

DOI: 10.5846/stxb201407251505

赵晓静, 张胜利, 马国栋. 间伐强度对秦岭锐齿栎林冠层和枯落物层水化学效应的影响. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Zhao X J, Zhang S L, Ma G D. Effects of harvesting intensity on rain water chemistry of canopies and litters of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

间伐强度对秦岭锐齿栎林冠层和枯落物层水化学效应的影响

赵晓静^{1,3}, 张胜利^{1,2,*}, 马国栋¹

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

3 西藏自治区拉萨市曲水县聂当乡人民政府, 拉萨 850000

摘要: 本文将森林抚育间伐与森林水化学效应结合起来进行研究, 探讨小强度间伐对森林水质的影响。基于固定样地的研究方法, 在秦岭火地塘林区选择天然锐齿栎林, 设置抚育间伐强度分别为 5%、10%、15% 和 20% 的样地 and 对照样地, 定期采集大气降雨、林内雨和枯透水样品, 测定其水化学物质浓度, 采用对比分析的方法, 研究间伐强度对锐齿栎林内雨和枯透水化学效应的影响。结果表明: 间伐样地林内雨和枯透水的 pH 值均低于对照样地, 呈弱酸性, 在 5% 的间伐强度下, 森林冠层和枯落物层对大气降雨 pH 值的调升作用较显著, 随着间伐强度的增加, 调升幅度逐渐减小; 大气降雨对森林冠层和枯落物层中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 均具有淋溶作用, 尤其是对对照样地林内雨和枯透水中 SO_4^{2-} 的浓度增幅最显著, NO_3^- 次之, PO_4^{3-} 最不显著。间伐样地, 雨水对林冠层和枯落物层 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的淋溶作用均低于对照样地, 20% 的间伐强度最有利于净化雨水中的 SO_4^{2-} , 其在林内雨和枯透水中的含量较对照样地降幅最大, 间伐强度为 5% 时, 林内雨中 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的含量最低, 三者较对照样地的含量分别降低了 56.3%、46% 和 9.2%, 而枯透水中三者的降幅分别为 64.6%、45% 和 60.8%; 在 10% 的间伐强度下, 大气降雨对林冠层和枯落物层中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的淋溶作用最强, 三种离子中以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量增幅最为显著。林内雨中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量分别较对照样地增加了 89.9% 和 120%, 枯透水中二者较对照样地分别增加了 72.4% 和 40%, K^+ 的增幅相对不明显; 大气降雨中的 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 经过森林冠层和枯落物层的阻减, 其在林内雨和枯透水中的含量随着间伐强度的增加呈先增大后减小的趋势, 当间伐强度达到 20% 时, 三者含量明显降低。总体上, 20% 的间伐强度最有利于森林冠层及枯落物层对重金属 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的截留净化。

关键词: 秦岭锐齿栎林; 间伐强度; 水化学效应

Effects of harvesting intensity on rain water chemistry of canopies and litters of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountain

ZHAO Xiaojing^{1,3}, Zhang Shengli^{1,2,*}, Ma Guodong¹

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, China

3 Quxur County, LhaSa City, Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

Abstract: Harvest intensity is an important factor affecting water quality within a forest ecosystem. However, there has been little research on the effects of forest harvest on water quality. This study investigated the relationship between forest thinning and rainwater chemistry to quantify the effects of thinning intensity on forest water quality. Five experimental field plots with

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项 (201004036)

收稿日期: 2014-07-25; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: victory6515@sina.com

different thinning intensities (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) were established in a natural *Prunus armandii* forest of the Huoditang in Qinling Mountains. Rainwater samples were collected twice a month from June to September in 2012 and 2013. Water chemistry was measured to analyze the chemical effects of tending and thinning intensity on throughfall and litterthrough. Our results showed that thinning intensity had strong relationships with forest water chemistry. Rainwater was slightly acidic, and both the forest canopy and litter layer could reduce the pH value of rainwater, which decreased with increasing thinning intensity. The pH value was 0.48 in throughfall and 0.65 in litterthrough, which was highest in the plot with a thinning intensity of 5%. The concentrations of SO_4^{2-} , NO_3^- , and PO_4^{3-} increased as they passed through the forest ecosystem. Both the canopy and litter layers showed strong SO_4^{2-} purification in the plot with 20% thinning intensity. The increases of SO_4^{2-} concentration were statistically significant when compared with NO_3^- and PO_4^{3-} concentrations in the control plots, with fewer significant relationships in the plots with higher thinning intensities. The increase of SO_4^{2-} concentration was 4.422 mg/L in throughfall and 1.5 mg/L in litterthrough, compared to the concentration in the thinning plots. A sharp decline in NO_3^- , NH_4^+ , and PO_4^{3-} concentrations was observed in the 5% thinning plots, compared to concentrations within the control plot, with decreases of 56.3%, 46%, and 9.2% in throughfall and 64.6%, 45%, and 60.8% in litterthrough, respectively. The capability for K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} leaching in the plots with a thinning intensity of 10% was significantly greater than the leaching capability in the other plots. The increasing fractions of Ca^{2+} and Mg^{2+} were as high as 89.9% and 120%, respectively, in throughfall, whereas the rising fractions were only 7.24% and 40%, respectively in litterthrough. The increase of K^+ was not significant. The rainwater in throughfall and litterthrough contained little Pb^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} because of the interceptions of different forest layers. The thinning intensity was also strongly related to the changing tendency of heavy metal ions. Compared with the control field plot, the concentrations of Pb^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} were lower than those in the thinning plots. The plots with 20% thinning intensity showed the highest capability for intercepting and absorbing heavy metals. The concentrations of Pb^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} reduced by 10.6%, 22.4%, and 33.5%, respectively. Therefore, the canopy and litter layer in the plot with 20% thinning intensity had the strongest ability to intercept Pb^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} from rainwater.

Key Words: *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest; thinning intensity; water chemistry impact

水源涵养林具有涵养水源、保持水土、改善水质,为人们提供优质水源的功能^[1]。秦岭南坡中山地带既是秦巴山区水源涵养林的集中分布区,又是南水北调中线工程取水地—丹江口水库的水源地之一,因此,该地带的森林水质状况备受重视,成为研究热点^[2-4]。森林生长状况直接关系到森林水质的的好坏,近年来,随着秦岭周边环境污染的加剧,以及对森林资源的粗放式经营,该地带天然林普遍存在郁闭度过高、生长势弱,生态功能不高,生态效益不能充分发挥的问题。抚育间伐作为一种近自然的森林经营措施,对于解决这一问题具有重要的意义^[5]。目前,林业科学工作者们关于抚育间伐的研究较多,但主要集中在抚育间伐对森林空间结构优化以及森林更新和植物多样性的影响等方面^[6-8],而将抚育间伐与森林水化学效应结合起来研究的却很少,尤其是在秦岭林区,这一方面的研究几乎是空白。

目前,国外有部分研究认为采伐对森林水化学的影响较大,尤其是在采伐后的3—5年间^[9-10]。但也有研究表明抚育间伐对森林水化学效应的影响,因间伐强度、森林类型和立地条件的不同而异^[11],间伐强度与森林养分输出之间不存在线性关系,但可能存在一个间伐强度的阈值,低于这个阈值,养分的流失不显著^[12]。为进一步探讨间伐强度对森林水化学效应的影响,本文以秦岭火地塘天然锐齿栎林为研究对象,就间伐强度对森林林冠层和枯落物层水化学效应的影响进行研究,探讨抚育间伐对森林水质的影响,旨在为研究确定适合秦岭水源涵养林的抚育间伐强度及全面发挥秦岭水源涵养林的生态功能提供参考。

1 研究区域

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,地处秦岭南坡中部腹地。

海拔在 1 420—2 037m,山势陡峻,平均坡度在 30—35°。林区面积 22.25km²。地形复杂,境内主要河流为发源于平河梁的长安河,其次为火地沟、板桥沟和水井沟等沟溪。气候为暖温带湿润山地气候。年平均气温为 8.0℃;年平均降水量为 1130mm,多集中于 7—9 月,年蒸发量 800—950mm,湿润系数 1.022,平均相对湿度为 77.1%,无霜期 199d。这种雨热同期且与生长季节一致的气候条件,适宜于多种林木的生长发育。土壤类型主要为山地棕壤、暗棕壤和山地草甸土,土层平均厚度 50cm 左右,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。

火地塘林区属山地温带落叶阔叶林区域。研究样地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,在自然演替和人工抚育的共同作用下,经过 30 多年的恢复,林区景观格局基本上形成以华山松林、硬阔叶林和桦木林为主的次生森林景观格局。森林小流域处在动态的演替阶段。森林覆盖率较高,主要成林树种有锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、桦类 (*Betula*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、青扦 (*Picea wilsonii*)、巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 等。

按照陕西省立地条件分类系统划分,火地塘试验林场抚育作业区立地条件属秦岭南坡山地立地亚区 (C),秦岭南坡土石山地立地类型小区 (27)^[13]。火地塘林区森林植被、地形地貌、土壤和气候等具有秦岭南坡中山地带的典型特征,而该地带又是南水北调中线水源区天然林的主要分布区,因此火地塘林区具有较好的代表性。

2 研究方法

2.1 样地设置与样品采集

在秦岭火地塘林区,选择立地条件基本一致的锐齿栎林,在其内设置 5 块固定样地,样地大小均为 20m * 30m,分别为对照样地 (DZ,未间伐)和间伐强度为 5% (B1)、10% (B2)、15% (B3)、20% (B4) 的样地 (图 1)。由于样地间伐采取“去劣留优、去弱留强”的措施,伐除了“霸王树”和处于相对劣势的小径级材^[14],所以间伐后各样地林分特征,特别是平均胸径有差异。间伐后,各样地概况见表 1。

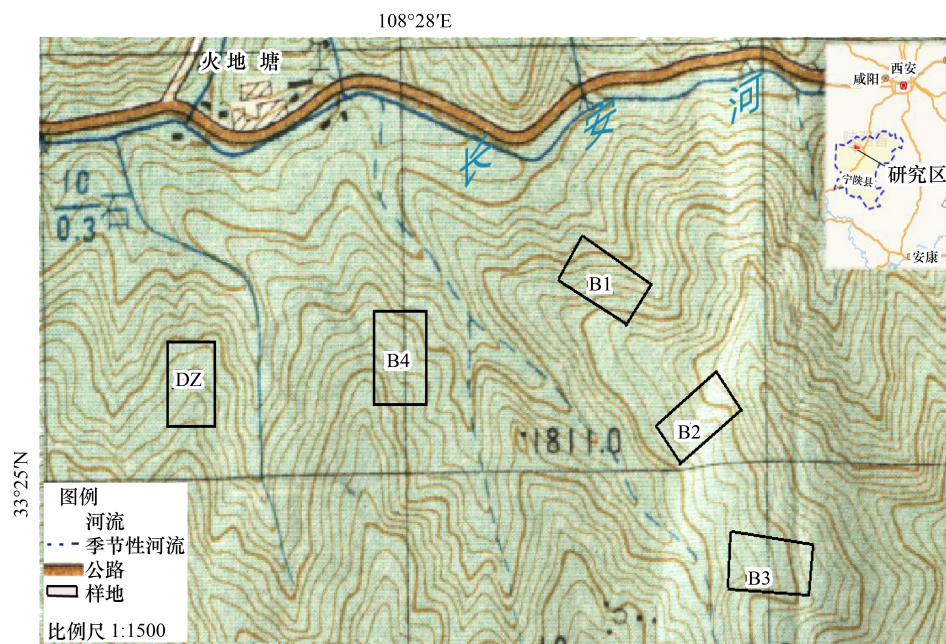


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the Study Area

火地塘林区降雨量超过 20mm 的降雨集中在 6—9 月份,因此采样时间为每年的 6—9 月份。本研究需要采集的水样类型为大气降雨 (林外雨) 和经过林冠层后形成的林内雨,以及经过枯落物层的枯透水。大气降

雨采集点在火地塘实验站,于空旷处分别放置塑料盆进行收集,雨后及时将各点收集的雨水混匀,取 500mL 作为检测水样。林内雨在各样地内采集,于标准样地内的坡面上按照上、中、下坡位分别布设 3 个聚氯乙烯塑料桶,桶的表面覆盖纱网,以防杂物进入桶内。雨后及时将各点收集的林内雨混合,每个样地取 500mL 作为检测水样。枯透水的采集方式同林内雨,另外,需在纱网表面铺设原状枯落物,取样时取上清液 500mL,置于塑料瓶中,贴上标签,置于 4℃ 的冰箱保存。样品分析前,先用 0.4mm 的聚碳酸酯膜进行过滤。

表 1 样地概况

Table 1 The basic situation of plots

样地 Plots	海拔 Altitude/ m	坡度 Slop	坡向 Slop aspect	平均胸径 Mean DBH/ cm	平均树高 Mean height/ m	胸高断面积 Basal area/ (m^2/hm^2)	郁闭度 Canopy closure	林分密度 Stand density/ (棵/ hm^2)
DZ	1590	20	半阴坡	15.72	14.36	25.40	85%	1501
B1	1640	37	阴坡	10.93	10.68	24.13	83%	1423
B2	1620	32	半阴坡	10.78	10.06	22.86	78%	1351
B3	1617	25	阴坡	15.57	16.27	21.59	75%	1276
B4	1600	29	阴坡	15.48	15.08	20.32	70%	1200

本研究采样时间为 2012、2013 年的雨季,两年内共采集水样 11 次,采集大气降雨、林内雨和枯透水系列水样共 128 个。

2.2 样品测试及数据处理

所有样品的测定方法均采用国颁标准^[15]。水样测试指标包括: pH、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的浓度。pH 用 pH S-9V 型酸度计(杭州高新电子有限公司)测定; NO_3^- 、 NH_4^+ 用流动分析仪测定; PO_4^{3-} 用钼酸铵分光光度法测定; SO_4^{2-} 用全自动化学分析仪测定;K、Ca、Mg 用火焰发射光度计测定;Cd、Pb 用石墨炉原子吸收法测定;Zn 用 JY38S 型高频电感耦合等离子体直读光谱仪(法国克梅福公司)测定。所有数据使用 Excel 2007 和 SPSS22.0 进行处理,取水化学指标各次检测数值的平均值做图,进行对比分析。

3 结果分析

3.1 不同层次水样 pH 值变化

各样地林内雨和枯透水的 pH 值在 6.18—6.61 之间,均呈弱酸性(图 2),但比同期监测到的大气降雨的 pH 值要高出 0.05—0.48,说明林冠层和枯枝落叶层对大气降雨的 pH 值均有调升作用。其中,林冠层对大气降雨 pH 的调升作用更为明显,这一方面是由于酸性降水对林冠层的淋溶,导致叶片组织内盐基离子与降水中 H^+ 发生置换作用,造成盐基离子脱洗和 pH 值上升;另一方面叶片中淋失的弱碱离子与降水中酸性离子发生中和反应,使酸性离子减少, pH 升高^[16]。枯枝落叶相对于新鲜枝叶生理活性降低,因此,对大气降雨 pH 值的调升作用较弱,主要是枯落物中有机质分解 N 的氨化过程会释放出 NH_4^+ ,与降水中酸性离子发生中和反应,使酸性离子减少,从而调升大气降水的 pH 值。

间伐样地林内雨的 pH 值均小于对照样地,且 pH 值随着间伐强度的增加而减小,对酸性降水的 pH 值调

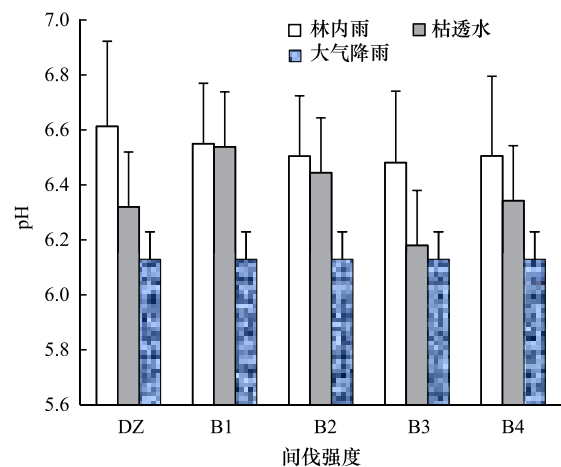


图 2 大气降雨及各样地林内雨和枯透水中 pH 值

Fig. 2 Variations of pH in rainwater throughfall and litter drainage

1. DZ 对照样地; 2. B1 5% 间伐强度; 3. B2 10% 间伐强度; 4. B3 15% 间伐强度; 5. B4 20% 间伐强度。

升作用减弱。通过差异显著性分析发现,B1 样地林内雨较大气降雨的差异性在 0.05 水平上达到显著差异($P < 0.05, N = 48$),而其它样地林内雨较大气降雨的差异性均不显著($P > 0.05, N = 48$)。这是由于低强度的间伐对森林郁闭度的影响较弱,随着间伐强度的增加,形成了采伐林窗,林冠层叶面积指数下降,对酸性降水的截留作用减弱,使得部分未经过冠层截留的雨水直接进入林内,导致林内雨 pH 值降低,但仍高于林外雨的 pH 值。当间伐强度达到 20% 时,林内雨 pH 值又出现上升趋势,这与采伐后林下喜光植被尤其是幼树和灌木等^[14]迅速增加,形成亚冠层,对雨水出现二次拦截作用,从而调升了降水的 pH 值。

枯透水的 pH 值变化与林内雨基本一致,以 5% 的间伐强度下,枯透水的 pH 值较大气降雨的增幅最大,达 0.65 个 pH 单位,达到显著差异($P < 0.05, N = 48$)。在间伐强度较小的情况下,枯透水的 pH 值均大于对照样地,随着间伐强度的增加,枯透水的 pH 值又出现显著下降,B3 样地枯透水的 pH 值显著减小,达到 6.18,接近大气降雨的 pH 值。这主要是由于间伐后,林下枯落物厚度减小,其分解产生的有机酸减少,导致枯透水的 pH 值较对照样地增大,随着间伐强度的增大,林内温度上升,有机质分解加快^[17],使得 pH 值又显著减小。B4 样地随着林内雨 pH 值的上升,枯透水的 pH 值也出现上升趋势。

3.2 不同层次水样中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 质量浓度变化

大气降水中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 对雨水酸化的贡献最大。但在研究期间,火地塘大气降水中的 SO_4^{2-} 质量浓度极少,基本可以忽略。通过林冠层后,林内雨中 SO_4^{2-} 质量浓度急剧增加,这与梁翠萍^[18] 等对秦岭锐齿栎林的研究一致,表明降雨对林木枝叶中的 SO_4^{2-} 具有淋溶作用。DZ 样地 SO_4^{2-} 质量浓度最大,达 4.422 mg/L (图 3),较大气降雨显著增加($P < 0.05, N = 48$),随着间伐强度的增加,这种差异性逐渐减弱, SO_4^{2-} 浓度逐渐减小。在 B4 样地,林内雨中 SO_4^{2-} 质量浓度降为 1.583 mg/L,比对照样地降低了 64%,说明淋溶作用随着间伐强度的增加而减弱。大气降水中的 SO_4^{2-} 主要来自陆源物质,由于滞留或吸附在林冠的干沉降物质被雨水冲刷淋洗使得 SO_4^{2-} 等阴离子在林内雨中浓度增加^[16],间伐降低叶面积指数,使得冠层截留的干沉降物质减少,导致雨水淋溶出的 SO_4^{2-} 减少。枯透水中 SO_4^{2-} 的质量浓度变化趋势与林内雨基本一致,但低于林内雨的质量浓度,尤其是 DZ 样地 SO_4^{2-} 的质量浓度下降最为显著,达 3 mg/L,说明枯落物层对 SO_4^{2-} 具有一定的吸附固定作用。由于对照样地林下枯落物相对厚度较大,对 SO_4^{2-} 的吸附固定作用强, SO_4^{2-} 的质量浓度降低了 61%;而其它间伐区,枯透水中 SO_4^{2-} 的质量浓度跟林内雨相比,变化不明显,降低幅度在 0.4 mg/L 左右,这主要是间伐使得林下枯落物层厚度减小所致^[17]。

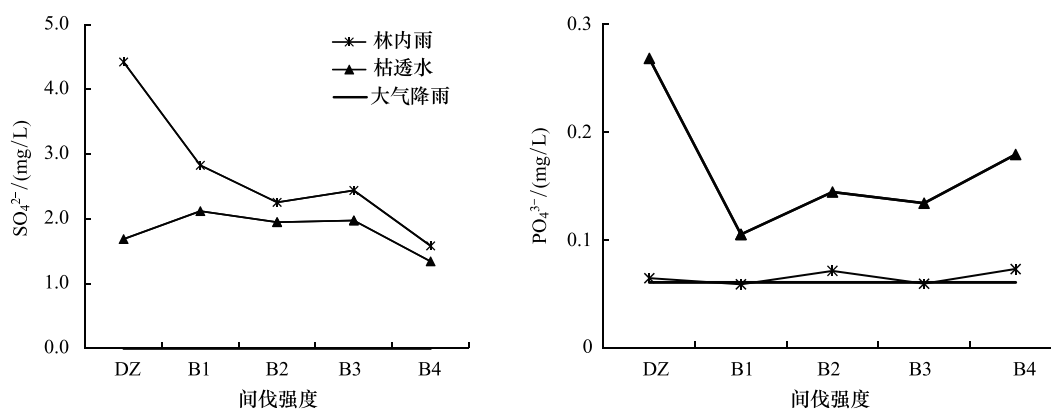


图 3 大气降雨及各样地林内雨和枯透水中 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的质量浓度

Fig. 3 Concentration of SO_4^{2-} and PO_4^{3-} in rainwater throughfall and litter drainage

1.DZ 对照样地;2.B1 5%间伐强度;3.B2 10%间伐强度;4.B3 15%间伐强度;5.B4 20%间伐强度.

森林生态系统中,P 元素的风化输入极少,主要靠降水输入。大气降水中的 PO_4^{3-} 质量浓度很低,仅为

0.061 mg/L, 经过林冠层和枯枝落叶层后, 雨水中 PO_4^{3-} 质量浓度均增加, 但林内雨 PO_4^{3-} 质量浓度的变化很小, 考虑到人为测试误差, 基本可以忽略不计。而枯透水中 PO_4^{3-} 质量浓度较林内雨有所增加, 但增幅不显著 ($P > 0.05$), 仅 0.04—0.2 mg/L, B1 样地降幅最显著。考虑到 PO_4^{3-} 主要在森林生态系统内部循环, 林木在生长过程中对 PO_4^{3-} 的吸收利用有限^[19], 当间伐强度低于 20% 时, 对林冠层和枯落物层的扰动很小^[12], 而由此所引起的 PO_4^{3-} 质量浓度的变化就更小。

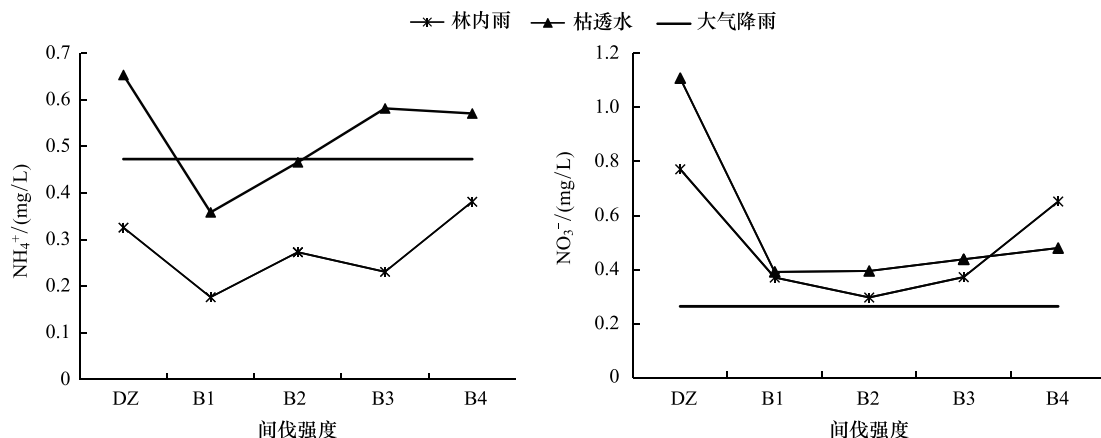


图 4 大气降雨及各样地林内雨和枯透水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 的质量浓度

Fig. 4 Concentration of NO_3^- and NH_4^+ in rainwater throughfall and litter drainage

1. DZ 对照样地; 2. B1 5% 间伐强度; 3. B2 10% 间伐强度; 4. B3 15% 间伐强度; 5. B4 20% 间伐强度。

研究时段内, 大气降雨中 NO_3^- 质量浓度为 0.264 mg/L, 经林冠层后, NO_3^- 质量浓度增加, 其变化趋势与 SO_4^{2-} 一致, 说明降雨对枝叶拦截的 NO_3^- 具有淋溶作用。由于 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的前体物 SO_2 和 NO_x 在大气中经常一起排放, 因此二者在通常情况下都表现出较好的相关性。本研究中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数为 0.682, 相关性较明显。DZ 样地 NO_3^- 质量浓度增幅最大, 为 0.5 mg/L, B2 样地 NO_3^- 质量浓度增幅最小, 仅为 0.03 mg/L。说明间伐后, 随着林木枝叶量的减少, 淋溶作用也有所减弱, 导致 NO_3^- 质量浓度降低, 但间伐强度达到一定的值, 反而会促进林木生长^[5], 使得降雨对枝叶中 NO_3^- 的淋溶量增大。枯透水中 NO_3^- 质量浓度明显要比林内雨高 (图 4), 增幅最高达 0.85 mg/L, 这主要是由于枯落物层微生物生理活动产生无机氮, 这些无机氮经林内雨的淋洗、溶解, 使 NO_3^- 质量浓度增加^[20]。总体来看, B1 样地的林内雨和枯透水中 NO_3^- 质量浓度增幅最小, 随着间伐强度的增加, 林内雨和枯透水中的 NO_3^- 质量浓度又出现上升趋势。

大气降雨中 NH_4^+ 质量浓度为 0.473 mg/L, 通过林冠层后, 其浓度降低, 说明锐齿栎林冠层对大气降雨中的 NH_4^+ 表现为吸附作用。林内雨和枯透水中 NH_4^+ 质量浓度的变化趋势与 NO_3^- 基本一致。同样, B1 样地 NH_4^+ 质量浓度最低。而且枯透水中 NH_4^+ 含量明显高于林内雨, 由于枯落物在森林 NH_4^+ -N 养分循环中起着十分重要的作用, 枯落物中有机质分解 N 的氨化反应过程会释放出 NH_4^+ , 导致枯透水中 NH_4^+ 质量浓度增加。

总体来看, 与对照样地相比, 林内雨和枯透水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度在 5% 的间伐强度下增幅最小, 这主要是由于小强度的间伐使得立木密度减小, 林冠层表现出的淋溶作用和吸收作用均减弱。随着间伐强度的增加, 林内雨和枯透水中的 NO_3^- 浓度又出现上升趋势, 这与森林郁闭度降低, 林内光照提高了温度, 促进了硝化反应有关^[17]。李华对东北红松林的研究也表明森林降水中郁闭度 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度峰值出现在郁闭度为 0.4—0.6 的范围内, 随着郁闭度增加, 二者浓度反而降低^[21]。

3.3 不同层次水样中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度变化

K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱性阳离子的浓度一方面影响水体的硬度; 另一方面可提升水体 pH 值^[22]。林内雨中营养元素含量明显高于大气降雨, 含量最大的是 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 这与詹鸿振^[23] 在小兴安岭原始林区的

研究一致。 Na^+ 为海盐离子,研究区远离海洋,因此,大气降水中 Na^+ 含量极低,在此不做考虑。

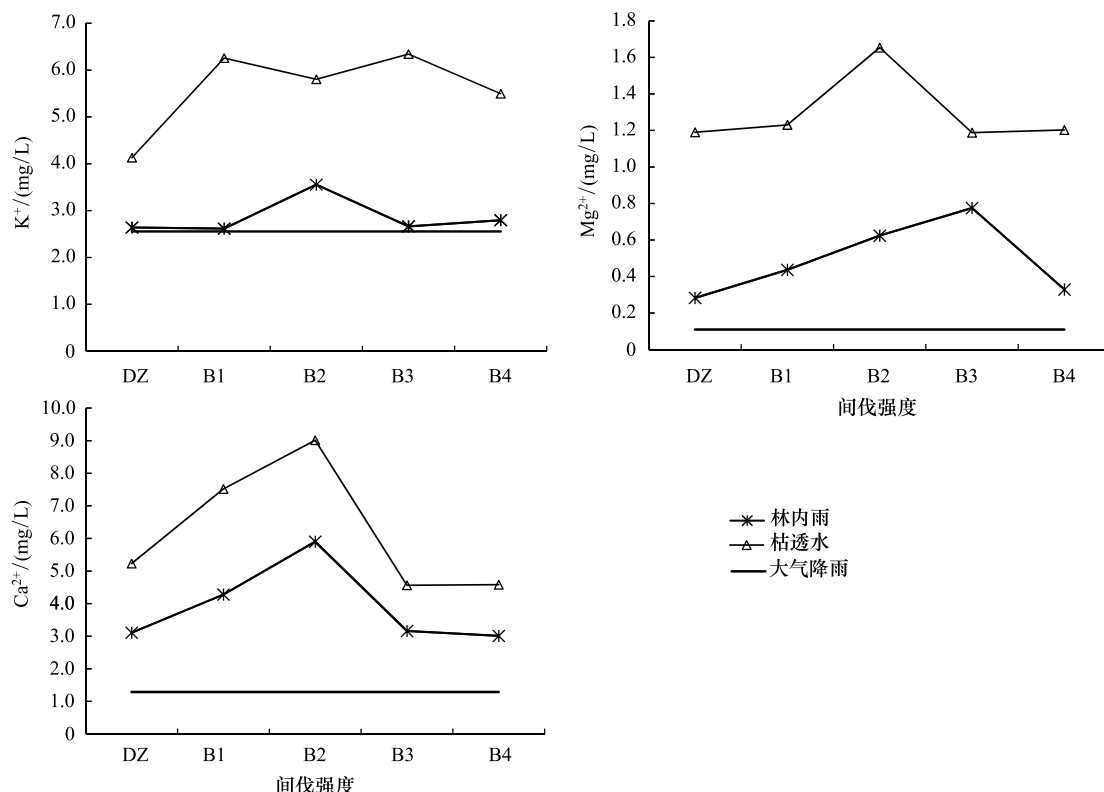


图5 大气降雨及各样地林内雨和枯透水中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的质量浓度

Fig. 5 Concentration of the base cations in rainwater throughfall and litter drainage

1.DZ 对照样地;2.B1 5%间伐强度;3.B2 10%间伐强度;4.B3 15%间伐强度;5.B4 20%间伐强度。

大气降雨中 K^+ 的质量浓度为2.555mg/L。通过林冠层后,林内雨中 K^+ 的质量浓度有所增加,说明林冠层中的 K^+ 被雨水淋溶析出,以B2样地的淋溶量最大,达1 mg/L,而其它样地林内雨中 K^+ 浓度基本接近大气降雨。大气降雨中 Ca^{2+} 质量浓度较低,为1.289 mg/L,经过林冠层的淋溶作用,林内雨中 Ca^{2+} 质量浓度急剧增加,其变化趋势与 K^+ 基本一致,呈先增加后减少的趋势(见图5)。与对照样地DZ相比, K^+ 和 Ca^{2+} 的浓度增幅在B2样地达到最大,分别增加了34.7%和89.9%,之后,随着间伐强度的增加,二者的浓度又急剧下降,B4样地林内雨中 K^+ 、 Ca^{2+} 的质量浓度接近DZ样地的浓度值。Burns等的研究表明,影响K和Ca浓度大幅升高的主要因素来源于大气降雨对林冠层和枯落物层的淋洗作用^[24],因此,当间伐强度增加到一定的值,减小了叶面积指数,使降雨对林冠层 K^+ 、 Ca^{2+} 的淋洗量减少。

Mg是一种难于溶解和淋溶的元素,因此大气降雨中的 Mg^{2+} 含量极少^[25],相应的,林内雨中 Mg^{2+} 的质量浓度也较低。对比各样地,随着间伐强度的增加,林内雨中的 Mg^{2+} 质量浓度先出现小幅增加,B3样地的浓度达到最大值,几乎是DZ样地浓度的3倍,但B4样地 Mg^{2+} 质量浓度又下降至接近DZ样地的浓度水平,这可能跟 Ca^{2+} 的浓度升高有关,通过对 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 进行相关性分析发现,二者呈显著负相关,相关系数为-0.710,主要是因为雨水中的钙盐会抑制枝叶对其它营养元素的淋溶反应^[26]。

K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 这三种离子在枯透水中的质量浓度均高于林内雨,主要是在形成枯透水的过程中,枯枝落叶经过微生物分解,其中的K、Ca和Mg再次被雨水淋洗出来的缘故^[19]。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的质量浓度变化趋势与林内雨完全一致。 K^+ 质量浓度基本呈先增后减的趋势,其浓度峰值出现在B3样地。说明间伐强度达到一定的值反而会促进雨水对枯枝落叶中K的淋溶。

3.4 不同层次水样中重金属离子 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 质量浓度变化

秦岭地区铅锌矿资源丰富,而且在自然环境中,Cd常与Zn、Zn-Pb矿相伴,尤其是秦岭陕西段铅锌矿场比

较集中,在采矿过程中产生含有 Pb、Zn、Cd 等的粉尘^[27],这些粉尘随大气运动远距离传输,最后通过干湿沉降的方式进入森林生态系统,对森林水质产生影响。Pb 和 Cd 是公认的有毒重金属元素,对森林植物的危害较大。

大气降雨中 Pb^{2+} 的质量浓度为 $1.132\mu\text{g/L}$,经过林冠层截留,各间伐样地林内雨中 Pb^{2+} 的质量浓度差异较大(图6),其中 B2 和 DZ 样地 Pb^{2+} 浓度基本接近大气降雨的值,B1 和 B4 样地 Pb^{2+} 质量浓度明显低于大气降雨的值,较大气降雨降低了 38.7%,B4 样地降幅最显著($P<0.05, N=48$)。说明间伐强度为 20%的样地,森林枝叶对 Pb^{2+} 以吸收累积作用为主,因此,林内雨中 Pb^{2+} 浓度低于大气降雨。而 B3 样地, Pb^{2+} 浓度较大气降雨增加了 $0.127\mu\text{g/L}$,表明,林冠层中的 Pb 被雨水淋溶析出,导致林内雨中 Pb^{2+} 浓度增加。枯透水中 Pb^{2+} 浓度变化趋势与林内雨一致,但浓度值要明显高于林内雨,主要是枯枝落叶中的 Pb 被进一步淋溶进入水体^[28],尤其是 B3 样地 Pb^{2+} 浓度增幅非常显著,较林内雨增大了近 3 倍,可能是由于 B3 样地林下地被层所受的扰动较大,雨水对枯枝落叶中的 Pb 淋溶作用较强。

大气降雨中 Pb^{2+} 的质量浓度为 $1.132\mu\text{g/L}$,经过林冠层截留,各间伐样地林内雨中 Pb^{2+} 的质量浓度差异较大(图6),其中 B2 和 DZ 样地 Pb^{2+} 浓度基本接近大气降雨的值,B1 和 B4 样地 Pb^{2+} 质量浓度明显低于大气降雨的值,较大气降雨降低了 38.7%,B4 样地降幅最显著($P<0.05, N=48$)。说明间伐强度为 20%的样地,森林枝叶对 Pb^{2+} 以吸收累积作用为主,因此,林内雨中 Pb^{2+} 浓度低于大气降雨。而 B3 样地, Pb^{2+} 浓度较大气降雨增加了 $0.127\mu\text{g/L}$,表明,林冠层中的 Pb 被雨水淋溶析出,导致林内雨中 Pb^{2+} 浓度增加。枯透水中 Pb^{2+} 浓度变化趋势与林内雨一致,但浓度值要明显高于林内雨,主要是枯枝落叶中的 Pb 被进一步淋溶进入水体^[28],尤其是 B3 样地 Pb^{2+} 浓度增幅非常显著,较林内雨增大了近 3 倍,可能是由于 B3 样地林下地被层所受的扰动较大,雨水对枯枝落叶中的 Pb 淋溶作用较强。

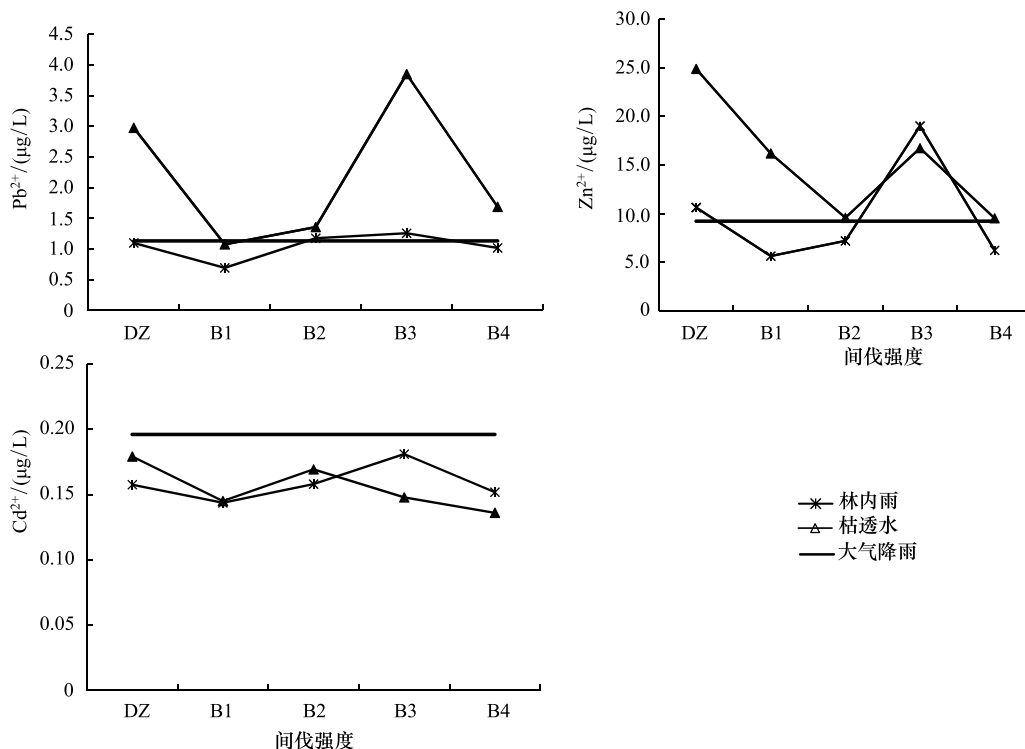


图6 大气降雨及各样地林内雨和枯透水中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的质量浓度

Fig. 6 Concentration of Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} in throughfall and litter drainage

1.DZ 对照样地;2.B1 5%间伐强度;3.B2 10%间伐强度;4.B3 15%间伐强度;5.B4 20%间伐强度.

Zn^{2+} 质量浓度变化趋势与 Pb^{2+} 基本一致。大气降雨中 Zn^{2+} 质量浓度为 $9.214\mu\text{g/L}$, 林内雨中 DZ 和 B3 样地的 Zn^{2+} 质量浓度略高于大气降雨的值, B3 样地的增幅更为显著, 增大了 1.06 倍。说明在不间伐或间伐强度为 15% 时, 大气降雨对林冠层的 Zn 表现为淋溶作用; 而 B1、B2 和 B4 样地 Zn^{2+} 质量浓度明显低于大气降雨, 表明在这三种间伐强度下, 林冠层对大气降雨输入的 Zn^{2+} 表现为吸附截留。枯透水中的 Zn^{2+} 质量浓度除 B3 样地外, 均高于林内雨的值, 主要是由于枯枝落叶中的 Zn^{2+} 被雨水淋溶向水中迁移, 导致枯透水 Zn^{2+} 质量浓度升高, 尤其是 DZ 样地, 增幅高达 $14.25\mu\text{g/L}$ 。随着间伐强度的增大, 枯透水中 Zn^{2+} 质量浓度基本上呈线性下降, B3 样地 Zn^{2+} 质量浓度又出现回升, 这可能跟 B3 样地林内雨中 Zn^{2+} 质量浓度过高有关。总体上, B4 样地林内雨和枯透水中 Zn^{2+} 质量浓度最低, 差异显著性水平达到 0.038, 主要是由于间伐强度大于 20%, 会促进森林亚冠层枝叶的生长^[29], 林冠层和亚冠层对 Zn^{2+} 的双重截留, 使得雨水中的 Zn^{2+} 趋于降低。

大气降雨所携带的 Cd^{2+} 质量浓度较低, 仅为 $0.196\mu\text{g/L}$, 经过林冠层的截留作用, 林内雨中 Cd^{2+} 质量浓度进一步降低, 对比各样地, 随着间伐强度的增加, Cd^{2+} 质量浓度出现小幅度的上下波动, 以 B4 样地的降幅最大, 降低了 $0.044\mu\text{g/L}$, 说明当间伐强度大于 15%, 林冠层对 Cd^{2+} 的吸附能力会逐渐变大。枯透水中 Cd^{2+} 的质量浓度随着林内雨的浓度变化而变化, 当间伐强度大于 10%, 枯透水中 Cd^{2+} 的质量浓度明显低于林内雨的值, 说明随着间伐强度的增加, 枯落物层对 Cd 有较强的截留过滤作用, 刘焯章^[30]等的研究也表明林下地被物层几乎能全部截留穿透水所携带的 Cd。

4 结论

森林抚育间伐通过改变森林结构, 间接影响森林水化学过程, 本文通过对比分析 0—20% 间伐强度下, 锐齿栎林冠层和枯落物层的水化学效应, 得出了一些初步结论:

(1) 锐齿栎林不同层次对酸性大气降雨的 pH 值均有不同程度的调升作用, 这种作用随着间伐强度的增加而减弱, 综合考虑林冠层和枯枝落叶层对降低雨水酸度的贡献, 以 5% 的间伐强度对 pH 值的调升作用较显著。

(2) 秦岭火地塘林区受周边硫酸型污染物沉降的影响较大^[31], 雨水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 质量浓度对酸性降雨的贡献最大。间伐样地, 林内雨和枯透水中 SO_4^{2-} 质量浓度随着间伐强度增加而降低, 均低于对照样地, 说明间伐有利于森林对酸性降雨中 SO_4^{2-} 的净化。N 和 P 含量超标是水体富营养化的主要诱因^[32], NO_3^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 这三种离子在 B1 样地内质量浓度最低, 说明 5% 的间伐强度下, 林内雨和枯透水中 N 和 P 的含量均较低, 对缓解研究区流域下游水体的富营养化威胁无疑是非常有利的。

(3) 锐齿栎林冠层对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均表现出淋溶作用, 10% 间伐强度样地内的质量浓度值最高。表明在 10% 的间伐强度下, 大气降雨对林冠层和枯落物层中这三种盐基离子的淋溶作用最强, 能给林地带来较多的营养元素。

(4) 与对照样地相比, 间伐后林内雨和枯透水中 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 三种离子的质量浓度均有所下降。其中, 5% 和 20% 间伐强度样地的林冠层和枯落物层对大气降雨中 Pb^{2+} 的截留净化作用最强, 而 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 在 20% 的间伐强度下的质量浓度最小。总体上来说, 20% 的间伐强度, 最有利于森林对重金属的截留固定。

由于缺乏长期的定位观测, 本研究仅仅针对间伐后短期内的数据进行分析, 加之样地布设及采样频率目前尚无统一标准, 这使得研究结果差异性较大, 因此本文对秦岭锐齿栎林间伐与水质的研究只是初步探讨, 对于揭示森林间伐与水化学的深层机理和规律尚显不足, 还需要在以后做系统研究, 进一步揭示森林间伐对森林水化学效应的影响机理。

参考文献 (References):

- [1] 施立新, 余新晓, 马钦彦. 国内外森林与水质研究综述. 生态学杂志, 2000, 19(3): 52-56.
- [2] 赵欣, 张中旺, 刘超, 谢先军. 南水北调中线工程水源区的环境评价与预测. 安全与环境工程, 2003, (4): 5-8, 12-12.

- [3] 张胜利. 南水北调中线水源林水质年际变化及趋势——以秦岭火地塘天然林为例. 林业科学, 2008, 44(2): 15-22.
- [4] 张巧明, 王得祥, 龚明贵, 张丽楠. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质. 水土保持学报, 2011, 25(5): 69-73.
- [5] 李荣, 何景峰, 张文辉, 周建云. 近自然经营间伐对辽东栎林植物组成及林木更新的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, (7): 83-91.
- [6] Aubert M, Alard D, Bureau F. Diversity of plant assemblages in managed temperate forests: a case study in Normandy(France). Forest Ecology and Management, 2003, 175(1/3): 321-337.
- [7] Ge Z M, Kellomäki S, Peltola H, Zhou X, Wang K Y, Väisänen H. Effects of varying thinning regimes on carbon uptake, total stem wood growth, and timber production in Norway spruce (*Picea abies*) stands in southern Finland under the changing climate. Annals of Forest Science, 2011, 68(2): 371-383.
- [8] 段劼, 马履一, 贾黎明, 贾忠奎, 公宁宁, 车文瑞. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.
- [9] Fukushima K, Tokuchi N. Effects of forest clearcut and afforestation on streamwater chemistry in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forests: comparison among watersheds of various stand ages. Journal of the Japanese Forest Society, 2008, 90(1): 6-16.
- [10] Martin C W, Hornbeck J W, Likens G E, Buso D C. Impacts of intensive harvesting on hydrology and nutrient dynamics of northern hardwood forests. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(S2): 19-29.
- [11] Lapointe B, Bradley R, Parsons W, Brais S. Nutrient and light availability to white spruce seedlings in partial and clearcut harvested aspen stands. Silva Fennica, 2007, 40(3): 459-471.
- [12] Siemion J, Burns D A, Murdoch P S, Germain R H. The relation of harvesting intensity to changes in soil, soil water, and stream chemistry in a northern hardwood forest, Catskill Mountains, USA. Forest Ecology and Management, 2011, 261(9): 1510-1519.
- [13] 杨亭, 丁艳平. 建设秦岭国家中央公园的探究. 资源开发与保护, 2012, (5): 475-478.
- [14] 黄丹, 惠晓萍, 韩玉洁, 吴尧, 耿晔, 薛春燕, 薛耀英, 顾国林, 汤纪红. 不同强度间伐对奉贤区水源涵养林及其林下植物多样性的影响. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2012, 30(6): 41-46.
- [15] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [16] 周光益, 徐义刚, 吴仲民, 骆士寿, 李炳球, 何在成. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究. 林业科学研究, 2000, 13(6): 598-607.
- [17] 冉然, 张文辉, 何景峰, 周建云. 间伐强度对秦岭南坡栓皮栎天然林种群更新的影响. 应用生态学报, 2014, 25(3): 695-701.
- [18] 梁翠萍, 张胜利. 秦岭锐齿栎林和油松林林冠层对大气降水水质的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 53-56.
- [19] 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. 生态学报, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [20] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转化及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [21] 李华. 原始红松林生态系统水化学特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [22] 刘楠, 王玉杰, 王云琦, 赵占军, 赵洋毅. 亚热带缙云山典型林分不同层次水化学效应. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 236-248.
- [23] 詹鸿振, 刘传照, 刘吉春, 李兆全. 小兴安岭阔叶红松林主要树种凋落物的分解研究. 东北林业大学学报, 1990, 18(3): 1-8.
- [24] Wang X, Burns D A, Yanai R D, Briggs R D, Germain R H. Changes in stream chemistry and nutrient export following a partial harvest in the Catskill Mountains, New York, USA. Forest Ecology and Management, 2006, 223(1/3): 103-112.
- [25] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 黄梦虹. 鼎湖山森林地表水水质状况分析. 生态学报, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [26] Edmonds R L, Thomas T B, Rhodes J J. Canopy and soil modification of precipitation chemistry in a temperate rain forest. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1685-1693.
- [27] 任鹏, 梁婷, 牛亮, 鲁麟, 张文璟, 杨钊, 王婵, 程玉龙. 陕西秦岭铅锌矿床的地质特征及成矿动力学过程. 地球科学与环境学报, 2013, (1): 34-47.
- [28] 晋建霞, 张胜利, 陆斌, 马国栋. 西安市水源地森林生态系统水质空间变化特征. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 46-50.
- [29] 罗永福. 不同采伐强度对闽西常绿阔叶林林分结构稳定性的影响. 江西林业科技, 2012, (4): 11-14.
- [30] 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. 林业科学, 1995, 31(3): 193-199.
- [31] 张胜利, 梁翠萍, 晋建霞, 覃超. 秦岭林区径流水化学对雨水酸化的响应. 林业科学, 2012, 48(4): 1-7.
- [32] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 82-85.