

DOI: 10.5846/stxb202112283676

王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 林泽生, 李乔妹, 叶有华. 中国亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征. 生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.

Wang W H, Yu Y N, Xie J Q, Lin Z S, Li Q M, Ye Y H. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1793-1803.

# 中国亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征

王薇菡<sup>1</sup>, 虞依娜<sup>1,\*</sup>, 谢嘉淇<sup>1</sup>, 林泽生<sup>2</sup>, 李乔妹<sup>2</sup>, 叶有华<sup>3</sup>

1 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

2 广州市林业和园林局, 广州 510030

3 仲恺农业工程学院园林园艺学院, 广州 510225

**摘要:** 碳汇林的固碳效益十分显著, 是实现“碳中和”的主要碳增汇途径之一, 在研究亚热带地区不同造林模式碳汇林土壤碳汇的同时, 研究碳汇林土壤氮、磷储量及土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征, 能够为不同造林模式碳汇林的土壤碳、氮、磷储量的评估提供科学依据。采取单因素随机区组设计, 选择立地条件基本一致的研究区和 4 种造林模式(新造林、封山育林、补植套种、更新改造)的碳汇林, 分析了不同造林模式土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的含量、储量、生态化学计量比, 以及微生物生物量碳(MBC)的变化特征。结果表明, 不同造林模式碳汇林的土壤理化性质, 碳氮磷储量、化学计量比及微生物生物量碳含量差异显著, 且土壤碳氮磷储量随土壤深度增加而减少, 表现出明显的垂直变化特征。4 种造林模式下碳氮比(C/N)介于 11.11—17.86, 碳磷比(C/P)介于 17.00—242.59, 氮磷比(N/P)介于 1.18—15.99 之间, 在 0—60 cm 土层上均以更新改造模式林最低, 封山育林模式下 C/P 和 N/P 均显著高于其他造林模式。土壤 SOC 与 TN、N/P 呈极显著正相关关系, 土壤 TN 与 C/P 呈极显著正相关关系。综合来看, 封山育林模式土壤的碳、氮含量和储量最高, 而磷含量最低, 说明封山育林模式更有利于土壤碳、氮的累积, 而后期表现出土壤磷的缺乏, 可能会限制封山育林模式碳汇林后期的碳汇功能。更新改造模式碳汇林的土壤养分限制少, 后期碳汇潜力较大。

**关键词:** 土壤养分; 化学计量; 造林模式; 碳汇林; 亚热带

## Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns

WANG Weihuan<sup>1</sup>, YU Yina<sup>1,\*</sup>, XIE Jiaqi<sup>1</sup>, LIN Zesheng<sup>2</sup>, LI Qiaomei<sup>2</sup>, YE Youhua<sup>3</sup>

1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Guangzhou Municipal Bureau of Forestry and Landscape, Guangzhou 510030, China

3 College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China

**Abstract:** Carbon sink forests is one of the effective ways to achieve "carbon neutrality". Besides soil carbon (C) sink, soil nitrogen (N), phosphorus (P) stocks and stoichiometry were investigated under different afforestation patterns, which provides the theoretical basis for estimating soil nutrition stocks. A single-factor randomized block design was used to investigate C, N, and P contents, stocks, their stoichiometric characteristics and soil microbial biomass carbon in soils with

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(31100402); 广东省自然科学基金项目(S2011040001125); 广东省林业科技创新专项资金项目(2015KJCX028); 广州市林业科技项目(201806)

**收稿日期:** 2021-12-28; **网络出版日期:** 2022-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzyyn@163.com

different soil depths under four afforestation patterns including new afforestation, closed mountain afforestation, replanting, and regeneration. The results showed that the storage of soil C, N, and P decreased with soil depth. The range of soil C/N, C/P and N/P under the four afforestation patterns were 11.11—17.86, 17.00—242.59 and 1.18—15.99, respectively. Soil C/P and N/P under closed mountain afforestation were significantly higher than the other afforestation patterns, while regeneration pattern showed the lowest. The soil C was positively correlated to soil N and N/P, soil N was positively correlated with C/P. In summary, the content and stock of soil C and N were the highest under closed mountain afforestation, while phosphorus content was the lowest, indicating that the closed mountain afforestation is an effective afforestation to promote the accumulation of soil carbon and nitrogen. However, the capacity of soil carbon sink under closed mountain afforestation may be weakened by soil phosphorus limitation. Regeneration pattern has less nutrition limitation, which has great potential to sequestration carbon.

**Key Words:** soil nutrients; ecological stoichiometry; afforestation pattern; carbon sequestration forest; subtropical

2020年9月中国政府宣布,中国将争取在2060年前实现“碳中和”<sup>[1]</sup>。实现“碳中和”依赖于碳减排和碳增汇,碳增汇的核心是生态保护、建设和管理<sup>[2]</sup>。陆地生态系统通过光合作用和碳循环过程,将大气中的CO<sub>2</sub>固定下来,成为大气CO<sub>2</sub>的重要碳汇。为了有效地增强陆地生态系统的固碳能力,需要通过“最优的生态系统布局、最优的物种配置、最优的生态系统管理”,以实现“宜林(草)则林(草)、适地适树(草)、最优管理”的碳汇最大化目的<sup>[2]</sup>。碳汇造林是以增加森林碳汇为主要目的,对造林和林木生长全过程实施碳汇计量和监测而进行的造林活动<sup>[3]</sup>,它是通过森林生态系统的建设与改造实现“碳中和”的主要碳增汇途径之一,是人类应对全球气候变化的重要手段之一。

森林生态系统是陆地生态系统的固碳主体,发挥了巨大的固碳潜力。森林植被中储存着全球植被总碳储量的86%左右,森林土壤中储存着全球土壤总碳储量的73%左右<sup>[4]</sup>。近年来,土壤的碳汇潜力引起了广泛的关注。碳汇造林可以提升森林生产力、改善土壤质量、改变养分循环及土壤微生物生物量及酶活性等<sup>[5-7]</sup>,进而产生不同的碳汇功能。夏江宝等<sup>[8]</sup>研究了不同造林模式对土壤碳、氮影响的生态效应,结果表明,相较于纯林,农林间作模式更能有效提升土壤碳氮含量。徐芷君等<sup>[9]</sup>研究发现,马尾松林土壤有机碳含量及储量在补植阔叶树后显著增加近一倍。徐英明等<sup>[10]</sup>前期开展了不同造林模式碳汇林的土壤碳汇功能的研究,结果表明不同造林模式之间碳储量及碳储量增幅存在显著差异。此外,土壤总有机碳约有5%存在于微生物生物量组分中,微生物生物量碳比土壤有机碳对环境变化的响应更灵敏和显著<sup>[11]</sup>。对于陆地生态系统碳循环,土壤微生物不仅可以通过分解代谢将碳释放到大气中,还可以通过合成代谢将外源碳转化为储存在土壤中的碳汇<sup>[12]</sup>。土壤微生物碳同化的效率可以用土壤微生物熵(qMB)表征,即微生物生物量碳与土壤有机碳的比值( $C_{mic}/C_{soil}$ ),同时也是土壤生物对环境响应的敏感指标<sup>[13]</sup>。已有很多研究探讨了随植被恢复不同演替阶段土壤微生物生物熵的变化<sup>[14]</sup>。因此,在研究不同造林模式碳汇林土壤碳储量的同时,比较不同碳汇林的土壤微生物生物量碳能够更好地理解土壤碳储量变化。

除了土壤碳储量,土壤氮磷储存及碳、氮、磷之间的耦合对陆地生态系统可持续性有重要作用<sup>[15-16]</sup>。许多研究表明造林再造林能够增加土壤养分固持能力,且不同造林模式下土壤养分固持能力有所差异,土壤理化性质也有各自的变化特征。但大多数研究集中于土壤碳汇能力,而忽略了土壤氮、磷的养分变化以及其化学计量比的变化,而这也是决定陆地生态系统能否长期持续发挥碳汇功能的重要因素<sup>[17-21]</sup>。另外,氮、磷是植物必需的大量元素,参与许多生理生态过程,且与土壤碳汇过程紧密相关<sup>[22]</sup>。碳、氮、磷元素对环境因子、空间分布的响应具有良好的耦合关系<sup>[23]</sup>。土壤养分元素化学计量是衡量元素间耦合关系的重要指标。生态化学计量学对于揭示碳、氮、磷之间的相互关系具有重要意义,研究森林土壤的生态化学计量特征有助于加深对于森林生态系统养分循环、对全球气候变化的响应、人类干预的影响等方面的理解<sup>[24-25]</sup>。

因此,在前期研究不同造林模式碳汇林土壤碳汇功能的基础上<sup>[10]</sup>,本文选择华南普遍采用的4种碳汇造

林模式的碳汇林,重点研究土壤氮、磷的储量、微生物生物量碳含量以及碳、氮、磷之间的化学计量特征,据此综合分析不同碳汇造林模式的碳、氮、磷储量与化学计量的差异,以为亚热带碳汇造林提供理论依据和技术指导。

## 1 研究区概况

研究区位于广州市从化区和增城区(北纬  $23^{\circ}23'22''$ — $23^{\circ}45'13''$ ,东经  $113^{\circ}21'31''$ — $113^{\circ}45'41''$ 之间),监测样点和样地主要选自广州市北部的碳汇林地(图 1),平均海拔约 94.37 m,年均温约  $20$ — $22^{\circ}\text{C}$ ,属亚热带季风型湿润气候。土壤以赤红壤为主,成土母质为花岗岩和砂页岩,砂砾含量高而黏粒含量偏低<sup>[26]</sup>。研究区域森林植被属于亚热带常绿阔叶林。现有的森林多为人工林,保存完整的天然次生林较少。

## 2 材料与方法

### 2.1 碳汇造林基线情景的确定

实施造林再造林项目之前依照联合国气候变化框架公约(UNFCCC)和国家林业局对于碳汇造林的要求制定一个参照情景即基线,碳汇造林基线代表了未进行项目时的碳吸收和碳排放的历史状况<sup>[27]</sup>。碳汇造林即在确定了基线的土地上开展造林活动,其目的是增加森林碳汇能力<sup>[27]</sup>。基线的确定是为了保证碳汇造林的额外性原则:即项目边界内的净碳汇增量是由项目所产生的,而非因为外部环境变化等因素引起的<sup>[28]</sup>。经前期资料调取以及现场踏查,广州市于 2012 年开始碳汇造林,研究样地造林前均为宜林荒山,有少量次生林,且样地地表及地下碳库处于稳定或退化状态,其碳储量变化为零<sup>[10]</sup>。

### 2.2 样地设置

本研究选取的 4 种造林模式均从 2015 年起对基线情景采用带状清理并开始造林,不同造林模式采取的造林措施如下:

(1)新造林:造林对象为的宜林的荒山荒地,通过新造林恢复其森林植被,增大森林面积,使其发挥更好的碳汇能力。

(2)封山育林:对破坏退化情况较轻,乔灌木具在的林分,具有天然萌蘖能力,依靠森林的自我调节与更新能力进行植被恢复,无人工炼山、整地等活动,禁止人为进入干扰森林发育。

(3)补植套种:造林对象是生态功能水平较低的疏林(残林),林木稀疏。林地内有部分幼树,而且分布较均匀,有一定的天然更新能力,通过适度采伐、施肥补植、套种乡土阔叶树种,提高森林质量与效益,改善区域生态环境。

(4)更新改造:对现有的低效纯松林和低效桉树林进行疏伐,然后选用碳汇效果好的乡土阔叶树种,通过人工植苗方法重新造林,优化森林结构,营建针阔混交林,提高森林质量与生物多样性,从而增加森林碳汇能力。

在每个造林模式下选取典型地段,设置 3 个重复  $20\text{ m}\times 20\text{ m}$  的样方,共 12 个样方,作为固定样地进行长期定位观测研究,4 种造林模式样地的基本特征及树种组成见图 1 和表 1。

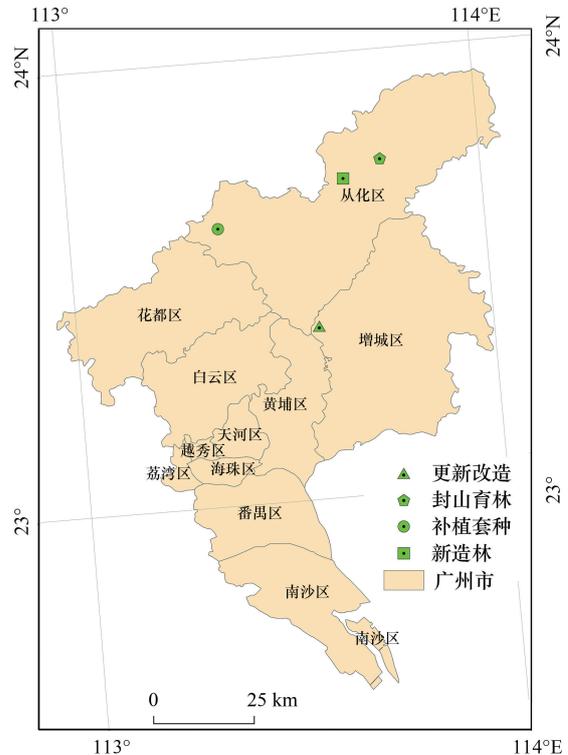


图 1 研究区域位置与研究样地分布

Fig.1 Location of study site and distribution of study plots

表 1 不同造林模式碳汇林地基本概况

Table 1 Basic information of carbon forests with different afforestation patterns

| 造林模式<br>Afforestation patterns        | 优势树种<br>Dominant tree species   | 海拔/m<br>Altitude | 坡向<br>Aspect | 坡度/(°)<br>Slope |
|---------------------------------------|---|------------------|--------------|-----------------|
| 新造林<br>New afforestation              | 木荷( <i>Schima superba</i> )、枫香( <i>Liquidambar formosana Hance</i> )、红花荷( <i>Rhodoleia championii</i> )、乐昌含笑( <i>Michelia chapensis</i> ) | 99.9             | 西南           | 28              |
| 封山育林<br>Closed mountain afforestation | 木荷( <i>Schima superba</i> )、红锥( <i>Castanopsis hystrix</i> )、华润楠( <i>Machilus chinensis</i> )   | 108              | 西南           | 36              |
| 补植套种<br>Replanting                    | 木荷( <i>Schima superba</i> )、枫香( <i>Liquidambar formosana Hance</i> )  | 89.5             | 西南           | 32              |
| 更新改造<br>Regeneration                  | 木荷( <i>Schima superba</i> )、枫香( <i>Liquidambar formosana Hance</i> )、火力楠( <i>Michelia macclurei</i> )                                     | 92.3             | 西南           | 18              |

### 2.3 土样的采集与测定

因为土壤养分在表层(0—20 cm)的分布和变化最明显,最具代表性<sup>[29]</sup>。每个样方内按照品字型采样法选择3个采样点,每个采样点分3层,按0—20 cm层、20—40 cm层、40—60 cm层采集土壤样品。每层取土样500 g左右。土样自然风干后先过2 mm筛,再以四分法取适量样品磨细过0.2 mm或0.15 mm的筛。

土壤容重和总孔隙度等土壤物理性状指标采用环刀法测定,pH值采用电位法(土水比1:2.5),含水量采用烘干法,用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>法测定土壤有机碳(SOC),土壤全氮(TN)用半微量凯氏定氮法测定,土壤全磷(TP)选择HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消解后用钼锑抗比色法测定,土壤中铵态氮、硝态氮、土壤速效磷含量采用比色法测定<sup>[30]</sup>。土壤微生物生物量碳含量测定采用定采用氯仿熏蒸浸提法<sup>[31]</sup>。

### 2.4 土壤碳氮磷储量的计算

采用下式计算土壤单位面积碳、氮、磷的储量:

$$\text{碳储量 (tc/hm}^2\text{): } T = \sum_1^i 0.1 \times E_i \times D_i \times C_i (1 - G_i) \quad (1)$$

$$\text{氮储量 (tc/hm}^2\text{): } T = \sum_1^i 0.1 \times E_i \times D_i \times N_i (1 - G_i) \quad (2)$$

$$\text{磷储量 (tc/hm}^2\text{): } T = \sum_1^i 0.1 \times E_i \times D_i \times P_i (1 - G_i) \quad (3)$$

式中, $E_i$ 代表第*i*层土层厚度(cm); $D_i$ 代表第*i*层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $C_i$ 代表第*i*层土壤碳含量(gC/kg); $N_i$ 代表第*i*层土壤氮含量(gC/kg); $P_i$ 代表第*i*层土壤磷含量(gC/kg); $G_i$ 代表第*i*层直径大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%);0.1为单位换算系数。

### 2.5 数据处理

统计采用Excel 2019对本文数据进行初步处理。用SPSS 25.0软件对数据进行描述分析,应用单因素方差分析的最小显著差异法(LSD)法对不同造林模式森林土壤的理化性质和碳、氮、磷储量及化学计量比进行显著性检验( $P=0.05$ ),土壤理化性质与碳氮磷储量和比值之间的相关性采用Pearson分析。采用双因素方差分析研究了造林模式和土壤深度及其相互作用对土壤SOC、TN、TP储量和碳氮比(C/N)、碳磷比C(/P)和氮磷比(N/P)的影响( $P=0.05$ ),并通过CANOCO 5.0软件进行冗余分析(RDA),分析土壤碳、氮、磷化学计量特征与土壤pH、容重、含水量、土壤铵态氮含量、硝态氮含量、土壤微生物生物量碳含量土壤等环境因子之间相关关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同造林模式碳汇林的土壤理化性质的差异

结果表明,不同造林模式碳汇林土壤的容重、含水量、pH、SOC、TN和TP均存在显著差异( $P<0.01$ ),而不同土壤深度之间这些土壤指标并无显著性差异(表2)。

为了进一步研究不同造林模式的影响,本研究比较了各种碳汇林0—60 cm土壤理化性质平均值的差异(表3)。结果表明,与其他三种造林模式相比,更新改造模式显著降低了土壤容重,增加了土壤含水量,表现

出较好的土壤物理性质;而新造林模式下土壤容重显著高于其他造林模式,土壤含水量显著低于其他造林模式( $P<0.05$ )。

表 2 造林模式和土壤深度对土壤理化性质、碳氮磷储量及化学计量比的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of afforestation patterns and soil depth on soil physicochemical properties, stocks and stoichiometry of C, N and P

| 因素<br>Factors | 土壤容重<br>Soil bulk density | 含水量<br>Moisture | pH         | 有机碳<br>Organic carbon | 全氮<br>Total nitrogen | 全磷<br>Total phosphorus | 微生物生物量碳<br>Microbial biomass carbon | 碳储量<br>Carbon storage | 氮储量<br>Nitrogen stock | 磷储量<br>Phosphorus stock | 碳氮比<br>C/N | 碳磷比<br>C/P | 氮磷比<br>N/P |
|---------------|---------------------------|-----------------|------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| A             | 14.455 ***                | 47.908 ***      | 44.250 *** | 6.294 ***             | 6.332 ***            | 83.533 ***             | 4.812 ***                           | 2.680                 | 3.844 *               | 57.803 ***              | 5.204 **   | 17.014     | 18.264 *** |
| B             | 6.652                     | 0.203           | 0.153      | 1.379                 | 1.085                | 0.503                  | 0.547                               | 4.122 *               | 6.724 *               | 18.686 ***              | 2.839      | 1.211      | 0.680      |
| A×B           | 0.794                     | 0.882           | 0.353      | 0.187                 | 0.229                | 0.095                  | 0.268                               | 0.089                 | 0.125                 | 4.658 ***               | 0.243      | 0.299      | 0.291      |

A 表示造林模式,B 表示土壤深度。\* 表示  $P<0.05$  的显著性; \* \* 表示  $P<0.01$  的显著水平; \* \* \* 表示  $P<0.001$  的显著水平

表 3 不同造林模式碳汇林的土壤理化性质(平均值±标准差)

Table 3 Soil physicochemical properties of carbon forests under different afforestation patterns (Mean±SD)

| 造林模式<br>Afforestation patterns        | 土壤容重<br>Soil bulk density/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | pH         | 含水量<br>Water content/<br>(g/kg) | 有机碳<br>Organic carbon/<br>(g/kg) | 全氮<br>Total nitrogen/<br>(g/kg) | 全磷<br>Total phosphorus/<br>(g/kg) |
|---------------------------------------|--|------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 新造林<br>New afforestation              | 1.248±0.14a  | 5.11±0.45a | 117.16±11.59c                   | 4.50±0.86b                       | 0.331±0.03b                     | 0.06±0.00b                        |
| 封山育林<br>Closed mountain afforestation | 1.016±0.10bc                                       | 5.12±0.45a | 156.79±26.40b                   | 13.07±8.04a                      | 0.89±0.53a                      | 0.08±0.02b                        |
| 补植套种<br>Replanting                    | 1.074±0.16b  | 4.43±0.11b | 152.76±12.34b                   | 5.82±1.63b                       | 0.37±0.07b                      | 0.07±0.00b                        |
| 更新改造<br>Regeneration                  | 0.896±0.12c  | 4.44±0.21b | 210.58±7.28a                    | 6.97±1.88b                       | 0.56±0.35b                      | 0.27±0.05a                        |

不同小写字母代表具有显著性差异( $P<0.05$ )

4 种造林模式下土壤 SOC 含量和 TN 含量均表现为封山育林模式的最高,由大到小依次为封山育林>更新改造>补植套种>新造林;封山育林显著提高了 0—20 cm 土壤碳、氮含量,而 20—60 cm 不同造林模式的碳、氮含量没有显著变化(图 2);更新改造样地 0—20 cm 土壤 TP 含量显著高于其他三种造林模式( $P<0.01$ )。

### 3.2 不同造林模式碳汇林的土壤碳、氮、磷储量和化学计量特征

结果表明,不同造林模式显著影响土壤碳、氮、磷储量和化学计量比(表 4)。0—20 cm 土壤中,土壤 SOC 储量和 TN 储量均在封山育林模式下最高,显著高于其他造林模式,表现出较好的固碳、固氮能力;土壤 TP 储量在更新改造模式下最高,且更新改造模式在土壤固氮方面也有较好表现,仅次于封山育林。封山育林的土壤 C/P、N/P 值均显著高于其他三种造林模式,分别为 145.14 和 9.97;显著高于我国森林土壤平均值(61、9.3)<sup>[32]</sup>。而 C/N、C/P 和 N/P 最低的均为更新改造模式,分别为 12.49、27.19 和 2.21。此外,同一造林模式不同土壤深度下碳、氮、磷储量差异显著(图 3),土壤碳、氮、磷储量整体上随土壤深度的加深而显著降低。

### 3.3 不同造林模式碳汇林的土壤微生物生物量碳差异

结果表明,不同造林模式碳汇林的表层土壤(0—20 cm)微生物生物量碳含量显著差异(表 5),封山育林模式的土壤微生物生物量碳含量显著高于新造林模式,而其它造林模式间无显著差异。微生物生物量碳占土壤总有机碳库的 1.42%—3.08%(平均值为 2.17%),高于中国森林的平均值 1.92%<sup>[12]</sup>。

### 3.4 土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比之间的相关性

相关分析结果表明,0—60 cm 所有土层的土壤碳、氮含量及 N/P 呈极显著正相关关系,土壤氮含量与(C/P)呈极显著正相关关系,土壤的微生物生物量碳与碳、氮含量呈极显著正相关关系,而微生物生物量碳仅在 0—20 cm 土层与 N/P 呈显著正相关关系(表 6)。

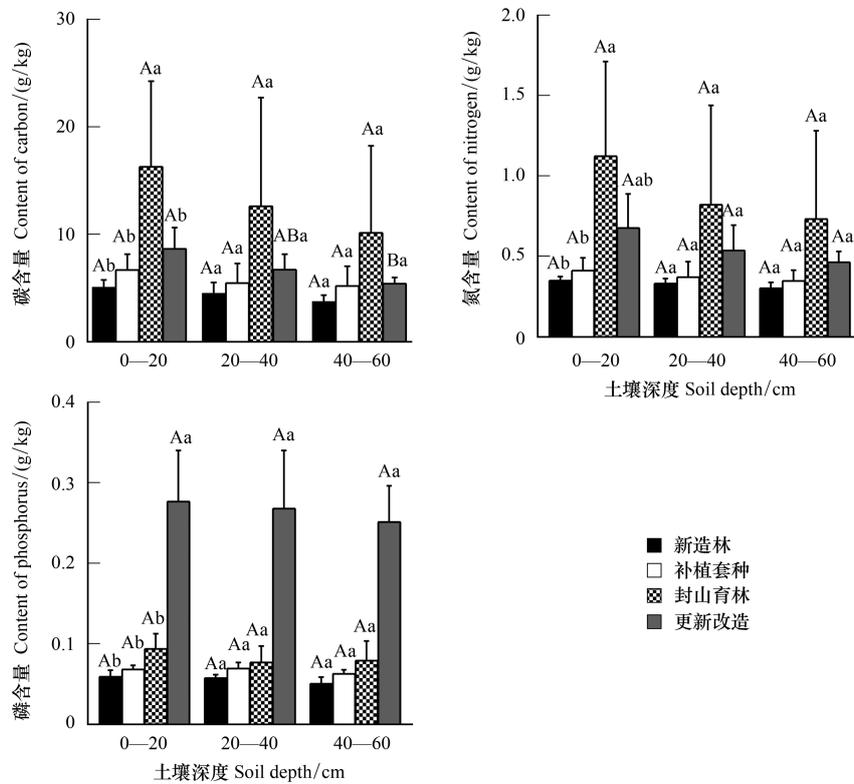


图 2 不同造林模式碳汇林土壤碳氮磷含量

Fig.2 Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents of carbon forests under different afforestation patterns

不同小写字母表示相同深度不同造林模式间的差异显著,不同大写字母表示同一造林模式不同土壤深度的显著性差异( $P < 0.05$ )

表 4 不同造林模式碳汇林的土壤养分储量及化学计量特征(平均值±标准差)

Table 4 Soil physicochemical properties and stoichiometry of C, N and P of carbon forests under different afforestation patterns (Mean±SD)

| 造林模式<br>Afforestation patterns         | 有机碳储量<br>Organic carbon stocks/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 氮储量<br>Total nitrogen stocks/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 磷储量<br>Total phosphorus stocks/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 微生物生物量碳<br>Microbial biomass carbon/<br>(mg/kg) | 碳氮比<br>C/N   | 碳磷比<br>C/P    | 氮磷比<br>N/P |
|--|---|---|---|---|--------------|---------------|------------|
| 新造林 New afforestation                  | 65.45±9.58b   | 4.97±0.73b  | 0.84±0.12b  | 103.30±60.69b                                   | 13.50±1.58ab | 80.77±16.53b  | 5.97±0.97b |
| 封山育林<br>Closure mountain afforestation | 129.80±32.54a   | 9.96±2.28a  | 1.00±0.16b  | 207.76±81.93a                                   | 14.45±1.11a  | 145.14±60.05a | 9.97±3.83a |
| 补植套种 Replanting                        | 72.31±13.61b  | 4.94±0.86b  | 0.88±0.15b  | 151.35±29.80ab                                  | 15.22±2.12a  | 85.86±19.43b  | 5.60±0.72b |
| 更新改造 Regeneration                      | 70.19±8.57b   | 5.79±0.81ab   | 2.88±0.46a  | 142.61±17.31b                                   | 12.49±1.08b  | 27.19±9.08c   | 2.21±0.82c |

表 5 不同造林模式碳汇林的土壤微生物生物量碳/(mg/kg)

Table 5 Soil microbial biomass carbon of carbon forests under different afforestation patterns

| 土壤深度 Soil depth/cm                     | 0—20 cm                | 20—40 cm              | 40—60 cm               |
|--|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 新造林 New afforestation                  | 88.99±47.81Ab (1.73)   | 137.10±90.96Aa (3.01) | 83.83±39.82Aa (2.20)   |
| 封山育林<br>Closure mountain afforestation | 231.21±93.27Aa (1.42)  | 200.72±69.89Aa (1.58) | 191.35±109.38Aa (1.88) |
| 补植套种 Replanting                        | 141.31±51.27Aab (2.10) | 166.39±5.72Aa (3.08)  | 146.34±19.05Aa (2.77)  |
| 更新改造 Regeneration                      | 146.63±15.95Aab (1.68) | 149.63±8.50Aa (2.22)  | 131.82±2.45Aa (2.41)   |

括号内为微生物生物量碳对土壤有机碳的贡献率(%),即土壤微生物生物熵;不同小写字母表示同一土壤深度不同造林模式间的差异,不同大写字母表示同一造林模式下不同土壤深度之间的差异( $P < 0.05$ )

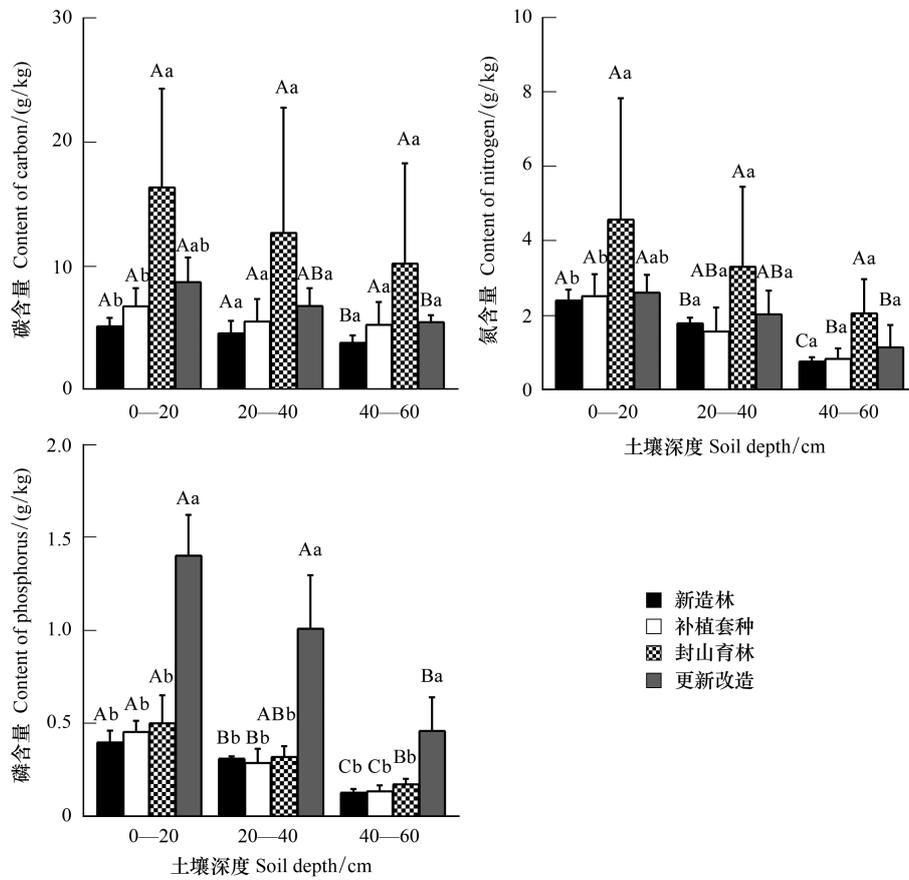


图 3 不同造林模式碳汇林土壤的碳氮磷储量

Fig.3 Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of carbon forests under different afforestation patterns

表 6 土壤碳、氮、磷含量与生态化学计量比之间的相关性

Table 6 The correlation coefficients between C, N, P content and their stoichiometry

|         | 土壤深度<br>Soil depth/cm | 碳<br>C   | 氮<br>N   | 磷<br>P  | 碳氮比<br>C/N | 碳磷比<br>C/P | 氮磷比<br>N/P |
|---------|-----------------------|----------|----------|---------|------------|------------|------------|
| 碳 C     | 0—20                  | 1        | 0.987 ** | 0.081   | —          | —          | 0.795 **   |
|         | 20—40                 | 1        | 0.986 ** | 0.031   | —          | —          | 0.806 **   |
|         | 40—60                 | 1        | 0.985 ** | 0.057   | —          | —          | 0.716 **   |
| 氮 N     | 0—20                  |          | 1        | 0.174   | —          | 0.658 *    | —          |
|         | 20—40                 |          | 1        | 0.103   | —          | 0.772 **   | —          |
|         | 40—60                 |          | 1        | 0.149   | —          | 0.659 *    | —          |
| 磷 P     | 0—20                  |          |          | 1       | -0.557     | —          | —          |
|         | 20—40                 |          |          | 1       | -0.249     | —          | —          |
|         | 40—60                 |          |          | 1       | -0.382     | —          | —          |
| 微生物生物量碳 | 0—20                  | 0.780 ** | 0.790 ** | 0.062   |            |            | 0.595 *    |
|         | 20—40                 | 0.601 ** | 0.602 ** | -0.067  |            |            | 0.566      |
|         | 40—60                 | 0.885 ** | 0.870 ** | 0.584 * |            |            | 0.539      |

\* 表示  $P < 0.05$  的显著性; \*\* 表示  $P < 0.01$  的显著水平; \*\*\* 表示  $P < 0.001$  的显著水平

为了更好地揭示土壤因子与生态化学计量比之间的关系,采用冗余分析(RDA)对不同土壤层理化环境因子进行蒙特卡洛检验(Monte-Carlo),得到0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm各层土壤理化因子相关关系程度的排序(表7)。结果表明,0—20 cm土层的理化因子的重要性由大到小排序为:土壤含水量、土壤微生物

生物量碳、铵态氮,其中土壤含水量和微生物生物量碳对土壤碳、氮、磷化学计量特征影响显著( $P < 0.05$ )。20—40 cm 土层的理化因子的重要性由大到小排序为:土壤含水量、微生物生物量碳、土壤容重,其中土壤含水量对土壤碳、氮、磷化学计量特征影响显著( $P < 0.05$ )。40—60 cm 土层的理化因子的重要性由大到小排序为:微生物生物量碳、土壤含水量、土壤容重,其中微生物生物量碳和土壤含水量对土壤碳、氮、磷化学计量特征影响显著( $P < 0.05$ )。

表 7 基于冗余分析的土壤理化性质的环境变量

Table 7 The RDA results of environmental variables on soil physicochemical properties

| 土壤深度/cm<br>Soil depth | 指标<br>Factors | 重要性排序<br>Importance ranking | <i>F</i> | <i>P</i> |
|-----------------------|---------------|-----------------------------|----------|----------|
| 0—20                  | 土壤含水量         | 1                           | 16.3     | 0.004    |
| 20—40                 | 土壤含水量         |                             | 10       | 0.014    |
| 40—60                 | 微生物生物量碳       |                             | 14.3     | 0.018    |
| 0—20                  | 微生物生物量碳       | 2                           | 11.4     | 0.008    |
| 20—40                 | 微生物生物量碳       |                             | 3.4      | 0.082    |
| 40—60                 | 土壤含水量         |                             | 5.4      | 0.036    |
| 0—20                  | 铵态氮           | 3                           | 4.8      | 0.052    |
| 20—40                 | 土壤容重          |                             | 2.4      | 0.154    |
| 40—60                 | 土壤容重          |                             | 1.9      | 0.216    |

## 4 讨论

### 4.1 不同碳汇林土壤碳、氮、磷储量的差异及成因分析

植树造林可以提高土壤养分含量和储量并改善土壤的碳汇能力<sup>[33-34]</sup>。然而,不同的造林模式养分封存能力也有所不同,主要是通过改变土壤养分的输入和输出量的平衡来控制土壤碳、氮的积累和释放速率,从而进一步影响土壤碳、氮的含量和储量<sup>[35]</sup>。封山育林造林模式的目的在于最大程度减少森林受人为干扰,从而使林分得到自然演替和更新。马少杰等<sup>[36]</sup>在研究北亚热带植被恢复研究中表明,封山育林可以显著增加土壤有机碳、全氮含量;曹军等<sup>[37]</sup>在研究海南岛生态系统碳储量变化中指出,海南在实施禁伐和封育措施后,森林碳储量能力显著增加。本研究不同造林模式对碳、氮、磷含量以及储量均有显著影响,封山育林模式下土壤碳、氮含量和储量显著高于其他造林模式。一般认为,枯落物和植物根系能够有效减少土壤碳的流失<sup>[38]</sup>。由于土壤碳元素主要来源于凋落物和根系的输入,因此不同造林模式的凋落物差异会在一定程度上影响土壤碳的含量及储量。封山育林造林模式人为干扰少,保留了更多的地表枯落物,进而有更多来自凋落物的有机碳的输入,增加了土壤对有机碳、氮的截存。值得注意的是,更新改造模式在土壤养分固持能力表现较好,土壤氮含量和储量仅次于封山育林模式,且土壤磷含量和储量显著高于其他造林模式。土壤化学计量比对于养分平衡也有重要指示作用,土壤 C/N 比会影响有机质矿化分解速率,进而影响碳、氮、磷元素的积累。结果表明,更新改造模式下化学计量比显著低于其他模式,表征了其较高的有机质分解速率和养分利用效率。可能是由于更新改造模式针叶林中混交阔叶树改善了林分组成结构。此外不同土壤结构、理化性质下有机碳的分解速率不同,也会影响土壤中的养分固存。研究表明<sup>[39-40]</sup>,土壤物理性质也通过影响土壤水分含量和土壤微生物等来控制凋落物的分解进而控制土壤中的养分含量。

碳汇造林或自然植被恢复可能会通过改变土壤性质,如温度、水分、pH、质地、速效养分、碳、氮、磷比值,以及地表植物残体的有机质输入来影响土壤微生物生物量和群落结构<sup>[41-42]</sup>。本研究结果表明,不同碳汇林表层土壤(0—20 cm)的微生物生物量碳含量有极显著差异,而 20—60 cm 的微生物生物量碳含量无显著差异。这可能与表层土壤具有更多的凋落物和较高的有机质含量有关<sup>[23, 43-44]</sup>。此外,微生物生物量碳与土壤碳、氮含量存在显著正相关关系,即土壤微生物生物量碳与土壤中可利用的碳、氮的变化同步。

总体来看,封山育林模式累积土壤碳、氮的效果较好,更新改造模式使过去植被结构单一的低效纯松林演变为如今的针阔混交林,土壤物理结构得到改善,土壤氮、磷累积效果较好,土壤微生物碳也有所增加。有研究表明,相较于更新造林前的纯林,选用乡土阔叶树种进行更新造林后,土壤微生态环境以及土壤物理性状均有明显改善<sup>[45-46]</sup>。此外,徐芷君等<sup>[9]</sup>研究表明,通过混交阔叶树更新改造低效针叶林可显著增加针叶林土壤氮储量,并改变土壤碳氮磷生态化学计量特征。可以看出,封山育林模式在增加碳储量方面更具优势,而更新改造模式在改善土壤物理结构和土壤中氮、磷累积方面更具优势。

#### 4.2 不同碳汇林土壤碳、氮、磷化学计量特征的差异及成因分析

碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生长中最基本的营养元素,其生态化学计量学特征能够表征植物的生长状况以及对养分的利用效率<sup>[47]</sup>。C/N和C/P与土壤有机质的矿化和分解速率成反比。较低的C/P有利于微生物分解有机质和释放养分,进一步导致土壤中有效磷含量不断增加,也是土壤中磷的高利用率的原因<sup>[41]</sup>。

本研究结果表明,更新改造模式土壤C/N、C/P和N/P值最低,而封山育林模式和补植套种模式均有较高的C/N和C/P值,且均高于我国土壤C/N和C/P的平均值12和61<sup>[32]</sup>,说明这两种模式下有机质的积累速率高于分解速率,提高了土壤碳、氮含量和储量,增强了养分净固持能力。研究表明,C/P比值低,可以促进土壤微生物对有效磷的释放,进而减轻土壤P元素对植物生长的限制<sup>[48]</sup>,这说明更新改造模式碳汇林土壤氮、磷的限制最小,这有利于后期植物的生长和森林的碳汇功能。而封山育林模式的N/P显著高于中国土壤平均值9.3<sup>[32]</sup>,表征该模式下土壤磷限制严重。

研究区土壤呈现出较高的C/P值,说明研究区内磷的有效性较低,随着碳汇林植物群落的继续生长,P元素可能会成为碳汇功能增长的主要限制因子。这与张芸等<sup>[49]</sup>研究结果一致,即杉木林生长到成熟林时期,土壤中P元素可利用性降低。且有研究表明,我国近年来氮沉降不断增加,从而导致氮磷的比例失衡,使得磷成为限制生态过程主要因素。可见,如果考虑到未来碳汇林后期碳汇功能的生长,从磷养分限制角度,更新造林模式未来碳汇功能的潜力较大。同时也说明在南亚热带碳汇林的抚育管理中,土壤磷的补充尤为重要。

## 5 结论

(1)封山育林模式碳汇林土壤的碳、氮含量和储量最高,其微生物生物量碳也最高,而磷含量最低,说明封山育林模式更有利于土壤碳、氮的累积,后期容易出现土壤磷缺乏的问题。

(2)更新改造模式的碳汇林土壤生态化学计量比值最低,说明土壤养分限制少,其后期的碳汇潜力较大;而封山育林碳汇林的C/P和N/P最高,说明相较于其它造林模式,封山育林模式的土壤存在一定程度的磷限制,可能会限制其后期的碳汇功能。

#### 参考文献(References):

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] 方精云. 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [3] 陈先刚, 赵晓惠, 陆梅. 造林再造林项目碳汇能力有效性判别. 东北林业大学学报, 2009, 37(10): 99-101.
- [4] Six J, Callewaert P, Lenders S, de Gryze S, Morris S J, Gregorich E G, Paul E A, Paustian K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [5] 邵水仙, 董智, 李红丽, 张钦敬, 许婷婷. 不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响. 水土保持学报, 2015, 29(01): 263-267.
- [6] 张雅茜, 方晰, 冼应男, 王振鹏, 项文化. 亚热带区4种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征. 生态学报, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [7] Berger T W, Neubauer C, Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. Forest Ecology and Management, 2002, 159(1-2): 3-14.
- [8] 夏江宝, 陈印平, 王贵霞, 任加云. 黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征. 生态学报, 2015, 35(14): 4633-4641.
- [9] 徐芷君, 刘苑秋, 方向民, 陈伏生, 刘晓君, 刘鹏溟, 袁新月, 吴高洋. 亚热带2种针叶林土壤碳氮磷储量及化学计量比对混交响应.

- 水土保持学报, 2019, 33(01): 165-170.
- [10] 徐英明, 虞依娜, 李鑫, 李昊, 何明威, 林森. 南亚热带不同造林模式碳汇土壤碳积累与碳汇功能. 生态学报, 2019, 39(01): 355-362.
- [11] Schimel J P, Schaeffer S M. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 96-102.
- [12] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [13] Zhou Z H, Wang C K. Reviews and syntheses: soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems. *Biogeosciences*, 2015, 12(22): 6751-6760.
- [14] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 胡璟, 罗明霞, 李亚非, 石松林, 吴德勇, 肖玖金. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征. 生态学报, 2021, 41(12): 4900-4912.
- [15] Luo Y, Su B, Currie W S, Dukes J S, Finzi A, Hartwig U, Hungate B, McMurtrie R E, Oren R, Parton W J, Pataki D E, Shaw R, Zak D R, Field C B. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bioscience*, 2004, 54(8): 731-739.
- [16] Finzi A C, Moore D J P, DeLucia E H, Lichter J, Hofmockel K S, Jackson R B, Kim H S, Matamala R, McCarthy H R, Oren R, Pippin J S, Schlesinger W H. Progressive nitrogen limitation of ecosystem processes under elevated CO<sub>2</sub> in a warm-temperate forest. *Ecology*, 2006, 87(1): 15-25.
- [17] Van Groenigen K J, Six J, Hungate B A, de Graaff M A, van Breemen N, van Kessel C. Element interactions limit soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(17): 6571-6574.
- [18] He N, Yu Q, Wu L, Wang Y, Han X. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(12): 2952-2959.
- [19] Goll D S, Brovkin V, Parida B R, Reick C H, Kattge J, Reich P B, van Bodegom P M, Niinemets. Nutrient limitation reduces land carbon uptake in simulations with a model of combined carbon, nitrogen and phosphorus cycling. *Biogeosciences*, 2012, 9(9): 3547-3569.
- [20] Cleveland C C, Houlton B Z, Smith W K, Marklein A R, Reed S C, Parton W, del Grosso S J, Running S W. Patterns of new versus recycled primary production in the terrestrial biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(31): 12733-12737.
- [21] Li R, Chang R Y. Effects of external nitrogen additions on soil organic carbon dynamics and the mechanism. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(10): 1012-1020.
- [22] Shi S, Peng C, Wang M, Zhu Q, Yang G, Yang Y, Xi T, Zhang T. A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation. *Plant and Soil*, 2016, 407(1-2): 323-340.
- [23] Cao Z, Fang X, Xiang W, Lei P, Peng C. The vertical differences in the change rates and controlling factors of soil organic carbon and total nitrogen along vegetation restoration in a subtropical area of China. *Sustainability*, 2020, 12(16): 6443.
- [24] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005(06): 141-153.
- [25] 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(08): 3937-3947.
- [26] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲地区森林生物量及其动态. 应用生态学报, 2007(04): 705-712.
- [27] 国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室. 造林项目碳汇计量与监测指南. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [28] 武曙红, 宋维明. CDM 造林再造林项目源汇估计的不确定性源及其估算方法. 林业科学, 2010, 46(04): 31-36.
- [29] Ahirwal J, Maiti S K, Reddy M S. Development of carbon, nitrogen and phosphate stocks of reclaimed coal mine soil within 8 years after forestation with *Prosopis juliflora* (Sw.) Dc. *Catena*, 2017, 156: 42-50.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 12-20.
- [32] Tian H, Chen G, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [33] Cheng X, Yang Y, Li M, Dou X, Zhang Q. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Plant and Soil*, 2013, 366(1-2): 415-424.
- [34] Wei X, Li X, Jia X, Shao M. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 637-646.
- [35] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏, 郭熙, 匡丽花, 叶英聪. 江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响. 环境科学学报, 2018, 38(06): 2486-2497.
- [36] 马少杰, 李正才, 周本智, 格日乐图, 孔维健, 安艳飞. 北亚热带天然次生林封山育林对土壤肥力质量的影响. 江西农业大学学报, 2011, 33(02): 328-334.
- [37] 曹军, 张懿铨, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002(05): 551-560.

- [38] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2005(10): 2662-2668.
- [39] Wei D, Zhou B, Ma X, Chen X, Zhang J. Soil microbial properties of black soil under long-term fertilisation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2014, 63(S2): 195-199.
- [40] Dilekoglu M F, Sakin E. Effect of temperature and humidity in soil carbon dioxide emission. *Journal of Animal and Plant Sciences-Japs*, 2017, 27(5): 1596-1603.
- [41] Liang J, Wang X A, Yu Z D, Dong Z M, Wang J C. Effects of vegetation succession on soil fertility within farming-plantation ecotone in Ziwuling mountains of the loess plateau in China. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(10): 1481-1491.
- [42] Wei Y, Yu L F, Zhang J C, Yu Y C, Deangelis D L. Relationship between vegetation restoration and soil microbial characteristics in degraded karst regions: a case study. *Pedosphere*, 2011, 21(1): 132-138.
- [43] Wei J, Cheng J, Li W, Liu W. Comparing the effect of naturally restored forest and grassland on carbon sequestration and its vertical distribution in the Chinese Loess Plateau. *Plos One*, 2012, 7(7): e40123.
- [44] Li D, Shao M. Soil organic carbon and influencing factors in different landscapes in an arid region of northwestern China. *Catena*, 2014, 116: 95-104.
- [45] 王凌云, 喻荣岗, 万佳蕾, 徐爱珍, 杨洁. 马尾松纯林与枫香木荷混交林土壤微生态环境差异分析. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(12): 82-86.
- [46] 任启文, 毕君, 李联地, 王超, 尤海舟. 冀北山地 3 种森林植被恢复类型对土壤质量的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1818-1824.
- [47] Agren G I, Weih M. Plant stoichiometry at different scales: element concentration patterns reflect environment more than genotype. *New Phytologist*, 2012, 194(4): 944-952.
- [48] 陈婵, 张仕吉, 李雷达, 刘兆丹, 陈金磊, 辜翔, 王留芳, 方晰. 中亚热带植被恢复阶段植物叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2019, 43(08): 658-671.
- [49] 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗垲, 马祥庆. 不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2019, 39(07): 2520-2531.