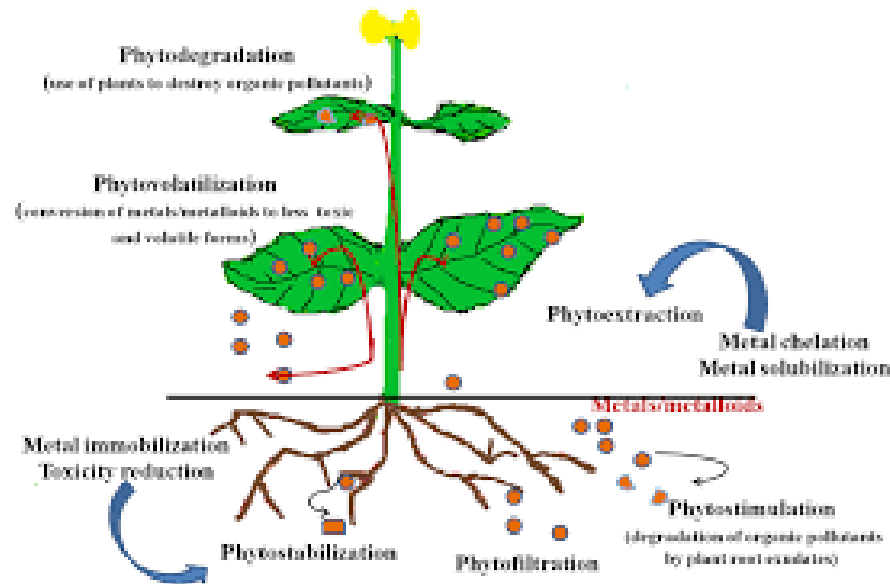


Διάλεξη 7

Φυτική απορρύπανση



Φυτική Απορρύπανση (Phytoremediation)

Η χρήση φυτών για την απομάκρυνση οργανικών και ανοργάνων ρύπων από το έδαφος

- **Φυτική Συσσώρευση (Phytoaccumulation)**
- Φυτική Εξάτμιση (Phytovolatilisation)
- Φυτική Διήθηση (Rhizofiltration)
- Φυτική Αδρανοποίηση (Phytostabilization)

Φυτική Συσσώρευση

Η διεργασία απορρόφησης, μετακίνησης και συσσώρευσης στο εσωτερικό ορισμένων φυτών ιδιαίτερα υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων

Φυτά που έχουν τέτοιες ικανότητες συσσώρευσης μετάλλων ονομάζονται **υπερ-συσσωρευτές (hyperaccumulators)** και έχουν την δυνατότητα να συσσωρεύουν στην φυτική τους μάζα 50-100 φορές υψηλότερες συγκεντρώσεις συγκεκριμένων μετάλλων από ότι τα καλλιεργούμενα φυτά

Φυτική Συσσώρευση

Περίπου 400 φυτά έχουν αναγνωρισθεί ως υπερ-συσσωρευτές μετάλλων όπως Cd, Zn, Ni, Co, Cu, As, Se

Συγκεντρώσεις μετάλλων στα υπέργεια τμήματα υπερ-συσσωρευτών

Μέταλλα	Συγκέντρωση (mg kg ⁻¹ ξ.β)
---------	---------------------------------------

Zn, Mn	10,000
--------	--------

Co, Cu, Ni, As, Se	1,000
--------------------	-------

Cd	100
----	-----

Συνήθως φυτά υπερ-συσσωρευτές έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν στο υπέργειο τμήμα τους ποσότητες 1-3% ξ.β.

Φυτική Συσώρευση

Metal	Plant Species	Concentrations in "Harvestable" Material from Plants Grown in Contaminated Soil (dry wt basis)
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	1,800 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
Cu	<i>Ipomoea alpina</i>	12,300 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
Co	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10,200 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
Pb	<i>T. rotundifolium</i>	8,200 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i>	51,800 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
Ni	<i>Psychotria douarrei</i>	47,500 mg kg ⁻¹ in shoots ^a
	<i>Sebertia acuminata</i>	25% by wt of dried sap ^b
Zn	<i>T. caerulescens</i>	51,600 mg kg ⁻¹ in shoots ^c

Ni – υπερσυσσωρευτές: οι πιο πολυπληθείς (277), ακολουθούμενοι από Co, Cu, Zn – συσσωρευτές ενώ Pb, Cd, Cr, Se – συσσωρευτές έχουν επίσης αναφερθεί σε μικρότερους αριθμούς





© -josef hlasek
www.hlasek.com
Thlaspi caerulescens 8235

Thlaspi caerulescens υπερυσσωρευτής Zn



Psychotria douarrei υπευσσωρευτής Ni

Φυσιολογικός Ρόλος Φυτικής Συσώρευσης

Ποιο όφελος αποκομίζουν τα φυτά από την συσώρευση μετάλλων;

Ανθεκτικότητα και μηχανισμός άμυνας από έντομα, μύκητες και βακτήρια που προσβάλλουν με τους φυτικούς ιστούς

Το φυτό *Thlaspi caerulescens* που είναι γνωστό ως συσσωρευτής Zn παρουσιάζει μειωμένη προσβολή από έντομα λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων Zn στα φύλλα

Μηχανισμοί Φυτικής Συσσώρευσης

1. Αυξημένη πρόσληψη μεταλλικών ιόντων από το έδαφος είτε αυτούσια είτε υπό μορφή συμπλόκων με οργανικά οξέα, φωσφορικά
2. Αυξημένη μεταφορά των μετάλλων, υπό την μορφή κατάλληλων συμπλόκων με φυτικά οργανικά μόρια
3. Εξειδικευμένη ικανότητα των φυτών να αποθηκεύουν τα προσληφθέντα μέταλλα στα κύτταρα τους περιορίζοντας έτσι την έκφραση τοξικότητας

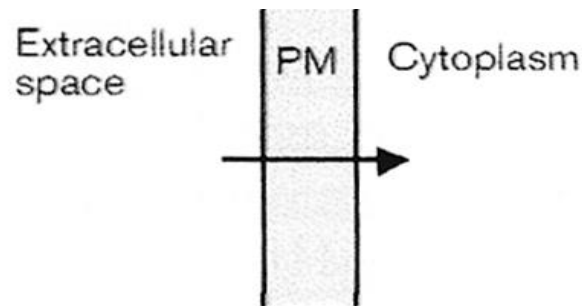
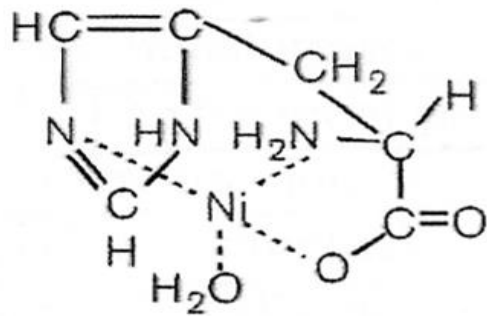
1. Αυξημένη πρόσληψη μετάλλων

Η ικανότητα του φυτού *T. caerulescenes* να συσσωρεύει Zn οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στην παρουσία εξειδικευμένων πρωτεϊνών μεταφοράς και πρόσληψης Zn, *ZNT1* και *ZNT2* (Zinc transporter) που στις ρίζες του συγκεκριμένου φυτού παρουσιάζουν υψηλή έκφραση ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι έλλειψης Zn στο φυτό

Η ικανότητα του ιδίου φυτού να προσλαμβάνει και να συσσωρεύει Cd αποδίδεται στην αυξημένη έκφραση των πρωτεϊνικών-μεταφορέων *IRT1* (iron regulated transporter) στις ρίζες του

2. Αυξημένη μεταφορά στο υπέργειο τμήμα

Το φυτό *Alyssum lesbiacum* παρουσιάζει αυξημένη παραγωγή ιστιδίνης στο ξύλωμα, η οποία σχηματίζοντας σύμπλοκα με Ni παρέχει ταχύτατη μεταφορά του μετάλλου από τις ρίζες στο υπέργειο τμήμα του φυτού όπου και συσσωρεύονται



3. Αποθήκευση σε φυτικά κύτταρα των φύλλων

Η αποθήκευση των μετάλλων στα φυτικά κύτταρα παρέχει ανθεκτικότητα στα φυτά και πραγματοποιείται είτε με συμπλοκοποίηση (complexation) είτε με αποθήκευση των μετάλλων σε συγκεκριμένα οργανίδια των κυττάρων (compartmentation)

Φυτική Συσσώρευση - Εφαρμογές

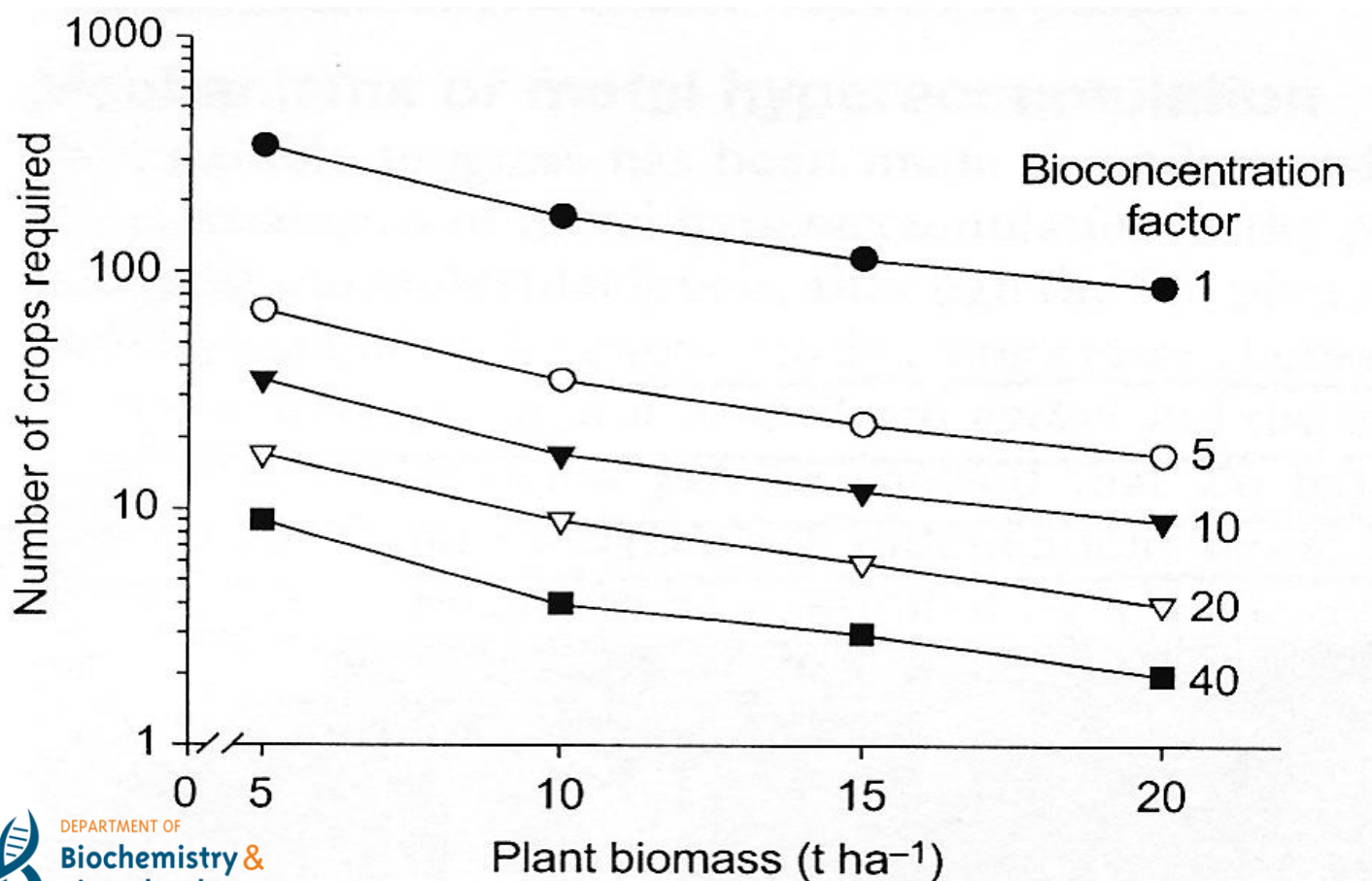
Φυτά υπερ-συσσωρευτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πράξη για την αποκατάσταση περιοχών που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων

Αποτελεσματικότητα Φυτικής Συσσώρευσης

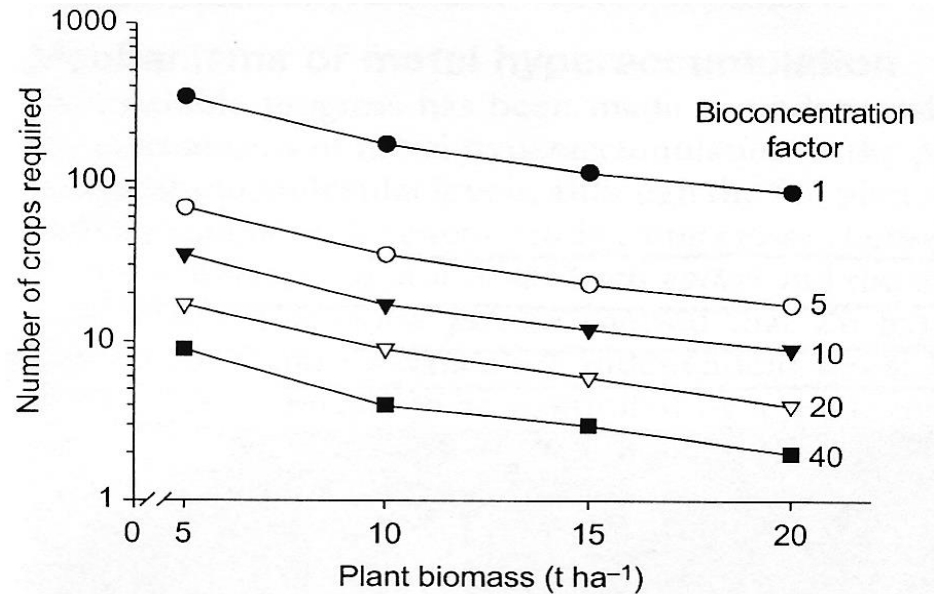
Η αποτελεσματικότητα της φυτικής συσσώρευσης εξαρτάται:

- Ποσότητα φυτικής βιομάζας
- Συντελεστή βιοσυσσώρευσης του μετάλλου: λόγος συγκέντρωσης μετάλλου στο υπέργειο τμήμα του φυτού προς την συγκέντρωση του μετάλλου στο έδαφος

Για τα κοινά φυτά ο συντελεστής βιο-συσσώρευσης είναι 1 και δεν χρησιμοποιούνται στην βιολογική απορρύπανση ακόμη και εάν παράγουν μεγάλη φυτική μάζα γιατί θα απαιτούνται 100 καλλιεργητικές περιόδους για να επιτύχουν φυτική απορρύπανση



Για φυτά υπερ-συσσωρευτές ο συντελεστής βιο-συσσώρευσης μερικές φορές φτάνει τιμές 50 –100



Το σύνηθες πρόβλημα για φυτά υπερ-συσσωρευτές είναι η χαμηλή παραγωγή φυτικής μάζας όπως το *Thlaspi caerulescens* (Zn/Cd) που παράγει 2-5 tn ha⁻¹ ενώ τα καλλιεργούμενα φυτά > 10 tn ha⁻¹

Τα περισσότερα φυτά υπερ-συσσωρευτές Zn, Cd, Cu, Pb, Cr παράγουν μικρή φυτική μάζα



Εξάιρεση αποτελούν Ni-συσσωρευτές όπως το φυτό
Berkheya coddii που παράγει ως και 22 t_n ha⁻¹

Προβλήματα εφαρμογής Φυτικής Συσώρευσης

- Τα φυτά συσσωρευτές μετάλλων συνήθως αναπτύσσονται αργά και παράγουν μικρή φυτική μάζα
- Δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για τα αγρονομικά χαρακτηριστικά τους και γενετικές πληροφορίες για την γενετική τους βελτίωση

Τι κάνουμε την συγκομισμένη φυτική μάζα;

Συγκομίζεται και με κατάλληλη επεξεργασία τα μέταλλα μπορούν να ανακτηθούν σε υψηλές ποσότητες και να ανακυκλωθούν

Το οικονομικό όφελος από την ανάκτηση των μετάλλων από την φυτική μάζα καθιστά την φυτική συσσώρευση και οικονομικά βιώσιμη μέθοδο απορρύπανσης

Φυτική Συσσώρευση – Βιοτεχνολογία

- Διασταύρωση μεταξύ φυτών συσσωρευτών και φυτών που παράγουν μεγάλη φυτική μάζα ώστε να παραχθούν φυτά με αυξημένη ικανότητα συσσώρευσης μετάλλων και ταυτόχρονα αυξημένη παραγωγή φυτικής μάζας
- Γενετική τροποποίηση φυτών με μεγάλη φυτική μάζα με εισαγωγή γονιδίων ή μονοπατίων από μικροοργανισμούς ή φυτά συσσωρευτές μετάλλων
- Καλύτερη κατανόηση των βιοχημικών μηχανισμών με τους οποίους τα φυτά καταφέρνουν να παραλαμβάνουν και να συσσωρεύουν μέταλλα στην φυτική τους μάζα

- Φυτική Συσσώρευση (Phytoaccumulation)
- **Φυτική Εξάτμιση (Phytovolatilisation)**
- Φυτική Διήθηση (Rhizofiltration)
- Φυτική Αδρανοποίηση (Phytostabilization)

Φυτική Εξάτμιση (Phytovolatilization)

Η χρήση φυτών για την μετατροπή διαθέσιμων μετάλλων στο έδαφος σε πτητικές μορφές με τις οποίες ελευθερώνονται στο περιβάλλον και απομακρύνονται από το έδαφος

Επιθυμητή μέθοδος φυτικής απορρύπανσης διότι το τελικό προϊόν δεν χρήζει επεξεργασίας άρα παρουσιάζει μειωμένο κόστος εφαρμογής

Ιδιαίτερη εφαρμογή με την χρήση γενετικά τροποποιημένων φυτών για την φυτική εξάτμιση Hg, Se

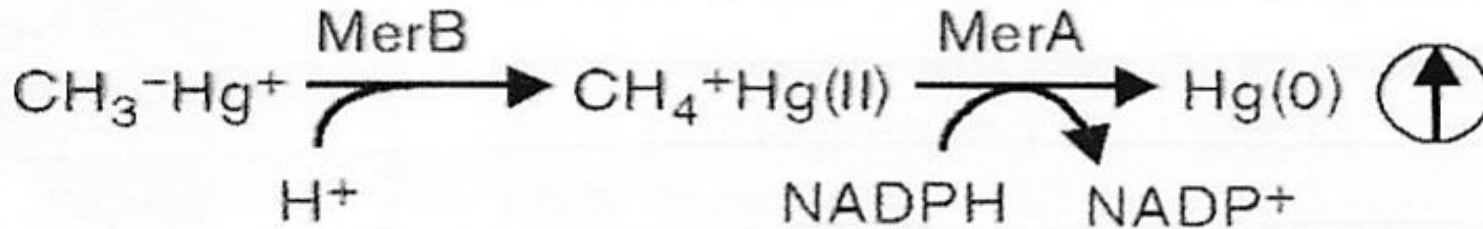
Φυτική Εξάτμιση - Hg

Η δημιουργία γενετικά τροποποιημένων φυτών καπνού ή του φυτού *Arabidopsis thaliana* με τα **βακτηριακά γονίδια *merB*, *merA*** οδήγησε σε αυξημένη ανθεκτικότητα σε υψηλές συγκεντρώσεις CH₃Hg και Hg(II) που είναι ιδιαίτερα τοξικές μορφές στον άνθρωπο και στους μικροοργανισμούς

Το γονίδιο *merB* ελέγχει την παραγωγή μιας λυάσης που καταλύει την μετατροπή του CH₃Hg σε Hg(II)

Το γονίδιο *merA* ελέγχει την παραγωγή μιας αναγωγάσης που καταλύει την μετατροπή Hg(II) σε Hg⁰

Φυτική Εξάτμιση - Hg



Τα γενετικώς τροποποιημένα φυτά παρουσιάζουν 50 φορές υψηλότερη ανθεκτικότητα σε CH_3Hg από ότι τα μη τροποποιημένα φυτά

Η εφαρμογή των φυτών αυτών στην πράξη παρουσιάζει το πρόβλημα της χαμηλής διαθεσιμότητας του Hg στο έδαφος

Είδος Εδάφους

WT

merA9

WT

merA9

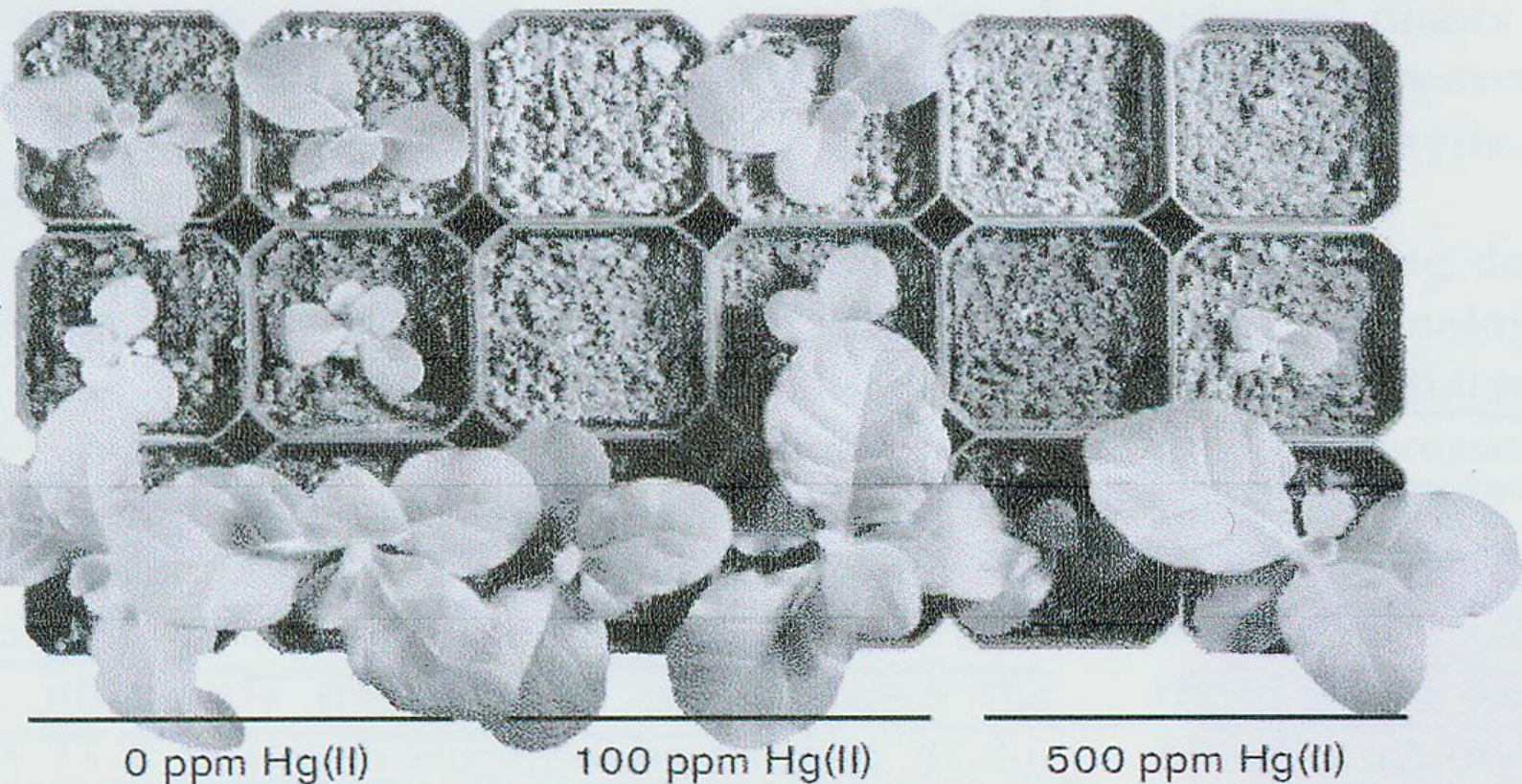
WT

merA9

North Georgia
2.4% organic

South Georgia
2.6% organic

Commercial
70% organic



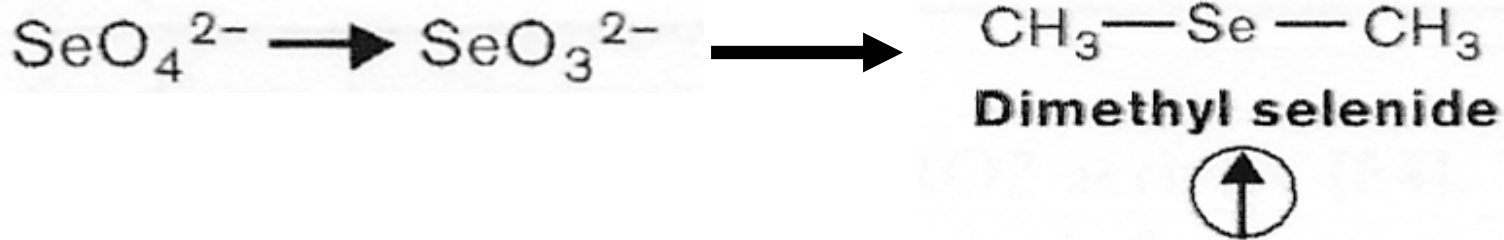
WT: μη τροποποιημένα φυτά

merA9: τροποποιημένα φυτά με το γονίδιο *merA*

Φυτική Εξάτμιση - Se

Το Se συσσωρεύεται στο αρδευτικό νερό και προκαλεί προβλήματα ρύπανσης σε υδάτινα οικοσυστήματα

Γενετικά τροποποιημένα φυτά *A. thaliana* είχαν την ικανότητα να μετατρέπουν **SeO₄⁻²** και **SeO₃⁻²** σε **(CH₃)₂Se** που είναι πτητικό και ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα



- Φυτική Συσσώρευση (Phytoaccumulation)
- Φυτική Εξάτμιση (Phytovolatilisation)
- **Φυτική Διήθηση (Rhizofiltration)**
- Φυτική Αδρανοποίηση (Phytostabilization)

Φυτική Διήθηση (Rhizofiltration)

Η χρήση φυτών για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων από τρεχούμενο νερό

Η δέσμευση των μετάλλων πραγματοποιείται είτε από τα ίδια τα φυτά είτε από την πλούσια μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας αυτών των φυτών

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει βρει εφαρμογή στην κατασκευή τεχνικών υδροβιότοπων όπου καλλιεργούνται υδροχαρή φυτά που έχουν την ικανότητα να παρέχουν διαλυτό οξυγόνο στην ριζόσφαιρα και κατά συνέπεια να δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για την δραστηριότητα των μικροοργανισμών

Φυτική Διήθηση

Διάφορα υδροχαρή φυτά (*Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Azolla pinnata*) έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να συσσωρεύουν εντός ή εκτός των κυττάρων τους διάφορα μέταλλα (Pb, Cu, Cd, Hg) από υδατικά συστήματα

Φυτά ηλίανθου (*Helianthus annuus*) που καλλιεργούνταν υδροπονικά σε διάλυμα που περιείχε 300 mg L^{-1} Pb προκάλεσαν μείωση της συγκέντρωσης Pb στο 1 mg L^{-1} εντός 8 ωρών με παράλληλη ενσωμάτωση του μετάλλου στην ριζική μάζα σε ποσοστό 10% ξ.β





- Φυτική Συσσώρευση (Phytoaccumulation)
- Φυτική Εξάτμιση (Phytovolatilisation)
- Φυτική Διήθηση (Rhizofiltration)
- **Φυτική Αδρανοποίηση (Phytostabilization)**

Φυτική Αδρανοποίηση (Phytostabilization)

Η χρήση φυτών για την μετατροπή μετάλλων σε λιγότερο τοξικές ή μη διαθέσιμες μορφές χωρίς όμως να απομακρύνονται πλήρως από το περιβάλλον

Η φυτική αδρανοποίηση έχει εφαρμοστεί ήδη με επιτυχία σε περιοχές εξόρυξης μετάλλων που έχουν εγκαταλειφθεί

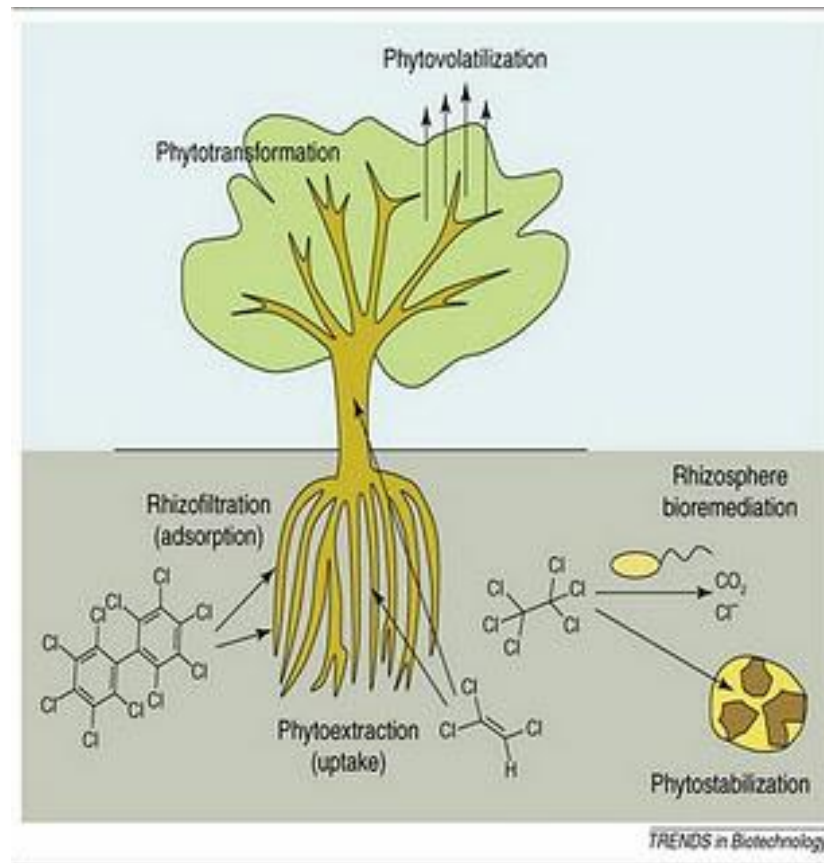
Μηχανισμοί Φυτικής Αδρανοποίησης

- Μετατροπή διαλυτών και τοξικών μορφών μετάλλων σε αδιάλυτες και μη τοξικές μορφές
- Έκκριση ουσιών από το ριζικό σύστημα που δημιουργούν αδιάλυτα σύμπλοκα με τα μέταλλα
- Ενεργοποίηση των μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας για χημική μετατροπή και αδρανοποίηση των μετάλλων

Φυτική Αδρανοποίηση – Εφαρμογές

- Η φυτική αδρανοποίηση μετάλλων παρουσιάζει ενδιαφέρον για τα Cr^{+6} και Pb
- Ορισμένα βαθύρριζα φυτά έχουν την ικανότητα να ανάγουν Cr^{+6} (τοξικό και διαλυτό) προς Cr^{+3} (χαμηλή τοξικότητα και αδιάλυτο)
- Το φυτό *Agrostis capillaris* όταν αναπτύσσεται σε εδάφη με υψηλές ποσότητες Pb/Zn έχει την ικανότητα να χρησιμοποιεί Pb και PO_4 του εδάφους για τον σχηματισμό πυρομορφίτη που είναι αδιάλυτη ουσία και συνεπώς μη διαθέσιμη

Φυτική απορρύπανση οργανικών ρύπων



Φυτική απορρύπανση οργανικών ρύπων

Τα φυτά έχουν ενζυμικά συστήματα που εκλεκτικά διασπούν ορισμένους οργανικούς ρύπους όπως γεωργικά φάρμακα προς μη-βιολογικά δραστικές ουσίες

Παρόλα αυτά τα φυτά, σε σύγκριση με τους μικροοργανισμούς, έχουν την ικανότητα να πραγματοποιούν μόνο απλά μεταβολικά βήματα χωρίς να έχουν την ικανότητα να ανοργανοποιούν πλήρως μια ξενοβιοτική ουσία

Φυτική απορρύπανση οργανικών ρύπων

Οργανικοί ρύποι που έχει βρεθεί ότι απομακρύνονται με την χρήση φυτικής απορρύπανσης είναι:

- **Διαλύτες (τριχλωροαιθυλένιο, TCE)**
- **Προσθετικά βενζίνης (μέθυλ-τερτυλ-βουτυλ-αιθέρας MTBE)**
- **Αντιψυκτικούς παράγοντες (Βενζοτρίαζόλες)**
- **Γεωργικά φάρμακα**
- **Εκρηκτικά υλικά (TNT, RDX, HMX)**
- **Πετρελαϊκά παράγωγα (PAHs)**
- **PCBs**

Φυτική Απορρύπανση Οργανικών Ρύπων

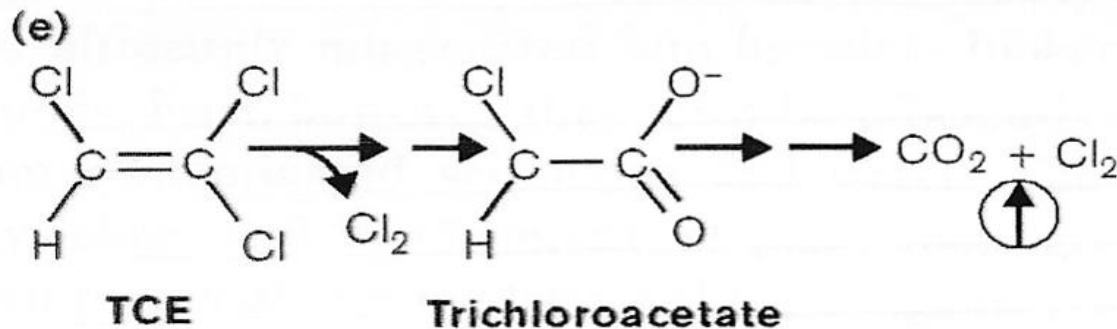
- **Φυτά λεύκης** βρέθηκε ότι είχαν την ικανότητα να απορροφούν **TCE** από το έδαφος και να το ελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα διαμέσου βλαστών και φύλλων



- **Φυτά ηλίανθου** είχαν την ικανότητα να προσλαμβάνουν και να ενσωματώνουν στα φυτικά κύτταρα υψηλές

Φυτική Απορρύπανση TCE

Φυτά λεύκης (*Populus* sp.) είχαν την ικανότητα να απορροφούν TCE από το έδαφος και να το μετατρέπουν σε τριχλωροξικό οξύ και τελικά CO₂

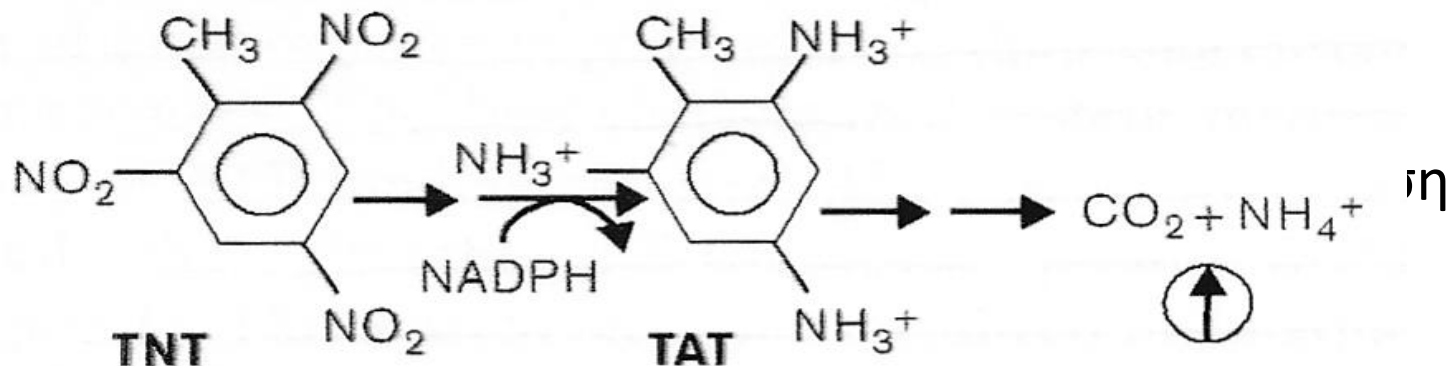


Εναλλακτικά φυτά λεύκης έχει βρεθεί ότι παράγουν στην ριζόσφαιρα ουσίες που υποβοηθούν ή ενεργοποιούν τους μικροοργανισμούς για διάσπαση του TCE

Φυτική Απορρύπανση TNT

Τα εκρηκτικά υλικά TNT (τρινιτροτολουόλιο), GTN (νιτρογλυκερίνη) αποτελούν σοβαρούς ρύπους σε περιοχές που γειτνιάζουν εργοστάσια παραγωγής τους

Τα φυτά *Micr* ικανότητα να των νιτροομά



Γενετικά τροποποιημένα φυτά με το γονίδιο που ελέγχει την παραγωγή μια βακτηριακής νιτρο-αναγωγάσης αύξησε σημαντικά την ανθεκτικότητα (10 φορές) των φυτών και την ικανότητα διάσπασης του GTN

Φυτική Απορρύπανση Πετρελαιοειδών - PCBs

Η φυτική απορρύπανση πετρελαϊκών αποβλήτων οφείλεται

1. Στην άμεση μεταβολική δραστηριότητα ορισμένων φυτών που έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να μεταβολίζουν πετρελαιοειδή (ελάχιστα παραδείγματα έχουν καταγραφεί)
2. Στην έμμεση δράση τους μέσω ενεργοποίησης των μικροοργανισμών στην ριζόσφαιρα με αποτέλεσμα αυξημένο μικροβιακό μεταβολισμό τέτοιων οργανικών ρύπων

Φυτική Απορρύπανση PCBs - Άμεση

Εργαστηριακές καλλιέργειες του φυτού *Solanum nigrum* μεταβόλιζαν σημαντικές ποσότητες διαφόρων PCBs



Η απομόνωση και ταυτοποίηση πλέον βακτηριακών γονιδίων που ελέγχουν τον καταβολισμό των PCBs ανοίγει νέους ορίζοντες για την γενετική ενσωμάτωση των καταβολικών γονιδίων σε φυτά ώστε αυτά να διασπούν πλέον εξίσου αποτελεσματικά τα PCBs

Φυτική Απορρύπανση Πετρελαιοειδών - Έμμεση

Συγκεκριμένα φυτά έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται σε εδάφη ρυπασμένα με απόβλητα πετρελαίου αλλά παράλληλα διαμορφώνουν βέλτιστες συνθήκες για μικροβιακή ανάπτυξη στην ριζόσφαιρα (ριζικά εκκρίματα, οξυγόνο)

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν την ύπαρξη αυξημένου αριθμού γονιδίων που σχετίζονται με τον καταβολισμό PAHs (ndoB, alkB, xylE) στην ριζόσφαιρα φυτών σε σχέση με αντίστοιχα εδάφη στα οποία δεν καλλιεργούνταν φυτά

***Πλεονεκτήματα –
Μειονεκτήματα
Φυτικής Απορρύπανσης***

Μειονεκτήματα Φυτικής Απορρύπανσης

- Ο ρύπος πρέπει να βρίσκεται εντός της ριζόσφαιρας
- Αργή μέθοδος σε σύγκριση με τις μηχανικές – συμβατικές μεθόδους απορρύπανσης
- Απαιτείται μεγάλη έκταση εφαρμογής ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν συνήθεις αγροτικές πρακτικές
- Τα φυτά υπερ-συσσωρευτές μετάλλων παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα στην εφαρμογή τους όπως: συσσώρευση ενός μόνο μετάλλου, αργή ανάπτυξη και παραγωγή μικρής φυτικής μάζας, μη ύπαρξη δεδομένων για την διαχείριση και καλλιέργεια φυτοσυσσωρευτών

Πλεονεκτήματα Φυτικής Απορρύπανσης

- Χαμηλό κόστος
- Απλή στην εφαρμογή και στην συντήρηση
- Παραγωγή, ως τελικό προϊόν, φυτικής μάζας με υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα που μπορεί να ανακυκλωθεί
- Εφαρμογή σε ευρύ φάσμα τοξικών μετάλλων και ραδιονουκλεϊδίων
- Ελάχιστη διατάραξη της ισορροπίας του περιβάλλοντος
- Περιορισμός δευτερογενών αερίων ή υγρών αποβλήτων που χρήζουν νέας επεξεργασίας
- Αποδοχή από την κοινή γνώμη

Κόστος Απορρύπανσης

- Κόστος απορρύπανσης για έδαφος με πτητικά, υδατοδιαλυτά ρυπαντικά 10-100 \$ / m³ εδάφους
- Κόστος απορρύπανσης για ρυπαντικά που απαιτούν θερμική επεξεργασία σε χαμηλή θερμοκρασία 60-300 \$ / m³ εδάφους
- Κόστος απορρύπανσης με ειδική επεξεργασία ταφής ή θερμική επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες 200-270 \$ / m³ εδάφους
- Κόστος απορρύπανσης εδάφους με καύση 100 \$ / m³ εδάφους
- Κόστος απορρύπανσης εδάφους από ραδιενεργές ουσίες 1000-3000 \$ / m³ εδάφους

Κόστος φυτικής απορρύπανσης 0.02-1 \$ m³ εδάφους