



《病理生理学》

Pathophysiology

第七章 缺氧 (hypoxia)

河北医科大学
病理生理学教研室

- 一、概述
- 二、缺氧的原因、分类和血氧变化的特点
- 三、缺氧时机体的功能与代谢变化
- 四、缺氧治疗的病理生理学基础（自学）



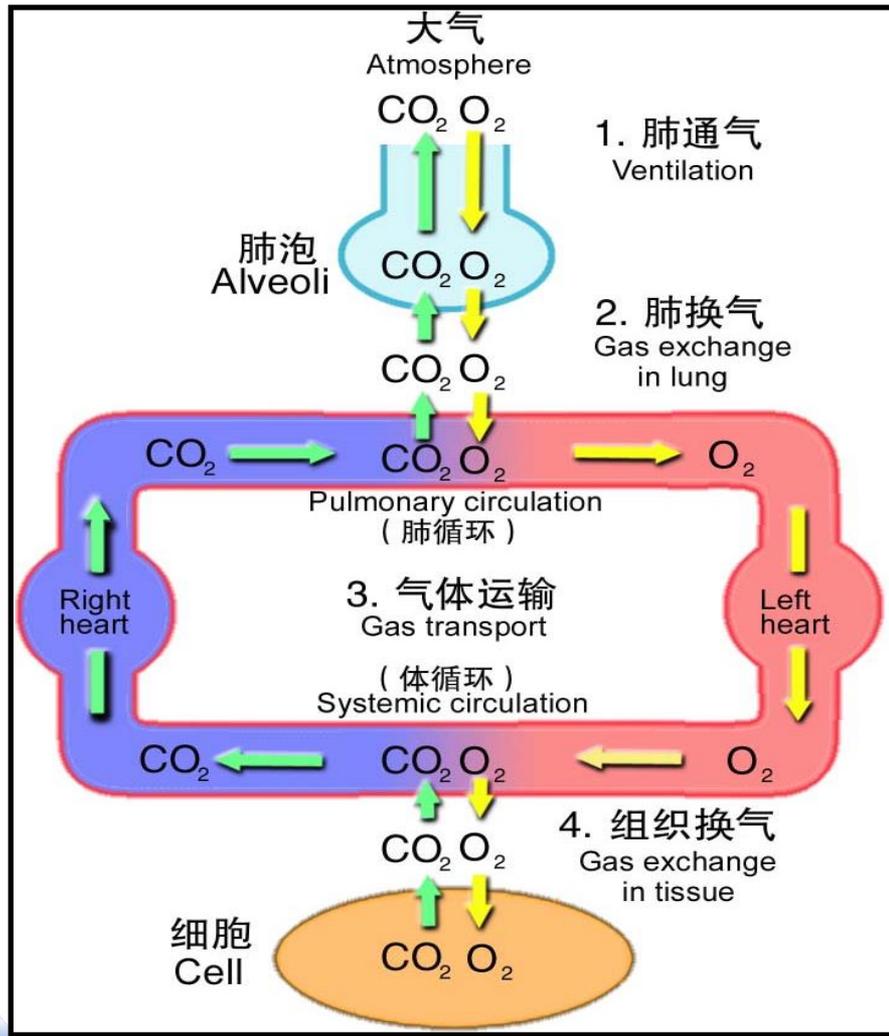
第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

Question:

正常情况下，机体是怎样获得和利用氧气的呢？



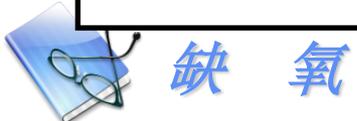


氧气的获得和利用:

- 外界空气中要有足够的氧
——吸入气的氧分压正常
- 外呼吸功能正常
- Hb的数量和性质正常
- 循环系统功能正常
- 组织利用氧的能力正常



缺氧



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

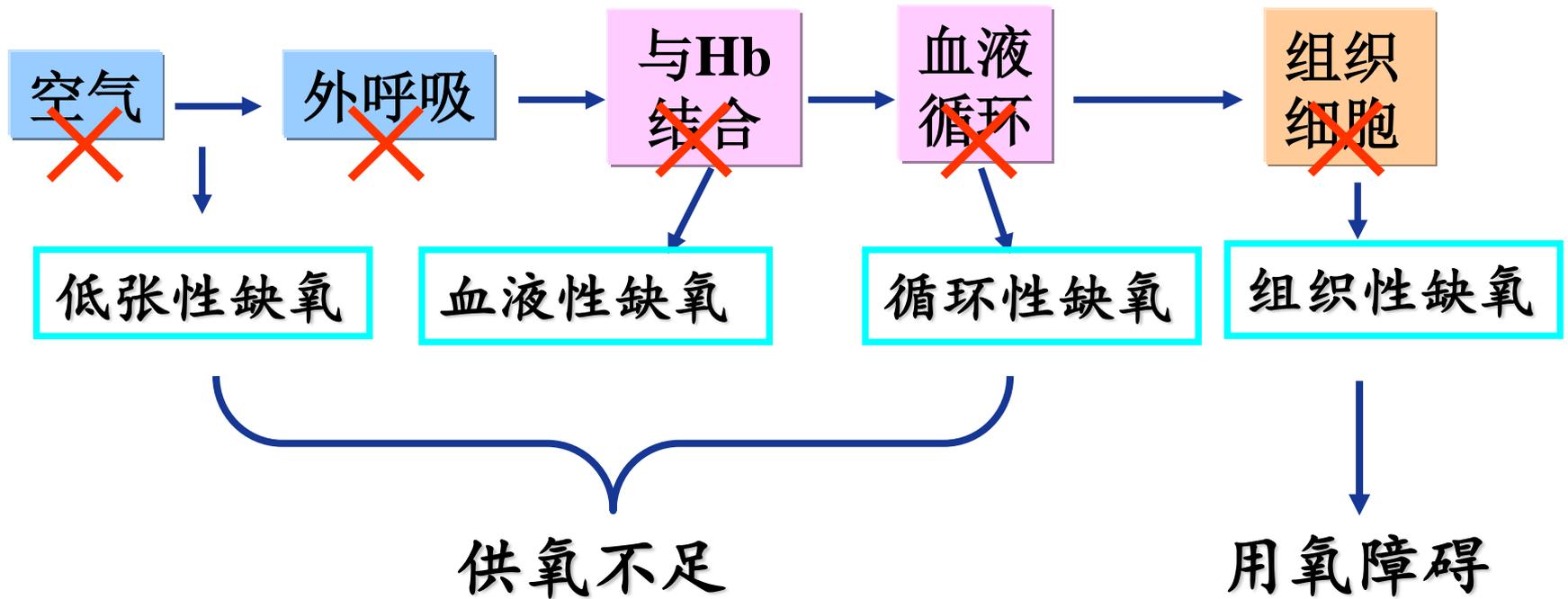
一、缺氧的概念 (hypoxia)

组织氧供减少或不能充分利用氧，导致组织代谢、功能和形态结构异常改变的病理过程。



缺氧

缺氧的类型



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动-静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 血氧分压 (Partial Pressure of Oxygen, PO_2)

物理溶解于血液中的氧所产生的张力。

正常值: PaO_2 100 mmHg PvO_2 40 mmHg

影响因素:  吸入气体氧分压
 外呼吸功能: 肺通气和肺换气

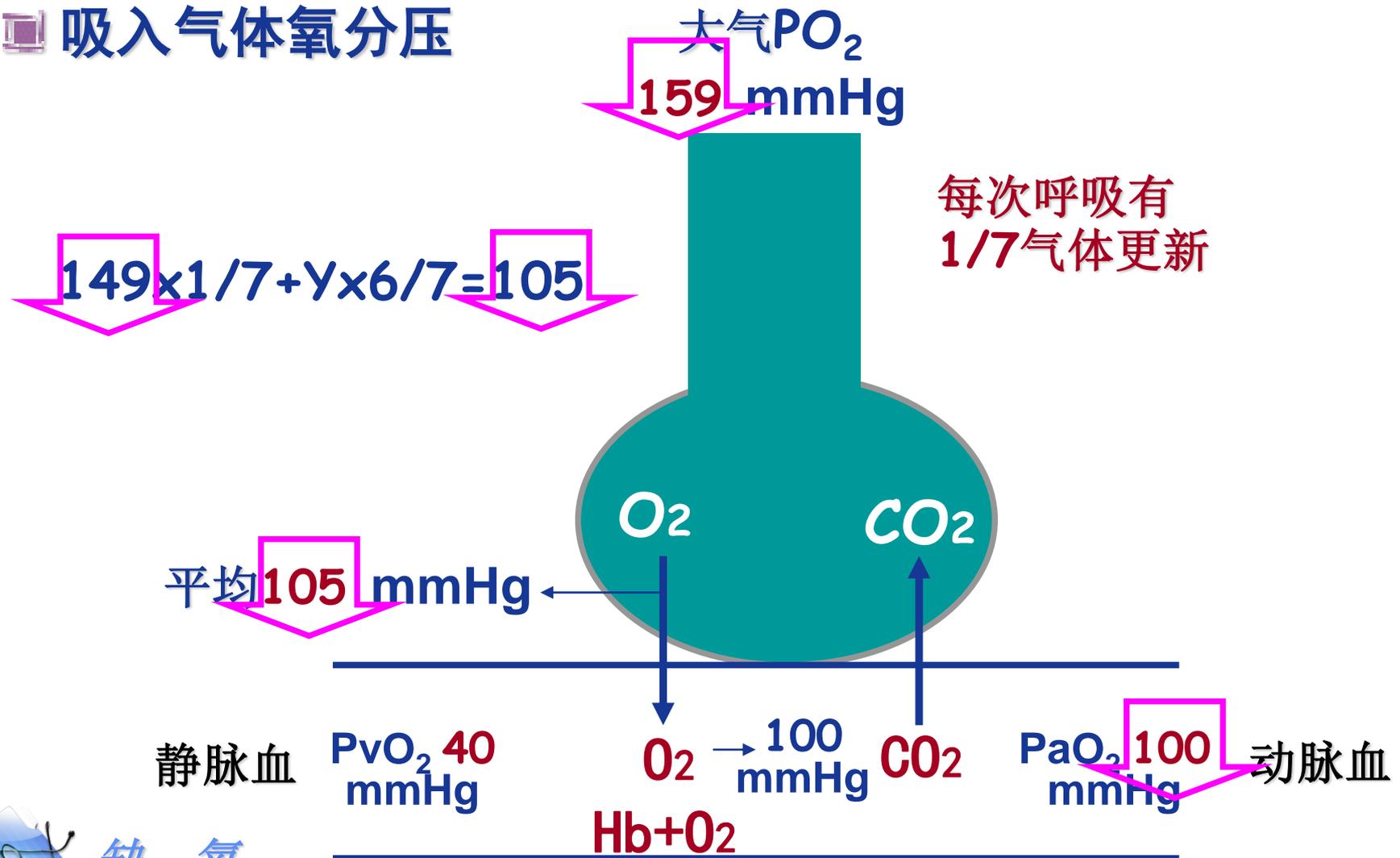


缺氧

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

吸入气体氧分压



缺氧

第一节 概述 (General Introduction)

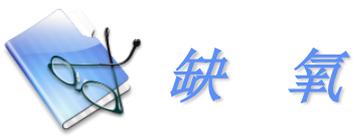
<http://www.hebmubs.cn>

❖ 血氧分压 (Partial Pressure of Oxygen, PO_2)

物理溶解于血液中的氧所产生的张力。

正常值: PaO_2 100 mmHg PvO_2 40 mmHg

影响因素:  吸入气体氧分压
 外呼吸功能: 肺通气和肺换气



缺氧

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

外呼吸功能：
肺通气和肺换气

$$149 \times \frac{1}{7} + Y \times \frac{6}{7} = 105$$

平均 **105** mmHg

大气 PO_2
159 mmHg

每次呼吸有
1/7 气体更新

静脉血

PvO_2 **40**
mmHg

$O_2 \rightarrow$ **100**
mmHg

CO_2

PaO_2 **100**
mmHg

动脉血

$Hb + O_2$

缺氧



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

❖ 血氧分压



❖ 血氧容量



❖ 血氧含量



❖ 动-静脉血氧含量差



❖ 血氧饱和度



❖ P_{50}



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 血氧容量

(Oxygen Binding Capacity, $C-O_{2max}$)

体外标准条件

100 ml血液中的血红蛋白, 在氧分压为150 mmHg, 二氧化碳分压为40 mmHg, 温度为38°C时, 完全氧合后的最大带氧量, 即100 ml血液中血红蛋白的最大带氧量。

正常值:

$$1.34\text{ml/g} \times (11.5-15\text{g/dl}) = 15-20\text{ml/dl}$$

影响因素: Hb的质和量

缺氧



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动-静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 血氧含量

(Oxygen Content, C-O₂)

100 ml血液中实际含有的氧量。

物理溶解氧(0.3ml/dl) + 化学结合氧

正常值:

15 g Hb, 氧分压正常时

A: 19 ml/dl V: 14 ml/dl

影响因素:  血氧分压
 Hb的质和量



缺氧

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

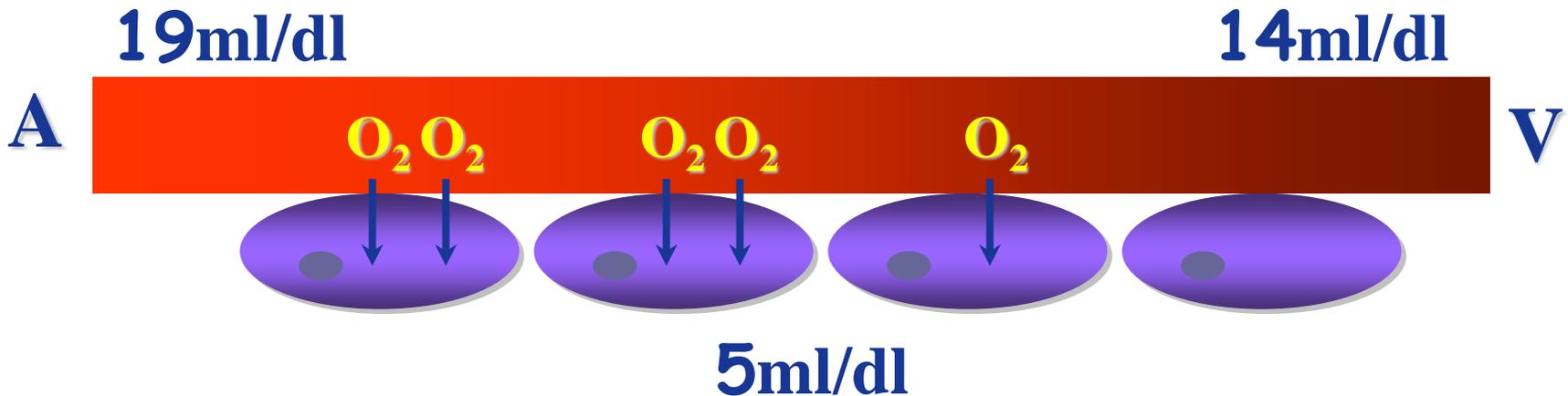
- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动-静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 动-静脉血氧含量差 ($D_{a-v}O_2$)

动脉血氧含量 - 静脉血氧含量。反映组织对氧气的摄取和利用能力。



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 动-静脉血氧含量差 ($D_{a-v}O_2$)

动脉血氧含量 - 静脉血氧含量。反映组织对氧气的摄取和利用能力。

正常值:

$D_{a-v}O_2$: 5 ml/dl

影响因素: 组织代谢率、血氧分压、
血流速度、氧离曲线



缺氧

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动-静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 血氧饱和度

(Oxygen Saturation, SO_2)

指血液中氧合血红蛋白占总血红蛋白的百分数。

0.3ml/dl

$$= \frac{\text{血氧含量} - \text{溶解的氧量}}{\text{血氧容量}} \times 100\%$$

正常值:

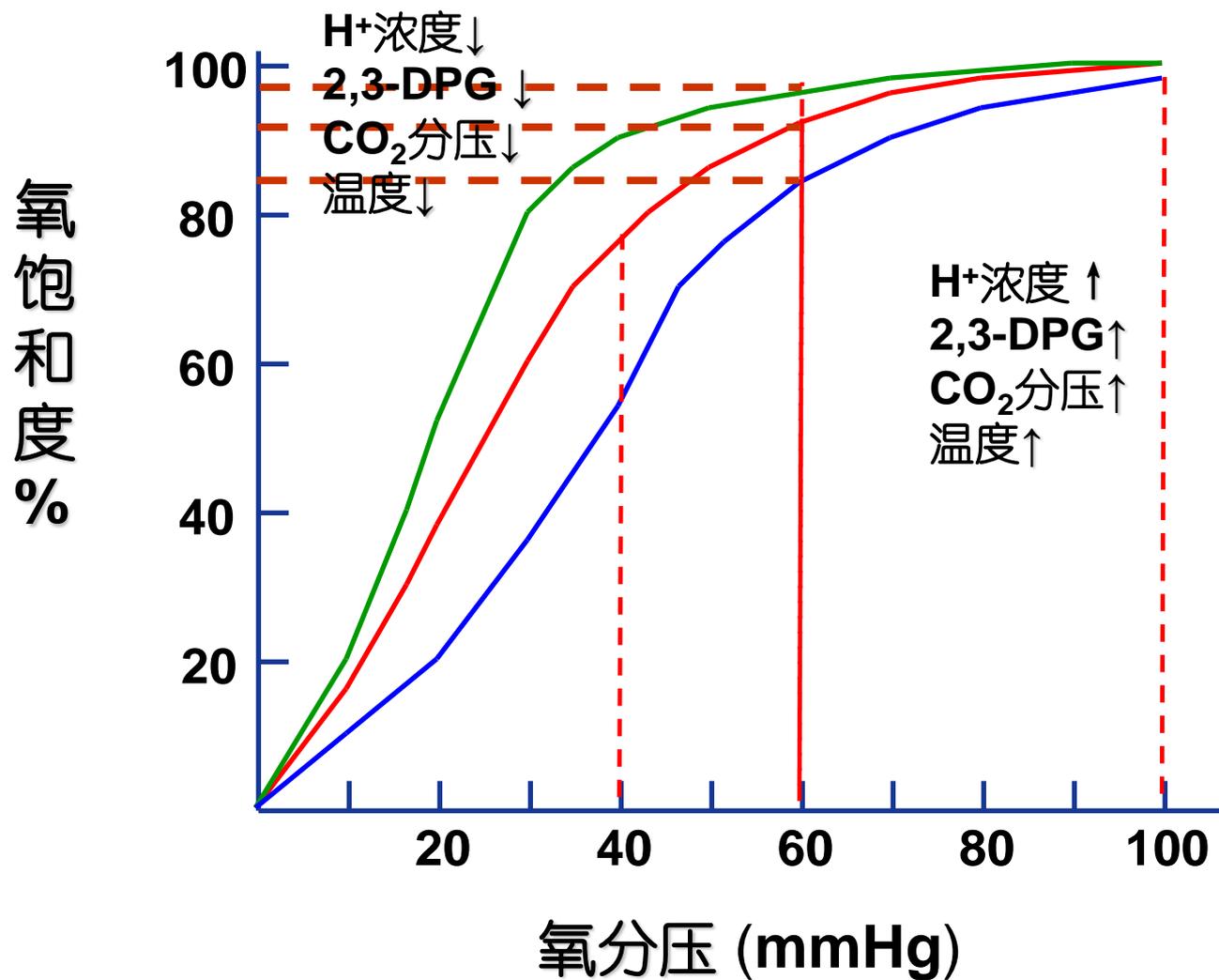
SaO_2 95%-98% SvO_2 70%-75%

影响因素: **氧分压**



缺氧

氧分压与氧饱和度的关系——氧离曲线



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

二、血氧指标

- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

❖ P_{50}

血氧饱和度达到50%时的氧分压。反映Hb和 O_2 的亲合力。

正常值：26-27mmHg

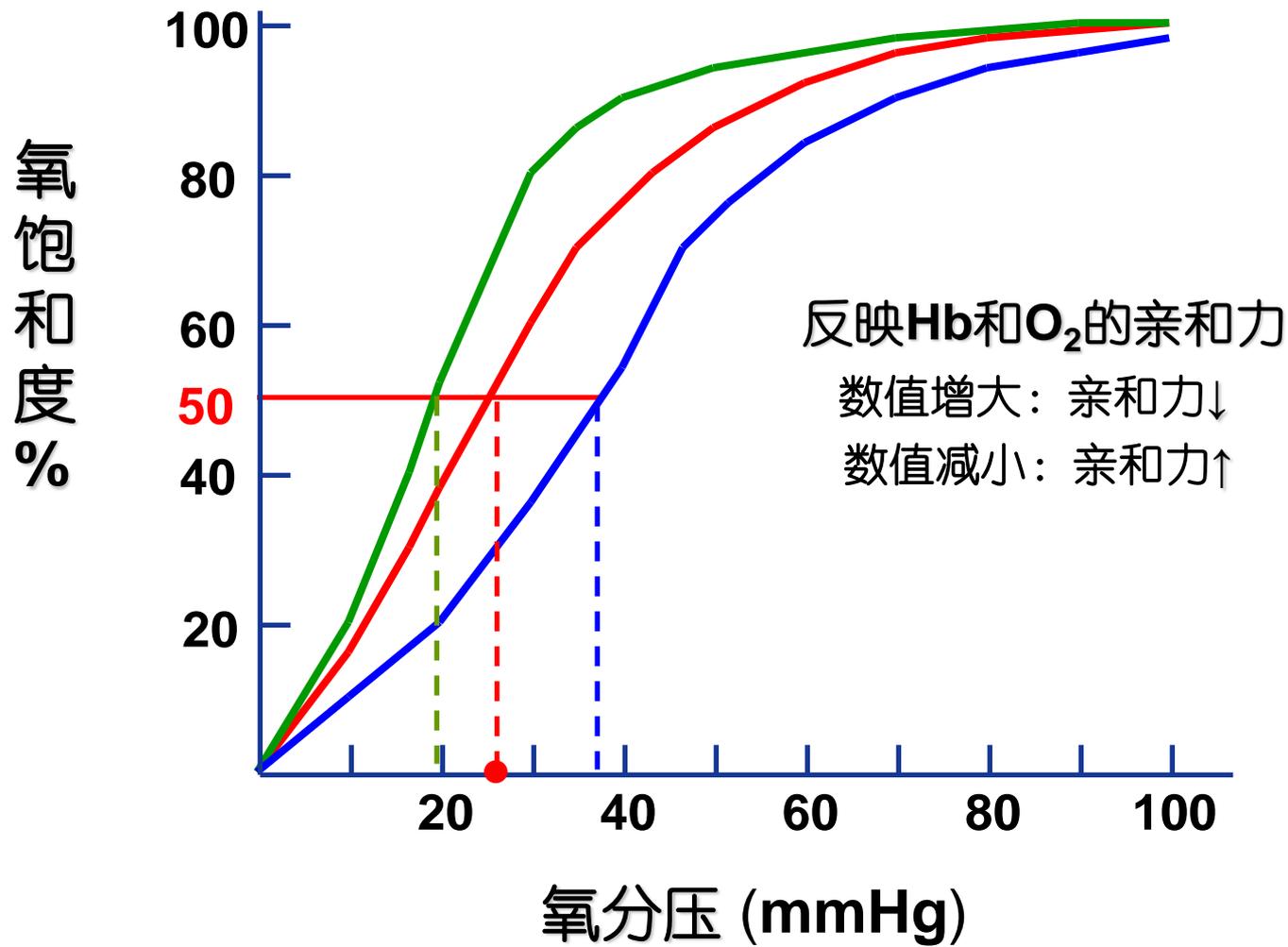
P_{50} 增大：Hb和 O_2 的亲合力降低

P_{50} 减小：Hb和 O_2 的亲合力增高



缺氧

P_{50}



第一节 概述 (General Introduction)

<http://www.hebmubs.cn>

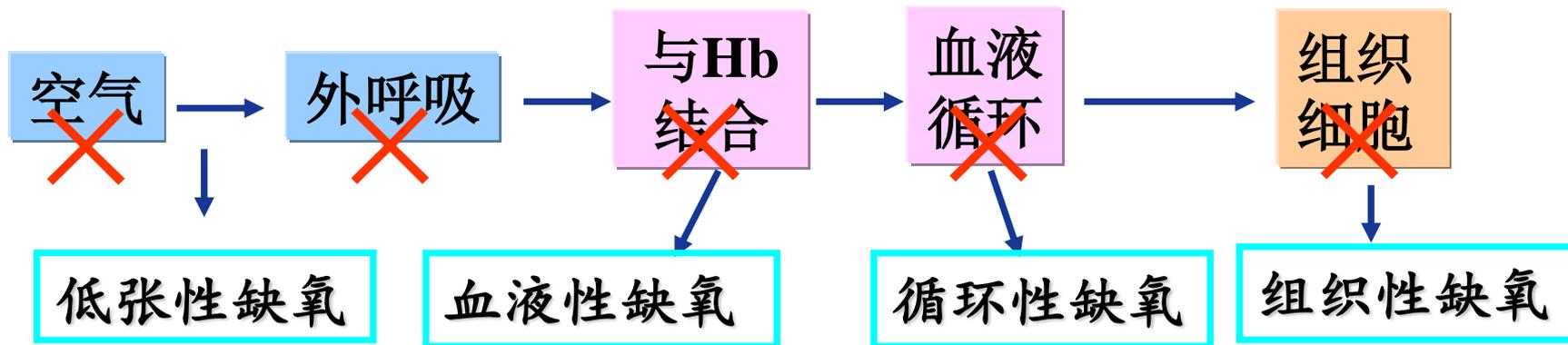
二、血氧指标

- ❖ 血氧分压 
- ❖ 血氧容量 
- ❖ 血氧含量 
- ❖ 动静脉血氧含量差 
- ❖ 血氧饱和度 
- ❖ P_{50} 

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

缺氧的类型



一、低张性缺氧 (Hypotonic Hypoxia)

由于 PaO_2 降低，血氧含量减少，导致组织供氧不足的缺氧称为低张性缺氧。又称乏氧性缺氧(hypoxic hypoxia)。



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

1. 吸入气中 PO_2 过低



海拔高度 (m)	大气压 (mmHg)	大气PO ₂ (mmHg)	肺泡内PO ₂ (mmHg)
海平面	760	159	105
1000	680	140	90
2000	600	125	70
3000	530	110	62
5000	405	85	45
6000	366	74	40
8000	270	56	30

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

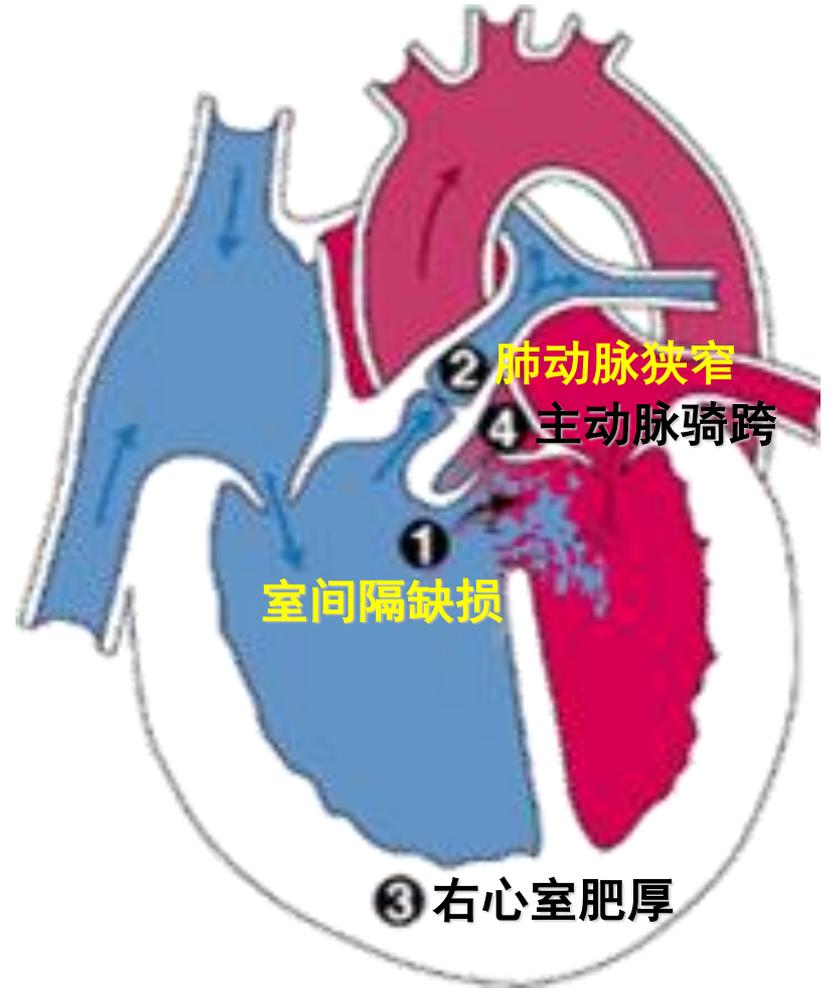
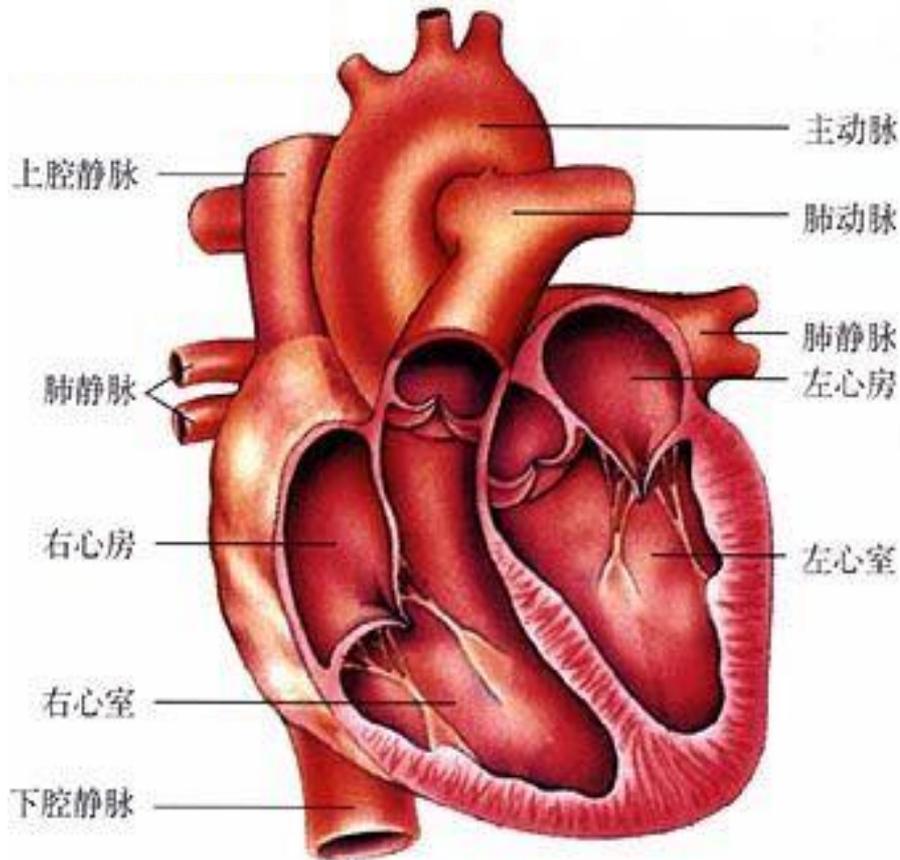
<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

1. 吸入气中 PO_2 过低
2. 外呼吸功能障碍：通气和换气功能障碍
(呼吸性缺氧)
3. 静脉血分流入动脉



法洛氏三联症



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

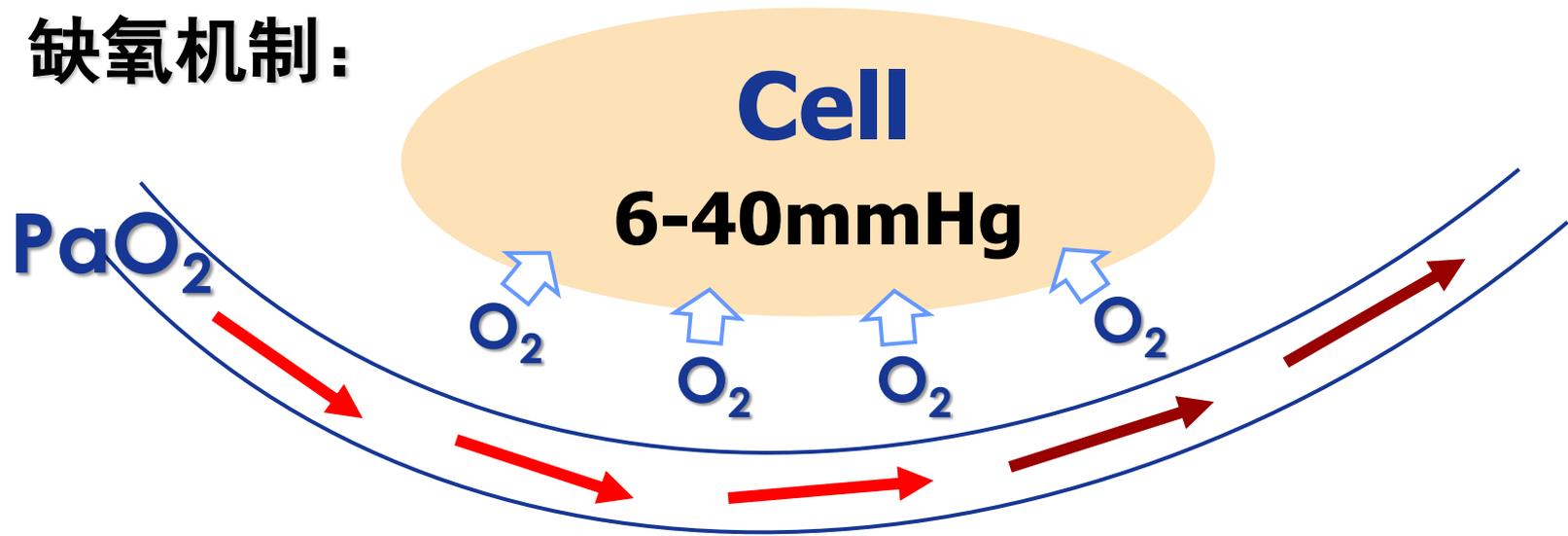
1. 吸入气中 PO_2 过低
2. 外呼吸功能障碍: 通气和换气功能障碍
(呼吸性缺氧)
3. 静脉血分流入动脉



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(二) 缺氧机制:



$\text{PaO}_2 \downarrow \Rightarrow$ 毛细血管 $\text{PO}_2 \downarrow$

向细胞弥散速度 \downarrow , 弥散量 \downarrow

组织细胞获氧 \downarrow (A-V氧含量差 \downarrow)

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(三) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧含量差
低张性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N

$$PaO_2 < 60 \text{ mmHg}$$

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(四) 皮肤黏膜颜色:

发绀 (cyanosis):



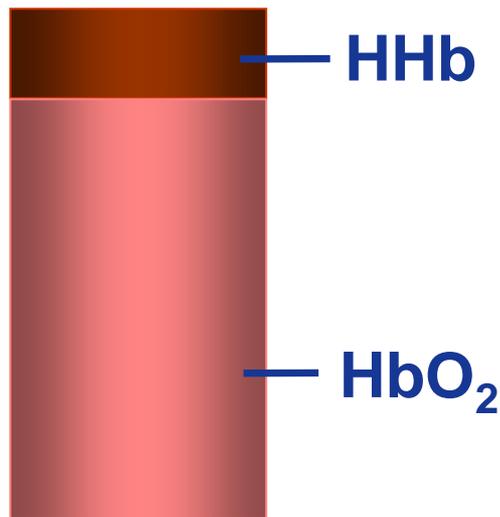
第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

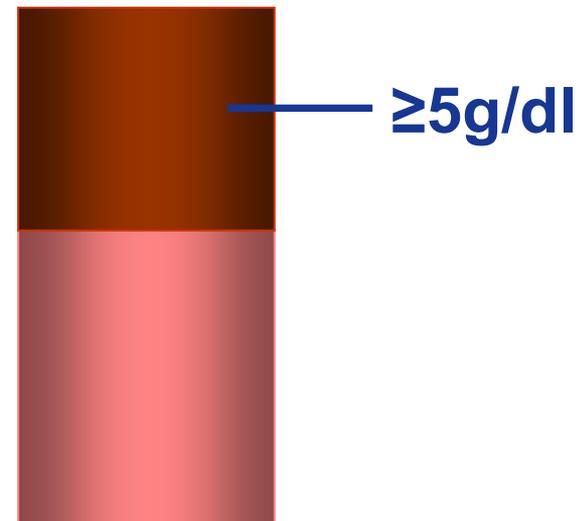
发绀 (cyanosis):

毛细血管血液中脱氧血红蛋白 $\geq 5\text{g/dl}$,
使皮肤、粘膜呈青紫色。

2.6g/dl



正常



缺氧



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

发绀 ? 缺氧

Hb正常

发绀与缺氧呈正相关

Hb异常

发绀与缺氧不一定呈正相关

Hb↓, 有明显的缺氧, 也不一定有发绀

Hb↑, 有明显的发绀, 但不一定有缺氧



缺氧

二、血液性缺氧 (Hemic Hypoxia)

Hb数量减少或性质改变，使血液携氧能力降低或与血红蛋白结合的氧不易释出而引起的缺氧。

PaO₂不变，又称等张性缺氧 (isotonic hypoxia)。

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

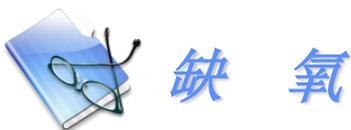
1. Hb数量减少: 贫血最常见

2. Hb性质改变:

CO中毒

高铁血红蛋白血症

Hb与氧亲和力异常增高



缺氧

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

❖ 一氧化碳中毒

Hb和氧的结合速度是Hb和CO结合速度的10倍，但HbCO的解离速度是HbO₂的1/2100；因此，CO和Hb的亲合力是O₂的210倍。

当吸入气含0.1% CO时，可能形成50% HbCO

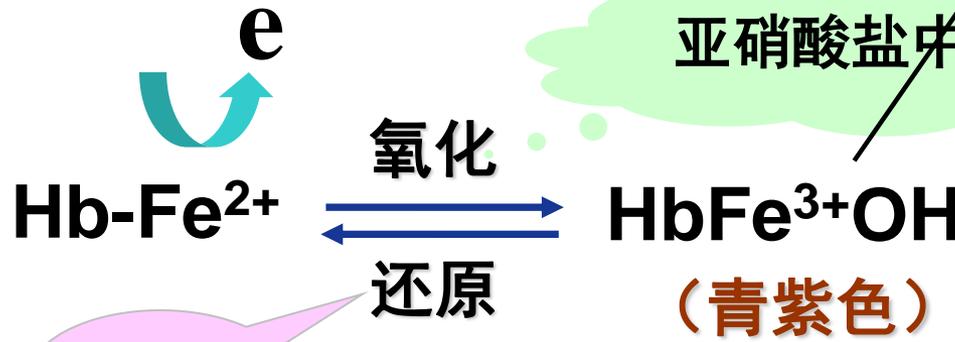
- Hb失去携氧能力
 - 增加剩余血红素对氧的亲合力
 - HbCO抑制红细胞糖酵解
- 皮肤、粘膜呈现**樱桃红色**



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

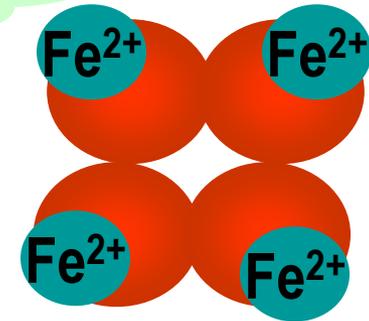
<http://www.hebmubs.cn>

❖ 高铁血红蛋白血症



美兰

- 1 失去携氧能力
- 2 使Hb分子内其它 Fe^{2+} 不易释氧



肠源性发绀:

高铁血红蛋白血症最常见于亚硝酸盐中毒，如食用大量含硝酸盐的腌菜后，硝酸盐经肠道细菌作用还原为亚硝酸盐，大量吸收入血后，导致高铁血红蛋白血症。当毛细血管血液中的高铁血红蛋白达到1.5 g/dl时，皮肤、粘膜可呈青紫色。

亚硝酸盐、过氯酸盐、磺胺衍生物

缺氧



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

1. Hb数量减少: 贫血最常见

2. Hb性质改变:

CO中毒、高铁血红蛋白血症

Hb与O₂亲和力异常增强:

输入库存血(2, 3-DPG减少)

碱性液体(H⁺浓度降低)

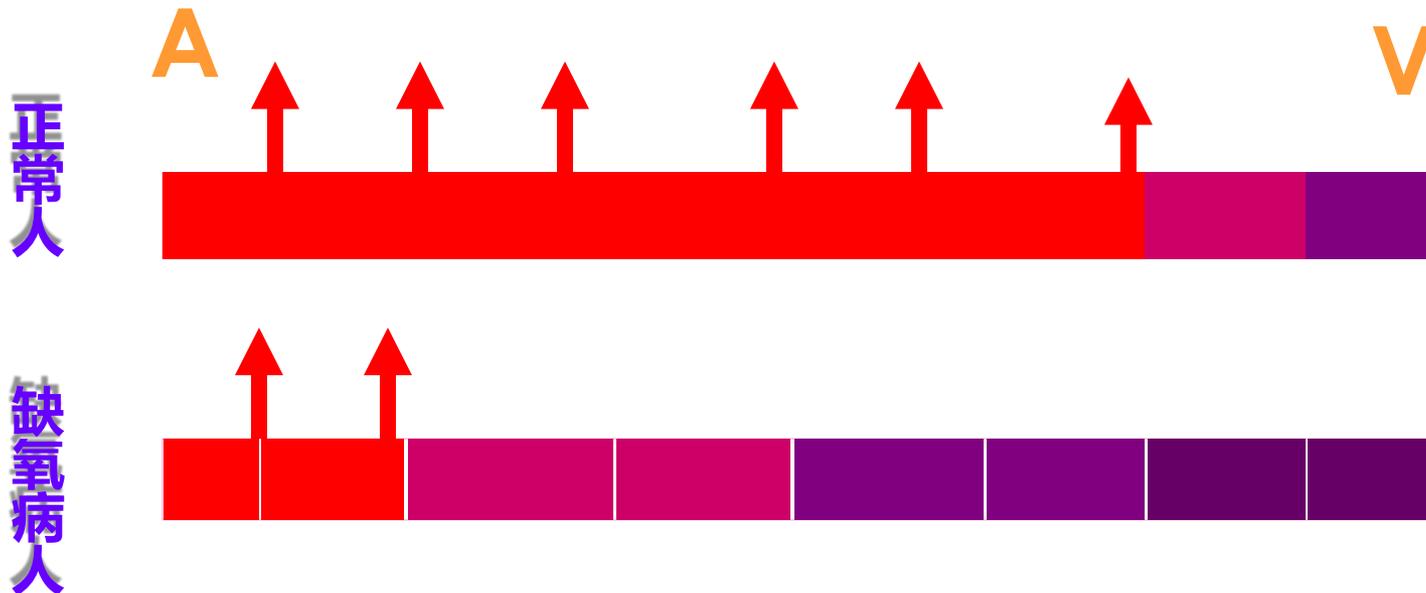


第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(二) 缺氧机制:

毛细血管中血氧分压下降示意图



▲ 血液流经毛细血管时 PaO_2 下降过快 $\rightarrow \text{O}_2$ 弥散量 \downarrow
(A-V氧含量差 \downarrow)



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(三) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧含量差
低张性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N
贫血	N	↓	↓	N	↓
CO中毒	N	N	↓	N	↓
高铁Hb血症	N	↓	↓	N	↓
Hb亲和力↑	N	N	N	N	↓

缺氧

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(三) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧含量差
低张性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N
血液性缺氧	N	↓或N	↓或N	N	↓

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(四) 皮肤黏膜颜色:

贫血	苍白色
CO中毒	樱桃红色
高铁Hb血症	棕褐色（咖啡色）
Hb亲和力↑	红色

三、循环性缺氧 (Circulatory Hypoxia)

是指因组织血流量减少而引起的缺氧,又称为低血流性缺氧或低动力性缺氧(hypokinetic hypoxia)。



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

分类:

- ❖ **缺血性缺氧：因动脉血灌流不足引起的缺氧**



- ❖ **淤血性缺氧：因静脉血回流障碍引起的缺氧**



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

1. 全身性循环障碍: 心力衰竭或休克

2. 局部性循环障碍:

动脉硬化, 血栓形成, 栓塞, 血管痉挛等



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

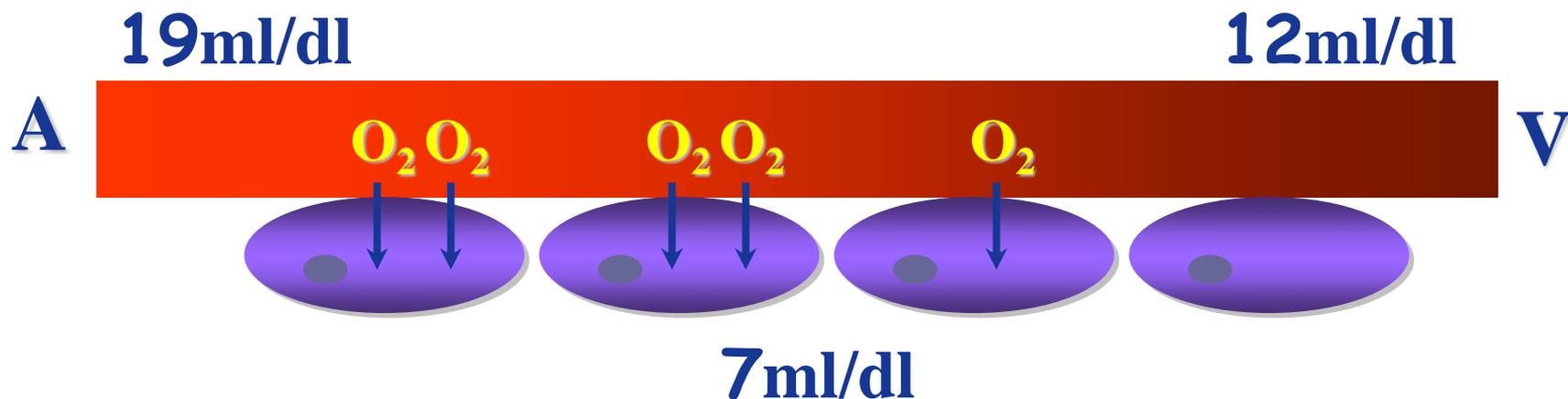
(二) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧含量差
低张性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N
血液性缺氧	N	↓或N	↓或N	N	↓
循环性缺氧	N	N	N	N	↑

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

缺氧机制：



组织供氧量 = 组织血液灌流量 \times A-V 氧含量差

单位时间流经组织的总血量 \downarrow \rightarrow 供氧量 \downarrow

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(二) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧含量差
低张性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N
血液性缺氧	N	↓或N	↓或N	N	↓
循环性缺氧	N	N	N	N	↑

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(三) 皮肤黏膜颜色:

缺血性缺氧	苍白色
瘀血性缺氧	暗红色、发绀



四、组织性缺氧 (Histogenous Hypoxia)

是指因组织、细胞利用氧的能力减弱而引起的缺氧，又称为氧利用障碍性缺氧 (dysoxidative hypoxia)。

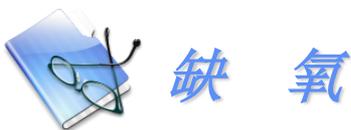


第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(一) 原因:

1. 线粒体功能受抑制：氰化物中毒等
2. 呼吸酶合成障碍：VitB1,B2,PP缺乏
3. 线粒体损伤：放射线、细菌毒素



第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(二) 血氧变化特点:

缺氧类型	PaO ₂	血氧容量	血氧含量	SaO ₂	A-V血氧差
乏氧性缺氧	↓	N或↑	↓	↓	↓或N
血液性缺氧	N	↓或N	↓或N	N	↓
循环性缺氧	N	N	N	N	↑
组织性缺氧	N	N	N	N	↓

第二节 缺氧的原因、分类和血氧变化的特点

<http://www.hebmubs.cn>

(三) 皮肤黏膜颜色：

细胞用氧障碍，毛细血管中氧合血红蛋白较正常时为多，患者皮肤可呈红色或玫瑰红色。

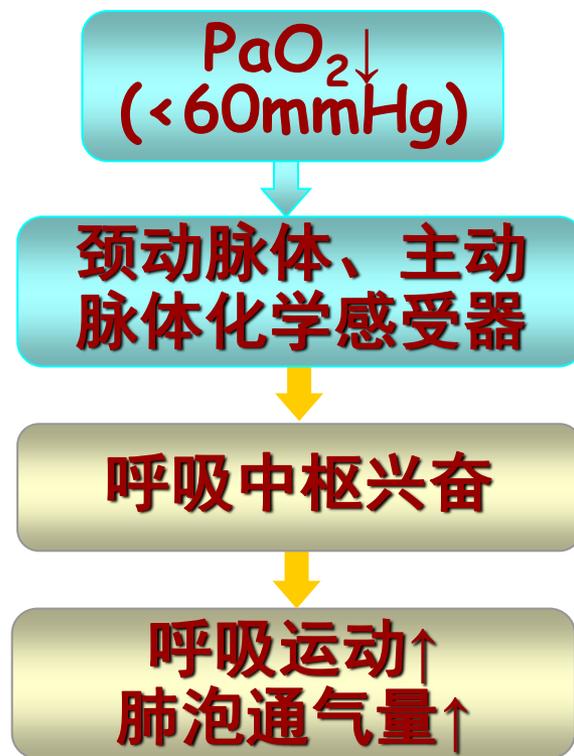


第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

一、对呼吸系统的影响 (Effects on respiratory system)

(一) 代偿反应



意义:

- ◆ 提高 PaO_2
- ◆ 增加回心血量



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

一、对呼吸系统的影响

(Effects on respiratory system)

(二) 不利影响（严重缺氧引起）

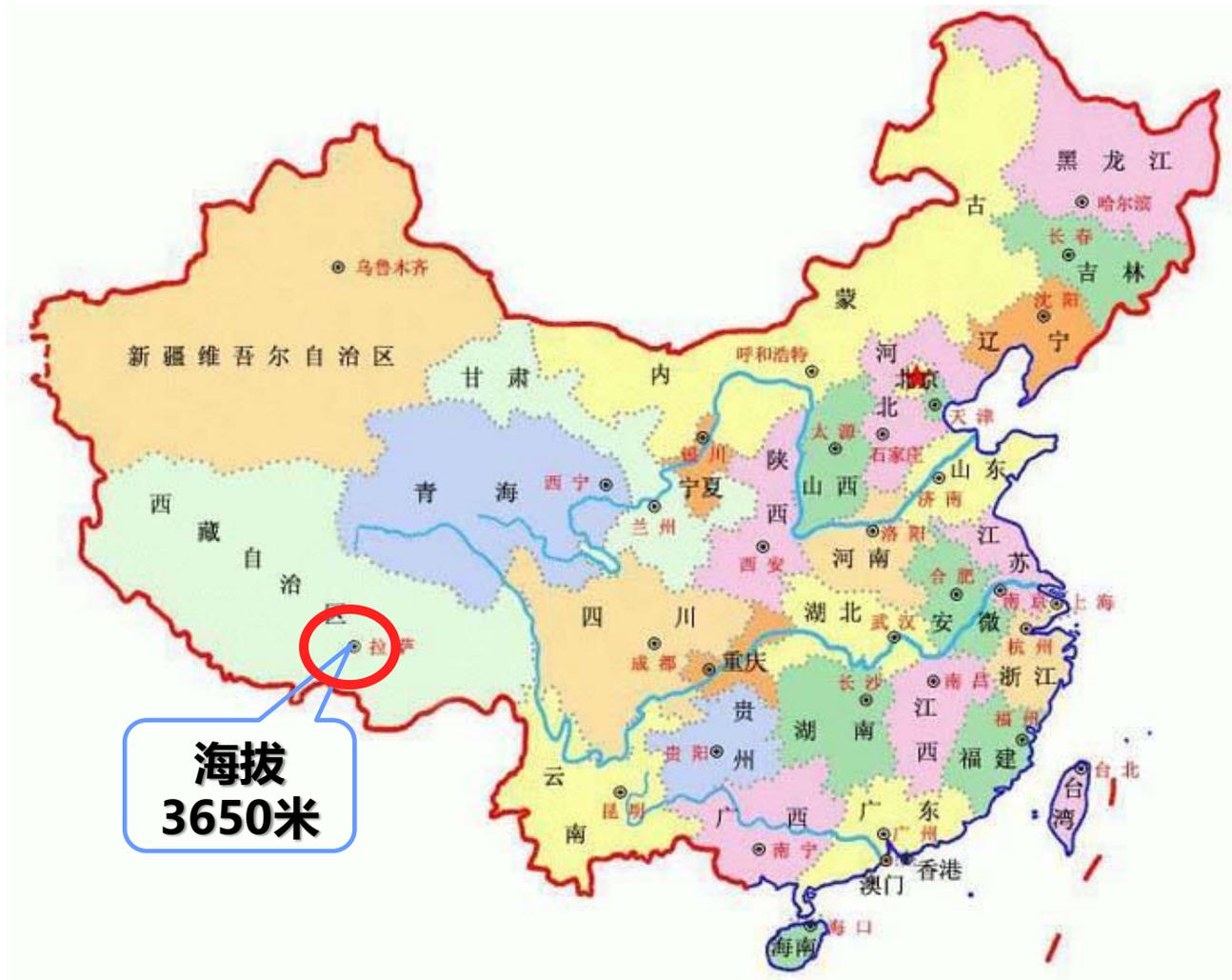
1. 急性缺氧→ 高原性肺水肿

- ① 肺动脉不均匀收缩；
- ② 缺氧使肺血管内皮细胞通透性↑；
- ③ 外周容量血管收缩，回心血量增加，肺血流量增多。
- ④ 肺水清除障碍。



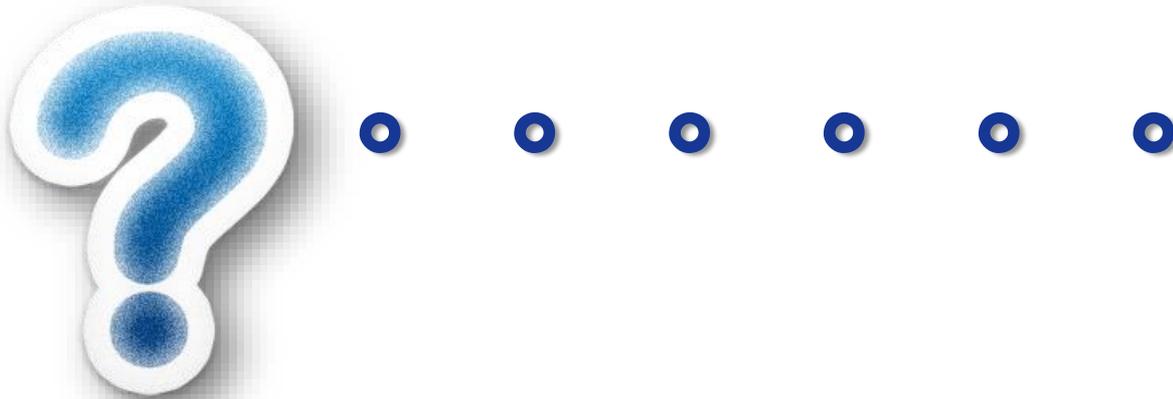
缺氧





出现静息时呼吸困难、胸闷、胸部压塞感、咳嗽、咳白色或粉红色泡沫痰.....

——高原肺水肿



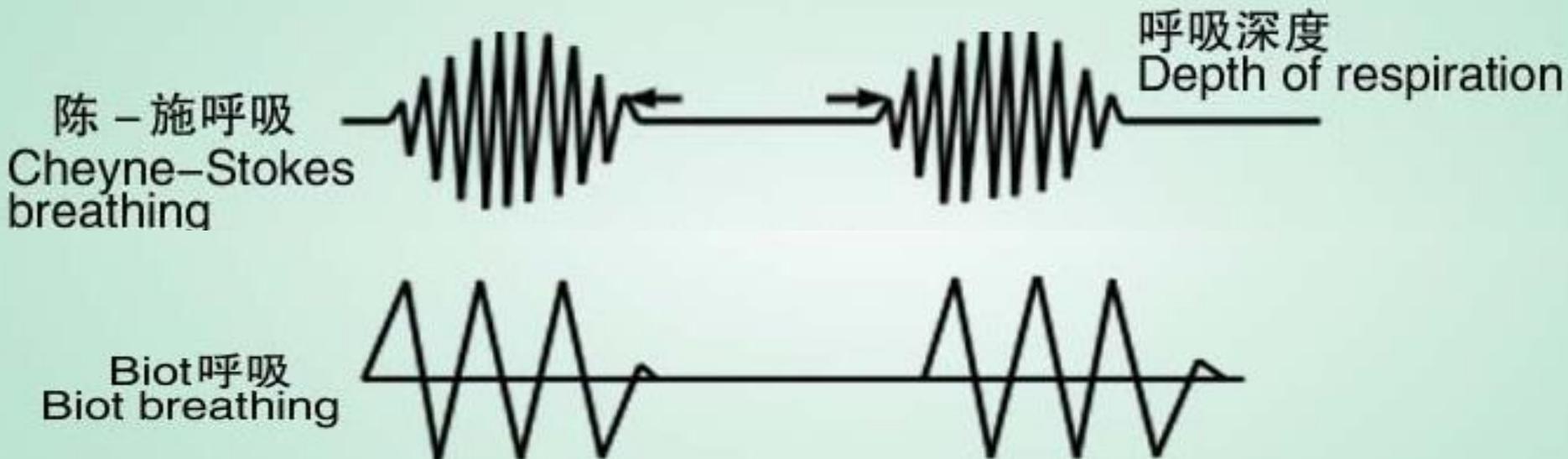
第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

一、对呼吸系统的影响

(Effects on respiratory system)

(二) 不利影响 (严重缺氧引起)

2. 中枢性呼吸衰竭



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

二、对循环系统的影响

(Effects on the cardiovascular system)

(一) 心功能改变

❖ 心率加快 严重缺氧时心率减慢

$\text{PaO}_2 \downarrow$ 兴奋颈动脉体主动脉体化学感受器兴奋；
交感N兴奋；过度呼吸刺激肺牵张感受器

❖ 心肌收缩性增强 严重缺氧时减弱

交感神经兴奋，作用心肌 β 受体

❖ 心输出量增加 严重缺氧时减少

心率增快；心肌收缩增加；呼吸深快，静脉回流量增加。



二、对循环系统的影响

(Effects on the cardiovascular system)

(二) 血流重新分布

- ◆ 交感兴奋→皮肤、骨骼肌、内脏血管收缩；
- ◆ 乳酸、腺苷、 PGI_2 等使心、脑血管扩张

血流重新分布，有利于心脑血管供。



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

二、对循环系统的影响

(Effects on the cardiovascular system)

(三) 肺循环变化

肺血管收缩，肺动脉高压：

(1) 缺氧对血管平滑肌的直接作用

(2) 体液因素

(3) 交感神经兴奋：使肺血管平滑肌收缩

(4) 慢性缺氧，使血管平滑肌重构

胶原增生，纤维增生，血管管壁增厚硬化，形成肺动脉高压，引起右心后负荷增加。

缺氧



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

二、对循环系统的影响

(Effects on the cardiovascular system)

(四) 组织毛细血管增生

慢性缺氧促进组织毛细血管增生，心脏和脑血管增多更明显，有利于组织摄入氧。



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

三、对血液系统的影响

(Effects on hematological system)

(一) 红细胞增多，血红蛋白增多

急性缺氧：交感神经兴奋，血液重分布→骨髓、肝、脾储血释放

慢性缺氧：肾脏→EPO↑→骨髓造血加强

RBC过多，增加血液粘滞度和血流阻力，以致血流减慢，并加重心脏负担，而对机体不利。



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

三、对血液系统的影响

(Effects on hematological system)

(二) 2,3-DPG \uparrow ，氧离曲线右移 \rightarrow Hb释放O₂ \uparrow

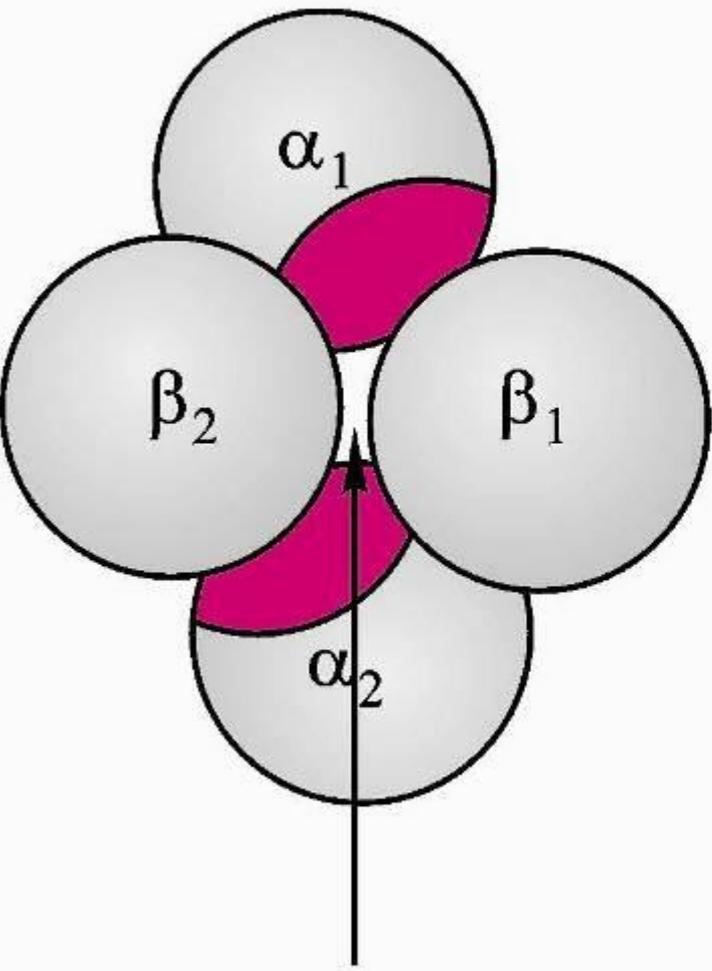
2,3-DPG \uparrow 机制:

(1) 当脱氧Hb \uparrow ，RBC内游离的 2,3-DPG \downarrow ，使其对磷酸果糖激酶及二磷酸甘油酸变位酶的抑制作用减弱，从而使糖酵解过程大大增强，2,3-DPG明显增多。

(2) 呼吸性碱中毒和脱氧Hb稍偏碱性 \rightarrow pH \uparrow \rightarrow 磷酸果糖激酶和DPGM活性增加 \rightarrow 糖酵解 \uparrow \rightarrow 2,3-DPG \uparrow ；并且pH \uparrow 使DPGP活性降低，不利于2,3-DPG分解。

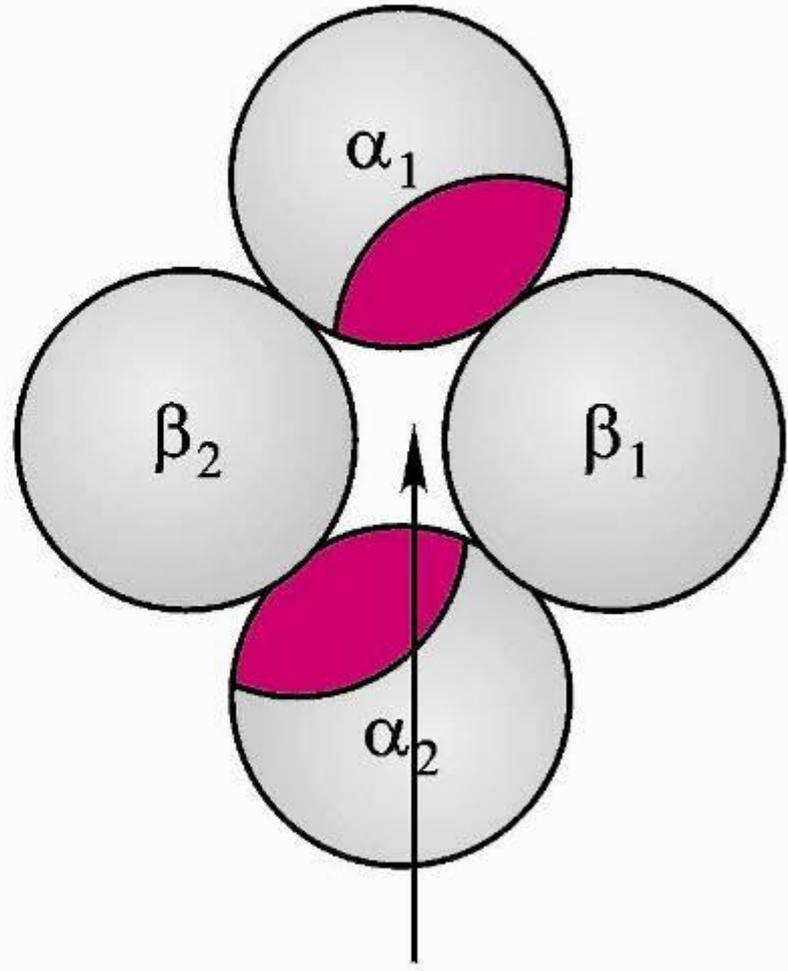


HbO₂



2,3-DPG 不能结合

Hb



2,3-DPG 结合的部位

葡萄糖

磷酸果糖激酶



DPGM

1,3 二磷酸甘油酸

DPGP

3-磷酸甘油酸

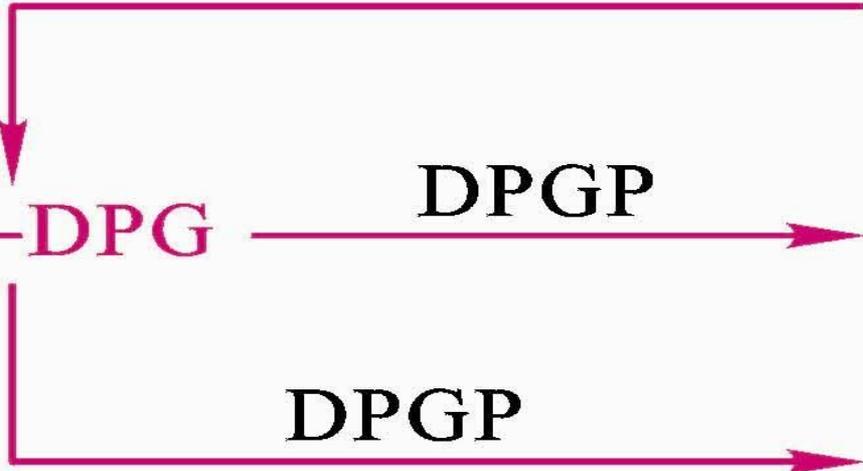
DPGP

2-磷酸甘油酸

丙酮酸

乳酸

2,3-DPG



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

三、对血液系统的影响

(Effects on hematological system)

(二) 2,3-DPG \uparrow ，氧离曲线右移 \rightarrow Hb释放O $_2$ \uparrow

2,3-DPG \uparrow 意义:

RBC内 2,3-DPG \uparrow \rightarrow 氧离曲线右移，当 PaO $_2$ 大于 60mmHg，对氧饱和度影响不大，而有利于释放氧；但如果 PaO $_2$ < 60mmHg，虽也有利于释放氧，但血液通过肺泡时结合的氧 \downarrow ，失去代偿意义。



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

<http://www.hebmubs.cn>

四、 中枢神经系统的变化 (Effects on central Nervous system)



轻度缺氧或缺氧早期:

血流重新分布保证脑的血流供应

重度缺氧或缺氧中、晚期:

功能障碍: 脑水肿
脑细胞损伤



第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

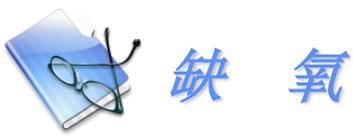
<http://www.hebmubs.cn>

五、对细胞代谢的影响

(Effects on the cellular metabolism)

(一) 代偿反应

- ❖ 细胞利用氧能力↑：线粒体↑
呼吸酶↑
- ❖ 糖酵解↑
- ❖ 肌红蛋白↑：与氧的亲合力高



缺氧

第三节 缺氧时机体的功能与代谢变化

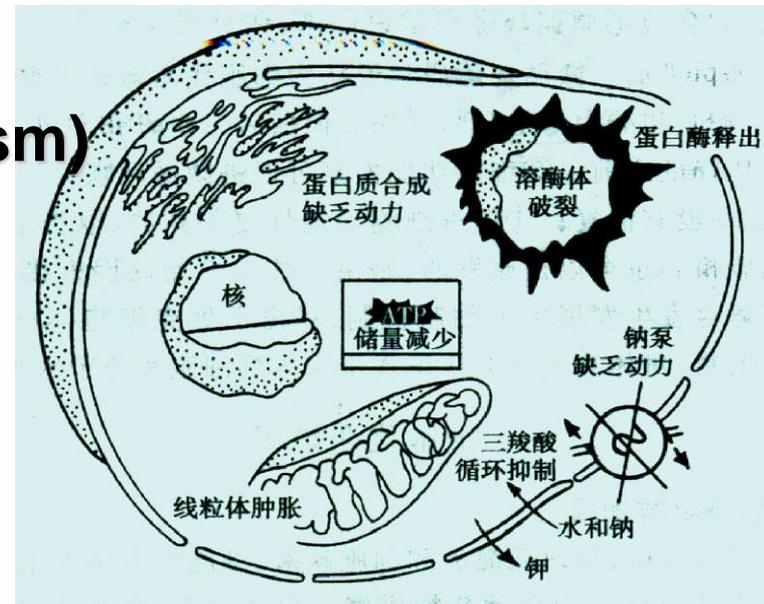
<http://www.hebmubs.cn>

五、对细胞代谢的影响

(Effects on the cellular metabolism)

(二) 损伤反应

- ❖ 有氧氧化↓, ATP↓
- ❖ 乳酸酸中毒
- ❖ 钠泵功能障碍, 细胞水肿
- ❖ 细胞膜、线粒体、溶酶体损伤



Na^+ 、 Ca^{2+} 内流, K^+ 外流
细胞膜通透性↑ 线粒体损伤
溶酶体损伤

第四节 缺氧治疗的病理生理学基础

<http://www.hebmubs.cn>

- 一、去除病因
- 二、氧疗
- 三、防止氧中毒



A close-up, blue-tinted photograph of a fountain pen and a metal fastener (possibly a paperclip or a similar device) resting on a document. The document has some text, which is mostly out of focus. The pen is on the left, and the fastener is on the right. The overall scene is set against a dark red background.

The End

Thank You!