

福州不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征

刘旭阳¹, 陈晓旋¹, 陈优阳¹, 金强¹, 林少颖¹, 王维奇^{1,2}

(1.福建师范大学地理研究所,福州 350007;2.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)

摘要:为阐明不同土地利用类型土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量学特征,对福州农田不同土地利用类型(水稻田、菜地和茉莉园)下的土壤全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其生态化学计量学特征进行测定和分析。结果表明:土壤TC含量均值基本表现为水稻田>菜地>茉莉园($P<0.05$);在春、秋季节土壤TN含量均值表现为水稻田>菜地>茉莉园($P<0.05$),在夏、冬季节表现为菜地>水稻田>茉莉园($P<0.05$);在各个季节菜地土壤TP含量均值均为最大($P<0.05$),在冬季土壤TP含量均值达到最大($P<0.05$)。土壤C/N、C/P和N/P在各个土地类型下均值分别为10.17~12.89,0.46~0.86,4.76~9.61,C/N季节差异不显著,唯有夏季略高于其他季节,菜地土壤C/N在各个季节均低于水稻田和茉莉园($P<0.05$);C/P和N/P在全年内季节差异不显著,均表现为水稻田>菜地>茉莉园($P<0.05$)。菜地土壤C和N储量在各个季节均高于水稻田与茉莉园土壤($P<0.05$),各个季节里水稻田和茉莉园土壤C和N储量无明显差异,秋季各个土壤类型C和N储量基本低于其他季节($P<0.05$)。在各个季节P储量均值表现为菜地>茉莉园>水稻田($P<0.05$)。总体来看,与其他土壤相比,茉莉园土壤C、N、P含量最低,菜地土壤N和P含量以及储量较高,且土壤碳氮磷生态化学计量学特征在不同土地利用类型下差异显著,其生态化学计量学特征对土壤碳氮磷固持及限制性养分具有一定的指示作用。

关键词:碳;氮;磷;生态化学计量学;不同土地利用类型;福州农田

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0348-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.049

Ecological Stoichiometric Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Under Different Agricultural Land-Use Types in Fuzhou

LIU Xuyang¹, CHEN Xiaoxuan¹, CHEN Youyang¹, JIN Qiang¹, LIN Shaoying¹, WANG Weiqi^{1,2}

(1.*Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007*; 2.*Key Laboratory of Humid*

Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: In order to clarify the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in different land-use types (paddy field, vegetable field and jasmine garden) of Fuzhou farmland, the contents of total carbon (TC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) and their ecological stoichiometric characteristics were measured and analyzed. The results showed that the averaged TC content in soil was: paddy field>vegetable field>jasmine garden ($P<0.05$). In spring and autumn, the averaged TN content in soil was: paddy field>vegetable field>jasmine garden ($P<0.05$). However, in summer and winter, the averaged TN content in soil was: vegetable field>paddy field>jasmine garden ($P<0.05$). In each season, the averaged content of TP in vegetable soils was the largest ($P<0.05$), and in winter, the averaged content of TP in vegetable soils appeared the maximum ($P<0.05$). The C/N value, C/P value and N/P value of soil were between (10.17~12.89), (0.46~0.86) and (4.76~9.61) respectively in different land types. The seasonal difference of C/N value was not significant, except in summer, which was slightly higher than that of other seasons. It is worth mentioning that the C/N value of vegetable soil was lower than that of paddy field and jasmine garden in each season ($P<0.05$). C/P value and N/P value had no significant seasonal difference in the whole year, which showed: paddy field>vegetable field>jasmine

收稿日期:2019-06-10

资助项目:国家自然科学基金项目(41571287);福建省公益类科研院所专项(2018R1034-1);福建省高校杰出青年科研人才培养计划项目(2017)

第一作者:刘旭阳(1994—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事生态与环境研究。E-mail:lesliexyang@163.com

通信作者:王维奇(1982—),男,辽宁沈阳人,副研究员,主要从事生态与环境研究。E-mail:wangweiqi@fjnu.edu.cn

garden ($P<0.05$). The C and N storage of vegetable soil were higher than those of paddy soil and jasmine garden soil in each season ($P<0.05$). There was no significant difference in C and N storage between paddy soil and jasmine garden soil in each season, but the C and N storage of different soil types in autumn were lower than those of other seasons ($P<0.05$). Overall, compared with other soils, the content of C, N and P in jasmine garden soil were the lowest, while the content and storage of N and P in vegetable soil were higher. What's more, the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus were obviously different in those three land-use types, and it can be used to indicate the fixation of carbon, nitrogen and phosphorus in soil and the limited nutrient of soil.

Keywords: carbon; nitrogen; phosphorus; ecological stoichiometry; different land-use types; Fuzhou farmland

生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学,结合了生物学、生态学和化学的基本原理,也是元素平衡对生态交互作用影响的一种理论^[1]。作为研究 C(碳)、N(氮)、P(磷)等元素在各种生态过程中的动态平衡以及耦合关系的一种新方法,生态化学计量学在近年来已成为生态学研究的一个热点^[2]。目前,国内对土壤 C、N、P 化学计量学特征的研究主要集中于湿地,森林土壤以及湖泊沉积物^[3-5],并取得了一些成果。但对于农田土壤 C、N、P,特别是南方农田土壤 C、N、P 对土地利用类型不同响应的研究较少。因此深入研究阐明农田土壤 C、N、P 化学计量学特征对土地利用类型不同的响应及机制对指导农业生产具有重要的指导意义。

生物地球化学和生态系统 C、N、P 生态化学计量特征受土地管理实践措施,如土地利用变化的影响较大^[6-7]。造成这种影响的主要原因在不同的研究中并不一致,有研究^[8]表明,农田土地利用方式的变化将导致土壤肥料的施加、作物凋落物及残体在性质和数量上均有差异,进而影响土壤 C、N、P 等养分循环及其生态化学计量比特征。在国内,土地利用变化对土壤 C、N、P 或生态化学计量学特征的研究主要侧重不同典型区域,如高君亮等^[9]研究了阴山北麓农牧交错带土壤对土地利用变化的响应,罗由林等^[10]探讨了近 30 年土地利用变化对川中丘陵区土壤化学计量比的影响。南方不同农田农业土地利用类型研究已有一些报道,如汪明霞等^[11]研究江汉平原不同土地利用方式下土壤有机碳组成特点,张晗等^[12]研究了江西省农田不同土地利用下碳氮比特征,Jiang 等^[13]研究了鄱阳湖不同农田类型下土壤碳氮磷生态化学计量学特征,但综观国内外研究进展,更多是基于内陆平原区的研究,对于我国东南沿海地区福建农田生态系统不同土地利用类型土壤的 C、N、P 生态化学计量比及其影响机制的研究尚鲜见报道。因此,开展不同土地利用类型下农田土壤 C、N、P 的相关研究显得尤为必要。基于此,本文以福州平原水稻田、菜地和茉莉园为研究对象,探究不同土地利用类型下,农田土壤 C、N、P

含量变化,并分析其化学计量学特征,以期为农业方式的选择与农业可持续发展提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本试验区位于福建省水稻研究所吴凤综合实验基地,试验区内主要实行早稻—晚稻—休耕的轮作制度,为使土壤的质量保持均一,试验前人工整平翻耕后的田地^[14]。区内属于亚热带季风性湿润气候,夏季高温多雨,冬季温暖潮湿,雨量充沛,年均降水量约为 1 342.5 mm,全年约 80% 的降雨量集中于 5—10 月,全年无霜期为 326 天^[15]。

该基地农田面积 7 hm²,其中水稻田,菜地和茉莉园面积分别约占总面积的 60%,38% 和 2%。2017 年 4 月 16 日设置水稻田,菜地以及茉莉园样地各小区面积 10 m²,每种样地 3 个重复,共 9 个小区。试验区早稻于 2017 年 4 月 16 日机插移栽,2017 年 7 月 8 日收割,晚稻于 2017 年 7 月 25 日机插移栽,2017 年 11 月 7 日收割,早晚稻栽培品种分别为江西省农科院研发的“禾盛 10 号”和福建省农科院研发的“沁香优 212”,株行距 14 cm×28 cm^[14]。试验茉莉品种选取 9 年生双瓣茉莉,茉莉生长阶段分为:枝叶生长期(4 月初至 5 月初)、花蕾萌芽期(5 月初至 5 月下旬)、盛花期(6 月初至 9 月)^[16]。菜地的蔬菜种植采用空心菜—花菜轮作方式,空心菜种植 2 茬,冬季种植花菜。在施肥管理中,均施俄罗斯产复合肥,N—P₂O₅—K₂O 为 16—16—16。其中稻田为 470 kg/(hm²·a),菜地为 1 250 kg/(hm²·a),茉莉园为 230 kg/(hm²·a)。水稻生长水分管理为水稻分蘖期以前实行水淹管理,分蘖期后实行烤田—淹水—湿润灌溉相结合。茉莉园和菜地采用湿润管理方式,在气候较干旱的时节,通过沟中灌水保证作物生长的水分需求。

1.2 样品采集与测定

土样采集:在春(4 月 16 日)、夏(7 月 8 日)、秋(10 月 25 日)、冬(1 月 18 日) 4 个季节内分别用采土器采集水稻田、菜地、茉莉园 3 种样区(各 3 个重复)共 9 个采样点的表层 0—15 cm 土柱,装入自封袋,并

保存在便携式保温箱内,带回实验室。剔除土壤中的作物残体和杂质,土样一分为二,分别 4℃ 冰箱冷藏和自然风干待用。

土样测定:其中,土壤全碳(TC)和全氮(TN)采用 Elementar Vario MAXCN 元素分析仪测定,全磷(TP)采用硫酸—高氯酸消解^[17]后 SKALAR SAN++ 连续流动分析仪进行测定。土壤电导率(EC)和土温采用 2265FS 便携式电导/温度计测定;pH 采用 STARTER 300pH 计测定;含水量采用烘干法测定^[18];容重采用环刀法测定^[18];粒度测量使用英国 Malvern 仪器公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪分析完成,采用国际制对粒度进行分级。

1.3 土壤 C、N、P 储量计算方法

土壤表层剖面单位面积一定深度 C、N、P 储量(T_c)(t/km²)的计算公式为:

$$T_c = \sum D \times M \times d \times 10$$

式中: D 为土壤表层容重(g/cm³); M 为土壤表层碳、氮、磷含量(g/kg); d 为土层深度(cm)。

1.4 数据处理与分析

运用 Excel 2007 软件对测定数据进行整理。运用 Origin8.6、SPSS 20.0 统计分析软件进行统计分析(Pearson 相关性分析和单因素方差分析)和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型下土壤 C、N、P 含量特征

土壤 C、N、P 含量在不同土地利用类型下和季节上均有不同程度的差异(图 1),土壤 TC 含量均值在水稻田、菜地、茉莉园土地利用下分别为 16.76~19.45,16.26~18.59,11.78~14.55 g/kg。土壤 TC 含量均值在春、秋、冬季节基本表现为水稻田>菜地>茉莉园($P<0.05$),而在夏季表现为菜地>水稻田>茉莉园($P<0.05$)。土壤 TN 含量均值在水稻田、菜地、茉莉园分别为 1.49~1.65,1.52~1.66,1.04~1.27 g/kg。在春、秋季土壤 TN 含量均值表现为水稻田>菜地>茉莉园($P<0.05$),在夏、冬季节表现为菜地>水稻田>茉莉园($P<0.05$)。土壤 TP

含量均值在水稻田、菜地、茉莉园分别介于 1.98~2.21,2.13~2.48,1.97~2.97 g/kg。在各个季节菜地土壤 TP 含量均值均为最大($P<0.05$),在冬季土壤 TP 含量均值达到最大($P<0.05$)。

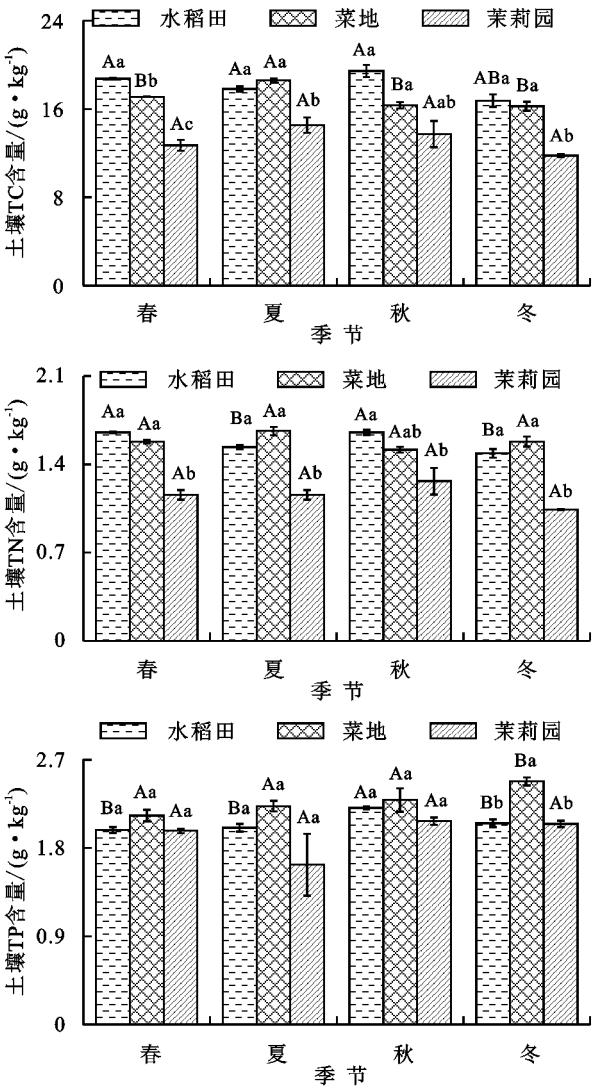


图 1 不同土地利用类型下土壤 C、N 和 P 含量特征

2.2 土壤 C、N、P 含量的回归分析

通过对 3 种土壤 C、N、P 含量进行回归拟合分析(图 2)发现,从斜率上来看,C 和 N 的拟合程度较高,相关性极显著($P<0.01$),而 C 和 P,N 和 P 拟合程度相对较低,离散程度较大,无明显相关性。

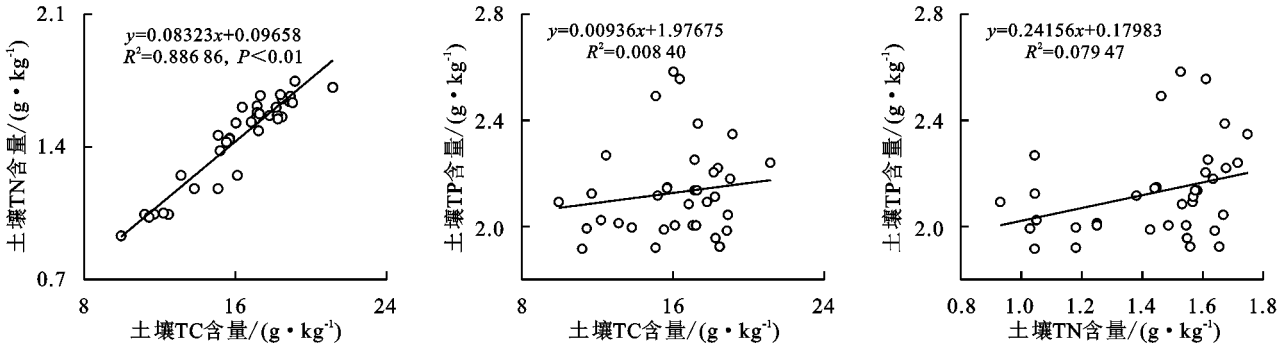


图 2 不同土地利用类型下土壤 C、N、P 线性回归分析

土壤 C/N 与 TC 存在较显著正相关($P<0.05$),与含水量和土温存在极显著正相关($P<0.01$),与 TP 和 EC 存在极显著负相关($P<0.01$),土壤 C/P 与 TC 和含水量以及土温均存在极显著正相关($P<0.01$),与 TP 和 EC 存在极显著负相关($P<0.01$),与

pH 存在较显著正相关($P<0.05$),土壤 N/P 与 TC 和 pH 存在极显著正相关($P<0.01$),与 TP 和 EC 存在极显著负相关($P<0.01$);茉莉园土壤 C/N 与黏粒存在极显著正相关($P<0.01$),土壤 C/P 与 TC 和 TN 存在极显著正相关($P<0.01$),C/P 和 N/P 与粉粒均存在极显著负相关($P<0.01$)和较显著负相关($P<0.05$),土壤 N/P 还与 TC 和 TN 存在极显著正

相关($P<0.01$)。综合来看,C/N 与 TP 和土温均存在极显著正相关($P<0.01$),C/P 与 TC、TN、含水量和 pH 均存在极显著正相关($P<0.01$),与土温和 EC 存在较显著正相关($P<0.05$),与容重存在较显著负相关($P<0.05$),N/P 与 TC、TN、含水量、EC 和 pH 存在极显著正相关($P<0.01$),与容重存在较显著负相关($P<0.05$)。

表 2 生态化学计量比与土壤 C、N、P 含量及环境影响因子以及物理组成结构间的相关关系

处理	指标	TC	TN	TP	含水量	土温	EC	pH	容重	机械组成		
										黏粒	粉粒	砂粒
水稻田	C/N	0.765 **	0.472	0.126	-0.298	0.319	-0.472	-0.270	-0.139	0.054	0.137	0.112
	C/P	0.781 **	0.735 **	-0.469	0.355	0.405	-0.100	0.145	0.103	-0.371	-0.546	0.243
	N/P	0.615 *	0.697 *	-0.598 *	0.574	0.356	0.081	0.286	0.166	-0.470	-0.734 **	0.224
菜地	C/N	0.592 *	0.066	-0.778 **	0.840 **	0.836 **	-0.785 **	0.417	-0.249	-0.187	0.170	0.122
	C/P	0.778 **	0.392	-0.865 **	0.799 **	0.736 **	-0.840 **	0.683 *	-0.017	-0.234	-0.076	0.283
	N/P	0.781 **	0.493	-0.826 **	0.703 *	0.624 *	-0.784 **	0.741 **	0.082	-0.220	-0.204	0.326
茉莉园	C/N	0.481	0.013	-0.084	-0.113	0.581 *	0.325	-0.399	0.184	0.761 **	-0.558	-0.530
	C/P	0.961 **	0.831 **	-0.415	0.051	0.456	0.479	-0.253	0.034	0.520	-0.812 **	0.131
	N/P	0.861 **	0.953 **	-0.400	0.121	0.213	0.368	-0.075	-0.055	0.213	-0.642 *	0.408
综合	C/N	0.184	-0.147	-0.495 **	0.069	0.480 **	-0.156	0.103	-0.250	0.131	0.239	-0.097
	C/P	0.897 **	0.764 **	-0.304	0.550 **	0.346 *	0.375 *	0.429 **	-0.394 *	0.097	0.223	0.244
	N/P	0.912 **	0.880 **	-0.158	0.576 **	0.216	0.454 **	0.426 **	-0.332 *	0.068	0.141	0.289

2.5 土壤 C、N、P 储量及其与生态化学计量比的关系

不同土地利用情况下土壤 C、N、P 储量季节变化见图 4。水稻田、菜地和茉莉园土壤的 C 储量均值分别为 1 960.17~3 453.76,2 441.83~3 689.89,1 554.91~2 757.38 t/km²,N 储量均值分别为 178.08~291.45,224.92~339.44,145.22~262.49 t/km²。菜地土壤 C 和 N 储量在各个季节均高于水稻田与茉莉园土壤($P<0.05$),各个季节里水稻田和茉莉园土壤 C 和 N 储量相差不大,秋季各土壤类型 C、N 储量基本低于其他季节($P<0.05$)。水稻田、菜地和茉莉园土壤的 P 储量均值分别为 278.75~375.51,334.01~517.09,326.03~422.52 t/km²,在各个季节 P 储量均值表现为菜地>茉莉园>水稻田($P<0.05$)。

土壤 C、N、P 储量与 C/N、C/P 和 N/P 的相关关系见表 3。菜地土壤 P 储量与 C/N、C/P 均存在较显著负相关($P<0.05$);茉莉土壤 C 储量与 C/P 存在极显著正相关($P<0.01$),与 N/P 存在较显著正相关($P<0.05$),N 储量与 C/P、N/P 均存在极显著正相关($P<0.01$)。综合来看,C 储量与 C/P、N/P 均存在极显著正相关($P<0.01$),N 储量与 C/N 存在较显著负相关($P<0.05$),P 储量与 C/N、C/P 存在极显著负相关($P<0.01$),土壤 P 储量与 C/N、C/P、N/P 关系密切。

3 讨论

3.1 不同土地利用类型下土壤 C、N、P 含量特征

土壤 C、N、P 生态化学计量比作为一个重要指

标,不仅可以反映土壤质量优劣,衡量土壤有机质组成、质量及营养平衡,也是植物赖以生存的物质基础和重要的环境条件^[19-20]。相关研究^[13]表明,土壤 C、N、P 生态化学计量比不仅受到气候、土壤类型、土壤母质、地形地貌和植被类型等自然环境因素的影响,同时也受到不同土地利用类型、田间管理措施、投入管理水平差异等人类活动的显著影响。本试验中,在不同土地利用类型下,土壤 TC 和 TN 含量基本表现为水稻田>菜地>茉莉园。这是由于土地利用方式主要通过土壤养分的输入输出量来控制土壤 C、N 的积累和释放速率,从而进一步影响土壤 TC 和 TN 含量。在土壤养分输入方面,茉莉花蕾经常被采摘,且为多年生灌木,复种率极低,水稻和菜地较茉莉复种率高,有机肥和氮肥施用量高且频繁,加之水稻田和菜地生物量较高,还田秸秆残体较多积存,有机物分解速率快,而这正是土壤有机碳和氮的重要输入来源,从而导致土壤 C、N 含量储存较高。另外,在土壤养分输出方面,由于水稻田和菜地的水分需求较茉莉大,灌溉较多,特别是水稻土处于长期淹水状况^[21],由此导致微生物活性较低,有机质矿化速率减慢,从而提高土壤 C、N 的积累,这与张晗等^[12]对江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响的研究一致;茉莉园土壤的通气条件相对较好,土壤孔隙度和氧气含量增加,好氧型微生物活性增强^[22],加速有机碳的分解,导致土壤 C 积存较少,同时 N 也容易流失。

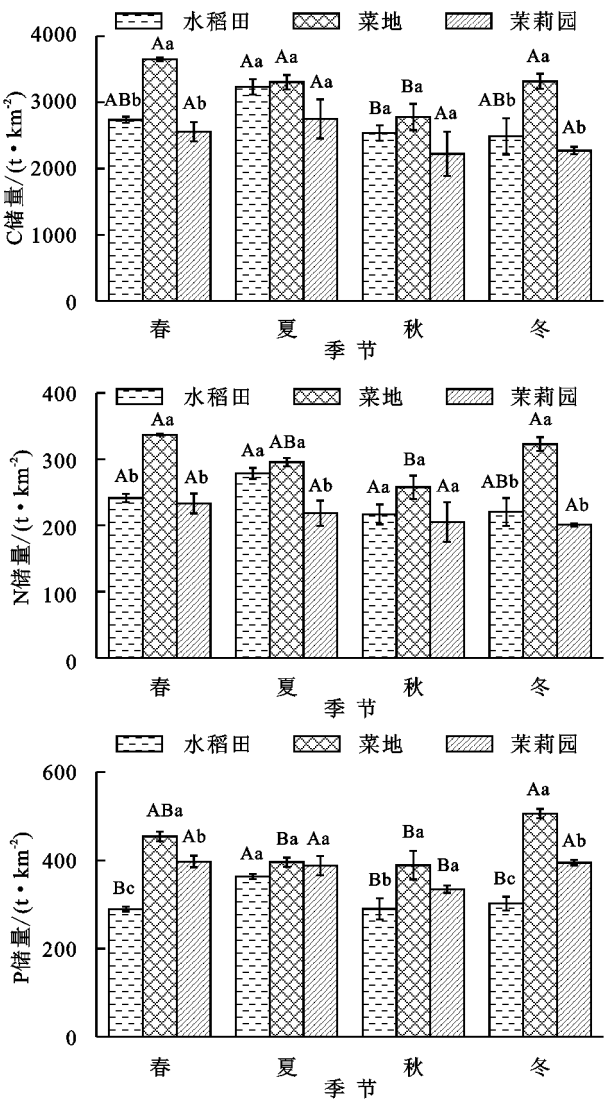


图 4 不同土地利用类型下土壤 C、N、P 储量特征

表 3 土壤 C、N、P 储量与 C/N、C/P 和 N/P 的相关关系

处理	指标	C/N	C/P	N/P
水稻田	C 储量	0.188	0.482	0.483
	N 储量	-0.024	0.368	0.441
	P 储量	-0.177	-0.101	-0.056
菜地	C 储量	0.130	0.441	0.528
	N 储量	-0.196	0.162	0.298
	P 储量	-0.707 *	-0.582 *	-0.479
茉莉园	C 储量	0.553	0.854 **	0.699 *
	N 储量	0.136	0.760 **	0.806 **
	P 储量	0.145	-0.193	-0.275
综合	C 储量	-0.086	0.464 **	0.542 **
	N 储量	-0.365 *	0.312	0.472 **
	P 储量	-0.464 **	-0.473 **	-0.344 *

本研究中,与水稻田和茉莉园土壤相比,菜地土壤一年四季的 TP 含量均最高。首先,这主要与作物的施肥量有关,作物每次施肥量大小为菜地>水稻田>茉莉园,由于蔬菜生长期短,施加复合肥次数较多,菜地土壤肥料是一个较大的 P 输入源;其次,研究中菜地的蔬菜种植为空心菜—花菜轮作方式,蔬

菜每次收获后,土壤中作物残体较多,这些残体的分解加速 P 的积聚。研究表明,土壤养分元素之间通常是密切相关、相互耦合的。由图 2 对土壤的 TC、TN、TP 含量回归拟合分析可发现,土壤 TC 和 TN 拟合程度较高,表明 3 种不同土地利用类型下 C 和 N 含量的变化速率趋于一致,且呈极显著正相关关系($P<0.01$)。而 C 与 P,N 与 P 拟合程度不高,主要是由于土地利用类型的不同导致养分在空间上积聚速率的改变,也与 P 的迁移速率较低与 C 和 N 不一致,导致拟合程度较低有关。

3.2 不同土地利用类型下土壤 C、N、P 生态化学计量学特征及其指示作用

土壤 C 组成和土壤释放 N、P 矿化养分的能力都可以通过土壤生态化学计量比来反映^[23]。土壤 C、N、P 之间的比值会逐渐趋于固定是由于生物体生长最需要的那种养分元素限制了其养分循环速度。因此,其比值可表征土壤养分循环模式^[24]。本研究中,土地利用变化下的土壤 C、N、P 化学计量学特征受土地利用方式影响显著。与此同时,土壤 C/N、C/P 及 N/P 远低于中国土壤(分别为 12.30,52.64 和 4.20)的研究结果^[25],整个研究期中,菜地土壤 C/N 在各个季节均低于水稻田和茉莉园土壤。一般来说,较低的土壤化学计量比可以有效反映土壤有机质组成和稳定。较水稻田与茉莉园相比,菜地对肥料的需求更大,氮肥的施加是菜地土壤 N 含量增加的重要原因,另外由于蔬菜在夏季采摘收割,植物残体和根系残留较多,这些新鲜植物残体比正常残体所含养分要高^[26],增加了土壤养分积聚,但由于 N 元素对环境的响应速率较快,从而导致较低的 C/N。

本研究中各类型土壤 C/N 在夏季稍高,这可能是由于在夏季水稻成熟期,土壤含水量较低,水稻对 N 的吸收需求量明显增高,氮肥被大量吸收,导致稻田 N 元素积聚较少;同理,在夏季热量充足,蔬菜生长最为旺盛,对 N 需求也加大,导致较低的土壤 N 含量;由于茉莉为喜干灌丛^[27],灌溉较少,水稻成熟期高温少雨导致土壤较为干燥,福州降雨酸性较强^[28],导致土壤有机态氮中有一种非水解性有机态氮被酸雨淋溶水解较少^[29],土壤 N 元素积累也较低;由此导致土壤 C/N 在夏季稍高。

此外,生态化学计量学特征也具有重要的指示作用。本研究中,各类型土壤 C/P 和 N/P 表现为水稻田>菜地>茉莉园。一般来说,C/P 高,说明土壤微生物对土壤有效磷有同化趋势,土壤具有较强的固 P 潜力^[30],稻田的淹水环境为厌氧微生物提供了良好

的条件,从而使 P 积聚;N/P 比作为限制性养分判断的重要指标,其较低的比值一般反映植物受到 N 限制,指示着较高的初级生产力^[31]。在全年生长期中,氮肥的需求量依次表现为菜地>水稻田>茉莉园,土地复种频数表现为菜地>水稻田>茉莉园;由于水稻生物量较大,凋落物总量也较大,所以土壤中 N 元素积聚含量表现为水稻田>菜地>茉莉园;又因为 P 在土壤中迁移率较低,以及凋落物输入 C 量表现为水稻>菜地>茉莉园;所以导致了 C/P 及 N/P 表现为水稻田>菜地>茉莉园。由表 3 可知,生态化学计量比与 C、N、P 储量也有着密切的相关关系,C 储量与 C/P 及 N/P 均存在正相关,这是由于 P 在土壤中迁移率较低,C 和 N 的变化速率在各土地利用类型下较趋于一致,所以 C 储量的丰盈程度也与 C 和 N 的变化趋于同步;N 储量分别与 C/N 和 N/P 呈存在负相关和正相关,这也是由于 C 和 N 的变化速率较趋于一致,N 作为本研究中土壤中的限制性养分指标分别作为计量比的分母和分子,这就解释了 N 储量与计量比之间的关系;P 储量与 C/N 和 C/P 及 N/P 均存在负相关也与 P 在土壤中迁移率较低有密切的联系。本研究发现,菜地土壤 C、N、P 储量与另 2 种土地利用方式相比较,主要是因为菜地施肥活动、人为的翻耕以及灌溉较频繁促进土壤具有较高的养分固持能力。

4 结 论

(1)土壤 C、N、P 含量在不同土地利用类型下具有较为明显的差异,且具有生长期变化,C、N 含量一般表现为水稻田>菜地>茉莉园,菜地土壤的 P 含量最高;菜地 C、N、P 储量均较高。

(2)土地利用变化影响下土壤 C 和 N 元素之间线性拟合关系较为密切,其中 C 与 P、N 与 P 元素之间线性拟合的程度较低。

(3)土地利用变化影响下土壤 C、N、P 生态化学计量学特征具有较为明显的生长期变化,受土地利用变化影响亦显著,菜地土壤 C/N 最低,C/P 和 N/P 一般表现为水稻田>菜地>茉莉园。

致谢:本研究在野外采样和室内分析过程中得到福建师范大学蓝兴福、张雨雪和李志星等同学的帮助,在此一并表示深深地感谢!

参考文献:

[1] Moreno A R, Martiny A C. Ecological stoichiometry of ocean plankton[J]. Annual Review of Marine Science, 2018,10(1):43-69.

[2] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Moosham-

mer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. Ecological Monographs, 2016, 85(2): 133-155.

[3] 靖磊,周延,吕偲,等.洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(18):6530-6538.

[4] 邓健,张丹,张伟,等.黄土丘陵区刺槐叶片—土壤—微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J].生态学报,2019,39(15):1-9.

[5] 闫玉琴,解刚,项宇,等.毛乌素沙地湖滨带沉积物碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2018,32(2):223-228.

[6] 周正虎,王传宽,张全智.土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J].生态学报,2015,35(20):6694-6702.

[7] Liu X, Ma J, Ma Z W, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. Catena, 2017, 150: 146-153.

[8] 潘国浩,刘洋,张莹莹,等.滨海滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷化学计量学特征及其随盐度的变化[J].江苏农业科学,2019,47(8):273-278.

[9] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.

[10] 罗由林,李启权,王昌全,等.近 30 年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J].土壤,2016,48(4):726-733.

[11] 汪明霞,朱志锋,刘凡,等.江汉平原不同土地利用方式下农田土壤有机碳组成特点[J].水土保持研究,2012,19(6):24-28.

[12] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等.江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响[J].环境科学学报,2018,38(6):2486-2497.

[13] 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, 19(10): 3476-3488.

[14] Wang W, Zeng C, Sardans J, et al. Amendment with industrial and agricultural wastes reduces surface-water nutrient loss and storage of dissolved greenhouse gases in a subtropical paddy field[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 231: 296-303.

[15] 张永勋,闵庆文,王维奇,等.农户社会经济特征对农业种植意愿的影响:基于农业文化遗产保护目的的福州茉莉种植户研究[J].中国生态农业学报,2016,24(12):1714-1721.

[16] 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]. Ag-

ronomy Journal,2016,108(4):1636-1648.

[17] 张英利,许安民,杨玉秀,等.自动分析仪测定土壤全磷的方法探讨[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):168-171.

[18] 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.

[19] 宁志英,李玉霖,杨红玲,等.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响[J].生态学报,2019,39(10):1-10.

[20] Mulder C, Elser J J. Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs[J]. Global Change Biology,2010,15(11):2730-2738.

[21] 李文军,杨奇勇,赵迪,等.洞庭湖水稻土有机氮组分及其与可矿化氮的关系特征[J].中国土壤与肥料,2018,277(5):18-26.

[22] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macro-aggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J].Soil and Tillage Research,2018,178:99-107.

[23] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of, bothriochloa ischaemum, to nitrogen addition on the Loess Plateau, China[J].Journal of Plant Growth Regulation,2017,36(3):714-722.

[24] Cao L, Song J M, Li X G, et al. Geochemical characteristics of soil C, N, P, and their stoichiometrical significance in the coastal wetlands of Laizhou Bay, Bohai Sea[J].Clean-Soil, Air, Water,2015,43(2):260-270.

[25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J].Biogeochemistry,2010,98(1/3):139-151.

[26] Lv Y N, Wang C Y, Jia Y Y, et al. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China[J].Applied Soil Ecology,2014,79(5):1-9.

[27] 汪旭明,曾冬萍,闵庆文,等.福州茉莉花种植园土壤化学计量比及其对碳释放潜力的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(1):118-126.

[28] 陈彬彬,王宏,郑秋萍,等.福建省区域酸雨特征及成因分析[J].气象与环境学报,2016,32(4):70-76.

[29] 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.

[30] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):119-130.

[31] Zhang P, Wei T, Li Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China[J].Soil and Tillage Research,2015,153:28-35.

[26] Kamani H, Ashrafi S D, Isazadeh S, et al. Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran[J].Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2015,94(3):382-386.

[27] Tsai Y I, Kuo S C, Young L H, et al. Atmospheric dry plus wet deposition and wet-only deposition of dicarboxylic acids and inorganic compounds in a coastal suburban environment[J].Atmospheric Environment,2014,89:696-706.

[28] 杨孝智,陈扬,徐殿斗,等.北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J].中国环境科学,2011,31(6):944-950.

[29] 张舒婷,李晓燕.城市室内灰尘重金属的水平及来源[J].环境化学,2014,33(7):1201-1207.

[30] 邓高松,陈思民,李晓燕,等.城市室内外灰尘重金属形态差异分析:以贵阳市为例[J].地球与环境,2015,43(4):451-456.

[31] 李晓燕,汪浪,张舒婷.城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例[J].环境科学,2016,37(8):2889-2896.

[32] 杨昆昊,夏赞宇,何芃,等.机动车燃油质量及尾气排放与北京市大气污染的相关性[J].中国科学院大学学报,2017,34(3):304-317.

[33] 刘汝海,王起超,郝庆菊,等.三江平原湿地土壤汞的分布特征及影响因素分析[J].水土保持学报,2003,17(1):122-130.

[34] Liu Y, Wang Q F, Mei R J, et al. Mercury-re-emission in flue gas multipollutants simultaneous absorption system[J].Environmental Science and Technology,2014,48(23):14025-14030.

(上接第 347 页)