

农药污染土壤的植物修复技术研究进展

沙净 王建中 (西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

摘要 系统地阐述了植物修复农药污染土壤的机理, 回顾了近年来国内外学术界对植物修复的研究成果及应用, 并指出了植物修复技术中的不足和今后的发展方向。

关键词 农药; 土壤污染; 植物修复

中图分类号 S154 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)06-02509-03

Research Progress in the Phytoremediation Technology for the Soil Polluted by Agrochemical

SHA Jing et al (College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract At present the soil polluted by agrochemical in China is becoming more and more serious. And the phytoremediation is a useful and effective way to resolve the problem with strengths of economical and friendly to environment. In the paper the theory of phytoremediation to the soil polluted by agrochemical was systematically defined and the achievement of research and application in those years at home and abroad was reviewed. And the weaknesses of phytoremediation was analysed and the direction of this technology in the future was pointed out.

Key words Agrochemicals; Soil Pollution; Phytoremediation

农药污染已成为我国范围最广、危害最大的一种有机污染, 因此, 对农药污染土壤的治理也日益迫切。自1983年美国科学家 Channy 首次提出利用植物修复技术清除污染物的设想, 此技术便以其经济有效、不破坏土壤和河流生态环境、不引起二次污染等优点引起了公众和科学界的广泛关注, 成为环境污染治理研究领域中的一个前沿性课题。

1 我国土壤农药污染现状及危害

1.1 土壤农药污染的现状 中国是一个农业大国, 农药施用量居世界前列, 且农药已成为现代农业发展的必要物质保障, 但长期、大量、不合理地施用农药也对土壤环境造成了严重污染。目前, 我国每年施用农药量达50~60万t, 其中70%~80%直接进入环境^[1], 农药有效利用率仅为20%~30%, 全国至少有1300~1600万hm²耕地受到农药污染, 对生活、生产活动产生越来越多的直接或间接危害。

1.2 土壤农药污染的危害

1.2.1 对植物的危害。植物在接触某些农药后, 其生理、生化代谢功能受到干扰, 正常的生长发育过程受到影响, 如叶片、果实出现斑点、黄化、失绿、卷叶、落叶、落果及枯萎等^[2]。植物还会从土壤中吸收农药在体内残留, 导致农产品污染超标, 并通过食物链造成牲畜的慢性中毒, 最终影响人体健康。

1.2.2 对动物的危害。农药长期污染土壤环境, 不仅使土壤害虫抗药性不断增强, 也使有益于农作物的微生物、昆虫、鸟类及大量害虫的天敌遭受毒害。据调查, 过去用稀释2000倍的敌百虫可杀灭80%~90%菜青虫, 而现在稀释500倍才能起到杀死害虫的作用^[3]。一些杀虫剂对蚯蚓有较强的杀伤力, 蚯蚓数量的减少势必影响土壤团粒结构的形成, 阻碍植物的生长。

1.2.3 对环境的危害。由于农药有效利用率较低, 喷施农药时, 附着在作物上的粉剂不超过10%, 液剂常不超过30%, 约5%~30%的农药微粒和蒸汽飘浮于空气中, 40%~60%药剂降落到地面残留于土壤中, 通过径流、入渗污染地表水与地下水^[2]。农药污染已成为一种潜在的次生污染源污染

大气、水体等。

2 植物修复农药污染土壤的机理

植物修复(phytoremediation)是利用植物来转移、容纳或转化环境污染物, 以达到清除污染、修复或治理的目的^[4]。植物修复利用植被进行原位处理, 主要通过以下3种机制降解去除土壤中的污染物和沉积物。

2.1 植物对农药的直接吸收和降解 植物对农药的吸收很大程度上受化合物的化学特性、环境条件及植物种类等影响, 植物修复通常对表层土壤最有效。植物对位于浅层土壤的中度憎水有机物(辛醇-水分配系数的对数lgk_{ow}=0.5~3.0)如BTEX、氯代溶剂、短链脂肪族化合物等有很高的去除效率。憎水有机物(lgk_{ow}>3.0)和植物根表面结合的十分紧密, 致使它们在植物体内不能转移, 水溶性物质(lgk_{ow}<0.5)不会充分吸着到根上, 往往迅速通过植物膜转移^[5]。如除草剂(terbutylazine lgk_{ow}=3.06)修复实验中, 大麦和小麦都只能从沙质土壤中吸收3%的部分^[6]。许多植物对有机农药有直接吸收的能力, 一旦有机污染物被吸收, 就可通过木质化作用在新的植物结构中储藏它们及其残片, 或是在植物生长代谢活动中发生不同程度的转化或降解, 变成对植物无害的中间产物储存在植物体内; 有的则被完全降解并最终矿化成水和二氧化碳; 有些则通过植物的挥发作用去除污染物。

植物对农药的吸收需要有发达的根系, 较高的根/茎能提高植物的吸收性能, 且对多数植物来说, 根系累积污染物的能力大于茎叶和籽实, 农药在植物体内的分布顺序为根>茎>叶>果实。同时, 选择具有发达根系的植物还能满足对亚表层土壤污染的修复。Li等^[7]研究发现, 黑麦草能吸收杀虫剂氟乐灵, 并在植株体内将其代谢掉。相反, 杀虫剂林丹在黑麦草植株体内很少被代谢, 在体内形成残留物。一些研究表明, 小麦和大豆的植物细胞能部分同化除草剂2,4-D和DDT等农药^[8], 玉米、小麦、大麦、水稻、绿豆、烟草等农作物对莠去津、禾草敌等有机农药具有良好的吸收效果^[9]。Conger等^[10]发现, 黑柳、北美鹅掌楸、落羽杉、黑桦及栎属植物等都能有效降解除草剂灭草松。此外, 一些野生植物和藻类对某些有机农药同样具有显著的吸收作用。在加入0.909 ng/L的甲霜灵和0.242 ng/L西玛津的营养液中培养香蒲7 d

作者简介 沙净(1982-), 女, 内蒙古额尔古纳人, 硕士研究生, 研究方向: 水污染处理。

收稿日期 2007-07-19

后,被吸收的甲霜灵和西玛津分别可达34%和65%^[11]。Hrman等^[12]研究了黑藻对莠去津、林丹和氯丹的吸收动态,这几种化合物在黑藻体内达成吸收-释放平衡所需时间分别为1~2、24、144 h,其富集系数分别为9.62、38.15、1 060.95。

不同植物对农药的吸收与富集能力有很大的差异,同一植物对不同农药的吸收与富集能力也不同。同时,污染物的浓度也影响植物吸收与富集作用的发挥,浓度太低会限制植物对污染物的吸收,降低植物的修复效果,浓度过高又会毒害植物。

2.2 植物根系分泌物和酶对农药的去除 植物根系可分泌一些物质到土壤中,这些物质包括酶及一些糖、醇、蛋白质、有机酸等。植物根系释放到土壤中的酶可直接降解有关化合物,且降解速度非常快,致使有机污染物从土壤中的解吸和转移成为限速步骤^[13],植物死亡后酶释放到环境中还可继续发挥分解作用。

研究发现,某些能降解有机污染物的酶来源于植物而不是微生物。美国佐治亚州 Athens 的 EPA 实验室从淡水的沉积物中鉴定出5种酶:脱卤酶、硝酸还原酶、过氧化物酶、漆酶和胍水解酶,这些酶均来自植物。硝酸还原酶和漆酶能分解炸药废物TNT,将破碎的环状结构结合到植物材料或有机物残片中,使之成为无毒的成分;脱卤酶能将含氯有机溶剂三氯乙烯还原为氯离子、水和二氧化碳^[14]。对各种杀虫剂、除草剂等外源有机物的降解起着重要作用的植物酶主要是降解酶,常见的降解酶有水解酶类和氧化还原酶类,这些酶通过氧化、还原、脱氢等方式将农药分解成结构简单的小分子化合物。Lewis等由黄杆菌分离到一种酯酶或磷酸酯酶,可降解对硫磷,显著降低原药毒性,同时还可水解另外10余种有机磷农药;Kaufman和Kearney从假单胞菌中分离到能切断氯苯胺灵酰胺键或酯键的降解酶;Wallnofer和Bader则发现球形芽孢杆菌无细胞抽提物具有酰胺酶活性,可降解苯胺类除草剂;刘建平等和钞亚鹏等分别从甲基营养菌中分离到甲胺脱氢酶和甲胺磷降解酶,对催化农药甲胺磷降解非常有效;Bollag从节杆菌中得到一种多功能氧化酶,可降解2,4-D和3,5-二氯酚;虞云龙等将产碱菌YF-11产生的酶固定化后,不仅对氰戊菊酯有较好的净化效果,还可降解多种有机磷和拟除虫菊酯类杀虫剂^[15]。

有机农药在植物体内的脱毒过程基本是在酶的作用下进行的,这些分离到的酶确实可迅速转换底物,但植物修复还要靠整个植物体来实现。游离的酶系在低pH值、高金属浓度和细菌毒性下会被摧毁或钝化,而植物生长在土壤上,pH被中和,金属被生物吸着或螯合,酶被保护在植物体内或吸附在植物表面,不会受到损伤,从而保持其降解活性^[16]。

2.3 根际微生物的联合矿化作用 植物根系具有分泌有机质的作用,使其pH、Eh(氧化还原电位)、微生物等组成一个特殊的微生物环境——根际环境,根系分泌、根际微生物间存在着复杂的相互关系。¹⁴CO₂连续标记植物与密闭根——土壤系统研究表明,植物光合产物40%以上通过根释放到土壤,供相关的微生物群的代谢作用,包括自由生活的微生物及与植物共生的根瘤菌和菌根真菌^[17]。许多研究表明,根系分泌物会影响土壤中微生物的数量及群落组成,群落特征

也随着根系分泌物的类型而不同。土壤中由于植物根系的存在,微生物的活性和数量比无根系土壤中微生物活性和数量增加5~10倍,有的高达100倍^[18]。Nichol^[19]研究表明,植物根际微生物明显比空白土壤中多。Kozdroj等^[20]也发现,植物根系分泌物明显影响根际微生物群落结构,根系分泌物中的有机成分是引起根际新的细菌群落发展的潜在机制。Katayama等^[21]做了根际真菌降解多种有机化合物如五氯苯酚、DDT等方面的研究,证实了根际微生物对有机污染物有降解作用,其降解原因可能是植物根系分泌物刺激了微生物的活动。

在植被覆盖的土壤中,农药在根际区域发生降解的速度是最快的,植物根际的联合作用加速了有机农药的降解,根际区的土壤微生态环境也使化学农药的矿化作用增强。Sandmann等^[22]研究证明,许多植物根际区的农药降解率与根际区微生物数量呈正相关,且多种微生物联合的群落比单一群对化合物的降解具有更广的适应范围。Hsu等^[23]研究了二磷(diapadin)与对硫磷(parathion)在菜豆根系中的降解,30 d后,在根际区与非根际区土壤中,二磷降解率分别为12.9%与5.0%;对硫磷分别为17.9%与7.8%,而在灭菌土中仅为1.8%。

植物根系分泌物在增强根际微生物活性的同时,微生物的活动也促进了根系分泌物的释放,两者共同加速了根际区农药的降解。如菌根是土壤真菌菌丝与植物根系形成的共生体,菌根化植物对农药有很强的耐受能力,并能把一些有机成分转化为菌根真菌和植株的养分源,降低农药对土壤的污染程度。林先贵等^[24]研究了施用绿麦隆,二甲四氯和氟乐灵的土壤接种菌根对三叶草生长的影响,发现接种VA菌根真菌后,植株的菌根侵染率、生长量和氮、磷的吸收都显著高于不接种的对照植物。Méndez Auan A等^[25]指出,菌根真菌摩西球囊霉侵染的大豆,其生长不受杀虫剂乐果影响,施用0.5 ng/L的乐果反而增加了摩西球囊霉的孢子萌发。因此,根际生态系统的正常生态功能能有效降解各种污染物,避免污染农作物或农产品,同时也可减少土壤中污染物的向外转移,使农药的污染范围得到控制。对农作物而言,根际环境对农药污染或其他污染物的高效降解是避免作物自身遭受污染和农产品污染的第一道屏障。

3 植物修复农药污染土壤的研究成果及应用

3.1 阿特拉津污染土壤的植物修复 阿特拉津是一种人工合成的化学除草剂,可防除一年生禾本科杂草和阔叶杂草,对某些多年生杂草也有抑制作用。但阿特拉津在土壤中的残留期较长,且具有生物蓄积性,对粮食、农产品的安全及人体健康构成威胁。Kruger等^[26]研究发现,地肤草可明显吸收多年沉积的阿特拉津,使土壤中阿特拉津显著减少,降低土壤生物获取量,且其降解不受其他农药的影响。Jerald Schnoor研究发现,白杨树能降解土壤中10%~20%的阿特拉津,在沙质土壤里100%的阿特拉津会被完全分解。

3.2 莠去津污染土壤的植物修复 莠去津是一种被广泛使用的除草剂,近年研究发现,莠去津具有干扰内分泌的危害。Perkovich等^[27]研究发现,种植在含莠去津土壤上的地肤草大大加速了莠去津在根际区的矿化,36 d后其矿化率达62.1%,

而未种植土壤与灭菌土壤则分别为48.7%与4.4%。如前所述,根际菌群的存在可显著提高植物对污染物的吸收与代谢,有的代谢直接发生在根际。Caskin 等^[28]研究发现,在外部根际菌群与宿主植物松树共存时,莠去津的修复效率比单独的植物修复高3倍。但并非所有植物的根际菌群都能加速污染物的降解或转移,如牧地雀麦草引入接种菌群是通过改变根际菌群结构来提高除草剂2-氯代苯甲酸的代谢,而野黑麦引入接种菌群选择性的加强2-氯代苯甲酸的代谢却并不影响根际菌群结构^[29]。Fang 等^[30]将苏丹草、黑麦草、高牛毛草、冠毛芽草、柳枝稷5种类似植物种植于肥沃的湿土中,发现种植苏丹草的土壤异于其他4种草,与未种任何植物的土壤情况是类似的。

3.3 DDT 污染土壤的植物修复 杀虫剂 DDT 及其代谢中间产物是一类典型的持久性污染物,在环境中很难分解,已有不少植物用于其吸收和代谢研究,但多数强调根际微生物的作用。实际上,无菌植物本身也能吸收和代谢有机化合物。Lunney 等^[31]通过对小胡瓜、大牛毛草、紫花苜蓿、黑麦草和南瓜5种植物在温室内对 DDT 及其代谢产物 DDE 运输传导和修复能力的研究发现,两种葫芦科植物南瓜和小胡瓜具有较强的运输和富集能力,且嫩芽的富集能力高于根系。在用较高质量浓度 DDT 处理的土壤中,DDT 在南瓜和小胡瓜根系的富集量分别为1 519 和2 043 ng,在芽中分别为57 536 和35 277 ng。Garrison 等^[32]经过对放射线杀菌的水系统中的水生植物伊乐藻和陆地植物野葛研究发现,它们将 p,p'-DDT 和其对应物 o,p'-DDT 降解为 DDD 的半衰期为1~3 d。Gao 等^[33]进一步研究发现,无菌条件下水生植物鸚鵡毛、浮萍、伊乐藻在6 d 内可富集全部水环境中的 DDT,并能将1%~13%的 DDT 降解为 DDD 和 DDE。安凤春等^[34]用植草方法研究了受 DDT 及其主要降解产物污染土壤的植物修复,比较了早熟禾、草地早熟禾、多年生黑麦草等10种草在不同污染物质量浓度下对不同土壤的修复能力。研究发现,同一种草在不同土壤中对污染物的清除能力是不同的,不同的草在同一土壤中对污染物的清除能力也不相同。在植物修复过程中,通过植草吸收土壤中有机污染物修复受污染土壤的方法效果不佳,植草3个月后,草对 DDT 及其主要降解产物的吸收与富集仅占原施药量的0.13%~3.00%,而7.10%~71.90%的 DDT 及其主要降解产物已从土壤中消失。植草的作用可能是通过草的根部向土壤中释放酶或某些分泌物,从而激发土壤中微生物的活性,加速农药的生物降解作用。草在不同土壤中修复能力的差异,可能与不同土壤中所存微生物种类和数量差异及其活性受酶和某些分泌物影响有关,因此,选择能加强根际区生物降解作用的草品种,是利用植草修复农药污染土壤的研究热点。

4 结语

植物修复能否有效受多种因素的影响,包括与植物生长相关的气候、土壤等自然条件,污染物浓度,修复植物的特性等。另外,植物修复相比其他修复技术,清除污染物的时间较长,且往往只适合特定的一种或几种污染物的修复,受根系的限制,植物修复只能在表层或亚表层土壤进行,当污染物在土层10 m 以下时,植物的根系就无法伸展到该污染带。

研究认为,虽然植物修复还处在探索研究和初步应用阶段,但其经济有效、绿色环保、以太阳光为驱动等优点使得该技术成为非常适合我国国情的实用技术。如何寻找、筛选自然界中累积、超累积植物,如何利用现代生物技术手段培育具有多种吸收和降解机制的植物,如何耕种混合植物进行复合污染植物修复等问题仍是今后研究的重点。如利用基因工程技术来增强植物本身对农药的降解能力,提高植物修复的效率。同时,要加强根系分泌物如何调节与控制根际微生物对污染物的降解转化机理研究,重视植物修复中各种配套技术与方法的系统集成研究,深化应用基础理论的研究,并注重多学科的综合技术应用研究。土壤污染的植物修复技术需要依靠多学科的合作。要更积极地推广植物修复的商业化和实际利用,使植物修复技术真正成为一项治理农药污染土壤的优选技术。

参考文献

- [1] 胡春华,邓先珍,汪茜.土壤污染修复技术研究综述[J].湖北林业科技,2005(5):44-47.
- [2] 王敬国.农用化学物质的利用与污染控制[M].北京:北京出版社,2000:69,189-190.
- [3] 郝亚琦,王益权.土壤污染现状及修复对策[J].水土保持研究,2007,14(3):248-250.
- [4] 王校常,施卫明,曹志洪.重金属的植物修复——绿色清洁的污染治理技术[J].核农学报,2000,14(5):315-320.
- [5] 沈德中.污染环境的生物修复[M].北京:化学工业出版社,2002:316.
- [6] MATTHS M,BEHRENDT H. Dynamics of leaching, uptake, and translocation: The simulation network atmosphere plant-soil (SNAPS) [C]// TRAPP S, MC FARLANE C. Part Contamination Modelling and Simulation of Organic Chemicals Processes. Boca Raton: Lewis Pub House USA, 1995:215-243.
- [7] LI H, SHENG G, SHENG W, XU O. Uptake of trifluralin and lindane from water by Ryegrass [J]. Chemosphere, 2002, 48:335-341.
- [8] HARMS H, LANGEBAARIELS C. Standardized plant cell suspension test systems for an ecotoxicologic evaluation of the metabolic fate of xenobiotics [J]. Part Sci, 1986, 5:157-165.
- [9] RAVETON M, RAVANEL P, SERRE A M, et al. Kinetics of uptake and metabolism of atrazine in model plant systems [J]. Pestic Sci, 1997, 49:157-163.
- [10] CONGER R M, PORIER R. Phytoremediation experimentation with the herbicide bertazon [J]. Remediation, 1997, 7(2):19-37.
- [11] WILSON P C, WHITWELL T, KLAINES J. Metalaxyl and simazine toxicity to uptake by typhalatifolia [J]. Environ Contamin Toxicol, 2000, 39:282-288.
- [12] HRMAN MI, KLAINES J. Uptake and translocation of selected organic pesticides by the rooted aquatic plant hydrilla verticillata Royle [J]. Environ Sci Technol, 1992, 26:609-613.
- [13] 刘世亮, 骆永明, 丁克强. 土壤中有机污染物的植物修复研究进展[J]. 土壤, 2003, 35(3):187-192.
- [14] STEER J, A HARRIS J A. Shift in the microbial community in rhizosphere and nonrhizosphere soils during the growth of agrostis stolonifera [J]. Soil Biol Soil Chem, 2000, 32:869-878.
- [15] 权桂芝. 土壤的农药污染及修复技术[J]. 天津农业科学, 2007, 13(1):35-38.
- [16] 刘惠君, 刘维屏. 农药污染土壤的生物修复技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(2):74-80.
- [17] JIN L. What's new in the rhizosphere [J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(12):548.
- [18] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程和植物营养[J]. 土壤学报, 1992, 29(3):239-250.
- [19] NCHOL T D. Rhizosphere microbial populations in commercialization [J]. Environ Sci Technol, 1997, 31:182-186.
- [20] KOZDROJ J, ELSAS J D. Response of the bacterial community to root exudates in soil polluted with heavy metals assessed by molecular and cultural approaches [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:1405-1417.
- [21] KATAYAMA A, MAISUMURA F. Degradation of organochlorine pesticides, particularly endosulfan, by trichoderma harzianum [J]. Environ Toxicol Chem, 1993, 12:1059-1065.

高度尊重之上,在与自然的和谐平衡中进行与发展。

代内公平性原则。代内公平是指当代人在利用自然资源、满足自身利益上机会平等。代内公平性原则不仅强调了人类生存权利的平等性、人类基本需求和欲望满足的合理性,而且特别强调了人类使用、分配、保护自然环境的权利的公平性。代内公平性原则从价值目标上规定了人类在生存与发展问题上要抛弃过去那种为了个人利益和集团利益而相互争斗、相互掠夺、相互推诿、转嫁环境责任的陋习,树立“人类只有一个地球”、人地共同发展的崇高理想。

代际公平性原则。是指当代人与后代人应公平地享有地球资源与生态环境。代际公平的实质是既满足当代人的发展,又不损害后代人获得发展的能力。换言之,地球资源是有限的,地球有限资源在不同代际间要合理分配与补偿。为了子孙后代的生存与发展,当代人必须给后人留下最低限度质量的环境和最低限度数量的自然资源。

2.2 人地关系地域系统稳定模型 人地关系地域系统的稳定与否,关键在于能否解决人类无限的需求与自然有限的供给之间的矛盾,使供需达到平衡状态(图2)。

人类需求取决于社会总消费,社会总消费是人口总量和消费水准的函数。人口总量取决于人口基数与人口增长率;消费水准则取决于人口素质与消费观念。

自然环境的供给量取决于环境的承载力,环境的承载力是环境生产力、环境纳污力、灾害破坏力的函数。资源生产力与可再生资源的再生能力和不可再生资源的替代能力有关;环境纳污力取决于生态环境的完整性;灾害破坏力对环境起负作用,它取决于灾害类型与灾害频度。

从上述分析不难找出协调人地关系的对策,即在一定范

围内限制社会总消费,提高环境承载力;科学技术是第一生产力,是平衡社会总消费与环境承载力的杠杆,在协调人地关系过程中起着不可替代的作用。

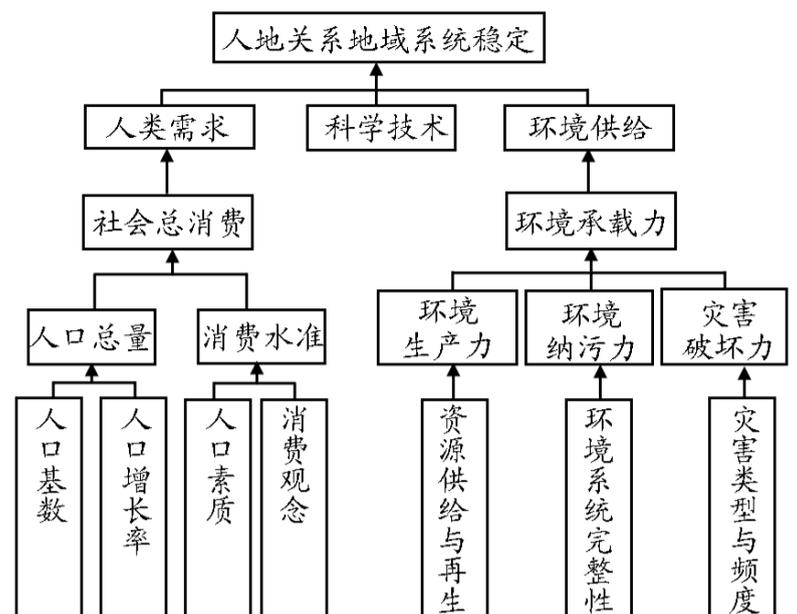


图2 人地关系地域系统协调

Fig. 2 Coordination of man-land relationship area system

3 结语

人地关系的协调是相对的,有条件的;人地矛盾是绝对的无条件的。从可持续发展的角度看,人地关系地域系统稳定与否关键在人,人类应正确处理与自然的关系,抛弃自我,善待地球,使地球的今天、明天变得更美丽。

参考文献

- [1] 付修勇. 论矛盾与和谐的人地关系[J]. 德州高专学报, 2000(3): 54.
- [2] 叶岱夫. 人地关系地域系统与可持续发展的相互作用机理[J]. 地理研究, 2001(3): 307.
- [22] SANDMANN C, LOOS M A. Enumeration of 2,4-D degrading microorganisms in soils and crop plant rhizosphere using indication media: High populations associated with sugarcane (*Saccharum officinarum*) [J]. *Ctenosphere*, 1984, 13: 1073 - 1084.
- [23] HSUTS, BARIHA R. Accelerated mineralization of tow organophosphorus insecticides in the rhizosphere [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1979, 37: 36 - 41.
- [24] 林先贵, 郝文英, 施亚琴. 三种除草剂对VA菌根真菌的侵染和植物生长的影响[J]. 环境科学学报, 1991, 11(4): 439 - 444.
- [25] MENENDZ AUAN A. Influence of the insecticide diazinon on arbuscular mycorrhizal colonization and growth in soybean plant [J]. *Int Microbiol*, 1999, 2(1): 43 - 45.
- [26] KRUGER E L, ANHALT C, SORENSON D. Atrazine degradation in pesticide contaminated soils [C] // *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*. Washington DC: American Chemical Society, 1997.
- [27] PERKOM CH B S, ANDERSON T A, KRUGER E L, et al. Enhance mineralization of ¹⁴C atrazine in kochia scoparia rhizosphere soil from a pesticide contaminated soil [J]. *Pestic Sci*, 1996, 46: 391 - 396.
- [28] GASKIN J L, FLETCHER J. The metabolism of exogenously provided atrazine by the ectomycorrhizal fungus hebeloma crustuliniforme and the host plant pinus ponderosa [J]. *ACS SymSer*, 1997, 664: 152 - 160.
- [29] SCILIANO S D, GERMDA J J. Biology analysis and fatty acid methyl ester profiles indicate that pseudonon inoculants that promote phytoremediation alter the root-associated microbial community of bromus hiberstein [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998(13), 30: 1717 - 1723.
- [30] FANG C, RADOSEM CH M, FUHMANN J J. Atrazine and pheranthrene degradation in grass rhizosphere soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(4-5): 671 - 682.
- [31] LUNNEY A I, ZEEB B A, REIMER K J. Uptake of weathered ddt in vascular plants: Potential for phytoremediation [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38: 6147 - 6154.
- [32] GARRISON A W, NZENGLUNG V A, AVANIS J K, et al. Phytoremediation of p,p'-DDT and the enantiomers of o,p'-DDT [J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34: 1663 - 1670.
- [33] GAO J, GARRISON A W, HECHAMER C, et al. Uptake and phytoremediation of o,p'-DDT and p,p'-DDT by axerically cultivated aquatic plants [J]. *J Agr Food Chem*, 2000, 48(12): 6121 - 6127.
- [34] 安凤春, 莫汉宏, 郑明辉, 等. DDT及其主要降解产物污染土壤的植物修复[J]. 环境化学, 2003, 22(1): 19 - 25.

(上接第2511页)