

常氧条件下高原鼢鼠、甘肃鼢鼠及 SD 大鼠血液理化特征比较

潘巧琳^① 唐燕红^① 谢静^① 谢惠春^{①②} 李金钢^① 何建平^{①*}

① 陕西师范大学生命科学学院 西安 710062; ② 青海师范大学 青藏高原环境与资源教育部重点实验室 西宁 810008

摘要: 为探讨不同低氧环境适应动物的血液理化特征, 用美国雅培手掌血气分析仪分别测定常氧适应 4 周的高原鼢鼠 (*Myospalax baileyi*) 及甘肃鼢鼠 (*M. cansus*) 血液的血气、酸碱及电解质指标, 并与 SD 大鼠 (*Rattus norvegicus*) 进行比较。结果显示, 常氧适应后, 甘肃鼢鼠与高原鼢鼠动脉氧分压 (PaO₂)、静脉氧分压 (PvO₂)、动静脉氧分压差 (PaO₂ - PvO₂)、动脉氧饱和度 (SaO₂)、静脉氧饱和度 (SvO₂) 及氧利用率均无显著性差异, 两种动物静脉血的氧分压和氧饱和度均极显著低于 SD 大鼠, 氧利用率极显著高于 SD 大鼠; 高原鼢鼠与甘肃鼢鼠动、静脉血红蛋白 (Hb) 及动、静脉红细胞压积 (HCT) 无显著性差异, 血红蛋白含量与 SD 大鼠无显著性差异, 但红细胞压积 (HCT) 极显著低于 SD 大鼠; 高原鼢鼠和甘肃鼢鼠血液酸碱特征趋于一致, 不同于 SD 大鼠, 动静脉 pH 差 (pHa - pHv) 及动静脉 CO₂ 总含量差 (TvCO₂ - TaCO₂) 显著高于 SD 大鼠, 动脉二氧化碳分压 (PaCO₂) 极显著低于 SD 大鼠, 动静脉二氧化碳分压差 (PvCO₂ - PaCO₂) 极显著高于 SD 大鼠; 高原鼢鼠和甘肃鼢鼠血浆中钠离子 (Na⁺) 浓度、钾离子 (K⁺) 浓度、游离钙离子 (iCa²⁺) 浓度及动静脉钠离子浓度差 (Na⁺v - Na⁺a)、钾离子浓度差 (K⁺v - K⁺a) 和游离钙离子浓度差 (iCa²⁺v - iCa²⁺a) 无显著性差异; 高原鼢鼠动脉血钾离子浓度显著低于 SD 大鼠, 钾离子浓度差显著高于 SD 大鼠; 甘肃鼢鼠钾离子浓度差及动、静脉血钙离子浓度显著高于 SD 大鼠。这些结果说明, 低氧适应动物血气、酸碱及电解质特征一致, 与地面生活的 SD 大鼠差异很大, 表现出较低的红细胞压积和较高的氧利用率, 血液能耐受较宽范围的酸碱变化, 维持电解质稳定, 保证内环境稳态。

关键词: 低氧; 甘肃鼢鼠; 高原鼢鼠; 血气; 酸碱特性; 电解质

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2015) 06-839-07

The Comparison of Blood Physicochemical Characteristics between Plateau Zokor (*Myospalax baileyi*), Gansu Zokor (*M. cansus*) and SD Rat (*Rattus norvegicus*) under Normal Oxygen Condition

PAN Qiao-Lin^① TANG Yan-Hong^① XIE Jing^① XIE Hui-Chun^{①②} LI Jin-Gang^① HE Jian-Ping^{①*}

① College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062; ② Qinghai Normal University, The Key Laboratory of Education

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 30670360);

* 通讯作者, E-mail: hejianping@snnu.edu.cn;

第一作者介绍 潘巧琳, 女, 硕士研究生; 研究方向: 比较神经生物学; E-mail: panqiaolin03@snnu.edu.cn.

收稿日期: 2015-01-14, 修回日期: 2015-05-10 DOI: 10.13859/j.cjz.201506003

Ministry on Environments and Resources in Tibetan Plateau, Xining 810008, China

Abstract: In order to know the blood gas, acid-base balance and electrolyte characteristics of blood in subterranean rodents under normal oxygen condition, these parameters were measured by the i-STAT blood gas analyzer in Gansu zokor (*Myospalax cansus*), Plateau zokor (*M. baileyi*) and SD rat (*Rattus norvegicus*) which had adapted at normal oxygen condition for 4 weeks. The comparison of difference between groups was analyzed with one-way ANVOA method using SPSS 17.0. The results showed that there was no significant difference in PaO₂, PvO₂, PaO₂ - PvO₂, SaO₂, SvO₂ and oxygen utilization rate between Gansu zokor and Plateau zokor. Their PvO₂ and SvO₂ were significantly lower than those in SD rat, but oxygen utilization was significantly higher than that in SD rat. There was no significant difference of Hba, Hbv, HCTa and HCTv between Gansu zokor and Plateau zokor. But their HCTa and HCTv were significantly lower than those in SD rat (Table 1). Blood acid-base characteristics in Gansu zokor and Plateau zokor were different from those of SD rat, but the characteristics in Gansu zokor and Plateau zokor were similar. pH_a - pH_v, TvCO₂ - TaCO₂ in Gansu zokor and Plateau zokor were higher than that in SD rat. PaCO₂ in Gansu zokor and Plateau zokor was significantly lower than that in SD rat. PvCO₂ - PaCO₂ in Gansu zokor and Plateau zokor was significantly higher than that in SD rat (Table 2). There was no significant difference in Na⁺, K⁺, iCa²⁺, Na⁺v - Na⁺a, K⁺v - K⁺a and iCa²⁺v - iCa²⁺a in Gansu zokor and Plateau zokor. K⁺a in Plateau zokor was lower than that in SD rat, but K⁺v - K⁺a in Plateau zokor was higher than that in SD rat. K⁺v - K⁺a, iCa²⁺a and iCa²⁺v in Gansu zokor were higher than those in SD rat (Table 3). The results suggest that the blood gas characteristics, acid-base balance and electrolyte characteristics in Gansu zokor and Plateau zokor are similar, but are different from those of SD rat. The oxygen utilization rate in Gansu zokor and Plateau zokor are higher than that in SD rat. In order to guarantee internal environment and homeostasis, Gansu zokor and Plateau zokor have strong tolerance to acid-base variation and maintenance to electrolyte stability.

Key words: Hypoxia; Gansu zokor (*Myospalax cansus*); Plateau zokor (*M. baileyi*); Blood gas; Acid-base properties; Electrolyte

高原鼯鼠 (*Myospalax baileyi*) 与甘肃鼯鼠 (*M. cansus*) 均为地下啮齿动物, 终年生活在地下黑暗的隧道里, 很少在地面活动, 其隧道呈封闭状态, 生活环境是典型的低氧、高二氧化碳环境, 独特的环境使其经过世代进化后具备对低氧和高二氧化碳极强的耐受力, 是研究低氧适应的理想动物模型。已有的研究表明, 地下鼠已进化出较一致的适应性生理特征, 如较低的基础代谢率、体温、肺通气量、心输出量和心率及冠状动脉阻力 (Lechner 1977, Arieli 1990, Arieli et al. 1991, Boggs et al. 1998); 低氧高二氧化碳的地下隧道中, 动脉血二氧化碳分压较高的情况下仍保持血液酸碱平衡

(Quilliam et al. 1971, Buffenstein 2000); 肺、心肌和骨骼肌中具有较高的毛细血管密度和较小表面积的骨骼肌纤维, 增加氧运输扩散能力 (Arieli 1990); 骨骼肌中较高的肌红蛋白浓度和线粒体数量, 有利于挖掘时快速供能 (Arieli 1990, Widmer et al. 1997); 红细胞生成素、血红蛋白和内皮生长因子的结构与功能发生适应性改变 (Kleinshmidt et al. 1984, Nevo et al. 1989, Avivi et al. 1999, Shams et al. 2004); 同时, 超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、谷胱甘肽还原酶等抗氧化酶活性高, 可降低氧气和二氧化碳浓度波动引起的氧化损伤 (Caballero et al. 2006, 高媛等 2012, 唐燕红等 2013)。

高原鼯鼠与甘肃鼯鼠均隶属于仓鼠科(Cricetidae)鼯鼠属,高原鼯鼠分布于青藏高原东部海拔2 800 ~ 4 200 m的地区(樊乃昌等1982),其血液学特征是高红细胞数(blood corpuscle count, RBC)、低红细胞压积(hematocrit, HCT)和低平均红细胞容积(mean corpuscular volume, MCV),红细胞压积和平均红细胞容积小,有利于降低血液黏度、减小血液循环阻力和减轻心负担,提高血液运输氧的能力(叶润蓉等1994,魏登邦等2006)。甘肃鼯鼠分布在我国黄土高原,为适应地下低氧、高二氧化碳环境,其生理机能出现适应性变化,低氧适应后,其红细胞数显著增多,红细胞压积增大,血红蛋白浓度(hemoglobin in concentration, HBC)显著升高(杨静等2006,谢芬等2012)。

甘肃鼯鼠和高原鼯鼠生境同为低氧环境,但又有区别。高原鼯鼠生活的青藏高原相对于甘肃鼯鼠生存的黄土高原,还存在低压、低温等胁迫。这两种低氧适应动物与地面活动啮齿动物间的血液理化特征有何差异?本研究将捕自青海的高原鼯鼠、延安的甘肃鼯鼠及购自西安的SD大鼠(*Rattus norvegicus*)于实验室饲养4周,测定三者血液的血气、酸碱及电解质指标并进行比较,以探讨不同低氧适应动物间及地下生活与地面生活动物间血液理化特征异同,为低氧适应研究积累资料。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用雄性高原鼯鼠6只,体重220 ~ 280 g,采自青海省湟中县(海拔3 200 m),实验用雄性甘肃鼯鼠6只,体重220 ~ 280 g,采自陕西省延安市,均饲以胡萝卜;雄性SD大鼠6只,体重220 ~ 280 g,购于西安交通大学医学院,饲以鼠粮并自由饮水。动物于实验室动物饲养箱(475 mm × 350 mm × 200 mm)内单笼饲养,以锯末为笼垫,棉花为巢材,室温(21 ± 1)℃,光周期14 L : 10 D,饲养4周后进行实验。

1.2 血气分析

1%肝素钠润洗1 ml一次性注射器,将4℃保存的血气电极片EG7+ (i-STAT Corp., USA)置于室内常温下。

实验动物用20%氨基甲酸乙酯腹腔注射,SD大鼠注射剂量7.5 ml/kg,甘肃鼯鼠和高原鼯鼠5 ml/kg,待深度麻醉后,剖开颈部,用1 ml一次性注射器于颈静脉窦和颈动脉中分别取静脉血和动脉血各0.1 ml。手掌温热注射器,排出第一滴血液后,将血样注入血气电极片EG7+,利用美国雅培手掌血气分析仪(i-STAT PCA, i-STAT Corp., USA)分别测定常氧适应4周的高原鼯鼠、甘肃鼯鼠及SD大鼠的血气、酸碱及电解质指标。

1.3 统计方法

SPSS17.0软件单因素方差分析进行组间差异比较,结果以平均值 ± 标准差(Mean ± SD)表示,0.01 < P < 0.05为显著性水平, P < 0.01为极显著水平。

2 结果

2.1 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和SD大鼠血氧指标及红细胞特征的比较

常氧适应4周后,高原鼯鼠与甘肃鼯鼠的动、静脉氧分压,动静脉氧分压差,动、静脉氧饱和度,氧利用率,动、静脉血红蛋白及动、静脉红细胞压积均无显著性差异(P > 0.05)。高原鼯鼠和甘肃鼯鼠动、静脉红细胞压积、静脉氧分压及静脉氧饱和度均极显著低于SD大鼠(P < 0.01),氧利用率极显著高于SD大鼠(P < 0.01),3种动物血液血红蛋白浓度无显著性差异(表1)。

2.2 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和SD大鼠血液酸碱指标比较

高原鼯鼠与甘肃鼯鼠相比,除了静脉pH和碳酸氢根浓度显著高于甘肃鼯鼠,其余血液酸碱指标均无显著性差异。高原鼯鼠静脉pH、动静脉pH差、动静脉二氧化碳总含量差显著高于SD大鼠(0.01 < P < 0.05),动脉pH、静

表 1 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和 SD 大鼠血氧指标及红细胞特征的比较 (平均值 ± 标准差)

Table 1 The comparison of blood oxygen index and characteristics in plateau zokor, Gansu zokor and SD rat (Mean ± SD)

		高原鼯鼠 <i>Myospalax baileyi</i>	甘肃鼯鼠 <i>M. cansus</i>	SD 大鼠 <i>Rattus norvegicus</i>
氧分压 (×10 ³ Pa) Oxygen pressure, PO ₂	动脉 Arterial blood	17.96 ± 4.38	15.83 ± 3.16	18.35 ± 1.39
	静脉 Veinal blood	2.66 ± 6.91 ^{bb}	3.77 ± 9.09 ^{cc}	5.83 ± 0.70 ^{bb, cc}
	动静脉差 Arterial blood—veinal blood	15.30 ± 4.78	12.06 ± 3.32	12.52 ± 1.11
氧饱和度 (%) Oxygen saturation, SO ₂	动脉 Arterial blood	99.00 ± 1.00	95.33 ± 7.69	98.33 ± 0.82
	静脉 Veinal blood	29.00 ± 11.27 ^{bb}	41.00 ± 14.59 ^{cc}	76.17 ± 6.11 ^{bb, cc}
	氧利用率 Oxygen utilization rate	70.64 ± 11.70 ^{bb}	56.90 ± 14.75 ^{cc}	22.54 ± 6.13 ^{bb, cc}
血红蛋白 (g/L) Hemoglobin, Hb	动脉 Arterial blood	137.33 ± 9.07	133.16 ± 11.96	143.67 ± 8.66
	静脉 Veinal blood	140.67 ± 8.02	136.33 ± 10.76	148.83 ± 9.72
红细胞压积 (%) Hematokrit, HCT	动脉 Arterial blood	40.00 ± 3.61 ^{bb}	39.83 ± 3.19 ^{cc}	50.83 ± 2.14 ^{bb, cc}
	静脉 Veinal blood	42.33 ± 3.79 ^{bb}	40.67 ± 3.33 ^{cc}	51.33 ± 1.86 ^{bb, cc}

a 表示高原鼯鼠与甘肃鼯鼠比较, b 表示高原鼯鼠与 SD 大鼠比较, c 表示甘肃鼯鼠与 SD 大鼠比较。a、b、c 表示 0.01 < P < 0.05; aa、bb、cc 表示 P < 0.01。

“a” indicates comparison between *Myospalax baileyi* and *M. cansus*, “b” indicates comparison between *M. baileyi* and *Rattus norvegicus*, “c” indicates comparison between *M. cansus* and *R. norvegicus*. a, b, c, 0.01 < P < 0.05; aa, bb, cc, P < 0.01.

脉二氧化碳分压、动静脉二氧化碳分压差、动静脉碳酸氢根浓度差、静脉碳酸氢根浓度、静脉二氧化碳总含量极显著高于 SD 大鼠 (P < 0.01), 动脉二氧化碳分压极显著低于 SD 大鼠 (P < 0.01)。甘肃鼯鼠动静脉 pH 差、静脉碳酸氢根浓度、动静脉碳酸氢根浓度差、动静脉二氧化碳总含量差显著高于 SD 大鼠 (0.01 < P < 0.05), 动静脉二氧化碳分压差极显著高于 SD 大鼠 (P < 0.01), 动脉二氧化碳分压极显著低于 SD 大鼠 (P < 0.01)。3 种物种之间血液剩余碱指标均无显著性差异 (表 2)。

2.3 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和 SD 大鼠血浆电解质指标比较

高原鼯鼠与甘肃鼯鼠的血浆钠离子浓度、钾离子浓度及游离钙离子浓度均无显著性差异 (P > 0.05); 高原鼯鼠动脉血钾离子浓度显著低于 SD 大鼠 (0.05 < P < 0.01), 动静脉钾离子浓度差显著高于 SD 大鼠 (0.05 < P < 0.01)。甘肃鼯鼠血液中, 动静脉钾离子浓度差、动脉

血钙离子浓度、静脉血钙离子浓度显著高于 SD 大鼠 (0.05 < P < 0.01) (表 3)。

3 讨论

常氧适应后, 甘肃鼯鼠与高原鼯鼠血氧指标无显著性差异, 二者静脉氧分压、静脉氧饱和度均极显著低于 SD 大鼠, 氧利用率极显著高于 SD 大鼠。常氧环境下氧气充足, 高原鼯鼠和甘肃鼯鼠充分摄取氧气, 动脉氧分压、动脉氧饱和度与 SD 大鼠差异不显著, 但静脉氧分压和静脉氧饱和度明显低于 SD 大鼠, 说明两种地下鼠体内存在有利于血红蛋白释放更多氧的生理机制, 可给机体组织提供充足的氧。高原鼯鼠与甘肃鼯鼠动静脉血中血红蛋白及红细胞压积均无显著性差异, 二者的血红蛋白浓度与 SD 大鼠无显著性差异, 但红细胞压积极显著低于 SD 大鼠。说明低氧适应动物红细胞压积保持在较低水平, 利于降低血液黏度、减小血液循环阻力、减轻心负担, 提高血液运输

表2 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和SD大鼠血液pH、二氧化碳分压、碳酸氢根、二氧化碳总含量、血液酸碱的比较(平均值 ± 标准差)

Table 2 The comparison of pH, PCO₂, HCO₃⁻, TCO₂ and BE in Plateau zokor, Gansu zokor and SD rat (Mean ± SD)

		高原鼯鼠 <i>Myospalax baileyi</i>	甘肃鼯鼠 <i>M. cansus</i>	SD 大鼠 <i>Rattus norvegicus</i>
pH	动脉 Arterial blood	7.54 ± 0.15 ^{bb}	7.44 ± 0.04	7.36 ± 0.03 ^{bb}
	静脉 Veinal blood	7.38 ± 0.02 ^{a, b}	7.32 ± 0.04 ^a	7.31 ± 0.02 ^b
	动静脉差 Arterial blood - veinal blood	0.16 ± 0.13 ^b	0.12 ± 0.03 ^c	0.04 ± 0.01 ^{b, c}
	二氧化碳分压 (× 10 ³ Pa) Carbon dioxide pressure, PCO ₂	3.92 ± 0.54 ^{bb}	3.90 ± 0.51 ^{cc}	5.54 ± 0.83 ^{bb, cc}
碳酸氢根浓度 (mmol/L) Concentration of bicarbonate, HCO ₃ ⁻	静脉 Veinal blood	7.68 ± 0.04 ^{bb}	7.03 ± 0.59	6.48 ± 0.52 ^{bb}
	静动脉差 Veinal blood - arterial blood	3.76 ± 0.49 ^{bb}	3.13 ± 0.69 ^{cc}	0.94 ± 0.48 ^{bb, cc}
	动脉 Arterial blood	16.73 ± 2.21	16.48 ± 4.35	19.20 ± 1.53
	静脉 Veinal blood	31.90 ± 1.54 ^{a, bb}	28.97 ± 1.76 ^{a, c}	26.67 ± 1.94 ^{bb, c}
二氧化碳总量 (mmol/L) Total carbon dioxide, TCO ₂	静动脉差 Veinal blood - arterial blood	15.17 ± 0.67 ^{bb}	12.48 ± 4.14 ^c	7.47 ± 2.12 ^{bb, c}
	动脉 Arterial blood	17.67 ± 2.52	17.50 ± 4.81	20.83 ± 1.83
	静脉 Veinal blood	33.67 ± 2.08 ^{bb}	30.67 ± 1.97	29.00 ± 2.10 ^{bb}
	静动脉差 Veinal blood - arterial blood	16.00 ± 4.36 ^b	13.17 ± 4.45 ^c	8.17 ± 2.48 ^{b, c}
血液剩余碱 (mmol/L) Base excess, BE	动脉 Arterial blood	0.67 ± 1.53	0.67 ± 1.37	0.83 ± 0.75
	静脉 Veinal blood	3.67 ± 0.58	3.67 ± 1.03	3.17 ± 0.41
	静动脉差	3.00 ± 1.00	3.00 ± 0.63	2.33 ± 0.52
	Veinal blood - arterial blood			

a 表示高原鼯鼠与甘肃鼯鼠比较, b 表示高原鼯鼠与 SD 大鼠比较, c 表示甘肃鼯鼠与 SD 大鼠比较。a、b、c 表示 0.01 < P < 0.05; aa、bb、cc 表示 P < 0.01。

"a" indicates comparison between *Myospalax baileyi* and *M. cansus*, "b" indicates comparison between *M. baileyi* and *Rattus norvegicus*, "c" indicates comparison between *M. cansus* and *R. norvegicus*. a, b, c, 0.01 < P < 0.05; aa, bb, cc, P < 0.01.

氧能力。这与对高原鼯鼠的研究结果一致(Wei et al. 2006)。地下鼠血红蛋白浓度与 SD 大鼠无显著性差异,但氧利用率极显著高于 SD 大鼠,说明地下鼠血红蛋白具有极强的氧亲和性和释放能力,这可能与血红蛋白的结构和功能发生适应性变化有关(Kleinschmidt et al. 1984)。有研究表明,低氧适应动物血红蛋白具有很高的氧亲和性,血红蛋白的氨基酸序列发生了改变,在结合氧的关键位点,发生了氨基酸替换,使血红蛋白与氧的结合能力增强(Kleinschmidt et al. 1984, Nevo et al. 1989, Widmer et al. 1997)。

常氧适应后,高原鼯鼠和甘肃鼯鼠血液酸

碱特征不同于 SD 大鼠,但两种地下鼠血液的酸碱特征趋于一致,静脉血 pH、静脉二氧化碳分压、静脉碳酸氢根浓度、静脉二氧化碳总含量均高于 SD 大鼠,说明地下鼠血液运输二氧化碳的能力较强,可将组织代谢产生的二氧化碳及时排出体外。推测地下鼠血液内碳酸酐酶活性较强或者浓度较高,因为碳酸酐酶是一种活性中心含锌离子的金属酶,能可逆催化二氧化碳生成碳酸氢盐,维持生理 pH 以及离子转运等生理过程(李春秀等 2013)。高原鼯鼠和甘肃鼯鼠动静脉血 pH 差、动静脉二氧化碳分压、动静脉碳酸氢根浓度差、动静脉二氧化碳

表3 高原鼯鼠、甘肃鼯鼠和SD大鼠血液中Na⁺、K⁺、Ca²⁺浓度的比较 (平均值 ± 标准差)
Table 3 The comparison of Na⁺, K⁺ and Ca²⁺ in Plateau zokor, Gansu zokor and SD rat (Mean ± SD)

	高原鼯鼠 <i>Myospalax baileyi</i>	甘肃鼯鼠 <i>M. cansus</i>	SD 大鼠 <i>Rattus norvegicus</i>
钠离子浓度 (mmol/L) Natriumion, Na ⁺	动脉 Arterial blood	137.33 ± 4.51	138.67 ± 4.41
	静脉 Veinal blood	140.00 ± 5.57	141.33 ± 5.05
	静动脉差 Veinal blood—arterial blood	2.67 ± 1.53	2.67 ± 0.82
钾离子浓度 (mmol/L) Potassium, K ⁺	动脉 Arterial blood	3.47 ± 0.40 ^b	3.92 ± 0.55
	静脉 Veinal blood	4.20 ± 0.26	4.58 ± 0.33
	静动脉差 Veinal blood—arterial blood	0.73 ± 0.21 ^b	0.67 ± 0.29 ^c
钙离子浓度 (mmol/L) Serum calcium, Ca ²⁺	动脉 Arterial blood	1.26 ± 0.07	1.33 ± 0.08 ^c
	静脉 Veinal blood	1.32 ± 0.06	1.37 ± 0.12 ^c
	静动脉差 Veinal blood—arterial blood	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.08

a 表示高原鼯鼠与甘肃鼯鼠比较, b 表示高原鼯鼠与 SD 大鼠比较, c 表示甘肃鼯鼠与 SD 大鼠比较。a、b、c 表示 0.01 < P < 0.05; aa、bb、cc 表示 P < 0.01。

“a” indicates comparison between *Myospalax baileyi* and *M. cansus*, “b” indicates comparison between *M. baileyi* and *Rattus norvegicus*, “c” indicates comparison between *M. cansus* and *R. norvegicus*. a, b, c, 0.01 < P < 0.05; aa, bb, cc, P < 0.01.

总含量差较高,说明地下鼠血液具有较高的 pH 调节能力和缓冲二氧化碳能力。剩余碱表示血液中碱储备增加或减少的量,可直接、快速地判断代谢性酸中毒、碱中毒,是反映血液代谢性酸碱失衡的重要指标之一(徐艳霞等 2014)。常氧适应后,三种物种之间剩余碱差异不明显,说明地下鼠虽然动、静脉的二氧化碳分压和二氧化碳含量波动大,但剩余碱含量仍处于正常范围,机体不会出现代谢性酸中毒。高原鼯鼠和甘肃鼯鼠血浆钠离子浓度、钾离子浓度、游离钙离子浓度无显著性差异,说明地下鼠血浆电解质特征趋于一致。钾离子,是细胞液中含有最高的呈结合状态的阳性离子,在细胞内直接参与相关代谢活动,血钾浓度对机体电解质情况、酸碱平衡及氧合状态等具有非常重要作用(江龙等 2013)。血浆 pH 与钾离子浓度呈负相关, pH 升高 0.1, 血浆钾离子浓度降低 0.6 mmol/L; 反之,钾离子浓度升高 0.6 mmol/L (俞森洋 2008)。高原鼯鼠和甘肃鼯鼠动脉钾离子浓度均低于 SD 大鼠,且二者动脉血 pH 高,符合上述结果。甘肃鼯鼠动、静脉血游离钙浓

度均显著高于 SD 大鼠,说明其血浆游离钙的储存量较大。血钙以离子钙和结合钙两种形式存在,血浆钙中只有离子钙才直接起生理作用,钙可调节心搏动,保持心连续交替地收缩和舒张,并能维持肌肉的收缩和神经冲动的传递(邓树勋等 2005)。甘肃鼯鼠动、静脉游离钙离子浓度显著高于 SD 大鼠,推测这与其在地下洞道中进行挖掘活动相关。

综上所述,高原鼯鼠和甘肃鼯鼠血气、酸碱及电解质特征趋于一致且与 SD 大鼠差异显著,两种地下鼠血红蛋白具有较强的氧亲和力和释放氧能力,其机体具有较高的酸碱缓冲能力和电解质平衡能力,保证了低氧下内环境的稳态。

参 考 文 献

Arieli R. 1990. Adaptation of the mammalian gas transport system to subterranean life. *Progress in Clinical and Biological Research*, 335(2): 251–268.
 Arieli R, Nevo E. 1991. Hypoxic survival differs between two mole rat species (*Spalax ehrenbergi*) of humid and arid habitats.

- Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 100(3): 543–545.
- Avivi A, Resnick M B, Nevo E, et al. 1999. Adaptive hypoxic tolerance in the subterranean mole rat *Spalax ehrenbergi*: the role of vascular endothelial growth factor. FEBS Letters, 452(3): 133–140.
- Boggs D F, Frappell P B, Kilgore D L Jr. 1998. Ventilatory, cardiovascular and metabolic responses to hypoxia and hypercapnia in the armadillo. Respiration Physiology, 113(2): 101–109.
- Buffenstein R. 2000. Ecophysiological responses of subterranean rodents to underground habitats // Lacey E A, Cameron G, Patton J L. Life Underground: The Biology of Subterranean Rodents. Chicago: University of Chicago Press, 62–110.
- Caballero B, Tom & Zapico C, Vega-Naredo I, et al. 2006. Antioxidant activity in *Spalax ehrenbergi*: a possible adaptation to underground stress. Journal of Comparative Physiology A-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 192(7): 753–759.
- Kleinschmidt T, Nevo E, Braunitzer G. 1984. The primary structure of the hemoglobin of the mole rat (*Spalax ehrenbergi*, Rodentia, Chromosome species 60). Hoppe-Seyler's Zeitschrift für Physiologische Chemie, 365(1): 531–537.
- Lechner A J. 1977. Metabolic performance during hypoxia in native and acclimated pocket gophers. Journal of Applied Physiology, 43(6): 965–970.
- Nevo E, Ben-Shlomo R, Maeda N. 1989. Haptoglobin DNA polymorphism in subterranean mole rats of the *Spalax ehrenbergi* superspecies in Israel. Heredity, 62(1): 85–90.
- Quilliam T A, Clarke J A, Salsbury A J. 1971. The ecological significance of certain new haematological findings in the mole and hedgehog. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 40(1): 89–94, IN11–IN15, 95–102.
- Shams I, Avivi A, Nevo E. 2004. Hypoxic stress tolerance of the blind subterranean mole rat: expression of erythropoietin and hypoxia-inducible factor 1. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(26): 9698–9703.
- Wei D B, Wei L, Zhang J M, et al. 2006. Blood-gas properties of Plateau zokor (*Myospalax baileyi*). Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 145(3): 372–375.
- Widmer H R, Hoppeler H, Nevo E, et al. 1997. Working underground: respiratory adaptations in the blind mole rat. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 94(5): 2062–2067.
- 邓树勋, 王健, 乔德才. 2005. 运动生理学. 北京: 高等教育出版社, 43–55.
- 樊乃昌, 施银柱. 1982. 中国鼯鼠 (*Eospalax*) 亚属分类研究. 兽类学报, 2(2): 183–199.
- 高媛, 熊晓毅, 谢惠春, 等. 2012. 甘肃鼯鼠与SD大鼠骨骼肌低氧适应的比较. 动物学杂志, 47(3): 122–128.
- 江龙, 李鹏. 2013. 床旁血气分析仪与生化仪测定动静脉血钾浓度差异的检测. 中国医疗设备, 28(3): 115–117.
- 李春秀, 姜笑辰, 邱勇隼, 等. 2013. 碳酸酐酶的生理功能、多样性及其在 CO₂ 捕集中的应用. 生物加工过程, 11(1): 94–103.
- 唐燕红, 王剑, 李金刚, 等. 2013. 低氧应激下甘肃鼯鼠与SD大鼠心脏抗氧化酶和ATP酶活性的比较. 兽类学报, 33(2): 178–185.
- 魏登邦, 张建梅, 魏莲, 等. 2006. 高原鼯鼠对低氧高二氧化碳环境适应的相关血液生理指标的季节变化. 动物学报, 52(5): 871–877.
- 谢芬, 李涛, 何建平. 2012. 低氧对甘肃鼯鼠体内 ACTH 及血液生理指标的影响. 动物学杂志, 47(5): 119–123.
- 徐艳霞, 陈建丽, 肖德卫, 等. 2014. 严重脓毒症患儿血乳酸清除率和剩余碱变化及临床意义. 贵州医药, 38(2): 155–157.
- 杨静, 李金钢, 何建平, 等. 2006. 甘肃鼯鼠血象及其与低氧适应的关系. 动物学杂志, 41(2): 112–115.
- 叶润蓉, 曹伊凡, 白琴华. 1994. 高原鼠兔的血象及其与低氧适应的关系. 中国实验动物学报, 2(2): 115–120.
- 俞森洋. 2008. 呼吸危重病学 (上). 北京: 中国协和医科大学出版社, 284–285.