

网络出版时间:2016-01-08 10:22 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.02.011
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160108.1022.022.html

黄花甸子流域人工林土壤有机碳密度分布特征

李 龙,姚云峰,秦富仓,张美丽,高玉寒

(内蒙古农业大学 生态环境学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

[摘 要] **【目的】**分析内蒙古黄花甸子流域不同人工林土壤有机碳密度分布特征,为该地区人工林生态系统的碳汇管理提供理论依据。**【方法】**以内蒙古赤峰市敖汉旗黄花甸子流域内山杏×油松混交林、山杏林、小叶杨林、柠条林 4 种典型人工林为研究对象,选取典型样区,探讨了 0~100 cm 土层不同林分土壤有机碳密度的变化。**【结果】**4 种林分土壤平均有机碳密度为 0.85~1.07 kg/m²;土壤有机碳密度呈现出混交林明显高于纯林,乔木林明显高于灌木林的特征,土壤平均有机碳密度由大到小表现为山杏×油松混交林>山杏林>小叶杨林>柠条林。土壤有机碳富集在 0~20 cm 土层中,并随土层深度的增加,土壤有机碳密度明显降低。**【结论】**在研究区的造林实践中,建议增加混交林造林面积,减少人类活动对森林表层土壤的干扰和破坏。

[关键词] 人工林;土壤有机碳密度;土层

[中图分类号] S714

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)02-0077-06

Distribution characteristics of soil organic carbon density of different forests in Huanghuadianzi watershed

LI Long, YAO Yun-feng, QIN Fu-cang, ZHANG Mei-li, GAO Yu-han

(College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: **【Objective】** This study analyzed the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) density in different plantations in Huanghuadianzi watershed to provide theoretical basis for management of carbon sink in plantation ecosystem. **【Method】** Four different forest plantations, *Prunus sibirica* × *Pinus tabulaeformis*, *Prunus sibirica*, *Populus simonii* and *Caragana intermedia* in Huanghuadianzi watershed, Aohan, Chifeng of Inner Mongolia were selected to investigate the distribution characteristics of SOC density at the depth of 0—100 cm. **【Result】** Average density of SOC in four forest types was 0.85—1.07 kg/m². SOC density of mixed forest was significantly higher than that of pure forest, and SOC density of arbor forest was significantly higher than that of shrub forest. SOC mainly accumulated in the depth of 0—20 cm and it decreased significantly with the increase of soil depth. **【Conclusion】** It is suggested to increase the planting area of mixed forest and reduce the effects of human activities on disturbance and destruction of forest soil.

Key words: plantation; soil organic carbon density; layer

森林生态系统作为陆地生物圈的主体,除其本身蕴藏着 86% 以上的植被碳库外,同时森林生态系

统还维持着 70% 以上的土壤碳库^[1]。因而,森林生态系统在全球碳循环和碳收支平衡中发挥着不可替

[收稿日期] 2014-06-23

[基金项目] 内蒙古应用研究与开发计划项目“农林牧耦合生态系统固碳关键技术”(20110732)

[作者简介] 李 龙(1989—),男,吉林桦甸人,博士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lilongdhr@126.com

[通信作者] 姚云峰(1959—),男(蒙古族),内蒙古阿拉善人,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

代的作用^[2]。近年来,人们普遍意识到人工林建设已逐渐成为生态恢复的重要手段^[3-4],大量的区域及全球尺度上的研究结果也肯定了人工林对提高陆地碳储量的重要作用^[5-8]。土地利用变化是仅次于化石燃料燃烧导致碳元素从陆地生态系统的释放,使大气中 CO₂ 浓度升高的主要原因之一^[9]。而土壤碳含量很大程度上依赖于地表植被种类与土地利用状况^[10-11]。但在早期的造林工作中,营造人工林多以防风固沙、涵养水源以及农田防护为主要目的,对森林及其林下土壤的固碳效益并未进行深入探讨。森林土壤中的有机碳主要来自于植被凋落物的分解补充与累积,不同林分下所形成的凋落物的化学组成也各不相同,这就使得不同林种下土壤有机碳含量存在一定差异^[12]。因此,对同一地区的不同森林类型土壤有机碳含量的研究,对揭示该区土地利用方式变化对土壤碳的影响具有十分重大的意义。

内蒙古赤峰市敖汉旗位于半干旱地区,属于温带大陆性季风气候,在我国碳汇林营造中起步较早规模较大,其中在敖汉旗的中意合作项目“中国东北部内蒙古敖汉旗防治荒漠化青年造林项目”是我国第一个碳汇造林项目,其造林面积达 3 000 hm²,对我国其他地区的碳汇研究工作具有积极的借鉴作用,对这一地区的土壤碳库研究更具指导价值^[13]。因此,本试验以内蒙古赤峰市敖汉旗内 4 种主要人工林为研究对象,以实地调查土壤数据为基础,并结合海拔高度的变化分析研究区土壤有机碳含量的空间变异特征,旨在为该地区人工林生态系统的碳汇管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄花甸子流域的赤峰市敖汉旗境内,燕山山脉东段,科尔沁沙地南缘向松辽平原过渡的地段,其地势南高北低,并向东北倾斜。地理坐标位于北纬 41°42′~42°02′、东经 119°30′~120°53′。

黄花甸子流域面积约为 30 km²,海拔 440~806 m,属于中温带半干旱大陆性季风气候区,四季分明,年均降雨量为 400~470 mm,年均蒸发量为 2 290~2 400 mm。土壤类型大部分为栗钙土,伴随着少量的风沙土,体现了森林土壤向草原土壤的过渡特点,pH 值呈弱碱性到碱性,全剖面具有石灰反应。地带性植被以疏林草原为主,人工植被以水土保持林和防风固沙林为主要目的,主要造林树种为小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Prunus sibirica*)、柠条(*Caragana intermedia*)等,小面积分布有樟子松(*Pinus sylvestris*),原生植被较少,只有低矮丛生小灌木及杂草,主要为达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等 1 年生草本植物。

1.2 样品采集

结合研究区 1:5 万地形图、林相图,于 2012-07 采集研究区土壤样品,将海拔以 100 m 为一个单元等距划分为<550,≥550<650,≥650<750 m 共 3 个梯度。每个梯度下选取小叶杨、山杏林、山杏×油松混交林和柠条林 4 种人工林地作为研究对象,对每种人工林均选择 3 块坡度、坡向等自然特征一致林分作为研究样地,每块样地设置 20 m×20 m 的样方,调查林分树高、胸径等基本信息。并于样地内挖掘深 1 m、长 1.5 m、宽 1 m 的土壤剖面,除去枯落物层,按 0~10,10~20,20~40,40~60,60~100 cm 划分 5 个土层并取样,每层取 3 个重复。将各土层土壤样品混合装入土壤袋,自然风干后剔除石块、根茎及各种新生体和侵人体,充分混合后研磨过筛。采用 105 ℃烘干至恒质量法测定土壤样品的含水率;采用环刀法测定土壤体积质量;土壤有机质含量采用重铬酸钾加热法测定。取样同时进行林分结构调查,调查不同植被造林时间和经营状况、土壤及其厚度、海拔、坡度、坡向、林木及其林下植被的生长状况等。综合同类林地下的 3 块样地特征,研究区 4 种人工林样地的基本情况见表 1。

表 1 研究区 4 种人工林样地的基本情况
Table 1 Basic situation of plots in the four forests

林种 Forest species	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect	平均林龄/ 年 Average age	林分密度/ (株·m ⁻²) Density	郁闭度/ 盖度/% Canopy density	平均树高/m Mean height	平均胸径/cm Mean DBH	土壤类型 Soil type	主要地被物 Ground cover
山杏林 <i>Prunus sibirica</i>	2~4	半阴坡 Half shady slope	28	0.08	45	2.3		栗钙土 Chestnut soil	赖草、达乌里胡枝子 <i>Leymus secalinus</i> , <i>Lespedeza davurica</i>
柠条林 <i>Caragana intermedia</i>	2~4	平 Flat	29	0.25	55	1.57		栗钙土 Chestnut soil	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>

续表 1 Continued table 1

林种 Forest species	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect	平均林龄/ 年 Average age	林分密度/ (株·m ⁻²) Density	郁闭度/ 盖度/% Canopy density	平均树高/m Mean height	平均胸径/cm Mean DBH	土壤类型 Soil type	主要地被物 Ground cover
小叶杨林 <i>Populus simonii</i>	2~4	平 Flat	28	0.04	29	6.4	11	栗钙土 Chestnut soil	猪毛菜、蒺藜 <i>Salsola collina</i> Pall., <i>Tribu- lus terrestris</i> L.
山杏× 油松林 <i>Prunus sibirica</i> × <i>Pinus tabulaeformis</i>	2~4	半阴坡 Half shady slope	28	0.05	44	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> 3.74 山杏 <i>P. sibirica</i> 1.90	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> 12.18 山杏 <i>P. sibirica</i> 5.31	栗钙土 Chestnut soil	达乌里胡枝子、铁杆蒿、沙打 旺 <i>Lespedeza davurica</i> , <i>Hetero- pappus altaicus</i> (Willd.), <i>Astragalus adsurgens</i>

1.3 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量。采用的计算方法为：

$$Soc_i = d_i \times p_i \times O_i \times 10^{-2}。$$

式中： i 为土壤不同层次， Soc_i 为土壤有机碳密度 (kg/m^2)， d_i 为土层厚度 (cm)， p_i 为土壤平均体积质量 (g/cm^3)， O_i 为土壤有机碳含量 (g/kg)^[14]。

为了便于对每层土壤有机碳密度进行对比分析，本研究将各取土区间的土层厚度 d_i 均按 10 cm 进行计算，以便排除各土层取样深度不一的干扰。

采用 SAS 9.0 对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同林分下土壤有机碳的分布特征

不同植被类型中，由于土壤受不同植物根系分布、凋落物分解程度以及人为干扰等因素的影响，致

使土壤有机碳含量及土壤体积质量随之发生变化，所以土壤碳密度也随之出现差异^[15]。表 2 显示，不同林分下土壤有机碳密度存在较为明显的差异，4 种林分平均土壤有机碳密度为 0.85~1.07 kg/m^2 ；不同林分类型下，土壤平均有机碳密度表现为混交林明显高于纯林，乔木林明显高于灌木林。有机碳密度由大到小表现为山杏×油松混交林>山杏林>小叶杨林>柠条林。其中，山杏×油松混交林与山杏林、小叶杨林之间平均有机碳密度存在显著差异 ($P<0.05$)；3 种乔木林与柠条林之间的平均有机碳密度存在显著差异 ($P<0.05$)。混交林的平均土壤碳密度分别是纯林和灌木林的 1.1 和 1.3 倍。这主要是因为不同林分下枯落物现存量、土壤质地以及人为干扰活动均对土壤有机碳密度产生明显的影响。

表 2 不同林分下的土壤有机碳密度

Table 2 Soil organic carbon density in different forests					kg/m^2
土层深度/cm Soil depth	山杏×油松 <i>Prunus sibirica</i> × <i>Pinus tabulaeformis</i>	山杏 <i>Prunus sibirica</i>	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	柠条 <i>Caragana intermedia</i>	
0~10	1.34	1.27	1.15	1.20	
10~20	1.21	1.20	1.02	1.10	
20~40	1.09	0.84	1.04	1.01	
40~60	0.98	0.86	0.87	0.47	
60~100	0.70	0.68	0.62	0.49	
平均值 Mean	1.07 a	0.97 b	0.94 b	0.85 c	
标准差 Standard deviation	0.25	0.25	0.21	0.35	
变异系数/% CV	23	26	22	41	

注：同行数据后标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters represent significant difference ($P<0.05$).

山杏×油松混交林属于乔灌混交类型，这种混交林在研究区十分常见，是早期当地营建水土保持林较为典型的林种，乔灌混交在空间上可以更加充分利用光照条件，具有十分合理的林分垂直结构，因此在林下有较为丰富的困落物层，成为土壤有机碳的重要补给源。混交林更能合理利用土地资源，对

土壤有机碳的积累具有积极作用^[16]。山杏本属于亚乔木，作为当地主要的坡面防护林，其主要分布在坡度较为平缓的山坡以涵养水源。在造林前坡面上均大面积进行过水平沟和鱼鳞坑等坡面集流整地工程，这就使得林下保持了相对较好的水分条件，更有利于山杏根系的生长和林下草本植被的存活，这些

因素都明显提高了林下土壤有机碳的积累。小叶杨是以农田防护为目的林网和以道路防护为主要目的林带 2 种形式出现在研究区内,由于小叶杨本身特点,其对土壤水分需求量较大,不宜过密种植,林分密度仅为 0.04 株/m²,因此郁闭度和其他林种相比较低;加之小叶杨的分布位置多在道路和农田旁,受人为干扰频繁,地表植被盖度较低且枯落层很薄,以致其林下土壤有机碳密度较山杏林、山杏×油松混交林都低。研究区的柠条林均是飞播林分,造林地主要集中在风沙区,飞播密度较大,以防风固沙为主要造林目的。尽管柠条林保持着较高的盖度,但缺乏后期管护,多年没有平茬,林分难以更新;土壤本身为沙土,养分含量低,柠条的生长对水分又有着极大的需求,以致林下植被极为稀少,故土壤有机碳密度很低。

2.2 不同林分土壤有机碳的垂直分布特征

表 2 显示,4 种林分土壤有机碳密度垂直分布上均表现为随土层深度的增加而减少。主要是由于植物根系集中分布在土壤表层,凋落物和腐殖层以及土壤微生物的分解对土壤有机碳贡献主要作用于地表,且随着土层深度的增加而分解作用减弱所致,因而表层土壤的碳密度大^[17]。就变异系数而言,柠条林下土壤有机碳密度的变异最大,为 41%,而其他乔木林分下土壤有机碳密度的变异系数为 22%~26%。说明柠条林下土壤的有机碳密度的变

异程度较 3 种乔木林更为剧烈。

表 3 显示,山杏×油松混交林、山杏林、小叶杨、柠条林 4 种人工林分下 0~20 cm 层土壤有机碳密度所占比例分别为 48.32%,50.97%,46.20%,53.93%,均表现出明显的表聚作用;并且随着土层的加深,各林分土壤有机碳所占比例均呈下降趋势,而 0~60 cm 土层土壤有机碳密度所占比例已达 85%以上,说明研究区 60 cm 以下土壤有机碳密度极小,而加强对表层土壤的研究意义更加明显。这主要是由于随着土层深度的增加,植被凋落物和根系数量减少,土壤体积质量增加,土壤水分减少、透气性变差,微生物分解的活性减弱,从而导致土壤有机碳储量下降^[18]。0~20 cm 土层有机碳密度由高到低为山杏×油松混交林(2.55 kg/m²)>山杏林(2.47 kg/m²)>柠条林(2.30 kg/m²)>小叶杨(2.17 kg/m²)。由此可见,在柠条林 0~20 cm 土层中上有机碳密度的表聚作用要强于小叶杨,且约有 54%有机碳密度集中在 0~20 cm 土层,这是由于柠条的水平根系分布密集,且飞播密度高,柠条盖度已超过 50%,沙地整体已成固定沙地,土壤表层已形成结皮层,对土壤养分的固持起到积极作用。而小叶杨林的表层土壤受人为破坏较大,降低了其表层土壤的有机碳密度。在 20~100 cm 土层,与其他林地相比,柠条林地土壤有机碳密度急剧下降,这应该和不同林种根系垂直分布特点有关。

表 3 不同林分类型下各土层土壤有机碳密度所占比例

Table 3 Ratios of soil organic carbon density at different layers in different forests					%
土层深度/cm Soil depth	山杏×油松 <i>Prunus sibirica</i> × <i>Pinus tabulaeformis</i>	山杏 <i>Prunus sibirica</i>	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	柠条 <i>Caragana intermedia</i>	
0~10	25.00	26.23	24.49	28.11	
10~20	23.32	24.74	21.71	25.82	
20~40	20.34	17.32	22.12	23.62	
40~60	18.28	17.69	18.50	11.04	
60~100	13.06	14.02	13.18	11.41	

3 讨 论

本研究中各人工林下土壤有机碳密度随土壤深度的增加而减少,这与曹吉鑫等^[19]针对不同林种都得出结论一致。此外,杨金艳等^[20]对东北东部地区森林的研究也得出,土壤有机碳储量随土层深度的增加而递减。土壤有机碳在表层表现出明显的聚集性,表明表层有机碳具有“表聚作用”^[21]。根据 Batjes^[22]对各类型土壤有机碳储量的研究得出,在 0~100 cm 的土层中,0~30 cm 土层土壤有机碳所占的比例平均为 49%。本研究中土壤有机碳富集

在 0~20 cm 土层,表层聚集作用更为明显,这可能是研究区以栗钙土为主,土层较薄,植被根系分布较浅所致。森林土壤有机碳的来源主要是动植物残体,地表植被根系等,由于这些物质深入土壤中深度一定,加之降雨淋溶作用中的微生物分解碳随雨水入渗到土壤也存在一定深处,使土壤有机碳具有明显的垂直分布特征^[20]。因此加强对森林表层土壤的保护具有重要的意义。

地上植被是影响林分下土壤有机碳含量的重要因素,不同的树种以及树种间的搭配也对土壤有机碳产出有明显的影响,混交林在土壤有机碳储量方

面相比纯林具有显著优势。郭月峰等^[16]、王文静等^[21]均提出混交林较纯林的固碳能力更强。混交林的林分结构更为合理,其有效提高了林内物种多样性,凋落物和根系的种类与数量也增多,在抵御灾害能力上具有明显优势,其有机碳含量也显著增加。因此在人工林的经营与管理中,更应深入研究混交林在调节全球碳循环中的巨大作用,充分发挥森林生态系统在碳储量方面的能力。

4 结 论

1)不同林分下土壤有机碳密度存在较为明显的差异,4 种林分土壤平均有机碳密度为 0.85~1.07 kg/m²;土壤有机碳密度呈现出混交林明显高于纯林,乔木林明显高于灌木林的特征。其有机碳密度由大到小表现为山杏×油松混交林>山杏林>小叶杨林>柠条林。

2)土壤有机碳富集在 0~20 cm 土层中,4 种林分土壤有机碳密度均表现为随土层深度的增加而明显减少,其中柠条林下土壤有机碳的表聚作用最为突出。

内蒙古赤峰市敖汉旗林业建设过程中,应加大对混交林的种植规模,尝试更多不同树种的混交搭配以应用到造林实践中,尤其对各林分下的 0~20 cm 土层土壤的保护和科学利用应给予高度重视,应避免因不合理的人为活动破坏地表,同时对早期飞播林地进行及时的平茬更新处理,在部分流沙基本固定的沙地应适当更新林种,加强造林后的人为管护,以达到土地资源合理利用科学管理的目的。

[参考文献]

[1] Post W M, Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.

[2] 梁启鹏, 余新晓, 庞 卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.

Liang Q P, Yu X X, Pang Z, et al. Study on soil organic carbon density of different forest types [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 889-893. (in Chinese)

[3] 杨万勤, 张 健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学 [M]. 成都: 四川科学出版社, 2006: 1-2.

Yang W Q, Zhang J, Hu T X, et al. Forest soil ecology [M]. Chengdu: Sichuan Science Press, 2006: 1-2. (in Chinese)

[4] 胡会峰, 刘国华. 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1212-1218.

Hu H F, Liu G H. Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1212-1218. (in Chinese)

[5] Garten C T, Post W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the Southern Appalachian Mountains [J]. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115-145.

[6] Dvid P T, Greg J K. Carbon sequestration by forests of the United States: Current status and projections to the year 2040 [J]. Tellus, 1995, 47(1/2): 232-239.

[7] Sten N, Wolfgang S. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program [J]. Climatic Change, 1995, 30(3): 267-293.

[8] 张 城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析 [J]. 资源科学, 2006, 28(2): 97-103.

Zhang C, Wang S Q, Yu G R, et al. Soil organic carbon storage in typical forestland in east China [J]. Resources Science, 2006, 28(2): 97-103. (in Chinese)

[9] Mo J M, Brown S, Peng S L. Nitrogen availability in disturbed rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175: 573-583.

[10] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, et al. Annual fluxes or carbon from deforestation and re-growth in the Brazilian Amazon [J]. Nature, 2000, 403: 301-304.

[11] Arrouays D, Deslais W, Badeau V. The carbon content of top soil and its geographical distribution in France [J]. Land Use and Management, 2001, 17(1): 7-11.

[12] 陈 伟, 孟 梦, 李 江, 等. 云南热区 4 种林分土壤有机碳的比较研究 [J]. 西部林业科学, 2013, 42(3): 79-85.

Chen W, Meng M, Li J, et al. Comparison of soil organic carbon of four forests in tropical Yunnan [J]. Journal of West China Forestry Science, 2013, 42(3): 79-85. (in Chinese)

[13] 李 龙, 吴丽芝, 姚云峰, 等. 小流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究: 以内蒙古赤峰市黄花甸子流域为例 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 18-23.

Li L, Wu L Z, Yao Y F, et al. Spatial variations of organic carbon in small watershed: Taking Huanghuadianzi watershed as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 18-23. (in Chinese)

[14] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素 [J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1604-1616.

Sun W Y, Guo S L. The spatial distribution of soil organic carbon and it's influencing factors in hilly region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1604-1616. (in Chinese)

[15] 刘 艳, 查同刚, 付汝军. 百花山典型林分土壤有机碳储量及垂直分布特征 [J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 182-187.

Liu Y, Zha T G, Fu R J. Soil organic carbon storage and vertical distribution of different forest types in Baihua mountain area [J]. Acta Agriculturae Borealis-occidentalis Sinica, 2012, 21(3): 182-187. (in Chinese)

[16] 郭月峰, 姚云峰, 秦富仓, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳与其他土壤理化指标的关系 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(8): 103-109.

Guo Y F, Yao Y F, Qin F C, et al. Relationship between soil

organic carbon with other soil physical and chemical indexes of different land use types [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2013, 41(8): 103-109. (in Chinese)

[17] 黄从德, 张 健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
Huang C D, Zhang J, Yang W Q, et al. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1217-1225. (in Chinese)

[18] 周 莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99-105. (in Chinese)

[19] 曹吉鑫, 孙向阳, 高程达, 等. 宁夏贺兰山三种植被下土壤有机碳密度的比较 [J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1641-1644.
Cao J X, Sun X Y, Gao C D, et al. Comparison of soil organic carbon density under three vegetations in Helan Mountain of Ningxia [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1641-1644. (in Chinese)

[20] 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 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.
Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2875-2882. (in Chinese)

[21] 王文静, 王百田, 吕 钊, 等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 81-85.
Wang W J, Wang B T, Lü Z, et al. Soil organic carbon reserve of different forests in Taiyue mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 81-85. (in Chinese)

[22] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151-163.

(上接第 76 页)

[28] Chapin S F III, Matson P, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 2002.

[29] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. Europe Journal of Soils Science, 1996, 47: 151-163.

[30] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage [J]. Nature, 1985, 317: 613-616.

[31] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Huang C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)

[32] 孙 超. 基于生态化学计量学的草地退化研究: 以大安市姜家店草场为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Sun C. Study on grassland degeneration based on ecological stoichiometry: A study of Jiangjiadian meadow in Da'an city [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)

[33] 贾 宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应 [J]. 生态学报, 2011, 18(5): 166-170.
Jia Y, Xu B C, Li F M, et al. Availability and contributions of soil phosphorus to forage production of seeded alfalfa in semi-arid Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 18(5): 166-170. (in Chinese)

[34] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40: 523-534.