

合肥蜀山森林公园马尾松林松材线虫病危害后 土壤溶解性有机碳氮与养分的变化

葛萍, 尹维彬, 王雷, 徐小牛*

(安徽农业大学林学与园林学院 合肥 230036)

摘要:以合肥蜀山森林公园松材线虫病危害后的马尾松林为研究对象,对不同受损程度(轻度和重度)的马尾松林土壤溶解性有机碳(DOC)和氮(DON)及土壤养分的动态变化进行了研究。结果表明,不同受损的马尾松林土壤N、P、NO₃⁻-N和AP含量均随土层深度的增加而减少,而K、Ca、Mg含量则相反。经方差分析,重度受损林分土壤的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量显著高于轻度受损林分,而土壤的K、Ca、Mg含量表现为轻度受损林分显著高于重度受损林分。不同受损的马尾松林土壤DOC和DON含量均随土层深度的增加而逐渐下降,且在同一土层内重度受损林分均略高于轻度受损林分。相关性分析显示,重度受损林分土壤DOC和DON含量分别与土壤N、P存在极显著的正相关,与AP存在显著的正相关,同时分别与Ca、Mg含量存在着不同程度的负相关性。轻度受损林分土壤DOC含量分别与N、P、NO₃⁻-N之间存在极显著的正相关,与Mg存在极显著的负相关;DON含量仅与Ca、NO₃⁻-N存在不同程度的显著相关。

关键词:马尾松林; 溶解性有机碳; 溶解性有机氮; 土壤养分; 自然干扰

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2011)04-0511-06

Changes of dissolved organic carbon and nitrogen and other nutrients in soil of *Pinus massoniana* stands disturbed by pine wilt disease on Shushan Forest Park in Hefei

GE Ping, YIN Wei-bin, WANG Lei, XU Xiao-niu

(School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: This study was conducted on a suburban forest park in Hefei. The changes of DOC, DON and other soil nutrients were studied in a *Pinus massoniana* forest disturbed by pine wilt disease. The results showed: with the increase of soil depth in the differently damaged stands, the total N, P, NO₃⁻-N and available P contents declined, while the contents of K, Ca and Mg increased. NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents in soil were significantly higher in the seriously damaged stand than that in the slightly damaged one. However, the K, Ca and Mg contents were significantly higher in the slightly damaged stand than that in the seriously damaged stand. DOC and DON contents declined with the increase of soil depth in the differently damaged stands, and the seriously damaged stand showed a little higher contents than that in the slightly damaged one. The contents of DOC and DON in the seriously damaged stand were significantly and positively correlated with total N, P, and AP, while negatively correlated with Ca and K. The contents of DOC in the slightly damaged stand were significantly and positively correlated with N, P and NO₃⁻-N, and were negatively correlated with Mg. The content of DON had a significant correlation with Ca and NO₃⁻-N.

Key words: *Pinus massoniana* forest; dissolved organic carbon (DOC); dissolved organic nitrogen (DON); soil nutrient; natural disturbance

土壤溶解性有机碳(dissolved organic carbon, 简称 DOC)和溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen,

收稿日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070558, 30771719)资助。

作者简介: 葛萍, 女, 硕士研究生。E-mail: geping2010@126.com

* 通讯作者: 徐小牛, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xnzu61@yahoo.com.cn

简称 DON)是土壤溶解性有机质的主要组成部分,在全球陆地生态系统的 C、N 循环和周转中具有重要作用。DOC 容易被土壤微生物分解^[1],参与土壤生物化学转化过程,又是土壤微生物生命活动的能源,对土壤养分的有效化有着十分重要的作用^[2-3]。有学者提出, DON 可能是植物可以吸收利用的一个重要的土壤氮素组分^[4],在土壤中的行为既不同于矿质氮,也不同于不溶性有机氮^[5]。此外, DON 在维持陆地生态系统养分平衡方面发挥重要作用^[6]。以往森林生态系统的研究,多集中在 N、P、K 等单个营养元素循环方面。近年来,关于林地土壤中 DOC, DON 含量研究的报道屡见不鲜,但是,有关病虫害干扰对林地土壤 DOC、DON 的影响及其与土壤养分关系的研究甚少。马尾松(*Pinus massoniana*)为我国亚热带地区典型的乡土针叶树种,分布面积位居全国针叶林总面积的首位^[7]。由于长期大面积纯林经营,我国马尾松林的稳定性较差,特别是病虫害严重,导致森林生产力下降和诸多的生态问题^[8]。自 1982 年我国首次发现松材线虫,迄今发病面积超过 10 万 hm^2 ,已造成 2 000 多万株松树枯死,其中马尾松林受害面积大^[9]。了解松材线虫病干扰后,马尾松林土壤环境特别是养分状况的变化特点,对受损森林的恢复和重建具有重要意义。为此,本研究以合肥蜀山森林公园的马尾松林为研究对象,比较分析松材线虫病不同干扰下马尾松林土壤的 DOC、DON 和养分含量的变化,旨在揭示森林土壤对松材线虫病干扰的响应机制,为受损林分的生态恢复与可持续经营提供理论依据和可行措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

调查地位于合肥市郊的蜀山森林公园内,其地理位置为 $31^{\circ}51'N$ 、 $117^{\circ}14'E$,属亚热带北缘。气候

四季分明,年平均降水量 969.5 mm,年平均气温 $15.7^{\circ}C$,年平均相对湿度 75%。森林公园内的植被 90%为人工林,其中马尾松林面积 200 多 hm^2 ,占公园森林面积的 65%,系 20 世纪 50~60 年代营造,近 20 年来没有人为经营,林下植被发育较好,有较多的灌木生长,主要种类有:枫香(*Liquidambar formosana*)、榆树(*Ulmus pumila*)、朴树(*Celtis sinensis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、黄檀(*Dalbergia hupeana*)等。1998 年首次发现松材线虫病感染,2002~2007 年出现大量树木枯死,至 2008 年,林内枯死树木已基本清理。根据松材线虫病危害状况及其立地条件的一致性,选择重度受损(MP1)和轻度受损(MP2)马尾松林各 1 块作为研究对象,设置固定样地($20\text{ m}\times 20\text{ m}$),两林分相距约 300 m。各林分基本情况见表 1。

调查地土壤是辉长岩风化母质上发育起来的黄棕壤,土层较厚,质地粘重,呈酸性。马尾松林下凋落物层发育较好。

1.2 样品的采集与处理

2009 年 10 月对固定样地进行了每木调查,测定指标包括胸径 3.0 cm 以上树木的胸径、树高、林下植被状况、以及枯死立木状况等。同时,在标准地内用土壤钻随机钻取 5 个土样,各取样点土样分为 0~10 cm 和 10~20 cm 两层。土样带回室内拣去石砾,植物根系和碎屑,过 2 mm 土壤筛,再分成 2 份。一份鲜样用于溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)的提取。另一份风干后,进一步处理,供土壤养分分析。

1.3 样品分析方法

土壤全 N(TN)含量用全自动凯氏定氮法测定;全 P(TP)和有效 P(AP)含量用钼锑抗比色法测定;土壤溶液电导率(EC)按照土水比为 1:5 混合、摇匀后震荡 30 min,稍静置,用 Extech II 型电导仪

表 1 调查林分基本情况

Table 1 Basic conditions of the sampling stands

样地 Plot	树种组成 Species composition	密度/株· hm^{-2} Density		平均胸径/cm Mean DBH		平均树高/m Mean height		胸高断面面积 / $\text{m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ Basal area		现有枯死立木 /株· hm^{-2} Standing dead trees
		2002	2009	2002	2009	2002	2009	2002	2009	
MP1	马尾松 <i>P. massoniana</i>	1 075	475	17.9	24.13	14.53	16.97	27.05	21.71	50
	阔叶树 Broad-leaved trees	550	800	7.76	8.15	7.22	7.73	4.16	5.96	
	林分 Stand	1 625	1 275	13.96	13.48	11.75	10.79	31.21	27.67	
MP2	马尾松 <i>P. massoniana</i>	1 150	850	17.10	21.81	14.71	17.96	26.36	31.74	25
	阔叶树 Broad-leaved trees	575	750	6.93	7.34	7.03	7.40	4.18	6.05	
	林分 Stand	1 725	1 600	10.61	11.83	10.15	10.76	30.54	37.79	

测定; 土壤 pH 值按 1:2.5 的水土比充分混合、摇匀后, 用 Extech II pH 计测定。K、Ca、Mg 全量用原子吸收光度法测定^[10]。

准确称取 30 g 新鲜土样于 100 mL 塑料瓶中, 每份土样 3 次重复, 然后每瓶样品加入 50 mL 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液浸提, 震荡 30 min 后静置, 再用 GF/F 玻璃纤维滤纸过滤。用 Multi N/C 3100 测定滤液的 DOC 和 DON 含量; 用 FIAstar 5000 流动注射分析仪测定 NH₄⁺-N (AN) 和 NO₃⁻-N (NN) 含量。

1.4 数据分析

利用 Excel 和 DPS 统计软件对分析结果进行统计分析, 试验数据是 3 个重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 松材线虫病危害后林分变化

根据松材线虫病危害前后的林分调查结果 (表 1) 可知, 重度受损林分中马尾松种群密度降低了 55.8%, 胸高断面面积下降了 19.8%, 林分郁闭度由 0.8 下降至 0.5。轻度受损林分马尾松种群密度下降了 26.1%, 而胸高断面面积则提高了 20.4%, 林分郁闭度基本没有变化, 维持在 0.8。表明轻度受损林分

中马尾松枯死木多为小径木。林分结构的显著变化, 势必引起林内小气候条件的改变, 从而会进一步引起地表凋落物分解及土壤养分状况变化。

2.2 土壤养分变化

由表 2 可知, 土壤 TN、TP 含量都表现为表层 (0~10 cm) 高于下层 (10~20 cm), 中度受损林分 MP2 土壤 N、P 含量垂直变化明显高于轻度受损林分 PM1。MP2 土壤 TP 含量仅在 0~10 cm 土层内显著高于 PM1 ($P<0.05$)。不同林分土壤 K、Ca、Mg 含量都随土层深度的增加而增加, MP2 土壤 K、Ca、Mg 含量都高于 MP1。MP2 的 0~10 cm 土层内 K、Ca、Mg 含量分别是 MP1 的 1.62、1.34 和 1.17 倍; 在 10~20 cm 土层内, K、Ca、Mg 含量分别为 15.77、1.18 和 6.58 g·kg⁻¹, 分别是 MP1 的 1.73、1.20 和 1.27 倍。方差分析结果可知, 两林分土壤 K、Ca、Mg 含量差异显著 ($P<0.05$), 而 TN 含量差异不显著。尽管调查林地立地条件相同, 但不同林分土壤全量养分含量存在一定的差异。这可能是由于 MP1 受到松材线虫病严重危害后, 大量林木枯死, 林冠破损严重, 土壤养分吸收减少、流失增加所致。

表 2 不同林地土壤全量养分含量和理化性质

Table 2 Physicochemical properties and soil total nutrient contents in the different stands

样地 Plot	土层/cm Soil layer	TN /g·kg ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	K /g·kg ⁻¹	Ca /g·kg ⁻¹	Mg /g·kg ⁻¹	含水率/% Moisture	pH (H ₂ O)	EC /μS·cm ⁻¹
MP1	0~10	1.73 (0.33) ^a	98.67 (1.71) ^b	8.21 (1.01) ^c	0.87 (0.05) ^c	4.50 (0.31) ^c	23.96 (0.03) ^a	4.49 (0.14) ^a	85.66 (1.34) ^a
	10~20	1.06 (0.11) ^b	91.23 (0.40) ^c	9.10 (0.59) ^c	0.98 (0.02) ^b	5.29 (0.26) ^b	28.62 (0.06) ^{ab}	5.06 (0.08) ^a	88.86 (1.49) ^a
MP2	0~10	1.46 (0.08) ^a	109.1 (1.18) ^a	13.31 (1.57) ^b	1.17 (0.05) ^a	5.27 (0.23) ^b	20.65 (0.01) ^b	4.54 (0.12) ^b	66.52 (7.47) ^b
	10~20	0.78 (0.06) ^b	90.7 (0.90) ^c	15.77 (0.53) ^a	1.18 (0.02) ^a	6.58 (0.51) ^a	22.89 (0.01) ^b	5.06 (0.11) ^b	66.32 (5.42) ^b

注: 表中同一栏数据带不同字母的表示达到了 5% 的差异显著水平; 括号内数字为标准偏差。下同。

Note: values in the same column with the different letters indicate significant difference at 1% level; standard deviations (in parentheses) are listed. The same below.

表 3 不同林分土壤溶解性有机碳、氮和土壤有效氮磷含量

Table 3 Concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen and soil available N and P in the different stands

样地 Plot	土层/cm Soil layer	DOC /mg·kg ⁻¹	DON /mg·kg ⁻¹	AN /mg·kg ⁻¹	NN /mg·kg ⁻¹	AP /mg·kg ⁻¹
MP1	0~10	78.37 (2.39) ^a	25.81 (3.72) ^a	9.27 (0.41) ^a	20.40 (2.84) ^a	1.88 (0.70) ^a
	10~20	67.02 (2.07) ^b	16.26 (4.15) ^b	9.37 (0.25) ^a	16.04 (0.68) ^b	0.38 (0.06) ^b
MP2	0~10	73.86 (1.38) ^a	18.40 (2.50) ^b	6.18 (0.38) ^b	10.33 (0.31) ^c	0.63 (0.14) ^b
	10~20	52.53 (4.85) ^c	15.77 (1.74) ^b	5.89 (0.36) ^b	7.22 (1.48) ^d	0.53 (0.22) ^b

由表 3 可知, MP1 林地 0~10 cm 土层的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别为 9.27 和 20.40 mg·kg⁻¹, 分别是 MP2 的 1.50 和 1.97 倍; 同样 10~20 cm 土层的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别为 MP2 的 1.59 和 2.22

倍。经方差分析可知, 不同林地土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量差异显著 ($P<0.05$), 而不同林地土壤 AP 含量在 0~10 cm 土层差异显著, 而 10~20 cm 土层差异不显著。从有效性 N 和 P 的比例来看 (图 1),

MP1 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N/TN}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N/TN}$ 明显高于 MP2, 而且两林分中 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层。然而, 不同林分土壤的 AP/TP 比存在一定差异, MP1 的 0~10 cm 土层的 AP/TP 比显著高于 MP2, 而 10~20 cm 土层则相反, MP2 略高于 MP1。

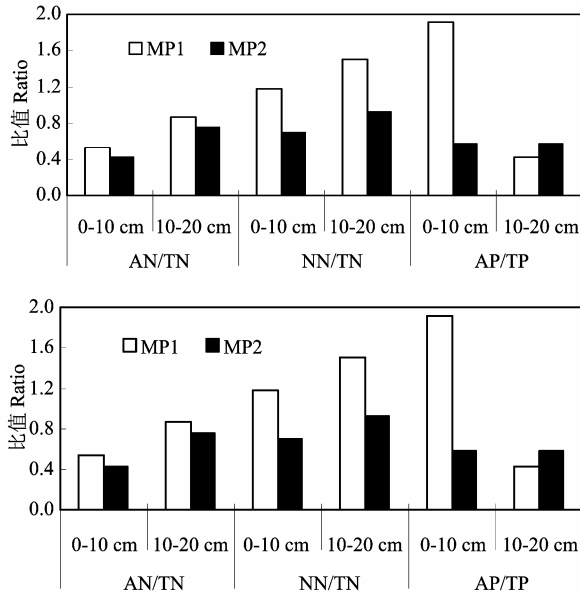


图 1 不同林分土壤有效氮磷与其全量比值的变化

Figure 1 Changes in ratios of available N and P to total N and P for the different stands

2.3 土壤 DOC 和 DON 变化

由表 3 可知, 不同林地土壤 DOC 和 DON 含量

都随土层深度的增加而降低。MP1 的 0~10 cm 土层 DOC 含量为 $78.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 略高于 MP2 ($73.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 在 10~20 cm 土层, MP1 的 DOC 含量 ($67.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于 MP2 ($52.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $P < 0.05$)。就 DON 来看, 在 0~10 cm 土层中 MP1 显著高于 MP2 ($P < 0.05$), 而在 10~20 cm 土层中, 两林分非常接近。

不同林分土壤 DOC/DON 比为 3.04~4.12, DON/TN 比为 1.26%~2.02%, 在不同土层中存在一定变异。MP1 土壤 0~10 cm 的 DOC/DON 比低于 10~20 cm, 而 MP2 则相反, 表现出表层高于下层。两林分中 DON/TN 比均表现为 0~10 cm 大于 10~20 cm 土层。

2.4 DOC、DON 与土壤养分的关系

相关分析结果表明 (表 4), MP1 土壤 DOC 和 DON 含量分别与 TN、TP 之间存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 AP 存在显著的正相关 ($P < 0.05$), 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不存在显著的相关性, 且 DOC 与 DON 含量之间也达到了极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 其中 DOC、DON 含量分别与 TN、TP、AP 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的正相关程度依次为: $\text{TP (TN)} > \text{TN (TP)} > \text{AP} > \text{NO}_3^-\text{-N}$ 。此外, DOC 和 DON 含量都与 Ca 存在极显著负相关 ($P < 0.01$), Mg 含量与 DOC ($P < 0.05$) 及 DON ($P < 0.01$) 存在显著的负相关; DOC 和 DON 分别与 K、Ca、Mg 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的负相关程度依次为: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

表 4 MP1 土壤 DOC、DON 与其他土壤养分之间的相关性分析结果

Table 4 The result of correlations of DOC, DON with other soil nutrients in the stand MP1

指标 Parameter	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	N	K	P	AP	Ca	Mg	DOC	DON
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	1									
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.29	1								
N	-0.61	0.41	1							
K	-0.30	-0.88**	-0.25	1						
P	-0.40	0.62	0.96**	-0.39	1					
AP	-0.49	0.46	0.88**	-0.18	0.93**	1				
Ca	0.42	-0.47	-0.96**	0.30	-0.95**	-0.81*	1			
Mg	0.26	-0.42	-0.86*	0.35	-0.86*	-0.70	0.94**	1		
DOC	-0.42	0.67	0.95**	-0.52	0.98**	0.86*	-0.93**	-0.83*	1	
DON	-0.47	0.51	0.93**	-0.49	0.90**	0.76*	-0.93**	-0.92**	0.94**	1

注: * 相关性显著水平: $P < 0.05$; ** 相关性显著水平: $P < 0.01$ 。下同。

Note: *means significant difference at $P < 0.05$; ** means significant difference at $P < 0.01$. The same below.

从表 5 可看出, MP2 土壤 DOC 含量分别与 TN、TP 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间存在极显著的正相关 ($P < 0.01$), 其中 DOC 含量与 TN 的相关性最大 ($r = 0.97$, $P <$

0.01), 其次为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、P。DOC 含量与 Mg 存在极显著的负相关 ($r = -0.88$, $P < 0.01$), 与 K、Ca、AP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之间均不存在显著的相关关系。土壤

DON 含量仅与 NO_3^- -N 存在显著的正相关关系 ($r=0.78$, $P<0.05$), 与 Ca 含量存在显著的负相关关系 ($r=-0.85$, $P<0.05$), 与土壤 N、P、K、Mg、AP、

NH_4^+ -N 和 DOC 含量之间均不存在显著的相关关系 ($P<0.05$)。

表 5 MP2 土壤 DOC、DON 与其他土壤养分之间的相关性分析结果

Table 5 The result of correlations of DOC, DON with other soil nutrients in the stand MP2

指标 Parameter	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	N	K	P	AP	Ca	Mg	DOC	DON
NH_4^+ -N	1									
NO_3^- -N	0.54	1								
N	0.31	0.87*	1							
K	-0.73	-0.62	-0.69	1						
P	0.37	0.84*	0.99**	-0.77*	1					
AP	0.32	0.51	0.33	-0.06	0.30	1				
Ca	0.03	-0.40	-0.24	-0.31	-0.13	-0.32	1			
Mg	-0.13	-0.85*	-0.85*	0.41	-0.81*	-0.59	0.23	1		
DOC	0.42	0.96**	0.97**	-0.68	0.95**	0.41	-0.32	-0.88**	1	
DON	0.17	0.78*	0.66	-0.13	0.56	0.32	-0.85*	-0.61	0.74	1

3 讨论

3.1 土壤养分

森林土壤是维持林木健康生长的基质, 其肥力特征影响并控制着林木的生长和健康状态^[11]。森林退化与土壤肥力的衰退有密切的联系^[12]。本研究结果显示, 不同林分土壤养分状况差异明显。重度受损林分土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的含量显著高于轻度受损林分, 而土壤 K、Ca、Mg 的含量都显著低于轻度受损林分。这可能是因为马尾松林在松材线虫严重危害后, 导致大量林木枯死, 林内光照增强, 温度升高。这种立地环境变化, 在一定程度上提高了地表凋落物分解以及土壤氮素矿化速率, 加之林木吸收固滞减少, 使得重度受损林分土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量相对较高。但是, 较高的土壤 NO_3^- -N 含量意味着氮损失的潜在风险相对较大, 即在缺乏植物有效利用和地表径流增强的共同作用下, NO_3^- -N 极易通过地表径流、反硝化、渗漏等方式损失, 引起土壤氮含量的减少。同时, 土壤中 NO_3^- -N 含量高, 可导致土壤酸化、增加土壤盐基离子淋失, 这可能是重度受损林分土壤 K、Ca、Mg 含量降低的重要原因之一。实测表明, 不同受损林地土壤全 P 和有效 P 含量均随土层深度的增加而减少, 在 0-10 cm 土层内, 重度受损林分土壤有效 P 含量显著高于轻度受损林分 ($P<0.05$), 而土壤全 P 含量则显著低于轻度受损林分 ($P<0.05$)。这可能与土壤 P 的转化有关, 受害较重的林分, 土壤 P 转化加快所致。

3.2 溶解性有机碳和氮

土壤溶解性有机碳直接参与土壤生物化学转化过程, 对土壤变化十分敏感, 也是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力^[13]。Linn 和 Doran^[14]认为在森林土壤中 DOC 含量一般不超过 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本研究的结果显示, 不同受损林地土壤 DOC 的含量在 $52.53\sim 78.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 与 Qualls^[15]等报道的森林土壤 DOC 含量范围 ($10\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 一致。不同受损林地土壤 DOC 含量都随土层深度的增加而减少。这与土壤中根系和微生物量的垂直分布有关; 还与 DOC 的生物降解或吸附等因素有关。在 10~20 cm 土层内, 不同林地间 DOC 含量的差异显著 ($P<0.05$), 即重度受损林分土壤有较高的 DOC 含量。可能是松材线虫严重危害后, 林地枯落物和土壤有机质降解加快所致。

溶解性有机氮是林地土壤中可溶性全氮的主要组分, 占林地土壤可溶性全氮含量的 90% 以上^[16-17]。Bhogal 等^[18]对英国两个草地 DON 含量的研究表明 DON 占土壤可溶性全氮的 16.7%~89.3%, 一些土壤 DON 含量高达 $57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Chen 等^[19]用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 浸提的 22 个林地 0~10 cm 土层 DON 含量为 $5\sim 45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均占土壤 TN 的 2.3%。本研究的结果显示, 不同受损林地上层土壤中 DON 含量高于下层土壤, 其含量在 $15.77\sim 25.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 占土壤 TN 的 1.26%~2.02%。在 0~10 cm 土层内, 重度受损林分土壤 DON 含量显著高于轻度受损林分 ($P<0.05$)。

土壤中 DOC/DON 比受各种因素影响, 对此变

化的了解能更好地反应 DON 在评价土壤供氮能力中的作用与效果。Lajtha 等^[20]发现 DOC/DON 比在所有的处理中随着剖面深度的增加而降低,认为是由于上层非亲水有机质中 C:N 比高于下层亲水有机质 C:N 比,具有优先吸附作用。本研究中,重度受损林分上层土壤(0~10 cm)内 DOC/DON 比低于下层土壤(10~20 cm),而轻度受损林分则相反(表3)。

DOC、DON 是土壤有机碳、氮中活性最高的组分之一,在森林生态系统养分循环过程中起着重要作用。DOC 与土壤生态系统有机碳的迁移、固持和二氧化碳的释放有密切联系^[21],DON 与土壤氮素供应及 N_xO 排放之间具有紧密的相关性。研究结果显示土壤 DOC、DON 含量与土壤全 N、全 P、有效 P、 NO_3^- -N、Ca 和 Mg 之间存在较高的相关性,因此,土壤 DOC、DON 与土壤肥力紧密相关,可以作为指示土壤肥力的重要指标。在松材线虫病干扰后,林地土壤 DOC 和 DON 含量变化与其它养分间的相关性发生一定变化。

综上所述,松材线虫病危害造成大量林木枯死,引起林内环境显著变化,导致林地土壤 DOC、DON 及主要养分状况产生显著变化,其变化特点显示,重度受损林分表层土壤 DON、无机氮、有效磷含量显著高于轻度受损林分,增加了土壤养分损失的危险性,特别是土壤硝态氮的显著增加,可能会进一步引起土壤酸化,加大土壤盐基离子淋失的可能性,如不及时恢复植被,可能加剧土壤肥力退化。因此,松材线虫病严重干扰对土壤生物地球化学过程的影响机制有待深入研究。

参考文献:

- [1] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic C fractions and ^{13}C natural isotope abundance [J]. *Plant and Soil*, 1993, 156: 399-402.
- [2] Wander M M, Traina S J, Stinner BR, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fraction [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1130-1139.
- [3] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 15-17.
- [4] Nemet H K, Bertel S H, Voge L M, et al. Organic nitrogen compounds extracted from arable and forest soils by electro-ultrafiltration and recovery rates of amino acids [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 5: 271-275.
- [5] Hagedorn F, Bucher J B, Schleppei P. Contrasting dynamics of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil and surface waters of forested catchments with Gleysols [J]. *Geoderma*, 2001, 100: 173-192.
- [6] Hedin L O, Armesto J J, Johnson A H. Patterns of nutrient loss from unpolluted old-growth temperate forest: evaluation of biogeochemical theory [J]. *Ecology*, 1995, 76: 439-509.
- [7] 康冰, 刘世荣, 史作民, 等. 南亚热带人工马尾松林下植物组成特征及主要木本种群生态位研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (9): 1786-1790.
- [8] 徐小牛, 李宏开. 马尾松枫香混交林生长及其效应研究[J]. *林业科学*, 1997, 33(5): 385-393.
- [9] 黎镇湘, 安树杰, 张晓丽, 等. 松材线虫入侵林地土壤因子相关性分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 938-942.
- [10] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Fisher R F, Binklet D. Ecology and management of forest soils[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2000: 282-284.
- [12] La Manna L, Rajchenberg M. Soil properties and *Austrocedrus chilensis* forest decline in Central Patagonia, Argentina [J]. *Plant and Soil*, 2004, 263: 29-41.
- [13] Coleman D C, Crossley D A, Hendrix P. Fundamentals of soil ecology[M]. New York, Academic Press, 1996.
- [14] Linn D M, Doran J W. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 1267-1272.
- [15] Qualls R G, Haines B L, Swank W T, et al. Soluble organic and inorganic nutrient fluxes in clearcut and mature deciduous forests [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1068-1077.
- [16] Stevens P A, Wannop C P. Dissolved organic nitrogen and nitrate in an acid forest soil [J]. *Plant and Soil*, 1987, 102: 137-139.
- [17] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. *Ecology*, 1997, 72: 254-266.
- [18] Bhogal A, Murphy D V, Fortune S, et al. Distribution of nitrogen pools in the soil profile of undisturbed and reseeded grasslands [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 356-362.
- [19] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, et al. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia [J]. *Plant and Soil*, 2005, 277: 285-297.
- [20] Currie W S, Aber J D, McDowell W H, et al. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests [J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 471-505.
- [21] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552.