

青藏高原短居人群缺氧风险性评价

柳金昊^{1,2}, 信忠保^{1,2*}, 黄艳章^{1,2}, 林峰^{1,2}

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

摘要 青藏高原具有鲜明的高寒缺氧的气象特征, 对短居人群的健康有严重影响, 从自然地理的角度研究青藏高原缺氧风险对地方发展与缺氧政策制定具有重要意义。基于2021年7月采集青藏高原不同海拔地区的气压、含氧量和短居人群的血氧饱和度等数据, 建立了海拔与血氧饱和度的关系, 绘制了青藏高原短居缺氧空间分布图。结果表明: (1) 随着海拔的升高, 绝对含氧量线性下降($y=-0.0325x+280.45$, $n=70$, $r^2=0.94$), 绝对含氧量与海拔呈线性关系。(2) 随着海拔的升高, 血氧饱和度呈指数下降, 缺氧风险呈指数上升($y=104-0.68 \times e^{0.35x+1.77}$, $n=70$, $r^2=0.57$)。 (3) 根据血氧饱和度与海拔高度的关系, 青藏高原缺氧低风险区、缺氧中风险区和缺氧高风险区占青藏高原总面积比分别为10.6%、32.0%和57.4%, 其中低风险区主要分布在青海东北部、柴达木盆地和林芝市以南, 中风险区分布在青海西北部、西藏东部山地和青藏高原河流谷地, 高风险区主要分布在藏北高原无人区和喜马拉雅山系附近。

关键词 青藏高原; 高海拔; 血氧饱和度; 缺氧风险

青藏高原地处亚洲内陆, 是世界上海拔最高的高原, 被称为“世界屋脊”“第三极”, 具有独一无二的自然景观。青藏高原是藏文化的发源地, 孕育了独特而神秘的西藏文明。青藏高原独特的自然景观和人文景观使其成为国内外旅游者倾心向往的世外桃源^[1]。21世纪以来, 青藏高原的旅游人次以每年超过25%的速度增长, 仅2017年就有超过5100万游客前往青藏高原观光^[2]。旅游成为推动

青藏高原地区经济发展, 提高当地居民幸福感的重要支柱产业。同时, 党和国家一直关心青藏高原的发展, 特别是第一次西藏工作座谈会后, 中央不断增加对青藏高原的物力、财力支持, 同时派出大批平原地区的专业技术人员进入高原进行援助。截至2020年, 各省市、中央国家机关及中央企业分9批共选派超过9682名优秀干部援藏, 极大地促进了西藏经济社会发展。1973年中国科学院青藏高

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-07-12

基金项目: 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0608)

作者简介: 柳金昊, 硕士研究生, 研究方向为人类环境健康安全, 电子信箱: hawkey_liu@126.com; 信忠保(通信作者), 副教授, 研究方向为自然地理学、水土保持与荒漠化防治, 电子信箱: xinzhongbao@126.com

引用格式: 柳金昊, 信忠保, 黄艳章, 等. 青藏高原短居人群缺氧风险性评价[J]. 科技导报, 2022, 40(14): 92-100; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.14.010

原综合考察队成立,拉开了对青藏高原进行大规模综合科学考察的序幕。2017年,中国启动了第二次青藏高原综合科学考察研究,大批科考队进入高原进行科学考察。随着青藏高原旅游、援藏建设、科学考察等活动日益增多,每年有超过9000万低海拔人群进入青藏高原。

然而,青藏高原平均海拔超过4000 m,高海拔地区的低压、低氧引起发的高原反应会给初入高原的人带来不适甚至会危及生命^[3]。如何保障缺氧胁迫条件下外来人群的身心健康是一项巨大挑战,因此探究青藏高原不同地区的缺氧风险,对青藏高原区域发展进行规划指导,对促进青藏高原发展以及开展人居环境建设与优化,推进青藏高原经济发展具有重要意义。

吴天一^[4-5]从医学机理方面对高原地区的缺氧产生的风险和评价标准进行了系统性综述和研究。服用抗缺氧药物、“阶梯式”习服、服用葡萄糖等对高原缺氧都有一定的预防作用^[6-8]。尽管目前在缺氧机理方面进行了大量研究,但是以整个地理区域为背景,系统评价青藏高原不同地区的缺氧风险的研究并不多见。在进行青藏高原规划研究时,多简化地认为缺氧风险和海拔呈一元线性相关关系,即海拔升高,缺氧风险线性上升^[9-10]。余志康等^[11]和查瑞波等^[12]则用海拔和缺氧风险的多个一元线性函数组成多段函数评价高原缺氧风险,海拔越高,缺氧函数越陡峭,缺氧风险变化越大。然而此多段函数中的各段函数并不连续,在函数连接点存在突变,且其并未对突变点进行很好的解释。综上所述,目前以整个地理区域为背景,评价青藏高原缺氧风险时,多未考虑游客等短居人群真实身体反应。血氧饱和度是用于表征人体对缺氧反映的指标,它是与氧气结合的血红蛋白数量和总血红蛋白数量两者之间的比值。在失压过程中,通过测量人体的血氧饱和度可以非常准确地评估进入青藏高原短居人群脑组织的供氧水平^[13]。

本研究通过监测短居人群在不同海拔血氧饱和度情况,结合当地的气压、含氧量等数据,建立不同海拔血氧饱和度、缺氧风险和空气含氧量的关系,绘制青藏高原缺氧风险空间分布图。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于亚洲内陆,包括中国西藏全境和青海、新疆、甘肃、四川、云南的部分地区,南起喜马拉雅山脉南缘,北至昆仑山、阿尔金山脉和祁连山北缘,西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,东及东北部与秦岭山脉西段和黄土高原相接^[14-15],平均海拔超过4000 m。青藏高原面积 $258.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国国土面积的26.8%,是东亚、东南亚和南亚许多大河的源头。青藏高原年平均气温由东南向西北递减,在 $5 \sim 15.5^\circ\text{C}$ 之间^[16]。青藏高原阳光充足,年总太阳辐射 $140 \sim 180 \text{ kcal/m}^2$,年总日照时数 $2500 \sim 3200 \text{ h}$ 。

青藏高原地区旅游资源丰富^[17]。目前可供游览的景点300多处,拉萨市、格尔木市、西宁市是中国优秀旅游城市,日喀则市、江孜县、同仁县、喀什市是国家历史文化名城。青藏高原地区自治区级风景名胜16处,各级自然保护区47个,保护区面积超过全区国土面积的 $1/3$ ^[18]。进入21世纪,青藏高原旅游人数呈现指数上升态势,2000—2017年游客年均增长率超过25%。2017年青海和西藏的旅游总收入分别相当于国内生产总值(GDP)的13.22%和28.94%,旅游业已成为青藏高原地区经济支柱型产业^[19]。

1.2 数据观测

2021年7月19日至7月28日,研究组在青藏高原共开展了70个样点的含氧量、气压等检测,海拔分布在3000~5000 m(图1)。利用GPS获取样点的经纬度和精确海拔数据,利用CY-12C型数字测氧仪(分辨率0.1%)测量样地相对含氧量,利用DPH-103型数字温湿度大气压测量样点的大气压(分辨率0.01 Kpa)、气温(0.1°C),为避免误差,同时使用3个仪器测量取平均值。

研究使用鱼跃YX302型号血氧饱和度测量仪测量每个样点4位测试人员的血氧饱和度。4位测试人员在进入高原以前均身体健康,没有呼吸系统疾病,在平原地区血氧饱和度均在98%以上(表1)。上高原期间未出现任何疾病,没有吸氧,未服

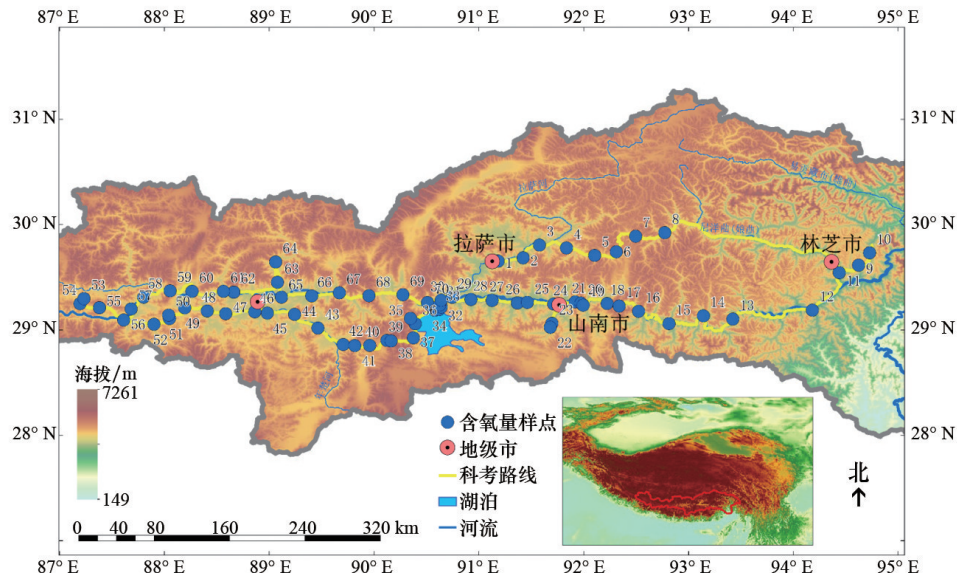


图1 含氧量取样点概况

用过任何药物。在测量血氧饱和度前 15 min 未进行剧烈活动且在室外呼吸至少 3 min, 直至血氧饱和度稳定后读数。

表1 不同测试人员的基本信息

指标	测试人员			
	a	b	c	d
性别	男	男	男	男
年龄	43	24	23	22
平原血氧饱和度/%	100	100	99	100

1.3 绝对含氧量计算

根据理想气体状态方程计算出各采样点的空气密度, 公式为:

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度 (g/m^3); M 为气体相对分子质量 (空气取 29); P 为大气压 (Pa); R 为通用气体常数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), 数值取 8.314; T 为开氏温度 (K)。

绝对含氧量为空气密度与氧气相对含量的乘积, 根据定义, 其公式为:

$$\rho_{\text{O}_2} = \rho \times a \quad (2)$$

式中, ρ_{O_2} 为绝对含氧量 (g/m^3); a 为空气相对含氧

量 (%)。

2 结果

2.1 气压含氧量

测量样点平均气压为 (63.6 ± 3.8) kPa, 平均绝对含氧量为 (155.3 ± 14.3) g/m^3 。随着海拔的上升, 含氧量和气压逐渐降低。绝对含氧量和气压均与海拔呈显著负相关 ($P < 0.01$) (图 2)。气压和绝对含氧量的最小值均出现在海拔 4959 m 的样点, 分别为 55.8 kPa 和 123.6 g/m^3 , 气压和绝对含氧量的最大值则均出现在海拔 2954 m 的样点, 分别为 71.3 kPa 和 190.9 g/m^3 。

2.2 血氧饱和度

4 位测试人员在青藏高原的血氧饱和度平均值为 $(89.0 \pm 1.9)\%$, 均低于平原地区 ($> 95\%$)。相同海拔时不同 4 位测试人员血氧饱和度极差的平均值为 3.9 (表 2)。4 人的血氧饱和度并无显著差异 ($P = 0.199$), 说明 4 人的血氧饱和度对不同海拔的响应是相似的。随着海拔的上升, 4 位测试人员的血氧饱和度逐渐降低, 绝对含氧量和气压均与海拔呈显著负相关 ($P < 0.01$)。

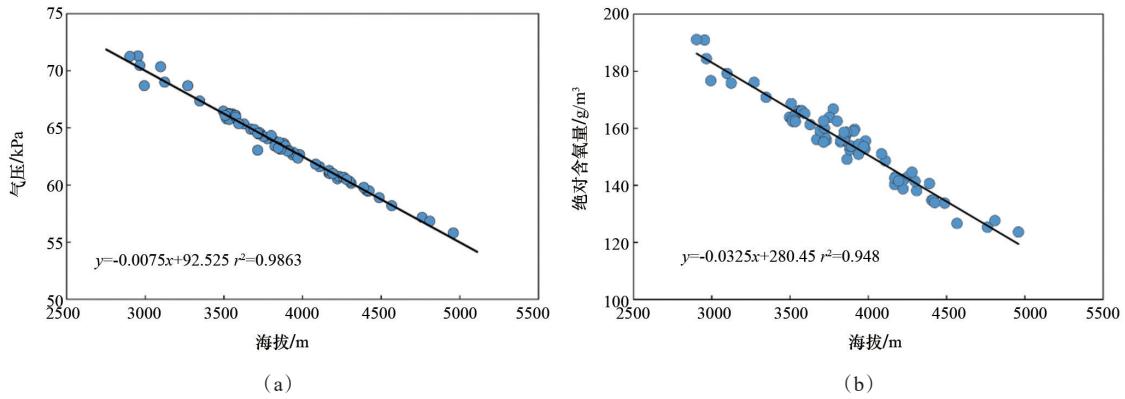


图2 气压(a)、含氧量(b)与海拔的关系

表2 测试人员不同海拔的血氧饱和度(%)

样点	采样时间	测试人员 a	测试人员 b	测试人员 c	测试人员 d	平均值	方差	极差
1	2021.7.21 8:00	89	84	86	88	87	2.2	5
2	2021.7.21 9:35	84	84	86	88	86	3.4	4
3	2021.7.21 11:10	86	84	84	85	85	1.4	2
4	2021.7.21 13:30	85	85	83	84	84	3.6	2
5	2021.7.21 14:30	83	78	84	83	82	3.7	6
6	2021.7.21 15:30	86	78	85	83	83	3.6	8
7	2021.7.21 16:30	84	74	83	78	80	5.5	10
8	2021.7.21 18:15	89	82	81	84	84	3.6	8
9	2021.7.22 15:30	85	83	83	78	82	3.0	7
10	2021.7.22 17:00	91	89	89	88	89	1.3	3
11	2021.7.23 9:45	95	91	91	93	93	1.9	4
12	2021.7.23 12:30	95	91	93	91	93	1.9	4
13	2021.7.23 16:20	93	89	93	91	92	1.9	4
14	2021.7.23 17:50	95	89	93	96	93	3.1	7
15	2021.7.23 19:30	95	89	95	90	92	3.2	6
16	2021.7.24 9:35	91	91	92	94	92	1.4	3
17	2021.7.24 9:55	94	95	93	94	94	0.8	2
18	2021.7.24 10:20	93	93	92	92	93	0.6	1
19	2021.7.24 10:50	89	93	93	90	91	2.1	4
20	2021.7.24 11:50	90	91	92	90	91	1.0	2
21	2021.7.24 12:15	92	92	92	93	92	0.5	1
22	2021.7.24 12:50	90	86	91	88	89	2.2	5
23	2021.7.24 14:30	89	91	91	89	90	1.2	2
24	2021.7.24 13:00	87	90	91	91	90	1.9	4
25	2021.7.24 16:00	94	88	92	93	92	2.6	6
26	2021.7.24 17:15	93	90	92	91	92	1.3	3
27	2021.7.24 17:55	94	89	93	89	91	2.6	5
28	2021.7.24 18:50	93	94	92	90	92	1.7	4
29	2021.7.25 9:00	95	93	91	92	93	1.7	4
30	2021.7.25 10:24	93	92	92	93	93	0.6	1
31	2021.7.25 10:55	89	92	91	88	90	1.8	4
32	2021.7.25 11:50	88	91	90	89	90	1.3	3
33	2021.7.25 12:10	88	88	88	84	87	2.0	4

表2 测试人员不同海拔的血氧饱和度(%) (续)

样点	采样时间	测试人员 a	测试人员 b	测试人员 c	测试人员 d	平均值	方差	极差
34	2021.7.25 13:05	84	83	83	88	85	2.4	5
35	2021.7.25 13:20	86	85	85	84	85	0.8	2
36	2021.7.25 14:45	88	89	86	88	88	1.0	3
37	2021.7.25 15:00	89	83	85	85	86	2.5	6
38	2021.7.25 16:20	84	77	86	80	82	4.0	9
39	2021.7.25 17:02	85	84	85	82	84	1.4	3
40	2021.7.25 17:20	87	86	88	85	87	1.3	3
41	2021.7.25 18:11	90	88	85	89	88	2.2	5
42	2021.7.25 18:50	89	86	86	83	86	2.4	6
43	2021.7.25 19:10	92	89	88	84	88	3.3	8
44	2021.7.26 9:20	92	90	89	90	90	1.3	3
45	2021.7.26 10:00	89	89	91	91	90	1.2	2
46	2021.7.26 11:00	90	94	92	93	92	1.7	4
47	2021.7.26 12:00	88	89	89	88	89	0.6	1
48	2021.7.26 12:50	92	88	90	92	91	1.9	4
49	2021.7.26 13:15	88	87	87	89	88	1.0	2
50	2021.7.26 14:38	88	88	88	89	88	0.5	1
51	2021.7.26 15:05	85	91	90	88	89	2.6	6
52	2021.7.26 15:30	86	88	86	86	87	1.0	2
53	2021.7.26 16:40	89	86	88	86	87	1.5	3
54	2021.7.27 9:15	85	88	84	90	87	2.8	6
55	2021.7.27 9:35	89	91	86	85	88	2.8	6
56	2021.7.27 10:25	89	88	88	89	89	0.6	1
57	2021.7.27 12:25	91	91	89	86	89	2.4	5
58	2021.7.27 12:55	90	90	90	92	91	1.0	2
59	2021.7.27 14:00	90	90	90	89	90	0.5	1
60	2021.7.27 15:50	92	90	89	89	90	1.4	3
61	2021.7.27 16:50	91	93	90	89	91	1.7	4
62	2021.7.27 17:10	92	95	88	92	92	2.9	7
63	2021.7.27 18:26	89	89	87	88	88	1.0	2
64	2021.7.27 19:00	92	88	89	88	89	1.9	4
65	2021.7.28 10:00	89	92	89	90	90	1.4	3
66	2021.7.28 11:00	89	89	91	91	90	1.2	2
67	2021.7.28 11:35	89	92	91	90	91	1.3	3
68	2021.7.28 12:50	94	93	91	95	93	1.7	4
69	2021.7.28 14:15	94	91	91	92	92	1.4	3
70	2021.7.28 15:20	93	94	93	92	93	0.8	2
平均值		90	88	89	89	89	1.9	3.9

3 讨论

3.1 绝对含氧量

空气中的氧气绝对含量表征单位体积内氧气的多少,其数值直接反映了人体是否能够通过空气

获得足够的氧气以维持人体正常运转。由公式(1)和(2)所得,绝对含氧量与大气压、开氏温度和相对含氧量有关。其中,大气压随海拔升高显著下降;而不同海拔下氧气的相对含量变化不大^[20],本研究测得 3000~5000 m 范围内,青藏高原相对含氧量平

均值为(20.6±1.05)%,这与其他研究结果基本一致^[8];开氏温度在285~303 K之间变化,平均值为295 K。相比于气压,含氧量和温度的变化幅度都不大,因此,不同海拔氧气绝对含量的主要影响因素为气压。由于地球引力的影响,随着海拔高度的增加,大气压呈线性下降,因此绝对含氧量与海拔也呈线性相关($y=-0.0325x+280.45, n=70, r^2=0.94$)。

3.2 缺氧对海拔的响应

由于海拔升高,大气压力降低,进入肺部的空气减少,绝对含氧量减少,肺泡气氧分压减少,因此,血液能够结合到的 O_2 也随之减少,动脉血氧分压减少,使血液向组织弥散氧的速率减慢^[21-22],导致供应组织的氧不足,细胞缺氧^[23]。简而言之,海拔升高使肺泡气氧分压、动脉血氧分压下降,最终导致血氧饱和度下降而引起缺氧。

动脉血氧分压与血氧饱和度存在密切的关系。在医学上,以动脉血氧分压(PaO_2)为横坐标(x 轴),动脉血氧饱和度为纵坐标(y 轴)所表达的动脉血氧分压与血氧饱和度相关性的曲线称动脉氧分压的氧离曲线^[24-25],它可以用指数函数^[26]进行表征 $y = 104 - 0.68 \times e^{-(PaO_2 - 20)/20.5}$ 。通过氧离曲线可以看出,动脉血氧分压从100 mmHg降到70 mmHg时,血氧饱和度下降的很缓慢,此段期间缺氧风险并不严重。当动脉血氧分压从70 mmHg继续下降时,血氧饱和度进入敏感段,氧离曲线变得陡峭,此时动脉血氧分压下降一个较小的值便会引发血氧饱和度的以指数型大幅下降,缺氧的风险也随之以指数型提高。

综上所述,随着海拔的升高,血氧饱和度并非简单的线性下降,而是呈指数型先慢后快下降趋势。借鉴氧离曲线的函数形式,研究将4位测试人员的血氧饱和度的平均值与海拔高度进行拟合,其关系式为 $y=104-0.68 \times e^{0.35x+1.77}$ (x 为海拔m, y 为血氧饱和度%),其相关系数 r^2 为0.574。以血氧饱和度为缺氧指示指标,则说明随着海拔升高,缺氧风险呈指数型上升(图3)。研究结果与查瑞波等^[12]的风险示意图相似,但本研究得出的缺氧(血氧饱和度)与海拔高度是一个连续函数关系式,没有断点,更

符合自然环境要素在空间连续分布特征,易于应用。

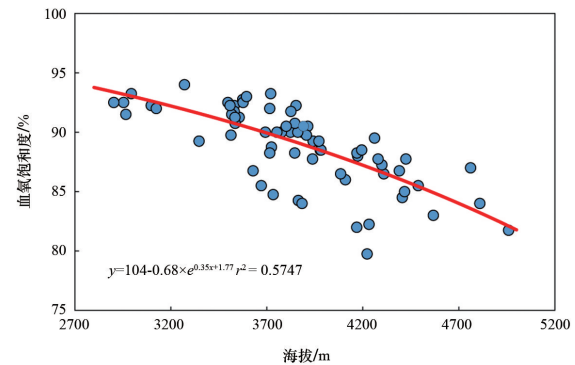


图3 海拔与血氧饱和度的关系

3.3 短居人群缺氧风险空间分布

为了进一步揭示青藏高原短居人群缺氧风险性的地域分布,以便帮助旅游者科学、合理地制定出行计划,研究以血氧饱和度为缺氧指示指标,利用血氧饱和度与海拔高度的关系式,评估青藏高原各区域缺氧风险。本研究基于在航空方面的研究,取血氧饱和度92%和85%分别是缺氧和严重缺氧的标准^[27]。据该标准将青藏高原缺氧风险划分为缺氧低风险区、缺氧中风险区、缺氧高风险区3个等级(图4),为充分认识各区域的缺氧现状,制定旅游等短居人群保护措施和区域人居环境改善与提升相关发展战略提供科学依据。

1) 缺氧低风险区。该地区海拔高度在3300 m以下,面积为 27.6×10^4 km²,占青藏高原面积的10.6%,主要分布在青海东北部、柴达木盆地和林芝以南,包括林芝、格尔木、西宁等城市。在该地区血氧饱和度缓慢下降,高原反应症状轻,活动能力基本不受限制,日常生活可自理,通常情况下不需要就医处理。

2) 缺氧中风险区。该地区面积为 82.4×10^4 km²,占青藏高原面积的30.2%,海拔高度在3300 m以上,包括拉萨、山南、日喀则、昌都、玉树、玛多、玛沁、甘孜等城市。该区域主要分布在青海西北部、西藏东部山地和青藏高原河流谷地之间,是青藏高原缺氧风险区比较高的地区。在该区域血氧饱和度迅速下降,高原反应症状较重,静息时

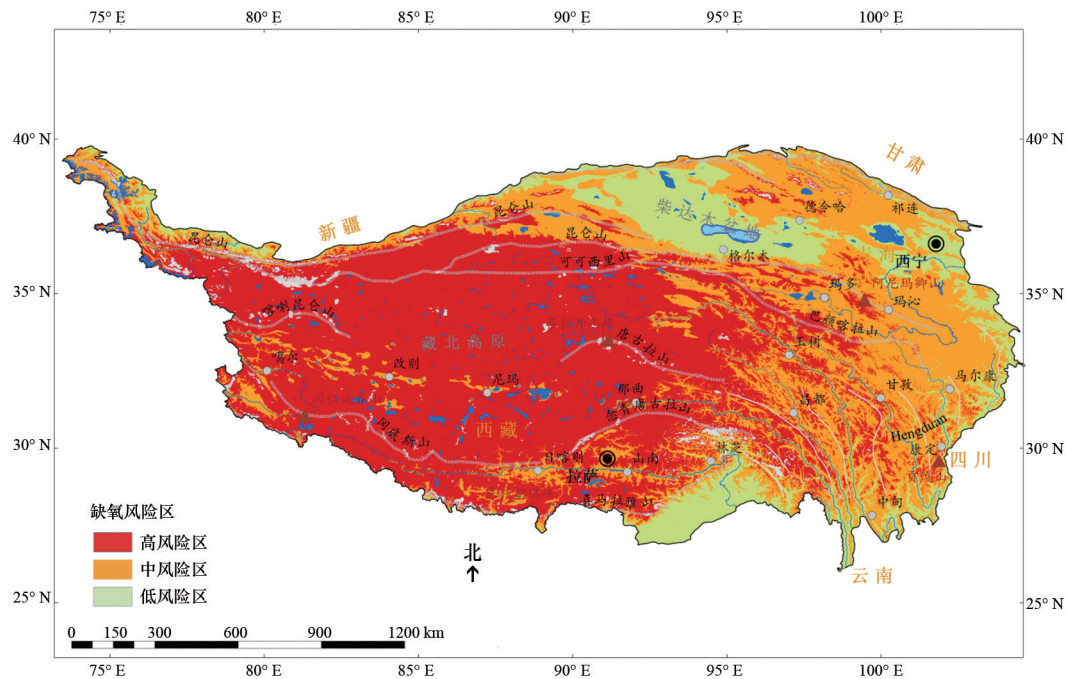


图4 青藏高原缺氧风险示意

心率、呼吸增加,活动能力部分受限,如果出现病症需立即对症治疗。

3) 缺氧高风险区。该地区面积为 $148.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占青藏高原面积的 57.4%, 海拔高度在 4550 m 以上, 包括改则、那曲、尼玛、噶尔等城市,

该区域大概分布在藏北高原无人区和喜马拉雅山系, 是青藏高原缺氧风险区最高的地区。该地区血氧饱和度明显偏低, 在该地区时要时刻注意缺氧风险, 非必要不要在此地长期逗留, 必要时采取吸氧或者药物治疗(表3)。

表3 不同缺氧风险区基本情况

	面积/ 10^4 km^2	面积比例/%	海拔/m	急性高原反应风险频率 ^[11]	主要旅游城市
高风险区	148.3	57.4	>4550	>77%	改则、那曲、尼玛、噶尔
中风险区	82.4	32.0	>3300	40%~77%	拉萨、山南、日喀则、昌都、玉树
低风险区	27.6	10.6	<3300	<40%	格尔木、西宁、林芝、墨脱

3.4 不足与展望

本研究分析了青藏高原70个不同海拔点的绝对含氧量和血氧饱和度分布特征, 以海拔为缺氧风险的主要指标, 绘制了青藏高原缺氧风险图, 认为海拔是影响氧气含量和缺氧风险的主要因素。史培军等^[8]研究发现, 除了海拔高程, 植被盖度和500 hPa-T(500百帕的大气温度)也对绝对含氧量有影响, 且其贡献率分别达到了18.5%和14.5%。现有研究尚无法具体量化验证含氧量与海拔、植被盖

度、500 hPa-T的相互关系, 以用于评价一个地方的缺氧风险, 这也是未来研究的重要方向。

除此之外, 一方面, 为了尽量贴合短居人群的出行特征和对高原的适应情况, 本次研究只选择了旅游旺季进行了一周, 野外工作采集的数据有限, 可能对研究结果造成一定影响。同时, 本次考察主要选择的是青藏高原人口密集的雅鲁藏布江地区, 将结果外推到青藏高原, 是否存在差别也是未来研究的方向之一。

4 结论

目前每年有超过9000万低海拔人群进入青藏高原,然而高原独特的地理特征引起缺氧给进藏人员的人体健康造成严重危害,然而目前关于青藏高原缺氧风险尚缺乏机理性研究。本文以此为出发点,基于对青藏高原地区不同海拔的气压、含氧量等测量,结合4位测试人员在不同区域血氧饱和度,拟合海拔与血氧饱和度的关系,并做出青藏高原缺氧风险空间分布图。结果发现绝对含氧量随海拔呈线性关系下降,但缺氧风险并非线性上升,而是呈现指数形式快速上升。根据血氧饱和度与海拔高度的关系,将青藏高原划分为缺氧高风险区(57.4%)、缺氧中风险区(32.0%)、缺氧低风险区(10.6%)。青藏高原有近90%的区域存在中高程度的缺氧风险,应做好缺氧防护工作。研究可为制定缺氧保护措施和地区发展战略提供科学依据,也可为进一步解释高原缺氧机理提供理论依据。

参考文献(References)

- [1] 虞虎, 钟林生, 樊杰. 青藏高原国家公园群地域功能与结构研究[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 823-832.
- [2] 许珺, 徐阳, 胡蕾, 等. 基于位置大数据的青藏高原人类活动时空模式[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 12.
- [3] 李雪, 李文斌, 封士兰, 等. 血红蛋白在高原低氧适应中的机制研究进展[J]. 浙江大学学报(医学版), 2019, 48(6): 674-681.
- [4] 吴天一. 青藏高原人体低氧适应问题[J]. 青海环境, 1995, 6(1): 5-7.
- [5] 吴天一. 我国青藏高原慢性高原病研究的最新进展[J]. 中国实用内科杂志, 2012, 32(5): 321-323.
- [6] 薛华菊, 方成江. 高原人体生理适应学理论在进藏旅游中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2): 183-189.
- [7] 赵海霞. 高浓度葡萄糖应用于高原列车进藏旅客急性轻型高原病460例临床分析[J]. 青海医学杂志, 2010, 40(9): 87-88.
- [8] 史培军, 陈彦强, 张安宇, 等. 青藏高原大气氧含量影响因素及其贡献率分析[J]. 科学通报, 2019, 64(7): 89-98.
- [9] Zhong L, Yu H, Zeng Y. Impact of climate change on Tibet tourism based on tourism climate index[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(12): 2085-2100.
- [10] 长安, 葛全胜, 方修琦, 等. 青藏铁路旅游线气候适宜性分析[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 533-540.
- [11] 余志康, 孙根年, 冯庆, 等. 青藏高原旅游气候舒适性与气候风险的时空动态分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2327-2336.
- [12] 查瑞波, 孙根年, 董治宝, 等. 青藏高原大气氧分压及游客高原反应风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, 29(1): 92-98.
- [13] Woorons X, Richalet J P. Modelling the relationships between arterial oxygen saturation, exercise intensity and the level of aerobic performance in acute hypoxia[J]. European Journal of Applied Physiology, 2021, 121(7): 1993-2003.
- [14] Qiu J. China: The third pole[J]. Nature, 2008, 454, 393-396.
- [15] Yao T, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. Third pole environment (TPE) [J]. Environmental Development, 2012, 3(1): 52-64.
- [16] Chen X, An S, Inouye D W, et al. Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof[J]. Global Change Biology, 2015, 21, 3635-3646.
- [17] 张丛林, 陈伟毅, 黄宝荣, 等. 国家公园旅游可持续性管理评估指标体系——以西藏色林错-普若岗日冰川国家公园潜在建设区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7299-7311.
- [18] 尼玛. 西藏旅游助力西藏精准脱贫研究[J]. 现代商业, 2017, 11: 79-81.
- [19] 钟林生. 青藏高原旅游规划案例[M]. 北京: 中国旅游出版社, 2018.
- [20] Cynthia M B. Two routes to functional adaptation: Tibetan and Andean high-altitude natives[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(Suppl.1): 8655-8600.
- [21] 陈卫民, 崔健君, 郭艳辉, 等. 动脉与肺泡氧分压比值在评价ICU病人肺换气功能中的应用[J]. 中国实用外科杂志, 1997(7): 48-49.
- [22] Gattinoni L, Busana M, Camporota L. Standardised PaO₂/FiO₂ ratio in COVID-19: Added value or risky assumptions? [J]. European Journal of Internal Medicine, 2021, 92: 45-54.
- [23] LeónVelarde F, Gamboa J, Chuquiza W, et al. Hematological parameters in high altitude residents living at 4355, 4660, and 5500 meters above sea level[J]. High Altitude Medicine and Biology, 2000, 1: 97-104.

- [24] 曹稳根. 氧离曲线特征及其影响因素作用的分析[J]. 生物学通报, 2000, 35(12): 11-13.
- [25] 张倩, 官立彬, 白志川, 等. 血红蛋白与高原习服适应的研究进展[J]. 重庆医学, 2014, 43(6): 753-755, 757.
- [26] 罗凯, 罗炎杰. 氧离曲线的数学模式与临床意义[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2007, 6(6): 448-451.
- [27] 魏志强, 庞西宁. 基于血氧饱和度计算客舱应急补氧量的研究[J]. 航天医学与医学工程 2020, 33(5): 422-426.

Risk of hypoxia of short-term residents in Qinghai-Tibet Plateau

LIU Jinhao^{1,2}, XIN Zhongbao^{1,2*}, HUANG Yanzhang^{1,2}, LIN Feng^{1,2}

1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network(CNERN), Beijing 100083, China

Abstract The Qinghai-Tibet Plateau is an attraction for ecological and cultural tourists. However, the risk of hypoxia threatens serious harm to human health. It is of great significance to study the hypoxia risk in the Qinghai Tibet Plateau from the perspective of the physical geography for the local development and the hypoxia policy-making. In this study, the relationship between the altitude and the blood oxygen saturation is studied and the spatial distribution map of the hypoxia in the Tibetan Plateau is obtained. It is shown that, (1) the absolute oxygen content decreases linearly with the increase of the altitude ($y = -0.0325x + 280.45$, $n = 70$, $r^2 = 0.94$); (2) there is an exponential relationship between the blood oxygen saturation and the altitude ($y = 104 - 0.68 \times e^{0.35x + 1.77}$, $n = 70$, $r^2 = 0.57$) and with the increase of the altitude, the risk of the hypoxia increases exponentially; (3) the Tibetan Plateau is divided into the high risk area, the medium risk area and the low risk area of hypoxia according to the relationship between the blood oxygen saturation and the altitude. The study could provide a scientific basis for the regional tourism development strategy and also a theoretical basis for further exploring the mechanism of the altitude anoxia.

Keywords Qinghai-Tibet Plateau; high altitude; blood oxygen saturation; hypoxia risk ●



(责任编辑 徐丽娇)