

汉江上游金水河流域森林植被对水环境的影响

卜红梅^{1,2}, 党海山¹, 张全发^{1,*}

(1. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以汉江上游金水河流域为研究区域, 分析了流域森林植被对水环境的影响。利用年降水量、林冠截留率和不同森林类型面积的数据, 计算了金水河流域森林生态系统的水源涵养量, 分析了流域森林植被对水量的影响; 采用监测的方法, 分别对金水河流域阔叶林森林生态系统的大气降水、枯落物层、土壤层和出口河水的水质进行了比较分析, 探讨流域森林植被对水质的影响。结果表明, (1) 金水河流域森林生态系统的水源年涵养总量为 $466.79 \times 10^6 \text{ m}^3$, (2) 流域阔叶林森林生态系统能够调节 pH 值, 缓解大气降水的酸性环境; 降低了大气降水中 TDS、 COD_{Mn} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、Cl、 NO_3^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TDP、As、Ba、Cr、Na、Pb、Fe、K、Mn、V 和 Zn 的含量, 净化了水质。(3) 根据各贮水层的水质分析, 推断了河水中各物质的不同来源。研究为南水北调中线工程水源地的管理和建设提供了参考。

关键词: 金水河流域; 森林植被; 水源涵养量; 水质; 水环境影响

Impacts of forest vegetation on water environment of the Jinshui River Basin in the Upper Han River

BU Hongmei^{1,2}, DANG Haishan¹, ZHANG Quanfa^{1,*}

1 Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As a case study of area in the Jinshui River basin of the upper Han River, the impacts of forest vegetation on water environment were investigated. The water conservation volumes were calculated by using the annual rainfall, crown cover interception rate and areas of different forest types. The effects of the forest ecosystem on water quality were determined by monitoring and comparing the water quality of rainfall, litter layer water, soil layer water and river water in the river outlet for the broad-leaf forest ecosystem of the basin. The results indicated that (1) the annual conserved water volumes through the forest ecosystem of the Jinshui River basin was about $466.79 \times 10^6 \text{ m}^3$. (2) The pH values could be regulated by the broad-leaf forest ecosystem of the basin, which alleviated the rain acidity. Similarly, the physico-chemical concentrations of rainfall, including TDS, COD_{Mn} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl, NO_3^- , $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, TDP, As, Ba, Cr, Na, Pb, Fe, K, Mn, V and Zn, were reduced, and hence the water quality was purified. (3) The sources of matter in the river water were different based on the assessment for the water quality in different water layers. Thus, the study provided a reference for the management and construction for the water source area of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project, China.

Key Words: Jinshui River basin; forest vegetation; water conservation; water quality; water environmental impact

大气降水通过森林植被变为地表径流进入河流生态系统的过程中, 森林植被对陆地生态系统的水分循环有着重要的调节作用。一方面, 森林植被能够拦蓄降水、补充地下水、调节河川流量, 从而起到涵养水源的作

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目(0629221C01); 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAC10B020)

收稿日期: 2009-04-27; **修订日期:** 2009-07-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzhang@wbgeas.cn

用^[1-2],被称作“天然水库”;另一方面,森林植被能够改变大气降水中的化学组成,使水质得到改善^[3-6],又被誉为森林流域清洁水源的“过滤器”。因此,森林植被是对水源涵养量和水环境化学的变化最直接最敏感的部分,分析森林植被对水环境的影响,对探索河流水质的演化及其污染来源、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水环境过程的响应,都具有重要意义。

汉江上游金水河流域是我国南水北调中线工程的水源涵养区之一,本文以金水河上游的阔叶林生态系统为例,研究森林植被对流域水环境的影响,包括对水量和水质的调控作用,从而为南水北调中线工程水源地的管理和建设提供指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

金水河流域地处 $107^{\circ}40'—108^{\circ}10' E, 33^{\circ}16'—33^{\circ}45' N$,行政区划上位于陕西省佛坪县和洋县境内。金水河是汉江的一级支流,发源于陕西秦岭南坡的佛坪自然保护区,流域面积 730 km^2 ,河道全长 87 km ,天然落差 2590 m ,平均比降 33.6% ,较大的支流主要有西河、新店子河、东河和吕关河(图 1)。该流域属于北亚热带山地暖温带湿润季风气候区,多年平均气温 $11.5—14.5^{\circ}\text{C}$,降水多集中在夏季,多年平均降水量在 $900—1244 \text{ mm}$ 之间。流域内森林资源丰富,植被面积占流域面积的 96.40% 。其中针阔混交林面积占植被面积的 47.19% ,阔叶林面积占 20.32% ,高山箭竹灌丛面积占 19.55% ,针叶林面积占 0.87% ^[7]。受海拔梯度的影响,流域内的植被表现出显著的垂直分布格局^[8]。海拔 $1020—2000 \text{ m}$ 为落叶阔叶林带(栎林带),海拔 $2000—2500 \text{ m}$ 为中山小叶林带(桦林带);海拔 $2500—2904 \text{ m}$ 为亚高山针叶林带(巴杉冷杉林带),大部分地段为巴杉冷杉林占据,山脊或峰顶多强风处分布有亚高山灌丛和草甸。土壤类型也呈现垂直分布特征,根据海拔高度的不同,依次为水稻土(海拔 540 m 以下)、黄褐土(海拔 $540—800 \text{ m}$)、黄棕壤(海拔 $800—1500 \text{ m}$)、棕壤($1500—2300 \text{ m}$)及暗棕壤($2300—2904 \text{ m}$)。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计及采样

在金水河干流上游的林区内选择一个有代表性的集水区作为试验地,该集水区海拔 $1264—1381 \text{ m}$,林分以落叶阔叶林为主,主要成林树种有锐齿栎、栓皮栎、亮叶桦、板栗等。林下植被稀疏,枯落物层厚度为 $5—10 \text{ cm}$ 。林内土壤主要为典型的山地黄棕壤,成土母岩主要为花岗片麻岩,表土层含有机质高,土壤 pH 值呈中性—微酸性反应。土层质地轻,多沙壤,粒状、块状、楞状结构,平均厚度为 $0.5—0.8 \text{ m}$ 。实验区交通闭塞,人迹罕至,基本无人类活动干扰。试验地内布设了自制的水量收集器分别收集大气降水、枯落物层截留水和土壤层贮水。其中,在试验地的开阔区内放置 2 个收集器,获得大气降水;在林下枯落物层下埋入 2 个收集器,并在表面覆盖原状枯落物,收集枯落物层截留水;在林下埋入 4 个收集器,并在收集器上覆盖约 20 cm 厚的土壤,以便获得土壤层贮水。此外,在集水区出口处收集河水,用于出水口的水质评价。试验地及采样点布设如图 1 所示。

本研究分别于 2008 年 3 月(枯水期)、8 月(丰水期)和 11 月(平水期)在试验地进行了 3 次采样,每次样品均在雨后当天内收集。水样的收集和预处理严格按照《水和废水监测分析方法》^[9]进行。

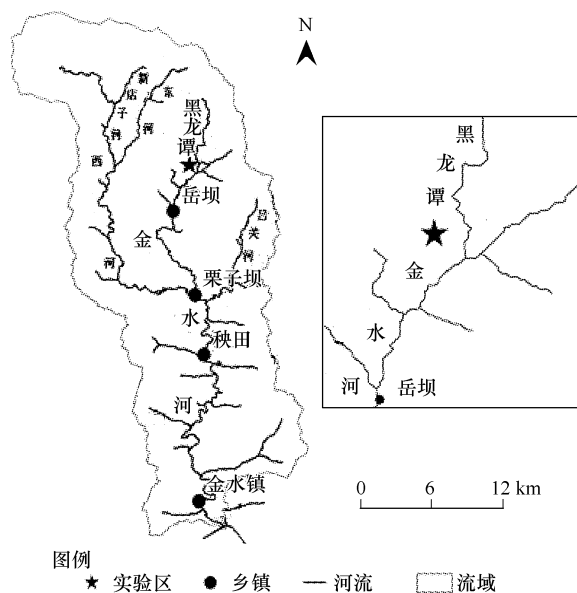


图 1 金水河流域水系及试验地示意图

Fig. 1 Sketch map of water system and experimental area in the Jinshui River basin

1.2.2 样品分析方法

采用 YSI 6920 型多功能水质测定仪现场测定 pH 值、电导(EC)、总溶解性固体(TDS)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$) 和硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$) 5 个指标。每次采样之前仪器均经过校正。另外,在采样现场采用滴定方法测定重碳酸盐(HCO_3)^[9]。

经预处理后的样品带回实验室冷藏并尽快进行分析。采用国家标准测定方法^[9],在实验室内分别测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总硬度(T-Hard)、正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$) 和总溶解性磷(TDP) 4 个指标。采用 DX-120 型离子色谱仪(DIONEX, USA) 测定硫酸根离子(SO_4)、氯离子(Cl) 和硝酸根离子(NO_3),检测限分别为 0. 10、0. 04 mg/L 和 0. 10 mg/L。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, USA) 测定溶解性微量元素 Fe、K、Mg、Mn、As、Ba、Ca、Cr、Na、Pb、Sb、Sr、Zn、V、Se 和 Si 的含量。用标准物质(SRM, SPEX CertiPrep, Inc, USA) 对测定方法的准确度进行验证,结果表明数据分析质量可靠,回收率在 96. 38% (Na)—105. 44% (Si) 之间。

为了减小误差,以上样品均重复测定 3 次,取其平均值。数据处理和分析应用统计软件 SPSS 13. 0 完成。

1.2.3 水源涵养量的估算方法

森林生态系统水源涵养量是指森林土壤的拦截、渗透与储藏雨水的数量。可通过降雨量和林冠(包括灌木层) 对降雨的截留率等关系来计算水源涵养量,其计算公式为^[2,10]:

$$W_i = \sum PS_i(1 - I_i) \times 10 \tag{1}$$

式中, W_i 为研究区域的森林水源年涵养量(m^3); P 为研究区域的年降雨量(mm); S_i 为第 i 类森林类型的面积(hm^2); I_i 为第 i 类森林类型的林冠截留率。

本文所指的森林生态系统水源年涵养量是森林生态系统年截留降雨量后用以调节河川流量的水资源量。它是根据以往对各种森林类型截留雨水及其涵养水源的状况,利用降雨量减去林冠截留雨水量所得到的水资源量。研究区域的年降水量取多年平均值 903. 23 mm^[11],各森林类型的面积与林冠对降雨量的截留率^[2,10]见表 1。

表 1 各森林类型的面积与林冠对降雨量的截留率
Table 1 Area and crown cover interception rate of different forest types on the rainfall

项 目 Items	阔叶林 Broad-leaved forest	针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	针叶林 Conifer forest	高山箭竹 Alpine arrow bamboo forest	灌木林 Shrub forest
森林面积 Forest area/ hm^2	14837	34450	638	14268	6177
截留率 Interception rate/%	31. 2	27. 8	29. 9	21. 6	19. 6

2 结果分析

2.1 水源涵养量的计算结果

按照不同的森林类型,计算得到了金水河流域森林生态系统的水源年涵养量(表 2)。

表 2 金水河流域上游森林生态系统水源涵养量
Table 2 Water conservation of forest ecosystem in upper reaches of the Jinshui River

项目 Items	阔叶林 Broad-leaved forest	针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	针叶林 Conifer forest	高山箭竹 Alpine arrow bamboo forest	灌木林 Shrub forest	合计 Total	年降水总量 Total annual rainfall
水源年涵养量/($\times 10^6 \text{ m}^3$) Volume of annual water conservation/($\times 10^6 \text{ m}^3$)	92. 20	224. 66	4. 04	101. 04	44. 86	466. 79	635. 60

2.2 水质监测结果

2.2.1 物理化学指标测定值

比较大气降水、枯落物层蓄水、土壤层贮水和出口河水的物理化学指标值(表 3),可以看出,大气降水和

枯落物层蓄水的 pH 值偏低,其平均值分别为 6.2 和 6.4,均呈弱酸性,超出国家地表水环境质量 I 类水质标准 6.5—8.5 的范围。大气降水经过枯落物层蓄水之后,EC 和 T-Hard 均在土壤层贮水中的值最大,分别为 219.18 μ S/cm 和 1.16mmol/L。TDS、HCO₃ 和 SO₄ 的含量在各层截留水中具有相同的变化趋势,在大气降水中其含量最高,通过枯落物层后含量下降,在土壤层蓄水中进而增大,仅次于在大气降水中的含量,而在出口河水中含量又明显减少。Cl 在大气降水中的含量最高,为 40.13mg/L,其次依次在各贮水层减少;而 NO₃ 在土壤层贮水中含量最高,为 15.8mg/L,其次是在大气降水中的含量为 5.78mg/L。COD_{Mn} 的含量在枯落物层的测定值最大,为 45.38mg/L;其次是土壤层贮水中的含量,而在出口河水中的含量最小,为 2.51mg/L。大气降水中的 COD_{Mn} 含量是其中出口河水中的含量的 3.45 倍,出口河水中的含量值超出国家地表水环境质量 I 类水质标准(2mg/L)的 25.5%。

表 3 各水样的物理化学指标监测值

Table 3 Values of physicochemical parameters of different water samples

水样 Water samples		pH	EC /(μ S/cm)	TDS /(mg/L)	COD _{Mn} /(mg/L)	HCO ₃ /(mg/L)	SO ₄ /(mg/L)	Cl /(mg/L)	NO ₃ /(mg/L)	T-Hard /(mmol/L)
大气降水	平均值 Mean	6.2	156.67	486.67	8.66	331.84	26.46	40.13	5.78	0.53
Rainfall	方差 S. D	0.3	58.16	689.43	7.41	434.79	14.72	82.95	7.74	0.11
枯落物层水	平均值 Mean	6.4	175.83	114.17	45.38	49.41	6.03	6.07	2.12	1.15
Litter layer water	方差 S. D	0.8	53.02	34.63	28.84	9.84	2.56	1.72	3.14	1.00
土壤层水	平均值 Mean	6.8	219.18	142.45	22.90	51.12	16.46	5.20	15.80	1.16
Soil layer water	方差 S. D	0.8	72.82	47.43	11.49	15.26	13.52	3.79	17.30	0.40
出口河水	平均值 Mean	7.7	109.33	71.33	2.51	45.55	14.17	2.28	2.97	0.74
River water outlet	方差 S. D	0.1	23.63	15.70	0.83	12.28	0.87	0.47	1.45	0.28

2.2.2 营养指标测定值

营养物质 NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P 和 TDP 在各截留层的含量如图 2 所示。NH₄-N、PO₄-P 和 TDP 在各层水样中具有相似的变化趋势,即从大气降水到出口河水,其平均含量依次降低,在大气降水中的最大值分别为 2.04、1.52、2.10mg/L。NO₃-N 在枯落物层和土壤层的含量依次升高,并在土壤层贮水中达到最大值,为 16.01mg/L。4 种营养物质在出口河水中的含量均最小,依次为 NH₄-N 0.03、NO₃-N 2.32、PO₄-P 0.03、TDP 0.14 mg/L,其中 NO₃-N、PO₄-P 和 TDP 的含量分别超出国家地表水环境质量 I 类水质标准对总氮的限定值(0.2mg/L)和对总磷的规定值(0.02 mg/L)。

2.2.3 溶解性微量元素测定值

各层水样中溶解性微量元素的测定值见图 3。在测定的 16 种元素中,表现出 5 种变化形式。第 1 种变化形式以元素 As、Fe、K、Mn 和 V 为主,其变化特征是大气降水经过枯落物层后元素含量增加到最大值,经过土壤层后含量依次减少,并在出口河水中的含量最小。第 3 种变化形式是以 Ba、Ca、Sb、Sr、Mg 为主体,其元素含量经过枯落物层后一直增加,并在土壤层贮水中测得最大值,而在出口河水中获得较低含量值。第 3 种是以 Na、Pb 和 Zn 为代表,3 种元素在大气降水中的含量最高,随后在枯落物层和土壤层依次减少,而在出口河水中的含量也较小。第 4 种形式是以 Cr 和 Se 为代表,其变化特征主要是元素含量在枯落物层蓄水中减少,随后在土壤层贮水中增加,而在出水口处的含量明显降低。第五种形式是 Si 的变化,从大气降水到出口河水呈现出“升-降-升”的“N”型变化趋势。

值得注意的是,出口河水中元素 Pb、V 和 Se 的含量分别超出国家地表水环境质量 I 类水质标准对其规定的限定值(0.01, 0.05, 0.01mg/L)60%、212% 和 160%。河水中 Sb 的含量为 2.802mg/L,远远超出 I 类水质标准 0.005 mg/L 的规定值。

3 讨论

3.1 对水源涵养量的影响

金水河流域森林生态系统已成为长江上游汉江流域重要的水源涵养区。其森林生态系统的水源年涵养

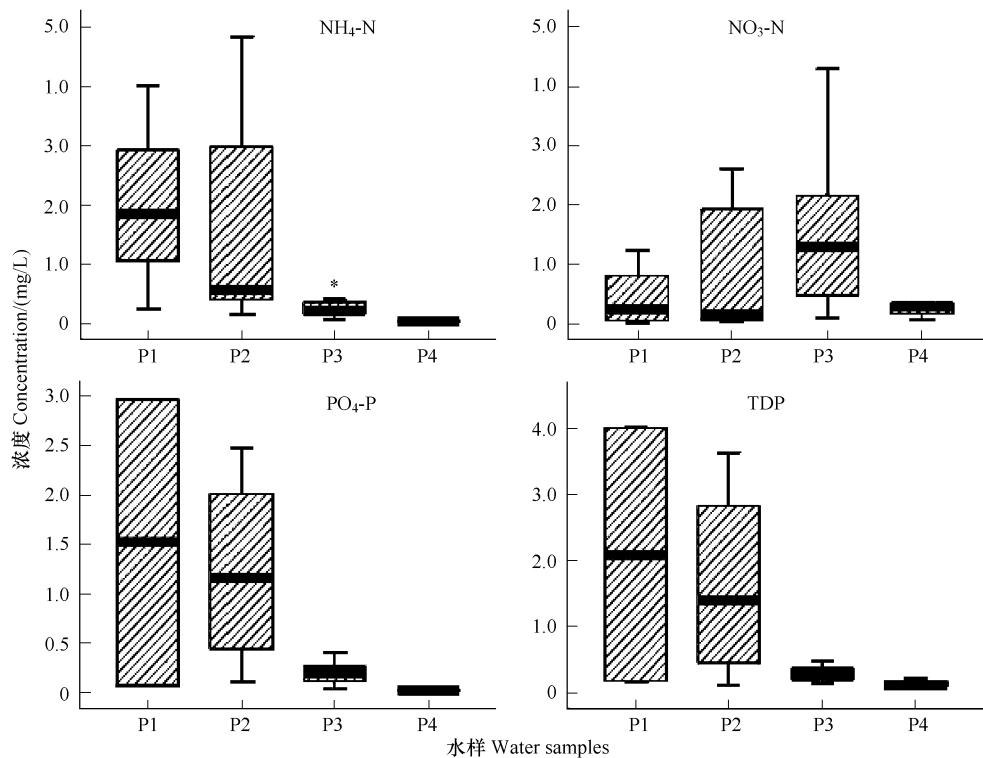


图2 各水样中营养元素的含量

Fig. 2 Concentrations of nutrient elements in different water samples

P1 大气降水, P2 枯落物层水, P3 土壤层水, P4 出口河水, 下同

总量为 $466.79 \times 10^6 \text{ m}^3$ (表 2), 是长江上游地区森林生态系统的水源涵养总量 ($2397.2814 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 0.195%, 秦巴山地区 ($297.617 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 1.56% [2]。其中, 针阔混交林地的水源涵养量最大为 $224.66 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其次为高山箭竹林, 阔叶林地的水源涵养量排在第 3 位, 为 $92.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

计算结果表明, 流域内水源涵养总量占年降水总量的 73.44%, 很好的发挥了森林拦蓄降水、涵养土壤水分和补充地下水、调节河川流量的功能。涵养水源的作用主要表现在林冠截留、枯落物层截留和森林土壤贮水 3 个方面。一般认为枯落物层含蓄量与厚度有关, 大致可占降水量的 15%—20%; 森林土壤蓄水量与土壤结构、土层厚度有关, 占总降水量的 25%—30% [12]。据此, 计算得到流域上游枯落物层的水源涵养量约为 $(95.34—127.12) \times 10^6 \text{ m}^3$, 土壤层的水源涵养量约为 $(158.90—174.79) \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

3.2 对流域水质的影响

森林生态系统对流域水质的影响与森林所处的气候条件、林地枯落物层状况、土壤性质及地质结构密切相关, 是森林和降水、土壤等共同作用的结果 [1]。森林对水质的影响主要包括 2 个方面: 一是森林本身对天然降水中某些化学成分的吸收和溶滤作用, 使天然降水中化学成分的组成和含量发生变化; 二是森林变化对河流水质的影响 [4,13]。当水分以大气降水形式进入森林生态系统, 经过传输和转化之后, 通过林冠层、枯落物层及土壤层的过滤、吸附、交换、吸收、降解等作用, 最后以地表水的形式流出 [5,14-15]。在整个过程中, 森林生态系统对不同化学组成物质, 会表现出不同的作用方式和显示不同的净化程度 [6], 水环境的化学物质含量也随之发生变化, 从而使水质得到改善。本文主要讨论以阔叶林为主的森林生态系统对流域水质的影响。

3.2.1 枯落物层对水质的影响

大气降水经过枯落物层后, 随水分携带的各种物质进行着两种相反的过程, 即过滤吸附与淋溶, 使物质的浓度和携带量发生变化 [4]。在枯落物层蓄水中, pH 值升高了 0.2, 缓解了降水的酸性。通过枯落物层中有机物和微生物的吸收和过滤作用 [16], 大部分物理化学指标和营养物质的监测值与大气降水相比显著降低。其

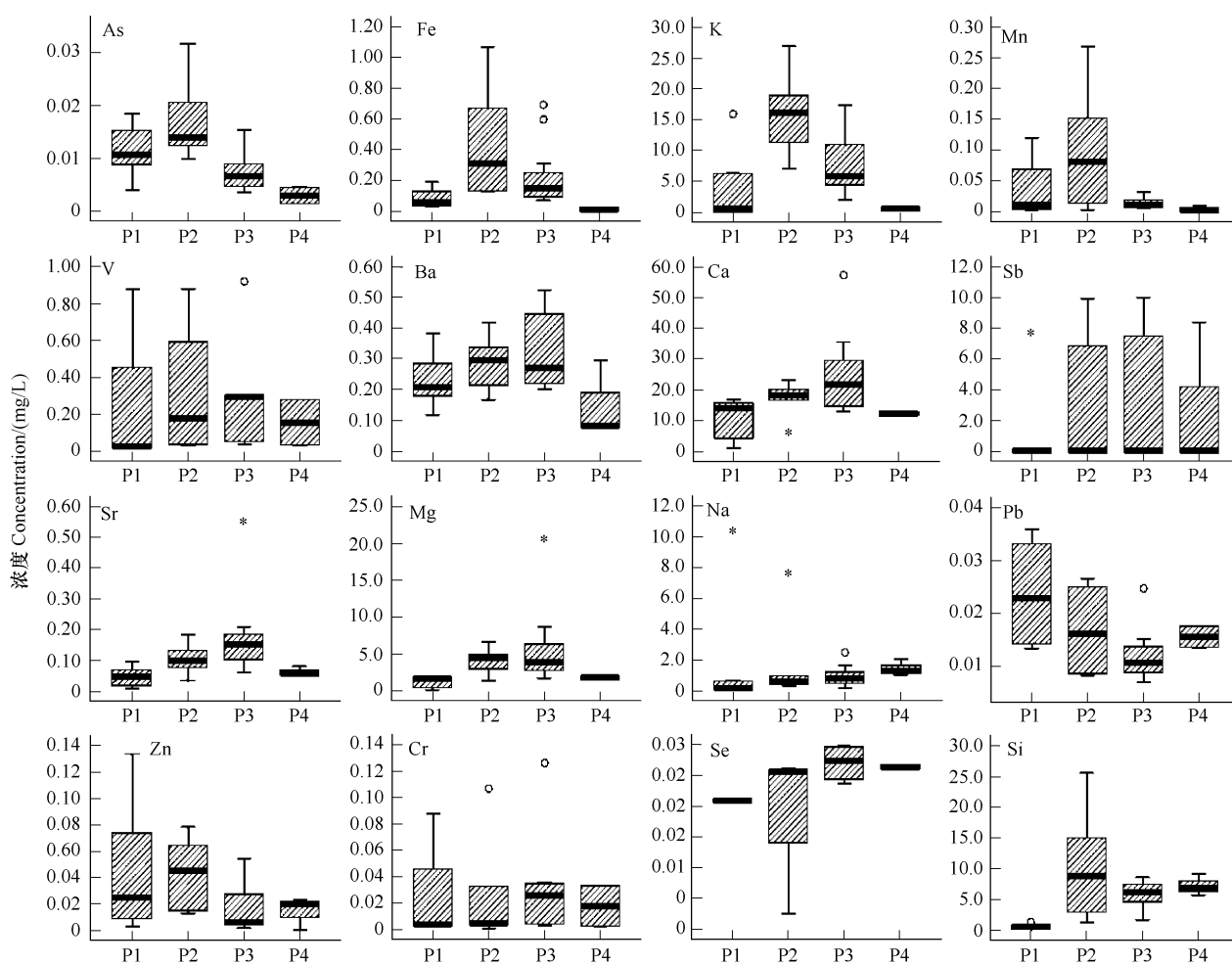


图3 各水样中溶解性微量元素的含量

Fig. 3 Concentrations of dissolved trace elements in different water samples

中,物理化学指标 TDS、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、Cl、 NO_3^- 的含量分别下降了 3.3、5.7、3.4、5.6 倍和 1.7 倍;营养物质 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TDP 的含量分别降低了 0.3、0.2 倍和 0.3 倍。枯落物层对溶解性微量元素也具有过滤吸附作用。元素 Na、Pb、Zn、Cr 和 Se 通过枯落物层后,其含量分别下降了 9.54、0.41、0.11、0.03 倍和 0.15 倍。因此,枯落物层对大气降水起到了一定的净化作用。

另外,指标 EC、 COD_{Mn} 、T-Hard、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、溶解性微量元素 As、Fe、K、Mn、V、Ba、Ca、Sb、Sr、Mg 和 Si,经过枯落物层之后,其监测值反而升高,可能与枯落物层中有机物和微生物的分解有关^[4,15]。

3.2.2 土壤层对水质的影响

森林土壤是生态系统中主要的水分贮藏所和调节器。大气降水经过枯落物层进入土壤层后,其化学组成再次发生变化。土壤层贮水中,pH 值继续升高到 6.8,使大气降水的微酸性环境进一步得到调升。指标 EC、T-Hard、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Ba、Ca、Sb、Sr 和 Mg 的监测值继续增加,同时 TDS、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、Cr 和 Se 的含量也开始增加。这一现象主要是因为土壤中的有机质和其他一些物质在物理、化学作用下溶解,从而使土壤层贮水中的化学成分增加^[17]。Cl、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TDP、Na、Pb 和 Zn 的含量继枯落物层之后继续降低,而 COD_{Mn} 、As、Fe、K、Mn、V 和 Si 的含量也出现减少,使得水质得到进一步净化。这主要是由于黄棕壤的这种结构和质地促进了其对水质的过滤和吸附作用^[5]。研究中发现,土壤层对营养物质的净化效果最明显^[3],与大气降水相比, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TDP 含量分别下降了 6.8、7.7 倍和 7.3 倍,与施立新等人^[4]的研究结果相似。

土壤层贮水经过运输和转化之后,形成地表径流。在集水区出口监测到河水中 pH 值上升到 7.7,符合国

家地表水环境质量 I 类水质标准,说明土壤对酸性溶液具有一定的缓冲能力。除 Na、Pb 和 Si 外,其余监测值均比土壤层贮水低,是因为土壤层贮水在运输过程中部分物质被植物吸收所致^[5]。与大气降水相比,河水中除 pH、T-Hard、Ca、Sb、Sr、Mg、Si 和 Se 外,其余指标均不同程度呈现下降趋势,表明了森林生态系统对大气降水起到了很好的净化作用。另一方面,从各层水样含量的变化趋势可以推断,河水中 TDS、HCO₃、SO₄、Cl、NH₄-N、PO₄-P、TDP、Na、Pb 和 Zn 主要来源于大气降水,而 NO₃、T-Hard、NO₃-N、Ba、Ca、Sb、Sr 和 Mg 主要来源于土壤^[18],COD_{Mn}、As、Fe、K、Mn、V 和 Si 主要来源于枯落物层的分解,Se 和 Cr 主要来源于大气降水和土壤两部分。

4 结论

(1) 金水河流域森林生态系统的水源年涵养总量为 $466.79 \times 10^6 \text{ m}^3$,占年降水总量的 73.44%。其中,针阔混交林地的水源涵养量最大为 $224.66 \times 10^6 \text{ m}^3$,其次为高山箭竹林,为 $101.04 \times 10^6 \text{ m}^3$,第 3 为阔叶林地,其水源涵养量为 $92.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

(2) 流域阔叶林生态系统能够调节 pH 值,缓解大气降水的酸性环境。

(3) 流域阔叶林生态系统能够降低大气降水中 TDS、COD_{Mn}、HCO₃、SO₄、Cl、NO₃、NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P、TDP、As、Ba、Cr、Na、Pb、Fe、K、Mn、V 和 Zn 的含量,从而净化了水质。

(4) 流域阔叶林生态系统增加了大气降水中 T-Hard、Ca、Sb、Sr、Si、Se 和 Mg 的含量,一定程度上影响了河流水质。

(5) 推断河水中 TDS、HCO₃、SO₄、Cl、NH₄-N、PO₄-P、TDP、Na、Pb 和 Zn 主要来源于大气降水,而 NO₃、T-Hard、NO₃-N、Ba、Ca、Sb、Sr 和 Mg 主要来源于土壤,COD_{Mn}、As、Fe、K、Mn、V 和 Si 主要来源于枯落物层的分解,Se 和 Cr 主要来源于大气降水和土壤两部分。

References:

- [1] Li W H, He Y T, Yang L Y. A summary and perspective of forest vegetation impacts on water yield. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 398-406.
- [2] Deng K M, Shi P L, Xie G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits. *Resources Science*, 2002, 24(6): 68-73.
- [3] Nakagawa Y, Iwatsubo G. Water chemistry in a number of mountainous streams of east Asia. *Journal of Hydrology*, 2000, 240(1/2): 118-130.
- [4] Shi L X, Yu X X, Ma Q Y. Review on the study of forest and water quality. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(3): 52-56.
- [5] Ou Yang X J, Zhou G Y, Huang Z L, Huang M H. Analysis on runoff water quality in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [6] Li W Y, Yu X X, Ma Q Y, Shi Q, Liu P. Analysis to influence of water conservation forest in Miyun Reservoir on water quality. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(2): 80-83.
- [7] Shen Z H, Zhang Q F, Yue C, Zhao J, Hu Z W, Lü N, Tang Y Y. The spatial pattern of land use/land cover in the water supplying area of the Middle-Route of the South-to-North Water Diversion (MR-SNWD) Project. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 633-644.
- [8] Yue M, Dang G D, Gu T Q. Vertical zone spectrum of vegetation in Foping National Reserve and the comparison with the adjacent areas. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2000, 18(5): 375-382.
- [9] National Environmental Protection Bureau (NEPB). Standard methods for the examination of water and wastewater (version 4). Beijing: China Environmental Science Publish Press, 2002.
- [10] Zhang W G, Hu Y M, Zhang J, Liu M, Yang Z P, Chang Y, Li X Z. Forest water conservation and its benefits in upper reaches of Minjiang River in recent 30 years. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7): 1063-1067.
- [11] Bu H M, Dang H S, Zhang Q F. Climate change in the Jinshui River basin of the upper Han River in recent 50 years and its impacts on ecological environment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(5): 459-465.
- [12] Sun J P, Sun G N. Economic evaluation of forest eco-service value in Foping Nature Protect Area in Shaanxi Province. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 32(3): 107-111.
- [13] Gao J R, Xiao B, Zhang D S, Li M H. Review on forest hydrology study in world. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(5): 60-64.
- [14] Chen B F, Lin M X, Qiu J R, Wu Z M, Zhou T F. Effect of tropical mountain rainforest ecosystem on water quality of precipitation. *Forest*

Research, 1999, 12(4): 333-338.

- [15] Wang Y H, Jin M, Yu P T. The environment problems related with forest/vegetation and water resources in China and future research requirements. Forest Research, 2003, 16(6): 739-747.
- [16] Tan F L, Lei R D, Wang Z J. Effects of the Sharp-Tooth Oak Forest Ecosystem on the Water Quality. Journal of Fujian Forestry Science & Technology, 1999, 26(2): 1-5.
- [17] Wang Y Q, Wang Y J. Evolution of study on the forest stream water quality. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 242-246.
- [18] Zhang S L, Li J, Han C J, Wang D L. Effect of the forest ecosystem on water quality in the water supply catchment for the middle line of South-to-North Water Transfer Project: A case study of the Huoditang forest, part of the medium altitude, southern slope of the Qinling mountain range. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 559-565.

参考文献:

- [1] 李文华,何永涛,杨丽韡. 森林对径流影响研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2001, 16(5): 398-406.
- [2] 邓坤枚,石培礼,谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李文宇,余新晓,马钦彦,石青,刘萍. 密云水库水源涵养林对水质的影响. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 80-83.
- [7] 沈泽昊,张全发,岳超,赵俊,胡志伟,吕楠,唐园园. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆盖的空间格局. 地理学报, 2006, 61(6): 633-644.
- [8] 岳明,党高弟,辜天琪. 佛坪国家级自然保护区植被垂直带谱及其与邻近地区的比较. 武汉植物学研究, 2000, 18(5): 375-382.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会编. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 张文广,胡远满,张晶,刘森,杨兆平,常禹,李秀珍. 岷江上游地区近 30 年森林生态系统水源涵养量与价值变化. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1063-1067.
- [11] 卜红梅,党海山,张全发. 汉江上游金水河流域近 50 年气候变化特征及其对生态环境的影响. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 459-465.
- [12] 孙建平,孙根年. 陕西佛坪自然保护区森林生态服务价值测评. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 107-111.
- [13] 高甲荣,肖斌,张东升,李迈和. 国外森林水文研究进展述评. 水土保持学报, 2001, 15(5): 60-64.
- [14] 陈步峰,林明献,邱坚锐,吴仲民,周铁峰. 热带山地雨林生态系统对降雨水质的影响. 林业科学研究, 1999, 12(4): 333-338.
- [15] 王彦辉,金旻,于彭涛. 我国与森林植被和水资源有关的环境问题及研究趋势. 林业科学研究, 2003, 16(6): 739-747.
- [16] 谭芳林,雷瑞德,王志洁. 锐齿栎林生态系统对水质影响的研究. 福建林业科技, 1999, 26(2): 1-5.
- [17] 王云琦,王玉杰. 森林溪流水质的研究进展. 水土保持研究, 2003, 10(4): 242-246.
- [18] 张胜利,李靖,韩创举,王德连. 南水北调中线工程水源林生态系统对水质的影响——以秦岭南坡中山火地塘林区为例. 水科学进展, 2006, 17(4): 559-565.