

兴安落叶松生态系统水质调节功能研究

田磊,张秋良

(内蒙古农业大学林学院,呼和浩特 010019)

摘要:以寒温带兴安落叶松生态系统为研究对象,在2020年6—9月,对其中的大气降雨、穿透雨、树干径流、壤中流以及林地内的溪流水进行取样,并使用哈希Dr1900水质分析仪测定其pH值、酸根离子、金属离子。结果显示,兴安落叶松生态系统各空间层次对大气降雨均有调节作用,但不同层次对不同化学成分的调节强度不同,研究结果对于揭示森林生态系统水源涵养功能与对下游地区水质酸化及金属污染的防治提供理论基础和数据支持。

关键词:兴安落叶松生态系统;调节功能;pH值;酸根离子;金属离子

森林是陆地生态系统的主体,水是地球所有生命生存发展不可或缺的基础资源和森林生态系统中最活跃的因子之一,它们不只为人类提供物质资源,也在维持和调节着生态系统的平衡性,水与森林关系紧密、相互联系,决定着森林的存在、恢复、经营、稳定和发展,影响着森林中植物的生长发育和散布情况^[1-3]。水分承载能力的大小决定了森林植被类型、数量和格局。降雨可以促进森林对其调节、利用、储存、转化,以及溶解各种土壤及动植物遗体,从而影响水体中化学成分的增减。因此,研究大气降雨经过森林生态系统的过程中水质如何变化,尤其是降雨经过森林生态系统不同层次的过程中,其化学成分浓度的改变特征和规律将是探讨森林水源涵养功能的重要科学问题。故在2020年6—9月降雨季节,采集兴安落叶松生态系统中的大气降雨、林内雨、树干径流、壤中流及溪流水,通过其pH值、酸根离子、金属离子的浓度变化,分析降水在兴安落叶松林内水质的变化规律,旨在阐明兴安落叶松林对降水的净化作用,为该地区水质污染和酸雨的防治工作以及森林可持续经营提供基础理论数据。

1 研究区概况及研究方法

根据上述结果可以初步看出,第1个月增殖效果好的培养基,开花效果不太明显,而开花效果暂时明显的,增殖效果不明显。铁皮石斛开花趋势呈曲线,以1个月为分界,第1个月呈现缓慢上升,到第2个月呈现急速上升趋势;2个月之后,开花趋势会随瓶内培养基的营养成分消耗而下降,但其开花植株普遍较矮小,未开花植株比开花的植株要更高大、壮硕一些。可能是植物的开花消耗了植株体内的一些营养物质,所以开花的植株长势较为矮小,而未开花的植株长势更为健壮。研究结果为以后的实际生产提供了可靠的科学依据与技术参考。

(收稿:2021-09-19)

参考文献:

[1]代兴波,李琴,喻国胜.铁皮石斛种苗繁育及栽培技术[J].湖北林业科技,2018,47(1):22-24,41.

1.1 研究区概况

研究地点位于根河林业局潮查林场境内的内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站(以下简称“大兴安岭森林生态站”)。研究区所在的坐标为北纬东经121°30′~121°31′、50°49′~50°51′,海拔约为960m,森林覆盖率约为76%。

1.2 植被类型

该区域植被依靠蒙古植物区系和西伯利亚植被区系及东亚植物区系构成,以木本植物为主。由于年均温较低,同时降雨量较多,出现了湿润环境和土壤永冻层的存在,由此制约了阔叶落叶林的生长,而兴安落叶松作为阳性树种,由于其更耐寒的属性,成为了此区域的优势树种,从而出现了占据总林地81.7%的耐寒型地段性针叶林带,并混生有白桦、山杨、蒙古栎以及分布零散的黄檗和水曲柳。

1.3 采样点设置

2020年6—9月,在大兴安岭森林生态站进行试验,选择兴安落叶松天然林的代表性地段,对样地进行每木检尺后,统计出样地中分布着潮查林区具有代表性的兴安落叶松林,林中植被保存完好,树种组成为8

[2]谌红辉,冯昌林,吴天贵,等.铁皮石斛组培快繁技术研究[J].林业科技通讯,2008,(11):9-10.

[3]宋顺,许奕,李敬阳,等.铁皮石斛的组织培养与快速繁殖研究进展[J].中国农学通报,2013,(33):286-290.

[4]饶宝蓉,陈泳和,江文清,等.铁皮石斛不同外植体组培快繁技术比较[J].安徽农业科学,2017,04(56):146-149+203.

[5]温明霞,聂振朋,林媚,等.铁皮石斛组织培养与快速繁殖研究进展[J].南方农业学报,2007,38(3):227-230.

[6]余乐,兰芹英,姜宗庆.铁皮石斛离体快繁技术[J].江苏农业科学,2014,42(11):268-270.

[7]李茹,李枝林,商正蕊,等.不同LED光质对铁皮石斛瓶内开花的影响[J].南方农业学报,2019,50(7):1550-1556.

[8]李茹,李枝林,白建昆,等.2种多胺对铁皮石斛瓶内开花的影响[J].热带作物学报,2020,041(4):709-714.

[9]李茹,王玉英,赵丽莹,等.多效唑(PP_(333))对铁皮石斛瓶内开花的促进作用[J].分子植物育种,2020,18(23):303-311.

[10]王兆春,唐颖,吴嘉荟,等.恒温条件下营养和水分胁迫促进铁皮石斛组培苗试管内开花[C].中国园艺学会学术年会,2018.

落2白,郁闭度为0.8,种类相对单一,乔、灌层结构明显,土壤紧实,覆盖有厚度为5~10cm的枯枝落叶层。

1.4 研究内容

本试验对兴安落叶松天然林典型植被群落大气降雨、林内雨、树干径流、壤中流及河流水水质进行分析,在6—9月降雨后采集水样本,并在采集后当日带回实验室进行各项指标测定(pH值、酸根离子 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Cr^{2+})。

1.5 水样采集方法

1.5.1 大气降雨。在林缘外空旷的地方,分别设置3个雨水收集瓶采集林外降雨样品。

1.5.2 穿透雨。在样地内设置3个上口宽20cm的漏斗型受雨器进行穿透雨的收集,放置接收瓶的位置保证雨水为该片林冠覆盖下捕获的落叶滴落的降雨。

1.5.3 树干径流。在样地内选择3株与标准木林木特征一致的样木,将直径为3cm的聚乙烯管纵剖后沿树干螺旋形缠绕固定在树干,从管切口处收集树干径流雨,最终流入尾端接收瓶内。

1.5.4 壤中流。在40m×40m林内降雨样方内选取高差较大的土坡,挖壕埋管,土壤表面放置受雨器,土壤表面下层15cm深处安置采样瓶,首尾用管连接。

1.5.5 溪流水。选取样地内溪流水,对于所采集的样品,为防止途中蒸发和污染,均用Dr1900当日在实验场所进行检测。

2 结果分析

2.1 兴安落叶松林不同层次降雨pH值的动态变化

经过对水样的分析可知,兴安落叶松6—9月大气降雨pH值变化范围在8.36~8.96之间。由图1可以看出,在月际变化方面,大气降雨pH值最大的月份是7月,为8.96,最小的是6月为8.36,生长季平均值为8.60,整体变化不明显,说明潮查林区降雨随月份变化并没有明显上升或下降趋势,均呈弱碱性,即该林区没有受到酸雨污染;穿透雨pH平均值6.10,数值最大的

月份为8月,最小的月份是7月,月际波动和大气降雨相似,波动变化不是很大,但整体值降低;树干径流的pH值极显著低于大气降雨、林内雨、壤中流和溪流水,平均值只有3.9,且波动性同样很小;经由土壤层的过滤之后,壤中流的pH值呈现出与树干径流的pH值相比不同程度的升高趋势,平均升高幅度为1.66,不过,因为研究区土壤偏酸性的原因,壤中流的pH值仍然低于林外雨的pH值,总体与穿透雨pH值相似。

综上可知,大气降雨的pH值在经过兴安落叶松生态系统不同层次显著的变化趋势,说明了森林冠层与土壤均具有调节降雨pH值的作用,进入林冠层后,穿透雨、树干径流pH值下降的趋势显著高于其他层次,说明树木枝干对导致雨水变酸的离子进行了释放,进而降低了降雨的pH值。这说明林冠层对降雨酸碱性有调节作用^[4,5]。在进入土壤后,壤中流的pH值依然低于大气降雨,但相比穿透雨有了升高趋势,这是因为在兴安落叶松林中,地表枯枝落叶和腐殖质导致酸离子的释放,加之温度的升高,从而使pH值依然处于较低的值,但相比林内雨出现的升高现象,是因为土壤中存在一定浓度的盐基离子,对雨水的酸性产生了缓冲作用,这说明土壤同样具有对雨水酸碱度的调节功能,研究结果对讨论化学成分升高与降低是否会导致降雨酸碱性的变化提供了帮助。

2.2 兴安落叶松林不同层次降雨酸根离子动态变化特征

对兴安落叶松林各层次降雨中酸根离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-})的平均质量浓度进行测定。通过图2可以看出,在6—9月大气降雨中, NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 质量浓度分别在 $0.23 \pm 0.47\text{mg/L}$ 、 $0.008 \pm 0.11\text{mg/L}$ 、 $0.001 \pm 0.006\text{mg/L}$ 、 $0.36 \pm 1.0\text{mg/L}$ 范围之内,均属于较低水平,这是由于潮查林区位于大兴安岭深处,此区域降水由于地形和位置的影响出现较明显的季风气候,暖湿空气受夏季季风影响使得大气污染物

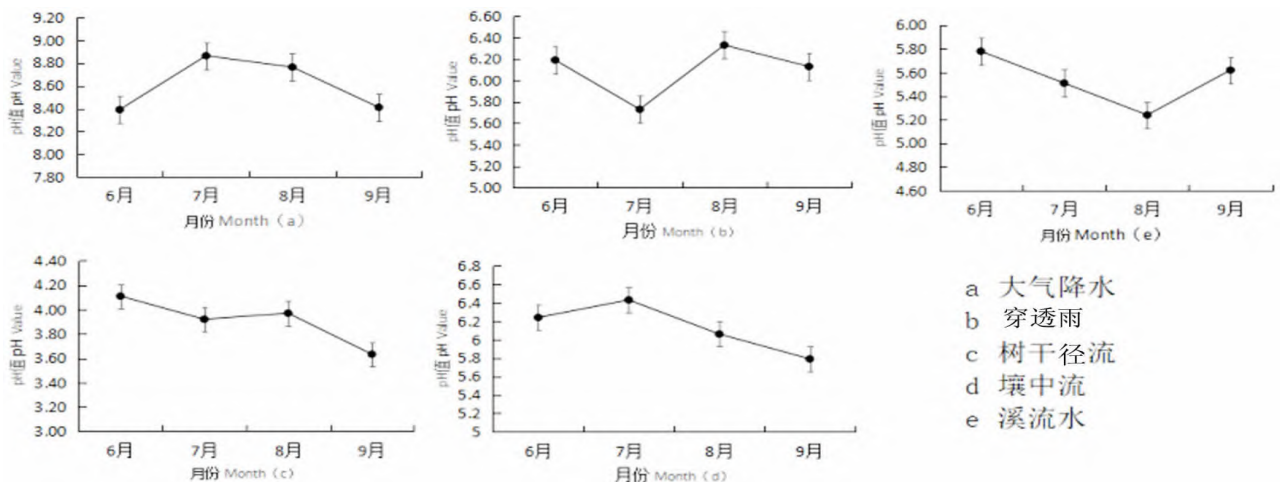
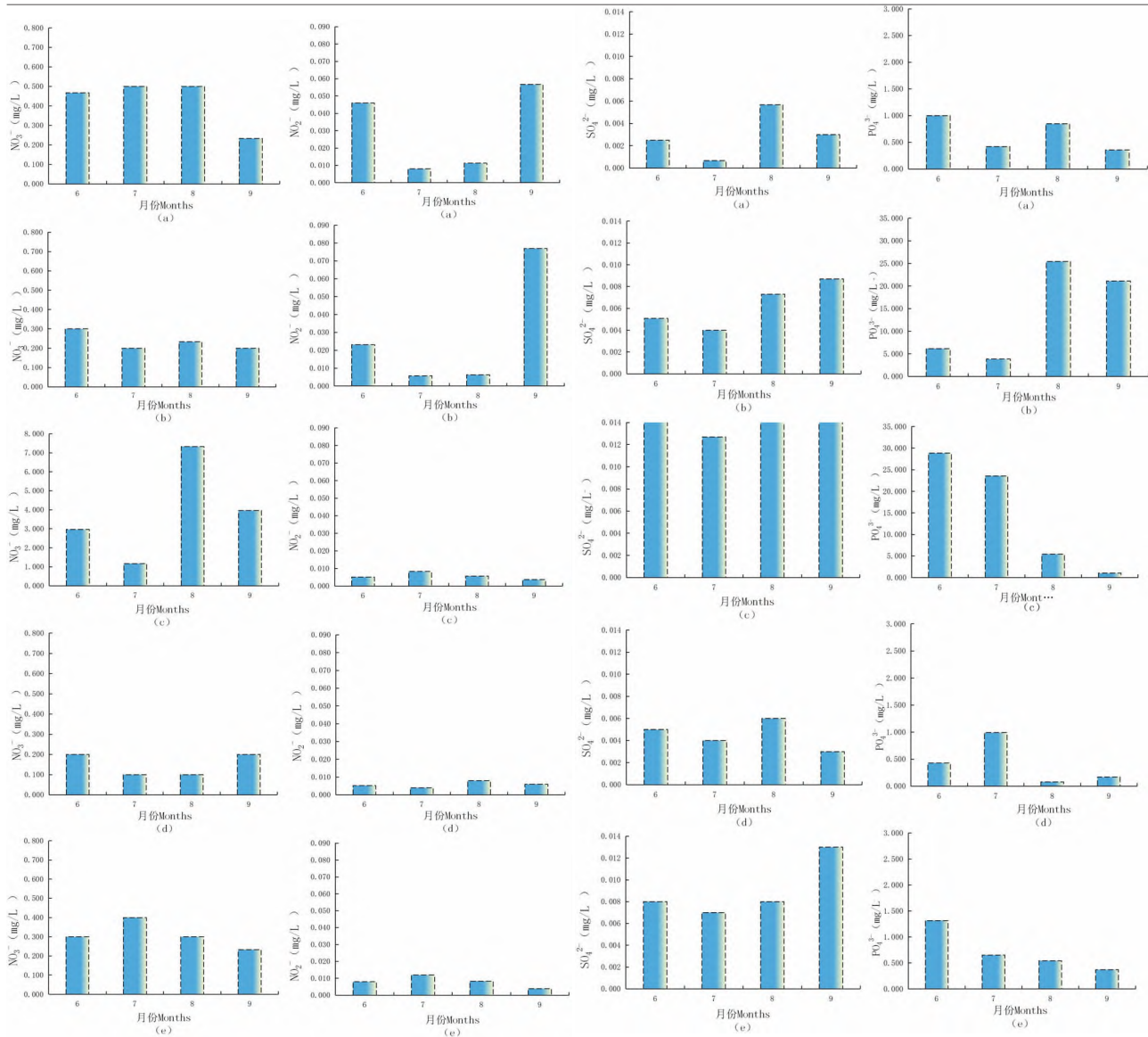


图1 森林不同层次降雨pH值月际变化



a 大气降雨 b 穿透雨 c 树干径流 d 壤中流 e 溪流水

图2 6—9月各层次降雨酸根离子测定数据表

向该地区输入较少,由于抬升作用,降雨较多,且城市、工业生产所产生的 NO_x 、含氮干物质、硫、磷化物含量较少,导致林外雨中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 浓度与内陆临近城市的森林生态系统相比含量较低。

氮元素是植物生长和发育所必需的营养元素,大气降雨中的硝态氮浓度与穿透雨、树干径流以及壤中流都有显著的相关性,林内穿透雨中 NO_3^- 、 NO_2^- 的平均质量浓度较林外雨有所降低,说明林冠层的枝叶对 NO_3^- 与 NO_2^- 表现出了吸附作用,而对林冠层枝叶的 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 发生了淋溶。对于 NO_2^- ,降雨中的 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^[6]。以 PO_4^{3-} 为例,当大气降雨通过林冠后,其化学特性发生变化,与大气降雨相比,穿透雨含量浓度剧增,由 PO_4^{3-} 在穿透

雨中的变化可见,树木枝叶无论是在生长季开端或是结束,雨水中的 PO_4^{3-} 均易被淋溶。由于降雨量的关系导致化学成分淋溶程度有所区别,原因是林冠层上的沉降物及分泌物受到大气降雨的影响产生了淋洗,化学成分自然便增加了,同时树木也会吸收降雨中另外一部分化学成分,那么其浓度自然也就减少了^[7]。 SO_4^{2-} 经过林冠层后浓度的增加,也说明了在晴朗天气中通过干沉降而沉降在林冠层的含有 SO_4^{2-} 物质经过雨水的淋洗,使 SO_4^{2-} 浓度增加。林冠层与大气降雨相互作用,能洗脱叶片内含 SO_4^{2-} 物质。

大气降雨被林冠截留后,穿透雨通过冠层枝叶进入林地内,另外一部分则是树干径流。当降水从树冠向下流过树的枝叶,再向树干聚集后继续流下,在这个过程中,雨水与枝干进行了一系列的化学反应,同时冲洗掉了灰尘和其他沉降物,因此,化学成分的质量浓度

自然而然发生了变化^④。当以径流方式流出,NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻的平均质量浓度达到了各层次的最高值,并且波动曲线与林外雨和穿透雨有明显区别,这可能与林冠层离子的聚集、降雨量的大小、温度的高低有一定关系。氮(N)、硫(S)、磷(P)是植物生长过程中所必需的营养元素,存在于生物体的各个组织中,但如果浓度过高,便会出现一系列副作用,由于植物体具有气孔可以进行呼吸作用。因此,便会发生物质和能量的交换,树干径流对大气降雨中SO₄²⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻表现出了淋洗释放的作用。

土壤层是一个繁杂的生态系统,其中生活着庞大数量的微生物群落^⑤。壤中流是降雨从林冠落到地表,再汇集进入土壤中,土壤层对其过滤后便形成了壤中流。林内降雨经过枯落物进入土壤后,NO₃⁻的平均质量浓度相较于树干径流减少量为3.71mg/L,SO₄²⁻平均质量浓度为0.005mg/L,说明了NO₃⁻、SO₄²⁻在从土壤向下迁移的过程中被土壤颗粒和土壤胶体吸附或者拦截^⑥,以及植物根系吸收了NO₃⁻、SO₄²⁻。因此,导致了壤中流中NO₃⁻、SO₄²⁻离子浓度的减少,由此也说明土壤和壤中流pH值较低的原因与硫化物被吸收有一定关系。

森林生态系统中的溪流水是大气降雨进入林地后,由各层次降雨和地下水汇集而成的水体。大气降雨在经过林冠后进入林地,冲洗了地表,导致枯落物层中的矿物质渗入土壤,地表和地下的径流又溶解了土壤及动植物遗体,由此便控制水体中化学成分的增减。在所研究的酸根离子中,潮查林区溪流水除SO₄²⁻的质量浓度相较于林外雨有所上升,其他元素均有所下降,这说明降雨经过林冠层和土壤对NO₃⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻进行了淋洗,使其质量浓度下降,而且吸收氮磷元素保证了兴安落叶松生态系统对二者的需求,也正是这种需求使得森林更好地起到了固定氮素与磷素的作用,水质也被净化,这说明森林生态系统中,植物对氮磷元素的固定,可以使流域水质富营养化程度降低,这对水质净化的作用无疑是有益的。

NO₂⁻在溪流水以外的各层次的浓度变化表面来看并不明显。但NO₂⁻作为植物生长的营养物质,在经过林冠淋溶后或多或少都会被吸收,而造成浓度下降的现象,所以推测为是部分硝酸盐被植物细胞中含有的硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)还原成了亚硝酸盐,伴随着植物分泌物被带到植物的叶面,而大气降雨在经过林冠层枝叶时淋溶了分泌物中的NO₂⁻,导致其浓度先减少再增多,表现为各层次浓度变化不大。

2.3 兴安落叶松林不同层次降雨金属离子动态变化特征

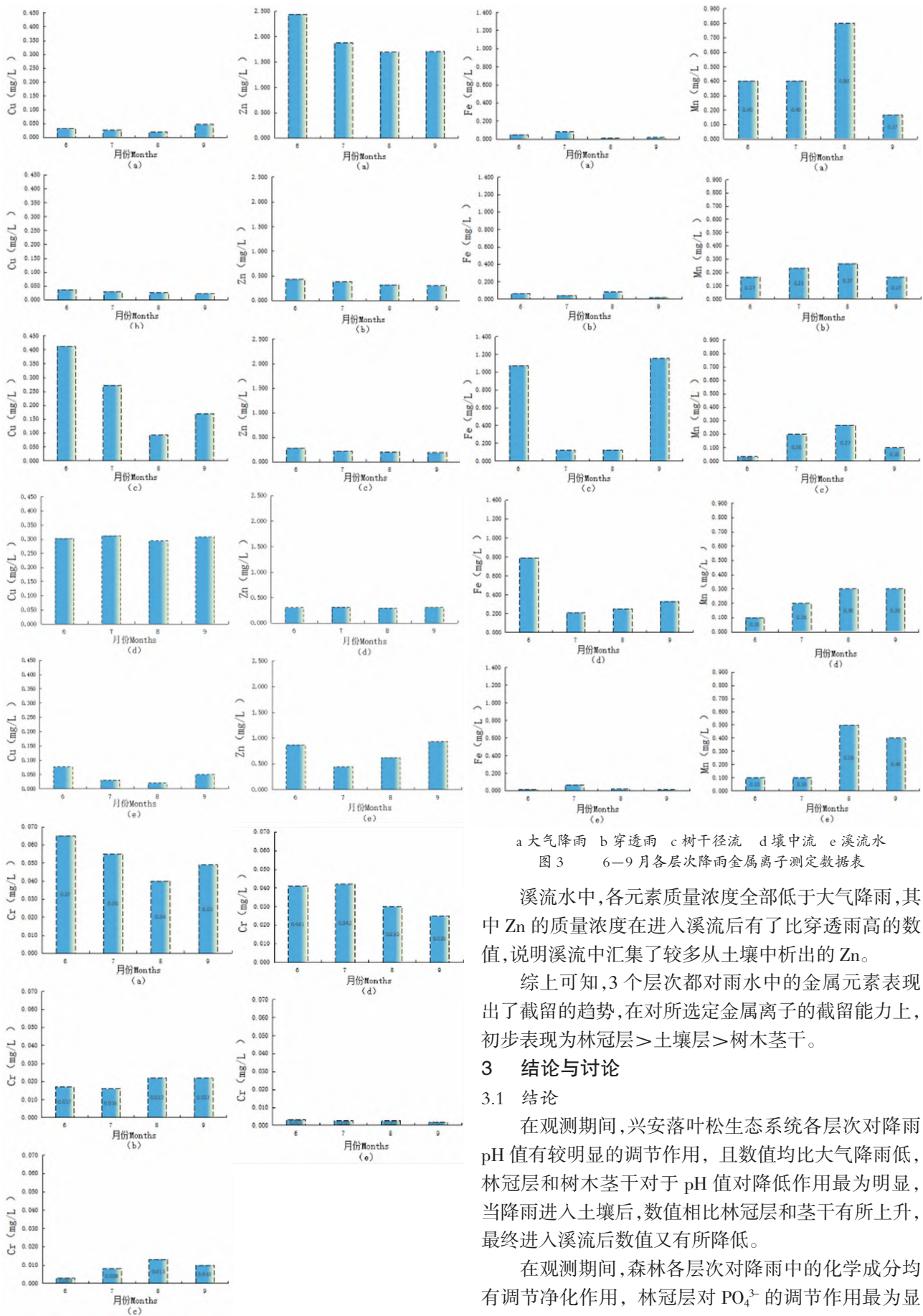
Cu、Zn、Fe、Mn等是植物生长发育所必需的金属元素,在一定浓度范围内促进植物生长。例如Fe对合

成叶绿素起重要作用;Mn和Cu是酶的催化剂;Zn参与吲哚乙酸(IAA)的合成,与蛋白质的合成也有关,这些金属元素在植物体内需要保持在一个正常的含量值,如果含量过高,便会对植物的生长产生不利影响。Cr⁶⁺会对植物的生长产生一定的不利影响,包括植物发芽率低、长势较差、植物量减少、果实减少等,因为潮查林区降雨pH值呈碱性,当进入林内后,pH值有明显降低趋势,而在弱酸性与碱性条件下存在着六价铬化合物,截至目前,从生物学角度看,Cr为非必要的、无益的元素,且毒性很大。对所采集数据进行分析,可以为研究植物体对金属元素吸收与排放的界值提供有利的数据支撑。

对兴安落叶松林各层次降雨中金属离子(Cu、Zn、Fe、Mn、Cr)的平均质量浓度进行测定。从图3可以看出,在研究期间大气降雨中Cu、Zn、Fe、Mn、Cr质量浓度分别在0.02±0.05mg/L、1.69±2.44mg/L、0.069mg/L、0.01±0.08mg/L、0.04±0.07mg/L之间,当大气降雨中的Zn、Mn、Cr元素经过林冠层淋溶后在穿透雨和树干径流中的含量均为负淋溶,说明植物体吸收了一定量的Zn、Mn、Cr,且对3种金属元素的调节都比较明显;经过林冠截留后,Zn、Mn、Cr的平均质量浓度大小排序为Zn>Mn>Cr。这证明了兴安落叶松生态系统对降雨中金属元素起到了较好的净化、调节作用,但净化的程度却有所差别。

经过冠层淋溶,Cu、Fe含量也有所减少,在树干径流中却呈现正淋溶,说明林冠层吸收了一定量的Cu、Fe,但树干的含量浓度却增加,这可能是因为:一是树干对这2种元素通过降雨淋洗进行了释放;二是林地较为密集,不利于空气的扩散,导致树干对冬季降雪中的Cu、Fe产生了沉积,而降雨将其冲洗下来。对树干径流中金属离子质量浓度进行排序,大小为:Fe>Cu>Zn>Mn>Cr。

当降雨经过土壤的过滤,除Fe、Cu以外,其余金属离子含量均比林外雨有所减少,这主要是由于降雨中较高浓度的金属离子被土壤胶体吸附,以及土壤会为植物根系提供所需要的金属离子,从而被重新利用。由Fe的浓度质量变化可以看出,生长季初期,Fe离子本身具有的活性,由于较低的温度导致降雨进入土壤后Fe被析出或与其中的阴离子如Cl⁻、O₂⁻等发生反应。随着生长季温度的升高,Fe的淋洗量逐渐减少。而Cu在壤中流中质量浓度相对较高且稳定,说明Cu是一种相对稳定的金属离子,温度对其影响并不大,对壤中流中金属离子浓度质量做出排序大小为:Fe>Zn>Cu>Mn>Cr。通过对比发现,在各层次降雨中,金属元素的质量浓度与我国大部分受到污染的地区相比,降雨多的金属含量均相对较低(例如陕西、四川等)。



a 大气降雨 b 穿透雨 c 树干径流 d 壤中流 e 溪流水
图3 6—9月各层次降雨金属离子测定数据表

溪流水中,各元素质量浓度全部低于大气降雨,其中Zn的质量浓度在进入溪流后有了比穿透雨高的数值,说明溪流中汇集了较多从土壤中析出的Zn。

综上可知,3个层次都对雨水中的金属元素表现出了截留的趋势,在对所选定金属离子的截留能力上,初步表现为林冠层>土壤层>树木茎干。

3 结论与讨论

3.1 结论

在观测期间,兴安落叶松生态系统各层次对降雨pH值有较明显的调节作用,且数值均比大气降雨低,林冠层和树木茎干对于pH值对降低作用最为明显,当降雨进入土壤后,数值相比林冠层和茎干有所上升,最终进入溪流后数值又有所降低。

在观测期间,森林各层次对降雨中的化学成分均有调节净化作用,林冠层对 PO_4^{3-} 的调节作用最为显

著,并且为正淋溶,质量浓度增多了 13.5mg/L;对 Cu 的调节作用最小;各化学成分淋溶系数排序为: $PO_4^{3-} > SO_4^{2-} > Zn > Fe > NO_3^- > NO_2^- > Mn > Cr > Cu$ 。

在观测期间,树干对 PO_4^{3-} 的调节作用最为显著,并且为正淋溶,平均质量浓度升高了 14.07mg/L,对 NO_2^- 的调节作用最小;各化学物质淋溶系数排序为: $PO_4^{3-} > SO_4^{2-} > NO_3^- > Fe > Cu > Mn > Cr > Zn > NO_2^-$ 。

在观测期间,土壤对 Fe 的调节作用最为显著,并且为正淋溶,质量浓度升高了 0.28mg/L,对 NO_2^- 的调节作用最小;各化学物质淋溶系数排序为: $Fe > SO_4^{2-} > Cu > Cr > PO_4^{3-} > Mn > NO_3^- > Zn > NO_2^-$ 。

在观测期间,溪流水中化学成分质量浓度除 SO_4^{2-} 均小于大气降雨,且都有较强的月度动态特征。

3.2 讨论

兴安落叶松林中,2020年6—9月大气降雨 pH 值在各层次中大小排序为大气降雨 > 穿透雨 > 壤中流 > 树干径流,该研究区大气降雨呈碱性,大气降雨 pH 值最大月份为 7 月,最小为 6 月,整体随月份的变化程度并不明显,在经过林冠层后出现了显著的酸化现象,进行到径流层呈现出最低值,在经过土壤层后有了小幅提升,说明了树冠层对致酸性化学离子进行了淋溶释放;土壤中的盐基离子和淋溶后的雨水发生了中和,从而使 pH 值出现上升趋势,由此可以看出,森林生态系统具有调节大气降雨 pH 值的作用。

大气降雨经过林冠层后, NO_3^- 、 NO_2^- 、Cu、Zn、Mn、Cr 的平均质量浓度均出现了不同程度的降低趋势,特别是 Cr、Zn 的降幅很大; PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、Fe 则出现了不同程度的上升趋势。林冠截留变化特征的研究表明了林冠层对 NO_3^- 、 NO_2^- 、Cu、Zn、Mn、Cr 有较强的截留作用,这也可以看出在森林生态系统每个空间层次中,林冠层对于降雨的截留能力是最强的。降雨经过林冠层时与枝叶接触,使分泌物或附着尘埃中的 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、Fe 被淋洗或置换出来,导致浓度的升高。在生长季所收集的穿透雨样品中,有大于 20% 的水样瓶中穿透雨量大于大气降雨量,这种情况主要原因是林冠边缘的枝叶上出现了雨水汇集以及收集装置上方林冠层有空隙导致的,且大气降雨量越大,林冠的负淋溶越大。

树干径流中, NO_2^- 、Zn、Mn 的平均质量浓度均有一定程度的下降,表明了树干对其有一定程度的截留作用,而 NO_3^- 、Cu、Cr、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、Fe 的平均质量浓度均有所上升,同时硝化作用使一部分 NO_2^- 转化为 NO_3^- ,另一部分与 Zn、Mn 一同被树干表面所吸收;树干也对枝叶上的分泌物和冠层吸附的尘埃颗粒表现出淋洗作用,导致树干径流对 NO_3^- 、Cu、Cr、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、Fe 进行了释放,研究表明这与植物生长性质、降雨强度、林内

温度、湿度以及元素的沉积都有一定关系。

在土壤中存在数量庞大的微生物群落,会调节水中的 pH 值。由于潮查林区降雨呈碱性,土壤层即使分解了一定数量的枯枝落叶,也没有出现较强的酸化特征; NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、Cu、Cr、Fe 的平均质量浓度相对树干径流有所降低,这是由于土壤调节的作用使其重新被植物吸收或被释放到溪流中; NO_2^- 、Mn、Zn 被土壤层中的胶体和其他基团吸附和储存,导致平均质量浓度有一定的升高。由此可以看出,大气的湿沉降会补偿森林生态系统中缺失的化学成分,而对于含量多出承载能力的,便由土壤进入到流域系统。

在溪流水中,由于降雨本身的化学元素汇集,以及森林中经过林冠层过滤的雨水流入到溪流中,从而引起水中化学成分质量浓度的变化。溪流水中,除 SO_4^{2-} 质量浓度较大气降雨有所上升外, NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 以及 Cu、Zn、Fe、Mn、Cr 离子的质量浓度均小于大气降雨,这种现象除了溪流的稀释作用,森林各层次的调节也起到了至关重要的作用, pH 值的降低也说明了这个原因。

森林生态系统对降雨中导致水质酸化的离子有很好的调节作用,同时对于降雨中可能造成污染的金属离子也有很好的净化作用,这总体表现出了对森林中的水循环起到了调节功能。森林生态系统水质研究是森林水文过程研究重要的一个方向,探究此过程有利于提升对森林与水质关系的机理认识,对森林生态系统水质特征的解释提供了重要的数据。

(收稿:2021-10-05)

参考文献:

- [1]代力民,温远光,王晖.面向生态系统服务的森林生态系统经营:现状、挑战与展望[J].生态学报 2015,35(01):1-9.
- [2]缪宁,刘世荣,史作民,等.强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述[J].生态学报 2013,33(13):3889-3897.
- [3]吕超群,田汉勤,黄耀.陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J].植物生态学报,2007(02):205-218.
- [4]马明,孙涛,李定凯,等.缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征[J].环境科学 2017,38(12):5056-5062.
- [5]晋建霞.秦岭林区流域森林生态系统对水质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2013.
- [6]彭焕华.祁连山北坡青海云杉林冠截留过程研究[D].兰州:兰州大学,2010.
- [7]姜海燕.大兴安岭森林生态系统水文特性的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2008.
- [8]郭鑫炜.辽西北风沙区人工林土壤养分的垂直分布特征[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [9]王少平,俞立中,许世远,等.上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J].长江流域资源与环境 2002(06):554-558.

作者简介:田磊(1994-),男,硕士,研究方向:森林经理学。

通信作者:张秋良(1960-),男,博士,教授,研究方向:林业生态。