

不同植被类型及土壤对径流水化学特征的影响

刘鸿雁^{1,2}, 黄建国¹, 郭艳娜¹

(1. 西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 在不同植被类型覆盖条件下, 对降雨形成地表径流和地下径流的化学成分变化及其与土壤剖面性质的关系进行分析, 结果表明: 地表径流和地下径流的化学特征与雨水基本相同, 阳离子主要以 Ca^{2+} 为主, 离子排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$, 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$. 降雨形成地表径流和地下径流后, 各成分浓度发生了明显的变化, 水体中主要的阴阳离子如 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- 等浓度增加, 与雨水相比为内贮型化学成分, 地下径流中 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 和 Cl^- 增加的幅度显著高于地表径流. 相关分析结果显示, 地下径流 pH 受到土壤 pH 的强烈影响, 受土壤胶体吸附的影响, 水体中 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 等阳离子与土壤交换性阳离子之间一般呈负相关的关系, 由于阴离子容易随水流失, 水体中 SO_4^{2-} , NO_3^- 和 Cl^- 与土壤相关离子之间普遍呈正相关关系.

关键词: 雨水; 径流; 化学成分; 土壤特性; 相关系数

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)04-0655-06

Impacts of Different Vegetation Types and Soil Properties on Runoff Chemical Characteristics

LIU Hong-yan^{1,2}, HUANG Jian-guo¹, GUO Yan-na¹

(1. College of Natural Resource and Environment Science, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China; 2. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Chemical characteristics of surface runoff and groundwater in different vegetation types on Jinyunshan located in suburb of Chongqing were studied, and the relationship between runoff chemical characteristics and soil properties were analyzed. The vegetation types include coniferous broad-leaved mixed forest, evergreen broad-leaved forest, bamboo forest, shrubbery and bare soil. Results showed as follows: Chemical characteristics in surface runoff and groundwater were similar to that in rainfall, which Ca^{2+} was the dominant cation, $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$; and SO_4^{2-} was the dominant anion, $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$. The concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- in runoff were higher than that in rainfall, meanwhile Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- in groundwater were higher than that in surface runoff. pH of groundwater was obviously influenced by soil pH. Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ in groundwater showed a negative correlation to those properties in soil profile because cations were always absorbed by colloids in soils. Moreover, since anions were easy to be leaching, SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- in groundwater displayed a positive correlation to that in soil profile.

Key words: rainfall; runoff; chemical characteristics; soil properties; coefficient of correlation

森林水环境是森林对化学环境变化反映最直接最敏感的部分, 分析森林水环境的化学成分及变化, 对探索地表水水质的演化、森林生态系统净化水源的作用机制, 了解区域地球化学条件对环境变化的响应, 都具有重要意义^[1]. 我国关于植被变化的水文生态效应研究主要集中在森林生态系统本身的营养循环上, 有关森林植被变化对溪流、水库水质的影响研究较少, 是一个比较薄弱的环节^[2]. 缙云山国家森林公园位于三峡库区上游的嘉陵江畔, 本文在森林公园不同植被类型覆盖条件下, 测定降雨形成径流的水文学过程中水体化学成分的变化, 研究土壤理化性质对径流水化学成分变化的影响, 这对径流水水质演化的机制研究有一定的理论价值, 同时对制定三峡水库流域的水质保护规划和控制措施具

有一定的指导作用.

1 材料与方法

1.1 样地自然概况

缙云山国家森林公园位于东经 $106^\circ 20'$, 北纬 $29^\circ 49'$, 距重庆市中心距离 32.5km. 年均气温 13.6°C , 年均相对湿度 87%, 年均降水量 1 611.8mm, 属于亚热带常绿阔叶林生物气候带, 植被类型非常丰富^[3]. 试验选择了该区的常绿阔叶林、针阔混交林、毛竹林、灌木林和裸地等 5 个不同的植被覆盖类型.

收稿日期: 2005-03-24; 修订日期: 2005-07-29

基金项目: 科技部“十五”重大攻关项目(2002BA516A17-05)

作者简介: 刘鸿雁(1969~), 女, 博士, 副教授, 主要从事植物营养与环境研究, E-mail: Hongyan.L@163.com

各植被类型的主要植物区系组成如下: 常绿阔叶林有山毛榉科的刺果米槠 (*Castanopsis carlesiivar. spinulosa*)、栲树 (*C. fargesii*)、山茶科的四川大头茶 (*Gordonia sichuanensis*)、银木荷 (*Schima angentea*) 等; 针阔混交林主要由上述植物和马尾松 (*Coniferous*)、杉木 (*Fir*) 组成; 毛竹林主要有毛竹 (*Phyllostachys pubescens*)、草本如蝴蝶花 (*Iris japonica*)、四块瓦 (*Lysimachia paridiformis*) 等; 灌木林有乔木幼树、狗骨柴属 (*Diplospora*) 及梔子属 (*Gardenia*) 等灌木、草本如蕨类的里白属 (*Dicranopteris*)、瘤足蕨属 (*Plagiogyria*) 等; 裸地是裸露的土壤。各样地土壤均为三迭纪须家河组 (T_3Xi) 厚层石英砂岩风化发育的酸性黄壤。样地其它自然状况见表 1。

表 1 不同植被类型样地自然概况

Table 1 Outline of the sites of variable vegetations

植被 编号	植被 类型	地点	海拔 /m	林下调 落物厚 度/cm	土层厚 度/cm	占保护区 面积的 百分数/%
X1	针阔混交林	聚云峰	770	2.5	120	13.4
X2	常绿阔叶林	聚云峰	825	3.4	177	4.5
X3	毛竹林	小狮子峰	800	1.6	78	19.8
X4	灌木林	杉木园	700	3.0	153	< 1.0
X5	裸地	杉木园	700	0.0	150	< 1.0

1.2 径流场的设置和径流水样、土壤样品的采集

在比较典型的群落分布区域设置径流场, 面积为 $5m \times 20m$, 地表集流槽处于径流场下方; 地表集流槽下端 2 m 的墙体上留有过水孔, 在墙上做滤层, 地下径流通过水孔汇集在地下集流槽, 集流槽中间置一导管将径流引入观测房。每次降雨后立即采集径流水样, 在不同降雨时段取 3 次样作为重复, 及时进行分析测定。在裸地旁设置气象观测站, 并采集雨水样品。在 2003-06~2003-07, 有 5 次比较大的降雨过程可产生地表径流及地下径流, 分别采集大气降水、地表径流和地下径流样品进行研究。

在各径流场所属群落范围内采集混合土样, 根据土壤发生层次分腐殖质层(A)、淀积层(B)和母质层(C)分别采集土壤样品, 在各群落不同区域采集 4 个混合样品作为重复, 根据 Carter 提出的公式^[4]确定采样点数, 要达到的 95% 精确度, 每个混合土壤样品均为 26 个样点组成。

1.3 水样和土样分析项目及分析方法

水样: pH(玻璃电极法, GB6920-86), 氯化物(硝酸银滴定法, GB11896-89), 硝酸盐(酚二磺酸分光

光度法, GB7840-87), 凯氏氮(浓硫酸消煮-靛酚蓝比色法), 总磷(钼酸铵分光光度法, GB11893-89), 氨氮(靛酚蓝比色法), 硫酸盐(EDTA 间接络合滴定法), 钙、镁离子(EDTA 滴定法, GB 7476-87), 钾、钠(火焰光度计法), 电导率(电导仪法)^[5]。

土样: 土壤 PH(水浸提-酸度计法, GB 7859-87), 全氮(硫酸-混合加速剂消煮-蒸馏法, GB 7848-87), 全磷(氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法, GB 7852-87), 全钾(氢氧化钠熔融-火焰光度计法, GB 7854-87), 碱解氮(碱解扩散法, GB7849-87), 氯离子(水浸提, 硝酸银滴定法), 有效硫(磷酸盐浸提, EDTA 间接络合滴定法), 交换性盐基总量(NH_4OAc 交换法, GB7863-87), 交换性钾、钠(NH_4OAc 交换-火焰光度法, GB7866-87), 交换性钙、镁(NH_4OAc 交换-原子吸收分光光度法, GB7865-87), 氨氮(KCl 浸提-靛酚蓝比色法), 硝酸盐(饱和 $CaSO_4$ 溶液浸提, 酚二磺酸分光光度法, GB7840-87)^[6]。

2 结果与讨论

2.1 大气降水及径流水化学组成特征

雨水和径流水样品测定结果见表 2。统计结果显示 5 次降雨过程之间的标准差较大, 这与田大伦^[7]等人的研究结果是一致的。首先, 降雨量不同大气降水的水质有差异^[8], 雨量大小及雨水 pH 的差异直接影响雨水对植被、凋落物及土壤的淋溶强度, 因此, 重复之间化学成分浓度存在一定的差异。

从雨水的化学特征来看, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 离子排序为 $Ca^{2+} > K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > NH_4^+$, 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$ 。不同植被覆盖条件下地表径流化学成分分布特征与雨水相同, 地下径流也基本相似, 只存在较小差异, 如常绿阔叶林阳离子表现为 $Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > NH_4^+$, 这可能与常绿阔叶林下针叶树种少, Na^+ 的含量低有关。可见, 在森林生态系统内, 不同土壤-植物系统对降雨水化学成分的影响效应基本一致。

2.2 地表径流中化学成分的迁移量及迁移系数

以地表径流或地下径流的元素输出含量与降水的元素输入含量之比值(迁移系数)等于 1, 或以输出含量与输入含量之差值(迁移量)等于 0 为平衡界限, 迁移量为正值, 径流中化学成分含量增加, 与雨水相比为内贮型化学成分, 反之为淋失迁移型^[7], 综合评价地表径流和地下径流化学成分的迁移特征, 计算结果见表 3。

表 2 雨水、地表径流及地下径流中化学成分浓度的平均值及标准差

Table 2 Mean value and standard deviation of concentrations of chemical compositions in rainfall surface runoff and groundwater

项目	pH	NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	电导率 /μS·cm ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	凯氏 N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹
雨水	5.89±0.45	0.12±0.05	6.38±3.02	0.63±0.29	1.34±0.95	0.73±0.82	40.8±19.4	2.41±2.31	0.50±0.70	6.28±1.78	0.38±0.18	0.02±0.03
地 表 径 流	X16.72±0.33	0.31±0.43	14.8±4.70	0.89±0.32	7.98±3.29	1.56±1.12	79.9±34.9	1.91±1.87	0.00±0.00	8.07±4.08	0.46±0.18	0.02±0.02
	X26.82±0.38	0.51±0.53	15.0±4.84	1.04±0.51	8.18±2.55	1.88±0.48	91.2±26.7	1.76±1.78	1.17±1.78	7.59±9.16	0.74±0.21	0.01±0.01
	X36.95±0.40	0.09±0.13	21.0±4.14	0.96±0.81	6.20±5.20	1.04±0.82	114±19.1	1.75±1.45	0.89±1.40	12.9±10.55	0.49±0.15	0.02±0.02
	X46.78±0.28	0.01±0.02	9.46±3.73	0.64±0.25	10.1±6.13	2.64±1.96	82.4±39.3	1.53±1.35	0.60±0.99	8.24±10.40	0.40±0.40	0.00±0.00
	X56.86±0.33	0.06±0.04	10.2±2.40	0.55±0.30	10.3±4.24	2.34±1.56	90.9±23.7	2.18±2.16	0.14±0.31	4.37±4.12	0.31±0.27	0.02±0.02
地 下 径 流	X16.46±0.48	0.00±0.01	35.3±16.20	2.15±0.67	5.18±4.34	3.28±2.93	157±34.20	7.36±5.53	0.58±0.54	22.6±19.99	0.19±0.12	0.01±0.01
	X26.50±0.33	0.01±0.00	24.6±2.83	2.05±0.47	2.28±0.74	1.32±0.73	130±12.14	4.80±2.97	1.26±1.20	17.8±8.74	0.20±0.12	0.00±0.00
	X36.96±0.35	0.01±0.01	35.3±6.32	3.18±4.54	2.40±0.75	1.64±1.16	163±7.58	2.77±2.89	2.01±3.54	14.7±14.74	0.37±0.07	0.01±0.01
	X46.69±0.42	0.02±0.04	43.6±9.48	1.76±0.68	4.63±4.55	1.68±0.95	195±39.97	2.91±2.85	0.92±1.31	23.1±22.94	0.20±0.14	0.00±0.00
	X56.59±0.39	0.02±0.03	18.5±5.50	2.16±1.05	2.61±0.72	1.36±0.99	121±40.21	1.81±3.19	0.90±1.28	11.2±8.29	0.24±0.21	0.03±0.06

表 3 地表径流、地下径流化学成分相对雨水浓度的迁移量和迁移系数

Table 3 Migration amount and coefficient of surface runoff and groundwater compared with rainfall

项目		NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	凯氏 N	TP	
地表径流	迁移量 /mg•L ⁻¹	X1	0.19	8.42	0.26	6.64	0.83	- 0.50	- 0.50	1.79	0.08	0.00
		X2	0.39	8.58	0.41	6.84	1.15	- 0.65	0.67	1.31	0.36	- 0.01
		X3	- 0.03	14.6	0.33	4.86	0.31	- 0.66	0.39	6.62	0.11	0.00
		X4	- 0.11	3.08	0.01	8.80	1.91	- 0.88	0.10	1.96	0.02	- 0.02
		X5	- 0.06	3.87	- 0.08	8.94	1.61	- 0.23	- 0.36	- 1.91	- 0.07	0.00
	迁移系数	X1	2.58	2.32	1.41	5.96	2.14	0.79	0.00	1.29	1.21	1.00
		X2	4.25	2.34	1.65	6.10	2.58	0.73	2.34	1.21	1.95	0.50
		X3	0.75	3.29	1.52	4.63	1.42	0.73	1.78	2.05	1.29	1.00
		X4	0.08	1.48	1.02	7.57	3.62	0.63	1.20	1.31	1.05	0.00
		X5	0.50	1.61	0.87	7.67	3.21	0.90	0.28	0.70	0.82	1.00
地下径流	迁移量 /mg•L ⁻¹	X1	- 0.12	29.0	1.52	3.84	2.55	4.95	0.08	16.4	- 0.19	- 0.01
		X2	- 0.11	18.2	1.42	0.94	0.59	2.39	0.76	11.6	- 0.18	- 0.02
		X3	- 0.11	29.0	2.55	1.06	0.91	0.36	1.51	8.44	- 0.01	- 0.01
		X4	- 0.10	37.3	1.13	3.29	0.95	0.50	0.42	16.8	- 0.18	- 0.02
		X5	- 0.10	12.2	1.53	1.27	0.63	- 0.60	0.40	4.95	- 0.14	0.01
	迁移系数	X1	0.00	5.54	3.41	3.87	4.49	3.05	1.16	3.61	0.50	0.50
		X2	0.08	3.85	3.25	1.70	1.81	1.99	2.52	2.84	0.53	0.00
		X3	0.08	5.54	5.05	1.79	2.25	1.15	4.02	2.34	0.97	0.50
		X4	0.17	6.84	2.79	3.46	2.30	1.21	1.84	3.68	0.53	0.00
		X5	0.17	2.90	3.43	1.95	1.86	0.75	1.80	1.79	0.63	1.50

不同植被类型地表径流中 4 种阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)的迁移量均为正值,为内贮型化学成分,说明雨水对植物凋落物及表层土壤有强烈的淋溶作用,从电导率的变化可看出这种趋势,地表径流的电导率分别为 79.92, 91.16, 114.46, 82.42 和 90.94 μS·cm⁻¹,显著高于大气降水的电导率 40.84 μS·cm⁻¹。由于不同植被类型下植物及土壤性质不同,径流中盐基离子浓度也有差异。Ca²⁺的迁移系数排列为 X3>X2>X1>X5>X4,毛竹林的迁移量最大,灌木林最小;K⁺的迁移系数为 X5>X4>X2>X1>X3,以裸地的迁移量最大,毛竹林的最小;镁

和钠离子的迁移系数也有各自的特点。

NH₄⁺的变化体现了植被成分及其分解对水体的影响,常绿阔叶林和针阔混交林的凋落物量大,且易于分解,产生的 NH₄⁺较多,NH₄⁺的淋溶使迁移量呈正值,而毛竹林、灌木林和裸地产生的 NH₄⁺较少,迁移量为负值,迁移系数排列为 X2>X1>X3>X5>X4。

在大气降水形成地表径流的过程中,水体 pH 增加的趋势非常明显,大气降水 pH 为 5.89,而地表径流 pH 在 6.72~6.95 之间,pH 变化主要受水体中盐基离子浓度的影响,尤其是 Ca²⁺浓度,地表径

流中 Ca^{2+} 浓度是雨水的 2~3 倍, 直接导致了水体 pH 上升.

除裸地的迁移量为 -1.91 mg/L 外, 其它地表径流中 SO_4^{2-} 的迁移量呈正值, 说明从植物及其凋落物中淋溶的 SO_4^{2-} 较多, 并容易随水流失, 为内贮型化学成分, SO_4^{2-} 的迁移系数排列为 $\text{X3} > \text{X4} > \text{X1} > \text{X2} > \text{X5}$, 毛竹林迁移量最大; 水体中 Cl^- 迁移量有 2 个为正值, 3 个为负值, 移动趋势不明显; 径流中 NO_3^- 迁移量均为负值, 与雨水相比为淋失迁移型化学成分, 迁移系数为 $\text{X5} > \text{X1} > \text{X2} > \text{X3} > \text{X4}$.

大气降水凯氏氮浓度为 0.36 mg/L , 地表径流为 $0.40 \sim 0.74 \text{ mg/L}$ (裸地为 0.31 mg/L), 凯氏氮的增加主要是由于可溶性有机物增加的结果, 迁移系数排列为 $\text{X2} > \text{X3} > \text{X1} > \text{X4} > \text{X5}$, 由于常绿阔叶林凋落物量大, 容易分解, 可溶性有机物相对较多, 全 N 的迁移量最大, 裸地正相反, 没有植物凋落物的分解, 有机物较少, 凯氏氮量也小, 迁移量为负值; 总磷的迁移量为 0 或负值, 灌木林迁移量是 0, 在地表径流中没有磷的输出, 属淋失迁移型化学成分, 迁移系数为 $\text{X1} = \text{X3} = \text{X5} > \text{X2} > \text{X4}$.

2.3 地下径流中化学成分的迁移量及迁移系数

与雨水相比, 地下径流中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 增加, 增加的幅度显著高于地表径流, 表明大气降水在形成地下径流的过程中对土壤中盐基离子的淋溶作用更加强烈, 这种淋溶作用是亚热带地区高温多雨的气候因素决定的^[9]. Ca^{2+} 的迁移系数排列为 $\text{X4} > \text{X3} > \text{X1} > \text{X2} > \text{X5}$; Na^+ 为 $\text{X1} > \text{X4} > \text{X3} > \text{X5} > \text{X2}$; Mg^{2+} 为 $\text{X3} > \text{X5} > \text{X1} > \text{X2} > \text{X4}$. K^+ 增加的幅度小于地表径流, 说明降雨主要对植物及其凋落物的 K^+ 产生淋溶, 对土壤中 K^+ 的淋溶作用相对较弱, 迁移系数排列为 $\text{X1} > \text{X4} > \text{X5} > \text{X3} > \text{X2}$, 以针阔混交林的迁移量最大, 毛竹林的最小.

地下径流 pH 增加的趋势与地表径流相似, 但由于作用过程不同, pH 增加的幅度小于地表径流, 普遍处于 6.50~6.69 之间, 地下径流 pH 的升高也与水体中盐基离子浓度增加有关, 径流 Ca^{2+} 浓度是雨水浓度的 3~7 倍.

与地表径流不同, 地下径流中氮氮被土壤胶体吸附的作用非常明显, 浓度显著降低, 随径流的输出量小, 甚至难以被检测出来. NH_4^+ 的迁移系数表现为 $\text{X5} > \text{X4} > \text{X3} > \text{X2} > \text{X1}$, 均为淋失迁移型化学成分.

地下径流中 SO_4^{2-} 迁移量均为正值, 并远大于地表径流, 为内贮型化学成分, 迁移系数排列为 $\text{X4} > \text{X1} > \text{X2} > \text{X3} > \text{X5}$, 由于没有植被的覆盖, 裸地淋

溶出的 SO_4^{2-} 最少; 与地表径流相反, 地下径流中 NO_3^- 迁移量都是正值, 说明土壤-植物系统中的 NO_3^- 很容易下渗, 并随着地下径流流失, 迁移系数排列为 $\text{X1} > \text{X2} > \text{X4} > \text{X3} > \text{X5}$, 常绿阔叶林和针阔混交林凋落物量最大, 产生的 NO_3^- 多, 流失量也大, 裸地产生的 NO_3^- 少, 流失量相对较小; Cl^- 的迁移量也为正值, 容易流失, 迁移系数排列为 $\text{X3} > \text{X2} > \text{X5} > \text{X4} > \text{X1}$.

地下径流中凯氏 N 的迁移量均呈负值, 迁移系数排列为 $\text{X3} > \text{X5} > \text{X4} = \text{X2} > \text{X1}$. 总磷的变化趋势不明显, 只有裸地迁移量为正值, 针阔混交林和毛竹林为负值, 常绿阔叶林和灌木林为 0, 径流中没有总磷的输出, 迁移系数为 $\text{X5} > \text{X1} = \text{X3} > \text{X2} = \text{X4}$.

在大气降水、地表径流和地下径流水样检测中, PO_4^{3-} 均未检出, 因此没有进行统计分析, 总磷检出量甚微或未检出, 说明磷在土壤中是较难移动的元素. 径流中磷的流失与 Al 和 Fe 的含量有关, 一般不以可溶态流失, 而主要以颗粒态随着土壤侵蚀一起流失; 另外, 径流水体中凯氏氮及三氮含量也极低 (试验过程中 NO_2^- 均未检出). 森林生态系统能有效防止土壤侵蚀, 同时也减少了氮和磷的流失, 而农业生态系统中存在大量氮和磷的流失, 加剧了水体的富营养化. 与农业生态系统相比, 森林生态系统具有净化水体和防止环境污染的生态功能.

2.4 土壤化学性质对地表径流化学成分的影响

选择与径流水化学成分相关的土壤化学性质进行分析, 结果见表 4. 对不同植被类型径流水化学成分与各植被土壤化学性质进行相关分析. 因为地表径流只与土壤 A 层 (腐殖质层) 相互作用, 因此对不同植被条件下地表径流的化学成分与土壤 A 层的化学特性进行相关分析, 相关系数见表 5.

从表 5 可看出, 地表径流 pH 与土壤 pH 的相关系数为 0.551 0, 表明土壤对水体 pH 有一定的影响; 从氮的分布来看, 由于氮素主要富集在土壤表层, 所以水体的 NH_4^+ 和 NO_3^- 与土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 之间呈现正相关的关系, 说明地表径流中各种形态的氮素在一定程度上受到土壤表层氮素形态及数量的影响. 此外, 水体 Cl^- 及 SO_4^{2-} 也与土壤相应指标之间呈正相关的关系.

水体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 与土壤交换性的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 呈负相关关系, 因此, 地表径流电导率与土壤交换性盐基总量之间相关系数也为负值. 从数值上可看出, 水体中盐基离子的浓度较低, 如灌

木林地表径流 Ca^{2+} 为 9.46 mg/L , 而土壤交换性 Ca^{2+} 为 76 mg/kg , 常绿阔叶林地地表径流 K^{+} 浓度为 7.98 mg/L , 土壤交换性 K^{+} 为 124 mg/kg , 两者之间相差几倍至十几倍, 说明土壤中的盐基离子主要以交换态被胶体吸附, 水溶性盐基较少, 相应地, 对径流中盐基离子浓度的影响较小. 除土壤外, 地表径流化学成分还受到植物及其凋落物分解的影响, 因此, 径流水化学成分与土壤相关指标之间的 r 均未

达到显著水平.

2.5 土壤剖面化学性质对地下径流水化学成分的影响

如表 4 所示, 与地表径流相比, 地下径流受土壤剖面性质的影响较大. 首先, 径流水 pH 受到土壤 pH 的强烈影响, 在 A 层, r 为 0.9357 , 达到极显著水平; 在 B 层, r 为 0.8370 , 达到显著水平; 在 C 层, r 为 0.6211 , 关系明显.

表 4 土壤剖面化学性质¹⁾

Table 4 Forest soil properties in different layers

植 土 被 壤 层	pH	全 N / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 P / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 K / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换性 Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换性 Mg^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换性 K^{+} / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换性 Na^{+} / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cl^- / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效 S / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换性 盐基总量 / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
X1 A	4.03	1.63	0.19	10.9	45	3.8	106	30	149.1	27.8	4.75	5.95	15.8	4.12
X2	3.91	2.41	0.25	10.5	37	3.5	124	18	206.7	23.1	2.88	5.70	17.4	3.97
X3	4.59	1.29	0.32	10.1	39	5.2	95	15	107.3	7.50	2.00	7.95	13.7	3.92
X4	4.41	1.86	0.22	11.6	76	3.2	89	13	190.2	14.7	2.25	3.60	17.3	5.39
X5	4.07	2.12	0.24	11.9	112	8.6	97	48	185.1	19.7	3.25	4.25	12.5	10.7
X1 B	4.52	0.45	0.11	9.9	31	1.8	62	10	28.09	4.50	2.75	2.90	7.59	2.74
X2	4.34	0.71	0.16	11.2	21	1.6	75	15	69.87	6.55	0.00	2.40	6.64	2.03
X3	5.31	0.39	0.17	11.6	26	1.8	55	15	27.37	2.85	0.50	3.80	4.21	2.27
X4	4.58	0.33	0.13	12.2	22	1.4	70	15	23.05	3.60	0.25	2.65	7.58	2.02
X5	4.95	0.69	0.17	10.8	78	4.7	71	49	78.50	3.43	2.10	2.95	6.36	6.56
X1 C	4.85	0.11	0.07	10.8	22	1.2	18	15	6.90	3.00	1.50	1.65	2.07	1.90
X2	4.57	0.13	0.05	12.2	21	1.1	21	15	7.20	4.05	0.25	1.20	1.89	1.80
X3	5.65	0.09	0.06	10.2	15	1.1	39	15	5.76	2.25	0.38	1.55	1.84	1.57
X4	4.83	0.12	0.15	12.3	12	1.0	25	10	9.36	3.00	1.00	1.10	1.52	1.17
X5	5.67	0.13	0.15	11.9	39	1.7	16	20	10.40	3.14	1.50	1.30	1.47	3.00

1) A 为腐殖质层, B 为淀积层, C 为母质层

表 5 土壤剖面性质与径流水化学性质的相关关系

Table 5 Correlation coefficients between soil profile properties and runoff chemical compositions

径流水化学成分	pH	NH_4^+	NH_4^+	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	电导率
土壤化学性质	pH	NH_4^+	碱解氮	NO_3^-	Cl^-	有效 S	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}	交换性 K^{+}	交换性 Na^{+}	交换性 盐基总量
地表径流 A 层	0.5510	0.6411	0.2995	0.5209	0.3384	0.0818	-0.7569	-0.5539	-0.2440	0.3491	-0.1388
地下径流 A 层	0.9357 [*]	-0.4557	0.4396	0.7633	0.7109	0.8211 [*]	-0.3590	0.2505	-0.3074	-0.3577	-0.4605
B 层	0.8370 [*]	-0.3417	0.3161	0.3838	0.6652	0.6738	-0.7031	-0.0103	-0.1260	-0.2015	-0.6197
C 层	0.6211	0.0242	0.7765	0.1384	0.1088	0.3626	-0.8577 [*]	-0.0259	-0.2838	-0.1396	-0.8364 [*]

其次, 地下径流中阳离子与阴离子浓度受土壤剖面影响的效应表现出相反的趋势. 径流中阳离子浓度与土壤交换性阳离子之间普遍呈负相关关系, 而径流阴离子与土壤阴离子之间均呈正相关关系, 并且在不同剖面表现出相同的规律. 这一现象是与土壤特性密切相关的, 土壤胶体具有吸附阳离子的功能, 土壤阳离子交换量越大, 吸附的阳离子就越多, 并且不容易流失, 这种规律在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 和 NH_4^+ 的相关系数上都有所体现, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 和 NH_4^+ 与土壤各层次的交换性离

子之间普遍呈负相关的关系, 地下径流电导率与土壤交换性盐基总量之间的相关系数也证明了这种规律性, 其 r 分别为 -0.4605 (A 层)、 -0.6197 (B 层) 和 -0.8364 (C 层).

阴离子带负电荷, 不被土壤胶体吸附, 容易随水移动, 因此, 径流水阴离子与土壤阴离子之间表现出正相关关系, 在不同的土壤剖面上 NO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 都表现出相同的规律, 地下径流的 NO_3^- 与土壤的 NO_3^- 相关系数分别为 0.7633 (A 层), 0.3838 (B 层), 0.1384 (C 层); SO_4^{2-} 与 A 层土壤有效硫

含量的 r 为 0.821 1, 达到显著水平, B 层为 0.673 8, C 层为 0.362 6; Cl^- 相关系数也表现出 A 层 > B 层 > C 层的趋势, 这与土壤 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在剖面上的浓度分布相同, 说明地下径流中的 NO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 明显受到土壤不同层次离子浓度的影响。

综上所述, 大气降水在形成地下径流的过程中, 水体中的化学成分变化直接受到土壤剖面性质的影响, 而地表径流受土壤化学特性的影响相对较小, 水体化学成分浓度与植物及其凋落物分解有很大关系。

在森林生态系统水文过程水质变化研究中, 有关林外雨、林内雨、树干流的研究较多, 这些研究能够较为准确地评价降雨对森林林冠层的淋溶强度。但森林植被具有明显的层次性, 除乔木层外, 灌木层、草本层和凋落物层对降雨水质也有较大的影响。大气降水在森林生态系统中主要以地表径流和地下径流的形态输出, 因此, 对地表径流和地下径流水化学成分变化研究可以全面了解植被、凋落物和土壤对大气降水水质的影响效应。本文以雨水为对照, 研究不同植被覆盖条件下地表径流和地下径流水化学成分的变化, 并对土壤特性与径流水化学特征进行相关性分析, 试图全面认识森林生态系统诸因子对水质的综合影响效应。在以后的研究中还需要长期的数据积累以及对降雨过程中水质的变化趋势作进一步深入研究。

3 结论

(1) 不同植被覆盖条件下地表径流和地下径流水化学特征与雨水基本相同, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, Ca^{2+} 浓度最高, 所占比例最大, 离子排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$; 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$, 说明径流水化学特征受雨水的影响较大, 不同植被类型对径流水化学成分的影响效应基本一致。

(2) 在雨水形成地表径流的水文学过程中, 对环境中的盐基离子产生淋溶作用, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等阳离子浓度增加, pH 上升的趋势非常明显, SO_4^{2-} 和 Cl^- 的浓度也增加, 与雨水相比为内贮型化学成分; NO_3^- 浓度降低, 为淋失迁移型。

(3) 地下径流化学成分的变化趋势与地表径流基本相似, 但也表现出一定的差异, 如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在地下径流中的迁移量和迁移系数都远大于地表径流, 说明雨水对土壤离子的淋溶作用更加强烈。由于土壤系统和植物系统中氮的形态和数量存在较大差异, NH_4^+ 、凯氏氮和 NO_3^- 在地下径流中的变化趋势与地表径流相反, NH_4^+ 和凯氏 N 浓度降低, NO_3^- 浓度增加。除裸地外, 地下径流中总磷浓度均小于雨水, 为淋失迁移型。

(4) 地表径流化学成分与土壤腐殖质层相关化学性质存在一定的相关关系, 但没有达到显著水平; 径流水化学特征与植物及其凋落物分解有很大关系。地下径流的化学成分与土壤剖面化学成分的相关系数在 A、B、C 层都表现出相同的规律, 其中径流水 pH 受到土壤 pH 的强烈影响; 受土壤胶体吸附的影响, 地下径流中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 等阳离子与不同层次的土壤交换性阳离子之间普遍呈负相关关系; 而阴离子容易随水流失, 地下径流阴离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^-) 与土壤阴离子之间均呈现正相关的关系。可见, 土壤特性对地下径流化学特征有较大的影响。

参考文献:

- [1] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 鼎湖山森林地表水水质状况分析[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1373~1379.
- [2] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 6: 14~23.
- [3] 刘玉成, 杜道林, 岳泉, 等. 缙云山森林次生演替中优势种群的特性与生态因子的关联度分析[J]. 植物生态学报, 1994, 18(3): 283~289.
- [4] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业出版社, 1996. 1~10.
- [5] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 鲍士旦主编. 土壤农业化学分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 12.
- [7] 田大伦, 项文化, 杨晚华. 第 2 代杉木幼林生态系统水化学特征[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 859~866.
- [8] 冯延文, 冯宗炜, 小仓纪雄, 等. 北京郊外森林小流域的大气降水的水质及其变化过程[J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 112~119.
- [9] 西南农业大学主编. 土壤学, 南方本[M]. (第二版). 北京: 农业出版社, 1996.