

保定市河道公路绿化树种毛白杨的抗重金属能力*

徐学华 黄大庄 王圣杰 王秀彦

(河北农业大学林学院 保定 071000)

摘要: 对保定市河道公路不同年龄毛白杨根际土壤重金属及毛白杨各器官 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、叶绿素含量以及细胞膜透性进行研究。结果表明:河道公路两侧土壤重金属污染严重;污染区毛白杨 SOD 活性随着年龄增加而降低,POD 活性和叶绿素含量随着年龄增加先增加后降低,CAT 活性随着年龄的增加变化趋势不一致,而细胞膜透性随着年龄增加变化不明显;污染区不同年龄毛白杨 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、叶绿素含量以及细胞膜透性的化感指数变化趋势不一致;采用隶属函数值法对污染区毛白杨抗重金属特性分析得出,不同年龄毛白杨抗重金属能力表现为 3 年生 > 10 年生 > 20 年生 > 30 年生,表明较大树龄的毛白杨抗重金属的能力有下降趋势。

关键词: 公路;毛白杨;重金属;抗氧化酶;化感指数

中图分类号:S731.2 文献标识码:A 文章编号:1001-7488(2010)05-0007-07

Resistance of Heavy Metal in *Populus tomentosa* along Stream Highway

Xu Xuehua Huang Dazhuang Wang Shengjie Wang Xiuyan

(College of Forestry, Agriculture University of Hebei Baoding 071000)

Abstract: Heavy metal content in the soil near roots of *Populus tomentosa* at different ages, and Superoxide dimutase (SOD), Peroxidase (POD), Catalase (CAT), content of chlorophyll, permeability of cell membrane in the poplar various organs were studied. The trees located at sides of a road which was along a river, in Baoding, China. The results showed that the pollution of soil heavy was serious. SOD activity reduced with age of *Populus tomentosa* grown in the contaminative area. POD activity and content of chlorophyll increased at early stage and decreased later with age of *Populus tomentosa*. Variation of CAT activity had no relationship with the age of *Populus tomentosa*. Permeability of cell membrane was not difference over ages of *Populus tomentosa*. Variation pattern of allelopathic index of SOD, POD, CAT, Chlorophyll, permeability of cell membrane of different age *Populus tomentosa* in pollution area were inconsistent. Subordinate function value method (SFVM) was adopted in this paper to evaluate heavy resistance of *Populus tomentosa* in contaminative area comprehensively, the result indicated that the pollution capacity was 3 age > 10 age > 20 age > 30 age, which suggested that resistance ability was reduced with age of *Populus tomentosa*.

Key words: highway; *Populus tomentosa*; heavy metal; anti-oxidative enzyme; allelopathic index

随着人类社会的不断进步和工业化进程的加快,环境污染成了当前日益突出的重要生态问题之一,土壤重金属污染已成为人们广为关注的环境问题(郭平等,2007)。对重金属污染的研究一直是生态学和环境生物学的热点之一,在重金属对生物的形态、生理生化效应及植物对重金属污染的抗性机制等方面已有不少研究(万永吉等,2008;李庆亭等,2008;孔祥瑞等,2007;周守标等,2007),但这些研究主要集中于农作物和草本植物(田如男等,2004),草本植物对重金属吸收具有选择性,限制了植物修复效果。和草本植物相比,木本植物具

有生物量大、根系发达的特点,具有较强的吸收能力,所以木本植物修复土壤重金属的应用越来越广泛(Pulford *et al.* 2003),尤其在道路两侧。目前,国内外有关道路两侧土壤中重金属分布方面的研究已有报道(Much, 1992; Volker, 2002)。同时国内外也开展了一些有关道路两侧土壤植物系统重金属污染的研究(殷云龙等,2005;朱建军等,2006),而以同一树种不同年龄绿化植物为研究对象进行抗重金属胁迫能力的研究未见报道。在城市生态系统中,植物对整个城市生态环境的改善起着不可估量的作用。研究城市环境中绿化植物对污染胁迫的反应、

收稿日期:2009-02-02。

基金项目:河北省林业局项目(0803015)。

* 黄大庄为通讯作者。

不同植物对污染的耐受性及在污染环境中的安全性,已成为城市绿化、美化和生态环境修复中亟待研究的课题。当前,利用树木修复土壤重金属污染的研究集中在杨柳科(Salicaceae)植物的盆栽试验和水培试验上,而对自然生长于污染土壤上的树木的研究较少,并且缺少野外试验数据的支持(刘维涛等,2008)。

毛白杨(*Populus tomentosa*)作为北方城市的主要乡土绿化树种,广泛用于行道树和护岸护堤,但是这些地方的树木容易遭受铅和镉等重金属的污染。本研究以3、10、20和30年生的毛白杨为研究对象,在城市河道公路两岸土壤受重金属严重污染的情况下,研究不同年龄毛白杨抗氧化酶活性、细胞膜透性及叶绿素含量等生理生态响应,同时以河北农业大学校园标本园3、10、20和30年生的毛白杨为对照,评定污染区不同年龄毛白杨抗重金属胁迫的能力,为河道和公路两岸树种的选择和改良提供基础数据和理论依据。

1 研究区概况

研究区位于保定市区(113°40′—116°20′E, 38°10′—38°40′N)。平均海拔18.5 m。气候温和,四季分明,属于暖温带半湿润季风区域,年平均气温12.2℃;年日照2563 h;年无霜期210天;年平均降水量570 mm;土质为粘土,地带性植被为暖温带落叶阔叶林(李国栋等,2007)。研究区公路两侧是工业区,生产过程中产生大量的废水、废气和废渣,部分直接排放到公路旁边的河道,加之公路车流量大,污染严重。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

2008年8月在保定市西郊车流量较大的污染严重的防洪河道公路两侧(污染区)和河北农业大学标本园(对照区,位于校园西南区,东边为科研楼,南边为居民区,西边为农田,北边为学生操场),选择健康、无病虫害的毛白杨。在对照区和污染区分别选择3株3、10、20和30年生的毛白杨样株。分别在每个样株的不同方向采集叶、枝、树干及地下细根,每个样株各采集15个叶、枝、树干和地下细根样品。在每个样株的根际采集0~20 cm表层土壤样品5个(每15个土壤样点土样混合为1个土壤样品)。土壤样品自然风干,过100目筛,用HNO₃-HF-HClO₄消解,测定Pb、Cd、Cu、Zn、Cr和Ni含量,土壤重金属含量均采用原子吸收分光光度计测定(赵

卓亚等,2009)。

2.2 土壤生态危害指标的测定

根据目前评价土壤污染的综合方法,本研究选用内梅罗污染指数法来计算综合污染指数,评价土壤污染程度(谢建治等,2002),计算公式为

$$P = \{[(\bar{P}_i)^2 + (\max P_i)^2] / 2\}^{1/2}.$$

式中: P 为土壤综合污染指数, P_i 为某污染物的污染指数,且 $P_i = C_i / S_i$, C_i 为某污染物的实测值, S_i 为某污染物的评价标准, $S_i = x + 2s$; x 为该地区土壤重金属背景值, s 为背景值的标准误差值, \bar{P}_i 为土壤中各污染物的指数平均值; $\max(P_i)$ 为土壤中单项污染物的最大污染指数。当 $P < 1$ 时为未污染;当 $1 \leq P < 2$ 时为轻污染;当 $2 \leq P < 3$ 时为中度污染;当 $P > 3$ 时为重度污染。

2.3 生理生化指标的测定

叶绿素总含量(叶绿素a和b)的测定:采用沈伟其(1988)的方法。SOD活性、POD活性、CAT活性和细胞膜透性采用李合生等(2004)的方法,其中细胞膜透性以相对电导率表示细胞膜透性大小。化感作用效应敏感指数AI采用Williamson等(1988)的方法计算:AI = 1 - C/T (T ≥ C); AI = T/C - 1 (T < C),C为对照值,T为处理值。当AI > 0时,表示促进作用,当AI < 0时,表示抑制作用。AI绝对值的大小代表化感(自毒)作用强度。

2.4 综合评定

综合评定采用隶属函数值法(李彦慧等,2008;陈德明等,2002),对各项测定指标用模糊数学隶属公式进行定量转换,分别用模糊数学隶属度公式求出不同年龄毛白杨各指标的具体函数值, $U(X_i) = (X_y - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$, $\Delta = 1/n \sum U(X_i)$ (计算隶属函数值的平均值)。如果某一指标与抗性为负相关,用反隶属函数计算其隶属函数值,即 $U(X_i) = 1 - (X_y - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$, $\Delta = 1/n \sum U(X_i)$ 。式中: X_y 为第*i*个年龄第*j*个测定指标; $U(X_i) \in [0, 1]$, Δ 为同一年龄毛白杨各项指标测定的综合评定结果; n 为测定的指标总数; $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别为不同年龄树种第*j*项指标的最大值和最小值。

3 结果与分析

3.1 河道公路旁侧土壤重金属含量与土壤元素背景值比较

河道公路旁侧土壤重金属含量与土壤元素背景值见表1(魏复盛,1990;谢建治等,2002)。除了Ni之外,污染区毛白杨根际土壤重金属Pb、Cd、Cu、

Zn 和 Cr 含量均高于中国土壤元素背景值和河北省土壤元素背景值,分别是河北省土壤元素背景值的 2.11、120.21、3.33、3.12 和 1.11 倍。污染区土壤根际重金属 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量分别是保定市土壤元素背景值的 1.46、16.50、3.48 和 2.85 倍。其中 Cd 是国家土壤环境质量标准规定(GB15618-95) 3 级标准的(1 mg·kg⁻¹)的 11.3 倍,3 级标准主要适

用于林地土壤及污染物容量较大的高背景值土壤和矿区附近的农田土壤。通过计算内梅罗污染指数,河道土壤生态危害指标 P 值为 7.398,大于 3,表明河道公路两侧土壤已经受到了重度污染,河道成为重度污染区。而对照区土壤生态危害指标 P 值为 0.877,小于 1,标本园土壤没有受到污染。

表 1 河道公路旁侧土壤重金属含量与土壤重金属环境背景值

Tab. 1 Heavy metal content along stream highway and the background value in soil							mg·kg ⁻¹
项目 Item	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	
中国土壤元素背景值 Element background value in soil of China	26.0 ± 24.74	0.097 ± 0.16	22.6 ± 22.82	74.2 ± 65.56	61.0 ± 62.14	26.9 ± 28.72	
河北省土壤元素背景值 Element background value in soil of Hebei Province	21.5 ± 13.76	0.094 ± 0.16	21.8 ± 12.44	78.4 ± 76.38	68.3 ± 44.7	30.8 ± 22.36	
保定土壤元素背景值 Element background value in soil of Baoding City	31.04 ± 23.4	0.685 ± 0.47	20.9 ± 11.2	85.9 ± 73.2	—	—	
河道公路毛白杨根际土壤重金属含量 Heavy metal content near root of <i>Populus tomentosa</i> along stream highway	45.4 ± 25.34	11.3 ± 2.56	72.7 ± 24.15	244.6 ± 85.21	76.1 ± 47.5	21.2 ± 18.64	
对照区毛白杨根际土壤重金属含量 Heavy metal content near root of <i>Populus tomentosa</i> in contrast area	32.8 ± 12.45	1.76 ± 0.35	25.8 ± 10.23	86.3 ± 42.27	69.5 ± 35.42	32.3 ± 16.43	

3.2 重金属胁迫对 SOD 活性的影响

不同年龄毛白杨 SOD 活性大小见图 1。随着年龄增加,对照区各器官 SOD 活性呈现先增加后降低再增加的趋势。整体上来看,污染区毛白杨的 SOD 活性呈现降低的趋势。从图 1 中可以看出,污染区 3 年生 SOD 活性大于对照,叶、枝、树干和根部分别是对照的 1.29、1.34、1.05 和 1.17 倍。污染区 10、20 和 30 年生毛白杨 SOD 活性小于对照区。从毛白杨的不同器官来看,不同年龄毛白杨叶和根部的 SOD 酶活性变化比较明显,差异显著(P < 0.05),其他器官变化不显著。

污染区毛白杨 SOD 活性的化感效应结果见图 2。从图 2 可以看出,3 年生的毛白杨表现为促进效应,其中叶与枝的促进效应高于根和树干。10 年生和 30 年生的表现为抑制作用,并且抑制作用表现为 30 年生 > 20 年生,其中叶的抑制效应高于枝、树干和根。20 年生的毛白杨叶和枝表现为抑制作用,树干和根为促进效应。

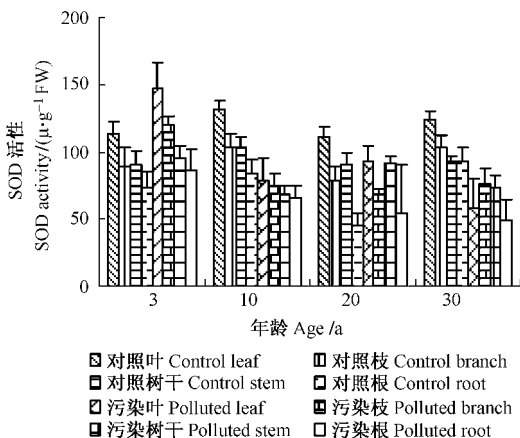


图 1 重金属胁迫对 SOD 活性的影响
Fig. 1 Effect of heavy metal on SOD activity

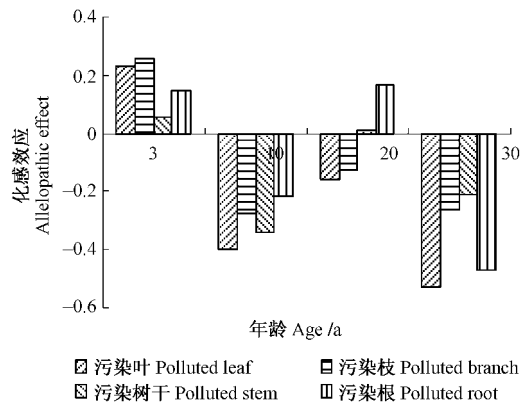


图 2 重金属胁迫对 SOD 活性的化感效应
Fig. 2 Allelopathic effect of heavy metal on SOD activity

3.3 重金属胁迫对 POD 活性的影响

不同年龄毛白杨 POD 活性大小见图 3。整体来看,随着年龄的增加,对照区毛白杨 POD 活性呈现先增加后降低的趋势,污染区也呈现出先增加后降低的趋势。对于 3 年生的毛白杨来说,与对照区相

比较,毛白杨树干的 POD 活性差异不显著,其他各器官 POD 活性差异显著。10、20 和 30 年生的毛白杨其 POD 活性均小于对照区。

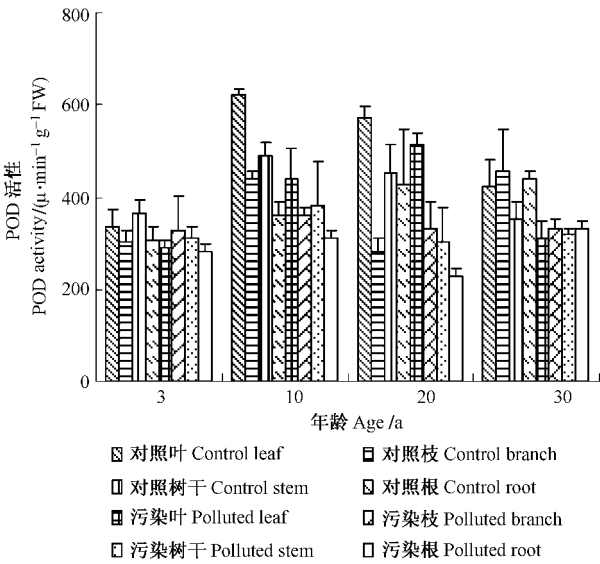


图 3 重金属胁迫对 POD 活性的影响
Fig.3 Effect of heavy metal on POD activity

污染区毛白杨 POD 活性的化感效应结果见图 4。从图 4 可以看出,除了 3 和 20 年生的枝外,均表现为抑制效应。并且整体表现为根和叶的抑制作用大于树干和枝,表明叶和根部在重金属的胁迫下,酶活性变化剧烈。

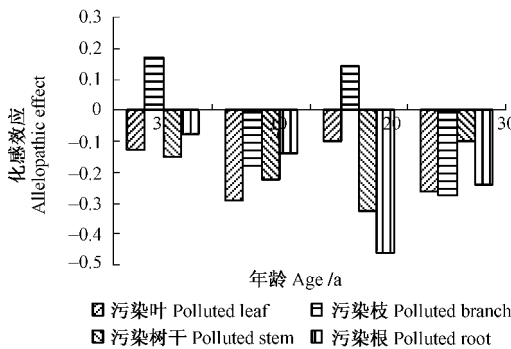


图 4 重金属胁迫对 POD 活性的化感效应
Fig.4 Allelopathic effect of heavy metal on POD activity

3.4 重金属胁迫对 CAT 活性的影响

不同年龄毛白杨 CAT 活性大小见图 5。整体来看,随着年龄增加,对照区毛白杨 CAT 活性叶表现出先增加后降低再增加的趋势,而枝、树干和根 CAT 活性呈现先降低后增加的趋势。污染区不同年龄的毛白杨 CAT 活性表现出不一致的变化趋势。3 年生的污染区毛白杨 CAT 活性低于对照区,分别是对照的 0.68、0.47、0.69 和 0.15 倍,差异显著 ($P < 0.05$)。但是 10、20 和 30 年生的毛白杨 CAT 活

性表现为根部小于对照区,但其他器官无明显变化规律。

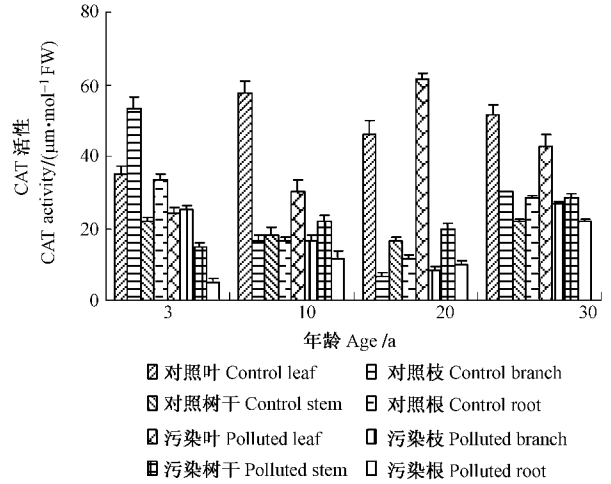


图 5 重金属胁迫对 CAT 活性的影响
Fig.5 Effect of heavy metal on CAT activity

污染区毛白杨 CAT 活性的化感效应结果见图 6。从图 6 中可以看出 3 年生的毛白杨各器官均表现为抑制作用,并且根部的抑制作用大于其他器官。10、20 和 30 年生的根部均表现为抑制作用,并且 10 年生的抑制作用最大,但树干表现为促进作用。除了 20 年生叶部有促进作用外,其他各年龄毛白杨叶部均表现为抑制作用。

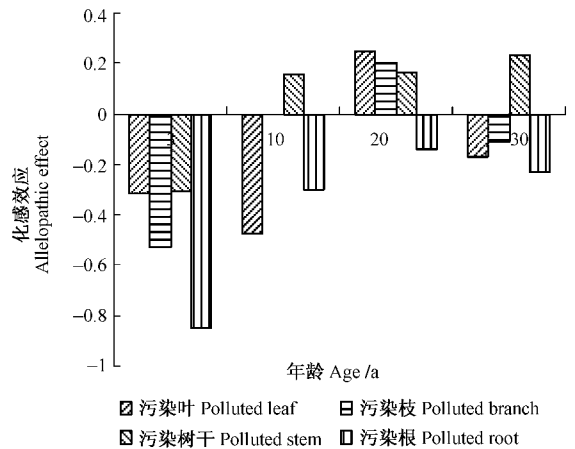


图 6 重金属胁迫对 CAT 活性的化感效应
Fig.6 Allelopathic effect of heavy metal on CAT activity

3.5 重金属胁迫对细胞膜透性的影响

不同年龄阶段毛白杨叶片的细胞膜透性见图 7。从图 7 中可以看出,对照区毛白杨的电导率随着年龄的增加呈现增加的趋势。与对照相比,污染区的毛白杨随着年龄的增加,细胞膜透性变化不明显,但是均大于对照,分别是对照的 2.26、1.38、1.29 和 1.17 倍,并且均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

污染区毛白杨叶片细胞膜透性的化感效应见图

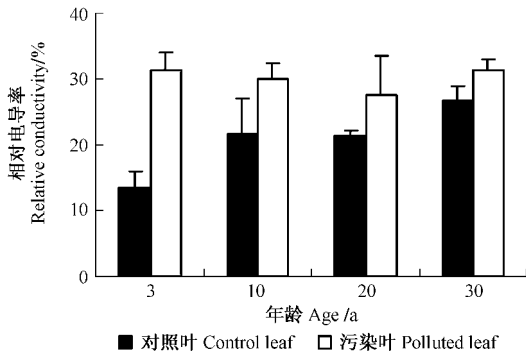


图 7 重金属胁迫对叶片细胞膜透性的影响

Fig. 7 Effect of heavy metal on permeance of cell membrane in leaves

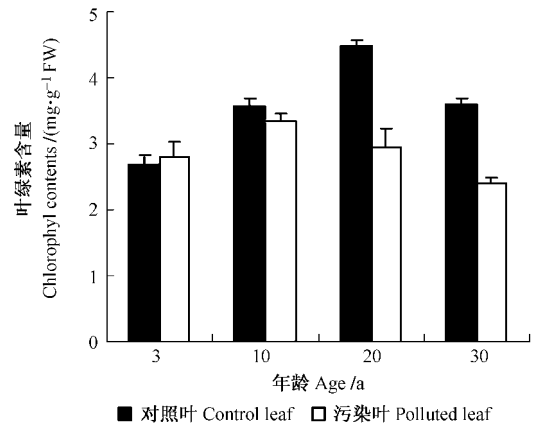


图 9 重金属胁迫对叶片叶绿素含量的影响

Fig. 9 Effect of heavy metal on chlorophyll contents

8。从图 8 可以看出,不同年龄毛白杨相对电导率的化感效应表现为抑制效应,随着年龄的增加化感效应减弱。3 年生毛白杨的抑制作用最大,表明受的伤害最大,分别是 10、20 和 30 年生的 2.06、2.52 和 3.87 倍。

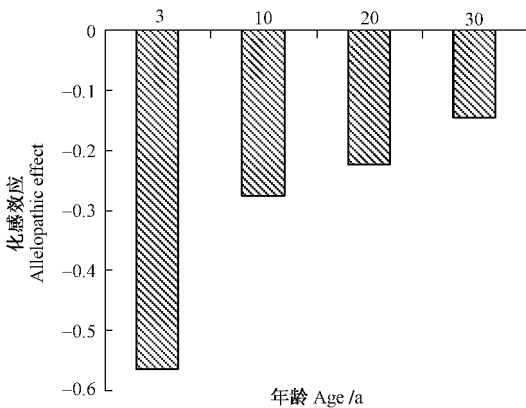


图 8 重金属胁迫对叶片细胞膜透性的化感效应

Fig. 8 Allelopathic effect of heavy metal on permeance of cell membrane in leaves

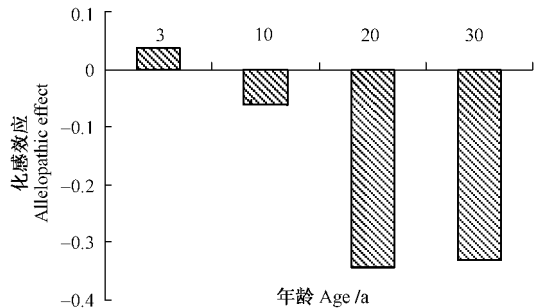


图 10 重金属胁迫对叶片叶绿素含量的化感效应

Fig. 10 Allelopathic effect of heavy metal on chlorophyll contents in leaves

3.6 重金属胁迫对叶片叶绿素含量的影响

从图 9 可以看出,随着年龄增加,对照区与污染区毛白杨叶绿素含量均呈现先增加后降低的趋势。受胁迫的 10 年生毛白杨叶绿素含量最高,而 30 年生叶绿素含量最低。除了 3 年生叶绿素含量高于对照,差异不显著 ($P > 0.05$),其他均小于对照,分别是对照的 0.93、0.66 和 0.67 倍,差异显著 ($P < 0.05$)。

污染区毛白杨叶片叶绿素含量的化感效应见图 10。3 年生毛白杨叶片叶绿素的化感效应表现为促进作用,其他年龄则表现为抑制作用,10 年生的抑制作用最小。

3.7 抗重金属能力综合评定

植物受到逆境时其生理变化是错综复杂的,并受到多种因素的影响,孤立地用一个指标评价植物抗污染能力很难反映植物的抗性本质。因此,为综合评价污染区不同年龄毛白杨抗重金属能力的大小,采用隶属函数法,也就是用模糊数学隶属度公式对各项指标测定值进行定量转换,具体计算方法是,对污染区毛白杨 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和叶绿素含量采用隶属函数。用污染区每一年龄毛白杨各项指标隶属度的平均值(即综合评定值)作为这个年龄毛白杨抗性能力综合评判的标准。

由表 2 可以看出,污染区各年龄的毛白杨抗重金属能力表现为 3 年生 > 10 年生 > 20 年生 > 30 年生。将各指标隶属度值与综合评定值做相关性分析,结果表明,POD 活性隶属度值与评定结果相关性极显著 ($P < 0.01$)。SOD 活性、CAT 活性和叶绿素含量隶属度值与综合评定值相关性显著 ($P < 0.05$)。而相对电导率隶属度值与综合评定值相关性不显著。

表 2 不同年龄毛白杨对重金属抗性的综合评定^①Tab. 2 Comprehensive comparison result of resistance to heavy metal of different aged *P. tomentosa*

指标 Index	隶属函数值				综合评定值与隶属函数值的相关系数 Correlation coefficient between comprehensive comparison value and subordinate function value
	Value of subordinate function				
	3 年生 3-year-old	10 年生 10-year-old	20 年生 20-year-old	30 年生 30-year-old	
SOD 活性 SOD activity	0.430	0.462	0.587	0.556	0.943 *
POD 活性 POD activity	0.594	0.484	0.404	0.356	0.983 **
CAT 活性 CAT activity	0.615	0.455	0.291	0.390	0.951 *
细胞膜透性 Permeance of cell membrane	0.441	0.548	0.373	0.531	0.022
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.669	0.430	0.394	0.211	0.912 *
综合评判 Comprehensive comparison	0.550	0.476	0.410	0.409	

①* : $\alpha = 0.05$; ** : $\alpha = 0.01$.

4 结论与讨论

正常条件下,植物活性氧的形成和清除之间保持一种动态平衡,在遭受胁迫时,平衡被打破,活性氧积累。相应的植物体内也有一套复杂的活性氧清除系统,其中 SOD、POD 和 CAT 是植物体内酶防御系统的 3 种重要保护酶,他们协同起来可以保护植物细胞免受活性氧的损伤(韩刚等,2008)。本研究表明:污染区毛白杨 SOD 活性随着毛白杨年龄的增加,表现为降低的趋势。POD 活性随着毛白杨年龄的增加,表现为先增加后降低的趋势。污染区不同年龄的毛白杨 CAT 活性表现出不一致的变化趋势。与对照相比,污染区毛白杨随着年龄的增加,叶绿素含量先增加后降低,但低于对照。众所周知,叶绿素是光合作用的主要色素,叶绿素的破坏与降解会直接导致光合作用效率的降低,使植物得不到足够养分,从而生长缓慢,甚至停止生长(刘登义等,2002)。在重金属胁迫下,对于 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和叶绿素含量的变化情况,以不同的树木为试验材料,研究者有不一致的结论(吴月燕等,2009;杨卫东等,2009;李永杰等,2009)。由于树木本身的差异以及重金属元素毒性的差异,使得树木对重金属污染的适应过程和机理的研究极为复杂,很多机理和规律尚未发现或不甚明确(唐凌凌等,2009),且有关不同年龄相同树木抗重金属能力的研究未见报道,因此对不同年龄同一树种抗重金属能力的研究具有重要意义。

污染区毛白杨 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和叶绿素含量指标隶属度值与综合评定结果呈现显著或极显著相关性,表明这 4 项指标是评定毛白杨对重金属胁迫响应的重要指标。膜脂过氧化是细胞中产生的自由基诱导膜脂不饱和脂肪酸过氧化造成的,导致细胞膜受损伤,使细胞膜透性增大,细胞膜透性越大,说明细胞膜受到的伤害越大(彭建云等,

2007)。随着年龄增加,污染区毛白杨相对电导率均大于对照区,说明污染区细胞膜均受到一定的伤害。同时污染区毛白杨的相对电导率与综合评定结果相关性不显著。

本研究应用化感指数分析污染区毛白杨的抗性大小。化感指数为正值表明重金属通过刺激体内少量活性氧的积累而激发了细胞自身的防御系统,从而起到保护作用,化感指数值越高,保护作用越强;化感指数为负值表明重金属胁迫致使植物体内活性氧大量积累,超出了细胞自身的防御能力,表现为毒害作用,化感指数越低,说明毒害作用越大(龚双姣等,2007)。根据化感指数值的大小可以看出,污染区不同年龄毛白杨各器官 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、叶绿素含量和相对电导率指标的化感指数大小的变化趋势不一致,说明需要将化感指数指标和 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、叶绿素含量以及相对电导率指标结合起来进行植物抗性评价。综上所述,各年龄的毛白杨抗重金属能力表现为 3 年生 > 10 年生 > 20 年生 > 30 年生,表明较大年龄的毛白杨抗重金属的能力有下降的趋势。

目前关于树木抗重金属能力的研究很多,但大多集中在草本植物和部分树木幼苗的研究(庞欣等,2001;谢传俊等,2008;万雪琴等,2008),今后应加强城市绿化树种以及同一树种不同年龄时期抗重金属能力的研究,为选择抗重金属能力强的城市绿化树种提供依据。

参 考 文 献

- 陈德明,俞仁培,杨劲松. 2002. 盐渍条件下小麦抗盐性的隶属函数值法评价. 土壤学报, 39(3): 368-374.
- 龚双姣,马陶武,姜业芳,等. 2007. 铅胁迫对 3 种藓类植物抗氧化酶活性的影响. 西北植物学报, 27(10): 2035-2040.
- 郭平,刘畅,张海博,等. 2007. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究. 水土保持学报, 21(6): 92-97.
- 韩刚,党青,赵忠. 2008. 干旱胁迫下沙生灌木花棒的抗氧化

- 保护响应研究. 西北植物学报, 28(5):1007-10131.
- 孔祥瑞,曲东,周莉娜,等. 2007. 硫营养对重金属胁迫下玉米和小麦根系导水率的影响. 西北植物学报, 27(11):2257-2262.
- 李国栋,王志刚,袁玉欣,等. 2007. 保定市城市森林结构特征分析. 河北农业大学学报, 30(5):51-56.
- 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化技术实验原理和技术. 北京:高等教育出版社,164-169.
- 李庆亭,杨锋杰,张兵,等. 2008. 重金属污染胁迫下盐肤木的生化效应及波谱特征. 遥感学报, 12(2):284-290.
- 李永杰,李吉跃,蔡囊. 2009. 铅胁迫对大叶黄杨铅积累量及叶片生理特性的影响. 水土保持学报, 23(5):257-260.
- 刘登义,王友保,张徐祥,等. 2002. 污灌对小麦幼苗生长及活性氧代谢的影响. 应用生态学报, 13(10):1319-1322.
- 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等. 2008. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布. 应用生态学报, 19(4):752-756.
- 李彦慧,李向应,白瑞琴. 2008. 4种李属彩叶树木对SO₂的抗性. 林业科学, 44(2):28-33.
- 庞欣,王东红,彭安. 2001. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响. 环境科学, 22(5):108-111.
- 彭建云,丁同楼,陈敏,等. 2007. 同盐处理对玉米幼苗根系质子分泌及细胞膜透性的影响. 西北植物学报, 27(12):2496-2501.
- 沈伟其. 1988. 测定水稻叶片叶绿素含量的混合液体取法. 植物生理通讯, 24(3):62-67.
- 唐凌凌,教忠意,隋德宗,等. 2009. 林木对重金属胁迫的抗性研究进展. 浙江林业科技, 29(4):92-96.
- 田如男,薛建辉,潘良,等. 2004. 铅胁迫对4种常绿阔叶行道树幼细胞膜透性的影响. 南京林业大学:自然科学版, 28(4):43-46.
- 万雪琴,张帆,夏新莉,等. 2008. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响. 林业科学, 44(6):73-78.
- 万永吉,郑文教,方煜. 2008. 重金属铬(Ⅲ)胁迫对红树植物秋茄幼苗SOD、POD活性及其同工酶的影响. 厦门大学学报:自然科学版, 47(4):571-574.
- 魏复盛. 1990. 中国土壤元素背景值. 北京:中国环境科学出版社, 366-369.
- 谢传俊,杨集辉,周守标,等. 2008. 铅递进胁迫对假俭草和结缕草生理特性的影响. 草业学报, 17(4):65-70.
- 谢建治,刘树庆,王立敏,等. 2002. 保定市郊土壤重金属污染现状调查及其评价. 河北农业大学学报, 25(1):38-41.
- 吴月燕,陈赛,张燕忠,等. 2009. 重金属胁迫对5个常绿阔叶树种生理生化特性的影响. 核农学报, 23(5):843-852.
- 杨卫东,陈益泰. 2008. 镉胁迫对旱柳细胞膜透性和抗氧化酶活性的影响. 西北植物学报, 28(11):2263-2269.
- 殷云龙,宋静,骆永明,等. 2005. 南京市城乡公路绿地土壤重金属变化及其评价. 土壤学报, 42(2):206-209.
- 赵卓亚,王志刚,毕拥国,等. 2009. 保定市城市绿地土壤重金属分布及其风险评价. 河北农业大学学报, 32(2):16-20.
- 周守标,王春景,杨海军,等. 2007. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. 生态学报, 27(1):281-287.
- 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 2006. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征. 生态学报, 26(2):146-153.
- Much D. 1992. Soil contamination beneath asphalt roads by polynuclear aromatic hydrocarbons, zinc, lead and cadmium. Science of the Total Environment, 12(2):49-60.
- Pulford I D, Watson C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. Environment International, 29:529-540.
- Volker R. 2002. Influence of heavy metals on the microbial degradation of diesel fuel. Chemosphere, 49(6):559-568.
- Williamson G B, Richardson D. 1988. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. Journal Chemical Ecology, 14(1):181-187.

(责任编辑 于静娴)