

网络出版时间:2014-06-21 18:02

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.07.005

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.07.005.html

秦岭南坡 2 种林分类型林冠层对大气降水 水质的生态效应

刘永杰,党坤良,王连贺,刘盼

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】研究秦岭南坡 2 种林分类型的林冠层对大气降水水质的影响,探讨林冠层对大气降水水质的生态学效应,为水源林建设提供理论依据。【方法】在秦岭火地塘林区选取红桦(*Betula albo-sinensis* Burkill)林和锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)林 2 种林型,检测大气降水通过这 2 种林分林冠层所形成的林内穿透雨的水质,并与大气降雨的水质进行比较,研究林冠层对水质的影响。【结果】红桦林、锐齿栎林林冠层均有降低雨水酸性的作用,其中锐齿栎林提升降水 pH 的能力相对较强;2 种林分的林冠层对大气降雨中的 NO_3^- 均表现出较强的吸附作用,而对于 NH_4^+ 则表现出较强的淋溶作用;锐齿栎林林冠层吸附大气降雨中 Na 的能力及被大气降雨淋溶出 PO_4^{3-} 、Ca 和 Mg 的能力均明显强于红桦林林冠层;红桦林林冠层被大气降水淋溶出 K 的能力明显强于锐齿栎林林冠层;红桦林林冠层和锐齿栎林林冠层对降雨中 Cu、Pb、Cd、Cr 有较明显的净化作用,2 种林分对同一种元素的净化能力基本接近;锐齿栎林林冠层净化大气降水中 As 的能力要优于红桦林林冠层。【结论】森林林冠层对大气降水有一定的净化作用。

【关键词】 秦岭南坡;红桦;锐齿栎;林冠层;水质

【中图分类号】 S718.56

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)07-0089-06

Ecological effects of canopies of two forest types on rain water quality on the south slope of Qinling Mountains

LIU Yong-jie, DANG Kun-liang, WANG Lian-he, LIU Pan

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the effects of canopies of two forest types on south slope of Qinling Mountains on water quality of atmospheric precipitation, thereby revealing the ecological effects of forest canopy on atmospheric precipitation and providing theoretical basis for construction of water conservation forest. 【Method】 We used two forest types, *Betula albo-sinensis* Burkill and *Quercus aliena* var. *acuteserrata*, in Huoditang forest region in Qinling Mountains for detecting quality of water falling through the canopy layers and comparing with that of atmospheric precipitation. 【Result】 Canopies of both *B. albo-sinensis* Burkill and *Q. aliena* var. *acuteserrata* reduced the acidity of rain water, the latter reduced more strongly. The two forest canopies had a great ability of absorbing NO_3^- and enriching NH_4^+ in rain water. *Q. aliena* var. *acuteserrata* canopy had better ability of absorbing Na and enriching PO_4^{3-} , Ca and Mg, while *B. albo-sinensis* Burkill canopy was better at enriching K in rain water. Moreover, both forest

【收稿日期】 2014-02-21

【基金项目】 国家林业公益性行业科研专项(201204502)

【作者简介】 刘永杰(1986—),男,河南新郑人,在读硕士,主要从事森林生态学研究。E-mail:626901852@qq.com

【通信作者】 党坤良(1960—),男,陕西渭南人,副教授,硕士生导师,主要从事森林水分循环与平衡、森林土壤肥力、树木营养与树木生长、环境监测与保护、自然保护区经营与管理等研究。E-mail:dangkl@126.com

canopies had identically strong purification effects on Cu,Pb,Cd,and Cr in rain water,while *Q. aliena* var. *acuteserrata* canopy had greater ability of purifying As in rain water.【Conclusion】Forest canopy had a purification effect on atmospheric precipitation.

Key words: Qinling Mountain range; *Betula albo-sinensis* Burkill; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; forest canopies; water quality

水质安全是南水北调中线工程的生命线^[1]。森林生态系统是地球上至关重要的系统之一,在净化水质、保护水源上居功至伟,素有“绿色水库”的美称。随着经济与社会的发展,水的资源与环境问题倍受关注。因此,开展森林与水源净化关系的研究,具有十分重要的意义。

秦岭林区位于国家战略性重点工程——南水北调中线工程水源区,其主体位于陕西。由于陕西南部矿产资源丰富,近年来采矿业发展迅速,采矿和金属冶炼产生的粉尘及排出的废气已造成当地物理化学污染,并引发酸雨等一系列问题,进而很有可能会影响到调水的水质。大量的研究表明:森林生态系统可以通过能量转换、吸收同化、物质循环等功能稳定、净化、调节水质,进而提供优质水源^[2-4]。目前,有关陕西秦岭林区森林生态系统对森林水质的影响研究很多^[5-9],但很少有针对不同林分类型展开讨论的相关报道,因此对南水北调水源林建设的指导意义有限。秦岭森林面积约占陕西省总土地面积的40%,并多分布于海拔1 300 m以上的中山地带,主要成林树种有锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、山杨(*Populus da-vidiana*)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burkill)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和华山松(*Pinuss armandi*)等。火地塘林区地处秦岭南坡中山地带中部,又位于南水北调中线工程水源林区的核心地带,其气候、土壤、植被等在秦岭林区均具有较好的代表性。因此,本研究在该林区选择2种主要林分——红桦林和锐齿栎林,就其林冠层

对大气降雨水质的影响进行探讨,旨在为秦岭水源林建设过程中造林树种的选择提供基础数据。

1 试验地概况

火地塘林区(东经108°24′00″~108°36′10″,北纬33°22′00″~33°37′30″)位于陕西省宁陕县境内。林区面积22.25 km²,海拔1 470~2 473 m。气候为暖温带湿润山地气候。1月份平均气温-2.8℃,7月份平均气温23.8℃,年平均气温8.0℃;年平均降水量1 130 mm,多集中于7—9月份,降雪从10月末到次年4月初;平均相对湿度77.1%,无霜期199 d。林区地形陡峭,坡度一般为30°~35°,土壤类型主要为山地棕壤、山地暗棕壤和山地草甸土,土层平均厚度50 cm左右,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。现有森林是原生植被在20世纪60、70年代主伐后恢复起来的天然次生林,主要成林树种有锐齿栎、油松、华山松、红桦、光皮桦(*Betula luminifera*)、青杆(*Picea wilsonii*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、山杨等。

2 材料与方法

2.1 试验设计与水样采集

根据秦岭林区的主要林分构成,在火地塘林区选择具有代表性的红桦林和锐齿栎林2种林分类型作为研究对象,在红桦林和锐齿栎林内的典型地段设置观测样地,其林分基本情况见表1。

表 1 秦岭火地塘林区红桦林和锐齿栎林的林分概况

Table 1 Overview of *Betula albo-sinensis* Burkill and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests at Huoditang forest region in Qingling Mountains

林分类型 Forest type	海拔/m Elevation	树种组成 Tree species composition	郁闭度 Canopy density	林龄/a Forest age	坡向 Slope aspect	坡度/(°) Slope angle
红桦林 <i>B. albo-sinensis</i> Burkill	2 160	8 桦 2 杂 8 <i>B. albo-sinensis</i> Burkill and 2 hardwood	0.75	28	西南 SW	26.5
锐齿栎林 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	1 760	7 锐 3 杂 7 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserra- ta</i> and 3 hardwood	0.75	38	东南 SE	43.5

本研究采用对比大气降雨和林内雨水化学成分含量的方法,探讨红桦林、锐齿栎林林冠层对大气降

雨水质的影响。需采集的水样类型为大气降雨(林外雨)和经过2种林型林冠层后形成的林内雨。在

空旷地带设 3 个雨水样(林外雨)收集点,雨后及时将所收集的雨水混合,取部分(约 500 mL)作为试验分析用水样。林内雨收集点于林分林下布设,每种林分设置 3 个,各点代表的面积基本相同,分别用口径 20 cm、高 15 cm 的塑料桶接取,其顶部用带孔的聚氯乙烯薄膜罩住,以防杂物进入。采样时,将同一林分 3 个点的水样混合,取部分(约 500 mL)作为该林分林内雨水样。采集的上述水样均装于聚氯乙烯塑料瓶内,0℃保存,2 周内测定完毕。

水样采集时间为 2013 年 5—8 月,分别于 05-21、06-15、07-23 和 08-22 分 4 次采集 20 mm 以上降雨的系列水样。

2.2 水样测定项目及方法

pH 值采用电位法测定,NO₃⁻、NH₄⁺ 采用 AA3 型连续流动化学分析仪测定,PO₄³⁻ 采用紫外分光光度计法测定,K、Na、Ca、Mg 采用火焰原子吸收分光光度计法测定,Cu、Pb、Cd、Cr 采用 AA-7000 石墨炉原子吸收分光光度计法测定,As 采用 AFS-930 双道原子荧光光度计法测定。

3 结果与分析

3.1 林冠层对大气降雨中 pH 的生态效应

由表 2 可知,大气降雨 pH 值平均为 5.75,水质偏酸性,降水通过红桦林和锐齿栎林林冠层后 pH 分别上升到 6.29 和 6.35,升高了 0.54 和 0.60,说

明红桦林、锐齿栎林林冠层对偏酸性降水 pH 值均有调升作用,其中锐齿栎林的提升能力相对较强。

林冠层之所以具有降低雨水酸性的能力,一是由于其在受到酸性降水淋溶时,叶片组织内的盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺和 K⁺等)与降水中的 H⁺ 发生了交换反应,H⁺ 取代盐基离子将其置换出来,造成盐基离子脱洗和 pH 值升高^[10];二是叶片中淋失的弱碱离子与降水中的酸性离子发生中和反应,使酸性离子减少,pH 值升高^[11]。

3.2 林冠层对大气降雨中 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的生态效应

由表 2 可知,大气降雨中 NO₃⁻ 的平均质量浓度为 0.226 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层之后形成的林内雨中 NO₃⁻ 的平均质量浓度均有所下降,分别降低了 72%和 81%。说明 2 种林分的林冠层都具有净化降水中 NO₃⁻ 的作用,这种作用可能是由于林木枝叶对 NO₃⁻ 的吸收和利用所造成的^[12-15]。

由表 2 还可知,大气降雨中 NH₄⁺ 平均质量浓度为 0.507 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层之后形成的林内雨中 NH₄⁺ 的平均质量浓度均有所上升,分别升高 84%和 73%。说明 2 种林分的林冠层均有增加降水中 NH₄⁺ 含量的作用,或者说大气降水可淋溶林冠层中的 NH₄⁺^[16]。

表 2 红桦林和锐齿栎林林内雨与大气降雨中几种有益元素和离子平均质量浓度的比较

Table 2 Comparison of the average mass concentrations of useful elements and ions of the inner precipitation in *Betula albo-sinensis* Burkill and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests and atmospheric precipitation

样品名 Sample name	pH	NO ₃ ⁻ / (mg · L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ / (mg · L ⁻¹)	K/ (mg · L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ / (mg · L ⁻¹)	Na/ (mg · L ⁻¹)	Ca/ (mg · L ⁻¹)	Mg/ (mg · L ⁻¹)
大气降雨 Atmospheric precipitation	5.75	0.226	0.507	1.100	0.042	0.285	0.282	0.099
红桦林林内雨 Inner precipitation of <i>B. albo-sinensis</i> Burkill	6.29	0.063	0.935	3.305	0.105	0.147	0.584	0.580
锐齿栎林林内雨 Inner precipitation of <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	6.35	0.044	0.876	2.155	0.184	0.072	1.960	1.839

3.3 林冠层对大气降雨中 K 和 P 的生态效应

由表 2 可知,大气降雨中 K 的平均质量浓度为 1.100 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层之后形成的林内雨中 K 的平均质量浓度分别上升至 3.305 和 2.155 mg/L,升高 200%和 96%。比较大气降水和 2 种林分林内雨中 K 的平均质量浓度,发现红桦林林冠层的增 K 作用非常显著,或者说红桦林林冠层有更多的 K 可供大气降水淋溶。

水中 P 主要以 PO₄³⁻ 的形式存在^[5]。由表 2 可知,降水通过红桦林和锐齿栎林林冠层后,PO₄³⁻ 的

平均质量浓度从 0.042 mg/L 分别上升至 0.105 和 0.184 mg/L,上升 150%和 338%,说明林冠层中可供大气降雨淋溶的 PO₄³⁻ 含量比较高,且锐齿栎林林冠层中可供淋溶的 PO₄³⁻ 平均质量浓度更高。而林冠层中的 P 主要来源于新叶和分生组织^[2],说明锐齿栎林林木叶中含有较多的 P。

3.4 林冠层对大气降雨中 Na、Ca 和 Mg 的生态效应

Na 盐多为易溶盐,Na 在大气降雨中的含量较低^[5]。由表 2 可知,大气降雨中 Na 的平均质量浓

度为 0.285 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层后形成的林内雨中 Na 的平均质量浓度分别下降至 0.147 和 0.072 mg/L,降低了 48%和 75%。说明 2 种林分的林冠层对大气降雨中的 Na 有吸附作用,并且锐齿栎林林冠层吸附大气降雨中 Na 的能力强于红桦林林冠层。

由表 2 可知,大气降雨中 Ca 的平均质量浓度为 0.282 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层后形成的林内雨中 Na 的平均质量浓度分别上升至 0.584 和 1.960 mg/L,升高了 107%和 595%。说明 2 种林分的林冠层能被大气降水淋溶出 Ca,并且锐齿栎林林冠层淋溶出的 Ca 要明显多于红桦林林冠层。

由表 2 可知,大气降雨中 Mg 的平均质量浓度为 0.099 mg/L,降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层之后形成的林内雨中 Mg 的平均质量浓度分别上升至 0.580 和 1.839 mg/L,升高了 484%和 1 751%。说明大气降雨能够从 2 种林分的林冠层中淋溶出 Mg,并且锐齿栎林林冠层淋溶出的 Mg 要明显高于红桦林林冠层。

大气降雨通过林冠层后不管是 Ca 还是 Mg 的质量浓度均上升,而且上升幅度较大,说明降水中有较多的 H⁺ 参与了置换反应,从而置换出了较多的盐基营养离子^[11,17]。

3.5 林冠层对大气降雨中 Cu、Pb、Cd、Cr 的生态效应

到目前为止,从生物学角度看,Cu、Pb、Cd、Cr 均为非必要的、无益的元素,且毒性很大,尤其是 Cd。由表 3 可知,大气降雨通过红桦林和锐齿栎林林冠层之后,这 4 种重金属的质量浓度均有不同程度的下降,说明 2 种林分的林冠层对于净化大气降

雨中的 Cu、Pb、Cd、Cr 有十分积极的作用。

由表 3 可知,大气降雨中 Cu 的平均质量浓度为 2.413 μg/L,经过红桦林和锐齿栎林林冠层后平均质量浓度分别下降到 2.075 和 1.964 μg/L,降低了 14%和 19%;大气降雨中 Pb 的平均质量浓度为 7.745 μg/L,经过红桦林和锐齿栎林林冠层后平均质量浓度分别下降到 1.456 和 1.141 μg/L,降低了 81%和 85%;大气降雨中 Cd 的平均质量浓度为 0.135 μg/L,经过红桦林和锐齿栎林林冠层后平均质量浓度分别下降到 0.067 和 0.071 μg/L,降低了 50%和 47%;大气降雨中 Cr 的平均质量浓度为 1.080 μg/L,经过红桦林和锐齿栎林林冠层后平均质量浓度分别下降到 0.395 和 0.610 μg/L,降低了 63%和 43%。2 种林分的林冠层净化大气降雨中同一种重金属的能力基本接近,其中净化 Cu 的能力相对于其他 3 种重金属较弱,净化 Pb 的能力最强,净化 Cd、Cr 的能力适中。综合来讲,红桦林和锐齿栎林 2 种林分的林冠层对于净化大气降雨中的重金属均能起到积极作用^[18-21]。

3.6 林冠层对大气降雨中 As 的生态效应

元素砷本身无毒,但极易氧化为剧毒物质三氧化二砷(砒霜)。因此,我国生活饮用水水质标准规定,As 的质量浓度不得超过 0.05 mg/L^[22]。由表 3 可知,大气降雨中 As 的平均质量浓度为 1.055 μg/L,经过红桦林和锐齿栎林林冠层后平均质量浓度分别下降到 0.855 和 0.287 μg/L,降低了 19%和 73%。说明 2 种林分的林冠层对于大气降雨中的 As 表现为吸附作用,并且锐齿栎林林冠层的吸附作用要明显强于红桦林林冠层。因此对于净化大气降雨中 As 的效果而言,锐齿栎林林冠层要优于红桦林林冠层。

表 3 红桦林和锐齿栎林林内雨与大气降雨中几种重金属及砷平均质量浓度的比较

Table 3 Comparison of the average mass concentrations of heavy metals and As of the inner precipitation in <i>Betula albo-sinensis</i> Burkill and <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> forests and atmospheric precipitation μg/L					
样品名 Sample name	Cu	Pb	Cd	Cr	As
大气降雨 Atmospheric precipitation	2.413	7.745	0.135	1.080	1.055
红桦林林内雨 Inner precipitation of <i>B. albo-sinensis</i> Burkill	2.075	1.456	0.067	0.395	0.855
锐齿栎林林内雨 Inner precipitation of <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	1.964	1.141	0.071	0.610	0.287

4 结 论

红桦林、锐齿栎林林冠层均有降低雨水酸性的作用,其中锐齿栎林提升降水 pH 的能力相对较强;红桦林林冠层和锐齿栎林林冠层对大气降雨中的

NO₃⁻ 表现为较强的吸附作用,而对于 NH₄⁺ 则表现出较强的淋溶作用;红桦林林冠层被大气降水淋溶出 K 的能力要明显强于锐齿栎林林冠层,而在 PO₄³⁻ 方面则恰恰相反,后者强于前者;锐齿栎林林冠层吸附大气降雨中 Na 的能力要强于红桦林林冠

层;锐齿栎林林冠层被大气降雨淋溶出 Ca 和 Mg 的能力均要明显强于红桦林林冠层;红桦林林冠层和锐齿栎林林冠层对降雨中 Cu、Pb、Cd、Cr 有较为明显的净化作用,2 种林分对同一种元素的净化能力基本接近;锐齿栎林林冠层净化大气降雨中 As 的能力要优于红桦林林冠层。

[参考文献]

[1] 刘正才,王家永.南水北调中线工程水源地水质保护工作研究[J].南水北调与水利科技,2005,4(4):7-9.
Liu Z C,Wang J Y. To protect water sources quality for middle line of the south-to-north water transfers [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 4 (4):7-9. (in Chinese)

[2] 陈步峰,陈勇,尹光天,等.珠江三角洲城市森林植被生态系统水质效应研究[J].林业科学研究,2004,17(4):453-460.
Chen B F,Chen Y,Yin G T,et al. Study on the water quality of urban forest ecogystem in the Pearl River Delta [J]. Forest Research,2004,17(4):453-460. (in Chinese)

[3] 任青山,王景升,张博,等.藏东南冷杉原始林不同形态水的水质分析[J].东北林业大学学报,2002,30(2):52-55.
Ren Q S,Wang J S,Zhang B,et al. Water quality analyses of different water states of Fir origin forests in southeast Tibet [J]. Journal of Northeast Forestry University,2002,30(2):52-55. (in Chinese)

[4] 陈步峰,周光益,骆士寿,等.流溪河水源林流域径流水化学含量及评价[J].北京林业大学学报,1998,20(4):111-117.
Chen B F,Zhou G Y,Luo T S,et al. Study on the hydrochemistry and appraising of runoff in the forest watershed of Liuxihe [J]. Journal of Beijing Forestry University,1998,20(4):111-117. (in Chinese)

[5] 张胜利,李靖.天然林冠层的水质效应[J].水土保持学报,2006,20(3):58-62.
Zhang S L,Li J. Effects of canopy of natural forest on water quality [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20 (3):58-62. (in Chinese)

[6] 张胜利,李光录.秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应[J].生态学报,2007,27(5):1838-1844.
Zhang S L,Li G L. The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang forest region,Qinling Mountain range [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):1838-1844. (in Chinese)

[7] 张胜利.秦岭火地塘林区森林生态系统对降水中重金属的作用[J].林业科学,2009,45(11):55-62.
Zhang S L. Effects of forest ecosystem on heavy metals in water during the rainfall-runoff processes in the Huoditang forest area of the Qinling Mountain range [J]. Scinetia Silvae Sinicae, 2009,45(11):55-62. (in Chinese)

[8] 谭芳林,雷瑞德.锐齿栎林生态系统对水质影响的研究[J].福建林业科技,1999,26(2):1-5.
Tan F L,Lei R D. Effects of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*

forest ecosystem on the water quality [J]. Jour of Fujian Forestry Sci & Tech,1999,26(2):1-5. (in Chinese)

[9] 雷瑞德,吕喻良.锐齿栎林生态系统对水质的影响及评价[J].西北林学院学报,2003,18(4):1-4.
Lei R D,Lü Y L. Effects and estimation of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest ecosystem on water quality [J]. Journal of Northwest Forestry University,2003,18(4):1-4. (in Chinese)

[10] 程伯容,许广山,高世东.森林冠层对酸性降水化学组成的影响[J].中国环境科学,1989,9(2):155-157.
Cheng B R,Xu G S,Gao S D. Biogeochemical response of forest canopies to acid precipitation [J]. China Environmental Science,1989,9(2):155-157. (in Chinese)

[11] 刘菊秀,温达志,周国逸.广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征[J].中国环境科学,2000,20(3):198-202.
Liu J X,Wen D Z,Zhou G Y. Chemical properties of the rainfall in the coniferous and broad-leaved forests in acid rain area of Heshan, Guangdong [J]. China Environmental Science, 2000,20(3):198-202. (in Chinese)

[12] 周光益,徐义刚,吴仲民,等.广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究[J].林业科学研究,2000,13(6):598-607.
Zhou G Y,Xu Y G,Wu Z M,et al. Influences of acid rain on crown leaching of chemical ions in different forest ecosystem in Guangzhou [J]. Forest Research,2000,13(6):598-607. (in Chinese)

[13] Rallaella B,Antonio T. Atmospheric deposition and canopy exchange process in alpine forest ecosystems(north Italy) [J]. Atmospheric Environment,2001,35(36):6421-6433.

[14] Polkowska Z,Aleksander A,Barbara W,et al. Chemometric analysis of rainwater and throughfall at several sites in Poland [J]. Atmospheric Environment,2005,39(5):837-855.

[15] Chiwa M,Crossley A,Sheppard L J,et al. Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six diffrent simulated polluted mist treatments [J]. Environmental Pollution,2004,127:57-64.

[16] 彭培好,王金锡,胡振宇,等.人工桉柏混交林中降雨对养分离子的淋溶影响[J].生态学杂志,1996,15(5):12-15.
Peng P H,Wang J X,Hu Z Y,et al. The effects of the partitioning of rainfall on the nutrients leaching processes in the mixed *Alnus cremastogyne* and *Cupressus funebris* forest [J]. Chinese Journal of Ecology,1996,15(5):12-15. (in Chinese)

[17] 韩亚芬,孙根年,李琦,等.西安市酸雨及化学成分时间变化分析[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2006,34(4):109-113.
Han Y F,Sun G N,Li Q,et al. Analysis on temporal changes of acid rain and its chemical composition in Xi'an City [J]. Journal of Shaanxi Normal University; Natural Science Edition,2006,34(4):109-113. (in Chinese)

[18] 尚德隆,李珍珍,李春华.杨树、京桃、丁香叶片对大气中重金属污染物 Cu、Cr、Pb、Zn 净化潜力的探讨[J].环境科学保护,1991(3):71-75,57.
Shang D L,Li Z Z,Li C H. Study of *Populus canadensis*

Moench, *Persica davidiana* Carr, *Syringa oblata* Lindl leaves purification potential of heavy metal pollutants in the atmosphere of Cu, Cr, Pb, Zn [J]. Environmental Protection Science, 1991(3): 71-75, 57. (in Chinese)

[19] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb、Cd、Cu、Zn)污染及其在植物中的富积 [J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2000, 13(1): 31-37.

Zhuang S H, Wang K M. Study on the relationship between atmospheric heavy metal pollution (Pb, Cd, Cu, Zn) and its accumulations in leaves of urban trees [J]. Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering Edition, 2000, 13(1): 31-37. (in Chinese)

[20] 许宗仁. 水质评价标准 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 31-109.

Xu Z R. Evaluation of water quality standards [M]. Beijing: China Architecture & Buildin Press, 1981: 31-109. (in Chinese)

[21] 黄益宗, 朱永官. 森林生态系统镉污染研究进展 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 101-107.

Huang Y Z, Zhu Y G. A review on cadmium contamination in forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 101-107. (in Chinese)

[22] 梁翠萍, 张胜利. 秦岭锐齿栎林和油松林林冠层对大气降水雨质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 54-56.

Liang C P, Zhang S L. Effects of forest canopies of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* and *Pinus tabulaeformis* stands on rain water quality in Qinling Mountain range [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 54-56. (in Chinese)

(上接第 88 页)

[12] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2(-Delta C (T)) method [J]. Methods, 2001, 25(4): 402-408.

[13] Meins F J, Fritig B, Linthorst H J M, et al. Plant chitinase genes [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 1994, 12(2): S22-S28.

[14] Beintema J J. Structural features of plant chitinases and chitin-binding proteins [J]. FEBS Letters, 1994, 350(2): 159-163.

[15] Kasprzewska A. Plant chitinases-regulation and function [J]. Cellular and Molecular Biology Letters, 2003, 8(3): 809-824.

[16] 欧阳石文, 赵开军, 冯兰香. 植物几丁质酶的结构与功能、分类及进化 [J]. 植物学通报, 2001, 18(4): 418-426.

Ouyang S W, Zhao K J, Feng L X. The structure and function, classification and evolution of plant chitinases [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(4): 418-426. (in Chinese)

[17] Rinaldi C, Kohler A, Seo M S, et al. Transcript profiling of poplar leaves upon infection with compatible and incompatible strains of the foliar rust *Melampsora larici-populina* [J]. Plant Physiology, 2007, 144(1): 347-366.

[18] 陈祖静, 曹支敏, 苟兴庆, 等. 杨树与杨棚锈菌互作中寄主活性氧及抗性相关酶变化 [J]. 林业科学, 2010, 46(8): 101-106.

Chen Z J, Cao Z M, Gou X Q, et al. Dynamic changes of active oxygen and related enzymes of the host in interaction between the poplar and *Melampora larici-populina* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(8): 101-106. (in Chinese)