

科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C、N、P 储量和分配格局

胡亚林^{1,2}, 曾德慧^{1,*}, 姜 涛³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所 大青沟沙地生态实验站, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 辽宁省风沙地改良利用研究所, 阜新 123000)

摘要: 土地利用/覆被变化是影响陆地生态系统 C、N、P 循环过程的重要因素之一。退耕还林作为一种重要的土地利用/覆被变化, 受到国内外研究人员的广泛关注。以科尔沁沙地农田、5 年生杨树人工林和 10 年生杨树人工林为研究对象, 开展了退耕还林对生态系统 C、N、P 储量和空间格局影响的研究。结果发现: (1) 与农田相比, 退耕 5 年杨树人工林生态系统总的 C、N、P 储量下降, 然而 10 年生杨树人工林生态系统总的 C、N、P 储量升高, 其中植物生物量的 C、N、P 储量占生态系统总储量比例随着退耕还林年龄的增加逐渐增大; (2) 与 5 年生杨树人工林相比, 退耕还林 10 年的杨树人工林树叶、树枝、树干、树根和凋落物的 C、N、P 储量均显著增加 ($P < 0.05$), 不同元素 (C、N、P) 储量在退耕 5 和 10 年的杨树人工林各器官空间分配格局不同; (3) 与农田相比较, 退耕还林 5 年杨树人工林土壤 C、N、P 储量在不同土层 (0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm) 均表现出下降趋势, 而 10 年生杨树人工林土壤 C、N、P 储量在不同土层表现出增加趋势, 不同生态系统类型 (农田、5 年生杨树人工林和 10 年生杨树人工林) 土壤 C、N、P 储量在各土层分配格局不同。上述结果充分表明, 在我国科尔沁沙地将农田退耕为杨树人工林能够显著改变生态系统 C、N、P 储量和空间分配格局。

关键词: 土地利用/覆被变化; 退耕还林; C、N、P 储量; 分配格局; 杨树人工林

文章编号: 1000-0933 (2009) 08-4206-09 中图分类号: Q945 文献标识码: A

Effects of afforested poplar plantations on the stock and distribution of C, N, P at Keerqin Sandy Lands

HU Ya-Lin^{1,2}, ZENG De-Hui^{1,*}, JIANG Tao³

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Institute of Sandy Lands Improved and Use of Liaoning, Fuxin 123000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4206 ~ 4214.

Abstract: In recent decades converting agricultural land to plantation forestry has been one of the major land use/land cover changes in many countries, and such land use/land cover change can affect ecosystem C, N and P cycling. In this paper we investigated the effects of afforestation with poplar (*Populus simonii*) on the stock and distribution pattern of C, N and P in former agricultural lands. The sites selected were 5- and 10-year-old poplar plantations with adjacent agricultural lands as control. The results showed that: (1) total ecosystem C, N and P stocks decreased in the initial stages of plantation establishment but increased with the stand age and the proportion of biomass C, N and P in total ecosystem storage increased; (2) C, N and P stocks in leaf, branch, stem, root and forest floor in the 10-year-old plantations were significantly higher than in the 5-year-old plantations, and the distribution of C, N and P in different plant components were different between the 5- and 10-year-old plantations; (3) compared with the agricultural land, C, N and P stocks in the

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (30872011); 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD26B0201-1); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB106803)

收稿日期: 2008-05-21; 修订日期: 2009-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengdh@iae.ac.cn

mineral soil decreased in the 5-year-old plantation at the different soil depths (0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm and 40–60 cm) but increased in the 10 year-old plantation. In addition, we found that soil C, N and P distribution patterns among the three ecosystems were different. Our results indicated that agricultural lands afforestation with poplar affected the stock and distribution pattern of C, N, P at Keerqin Sandy Lands.

Key Words: land-use/land-cover change; agricultural land afforestation; C, N and P stocks; distribution patterns; poplar plantations

近 20a 来,土地利用/覆被变化(LUCC)及其对陆地生态系统影响的研究受到国内外学者的广泛关注^[1]。有关该领域的跨国研究项目不断增加,例如,美国 NASA 土地利用/覆被变化研究项目、美国政府气候变化科学项目中土地利用/覆被变化子项目、IGBP 土地利用/覆被变化核心项目以及国际应用系统分析研究所土地利用/覆被和农业项目等^[2]。土地利用/覆被变化是影响陆地生态系统 C、N、P 循环过程发生改变的重要因素之一^[3]。估计每年由于不合理的土地利用变化引起的碳排放量为 0.7~1.6 Pg (1 Pg = 10^{15} g)^[4], 大约 20 Tg (1 Tg = 10^{12} g) 的 N 被活化^[5],加剧了全球变化危机。

退耕还林(Grain for Green),即在退化荒地或农田上植树造林,已经成为世界许多国家应对全球气候变化的重要措施之一^[6~8]。目前,有关退耕还林对陆地生态系统 C 循环过程影响的研究被大量报道,研究表明:农田营造人工林后地上植物生物量库的 C 储量明显增加^[8~10]。然而,有关退耕还林对土壤 C 库储量和空间格局特征的影响比较复杂,仍然无法得到一致的研究结果。例如,Huntington 等^[11]研究美国东南部农田恢复为森林的 70a 期间,土壤 C 储量积累速率在 $0.34 \sim 0.79 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (1 Mg = 10^6 g),生物量中的 C 积累速率为 $1.47 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而 Vesterdal 等^[7]研究丹麦农田退耕造林 29a 后 0~5 cm 土壤 C 储量增加 $3.8 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 5~15 cm 和 15~25 cm 深度土壤 C 储量分别下降 $7.1 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.4 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其结果导致 0~25 cm 矿质土壤总 C 储量下降了 $11.8 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。研究地区、土壤质地、林分年龄、造林树种等多种因素均能够影响退耕还林后生态系统 C 储量和分配格局的变化^[12, 13]。此外,有研究也表明土壤 N、P 等养分储量和空间格局变化也受到多种因素的影响^[14, 15]。因此,研究不同地区退耕还林后生态系统 C、N、P 储量和空间格局变化特征具有重要理论和现实意义。

1999 年我国启动了“退耕还林”生态恢复建设工程项目,这是对我国林业生产布局进行的又一次重大战略性调整,整个工程造林面积达 $3.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中农田造林面积将达到 $1.46 \times 10^7 \text{ hm}^2$,截至 2007 年已经完成农田造林面积 $9.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[16]。国内许多学者比较了农田和林地这 2 种不同土地利用方式下生态系统 C、N、P 储量的变化。例如,吴建国等^[17, 18]开展了六盘山地区农田和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林生态系统植被和土壤 C 储量变化研究;王小利等^[19]开展了黄土丘陵区小流域农田和林地土壤 C 和 N 含量和分布的研究;迟光宇等^[20]开展了三江平原地区农田和天然林地土壤 C 动态变化的研究。然而,针对退耕还林工程对生态系统 C、N、P 储量影响的研究较少^[8, 21~24]。而且,上述研究主要是退耕还林对生态系统 C 储量及空间格局变化的研究,有关 N、P 储量和分配格局变化研究未见报道。

科尔沁沙地是我国北方典型农牧交错区,是内蒙古自治区重要的畜牧业和商品粮生产基地,也是我国东北大平原和腹地工业城市群生态环境的天然屏障。由于生态上的脆弱性和资源的不合理利用,近几十年来,本区土地荒漠化越来越严重,不仅严重制约着本地区经济的持续发展和人民生活水平的提高,而且对我国东北部的生态建设与经济发展也带来巨大的影响。因此,近 10a 来,该地区开展了大规模的退耕还林生态恢复建设。然而,有关科尔沁沙地退耕还林后生态系统 C、N、P 储量和空间分配格局变化的研究未见报道。因此,本文以科尔沁沙地地区农田、退耕 5a 和 10a 的杨树(*Populus simonii*)人工林为研究对象,开展了退耕还林后生态系统 C、N、P 储量和空间格局特征的研究,旨在从养分循环角度评价退耕还林的生态环境效果。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于科尔沁沙地东南缘大青沟沙地生态实验站区(42°45′~42°48′N, 122°13′~122°15′E), 属半干旱半湿润过渡气候区, 年均降水量 450 mm, 年均蒸发量 1300~1800 mm, 年均气温 6.4℃, 最高月平均气温 23.8℃, 最低月平均气温 -12.5℃。土壤类型主要为干润砂质新成土(*Ustipsamment*), 土壤有机质、N、P 含量较低, 颗粒组成以砂粒为主, 占 80% 以上^[25]。

在研究区内选择相邻的农田、退耕 5a 和 10a 的杨树人工林为研究对象, 各样地之间相距不到 500 m, 立地条件一致。农田主要以种植玉米为主, 施用化肥主要以硝酸铵为主, 施肥数量约 357 kg·hm⁻²·a⁻¹。5 年生杨树人工林是 2002 年造林, 整地方式采用穴垦; 5 年生杨树人工林平均树高 4.5 m, 胸径 5.6 cm, 密度约 1300 株·hm⁻² (株行距是 1.5 m × 6 m); 5 年生杨树人工林尚未郁闭, 仍然间作农作物 (种植方式与农田一致), 因此林地没有凋落物积累和林下植被存在。10 年生杨树人工林是 1997 年造林, 整地方式采用穴垦; 10 年生杨树人工林平均树高 9.7 m, 胸径 10.5 cm, 密度约 1600 株·hm⁻² (株行距是 1 m × 6 m); 10 年生杨树人工林基本郁闭, 林下无间作农作物, 林地表面积 1 层约 2~3 cm 厚度的凋落物, 林下植被比较稀疏, 覆盖度小于 5%。

1.2 研究方法

2007 年 5 月份末, 分别在 2 块杨树人工林样地设立 4 个 15 m × 15 m 样方, 测定样方内所有树木的树高 (m)、胸径 (cm) 和密度 (株·hm⁻²)。然后每个样方内分别选取 2 棵代表性的样木, 用于收集植物样品。用生长锥在树胸径高度 (1.3 m) 处钻取树干; 用高枝剪在树冠上下 1/3 处剪取树枝和树叶; 树根采用挖掘法收集。将 2 棵平均木收集的树干、树枝、树叶和树根等各部分植物样品分别混合为 1 个植物样。5 年生杨树人工林林地由于间种农作物, 林下几乎没有凋落物存在, 因此未做林下凋落物调查; 10 年生杨树人工林林地没有灌木和大型草本植物存在, 并且林下植被稀疏, 因此将其与林下凋落物一起收集。林下凋落物收集采用木框法收集, 在每个样方内用 50 cm × 50 cm 的木框随机收集 5 个样品, 混合为 1 个凋落物样品。在每个样方内, 随机选择 5 个取样点, 分别用土钻 (直径 = 2.5 cm) 取 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 不同土层的土壤样品, 然后按土壤层次分别混合为 1 个土壤样品。同时用环刀法测定各土层土壤容重。农田样地内设立 4 条 15 m × 60 m 的样带, 然后在每条样带内随机选择 5 个取样点, 分别用土钻 (直径 = 2.5 cm) 取 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 层次的土壤样品, 然后分别混合为 1 个土壤样品。同时用环刀法测定各土层土壤容重。农田主要为 1 年生农作物, 生物量中固持的 C、N、P 很快被移出生态系统, 所以本研究不做农田植物生物量 C、N、P 储量调查。

收集的土壤和植物样品迅速带回实验室。植物样品在 60℃ 条件下烘干 48h, 根系在烘干前用清水冲洗, 以便除去根系上的泥土。烘干的树干、树枝、树叶、树根和凋落物等样品用粉碎机粉碎, 保存于干燥器内, 留待分析。土壤样品在室温 (20℃) 条件下风干, 用手捡法去除植物残体, 磨碎后过 0.25 mm 筛。有机碳含量采用重铬酸钾法测定; 氮和磷含量采用流动注射分析仪测定 (AutoAnalyzer III, Bran + Luebbe, Germany)。

1.3 数据分析

树叶、树枝、树干和树根 C、N、P 储量计算方法如下:

根据已知的杨树生长曲线方程^[26]计算出植物各器官生物量, 然后乘以测定的 C、N、P 含量和相应林分密度, 即得到林分水平植物各器官的 C、N 和 P 储量。

凋落物的 C、N、P 储量计算方法如下:

$$\text{凋落物 C、N 和 P 储量} = \text{凋落物干质量} \times \text{凋落物 C、N、P 含量}$$

土壤 C、N、P 储量如下:

$$SOC_i = C_i \cdot B_i \cdot D_i \cdot (1 - G_i)$$

式中, SOC_i 为第 i 层土壤 C、N、P 储量, C_i 为第 i 层土壤 C、N、P 含量, B_i 、 D_i 和 G_i 分别为土壤容重、土壤层厚度和砾石含量。

数据经 Excel 整理后,利用 SPSS 13.0 软件包进行平均值、标准差和单因素方差(one-way ANOVA)分析,显著性检验水平为 $\alpha < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 退耕还林对生态系统总的 C、N、P 储量和分配格局影响

退耕还林后生态系统总的 C、N、P 储量发生了显著变化(表 1)。与农田相比,5 年生杨树人工林生态系统总的 C、N、P 储量分别下降了 13%、32% 和 8%,其中生态系统总 N 储量差异达到显著水平($P < 0.05$)。与农田相比,10 年生杨树人工林生态系统总的 C、N、P 储量分别增加了 176%、47% 和 42%,差异均达到显著水平($P < 0.05$);与 5 年生人工林相比,10 年生杨树人工林生态系统总的 C、N、P 储量分别增加了 217%、116% 和 55%,差异亦均达到显著水平($P < 0.05$)。表明,农田造林初期生态系统总的 C、N、P 储量表现出下降趋势,随着退耕还林年龄的增加,生态系统总的 C、N、P 储量能够逐渐恢复,甚至显著高于退耕前农田生态系统 C、N、P 储量。

表 1 退耕杨树人工林对生态系统总的 C、N、P 储量特征影响

Table 1 Characteristics of ecosystem total C, N and P stocks following agricultural land afforestation with the poplar plantations

样地 Stands	碳储量 C stock (Mg·hm ²)	氮储量 N stock (Mg·hm ²)	磷储量 P stock (Mg·hm ²)
农田 Agricultural land	18.24(2.67)b	1.29(0.16)b	0.48(0.06)b
5 年生人工林 5 year-old poplar plantation	15.86(0.39)b	0.88(0.01)c	0.44(0.02)b
10 年生人工林 10 year-old poplar plantation	50.30(2.42)a	1.90(0.08)a	0.68(0.01)a

表中数字为平均值($n=4$)和标准偏差 SD(括号内数字);同列不同字母表示差异显著 Mean ($n=4$) and standard deviation (in parentheses) were given; The different letter in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level

植物生物量和土壤 C、N、P 储量占生态系统总储量的比例如图 1a、1b、1c。土壤 C 储量所占比例分别为:农田 100%、5 年生杨树人工林 77% 和 10 年生人工林 50%;土壤 N 储量所占比例分别为:农田 100%、5 年生杨树人工林 96% 和 10 年生人工林 91%;土壤 P 储量所占比例分别为:农田 100%、5 年生杨树人工林 96% 和 10 年生人工林 86%。该结果表明,随着退耕还林年龄的增加土壤 C、N、P 储量在整个生态系统中所占的比例逐渐减小,而植物生物量 C、N、P 储量在整个生态系统中所占的比例逐渐增加。而且,植物生物量 C 储量占生态系统总 C 储量的比例增加最快,其次为 P,最后为 N。

2.2 退耕杨树人工林不同器官生物量 C、N、P 储量和空间格局特征

退耕还林后不同年龄杨树人工林生态系统植物不同器官生物量 C、N、P 储量和空间分配格局特征见表 2。与 5 年生人工林相比较,10 年生杨树人工林树叶、树枝、树干、树根和凋落物的 C、N、P 储量均显著增加($P < 0.05$)。5 年生人工林不同器官生物量 C 储量大小依次为:树干 > 树根 > 树枝 > 树叶 > ;N 储量大小依次为:树根 > 树叶 > 树枝 > 树干;P 储量大小依次为:树根 > 树干 > 树枝 > 树叶。10 年生杨树人工林不同器官生物量 C 储量大小依次为:树干 > 树根 > 树枝 > 凋落物 > 树叶;N 储量大小依次为:凋落物 > 树根 > 树叶 > 树干 > 树枝;P 储量大小依次为:树根 > 树干 > 凋落物 > 树枝 > 树叶。上述研究结果表明,农田退耕为杨树人工林后,随着人工林年龄的增加,植物不同器官生物量 C、N、P 储量均逐渐增加;不同年龄杨树人工林各器官生物量 C、N、P 储量的空间分配格局特征不同,并且不同元素(C、N、P)储量在 5 年生和 10 年生杨树人工林各器官分配格局特征亦存在差异。

2.3 退耕还林对土壤 C、N、P 储量和垂直分配格局的影响

农田退耕杨树人工林后土壤 C、N 和 P 储量发生改变(表 3)。与农田相比,5 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 C 储量分别下降了 9%、37%、54% 和 22%,其中 10~20 cm 和 20~40 cm 土壤 C 储量差异达到显著性水平($P < 0.05$);10 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 C 储量分别增加了 66%、52%、2% 和 55%,其中 0~10 cm、10~20 cm 和 40~60 cm 土壤 C 储量差异均达到显著性水平($P < 0.05$)。与农田相比,5 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40

~60 cm 土壤 N 储量分别下降了 11%、31%、56% 和 20%, 其中 10~20 cm 和 20~40 cm 土壤 N 储量差异达到显著性水平 ($P < 0.05$); 10 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 N 储量分别增加了 76%、45%、1% 和 45%, 其中 0~10 cm、10~20 cm 和 40~60 cm 土壤 N 储量差异均达到显著性水平 ($P < 0.05$)。与农田相比, 5 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土壤 P 储量分别下降了 7%、10% 和 29%, 而 40~60 cm 土壤 P 储量增加了 5%, 其中仅 20~40 cm 土壤 P 储量差异达到显著性水平 ($P < 0.05$); 10 年生杨树人工林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 P 储量分别增加了 34%、26%、7% 和 29%, 其中 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤 P 储量差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。比较不同退耕年龄杨树人工林不同土层 C、N 和 P 储量, 发现退耕 10 年的杨树人工林不同层次土壤 C、N、P 储量均显著高于退耕 5 年的杨树人工林 ($P < 0.05$)。研究结果表明, 农田造林初期不同深度土壤 C、N、P 储量出现不同程度的下降。然而, 随着杨树人工林年龄的增加, 土壤中 C、N、P 储量逐渐恢复到农田水平, 甚至显著高于农田水平。

农田退耕还林后土壤 C、N、P 储量在不同土层的分配格局同样发生改变 (表 3)。农田生态系统土壤 C 储量在 20~40 cm 土层所占比例最高, 5 年生和 10 年生杨树人工林在 40~60 cm 土层所占比例最高, 其次为 0~10 cm。农田和 10 年生杨树人工林土壤 N 和 P 储量在 20~40 cm 土层所占比例最高, 然而 5 年生杨树人工林土壤 N 和 P 储量在 40~60 cm 土层所占比例最高。

3 讨论与结论

农田或草地造林已经成为《京都议定书》框架下减缓 CO₂ 排放的一项重要有效措施^[27]。Richter 等^[28]研究表明, 美国南卡罗来那州耕种 100 多年的土地恢复为森林 40a 后生态系统 C 储量明显积累, 生物量 C 积累 14060 g·m⁻² (1957~1990 年), 凋落物层 C 积累 3780 g·m⁻² (1957~1997 年), 矿质土壤 C 积累 145 g·m⁻²

(1962~1990 年)。Hooker & Compton^[9]研究美国罗德艾兰州退耕还林后生态系统 C 和 N 储量变化, 发现农田恢复为森林的 115a 期间生态系统平均每年 C 积累 2.1 Mg·hm⁻², 其中 73% 的 C 分配在植物生物量中, 森林地被物占 17%, 矿质土壤占 6%; 然而, 生态系统 N 储量没有显著变化。吴建国等^[29]比较我国六盘山地区不同土地利用方式下生态系统 C 储量变化, 同样发现农田或草地生态系统转变为 13、18 年生和 25 年生落叶松人工林后生态系统 C 储量显著增加。李正才等^[30]研究四川省沐川县退耕还林生态系统 C 吸存能力, 也发现退耕还林能有效增加生态系统 C 储量。退耕还林后生态系统 C、N、P 储量的增加主要是由于植物生物量的积累, 并且随着退耕时间的增加生物量 C、N、P 储量占整个生态系统总储量的比例逐渐增加^[9,11]。杨景成

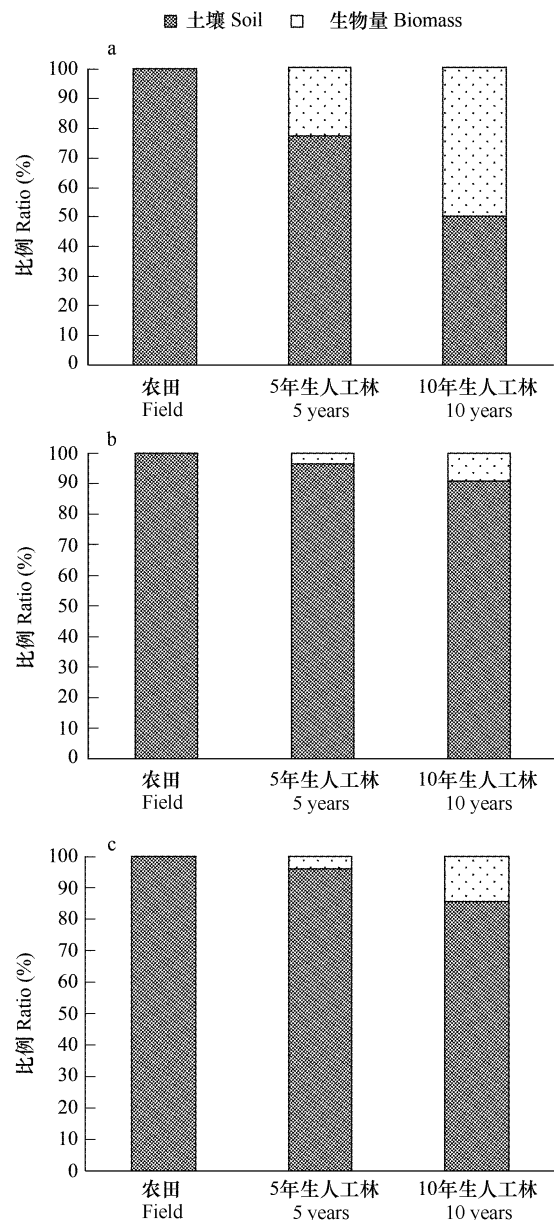


图1 退耕还林后植物生物量和土壤 C(a)、N(b)、P(c) 储量比例关系

Fig. 1 The ratios of C (a), N (b) and P (c) stocks between vegetation biomass and soil following agricultural land afforestation with the poplar plantations

等^[8]研究我国西双版纳农田弃耕转变为橡胶园后植被生物量和土壤 C 吸存能力,结果发现植物生物量固持 C 的速率为 $9.4 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $10.2 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而土壤固持 C 的速率仅为 $0.61 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.72 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与上述研究结果相一致,本研究发现退耕 10a 的杨树人工林生态系统总 C、N、P 储量增加均在 40% 以上;退耕 5a 的杨树人工林生物量较农田有所增加,但是由于土壤 C、N、P 储量较农田低,5 年生杨树人工林生态系统总储量仍然低于农田生态系统。此外,本研究没有考虑农田和 5 年生杨树人工林内种植的农作物生物量 C、N、P 储量情况,我们可能低估了农田和 5 年生杨树人工林生态系统的 C、N、P 储量。然而,有研究发现农田生态系统地上、地下生物量 C 储量分别为 $0.83 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.49 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,农田植物生物量 C 储量明显低于人工林生态系统^[29]。

表 2 退耕杨树人工林植物不同器官 C、N、P 储量和分配格局

Table 2 Characteristics of C, N and P stocks and distribution patterns in different plant components under the poplar plantations

项目 Items	5 年生人工林 5 year-old poplar plantation					
	碳储量 C stocks ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)	氮储量 N stocks ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)	磷储量 P stocks ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)
树叶 Leaf	0.24(0.00)	6.70	8.12(0.46)	25.60	2.61(0.27)	14.61
树枝 Branch	0.87(0.06)	24.30	6.81(1.27)	21.47	3.48(0.82)	19.48
树干 Stem	1.47(0.05)	41.06	4.07(0.75)	12.83	5.09(2.61)	28.50
树根 Root	1.00(0.03)	27.93	12.72(1.50)	40.10	6.68(0.82)	37.40
凋落物 Litter	—	—	—	—	—	—
合计 Total	3.58	100	31.72	100	17.86	100

项目 Items	10 年生人工林 10 year-old poplar plantation					
	碳储量 C stocks ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)	氮储量 N stocks ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)	磷储量 P stocks ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio(%)
树叶 Leaf	1.17(0.06)*	4.68	32.09(1.99)*	18.83	9.47(2.39)*	9.56
树枝 Branch	4.13(0.41)*	16.53	20.06(5.50)*	11.77	13.07(4.40)*	13.20
树干 Stem	11.46(0.21)*	45.86	20.33(10.72)*	11.93	24.91(12.02)*	25.15
树根 Root	5.74(0.22)*	22.97	47.87(1.27)*	28.09	33.91(9.53)*	34.24
凋落物 Litter	2.49(0.24)*	9.96	50.07(6.55)*	29.38	17.69(4.88)*	17.86
合计 Total	24.99	100	170.42	100	99.05	100

表中字为平均值($n=4$)和标准偏差 SD(括号内数字); * 表示植物不同器官生物量 C、N、P 储量差异显著 Mean ($n=4$) and standard deviation (in parentheses) were given. The asterisk indicate significant difference at $P<0.05$ level between C, N, P stock in different plant components

表 3 退耕杨树人工林土壤 C、N、P 储量和空间分配格局

Table 3 Characteristics of mineral soil C, N and P stocks and distribution patterns at different soil depth following agricultural land afforestation with poplar plantations

土壤 Soil (cm)	农田 Agricultural land		5 年生人工林 5 year-old poplar plantation		10 年生人工林 10 year-old poplar plantation	
	储量 Stocks ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio (%)	储量 Stocks ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio (%)	储量 Stocks ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	比例 Ratio (%)
C	0~10	3.94(0.39)b	22	3.56(0.83)b	29	6.52(0.56)a
	10~20	3.20(0.67)b	18	2.01(0.43)c	16	4.85(0.98)a
	20~40	6.22(1.36)a	34	2.88(0.34)b	23	6.37(0.66)a
	40~60	4.88(0.60)b	27	3.82(1.28)b	31	7.56(2.24)a
N	0~10	0.25(0.02)b	20	0.23(0.04)b	27	0.45(0.02)a
	10~20	0.25(0.03)b	19	0.17(0.02)c	20	0.36(0.06)a
	20~40	0.50(0.06)a	38	0.22(0.02)b	26	0.50(0.04)a
	40~60	0.29(0.08)b	23	0.23(0.06)b	28	0.42(0.10)a
P	0~10	0.10(0.01)b	21	0.10(0.01)b	23	0.14(0.01)a
	10~20	0.08(0.01)b	16	0.07(0.00)b	16	0.10(0.01)a
	20~40	0.17(0.02)a	36	0.12(0.01)b	29	0.19(0.01)a
	40~60	0.13(0.03)a	26	0.13(0.01)a	32	0.16(0.03)a

表中字为平均值($n=4$)和标准偏差 SD(括号内数字); 同行不同字母表示差异显著 Mean ($n=4$) and standard deviation (in parentheses) were given. The different letter in the same line indicate significant difference at $P<0.05$ level

本研究发现,退耕 10a 的杨树人工林比退耕 5a 的人工林生物量 C、N、P 储量分别增加了 5.98、4.37 和 4.55 倍。这与他人研究结果相一致,随着退耕还林时间的增加植物生物量 C、N、P 储量迅速增加^[8,10,18,23]。本研究中,退耕杨树人工林生物量 C、N、P 储量的空间分配格局不同。5 年生和 10 年生杨树人工林生物量 C 储量主要存在树干(分别占 41.06% 和 45.86%),其次为树根(分别为 27.93% 和 22.97%)。5 年生杨树人工林生物量 N 储量主要存在树根(40.10%)和树叶(25.60%)。然而,10 年生杨树人工林 N 储量主要存在凋落物(29.38%)和树根(28.09%)。5 年和 10 年生杨树人工林生物量 P 储量均是以树根中最多(分别 37.40% 和 34.42%)。这些研究结果与他人的研究一致。吴建国等^[18]研究不同年龄落叶松人工林植物生物量 C 储量分配格局,也发现生物量 C 储量主要分配于树干和树根。黄宇等^[31]研究发现 25 年生杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、火力楠人工林以及杉木火力楠混交林 3 个不同生态系统植被生物量 C 储量均是树干最高,其次为树根;N 储量主要存在树干,其次为树叶和树根。Hooker 等^[9]同样发现,不同退耕年龄的次生林生物量 C、N 储量空间分配格局特征不同。不同木本植物各器官生物量 C 含量变化不大,因此植物各器官 C 储量分配格局主要决定于各器官生物量占整个生态系统全部生物量的比例^[23]。不同树种植物生物量 C 储量主要分配在树干。然而,植物各器官 N 和 P 含量随树木物种不同存在较大差异。因此,不同树种植物生物量 N 和 P 储量分配格局不同,受到植物各器官生物量所占比例以及各器官相应的 N 和 P 含量的影响。

土壤中 C、N、P 储量的变化主要取决于土壤系统 C、N、P 元素输入和输出的动态平衡过程^[32,33]。土壤中有有机物质输入速率的增加,输入的有机物质易分解性的提高,土壤生物活性的提高以及通过形成土壤团聚体、有机-矿物复合体增加土壤有机质的物理性保护等过程有利于土壤 C、N、P 储量的增加^[34]。然而,土壤呼吸速率的增加、植物对 N 和 P 营养元素的吸收利用以及土壤可溶性有机 C、N、P 和无机态 N、P 的淋溶等过程能够导致土壤中的 C、N、P 储量下降^[33,35]。Vesterdal 等^[7]研究丹麦农田退耕造林对土壤 C 储量影响,发现退耕还林后土壤(0~25 cm)C 储量逐渐下降。Hooker & Compton^[9]研究发现,农田恢复成森林 100 多年后表层矿质土壤(0~20 cm)C 储量没有变化,N 储量下降。然而,深层土壤(20~70 cm)C 储量有所增加,N 储量没有变化。王春梅等^[24]研究不同退耕年限落叶松人工林土壤有机 C 储量变化,发现退耕还林后土壤有机 C 储量逐渐下降,退耕还林 12a 的落叶松人工林土壤有机 C 储量最低,大约下降了 13.5%;随后土壤 C 储量逐渐增加,退耕还林 33a 后土壤有机碳储量比农田大约增加 21%。吴小山等^[23]研究我国四川省农田退耕为桦木(*Betula L.*)人工林土壤 C 储量变化,同样发现退耕还林后土壤(0~60cm)C 储量下降约 6 Mg·hm⁻²。Paul 等^[13]综述了全球不同地区造林对土壤有机 C 储量影响的研究结果,发现农田或草地造林后在最初的 5a 期间,土壤碳储量下降约 3.64%,随后逐渐增加,30a 后土壤 C 储量通常高于最初的农田土壤 C 储量。农田转变为森林后土壤中 C、N、P 储量和分配格局的变化受造林树种、退耕还林时间、土壤背景等多种因素的影响^[12,13]。本研究发现,农田退耕还林初期 10~20 cm 和 20~40 cm 土壤 C、N、P 储量显著下降,可能是因为来源于地上地下生物量较小,通过凋落物和根系等归还到土壤中的有机物质相对较少;同时,由于造林整地、植树等过程的干扰导致来源于农田的土壤有机质分解和 N、P 养分流失加快,从而引起土壤 10~20 cm 和 20~40 cm C、N、P 储量的下降^[7]。然而,与农田相比,5 年生杨树人工林 0~10 cm 表层土壤 C、N、P 储量差异不显著。5 年生杨树人工林仍然间作农作物,由于农作物施有机无机肥管理以及来源于农作物凋落物的输入,在一定程度上能够平衡退耕还林初期表层土壤有机碳的流失^[36]。随着退耕年限的增加,来源于杨树人工林地上凋落物的积累和地下根系生物量的增加以及人为干扰作用的减少,从而使得 10 年生杨树人工林不同土层 C、N、P 储量均显著高于农田和 5 年生杨树人工林。

上述研究结果可以看出,在我国北方科尔沁沙地实施退耕还林有可能成为一个重要的陆地“碳汇”,尤其是植被生物量 C、N、P 储量随着退耕年龄的增加显著提高。土壤 C、N、P 储量虽然在退耕还林初期有所降低,然而随着退耕还林年龄的增加,土壤 C、N、P 储量能够逐渐恢复,甚至显著高于农田土壤 C、N、P 储量。减少造林整地干扰、保护林下凋落物等人工林管理措施将有利于退耕还林后生态系统 C、N、P 储量的增加。然而,许多文献报道大面积营造人工林可能导致地下水位下降,尤其在干旱半干旱地区^[37]。因此,今后有必要进一

步加强有关科尔沁沙地退耕还林生态环境效应的研究。

References:

- [1] Vitousek P M. Beyond global warming: Ecology and Global Change. *Ecology*, 1994, 75: 1861 — 1876.
- [2] Chen G S, Tian H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31: 189 — 204.
- [3] Parfitt R L, Scott N A, Ross D J, Salt G J, Tate K R. Land-use change effects on soil C and N transformations in soils of high N status: comparisons under indigenous forest, pasture and pine plantation. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 203 — 221.
- [4] IPCC. IPCC Third Assessment Report Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7: 737 — 750.
- [6] IPCC. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [7] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169: 137 — 147.
- [8] Yang J C, Huang J H, Tang J W, Pan Q M, Han X G. Carbon sequestration in rubber tree plantations established on former arable lands in Xushuangbanna, SW China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29: 296 — 303.
- [9] Hooker T D, Compton J E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. *Ecological Applications*, 2003, 13: 299 — 313.
- [10] Thuille A, Schulze E D. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. *Global Change Biology*, 2006, 12: 325 — 342.
- [11] Huntington T G. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the Southeastern USA. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1459 — 1467.
- [12] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345 — 360.
- [13] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168: 241 — 257.
- [14] Ritter E. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant and Soil*, 2007, 295: 239 — 251.
- [15] Smal H, Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant and Soil*, 2008, 305: 171 — 187.
- [16] Chen X G, Zhang X Q, Zhang Y P, Wan C B. Carbon sequestration potential of the stands under the Grain for Green program in Yunnan Province, China. *Forest Ecology and Management*. DOI: 2008. 10.1016/j.foreco.2008.07.010.
- [17] Wu J G, Zhang X Q, Xu Y D. Impact of land-use change on soil carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 593 — 599.
- [18] Wu J G, Zhang X Q, Xu Y D, Zhu G. The storage of biomass carbon under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Forest Research*, 2006, 19(3): 277 — 283.
- [19] Wang X L, Guo S L, Ma Y H, Huang D Y, Wu J S. Effects of land use type on soil organic C and total N in a small watershed in loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18: 1281 — 1285.
- [20] Chi G Y, Wang J, Chen X, Shi Y. Dynamic changes of soil organic carbon (SOC) of different land use types in Sanjiang Plain. *Soils*, 2006, 38: 755 — 761.
- [21] Chen L Z, Xiao W F, Tang W P, Pan L, Shi Y H. Study on soil organic carbon under several reafforestation patterns in the Three Gorges Reservoir area. *Scientia Silvae Sinica*, 2007, 43(4): 111 — 114.
- [22] Long J, Deng Q Q, Jiang X R, Liu F. Effects of different de-farming and reafforestation patterns on changes of soil fertility quality in karst region of southwestern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16: 1279 — 1284.
- [23] Wu X S, Huang C D. Carbon density, storage and distribution in birch forest ecosystem on the forestland converted from farmland. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26: 323 — 326.
- [24] Wang C M, Liu Y H, Shao B, Zhao J G. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 112 — 119.
- [25] Li F X, Chen L H, Di X M, Qi S Z. Taxonomic classification of Sandic Entisols in China. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(zl): 26 — 32.
- [26] Liang W J, Hu H Q, Liu F J, Zhang D M. Research advance of biomass and carbon storage of poplar in China. *Journal of Forest Research*, 2006,

17(1): 75—79.

- [27] Smith K A. After the Kyoto Protocol: Can soil scientists make a useful contribution? *Soil Use and Management*, 1999, 15: 71—75.
- [28] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, Wells C G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature*, 1999, 400: 56—58.
- [29] Wu J G, Zhang X Q, Xu Y D. The assessment of the impacts of land use change on the ecosystem carbon sink. *Engineering Science*, 2003, 5(9): 65—71.
- [30] Li Z C, Fu M Y, Xie J Z, Zhou B Z, Xiao T Q, Wu M. Carbon sequestration of 5 ecological reestablishment vegetation types in Muchuan County of Sichuan. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, 21(4): 382—387.
- [31] Huang Y, Feng Z W, Wang S L, Feng Z Z, Zhang H X, Xu Y R. C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25: 3146—3154.
- [32] Baldock J A. Composition and cycling of organic carbon in soil. In: Marschner P and Rengel Z. eds. *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Berlin: Springer, 2007. 1—35.
- [33] Davis M R, Condon L M. Impact of grassland afforestation on soil carbon in New Zealand: A review of paired-site studies. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40: 675—690.
- [34] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317—327.
- [35] McNeill A, Unkovich M. The nitrogen cycle in terrestrial ecosystem. In: Marschner P and Rengel Z. eds. *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Berlin: Springer, 2007. 37—64.
- [36] Li H B, Han X Z, Wang F. Review of soil carbon and nitrogen cycling under long-term fertilization. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38: 384—388.
- [37] Jackson R B, Banner J L, Jobbagy E G. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418: 623—626.

参考文献:

- [2] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31: 189~204
- [8] 杨景成, 黄建辉, 唐建维, 潘庆民, 韩兴国. 西双版纳农田弃耕后橡胶园的建立对碳固存作用. *植物生态学报*, 2005, 29: 296~303
- [17] 吴建国, 徐德应, 张小全. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15: 593~599.
- [18] 吴建国, 张小全, 徐德应, 朱高. 六盘山林区几种土地利用方式植被活体生物量 C 贮量的研究. *林业科学研究*, 2006, 19(3): 277~283
- [19] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 黄道友, 吴金水. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机和全氮的影响. *应用生态学报*, 2007, 18: 1281~1285.
- [20] 迟光宇, 王俊, 陈欣, 史奕. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化. *土壤*, 2006, 38: 755~761
- [21] 陈亮中, 肖文发, 唐万鹏, 潘磊, 史玉虎. 三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究. *林业科学*, 2007, 43(4): 111~114.
- [22] 龙健, 邓启琼, 江新荣, 刘方. 西南喀斯特地区退耕还林(草)模式对土壤肥力质量演变的影响. *应用生态学报*, 2005, 16: 1279~1284.
- [23] 吴小山, 黄从德. 退耕还林地桦木林生态系统碳素密度、贮量与空间分布. *生态学杂志*, 2007, 26: 323~326.
- [24] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 赵景刚. 量化退耕还林后土壤碳变化. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3): 112~119
- [25] 李福兴, 陈隆亨, 邸醒民, 齐善忠. 中国砂质新成土的系统分类. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 26~32.
- [29] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. *中国工程科学*, 2003, 5(9): 65~71.
- [30] 李正才, 傅懋毅, 谢锦忠, 周本智, 肖体全, 吴明. 沐川县退耕还林生态恢复地碳截留效应的研究. *浙江林学院学报*, 2004, 21(4): 382~387.
- [31] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. *生态学报*, 2005, 25: 3146~3154
- [36] 李海波, 韩晓增, 王凤. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展. *土壤通报*, 2007, 38: 384~388.