

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.010

普瑞杨、46 杨及 107 杨的林内 SO₂ 浓度及叶片硫酸根离子含量差异

冯锦霞, 马 洁, 万贤崇*

(中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 研究 3 种杨树对空气中 SO₂ 的吸收和转化作用, 探索普瑞杨抗 SO₂ 的机制以及净化大气的能力。[方法] 在普瑞杨、46 杨和 107 杨森林中, 测定林内、林外空气中 SO₂ 浓度的日动态变化, 并测定在 SO₂ 污染环境和非污染环境条件下杨树叶片中硫酸根 (SO₄²⁻) 离子的浓度, 依此比较 3 种杨树对 SO₂ 污染的净化作用。[结果] 从林内、林外 SO₂ 浓度的日动态变化可见, 3 种杨树均能吸收 SO₂, 其中, 普瑞杨吸收 SO₂、净化空气的能力显著大于 107 杨和 46 杨。无论在高浓度还是低浓度 SO₂ 环境下, 普瑞杨叶片中的硫酸根离子含量均显著高于 46 杨和 107 杨, 说明普瑞杨具有更强的吸收 SO₂ 并转化为无毒含硫化合物的能力, 这也是普瑞杨抗 SO₂ 的重要机理。[结论] 普瑞杨具有比 107 杨和 46 杨更强的净化 SO₂ 污染环境的能力, 从而可以更好净化空气, 减少雾霾对人体的危害; 普瑞杨具有更强的将 SO₂ 转化为无毒的硫酸根离子的能力, 从而达到脱毒和抗 SO₂ 的作用。

关键词: 杨树; SO₂; 吸收转化; 净化空气; 脱毒

中图分类号: S792.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)01-0092-05

二氧化硫 (SO₂) 是主要的大气污染物, 主要源于煤和石油的燃烧。SO₂ 在空气中会氧化形成硫酸盐、气溶胶 ((NH₄)₂SO₄) 等衍生物, 是 PM_{2.5} 和雾霾的组成成分, 也是雾霾中的主要有害成分, 造成二次污染, 严重危害人体健康^[1-3]。随着我国工业化、城镇化和重化工业的继续快速发展、能源消费和机动车保有量的快速增长, SO₂ 乃至雾霾污染形势十分严峻。环境治理、生态文明建设是当前重大国策。

普瑞杨是近年发现的杨树抗 SO₂ 新品种 (品种权号: 20120047), 有很强的抗 SO₂ 有毒气体特性, 在 SO₂ 污染和酸雨严重地区仍生长旺盛^[4-5]。在高达 26 mg·m⁻³ 的 SO₂ 浓度短期静态熏气条件下, 普瑞杨没有出现叶片受害症状, 而且可维持较

强光合速率^[4]。另外, 普瑞杨还兼具 107 杨的速生等性状^[5]。

植物主要通过气孔吸收大气中的 SO₂, 在植物体内, SO₂ 遇水转化成亚硫酸盐 (SO₃²⁻)^[6]。这些亚硫酸盐对植物具有很强毒性^[7], 通过形成活性氧 (ROS) 和其他自由基等干扰生理过程^[8]; 但硫是植物生长发育必需的矿质元素, 是含硫氨基酸以及谷胱甘肽的组成成分。植物可以通过代谢将亚硫酸盐转化为硫酸根离子, 而硫酸根对植物没有毒害作用, 所以植物将亚硫酸盐转化成硫酸根就起到解除毒性的作用。硫酸根主要存在于液泡中, 一部分硫酸根还会进一步还原及同化后生成半胱氨酸, 半胱氨酸进一步合成甲硫氨酸和谷胱甘肽^[9]。谷胱甘肽是一种重要的抗氧化剂, 负责维持细胞在胁迫下的

收稿日期: 2021-07-31 修回日期: 2021-09-27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (CAFYBB2018SZ019); (CAFINT2014K09)

* 通讯作者: 万贤崇, 研究员。研究方向: 植物生态生理学。E-mail: wxc@caf.ac.cn

抗氧化机制。笔者先前的研究发现, 普瑞杨叶片的谷胱甘肽含量比 107 杨高, 在高 SO₂ 浓度环境下仍可维持较高光合作用速度及气孔导度^[4]。

有关植物吸收、转化及利用 SO₂ 的研究, 有助于深入了解植物的大气净化和环境保护作用、利于人们更深刻体会到绿水青山就是金山银山。多年生的木本植物可以持续的起到大气净化作用, 并将大气中有害污染物转化为对植物自身有益的化合物。关于植物对大气 SO₂ 的净化作用, 以前的报道多通过测定叶片含硫量的变化来推测植物的净化作用^[10-12], 没有同时直接测定空气中的 SO₂ 浓度变化。另外, 叶片含硫量的测定是测定植物体内的总硫含量, 其可能包括植物体内的 SO₂ 和亚硫酸盐, 这些化合物对植物有毒害作用。所以, 总硫的测定不能体现植物对 SO₂ 的脱毒功能。

笔者推测普瑞杨可以吸收更多 SO₂, 并且有更强的将 SO₂ 转化为硫酸根离子的解毒能力。所以, 本研究通过测定普瑞杨林内空气中 SO₂ 浓度, 与空旷地和其它杨树品种林内测定值对照, 以说明普瑞杨减少大气 SO₂ 的净化能力; 通过测定普瑞杨在大气 SO₂ 污染环境和无污染环境(苗圃)中叶片硫酸根的含量, 探索普瑞杨是否有降低 SO₂ 毒害的能力。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况和试验材料

试验一: 在河南省濮阳市热电厂大院内试验林进行。在试验初期, 该试验地的空气 SO₂ 浓度较高。为了比较普瑞杨和 46 杨的抗 SO₂ 能力, 2010 春在该电厂内扦插了 1 年生普瑞杨和 46 杨各 1 hm² 左右, 株行距为 150 cm × 150 cm。2014 年 7 月 28 日 9: 00—11: 00 am, 对种在热电厂内的普瑞杨林内和比邻的 46 杨林内以及紧邻的空旷地, 进行了空气 SO₂ 浓度的测定。2015 年 7 月 6 日, 从 8: 00—18: 00, 每 2h 取 1 次空气样品, 对热电厂的普瑞杨林内、46 杨林内和空旷地空气 SO₂ 浓度进行了全天动态检测。

试验二: 2018 年 5 月中旬, 分别在 3 个地点(河南省濮阳市热电厂大院内试验林, 河南安阳汤阴宜沟镇大寺台村普瑞杨、107 杨试验林, 河北献县河城街镇王友村普瑞杨、107 杨试验林)对普瑞杨、46 杨和 107 杨林内外空气 SO₂ 浓度进行了再次全天动态检测, 3 个地点的基本信息见表 1。

表 1 试验林基本信息

Table 1 Basic information of experimental forests

地点 Site	品种 Variety	林龄/a Forest age	密度/ (m × m) Density	树高/m Height	胸径/cm DBH	郁闭度 Canopy density
濮阳	普瑞	5	1.5 × 1.5	10.7	11.4	完全
濮阳	46	5	1.5 × 1.5	10.7	11.1	完全
濮阳	普瑞	8	1.5 × 1.5	16.3	13.3	完全
濮阳	46	8	1.5 × 1.5	15.5	12.4	完全
安阳	普瑞	8	2 × 6	18.3	16.7	部分
安阳	107	8	2 × 6	18.3	16.6	部分
献县	普瑞	5	2 × 3	12.9	14.3	完全
献县	107	5	2 × 3	12.7	13.8	完全

另外, 2015 年 7 月 6 日采集了种在濮阳热电厂普瑞杨和 46 杨大树的成熟叶片; 2018 年 5 月中旬, 在河南安阳汤大田苗圃中采集了普瑞杨和 107 杨成熟叶片; 杀青烘干后, 带回实验室测定叶片的硫酸根离子含量。

1.2 空气中 SO₂ 浓度的测定方法

空气中 SO₂ 浓度采用国家标准 (GBZ/T160.33-2004) 进行检测, 2015 年委托具有检测资质的第三方(河南濮阳环境检测站)测定在河南濮阳火力发电厂空气中的 SO₂ 浓度, 2018 年委托具有检测资质的第三方(河南安凯职业技术检测有限公司)测定空气中的 SO₂ 浓度。采用大气采样器 (FCC-1500D) 采集气样, 运用甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法测定 SO₂ 浓度。

1.3 叶片硫酸根离子的测定方法

使用阴离子交换色谱仪 (Dionex ICS-3000) 定量测定叶片的 SO₄²⁻ 含量^[13]。叶片烘干后, 用研钵粉碎, 将过 100 目筛子的叶片粉末 50 mg 加入离心管中, 并在离心管中加入含有 100 mg 的 PVPP 的 1 mL 去离子水。将离心管放入混匀仪中, 4℃ 混匀振荡 60 min, 然后沸水煮 15 min。取出离心管, 4℃, 15 000 g 离心 10 min, 吸取上清液, 再将上清液离心 5 min 后, 取上清液稀释 20 倍后, 通过离子色谱仪 (戴安 ICS-3000) 测定硫酸根离子含量 (于中国林科院森林生态学重点实验室和森林保护学重点实验室完成)。

1.4 数据处理及分析

采用 Excel 进行 *t*-检验, 单因素方差分析, Duncan 多重比较。以 *p* = 0.05 为显著性鉴定标准。

所有测定至少重复3次。

2 结果与分析

2.1 普瑞杨林内外空气中 SO₂ 浓度的差异

空气中 SO₂ 浓度的测定在濮阳市热电厂大院内试验林中于 2014 年 7 月 28 日 9:00—11:00 am 进行,发现普瑞杨林内 SO₂ 浓度是林外的 55% ($p < 0.05$) (表 2),表明普瑞杨可减少空气中大概 45% 的 SO₂。普瑞杨林内空气中 SO₂ 浓度也显著的低于相邻的 46 杨林内空气中 SO₂ 浓度,后者是林外空地 SO₂ 浓度的 65%。

表 2 普瑞杨和 46 杨林内以及林外的大气 SO₂ 浓度

Table 2 The sulfur dioxide concentration in the air inside and outside the Purui and Zhonglin 46 forests

地点 Site	SO ₂ 浓度 Concentration of sulfur dioxide/ (mg·m ⁻³)
普瑞杨林内 Purui poplar forest	0.044 ± 0.002 5 c
46杨林内 46 poplar forest	0.052 ± 0.002 5 b
林外空地 Open space outside the forest	0.080 ± 0.006 2 a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant ($p < 0.05$) differences.

2.2 普瑞杨、46 杨和 107 杨林内外空气中 SO₂ 浓度各时间段的差异

在河南濮阳、安阳、河北献县进行了 4 次对比测定,分别于 2015 和 2018 年 2 次在濮阳进行普瑞杨和 46 杨树林对比试验;2018 在河南安阳和河北献县各进行了 1 次普瑞杨和 107 杨林对比试验。比较普瑞杨和 46 杨、普瑞杨和 107 杨林内空气的 SO₂ 浓度,并以相邻的林外空地 SO₂ 浓度为对照,计算普瑞杨、107 杨和 46 杨林内 SO₂ 浓度与林外空地的比值,所得数据绘成动态曲线(图 1、2)。图 1 呈现的是于 2018 年 5 月中旬在河北献县测定的情况,全天的 SO₂ 浓度有较大波动,但 2 种杨树林中大气 SO₂ 浓度都低于相邻空地,分别相当于空地中 59% 和 71%,其中,普瑞杨内更低。

将 3 地 4 次测定的结果绘制在一起(图 2),显示 46 杨和 107 杨林内的 SO₂ 浓度是空地的 70% 左右,而普瑞杨林内是 55% 左右。普瑞杨净化空气中 SO₂ 能力比 46 杨和 107 杨大于约 15%。回归曲线显示:46 杨和 107 杨林内的 SO₂ 浓度全天基本不变或略有上升的趋势;而普瑞杨林内的

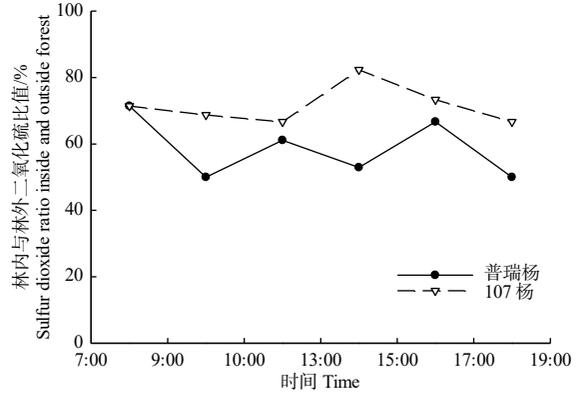
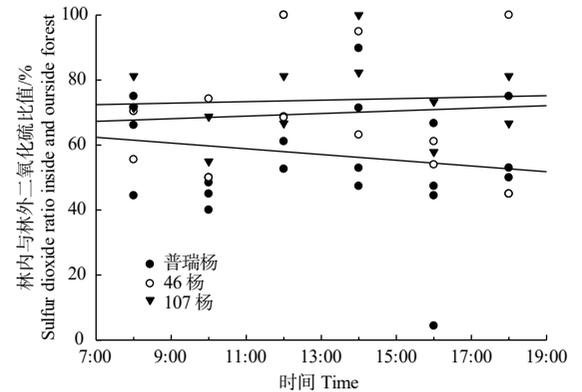


图 1 普瑞杨和 107 杨林内和林外不同时间 SO₂ 浓度的动态曲线

Fig. 1 Diurnal dynamic changes of sulfur dioxide concentration in the air inside and outside the Purui and 107 poplar forests at different times



注: 图中回归线从下往上依次是普瑞杨林、46 杨林和 107 杨林

Note: The regression lines in the figure are of Purui, 46 and 107 poplar forest from bottom to top

图 2 普瑞杨林、46 杨和 107 杨林内和林外不同时间 SO₂ 浓度动态变化。

Fig. 2 Diurnal dynamic changes of sulfur dioxide concentration in the air inside and outside the Purui, 46 and 107 poplar forests at different times

SO₂ 浓度从早晨到下午一直在下降。

2.3 普瑞杨在不同大气 SO₂ 浓度环境中的叶片硫酸根含量

本文测定污染环境(河南濮阳市热电厂内)下的普瑞杨和 46 杨以及无污染环境(苗圃)下的普瑞杨和 107 杨的叶片硫酸根含量(表 3),表明热电厂内普瑞杨叶片硫酸根的含量是 46 杨的 2.13 倍 ($p < 0.01$),是苗圃中普瑞杨的 2.49 倍 ($p < 0.01$),说明在大气 SO₂ 污染环境普瑞杨更能发挥将有毒 SO₂ 气体转化成无毒的硫酸盐的功能。苗圃普瑞杨叶片硫酸根的含量也比 107 杨高 2.07 倍 ($p <$

表 3 普瑞杨与其它杨树品种叶片硫酸根含量的差异

Table 3 Difference of sulfate (SO₄²⁻) concentration in the leaves of Purui and other poplar varieties

地点 Site	杨树品种 Varieties	SO ₄ ²⁻ 浓度 Concentration of sulfate/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	环境SO ₂ 浓度 Concentration of sulfur dioxide in the air / ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
热电厂 Power plant	普瑞杨 Purui poplar	55.14 ± 3.48 A	0.220 ± 0.025
	46杨 46 poplar	25.86 ± 3.52 B	
苗圃 Nursery	普瑞杨 Purui poplar	22.14 ± 0.83 A	0.017 ± 0.002
	107杨 107 poplar	10.69 ± 1.98 B	

注: 不同大写字母表示差异显著 ($p < 0.01$)。
Note: Different capital-letters in the same column indicate significant ($p < 0.01$) differences.

0.01), 说明在低 SO₂ 环境中普瑞杨吸收转化 SO₂ 的能力也比 107 杨强。

3 讨论

本文首次从杨树林内、外空气中 SO₂ 浓度的差异, 比较了普瑞杨等 3 种杨树品种吸收 SO₂ 净化空气的能力, 并结合测定叶片中硫酸根离子的浓度, 探索这几种杨树品种将吸收空气中的 SO₂ 转化为无毒的含硫化合物的能力, 藉此阐明抗硫无性系普瑞杨的抗 SO₂ 机制。

关于森林树木对大气污染物吸收净化功能的研究, 同时比较森林内外 SO₂ 浓度的变化和树木体内硫酸根离子的浓度变化有助于精确判定树木的吸收净化能力。仅通过测定树木叶片中硫含量来判定其吸收 SO₂ 的能力, 难以确定硫含量的变化是否是通过 SO₂ 的吸收, 因为也可能来自根系对硫酸盐的吸收。另一方面, 仅从森林内、外 SO₂ 浓度变化来判断树木净化大气的能力也难以断定 SO₂ 是否直接被树木吸收了, 而植物体内硫含量的数据可以佐证这一判断。

植物吸收 SO₂、净化空气作用还需和它转化脱毒的能力相关连, 因为 SO₂ 对植物有毒害作用, 只有及时将 SO₂ 转化成无毒的化合物才能保证在植物体内 SO₂ 不累积到毒害浓度, 使植物健康正常生长并持续起到吸收 SO₂、净化空气的作用。植物主要是通过气孔吸收 SO₂ 等有毒气体^[14-15]。SO₂ 通过气孔进入细胞质中, 并迅速水合并分离成亚硫酸盐 (SO₃²⁻) 和亚硫酸氢离子 (HSO₃⁻), 亚硫酸盐可以在过氧物体中被亚硫酸盐氧化酶 (SO) 氧化成硫酸盐 (SO₄²⁻), 后者在质体中进一步同化成无毒有机硫, 植物以此来降低受 SO₂ 毒害的程度^[16]。本研究在不同的地点、时间、SO₂ 浓度条件下, 对比了不同品种杨树林内、外空气中 SO₂ 浓度及其

变化规律, 充分证明 3 种杨树都具有吸收 SO₂、净化空气的能力, 但普瑞杨的能力更强。同时本研究通过比较污染环境 (热电厂内) 和较洁净空气环境 (苗圃中) 中普瑞杨与其它品种杨树叶片硫酸根含量的差异, 均显示普瑞杨叶片硫酸根的含量显著高于其他杨树, 说明普瑞杨有更强的吸收、转化 SO₂ 的能力。笔者先前研究发现, 普瑞杨叶片中的谷胱甘肽含量比 107 杨高出 24%^[4]。可见一部分硫酸根发生还原以及同化生成谷胱甘肽^[9]。谷胱甘肽的产生不但消耗了吸入植物体内的 SO₂, 而且谷胱甘肽本身具有抗过氧化作用, 藉以增强植物抗环境胁迫的能力。这些转化也揭示了普瑞杨的抗 SO₂ 机制, 即通过及时迅速地将 SO₂ 水合之后生成的亚硫酸盐转化为对植物是有益无害的硫酸根离子, 从而实现脱毒。

4 结论

普瑞杨具有很强的吸收空气中 SO₂ 能力, 它可以减少空气中 SO₂ 含量和污染危害, 并且能将有毒的 SO₂ 转化成无毒且对植物 (及其他生物) 有益的硫酸根离子, 最后转化为植物所需的含硫氨基酸及谷胱甘肽 (对生物有益的还原剂)。这些转化脱毒能力可能是普瑞杨抗 SO₂ 的重要机理。因此, 普瑞杨可作为净化空气、并适宜 SO₂ 污染区种植的优良造林树种。

参考文献:

- [1] Zheng M, Cass C R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(11): 2361-2371.
- [2] 吕效谱, 成海容, 王祖武, 等. 中国大范围雾霾期间大气污染特征分析[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 28 (3): 104-110.
- [3] Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contri-

- bution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [4] 徐 洁, 白坤栋, 万贤崇, 等. 欧美杨107抗硫无性系的变异及其抗氧化保护系统对SO₂响应[J]. *林业科学*, 2011, 47(2): 66-71.
- [5] 万贤崇, 张存义, 冯锦霞, 等. 杨树抗硫新品种‘普瑞’[J]. *林业科学*, 2012, 48(12): 160.
- [6] Sekiya J, Wilson L G, Filner P. Resistance to injury by sulfur dioxide[J]. *Plant Physiology*, 1982, 70: 437-441.
- [7] Thomas M D, Hendricks R H, Collier T R, *et al.* The utilization of sulfate and sulfur dioxide for the nutrition of alfalfa[J]. *Plant Physiology*, 1943, 18(3): 345-371.
- [8] Tanaka K, Otsubo T, Kondo N. Participation of hydrogen peroxide in the inactivation of Calvin-cycle SH enzymes in SO₂-fumigated spinach leaves[J]. *Plant Cell Physiology*, 1982, 23(6): 1009-1018.
- [9] Randewig D, Hamisch D, Eiblmeier M, *et al.* Oxidation and reduction of sulfite contribute to susceptibility and detoxification of SO₂ in *Populus × canescens* leaves[J]. *Trees*, 2014, 28(2): 399-411.
- [10] 黄会一, 张有标, 张春兴, 等. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究[J]. *生态学报*, 1981, 1(4): 39-48.
- [11] 吴耀兴, 康文星, 郭清和, 等. 广州市城市森林对大气污染物吸收净化的功能价值[J]. *林业科学*, 2009, 45(5): 42-48.
- [12] 王荣新, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京市9种常见绿化树种吸收积累SO₂能力研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 392-398.
- [13] Brychkova G, Xia Z, Yang G, *et al.* Sulfite oxidase protects plants against sulfur dioxide toxicity[J]. *Plant Journal*, 2007, 50(4): 696-709.
- [14] Omasa K, Saji H, Youssefian S, *et al.* Air pollution and plant biotechnology[M]. Tokyo: Springer-Verlag, 2002.
- [15] 曹裕松, 李志安, 邹 碧. 森林植物的一些特殊环境功能[J]. *生态科学*, 2003, 22(3): 284-287.
- [16] Rennenberg H, Herschbach C. A detailed view on sulphur metabolism at the cellular and whole-plant level illustrates challenges in metabolite flux analyses[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(20): 5711-5724.

Absorption and Transformation of Sulfur Dioxide by *Populus × euramericana* cv. 'Purui'

FENG Jin-xia, MA Jie, WAN Xian-chong

(Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 10091, China)

Abstract: [Objective] To investigate the absorption and transformation of sulfur dioxide in the air by three poplar varieties in order to study the mechanism of sulfur dioxide resistance and the capacity of *Populus × euramericana* cv. 'Purui' in purifying the atmosphere. [Method] Three poplar varieties (*Populus × euramericana* cv. 'Purui' (Purui), *Populus × euramericana* cv. '74/76' (107) and *Populus × euramericana* cl. 'Zhonglin 46' (Zhonglin 46)) were selected to compare their effects on absorbing and purifying the sulfur dioxide in atmosphere. The diurnal dynamic changes of sulfur dioxide concentration in the air inside and outside the forests were measured. The concentrations of sulfate (SO₄²⁻) in the leaves of Purui, Zhonglin 46 and 107 under different sulfur dioxide pollution environments were measured. [Result] The daily dynamic changes of sulfur dioxide concentration inside and outside the forests indicated that the three poplar varieties were able to absorb sulfur dioxide, and hence purify the air. Among them, Purui had significantly greater capacity in sulfur dioxide absorption and air purification than Zhonglin 46 and 107. Sulfate ion concentration in Purui leaves was significantly higher than that in Zhonglin 46 and 107. Whether in the environment of high or low concentration of sulfur dioxide, the sulfate ion in the leaves of Purui was higher than that of the other two varieties, indicating that Purui had stronger ability to absorb sulfur dioxide and convert it into non-toxic sulfur compounds. This is also an important mechanism of sulfur dioxide resistance for Purui. [Conclusion] Among the three poplar varieties, Purui has stronger ability to purify the atmosphere polluted by sulfur dioxide, thereby detoxifying sulfur dioxide, so as to better purify the air and reduce the harm of haze to human body. Compared with other poplar species, Purui has stronger ability to convert sulfur dioxide into non-toxic sulfate ions, which can facilitates its detoxification.

Keywords: Poplar; sulfur dioxide; absorption and transformation; air purification; detoxification