DOI: 10.5846/stxb201303050351
唐晓芬,王云琦,王玉杰,郭平,胡波,孙素琪.水文过程对缙云山径流盐基离子变化特征的影响.生态学报,2014,34(23):7047-7056.
Tang X F, Wang Y Q, Wang Y J, Guo P, Hu B, Sun S Q.Influence of hydrological processes on the runoff variation of base cations in Jinyun Mountain. Acta Ecologica Sinica,2014,34(23):7047-7056.

水文过程对缙云山径流盐基离子变化特征的影响

唐晓芬,王云琦*,王玉杰,郭 平,胡 波,孙素琪
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:通过选取缙云山针阔混交林(马尾松×四川大头茶)和常绿阔叶林(四川大头茶×四川山矾)内 2 个标准径流小区,结合野外观测和室内分析研究降雨及径流的化学性质径流盐基离子变化特征,为该地区水环境保护提供依据。结果表明:1)针阔混交林与常绿阔叶林中 pH 值变化趋势相同均为:地表径流>壤中流>大气降水。pH 与降雨量之间存在显著相关关系。2)在大气降雨-地表径流-壤中流过程中,NH_4^+ 的地表径流及壤中流输出总量小于降雨输入量,表明了土壤对 NH_4^+ 有一定的吸附持留能力。其他盐基离子径流输出量均高于大气降雨的输入量,且主要以壤中流输出为主,元素发生流失。从盐基离子总量来看,径流输出量均增加:针阔混交林(2.86 kg/hm^2),常绿阔叶林(2.47 kg/hm^2),说明在两种林分内养分均流失。(3)K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}和 Na^+盐基离子输出量与径流量之间存在相关关系,随着径流量的增大径流输出量增加。而 NH_4^+ 输出量与径流量之间的相关性不明显,说明了 NH_4^+ 的变化除受径流量的影响外,可能还受微生物、季节等其他因素的影响。

关键词:缙云山; 地表径流; 壤中流; 盐基离子

Influence of hydrological processes on the runoff variation of base cations in Jinyun Mountain

TANG Xiaofen, WANG Yunqi*, WANG Yujie, GUO Ping, HU Bo, SUN Suqi
Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, *China*

Abstract: By selected two standard runoff plots of Mixed conifer (*Pinus massoniana* × *Gordonia acuminata*) and Evergreen broad-leaved forest (*Gordonia acuminata* × *Symplocos setchuanensis*) in Jinyun Mountain, combined with field observations and laboratory analysis of rainfall and runoff chemical properties, conducts a study about the runoff variation of base cations in the hydrological process to provide a basis for the protection of the water environment in this region. The results show that: (1) pH value in Mixed coniferous and evergreen broad-leaved forest have the same trends: surface runoff > interflow> precipitation. There is significant correlation between pH and rainfall. (2) In rainfall-surface runoff-interflow process, the sum of NH_4^+ surface runoff output and interflow output is less than the amount of rainfall input, indicating that the soil have a certain of retain the ability of NH_4^+ to make it loss less. While the runoff outputs of other base cations are higher than rainfall input and element loss, respectively. In terms of the total amount of base cations, compared to the rainfall the runoff output of base cations increased: mixed coniferous (2.86 kg/hm^2), evergreen broad-leaved forest (2.47 kg/hm^2), which indicates that there is a loss of base cations in the evergreen broad-leaved forest and the mixed coniferous. (3) It has correlation between the runoff output of base cations (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} and Na^+) and the amount of runoff, respectively, which mean the output of cations rise with the increase of runoff. While that of NH_4^+ has no obvious correlation between the output runoff. In addition to the impact of runoff, the changes of NH_4^+ may also be affected by other factors such as micro-

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20110014120001); 国家自然科学基金项目(31100515)
收稿日期:2013-03-05; **网络出版日期**:2014-03-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

organisms, season and so on.

Key Words: Jinyun Mountain; surface runoff; interflow; base cations

森林不仅会影响水量分配,对水中元素还具有物理的、化学的、生物的吸附、调节和滤贮的能力,从而影响水的化学特征。亚热带生态系统养分的主要来源于土壤和枯落物。由于生态系统中水分运动的途径会影响系统内养分的迁移。土壤养分的迁移不仅造成土壤退化,土地生产力水平逐渐降低,而且会加速地表水体的富营养化等[1-3]。

从降雨降落到地面产生地表径流和壤中流水文过程中,经过森林冠层、枯落物层、土壤层的作用,其水化学性质会发生不同程度的变化。水体通过淋溶枯落物层及土壤中的交换性盐基离子,使其进入地表经流从森林生态系统中流出,造成森林生态系统生产力下降和环境退化[4-6]。由于枯落物的水分蓄持能力[4]和土壤水分入渗[5]作用,森林能够减少径流量和土壤养分的流失。目前国内外关于径流中养分的研究集中在氮和磷等方面[6-11],并且主要在红壤及紫色土地区养分流失特征的研究,而对径流中的盐基离子研究很少[12-15]。缙云山位于重庆酸雨区,森林生态系统受到酸雨影响严重。酸雨主要通过作用于土壤来危害生态系统。土壤酸化导致土壤物理化学性质的变化,会引起使土壤养分 Ca、Mg、K 等的流失[16-17]。基于水文过程研究缙云山具有代表性的森林群落针阔混交林和常绿阔叶林内的地表径流及壤中流中盐基离子流失特征,旨在探明缙云山水文过程中营养盐流失特征,并探讨林分养分流失对径流水质的影响。

1 研究区概况

试验地位于重庆市缙云山国家级自然保护区内,地理位置东经 106°22′、北纬 29°49′,海拔 350—951.5m。属亚热带季风湿润性气候特征,年平均降水量 1611.8mm,最高年降水量 1683.8mm。相对湿度年平均值为 87%,降雨主要发生在 4—8 月,降水量 1243.8mm,占全年的 77.2%;缙云山多雾,日照时数少,年平均雾日数高达 89.8d,年平均日照时数则低于 1293h。缙云山地形平缓,土层深厚,土壤肥力高,以三叠纪须家河组厚层石英砂岩、灰质页岩和泥质页岩为木质风化而成的酸性黄壤土为主。实验研究林总面积约为 33.5hm^2。保护区主要树种为四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)、四川杨桐(*Adinandra bockiana*)、广东山胡椒(*Lin-dera kwangtungensis*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、细齿叶柃(*Eurya nitidaKorthals*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)等。缙云山研究地理位置图 1 所示。

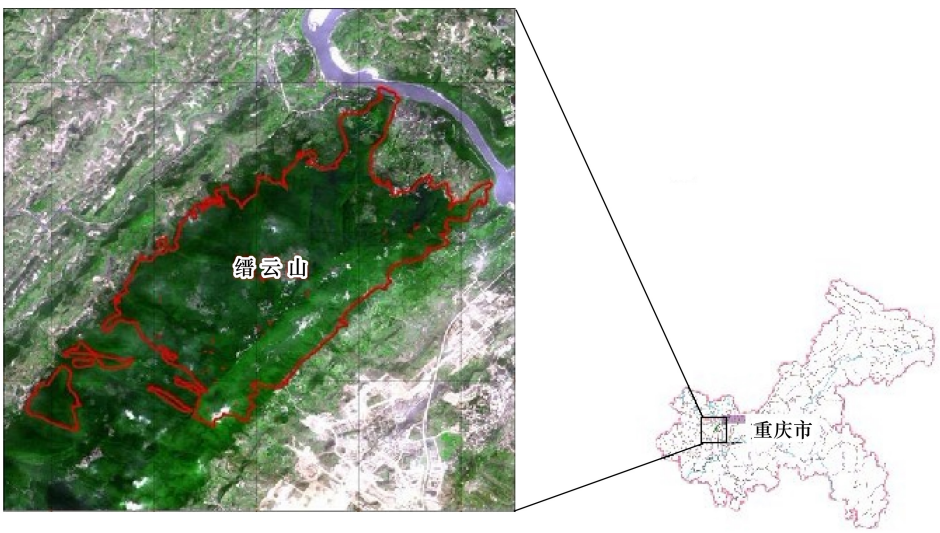

图 1 缙云山位置示意图

Fig.1 Jinyun Mountain site exhibition in Chongqing

2　研究方法

2.1　降雨及径流量观测

实验样地选取针阔混交林、常绿阔叶林两种林分(表 1)内 5m×20m 的标准径流小区。研究区林外空旷地设置全自动气象站 1 个具有 CR10X 数据采集器,其中以 TE525MM 雨量计记录降雨量。小区四周围墙高出地面约 0.8m,深度均达到母岩层。地表流和壤中流集流槽设置在小区坡面下缘,垂直于径流流向,长度与径流小区宽度一致,宽高均为 24cm。其上缘与小区坡地地面同高且水平,槽身由两端向下中心倾斜,以不产生泥沙为准。集流槽上、下端有混凝土浇筑的挡墙,墙体留有过水孔。在径流小区内,降雨产生的地表径流与壤中流在集流槽聚集,水流通过集流槽下端导管进入观测房。观测房配有 T9801 型多通道微电脑全自动翻斗式流量计(10 次/min 的翻斗容量为 37.19mm),自动监测记录地表径流和壤中流数据。

表 1　各林地的基本情况

Table 1　The Basic information of plots

林分类型 Forest types	主要树种 Main tee secies	伴生树种 Associated tee secies	主要地被物 Main gound cover	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average hight/m	龄级 Age class	郁闭度 Canopy dnsity	林分密度 Stand dnsity/(株/hm^2)	坡度/(°) Slope	坡向 Slope oientation	土壤深度 Soil dpth/cm
针阔混交林 Mixed conifer	马尾松(*Pinus massoniana*)×四川大头茶(*Gordonia acuminata*)	杉木(*Cunninghamia lanceolata*),四川杨桐(*Adinandra bockiana*),四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)	里白(*Diplopterygium glauca*),淡竹叶(*Woodwardia japonica*)	8.2	7.3	Ⅵ	0.8	1510	21	NW	86
常绿阔叶林 Evergreen boad-leaved forest	四川大头茶(*Gordonia acuminata*)×四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)	细齿叶柃(*Eurya nitidaKorthals*),白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)	里白(*Diplopterygium glsucum*),狗脊蕨(*Lophatherum gracile Brongn*)	10.22	12.74	Ⅵ	0.7	2200	26	NW	98

2.2　样品采集及分析方法

在针阔混交林、常绿阔叶林实验样地内收集 2012 年 4—9 月内 8 场典型降雨、地表径流及壤中流。在样地附近空旷处,放置自记雨量计筒,收集大气降雨。在径流小区观测房流量计出水口处放置塑料桶收集地表径流及壤中流,各采集 500 mL 装入塑料细口瓶内,在 5℃下保存以备检测。监测项目包括 pH 值、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、NH_4^+。检测 pH 值采用电极法,样品经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}的浓度用原子吸收光谱仪测定,用比色分光光度法测定 NH_4^+ 的浓度。

降雨及径流内的离子通量根据公式(1)计算。

$$F = \frac{C_i \cdot V_i}{100} \quad (1)$$

式中,F 为离子通量(kg/hm^2)C_i 为离子浓度(mg/L),V_i 为降雨量或径流量(mm),i 为 SO_4^{2-}、NO_3^-、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+。

采用 SPSS18.0 和 Excel 软件分析数据并处理图表。

3　结果分析

3.1　林分水文过程分析

从表 2 中可以看出,选取的 8 次降雨量范围在 9.2—30.6mm 之间,降雨强度为 0.62—2.45mm/h,包括小雨到暴雨等级的典型降水。与常绿阔叶林相比,针阔混交林中平均地表径流量较高,壤中流量较低[18]。针阔混交林地表径流系数在 0.023—0.080 之间,壤中流系数在 0.136—0.627 之间。常绿阔叶林地表径流系数在 0.006—0.198 之间,壤中流系数在 0.281—0.859 之间。地表径流主要受地表覆盖物和土壤物理性质(包括郁闭度、土壤有效蓄水量、枯落物厚度等)和降雨因子(包括降雨量、降雨历时、降

雨强度等)的影响。壤中流主要受土壤结构特征(包括土壤非毛管孔隙度和最大持水量等)的影响。因此,不同林分内的径流特征是不同的。

表 2 降雨及径流特征

Table 2 The characteristics of Rainfall and runoff

序号 No.	降雨/mm Rainfall	降雨强度 Rainfall intensity /(mm/h)	针阔混交林 Mixed conifer		常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	
			地表径流/mm Surface runoff	壤中流/mm Interflow	地表径流/mm Surface runoff	壤中流/mm Interflow
1	21.20	1.23	0.82	5.05	0.30	6.27
2	13.60	0.27	1.09	1.84	1.36	10.23
3	21.80	1.31	0.90	10.2	0.70	12.70
4	12.40	0.62	0.53	2.00	2.46	10.11
5	21.40	2.37	1.43	10.27	0.13	6.01
6	9.20	0.55	0.21	2.96	0.08	4.09
7	30.60	2.45	0.89	10.10	0.24	19.90
8	20.40	1.88	1.12	12.80	0.28	12.15

3.2 水文过程对 pH 值的作用

从图 2 中可以看出,大气降水的 pH 值为 5.25 属于酸性降雨。在大气降雨-地表径流-壤中流过程中 pH 值变化趋势为:地表径流>壤中流>大气降水。与降雨 pH 值相比,针阔混交林地表径流和壤中流的 pH 值分别平均升高了 42.86%、35.05%,常绿阔叶林地表径流和壤中流的 pH 值各升高了 32.57%、18.29%,说明土壤及枯落物对酸雨有一定的缓冲作用,使地表径流及壤中流的 pH 值上升。针阔混交林对酸雨的缓冲作用高于常绿阔叶林。

对降雨量和 pH 进行回归分析(图 3),发现降雨量与 pH 值之间存在明显的指数关系,其拟合方程的决定系数 $R^2 = 0.539$,且达到了显著水平($P < 0.05$, $n = 8$)。表 3 也指出降雨强度与 pH 之间也存在一定的正相关关系($R = 0.583$, $n = 8$),说明该地区 pH 值的大小随着降雨量增加和降雨强度的增大而上升。重庆市大气污染严重,主要污染物为 SO_2、NO_x 等酸性气体。降雨过程中,SO_2、NO_x 等溶于水产生 H^+ 导致降水 pH 值降低,当降雨量增加 H^+ 浓度降低,从而 pH 值上升。

两种林分内径流的 pH 与径流系数之间没有明显的相关关系(表 3)。针阔混交林内径流 pH 与地表径流径流系数和壤中流系数相关系数分别为 −0.500、0.145,常绿阔叶林中相关系数也较小分别为 0.328、0.014。说明降雨通过枯落物层及土壤层形成径流的过程中,pH 值维持在相对稳定的范围内尤其是在壤中流中。pH 的变化受径流流量影响较小,主要受枯落物及土壤的酸缓冲作用影响。

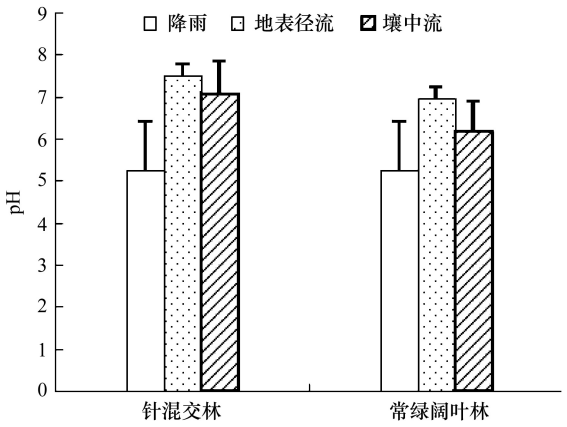

图 2 各林分 pH 值的变化

Fig.2 The change pH of different forest stand

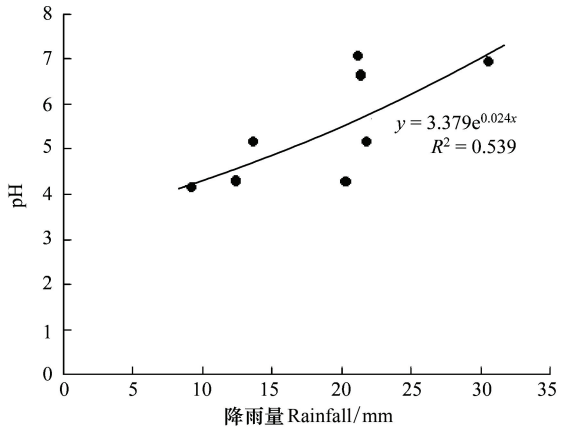

图 3 pH 值和降雨量之间关系

Fig.3 The relationship between pH and rainfall

表 3　pH 值与降雨及径流特征之间的相关系数

Table 3　Correlation coefficient of pH value with precipitation and runoff characteristics

林分类型 Stand types / 相关指标 Related indicators	林外空旷地 Open area		针阔混交林 Mixed conifer		常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest		样本数 Number n
	降雨量 Rainfall	降雨强度 Rainfall intensity	地表径流系数 Surface runoff coefficient	壤中径流系数 Interflow coefficient	地表径流系数 Surface runoff coefficient	壤中径流系数 Interflow coefficient	
pH	0.733	0.583	−0.500	0.145	0.328	0.014	8

3.3　水文过程对盐基离子的影响

盐基离子是植物生长所必需的营养元素,主要包括 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、NH_4^+ 等碱性阳离子。在酸雨的作用下,吸附在森林土壤胶体上的交换性盐基离子同 H^+ 发生反应,置换出盐基离子进入径流中,从而降低酸雨对土壤的危害[17]。林分内地表枯落物的分解作用产生的盐基离子也会随着降水淋滤到径流中,增加了径流中离子的浓度,造成了盐基离子的损失。

3.3.1　对 Ca^{2+} 的影响

由图 4 可知,在降雨-地表径流-壤中流过程中,林分内 Ca^{2+} 输出量均表现为壤中流>地表径流。针阔混交林中 Ca^{2+} 在地表径流中输出量最小为 0.138 kg/hm^2,壤中流中最大为 1.854kg/hm^2。Ca^{2+} 降雨输入了 0.690 kg/hm^2,总的径流输出约是降雨输入的 2.89 倍。这可能是由于枯落物的分解和土壤的的风化产生 Ca,降雨经过枯落物层及土壤层后淋滤出 Ca^{2+} 使得径流输出量增多。常绿阔叶林中 Ca^{2+} 地表径流(0.134 kg/hm^2)<降雨(0.690 kg/hm^2)<壤中流(2.142 kg/hm^2)。总的径流输出量比降雨输入量增加了 1.586 kg/hm^2。

通过与地表径流和壤中流径流量进行拟合分析(表 4),发现两种林分内 Ca^{2+} 输出量与径流量呈指数相关。针阔混交林中拟合决定系数分别为 0.822、0.879,常绿阔叶林中拟合决定系数分别为 0.839、0.609。说明两种林分内 Ca^{2+} 输出量随着径流量的增加而增加。常绿阔叶林与针阔混交林都处于 Ca 流失状态影响森林健康。Ca 含量升高会造成水体硬度变大,当径流汇入河流后引起河流水质变化。

3.3.2　对 Mg^{2+} 的影响

由图 4 可知,Mg^{2+} 的变化情况与 Ca^{2+} 相似,Mg^{2+} 的降雨输入量为 0.079 kg/hm^2,输出主要以壤中流输出为主。针阔混交林和常绿阔叶林总径流输出比降雨输入分别增加了 19.03%、89.29%,说明常绿阔叶林中 Mg^{2+} 流失量高于针阔混交林。通过与地表径流和壤中流径流量进行拟合分析(表 4),发现 Mg^{2+} 径流输出量与径流量之间呈显著指数相关。针阔混交林(R^2 = 0.584, 0.901; P <0.05),常绿阔叶林中的相关性(R^2 = 0.736, 0.963; P <0.01),说明 Mg^{2+} 的输出量会随着径流量的增加而增大。水体内 Mg 的含量对水体硬度也有一定的影响,因此 Mg 的流失会影响森林健康、径流水质及森林生态系统的养分平衡。

3.3.3　对 K^+ 的影响

由图 4 可知,大气降雨输入了 0.199 kg/hm^2 的 K^+,K^+ 输出主要以壤中流输出为主。针阔混交林总径流输出约是降雨输入的 2.66 倍,阔叶林是降雨输入的 1.15 倍。这可能是由于枯落物的分解和土壤的的风化产生 K,降雨经过枯落物层及土壤层后发生淋滤作用造成 K^+ 径流输出量增多。K^+ 径流输出量与径流量之间呈指数相关(表 4),在针阔混交林中相关性显著(P<0.05),地表径流和壤中流的相关性 R^2 均为 0.685,其含量随着径流量的增加而增大。常绿阔叶林相关性较低(P>0.05),地表径流和壤中流的相关性 R^2 分别为 0.485、0.455,说明常绿阔叶林中壤中流 K 的输出除受径流量影响外,可能还受土壤内钾氧化物含量及溶解状况等其他因素的影响。由于 K 的溶解度高,径流量越大其溶解量越大,导致林分土壤内 K 的损失量增大,从而影响植物对 K 的吸收利用,并影响径流水质。

3.3.4　对 Na^+ 的影响

从图 4 可知,在降雨-地表径流-壤中流水文过程中,Na^+ 降雨输入量和径流输出量都较低。大气降雨输入量为 0.107 kg/hm^2,针阔混交林和常绿阔叶林总的径流输出约比降雨输入分别增加了 0.126、0.044 kg/hm^2。这可能是由于枯落物的分解作用,降雨通过枯落物层及土壤层后淋滤出 Na^+,造成径流内 Na^+ 增多。由表 4 可知,Na^+ 径流输出量与径流量之间呈指数相关,而常绿阔叶林 Na^+ 在壤中流中的相

关性不明显(P >0.05),说明常绿阔叶林 Na^+输出量还受其他因素的影响,如土壤内 Na 的含量等。在两种林分内 Na 径流输出量大于降雨输入量,都发生了养分流失。

3.3.5 对 NH_4^+ 的影响

由图 4 可知,针阔混交林与常绿阔叶林中 NH_4^+ 的降雨输入远大于总径流输出,降低幅度分别为 94.08%、95.10%。对 NH_4^+ 输出量与地表径流和壤中流径流量进行拟合分析(表 4),两种林分中 NH_4^+ 输出量与径流量之间无明显的相关性。这可能是由于地表径流中 NH_4^+ 来源比较复杂,主要来自林冠层大气沉降及代谢产物淋洗和枯落物的分解,在形成径流阶段截留了部分的 NH_4^+ 或矿化为 NO_3-N,减少了 NH_4^+ 的淋失。壤中流中 NH_4^+ 输出量的变化与枯落物或土壤中氮含量等多种因素有关。由于氮含量增大是水体富营化重要原因之一,径流内 NH_4^+ 的减少,降低了水体富营养化的风险。

3.3.6 对盐基离子总量的影响

由图 4 可知,针阔混交林中盐基离子总量在地表径流输出量为 0.283 kg/hm^2,壤中流为 2.58 kg/hm^2。降雨输入 0.929 kg/hm^2,径流输出较降雨输入增加了约 3.1 倍。这可能是由于枯落物的分解和土壤的的风化产生,降雨经过枯落物层及土壤层后淋滤作用使得径流输出量增多。常绿阔叶林中所有盐基离子径流输出增加了 3.238 kg/hm^2。可以看出,针阔混交林中总的盐基离子输出量要大于常绿阔叶林输出量,说明针阔混交林对保持土壤肥力的能力较差,且两种林分内养分均流失,影响森林养分循环及平衡。径流内盐基离子含量的增加也会造成水体污染,影响生活、工业及灌溉用水。

表 4 各盐基离子含量与径流量之间的拟合分析

Table 4 The fitting analysis between base cations content and runoff

离子 Ions	类型 Types	针阔混交林 Mixed conifer	R^2	P	n	常绿阔叶林 Evegreen broadleaves forest	R^2	P	n
Ca^{2+}	地表径流	$y=0.025e^{1.714x}$	0.822	0.005	7	$y=0.022e^{1.460x}$	0.839	0.001	8
	壤中流	$y=0.287e^{0.221x}$	0.879	0.021	7	$y=0.660e^{0.2x}$	0.609	0.038	7
Mg^{2+}	地表径流	$y=0.001e^{1.815x}$	0.584	0.045	7	$y=0.001e^{1.654x}$	0.736	0.006	8
	壤中流	$y=0.023e^{0.163x}$	0.901	0.001	7	$y=0.051e^{0.092x}$	0.963	0	7
K^+	地表径流	$y=0.011e^{2.139x}$	0.685	0.022	7	$y=0.013e^{1.056x}$	0.485	0.055	8
	壤中流	$y=0.054e^{0.235x}$	0.685	0.022	7	$y=0.089e^{0.058x}$	0.455	0.077	7
Na^+	地表径流	$y=0.002e^{2.248x}$	0.646	0.029	7	$y=0.002e^{1.241x}$	0.515	0.045	8
	壤中流	$y=0.032e^{0.201x}$	0.648	0.029	7	$y=0.061e^{0.065x}$	0.485	0.124	6
NH_4^+	地表径流	$y=0.001e^{1.689x}$	0.277	0.361	5	$y=0.000e^{1.158x}$	0.248	0.314	6
	壤中流	$y=0.007e^{-0.07x}$	0.042	0.698	6	$y=0.003e^{0.116x}$	0.236	0.406	5

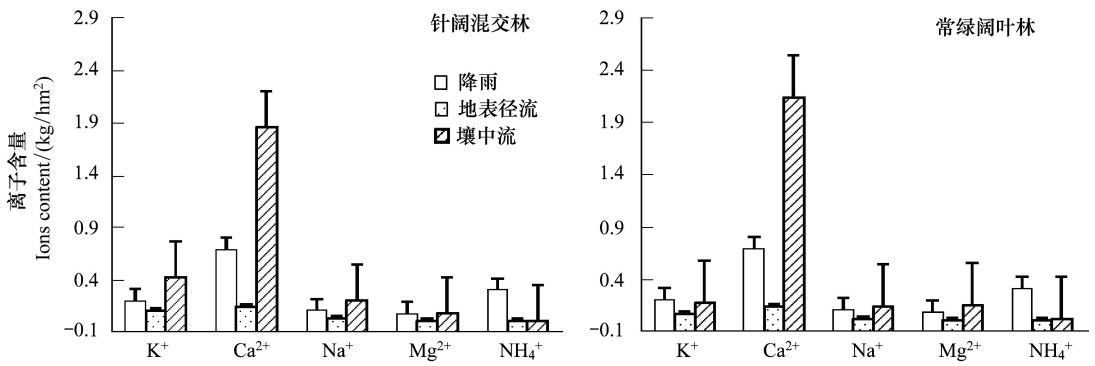

图 4 各盐基离子在水文过程中含量的变化情况

Fig.4 The variation of base cations during hydrological processes

4　结论与讨论

4.1　讨论

4.1.1　水文过程中 pH 值的变化

本研究指出大气降雨 pH 值与降雨量之间存在显著的相关性,而冯延文等人指出降雨量的不同也会造成大气降水化学性质的差异[18]。刘鸿雁等人在缙云山的研究中指出 pH 值的变化主要受水体中盐基离子浓度的影响,尤其是 Ca^{2+} 浓度。地表径流及壤中流中 Ca^{2+} 浓度分别增加了 2—3 倍和 3—7 倍,影响径流 pH 值的变化[19]。本研究中地表径流中 Ca^{2+} 浓度增加了约 3—11 倍,壤中流中增加了 4—12 倍,地表径流和壤中流中 pH 值明显上升。与刘鸿雁的研究相比,pH 增加幅度在壤中流中相近,而地表径流中相差较大,可能是由于土壤类型相同且性质稳定而地表凋落物覆盖及分解程度不同等造成的。万睿等人在三峡库区水化学循环中也发现降水形成径流后 pH 值升高,并指出可能是由于土壤层枯枝落叶的分解物及土壤内的盐基离子逐渐被淋溶到地表径流中,从而 pH 值上升[20-21]。壤中流 pH 值低于地表径流,可能是由于元素在水分作用向下迁移,土壤下层的盐基含量要高于土壤上层,因而缓冲能力增加引起的。缙云山地区降水多属于酸性降水,经过森林生态系统的作用后,径流 pH 值上升至 6.2—7.5 之间,从而不会危害水生生物的健康和人类饮用水水质。

4.1.2　对盐基离子损失的影响

(1) Ca^{2+} 和 Mg^{2+}

通过水文过程可以看出,Ca^{2+} 径流输出量明显大于降雨输入,当径流量增大损失会增加。这与吴飞华等人关于钙在森林生态系统中流失研究结果一致[22]。张胜利等人在秦岭地区的研究中指出径流输出的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 量增加,且 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于土壤、岩石及林冠层、枯落物层[23]。当水硬度过大时,易使人患暂时性胃肠不适、肾结石、脑血管等疾病,影响人类健康。因此,缙云山径流中 Ca、Mg 等主要盐基离子的流失,主要影响水的硬度和矿化度,同时其长期流失会导致森林生态系统营养失衡和影响人类活动用水。

(2) K^+

K^+ 是植物生长必需的重要营养元素,其流失会影响植物的健康生长。研究地内 K^+ 的输出量大于输入量,而任青山等人指出在藏东南冷杉原始林中 K^+ 被吸附滞留在凋落物或土壤中,其输出量小于输入量[24]。这与本研究存在一定的差别,可能是由本研究中降雨数据较少产生的误差。针阔混交林地表径流输出量与地表径流量之间存在指数关系,与谭家得等关于湿地松林地表径流研究结果一致,指出径流量是决定 K 流失量的主要因子[25,26]。此外,李俊波等人指出 K 流失量还受到降雨强度、地形坡度。地表覆盖度的影响[27]。

(3) Na^+

Na^+ 属于比较稳定的离子,主要来源于海洋。通过水面蒸发和海浪飞沫向大气中输入含 Na 的物质,并且迁移到陆地以干沉降和湿沉降的形式落到地表下垫面上[28]。缙云山处于内陆地区远离海洋,缺少海洋输送,因而该地降雨中的 Na^+ 含量较小。两种林分径流输出中 Na^+ 含量都增加,张胜利指出森林中水体土壤是 Na^+ 的主要来源,此外,有人指出枯落物也有一定的影响[23,29]。刘鸿雁等人在缙云山研究中也发现 Na^+ 的径流输出浓度大于降雨输入[19],而万睿等人的研究表明径流中 Na^+ 含量增加不明显[20]。与 K^+ 相同的是在水文过程中 Na^+ 损失还受到降雨量、降雨强度及地表覆盖度等的影响[27]。

(4) NH_4^+

NH_4^+ 是植物生长不可缺少的营养元素之一。张兴昌、黄河仙等人的研究中都指出氮素流失,并探讨了不同植被覆盖类型对氮流失的影响,植被覆盖度大的地区养分流失较少[21,30]。任青山等人指出 NH_4^+ 降雨输入小于径流输出,会造成元素流失和土壤生产力的衰退[25]。而本研究中针阔混交林及常绿阔叶林内 NH_4^+ 的降雨输入量大于径流输出量,这可能是由于本实验处于植物生长季节,对氮素的吸收作用强烈或一部分的铵态氮在微生物作用下转化为硝态氮形式流失。此外,土壤对 NH_4^+ 也具有一定的净化作用[23,30]。

(5) 盐基离子总量

酸雨对森林生态系统影响主要作用在土壤上,盐基离子径流输出量因森林土壤中交换态盐基离子的淋失而增加。Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+ 径流输出量与径流量之间存在指数关系,随着径流量的增大,林分土壤中盐基离子流失量也越大,径流汇入河流、湖泊后

影响其水质。刘鸿雁等人发现径流中盐基离子与土壤交换性盐基离子之间存在负相关关系,但显著性不明显,地表径流化学成分受土壤和枯落物分解的影响,而壤中流主要受土壤的影响[19]。因此,土壤及枯落物与径流内养分盐基离子损失之间的关系需要进一步研究。同时,刘楠等人发现降雨除了加速盐基离子的淋溶外,径流内重金属元素的含量也增加,从而导致了水体的进一步污染[31]。盐基离子的变化可反映森林生态系统的营养平衡趋势,随着径流量的增大,大部分盐基离子径流输出量增加,引起森林生态系统养分的流失,造成土壤贫瘠化,导致生态环境恶化[32-33]。因此,为减少酸雨导致的养分流失及保护河流等水体的清洁,需要减少煤、石油等能源的燃烧。

在森林生态系统中,大气降水主要以地表径流及壤中流的形式输出。通过对地表径流及壤中流中盐基离子变化特征的研究,可以全面了解水文过程中,植被、凋落物和土壤对水质的影响,为保护流域周围水环境提供依据。由于本文研究时间序列较短、数据较少,因此径流中盐基离子的变化特征有待进一步研究。

4.2 结论

针阔混交林与常绿阔叶林的 pH 值变化趋势相同均为:地表径流>壤中流>大气降水。pH 与降雨量,降雨强度之间存在显著相关关系。在大气降雨-地表径流-壤中流过程中,除 NH_4^+ 外,Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+ 在地表径流和壤中流输出量之和均大于降雨输入量,表明了大部分盐基离子发生了损失,土壤对 NH_4^+ 有一定的持留能力,使得其流失较少。从盐基离子的总量来看,林分内地表径流盐基离子总量相对于降雨下降的幅度分别为:常绿阔叶林(76.43%),针阔混交林(69.58%);壤中流中增加的倍数分别为:针阔混交林(2.77),常绿阔叶林(2.34)。径流输出量均增加表现为针阔混交林(2.86 kg/hm^2),常绿阔叶林(2.47 kg/hm^2),说明在针阔混交林中和常绿阔叶林盐基离子都发生损失。通过对各盐基离子含量与降雨量及径流量之间进行回归分析发现,K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+ 盐基离子输出量与径流量之间存在指数相关关系。而 NH_4^+ 输出量与径流量之间的相关关系不明显。

References:

[1] Hinkle S R, Böhlke J K, Duff J H, Morgana D S, Weickd R J. Aquifer scale controls on the distribution of nitrate and ammonium in ground water near La Pine, Oregon, USA. Journal of Hydrology, 2007, 333(224): 486-503.

[2] Chang L F, Wang X L, Li H P, Hu F. Characteristics of soil nutrient loss with interflow from uplands as affected by land uses in low hill region of Chaohu Basin. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(5): 511-517.

[3] Anderson M G, Mcdonne J J. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chicheser: John Wiley and Sons, 2005: 1719-1732.

[4] Xue L, He Y J, Qu M, Wu M, Xu Y. Water holding characteristics of litter in plantation in south China. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(3): 415-421.

[5] Xue L, Liang L L, Ren X R, Cao H, Wang X E, Xie T F. Soil physical properties and water conservation function of model plantations in south China. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 986-989.

[6] Carroll C, Mcrton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coalmines. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(2): 313-327.

[7] Rimski-Korsakov H, Rubio G, Lavado R S. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region Argentina. Agricultural Water Management, 2004, 65(2): 83-94.

[8] Silva R G, Holub SM, Jorgensen E E, Ashanuzzaman A N M. Indicators of nitrate leaching loss under different land use of clayey and sandy soils in southeastern Oklahoma. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 109(3/4): 346-359.

[9] Xu Q G, Liu H L, Shen Z Y, Xi B D. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area. Acta Scientiae Circumstantia, 2007, 27(2): 326-331.

[10] Song Z F, Wang K Q, Sun X L, He J Q, Li H B, Yi J Z. Phosphorous and nitrogen loss characteristics with runoff on different lands use pattern in small watersheds in Jianshan river, Chengjiang. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(4): 109-113.

[11] Qiu E F, Chen Z M, Zheng Y S, Hong W, You Z D. Effects of stand condition improvement on surface soil nutrient losses of hilly land Dendrocalamus latiflorus plantation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1017-1021.

[12] Gao Y, Zhu B, Wang T, Liao C Y, Tang J L, Zhou P. Purple soil sloping land bio-available phosphorus transported out under the condition of artificial simulated rainfall. China Environmental Science, 2008, 28(6): 542-547.

[13] Ma K, Wang Z Q, Chen X, You L. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(3): 16-19.

[14] Ding W F, Zhang P C. Characteristics of nutrient transportation of subsurface flow of purple soil slope. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 15-18, 53-53.

[15] Wang X X, Zhang T L, Zhang B. Nutrient cycling and balance of sloping upland ecosystems on red soil. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 335-341.

[16] Jang W H, Zhang S, Chen G C, Xiong H Q, Ding Y, Li X Y. Effect of acid deposition on soil and vegetation of forest ecosystem in Nanshan of Chongqing. Research of Environmental Sciences, 2002, 15(6): 8-11.

[17] Ling D J, Zhang J E, Ouyang Y. Advancements in research on impact of acid rain on soil ecosystem: A review. Soils, 2007, 39(4): 514-521.

[18] Feng Y W, Feng Z W, Ogura N, Huang Y Z. Water quality and change process of atmospheric precipitation at forest small catchment of Beijing Suburb, China. Advances in Environmental Science, 1999, 7(4): 112-119.

[19] Liu H Y, Huang J G, Guo Y N. Impacts of different vegetation types and soil properties on runoff chemical characteristics. Chinese Journal of Environmental Science, 2006, 27(4): 655-660.

[20] Wan R, Wang P C, Zeng L X, Shi Y H, Pan L. Chemical properties of the precipitation circulation in the forest of Lanlingxi small watershed in the Three Gorges Reservoir Area. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2010, 34(3): 39-44.

[21] Huang H X, Xie X L, Wang K R, Yin F R. Surface runoff and nutrient loss from red-soil slope-lands under different land use types. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1645-1649.

[22] Wu F H, Liu T W, Pei Z M, Zheng H L. Calcium depletion in forest ecosystem induced by acid rain: a review. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 1081-1088.

[23] Zhang S L. Effects of Forest Ecosystem on Runoff and Water Quality in Medium-Altitude Mountainous Region of Southern Slopes, Qinling Mountains [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, 2005.

[24] Ren Q S, Wang J S, Zhang B, Luo J, Pan G. Water quality analyses of different water states of fir origin forests in southeast Tibet. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(2): 52-54.

[25] Norrström A C. Acid-base status of soils in groundwater discharge zones-relation to surface water acidification. Journal of Hydrology, 1995, 170(1/4): 87-100.

[26] Tan J D, Xue L, Zheng W G, Fu J D, Zhang X P, Tian X Q, Zhao H J. Characteristics of surface runoff and potassium export in a pinus elliottii Stand. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(4): 57-60.

[27] Li J B, Hua L, Fu X, et al. Analysis on K and Na losses in surface runoff and study on its effective factors. Soil and Water Conservation in China, 2005, (2): 5-7.

[28] Gao Y, Robert A D. Air sea chemical exchange in coastal oceans. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(6): 553-563.

[29] Liu J X, Zhou G Y. Effects of cumulative acidification of soil on element transfer in pinus massoniana lamb forest at Dinghushan. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2005, 31(4): 381-391.

[30] Zhang X Ch, Liu G B, Fu H F. Soil nitrogen losses of catchment by water erosion as affected by vegetation coverage. Chinese Journal of Environmental Science, 2000, 21(6): 16-19.

[31] Liu N. Effects of Typical Forest Stands on Water Quality of Runoff and Its Evaluation in Jinyun Mountain, Southwestern China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

[32] Duchesne L, Houle D. Base cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest. Biogeochemistry, 2006, 78(2): 195-216.

[33] Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, Huang M S. Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of three Gorges Reservoir. Chinese Journal of Environmental Science, 2008, 29(1): 1-6.

参考文献:

[2] 常龙飞, 王晓龙, 李恒鹏, 胡锋. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 511-517.

[4] 薛立, 何跃君, 屈明, 吴敏, 徐燕. 华南典型人工林凋落物的持水特性. 植物生态学报, 2005, 29(3): 415-421.

[5] 薛立, 梁丽丽, 任向荣, 曹鹤, 王相蛾, 谢腾芳. 华南典型人工林的土壤物理性质及其水源涵养功能. 土壤通报, 2008, 39(5): 986-989.

[9] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 席北斗. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326-331.

[10] 宋泽芬, 王克勤, 孙孝龙, 和甲秋, 李红波, 依佼传. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型地表径流氮、磷的流失特征. 环境科学研究, 2008, 21(4): 109-113.

[11] 邱尔发, 陈卓梅, 郑郁善, 洪伟, 尤志达. 土壤垦复对山地麻竹林地表养分流失动态的影响. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1017-1021.

[12] 高扬, 朱波, 汪涛, 缪驰远, 唐家良, 周培. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出. 中国环境科学, 2008, 28(6): 542-547.

[13] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 尤力. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.

[14] 丁文峰, 张平仓. 紫色土坡面壤中流养分输出特征. 水土保持学报, 2009, 23(4): 15-18, 53-53.

[15] 王兴祥, 张桃林, 张斌. 红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡. 生态学报, 1999, 19(3): 335-341.
[16] 姜文华, 张晟, 陈刚才, 熊好琴, 丁易, 李旭光. 酸沉降对重庆南山森林生态系统土壤和植被的影响. 环境科学研究, 2002, 15(6): 8-11.
[17] 凌大炯, 章家恩, 欧阳颖. 酸雨对土壤生态系统影响的研究进展. 土壤, 2007, 39(4): 514-521.
[18] 冯延文, 冯宗炜, 小仓纪雄, 黄益宗. 北京郊外森林小流域的大气降水的水质及其变化过程. 环境科学进展, 1999, 7(4): 112-119.
[19] 刘鸿雁, 黄建国, 郭艳娜. 不同植被类型及土壤对径流水化学特征的影响. 环境科学, 2006, 27(4): 655-660.
[20] 万睿, 王鹏程, 曾立雄, 史玉虎, 潘磊. 三峡库区兰陵溪小流域森林降水化学循环特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(3): 39-44.
[21] 黄河仙, 谢小立, 王凯荣, 殷芙蓉. 不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征. 生态环境, 2008, 17(4): 1645-1649.
[22] 吴飞华, 刘廷武, 裴真明, 郑海雷. 酸雨引起森林生态系统钙流失研究进展. 生态学报, 2010, 30(4): 1081-1088.
[23] 张胜利. 秦岭南坡中山地带森林生态系统对径流和水质的影响研究 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2005.
[24] 任青山, 王景升, 张博, 罗建, 潘刚. 藏东南冷杉原始林不同形态水的水质分析. 东北林业大学报, 2002, 30(2): 52-54.
[26] 谭家得, 薛立, 郑卫国, 傅静丹, 张学平, 田雪琴, 赵鸿杰. 湿地松林的地表径流及钾流失特征. 华南农业大学学报, 2009, 30(4): 57-60.
[27] 李俊波, 华珞, 付鑫, 蔡典雄, 冯琰, 朱凤云, 马礼, 周万荣. 地表径流中 K、Na 流失量分析及其影响因素研究. 中国水土保持, 2005, (2): 5-7.
[28] 高原, Robert A D. 沿海海-气界面的化学物质交换. 地球科学进展, 1997, 12(6): 553-563.
[29] 刘菊秀, 周国逸. 土壤累积酸化对鼎湖山马尾松林物质元素迁移规律的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(4): 381-391.
[30] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响. 环境科学, 2000, 21(6): 16-19.
[31] 刘楠. 缙云山典型林分对径流水质的作用及评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
[33] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 黄民生. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析. 环境科学, 2008, 29(1): 1-6.