

UČEBNÍ TEXTY
UNIVERZITY KARLOVY

FYZIOLOGIE DÝCHÁNÍ

Jana Slavíková
Jitka Švíglerová

KAROLINUM

FYZIOLOGIE DÝCHÁNÍ

Jana Slavíková, Jitka Švíglerová

Recenzovali:

prof. MUDr. Martin Vízek, DrSc.

prof. MUDr. Pavel Sobotka, DrSc.

Vydala Univerzita Karlova

Nakladatelství Karolinum

jako učební text pro Lékařskou fakultu UK v Plzni

Praha 2024

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

2. vydání

© Univerzita Karlova, 2024

© Jana Slavíková, Jitka Švíglerová, 2024

ISBN 978-80-246-5867-4

ISBN 978-80-246-5873-5 (pdf)



Univerzita Karlova

Nakladatelství Karolinum

www.karolinum.cz

ebooks@karolinum.cz

OBSAH

Předmluva ke 2. vydání	7
1. ÚVOD	9
2. ANATOMIE A FUNKCE DÝCHACÍCH CEST	11
3. PLICNÍ VENTILACE	15
3.1 Plicní tlaky	15
3.2 Výměna vzduchu mezi atmosférou a plicemi	15
3.3 Vztah mezi hrudní stěnou a plicemi	16
3.4 Dýchací svaly	17
3.5 Dechový cyklus	20
3.6 Poddajnost a smrštivost hrudníku a plic	22
3.7 Dechová práce	26
3.8 Plicní objemy a kapacity	29
3.9 Hodnoty plicní ventilace, typy dýchání	35
3.10 Alveolární ventilace	35
4. VÝMĚNA PLYNŮ V PLICÍCH A VE TKÁNÍCH	39
4.1 Atmosférický a alveolární vzduch	39
4.2 Krevní oběh v plicích	41
4.2.1 Struktura plicního řečiště	42
4.2.2 Objem krve v plicích	43
4.2.3 Krevní tlak v plicním řečišti	44
4.2.4 Průtok krve plicním řečištěm	45
4.3 Difuze plynů alveolokapilární membránou	46
4.3.1 Rozpustnost a molekulová hmotnost O ₂ a CO ₂	47
4.3.2 Tlakový gradient	47
4.3.3 Difuzní plocha	48
4.3.4 Difuzní dráha	49
4.4 Regionální rozdíly ventilace a perfuze	49

5.	TRANSPORT DÝCHACÍCH PLYNŮ MEZI PLÍCEMI A TKÁNĚMI	52
5.1	Transport kyslíku	52
5.1.1	Formy transportu kyslíku	52
5.1.2	Vazba kyslíku na hemoglobin	54
5.1.3	Uvolňování kyslíku z hemoglobinu	55
5.1.4	Pohyb kyslíku mezi plícemi a tkáněmi	55
5.1.5	Hemoglobin jako faktor stabilizace pO_2 v tkáních	57
5.1.6	Faktory ovlivňující vazebnou křivku hemoglobinu pro kyslík	58
5.1.7	Fetální hemoglobin	60
5.2	Transport oxidu uhličitého	60
5.2.1	Difuze oxidu uhličitého z buněk do tkáňových kapilár	60
5.2.2	Formy transportu oxidu uhličitého	61
5.2.3	Uvolňování oxidu uhličitého z krve v plicích	62
5.2.4	Vazebná křivka oxidu uhličitého	63
5.2.5	Respirační kvocient	65
6.	REGULACE DÝCHÁNÍ	66
6.1	Respirační centra	66
6.1.1	Respirační centra v prodloužené míše	66
6.1.2	Respirační centra v pontu	68
6.2	Chemická regulace dýchání	69
6.2.1	Centrální chemosenzitivní oblast	69
6.2.2	Periferní chemoreceptory	71
6.2.3	Společný účinek pCO_2 , pH a pO_2 na velikost alveolární ventilace	75
6.3	Ovlivnění dýchání nervovými a dalšími nechemickými vlivy	75
6.3.1	Aferentace z dýchacích cest	75
6.3.2	Aferentace z baroreceptorů	76
6.3.3	Aferentace z proprioreceptorů	77
6.3.4	Ovlivnění z vyšších nervových center	77
6.3.5	Volní kontrola	77
6.3.6	Vliv tělesné teploty	77
7.	NERESPIRAČNÍ FUNKCE PLIC	78
8.	ZMĚNY DÝCHÁNÍ VE ZDRAVÍ A NEMOCI	81
8.1	Regulace dýchání při svalové práci	81
8.2	Hypoxie	83
8.3	Hyperoxie, léčba kyslíkem	84
8.3.1	Hyperoxie	84
8.3.2	Léčba kyslíkem	85
8.4	Otrava oxidem uhelnatým	86

8.5 Hypokapnie	87
8.6 Hyperkapnie	87
8.7 Pobyt ve vysoké nadmořské výšce	88
8.8 Potápění	90
8.8.1 Rizika potápění	91
8.8.2 Nemoc z dekomprese.....	92
Seznam zkratk	94

PŘEDMLUVA KE 2. VYDÁNÍ

První vydání učebního textu *Fyziologie dýchání* vyšlo před 12 lety. Za tu dobu jsme na našem pracovišti vyzkoušeli více než 2 500 studujících a postupně jsme zjišťovali, která „respirační“ témata umí lépe, a která jim naopak činí obtíže. Těmito poznatky jsme se řídili při přípravě druhého vydání, ve kterém jsou upraveny zejména ty podkapitoly, které – podle našeho názoru – zasluhovaly srozumitelnější vysvětlení. Doufáme, že se náš záměr povedl.

Části textu tištěné kurzivou obsahují buď patofyziologické, nebo klinické poznámky související s popisovaným tématem.

Děkujeme prof. Martinovi Vízkovi, CSc., z Ústavu patologické fyziologie 2. lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze a prof. Pavlovi Sobotkovi, DrSc., z Ústavu patologické fyziologie Lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Plzni za ochotu, se kterou se ujali recenze textu, za jeho pečlivé posouzení, kritický komentář a doporučené opravy v textu.

Dále chceme poděkovat doc. MUDr. Ladě Eberlové z Ústavu anatomie Lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Plzni za cenné rady z oblasti anatomie a paní Ivaně Hajdúkové za výraznou pomoc při přípravě obrazové dokumentace a za její pečlivost a trpělivost, se kterou napomáhala vzniku tohoto učebního materiálu.

Jana Slavíková, Jitka Švíglerová

1. ÚVOD

Dýchací systém je v úzkém aktivním spojení se zevním prostředím. Zajišťuje příjem kyslíku z atmosféry a výdej oxidu uhličitého do atmosféry. Jedná se o trvalý děj, který začíná s prvním vdechem novorozence a končí smrtí jedince. Přívod kyslíku do organismu nelze přerušit na dobu delší než několik minut bez závažných následků, neboť zásoby kyslíku, které má organismus k dispozici po přerušení jeho přívodu, nejsou velké. Tvoří je kyslík v respiračních bronchiolích, alveolech, kyslík obsažený v krvi, rozpuštěný v tkáních a kyslík navázaný na myoglobin. Celkově tyto zásoby činí asi 1 l po klidném výdechu a téměř 2 l po hlubokém vdechu. Při klidové spotřebě 250 ml O₂ za 1 minutu představuje toto množství funkční rezervu na dobu asi 4–7 minut.

Člověk si existenci nepatrných zásob kyslíku vůbec neuvědomuje. Stálý přívod kyslíku do organismu je zajišťován zcela automaticky. Fyziologický mechanismus transportu kyslíku udržuje jeho nepřetržitou dodávku tkáním. Ta je neustále upravována bez vědomé kontroly tak, aby odpovídala aktuálním nárokům jednotlivých tkání na spotřebu kyslíku.

Převážná část kyslíku přijatého do organismu se spotřebuje k získávání energie z různých substrátů přijímaných v potravě. Menší část se spotřebuje při biochemických reakcích, při nichž je kyslík použit k syntéze některých látek.

Dýchací systém zajišťuje také tzv. nerespirační funkce. Sem patří např. fonace – vznik zvukového projevu a jeho formování, ochrana a obrana organismu před škodlivinami, čichání, regulace pH a endokrinní a metabolické funkce plic. Kromě toho slouží dýchací systém jako zásobárna krve a podílí se jako pomocný mechanismus na termoregulaci, defekaci a mikci.

Základní pojmy

K tomu, aby respirační systém mohl plnit svoji základní funkci, tj. dodávat O_2 do tkání a odstraňovat CO_2 z těla, jsou zapotřebí následující procesy:

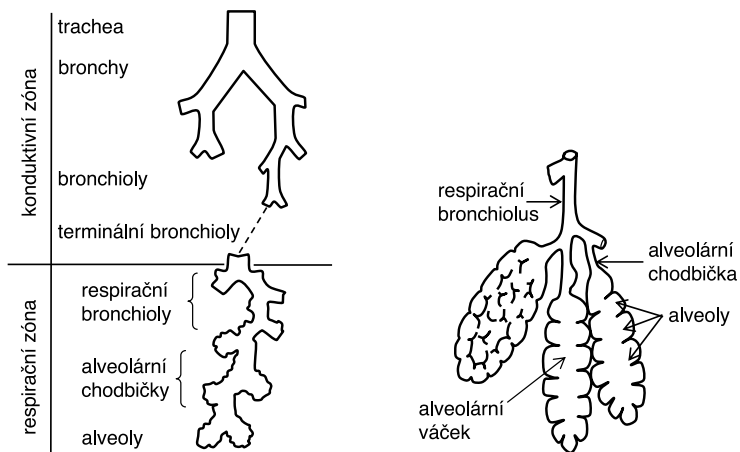
1. Výměna vzduchu mezi zevním prostředím a plicemi se nazývá **plicní ventilace**. Ta je vždy spojena s přísunem vdechovaného vzduchu do různých částí plic, tj. s intrapulmonální distribucí a se smísením tohoto vzduchu se vzduchem v plicích již přítomným. Tyto procesy zahrnujeme také pod pojem **zevní dýchání**. Fyzikálně-biologickou podstatu této činnosti nazýváme **mechanika dýchání**.
2. Přesun kyslíku z alveolů do krve plicních kapilár a oxidu uhličitého v opačném směru probíhá na základě **difuze**. Jejím předpokladem je, kromě plicní ventilace, průtok krve kapilární sítí opřádající alveoly, tzv. **plicní perfuze**, která je zajišťovaná plicní cirkulací.
3. Další transport krevních plynů zajišťuje systémová cirkulace. Jejich přesun mezi krví, tkáňovým mokem, buňkami a naopak se uskutečňuje opět difuzí. Výměna plynů mezi krví a tkáněmi se označuje **vnitřní dýchání**.
4. **Regulace dýchání** zahrnuje mechanismy zajišťující automatickou mimovolní plicní ventilaci a její přizpůsobení aktuálním požadavkům organismu.

2. ANATOMIE A FUNKCE DÝCHACÍCH CEST

Dýchací cesty dělíme na **horní** zahrnující nos a nosohltan (**nazofarynx**) a **dolní** sestávající z hrtanu (**laryngu**), průdušnice (**trachey**) a průdušek (**bronchů**). V nosní dutině se vzduch filtruje, ohřívá a sytí vodní parou. Dýchat lze i ústy, např. při fyzickém výkonu nebo ucpání nosu. Ústy také vydechujeme při mluvení. Z nosní i ústní dutiny se vzduch dostává do faryngu, kudy prochází i potrava. Ta pokračuje do jícnu, zatímco vzduch proudí do laryngu. Při polykání se vstup do laryngu uzavře chrupavčitou záklopkou (**epiglottis**). Larynx je chrupavčitá struktura, která obsahuje hlasové vazy oddělené štěrbinou (**glottis**). Šířka glottis se mění při dýchání. Během vdechu se rozšiřuje, při výdechu se zužuje. Svaly, které kontrolují šířku glottis, jsou příčně pruhované a jsou inervovány větví X. hlavového nervu (**n. laryngeus recurrens**).

Počínaje tracheou se dýchací cesty větví zpravidla dichotomicky, tzn. že každý úsek proximální se dělí na dva distální. Takových dělení je u člověka 20–23. Celkový průsvit dýchacích cest se distálně zvětšuje, přestože průměr jednotlivých větvení výrazně klesá. Trachea se větví na **pravý** a **levý hlavní bronchus**, které se dále dělí na **lobární** a **segmentální bronchy** pokračující jako **bronchioly**. Nejmenšími bronchioly, jimiž končí tzv. **vodivá (konduktivní) zóna** dýchacích cest, jsou **terminální bronchioly** (průměr několik desetin mm). Funkcí vodivé zóny je přivádět vzduch do oblastí výměny plynů. Vzduch ve vodivé zóně se výměny plynů neúčastní (obr. 2.1).

Z terminálních bronchiolů odstupují **respirační bronchioly**, z nich pak alveolární chodbičky a váčky (**ductuli et sacculi alveolares**), na které nasedají **alveoly**. Celé toto konečné větvení, označované jako **acinus**, představuje vlastní plicní parenchym, na jehož úrovni probíhá výměna plynů. Někdy také hovoříme o tzv. **respirační zóně** či **terminální respirační jednotce** (viz obr. 2.1).



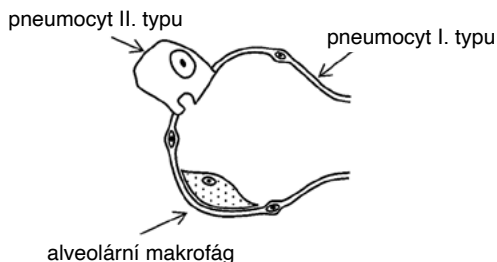
Obr. 2.1 **Anatomie dýchacích cest:** vlevo – větvení dýchacích cest, vpravo – terminální respirační jednotka

Respirační zóna je velmi dobře přizpůsobena své funkci. Nepatrný průměr alveolů (0,1–0,9 mm), jejich velký počet (300–400 milionů v jedné plíci), ohromná plocha (70–140 m²) a velmi jemná struktura alveolární stěny (tloušťka několik desetin μm) jsou předpokladem účinné výměny plynů. Výstelka alveolů je tvořena dvěma odlišnými druhy epiteliálních buněk. **Pneumocyty I. typu** jsou ploché buňky tvořící výstelku alveolů. Regenerují z **pneumocytů II. typu** (granulárních), které jsou kubické a syntetizují a secernují **surfaktant** (viz kap. 3.6). Pneumocyty II. typu tvoří asi 10% plochy výstelky alveolů a jsou rozptýleny mezi pneumocyty I. typu. Na vnitřní ploše alveolů se nacházejí **alveolární makrofágy**, které fagocytují prach, mikroorganismy a další cizorodé částice (obr. 2.2).

Lumen dýchacích cest od nosu až k terminálním bronchiolům (včetně) je vystláno řasinkovým epitelem a pokryto sekretem mucinózních buněk a podslizničních serózních žlázek inervovaných parasymptikem. Sekret:

- svažuje sliznici,
- vytváří ochranný film,
- fixuje škodlivé látky, které se v hlenu zachycují, rozpouští je a ředí,
- je předpokladem funkce řasinek.

Řasinky neustále synchronně kmitají (10–20krát za sekundu), čímž posouvají vrstvičku hlenu směrem k faryngu, odkud je hlen odstraňován



Obr. 2.2. Výstelka alveolů

polykáním. Překročí-li množství vznikajícího sekretu asi 150 ml/24 h nebo hromadí-li se sekret při nedostatečné funkci řasinkových epitelů, objevuje se kašel jako podstatně účinnější forma odstraňování obsahu z dýchacích cest.

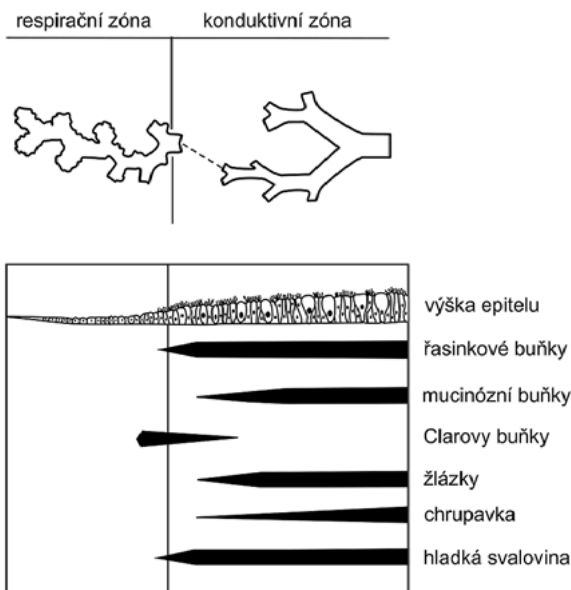
Funkce a počet řasinek jsou významně redukovány různými škodlivinami, např. cigaretovým kouřem. To vysvětluje, proč kuřáci často trpí chronickým kašlem.

V epitelu bronchiolů (terminálních i respiračních) se nacházejí tzv. **Clarovy buňky**, což jsou cylindrické buňky bez řasinek. Jejich funkcí je odstraňovat toxické látky z dýchacích cest a secernovat látku podobnou surfaktantu, která brání kolapsu bronchiolů (viz dále).

Jednou z podmínek výměny vzduchu mezi atmosférou a alveoly je zajištění volného průsvitu dýchacích cest. Za fyziologické situace proudí vzduch dýchacími cestami snadno. Stěna trachey a bronchů je částečně vyztužená chrupavčitými prstenci podkovovitého tvaru, jejichž pružnost se uplatňuje při vdechu a pevnost při výdechu. Části stěny trachey a bronchů mezi prstenci chrupavky jsou tvořeny hladkou svalovinou. Jejím podíl na skladbě stěny bronchů a bronchiolů v konduktivní zóně se směrem do periferie relativně zvyšuje. Respirační bronchioly obsahují už jen ojedinělá vlákna hladké svaloviny. Podíl chrupavky směrem do periferie klesá. Malé bronchy obsahují pouze chrupavčité ploténky a v bronchiolích se chrupavka nevyskytuje vůbec.

Základním regulátorem průsvitu bronchů a zejména bronchiolů je tonus hladké svaloviny, který se periodicky mění. Při vdechu se bronchy rozšiřují a prodlužují, při výdechu se zužují a zkracují (obr. 2.3).

Hladká svalovina bronchiálního stromu je inervována převážně parasympatickými (cholinergními) vlákny X. hlavového nervu (**n. vagus**), sympatická (adrenergní) inervace je méně významná. Stimulace parasympa-



Obr. 2.3 Stavba stěny dýchacích cest

tiku vede prostřednictvím M-receptorů k zúžení bronchiálního stromu – **bronchokonstrikci**. Stimulace sympatiku, hlavně však cirkulující katecholaminy adrenalin a noradrenalin, působí rozšíření bronchů – **bronchodilataci** prostřednictvím β_2 -receptorů. Proto se látky snižující účinek parasympatiku (**parasympatolytika**) nebo látky vyvolávající stejný účinek jako sympatikus (**sympatomimetika**) používají v léčbě asthma bronchiale.

Asthma bronchiale je chronické zánětlivé onemocnění dýchacích cest charakterizované mimo jiné záchvatovitým zúžením bronchů.

Parasympatikus může být aktivován také reflexně, drážděním epitelu dýchacích cest škodlivými plyny, prachem, cigaretovým kouřem nebo bronchiální infekcí. Bronchokonstrikce však může být vyvolána i působením lokálních faktorů, např. histaminu, který se uvolňuje z žírných buněk lokalizovaných v těsné blízkosti sliznice dýchacích cest během alergické reakce. Kromě klasických mediátorů autonomní inervace ovlivňují hladkou svalovinu bronchů rovněž peptidy neadrenergní necholinergní inervace. Například substance P způsobuje bronchokonstrikci, naopak bronchodilatace je výsledkem působení vazoaktivního intestinálního polypeptidu.

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázkou z knihy ***Fyziologie dýchání***.
Pokud se Vám ukáзка líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.