

DOI: 10.5846/stxb201908161712

焦宏哲, 李欢, 陈惠, 司友涛, 鲍勇, 孙颖, 杨玉盛. 氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机质数量和结构的影响. 生态学报, 2021, 41(4): 1593-1602.
Jiao H Z, Li H, Chen H, Si Y T, Bao Y, Sun Y, Yang Y S. Effects of nitrogen deposition on the quantity and structure of soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different depths. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1593-1602.

氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机质数量和结构的影响

焦宏哲^{1,2}, 李欢^{1,2}, 陈惠^{1,2}, 司友涛^{1,2,*}, 鲍勇^{1,2}, 孙颖^{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:氮沉降作为现在乃至未来气候变化的趋势之一,其可能深刻影响土壤可溶性有机质的数量和结构。选取我国中亚热带杉木人工林不同深度土壤(0—10 cm 和 10—20 cm)进行氮沉降试验,利用光谱技术研究氮沉降对土壤可溶性有机质数量和结构的影响。试验设对照(CT, 0 kg hm⁻² a⁻¹)、高氮(HN: 80 kg hm⁻² a⁻¹)、低氮(LN: 40 kg hm⁻² a⁻¹)3种处理。结果表明:(1)在0—10 cm 和 10—20 cm 土层,HN、LN 处理的土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮含量显著高于CT。(2)在0—10 cm 和 10—20 cm 土层,1 月时 HN、LN 处理的芳香性指数和腐殖化程度都显著高于CT,而4 月时 HN、LN 处理的芳香性指数和腐殖化程度都显著低于CT。除了氮含量的直接影响外,RDA(冗余分析)表明,两土层中土壤含水量、pH 和土壤有机碳是驱动氮沉降对土壤 DOM 数量和结构的重要环境因子。因此,氮沉降对土壤 DOM 的影响是复杂的,未来尤其应该注重氮沉降对生态系统影响的季节模式。

关键词:氮沉降;杉木人工林;土壤可溶性有机质;光谱学特征

Effects of nitrogen deposition on the quantity and structure of soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different depths

JIAO Hongzhe^{1,2}, LI Huan^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}, SI Youtao^{1,2,*}, BAO Yong^{1,2}, SUN Ying^{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: Nitrogen deposition, in relation with climate change, is anticipated to increase in the following decades. It is a potential factor that might profoundly affect ecosystem functioning. Enhanced nitrogen deposition might result in stoichiometric imbalance or other changed soil environment, and thereby affect plant growth and soil processes. Soil DOM (dissolved organic matter) plays an important role in ecosystem biogeochemical cycles. It is central to the questions of carbon sequestration in soils and nutrient availability to microorganisms. For example, in the early stage of plant litter decomposition, non-structural compounds are lost to soils mainly by the vehicle of DOM, which in return forms mineral-stabilized soil organic matter. Soil DOM is thus often considered to be a sensitive indicator of the interaction among plant, soil and microorganisms. Although many experiments on nitrogen deposition have been reported, inconsistency still remains about how soil DOM will respond to nitrogen deposition, especially in subtropical China. Natural evergreen broad-leaved trees make up the typical vegetation in the subtropical zone of China, but large areas of natural forests have been transformed to *Cunninghamia lanceolata* plantations. Therefore, it is critical that we should explore the effects of nitrogen

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31570606);国家重点研发计划(2016YFD0600304-05);福建省自然科学基金面上项目(2019J01282)

收稿日期:2019-08-16; 修订日期:2020-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yt.si@fjnu.edu.cn

deposition on the dynamic changes of soil DOM in these plantations. In this study, we conducted a mesocosm field experiment in a *Cunninghamia lanceolata* plantations that stimulated nitrogen deposition. DOM from soils of 0—10 cm and 10—20 cm depth were examined by spectroscopic characterization, to explore the effect of nitrogen deposition on the quantity and structure of soil DOM. Three treatments (three replicates per treatment) were assigned to 9 plots: CT (control), HN ($80 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and LN ($40 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The results showed that (1) compared with CT, nitrogen deposition significantly increased the quantity of soil DOC (dissolved organic carbon) and soil DON (dissolved organic nitrogen) for both 0—10 cm and 10—20 cm soil layers. (2) The aromaticity index and humification index of DOM from both 0—10 cm and 10—20 cm soil layers were significantly enhanced by nitrogen deposition treatments in January, whereas an opposite pattern were observed in April. Besides the direct impact of nitrogen content, RDA (redundancy analysis) revealed that soil moisture, pH and soil organic carbon content were also main drivers regulating soil DOM. Our study suggests that nitrogen deposition might regulate soil DOM in either a direct way or an indirect way. More attention should be paid on the seasonal pattern of the influence of nitrogen deposition on ecosystem functioning.

Key Words: nitrogen deposition; *Cunninghamia lanceolata* plantations; dissolved organic matter; spectroscopic characterization

可溶性有机质是能通过 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径滤膜大小的且能溶解于水、酸或碱溶液的、不同大小和结构的有机分子混合物^[1]。DOM 占土壤有机质的比例小于 5%, 但其是陆地生态系统中极为活跃的部分^[2-3]。植物凋落物、微生物生物量、枯死根及根系分泌物是土壤 DOM 的主要来源, 它们通过淋溶、分解等过程转化为 DOM^[4]。随后, DOM 可能被微生物分解利用, 也可能从表层土壤迁移到深层土壤, 或者被土壤颗粒吸附。因此, DOM 在调节森林生态系统养分库物质循环和能量流动等方面均发挥重要作用。

氮沉降在近年来受到广泛关注, 已成为全球气候变化的主要趋势之一。由于化石燃料燃烧与农业化肥的使用, 大气氮沉降比例不断增加, 我国已成为继欧洲、美国之后的全球第三大高氮区^[5]。目前陆地上年均大气氮沉降量已达 43.47 Tg/a , 预计至 2050 年大气氮沉降量将比 2000 年翻一番^[6]。氮沉降会改变陆地生态系统的生物地球化学循环过程, 如森林初级生产力^[7]、土壤呼吸^[8]、土壤氮矿化^[9]和微生物群落结构^[10]等。

目前, 已有大量关于氮沉降对土壤表层 DOM 影响的研究^[11-12], 而关于氮沉降对不同深度土壤 DOM 含量和结构的研究仍然不明确。Fang 等^[13]在青藏高原高寒草甸的研究表明, 氮沉降显著增加 0—10 cm 土层土壤 DOC 含量, 降低 10—20 cm 土层 DOC 含量。这可能是因为表层土壤有机质库增加造成的。Rappe—George 等^[14]在瑞典中部云杉林的研究发现, 氮沉降对 O 层(有机层)土壤 DOC 含量无显著影响, 但提高了 B 层(淀积层)DOC 含量。Xu 等^[15]在长白山红松阔叶混交林研究发现, 氮沉降对 0—15 cm 土层土壤 DOC 含量无显著影响, 但 15—60 cm 土层土壤 DOC 含量降低。随着光谱学分析手段的更新与发展, 土壤 DOM 化学结构的分析取得进一步发展。运用紫外可见光谱分析的芳香性指数可以表示 DOM 中芳香化合物的含量, AI 越高, 表明其含有的芳香族化合物越多^[16]。运用荧光光谱分析的发射腐殖化指数可以指示 DOM 中分子的缩合程度, HIX 越大, 表明 DOM 中含有更多浓缩的芳香环难分解组分^[17]。元晓春等^[18]研究表明, 氮沉降会使 0—15 cm 和 15—30 cm 土层土壤 DOM 芳香性指数、腐殖化指数提高。Fang 等^[13]却发现氮沉降对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤 DOM 腐殖化指数影响不明显。因此, 氮沉降对不同深度土壤 DOM 的影响极为复杂, 十分有必要开展进一步的研究。

我国湿润亚热带地区是全球同纬度的“绿洲”, 森林资源和生物资源丰富。近年来, 大面积的常绿阔叶林通过皆伐、炼山和整地等传统营林措施被改造成杉木人工林。杉木是中国南方重要的速生和用材树种, 其种植面积占全国总人工林面积的 25.55%^[19]。相比温带, 在亚热带湿润的气候条件下, DOM 的淋溶、迁移及积累成为亚热带地区的重点关注内容^[20]。氮沉降对土壤 DOM 在碳、氮养分循环中的影响机制较为复杂, 尚未明确^[14-21]。因此, 研究土壤 DOM 对氮沉降的响应为了解未来全球环境变化背景下该地区森林生态系统结构

和功能的变化起到至关重要的作用。本研究在福建三明森林生态系统与全球变化研究站的氮沉降试验平台,以不同深度(0—10 cm 和 10—20 cm)土壤 DOM 为对象,结合紫外-可见光谱(UV-Vis)、荧光光谱(FS)等技术,探讨氮沉降对土壤 DOM 含量以及化学结构的影响,并揭示亚热带杉木人工林土壤 DOM 对氮沉降的响应机制。

1 试验地概况与试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建三明森林生态系统与全球变化野外观测研究站陈大观测点(26°19'N,117°36'E)。该地平均海拔 300 m,年均气温 19.1 °C,多年平均降水量 1749 mm,年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%,属于中亚热带季风气候。土壤为黑云母花岗岩发育的红壤^[22]。

1.2 实验设计

试验所选样地为杉木幼林地。参照中亚热带地区氮沉降水平的背景值 36.3 kg hm⁻² a⁻¹^[23],并结合未来大气氮沉降可能继续增加的氮沉降趋势,试验样地内设对照(CT)、高氮(HN: 80 kg hm⁻² a⁻¹)、低氮(LN: 40 kg hm⁻² a⁻¹)3 种处理,每种处理设 3 个小区(重复),共 9 个面积为 2 m×2 m 的小区。小区四周采用 PVC 板(200 cm×70 cm)使其与周围土壤隔开。小区土壤取自附近成熟杉木林土壤,按 0—10 cm 和 10—20 cm 将土壤分层取回,剔除根系、石块和其他杂物,再分层混合均匀,按 10—20 cm 和 0—10 cm 的顺序重填回 2 m×2 m 的小区内。2013 年 11 月,每个小区内栽植 4 棵 1 年生杉木幼苗(样地内除杉木幼苗外,没有其他地表植被)。氮沉降处理于 2014 年 3 月开始,在 HN 和 LN 小区内,按照处理水平要求,使用硝酸铵(NH₄NO₃)溶于去离子水模拟氮沉降,每月月初以溶液的形式对小区进行喷洒,全年分 12 次模拟氮沉降。为消除因外加水而造成的影响,对照小区喷洒等量的去离子水。

1.3 样品采集

2015 年 1 月和 4 月在各个小区按 S 型布设 5 个土壤取样点,按 0—10 cm 和 10—20 cm 分层取样。将每个小区中的相同层次的 5 个取样点土样混合成一个样品迅速带回室内,人工挑除凋落物、细根和砂砾,过 2 mm 筛。一部分用于测定土壤基本理化性质,另一部分用于提取 DOM。

1.4 样品测定

1.4.1 土壤基本理化性质测定

土壤 pH 使用 CHN868 型 pH 计测定,水土比为 2.5:1。采用烘干法测定土壤含水量。土壤总有机碳及土壤总氮用碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III, Elementar, German)测定。

1.4.2 土壤 DOM 的测定

土壤 DOM 的提取采用水浸提法^[24]。称取 15 g 鲜土于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 去离子水(水土比为 2:1,体积质量比),振荡 30 min 后,以转速 4000 r/min 离心 10 min,再用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液中的有机物即为土壤 DOM。

滤液中 DOC 和 DON(可溶性有机氮, Dissolved organic nitrogen)含量分别采用有机碳分析仪(TOC—VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)和连续流动分析仪(Skalar San++, Netherlands)测定。用紫外-可见光光度计(UV—2450, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定 DOM 溶液在 254 nm 处的吸光度值。利用待测液 254 nm 处吸收值和 DOC 含量能够计算芳香性指数(Aromaticity Index, AI)^[25], $AI = (UV_{254}/C) \times 100$ ^[26]。荧光光谱采用日立荧光光谱仪(F7000, Hitachi, Tokyo, Japan)测定,激发和发射光栅狭缝宽度为 5 nm,扫描速度为 1200 nm/min,其中发射波长范围为 300—480 nm。为提高灵敏度,荧光光谱测定前使用 2 mol/L 盐酸将所有待测液的 pH 值调成 2^[27]。荧光发射光谱腐殖化指数(Humification index, emission mode, HIX_{em})为荧光发射光谱中 $\Sigma(435—480 \text{ nm})$ 区域与 $\Sigma(300—345 \text{ nm})$ 区域的峰面积比值。

1.5 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析和独立样本 *t* 检验比较同一时间同一土

层下不同处理间或同一时间同一处理不同土层间的土壤理化性质和 DOM 含量及其光谱学特征的差异性;采用三因素方差分析检验时间、氮沉降、土层对各指标的影响;采用 Canoco Software 5.0 软件以土壤 DOM 为响应变量,以土壤理化性质为解释变量进行冗余分析。图表由 Excel 和 Origin 完成。

2 结果

2.1 氮沉降对土壤理化性质的影响

2015 年 1 月,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,CT 处理的土壤含水量、pH、SOC、STN 显著高于 HN 和 LN 处理(表 1)。与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层 LN 处理的土壤含水量显著降低。2015 年 4 月,在 0—10 cm 土层,HN 和 LN 处理的土壤含水量显著低于 CT。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,CT、HN、LN 三种处理间的 pH、SOC、STN、C/N 均无显著差异。与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层 CT 处理的土壤含水量、SOC、STN、C/N 显著降低,而 CT、HN、LN 处理的 pH 显著升高。方差分析表明,氮沉降、土层、时间和氮沉降交互作用、时间、氮沉降和土层三者交互作用对土壤含水量作用显著(表 2),时间、氮沉降、土层、时间和氮沉降交互作用对 pH 有显著作用,氮沉降、土层对 SOC 和 STN 作用显著。

表 1 不同取样土层下不同处理的土壤性质

Table 1 Soil properties of different soil layers at different treatments

处理 Treatments	采样时间 Sample time	土壤含水量 Soil water content/%		pH		土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	
		0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
		CT	2015-01	22.55±0.65Aa	21.46±0.28Aa	4.60±0.17Aa	4.73±0.26Aa
	2015-04	20.87±0.14Aa	18.67±0.67Ba	4.42±0.03Ba	4.72±0.08Aa	14.29±1.02Aa	10.24±1.34Ba
HN	2015-01	19.05±0.83Ab	17.93±0.45Ab	3.90±0.07Ab	4.02±0.16Ab	11.43±0.47Ab	9.75±0.80Ab
	2015-04	18.67±0.35Ab	18.78±1.28Aa	4.40±0.07Ba	4.59±0.06Aa	12.04±1.42Aa	8.67±0.74Ba
LN	2015-01	19.23±1.15Ab	16.64±0.56Bc	4.06±0.06Ab	4.12±0.06Ab	12.00±0.48Ab	9.27±1.31Ab
	2015-04	18.49±0.83Ab	18.96±0.81Aa	4.48±0.06Ba	4.65±0.03Aa	12.71±1.52Aa	10.29±1.68Aa

处理 Treatments	采样时间 Sample time	土壤总氮 Soil total nitrogen/(g/kg)		碳氮比 C/N	
		0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
		CT	2015-01	1.34±0.13Aa	1.19±0.10Aa
	2015-04	1.36±0.12Aa	1.13±0.12Ba	10.55±0.36Aa	9.07±0.25Ba
HN	2015-01	1.07±0.04Ab	0.99±0.06Ab	10.67±0.76Aa	9.85±0.27Aa
	2015-04	1.16±0.22Aa	0.97±0.09Aa	10.55±0.97Aa	8.95±0.87Aa
LN	2015-01	1.12±0.05Ab	0.93±0.12Ab	10.71±0.34Aa	9.96±0.17Aa
	2015-04	1.21±0.13Aa	1.09±0.17Aa	10.50±0.64Aa	9.44±0.26Aa

CT: 对照 Control; HN: 高氮 High nitrogen deposition; LN: 低氮 Low nitrogen deposition; 不同大写字母表示同一时间同一处理不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一时间同一土层下不同处理间差异显著($P < 0.05$); 结果表示为平均值±标准差($n=3$)

2.2 氮沉降对土壤 DOM 含量的影响

2015 年 1 月,10—20 cm 土层的 HN、LN 处理的土壤 DOC 含量显著高于 CT 处理(图 1)。0—10 cm 土层的三种处理 DON 含量差异显著,表现为 HN>LN>CT;10—20 cm 土层的三种处理 DON 含量也存在差异显著,表现为 LN>HN>CT。2015 年 4 月,0—10 cm 和 10—20 cm 土层的 HN、LN 处理的土壤 DOC、DON 含量显著高于 CT 处理。0—10 cm 土层的同种处理的 DOC 和 DON 高于 10—20 cm 土层。方差分析表明,时间、氮沉降、土层、时间和氮沉降交互作用、时间和土层交互作用对 DOC 有显著影响,时间、氮沉降、土层、时间和氮沉降交互作用、氮沉降和土层交互作用、时间、氮沉降和土层三者交互作用对 DON 有显著影响(表 2)。

表 2 时间、氮沉降、土层对土壤性质、土壤 DOM 的数量及其光谱学特征的影响的方差分析

Table 2 Variance analyses of the effects of time, nitrogen deposition and soil layers on soil properties, the quantity and spectroscopic characteristics of DOM

指标 Indices	因子 Factor						
	T	N	L	T×N	T×L	N×L	T×N×L
土壤水分 Moisture	ns	***	**	**	ns	ns	*
pH	***	***	**	***	ns	ns	ns
SOC	ns	***	***	*	*	ns	ns
STN	ns	***	*	ns	ns	ns	ns
DOC	***	***	***	**	*	ns	ns
DON	**	***	***	***	ns	***	**
AI	***	**	***	***	**	ns	***
HIX _{em}	***	***	**	***	ns	*	ns

T: 时间 Time; N: 氮沉降 Nitrogen deposition; L: 土层 Soil layers; T×N: 时间和氮沉降的交互效应 Interactive effect of time and nitrogen deposition; T×L: 时间和土层的交互效应 Interactive effect of time and soil layers; N×L: 氮沉降和土层的交互效应 Interactive effect of nitrogen deposition and soil layers; T×N×L: 时间、氮沉降和土层的交互效应 Interactive effect of time, nitrogen deposition and soil layers; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; STN: 土壤总氮 Soil total nitrogen; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; AI: 芳香性指数 Aromaticity index; HIX_{em}: 荧光发射光谱腐殖化指数 Humification index of emission mode; DOM: 可溶性有机质 Dissolved organic matter; ns, $P>0.05$; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$

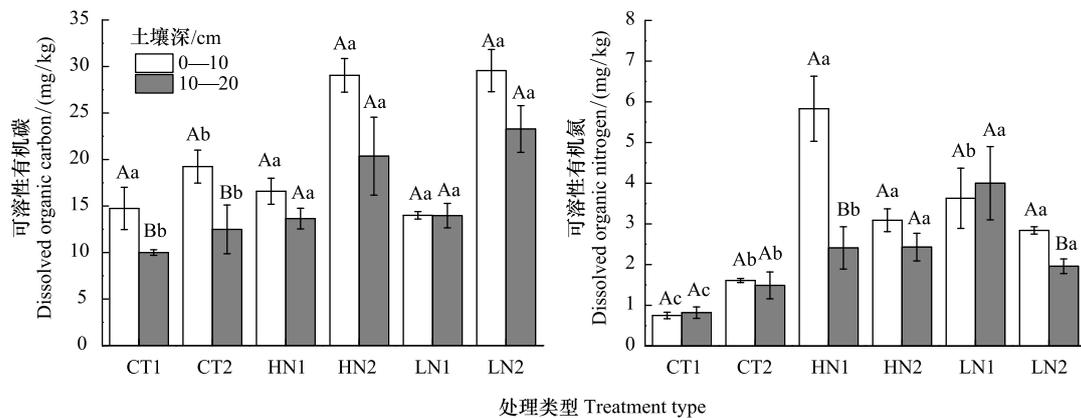


图 1 不同取样土层下不同处理的土壤可溶性有机碳及可溶性有机氮的数量

Fig. 1 The quantity of soil dissolved organic carbon and nitrogen of different treatments at different soil layers

1: 2015 年 1 月; 2: 2015 年 4 月; CT: 对照 Control; HN: 高氮 High nitrogen deposition; LN: 低氮 Low nitrogen deposition; 不同大写字母表示同一时间同一处理不同土层间差异显著, 不同小写字母表示同一时间同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 结果表示为平均值±标准差 ($n=3$)

2.3 氮沉降对土壤 DOM 芳香性指数的影响

2015 年 1 月, 0—10 cm 三种处理芳香性指数差异显著, 表现为 $HN>LN>CT$; 10—20 cm 土层的 HN、LN 处理的芳香性指数显著高于 CT 处理(图 2)。与 0—10 cm 土层相比, 10—20 cm 土层 HN、LN 处理的芳香性指数显著降低。2015 年 4 月, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的 HN、LN 处理的芳香性指数显著低于 CT 处理。方差分析表明, 时间、氮沉降、土层、时间和氮沉降交互作用、时间和土层交互作用、时间、氮沉降和土层三者交互作用对芳香性指数有显著影响(表 2)。

2.4 氮沉降对土壤 DOM 荧光光谱特征的影响

2015 年 1 月, 与 0—10 cm 土层相比, 10—20 cm 土层 LN 处理的 HIX_{em} 显著降低(图 3)。2015 年 4 月, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的 HN、LN 处理的 HIX_{em} 显著低于 CT 处理。方差分析表明, 时间、氮沉降、土层、时间

和氮沉降交互作用、土层和氮沉降交互作用对 HIX_{em} 作用显著(表 2)。

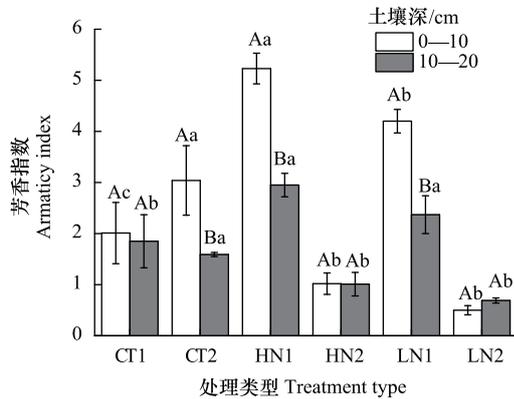


图 2 不同取样土层下不同处理土壤 DOM 的紫外光谱特征

Fig. 2 Characteristics of ultraviolet spectra of soil DOM of different treatments at different soil layers

DOM: 可溶性有机质 Dissolved organic matter

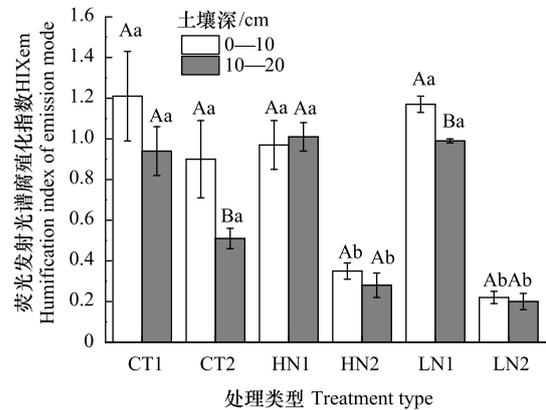


图 3 不同取样土层下不同处理土壤 DOM 的荧光光谱特征

Fig. 3 Characteristics of fluorescence spectra of soil DOM of different treatments at different soil layers

2.5 氮沉降对土壤 DOM 影响的 RDA 分析

以土壤 DOM 为响应变量,以土壤理化性质为解释变量,并结合不同的处理样点,分别对 1 月和 4 月 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的土壤 DOM 进行冗余分析(RDA),如图 4。1 月时,第一轴和第二轴共同解释了 0—10 cm 土层土壤 DOM 变异的 89.8%,其中土壤 pH、含水量分别解释了 82.5% 和 7.3%。两轴共同解释 1 月 10—20 cm 土层土壤 DOM 变化的 78.7%,土壤含水量和 SOC 分别解释了 75.7% 和 3.0%。4 月时,第一轴和第二轴共同解释了 0—10 cm 土层土壤 DOM 变异的 77.0%,其中土壤含水量、SOC 分别解释了 73.3% 和 3.7%。两轴共同解释了 4 月 10—20 cm 土层土壤 DOM 变化的 61.7%,pH、含水量分别解释了变异的 52.9% 和 8.8%。

3 讨论

3.1 氮沉降对不同深度土壤理化性质的影响

土壤含水量是影响生态过程的关键因素。研究发现,1 月和 4 月时,0—10 cm 土层的 HN 和 LN 处理土壤含水量显著低于 CT(表 1)。这主要是因为氮沉降会导致土壤有效氮含量增加,有效氮被植物体吸收后,会促进植物生长,进而促进植物根系发育,有利于水分吸收^[28]。且植物根系多集中在 0—10 cm 土层土壤^[29],使植物根系从表层土壤中汲取更多的水分,因此 0—10 cm 土层氮沉降处理的土壤含水量显著降低。

土壤有机质的变化受有机物输入量、微生物、水分等多种因素的综合影响。4 月时,与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层 CT 处理的 SOC、STN、C/N 显著降低(表 1)。且土层对 SOC、STN 影响显著(表 2)。这与赵佳宝等^[30]人研究结果一致,可能是凋落物的分解主要发生在土壤表层,增加了土壤有机质的积累。另外,0—10 cm 土层土壤聚集更多植物根系,细根输入的土壤有机质占 30%—80%^[31],有利于土壤有机质在表层积累。因此 10—20 cm 土层的土壤有机质含量低于 0—10 cm 土层。

土壤 pH 是表征酸碱性的重要指标,其可引起土壤其他性质的变化。1 月时,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,CT 处理的 pH 显著高于 LN 和 HN 处理。这可能是因为氮沉降会增加土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量, NH_4^+ 能够置换土壤中的盐基离子,导致盐基离子流失。并且氮沉降会促进植物吸收 NH_4^+ ,释放 H^+ 。另外 NO_3^- 淋失释放更多的 H^+ ^[32]。4 月时,与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层的 CT、LN、HN 处理的 pH 显著升高(表 1),并且土层对 pH 有显著影响(表 2)。可能的原因有:(1)植物的大多数细根集中于 0—10 cm 土层土壤^[29],

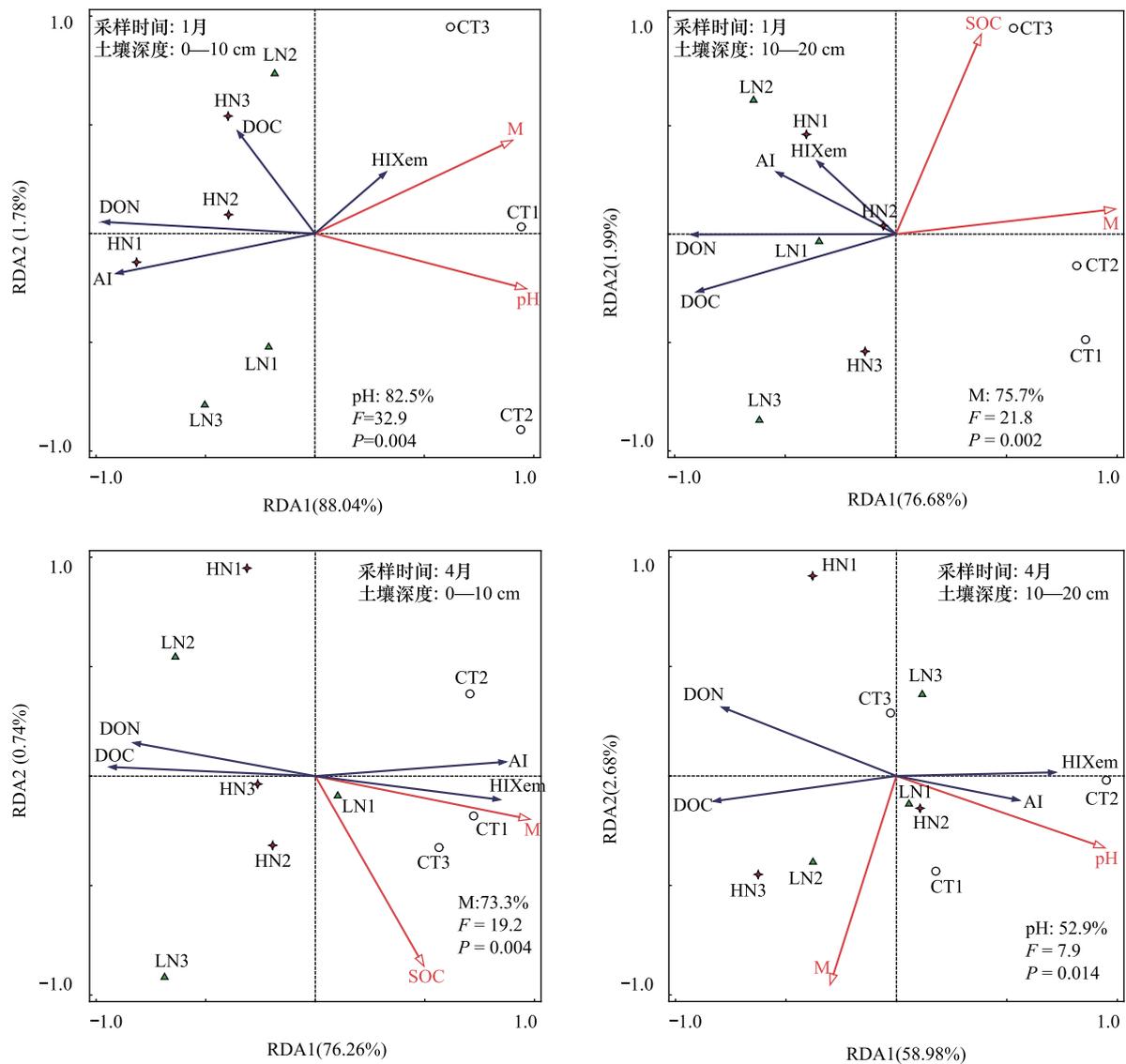


图4 氮沉降对土壤 DOM 影响的冗余分析

Fig. 4 Correlations of soil DOM to soil properties as determined by redundancy analysis (RDA)

CT1, 2, 3: 对照处理的三个重复 Three replicates of control treatment; HN1, 2, 3: 高氮处理的三个重复 Three replicates of high nitrogen deposition treatment 1, 2, 3; LN1, 2, 3: 低氮处理的三个重复 Three replicates of low nitrogen deposition treatment 1, 2, 3; M: 土壤含水量 Soil moisture; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; AI: 芳香性指数 Aromaticity index; HIX_{em}: 荧光发射光谱腐殖化指数 Humification index of emission mode

氮沉降促进植物细根吸收表层土壤的 NH_4^+ 和盐基离子, 释放 H^+ , 引起 pH 降低^[27]。(2) 亚热带地区降雨量大, 表层土壤的 NO_3^- 比下层土壤更容易淋失, 释放出 H^+ 导致土壤酸化 pH 下降^[33]。(3) 表层土壤微生物较多, 硝化作用主要发生在土壤表层, 因此表层土壤 pH 显著低于下层土壤。

3.2 氮沉降对不同深度土壤 DOM 数量和结构的影响

1 月和 4 月时, 0–10 cm 土层 CT、HN、LN 处理的土壤 DOC 和 DON 含量高于 10–20 cm, 这与 Fang 等^[13] 研究结果一致, 可能由两方面的原因所致。第一, 凋落物的分解主要集中在土壤表层, 且大多数植物的细根集中在土层 0–10 cm^[29], 而土壤 DOM 主要来源于凋落物降解和根系分泌物, 0–10 cm 土层积累更多 DOM。第二, 10–20 cm 土层的同种处理的土壤 pH 显著高于 0–10 cm 土层(表 1), 所以当土壤 pH 升高, 土壤颗粒表

面电荷增加, SOM 和土壤颗粒的结合力升高, SOM 受到的物理保护增强^[34], SOM 不易转化为 DOM。4 月为植物生长季, 植物通过新鲜凋落物、根系及根系分泌物向 0—10 cm 土层土壤输入有机质, 促进土壤 SOC 积累, 土壤 SOC 易转化为 DOC。因此, 4 月时 0—10 cm 土层 HN、LN 处理的土壤 DOC 和 DON 含量显著高于 CT。但最主要的是, 氮沉降会促进植物生长^[35], 增加新鲜有机质向土壤输入, 有利于 DOM 的积累^[36]。因此 4 月时两土层 HN、LN 处理的土壤 DOC 和 DON 含量显著高于 CT(图 1)。本研究发现, 1 月时两土层 HN、LN 处理的 AI 显著高于 CT, 而 4 月时两土层 HN、LN 处理的 AI、HIX_{em} 显著低于 CT。1 月为非生长季, 植物向土壤输送的新鲜有机质很少, 且氮沉降处理会使氮和木质素及其降解中间产物结合, 木质素降解受到抑制, 木质素作为凋落物中最难分解的复合物不断积累, 土壤 AI 含量增加^[37]。而 4 月为生长季, 植物向土壤输送的新鲜有机质(尤其是小分子物质)增多。且杉木凋落物氮含量较低^[38](6 g/kg), 不能满足参与凋落物分解的微生物生长需要, 氮沉降处理在一定程度上增加了凋落物分解可利用的氮素, 加速凋落物分解, 减少难分解物质积累, 因而 HN、LN 处理的 AI、HIX_{em} 下降。这与李仁洪等^[39]研究一致。

冗余分析表明, 1 月时, 0—10 cm 土层的土壤含水量和 pH 是显著影响土壤 DOM 数量和结构的因子(图 4), 10—20 cm 土层的土壤含水量和 SOC 是影响土壤 DOM 的重要因子。4 月时, 0—10 cm 土层的土壤含水量和 SOC 是显著影响土壤 DOM 数量和结构的因子。在 10—20 cm 土层, pH 和土壤含水量是影响土壤 DOM 的重要因子。0—10 cm 土层的 SOC 与 DOC 含量呈负相关(DOC 与 SOC 夹角大于 90°, 图 4)。0—10 cm 土层土壤覆盖更多植物凋落物, 且分布了主要的植物根系, 有利于土壤 SOC 的积累, 4 月气温较高, 加速土壤 SOC 分解, 土壤 SOC 易转化为 DOC。本研究发现, 土壤含水量对土壤 DOM 的影响似乎只是“表观”上的。一方面, 理论上土壤含水量越高, DOC 含量也越高, 即土壤含水量与 DOC 含量呈正相关关系。而本研究发现 0—10 cm 土层 HN、LN 处理的土壤含水量显著降低(表 1), HN、LN 处理的 DOC、DON 显著升高(图 1), 即土壤含水量与 DOC、DON 含量呈负相关关系。因此, 氮沉降促进植物的生长才是土壤 DOM 增加的真正原因。另一方面, 0—10 cm 土层土壤含水量作用大于 10—20 cm 土层, 即在 0—10 cm 土层, 土壤含水量解释度为 73.2%; 而在 10—20 cm 土层, 土壤含水量解释度仅为 8.8%(图 4)。这可能是因为氮沉降通过调节植物的生长促进新鲜有机质主要向土壤表层输入并使植物吸收更多土壤表层水分, 使土壤 DOM 含量增加。所以, 更突显了土壤含水量和土壤 DOM 含量的负相关关系。在 10—20 cm 土层, pH 影响土壤 DOM 的机理, 即土壤 pH 升高, SOM 和土壤颗粒的结合力升高, SOM 受到的物理保护增强^[34], SOM 不易转化为 DOM。因此 pH 与 DOC、DON 的含量呈负相关的关系(DOC、DON 与 pH 的夹角大于 90°, 图 4)。

4 结论

氮沉降会促使 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤 DOM 含量增加。此外, 1 月时植物向土壤输送的新鲜有机质很少, 氮沉降处理会抑制木质素降解, 两土层芳香性指数升高。4 月时氮沉降能够增加凋落物分解可利用的氮素, 加速凋落物分解, 难分解物质减少, 促使两土层氮沉降处理的芳香性指数、腐殖化程度显著降低。模拟氮沉降的时间长短对土壤 DOM 也有一定的影响, 因此试验样区氮沉降模拟试验还需持续进行, 以便更好地探究土壤 DOM 数量及结构对氮沉降的长期响应, 为揭示氮沉降对土壤 DOM 的影响以及探索中亚热带森林生态系统碳氮循环提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Boddy E, Hill P W, Farrar J, Jones D L. Fast turnover of low molecular weight components of the dissolved organic carbon pool of temperate grassland field soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4): 827-835.
- [3] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 29-48.
- [4] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 陈银秀, 于占源, 董彬, 刘东霞. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动. *生态学报*, 2003, 23(3): 547-558.

- [5] Richter A, Burrows J P, Nüß H, Granier C, Niemeier U. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over china observed from space. *Nature*, 2005, 437(7055): 129-132.
- [6] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, Caporn S J M, Dise N B, Helliwell R, Jones L, Leake J R, Leith L D, Sheppard L J, Sowerby A, Pilkington M G, Rowe E C, Ashmore M R, Power S A. Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1197-1215.
- [7] Chen H, Li D J, Gurmessa G A, Yu G R, Li L H, Zhang W, Fang H J, Mo J M. Effects of nitrogen deposition on carbon cycle in terrestrial ecosystems of China: a meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 352-360.
- [8] Vourlitis G L, Zorba G. Nitrogen and carbon mineralization of semi-arid shrubland soil exposed to long-term atmospheric nitrogen deposition. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 611-615.
- [9] Biudes M S, Vourlitis G L. Carbon and nitrogen mineralization of a semiarid shrubland exposed to experimental nitrogen deposition. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2068-2073.
- [10] Ochoa-Hueso R, Delgado-Baquerizo M, Gallardo A, Bowker M A, Maestre F T. Climatic conditions, soil fertility and atmospheric nitrogen deposition largely determine the structure and functioning of microbial communities in biocrust-dominated Mediterranean drylands. *Plant and Soil*, 2016, 399(1/2): 271-282.
- [11] Manninen O H, Stark S, Kytöviita M M, Tolvanen A. Individual and combined effects of disturbance and N addition on understorey vegetation in a subarctic mountain birch forest. *Journal of Vegetation Science*, 2011, 22(2): 262-272.
- [12] Scheuner E T, Makeschin F. Impact of atmospheric nitrogen deposition on carbon dynamics in two scots pine forest soils of northern Germany. *Plant and Soil*, 2005, 275(1/2): 43-54.
- [13] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Xu M J, Wang Y S, Li L S, Dang X S, Wang L, Li Y N. Experimental nitrogen deposition alters the quantity and quality of soil dissolved organic carbon in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *Applied Soil Ecology*, 2014, 81: 1-11.
- [14] Rappe-George M O, Gärdenäs A I, Kleja D B. The impact of four decades of annual nitrogen addition on dissolved organic matter in a boreal forest soil. *Biogeosciences*, 2013, 10(3): 1365-1377.
- [15] Xu X K, Han L, Luo X B, Liu Z R, Han S J. Effects of nitrogen addition on dissolved N_2O and CO_2 , dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest. *Geoderma*, 2009, 151(3/4): 370-377.
- [16] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, Fram M S, Fujii R, Mopper K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4702-4708.
- [17] Bu X L, Ding J M, Wang L M, Yu X N, Huang W, Ruan H H. Biodegradation and chemical characteristics of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types in the Wuyi Mountains, southeastern China. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(2): 102-107.
- [18] 元晓春, 陈岳民, 袁硕, 郑蔚, 司友涛, 元志鹏, 林伟盛, 杨玉盛. 氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 1-11.
- [19] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [20] Carter H T, Tipping E, Koprivnjak J F, Miller M P, Cookson B, Hamilton-Taylor J. Freshwater DOM quantity and quality from a two-component model of UV absorbance. *Water Research*, 2012, 46(14): 4532-4542.
- [21] Fröberg M, Grip H, Tipping E, Svensson M, Strömgen M, Kleja D B. Long-term effects of experimental fertilization and soil warming on dissolved organic matter leaching from a spruce forest in northern Sweden. *Geoderma*, 2013, 200-201: 172-179.
- [22] 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): 84-92.
- [23] 章伟, 高人, 陈仕东, 马红亮, 高艳, 朱祥妹, 尹云峰, 杨玉盛, 官惠玲. 米楮天然林土壤真菌对 N_2O 产生的贡献. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(2): 28-34.
- [24] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, Xu Q F, Lin Y. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(1): 27-36.
- [25] Saadi I, Borisover M, Armon R, Laor Y. Monitoring of effluent DOM biodegradation using fluorescence, UV and DOC measurements. *Chemosphere*, 2006, 63(3): 530-539.
- [26] Akagi J, Zsolnay Á, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: air-drying and pre-incubation. *Chemosphere*, 2007, 69(7): 1040-1046.
- [27] Kalbitz K, Geyer W, Geyer S. Spectroscopic properties of dissolved humic substances—a reflection of land use history in a fen area. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2): 219-238.

- [28] 于贵瑞, 王秋凤, 方华军. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、理论框架与研究方法. 第四纪研究, 2014, 34(4): 683-698.
- [29] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [30] 赵佳宝, 杨喜田, 徐星凯, 陈家林, 孔玉华. 马尾松—麻栎混交林土壤溶解性有机碳氮空间分布特征. 水土保持学报, 2016, 30(3): 213-219.
- [31] Yang L Y, Wu S T, Zhang L B. Fine root biomass dynamics and carbon storage along a successional gradient in Changbai Mountains, China. *Forestry*, 2010, 83(4): 379-387.
- [32] Chen D M, Li J J, Lan Z C, Hu S J, Bai Y F. Soil acidification exerts a greater control on soil respiration than soil nitrogen availability in grasslands subjected to long-term nitrogen enrichment. *Functional Ecology*, 2016, 30(4): 658-669.
- [33] Burton J, Chen C G, Xu Z H, Ghadiri H. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2723-2734.
- [34] Fissore C, Giardina C P, Kolka R K, Trettin C C, King G M, Jurgensen M F, Barton C D, McDowell S D. Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 193-205.
- [35] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Zheng J J, Zhang P L, Xu M J, Li Y N, Yang X M. Responses of CO₂ efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 177-190.
- [36] Portillo-Estrada M, Korhonen J F J, Pihlatie M, Pumpanen J, Frumau A K F, Morillas L, Tosens T, Niinemets Ü. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests. *Annals of Forest Science*, 2013, 70(4): 367-379.
- [37] 周世兴, 黄从德, 向元彬, 韩博涵, 肖永翔, 唐剑东. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物木质素和纤维素降解的影响. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1368-1374.
- [38] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [39] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 雒守华, 向元彬, 戴洪忠, 黄立华. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2588-2593.