生理学报 *Acta Physiologica Sinica*, December 25, 2019, 71(6): 833–838
DOI: 10.13294/j.aps.2019.0063 http://www.actaps.com.cn


研究论文

# 颜色明度辨别阈限的高海拔效应

王治新[#]，张得龙[#]，马海林[*]

西藏大学-华南师范大学高原脑科学研究中心，拉萨 850000/广州 510631

**摘 要**：高海拔低氧环境暴露广泛影响人类中枢神经系统。以往高海拔低氧环境影响人类颜色感知的研究集中于模拟高海拔环境和急性暴露于高海拔环境，鲜有对长期暴露于高海拔低氧环境的移居者和世居者的研究。本研究采用最小变化法比较汉族平原居住者(30名)、汉族移居高海拔区时间满2年者(30名)、高海拔藏族世居者(28名)的红、绿、蓝、黄4种颜色的明度差别阈限，观察其受海拔环境的影响。结果显示，长期高海拔暴露对世居者和移居者的蓝色和红色差别阈限影响最显著，对蓝色差别阈限影响显著大于红色，而对绿色差别阈限产生的影响仅发生于世居者。研究提示，血液供应量与高原环境暴露导致视觉颜色加工选择性改变有内在的关联。

**关键词**：高海拔；差别阈限；颜色；移居者；世居者
**中图分类号**：B84；B845；B845.2

## The effect of high altitude on human color perception

WANG Zhi-Xin[#], ZHANG De-Long[#], MA Hai-Lin[*]

*Plateau Brain Science Research Center, Tibet University/South China Normal University, Lhasa 850000 /Guangzhou 510631, China*

**Abstract:** Exposure to a high altitude hypoxia environment has significant negative effects on human central nervous system. Many previous studies have explored the influence of the high altitude environment on human color perception in a simulated high altitude environment or in an environment acutely exposed to high altitude, but little has been done in migrators and natives exposed to high altitude and low oxygen for a long period of time. In this study, the minimal-change method was used to examine whether the color perception of red, green, blue and yellow was affected by the high altitude in 30 plain residents, 30 Han migrators who have lived in the high altitude for 2 years, and 28 high-altitude-adapted Tibetan natives. The results showed that long-term high altitude exposure had the most significant effect on the blue and red color perception in the natives and the migrators, with the effect on the blue color being significantly greater than that on the red color. However, the effects on green color processing only happened to the natives. The results suggest that there is an internal correlation between blood supply and selectivity changes of visual color processing caused by exposure to the plateau environment.

**Key words:** high altitude; difference threshold; color; migrators; native

高海拔地区低气压、低氧气含量、长日照时间、干燥等自然环境条件影响人体生理机能，影响人类中枢神经系统[1–3]。早在 1939 年，已有研究表明视觉系统对高海拔低氧环境尤其敏感，持续低氧损伤人类夜视能力[4]。视网膜是视觉系统接受外界信息的感受器，其上广泛分布视锥细胞和视杆细胞两类光感受细胞。这两类细胞的光谱敏感度不同：视杆细胞主要加工明暗信息，视锥细胞主要加工颜色信

Received 2019-04-03 Accepted 2019-08-15

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31660274, 31560277, 31600907) and the National Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program of China (No. 201710694027).

[#]These authors contributed equally to this work.

[*]Corresponding author. E-mail: 83976475@qq.com

息。视网膜长、中和短三种视锥细胞分别对红色、绿色和蓝色刺激敏感。研究显示，高海拔低氧环境不仅导致夜视能力下降，还会影响视觉加工过程，其中包括对不同颜色加工的影响 [5]。

采用低压氧舱模拟高海拔低氧环境、高海拔急性暴露的颜色视觉研究都发现高海拔低氧环境暴露影响颜色加工能力；虽然结果不尽相同，但大部分研究比较一致地证实高原低氧环境对红色和蓝色加工的影响较大。Bouquet 等探讨了模拟氧舱 (8 848 m) 对 8 名受试者颜色加工的影响，结果显示模拟的高海拔环境导致被试颜色辨别能力显著下降，尤其是红色与蓝色的辨别能力 [6]。与之呼应，Kobrick 研究发现低氧致红色识别能力退化 [7]；Modugno 研究发现急性暴露于 4 550 m 海拔者蓝色敏感性降低 [8]。此外，也有研究者发现高海拔暴露损伤黄色、绿色加工能力。例如，Karakucuk 等发现急性暴露于 3 000 m 海拔的个体黄、蓝色系敏感性下降 [9]。Richale 等对急性暴露于 4 350 m 和 4 800 m 海拔的个体进行研究，结果显示两种海拔高度暴露个体红、绿颜色的识别能力均下降，而且绿色识别能力下降更加明显 [10]。

如上所述，大量研究证实了高原低氧环境对颜色加工存在特异性影响，但是 还有一些研究指出，高海拔低氧环境对所有颜色的加工均产生影响，并不存在特异性影响。例如，Vingrys 等发现急性暴露于海拔 3 658 m 的个体黄、蓝、红、绿色识别能力均下降 [11]。

值得注意的是，有关高海拔低氧环境对颜色加工是否存在特异性影响的问题，研究者之间尚存在分歧。分歧存在的根源是已有研究均采用高海拔急性暴露条件 ( 被试尚处于应激状态 )，而缺乏对长期居住在高海拔的外来移居者与世代居住在高海拔的居民的颜色加工 ( 稳定状态 ) 的研究。近年来，本研究组对与视觉直接相关的注意功能的研究显示，长期高海拔暴露影响外来移居者的注意功能 [12, 13]，也影响世居者的注意功能，但也有研究显示长期居住在高海拔环境的世居者 ( 藏族人 ) 已经从生理和基因上适应了高原低氧环境 [13, 14]，但是他们的颜色加工能力是否发生了改变有待进一步研究。

本研究选取高海拔世居者、外来移居者 ( 平原地区出生并成长但在高海拔居住满 2 年 ) 和平原居住者，测试他们红、绿、蓝、黄 4 种颜色的明度差别阈限，比较长期高海拔低氧环境暴露对外来移居者和高原世居者颜色加工能力的影响。

## 1 研究方法

**1.1 被试** 移居群体实验组为 30 名西藏大学在校学生，移居群体被试均在平原出生和成长，成年以后进入高原并至少在高原 ( 拉萨市海拔 3 680 m) 居住满 2 年，回平原地区的时间不超过 3 个月。平原地区对照组为 30 名山东师范大学在校大学生，平原地区被试在平原地区出生和成长并且无进入高原的经历；高海拔世居实验组选取 28 名被试，他们在高海拔 ( 平均海拔 3 680 m 以上 ) 出生和成长并且无进入平原地区生活的经历。被试皆为右利手，无躯体疾病及精神障碍病史，视力或矫正视力正常，无色盲色弱，年龄 20~23 岁。所有被试通过自愿报名方式参加实验，并签署知情同意书，实验结束后给予一定报酬。

**1.2 实验程序** 实验仪器：计算机和 E-Prime 2.0 实验系统平台。实验方法：最小变化法。实验材料：通过计算机呈现不同颜色的方块 ( 长宽比为 0.75:1)，颜色有红 RGB (120, 0, 0)、绿 RGB (0, 120, 0)、蓝 RGB (0, 0, 120)、黄 RGB (120, 120, 0)。材料背景颜色均为黑色，明度差为 2，其中一个是比较刺激 (Co)，一个是标准刺激 (St)，明度的差额随机呈现，标准刺激左右次数各半，刺激呈现采用 ↓ ↑ ↑ ↓ 和 ↑ ↓ ↓ ↑ 刺激系列 ( 刺激系列增记为 ↑，减记为 ↓)。实验流程如图 1 所示，实验分红、绿、蓝、黄 4 个实验组，每组实验结束后给被试足够的休息时间，实验背景色为黑色。实验开始时先呈现指导语，被试理解实验要求后进行练习，练习材料为灰色色块和白色色块，用不同的按键表示“深”、“浅”和“相等”，正确率达到 100% 才进行正式实验。如图所示，正式实验流程包括：注视点呈现 1 000 ms，然后呈现任务界面，给予被试足够时间进行分辨，当被试做出反应后才进入下一任务。每个颜色实验组包含 24 组刺激 ( 刺激界面呈现的两张不同明度的图片为一组刺激 )，4 种颜色共 96 组刺激，每组实验结束后呈现空白界面，被试休息结束后按键进入下一组实验。

差别阈限是指感觉所能觉察的刺激物的最小差异量。差别阈限计算方法：先计算每个系列差别阈上限 ($T_{上限}$) 和下限 ($T_{下限}$)，然后计算，上差别阈限 = $T_{上限} - St$；下差别阈限 = $St - T_{下限}$，最后采用

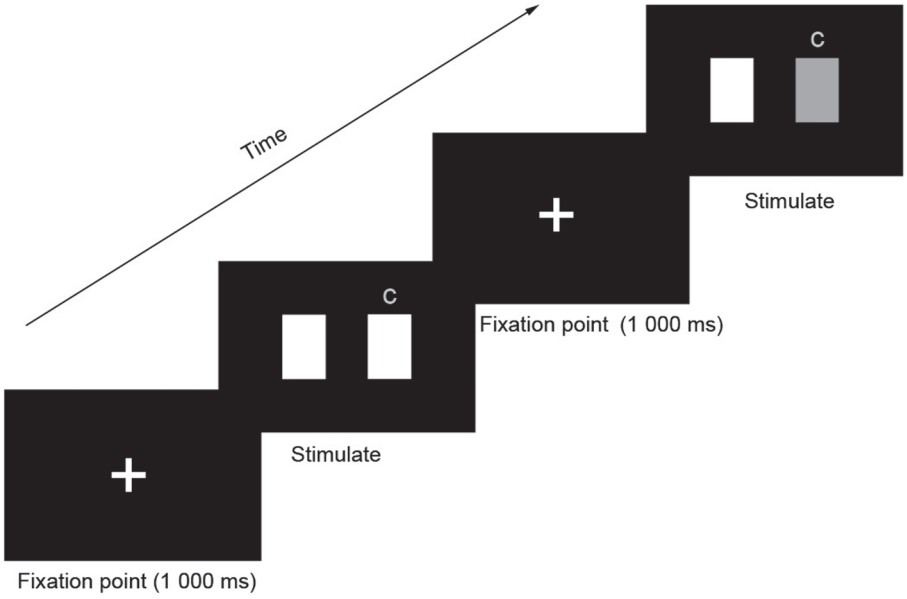


图 1. 实验流程图
Fig. 1. Diagram of experiment. C: comparative stimulus.

公式计算差别阈限 (difference threshold, DL)：

$$DL = \frac{T_{上限} - St + St - T_{下限}}{2} = \frac{T_{上限} - T_{下限}}{2}$$

**1.3 实验结果分析** 数据采用 SPSS 20.0 软件统计。采用混合测量方差分析，因变量为差别阈限，被试间变量为组别 ( 移居群体、世居者群体、平原群体 )，被试内变量为颜色类型 ( 红、绿、蓝、黄 )；如果主效应显著，则采用最小显著差异法 (least significant difference, LSD) 事后比较。$P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

3 ( 移居群体、世居者群体、平原群体 ) × 4 ( 红、绿、蓝、黄 ) 的混合方差分析结果显示，组别主效应显著 [$F(2, 82) = 11.05$, $P < 0.001$]；成对比较表明，平原群体的颜色差别阈限值显著低于移居群体 ($P < 0.01$)、世居群体 ($P < 0.001$)。颜色类型的主效应显著 [$F(3, 80) = 9.56$, $P < 0.001$]，进一步分析发现，

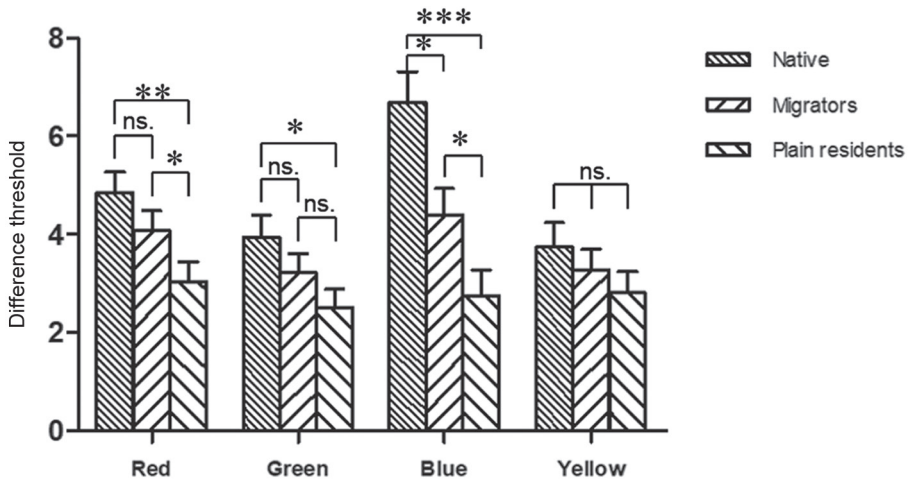


图 2. 不同群体四种颜色明度阈限的均值分布情况
Fig. 2. Mean distribution of four color's difference threshold of the brightness in different populations. $^{*}P < 0.05$, $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$, ns.: $P > 0.05$.

绿色和黄色的差别阈限低于红色 ($P < 0.001$, $P < 0.01$)，而且也都低于蓝色的差别阈限 ($P < 0.001$)。

不同组别与不同颜色之间的交互作用显著 [$F(6, 246) = 2.473$, $P = 0.024$]，简单效应分析发现：在红色任务上，高海拔世居者和移居者的差别阈限值均显著高于平原对照组 ($P < 0.01$, $P < 0.05$)；在绿色任务上，高海拔世居者的差别阈限值显著高于平原对照组 ($P < 0.05$)；在蓝色任务上，高海拔世居者的差别阈限值显著高于移居者 ($P < 0.05$) 和平原对照组 ($P < 0.001$)，移居者的阈限值显著高于平原对照组 ($P < 0.05$)；在黄色任务上，三组之间没有显著的差异 ( 图 2)。简单效应分析还发现，对于高海拔世居者，蓝色的差别阈限值显著高于红、绿、黄三种颜色的阈限值 ($P < 0.05$, $P < 0.001$, $P < 0.01$)，红色的差别阈限值显著高于绿色 ($P < 0.01$) 和黄色 ($P < 0.05$)，绿色和黄色的差别阈限值之间没有显著差异；对于高海拔移居者，红色 ($P < 0.01$) 和蓝色 ($P < 0.001$) 的差异阈限均显著高于绿色和黄色的差别阈限，红色和蓝色之间、绿色和黄色之间的差别阈限值均无显著差异；对于平原对照组，4 种颜色的差别阈限之间均不存在显著差异 ( 图 3)。

## 3 讨论

本研究围绕高海拔低氧环境暴露对颜色加工是否存在特异性影响问题，以高原世居者和移居者为研究对象，采用颜色差别辨别任务，探讨了长期高海拔暴露对颜色明度辨别阈限的影响。研究显示，不管是高海拔的世居者还是移居者在红色任务和蓝色任务上均受到了显著影响，高海拔世居者的蓝色加工能力受到的影响显著大于红色。高海拔世居者的绿色加工能力也受到了明显的影响，但高海拔移居者的绿色加工能力则没有受到影响。高海拔世居者和移居者的黄色加工能力均未受到影响。该研究结果为高海拔低氧环境对颜色加工存在特异性影响提供了实验证据。

本研究显示长期高海拔暴露对世居者和移居者的蓝色和红色加工能力均产生影响，这一结果与以往高海拔急性暴露的研究结果一致 [6–8]。但与以往研究结果不同，我们发现高海拔暴露对蓝色加工能力的影响大于对红色的影响，Bouquet 等的研究结果显示，高海拔暴露对红色的影响大于对蓝色的影响 [6]。本研究结果还显示高海拔世居者的绿色加工能力也受损，Richale 等对急性暴露于 4 350 m 和 4 800 m 海拔的人群研究也发现红、绿两种颜色的识别能力均下降，而且绿色下降比红色更加明显 [10]，但是本研究结果显示长期高海拔暴露对世居者和移居者蓝色的影响大于红色，对红色的影响大于绿色。Vingrys 等对急性暴露于海拔 3 658 m 的个体的研究显示，不仅黄、蓝色的识别能力下降，还发现红、绿色的识别能力也下降 [11]，但是本研究中世居者和移居者黄色加工能力均未受到影响。

有研究指出，低氧导致的颜色加工能力下降可

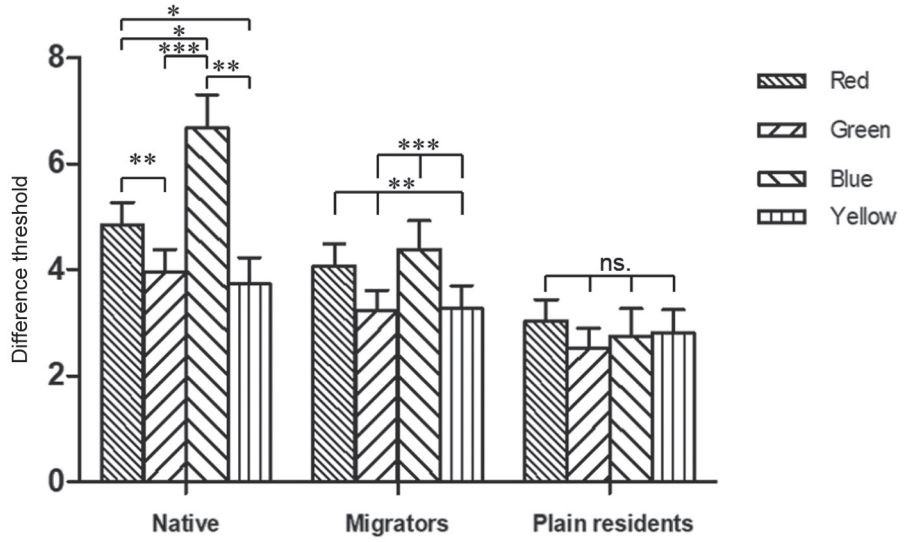


图 3. 四种颜色明度阈限在同一群体的均值分布情况

Fig. 3. Mean distribution of four color's difference threshold of the brightness in same populations. $^{*}P < 0.05$, $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$, ns.: $P > 0.05$.

能不是负责调节颜色视觉的单个神经机制的选择性损伤[17]。众所周知，轻度低氧会影响光感受器离子泵[18]，低氧时可能会引发光感受器的工作效率降低。有研究者指出，在各种低氧的哺乳动物神经元末端去极化之前，有一个 $K^+$ 通道的超极化，这种超极化降低了神经元活动，从而降低了离子泵的活性[19]。有一项电生理学研究报道了低氧血症使 7 例无视网膜病变患者的视网膜电图 b 波振幅降低到 69%，10 例视网膜病变患者的 b 波振幅降低到 88%[20]。还有研究者发现低氧会影响视紫红质的再生[21]。视紫红质位于视杆细胞外节，是视杆细胞的视色素，人类视锥细胞中存在对蓝光、红光、绿光敏感的多种视色素[22]，低氧会影响这些视色素的生成。基于低氧导致视网膜光感受器离子通道和感光色素的的异常，可以很好地解释高海拔低氧暴露者的颜色加工能力的下降，但是并不能解释高海拔低氧暴露导致颜色加工能力的选择性改变。

有研究者指出，高海拔低氧导致人类颜色加工能力特异性的改变有可能是高海拔低氧环境导致视觉系统血液循环改变的原因。本研究中观察到世居者和移居者红色和蓝色明度差别阈限出现显著的损伤，可能是低氧导致眼压降低，视网膜静脉扩张，血液发生血流变，视网膜血管的分布发生改变导致的[20]。血流变会引起机体血液循环障碍，尤其是微循环灌流量下降可能会引发视网膜血管的血液流量变缓，从而影响视网膜组织的功能。视觉这一生理过程需要很高的耗氧量，低氧导致了血液流量变缓。颜色视觉过程通过红、绿、蓝三色敏感视锥细胞起作用，低氧诱导的颜色视觉选择性改变可能与视锥光感受器之间根据其在视网膜中的不同分布而产生的血液供应不平均有关，而绿敏受体被认为比其他光感受器接受更大的血液供应[8]。Zwick 等于 1984 年提出，由于视觉细胞在视网膜中的分布不同，同时视网膜血管分布的密度不同，对绿色敏感的受体比对红色敏感的受体接受更多的血液供应[23]。同时还有研究指出，这样的低血供应的红色和蓝色敏感的受体会使他们对低氧的敏感度高于其他类型的感光细胞[24]。由此推测血液供应量应该是蓝色和红色受体小于绿色和黄色受体，进而导致蓝色和红色的损伤效应。

本研究结果还显示高海拔世居者的绿色加工能力也出现了损伤，但是外来移居者没有发现类似的损伤，这一结果说明，长期高海拔暴露影响人类颜色加工可能与高海拔暴露的时间直接相关。本研究中的世居者选取的是在 3 680 m 海拔出生长大的藏族大学生，而高海拔移居者选取的是在 3 680 m 海拔居住满两年的汉族大学生。已有研究认为，长期居住在高海拔的藏族人生理上已经适应了高海拔低氧环境，他们通过增强心肺功能来增加血流量供应对抗机体组织的氧供应不足[14, 25, 26]。本研究的结果说明高海拔世居者的适应机制可能仍不足以对抗组织的损伤，即高海拔环境对颜色加工的特异性影响可能存在时间累积效应。

总之，本研究在世居者和移居者中发现了高海拔低氧环境暴露对颜色加工存在特异性影响，而且这一影响可能与大脑血流量的变化相关，后续研究需要进一步探讨长期高海拔暴露对颜色识别的时间效应和海拔效应，以及这种影响的时间变化和由低氧引起的视觉功能改变的生理机制。

## 参考文献


1 Virués-Ortega J, Buela-Casal G, Garrido E, Alcázar B. Neuropsychological functioning associated with high-altitude exposure. Neuropsychol Rev 2004; 14(4): 197–224.

2 Virués-Ortega J, Garrido E, Javierre C, Kloezeman KC. Human behaviour and development under high-altitude conditions. Dev Sci 2006; 9(4): 400–410.

3 Yan X. Cognitive impairments at high altitudes and adaptation. High Alt Med Biol 2014; 15(2): 141–145.

4 Mcfarland RA, Evans JN. Alterations in dark adaptation under reduced oxygen tensions. Am J Physiol 1939; 127(1): 37–50.

5 Bahrke MS, Shukitt-Hale B. Effects of altitude on mood, behaviour and cognitive functioning. Sports Med 1993; 16(2): 97–125.

6 Bouquet C, Gardette B, Gortan C, Therme P, Abraini JH. Color discrimination under chronic hypoxic conditions (simulated climb “Everest-Comex 97”). Percept Mot Skills 2000; 90(1): 169–179.

7 Kobrick JL. Effects of hypoxia and acetazolamide on color sensitivity zones in the visual field. J Appl Physiol 1970; 28(6): 741–747.

8 Modugno GC. Changes in color perception during a prolonged stay at 4550 meters above sea level. Riv Med Aeronaut Spaz 1982; 47(1–4): 247–253.

9 Karakucuk S, Oner AO, Goktas S, Siki E, Kose O. Color vision changes in young subjects acutely exposed to 3,000 m altitude. Aviat Space Environ Med 2004; 75(4): 364–366.

10 Richalet JP, Duval-Arnould G, Darnaud B, Keromes A,

Rutgers V. Modification of colour vision in the green-red axis in acute and chronic hypoxia explored with a portable anomaloscope. Aviat Space Environ Med 1988; 59(7): 620–623.

11 Vingrys AJ, Garner LF. The effect of a moderate level of hypoxia on human color vision. Doc Ophthalmol 1987; 66(2): 171–185.

12 Wang Y, Ma H, Fu S, Guo S, Yang X, Luo P, Han B. Long-term exposure to high altitude affects voluntary spatial attention at early and late processing stages. Sci Rep 2014; 4: 4443. DOI: 10.1038/srep04443.

13 Zhang D, Ma H, Huang J, Zhang X, Ma H, Liu M. Exploring the impact of chronic high-altitude exposure on visual spatial attention using the ERP approach. Brain Behav 2018; e00944.

14 Wu T, Kayser B. High altitude adaptation in Tibetans. High Alt Med Biol 2006; 7(3): 193–208.

15 Hochachka PW. Defense strategies against hypoxia and hypothermia. Science 1986; 231(4735): 234–241.

16 Rimmer TJ, Smith MJ, Ogilvy AJ, Mcnally PG. Effects of hypoxemia on the electroretinogram in diabetics. Doc Ophthalmol 1995; 91(4): 311–321.

17 Hart WM Jr. Acquired dyschromatopsias. Surv Ophthalmol 1987; 32(1): 10–31.

18 Steinberg R. Monitoring communications between photoreceptors and pigment epithelial cells: Effects of “mild” systemic hypoxia (Friedenwald Lecture). Invest Ophthalmol Vis Sci 1987; 12: 1888–1904.

19 Zhu HL, Luo WQ, Wang H. Iptakalim protects against hypoxic brain injury through multiple pathways associated with ATP-sensitive potassium channels. Neuroscience 2008; 157(4): 884–894.

20 Brinchmann-Hansen O, Myhre K. Blood pressure, intraocular pressure, and retinal vessels after high altitude mountain exposure. Aviat Space Environ Med 1989; 60(10 Pt 1): 970–976.

21 Ostroy SE, Gaitatzes CG, Friedmann AL. Hypoxia inhibits rhodopsin regeneration in the excised mouse eye. Invest Ophthalmol Vis Sci 1993; 34(2): 447–452.

22 Qi MY (祁美艳). Molecular mechanism of visual signal transmission in the retina. J Shanghai Tiedao Univ (上海铁道大学学报) 2000; 21(1): 106–108 (in Chinese).

23 Kobrick JL, Zwick H, Witt CE, Devine JA. Effects of extended hypoxia on night vision. Aviat Space Environ Med 1984; 55(3): 191–195.

24 Harris A, Arend O, Kopecky K, Caldemeyer K, Wolf S, onsel W. Physiological perturbation of ocular and cerebral blood flow as measured by scanning laser ophthalmoscopy and color Doppler imaging. Surv Ophthalmol 1994; 38: S81–S86.

25 Beall CM. Andean, Tibetan, and Ethiopian patterns of adaptation to high-altitude hypoxia. Integr Comp Biol 2006; 46(1): 18–24.

26 Beall CM, Brittenham GM, Strohl KP, Blangero J, Williams-Blangero S, Goldstein MC, Decker MJ, Vargas E, Villena M, Gonzales C. Hemoglobin concentration of high-altitude Tibetans and Bolivian Aymara. Am J Phys Anthropol 1998; 106(3): 385–400.