



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响

王超, 熊凡, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清

引用本文:

王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 494–501.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0262>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹瑄, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

烤烟连作对土壤生态化学计量特征的影响

王棋, 徐传涛, 王昌全, 杨梅, 李冰, 顾勇

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 702–708 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0163>

模拟降雨条件下北运河流域农田养分流失特征

刘操, 马宁, 龚明波

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 238–243 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0280>

不同经营年限柑橘果园土壤稳定性有机碳比较

王义祥, 叶菁, 王成己, 翁伯琦, 黄毅斌

农业资源与环境学报. 2015(4): 332–337 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0362>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 494–501.

WANG Chao, XIONG Fan, LU Ying, et al. Effect of land use on topsoil aggregate distribution and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 494–501.



开放科学 OSID

利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响

王超¹, 熊凡¹, 卢瑛^{1,2,3*}, 李博¹, 唐贤¹, 董玉清¹

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 农业农村部华南耕地保育重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642)

摘要:为探明利用方式对珠江三角洲农田耕层土壤团聚体特征和碳氮磷的影响, 采集长期水田、旱地和水旱轮作的耕层土壤, 对土壤团聚体组成、碳氮磷分布及其化学计量特征进行研究。结果表明, 水田土壤以>2 mm 团聚体为主, 其含量占比显著高于旱地和水旱轮作两种利用方式, 旱地和水旱轮作土壤则以<0.25 mm 微团聚体为主。各粒级团聚体有机碳和全氮含量均表现为水田显著高于旱地、水旱轮作, 而全磷含量变化规律不明显。水田土壤团聚体有机碳和全氮含量随粒径减小呈先升高后降低趋势, 旱地、水旱轮作土壤的有机碳、全氮和全磷含量均随粒径减小呈降低趋势, 三种利用方式碳氮磷主要集中在>2 mm 和 2~0.5 mm 团聚体中。各粒级团聚体 C:P 和 N:P 表现为水田土壤显著高于旱地、水旱轮作, 而 C:N 差异不显著 ($P>0.05$)。水田和旱地土壤团聚体 C:N、C:P 和 N:P 随粒径变化规律与其团聚体养分表现出一致性, 而水旱轮作则表现出相反规律。土壤碳氮磷与团聚体碳氮磷总体上呈显著正相关 ($P<0.05$), 表明团聚体碳氮磷对土壤养分具有良好的指示性, 且随粒径减小指示作用增强。土壤团聚体 C:P 对利用方式变化最敏感, 可作为反映该区域耕层土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量特征的敏感性指标。水田土壤大团聚体及其碳氮磷含量较高, 土壤结构良好, 有利于团聚体对土壤养分的物理保护和土壤碳氮磷的积累。

关键词:碳; 氮; 磷; 化学计量特征; 土壤团聚体; 利用方式; 珠江三角洲

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)03-0494-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0262

Effect of land use on topsoil aggregate distribution and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the Pearl River Delta

WANG Chao¹, XIONG Fan¹, LU Ying^{1,2,3*}, LI Bo¹, TANG Xian¹, DONG Yu-qing¹

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Laboratory of Arable Land Conservation in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To explore the effect of different types of land use on the characteristics of topsoil aggregates and C, N, and P in the Pearl River Delta farmland, the composition of soil aggregates and the distribution of C, N, and P in paddy, dry land and paddy-upland rotation topsoil were studied. The size of the main aggregates in paddy was >2 mm, which was significantly higher than that in other types of land use; the main aggregates in dry land and paddy-upland rotation were <0.25 mm. The content of organic C and total N within different aggregate sizes in paddy was significantly higher than that in dry land and paddy-upland rotation, but the change of total P content was not obvious.

收稿日期: 2020-05-17 录用日期: 2020-07-14

作者简介: 王超(1994—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事耕地质量提升研究。E-mail: 1774467928@qq.com

*通信作者: 卢瑛 E-mail: luying@scau.edu.cn

基金项目: NSFC-广东省联合基金集成项目(U1901601); 国家科技基础性工作专项重点项目(2014FY110200)

Project supported: Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Provincial People's Government(U1901601); The Key Work of National Basic and Technology Project(2014FY110200)

The content of organic C and total N in paddy aggregates initially increased and then decreased with decreasing aggregate size. The content of organic C, total N, and total P in dry land and paddy-upland rotation aggregates decreased with decreasing aggregate size. The contents of C, N, and P in the three types of land use were mainly concentrated in aggregates >2 mm and 2~0.5 mm. The C:P and N:P ratios of each aggregate size in paddy were significantly higher than that in dry land and paddy-upland rotation but there was no significant difference in the C:N ratio, which indicated good coupling of C and N in soils. The C:N, C:P, and N:P ratios of each aggregate size in paddy and dry land were consistent with the variation of C, N, and P, while paddy-upland rotation showed the opposite regular pattern. There was a significant positive correlation between C, N, and P in soil and C, N, and P in aggregate ($P<0.05$), which indicated that C, N, and P in aggregate had a good indicative effect on soil nutrients, and that the indicative effect was stronger with decreasing aggregate size. The highest sensitivity value was observed for C:P, which could be used as a sensitive indicator to reflect the C, N, and P content and the stoichiometric characteristics of topsoil aggregates in farmland. In paddy field, the size of macroaggregates and their C, N, and P content were the highest, showing good soil structure. They are beneficial for the physical protection of soil nutrients and in promoting the accumulation of C, N, and P.

Keywords: C; N; P; stoichiometric characteristics; soil aggregates; land use; Pearl River Delta

土地利用是人为因素影响土壤最直接的活动,能够长期持续改变土壤结构、养分特征以及土壤微生物的代谢活动^[1-2],使得土壤物理、化学及生物特性发生改变。不同利用方式的农田地表覆盖物、种植制度及人为干扰程度不同,容易造成耕层土壤结构和碳氮磷养分的差异。因此,了解不同利用方式农田的土壤结构和养分特性,有利于改善农田质量和发展可持续性农业。

团聚体作为土壤结构的基本单位,其形成发育是土壤动物、微生物、植物根系等与一系列复杂的生物化学反应综合作用的结果。良好的团聚体结构具有较好的通气透水性,能改善土壤生物的生存环境,调控植物生长,固持土壤碳氮磷养分,提高土壤肥力水平。荣勤雷等^[3]和孙萌等^[4]研究表明,各粒径团聚体的养分含量及有效性存在差异,影响土壤肥力特性,因此在了解土壤团聚体组成分布的同时,明确各粒径团聚体C、N、P的化学计量特征是十分必要的。生态化学计量学是一门综合生态学和化学计量学基本原理,利用生物、化学、物理过程中多种元素之间的耦合平衡机制,分析各种元素(特别是C、N、P)对生态系统循环交互的理论科学^[5]。土壤化学计量特征对植物生长和土地利用具有良好的表征作用,能够揭示土壤圈生态系统C、N、P养分循环和平衡机制^[6-7]。近年来,国内外关于土壤团聚体化学计量特征的研究较多,主要研究生态林种类、种植年限及植被恢复对林地团聚体化学计量特征的影响^[8-10],以及不同耕作方式、施肥方式和植物残体还田对土壤团聚体化学计量特征的影响^[11-13],但对于珠江三角洲地区农田生态系统不同利用方式的土壤,特别是不同粒径土壤的C、N、P化学计量特征及影响机制的研究鲜见报道。

珠江三角洲地区是广东省重要的农业生产基地。近年来,随着城市化进程的推进,珠江三角洲耕地面积急剧减少,加上对土地资源的不合理利用,农田复种指数增加,造成了土壤养分供应不足,土壤结构严重破坏^[14],限制了耕地质量的提高。鉴于此,研究珠江三角洲农田3种主要利用方式(水田、旱地和水旱轮作)对耕层团聚体和碳氮磷含量影响的差异,探讨土壤团聚体碳氮磷含量与其化学计量特征之间的关系,以期对珠三角农田养分管理、土壤培肥和降低农业面源污染等方面提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

珠江三角洲位于广东省中南部,属亚热带海洋性季风气候,年平均降雨量约1 800 mm,年平均气温为21.4~22.4℃,雨热同季。成土母质为三角洲沉积物,土壤类型为水耕人为土。主要种植作物为水稻、木薯、甘蔗和蔬菜。本研究根据种植历史和种植制度挑选试验样点,基本信息见表1。

按照土壤发生层次采集耕作层土壤。采用五点取样法,将土壤样品混合后带回实验室自然风干,取一部分样品研磨过0.149 mm筛,用于测定土壤有机碳、全氮和全磷含量;另取一部分测定土壤团聚体分布。

1.2 测定方法

土壤团聚体采用团聚体筛分仪(TPF-100,上海托莫斯科学仪器有限公司)进行湿筛处理,筛出粒径大小为>2、2~0.5、0.5~0.25 mm和<0.25 mm的团聚体;土壤pH采用电位法测定;有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测

定;全磷含量采用钼锑抗比色法测定^[15]。供试土壤基本理化性质见表2。

1.3 数据分析

土壤团聚体碳氮磷含量、化学计量特征的敏感性指标采用以下公式^[16]计算:

敏感性指标=(变量最大值-变量最小值)/变量最小值

土壤碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)均采用元素质量比。采用 Excel 2016 对数据进行整理和统计分析,Origin 2018 对数据进行绘图,SPSS 22.0 进行单因素方差分析和相关性分析,差异显著水平($\alpha=0.05$)通过最小显著性差异法(LSD法)进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式下耕层土壤团聚体分布特征

从耕层土壤团聚体含量统计结果(表3)发现,水田团聚体以>2 mm 粒级的大团聚体为主,0.5~0.25 mm 团聚体占比最小;旱地和水旱轮作土壤团聚体以<0.25 mm 粒级的微团聚体为主,>2 mm 团聚体占比最小。水田和旱地各粒级团聚体含量差异显著,水旱轮作土壤<0.25 mm 微团聚体含量显著高于其他粒级团聚体。>2 mm 和 2~0.5 mm 团聚体均表现为水田>旱地>水旱轮作,其中水田与水旱轮作差异显著($P<0.05$);0.5~0.25 mm 粒级团聚体含量表现为旱地>水

表1 土壤样点基本信息

Table 1 Basic information of the soil sampling sites

采样点 Sample sites	利用方式 Land uses	种植制度 Cropping system	种植年限 Cultivation age/a	采样深度 Depth/cm
珠海市斗门区莲洲镇西落村	水田 I	双季水稻	>30	0~11
江门市新会区大鳌镇新一村	水田 II	双季水稻	>30	0~14
江门市新会区银湖湾管理委员会	旱地 I	蔬菜	20	0~20
广州市南沙区横沥镇新兴村	旱地 II	蔬菜	25	0~18
中山市民众镇裕安村	旱地 III	蔬菜	20	0~18
广州市南沙区万顷沙镇红洋村	水旱轮作 I	水稻-蔬菜	20	0~16
珠海市金湾区平沙镇平塘社区	水旱轮作 II	水稻-蔬菜	22	0~19

表2 土壤样品基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the sampling soil

利用方式 Land use	pH	有机碳 Organic C/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
水田 I	5.86	28.48	2.71	1.33	10.49	21.41	2.04
水田 II	6.65	22.35	2.07	0.89	10.82	25.16	2.32
旱地 I	6.33	15.45	1.49	1.66	10.37	9.32	0.90
旱地 II	6.24	10.51	1.63	1.79	6.46	5.86	0.91
旱地 III	5.71	13.13	1.42	1.72	9.25	7.63	0.82
水旱轮作 I	7.59	10.36	0.90	1.43	11.56	7.25	0.63
水旱轮作 II	4.83	14.83	1.38	1.27	10.72	11.68	1.09

表3 不同利用方式下耕层土壤团聚体分布(%)

Table 3 The distribution of topsoil aggregates under different utilization modes(%)

利用方式 Land use	>2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
水田	49.35±1.77Aa	13.13±2.15Ac	4.26±1.03Ad	33.28±0.65Cb
旱地	2.72±0.51Bd	10.60±0.26Ab	6.12±1.08Ac	80.57±1.09Ba
水旱轮作	0.46±0.13Bb	4.82±0.76Bb	4.09±2.15Ab	90.64±1.51Aa

注:不同大写字母表示不同利用方式下相同粒级团聚体差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同利用方式下不同粒级团聚体差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: Different capital letters indicate significant differences among utilization modes in the same aggregate size ($P<0.05$); Different small letters indicate significant differences among aggregate sizes under the same utilization mode ($P<0.05$). The same below.

田>水旱轮作,但在三种利用方式间差异不显著($P>0.05$)。 <0.25 mm 粒级团聚体表现为水旱轮作>旱地>水田,三种利用方式之间均差异显著($P<0.05$)。耕层土壤各粒级团聚体含量明显不同,而且利用方式对团聚体含量影响较大。

2.2 不同利用方式下耕层土壤团聚体C、N、P分布特征

不同利用方式下耕层土壤团聚体有机碳和全氮含量变化范围分别为 $14.04\sim38.59$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.20\sim2.68$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图1),团聚体有机碳和全氮含量总体表现为水田显著高于旱地和水旱轮作($P<0.05$),而旱地土壤和水旱轮作土壤之间无显著差异($P>0.05$)。土壤团聚体全磷含量变化范围为 $2.05\sim10.43$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, >2 mm和 $2\sim0.5$ mm团聚体全磷含量表现为水旱轮作土壤显著高于水田和旱地土壤($P<0.05$), $0.5\sim0.25$ mm和 <0.25 mm团聚体全磷含量表现为旱地>水旱轮作>水田,其中旱地土壤团聚体全磷含量显著高于水田($P<0.05$),而水旱轮作与水田、旱地土壤之间无显著差异。

水田土壤团聚体有机碳和全氮含量在 $2\sim0.5$ mm团聚体中最高,在 <0.25 mm团聚体中最低,而全磷含量随粒径减小而降低,其中各粒级团聚体有机碳和全磷含量无显著差异, >2 mm和 $2\sim0.5$ mm团聚体全氮含量显著高于 <0.25 mm团聚体($P<0.05$)。旱地和水旱轮作耕层土壤团聚体有机碳、全氮和全磷含量也随着粒径减小呈下降趋势,旱地土壤 >2 mm团聚体有机碳和全氮含量显著高于 $0.5\sim0.25$ mm和 <0.25 mm团聚体($P<0.05$),其各粒级团聚体全磷含量无显著差异;水旱轮作土壤 >2 mm团聚体全氮和全磷含量显著高于 $0.5\sim0.25$ mm和 <0.25 mm团聚体($P<0.05$),其各粒级团聚体有机碳含量无显著差异。

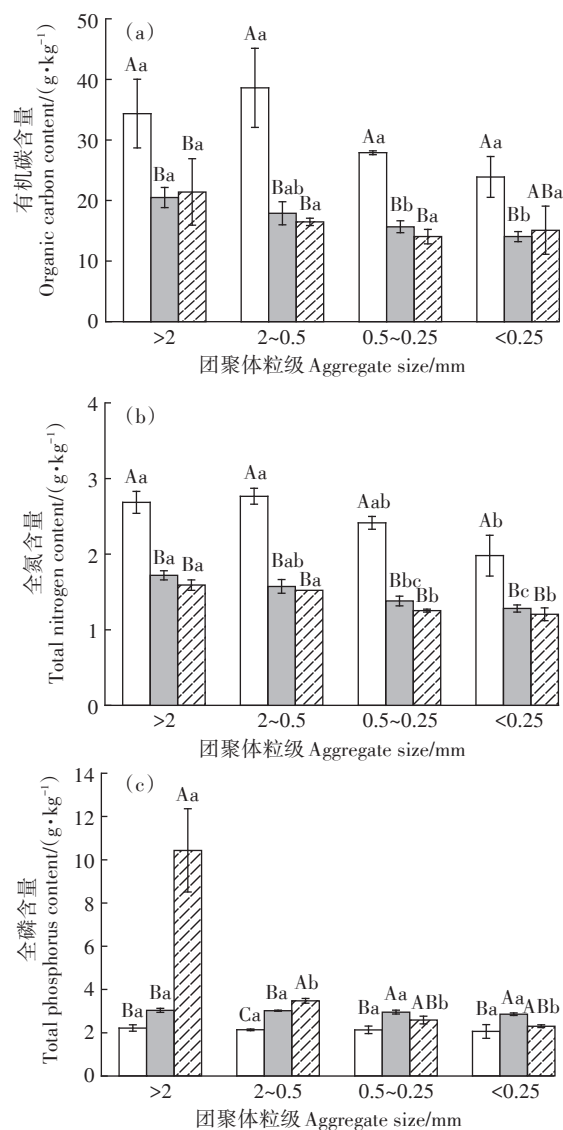
2.3 不同利用方式下耕层土壤化学计量特征

不同利用方式下耕层土壤团聚体化学计量特征C:N、C:P和N:P变化范围分别为 $10.84\sim13.89$ 、 $2.03\sim18.08$ 和 $0.16\sim1.30$ (图2)。

土壤各粒级团聚体C:N无显著差异, >2 mm和 <0.25 mm粒级团聚体表现为水旱轮作>水田>旱地, $2\sim0.5$ mm和 $0.5\sim0.25$ mm粒级团聚体为水田>旱地>水旱轮作。各粒级团聚体C:P水田均显著高于旱地和水旱轮作($P<0.05$), >2 mm和 $2\sim0.5$ mm粒级团聚体表现为旱地>水旱轮作, $0.5\sim0.25$ mm和 <0.25 mm粒级团聚体为水旱轮作>旱地。土壤团聚体N:P的规律与C:P一致。

水田土壤各粒级团聚体C:N、C:P和N:P均无显著差异,最大值均出现在 $2\sim0.5$ mm粒级。旱地土壤

各粒级团聚体C:N、C:P和N:P均随着粒径减小而呈现下降趋势,各粒级土壤团聚体C:N无显著差异,但旱地土壤 >2 mm团聚体C:P和N:P显著高于 $0.5\sim0.25$ mm和 <0.25 mm土壤团聚体($P<0.05$),最大值出现在 >2 mm粒级。水旱轮作土壤(C:N >2 mm粒径除外)各粒级团聚体C:N、C:P和N:P规律与旱地土壤相反,



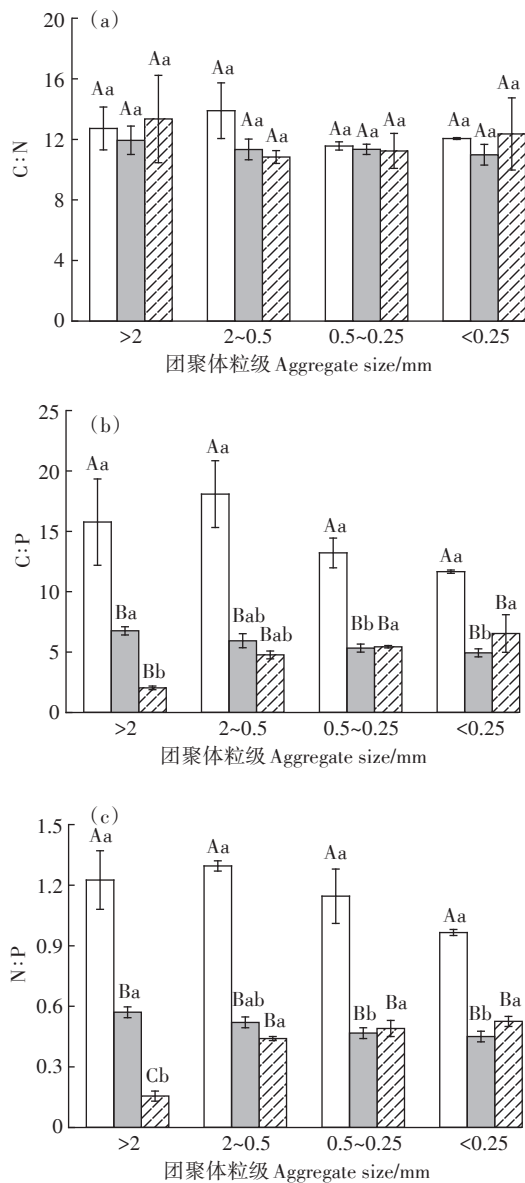
□ 水田 Paddy ■ 旱地 Dry land ▨ 水旱轮作 Paddy-upland rotation

不同大写字母表示不同利用方式下相同粒级团聚体差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同利用方式下不同粒级团聚体差异显著($P<0.05$)。下同

Different capital letters indicate significant differences among utilization modes in the same aggregate size ($P<0.05$); Different small letters indicate significant differences among aggregate sizes under the same utilization mode ($P<0.05$). The same below

图1 不同利用方式下耕层土壤团聚体的C、N和P含量

Figure 1 The content of C, N and P in topsoil aggregates under different land uses



□ 水田 Paddy ■ 旱地 Dry land ▨ 水旱轮作 Paddy-upland rotation

图2 不同利用方式下耕层土壤团聚体的碳氮磷化学计量特征

Figure 2 Stoichiometric characteristics of C, N and P in topsoil aggregates under different land uses

随粒径减小呈上升趋势,各粒径土壤团聚体 C:N 无显著差异,>2 mm 团聚体 C:P 显著低于 0.5~0.25 mm 和 <0.25 mm,>2 mm 团聚体 N:P 显著低于其他粒径 ($P<0.05$)。

2.4 土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量特征的敏感性分析

耕层团聚体碳氮磷含量及化学计量特征的敏感性分析见表4,其对不同利用方式下耕层土壤团聚体的敏感性(均值)排序为 $C:P_A > N:P_A > P_A > C_A > N_A > C:N_A$, 土壤团聚体 C:P 即 $C:P_A$ 对利用方式的响应最为明显,宜作为利用方式对耕层团聚体碳氮磷含量及化学计量特征影响的良好指标。

2.5 土壤碳氮磷含量与化学计量特征的相关性分析

对不同利用方式下土壤团聚体养分与化学计量指标进行相关性分析(表5),结果表明,全土与团聚体有机碳、全氮和全磷含量呈现不同程度的相关性,全土有机碳、全氮、全磷与团聚体有机碳、全氮、全磷呈显著正相关($P<0.05$),>2 mm 和 2~0.5 mm 团聚体全磷除外),且随着粒径减小相关系数逐渐增大($P<0.01$)。

各粒径团聚体有机碳与全氮含量均呈极显著正相关($P<0.01$),在 2~0.5 mm 粒径时团聚体有机碳和团聚体全磷呈极显著负相关($P<0.01$),2~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径团聚体全氮和团聚体全磷呈极显著负相关($P<0.01$)。仅 2~0.5 mm 粒径团聚体有机碳、全氮与团聚体 C:N 呈显著相关关系,团聚体有机碳、全磷均与团聚体 C:P 呈显著相关关系(>2 mm 粒径团聚体全磷除外),各粒径团聚体全氮、全磷均与团聚体 N:P 呈显著相关关系。

3 讨论

3.1 利用方式对耕层土壤团聚体分布特征的影响

土壤团聚体组成作为土壤结构重要评价指标,影

表4 不同利用方式下耕层土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量特征敏感性指标

Table 4 Sensitivity index of C, N, P and stoichiometric characteristics in topsoil aggregates under different land uses

团聚体粒径 Aggregate size	C_A	N_A	P_A	$C:N_A$	$C:P_A$	$N:P_A$
>2 mm	1.51	0.86	4.97	0.61	9.33	9.20
2~0.5 mm	1.97	0.98	0.71	0.57	3.70	2.11
0.5~0.25 mm	1.20	1.03	0.60	0.23	2.03	1.89
<0.25 mm	1.45	1.02	0.71	0.51	1.64	1.45
平均值	1.53	0.97	1.75	0.48	4.18	3.66

注: C_A 、 N_A 、 P_A 分别表示团聚体有机碳、全氮、全磷含量; $C:N_A$ 、 $C:P_A$ 、 $N:P_A$ 分别表示团聚体 C:N、C:P、N:P。下同。

Note: C_A , N_A , and P_A represent organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of soil aggregate; $C:N_A$, $C:P_A$, $N:P_A$ represent C:N, C:P, and N:P of soil aggregate. The same below.

表5 土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量指标相关性

Table 5 Correlations of C, N, P and stoichiometry index in soil aggregates

项目 Item	>2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
C _T -C _A	0.751*	0.762*	0.909**	0.955**
N _T -N _A	0.826*	0.842*	0.858*	0.968**
P _T -P _A	-0.144	0.476	0.842*	0.947**
C _A -N _A	0.875**	0.967**	0.987**	0.925**
C _A -P _A	-0.228	-0.856**	-0.723	-0.414
N _A -P _A	-0.528	-0.912**	-0.792**	-0.383
C _A -C:N _A	0.579	0.919**	0.308	0.553
N _A -C:N _A	0.125	0.798*	0.157	0.197
C _A -C:P _A	0.837**	0.992**	0.972**	0.904**
P _A -C:P _A	-0.699	-0.905**	-0.851*	-0.755*
N _A -N:P _A	0.942**	0.993**	0.997**	0.887**
P _A -N:P _A	-0.774*	-0.947**	-0.888**	-0.758*

注: C_T、N_T、P_T 分别表示全土有机碳、全氮、全磷含量; *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

Note: C_T, N_T, and P_T represent organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of soil; * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$.

响着土壤质量的好坏。本研究发现,水田利用方式以大团聚体为主,而旱地与水旱轮作以<0.25 mm 微团聚体为主,这与前人的研究结果一致^[17-18],主要是由于水田的种植作物为水稻,水稻收割后会留有大量残茬或稻秆还田,使得水田土壤有机碳来源增加,能够胶结微团聚体形成大团聚体,而旱地和水旱轮作有机残体归还量较少,与本研究水田土壤耕作层有机碳含量明显高于旱地和水旱轮作的结论相一致。Wei等^[19]研究表明旱地和水旱轮作利用方式人为扰动大,定期耕作破坏了土壤结构,使得大团聚体含量减少,微团聚体含量升高。

3.2 利用方式对农田耕层土壤团聚体 C、N、P 含量的影响

张晗等^[2,20]研究表明,利用方式受自然环境条件和人为活动综合影响,是土壤圈生态系统和元素地球化学循环过程的变化,显著影响农田碳氮磷含量及其空间分布特征。Cleveland等^[21]研究发现,土壤团聚体有机碳、全氮和全磷含量可反映出土壤有机碳和有效养分的分布状况。本研究中,团聚体中的有机碳和全氮含量均表现为水田高于旱地和水旱轮作,这是由于利用方式通过土壤养分的输入和输出来控制土壤碳氮的固存和释放。土壤养分输入方面,水稻种植留有残茬和稻秆,有机残体分解速率快,导致输入土壤的有机碳量较多,再加上有机物质腐殖化系数高,表现出高有效性的土壤养分^[22]。土壤养分输出方面,旱

地、水旱轮作复种指数较高,作物生长吸收了大量的碳氮而土壤未得到及时补充,导致土壤养分的缺失;此外旱作时,频繁的作业破坏了土壤结构,渗漏和地表径流带走表层土壤的 C、N^[19]。团聚体全磷含量在不同利用方式之间存在差异性,>0.5 mm 和<0.5 mm 团聚体分别表现为水旱轮作和旱地含量最高。旱地种植蔬菜,生长周期短,施肥次数较多,土壤肥料是较大的 P 输入源,同时受到地表动植物残体分解的影响,这些有机残体的分解会加速磷的积聚,因而水旱轮作团聚体磷含量也较高。

土壤团聚体 C、N、P 在不同粒径团聚体中的分配存在差异性。瞿晴等^[23]对黄土高原不同植被带的研究发现,团聚体有机碳、全氮和全磷含量随着粒径的减小呈现“V”字形变化趋势。潘俊等^[24]对退化红壤植被恢复过程的研究发现,团聚体有机碳、全氮和全磷含量总体上随着粒径的减小而呈增加趋势。而本研究中,水田(<0.25 mm 团聚体全氮除外)各粒级团聚体有机碳、全氮和全磷含量无显著差异,说明养分均衡分配在不同大小的团聚体中。而旱地和水旱轮作 C、N、P 含量均随着团聚体粒径的减小而呈下降趋势,这是因为大团聚体吸附有机碳能力强,不易被微生物分解,对土壤养分具有较强的固持能力^[23,25]。

不同利用方式团聚体养分的分配特征可能与母质的组成、成土过程、地表覆盖物、侵蚀状况和人为扰动等因素有关。相关性分析可知,耕层土壤 C、N、P 含量总体上与团聚体 C、N、P 含量显著相关,表明团聚体 C、N、P 含量对土壤 C、N、P 含量具有很好的指示作用,这与区晓琳等^[26]的研究结果相同,且随着粒径的减小相关系数越高,对土壤 C、N、P 含量的指示作用越强烈。

3.3 利用方式对农田耕层土壤化学计量特征的影响

土壤化学计量特征是土壤养分元素的平衡耦合机制,反映土壤矿化养分的能力,决定土壤养分有效性及生态化学循环。王绍强等^[27]研究表明,土壤 C、N、P 之间的比值往往趋近于定值,对植物生长限制最强的因子决定其他养分的循环速度,可以反映出该地区的生态利用模式。土地利用方式的不同对表层土壤的影响最为直接,对团聚体 C:N、C:P 和 N:P 具有不同程度的影响。

C:N 表明土壤碳氮“汇”的能力,较低的 C:N 意味着土壤有机碳矿化快,养分周期短,不利于土壤碳氮养分的固存^[1]。团聚体 C:N 总体上表现为水田、水旱轮作大于旱地,因为种植水稻使得土壤长期处于淹水

状态,导致微生物活性降低,有机碳的矿化速率减缓^[28],加上植物残茬为土壤提供了丰富的有机碳源,土壤处于高C:N状态。而旱地土壤通气透水性相对较好,孔隙度高,好氧型细菌活性增强^[29],加速了有机碳的矿化,导致土壤固存的C减少。不同利用方式的农田土壤C:N之间差异不大,这是由于土壤C、N循环联系紧密,空间分布规律表现出一致性,C:N相对稳定^[21,27]。

土壤C:P通常被认为是土壤磷元素矿化能力的指标,可以反映从生态系统中吸收固持磷的潜在能力^[30]。团聚体C:P表现为水田大于旱地、水旱轮作,说明水田耕层土壤具有较强的固磷潜力。水田长期淹水,土壤温度较低、通气透水性较差,处于强还原状态,微生物活性降低,土壤C、P矿化速率慢,而有机碳来源丰富,造成水田C:P较高;而旱地土壤通气性好,微生物和土壤酶活性高,磷矿化作用强,造成旱地C:P较低。不同利用方式下土壤团聚体指标的敏感指数C:P最高,宜作为利用方式对耕层土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量特征影响的敏感性指标。

N、P是植物生长必需的营养元素,是土壤中常见的限制性养分。N、P空间分布的不一致性导致不同利用方式下土壤团聚体N:P存在明显差异。团聚体N:P表现为水田显著大于旱地和水旱轮作,主要是由于水田有机残体归还量多,碳氮具有同质效应,导致水田氮含量较高。相关性分析结果显示,团聚体N:P与全氮呈极显著正相关($P<0.01$),相关程度高于磷,说明N:P主要受到氮素的影响。此外,研究区N:P整体水平低于热带-亚热带土壤N:P平均水平^[31],理论上是由于氮素限制了土壤养分的供应,但珠江三角洲农田磷肥施用普遍,土壤高磷量也会导致N:P变低。因此,关于氮素是否为珠三角农田的限制性元素还有待进一步研究。

4 结论

(1)珠江三角洲农田耕层土壤团聚体碳氮磷含量主要集中在>2 mm和2~0.5 mm团聚体中,大团聚体保蓄养分能力强;全土碳氮磷与团聚体碳氮磷总体呈显著正相关,团聚体碳氮磷对土壤养分具有良好的指示性,且粒径越小,指示作用越强。

(2)珠江三角洲农田耕层土壤碳氮耦合性较好,团聚体C:P可作为该区域土壤团聚体碳氮磷含量及化学计量特征的敏感性指标。

(3)珠江三角洲水田土壤大团聚体及其碳氮磷含

量较高,土壤结构良好,有利于团聚体对土壤养分的物理保护和碳氮磷的积累。

参考文献:

- [1] 刘旭阳,陈晓旋,陈优阳,等. 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[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 348-355. LIU Xu-yang, CHEN Xiao-xuan, CHEN You-yang, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different agricultural land-use types in Fuzhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 348-355.
- [2] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951. ZHANG Han, OUYANG Zhen-cheng, ZHAO Xiao-min. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(3): 939-951.
- [3] 荣勤雷,李若楠,黄绍文,等. 不同施肥模式设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1084-1096. RONG Qin-lei, LI Ruo-nan, HUANG Shao-wen, et al. Characteristics of nutrients and microbial biomass in soil aggregates under different fertilization modes in greenhouse vegetable production [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1084-1096.
- [4] 孙萌,梁曼曼,李寒,等. 地面覆盖对核桃园土壤团聚体分布及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 127-134, 190. SUN Meng, LIANG Man-man, LI Han, et al. Effects of mulching on soil aggregate distribution and stoichiometry in walnut orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 127-134, 190.
- [5] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism size, life history and N:P stoichiometry[J]. *BioScience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [6] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308-1320.
- [7] Manuel D B, David J E, Fernando T M, et al. Aridity decouples C:N:P stoichiometry across multiple trophic levels in terrestrial ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2018, 21(3): 459-468.
- [8] 李秋嘉,薛志婧,周正朝. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体养分特征及微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 137-145. LI Qiu-jia, XUE Zhi-jing, ZHOU Zheng-chao. Effects of vegetation restoration on nutrient and microbial properties of soil aggregates with different particle sizes in the loess hilly regions of Ningxia, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 137-145.
- [9] 孙娇,赵发珠,韩新辉,等. 不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6879-6888. SUN Jiao, ZHAO Fa-zhu, HAN Xin-hui, et al. Ecological stoichiometry of soil aggregates and relationship with soil nutrients of different-aged *Robinia pseudoacacia* forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6879-6888.
- [10] Bai X J, Wang B R, An S S, et al. Response of forest species to C:N:P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2019, 183: 104186.

- [11] 陈晓旋, 黄晓婷, 陈东阳, 等. 炉渣与生物炭配施对福州平原稻田土壤团聚体及碳、氮分布的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1989–1998. CHEN Xiao-xuan, HUANG Xiao-ting, CHEN You-yang, et al. Effects of slag and biochar mixed amendment on soil aggregates and carbon, nitrogen distribution in paddy field of Fuzhou plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1989–1998.
- [12] 李明, 秦洁, 红雨, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体碳、氮和磷生态化学计量学特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 29–40. LI Ming, QIN Jie, HONG Yu, et al. Effects of nitrogen addition on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Stipa baicalensis* grassland soil aggregates[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 29–40.
- [13] Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Soil and plant components ecological stoichiometry in four steppe communities in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2016, 147(11): 481–488.
- [14] 叶云, 赵小娟, 胡月明. 基于GA-BP神经网络的珠三角耕地质量评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 964–973. YE Yun, ZHAO Xiao-juan, HU Yue-ming. Evaluation of cultivated land quality in Pearl River Delta based on GA-BP neural network[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 964–973.
- [15] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. ZHANG Gan-lin, GONG Zi-tong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1564–1576. LIU Meng-yun, WU Jian-li, LIU Li-wen, et al. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1564–1576.
- [17] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 265–270. JIANG Min, LIU Yi, LIU Chuang, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 265–270.
- [18] 史琼彬, 赵秀兰, 常同举, 等. 耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1923–1930. SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, et al. Effects of tillage on distribution of heavy metals and organic matter within purple paddy soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1923–1930.
- [19] Wei G X, Zhou Z F, Guo Y, et al. Long-term effects of tillage on soil aggregates and the distribution of soil organic carbon, total nitrogen, and other nutrients in aggregates on the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28(3): 291–310.
- [20] 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. ZHANG Han, OUYANG Zhen-cheng, ZHAO Xiao-min, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon, nitrogen and ratio of carbon to nitrogen in the plow layer of farmland soil in Jiangxi Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2486–2497.
- [21] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235–252.
- [22] Komiyama A, Ong J E, Pongparn S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review[J]. *Aquatic Botany*, 2007, 89(2): 128–137.
- [23] 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 等. 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2904–2911. QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, et al. Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in *Robinia pseudoacacia* forest within different vegetation zones on the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2904–2911.
- [24] 潘俊, 刘苑秋, 刘晓君, 等. 退化红壤植被恢复团聚体及化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 187–195, 320. PAN Jun, LIU Yuan-qiu, LIU Xiao-jun, et al. Distribution and stoichiometry of water-stable aggregates of different vegetation restoration patterns in degraded red soil regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 187–195, 320.
- [25] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626–1632. GE Nan-nan, SHI Yun, YANG Xian-long, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1626–1632.
- [26] 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): 1156–1167. OU Xiao-lin, CHEN Zhi-biao, CHEN Zhi-qiang, et al. Stoichiometric characteristics of soil aggregates in subtropical eroded red soil under vegetation restoration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1156–1167.
- [27] 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[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947. WANG Shao-qiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [28] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1118–1127. CHEN Xiao-fen, LIU Ming, JIANG Chun-yu, et al. Mineralization of soil organic carbon and its sensitivity to temperature in soil aggregates, relative to particle size in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1118–1127.
- [29] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 99–107.
- [30] Jiao F, Wen Z M, An S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 249–254.
- [31] 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(1/2/3): 139–151.