

重金属 Cd 对一年生直立与倾斜生长杨树解剖特性的影响

戎 恭¹, 储 茵², 刘盛全^{1*}

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要: 以 30 棵一年生人工林 69 杨(*Populus deltoids* Bartr. cv. 'Lux' (I-69/55))为研究对象, 在生长季节将其中的 15 棵苗木人工倾斜 45°, 将直立生长和倾斜生长的苗木分别平均分成 5 组(每组 3 棵), 分别施加 0、5、20、50 和 100 mg·kg⁻¹ 的 Cd(NO₃)₂, 记为 C₀、C₁、C₂、C₃ 和 C₄。苗木生长 8 个月开始取样, 树干按其纵向上的高度分为顶部、中部和基部, 倾斜生长分应拉区和对应区对其解剖特性进行测定分析。结果表明: (1) 随着土壤中重金属 Cd 浓度的增加, 直立生长下的杨树的纤维长度在 C₀、C₁、C₂ 浓度下大于倾斜生长, C₃、C₄ 浓度下则小于倾斜生长; 在倾斜生长下, C₀ 与 C₄ 浓度下应拉区纤维长度小于对应区, 而 C₁、C₂、C₃ 则相反。在树干纵向分布上, 纤维长度为基部>中部>顶部。方差分析表明, 不同 Cd 浓度对纤维长度的影响显著, 不同区域上影响不显著。(2) 导管长度上, 直立生长大于倾斜生长, 应拉区的导管长度大于对应区; 纵向分布上, 在倾斜生长下导管长度为基部>中部>顶部。方差分析表明, 不同 Cd 浓度和不同区域对导管长度的影响显著。(3) 双壁厚上, C₀、C₁ 为直立生长小于倾斜生长, C₂、C₃、C₄ 则与此相反。方差分析表明, 不同 Cd 浓度对双壁厚的影响显著, 不同生长方式和高度上影响不显著。(4) 微纤丝角上, C₀、C₁、C₂ 浓度下直立生长大于倾斜生长, C₃、C₄ 浓度下则相反; 倾斜生长下的应拉区微纤丝角小于对应区。方差分析表明不同 Cd 浓度和不同区域对微纤丝角的影响显著。(5) 结晶度上, 倾斜生长下应拉区结晶度大于对应区; 在纵向分布上, 结晶度为基部>中部>顶部。方差分析表明, 不同 Cd 浓度和不同区域对结晶度的影响显著。

关键词: 69 杨; 人工倾斜; 应拉木; 重金属 Cd; 解剖特性

中图分类号: S781.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)01-0027-08

Effects of heavy metal Cd on anatomical characteristics of one-year-old upright and inclined poplars

RONG Gong¹, CHU Yin², LIU Shengquan¹

(1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: Poplar 69 (*Populus deltoids* Bartr. cv. 'Lux' (I-69/55)) was selected to study the anatomical characteristics of one-year-old upright and inclined poplars under Cd stress. Thirty seedlings were planted, among which, 15 were artificially inclined by 45°, and 15 were upright planted during the growing season. Five treatments of Cd application in the soil with 3 repetitions were set for each group, which were 0, 5, 20, 50, and 100 mg·kg⁻¹ in terms of Cd, denoted as C₀, C₁, C₂, C₃, and C₄, respectively. Poplar trunks were sampled longitudinally along the height for the top, middle and base parts after 8 months of the growth. For inclined poplar (IP), each trunk part was further sampled for the tension zone (TZ) and the opposite zone (OZ). The anatomical characteristics were measured and analyzed. The results showed that: (1) With the increase of Cd application in the soil, the fiber length of upright poplar (UP) was greater than that of IP at C₀, C₁, and C₂, but less than that of IP at C₃ and C₄. For IP, the fiber length in TZ at C₀ and C₄ was smaller than that in OZ, while it was opposite at C₁, C₂, and C₃. Longitudinally, the fiber length demonstrated an order as the base > middle > top. ANOVA showed that Cd application had a significant effect on the fiber length, but the difference was not significant between the two zones for IP. (2) The length of the vessel of UP was greater than that of IP, and that in TZ was greater than that in OZ for IP. Longitudinally, the length of the vessel of IP demonstrated an order as the base > middle > top. ANOVA showed that the length of the vessel was significantly

收稿日期: 2021-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(31770595)资助。

作者简介: 戎 恭, 博士研究生。E-mail: ronggong@ahau.edu.cn

* 通信作者: 刘盛全, 教授。E-mail: liusq@ahau.edu.cn

different among the Cd treatments, as well as between the two zones of IP. (3) The double-wall thickness of UP was less than that of IP at C₀ and C₁, while it was opposite at C₂, C₃, and C₄. ANOVA showed that Cd application had significant effects on the double-wall thickness, while the difference was not significant longitudinally along the height, nor between the two plantations. (4) The microfibril angle of UP was greater than that of IP at C₀, C₁ and C₂, while it was opposite at C₃ and C₄. The angle of the microfibrils in TZ was smaller than that in OZ for IP. ANOVA showed that the microfibril angle was significantly different among the Cd treatments, as well as between the two zones of IP. (5) The crystallinity of TZ was greater than that in OZ of IP. Longitudinally, the crystallinity demonstrated an order as the base > middle > top. ANOVA showed that crystallinity was significantly different among the Cd treatments, as well as between the two zones of IP.

Key words: poplar 69; artificial inclination; tension wood; heavy metal Cd; anatomical characteristics

重金属 Cd 通过工业过程、供暖系统、城市交通、磷肥和岩石矿化进入环境,被认为是对动植物有毒害作用最广泛的污染物之一^[1]。与有机物不同,重金属本质上是不可生物降解的,因此会在环境中积累。土壤中重金属积累对环境和人类都会构成威胁。在土壤中,重金属对土壤微生物产生毒理学效应,可能导致微生物数量的减少和活性的降低^[2]。树木修复(Dendroremediation)是一种新兴的植物修复技术^[3],发挥了树木生长迅速、生物量大、根系稳定、寿命长、耐修剪、易繁殖等多种优势,可以弥补超富集植物总量小的缺陷,可实现城市土壤重金属污染治理的可持续修复。

杨树具有适应性强、生长迅速、繁殖容易等特点,是世界上人工栽培最多的树种之一。虽然杨树重金属富集能力不如超富集植物,但它的根系深,生物量大,蒸腾速率高,具有较好的重金属固着能力,且吸着在木材细胞壁中的重金属可较长地固定,避免很快又回到环境中。从木材利用角度,重金属富集木还有助于部分木材性质的改良。杨树基因组完整,便于后期通过基因表达的调控来提高杨树重金属富集木的形成,提高木材富集重金属能力。因此,因地制宜栽培杨树等人工林树种被认为是今后最具潜力和应用前景的绿色、高效重金属污染治理技术^[4]。

应拉木是树木中非正常木材组织,通常是指阔叶材在外力作用下形成的弯曲树干或树枝试图恢复到它原来位置,从而在倾斜树干上形成的解剖和物理力学性质明显不同的木材^[5]。杨树应拉木的结构和正常木有很多不同点:在微观角度上应拉木中导管比较少,但是其整体所占体积大于正常木^[6]。在超微结构上应拉木比正常木次生细胞壁层多一个细胞壁层(即胶质层, gelatinous layer),应拉木次生细胞壁木质化程度低于正常木,而胶质层中纤维素含量高、微纤丝排列规整且角度近于零度,微纤丝束之间存在大量微空隙(10~30 nm)^[7]。这些微空

隙对于重金属离子来说,无疑是最好的吸着和富集位点。因此,应拉木在立木蒸腾作用过程中,更有利于无机盐从根部运输至树冠,也有利于对土壤中重金属的吸收。

对于杨树等树种木材富集重金属的研究,目前主要是从重金属在不同杨树品系树木根、茎、枝、叶和树皮的含量分布差异性来进行比较。如,新西兰园艺与食品研究所 Robinson 博士研究不同品系的杨树和柳树对 Cd 的耐性和富集特性,发现杨树树干对 Cd 具有较好的耐性和固着性^[8];德国哥廷根大学 Polle 博士比较了两种品系杨树对重金属 Cd 的耐受性,研究结果表明 Cd 在两种品系杨树的根部和树干富集最多^[9]。国内学者张东为等研究不同浓度 Cd (5~150 mg·kg⁻¹) 对 5 种杨树品系生长的影响^[10];何家利等研究了 6 种杨树品系对 Cd 的耐受性,发现 Cd 会使其中 4 个品系的光合作用下降,但 Cd 在杨树地上部分含量可达到超固着水平^[11]。

综上所述可以看出,尽管国内外对杨树重金属富集木木材开展了一些研究,但主要集中在土壤重金属对不同杨树生长性状的影响以及树木根、茎、叶等不同部位吸收效果测定上,而对从正常木和应拉木的比较角度去研究重金属 Cd 对杨树树干解剖特征的影响还鲜见报道。

本试验以人工林 69 杨(*Populus deltoids* cv. I-69/55)为研究对象,在相同环境和立地条件下,先在春季通过营养盆培育杨树苗木,然后施加 0、5、20、50 和 100 mg·kg⁻¹ 的重金属 Cd,再在生长旺盛时期人工控制树干使其倾斜 45°,测定分析不同 Cd 浓度对直立生长和倾斜生长这两种生长方式下微纤丝角、结晶度、纤维长度、导管长度以及双壁厚等解剖特征的影响程度,以期揭示重金属 Cd 在进入不同倾斜角度的杨树体内后对杨树材性的影响,为杨树木材材质改良和高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试土壤 试验土壤采用安徽农业大学农萃园内表层土并拌入适量的营养土, 其中自然土壤与营养土壤的比例为 1:1 (自然土壤与营养土壤各占 10.5 kg), 混合均匀后装入花盆中。测得土壤的理化性质中有机质、全氮、有效磷、速效钾和有效硫分别为 $73.104 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.822 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $133.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $346 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $80.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 微量元素中 Cd、Zn 和 Cu 分别为 0.1447 、 22.68 和 $37.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 培育苗木及处理 试验采用 69 杨 (*Populus deltoids* Bartr. cv. 'Lux' (I-69/55)) 扦插苗。2018 年 3 月, 从安徽农业大学农萃园中的一棵生长状态良好的 69 杨树上剪下一些 15 cm 左右的插穗备用。经一个月培养后, 选取长势均一约 20 cm 高的扦插苗 30 棵。将 30 棵扦插苗栽植在安徽农业大学农萃园阳光大棚的营养盆中。花盆直径 33 cm, 高 38 cm, 每盆装土 21.0 kg。在 7 月份通过对其中的 15 棵杨树苗人工授力使其与垂直方向倾斜 45° , 为了避免外界对苗木生长的干扰, 每根苗木用竹竿固定并用塑料

扎带捆扎住树干和竹竿, 如图 1 所示。同时配置 4 种不同浓度的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液(5、20、50 和 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)对其土壤进行表面喷洒, 记为 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 。并设置未进行重金属处理的苗木作为对照组, 记为 C_0 。同一种浓度 Cd 处理的杨树苗栽植 3 棵作为重复试验。为了使杨树生长在环境相同的生长条件下, 定期定量给杨树苗浇水和施肥。8 月初至 11 月底对直立和倾斜的杨树每月测量 1 次生长量 (树高和地径), 共 4 次, 如表 1 和表 2 所示。



(a) 直立生长 (b) 人工授力倾斜 (45°)

图 1 杨树两种培育方式

Figure 1 Poplars in two plantations

表 1 不同 Cd 处理浓度下直立生长与人工倾斜杨树的树高

Table 1 Tree height of upright and inclined poplars at different treatments of Cd application cm

处理	直立生长树高				人工倾斜生长树高			
	8 月	9 月	10 月	11 月	8 月	9 月	10 月	11 月
C_0	79.33 ± 8.16	143.33 ± 13.05	158.67 ± 9.45	161.00 ± 8.72	75.00 ± 15.13	145.33 ± 5.69	148.00 ± 6.56	149.33 ± 5.69
C_1	51.00 ± 13.45	119.67 ± 18.93	134.67 ± 11.50	136.00 ± 12.53	55.00 ± 8.66	129.67 ± 10.70	132.33 ± 12.58	133.33 ± 12.22
C_2	49.33 ± 6.11	129.33 ± 6.66	133.67 ± 11.02	134.67 ± 10.60	55.33 ± 6.51	112.67 ± 7.77	117.67 ± 12.01	118.67 ± 13.01
C_3	61.67 ± 16.80	129.67 ± 7.23	140.67 ± 10.02	141.33 ± 10.01	49.33 ± 11.02	110.33 ± 7.23	112.67 ± 5.90	114.33 ± 5.03
C_4	71.00 ± 23.26	139.00 ± 23.90	147.33 ± 30.67	148.00 ± 31.61	59.33 ± 15.37	132.67 ± 17.90	134.00 ± 17.32	134.33 ± 17.62

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$)。下同。

表 2 不同 Cd 处理浓度下直立生长与人工倾斜杨树的树径

Table 2 Basal diameter of upright and inclined poplars at different treatments of Cd application cm

处理	直立生长地径				人工倾斜生长地径			
	8 月	9 月	10 月	11 月	8 月	9 月	10 月	11 月
C_0	2.58 ± 0.11	4.47 ± 1.13	5.62 ± 0.65	6.14 ± 0.48	2.58 ± 0.28	4.26 ± 0.36	4.47 ± 0	4.89 ± 0.18
C_1	2.37 ± 0.18	3.42 ± 0.48	4.26 ± 0.18	5.72 ± 0.31	2.58 ± 0.33	4.26 ± 0.36	4.68 ± 0.48	4.99 ± 0.18
C_2	2.69 ± 0.18	4.57 ± 0.18	4.89 ± 0.18	5.72 ± 0.32	2.58 ± 0.29	3.42 ± 0.18	4.15 ± 0.54	4.57 ± 0.48
C_3	3.00 ± 0.36	3.94 ± 0.79	4.36 ± 0.65	5.20 ± 0.65	2.69 ± 0.73	3.63 ± 0.48	3.94 ± 0.36	4.26 ± 0.36
C_4	3.00 ± 0.48	3.74 ± 0.36	4.78 ± 0.83	5.72 ± 0.83	2.79 ± 0.36	3.42 ± 0.48	4.47 ± 0.31	4.78 ± 0.31

1.1.3 化学试剂 试验用 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 为天津市光复精细化工研究所生产的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 分子量为 308.47。

1.2 方法

1.2.1 试样的选取 12 月初砍伐取样, 树干按其高

度分为顶部、中部和基部 3 个部分, 另外倾斜生长下的树干以髓心为分界点, 倾斜树干上部为应拉区, 倾斜树干下部为对应区。

1.2.2 纤维长度和导管长度的测量方法 将杨树的树干的每部分用美工刀片修剪至火柴杆大小的木条,

放入试管中,用冰醋酸—双氧水($V:V=1:1$)离析液离析,然后水洗3次,观测时先混合均匀,然后取适量样品置于载玻片上,在投影显微镜上放大倍数为100倍条件下测定纤维长度和导管长度。纤维长度和导管长度随机测定30根,最后取得平均值。

1.2.3 双壁厚的测量方法 将制作的永久切片放在显微镜下拍照,拷贝出图片在Image J软件中测量细胞的腔径和直径,计算得到双壁厚。双壁厚=细胞直径-细胞腔径。每组测量30个数据,求得平均值。

1.2.4 微纤丝角的测量方法 采用XRD(X射线衍射仪)测量微纤丝角,将杨树树干去除树皮后,倾斜生长树干沿髓心劈开,上部为应拉区,下部为对应区,然后用切片直接操作最终得到30 mm×10 mm×1 mm表面光滑的长方形薄片为标准试样。在X射线衍射仪的旋转靶台上安装好样品。

测试条件:36 kV, 20 mA, 波长为1.540 56的Cu靶X射线衍射发生装置。2 θ 角度为22.2°,试样从90°到270°,共旋转180°,扫描速度16°·min⁻¹。采用0.6T法来测定微纤丝角^[12]。

1.2.5 结晶度的测量方法 采用XRD(X射线衍射仪)测量结晶度,将杨树树干以及直立生长和倾斜生长下的顶部,中部,基部试样分别磨成粉末。将其平铺在X射线衍射仪的测试板的凹槽里。

测试条件:36 kV, 20 mA, 波长为1.540 56的Cu靶X射线衍射发生装置。扫描范围2 $\theta=5^{\circ}\sim 50^{\circ}$,扫描速度为2°·min⁻¹。衍射强度在2 $\theta=22^{\circ}$ (002面)是极大值,设其积分强度为 I_u ;在2 $\theta=18^{\circ}$ 附近出现波谷,设其积分强度为 I_a ,则得到结晶度计算公

式为 $C_r=(I_u-I_a)/I_u\times 100\%$ ^[13]。

1.3 数据处理

采用Origin软件作图,采用SPSS及Excel软件对数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同Cd浓度处理下直立和倾斜杨树的纤维长度和导管长度变化规律

2.1.1 纤维长度 表3为不同Cd浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下的纤维长度。由表3中的数据可知,在直立生长中,随着土壤中重金属Cd浓度的升高,各浓度下的纤维长度均小于 C_0 ,但减少量并不与土壤中Cd的浓度呈正比;在倾斜生长中,对应区的纤维长度变化与直立生长下的保持一致,均为 C_0 浓度下的纤维长度最高。但在应拉区中则不同,在应拉区中,随着土壤中Cd浓度的升高,纤维长度先减小后增大。且在 C_1 浓度下达到最小。另外,通过LSD分析,应拉区组内各处理浓度的纤维长度之间无显著性差异。说明在倾斜生长下的应拉区中,重金属Cd浓度的高低对纤维长度影响不大。而对应区中则与此不同,说明对应区对Cd浓度的吸收能力较应拉区强。

图2为不同Cd浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下纵向分布上的纤维长度变化情况,从图中可以看出,随着土壤中重金属Cd含量的增加,直立生长和倾斜生长下的纤维长度在纵向分布上总是呈现基部>中部>顶部的趋势。即同一处理下的纤维长度随着树干高度的增加而减小。

表3 不同Cd浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下的纤维长度

Table 3 Fiber length of upright and inclined poplars at different treatments of Cd application

处理浓度	直立生长的纤维长度	倾斜生长的纤维长度	
		应拉区	对应区
C_0	611.62±27.62 ^a	604.10±60.26 ^a	612.69±51.46 ^a
C_1	578.85±50.80 ^{ab}	575.13±63.59 ^a	544.97±68.06 ^b
C_2	607.29±55.39 ^a	604.78±46.17 ^a	575.40±43.20 ^{ab}
C_3	543.58±34.52 ^b	616.21±54.63 ^a	592.88±61.35 ^{ab}
C_4	572.15±43.99 ^{ab}	608.71±51.36 ^a	609.97±57.11 ^a

注:表中数据为平均值±标准差。树干分为顶、中、基3个部位,每个部位测量30组,同一浓度下3个重复($n=270$),经最小显著性差异检测,同列相同字母表示无显著性差异($P<0.05$)。下同。

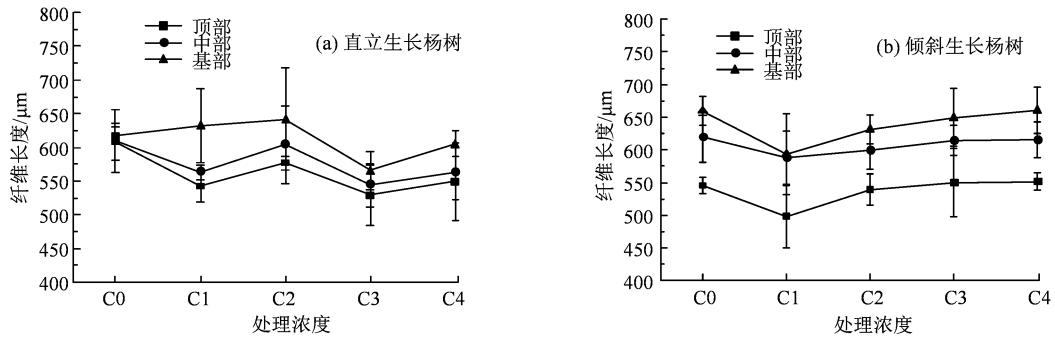
对处理浓度、倾斜角度下纤维长度和导管长度的双因素方差进行分析,结果(表4)显示,单因素显著性分析中,处理浓度对纤维长度的影响达到了显著水平。处理浓度和倾斜角度的共同作用下,也达到显著水平。

2.1.2 导管长度 表5为不同Cd浓度处理下杨树

直立生长和倾斜生长下的导管长度。由表5可知,在直立生长中,随着土壤中Cd浓度的升高,杨树的导管长度先是保持稳定,当Cd的浓度达到 C_3 和 C_4 时,导管长度大于 C_0 。这一结果表明,当土壤中的Cd浓度达到一定浓度时,会使直立生长下的导管长度增加。在倾斜生长的应拉区中,随着土壤中

的 Cd 浓度的升高, 应拉区的导管长度也逐渐增大, 并且在 C₃ 浓度下达到最大, 当浓度升高到 C₄ 时, 导管长度减少。在倾斜生长的对应区中, 随着土壤

中 Cd 浓度的升高, 对应区的导管长度呈现先减小再增大的趋势, 并且在 C₁ 浓度下最小, C₄ 浓度下最大。



注: 图中数据为平均值, 误差条为标准差(n = 270)。下同。

图 2 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树在纵向上的纤维长度

Figure 2 Fiber length on longitudinal distribution of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd

表 4 处理浓度和倾斜角度下纤维长度、导管长度的双因素方差分析结果 (P 值)

Table 4 Double factors variance analysis results (P value) of fiber length and vessel length at different treatments of Cd application and titl angles

因素	纤维长度	导管长度
处理浓度	0.048	0.051
倾斜角度	0.223	<0.001
浓度×角度	0.035	0.944

图 3 为不同 Cd 浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下纵向分布上的导管长度变化情况。从图 3 中可以看出, 随着土壤中重金属 Cd 含量的增加,

倾斜生长下的导管长度在纵向分布上呈现基部 > 中部 > 顶部的趋势。而在直立生长中, 三者之间的大小关系只在 C₀ 浓度下表现为基部 > 中部 > 顶部, 但随着 Cd 浓度的升高, 三者之间的关系没有明显的规律。

由表 4 可知, 单因素中, 倾斜角度对导管长度的影响达到显著水平。表明杨树木管的形态会随着倾斜生长而发生改变, 从而影响重金属 Cd 在管内的累积和迁移。这与前期研究得出的倾斜树干吸收重金属镉含量比直立树干多的结果相一致^[14]。

表 5 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树的导管长度

Table 5 Vessel length of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd μm

处理浓度	直立生长的导管长度	倾斜生长的导管长度	
		应拉区	对应区
C ₀	335.32 ± 20.72 ^a	310.41 ± 11.42 ^b	310.04 ± 21.60 ^{ab}
C ₁	334.74 ± 26.50 ^a	313.07 ± 21.91 ^{ab}	298.61 ± 23.95 ^b
C ₂	335.74 ± 27.07 ^a	317.44 ± 25.11 ^{ab}	309.12 ± 23.31 ^{ab}
C ₃	342.37 ± 30.18 ^a	333.36 ± 28.93 ^a	314.76 ± 25.27 ^{ab}
C ₄	348.45 ± 22.63 ^a	332.23 ± 17.27 ^a	323.55 ± 17.21 ^a

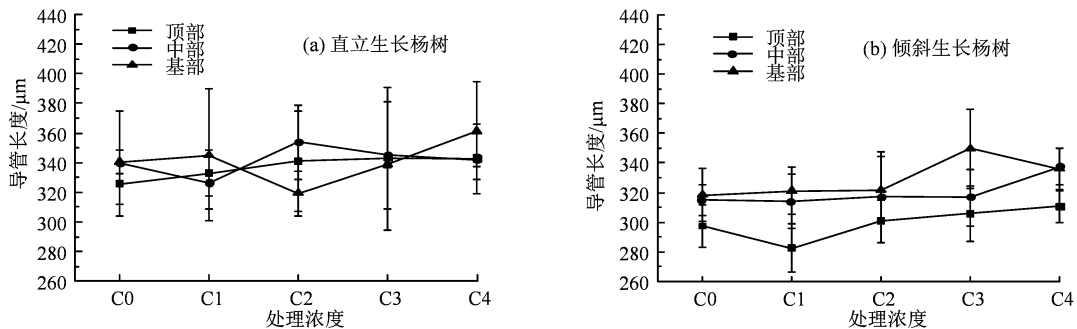


图 3 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树在纵向上的导管长度

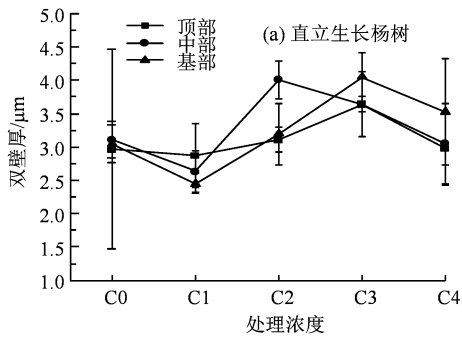
Figure 3 Vessel length on longitudinal distribution of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd

表 6 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树的双壁厚
 Table 6 Double wall thickness of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd μm

处理浓度	直立生长双壁厚	倾斜生长双壁厚
C ₀	3.04±0.78 ^{bc}	3.16±0.45 ^a
C ₁	2.65±0.35 ^c	2.73±0.43 ^b
C ₂	3.44±0.51 ^{ab}	3.03±0.43 ^a
C ₃	3.78±0.37 ^a	2.98±0.38 ^a
C ₄	3.19±0.63 ^b	3.15±0.53 ^a

2.2 不同 Cd 浓度处理下直立和倾斜杨树双壁厚的变化规律变化规律

不同 Cd 浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下的双壁厚如表 6 所示。由表 6 可知，直立生长下的双壁厚随着土壤中 Cd 浓度的升高先减小再增大，



并且在 C₁ 浓度下达到最小。这一结果表明，高浓度下细胞壁加厚。倾斜生长下，随着土壤中 Cd 浓度的升高，双壁厚小于对照组 C₀。表明在直立和倾斜生长的条件下，重金属 Cd 的施加对双壁厚作用正好相反。随着土壤中 Cd 浓度的升高，直立生长和倾斜生长下纵向分布上的双壁厚呈波动变化的趋势，但直立生长下波动趋势要比倾斜生长下范围大（图 4）。这一结果表明，重金属 Cd 对直立生长的双壁厚的影响要强于倾斜生长。

由表 7 中可知，在单因素方面，只有处理浓度对双壁厚的厚度影响达到显著水平，在两个因素的相互作用下，处理浓度和倾斜角度共同作用下达到了显著水平。

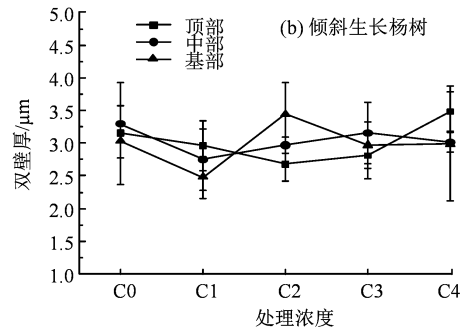


图 4 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树在纵向上的双壁厚

Figure 4 Double wall thickness on longitudinal distribution of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd

表 7 处理浓度和倾斜角度下双壁厚多因素方差分析结果 (P 值)

Table 7 Multivariate factors variance analysis results (P value) of double wall thickness at different treatments of Cd application and titl angles

因素	双壁厚
处理浓度	0.002
倾斜角度	0.050
处理浓度×倾斜角度	0.035

2.3 不同 Cd 浓度处理下直立和倾斜杨树的微纤丝角变化规律

表 8 为不同 Cd 浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下的微纤丝角。从表 8 中可以看出，随着土壤中 Cd 浓度的增大，直立生长下的微纤丝角逐渐减小，并且在 C₃ 浓度下减到最小，然后当 Cd 浓度为 C₄ 时，又增大为最大。而在倾斜生长下则呈现出不同的趋势，在应拉区的微纤丝角中，C₁、C₂ 浓度下的微纤丝角小于 C₀，C₃、C₄ 浓度下的微纤丝角则大于 C₀。而在对应区中，在所有受 Cd 胁迫土壤下的微纤丝角均大于 C₀。这一结果表明，重金属 Cd 的施加浓度会对直立生长以及倾斜生长下的微纤丝角产成不同的

影响。产生这一现象的原因可能与直立生长和倾斜生长下的杨树在内部结构上的不同以及二者所吸收的重金属 Cd 的含量不同而导致的。

另外，从表 8 中还可以看出，在应拉区的微纤丝角上，除 C₃ 浓度下倾斜生长下的微纤丝角大于直立生长，其余浓度下均为直立生长下的微纤丝角大于倾斜生长。在对应区中，在 C₄ 浓度下，直立生长下的微纤丝角小于倾斜生长，这一结果与 C₀ 浓度下的结果一致，而其余浓度下 (C₁、C₂ 和 C₃) 则与此相反，均为直立生长下的微纤丝角大于倾斜生长。

此外，在杨树倾斜生长下，随着土壤中的 Cd 浓度的升高，应拉区的微纤丝角总是小于对应区。这一结果与刘亚梅等人研究的结果一致，其主要原因是由于应拉区中含有大量的胶质层，而胶质层 S₂ 层微纤丝几乎与纵向平行，导致应拉区微纤丝角比对应区要小^[7]。

表 9 为处理浓度和不同区域微纤丝角、结晶度的双因素方差分析结果。由表 9 可知，处理浓度和倾斜角度以及两个因素的共同作用下对微纤丝角的影响均未达到显著水平。

表 8 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树的微纤丝角

Table 8 Microfibril angle of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd (%)

处理浓度	直立生长微纤丝角	倾斜生长微纤丝角	
		应拉区	对应区
C ₀	24.24 ± 9.12 ^{ab}	19.73 ± 6.51 ^a	23.27 ± 7.19 ^a
C ₁	21.70 ± 4.16 ^b	14.96 ± 4.78 ^a	23.65 ± 14.30 ^a
C ₂	19.54 ± 8.44 ^b	15.79 ± 9.08 ^a	27.80 ± 4.10 ^a
C ₃	18.09 ± 7.24 ^b	21.85 ± 12.71 ^a	24.58 ± 6.99 ^a
C ₄	28.99 ± 3.53 ^a	21.56 ± 3.23 ^a	27.14 ± 4.24 ^a

表 9 处理浓度和倾斜角度下微纤丝角、结晶度的双因素方差分析结果 (P 值)

Table 9 Double factors variance analysis results (P value) of microfibril angle and crystallinity treated with different concentrations of Cd

因素	微纤丝角	结晶度
处理浓度	0.089	0.155
倾斜角度	0.667	0.385
浓度×角度	0.299	0.175

2.4 不同 Cd 浓度处理下直立和倾斜杨树的结晶度变化规律

表 10 为不同 Cd 浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下的结晶度。从表 10 中可以看出, 随着土壤中 Cd 浓度的升高, 直立生长下的结晶度总是小于 C₀, 而在倾斜生长下应拉区中则呈现出相反的趋势, 在应拉区的结晶度中, 随着土壤中 Cd 浓度的升高, 受 Cd 胁迫下各浓度的结晶度总是大于 C₀。而在对应区中, 除在 C₁ 浓度下对应区的结晶度大于 C₀ 外,

其余浓度下均小于 C₀。这一结果表明, 当树干吸收土壤中的重金属 Cd 后, 会影响纤维素构成的结晶区在纤维素整体中的占比。

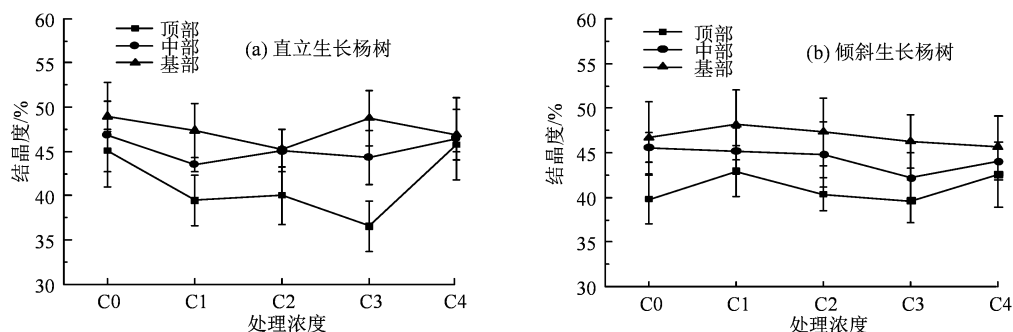
另外, 从表 10 还可以看出, 在应拉区的结晶度上, 只有 C₀ 与 C₄ 浓度下倾斜生长下的结晶度大于直立生长, 其余浓度下均为直立生长下的结晶度大于倾斜生长。在对应区中, 除 C₁ 浓度下, 直立生长下的结晶度小于倾斜生长, 而其余浓度下 (C₁、C₂ 和 C₃) 则与此相反, 均为直立生长下的微纤丝角大于倾斜生长。

此外, 在杨树倾斜生长下, 随着土壤中的 Cd 浓度的升高, 应拉区的结晶度总是大于对应区。这一结果与朱玉慧等人研究的结果一致^[15]。其主要原因是由于应拉区中含有大量的胶质木纤维, 其中胶质层微纤丝倾角基本与树轴方向平行, 同时, 木质素和半纤维素等不定型高聚物含量减少, 使得纤维素结晶度增加^[16]。

表 10 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树的结晶度

Table 10 Crystallinity of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd %

处理浓度	直立生长结晶度	倾斜生长结晶度	
		应拉区	对应区
C ₀	46.98±3.72 ^a	44.09±5.01 ^a	43.94±3.49 ^a
C ₁	43.47±4.02 ^a	46.48±4.43 ^a	44.35±2.68 ^a
C ₂	43.46±3.48 ^a	45.18±5.45 ^a	43.14±2.38 ^a
C ₃	43.22±5.96 ^a	44.11±3.11 ^a	41.24±4.10 ^a
C ₄	46.37±2.80 ^a	45.29±1.81 ^a	42.91±3.97 ^a



注: 图中数据为平均值, 误差条为标准差 (n=9)。

图 5 不同 Cd 浓度处理下直立生长和倾斜生长杨树在纵向上的结晶度

Figure 5 Crystallinity on longitudinal distribution of upright and inclined poplars treated with different concentrations of Cd

图 5 为不同 Cd 浓度处理下杨树直立生长和倾斜生长下纵向分布上的结晶度变化情况。从图 5 中可以看出,随着土壤中重金属 Cd 含量的增加,直立生长和倾斜生长下的结晶度在纵向分布上总是呈现基部>中部>顶部的趋势。

由表 9 可知,处理浓度和倾斜角度以及两个因素的共同作用下对结晶度的影响均未达到显著水平。

3 结论

当杨树受土壤中的重金属 Cd 胁迫后,不同的解剖特征影响不同。其中纤维长度和细胞壁厚与土壤中 Cd 的处理浓度具有显著性差异,而导管长度、微纤丝角、结晶度等差异不显著。表明纤维和细胞壁层的厚度对重金属 Cd 的响应更显著。

不同倾斜角度对同一 Cd 处理浓度下的解剖特征表现不同,其中倾斜角度对导管长度的影响具有显著性差异。表明杨树导管的形态会随着倾斜生长而发生改变,从而影响到重金属 Cd 在导管内的累积和迁移。

参考文献:

- [1] RAUSER W E, MEUWLY P. Retention of cadmium in roots of maize seedlings. Role of complexation by phytochelatins and related thiol peptides[J]. *Plant Physiol*, 1995, 109(1): 195-202.
- [2] PAN J, YU L. Effects of Cd or/and Pb on soil enzyme activities and microbial community structure[J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(11): 1889-1894.
- [3] 商侃侃, Gilles Vincent. 树木修复技术—城市土壤污染治理的可持续方法[J]. *园林*, 2017(7): 34-36.
- [4] THAKUR S, SINGH L, WAHID Z A, et al. Plant-driven removal of heavy metals from soil: uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives[J]. *Environ Monit Assess*, 2016, 188(4): 206.
- [5] IAWA Committee. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. *IAWA Bull*, 1989, (10): 219-332.
- [6] 刘亚梅, 刘盛全. 欧美杨 107 杨苗人工倾斜树干应拉木形成特征及其解剖特性[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 133-140.
- [7] 刘亚梅, 刘盛全. 人工授力欧美杨 107 杨不同倾斜角度苗木的微纤丝角、基本密度和轴向干缩率[J]. *林业科学*, 2011, 47(8): 115-120.
- [8] ROBINSON B H, MILLS T M, PETIT D, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation[J]. *Plant Soil*, 2000, 227(1/2): 301-306.
- [9] POLLE A, KLEIN T, KETTNER C. Impact of cadmium on young plants of *Populus euphratica* and *P. extimes canescens*, two poplar species that differ in stress tolerance[J]. *New For*, 2013, 44(1): 13-22.
- [10] 张东为, 崔建国, 戈素芬, 等. 土壤镉污染对不同品种杨树生长状况的影响[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 59-64.
- [11] HE J L, MA C, MA Y, et al. Cadmium tolerance in six poplar species[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2013, 20(1): 163-174.
- [12] 姜贵君, 姜贵平, 李建华. X 射线衍射分析及其在微纤丝角测定中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(2): 592-594.
- [13] 李新宇, 张明辉. 利用 X 射线衍射法探究木材含水率与结晶度的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(2): 96-99.
- [14] RONG G, CHU Y, LIU S Q, et al. Comparison of cadmium accumulation in upright and leaning poplar trees[J]. *BioResources*, 2021, 16(2): 3422-3436.
- [15] 朱玉慧, 闻靓, 张耀丽, 等. 杨木应拉木微区结构可视化及化学成分分析[J]. *林业工程学报*, 2020, 5(3): 54-58.
- [16] 石江涛, 王丰, 骆嘉言. 杂交鹅掌楸应力木解剖特征及光谱分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3): 125-129.