

雷州半岛经济果林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素

卢芷晴, 陈碧珊*, 钟诗明, 李 焯, 冯婷婷, 李炎松, 王 璟

岭南师范学院地理科学学院, 广东 湛江

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年4月11日

摘 要

土壤碳氮磷储量对作物生长和驱动养分循环起重要作用, 指示着土壤肥力和生产力。本研究对雷州半岛不同类型经济果林土壤碳氮磷储量分布特征进行分析, 并探讨其与土壤理化性质的关系。结果表明, 7种经济果林土壤有机碳含量香蕉地 > 甘蔗地 > 荔枝地 > 红橙地 > 青枣地 > 芒果地 > 龙眼地, 土壤全氮含量荔枝地 > 红橙地 > 香蕉地 > 甘蔗地 > 青枣地 > 芒果地 > 龙眼地, 土壤全磷含量青枣地 > 香蕉地 > 芒果地 > 甘蔗地 > 龙眼地 > 荔枝地 > 红橙地。总体上, 雷州半岛经济果林土壤处于低碳储量、低氮储量、高磷储量状态; 各类型经济果林不同深度土层土壤碳氮磷含量总体上随剖面深度加深呈先增加后降低的趋势。经济果林土壤碳氮磷储量与不同土壤理化性质相关性存在差异, 整体上土壤碳储量与土壤含水量呈正相关, 土壤氮储量与土壤主要理化性质间的相关性不显著, 土壤磷储量与土壤含水量、pH值呈正相关, 与土壤比重呈负相关。本研究结果可以为雷州半岛经济果林土壤碳氮磷研究提供基础数据, 同时为经济果林经营管理提供科学支撑。

关键词

经济果林, 土壤, 碳氮磷储量, 雷州半岛

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Reserves in Economic Fruit Forest of Leizhou Peninsula

Zhiqing Lu, Bishan Chen*, Shiming Zhong, Ye Li, Tingting Feng, Yansong Li, Jing Wang

School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

*通讯作者。

文章引用: 卢芷晴, 陈碧珊, 钟诗明, 李焯, 冯婷婷, 李炎松, 王璟. 雷州半岛经济果林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素[J]. 土壤科学, 2024, 12(2): 53-64. DOI: 10.12677/hjss.2024.122007

Abstract

Soil carbon, nitrogen and phosphorus play an important role in crop growth and driving nutrient cycling, indicating soil fertility and productivity. In this study, the distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different types of economic fruit forests in Leizhou Peninsula were analyzed, and the relationship between carbon and phosphorus and soil physico-chemical properties was discussed. The results showed that soil organic carbon content in 7 economic fruit forests was banana field > sugarcane field > litchi field > Red and orange field > jujube field > Mango field > Longan field, soil total nitrogen content in litchi field > Red and orange field > banana field > sugarcane field > jujube field > Mango field > Longan field, soil total phosphorus content in jujube field > banana field > mango field > sugarcane field > Longan field > litchi field > Red and orange field. In general, the soil of economic fruit forest in Leizhou Peninsula was in the state of low carbon reserve, low nitrogen reserve and high phosphorus reserve. The soil carbon, nitrogen and phosphorus contents in different depth layers of different types of economic fruit forests generally increased first and then decreased with the deepening of profile depth. On the whole, soil carbon, nitrogen and phosphorus reserves were positively correlated with soil water content, while soil nitrogen reserves were not significantly correlated with soil main physical and chemical properties. Soil phosphorus reserves were positively correlated with soil water content and pH value, and negatively correlated with soil specific gravity. The results of this study can provide basic data for the study of soil carbon, nitrogen and phosphorus in economic fruit forest of Leizhou Peninsula, and provide scientific support for the management of economic fruit forest.

Keywords

Economic Fruit Forest, Soil, Carbon, Nitrogen and Phosphorus Reserves, Leizhou Peninsula

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤中的碳(C)、氮(N)和磷(P)储量是表征土壤肥力和生产力的重要指标,对调节植物生长和驱动养分循环具有关键作用[1]。其中,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,增加土壤有机碳存储可有效促进陆地生态系统对大气CO₂固定和延缓温室效应,而森林土壤有机碳库作为全球碳循环中最活跃的部分,其储量约占全球土壤碳储量的73% [2]。土壤氮和磷储量深刻影响着森林生态系统的净初级生产力和功能[3]。土壤碳氮磷储量与土地利用方式密切相关,合理的土地利用方式和生态恢复措施是促进土壤固碳、缓解温室效应的潜在有效途径之一[4]。因此,研究土壤碳氮磷储量对于深入理解生态系统功能和经营管理有重要意义[5]。目前,国内外针对不同类型自然生态系统及不同典型区域土壤碳氮磷储量特征进行了广泛的研究[6]。Murty等通过分析指出土地利用变化会引起土壤碳氮的损失,其中森林转化为耕地会导致土壤碳平均损失约30% [7]。Li等研究了呼伦贝尔草原河岸带碳氮磷生态化学计量特征,表明其与土壤理化性质显著相关[8]。Jobbagy等研究指出1~3 m深土层土壤有机碳含量占整个土壤剖面总有机碳含量的50%以上[9]。邓玉娇等分析了广东省植被固碳量时空变化,表明广东省植被固碳能力强,在2001~2020

年间呈上升趋势,另外固碳量与气象因子相关性显著[10]。罗丝琼等对黔东南3种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征进行研究,指出土壤碳氮磷含量在垂直分布上具有一致性,均随土层深度增加而降低[11]。顾伟等对华南热带人工林有机碳含量进行研究,表明林地碳汇过程提高了土壤氮水平和速效磷水平,有利于植被生长[12]。徐英明等发现南亚热带不同造林模式土壤碳汇量由大到小为补植套种 > 封山育林 > 新造林[13]。王薇菡等指出南亚热带不同造林模式碳汇林之间碳储量存在显著差异,土壤碳氮磷储量随土壤深度增加而减少,表现出明显的垂直性变化[14]。近年来,针对人工生态林和农耕地土壤有机碳含量、土壤磷素分布等方面的研究较多,但众多研究主要集中于地表0~20 cm深土层。雷州半岛经济果林土壤碳氮磷含量和储量分布特征研究较缺乏,对土壤碳氮磷的影响因素还不够明晰。

经济林是一种特殊的人工林,因其生产周期短、效率高而得到了极大的发展,但也存在着过度追求效益导致土地质量下降等问题。因此,研究经济林发展模式下的土壤碳氮磷含量的特征及影响因素,对实现区域生态效益、经济效益和社会效益有机统一有促进作用。本研究以雷州半岛不同类型的经济果林土壤为研究对象,通过分析土壤碳氮磷含量和储量特征,并探讨土壤碳氮磷储量与土壤理化性质的关系,可以为雷州半岛经济果林加强土壤碳汇管理、可持续经营及经济树种选择提供基础数据支撑。

2. 研究区概况

雷州半岛地处中国大陆最南端,属于热带季风气候北缘,年均温 23.5℃,年平均降水量 1417~1804 mm,地势平缓,西北高、东南低,海拔多在 1000 m 以下,作物熟制一年两熟至三熟,土壤肥沃,是中国传统的农业高产区。雷州半岛是广东省主要农业区,盛产各种亚热带特色水果。目前经济果林总面积达 $1.189 \times 10^4 \text{ km}^2$,占雷州半岛林地面积的 77.65%。

3. 研究方法

3.1. 样品采集

本研究对雷州半岛经济林地进行野外考察,最终选取 7 个典型的经济果林种植区土壤进行采样,主要包括雷州市乌石镇青枣和覃斗镇芒果,遂溪县洋青镇甘蔗和香蕉,廉江市青平镇龙眼、石颈镇红橙和吉水镇荔枝 7 个经济果林种植区,采样点分布见图 1。对每个经济果林种植区采集土壤剖面样品,每个典型土壤剖面分层采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~75 cm、75~100 cm 的土壤样品,使用环刀(容积为 100 cm^3)采集不同深度土层土壤,并记录采集样地的基本情况(见表 1)。其中芒果林土壤剖面在 75 cm 深处已达到含水层,故其只分层采集 0~75 cm 深度的土壤剖面样品。

3.2. 样品处理

野外采集的土壤样品经实验室预处理后,送往中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室进行测试分析。各类指标的测试方法如下:土壤有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸氧化-滴定法进行测定,主要过程是在高温和强酸下,土壤中的有机碳成分被过量的重铬酸钾溶液和硫酸溶液氧化,使 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 中的 Cr^{6+} 被还原成 Cr^{3+} ,而 Cr^{3+} 含量与土壤有机碳含量正相关,在某一波长处测定吸光度,按照 Cr^{3+} 的含量计算土壤有机碳含量[15]。土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,主要过程是在 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 H_2SO_4 、 HC_{104} 和催化剂的作用下,经过氧化还原作用后消解,转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,将铵态氮碱化蒸馏出来的氨被 H_3BO_3 吸取,用标准 HCL 溶液滴定,通过滴定的用量来计算土壤中全氮含量[16]。土壤全磷含量采用碱熔-紫外可见分光光度计法测定,用氢氧化钠熔融分解,然后在一定酸度和三价铈离子存在下,磷与钼酸铵形成铈磷钼混合杂多酸,以抗坏血酸还原为磷钼蓝进行光度法测定[17]。此外,还测定土壤相关的理化性质,其中土壤含水量采用烘干法测定;土壤比重采用排水称重法测定;土壤容重采用环刀法

测定；土壤 pH 值使用梅特勒 pH 计测定(水土比为 2.5:1)。

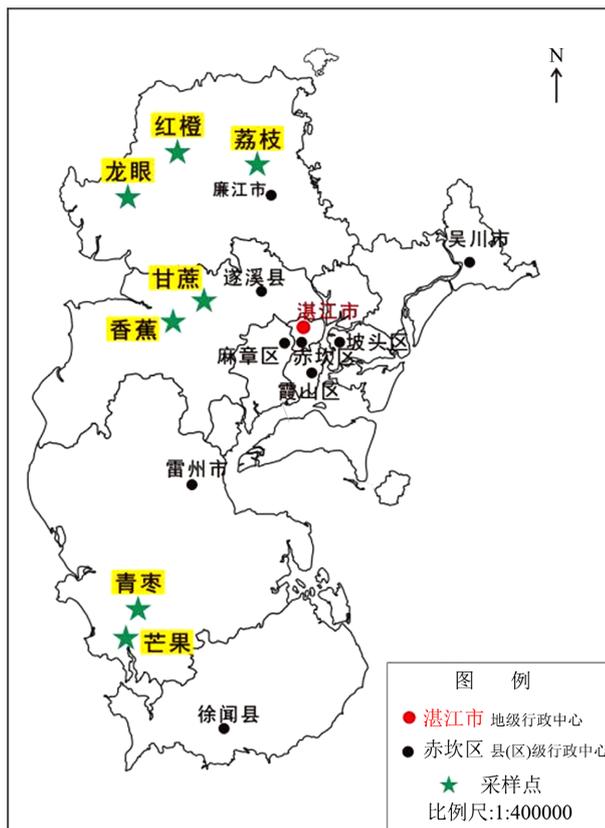


Figure 1. Distribution of economic forest land sampling points in Leizhou Peninsula

图 1. 雷州半岛经济林地采样点分布图

Table 1. Basic situation of different economic fruit forest plots

表 1. 不同经济果林样地基本情况

类型	经纬度	海拔 //m	种植年份 //年	作物高度 //m	果实产量// kg/hm ²	施肥情况	种植密度 //棵/hm ²
甘蔗地	21.32°N、110.08°E	50.58	5	2	105,000	氮、磷、钾、尿素	4,000,000
香蕉地	21.32°N、110.07°E	20.75	3~5	2	87,750	氮、磷、钾	2700
青枣地	20.59°N、109.89°E	38.93	8	2	45,000	复合肥、杀虫剂	450
芒果地	20.54°N、109.88°E	14.03	12	2	18,750	生物有机肥	750
荔枝地	21.67°N、110.24°E	200	27	3.8	15,000	复合肥、有机肥	300
红橙地	21.74°N、110.06°E	35.69	6	1.8	37,500	农家肥	750
龙眼地	21.59°N、109.96°E	32.34	25	4	15,000	钾、尿素、复合肥	300

3.3. 数据分析

3.3.1. 土壤碳氮磷储量的计算

利用公式计算不同类型经济果林不同深度土层土壤碳氮磷储量，分析其储量分布特征。土壤碳(氮、磷)储量计算公式如下[5]:

$$S_{C(N,P)i} = c_i \rho_i d_i / 10 \quad (1)$$

$$T_{C(N,P)} = \sum_{i=1}^n c_i \rho_i d_i / 10 \quad (2)$$

其中, $S_{C(N,P)i}$: 第 i 层土壤碳(氮、磷)储量, kg/m^2

c_i : 第 i 层土壤碳(氮、磷)含量, g/kg

ρ_i : 第 i 层土壤比重, g/cm^3

d_i : 第 i 层土层厚度, cm

$T_{C(N,P)}$: 土壤 0~100 cm 碳(氮、磷)总储量, kg/m^2 。

3.3.2. 土壤碳氮磷储量相关分析

通过对测试数据进行整理, 借助 SPSS 27.0 软件, 采用多因素相关性分析方法, 分别以土壤碳、氮、磷出来为主控因素, 分析各经济果林不同深度土壤碳氮磷储量之间、土壤碳氮磷储量与土壤主要理化性质之间的相关性, 探讨土壤碳氮磷储量变化的影响因素。

4. 结果分析

4.1. 不同类型经济果林土壤理化性质分析

不同经济果林土壤理化性质平均值如表 2 所示, 7 种经济果林土壤有机碳含量平均值为 12.21 g/kg , 其中香蕉地土壤的有机碳含量最大, 龙眼地土壤的有机碳含量最小。7 种经济果林土壤全氮含量平均值为 0.93 g/kg , 其中, 红橙地土壤的全氮含量最高, 龙眼地土壤的全氮含量最低。7 种经济果林土壤全磷含量平均值为 5.09 g/kg , 其中青枣地土壤全磷含量最高, 红橙地土壤全磷含量最低, 二者差为 13.95 g/kg , 差异显著。7 种经济果林土壤有效磷含量平均值为 27.08 mg/kg , 其中青枣地土壤有效磷含量最高, 芒果地土壤有效磷含量最低。7 种经济果林土壤含水量平均值为 26.08% , 香蕉地土壤的含水量最高, 龙眼地土壤的含水量最低。7 种经济果林土壤 pH 平均值为 5.10 , 属于酸性土壤, 其中芒果地土壤 pH 值最高, 龙眼地土壤 pH 值最低。

Table 2. The mean value of soil physical and chemical properties of different economic fruit forests

表 2. 不同经济果林土壤理化性质均值

林地类型	有机碳 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	有效磷 mg/kg	平均含水量 %	pH
甘蔗	17.98	0.88	4.40	13.02	31.89	5.51
香蕉	19.52	1.12	7.82	28.48	38.22	5.38
青枣	7.65	0.91	14.33	53.44	25.15	5.30
荔枝	14.89	1.31	0.57	45.53	23.85	4.55
红橙	12.50	1.13	0.38	14.90	20.22	5.00
龙眼	5.33	0.42	2.73	21.52	15.21	4.47
芒果	7.60	0.73	5.41	12.64	28.03	5.52
均值	12.21	0.93	5.09	27.08	26.08	5.10

4.2. 不同类型经济果林土壤碳氮磷储量特征

各经济果林土壤碳氮磷储量均值如表 3 所示, 从表 3 可以看出不同经济果林土壤碳储量远高于氮储量, 香蕉林的土壤碳储量最高(56.56 kg/m^3), 荔枝林的土壤氮储量最高(4.64 kg/m^3), 青枣林的土壤磷储量最高(43.89 kg/m^3)。

Table 3. Mean values of soil carbon, nitrogen and phosphorus reserves in different economic fruit forests (kg/m²)
表 3. 不同经济果林土壤碳氮磷储量均值(kg/m²)

类型	碳储量	氮储量	磷储量
甘蔗	56.20	2.65	12.12
香蕉	56.56	3.27	21.95
青枣	20.96	2.93	43.89
芒果	20.27	1.98	14.75
荔枝	45.48	4.64	1.82
红橙	38.44	3.40	1.20
龙眼	17.92	1.29	9.33
均值	36.54	2.89	15.01

4.2.1. 不同类型经济果林土壤碳储量特征

雷州半岛不同类型经济果林不同深度土壤有机碳储量如图 2 所示，可以看出土壤有机碳储量从大到小依次为：香蕉 > 甘蔗 > 荔枝 > 红橙 > 青枣 > 芒果 > 龙眼。甘蔗、香蕉、荔枝土壤有机碳储量最高值均在深度 75~100 cm 土层，而甘蔗最低值在深度 40~50 cm 土层，香蕉在 10~20 cm，荔枝在 30~40 cm。在甘蔗林和香蕉林中深度 75~100 cm 土层土壤有机碳储量远高于其它各土层，而荔枝林则集中分布在深度 75~100 cm 土层。青枣、芒果、红橙、龙眼土壤有机碳储量在深度 50~75 cm 土层为最高，龙眼最低值在深度 0~10 cm 表土、青枣在深度 10~20 cm、芒果和红橙在深度 20~30 cm，且这四种类型经济果林土壤有机碳储量集中分布在深度 75~100 cm 土层，芒果林在深度 10~20 cm、红橙在深度 30~40 cm 土层土壤有机碳储量也较高。

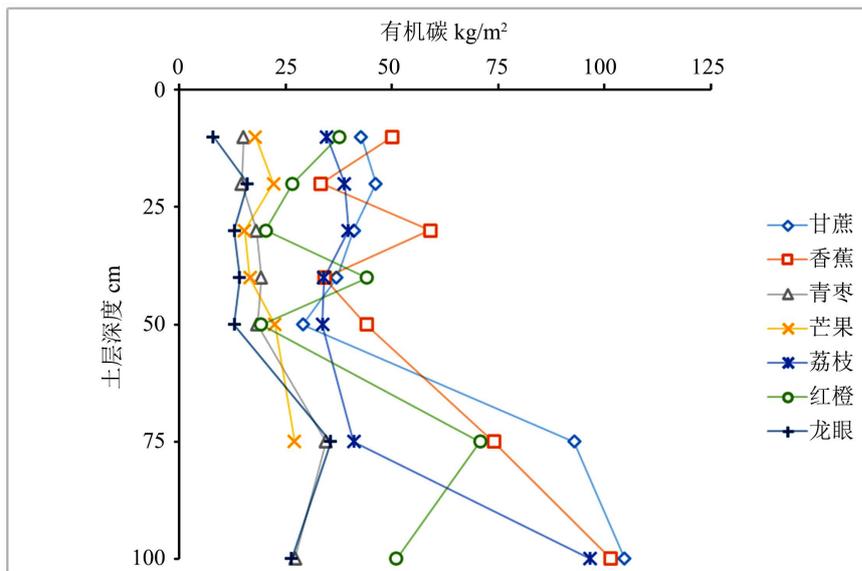


Figure 2. Organic carbon reserves in soil layers at different depths in different economic fruit forests

图 2. 不同经济果林不同深度土层有机碳储量

4.2.2. 不同类型经济果林土壤全氮储量特征

不同经济果林类型不同深度土层土壤全氮储量分布见图 3，从大到小依次为：荔枝 > 红橙 > 香蕉 >

青枣 > 甘蔗 > 芒果 > 龙眼。如图 3 所示, 甘蔗、荔枝、龙眼土壤全氮储量在深度 75~100 cm 最高, 荔枝和龙眼最低值在深度 30~40 cm 土层, 甘蔗在 40~50 cm 深土层最低。甘蔗和荔枝土壤全氮储量均集中在 50~75 cm 深土层分布, 龙眼则各土层分布较均匀。青枣、芒果、红橙、香蕉土壤全氮储量均在 50~75 cm 深土层最高, 而最低值依次在 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、40~50 cm, 这四种类型经济果林土壤全氮储量均在 75~100 cm 深土层分布。

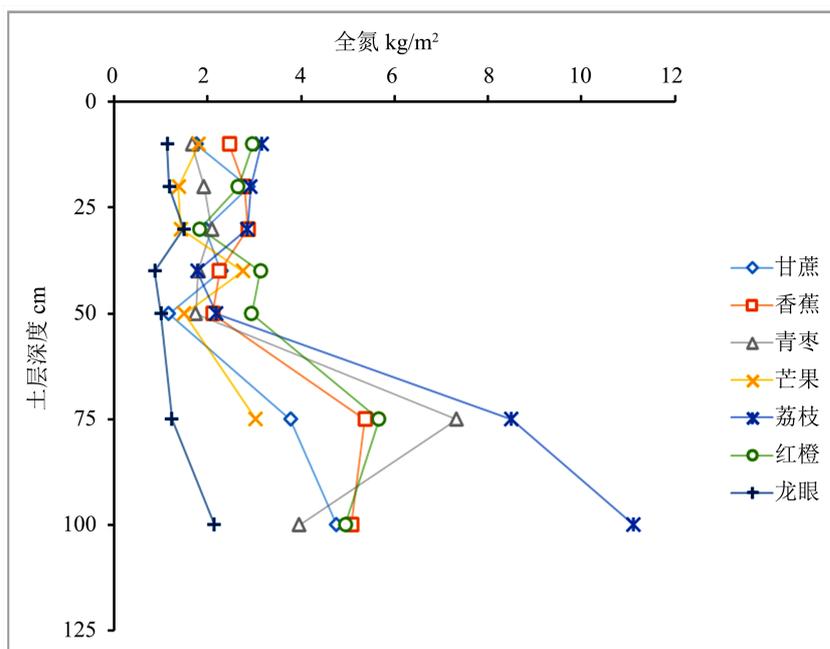


Figure 3. Total nitrogen reserves in soil layers at different depths for different economic fruit forest types

图 3. 不同经济果林类型不同深度土层全氮储量

4.2.3. 不同类型经济果林土壤全磷储量特征

不同经济果林类型不同深度土层土壤全磷储量分布见图 4, 从大到小依次为, 青枣 > 香蕉 > 芒果 > 甘蔗 > 龙眼 > 荔枝 > 红橙。甘蔗地土壤全磷储量最高值在 0~10 cm 深表土层, 最低值在 40~50 cm 深土层, 集中分布在 0~10 cm、50~100 cm 深土层中。香蕉地土壤全磷储量在 75~100 cm 深土层中最高, 在 20~30 cm 深最低, 50~100 cm 深土层全磷储量占整个剖面土壤全磷储量较大。青枣地、芒果地、荔枝地、红橙地、龙眼地土壤全磷储量最高值均在 50~75 cm 深土层, 青枣地和荔枝地的最低值在 30~40 cm 深土层、芒果地和龙眼地的在 20~30 cm 深、红橙地的则在 10~20 cm 深。青枣地、荔枝地、龙眼地土壤全磷储量在 50~75 cm 深土层中集中分布, 芒果地和红橙地在各土层上土壤全磷储量分布均匀。其中相对其它类型经济果林而言, 在同一土层深度上, 青枣地土壤全磷储量较高, 红橙地较低。

4.2.4. 不同类型经济果林土壤养分储量特征

从不同林地土壤养分储量总体特征如图 5 所示, 从图中可以看出香蕉地土壤在碳、氮、磷总储量中皆高于其他林地, 龙眼地则低于大部分林地。甘蔗地土壤的碳储存能力明显高于氮、磷储存的能力。对比其他林地, 青枣地与芒果地土壤在三大指标中, 皆呈现磷储存能力高于碳、氮储存能力的特征。与之相反的是荔枝地与红橙地, 这两种林地土壤则呈现磷储存能力低于碳、氮储存能力的现象。总体而言, 这七类样品树种皆呈现碳储量占比最优, 其次是磷储量, 最后是氮储量的土壤主要养分储量特征。

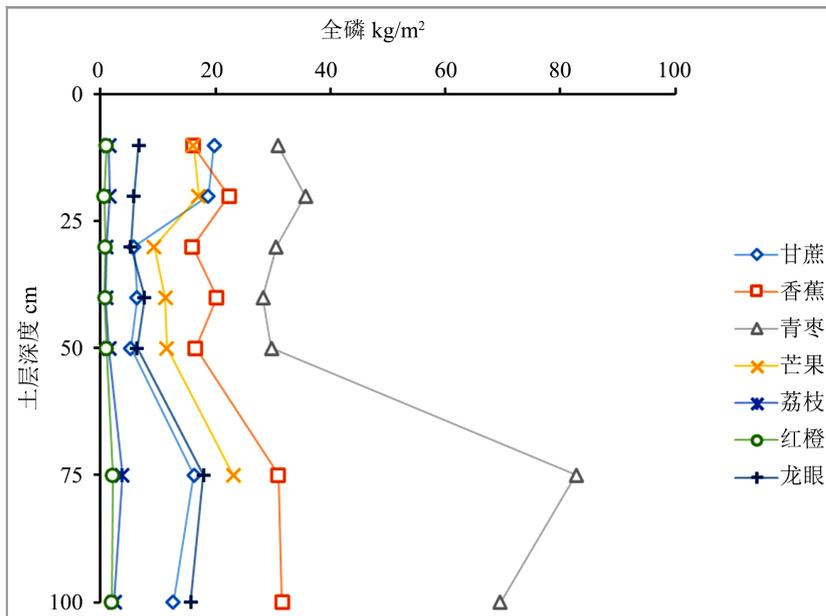


Figure 4. Total phosphorus reserves in soil layers at different depths for different economic fruit forest types

图 4. 不同经济果林类型不同深度土层全磷储量

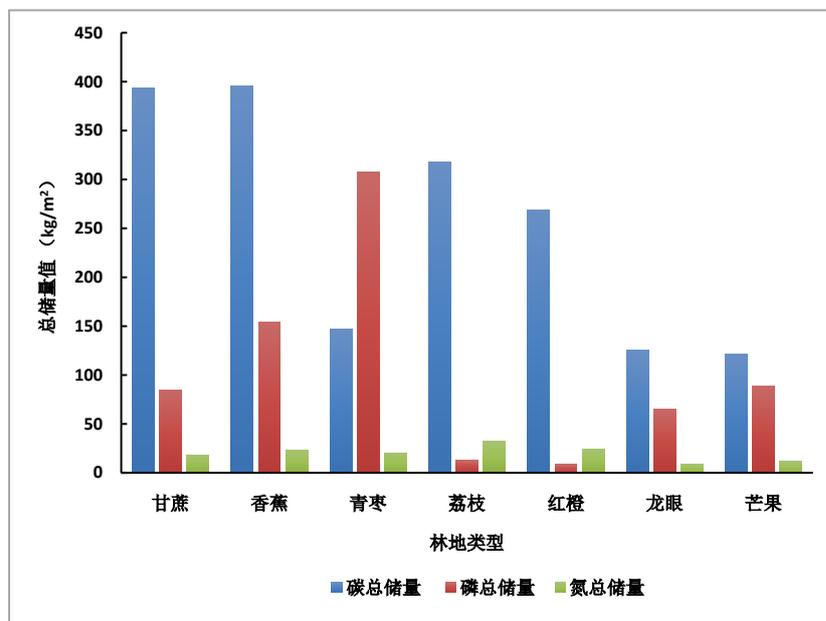


Figure 5. Total reserves of carbon, phosphorus and nitrogen in soils of different economic fruit forests

图 5. 不同经济果林土壤的碳磷氮总储量

4.3. 经济果林土壤碳氮磷储量与土壤理化性质的关系

4.3.1. 经济果林土壤碳储量与土壤理化性质的关系

通过分析土壤有机碳储量与土壤主要理化性质的相关性，探讨土壤中碳储量的影响因素，结果如表 4 所示。从表中可以看出经济果林土壤有机碳储量与土壤含水量呈极显著正相关，与 pH 值、有效磷、土

壤比重、土壤容重间相关性不显著，其中经济果林土壤有机碳储量与 pH 值、土壤容重间不显著正相关，与有效磷、土壤比重呈不显著负相关。

Table 4. Correlation between soil organic carbon reserves and the main physical and chemical properties of soil

表 4. 土壤有机碳储量与土壤主要理化性质相关性

类型	pH	有效磷	土壤比重	土壤容重	含水量
碳储量	0.047	-0.187	-0.144	0.171	0.541**

注：*，表示相关性显著；**，表示相关性极显著。

4.3.2. 经济果林土壤氮储量与土壤理化性质的关系

土壤全氮储量与土壤主要理化性质相关性如表 5 所示，从表中可以看出经济果林土壤全氮储量与土壤主要理化性质间相关性不显著，其中 pH 值、土壤比重与之呈不显著负相关关系，有效磷、土壤容重、含水量与之呈不显著正相关关系。

Table 5. Correlation between soil total nitrogen reserves and main soil physical and chemical properties

表 5. 土壤全氮储量与土壤主要理化性质相关性

类型	pH	有效磷	土壤比重	土壤容重	含水量
氮储量	-0.162	0.060	-0.053	0.080	0.178

4.3.3. 经济果林土壤磷储量与土壤理化性质的关系

土壤全磷储量与土壤主要理化性质相关性如表 6 所示，从表中可以看出经济果林土壤全磷储量与 pH 值、含水量间显著正相关，土壤比重与之呈显著负相关关系，土壤容重与之呈极显著负相关关系，有效磷与之呈不显著正相关。

Table 6. Correlation between soil total phosphorus reserves and main soil physical and chemical properties

表 6. 土壤全磷储量与土壤主要理化性质相关性

类型	pH	有效磷	土壤比重	土壤容重	含水量
磷储量	0.325*	0.264	-0.344*	-0.431**	0.307*

注：*，表示相关性显著；**，表示相关性极显著。

5. 讨论

土壤碳、氮、磷对作物生长和驱动养分循环起重要作用，指示土壤肥力和生产力，植被类型、土壤含水量、地形等因素影响土壤碳氮磷含量空间分布[18]，其中种植人工林可以提高土壤养分含量[19] [20]。研究区 7 种类型经济果林不同深度土层土壤碳、氮、磷含量分布有差异，与张青青等[21]研究结果基本一致。本研究剖面土层深度与 7 种类型经济果林土壤碳氮磷含量分布相关性不显著，但土壤碳氮磷含量整体上随剖面深度加深呈增加趋势，这是由于雷州半岛属于热带多雨地区，营养元素从表土随水分或者其他介质向土壤下层迁移扩散[22] [23]，再者土壤脱硅富铝化普遍，在根系分泌有机酸作用下，释放出的铁铝氧化物能够与有机碳、氮发生沉淀进行积累[24]。

本研究发现碳总储量和氮总储量间极显著正相关，氮总储量和磷总储量间极显著正相关，碳总储量和磷总储量间呈显著正相关。雷州半岛主要经济林地碳储量为 36.54 kg/m²，远低于中国人工林土壤碳储量平均水平(107.1 kg/m²) [25]，处于低碳储量状态，这可能与研究区对经济果林产量多施用化肥而少施用有机肥有关。其中，氮肥的施加会增大有机碳的溶解性，导致有机碳易于流失，使得土壤有机碳含量减

少[26][27]。经济果林土壤氮储量为 2.89 kg/m^2 ，远低于中国森林土壤氮储量平均水平(10.96 kg/m^2) [28]，处于低氮储量状态，这可能与雷州半岛典型经济果林种植年份与复种次数相关。陶宝先等[29]研究指出连作障碍使土壤养分降低，对作物产量产生影响，大量施加有机肥不仅可以提高产量而且显著增加土壤碳氮储量，而种植 10 年以上土壤较 10 年以下土壤施用有机肥减少，但有机碳稳定性提高。经济林地土壤处于高磷储量状态(15.01 kg/m^2)，高于中国土壤磷储量估算值(0.18 kg/m^2) [30]，这可能与经济果林长期施用磷肥有关，施加磷肥显著提高土壤磷储量[31]。

土壤水分条件在良好情况下，有利于土壤碳氮磷的积累。此外，牛海等[32]研究表明深层土壤环境相对封闭，60 cm 以下深度土层土壤含水量与土壤碳氮磷更容易建立起稳定的关系。本研究中经济果林土壤碳氮磷储量与土壤含水量间呈正相关，其中经济果林土壤有机碳储量与之呈极显著正相关，土壤全磷储量与之呈显著正相关。由于土壤中 pH 值对土壤微生物的活动强度影响不同，pH 值与土壤碳氮磷储量之间的影响机理目前还在研究，张静静等[33]、郭志华等[34]、戴万宏等[35]研究指出，土壤碳氮磷与 pH 值之间呈负相关，李丹等则指出土壤碳氮磷与 pH 值呈正相关[36]，本研究经济果林土壤全磷储量与 pH 值呈显著正相关，符合土壤 pH 值呈弱碱性，土壤微生物活性弱，有机质分解速率降低，土壤碳氮磷难以积累[21]。土壤通气性、微生物活性及植物根系生长受土壤容重影响，土壤容重越大，土壤通气性变差，植被根系的生长缓慢，微生物难以活动，土壤碳氮磷储量少[21]，本研究经济果林土壤全磷储量与容重呈极显著负相关关系，对此可选择种植适合实施轮作、翻耕和覆盖材料等耕作方式的经济作物，以有效降低土壤容重，提高土壤碳氮磷储量。

6. 结论

(1) 雷州半岛各类型经济果林不同深度土层土壤碳氮磷含量总体上随剖面深度加深呈增加趋势，土层深度对土壤碳氮磷含量分布影响不显著。各类型经济果林土壤总体处于低碳储量、低氮储量、高磷储量状态，不同深度土层土壤碳氮磷储量总体集中分布在 50~100 cm 深土层，土层深度对土壤碳、氮储量影响显著，而对磷储量影响不显著。就整个剖面而言，碳、氮、磷总储量间显著正相关。

(2) 雷州半岛 7 种类型经济果林土壤碳氮磷储量与不同土壤理化性质相关性表明含水量越大、pH 值越高和土壤容重越小则有利于土壤碳氮磷的积累。其中本研究经济果林土壤全磷储量与 pH 值呈显著正相关，这与之前研究有所不同。

(3) 雷州半岛地区可选择种植涵养水源率高、适合实施轮作、翻耕和覆盖材料等耕作方式的经济作物，以有效提高土壤含水量和降低土壤容重，提高土壤碳氮磷储量，促进经济与生态效益共同发展。

基金项目

岭南师范学院大学生创新创业训练计划项目(X202210579042)。

参考文献

- [1] Sistla, S.A. (2012) Stoichiometric Flexibility as a Regulator of Carbon and Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems under Change. *New Phytologist*, **196**, 68-78. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04234.x>
- [2] 宋娅, 康峰峰, 韩海荣, 等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. 世界林业研究, 2015, 28(3): 6-12.
- [3] Fang, X.M., Zhang, X.L., Zong, Y.Y., et al. (2017) Soil Phosphorus Functional Fractions and Tree Tissue Nutrient Concentrations Influenced by Stand Density in Subtropical Chinese Fir Plantation Forests. *PLOS ONE*, **12**, e0186905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186905>
- [4] 马月婷. 阿拉善荒漠不同株龄白沙蒿对土壤养分的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [5] 柳叶, 任悦, 高广磊, 等. 沙地樟子松人工林土壤碳氮磷储量分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(6): 27-34.
- [6] 王超, 董玉清, 卢瑛, 等. 粤北低山林地改建梯田对土壤碳、氮、磷及其化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报,

- 2021, 32(7): 2440-2448.
- [7] Murty, D., Kirschbaum, M.U.F., Mcmurtrie, R.E., *et al.* (2002) Does Conversion of Forest to Agricultural Land Change Soil Carbon and Nitrogen? A Review of the Literature. *Global Change Biology*, **8**, 105-123. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00459.x>
- [8] Li, X.F., Ding, C.X., Bu, H., *et al.* (2020) Effects of Submergence Frequency on Soil C:N:P Ecological Stoichiometry in Riparian Zones of Hulunbuir Steppe. *Journal of Soils and Sediments*, **20**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02533-x>
- [9] Jobbagy, E.G. and Jackson, R.B. (2000) The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*, **10**, 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- [10] 邓玉娇, 王捷纯, 徐杰, 等. 广东省植被固碳量时空变化及气象贡献率研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 1-8.
- [11] 罗丝琼, 郭其强, 盘金文, 等. 黔东南 3 种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2022, 53(11): 3192-3200.
- [12] 顾伟, 李志安, 邹碧, 等. 华南热带人工林土壤有机碳含量及其稳定性特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 17(5): 369-376.
- [13] 徐英明, 虞依娜, 李鑫, 等. 南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 355-362.
- [14] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 等. 中国南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[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [15] 田云飞, 安俊芳, 陶士敏. 重铬酸钾氧化-分光光度法测定土壤有机碳含量的研究[J]. 现代化工, 2020, 40(4): 231-235.
- [16] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [17] 李芳. 给水污泥用于园林种植的可行性和环境影响分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2012: 16.
- [18] Liu, Z.P., Shao, M.A. and Wang, Y.Q. (2011) Effect of Environmental Factors on Regional Soil Organic Carbon Stocks across the Loess Plateau Region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **142**, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.002>
- [19] Cheng, X., Yang, Y., Li, M., *et al.* (2013) The Impact of Agricultural Land Use Changes on Soil Organic Carbon Dynamics in the Danjiangkou Reservoir Area of China. *Plant and Soil*, **366**, 415-424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1446-6>
- [20] Wei, X., Li, X., Jia, X., *et al.* (2013) Accumulation of Soil Organic Carbon in Aggregates after Afforestation on Abandoned Farmland. *Biology and Fertility of Soils*, **49**, 637-646. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0754-6>
- [21] 张青青, 张桂莲, 伍海兵, 等. 上海市林地土壤有机碳分布特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1087-1095.
- [22] 余明, 郑新颖, 薛立. 火力楠林地土壤碳和养分储量垂直分布研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 77-82.
- [23] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [24] Atere, C.T., Gunina, A., Zhu, Z.K., *et al.* (2020) Organic Matter Stabilization in Aggregates and Density Fractions in Paddy Soil Depending on Long-Term Fertilization: Tracing of Pathways by ^{13}C Natural Abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, **149**, Article ID: 107931. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107931>
- [25] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [26] 熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1656-1668.
- [27] 蔡乾坤. 长期施用氮肥对杉木人工林土壤 C、N、P 的影响[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2015.
- [28] Xu, L., He, N.P. and Yu, G.R. (2020) Nitrogen Storage in China's Terrestrial Ecosystems. *Science of the Total Environment*, **709**, Article ID: 136201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136201>
- [29] 陶宝先, 张保华, 董杰, 等. 不同土地利用方式对寿光市农业土壤有机碳分子结构和稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1801-1806.
- [30] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 54(6): 945-952.

- [31] 刘丹, 游郭虹, 宋小艳, 等. 施磷对川西北高寒草地土壤磷形态及有效性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 1-10.
- [32] 牛海, 李和平, 赵萌莉, 等. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 157-163.
- [33] 张静静, 刘尊驰, 鄢创, 等. 土壤 pH 值变化对 3 种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 69-81.
- [34] 郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 8-15.
- [35] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.
- [36] 李丹, 刘铁男, 王文帆, 等. 丰林自然保护区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关性分析[J]. 林业科技, 2012, 37(5): 25-26.