

DOI: 10.5846/stxb201302060253

杨丽丽,王彦辉,杜敏,于澎涛,郝佳,李振华.六盘山典型森林伴随降水的总有机碳(TOC)通量变化特征.生态学报,2014,34(21):6297-6308.

Yang L L, Wang Y H, Du M, Yu P T, Hao J, Li Z H. The variation of total organic carbon (TOC) flux with rain water in regional forests of Liupan Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6297-6308.

六盘山典型森林伴随降水的总有机碳(TOC) 通量变化特征

杨丽丽^{1,2}, 王彦辉^{1,*}, 杜敏^{1,2}, 于澎涛¹, 郝佳¹, 李振华¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境与保护重点实验室, 北京 100091;

2. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要:在六盘山香水河小流域,选择 6 种典型森林样地,测定了 2011 年生长季的大气降水、穿透水、干流、枯落物渗漏水 and 主根系层(0—30 cm 深)土壤渗漏水的总有机碳(TOC)浓度及其相应的通量变化。结果表明,在降水转化为由穿透雨和干流组成的林下降水中,所有样地的 TOC 浓度都不同程度地增大;虽然林冠截持使林下降水减小,但因雨水淋洗和与林冠发生碳交换,各样地林下降水携带的生长季 TOC 通量(kg/hm²) (华北落叶松人工林 132.28、华山松次生林 106.56、油松人工林 94.10、灌木林 79.49、桦木林 66.52、辽东栎次生林 63.01)都比林外降水(53.17)不同程度地明显增大,整体看来,林冠的 TOC 淋出作用在针叶林很大,在阔叶林较弱。在 6 种森林样地的枯落物层渗漏水中,其 TOC 浓度彼此相差不大,平均为 24.51 mg/L,高于林冠穿透水的 TOC 浓度;受枯落物截持部分降水及与枯落物 TOC 交换的影响,4 个样地枯落物渗漏水的 TOC 通量(kg/hm²) (桦木次生林 84.35、野李子灌丛 129.35、辽东栎次生林 79.21、油松人工林 114.93)都比其林下降水 TOC 通量增加了,但华北落叶松人工林和华山松次生林的 TOC 通量分别降至 90.76 和 104.90 kg/hm²。在测定的华北落叶松人工林和华山松次生林的主根系层(0—30 cm)土壤渗漏水中,TOC 浓度均低于枯落物渗漏水;由于水量减小和与土壤发生碳交换,土壤渗漏水的 TOC 通量均显著低于枯落物渗漏水,两个林分样地分别降至 43.04 和 66.33 kg/hm²。整体来看,林外降水携带的 TOC 输入通量在林地 TOC 输入中占有重要地位,林冠的 TOC 淋洗使其程度不同地增加 TOC 通量,枯落物层具有增加或减少 TOC 通量的作用,但主根系层土壤会显著减少 TOC 输出通量,所以是固定 TOC 的重要场所。

关键词:典型森林;水文过程;总有机碳;通量

The variation of total organic carbon (TOC) flux with rain water in regional forests of Liupan Mountains, China

YANG Lili^{1,2}, WANG Yanhui^{1,*}, DU Min^{1,2}, YU Pengtao¹, HAO Jia¹, LI Zhenhua¹

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Both flux and concentration of total organic carbon(TOC) from rain water were documented and analyzed from six regional forests growing in the small watershed of Xiangshuihe inside Liupan Mountains in NW China during the 2011 growing season. The results indicated that TOC concentration of all six forests was increased in term of rain water under canopy. Although the rain water volume under canopy was decreased due to the canopy interception, the TOC flux carried by the rain water under canopy was increased for all six forests as compared them with that carrying by the open field rainfall (53.17 kg/hm²) because of carbon exchange or wash out from canopy. The corresponding TOC flux (kg/hm²) of rain water

基金项目:国家自然科学基金项目(41230852、41390461);科技部“十二五”农村领域国家科技计划(2012BAD22B030102);中挪合作项目(209696/E10);国家林业局宁夏六盘山森林生态站资助

收稿日期:2013-02-06; **网络出版日期:**2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

under canopy was 132.28 for *Larix principis-rupprechtii* plantation, 106.56 for the secondary forest of *Pinus armandii*, 94.10 for the plantation of *Pinus tabulaeformis*, 79.49 for the shrub of *Prunus salicina*, 66.52 for the secondary forest of *Betula platyphylla*, and 63.01 for the secondary forest of *Quercus liaotungensis*. The canopy leaching (or wash out) effect of TOC was high for the coniferous forests, but weak for the broad-leaved forests. The difference of TOC concentrations in the leakage under humus layer was low among the six forest types, with an average of 24.51 mg/L, which was still higher than the TOC concentration in throughfall. As an integrated result of the humus interception loss and the TOC exchange with humus layer, the TOC flux carried by the humus leakage was increased than that carried by throughfall for four forests and they were 84.35 (kg/hm^2) for the stand of *Betula platyphylla*, 129.35 for the bush of *Prunus salicina*, 79.21 for the stand of *Quercus liaotungensis*, 114.93 for the stand of *Pinus tabulaeformis*, but the TOC flux carried by the humus leakage was decreased to 90.76 and 104.90 kg/hm^2 for the stand of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus armandii* respectively. In the leakage under the soil layer of main root zone (0—30 cm), the TOC concentrations were reduced compared with that in humus leakage for the stands of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus armandii*. Affected by the water volume decrease and the TOC exchange with mineral soil, the TOC flux carried by the soil leakage under main root zone was significantly reduced, compared with the TOC flux of humus leakage, to 43.04 kg/hm^2 for the stand of *Larix principis-rupprechtii* and to 66.33 kg/hm^2 for the stand of *Pinus armandii*. In conclusion, the TOC input flux through open field rainfall played an important role in the TOC flux input to forest soil. The canopy of all six forest types could increase the TOC flux due the TOC leaching from canopy surface. The TOC flux in humus layer leakage were usually increased or decreased. However, the mineral soil at the main root zone greatly reduced the TOC flux output, thus the soil layer should be the most important pool for fixing the TOC.

Key Words: representative forests; hydrological processes; total organic carbon; flux

降水在携带各种元素进入森林生态系统的同时,随着与植被的接触,还会发生水量与元素浓度的明显变化,这些变化都对森林生长和其功能发挥具有重要作用^[1-3]。碳元素虽然不是营养元素,但由于森林固碳功能日益受到重视,深入理解森林对碳循环的影响就显得格外重要。碳元素在森林生态系统内的流通和固定,在很大程度上也是森林生物地球化学循环的研究内容。维持碳循环与碳平衡是森林生态系统的重要服务功能,其大小与森林植被结构紧密相关,并受到森林水文过程的影响,突出表现在伴随水流而发生的碳浓度及通量的明显变化。当前的森林生态系统碳循环研究,还存在着很大不确定性^[4],且大部分研究集中在植被、土壤以及以气体为载体的碳循环方面^[5-6],在以水为载体的生态系统碳循环研究还较少。

总有机碳(TOC)指在水中以溶解或悬浮形态存在的全部有机碳,即可溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)^[7]。国外不少学者对温带和热带森林的大气降水、穿透降水、干流、土壤溶液和溪流水的DOC进行过报道^[8-10],包括我国南方亚热带森林水

文学过程中的TOC动态^[11-13],然而在西北干旱半干旱地区研究还很少,限制着对森林生态功能的认识与管理。

本研究在宁夏六盘山区选择了六种典型森林类型,在生长季测定评价了伴随降水输入转化过程而发生的TOC通量变化,以便能为当地及类似地区的森林元素循环、养分平衡、固碳功能等相关过程的理解和定量评价提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域和样地概况

研究地点是六盘山自然保护区的香水河小流域,它处在黄土高原中西部的宁夏回族自治区南端,属黄河二级支流泾河的源头地区,海拔范围 2060—2931 m,位于东经 109°9′—109°30′,北纬 35°15′—35°41′,属暖温带大陆性季风气候,年均气温 5.8℃,年均降水量 770.7 mm,多集中于 6—9 月。小流域内植被良好,森林覆盖率达 72.9%,主要为天然次生林,主要树种包括华山松(*Pinus armandii*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphlla*)、红桦

(*Betula albosinensis*)、山杨(*Populus davidiana*)等;其中人工林覆盖率为 23.6%,主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林和油松(*Pinus tabulaeformis*)林。山体阳坡分布着较多灌丛;高海拔(2700 m 以上)地区则分布着亚高山草甸群落。土壤以灰褐土为主,还分布着一定的亚高山草甸土。土壤中砾石较多,成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物。

选择了具代表性的华北落叶松人工林、华山松次生林、桦木次生林、辽东栎次生林和油松人工林建立了面积 30 m×30 m 的样地各 1 个,并在野李子(*Prunus salicina*)灌丛建立了 1 个 20 m×20 m 的样地。华北落叶松林、华山松林和桦木林样地分布于洪沟子流域,野李子灌丛样地分布于草沟子流域,辽东栎林和油松林样地分布于大南沟子流域。在华北落叶松林样地,林下的灌木和草本数量较少,灌木主要有华西箭竹(*Fargesia nitida*)、黄刺玫(*Rosa hugonis*)等,草本主要有华北苔草(*Carex hancokiana*)、蕨(*Pteridium aquilum*)等。华山松次生

林中混生有少量的白桦和红桦,林下的灌木和草本数量较多,主要是忍冬(*Lonicera japonica* Thunb)、榛子(*Corylus heterophylla*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、苔草(*Carex*)等。桦木天然次生林样地由白桦和少量红桦组成,林下的灌木和草本较多,主要有三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、箭竹(*Fargesia spathacea* Franch)、榛子、小叶丁香(*Sytinga microphylla*)、忍冬、蕨、菝葜(*Smilax china* L.)等。野李子灌木样地的林下草本数量较多,主要由冰草组成。辽东栎次生林样地的伴生树种较多,主要有白桦、山杨、少脉槲(*Tilia paucicostata* Maxim)等,其林下的灌木和草本较多,主要有甘肃山楂(*Crataegus Kansuensis*)、水 栒 子 (*Cotoneaster multiflorus*)、柔毛绣线菊(*Spiraea pubescens*)、刺五加(*Eleutherococcus giraldii*)、箭竹等灌木以及苔草等。油松人工林样地为林分结构单一的纯林,林下草本层发育明显,种类较多,以东方草莓(*Fragaria orientalis*)、苔草、冰草为主要优势种。各试验地基本特征见表 1、表 2。

表 1 研究样地的立地和植被基本特征

Table 1 The site condition and vegetation characters in sample plots										
样地名称 Sample plot	海拔 Elevation/ m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient/ (°)	坡位 Slope position	林龄 Stand age/a	林冠郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	乔木平 均胸径 Mean tree DBH/cm	乔木平 均树高 Mean tree height/m	灌木层 盖度 Shrub coverage/%
华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	2320	东南	30	坡下	23	0.8	1125	15.6	13.9	5
华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	2280	北	35	坡下	43	0.8	675	12.14	6.81	60
桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	2380	北	30	坡中	45	0.6	725	18.3	9.34	65
野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	2230	西	39	坡中	20	—	—	2.57	1.96	50
辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	2080	东	34	坡下	41	0.6	625	16.16	9.23	60
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	2155	东南	7	坡下	32	0.65	2275	14.85	9.41	10
枯落物层厚度 Thickness of humus/cm										
样地名称 Sample plot	林冠层 LAI Canopy LAI	枯落物层厚度 Thickness of humus/cm				枯落物层重量 Weight of humus/(t/hm ²)				
		未分解 Un-deco mposed	半分解 Half-deco mposed	已分解 Decomp osed	合计 Total	未分解 Un-deco mposed	半分解 Half-deco mposed	已分解 Decomp osed	合计 Total	
华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	3.16	1.0	3.5	1.0	5.5	1.82	18.25	2.76		22.83
华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	2.94	0.7	2.2	0.5	3.4	1.54	12.68	10.51		24.73

续表

样地名称 Sample plot	林冠层 LAI Canopy LAI	枯落物层厚度 Thickness of humus/cm				枯落物层重量 Weight of humus/(t/hm ²)			
		未分解 Un-decomposed	半分解 Half-decomposed	已分解 Decomposed	合计 Total	未分解 Un-decomposed	半分解 Half-decomposed	已分解 Decomposed	合计 Total
桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	3.32	0.8	3.3	2.0	6.1	1.72	13.19	10.95	25.87
野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	—	2.7	0.7	—	3.4	2.62	3.34	—	5.96
辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	4.23	2.5	3.8	2.2	8.5	3.30	18.14	10.12	31.57
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	3.15	2.0	2.0	1.9	5.9	1.59	20.36	10.35	32.30

* 野李子灌丛样地的“乔木平均胸径”和“乔木平均树高”均为灌木数据

表 2 研究样地的土壤物理化学性质
Table 2 Soil physical and chemical properties of sample plots

样地名称 Sample plot	土层深度 Soil depth/ cm	土壤容重 Soil bulk density / (g/cm ³)	pH	元素含量 Element content/(g/100g)					
				有机 C Organic C	全 N Total N	全 P Total P	全 K Total K	Ca	Mg
华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	0—10	0.88	7.15	3.88	0.29	0.08	0.35	0.47	1.33
	10—20	1.00	7.35	3.45	0.26	0.09	0.38	0.65	1.33
	20—40	1.02	7.32	2.97	0.25	0.08	0.35	0.68	1.32
	40—60	1.11	7.45	2.83	0.25	0.09	0.31	1.17	1.27
	60—80	1.31	7.45	2.79	0.24	0.09	0.37	0.86	1.38
	80—100	1.45	7.57	2.02	0.18	0.09	0.33	0.85	1.40
	0—100	1.13	7.38	3.04	0.25	0.09	0.35	0.78	1.34
华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	0—10	0.70	6.95	7.92	0.68	0.10	0.40	0.72	1.05
	10—20	0.74	6.89	6.78	0.61	0.10	0.29	1.00	1.06
	20—40	0.73	7.08	6.67	0.61	0.09	0.29	0.89	1.04
	40—60	0.78	7.16	3.76	0.36	0.08	0.24	0.71	1.15
	60—80	0.94	7.25	3.18	0.33	0.08	0.19	0.72	1.16
	80—100	1.11	7.31	2.79	0.26	0.07	0.15	0.65	1.16
	0—100	0.83	7.11	5.18	0.47	0.09	0.26	0.78	1.10
桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	0—10	0.69	6.95	8.54	0.64	0.10	0.27	1.32	0.98
	10—20	0.75	6.78	7.97	0.62	0.09	0.29	1.15	0.96
	20—40	0.86	6.65	6.92	0.55	0.05	0.14	0.99	0.64
	40—60	1.17	6.95	5.28	0.44	0.07	0.25	0.91	1.04
	60—80	1.24	6.94	4.85	0.39	0.07	0.24	0.94	1.08
	80—100	1.41	6.98	3.40	0.27	0.05	0.21	0.77	1.13
	0—100	1.02	6.88	6.16	0.49	0.07	0.23	1.01	0.97
野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	0—10	0.98	7.77	2.62	0.22	0.07	0.27	0.61	1.39
	10—20	1.07	7.72	2.20	0.20	0.06	0.25	0.49	1.38
	20—40	1.02	7.87	2.02	0.18	0.07	0.23	0.66	1.44
	40—60	1.18	8.08	1.95	0.15	0.07	0.22	0.57	1.44
	60—80	0.96	8.28	1.80	0.11	0.06	0.20	1.86	1.65
	80—100	1.20	8.19	1.11	0.10	0.07	0.22	1.54	1.64
	0—100	1.07	7.99	1.95	0.16	0.07	0.23	0.96	1.49
辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	0—10	0.74	7.22	4.21	0.34	0.04	0.14	0.72	0.93
	10—20	0.86	7.29	3.48	0.28	0.05	0.15	0.76	0.91
	20—40	1.08	7.37	2.62	0.21	0.04	0.11	0.57	0.99

续表

样地名称 Sample plot	土层深度 Soil depth/ cm	土壤容重 Soil bulk density / (g/cm ³)	pH	元素含量 Element content/(g/100g)					
				有机 C Organic C	全 N Total N	全 P Total P	全 K Total K	Ca	Mg
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	40—60	1.15	7.15	1.71	0.19	0.03	0.10	0.51	0.99
	60—80	1.15	7.34	1.91	0.19	0.05	0.13	0.49	1.14
	80—100	1.27	7.53	1.10	0.09	0.06	0.17	0.41	1.31
	0—100	1.04	7.32	2.51	0.22	0.05	0.13	0.58	1.04
	0—10	0.99	7.51	5.81	0.53	0.10	0.27	0.80	0.97
	10—20	0.99	7.86	4.07	0.40	0.10	0.25	0.90	1.04
	20—40	1.12	7.95	3.20	0.30	0.09	0.19	0.71	1.00
	40—60	1.02	7.99	3.02	0.27	0.10	0.17	0.74	0.98
	60—80	1.00	8.08	2.74	0.25	0.09	0.17	0.62	0.98
	80—100	1.13	8.22	2.40	0.23	0.09	0.16	0.72	0.99
	0—100	1.04	7.94	3.54	0.33	0.09	0.20	0.75	0.99

1.2 研究方法

1.2.1 水量测定和水样采集

在林外开阔地放置一台自动气象站(美国, Weatherhawk 公司),配有计量精度为 1 mm 的翻斗式雨量计,2011 年 5—10 月连续观测降水量和降水过程;同时配有一台虹吸式自计雨量计和一个标准雨量筒,配合测定林外降雨量及降雨过程。在林外布设了 3 个内径 20 cm 的自制雨量筒,用于收集林外降水的样品。

为收集穿透水,在六种森林样地内,根据上方林冠(以及高大灌木)的遮蔽程度,选择代表性地点,在距地面 20 cm 的高度,分别布设 6—12 个雨量筒,每次雨后测定水量,计算其算术平均值,作为样地整个冠层下的穿透水量。

为测定干流,按林木径级和树冠中等标准,每个样地内选择 5—6 棵林木,将直径 2.0 cm 的聚乙烯塑料软管沿中缝剖开,从树干 2 m 高处自上向下蛇形缠绕于树干上,塑料管与水平面角度呈 30°,用玻璃胶密封树干与胶管间的空隙,再将胶管引入密封口的塑料容器。每次雨后及时测水量,并依据林冠投影面积换算为单株和林分的干流深。

为收集穿过枯落物层的渗漏水,在尽量不破坏原来枯落物层次结构的条件下,每个样地内选择 5 个样点,把 0.5 m×0.5 m 的原状枯落物整体移放到塑料膜上。每次降雨后将渗过枯落物层的雨水引入塑料盆中收集,测定枯落物渗漏水,并保存水样以测定元素浓度。

为测定主根系层的土壤渗漏水,在华北落叶松

林和华山松林样地内,随机布设 7 个自制的内径 20 cm 的蒸渗仪,蒸渗仪内装填了未扰动的林地土壤,其土层厚度为 30 cm,筒内保留采集原状土柱地点的原有枯落物层及可能生长的草本和小灌木等林下植被。在每次降雨停止后,测定蒸渗仪底筒收集的土壤渗漏水,并采集化学分析的水样。

每场降雨后,将多点采集的林外降水以及各样地内多点采集的穿透水、干流、枯落物渗漏水及土壤渗漏水混合,分别形成混合水样;另外,在洪沟、草沟、大南沟小流域分别采集溪水水样。保留水样的体积为 500 mL,存储于冰柜内,及时送回北京的实验室进行处理、保存和分析。在 2011 生长季(5 月 24 日—10 月 20 日),共测定 22 次降雨事件,取得 528 瓶水样。

1.2.2 水样处理和化学分析

在野外用定性滤纸过滤水样后,立即用上海雷磁公司出产的 pH 计测定其 pH 值及电导率。在清华大学分析实验室,采用燃烧氧化-非分散红外吸收法,测定总有机碳(TOC)浓度。

1.2.3 TOC 浓度计算

某类水样在生长季中的 TOC 浓度平均值是各降雨事件中相应水量的加权计算值(式(1)):

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中, C 为生长季内某类水样(林外降水、穿透水、干流、渗漏水)的 TOC 平均浓度(mg/L), C_i 为单次降雨后测定的 TOC 浓度(mg/L), P_i 为单次降雨事件的某类水的水量(mm), P 为生长季内某类水的总量

(mm), n 为测定的降水次数。

林下降水包括林冠穿透水和干流,故其数值等于穿透水和干流的深度之和,其 TOC 浓度平均值是单独测定的穿透水与干流的 TOC 浓度的水量加权平均值。

本研究中,将森林生态系统复杂结构简化为 3 个作用层,即冠层(林冠层+灌草层)、枯落物层、主根系层土壤层(0—30 cm),则伴随降水转化通过各作用层的 TOC 通量依下面式(2)计算:

$$F = C \cdot P / 100 \tag{2}$$

式中, F 为通过某作用层的 TOC 通量(kg/hm^2), C 为 TOC 的平均浓度(mg/L), P 为通过各作用层的总水量(mm)。

在降水通过各个作用层时,会有 TOC 的吸附、交换、洗脱等作用过程,从而在发生水量变化的同时也

发生 TOC 浓度变化,综合形成各作用层对 TOC 通量的影响。依据下面式(3),计算通过某作用层的 TOC 通量(F_i) 相对其相邻上作用层输入的 TOC 通量(F_j)的变化(ΔF),即该作用层对上面相邻作用层的影响:

$$\Delta F = F_i - F_j \tag{3}$$

2 结果与分析

2.1 森林植被作用下的水流通量垂直变化

在香水河小流域的 2011 生长季(5 月 24 日—10 月 20 日)研究期间,共观测到 22 次降雨,总降雨量为 724.3 mm。其月际分配差异较大(表 3):在 5 月份降雨量为 0,6 月份降雨量不大,到 7 月份开始急剧增加,8 月份比 7 月份稍有降低,9 月份由于暴雨出现而达到最大,在 10 月份则迅速减少。

表 3 2011 生长季和各月的六盘山主要森林样地的降水再分配特征

Table 3 The monthly redistribution of precipitation during the growing season of 2011 in the main forests at Liupan Mountains

样地名称 Sample plot	月份 Months	降雨量 Precipitation/ mm	截留量 Interception		干流量 Stemflow		穿透降雨 Throughfall		林下降水 Rainfall under canopy		枯落物渗漏水 Humus leakage/ mm	土壤渗漏水 Soil leakage/ mm
			/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%		
华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	0.2
	6	83.3	19.2	23.02	0.1	0.09	64.0	76.88	64.1	76.98	34.7	32.4
	7	188.0	37.9	20.17	0.5	0.29	149.5	79.54	150.1	79.83	104.7	23.3
	8	171.1	25.0	14.60	0.6	0.34	145.5	85.06	146.1	85.40	112.7	107.8
	9	232.3	36.6	15.76	1.0	0.44	194.7	83.80	195.7	84.24	135.6	59.4
	10	49.6	6.2	12.58	0.3	0.65	43.0	86.78	43.4	87.42	19.5	21.1
	5—10	724.3	124.9	17.25	2.6	0.35	596.8	82.40	599.4	82.75	407.2	244.2
华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	0.4
	6	83.3	14.3	17.13	0.3	0.39	68.7	82.48	69.0	82.87	40.8	32.8
	7	188.0	40.1	21.33	0.4	0.22	147.5	78.45	147.9	78.67	100.5	29.4
	8	171.1	14.7	8.58	0.3	0.20	156.1	91.21	156.4	91.42	119.7	123.3
	9	232.3	24.9	10.70	0.5	0.22	206.9	89.08	207.4	89.30	143.4	61.0
	10	49.6	8.4	16.98	0.2	0.31	41.0	82.71	41.2	83.02	20.0	29.0
	5—10	724.3	102.3	14.13	1.8	0.24	620.2	85.63	622.0	85.87	424.3	275.9
桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
	6	83.3	17.8	21.33	0.1	0.11	65.4	78.56	65.5	78.67	34.8	
	7	188.0	35.1	18.66	0.3	0.17	152.6	81.17	152.9	81.34	95.9	
	8	171.1	31.6	18.47	0.4	0.22	139.1	81.31	139.5	81.53	101.1	
	9	232.3	52.4	22.54	0.5	0.20	179.5	77.26	179.9	77.46	115.8	
	10	49.6	8.8	17.81	0.1	0.11	40.7	82.08	40.8	82.19	20.7	
	5—10	724.3	145.6	20.11	1.3	0.18	577.3	79.71	578.7	79.89	368.3	
野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
	6	83.3	11.6	13.98	0.2	0.21	71.5	85.81	71.7	86.02	45.2	
	7	188.0	23.4	12.44	1.2	0.63	163.4	86.93	164.6	87.56	136.1	
	8	171.1	18.6	10.86	1.4	0.81	151.1	88.33	152.5	89.14	139.1	

续表

样地名称 Sample plot	月份 Months	降雨量	截留量		干流量		穿透降雨		林下降水		枯落物渗漏水	土壤渗漏水
		Precipitation/ mm	Interception		Stemflow		Throughfall		Rainfall under canopy		Humus leakage/ mm	Soil leakage/ mm
			/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%		
辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	9	232.3	28.2	12.14	1.5	0.66	202.6	87.20	204.1	87.86	185.9	
	10	49.6	4.4	8.91	0.4	0.86	44.8	90.23	45.2	91.09	18.7	
	5—10	724.3	86.2	11.91	4.7	0.65	633.4	87.44	638.1	88.09	525.0	
	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
	6	83.3	15.8	19.02	0.2	0.30	67.2	80.69	67.5	80.98	29.2	
	7	188.0	44.4	23.61	0.7	0.40	142.9	76.00	143.6	76.39	119.3	
	8	171.1	41.8	24.43	0.5	0.31	128.8	75.26	129.3	75.57	46.0	
	9	232.3	42.8	18.43	0.7	0.28	188.8	81.29	189.5	81.57	118.3	
	10	49.6	11.3	22.84	0.2	0.37	38.1	76.80	38.3	77.16	18.1	
	5—10	724.3	156.2	21.56	2.4	0.33	565.8	78.11	568.1	78.44	330.8	
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
	6	83.3	26.6	31.94	0.8	1.02	55.8	67.04	56.7	68.06	34.6	
	7	188.0	43.0	22.87	2.5	1.35	142.5	75.78	145.0	77.13	125.6	
	8	171.1	37.7	22.04	2.1	1.22	131.3	76.74	133.4	77.96	50.1	
	9	232.3	37.8	16.29	2.7	1.18	191.7	82.53	194.5	83.71	170.9	
	10	49.6	11.2	22.56	0.5	0.98	37.9	76.46	38.4	77.44	21.6	
	5—10	724.3	156.3	21.59	8.7	1.20	559.3	77.21	568.0	78.41	402.6	

* 观测从 5 月 24 日开始,10 月 20 日结束

降水进入森林后进行了一连串的再分配,形成了冠层截留、直接穿透雨、干流、枯落物渗漏水 and 土壤渗漏水。因植被特征差异,各样地的降雨分配存在差异。由表 3 可知,2011 年生长期(5 月 24 日—10 月 20 日)的截留量(率)在油松人工林最大,达到 156.3 mm(21.59%),其次为辽东栎次生林的 156.2 mm(21.56%)、桦木次生林的 145.6 mm(20.11%)、华北落叶松人工林的 124.9 mm(17.25%)、华山松次生林的 102.3 mm(14.13%)、野李子灌丛的 86.2 mm(11.91%)。目前国内研究的林冠截留率大多介于 10%—35%^[14-15],但一些地区有时会超过 50%^[16-17]。本研究中截留率接近于徐丽宏等^[18]2004—2005 年生长季对六盘山主要植被类型的林冠层截留结果。

各主要植被类型的干流量月统计表明,干流量随降雨量增大而升高,但干流率均不高。影响干流的因素很多,包括树种、树干粗细、直立程度、树皮干燥程度等。在各样地的干流量(率)中,以油松人工林最大,达到 8.7 mm(1.20%);野李子灌丛次之,达到 4.7 mm(0.65%);桦木次生林最小,为 1.3 mm(0.18%)。

由表 3 可看出,各样地的月穿透水量随林外降水量增大而增大,其在各水文分量中都是最大。各

样地的穿透水量(mm)依次为野李子灌丛(633.4)>华山松林(620.2)>华北落叶松林(596.8)>桦木林(577.3)>辽东栎林(565.8)>油松林(559.3),分别占同期降水量的 87.44%、85.63%、82.40%、79.71%、78.11%、77.21%。

枯落物渗漏水大小与各林分样地的枯落物数量和分解状况等有关,由大到小依次为野李子灌丛(525.0 mm)>华山松林(424.3 mm)>华北落叶松林(407.2 mm)>油松林(402.6 mm)>桦木林(368.3 mm)>辽东栎林(330.8 mm),并随各月降水量增大而增大。

土壤渗漏水与立地条件、植被生长耗水、土壤机械组成等多种因素密切相关。基于本文测定,华北落叶松林和华山松林在 2011 年生长季的土壤(0—30 cm)渗漏水分别为 244.2 和 275.9 mm。

2.2 各水文分量的 TOC 浓度变化

从表 4 可看出,在降水通过森林各层次的过程中,TOC 浓度均发生了改变。雨季大气降水的 TOC 平均浓度为(7.34±0.098) mg/L;由于降水通过林冠时和树体接触发生淋洗作用,TOC 浓度明显增加,并在干流中达到最大。通过各样地枯落物层的渗漏水 TOC 浓度比林冠穿透水继续明显增加。在经过主

根系土壤层后,由于土壤过滤作用,华北落叶松林和华山松林的土壤渗漏水 TOC 浓度均低于其枯落物渗漏水 TOC 浓度。在本文研究的森林流域,溪水主要是雨水入渗到土壤后形成的壤中流和基流组成的,溪水的 TOC 浓度远低于林外降水,说明土壤具有突出的 TOC 过滤作用。需要说明的是,表 4 中假设林外降水的 TOC 平均浓度对所有样地都一样,各样地对应的溪水 TOC 浓度为各样地所在子流域的溪水实测均值。

降水转化中的 TOC 浓度 (mg/L) 变化对华北落叶松林表现为林外降水 (7.34) < 土壤渗漏水 (17.63) < 穿透水 (21.92) < 枯落物渗漏水 (22.29) < 干流 (56.89), 对华山松林表现为林外降水 (7.34) < 穿透水 (17.11) < 土壤渗漏水 (24.04) < 枯落物渗漏水 (24.72) < 干流 (25.68), 对桦木林为林外降水 (7.34) < 穿透水 (11.47) < 枯落物渗漏水 (22.9) < 干流 (23.57), 对油松林为林外降水 (7.34) < 穿透水 (16.23) < 枯落物渗漏水 (28.55) < 干流 (37.9), 对野李子灌丛为林外降水 (7.34) < 穿透水 (12.41) < 干流 (18.12) < 枯落物渗漏水 (24.64), 对辽东栎林为林外降水 (7.34) < 穿透水 (11.05) < 干流 (21.04) < 枯落物渗漏水 (23.94)。

大气降水进入森林后 TOC 浓度增加,是因降水

对叶面或树皮上有机碳的淋洗或淋溶^[10],因而冠层结构和组成是重要影响因素。在测定的 6 种森林样地中,穿透水的 TOC 浓度 (mg/L) 为华北落叶松林 (21.92) > 华山松林 (17.11) > 油松林 (16.23) > 灌丛 (12.41) > 桦木林 (11.47) > 辽东栎林 (11.05), 表现为针叶林的 TOC 淋洗或淋溶能力较阔叶林强,这不同于罗艳等^[11]对鼎湖山 3 种主要林型总有机碳浓度的研究结果,这可能与具体林分的冠层叶量有关,也可能与不同地点的降雨特征差异有关,还有待深入定量研究。

降水在树皮中停留时间和树皮形态及可溶性 TOC 含量是影响干流 TOC 浓度的主要因素^[2,10]。针叶树(尤其华北落叶松和油松)树皮一般较粗糙,并有分层结构,故相对其它树种可将雨水滞留更长时间,所以其干流 TOC 浓度明显高于阔叶树种,也高于本身的其他水文分量。华山松的干流 TOC 浓度在 3 个针叶树中最低,是因其树皮光滑且量少。对其它 3 个阔叶树种,因其树皮较光滑,滞水能力相对较差,所以干流 TOC 浓度也低,与枯落物渗漏水相近。

枯落物渗漏水的 TOC 浓度整体而言大于穿透水,主要是因对枯落物的淋洗淋溶造成的。不同样地的枯落物渗漏水 TOC 浓度增加程度存在一些差异,这与枯落物的厚度和组成有关。

表 4 2011 生长季典型森林植被样地水文转化过程中的 TOC 平均浓度 (mg/L)

Table 4 The mean TOC concentration in rainwater flowing through forests in growing season of 2011

水文分量 Water components	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation
林外降水 Precipitation	7.34±0.098	7.34±0.098	7.34±0.098	7.34±0.098	7.34±0.098	7.34±0.098
穿透水 Throughfall	21.92±0.200	17.11±0.209	11.47±0.084	12.41±0.259	11.05±0.124	16.23±0.169
干流 Stemflow	56.89±0.285	25.68±0.229	23.57±0.131	18.12±0.171	21.04±0.146	37.90±0.436
枯落物渗漏水 Humus leakage	22.29±0.304	24.72±0.210	22.90±0.213	24.64±0.217	23.94±0.206	28.55±0.345
土壤渗漏水 Soil leakage	17.63±0.200	24.04±0.175				
溪水 Stream water	3.88±0.087	3.88±0.087	3.88±0.087	3.45±0.069	3.59±0.057	3.59±0.057

2.3 林内各作用层的 TOC 通量

由表 5 可知,2011 年生长季林外降水携带的 TOC 通量为 53.17 kg/hm²。各林分样地的林下降水(穿透水和干流)携带的 TOC 通量均高于林外降水,说明林冠层具有 TOC 的净淋出作用。各样地的生长季林下降水 TOC 通量的大小 (kg/hm²) 排序为华北

落叶松林 (132.28) > 华山松林 (106.56) > 油松林 (94.10) > 野李子灌丛 (79.49) > 桦木林 (66.52) > 辽东栎林 (63.01)。

各样地枯落物渗漏水的生长季 TOC 通量 (kg/hm²) 排序为野李子灌丛 (129.35) > 油松林 (114.93) > 华山松林 (104.90) > 华北落叶松林 (90.76) > 桦木林

(84.35)>辽东栎林(79.21)。(43.04),这可能和华山松林土壤结构比较疏松和大孔隙较多有关。

经过主根系层土壤后的渗透水的生长季 TOC 通量 (kg/hm²) 为华山松林 (66.33) > 华北落叶松

表 5 2011 年生长季典型森林植被样地降水转化中各作用层的 TOC 通量 (kg/hm²)

Table 5 TOC flux with rainwater flowing through the forests in the growing season of 2011

水文分量 Water components	华北落叶松 人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation
林外降水 Precipitation	53.17	53.17	53.17	53.17	53.17	53.17
穿透水 Throughfall	130.82	106.11	66.22	78.63	62.51	90.80
干流 Stemflow	1.46	0.45	0.31	0.86	0.50	3.30
林下降水 Rainfall under canopy	132.28	106.56	66.52	79.49	63.01	94.10
枯落物渗漏水 Humus leakage	90.76	104.90	84.35	129.35	79.21	114.93
土壤层渗漏水 Soil leakage	43.04	66.33				

2.4 各作用层间 TOC 通量的差别

在降水接触植被表面、枯落物和土壤时,都会发生 TOC 的淋失、吸附和吸收等过程,加之水量变化,造成了 TOC 通量在各作用层的差别(表 6)。

林冠层表面积巨大,一般会有降水在林冠层的 TOC 净淋洗作用^[19],包括对树体表面积累的干沉降的洗脱作用,这导致树冠对林地 TOC 输入的“源”作用。在本研究中,各林分样地的林下降水携带 TOC

通量(kg/hm²)相对林外降水均有不同程度的增加,其中华北落叶松林增幅最大(77.65),华山松林(52.94)和油松林(37.63)次之,表明针叶林冠层(针叶、枝条和树皮)的 TOC 净淋出作用很强;相比之下,桦木林和辽东栎林的 TOC 通量仅增大了 13.05 和 9.34,说明阔叶林冠层的 TOC 净淋出作用不强;野李子灌丛的 TOC 通量增幅也不是很大(25.46)。

表 6 2011 年生长季典型森林植被样地的不同作用层的 TOC 通量差别(kg/hm²)

Table 6 The difference of TOC flux of rainwater at each forest layer in the growing season of 2011

比较的作用层 Layers to be compared	华北落叶松 人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	辽东栎次生林 <i>Quercus liaotungensis</i> secondary forest	油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation
林下降水-林外降水 Rainfall under canopy-Precipitation	77.65	52.94	13.05	25.46	9.34	37.63
枯落物渗漏水-林下降水 Humus leakage-Precipitation	-41.52	-1.67	17.83	49.86	16.19	20.83
土壤层渗漏水-枯落物渗漏水 Soil leakage-Humus leakage	-47.71	-38.57				
土壤层渗漏水-林外降水 Soil leakage-Precipitation	-10.12	13.16				

枯落物层渗漏水与林下降水携带的 TOC 通量之差,可指示枯落物层对输入林地的 TOC 通量的作用,其值在华北落叶松林和华山松林内均为负值,说明其枯落物层具有 TOC 的净吸附或净储存的“汇”作用,也说明这两种森林内部的 TOC 增加主要源于雨水对冠层的淋洗。而在其他四个样地的枯落物层渗

漏水的 TOC 通量均大于林下降水,说明这几种森林样地的枯落物层具有净增加林地 TOC 输入通量的“源”作用。

本文仅测定了华北落叶松林和华山松林 2 种森林样地的主根系层土壤渗漏水,其携带的 TOC 通量(kg/hm²)相对于枯落物渗漏水均降低了,其减幅比

较接近,分别为 47.71 和 38.57,说明土壤层对输出主根系层的 TOC 通量具有净吸附固定的“汇”作用。

林地主根系层土壤渗漏水的 TOC 通量与林外降水 TOC 通量的差,可以表明森林生态系统对林外降水输入的 TOC 通量的作用。在本研究中,表现为华北落叶松林生态系统(仅考虑到主根系层的 0—30 cm)对降水输入 TOC 通量有净固定作用,其值为 10.12 kg/hm²;华山松林生态系统对降水输入 TOC 通量有净淋出作用,其值为 13.16 kg/hm²。

3 讨论和结论

在宁夏六盘山地区,林外降水的 TOC 浓度(7.34 mg/L)明显高于一些其他地区的报道值(表 7),如广东鼎湖山(2.4 mg/L)^[12]、中国台湾关刀溪(4.7 mg/L)和一些国外温带森林研究结果(1.0—2.9 mg/L)^[8-10,20-25],这可能和地处干旱地区的六盘山降水量少有关。

表 7 一些研究地点降水转化中的 DOC 或者 TOC 浓度(mg/L)

Table 7 Concentration of DOC or TOC in the rainwater flowing through forests at some study sites

试验地点 Site	测定项目 Items	森林类型 Forest type	林外降水 Precipitation	穿透水 Throughfall	干流 Stemflow	土壤渗漏水 Soil leakage		溪水 Stream water	参考文献 References
						0—15 cm	15—30 cm		
美国新罕布什尔州 Hubbard Brook, New Hampshire, USA	DOC	硬木阔叶林	1.1	33.9		5.9	3.0	3.1	[21]
加拿大魁北克省希莱尔 Mont St, Hilaire, Quebec	DOC	硬木阔叶林	2.0	12.3		47.6	18.0		[22]
美国华盛顿奥林匹克公园 Olympic National Park, Washington, USA	DOC	针叶林	1.5±1.1	10.5±17.9	25.5±9.3				[23]
		硬木阔叶林	1.5±1.1	7.3±5.5	26.3±16.3	9.0±4.6	2.9±1.1	1.0±1.0	
波多黎各卢科伊罗山 Luquillo Mountains, Puerto Rico	DOC		1.0	6.2				1.9	[10]
美国威斯康星州下威斯康星河 Lower Wisconsin River Valley, Wisconsin, USA	DOC	北美赤松	2.9±0.2	11.8±0.9					[24]
新西兰华兰 Westland, New Zealand	DOC	桦木林	1.4±0.7	16.0±12.3	35.6±68.6	55.7±37.6		4.5±1.7	[25]
日本熊本县 Kumamoto, Japan	DOC	针叶林	1.0	4.3	11.5				[9]
		硬木阔叶林	1.0	3.1	7.1				
美国马萨诸塞州哈佛森林 Harvard Forest, Massachusetts, USA	DOC	针叶林	1.8±0.7	24.7±3.2					[8]
		硬木阔叶林	1.8±0.7	29±6.9					
中国台湾关刀溪 Guandaoshi, Taiwan, China	DOC	杉木林	4.7	7.0	30.8	8.8	7.7	2.7	[20]
		次生阔叶	4.7	9.9	10.0	15.5	13.5		
		天然阔叶林	4.7	8.3	7.2	21.3	11.0		
广东鼎湖山	TOC	马尾松林	2.4±1.2	12.9±7.9	52.1±25.6	12.8±4.4	12.1±6.8	5.1±5.3	[12]
		季风林	2.4±1.2	14.6±12.2	18.6±9.7	10.8±8.3	5.5±1.5	2.0±0.5	
		混交林 1	2.4±1.2	14.2±13.6	21.5±10.7	13.6±4.3	10.2±5.7	1.8±0.7	
		混交林 2	2.4±1.2	13.2±13.1	23.9±11.8	11.9±5.3	5.4±2.9		

* DOC:可溶性有机碳

由于雨水对树体表面的淋洗^[26]和冲刷^[10],在林外降水转为穿透水和干流过程中,TOC 浓度明显增大。对六盘山所有测试树种,TOC 浓度均在干流中达到最高,变化在 18.12—56.89 mg/L,略高于其它地区的测定值范围(7.1—52.1 mg/L)^[8-11,20-25]。六盘

山主要森林类型穿透降水的 TOC 浓度变化在 11.05—21.92 mg/L,平均 15.03 mg/L,稍高于广东鼎湖山(12.9—14.6 mg/L)^[12],高于中国台湾中部关刀溪(7.0—9.9 mg/L)^[20],但在其他地区的变化范围(3.1—33.9 mg/L)之内。这些地区差别,可能

既与树种形态特征有关,也与区域降水特征有关^[9]。

在林下降水转为枯落物层渗漏水过程中,其 TOC 浓度变化与树种特征、枯落物数量和组成、生长物候期等均有关^[27-28]。六盘山主要森林类型枯落物渗漏水的 TOC 浓度变化在 22.29—28.55 mg/L,相互差别不大,但整体上低于广东鼎湖山的马尾松林(31.7)、针阔混交林(28.3)和季风林(25.5)^[13],这可能与六盘山地区温度低枯落物分解慢有关。

土壤渗漏水 TOC 含量与土壤有机质含量密切相关,并一般随土壤酸度增加而降低^[29]。在六盘山典型森林植被中,土壤渗漏水(0—30 cm)的 TOC 浓度(mg/L)变化在 17.63—24.04,高于广东鼎湖山(5.4—12.1)^[12]和中国台湾关刀溪(7.7—11.0)^[20],这可能与南方土壤有机质含量低和土壤严重酸化导致有机质分解缓慢有关^[30]。

在六盘山香水河小流域几个子流域的溪水中,TOC 浓度较接近,变化在 3.45—3.88 mg/L,显著低于从林外降水到土壤渗漏水的各转换环节,说明深层土壤的 TOC 吸附拦截作用不容忽视,这与国内外其他地方研究结果相同^[10,20-21,23,25],并处在相近的数值范围内。

本文在六盘山的研究表明,随着雨水穿过林冠和植被表面接触,发生了生长季内的 TOC 通量变化,并在不同树种林分之间具有显著差别。相对于林外降水的 TOC 通量(53.17 kg/hm²),由穿透降水和干流组成的林下降水的 TOC 通量在所有林分样地都增大了,表明所有森林类型的林冠层均有 TOC 净淋出作用。但整体看来,林冠的 TOC 净淋出作用在针叶林内很大,在阔叶林内较弱,其原因可能是阔叶树的叶面光滑因此与针叶树林冠相比难以拦截和储存大量干沉降,或阔叶树的叶片革质化程度高从而被雨水浸出 TOC 较少等,其具体原因有待继续深入研究。

生长季内六盘山不同林分枯落物渗漏水的 TOC 通量变化在 79.21—129.35 kg/hm²,平均为 100.58 kg/hm²。在研究的几种森林样地中,仅华北落叶松人工林和华山松次生林的枯落物渗漏水的 TOC 通量低于林下降水的 TOC 通量,说明这两种森林样地的枯落物层起着净固定 TOC 的“汇”作用;而其他四种森林样地的枯落物层 TOC 通量高于林下降水,说明其枯落物层对 TOC 通量起着净输出的“源”作用。

由于工作量原因,本文在 6 个样地中仅测定了

华北落叶松林和华山松林的主根系层土壤(0—30 cm)渗漏水的生长季 TOC 通量,二者数值分别为 43.04 和 66.33 kg/hm²,它们都大大低于枯落物渗漏水的 TOC 通量,说明土壤层起着最重要的吸收固定 TOC 的“汇”作用;溪水中的 TOC 含量降到了 3.45—3.88 mg/L,仅为林外降水 TOC 含量的一半左右,这说明土壤层起着过滤和固定 TOC 的巨大作用。

林内不同水文学过程的 TOC 浓度和通量变化,可反映森林内部伴随雨水转化发生的碳转运过程。可以认为,在六盘山地区,林冠层具有对林外降水输入 TOC 通量的净增加(淋溶和淋洗)作用;枯落物层具有对林下降水输入 TOC 通量的减少或增加作用,表现为某种程度的缓冲作用,即在林下降水 TOC 通量低时增加和高时减少,同时这个缓冲作用可能和不同森林类型的枯落物的数量、性质及分解程度等有关,其具体作用机制和不同因素的贡献都还有待深入探讨;但主根系层(土壤层)可大大降低枯落物层渗漏水输入的 TOC 通量,起着净固定作用。

综合来看,林外降水为森林生态系统输入了相当数量的 TOC(“源”作用)。对于森林生态系统内随降水发生的 TOC 转化而言,作为“TOC 活库”的林冠层具有增加 TOC 通量的“源”作用,作为“TOC 死库”的枯落物层可起增加 TOC 通量的“源”作用或减少 TOC 通量的“汇”作用。由于林地土壤层(0—30 cm 土层渗漏水)的 TOC 输出通量低于林下降水和枯落物渗漏水的 TOC 输入通量,因而说森林土壤能发挥固定 TOC 的“库”作用。

References:

- [1] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, Johnson D W. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science*, 1986, 231(4734): 141-145.
- [2] Puckett L J. Estimates of ion sources in deciduous and coniferous through-fall. *Atmospheric Environment*, 1990, 24: 545-556.
- [3] Ma X H. *Forest Hydrology*. Beijing: China Forestry Press, 1993, 43-45.
- [4] Yang X, Wang M X. Reviews of several aspects of terrestrial carbon cycling. *Progress In Geography*, 2001, 16(3): 427-435.
- [5] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [6] Raich J W, Schlesinger W H. The Global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [7] Greenberg A E. *Standard Methods for Examination of Waters and*

- Watersheds. Washington, DC: American Public Health Association, 1992, 64(3/4): 51-59.
- [8] Currie W S, Aber J D, McDowell W H, Boone R D. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests. *Biogeochemistry*, 1996, 35(3): 471-505.
- [9] Inagaki M, Sakai M, Ohnuki Y. The effects of organic carbon on acid rain in a temperate forest in Japan. *Water Air Soil Pollution*, 1995, 85(4): 2345-2350.
- [10] McDowell W H. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 1998, 14(4): 521-536.
- [11] Luo Y, Zhou G Y, Zhang D Q, Guan L L, Ouyang X J, Chu G W. Study on the concentration of total organic carbon in the forest hydrological processes of three main forest types in Dinghushan during a rain season. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2973-2978.
- [12] Yin G C, Zhou G Y, Zhang D Q, Wang X, Chu G W, Liu Y. Dynamics of total organic carbon (TOC) in hydrological processes in coniferous and broad-leaved mixed forest of Dinghushan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1655-1660.
- [13] Qiao Y N, Yin G C, Luo Y. Dynamics of total organic carbon (TOC) in hydrological processes and its contributions to soil organic carbon pools of three successional forest ecosystems in southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2300-2307.
- [14] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, Huang G H, Li J B, Yao J M, Tan W, Xiang R, Zhang X L. Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, 10(1): 65-77.
- [15] Whitehead D, Kelliher F M. A canopy water balance model for a *Pinus radiata* stand before and after thinning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 55(1/2): 109-126.
- [16] Chang Z Y, Bao W K, He B H, Yang Y C, He Q H. Interception and distribution effects of mixed artificial *Pinus tabulae formis* and *Pinus armandi* forests on precipitation in the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 37-40.
- [17] Lankreijer H, Hendriks M J, Klaassen W. A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 64(3/4): 187-199.
- [18] Xu L H, Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, Yu P T. Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [19] Chiwa M, Crossley A, Sheppard L J, Sakugawa H, Cape J N. Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments. *Environmental Pollution*, 2004, 127(1): 57-64.
- [20] Liu C P, Sheu B H. Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and stream water at the Guandaushi subtropical forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172(2/3): 315-325.
- [21] McDowell W H, Likens G E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecological Monographs*, 1988, 58(3): 177-195.
- [22] Dalva M, Moore T R. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. *Biogeochemistry*, 1991, 15(1): 1-19.
- [23] Edmonds R L, Thomas T B, Blew R D. Biogeochemistry of an old-growth forested, Olympic National Park, Washington. *Journal of the American Water Resources Association*, 1995, 31: 409-419.
- [24] Quideau S A, Bockheim J G. Biogeochemical cycling following planting to red pine on a sandy prairie soil. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(4): 1167-1175.
- [25] Moore T R, Jackson R J. Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand. 2. Larry River. *Water Resources Research*, 1989, 25(6): 1331-1339.
- [26] Turkey H B. The leaching of substances from plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1970, 21(1): 305-324.
- [27] Peichl M, Moore T R, Arain M A, Dalva M, Brodkey D, McLaren J. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in an age-sequence of white pine forests in Southern Ontario, Canada. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 1-17.
- [28] Don A, Kalbitz K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2171-2179.
- [29] James B R, Riha S J. pH buffering in forest soil organic horizons: Relevance to acid precipitation. *Journal of Environmental Quality*, 1986, 15: 229-234.
- [30] Guo X M. Study of affects of acidification on organic matter stability in red soils from south China. Guangzhou: South China Normal University, 2008, 38-39.

参考文献:

- [3] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993, 43-45.
- [4] 杨昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 427-435.
- [11] 罗艳, 周国逸, 张德强, 官丽莉, 欧阳学军, 褚国伟. 鼎湖山三种主要林型水文学过程中总有机碳浓度对比. *生态学报*, 2004, 24(12): 2973-2978.
- [12] 尹光彩, 周国逸, 张德强, 王旭, 褚国伟, 刘艳. 鼎湖山针阔叶混交林水文学过程中总有机碳动态. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1655-1660.
- [16] 常志勇, 包维楷, 何丙辉, 杨以翠, 何其华. 岷江上游油松与华山松人工混交林对降雨的截留分配效应. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 37-40.
- [18] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [30] 郭杏妹. 酸化作用对华南红壤中有机质稳定性的影响研究. 广州: 华南师范大学, 2008, 38-39.