大, 17~76 岁在海拔 500m 出生长大的沙特阿拉伯居民的身高与体重测量发现, 高海拔地区出生长大者与低海拔者相比, 前者明显的高、重^[37]。这与青藏高原的居民不同。对生活在海拔 2000m 的土耳其 CA (6~14 岁) 研究显示, 海拔对生长发育具有肯定的影响^[52]。

与安第斯山人相比, 藏族胎儿在子宫内发育迟缓, 慢性高原病发病率低。男女身高随年龄增加, 达到最大身高后开始下降, 下降时间不等。藏族儿童青少年的身高高于青海、印度及安第斯山的儿童青少年。两大高原地区儿童青少年身高的方差分析表明, 青藏高原儿童青少年与安第斯山儿童青少年相比, 前者的身高比后者平均高 3.17cm (男) 和 5.09cm (女) ($P<0.01$); 前者的体重比后者平均轻 1.86kg (男) 和 1.57kg (女) ($P<0.01$); 前者的胸围比后者平均小 5.59cm (男) 和 4.77cm (女) ($P<0.01$)。印度的难民 (3, 521m) 比安第斯山居民高、重^[9]。高原人口身高的差异很大, 玻利维亚 La Paz 儿童身高最高与最低样本相差总量达 10cm (男) 和 8cm (女)^[53]。

Weitz, et al (2004) 对青海与北京儿童青少年的比较研究和 Tripathy, et al 的研究也都证实了地域之间的差异^[9,10]。安第斯山高原比平原居民有更大的胸径并影响肺弥散能力, 而

在尼泊尔，长期生活在喜马拉雅山的居民并没有很大的胸径。

藏族、安第斯山人和埃塞俄比亚人对高原的适应方式不同。藏族有更多的基因差异，因而为自然选择提供了更多的潜力。不同的循环、呼吸和血红蛋白的适应高原变化在安第斯山、西藏和埃塞俄比亚高原人口都表现得非常明显。西藏和安第斯山各自独有的适应高原特征导致不同的生理适应功能^[47]。青藏高原与安第斯山的当地居民对高原缺氧的压力反应不同，藏族对氧的摄取与利用好于其他高原居民。在同一海拔高度藏族的静息通气和缺氧通气比安第斯山人 (Aymara) 高 1 个标准差，但其氧饱和度和 Hb 浓度却比安第斯山人低一个标准差，两者具有不同的适应类型^[54]。藏族脑血流量比安第斯山人高 24%。血红蛋白浓度低于安第斯山。安第斯人血氧饱和度 (SaO₂) 低而血红蛋白 (Hb) 升高，埃塞俄比亚人 Hb 降低而 SaO₂ 升高，藏族这两者均降低^[55]。

居住在不同高原居民之间的体质特征存在差异，就是生活在同一高原上的居民体质也不一样。西藏藏族与青海藏族学生相比，前者生长发育明显好于后者，男女皆如此。藏族 HIF1A 基因单核苷酸多态性在西藏藏族与云南藏族明显不同^[56]。对青海、四川、云南西藏和印度藏族的研究中发现，ABO 血型的分布是 O>A>B>AB，民族指数和遗传距离分别是 0.63-0.98 和 0-0.0072^[57]，这都反映了地域差异。此外，其他指标也显现出体质特征的地域差异，这也得到安第斯山居民的证实。

6 藏族高原适应的思考

藏族的高原适应有别于其他高原居民，形成了独有的特点。从藏族的高原适应方面我们认识到：

1) 藏族特殊的高原适应能力是长期进化形成的。藏族在高原生活几千年，比其他民族生活在高原的时间都长，与非高原相比，无论在静息状态还是运动时，都具有更高的动脉氧饱和度，有很大的低氧换气和高碳酸换气反应，较大的肺活量和更好的肺功能，更好的肺扩散能力，比平原地区和生活在相似的海拔高度的安第斯山人血红蛋白浓度低，只发展了最小的低肺动脉压就具有了高水平的 NO 发散能力。藏族在高原睡眠质量好，藏族对高原条件下的生活和工作有更好的适应性^[16]，这种出众的适应性是长期进化形成的。

2) 基因与环境因素造就了藏族的适应高原缺氧能力。在生长发育期，人的外形的可塑性是很大的，受气候、生态、海拔高度、遗传、社会、政治、经济、文化等多种因素的影响，绝不是某一种因素作用的结果。在高原地区，高原缺氧、寒冷、营养、压力或几种因素共同影响生长发育，在影响生长发育的这些因素中，遗传、高原缺氧和社会政治经济因素起很大作用，遗传可以提供适应高原环境的基因，高原缺氧和社会政治经济因素作为环境因素塑造人的生物学特征。

3) 藏族的高原适应性变化达到了形态、机能和体成分完美的统一。藏族长期生活在高原缺氧的环境中，不仅形态与机能发生适应性变化，而且体成分也相应改变，三者相互影响，相互作用，共同达到适应的目的。

致谢: 本文的形成得到了国家自然科学基金、教育部重点基金、辽宁省自然科学基金、辽宁省教育厅基金的资助, 西藏自治区政府及西藏的一些学校、医院和藏族同胞给了大力的帮助; 赵红老师, 研究生赵宏同学和李文慧老师, 毕竟教授也给了很多帮助; 吴新智院士和刘武博士给了很多指导, 在此一并表示感谢。由于时间仓促, 加之本人专业知识和水平所限, 遗漏及错误在所难免, 敬请同行和读者批评指正。

参考文献

- [1] Moore LG, Nieermeyer S, Zamudio S. Human adaptation to high altitude: regional and lifecycle perspective[J]. *Am J Phys Anthropol*, 1998, 27: 25-64
- [2] Argani L, Cogo A, Gualdi-Russo E. Growth and nutritional status of Tibetan children at high altitude[J]. *Coll Antropol*, 2008, 32(3): 807-812
- [3] 杜晓燕, 胡小琪, 张倩, 等. 四川阿坝州藏族儿童青少年生长发育状况分析 [J]. *中国学校卫生*, 2011, 32(6): 44-746
- [4] Greksa LP. Growth and development of Andean high altitude residents[J]. *High Alt Med Biol*, 2006, 7(2): 116-124
- [5] Weinstein KJ. Body proportions in ancient Andeans from high and low altitudes[J]. *Am J Phys Anthropol*, 2005, 128(3): 569-585
- [6] Lippel FJ, Neubauer S, Schipfer S, Lichter N, Tufman A, Otto B, Fischer R. Hypobaric hypoxia causes body weight reduction in obese subjects[J]. 2010, 18(4): 675-681
- [7] 赵秀欣, 王旭萍. 高原缺氧环境对世居藏族和移居汉族胎儿生长发育的影响 [J]. *高原医学杂志*, 2007, 17(3): 17
- [8] Bailey SM, Xu J, Feng JH, et al. Tradeoffs between oxygen and energy in tibial growth at high altitude [J]. *Am J Hum Biol*, 2007, 19(5): 662-668
- [9] Tripathy V, Gupta R. Growth among Tibetans at high and low altitudes in India[J]. *Am J Hum Biol*, 2007, 19(6): 789-800
- [10] Weitz CA, Garruto RM, Chin CT, et al. Morphological growth and thorax dimensions among Tibetan compared to Han children, adolescents and young adults born and raised at high altitude[J]. *Ann Hum Biol*, 2004, 31(3): 292-310
- [11] Weinstein KJ. Thoracic skeletal morphology and high-altitude hypoxia in Andean prehistory [J]. *Am J Phys Anthropol*, 2007, 134(1): 36-49.
- [12] Hoppeler H, Kleinert E, Schlegel C, et al. Morphological adaptations of human skeletal muscle to chronic hypoxia[J]. *Int J Sports Med*, 1990, 11(1): S3-9
- [13] Karser B, Hoppeler H, Desplanches D, et al. Muscle ultrastructure and biochemistry of lowland Tibetans[J]. *J Appl Physiol*, 1991, 70: 1938-1942
- [14] Gupta ML, Rao KS, Anand IS, et al. Lack of smooth muscle in the small pulmonary arteries of the native Ladakhi. Is the Himalayan highlander adapted [J]? *Am Rev Respir Dis*, 1992, 145(5): 1201-1204
- [15] Sharma JC. Dental morphology and odontology of the Tibetan immigrants[J]. *Am J Phys Anthropol*, 1983, 61(4): 495-505
- [16] Wu T, Kayser B. High altitude adaptation in Tibetan [J]. *High Alt Med Biology*, 2006, 7: 193-208
- [17] Niermeyer S, Yang P, Shanmina, et al. Arterial oxygen saturation in Tibetan and Han infants born in Lhasa, Tibet [J]. *N Engl J Med*, 1995, 333(190): 1248-1252
- [18] Huang SY, Sun S, Droma T, et al. Internal carotid arterial flow velocity during exercise in Tibetan and Han residents of Lhasa(3658m)[J]. *J Appl Physiol*, 1992, 73(6): 2638-2642
- [19] Zhuang J, Droma T, Sutton JR, et al. Autonomic regulation of heart rate response to exercise in Tibetan and Han residents of Lhasa (3658m)[J]. *J Appl Physiol*, 1993, 75(5): 1968-1973
- [20] Zhang J, Zhu H, Zhou Z. Reserved higher vagal tone under acute hypoxia in Tibetan adolescents with long-term migration to sea level[J]. *Jpn J Physiol*, 2002, 52(1): 51-56
- [21] Baracco R, Mohanna S, Seclen S. A comparison of the prevalence of metabolic syndrome and its components in high and low altitude populations in Peru[J]. *Metab Syndr Relat Disord*, 2007, 5(1): 55-62
- [22] Gamboa JL, Garcia-Cazarin ML, Andrade FH. Chronic hypoxia increases insulin-stimulated glucose uptake in mouse soleus muscle[J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2011, 300(1): R85-91
- [23] 刘兵柱, 朱志全. 高原适应初期对人体部分代谢的影响 [J]. *高原医学杂志*, 2002, 12(3): 12-14.

- [24] Garruto RM, Chin CT, Weitz CA, et al. Hematological differences during growth among Tibetans and Han Chinese born and raised at high altitude in Qinghai, China[J]. *Am J Phys Anthropol*, 2003, 122(2): 171-183
- [25] 马军, 吴双胜, 周学雷, 等. 中国 1985-2005 年藏族学生身体形态发育及营养状况动态分析 [J]. *中华流行病学杂志*, 2009, 30(10): 1030-1033
- [26] Sherpa LY, Deji, Stigum H, et al. Obesity in Tibetans aged 30-70 living at different altitudes under the north and south faces of Mt. Everest[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2010, 7(4): 1670-1680
- [27] Xi H, Zhang L, Guo Z, et al. Serum leptin concentration and its effect on puberty in Naqy Tibetan adolescents [J]. *J Physiol Anthropol*, 2011, 30(3): 111-117
- [28] 卓玛次仁, 岑维瀚, 陈勇, 等. 高原病与体液因子的研究 [J]. *西藏医药杂志*, 2004, 25(80): 34-36
- [29] Banholt KE, Hoffman AR, Rock PB, et al. Endocrine responses to acute and chronic high-altitude exposure(4300m): modulating effects of caloric restriction [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2006, 290(6):E1078-1088
- [30] 王自勉. 人体组成学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008
- [31] Morel OE, Aubert R, Richalet JP, et al. Simulated high altitude selectively decreases protein intake and lean mass gain in rats [J]. *Physiol Behav*, 2005, 86(1-2): 145-153
- [32] Tannheimer M, Fusch C, Böning D, et al. Changes of hematocrit and hemoglobin concentration in the cold Himalayan environment in dependence on total body fluid[J]. *Sleep Breath*, 2010, 14(3): 193-199
- [33] 庞金荣, 颜中. 西藏高原地区藏族人群血脂水平分析 [J]. *中华检验医学杂志*, 2010, 9(33): 856-861
- [34] Ray US, Selvamurthy W. Body composition in air and road inductees at high altitude during the initial days of acclimatization[J]. *Int J Biometeorol*, 1998, 41(3): 120-124
- [35] Macdonald JH, Oliver SJ, Hillyer K, et al. Body composition at high altitude: a randomized placebo-controlled trial of dietary carbohydrate supplementation[J]. *Am J Clin Nutr*, 2009, 90(5): 1193-1202
- [36] Meerson FZ, Krasikov SI, Chavkin II, et al. Reversal of withdrawal injuries of the heart and liver by adaptation to intermittent hypoxia when discontinuing ethanol in chronically alcoholized animals[J]. *Kardiologiia*, 1992, 32(11-12): 78-82
- [37] Khalid ME, Ali ME. Relationship of body weight to altitude in Saudi Arabia[J]. *Ann Saudi Med*, 1994, 14(4): 300-303
- [38] Luo Y, Gao W, Liu F, et al. Mitochondrial nt3010G-nt3970C haplotype is implicated in high-altitude adaptation on Tibetans[J]. *Mitochondrial DNA*, 2011, 22(5-6): 181-190
- [39] 顾明亮, 汪业军, 史磊, 等. 藏汉民族线粒体基因组全序列的比较研究 [J]. *中华医学遗传学杂志*, 2008, 25(4): 382-385
- [40] Wang S, Sun X, Liu K, et al. Relationship between adaptation to high altitude hypoxia environment and glucose transport 1 gene polymorphism[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104(1): 8655-8660
- [41] 刘坤祥, 孙学川, 王胜巍, 等. HIF-1 α 基因 C1772T、G1790A 多态性与藏族人群高原低氧适应关系的研究 [J]. *生物医学工程学报*, 2007, 24(3): 654-658
- [42] 陈郁, 高钰琪. 基因组学研究在藏族高原适应遗传机制研究的实践与运用 [J]. *国际遗传学杂志*, 2012, 35(4): 213-216
- [43] Simonson TS, Yang Y, Huff CD, et al. Genetic evidence for high-altitude adaptation in Tibet[J]. *Science*, 2011, 329(5987): 72-75
- [44] Wang B, Zhang YB, Zhang F, et al. On the origin of Tibetans and their genetic basis in adapting high-altitude environments[J]. *PLoS One*, 2011, 6(2): e17002
- [45] Yi X, Liang Y, Huerta-Sanchez E, et al. Sequencing of 50 human exomes reveals adaptation to high altitude[J]. *Science*, 2010, 329(5987): 75-78
- [46] Peng Y, Yang Z, Zhang H, et al. Genetic variations in Tibetan populations and high-altitude adaptation at the Himalayas [J]. *Mol Biol Evol*, 2011, 28(2): 1075-1081
- [47] Bigham A, Bauchet M, Pinto D, et al. Identifying signatures of natural selection in Tibetan and Andean populations using dense genome scan data[J]. *Natural Selection of High Altitude*[J]. *PLoS Genet*, 2010, 6(9): 1-14
- [48] Scheinfeldt LB, Tishkoff SA. Living the high life: high altitude adaptation[J]. *Genome Biol*, 2010, 11(9): 133
- [49] Van Patot MC, Gassmann M. Hypoxia: adapting to high altitude by mutating EPAS-1, the gene encoding HIF-2 α [J]. *High Alt Med Biol*, 2011, 12(2):157-167
- [50] Jay F. Storz. Genes for high altitudes[J]. *Science*, 2010, 329(5987): 40-41
- [51] Leonard WR, DeWalt KM, Stansbury JP, et al. Growth differences between children of highland and coastal Ecuador[J]. *Am J Phys Anthropol*, 1995, 98(1): 47-57

- [52] Ismail Malkoc, Mumkaz M, Mazicioglu, et al. Height, weight and body mass index percentiles of children aged 6-14 years living at moderate altitudes[J]. *J Clin Res Pediatr Endocrinol*, 2012, 4(1): 14-20
- [53] Greksa LP, Spielvogel H, Paredes-Fernandez L, et al. The physical growth of urban children at high altitude[J]. *Am J Phys Anthropol*, 1984, 65(3): 315-322
- [54] Beall CM. Tibetan and Andean contrasts in adaptation to high-altitude hypoxia[J]. *Exp Med Biol*, 2000, 475: 63-74
- [55] 周付涛, 孙学川. 高原低氧适应的遗传学研究进展 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2010, 27(3): 711-715
- [56] Ke JK, Yao YF, Shi L, et al. Study of nine single nucleotide polymorphism loci of human HIF1A gene in three Tibetan groups[J]. *Chinese Journal of Medical Genetics*, 2010, 27(5): 584-589
- [57] Long Y, Huang W, Yu Y, et al. Distribution of ABO blood group in Tibetan population and their genetic relationship[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 34(10): 965-969

Adaptation to High Altitude Hypoxia Environment in Tibetans: A Preliminary Review of the Biological Anthropology of Tibetan

Xi Huan-jiu

The Biological Anthropology Institute of Liaoning Medical University Jinzhou 121001

Abstract: Tibetans live in a special ecological environment, the Tibetan Plateau, called the Roof of the World. They have a unique culture and special adaptive mechanisms to high altitude hypoxia, which caused widespread global attention and scholarly interest. We reviewed 30 years of Tibetan biological anthropology studies, specifically plateau hypoxia adaptation. The review showed that Tibetans have adaptive variations in their body morphology and function, but also in their body composition. These adaptive changes in Tibetans had evolved for a long time and were significantly different from those of Andens, even living in the same of the Tibetan Plateau. Tibetans in Tibet, Qinghai, Sichuan, Gansu and Yunnan provinces of China, including Tibetans in Nepal and India also showed regional differences in the above biological aspects. Changes in Tibetan adaptations to hypoxia were caused by a number of factors, in addition to two key genes for hypoxia adaptation.

Keywords: Tibet; Biological anthropology; Adaptation; Altitude