

青藏高原大气氧含量影响因素及其贡献率分析

史培军^{1,2,3*}, 陈彦强^{1,3}, 张安宇^{1,3}, 何研^{1,3}, 高妙妮⁴, 杨静^{1,2,3}, 毛睿^{1,2,3}, 吴吉东^{1,2,3},
叶涛^{1,2,3}, 效存德^{1,3}, 徐柏青⁵

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;
3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
4. 北京师范大学系统科学学院, 北京 100875;
5. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101

* 联系人, E-mail: spj@bnu.edu.cn

2018-07-01 收稿, 2018-10-10 修回, 2018-10-11 接受, 2018-11-21 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602404)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20000000)和国家自然科学基金创新研究群体项目(41621061)资助

摘要 已有工作认为, 近地表空气中氧气相对含量在不同海拔上无明显变化. 然而, 对采集自青藏高原的数据利用主成分分析发现, 500 hPa的大气温度(500 hPa-T)、地表植被盖度及海拔对氧气相对和绝对含量都产生一定的影响. 就氧气相对含量而言, 植被盖度的方差解释率为33.1%, 500 hPa-T和海拔的方差解释率分别为28.5%和3.9%, 总方差解释率为65.5%; 通过理想气体状态方程计算得到氧气绝对含量, 发现海拔对其方差解释率为45.9%, 植被盖度和500 hPa-T分别为18.5%和14.5%, 总方差解释率为78.9%. 认识高海拔地区氧气相对和绝对含量与其对应的植被及气象要素间的关系, 不仅对改善居住及生活在高海拔地区人类和家畜的健康具有重要指导作用, 也对加深理解全球变化背景下高海拔地区的环境风险有重要的理论与实践意义.

关键词 氧含量, 青藏高原, 生命健康, 海拔, 植被, 气象要素, 主成分分析

高海拔地区(海拔 ≥ 2500 m, 图1)是现代人类重要的居住及活动区域之一. 据估算, 其区域面积为1100多万平方千米, 占全球陆地总面积的7.7%; 2015年, 区内人口约为1.07亿, 占全球总人口的1.5%^[1,2]. 因其区内丰富的矿产与景观资源、特殊重要的战略地位, 对包括地球“三极”在内的高海拔地区的环境风险研究已引起社会各界的高度重视^[3-5]. 高海拔地区是世界环境与生态安全的重要屏障, 也是全球变化的敏感区和调节区^[6]. 在人类活动不断增强和全球变暖的大背景下, 区内冰川退缩、土地退化、生物多样性受到威胁、局部地区污染等问题日趋严重, 自然灾害发生频次也可能增多, 巨灾发生概率增大, 环境与

自然灾害风险进一步增加^[7].

人与动物血液中的血红蛋白具有携氧功能, 它能与氧气迅速结合, 又能迅速分离. 当血液通过肺时, 肺内的氧分压较高, 血红蛋白能结合96%左右的氧, 形成氧合血红蛋白而把氧带到组织细胞中去, 供给身体之需要. 海拔升高, 大气中氧分压减小, 导致人体血液中血红蛋白浓度明显下降, 人体呼吸和运输氧气的能力减弱^[8], 会出现血氧过少的现象. 当海拔高于2700 m时, 人体心血管系统和中央神经系统已经开始受到缺氧的影响^[9].

初入高原时, 人体多表现为头痛、全身疲乏无力、头昏眼花、失眠、眩晕、恶心和呕吐等症状; 严

引用格式: 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. 科学通报, 2019, 64: 715-724

Shi P J, Chen Y Q, Zhang A Y, et al. Factors contribution to oxygen concentration in Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 715-724, doi: 10.1360/N972018-00655

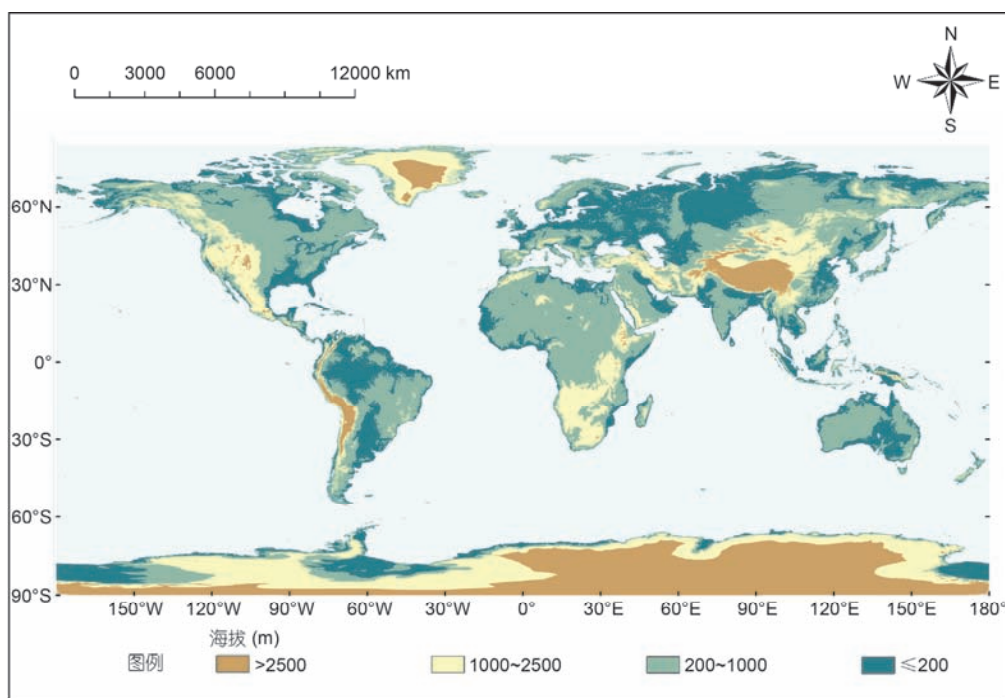


图1 全球陆地海拔分布图. 改编自文献[10], 棕褐色部分为高海拔地区

Figure 1 Distribution map of global land altitude. Adapted from Ref. [10], the high altitude area in tan

重时易出现脑水肿、肺水肿等危险状况^[11-13];在高原环境适应3个月左右后,又可能会重新出现不适应,出现乏力、头痛、头晕、运动缺乏耐力等,部分患者甚至可能出现肝大或蛋白尿^[14-17]。另外,高原上人的工作能力也会随海拔高度的增加而降低——海拔每升高1000 m,人的工作能力下降10%左右^[18]。伴随着高海拔而来的急性高原病(AMS)^[11]和慢性高原病(CMS)^[19,20]等对人类适应这一极端环境的能力提出了巨大的挑战。一些研究则表明,即使经过较长时间的持续暴露,人类对低氧环境的适应能力仍处于较低水平^[21,22]。高海拔地区恶劣的自然环境、欠发达的基础设施建设水平和医疗卫生体系以及愈来愈多的人口暴露和人类较低的适应能力,使得这一区域的人口环境风险居高不下。

青藏高原是世界“第三极”^[3],总面积约为 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,平均海拔4000 m以上^[23],空气稀薄,生态环境极为脆弱^[7]。对于区域内人口与经济系统来说,缺氧是极其重要的致灾因子之一^[24,25]。仅就西藏而言,从1982~2015年,区内总人口数从189万增长至324万;年进藏旅游人数也从1.8万人次增长至2018万人次,尤其是2006年青藏铁路开通后呈现井喷式增长^[26]。缺氧环境严重影响当地居民和外来游客的正

常生产、生活、观光和其他人文与社会活动。

已有研究表明,大气压和氧气分压随着海拔的升高呈现出显著的减小趋势^[27-29],而氧气相对含量在不同高程上则无明显变化^[30]。2017年7~8月,本研究组在青藏高原野外科考工作过程中发现,近地表空气中氧气相对含量与气象要素、植被盖度及海拔(大气压)密切相关。经文献调研,发现前人研究中几无相关研究。在全球变暖的大背景下,厘定地表氧气相对和绝对含量与海拔、植被盖度及气象要素间的相互关系,对深入理解全球气候变化背景下青藏高原乃至全球高海拔地区人口与经济系统的环境风险,进而保障高海拔地区生态安全,提高区内居民/游客的健康水平与人身福祉、动物健康与安全水平,促进高海拔地区稳定、繁荣与可持续发展具有重要的意义。

1 数据与方法

2017年7月27日~8月4日,本研究组在青藏高原野外工作(考察区域及采样点位置见图2)时,选取65个样点,采集到每个样点的经纬度、海拔、大气压及氧气相对含量等数据,并对每个取样点的植被盖度情况进行了拍照取样。

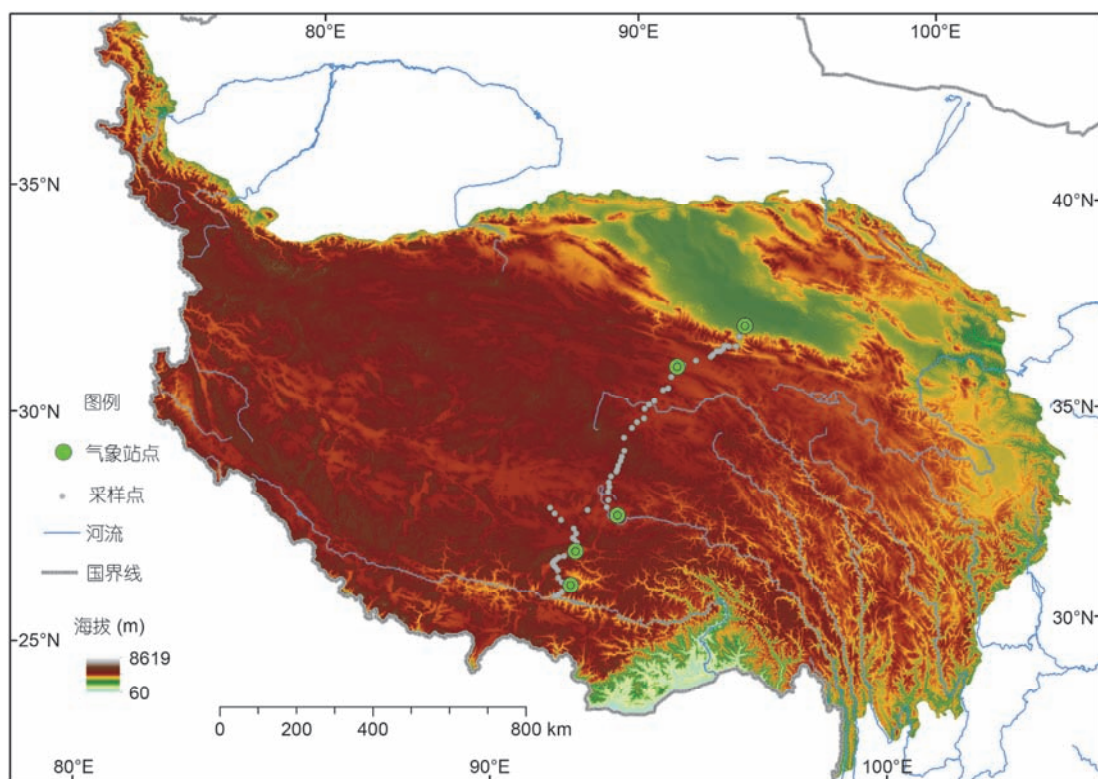


图2 研究区及采样点位置图

Figure 2 Location map of study area and sampling sites

(i) 海拔. 通过Garmin Oregon 450型GPS测定, 其精度为1 m. 利用SRTM 90 m数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>)对测量的海拔数据进行了验证. 如图3所示, 对实测海拔与SRTM数据进行线性拟合, 发现二者相关性很好, 且通过了0.001显著性检验.

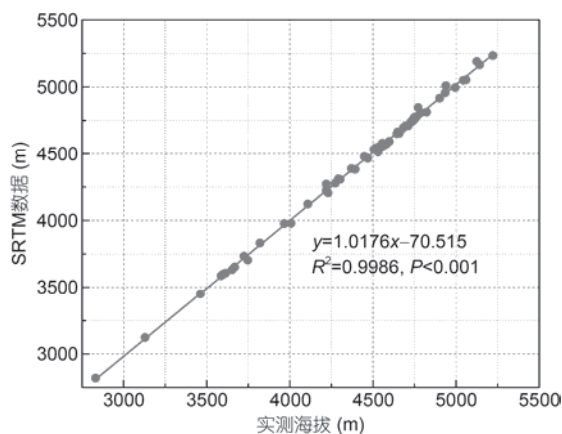


图3 实测海拔与SRTM数据对照图

Figure 3 Comparison of measured elevations to SRTM data

(ii) 气压. 近地表大气压通过卡西欧prg-130gc型气压计测定, 其精度为5 hPa.

(iii) 氧气相对含量(ROC). 利用CY-12C型数字测氧仪测得(所用仪器由浙江省建德市新安江分析仪器二厂生产, 0~50.0%量程, 其最小分辨率为0.1%, 精度为±1%). 为尽可能减小系统误差, 采集数据时利用3台测氧仪同时测量, 在后续分析时取其平均值.

(iv) 氧气绝对含量(AOC). 根据理想气体状态方程(式(1))可计算出各采样点的空气密度:

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

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)(在数值上, 开氏温度=摄氏温度+273.15). 因此, 空气密度(ρ)是大气压(P)和气温(T)的函数; 中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供了当雄、那曲、五道梁、格尔木及拉萨等5个气象站点(站点具体位置见图2)逐小时气温数据, 根据“就近”原则, 取空间上最近站点最接近采样时间的温度数据, 通过垂直气温递减

率^[31](取6.5℃/1000 m)可换算得到65个采样点的气温.

将空气密度与氧气相对含量的乘积定义为“氧气绝对含量”,进一步可计算得到65个采样点的氧气绝对含量.氧气相对含量与绝对含量数据的基本统计信息如表1所示.

(v) 植被盖度. 利用采样点照片估算各采样点植被盖度. 具体解译过程如下: (1) 对每个测量点,在Google Earth中标记出某方向上的一个点(如图4,黄点为采样点,绿点为标记的方向). 根据照片中标记的方向,由采样点外每隔50 m标记1个位置点,向外延伸1000 m,则共有20个位置点; (2) 按逆时针方向依次旋转90°,180°和270°,在另外3个方向各标记20个位置点,这样每个采样点共有81个位置点(含拍照站立点). 考虑到高原夏季的植被生长情况,结合实地照片和遥感影像进行目视解译,按照中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)建立的土地利用与土地覆盖变化(Land Use and Cover Change, LUCC)分类系统^[32]取各土地利用类型对应的盖度情况(表2). 81个位置点植被盖度的平均数即为该采样点的植被盖度. 利用中国国家地球系统科学数据共享服务平台提供的全球陆表特征参量(GLASS)植被覆盖率(FVC)产品(<http://www.geodata.cn/thematicView/GLASS.html>),得到2016年同期(7月27日)各采样点对应的植被盖度,据此对经照片计算得到的植被盖度数据进行验证,结果为二者线性相关

关系可通过0.05显著性检验,说明通过照片估算的植被盖度具有较好的准确性.

(vi) 500 hPa气温(500 hPa-T). 500 hPa-T数据下载自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA-Interim逐6小时气温再分析数据(<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/evtype=pl/>),其水平空间分辨率为0.25°×0.25°,数据区域和时间与野外采样点保持一致. 该数据为格点数据,在计算时选用距目标采样点最近的格点温度为对应500 hPa的气温.

(vii) 主成分分析法. 地理要素各指标之间总是存在或多或少的联系,主成分分析法能够考虑到各指标间的信息关联,在最大限度保留原始信息的同时,对高维变量进行降维,在此基础上较客观地确定各指标的权重,从而使得评价结果更加客观. 本研究中利用SPSS21.0软件对相关数据进行主成分分析,主要步骤^[33,34]包括: (1) 数据标准化; (2) 检验数据是否适合采用主成分分析法进行因子分析; (3) 根据特征值或所得贡献率确定主成分; (4) 主成分的综合分析.

表1 氧气含量数据基本统计信息

Table 1 Descriptive statistics for ROC and AOC

指标	样本数	平均值	最大值	最小值	标准差
氧气相对含量(%)	65	21.1	21.9	20.8	0.2
氧气绝对含量(g/m ³)		153.2	183.0	136.1	9.9



图4 地表植被盖度估算方法示意图

Figure 4 Schematic diagram of surface vegetation coverage estimation

表 2 各土地利用类型对应的植被盖度表

Table 2 Vegetation coverages corresponding to LUCC

编号	二级分类	盖度(%)	编号	二级分类	盖度(%)
12	旱地	70	43	水库坑塘	0
21	有林地	65	51	城镇用地	0
22	灌木林	60	52	农村居民点	0
23	疏林地	20	53	其他建设用地	0
24	其他林地	30	61	沙地	2.5
31	高覆盖度草地	75	62	戈壁	2.5
32	中覆盖度草地	35	64	沼泽地	75
33	低覆盖度草地	13.5	65	裸土地	2.5
41	河渠	0	66	裸岩石质地	2.5
42	湖泊	0	67	其他未利用地	20

为剥离出海拔、植被盖度和500 hPa-T三个因子对氧气含量的贡献率, 取各因子的系数为主成分方差贡献率的权重, 对各因子在主成分线性组合中的系数做加权平均^[34], 在此基础上对各因子权重的绝对值进行归一化处理, 即可得到各因子的贡献率权重。

2 结果

2.1 各要素相关关系

如图5(a), 经计算发现, 在本次采样范围内, 随着海拔的增加, 近地表氧气相对含量呈现出明显的下降趋势, 且通过0.05显著性检验. 植被盖度与氧气相对含量之间存在一定的正相关(图5(b)), 在采样范围内, 随着植被盖度的增加, 氧气相对含量呈现一定的增加趋势, 且亦通过0.05显著性检验. 如图5(c), 在本次采样范围内, 随着500 hPa-T的增加, 氧气相对含量呈现出一定的下降趋势, 且通过0.05显著性检验. 对氧气绝对含量与海拔进行线性拟合, 发现在本次采样范围内, 随着海拔的增加, 氧气绝对含量呈现显著下降趋势(图5(d)), 且通过0.001显著性检验。

因实测近地表大气压数据本身无法验证其准确性, 故利用海拔与实测大气压间的相关关系进行检验(图6黑色圆圈及实线). 可以看出, 海拔与大气压之间存在显著的负相关关系, 随着海拔的增加, 实测

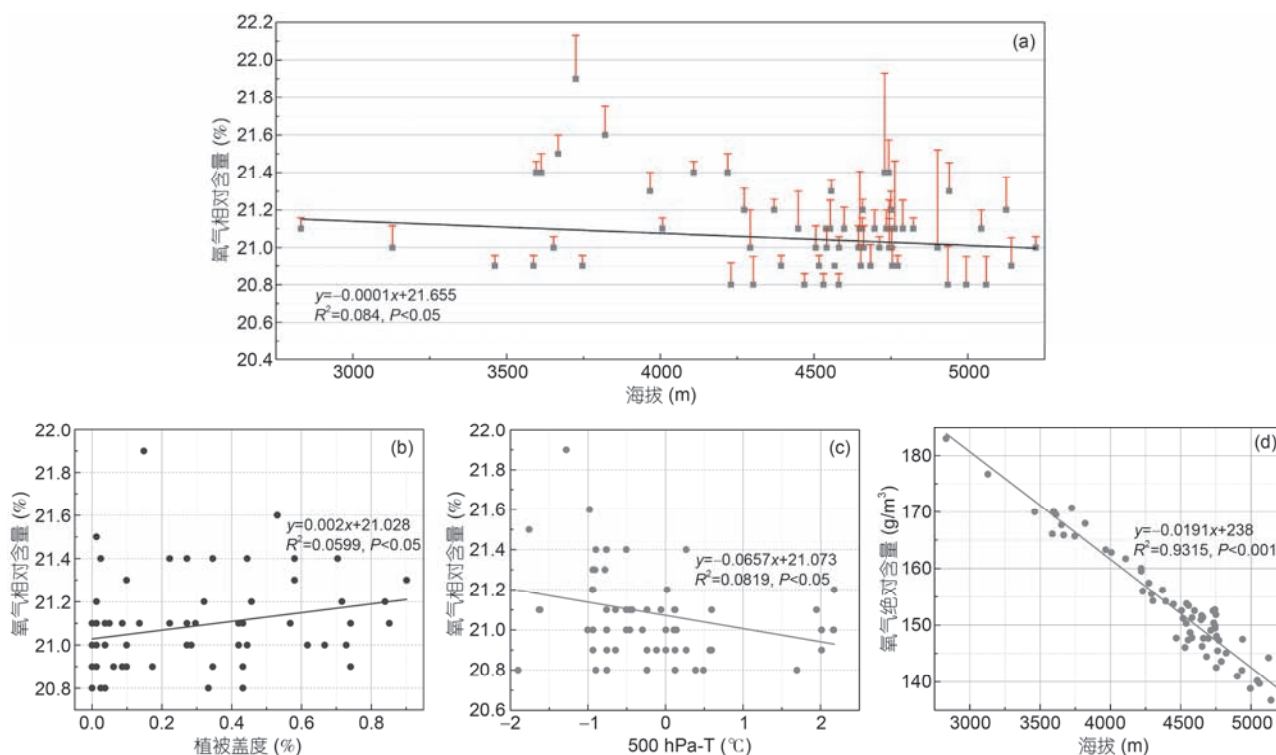


图 5 (网络版彩色)各要素相关关系图. (a) 海拔与氧气相对含量, 误差条为氧气相对含量标准差; (b) 植被盖度与氧气相对含量; (c) 500 hPa-T 与氧气相对含量; (d) 海拔与氧气绝对含量

Figure 5 (Color online) The relationship between multi-factors (S.D. error bar in (a)). (a) Altitude and ROC; (b) vegetation coverage and ROC; (c) 500 hPa-T and ROC; (d) altitude and AOC

大气压呈现明显的下降趋势,且通过了0.001显著性检验,证明实测大气压数据是准确的.

2.2 基于主成分分析的方差解释率

对选用的氧气相对含量、海拔、植被盖度及500 hPa-T四个指标进行主成分分析,发现海拔、植被盖度和500 hPa-T三者对氧气相对含量的总方差解释率为65.5%,其中植被盖度的方差解释率为33.1%,500 hPa-T和海拔的方差解释率分别为28.5%和3.9%.

利用同样的方法,发现海拔、植被盖度和500 hPa-T三者对氧气绝对含量的总方差解释率为78.9%,其中海拔的方差解释率最大,为45.9%,植被盖度和500 hPa-T分别为18.5%和14.5%.各因子解释的总方差及成分矩阵分别如表3和4所示.

3 讨论

3.1 近地表氧气含量与海拔、植被盖度及500 hPa-T之关系

上述分析结果表明,海拔、植被盖度和500 hPa-T与近地表氧气相对含量的线性拟合,均通过了0.05显著性检验.其相关关系的具体意义与可能原因如下:海拔与氧气相对含量呈现负相关关系(图5(a)),说明在一定范围内,海拔越高,对应氧气相对含量越低.植被盖度与氧气相对含量呈现正相关关系(图5(b)),即当地表植被盖度增加时,对应区域的氧气相对含量上升,这可能是因植被光合作用产氧增多引起.这就要求在考虑地表植被盖度的同时,还要关注植被

类型.青藏高原近地表气温与同高度的自由大气相比,冬季高原地表气温偏低,夏季偏高^[35].在夏季,青藏高原是个强大的热源,向四周大气输送热量,形成地面热低压,空气上升,在对流层上层形成暖高压,进而发展成为南亚高压的一部分^[36].从数据分析结果来看,500 hPa-T与氧气相对含量亦呈现负相关关系(图5(c)),500 hPa的大气温度愈高,对应位置的氧气相对含量越低.

经主成分分析发现,海拔、植被盖度和500 hPa-T对氧气相对含量的总方差解释率为65.5%,其关系为植被盖度>500 hPa-T>海拔.说明氧气相对含量不仅受到海拔的作用,同时更受到植被盖度和500 hPa-T的影响.海拔、植被盖度和500 hPa-T三者对氧气绝对含量的总方差解释率为78.9%,其关系为海拔>植被盖度>500 hPa-T.说明氧气绝对含量主要受到海拔的

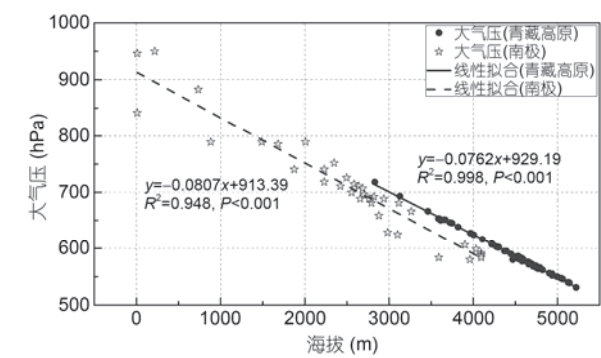


图6 青藏高原与南极^[20]大气压随海拔变化情况对比图
Figure 6 Surface air pressure change with altitude change in Qinghai-Tibetan Plateau and Antarctica^[20]

表3 因子解释的总方差表

Table 3 The total variances of the interpretation

成分		初始特征值			提取平方和载入		
		合计	方差的百分量(%)	累积百分量(%)	合计	方差的百分量(%)	累积百分量(%)
氧气 相对 含量	1	1.559	38.982	38.982	1.559	38.982	38.982
	2	1.061	26.519	65.501	1.061	26.519	65.501
	3	0.797	19.931	85.432			
	4	0.583	14.568	100.000			
氧气 绝对 含量	1	1.973	49.317	49.317	1.973	49.317	49.317
	2	1.183	29.566	78.883	1.183	29.566	78.883
	3	0.814	20.351	99.234			
	4	0.031	0.766	100.000			

表4 成分矩阵表

Table 4 Component matrices

	氧气相对含量成分		氧气绝对含量成分	
	1	2	1	2
海拔(m)	0.458	0.788	0.988	0.089
植被盖度(%)	0.540	0.590	0.045	0.777
500 hPa-T(°C)	0.643	0.260	0.124	0.754

作用,同时也受到植被盖度和500 hPa-T的影响。

3.2 全球变暖背景下高海拔地区近地表氧气相对含量的变化

在全球气候变暖背景下,高海拔地区普遍存在区域升温增强现象和随海拔升温增强趋势^[37],这一区域地表气温的显著变化可能引起近地表大气氧气相对含量的变化。作为O₂重要的生产源,地表植被的变化可能会显著改变大气氧气相对含量及其分布格局。研究表明,近几十年青藏高原植被NPP总体呈现上升趋势^[38],而海拔在短期内保持相对不变,在这种背景下,该区域大气氧气相对含量的变化将取决于500 hPa-T和地表植被盖度及其组成的相对变化。

与采集自南极近地表的数据^[20]对比发现,同一海拔高程上,青藏高原的大气压比南极地区高一些(图6),说明在可获取数据范围内,同一海拔上南极大气比青藏高原更稀薄,这可能是由于两地同样高的海拔内,地表植被盖度和气象要素的显著差异造成的,事实上南极高原几无植被^[39],且更加寒冷。图6显示,两地近地表大气压与海拔的拟合曲线中,南极地区的斜率比青藏高原稍小,说明除地表植被盖度

的影响外,两地同一大气压下的大气温度也可能有明显差异。同时,这也可能受到采样时间(季节)的影响。为此,还需要更多更细致的测量和更深入的分析工作。

3.3 氧气含量变化与高原缺氧健康风险

通常,人体动脉中的氧分压高于7.98 kPa时,机体才能进行基本的生理活动^[40]。而当人体吸入空气的氧分压低于16 kPa时,就会出现缺氧症状,人变得行动迟钝^[41]。结合野外采样获得的数据(图7(a)),可以发现在所有采样点所在的海拔上,氧分压都已低于16 kPa,即可导致人体出现高原反应。在同一海拔上,与人体呼吸的生理过程最为密切的4种氧分压存在如下规律:大气氧分压>可吸入氧分压>肺泡气氧分压>动脉血氧分压^[29],现有的研究和数据暂无法具体量化其相互关系,未来可尝试开展更深入的研究工作。

此外,有文献以5年以上驻藏部队人员为样本,给出了西藏迁入人口CMS发病率与海拔间的关系^[25]。通过线性拟合,本研究选取的65个采样点其氧气绝对含量与CMS发病率之间的关系如图7(b)所示。可以看出,氧气绝对含量与CMS发病率有很好的相关性,氧气绝对含量的提高可以显著减少CMS的发病率。另外,Huang等人^[42]的研究结果表明,在典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs) RCP8.5情景下,到21世纪末,大气中的氧气相对含量将进一步下降,这也进一步说明了高原缺氧健康风险研究的必要性和紧迫性。

本研究初步分析了青藏高原65个采样点海拔、地表植被盖度和500 hPa-T与近地表氧气含量的关系。

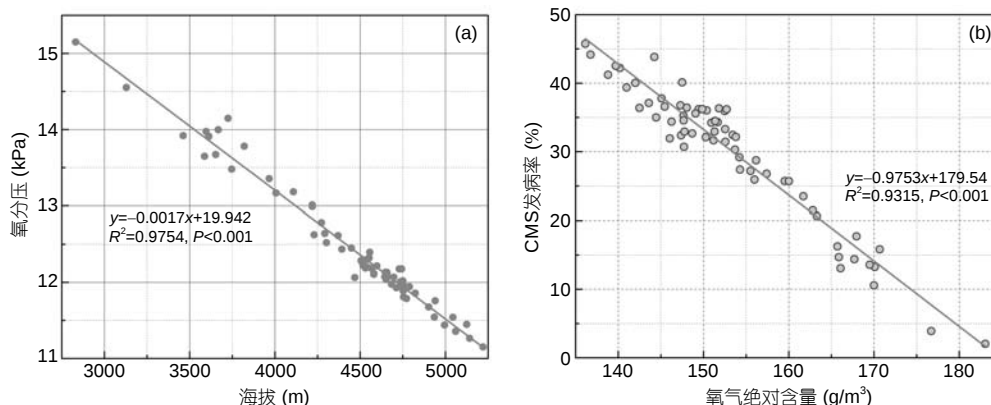


图7 海拔与氧分压(a)及氧气绝对含量与CMS发病率^[25](b)关系图

Figure 7 The relationships between altitude and oxygen partial pressure (a), between AOC and CMS incidence^[25] (b)

除海拔(大气压)外,近地表氧气相对和绝对含量同时受到植被盖度和气象要素的显著影响.应当看到,青藏高原上气象站点分布较少,近地表的温度通过仅有的几个站点换算得到,其可靠性尚待检验和改进;另一方面,野外工作采集的数据总是有限,而且本次采样只是在短短几天内完成,不排除其他偶然因素的影响.另外,计算结果显示,氧气相对含量的标准差约为0.2%(表1),相对较小,除该指标本身原因外,这可能也与野外获得的样本数量及其地表被盖度的变幅和气象要素的波动幅度有关.

为进一步检验这些结果是否适用于全球其他高海拔地区,未来的工作中可以通过定点观测和扩大观测高原植被盖度变化范围,研究一年中不同季节、不同天气状况,以及不同植被盖度条件下氧气相对含量的变化情况.同时还需对高海拔地区其他相关环境参数进行观测.这样,结合全球遥感对地观测数据、站点数据和天气与气候的再分析资料,可以在更

大的时空尺度上分析、检验这些结果.

4 结论

基于2017年7~8月采集自青藏高原的数据,本研究发现海拔、500 hPa-T与近地表氧气相对含量呈现显著的负相关关系,地表植被盖度与氧气相对含量呈现显著的正相关关系.利用主成分分析方法,计算得到海拔、植被盖度和500 hPa-T三者对氧气相对含量的总方差解释率为65.5%,其中,植被盖度的方差解释率最大,为33.1%,500 hPa-T和海拔分别为28.5%和3.9%;利用理想气体状态方程计算得到氧气绝对含量,发现海拔、植被盖度和500 hPa-T三者对氧气绝对含量的总方差解释率为78.9%,其中海拔的方差解释率最大,为45.9%,植被盖度和500 hPa-T分别为18.5%和14.5%.氧气绝对含量与CMS发病率有很好的相关性,氧气绝对含量的提高可以显著减少CMS的发病率.

致谢 在野外观测中,相关工作得到中国科学院青藏高原研究所姚檀栋院士,西藏自治区人民政府丁业现先生,西藏自治区那曲行政公署斯郎江措、罗布扎堆和高鹏先生等的大力支持与帮助,中国科学院大气物理研究所孔祥慧博士、中国科学院地理科学与资源研究所王红博士及应急管理部国家减灾中心周洪建博士参加了野外采样工作,北京师范大学龚道溢和周涛教授在数据分析方面提供了帮助,匿名审稿人为本文提出了建设性修改意见和建议,在此一并致谢!

参考文献

- 1 US Geological Survey. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). US Geological Survey, 2011
- 2 National Aeronautics and Space Administration. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2016
- 3 Qiu J. The third pole. *Nature*, 2008, 454: 393–396
- 4 Katherine M. Climate change and security at the third pole. *Contemp Int Rel*, 2011, 53: 34–55
- 5 Lee J R, Raymond B, Bracegirdle T, et al. Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat. *Nature*, 2017, 547: 7661
- 6 Yao T D, Thompson L, Mosbrugger V, et al. Third pole environment (TPE). *Environ Dev*, 2012, 3: 52–64
- 7 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3025–3035 [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. *科学通报*, 2015, 60: 3025–3035]
- 8 LeónVelarde F, Gamboa J, Chuquiza W, et al. Hematological parameters in high altitude residents living at 4355, 4660, and 5500 meters above sea level. *High Alt Med Biol*, 2000, 1: 97–104
- 9 Guger C, Domej G, Lindner K, et al. Effects of a fast cable car ascent to an altitude of 2700 m on EEG and ECG. *Neurosci Lett*, 2005, 377: 53–58
- 10 Shi P J, Karsperson R. *World Atlas of Natural Disaster Risk*. Beijing: Springer & Beijing Normal University Press, 2014. 7
- 11 Lassen N, Harper A. High-altitude cerebral oedema. *Lancet*, 1975, 2: 1154
- 12 Maggiorini M, Pierre S, Pfeiffer F, et al. High-altitude pulmonary edema is initially caused by an increase in capillary pressure. *Circulation*, 2001, 103: 2078–2083
- 13 Wu T Y, Ding S Q, Liu J L, et al. Ataxia: An early indicator in high altitude cerebral edema. *High Alt Med Biol*, 2006, 7: 275–280
- 14 Hackett P, Rennie D, Levine H. The incidence, importance, and prophylaxis of acute mountain sickness. *Lancet*, 1976, 2: 1149–1155

- 15 Wu T Y. Chronic mountain sickness on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chin Med J*, 2005, 118: 161–168
- 16 Schoene R. Illnesses at high altitude. *Chest*, 2008, 134: 402–416
- 17 Gonggalanzi, Labasangzhu, Nafstad P, et al. Acute mountain sickness among tourists visiting the high-altitude city of Lhasa at 3658 m above sea level: A cross-sectional study. *Arch Public Health*, 2016, 74: 23
- 18 Wang Y Z, Jiang H, Zhang H Z, et al. The influence of environment on human ability to work (in Chinese). In: Conference on Qinghai Province's Resources, Environment and Development. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 10: 208–212 [王永珍, 姜红, 张慧忠, 等. 环境对人类劳动能力的影响. 见: 青海省资源、环境和发展会议论文集. 北京: 气象出版社, 1996, 10: 208–212]
- 19 Hurtado A. Chronic mountain sickness. *J Am Med Assoc*, 1942, 120: 1278–1282
- 20 Monge C, Lozano R, Whittembury J. Effect of blood-letting on chronic mountain sickness. *Nature*, 1965, 207: 770
- 21 Xu C L, Xu W, Xu K F, et al. An association analysis between psychophysical characteristics and genome-wide gene expression changes in human adaptation to the extreme climate at the Antarctic Dome Argus. *Mol Psychiatry*, 2015, 20: 536–544
- 22 Porcelli S, Marzorati M, Healey B, et al. Lack of acclimatization to chronic hypoxia in humans in the Antarctica. *Sci Rep*, 2017, 7: 1–6
- 23 Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China (in Chinese). *Geogr Res*, 2002, 21: 1–9 [张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21: 1–9]
- 24 Wu T Y, Kayser B. High altitude adaptation in Tibetans. *High Alt Med Biol*, 2006, 7: 193–208
- 25 Li, X X, Pei T, Xu H T, et al. Ecological study of community-level factors associated with chronic mountain sickness in the young male Chinese immigrant population in Tibet. *J Epidemiol*, 2012, 22: 136–143
- 26 Statistics Bureau of Tibet Autonomous Region. Statistical Yearbook of Tibet (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2016 [西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016]
- 27 West J B. Prediction of barometric pressures at high altitudes with the use of model atmospheres. *J Appl Physiol*, 1996, 81: 1850–1854
- 28 Erik R S, Peter B. High Altitude-Human Adaptation to Hypoxia. Berlin: Springer, 2014
- 29 Zha R B, Sun G N, Dong Z B, et al. Assessment of atmospheric oxygen practical pressure and plateau reaction of tourists in the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2016, 25: 92–98 [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. 生态环境学报, 2016, 25: 92–98]
- 30 Cynthia M B. Two routes to functional adaptation: Tibetan and Andean high-altitude natives. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104 (Suppl.1): 8655–8600
- 31 Li Q Y, Xie Z C. Analyses on the characteristics of the vertical lapse rates of temperature—Taking Tibetan Plateau and its adjacent area as an example (in Chinese). *J Shihezi Univ (Nat Sci)*, 2006, 24: 719–723 [李巧媛, 谢自楚. 高原区气温垂直递减率的分布及其特点分析——以青藏高原及其周边地区为例. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24: 719–723]
- 32 Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *J Geogr Sci*, 2014, 24: 195–210
- 33 He Y X, Pang Y X, Zhang Q, et al. Comprehensive evaluation of regional clean energy development levels based on principal component analysis and rough set theory. *Renew Energy*, 2018, 122: 643–653
- 34 Dong J W, Chen Y M, Meng P. The determining weight method of the influence factors of PM_{2.5} based on principal component analysis (in Chinese). *J Guangdong Polytechn Normal Univ*, 2016, 37: 25–28 [董健卫, 陈艳美, 孟盼. 基于主成分分析的 PM_{2.5} 的影响因素权重确定方法. 广东技术师范学院学报, 2016, 37: 25–28]
- 35 Mason R, Anderson C. The development and decay of the 100 mb summertime anticyclone over southern Asia. *Mon Wea Rev*, 1963, 91: 3–12
- 36 Wang T M, Wu G X, Wan R J. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area (in Chinese). *Plat Meteorol*, 2008, 27: 1–9 [王同美, 吴国雄, 万日金. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响. 高原气象, 2008, 27: 1–9]
- 37 Wang Q, Fan X, Wang M. Recent warming amplification over high elevation regions across the globe. *Clim Dyn*, 2014, 43: 87–101
- 38 Lin X H, Han P F, Zhang W, et al. Sensitivity of alpine grassland carbon balance to interannual variability in climate and atmospheric CO₂ on the Tibetan Plateau during the last century. *Glob Planet Change*, 2017, 154: 23–32
- 39 Jaswant S, Rudra P S, Rajni K. Influence of climate change on Antarctic flora. *Polar Sci*, 2018, 18: 94–101
- 40 Campbell E J. Respiratory failure. *Br Med J*, 1965, 1: 1451–1460
- 41 Michael R, Michael J R, Grace M. Advanced Biology. London: Nelson Thornes, 2000. 172–176
- 42 Huang J P, Huang J P, Liu X Y, et al. The global oxygen budget and its future projection. *Sci Bull*, 2018, 63: 1180–1186

Summary for “青藏高原大气氧含量影响因素及其贡献率分析”

Factors contribution to oxygen concentration in Qinghai-Tibetan Plateau

Peijun Shi^{1,2,3*}, Yanqiang Chen^{1,3}, Anyu Zhang^{1,3}, Yan He^{1,3}, Miaoni Gao⁴, Jing Yang^{1,2,3}, Rui Mao^{1,2,3}, Jidong Wu^{1,2,3}, Tao Ye^{1,2,3}, Cunde Xiao^{1,3} & Baiqing Xu⁵

¹ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

³ Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁴ School of Systems Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁵ Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding author, E-mail: spj@bnu.edu.cn

Oxygen (O₂) is essential for physiological activity in humans. On the Qinghai-Tibetan Plateau, with an average altitude of more than 4 km, hypoxia can seriously damage local residents' health, especially the respiratory system. When an organism cannot fully compensate for insufficient physiological function caused by hypoxia, acute and chronic mountain sickness (AMS and CMS) will occur. Previous studies have suggested that the relative oxygen concentration (ROC) in the near-ground air shows no obvious changes at different altitudes. However, during field work in the Qinghai-Tibetan Plateau, we found that, in addition to altitude, surface vegetation coverage and weather conditions may also have an impact on ROC. The results of data analysis showed that altitude and 500 hPa air temperature (500 hPa-T) were negatively correlated with ROC, while vegetation coverage was directly proportional to ROC. Based on principal component analysis (PCA), the results indicated that altitude, vegetation coverage and 500 hPa-T accounted for 65.5% of the total variance in ROC, of which the variance interpretation rate of vegetation coverage was highest (33.1%), followed by 500 hPa-T (28.5%) and altitude (3.9%). Absolute oxygen concentration (AOC) was calculated using the Ideal-Gas Equation. Using this equation, we found that altitude, vegetation coverage and 500 hPa-T accounted for 78.9% of the total variance in AOC, of which the variance interpretation rate of altitude was highest (45.9%), followed by vegetation coverage (18.5%) and 500 hPa-T (14.5%). AOC was negatively correlated with the incidence of CMS, and elevated AOC significantly reduced the incidence of CMS. The science community should pay more attention to this topic as a further decrease in ROC could significantly increase instability and risk in populations at high altitudes. These findings could enhance our understanding of the relationships between oxygen concentration, altitude, vegetation, weather conditions and their interactions. In addition, this research may not only play an important guiding role in human and animal health in high altitude areas, but also significantly deepen our understanding of the risks in high altitude environments under global warming both theoretically and practically. Multi-source data, including *in-situ* measurement data, remote sensing data, and model reanalysis data, will facilitate further implementations in this direction. Future work can be carried out using more fixed-point observations and by expanding the spatio-temporal extent of relevant data in high altitudes.

oxygen concentration, Qinghai-Tibetan Plateau, life and health, altitude, vegetation, meteorological factors, principal component analysis (PCA)

doi: 10.1360/N972018-00655