

不同松栎混交林土壤溶解性有机碳氮的差异分析

杨果果, 孔玉华, 赵佳宝, 冯志培, 范贝贝, 杨喜田

(河南农业大学 林学院, 郑州 450002)

摘要:为揭示北亚热带地区不同林分类型的土壤活性碳氮分布特征,在驻马店市南部山区选取4处具有代表性的松栎人工混交林为研究对象,对其0—20 cm土壤的溶解性有机碳(DOC),溶解性有机氮(DON)等组分进行研究。结果表明:4种林型土壤DOC的含量为麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林>马尾松麻栎混交林,DON的含量为马尾松麻栎混交林>麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林,不同林分类型间整体上差异性显著($p<0.05$);在垂直剖面上,4种林型土壤DOC和DON均随土层深度的增加而显著性下降($p<0.05$)。4种林分类型DOC/SOC, DON/TN, DOC/DON分别以麻栎纯林、马尾松麻栎混交林、麻栎纯林最高,在垂直空间分布上,差异性整体上不显著。土壤DOC和DON与土壤含水率、土壤硬度、速效钾、全氮均呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)相关性。

关键词:麻栎; 溶解性有机碳; 溶解性有机氮; 混交林

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0079-05

Differences of Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in Soils of Four Mixed Pine-Oak Plantations

YANG Guoguo, KONG Yuhua, ZHAO Jiabao, FENG Zhipei, FAN Beibei, YANG Xitian

(College of Forestry, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to reveal the distribution characteristics of soil active carbon and nitrogen in different forest types in the north subtropics, four typical representative mixed plantations of Pine and *Quercus acutissima* in the southern mountainous area of Zhumadian were selected, and the components of 0—20 cm soil layer such as dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON), and so on were studied. The experimental results showed that the detail contents of soil DOC in four forest sites decreased in the order: pure *Quercus acutissima* > mixed *Quercus acutissima* and *mongolica* > mixed *Pinus taeda* and *Quercus acutissima* > mixed *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima*, the contents of soil DOC decreased in the order: mixed *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* > pure *Quercus acutissima* > mixed *Quercus acutissima* and *mongolica* > mixed *Pinus taeda* and *Quercus acutissima*, and the statistics differences between different forest types are significantly ($p<0.05$). In the vertical profile, the contents of soil DOC and DON for the four forest types decreased significantly with increase of soil depth ($p<0.05$). The max proportion of DOC/SOC, DON/TN, DOC/DON was found in pure *Quercus acutissima*, mixed *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima*, pure *Quercus acutissima*, respectively. There were no significant differences in the vertical spatial distribution, soil DOC and DON are significantly ($p<0.05$) or extremely significantly ($p<0.01$) related with soil water content, soil hardness, available potassium and total nitrogen.

Keywords: *Quercus acutissima*; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; mixed forest

溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是非常活跃的有机碳组分^[1],占土壤有机碳的比例很少^[2],具有周转速率快、易分解、生物活性高等特征^[3]。溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen,

DON)是重要的土壤营养库,矿化和硝化速率较快^[4]。土壤DOC和DON含量易受到土壤养分、土壤质量、地形、气候、植被类型等因素的影响^[5-6],其微弱的变化都可能会影响土壤DOC和DON的转化过

程。Cookson^[7]、Kemmitt^[8]等研究发现土壤温度、水分、pH 值等均对土壤 DOC 和 DON 的转化和消耗有影响。Qualls 等^[9]提出土壤 DOC 和 DON 主要来源于新进的凋落物,由此可见,林木的组成对土壤 DOC 和 DON 的来源和转化尤为重要,国内外关于林分类型和垂直剖面上土壤 DOC 和 DON 的分布、转化和积累等方面已经做了大量的研究工作,曾全超等^[10]研究发现不同乔木林下土壤 DOC 和 DON 有不同程度的差异性,赵佳宝等^[11]研究马尾松麻栎混交林时发现土壤养分、坡向、土层深度和胸高断面面积对土壤 DOC 和 DON 含量有影响。但是关于北亚热带地区不同松栎混交林的土壤 DOC 和 DON 分布的差异研究还未见报道。

麻栎(*Quercus acutissima*),壳斗科栎属,是优良的硬阔叶用材树种,具有生长迅速、耐干旱瘠薄和水土保持功能,是一种具有广阔的开发前景的能源树种^[12],麻栎在北亚热带地区分布广泛,是重要的森林资源,这一地区属于亚热带和暖温带的过渡区,对气候变化具有敏感性,关于北亚热带的麻栎混交林土壤 DOC 和 DON 积累和转化的研究变得尤为重要。本研究选择了驻马店南部低山丘陵区 3 处具有代表性

的马尾松、湿地松、火炬松和麻栎的松栎人工混交林,以麻栎纯林为对照,进行研究 4 种林分类型土壤溶解性有机碳氮的差异,探讨人工林生态系统的土壤 DOC 和 DON 的转化和周转机理,以期为北亚热带地区松栎人工混交林地的土壤有机碳氮积累和土壤质量改善提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究地区概况

研究区位于河南省驻马店市确山县薄山林场和泌阳县马道林场,是桐柏山系余脉,地处东经 113°23′—114°30′,北纬 32°24′—32°45′。该区位于亚热带和暖温带的过渡区,属于大陆性季节气候,年平均降雨量约为 850~960 mm,年平均气温约为 15.1℃,日照时长约 2 140 h,无霜期约为 220 d。土壤以黄棕壤和黄褐土为主。主要植被为马尾松(*Pinus massoniana*),刺槐(*Robinia pseudoacacia*),麻栎(*Quercus acutissima*),栓皮栎(*Quercus variabilis*),侧柏(*Platycladus orientalis*),杨树(*Populus* spp)等,以及稀有树种湿地松(*Pinus elliottii*),火炬松(*Pinus taeda*)等。

表 1 研究区样地的基本概况

混交类型	混交比例	海拔/m	坡向	坡度	经纬度	植株密度/		平均胸径/cm		平均树高/m		植被区地点
						(棵·hm ⁻²)		松类	麻栎	松类	麻栎	
湿×麻	25:16	167	北坡	11°	113°59′4″E,32°43′20″N	1325		15.07	10.35	8.94	8.58	薄山林场土门林区
马×麻	1:4	295	西坡	9°	113°33′29″E,32°39′18″N	2000		12.25	11.73	6.38	8.96	马道林场义和寨林区
火×麻	1:18	190	西坡	5°	113°56′2″E,32°39′7″N	2700		30.13	5.27	13.5	5.68	马道林场铜山湖林区
麻栎纯林	—	150	西坡	5°	113°59′20″E,32°43′18″N	1600		—	11.84	—	8.39	薄山林场土门林区

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取 于 2014 年 7 月先后在研究区薄山林场和马道林场进行调查采样,为尽可能减少对森林资源的破坏,选取 4 处具有代表性的人工林样地作为研究对象,分别为马尾松麻栎混交林(马×麻),湿地松麻栎混交林(湿×麻),火炬松麻栎混交林(火×麻)以及麻栎纯林。样地选择坡面相对均匀、人为干扰较少、胸径处的年轮变化大致相同的区域,设置面积为 20 m×20 m 的样方。采用罗盘仪对选取过的样地进行测量,用每木检尺法逐一测定样方内林木(胸径≥2 cm)的胸径和树高,并记录调查样地的名称、海拔、经纬度、树高、坡度、坡向、胸径等信息(表 1)。

1.2.2 土壤取样 在每 1 个人工林样地中所选择的 20 m×20 m 的样方内按照对角线设定 3 个取样点,样点间隔≥1 m,清理土壤表面的枯落物等杂质后,使用环刀取样法分别取 0—10 cm,10—20 cm 的土层,装入已记录好对应的采样编号、地点和深度的密封袋中,留测土壤

中根系生物量;在环刀所取位置挖取剖面,每个剖面分为 0—10 cm,10—20 cm 的土层,每个土层取约 1 kg 的混合样品(四分法)另放入同上已记录好的密封袋中,带回实验室进行测定和分析。

1.2.3 分析方法 采用烘干法测定土壤含水量和根系密度,采用山中式土壤硬度计测定土壤硬度,采用环刀法测定土壤容重,用土壤粒径粒型测量系统测量(Mastersizer 2000, Malvern, 英国)测定土壤颗粒组成,将土壤颗粒按粒径分为黏粒(0~0.002 mm),粉粒(0.002~0.02 mm),砂粒(0.02~2 mm)。土壤 pH 值采用酸度计进行测定,采用连续流动分析仪测量铵态氮、硝态氮、DOC 和 DON,土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法,土壤全氮测定采用半微量开氏法,采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定土壤中速效钾含量,采用盐酸—氟化铵提取钼锑抗比色法测定土壤中速效磷含量,采用碱解扩散法测定样品中碱解氮。

表 2 研究区供试土壤的物理性质(平均值±标准差)

混交 类型	土层 深度/cm	含水率/ %	土壤 硬度/mm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	根密度/ (mg·cm ⁻³)	土壤粒径体积分数		
						黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%
湿×麻	0—10	10.09±0.11	20.30±0.70	0.96±1.80	6.11±1.80	2.07±0.02	83.34±1.19	20.40±1.35
	10—20	7.92±1.01	17.85±0.84	0.95±0.03	17.34±3.30	2.58±0.09	83.23±1.30	24.40±5.40
马×麻	0—10	9.51±0.05	19.80±1.00	1.04±0.04	5.99±1.20	0.22±0.03	31.73±0.77	68.03±8.10
	10—20	7.11±0.07	20.80±0.40	0.83±0.04	17.52±3.24	0.32±0.02	30.46±0.67	68.87±10.67
火×麻	0—10	4.00±0.04	23.20±1.40	1.16±0.03	5.92±1.38	0.51±0.03	43.50±1.89	56.00±1.04
	10—20	4.01±0.02	21.70±0.60	0.89±0.08	7.89±1.17	0.52±0.04	42.51±1.87	57.00±1.26
麻栎纯林	0—10	14.68±0.12	17.20±1.80	0.92±0.03	8.55±2.16	2.11±0.04	83.34±1.79	14.6±3.70
	10—20	12.11±0.17	19.60±2.30	0.88±0.06	7.46±3.61	2.58±0.15	83.23±1.16	14.2±1.50

表 3 研究区供试土壤的化学性质(平均值±标准差)

混交 类型	土层 深度/cm	pH 值	速效钾/	速效磷/	全氮/	硝态氮/	铵态氮/	碱解氮/	有机碳/	有机质/
			(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)
湿×麻	0—10	5.63±0.12	52.21±3.86	5.82±0.70	21.11±0.03	3.18±0.37	8.44±0.13	75.17±1.52	8.31±0.41	13.89±0.49
	10—20	5.56±0.17	45.27±3.38	8.19±0.20	18.70±0.16	2.22±0.23	7.89±0.05	99.60±1.45	6.72±0.38	11.59±0.40
马×麻	0—10	5.62±0.13	119.06±10.42	11.30±1.00	19.94±0.01	0.76±0.29	7.53±0.01	39.97±1.58	6.53±0.08	6.53±0.20
	10—20	5.65±0.20	62.83±4.67	12.60±0.30	18.67±0.02	0.82±0.13	6.76±0.13	33.67±4.41	4.93±0.19	4.93±0.30
火×麻	0—10	5.30±0.07	68.39±4.71	9.20±1.00	16.07±0.32	1.59±0.36	7.66±0.01	37.10±1.09	6.16±0.29	10.62±0.50
	10—20	5.58±0.19	41.88±3.38	10.70±0.60	15.75±0.32	2.28±0.18	7.45±0.11	57.12±1.88	5.30±0.30	9.49±0.87
麻栎纯林	0—10	5.52±0.02	126.73±3.80	5.80±0.20	25.51±0.22	1.79±0.27	10.82±0.24	61.22±3.00	10.94±1.00	18.52±0.50
	10—20	5.50±0.07	89.01±2.59	8.20±0.20	17.65±0.83	0.89±0.47	8.88±0.19	40.01±2.65	8.81±1.00	15.19±0.10

1.2.4 数据处理和分析 采用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和检验不同松栎林分类型 DOC, DON, DON/TN, DOC/SOC, DOC/DON 的差异性,并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较和对土壤溶解性有机碳氮与理化性质进行了相关性分析,采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤溶解性有机碳氮的分布

4 种林型土壤 DOC 含量在 77.09~131.89 mg/kg 范围波动,常晨晖等^[13]研究发现川西高山森林土壤 DOC 含量为 33.1~448.2 mg/kg,和其他研究者结论一致。土壤 DOC 含量从大到小的顺序为麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林>马尾松麻栎混交林,在 0—10 cm 和 10—20 cm 混交林土壤中的 DOC 含量均显著($p<0.05$)低于麻栎纯林,0—10 cm 土层中湿地松麻栎混交林、马尾松麻栎混交林、火炬松麻栎混交林分别是麻栎纯林土壤 DOC 含量的 79.85%,57.61%,63.72%;10—20 cm 土层中湿地松麻栎混交林、马尾松麻栎混交林、火炬松麻栎混交林分别是麻栎纯林土壤 DOC 含量的 82.51%,61.88%,58.45%。随着土层深度的增加,不同林型中 DOC 含量均呈显著下降趋势($p<0.05$),在湿地松麻栎混交林、马尾松麻栎混交林、火炬松麻栎混交

林、麻栎纯林 0—10 cm 土层 DOC 含量分别比 10—20 cm 高出 10.53%,6.34%,24.52%,14.22%。

土壤 DON 含量以马尾松麻栎混交林最高,高达 11.36 mg/kg,在 0—10 cm 土层,以麻栎纯林最高,为 12.9 mg/kg,在 10—20 cm 土层,以马尾松麻栎混交林最高,为 11.09 mg/kg,湿地松麻栎混交林次之,为 8.59 mg/kg。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,火炬松麻栎混交林中土壤 DON 含量均是最低的。在 Chen 等^[14]发现土壤溶解性有机氮含量的范围为 5~45 mg/kg。随着土层深度的增加,不同林型中 DON 含量均呈显著下降趋势($p<0.05$),在湿地松麻栎混交林、马尾松麻栎混交林、火炬松麻栎混交林、麻栎纯林 0—10 cm 的 DON 含量分别比 10—20 cm 高出 10.36%,4.99%,13.35%,63.64%,其中以麻栎纯林中土壤 DON 含量变化最为显著。

2.2 DOC/SOC, DON/TN, DOC/DON 的变化特征

4 种林型土壤 DOC/SOC 以麻栎纯林土壤最高,为 2.11%,均高于松栎混交林,与火炬松麻栎混交林的差异性不显著。在不同林型中不同土层深度土壤 DOC/SOC,除了火炬松麻栎混交林 10—20 cm 显著($p<0.05$)高于 0—10 cm,整体上以 0—10 cm 低于 10—20 cm,其中麻栎混交林 0—10 cm 显著低于 10—20 cm。土壤 DON 占 TN 的比例大小为 38.18%~53.39%,其由大到小的顺序为马尾松麻栎混交林>麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林,其中,马尾松麻栎混

交林 DON/TN 显著 ($p < 0.05$) 高于其他林型,但不同土层深度土壤 DON/TN 的比值差异性均不显著。土壤溶解性有机碳氮比以马尾松麻栎混交林最低,其

他林型整体上差异性不显著,不同土层深度以麻栎纯林差异最为显著,3 种混交林的垂直分布上的 DOC/DON 差异性均不显著。

表 4 4 种林型 DOC 和 DON 的含量

混交类型	土层深度/cm	DOC/(mg·kg ⁻¹)	DON/(mg·kg ⁻¹)	DOC/SOC/%	DON/TN/%	DOC/DON
湿×麻	0—10	120.29±1.49Ab	9.48±0.21Ac	1.73±0.03Ab	44.92±1.48Ab	12.70±0.44Aa
	10—20	108.83±2.18Bb	8.59±0.02Bc	1.80±0.05Ab	45.93±0.70Ab	12.67±0.28Ab
马×麻	0—10	86.79±1.52Ad	11.64±0.29Ab	1.33±0.03Ac	58.39±2.03Aa	7.46±0.32Ab
	10—20	81.61±1.01Bc	11.09±0.03Ba	1.38±0.02Ac	59.39±0.12Aa	7.36±0.07Ac
火×麻	0—10	95.99±2.60Ac	6.82±0.68Ad	2.04±0.08Aa	42.38±4.79Ac	14.18±1.04Aa
	10—20	77.09±5.91Bc	6.02±0.26Bd	1.58±0.17Bb	38.18±1.08Ac	12.88±1.53Ab
麻栎纯林	0—10	150.65±2.46Aa	12.90±0.26Aa	1.70±0.04Bb	50.56±0.80Ab	11.68±0.04Ba
	10—20	131.89±2.75Ba	7.88±0.18Bc	2.11±0.07Aa	44.71±1.59Ab	16.73±0.02Aa

注:字母区分不同处理的比较,不同大写字母表示同种林分类型不同土层深度数据的差异显著性 ($p < 0.05$);不同小写字母表示同一土层深度不同林分类型数据的差异显著性 ($p < 0.05$)。

2.3 土壤溶解性有机碳氮与理化性质的相关性

通过分析研究区土壤溶解性有机碳氮与土壤理化性质之间的相关关系,可以看出:土壤 DOC 与土壤含水率、速效钾、全氮、有机碳、铵态氮均达成极显著水平 ($p < 0.01$) 的正相关关系,与土壤硬度呈极显著水平 ($p < 0.01$) 的负相关关系,与速效磷存在显著 ($p < 0.05$) 的负相关性,姜培坤^[15],张彪^[16]等研究发

现:土壤 DOC 与土壤 SOC、全氮、速效磷、速效钾、铵态氮含量有显著或极显著相关性。土壤 DON 与速效钾、全氮存在极显著水平 ($p < 0.01$) 的正相关,与土壤含水率存在显著 ($p < 0.05$) 正相关关系,和土壤硬度呈显著 ($p < 0.05$) 负相关关系。王清奎^[17],李淑芬^[18]等研究发现土壤 DON 与速效钾、全氮等存在显著或极显著的相关关系。

表 5 土壤溶解性有机碳氮与理化性质的相关系数 (自由度 $n=23$)

相关系数	SWC	SH	SBD	RD	pH	AN	AK	AP	TN	SOC	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DOC
DON	0.686*	-0.586*	-0.173	0.161	0.304	-0.054	0.703**	0.160	0.853**	0.403	-0.280	0.398	0.349
DOC	0.846**	-0.627**	-0.124	-0.186	0.096	0.287	0.449*	-0.476*	0.691**	0.924**	0.179	0.929**	1.000

注: ** 在 0.01 水平上(双侧)极显著相关; * 在 0.05 水平上(双侧)显著相关。SWC(土壤含水率)、SH(土壤硬度)、SBD(土壤容重)、RD(根系密度)、AN(碱解氮)、AK(速效钾)、AP(速效磷)、TN(全氮)、SOC(有机碳)、NO₃⁻-N(硝态氮)、NH₄⁺-N(铵态氮)、DON(溶解性有机氮)、DOC(溶解性有机碳)。

3 讨论

不同的林分类型受到不同树种的自身生物学特征的影响,导致了林内的水分、温度、光照等环境和凋落物种类和数量的差异。本研究发现不同林型中的 DOC 含量差异性显著 ($p < 0.05$),麻栎纯林和湿地松麻栎混交林的土壤 DOC 含量较高,造成这种差异原因有植被类型、土壤养分等因素,不同的林分类型中凋落物分解速率有差异^[19],从而影响到土壤 DOC 含量,一方面可能由于其土壤含水率较高(表 2),更有利于植物凋落物的分解,进而增加土壤 DOC 的含量;另一方面可能是其土壤 SOC 含量较高,为微生物提供了必需物质,促进微生物的生长^[20],加速土壤有机物的分解,进而影响土壤 DOC 的转化,研究也发现 4 种林型土壤 DOC 的含量变化和 DOC/SOC 变化规律基本一致(表 4),表明较高的土壤 SOC,能促进土壤 DOC 的增加。相关性分析也表明了土壤 DOC 与土壤含水率、速效钾、全氮、有机碳、铵态氮均达成极显著水平 ($p < 0.01$) 的正相关关系。本研究发

现:不同林型中的 DON 含量差异性显著 ($p < 0.05$),麻栎纯林和马尾松麻栎混交林的土壤 DON 含量较高,分析其原因首先可能是土壤 DON 受到土壤 TN 的影响,研究也发现 4 种林分类型 DON/TN 的变化和土壤 DON 的含量变化规律基本一致(表 4),表明较高的土壤 TN,能促进土壤 DON 的转化。相关性分析也表明了土壤 DON 与 TN、速效钾存在极显著水平 ($p < 0.01$) 的正相关关系。其次土壤 DON 是植物和微生物直接利用的氮源,在氮循环过程中扮演着重要角色,说明土壤 DON 含量的变化与林木的生长关系密切。另外,4 种林型土壤 DOC/DON 以马尾松麻栎混交林的比值最低,File^[6]等提出土壤 DOC/DON 与有机质有关,土壤有机质较低,其 DOC/DON 也会降低,本研究中 4 种林型的土壤 DOC/DON 的比值与土壤有机质关系符合 File 的研究结果,而凋落物的质量和数量影响着土壤有机质的积累,从而可以推断不同林分类型的植被种类对土壤 DOC 和 DON 含量有影响。

本研究中在 4 种林型均出现表层的土壤 DOC 和 DON 含量显著 ($p < 0.05$) 大于下层,汪伟等^[21]在研

究罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化时发现土壤 DOC 随着土层深度的增加而减少;沈玉芳等^[22]研究黄土高原水蚀风蚀交错区施肥对黑麦草农田土壤水溶性有机碳、氮的影响时发现在 0—20 cm 土层的土壤 DOC 和 DON 含量均大于 20—40 cm 土层。主要原因:一是表层大量凋落物输入形成了枯枝落叶层,为土壤微生物生长提供了丰富的碳源和氮源,促进了土壤有机质的分解和转化^[23],增加土壤 DOC 和 DON 的来源^[24]。二是由于表层土壤的水分充足、有机碳、全氮的含量均较高,通气性好,微生物活性比下层剧烈,从而有利于表层土壤 DOC 和 DON 的积累。以上进一步证明了凋落物层是土壤 DOC 和 DON 的重要来源。

4 结论

通过不同松栎人工混交林 0—20 cm 土壤 DOC 和 DON 的分布特征的研究发现:4 种林型土壤 DOC 和 DON 的含量大小顺序分别为麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林>马尾松麻栎混交林、麻栎混交林>麻栎纯林>湿地松麻栎混交林>火炬松麻栎混交林,且均随土层深度的增加而呈显著性下降趋势。土壤中 DOC/SOC, DON/TN, DOC/DON 分别以麻栎纯林、马尾松麻栎混交林、麻栎纯林最高。土壤 DOC 和 DON 均土壤含水率、土壤硬度、速效钾、全氮等土壤理化性质均呈现不同程度的相关性,进一步证明了土壤 DON 和 DOC 变化与植被类型、土层深度及土壤理化性质关系密切。

参考文献:

- [1] 刘艳,周国逸,刘菊秀. 陆地生态系统可溶性有机氮研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 573-577.
- [2] 汪景宽,李丛,于树,等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6165-6171.
- [3] 李玲,仇少君,刘京涛,等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1407-1414.
- [4] Mariano E, Jones D L, Hill P W, et al. Mineralisation and sorption of dissolved organic nitrogen compounds in litter and soil from sugarcane fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103(12): 522-532.
- [5] 万晓华,黄志群,何宗明,等. 杉木采伐迹地造林树种转变对土壤可溶性有机质的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 12-18.
- [6] File T, Rék si M. Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary[J]. *Geoderma*, 2011, 162(3): 312-318.
- [7] Cookson W R, Osman M, Marschner P, et al. Controls on soil nitrogen cycling and microbial community com-

position across land use and incubation temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(3): 744-756.

- [8] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, et al. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 898-911.
- [9] Qualls R G, Haines B L. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(4): 1112-1123.
- [10] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3598-3605.
- [11] 赵佳宝,杨喜田,徐星凯,等. 马尾松—麻栎混交林土壤溶解性有机碳氮空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 213-219.
- [12] 刘志龙,虞木奎,唐罗忠,等. 麻栎资源研究进展及开发利用对策[J]. 中国林副特产, 2009, 12(6): 93-96.
- [13] 常晨晖,苟小林,吴福忠,等. 利用海拔差异模拟增温对高山森林土壤溶解性有机碳和有氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 663-671.
- [14] 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(1/2): 285-297.
- [15] 姜培坤,徐秋芳,杨芳. 雷竹土壤水溶性有机碳及其与重金属的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(1): 8-11.
- [16] 张彪,高人,杨玉盛,等. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1635-1640.
- [17] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1299-1305.
- [18] 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.
- [19] 丁新景,解国磊,敬如岩,等. 黄河三角洲不同人工刺槐混交林凋落物分解特性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 249-252, 307.
- [20] 罗达,史作民,唐敬超,等. 南亚热带乡土树种人工纯林及混交林土壤微生物群落结构[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2543-2550.
- [21] 汪伟,杨玉盛,陈光水,等. 罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 924-928.
- [22] 沈玉芳,陶武辉,李世清. 黄土高原水蚀风蚀交错区施肥对黑麦草农田土壤水溶性有机碳、氮的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1387-1393.
- [23] 高忠霞,周建斌,王祥,等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 115-121.
- [24] Qualls R G, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. *Ecology*, 1991, 72(1): 254-226.