

大兴安岭兴安落叶松林不同水文调节层对水质的影响

刘睿奇^{1,2}, 张秋良^{1,2*}, 赵亚萍³

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古 根河 022350;
3. 黄河水利委员会 宁蒙水文水资源局, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 以大兴安岭地区的兴安落叶松林为研究对象, 通过对林内不同水文调节层的 pH、浊度、电导率、Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺、PO₄³⁻、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 等水质指标进行测定来探究各水文调节层对水质的影响。结果表明, 研究期内林外雨 pH 均值为 8.227, 呈弱碱性, 兴安落叶松林的林冠层和树干会对降水会造成明显的酸化作用; 林外雨浊度均值仅为 1.790 NTU, 在流经各水文调节层面后浊度明显增加, 林冠层、枯枝落叶层和土壤层的浊化作用最为明显; 电导率的变化表明各个调节层总离子的淋溶量均大于吸收量; 土壤层为主要净化层面但不具备净化 Zn、Pb、Cr⁶⁺ 的能力; 整个森林仅对 Mn 和 NH₄⁺-N 有净化作用, 净化率分别为 78.04% 和 12.01%; 树干茎流决定了大兴安岭兴安落叶松林各元素输入量, 其次为枯落物渗透水; 根据地表水环境质量标准, 大兴安岭兴安落叶松林不会对降水水质造成明显影响。

关键词: 降水; 兴安落叶松林; 水文调节层; 淋溶; 水质

中图分类号: S791.22

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)03-0055-08

Effects of Different Hydrological Regulation Layers on Water Quality of *Larix Gmelinii* Forest in the Daxingan Mountains

LIU Rui-qi^{1,2}, ZHANG Qiu-liang^{1,2*}, ZHAO Ya-ping³

(1. Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; 2. Forest Ecosystem National Observation and Research Station of Greater Khingan Mountains, Inner Mongolia, Genhe 022350, Inner Mongolia, China;
3. Yellow River Conservancy Commission, Ningmeng Hydrology and Water Resources Bureau, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to explore the effects on water quality of different hydrological regulation layers of *Larix gmelinii* forest occurring in the Daxingan Mountains, *L. gmelinii* forest in the mountains was taken as the research object. Indices of water quality were measured, such as pH, turbidity, conductivity, Cu, Fe, Zn, Mn, Pb, Cr⁶⁺, PO₄³⁻, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents in different hydrological regulation layers in the forest. The results showed that the average pH of rainfall during the study period was 8.227, presenting weakly alkaline. The canopy layer and trunk of *L. gmelinii* forest significantly acidified the rainfall. The average turbidity of the rainfall was only 1.790 NTU, which increased significantly after flowing through each hydrological regulation layer, and the turbidity effects of canopy layer, litter layer and soil layer were the most significant. The change of conductivity revealed that the leaching amount of total ions in each regulation layer was greater than the absorption amount. The soil layer was the main purification layer, but it did not have the ability to purify Zn, Pb, and Cr⁶⁺. The whole forest could only purify Mn and NH₄⁺-N with the purification rates of 78.04% and 12.01%. The input of elements in *L. gmelinii* forest in the Daxingan Mountains mainly depended on stem flow, followed by litter water. According to the environmental

收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(32060262)。

第一作者: 刘睿奇。研究方向: 森林经理学。E-mail: 519922374@.com

* 通信作者: 张秋良, 教授, 博士, 博士生导师。研究方向: 森林经理学。E-mail: 18686028468@163.com

quality standard of surface water, *L. gmelinii* forest in the Daxing'an Mountains will not have a significant impact on water quality of rainfall.

Key words: rainfall; *Larix gmelinii* forest; hydrological regulation layer; leaching; water quality

大气降水既是森林生态系统水分和养分的重要来源,又是地球化学循环的重要组成部分^[1-2]。森林是在一定地域内生存的森林生物群落与环境相互作用、具有能量转换和信息传递功能的统一体^[3],由降水穿过不同层面而导致的水体理化性质的变化不断推动森林生态系统中的各种循环过程,进而影响大气和土壤的组成、结构、功能以及能量的转换与平衡。森林由上至下具有丰富且明显的层次,其林冠层、树干茎流层、枯枝落叶层、土壤层都会对降雨的水质造成不同程度的影响^[4]。已有研究表明,大气降水中除了植物生长所必需养分元素^[5]以外还包含有 85 种以上有机化合物以及重金属元素如铅(Pb)镉(Cd)六价铬(Cr⁶⁺)等。同时因城市化、工业化发展加速,SO₂、NO_x、工业粉尘、生活废气的排放加速了大气污染。污染物随着降水穿过森林不同水文调节层面后的雨水的化学物理性质会发生显著改变^[6],有关森林与水质关系的研究已成为森林生态水文学研究的重点和热点^[7]。兴安落叶松作为大兴安岭地区的典型优势树种,对于整个大兴安岭地区的水源涵养、净化有着重要意义。本试验以原始林区内的兴安落叶松林为对象,系统研究兴安落叶松林不同水文调节层对水质的影响。为评价兴安落叶松林所具有的净化水质、涵养水源等环境效益提供科学的依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭林业管理局根河林业局潮查林场境内,海拔约 848 m。属寒温带湿润

气候区,冬季(候平均气温<10℃)长达 9 个月,夏季(候平均气温≥22℃)不超过 1 个月。平均气温-5.4℃,最低气温-50℃,最高气温 40℃,年降水量 450~550 mm,60%集中在 6、7、8 月,9 月末至第 2 年 5 月初为降雪期,降雪厚度 20~40 cm。年均日照 2 594 h,无霜期 80 d,土壤以暗棕壤为主。大兴安岭森林覆被率达 60%以上,以兴安落叶松占优势的针叶林为主,主要树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等,是我国东北重要的生态屏障和国家森林保育区。

2 材料与方法

2.1 样地设置

经过实地勘测,将样地设置于大兴安岭生态站水量平衡场内(表 1)。按照国家林业行业标准在样地内设置降雨收集装置。于 2020 年 6—8 月在样地内进行水样采集。为确保大气降水能形成有效的树干茎流、地表径流以及枯落物渗透水,在进行采样之前根据气象信息在有较大的降雨前对采样容器(PVC 瓶)使用蒸馏水进行清洗晾干。

2.2 样品采集

2.2.1 林外雨采集 于水量平衡场内一块较大的林窗处选取 3 个取样点,每个取样点固定放置雨水收集 PVC 瓶,收集瓶尽量放置于林窗中心,避免穿透水受风力影响吹入瓶中。每个收集瓶上放置直径 15 cm 玻璃漏斗,漏斗中放置一乒乓球避免昆虫树枝灰尘等污染,同时避免水分蒸发。

表 1 样地基本信息

Table 1 Characteristics of experimental plots

经纬度	坡向	坡度 /(°)	树种组成	林分密度 /(株·hm ⁻²)	海拔/m	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均冠幅 /m
121.509 64°E, 50.939 85°N	西北	5.0	10 落+桦	1344	853.168	19.6	16.7	3.9

2.2.2 穿透水采集 在水量平衡场内随机选取 3 棵长势正常的兴安落叶松,分别在其树荫下放置 PVC 瓶进行收集,每个收集瓶上放置直径 15 cm 玻璃漏斗,漏斗中放置一乒乓球避免昆虫树枝灰尘等污染,同时避免水分蒸发。

2.2.3 树干茎流采集 在水量平衡场内选择长势良好无明显伤口或病态兴安落叶松。用直径为 1 cm 的聚乙烯管剖开后沿树干螺旋形固定在树干基部,同时将聚乙烯管插入收集瓶并封死。用钉钉

牢,玻璃胶封严各接缝处,确保树干茎流全部流入 PVC 瓶,下接聚乙烯收集瓶收集树干茎流雨。

2.2.4 枯落物渗透水采集 在水量平衡场地表随机选取 3 处样点,将地表枯落层环切下来放置于直径 40 cm 的漏斗上,漏斗下置筛网并将漏斗底部插入 PVC 瓶并封死,避免污染。

2.2.5 地表径流采集 在水量平衡场地表径流小区内出口设立地表径流采集点,并在周围设立保护网,避免人为和动物的践踏,以及昆虫落叶的影响。

2.3 样品测定

样品采集完毕后及时测量各样品浊度,随后使用中性滤纸进行过滤,并在 4 ℃ 环境下保存并进行水质化学分析。一部分样品冷藏寄送专业实验室测定其 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr⁶⁺ 含量。另一部分样品于 24 h 内使用美国哈希生产的 HACH Dr1900 型水质分析仪测定其 PO₄³⁻、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。pH、浊度和电导率分别使用美国哈希生产的 HACH-HQ40D、HACH-2100Q、HACH-HQ14D 测定。水样测定及检测标准见表 2。

表 2 大兴安岭兴安落叶松天然林水样测定方法
Table 2 Water sample determination method of *L. gmelinii* natural forest in Daxingan Mountains

项目	参照国标名称	分析方法
pH	pH	玻璃电极法
TURB	浊度	分光光度法
COND	电导率	电极法
Cu	铜	原子吸收分光光度法
Fe	铁	原子吸收分光光度法
Pb	铅	原子吸收分光光度法
Mn	锰	原子吸收分光光度法
Zn	锌	原子吸收分光光度法
Cr ⁶⁺	六价铬	分光光度法
PO ₄ ³⁻	磷酸盐	Phosver3 酸水解法
NH ₄ ⁺ -N	氨氮	纳氏试剂分光光度法
NO ₃ ⁻ -N	硝酸盐氮	镉还原法

2.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理和图表绘制。使用 SPSS 26.0 对所选取检测指标进行差异显著性检验(LSD 法,α=0.05)。

3 结果与分析

3.1 不同水文调节层 pH、浊度、电导率变化

3.1.1 pH 的变化 总试验期间内,林外雨的 pH 均值为 8.277,呈碱性。这与许多关于北方降雨研究的结果相吻合^[8-9]。由表 3 可以看出,大气降水在经过不同的水文调节层后 pH 发生了明显的变化。整体趋势表现为先下降后增加。表现为:林外雨>地表径流>穿透水>穿透水枯落物渗透水>树干茎流,各层面具有显著的差异性(P<0.05)。降水在经过林冠后会对枝条叶面进行淋洗,带走枝条叶面上的尘埃颗粒以及植物本身分泌的酸,同时叶表面交换位上的阳离子与降水溶液中的氢离子发生交换也使得穿透水酸度降低^[10-11]。树干茎流的酸化程度最为强烈,观测期间 pH 平均值仅为 4.427。相对于阔叶树种,松、杉等针叶树种树干表皮的酸化能力更强。其酸化的主要原因来自于降水对树木表皮大

气干沉降物质以及树木表皮代谢的有机酸与无机酸的冲刷。降水在经过地表层和枯落物时 pH 都会有所增加,观测期间地表径流和枯落物渗透水的平均 pH 分别为 6.187 和 5.550,大于树干茎流且小于林外雨。其酸性变化与地表和枯落层的碱性沉降物、弱碱性阳离子有关。林地地表和枯落层会吸收降水中的 NH₄⁺ 离子,从而降低水体中 H⁺ 的质量浓度,同时林地地表以及枯落层有机物分解和野生动物排泄物会产生碱性的 NH₃^[12],北方的碱性土壤扬尘同样会中和地表径流和枯落物渗透水的酸性。

3.1.2 浊度的变化 本试验样地内水体浊度整体表现为地表径流>枯落物渗透水>穿透水>树干茎流>林外雨,各水文调节层面上具有显著的差异性(P<0.05)。试验期间的林外雨平均浊度为 1.790 NTU。经过林冠层的大气降水对枝叶上的干沉降以及扬尘的淋洗,浊度有明显的上升,平均浊度为 11.692 NTU,为林外雨的 6.53 倍。相对于阔叶林,针叶林穿透水浊度上升并不明显^[13]。树干茎流较穿透水浊度有明显下降,平均浊度为 6.067 NTU,反映了树干具有一定的物理吸附和沉淀能力。枯落物中含有大量的颗粒沉降、枯落物碎屑、生物碎屑等类杂质且数量较大,因此枯落物渗透水的平均浊度较高,均值为 17.346 NTU。地表层的水体会侵蚀表层土壤,使得浊度大幅度上升,其浊化作用最为明显,试验期间地表径流平均浊度为 23.916 NTU(表 3)。

3.1.3 电导率的变化 整个试验期内,大兴安岭兴安落叶松原始林的电导率为 3.997~20.740 mS·m⁻¹,最低与最高相差 5.189 倍,具有显著的差异性(P<0.05)。具体表现为林外雨>穿透水>树干茎流>地表径流>枯落物渗透水。电导率在不同水文调节层面的变化呈现出明显的空间性,由上到下逐渐上升(表 3),与先前的众多研究结果一致^[14-15]。这是因为降水对森林的各个层面的淋溶作用使得水体中的离子质量浓度上升,同时也反映了降水对兴安落叶松林内各种元素整体呈现正淋溶的状态。

3.2 不同水文调节层金属元素含量变化

由表 4 可知,在所测定的金属元素中仅有 Pb、Cr⁶⁺ 在各水文调节层面上无显著差异变化(P≥0.05)。研究期间测定出的林外雨中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺ 的平均质量浓度分别为 0.020、0.023、0.140、0.287、0.046、0.031 mg·L⁻¹,相对于以往的研究,Zn 和 Mn 的质量浓度要高出许多。这是因为根河地区位于我国寒温带最北部,用于取暖的煤和木材的消耗量比较大,燃烧所产生的气体中含有大量的 Zn、Mn 等元素,较长的供暖期进一步增加了这些元素在大气中的含量^[16]。这些元素以气溶

胶的形式悬浮在空中,随着大气降水被淋洗下来,导致林外雨中的 Zn、Mn 含量增加^[17]。所观测的时段(6—8 月)内各种金属元素含量的大小顺序依次为 Mn>Zn>Pb>Cr⁶⁺>Cu>Fe。最高与最低相差 14.35 倍。受气候条件、大气尘埃物、降雨时间、降雨强度、降雨间隔期以及树木生理活动等因素的影响,不同月份的水体中所含元素及其含量具有一定的差异性^[18],其中 Pb 的变异系数最大,均大于 1。穿透水中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺ 的平均质量浓度分别为 0.027、0.080、0.149、0.177、0.150、0.042 mg·L⁻¹。各种金属元素含量的大小顺序依次为 Mn>Zn>Fe>Pb>Cr⁶⁺>Cu。穿透水中 Cu、Fe、Zn、Pb、Cr⁶⁺ 质量浓度均高于大气降水,其中 Fe 升高较为明显,Mn 质量浓度则呈现下降的趋势。各月的树干茎流中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺ 平

均质量浓度分别 0.527、0.747、0.261、0.323、0.060、0.020 mg·L⁻¹。各种金属元素含量的顺序为 Fe>Cu>Mn>Zn>Pb>Cr⁶⁺。Fe、Cu 和 Zn 的含量继续增加且较穿透水增幅更大,说明大气降水对兴安落叶松枝叶和树干中的 Fe、Cu 和 Zn 有明显的淋溶作用,其中树干茎流的淋溶作用最为明显。当大气降水降落到林地表面后,枯枝落叶层主要表现为枯落物对大气降水和穿透水树干茎流中各种离子的吸收,地表微生物对化合物的分解、对离子的吸收。各月枯落物渗透水中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺ 的平均质量浓度分别为 0.418、0.303、0.244、0.077、0.068、0.043 mg·L⁻¹。各种金属元素含量的顺序为 Cu>Fe>Zn>Mn>Pb>Cr⁶⁺,可见枯落层对 Cu 和 Fe 离子具有较强的吸附净化能力。除了重金属 Pb 和 Cr⁶⁺ 外均相对于树干茎流有所降

表 3 不同水文调节层 pH、浊度以及电导率的变化

Table 3 Variation of pH value,turbidity and conductivity of different hydrological regulation layers

监测项目	统计量	不同水文调节层面测定结果				
		林外雨	穿透水	树干茎流	枯落物渗透水	地表径流
pH 值	X	8.277	5.590	4.427	5.550	6.187
	S	0.029	0.037	0.571	0.347	0.223
	cv	0.004	0.007	0.129	0.063	0.036
浊度/ntu	X	1.790	11.692	6.067	17.346	23.916
	S	0.934	11.838	2.252	3.106	3.842
	cv	0.522	1.012	0.371	0.179	0.161
电导率 COND/(mS·m ⁻¹)	X	3.997	7.053	17.753	18.867	20.740
	S	0.152	0.180	2.172	1.869	1.853
	cv	0.038	0.026	0.122	0.099	0.089

注:X、S 和 cv 分别表示 6—8 月水质参数的平均值、标准差和变异系数, cv=S/X。下同。

表 4 不同水文调节层金属元素的变化

Table 4 Variation of metal element content in different hydrological regulation layers

mg·L⁻¹

监测项目	统计量	不同水文调节层面测定结果				
		林外雨	穿透水	树干茎流	枯落物渗透水	地表径流
铜 Cu	X	0.020	0.027	0.527	0.418	0.027
	S	0.008	0.005	0.159	0.021	0.468
	cv	0.408	0.185	0.302	0.050	17.333
铁 Fe	X	0.023	0.080	0.747	0.303	0.233
	S	0.017	0.037	0.687	0.323	0.224
	cv	0.728	0.468	0.920	1.065	0.960
锌 Zn	X	0.140	0.149	0.261	0.244	0.253
	S	0.050	0.058	0.077	0.079	0.112
	cv	0.354	0.389	0.293	0.324	0.443
锰 Mn	X	0.287	0.177	0.157	0.077	0.063
	S	0.208	0.114	0.169	0.108	0.046
	cv	0.724	0.648	1.076	1.414	0.733
铅 Pb	X	0.046	0.050	0.060	0.068	0.050
	S	0.057	0.067	0.067	0.085	0.066
	cv	1.248	1.344	1.131	1.252	1.316
六价铬 Cr ⁶⁺	X	0.031	0.042	0.020	0.043	0.063
	S	0.002	0.023	0.011	0.015	0.025
	cv	0.054	0.549	0.563	0.348	0.393

低,其中 Fe 降幅 58.5%,为所有元素中降幅最大的。在地表径流中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cr⁶⁺ 的平均质量浓度分别为 0.027、0.233、0.253、0.063、0.050、0.063 mg·L⁻¹。可见土壤层对部分金属元素有一定的净化作用。各种金属元素含量的顺序为 Zn>Fe>Mn>Cr⁶⁺>Pb>Cu。Cu 和 Fe 含量大幅度降低。理论上森林对 Pb、Cr⁶⁺ 有一定的净化作用。但是从本次试验结果中发现 Pb、Cr⁶⁺ 这 2 种重金属元素在地表以上无明显减少,在枯落物渗透水和地表径流中甚至略微增加,这可能是因为兴安落叶松较阔叶林叶面积小,加之位于寒温带地区,代谢速度较慢,对于 Pb、Cr⁶⁺ 的吸收能力差。同时该地区地表以及枯落层呈现弱酸性,会引起枯落物中含重金属的矿物质溶解。因此 Pb、Cr⁶⁺ 的质量浓度在枯落层渗透水和地表径流中有轻微增加^[19]。

3.3 不同水文调节层 PO₄³⁻、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量变化

大气降水中的无机 N 主要以 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 2 种形式存在,二者在一定条件下可以相

互转换。P 主要以 PO₄³⁻ 形式存在。整个观测期间,在各水文调节层面上有显著差异变化($P < 0.05$)。试验区内林外雨中 PO₄³⁻、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的平均质量浓度分别为 0.663 μg·L⁻¹、0.141 mg·L⁻¹ 和 0.273 mg·L⁻¹,整体含量较低(表 5)。

与林外雨相对比,穿透水中的 PO₄³⁻ 质量浓度增加了 8.740 μg·L⁻¹,增加了 13.18 倍。树干茎流、枯落物渗透水、地表径流分别达到了 49.627 mg·L⁻¹、53.667 μg·L⁻¹ 和 22.103 μg·L⁻¹。这是因为 P 作为叶片细胞的主要物质交换元素,在叶面的表皮细胞中比较活跃,同时也极容易被淋溶。枯枝落叶层中凋落的植物组织中有机质降解以及微生物对植物组织中的氨基酸和蛋白质的分解也可以释放出大量的 PO₄³⁻,进而导致降雨经过枯枝落叶层时溶解了此部分 PO₄³⁻,使得 PO₄³⁻ 质量浓度进一步上升。地表径流中的 PO₄³⁻ 大幅度减少,降幅达到了 58.9%,可见兴安落叶松林土壤层对 PO₄³⁻ 有一定的吸附净化能力。

表 5 各水文调节层 PO₄³⁻、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的变化

Table 5 Variation of PO₄³⁻、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N in different hydrological regulation layers

监测项目	统计量	不同水文调节层面测定结果				
		林外雨	穿透水	树干茎流	枯落物渗透水	地表径流
磷酸盐 PO ₄ ³⁻ /(μg·L ⁻¹)	X	0.663	9.403	49.960	53.667	22.013
	S	0.000	0.011	0.028	0.015	0.028
	cv	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	X	0.273	0.283	0.393	3.313	0.240
	S	0.005	0.083	0.213	1.669	0.093
	cv	0.017	0.294	0.541	0.504	0.386
硝酸盐氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	X	0.141	0.245	0.709	1.114	0.535
	S	0.099	0.178	0.517	0.197	0.088
	cv	0.707	0.724	0.729	0.177	0.164

大气降水在经过林冠层和树干后 NH₄⁺-N 浓度仅上升了 0.010 mg·L⁻¹ 和 0.120 mg·L⁻¹,在经过地表径流后也仅有微量的降低,并无显著变化。枯落物渗透水中的 NH₄⁺-N 质量浓度显著增加,达到了 3.313 mg·L⁻¹,是林外雨的 12.14 倍。其原因为枯枝落叶的降解导致了植物组织中的有机物的降解释放出了 N 元素^[20],同时动物昆虫粪便和尸体也含有大量的 N 元素^[21]。这些 N 元素经微生物分解后可以形成大量的 NH₄⁺-N。NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 的变化特征具有一定的差异。大气降水在经过林冠层和树干后水体中的 NO₃⁻-N 质量浓度呈现出了上升的趋势,分别上升了 0.104 mg·L⁻¹ 和 0.568 mg·L⁻¹,这是由于降水对林冠层和树干表面的 NO₃⁻-N 的淋洗导致的,与阔叶林相

比,针叶林中的 NO₃⁻-N 更容易被降水淋洗,其变化程度也更加明显^[22]。枯落物渗透水的 NO₃⁻-N 质量浓度达到了 1.114 mg·L⁻¹,是林外雨的 7.90 倍,其原因与 NH₄⁺-N 在枯枝落叶层中的显著增加相同,都是由枯枝落叶层中的微生物将动物昆虫尸体分解成无机氮导致的。土壤层对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 均有一定的吸附净化能力^[23],相对于枯落物渗透水,地表径流中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 分别下降了 92.33%和 51.97%。

3.4 大兴安岭兴安落叶松林各元素输入输出特征

通过观测大兴安岭兴安落叶松林生长季节降水以及各层面水文调节特征结果可知:所有测定指标净输入量均为正,其中 Cu、Fe、Zn、NNO₃⁻-N 主要来源于树干茎流,分别是林外雨的 26.35、32.00、

1.86、5.04 倍。Pb、 Cr^{6+} 、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+-N 主要来源于枯落物渗透水,分别是林外雨的 1.48、1.37、81.01、1.44 倍。所有测定指标中仅有 Mn 和 NH_4^+-N 净迁移量为负,分别为 -0.223 和 -0.033。可见大兴安岭兴安落叶松林各元素输入量主要决定于树干茎流,其次为枯落物渗透水。整个森林仅对 Mn 和 NH_4^+-N 有净化作用,净化率分别为 78.04% 和 12.01% (表 6)。土壤层为主要净

化层面但不具有净化 Zn 和 Cr^{6+} 的能力。根据《地表水环境质量标准》GB 3838—2002,大气降水水质为Ⅱ类,枯落物渗透水水质为Ⅴ类,流经森林后的地表径流水质也为Ⅱ类,说明土壤层为主要净化层面。大兴安岭兴安落叶松林虽然会使得流出森林的水体中各项元素有所增加,但增量较低,不会明显影响水质。

表 6 兴安落叶松林各元素输入量

Table 6 Input quantity number of element in *Larix gmelinii* forest

水文过程分量	Cu	Fe	Zn	Mn	Pb	Cr^{6+}	PO_4^{3+}	NH_4^+-N	NO_3^--N
林外雨	0.020	0.023	0.140	0.287	0.046	0.031	0.663	0.273	0.141
穿透水	0.027	0.080	0.149	0.177	0.050	0.042	9.403	0.283	0.245
树干茎流	0.527	0.747	0.261	0.157	0.060	0.020	49.960	0.393	0.709
枯落物渗透水	0.419	0.303	0.244	0.077	0.068	0.043	53.667	3.313	1.114
地表径流	0.027	0.233	0.253	0.063	0.050	0.063	22.013	0.240	0.535
净输入量	0.952	1.107	0.514	0.124	0.131	0.074	112.367	3.717	1.927
净迁移量	0.007	0.210	0.113	-0.223	0.004	0.032	21.350	-0.033	0.394

注:除 PO_4^{3-} 计量单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 外,其他指标计量单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

4 结论与讨论

4.1 结论

兴安落叶松林的林冠层和树干会对降水会造成明显的酸化。研究期内林外雨 pH 均值 8.227,呈弱碱性,流经不同水文调节层后 pH 整体表现为:林外雨>地表径流>枯落物渗透水>穿透水>树干茎流;林冠层、枯枝落叶层和土壤层有较强的浊化作用,林外雨浊度平均值仅为 1.790 NTU,在流经各水文调节层面后浊度明显增加,增幅达 1336.08%;电导率的变化表明各个调节层总离子的淋溶量均大于吸收量;土壤层为主要净化层面但不具备净化 Zn、Pb、 Cr^{6+} 的能力;整个森林仅对 Mn 和 NH_4^+-N 有净化作用,净化率分别为 78.04% 和 12.01%;树干茎流决定了大兴安岭兴安落叶松林各元素输入量,其次为枯落物渗透水;根据《地表水环境质量标准》GB 3838—2002,流经兴安落叶松林的大气降水虽然化学成分与质量浓度发生显著改变,但不影响整体水质。

4.2 讨论

本试验的主体为兴安落叶松林。2020 年 6—8 月实测降水呈弱碱性。这一现象多出现于北方地区^[24-25]。碱性降水在流经兴安落叶松林各个层面后 pH 呈弱酸性,这与鲜靖苹等^[26]的研究结论一致。虽然森林会酸化大气降水,但是不会对生态系统造成危害。森林各个层面对于不同酸碱度降水的调节作用,会使其 pH 保持在一个健康、有利的范围内。电导率是水体中离子含量的总反应^[27]。本试验所

反映的电导率变化规律与全国大部分的研究结果相似,但受气候的影响,整个森林内部的物质交换要低于其他地区,各水文调节层面电导率变化强度较弱,电导率数值均低于其他地区的研究^[21]。兴安落叶松林不同的水文调节层水体浊度差异性较为明显。降水流经各水文调节层面后浊度增加明显。但相较于阔叶林,针叶林穿透水浊度上升并不明显,在杨钙仁等^[13]对桉树人工林冠层淋溶水质特征初步研究中,桉树林冠层穿透水的浊度多在 100 NTU 以上,这些差异与兴安落叶松的树种特性以及研究区周围自然环境有一定的关系。兴安落叶松作为针叶落叶树种,其光滑的针叶不利于灰尘和杂质的附着,同时,每年落叶的性质也可以避免灰尘和杂质在非生长季节的堆积。

在森林水文化学变化中,金属元素同时可以看作营养元素和污染元素^[28],其在参与森林生态系统化学元素循环的同时,还与系统中的化学元素相互作用^[29]。以往研究中^[10,13-14],森林对降水中的重金属有着较好的净化作用。一般情况下重金属元素在经过各水文调节层后会大幅度减少。杜敏等^[30]的研究发现华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 凋落物层对重金属具有吸收和固定作用。雷瑞德等^[31]对锐齿栗林 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) 的研究也有相似的结论。但是本试验中的结果与之存在差异,各个水文调节层面仅对 Mn 有吸附净化作用。Fe、Cu、Zn 在经过林冠层、树干以及枯枝落叶层后质量浓度大幅度增加。对比大气降水,地表径流中 Cu、Fe、Zn、Pb、 Cr^{6+} 的含量分

别增加了 35.00%、913.04%、80.71%、8.70% 和 103.22%,这说明并非所有森林都可以净化重金属元素。阔叶树种可以有效吸附净化降水中的 Zn,而松类树种与之相反。究其原因是松类树种叶面的蜡质和松脂对 Zn 有着较强的拦截作用,降雨淋洗时会把叶面上的 Zn 淋洗下来,导致冠层及以下水文调节层面的 Zn 质量浓度增加。晋建霞等^[32]对天然针阔混交林,李伟等^[23]对华山松人工林研究发现,凋落物层对重金属的富集作用小于释放作用,其主要原因有 3 点:1) 针叶类凋落物对大气干性沉降物具有较强的富集效应,降水时易被淋洗;2) 枯落物层中的碳水化合物和氨基酸重金属络合后容易提高重金属的移动性;3) 对 pH、气温等环境因子的响应。森林会酸化大气降水,当 pH 呈酸性时凋落物层中的重金属溶出速度加快。当温度升高时凋落物分解加快,凋落物表层吸附和自身固有的重金属会被解吸而迁移到淋溶液中。本研究对象为兴安落叶松林,试验期为温度较高的生长季节,刚好符合以上原因。

P 和 N 是植物生理过程中与环境交换最为频繁且复杂的元素。林冠层和树干对 P 和 N 有一定的吸收作用,降水也可以有效地淋溶叶面和枝干上的无机 P 和无机 N^[7,18]。由试验结果可见,兴安落叶松林的林冠层和树干的淋溶作用要大于对 P 和 N 的吸收作用。植物组织中含有大量的氨基酸和蛋白质,枯枝落叶层中的微生物和土壤中的硝化细菌微生物利用过后释放出了 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 等无机物,进而导致枯落物渗透水和地表径流中的 N 和 P 元素增加。受土壤酸化机制的影响,大气中的 N 元素以 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 进入土壤时,一部分 NH_4^+ 被植物细根吸收释放出 1 个氢离子,同时土壤中的硝化细菌会将 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 并释放出 1 个氢离子^[33]。因此枯落物渗透水中的 N 元素在主要以 NH_4^+ -N 形式存在,而在地表径流中更多以 NO_3^- -N 的形式存在。这与吴初平等^[10]在浙江舟山岛的试验结果一致,而与李伟等^[23]研究的结果存在差异。

受地形和气候影响,观测区土壤层多为永久冻土,无法将其分层分析。只能通过对比枯落物渗透水与地表径流的水质情况来反映森林土壤的水质调节效应。希望在今后条件允许的情况下对土壤分层进行分析以获得更加精确的结果。

参考文献:

- [1] PARKER G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13(4): 57-133.
- [2] RODRIGO A, ÀVILA A, RODÀ F. The chemistry of precipitation, throughfall and stemflow in two holmoak (*Quercus ilex* L.) forests under a Contrasted pollution environment in NE Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 305(1/3): 195-205.
- [3] 李景文. 森林生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994.
- [4] 施立新, 余新晓, 马钦彦. 国内外森林与水质研究综述[J]. *生态学杂志*, 2000, 19(3): 52-56.
- [5] SHI L X, YU X X, MA Q Y. Review of forest and water quality research at home and abroad [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(3): 52-56. (in Chinese)
- [6] 胡悦, 满秀玲, 魏红. 降雨特征对兴安落叶松林降雨再分配过程中钾元素影响分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 307-314.
- [7] HU Y, MAN X L, WEI H. Analysis on the effects of rainfall characteristics on potassium content in *Larix gmelinii* forest during rainfall redistribution[J]. *Forestry Research*, 2017, 30(2): 307-314. (in Chinese)
- [8] POTTER C S, RAGSDALE H L, SWANK W T. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian forest canopy [J]. *Journal of Ecology*, 1991, 79: 97-115.
- [9] SINGH S, BHARDWAJ A, VERMA V K. Remote sensing and GIS based analysis of temporal land use/land cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110355.
- [10] 张宝贵, 杜建双, 李卫敏, 等. 北戴河降水 pH 值与大气环境的关系研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(10): 49-53.
- [11] ZHANG B G, DU J S, LI W M, et al. Relationship between pH value of rainfall and atmospheric environment in Beidaihe[J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(10): 49-53. (in Chinese)
- [12] 张凤琳, 冯大伟, 林艳玲. 大庆市区降水偏碱性成因探析[J]. *环境科学与管理*, 2007(2): 132-133, 137.
- [13] ZHANG F L, FENG D W, LIN Y L. The analysis of reason why the precipitation is weak alkaline in city proper of Daqing [J]. *Environmental Science and Management*, 2007(2): 132-133, 137. (in Chinese)
- [14] 吴初平, 叶激华, 黄玉洁, 等. 浙江舟山岛不同林分类型的水质效应[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(4): 75-804.
- [15] WU C P, YE J H, HUANG Y J, et al. Effects of different forest types on water quality in Zhoushan Island, Zhejiang Province[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2015, 39(4): 75-804. (in Chinese)
- [16] TUKEY H B. The leaching of substances from plants[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1970, 21: 305-324.
- [17] 逯军峰, 王辉, 曹靖, 等. 油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(3): 25-28.
- [18] LU J F, WANG H, CAO J, et al. Effect of forest litter on soil physical and chemical properties in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(3): 25-28. (in Chinese)
- [19] 杨钙仁, 雷世满, 黄承标, 等. 桉树人工林冠层淋溶水质特征初步研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 203-206.
- [20] YANG G R, LEI S M, HUANG C B, et al. Water quality of canopy rain in *Eucalyptus* plantations[J]. *Journal of Soil and*

- Water Conservation, 2009, 23(6): 203-206. (in Chinese)
- [14] 陈书军, 田大伦, 闫文德, 等. 樟树人工林生态系统的水分生态效应[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 10-14.
CHEN S J, TIAN D L, YAN W D, *et al.* Ecological effect of *Cinnamomum camphora* plantation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 10-14. (in Chinese)
- [15] 辛颖, 赵雨森, 曾凡锁, 等. 黑龙江省东部山地白桦人工林对水质的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26(3): 287-291.
XIN Y, ZHAO Y S, ZENG F S, *et al.* Influence of *Betula platyphylla* plantations at mountain region in east Heilongjiang on water quality[J]. Forestry Research, 2013, 26(3): 287-291. (in Chinese)
- [16] 韩冬芸. 城市森林及气候因子对大气颗粒物沉降影响研究[D]. 哈尔滨, 东北林业大学, 2021.
- [17] 赵雨森, 辛颖, 曾凡锁. 阿什河源头水源涵养林在水分传输过程中对水质的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(6): 5-9.
ZHAO Y S, XING Y, ZENG F S. Influence of the water conservation forest in the headstream of Ashi River on water quality[J]. Forestry Science, 2008, 44(6): 5-9. (in Chinese)
- [18] 鲍文, 包维楷, 丁德蓉, 等. 森林植被对降水水化学的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 112-115.
BAO W, BAO W K, DING D R, *et al.* Effects of forest vegetation on water chemistry of precipitation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2004, 13(1): 112-115. (in Chinese)
- [19] 孙涛, 马明, 王定勇. 中亚热带典型森林生态系统对降水中铅镉的截留特征[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 218-225.
SUN T, MA M, WANG D Y. Interceptive characteristics of lead and cadmium in a representative forest ecosystem in mid-subtropical area in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 218-225. (in Chinese)
- [20] 杨双娜, 袁朝祥, 朱贵青, 等. 哀牢山常绿阔叶林穿透雨与树干茎流水质特征研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(5): 109-116.
YANG S N, YUANG C X, ZHU G Q, *et al.* Water quality characteristics of penetrating rain and trunk stream in Ailaoshan evergreen broad-leaved forest[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(5): 109-116. (in Chinese)
- [21] 樊后保. 森林降水酸度及电导率的时空变化[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 463-467.
FAN H B. Temporal and spatial changes in acidity and electrical conductivity of forest precipitation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(4): 463-467. (in Chinese)
- [22] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1223-1228.
LIU J X, ZHANG D Q, ZHOU G Y, *et al.* A Preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow, and surface run-off in major forest type at Dinghusan under acid deposition[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1223-1228. (in Chinese)
- [23] 李伟, 张胜利, 孟庆旭, 等. 秦岭华山松林生态系统对大气降雨水化学特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 15-22.
LI W, ZHANG S L, MENG Q X, *et al.* Effect of *Pinus armandii* forest ecosystem on chemical features of atmospheric rainfall water in Qingling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 15-22. (in Chinese)
- [24] 牛莉萍, 郑宇秀. 酸雨与空气中酸碱物质的探讨[J]. 山西能源与节能, 2007(4): 28-29.
- [25] 曹志锋, 王荣, 陈刚. 双鸭山市降水酸碱变化情况分析[J]. 黑龙江气象, 2013, 30(1): 32-33.
- [26] 鲜靖苹, 张家洋, 胡海波. 森林冠层水文研究进展[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 96-104.
XIAN J P, ZHANG J Y, HU H B. Forest canopy hydrology: a review[J]. Journal of Northwest of Forestry University, 2014, 29(3): 96-104. (in Chinese)
- [27] 谷洪彪, 迟宝明, 王贺, 等. 柳江盆地地表水与地下水转化关系的氢氧稳定同位素和水化学证据[J]. 地球科学进展, 2017, 32(8): 789-799.
- [28] 张淑芬, 马明. 中亚热带典型林分不同层次降水的水质变化特征[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 47-52.
ZHANG S F, MA M. Precipitation levels of typical forest stand in mid-subtropical zone: variation characteristics of water quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(22): 47-52. (in Chinese)
- [29] DOCILE T N, FIGUEI R R, GIL-AZEVEDO L H, *et al.* Water pollution and distribution of the black fly (*Diptera: Simuliidae*) in the Atlantic forest, Brazil[J]. Revista De Biologia Tropical, 2015, 63(3): 683-693.
- [30] 杜敏, 文仕知, 杨丽丽, 等. 六盘山华北落叶松林降水转化中的阳离子通量变化特征[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 133-139.
DU M, WEN S Z, YANG L L, *et al.* Variation of cation flux with rain water in a *Larix principis-rupprechtii* plantation on liupan Mountains[J]. Forestry Research, 2013, 26(2): 133-139. (in Chinese)
- [31] 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 estimations of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest ecosystem on water quality[J]. Journal of Northwest of Forestry University, 2003, 18(4): 1-4. (in Chinese)
- [32] 晋建霞, 张胜利, 陆斌, 等. 西安市水源地森林生态系统水质空间变化特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 46-50.
2003, 18(4): 1-4.
- [33] PENG C, LI Q, ZHANG Z, *et al.* Biochar amendment changes the effects of nitrogen deposition on soil enzyme activities in a moso bamboo plantation[J]. Journal of Forest Research, 2019, 24(5): 275-284.