

Μελέτη επίδρασης του υδροξειδίου του ασβεστίου στο κατώτερο μικροβιακό τροφικό πλέγμα

Χαραλαμπία – Σταυρούλα Γρίτση
Επιβλέπουσα: Δρ. Παρασκευή Πήττα

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση των επιπέδων του CO₂ στην ατμόσφαιρα, γεγονός που έχει προκαλέσει την υπερθέρμανση του πλανήτη. Βασικός στόχος της Συμφωνίας του Παρισιού είναι ο περιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας σε επίπεδα κάτω των 2 °C σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή. Ο στόχος αυτός δεν είναι πλέον εφικτός μόνο με μείωση των εκπομπών CO₂, αλλά χρειάζονται επίσης τεχνικές απομάκρυνσής του από την ατμόσφαιρα. Μία από τις πλέον υποσχόμενες μεθόδους απομάκρυνσης CO₂ είναι η Ενίσχυση της Αλκαλικότητας των Ωκεανών. Σε μεγάλη κλίμακα, η μέθοδος περιλαμβάνει απόρριψη αλκαλικού υλικού στους ωκεανούς, μέσω της κυκλοφορίας των πλοίων, ωστόσο λίγα είναι γνωστά για τις λεπτομέρειες εφαρμογής της μεθόδου και για τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της στους θαλάσσιους οργανισμούς. Στην παρούσα μελέτη, και στην περιοχή του Κρητικού πελάγους (Ανατολική Μεσόγειος), πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα σε μικροκόσμους, διάρκειας πέντε ημερών το καθένα, στα οποία διερευνήθηκε η απόκριση του μικροβιακού πλαγκτού: στην προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων βιομηχανικού Ca(OH)₂ (0,74 mg L⁻¹, 2,97 mg L⁻¹ και 6,67 mg L⁻¹), στον διαφορετικό τρόπο χορήγησης του Ca(OH)₂ (εφάπαξ ή επαναλαμβανόμενες προσθήκες), και στη συνδυαστική επίδραση του Ca(OH)₂ και της θερμοκρασίας. Από τα πειράματα προέκυψε πως η υψηλή προσθήκη 6,67 mg L⁻¹ Ca(OH)₂ προκάλεσε την αύξηση τόσο των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών, όσο και των ετερότροφων βακτηρίων, μαστιγωτών και βλεφαριδωτών. Επιπλέον, η απόκριση των οργανισμών ήταν η ίδια όταν η προσθήκη του Ca(OH)₂ έγινε εφάπαξ και όταν έγινε σε μικρότερες δόσεις. Τέλος, τα ετερότροφα βακτήρια αυξήθηκαν περισσότερο όταν η προσθήκη έγινε στη θερμοκρασία των 15 °C, σε σχέση με τις θερμοκρασίες των 20 και 25 °C. Συνολικά, φάνηκε πως η προσθήκη Ca(OH)₂ στην κατάλληλη ποσότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της Ενίσχυσης της Αλκαλικότητας των Ωκεανών, καθώς μπορεί να αυξήσει την αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού σημαντικά, και άρα την ικανότητά του να απορροφήσει ατμοσφαιρικό CO₂, χωρίς να είναι τοξική για τους οργανισμούς.

Εισαγωγή

Η Ενίσχυση της Αλκαλικότητας των Ωκεανών, είναι μια μέθοδος δέσμευσης μεγάλων ποσοτήτων CO₂ από την ατμόσφαιρα, που προσομοιώνει τον φυσικό μηχανισμό της αποσάθρωσης των πετρωμάτων, και περιλαμβάνει τη διάλυση αλκαλικού υλικού στη θάλασσα με σκοπό την αύξηση της αλκαλικότητας του θαλασσινού νερού, δηλαδή της ικανότητάς του να εξουδετερώνει οξέα. Οι αλκαλικές ουσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της αλκαλικότητας στη θάλασσα, μπορεί να είναι είτε φυσικά αλκαλικά ορυκτά, είτε παραπροϊόντα από βιομηχανικές δραστηριότητες. Ιδιαίτερα δημοφιλές για τη χρήση του στο πλαίσιο της Ενίσχυσης της Αλκαλικότητας των Ωκεανών, είναι το Ca(OH)₂, λόγω της υψηλής διαλυτότητάς του στο θαλασσινό νερό, και της γρήγορης διάλυσής του. Η προσθήκη του Ca(OH)₂ στην επιφάνεια της θάλασσας είναι γνωστή και ως ασβέστωση των ωκεανών. Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους, με κυριότερο το ότι μπορεί να αντιμετωπίσει τις αρνητικές συνέπειες της οξίνισης των ωκεανών. Παρόλα αυτά, πριν από την εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις λεπτομέρειες εφαρμογής της και τις επιπτώσεις της στους οργανισμούς. Πολύ σημαντικό, μάλιστα, είναι να εξεταστεί η απόκριση των οργανισμών του κατώτερου μικροβιακού τροφικού πλέγματος, οι οποίοι παίζουν κρίσιμο ρόλο στους βιογεωχημικούς κύκλους και ελέγχουν τη μεταφορά της ύλης και της ενέργειας στα ανώτερα τροφικά επίπεδα.

Υλικά και Μέθοδοι

Πίνακας 1. Σύνοψη των τριών πειραμάτων.

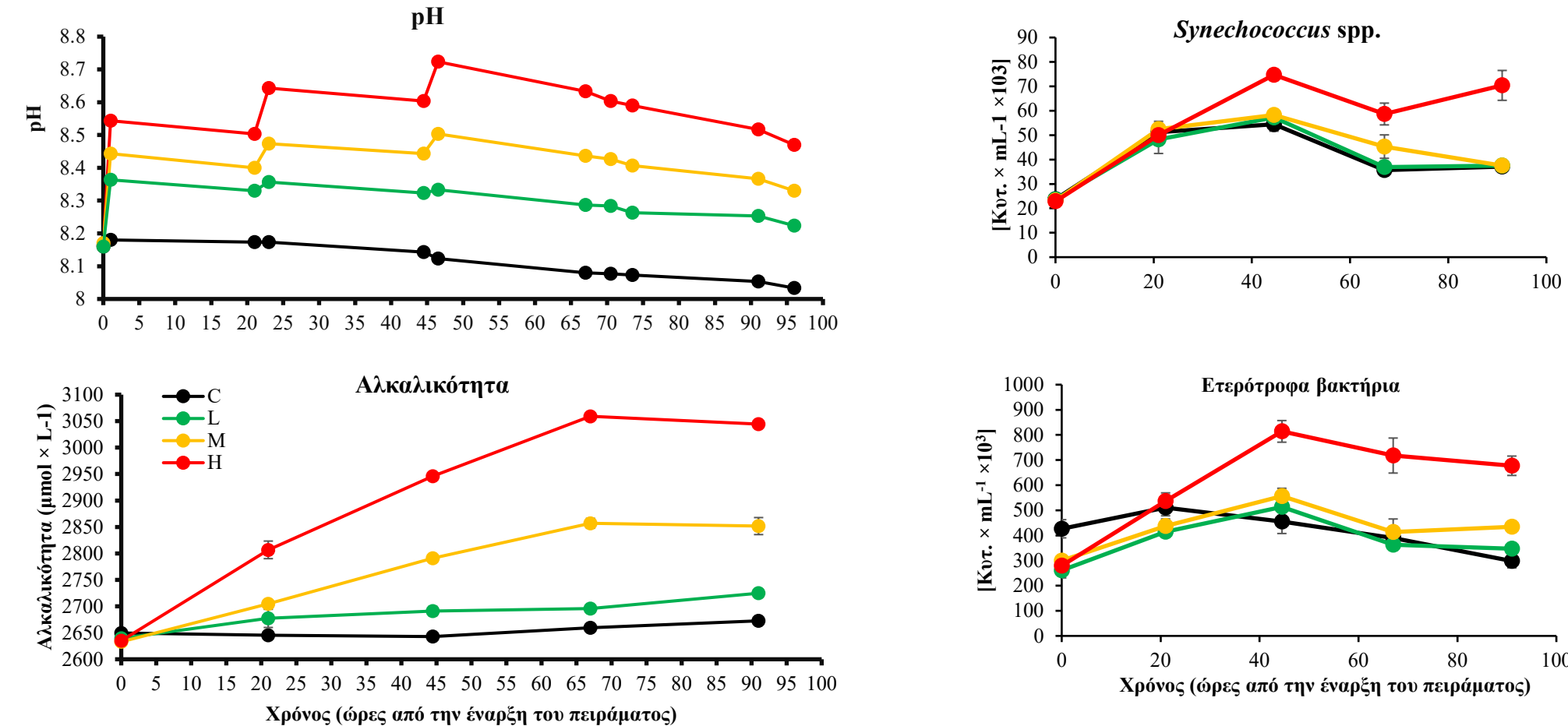
Πείραμα	Αριθμός μικροκόσμων	Αριθμός αντιγράφων	Όγκος νερού	Διάρκεια πειράματος	Ημέρες που έγινε η προσθήκη	Πειραματικές συνθήκες	Ποσότητα Ca(OH) ₂ που προστέθηκε
1 ^ο	12	3	15 L	5 ημέρες	1, 2, 3	Control [C]: χωρίς προσθήκη Low [L]: χαμηλή ποσότητα Medium [M]: μεσαία ποσότητα High [H]: υψηλή ποσότητα	Low: 0,74 mg L ⁻¹ Ca(OH) ₂ Medium: 2,97 mg L ⁻¹ Ca(OH) ₂ High: 6,67 mg L ⁻¹ Ca(OH) ₂
2 ^ο	9	3	15 L	5 ημέρες	1, 2, 3	Control [C]: χωρίς προσθήκη Single [S]: εφάπαξ προσθήκη Repeated [R]: προσθήκη σε 4 δόσεις	6,67 mg L ⁻¹ Ca(OH) ₂
3 ^ο	12	2	2 L	5 ημέρες	1, 2, 3	Control/15[C/15]: χωρίς προσθήκη / 15 °C Single/15 [S/15]: προσθήκη/ 15 °C Control/20 [C/20]: χωρίς προσθήκη / 20 °C Single/20 [S/20]: προσθήκη/ 20 °C Control/25 [C/25]: χωρίς προσθήκη / 25 °C Single/25 [S/25]: προσθήκη/ 25 °C	6,67 mg L ⁻¹ Ca(OH) ₂

Οι μεταβλητές των πειραμάτων και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρησή τους είναι οι εξής: Ο προσδιορισμός του pH έγινε με πεχόμετρο, η αλκαλικότητα μετρήθηκε με συσκευή τιτλοδότησης, ενώ για την ανάλυση των θρεπτικών χρησιμοποιήθηκαν στάνταρ χημικές μέθοδοι. Η χλωροφύλλη, αφότου εκχυλίστηκε σε ακετόνη, μετρήθηκε με φθοριόμετρο. Η αφθονία του πικοπλαγκτού (αυτότροφα βακτήρια *Synechococcus* spp. και ετερότροφα βακτήρια) καθώς και του νανοπλαγκτού (αυτότροφα και ετερότροφα μαστιγωτά), προσδιορίστηκε με κυτταρομετρητή ροής, ενώ για τον προσδιορισμό της αφθονίας του μικροπλαγκτού (διάτομα, δινομαστιγωτά και βλεφαριδωτά) χρησιμοποιήθηκε ανάστροφο μικροσκόπιο.

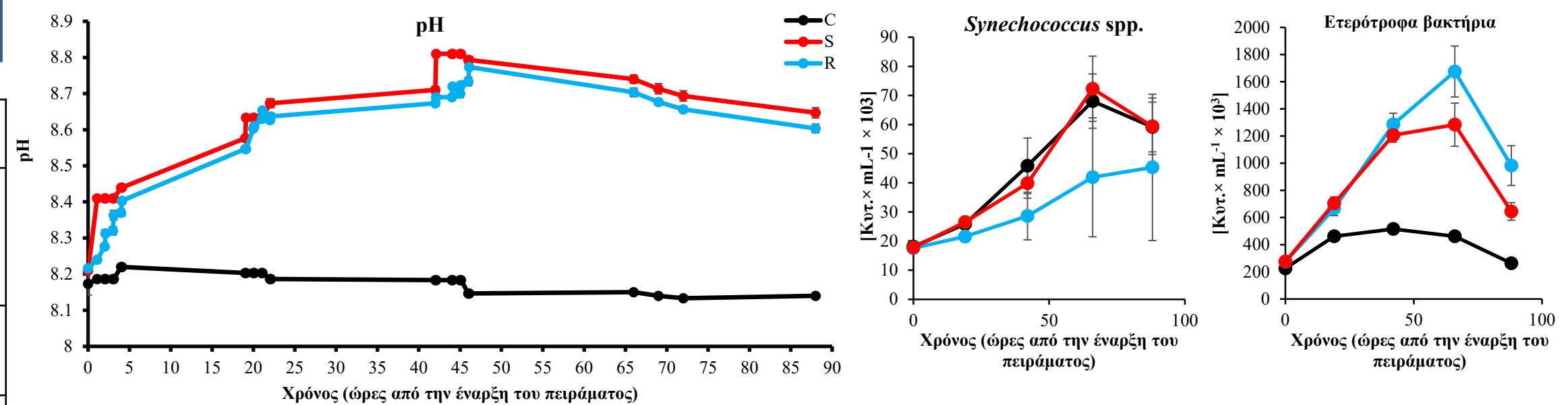
Αποτελέσματα

Όσο μεγαλύτερη ήταν η ποσότητα του Ca(OH)₂ που προστέθηκε, τόσο περισσότερο αυξήθηκε το pH και η αλκαλικότητα. Ωστόσο, σημαντικά στο χρόνο σε σχέση με τον μάρτυρα διέφεραν μόνο οι πειραματικές συνθήκες H και M. Η αφθονία τόσο των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών (*Synechococcus* spp., αυτότροφα μαστιγωτά, διάτομα) όσο και των ετερότροφων οργανισμών (ετερότροφα βακτήρια, ετερότροφα μαστιγωτά, βλεφαριδωτά) αυξήθηκε στην πειραματική συνθήκη H (Εικόνα 2).

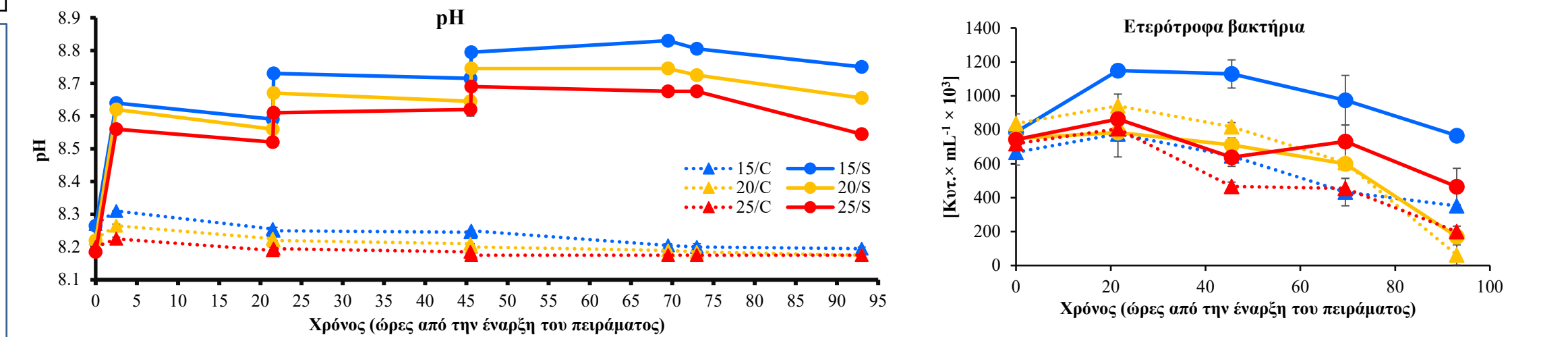
Η εφάπαξ προσθήκη του Ca(OH)₂ δεν είχε διαφορά ούτε στη μεταβολή του pH ούτε στην απόκριση των οργανισμών, σε σχέση με την προσθήκη σε μικρότερες δόσεις (Εικόνα 3). Όσο μικρότερη ήταν η θερμοκρασία, τόσο περισσότερο αυξήθηκε το pH. Ο συνδυασμός χαμηλής θερμοκρασίας (15 °C) και προσθήκης Ca(OH)₂ προκάλεσε αύξηση της αφθονίας των ετερότροφων βακτηρίων (Εικόνα 4).



Εικόνα 2. Μεταβολή του pH, της αλκαλικότητας και της αφθονίας των *Synechococcus* spp. και των ετερότροφων βακτηρίων στις τέσσερις πειραματικές συνθήκες (C, L, M, H), κατά τη διάρκεια του πρώτου πειράματος. Τα σημεία απεικονίζουν τη μέση τιμή και το τυπικό σφάλμα (± SE) των τριών επαναλήψεων σε κάθε πειραματική συνθήκη.



Εικόνα 3. Μεταβολή του pH και της αφθονίας των *Synechococcus* spp. και των ετερότροφων βακτηρίων στις τρεις πειραματικές συνθήκες (C, S, R), κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειράματος. Τα σημεία απεικονίζουν τη μέση τιμή και το τυπικό σφάλμα (± SE) των τριών επαναλήψεων σε κάθε πειραματική συνθήκη.



Εικόνα 4. Μεταβολή του pH και της αφθονίας των ετερότροφων βακτηρίων στις έξι πειραματικές συνθήκες (15/C, 15/S, 20/C, 20/S, 25/C, 25/S), κατά τη διάρκεια του τρίτου πειράματος. Τα σημεία απεικονίζουν τη μέση τιμή και το τυπικό σφάλμα (± SE) των δυο επαναλήψεων σε κάθε πειραματική συνθήκη.

Συζήτηση

Η ενίσχυση της αλκαλικότητας του θαλασσινού νερού, προκαλεί συνθήκες έλλειψης CO₂, ωστόσο υπάρχουν είδη που μπορούν να προσαρμόζονται σε τέτοια περιβάλλοντα, και μέσω μηχανισμών συγκέντρωσης άνθρακα, να αξιοποιούν το HCO₃⁻ για να δεσμεύουν άνθρακα. Αυτά τα είδη θα μπορούσαν ενδεχομένως να ευνοηθούν έναντι εκείνων που εξαρτώνται αποκλειστικά από το CO₂, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη σύνθεση των κοινοτήτων. Επομένως, η παρατηρούμενη αύξηση των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών στην προσθήκη υψηλής ποσότητας Ca(OH)₂, θα μπορούσε να οφείλεται στην εύνοια κάποιων ειδών έναντι άλλων σε αυτές τις συνθήκες χαμηλού CO₂. Οι μελέτες που έχουν γίνει στο πλαίσιο της ενίσχυσης της αλκαλικότητας των ωκεανών, ως επί το πλείστον έχουν αποκαλύψει ουδέτερη (Ferderer et al., 2022; Ramirez et al., 2024; Xin et al., 2024) ή θετική απόκριση των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών (Guo et al. (2023)). Αναφορικά με τους ετερότροφους οργανισμούς, η αυξημένη αλκαλικότητα μπορεί να συμβάλει στη συσσώρευση πλουσιότερων σε άνθρακα σωματιδίων, γεγονός που μπορεί να ωφελήσει τα ετερότροφα βακτήρια, ενώ η αύξηση των ετερότροφων μαστιγωτών και των βλεφαριδωτών πιθανά οφείλεται στην αύξηση της αφθονίας των θηραμάτων τους.

Συμπεράσματα

- Η προσθήκη Ca(OH)₂ δεν ήταν τοξική για τους οργανισμούς, μάλιστα κάποιοι ευνοήθηκαν.
- Η κατάλληλη ποσότητα Ca(OH)₂ μπορεί ταυτόχρονα να αυξήσει την αλκαλικότητα και να μην επιδρά στους οργανισμούς, όπως γίνεται για παράδειγμα στην περίπτωση της προσθήκης μεσαίας ποσότητας Ca(OH)₂.
- Η προσθήκη του Ca(OH)₂ δε χρειάζεται να γίνεται σε μικρότερες δόσεις, γεγονός που προσδίδει ευκολία στην εφαρμογή της μεθόδου.
- Η θερμοκρασία μπορεί να παίζει ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου.
- Το Ca(OH)₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της Ενίσχυσης της αλκαλικότητας των ωκεανών, καθώς μπορεί να αυξήσει την αλκαλικότητα του νερού σημαντικά, και άρα την ικανότητα του θαλασσινού νερού να απορροφήσει ατμοσφαιρικό CO₂, χωρίς να επηρεάζει αρνητικά τους οργανισμούς.

Αναφορές

- Bach et al., 2019. CO₂ Removal With Enhanced Weathering and Ocean Alkalinity Enhancement: Potential Risks and Co-benefits for Marine Pelagic Ecosystems. Frontiers in Climate, 1.
- Ferderer et al., 2022. Assessing the influence of ocean alkalinity enhancement on a coastal phytoplankton community. Biogeosciences. 19. 5375–5399.
- Guo et al., 2023. Influence of Ocean Alkalinity Enhancement with Olivine or Steel Slag on a Coastal Plankton Community in Tasmania. EGU sphere
- Kheshti, 1995. Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity.
- Moras et al., 2022. Ocean alkalinity enhancement - avoiding runaway CaCO₃ precipitation during quick and hydrated lime dissolution. Biogeosciences, 19(15), 3537–3557.
- Nimer et al., 1997. Bicarbonate utilization by marine phytoplankton species. J. Phycol., 33, 625–631.
- Paul et al., 2024. Ocean alkalinity enhancement in an open ocean ecosystem: Biogeochemical responses and carbon storage durability. EGU sphere
- Ramirez et al., 2024. Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) does not cause cellular stress in a phytoplankton community of the sub-tropical Atlantic Ocean. EGU sphere
- Suessle et al., 2023. Particle fluxes by subtropical pelagic communities under ocean alkalinity enhancement. EGU sphere
- Xin et al., 2024. Resilience of Phytoplankton and Microzooplankton Communities under Ocean Alkalinity Enhancement in the Oligotrophic Ocean. Environmental Science and Technology.