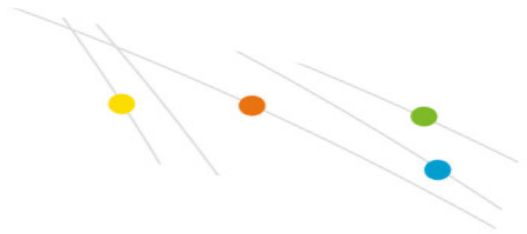


?? ????? ?????????????? ??????, ??? ??????? ?????????? ?? ?????? ?????????? ??????????????????
?? ?????????????? ??????????? ?????????????? ??? ??? ??????????????????

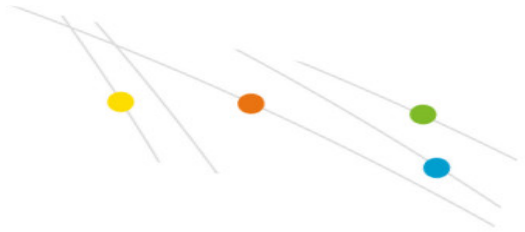
"Το ιώδιο πρέπει να θεωρείται θρεπτικό συστατικό για τα φυτά". Αυτό είναι το βασικό συμπέρασμα μιας επιστημονικής εργασίας που δημοσιεύθηκε τον Σεπτέμβριο του 2020 από μια ομάδα ερευνητών στην Ιταλία. Το ιώδιο αναγνωρίζεται ως απολύτως απαραίτητο στοιχείο για την υγεία των ανθρώπων και των εκτρεφόμενων ζώων και, πλέον, έχει ανακαλυφθεί ότι και τα φυτά χρειάζονται ιώδιο, σε μικρογραμμομοριακή δόση στο εδαφικό διάλυμα. Περιγράφεται για πρώτη φορά η φυσική εμφάνιση ιωδιούχων πρωτεϊνών σε ανώτερα φυτά και έχουν ταυτοποιηθεί 82 ιωδιούχες πρωτεΐνες. Με βάση φαινοτυπικές, γονιδιωματικές και πρωτεομικές μελέτες, αποδείχθηκε ότι τα φυτά χρειάζονται ιώδιο για την ανάπτυξη των φύλλων και των ριζών, την αποτελεσματική φωτοσύνθεση (δηλαδή, τη διαδικασία μετατροπής του ηλιακού φωτός σε χημική ενέργεια στο φύλλο), την έγκαιρη ανθοφορία, την αυξημένη παραγωγή σπόρων και την ενεργοποίηση ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης που προστατεύει το φυτό από βλάβες εξαιτίας αβιοτικών και βιοτικών καταπονήσεων. Σε περιοχές όπου το έδαφος και το νερό έχουν από τη φύση τους χαμηλή περιεκτικότητα σε ιώδιο, η έλλειψη ιωδίου μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της απόδοσης των καλλιεργειών και μειωμένη ποιότητα των καρπών. Για την εύκολη και ασφαλή χορήγηση αυτού του στοιχείου, από τη σωστή πηγή, αλλά και στη σωστή δόση και χρονική στιγμή, υπάρχουν εμπορικά προϊόντα που συνδυάζουν το ιώδιο και το νιτρικό κάλιο σε ένα ενιαίο εξειδικευμένο λίπασμα, δεδομένου ότι η ζήτηση ιωδίου από το φυτό είναι καλά συγχρονισμένη με τις τυπικές εφαρμογές του νιτρικού καλίου



καλίου στα εδαφικά διαλύματα.

Το ιώδιο είναι ένα ανόργανο θρεπτικό συστατικό, απαραίτητο για τα φυτά

Τα στοιχεία που θεωρούνται σήμερα βασικά θρεπτικά συστατικά για τα φυτά είναι ο άνθρακας (C), το υδρογόνο (H), το οξυγόνο (O), το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K) (πρωτογενή θρεπτικά συστατικά), το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το θείο (S) (δευτερογενή θρεπτικά συστατικά), καθώς και ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το βόριο (B), το χλώριο (Cl), το μολυβδαίνιο (Mo), το κοβάλτιο (Co) και το νικέλιο (Ni) (μικροθρεπτικά συστατικά). Αυτός ο κατάλογος των γνωστών φυτικών θρεπτικών συστατικών μπορεί τώρα να επεκταθεί περιλαμβάνοντας και το στοιχείο ιώδιο, το πρώτο μικροθρεπτικό συστατικό που προστέθηκε μετά τη συμπερίληψη του νικελίου (Ni) το 1987. Στην Ιταλία, ο καθηγητής Pierdomenico Perata, η Δρ. Claudia Kiferle, η ομάδα τους στο Sant'Anna Scuola Universitaria Superiore στην Πίζα και επιστήμονες που συνδέονται με το Consiglio Nazionale delle Ricerche (Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας της Ιταλίας) στη Νάπολη, δημοσίευσαν την ακόλουθη νέα σημαντική ανακάλυψη: τα φυτά δεσμεύουν το ιώδιο με 82 διαφορετικές πρωτεΐνες, μέσω λειτουργιών στο πλαίσιο σημαντικών βιολογικών διεργασιών, όπως είναι η πρωτεΐνη Rubisco για την αποτελεσματική φωτοσύνθεση στα φύλλα ή τα ένζυμα υπεροξειδάσης που βοηθούν το φυτό να αμύνονται έναντι των αβιοτικών και βιοτικών καταπονήσεων και το ένζυμο ATPase, που είναι απαραίτητο για την παροχή ενέργειας για την ανάπτυξη των φυτών και τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών. Η έλλειψη ιωδίου στο φυτό μπορεί να οδηγήσει σε



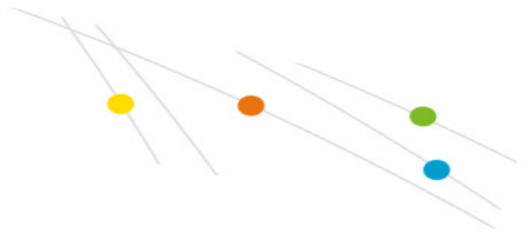
απώλεια απόδοσης των καλλιεργειών, παρόμοια με αυτή που μπορεί να παρουσιαστεί αν το φυτό έχει έλλειψη σε οποιοδήποτε άλλο μικροθρεπτικό συστατικό. Για τη βέλτιστη παραγωγή μιας καλλιέργειας θα πρέπει να εφαρμόζεται επαρκής δόση ιωδίου.

Τι είναι το ιώδιο

Το ιώδιο είναι ένα στοιχείο του περιοδικού πίνακα με σύμβολο I και ατομικό αριθμό 53. Το ιώδιο είναι αλογόνο, δηλαδή στοιχείο που κατατάσσεται στην ίδια ομάδα με το χλώριο (Cl) και το βρώμιο (Br). Τα αλογόνα αντιδρούν εύκολα με μέταλλα, όπως το νάτριο ή το κάλιο. Παραδείγματα είναι το χλωριούχο νάτριο (μαγειρικό αλάτι, NaCl) ή το ιωδιούχο κάλιο (KI) το οποίο προστίθεται στο αλάτι, παράγοντας ιωδιούχο μαγειρικό αλάτι ευεργετικό για την ανθρώπινη υγεία.

Πού απαντάται φυσικά το ιώδιο

Το ιώδιο υπάρχει παντού, αλλά μόνο σε μικρές ποσότητες. Η μεγαλύτερη ποσότητα ιωδίου βρίσκεται στους ωκεανούς, με μέση συγκέντρωση 0,5 μικρογραμμομόρια ιωδίου ανά λίτρο θαλασσινού νερού. Αντίθετα, η βροχή, το εδαφικό διάλυμα και το νερό άρδευσης περιέχουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις (λιγότερο από 0,2 μικρογραμμομόρια ανά λίτρο). Επιπλέον, συνήθως, λιγότερο από το 10% του συνολικού ιωδίου στο έδαφος είναι διαθέσιμο για πρόσληψη από τα φυτά. Στους



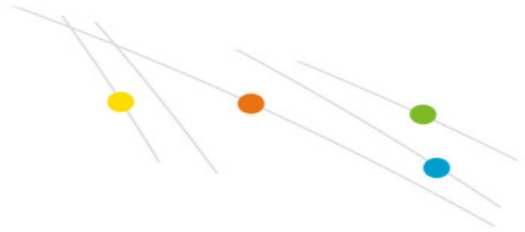
ανθρώπους και τα ζώα εκτροφής, η έλλειψη ιωδίου προκαλεί διαταραχές όπως είναι η βρογχοκήλη και ο υποθυρεοειδισμός, που μεταβάλλει τη λειτουργία του θυρεοειδούς.

Στην ιστορία του Περού, έχουν καταγραφεί διαταραχές όπως ενδημική βρογχοκήλη και κρετινισμός στις ορεινές περιοχές και στις ζούγκλες του Αμαζονίου λόγω της μόνιμης φυσικής έλλειψης ιωδίου στα εδάφη και τα φυτά αυτά.

Οι έρευνες που ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1960 καταδεικνύουν τη συνέχιση της σοβαρής έλλειψης ιωδίου, καθώς επίσης ότι η έλλειψη αυτή αποτελεί αιτία εγκεφαλικής βλάβης που μπορεί να προληφθεί. Το 1983 καταρτίστηκε ένα πρόγραμμα για τον έλεγχο των διαταραχών έλλειψης ιωδίου στον πληθυσμό του Περού, το οποίο εφαρμόστηκε πλήρως το 1986, ενώ το 1998 το 90% των νοικοκυριών είχε πρόσβαση σε ιωδιούχο αλάτι.

Τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν και να συσσωρεύσουν ιώδιο.

Από καιρό είναι γνωστό ότι τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν το ιώδιο με τις ρίζες τους και να αποθηκεύσουν ιώδιο στα φύλλα και τους καρπούς τους. Το όφελος της συμπληρωματικής χορήγησης μικρών ποσοτήτων ιωδίου για την ανάπτυξη των φυτών και την ανθεκτικότητα στις καταπονήσεις έχει υπογραμμιστεί σε πολλές μελέτες του παρελθόντος. Οι ερευνητές στην Ιταλία (Scuola Superiore Sant'Anna στην Πίζα) κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα μετά από εξέταση όλων των στοιχείων που είχαν έρθει στο φως με προγενέστερες δημοσιεύσεις: τα φυτά μπορούν να συσσωρεύουν ιώδιο επειδή είναι ευεργετικό για την ανάπτυξή τους, για το



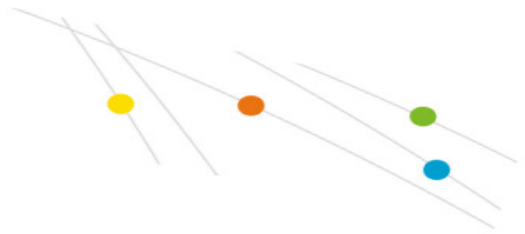
μεταβολισμό του αζώτου, για την αντοχή στις καταπονήσεις λόγω της αλατότητας στο ριζικό διάλυμα και, ιδίως, για την παραγωγή αντιοξειδωτικών από το φυτό. Όπως και στην περίπτωση άλλων μικροθρεπτικών συστατικών, η χορήγηση της σωστής δόσης (που να μην είναι ούτε πολύ λίγη, όχι πολύ υψηλή) του θρεπτικού συστατικού είναι πολύ σημαντική.

Είναι επίσης σημαντικό να χορηγείται η σωστή μορφή ιωδίου. Για παράδειγμα, το ιώδιο που περιέχεται στα απολυμαντικά (ελεύθερο ιώδιο, I_2 , και ιώδιο σε μορφή ανιόντων, I^-) μπορεί να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις σε χαμηλότερη δόση σε σύγκριση με άλλες μορφές ιωδίου.

Γιατί είναι απαραίτητο το ιώδιο για τα φυτά

Παρά το γεγονός ότι έχουν δημοσιοποιηθεί τα οφέλη από την εφαρμογή ιωδίου στη σωστή δοσολογία, ο ρόλος του ιωδίου ως θρεπτικού συστατικού για τα φυτά δεν έχει τύχει της προσοχής που του αρμόζει από την επιστημονική κοινότητα. Μέχρι τώρα. Σε δημοσίευση που κυκλοφόρησε πρόσφατα περιγράφεται μια σειρά πειραμάτων. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν από μια ομάδα επιστημόνων στην Πίζα της Ιταλίας και καταδεικνύουν με ποιους τρόπους τα φυτά χρειάζονται ιώδιο.

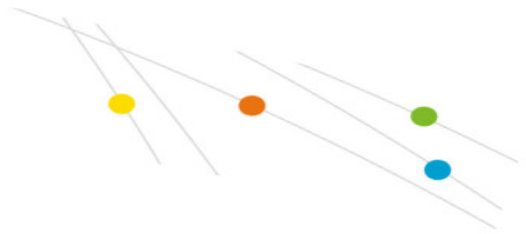
Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ως φυτό-πρότυπο το *Arabidopsis thaliana*. Αυτό το φυτό αναπτύσσεται ταχύτατα στο εργαστήριο (μόλις έξι εβδομάδες από σπόρο σε σπόρο) και όλες οι γνώσεις σχετικά με τη γενετική και το μεταβολισμό του κοινοποιούνται στο διαδίκτυο από επιστήμονες από όλο τον κόσμο.



Τα φυτά περιέχουν πάντα κάποιας μορφής ιώδιο, καθώς το στοιχείο αυτό μπορεί να απαντηθεί σε μικρές συγκεντρώσεις στον αέρα και το νερό. Στην πραγματικότητα, το ιώδιο προστίθεται σε ένα γνωστό καλλιεργητικό μέσο για τη μελέτη της φυσιολογίας των φυτών στο Arabidopsis. Για να μελετηθεί η επίδραση της έλλειψης ιωδίου στο Arabidopsis, το νερό για την παρασκευή του εδαφικού διαλύματος υποβλήθηκε σε απομετάλλωση με ανάστροφη όσμωση και χρησιμοποιήθηκαν εξαιρετικά καθαρές χημικές ουσίες για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος.

Χωρίς τη σκόπιμη εφαρμογή ιωδίου, η ανάπτυξη και η ανθοφορία των φυτών ήταν πολύ πιο αργή σε σύγκριση με φυτά στα οποία χορηγήθηκαν 0,2 ή 10 μικρογραμμομόρια ιωδίου ανά λίτρο. Η εφαρμογή ιωδίου σε μικρογραμμομοριακές συγκεντρώσεις αύξησε την ανάπτυξη των ριζών και των βλαστών, την παραγωγή σπόρων και την πρώιμη ανθοφορία.

Για να εξακριβωθεί γιατί η ανάπτυξη του φυτού τίθεται σε κίνδυνο με τη χρήση εδαφικών διαλυμάτων χωρίς ιώδιο, διερευνήθηκε η γενετική απόκριση του φυτού στην παρουσία ή την απουσία ιωδίου στο εδαφικό διάλυμα. Οι διαδικασίες επεξεργασίας με ιώδιο ρύθμισαν ειδικά την έκφραση των διαφόρων γονιδίων που εμπλέκονται στη φωτοσύνθεση, την οδό απόκρισης στις καταπονήσεις από το σαλικυλικό οξύ (SA), την απόκριση των φυτικών ορμονών, τη σηματοδότηση μέσω Ca^{2+} και την άμυνα του φυτού έναντι προσβολής από παθογόνους μικροοργανισμούς. Ο συνδυασμός αυτών των διεργασιών επιβεβαιώνει τις ήδη δημοσιευμένες παρατηρήσεις ότι το ιώδιο βοηθά τα φυτά να αποφύγουν βλάβες από βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις.

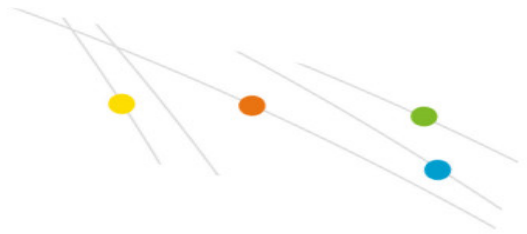


Για να εξακριβωθεί αν η απόκριση στην ανάπτυξη των φυτών και τη γονιδιακή έκφραση ήταν μοναδική μέσω της ενσωμάτωσης ιωδίου σε εδαφικό διάλυμα με έλλειψη ιωδίου, διεξήχθη το ίδιο πείραμα με χρήση του αλογόνου που μοιάζει περισσότερο ως προς την ατομική δομή με το ιώδιο: το βρώμιο. Σε αντίθεση με το ιώδιο, ούτε η γονιδιακή έκφραση ούτε η ανάπτυξη των φυτών αποκρίθηκαν στη συμπληρωματική χορήγηση βρωμίου. Αυτό αποδεικνύει ότι η απόκριση του φυτού στο ιώδιο είναι μοναδική και δεν μπορεί να αντικατασταθεί από άλλο στοιχείο.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι το ιώδιο ενσωματωνόταν στις φυτικές πρωτεΐνες, παρέχοντας στα φυτά ραδιοσημασμένα με ιώδιο ισότοπα, που ανακτώνται στις πρωτεΐνες. Οι πρωτεΐνες αυτές μπορεί να είναι ένζυμα ή συστατικά δομικών συμπλεγμάτων που είναι απαραίτητα για όλες τις κυτταρικές λειτουργίες και για τη συνεργασία και την επικοινωνία με άλλα κύτταρα εντός και μεταξύ των οργάνων του φυτού.

Οι ιωδιούχες πρωτεΐνες δεν ανακαλύφθηκαν μόνο στο *Arabidopsis*, αλλά και στη ντομάτα, τον αραβόσιτο, το σιτάρι και το μαρούλι. Η εύρεση ιωδιούχων πρωτεϊνών σε οικογένειες φυτών που δεν σχετίζονται μεταξύ τους αποδεικνύει ότι αυτές οι πρωτεΐνες που περιέχουν ιώδιο υπάρχουν ευρέως στο φυτικό βασίλειο.

Συνολικά 82 ιωδιούχες πρωτεΐνες ταυτοποιήθηκαν για το *Arabidopsis thaliana* μέσω της χρήσης προσεγγίσεων βιοπληροφορικής, σε ανεξάρτητες πρωτεωμικές βάσεις δεδομένων οι οποίες περιέχουν όλες τις φυτικές πρωτεΐνες που έχουν μελετηθεί

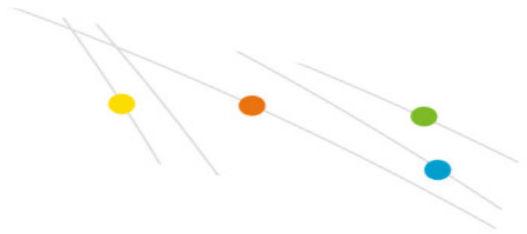


παγκοσμίως. Στους βλαστούς, οι ιωδιούχες πρωτεΐνες συνδέονται κυρίως με τους χλωροπλάστες και εμπλέκονται λειτουργικά στις διεργασίες φωτοσύνθεσης, ενώ οι πρωτεΐνες στις ρίζες είναι κυρίως διάφορα ένζυμα υπεροξειδάσης, τα οποία είναι σημαντικά για τη σηματοδότηση των καταπονήσεων ή σχετίζονται με τη δράση της υπεροξειδάσης. Ορισμένες από αυτές τις πρωτεΐνες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των ριζών. Επίσης, βρέθηκαν ιωδιούχες πρωτεΐνες με κρίσιμο ρόλο στον μεταβολισμό του αζώτου, στη ρύθμιση των φυτοορμονών και στην παραγωγή ενέργειας στα κύτταρα τόσο των ριζών όσο και των φύλλων

Οι ανακαλύψεις αυτές ανοίγουν νέους ορίζοντες για καινούργιες αναδυόμενες πτυχές της φυσιολογίας των φυτών, ιδίως στους τομείς της πρωτεωμικής και της ενζυμολογίας. Διαπιστώθηκε ότι τα ιωδιούχα ένζυμα διαδραματίζουν θεμελιώδεις ρόλους σε βασικές διατηρημένες εξελικτικές λειτουργίες και αυτή η ανακάλυψη αποτελεί ένα πρώτο βήμα που έχει εγείρει το ακαδημαϊκό ενδιαφέρον για το ιώδιο ως σημαντικό παράγοντα στην παραγωγή καλλιεργειών.

Η χορήγηση επαρκούς ποσότητας ιωδίου στις καλλιέργειες συμβάλλει στην πρόληψη της απώλειας απόδοσης, αλλά και στη διατήρηση της ποιότητας των καρπών.

Η σωστή χορήγηση ιωδίου ωφελεί άμεσα τους παραγωγούς, καθώς βελτιώνει την απόδοση της συγκομιδής και αποτρέπει τις απώλειες καλλιεργειών σε περιοχές όπου δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα ιωδίου για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Η ανεπάρκεια ιωδίου για τις καλλιέργειες στο Περού μπορεί να προβλεφθεί από τη συγκέντρωση ιωδίου στο νερό και στο έδαφος. Σε δείγματα νερού από πηγάδια στην



Ίκα και τη Λίμα, έχουν εντοπιστεί επίπεδα μεταξύ 0,05 και 0,6 μικρογραμμομορίων ιωδίου ανά λίτρο. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι η διαθεσιμότητα του ιωδίου είναι γενικά χαμηλή στον τύπο εδάφους που επικρατεί στην περιοχή (αμμώδη εδάφη, με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη).

Προκειμένου οι παραγωγοί να είναι σε θέση να χορηγούν τη σωστή δόση ιωδίου εύκολα και με ασφάλεια, το ιώδιο μπορεί να εφαρμοστεί σε καλύτερη μορφή με νιτρικό κάλιο, αντί μόνο ως μικροθρεπτικό συστατικό. Η ζήτηση ιωδίου από το φυτό είναι καλά συγχρονισμένη με τις τυπικές εφαρμογές του νιτρικού καλίου ως πηγής νιτρικών και καλίου στα εδαφικά διαλύματα. Το νιτρικό κάλιο είναι η βέλτιστη πηγή καλίου, καθώς παρέχει κάλιο (K) σε συνδυασμό με την προτιμώμενη πηγή αζώτου: νιτρικό άζωτο (N-NO₃). Η πρόσληψη νιτρικού αζώτου προάγει την πρόσληψη κατιόντων από το έδαφος, όπως κάλιο, ασβέστιο και μαγνήσιο.

Το ιώδιο αποτελεί το φυσικό συμπλήρωμα των νιτρικών για τη μεταφορά ασβεστίου στο φυτό, η οποία παρεμποδίζεται από την έλλειψη ιωδίου. Οι ιωδιούχες πρωτεΐνες στις ρίζες εμπλέκονται στον μεταβολισμό της ενέργειας και στην απόκριση στις οξειδωτικές καταπονήσεις, προβλέποντας χαμηλότερη μεταφορά ασβεστίου στους καρπούς σε συνθήκες έλλειψης ιωδίου. Το ιώδιο είναι, επίσης, απαραίτητο για το φυτό για τη διατήρηση των διεργασιών της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής στα φύλλα. Έχει παρατηρηθεί στις καλλιέργειες ντομάτας ποικιλίας «cherry» στην Αλμερία της Ισπανίας ότι, με την επαρκή χορήγηση ιωδίου με νιτρικό κάλιο, η βελτιωμένη οξειδοαναγωγική ισορροπία και ο μεταβολισμός της ενέργειας ευνόησαν τη μεταφορά ασβεστίου από τις ρίζες στον καρπό, με αποτέλεσμα υψηλότερη



συγκέντρωση ασβεστίου στον καρπό. Αυτό συνδέεται με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων ποιότητας που σχετίζονται με την έλλειψη ασβεστίου, όπως είναι η σήψη των καρπών στο επίπεδο του ομφαλού, αλλά και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κατά τη μεταφορά. Επομένως, η εξασφάλιση επαρκούς επιπέδου ιωδίου στο εδαφικό διάλυμα βοηθά τους παραγωγούς να επιτύχουν βέλτιστες αποδόσεις συγκομιδής στις καλλιέργειες με προϊόντα υψηλής ποιότητας, ιδίως σε δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το ιώδιο:
https://www.worldiodineassociation.com/elemental_chemistry

Κύρια πηγή:

Kiferle, C., Martinelli, M., Salzano, A.M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P.A., Hora, K., Holwerda, H.T., Scaloni, A., Perata, P. (2020) Evidences for a nutritional role of iodine in plants. BioRxiv

<https://doi.org/10.1101/2020.09.16.300079>.