

福州市不同种植年限茉莉花园土壤碳、氮、磷及生态化学计量比特征

黑杰^{1,2}, 金强^{1,2}, 杨文文³, 阮敏敏³, 陈斌³,
陈思聪³, 王艳娜³, 黄艳³, 刘旭阳^{1,2}, 林少颖^{1,2}, 王维奇^{1,2}

(1.福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007;

2.福建师范大学地理研究所,福州 350007;3.福州市农业农村局,福州 350026)

摘要:为了阐明种植年限对茉莉花园土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)及其生态化学计量特征的影响,以福州市种植年限约为3(J-3),10(J-10),15(J-15),30(J-30),>40(J-40)年的茉莉花园为研究对象,对土壤C、N、P与生态化学计量比及其影响因子进行了测定与分析。结果表明:(1)与J-3相比,随着种植年限的增加J-10、J-30、J-40土壤容重显著下降29%,19%和18%($P<0.05$),J-10、J-15、J-30、J-40土壤黏粒含量分别显著降低26%,12%,30%和12%($P<0.05$);(2)与J-3相比,J-10、J-15、J-30和J-40土壤C、N含量分别降低82%和236%,73%和199%,149%和488%,201%和481%($P<0.05$);速效氮(AN)分别降低97%和337%,234%和98%($P<0.05$);而与J-3相比,J-15和J-40土壤P和速效磷(AP)分别显著增加119%和123%,123%和136%($P<0.05$);(3)土壤C、N具有良好的拟合关系($R^2=0.96$, $P<0.01$),表明C、N具有良好的养分协同关系,并且C、N都与C:N呈显著负相关($P<0.01$),与C:P和N:P显著正相关($P<0.01$);(4)与J-3相比,J-10、J-15、J-30和J-40土壤C:N分别显著增加85%,72%,136%和93%($P<0.05$),而C:P和N:P分别显著降低161%和390%,279%和554%,109%和472%,372%和809%($P<0.05$);(5)土壤容重、pH和黏粒含量是影响土壤C、N、P等养分因子和生态化学计量比的主要影响因素,且随着茉莉花种植年限的增加pH上升,容重和黏粒含量下降,土壤理化结构改善。总体来看,随着茉莉花种植年限的增加,福州市茉莉花园土壤C、N、P及其生态化学计量特征和理化性质将发生一定的变化,这种改变将不利于茉莉花的种植,可进一步优化施肥方案,并进行土壤改良,以期实现茉莉花的可持续生产。

关键词: 碳; 氮; 磷; 生态化学计量比; 理化因子; 茉莉花园

中图分类号:S59

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0288-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.037

Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Ecological Stoichiometry in Jasmine Orchards with Different Planting Years

HEI Jie^{1,2}, JIN Qiang^{1,2}, YANG Wenwen³, RUAN Minmin³, CHEN Bin³, CHEN Sicong³,

WANG Yanna³, HUANG Yan³, LIU Xuyang^{1,2}, LIN Shaoying^{1,2}, WANG Weiqi^{1,2}

(1.Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of

Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2.Institute of Geographical Science,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. Fuzhou Agriculture and Rural Affairs Bureau, Fuzhou 350026)

Abstract: In order to clarify the impact of planting years on the soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and their ecological stoichiometry characteristics of jasmine garden, the 3-year (J-3), 10-year (J-10), 15-year (J-15), 30-year (J-30) and > 40-year (J-40) jasmine gardens in Fuzhou were taken as the research object, soil C, N, P and ecological stoichiometric ratios and their environment factors were determined and analyzed. The result showed: (1) Compared with J-3, the soil bulk density of J-10, J-30 and J-40 were decreased significantly by 29%, 19% and 18% ($P < 0.05$) respectively with the increase of

收稿日期:2021-08-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41571287);福州茉莉花与茶文化系统全球重要农业文化遗产监测项目(2021)

第一作者:黑杰(1996—),男,硕士研究生,主要从事生态与环境研究。E-mail:hj15377185569@163.com

通信作者:王维奇(1982—),男,博士,研究员,主要从事生态与环境研究。E-mail:wangweiqi15@163.com

planting years. The soil clay contents of J-15, J-30 and J-40 were significantly reduced by 26%, 12%, 30% and 12% ($P < 0.05$) respectively. (2) Compared with J-3, soil C and N contents of J-10, J-15, J-30 and J-40 were decreased by 82% and 236%, 73% and 199%, 149% and 488%, 201% and 481% ($P < 0.05$) respectively. Available nitrogen (AN) contents were reduced by 97%, 337%, 234% and 98% ($P < 0.05$). Compared with J-3, soil P and available phosphorus (AP) contents of J-15 and J-40 were increased significantly by 119% and 123%, 123% and 136% respectively ($P < 0.05$). (3) Soil C and N had a good fitting relationship ($R^2 = 0.96$, $P < 0.01$), which indicated that C and N was significantly correlation and both C and N were significantly and negatively correlated with C : N ($P < 0.01$), which were significantly and positively correlated with C : P and N : P ($P < 0.01$). (4) Compared with J-3, soil C : N of J-10, J-15, J-30, and J-40 were significantly increased by 85%, 72%, 136% and 93% ($P < 0.05$) respectively, while C : P and N : P were significantly reduced by 161% and 390%, 279% and 554%, 109% and 472%, 372% and 809% respectively ($P < 0.05$). (5) Soil bulk density, pH, and clay content were the main factors affecting soil C, N, P and other nutrient factors and ecological stoichiometry. Soil pH was increased, and bulk density, clay contents were decreased with the increment of jasmine planting years. The physical and chemical structures of the soil were improved. On the whole, soil C, N, P and their ecological stoichiometric characteristics, physical and chemical properties of the jasmine garden in Fuzhou will undergo certain changes with the increment of planting years. These changes would be inconducive to the planting of jasmine, so further optimized fertilization and soil improvement will be need for achieving sustainable production of jasmine.

Keywords: C; N; P; ecological stoichiometry; physical and chemical factors; jasmine garden

碳(C)、氮(N)、磷(P)是土壤中主要的组成元素,也是维持陆地生态系统生产力的关键因子^[1]。生态化学计量学将生物的能量平衡与化学计量比相联系,从生态学与化学角度来研究 C、N、P 元素的循环与周转^[2]。土壤 C : N 比值可以反映土壤矿化能力和微生物群落结构,也可以作为预测有机质分解速率的指标之一,通常土壤的 C : N 与其分解速率成反比关系^[3]。土壤 C : P 被认为是土壤磷矿化能力的标志,也是衡量 P 释放潜力和微生物对磷吸收潜力的指标^[4]。土壤 N : P 可以反映土壤 N、P 元素的限制性特征^[5]。

近年来,国内外对于土壤生态化学计量比的研究更为关注不同海拔下^[6]、不同种植年限^[7]、特定的大区域^[8]和微环境下^[9]生态化学计量比的变化特征,研究对象主要集中在人工林木、灌丛以及草本植物等,而关于农田经济作物,特别是茉莉花园土壤生态化学计量比的变化特征的研究尚鲜见报道。时间尺度可以反映生态系统长期演化的进程。当下,对于土壤生态化学计量比在时空格局变化的规律尚不清楚^[10]。从时间角度的变化上看,农业用地具有长久性、高频繁性、高强度性和复杂性,其生态化学计量比变化规律对于维系农业可持续生产具有深刻的意义。因此,从不同种植年限的时间角度来研究茉莉花园土壤生态化学计量比变化特征,有助于揭示茉莉花园土壤 C、N、P 含量的循环特征,为茉莉花园增产增收提供指导意义。

生态化学计量比与环境因子相互关联,并作用于生态系统^[11]。青焯等^[12]研究若尔盖花湖湿地保护区生态化学计量比表明,土壤含水量与容重显著影响了土壤养分含量及生态化学计量比的变化;刘旭阳等^[13]研究福州市不同农田生态化学计量比差异特征表明,土壤含水量、pH 和粒径组成也会影响不同类型的农田土壤生态化学计量比特征。根据国内学者对于土壤理化因子与土壤生态化学计量比关研究发现,二者关系紧密,对于土壤内部 C、N、P 元素的循环与变化非常重要。因此,探讨出生态化学计量学特征变化的驱动因素尤为重要,对于生态系统中 C、N、P 等元素的平衡及关联性的研究具有重要的意义。

福州市是我国四大茉莉花主产区之一,种植历史悠久,在涵养水源、护岸促淤、保障生物多样性和促进经济发展等方面发挥着重要作用。现有研究对于茉莉花园土壤养分及其生态化学计量比研究并不充分,对于从时间尺度上厘清茉莉花园 C、N、P 等养分元素和生态化学计量比特征的研究尚未开展。因此,从种植年限角度来探讨茉莉花园 C、N、P 及其他养分元素和计量比的变化特征,有助于揭示特定区域环境下,土壤养分循环状况、限制因子在时间尺度上的变化特征,明晰土壤中营养元素的动态变化以及生态循环过程中的耦合作用,为农业可持续发展提供理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福州市茉莉花园(25°36′00″—26°20′00″N,118°

加 68%,26%,74% ($P<0.05$)。土壤黏粒整体随着种植年限的增加而降低,表现为 J-3>J-40>J-15>J-10>J-30。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低了 26%,12%,30%,12% ($P<0.05$)。

表 1 福州市不同种植年限下茉莉花园土壤理化特征

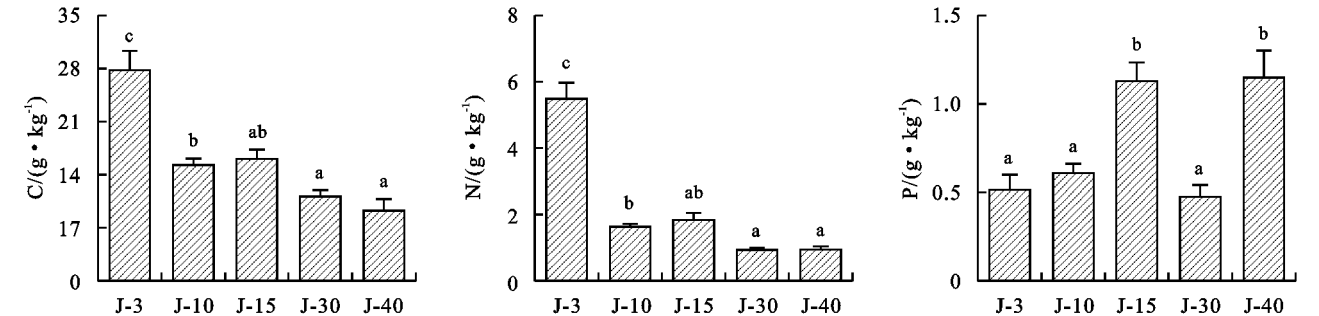
样地	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水量/%	pH	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
J-3	1.54±0.03a	16.28±1.62d	5.94±0.04a	0.17±0.02a	5.39±2.25a	25.42±1.55c	69.19±2.76a
J-10	1.19±0.04c	29.64±1.70a	5.98±0.04a	0.16±0.01a	6.48±2.21a	42.64±2.33a	50.88±2.96c
J-15	1.47±0.04a	19.21±1.55cd	6.06±0.09a	0.15±0.03a	7.42±2.96a	32.12±1.51b	60.46±2.98b
J-30	1.29±0.03b	21.79±1.26bc	5.99±0.03a	0.13±0.01a	7.03±2.61a	44.35±1.25a	48.62±3.51c
J-40	1.24±0.03bc	25.20±2.63ab	6.33±0.13b	0.18±0.09a	13.34±1.34b	25.88±2.77c	60.78±2.33b

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示不同种植年限茉莉花园间差异性显著($P<0.05$)。下同。

2.2 福州市不同种植年限下茉莉花园土壤 C、N、P 含量特征

由图 2 可知,福州市不同年限茉莉花园土壤 C 和 N 含量整体上随着种植年限的增加而降低,具体表现为 J-3>J-15>J-10>J-30>J-40。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低 82%,73%,150%,201% ($P<0.05$)。土壤 C 含量为 9.24~27.80 g/kg,与 J-3 相比,J-10、J-15、J-

30、J-40 分别显著降低 82%,73%,149%和 201% ($P<0.05$)。土壤 N 含量 0.94~5.47 g/kg,与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低 236%,199%,488%和 481% ($P<0.05$)。土壤 P 含量整体上随着种植年限的增加而增加,具体表现为 J-40>J-15>J-10>J-3>J-30。土壤 P 含量为 0.49~1.14 g/kg,其中与 J-3 相比,J-15 和 J-40 分别显著增加 119%和 123% ($P<0.05$)。



注:图中数据为平均值±标准误差;图柱上方不同小写字母表示不同种植年限茉莉花园间差异达显著性水平($P<0.05$)。下同。

图 2 福州市不同种植年限茉莉花园土壤 C、N、P 含量

2.3 福州市不同种植年限茉莉花园土壤 C、N、P 生态化学计量比特征

由图 3 可知,福州市不同种植年限茉莉花园土壤 C:N 整体表现为随着种植年限的增加而上升。不同种植年限茉莉花园土壤 C:N 为 5.07~11.97。并且与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著增加 85%,72%,136%和 93% ($P<0.05$)。土壤

C:P 整体随着种植年限的增加而降低,变动范围为 8.04~54.01。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低了 161%,279%,109%和 372% ($P<0.05$)。土壤 N:P 整体随着种植年限的增加而降低,变动范围为 0.12~1.90。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低 390%,554%,472%和 809% ($P<0.05$)。

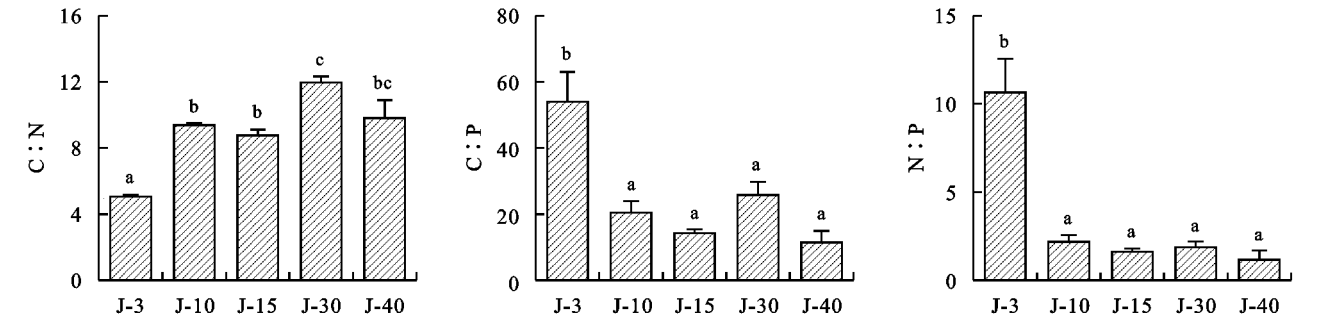


图 3 福州市不同种植年限茉莉花园土壤 C:N、C:P 和 N:P

2.4 福州市不同种植年限下茉莉花园土壤 C、N、P 及生态化学计量比特征的回归分析

通过对福州市茉莉花园土壤 C、N、P 与生态化学计

量比的拟合分析(图 4)可以看出,土壤 C 和 N 含量具有显著的拟合关系,表现出随着 C 含量的增加,N 含量显著增加($R^2=0.96,P<0.01$)。土壤 C 含量与 C:N 和

C : P 都具有较好的线性拟合关系($R^2=0.70,R^2=0.78$, $P<0.01$),表现出随着 C 含量增加 C : N 呈现降低趋势, C : P 呈现增加趋势。土壤 N 含量与 N : P 和 C : P 也具有较好的线性拟合关系($R^2=0.82,R^2=0.91,P<$

0.01),表现为随着 N 含量的增加 N : P 显著降低,C : N 显著降低。土壤 P 含量与 C : P 和 N : P 具有较好的线性拟合关系($R^2=0.68,R^2=0.51,P<0.01$),表现出随着 P 含量的增加,N : P 和 C : P 显著降低。

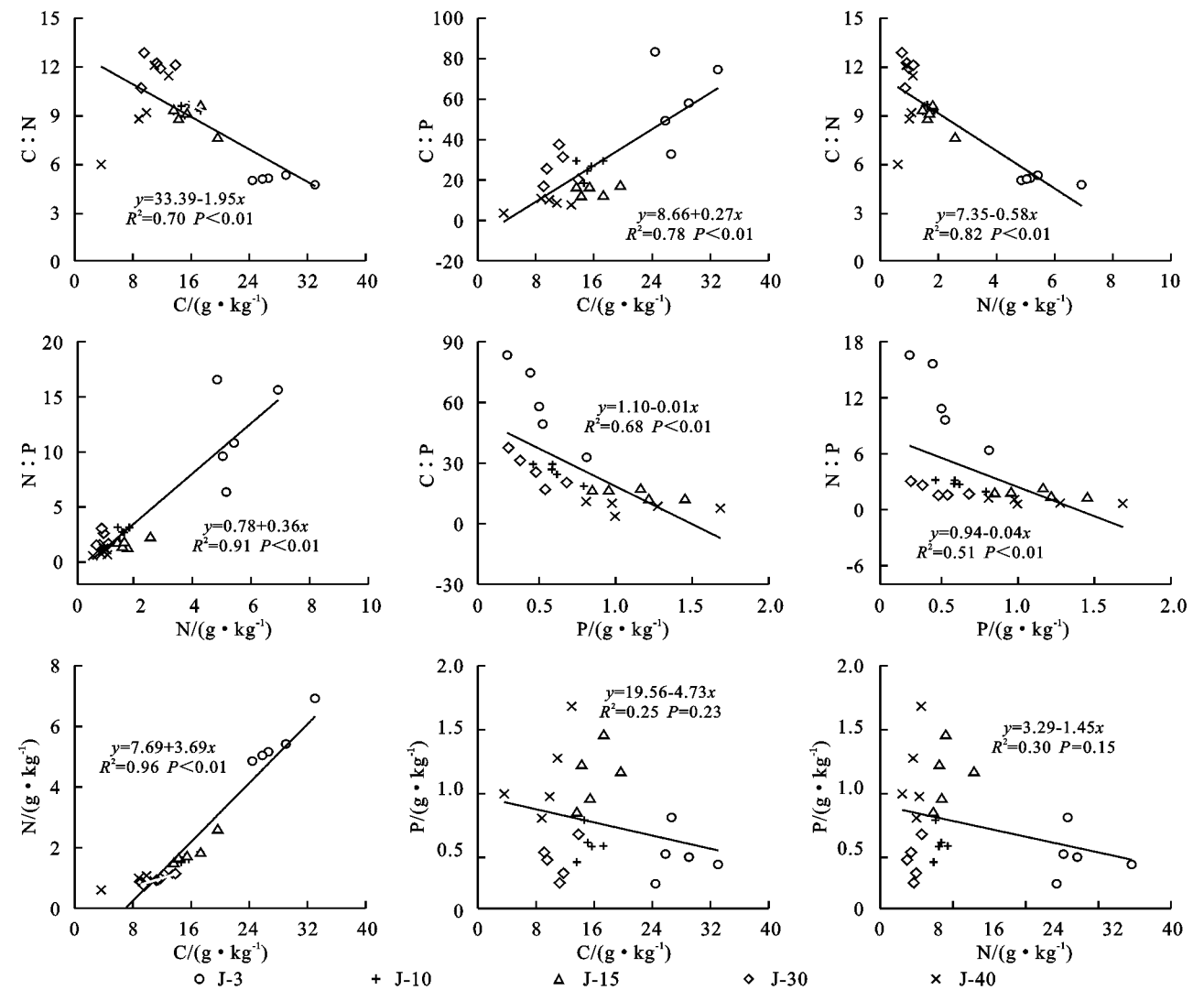


图 4 福州市不同种植年限茉莉花园 C、N、P 及生态化学计量比的线性回归

2.5 福州市不同种植年限茉莉花园土壤速效养分、DOC 和 SOM 特征分析

根据福建省肥力丰缺指标以及福建与全国土壤背景值划分出福州市不同种植年限茉莉花园土壤速效养分丰缺特征。从表 2 可以看出,福州市茉莉花园土壤 AN 含量水平等级较低(IV 和 V),变化范围为 20.68~90.47 mg/kg。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低 97%,337%,234%和 98% ($P<0.05$);土壤 AP 含量值均处于极高水平(I),变化范围为 73.91~174.47 mg/kg。与 J-3 相比,J-15 和 J-30 分别显著增加 123%和 136% ($P<0.05$);土壤 SOM 含量变化范围为 15.93~47.91 mg/kg。与 J-3 相比,J-10、J-15、J-30、J-40 分别显著降低 82%,72%,150%和 201% ($P<0.05$)。土壤 DOC 含量变化范围为 61.13~140.63 mg/kg。与 J-3 相比,J-10 和 J-40 分别显

著降低了 44%和 49% ($P<0.05$)。

2.6 土壤环境因子、养分含量及其生态化学计量比之间的关系特征

由图 5 可知,RDA 累计可解释变量为 47.11%。其中土壤容重、黏粒含量是影响 C、N、AN、C : P、N : P 和 SOM 的主要因子,呈正相关性,也显著影响 C : N,呈负相关性。土壤含水量也是影响 C、N、C : P、N : P 和 SOM 的主要因子,呈负相关性。

通过对福州市不同种植年限茉莉花园土壤养分元素和生态化学计量比与理化之间的相关分析可知,土壤含水量与 C、N、SOM 呈显著负相关($P<0.01$),而与 C : N 呈显著正相关($P<0.05$),与 N : P、C : P 呈显著负相关($P<0.05$)。土壤容重与 N、SOM、C、N : P 呈显著正相关($P<0.01$),与 C : P 呈显著正相关($P<0.05$),与 C : N 呈显著负相关($P<0.01$)。

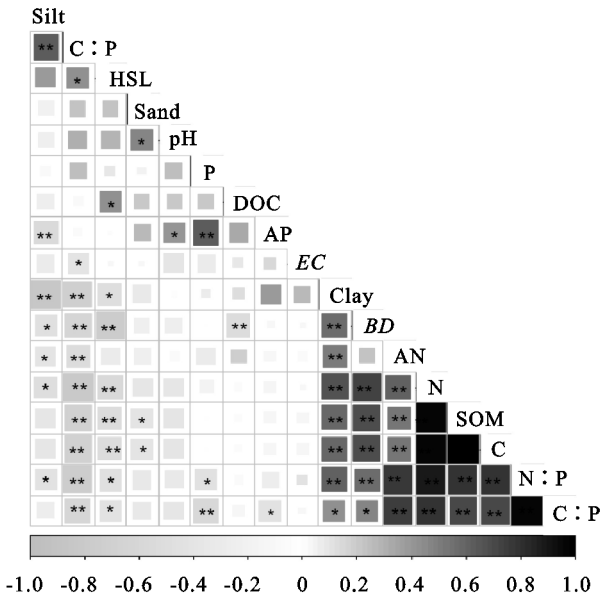
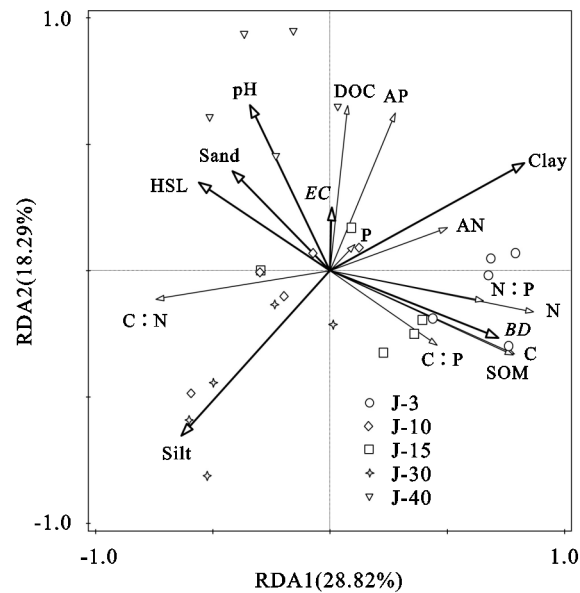
土壤电导率仅与 C : N 呈显著负相关($P<0.05$)。土壤 PH 与 AP 呈显著正相关($P<0.05$)。土壤黏粒与 N、SOM、C、AN、N : P 呈显著正相关($P<0.01$),与 C : P 呈显著正相关($P<0.05$),与 C : N 呈显著负相关($P<0.01$)。土壤粉粒与 C : N 呈显著正相关($P<0.01$),与 AP 呈显著负相关($P<0.01$),与 N、AN、N : P 呈显著负相关($P<0.05$)。土壤砂粒与 C

和 SOM 呈显著负相关($P<0.05$)。土壤 C 与 SOM、N、AN、N : P、C : P 呈显著正相关($P<0.01$),与 C : N 呈显著负相关($P<0.01$)。土壤 N 与 SOM、AN、N : P、C : P 呈显著正相关($P<0.01$),与 C : N 呈显著负相关($P<0.01$)。P 与 AP 呈显著正相关($P<0.01$),与 N : P($P<0.05$)、C : P($P<0.01$)呈显著负相关。

表 2 福州市不同种植年限茉莉花园土壤速效养分及 SOM 和 DOC 含量分布特征

样地	AN/(mg · kg ⁻¹)	AP/(mg · kg ⁻¹)	SOM/(g · kg ⁻¹)	DOC/(mg · kg ⁻¹)
J-3	90.47±20.98a(IV)	73.91±11.68a(I)	47.91±2.60a(I)	94.19±6.80a
J-10	45.85±2.19b(V)	76.16±3.36a(I)	26.32±1.05b(II)	135.89±18.56b
J-15	20.68±1.30b(V)	165.43±22.73b(I)	27.70±1.88b(II)	80.33±7.02a
J-30	27.02±0.98b(V)	112.36±5.60a(I)	19.16±1.46b(III)	61.13±9.41a
J-40	45.61±13.49b(V)	174.47±25.44b(I)	15.93±2.68b(III)	140.63±15.47b

注:(I)为极高水平;(II)为高水平;(III)为中等水平;(IV)为低水平;(V)为极低水平。



注:BD 为土壤容重;EC 为土壤电导;Sand 为土壤砂粒粒径;Silt 为土壤粉粒粒径;Clay 为土壤黏粒粒径;HSL 为土壤含水量;SOM 为土壤有机质;C 为碳;N 为氮;P 为磷;DOC 为可溶性有机碳;AN 为速效氮;AP 为速效磷。下同。

图 5 福州市不同种植年限茉莉花园土壤生态化学计量比与理化性质相关性

3 讨论

3.1 福州市不同种植年限茉莉花园土壤 C、N、P 含量及变化特征

福州市茉莉花园土壤 C、N 含量均高于全国平均水平^[21],而 P 含量略低于全国平均水平。这与张莎莎等^[22]、李丹维等^[6]研究结果较为类似,而与张友等^[23]、董雪等^[24]研究结果差异较大(表 3)。通过整合不同学者对于不同气候、不同土地覆被下土壤 C、N、P 含量及其与全国平均土壤含量的比较发现,茉莉花园和森林相对于湿地、沙漠具有更为丰富的 C、N、P,主要是因为不同土地覆被的差异性。同时这也说明福州茉莉花园具有较高的 C、N、P 含量满足茉莉花生长,有利于进一步剖析在时间变化尺度下不同种植年限土壤 C、N、P 的变化特征。

本研究中土壤 C、N、AN、SOM 的含量整体上随着种植年限的增加而降低,而 P 和 AP 的含量整体随着种植年限的增加而增加,表明茉莉花连作会增大对农田土壤肥力的消耗,进而导致土壤 C、N、AN、SOM 的损耗。P 和 AP 含量整体增加可能是由于茉莉花园施肥以无机肥为主,导致可溶性磷与铁、铝元素螯合,促进磷酸化合物的形成^[25],进而导致 P 和 AP 含量的相对富集。并且,茉莉花园 AN 含量水平整体上偏低(IV 和 V),速效磷水平偏高(I)。这也表明茉莉花可利用的有效氮供给能力弱,而有效磷供给能力强。

此外,通过整合其他学者对不同种植年限植被的研究(表 4)发现,茉莉花与紫花苜蓿、柚木人工林和香榧较为类似,而与葡萄、茶树等差别较大。这可能与区域环境的异质性、作物类型和农艺管理模式有关。茉莉花和紫花苜蓿都是多年生的木犀科植

物^[26],木质素含量较高,不易分解,复种率低且花蕾经常被采摘^[27]。因此,凋落物残体及其根系残留物归还土壤较少,不利于土壤 C、N 的积累。柚木人工林与香榧都是多年生林木,其树种、凋落物单一,且随着种植年限增加凋落物减少,因而对土壤养分补充不足^[5,28]。而葡萄和茶树最有可能是因为施肥与农业管理所造成的不同^[7,29]。此外,茉莉花是喜肥农作物,多年连作,会加大对土壤肥力的消耗。并且长期单一化的农田种植,使植物平均盖度降低、生态系统单一化、微生物多样性降低,最终使得土壤 C、N 含量降低。气候、地形、土壤粒径结构与环境因子等因

素也会影响土壤养分含量^[3]。茉莉花喜光照,生长期间土壤含水量较低。本研究生长季土壤含水量整体随着种植年限的增加而增加,但相对含量较低,这也说明了土壤矿化效果较强,不利于土壤碳、氮的积累。另外随着种植年限的增加土壤整体 DOC 也在增加,表明茉莉花园土壤不稳定性有机碳含量在增加,不利于土壤碳库的稳定性^[30]。此外,随着种植年限的增加土壤粒径结构也产生了变化,砂粒和粉粒含量增加,而黏粒含量降低也说明土壤保持养分的能力降低,但增加了土壤通气性和疏松性,有利于改善土壤粒径组成。

表 3 全国土壤养分含量及生态化学计量比特征

研究地点	土壤类型	C/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P	参考文献
全国	全国土壤	10.32	1.86	0.78	12.30	52.70	3.90	Tian 等 ^[21]
山东黄河三角洲国家级自然保护区	温带季风湿地土壤	3.50	0.40	0.50	8.77	6.81	0.77	张友等 ^[23]
内蒙古自治区乌兰布和沙漠	中温带干旱性沙漠土壤	2.45	0.26	0.28	9.41	8.70	0.93	董雪等 ^[24]
安徽省金寨天马国家自然保护区	亚热带季风森林土壤	42.15	2.51	0.92	17.01	43.59	2.63	张莎莎等 ^[22]
陕西省宝鸡	温带季风森林土壤	40.58	3.11	0.39	13.34	102.20	7.55	李丹维等 ^[6]
福建省福州市	亚热带季风茉莉花园土壤	15.90	2.16	0.74	9.01	25.16	3.49	本研究

表 4 不同种植年限下土壤养分含量整体变化趋势特征

研究地点	植被	种植年限/a	C/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P	参考文献
广西	柚木人工林	10,32,37	降低	降低	降低	增加	降低	降低	张继辉等 ^[5]
黄土高原	紫花苜蓿	1,10,20,30	降低	降低	降低	降低	降低	降低	赵如梦等 ^[26]
贺兰山东麓	葡萄	1,7,20	增加	增加	增加	降低	降低	降低	贺婧等 ^[7]
四川雅安	茶树	12~15,20~22,30~33,>50	增加	增加	降低				李玮等 ^[29]
浙江省新昌县	香榧	5,10,15	降低	降低	降低	降低			叶雯等 ^[28]
福建省福州市	茉莉花	3,10,15,30,40	降低	降低	增加	增加	降低	降低	本研究

3.2 福州市不同种植年限茉莉花园生态化学计量比分布特征

本研究中 C 与 N、AN 与 N、P 与 AP、C 与 SOM、C 与 C : N 和 C : P、N 与 C : N 和 N : P、P 与 C : P 和 N : P 都具有良好的线性相关关系(图 3、图 5b),这与玛孜依热阿·努尔海拉提等^[31]研究结果较为类似。表明土壤 C、N、P 与速效养分及生态化学计量比关系密切,土壤内部养分循环和计量比是一体化的耦合关系。

亚热带季风茉莉花园土壤 C : N 低于全国、中温带干旱性沙漠、亚热带季风森林和温带季风森林土壤 C : N(表 3),高于温带季风湿地土壤,表明亚热带茉莉花园土壤相对于全国、中温带干旱性沙漠、亚热带季风森林和温带季风森林土壤具有较低的土壤矿化速率和潜在的 N 库。此外,随着种植年限的增加,C : N 整体上处于上升趋势,这与张继辉等^[5]研究亚热带柚木人工林研究结果一致,这可能与二者气候类型类似有关(表 4)。随着种植年限的提升,茉莉花园土壤 N 的矿化速率在增加,有效氮的水平在降低。这也与本研究的茉莉花

园土壤 AN 水平较低(IV 或 V)这一结论相呼应。另外,土壤 C : N 也反映出土壤质量和 C、N 的动态变化过程^[30]。随着种植年限增加,C : N 越高,说明土壤质量越来越不稳定,C、N 的输入与输出处于不平衡状态。茉莉花是多年生的旱地农作物,其凋落物残留物和根系分泌物对于土壤养分输入贡献低于豆科植物和越冬谷物^[25],不利于土壤 C、N 的长时间积累。另外福州市多酸雨,土壤酸化较为明显,导致部分有机态氮溶蚀,进而减少土壤的氮积累^[32],形成较高的 C : N。同时,茉莉花园属于旱作农业,土壤通透性好,微生物周转速率高,有机物和水溶性代谢产物矿化作用强,导致较高的二氧化碳与氧化亚氮排放量^[33],不利于土壤 C、N 的积累。

亚热带季风茉莉花园土壤 C : P 低于亚热带季风森林、温带季风森林和全国土壤水平(表 3),高于温带季风湿地、中温带干旱性沙漠土壤水平,表明亚热带茉莉花园土壤 C : P 相对于亚热带季风森林、温带季风森林和全国土壤较为稳定。但随着种植年限

的增加,土壤 C : P 总体上呈现减低趋势,这与张继辉等^[5]、赵如梦等^[26]和贺婧等^[7]的研究结果一致,这可能与 P 元素的有效性提高有关(表 4)。P 的含量主要来自于成土母质,变化相对较小^[21]。P 的有效性提高最有可能是因为施用 P 肥。但紫花苜蓿草地、柚木人工林、葡萄园和茉莉花园 C : P 都低于 200。表明土壤微生物较少受 P 限制,具有较高的有效 P 水平^[4]。

亚热带季风茉莉花园土壤 N : P 值低于温带季风森林和全国水平(表 3),高于亚热带季风森林、中温带干旱性沙漠和温带季风湿地土壤水平,表明相对于亚热带季风森林、中温带干旱性沙漠和温带季风湿地土壤 N 或 P 元素的出现匮乏现象。随着种植年限的增加土壤 N : P 整体上呈现降低趋势,这与张继辉等^[5]、赵如梦等^[26]和贺婧等^[7]的研究结果一致,这可能与 N 元素限制有关(表 4)。而本研究表明,AN 和 N 含量随着种植年限的增加而降低,N 元素矿化作用明显,P 和 AP 却增加,进而导致较低的 N : P。福州市不同种植年限的茉莉花园土壤受 N 和 AN 限制明显,且随着种植年限的增加 N 和 AN 限制程度加深。因此,适当的增施氮肥对于维系茉莉花园土壤生态化学计量比平衡具有重要作用。

3.3 环境因子对福州市不同年限茉莉花园土壤 C、N、P 及生态化学计量比的影响

福州市不同种植年限茉莉花园的土壤粒径分布表现为黏粒>粉粒>砂粒。本研究中土壤黏粒与 C、N 显著正相关,并且 RDA 分析也表明,土壤黏粒对于土壤 C、N、SOM、C : N 贡献率最大,表明土壤黏粒有利于土壤养分积累。这与张华渝等^[34]的研究结果具有类似性。而土壤粉粒与 N 呈现负相关,砂粒粒径与 C、SOM 负相关,表明较大土壤粒径不利于土壤养分的积累。福州市茉莉花园都位于河滨旁,因此土壤黏粒含量高。土壤黏粒由于通透性较差,可与土壤有机质、有机碳等养分耦合为无机和有机的结合体,很难被微生物利用^[6]。此外,黏粒结构在形成稳定性土壤团聚体,抵抗外力侵蚀方面具有积极作用^[35]。另外,随着种植年限的增加,与 J-3 相比,土壤黏粒含量整体上显著下降,而砂粒和粉粒整体上上升,这表明虽然土壤养分含量会下降,但土壤通透性得以提高。鉴于茉莉花园黏粒含量本来就较高,适当的砂粒和粉粒结构的优化更有利于土壤质量的提高。土壤容重可以反映出土壤紧实程度和养分通达能力。本研究中土壤容重是影响 C、N、N : P、C : P、C : N、SOM 等因子的重要理化指标。对于农田土壤而言,较高的土壤容重影响土壤对水分和养分的吸取能力,限制作物的根系生长^[36]。茉莉花园处于湖滨旁,土壤黏粒含量高,因而土壤紧实,但随着种植年限的增加,容重呈下

降趋势,表明土壤通透性得到提升,土壤理化性质得到改善(图 6)。pH 与 AP 显著正相关,土壤 pH 的升高可以提高土壤可变电荷,影响有效磷的吸收和土壤微生物的活动,进而提高微生物量磷^[37]。随着种植年限的增加 pH 整体为增加的趋势,但仅 J-40 与 J-3 有显著差异性,表明福州市茉莉花园经过长时间耕作土壤酸化得到一定程度的缓解。

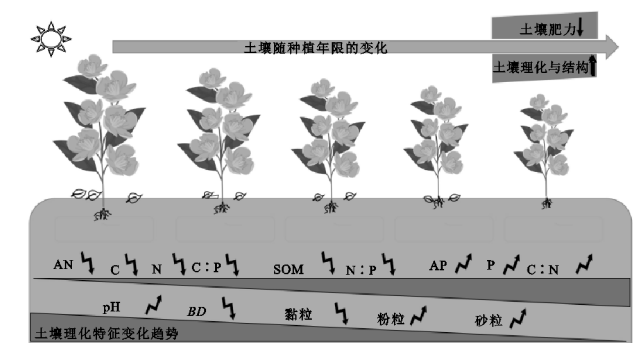


图 6 福州市不同种植年限茉莉花园土壤生态化学计量比概念模型

4 结论

- (1)茉莉花园土壤 C、N 和 AN、SOM 含量随着种植年限的增加而降低,P 和 AP 含量随着种植年限的增加而增加。
- (2)随着种植年限的增加,茉莉花园生态化学计量比表现为 C : N 上升、N : P、C : P 下降,表明土壤矿化作用明显,土壤受 N 和 AN 限制明显。
- (3)随着种植年限的增加,土壤容重、黏粒含量下降,pH、砂粒和粉粒含量上升,表明种植年限的增加改善土壤理化环境与粒径组成结构,但造成保肥能力下降。因此,福州市茉莉种植园随着种植年限的提升,茉莉的生长主要受 N 的限制,适当的补施氮肥有利于改善茉莉花园的土壤养分循环,促进茉莉花园农业生产的可持续发展。

参考文献:

[1] Zhang J H, Li M X, Xu L, et al. C : N : P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China [J].Science of the Total Environment,2021,795:e148849.

[2] He M, Zhou G Y, Yuan T F, et al. Grazing intensity significantly changes the C : N : P stoichiometry in grassland ecosystems [J].Global Ecology and Biogeography,2020,29(2):355-369.

[3] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等.古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(2):305-314.

[4] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.

[5] 张继辉,蔡道雄,卢立华,等.不同林龄柚木人工林土壤生态

- 化学计量特征[J].生态学报,2020,40(16):5718-5728.
- [6] 李丹维,王紫泉,田海霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.
- [7] 贺婧,魏琪琪,钟艳霞,等.贺兰山东麓不同种植年限葡萄地土壤生态化学计量特征[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):23-30.
- [8] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China [J].Journal of Soils and Sediments,2019,9(10):3476-3488.
- [9] 李森,李玲,樊华,等.川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征[J].应用生态学报,2020,31(8):2567-2573.
- [10] 冯德枫,包维楷.土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.
- [11] 田静,盛茂银,汪攀,等.西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物—土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响[J].环境科学,2019,40(9):4278-4286.
- [12] 青烨,孙飞达,李勇,等.若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J].草业学报,2015,24(3):38-47.
- [13] 刘旭阳,陈晓旋,陈优阳,等.福州市不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2019,33(6):348-355.
- [14] Wang W Q, Min Q W, Sardans J, et al. Organic cultivation of jasmine and tea increases carbon sequestration by changing plant and soil stoichiometry [J].Agronomy Journal,2016,108(4):1636-1648.
- [15] 刘小慧,严锦华,杨文文,等.秸秆及配施工农业废弃物对茉莉种植园碳排放的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1555-1563.
- [16] Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis [M].Floriaa: The Chemical Rubber Company Press,1993:637-644.
- [17] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J].Biology and Fertility of Soils,2000,30(5):374-387.
- [18] Jin Q, Peñuelas J, Sardans J, et al. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents, storages, and stoichiometry during land degradation in jasmine croplands in subtropical China [J].Experimental Agriculture,2021,57(2):113-125.
- [19] 孔庆波,章明清,姚宝全,等.福建县级区域耕地土壤养分时空变异研究[J].热带作物学报,2010,31(10):1686-1691.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [21] Tian H, Chen G S, Zhang C S, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J].Biogeochemistry, 2010, 98(1):139-151.
- [22] 张莎莎,李爱琴,王会荣,等.不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态环境学报,2020,29(1):97-104.
- [23] 张友,徐刚,高丽,等.黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义[J].地球与环境,2016,44(6):647-653.
- [24] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.
- [25] 王棋,徐传涛,王昌全,等.烤烟连作对土壤生态化学计量特征的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(5):702-708.
- [26] 赵如梦,张炳学,王晓霞,等.黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤与植物化学计量特征[J].草业科学,2019,36(5):1189-1199.
- [27] 朱秋丽,王纯,严锦华,等.施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):191-197.
- [28] 叶雯,李永春,喻卫武,等.不同种植年限香榧根际土壤微生物多样性[J].应用生态学报,2018,29(11):3783-3792.
- [29] 李玮,郑子成,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2015,26(1):9-16.
- [30] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.
- [31] 玛孜依热阿·努尔海拉提,陶冶,周晓兵,等.新疆野苹果群落表层土壤化学计量特征[J].生态学杂志,2019,38(9):2638-2647.
- [32] 张新明,张俊平,刘素萍,等.模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):18-21.
- [33] Wang C, Li X, Min Q W, et al. Responses of greenhouse-gas emissions to land-use change from rice to jasmine production in subtropical China [J]. Atmospheric Environment,2019,201:391-401.
- [34] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤粒径分布对土壤有机碳组分的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(4):93-100.
- [35] 李娜,韩晓增,尤孟阳,等.土壤团聚体与微生物相互作用研究[J].生态环境学报,2013,22(9):1625-1632.
- [36] 熊鹏,郭自春,李玮,等.淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J].土壤,2021,53(2):391-397.
- [37] 方晰,陈金磊,王留芳,等.亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J].中南林业科技大学学报,2018,38(12):1-12.