

Mezipředmětová integrace tělesná výchova – biologie – chemie

Biochemie pro učitele tělesné výchovy III.: aerobní metabolismus

(průvodce studiem)

Filip Neuls, Ph.D.

Průvodce studiem

Z pohledu tělesného zatížení má lidský organismus možnost pracovat bez kyslíku (anaerobně), s vysokou intenzitou, ovšem po relativně krátkou dobu, neboť vysoká intenzita zatížení je spojena s výraznou tvorbou kyselých metabolitů, které omezují či dokonce znemožňují svalovou kontrakci, a tedy pohyb. Při snížení intenzity může sval využít daleko větší množství kyslíku pro aerobní krytí energetických požadavků, tudíž pak může pracovat po velmi dlouhou dobu. Při dostatečné dodávce energie a adaptacích vytvořených vytrvalostním typem tréninku lze podávat výkon řádově i desítky hodin, jak je známo z různých ultramaratonských soutěží. Pamatujte: čím vyšší intenzita, tím kratší čas zatížení a naopak, čím nižší intenzita, tím delší doba, po kterou lze organismus pohybově zatížit.

Cíl textu

Cílem tohoto metodického listu je vysvětlení pojmů a dějů souvisejících s aerobním způsobem získávání energie a aplikace těchto poznatků na svalovou práci, resp. na sportovní výkon.

Úvod

Pohybový (sportovní) výkon může mít různé podoby:

- rychlostní, silový, vytrvalostní, kombinovaný (např. rychlostně-vytrvalostní, rychlostně-silový aj.);
- krátkodobý, střednědobý, dlouhodobý;
- cyklický, acyklický;
- souvislý, intermitentní apod.

Dle povahy daného výkonu převládají různé metabolické cesty resyntézy ATP jakožto zdroje energie pro svalovou kontrakci. Při kratších a intenzivnějších výkonech dominuje anaerobní způsob energetického krytí, při delších výkonech přebírá hlavní úlohu aerobní metabolismus. Ten je výhodnější jak z hlediska efektivity (množství vytvořených molekul ATP na jednu molekulu vstupního substrátu), tak z hlediska konečných produktů, kterými jsou CO_2 a H_2O , čili látky, kterými organismus nijak výrazně nezatěžuje oproti produktům metabolismu anaerobního.

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

Aerobní metabolismus tudíž jasně dominuje ve vytrvalostních disciplínách. Podíl aerobního metabolismu naopak klesá při intenzitách zatížení nad anaerobním prahem (dodávka O_2 nestačí pokrýt energetickou potřebu svalu při vysoké intenzitě svalové práce).

1 Kyslík jako základ aerobního metabolismu

Aerobní metabolismus tedy představuje pomalejší, ale energeticky efektivnější cestu tvorby ATP, která je alaktátová (nevznikají během ní kyselé metabolity). Některé primitivní mikroorganismy, jako např. bakterie, si mohou „vybrat“, jaký typ metabolismu budou využívat, zda anaerobní, pokud žijí v podmínkách bez kyslíku, nebo aerobní, pokud je kyslík dostupný. Pakliže je ale kyslíku dostatek, vždycky bude upřednostněn metabolismus aerobní, (tzv. Pasteurův efekt). Podobně i u složitějších organismů dojde v jejich buňkách k dominanci aerobního metabolismu, pokud tomu odpovídají podmínky. Bez přístupu kyslíku ovšem nemohou složitější organismy vůbec dlouhodobě existovat, což třeba bakterie mohou.

Vraťme se zpět k energetickému metabolismu ve svalu. Podmínkou pro aerobní metabolismus je dostatečný přísun O_2 do pracující svalové tkáně, což je úkolem tzv. transportního systému (dýchací systém, kardiovaskulární systém a krev; viz též Wassermanovo schéma), a možnosti využití kyslíku samotným svačem (množství myoglobinu, mitochondrií, zvýšená aktivita aerobních enzymů apod.). Díky oxidačním reakcím při dostatečném přísunu O_2 se využívá „energetický potenciál“ elektronů (e^-) a vodíkových iontů (H^+) uvolňovaných během katabolismu základních živin, čehož je využito k resyntéze ATP v mitochondrii. Kyslík je tedy nezbytnou součástí získávání energie pro činnost buňky.

2 Mitochondrie

Mitochondrie je buněčná organela, které se též říká energetické centrum buňky. Je to organela semiautonomní (částečně nezávislá). Má dvě membrány, vnitřní je zprohýbaná (tvoří tzv. krysty a matrix). V mitochondriích je lokalizován spřažený systém biologických oxidací, tedy Krebsův cyklus a systém reakcí označovaných jako dýchací řetězec, který je spojen s oxidativní fosforylací neboli aerobní produkcí ATP. Probíhá zde i beta-oxidace mastných kyselin.

Evoluční vznik mitochondrií vysvětluje tzv. endosymbiotická teorie, která předpokládá, že mitochondrie je původně aerobní bakterie pohlcená složitějším organismem v období nárůstu O_2 (pro složitější organismus toxického) v atmosféře. Tato myšlenka je podpořena 1) existencí dvojitě membrány mitochondrie (vnitřní membrána je původní bakteriální, vnější vznikla vchlípením membrány hostitelského organismu při pohlcení bakterie), 2) vlastní mitochondriální DNA, která je podobná DNA bakterií (je cirkulární, tj. kruhová, není uspořádána v chromozomech jako u složitějších organismů) a 3) způsobem množení, tj. dělením (opět podobně jako u bakterií). Jde o vzájemně prospěšný vztah (složitější organismus přijímá potravu z okolí a ta je mitochondrií oxidována za vzniku ATP, kterého je v mitochondrii přebytek a tudíž mitochondrie předává část ATP svému hostitelskému organismu).

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

3 Krebsův cyklus

Aby bylo možné získat energii z nějaké živiny, je třeba jejího enzymatického rozkladu na jednodušší látky (tj. katabolismu). Doposud jsme se orientovali na metabolismus sacharidů, který ve své anaerobní části rozkládá svalový glykogen (glukózu) na pyruvát. Podívejme se nyní zpět na konečné produkty anaerobního rozkladu glukózy (pyruvát/laktát), jejichž poměr závisí na množství dostupného kyslíku. Je-li v pracujícím svalu dostatek O_2 , vzniká větší množství pyruvátu (3C). Ten je dekarboxylován (odštěpení CO_2) a pojí se s koenzymem A (CoA) za vzniku acetyl-CoA, který vstupuje do tzv. Krebsova cyklu (pro připomenutí – při nedostatku O_2 je z pyruvátu formován laktát a H^+). Přes acetyl-CoA coby produkt katabolismu základních živin pak mohou být kromě pyruvátu metabolizovány i dvouuhlíkaté zbytky mastných kyselin (vzniklé tzv. beta-oxidací) nebo i aminokyselin (vzniklé různě složitými metabolickými dráhami).

Krebsův cyklus (též citrátový cyklus, cyklus kyseliny citrónové) začíná spojením **acetyl-CoA** (2C) a **oxalacetátu** (4C) za vzniku **citrátu** (6C), čemuž napomáhá enzym **citrátsyntáza**. Během jedné „otáčky“ cyklu dochází k enzymaticky katalyzované tvorbě různých na sebe navazujících meziproductů (viz přílohu 1), což je spojeno s **dekarboxylacemi** (odštěpením CO_2) a **dehydrogenacemi** (odštěpením H^+). Postupné dekarboxylace a oxidace uvolňují CO_2 jako odpadní produkt, hlavně ale dochází k **redukci koenzymů** NAD a FAD (ty se pojí s H^+ a e^- , které jsou těmito štěpnými reakcemi uvolněny). Tyto redukované formy koenzymů pak budou následně oxidovány kyslíkem v respiračním řetězci za vzniku vody a energie pro resyntézu ATP. Konečným produktem cyklu je opět oxalacetát, který se pojí (kondenzuje) s dalším acetyl-CoA.

Shrnutí Krebsova cyklu:

před vstupem do cyklu (při návaznosti na glykolýzu)

- pyruvát - CO_2 (dekarboxylace) → acetyl,
- acetyl + CoA → acetylCoA,
- redukce NAD;

vlastní cyklus

- acetyl CoA + oxalacetát → citrát,
- dekarboxylace 2×,
- dehydrogenace, redukce NAD 3×, redukce FAD 1×,
- syntéza GTP (guanointrifosfát, analog ATP).

Pro zajímavost si uveďme, že cyklus nemusí proběhnout celý, některé jeho meziproducty mohou být substrátem pro jiné metabolické dráhy, naopak jiné dráhy končí v některé součásti cyklu. Krebsův cyklus je součástí nejen oxidativních pochodů, ale i různých syntetických drah, je tedy amfibolický (tj. katabolický i anabolický). Např. oxalacetát může být přeměněn na pyruvát a použit ke glukoneogenezi. Cyklus může sloužit také jako zdroj uhlíkových koster k syntéze neesenciálních (postradatelných) AK. Acetyl-CoA je hlavním substrátem pro syntézu mastných kyselin. Nezastupitelnou úlohu ve správné funkci citrátového cyklu mají některé vitamíny patřící do B-komplexu (B_1 funguje jako koenzym dílčí reakce cyklu, aktivní formou B_2 je FAD, aktivní formou B_3 je NAD, B_5 je součástí molekuly CoA).

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

4 Oxidativní fosforylace

Základem pro **oxidativní fosforylaci**, resp. aerobní produkci ATP, je tzv. **dýchací (respirační) řetězec** (též flavoprotein-cytochromový řetězec nebo elektronový transportní řetězec). **Flavoproteiny** tvoří systém proteinů přenášejících e^- (obvykle jsou to enzymy patřící mezi oxidoreduktázy). **Cytochromy** jsou proteiny mitochondriální membrány, které přenášejí e^- pomocí střídavé oxidace a redukce hemového Fe ($Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$).

Dýchací řetězec tvoří závěrečnou fázi aerobního katabolického procesu známého jako **buněčné (vnitřní) dýchání**. Koenzymy NAD a FAD zde fungují jako přenašeče H^+ a e^- , jejichž donory jsou pyruvát, MK, některé AK a další uhlíkaté řetězce při svém katabolismu. Redukované NAD a FAD pak putují podél flavoprotein-cytochromového řetězce, jsou oxidovány (ztrácejí H^+ a e^-), čímž vzniká vodíkový gradient, který aktivuje enzym **ATP-syntázu** k produkci ATP. Připomeňme si, že na oxidaci NAD připadá syntéza 3 molekul ATP, na oxidaci FAD se váže vznik 2 molekul ATP. Vodíkové ionty a elektrony se pak pojí s O_2 . Kyslík je tedy finálním akceptorem H^+ a e^- v dýchacím řetězci za vzniku tzv. **metabolické vody**. Její množství činí cca 300–500 ml/den v závislosti na intenzitě metabolismu.

5 Energetický výnos ze sacharidů

Počítejme, že na začátku katabolického zpracování sacharidů je jedna molekula glukózy (6C). Ta se anaerobní cestou štěpí na dvě molekuly pyruvátu ($2 \times 3C$). Na tyto děje při dostatku kyslíku v buňce navazuje metabolismus aerobní (anaerobní cesta metabolizace sacharidů je nedílnou součástí cesty aerobní). Molekula pyruvátu před vstupem do Krebsova cyklu přichází dekarboxylací o jeden uhlík (vznik acetylu, 2C) a v Krebsově cyklu probíhají další dvě dekarboxylace. Tím je vyřešen rozklad původní šestiuhlíkaté glukózy pomocí kyslíku až na 6 molekul CO_2 , který přechází do krve a je vydýchán plicemi jako zplodina aerobního metabolismu. Dílčí štěpné reakce jsou doprovázeny uvolňováním H^+ a e^- , které redukují koenzymy NAD ($NAD^+ \rightarrow NADH$) a FAD ($FAD \rightarrow FADH_2$), jež budou dále oxidovány v dýchacím řetězci (kde proběhne opačná reakce: $NADH \rightarrow NAD^+$, resp. $FADH_2 \rightarrow FAD$) za vzniku ATP a H_2O . Celkový zisk ATP z původní molekuly glukózy (z krve nebo odštěpené ze svalového glykogenu) lze vypočítat takto:

- oxidace 5 mol NADH: $5 \times 3 = 15$ ATP,
- oxidace 1 mol $FADH_2$: $1 \times 2 = 2$ ATP,
- vznik 1 GTP = 1 ATP,
- výsledkem aerobní cesty je $18 \text{ ATP} \times 2$ (nezapomenout vynásobit dvěma, neboť původní 6C glukóza se štěpí na $2 \times 3C$ pyruvát) = 36 ATP,
- plus anaerobní cesta (2 ATP z glukózy nebo 3 ATP z glykogenu),
- celkový výsledek je teoreticky **38–39 molekul ATP** z 1 molekuly glukózy (prakticky o něco nižší, neboť zejména přestupy některých molekul přes membrány bývají hrazeny právě na úkor ATP, čili reálných je cca 36 molekul ATP na 1 molekulu glukózy) oproti pouhým 2–3 molekulám ATP vzniklým anaerobní cestou.

Aerobní způsob získávání energie je tudíž daleko efektivnější (i když pomalejší) než anaerobní cesta. *Tip: projděte si znovu schémata anaerobních a aerobních reakcí, ať si zopakujete, kde*

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

všude během katabolismu sacharidů dochází k redukcím koenzymů (anaerobní glykolýza, oxidativní dekarboxylace pyruvátu, Krebsův cyklus).

6 Oxidační stres

Při intenzivní svalové práci (nad ANP, nad 70 % $VO_2\text{max}$) dochází ke vzniku reaktivních forem kyslíku (popř. dusíku). Vzniká tzv. **oxidační stres**, který může vést k poškození buněk, vyšší zánětlivosti atd. Např. při oxidačním vzniku H_2O se tvoří **volné kyslíkové radikály** (při štěpení molekulárního O_2). Pozitivem je to, že volné radikály mohou fungovat i jako signální molekuly nebo imunitní ochrana (ničení bakterií). Negativem je ale na druhou stranu poškození membrán organel (včetně mitochondrií) a buněk, ničení struktury a funkce enzymů, hormonů, poškození genetické informace (DNA). Jaké je řešení? Tělo má vlastní antioxidační látky (některé enzymy, bilirubin, feritin, albumin, melatonin aj.), **antioxidanty** lze dodávat i dieteticky např. při častém intenzivním tréninku (vitamíny E, C, B_2 , karotenoidy, koenzym Q_{10} , sloučeniny Se, Zn, Cu). Nadto pravidelná středně intenzivní pohybová aktivita (vytrvalostní zátěž pod ANP, 50–70% $VO_2\text{max}$) vede ke zlepšení kapacity antioxidačních mechanismů. Jinými slovy intenzivní vrcholový trénink může organismus i poškozovat, pravidelná pohybová aktivita rozumné intenzity je naopak zdraví prospěšná.

Použitá a doporučená literatura

Koolman, J., & Röhm, K.-H. (2012). *Barevný atlas biochemie*. Praha: Grada.

Lehnert, M., Botek, M., Sigmund, M., Smékal, D., Šťastný, P., Malý, T., Háp, P., Bělka, J., & Neuls, F. (2014). *Kondiční trénink*. Olomouc: Univerzita Palackého. (<https://publi.cz/books/149/Cover.html>).

Vacík, J. (1999). *Přehled středoškolské chemie* (4th ed.). Praha: SPN.

Kontrolní otázky

Co je to mitochondrie? Jakým způsobem se využívá kyslík v buněčném metabolismu?

Co probíhá v Krebsově cyklu? Čím je pro svalovou kontrakci významný dýchací řetězec?

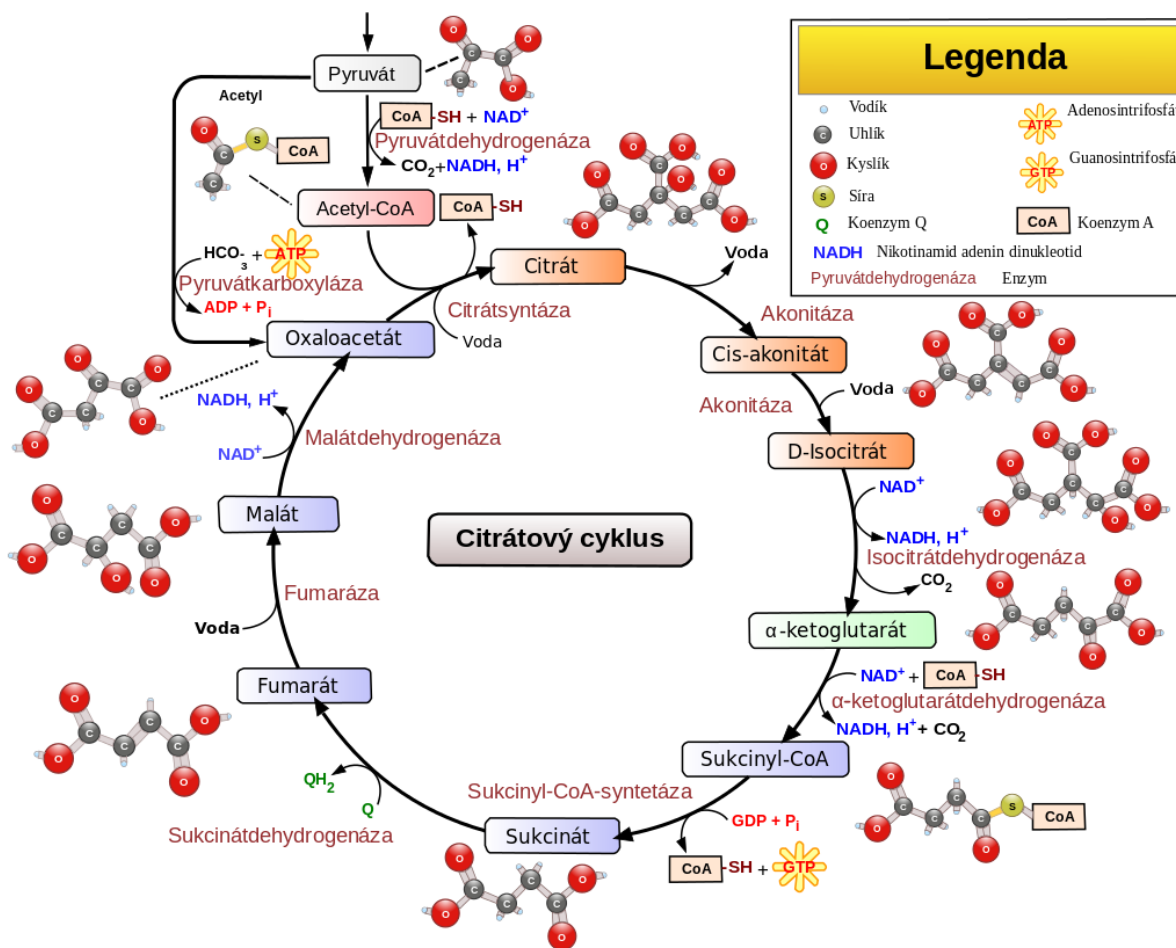
Co je to oxidační stres a jaká jsou jeho pozitiva a negativa?

Samostudium

Sestavte tabulku disciplín s kontinuálním cyklickým charakterem (běh, plavání, cyklistika, běh na lyžích apod.) od těch s převážně anaerobním krytím, přes krytí smíšené aerobně-anaerobní, až po typické vytrvalostní disciplíny s dominancí energetického krytí aerobního. Klíčové je uvědomit si dobu trvání disciplíny a s ní spojenou intenzitu zatížení, ale i charakter zatížení z hlediska zapojení svalových skupin (např. převážně dolní končetiny v cyklistice, převážně horní končetiny při běhu na lyžích – běh soupažný jednodobý, celé tělo v plavání nebo v běhu na lyžích – bruslení oboustranné jednodobé i dvoudobé).

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

Příloha 1. Krebsův cyklus (zdroj: Wikipedie)



Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

Příloha 2. Oxidativní fosforylace (zdroj: Wikipedie)

