

辽东山溪河岸林群落特征对降雨再分配及其养分特征的影响

王琼, 王善祥, 范志平, 李法云, 涂志华, 王珺

(辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 为明确不同物种组成和群落结构的河岸林对降雨再分配及其养分特征的影响, 于2014年5—10月对辽东山地典型河岸林群落(落叶松林、蒙古栎林和槭树林)大气降雨、穿透雨和树干茎流过程及其水质特征进行研究。结果表明: 落叶松林、蒙古栎林和槭树林穿透雨量分别占大气降雨量的81.9%、77.9%、73.1%, 树干茎流量分别占大气降雨量的1.2%、4.4%、4.3%。与大气降雨相比, 穿透雨和树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷的浓度较高, 不同林型铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷的浓度和输入量差异显著。不同物种组成和群落结构的河岸林通过树木的形态特征及群落的结构特征对降雨进行再分配, 通过林冠表层的物理特征、化学特征和生理特性等改变降雨理化性质, 加之雨量、雨强的影响共同作用使铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷的浓度和输入量发生改变。

关键词: 穿透雨; 树干茎流; 群落特征; 物种组成; 水化学特征

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)03-0129-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.020

Influence of Community Characteristics on Redistribution of Rainfall and Nutrients in the Mountain Regions of Eastern Liaoning Province

WANG Qiong, WANG Shanxiang, FAN Zhiping, LI Fayun, TU Zhihua, WANG Jun

(Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001)

Abstract: To make clear the influence of species composition and community structure on redistribution of rainfall and nutrient, three typical riparian forest, *Larix kaempferi* forest, *Quercus mongolica* forest, *Acer ukurunduense* forest were selected as objects of study in the mountain regions of eastern Liaoning Province from May to October 2014. The rainfall process and nutrients characteristics in atmospheric rainfall, throughfall and stemflow were analyzed. The results showed that during the research period, the total precipitation was 278.6 mm, and the throughfalls of *Larix kaempferi* forest, *Quercus mongolica* forest, *Acer ukurunduense* forest were 81.9%, 77.9% and 73.1% of total rainfall, respectively, and stemflow were 1.2%, 4.4% and 4.3%, respectively. The concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, Cl^- , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and total phosphorus (TP) in throughfall and stemflow were higher than those of atmospheric rainfall, and the concentrations and inputs of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, Cl^- , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP in different forest types were different significantly. The riparian forest with different species composition and community structure influenced rainfall distribution through the morphological and structure characteristics of community, and changed water physical and chemical properties through the physical, chemical and physiological characteristics of forest canopy gaps, resulting in the changes of the concentrations and inputs of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, Cl^- , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and TP variously combined with rainfall amount and intensity.

Keywords: throughfall; stemflow; community characteristics; species composition; hydrochemical features

随着社会经济的不断发展, 水资源短缺、水体污染已成为人类共同关注的全球性问题^[1-5]。山区流域是整个流域水源形成和供给区, 山区森林生态系统作

为清洁水的发源地, 在整个流域水循环与养分循环中起到重要作用^[6-8]。大气降水是森林生态系统水分来源和养分输入的主要形式之一, 降雨通过森林植被冠

收稿日期: 2018-10-30

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B030102); 辽宁省自然科学基金项目(201602473); 辽宁省教育厅重点项目(L2017LZD005)

第一作者: 王琼(1983—), 女, 博士研究生, 实验师, 主要从事生态工程、水土保持研究。E-mail: wangqiong0407@163.com

通信作者: 范志平(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态工程、水土保持研究。E-mail: zhiping_fan@hotmail.com

层而重新分配为穿透雨、树干茎流和林冠截留等组分。大气降水携带着的养分物质经过林冠层后,由于林冠的吸收、淋溶作用以及树干上的分泌物质,养分特征发生了明显改变,从而影响生态系统的水分和养分循环^[9-10]。山溪河岸林作为一种地理位置特殊地森林生态系统,由于其群落结构、物种多样性、水分条件等下垫面条件的特性,导致了降雨再分配过程及其水化学特征的复杂性和多样化^[11-12]。因此,科学地认识山溪河岸林群落特征及物种组成对降雨再分配及其养分特征的影响,不仅对森林生态系统水分和养分循环,以及防治水土流失具有重要作用,而且对水资源持续利用和生态保护也具有重要的现实意义。目前对林冠降雨再分配及其养分特征的研究主要集中在不同林分类型的差异及雨强、雨量等气象因子对其的影响。宋文龙等^[13]对贵州典型森林群落林冠降雨淋溶特征的比较,孙素琪等^[14]对缙云山 3 种典型森林降雨过程及氮素输入的研究,赵海蓉等^[15]对华西雨屏区人工林铵态氮、硝态氮的过滤作用研究,章迅等^[16]对温带 2 种林型降水氮沉降季节动态的研究,邹志谨等^[16]对广州 2 种林型暴雨水文及水化学特征的研究。关于群落特征对降雨再分配及其养分输入影响的研究较少,得到的结论也不尽相同。张娜等^[17]和 Macinnis-Ng 等^[18]认为,树种组成与群落特征对穿透雨和树干茎流中离子动态影响较小,而 Ponette-González 等^[19]、Xiao 等^[20]、Hofhansl 等^[21]认为,树种组成与群落特征对穿透雨和树干茎流中离子浓度产生较大影响,并把这种差异归结于林冠结构和树木形态的不同,冠层结构的多样影响空气中颗粒、雨滴的湍流混合,树木的胸径和树高及粗糙程度可以通过与降雨的接触面积影响沉积物质输入。造成这种结论不一致的原因可能是地区差异和树种的组成不同。因此,研究特定区域典型林分树种组成与群落特征对降雨再分配及其养分输入的影响具有重要意义。

辽东山地处于辽宁省的东部,境内山地属于长白山系千山山脉,山地面积占总面积 80% 以上,水资源丰富,森林覆盖度高,是辽宁中部平原的天然屏障和重要的水源补给区。辽东山地森林生态系统发挥着净化空气、改善微气候、涵养水源、防治水土流失、净化水质等重要功能。深入分析典型森林群落降雨再分配格局及养分特征,揭示森林水文过程中一些营养元素的迁移规律、养分循环特性,对辽东山地森林生态系统综合生态效益的发挥具有重要意义。本研究以辽东山地典型河岸林群落落叶松林、蒙古栎林和槭树林为研究对象,研究大气降雨经过森林河岸带后,

不同物种组成和群落结构的河岸林对降雨及养分的再分配过程及差异,分析森林植被覆盖特征对降雨及其养分再分配过程的影响,为系统深入的了解辽东山溪河岸林生态系统水分与养分循环提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于太子河北支上游,老秃顶子国家级自然保护区(124°41'13"—125°05'15" E, 41°11'11"—41°21'34" N),地处辽宁省桓仁县和新宾县交界处,是以北温带中山山地森林系统及珍稀动植物为主要保护对象的自然保护区,总面积 15 217.3 hm²。气候属北温带大陆性季风气候,降水多集中在 6—8 月,多年平均降水量 775 mm,年平均气温 5.2 ℃,最高气温 37.2 ℃,最低气温 -37.5 ℃,年无霜期 133 d。土壤以棕壤和暗棕壤为主。区域内水资源丰富,共有大小河 17 条,植物群落组成复杂,森林覆盖率达到 97%。主要乔木树种有蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭(*Acer mono*)、硕桦(*Betula costata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)和日本落叶松(*Larix kaempferi*)等。本试验选择 3 种不同的河岸林群落(落叶松林、蒙古栎林和槭树林)为研究对象,3 种河岸林的起源均为红松林,经过几十年的不合理砍伐和火烧消失殆尽,而后经多年自然演替形成了蒙古栎林和槭树次生林,在演替的初期种植落叶松幼苗形成落叶松人工林。

1.2 研究方法

在落叶松林、蒙古栎林和槭树林内设置 3 个 40 m×30 m 的样方,样地的基本情况参考已有研究^[22-23],见表 1。2014 年 5—10 月在 3 个重复样方内随机布设 30 个雨量桶测定林内穿透雨量,在每块重复样方内选择径级大(>20 cm)、中(15~20 cm)、小(<15 cm)标准木各 1~2 株,用直径 1 cm 的胶皮管剖开绕树干 2 周固定在树干上,在胶皮管与树皮的间隙填上玻璃胶,并用取样瓶在底部接取树干茎流。大气降雨由老秃顶子国家级自然保护区抚顺管理局自动气象站提供,并设置 9 个雨量桶用于测定大气降雨的理化性质。雨后 12 h 内用多参数水质分析仪(YSI6600,美国)测定大气降雨、穿透雨、树干茎流 pH、电导率、氯离子,剩余水样冷冻保存,用流动分析仪测定硝态氮、铵态氮,总磷采用钼锑抗比色法^[24-25]测定。

林外降雨量和穿透雨量根据降雨体积和雨量桶的面积换算成雨量(mm),树干茎流量计算公式为:

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{S \times 1000} \quad (1)$$

式中:SF 为树干茎流量(mm);n 为径级数; C_i 为树干茎流量体积(mL); M_i 为株数;S 为样地面积(m²)。

林冠截留率计算公式为:

$$I = P - (TF + SF) \quad (2)$$

式中: I 为林冠截留率(%); P 为大气降水(mm); TF 为穿透雨量(mm); SF 为树干茎流量(mm)。

每次降雨养分的输入量计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n c_i P_i}{100} \quad (3)$$

式中: D 为降雨养分的总输入量(kg/hm^2); c_i 为场降雨中相应形态氮的浓度(mg/L); P_i 为场降雨的降雨量(mm); n 为降雨次数。

表1 样地基本特征

指标	落叶松林	蒙古栎林	槭树林
经度	124°48'44"	124°48'51"	124°48'58"
纬度	41°18'13"	41°18'16"	41°18'16"
坡度/(°)	18	16	17
海拔/m	684	672	614
植被类型	落叶松、羊草、老鹳草和野大豆等	蒙古栎、花曲柳、核桃楸、大砧草、狭叶荨麻、紫花地丁等	花楷槭、色木槭、胡桃楸、千金榆、堇菜、野大豆等
盖度/%	75	90	95
乔木层物种数	8	12	13
总物种数	24	23	37
树高/m	20.22±1.53	19.00±3.56	9.22±7.27
胸径/cm	24.82±3.74	24.53±9.73	12.18±10.68
香浓多样性(乔)	0.42±0.07	1.31±0.04	3.47±0.81
香浓多样性(灌草)	2.28±0.13	1.99±0.29	2.92±0.38
MI丰富度(乔)	0.56±0.04	1.72±0.24	2.63±0.50
MI丰富度(灌草)	4.11±0.38	3.90±0.53	7.34±1.07
总生物量/(t·hm ⁻²)	131.03±5.55	54.80±21.01	122.48±23.36
叶生物量/(t·hm ⁻²)	2.31±0.19	1.21±0.46	2.92±0.51
枝生物量/(t·hm ⁻²)	16.28±1.48	10.42±5.43	30.85±10.69
干生物量/(t·hm ⁻²)	90.66±3.88	37.15±15.12	71.47±12.16
灌草地上生物量/(t·hm ⁻²)	0.41±0.12	0.31±0.19	0.32±0.19

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

1.3 统计分析

采用 Excel 2007 软件对数据进行处理及作图,并利用 SPSS 18.0 软件对不同森林类型穿透雨、树干茎流、及其铵根离子、硝酸根离子、总磷、氯离子、电导率和 pH 进行重复方差分析,并利用最小显著差异法(LSD)进行多重比较分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同林型冠层降雨再分配特征

试验过程中共收集到单次连续降水大于 10 mm 共 10 次,林外降雨总量为 278.6 mm,单场降雨量在 10.4~70.6 mm,平均单场降雨量 27.8 mm。降雨量多为中、大雨,没有大暴雨。雨强变化范围 2.6~33.4 mm/h,均值 12.0 mm/h(表2)。测定期间,落叶松林、蒙古栎林和槭树林的穿透雨总量分别为 228.17,217.1,205.4 mm,分别占同期林外降雨总量的 81.9%,77.9%,73.1%。树干茎流总量分别为 3.26,12.3,12.1 mm,分别占同期林外降雨总量的 1.2%,4.4%,4.3%。林冠截留总量分别为 47.2,49.2,61.1 mm,分别占同期林

外降雨总量的 16.9%,17.1%,21.9%(表3)。落叶松林的穿透雨量显著高于蒙古栎林和槭树林($P<0.01$),蒙古栎林和槭树林树干茎流量和林冠截留率显著高于落叶松林($P<0.01$)。通过降雨量与林冠截留率的拟合分析,可以看出林冠截留率随着降雨量的增加而减小,在降雨量超过 24 mm 时,林冠截留率趋于平稳,林冠达到饱和(图1)。

表2 林外降雨的雨量 and 雨强

时间 (月-日)	历时/ h	雨量/ mm	雨强/ (mm·h ⁻¹)
05-25	6.0	17.0	2.83
06-17—06-18	27.0	70.6	2.60
06-27	7.0	34.1	4.90
07-11	0.5	16.7	33.40
07-17	2.0	10.4	5.20
07-21	2.0	24.6	12.30
07-26	1.0	17.2	17.20
08-25	2.0	47.5	23.80
08-31	3.0	16.7	5.60
10-02	2.0	23.8	11.90

表 3 不同林型降雨再分配

林型	降雨/mm	穿透雨/mm	树干茎流/mm	林冠截留/mm
落叶松林	278.6	228.17(81.91)	3.26(1.17)	47.17(16.93)
蒙古栎林	278.6	217.10(77.93)	12.30(4.41)	49.20(17.66)
槭树林	278.6	205.40(73.71)	12.10(4.34)	61.10(21.93)

注:括号内数字为占降雨比例(%)。

2.2 大气降雨水质特征

大气降水各月水质指标差异较大(表 4),电导率变化范围 0.5~4.1 mS/cm,pH 变化范围 6.5~8.0,铵态氮浓度变化范围 0.13~0.38 mg/L,氯离子浓度变化范围 0.15~1.59 mg/L,硝态氮浓度变化范围 0.19~0.51 mg/L,总磷浓度变化范围 0.05~0.15 mg/L。电导率最大值出现在 7 月 17 日,最小值出现在 7 月 26 日。pH 最大值出现在 7 月 17 日,最小值出现在 8 月 25 日。铵态

表 4 大气降雨水质特征

日期(月-日)	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	pH	铵态氮/ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	硝态氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)
05-25	3.93±0.15	6.96±0.02	0.34±0.11	0.91±0.11	0.45±0.08	0.14±0.04
06-17—06-18	3.40±0.20	6.94±0.05	0.32±0.02	0.99±0.02	0.38±0.04	0.11±0.01
06-27	2.57±0.25	7.39±0.05	0.22±0.02	0.58±0.03	0.31±0.22	0.09±0.01
07-11	1.17±0.06	7.62±0.11	0.13±0.01	0.54±0.05	0.19±0.02	0.11±0.05
07-17	4.10±0.01	7.96±0.02	0.34±0.13	0.15±0.01	0.46±0.13	0.11±0.02
07-21	1.50±0.10	7.93±0.04	0.27±0.25	0.52±0.02	0.38±0.04	0.05±0.01
07-26	0.50±0.10	7.79±0.03	0.35±0.04	0.49±0.01	0.32±0.03	0.07±0.01
08-25	2.60±0.01	6.51±0.03	0.31±0.07	1.59±0.08	0.44±0.25	0.15±0.04
08-31	0.87±0.06	6.85±0.06	0.35±0.15	1.09±0.09	0.48±0.13	0.08±0.02
10-02	0.83±0.06	6.81±0.05	0.38±0.07	0.52±0.07	0.51±0.09	0.07±0.01

2.3 不同林型穿透雨水水质特征

不同森林类型穿透雨中铵态氮、硝态氮、氯离子浓度和电导率的月份变化较明显,总磷浓度和 pH 月份变化不明显(图 2)。落叶松林和蒙古栎林的铵态氮浓度最大值均出现在 8 月 25 日,最小值均出现在 6 月 27 日。槭树林铵态氮浓度最大值也出现在 8 月 25 日,最小值出现在 7 月 26 日。落叶松林、蒙古栎林和槭树林硝态氮最小值均出现在 6 月 27 日,硝态氮最大值均出现在 5 月 25 日。重复方差分析显示,蒙古栎林电导率显著大于落叶松林和槭树林,pH、铵态氮和总磷含量均表现为槭树林>蒙古栎林>落叶松林,硝态氮和氯离子含量表现为槭树林>落叶松林>蒙古栎林(表 5)。

2.4 不同林型树干茎流水质特征

不同林型树干茎流中铵态氮、硝态氮、氯离子浓度和电导率的月份变化较明显,总磷浓度和 pH 月份变化较小(图 3)。落叶松林和槭树林的铵态氮浓度最大值均出现在 10 月 2 日,最小值均出现在 6 月 27 日。蒙古栎林的铵态氮浓度最大值均出现在 8 月 25 日,最小值出现在 7 月 26 日。落叶松林、蒙古栎林和

槭树林硝态氮浓度最大值出现在 10 月 2 日,最小值出现在 7 月 11 日。氯离子浓度最大值出现在 8 月 25 日,最小值出现在 7 月 17 日。总磷浓度最大值出现在 8 月 25 日,最小值出现在 7 月 21 日。

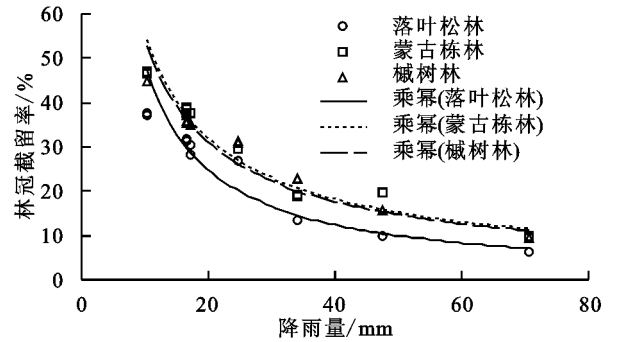


图 1 降雨量与林冠截留率关系

槭树林硝态氮最小值均出现在 6 月 27 日,最大值均出现在 5 月 25 日。重复方差分析显示,电导率表现为槭树林<蒙古栎林<落叶松林,pH 表现为槭树林>蒙古栎林>落叶松林,铵态氮、总磷含量表现为蒙古栎林>槭树林>落叶松林,硝态氮和氯离子含量表现为落叶松林和蒙古栎林大于槭树林(表 6)。

2.5 不同林型 N、P、Cl⁻ 输入量

穿透雨铵态氮、硝态氮、氯离子和总磷输入量均大于树干茎流输入量(表 7)。落叶松林、蒙古栎林和槭树林穿透雨中铵态氮输入量分别是树干茎流的 14.24,3.31,7.23 倍,穿透雨中氯离子的输入量分别是树干茎流的 63.21,14.44,24.06 倍,穿透雨硝态氮的输入量分别是树干茎流的 44.48,11.19,15.56 倍,穿透雨总磷的输入量分别是树干茎流的 39.51,9.91,13.43 倍。穿透雨中铵态氮、氯离子和总磷输入量均表现为槭树林最大,铵态氮和总磷表现为蒙古栎林次之,落叶松林最小,氯离子表现为落叶松林次之,蒙古栎林最小。穿透雨硝态氮输入量为落叶松林和槭树林显著大于蒙古栎林。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷输入量均表现为蒙古栎林最大,槭树林

次之,落叶松林最小。林冠净流量(穿透雨+树干茎流-大气降水)负值表示降水中的养分被林冠直接吸收,正值表示养分被降水淋洗到河岸带土壤中,由表 7 可知,3 种林分林冠净流量均为正值,即林冠

附着的养分被降水淋洗进入土壤。铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷的林冠净流量均表现为槭树林最大,铵态氮和总磷表现为蒙古栎林次之,槭树林最小,氯离子和硝态氮表现为槭树林次之,蒙古栎林最小。

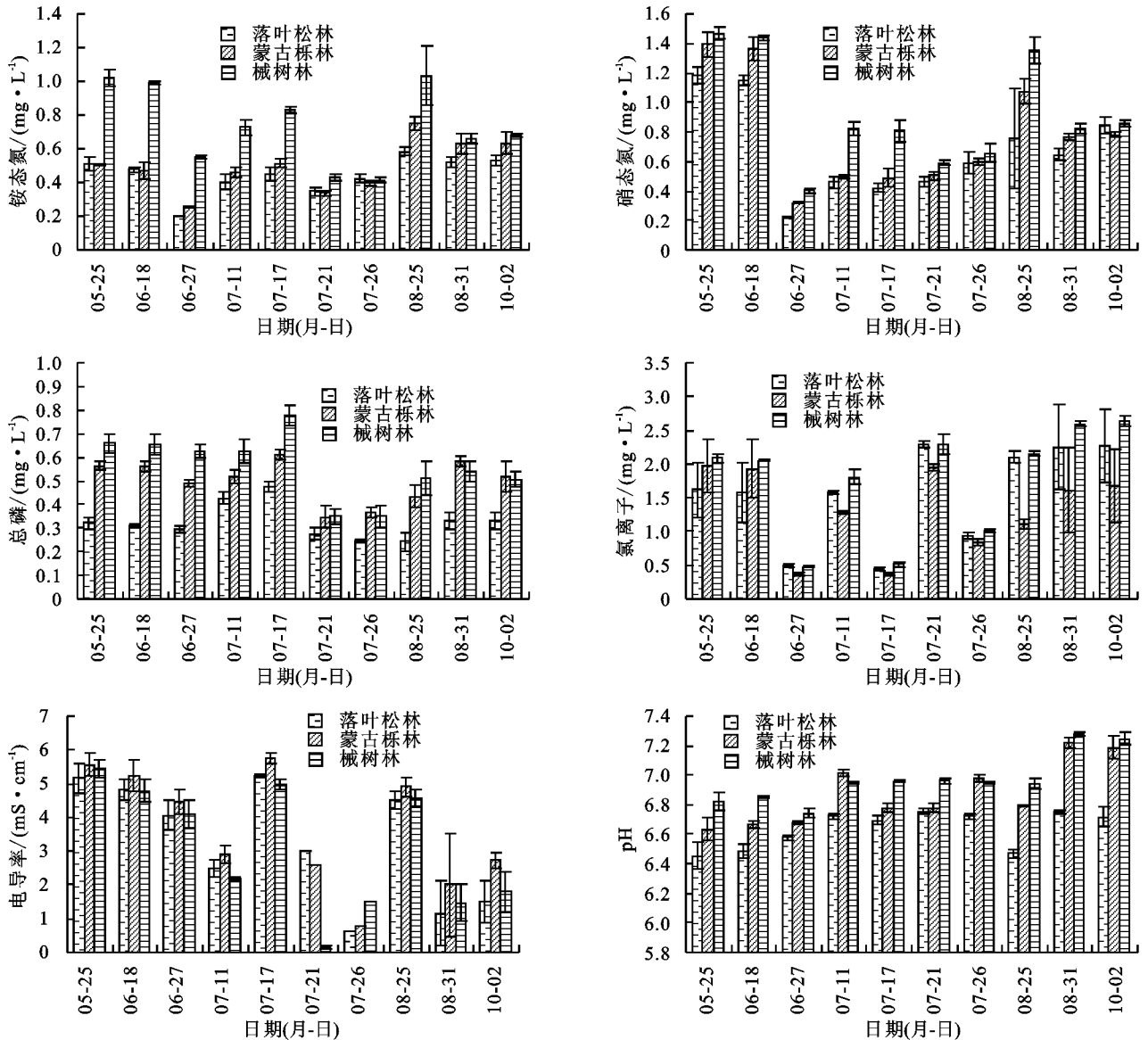


图 2 不同森林类型穿透雨铵态氮、硝态氮、总磷、氯离子、电导率和 pH

表 5 不同森林类型穿透雨铵态氮、硝态氮、总磷、氯离子、电导率和 pH 比较

林型	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cl^{-} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
落叶松林	$3.26 \pm 0.17\text{b}$	$6.63 \pm 0.13\text{c}$	$0.44 \pm 0.11\text{c}$	$1.56 \pm 0.70\text{b}$	$0.89 \pm 0.50\text{b}$	$0.37 \pm 0.12\text{c}$
蒙古栎林	$3.70 \pm 0.20\text{a}$	$6.87 \pm 0.21\text{b}$	$0.50 \pm 0.15\text{b}$	$1.31 \pm 0.66\text{c}$	$0.78 \pm 0.37\text{c}$	$0.52 \pm 0.09\text{b}$
槭树林	$0.31 \pm 0.06\text{b}$	$6.97 \pm 0.17\text{a}$	$0.74 \pm 0.23\text{a}$	$1.76 \pm 0.78\text{a}$	$0.92 \pm 0.36\text{a}$	$0.59 \pm 0.12\text{a}$

注:同列不同字母代表林型间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.6 穿透雨、树干茎流水质与群落特征的关系

由表 8 可知,穿透雨中电导率与胸径成显著正相关($P < 0.05$),与灌草多样性和乔木地上生物量成显著负相关($P < 0.05$)。pH 与胸径、树高、叶、枝、干、灌草地上生物量成显著负相关关系($P < 0.05$),与盖度、单位面积物种数、乔木层多样性和丰富度、灌草层

丰富度均成显著正相关($P < 0.05$)。铵态氮浓度与胸径、树高成显著负相关关系($P < 0.05$),与盖度、单位面积物种数、乔木层和灌草层多样性和丰富度均成显著正相关($P < 0.05$)。氯离子浓度与胸径和树高成显著负相关($P < 0.05$),与灌草层多样性和丰富度

成显著正相关($P < 0.05$)。硝态氮浓度与胸径成显著负相关($P < 0.05$),与灌草层多样性、乔木层生物量成显著正相关($P < 0.05$)。总磷浓度与胸径、树

高、叶、枝、灌草地上生物量成显著负相关关系($P < 0.05$),与盖度、单位面积物种数、乔木层多样性和丰富度均成极显著正相关($P < 0.05$)。

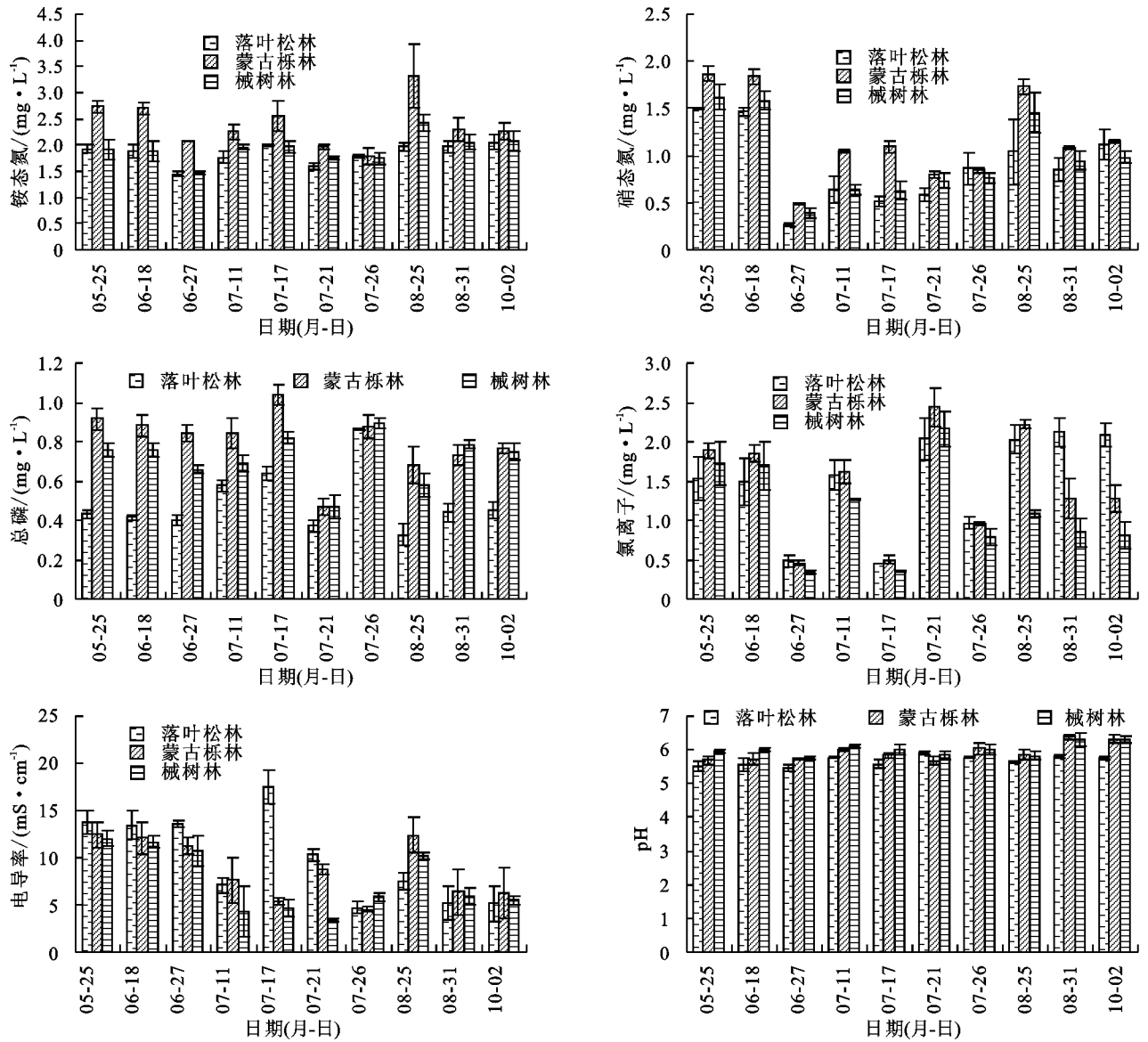


图 3 不同森林类型树干茎流铵态氮、硝态氮、总磷、氯离子、电导率和 pH

表 6 不同森林类型树干茎流铵态氮、硝态氮、总磷、氯离子、电导率和 pH 比较

林型	电导率/ ($mS \cdot cm^{-1}$)	pH	铵态氮/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Cl^{-} / ($mg \cdot L^{-1}$)	硝态氮/ ($mg \cdot L^{-1}$)	总磷/ ($mg \cdot L^{-1}$)
落叶松林	9.82±4.5a	5.68±0.17c	1.84±0.20c	1.48±0.64a	1.15±0.64a	0.49±0.16c
蒙古栎林	8.72±3.31b	5.93±0.27b	2.40±0.48a	1.44±0.67a	1.19±0.46a	0.80±0.16a
槭树林	7.40±3.36c	6.01±0.20a	1.92±0.26b	1.11±0.60b	0.97±0.43b	0.71±0.12b

由表 9 可知,树干茎流电导率与胸径、树高、叶、枝、干、灌草地上生物量成显著正相关($P < 0.05$),与盖度、单位面积物种数、乔木层和灌草才能多样性和丰富度成显著负相关($P < 0.05$)。pH 与胸径、树高、叶、枝、干、灌草地上生物量成显著负相关($P < 0.05$),与盖度、物种数、乔木层多样性和丰富度成显著正相关($P < 0.05$)。铵态氮浓度与灌草层地上生物量成显著负相关($P < 0.05$)。氯离子浓度与胸径和树高

成显著正相关($P < 0.05$),与盖度、单位面积物种数、乔木层多样性和丰富度、灌草层丰富度成显著负相关($P < 0.05$)。硝态氮浓度与胸径和树高成显著正相关($P < 0.05$),与单位面积物种数、乔木层多样性、灌草层丰富度成显著负相关($P < 0.05$)。总磷浓度与盖度、单位面积物种数和乔木层丰富度成显著正相关($P < 0.05$),与叶、枝、干、灌草层地上生物量成显著负相关($P < 0.05$)。

表 7 大气降水和不同林分类型穿透雨、树干茎流的养分输入量

指标	林分类型	单位: kg/hm ²			
		大气降水	穿透雨	树干茎流	林冠净流量
铵态氮	落叶松林	0.84	1.04	0.07	0.27
	蒙古栎林		1.05	0.32	0.53
	槭树林		1.72	0.24	1.12
Cl ⁻	落叶松林	2.43	3.74	0.06	1.36
	蒙古栎林		2.97	0.21	0.75
	槭树林		3.98	0.17	1.72
硝态氮	落叶松林	1.09	2.30	0.05	1.26
	蒙古栎林		1.94	0.17	1.03
	槭树林		2.26	0.14	1.31
总磷	落叶松林	0.29	0.70	0.02	0.43
	蒙古栎林		1.04	0.10	0.86
	槭树林		1.20	0.09	1.00

表 8 穿透雨水质与林分结构、组成指标的相关分析

指标	胸径	树高	盖度	物种数	乔木		灌木		叶生物量	枝生物量	干生物量	乔地上生物量	灌草地上生物量
					多样性	丰富度	多样性	丰富度					
电导率	0.67*	0.59	0.02	-0.16	-0.30	-0.12	-0.66*	-0.63	-0.32	-0.30	-0.27	-0.68*	-0.34
pH	-0.69*	-0.77*	0.99**	0.98**	0.94**	0.96**	0.42	0.65*	-0.93**	-0.93**	-0.95**	-0.23	-0.91**
铵态氮	-0.94**	-0.99**	0.80**	0.90**	0.95**	0.85**	0.75*	0.90**	-0.61	-0.62	-0.63	0.19	-0.54
Cl ⁻	-0.77*	-0.77*	0.18	0.37	0.49	0.26	0.86**	0.81**	0.08	0.04	0.06	0.49	0.17
硝态氮	-0.65*	-0.58	-0.05	0.13	0.27	0.08	0.69*	0.62	0.28	0.24	0.27	0.69*	0.38
总磷	-0.70*	-0.75*	0.99**	0.97**	0.93**	0.95**	0.37	0.61	-0.94**	-0.95**	-0.96**	-0.24	-0.91**

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。下同。

表 9 树干茎流水质与林分结构、组成指标的相关分析

指标	胸径	树高	盖度	物种数	乔木		灌木		叶生物量	枝生物量	干生物量	乔地上生物量	灌草地上生物量
					多样性	丰富度	多样性	丰富度					
电导率	0.83**	0.89**	-0.92**	-0.97**	-0.96**	-0.91**	-0.66*	-0.85**	0.77*	0.78*	0.81**	0.11	0.77*
pH	-0.65*	-0.72*	0.97**	0.96**	0.92**	0.97**	0.35	0.60	-0.93**	-0.92**	-0.94**	-0.22	-0.92**
铵态氮	0.34	0.29	0.41	0.22	0.08	0.29	-0.55	-0.39	-0.62	-0.59	-0.61	-0.61	-0.68*
Cl ⁻	0.95**	0.93**	-0.70*	-0.81**	-0.86**	-0.72*	-0.63	-0.82**	0.49	0.52	0.51	-0.10	0.45
硝态氮	0.89**	0.85**	-0.51	-0.65*	-0.72*	-0.57	-0.71	-0.87**	0.25	0.26	0.28	-0.16	0.23
总磷	-0.23	-0.32	0.86**	0.75*	0.64	0.77*	-0.01	0.21	-0.95**	-0.93**	-0.96**	-0.51	-0.97**

表 10 降雨因子与养分输入量的相关分析

指标	穿透雨				树干茎流			
	铵态氮	Cl ⁻	硝态氮	总磷	铵态氮	Cl ⁻	硝态氮	总磷
降雨量	0.86**	0.89**	0.92**	0.90**	0.67**	0.64**	0.67**	0.59**
雨强	-0.07	-0.10	-0.19	-0.23	-0.26	-0.22	-0.29	-0.29
穿透雨量/树干茎流量	0.86**	0.90**	0.93**	0.89**	0.96**	0.93**	0.95**	0.98**

不同森林类型降雨在穿透雨、树干茎流中的分配特征存在不同程度的差异^[14,26]。本研究中落叶松林、蒙古栎林和槭树林的穿透雨率分别为 81.9%、77.9%、73.1%，树干茎流率分别为 1.2%、4.4%、4.3%。主要由于落叶松林相对于其他 2 种林型，针叶细小，冠层薄，针叶表面光滑，吸水能力差，降雨容易穿过和下落，因此穿透雨量最大。槭树林树种较多，因此林冠层次多，雨水附着面积较大，容易拦截降雨，穿透雨量最小。蒙古栎林林冠承接雨水能力也较高，但林冠层次较槭树林小，穿透雨量居中。树种对树干茎流量的影响主要取决于树皮的光滑、粗糙程度和树皮的吸水

2.7 穿透雨、树干茎流 N、P、Cl⁻ 输入量与降雨的关系

由表 10 可知，通过穿透雨输入的铵态氮、Cl⁻、硝态氮和总磷量与降雨量和穿透雨量均呈显著正相关 ($P < 0.01$)，与雨强相关性不显著。通过树干茎流输入的铵态氮、Cl⁻、硝态氮和总磷量也与降雨量和穿透雨量均呈显著正相关 ($P < 0.01$)，与雨强相关性不显著。树干茎流输入的铵态氮、Cl⁻、硝态氮和总磷量与降雨量的相关性小于穿透雨。

3 讨论

不同物种组成和群落结构的河岸林可以通过树木的形态特征及群落的结构特征对降雨进行再分配，通过林冠表层的物理特征、化学特征和生理特性等改变降雨理化性质，加之雨量、雨强的影响共同作用使养分的输入量也发生改变。

作用,分别为降雨对植物表面沉积的污染物和植物体分泌的代谢物的冲刷淋洗作用,和植物(主要树叶和树皮)对降雨中养分物质的吸收和污染物的吸附作用,这 2 种作用统称为淋溶作用^[17-19]。不同林型通过以上物理、化学和生物过程共同作用使穿透雨和树干茎流中溶质的浓度发生改变^[20-21,28]。很多研究^[28-29]指出,林冠层特征,包括森林结构特征、物种多样性、丰富度、单位面积物种数、胸径、树高、盖度、生物量等都可以影响穿透雨和树干茎流中溶质的浓度。本研究中穿透雨中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度多与胸径和树高成显著负相关,与盖度、物种数、多样性和丰富度成显著正相关,说明盖度、物种数、多样性和丰富度越大,穿透雨中溶质的浓度越大。物种数、多样性和丰富度高使森林结构更紧实,降雨与林冠特别是树叶接触更多,冲刷、淋洗更多的溶质,使穿透雨的溶质浓度更高,这也是槭树林穿透雨中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度最大的主要原因之一。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度多与胸径和树高成显著正相关,主要由于树高和胸径越大,树干茎流与树皮的接触时间越长,溶出的溶质越多,树干茎流中溶质的浓度越大。这也是蒙古栎林树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度最大的主要原因之一。本研究中穿透雨和树干茎流中溶质的浓度均高于降雨,其原因主要有 2 个方面:一是林冠层截留的降雨蒸发使穿透雨量和树干茎流量减少,导致溶质浓度升高;二是 3 种河岸林类型植被发育比较成熟,对降雨中养分的吸收作用小于大气降水经过林冠和树干时的淋洗作用。

穿透雨和树干茎流中铵态氮、硝态氮、氯离子浓度随时间的动态变化较明显,这主要与降雨时间间隔、降雨量和植物对养分的吸收的生理周期有关,铵态氮、硝态氮在 5 月 25 日和 6 月 18 日较高,主要是由于一个冬季沉积在林冠的物质被冲刷,以及研究区域在 5 月和 6 月初气温还较低,植物对养分的需求还较少,土壤养分的供应较充足。铵态氮、硝态氮和氯离子在 6 月 27 日到 7 月 26 日这 5 场降雨产生的穿透雨和树干茎流中含量较小,主要是由于这 5 场降雨时间间隔较小,大气沉积在林冠上的物质较少,并且这期间温度逐渐升高,植物生长加快,对养分的需求增加,植物通过叶片吸收养分增多。8 月 25 日穿透雨和树干茎流中铵态氮、硝态氮和氯离子浓度均较高,主要是由于与上一次降雨(7 月 26 日)时间间隔较长。

林冠降雨浓度和林冠雨量的不同使不同林型养分输入量产生差异。本研究中,虽然穿透雨铵态氮、硝态氮、氯离子和总磷浓度显著小于树干茎流,但输入量均大于树干茎流输入量,这主要是由于树干茎流量非常小,仅占降雨量的 1.2%~4.1%,而穿透雨量较大,占降

雨量 73.1%~81.9%。穿透雨中铵态氮、氯离子和总磷输入量均表现为槭树林最大,铵态氮和总磷落叶松林最小,氯离子蒙古栎林最小。穿透雨硝态氮输入量为落叶松林和槭树林显著大于蒙古栎林。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷输入量均表现为蒙古栎林最大,槭树林次之,落叶松林最小。不同林分穿透雨和树干茎流各溶质的输入量与浓度的排序有微小差异,主要是由于雨量的不同。本研究发现穿透雨和树干茎流各溶质的输入量与大气降雨量和穿透雨量或树干茎流量成显著正相关。另外,本研究中,3 种森林类型林冠净流通量均为正值,即降雨流经林冠层表现为淋洗作用,其中,槭树林的林冠净流通量最大,淋洗作用最强。林冠层淋溶能够促进养分的循环和为植物提供营养物质,如果淋洗作用过强,有可能会造成森林生态系统的氮饱和,增加营养元素的流失风险,最终影响森林生态系统的生产力和流域水生态安全^[30]。

4 结论

(1)本研究中落叶松林、蒙古栎林和槭树林的穿透雨量分别占大气降雨量的 81.9%,77.9,73.1%,树干茎流量分别占大气降雨量的 1.2%,4.4,4.3%。

(2)穿透雨和树干茎流中溶质的浓度均高于降雨,穿透雨中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度均表现为槭树林最大,铵态氮和总磷落叶松人工林最小,氯离子和硝态氮蒙古栎林最小。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度均表现为蒙古栎林最大,铵态氮和总磷落叶松林最小,氯离子和硝态氮槭树林最小。

(3)不同森林类型穿透雨和树干茎流各溶质的输入量与浓度的排序有微小差异,穿透雨中铵态氮、氯离子和总磷输入量均表现为槭树林最大,铵态氮和总磷落叶松林最小,氯离子蒙古栎林最小。穿透雨硝态氮输入量为落叶松林和槭树林显著大于蒙古栎林。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷输入量均表现为蒙古栎林最大,槭树林次之,落叶松林最小。

(4)穿透雨中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度多与胸径和树高成显著负相关,与盖度、物种数、多样性和丰富度成显著正相关。树干茎流中铵态氮、氯离子、硝态氮和总磷浓度多与胸径和树高成显著正相关,与盖度、物种数、多样性和丰富度成显著负相关。穿透雨和树干茎流各溶质的输入量与大气降雨量和穿透雨量或树干茎流量成显著正相关。不同物种组成和群落结构与雨量、雨强的影响共同作用使养分的输入量发生改变。

(5)不同物种组成和群落结构的河岸林可以通过树木的形态特征及群落的结构特征对降雨进行再分配,通过林冠表层的物理特征、化学特征和生理特性等改变降雨理化性质,加之雨量、雨强的影响共同作用使养分的输入量也发生改变。

参考文献:

- [1] Aulenbach B T, Landers M N, Musser J W, et al. Effects of impervious area and BMP implementation and design on storm runoff and water quality in Eight Small Watersheds [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(2): 382-399.
- [2] Barzegar R, Moghaddam A A, Tziritis E, et al. Identification of hydrogeochemical processes and pollution sources of groundwater resources in the Marand plain, northwest of Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76 (7): e297.
- [3] 高伟,严长安,李金城,等.基于水量-水质耦合过程的流域水生态承载力优化方法与例证[J].*环境科学学报*, 2017,37(2):755-762.
- [4] 杨永辉,任丹丹,杨艳敏,等.海河流域水资源演变与驱动机制[J].*中国生态农业学报*,2018,26(10):1443-1453.
- [5] 杨丽标,雷坤,乔飞,等.铁岭市河流氮素时空分布及源解析[J].*环境科学*,2018,39(2):711-719.
- [6] 赖正清,李硕,李呈罡,等.SWAT 模型在黑河中上游流域的改进与应用[J].*自然资源学报*,2013,28(8):1404-1413.
- [7] Caldwell P V, Miniati C F, Elliott K J, et al. Declining water yield from forested mountain watersheds in response to climate change and forest mesophication [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 2997-3012.
- [8] 丁永建,张世强.西北内陆河山区流域内循环过程与机理研究:现状与挑战[J].*地球科学进展*,2018,33(7):719-727.
- [9] Siegert C M, Levia D F, Hudson S A, et al. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest [J]. *Forest Ecology & Management*, 2016, 359(1): 109-117.
- [10] 章迅,孙忠林,张全智,等.温带两种林型对氮沉降的再分配及其生长季动态与影响因子[J].*生态学报*,2017,37(10):3344-3354.
- [11] He Z B, Zhao W Z, Liu H, et al. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: A case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(4): 613-621.
- [12] 何志斌,杜军,陈龙飞,等.干旱区山地森林生态水文研究进展[J].*地球科学进展*,2016,31(10):1078-1089.
- [13] 宋文龙,杨胜天,温志群,等.贵州典型森林群落植被冠层的酸雨淋溶特征及缓冲作用[J].*环境科学学报*,2010,30(1):15-23.
- [14] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等.缙云山3种典型森林降雨过程及其氮素输入[J].*环境科学*,2014,35(3):1081-1090.
- [15] 赵海蓉,帅伟,李静,等.华西雨屏区典型人工林对降雨过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的过滤作用[J].*环境科学学报*,2015,35(11):3710-3718.
- [16] 邹志谨,陈步峰.广州市帽峰山两种主要林型的暴雨水文特征[J].*生态环境学报*,2017,26(5):770-777.
- [17] 张娜,刘兴诏,李坤,等.南亚热带3种主要森林降雨及其再分配过程中的养分差异规律[J].*生态学杂志*,2011,30(2):193-200.
- [18] Macinnis-Ng C M O, Flores E E, Müller H, et al. Rainfall partitioning into throughfall and stemflow and associated nutrient fluxes: Land use impacts in a lower montane tropical region of Panama [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111: 661-676.
- [19] Ponette-González A G, Weathers K C, Curran L M. Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: Synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 946-963.
- [20] Xiao Q F, Mc Pherson E G. Rainfall interception of three trees in Oakland, California [J]. *Urban Ecosystem*, 2011, 14: 755-769.
- [21] Hofhansl F, Wanek W, Huber W, et al. Topography strongly affects atmospheric deposition and canopy exchange processes in different types of wet lowland rainforest, Southwest Costa Rica [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106: 371-396.
- [22] 王琼,荣湘民,李法云,等.太子河源头水源涵养林不同植被类型矿质态氮流失特征及其对环境因子的响应[J].*水土保持学报*,2016,31(3):216-223.
- [23] Wang Q, Li F Y, Rong X M, et al. Plant-soil properties associated with nitrogen mineralization: Effect of conversion of natural secondary forests to larch plantations in a headwater catchment in northeast China [J]. *Forests*, 2018, 9(7): e386.
- [24] 郝卓,高扬,张进忠,等.南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响[J].*环境科学*,2015,36(5):1630-1638.
- [25] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [26] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2018,32(4):145-150.
- [27] 黄承标,梁宏温.广西亚热带主要林型的树干茎流[J].*植物资源与环境*,1994,3(4):10-17.
- [28] Kopáček J, Turek J, Hejzlár J, et al. Bulk deposition and throughfall fluxes of elements in the Bohemian Forest (central Europe) from 1998 to 2009 [J]. *Boreal Environment Research*, 2011, 16(6): 495-508.
- [29] Zimmermann A, Germer S, Neill C, et al. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rainforest [J]. *Journal Hydrology*, 2008, 360(1): 87-102.
- [30] 樊建凌,胡正义,周静,等.林地大气氮沉降通量观测对比研究[J].*中国环境科学*,2013,33(5):786-792.