

土壤镉污染对不同品种杨树生长状况的影响

张东为¹, 崔建国², 戈素芬¹, 杨成超³

(1. 辽宁省水土保持研究所, 辽宁 朝阳 122000;

2. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110161; 3. 辽宁省杨树研究所, 辽宁 盖州 115200)

摘要: 采用室外盆栽方法, 以生长于辽宁省的 5 种不同杨树品种(分别为辽育 1 号、938—18、盖杨、辽育 3 号、小胡杨)为研究对象, 通过研究不同杨树品种在土壤 Cd 胁迫条件下速生杨树品种对重金属 Cd 的反应, 为 Cd 污染土壤的树木修复提供依据, 并借以推动我国污染土壤树木修复工作的开展。研究结果表明, 每一树种各处理之间的苗高、地径并没有显著差异。938—18、盖杨及小胡杨的生物量无显著差异, 辽育系列苗木的生物量明显受镉污染的影响, 低浓度的 Cd 污染刺激了苗木生长, 高浓度的 Cd 污染对苗木造成了一定程度的伤害, 抑制了苗木的生长。土壤中的 Cd 污染没有对 938—18 与小胡杨插穗生根数量造成影响。土壤中的 Cd²⁺ 在一定程度上刺激了盖杨及辽育 3 号的生根数量。

关键词: 杨树; 土壤镉污染; 生长; 影响

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)03—0059—06

中图分类号: X53, S792.11

Effect of Cd Contamination in Soil on Growth of Poplar of Different Varieties

ZHANG Dong-wei¹, CUI Jianguo², GE Sufen¹, YANG Chengchao³

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Liaoning Province, Chaoyang, Liaoning 122000, China;

2. Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China;

3. Research Institute of Poplar of Liaoning Province, Gaizhou, Liaoning 115200, China)

Abstract: Pot experiment in outdoors was conducted by comparing 5 kinds of poplar (*P. liaoyu* 1, 938—18, *P. × gaixianensis*, *P. liaoyu* 3, and "*P. simonii* × *P. euphratica*" × *P. sp.*) to search for suitable tree species which can be adopted in the Cd contaminated region. There was no significant difference between treatments for seeding height and basal diameter. Moreover, there was no significant difference between treatments for biomass of 938—18, *P. × gaixianensis*, and "*P. simonii* × *P. euphratica*" × *P. sp.* However, biomasses of *P. liaoyu* 1 and *P. liaoyu* 3 were affected significantly by Cd. At the Cd contamination level of 150 mg/kg, their biomasses were significantly decreased. At the level of 5 mg/kg, seedling's biomasses of *P. liaoyu* 1 and *P. liaoyu* 3 were the heaviest, so the lower Cd density may increase seedling's biomass and the higher Cd density may repress seedling growth. There was no influence on the amounts of roots of 938—18 and "*P. simonii* × *P. euphratica*" × *P. sp.*, but Cd²⁺ in soil may activate rooting of the rest kinds of poplar.

Keywords: poplar; Cd contamination in soil; growth; effect

20 世纪 20 年代以来, 由于工业化和城市化的发展, 金属的产量明显增加, 由此引起的土壤重金属污染越来越受到人们的广泛关注。土壤中的重金属污染物主要为 Hg, Cd, Ni, Cr, As, Se, Pb, Zn 等, 这些重金属污染物不仅使土壤肥力下降, 还使农产品质量下降, 对生态安全和食品安全都构成威胁, 危害人畜健康, 具有很大的危害性。20 世纪 50—60 年代发生于日本的骨痛病、水俣病事件就是重金属污染造成的严重后果。土壤中重金属污染源主要包括“三废”的排放、矿山的开采和冶炼、化肥和农药的施用、城市生

活垃圾的排放、污水灌溉和污泥农用等等。我国仅因采矿侵占土地面积已接近 $4.00 \times 10^4 \text{ km}^2$, 因此而废弃的土地面积速度达 $330 \text{ km}^2/\text{a}^{[1]}$, 并且矿山废弃物的排放和堆存也带来了一系列影响深远的环境问题, 对土地的侵占和环境污染也制约了当地的社会经济发展并危害到人体的健康等^[2]。

重金属污染中, 尤以 Cd 污染引起的危害最为严重。为了治理和修复被重金属污染土地, 目前人们采用的方法主要是物理和化学方面的方法, 如客土法、石灰改良法、化学淋洗法等等^[3]。但这些方法不但治

理费用昂贵,而且常常导致土壤结构破坏,土壤生物活性下降,土壤肥力退化等副作用,难以推广应用。因而寻求一种投入低,又可维持土壤肥力的植物修复法一直是众人瞩目的焦点问题。

植物修复是指以植物忍耐和富集某种或某些有机或无机污染物为基础,利用植物或植物与微生物的共生体系,清除环境中污染物的一门环境污染治理技术。与传统的化学修复、物理和工程修复等技术手段相比,它的优点是投资和维持成本低,操作简便,不易造成二次污染,具有双重经济效益。该方法在治理重金属污染的土壤方面正在受到各国的普遍重视。2001年,美国密歇根州立大学的学者在植物修复的基础上首创了树木修复(*dendroremediation*)一词,并已经被世界上一些学者所接受和采用。树木修复主要是利用一些具有富集重金属能力的木本植物对污染土壤进行植物修复,这种修复方法不仅具有一般植物修复的优点,而且还有一些独特的优点。它是真正的原位修复,能够实现污染土壤的资源化,能够产生大量的木材或生物质能源,产品不进入食物链,可以继续利用城市污水灌溉,具有绿化美化功能等。本研究以5个杨树品种作为材料,研究其在土壤镉(Cd)胁迫下的生长状况,为污染土壤的树木修复提供基础材料和物质资料。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物材料 试验用杨树1年生插穗,由辽宁省杨树研究所提供,品种分别为辽育1号(*P. liaoyu 1*), 938-18, 盖杨(*P. × gaixianensis*), 辽育3号(*P. liaoyu 3*), 小胡杨(*P. simonii × P. euphratica* × *P. sp.*)。

1.1.2 化学试剂 试验用CdCl₂为沈阳试剂一厂生产的CdCl₂·2.5H₂O,分子量为228.35。

1.1.3 供试土壤 试验用土壤取自沈阳农业大学植

物园苗圃0—20 cm表土,土壤全Cd含量为0.85 mg/kg。有效态Cd为0.084 mg/kg。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验 2005年春季采取室外盆栽的方法。试验用土自然风干后过2 mm筛,将CdCl₂溶液喷洒于土中,充分搅拌,使土壤中Cd含量为5, 10, 50, 100, 150 mg/kg,各处理浓度依次用C₁, C₂, C₃, C₄, C₅表示,对照处理用CK表示。经处理的土壤平衡2周后装入花盆,花盆直径为28 cm,高25 cm,每盆装土12 kg。杨树插穗剪成15 cm左右,经过沙藏处理后于4月末进行扦插,每盆3株,每个处理3次重复,同时设对照处理。

1.2.2 调查测量项目及其方法

(1) 土壤理化性质的测定。土壤速效磷、速效钾、有机质、全氮、全磷、pH值的测定均采用常规方法测定^[4]。

(2) 苗木生长状况调查。在苗木速生期观察苗木生长状况及受害状况,收获时测量苗高、地径、生物量,同时调查苗木在插穗上直接生出的吸收根(≥2 mm)的数量。将植物样品用自来水冲洗干净,分为地上部与地下部,地上部将茎干与叶分开,分别沥去水分后在烘箱中先用105℃下杀青30 min,然后于80℃烘箱中烘干至恒重,分别称重,计算生物量。

2 结果与分析

2.1 不同Cd处理浓度对苗高、地径的影响

经过一个生长季,各杨树品种的苗高、地径表现各不相同(表1)。经过方差分析,每一树种各处理之间的苗高、地径并没有显著差异。供试杨树品种中,盖杨生长表现最好,平均苗高及平均地径是所有品种中最大的,其中平均苗高达到了117.97 cm,平均地径达到了1 cm,而938-18在所有供试品种中生长表现不佳,平均苗高及地径最低,但数值波动范围不大,平均苗高为80.6 cm,地径平均为0.78 cm。

表1 不同杨树品种在不同镉处理浓度下的苗高和地径

处理水平	辽育1号		938-18		盖杨		辽育3号		小胡杨	
	苗高/cm	地径/cm	苗高/cm	地径/cm	苗高/cm	地径/cm	苗高/cm	地径/cm	苗高/cm	地径/cm
0	107.2	1.08	77.6	0.77	119.5	1.01	134.0	0.88	98.1	0.90
5	117.8	0.99	74.2	0.76	109.0	1.11	118.8	0.97	101.9	0.91
10	119.0	1.08	85.4	0.82	111.7	1.05	102.3	0.93	91.6	0.88
50	100.4	0.90	81.3	0.75	110.6	0.84	104.2	0.99	98.0	0.91
100	103.5	0.89	82.2	0.76	126.8	0.99	104.3	0.89	97.8	0.86
150	104.4	0.92	83.0	0.82	139.3	0.97	104.9	0.89	113.7	0.93

2.2 不同 Cd 处理浓度对苗木生物量的影响

Cd 污染对供试 5 个杨树品种的生物量影响各不相同(图 1—5), 经方差分析及最小显著差数法(LSD 法) 检验, 938—18、盖杨及小胡杨的总生物量在 5 个处理浓度与对照这 6 个水平之间无显著差异, 根系及地上部(茎、叶) 生物量 5 个处理浓度与对照这 6 个水平同样无显著差异, 地上部及地下部生物量数值波动幅度不大。

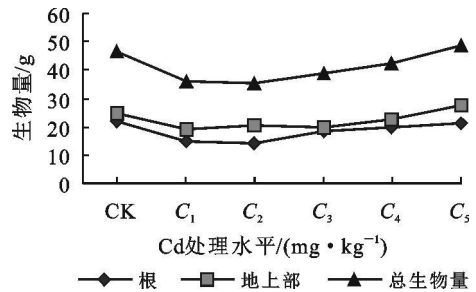


图 5 不同 Cd 处理水平小胡杨生物量图

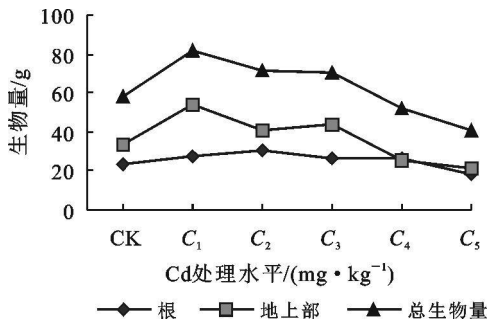


图 1 不同 Cd 处理水平辽育 1 号生物量图

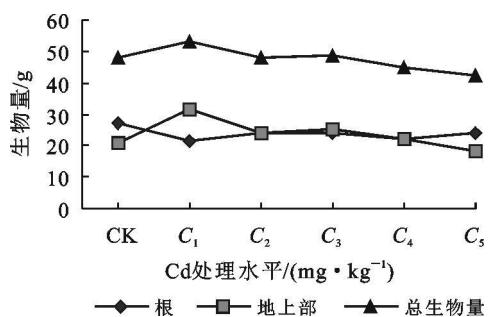


图 2 不同 Cd 处理水平 938—18 生物量

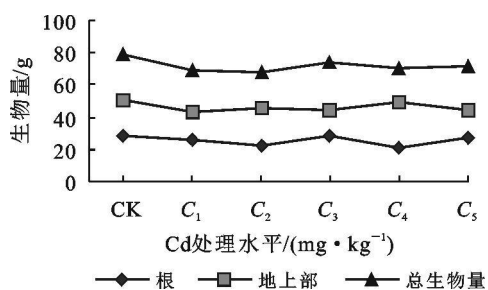


图 3 不同 Cd 处理水平盖杨生物量图

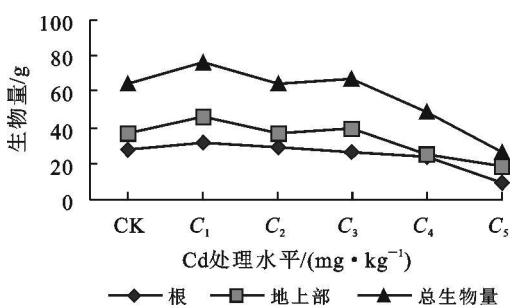


图 4 不同 Cd 处理水平辽育 3 号生物量图

辽育 1 号、938—18 及辽育 3 号这三个品种生物量基本表现出一致趋势: 先增加, 后降低, 即在土壤含镉量 $\leq 50 \text{ mg/kg}$ 时生物量与对照相比表现出增加, 并在土壤含 Cd 量为 5 mg/kg 时生物量达到最大值, 分别是对照值的 140.9%、110.8% 及 119.8%, 然后生物量逐渐减少, 但仍高于对照, 当土壤中含 Cd 量达到和超过 100 mg/kg 时, 生物量与对照相比开始下降, 并在最大浓度时生物量达到最低。辽育 1 号生物量在土壤含 Cd 量为 150 mg/kg (C_5) 时, 生物量下降的最多, 是对照的 69.6%, 仅是最大生物量 (C_1) 的 49.41%, 经 LSD 法检验(表 2), 除与 C_4 时的生物量无显著差别外, 与对照及其它处理水平均达到极显著水平; 辽育 3 号生物量在土壤含 Cd 量为 150 mg/kg 时生物量下降值最大, 仅是对照的 43.4%, 是最大生物量 (C_1) 的 36.2%, 同样除与 C_4 时的生物量无显著差别外(表 3), 与对照及其它处理水平均达到显著或极显著水平。

对这两个品种地上部及根的生物量进行方差分析及 LSD 检验表明, 地上部及根生物量间都存在显著差异, 辽育 1 号在处理水平为 C_1 时, 地上部生物量最大(表 4), 根在 C_2 处理时生物量最大, 除 C_4 与 C_5 及 C_1 与 C_3 这两组之间差异不显著外, 其余各处理之间差异显著, 有的达到极显著水平, 与总生物量 LSD 检验结果相类似, 根生物量除对照与土壤最高含 Cd 量之间差异不显著外, 其余各处理浓度均与 C_5 达到显著水平。辽育 3 号 C_5 的根生物量为 9.4 g/株 , 明显小于对照及其它处理, 仅为对照的 33.9%, 而其余各处理之间及与对照之间并无显著差异, 但数值上表现与总生物量趋势相一致, 呈现出先增大, 后减少的趋势, 对地上部生物量进行 LSD 检验(表 5), 其结果表现基本与辽育 1 号地上部生物量的结果相一致, 即 C_4 , C_5 之间无显著差异, 其余处理与 C_5 均有显著或极显著差异, 对照处理与 C_1 , C_2 , C_3 处理水平之间差异不显著, 辽育 3 号在 C_5 时之所以生物量下降幅度最大, 与根生物量明显下降有直接关系。小胡杨在 C_1 , C_2 处理时生物量比对照低, 这可能是与苗木生长

中后期遭到虫害有关,叶片有的被虫吃掉了一部分,造成生物量降低。

一般来说,即使土壤中重金属污染程度较高,但只要土壤中重金属浓度没有达到抑制植物生长的临界浓度,植物地上部生物量通常不会下降,但一旦超过这一临界浓度,植物的生长就会受到抑制,其叶色、株高等生长特性就会发生不同程度的变化,最终集中反映在植物地上部的生物量显著降低^[5]。供试 5 个品种在所有处理组合中,生长状况表现不一,938—18 及小胡杨表现出了很好的抗性,生长状况基本正常,而其余几个品种在土壤含 Cd 量达到 50 mg/kg 时,其叶片不同程度受到了伤害(表 6),而以辽育 3 号、辽育 1 号在土壤含 Cd 量达到 50 mg/kg 以上时受到的伤害最为严重,叶片受到伤害基本上表现出了

相同的症状:首先都是叶脉受到伤害,逐渐变红,沿叶脉处生出色斑,最后色斑逐渐扩大,连成片状。938—18 在土壤最高含 Cd 量时并没有表现出受害状,但生物量虽与对照相比并没有达到显著水平但也下降了,是对照的 87.2%,盖杨虽然在土壤含 Cd 量达到或超过 50 mg/kg 时也表现出了一定的受害症状,但生物量在对照和各处理水平下并没有显著差异。

黄会一等^[6]认为,有些树种地上部分的叶片并没有受害症状的出现,而植株的生物量却明显下降,说明植物本身受 Cd 的危害并不都表现在叶片症状上,而有的树种虽然体内积累的 Cd 量较大,叶片也出现退绿等被害症状,但植株长势正常,与对照植株比,生物量并未出现差异,从叶片生长状况分析,盖杨就属于后一种类型。

表 2 辽育 1 号生物量差异显著性检验 LSD 法

处理水平	平均生物量/g	$C_i - C_5$	$C_i - C_4$	$C_i - CK$	$C_i - C_3$	$C_i - C_2$
C_1	81.62	41.29**	29.96**	23.68**	11.35	9.94
C_2	71.69	31.36**	20.03**	13.74*	1.41	
C_3	70.28	29.95**	18.62**	12.33*		
CK	57.94	17.61**	6.28			
C_4	51.66	11.33				
C_5	40.33					

注: * $LSD_{0.05} = 11.43$; ** $LSD_{0.01} = 16.03$ 。

表 3 辽育 3 号生物量差异显著性检验 LSD 法

处理水平	平均生物量/g	$C_i - C_5$	$C_i - C_4$	$C_i - CK$	$C_i - C_2$	$C_i - C_3$
C_1	76.66	48.91**	27.54*	12.68	11.81	9.83
C_3	66.83	39.08**	17.71	2.85	1.98	
C_2	64.85	37.10*	15.73	0.87		
CK	63.98	36.23*	14.86			
C_4	49.12	21.37				
C_5	27.75					

注: * $LSD_{0.05} = 26.464$; ** $LSD_{0.01} = 37.103$ 。

表 4 辽育 1 号地上部生物量 LSD 检验

处理水平	平均生物量/g	$C_i - C_5$	$C_i - C_4$	$C_i - CK$	$C_i - C_2$	$C_i - C_3$
C_1	53.94	32.40**	28.57**	19.83**	13.23*	10.44
C_3	43.50	21.96**	18.13**	9.39	2.79	
C_2	40.72	19.17**	15.34*	6.60		
CK	34.11	12.57*	8.74			
C_4	25.37	3.83				
C_5	21.54					

注: * $LSD_{0.05} = 12.113$; ** $LSD_{0.01} = 16.983$ 。

表 5 辽育 3 号地上部生物量差异显著性检验 LSD 法

处理水平	平均生物量/g	$C_i - C_5$	$C_i - C_4$	$C_i - CK$	$C_i - C_3$	$C_i - C_2$
C_1	45.41	27.05**	20.53**	9.17	9.04	5.33
C_3	40.08	21.73**	15.20*	3.84	3.72	
C_2	36.37	18.01**	11.48	0.13		
CK	36.24	17.88*	11.35			
C_4	24.88	6.53				
C_5	18.36					

注: * $LSD_{0.05} = 13.632$; ** $LSD_{0.01} = 19.112$ 。

表6 各树种叶片生长状况

处理水平	辽育1号	938—18	盖杨	辽育3号	小胡杨
CK	生长正常	生长正常	生长正常	生长正常	生长正常
C ₁	生长正常	生长正常	生长正常	生长正常	生长正常
C ₂	叶片颜色及生长状况正常	叶片颜色及生长状况正常	叶片颜色及生长状况正常	叶片颜色及生长状况正常	叶片颜色及生长状况正常
C ₃	个别叶片有零星红褐色斑点, 叶脉轻微变红, 叶脉中出现色斑	生长正常	主脉基部变红, 偶见色斑	主脉变红, 脉中有色斑, 同时延主脉两侧出现色斑, 没有连成片	生长正常
C ₄	叶脉主脉发红, 支脉全部变红, 出现红褐色斑点	无明显受害状	支脉受到伤害, 出现少量色斑	叶脉受到伤害, 变红, 支脉受害较重, 延支脉两侧出现红褐色斑点, 并连成片状	生长正常
C ₅	支脉变红, 叶缘侧部支脉受害较为严重, 斑点连成片状	未见异常	叶脉变红, 延支脉出现色斑, 量少, 并连成片状	叶脉全部变红, 色斑连成片状	叶片变化不明显, 仅1株出现叶脉发红现象

2.3 不同 Cd 处理水平对插穗生根数量的影响

生产中的杨树栽培主要靠无性繁殖法来扩大种苗量, 所以插条的生根能力是一个品种繁殖能力好坏的重要标志。品种及无性系最早生根时间是受遗传基因控制的, 而各品种及无性系生根能力受遗传控制程度小, 而受环境控制程度大, 这就造成了不同品种及无性系之间生根能力不同^[7]。通过调查每一品种插穗的生根量, 可以看出 Cd 对不同品种的插穗生根的影响。插穗生根主要是由插穗根部的愈伤组织生出的侧根及根茎处生出的侧根, 插穗中间部位生出的主要是吸收根的形式。由于品种生物学特性不同, 各品种生根数量表现也不尽相同(图6), 通过方差分析, 938—18 ($F=0.243$, $\text{sig}=0.935$) 与小胡杨 ($F=0.036$, $\text{sig}=0.999$) 各处理水平间差异不显著, 说明土壤中的 Cd 污染没有对上述两个品种的插穗生根造成影响。辽育1号 ($F=5.224$, $\text{sig}=0.009$)、盖杨 ($F=3.098$, $\text{sig}=0.050$) 及辽育3号 ($F=4.170$, $\text{sig}=0.020$) 差异显著。辽育1号经过最小显著差数法检验(LSD法), 当在处理水平 C₅ 时, 插穗平均生根数量达到了31条, 明显高于对照及其它4个处理水平, 差异达到了极显著水平, 而其它4个处理及对照之间并不存在差异, 造成这种差异的原因可能是由插穗皮部生出的吸收根较多引起的, 在此处理浓度下, 插穗的皮部生产的吸收根多达平均10条, 而对照及其它处理水平生出的吸收根平均5~8条。盖杨经 LSD 法检验(表7), 对照及低浓度处理之间(CK, C₁, C₂) 的生根数量没有差异, 较高处理浓度之间也没有差异(C₃, C₄, C₅), 但较高浓度处理(C₃, C₄, C₅) 与 CK 及 C₂ 之间有差异显著。

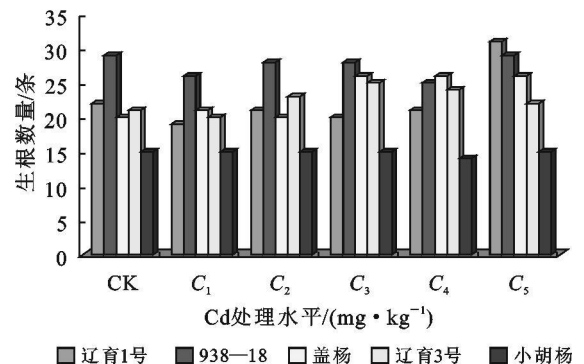


图6 不同 Cd 处理水平各树种生根数量图

从图6可以看出, C₃, C₄, C₅ 的生根数量要高于 CK, C₁, C₂。辽育3号经 LSD 法检验(表8), CK, C₁, C₃ 及 C₄ 有显著差异, 并且 CK, C₁ 与 C₃ 达到了极显著差异水平; CK, C₁, C₂, C₅ 之间无显著差异, 较高浓度处理之间(C₃, C₄, C₅) 生根数无显著差异。

3 结论

(1) 每一树种各处理之间的苗高、地茎并没有显著差异。苗木生物量是苗木生长状况的最直接描述, 938—18、盖杨及小胡杨的根系及地上部生物量在对照与5个处理水平之间及各水平之间均无显著差异, 总生物量同样无显著差异, 说明在供试土壤 Cd 污染范围内, 并没有对上述品种生物量造成太大影响, 即使盖杨叶片在较高的 Cd 胁迫下表现出了受害状, 但由于没有达到抑制其生长的临界浓度, 其生物量并没有出现显著下降的趋势; 小胡杨是杨树研究所培育的耐盐碱新品种, 其抗盐碱性突出, 可以抗 pH 值至

9.0, 抗全盐量可达 4%, 对于重金属污染同样表现出了很强的抗性。

辽育系列苗木的生物量明显受镉污染的影响, 在土壤含 Cd 量为 150 mg/kg 时, 这两个品种生物量显著下降, 与对照相比均达到了极显著水平, 其中辽育 3 号的生物量下降最大, 但是在土壤含 Cd 量为 5 mg/kg 时, 这两个树种生物量达到最大值, 这说明低浓度的 Cd 污染对辽育系列苗木的生长起到了一定的刺激作用, 而高浓度的 Cd 污染明显抑制了苗木生长, 减少了苗木生物量。

(2) 由于各品种生物学特性不同, 供试各品种生根数量表现也不尽相同。938—18 与小胡杨各处理水平间差异不显著, 说明土壤中的 Cd 污染没有对上述两个品种的插穗生根造成影响; 当处理浓度最高(150 mg/kg) 时, 辽育 1 号插穗生根数量与对照及其它 4 个处理水平之间的差异极为显著, 而其它 4 个处理及对照之间并不存在差异, 造成这种差异的原因可能是由插穗皮部生出的吸收根较多引起的。随着土壤含 Cd 量的增加, 盖杨及辽育 3 号的生根数量增加, 说明土壤中的 Cd²⁺ 刺激了上述两个品种插穗的生根。

表 7 盖杨生根数量差异显著性检验 LSD 法

处理水平	平均生根数/条	$C_i - CK$	$C_i - C_2$	$C_i - C_1$	$C_i - C_5$	$C_i - C_4$
C_3	25.67	6.33*	6.00*	5.00	0.33	0.33
C_4	25.33	6.00*	5.67*	4.67	0.00	
C_5	25.33	6.00*	5.67*	4.67		
C_1	20.67	1.33	1.00			
C_2	19.67	0.33				
CK	19.33					

注: * $LSD_{0.05} = 5.387$; * * $LSD_{0.01} = 7.552$ 。

表 8 辽育 3 号生根数量差异显著性检验 LSD 法

处理水平	平均生根数/条	$C_i - C_1$	$C_i - CK$	$C_i - C_5$	$C_i - C_2$	$C_i - C_4$
C_3	24.67	5.00* *	4.33* *	2.67	2.33	1.00
C_4	23.67	4.00*	3.33*	1.67	2.33	
C_2	22.33	2.67	2.00	0.33		
C_5	22.00	2.33	1.67			
CK	20.33	0.67				
C_1	19.67					

注: * $LSD_{0.05} = 2.875$; * * $LSD_{0.01} = 4.03$

[参 考 文 献]

- [1] 李永庚, 蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 95—100.
- [2] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究[J]. 生态科学, 2000, 19(2): 24—29.
- [3] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997(3): 72—76.
- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 中国农业出版社, 2000.
- [5] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568—2573.
- [6] 黄会一, 蒋德明, 张春兴, 等. 木本植物对土壤中镉的吸收、积累和耐性[J]. 中国环境科学, 1989, 9(5): 323—330.
- [7] 张兴芬, 孙运清, 刘毅, 等. 新品种辽育 3 号杨树生物学特性及应用技术[J]. 中国林副特产, 2005(5): 10—11.