DOI：10.11766/trxb201708080194

大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力*

徐嘉晖 高 雷 孙 颖 崔晓阳†
（东北林业大学林学院，哈尔滨 150040）

摘 要 稳定性土壤有机碳（SSOC）决定着土壤抗干扰与固碳能力。量化了大兴安岭森林土壤两种典型的SSOC：矿物结合态有机碳（MOC）与黑碳（BC），并以矿物结合态碳库为碳饱和容量来估算土壤的固碳潜力。MOC的量化采取物理分组和化学分离两种方法，BC的分析采用重铬酸钾氧化法。结果表明：粒级分组方法过高估计了MOC，矿物结合态有机质中的有机碳并非完全与矿物络合。BC占土壤有机碳（SOC）的比例约为25.4%，其中，颗粒有机质（POM）中BC所占比例约为26.3%，说明颗粒有机碳（POC）并非绝对属于活性组分。表层土壤碳饱和水平达到了97.8%，而深层仅有21.2%，表明深层土壤的固碳潜力巨大，为当前深层SOC储量的1.86倍。目前的碳饱和理论均以SSOC为基础，然而，BC于POM中的存在说明了POC在土壤固碳潜力中的重要性。

关键词 土壤有机碳；土壤分组；稳定性有机碳；颗粒有机碳；碳饱和
中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

土壤碳库是陆地生态系统最大的有机碳库，在全球碳循环中起着关键作用[1]。然而，相关研究[2-3]表明，在某些土壤中，土壤有机碳（SOC，Soil organic carbon）含量并非线性地随着外源碳的输入而增加，意味着SOC达到了一定的饱和水平[2, 4]。若稳定性土壤有机碳（SSOC，Stable soil organic carbon）达到饱和，输入的外源碳则只能积累于活性碳库中，并将被分解，那么土壤碳含量将不会持续增加[5-6]。SSOC决定着土壤抗干扰与固碳能力[7-8]，而土壤以稳定态形式固持有机碳的潜力受控于SOC的稳定机制[7]。

SOC的稳定机制主要包括有机碳的固有难降解性[9]、与土壤矿物的相互作用[10]以及团聚体的物理闭蓄[11]。黑碳（BC，Black carbon）是第一种的典型代表，其稳定性来源于芳香结构[12]。BC是生物质与化石燃料的不完全燃烧产物，广泛存在于土壤和沉积物中，在土壤中的驻留时间可达成百上千年[12-13]，有效提高了土壤碳储存，在土壤碳汇研究中受到了广泛关注[12, 14]。矿物结合态有机碳（MOC，Mineral-bonded organic carbon）代表第二种稳定机制，通过与土壤细颗粒的相互作用而获得稳定性[10, 15]。早在20世纪，Hassink[16]认为矿物结合态碳库决定着土壤的固碳潜力（CSP，Carbon sequestration potential），并提出了经验公式来计算土壤固碳潜力，随后这一经验公式被广泛应用[7, 15]。

森林土壤碳是陆地土壤碳库的主要组成，在调节陆地生态系统碳循环与减缓全球气候变化中扮演重要角色[17]。方精云等[18]基于272篇已发表文献数据估算了我国森林表层土壤有机碳储量的

* 国家“十三五”重点研发计划项目（2016YFA0600803）和国家自然科学基金重点项目（41330530）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China（No. 2016YFA0600803）and the National Natural Science Foundation of China（No. 41330530）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：c_xiaoyang@126.com
作者简介：徐嘉晖（1995—），男，辽宁盖州人，硕士研究生，主要从事森林土壤碳循环方面的研究。E-mail：897475390@qq.com

收稿日期：2017-08-08；收到修改稿日期：2017-09-22；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2017-10-12

变化，结果表明，过去20年我国森林土壤有机碳库以每年20 g m^{-2}（以碳计）的速率增加。汲玉河等[19]采用BIOME4模拟方法对安徽省森林土壤固碳潜力进行估算，模拟显示，当该地区森林发育成气候顶级群落时，土壤碳库将增加92 Tg C。大兴安岭是我国面积最大的林区，但鲜见专门对其土壤固碳潜力进行定量评价。此外，该地区火烧频繁，土壤黑碳储量也相当可观，然而，关于黑碳在该地区土壤碳库的重要性尚未受到重视。目前仅见任清胜等[20]几篇针对火烧强度对大兴安岭棕色针叶林土表层黑碳的影响。本研究区域贯穿大兴安岭中段，涵盖了大兴安岭三种典型的森林土壤，通过物理和化学手段分析MOC与BC，并采用Hassink经验公式计算土壤固碳潜力，旨在为我国寒温带和温带森林土壤碳汇的评估提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区牙克石市东南部（48°36′N～48°54′ N，121°08′E～122°12′ E），贯穿大兴安岭中段。大兴安岭中段存在明显的焚风效应，温度和降水均表现为自东南向西北逐渐降低的总趋势，基于地形与气候条件，该区域发育成三种土壤，中脊为棕色针叶林土（暗瘠寒冻雏形土，Umbri-Gelic Cambosols，BF），东、西坡分别为暗棕壤（暗沃冷凉湿润雏形土，Mollic Bori-Udic Cambosols，DB）与灰色森林土（黏化简育干润均腐土，Argic Hapli-Ustic Isohumosols，GF）。中脊海拔在1 000 m以上，除兴安落叶松（*Larixg melinii*）外伴有少量的白桦（*Betula platyphylla*），郁闭度为0.3～0.65，林下植被相对稀疏。东坡属中山地貌，地势陡峻起伏明显，植被为寒温带针叶林和夏绿阔叶林的过渡类型，乔木以兴安落叶松、白桦、蒙古栎（*Quercus mongolica*）为主，郁闭度为0.4～0.7，灌木主要有兴安杜鹃（*Rhododendron dauricum*）、大叶蔷薇（*Rosa macrophylla*）等。西坡地势则相对平缓，总体由东南部的主脊向西北逐渐降低。植被属于寒温带针叶林向草原植被的过渡类型，乔木以兴安落叶松、白桦、山杨（*Populus davidiana*）为主，郁闭度为0.4～0.8，灌木有胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、稠李（*Prunu spadus*）等，草本植被发达，盖度约为90%，主要有贝加尔针茅（*Stipa baicalensis*）、黄芩（*Scutellaria baicalensis*）、芍药（*Paeonia lactiflora*）等。

1.2　样品采集

在上述三种土壤类型所属区域内，各设置6个20 m×30 m样地，每个样地内按照“S”形选取3～5个采样点。采样前去除地表枯枝落叶，按照土壤发生层分别采取腐殖质层（A）、过渡层（AB）与淀积层（B）土样，各样地土样同层混匀，用四分法留取1 kg左右，每个样地3个混合样品，共54个样品。将土样带回实验室后挑出根系，无损风干，同样利用四分法选取部分土样分别研磨过2 mm与150 μm筛备用。样地基本信息见表1，表中数据为平均值。

1.3　分析方法

矿物结合态有机碳（MOC）与黑碳（BC）已被广泛研究，但研究方法却有差别。分离MOC的

表1　样地基本信息

Table 1　Basic information of the sampling sites

土壤类型 Soil type	年均降水量 Mean annual precipitation（mm）	年均温 Mean annual temperature（℃）	海拔 Altitude（m）	土层厚度 Soil depth（cm）			土壤容重 Soil bulk density（g cm^{-3}）		
				A	AB	B	A	AB	B
DB	474	−0.5	738.7	13.26	16.02	32.43	0.97	1.31	1.68
BF	450	−3.2	1157.5	6.87	15.37	21.77	0.92	1.35	1.68
GF	360	−2.9	704.8	25.54	24.53	36.31	1.11	1.22	1.44

注：DB：暗棕壤（暗沃冷凉湿润雏形土）；BF：棕色针叶林土（暗瘠寒冻雏形土）；GF：灰色森林土（黏化简育干润均腐土），A、AB、B表示土壤层次。下同Note：DB：Dark brown soil（Mollic Bori-Udic Cambosols）；BF：Brown coniferous forest soil（Umbri-Gelic Cambosols）；GF：Grey forest soil（Argic Hapli-Ustic Isohumosols）.A，AB，and B represents soil horizons. The same below

方法包括粒级分组[21]、密度分组[14]、化学分离[22]以及物理与化学手段的结合。Hammes等[23]比较了七种分离BC的方法，并总结了各方法的利弊。重铬酸钾氧化法从化学性质的角度对BC进行量化，包括木炭、烟炱等，广泛应用于土壤和沉积物BC的分离[24]。本文分别利用物理粒级分组和化学分离法量化MOC，采用重铬酸钾氧化法分析BC。

MOC的物理分离（物理分离的矿物结合态有机碳，MOC_P）基于Rehbein等[25]的方法：30 g过2 mm筛风干土置于250 ml烧杯中，加水150 ml，用超声波破碎仪在440 J ml^{-1}能量下进行超声破碎，超声后悬浮液手动湿筛过53 μm样筛，筛上残留的即视为颗粒有机质（POM，Particulate organic matter），剩余悬浮液离心处理后转移至蒸发皿中，视为矿物结合态有机质（MOM，Mineral-bonded organic matter）。将POM和MOM在60℃下烘干、称重，然后研磨过150 μm筛，测定其中的有机碳（OC，Organic carbon）含量。POM和MOM中的OC分别为颗粒有机碳（POC，Particulate organic carbon）和MOC_P。

MOC的化学分离（化学分离的矿物结合态有机碳，MOC_C）基于Eusterhues等[22]的方法：3 g过150 μm筛风干土置于100 ml离心管中，加入25 ml 10 mol L^{-1} HF/1 mol L^{-1}HCl（2:1，V/V），反应24 h，离心管中样品用蒸馏水通过旋涡混合仪搅拌后离心机洗涤3～5次。再加入15 ml 10 mol L^{-1}HCl，静置24 h，同样的洗涤过程清洗3～5次。最终离心管残余物60℃烘干、称重，然后研磨过150 μm筛，测定OC含量记为$nMOC_C$（未与矿物结合的有机碳），而MOC_C为HF处理时流失的有机碳，即MOC_C=SOC−$nMOC_C$。

BC的分离基于尹云锋等[24]的方法：称取0.3 gMOC化学分离后过150 μm筛样品于离心管中，加入30 ml 0.1 mol L^{-1} $K_2Cr_2O_7$/2 mol L^{-1} H_2SO_4（1∶1，V/V）溶液，超声10 min，55℃条件下恒温水浴反应60 h，期间每12 h超声分散10 min，并适时补充蒸发损失的水分。反应完毕后离心弃上清液，加蒸馏水漩涡搅拌1 min，离心洗涤3～5次。最后60℃烘干、称重，其中的OC即为BC。

此外，分别测定POM与MOM中BC含量。土壤总有机碳与上述所有组分内的OC、BC含量直接用TOC分析仪（vario TOC，Elementary，德国）测定，单位转换成g kg^{-1}。不同组分OC含量（g kg^{-1}）=不同组分有机质中OC含量（g kg^{-1}）×不同组分占土壤质量的百分比（%）；不同组分OC所占比例（%）=不同组分OC含量（g kg^{-1}）/土壤总有机碳（g kg^{-1}）×100。土壤有机碳密度（SOCD，Soil organic carbon density）按以下公式计算：

$$C_D=C_C\times BD\times T\times(1-RF)\times10^{-2} \quad (1)$$

式中，C_D为某层土壤的有机碳密度，kg m^{-2}；C_C、BD、T、RF分别为该层土壤的有机碳含量（g kg^{-1}）、容重（g cm^{-3}）、厚度（cm）及>2 mm石砾含量（%）。

土壤固碳潜力CSP计算基于Hassink[16]的方法。计算公式如下：

$$CSC=4.09+0.37\times颗粒\leqslant53\ \mu m(\%) \quad (2)$$

$$CSD=CSC-MOC_C \quad (3)$$

$$CSP=CSD\times BD\times T\times(1-RF)\times10^{-2} \quad (4)$$

式（2）中，CSC为碳饱和容量（Carbon saturation capacity），g kg^{-1}；式（3）中，CSD为碳饱和亏缺（Carbon saturation deficit），g kg^{-1}；式（4）中，BD、T、RF与式（1）一致。土壤碳饱和水平（CSL，Carbon saturation level）为MOC_C占CSC的比例（%）。由于MOC_C与CSP均以黏、粉粒结合的碳为基础，为了比较三种不同发育程度土壤的稳定性土壤有机碳储量与固碳潜力，本研究选择按照土壤发生层采样而非按照机械分层。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析。采用单因素（one-way ANOVA）和邓肯（Duncan）法进行方差分析和多重比较（p=0.05），并分别对SOC与MOC及SOC、BC与黏粉粒含量之间进行相关分析。利用SigmaPlot 12.5软件作图，图中变异性用标准差表示。

2 结 果

2.1 矿物结合态有机碳含量及其占有机碳比例

土壤有机碳（SOC）及各组分有机碳含量均随土层的加深而降低（表2）。A层SOC含量为76.11±6.77 g kg^{-1}，约占整个剖面的70.6%。相关分析表明，物理分离的矿物结合态有机碳（MOC_p）和化学分离的矿物结合态有机碳（MOC_C）均与SOC呈显著正相关关系，然而其各自含量及占SOC比例之间却相差甚大。如A层MOC_p与MOC_C分别

表2　不同层次森林土壤矿物结合态有机碳含量及其所占比例

Table 2　Content of MOC and its proportion in SOC in forest soils relative to soil horizon

土壤类型 Soil type	土壤层次 Soil horizon	SOC (g kg^{-1})	POC (g kg^{-1})	MOC_P (g kg^{-1})	MOC_C (g kg^{-1})	POC/SOC (%)	MOC_P/SOC (%)	MOC_C/SOC (%)
DB	A	75.81b α	14.52b α	59.32a α	36.66a α	19.2c α	78.3a γ	48.4a γ
	AB	17.73b β	2.60c β	14.59b β	9.43b β	14.7c β	82.3a β	53.2a β
	B	10.25b γ	1.03c β	8.82b γ	5.65b γ	10.1c β	86.1a α	55.1a α
BF	A	90.78a α	27.31a α	61.22a α	31.23b α	30.1a α	67.4c γ	34.4c γ
	AB	13.16c β	3.36b β	9.38c β	5.02c β	25.5a β	71.3c β	38.2c β
	B	8.29b γ	2.00b β	6.15c γ	3.34c β	24.2a β	74.1c α	40.3c α
GF	A	61.75c α	14.53b α	44.79b α	26.34c α	23.5b α	72.5b γ	42.7b γ
	AB	27.15a β	5.10a β	21.10a β	13.32a β	18.8b β	77.7b β	49.1b β
	B	18.33a γ	3.12a γ	14.56a γ	9.57a γ	17.0b β	79.4b α	52.2b α

注：MOC：矿物结合态有机碳；SOC：土壤有机碳；POC：颗粒有机碳；MOC_P：物理分离的矿物结合态有机碳；MOC_C：化学分离的矿物结合态有机碳。不同英文字母代表同一土层不同土壤类型间的差异显著（$p<0.05$），不同希腊字母代表同一土壤类型不同土层间的差异显著（$p<0.05$），下同Note：MOC：Mineral-bonded organic carbon；SOC：Soil organic carbon；POC：Particulate organic carbon；MOC_P：Physically isolated MOC；MOC_C:Chemically isolated MOC. Different English letters meant significant difference between soil types in the same horizon（$p<0.05$）. Different Greek letters meant significant difference between soil horizons in the same soil profile（$p<0.05$）. The same below

为55.12 ± 7.36 g kg^{-1}、31.41 ± 6.41 g kg^{-1}，前者约为后者的1.75倍，综合所有土层，MOC_p为MOC_C的1.65倍。MOC占SOC的比例随土深而增加，MOC_P/SOC平均值为76.6%，而MOC_C/SOC仅为45.9%，前者较后者高出约30.7%。综合三种土壤，暗棕壤的MOC含量最高，其次为灰色森林土，棕色针叶林土最低。

2.2　黑碳含量及其在不同组分内的分布

BC与SOC表现出了极显著的相关性（表3），因此，BC含量也随土深而降低（图1a），A层BC含量为17.51 ± 3.36 g kg^{-1}，占整个剖面的68.7%。三种土壤间，棕色针叶林土的BC含量显著高于其他两种土壤，其中A层表现最明显。然而，BC占SOC比例却表现出上升的趋势（图1b），A层BC/SOC为22.1%，B层升至29.0%，其中，棕色针叶林土的BC/SOC也显著高于其他两种土壤。

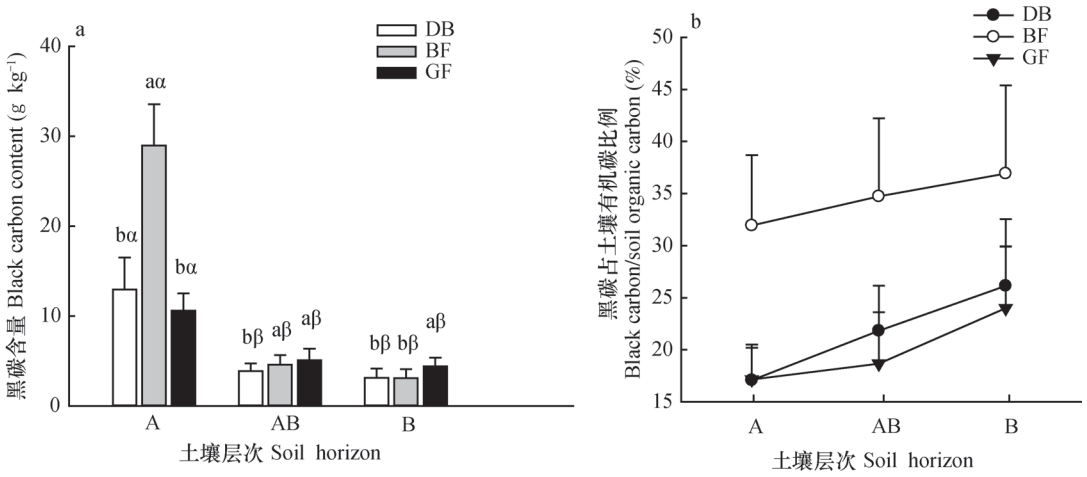
表3　不同层次土壤有机碳、黑碳与黏粉粒含量之间的相关系数

Table 3　Correlation coefficients（r）of soil particles ≤53 μm with SOC and BC relative to soil horizon

	A			AB			B		
	SOC	BC	≤53 μm	SOC	BC	≤53 μm	SOC	BC	≤53 μm
SOC	1	0.913**	0.390	1	0.880**	0.581*	1	0.810**	0.648*
BC	—	1	0.036	—	1	0.565*	—	1	0.755**
≤53 μm	—	—	1	—	—	1	—	—	1

注：BC：黑碳；≤53 μm：≤53 μm的黏粉粒 Note：BC：Black carbon；≤53 μm：Soil particles ≤53 μm；*：$p<0.05$，**：$p<0.01$

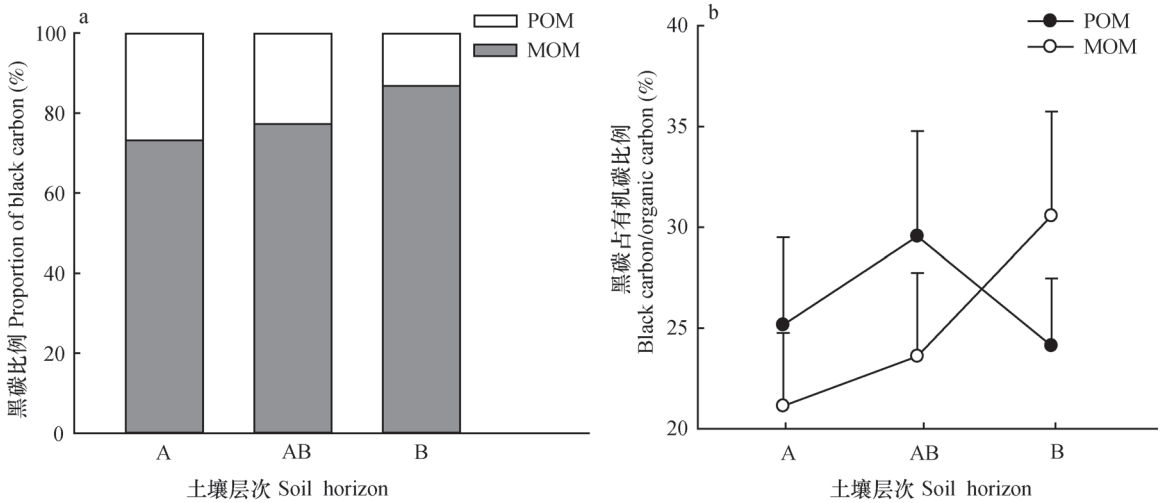
综合三种土壤，约有21.2%的BC存在于POM中（图2a），且该比例随着土深而下降，其中，棕色针叶林土约有35.1%的BC位于POM中，远高于其他两种土壤。尽管大部分BC存在于MOM中，然而A层BC与黏粉粒含量却几乎无相关性（表3），随土深的增加才逐渐表现出显著的相关性。POM中，BC/OC约为26.3%，随土层表现为先上升再下降（图2b），棕色针叶林土的POM中，BC/OC高达



注：不同英文字母代表同一土层不同土壤类型间的差异显著（$p<0.05$），不同希腊字母代表同一土壤类型不同土层间的差异显著（$p<0.05$）Note：Different English letters meant significant difference between soil types in the same horizon（$p<0.05$）. Different Greek letters meant significant difference between soil horizons in the same soil profile（$p<0.05$）

图1 不同森林土壤中黑碳随土层的变化

Fig. 1 Variation of BC with soil depth in different forest soils



注：POM：颗粒有机质；MOM：矿物结合态有机质Note：POM：Particulate organic matter；MOM：Mineral-bonded organic matter

图2 黑碳在颗粒有机质与矿物结合态有机质中的分布

Fig. 2 Distribution of BC in POM and MOM

43.8%，极显著高于其他两种土壤；MOM中，BC/OC约为24.9%，随土深而增加（图2b）。

2.3 土壤有机碳密度与固碳潜力

基于计算，土壤有机碳密度（SOCD）、矿物结合态有机碳密度（MOC_CD）与黑碳密度（BCD）均随土深而降低（表4），但B层的MOC_CD与BCD略高于AB层。A层SOCD为9.87 ± 2.02 kg m^{-2}，B层降低至3.26 ± 0.60 kg m^{-2}。本研究区碳饱和容量（CSC）为31.77 ± 4.28 g kg^{-1}，随土深而降低，但变化不显著；碳饱和水平（CSL）为49.9% ± 6.7%，其中A层CSL高达97.8%，尤其棕色针叶林A层已接近99%；碳饱和亏缺（CSD）随着土层显著升高，A层仅为0.75 g kg^{-1}，B层升至25.13 g kg^{-1}；固碳潜力（CSP）同CSD变化趋势相同，A层低至0.10 ± 0.02 kg m^{-2}，仅有SOCD的1.0%，B层为6.06 ± 1.05 kg m^{-2}，约为SOCD的1.86倍。

表4　不同层次森林土壤有机碳密度及固碳潜力

Table 4　Soil organic carbon density and carbon sequestration potential of forest soils relative to horizon in profile

土壤类型 Soil type	土壤层次 Soil horizon	SOCD (kg m^{-2})	MOC$_C$D (kg m^{-2})	BCD (kg m^{-2})	CSC (g kg^{-1})	CSL (%)	CSD (g kg^{-1})	CSP (kg m^{-2})
DB	A	8.19b α	3.96b α	1.40b α	38.05a α	96.3b α	1.39a γ	0.15a γ
	AB	2.34b γ	1.24b β	0.51b γ	38.45a α	24.5b β	29.02a β	3.83a β
	B	3.37b β	1.86b β	0.88b β	38.29a α	14.8b γ	32.64a α	10.73a α
BF	A	5.01c α	1.70c α	1.60b α	31.61b α	98.8a α	0.38b β	0.02b γ
	AB	1.81b β	0.69c β	0.63b β	30.95b β	16.2c β	25.93b α	3.57a α
	B	0.81c γ	0.33c γ	0.30c γ	30.33b β	11.0b γ	26.99b α	2.65c β
GF	A	16.43a α	7.01a α	2.82a α	26.83c α	98.2a α	0.49b γ	0.13a γ
	AB	5.86a β	2.88a β	1.09a β	26.03c α	51.2a β	12.71c β	2.74b β
	B	5.59a β	2.92a β	1.34a β	25.34c β	37.8a γ	15.77c α	4.81b α

注：SOCD：土壤有机碳密度；MOC$_C$D：矿物结合态有机碳密度；BCD：黑碳密度；CSC：碳饱和容量；CSL：碳饱和水平；CSD：碳饱和亏缺；CSP：固碳潜力 Note：SOCD：Soil organic carbon density；MOC$_C$D：Mineral-bonded organic carbon density；BCD：Black carbon density；CSC：Carbon saturation capacity；CSL：Carbon saturation level；CSD：Carbon saturation deficit；CSP：Carbon sequestration potential

3　讨　论

3.1　矿物结合态有机碳（MOC）不同分离方法比较

本文物理分离的矿物结合态有机碳（MOC$_P$）占土壤有机碳（SOC）的比例约为76.6%，与蔡岸冬等[15]及石亚攀等[21]研究结果接近。关于MOC的分析，有的研究从SOC中减去POC[21]，或者直接测定某一粒级有机质中的有机碳含量[5]。前者主要基于一种假设，即SOC的组成除了POC就是MOC，然而，这却忽略了其他SOC成分。在SOC物理分组中反复的滤洗过程流失了溶解性有机碳，如果将SOC与POC的差值视为MOC，那么就将活性的溶解性有机碳算入了相对稳定的MOC中，造成MOC的正误差，尤其在溶解性有机碳含量较高的土壤中。因此，建议以后对SOC物理分组时，尽量不要用SOC与某组分有机碳的差值代替其他组分的有机碳含量。

本文化学分离的矿物结合态有机碳（MOC$_C$）占SOC的比例约为45.9%，略高于Eusterhues等[22]对欧洲云杉林的研究结果。Eusterhues等[22]通过固体^{13}C核磁共振波谱发现，HF处理仅溶解土壤矿物和与土壤矿物络合的有机质，而不与矿物结合的有机质几乎不受影响。因此，MOC$_C$实为土壤矿物络合吸附的有机碳。MOC$_C$/SOC显著低于MOC$_P$/SOC，说明MOM中的有机碳并非完全与土壤矿物络合。实际上，MOM中MOC$_C$仅占60.6%左右，因此，SOC的物理分组过高量化了MOC含量。其他研究也得出了相同结论，Lopez-Sangil 和 Rovira[26]利用连续的化学分离量化MOC，结果表明，MOM中仅有55%～75%的有机碳是受矿物化学保护的。棕色针叶林土的MOC$_C$/SOC仅有37.6%，显著低于其他两种土壤，体现了棕色针叶林土风化程度低，土壤黏土矿物少，对SOC化学保护能力差。

3.2　不同森林土壤不同层次中黑碳（BC）的分布

尽管BC含量随土层深度降低，然而BC/SOC却表现为上升趋势，这可能有以下几方面原因：（1）伴随着黑碳的降解，土壤水分的流动与生物扰动作用等促使BC向深层土壤迁移[27]；（2）表层的BC更易被循环火氧化，而深层土壤微生物活性差以及与土壤矿物的络合作用等，降低了BC被降解的可能性；（3）表层BC占SOC的比例容易被大量的新鲜有机碳源所稀释，而深层有机碳输入低，对BC的稀释作用弱；（4）在有机质的降解过程中，BC由于其自身的生物化学惰性而被选择性富集[13]；（5）由于BC驻留时间长，不排除部分深层BC是在某一时期内由表层BC受地形因素作用而被埋藏于深层土壤中，如在坡积作用明显的中、下坡位。此外，本研究区BC/SOC平均在0.17～0.36范围内，基于相关研究[20, 24]，BC占SOC的比值可以反映土壤中BC的来源，比值在0.5左右表明BC主

要来自化石燃料燃烧，因此，本研究区黑碳主要来源于生物质燃烧。

BC在矿物结合态有机质（MOM）中所占比例以及MOM中BC/OC随土深的增加，体现出黏土矿物对BC吸附的增强，棕色针叶林土BC于MOM中分配的比例显著低于其他两种土壤，说明其对BC化学保护能力低。MOM中BC/OC约为24.9%，高于Wang等[6]所研究的湿地土壤的15.6%。类似地，Lorenz等[28]利用$Na_2S_2O_2$氧化法分离BC，最终黏、粉粒组分共剩余约23.6%的有机碳，与本研究结果接近。然而，尽管BC主要分布于MOM中，但A层BC与黏粉粒的相关性并不显著，说明表层MOM中的大部分BC并未吸附于黏、粉粒表面，到了B层二者的相关性才达到极显著水平，说明深层BC主要与黏、粉粒相结合。Brodowski等[29]结合扫描电子显微镜与X射线能量散布分析仪证实了这一观点，发现表层BC颗粒大多处于游离状态，随着土层的加深才逐渐吸附于黏土矿物表面。

本研究颗粒有机质（POM）中BC/OC约为26.3%，略低于Wang等[6]对湿地土壤的研究结果。BC于POM中的存在以及POM中BC占OC的较高比例这些结果向颗粒有机碳（POC）属于活性碳库这一传统认识提出挑战。其他相关研究结果也表明，一定比例的BC存在于类似的活性组分中，孙金兵等[14]于长白山森林土壤表层利用重铬酸钾氧化法发现轻组（LF，Light fraction，$<1.8\ g\ cm^{-3}$）中BC/OC约为14.8%。大兴安岭林区火烧历史久远，火烧残留的木炭可以解释POM中大部分的BC。Brodowski等[29]与Wang等[6]分别表明了POM中的BC主要为木炭。因此，在生物质燃烧频繁的生态系统中，提及POC时应谨慎表明其属于活性组分，因为POC并非一成不变地处于活性状态。

3.3 大兴安岭不同森林土壤稳定性有机碳密度与固碳潜力

本文剖面（0.64 m）内土壤有机碳密度（SOCD）为16.47 ±3.27 kg m^{-2}，齐光等[30]于大兴安岭原始红松林0.4 m剖面内测定的SOCD约为14.38 kg m^{-2}，按照其分析的SOCD随土层变化趋势估算，与本文所对应剖面深度的SOCD将接近于本研究结果。本文利用连续的化学分离分析了两种主要的稳定性土壤有机碳（SSOC），有利于清晰地理解SSOC的重要性。SSOC密度（矿物结合态有机碳密度MOC_CD与黑碳密度BCD）约为11.06 ±1.99 kg m^{-2}，占SOCD的67.2%，说明大兴安岭森林土壤稳定性强，其中，化学分离的矿物结合态有机碳（MOC_C）与黑碳（BC）分别贡献了68.1%和31.9%。需要提及的是，灰色森林土SOCD、MOC_CD与BCD均显著高于其他两种土壤，这并非其对应的碳含量高，而是由于其土层厚度较深，因为灰色森林土的发育过程既有一般森林土壤的淋溶淀积过程，又存在草原土壤的高度腐殖化过程，导致其土壤发育深厚，碳储量显著高于其他森林土壤。

暗棕壤黏粉粒含量高，因此，其碳饱和容量（CSC）显著高于其他两种土壤。碳饱和水平（CSL）与碳饱和亏缺（CSD）取决于CSC与当前MOC含量，本文CSL约为49.9%，其中A层CSL约为97.8%，高于Wiesmeier等[7]于森林表层（0～10 cm）的93%。由于他们仅分析了表层土，因此得出森林土壤固碳潜力远低于农田与草地。然而，本文深层土壤（B层）CSL仅有21.2%，说明深层森林土壤仍然可以储存大量的SOC。此外，A层SOC与黏粉粒含量的相关性表明，表层SOC与黏粉粒吸附作用很低，从而说明在一定程度上森林表层土壤的碳饱和水平可能低于估算。而B层SOC与黏粉粒含量的相关性达到了显著水平，说明深层土壤的CSL可能接近于实际值。固碳潜力（CSP）与CSL情况相反，深层土壤CSP达到了6.06 kg m^{-2}，约为深层土壤有机碳密度（SOCD）的1.86倍，可见深层土壤固碳潜力之大。相反，A层CSP为0.10 kg m^{-2}，仅为A层SOCD的1.0%。暗棕壤发育程度高，因此其固碳潜力最强，而尽管棕色针叶林土黏粉粒含量高于灰色森林土，但由于其土壤发育过浅，导致其固碳潜力最低。

前文所述的黑碳（BC）于颗粒有机质（POM）中的存在也质疑了一直以来关于碳饱和理论的观点。Hassink[16]以矿物结合态碳库为基础估算土壤固碳潜力。随后Six等[2]提出了碳饱和概念模型，将SOC分为四个库：生物化学保护的碳库、黏粉粒保护的碳库、微团聚体保护的碳库以及未受保护的碳库。他们认为前三个碳库的最大保护能力限制着SOC随外源碳输入的增加。这一碳饱和假设随后通过将土壤有机碳库具体地分离为可量化的组分而被陆续证实[4-5]。其中，生物化学保护碳库仅是从黏粉粒组分中分离，未受保护碳库主要为颗粒有机碳或者轻组有机碳等。然而，本研究表

明，有相当比例的BC存在于POM中，意味着生物化学稳定的SOC可以存在于任何物理组分（粒级或者密度分组）中。而无论是Hassink[16]的经验公式还是Six等[2]的概念模型，土壤的碳饱和理论均是以稳定性土壤有机碳为基准，因此，鉴于BC于POM中的存在，POC在土壤碳饱和中的角色需要被重新考虑，在生物质燃烧作为BC主要来源的生态系统中，土壤固碳潜力将高于预估。基于计算，棕色针叶林土固碳潜力最低，然而由于其POM中BC含量高，提高了土壤固碳潜力。

4　结　论

本文利用物理粒级分组和化学分离量化了大兴安岭三种森林土壤的矿物结合态有机碳（MOC）与黑碳（BC），并采用了Hassink的经验公式基于土壤黏粉粒含量估算土壤固碳潜力。通过比较量化MOC的不同方法，发现粒级分组方法过高地估计了MOC含量，这一正误差的产生是由于将矿物结合态有机质中的所有有机碳均视为MOC。依据BC/SOC比例，本研究区BC主要来源于生物质燃烧。通过物理和化学方法结合，发现BC存在于所有粒级组分内，而颗粒有机质中BC的存在说明了颗粒有机碳并非传统认识的绝对活性。基于计算，发现表层土壤碳接近于饱和水平，然而由于表层SOC与黏粉粒结合程度低，这一结果可能高于实际碳饱和情况。而深层碳饱和水平很低，说明深层土壤的固碳潜力巨大。目前，现有的碳饱和模型与理论均以稳定性土壤有机碳为基础，然而BC于颗粒有机质中的存在打破了这一理论束缚，在生物质燃烧频繁的生态系统中，颗粒有机碳在土壤固碳潜力中的角色需要被重新评估。

参 考 文 献

[1] 戴尔阜，黄宇，赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展. 生态学报，2015，35（12）：3908—3918
Dai E F，Huang Y，Zhao D S. Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2015，35（12）：3908—3918

[2] Six J，Conant R T，Paul E A，et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter：Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil，2002，241（2）：155—176

[3] Castellano M J，Mueller K E，Olk D C，et al. Integrating plant litter quality，soil organic matter stabilization，and the carbon saturation concept. Global Change Biology，2015，21（9）：3200—3209

[4] 杜章留，张庆忠，任图生. 农田土壤碳饱和机制研究进展. 土壤与作物，2015，4（2）：49—56
Du Z L，Zhang Q Z，Ren T S. Advances of soil carbon saturation mechanisms in agroecosystems（In Chinese）. Soil and Crop，2015，4（2）：49—56

[5] Gulde S，Chung H，Amelung W，et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. Soil Science Society of America Journal，2008，72（3）：605—612

[6] Wang Q，Zhang P J，Liu M，et al. Mineral-associated organic carbon and black carbon in restored wetlands. Soil Biology & Biochemistry，2014，75：300—309

[7] Wiesmeier M，Hübner R，Spörlein P，et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. Global Change Biology，2014，20（2）：653—665

[8] Cai A，Feng W，Zhang W，et al. Climate，soil texture，and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. Journal of Environmental Management，2016，172：2—9

[9] 万晓华，黄志群. 植物标志物在森林土壤碳循环研究中的应用. 土壤学报，2013，50（6）：1207—1215
Wan X H，Huang Z Q. Application of plant biomarkers to studying carbon cycling in forest soil systems（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2013，50（6）：1207—1215

[10] Angst G，Mueller K E，Kögel-Knabner I，et al. Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay-sized particulate and mineral associated organic matter. Biogeochemistry，2017，132（3）：307—324

[11] Chaplot V，Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. Geoderma，2015，243/244：205—213

[12] Keith A，Singh B，Dijkstra F A. Biochar reduces the rhizosphere priming effect on soil organic carbon. Soil Biology & Biochemistry，2015，88：372—379

[13] Singh N，Abiven S，Maestrini B，et al. Transformation and stabilization of pyrogenic organic matter in a temperate forest field experiment. Global Change Biology，2014，20（5）：1629—1642

[14] 孙金兵，桑英，宋金凤，等. 长白山典型森林土壤黑碳含量及不同组分中的分布特征. 林业科学研究，2016，29（1）：34—40
Sun J B，Sang Y，Song J F，et al. Content and

distribution of black carbon in typical forest soils inChangbaishan Mountains (In Chinese) . Forest Research, 2016, 29 (1) : 34—40

[15] 蔡岸冬，徐香茹，张旭博，等. 不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析. 中国农业科学，2014，47 (21) : 4291—4299
Cai A D, Xu X R, Zhang X B, et al. Capacity and characteristics of mineral associated soil organic carbon under various landuses (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (21) : 4291—4299

[16] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. Plant and Soil, 1997, 191 (1) : 77—87

[17] 叶功富，尤龙辉，卢昌义，等. 全球气候变化及森林生态系统的适应性管理. 世界林业研究，2015，28 (1) : 1—6
Ye G F, You L H, Lu C Y, et al. Global climate change and adaptive management of forest ecosystem (In Chinese) . World Forestry Research, 2015, 28 (1) : 1—6

[18] 方精云，黄耀，朱江玲，等. 森林生态系统碳收支及其影响机制. 中国基础科学，2015 (3) : 20—25
Fang J Y, Huang Y, Zhu J L, et al. Carbon budget of forest ecosystems and driving forces (In Chinese) . China Basic Science, 2015 (3) : 20—25

[19] 汲玉河，郭柯，倪健，等. 安徽省森林碳储量现状及固碳潜力. 植物生态学报，2016，40 (4) : 395—404
Ji Y H, Guo K, Ni J, et al. Current forest carbon stocks and carbon sequestration potential in Anhui Province, China (In Chinese) . Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40 (4) : 395—404

[20] 任清胜，辛颖，赵雨森. 重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响. 北京林业大学学报，2016，38 (2) : 29—36
Ren Q S, Xin Y, Zhao Y S. Impact of severe burning on organic carbon and black carbon in soil aggregates in natural *Larixg melinii* forest of Great Xing'an Mountains (In Chinese) . Journal of Beijing Forest University, 2016, 38 (2) : 29—36

[21] 石亚攀，乔璐，陈立新，等. 红松针阔混交林林隙土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的时空异质性. 林业科学，2014，50 (6) : 18—27
Shi Y P, Qiao L, Chen L X, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil particulate and mineral-associated organic carbon of forest gaps in *Pinus koraiensis* coniferous and broad-leaved mixed forest (In Chinese) . Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50 (6) : 18—27

[22] Eusterhues K, Rumpel C, Kleber M, et al. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation. Organic Geochemistry, 2003, 34 (12) : 1591—1600

[23] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J, et al. Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21 (3) : GB3016. DOI: 10.1029/2006GB002914

[24] 尹云锋，杨玉盛，高人，等. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响. 土壤学报，2009，46 (2) : 352—355
Yin Y F, Yang Y S, Gao R, et al. Effects of slash burning on soil organic carbon and black carbon in Chinese fir plantation (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (2) : 352—355

[25] Rehbein K, Sandhage-Hofmann A, Amelung W. Soil carbon accrual in particle-size fractions under *Miscanthus x. giganteus* cultivation. Biomass & Bioenergy, 2015, 78: 80—91

[26] Lopez-Sangil L, Rovira P. Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: An integrated approach for the fractionation of organo-mineral complexes. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 62 (5) : 57—67

[27] Boot C M, Haddix M, Paustian K, et al. Distribution of black carbon in ponderosa pine forest floor and soils following the High Park wildfire. Biogeosciences Discussions, 2014, 11 (12) : 3029—3039

[28] Lorenz K, Lal R, Shipitalo M J. Chemical stabilization of organic carbon pools in particle size fractions in no-till and meadow soils. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44 (8) : 1043—1051

[29] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. Geoderma, 2005, 128 (1/2) : 116—129

[30] 齐光，王庆礼，王新闯，等. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量. 应用生态学报，2013，24 (1) : 10—16
Qi G, Wang Q L, Wang X C, et al. Soil organic carbon storage in different aged *Larixg melinii* plantations in Great Xing'anMountains of Northeast China (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (1) : 10—16

Distribution of Mineral-bonded Organic Carbon and Black Carbon in Forest Soils of Great Xing'an Mountains, China and Carbon Sequestration Potential of the Soils

XU Jiahui　GAO Lei　SUN Ying　CUI Xiaoyang†

(*College of Forestry*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*)

Abstract　【Objective】 Sequestration of carbon (CO_2) from the atmosphere into forest soils is considered to have great potential to mitigate the momentum of global climate change. However, soil carbon saturation has been observed in some soils. When the soil is saturated with stable soil organic carbon (SSOC) , any new inputsoil organic carbon (SOC) , which would accumulate in labile pools, would easily be decomposed by microorganisms, contributing little to the soil carbon storage. The potential of soils to sequestrate SSOC is limited by SOC stabilization. SOC is stabilized mainly through inherent biochemical recalcitrance, protection through interaction with minerals, and occlusion in aggregates. Black carbon (BC) is an example of the first mechanism, gaining stability from condensed aromatic structure, while mineral-bonded organic carbon (MOC) is one of the second. SSOC plays a vital role in soil sequestration; however, researches on SSOC in natural forests are still inadequate. In this paper, MOC and BC, two representatives of SSOC, were studied and their carbon sequestration potentials (CSP) in three types of forest soils in the Great Xing'an Mountains, Northeast China were estimated.【Method】MOC was analyzed with a physical method and a chemical one, too. In physical analysis, soil was divided into particulate organic matter (POM, > 53 μm) and mineral-bonded organic matter (MOM, ≤53 μm) , and organic carbon (OC) was detected in MOM (MOC_P) , whereas in chemical analysis, soil was acidified with hydrofluoric acid, and OC loss (MOC_C) was measured. BC was determined with the oxidation method using potassium dichromate. CSP was calculated based on the carbon saturation capacities of silt and clay particles according to Hassink.【Result】Results show that MOC and SOC was remarkably correlated to each other, however, comparative analysis shows that the particle size fractionation method overestimated MOC, because it was found that not all the OCs in MOM are bonded with minerals into MOC. Actually, only 60.6 % of the OCs in MOM are. BC in the soils was 8.46 ± 3.85 g kg^{-1} in content and declined with soil depth, however, the proportion of BC to SOC displayed a rising trend. Most of the BC (78.8%) was enclosed in MOM, and the proportion of BC in MOM increased with soil depth, meanwhile the relevances of BC with silt and clay were also reinforced, which illustrated that soil mineral plays an important role in chemical protection of BC. BC/SOC ratio in the soils was 25.4 %, which was reasonable since the forests had not been affected directly by industrial activities. Thereinto, the BC/OC ratio was 26.3% and 24.9% in POM and MOM, respectively. MOC and BC contributed to SOC by around 67.2%, which demonstrates that the soil has a high disturbance resisting capacity in the study area. The surface soils were highly carbon saturated, reaching up around 97.8% in saturation, while carbon saturation declined with soil depth, down to 21.2% in bottom soil, which illustrated that the soil deep in profile could store a considerable amount of SOC. Based on calculation, CSP of the soil deep in profile could be 1.86 times the current SOC storage, while the CSP of surface soil accounted only for about 1% of current SOC stock.【Conclusion】The SOC storage in forest soils is huge, with SSOC taking an crucial place, and what is more, the potential of forest soils for carbon sequestration is also enormous, especially

in the soil deep in profile. The current carbon saturation theories are all based on the conception of SSOC, however, the existence of BC in POM manifests that the role of POC in soil carbon sequestration needs to be reconsidered, because POC is not invariably labile as is commonly understood.

Key words Soil organic carbon; Soil fractionation; Stable organic carbon; Particulate organic carbon; Carbon saturation

（责任编辑：陈荣府）

信息

《土壤学报》2016年度优秀论文评选揭晓

《土壤学报》2016年度优秀论文评选活动已于近期结束。经本刊编委推荐和评选，共评出优秀论文奖10篇，涵盖土壤地理与土壤信息、土壤物理与土壤侵蚀、土壤化学、土壤生物、植物营养、土壤肥力、土壤污染等版块。现将获奖名单公布如下（详见附件），并授予年度优秀论文证书，给予适当奖励。

《土壤学报》编辑部
二〇一七年十二月四日

附件：

《土壤学报》2016年度优秀论文奖获奖名单（以版块顺序排序）

序号	论文题目	论文作者	第一作者单位	卷期页码
1	人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究——以典型黑土区和水稻土区为例	郭乃嘉，史学正，赵永存，徐胜祥，王美艳，孔超.	土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所）	53（5）：1097-1106
2	地形对黑土区典型坡面侵蚀-沉积空间分布特征的影响	杨维鸽，郑粉莉，王占礼，韩勇.	中国科学院水利部水土保持研究所	53（3）：572-581
3	土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展	吴云当，李芳柏，刘同旭.	广东省生态环境与土壤研究所	53（2）：277-291
4	重新被“激活”的土壤无机碳研究	李彦，王玉刚，唐立松.	中国科学院新疆生态与地理研究所	53（4）：845-849
5	腐殖物质特异性及其产生机制	窦森，李艳，关松，郭聃，张明阳，金良.	吉林农业大学资源与环境学院	53（4）：821-831
6	秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨	杨瑞，刘帅，王紫泉，曹永昌，赵翊明，和文祥，耿增超.	西北农林科技大学资源环境学院	53（4）：1037-1046
7	旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性	王西娜，王朝辉，李华，王荣辉，谭军利，李生秀.	西北农林科技大学资源环境学院	53（5）：1202-1212
8	中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析	王金洲，卢昌艾，张文菊，冯固，王秀君，徐明岗.	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	53（1）：16-27
9	云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征	马任甜，方瑛，安韶山.	西北农林科技大学资源环境学院	53（5）：1170-1180
10	多环芳烃污染土壤生物联合强化修复研究进展	倪妮，宋洋，王芳，卞永荣，蒋新.	土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所）	53（3）：561-571