

Η οξεοβασική ισορροπία

4

Οι εξισώσεις Henderson και Hasselbalch	42
Διαταραχές της οξεοβασικής ισορροπίας	42
Υποβοηθητικές σχέσεις για την ερμηνεία της οξεοβασικής ισορροπίας	43
Αναπνευστική οξέωση	43
Αναπνευστική αλκάλωση	44
Μεταβολική οξέωση	44
Μεταβολική αλκάλωση	44
Βιβλιογραφία	44

Οι όροι *οξύ* και *βάση* αναφέρονται αντίστοιχα σε δότες και σε λήπτες ιόντων H^+ . Επειδή στα διάφορα υγρά του οργανισμού η ποσότητα των H^+ είναι πολύ μικρή, την αλκαλικότητα ή την οξύτητα ενός διαλύματος την αποδίδουμε με το pH, που είναι ο αρνητικός λογάριθμος με βάση το 10 της συγκέντρωσης των H^+ . Αυτό σημαίνει ότι αύξηση ή ελάττωση του pH εκφράζει μια δεκαπλάσια, προς την αντίθετη κατεύθυνση, μεταβολή της συγκέντρωσης των H^+ .

Αν υποθέσουμε ότι κάθε λίτρο παγκρεατικού υγρού περιέχει 0,0000002 moles H^+ , δηλαδή μια ελάχιστη ποσότητα H^+ , τότε η ποσότητα αυτή λογαριθμικά αποδίδεται ως $\log 2 \times 10^{-8}$. Αναλυτικά θα έχουμε: $\log (H)^+ = \log 2 + \log 10^{-8} = 0,3010 + (-8) = -7,69$, και επομένως: $pH = (-\log H^+) = +7,69$. Δηλαδή, το παγκρεατικό υγρό είναι αλκαλικό και έχει pH 7,69.

Το 1962 ο Campbell εισήγαγε έναν αριθμητικό τρόπο εκφράσεως της συγκέντρωσης των H^+ με βάση το nanomole (nmol), μια μονάδα ίση με 1×10^{-9} του mEq. Η απλότητα της εκφράσεως φαίνεται στο παράδειγμα: $pH 7,4 = -8 + 0,6 = 10^{-9} \times 40$. Επειδή όμως $1 \text{ nmol} = 10^{-9}$, γι' αυτό $pH 7,4 = 40 \text{ nmol/L}$.

Στον πίνακα 4.1 αντιπαραβάλλονται οι τιμές του pH προς τις τιμές σε nmoles H^+ .

Πίνακας 4.1. Λογαριθμική (pH) και αριθμητική (nmol/L) έκφραση της συγκέντρωσης των H^+

pH	nmol/L	
7,8	15	
7,7	20	Αλκάλωση
7,6	25	
7,5	3,2	
7,4	40	
—	—	
7,3	50	
7,2	63	
7,1	80	Οξέωση
7,0	100	
6,9	125	
6,8	160	

Η έκφραση της οξεοβασικής ισορροπίας σε nmol νομίζουμε ότι είναι καλύτερη, γιατί:

1. Η λογαριθμική έκφραση δεν αποδίδει ποσοτικά τις μεταβολές των H^+ . Π.χ. απαιτείται ποσότητα ιόντων H^+ διπλάσια για να ελαττωθεί το pH από 7,1 σε 7,0 από ό,τι για να ελαττωθεί από 7,4 σε 7,3 (βλέπε πίν. 4.1).
2. Το pH δεν αποδίδει το γεγονός ότι ο οργανισμός είναι περισσότερο ευαίσθητος στην αλκάλωση από ό,τι στην οξέωση. Το φυσιολογικό pH βρίσκεται στο μέσο ακριβώς των συμβατών με τη ζωή ορίων (pH 6,8-7,8). Από τον πίνακα 4.1,

όμως, φαίνεται ότι ελάττωση των H^+ κατά 25 nmol κάτω από τη φυσιολογική τιμή είναι ασύμβατη με τη ζωή. Αντίθετα, ασύμβατη με τη ζωή κατάσταση υφίσταται μόνο όταν η συγκέντρωση των H^+ αυξηθεί κατά 120 nmol/L περίπου.

Οι εξισώσεις Henderson και Hasselbalch

Η μεταφορά του CO_2 αποτελεί τη βάση για την κατανόηση της οξεοβασικής ισορροπίας. Φυσιολογικά ο μεταβολισμός του σώματός μας παράγει κάθε λεπτό 200 cc CO_2 ή το ισοδύναμό τους 12.960 mEq H^+ :



Σε αντίθεση με όλα τα άλλα οξέα που αποβάλλονται από τα νεφρά, το ανθρακικό οξύ αποβάλλεται από τους πνεύμονες ως CO_2 . Σε κατάσταση ισορροπίας, ο αριθμός των μορίων H_2CO_3 που διασπάται για την παραγωγή H^+ και HCO_3^- είναι ίσος με τον αριθμό των μορίων H_2CO_3 που επανασυντίθενται, δηλαδή:

$$K = \frac{(H^+) \times (HCO_3^-)}{H_2CO_3} \quad (\text{όπου } K = \text{σταθερά διασπάσεως})$$

Οι σχέσεις μεταξύ των H^+ , HCO_3^- και CO_2 δίνονται από τις εξισώσεις Henderson και Hasselbalch.

Εξίσωση Henderson

$$H^+ = K \frac{(H_2CO_3)}{(HCO_3^-)} \quad (4.2)$$

$$H^+ = K \frac{a \times PCO_2}{(HCO_3^-)} \quad (4.3)$$

$$H^+ = 24 \frac{PCO_2}{(HCO_3^-)} \quad (4.4)$$

Εξίσωση Hasselbalch

$$pH = pK + \log \frac{HCO_3^-}{H_2CO_3} \quad (4.5)$$

$$pH = pK + \log \frac{HCO_3^-}{aPCO_2} \quad (4.6)$$

$$pH = pK + \log \frac{HCO_3^-}{0,03 \times PCO_2} \quad (4.7)$$

Το pK του H_2CO_3 είναι 6,10. Όταν τα H^+ μετριοούνται σε nmol/L και τα HCO_3^- σε mEq/L, τότε το K είναι 794,3 nmoles/L, το $a = 0,03$ nmoles/L/mm Hg και το γινόμενο $K \times a = 24$ (περίπου). Όταν δηλαδή $PCO_2 = 40$ mm Hg και $HCO_3^- = 24$ mEq/L, τότε $H^+ = 40$ nmol/L (εξίσωση 4.4).

Αν στην εξίσωση 4.7 αντικαταστήσουμε τις φυσιολογικές τιμές HCO_3^- και PCO_2 , θα έχουμε:

$$pH = 6,1 + \log \frac{24}{40 \times 0,03} = \quad (\text{εξίσωση 4.7})$$

$$= 6,1 + \log \frac{24}{1,2} =$$

$$= 6,1 + \log 20 \text{ αλλά } \log 20 = 1,3, \text{ άρα:}$$

$$pH = 6,1 + 1,3 = 7,4$$

Διαταραχές της οξεοβασικής ισορροπίας

Η αύξηση του pH (ελάττωση των H^+) αναφέρεται ως αλκάλωση, ενώ η μείωσή του ως οξέωση. Όταν η αρχική διαταραχή αφορά τα HCO_3^- , τότε η αλκάλωση ή η οξέωση χαρακτηρίζεται ως *μεταβολική*, ενώ όταν αφορά την PCO_2 , ως *αναπνευστική*. Υπάρχουν λοιπόν οι εξής τέσσερις συνδυασμοί:

1. Μεταβολική αλκάλωση: αύξηση του pH που οφείλεται σε αύξηση των HCO_3^- .
2. Μεταβολική οξέωση: ελάττωση του pH που οφείλεται σε ελάττωση των HCO_3^- .
3. Αναπνευστική αλκάλωση: αύξηση του pH που οφείλεται σε ελάττωση της PCO_2 .
4. Αναπνευστική οξέωση: ελάττωση του pH που οφείλεται σε αύξηση της PCO_2 .

Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται: α) ως οξεία ή χρονία, αν συνέβη αντίστοιχα μέσα σε 48 ώρες ή όχι και β) ως αντιρροπούμενη ή μη αντιρροπούμενη ανάλογα με το αν και κατά πόσο μια αντίθετη μεταβολή, αντιρροπιστική, επαναφέρει την τιμή του pH κοντά στα φυσιολογικά όρια.

Ειδικότερα η αναπνευστική οξέωση αντιρροπείται με τη νεφρική κατακράτηση HCO_3^- , η μεταβολική οξέωση με τον υπεραερισμό και την ελάττωση της PCO_2 , η αναπνευστική αλκάλωση με τη νεφρική αποβολή HCO_3^- και η βαριά μεταβολική αλκάλωση με τον υποαερισμό και την αύξηση της PCO_2 .

Υποβοηθητικές σχέσεις για την ερμηνεία της οξεοβασικής ισορροπίας

α) Νομογράμματα

Για την ερμηνεία της οξεοβασικής ισορροπίας έχουν κατασκευαστεί νομογράμματα που στηρίζονται κυρίως στην εξίσωση Henderson (εξίσωση 4.2). Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ένα τέτοιο νομογράμμα, στο οποίο οι “δέσμες” αφορίζουν τις *in vivo* μεταβολές των H^+ , των HCO_3^- και της PCO_2 που αφορούν, π.χ., αμυγή μεταβολική οξέωση, αμυγή οξεία ή χρόνια αναπνευστική οξέωση. Με τη χρήση τέτοιων νομογραμμάτων μπορούμε να ξεχωρίζουμε περίπλοκες μεταβολές της οξεοβασικής ισορροπίας.

β) Ειδικές σχέσεις

1. PCO_2 και pH. Η αναπνευστική οξέωση μπορεί να είναι οξεία ή χρόνια. Στην οξεία δεν υπάρχει νεφρική αντιρρόπηση και η μεταβολή του pH εξαρτάται αποκλειστικά από τη μεταβολή της PCO_2 . Δηλαδή:
για οξεία μεταβολή, $\Delta pH = \Delta PCO_2 \times 0,007$ (4.8)
για χρόνια μεταβολή, $\Delta pH = \Delta PCO_2 \times 0,003$ (4.9)
2. PCO_2 και HCO_3^- . Στις οξείες καταστάσεις οι μεγάλες μεταβολές της PCO_2 συνοδεύονται από μικρές μεταβολές των HCO_3^- .

Οξεία αναπνευστική οξέωση

Για κάθε αύξηση της PCO_2 κατά 10 mm Hg τα HCO_3^- αυξάνονται κατά 1 mEq/L. (4.10)

Οξεία αναπνευστική αλκάλωση

Για κάθε ελάττωση της PCO_2 κατά 10 mm Hg τα HCO_3^- ελαττώνονται κατά 2 mEq/L. (4.11)

Στις χρόνιες καταστάσεις οι μεταβολές της PCO_2 συνοδεύονται από σημαντικές μεταβολές των HCO_3^- .

Χρόνια αναπνευστική οξέωση

Αύξηση της PCO_2 κατά 10 mm Hg συνοδεύεται από αύξηση των HCO_3^- κατά 4 mEq/L. (4.12)

Χρόνια αναπνευστική αλκάλωση

Ελάττωση της PCO_2 κατά 10 mm Hg συνοδεύεται από ελάττωση των HCO_3^- κατά 5 mEq/L. (4.13)

Τέλος, αν η μεταβολική οξέωση συνοδεύεται από την *κατάλληλη* αναπνευστική αλκάλωση, αυτό φαίνεται από τη σχέση:

$$PCO_2 = 1,5 \times HCO_3^- + 8$$

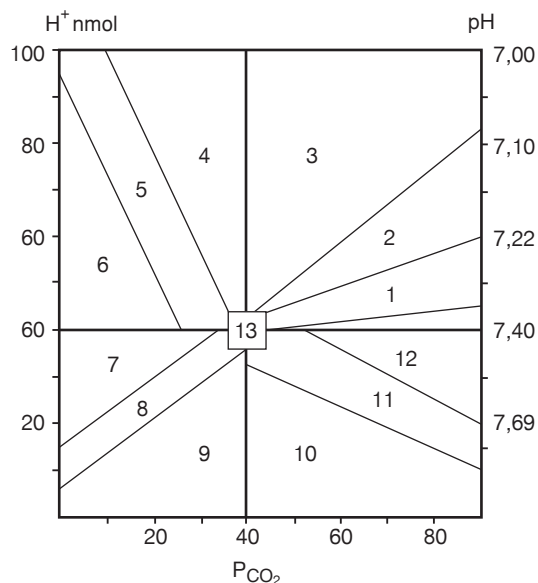
(PCO_2 = προβλεπόμενη PCO_2 με βάση τα μετρηθέντα HCO_3^-).

Αναπνευστική οξέωση

Οι παθήσεις που προκαλούν αναπνευστική οξέωση διακρίνονται σε παθήσεις με ελαττωμένο κατά

Εικόνα 4.1. Διάγραμμα σχέσεως PCO_2 και H^+ (pH). Ανάλογα με τον συνδυασμό των τιμών των H^+ (pH) και της PCO_2 οι διαταραχές χαρακτηρίζονται:

1. Χρόνια αναπνευστική οξέωση με νεφρική αντιρρόπηση.
2. Οξεία αναπνευστική οξέωση.
3. Αναπνευστική και μεταβολική οξέωση.
4. Μεταβολική οξέωση.
- 5,6,7. Μεταβολική οξέωση με προοδευτικά μεγαλύτερη αντιρρόπηση (αναπνευστική αλκάλωση).
8. Αναπνευστική αλκάλωση.
9. Αναπνευστική και μεταβολική αλκάλωση.
10. Ελάχιστη αντιρροπούμενη μεταβολική αλκάλωση.
11. Αντιρροπούμενη μεταβολική αλκάλωση.
12. Μεταβολική και αναπνευστική οξέωση και
13. Φυσιολογική οξεοβασική ισορροπία.



λεπτό αερισμό (π.χ. βλάβη ή καταστολή του αναπνευστικού κέντρου, νευρομυϊκές ασθένειες) και σε παθήσεις με φυσιολογικό ή αυξημένο κατά λεπτό αερισμό (π.χ. αυξημένες αντιστάσεις αεροφόρων οδών ή αυξημένη ενδοτικότητα).

Στην οξεία αναπνευστική οξέωση υπάρχει μια ελάχιστη αύξηση των HCO_3^- , ενώ στη χρόνια αναπνευστική οξέωση μια σημαντική αύξηση των HCO_3^- , που οφείλεται σε νεφρική αντιρρόπηση. Η τελευταία συμβαίνει μεταξύ της 12ης ώρας και της 5ης ημέρας.

Αναπνευστική αλκάλωση

Αίτια που προκαλούν αναπνευστική αλκάλωση είναι:

- α) Διέγερση του ΚΝΣ (λοιμώξεις, άγχος, φάρμακα).
- β) Διέγερση περιφερικών χημειοϋποδοχέων (υποξυγοναιμία, μεταβολική οξέωση).
- γ) Ιδιοπαθή (περιοριστικές πνευμονοπάθειες).

Γενικά, η αναπνευστική αλκάλωση παρατηρείται, όταν ο κυψελιδικός αερισμός αυξάνεται σε επίπεδα ανώτερα από αυτά που απαιτούνται για την αποβολή του CO_2 που παράγει ο οργανισμός.

Στην οξεία αναπνευστική αλκάλωση δεν παρατηρείται ελάττωση των HCO_3^- , πράγμα που συμβαίνει στη χρόνια (σχέσεις 4.11 και 4.13).

Μεταβολική οξέωση

Αίτια που προκαλούν μεταβολική οξέωση είναι:

- α) Αυξημένη πρόσληψη οξέων (NH_4Cl , methanol, ethylene glycol).
- β) Αυξημένη παραγωγή οξέων (γαλακτική οξέωση, διαβητική οξέωση).
- γ) Ελάττωση της αποβολής οξέων από τα νεφρά (ουραιμία, νεφροσωληναριακή οξέωση).
- δ) Σημαντική αποβολή διττανθρακικών (διάρροια, αναστολές της καρβονικής ανυδράσης).

Όταν δεν υπάρχει πνευμονοπάθεια, επέρχεται ταχεία αναπνευστική αντιρρόπηση της μεταβολικής οξέωσης.

Μεταβολική αλκάλωση

Προκαλείται από απώλεια οξέων ή από πρόσληψη HCO_3^- . Κλινικά παρατηρείται μετά από εμετούς ή θεραπεία με διουρητικά και συχνά συνοδεύει την απώλεια K^+ . Παρατηρείται επίσης σε πρωτοπαθή αλδοστερονισμό ή σε λήψη HCO_3^- (π.χ. σόδα).

Βιβλιογραφία

- Acid base terminology. Report by ad hoc committee of the New York Academy of Sciences conference. Ann NY Acad Sci 1966; 133: 1-274.
- Burton DR. Clinical physiology of acid-base and electrolyte disorders. NY: McGraw-Hill, 1989.
- Davenport H. The ABC of acid-base chemistry. Chicago: Univ. Chicago Press, 1969.
- Flenley DC. Another non-logarithmic acid-base diagram. Lancet 1971; 1: 961-965.
- McCurdy DK. Mixed metabolic and respiratory acid-base disturbances: diagnosis and treatment. Chest 1972; 62: 355.
- Severinghaus JW, Stupfel MA, et al. Accuracy of blood pH and PCO_2 determination. J Appl Physiol 1956; 9: 189-194.
- Shapiro BA. Clinical application of blood gases. Chicago: Year Book Med. Publ., 1976.