

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150238

热带季节雨林土壤 DOC 与 DN 特征及其影响因子

周文君^{1,2} 沙丽清¹ 张一平¹ 宋清海^{1,2} 刘运通¹ 邓云¹ 邓晓保¹

(1 中国科学院西双版纳热带植物园 西双版纳热带森林生态系统研究站 2 中国科学院大学)

摘要:为探明热带季节雨林土壤溶解态有机碳(DOC)、溶解态氮(DN)的时空动态及与土壤温、湿度和土壤酸度的关系,本研究在西双版纳热带季节雨林开展了土壤剖面DOC和DN含量的研究,在同一自然年度,在雾凉季(1月)、干季(3月)、雨季前期(5月)、雨季中期(8月)、雨季后期(10月),按0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm 分层采集土壤样品,测定土壤DOC和DN含量、土壤温、湿度和酸度。结果表明:西双版纳热带季节雨林土壤DOC和DN含量在0~60 cm 随深度增加而逐层递减,在60~100 cm 则随着深度增加而增加,总体表现为表层DOC和DN含量较深层土壤含量高的剖面特征。热带季节雨林各层土壤的DOC和DN的季节动态并不完全一致,呈雨季中后期高、干季低的季节特征。即DOC含量季节差异显著的土层为0~20和20~40 cm,而DN含量仅在0~20 cm 土层季节差异显著;土壤温湿度与DOC和DN的关系存在着层间差异,即0~20和20~40 cm 土壤DOC的含量与土壤湿度呈显著正相关关系;20~40 cm 的DOC含量与土壤温度呈显著正相关关系;0~20和80~100 cm 土层的DN含量与土壤湿度有显著的正相关关系;仅0~20 cm 土层的土壤温度与DN含量呈显著正相关关系;热带季节雨林土壤DOC和DN的含量与土壤酸度的关系不显著。以上结果表明热带季节雨林各层土壤的DOC和DN对温、湿度和酸度的反馈不同。

关键词:溶解态有机碳;溶解态氮;土壤剖面;影响因子;热带季节雨林

中图分类号:S718.55⁺6 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)09-0034-08

ZHOU Wen-jun^{1,2}; SHA Li-qing¹; ZHANG Yi-ping¹; SONG Qing-hai^{1,2}; LIU Yun-tong¹; DENG Yun¹; DENG Xiao-bao¹. **Characteristics and influencing factors of soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016) **38**(9) 34-41 [Ch, 36 ref.]

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna Station for Tropical Rain Forest Ecosystem Studies, Chinese Ecosystem Research Net, Mengla, Yunnan, 666303, P. R. China;

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, P. R. China.

In order to clarify the seasonal and profile dynamics of soil dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DN) contents, and to disclose the effects of soil temperature (T), soil water content (SWC) and pH on DOC and DN dynamics, we carried out a one-year study in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China. We measured soil DOC and DN content, T , SWC, and pH variation at soil depths of 0-20, 20-40, 40-80 and 80-100 cm in the fog-cool season (January), dry hot season (March), the beginning of rainy season (May), the middle of the rainy season (August) and the end of the rainy season (October) of one year. The results showed: from surface to the 60 cm depth along the soil profile, DOC and DN concentrations decreased; to the contrast, from the 60 cm to 100 cm depth, DOC and DN concentrations increased. The soil DOC and DN concentrations in the surface soil layer (0-20 cm) were the highest along the soil profile in the tropical rainforest. The seasonal variations

收稿日期: 2015-08-28 修回日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1202234、31290221、40801035)、中国科学院科技先导项目(XDA05020302、XDA05050601)、中国科学院135项目(XTBC-F01)、热带森林生态学重点实验室项目(09KF001B04)。

第一作者: 周文君, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 全球变化。Email: zhouwj@xtbg.ac.cn 地址: 650223 云南省昆明市学府路88号中国科学院西双版纳热带植物园。

责任作者: 张一平, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 全球变化。Email: yipingzh@xtbg.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

of soil DOC and DN concentrations showed a higher value in the middle/late rainy season than in the dry seasons. But significant seasonal dynamics only occurred in soil DOC concentration at soil layers of 0–20 cm and 20–40 cm and in DN concentration at soil layer of 0–20 cm. The correlations between soil DOC/DN concentration and SWC and T were different among soil layers. There were significantly positive correlations between DOC concentration and SWC at soil layers of 0–20 cm and 20–40 cm, between DOC concentration and T at soil layers of 20–40 cm; while, SWC at 0–20 cm and 80–100 cm, and T at 0–20 cm had significantly positive correlations with DN concentration. Soil DOC and DN concentrations along the soil profile were not correlated with pH. The results indicated that the feedback of soil DOC and DN concentrations to SWC, T and pH at different soil layers along the profile varied.

Key words dissolved organic carbon; dissolved nitrogen; soil profile; effect factors; tropical seasonal forest

土壤溶解态碳氮(Dissolved organic carbon/nitrogen, DOC/DN)占土壤总碳氮的比例虽小,但因其为土壤碳氮库中较为活跃的组分,对土壤微生物活性、土壤碳氮库的动态及土壤中重金属的迁移影响显著,具有重要的土壤生物学意义,而逐渐引起重视。研究认为在全球变化背景下,凋落物增加,温度升高,土壤 DOC 含量增加,会促进土壤 CO_2 的释放^[1-3],对区域气候变化形成负反馈效应^[4]。

DOC 和 DN 的时空动态不仅受温度、湿度和土壤酸度的影响,也与土壤的成土特征和植被类型等有关^[5-8]。土壤 DOC 和 DN 含量随着土壤剖面深度的增加而减少,但因土壤剖面特征的差异,尤其是土壤黏粒的作用,使得 DOC 和 DN 的剖面特征有地域差异,也有在浅层少深层多的现象^[7-9]。相关研究也证明,表层土壤 DOC 和 DN 的含量与土壤温、湿度相关关系密切,并表现出 DOC 和 DN 的含量与温、湿度同步的季节动态,如温带和北方森林的研究表明土壤 DOC 和 DN 的季节动态明显,具有随着土壤剖面加深含量减少的时空特征^[6-7, 9-12, 14],但因土壤类型、植被类型、立地条件的差异,有些研究的土壤 DOC 和 DN 动态与温湿度并不同步^[15]。可见,因区域差异,土壤的 DOC 和 DN 的时空特征不同^[7, 9-10, 12, 14-15]。土壤酸度对土壤 DOC 和 DN 的动态影响与土壤 pH 值呈极显著的负相关关系,但也有关系并不密切的森林类型^[16]。综上所述,因土壤、植被类型和气候特征的差异,不同研究区域的土壤 DOC、DN 含量的季节动态和剖面特征既有共性又有特性^[3, 5-7]。

相比于温带森林和北方森林,热带地区土壤有机碳和全氮含量低,降雨量丰富,平均温度高,必然使得土壤 DOC 和 DN 的时空特征与其他森林类型不同,对区域气候变化的响应和反馈也不同。为此,为探明热带森林土壤溶解态碳氮的时空动态及和相关影响因子的关系,本研究在热带季节雨林开展了

土壤剖面的溶解态有机碳和氮的研究,旨在探明 DOC 和 DN 的时空分配特征;土壤温度(T)、湿度(SWC)和酸度(pH)与土壤 DOC 和 DN 的关系,为揭示区域气候变化土壤 DOC 和 DN 的反馈效应做准备。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

西双版纳地处云南南部,位于印度马来热带雨林的北缘,终年受西南季风(印度季风)控制,属热带季风气候。年平均气温 $21.5\text{ }^\circ\text{C}$, $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 积温 $7860\text{ }^\circ\text{C}$, 平均最低气温 $7.5\text{ }^\circ\text{C}$, 年日照时数 1828 h , 年降雨量 1557 mm 。一年中干、湿季分明,一般 11 月到翌年 4 月为干季,5 到 10 月为雨季,其中干季又可分雾凉季(11 月至次年 2 月)和干热季(3—4 月)^[17]。降雨主要在雨季,占全年降雨量的 84.1% ^[18],其中雨季中期最高(7、8 月),雨季前期(5、6 月)和后期(9、10 月)的降雨量较少。

本研究设在西双版纳热带植物园生态站试验观测区内(属西双版纳热带季节雨林国家自然保护区)($21^\circ56' \text{ N}$, $101^\circ15' \text{ E}$),海拔约 580 m ,地形为中、低山丘陵谷型小盆地、多溪流,地带性土壤类型为砖红壤,由白垩黄色砂岩发育而成,土层厚度为 100 cm , $<0.002\text{ mm}$ 和 $0.002\sim 0.2\text{ mm}$ 的黏粒含量分别为 23.04% 和 29.50% ,为砂质黏壤土^[19]。森林植被类型为原生的热带季节雨林,优势种主要为干果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼(*Pometia tomentosa*)其群落高度 $35\sim 40\text{ m}$,群落的垂直结构可分为乔木层、灌木层、草本层和层间植物,结构复杂。具体群落结构参见相关文献[20]。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集与制备

在研究区域内随机设置 4 个 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ ^[15] 的样方,在每个样方内挖 1 个 $0\sim 100\text{ cm}$ 的土壤剖面,分

别在干热季(3月)、雨季前期(5月)、雨季中期(8月)、雨季后期(10月)、雾凉季(1月)采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm的新鲜土样。将土样尽快带回实验室,拣出细根、石子及其他杂质,过2 mm筛,当天完成土壤样品的制备后,进行样品分析,若来不及,将新鲜土样储存在4℃的冰箱内,24 h内完成样品分析。

1.2.2 样品分析

土壤溶解态有机碳和溶解态氮的测定^[15]:称取上述制备好的新鲜土壤样品20.0 g,加入200 mL超纯水(土:水=1:10),25℃下震荡30 min后,高速离心机(Beckman Coulter, Avanti J-25, American)离心10 min(80 000 r/min)。倒出上清液,进行真空抽滤,过0.45 μm玻璃纤维滤膜(天津泰山有限公司)。将过滤液在TOC/TN Analyser (Germany, Elementary)分析有机碳和氮含量,得出溶液DOC和DN浓度,依此计算得出干土的DOC和DN含量。

土壤pH测定:电极法,GB 7859—97。

土壤温度:利用安装在Eddy Flux Tower上的温度探头(107-L, 105-T, Campbell, USA, 温度探头)测定土壤20、40、60、80和100 cm的土壤温度,取采样日的平均温度。

土壤含水量:质量法,GB 7833—97。

1.3 数据分析与统计

在SPSS16.0中对DOC、DN、SWC、T、pH进行单样本Kolmogorov-Smirnov检验是否正态分布,得出热带季节雨林的土壤DOC、DN、SWC、T、pH值均符合正态分布,可进行Pearson相关分析和方差分析。各参数(DOC、DN、SWC、T、pH)的相关关系进行Pearson相关分析,季节动态与剖面间的差异进行One-Way ANOVA方差分析,文中用图均在Sigmaplot 10.0里绘制。

2 结果与分析

2.1 不同剖面深度土壤溶解态碳氮的动态

热带季节雨林土壤的DOC和DN平均含量剖面差异显著(DOC: $F=3.27$, $P=0.016$, $n=20$; DN: $F=9.97$, $P<0.001$, $n=20$)。最高含量在0~20 cm的表层土壤(DOC: (47.81 ± 14.00) mg/kg; DN: (9.62 ± 1.95) mg/kg),随后逐层递减到在40~60 cm含量最低(DOC: (30.24 ± 4.93) mg/kg; DN: (6.10 ± 0.70) mg/kg),但随着土层加深又略有增加(图1)。虽然各季节的DOC和DN含量最高值均在0~20 cm土壤表层,但各季节土壤剖面的DOC和含量动态不同:干热季的土壤DOC最低含量

(3月)在80~100 cm,其他季节均在40~60 cm;与DOC的剖面动态相比,DN的季节变化较大,除表层外,其他各层土壤均有最低值(图2)。

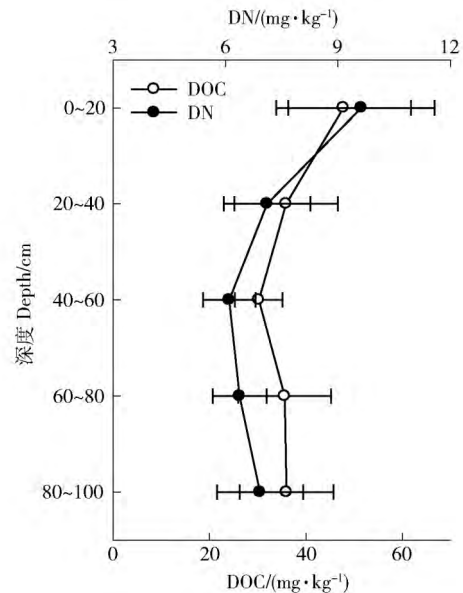


图1 热带季节雨林土壤DOC与DN含量的剖面动态
Fig. 1 Dynamics of DOC and DN content along soil profile in a tropical seasonal rainforest, southwest China DN

热带季节雨林各层土壤剖面的DOC和DN含量的季节动态并不一致。0~20 cm的土壤DOC含量季节动态明显($F=6.72$, $P<0.001$, $n=20$),表现为雨季中后期的DOC含量差异不显著,但显著高于雾凉季、干热季和雨季前期的。20~40 cm土壤DOC的含量与0~20 cm的一样,具有显著的季节动态($F=7.06$, $P<0.001$, $n=20$),表现为雨季中期的DOC含量最高(47.49 ± 6.91 mg/kg),干热季和雾凉季的土壤DOC含量低。而40~60 cm土壤的最高DOC含量在雨季后期,最低在雾凉季;60~80和80~100 cm的DOC含量最高在雨季中期,最低在干热季,但方差分析表明其季节差异不显著。土壤剖面DN含量的季节动态与DOC含量的不同,各土层中,仅有0~20 cm的季节差异显著($F=4.10$, $P=0.02$, $n=20$) (图2)。各土层雨季中后期的DN浓度较高,除60~80 cm DN最高含量在雨季中期外,其他各层的最高值均在雨季的10月,最低值均在干季,80~100 cm土壤的DN最低在干热季,其他层的最低值均在雾凉季。通过相关关系分析表明0~20 cm土壤的DOC和DN具有正相关关系,但并不显著($r=0.857$, $P=0.064$, $n=5$),其他层的相关关系均不显著(数值未列出)。以上结果表明,热带季节雨林各层土壤的DOC和DN的季节动态并不完全一致,但具有雨季中后期高,干季低的季节特征。

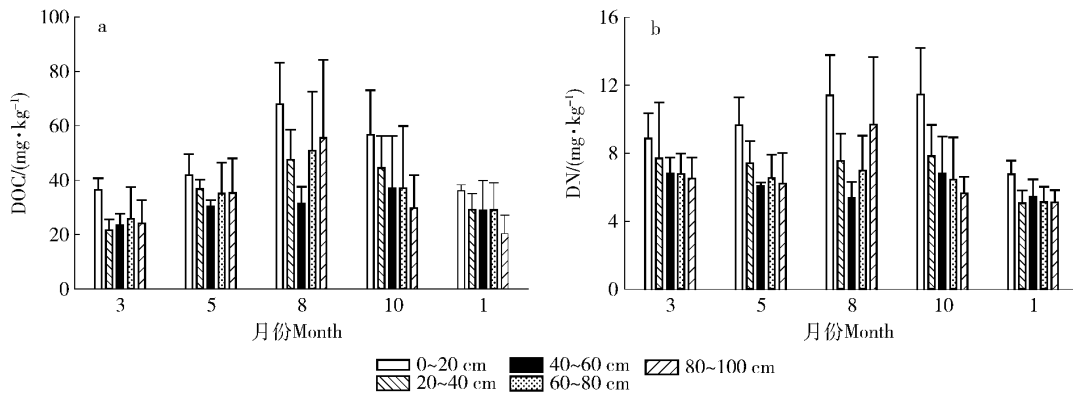


图 2 热带季节雨林土壤溶解态有机碳 (a) 与溶解态氮 (b) 的季节动态和剖面特征

Fig. 2 Seasonal and profile dynamics of soil dissolved organic carbon (a) and nitrogen (b) in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China

2.2 土壤温、湿度与土壤溶解态有机碳和溶解态氮的关系

土壤温度存在显著的层间差异 ($F = 3.52, P = 0.011, n = 20$) 和季节动态 ($F = 1.40 \times 10^{32}, P < 0.001, n = 20$) (图 3a)。而土壤湿度除 80~100 cm 的季节动态不显著外,其他各层土壤含水量的季节动态均显著,并且土壤含水量的层间差异只在雨季中期显著 ($F = 6.51, P = 0.0035, n = 20$) (图 3b)。但各层土壤含水量的季节动态明显:各层的最高含水量均在雨季中期;最低含水量在干季:其中 80~100 cm 的土壤在雾凉季,其他均在干热季。土壤 pH 的层间差异不显著,仅表层土的季节动态显著 ($F = 3.58, P = 0.03, n = 20$),其他各层的季节动态并不

明显 (图 3c)。土壤温、湿度和酸度对土壤 DOC 和 DN 含量的影响随着土壤剖面的变化而不同 (表 1)。综合各深度的数据看,土壤的 DOC 含量与土壤湿度的和温度的正相关关系显著,表明随着温湿度的升高,土壤的 DOC 含量也随之增加。但各层的 DOC 含量与湿度的关系则有不同,其中 0~20 和 20~40 cm 土壤 DOC 的含量与土壤湿度的相关关系显著;其他各层的 DOC 含量季节动态与土壤湿度的关联并不密切,值得注意的是除了 20~40 cm 的 DOC 含量与土壤温度呈正相关关系外,其他各层的 DOC 含量与温度的关系均不显著。土壤酸度与 DOC 含量无显著相关关系。

表 1 表明全年各剖面的 DN 含量虽与土壤含

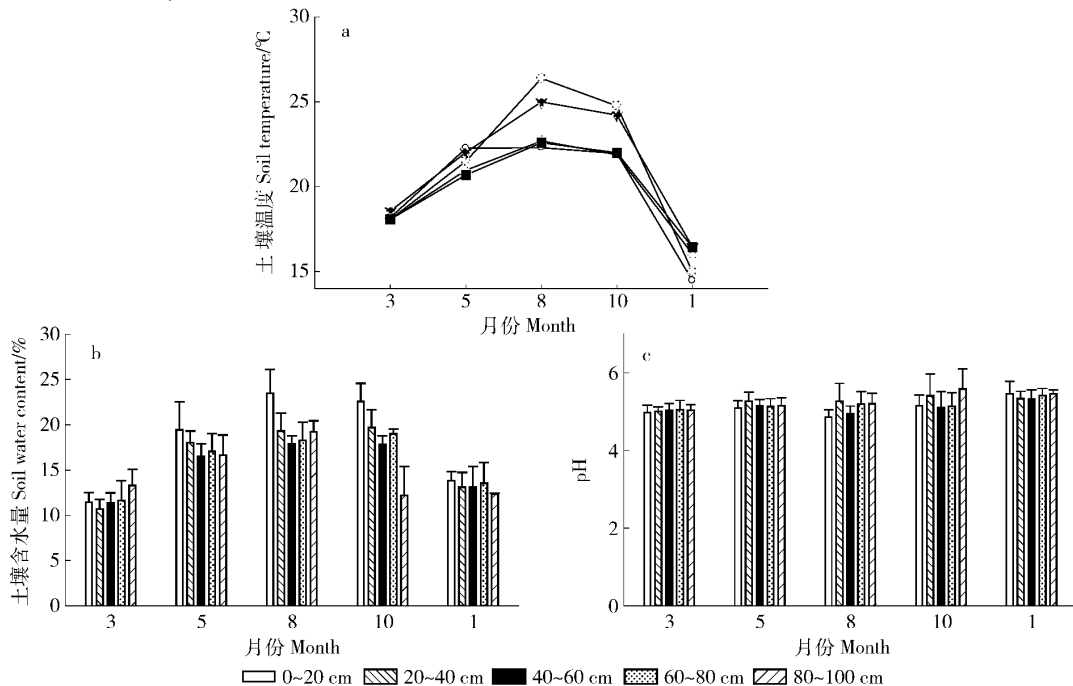


图 3 热带季节雨林土壤温度 (a)、土壤湿度 (b) 与土壤酸度 (c) 的季节动态和剖面特征

Fig. 3 Seasonal and profile dynamics of soil temperature (a), soil water content (b) and soil pH (c) in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China

水量呈显著的正相关关系,但层间差异显著。与 DOC 含量和 SWC 的关系不同的是 0~20 和 80~100 cm 土层的 DN 含量也随着土壤湿度的增加而显著增加。土壤温度对 DN 的季节动态影响不显著;仅表层土壤的 DN 与土壤温度呈显著的正相关关系。而土壤酸度与 DN 的含量关联并不密切,

pH 仅在 60~80 cm 深度与土壤 DN 含量呈显著的负相关关系。

土壤温、湿度和 pH 与土壤 DOC 和 DN 含量的关系表明土壤 DOC、DN 含量对土壤温、湿度和 pH 的反应存在剖面间的差异,且酸度与土壤 DOC 和 DN 含量的季节动态不同步。

表 1 各剖面土壤 DOC 和 DN 与土壤含水量、土壤酸度和土壤温度的关系

Tab. 1 Pearson correlation between concentration of DOC, DN and soil water content, soil temperature and pH of different soil depth in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China

深度 Depth/cm	DOC			DN		
	SWC	pH	T	SWC	pH	T
全部 Total	0.769 5**	-0.052 0	0.526 1**	0.562 5**	-0.343 5	0.312 9
0~20	0.904 8*	-0.592 5	0.682 8	0.862 2*	-0.731 7	0.889 9*
20~40	0.914 0*	0.643 8	0.912 0*	0.512 5	-0.321 2	0.684 8
40~60	0.261 9	0.325 8	0.431 4	-0.258 4	-0.036 3	0.000 8
60~80	0.776 1	-0.067 6	0.807 2	0.411 2	-0.817 3*	0.735 2
80~100	0.728 3	-0.016 4	0.702 9	0.895 0*	-0.311 7	0.652 4

注:全部参与分析的数据为 20 个,即 5 个剖面深度的 4 次采样数据。其他各剖面均为每个剖面的 5 次采样,每个处理 4 个重复,参与分析数为 4 个。* $P < 0.05$ 水平上相关关系显著,** $P < 0.01$ 水平上相关关系极显著。Notes: Total soil layers along with profile: $n = 20$, each profile: $n = 4$; * indicates the Pearson correlation is significant at 0.05, ** indicates correlation is significant at 0.01.

3 讨论与结论

土壤 DOC 和 DN 主要来自于地上凋落物、植物根系、土壤微生物及随森林水文过程输入的可溶性碳氮^[5-8],因受到降雨、温度和植物的物候特征及土壤的理化性状的差异的影响,土壤的 DOC 和 DN 含量的季节动态与剖面特征明显。在温带和北方森林的研究表明,土壤 DOC 和 DN 的季节动态明显,呈现与温湿度同步的季节动态,与温湿度的关系也呈显著的正相关关系,随着土壤剖面加深含量减少的时空特征^[6-7,9-12,14]。本研究的热带季节雨林的各层土壤 DOC 和 DN 含量虽然呈现雨季中后期较干季高,表现出与温湿度同步的季节动态,但各土层 DOC 和 DN 含量与温湿度的关系却并不完全一致(表 1)。而土壤 DOC 与 DN 含量的剖面动态为倒 V 字形“<”。可见,西双版纳热带季节雨林的土壤 DOC 和 DN 含量时空动态具有显著的地域特征,这与西双版纳热带季节雨林植被、微生物、土壤和气候环境特征有关。

凋落物、细根分泌物是土壤溶解态碳氮的主要来源^[7,15]。凋落物淋洗液和凋落物分解产物、大量的根系分泌物及微生物提供的 DOC 和 DN 因土壤团聚体的吸附作用大部分保留在土壤表层,使得表层土壤(0~20 cm)的 DOC 和 DN 在年和季节水平上均处于较高水平,形成土壤表层(0~20 cm)的

DOC 和 DN 含量高,深层土壤 DN 含量低的趋势(图 1、2)。随着土壤深度的增加,植物根系减少^[22],土壤黏粒含量增加^[19],有机质和氮含量减少^[23],微生物生物量减少,通过淋洗作用输入到深层土壤的 DOC 和 DN 量逐层减少^[24]。加之各层土壤黏粒的吸附作用,使得 DOC 和 DN 含量逐层减少,在 40~60 cm 达到最低含量(图 1、2)。根据实际观测,60 cm 以下的土壤几乎没有细根,土壤发育程度低,土壤黏粒逐层增加^[19],使得随淋洗作用输入到土壤深层的 DOC 被黏粒吸附,呈现出 80~100 cm 的土壤 DOC 和 DN 含量较 40~80 cm 的高,但较表层土壤低的“<”型剖面动态(图 1、2)。

热带雨林的研究表明凋落物的输入和分解对表层土壤的 DOC 和 DN 动态有显著的决定作用^[15]。热带季节雨林在干季的 3 月底有大量的凋落物输入^[29-31],但降雨量小,分解程度低,淋洗入土壤的 DOC 和 DN 量少。而在雨季中期,是凋落物输入和分解的高峰期^[31-32],丰富的降雨将分解产物和凋落物的 DOC 和 DN 淋洗入土壤,丰富的活细根^[22]产生的根系分泌物较其他季节多,较高的土壤温湿度,使得土壤对 DOM 的解吸附量较温度低的干季高^[5]。在这些因素的共同作用下,使得西双版纳热带季节雨林土壤的各层 DOC 在雨季较高,干季较低的季节动态(图 1、2)。

与 DOC 一样, DN 在土壤剖面中的剖面动态一

样呈现倒 V 字形“<”字形的剖面动态(图 1),表明 DOC 和 DN 在土壤中的生物地球化学过程关联紧密,但因 DOC 和 DN 的生物化学过程差异,使得土壤剖面深层的 DN 季节动态与 DOC 不完全相同(图 1、2)。因各季节的温、湿度因子和土壤水迁移路径的季节差异^[27-28],促使雨季中期的 DN 含量随剖面加深而增加,使得 40~60 cm 土壤的 DN 呈“V”字形的季节动态(图 2b),与表层 0~20、20~40 cm 土壤的“^”型形成显著差异。表明雨季中期降雨量大,土壤含水量高, DN 随着土壤水的垂直入渗带入 60 cm 以下的深层土壤,这也说明土壤黏粒对 DN 的吸附作用较 DOC 弱,这可能与深层土壤水的 DON 比例较低, NO₃-N 占比例较高有关^[24-26]。此外在 60 cm 以下土壤的微生物活性低,对氮的利用率低,致使氮沉积在土壤底层,使得深层土壤 DN 含量 20~40 cm 高,但低于 0~20 cm 土壤的剖面动态(图 2b)。在温湿度较高的雨季,植物生长茂盛,根系主要利用浅层土壤水,而在干季对深层土壤水的利用率增加,土壤 DN 也随之被根系利用,使得干季的深层土壤 DN 的含量最低,雨季最高。而 40~60 cm 可能是植物根系对地下水利用的季节转换的界限,依此深层土壤(60~100 cm)的溶解态碳氮的含量最低值存在季节差异(图 1、2)。可见,土壤 DOC 和 DN 含量的季节动态及受来源与温湿度的影响,也因剖面深度的差异,使得各层土壤的 DOC 和 DN 含量的季节动态并不一致,但总体呈现随着土壤剖面加深,DOC 和 DN 含量减少的特征^[1 6-7 9-12 14]。

因表层土壤 DOC 和 DN 动态主要决定于凋落物的输入量,热带季节雨林的凋落物输入高峰为 8 月^[29-31],在热带季节雨林主要分布在 0~20 cm,集中在 0~10 cm^[22],也是在雨季中期生物量最高,在雾凉季最少,这两个要素使得 0~20 cm 土壤 DOC 和 DN 的季节动态较深层土壤显著,呈现出雨季中期最高,温度最低的雾凉季含量最低的显著季节动态(图 1、2)。但因影响表层土壤 DOC 含量的主要因子为凋落物碳输入量,决定 DN 含量的决定因子为半纤维素量^[15],故而 0~20 cm 土壤 DOC 和 DN 具有正相关关系($r = 0.857, P = 0.064, n = 5$),但并未达到显著水平,这也表明土壤 DOC 和 DN 的生物地球化学过程具有差异。凋落物分解^[15 29-31],植物根系的季相动态^[22]与温湿度呈现显著的正相关关系,而微生物生物量的动态也与温湿度同步,使得热带季节雨林 0~20 cm 土壤 DOC 和 DN 与土壤湿度正相关关系显著。

而深层土壤的解吸附作用,不仅取决于湿度,也决定于土壤机械组成,故而对温、湿度的反应没有团

聚体多的表层土壤^[23]敏感(图 2a、表 1)。并且,随着雨季降雨量增加,土壤水分运动活跃,表层土壤中的 DOC 也会随水进入深层土壤,这也是深层土壤对温湿度响应不敏感的原因之一^[34],与 Christ 等^[5]认为土壤样品中的 DOC 产生量随温度增加而呈指数函数增加的结论相悖。DN 的来源与 DOC 相似,但其生物地球化学过程较 DOC 复杂,包括微生物参与的硝化、反硝化、氨化等过程,也包括根系的吸收,随土壤水的垂直和水平方向的迁移与扩散,使得表层土壤(0~20 cm) DN 含量的季节动态受温、湿度因子的影响显著(图 2b、表 1)。而深层土壤因微生物生物量少^[33],加之根系参与较少,氮循环的生物过程没有表层活跃,主要以物理过程(扩散和土壤水的水平与垂直迁移)为主,故而温、湿度对 20 cm 以下土壤 DN 的含量影响并不显著。因土壤 pH 不仅受到 DOC 含量的影响,也与土壤中微生物生物量、活性铁、黏粒和有机质含量等有关,故而,本研究中,土壤酸度与 DOC 和 DN 的关系并不显著,与 Vance 等^[34]的研究结果一致。综合已有研究和本研究,因土壤黏粒、活性铁和有机质含量,及土壤温、湿度的差异,使得土壤 DOC 和 DN 含量的季节动态和剖面特征与温带和寒带森林的特征既有相同,也有不同^[35],并且与土壤温、湿度和 pH 的关系不同。

热带季节雨林土壤 DOC 和 DN 含量的季节动态和剖面特征及与温湿度和土壤酸度的关系有显著的地域特征,也表明热带季节雨林各层土壤的 DOC 和 DN 的生物地球化学过程不同。相关研究证明,在全球变化进程中,随着凋落物输入量的增加,气候变暖将使土壤 DOC 含量增加^[4]。西双版纳热带季节雨林表层土壤 DOC 和 DN 含量与土壤温、湿度的关系显著(表 1),故而,在全球变化背景下,西双版纳热带季节雨林的土壤 DOC 含量将增加,而土壤 DOC 含量与土壤 CO₂ 排放量呈正比^[36],基于此,在区域气温升高的前提下^[18],土壤 DOC 含量的增加将促进土壤有机碳的分解,进而对区域气候变化起负反馈作用^[4],但西双版纳地区土壤 DOC 含量对气候变化的响应程度如何,对土壤碳库的影响如何均待深入探讨,故需进一步开展在全球变化背景下热带森林土壤 DOC 和 DN 的生物地球化学过程的研究。

致谢 本研究的野外采样工作得到周志华、刘梦楠先生的大力支持,土壤碳氮和碳氮同位素在中国科学院西双版纳热带植物园中心实验室分析,土壤 DOC 和 DN 的室内分析得到陈志玲、欧丽芳和阿叁梅女士的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] KINDLER R, SIEMENS J A N, KAISER K, et al. Dissolved

- carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1167–1185.
- [2] MARSCHNER B. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils [J]. *Geoderma*, 2003, 113(3–4): 211–235.
- [3] 黄黎英, 曹建华, 周莉, 等. 不同地质背景下土壤溶解有机碳含量的季节动态及其影响因子[J]. *生态环境*, 2007, 16(4): 1282–1288.
HUANG L Y, CAO J H, ZHOU L, et al. Seasonal change and the influence factors of soil dissolved organic carbon at different geological background [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1282–1288.
- [4] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440: 165–173.
- [5] CHRIST M J, DAVID M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1191–1199.
- [6] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳 (DOC) 的影响因子及生态效应[J]. *土壤通报* 2007, 38(4): 758–764.
LIU M, YU W T, JIANG Z Z, et al. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 758–764.
- [7] USELMAN S M, QUALLS R G, LILIENFEIN J. Contribution of root vs. leaf litter to dissolved organic carbon leaching through soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1555–1563.
- [8] WU Y, CLARKE N, MULDER J. Dissolved organic nitrogen concentrations and ratios of dissolved organic carbon to dissolved organic nitrogen in throughfall and soil waters in norway spruce and scots pine forest stands throughout Norway [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 210(1–4): 171–186.
- [9] USELMAN S M, QUALLS R G, LILIENFEIN J. Production of total potentially soluble organic C, N, and P across an ecosystem chronosequence: root versus leaf litter [J]. *Ecosystems*, 2008, 12(2): 240–260.
- [10] CLEVELAND C C, NEFF J C, TOWNSEND A R, et al. Composition, dynamics, and fate of leached dissolved organic matter in terrestrial ecosystems: results from a decomposition experiment [J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 275–285.
- [11] DON A, KALBITZ K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2171–2179.
- [12] NEFF J C, ASNER G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 29–48.
- [13] PARK J H, KALBITZ K, MATZNER E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 813–822.
- [14] SHAUNA M, USELMAN R G, QUALLS T R B. Effects of increased atmospheric CO₂, temperature, and soil N availability on root exudation of dissolved organic carbon by a N-fixing tree (*Robinia pseudoacacia* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2000, 222: 191–202.
- [15] ZHOU W J, SHA L Q, SCHAEFER A D, et al. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 255–258.
- [16] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. *浙江林学院学报*, 2003, 20(2): 119–123.
LI S F, YU Y C, HE S. Correlation between dissolved organic carbon and soil factors of the forest soil in southern of China [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2003, 20(2): 119–123.
- [17] 张克映. 滇南气候特征及其形成因子的初步分析[J]. *气象学报*, 1966, 33(2): 210–230.
ZHANG K Y. A preliminary study on the climatic characteristic and the formation factors in southern Yunnan [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1966, 33(2): 218–230.
- [18] 王馨, 张一平. 西双版纳勐仑地区降雨特征及变化趋势分析[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(6): 658–664.
WANG X, ZHANG Y P. An analysis of the characteristics of rainfall and linear trend in the Menglun area of Xishuangbanna, SW China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(6): 658–664.
- [19] 唐炎林, 邓晓保, 李玉武, 等. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较[J]. *中南林业科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 27: 70–75.
TANG Y L, DENG X B, LI Y W, et al. Comparison of the mechanical composition and soil fertility between tropical seasonal rain forest soil and rubber forest soil in xishuangbanna [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Natural Science)*, 2007, 27: 70–75.
- [20] CAO M, ZHANG J, FENG Z, et al. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Tropical Ecology*, 1996, 37(2): 183–192.
- [21] 高举明, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林地温特征[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 880–887.
GAO J M, ZHANG Y P, YU G R, et al. Characteristics of soil temperature in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. *Southwest China Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 880–887.
- [22] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林细根周转的研究[J]. *山地学报*, 2005, 23(4): 488–494.
FANG Q L, SHA L Q. Study of fine roots biomass and turnover in the rubber plantation of Xishuangbanna [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 23(4): 488–494.
- [23] 唐炎林, 邓晓保, 李玉武, 等. 西双版纳不同森林类型土壤肥力差异性研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(3): 779–781.
TANG Y L, DENG X B, LI Y W, et al. Research on the difference of soil fertility in the different forest types in Xishuangbanna [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(3): 779–781.
- [24] MICHALZIK B, KALBITZ K, PARK J H, et al. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen: a synthesis for temperate forests [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52

- (2): 173-205.
- [25] PARK J, MATZNER E. Detrital control on the release of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) from the forest floor under chronic N deposition [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 178-185.
- [26] 李明锐, 沙丽清. 西双版纳不同土地利用方式下土壤氮矿化作用研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 54-58.
LI M R, SHA L Q. Soil nitrogen mineralization under different land use patterns in Xishuangbanna [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2005, 16(1): 54-58.
- [27] LIU W J, LIU W Y, LI J T, et al. Isotope variations of throughfall, stemflow and soil water in a tropical rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *Hydrology Research*, 2008, 39(5-6): 437-449.
- [28] LIU W J, LIU W Y, LU H J, et al. Runoff generation in small catchments under a native rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwestern China [J]. *Water and Environment Journal*, 2011, 25(1): 138-147.
- [29] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 418-425.
REN Y H, CAO M, TANG J W, et al. A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in xishuangbanna, SW China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5): 418-425.
- [30] TANG J W, CAO M, ZHANG J H, et al. Litterfall production, decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in Xishuangbanna, SW China: a 10-year study [J]. *Plant and Soil*, 2010, 335(1): 271-288.
- [31] ZHENG Z, SHANMUGHAVEL P, SHA L, et al. Litter decomposition and nutrient release in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, southwest China [J]. *Biotropica*, 2006, 38(3): 342-347.
- [32] YANG X D, CHEN J. Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, Southwestern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 910-918.
- [33] BOYER J N, GROFFMAN P M. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(6): 783-790.
- [34] VANCE G, DAVID M B. Dissolved organic carbon and sulfate sorption by spodosol mineral horizons [J]. *Soil Science*, 1992, 154(2): 136-144.
- [35] 李太魁, 王小国, 朱波. 紫色土可溶性有机碳的吸附-解吸特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 721-727.
LI T K, WANG X G, ZHU B. Adsorption and desorption characteristics of dissolved organic carbon (DOC) on the purple soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4): 721-727.
- [36] MARSCHNER B, NOBLE A D. Chemical and biological processes leading to the neutralisation of acidity in soil incubated with litter materials [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(6): 805-813.

(责任编辑 赵勃
责任编辑委 王海燕)