

DOI: 10.5846/stxb201911132408

杨静, 张耀艺, 谭思懿, 王定一, 岳楷, 倪祥银, 廖姝, 吴福忠, 杨玉盛. 亚热带不同树种土壤水源涵养功能. 生态学报, 2020, 40(13): 4594-4604.
Yang J, Zhang Y Y, Tan S Y, Wang D Y, Yue K, Ni X Y, Liao S, Wu F Z, Yang Y S. Soil water conservation functions of different plantations in subtropical forest. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4594-4604.

亚热带不同树种土壤水源涵养功能

杨 静¹, 张耀艺¹, 谭思懿¹, 王定一^{1,2}, 岳 楷^{1,2}, 倪祥银^{1,2}, 廖 姝^{1,2,*}, 吴福忠^{1,2},
杨玉盛^{1,2}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要: 亚热带地区由于大面积的砍伐使天然林被人工林所代替, 对森林土壤水源涵养功能造成了很大影响。树种可以通过自身特性来改变土壤物理结构进而影响土壤持水能力, 因此合理选择树种对区域水源涵养具有重要意义。然而, 立地条件的差异往往会对实验结果产生影响。为减少立地条件的差异, 2012 年 2 月在土壤发育和经营历史相同的林地上建立了中亚热带常见树种同质园。2019 年 8 月测定了种植 12 个树种后不同土层 (0—10、10—20、20—30、30—40 cm 和 40—50 cm) 的土壤容重、含水量、总/毛管/非毛管孔隙度、最大/毛管/非毛管持水量和蓄水量。结果表明, 种植不同树种 7 年后, 土壤容重、含水量、总/毛管/非毛管孔隙度、最大/毛管/非毛管持水量和蓄水量均在表层 (0—20 cm) 土壤中差异显著, 而在深层 (20—50 cm) 土壤中差异不显著。土壤孔隙度、持水量和蓄水量均与土壤容重呈显著负相关关系, 而与土壤含水量呈显著正相关关系。与其他树种相比, 种植鹅掌楸、枫香和全缘叶栾树等落叶阔叶树种可在较短时间内增加土壤孔隙度, 提高土壤持水量和蓄水量。因此, 在亚热带人工林经营管理中, 可在杉木、马尾松纯林中适当引入鹅掌楸、枫香和全缘叶栾树等落叶阔叶树种, 提升亚热带森林土壤水源涵养功能。

关键词: 水源涵养; 土壤持水量; 土壤孔隙度; 同质园; 亚热带森林

Soil water conservation functions of different plantations in subtropical forest

YANG Jing¹, ZHANG Yaoyi¹, TAN Siyi¹, WANG Dingyi^{1,2}, YUE Kai^{1,2}, NI Xiangyin^{1,2}, LIAO Shu^{1,2,*},
WU Fuzhong^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Large amounts the subtropical natural forests have been replaced by plantations due to deforestation in the past decades. This conversion may affect the soil water conservation functions. Plantations of local dominant trees may change soil physical structure and further alter soil water holding capacity through their biological properties, so tree selection for plantation is very important for regional water conservation. However, the heterogeneity of the studied sites made the experimental results uncertain with low reliability. To reduce this heterogeneity, a common-garden was established in a subtropical forest by planting twelve trees dominated in this area at a forest stand with the same parent material and forest management at the Sanming Research Station of Forest Ecosystem and Global Change, Fujian Province, China, in February 2012. The soil bulk densities, water contents, porosities (total, capillary and non-capillary), water holding capacities (maximum, capillary and non-capillary), and water storage capacities (maximum, capillary and non-capillary at 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm, and 40—50 cm depth) under the twelve local dominant trees were determined

基金项目: 国家自然科学基金 (31800521, 31670526, 31800373, 31922052)

收稿日期: 2019-11-13; 网络出版日期: 2020-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liaos@fjnu.edu.cn

in August 2019. Our results showed that significant differences in bulk densities, gravimetric water contents, porosities (total, capillary and non-capillary) and water holding and storage capacities (maximum, capillary and non-capillary) among the soils planted with different trees were only observed in surface soils (0—20 cm), while there was no significant difference in deep soils (20—50 cm). Soil porosity, water holding capacity and water storage capacity (either in capillary or in non-capillary) were negatively related to soil bulk density but were positively correlated with soil water content. The soil porosities, water holding capacities and water storage capacities were greater in soils planted with *Liriodendron chinense*, *Liquidambar formosana* and *Koelreuteria bipinnata* after seven years of plantation compared with other plantations. These results suggest that these broadleaved trees can be planted together with *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations during forest management for improving the water conservation functions of the humid subtropical forests in Southern China.

Key Words: water conservation function; soil water holding capacity; soil porosity; common-garden; subtropical forest

水源涵养功能是森林生态系统重要的服务功能之一,是森林与水的相互作用关系在生态系统服务的集中体现^[1]。普遍认为,森林的林冠层、枯落物层和土壤层等通过拦截和吸收降水,使降水被充分蓄积和重新分配,这种调节降水的能力就是水源涵养功能^[2]。其中,土壤作为森林发挥水文效应的主要场所,能调节 90% 的大气降水,是森林生态系统水源涵养功能的重要组成部分^[3-5]。此外,土壤还能延缓地表径流和减少水土流失,对森林生态的保护和修复具有重要意义^[6]。因此,研究森林土壤水源涵养功能至关重要。

我国亚热带森林被称为“北回归线荒漠带上的绿洲”,但大面积的天然常绿阔叶林曾被砍伐,取而代之的是杉木、马尾松、巨桉等人工林。森林破坏初期林地内的土壤受到极大干扰,这对原有森林土壤水源涵养功能造成很大影响。同时,人工林的营造也会影响土壤水源涵养功能,其树种的不同可能是导致人工林土壤水源涵养功能差异的主要原因之一^[7-8]。因此,合理选择树种是亚热带森林经营中亟待解决的问题。然而,以往关于树种对土壤性质影响的研究多在气候、土壤发育、林龄相近的样地间进行比较^[9-10],很难评估立地条件差异的影响。已有研究表明,通过在土壤基质、林龄和森林经营历史相同的均质条件下开展同质园实验,可在最大程度上降低土壤自身差异造成的影响^[11]。但截至目前,利用同质园实验来探讨不同树种土壤水源涵养功能差异的研究十分缺乏。

为此,本研究于 2012 年 2 月在土壤发育、经营历史、坡向坡度相同的林地上建立了中亚热带常见树种同质园。并于 2019 年 8 月测定了种植 12 个树种后不同土层深度的土壤容重、含水量、总/毛管/非毛管孔隙度、总/毛管/非毛管持水量和蓄水量,以此来评估种植中亚热带常见树种对土壤水源涵养功能的早期影响,以期中亚热带森林经营过程中合理选择树种、充分发挥亚热带森林生态系统服务功能提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究样地位于福建省三明森林生态系统与全球变化野外科学观测研究站(26°19'N, 117°36'E),东南面和西北面分别与戴云山脉和武夷山脉相连。海拔在 250—500 m 之间,属中亚热带季风气候,年均气温 19.5℃,年均降水量 1700 mm,降水多集中于 3—8 月份,相对湿度 81%,无霜期 300 d。以低山丘陵地貌为主,土壤以花岗岩、红壤或红黄壤为主。区域内分布着中国面积最大的常绿阔叶林,植物群落组成丰富且分层明显。乔木层主要以格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)、木荷(*Schima superba*)、米槠(*Castanopsis carlesii*)和马尾松(*Pinus massoniana*)为主,灌草层以山茶(*Camellia japonica*)、皱叶狗尾草(*Setaria plicata*)和金银花(*Lonicera japonica*)为主。

1.2 样地设置

研究样地经砍伐、炼山后建立同质园,其中 4 个树种在种植前土壤基本特征见表 1。2012 年 2 月,在土壤

发育、经营历史、坡向坡度相同的林地上以 0.12 株/m² 的密度栽植 2 年生实生苗。选取的常绿阔叶树种为木荷、香叶 (*Lindera communis*)、米楮、杜英 (*Elaeocarpus decipiens*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*) 和醉香含笑 (*Michelia macclurei*)，落叶阔叶树种为鹅掌楸 (*Liriodendron chinense*)、无患子 (*Sapindus mukorossi*)、全缘叶栎 (*Koelreuteria bipinnata*) 和枫香 (*Liquidambar formosana*)，针叶树种为杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和马尾松，共 12 个树种，均为中亚热带常见树种。通过随机区组设计，每个树种 4 个重复，每个小区面积约为 0.1 hm²。后以相同的培养方式进行管理，于 2017 年对部分树种的生长情况进行调查 (表 2)。并于 2019 年 8 月对样地内各树种随机选择 3 个样方，调查了灌草层的物种组成和盖度 (表 3)。

表 1 同质园种植前 4 个树种表层 10 cm 土壤碳氮磷含量

Table 1 Carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in the upper 10 cm soils before plantations of four trees in the studied common-garden

变量 Variables	树种 Tree species			
	米楮 CCar	醉香含笑 MM	杉木 CL	马尾松 PM
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	20.02±3.58a	15.62±3.10a	16.40±1.49a	15.47±3.47a
总氮 Total nitrogen/(g/kg)	1.40±0.23a	1.26±0.15a	1.30±0.10a	1.25±0.16a
总磷 Total phosphorus/(mg/kg)	311.06±27.94a	232.79±43.15a	293.31±27.34a	296.86±11.32a
pH	4.28±0.17a	4.25±0.09a	4.28±0.17a	4.22±0.11a

数值为平均值±标准误 ($n=4$)。不同小写字母表示不同树种间差异显著 ($P<0.05$)；数据引自郑宪志等 (2018)^[12]。米楮 CCar: *Castanopsis carlesii*，醉香含笑 MM: *Michelia macclurei*，杉木 CL: *Cunninghamia lanceolata*，马尾松 PM: *Pinus massoniana*

表 2 种植 5 年后 7 个树种的生长情况

Table 2 Tree growth of seven species after five years of plantation

变量 Variables	树种 Tree species						
	木荷 SS	米楮 CCar	杜英 ED	香樟 CCam	醉香含笑 MM	杉木 CL	马尾松 PM
胸径 Diameter at breast height/cm	6.37±0.36b	7.26±0.47b	10.21±0.55a	6.58±0.31b	7.00±0.15b	10.24±0.43a	6.36±0.14b
株高 Tree height/m	5.26±0.18bc	5.65±0.26b	5.64±0.26b	4.61±0.25d	4.90±0.01cd	7.34±0.21a	4.61±0.08d
叶片生物量 Leaf biomass/(t/hm ²)	0.99±0.06cd	0.78±0.15d	1.44±0.10bc	1.67±0.27b	1.06±0.11cd	4.97±0.32a	0.68±0.09d
树枝生物量 Twig biomass/(t/hm ²)	1.13±0.09d	1.50±0.31cd	6.60±0.98a	2.78±0.65bc	1.95±0.22cd	3.53±0.24b	1.45±0.20cd
树干生物量 Stem biomass/(t/hm ²)	5.50±0.48b	5.93±1.19b	18.05±2.27a	8.80±1.75b	6.78±0.70b	14.98±1.05a	6.00±0.77b

数值为平均值±标准误 ($n=4$)。不同小写字母表示不同树种间差异显著 ($P<0.05$)。木荷 SS: *Schima superba*，米楮 CCar: *Castanopsis carlesii*，杜英 ED: *Elaeocarpus decipiens*，香樟 CCam: *Cinnamomum camphora*，醉香含笑 MM: *Michelia macclurei*，杉木 CL: *Cunninghamia lanceolata*，马尾松 PM: *Pinus massoniana*

表 3 种植 7 年后 12 个树种林下植被概况

Table 3 Basic information of understory vegetation after twelve trees have been planted for seven years

树种 Tree species	林下植被盖度 Understory vegetation coverage/%	林下植被组成 Understory vegetation
木荷 SS	23±13c	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、荩草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)
米楮 CCar	60±17b	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)
枫香 LF	70±20ab	皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、荩草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)

续表

树种 Tree species	林下植被盖度 Understory vegetation coverage/%	林下植被组成 Understory vegetation
香叶 LC	10±0.6c	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、菴草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)
杜英 ED	73±12ab	芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、菴草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)
香樟 CCam	83±3ab	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)
无患子 SM	93±3a	皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)
鹅掌楸 LC	83±7ab	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、半夏 (<i>Pinellia ternate</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)、山苍子 (<i>Litsea cubeba</i>)
醉香含笑 MM	11±4c	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、淡竹叶 (<i>Lophatherum gracile</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)、
全缘叶栲树 KB	92±1a	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)、
杉木 CL	83±7ab	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、菴草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、
马尾松 PM	67±8ab	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus-veneris</i>)、皱叶狗尾草 (<i>Setaria plicata</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、苔草 (<i>Carex</i> spp.)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、海金沙 (<i>Lygodium japonicum</i>)、山茶 (<i>Camellia japonica</i>)、毛桐 (<i>Mallotus japonicus</i>)

数值为平均值±标准误 ($n=3$)。不同小写字母表示不同树种间差异显著 ($P<0.05$)。木荷 SS: *Schima superba*, 米槠 CCar: *Castanopsis carlesii*, 枫香 LF: *Liquidambar formosana*, 香叶 LC: *Lindera communis*, 杜英 ED: *Elaeocarpus decipiens*, 香樟 CCam: *Cinnamomum camphora*, 无患子 SM: *Sapindus mukorossi*, 鹅掌楸 LC: *Liriodendron chinense*, 醉香含笑 MM: *Michelia macclurei*, 全缘叶栲树 KB: *Koelreuteria bipinnata*, 杉木 CL: *Cunninghamia lanceolata*, 马尾松 PM: *Pinus massoniana*

1.3 样品采集与分析

对各树种随机选择 3 个样方,在每个样方内随机选择 3 株长势较好的树,沿树干周围 1 m 处各挖取 1 个 50 cm 的土壤剖面,并用体积为 100 cm³的环刀自下而上按 40—50、30—40、20—30、10—20 cm 和 0—10 cm 土层深度分别取样,立即装入已消毒的自封袋,带回实验室。

采样当天称取每个环刀的重量 (m , g) 及装有原状土壤的环刀重量 (m_0 , g),计算含水量 (C_w , %)。将装有原状土的环刀于蒸馏水中浸泡 12 h 后称重 (m_1 , g),计算最大持水量 (C_s , g/kg);然后将其放于干砂上静置 2 h,待土壤的非毛管水全部流出,称重 (m_2 , g),计算毛管持水量 (C_c , g/kg);最后将环刀于 105℃ 烘至 24 h,称重 (m_3 , g)。按下列公式计算^[13-14]:

土壤容重 (ρ_s , g/cm³) 为:

$$\rho_s = (m_3 - m) / v$$

式中, v 为环刀体积 (cm³)。

土壤含水量 (C_w , %)、最大持水量 (C_s , g/kg) 和毛管持水量 (C_c , g/kg) 分别为:

$$C_w = (m_0 - m_3) / (m_3 - m)$$

$$C_s = (m_1 - m_3) / (m_3 - m) \times 10^3$$

$$C_c = (m_2 - m_3) / (m_3 - m) \times 10^3$$

土壤总孔隙度($P_s, \%$)、毛管孔隙度($P_c, \%$)和非毛管孔隙度($P_n, \%$)分别为:

$$P_s = (m_1 - m_3) / (m_3 - m) \times \rho_s \times 100\%$$

$$P_c = (m_2 - m_3) / (m_3 - m) \times \rho_s \times 100\%$$

$$P_n = P_s - P_c$$

土壤最大蓄水量($W_s, \text{t/m}^2$)、毛管蓄水量($W_c, \text{t/m}^2$)和非毛管蓄水量($W_n, \text{t/m}^2$)分别为:

$$W_s = P_s \times d$$

$$W_c = P_c \times d$$

$$W_n = P_n \times d$$

式中, d 为土层深度(m)。

1.4 数据分析

首先用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验不同土层和树种对各变量的影响,再用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异法(Least significant difference, LSD)逐一比较各变量在每个土层不同树种间的差异显著性。同时用 Pearson 相关分析比较土壤容重和含水量与毛管/非毛管孔隙度、持水量和蓄水量的相关关系。以上分析在 SPSS 21.0 (IBM SPSS, Chicago, IL, USA)中进行。

2 结果

2.1 土壤容重和含水量随土层和树种的变化

土壤容重和含水量在不同土层间均存在显著差异($P < 0.001$; 表 4),且土壤容重总体上随土层深度的增加而增加,而土壤含水量则相反。具体来讲,土壤容重在 0—10 cm 土层为 1.16—1.42 g/cm^3 ,而在 40—50 cm 土层则达 1.36—1.62 g/cm^3 ;土壤含水量在 0—10 cm 土层中为 9.7%—12.0%,而在 40—50 cm 土层降至 9.0%—10.6%。同质园种植 7 年后,表层(0—20 cm)土壤容重和(0—10 cm)土壤含水量在不同树种间差异显著($P < 0.05$; 图 1)。就土壤容重而言,在 0—10 cm 土层中,种植鹅掌楸和香叶的土壤容重显著低于种植其他

表 4 不同土层平均土壤容重、含水量、孔隙度、持水量和蓄水量

Table 4 Average bulk densities, water contents, porosities, water holding capacities and water storage capacities at different depths

土层 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g/cm^3)	含水量 Water content/%	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	最大持水量 Maximum water holding capacity/ (g/kg)
<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.047	<0.001
0—10	1.31±0.018c	11.0±0.17a	45.8±0.45a	44.2±0.44a	1.40±0.15a	352.5±7.9a
10—20	1.40±0.019b	10.5±0.15ab	42.8±0.43b	41.7±0.43b	1.06±0.14ab	309.3±7.9b
20—30	1.48±0.018a	10.0±0.17b	41.6±0.49b	40.6±0.51b	0.99±0.09ab	283.1±6.6bc
30—40	1.53±0.020a	9.8±0.21b	41.0±0.59b	40.2±0.57b	0.85±0.10b	270.7±6.7c
40—50	1.52±0.020a	9.7±0.19b	42.2±0.92b	41.2±0.93b	1.01±0.16ab	281.1±9.6c
土层 Soil depth/cm	毛管持水量 Capillary water holding capacity/ (g/kg)	非毛管持水量 Non-capillary water holding capacity/(g/kg)	最大蓄水量 Maximum water storage capacity/ (t/m^2)	毛管蓄水量 Capillary water storage capacity/ (t/m^2)	非毛管蓄水量 Non-capillary water storage capacity/(t/m^2)	
<i>P</i>	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	0.047	
0—10	341.5±7.5a	10.98±1.22a	4.56±0.045a	4.42±0.044a	0.140±0.015a	
10—20	301.3±7.1b	7.99±1.27ab	4.28±0.043b	4.17±0.043b	0.106±0.014ab	
20—30	276.4±6.5bc	6.75±0.62b	4.16±0.049b	4.06±0.051b	0.099±0.009ab	
30—40	265.0±6.4c	5.73±0.69b	4.10±0.059b	4.02±0.057b	0.085±0.010b	
40—50	274.3±9.5c	6.85±1.13b	4.22±0.092b	4.12±0.093b	0.101±0.016ab	

数值为 12 个树种在同一土层的平均值±标准误($n = 36$)。P 值表示不同土层间差异显著性水平,不同小写字母表示不同土层间差异显著($P < 0.05$)

树种的土壤;在 10—20 cm 土层中,种植全缘叶栎树的土壤容重显著低于种植马尾松的土壤;而在 20—30、30—40 cm 和 40—50 cm 土层中,种植不同树种对土壤容重无显著影响 ($P>0.05$)。就土壤含水量而言,在 0—10 cm 土层中,种植香樟、鹅掌楸和醉香含笑土壤含水量显著低于种植木荷的土壤;而在其他土层中,种植不同树种对土壤含水量均无显著影响 ($P>0.05$)。

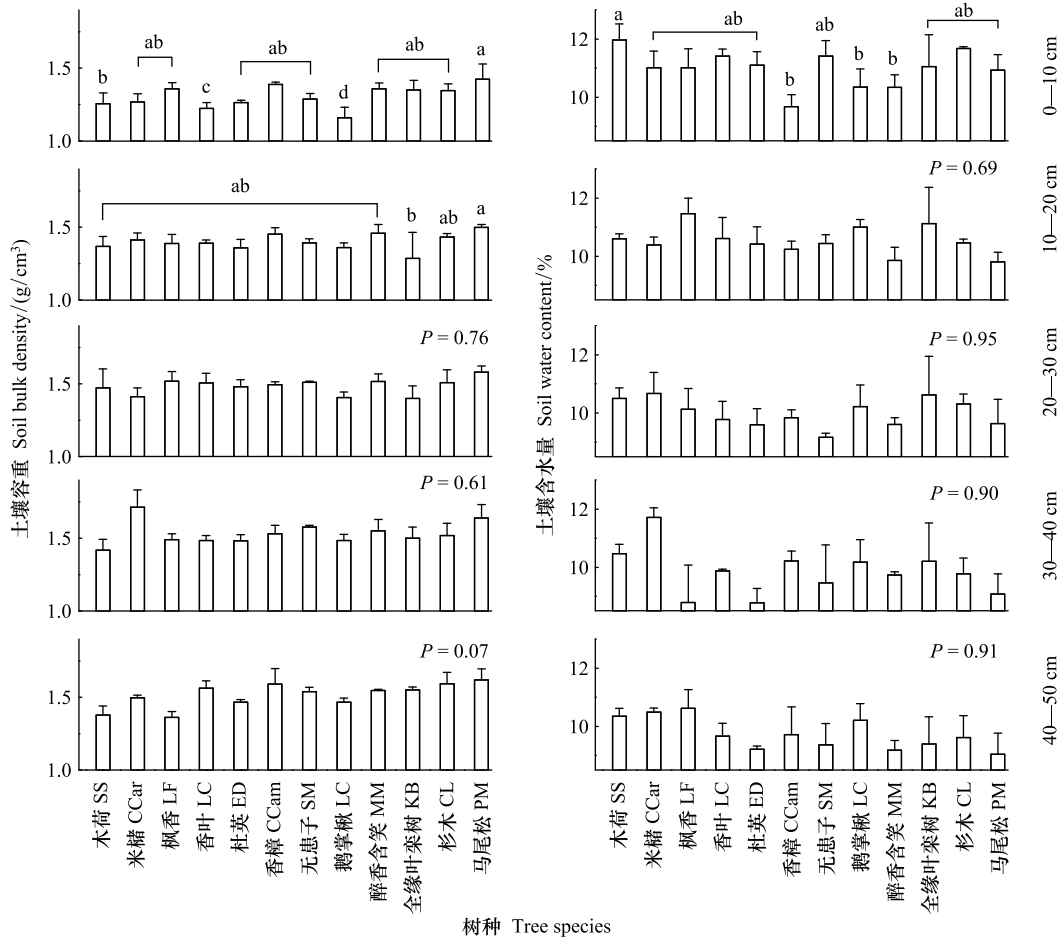


图 1 种植 7 年后 12 个树种不同土层土壤容重和含水量

Fig.1 Soil bulk densities and water contents at different depths after the twelve trees have been planted for seven years

数据为平均值±标准误 ($n=3$);不同小写字母表示同一土层不同树种间差异显著 ($P<0.05$), P 值表示同一土层不同树种间差异不显著 ($P>0.05$);木荷 SS: *Schima superba*, 米槠 CCar: *Castanopsis carlesii*, 枫香 LF: *Liquidambar formosana*, 香叶 LC: *Lindera communis*, 杜英 ED: *Elaeocarpus decipiens*, 香樟 CCam: *Cinnamomum camphora*, 无患子 SM: *Sapindus mukorossi*, 鹅掌楸 LC: *Liriodendron chinense*, 醉香含笑 MM: *Michelia macclurei*, 全缘叶栎树 KB: *Koelreuteria bipinnata*, 杉木 CL: *Cunninghamia lanceolata*, 马尾松 PM: *Pinus massoniana*

2.2 土壤孔隙度随土层和树种的变化

总体上看,土壤总孔隙度和毛管孔隙度在表层 10 cm 土壤显著高于 10 cm 以下的土壤 ($P<0.05$; 表 4)。在 0—10 cm 土层中,土壤总孔隙度和毛管孔隙度分别为 43.3%—47.4% 和 41.8%—46.2%,而非毛管孔隙度仅为 0.67%—2.89% (图 2)。种树 7 年后,各土层的土壤总孔隙度在不同树种间均不存在显著差异 ($P>0.05$),而表层 (10—20 cm) 土壤毛管孔隙度和 (0—10 cm 和 20—30 cm) 土壤非毛管孔隙度则在不同树种间存在显著差异。其中,在 10—20 cm 土层中,种植鹅掌楸的土壤毛管孔隙度显著高于种植全缘叶栎树的土壤,而非毛管孔隙度在 0—10 cm 土层以种植杜英的土壤最高、在 20—30 cm 土层以种植香叶和杜英的土壤最高。

2.3 土壤持水量和蓄水量随土层和树种的变化

总体而言,土壤持水量和蓄水量均随土层的增加而降低 (表 4),且表层 10 cm 土壤显著高于 10 cm 以下

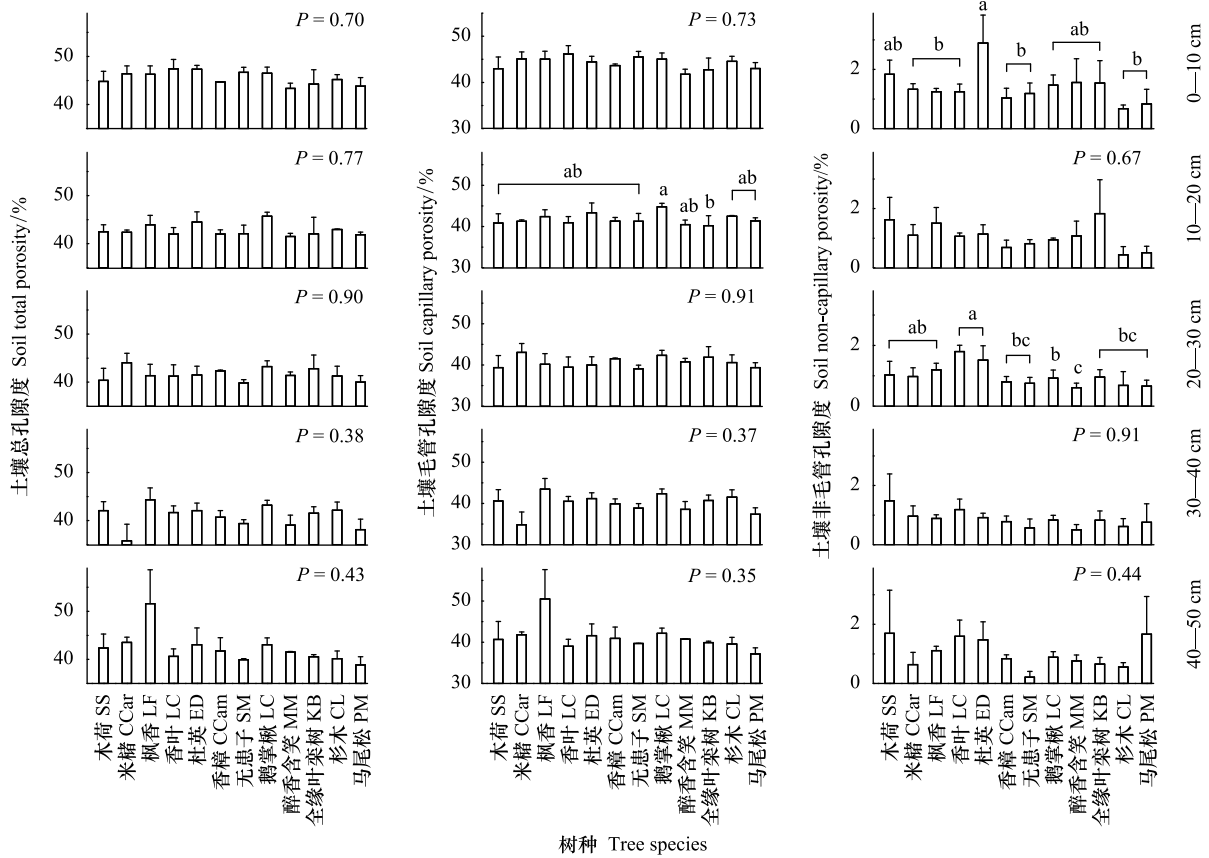


图2 种植7年后12个树种不同土层土壤孔隙度

Fig.2 Soil porosities at different depths after the twelve trees have been planted for seven years

数据为平均值±标准误($n=3$);不同小写字母表示同一土层不同树种间差异显著($P<0.05$), P 值表示同一土层不同树种间差异不显著($P>0.05$)

的土壤($P<0.05$)。具体来讲,在0—10 cm 土层中,土壤最大持水量和蓄水量分别达 313—405 g/kg 和 4.3—4.7 t/m²,毛管持水量和蓄水量分别为 307—392 g/kg 和 4.2—4.6 t/m²,而非毛管持水量和蓄水量仅为 4.9—22.9 g/kg 和 0.067—0.29 t/m²(图 3)。种植不同树种 7 年后,各土层的土壤最大蓄水量未发生显著改变($P>0.05$),而表层土壤的最大、毛管、非毛管持水量和毛管、非毛管蓄水量却发生了显著改变($P<0.05$)。就土壤持水量而言,在表层 10 cm 土壤中,种植鹅掌楸的土壤最大持水量和毛管持水量均最高,种植马尾松、醉香含笑和香樟的土壤最大持水量最低,而种植杜英的土壤非毛管持水量最高。就土壤蓄水量而言,在 10—20 cm 土层中,种植枫香、全缘叶栎和鹅掌楸的土壤毛管蓄水量较高,种植马尾松和醉香含笑的土壤毛管蓄水量最低,而非毛管蓄水量在 0—10 cm 土层中以种植杜英的土壤最高、在 20—30 cm 土层中以种植香叶的土壤最高。

2.4 土壤容重和含水量与土壤孔隙度、持水量和蓄水量的关系

土壤容重与土壤孔隙度、持水量和蓄水量均呈显著负相关关系($P<0.001$; 图 4),而土壤含水量则与其呈显著正相关关系($P<0.001$; 图 4)。

2.5 土壤容重、孔隙度、持水量和蓄水量随树种类型的变化

种植的 12 个树种可划分为常绿阔叶树种、落叶阔叶树种和针叶树种。整体看来,针叶树种的土壤容重高于常绿和落叶阔叶树种,常绿阔叶树种的土壤非毛管孔隙度、持水量和蓄水量要高于落叶阔叶和针叶树种,而落叶阔叶树种的土壤总孔隙度、总持水量、总蓄水量、毛管孔隙度、毛管持水量和毛管蓄水量则要高于常绿阔叶和针叶树种(图 5)。

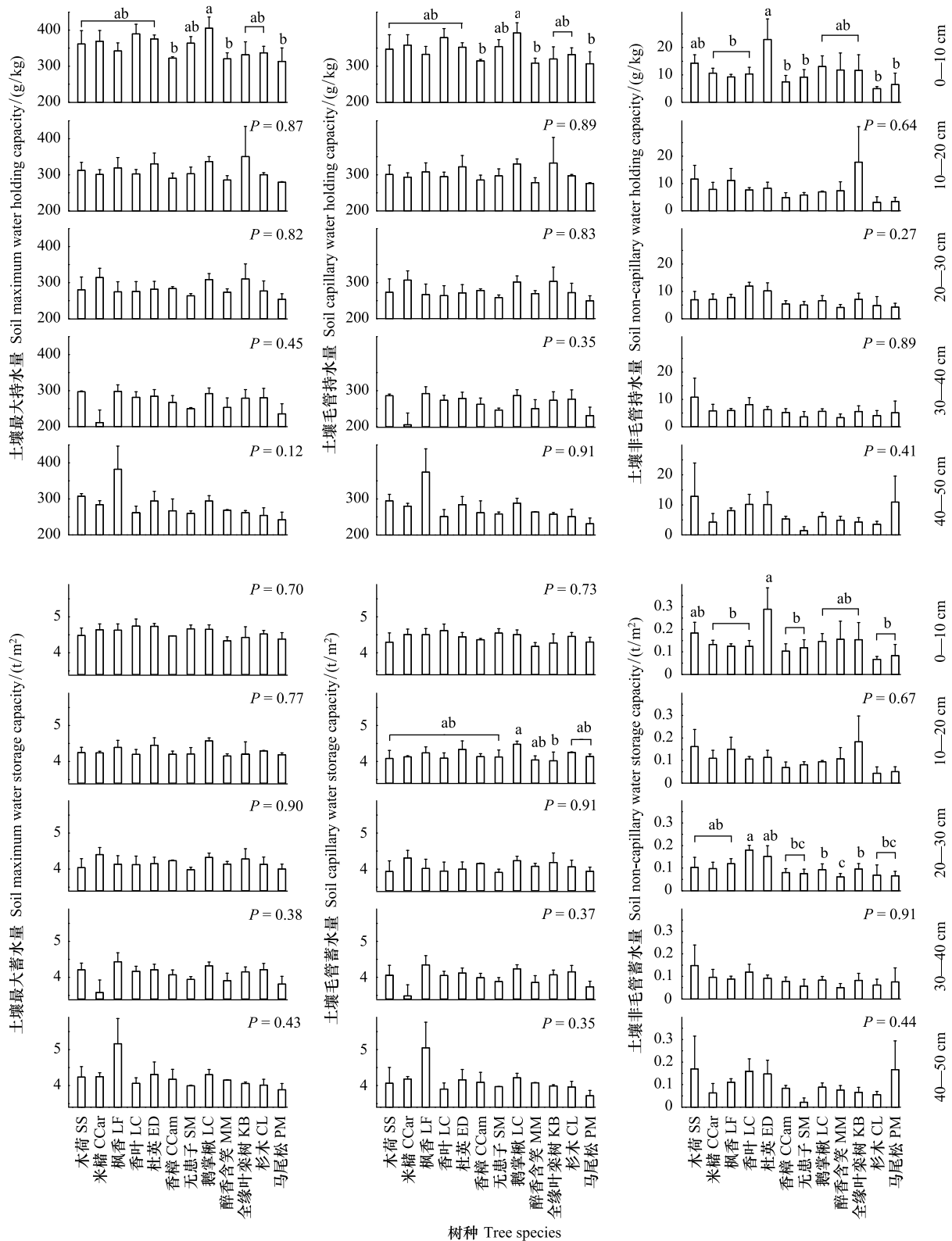


图3 种植7年后12个树种不同土层土壤持水量和蓄水量

Fig.3 Soil water holding and water storage capacities at different depths after the twelve trees have been planted for seven years
数据为平均值±标准误 (n=3);不同小写字母表示同一土层不同树种间差异显著 (P<0.05), P 值表示同一土层不同树种间差异不显著 (P>0.05)

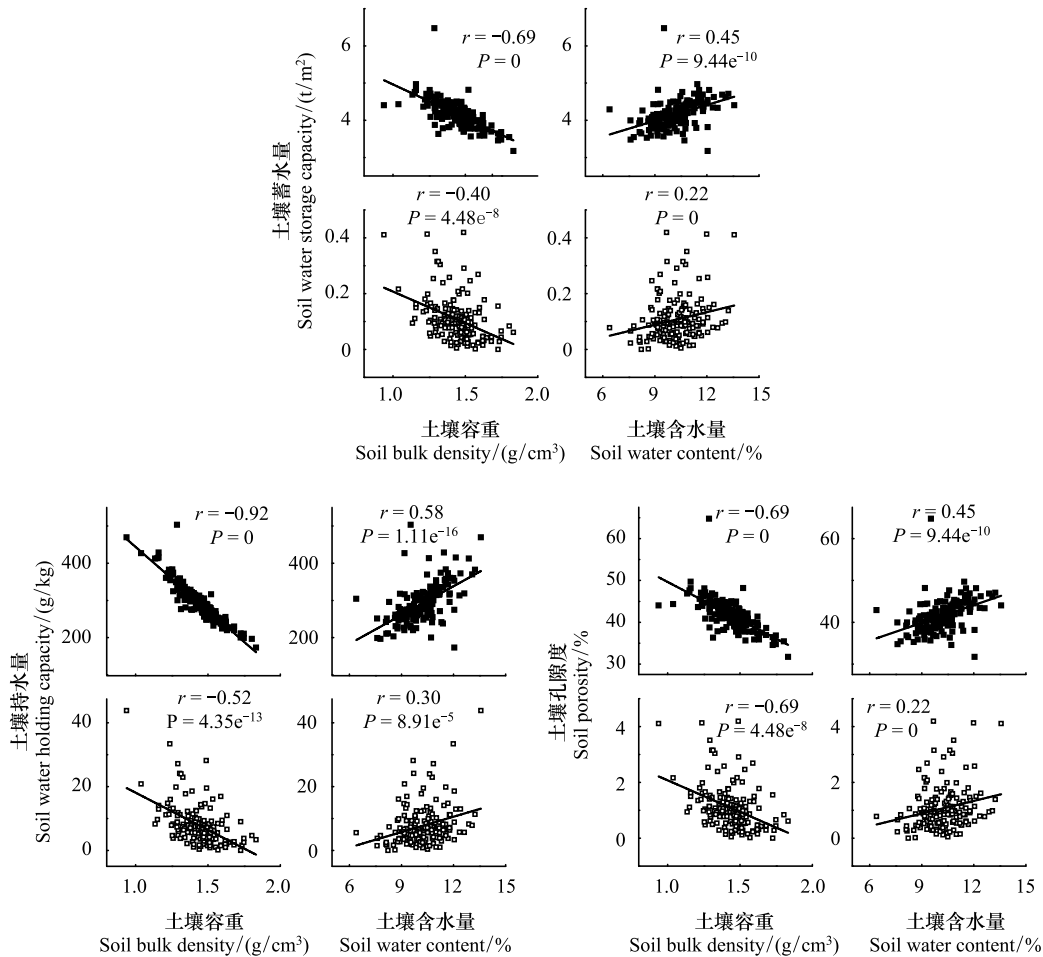


图4 土壤容重和含水量与土壤孔隙度、持水量和蓄水量的相关关系

Fig.4 Relationship of soil bulk density and water content with soil porosity, water holding and water storage capacity

实心点: 毛管孔隙度、持水量和蓄水量, 空心点: 非毛管孔隙度、持水量和蓄水量

3 讨论

本研究通过对同一立地条件下同质园中不同人工树种种植早期土壤物理性质的研究发现,不同树种的种植改变了土壤物理结构,进而影响了土壤的持水能力,但这种早期(7年)影响只发生在土壤表层。其中,种植鹅掌楸、枫香和全缘叶栾树等落叶阔叶树种能在较短时间内增加凋落物分解和根系分布,从而改善土壤容重和孔隙度,增加土壤的持水和蓄水能力,提升中亚热带森林土壤水源涵养功能。

土壤物理结构一般包括土壤容重和孔隙度,它的差异主要源于外界环境因素和树种本身的生物学特性^[15]。以往的研究表明,气候、土壤及植被类型等均能对土壤容重和孔隙度产生影响,但由于立地条件的差异难以评估,尚未得出一致结论^[5]。在本研究中,同质园经过相同的培养管理,各树种的土壤容重和孔隙度在种植7年后表现出了明显的差异。总体来看,种植鹅掌楸、枫香和全缘叶栾树等落叶阔叶树种的表层土壤物理结构优于其他树种的土壤,表现为土壤容重小和孔隙度大,这可能与鹅掌楸等落叶阔叶树种自身的生物学特性有关。首先,种植不同树种会对林下植被的盖度和组成产生影响,而不同植被根系生长发育的差异又会影响土壤的机械组成,进而影响土壤容重和孔隙结构^[15]。本研究调查发现,种植7年后不同树种的林下植被组成没有差异,但其盖度存在差异,并以种植鹅掌楸等落叶阔叶树种的植被盖度较高,这可能与其冠幅和凋落物的分解有关。

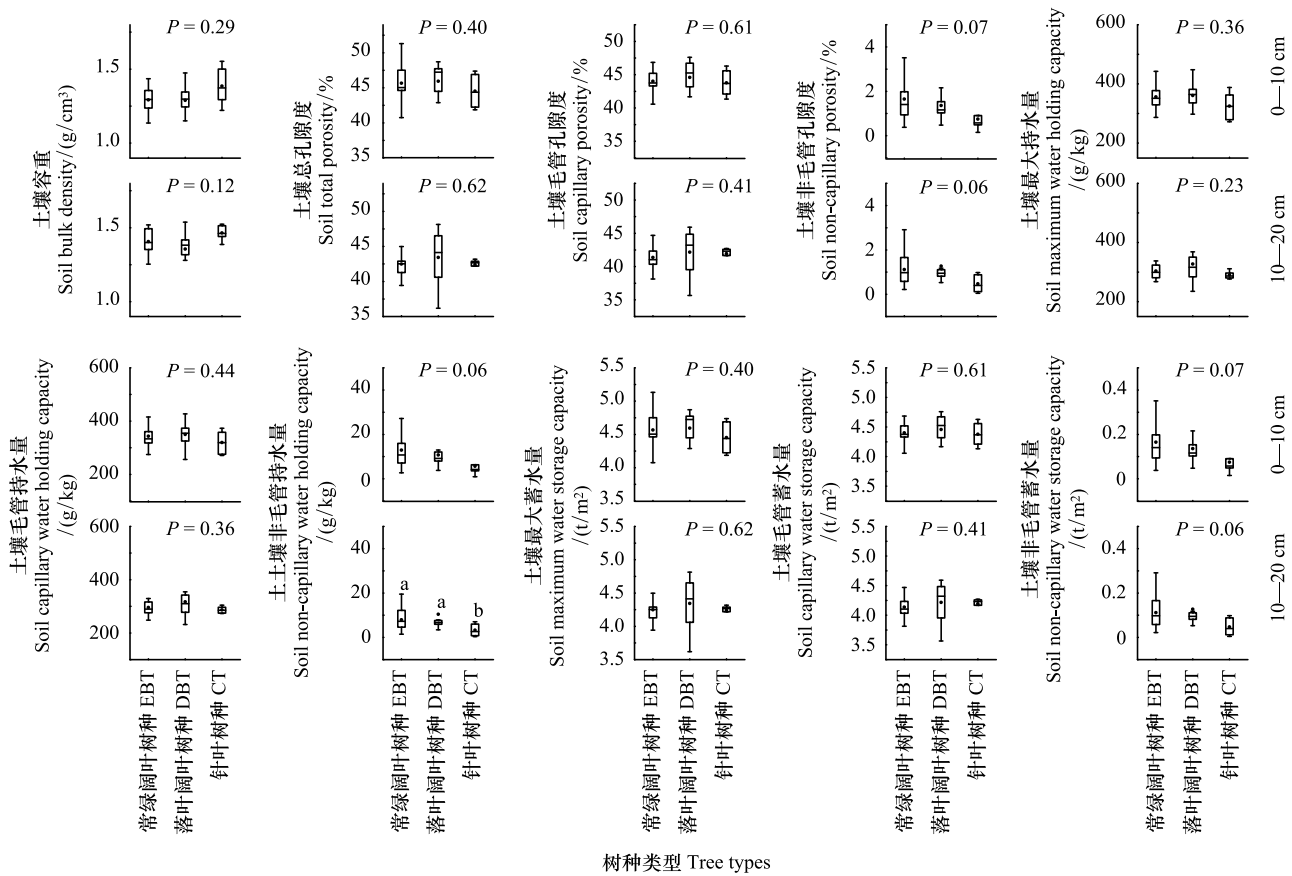


图 5 不同树种类型的土壤容重、孔隙度、持水量和蓄水量

Fig.5 Soil bulk densities, porosities, water holding and water storage capacities after planted with different tree types

箱型图包含中位数和 25%、75% 置信区间, 实心黑点表示平均值。不同小写字母表示不同类型树种间差异显著 ($P < 0.05$), P 值表示不同类型树种间差异不显著 ($P > 0.05$); EBT: 常绿阔叶树种 Evergreen broad-leaved tree, DBT: 落叶阔叶树种 Deciduous broad-leaved tree, CT: 针叶树种 Coniferous tree

其次, 不同树种凋落物输入量、化学组成及分解程度的差异会影响有机质向土壤的输入, 从而导致土壤物理结构的不同^[16]。通常来讲, 落叶阔叶林的凋落物输入量远高于常绿阔叶林和针叶林, 且更容易被微生物分解, 而针叶树种凋落物大多富含木质素、酚类化合物等难降解组分, 更难被分解^[17]。鹅掌楸、枫香和全缘叶栎树作为中亚热带常见的落叶阔叶树种, 其凋落物的易分解性既改善了土壤孔隙的结构, 而分解形成的腐殖质也增加了土壤表层的渗透性, 加速了水分的入渗^[18]。最后, 不同树种根系分布特征也会影响土壤物理结构^[19]。一方面, 根系在土壤中的穿插和挤压会改善土壤容重和孔隙结构, 而树种种植早期的根系分布具有表聚性, 所有这种改善只发生在土壤表层, 且以阔叶树种居多^[20]。另一方面, 地下菌根分泌物可为土壤提供丰富的有机质来源, 利于土壤颗粒的胶连和毛管孔隙的形成, 因而鹅掌楸等具有内生或外生菌根的树种具有较大的土壤孔隙度^[21-22]。

土壤容重和孔隙度是决定土壤水源涵养功能的重要物理指标^[23]。研究表明, 土壤容重随土层深度的增加而增加, 而土壤孔隙度则随土层深度的增加而降低^[24]。本研究也发现, 土壤容重与毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈显著负相关关系, 表明土壤容重越小, 孔隙度越高, 土壤结构越疏松多孔, 因此各树种表层土壤的贮水和透水性均高于下层土壤。而土壤容重与持水量和蓄水量的负相关性也证实了这一点。此外, 种植不同树种后土壤最大蓄水量、毛管蓄水量和非毛管蓄水量的变化规律分别与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的变化基本一致。这是由于土壤蓄水量主要受土层厚度及土壤孔隙度的影响, 因此在土层厚度一致的情

况下,土壤孔隙度越大,土壤的蓄水量就越大^[25]。因而种植鹅掌楸、枫香和全缘叶栎树等落叶阔叶树种的土壤毛管蓄水量较高,种植杜英的土壤非毛管蓄水量较高。所以从增大土壤孔隙度、提高土壤持水和蓄水能力的角度出发,在气候适宜的地区种植落叶阔叶树种比针叶树种更能提升区域水源涵养功能。

4 结论

本研究通过中亚热带常见树种同质园实验发现,树种因其自身的生物学特性使土壤容重和孔隙度在短时间内发生了改变,进而导致土壤持水量和蓄水量在不同树种间产生了显著差异,但这种差异在种植早期仅发生在土壤表层。鹅掌楸、枫香和全缘叶栎树等落叶阔叶树种通过增加凋落物分解和根系分布使表层土壤具有容重小、孔隙度大等良好的特性,因而具有较高的土壤蓄水量。与同一时期大量种植于南方湿润区的杉木和马尾松相比,种植鹅掌楸等落叶阔叶树种能在较短时间内显著提升土壤的水源涵养功能。因此,在亚热带人工林经营管理中,可以适当引入鹅掌楸、枫香和全缘叶栎树等落叶阔叶树种,避免种植单一的针叶纯林,有效提升亚热带森林土壤水源涵养功能。但目前来看,本研究所涉及的树种类型仍然较少,只能在一定程度上为森林的经营和管理提供参考,所以在今后的研究中应关注更多类型树种的土壤水源涵养功能。

参考文献 (References):

- [1] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [2] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [3] Wang B, Wu F Z, Xiao S, Yang W Q, Justine M F, He J Y, Tan B. Effect of succession gaps on the understory water-holding capacity in an over-mature alpine forest at the upper reaches of the Yangtze River. Hydrological Processes, 2016, 30(5): 692-703.
- [4] 孙立博, 余新晓, 陈丽华, 贾国栋, 常晓敏, 刘自强. 坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化. 水土保持学报, 2019, 33(1): 104-110.
- [5] 陈文静, 祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 包维楷, 庞学勇. 川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响. 生态学报, 2017, 37(15): 4998-5006.
- [6] 胡健, 吕一河, 张琨, 陶蕴之, 李婷, 任艳娇. 祁连山排露流域典型植被类型的水源涵养功能差异. 生态学报, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [7] Silveira M L, Comerford N B, Reddy K R, Prenger J, DeBusk W F. Soil properties as indicators of disturbance in forest ecosystems of Georgia, USA. Ecological Indicators, 2009, 9(4): 740-747.
- [8] Rodríguez-Loinaz G, Onaindia M, Amezaga I, Mijangos I, Garbisu C. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native mixed-oak forests. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(1): 49-60.
- [9] Neirynek J, Mirtcheva S, Sioen G, Lust N. Impact of *Tilia platyphyllos* scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. Forest Ecology and Management, 2000, 133(3): 275-286.
- [10] Prielzel J, Bachmann S. Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany. Forest Ecology and Management, 2012, 269: 134-148.
- [11] Vesterdal L, Clarke N, Sigurdsson B D, Gundersen P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? Forest Ecology and Management, 2013, 309: 4-18.
- [12] 郑宪志, 张星星, 林伟盛, 刘小飞, 楚海燕, 李若南, 杨智杰. 不同树种对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2018, 34(6): 86-93.
- [13] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 何先进. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 张海林, 李向富, 杨叶, 王秋月, 黄建武. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响. 生态学报, 2019, 39(13): 4844-4854.
- [16] Pang X Y, Bao W K. Effect of substituting plantation species for native shrubs on the water-holding characteristics of the forest floor on the eastern Tibetan Plateau. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(3): 217-224.
- [17] 陈婷, 郗敏, 孔范龙, 李悦, 庞立华. 枯落物分解及其影响因素. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
- [18] 丁访军, 王兵, 钟洪明, 潘明亮, 母永秋. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2009, 23(3): 179-183, 231-231.
- [19] 吕刚, 席彦霞, 凌帅, 黄鑫春, 李叶鑫, 金兆梁. 浑河源头不同水源涵养林根系分布特征. 灌溉排水学报, 2019, 38(S1): 82-85.
- [20] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能. 生态学报, 2000, 20(5): 869-874.
- [21] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 高茹, 吴金水. 湖南乌交界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能. 生态学报, 2012, 32(2): 538-547.
- [22] 陈祥欣, 陈连庆. 我国亚热带主要树种菌根调查. 林业科技通讯, 1983, (5): 8-12.
- [23] 吴庆贵, 邹利娟, 吴福忠, 杨万勤, 张素兰. 涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能. 水土保持学报, 2012, 26(6): 254-258.
- [24] 李阳, 万福绪. 黄浦江中游 5 种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究. 水土保持学报, 2019, 33(2): 264-271.
- [25] 黄乾, 杨海龙, 朱柱, 赵嘉玮. 青海云杉造林密度与水源涵养功能的响应关系. 水土保持学报, 2019, 33(4): 279-286.