

uděláme). Koncentrace všeho, včetně rozpuštěného CO_2 , klesne r -krát. Co se stane s pH? Zkusme dosadit „nové“ koncentrace do rovnic 1–4.

$$K = \frac{[\text{H}^+]}{\alpha} \cdot \frac{r \cdot [\text{HCO}_3^-]}{r \cdot p\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}^+]}{\alpha} \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]}{p\text{CO}_2}$$

$$K_A = [\text{H}^+] \cdot \frac{r \cdot [\text{A}^-]}{r \cdot [\text{HA}]} = \frac{[\text{H}^+]}{[\text{HA}]} \cdot \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

$$r \cdot A_{\text{tot}} = r \cdot [\text{A}^-] + r \cdot [\text{HA}]$$

$$r \cdot [\text{Na}^+] - r \cdot [\text{Cl}^-] = r \cdot \text{SID} = r \cdot [\text{HCO}_3^-] + r \cdot [\text{A}^-]$$

Vidíme, že se r ve všech rovnicích vykrátí. Ani v tomto případě se tedy rovnice nezmění a H^+ i pH zůstanou na původní hodnotě. Viděno Stewartovsky, všechny nezávislé proměnné klesnou r -krát. Není to tak zjevné, ale i v tomto případě se r v rovnici 5 vykrátí a původní rovnice 5 se nezmění. Nyní zkombinujeme osolení a ředění vodou, což je při vhodném poměru totéž, jako kdybychom roztok ředili fyziologickým roztokem. pH roztoku se nezmění, ač chloremie i natremie vzrostou. Proč tedy hovoříme o diluční a hyperchloremické acidóze, když jsme právě dokázali, že přidání NaCl ani vody pH nezmění?

Správně tušíte, že chyták je ve větě „roztok uzavřeme, aby už neměl kontakt s vnějším zdrojem CO_2 “. Uvažujeme nyní náš první roztok, osolený, ale ještě nenaředený, a obnovme kontakt s vnějším CO_2 . Vnější $p\text{CO}_2$ se nezměnil, pouhým osolením se však $p\text{CO}_2$ uvnitř roztoku též nezměnil. Proto se opět nezměnilo nic v rovnicích 1–4 resp. 5, tedy ani pH.

Nyní „otevřeme“ druhý roztok, osolený a zředěný vodou. Zředěním kleslo $p\text{CO}_2$ uvnitř. Proto se po otevření bude roztok sytit vnějším CO_2 a koncentrace $[\text{CO}_2]$ poroste. Tím přestane platit rovnost 1. Aby se její platnost obnovila, bude CO_2 , resp. H_2CO_3 disociovat na HCO_3^- a H^+ , čímž poroste jejich koncentrace. Po jisté době by se ustavila nová rovnováha s vyšším H^+ (a nižším pH). Tím by byla ovšem porušena rovnost 2. Ta se musí obnovit reakcí H^+ s A^- za vzniku HA. Celkově tedy dojde k tomu, že H_2CO_3 bude generovat nové H^+ (a HCO_3^-), které budou ihned neutralizovány reakcí s A^- . Vidíme, že systém HA/A^- funguje jako pufr pro kyselinu uhličitou. Vše bude probíhat do obnovy nové rovnováhy, kdy vzroste bikarbonát, klesne A^- , vzroste HA a vzroste H^+ .

Nyní už je důvod diluční acidózy zjevný a srozumitelný. Příčinou je pokles koncentrace bikarbonátu při zachovaném $p\text{CO}_2$. Acidóza vzniká dodatečnou disociací kyseliny uhličitě. Tvrdíme, že počáteční událostí byl pokles koncentrace bikarbonátu. V roztoku je však přítomen i A^- a HA. Proč není i zde primární porucha? Protože A^- i HA při diluci klesnou stejně, r -krát. Pro rovnici 2 je důležitý poměr A^-/HA , nikoli absolutní koncentrace. A poměr zůstane zachován. Výjimkou je právě CO_2 v otevřeném systému, kdy bikarbonát diluci klesne, ale CO_2 zůstane nezměněno.

Víme tedy, že diluce v otevřeném systému způsobí acidózu a že přispívání NaCl v otevřeném systému nemá žádný acidobazický efekt. Kombinace obou procesů ve vhodném poměru je ekvivalentní podání fyziologického roztoku. Stewartovským pohledem diluce způsobila po-

kles SID a A_{tot} . Přidání NaCl nezpůsobilo nic, s výjimkou navýšení natremie i chloremie.

Hyperchloremická acidóza

Promysleme to ještě přesněji. Před dilucí máme koncentraci natria a chloridů např. 140 a 100 mmol/l. Po diluci klesnou obě koncentrace např. o 20 %, proto $[\text{Na}^+] = 0,8 \times 140 = 112$ mmol/l, $[\text{Cl}^-] = 0,8 \times 100 = 80$ mmol/l. $[\text{Na}^+]$ tedy klesla o 28, $[\text{Cl}^-]$ o 20 mmol/l a SID klesl ze 40 na 32 mmol/l. Pokud nyní roztok dosolíme na původní hodnotu $[\text{Na}^+]$, tedy o 28 mmol/l, vzroste $[\text{Cl}^-]$ též o 28 na 108 mmol/l, ale SID zůstane na hodnotě 32 mmol/l. Poměr $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ vzrostl, je tedy relativně více chloridů než před přidáním fyziologického roztoku. Odtud název hyperchloremická acidóza. Jasně ale nyní vidíme, že podstatou hyperchloremické acidózy je diluční acidóza a naprosto nijak nesouvisí s NaCl. Pokles SID byl způsoben dilucí. Jde pouze o „misnomer“². Pro úplnost dodejme, že vyšší koncentrace chloridů sama o sobě může mít nějaké sekundární důsledky, které nemají prvotně acidobazický význam. Existují např. chloridové kanály a jistý gradient koncentrací chloridů na membráně, v distálním tubulu ledvin je detegována koncentrace chloridů apod.

Abychom definitivně vyvrátili mylnou představu, že příčinou kyselosti fyziologického roztoku je jeho nižší pH, než je pH plazmy, zkusme odhadnout, jak bude pH ovlivněno přidáním 10^{-5} M roztoku hydroxidu sodného (NaOH), který má naopak jasně alkalické pH = 9. Přidání 100 ml roztoku NaOH opět rozdělme na 2 dílčí úkony. Nejprve přidejme k 1 l naší „plazmy“ 100 ml vody. Tím klesne $[\text{HCO}_3^-]$ z 25 na 22,5 mmol/l. K tomu pak přidáme 10^{-6} molu NaOH (tj. NaOH obsažený ve 100 ml 10^{-5} M roztoku). Přidali jsme tedy 25 tisíckrát méně NaOH, než je bikarbonátu v 1 litru plazmy. Tak minimální množství prakticky nezmění koncentrace $[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{A}^-]$ ani $[\text{HA}]$, a proto nezmění ani pH. U takto slabého roztoku NaOH tedy diluční efekt vody násobně převyšuje alkalický efekt přítomného NaOH a způsobí diluční acidózu!

Mimochodem, pH fyziologického roztoku, který „stojí na stole“, je skutečně okolo 5,5. Příčinou je nasycení atmosférickým oxidem uhličitým a disociace vzniklé kyseliny uhličitě. Protože voda ani fyziologický roztok neobsahují žádné pufrы, pH klesne takto významně, ač $p\text{CO}_2$ ve vzduchu je velmi nízké, zhruba 0,3 mmHg. Hodnotu 5,5 si snadno můžeme ověřit výpočtem. Pro kyselinu uhličitou platí rovnice 1,

$$K = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-]}{\alpha \cdot p\text{CO}_2}$$

$\alpha = 3 \times 10^{-5}$ mol/l.mmHg a $K = 4,45 \times 10^{-7}$ (při 25 °C) [1]. Pokud disociuje H_2CO_3 , vznikne stejné množství H^+ a HCO_3^- , budou tedy $[\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-]$ (pokud zanedbáme dodatečné H^+ vzniklé vlastní disociací vody) a rovnici upravíme na tvar

$$K = \frac{[\text{H}^+]^2}{\alpha \cdot p\text{CO}_2} \rightarrow [\text{H}^+] = \sqrt{\alpha K \cdot p\text{CO}_2}$$

¹ Mohlo by se zdát, že jsme se svévolně rozhodli snížit všechny koncentrace r -krát a náhodou jsme zjistili, že pokud zůstane $[\text{H}^+]$ nezměněná, všechny 4 rovnosti platí. Dokazuje to však, že jde o správné řešení, že neexistují jiná řešení? Ano, dokazuje. Soustava rovnic 1–4 je v posledku kvadratická (jak je vidět z rovnice 5), existují proto právě 2 řešení, jedno s kladnou a druhé se zápornou hodnotou $[\text{H}^+]$. Víme, že fyzikální smysl má pouze kladná hodnota. Existuje tedy jediné kladné řešení. Námí nalezené řešení s nezměněnou $[\text{H}^+]$ a r -krát nižšími všemi ostatními koncentracemi je kladné řešení, a tudíž jediné, a tedy správné řešení.

² Peter Stewart ani jeho příznivci však nejspíše nejsou autory tohoto zavádějícího pojmenování.