

DOI: 10.5846/stxb201310072410

汲常萍, 王文杰, 韩士杰, 祖元刚. 东北次生杨桦林土壤碳氮动态特征. 生态学报, 2015, 35(17): - .

Ji C P, Wang W J, Han S J, Zu Y G. Features of soil C and N dynamics in a typical secondary poplar-birch forest in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

东北次生杨桦林土壤碳氮动态特征

汲常萍¹, 王文杰^{1,*}, 韩士杰², 祖元刚¹

¹ 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

² 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘要: 土壤分级组分是研究其碳氮动态的基础, 次生杨桦林作为东北地区主要的天然林类型, 目前相关数据的欠缺状态要求对此进行深入研究。为此, 本文采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 长白山次生杨桦林土壤, 通过土壤颗粒组分物理化学分级方法, 将土壤分成 5 种组分: 沙和稳定团聚体土壤组分 (SA)、酸不溶土壤组分 (AI)、易氧化土壤组分 (EO)、颗粒态土壤组分 (P) 和可溶性土壤组分 (S), 进而分析了不同组分的质量分数、碳氮含量、碳氮分配比例及红外光谱 5 类官能团相对含量, 旨在探讨次生杨桦林土壤固碳、氮供应机制。结果显示, 接近 90% 的土壤质量集中在稳定组分 AI (66.21%) 和 SA (22.11%) 上, 导致稳定组分中碳截获量最大 (占土壤总碳量的 2/3), 而且其 C/N 比活跃组分 (P 和 EO) 大 2—9 倍; 与碳不同, 由于活跃组分中 N 含量比稳定组分大 4—80 倍, 致使活跃组分 P 和 EO 氮的分配比例最大, 分别占土壤总氮的 33.1% 和 26.0%; 除了占土壤质量很少的 P 和 S 外, 组分间以及组分内的碳氮间多具有显著相关关系。这种土壤碳、氮在不同组分间贮存方式的差异使得土壤碳储存稳定性更高、而 N 肥力供应更快速。伴随不同组分碳氮储存的变化, 不同组分间红外官能团存在显著差异, AI 组分中绝大多数官能团相对含量均最低, 而 P 和 S 组分中绝大多数官能团相对含量均较高, 绝大多数官能团相对含量与碳含量、氮含量呈现显著的正相关关系, 反映了官能团具有维持土壤碳氮的功能。同时, 官能团与土壤 C/N 具有显著相关关系, 反映出组分官能团相对含量的高低具有指示组分化学活性高低的作用。上述研究发现对于林分土壤的碳截获与氮供应的机制阐明具有重要的科学意义, 这为深入了解东北次生杨桦林碳氮动态及对未来气候的响应提供基础数据。

关键词: 碳截获; 土壤氮; 土壤组分区分; 碳氮比; 红外线光谱官能团组成

Features of soil C and N dynamics in a typical secondary poplar-birch forest in Northeast China

Ji Changping¹, WANG Wenjie^{1,*}, HAN Shijie², ZU Yuangang¹

¹ Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

² Research Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: Precise classification of soil organic fractions is the basis for studying soil organic carbon (C) and nitrogen (N) dynamics. However, relevant information about the secondary poplar-birch forest (SPBF) is scarce, although it is one of the main natural forests in Northeast China. In this study, we discuss the potential of soil C sequestration and soil fertility in this forest. For this purpose, soils were sampled from layers at depths of 0—10, 10—20, and 20—30 cm in a typical SPBF in Changbai Mountain. Collected soils were divided into five fractions according to their physicochemical stabilities, which included sand and stable aggregates soil fraction (SA), acid insoluble soil fraction (AI), easily oxidized soil fraction (EO), particle soil fraction (P), and soluble soil fraction (S). Mass fraction (percentage of each component in the intact soil), concentration of organic C and N, allocation proportions of organic C and N, C/N ratio, and five infrared functional

基金项目: “973” 课题 (2011cb403205); 中央高校业务资金 (dl12da03); 国家自然科学基金 (41373075)

收稿日期: 2013-10-07; 网络出版日期: 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjwang225@hotmail.com

groups in all fractions were analyzed. Results showed that nearly 90% of all soil fractions was classified as AI (66.21%) and SA (22.11%), which resulted in the highest amount of soil C sequestration (about 2/3 of the entire soil C). This amount was occluded in stable fractions of soil with a 2–9 fold higher C/N ratio than the active fractions of P and EO. The 4–80 fold higher N concentration in the active fractions of P and EO resulted in higher allocation proportion of N in these two fractions (33.1% and 26.0%, respectively). Close correlation between organic C and N was generally found among fractions or within each of the fractions, with the exception of those in the P and S fractions owing to their extremely low proportion in the total intact soil. This difference in storage pattern of organic C and N among different fractions favors the long-term storage of C in soil with rapid N supply for plant growth. Together with the changes in organic C and N in different soil fractions, different infrared functional groups were observed in different soil fractions. The relative contents of most of infrared functional groups in the AI fraction were the lowest, while the relative contents of most of infrared functional groups in the P and S fractions were higher than those in other groups. Significant positive correlations among each couple of organic C, N, and most of the infrared functional groups in the same fraction were determined, indicating that the infrared functional groups can probably maintain the functions of soil C and N. Otherwise, significant correlations between the infrared functional groups and C/N ratio indicated the relative contents of infrared functional groups of the soil fractions, revealing various chemical activities of different soil fractions. Our findings indicate the importance of clarifying the mechanism of soil C sequestration and N availability in soils in SPBF. These data provide a basis for understanding changes in soil C and N dynamics in the SPBF and their possible performance in response to global warming process.

Key Words: Carbon sequestration; soil N; soil components fraction; soil C/N; Infra-red spectrum and functional group identification

东北林区面积占全国面积的 31.4%, 是中国的主要林区之一^[1], 而作为主要林型之一的杨桦林, 在本区分布了全国总面积 70% 左右^[2], 鉴于森林土壤碳、氮循环研究已经成为持续热点, 对杨桦林土壤碳氮动态进行系统研究, 对评估东北森林生态系统碳汇潜力和土壤养分供应特点具有重要意义。

在有机碳周转和营养元素循环中, 不同粒级和密度组分中土壤有机碳具有不同的特征^[3], 而据此区分的土壤颗粒组分成为国内外研究者建立了机理模型的基础, 也是阐明土壤碳氮周转机理的关键。例如 Zimmerman 等^[4]证明了利用物理化学方法分离出的 5 种土壤颗粒组分与土壤碳周转机理模型 (RothC 模型) 组分具有紧密相关性: 模型中有机碳两个活跃组分与颗粒态有机质和溶解性有机质匹配, 两种慢性组分与颗粒分级中的团聚体组分和与粉砂粘土有关的有机质紧密相关, 而惰性有机质与模型中的难分解组分一致。国内外学者经过大量研究证明 RothC 模型可以很好的模拟耕层土壤有机碳的动态, 目前已经拓展到森林、草地等多个生态系统, 但是针对东北地区典型林分——次生杨桦林这方面的研究鲜有报道, 急需深化研究其土壤不同物理化学组分差异及其碳氮相关特征差异。选择适宜的物理化学方法^[4], 对土壤进行分级, 成为杨桦林土壤碳氮循环研究的重要一环。

此外, 对土壤不同物理化学组分区分并对其化学性质, 如碳、氮含量、官能团组成特征等研究, 有利于从机理上揭示土壤碳氮循环与贮存的机制^[5]。红外光谱技术的发展使得对土壤有机质官能团特征研究成为可能, 不同耕作措施及植被恢复年限对土壤水溶性有机质组分、腐殖酸的官能团组成影响明显, 而且红外线光谱法官能团特征可揭示土壤的肥力状况^[6,7]。在测定不同土壤组分碳氮含量的基础上, 使用红外光谱法测定土壤有机物组分组成变化, 对其不同官能团组成差异进行分析, 有助于从官能团组成角度揭示其碳截获、肥力周转动态发生过程。

本文的科研假设: 土壤组分分级特征对于揭示土壤碳截获、氮养分供应的机制具有科学意义。基于此, 本文选取东北地区典型次生杨桦林为研究对象, 运用物理化学分级方法区分不同功能组分分级的基础上, 对其组分 C、N、红外线官能团组成进行分析, 对 RothC 模型参数化的基础上, 探讨长白山次生杨桦林土壤碳截获与

肥力(氮)供应的机制差异。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于我国吉林省东南部中国科学院长白山森林生态系统定位站(地理坐标为 $42^{\circ}21'—42^{\circ}24'N$, $127^{\circ}59'—128^{\circ}05'E$),该地区属于温带大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,夏季短暂而温暖,年平均气温 $3.6^{\circ}C$,最冷月为 1 月,平均气温为 $-15.6^{\circ}C$,最热月为 7 月,平均气温为 $19.7^{\circ}C$,降水较丰富,多集中在植物生长期,年平均降水量 $600—900\text{ mm}$,土壤为山地暗棕色森林土^[8]。

根据地势和环境特征相近原则,在相同坡向、坡位的立地条件下,选取 5 个典型次生杨桦林林分,林分主林层山杨、白桦平均年龄 40 年左右,胸高直径 30 cm 、树高 20 m 。坐标为 $42^{\circ}12'21.3"—42^{\circ}24'3.1"N$, $127^{\circ}5'54.1"—127^{\circ}59'0.7"E$,平均海拔为 891.8 m ,最高海拔为 1008 m ,最低海拔为 763.8 m ,地势较为平缓。主要乔木树种为山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等,林下灌木有东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、绢毛绣线菊(*Spiraea sericea*)、黄花忍冬(*Lonicera chrysantha*)等,草本植物常见的有山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、小叶樟(*Deyeuxia agustifolia*)等。

1.2 土壤样品采集

2011 年 10 月下旬进行土样采集,在上述每个林分内设置样地 1 块,大小 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,随机开挖 3 个土壤剖面,在去除可分辨的枯枝落叶层后,每个剖面分层 $0—10\text{ cm}$ 、 $10—20\text{ cm}$ 和 $20—30\text{ cm}$ 采集土样,装布质土壤袋 400 cm^3 左右,带回室内自然风干后,将同一样地同一深度的 3 个土样混匀,去除根系、可见植物残体和石块等,部分土壤木棍碾碎并过 2 mm 筛,装瓶备用于土壤颗粒组分分级。剩余部分土壤粉碎机粉碎,过 0.25 mm 筛,得到原始土样,备用于土壤碳氮含量测定分析。

1.3 土壤颗粒组分物理化学分级方法^[4]

本研究方法是参照 Zimmerman 等分离土壤组分的方法略加改进而来,通过土壤颗粒组分物理化学分级方法,可以得到 5 种具有不同物理化学性质的组分,即沙和团聚体土壤组分(Sand and stable Aggregates fraction, SA)、酸不溶土壤组分(Acid Insoluble fraction, AI)、易氧化土壤组分(Easily Oxidized fraction, EO)、颗粒态土壤组分(Particulate fraction, P)和水溶性土壤组分(Soluble fraction, S)。具体方法如下, (1) 30 g 风干土样($<2\text{ mm}$),置于烧杯,加入 150 mL 蒸馏水,使用超声波破碎仪(Scientz—II D, 中国)破碎,超声时间 1 min ,频率 6 次/min ,确保输出能量约为 22 J/mL 。(2) 过筛分离: (1) 中土壤浑浊液,湿筛($63\text{ }\mu\text{m}$),直至筛出水清澈为止;筛内为 $>63\text{ }\mu\text{m}$ 土壤,筛下为 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 土壤。(3) NaI 密度分级:将 100 mL NaI 加入到 $>63\text{ }\mu\text{m}$ 的土壤中,缓慢摇匀^[9],静置 2 h ,离心(3500 r/min , 15 min),抽吸回收上清液。重复提取,两次抽回液体混合抽滤($0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜),先后分别用 0.01 mol/L CaCl_2 溶液和蒸馏水离心洗涤数次,烘干称重,此为 P 组分。(4) 将上述第一次离心沉淀物加入蒸馏水,先震荡 10 min ,再离心洗涤至少 3 次,烘干称重,该组分为 SA 组分。(5) $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 抽滤:上述 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 土壤浑浊液,离心(3500 r/min , 15 min),上清液在 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜下抽滤,滤液为 S 组分,部分冻干称重获得 S 组分质量,部分低温储存用于 multi N/C3100 碳氮分析仪(耶拿,德国)法测定碳氮含量。(6) 将(5)中 $>0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的组分,在 $60^{\circ}C$ 下烘干称重,得到粉砂粘土。(7) 次氯酸钠氧化:从粉砂粘土中取出 7 g ,按照每 g 土壤加入 50 mL 6% $\text{pH}=8$ NaClO 溶液氧化(18 h),离心(3500 r/min , 15 min),倾倒上清液,水洗 3 次,烘干称重,此为 AI 组分。EO 组分不能直接得到,其质量为粉砂粘土减去 AI 组分的质量。

1.4 土壤碳氮指标测定

土壤碳测定: S 土壤组分,在溶液状态下使用 multi N/C3100 碳氮分析仪测定有机碳含量(耶拿,德国)^[10]。其它 4 个组分(粉砂粘土、SA、AI、P 组分)和混合土样($<0.25\text{ mm}$)采用重铬酸钾-外加热法^[11]测定碳含量。

土壤氮测定:可溶性土壤组分中氮含量通过测定溶液中氮含量来实现,所用仪器是 multi N/C3100 碳氮分

析仪(耶拿,德国),其它3个组分(粉砂粘土、SA、AI组分)和原始土样(<0.25 mm)采用凯氏定氮法测定氮含量。

易氧化土壤组分(Easily Oxidized soil fraction, EO)不能直接得到,其碳氮含量通过计算得到,为粉砂粘土土壤组分中碳氮含量与AI土壤组分碳氮含量之差。P土壤组分质量过低,凯氏定氮法不易测得,其氮含量为原始土样氮含量与其它组分氮含量之差。

上述土壤原样和每一个组分样品中C、N含量测定3个重复。

1.5 红外光谱官能团组成测定

将溴化钾置于烘箱中,120℃烘干(约4h),将充分烘干的土壤组分和溴化钾置于真空干燥器中干燥48h左右,待完全干燥后,取1.6mg干燥的土壤各组分与200mg溴化钾混合研磨,压片,然后进行红外光谱观察。红外光谱仪型号为IRAffinity⁻¹(SHIMADZU, Japan),波谱范围4000—500 cm⁻¹。

红外光谱图中每个吸收峰对应的官能团参照Bartels^[12]的方法进行划分。如图1所示,5类官能团分别为:Ⅰ:扫描范围3750—3200cm⁻¹,包括:羧酸、酚类、醇类的O—H伸缩振动带(O—H stretching of carboxylic acids, phenols, alcohols);有机胺类、酰胺N—H伸缩振动带((N—H stretching of amines, amides);结构性O—H伸缩振动带(stretching of structural OH);Ⅱ:2970—2820cm⁻¹,脂肪族C—H伸缩振动带(Aliphatic C—H stretching);Ⅲ:1750—1620cm⁻¹,包括O—H弯曲振动带(O—H bending)和羧酸、酰胺、酮类C=O的伸缩振动带(C=O stretching of carboxylic acids, amides, ketones);Ⅳ:1450—1360cm⁻¹,包括对称的COO—伸缩带(symmetrical COO— stretching);Ⅴ:1250—950cm⁻¹,包括C—O伸缩振动带、—COOH的O—H弯曲振动带、多糖的C—O伸缩振动带以及Si—O—Si伸缩振动带。利用Image软件计算各官能团吸收峰面积,面积大小反映各官能团相对含量的高低。

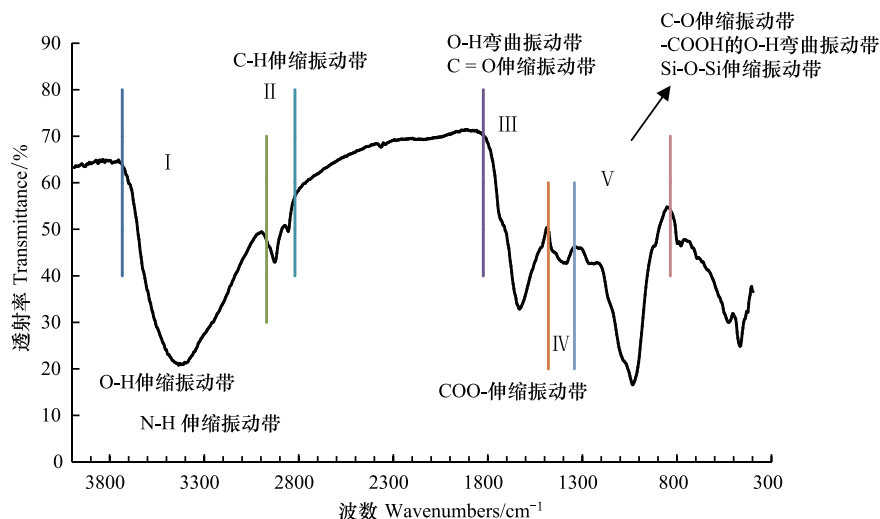


图1 土壤组分红外光谱吸收峰位置

Fig.1 IR absorption peak position of soil components

1.6 数据分析

每个土壤组分的质量占原始土样的百分比称为该组分的质量分数。各组分中C的含量占原土样C的含量定义为该组分中C的分配比例,各组分N的分配比例与C的定义类似。数据整理与计算在Excel 2007中进行。

利用Spss17.0软件进行方差分析与Duncan多重比较统计,分析同一土层不同土壤组分间的质量分数、C/N、碳氮含量的差异及显著性水平检验,此方法也同样用于对于同一组分不同土层间的各项指标差异水平检验以及同一官能团不同土层和不同组分间的差异水平检验。

对于各组分C、N之间以及原土样C、N与各组分C、N之间使用Pearson相关分析的方法表示;各组分C、

N、C/N 与各官能团之间的关系使用线性回归分析的方法表示。

2 结果与分析

2.1 不同组分所占质量分数(占总土壤的百分比)比较

不同组分的质量分数存在明显的差异(表 1)。主要表现在:AI 组分的质量分数最大,在 53%—75%之间,平均为 66.21%;S 组分质量分数最小,多在 0.1%—0.4%之间,平均为 0.23%;第二大组分为 SA,平均达到 22%,其次为 EO 和 P,平均占 8.25%和 3.20%。不同层 AI 均与其它组分存在显著差异,P 和 S 在深层(>10 cm)表现为差异不显著。

各组分的质量分数的垂直剖面分布有差异(表 1)。主要表现在:AI 和 EO 的质量分数随土壤深度增加显著增加,而 SA、P 则出现显著下降趋势,这种显著变化多发生在 0—10 cm 和更深层次上($P<0.05$)。S 随深度有下降趋势,但是未达到显著水平。

表 1 不同土层各组分质量分数差异

土深 Soil depth /m	土壤组分 Soil fractio/%					合计 Total/%
	沙和团聚体 SA Sand and stable Aggregates fraction	酸不溶 AI Acid Insoluble fraction	易氧化 EO Easily Oxidized fraction	颗粒态 P Particulate fraction	可溶性 S Soluble fraction	
0—10	30.96(Ab)	53.72(Ba)	6.16(Bc)	8.78(Ac)	0.37(Ad)	100
10—20	19.539(Bb)	70.63(Aa)	9.09(Ac)	0.61(Bd)	0.14(Ad)	100
20—30	15.85(Bb)	74.27(Aa)	9.51(Ab)	0.21(Bc)	0.17(Ac)	100
0—30	22.11(b)	66.21(a)	8.25(c)	3.20(cd)	0.23(d)	100

括弧内大写字母表示不同土层差异的显著性水平($P<0.05$),小写字母表示不同组分所占比例差异的显著性水平($P<0.05$)

2.2 不同组分碳含量比较

原土样及其各组分中碳含量的垂直变化规律(表 2)表现为:随着土壤深度的增加,SA、AI、EO 组分含量和原土样碳含量均显著降低,表层 0—10 cm 与深层 20—30 cm 相比,四者分别下降了 83.8%、77.8%、71.9%和 83.4%,差异多达到显著水平。P 和 S 组分中碳含量较高,但是不同层之间的差异未达到显著水平。

不同组分间的碳含量有差异,但是不同层多表现出类似的规律各土层多表现为 P 和 S>EO≈SA>AI,其中比原土样碳含量低的只有 AI。对于 0—10 cm 土层,P 和 S 碳含量显著高于原土样和其它组分含量,与原土样相比,P、S、EO 和 SA 碳含量分别高出 3.3 倍、2.3 倍、21%和 19%,而 AI 碳含量约为原土样的 1/2。在 10—20 cm 土层,S、P、SA 和 EO 碳含量分别为原土样的 21.4 倍、8.0 倍、2.4 倍和 1.9 倍,AI 碳含量接近原土样的 1/2。在 20—30 cm 土层,原土样及其组分碳含量大小顺序与 0—10 cm 相同,即 S>P>EO>SA>原土样>AI,其中 S、P、EO 和 SA 碳含量分别是原土样的 20.8 倍、15.6 倍、2.0 倍和 1.1 倍,AI 碳含量比原土样低约 1/3。

综合 0—30 cm 平均来看,S、P、EO 和 SA 碳含量是原土样的 6.2、1.8、1.3 和 1.4 倍,AI 碳含量为原土样的 2/3。

表 2 不同土层各组分碳含量差异

土深/cm Soil depth	Table 2 Difference of carbon concentration in variable soil components in different soil layers					
	原土样碳/(mg/g) Intact soil C	不同组分中碳 C in different soil components/(mg/g)				
		沙和团聚体 SA	酸不溶 AI	易氧化 EO	颗粒态 P	可溶性 S
0—10	85.16(Ac)	99.44(Ac)	49.91(Ac)	101.55(Ac)	277.17(Aa)	196.2(Ab)
10—20	24.59(Bc)	58.51(ABc)	12.86(Bc)	45.81(Bc)	195.53(Ab)	525.86(Aa)
20—30	14.17(Bb)	16.16(Bb)	11.07(Bb)	28.56(Bb)	220.55(Aa)	294.40(Aa)
0—30	39.22(c)	58.04(c)	24.61(c)	58.64(c)	231.08(b)	335.40(a)

2.3 不同组分氮含量比较

原土样及其组分氮含量在土壤剖面上有差异表现为(表3):随土层深度的加深,SA、EO、AI 和原土样氮含量均显著降低。P 和 S 氮含量较高,但是不同土层间差异不显著。

与不同组分中碳含量的差异相似,不同组分氮含量差异明显,且不同层表现类似规律,即 $P>S>EO>SA$,而 AI 最低(表3)。在表层 0—10 cm,与原土样氮含量相比,S、P 和 EO 含量较高,SA 相差不大,而 AI 含量则降低明显。10—20 cm 土层与 0—10 cm 结果类似, $P>S>EO>SA>$ 原土样 $>AI$,高出者分别为原土样氮含量的 54.7 倍、13.7 倍、5.6 倍和 1.3 倍。在 20—30 cm 土层,P 氮含量显著高于其它,是原土样的 91.2 倍,S、EO 和 SA 氮含量分别为原土样氮的 9.8—1.2 倍,AI 氮含量为原土样的 17.7%。

从整个剖面 0—30 cm 均值来看,原土样及其组分氮含量大小次序为 $P>S>EO>SA>$ 原土样 $>AI$,仅 P 氮含量显著高于其它,而 SA、AI、EO、原土样、S 中氮含量变化在 $0.9\text{—}17\text{ mg g}^{-1}$,但差异不显著(表3)。

表3 不同土层各组分氮含量差异

Table 3 Difference of nitrogen concentration in variable soil components in different soil layers

土层/cm Soil layer	原土样 N (/mg/g) Intact soil N	组分中 N 含量 N concentration in each soil component/(mg/g)				
		沙和团聚体 SA	酸不溶 AI	易氧化 EO	颗粒态 P	可溶性 S
0—10	7.35 (Aa)	6.98 (Aa)	2.08 (Aa)	23.02 (Aa)	31.94 (Aa)	13.58 (Aa)
10—20	1.84 (Ba)	2.31 (Ba)	0.35 (Ba)	10.38 (Ba)	100.69 (Aa)	25.20 (Aa)
20—30	1.13 (Bb)	1.30 (Cb)	0.20 (Bb)	5.71 (Cb)	103.10 (Aa)	11.12 (Ab)
0—30	3.27 (b)	3.53 (b)	0.88 (b)	13.03 (b)	78.58 (a)	16.63 (ab)

2.4 不同组分碳氮比差异比较

各土壤组分的碳氮比在垂直剖面上的分布有差异,但多不显著,仅 S 组分在表层 0—10 cm 与 20—30 cm 达到显著水平,碳氮比增加 80%(表4)。

从不同土壤组分的碳氮比的差异来看,0—30 cm 均值碳氮比最大发生在 AI 组分上,其次是 S 和 SA,分别是原土样的 2.7 倍、1.5 倍和 1.3 倍,而 EO 和 P 为原土样的 65.3%和 33.5%。不同土层基本规律与此一致。

表4 不同土层各组分碳氮比差异

Table 4 Difference of C/N ratio of variable soil components in different soil layers

土层/cm Soil layer	原土样碳氮比 Intact soil C/N	组分碳氮比 C/N for each component				
		沙和团聚体 SA	酸不溶 AI	易氧化 EO	颗粒态 P	可溶性 S
0—10	14.06 (Abc)	14.05 (Abc)	27.00 (Aa)	4.52 (Ad)	16.62 (Aab)	14.76 (Abc)
10—20	13.57 (Abc)	26.98 (Aab)	36.46 (Aa)	4.64 (Ac)	6.43 (Ac)	20.66 (ABabc)
20—30	13.92 (Abc)	12.35 (Abc)	50.07 (Aa)	4.75 (Ac)	4.11 (Ac)	26.81 (Bb)
0—30	13.86 (abc)	17.80 (bc)	37.84 (a)	4.64 (d)	9.05 (cd)	21.21 (b)

2.5 不同组分中碳、氮量占土壤相应值的比例差异(分配比例差异)

AI 和 EO 组分碳的分配比例均随深度增加而增加,前者由表层的 28.9%增加到深层的 57%,后者由 6.7%增加到 18.7%;可溶性组分 S 中碳的分配比例变化不大(3%);氮的分配比例垂直变化规律表现为 P 组分和 SA 组分下降明显,前者由表层 37.4%降低为深层的 18.7%,后者由 27.6%降低为 18.0%,随深度加深而上升的主要是 EO,由 18%上升到 48%(图2)。

不同组分间比较,30 cm 均值 SA 和 AI 组分 C 的分配比例最大(33.5%)和(33.0%),其次分别为 P(19.9%)、EO(9.9%)和 S(3.7%),这一规律在不同土层基本一致。氮的分配与此不同,SA 和 AI 组分 N 的分配比例(24.9%和 13.4%)较低,最高者为 P(33.1%)和 EO(26.0%)组分,最低者为 S(2.6%)组分,在不同土壤层中基本一致。

2.6 不同组分各官能团的相对含量比较

对于官能团 I (O—H、N—H 伸缩振动带),AI 与 AI+EO 组分相对含量最低,二者差异不明显($P>0.05$),

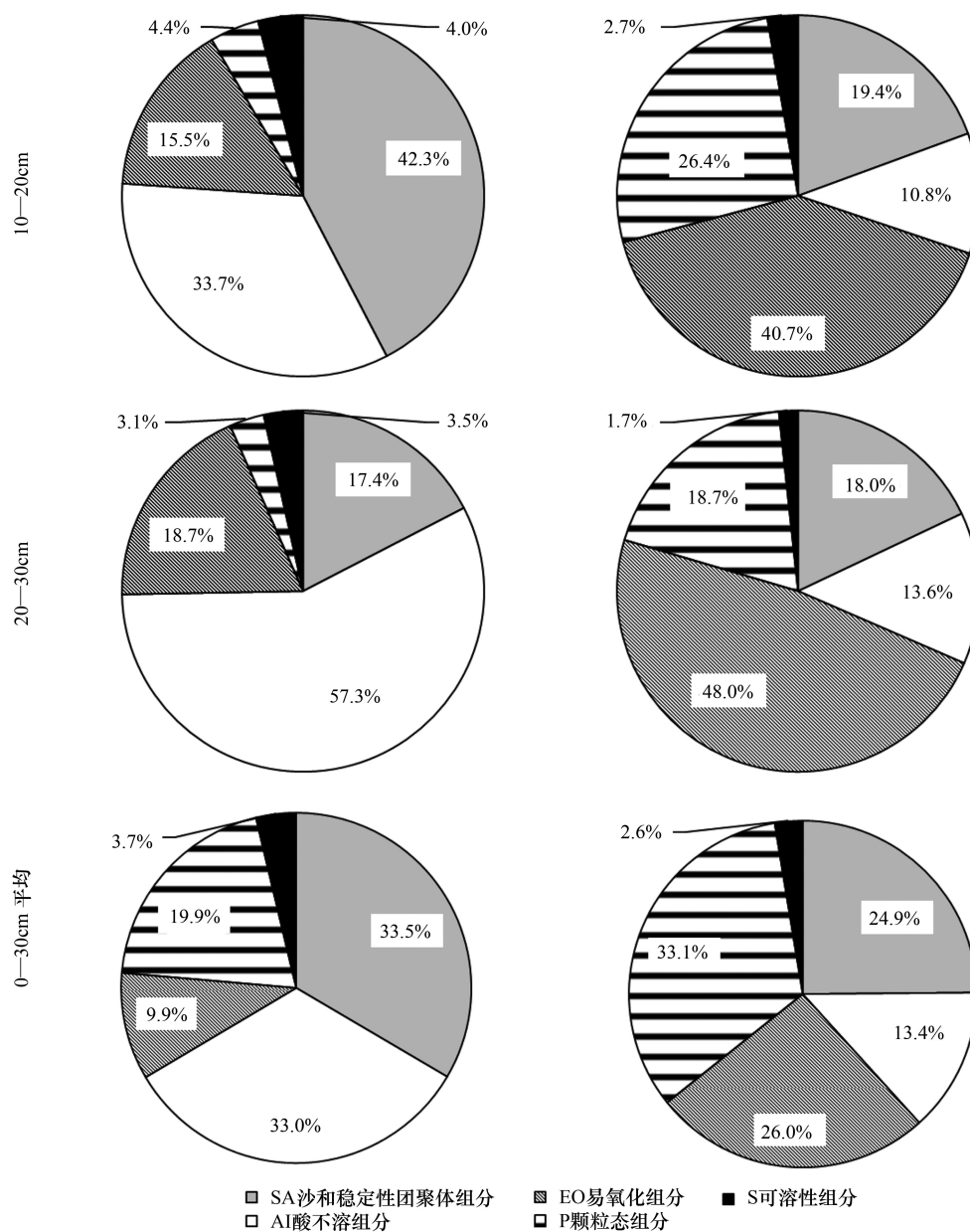


图2 不同组分中碳、氮对原土样的贡献比较及其不同土壤深度间的差异

Fig.2 Contribution of different soil components to intact soil C and N, and their differences in different soil layers

相对含量最高的 S 组分是其 2 倍, P 组分是其 1.4 倍, SA 组分是其 1.2 倍, 这些差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$); 官能团 II (C—H 伸缩振动带) S 和 P 组分最高, 而 SA、AI 和 AI+EO 组分最低, 而且之间差异不大 ($P > 0.05$), 最高最低相差 2.9—4.1 倍。与此类似, 官能团 III (O—H 弯曲、C=O 伸缩振动带) S 和 P 组分最高, 而 SA、AI 和 AI+EO 组分最低, 而且之间差异不大 ($P > 0.05$), 其中 S 和 P 组分分别高于 AI 组分 5.1 倍和 6.4 倍; 官能团 IV (COO—伸缩振动带), S 组分相对含量最大, 其次 P 组分, AI 组分最小, 前二者分别是 AI 组分的 7.8 倍和 3.0 倍; V 官能团主要是 Si—O—Si 伸缩振动带以及有机的 C—O 伸缩振动带和—COOH 的 O—H 弯曲振动带, P 组分最小, 而其它组分 S、SA、AI、AI+EO 间均没有显著差异, 平均高出 P 组分相对含量的 1.7 倍 (表 5)。

总而言之, AI 组分中绝大多数官能团相对含量均最低, 而 P 和 S 组分绝大多数官能团含量均较高。

表 5 红外线光谱法不同组分中各官能团峰面积大小比较(0—30 cm 均值)

Table 5 Peak area comparison of different infrared spectroscopy functional groups in different soil components from various soil layers (0—30 cm mean)

序号 No.	官能团 Functional group	土壤组分 Soil components				
		沙和团聚体 SA	酸不溶 AI	酸不溶+易氧化 AI+EO	颗粒态 P	可溶性 S
I	O—H、N—H 伸缩振动带	9085 (502)c	7475 (819)d	7507 (312)d	10191 (578)b	14713 (465)a
II	C—H 伸缩振动带	120 (82)b	159 (138)b	154 (84)b	415 (129)a	598 (61)a
III	O—H 弯曲、C=O 伸缩振动带	1417 (334)b	546 (128)b	842 (412)b	2778 (189)a	3478 (988)a
IV	COO—伸缩振动带	243 (15)bc	107 (11)c	117 (49)bc	319 (22)b	834 (231)a
V	Si—O—Si、C—O 伸缩振动带 —COOH 的 O—H 弯曲振动带	6793 (205)a	8142 (597)a	7531 (826)a	4534 (955)b	7552 (1832)a

I—V 具体表征的官能团参见研究方法,不同小写字母是指不同组分间相同官能团的相对含量差异达到显著($P < 0.05$),而相同小写字母则表示差异不显著($P > 0.05$)

2.7 原土样及不同组分中碳含量、氮含量、官能团相对含量的相关关系比较

Pearson 相关分析结果显示,除了 P 组分外,其它各组分和原土样中的碳氮呈极显著正相关($P < 0.01$)。而且,除 P 和 S 组分外,原土样中的碳氮与组分中的碳氮呈现显著或极显著的正相关关系(表 6)。

表 6 原土样及不同组分内碳、氮含量的 Pearson 相关分析

Table 6 Pearson correlation analysis among C, N concentration in intact soil and different soil components

N 指标 N parameter	土壤组分 Soil components	原土及不同组分中碳 C in intact soil and different soil components/(mg/g)					
		原土 Intact soil	团聚体 SA	酸不溶 AI	易氧化 EO	颗粒态 P	可溶性 S
原土及不同组分中氮	原土 Intact soil	0.90**	0.46	0.96**	0.60*	0.58*	-0.31
N in intact soil and different soil components/(mg/g)	团聚体 SA	0.97**	0.74**	0.79**	0.68**	0.58*	-0.38
	酸不溶 AI	0.87**	0.42	0.94**	0.46	0.69**	-0.32
	易氧化 EO	0.95**	0.74**	0.78**	0.69**	0.56*	-0.29
	颗粒态 P	-0.45	-0.43	-0.33	-0.43	-0.46	-0.03
	可溶解 S	-0.11	0.45	0.06	-0.14	0.22	0.78**

** 表示相关系数在 0.01 水平上极显著,* 表示在 0.05 水平上显著

各组分官能团含量与相关组分碳、氮、碳氮比含量的相关关系,如表 7 所示。结果显示,与 C 达到极显著正相关的有官能团 I、II、III 和 IV,而官能团 I 与碳的线性相关系数最高,达到 0.714;官能团 II、III 与 N 呈显著正相关,显著性最高的是官能团 III,官能团 V 与 N 呈极显著负相关,相关系数为 0.454;官能团 III 与 C/N 呈显著正相关($P < 0.05$, $R^2 = 0.363$),官能团 V 与 C/N 呈现极显著负相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.471$)(表 7)。

表 7 碳、氮、碳氮比与官能团间的线性回归分析

Table 7 Linear relationships between C, N, C/N and different functional groups

官能团 Functional groups	C			N			C/N		
	相关方程 Equation	R^2	Sig.	相关方程 Equation	R^2	Sig.	相关方程 Equation	R^2	Sig.
I	$y = 9.977x + 4762$	0.714	<0.01	$y = 21.02x + 5601$	0.189	>0.05	$y = -41.04x + 6835$	0.110	>0.05
II	$y = 0.714x + 83.64$	0.631	<0.01	$y = 2.171x + 127.0$	0.350	<0.05	$y = -6.679x + 405.3$	0.197	>0.05
III	$y = 4.186x + 562.6$	0.630	<0.01	$y = 15.08x + 759.6$	0.489	<0.01	$y = -33.32x + 1712$	0.363	<0.05
IV	$y = 0.918x + 77.38$	0.560	<0.01	$y = 2.225x + 147.3$	0.196	>0.05	$y = -4.861x + 286.9$	0.143	>0.05
V	$y = -2.086x + 4603$	0.098	>0.05	$y = -18.29x + 4771$	0.454	<0.01	$y = 47.78x + 3487$	0.471	<0.01

3 讨论

3.1 杨桦林不同组分间碳氮储存的差异决定了土壤碳截获、氮肥力供应和土壤质量维持

利用物理化学方法对土壤组分进行分级可以揭示土壤对植被变化、土地利用方式改变的响应机制。对草

原放牧和不放牧土壤碳氮及相关组分试验,没有放牧地区,表层 0—20 cm 有机碳和总氮保持不变,但是颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)显著增加,显示二者对人为活动比有机碳和总氮更为敏感,是土壤肥力变化的早期指标^[5]。我们的研究结果发现杨桦林不同组分间碳氮差异能够决定土壤碳截获质量与肥力供应的状况。

长白山次生杨桦林土壤氮的主体为活跃组分(P 和 EO),周转快,供应氮的潜力大。有研究表明,一般土壤有机质碳氮比与其分解速度呈反比关系^[13],有机物 C:N 比值越低,微生物分解速度就越快。易氧化组分(EO)的碳氮比最低(表 3),显示其为土壤中周转最快的组分^[14]。颗粒态有机碳(P 碳)是进入土壤中动、植物半分解的产物,具有较高的生物活性,是土壤中不稳定的有机碳库^[15],本研究确定 P 的碳氮比大约为 9.0(表 4),仅高于 EO 组分,反映了 P 组分的微生物分解速率也较快。本研究中 P 和 EO 氮含量远远高于其它土壤组分数十倍甚至数十倍(4—80 倍)(表 3),导致其氮的分配比例最大(33.1%和 26.0%)(图 2),成为土壤氮的主体,由于 P 和 EO 组分自身的化学性质相对活跃,不稳定易矿化分解,说明长白山次生杨桦林土壤营养物质(氮素)周转快。

长白山次生杨桦林土壤碳氮结构有利于土壤碳的长期累积。AI 是一种不被酸分解的惰性土壤组分,化学性质稳定,其碳氮比最大(表 4),这与它不易被分解的化学性质吻合。SA 组分是一种受物理保护的土壤组分,能够抵制微生物的分解^[4],化学性质较稳定。本研究中 AI 碳的分配比例为 33.5%,SA 碳的分配比例仅次于 AI 组分(33.0%)(图 2),鉴于二者是土壤中难分解的组分,说明杨桦林土壤碳主要截获于稳定组分,固碳潜力大。本研究中,P 碳氮比呈现随土层加深而减小的趋势,AI 和 S 碳氮比随土层加深而增大,其它组分碳氮比没有显著变化(表 4)。所以,作为土壤氮的主体之一的 P 氮(图 2),随根系的加深越来越容易被吸收利用,而有机碳主体之一的 AI 碳随土层深度的加深,越不容易分解,利于累积,说明土壤碳氮结构不仅适宜植物生长而且有利于碳的长期累积。产生这种碳截获结构主要是由 AI 和 SA 较高的质量分数所决定。本研究中,AI 和 SA 组分碳含量很低,比原土样小了 50%左右(表 3),这与 Golchin 等^[16]的研究结果相似。但是两者质量分数接近 90%(表 2),致使 AI 和 SA 土壤组分碳的分配比例最大(33.5%和 33.0%)(图 2)。王文颖等^[17]对高寒草甸研究发现其稳定组分占土壤质量的比例比活跃组分高了近 3 倍,而本研究高出近 9 倍(表 1),进一步说明杨桦林土壤有机碳主要禁锢在稳定组分是由其很高的质量分数所决定。

长白山次生杨桦林 S 土壤组分中碳占原土样的比例及其含量高于一般森林生态系统和耕地生态系统。新近凋落物,土壤腐殖质、植物残体、根系分泌物及微生物的代谢产物是土壤 S 碳的重要来源^[18-20]。有研究表明森林土壤 S 碳含量一般不超过表层土壤总有机碳含量的 2%^[21],而东北地区落叶松林 0—40 cm 土壤 S 组分碳的分配比例多在 1.1%—1.7%之间^[22],本研究中,S 碳的分配比例在 3.5%—4.0%之间(图 2),超出耕地和一般森林生态系统近 1 倍。本研究中 S 组分中碳含量平均为 335.40 mg/g,显著高于其它组分(表 2)。为了便于与前人研究结果相比较,将 S 组分中碳含量换算为占总土壤质量的碳含量,为(738±471) mg/kg。这一含量明显高于其它研究,如 Sinsabaugh 等^[23]报道美国密歇根州马尼斯蒂国家森林的糖枫榿木林土壤溶液介于 60 mg/kg—100 mg/kg,王连峰等^[24]测定庐山森林生态系统(落叶阔叶林和次生针叶林)土壤溶液 S 碳含量为(289.85±111.04) mg/kg。较高的可溶性组分可能来自于较多的新进凋落物和腐殖质及其快速周转^[25],对于较多的腐殖质这一点也可从本研究中的土壤团聚体组分含量较高(表 1)看出,较多的新进凋落物可能是与长白山次生杨桦林迅速更新代谢有关^[26-28]。土壤可溶性有机碳含量与土壤质量密切相关^[29],这种高可溶性碳含量也有助于杨桦林土壤质量的维持。

3.2 红外光谱官能团特征与不同组分碳氮及化学活性紧密相关

利用红外线光谱方法对土壤有机质进行官能团区分能够反映耕作措施的影响机理以及土壤肥力变化的深层原因。如:不同耕作措施对水溶性土壤有机质组分的红外光谱特征受种植作物影响明显,而不同土壤腐殖酸具有特征吸收峰,但是相对含量差异明显。土壤腐殖酸及其组分(富里酸和胡敏酸)的红外线光谱特征峰受植被恢复年限的影响明显^[6],对耕地土壤中疏水和亲水有机组分的红外线光谱官能团特征可揭示土壤

的肥力状况^[7]。我们的结果显示红外光谱官能团特征与不同组分碳氮及化学活性具有紧密相关关系,对不同组分的化学特征具有一定的指示作用。

红外线光谱法能够对化合物内官能团的量和组成进行分析^[30],这些小分子官能团的多少能够反映物质化学活性的高低。根据物理化学分组法,可以确定不同稳定性组分的多少^[4],这些组分中官能团的多少可以一定程度上反映出官能团与土壤稳定性组分的关系。我们的研究发现:土壤稳定最高组分 AI 中,官能团 I、II、III、IV 区域面积最小,而 V 区域面积最大。而活性较高组分(P、S)中,表现出不同的趋势:对于 S 组分而言,5 个官能团面积均最大,对于 P 组分,官能团 II、III 区域面积最大,官能团 V 面积最小。可以看出,特征官能团相对含量越少,土壤组分化学活性越低,尤其表现在 I、II、III、IV 红外官能团区域(图 2)。针对土壤而言,红外光谱法可以区分出很多官能团区域,这些官能团的大小与土壤物理化学稳定性的关系,至今尚没有明确结论,我们上述定量化结果对此有一定指示意义。

官能团具有土壤碳、氮含量指示的功能,同时还能反映土壤组分的性质也是本研究的一个重要发现。土壤碳与 I、II、III、IV 官能团相对含量呈极显著正相关,但是与 V 官能团不相关($P>0.05$),而且与 I 官能团相对含量相关性最高($R^2=0.714, P<0.01$);土壤氮与 II、III 官能团显著正相关,与官能团 V 呈极显著负相关($R^2=-0.454, P<0.01$);土壤 C/N 与 III 官能团显著负相关,与 V 官能团呈极显著正相关(表 7)。因此,可以基于红外线光谱法官能团的半定量分析可对碳、氮含量及 C/N 大小进行初步判断,这对于研究土壤碳氮动态具有重要的生态学意义。

4 结论

长白山次生杨桦林的土壤碳氮在不同组分中的分布特征揭示了土壤养分供应与碳的长期累积的机制。SA、AI 碳氮比都比 P、EO 碳氮比高出几倍到几十倍,说明前者难于分解易于碳库长期维持,而后者易于微生物分解、养分快速供应。虽然稳定组分(AI 和 SA)内含碳量在所有组分中最低,但是土壤质量接近 90%集中在稳定组分(SA 和 AI)中,导致稳定组分 SA 和 AI 组分碳的分配比例分别为 33.5%和 33%,成为土壤有机碳累积的主体,而且随土壤深度的加深,AI 组分作为有机碳累积的重要性进一步提高。由于化学性质相对活跃的组分(P 和 EO)中的氮含量比其它组分高出 4—80 倍,导致活跃组分(P 和 EO)氮的分配比例分别为 33.1%和 26.0%,而且随土层深度的加深,P 组分中的氮的分配比例增大,显示活跃组分是林分土壤肥力(氮库)的主体。S 土壤组分碳的分配比例和含量高于一般森林生态系统和耕地生态系统,说明长白山次生杨桦林土壤质量优于一般森林生态系统和耕地生态系统。此外,红外光谱结果显示,不同组分内官能团相对含量的高低可以反映各组分的化学活性高低;官能团含量具有维持土壤碳氮的功能,同时还能反映土壤组分的化学性质,这对于研究土壤碳氮动态具有重要的生态学意义。

参考文献(References):

- [1] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [2] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [3] 赵鑫,宇万太,李建东,姜子绍. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2203-2209.
- [4] Zimmermann M, Leifeld J, Schmidt MWI, Smith P, Fuhrer J. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 658-667.
- [5] Wen H Y, Niu D C, Fu H, Kang J. Experimental investigation on soil carbon, nitrogen, and their components under grazing and livestock exclusion in steppe and desert steppe grasslands, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3131-3141.
- [6] 张玉兰,孙彩霞,段争虎,陈利军,武志杰,陈晓红,张艾明,刘兴斌,王俊宇. 光谱法分析固沙工程对土壤腐殖质及组分的影响. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 179-183.
- [7] Matejkova S, Simon T. Application of FTIR spectroscopy for evaluation of hydrophobic/hydrophilic organic components in arable soil. *Plant Soil and Environment*, 2012, 58(4): 192-195.
- [8] 王存国,韩士杰,张军辉,王树堂,徐媛. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析. 应用生态学报, 2010, 21(4):

849-855.

- [9] 王刚, 王春燕, 王文颖, 王启基. 子午岭森林灰褐土保护有机碳的能力及各密度组分生化特征. 科学通报, 2004, 49(24): 2562-2567.
- [10] Froberg M, Berggren D, Bergkvist B, Bryant C, Knicker H. Contributions of Oi, Oe and Oa horizons to dissolved organic matter in forest floor leachates. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 311-322.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] Johnson C T, Aochi Y O. Fourier transform infrared and Raman spectroscopy. *Soil Science Society of America*, part 3, 1996: 269-321.
- [13] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [14] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, Yang X D, Sha L Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [15] Camberdella C A, Elliott E T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, 1993, 56(1/4): 449-457.
- [16] Golchin A, Clarke P, Oades J M, Skjemstad J O. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, 33(6): 975-993.
- [17] 王文颖, 王启基, 鲁子豫. 高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(5): 647-654.
- [18] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [19] Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters//Piccolo A. *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996: 171-223.
- [20] McDowell W H, Zsolnay A, Aitkenhead-Peterson J A, Gregorich E G, Jones D L, Jodemann D, Kalbitz K, Marschner B, Schwesig D. A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1933-1942.
- [21] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 黄道友, 吴金水. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 122-128.
- [22] 苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 王洪岩, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2012, 32(21): 6705-6714.
- [23] Sinsabaugh R L, Zak D R, Gallo M, Lauber C, Amonette R. Nitrogen deposition and dissolved organic carbon production in northern temperate forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(9): 1509-1515.
- [24] 王连峰, 潘根兴, 石盛莉, 黄明星, 张乐华. 酸沉降影响下庐山森林生态系统土壤溶液溶解有机碳分布. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 29-34.
- [25] Wang Y, Dai L M, Yu D P, Zhou L. Productivity and turnover of fine-roots of *Betula platyphylla* forest in Chang-bai Mountain. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, (7): 113-115.
- [26] 李飞. 红松阔叶林及其次生杨桦林生物生产力的研究. 生态学杂志, 1984, 3(2): 8-12.
- [27] 栾士波, 范玉清, 周希利, 李传生. 天然杨桦林生长规律的研究. 吉林林业科技, 1999, 139(2): 3-8.
- [28] 栾士波, 肖玉杰, 王汝才. 杨桦林经营密度的研究. 东北林业大学学报, 1999, 27(3): 7-9.
- [29] Tipping E, Woof C, Rig E. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. *Environment International*, 1999, 25(1): 83-95.
- [30] Vohland M, Besold J, Hill J, Frund H C. Comparing different multivariate calibration methods for the determination of soil organic carbon pools with visible to near infrared spectroscopy. *Geoderma*, 2011, 166(1): 198-205.