

江西省油菜土壤碳氮磷生态化学计量学空间变异性及影响因素

张 晗^{1,2}, 欧阳真程^{1,2}, 赵小敏^{1,4}, 何 炬³, 匡丽花⁴, 叶英聪^{1,5}

(1. 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045;

2. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 3. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 4. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 5. 江西农业大学林学院, 南昌 330045)

摘要: 运用经典统计学和地统计学分析方法, 探讨了江西省油菜种植区土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性及影响因素。结果表明: 江西省油菜土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)平均含量分别为16.99, 1.44, 0.50 g/kg, 土壤C:N、C:P和N:P平均值分别为12.28, 38.31和3.27, 土壤总体C:N:P为33.86:2.88:1, 整体处于相对较低水平, 表现出中等程度的变异性, 其空间变异特征受到结构性因素和随机性因素的共同影响, 但受结构性因素影响更大。从空间分布规律看, 土壤SOC、TN和TP含量均表现出东北高西南低的空间分布格局。土壤C:N高值区主要分布在赣北地区, 分布面积较小, 低值区主要分布在赣西、赣西北、赣西南以及赣东等地区。土壤C:P与N:P高值区零星分布在赣西南、赣东北等区域; 低值区主要分布在赣西北及赣南地区。回归分析表明, 成土母质、土壤类型、地形因子、气候条件、种植制度和氮肥施用量对研究区土壤C:N、C:P和N:P空间变异特征有极显著影响($P < 0.01$); 成土母质对土壤C:N、C:P和N:P空间变异的独立解释能力分别为16.6%, 3.7%和7.0%, 地形因子的独立解释能力分别为3.5%, 2.9%和4.2%, 种植制度的独立解释能力分别为9.7%, 4.4%和7.6%, 氮肥施用量的独立解释能力分别为3.9%, 4.4%和7.6%, 土壤类型和气候条件独立解释能力最高, 分别为16.8%, 5.1%, 9.0%和13.4%, 9.8%, 15.2%, 是调控江西省油菜土壤C:N、C:P和N:P空间变异最主要的影响因素。

关键词: 土壤碳、氮、磷; 生态化学计量; 空间变异; 影响因素; 油菜种植区; 江西省

中图分类号: S565.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0269-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.039

Spatial Variability of Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Its Influencing Factors in Rapeseed Soil in Jiangxi Province

ZHANG Han^{1,2}, OU YANG Zhencheng^{1,2}, ZHAO Xiaomin^{1,4},

HE Ju³, KUANG Lihua⁴, YE Yingcong^{1,5}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Resources and Ecology of Poyang Lake

Basin, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Land Resource and Environment

College, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 3. College of Urban and Environmental

Science, Central China Normal University, Wuhan 430079; 4. College of Public Administration, Nanjing

Agricultural University, Nanjing 210095; 5. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

Abstract: Spatial variability of stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus and its influence factors were systematically analyzed through classical statistics analysis and geostatistics analysis methods in Rapeseed Planting areas of Jiangxi Province. The results showed that the averaged values of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents were 16.99 g/kg, 1.44 g/kg and 0.50 g/kg respectively, and soil C:N, C:P, and N:P were 12.28, 38.31 and 3.27 respectively. The ecological stoichiometric ratios were 33.86:2.88:1, and the ratios were at a relatively low level, indicating that there existed variation coefficients and spatial variability with a moderate degree, which also suggested

收稿日期: 2018-05-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(41361049); 江西省自然科学基金项目(20122BAB204012); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中科院南京土壤研究所)开放课题项目(0812201202)

第一作者: 张晗(1992—), 男, 江西永丰人, 硕士研究生, 主要从事土地(土壤)遥感与信息、生态环境和土壤养分循环等研究。E-mail: zhang-han0307@163.com

通信作者: 赵小敏(1962—), 男, 江西上高人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业遥感与信息技术、土地规划和土地资源利用等研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

the spatial variability of soil C : N, C : P and N : P were determined by the co-effects of structural and random factors in Jiangxi Province, and the structural factors played a more important role. From the characteristics of spatial distribution, SOC, TN, and TP content trend to be high in northeast and low in southwest. The high-value region of soil C : N mainly distributed in the north of Jiangxi Province and the distribution area was small, while the low-value region was mainly distributed in West Jiangxi, Northwest Jiangxi, Southwest Jiangxi and East Jiangxi. Soil C : P and N : P had the same spatial distribution characteristics as well, the high-value region was located on Southwest Jiangxi and Northeastern Jiangxi sporadically; The low-value region was mainly distributed in Northwest Jiangxi and South Jiangxi. Regression analysis showed that soil parent materials, soil types, topography, climate condition and cropping system had very significant impacts on soil C : N, C : P and N : P ratios ($P < 0.01$). The soil parent materials were able to explain 16.6%, 3.7% and 7.0% of soil C : N, C : P and N : P spatial variability, respectively. The topography factors could explain 3.5%, 2.9% and 4.2% of the spatial variability, respectively. The explanatory power of cropping system were 9.7%, 4.4%, and 7.6%. The annual fertilizer Nitrogen application explained 3.9%, 4.4% and 7.6% of soil C : N, C : P and N : P spatial variability, respectively. However, The explanatory power of soil types and climate condition were 16.8%, 5.1%, 9.0% and 13.4%, 9.8%, 15.2%, respectively, which suggested that soil types and climate condition were the dominant factors in controlling the spatial variability of soil C : N, C : P and N : P.

Keywords: carbon, nitrogen and phosphorus; ecological stoichiometry; spatial variability; influencing factors; rapeseed soil; Jiangxi Province

元素从分子到生态系统都是按照一定比例组成的,生态化学计量学(ecological stoichiometry)集合了生物学、生态学和化学的基本原理,是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要包括 C、N 和 P 等)平衡的科学,以及元素平衡对生态交互作用影响的一种理论^[1-2],因此生态化学计量学已经成为当前生物地球化学循环与生态学研究的前沿热点之一^[3]。在土壤的生物地球化学元素循环中,C、N、P 元素作为重要的生命元素,是土壤养分循环与转化的核心,调节和驱动着整个生态系统的演替过程。目前,关于土壤 C、N、P 营养元素的研究大多聚焦于土壤 C、N、P 元素自身的变异特征,而忽略了土壤 C、N、P 三者之间的耦合平衡关系。受到结构因素和随机因素的共同作用,植被、气候、母质、土壤类型、地形地貌、生物活动、种植制度和施肥量等均会对土壤碳氮磷含量及其计量学特征造成一定影响。

生态化学计量学理论最早起源于水生生态系统,迄今为止,国内外学者运用生态化学计量学方法和原理在海洋、森林、草地、湿地、园地和微生物等生态系统方面取得了广泛研究^[4-7],然而对于农田土壤的研究却相对较少,尤其是油菜土壤的相关研究十分匮乏,难以有效地指导生产。由于土壤属性的空间变异性是尺度函数,且土壤养分是具有高度空间变异性的时空连续体,当前的研究^[5-7,13,15-16,21]主要集中于全球、全国、区域、流域以及农田等空间尺度上分析土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征,而缺乏对省域尺度下

土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征空间变异性及其影响因子进行深入分析。油菜土壤作为农田生态系统的重要组成部分,是油菜生长发育所需养分的直接物质来源,很大程度上制约着油菜组成(分)、结构、生产力水平以及农田生态系统的内稳性与稳定性^[2],相关研究^[8-9]表明,油菜作为我国当前最重要的油料作物和能源作物,其品质与产量对氮、磷、钾素和有机碳含量十分敏感。可见,土壤 C、N、P 及其生态化学计量特征对土壤养分的可获得性和群落的生态学过程具有良好的指示作用,不仅能够反映油菜的生长发育状况,还可以了解土壤 C、N、P 元素的循环特征与平衡机制。因此,探明油菜土壤生态化学计量空间变异特征及其影响因素对深入认识土壤—植物的 C、N、P 等养分循环机制、共变规律和耦合关系至关重要,对揭示省域尺度下土壤养分的有效性和可获得性及其 C、N、P 储量具有重要意义。

江西省是长江中下游地区人口最为密集的典型农业区,也是全国重要的商品粮、油、棉主产区之一,油菜作为江西省仅次于水稻的第二大农作物和最大的油料作物,在全省国民经济发展和农业产业结构中有着举足轻重的地位。近十年来,江西省油菜种植面积已达 $5.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占全国油菜种植面积的 7.32%,油菜总产量约为 $6.33 \times 10^6 \text{ t}$,占全国冬油菜产量的 4.71%^[10]。该区油菜种植以一年两季或一年三季的轮作为主,如油菜—棉花轮作、油菜—单季稻轮作和油菜—双季稻轮作等。但是,近些年来,随着

人地矛盾的加剧、土地垦殖系数的提高以及种植方式和施肥方式的不合理,导致江西省农田土壤化肥当季利用率不高,土壤板结、养分失调、酸化严重和面源污染等问题日益严峻^[21]。基于此,本文以江西省油菜种植区为研究对象,综合运用经典统计学、地统计学以及GIS等技术,研究省域尺度下土壤C、N、P及其化学计量比的空间分布格局,探讨土壤碳氮磷生态化学计量特征与成土母质、土壤类型、地形因子、种植制度、施肥方式和气候及环境因子的关系,以期对江西省油菜产区的土壤养分分区管理、高效科学施肥、生态环境保护等方面提供数据基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省简称“赣”,位于中国东南部,地处长江中下游交接处的南岸(24°29′14″—30°04′41″N, 113°34′36″—118°28′58″E)。江西省属典型的亚热带湿润气候,全省平均气温为16.4~19.4℃,年降水量为1751~2523 mm,主要集中在4—8月的雨季,年日照时间1395~1679 h,年无霜期平均272 d。江西省地形以丘陵山地为主,平原、盆地、谷地广布,省境东、西、南三面群山环绕,中部丘陵与平原交错分布,地势呈现出由外及里,从南到北,渐次向鄱阳湖倾斜的趋势,鄱阳湖是全国最大的淡水湖。根据《江西土壤》和《江西

土种志》该区域土壤类型主要为红壤、水稻土、黄壤和黄棕壤等,成土母质主要为酸性结晶岩类风化物、石英岩类风化和泥质岩类风化物。江西省粮食作物以水稻为主,还盛产油菜、花生、油茶等油料作物,油菜种类主要为白菜型冬油菜,江西省油菜种植区主要分布在吉安市、九江市、上饶市、宜春市和南昌市等赣中、赣北地区(图1a)。

1.2 土壤样品采集与分析

于2012年11月至翌年12月农作物收获后在江西省油菜种植区进行土壤样品采集,采样时应用“S”形采样法随机设置8个点,采样样地大小为20 m×20 m,共采集表层土壤(0—20 cm)有效样点1751个(图1a)。土壤样品经室内自然风干、剔除杂物,研磨过100目2 mm尼龙筛等前期处理后,制成待测土样,按照四分法混匀样品,留取1 kg样品以备分析,每个采样点均以GPS记录其经纬度坐标和海拔高度,并详细记载样点周围的地表环境信息。土壤样品测定方法参照《土壤农化分析方法》^[11]分析;有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量法测定;全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)含量采用NaOH熔融法—钼锑抗比色法测定;土壤pH采用玻璃电极法(水土比为2.5:1)测定;土壤容重采用环刀法测定。

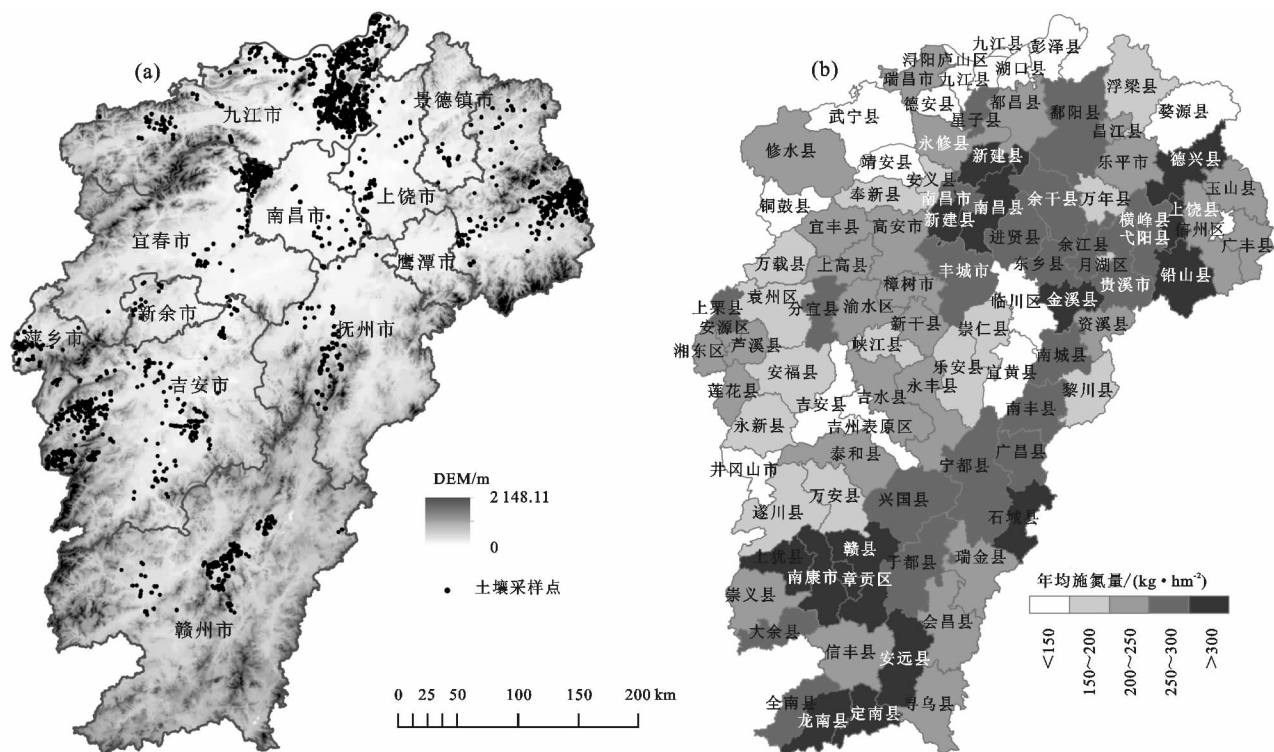


图1 江西省油菜种植区土壤样点及年均施氮量空间分布

1.3 数据来源与数据处理

研究区1751个油菜土壤样点数据来源于农业部开展的“江西省测土配方施肥”项目中的田间采样

数据。江西省成土母质类型和土壤类型来自于第2次土壤普查数据。江西省各地区的年均施氮量来源于1985—2015年30年来《江西省统计年鉴》中的各

县、区数据。江西省 30 m×30 m 的 DEM(数字高程模型)数据来源于中国科学院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),经 ArcGIS 10.5 软件平台提取出高程(H)、坡度(S)、坡向(A)、坡度变率(SOS)、坡向变率(SOA)、地形起伏度(QFD)、地表粗糙度(M)、地形湿度(Ψ)和河流动能指数(Ω)等地形因子,具体计算公式见参考文献[12]。年平均温度(MAT)、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和年降水量(MAP)数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供。

本研究中土壤碳氮比($C:N$)、碳磷比($C:P$)和氮磷比($N:P$)均采用质量比。成土母质、土壤类型和种植制度均为多分类变量,回归分析时采用虚拟变量进行赋值。运用 SPSS 22.0 统计分析软件进行描述性统计、相关分析、回归分析、方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan)等经典统计分析,采用 GS+7.0 软件进行地统计分析,利用 ArcGIS 10.5 软件进行普通克里格插值分析。

表 1 土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的描述性统计

指标	含量范围	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值	分布类型
SOC	5.80~28.83	16.99	5.14	30.3	0.18	-0.79	0.058	正态
TN	0.32~2.77	1.44	0.49	34.0	0.08	-0.35	0.090	对数正态
TP	0.09~1.13	0.50	0.17	34.7	0.73	0.06	0.092	正态
C:N	5.92~38.54	12.28	3.28	26.7	3.92	20.51	0.348	正态
C:P	8.25~143.45	38.31	18.60	48.6	1.17	2.10	0.083	正态
N:P	0.33~13.23	3.27	1.69	51.7	1.14	2.19	0.079	正态

注: SOC、TN 和 TP 的含量单位为 g/kg。

2.2 江西省油菜地土壤碳氮磷及化学计量比的空间结构特征

半方差函数能深刻、全面、直观地反映土壤碳氮磷含量及 $C:N:P$ 的空间结构特征,经过 GS+7.0 软件反复模拟选取土壤碳氮磷及其化学计量比的最优拟合函数,并输出其空间结构信息(表 2)。由表 2 可知,土壤 SOC、TP、 $C:P$ 和 $N:P$ 符合指数模型(Exponential),而 TN 和 $C:N$ 符合球状模型(Spherical),土壤碳氮磷及 $C:N:P$ 的决定系数 R^2

2 结果与分析

2.1 江西省油菜土壤碳、氮、磷含量及 C:N:P 的统计特征

统计结果表明(表 1),研究区土壤 SOC、TN 和 TP 平均含量分别为 16.99,1.44,0.50 g/kg,土壤 $C:N$ 、 $C:P$ 和 $N:P$ 平均值分别为 12.28,38.31 和 3.27。从变异系数来看,研究区土壤碳氮磷含量及其化学计量比为 26.7%~51.7%,属于中等程度的变异性。土壤养分数据服从正态分布性是进行空间分析的前提与基础,对土壤碳氮磷含量及其计量比进行单一样本 K-S($P>0.05$)正态检验时发现,除土壤 TN 含量不服从正态分布外,其余均符合正态分布。然而,经对数转换后的土壤 TN 含量 K-S 值为 0.090,表明 TN 含量服从对数正态分布。因此,研究区土壤碳氮磷含量及其化学计量比均符合地统计学和空间插值分析的要求。

均大于 0.70,残差 RSS 均趋近于 0,表明理论模型的拟合精度较高,能很好地表征土壤碳氮磷及其计量比的空间结构特征。研究区土壤碳氮磷及其化学计量比的块金效应为 25%~75%,具有中等程度的空间自相关性,表明土壤碳氮磷及其计量比的空间变异性主要由随机因素和结构性因素共同引起,但结构性因素影响更大。土壤 SOC 和 TN 含量的变程分别为 238.20,123.80 km,说明 SOC 和 TN 的空间自相关范围较大,远远高于土壤 TP、 $C:N$ 、 $C:P$ 和 $N:P$ 。

表 2 土壤 C、N、P 及其生态化学计量比的空间结构参数

指标	拟合模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/ km	决定系数 R^2	残差 RSS
SOC	Exponential	0.0533	0.1176	45.32	238.20	0.836	7.177×10^{-4}
TN	Spherical	0.0139	0.0431	32.24	123.80	0.851	1.680×10^{-4}
TP	Exponential	0.0132	0.0301	43.69	27.30	0.784	1.374×10^{-5}
C:N	Spherical	0.0199	0.0556	35.76	27.40	0.953	1.442×10^{-5}
C:P	Exponential	0.0845	0.2330	36.27	37.80	0.790	8.920×10^{-4}
N:P	Exponential	0.1011	0.2132	47.42	85.50	0.743	2.088×10^{-3}

注: Exponential 为指数模型; Spherical 为球状模型。

2.3 江西省油菜土壤碳氮磷及其化学计量比的空间分布规律

在 ArcGIS 10.5 地统计模块中运用普通克里格法对土壤碳氮磷含量及其计量比进行空间插值和交互检验(图 2、表 3)。交叉验证结果表明(表 3),

SOC、TN、TP、 $C:N$ 、 $C:P$ 和 $N:P$ 的测定值与预测值极显著相关,平均预测误差(ME)和标准平均预测误差(MSE)均趋近于 0,均方根误差(RMSE)最小,且最为接近平均标准误差(ASE),标准均方根预测误差(RMSSE)最接近于 1。由此可见,从预测误

差而言,利用普通克里法进行空间插值的结果精度较高,得出的结论较为可靠。

表 3 土壤碳、氮、磷化学计量比插值精度统计检验

统计指标	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
相关系数(R^2)	0.733**	0.782**	0.700**	0.821**	0.680**	0.711**
平均预测误差(ME)	0.007	0.000	0.000	-0.001	0.064	0.005
均方根误差(RMSE)	3.501	0.149	0.124	1.871	13.660	1.188
平均标准误差(ASE)	3.331	0.284	0.123	2.493	13.755	1.181
标准平均预测误差(MSE)	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.002	0.001
标准化均方根误差(RMSSE)	1.035	1.051	1.000	0.820	1.000	1.004

注: ** 表示相关性达极显著差异($P<0.01$)。

根据半方差函数的最优拟合模型及相应参数,在 ArcGIS 10.5 软件平台中对土壤碳氮磷及化学计量比进行普通 Kriging 插值,生成相应的空间分布图(图 2)。

由图 2 可以看出,江西省油菜土壤 SOC、TN 和 TP 含量具有相同的空间分布趋势,表现出东北高西南低的空间分布格局,且多呈团块状或斑块状分布,这可能与本文采取的非均匀采样法有关。高值区主要分布在鄱阳湖平原区、赣中、赣西南及赣东北地区,而低值区主要分布在赣东或赣南山地丘陵区。土壤 C : N 高值区主要分布在江西省北部地区,分布面积较小,低值区在全省范围内分布较为集中。土壤 C : P 与 N : P 表现出相同的空间分布特征,其空间分布多呈条带状或斑块状分布,高值区零星分布在赣西南、赣东北等地势较高的区域,分布面积较小;低值区主要分布在赣西北及赣南等地势较低的地区。

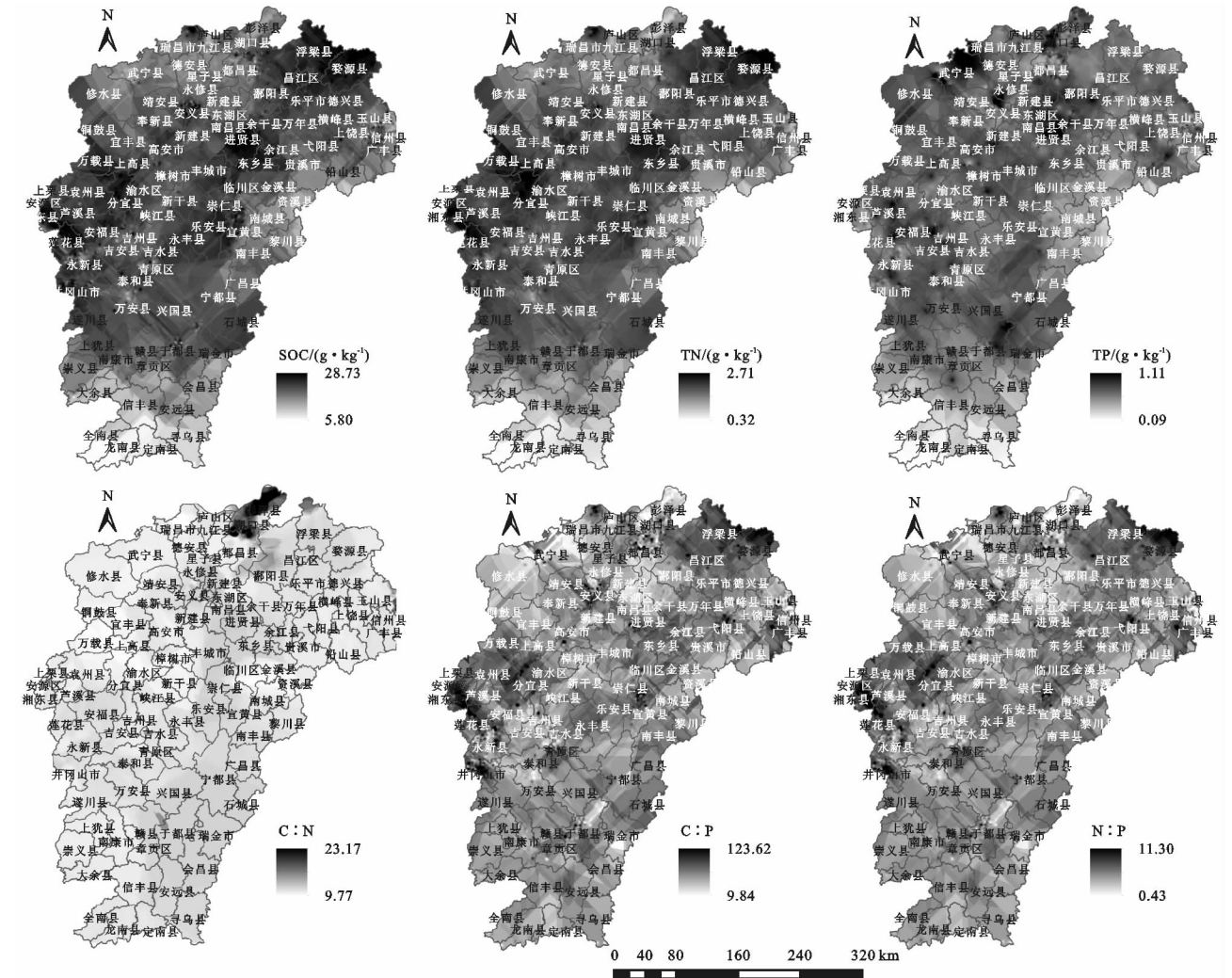


图 2 江西省油菜土壤 C、N、P 及其化学计量比空间分布

2.4 江西省油菜土壤碳氮磷生态化学计量比空间分
异的影响因素分析

2.4.1 成土母质 成土母质是土壤形成、发育和分布

的重要物质基础,它主要通过影响土壤的理化性质、矿物组成、物质的风化以及淋溶进程等生态过程,从而影响着土壤碳氮磷含量及其计量比的差异。

不同成土母质类型之间土壤 C : N、C : P 和 N : P 存在显著差异(表 4, $P<0.05$),其中土壤 C : N 平均值以下蜀系黄土状物(16.37±4.79)最高,紫色岩类风化物(11.16±0.43)最低;土壤 N : P 平均值以碳

酸盐岩类风化物(47.61±29.19)最高,下蜀系黄土状物(30.25±16.52)最低;土壤 C : P 平均值以碳酸盐岩类风化物(4.24±2.70)最高,下蜀系黄土状物(2.07±1.43)最低。

表 4 不同成土母质土壤 C : N、C : P 和 N : P 的多重比较

成土母质	SOC/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
第四纪红色黏土	18.51±4.87b	1.63±0.41b	0.55±0.17a	11.43±1.39c	37.63±16.70b	3.31±1.45bc
河湖沉积物	17.11±5.38c	1.48±0.50c	0.50±0.18b	11.89±2.10bc	39.14±18.78b	3.38±1.69b
红砂岩类风化物	16.23±5.28d	1.41±0.46c	0.48±0.16bc	11.64±2.64c	37.04±16.69b	3.23±1.49bc
基性结晶岩类风化物	13.66±6.15de	1.20±0.68cd	0.41±0.17bc	13.71±9.46b	39.48±32.72ab	3.41±2.99bc
泥质岩类风化物	17.04±4.93c	1.45±0.46c	0.49±0.17b	12.23±3.61b	38.93±17.86b	3.31±1.60bc
石英岩类风化物	16.55±4.01c	1.43±0.40c	0.54±0.17a	12.05±3.29bc	34.20±15.94c	2.95±1.44c
酸性结晶岩类风化物	20.11±4.75a	1.73±0.43a	0.49±0.15b	11.74±1.54bc	45.32±18.99a	3.93±1.71a
碳酸盐岩类风化物	16.48±6.16bc	1.47±0.61c	0.43±0.18c	11.61±2.12bc	47.61±29.19a	4.24±2.70a
下蜀系黄土状物	13.97±4.02e	0.94±0.39d	0.55±0.21a	16.37±4.79a	30.25±16.52bc	2.07±1.43d
紫色岩类风化物	16.73±4.43bc	1.50±0.38c	0.48±0.16bc	11.16±0.43c	40.26±21.08ab	3.59±1.83ab

注:同列数据后不同小写字母表示各成土母质间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4.2 土壤类型 统计结果(表 5)表明,不同土壤类型下土壤 C : N、C : P 和 N : P 平均值差异明显($P<0.05$)。土壤 C : N 均值大小顺序依次为黄褐土(16.78±4.70)>潮土(14.10±3.23)>红壤(12.63±3.85)>石灰土(12.10±2.94)>水稻土(11.69±2.53),水稻土除与石灰土无显著差异外,其余土壤类型之间均存在显著性差异($P<0.05$);土壤 C : P 均值大小顺序依次为水稻土(16.78±4.70)>石灰土(35.61±19.66)>红壤(35.44±15.49)>潮土(30.17±15.00)>黄褐土(25.79±13.37),

除水稻土与石灰土无显著差异外,其余土壤类型之间均存在显著性差异($P<0.05$);土壤 N : P 均值大小顺序依次表现为水稻土(16.78±4.70)>石灰土(35.61±19.66)>红壤(35.44±15.49)>潮土(30.17±15.00)>黄褐土(25.79±13.37),除水稻土与石灰土无显著差异外,其余土壤类型之间均存在显著性差异($P<0.05$)。

由以上分析可知,水稻土的 C : N 较其他土壤类型小,而 C : P 和 N : P 较其他土壤类型高,这与人们的耕垦、改良、熟化和施肥量等密切相关。

表 5 不同土壤类型土壤 C : N、C : P 和 N : P 的多重比较

土壤类型	SOC/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
潮土	14.88±5.24b	1.13±0.51c	0.55±0.17ab	14.10±3.23b	30.17±15.00c	2.29±1.35c
红壤	17.04±4.62a	1.43±0.46b	0.53±0.17b	12.63±3.85c	35.44±15.49b	2.97±1.41b
黄褐土	13.17±3.77c	0.88±0.41d	0.59±0.21a	16.78±4.70a	25.79±13.37c	1.72±1.21d
石灰土	13.04±3.88bc	1.14±0.44c	0.43±0.14c	12.10±2.94cd	35.61±19.66ab	3.10±1.89ab
水稻土	17.52±5.17a	1.52±0.46a	0.49±0.17c	11.69±2.53d	40.52±19.10a	3.52±1.69a

2.4.3 地形因子 地形条件通过对地表水热条件和成土母质的重新分配来深刻影响土壤碳氮磷含量及其计量比的空间分异与分布。由表 6 可知,研究区土壤 C : N 与海拔、坡度、坡度变率、地形起伏度和河流动能指数均呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)负相关关系,而土壤 C : P 和 N : P 与海拔、坡度、坡度变率、地形起伏度和河流动能指数均呈极显著($P<0.01$)正相关关系;土壤 C : N、C : P 和 N : P 与坡向、坡向变率、地表粗糙度和地形湿度指数之间无显著相关性。表明土壤 C : N 随着海拔的上升、坡度变大、地形起伏度升高以及地表径流侵蚀力的增强而不断降低,而土壤 C : P 和 N : P 伴随着海拔的升高、坡度变陡、地形起伏度升高以及地表径流侵蚀力的增强表现出不断增加的趋势。这主要是因为海拔较高,地势起伏较大,坡度越大的区域水的排泄和地表径流作用越强烈,土壤易被冲刷侵蚀,

土壤碳氮容易随水流失,碳、氮累积速率减缓,且随着海拔的升高,温度的降低,成土母质风化作用过程变缓,全磷的释放减弱,土壤中全磷含量降低,使得土壤 C : P 和 N : P 不断升高,而 C : N 不断降低。总体而言,海拔、坡度、坡向变率地形起伏度和河流动能指数是引起江西省油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 空间变异特征的重要地形因子。

2.4.4 种植制度 与土地利用方式相比,种植制度更能有效揭示由人类耕作、灌溉条件和施肥方式等人类活动所引起的土壤养分输入输出关系的差异特征。江西省不同种植制度对油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 有显著的影响($P<0.05$)(表 7)。其中,土壤 C : N 大小顺序具体表现为油菜—棉花轮作(13.93±4.40)>油菜—双季稻轮作(11.92±2.86)>油菜—单季稻轮作(11.29±1.80)>油菜单作(11.18±0.31),油菜单作

与油菜—单季稻轮作之间无显著差异;土壤 C:P 大小顺序依次为油菜—单季稻轮作(42.51 ± 20.33)>油菜单作(39.91 ± 18.34)>油菜—双季稻轮作(39.34 ± 18.23)>油菜—棉花轮作(32.11 ± 15.60),油菜—棉花轮作与其他 3 种植制度存在显著差

异($P<0.05$);土壤 C:P 大小顺序依次为油菜—单季稻轮作(3.80 ± 1.83)>油菜单作(3.54 ± 1.55)>油菜—双季稻轮作(3.36 ± 1.58)>油菜—棉花轮作(2.54 ± 1.47),油菜—棉花轮作与其他 3 种植制度存在显著差异($P<0.05$)。

表 6 土壤 C:N、C:P 和 N:P 与地形因子的相关性分析

指标	海拔 (H)	坡度 (S)	坡向 (A)	坡度变率 (SOS)	坡向变率 (SOA)	地形起伏度(QFD)	地表粗糙度(M)	地形湿度 (Ψ)	河流动能 指数(Ω)
SOC	0.137**	0.035	0.038	0.020	0.051*	0.051*	-0.018	0.001	0.030**
TN	0.200**	0.043	0.040	0.043	0.055*	0.048*	-0.017	0.004	0.025
TP	-0.095**	-0.055*	-0.011	-0.049**	-0.004	-0.086**	-0.007	0.038	-0.078**
C:N	-0.184**	-0.051*	-0.010	-0.048**	0.005	-0.004*	0.016	0.036	-0.003**
C:P	0.153**	0.066**	0.035	0.054**	0.036	0.101**	-0.008	-0.033	0.081**
N:P	0.193**	0.069**	0.032	0.065**	0.036	0.096**	-0.003	-0.028	0.078**

注: * 表示显著性水平 $P<0.05$; ** 表示显著性水平 $P<0.01$ 。下同。

表 7 不同种植制度下的土壤 C:N、C:P 和 N:P 的多重比较

种植制度	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
油菜单作	16.47±4.28bc	1.47±0.35a	0.47±0.17c	11.18±0.31c	39.91±18.34ab	3.54±1.55ab
油菜—棉花轮作	15.53±4.79c	1.22±0.51c	0.54±0.18a	13.93±4.40a	32.11±15.60c	2.54±1.47c
油菜—单季稻轮作	18.11±5.67a	1.62±0.51a	0.48±0.17c	11.29±1.80c	42.51±20.33a	3.80±1.83a
油菜—双季稻轮作	17.17±4.82b	1.47±0.41b	0.49±0.17b	11.92±2.86b	39.34±18.23b	3.36±1.58b

2.4.5 气候与环境因子 Pearson 相关分析表明,土壤 C:N、C:P 和 N:P 除受到各自比例元素的影响外,还受到土壤 pH、容重、经纬度、年平均气温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和年降水量等因子的显著影响。由表 8 可知,除全磷与土壤 C:N 比相关性不显著外($P>0.05$),土壤中 C、N、P 元素含量对 C:N、C:P 和 N:P 均有重要影响;土壤 C:N 和 N:P 与 pH 呈极显著的负相关关系($P<0.01$),土壤 C:P 与 pH 呈负相关,但不显著($P>0.05$);土壤 C:P 和 N:P 与容重呈极显著的

负相关关系($P<0.01$),而土壤 C:N 与容重呈极显著的正相关关系($P<0.01$);土壤 C:N 与经度和纬度均呈极显著的正相关关系($P<0.01$),而土壤 C:N 和 N:P 则与经纬度呈极显著的负相关关系($P<0.01$);土壤 C:N 与年平均气温、年降水量有极显著的负相关关系($P<0.01$),土壤 C:P 和 N:P 与年平均气温和年降水量呈极显著的正相关关系($P<0.01$);土壤 C:N、C:P 和 N:P 与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温均呈极显著的正相关关系($P<0.01$)。

表 8 土壤 C:N、C:P 和 N:P 与气候及环境因子的相关性分析

指标	SOC	TN	TP	pH	容重	经度	纬度	年平均气温	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	年降水量
SOC	1.000	0.893**	-0.057*	-0.134**	-0.085**	-0.273**	-0.224**	0.084**	0.147**	0.150**
TN	0.893**	1.000	-0.081**	-0.163**	-0.110**	-0.303**	-0.305**	0.198**	0.190**	0.235**
TP	-0.057*	-0.081**	1.000	-0.057*	0.020	-0.015	0.089**	-0.137**	-0.028	-0.101**
C:N	-0.069**	-0.459**	0.046	-0.184**	0.073**	0.146**	0.270**	-0.268**	0.102**	-0.221**
C:P	0.645**	0.594**	-0.691**	-0.045	-0.092**	-0.182**	-0.171**	0.137**	0.112**	0.128**
N:P	0.604**	0.689**	-0.664**	-0.064**	-0.107**	-0.207**	-0.224**	0.208**	0.146**	0.184**

3 讨论

3.1 不同因素影响程度分析

分别以成土母质、土壤类型、地形因子、气候条件、种植制度和氮肥施用量为自变量进行回归分析,以定量揭示结构性因素和随机性因素对江西省油菜土壤 C:N、C:P 和 N:P 空间变异的影响程度。回归分析(表 9)表明,研究区不同影响因素的回归方程均达到极显著水平($P<0.01$),这说明本研究中选取的 6 个影响因素对油菜土壤 C:N、C:P 和 N:P 均有极显著的影响,但影响程度不一。

由表 9 可知,在结构性因素中,地形因子对土壤 C:N、C:P 和 N:P 空间变异的独立解释能力最低,分别为 3.5%、2.9%和 4.2%;成土母质其次,独立解释能力分别为 16.6%、3.7%和 7.0%;土壤类型和气候条件最高,独立解释能力分别为 16.8%、5.1%、9.0%和 13.4%、9.8%、15.2%。在随机性因素中,氮肥施用量对土壤 C:N、C:P 和 N:P 空间变异的独立解释能力最低,分别为 3.9%、4.4%和 7.6%;种植制度最高,分别为 9.7%、4.4%和 7.6%。由此可知,研究区油菜土壤 C:N、C:P 和 N:P 空间变异主要受到结构性

因素的影响,且气候条件和土壤类型是其空间变异的主要影响因素,这与表 2 半方差分析中的研究结果一致。

表 9 各影响因素对江油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 的回归分析

影响 因素	C : N			C : P			N : P		
	决定系数 R^2	校正决定 系数 R^2	Sig.	决定系数 R^2	校正决定 系数 R^2	Sig.	决定系数 R^2	校正决定 系数 R^2	Sig.
成土母质	0.167	0.166	<0.01	0.039	0.037	<0.01	0.072	0.070	<0.01
土壤类型	0.170	0.168	<0.01	0.053	0.051	<0.01	0.092	0.090	<0.01
地形因子	0.036	0.035	<0.01	0.030	0.029	<0.01	0.042	0.042	<0.01
气候条件	0.136	0.134	<0.01	0.100	0.098	<0.01	0.154	0.152	<0.01
种植制度	0.098	0.097	<0.01	0.045	0.044	<0.01	0.077	0.076	<0.01
氮肥施用量	0.040	0.039	<0.01	0.039	0.038	<0.01	0.051	0.050	<0.01

3.2 江西省油菜土壤 C : N : P 影响因素分析

碳、氮、磷是土壤中重要的生源要素,也是植物生长所必需的营养元素,其养分含量及其计量比的变化和分布状况综合反映了土壤生态系统功能的变异性^[13]。研究结果表明,土壤 SOC、TN、TP 与 C : N、C : P 和 N : P 之间极显著相关(表 8, $P<0.01$),表明油菜土壤 C、N、P 相互之间的耦合关系显著,土壤 C : N、C : P 和 N : P 的变化主要取决于土壤碳、氮、磷的输入与输出的相对关系。江西省成土母质大部分由千枚岩、板岩、花岗岩、砂岩等变质岩或沉积岩构成,不同岩组之间因母质的重叠性和土壤微域分布的复区性,使得岩性具有多样性和地域性的特点,导致不同岩组背景下土壤机械组成较为复杂^[14],故而成土母质对土壤 C : N、C : P 和 N : P 空间变异的有极显著影响(表 9, $P<0.01$)。同时,研究区不同土壤类型的 C : N、C : P 和 N : P 也存在显著差异(表 4, $P<0.05$),其中黄褐土的 C : N 最高,潮土、红壤和石灰土其次,水稻土最低,而 C : P 和 N : P 以水稻土最高,石灰土、潮土和红壤其次,黄褐土最低,这主要是因为水稻土在长期渍水的条件下,土壤以氧化还原为主,通过人为的水耕熟化,加上重氮肥而轻磷肥的种植观念,土壤有机质和氮素都有明显的提高,但磷素较为缺乏,黄褐土受母质和湿热气候条件的影响黏粒淋溶淀积特征明显^[15],土壤 SOC 含量较低,而 TP 含量丰富。因此,土壤类型对土壤 C : N、C : P 和 N : P 空间变异有极显著的影响(表 9, $P<0.01$)。本研究中,地形因子对研究区土壤 C : N、C : P 和 N : P 的独立解释能力最低,这可能与江西省 DEM 的空间分辨率较低有关,导致由 1 : 25 万生成的地形变量精度也相对较低;同时,江西省油菜种植区大部分处于海拔较低、地势平坦的区域(图 1),故而地形条件对土壤碳、氮、磷的影响程度有限。本研究发现,种植制度对土壤 C : N、C : P 和 N : P 有极显著的影响,但独立解释能力较低,油菜单作和油菜—单季稻轮作差异不显著,而与油菜—棉花轮作、油菜—双季稻轮作的差异显著,这说明同一地区的不同种植制度对油菜土壤 C、N、P 的积累和循环也有明显的影响。黄亿等^[8]

通过研究指出,长江中下游地区油菜的氮肥推荐用量介于 170~220 kg/hm²,而江西省油菜种植区年均氮肥施用量远低于或高于氮肥推荐用量,且氮肥施用量高的区域土壤 C : N、C : P 和 N : P 均较低(图 1b 和图 2),特别是鄱阳县、余干县、南康市等区域的氮肥利用效率还有待进一步提升,这可能是氮肥施用量对研究区土壤 C : N、C : P 和 N : P 的独立解释能力较低的重要原因。由此可见,除受到成土因素的影响外,人类活动的干扰也对土壤 C、N、P 元素的循环、转化和迁移等过程有着深刻影响,与之对应的元素比例也将发生相应的变化^[15-16]。

气候状况反映了水热条件在经度和纬度上的分配状况,进而影响土壤 C、N、P 等元素的循环转化和分布规律^[17]。本研究发现,气候条件对土壤 C : N、C : P、N : P 有极显著影响(表 9, $P<0.01$),且土壤 C : N、C : P、N : P 与经度、纬度、海拔、年平均气温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温及年降水量均存在极显著的相关关系(表 8, $P<0.01$),说明江西省油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 的空间分布表现出明显的三向地带性特征,总体上,土壤 C : N 比随着经度和纬度的增加而增加,且随海拔的升高呈降低趋势,而土壤 C : P、N : P 随着经纬度增加呈减小的趋势且随着海拔的升高呈上升趋势,这与前人^[17-19]的研究结果一致。有研究^[20]表明,气候条件是影响 C、N、P 空间分布的重要因素,江西省属中亚热带湿润季风区,受水热条件的影响,高温多雨能够加快岩石的风化速率及氮、磷素的淋溶,以致于土壤中 SOC 含量较高,而氮磷含量降低。可见,气候因素是决定江西省油菜种植区土壤 C : N、C : P 和 N : P 差异的重要环境因素;同时,江西省油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 变化与气候因子(特别是与经度、纬度、年平均气温以及年降水量)的关系研究将是今后江西省农田生态系统土壤碳氮磷生态化学计量学研究的重点。

土壤碳氮磷比(C : N : P)是反映有机质组成、生物地球化学循环和土壤质量的重要预测指标,是诊断土壤碳、氮、磷饱和状况和有效性的主要参数,能够作为判断 C、N、P 元素矿化作用和固持作用的重要指

标^[1-2]。江西省油菜土壤 C : N : P 表现出中等程度的空间异质性,土壤总体 C : N : P 为 33.86 : 2.88 : 1, 低于中国土壤 C : N : P(60 : 5 : 1),但要略高于中国农田土壤 C : N : P(26 : 3 : 1),而与中国农田生态系统 C : N : P(31 : 3 : 1)差异不大,表明研究区油菜土壤环境对碳、氮的储存和估算具有较好的指示作用。与世界及中国其他地区农田土壤 C : N、C : P 和 N : P 相比(表 10),江西省油菜土壤 C : N 平均值要低于澳大利亚棉花土壤,而与西北农田土壤和川中丘陵区水田土壤基本持平,但又高于亚热带稻田土壤和河北省耕地土壤,土壤 C : P 和 N : P 平均值低于澳大利亚棉花土壤、南方亚热带稻田土壤和亚热带稻田土壤。这反映了江西省油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 均处于中等偏下水平,表明研究区油菜土壤 SOC 矿化速率较慢,所释放出的氮素减少,土壤微生物体有机磷出现了净矿化现象,油菜种植提高了土壤中 P 的有效性,使得土壤的生物固氮量处于较高水平,同时也表明,江西省油菜土壤环境中表现出富碳而氮、磷相对缺乏的趋势。Reich 等^[20]研究分析,磷是赤道土壤中主要的限制性元素,而氮则是高纬度土壤中重要的限制性元素。因此,江西省南部油菜土壤更容易受磷的限制,北部地区则更容易受氮的限制,在进行养分分区管理时,南部地区油菜的种植更应关注磷肥的施用,而北部油菜土壤则更应该注意氮肥的施用。

表 10 江西省油菜土壤 C : N : P 化学计量比与世界及中国其他区域土壤比较

生态系统类型	C : N	C : P	N : P	参考文献
澳大利亚棉花土壤	20.00	324.00	16.30	[22]
西北农田土壤	12.90	40.30	1.90	[23]
南方亚热带稻田土壤	10.40	101.20	10.00	[24]
河北省耕地土壤	11.81	18.32	1.59	[15]
亚热带丘陵稻田土壤	10.23	66.52	6.85	[16]
川中丘陵区水田土壤	12.35	26.87	2.11	[25]
江西省油菜土壤	12.28	38.31	3.27	本研究

4 结 论

江西省油菜种植区土壤 C : N、C : P 和 N : P 平均值分别为 12.28,38.31 和 3.27,土壤 C : N : P 平均值为 33.86 : 2.88 : 1,整体处于相对较低水平,研究区油菜土壤 C : N : P 表现出中等程度的空间异质性,其空间变异受到结构因素和随机因素的共同作用,但主要受到结构性因素的影响。空间分布上,土壤 SOC、TN 和 TP 含量表现出东北高西南低的空间分布格局,土壤 C : N 高值区主要分布在赣北地区,低值区低值区主要分布在赣西、赣西北、赣西南以及赣东等地区,土壤 C : P 与 N : P 高值区零星分布在赣西南、赣东北等地势较高的区域,低值区主要分布在赣西北及赣南地区。成土母质、土壤类型、地形因

子、气候条件、种植制度和氮肥施用量对研究区油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 的变化均有极显著影响 ($P<0.01$),所有影响因素中,土壤类型和气候条件对土壤 C : N、C : P 和 N : P 空间变异的独立解释能力最高,分别为 16.8%,5.1%,9.0%和 13.4%,9.8%,15.2%,远高于其他各因素,是影响江西省油菜土壤 C : N、C : P 和 N : P 空间变异的主控因素。因此,江西省油菜种植区在适当增加氮肥、磷肥和有机肥使用的同时,作物轮作和秸秆还田相结合,实施保护性耕作,重点关注土壤属性、种植结构和气候条件的变化对油菜土壤碳氮磷生态化学计量特征的调控,有利于江西省农田土壤养分循环和改善土壤质量。

参考文献:

[1] 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(3):3937-3947.

[2] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等.生态化学计量学特征及其应用研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5484-5492.

[3] 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.

[4] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist,1958,46(3):205-221.

[5] 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.

[6] 张仲胜,吕宪国,薛振山,等.中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J].土壤学报,2016,53(5):1160-1169.

[7] 欧阳林梅,曾冬萍,闵庆文,等.鼓山茶园土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2014,28(2):297-301.

[8] 黄亿,李廷轩,张锡洲,等.基于“3414”试验的川中丘陵区油菜施肥指标体系构建[J].中国农业科学,2013,46(10):2058-2066.

[9] 丛日环,张智,郑磊,等.基于 GIS 的长江中游油菜种植区土壤养分及 pH 状况[J].土壤学报,2016,53(5):1213-1224.

[10] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2015[M].北京:中国统计出版社,2016.

[11] 鲁如坤.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业科技出版社,1999:106-185.

[12] 张素梅,王宗明,张柏,等.利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J].农业工程学报,2010,26(5):188-194.

[13] 李红林,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J].土壤学报,2015,52(6):1345-1355.

[14] 江西省土地利用管理局,江西省土壤普查办公室.江西土壤[M].北京:中国农业科技出版社,1991.

[15] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等.中温—暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性:以河北省为例[J].生态学报,2017,37(18):6053-6063.

- [14] Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(9):2521-2526.
- [15] Xu J, Zhang J, Xie H, et al. Physiological responses of *Phragmites australis* to wastewater with different chemical oxygen demands[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10):1341-1347.
- [16] Fu G, Yu T, Ning K, et al. Effects of nitrogen removal microbes and partial nitrification denitrification in the integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95:83-89.
- [17] Oopkaup K, Truu M, Nõlvak H, et al. Dynamics of bacterial community abundance and structure in horizontal subsurface flow wetland mesocosms treating municipal wastewater[J]. *Water*, 2016, 8:457.
- [18] Wu J, Zhang J, Jia W L, et al. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12):2910-2917.
- [19] Van Oostrom A J, Russell J M. Denitrification in constructed wastewater wetlands receiving high concentrations of nitrate[J]. *Water Science and Technology*, 1994, 29(4):7-14.
- [20] 丁怡. 补充碳源提取液对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [21] Liu S Y, Yan B X, Wang L X. The layer effect in nutrient removal by two indigenous plant species in horizontal flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37:2101-2104.
- [22] Konnerup D, Brix H. Nitrogen nutrition of *Canna indica*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, biomass allocation, photosynthesis, nitrate reductase activity and N uptake rates[J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(2):142-148.
- [23] 毛昕, 王丽红, 张光生. 不同生育期美人蕉-微生物修复富营养化水体[J]. *环境工程学报*, 2013, 12(7):4689-4696.
- [24] Ding Y, Song X S, Wang Y H, et al. Effects of dissolved oxygen and influent COD/N ratios on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46:107-111.
- [25] Zhi W, Ji G. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints[J]. *Water Research*, 2014, 64:32-41.
- [26] 刘树元, 阎百兴, 王莉霞. 人工湿地中氨氮反应与 pH 变化关系的研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3):243-246.

(上接第 277 页)

- [16] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6):1336-1344.
- [17] He X, Hou E, Liu Y, et al. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:e24261.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30):11001-11006.
- [21] 张晗, 赵小敏, 朱美青, 等. 近 30 年南方丘陵山区耕地土壤养分时空演变特征: 以江西省为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2):58-65.
- [22] Hulugalle N R, Strong C, Mcpherson K, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric ratios under cotton cropping systems in Australian Vertisols: A meta-analysis of seven experiments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017:1-11.
- [23] Liu X, Ma J, Ma Z W, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agropastoral region of northwest China[J]. *Catena*, 2017, 150:146-153.
- [24] Li Y, Wu J, Liu S, et al. Is the C : N : P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4):1-14.
- [25] 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.