

秦岭火地塘森林水质的季节性变化特征

张胜利^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 杨凌 712100)

摘要: 在秦岭火地塘林区选择 2 个闭合小流域及 2 个支沟集水区, 对流域出口径流及支沟集水区溪流水 pH 值及水化学成分进行了 8 a 的测试, 采用机理分析方法, 就森林水质的季节性变化特征进行了研究. 结果表明, 林区径流 pH 值在 7.1 ~ 8.4 之间, 冬、春季较高, 夏、秋季较低, 总体上水呈弱碱性; NO_3^- 浓度春季和初夏较高, NH_4^+ 冬季和初春较高, PO_4^{3-} 冬季与夏季较高; K^+ 浓度春、秋季较高, Na^+ 浓度则 9 月最大, 8 月最小; Ca^{2+} 浓度以 6 月和 10 月较高, 年内变化范围 $19.4 \sim 44.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 则 3 月较高, 年内变化范围 $2.18 \sim 5.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Cd 浓度随季节的变化以 1 ~ 4 月较高, Pb 浓度 12、1 月较高, 但 Cd、Pb 均以秋季较低, 年内变化范围分别为 $0.019 \sim 0.326 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.217 \sim 3.886 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Mn 浓度 5、12 月较高, Fe 浓度春季较高, Zn 则以 3、8 月较高. 林区径流水质属 I 类, 相对而言, 水质随季节的变化以秋季较好, 冬、春季较差.

关键词: 秦岭火地塘; 森林; 水质

中图分类号: X824; S718.56 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0316-06

Seasonal Water Quality Changes in the Huoditang Forest Region of the Qinling Mountain Range

ZHANG Sheng-li^{1, 2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. National Forest Ecosystem Research Station in the Qinling Mountains of Shaanxi Province, Yangling 712100, China)

Abstract: This study was conducted in the Huoditang forest region of Shaanxi Province. The region is located in the Qinling Mountain range. We collected stream water samples at the outlets of two small watersheds and two tributaries each month across an eight year period. The samples were analyzed for pH and water chemistry. Changes in pH and water chemistry with season were studied by using contributing factor analyses. The results of the study showed that stream water was slightly alkaline, with the pH ranging from 7.1 to 8.4 throughout the year. Stream water pH was higher in winter and spring and lower in summer and autumn. The NO_3^- concentrations in stream water were highest in spring and early summer, while NH_4^+ concentrations were highest in winter and early spring, and PO_4^{3-} concentrations were highest in winter and summer. K^+ concentrations were highest in spring. Na^+ concentrations were highest in September and lowest in August. Ca^{2+} concentrations in stream water were highest in June and September and ranged from $19.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $44.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the year. Mg^{2+} concentrations were highest in March and ranged from $2.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $5.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the year. Cd concentrations were highest from January to April, while Pb concentrations were highest in November and January. The concentration of both Cd and Pb was lowest in autumn. The concentration of Cd ranged from $0.019 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.326 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and the concentration of Pb ranged from $0.217 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $3.886 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Mn concentrations were highest in May and December, while Fe concentrations were highest in spring and Zn concentrations were highest in March and August. According to environmental quality standards for surface water, stream water quality in the Huoditang forest region met the requirements for water quality standard I. Water quality was best in autumn and poorest in winter and spring.

Key words: Huoditang region in the Qinling Mountain range; forest; water quality

秦岭山脉是我国南北气候的天然分界线, 森林植被不仅在水平地带上具有独特的过渡性特征, 而且在海拔梯度上也有明晰的垂直带谱. 同时, 秦岭南坡还是国家战略性重点工程——南水北调中线工程的重要水源区, 近 1/4 面积为天然林覆盖. 森林与水的关系历来是人们对森林的生态功能及其环境效益的研究热点^[1~5], 森林对水质的影响更是环境保护部门十分关心的问题. 多年来, 森林与水质研究的重点主要集中于森林生态系统对水质的作用方面^[6~12], 关于森林水质季节性变化方面的研究还较少, 而这又是饮用水水源区管理部门迫切需要了解

的问题. 秦岭南坡天然林基本分布在海拔 1 300 m 以上的中山地带. 因此, 本研究以该地带中部火地塘林区为典型, 采用机理分析的方法, 就森林水质的季节性变化特征进行探讨, 旨在丰富我国森林水质方面的内容, 并为南水北调中线工程取水地——丹江口水库的管理提供水质方面的参考.

收稿日期: 2007-06-22; 修订日期: 2007-10-24

基金项目: 西北农林科技大学校长基金项目(08080215); 国家林业局重点科研项目(2001-04)

作者简介: 张胜利(1965 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为森林水文, E-mail: victory6515@sina.com

1 试验区概况

火地塘林区(33°25′~33°29′N, 108°25′~108°30′E)位于陕西省宁陕县境内,属汉江(水量占丹江口水库入库水量的60%以上)中上游支流子午河水系。林区面积22.25 km²,海拔1 470~2 473 m,年平均气温8~12℃,多年平均降水量1 130 mm,且多集中于7~9月。林区土壤类型主要为山地棕壤、山地暗棕壤和山地草甸土,平均厚度50 cm左右,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。现有森林是原生植被在20世纪60、70年代主伐后恢复起来的天然次生林,大体上分为3个亚带,即松栎林亚带,海拔1 400~1 800 m;松桦林亚带,海拔1 800~2 200 m;云、冷杉针阔叶混交林亚带,海拔2 200~2 500 m。火地塘林区森林覆盖率93.8%,郁闭度在0.9以上。主要成林树种有:锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*Pinus armandii*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、青扦(*Picea wilsonii*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、山杨(*Populus davidiana*)等。

2 研究方法

2.1 试验方案

试验选择在火地塘林区2个相对较大的闭合小流域——火地沟流域和板桥沟流域(图1)进行。同时,为与流域范围内结果相互印证,还选择火地沟流域1、2支沟集水区布设试验。通过对年内不同季节流域出口径流和集水区出口溪流水水化学成分的测试分析,了解森林水质随季节的变化特征。

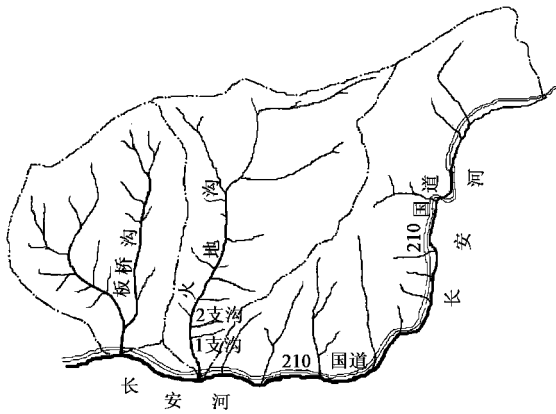


图1 试验地流域水系示意
Fig.1 Experimental watersheds

采伐,1998年后禁伐;板桥沟流域面积526 hm²,20世纪60年代开始封护,森林植被较好。1、2支沟集水区面积分别为8.6 hm²和7.2 hm²,为相似集水区。

2.2 水样采集与水质测试

采样与水质测试工作始于1997年(板桥沟、2支沟始于1998年),2004年结束,时间长达8 a。冬季因水质、水量变化较小,加之1、2支沟时常出现断流情况,水样采集次数较少。夏季气候过于干旱时,1、2支沟也会出现断流。流域出口径流与支沟沟口溪流水采样工作同步进行。单样一次采集约500 mL,采后24 h内送实验室,0℃以下保存。

水质共测试了13个项目,其中pH值采用电位法测定,NO₃⁻采用酚二磺酸比色测定,NH₄⁺采用苯酚-次氯酸盐比色测定,PO₄³⁻采用钼蓝比色测定,K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Zn、Fe、Mn采用等离子发射光谱测定,Pb、Cd采用石墨炉原子吸收分光光度计测定。

2.3 数据处理

8 a间,共采集水样144个。径流pH月平均值及各化学成分月平均浓度为水样测试结果按月归并后求得,2月份因交通困难而空缺。试验地径流PO₄³⁻浓度很低,许多水样低于0.000 1 mg·L⁻¹。本研究将PO₄³⁻浓度低于0.000 1 mg·L⁻¹的测试结果以0.000 1 mg·L⁻¹处理,未检测出的按0计。

为与国家标准相一致,本文水中重金属含量以元素浓度的形式表示,下文水中铁、锌含量表示形式与此相同。

3 结果与分析

3.1 pH值

支沟溪流水和流域出口径流pH值在7.1~8.4之间,水呈弱碱性。pH值随季节变化,大致呈“~”形状(图2),冬、春季较高,夏、秋季较低,但均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定,即pH值在6.5~8.5范围内。

水的pH值与水的化学成分有关,而沟道径流的化学成分主要是降水与生物、土壤、岩石接触、发生分解交换作用形成^[13]。冬、春季径流系土壤水和裂隙水补给形成,流量小,加之秦岭地区属碱性岩浆岩和变质岩地区,冬季冻融破坏对岩土的风化作用剧烈,故冬、春季径流pH值较高。夏秋季节,物理风化作用相对较弱,又为雨季,温湿条件适宜枯枝落叶分解,分解时产生的腐殖酸随壤中流进入溪流水,最终导致径流pH值降低。

火地沟流域面积729 hm²,20世纪60年代开始

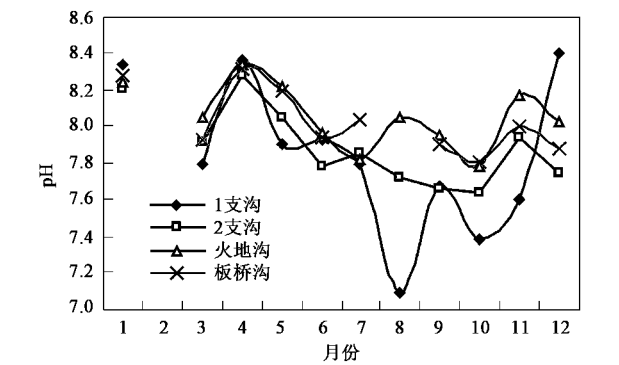


图 2 径流 pH 值随月份变化
Fig.2 Monthly changes of stream water pH

溪流水 pH 值随季节变化的标准差,2 支沟较 1 支沟小(见表 1),说明 2 支沟溪流水 pH 值变化比较平稳.1、2 支沟相邻,自然条件等各方面情况相似,但 1 支沟沟道内有大量的土石堆积物,2 支沟沟道底部为基岩.土石堆积物比表面积大,更易风化,故 1 支沟溪流水 pH 值冬、春季较高.1 支沟沟道堆积物的存在,也导致其沟底比降较低,1、2 支沟沟底比降分别为 11.1% 和 12.8%. 沟底比降较低,则枯枝落叶易于聚集,分解时会产生较多腐殖酸,故夏秋季节 1 支沟溪流水 pH 值较低.流域(集水区)面积的大小也会对径流 pH 值的变化程度产生影响.火地沟流域面积较板桥沟大,其出口径流 pH 值标准差较

表 1 水化学成分月平均浓度及其标准差

Table 1 Monthly means and standard deviations of stream water chemical concentrations														
水样	统计参数	pH	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PO_4^{3-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Na^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mg^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cd / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Pb / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Mn / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Fe / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1 支沟	平均值	7.85	2.891	0.160	0.021 2	1.665	1.097	24.48	2.595	0.052	0.788	0.001 8	0.022 7	0.016 5
	标准差	0.411	1.085	0.084	0.020 5	0.259	0.220	4.99	0.305	0.035	0.352	0.001 6	0.008 3	0.007 5
2 支沟	平均值	7.90	3.807	0.205	0.034 6	2.013	0.999	28.67	2.648	0.060	1.301	0.003 4	0.024 7	0.018 0
	标准差	0.215	1.383	0.151	0.027 3	0.325	0.314	4.94	0.414	0.089	0.952	0.003 4	0.009 8	0.010 2
火地沟	平均值	8.06	0.723	0.198	0.060 9	1.162	0.803	34.35	4.691	0.040	1.274	0.001 0	0.023 0	0.019 8
	标准差	0.175	0.551	0.237	0.098 6	0.143	0.182	4.60	0.300	0.020	0.707	0.000 7	0.006 6	0.010 4
板桥沟	平均值	8.03	1.939	0.200	0.077 5	1.471	1.145	33.35	3.533	0.047	1.130	0.000 8	0.017 6	0.023 2
	标准差	0.178	0.750	0.180	0.091 9	0.172	0.233	4.55	0.311	0.043	1.041	0.000 6	0.004 2	0.012 2

小(表 1),pH 值随季节的变化较为平稳.同样,流域面积较支沟集水区面积大,其出口径流 pH 值随季节的变化较支沟溪流水平稳.

3.2 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-}

NO_3^- 浓度随季节变化存在 2 个高峰,分别在 3、4 月和 6、7 月(图 3).径流中 NO_3^- 主要来源于枯枝落叶和有机质中 NO_3^- 的淋溶^[14].3、4 月 NO_3^- 浓度之所以较高,是因为融雪水淋溶了整个冬季枯枝落叶分解产生的 NO_3^- .其后,林木发芽,植物生长对 N 的需求增加^[15],吸收了一部分 NO_3^- ,从而使径流中 NO_3^- 浓度降低.6 月份,温湿条件利于枯枝落叶分解,形成了较多可被淋溶的 NO_3^- ^[16],加之降雨量较小,仅占 5~10 月降水总量的 12% 左右,故径流中 NO_3^- 浓度较高.7 月份,径流 NO_3^- 浓度较高可能是由于土壤 B 层壤中流的滞后效应所致.8、9 月多阴雨连绵天气,产流量较大,降水的连续淋溶和稀释作用则共同导致径流 NO_3^- 浓度较低.

径流 NH_4^+ 浓度较低,均未超过 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. NH_4^+ 浓度峰值分别发生在冬季和初春,与径流 NO_3^- 浓度随季节的变化相似(图 3).枯枝落叶在森林

NH_4^+ 养分循环中起着十分重要的作用,植物吸收的 NH_4^+ 最终以枯枝落叶被淋溶的方式又返回土壤,森林土壤对 NH_4^+ 有较大的吸附调节作用^[14].冬季和初春径流 NH_4^+ 浓度较高则与降水量小和冬季前后降雪融化淋溶枯枝落叶中富集的 NH_4^+ 有关.1 支沟沟道中存在大量的土石堆积物,故 1 支沟溪流水 NH_4^+ 浓度较 2 支沟低 22%,且标准差最小(表 1);流域出口径流 NH_4^+ 浓度随季节的变化与溪流水基本一致,但前者变化幅度较大,这是因为火地沟、板桥沟流域水域与岩石裸露面积分别占流域面积 7.5% 与 18%,而 1、2 支沟集水区基本为森林土壤覆盖.上述结果再次说明森林土壤对 NH_4^+ 具有吸附调节作用.

水中 P 主要以 PO_4^{3-} 形式存在.径流 PO_4^{3-} 浓度随季节变化,以 7~9 月、12 月和 1 月份较高(图 3). PO_4^{3-} 主要来源于降雨对林冠和枯枝落叶层的淋溶,森林土壤则对 PO_4^{3-} 有吸附作用^[14].

森林土壤可自然地形成发达的层次,其中土壤表层(A 层)富含有机质,孔隙大,利于入渗.火地塘林区土壤稳渗率介于 $6.6\sim10.0\text{ mm/min}$ 之间,远大于有观测资料以来的最大雨强记录,故很难产生地

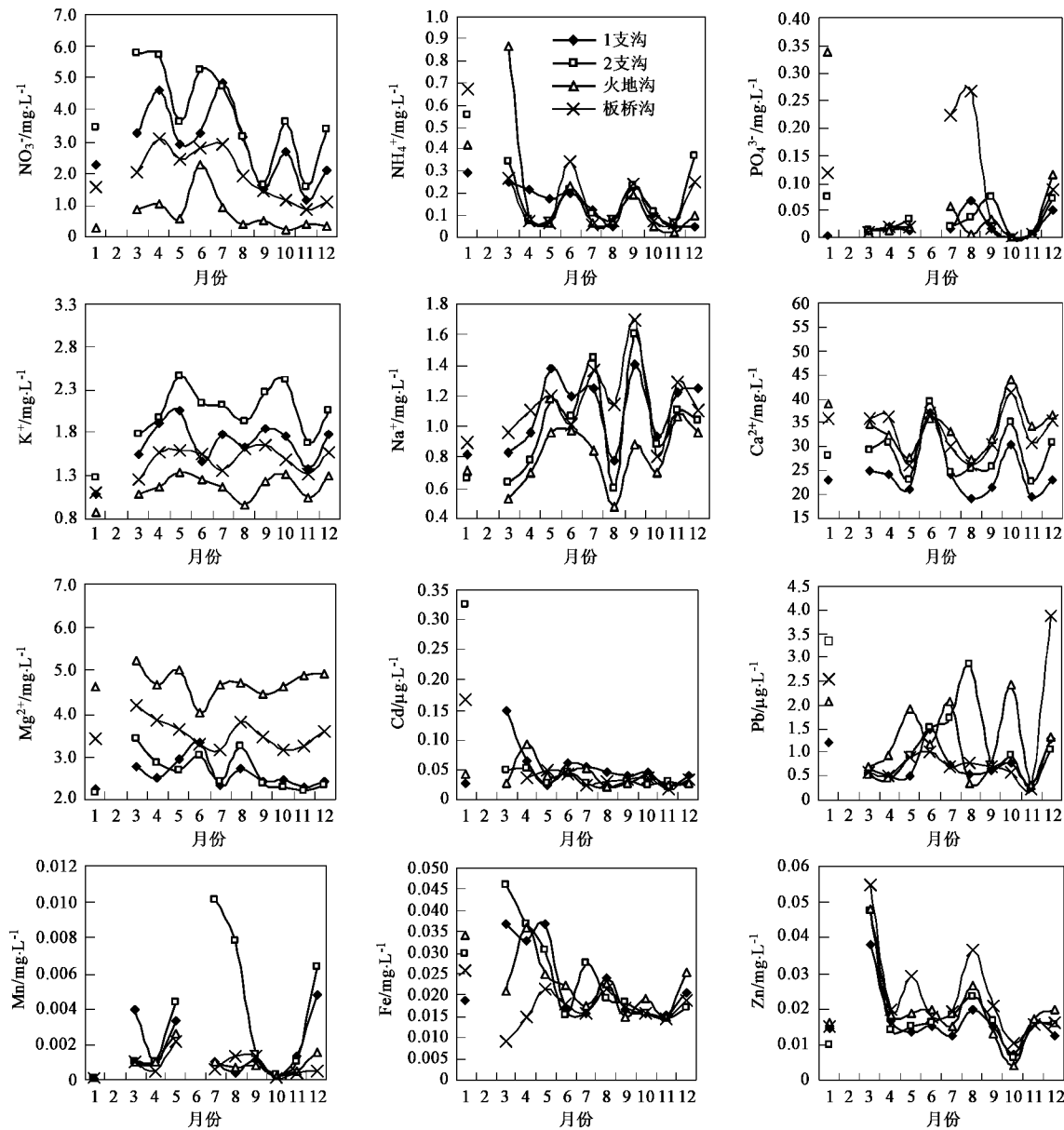


图 3 径流各化学成分浓度随季节变化

Fig.3 Monthly changes in stream water chemical concentrations

表径流,径流主要以壤中流的形式汇集.下层土壤(B层)有机质含量低,同时在重力作用下产生固结,土壤较为密实,透水性差.在试验地,土壤A、B层渗透系数分别为0.005 79 cm/s和0.001 684 cm/s,前者约为后者的3倍.根据降雨产流机制^[17],在沟道暴雨径流组成中,来源于土壤A层壤中流所占比例大,且流速较B层快,与土壤接触时间相对较短,对 PO_4^{3-} 的吸附不及B层充分,故土壤A层壤中流 PO_4^{3-} 浓度高.7~9月正是林区暴雨多发季节,暴雨次数占全年的62%,所以径流 PO_4^{3-} 浓度较高.10月

份左右多阴雨连绵天气,径流主要由B层壤中流汇集而成,故 PO_4^{3-} 浓度低.11月后,林区进入冬季,沟道径流主要由裂隙水和沿岩层表面流动的壤中流补给,而岩石可增加水中 PO_4^{3-} 浓度^[14],故12月、1月份径流 PO_4^{3-} 浓度较大.其后,径流 PO_4^{3-} 浓度较低则与降雪中 PO_4^{3-} 浓度较降雨低有关.根据检测,雨中 PO_4^{3-} 浓度为 $0.633\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,雪中仅 $0.137\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1支沟溪流水 PO_4^{3-} 浓度不但较2支沟低,而且变化平稳(表1),这是因为1支沟沟道内具有大量

的土石堆积物.流域出口径流 PO_4^{3-} 浓度较高(表1),是因为出口径流流程长,水与岩石接触时间长.

3.3 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

K^+ 浓度 5、9、10 月较高(图 3).枯枝落叶中 K 的淋溶是径流中 K^+ 的主要来源,森林土壤则对 K^+ 有吸附调节作用^[14].1 月是试验地最冷的月份,平均气温仅 -2.8°C ,枯枝落叶中的 K 难以被淋溶,因此径流 K^+ 浓度较低.此后,气温慢慢升高,融雪水逐渐淋溶枯枝落叶在整个冬季分解富积的可溶性 K 盐,故 3、4 月径流 K^+ 浓度呈上升趋势.5 月,气温进一步升高,枯枝落叶分解加快,形成的可溶性 K 盐较多,加之降雨稀少,径流 K^+ 浓度高.9、10 月,树木落叶,淋溶导致径流 K^+ 浓度达到另一个峰值.

Na^+ 浓度以 9 月最高,8 月最低(图 3).林冠层和枯枝落叶层对降水中的 Na^+ 均有一定的吸附作用,径流中的 Na^+ 则主要来源于森林土壤^[14].A 层土壤渗透性强,所以其中可溶性 Na 盐的淋溶较 B 层充分.8 月,林区降雨量大且多暴雨.根据 1996 ~ 2004 年降雨记录,8 月平均降雨量 163.5 mm,占 5 ~ 10 月降水量的 24.53%,大雨以上降水发生的次数占 5 ~ 10 月的 25.5%.暴雨径流中,A 层壤中流所占比例增大,故 8 月径流 Na^+ 浓度最低.9 月,阴雨天较多,壤中流多产生于 B 层土壤,故径流 Na^+ 浓度最高.10 月,林木落叶,枯枝落叶对 Na^+ 的吸附导致径流 Na^+ 浓度略有降低.4、5 月, Na^+ 浓度高与土壤解冻、风化后向水中释放更多的 Na^+ 有关.

Ca^{2+} 浓度在所有测试项目中最高,其随季节变化以 6 月和 10 月最高,其他各月变化不明显(图 3). Ca^{2+} 溶解量大小与水中游离态 CO_2 浓度有很大关系^[18,19]. CO_2 与难溶于水的 CaCO_3 反应生成易溶于水的 $\text{Ca}(\text{HCO})_2$,最终导致径流溶解岩石碳酸盐和对结晶岩进行风化作用的能力增强.问题的关键在于 6、10 月是否是水中 CO_2 浓度较高的月份.9 月底 10 月初是试验地林木大量落叶的时间,气温在 $6 \sim 20^\circ\text{C}$ 之间,早晚 8 时相对湿度一般在 90% 以上,温湿条件适宜于枯枝落叶分解.枯枝落叶在分解过程中会释放出大量 CO_2 气体,易使壤中流 CO_2 浓度升高,而试验地径流主要由壤中流汇集而成.6 月份气温高,降水量也较大,上一年度尚未分解的枯枝落叶在合适的温湿条件下迅速分解,也使壤中流 CO_2 浓度增大.所以,径流 Ca^{2+} 浓度在 6、10 月较高.

Mg^{2+} 浓度 3 月较高(图 3).径流中 Mg^{2+} 主要来源于基岩中含 Mg 矿物的溶解^[14].3 月份正是冰雪消

融、土壤解冻的时间,冬季冻融破坏对岩石的风化作用使融雪水易于溶解 Mg 盐.另外,与降雨中 Mg^{2+} 浓度 $0.325 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 比较,降雪中的浓度高,为 $1.301 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.正是这两者的共同作用,导致 Mg^{2+} 浓度在 3 月份较高.

3.4 重金属元素 Cd、Pb、Mn

Cd、Pb 属对人体有毒有害的重金属元素,其浓度高低对水质有着十分重要的影响,在水中的理想浓度为 0^[20].国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定: Cd 不得超过 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb 不得超过 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mn 不得超过 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Cd 浓度随季节的变化,1 ~ 4 月较高,其它月份变化则不明显(图 3).1 ~ 4 月,径流主要由“旧水”和融雪水形成,而试验地雪中 Cd 平均浓度为 $9.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,是雨中平均浓度的 10.77 倍,故当积雪消融形成径流时,Cd 浓度较高.尽管 1 ~ 4 月径流中 Cd 浓度较高,但仅为雪中的 1/60 ~ 1/170,说明森林生态系统对降水输入的 Cd 有明显的净化调节作用.

Pb 浓度随季节的变化,各取样点差异较大(图 3).但总体而言,12 月、1 月径流浓度均相对较高,这是因为雪中 Pb 浓度较高.根据测定,雪中 Pb 浓度为 $17.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而降雨中仅 $7.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.火地塘林区 11 月到来年 3 月为降雪的季节,11、12 月尚有一定地温,降雪融化后,部分缓慢形成溪流水,导致水中 Pb 浓度较高.但 Pb 浓度并未如 Cd 浓度在 3、4 月也较高,则与土壤对 Pb 的吸附、解吸或含 Pb 矿物的溶解有关.降水 pH 值降低时,会促进土壤 Pb 的释放,还可能影响含铅矿物的溶解^[21].试验地林区 12 月降雪 pH 为 5.98,1 月则为 7.62,正是 1 月 pH 值的升高使得 3、4 月径流 Pb 浓度并未如 Cd 浓度一样较高.

林木生长期,板桥沟流域出口径流中 Pb 浓度不但较火地沟流域低而且变化平稳,但在林木落叶后,则与火地沟流域差异较小(图 3),说明林木的叶在净化、调节水中 Pb 方面有着十分重要的作用.同时,也进一步说明流域森林植被良好,其对水中 Pb 的阻减能力强.

林区径流 Mn 浓度很低,甚至难以检测出来.1 支沟溪流水 Mn 浓度最高也不过 $0.0048 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2 支沟最高也仅 $0.0101 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远低于生活饮用水卫生标准.因此,Mn 对水质影响较小.

径流 Mn 浓度随季节的变化,以 5 月和 12 月较高(图 3).Mn 主要来源于大气降水捕获的尘埃^[14],4、5 月与 11、12 月降水次数少,气候干燥,大气中 Mn 的积累量较大,故降水中 Mn 浓度高.根据测试,11、

12月降水中Mn浓度分别为 $0.0451\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.0517\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而属雨季的7~9这3个月,降水中Mn浓度仅为 0.0088 、 0.0173 和 $0.0054\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.所以,5月和12月径流Mn浓度相对较高.

3.5 元素Fe、Zn

溪流水Fe浓度冬、春季较高(图3).Fe主要来源于岩石矿物^[14].冬、春季风化作用剧烈,兼之降水稀少,故溪流水Fe浓度较高.但其仍远低于生活饮用水卫生标准规定的 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,难以对水质产生不良影响,相反,还对人体有益.

流域出口径流Fe浓度随季节的变化与溪流水相似,只不过由于其集水面积较支沟集水区大,平均海拔也较高,Fe浓度随季节的变化表现出一定的滞后性,尤其是板桥沟流域,林木茂密,阴坡面积所占比例大,冰雪消融的时间推迟,Fe浓度的滞后效应更明显.

微量的Zn对人体是有益的,但并非愈高愈好.生活饮用水卫生标准规定Zn浓度不得超过 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.试验地径流Zn浓度远低于标准(表1,图3).径流中Zn主要来源于大气降水,岩石和土壤中亦有少量Zn溶解其中,但林冠层和枯枝落叶层均对降水中的Zn有吸附作用,尤其是林冠层^[14].试验地降水Zn平均浓度为 $1.487\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降水通过林冠层后,浓度仅为 $0.0111\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.Zn浓度3月较高可能与冰雪消融溶解岩土风化物中的Zn有关;8月,降水量大且频繁,林冠层吸附的Zn易达到饱和,从而导致其吸附能力暂时降低,故该月径流Zn浓度较高.

4 结论

(1)试验地林区径流pH值在7.1~8.4之间,属弱碱性水;pH值随季节变化大致呈“~”形状,冬、春季较高,夏、秋季较低.

(2)径流 NO_3^- 浓度春季和初夏较高, NH_4^+ 冬季和初春较高, PO_4^{3-} 冬季与夏季较高.

(3)径流 K^+ 浓度春、秋季较高, Na^+ 浓度9月最大,8月最小. Ca^{2+} 浓度在阳离子中最高,受枯枝落叶分解的影响,年内变化以6月和10月较高,变化范围 $19.4\sim44.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;其次为 Mg^{2+} , Mg^{2+} 浓度则春、夏较高,变化范围 $2.18\sim5.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(4)径流Cd浓度年内变化以1~4月较高,Pb浓度12、1月较高,但Pb、Cd均以秋季较低,年内变化范围分别为 $0.019\sim0.3265\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.217\sim3.886\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.Mn浓度5、12月较高,Fe浓度春季较高,Zn则以3、8月较高.

(5)根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)相关指标,试验地林区径流水质属Ⅰ类,相对而言,水质随季节的变化以秋季较好,冬、春季较差.

参考文献:

[1] 王兵,崔相慧,杨峰伟.从第21届国际林联世界大会看全球“森林与水”研究进展[J].世界林业研究,2001,14(5):1-7.

[2] 石培礼,李文华.森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J].自然资源学报,2001,16(5):481-487.

[3] Balestrini R, Tagliaferri A. Atmospheric deposition and canopy exchange process in alpine forest ecosystems (northern Italy) [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 6421-6433.

[4] 张志强,余新晓,赵玉涛,等.森林对水文过程影响研究进展[J].应用生态学报,2003,14(1):113-116.

[5] Asano Y, Uchida T. Quantifying the role of forest soil and bedrock in acid neutralization of surface water in steep hillslopes [J]. Environmental Pollution, 2005, 133: 467-480.

[6] 刘焯章,田大伦,周志华.杉木林生态系统净化水质功能的研究[J].林业科学,1995,31(3):193-199.

[7] 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.

[8] 余新晓,张志强,陈丽华,等.森林生态水文[M].北京:中国林业出版社,2004.18-22.

[9] 周光益.台风暴雨下热带林生态系统的水文学过程及水化学动态[J].生态学杂志,1998,17(增刊):1-8.

[10] 陈步峰,林明献,曾庆波,等.尖峰岭热带林集水区一组水质背景值及水质生态效应[J].林业科学研究,1998,11(3):231-236.

[11] 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.

[12] 张胜利,李靖,韩创举,等.南水北调中线工程水源林生态系统对水质的影响——以秦岭南坡中山地带火地塘林区为例[J].水科学进展,2006,17(4):559-565.

[13] 刘胤汉.秦岭水文地理[M].西安:陕西人民出版社,1983.141-142.

[14] 张胜利,李光录.秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应[J].生态学报,2007,27(5):1838-1844.

[15] Arheimer B, Andersson L, Lepistö A. Variation of nitrogen concentration in forest streams-influence of flow, seasonality and catchment characteristics [J]. Journal of Hydrology, 1996, 179: 281-304.

[16] Cauwet G, Sidorov I. The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution [J]. Marine Chemistry, 1996, 53: 211-227.

[17] 芮孝芳.关于降雨产流机制的几个问题的讨论[J].水利学报,1996,(9):22-26.

[18] 刘再华.碳酸盐岩岩溶作用对大气CO₂沉降的贡献[J].中国岩溶,2000,19(4):293-300.

[19] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995.52-53.

[20] 美国环境保护局(许宗仁译).水质评价标准[M].北京:中国建筑工业出版社,1981.31-109.

[21] 许中坚,刘广深.酸雨作用下红壤铅的释放特征与规律研究[J].农业环境科学学报,2005,24(6):109-113.