

秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应

张胜利 李光录

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 根据降水与森林生态系统相互作用的空间顺序, 分别对火地塘林区火地沟流域大气降水、林内雨、枯透水、支沟溪流水和流域出口径流水质进行了比较分析和变化机理分析。结果表明 森林生态系统不同层次均有使微酸性降水 pH 值升高的作用, 但以林冠层和森林土壤的作用最大, 升幅分别为 0.58 和 0.61。森林生态系统对 NO_3^- 、 NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 均有净化作用, 净化 NO_3^- 的关键阶段为沟道径流阶段, 净化 NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 的主要方式则为土壤吸附。森林生态系统各层次均增加 Ca 含量, 除土壤外, 也增加 Mg, 但 Ca 主要来源于土壤和岩石, Mg 主要来源于岩石。降水中的 Cd、Pb、Mn、Zn 经过森林生态系统不同层次的阻减, 含量分别降低了 $0.721\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6.528\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.0128\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.4674\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中以林冠层的阻减作用最大, 阻减效果分别为 83%、76.7%、54% 和 99%。总体上 林冠层是净化水质的关键层次, 其次为森林土壤。

关键词 秦岭 森林生态系统 层次 水质

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1838-07 中图分类号: Q948.5718.56 文献标识码: A

The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang forest region , Qinling Mountain Range

ZHANG Sheng-Li , LI Guang-Lu

College of Resources and Environment , Northwest A & F University , Yangling , Shaanxi 712100 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1838 ~ 1844.

Abstract : The objective of this study was to investigate the effects of different components of a forest ecosystem on water quality during the rainfall-runoff process. The study area was a small watershed , Huodigou , which is part of Huoditang forest region within the Qinling Mountain Range. For purposes of analysis , the forest ecosystem was divided spatially into four components : canopy , litter , soil , and bedrock. Water samples were collected from rainfall , throughfall , litter drainage , stream water from tributaries within the experimental watershed , and water at the watershed outlet. The samples were analyzed chemically and then compared to determine the effects of different components of the ecosystem on water quality. The analyses indicated that rainfall was slightly acidic , but the pH of the water increased as it moved through each component of the forest ecosystem. The largest increases in the pH were 0.58 units as rainwater passed through the canopy and 0.61 units as water passed through the soil. The NO_3^- , NH_4^+ , K , and PO_4^{3-} content of runoff water decreased as it passed through the ecosystem. The largest reduction in NO_3^- occurred as water flowed from the tributaries to the watershed outlet. In contrast , the greatest decline in NH_4^+ , K , and PO_4^{3-} occurred as water moved through the soil. This is important because the removal of these nutrients from runoff water reduces the probability of eutrophication in the Danjiangkou

基金项目 西北农林科技大学校长基金资助项目 (08080215) ; 国家林业局重点科研资助项目 (2001-04)

收稿日期 2006-06-15 ; 修订日期 2007-02-24

作者简介 张胜利 (1965 ~) , 男 , 陕西户县人 , 博士 , 副教授 , 主要从事森林水文和水土保持工程研究. E-mail : victory6515@ sina. com

Foundation item The project was financially supported by Chancellor Foundation of Northwest A & F University (No. 08080215) ; Science Research Project of the State Forestry Administration , P. R. China (No. 2001-04)

Received date 2006-06-15 ; **Accepted date** 2007-02-24

Biography ZHANG Sheng-Li , Ph. D. , Associate professor , mainly engaged in forest hydrology and soil and water conservation engineering. E-mail : victory6515@ sina. com

Reservoir , the main water storage area for the middle line of the South-to-North Water Transfer Project. In general , the Ca and Mg content of water increased as it passed through the ecosystem. The largest Ca increase occurred as water passed through the soil and bedrock , while the main increase in Mg occurred as water passed through bedrock. At the watershed outlet , water contained $0.721\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ less Cd , $6.528\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ less Pb , $0.0128\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ less Mn , and $1.4674\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ less Zn compared to natural precipitation. Compared to natural rainfall , the throughfall contained 83% less Cd , 77% less Pb , 54% less Mn , and 99% less Zn. Overall , the results from this study show that the canopy has the largest effect and the soil has the second largest effect on water quality in the forest ecosystem.

Key Words : Qinling Mountain Range ; forest ecosystem ; sequential components ; water quality

由于环境污染加剧 ,全球水质型缺水日益严重 ,是引起世界范围内淡水危机的重要原因之一。森林具有调节、净化、稳定水质的作用。因此 ,近 20a 来 ,森林与水质关系的研究倍受重视 ,已成为热点^[1]。国内外关于森林的水质效应研究主要从以下方面切入 :一是将森林生态系统视为一个有机整体 ,对输入、输出系统的化学物质等进行比较分析 ,以阐明森林生态系统对水质的作用 ;其次是根据森林生态系统的空间结构 ,将其分为不同的层次 ,如林冠层、树干茎、枯枝落叶层及森林土壤等 ,探讨某一或某几个层次对水质的影响及其机理 ,其中对林冠层的研究较为深入^[2~6]。将森林生态系统视为整体进行研究 ,存在的不足是难以了解水质在系统内部沿运移路径的变化情况及其机理 ,就某一或某几个层次进行探讨 ,则无法获知影响水质的关键层次。故本文拟以秦岭火地塘林区为典型 ,根据水与森林生态系统相互作用的空间顺序 ,从降水到流域出口径流 ,对森林生态系统不同层次的水质效应进行较为系统的研究 ,旨在了解水质在森林生态系统内部的变化情况及其影响水质的关键层次。同时 ,秦岭火地塘林区位于国家战略性重点工程—南水北调中线工程水源区 ,中线工程取水地湖北丹江口水库控制面积 95200km^2 ,其中 65.86% 为陕西秦巴山区 ,秦巴山区近 1/4 为森林覆盖 ,故开展该项研究还可为调水区水源林的管理和建设提供科学依据。

1 试验地概况

火地塘林区位于秦岭南坡中山地带中部 ,地处北纬 $33^{\circ}25' \sim 33^{\circ}29'$ 、东经 $108^{\circ}25' \sim 108^{\circ}30'$ 之间 ,在陕西省宁陕县境内。林区面积 22.25km^2 ,海拔 $1470 \sim 2473\text{m}$,地形平均坡度 $30 \sim 35^{\circ}$ 。气候为暖温带湿润山地气候。1 月份平均气温 -2.8°C ,7 月份平均气温 23.8°C ,年平均气温 $8 \sim 12^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 1130mm ,且多集中于 7 ~ 9 月 ,降雪从 10 月末到次年 4 月初 ,平均湿度 77.1%。林区土壤主要为棕色森林土 ,平均厚度 50cm 左右 ,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。森林植被为 20 世纪 60、70 年代主伐后恢复起来的天然林 ,覆盖率 93.8% ,郁闭度在 0.9 以上 ,主要成林树种有 :锐齿栎、油松、华山松、红桦、光皮桦、青扦、巴山冷杉、山杨等。

火地沟流域为火地塘林区内最大的自然集水区 ,呈羽毛形状 (见图 1) ,长约 4.5km ,宽约 1.6km ,面积 7.29km^2 ,海拔 $1644 \sim 2130\text{m}$,地形平均坡度约 30° ,主沟道沟底坡降约 7.5%。火地沟流域植被、土壤及其母质等与前述基本相同。

2 研究原理和方法

2.1 原理

大气降水进入森林生态系统后 ,首先与林冠层相互作用 ,其次是枯枝落叶层、森林土壤 ,最后为沟道堆积

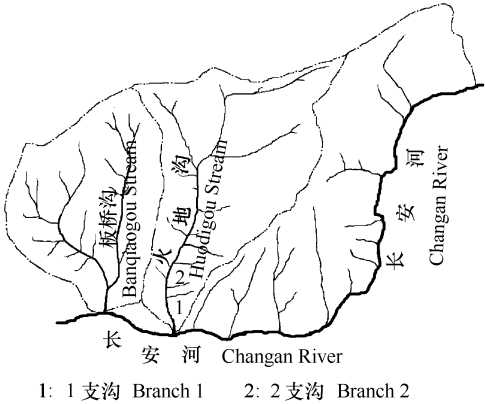


图1 试验地流域水系示意图
Fig. 1 Experimental Watershed

物或基岩。在相互作用过程中,水在系统内的运移经过了下述阶段:①林冠截留降水形成林内雨阶段;②林内雨通过枯枝落叶层形成枯透水阶段;③枯透水入渗形成壤中流阶段;④壤中流汇集进入支沟形成溪流水阶段;⑤溪流水逐渐汇集主干沟形成沟道径流阶段。在形成林内雨阶段,还伴有树干茎流的产生。试验地林区 7~10 月份树干茎流量仅占同期降水总量的 1.61%^[7],对水质影响较小,故该研究不将其列出。

根据以上降水与森林生态系统相互作用的空间顺序,该研究通过对不同阶段水质测试结果进行比较分析和机理分析,了解水质沿运移路径的变化及森林生态系统不同层次对水质的影响,进而弄清楚影响水质的关键层次。

2.2 试验布设与水样采集

试验布设在火地沟流域。根据研究原理,需要采集的水样为大气降水(降雨)、林内雨、枯透水、支沟溪流水和流域出口径流。

大气降水收集点位于火地沟沟口左侧,距流域出口约 100~150m,共 3 个点。雨后,及时将各点收集雨水混合,取部分作为测试分析水样。林内雨在火地沟流域 1、2 支沟集水区林下收集。1、2 支沟集水区面积分别为 8.6hm²和 7.2hm²,收集点在沟道纵、横断面上按上、中、下和左、中、右以“十”字形布设,每支沟 5 个。雨后,将各点收集林内雨混合,然后取样。枯透水分别在 1、2 支沟集水区枯枝落叶层下收集,收集点在支沟边坡上按上、中、下部位布设,每个点置有 5 个聚氯乙烯塑料杯,同样取混合水样。溪流水和流域出口径流直接在 1、2 支沟沟口和流域出口处取样即可。每种水样一次采集 500ml。

大气降水、林内雨采用聚氯乙烯塑料桶收集。桶上带有盖,盖呈漏斗状,既可防杂物进入,还可防止桶内水分蒸发浓缩而影响测试结果。

2.3 水样测试

水样测试项目见表 1。pH 值采用电位法测定; NO_3^- 采用酚二磺酸比色测定; NH_4^+ 采用苯酚-次氯酸盐比色测定; PO_4^{3-} 采用钼蓝比色测定;K、Na、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn 采用等离子发射光谱测定;Pb、Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度计测定。

3 结果分析

在试验地林区,能够产生明显径流的降雨一般在 20mm 左右,故采样时主要采集雨量在 20mm 以上的各种水样。采样时间为 1999 年 7~10 月和 2004 年 7~11 月,共采集水样 16 次,128 个水样,测试结果见表 1。

3.1 pH 值

根据表 1,从大气降水到流域出口径流,水的 pH 值逐渐上升,水从弱酸性变为弱碱性,说明森林生态系统对水的 pH 值有较大调升作用。林冠层、枯枝落叶层、森林土壤、岩石均有这种作用,但以林冠层和森林土壤的作用最大,调升幅度分别为 0.58 和 0.61。

3.2 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-}

7~11 月份,大气降水中 NO_3^- 含量较高,流域出口径流仅为降水的 25.2%。因此,森林流域仅径流输出并不会产生 NO_3^- 的流失问题。

降雨通过林冠层后, NO_3^- 含量降低,降幅达 $0.728\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这是因为林木枝叶对 NO_3^- 有一定的吸收作用^[2,8~10];其次,降水中的 NO_3^- 有一部分是以 HNO_3 的形式存在, HNO_3 不仅溶解于水,而且是一种挥发性酸,当雨滴击溅林木叶面时,击溅加速了 HNO_3 的挥发,从而使 NO_3^- 含量降低。

枯透水中 NO_3^- 含量迅速升高,几乎是林内雨中的 3 倍。枯枝落叶经微生物分解后,其中蛋白质、核酸、氨基酸中的氮逐渐变成无机氮^[11]。林内雨通过枯枝落叶层时无机氮被淋洗、溶解,从而使枯透水中 NO_3^- 含量剧增。因此,在森林生态系统水循环过程中,枯枝落叶以向水中释放 NO_3^- 的方式在系统内影响水质。

溪流水中 NO_3^- 含量达到最大,可能是壤中流在形成和汇集过程中,土壤有机质中的 NO_3^- 再次释放,因为土壤中的水溶性氮主要来源于有机质^[12]。流域出口径流中 NO_3^- 含量急剧降至最低,仅为溪流水的 1/8 左右,

降幅达 $2.493\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此,降低水中 NO_3^- 含量的关键阶段为沟道径流阶段。对溪流水和流域出口径流 NO_3^- 含量多年检测的结果也证实了这一点。1997 ~ 2004 年,每年至少采样 4 次对 NO_3^- 含量进行检测(除每季各采样一次外,还根据雨季降水情况适当增加采样次数,共采集水样 38 次,水样总数 112 个),检测结果为:1 支沟溪流水 NO_3^- 含量平均为 $3.178\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2 支沟为 $3.818\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,火地沟流域出口径流为 $0.705\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 1 森林生态系统不同层次水质测试结果

Table 1 Water quality indicators of different types of water in the forest ecosystem							
水样类型 Types of water	pH	NO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	K ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Na ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ca ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
大气降水 Rainfall	6.65	1.303	0.831	0.823	1.17	0.589	4.82
林内雨 Throughfall	7.23	0.575	1.069	2.989	5.49	0.286	5.5
枯透水 Litter drainage	7.44	1.554	1.684	5.034	9.05	0.35	9.93
溪流水 Stream water	8.05	2.822	0.151	0.081	1.55	0.982	22.98
流域出口径流 Outlet flow of the watershed	8.17	0.329	0.025	0.122	1.21	0.932	29.71

水样类型 Types of water	pH	Mg ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Pb ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mn ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fe ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Zn ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
大气降水 Rainfall	6.65	0.333	0.839	8.046	0.0164	0.0217	1.4874
林内雨 Throughfall	7.23	1.442	0.142	1.87	0.0075	0.0257	0.0111
枯透水 Litter drainage	7.44	2.544	0.106	0.637	0.0034	0.0264	0.0098
溪流水 Stream water	8.05	2.366	0.074	1.092	0.0018	0.0257	0.0185
流域出口径流 Outlet flow of the watershed	8.17	4.077	0.118	1.564	0.0036	0.0421	0.02

降雨通过林冠层后, NH_4^+ 含量增加了 28.6%,说明降雨对林木枝叶中的 NH_4^+ 有淋溶作用。枯透水中 NH_4^+ 含量增加幅度最大,比林内雨增加了 61.5%,说明枯枝落叶在森林 NH_4^+ 养分循环中起着十分重要的作用,植物吸收的 NH_4^+ 最终以落叶被淋溶的方式又返回土壤。溪流水中 NH_4^+ 含量降幅最大,说明森林土壤在保持 NH_4^+ 方面有“调蓄库”的作用。流域出口径流中 NH_4^+ 含量略有降低,这是因为流域出口径流呈弱碱性(pH 值为 8.17),而铵盐与碱起化学反应产生氨气并逸出,从而导致径流中 NH_4^+ 含量降低。

大气降水对森林生态系统 NH_4^+ 的输入有着十分重要的作用。流域出口径流中 NH_4^+ 含量仅为降水输入的 3%,林区径流系数为 0.44,也就是说通过流域出口径流输出的 NH_4^+ 量仅占降雨输入森林生态系统的不到 1.5%。

与大气降水比较,林内雨中 PO_4^{3-} 含量剧增,增幅度达 $2.166\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,枯透水在此基础上又增加了 $2.045\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见林木枝叶不管是在生长期还是凋落后,其中的 PO_4^{3-} 均易被淋溶^[3]。溪流水中 PO_4^{3-} 含量大幅度降低,降幅达 $4.953\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明森林土壤对水中 PO_4^{3-} 有较大的吸附作用。从溪流水到流域出口径流,水中 PO_4^{3-} 含量略有上升,如果考虑测试误差的影响, PO_4^{3-} 含量则几乎没有变化。

从表 1 可以看出,降水输入森林生态系统 PO_4^{3-} 的量较大,而溶解于水并以径流形式输出的量小。不管是大气降水还是流域出口径流, PO_4^{3-} 浓度相对于林内雨和枯透水来说均很低,所以 PO_4^{3-} 主要在森林生态系统内部循环,大气降水输入只是维持了林木生长对 PO_4^{3-} 的需求,正是这种需求起到了固定 PO_4^{3-} 的作用,同时也净化了水质。

富营养化是我国供水水库面临的主要水质问题,为流入水库中的过量营养(如 N、P 等)所致。森林生态系统对 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 的净化对降低丹江口水库水质富营养化威胁无疑是有益的。

3.3 K、Na、Ca、Mg

降水中 K 含量较低,浓度与流域出口径流基本相等,林区径流系数为 0.44,因此径流输出的 K 必然较降雨输入的少,而 K 很难以挥发或其它形式逃逸,故输入和输出相差部分必然存在于流域森林生态系统内部,

并在内部循环。所以,至少在 7 ~ 11 月份,森林生态系统具有固定 K 的能力。

降水通过林冠层后,K 含量明显升高,几乎是原输入浓度的 5 倍。其中固然有蒸散发的原因,但降雨期间蒸散发量有限,绝无可能对 K 含量产生如此大的影响。因此,也只有林冠层可以对 K 含量剧增产生关键性影响,这种影响来源于大气降水对林冠层的淋洗作用^[2,9,10,14]。从林内雨到枯透水,K 含量也有很大升高,升幅达 $3.56\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可能是枯枝落叶经过微生物分解,其中 K 再次被水分淋洗出来的缘故。溪流水中 K 含量明显降低,降幅达 $7.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明森林土壤对 K 有较大的吸附储存作用。森林土壤在某种程度上就像一个调节库,在水循环过程中储存营养元素 K,然后供林木生长使用。流域出口径流中 K 含量则略有下降,可能是主沟道堆积物中的泥土对 K 产生吸附的缘故。

试验地各种水中 Na 含量总体较低。降水经过林冠层后,Na 含量降至最低,说明林冠层对 Na 有一定的吸附作用。枯透水中 Na 含量略有升高,说明在枯透水形成过程中,枯枝落叶中的 Na 逐渐释放并被淋溶。溪流水中 Na 含量升幅较大,说明在水分运移过程中,森林土壤对水中 Na 含量的贡献较大。枯透水下渗形成壤中流,由于渗透阻力的作用,汇集所需时间较长,其间蒸散发量较大,对 Na 含量会产生一定的影响,但蒸散发的影响不可能达到这样一种程度,即溪流水中 Na 含量是枯透水的 2.8 倍,因为径流系数仅为 0.44。所以,森林土壤是水中 Na 的重要来源之一。

流域出口径流中 Na 含量较溪流水略有降低,可能与主沟道及其两侧存在部分岩石裸露面积和水域,降水较快进入主沟道或直接变为沟道径流,对 Na 产生稀释作用有关。

7 ~ 11 月份,森林生态系统各层次水样中 Ca 含量均较高,且逐步攀升。林内雨比大气降水增加了 14%,枯透水比林内雨增加 80%。因此,林木枝叶不管是在生长期还是凋落后,均有增加水中 Ca 含量的作用。枯透水到溪流水,Ca 含量增加幅度最大,增幅达 $13.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即便考虑其它因素如蒸散发的影响,Ca 含量增幅仍属很大。流域出口径流中 Ca 含量比溪流水又上升了 29.3%。

从枯透水到流域出口径流,Ca 含量增幅达 $19.78\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这一阶段水主要与森林土壤和岩石密切接触,故水中 Ca 含量的增加主要由土壤、岩石中 Ca 的溶解引起。

大气降水中 Mg 含量最低,林内雨中有所增高,枯透水中 Mg 含量进一步增加。因此,不管是林冠层^[2,9~10]还是枯枝落叶层均可增加水中 Mg 的含量。溪流水中 Mg 含量有所降低,但绝对变化量仅 $0.178\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相对变化量为 7%,故在水分运移过程中,森林土壤对 Mg 含量影响较小。溪流水到流域出口径流,Mg 含量增幅为 $1.711\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增幅最大,说明岩石中可溶性 Mg 含量较高。根据 Mg 含量沿水的运移路径的变化,Mg 主要来源于岩石,其次是林冠层。

Ca、Mg 含量高低对水质的影响主要体现在水的硬度上。根据国家《生活饮用水卫生标准》GB5749-85,尽管从大气降水到流域出口径流,Ca 含量大幅度升高,Mg 含量增加,但不会对水质产生较大的不良影响。

3.4 重金属元素 Cd、Pb、Mn

截至目前,从生物学角度看,Pb、Cd 均为非必要的、无益的元素,且毒性很大,尤其是 Cd,毒性更大^[15]。所以,在国家《生活饮用水卫生标准》中,要求 Cd 不超过 $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb 不超过 $50\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

相对而言,大气降水中 Cd 含量较高,其它水样中 Cd 含量很低,且变化较小,说明降水输入是 Cd 的重要来源。根据 Cd 随降水在森林生态系统内部运移过程中含量的变化,从输入到输出,Cd 含量降低了 85.9%,故森林生态系统对大气降水输入的 Cd 有较好的净化作用,其中林冠层对 Cd 的阻减量就达到了 $0.697\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,为大气降水中 Cd 含量的 83%。所以,在拦截有毒有害元素 Cd 方面,林冠层的作用最大,拦截效果最为明显。

林内雨通过枯枝落叶层后,Cd 含量进一步降低,说明枯枝落叶还具有吸附 Cd 的能力。

从枯透水到溪流水,Cd 含量的降低不明显。森林土壤富含有机质,有机质是胡敏酸类物质的重要来源,胡敏酸具有胶体特性,能够吸附较多的阳离子,而溶解于水中的 Cd 又以阳离子的形式存在。因此,森林土壤很有可能对水中 Cd 有较好的吸附作用^[16,17],只不过由于林木枝叶及其枯落物吸附了大气降水中 80% 以上的

Cd ,从而使土壤的这种潜力难以发挥而已。

溪流水到流域出口径流 ,Cd 含量略有升高 ,这是因为 210 国道 (沿长安河右岸)通过试验地林区。210 国道为国家交通主干线 ,过往机动车辆多 ,汽车尾气排放量大 ,尾气中含有重金属元素 Pb、Cd 等^[18~20]。火地沟流域主沟道地形开阔 ,汽车尾气容易进入 ,加之沟道内林木较为疏稀 ,林冠层和枯枝落叶对 Cd 的拦截作用降低 ,从而导致流域出口径流中 Cd 含量略有升高。

Pb 含量沿水的运移路径的变化几乎与 Cd 相同。不同层次水样中 ,Pb 含量仍以大气降水中最高。降水通过林冠层后 ,Pb 含量显著降低 ,降幅为 $6.194\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,林冠层对 Pb 的净化效果达 76.7%。枯透水中 Pb 含量进一步降低 ,枯枝落叶层对 Pb 的阻减量达到 $1.233\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。溪流水中 Pb 含量略有上升 ,说明森林土壤中积累的 Pb 有重新移动的现象 ,应高度警惕。流域出口径流中 Pb 含量再次略有上升 ,与 Cd 在沟口径流中升高的原因一致 ,这里不再详述。

大气降水到流域出口径流 ,Pb 含量降低了 80% ,说明森林生态系统对 Pb 有明显的净化作用。其中林冠层的净化作用最大 ,对森林生态系统阻减 Pb 的贡献率达 95% ,构成净化 Pb 的关键层次 ,其次为枯枝落叶层。

大气降水、林内雨、枯透水、溪流水和流域出口径流中 Mn 含量均非常低。但相对而言 ,大气降水中 Mn 含量最高 ,说明 Mn 主要来源于降水。降水通过林冠层 ,Mn 含量降低幅度最大 ,枯透水、溪流水中含量进一步降低 ,说明林冠层、枯枝落叶层和森林土壤均可拦截重金属元素 Mn ,但以林冠层的作用最为明显。虽然流域出口径流中 Mn 含量略有升高 ,但总体上 ,森林生态系统对 Mn 具有净化作用。

3.5 Fe、Zn

大气降水到林内雨 ,Fe 含量上升 ,说明降水对林木枝叶中的 Fe 有一定的淋洗作用。从林内雨到枯透水再到溪流水 ,Fe 含量基本没有变化 ,但流域出口径流中 Fe 含量上升了 61% ,说明沟道岩石中含有能够溶于水的铁盐。

Fe 是人体必需的重要元素之一 ,降水通过森林生态系统后 ,含量升高 ,但完全在生活饮用水卫生标准允许范围之内。所以 ,森林生态系统对 Fe 的调节有利于水质的改善。

7~11 月份 ,降水中 Zn 含量超过了 $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的国家标准 ,但降水通过林冠层后 ,Zn 含量急剧降低 ,符合标准要求。枯透水中 Zn 含量几乎没有变化 ,溪流水中则略有升高 ,流域出口径流中也有一定的上升 ,可能与火地沟流域主沟道及其两侧存在岩石裸露面积和水域面积有关。这部分面积上林木疏稀 ,林冠层对降水中 Zn 的吸附、净化作用降低 ,导致流域出口径流中 Zn 含量略有升高。

从大气降水到流域出口径流 ,Zn 含量减少了 $1.4674\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降幅达 98% ,符合《生活饮用水卫生标准》。因此 ,森林生态系统对大气降水中的 Zn 有很好的净化作用 ,其中林冠层最为关键 ,对降低大气降水中 Zn 的贡献率达到 99% 以上。

4 结论

通过对秦岭火地塘林区火地沟流域水质在森林生态系统内部沿运移路径的变化及森林生态系统不同层次对水质的影响分析 ,得出结论如下 :

- (1)森林生态系统对水的 pH 值有较大的调节作用 ,使微酸性降水 pH 值升高。林冠层、枯枝落叶层、森林土壤、岩石均有这种作用 ,但以林冠层和森林土壤的作用最大。
- (2)森林生态系统对降水输入的 NO_3^- 、 NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 有净化作用。对 NO_3^- 以吸收等方式净化 ,对 NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 则以固定的方式净化 , NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 主要在森林生态系统内部循环。净化水中 NO_3^- 的关键阶段是沟道径流阶段 ,降低 NH_4^+ 、K、 PO_4^{3-} 含量的主要层次则为森林土壤。
- (3)从降水到流域出口径流 ,水中 Na 含量变化不大 ,Mg 含量增幅较大 ,Ca 含量剧增。林冠层、枯枝落叶、森林土壤及其母质均有增加水中 Ca 含量的作用 ,但 Ca 主要来源于森林土壤和岩石。林冠层、枯枝落叶层、岩石对水中 Mg 含量的增加都有贡献 ,但 Mg 主要来源于岩石。
- (4)Cd、Pb、Mn、Zn 主要来源于降水输入 ,森林生态系统对其均有净化作用 ,其中林冠层的作用最大 ,枯枝

落叶层也有这种作用。

(5)降水中 Fe 含量较低,流域出口径流中有所升高,Fe 主要来源于沟道岩石。森林生态系统对水中 Fe 含量的调节有利于水质的改善。

References :

[1] Shi L X , Yu X X , Ma Q Y. Review on the Study of Forest and Water Quality. Chinese Journal of Ecology ,2000 ,19 (3) :52—56.

[2] Balestrini Raffaella , Tagliaferri Antonio. Atmospheric deposition and canopy exchange process in alpine forest ecosystems (North Italy). Atmospheric Environment ,2001 ,35 (36) :6421—6433.

[3] Jiang Y M , Zeng G M , Zhang G , *et al.* Variation of chemical properties and the mechanisms of the forest precipitation. Environmental Pollution and Control ,2003 ,25 (5) :271—276.

[4] Rodrigo A , vila A , Rod F. The chemistry of precipitation , throughfall and stemflow in two holm oak (*Quercus ilex* L.) forests under a contrasted pollution environment in NE Spain. The Science of the Total Environment ,2003 ,305 (1-3) :195—205.

[5] Li L H , Li P , He J Y , *et al.* Review on the study of forest Precipitation Chemistry. Journal of Soil and Water Conservation ,1994 ,8 (1) :84—95.

[6] Avila Anna , Rodrigo Anselm. Trace metal fluxes in bulk deosition , throughfall and stemflow at two evergreen oak stands in NE Spain subject to different exposure to the industrial environment. Atmospheric Environment ,2004 ,38 (2) :171—180.

[7] Zhang S L , Lei R D , Lü Y L , *et al.* Water-Balance of Forest Eco-system in Huoditang Area of Qinling Mountain. Bulletin of Soil and Water Conservation ,2000 ,20 (6) :18—22.

[8] 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. Forest Research ,2000 ,13 (6) :598—607.

[9] Polkowska Zaneta , Astel Aleksander , Walna Barbara , *et al.* Chemometric analysis of rainwater and throughfall at several sites in Poland. Atmospheric Environment ,2005 ,39 (5) :837—855.

[10] Chiwa M , Crossley A , Sheppard L J , *et al.* Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments. Environmental Pollution ,2004 ,127 (1) :57—64.

[11] Fang Y T , Mo J M , Gundersen Per , *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition : a review. Acta Ecologica Sinica ,2004 ,24 (7) :1523—1531.

[12] Wang Q S , He L P. Relationship between the Manure and Nitrogen Supply in the Soil. Shanxi Forestry Science and Technology ,2003 , (9) Sup : 25—27.

[13] Neal Colin , Reynolds Brian , Neal Margaret , *et al.* Soluble reactive phosphorus level in rainfall , cloud water , throughfall , soil water , stream waters and groundwaters for the Upper River Seven area , Plynlimon , mid Wales. The Science of the Total Environment ,2003 ,314~316 :99—120.

[14] Peng P H , Wang X J , Hu Z Y , *et al.* The Effects of the Partitioning of Rainfall on the Nutrients Leaching Processes in the Mixed Alnus Cremastogyne and Cupressus Funebis Forest. Chinese Journal of Ecology ,1996 ,15 (5) :12—15.

[15] United states environmental protection agency , Cadmium , lead. In : United states environmental protection agency eds , Xu Z R translated. Quality Criteria for Water , Beijing : China Architecture & Building Press ,1981. 31—109.

[16] Li Y R , Xu W H , Liu J Z , *et al.* Advances of Effect of Organic Acid on Cd Forms and Bioavailability in soil. Guangdong Weiliang Yuansu Kexue , 2005 ,12 (4) :12—17.

[17] Zhang J C , Zeng F , Zhu L J. “Memory ” Effects of heavy Metals on Forest Soils. Rural Eco-Environment ,2004 ,20 (4) :32—36.

[18] Wu Y G , Jiang Z L , Luo Q. The Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Teas on Both Sides of Highway. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition) ,2002 ,26 (4) :39—42.

[19] Li Q L , Wang X J. Influence of vehicle exhaust on the contents of Pb in soil and vegetables. Ecology and Environment ,2004 ,13 (1) :17—18.

[20] Zhang M K , Huang C Y. Chemical Forms of Lead and Cadmium in Soils from Some Tea Gardens Near Highway. Journal of Tea Science ,2004 ,24 (2) :109—114.

参考文献 :

[1] 施立新,余新晓,马钦彦. 国内外森林与水质研究综述. 生态学杂志,2000 ,19 (3) :52~56.

[3] 蒋益民,曾光明,张龚,等. 森林降水化学的变化特征和机理. 环境污染与防治,2003 ,25 (5) :271~276.

[5] 李凌浩,林鹏,何建源,等. 森林降水化学研究综述. 水土保持学报,1994 ,8 (1) :84~95.

[7] 张胜利,雷瑞德,吕瑜良,等. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究. 水土保持通报,2000 ,20 (6) :18~22.

[8] 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. 林业科学研究,2000 ,13 (6) :598~607.

[11] 方运霆,莫江明,Gundersen Per,等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报,2004 ,24 (7) :1523~1531.

[12] 王青山,何利平. 土壤有机质与氮素供应的相关关系. 山西林业科技,2003 ,(9)增刊:25~27.

[14] 彭培好,王金锡,胡振宇,等. 人工桉柏混交林中降雨对养分物质的淋溶影响. 生态学杂志,1996 ,15 (5) :12~15.

[15] 美国环境保护局. 铅,镉. 见:美国环境保护局编,许宗仁译. 水质评价标准. 北京:中国建筑工业出版社,1981. 31~109.

[16] 李仰锐,徐卫红,刘吉振,等. 有机酸雨对土壤中镉形态及其生物有效性影响的研究进展. 广东微量元素科学,2005 ,12 (4) :12~17.

[17] 张金池,曾锋,朱丽珺. 森林土壤对几种重金属污染的“记忆”效应. 农村生态环境,2004 ,20 (4) :32~36.

[18] 吴永刚,姜志林,罗强. 公路边茶园土壤与茶树重金属的积累与分布. 南京林业大学学报(自然科学版),2002 ,26 (4) :39~42.

[19] 李其林,王显军. 汽车尾气对土壤和蔬菜中铅含量的影响. 生态环境,2004 ,13 (1) :17~18.

[20] 章明奎,黄昌勇. 公路附近茶园土壤中铅和镉的化学形态. 茶叶科学,2004 ,24 (2) :109~114.