

DOI: 10.5846/stxb201607291557

胥超, 林成芳, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 陈仕东, 谢锦升, 杨玉盛. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Xu C, Lin C F, Liu X F, Xiong D C, Lin W S, Chen S D, Xie J S, Yang Y S. Effects of forest conversion on concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响

胥超^{1,2}, 林成芳^{1,2,*}, 刘小飞^{1,2}, 熊德成^{1,2}, 林伟盛^{1,2}, 陈仕东^{1,2}, 谢锦升^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要:米楮次生林转换成米楮人工幼林和米楮人工促进天然更新幼林(以下简称“人促幼林”)后,以这三种森林类型为研究对象,连续监测每次降雨后地表径流量及径流水中可溶性有机碳(DOC)的含量及通量,比较不同森林类型观测结果的差异,并分析降雨对实验结果的影响。结果表明:米楮人工幼林单次产流量是米楮次生林的 1.5—19.0 倍,观测期间总径流量为 5.9 倍;米楮人促幼林单次径流量和总径流量均与米楮次生林无显著差异($P>0.05$)。观测期间米楮次生林、人工幼林、人促幼林径流水 DOC 浓度值范围为 5.9—18.4 mg/L, 4.3—13.5 mg/L 和 3.2—9.9 mg/L,米楮次生林径流水浓度均值(12.6 mg/L)分别是米楮人促幼林(7.6 mg/L)和米楮人工幼林(5.3 mg/L)的 1.6 和 2.4 倍。回归分析表明,径流水中 DOC 浓度与降雨前土壤含水率呈显著相关;降雨前土壤含水率 20.8% 是一个临界值,含水率低于 20.8% 时,径流水 DOC 浓度与降雨前含水率呈显著正相关($P<0.05$);高于 20.8% 时,径流水 DOC 浓度与降雨前土壤含水率呈显著负相关($P<0.05$)。米楮人工幼林地地表径流 DOC 输出通量是米楮次生林的 0.7—5.4 倍,观测期间总输出通量为 2.1 倍;米楮人促林 DOC 单次通量和观测期间总通量均与米楮次生林差异不显著($P>0.05$)。三种森林类型 DOC 输出通量均与降雨量呈显著相关($P<0.05$)。可见,米楮次生林转变成米楮人工幼林后 DOC 输出浓度降低,但径流量显著增加,导致 DOC 输出通量增加;而转变成米楮人促幼林后 DOC 输出浓度也降低,但径流量并未增加,因而并未增加 DOC 输出通量。

关键词:森林转换;地表径流;可溶性有机碳

Effects of forest conversion on concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff

XU Chao^{1,2}, LIN Chengfang^{1,2,*}, LIU Xiaofei^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2}, LIN Weisheng^{1,2}, CHEN Shidong^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}

1 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

Abstract: In order to elucidate the relationships between runoff parameters and variation in rainfall, we compared the volume, dissolved organic carbon (DOC) concentration, and DOC flux of runoff from *Castanopsis carlesii* (*C. carlesii*) secondary forest (SF) and from SF plots converted to young plantation (BC) or assisted naturally regenerated young forest (NR) after individual rainfall events. Our results indicated that the volume of the BC runoff was 1.5 to 19.0 times that that

基金项目:国家自然科学基金重点项目(31130013);国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1505233)

收稿日期:2016-07-29; **修订日期:**2016-12-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tonylef99@163.com

of the SF runoff, depending on the specific rainfall event. The total accumulated volume of the BC runoff during the research period was 5.9 times that of the SF runoff. However, neither the per-event nor the accumulated volume of the NR runoff differed significantly from those of the SF runoff. Meanwhile, the DOC concentration of the NR, BC, and SF runoff ranged from 5.9 to 18.4 mg/L, 4.3 to 13.5 mg/L, and 3.2 to 9.9 mg/L, respectively, and the mean DOC concentration of the SF runoff (12.6 mg/L) was 1.6 times that of the NR runoff (7.6 mg/L) and 2.4 times that of the BC runoff (5.3 mg/L). Regression analysis indicated that the DOC concentration of runoff water was significantly related to pre-rain soil water content, and DOC concentration was observed to increase with soil water content when the pre-rain soil water content was lower than 20.8%, and to decrease with soil water content when the pre-rain soil water content was higher than 20.8%. In addition, the DOC flux of the BC runoff was 0.7 to 5.4 times that of the SF runoff, and the total accumulated DOC flux from the BC runoff was 2.1 times that of the SF runoff. However, differences between the DOC flux of the NR and SF runoff were insignificant ($P>0.05$), and for all three forests, the DOC flux was significantly ($P<0.05$) related to rainfall. Therefore, the conversion of SF to BC reduced the DOC concentration of the runoff, but increased overall DOC flux owing to dramatic increases in runoff volume, whereas the conversion of SF to NR had no significant effects on DOC flux owing to the runoff's relatively low DOC concentration and volume.

Key Words: forest conversion; runoff; dissolved organic carbon

DOC 的流动性强,DOC 在水驱动下的迁移构成陆地生态系统生物化学循环的关键组成部分^[1,2]。陆地生态系统 DOC 的输出一方面能够为水生异养生物提供外来能源,影响水生系统的生产力^[3,4];另一方面与部分金属元素发生络合反应,合成有害的副产物,从而影响饮用水安全^[5]。而森林是陆地生态系统的主体,亦是陆地生态系统最大的碳吸存库^[6]。因此森林生态系统 DOC 的输出是影响陆地生态系统生物化学循环和和水生环境的关键。DOC 随水流迁移过程受到土壤类型、植被类型和地貌特征以及降雨特征等因素的影响^[7-9]。当植被类型和地貌特征等下垫面因素发生改变时,DOC 在水中迁移的生物化学和水文学过程亦随之改变^[8]。森林转换将天然/次生林砍伐后转换成其他森林类型彻底改变生态系统原有的下垫面特征,从而影响生态系统 DOC 的输出过程。

降雨特征也是影响 DOC 输出的重要因素。有研究发现全年高达 36%—50%的 DOC 输出量是由高强度短历时的降雨事件所引起^[10-12],甚至有记录表明一次暴风雨造成的流域内 DOC 的流失量占全年 DOC 总流失量的 31%—66%^[11,13]。因此,在雨量充足、暴雨频发的区域,对每次降雨事件后的 DOC 输出进行连续动态监测有助于明晰 DOC-降雨之间的内在联系。但是,已有的研究大多数只关注季节性的甚至年际性的 DOC 输出变化^[11]。

福建三明地区是我国南方集体林区重要的商品林基地,近年来区域内大量的地带性植被(常绿阔叶天然/次生林)砍伐后采用不同的经营方式进行森林再更新,形成了人工林、人促幼林和保留下来的天然/次生林等一系列的森林类型。受亚热带季风性气候的影响,该区降雨量大、且集中,暴雨频繁^[14]。并且,人为活动导致的气候变暖将使该区域的暴雨和年降雨总量呈逐渐增加趋势^[15]。因此,在气候变化的背景下,将原有天然/次生林转变成其它森林类型极大改变的生态系统 DOC 的生物化学循环过程。本研究选择雨季时期(2013 年 5 月—7 月)以每次侵蚀性降雨事件为观测频率,收集每次降雨后的径流水并测其 DOC 含量。此时期降雨频繁,且分布有不同类型的降雨类型,因而本研究的开展能够很好地揭示森林转换之后下垫面的变化对 DOC 的输出影响及其对降雨变化的响应机制。

1 试验地概况

研究区位于福建省三明市,该区西北倚靠武夷山脉,东南毗连戴云山脉。在地质构造上,处于闽东燕山断陷带中段。地貌特征以陡峭的低丘陵为主,平均坡度 25—35°,山地面积占全境的 82%。地势北高南低,平均

海拔为 300m。本区属中亚热带海洋季风气候,年均温 17—19.4 °C;多年平均降水量 1749 mm,最大年降水量达 2422.4 mm,最小年降水量 904.6 mm;年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%。

试验地设在三明市陈大国有林场金丝湾森林公园内的黄坑工区(26°19'N, 117°36'E)的米楮次生林内,该林地于 1978 年由米楮天然林经强度择伐后,封山育林而形成。乔木层优势种为米楮,其林分密 2650 株/hm²,平均树高为 19.7 m,平均胸径 13.5 cm;其他乔木树种有闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、木荷(*Schima superba*)等;林下灌木主要由鼠刺(*Itea chinensis*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)和山矾(*Symplocos caudata*)等构成;草本则以黑莎草(*Gannia tristis* Nees)、芒萁(*Dicranopteris dichotama*)和毛冬青(*Ilex pubescens*)等为主。

2 研究方法

2.1 试验设计与处理

选取米楮次生林内坡向一致、坡度相近的一面坡地(面积约 1.14 hm²)作为研究样地,对其进行采伐后以不同的森林经营方式进行再造林。具体的森林经营措施如下:

米楮人促幼林:2011 年 12 月对原有的米楮次生林进行采伐,采伐时以每亩 300—400 株的标准保留米楮萌生幼苗,采伐完后将采伐剩余物均匀地平铺、保留在采伐迹地内。加以封禁,任其自然更新。

米楮人工幼林:2011 年 12 月对原有米楮次生林进行皆伐。皆伐后仅对干材进行收获,采伐剩余物平铺于采伐迹地内,暴晒数月后于 2012 年 3 月进行火烧,火烧完后种植米楮实生苗,种植密度为 2300 株·hm⁻²。造林初期(前三年),每年对米楮人工幼林进行两次抚育劈草,整个观测期间不做任何施肥管理。

米楮人促幼林和米楮人工幼林的森林经营面积均约为 0.36 hm²,每种森林经营模式各设 3 个重复区域,各自分布于上、中、下坡位,每个重复区域面积约为 0.12 hm²,其中心部位建 20 m×5 m(顺坡方向×等高线方向)径流小区。未砍伐的米楮次生林内同样在上、中、下坡位设 3 个重复的径流小区。

2013 年调查时林分特征情况如表 1 所示,土壤主要理化性质见表 2。

表 1 福建三明米楮次生林、人工幼林和人促幼林的林分特征

Table 1 Characters of SF, BC and NR in Sanming, Fujian Province

林分类型 Forest type	平均坡度 Mean slope/(°)	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	平均覆盖度 Mean coverage/%
次生林	32.7	10.8	12.2	93.3%
人工幼林	32.2	1.2	1.3	53.6%
人促幼林	31.7	—	—	91.7%

表 2 福建三明米楮次生林、人工幼林和人促幼林土壤理化性质

Table 2 Physicochemical properties of soil in SF, BC and NR in Sanming, Fujian Province

林分类型 Forest type	pH	容重 Bulk density/(g/cm ³)	总碳 TC/(g/kg)	总氮 TN/(g/kg)	碳氮比
次生林	4.52±0.03	1.15±0.04	21.74±1.43	1.63±0.10	13.37±0.33
人工幼林	4.47±0.13	1.16±0.04	19.06±3.68	1.35±0.24	14.09±0.29
人促幼林	4.65±0.20	1.15±0.03	21.04±0.83	1.35±0.04	15.60±1.02

2.2 样品与数据采集

本研究选择 2013 年 5 月至 2013 年 7 月期间于每次侵蚀性降雨后测量径流量并采集径流溶液样品。于每次侵蚀性降雨的次日早上八点进行取样,取样前先测量径流池内径流水的深度以确定径流量。然后对径流池内径流水均匀搅拌,并用 1.5L 试剂瓶在径流池内不同位置 and 不同深度取径流样品。室内置于 4°C 环境下保存,采用 0.45 μm 滤膜对径流溶液进行过滤,岛津 TOC-VcPh 测定滤液的 DOC 浓度。

在实验样地空旷处设置气象站(雨棍 RR1008,北京)对降雨进行观测,样地内设置 EC5 土壤水分传感器

(AVALON, USA)对土壤含水率进行长期实时监测。分析时提取气象站降雨过程数据和 EC5 实时监测数据,将有降雨记录开始前一刻对应的土壤含水率定义为降雨前土壤含水率。

2.3 数据分析与处理

数据分析在 SPSS 19.0 内进行,观测期间三种森林类型径流量、径流水 DOC 浓度、通量之间的差异用重复测量方差分析进行检验(显著性水平设为 $\alpha=0.05$)。图形制作在 Origin 9.0 内完成。

3 结果

3.1 降雨与产流

2013 年 5 月至 2013 年 7 月期间共计发生侵蚀性降雨 16 次,最小和最大降雨量分别为 16.6 mm 和 120.8 mm。侵蚀性降雨总量 705.4 mm,占全年(2013 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日)侵蚀性降雨总量的 43%。

重复测量方差分析结果表明米楮人工幼林径流量显著高于米楮次生林和米楮人促幼林,米楮人促幼林径流量与米楮次生林无显著差异($P>0.05$)。米楮人工幼林单次产流量是米楮次生林的 1.5—19.0 倍,总径流量为 5.9 倍。

3.2 径流水中 DOC 浓度及其影响因素

3.2.1 径流水中 DOC 浓度

重复测量方差分析显示观测期间米楮人工幼林径流水 DOC 浓度显著($P<0.05$)低于次生林,而米楮人促幼林与次生林差异不显著($P>0.05$)。米楮次生林、米楮人促幼林和米楮人工幼林径流水 DOC 浓度值范围为 5.9—18.4 mg/L, 4.3—13.5 mg/L 和 3.2—9.9 mg/L。米楮次生林历次径流水 DOC 浓度均值为 12.6 mg/L,是米楮人工幼林(5.3 mg/L)的 2.4 倍。因此,米楮次生林转换成米楮人工幼林后 DOC 在地表径流中的输出浓度明显降低。

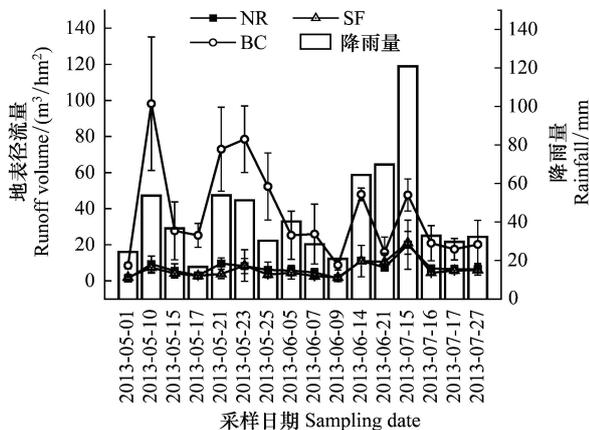


图 1 米楮人促幼林、米楮人工幼林和米楮次生林径流量与降雨量

Fig.1 Runoff volume and rainfall amount of NR, BC and SF

NR, 米楮人促幼林, assisted naturally regenerated *C. carlesii* young forest; BC, 米楮人工幼林, *C. carlesii* young plantation; SF, 米楮次生林, *C. carlesii* secondary forest

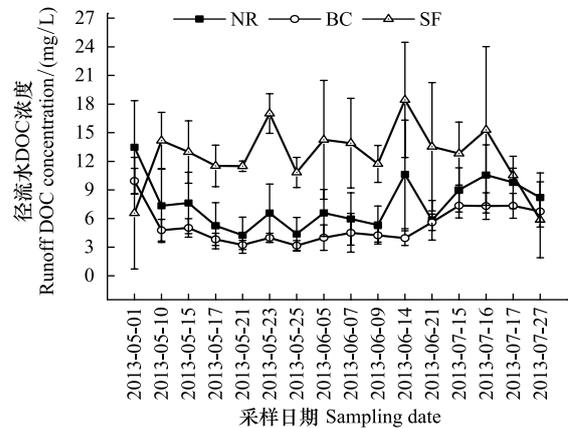


图 2 米楮人促幼林、米楮人工幼林和米楮次生林径流水 DOC 浓度

Fig.2 Runoff DOC concentration of NR, BC and SF

NR, 米楮人促幼林, assisted naturally regenerated *C. carlesii* young forest; BC, 米楮人工幼林, *C. carlesii* young plantation; SF, 米楮次生林, *C. carlesii* secondary forest

3.2.2 径流水 DOC 浓度的影响因素

米楮人促幼林和米楮人工幼林地表径流 DOC 浓度均与降雨前土壤含水率呈显著的($P<0.05$)负相关(图 3a 和图 3b),但是米楮次生林地表径流 DOC 浓度与降雨前土壤含水率呈显著($P<0.05$)正相关(图 3c)。观测期间正值雨季,土壤水分蒸发量小,米楮人促幼林和米楮人工幼林地上生物量明显小于次生林,因而地上植被对水分的吸收量小,导致米楮人促幼林和米楮人工幼林土壤含水率处在较高的范围而次生林土壤含水率则集

中在略低的水平(图 3),从而导致两种幼林径流水 DOC 浓度随土壤含水率的变化规律不同于米楮次生林。

3.3 径流水中 DOC 通量及其影响因素

重复测量方差分析结果显示米楮人工幼林径流水 DOC 通量显著($P < 0.05$)高于次生林和米楮人促幼林,人促幼林和次生林之间差异不显著($P > 0.05$)。就单次降雨事件而言,米楮人工幼林 DOC 通量是米楮次生林的 0.7—5.4 倍(图 4),观测期间累积 DOC 通量为 2.1 倍;而米楮人促幼林 DOC 通量与米楮次生林差异不显著($P > 0.05$)。

米楮人促林、米楮人工幼林和米楮次生林地表径流 DOC 输出通量均与降雨量呈极显著($P < 0.001$)线性相关(图 5)。因此,该区频繁的暴雨极容易造成土壤 DOC 的大量输出。

4 讨论

4.1 径流水 DOC 浓度的影响因素

4.1.1 森林类型对径流水 DOC 浓度的影响

本研究三种森林类型地表径流水 DOC 的浓度大小表现为米楮次生林>米楮人促幼林>米楮人工幼林,可见米楮次生林转变成其他不同森林类型之后对径流水 DOC 输出浓度有显著影响。

本研究中的三种不同下垫面实际上代表了三种不同大小的 DOC 库。米楮次生林地上生物量最高,降雨经过树冠/树干时所携带的 DOC 浓度更高,项目组前期研究发现米楮次生林穿透雨和树干茎流中 DOC 浓度高达 5.5—18.3 mg/L 和 11.3—18.6 mg/L^[16]。有研究认为林分生物量越高,降雨经过树冠层所能淋溶出来的养分浓度更高^[17]。此外,与幼龄林不同的是次生林能够在地表形成凋落物层,而凋落物层是 DOC 的主要来源之一^[18]。米楮次生林年凋落物量达 5.8 t/hm²,而 2 年生米楮人工幼林地未能形成明显的凋落物层。再者,次生林经皆伐、火烧后转变成人工林,土壤有机碳被火烧后瞬间大量损失,因此米楮人工幼林可供径流水淋溶的有机碳含量较低。

4.1.2 雨前土壤含水率对径流水 DOC 浓度的影响

McDowell 在早期提出了土壤中 DOC 的形成主要来源于微生物的分解产物^[19]。而土壤含水率能够通过影响微生物活性、土壤透气性、氧化还原环境等一系列因素来作用于 DOC 的合成,从而使得这一过程变得复杂。有关土壤含水率对 DOC 浓度的影响已有诸多甚至是相反的结论,有研究认为土壤含水率越高,所能浸提出来的 DOC 浓度越高,也有研究认为干燥的土壤 DOC 含量更高,更有报道表明 DOC 浓度不会受到土壤含水率的影响^[20]。目前,被普遍接受的观点认为干燥的土壤重新变湿润过程中,随着土壤含水率的提高,DOC 浓度也逐渐增加^[21]。Lundquist 就此规律给出了三种解释:(1)土壤干旱时期,微生物利用 DOC 的能力弱,DOC 得以储存在土壤中;(2)干燥土壤重新湿润之后,微生物周转加快,其代谢产物被浓缩;(3)干燥土壤被浸润之后,土壤结构被破坏,DOC 有效性提高^[22]。大量室内培养实验发现土壤水淹条件下 DOC 浸出浓度较高^[23-26];在自然条件下,亦有诸多研究发现流域内溪流水 DOC 的输出浓度和流域内的泥炭地面积大小呈正相关^[27-29],因为泥炭地长期处于水淹状态。水淹条件下,土壤处于还原状态,土壤中的铁和锰被还原使得原来被铁、锰氧化物吸附的 DOC 被释放出来^[30-32]。

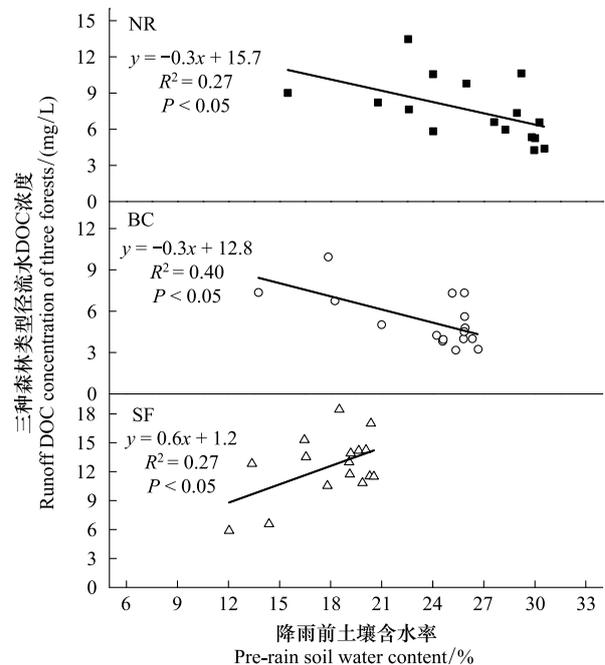


图 3 米楮人促幼林、米楮人工幼林和米楮次生林径流水 DOC 浓度与降雨前土壤含水率相关关系

Fig.3 Regression between DOC concentration of runoff water and pre-rain soil water content of NR, BC and SF

NR, 米楮人促幼林, assisted naturally regenerated *C. carlesii* young forest; BC, 米楮人工幼林, *C. carlesii* young plantation; SF, 米楮次生林, *C. carlesii* secondary forest

本研究的结果并没有发现径流水中 DOC 的输出浓度随降雨前土壤含水率的增加而逐渐增加(图 6)。和室内培养环境与农田土壤环境不同,森林土壤排水良好,不会出现水淹状况。目前,在森林土壤的自然环境条件下,尚无研究发现 DOC 的浸出浓度随着含水率的增加而增加的规律。那么森林土壤 DOC 的浸出浓度会随土壤含水率呈现怎样的变化?由于很少有研究对森林土壤的含水率状况进行长期动态监测,这一问题尚未得到很好地回答。本研究借助 EC5 对森林土壤含水率进行实时监测,并收集每一次降雨过后的径流溶液测其 DOC 含量,因而能够建立起自然条件下森林土壤径流水 DOC 的输出浓度与土壤含水率的良好关系。本研究的观测结果发现土壤 DOC 的浸出浓度与降雨前土壤含水率呈显著线性相关,观测期间降雨前土壤含水率变幅为 12.0%—30.7%,该含水率变化范围基本能代表我国亚热带各森林类型土壤含水率的季节变化^[33](易志刚 2003 生态学报)。当降雨前土壤含水率低于 20.8%时,DOC 浸出浓度随含水率的增加而增加,当降雨前土壤含水率高于 20.8%时,DOC 浸出浓度随含水率的增加而降低(图 6)。Michalzik 通过整合多个研究发现土壤存在一个最适含水率,在这个含水率下,DOC 的输出浓度最高^[34]。本研究的数据显示,土壤含水率处在 20% 环境下,最利 DOC 的输出。

4.2 降雨对 DOC 输出通量的影响

径流水中 DOC 的最终输出通量是生物化学过程和地表水文过程相互、共同作用的结果^[35-39]。降雨是影响地表水文过程的关键因素。本研究中米楮次生林、米楮人工幼林和米楮人促幼林 DOC 输出总量均与降雨量呈极显著线性相关,其他大量研究也得到类似的结果^[40]。可见,在雨量充沛、暴雨频繁的本研究区域,将有大量 DOC 随径流水流失。据报道,一次暴风雨所引起的径流水中 DOC 的输出量占全年 DOC 累积输出量的比例可高达 31%—66%^[11,13]。

4.3 森林转换对 DOC 输出通量的影响

综合以上分析,森林转换对 DOC 输出通量的影响主要是通过两个途径来实现,一是改变了 DOC 的养分库,从而影响径流水中 DOC 的浓度;二是改变了雨水流经的下垫面特征,从而改变了地表径流量。森林转换后,DOC 的最终输出量是两个过程的综合结果。

在森林生态系统中,雨水经过地上植被层后穿过地表凋落物层最终到达土壤层,并形成径流。因此径流水中 DOC 浓度直接受到各个层次 DOC 库存大小的影

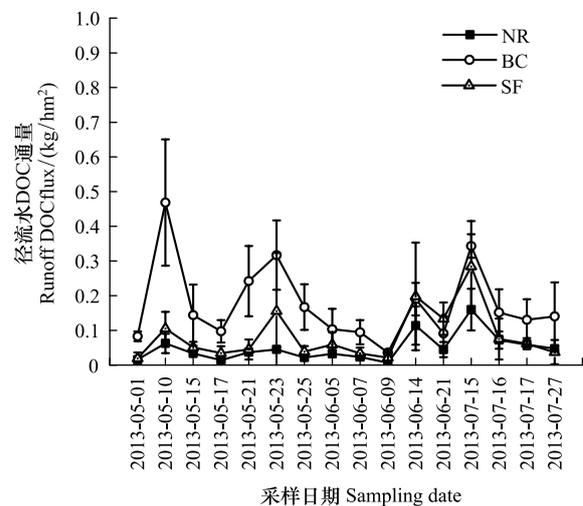


图 4 米楮人促幼林、米楮人工幼林和米楮次生林径流水 DOC 通量

Fig.4 Runoff DOC flux in NR, BC and SF

NR, 米楮人促幼林, assisted naturally regenerated *C. carlesii* young forest; BC, 米楮人工幼林, *C. carlesii* young plantation; SF, 米楮次生林, *C. carlesii* secondary forest

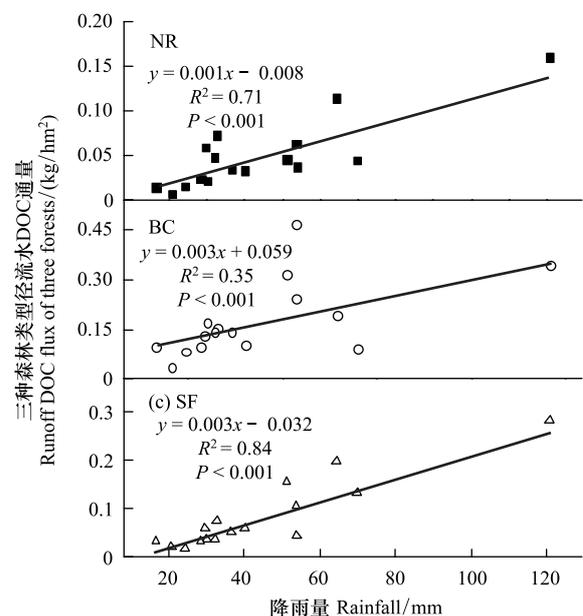


图 5 米楮人促幼林、米楮人工幼林和米楮次生林径流水 DOC 通量与降雨量相关关系

Fig. 5 Regression between runoff water DOC flux and rainfall amount

NR, 米楮人促幼林, assisted naturally regenerated *C. carlesii* young forest; BC, 米楮人工幼林, *C. carlesii* young plantation; SF, 米楮次生林, *C. carlesii* secondary forest

响。本研究的次生林转换成米楮人工幼林和米楮人促幼林后,地上生物量明显降低、凋落物层几乎没有。但是林分生物量越大,所能淋溶出的养分浓度就越高^[17],而凋落物层又是 DOC 的主要来源之一^[18],因此次生林转换后 DOC 浓度有所降低。虽然也有相当研究发现,森林砍伐将地上生物量收获提高了土壤微生物的活性,使养分从不可移动状态变成可移动状态,从而导致径流水中 DOC 浓度增加^[41-43],但这只是一个短期效应^[44,45]。

次生林转换成人工幼林之后,降雨-产流过程发生的下垫面也发生改变。复杂多层次的林分结果变得单一,地上植被对降雨动能的缓冲能力被削弱,导致地表产流显著增加。而且地表径流的增加幅度高于径流水中 DOC 浓度的减少幅度,最终表现为 DOC 的输出通量增加。而次生林转换成米楮人促幼林之后,虽然林分结构和生物量发生改变,但覆盖度并未下降,因而径流亦未增加,DOC 输出通量也没增加。

5 结论

米楮次生林转变成米楮人工幼林和米楮人促幼林之后使得不同森林类型之间的生物学过程和水文学过程发生改变,从而导致了降雨之后 DOC 的输出浓度和输出通量的差异。米楮次生林转变成米楮人工幼林后地上生物量降低土壤有机碳含量有所下降,因此 DOC 输出浓度降低。同时由于人工幼林地表覆盖度低,径流量显著增加,最终导致 DOC 输出通量增加。而人促幼林自形成时未经人为扰动,至本研究观测时地表覆盖度已较高,因而产流并未增加,DOC 输出通量也未增加。DOC 输出浓度还受到土壤含水率的显著影响,当土壤含水率处在 20.8%左右时最利于 DOC 输出,且降雨量越大 DOC 输出量越多。因此,在雨量充足,降雨频繁的本研究区域,森林转换加剧了人工幼林地的 DOC 输出通量,而对人促幼林的影响不大。

参考文献 (References):

- [1] Scott E E, Rothstein D E. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 83-92.
- [2] Laudon H, Berggren M, Ågren A, Buffam I, Bishop K, Grabs T, Jansson M, Köhler S. Patterns and dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in boreal streams: the role of processes, connectivity, and scaling. *Ecosystems*, 2011, 14(6): 880-893.
- [3] Aller R C, Blair N E. Carbon remineralization in the Amazon - Guianas tropical mobile mudbelt: a sedimentary incinerator. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2241-2259.
- [4] Pace M L, Cole J J, Carpenter S R, Kitchell J F, Hodgson J R, Van de Bogert M C, Bade D L, Kratzberg E S, Bastviken D. Whole-lake carbon-13 additions reveal terrestrial support of aquatic food webs. *Nature*, 2004, 427(6971): 240-243.
- [5] Raymond P A, Saiers J E. Event controlled DOC export from forested watersheds. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1/3): 197-209.
- [6] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [7] Strohmeier S, Knorr K H, Reichert M, Frei S, Fleckenstein J, Peiffer S, Matzner E. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: insights from high frequency measurements. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 905-916.
- [8] Sebestyen S D, Boyer E W, Shanley J B. Responses of stream nitrate and DOC loadings to hydrological forcing and climate change in an upland forest of the northeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, 114(G2): G02002.
- [9] Mattsson T, Kortelainen P, Räike A. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate. *Biogeochemistry*, 2005, 76(2): 373-394.

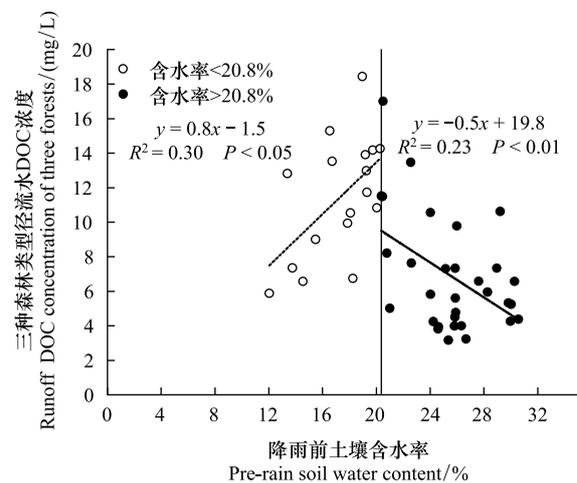


图 6 径流水 DOC 浓度随降雨前土壤含水率变化规律

Fig.6 DOC concentration of runoff water vary with pre-rain soil water content

图内空心圆圈代表观测期间三种森林类型降雨前土壤含水率小于 20.8%的观测事件($n=17$),黑色实心圆圈代表观测期间三种森林类型降雨前土壤含水率大于 20.8%的观测事件($n=31$)

- [10] Buffam I, Galloway J N, Blum L K, McGlathery K J. A stormflow/baseflow comparison of dissolved organic matter concentrations and bioavailability in an Appalachian stream. *Biogeochemistry*, 2001, 53(3): 269-306.
- [11] Hinton M J, Schiff S L, English M C. The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield catchments. *Biogeochemistry*, 1997, 36(1): 67-88.
- [12] Inamdar S P, Leary N, Mitchell M J, Riley J T. The impact of storm events on solute exports from a glaciated forested watershed in western New York, USA. *Hydrological Processes*, 2006, 20(16): 3423-3439.
- [13] Eimers M C, Buttle J, Watmough S A. Influence of seasonal changes in runoff and extreme events on dissolved organic carbon trends in wetland-and upland-draining streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, 65(5): 796-808.
- [14] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Xie J S, Gao R, Li Z, Jin Z. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216(1/3): 216-226.
- [15] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 宫鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈德亮, 高学杰, 戴晓苏. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.
- [16] 吕茂奎, 谢锦升, 江淼华, 罗水金, 曾少娟, 纪淑蓉, 万菁娟, 杨玉盛. 米槭常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2201-2208.
- [17] Ukonmaanaho L, Starr M, Lindroos A J, Nieminen T M. Long-term changes in acidity and DOC in throughfall and soil water in Finnish forests. *Environmental monitoring and assessment*, 2014, 186(11): 7733-7752.
- [18] Huang W Z, Schoenau J. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorus in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand. *Geoderma*, 1998, 81(3/4): 251-264.
- [19] 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.
- [20] Guggenberger G, Zech W. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin-degradation products in two coniferous forests, N E Bavaria, Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(1): 19-27.
- [21] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [22] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(7): 1031-1038.
- [23] Homann P S, Grigal D F. Molecular weight distribution of soluble organics from laboratory-manipulated surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(4): 1305-1310.
- [24] Kalbitz K, Knappe S. Influence of soil properties on the release of dissolved organic matter (DOM) from the topsoil. *Zeitschrift fuer Pflanzenernahrung und Bodenkunde (Germany)*, 1997, 160: 475-483.
- [25] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 水分状况对水稻土有机碳矿化动态的影响. *土壤*, 2006, 38(6): 750-754.
- [26] Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1191-1199.
- [27] Eckhardt B W, Moore T R. Controls on dissolved organic carbon concentrations in streams, southern Québec. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990, 47(8): 1537-1544.
- [28] Koprivnjak J F, Moore T R. Sources, sinks, and fluxes of dissolved organic carbon in subarctic fen catchments. *Arctic and Alpine Research*, 1992, 24(3): 204-210.
- [29] Hope D, Billett M F, Cresser M S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental pollution*, 1994, 84(3): 301-324.
- [30] Grybos M, Davranche M, Gruau G, Petitjean P, Pédrot M. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 13-19.
- [31] Gruau G, Dia A, Olivie-Lauquet G, Davranche M, Pinay G. Controls on the distribution of rare earth elements in shallow groundwaters. *Water Research*, 2004, 38(16): 3576-3586.
- [32] Olivie-Lauquet G, Gruau G, Dia A, Riou C, Jaffrezic A, Henin O. Release of trace elements in wetlands: role of seasonal variability. *Water Research*, 2001, 35(4): 943-952.
- [33] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 周丽霞, 张德强, 丁明懋. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, 2003, 23(8): 1673-1678.
- [34] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, Solinger S, Matzner E. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen-a synthesis for temperate forests. *Biogeochemistry*, 2001, 52(2): 173-205.
- [35] Lambert T, Pierson-Wickmann A C, Gruau G, Jaffrezic A, Petitjean P, Thibault J N, Jcu L. Hydrologically driven seasonal changes in the sources

- and production mechanisms of dissolved organic carbon in a small lowland catchment. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 5792-5803.
- [36] Aitkenhead J A, Hope D, Billett M F. The relationship between dissolved organic carbon in stream water and soil organic carbon pools at different spatial scales. *Hydrological Processes*, 1999, 13(8): 1289-1302.
- [37] Laudon H, Köhler S, Buffam I. Seasonal TOC export from seven boreal catchments in northern Sweden. *Aquatic Sciences*, 2004, 66(2): 223-230.
- [38] Sanderman J, Lohse K A, Baldock J A, Amundson R. Linking soils and streams: Sources and chemistry of dissolved organic matter in a small coastal watershed. *Water Resources Research*, 2009, 45(3): W03418.
- [39] Stutter M I, Lumsdon D G, Rowland A P. Three representative UK moorland soils show differences in decadal release of dissolved organic carbon in response to environmental change. *Biogeosciences*, 2011, 8(12): 3661-3675.
- [40] Jeong J J, Bartsch S, Fleckenstein J H, Matzner E, Tenhunen J D, Lee S D, Park S K, Park J H. Differential storm responses of dissolved and particulate organic carbon in a mountainous headwater stream, investigated by high-frequency, in situ optical measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G3):G30313.
- [41] Kreutzweiser D P, Hazlett P W, Gunn J M. Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems: a review. *Environmental Reviews*, 2008, 16: 157-179.
- [42] Creed I F, Band L E, Foster N W, Morrison I K, Nicolson J A, Semkin R S, Jeffries D S. Regulation of nitrate-N release from temperate forests: A test of the N flushing hypothesis. *Water Resources Research*, 1996, 32(11): 3337-3354.
- [43] Hornberger G M, Bencala K E, McKnight D M. Hydrological controls on dissolved organic carbon during snowmelt in the Snake River near Montezuma, Colorado. *Biogeochemistry*, 1994, 25(3): 147-165.
- [44] Kreutzweiser D P, Good K P, Capell S S, Holmes S B. Leaf-litter decomposition and macroinvertebrate communities in boreal forest streams linked to upland logging disturbance. *Journal of the North American Benthological Society*, 2008, 27(1): 1-15.
- [45] Lamontagne S, Carignan R, D'Arcy P, Prairie Y T, Paré D. Element export in runoff from eastern Canadian Boreal Shield drainage basins following forest harvesting and wildfires. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(S2): 118-128.