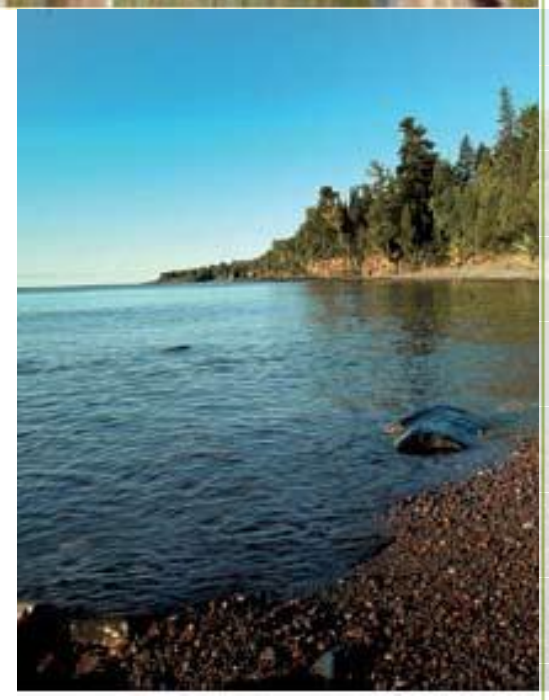
١٤٣٥هـ

٥٢٣ عمب (تلوث التربة)



د. عبدالله بن سليمان الفراج

قسم علوم التربة

كلية علوم الأغذية والزراعة

برنامج ماجستير علوم بيئية

جامعة الملك سعود

عمادة الدراسات العليا

المعالجة الحيوية Phytoremediation:

المعالجة الحيوية Phytoremediation

المعالجة الحيوية عبارة عن تقنية يُستخدم فيها عدد من النباتات[1] لتحلل أو استخلاص أو احتواء أو تقليل حركة الملوثات سواءً في التربة أو الماء، أي تنظيف المواقع الملوثة. وقد ازداد الاهتمام مؤخراً بالمعالجة الحيوية. ومن ذلك أن وكالة حماية البيئة الأمريكية USEPA تعمل على:

١. حماية صحة الإنسان والبيئة من المخاطر المصاحبة لمواقع وعمليات التخلص من المخلفات.

٢. تشجيع تطوير تقنيات المعالجة الحيوية لإعادة معالجة تلك المواقع.

Phyto= plant and remedation= correct

بدأ استخدام مصطلح المعالجة الحيوية عام ١٩٩١م. ويمكن تصنيف الجهود البحثية إلى اكتشاف وتقييم ميكانيكيات المعالجة الحيوية.

تطبيقات المعالجة الحيوية:

أولاً: Degradation:

تساعد النباتات في تفكيك وتحلل الملوثات في منطقة تأثير الجذور Rhizosphere. ومثاله بعض الملوثات الهيدروكربونية مثل Trinitrotoluene (TNT), Total petroleum hydrocarbons (TPH), Pentachlorophenol (PCP). ويمكن أن يكون التحلل داخل النبات، حيث تعمل بعض النباتات على امتصاص بعض الملوثات، ومن ثم تحويلها لصور غير سامة عند دخولها في علميات الأيض. ومثال ذلك تحلل مادة Trichloroethylene (TCE) في أشجار خشب الحور poplar.

ثانياً: الاستخلاص Extraction:

الاستخلاص الحيوي Phytoextraction:

يعرف بأنه امتصاص النباتات للملوثات بواسطة الجذور ومن ثم انتقالها خلال النبات. فبعض النباتات تعمل على مراكمة الملوثات في الأفرع الخضرية والأوراق، ومن ثم يمكن حصدها، مما يمكن من إزالة الملوثات من الموقع المراد معالجته وتركيزها في كتلة وحجم صغير جداً مقارنة بالموقع الملوث، مما يسهل التعامل معه.

Rhizofiltration:

تماثل طريقة الاستخلاص الحيوي حيث تعتمد على تقنية تركيز الملوثات. وتختلف بكونها تعتمد على ميكانيكية المراكمة في الجذور، وتكون الزراعة مائية، مما يعني مناسبة تلك الطريقة لمعالجة المياه الملوثة.

---

[1] لا تقتصر التقنية الحيوية على استخدام النباتات فقط، ولكنها الأكثر استخداماً.

Volatilization:

انتقال الملوثات سواءً من التربة أو المياه خلال النباتات إلى الغلاف الجوي. وما زال تقييم تلك الميكانيكية من حيث الخطورة يحتاج إلى دراسات أكثر. ومن تطبيقاته التخلص من الزئبق، حيث أن صور الزئبق المنتقلة إلى الهواء عبر النبات أقل خطورة من صوره في التربة.

ثالثاً: منع وإيقاف الحركة Containment and Immobilization:

تعتمد على إدمصاص الملوثات إلى التربة أو جعلها في صور غير ميسرة أو غير متحركة.

١. تعمل بعض النباتات على تركيز العناصر الثقيلة في الجذور، وبالرغم من عدم إمكانية الإزالة من موقع التلوث، إلى أن تلك الميكانيكية تقلل المخاطر البيئية والصحية لها.
٢. يمكن تقليل المخاطر بواسطة تحويل الملوثات إلى صور غير خطرة أو إلى صور غير ميسرة.
٣. Hydraulic control: تعتمد الميكانيكية على استخدام النباتات لزيادة البخر نتح من الموقع، فبعض النباتات تستهلك كميات كبيرة من المياه، وتمتد جذورها لمسافات أبعد.
٤. Vegetative cover: تعتمد على تقليل تسرب الماء، وينصح به في المناطق الجافة وشبه الجافة، وما زالت تحتاج إلى تقييم في بقية الأنظمة المناخية بشكل عام. ولا ينصح به إذا وُجِدَت ملوثات غازية، فمثلاً بعض مواقع التخلص من النفايات landfill تتطلب جمع وتحكم بالغازات المنطلقة منها.

محددات المعالجة الحيوية:

تنحو بعض من الأبحاث العلمية والتقارير الإعلامية وملاك المواقع الملوثة وعدد من مناصري البيئة لتفضيل المعالجة الحيوية لكونها أرخص وأنظف مقارنة ببقية أنواع المعالجة الأخرى. وبالرغم من ذلك توجد العديد من المحددات لاستخدام المعالجة الحيوية.

١. النظام الجذري:

تتطلب المعالجة الحيوية اتصال مباشر بين الملوثات والنظام الجذري للنبات، سواءً بتمدد الجذور للمناطق الملوثة، أو بتحرك الوسط الملوث باتجاه منطقة النظام الجذري. يبين كل من جدول ٢،٢ وشكل ٢،٢ العلاقة بين عمق الجذور النشطة ونوع النبات وظروف التربة والمناخ.

Table 2-2. Root Depth for Selected Phytoremediation Plants

Plant	Maximum Root Depth	Target Contaminants
Indian mustard	To 12 inches	Metals
Grasses	To 48 inches	Organics
Poplar trees	To 15 feet	Metals, organics, chlorinated solvents

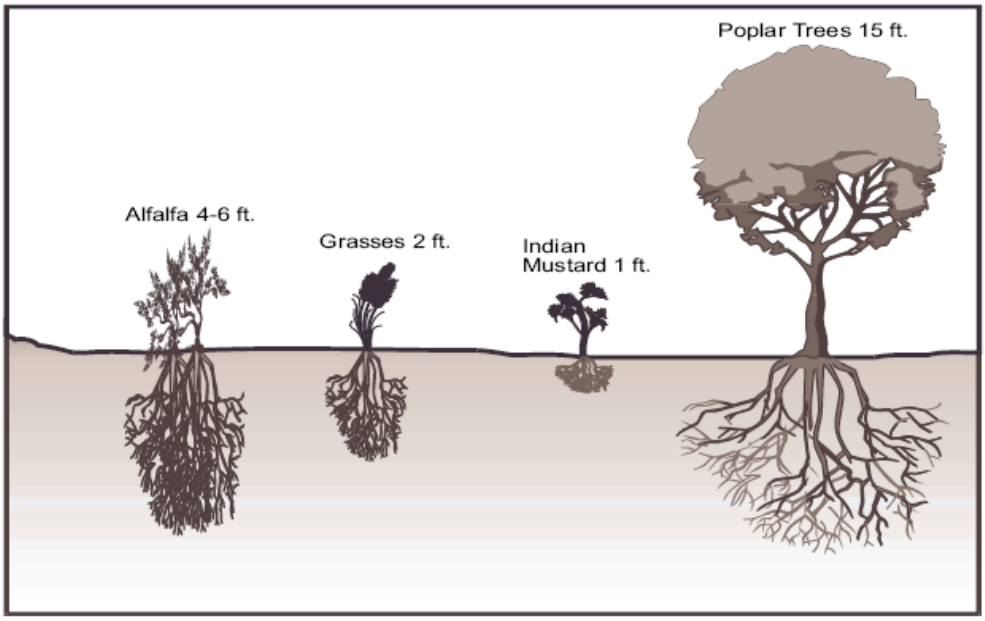


Figure 2-2. Example root depths.

٢. معدل النمو:

استخدام المعالجة الحيوية يحتاج وقت أطول مقارنة بالطرق التقليدية، فبينما تستغرق الأولى سنوات، تستغرق الطرق الأخرى أسابيع إلى أشهر. لذا لا بد من أخذ ذلك في الاعتبار.

٣. تركيز الملوثات:

قد تناسب المعالجة الحيوية مستويات التلوث الخفيفة والمتوسطة، بينما مستويات التلوث المرتفعة قد تؤدي إلى منع نمو النباتات ومن ثم عدم إمكانية المعالجة الحيوية.

٤. تأثيرات الغطاء الخضري الملوث:

وصول العناصر الثقيلة إلى الكتلة الحيوية تمثل خطورة. فنبات تباع الشمس تستخلص Ce and Sr (Cesium and Strontium) من الماء السطحي مما يجعلها خطرة كمواد مشعة. بالرغم من أن بعض صور المعالجة الحيوية تشمل مراكمة العناصر الثقيلة ويتطلب تداول مواد نباتية مشبعة بالعناصر الثقيلة، إلا أن أغلب النباتات لا تراكم كميات معنوية من الملوثات العضوية. وبينما تحتاج النباتات المراكمة للعناصر الثقيلة لأن تُحصد ومن ثم إعادة تدويرها أو جعلها في صورة يسهل التخلص منها، فأغلب النباتات المستغلة في المعالجة الحيوية لا تتطلب معالجة أو تخلص خاص.

يمثل الغطاء النباتي بداية السلسلة الغذائية، لذا فيجب الانتباه عند المعالجة الحيوية، ومع ذلك فحتى المناطق الغير مزروعة، قد تؤثر على السلسلة الغذائية عن طريق كائنات التربة الحية مثل اليرقات والقوارض. مما يحتم التعرف على أين تكون مراكمة الملوثات سواءً في البذور أو الثمار أو الأوراق والتي تمثل خطورة، بينما تكون المراكمة في السيقان أو الجذور أقل خطورة على انتقال الملوثات للسلسلة الغذائية.

اعتبارات تقنية:

يوجد عدد من العوامل يجب اعتبارها قبل اتخاذ قرار المعالجة الحيوية لمنطقة ما ملوثة بملوث ما:

١. وجود دراسات معملية على النباتات والملوثات تثبت إمكانية استخدامها في معالجة تلك الملوثات.

٢. معرفة ما إذا كانت النباتات تعمل على تحلل وتفكك الملوثات أو احتوائها فقط.

٣. معرفة الوقت الذي سوف تستغرقه عملية المعالجة الحيوية.

٤. لا بد من وجود بدائل متوفرة إذا ما لم تنجح المعالجة الحيوية.

٥. المراقبة لفاعلية المعالجة الحيوية، وكذلك سلوك الملوثات والنبات والتربة أثناء وبعد المعالجة.

تطبيقات تسبق المعالجة الحيوية:

تعتبر المعالجة الحيوية حديثة نسبياً، وليس لها تاريخ طويل من التطبيقات. ويمثل جدول ٣،٢ مواقع مُولَت المعالجة الحيوية لها ضمن مشاريع ذات موازنات ضخمة، حيث يبين الجدول أنواع المعالجة الحيوية المقرة سواءً للتربة أو الماء الأرضي.

Table 2-3. Phytoremediation at Superfund Sites

Site Name, State	Date Planted	Plant	Contaminant/Matrix
Carswell Site, TX	Spring 1996	Eastern cottonwood tree	TCE/groundwater at 4-12 feet
Aberdeen Proving Grounds, MD	Spring 1996	Hybrid poplar trees	TCE/groundwater
Edward Sears Site, NJ	Fall 1996	Hybrid poplar trees	TCE/groundwater at 8 feet
Iowa Army Ammunition Depot, IA	Spring 1997	Wetland and terrestrial plants	TNT/soil and pond water
Fort Wainwright, AK	Spring 1997	Felt leaf willow	Pesticides/soil and groundwater
Kaufman & Minteer, NJ	Spring 1997	Hybrid poplar trees	PCE/groundwater
Calhoun Park, SC	Fall 1998	Local landscaping plants	PAH/groundwater at 1-4 feet
Solvent Recovery Systems of New England, CT	Spring 1998	Hybrid poplar trees	Mixed solvents/groundwater
Twin Cities Army Ammunition Plant, MN	Spring 1998	Corn, Indian mustard	Metals/soil
Bofors-Nobel, MI	Planting scheduled	Various trees and wetland plants	Residual sludge in waste lagoons
Del Monte, HI	Spring 1998	Koa haole	Pesticides/soil and groundwater
INEEL, ID	Spring 1999	Kochia, willow	Cesium, mercury in soil

الاعتبارات الاقتصادية:

فيما يلي اعتبارات مهمة يجب الاعتناء بها عند التفكير بالمعالجة الحيوية. ومع اختلاف ذلك من نبات لآخر ومن بيئة لأخرى، فقد ذكر David Glass (1988) وغيره أن المعالجة الحيوية أقل تكلفة من الطرق الأخرى بـ ٥٠-٨٠%. ويبين جدول ٤،٢ بعض الأمثلة على ذلك.

Design costs:	Operating costs:
Site characterization	Maintenance
Work plan and report preparation	Irrigation water
Treatability and pilot testing	Fertilizer
Installation costs	pH control

Site preparation	Chelating agent
Facilities removal	Drainage water disposal
Debris removal	Pesticides
Utility line removal/relocation	Fencing/pest control
Soil preparation	Replanting
Physical modification: tilling	Monitoring
Chelating agents	Soil nutrients
pH control	Soil pH
Drainage	Soil water
Infrastructure	Plant nutrient status
Irrigation system	Plant contaminant status roots, shoots, stems,
Fencing	leaves)
Planting	Tree sap flow monitoring
Seeds, plants	Air monitoring (leaves,
Labor	branches, whole tree, area)
Protection	Weather monitoring

Table 2-4. Example Cost Comparisons

Problem	Phytoremediation Application	Cost ($ thousand)	Conventional Treatment	Cost ($ thousand)	Projected Savings
Lead in soil, 1 acre[a]	Extraction, harvest disposal	$150-250	Excavate and landfill	$500	50-65%
Solvents in groundwater, 2.5 acres[b]	Degradation and hydraulic control	$200 install and initial maintenance	Pump and treat	$700 annual running cost	50% cost saving by third year
TPH in soil, 1 acre[c]	In situ degradation	$50-100	Excavate and landfill incinerate	$500	80%

[a] Phytotech estimate for Magic Marker site (Blaylock et al. 1997).
[b] PRP estimate for Solvent Recovery Systems of New England site.
[c] PERF estimate (Drake 1997)

تكاليف الاستخلاص الحيوي Phytoextraction:

تكلف معالجة ١٢ أيكر ملوثة بالرصاص بواسطة الإزالة ١٢ مليون دولار، بينما تكلف ٦,٣ مليون دولار بواسطة غسيل التربة، و ٢٠٠ ألف دولار المعالجة الحيوية بالاستخلاص. كما ذكر آخر أن تكلفة المعالجة الحيوية لأرض ١,٢أيكر بعمق ٢٠ بوصة ملوثة بعنصري الكادميوم والزنك والسيزيوم ١٣٧ (^{137}Cs) ثلث تكلفة الغسيل. كما أوضح آخرون (Salt et al. 1995) أن ٦٠-١٠٠ ألف تكلفة المعالجة الحيوية لأيكر بعمق ٢٠ بوصة، ذات قوام طميي رملي، مقارنة بـ ٤٠٠ ألف دولار كحد أدنى لإزالة التربة ومن ثم تخزينها في موقع خاص.

تبلغ تكلفة إزالة بعض العناصر المشعة من الماء بواسطة دوار الشمس **٢-٦ دولار**/ألف جالون ماء. كما تكلف المعالجة الحيوية بواسطة Phytostabilization ٢٠٠-١٠٠٠٠ دولار/هكتار (٠,٠٢-١ دولار م$^{-3}$ تربة، وعمق جذور ١م).

تقويم تقنية المعالجة الحيوية:

الاستخلاص الحيوي Phytoextraction:

تناسب هذه الطريقة بصورة أفضل العناصر الثقيلة. وتستخدم في معالجة الترب الملوثة أكثر من معالجة المياه الملوثة. ومن ميزاتها إمكانية الاستفادة من الكتلة الحيوية للنباتات المراكمة للملوثات مصدراً للها، فمراكمة السلينيوم بواسطة بعض النباتات يجعلها مناسبة لتغذية الحيوانات. ومن عيوبها: ١) بطء نمو النباتات المراكمة للعناصر الثقيلة مع صغر الكتلة الحيوية وعدم تعمق النظام الجذري، ٢) لزوم معالجة الكتلة الحيوية، ٣) تأثير العناصر الثقيلة السام، ٤) الاختلاف ما بين القدرة الحقيقية لمراكمة العناصر الثقيلة في الحقل عنه في الظروف المعملية.

Phytoextraction Coefficient	Metal
58	Cr^{6+}
52	Cd^{2+}
31	Ni^{2+}
7	Cu^{2+}
1.7	Pb^{2+}
0.1	Cr^{3+}
17	Zn^{2+}

يتميز نبات Indian mustard بكتلة حيوية كبيرة، ويستطيع مراكمة الـ Pb, Cr (VI), Cd, Cu, Ni, Zn, ^{90}Sr, B, and Se. كما أنها ذات قدرة لنقل الرصاص إلى الأفرع، فتراكم >١،٨%. وبشكل عام تعتبر الذرة والـ sorghum والبرسيم الحجازي أكثر فعالية من النباتات العالية المراكمة، كما أنها أقدر على التخلص من كمية أكبر من العناصر الثقيلة لأنها أسرع نمواً وذات كتلة حيوية أكبر. ومع ذلك لا زال الأمر يحتاج إلى دراسات أكثر. هناك حاجة ماسة لمنع وصول الحيوانات وخاصة الماشية لتلك المناطق المعاد معالجتها بواسطة نباتات ذات قدرة على استخلاص العناصر الثقيلة.

Number of Taxonomic Groups of Hyperaccumulators

Metal		Metal	
Mn	8	Ni	>300
Pb	5	Co	26
Cd	1	Cu	24
Zn	18		

Rhizofiltration[٢]:

ما تنتجه الجذور قد يؤدي إلى ترسيب بعض العناصر، كما يحدث امتصاص لها داخل النبات ومن ثم إزالتها فيزيائية مع النبات. تستخدم لمعالجة المياه السطحية أو الماء الأرضي أو مياه الصرف. وتناسب

[٢] ذُكِرَ في التقرير أن التكلفة لإزالة ملوث Radionuclides من الماء بواسطة دوار الشمس تقارب ٢-٦ دولار لكل ١٠٠٠ جالون ماء.

حيث التركيز المنخفض أو المرتفع. ولا تناسب التربة أو الرواسب الملوثة. ولحدوثه في منطقة الجذور، لذا فلا بد للماء أن يتحرك اتجاه الجذور. كما أنها تحتاج معاملات من حيث ضبط الـ pH وإزالة العوالق. وتعتبر النباتات الأرضية Terrestrial plants مناسبة لتلك التقنية، حيث تمتاز بكتلة حيوية كبيرة ونظام جذري طويل وسريع النمو، ويفضل أن تستخدم البذور بدلاً من الشتلات، لعدم حاجتها للضوء والعناصر الغذائية لما يقارب أسبوعين.

تباع الشمس كان أكثر فعالية في إزالة اليورانيوم من Indian mustard. كما أن معامل التراكم في جذور دوار الشمس لليورانيوم كان أعلى بكثير من أفرعه. وفي منطقة Chernobyl من أوكرانيا، استطاع دوار الشمس النامي لمدة ٤–٨ أسابيع إزالة ^{90}Sr and ^{137}Cs.

امتصاص جذور Indian mustard لبعض العناصر الثقيلة خلال ٢٤ ساعة:

العنصر	Accumulation coefficient	ملجم لتر$^{-1}$
Cd	١٣٤	٢
Pb	٥٦٣	٢
Cu	٤٩٠	٦
Zn	١٣١	١٠٠
Cr^{6+}	١٧٩	٤
*U	>٩٥%	٥٦
*U	حتى ٦٣ جم لتر$^{-1}$ **	٦٠٠
*Cs	حتى ٣ جم لتر$^{-1}$	٢٠٠
*Sr	حتى ٣٥ جم لتر$^{-1}$	٢٠٠

*Sunflower; ** One hour, then to 10 g L^{-1} after 48 h.

Table 3-1. Phytoremediation Overview

Mechanism	Process Goal	Media	Contaminants	Plants	Status
Phytoextraction	Contaminant extraction and capture	Soil, sediment, sludges	Metals: Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn; Radionuclides: ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{239}Pu, $^{238,234}U$	Indian mustard, pennycress, alyssum sunflowers, hybrid poplars	Laboratory, pilot, and field applications
Rhizofiltration	Contaminant extraction and capture	Groundwater, surface water	Metals, radionuclides	Sunflowers, Indian mustard, water hyacinth	Laboratory and pilot-scale
Phytostabilization	Contaminant containment	Soil, sediment, sludges	As, Cd, Cr, Cu, Hs, Pb, Zn	Indian mustard, hybrid poplars, grasses	Field application
Rhizodegradation	Contaminant destruction	Soil, sediment, sludges, groundwater,	Organic compounds (TPH, PAHs, pesticides chlorinated solvents, PCBs)	Red mulberry, grasses, hybrid poplar, cattail, rice	Field application
Phytodegradation	Contaminant destruction	Soil, sediment, sludges, groundwater surface water	Organic compounds, chlorinated solvents, phenols, herbicides, munitions	Algae, stonewort, hybrid poplar, black willow, bald cypress	Field demonstration
Phytovolatilization	Contaminant extraction from media and release to air	Groundwater, soil, sediment, sludges	Chlorinated solvents, some inorganics (Se, Hg, and As)	Poplars, alfalfa black locust, Indian mustard	Laboratory and field application
Hydraulic control (plume control)	Contaminant degradation or containment	Groundwater, surface water	Water-soluble organics and inorganics	Hybrid poplar, cottonwood, willow	Field demonstration
Vegetative cover (evapotranspiration cover)	Contaminant containment, erosion control	Soil, sludge, sediments	Organic and inorganic compounds	Poplars, grasses	Field application
Riparian corridors (non-point source control)	Contaminant destruction	Surface water, groundwater	Water-soluble organics and inorganics	Poplars	Field application

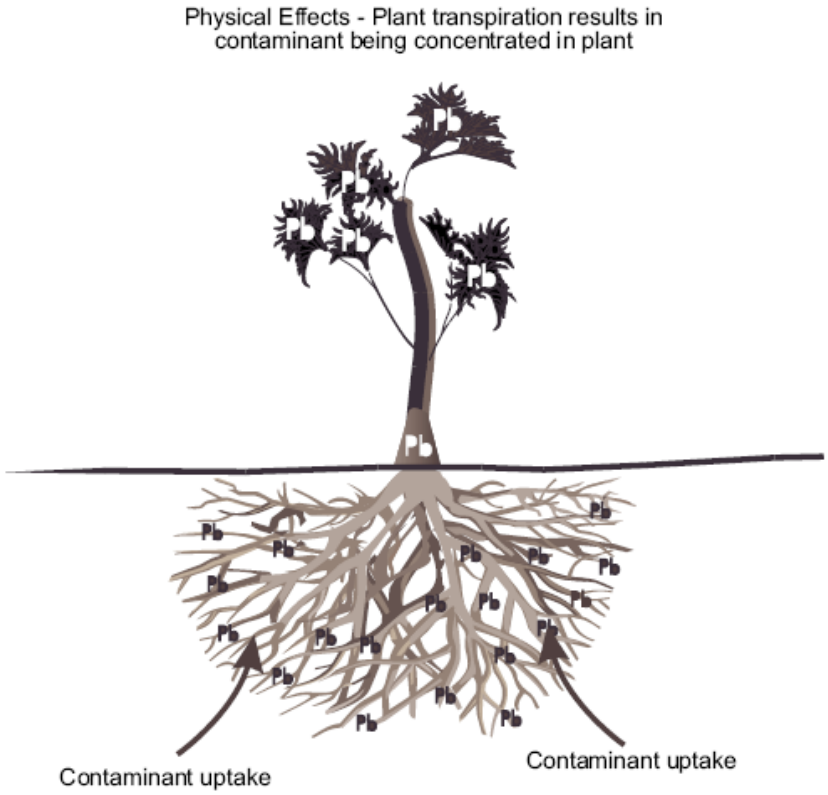


Figure 3-1. Phytoextraction.

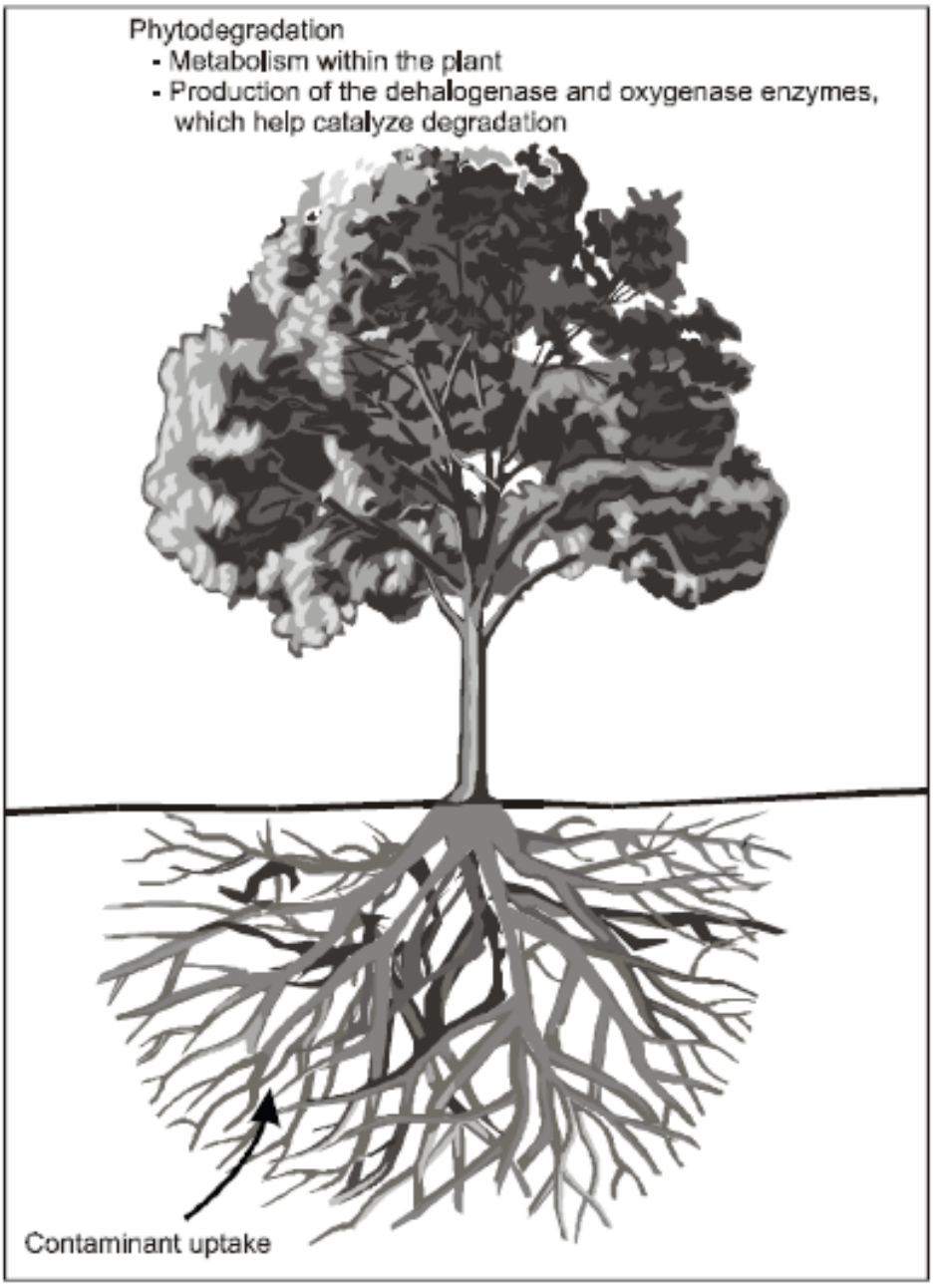


Figure 3-3. Phytodegradation.

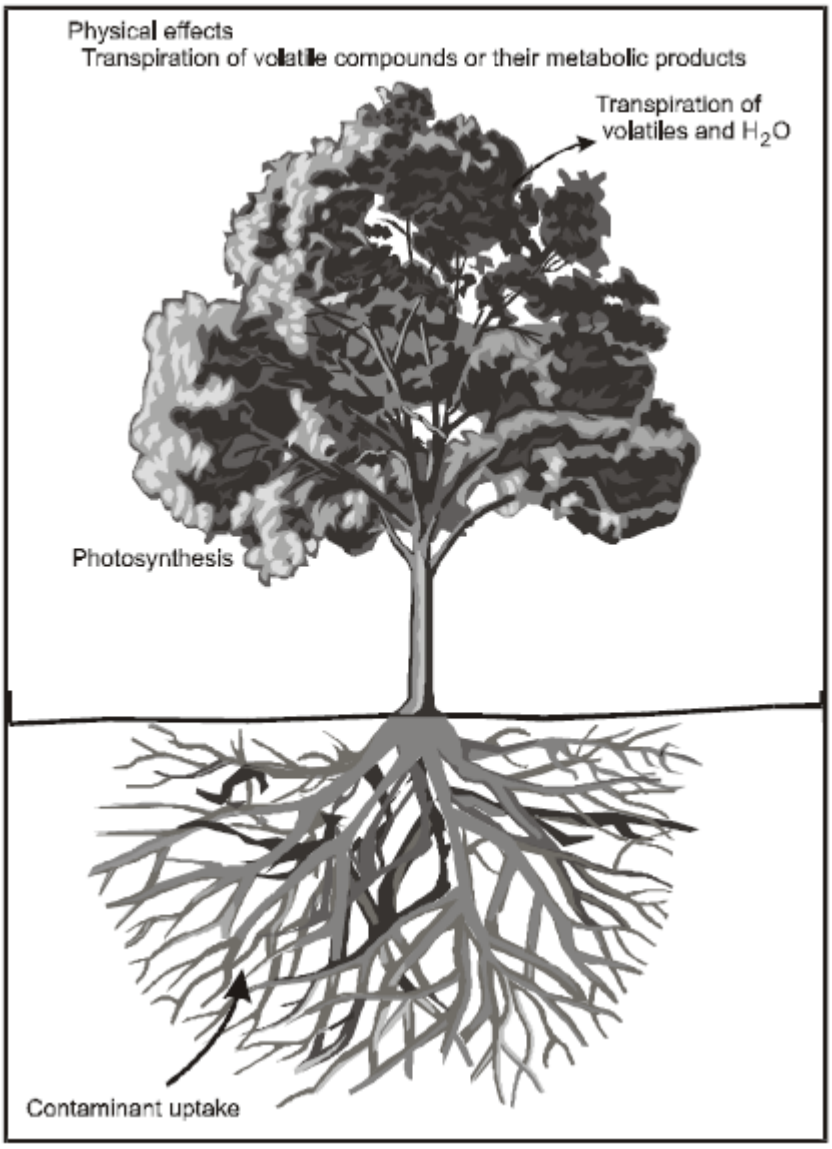


Figure 3-4. Phytovolatilization.

Phytostabilization (التثبيت الحيوي):

تعتمد تلك الميكانيكية على تحويل الملوثات إلى صور غير متحركة سواءً بإدمصاصها على الجذور أو مراكمتها داخل الجذور أو الترسيب لها في منطقة الجذور. كما تعتمد أيضاً على منع هجرة الملوثات بواسطة التعرية سواءً بالرياح أو المياه أو الغسيل. عملية التثبيت الحيوي يمكن تغير ذوبانية وحركة العناصر الثقيلة، ويمكن أن تؤثر في مدى ارتباطها بالمركبات العضوية. كما يمكن أن يغير النبات صورة العنصر الذائبة إلى صورة مؤكسدة غير ذائبة. لذا فالميكانيكية التي يمكن أن تحدث هي: ١) الإدمصاص، ٢) الترسيب، ٣) تكوين المعقدات، ٤) metal valence reduction (EPA 1997a).

ما تتميز به منطقة الجذور سواءً من الناحية الحيوية أو الكيميائية يؤثر في بيئة التربة أو كيمياء الملوثات. فحموضة التربة تتغير بواسطة نواتج الجذور وتنفسها. ويمكن أن تُستخدم في معالجة التربة والرواسب ومخلفات الصرف الصحي. لم تُجرب مع الملوثات العضوية.

استطاع نبات Indian mustard (*Brassica juncea*) اختزال الكروم السداسي إلى ثلاثي. كما استطاعت بعض الحشائش grasses النامية في مناطق التعدين من تثبيت النحاس وكذلك الرصاص والزنك. أما الزئبق فيعتبر أساسياً في مثل تلك التقنية، وإن كانت مازالت تحتاج إلى مزيد من الدراسة.

بشكل عام تحتاج عملية التثبيت الحيوي لنباتات مقاومة لوجود العناصر الثقيلة. وتعتبر مناسبة للترب الثقيلة والغنية بالمادة العضوية. قلل *Brassica juncea* ٩٨% العناصر الثقيلة في الغسيل. وتعتبر جامعتي كانسس ومونتانا رائدتين في هذا المجال. وتبلغ التكلفة ٢٠٠-١٠٠٠٠ دولار هكتار$^{-١}$ (٠،٠٢-١،٠دولار م$^{-٣}$ تربة)، لجذور متعمقة ١م.

مزايا التثبيت الحيوي:

١. لا تحتاج إلى إزالة التربة.
٢. التكلفة قليلة.
٣. لا تنتج كتلة حيوية تحتاج معالجة.

عيوب التثبيت الحيوي:

١. بقاء الملوثات في مكانها، مما يعني استمرارية رعاية الغطاء النباتي وصيانة التربة لمنع تحرر الملوثات.
٢. الحاجة للتسميد المستمر.
٣. لا بد من تجنب امتصاص الملوثات من قبل النباتات وانتقالها للأفرع.
٤. المراقبة الدائمة لمنطقة الجذور حتى تبقى الملوثات دائماً في حالة تثبيت.

Salt, D.E., M. Blaylock, P.B.A. Nada Kumar, V. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet, and I. Raskin. 1995. Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment using Plants. Biotechnol. 13:468-474.

Rhizodegradation:

تعتمد على تكسير الملوثات العضوية في التربة بتأثير النشاط الميكروبي المتأثر بنشاط منطقة الجذور. حيث تزيد نواتج الجذور من نشاط وأعداد الكائنات الحية الدقيقة مما يزيد من تحلل وتفكك الملوثات العضوية في التربة. كما أن نواتج الجذور تزيد من المساحة السطحية. كما تعمل الجذور على زيادة التهوية ورطوبة التربة.

مزايا:

١. التخلص من الملوثات في الموقع ذاته.
٢. انتقال الملوثات للنبات ومن ثم الهواء في بعض الأحيان.
٣. إمكانية معدنة الملوثات (أي تحويلها لصورة معدنية).
٤. منخفضة التكاليف.

عيوب:

١. محدودية عمق الجذور.
٢. الاختلاف في التفكيك ما بين منطقة وأخرى في التربة، حيث تكون منطقة الريزوزسفير هي الأعلى مقارنة بغيرها.
٣. إمكانية امتصاص الملوثات وعدم تمييزه عن عمليات التفكيك.
٤. الحاجة للتسميد وعمليات الخدمة الأخرى.
٥. المادة العضوية الناتجة عن النبات قد تُستخدم كمصدر للكربون عوضاً عن الملوثات العضوية، مما يؤدي إلى نقص التحلل الحيوي للملوثات.

استُخدِمَت هذه التقنية في التخلص من TPH (Total petroleum hydrocarbon) وكذلك BTEX (Benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) وبعض المبيدات مثل: Atrazine, metolachlor, trifluralin herbicides, 2,4-D herbicide. وما زالت التكلفة لتلك التقنية معقدة وتحتاج لدارسة أكثر.

Anderson, T.A., and J.R. Coats (eds.). 1994. Bioremediation Through Rhizosphere Technology, ACS Symposium Series, Volume 563. American Chemical Society, Washington, DC. 249 pp.

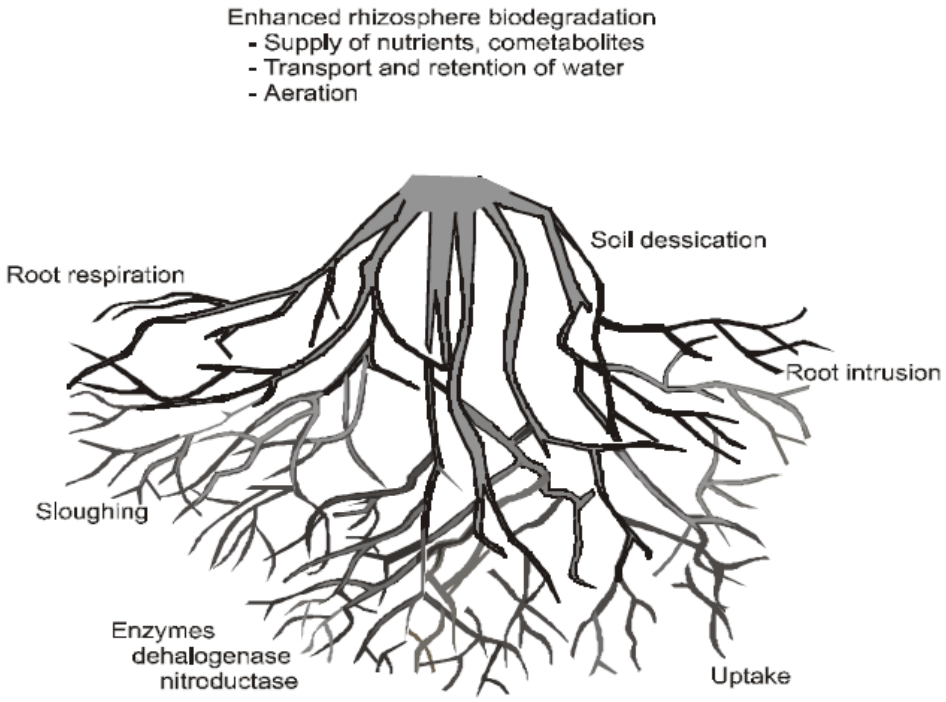


Figure 3-2. Rhizodegradation.

Phytodegradation:

تعتمد على تكسير الملوثات الممتصة بواسطة النباتات خلال عمليات الأيض أو التكسير خارج النبات مع تحفيز التكسير بواسطة الأنزيمات وغيرها من نواتج النباتات. وفي دراسة، حُصِرَ أكثر من ٧٠ مركباً عضوياً، امتصت بواسطة ٨٨ نوعاً نباتياً. ويعتمد امتصاص الملوثات على مدى ذوبانيتها وكونها محبة للماء وكذلك قطبيتها. فمحبة الماء المتوسطة (3.0 >log kow > 0.5) يسهل امتصاصها وانتقالها خلال النبات. والملوثات سهلة الذوبان لا يمكن إدمصاصها على الجذور أو انتقالها خلال النبات. أما محبة الماء يمكن ارتباطها لأسطح الجذور ولكن لا يمكن انتقالها داخل النبات. وأخيراً، المركبات الغير قطبية مع وزن جزيئي <٥٠٠، سوف تُدمص على أسطح الجذور، بينما المركبات القطبية سوف تُمتَص وتنتقل داخل النبات.

يمكن تكسير TCE إلى trichloroehanol, trichloroacetic acid and dichloroacetic acid بواسطة أشجار Poplar. وكذلك بعض المبيدات مثل Atrazine. كما قل تركيز TNT في التربة من ١٢٨ إلى ١٠ ملجم كجم$^{-1}$.

Phytovolatilization:

تعتمد على امتصاص وانتقال الملوثات خلال النبات ثم إلى الجو مع التفكيك لتلك الملوثات. وتناسب في الأصل مع الماء، ولكن يمكن استخدامها مع التربة أو الرواسب أو مخلفات الصرف الصحي. تستخدم مع الملوثات العضوية، فخلال سنتين، أُزِيلَ ٩٧% من TCE بتركيز ٥٠ ملجم كجم$^{-1}$ في الماء بواسطة بعض أنواع الـ poplars المهجنة. كما وُجِدَ إمكانية تحويل Se, Hg and As إلى مركبات طيارة.

Banuelos, G.S., H.A. Ajwa, N. Terry, and S. Downey. 1997a. Abstract: Phytoremediation of Selenium-Lade Effluent. Fourth International in Situ and On-Site Bioremediation Symposium, April 28- May 1, 1997, New Orleans, LA. 3:303.

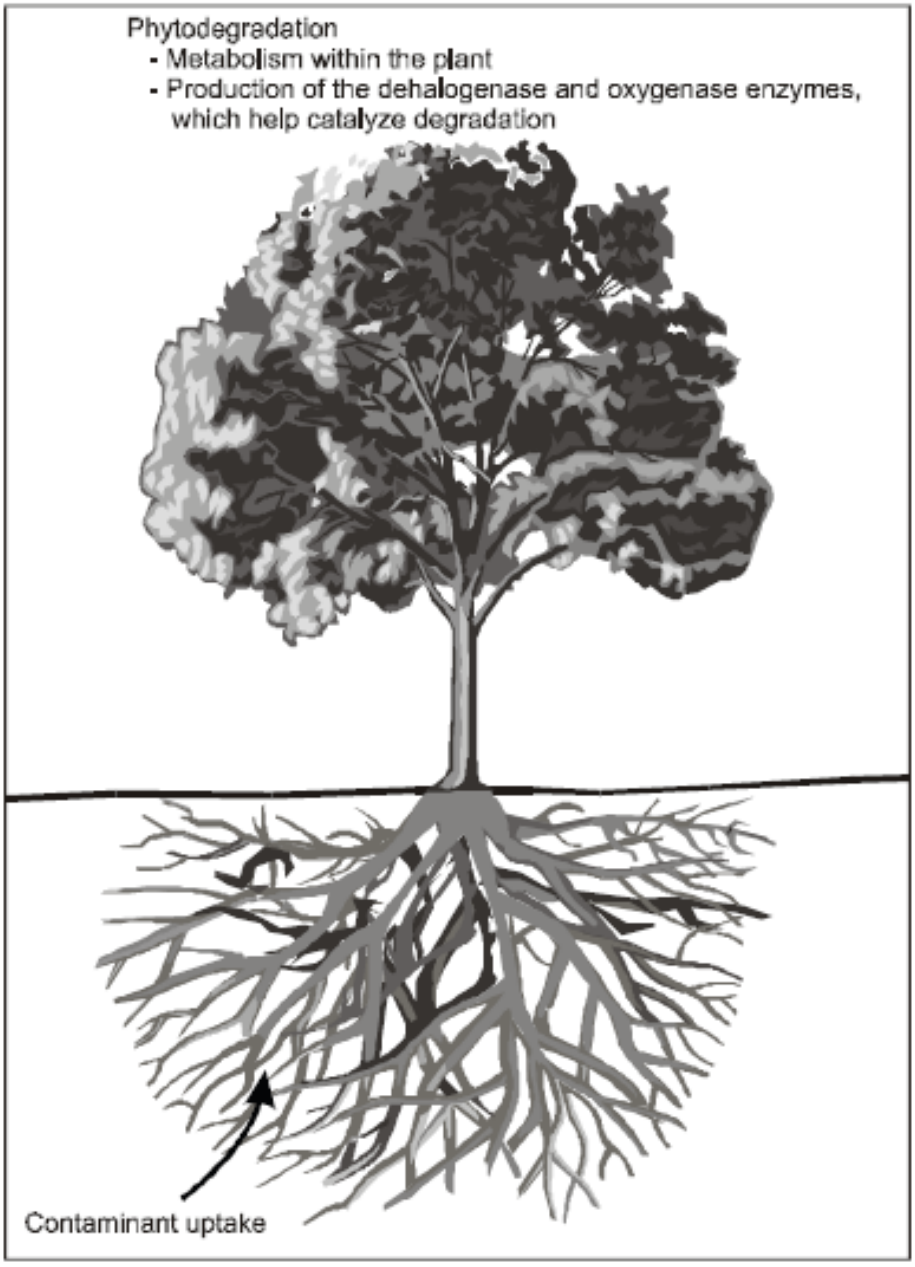


Figure 3-3. Phytodegradation.

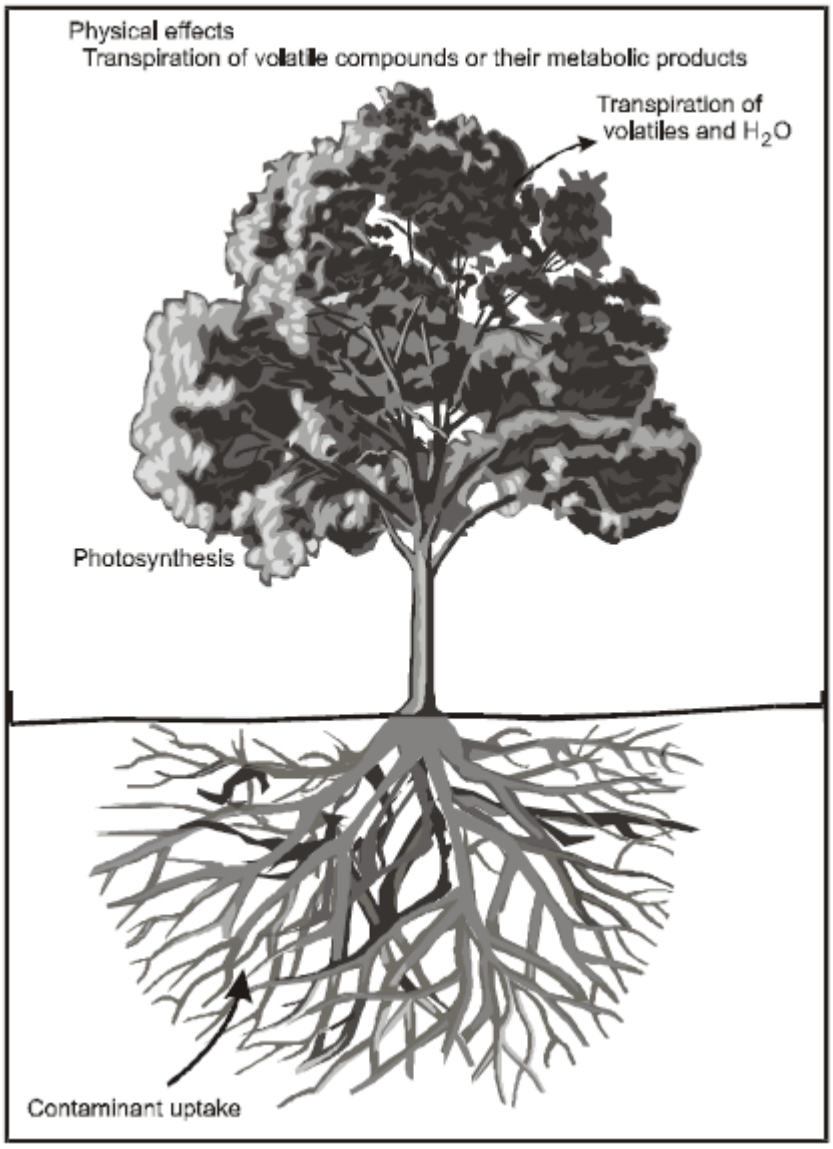


Figure 3-4. Phytovolatilization.

:Hydraulic Control

Gatliff, E.G. 1994. Vegetative Remediation Process offers Advantages Over Traditional Pump-andTreat Technologies. Remed. Summer. 4(3):343-352.

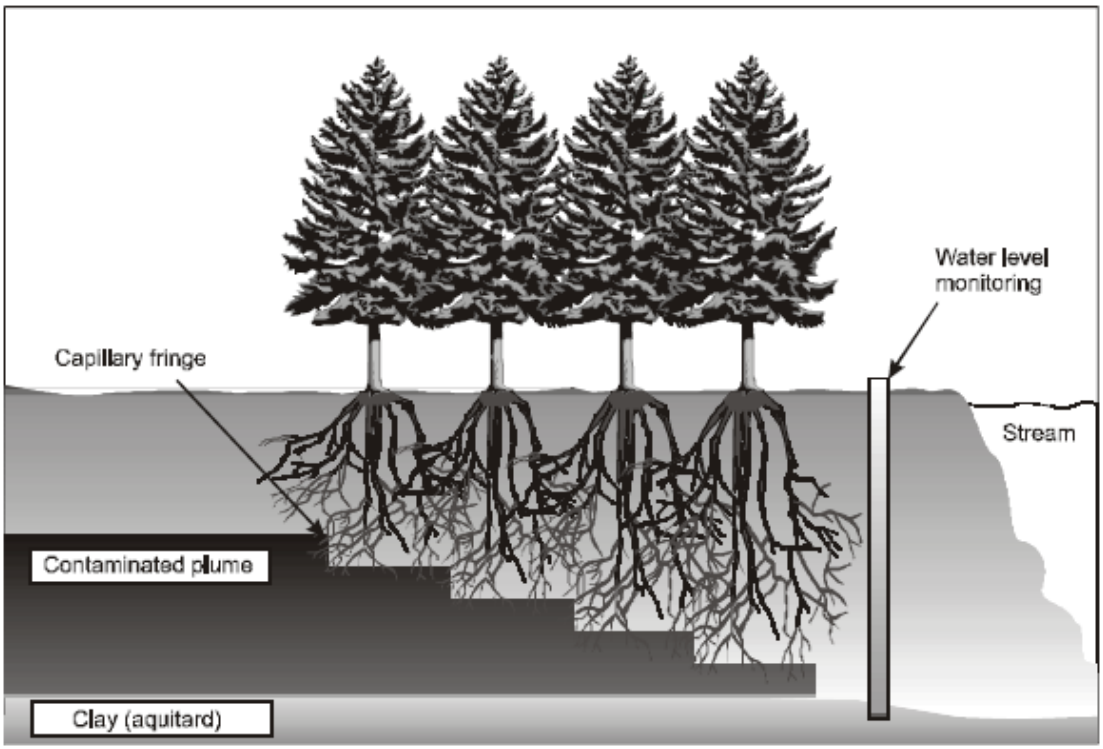


Figure 3-5. Hydraulic control of contaminated plume.

:Vegetative cover systems

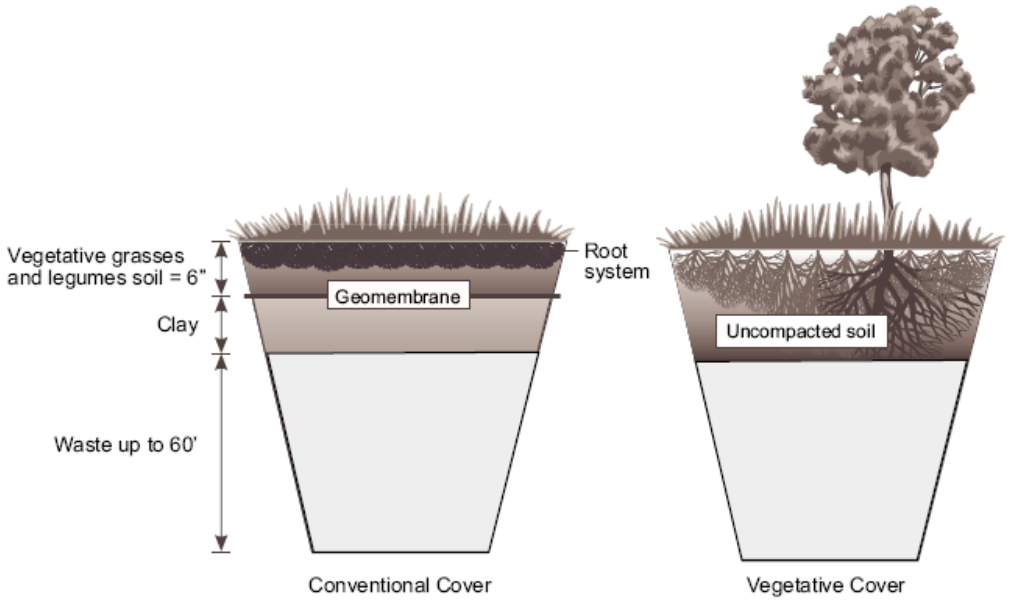


Figure 3-6. Illustration of an Evapotranspiration (ET) cover.

Table 4-1. Phytoremediation Technologies Applicable to Different Contaminant Types[1,2]

Technology	Phytoextraction		Rhizofiltration	Phytostabilization	Rhizodegradation	Phytodegradation		Phytovolatilization	
Media	Soil	Water	Water	Soil	Soil	Soil	Water	Soil	Water
Chlorinated solvents	T				F	G	F	T	T
Metals[3]	F	F	F	F				T (Hg)	
Metalloids	T	F (Se)		T				G	F (Se)
Munitions					G	G	F		
Nonmetals	T								
Nutrients			F[5]		G		F/F		
PAHs					F				
PCBs					T				
PCP				G	F				
Pesticides					F	F		T	
Petroleum hydrocarbons	T				F	F	F	T	
Radionuclides[4]	G	F	F	G					
Surfactants					T				

[1]The applicability of a particular method of phytoremediation to each contaminant type has been judged by the current state or stage of the application.
This is indicated in the table by the following designations:
T - The application is at the theoretical stage.
G - The application has been researched in the greenhouse or laboratory.
F - The application has been researched using field plots or has been applied in full-scale field systems.
[2]All contaminants can be controlled using vegetative covers. The vegetative cover, riparian corridors, buffer strips, and hydraulic control are not included in the table because they can be considered combinations of the other phytoremediation technologies.
[3]Reeves and Brooks 1983; Baker 1995, Salt et al. 1995; Nanda Kumar et al. 1995; Cornish et al. 1995.
[4]Salt et al. 1995; Nanda Kumar et al. 1995; Cornish et al. 1995.
[5]In constructed wetlands.

Table 5-1. Summary of Phytoremediation Technologies and Method of Contaminant Control

Method	Destruction	Extraction/Uptake	Containment
Phytoextraction (concentration)		√	
Rhizofiltration		√	
Phytostabilization		√	
Rhizodegradation	√		
Phytodegradation	√		
Phytovolatilization		√	
Plume control			
Vegetative cover	√[a]		√[b]
Riparian corridors	√	√	√

[a] Phytoremediation cover.
[b] Evapotranspiration cover .

Table 5-3. Information Needed for a Pilot Treatability Study

- Identification of contaminant(s)
- Level (concentration) of contaminant(s)
- pH
- Average monthly temperature, plus expected maximum and minimum temperatures
- Soil nutrient levels (P, K, N) and organic matter levels
- Average monthly rainfall
- Grade on site
- Aesthetic considerations (proximity to commercial or residential properties or recreational areas)
- Daily illumination
- Average relative humidity
- Wind patterns (prevailing direction and velocity)
- Presence of growth-suppressing contaminants

Table 5-4. Summary of Monitoring Parameters

Monitoring Parameter	Reason for Monitoring
Climatic data	
•Temperature	•Maintenance requirements (irrigation)
•Precipitation	•Determine water balance and evapotranspiration rates
•Relative humidity	
•Solar radiation	
•Wind speed and direction	
Plants	
•Visual characteristics (viability, signs of stress, damage from insects or animals, growth, leaf mass, etc.)	•Maintenance (plant replacement, fertilizer, pesticide application, etc.)
•Tissue composition (roots, shoots, stems, leaves, etc.)	•Quantify contaminants and byproducts
•Transpiration gases	•Quantify and/or predict system operation
•Transpiration rate	
•Root density	
Soil	
•Geochemical parameters (pH, nutrient concentrations, water content, oxygen content, etc.)	•Optimize vegetative, root, or microbial growth •Determine water balance and evapotranspiration rates
•Microbial populations	•Quantify contaminants and byproducts
•Contaminant and breakdown product levels	•Quantify and/or predict system operation
Groundwater	
•Aquifer information (direction and rate of flow, depth to groundwater, specific yield, etc.)	•Quantify contaminants and byproducts •Quantify and/or predict system operation
•Contaminant and breakdown product levels	

مصطلحات:

EPA: Enviromental Protection Agency.
MCL: Maximum Contaminant Level.
ORD: US EPA Office of Research and Development.
OSWER: US EPA Office of Solid Waste and Emergency Response.
RTDF: Remediation Technologies Development Forum.
TNT: Trinitrotoluene.
TPH: Total Peteroleum Hydrocarbons.
TSCA: Toxic Substances Control Act.
VOC: Volatile Organic Compounds.