

两年倾斜生长杨树吸收和富集土壤镉特性研究*

马云瑶¹ 戎 恭² 郑青雅¹ 马云璐¹ 储 茵¹ 刘盛全²

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

摘要 杨树是提取修复重金属镉(Cd)的优势树种, 应拉木特殊的微结构特征可能会有利于重金属在树干木材部分的附着聚集。这里选择69杨(*Populus deltoides* 'Lux' (I-69/55)), 通过盆栽实验, 着眼全树、聚焦树干, 研究在外源Cd胁迫下两年生人工倾斜(45°)种植杨树生长及吸收与富集Cd的特性。结果表明, Cd对两年倾斜杨树生长没有显著影响, 杨树不同部位Cd含量均随土壤中Cd处理浓度的增加而增加, 表现出对Cd有较强的耐受性。树叶中Cd含量和富集能力均最高, 其次是树皮、树根、树枝、树干, 树叶和树干的平均富集系数分别为1.45和0.58。对于树干, 纵向上, 树干顶部Cd含量显著高于中部和基部; 横向上, 木材对应区Cd含量略高于应拉区, 近树皮处Cd含量显著高于近髓心处。

关键词 69杨树; 倾斜生长; Cd; 树木修复; 两年生

中图分类号: X53 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-2053 (2022) 02-0060-07

Study on the Uptake and Enrichment of Cd from Soil in Two-year Old Poplar Trees Under Leaning Plantation

MA Yunyao¹ RONG Gong² ZHENG Qingya¹ MA Yunlu¹
CHU Yin¹ LIU Shengquan²

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract Poplar is the dominant tree species in the dendroremediation of Cd. Tension wood has some microstructure features, such as the colloidal layer and large micropores in cell wall, which may be conducive to the accumulation of heavy metals. Poplar 69 (*Populus deltoides* 'Lux' (I-69-55)) was selected to study the uptake and enrichment characteristics of Cd in the two-year old leaning planted (45°) poplar trees with a focus on the trunk wood through pot experiment. The results showed that Cd had no significant effect on the growth of the poplar trees, and the Cd content in different parts of poplar increased with the increase of Cd concentration in soil. The cadmium content and enrichment ability of leaves were the highest, followed by bark, roots, branches and trunks, with the average enrichment coefficient of leaves and trunks being 1.45 and 0.58, respectively. In the trunk wood, longitudinally, the Cd content in the top trunk wood was significantly higher than that at the middle and base heights. Radially, the Cd content in the opposite zone was slightly higher than that in the tension zone, and that in the wood near the bark was significantly higher than that near the pith.

Key words 69-Poplar; leaning growth; Cadmium; dendroremediation; two-year-old

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(31770595)。

第一作者: 马云瑶(2000—), 女, 本科, 主要从事环境污染防治研究, E-mail: 1793520442@qq.com。

通信作者: 储茵(1970—), 女, 教授, 主要从事环境污染与控制领域的教学和科研工作, E-mail: chuyin@ahau.edu.cn。

我国土壤镉 (Cd) 污染形势严峻, 治理和修复受 Cd 污染的土壤是当今面临的一个紧迫的任务^[1]。植物修复 (Phytoremediation) 是一种清洁污染土壤的新技术, 具有就地治理、低成本和可持续性的优点, 其中植物提取修复 (Phytoextraction) 是通过植物对污染土壤中重金属的耐受性和抵抗性以及重金属的吸收、富集能力来将土壤中的重金属转移到植物体内, 然后将植物移出土壤系统并进行回收和处置^[2]。目前主要是利用对重金属有超富集能力的草本植物, 但由于这些草本植物生长缓慢, 生物量低, 故修复治理耗时较长^[3-4]。树木提取修复 (Dendroextraction) 是利用木本植物进行的提取修复, 虽然它们对污染物多不具备高累积性, 但由于木本植物, 特别是速生树种具有生长迅速、生物量大、根系发达、管理方便、生态安全等优势, 与草本植物相比, 具有相当或更大的吸收总量以及更高的积极效益^[4-5]。杨树是速生树种, 在全世界栽种面积很广, 易繁殖、适应性强, 对 Cd 的吸收富集能力总体相对较强, 是土壤 Cd 提取修复的优势树种, 并且杨树在减少土壤中镉含量的同时, 具有清洁空气、美化环境的作用^[6]。但前期诸多的研究均表明杨树树干对 Cd 的吸收和富集能力则相对较低^[7-9]。研究树干吸收和富集 Cd 的特性及如何提高其富集能力对利用杨树进行 Cd 污染土壤修复治理有重要意义, 但目前这方面研究很少^[10]。

应拉木是阔叶树的树干或树枝由于倾斜生长而形成的一种异常的木材组织, 它的解剖和物理学特性是在外力的作用下试图恢复到原来的位置而形成的^[11-12]。其木材的微观结构形态和化学成分与正常木有所不同, 如应拉木纤维细胞壁的纤维腔壁内出现了特殊的胶质层, 该胶质层具有的纤维素含量高、木质素含量低、微纤丝角小等特点^[13-14], 可能更利于重金属在木材部分的富集^[10], 前后承接不当而极少有这方面的研究报道。

通过设置不同浓度 Cd 添加处理的土壤进行两年的盆栽试验, 人工模拟杨树应拉木的形成, 对杨树进行人工倾斜 (45°) 生长来模拟两年生倾斜种植杨树对重金属 Cd 的富集过程, 分析不同 Cd 浓度处理对两年生杨树生长量的影响, 并着眼全树, 聚焦树干, 研究杨树不同部位及树干纵向和横向 Cd 含量分布规律, 综合分析倾斜杨树富集 Cd 的能力和累积机理, 为提高杨树树干部分吸收和累

积 Cd 的能力进行初步的探寻。

1 材料与方法

1.1 盆栽实验

2018 年 3 月, 采集安徽农业大学农萃园内表层土然后拌入营养土组成试验土壤, 表层土壤和营养土的比例为 1 : 1, 混合均匀后装入营养盆中, 营养盆直径 33 cm, 高 38 cm, 每盆装土 21.0 kg。2018 年 3 月从安徽农业大学农萃园中的一棵 69 杨树 (*Populus deltoides* 'Lux' (I-69/55)) 新生树枝上剪下生长状态良好、长势均一的扦插苗 15 棵, 每棵杨树扦插苗剪成 15 cm 左右备用。将 15 棵扦插苗栽植于营养盆, 并安放在安徽农业大学农萃园阳光大棚下。树苗自然生长两个月后通过均匀喷洒 Cd(NO₃)₂ 溶液进行 Cd 的添加。综合参考《国家土壤质量环境农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018) 和《国家土壤质量环境建设用地土壤污染风险管控标准》(GB36600-2018) 的筛选值和管控值^[15-16], 以及国内外相关文献^[17-18], 设置 5 种不同的 Cd 添加浓度梯度 (0, 5, 20, 50, 100 mg/kg) 依次记为 C0、C1、C2、C3、C4, 每个处理设置 3 个重复。两周后将杨树树苗倾斜 45° 放置, 并用竹竿固定树苗, 使其保持倾斜生长。为了使杨树在环境相同的条件下生长, 在摆放花盆时采用随机分布的方法摆放, 并定期定量给树苗浇水。

1.2 生长量的跟踪测定

在生长季 (3—11 月) 每月测定杨树的生长状况, 主要包括树高和地径。树高统一从花盆土壤表层部位开始测量至树苗顶芽部位, 地径是从花盆土壤表面往上 5 cm 左右处用软尺围绕苗木一圈的长度, 再计算得出直径。

1.3 样品的采集、处理以及 Cd 的测定

于 2019 年 12 月对两年倾斜生长杨树按照树叶、树枝、树根、树干的树皮部分 (以下称为树皮)、树干的木材部分 (以下称为树干) 五个不同部位分别进行样品采样。其中树干和树皮又按照纵向分为顶部、中部、基部, 每一高度又分应拉区 (倾斜上部) 和对应区 (倾斜下部) 分别采集, 每一个区的树干木材部分再按径向取近树皮处和近髓心处样。树叶在 11 月落叶前采集, 然后在 12 月初拔出杨树, 其中树干截取 5 cm 厚的基部、中部、顶部圆盘。植株样首先用自来水冲洗, 除去

表面泥沙和污垢,再用去离子水冲洗3遍。每个圆盘分为应拉区和对应区两部分,首先用不锈钢刨刀分别将应拉区和对应区树皮取下,然后木材部分按年轮逐层分别取下应拉区和对应区的近树皮处和近髓心处木材样。各部位的样品用去离子水冲洗3遍,在60℃下烘干后用研钵磨碎或用球磨仪粉碎,过60目筛,分别装袋标号。采用石墨炉原子吸收分光光度法(TAS990 GF北京普析)测定杨树不同部分Cd含量。

此外,通过生物富集系数与转运系数表示倾斜杨树对Cd的富集和转运能力。生物富集系数(bioconcentration factors, BCF)指植物体内重金属含量与相应的土壤重金属含量之比,这里采用杨树地上各部分Cd含量与Cd添加处理浓度的比值。转运系数(translocation factor, TF)指植物地上部分重金属含量与地下根部重金属含量之比^[19]。

利用Excel 2013和Origin 2017等进行数据计算、统计与绘图,采用SPSS软件进行方差分析和最小显著性差异检验,比较两年倾斜生长杨树对Cd的吸收和富集能力在不同处理浓度,以及在不同部位、树干纵向和径向的差异。

2 结果与分析

2.1 外源Cd的添加对倾斜杨树生长性状的影响

在整个实验期间,所有Cd处理下的树木未出现明显的不良症状,杨树生长总体良好。杨树在不同Cd胁迫条件下树高和地径均随时间的增加而增加(表1)。

对于倾斜杨树树高,C1处理下第一年树高显著高于C3和C4处理,在两年收获时不同处理树高的顺序为C1 > C0 > C4 > C3 > C2,但未达

到差异显著(表1),表明外源Cd的添加对倾斜杨树树高生长没有显著的抑影响。对于地径,C0处理下第一年地径显著高于C1、C2、C3处理,在两年收获时不同处理倾斜杨树地径的顺序为C0 > C4 > C1 > C2 > C3,但未达到差异显著(表1),表明外源Cd的添加对杨树地径具有一定的抑制作用,但抑制作用没有达到显著水平。外源Cd的添加对杨树生长的影响与杨树品种、树龄、栽培方式以及土壤类型等因素有关^[19]。

2.2 倾斜杨树不同部位Cd含量分布

除了树根和树干中的Cd含量是C1略高于C2,两年倾斜杨树各部位中的Cd含量总体随土壤中Cd处理浓度的增加而增加(表2)。方差分析表明,杨树不同部位Cd含量在不同处理浓度和杨树不同部位都有显著差异($P < 0.001$),不同处理下杨树各部位Cd含量均是树叶中最高,其次是树皮、树根、树枝、树干(表2)。而在戎恭等人^[10]一年生倾斜生长杨树的研究当中树皮中Cd含量最高,其次是树叶、树根、树干,在何佳丽的研究当中灰杨树根的Cd含量最高^[21],这种差异可能与杨树的树龄及品种的不同有关^[22]。

2.3 树皮和树干Cd含量沿树高纵向及在不同区域的分布

树皮和树干Cd含量总体随土壤中Cd处理浓度的增加而显著增加,并且各处理倾斜杨树树皮Cd含量分别高于树干Cd含量(图1)。树皮中Cd含量在C1、C2、C3处理下均是基部显著高于中部和顶部,除了C4中部树皮Cd含量略高于基部外,其它处理均是基部最高,在所有处理中顶部树皮Cd含量都是最低(图1a)。树干中Cd含量在C1、C2、C3、C4处理下均是顶部显著高于中

表1 不同Cd浓度处理下两年生倾斜杨树每年的树高和地径

Table 1 Height and basal diameter of the two-year-old poplars in each year under different Cd treatments

处理 Treatment	树高/cm Tree Heights		地径/cm Ground Diameters	
	2018-11	2019-11	2018-11	2019-11
C0	123.00 ± 8.00ab	150.77 ± 9.65a	1.40 ± 0.16a	1.66 ± 0.07a
C1	142.67 ± 6.81a	163.47 ± 13.10a	1.00 ± 0.11b	1.42 ± 0.13a
C2	122.67 ± 9.02ab	131.07 ± 13.05a	1.02 ± 0.18b	1.41 ± 0.13a
C3	116.00 ± 8.89b	134.10 ± 22.86a	1.02 ± 0.25b	1.38 ± 0.16a
C4	115.67 ± 22.28b	137.47 ± 40.80a	1.17 ± 0.26ab	1.44 ± 0.16a

注:同一列中不同小写字母表示不同处理间差异性显著($P < 0.05$)。

Note: different lowercase letters in the same column indicate significant difference at different concentrations ($P < 0.05$).

表 2 不同 Cd 浓度处理下两年生倾斜杨树不同部位的 Cd 含量

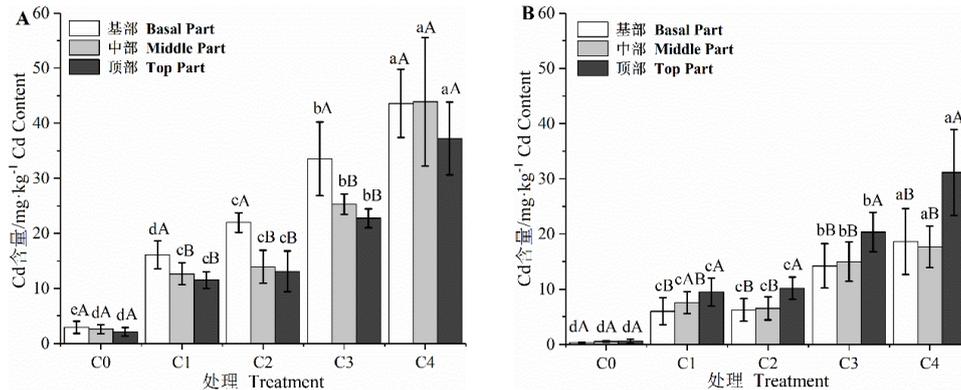
mg · kg⁻¹

Table 2 Cd concentration in different parts of the two-year old leaning poplars under different Cd treatments

处理 Treatment	不同部位 Different parts				
	树根 Root	树皮 Bark	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf
C0	1.57 ± 0.32dC	2.54 ± 0.92dB	0.48 ± 0.45dD	1.50 ± 0.32dC	3.80 ± 1.89cA
C1	9.98 ± 3.97bcC	13.42 ± 2.78cB	7.32 ± 2.56cC	7.74 ± 1.99cC	17.45 ± 2.99bcA
C2	5.62 ± 2.89cdB	16.33 ± 4.96cA	7.16 ± 2.53cB	10.20 ± 1.24cB	19.42 ± 5.97bA
C3	15.82 ± 0.67bC	27.19 ± 6.13bB	15.80 ± 4.37bC	15.07 ± 3.05bC	41.55 ± 9.85aA
C4	39.18 ± 8.15aA	41.58 ± 8.61aA	20.75 ± 7.58aB	24.68 ± 3.13aB	50.07 ± 14.19aA

注：根据最小显著性差异检验，不同小写字母 (a、b、c、d) 表示同一部位不同浓度间有显著性差异，不同大写字母 (A、B、C、D) 表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 (P < 0.05)。

Note: according to the least significant difference test, different lowercase letters (a, b, c, d) indicate significant difference at different concentrations of the same part, and capital letters (A, B, C, D) indicate significant difference in different parts at the same concentration (P<0.05).

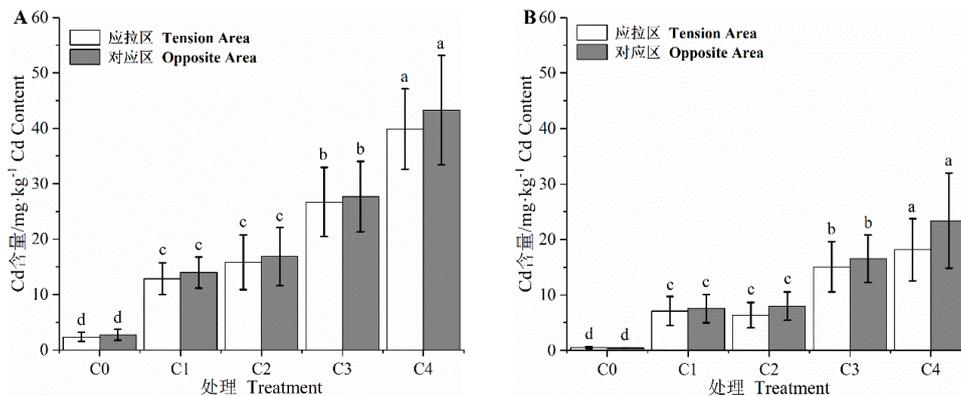


注：根据最小显著性差异检验，不同小写字母 (a、b、c、d) 表示同一部位不同浓度间有显著性差异，不同大写字母 (A、B、C、D) 表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 (P < 0.05)。

Note: according to the least significant difference test, different lowercase letters (a, b, c, d) indicate significant difference at different concentrations of the same part, and capital letters (A, B, C, D) indicate significant difference in different parts at the same concentration (P<0.05).

图 1 不同 Cd 浓度处理下两年生倾斜杨树不同高度树皮和树干 Cd 含量：(A) 树皮；(B) 树干

Fig. 1 Cd concentration in the bark and stem of the two-year old leaning poplars along the height under different Cd treatments : (a)bark;(b)stem



注：不同小写字母表示同一部位不同浓度间有显著性差异，不同大写字母表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 (P<0.05)。

Note: different lowercase letters indicate significant difference at different concentrations of the same part, and different capital letters indicate significant difference in different parts at the same concentration (P<0.05).

图 2 不同 Cd 浓度处理下两年生倾斜杨树应拉区与对应区中树皮和树干的 Cd 含量：(A) 树皮；(B) 树干

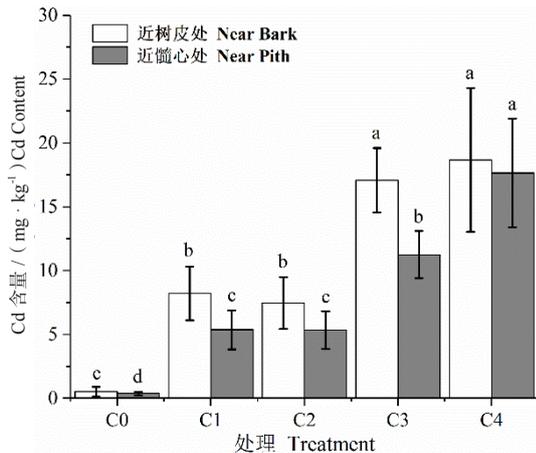
Fig.2 Cd concentration in the stem and bark parts of the two trunk zones of the two-year old leaning poplars under different Cd concentrations:(a)bark;(b)stem

部和基部, 在所有处理中, 均是顶部树干 Cd 最高, 除了 C4 树干基部 Cd 含量略高于中部外, 其它处理均是基部最低 (图 1b)。倾斜杨树树皮 Cd 含量总体表现出随着树高降低的特征, 而树干则相反 (图 1)。方差分析表明, 树皮中 Cd 含量随树高差异不显著, 树干中 Cd 含量随树高在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

倾斜杨树树皮和树干应拉区和对应区 Cd 含量均随土壤中 Cd 浓度的增加而显著增加 (图 2)。除了树干在 C0 处理外, 倾斜杨树树皮和树干中 Cd 的含量均是对应区略高于应拉区 (图 2)。方差分析表明, 树皮和树干应拉区和对应区 Cd 含量均未达到差异显著。

2.4 树干 Cd 含量的径向分布

杨树树干近树皮处与近髓心处的 Cd 含量均随土壤中 Cd 浓度的增加而显著增加, 不同 Cd 浓度处理下杨树树干中近树皮处的 Cd 含量均高于近髓心处 (图 3)。方差分析显示, 树干 Cd 含量在径向上的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。



注: 不同小写字母表示同一部位不同浓度间有显著性差异, 不同大写字母表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 ($P < 0.05$)

Note: different lowercase letters indicate significant difference at different concentrations of the same part, and different capital letters indicate significant difference in different parts at the same concentration ($P < 0.05$).

图 3 不同 Cd 浓度处理下两年生倾斜杨树树干 Cd 含量径向分布

Fig. 3 Radial distribution Cd concentration in the stem of the two-year old leaning poplars under different Cd treatments

2.5 倾斜杨树对 Cd 的富集和转运能力

BCF 能够表示植物从土壤中吸收和富集重金属的能力。由表 3 可知, 除树根外, 倾斜杨树地上各部位均表现出 BCF 随着 Cd 处理浓度的升高

而降低的趋势, 说明虽然倾斜杨树各部位对 Cd 的吸收量均随着处理浓度的升高而升高 (见 2.2, 2.3, 2.4 和 2.5), 但对 Cd 吸收量的增加并不与土壤 Cd 浓度增加成比例, 导致 BCF 随处理浓度降低。不同处理中二年生倾斜杨树各部位的平均 BCF 介于 0.21 ~ 3.49 之间, 总体低于许多具有 Cd 高累积性能的草本植物^[23-24], 但总体高于一年生倾斜杨树^[10]。杨树各部位在 C1 的 BCF 值均显著高于其在其它处理浓度的 BCF 值, 且均大于 1.0 (表 3), 说明在 5 mg/kg 左右的低浓度时, 杨树对 Cd 的吸收和富集能力最强。BCF 在倾斜杨树不同部位有差异性显著, 表现为树叶平均 BCF 最大, 其次是树皮、树根, 树枝和树干的 BCF 值最小 (表 3), 说明杨树树叶富集 Cd 的能力最强, 树枝和树干最弱。

TF 表示重金属在植物体内由根部向地上部位的迁移能力, 当 $TF > 1$ 时, 可说明该地上部位对 Cd 有较强的转运和富集能力。由表 4 可知, 不同处理杨树不同部位平均 TF 值介于 0.53 ~ 4.04 之间, 随着土壤中 Cd 浓度的升高, 各部位 TF 值均表现为 $C2 > C3 > C1 > C4$, 说明土壤中的 Cd 浓度可能会影响 Cd 在倾斜杨树内的迁移转运, 但这种影响并不与土壤中 Cd 的处理浓度成比例。杨树各部位在 C2 的 TF 值均大于 1.0, 且均显著高于其在其它处理浓度的 TF 值 (表 4)。不同部位 TF 有显著性差异, 树叶最高, 其次为树皮, 树枝和树干最低, 除了树干外, 其它部位 TF 均值都高于 1.0, 说明倾斜杨树地上各部位的转运能力总体较强。

3 结论与讨论

外源 Cd 的添加对两年生倾斜杨树树高和地径生长没有显著的抑制作用, 而且杨树不同部位的 Cd 含量均随土壤中 Cd 浓度的增加而显著增加, 说明倾斜杨树对 Cd 有较强的耐受性。

树叶中的 Cd 含量最高, 其次是树皮、树根、树枝、树干。沿着树干高度, 倾斜杨树树皮 Cd 含量总体表现出随着树高降低的特征, 而树干则相反。在两年生杨树强烈的蒸腾作用下, Cd 随着蒸腾流向上输送, 最终累积在树叶中, 加上树叶中含有较多的碳酸盐和氨基酸, 能够与 Cd 离子结合, 生成稳定的络合物, 导致树叶中的 Cd 含量不断增加^[3,25]。在树干内部, Cd 随着水分和所需的矿物质元素一起通过木质部往上运输迁移, 在树干顶部累积相对更多。Cd 又可通过纹孔和木射线

表 3 不同浓度 Cd 处理下两年生倾斜杨树不同部位的 BCF

Table 3 BCF of different parts of the two-year old leaning poplars under different treatments of Cd addition

处理 Treatment	不同部位 Different parts				
	树根 Root	树皮 Bark	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf
C1	2.00 ± 0.79aC	2.68 ± 0.56aB	1.46 ± 0.51aC	1.55 ± 0.39aC	3.49 ± 0.60aA
C2	0.28 ± 0.15bB	0.82 ± 0.25bA	0.36 ± 0.13bB	0.51 ± 0.06bB	0.97 ± 0.30bA
C3	0.32 ± 0.02bC	0.54 ± 0.12bB	0.30 ± 0.12bC	0.30 ± 0.06bC	0.83 ± 0.20bA
C4	0.39 ± 0.08bA	0.42 ± 0.09bA	0.21 ± 0.08bB	0.25 ± 0.04bB	0.50 ± 0.14bA
平均	0.75	1.12	0.58	0.65	1.45

注：不同小写字母表示同一部位不同浓度间有显著性差异，不同大写字母表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: different lowercase letters indicate significant difference at different concentrations of the same part, and different capital letters indicate significant difference in different parts at the same concentration ($P < 0.05$).

表 4 不同浓度 Cd 处理下两年生倾斜杨树不同部位的 TF

Table 4 TF of different parts of the two-year old leaning poplars under different treatments of Cd addition

处理 Treatment	不同部位 Different parts			
	树皮 Bark	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf
C1	1.42 ± 0.35bB	0.78 ± 0.28bC	0.82 ± 0.24bC	1.87 ± 0.55abA
C2	3.35 ± 0.58aA	1.45 ± 0.26aB	2.24 ± 1.40aAB	4.04 ± 1.28aA
C3	1.72 ± 0.39bB	1.00 ± 0.27abC	0.95 ± 0.16abC	2.62 ± 0.57abA
C4	1.06 ± 0.12bB	0.53 ± 0.18bC	0.64 ± 0.06bC	1.28 ± 0.24bA
平均	1.89	0.94	1.16	2.45

注：不同小写字母表示同一部位不同浓度间有显著性差异，不同大写字母表示同一浓度不同部位之间有显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: different lowercase letters indicate significant difference at different concentrations of the same part, and different capital letters indicate significant difference in different parts at the same concentration ($P < 0.05$).

等构造分子由木质部到韧皮部，由于树皮组织中富含有助于与二价离子结合的萜类、软木脂、脂肪酸酯、氨基酸等物质，可累积较多的 Cd，可能在基部的侧向输送比顶部更强，导致树皮是基部 Cd 累积高于顶部^[26]。

两年生倾斜杨树树皮和树干中 Cd 的含量均是对应区略高于应拉区。Cd 在树木内部进行横向输送的过程中，由于重力作用，可能更倾向于向倾斜杨树下部（对应区）迁移，导致对应区 Cd 含量略高于应拉区。另外，从两个区域木材结构来看，对应区木材的导管组织比量高于应拉区^[27]，而导管主要负责运输养分和无机盐，在输送的过程中 Cd 可暂时附着在导管壁上，这可能是导致对应区 Cd 含量高于应拉区的原因。树干近树皮处 Cd 含量高于近髓心处，这可能是由于在杨树幼龄材中，近髓心部分薄壁细胞比量高，而近树皮部分的导

管比量高于近髓心部分，因此会有更多的 Cd 随着水分和营养元素运输而附着在导管壁上^[28]。

两年生倾斜杨树不同部位不同处理浓度下 BCF 值在 0.21 到 3.49 之间，TF 值在 0.53 到 4.04 之间。地上部分各部位 BCF 总体随着土壤 Cd 浓度的升高而降低，在低浓度处理（C1=5 mg/kg）时倾斜杨树各部位 BCF 均显著高于其它较高浓度处理的 BCF。TF 值随不同 Cd 浓度处理和杨树各部位都有显著差异，各部位 TF 在 C2=20 mg/kg 时均显著高于其它处理浓度的 TF。各部位平均 BCF 值和 TF 值都是树叶最高，分别达到 1.45 和 2.45，树干最低，分别为 0.58 和 0.94。

倾斜杨树对 Cd 有较强的耐受性，各部位在较低浓度时对 Cd 有相对较高的富集能力，以及树叶对 Cd 有总体较高的富集能力等对利用 69 杨树在土壤树木修复具体实践上有重要意义。但是，Cd

在杨树中的吸收和累积机制, 以及如何进一步提高其吸收累积能力, 特别是在树干中的累积能力还有待深入的研究。

参考文献

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [2] PULFORD I D and WATSON C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review[J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 529-540.
- [3] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [4] 蔡囊, 李吉跃, 李永杰. 土壤重金属污染下植物效应研究进展[J]. 广东林业科技, 2009, 25(2): 71-77.
- [5] GONZALEZ-OREJA J A, ROZAS M A, ALKORTAA I, et al. Dendroremediation of heavy metal polluted soils[J]. *Rev Environ Health*, 2008, 23(3): 223-234.
- [6] 洗丽铎, 梁登裕, 冯嘉仪, 等. 重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(3): 124-132.
- [7] LAUREYSENS I, BLUST R, TEMMERMAN L D, et al. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture: I. Seasonal variation in leaf, wood and bark concentrations.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3): 485-494.
- [8] HU Y, NAN Z, SU J, et al. Heavy metal accumulation by poplar in calcareous soil with various degrees of multi-metal contamination: implications for phytoextraction and phytostabilization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7194-7203.
- [9] ZHAO X, LIU, J, XIA, X, et al. The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(7): 5076-5085.
- [10] 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.
- [11] CÔTÉ W A, DAY A C, and TIMELL T E. A contribution to the ultrastructure of tension wood fibers[J]. *Wood Science and Technology*, 1969, 3: 257-271.
- [12] ISEBRANDS J G, BENSEND D W. Incidence and structure of gelatinous fibers within rapid-growing eastern cottonwood[J]. *Wood and Fiber Science*, 1972, 4(2): 61-71.
- [13] 余敏, 刘盛全, 檀华蓉. 人工倾斜杨树应拉木内源激素分布规律的初步研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(6): 877-881.
- [14] 裘姗姗, 石洋, 刘元, 等. 应拉木胶质层解剖结构及化学主成分结构特征[J]. 林业科学, 2018, 54(2): 153-161.
- [15] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB15618-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行): GB36600-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [17] 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(6): 59-64.
- [18] ROBINSON B H, MILLS T M, PETIT D, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 301-306.
- [19] 李振良, 谢群, 曾珍, 等. 湛江观海长廊红树林土壤—植物体系重金属富集与迁移规律[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 398-409.
- [20] 杨园, 王良梅. 杨树对镉胁迫的响应及抗性机制研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(4): 29-34.
- [21] 何佳丽. 杨树对重金属镉胁迫的分子生理响应机制研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2014.
- [22] Romè C, Romeo S, Francini A, et al. Leaves position in *Populus alba* Villafranca clone reveals a strategy towards cadmium uptake response[J]. *Plant Growth Regulation* 2015, 79(3): 355-366.
- [23] WEI S, ZHOU Q, WANG X, et al. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1): 33-38.
- [24] 李吉锋. 超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 138-143.
- [25] LIU X Q, PENG K J, WANG A G, et al. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1136-1141.
- [26] SATOFUKA H, FUKUI T, TAKAGI M, et al. Metal-binding properties of phytochelatin-related peptides[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2001, 86: 595-602.
- [27] JOUREZ B, RIBOUX A, and LECLERCQ, A. Anatomical characteristics of tension wood and opposite wood in young inclined stems of poplar (*Populus euramericana* cv. 'Ghoy')[J]. *IAWA Journal*, 2001, 22 (2): 133-157.
- [28] 周亮, 刘盛全, 田根林, 等. 欧美杨107杨木材解剖特性的径向变异[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(10): 1-4.