

DOI: 10.11766/trxb201904160078

焦宏哲, 李欢, 陈惠, 鲍勇, 孙颖, 杨玉盛, 司友涛. 增温、施氮对中亚热带杉木林土壤可溶性有机质的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1249–1258.

JIAO Hongzhe, LI Huan, CHEN Hui, BAO Yong, SUN Ying, YANG Yusheng, SI Youtao. Effects of Soil Warming and Nitrogen Addition on Soil Dissolved Organic Matter of *Cunninghamia lanceolata* Plantations in Subtropical China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1249–1258.

## 增温、施氮对中亚热带杉木林土壤可溶性有机质的影响\*

焦宏哲<sup>1, 2</sup>, 李欢<sup>1, 2</sup>, 陈惠<sup>1, 2</sup>, 鲍勇<sup>1, 2</sup>, 孙颖<sup>1, 2</sup>, 杨玉盛<sup>1, 2</sup>, 司友涛<sup>1, 2†</sup>

(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:** 受人类活动的影响, 1880—2012 年, 全球地表平均温度约提高 0.85 °C; 同时, 1980—2010 年间我国大气氮沉降以 0.41 kg·hm<sup>-2</sup> 的速率逐年增加。全球变暖和大气氮沉降将通过影响环境因子变化进而影响土壤可溶性有机质(DOM, Dissolved organic matter)。为探究增温和施氮对 DOM 数量及其结构的影响, 选取我国中亚热带杉木人工林土壤进行增温以及施氮试验, 试验设对照(CT, 0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、增温(W, +5 °C, 0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、高氮(HN, 80 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、低氮(LN, 40 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、增温×高氮(WHN, +5 °C, 80 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、增温×低氮(WLN, +5 °C, 40 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 6 种处理。结果表明, 与 CT 相比, W 处理的土壤可溶性有机碳(DOC, Dissolved organic carbon)和可溶性有机氮(DON, Dissolved organic nitrogen)增加, 但其芳香性指数和腐殖化程度低, 这很可能是由于增温促进了土壤有机质(SOM, Soil organic matter)向 DOM 的转化。季节通过影响土壤环境, 对施氮后的土壤 DOM 结构有不同影响: 干季(2015 年 1 月)时, 施氮使 DOM 含量增加, 其芳香性指数显著升高; 雨季(2015 年 4 月)时, 施氮处理的土壤 DOM 含量升高, 但其芳香性指数和腐殖化程度呈下降趋势。在增温和施氮的交互作用下 DOM 含量达到最高, 其结构相对简单。除了温度和氮含量的直接影响外, RDA(冗余分析)表明, 土壤含水量和 pH 也是决定土壤 DOM 变化的重要因子。增温和施氮均可以降低土壤 pH, 使得 SOM 更容易向 DOM 转化。增温会加速植物残体和 SOM 向 DOM 的溶解过程; 施氮会通过促进植物生长, 增加土壤 DOM 的含量。

**关键词:** 增温; 氮添加; 杉木人工林; 可溶性有机质

中图分类号: S714 文献标志码: A

## Effects of Soil Warming and Nitrogen Addition on Soil Dissolved Organic Matter of *Cunninghamia lanceolata* Plantations in Subtropical China

JIAO Hongzhe<sup>1, 2</sup>, LI Huan<sup>1, 2</sup>, CHEN Hui<sup>1, 2</sup>, BAO Yong<sup>1, 2</sup>, SUN Ying<sup>1, 2</sup>, YANG Yusheng<sup>1, 2</sup>, SI Youtao<sup>1, 2†</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

**Abstract: 【Objective】** As affected by anthropogenic activities, such as greenhouse agriculture that emits greenhouse gases, the global mean surface temperature rose by about 0.85 °C over the period of 1880—2012; and nitrogen deposition in China

\* 国家自然科学基金面上项目(31570606)和福建省自然科学基金面上项目(2019J01282, 2015J01120)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 31570606) and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China(Nos. 2019J01282, 2015J01120)

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

作者简介: 焦宏哲(1994—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: 928187501@qq.com

收稿日期: 2019-04-16; 收到修改稿日期: 2019-06-19; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-10-15

increased significantly by  $0.41 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  with each passing year over the period from 1980 to 2010. In the context of global warming, soil dissolved organic matter (DOM) attracts more and more attention due to its important role affecting global carbon and nitrogen balance, which is of great significance to the ecological environment. This study aims to investigate effects of soil warming and nitrogen addition on content and structure of soil DOM in the soil of *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China. 【Method】 In 2014—2015, a mesocosm field experiment was carried out in a *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China. The experiment was designed to have six treatments, that is, (1) CT(no warming and  $0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); (2) W(+5,  $0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); (3) HN(no warming and  $80 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); (4) LN(no warming and  $40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); (5)WHN (+5 and  $80 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); and (6) WLN, (+5 and  $40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ). Soil samples were collected in January 2015(dry season)and April 2015(rainy season), separately for analysis of DOM. 【Result】 Results show that soil warming increased the content of DOM, but decreased its aromaticity index and humification index, which might be attributed to the effect of high temperature promoting conversion of SOM (soil organic matter)into DOM. The impact of nitrogen addition on DOM structure showed a seasonal pattern. In the dry season, addition of nitrogen increased both the content and aromaticity index of DOM, while in the rainy season, it increased the content of DOM, but reduced its aromaticity and humification index significantly. Under the joint effect of high temperature and nitrogen addition, the DOM peaked in content and got simpler in structure. Besides the direct impacts of temperature and nitrogen content, soil moisture and pH were also key factors controlling DOM dynamics as revealed by RDA (redundancy analysis). 【Conclusion】 Based on the findings of the experiment, it could be concluded that 1) Both warming and application of nitrogen affect soil pH, thus making it easier for SOM to convert into DOM. Since the dissolution of organic matter in soil solution is mostly endothermic, warming accelerates the dissolution of plant residues and SOM into DOM; while nitrogen addition can also increase soil DOM content by promoting plant growth. 2) The effects of warming and nitrogen addition on soil DOM show a strong seasonal pattern, indicating that the influences of future global warming and nitrogen deposition will vary with environment conditions from region to region. Hence, more experiments should be done to further explore impacts of warming, nitrogen addition and their interaction on soil DOM, and some other environmental variables should be taken into account to attain a more profound comprehension of carbon and nitrogen cycling under a changing global climate.

**Key words:** Warming; Nitrogen addition; *Cunninghamia lanceolata*; Dissolved organic matter

土壤有机质 (SOM, Soil organic matter) 在全球碳循环中扮演着十分重要的角色<sup>[1]</sup>。其中, 可溶性有机质 (DOM, Dissolved organic matter) 虽然占 SOM 的比例小于 5%, 却具有周转速度快、活性高的特性。土壤 DOM 主要来自地表凋落物的淋溶、根系分泌物、残根分解和固相 SOM 的分解转化。同时, 土壤 DOM 可能在不同土层间发生迁移, 甚至会迁移到生态系统之外, 也有可能被微生物分解利用、被土壤颗粒吸附, 这些过程均会降低土壤 DOM 的含量<sup>[2]</sup>。因此, DOM 不仅影响生态系统的物质循环和能量流动, 而且在调节森林生态系统各养分库的平衡方面起重要作用。

根据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 在 2013 年发布的第五次评估报告<sup>[3]</sup>, 1880—2012 年, 全球地表平均温度约提高  $0.85^\circ\text{C}$ 。同时, 大气氮沉降强度不断增加, 19 世纪 60 年代

人类活动产生的 N 为  $15 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ , 20 世纪 90 年代早期增至  $156 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ , 预计 2050 年将增至  $270 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。气候变暖和大气氮沉降会通过影响森林初级生产力调控植物向土壤输入有机碳的过程, 也会通过改变土壤温度、pH 等环境因子改变微生物对 SOM 的分解转化过程, 并最终改变 SOM。在这些过程中, DOM 是外源输入新鲜有机质库、本底 SOM 库和微生物可利用的能量和养分库之间的桥梁。因此 DOM 能敏感地反映气候变暖和氮沉降对 SOM 的影响<sup>[5]</sup>。

有研究表明<sup>[6]</sup>, 土壤可溶性有机碳 (DOC, Dissolved organic carbon) 的含量与温度呈正比, 这可能是因为增温使微生物活性增强, 促进了土壤有机质的周转, 从而使 DOM 含量增加<sup>[7]</sup>。然而, MacDonald 等<sup>[8]</sup>发现增温对土壤 DOC 含量没有影响。Camino-Serrano 等<sup>[9]</sup>则发现增温后 DOM 整体呈下降趋势。施氮与 DOM 含量的关系亦不确定。如,

在美国科罗拉多研究发现施氮促进土壤 DOC 含量增加, 这可能是因为长期施肥会促进土壤有机质储量的增加, 进而增加土壤 DOC 含量<sup>[10]</sup>。Rappe-George 等<sup>[11]</sup>研究发现施氮对土壤 DOM 无显著影响。而 Zak 等<sup>[12]</sup>认为施氮能够抑制微生物及酶的活性, 从而导致 DOM 含量的减少。

过去研究表明<sup>[13]</sup>, 增温会使土壤微生物分解速率加快, 增加土壤腐殖质成分和高芳香碳化合物。Nguyen 和 Choi 等<sup>[14]</sup>研究发现施氮对土壤 DOM 腐殖化指数影响不明显, 常单娜等<sup>[15]</sup>认为施氮肥会使土壤 DOM 芳香化指数和腐殖化指数升高, 而 Hagedorn 等<sup>[16]</sup>却发现施氮会使土壤 DOM 中芳香化合物减少。显然, 增温和施氮对土壤 DOM 的影响十分复杂, 其影响机制还不甚清楚, 仍需要更多的探索。尤其是鲜有研究从 DOM 的结构入手分析 DOM 的来源和分解状态, 并以此来解释 DOM 的含量。

我国亚热带被称为“回归带上的绿洲”, 森林生物资源丰富, 自然条件优越。由于南方山地开发和商品林基地建设, 大面积的常绿阔叶林被改造成杉木人工林, 约占我国南方森林面积的 1/3<sup>[17]</sup>。现有的增温和氮沉降开展的相关控制试验多集中于中高纬度温带地区<sup>[18-20]</sup>, 亚热带地区高温高湿, 有机质周转速度快, 增大了 DOM 淋溶和损失的风险, 亚热带森林对气候的响应可能比温带森林更加脆弱。因此, 在亚热带森林开展增温和施氮对了解全球气候变化背景下该地区森林生态系统结构和功能的变化具有极大的理论和现实意义。本研究在杉木幼林设置增温和施氮多因子试验平台, 利用紫外-可见光谱 (UV-Vis)、荧光光谱 (FS) 等技术探讨 DOM 的含量及化学结构对增温和施氮的响应, 以期深入了解全球气候变化对森林生态系统碳、氮循环的影响。

## 1 材料与方法

### 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, 属中亚热带季风气候, 年均温 17~19.4℃, 年均降水量 1 749 mm, 年均蒸发量 1 585 mm, 相对湿度 81%。土壤为黑云母花岗岩发育的红壤。

### 1.2 试验设计

试验所选样地为杉木幼林地。设对照 (CT)、增温 (W, +5℃)、高氮 (HN, 80 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、低氮 (LN, 40 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、增温×高氮 (WHN)、增温×低氮 (WLN) 6 种处理, 每个处理 3 个小区 (重复), 共 18 个 2 m×2 m 的小区。小区土壤取自附近成熟杉木林, 按 0~10、10~20、20~70 cm 将土壤分层取回, 剔除粗根、石块和其他杂物, 再分层混合均匀, 按 20~70、10~20、0~10 cm 的顺序重填回试验小区, 同时采用压实法调整土壤容重与原位土壤容重接近, 以消除土壤异质性。小区四周隔入焊接的 4 块 PVC 板 (200 cm×70 cm), 防止小区之间相互干扰。

于 2013 年 10 月在所有小区内平行布设加热电缆, 深度为 10 cm, 间距为 20 cm, 且在小区最外围环绕一周, 保证样地增温的均匀性。2013 年 11 月, 每个 2 m×2 m 小区种植 4 棵 1 年生杉木幼苗, 所选幼苗地径为 3 cm 左右, 高度 25 cm 左右, 杉木位置均处于两条电缆线之间。2014 年 3 月同时开展增温和施氮试验: 在 W、WHN 和 WLN 三种处理下的 9 个小区电缆通电增温 (始终较对照高 5℃); 在 HN、LN、WHN 和 WLN 小区内, 按照氮水平要求, 每月将每个小区所需要喷洒的 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶解在 800 mL 去离子水中, 用手提式喷雾器从幼苗林冠上方对小区均匀喷洒, 全年分 12 次模拟氮沉降。对照小区喷洒等量的去离子水, 以减少因外加水而造成的影响。

### 1.3 样品采集与分析

于 2015 年 1 月 (干季) 和 2015 年 4 月 (雨季) 采集土壤样品, 每次采样均在各个小区按 S 型布设 5 个土壤取样点, 采集 0~10 cm 的土壤。样品带回室内后, 去除碎屑、砂砾以及植物根系, 再将每块小区中的 5 个取样点土样混合成一个样品, 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。

土壤 DOM 的提取采用水浸提法。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, V:W), 振荡 30 min 后 4 000 r·min<sup>-1</sup> 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。

土壤 pH 用 CHN868 型 pH 计测定, 水土比为 2.5:1。土壤含水量采用烘干法测定。土壤总有机

碳及土壤全氮用碳氮元素分析仪 (Elementar Vario EL III, Elementar, German) 测定。DOM 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。DOM 溶液在 254 nm 处的吸光度值用紫外-可见分光光度计 (UV-2450, Shimadzu, Kyoto, Japan) 测定, 利用 254 nm 处吸收值和 DOC 含量计算芳香性指数 (Aromaticity Index, AI),  $AI = (UV_{254}/DOC) \times 100^{[21]}$ 。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  $1\ 200\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 荧光同步波长范围为 250~500 nm。为提高灵敏度, 荧光光谱测定前使用  $2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐酸将所有待测液的 pH 调成 2。荧光同步光谱腐殖化指数 (Humification index, synchronous mode,  $HIX_{\text{syn}}$ ) 为荧光同步光谱中波长 460 nm 与 345 nm 处荧光强度的比值<sup>[22-23]</sup>。

#### 1.4 数据处理

用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理。采用单因素方差分析和独立样本 t 检验比较同一取样时间下不同处理间或不同取样时间下同一处理间的土壤理化性质、DOM 含量及其光谱学特征值的差异性; 采用双因素方差分析检验增温、施氮对各指标的影响; 采用 Canoco Software 5.0 软件以土壤 DOM 为响应变量, 同时以土壤理化性质为解释变量做冗余分析 (RDA)。图表由 Excel 和 Origin 完成。

## 2 结果

### 2.1 增温、施氮及其交互作用对土壤理化性质的影响

1 月时, 与 CT 相比, HN 和 LN 处理的含水量分别显著下降了 15.5%、14.7% (表 1); 其他 5 种处理的土壤 pH 显著小于 CT; 各处理间 C/N 无显著差异。4 月时, 土壤经 W、HN、LN、WHN 和 WLN 处理后, 土壤含水量均显著降低; W、WHN 和 WLN 处理的 pH 显著低于 CT。1 月时同种处理的土壤含水量总体高于 4 月; 同时 HN、LN 和 WLN 三种处理的 pH 值低于 4 月。方差分析表明, 1 月时增温和

施氮对土壤含水量无显著影响 (表 2); 但增温和施氮对土壤 pH 的作用显著。4 月时增温、施氮对土壤含水量和 pH 均有显著影响。

### 2.2 增温、施氮及其交互作用对土壤 DOM 含量的影响

1 月时, WHN 和 WLN 处理显著增加土壤 DOC 含量; HN、LN、WHN 和 WLN 处理显著提高 DON 含量 (图 1)。4 月时, 与 CT 相比, 其他 5 种处理的 DOC 含量显著升高, 其中 WHN 处理的 DOC 最高; 除 WLN 外其他处理的 DON 显著高于 CT。4 月同种处理的 DOC 含量与 1 月相比呈增加趋势; 4 月 W 处理的 DON 含量相比 1 月呈增加趋势, 但 HN、LN、WHN 和 WLN 处理的 DON 含量呈下降趋势。方差分析表明, 1 月和 4 月时, 增温、施氮、增温和施氮的交互作用对土壤 DOC、DON 含量的作用显著 (表 2)。

### 2.3 增温、施氮及其交互作用对土壤 DOM 的芳香性指数的影响

1 月时, W 处理的 AI 显著低于 CT; 而 HN 和 LN 处理的 AI 显著升高, 分别为 CT 处理的 2.6 倍、2.1 倍。4 月时, HN、LN、WHN 和 WLN 的 AI 显著低于 CT。与 1 月相比, 4 月 W 的 AI 呈增加趋势, 但 HN、LN、WHN 和 WLN 的 AI 呈下降趋势 (图 2)。方差分析表明, 1 月时增温、施氮、增温和施氮的交互作用对芳香性指数作用显著, 4 月时仅施氮对芳香性指数有显著影响 (表 2)。

### 2.4 增温、施氮及其交互作用对土壤 DOM 荧光同步光谱特征的影响

1 月时, 与 CT 相比, 其他 5 种处理的  $HIX_{\text{syn}}$  显著降低。4 月时, 仅 LN 处理的  $HIX_{\text{syn}}$  值显著低于对照。从 1 月到 4 月, 各处理的  $HIX_{\text{syn}}$  值总体呈下降趋势 (图 3)。方差分析表明, 1 月时增温、施氮、增温和施氮的交互作用对  $HIX_{\text{syn}}$  作用显著 (表 2)。

### 2.5 增温和施氮对土壤 DOM 影响的 RDA 分析

以土壤 DOM 为被解释变量, 以土壤理化性质为解释变量, 分别对 2015 年 1 月 (图 4A) 和 2015 年 4 月 (图 4B) 的土壤 DOM 进行冗余分析 (RDA)。图 4A 中, 第一轴和第二轴共解释了土壤 DOM 变异的 64.37%; 其中 pH、含水量分别解释了 55.6% 和 8.7%, 说明二者对 1 月的土壤 DOM 含量和结构起

表 1 各取样时间下不同处理的土壤性质

Table 1 Properties of the soil samples relative to treatment and sampling time

处理 Treatment	采样时间 Sampling time	pH	土壤含水量 Soil moisture (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤有机碳 Soil organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N ratio	DOC/SOC
CT	2015-01	4.6±0.2Aa	225.5±0.7Aa	14.18±1.16Aa	1.34±0.13Aa	10.64±0.38Aa	1.04±0.10Bb
	2015-04	4.4±0.0Aa	208.7±0.1Ba	14.29±1.02Aa	1.36±0.12Aa	10.55±0.36Aa	1.38±0.06Ac
W	2015-01	4.3±0.1Ab	210.7±1.0Aab	11.61±1.46Ab	1.10±0.20Aab	10.68±0.77Aa	1.35±0.20Bb
	2015-04	4.2±0.1Abc	194.3±0.4Ab	12.71±2.24Aa	1.21±0.25Aa	10.57±0.69Aa	3.20±0.20Aa
HN	2015-01	3.9±0.1Bc	190.5±0.8Ab	11.43±0.47Ab	1.07±0.04Aab	10.67±0.76Aa	1.45±0.06Ab
	2015-04	4.4±0.1Aab	186.7±0.4Ab	12.04±1.42Aa	1.16±0.22Aa	10.55±0.97Aa	2.47±0.47Aab
LN	2015-01	4.1±0.1Bbc	192.3±1.2Ab	12.00±0.48Ab	1.12±0.05Ab	10.71±0.34Aa	1.17±0.08Bb
	2015-04	4.5±0.1Aa	184.9±0.8Ab	12.71±1.52Aa	1.21±0.13Aa	10.50±0.64Aa	2.37±0.41Ab
WHN	2015-01	3.8±0.1Ac	226.0±2.7Aa	11.39±0.30Bb	1.13±0.02Bb	10.11±0.24Aa	2.36±0.47Aa
	2015-04	4.1±0.1Ac	171.9±0.8Ac	13.53±0.07Aa	1.29±0.07Aa	10.52±0.52Aa	3.22±0.40Aa
WLN	2015-01	4.1±0.0Bbc	205.0±0.6Aab	11.16±0.39Ab	1.07±0.01Ab	10.40±0.33Aa	2.58±0.42Aa
	2015-04	4.3±0.0Abc	171.9±0.6Bc	13.02±0.86Aa	1.24±0.11Aa	10.50±0.40Aa	2.94±0.49Aab

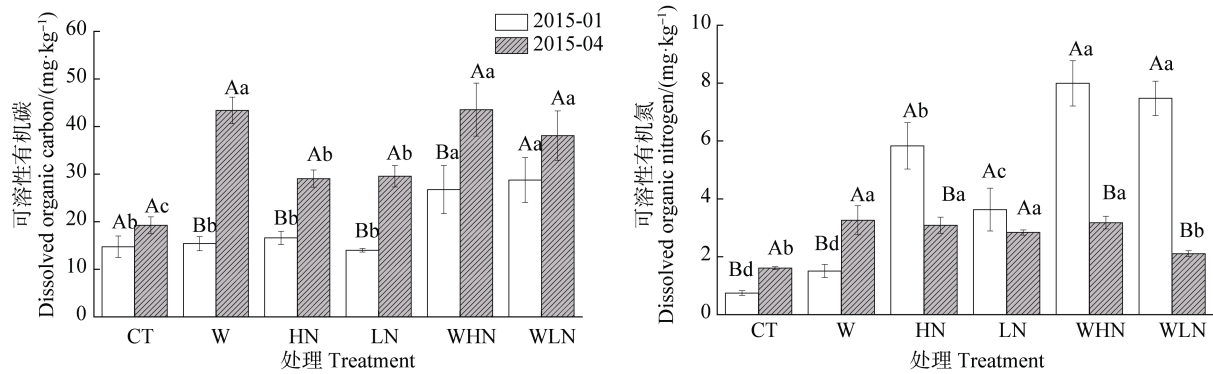
注：CT，对照；W，增温；HN，高氮；LN，低氮；WHN，增温×高氮；WLN，增温×低氮。下同。不同大写字母表示不同时间下同一种处理间差异显著，不同小写字母表示同一时间下不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )；结果表示为平均值±标准差 ( $n=3$ )。Note: CT, Control; W, Warming; HN, High nitrogen-addition; LN, Low nitrogen-addition; WHN, Warming and high nitrogen-addition; WLN, Warming and low nitrogen-addition. The same below. Different capital letters indicate significant difference between sampling times, and different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P<0.05$ ); data are means±SD ( $n=3$ ).

表 2 增温、施氮对土壤性质、DOM 含量及结构的影响的方差分析

Table 2 Variance analyses of the effects of warming and nitrogen addition on soil properties, and content and structure of DOM

指标 Index	采样时间 Sampling time	因子 Factor			指标 Index	采样时间 Sampling time	因子 Factor		
		W	N	W×N			W	N	W×N
Moisture	2015-01	ns	ns	ns	DOC	2015-01	***	*	*
	2015-04	**	***	ns		2015-04	***	ns	*
pH	2015-01	*	***	ns	DON	2015-01	***	***	*
	2015-04	***	*	ns		2015-04	*	**	***
SOC	2015-01	*	ns	ns	AI	2015-01	***	***	**
	2015-04	ns	ns	ns		2015-04	ns	***	ns
STN	2015-01	ns	ns	ns	HIX <sub>syn</sub>	2015-01	***	***	*
	2015-04	ns	ns	ns		2015-04	ns	ns	ns

注：W，增温；N，施氮；W×N，增温和施氮的交互作用；SOC，土壤有机碳；STN，土壤全氮；DOC，可溶性有机碳；DON，可溶性有机氮；AI，芳香性指数；HIX<sub>syn</sub>，荧光同步光谱腐殖化指数。Note: W stands for warming; N for nitrogen addition; W×N for interactive effect of warming and nitrogen addition; SOC for soil organic carbon; STN for soil total nitrogen; DOC for dissolved organic carbon; DON for dissolved organic nitrogen; AI for aromaticity index; HIX<sub>syn</sub> for humification index of synchronous mode; ns,  $P>0.05$ ; \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ ; \*\*\*,  $P<0.001$ .



注: 图中误差线为标准差 ( $n=3$ )。不同大写字母表示不同时间下同一处理间差异显著, 不同小写字母同一时间下不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。Note: Error bars stand for standard deviations ( $n=3$ ). Different capital letters indicate significant difference between sampling times, different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图 1 各取样时间下不同处理间土壤可溶性有机碳及可溶性有机氮的含量

Fig.1 Contents of soil dissolved organic carbon and nitrogen relative to treatment and sampling time

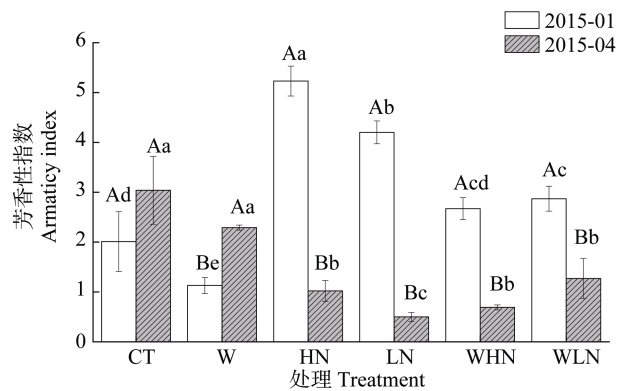


图 2 各取样时间下不同处理间土壤 DOM 的芳香性指数  
Fig. 2 Aromaticity Index of soil DOM relative to treatment and sampling time

重要作用。图 4B 中, 两轴共同解释 4 月土壤 DOM 变化的 55.33%; 含水量、pH 分别解释了变异的 37.6%和 17.8%。

### 3 讨论

#### 3.1 增温和施氮对土壤理化性质的影响

增温和施氮对土壤理化性质的影响主要体现在土壤含水量和 pH 两方面。

增温提高土壤温度, 加速土壤水分蒸发; 施氮促进植物生长, 使植物从土壤中汲取更多的水分;

二者均能使土壤含水量降低。增温和施氮在 4 月对土壤含水量的影响似乎比 1 月更明显, 具体表现为: 虽然 4 月是雨季而 1 月是干季, 但整体上 4 月的土壤含水量低于 1 月。很可能是因为 1 月气温较低, 增温后仍不足以明显促进水分蒸发, 且不是植物的生长季, 植物所吸收的土壤水分很少; 而 4 月气温较高, 增温后水分蒸发明显加快, 且此时正是生长季, 施氮促进了植物生长从土壤中获得水分的速度。此外, 4 月时其他 5 种处理的土壤含水量均显著低于 CT, 也证明此时增温和施氮对土壤含水量影响显著。

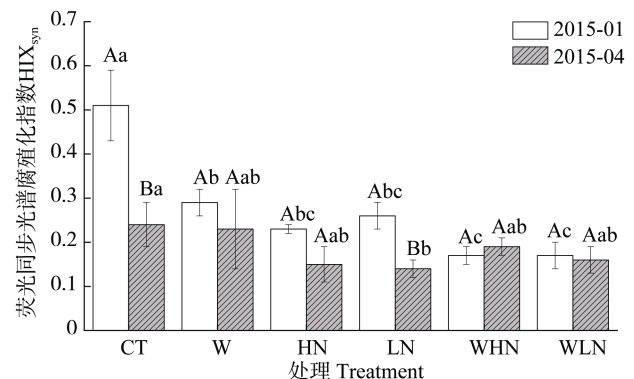
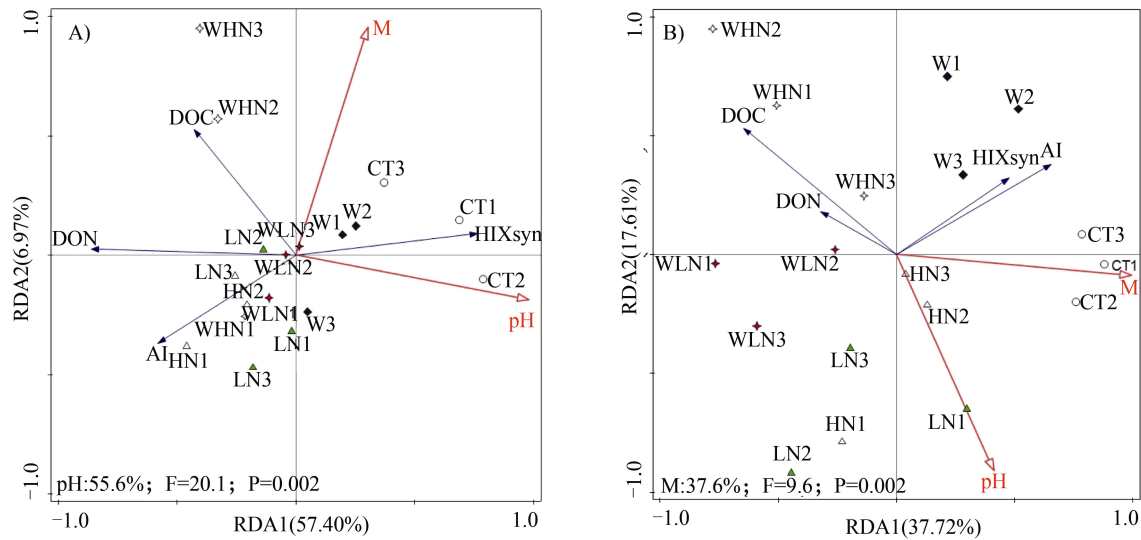


图 3 各取样时间下不同处理间土壤 DOM 的荧光同步光谱特征

Fig. 3 Characteristics of fluorescence synchronous spectra of soil DOM relative to treatment and sampling time





注：A，2015年1月；B，2015年4月；CT1，2，3，对照；W1，2，3，增温；HN1，2，3，高氮；LN1，2，3，低氮；WHN1，2，3，增温×高氮；WLN1，2，3，增温×低氮；M，土壤含水量；DOC，可溶性有机碳；DON，可溶性有机氮；AI，芳香性指数；HIX<sub>syn</sub>，荧光同步光谱腐殖化指数。Note：CT1，2，3，Control；W1，2，3，Warming；HN1，2，3，High nitrogen-addition；LN1，2，3，Low nitrogen-addition；WHN1，2，3，Warming and high nitrogen-addition；WLN1，2，3，Warming and low nitrogen-addition；M，Moisture；DOC，Dissolved organic carbon；DON，Dissolved organic nitrogen；AI，Aromaticity index；HIX<sub>syn</sub>，Humification index of synchronous mode.

图4 增温和施氮对土壤 DOM 影响的冗余分析

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

在每个取样时间点，W 处理的 pH 均显著小于 CT (表 1)，且增温对 pH 影响显著 (表 2)。Fissore 等<sup>[23]</sup>也发现，在自然的温度梯度下森林土壤的 pH 随着年平均气温的升高而下降。温度升高后，土壤盐溶液的浓度、土壤中可交换性阳离子 (CEC) 的数量和土壤水分中可溶性气体的浓度均会发生变化，因而使得土壤 pH 发生改变<sup>[23]</sup>。但也有研究发现，增温后土壤 pH 升高<sup>[24-25]</sup>，该研究结果与本研究不同，可能由于其使用的是 OTC (Open-Top Chamber) 被动增温方式。OTC 通过增加大气 CO<sub>2</sub> 浓度营造一种温室效应，来达到增温的目的。由于 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同时升高，所以 OTC 通常会明显加快植物的光合作用，使植物向土壤输入的有机质增多，但土壤本身的温度变化不大<sup>[26]</sup>，土壤变得更加肥沃，使得土壤腐殖质中盐基离子含量增加，并且在土壤中累积，释放 H<sup>+</sup> 数量较低，所以 pH 往往会升高。而本研究采用的是电缆加热的主动增温方式，这种方式对土壤有机质的分解具有更为直接和强烈的刺激作用，导致土壤变得贫瘠，盐基离子因淋失量大，释放更多 H<sup>+</sup>，所以土壤 pH 往往会降低。

同样，施氮亦会使土壤 pH 降低 (表 2)，可能的原因有：(1) 施氮后促进植物吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 释放等量 H<sup>+</sup>；(2) NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 淋失释放更多 H<sup>+</sup>；(3) NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 在硝化过程中释放 H<sup>+</sup>；(4) 施氮后促进植物吸收盐基离子，释放更多 H<sup>+</sup><sup>[27]</sup>。

### 3.2 增温和施氮对土壤 DOM 含量和结构的影响

增温后土壤 pH 下降，导致土壤颗粒表面电荷减少，SOM 和土壤颗粒的结合力下降，SOM 受到的物理保护减弱，更容易被微生物利用或者被土壤水溶液所溶解<sup>[28]</sup>；同时，由于有机质的溶解过程往往是吸热过程，所以温度升高会直接促进植物残体和 SOM 向 DOM 的溶解转化过程<sup>[29]</sup>。同一时间点，W 处理 DOM 的 AI 和 HIX<sub>syn</sub> 低于 CT，说明结构相对简单的小分子量物质在 DOM 中的比例上升，且微生物分解产物的比例相对较小，这些均证明了增温会促进植物残体和 SOM 向 DOM 的转化 (图 5 的过程 III)。由于 DOM 是微生物最容易利用的能量和养分源，增温后微生物的活性增加，所以增温后微生物对 SOM 的分解速率亦加快<sup>[30]</sup>，SOC、STN 有减少的趋势 (表 1)。4 月 W 处理的 DOM 含量与

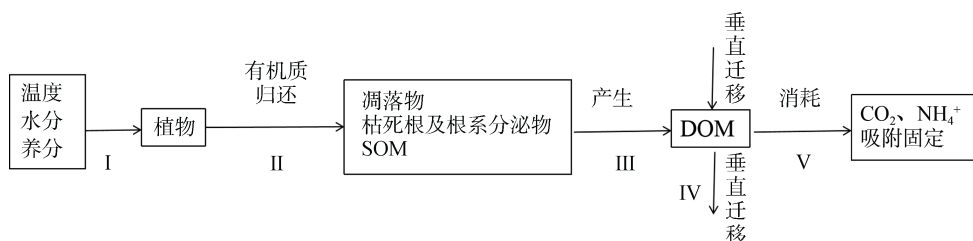


图5 DOM产生和消耗的主要途径

Fig. 5 Main pathways of DOM generation and consumption

CT 相比显著增加 (图 1), 且 W 处理在 4 月的 DOC/SOC 显著高于 1 月 (表 1); 可能因为 1 月平均温度 (10℃) 较低, 增温对植物残体和 SOM 的活化作用不明显, 而 4 月平均温度为 18℃, 增温后效果更显著<sup>[31]</sup>。

施氮后土壤 pH 降低, SOM 在土壤黏粒表面的吸附力减弱, 有利于 SOM 在土壤溶液中的溶解<sup>[28]</sup>; 更主要的, 施氮会促进植物生长, 增加新鲜有机质向土壤中的输入, 有利于土壤 DOM 的积累 (图 5 的过程 I)。因此施氮对土壤 DOM 的影响显示出季节效应。本研究中, 1 月非生长季单纯施氮 (HN 和 LN) 对 DOC 含量并无显著影响; 相反在 4 月生长季时, 施氮促进植物生长, 使得 HN 和 LN 处理下 DOC 含量显著升高 (图 1)。同理, 1 月时, 植物向土壤输送的新鲜有机质很少, 且由于外源的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  均可能与土壤中的酚类物质或木质素结合形成难分解的腐殖化化合物<sup>[32]</sup>, 故施氮后土壤 DOM 的 AI 明显升高, 并且 HN 处理的 AI 高于 LN 处理; 而在 4 月生长季, 来自植物的新鲜有机质 (尤其是小分子物质) 输入到土壤中, 使得 HN 和 LN 处理的土壤 DOM 的 AI 相对于 CT 较低 (图 2)。本研究中添加的是无机氮, 但施氮明显提高了土壤 DON 的含量 (图 1), 可能由两方面的原因所致。第一, 施氮促进了植物生长, 植物通过凋落物或根系向土壤输入的有机氮增多; 第二, 施氮使得微生物更少依赖分解土壤中的有机氮来获取氮素, 从而有利于有机氮的积累和 DON 的增加。

1 月, 增温和施氮对 DOM 的含量和结构有显著的交互作用。而在 4 月, 虽然增温和施氮的交互作用对 DOM 的含量有显著影响, 但对 DOM 的结构并无显著影响; 事实上只有施氮显著影响了 4 月 DOM 的 AI (表 2)。这说明在温度较高的生长季, 施氮后土壤 DOM 大多都来自植物体, 而增温会加速植物

有机质向 DOM 的转化。

冗余分析显示, pH 和土壤含水量均是显著影响土壤 DOM 含量和结构的因子 (图 4, 图 5 的过程 III), 但是其背后的影响机理并不相同。pH 对 DOM 的影响是直接的, 即: 土壤 pH 下降, 导致土壤颗粒表面电荷减少, SOM 和土壤颗粒的结合力下降, SOM 受到的物理保护减弱<sup>[23]</sup>, 更加容易转化为 DOM, 所以 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)。然而土壤含水量对 DOM 的影响似乎只是“表观”上的, 这一点可由以下几方面看出。第一, 理论上土壤含水量越多越有利于 SOM 的溶解, DOC 的含量应该与土壤含水量成正比; 但是本研究发现, 同种处理 4 月的土壤含水量低于 1 月的含水量, 同时 4 月 DOC 的含量要高于 1 月 (图 1), 即整体上土壤含水量与 DOC 的含量呈负相关关系 (图 4)。由此推断, 增温对植物残体和 SOM 的活化以及施氮对植物生长的促进才是 DOC 增加的真正原因。第二, 在 1 月, pH 的作用大于土壤含水量 (图 4A), 而在 4 月土壤含水量的作用大于 pH (图 4B)。之所以表观上 4 月土壤含水量的作用更大, 恰恰是因为此时气温较高, 增温的效果较 1 月显著, 水分蒸发加快, 对有机质的活化作用更强, 并且 4 月是植物的生长季, 施氮通过调节植物生长提高了新鲜有机质向土壤的输入速度并使植物吸收更多的土壤水分; 表观上使得土壤含水量和 DOM 含量的负相关关系更明显。

## 4 结论

增温和施氮均可以降低土壤 pH, 使得 SOM 更容易向 DOM 转化。由于有机质在土壤溶液中溶解大都是吸热的, 所以增温还会加速植物残体和 SOM 向 DOM 的溶解过程; 而施氮则还能通过促进植物



生长增加土壤 DOM 的含量。增温和施氮对土壤 DOM 的影响表现出明显的季节差异, 说明未来全球变暖和氮沉降加剧所带来的影响会因不同地区本底条件的差异而有所不同。增温和施氮及其交互作用对土壤 DOM 的含量及结构的影响还有待深入研究, 未来应将其他因素的影响机制考虑进来, 才能更好地揭示气候变化对土壤碳氮循环的影响。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47( 2 ): 151—163.
- [ 2 ] Wang L, Ying R R, Shi J Q, et al. Advancement in study on adsorption of organic matter on soil minerals and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 ( 4 ): 805—818. [王磊, 应蓉蓉, 石佳奇, 等. 土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54 ( 4 ): 805—818.]
- [ 3 ] IPCC. Summary for policymakers//Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [ 4 ] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494 ( 7438 ): 459—462.
- [ 5 ] Scott E E, Rothstein D E. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69: 83—92.
- [ 6 ] Liechty H O, Kuuseoks E, Mroz G D. Dissolved organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24 ( 5 ): 927—933.
- [ 7 ] Zhang J S, Tao S, Cao J. Spatial distribution pattern of water soluble organic carbon in Eastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 ( 3 ): 308—314. [张甲坤, 陶澍, 曹军. 中国东部土壤水溶性有机物含量与地域分异[J]. *土壤学报*, 2001, 38 ( 3 ): 308—314.]
- [ 8 ] MacDonald N W, Randlett D L, Zak D R. Soil warming and carbon loss from a Lake States Spodosol[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 ( 1 ): 211—218.
- [ 9 ] Camino-Serrano M, Gielen B, Luysaert S, et al. Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28 ( 5 ): 497—509.
- [ 10 ] Fröberg M, Grip H, Tipping E, et al. Long-term effects of experimental fertilization and soil warming on dissolved organic matter leaching from a spruce forest in Northern Sweden[J]. *Geoderma*, 2013, 200/201 : 172—179.
- [ 11 ] Rappe-George M, Gardenas A I, Kleja D B. The impact of four decades of annual nitrogen addition on dissolved organic matter in a boreal forest soil[J]. *Biogeosciences*, 2012, 10 ( 3 ): 1365—1377.
- [ 12 ] Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J, et al. Microbial responses to a changing environment: Implications for the future functioning of terrestrial ecosystems[J]. *Fungal Ecology*, 2011, 4 ( 6 ): 386—395.
- [ 13 ] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003, 113 ( 3/4 ): 273—291.
- [ 14 ] Nguyen H V M, Choi J H. Changes in the dissolved organic matter leaching from soil under severe temperature and N-deposition[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187 ( 6 ): 1—15.
- [ 15 ] Chang D N, Cao W D, Bao X G, et al. Long-term different fertilizations changed the chemical and spectrum characteristics of DOM of the irrigation-desert soil in north-western China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36 ( 1 ): 220—225. [常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36 ( 1 ): 220—225.]
- [ 16 ] Hagedorn F, Blaser P, Siegwolf R. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and increased N deposition effects on dissolved organic carbon—clues from  $\delta^{13}\text{C}$  signature[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 ( 3 ): 355—366.
- [ 17 ] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458 ( 7241 ): 1009—1013.
- [ 18 ] Xu X K, Han L, Luo X B, et al. Effects of nitrogen addition on dissolved N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>, dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest[J]. *Geoderma*, 2009, 151 ( 3/4 ): 370—377.
- [ 19 ] Li Q, Bai H H, Liang W J, et al. Nitrogen addition and warming independently influence the belowground micro-food web in a temperate steppe[J]. *PLoS One*, 2013, 8( 3 ): e60441. DOI:10.1371/journal.pone.0060441.
- [ 20 ] Gill R A. The influence of 3-years of warming and N-deposition on ecosystem dynamics is small compared to past land use in subalpine meadows[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374 ( 1/2 ): 197—210.
- [ 21 ] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37 ( 20 ): 4702—4708.
- [ 22 ] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, et al. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved

- organic matter in soils subjected to drying[J]. *Chemosphere*, 1999, 38 ( 1 ): 45—50.
- [ 23 ] Fissore C, Giardina C P, Kolka R K, et al. Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14( 1 ): 193—205.
- [ 24 ] Sun D D, Li Y J, Zhao W Q, et al. Effects of experimental warming on soil microbial communities in two contrasting subalpine forest ecosystems, eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13 ( 8 ): 1442—1452.
- [ 25 ] Li D D, Li Y J, Liang J, et al. Responses of soil micronutrient availability to experimental warming in two contrasting forest ecosystems in the Eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 ( 6 ): 1050—1060.
- [ 26 ] Ren F, Zhou H K, Zhao X Q, et al. Influence of simulated warming using OTC on physiological-biochemical characteristics of *Elymus nutans* in alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 ( 3 ): 166—171.
- [ 27 ] Chen D M, Li J J, Lan Z C, et al. Soil acidification exerts a greater control on soil respiration than soil nitrogen availability in grasslands subjected to long-term nitrogen enrichment[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30 ( 4 ): 658—669.
- [ 28 ] Oades J M. The retention of organic matter in soils[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5 ( 1 ): 35—70.
- [ 29 ] Li H, Yang Y S, Si Y T, et al. Effects of experimental soil warming and precipitation reduction on the quantity and structure of soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 ( 8 ): 2884—2895. [李欢, 杨玉盛, 司友涛, 等. 模拟增温及隔离降雨对中亚热带杉木人工林土壤可溶性有机质的数量及其结构的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 ( 8 ): 2884—2895.]
- [ 30 ] Rustad L, Campbell J, Marion G, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126 ( 4 ): 543—562.
- [ 31 ] Yuan S, Yang Z J, Yuan X C, et al. Effects of precipitation exclusion and warming on soil soluble carbon and nitrogen in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 ( 7 ): 2217—2223. [袁硕, 杨智杰, 元晓春, 等. 降雨隔离和温度增加对杉木幼林土壤可溶性碳氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 ( 7 ): 2217—2223.]
- [ 32 ] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems[J]. *Environmental Reviews*, 1997, 5 ( 1 ): 1—25.

(责任编辑: 卢 萍)