



再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率

史培军^{1,2,3*}, 陈彦强^{1,4}, 马恒^{1,4}, 叶涛^{3,4}, 唐海萍^{1,4}, 王静爱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. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016;
3. 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;
4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
5. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

* 联系人, E-mail: spj@bnu.edu.cn

2021-01-17 收稿, 2021-04-18 修回, 2021-04-19 接受, 2021-04-22 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0606, 2019QZKK0906)和国家重点研发计划(2016YFA0602400)资助

摘要 在2017年夏季对青藏高原青藏线沿线近地表大气相对氧含量测量的基础上, 于2018~2020年夏季对青藏高原新藏线、环青海湖、环祁连山(含冬季)、川藏线、西宁-玉树-昌都-昆明线、玉树-那曲-阿里线、西宁-合作-成都线等不同区域作了野外路线考察测量, 共计得到487个采样点的近地表大气相对氧含量等数据。研究结果表明, 海拔、气温、植被覆盖度三者对近地表大气相对氧含量的贡献存在明显的时空差异。海拔的相对贡献为47%, 气温的相对贡献为32%, 植被覆盖度的相对贡献为3%, 海拔不是绝对控制因素。海拔、气温、植被覆盖度只解释了近地表大气相对氧含量的82%, 其余未解释部分很可能与植被净第一性生产力(net primary productivity, NPP)、土壤异养呼吸等其他因素有关。青藏高原近地表大气相对氧含量的时空差异很可能主要由不同类型植被光合作用的释氧与土壤异养呼吸的耗氧之间的差异, 以及地势和近地表温度改变大气密度所致。

关键词 青藏高原, 大气相对氧含量, 时空差异, 地理环境, 贡献率

氧气(O_2)是大气中含量最为丰富的组分之一, 除厌氧生物外几乎所有生命体的生存和发展都依赖于它。但在气候变化与人类活动影响下, 全球氧循环正在发生显著的变化, 最为明显的特征是包括大气与海洋在内的环境氧含量下降^[1-4]。观测记录表明, 空气中每一百万个氧分子每年减少大约19个(<https://scripps2.ucsd.edu>)。在典型浓度路径(representative concentration pathways, RCP)8.5情景下, 截至2100年大气氧含量将从目前的20.946%下降到20.825%^[5]。

已有研究表明, 氧分压随着海拔的升高呈现出显著的减小趋势, 而氧含量在不同高程上则几乎保持不变^[6-8]。人类在高海拔地区(一般在2500 m及以上)暴露

时, 因缺氧会引发一系列生理反应, 严重时甚至导致高原疾病。短居人群(外来游客)在高海拔地区可能会引致急性高原病, 具体表现为头痛、疲劳、眩晕、心悸、失眠、食欲不振等症状, 严重时甚至会引发急性高原肺水肿、高原脑水肿等疾病^[9]。常居(世居)人口健康也受到高海拔缺氧的影响。2017年, 中国西藏、青海人口的期望寿命分别为69.99、73.47岁, 分别比同期全国平均的77.18岁低7.19、3.71岁^[10,11]。除医疗卫生条件等因素之外, 缺氧环境在其中起着重要作用。

2017年, 本课题组^[12]在青藏高原利用电化学式测氧仪, 野外实测发现, 青藏线沿线不同区域近地表大气相对氧含量(以下简称氧含量)存在明显差异, 其相对大

引用格式: 史培军, 陈彦强, 马恒, 等. 再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率. 科学通报, 2021, 66: 4028–4035

Shi P J, Chen Y Q, Ma H, et al. Further research on the factors contributing to oxygen concentration over the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4028–4035, doi: [10.1360/TB-2021-0072](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0072)

小很可能与500 hPa气温、植被覆盖度和海拔等多种因素密切相关。为进一步究其原因,我们于2018~2020年间分别在青藏高原的新藏线、川藏线、青海湖周边、环祁连山、西宁-玉树-昌都-昆明、玉树-那曲-阿里、西宁-甘南-成都沿线地区,开展了野外氧含量、气温、海拔高度、植被覆盖度等地理环境要素的测量。初步厘清了青藏高原氧含量的时空差异,证实了海拔、气温、植被、土壤等地理环境对青藏高原氧含量有显著影响。这一发现加深了对青藏高原缺氧环境及其成因的认识,为防范青藏高原缺氧健康风险提供了科学依据。

1 数据与方法

1.1 海拔、气温、大气压、氧含量数据

本课题组^[12]在2017年7月28日~8月1日对西藏拉萨河与雅鲁藏布江交汇处附近经拉萨沿青(青海)藏(西藏)公路至青海格尔木一线测量氧含量工作的基础上,利用电化学式测氧仪,于2018年8月1~9日从西藏拉萨沿318国道至聂拉木县樟木口岸、再从樟木口岸经拉孜沿新(新疆)藏(西藏)公路至新疆和田一线,2018年8月15~17日在环青海湖周边地区,2019年2月14~18日、7月15~20日(两次采样位置相同)在祁连山地区,2019年7月29日~8月3日沿川(四川)藏(西藏)公路沿线,2020年

6月22~29日沿西宁-玉树-昌都-昆明一线,7月24~29日沿玉树-那曲-阿里一线,8月2~5日沿西宁-甘南-成都一线进行了科学考察(图1),完成了青藏高原上述沿线地区氧含量等地理环境数据路线/样点式的野外测量工作,得到了487个测量点的经纬度、海拔高度、气温、大气压、氧含量等地理环境数据。对每一测量点,大气压、气温和氧含量分别由3台仪器同时测定,在后期数据处理时取其平均值。本研究野外测量指标及所用仪器情况见表1。

1.2 植被覆盖度数据

在野外利用植被覆盖度大样方(1 km × 1 km)测量得到33个大样方的植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)(具体方法参见文献[13])。利用谷歌地球(Google Earth)计算得到与33个大样方相应的植被大样方植被覆盖度(FVC_GE)(具体方法参见文献[12]);利用GLASS FVC数据(分辨率: 250 m × 250 m)(<http://www.glass.umd.edu>)计算得到与33个大样方相应的GLASS植被覆盖度(FVC_GLASS);利用MODIS MOD13Q1产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)计算得到与33个大样方相应的MODIS植被覆盖度(FVC_MODIS)^[14]。经相关分析比较发现, FVC_GLASS与FVC的线性拟合效果最好(样本数 $n = 33$, 拟合优度 $R^2 = 0.8377$, 显著性水平 $P < 0.001$)(表S1), 故利用FVC_GLASS数据插补得

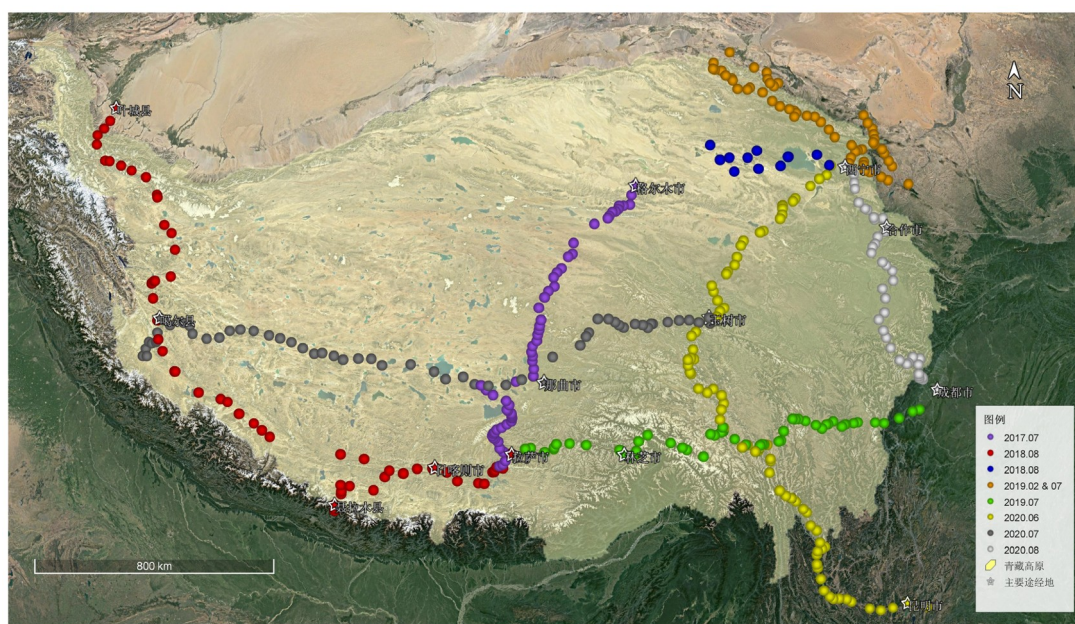


图1 2017~2020年青藏高原及周边野外采样点位置图

Figure 1 Location of the sampled sites within the Qinghai-Tibet Plateau and its neighboring regions in the period 2017–2020

表1 本研究野外测量指标及所用仪器情况

Table 1 Details of the instruments and parameters measured

指标	所用仪器/设备	精度
经纬度	Garmin 63sc型GPS	1"
海拔		1 m
气温	DPH-103型智能电子温湿压计	0.01°C
大气压		0.1 hPa
相对氧含量	TD400-SH-O ₂ 便携式测氧仪	0.01%
植被覆盖度	米尺(1000 m)	1 m

到剩余其他样点的植被覆盖度。

1.3 统计分析方法

利用Lindeman, Merenda and Gold(LMG)方法计算海拔、植被覆盖度、气温等地理环境因子对氧含量的相对贡献率。该方法通过多元线性回归模型区分不同回归量的相对贡献^[15]。 R^2 表示一组回归量解释的方差占比。如果能够估计每个回归因子所贡献的 R^2 比例,那么 R^2 越大的回归因子对解释变量就越重要。分解 R^2 最直观的方法是依次将回归因子添加到回归模型中,增加的 R^2 可以看作是刚刚添加回归因子的贡献。但是,如果回归量是相关的,此方法取决于所添加回归量的顺序。为此,LMG方法通过对序列进行平均来考虑对添加顺序的依赖性^[16]。

2 结果

2.1 氧含量与海拔的关系

2018~2020年所有夏季的测点,其海拔与氧含量呈显著的负相关关系($n = 369$, $R^2 = 0.7367$, $P < 0.001$)。从平均值看,海拔每上升1000 m,夏季的氧含量下降约0.15%(图2)。2018年各测点平均海拔为4006 m($n = 80$),其对应氧含量为20.19%。2019和2020年各测点的平均海拔分别为3000($n = 166$)和3562 m($n = 176$),其氧含量略高,均为20.30%。

2.2 氧含量与气温的关系

从2018~2020年夏季所有测点的数据来看,氧含量与温度亦呈现显著的正相关关系($n = 369$, $R^2 = 0.5661$, $P < 0.001$, 图3)。从平均值看,温度每上升10°C,夏季氧含量上升约0.21%。

为了对比冬、夏季氧含量差异,对青藏高原祁连山区2019年冬、夏季野外测量数据(表S2; 测量点共53

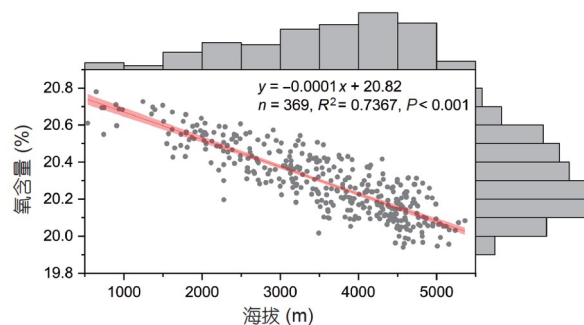


图2 氧含量与海拔的关系。2018~2020年夏季数据,不包括祁连山冬季数据,红色线为其线性拟合,红色阴影为95%置信区间,上侧和右侧分别为海拔和氧含量频数(频率)分布

Figure 2 Relationship between altitude and oxygen concentration. The red line and shade indicate the linearly fitted trend and 95% confidence interval of the two variables. The upper and right histograms depict the frequency distribution of altitude and oxygen concentration, respectively. The data used are sampled in 2018–2020 summer; those sampled within the Qilian Mountains in 2019 winter are excluded

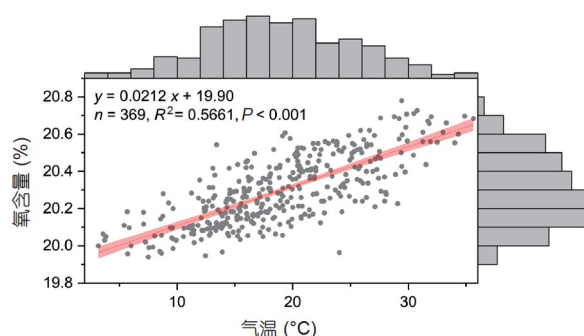


图3 氧含量与气温的关系。2018~2020年夏季数据,不包括祁连山冬季数据,红色线为其线性拟合,红色阴影为95%置信区间,上侧和右侧分别为气温和氧含量频数(频率)分布

Figure 3 Relationship between air temperature and oxygen concentration. The red line and shade indicate the linearly fitted trend and 95% confidence interval of the two variables. The upper and right histograms depict the frequency distribution of air temperature and oxygen concentration, respectively. The data used are sampled in 2018–2020 summer; those sampled within the Qilian Mountains in 2019 winter are excluded

个,冬、夏季各进行一次采样,采样点位置相同和采样时间基本相同)进行了分析,发现所有采样点的夏季氧含量(平均值: 20.47%)都高于冬季(平均值: 20.16%)。这一结果表明同一地点不同季节(不同气温条件下)氧含量也是不同的。

2.3 氧含量与植被覆盖度的关系

氧气主要来自绿色植物的光合作用,生态系统固碳产氧能力与其植被覆盖条件有很大关系^[17,18]。计算结果表明,植被覆盖度与氧含量呈正相关关系(2018~

2020年夏季数据, $n = 369$, $R^2 = 0.0767$, $P < 0.001$) (图4)。由此可见, 青藏高原植被覆盖度对氧含量也有一定的正影响, 即植被覆盖度愈高, 近地表氧含量愈高, 每增加10%的植被覆盖度, 近地表氧含量增加约0.02%。

青藏高原祁连山区冬、夏季采样点氧含量的差异, 除了受到气温差异的影响外, 冬夏季的光照和植被条件也明显不同。冬季光照辐射较弱, 光照时间较短, 平均气温较低(-1.96°C), 地表植被处于非生长季, 几乎停止生长, 其对氧含量的贡献可以忽略不计, 冬、夏季采样点海拔相同、采样时间基本一致, 表明氧含量明显受到气温、光照和植被条件的多重影响。

2.4 海拔、气温、植被覆盖度对氧含量的贡献

对2018~2020年夏季进行的植被覆盖度实地测量的所有样点($n = 33$)对应数据相关分析如表2。可以看出, 海拔与气温、植被覆盖度、氧含量在 $P < 0.01$ 水平上显著负相关; 气温与氧含量在 $P < 0.01$ 水平上显著正

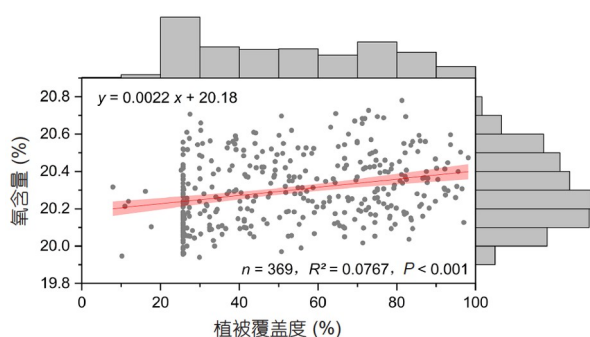


图4 近地表相对氧含量与植被覆盖度的关系。2018~2020年夏季数据, 不包括祁连山冬季数据, 红色线为其线性拟合, 红色阴影为95%置信区间, 上侧和右侧分别为植被覆盖度和氧含量频数(频率)分布
Figure 4 Relationship between fractional vegetation cover and oxygen concentration. The red line and shade indicate the linearly fitted trend and 95% confidence interval of the two variables. The upper and right histograms depict the frequency distribution of fractional vegetation cover and oxygen concentration, respectively. The data used are sampled in 2018–2020 summer; those sampled within the Qilian Mountains in 2019 winter are excluded

表2 海拔、气温、植被覆盖度、氧含量间的相关系数表

Table 2 Correlation coefficient matrix of altitude, air temperature, fractional vegetation cover and oxygen concentration

变量	海拔	气温	植被覆盖度	氧含量
海拔	1	-0.622**	-0.300**	-0.858**
气温	-0.622**	1	0.107*	0.753**
植被覆盖度	-0.300**	0.107*	1	0.281**
氧含量	-0.858**	0.753**	0.281**	1

a) $n = 33$; **在 $P < 0.01$ 水平上显著; *在 $P < 0.05$ 水平上显著

相关, 气温与植被覆盖度只在 $P < 0.05$ 水平上显著正相关; 植被覆盖度与氧含量在 $P < 0.01$ 水平上显著正相关。利用LMG方法计算的结果为: 总解释率为81.66%, 海拔、气温、植被覆盖度对氧含量的解释率分别为: 46.89%、31.57%及3.20%($n = 369$, 表3)。

3 讨论与结论

史培军等人^[12]认为影响青藏高原氧含量主要因素有海拔、500 hPa气温、植被覆盖度等地理因素, 且三者的总贡献率为65.5%(应为解释率), 相应分别为: 3.9%(6.0%)、28.5%(43.5%)、33.1%(50.5%)(括号内为占总贡献率的比例)。本研究结果表明青藏高原氧含量的主要因素有海拔、气温、植被覆盖度等, 且三者的总解释率为81.66%, 较此前的总解释率更大。近地表气温与500 hPa气温对氧含量的贡献不同, 前者与氧含量呈正相关, 后者为负相关。通过祁连山冬、夏季的对照观测, 证实了近地表气温与氧含量的正相关关系。在夏季, 青藏高原气温相对周边同海拔区偏高^[19], 周边气流向高原辐合, 故氧含量偏高。

本研究结果表明, 海拔、植被覆盖度与氧含量的相关系数与前人结果^[12]不一致, 其贡献率也不一致, 这与所采用的研究方法和研究指标不同有关。除此之外, 还与氧含量变化及其几个影响因素的影响幅度在不同研究区(路线)存在差异有关。之前的研究^[12]主要是沿青藏线展开, 这一区域与本研究的科考区——新藏线、川藏线、青海湖区、祁连山区等在地貌、植被、大气条件等方面存在显著差异, 因此, 上述几个影响因素对氧含量的影响幅度也不同; 同时, 本研究是对几条科考路线的整体计算, 在一定程度上避免了单条科考路线的特殊性问题。从本研究的结果看, 除海拔、气温、植被覆盖度三者的贡献外, 仍有18.34%不能被解释, 其原因可能与植被净第一性生产力(net primary productivity, NPP)、土壤异养呼吸对氧含量的作用未能考虑有关。虽

表3 地理要素对氧含量的贡献率(%)^{a)}

Table 3 Relative contributions of the geographical factors to oxygen concentration (%)

变量	相对贡献(相对重要性)	95%置信区间	R^2
海拔	46.89	43.52	50.12
气温	31.57	27.52	35.52
植被覆盖度	3.20	1.51	5.37

a) 基于2018~2020年夏季测量的369组数据

结合实测和多种遥感植被覆盖度数据,进一步证实了植被条件对氧含量的正影响,但很可能低估这一作用。因此,需要从光照、植物光合作用、土壤异养呼吸等影响产氧/耗氧的过程以及大气环流等影响氧含量分配的多个维度综合考虑青藏高原氧含量的时空差异(图5)。

在全球变化和人类活动影响加剧的背景下,青藏高原正全面经受着前所未有的气候变化^[20]。气象记录表明,过去50年青藏高原升温速率是全球同期升温速率的两倍^[21]。尽管从全球尺度看,地球大气的氧含量呈减少趋势^[1-4],但大气中的氧气主要来源于陆地绿色植物的光合作用,全球气温变暖、向好的植被条件将极大提升生态系统的产氧能力。在百年尺度青藏高原抬升不会明显影响其海拔高度的前提下,从气温和植被状况两个方面来看,过去几十年来青藏高原氧含量很可能整体增加,这极有可能减缓本区人口缺氧健康风险,并有利于登山、探险、科学考察、基础设施建设、生态观光与体验等活动的开展。

近20年来,随着中国经济社会的快速发展和“西部大开发”战略的纵深实施及相关产业的迅猛发展,青藏高原短居人群(外来游客)数量呈现急剧增长态势。统计数据表明从1999~2019年,西藏和青海两省区旅游人口从207万人次迅速增长至9092万人次,增幅近43倍;而同期当地常住人口从765万增长至958万,增幅约为

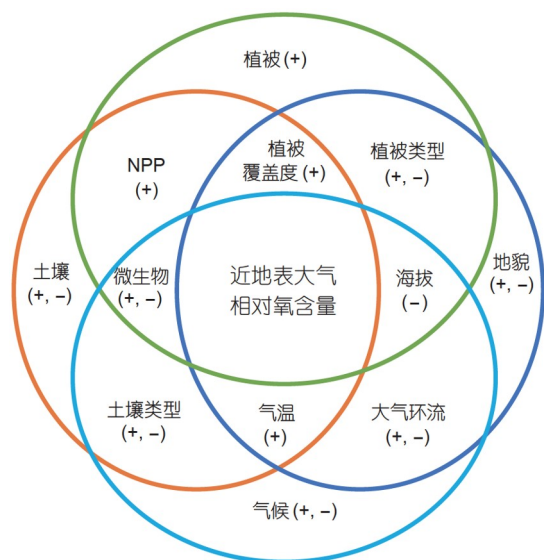


图5 青藏高原近地表大气相对氧含量影响因子图解。“+”“-”为地理要素对近地表大气相对氧含量的正或负影响

Figure 5 Conceptual diagram of the relationship among oxygen concentration and its influence factors over the Qinghai-Tibet Plateau. “+” and “-” indicate the positive or negative effects of geographical factors on the near-surface oxygen concentration

25%^[22,23]。从全球来看,高海拔地区总面积约为1100万平方公里(包括南极大陆),占全球总面积的7.7%;2015年,区内总人口约为1.07亿,占全球总人口(73.5亿)的1.5%^[24]。2000年左右,每年就有超过1亿人到高海拔地区进行旅游观光活动^[9]。同样快速增长的人口暴露可能带来越来越多的健康问题。例如,在阿尔卑斯山区,急性高原病的发病率可达9%~53%^[25]。研究表明,即使经过较长时间持续暴露,人类对低氧环境的适应能力仍处于较低水平^[26,27]。气候变化背景下的高海拔地区短居(外来旅游、观光、登山、探险等)和世居人群高原缺氧健康问题亟须关注。

青藏高原氧含量受到海拔的负影响。剔除祁连山区冬季53组数据后,不同海拔高度对应的氧含量差异通过了显著性检验($n = 369$, $R^2 = 0.7367$, $P < 0.001$)。青藏高原海拔每上升1000 m,夏季的氧含量下降约0.15%,这与前人研究的“氧含量在不同高程上则几乎保持不变^[6-8]”的结论不同。青藏高原氧含量的变化还受到气温和植被覆盖度的正影响,氧含量与温度亦呈现显著的正相关关系($n = 369$, $R^2 = 0.5661$, $P < 0.001$)。青藏高原温度每上升10°C,夏季氧含量上升约0.21%;植被覆盖度与氧含量也呈正相关关系($n = 369$, $R^2 = 0.0767$, $P < 0.001$),每增加10%的植被覆盖度,夏季氧含量增加约0.02%。

海拔、气温、植被覆盖度对氧含量的相对贡献率分别为47%(负)、32%(正)及3%(正)($n = 369$),且存在时空差异。海拔不是绝对控制青藏高原近地表大气相对氧含量的唯一因子,这正是植被生长旺季青藏高原短居人口(如游客)和常居人口均深感缺氧程度明显比植被非生长季(冬季)好得多的主要原因。海拔、气温、植被覆盖度只解释了对近地表大气相对氧含量贡献的82%,其他未解释部分可能与光照、植被NPP、土壤异养呼吸作用等其他因素有关。

我们的野外采样工作受到交通、天气、仪器等诸多条件限制,采集的实地数据仍然有限,且不排除其他偶然因素的影响。植被覆盖度的测量对本项工作至关重要,野外实测数据非常有限,利用遥感数据反演的对应采样点植被覆盖度与实际植被覆盖度有一定偏差。因此,今后需通过更多的野外测量数据在更精细的时空尺度上分析、检验上述研究结果,以此推动对青藏高原氧含量变化时空差异的深入研究,以及高海拔地区人口缺氧健康风险的科学防范,促进高海拔地区人口环境健康安全和可持续发展。

致谢 感谢如下人员先后参加了野外工作: 应急管理部周洪建, 北京师范大学杨静、吴吉东、毛睿、陈波、高妙妮、张钢锋, 青海师范大学陈志、马永贵、陈振宁、陈宗颜、杨显明、赵青林、谢惠春、罗巧玉、贾伟、索南吉, 中国科学院西北生态环境资源研究院杨建平, 中国科学院大气物理研究所孔祥慧, 中国科学院地理科学与资源研究所王红, 青海大学郝力壮, 西藏民族大学朱敏侠、张晓英、闫刚印、姜钊, 西藏农牧学院扎西列珠, 北京大学吴必虎, 中国矿业大学文艺, 大地文旅集团袁德宣、余洲, 北京师范大学研究生张安宇、何研、韩钦梅、刘甜、李翊尘、潘云龙、冯冰、井源源、孙烨琳、吴仁吉、梁大林、李佳桐、杨合仪、杨雯倩、胡小康, 青海师范大学研究生祁应莲、史运坤、王高峰、马伟东、李亚兄、梁向平、周源涛、董志强、杜少波、戢爽及本科生李国云、金兄莲, 青海大学研究生李爽林、张辉, 中国科学院西北生态环境资源研究院研究生陈虹举、冀钦等; 感谢两位匿名审稿人为本文提出了建设性修改意见和建议。

参考文献

- Keeling R F, Shertz S R. Seasonal and interannual variations in atmospheric oxygen and implications for the global carbon cycle. *Nature*, 1992, 358: 723–727
- Liu X Y, Huang J P, Huang J P, et al. Estimation of gridded atmospheric oxygen consumption from 1975 to 2018. *J Meteorol Res*, 2020, 34: 646–658
- Li C Y, Huang J P, Ding L, et al. Increasing escape of oxygen from oceans under climate change. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086345
- Huang J P, Liu X Y, He Y S, et al. The oxygen cycle and a habitable Earth. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 511–528
- Huang J, Huang J, Liu X, et al. The global oxygen budget and its future projection. *Sci Bull*, 2018, 63: 1180–1186
- Machta L, Hughes E. Atmospheric oxygen in 1967 to 1970. *Science*, 1970, 168: 1582–1584
- Cynthia M B. High-altitude adaptations. *Lancet*, 2003, 362: 14–15
- Beall C M. Two routes to functional adaptation: Tibetan and Andean high-altitude natives. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 8655–8660
- West J B. High-altitude medicine. *Lancet Resp Med*, 2015, 3: 12–13
- Zhou M, Wang H, Zhu J, et al. Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990–2013: A systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet*, 2016, 387: 251–272
- Zhou M, Wang H, Zeng X, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*, 2019, 394: 1145–1158
- 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 [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]
- Lin D, Gao Y, Wu Y, et al. A conversion method to determine the regional vegetation cover factor from standard plots based on large sample theory and TM images: A case study in the eastern farming-pasture ecotone of Northern China. *Remote Sens*, 2017, 9: 1035
- Ignatov A, Gutman G. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *Int J Remote Sens*, 1998, 19: 1533–1543
- Grömping U. Relative importance for linear regression in R: The package relaimpo. *J Stat Softw*, 2006, 17: 1–27
- Zhang Z, Wang L. *Advanced Statistics Using R*. Granger: ISDSA Press, 2017. 109–114
- Zhang Y, Xiao X, Wu X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. *Sci Data*, 2017, 4: 170165
- Zhang L, Zhang B, Li W, et al. Spatiotemporal changes and drivers of global land vegetation oxygen production between 2001 and 2010. *Ecol Indic*, 2018, 90: 426–437
- Mason R B, Anderson C E. The development and decay of the 100-mb. Summertime anticyclone over southern Asia. *Mon Weather Rev*, 1963, 91: 3–12
- Yao T D, Xue Y K, Chen D L, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2019, 100: 423–444
- 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]
- Statistics Bureau of Tibet Autonomous Region. *Statistical Yearbook of Tibet* (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2019 [西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019]

- 23 Statistics Bureau of Qinghai Province. Statistical Yearbook of Qinghai (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2019 [青海省统计局. 青海统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019]
 - 24 Zhang A, Wang J, Jiang Y, et al. Spatiotemporal changes of hazard intensity-adjusted population exposure to multiple hazards in Tibet during 1982–2015. *Int J Disaster Risk Sci*, 2018, 9: 541–554
 - 25 Basnyat B, Murdoch D R. High-altitude illness. *Lancet*, 2003, 361: 1967–1974
 - 26 Xu C, Ju X, Song D, 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
 - 27 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
-

补充材料

表S1 青藏高原33个采样点实测植被覆盖度与遥感数据测算结果对比

表S2 祁连山样点冬、夏季气温和近地表相对氧含量数据对比

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率”

Further research on the factors contributing to oxygen concentration over the Qinghai-Tibet Plateau

Peijun Shi^{1,2,3*}, Yanqiang Chen^{1,4}, Heng Ma^{1,4}, Tao Ye^{3,4}, Haiping Tang^{1,4} & Jing'ai Wang⁵

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

² Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810016, China;

³ Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁴ Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁵ College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

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

The oxygen concentration in near-surface air, which has been previously documented to be nearly constant (~20.946%), varies due to photosynthesis, respiration, and combustion processes, including combustion of fossil fuels. As the biggest and highest plateau in the world, the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) hosts the largest high altitude population and tourists. The hypoxic environment of the QTP challenges its inhabitants and visitors both physically and psychologically. Health problems associated with the exposure to high altitude have long been observed by the scientific community. However, few studies have investigated the key drivers and their contribution to spatio-temporal oxygen concentration variations over the QTP. To fill this gap, a field investigation conducted along the Qinghai-Tibet National Highway in the summer of 2017 found that, in addition to altitude, vegetation and weather conditions may also impact on oxygen concentrations. Subsequent investigations during 2018–2020 along other national highways and within the Qinghai Lake region, the Qilian Mountains and their vicinities recorded a total of 487 samples. These observations showed clear spatial and seasonal variations in oxygen concentrations. Statistical analysis showed that oxygen concentration is positively affected by air temperature and fractional vegetation cover (FVC) but decreases with altitudes. The Lindeman, Merenda and Gold (LMG) method showed that the relative contributions of altitude, air temperature, and FVC to oxygen concentration were 46.69%, 31.64% and 3.44%, respectively, jointly explaining ~82% of the total variance in oxygen concentration. The remaining unexplained variance could be possibly due to factors such as vegetation net primary productivity (NPP) and soil heterotrophic respiration. Spatio-temporal variations in oxygen concentration are likely caused by the oxygen production from photosynthesis and soil heterotrophic respiration and by changes in atmospheric density resulting from topography and near-surface air temperature. Under a warming climate, improved vegetation cover and higher air temperature over the QTP could increase oxygen concentration and, to some extent, reduce the risks of hypoxia in the populations of the QTP. These findings improve our understanding of the spatio-temporal variations in oxygen concentration over the QTP in the context of climate change. The results can also be used to support the health and safety of residents and tourists and promote the sustainable development of high altitude regions worldwide.

Qinghai-Tibet Plateau, oxygen concentration, spatio-temporal variations, geographical environment, relative contribution

doi: [10.1360/TB-2021-0072](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0072)