

江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征 及其影响因素^{*}

江叶枫^{1, 2} 叶英聪² 郭熙^{1, 2†} 饶磊^{1, 2} 孙凯^{1, 2} 李伟峰^{1, 2}

(1 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

(2 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

摘要 基于江西省2012年测土配方项目采集的16 582个耕地表层(0~20 cm)土壤样点数据, 探讨省域尺度下耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素。运用相关性分析、回归分析、方差分析和普通克里格法分析了成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量对耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异的影响。结果表明, 土壤氮磷比(N/P)在0.28~13.63之间, 均值为3.38, 变异系数为45.56%, 呈中等程度的变异。空间分布上, 高值区主要分布在海拔相对较低或鄱阳湖平原地区, 低值区主要分布在九江市。成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量对江西省耕地土壤N/P空间变异影响显著($p < 0.01$), 但影响程度有所不同。氮肥施用量能影响27.2%的土壤N/P空间变异, 是引起江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异的主要因素。

关键词 江西省; 土壤氮磷比; 生态化学计量; 空间变异; 氮肥施用量

中图分类号 S154.1; Q148 **文献标识码** A

生态化学计量学(Ecological stoichiometry)是一门主要研究化学元素平衡和生态系统能量平衡的新兴生态学科^[1], 为研究土壤—植物生态交互作用以及土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)循环方面提供了新思路, 广泛应用于植物动态变化、种群演替、物种竞争、化学元素循环乃至全球气候变化, 并取得了显著成就^[2-3]。其中, 土壤系统中C、N、P元素循环已成为全球气候变化背景下土壤学、环境学和生态计量学研究学者关注的焦点之一^[4]。土壤N和P是植物矿物质养分、有机养分和土壤肥力的重要组成部分, 作为陆地生态系统

中的2个限制性元素, 在植物的生长发育、群落组成以及生态系统的结构和功能等方面发挥着重要作用^[5]。受随机性因素与结构性因素的共同作用, 土壤N、P在空间分布上往往表现出一定的异质性, 会产生异质的土壤环境, 进而影响植物动态变化、种群演替和物种竞争^[6]。目前, 关于土壤N、P的研究主要集中在土壤N、P自身变异特征, 而忽略了土壤N、P耦合平衡的关系。研究表明, 与仅考虑土壤N、P自身变异特征相比, 氮磷比(N/P)能够更全面地阐述土壤N、P变异^[7]。

由于不同生态系统的土壤微生物活性差异、土

* 国家自然科学基金项目(41361049)、江西省自然科学基金项目(2012BAB204012)和江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41361049), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 2012BAB204012) and the GanPo “555” Talent Research Funds of Jiangxi Province (No. 201295)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xig435@163.com

作者简介: 江叶枫(1994—), 男, 江西余干人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境与系统模拟方面研究。E-mail:

jiangyf0308@163.com

收稿日期: 2017-05-31; 收到修改稿日期: 2017-07-10; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-08-14

壤N与P的循环与转换以及有机质分解与积累速度的不同,导致土壤N/P变化明显。与海洋生态系统相比较,陆地生态系统具有更为多变的环境因子、种群特征以及人为干扰,所以,土壤N/P变化更为复杂^[8]。近年来,有关陆地生态系统土壤N、P化学计量特征空间变异及其影响因素的报道越来越多。卢同平等^[9]对我国典型自然带土壤N/P空间变异特征及其影响因素进行研究,发现温带荒漠带森林土壤N/P主要受海拔影响,而青藏高原高寒植被带主要受气候和地形的影响。陈思宇等^[10]对甘南高原草地土壤N/P空间异质性研究结果表明:土壤N/P具有较强的空间变异性,在一定程度上受海拔和植被的共同影响。邬畏等^[6]研究表明,群落演替明显影响土壤N/P的空间异质性,且土壤N/P也是群落演替的一个重要影响因素。上述研究为认识我国陆地生态系统土壤N、P化学计量学特征提供了宝贵的资料。目前,对陆地生态系统土壤N/P的研究大多集中在湿地、草地与森林等,而对于耕地生态系统的报道并不多见。受成土母质、土壤类型以及耕地利用方式、秸秆还田方式、氮肥施用量等人为活动因素影响,导致耕地生态系统的土壤N、P较其他陆地生态系统空间异质性更为明显^[4]。研究陆地生态系统中耕地土壤N/P空间变异特征及其影响因素是研究陆地生态系统中营养结构变化、种群演替和化学元素循环的基本依据。

江西省地处我国东南部,是长江中下游地区农业人口较为密集的区域,也是我国从未间断向外输出商品粮的两个省份之一。耕地土壤N、P化学计量特征是表征耕地质量的重要因素,掌握耕地土壤N/P空间变异特征及其影响因素对农业可持续发展、现代农业管理与生态环境保护具有十分迫切的现实意义。本文基于江西省2012年测土配方施肥项目采集的16 582个耕地表层(0~20 cm)土壤样点数据,以耕地土壤N、P生态化学计量特征为研究对象,结合成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量,运用单因素方差分析、回归分析和普通克里格法,探讨江西省耕地表层土壤N/P空间变异特征及其影响因素。以期为江西省耕地表层土壤氮磷调控、耕地土壤化学元素分异与循环乃至全球气候变化响应模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省,年平均气温20~30℃,雨量充沛,年均降水量1 340~2 000 mm,为亚热带湿润气候;地理坐标介于24°29'14"N~30°04'41"N,113°34'36"E~118°28'58"E之间,总面积为 $1.69 \times 10^5 \text{ km}^2$,人口4 566万,辖11个地级行政区、100个县级行政区、1个国家级新区。省内东、西、南三面环山,中部丘陵和河谷平原交错分布,北部则为鄱阳湖平原;土地利用类型以耕地和林地为主(图1(a)),其中,耕地面积为 $3.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$,约占全省土地总面积的23.21%。耕地利用方式有一季水田、两季水田、水旱轮作、一季旱地和两季旱地等。土壤类型主要有水稻土、红壤、黄褐土、石灰土和潮土等。秸秆还田存在不还田、翻压还田和覆盖还田3种还田方式。粮食作物以水稻为主,水稻种植面积约占全省耕地总面积的80%。植被以常绿阔叶林为主,具有典型的亚热带森林植物群落。

1.2 土壤样品采集与测定

2012年11月至2013年2月按照《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》采集土壤样品。在考虑空间分布均匀性和样点代表性的前提下,每个采样点采集4个点并进行充分混合,用四分法留取1 kg土样,并运用GPS记录该样点经纬度,同时,详细记录该点成土母质、土壤类型、土属类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量等信息,共采集耕地表层(0~20 cm)土壤样品16 582个(图1(b))。土壤样品经过自然风干后,在实验室磨碎过筛,采用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec8400, Foss, 瑞典)测定全氮(TN)含量^[11],全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法^[12]进行测定。

1.3 数据处理

受采样及实验室分析误差的影响,土壤氮磷含量测量结果存在异常值,从而对土壤N/P空间总体分布与统计分析产生影响。本文采用域值法(3倍的标准差)对采样点数据的土壤TN与TP含量异常值进行剔除^[13],得到剔除后总样点为16 109个,本文相关研究均采用剔除异常值后的数据。基于

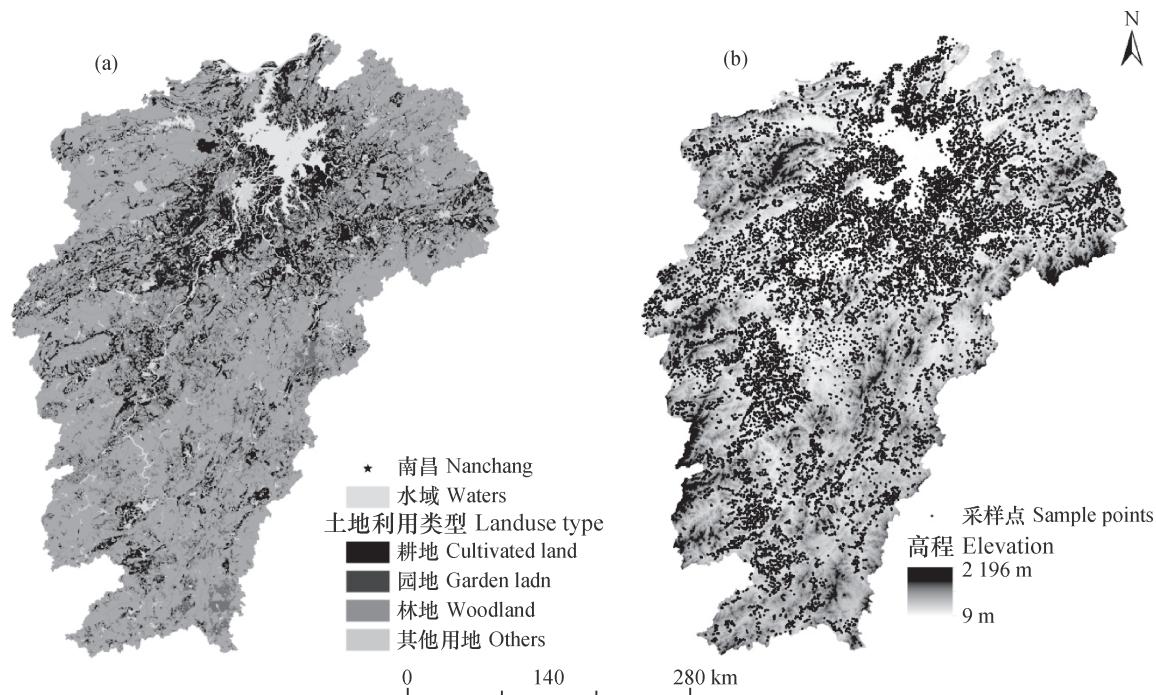


图1 江西省土地利用类型图和样点分布图

Fig. 1 Land-use type map and soil sampling site distribution map of Jiangxi Province

全省1:10万的地形图生成数字高程模型(Digital elevation model, DEM)。高程、坡度、坡度变率、坡向、曲率、地形起伏度、河流动能指数均由DEM在ArcGIS10.2软件中处理提取,各地形因子的计算公式见参考文献[14]。本研究中各县市氮肥施用量空间分布来源于1985—2015年《江西省统计年鉴》中各县市平均氮肥施用折纯量。成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量为定性变量,本文采用虚拟变量^[15]进行赋值。

2 结果

2.1 江西省土壤氮、磷化学计量描述性统计

土壤氮磷描述性统计分析结果见表1。江西省

耕地表层土壤TN、TP和N/P(质量比)均值分别为 1.58 g kg^{-1} 、 0.52 g kg^{-1} 和3.38。TN较我国平均水平(1.54 g kg^{-1})^[16]高 0.04 g kg^{-1} , TP处于我国中等水平($0.2 \sim 1.1 \text{ g kg}^{-1}$)^[11], N/P略低于我国平均水平(4.65)^[9]; 从变异系数可以看出, N/P变异系数最大, 其次为TP, 变异系数最小的为TN, 三者均呈中等程度的变异性。

2.2 江西省土壤氮、磷空间结构特征

在GS+软件中对TN、TP和N/P进行半方差函数的拟合, 用半方差函数描述其空间结构特征。从半方差拟合结果可以看出(图2和表2), 江西省土壤TN、TP和N/P的最优模型分别为球状模型、高斯模型和球状模型, 各模型的拟合效果较好, 决定系数均在0.85以上。从模型的参数来看(表2), TN、TP和N/P的块金效应(随机性因素引起的空

表1 江西省土壤全氮、全磷和氮磷比的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and N/P ratio in the soil of Jiangxi Province

土壤属性 Soil properties	样点数 Numbers	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数CV (%)	偏度 Skewness	峰度 kurtosis	分布类型 Distribution type
全氮 ^① (g kg^{-1})	16 109	0.26	3.57	1.58	0.49	31.01	0.15	-0.01	正态Normal
全磷 ^② (g kg^{-1})	16 109	0.20	1.15	0.52	0.17	32.69	0.71	-0.25	对数正态 ^④
氮磷比 ^③	16 109	0.28	13.63	3.38	1.54	45.56	0.85	1.00	对数正态 ^④

①Total nitrogen (TN), ②Total phosphorus (TP), ③N/P, ④Log normal

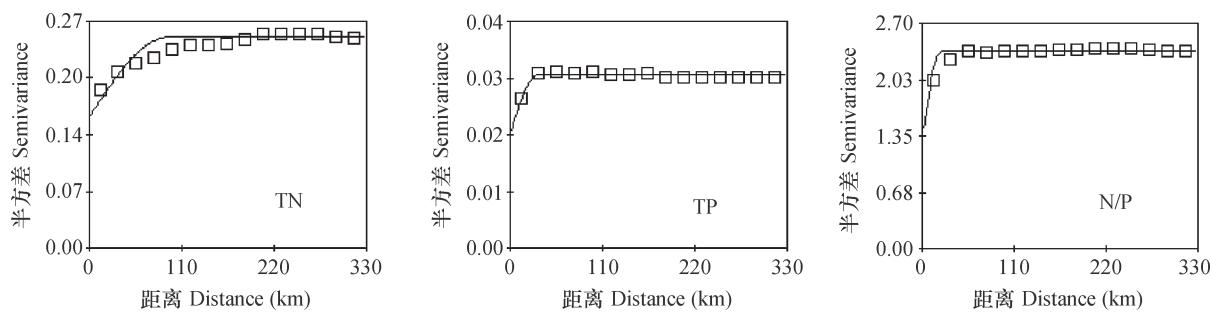


图2 江西省土壤TN、TP和N/P半方差函数图

Fig. 2 Isotropic semivariogram of TN, TP and N/P ratio in the soil of Jiangxi Province

表2 土壤TN、TP和N/P的半方差函数参数

Table 2 Semivariance parameters of TN, TP and N/P ratio in the soil of Jiangxi

土壤属性 Soil properties	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Partial sill	块金效应 Nugget/sill (%)	变程 Range (km)	决定系数 Determination coefficient	残差 Residual
TN	球状Spherical	0.157	0.251	62.55	93.78	0.851	0.001
TP	高斯Gaussian	0.020	0.031	64.52	33.41	0.898	0.000
N/P	球状Spherical	1.433	2.367	60.54	18.36	0.874	0.005

间变异与系统总空间变异的比值)^[15, 17]分别为62.55%、64.52%和60.54%，表明TN、TP和N/P均呈弱空间相关性，随机性因素引起的空间变异程度大于结构性因素。TN、TP和N/P的变程分别为93.78、33.41和18.36km，表明TN的空间自相关范围较大，而TP和N/P的空间自相关范围较小。

2.3 江西省土壤氮、磷空间变异特征

为直观反映江西省土壤N/P的空间变异特征，在半方差模型拟合的基础上运用普通克里格法对研究区土壤TN、TP和N/P进行空间插值，进而得到三者的空间分布。如图3所示，TN与N/P的空间分布图较为相似(图3(a)和图3(c))，高低分布趋势相当，空间分布为突变而非渐变，能在一定程度上体现二者的空间异质性；而TP分布较平滑，其中，含量在0.4~0.6 g kg⁻¹之间所占面积比例最大。TN与N/P的高值区域主要分布在上饶市婺源县、南昌市进贤县、萍乡市湘东区和莲花县、新余市分宜县、抚州市黎川县以及赣州市定南县，即主要分布在海拔相对较低或鄱阳湖平原地区(图1(b))；低值区主要分布在赣州市信丰县和九江市九江县、德安县、湖口县、永修县与彭泽县(图3(c))。大部分区域N/P位于2.0~5.0之间。

2.4 土壤N/P空间变异的影响因素

成土母质通过影响土壤团聚体数量及其稳定

性、物理化学组成和风化淋溶进程等引起土壤氮磷含量的差异。成土母质对江西省土壤N/P空间变异影响极显著($p < 0.01$ ，表3)。不同成土母质类型间N/P均值差异明显(表4)。以碳酸岩类风化物最高(3.66)，下蜀系黄土状物最低(2.33)。从变异系数可以看出(表4)，不同母质间N/P均呈中等变异性，变异系数最高为67.38% (下蜀系黄土状物)，最低为45.14% (红砂岩类风化物)。

不同土壤类型具有不同的成土过程、矿物组成和发育程度，从而影响土壤氮磷含量。土壤类型对江西省土壤N/P空间变异影响极显著($p < 0.01$ ，表3)。5种土壤类型中N/P均值大小依次为石灰土(3.84) > 水稻土(3.40) > 红壤(3.30) > 潮土(2.97) > 黄褐土(2.02)。变异系数处于为33.44%~73.27%之间，以黄褐土变异系数最大(73.27%)，麻沙泥田变异系数最小(33.44%)，均属于中等变异性。在水稻土的3种亚类中，以淹育型水稻土均值最低(3.14)，而潜育型水稻土均值最高(3.59)，这反映了水稻土不同亚类之间由于附加的成土过程导致其N/P均值已出现了一定的差异。从土属来看，土属值域范围为1.94~4.04，差异较大。

耕地利用方式影响土壤肥料和植物残体的数量和性质、土壤水分含量和耕作管理措施，因而，

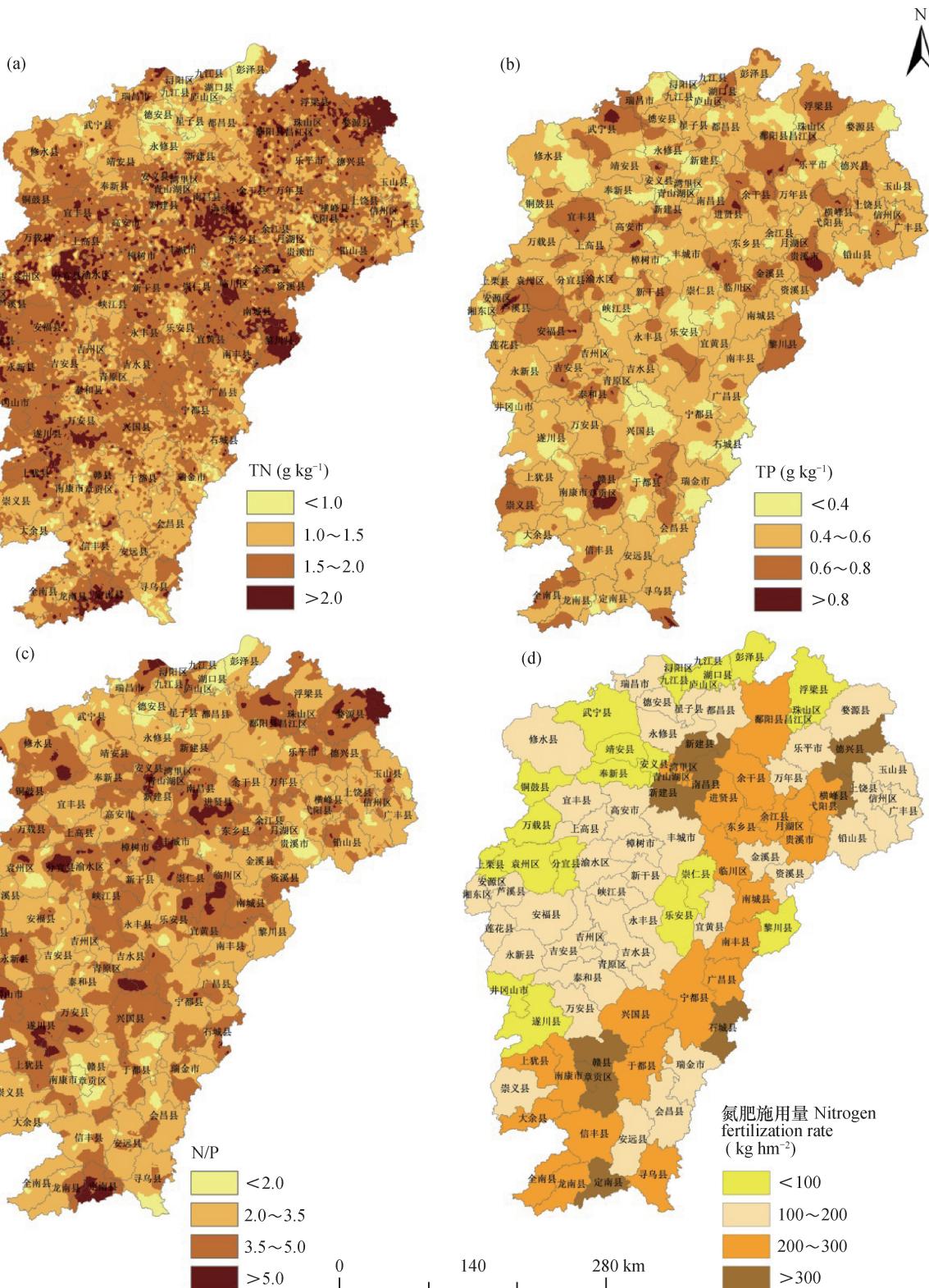


图3 江西省土壤TN、TP、N/P和氮肥施用量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of TN, TP, N/P ratio and nitrogen fertilization rate in the soil of Jiangxi Province

表3 不同因素对土壤N/P的回归分析

Table 3 Regression analysis of N/P ratio with affecting factors

影响因素 Factor	因素类别 Type of factor	F	决定系数 R^2	调整决定系数 Adjusted R^2	p
成土母质 Parent material		38.38	0.026	0.024	< 0.01
土壤类型 Soil type	土类 Soil group	52.90	0.019	0.018	< 0.01
	亚类 Soil subgroup	43.04	0.023	0.022	< 0.01
	土属 Soil family	32.06	0.032	0.030	< 0.01
耕地利用方式 Farmland-use type		62.34	0.022	0.022	< 0.01
秸秆还田方式 Straw returning pattern		2 312	0.133	0.130	< 0.001
氮肥施用量 Nitrogen fertilization rate		10 215	0.276	0.272	< 0.001

表4 不同成土母质类型土壤N/P描述性统计特征

Table 4 Descriptive statistic characteristics of N/P ratio relative to parent material

成土母质类型 Parent material	样点数 Numbers	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type
第四纪红色黏土 ^①	2 456	0.45	9.93	3.50	1.57	44.86	正态Normal
河湖沉积物 ^②	3 002	0.36	12.80	3.36	1.54	45.83	正态Normal
红砂岩类风化物 ^③	2 425	0.51	13.63	3.19	1.44	45.14	正态Normal
泥质岩类风化物 ^④	3 649	0.28	10.97	3.50	1.55	44.29	正态Normal
石英岩类风化物 ^⑤	1 010	0.44	11.22	3.27	1.48	45.26	正态Normal
酸性结晶岩类风化物 ^⑥	2 159	0.42	10.23	3.43	1.50	43.73	正态Normal
碳酸岩类风化物 ^⑦	428	0.53	10.61	3.66	1.77	48.36	正态Normal
下蜀系黄土状物 ^⑧	340	0.36	9.26	2.33	1.57	67.38	正态Normal
紫色岩类风化物 ^⑨	640	0.55	9.16	3.33	1.45	43.54	正态Normal

①Quaternary red clay, ②Lacustrine sediments, ③Red sandstone weathering, ④Argillaceous rock weathering, ⑤Quartzite weathering, ⑥Acid crystalline rock weathering substance, ⑦Carbonate weathering, ⑧Loess in lower Shu system, ⑨Purple rock weathering

不同利用方式下土壤氮磷含量存在差异性。耕地利用方式对江西省土壤N/P空间变异影响极显著($p < 0.01$, 表3)。从表5可以看出, 均值大小依次为: 水旱轮作(3.47)=一季旱地(3.47)>两季水田(3.39)>一季水田(3.37)>两季旱地(2.48)。其原因一方面与耕地休耕有关; 另一方面, 与水田和旱地的土壤微生物活性及土壤固氮和固磷的能力有关。两季旱地由于土地开发利用强度大、施肥量少于水田且地表作物大多被人为收取, 归还量小, 使得土壤N/P最低。水旱轮作条件下虽然土壤开发利用强度大, 但水田耕作条件下氮肥施用量也大, 而且长期的干湿交替会降低土壤磷的有效性^[18], 因此, 水旱轮作与一季旱地均值相近。两季水田与一季水田均值含量亦相近。变异系数处

于44.84%~58.06%之间, 均表现为中等程度的变异性。

秸秆还田通过改良土壤结构与物理化学性质, 促进微生物活力与作物根系发育并提高氮肥利用率, 从而提高土壤氮含量, 改善耕地土壤肥力。从表6可以看出, 秸秆不还田与还田土壤N/P差异明显, 秸秆还田较不还田土壤N/P增加52.28%~53.11%, 这是因为, 作物秸秆N、P含量不一且土壤氮含量要高于磷含量, 导致土壤氮的积累速度要大于磷, 因此, 秸秆还田较不还田土壤N/P呈增加趋势。翻压和覆盖两种还田方式下土壤N/P均值无显著差异($p=0.700$)。从变异系数的范围(40.33%~53.11%)可以得出, 不同秸秆还田方式均呈中等程度的变异性。

表5 不同耕地利用方式土壤N/P描述性统计特征

Table 5 Descriptive statistics of N/P ratio relative to farmland-use type

耕地利用方式 Farmland-use type	样点数 Numbers	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type
一季水田One season paddy fields	3 364	0.42	10.43	3.37	1.52	45.10	正态Normal
两季水田Two season paddy fields	11 480	0.28	13.63	3.39	1.52	44.84	正态Normal
一季旱地Oneseasondry land	336	0.38	9.93	3.47	1.84	53.03	正态Normal
两季旱地Two seasondry land	431	0.36	8.97	2.48	1.44	58.06	正态Normal
水旱轮作Water and dry rotation	498	0.60	12.24	3.47	1.60	46.11	正态Normal

表6 不同秸秆还田方式下土壤N/P描述性统计特征值

Table 6 Descriptive statistics of N/P ratio relative to straw returning pattern

秸秆还田方式 Straw returning pattern	样点数 Numbers	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type
不还田No straw return to field	3 924	0.28	12.80	2.41	1.28	53.11	正态Normal
翻压还田Turn over to field	9 518	0.55	13.63	3.67	1.48	40.33	正态Normal
覆盖还田Covering the field	2 667	0.78	10.61	3.69	1.52	41.19	正态Normal

氮肥施用量通过控制土壤氮积累速度来影响土壤N/P空间变异。氮肥施用量对江西省土壤N/P空间变异影响极显著($p < 0.001$, 表3)。具体表现为: 随着氮肥施用量增大, 土壤N/P均值呈上

升趋势(表7)。从变异系数看, 氮肥施用量大于300 kg hm⁻²的变异系数最小, 为42.44%; 氮肥施用量小于100 kg hm⁻²的变异系数最大, 为59.30%; 不同氮肥施用量土壤N/P均呈中等变异性。

表7 不同氮肥施用量土壤N/P描述性统计特征值

Table 7 Descriptive statistics of N/P ratio relative to nitrogen fertilization rate

氮肥施用量 Nitrogen fertilization rate (kg hm ⁻²)	样点数 Numbers	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type
< 100	2 032	0.45	10.43	2.58	1.53	59.30	正态Normal
100 ~ 200	5 676	0.28	12.80	3.35	1.56	46.57	正态Normal
200 ~ 300	6 354	0.35	13.63	3.40	1.51	44.41	正态Normal
> 300	2 047	0.36	7.29	3.44	1.46	42.44	正态Normal

为定量揭示成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量等因素对研究区耕地土壤N/P空间变异的影响水平, 对影响因素进行回归分析(表3)。结果表明: 成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量对江西省土壤N/P空间变异影响程度不一。成土母质对土壤N/P空间变异的影响程度较低, 仅为2.4%, 这与相关研究结果^[19]一致。这是因为, 江西省成

土母质主要为第四纪红色黏土、第三纪红砂岩和花岗岩的红壤岩层, 该岩层多为花岗岩、石灰岩和红色砂岩^[18], 不同岩组主要因沉淀环境和各岩组所占比例有所分异, 但岩性总体上较为相似, 导致土壤机械组成相近^[19], 成土母质主要通过影响土壤机械组成来影响土壤N、P含量分异, 因此, 成土母质对研究区土壤N/P影响有限。土壤类型的影响程度随土壤分类级别降低而升高, 土类、亚类和土

属的影响程度分别为1.8%、2.2%和3.0%，这与其他区域研究结果^[7-8]一致。因为级别越低，反映的成土过程、母岩特性、耕作管理措施和环境背景等信息越多，其影响程度越高^[20]，但具体如何影响尚有待进一步研究。耕地利用方式的影响程度为2.2%，远远低于其他区域的研究结果^[21]。究其原因：①土地利用方式的改变势必会打破陆地生态系统原有的氮磷平衡^[22-23]，但本文只研究了耕地，无法验证和比较与其他土地利用方式下土壤N/P的差异性。②研究表明，地上植被变化往往会导致土壤N、P含量及土壤N/P发生分异^[24]，其他土地利用方式如园地、林地和草地等土壤N/P变异主要源于母质与植物凋落物，而耕地除了种植作物的残骸与母质外，氮肥与磷肥的施用对江西省耕地土壤N/P严重不协调的地区进行了一定程度上的调节，导致仅耕地一种土地利用方式独立解释土壤N/P空间异质性的能力较低。秸秆还田方式能影响土壤N/P空间变异的13.0%，影响程度较高。氮肥施用量影响土壤N/P空间的程度最高，达到27.2%，远远高于其他影响因素，是影响江西省耕地土壤N/P空间变异的主要因素。

表8 土壤N/P与地形因子、全氮、全磷之间的相关系数

Table 8 Correlation coefficients of N/P ratio with terrain factor, TN and TP

高程 Elevation	坡度 slope	坡向 Aspect	曲率 Curvature	地形起伏度 Terrain relief	河流动能指数 River kinetic energy index	坡度变率 Slope variability	全氮 TN	全磷 TP
-0.38**	-0.013	0.007	0.000	-0.012	0.004	-0.007	0.681**	-0.665**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

纪80年代以来，土壤N、P含量具有不同程度的提升，其原因一方面与江西省大力推广秸秆还田有关；另一更重要的原因是江西省“高氮高产”的种植观念^[25]。秸秆还田对土壤N/P空间变异影响相对较大，不同还田方式之间也有一定的差异。造成这种现象主要是由于耕地土壤N/P变化取决于土壤氮和磷的输入与输出的相对关系，但磷一般相对稳定，有效性高，图3(b)也说明了这一点，因此，耕地土壤N/P变化在很大程度上由土壤氮元素含量决定。土壤氮大多数以有机氮的形式存在于有机质中，目前的研究均表明，秸秆还田能为耕地提供丰富的碳源，刺激微生物活性，降低作物吸收氮素的能力，减少氮素淋洗损失，但不同秸秆还田方

3 讨 论

3.1 地形因子、TN、TP与土壤N/P的关系

对研究区土壤N/P与地形因子、TN及TP进行相关性分析，从表8可以看出，高程与土壤N/P相关性显著，相关系数为-0.38，表明土壤N/P随高程上升逐渐减少，这与其他研究区域结果^[9-10]一致。不同高程下，水热条件和人为活动强度的差异引起土壤N/P空间变异。土壤N/P与其他地形因子相关性不显著，其原因可能在省域尺度下地形因子本身的变异较小，同时1:10万的地形图生成的DEM数据精度较低，其派生的地形变量精度也相对较低，这也在一定程度影响地形因子与土壤N/P的相关性。TN和TP与土壤N/P的相关系数分别为0.681和-0.665 ($p < 0.01$)，表明土壤N/P主要取决于TN与TP含量。

3.2 秸秆还田方式和氮肥施用量对土壤N/P的影响

20世纪70年代，江西省作物生产就开始由传统的仅仅依赖土壤自身肥力与有限的有机肥转变为秸秆还田与化肥施用（尤其是氮肥）中来。20世

纪对微生物活性、秸秆腐解与矿化速率影响程度不一，导致对秸秆有机物质释放和土壤氮积累效果形成一定的差异。从空间分布图可以看出（图3(c)和图3(d)），土壤N/P高值区域主要分布在氮肥施用量大于200 kg hm⁻²的县市（赣州市全南县、南昌市进贤县、九江市瑞昌市、上饶市鄱阳县），而低值区域主要分布在氮肥施用量小于100 kg hm⁻²的县市（如九江市湖口县、彭泽县和德安县、萍乡市袁州区、抚州市乐安县），表现为随着氮肥施用量增加，土壤N/P升高的总体趋势，与前人研究结果^[26-27]一致。究其原因：①氮肥的施用提高了土壤TN含量，使得N/P整体上呈明显上升的趋势，江西省“高氮高产”的种植观念导致农户倾向于

氮肥的施用而忽略磷肥的施用, 陈琦^[26]研究表明, 2011年江西省晚稻平均施氮量和施磷量分别为226.5和84.96 kg hm⁻², 2012年江西省早稻平均施氮量和施磷量分别为197.7和93.34 kg hm⁻²。②土壤酸碱度是影响土壤固磷的重要影响因子之一^[13], 氮肥的施用降低了土壤酸碱度^[27], 使磷更容易发生沉淀反应和吸附反应, 形成羟基磷灰石或氟磷灰石, 增加了磷的固定作用, 减少了磷的有效性。氮肥施用量在本研究所有影响因素中对土壤N/P空间变异的影响程度最高, 达到27.2%, 远高于其他因素。

3.3 土壤N/P变化的重要意义

生物固氮是生态系统中主要的氮源。研究表明, 无论是在陆地生态系统还是海洋生态系统中, 生物固氮量随土壤N/P增大而减少, 减少而增大^[28]。从表9可以看出, 江西省耕地土壤生态系统的N/P均值要高于青海封育芨芨草原带、高原过渡带、温带草原带、青藏高原高寒草原带和暖温带阔叶落叶带, 但低于东北农田、闽江河口湿地、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、青藏高原高寒植被

带和温带荒漠带。这表明, 江西省耕地生态系统土壤N/P处于中等偏下水平, 同时也说明耕地生态系统生物固氮量处于较高水平。《江西省统计年鉴》数据显示, 近10年来, 江西省氮肥施用量从2005年的47.75万t下降至2015年的42.36万t, 氮肥施用量呈下降趋势, 而粮食产量却在逐年上升, 反映出在江西省目前N/P的情况下, 若继续加大氮肥的施用对土壤N、P耦合平衡及提高耕地生态系统生物固氮能力方面意义甚微, 且过量地施用氮肥不但对生物固氮与固碳能力是一种削弱, 而且氮肥残留量或损失至环境中的量会显著增加, 造成土壤酸化和水体污染等农业面源污染问题^[29]。因此, 保持稳定的N/P是实现粮食增产与耕地生态系统生物固氮与固碳能力提升的主要途径, 一方面, 在高氮高产的种植观念下应加大宣传和相关技术培训力度, 提高农户对化肥(尤其是氮肥)的认知水平, 同时大力推广测土配方施肥技术, 促进农户合理施肥; 另一方面, 增加对有机肥施用的补贴和政策优惠, 加快绿肥产业发展, 同时配合秸秆还田。

表9 耕地生态系统与其他地区的土壤N/P

Table 9 Farmland ecosystem and soil N/P in other areas

生态系统类型 Ecosystem type	土壤N/P Soil N/P	文献 References
东北农田 Farmland in Northeast China	7.92	[30]
闽江河口湿地 Wetland in the estuary of the Minjiang River	4.42	[31]
青海封育芨芨草原 <i>Achnatherum splendens</i> grassland under enclosure in Qinhai Province	0.10	[32]
热带季雨林 Tropical monsoon rainforest	5.65	[33]
亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaved forest	8.62	[8]
高原过渡带 Alpine transition zone	3.23	[9]
温带草原带 Temperate steppe zone	2.49	[8]
青藏高原高寒草原带 Alpine grassland of the Qinghai-Tibet Plateau	1.59	[7]
青藏高原高寒植被带 Alpine vegetation zone of the Qinghai-Tibet Plateau	7.73	[8]
暖温带阔叶落叶带 Warm deciduous broad-leaved forest zone	2.26	[8]
温带荒漠带 Temperate desert zone	6.71	[8]
江西省耕地 Cultivated land in Jiangxi Province	3.38	本研究 This research

4 结 论

江西省耕地表层土壤N/P表现为中等程度的变异性, 空间分布格局受随机性因素和结构性因素共同影响, 但主要受随机性因素影响。空间分布方

面, 高值区域主要分布在上饶市婺源县、南昌市进贤县、萍乡市湘东区和莲花县、新余市分宜县、抚州市黎川县以及赣州市定南县, 低值区域主要分布在赣州市信丰县和九江市九江县、德安县、湖口县、永修县与彭泽县。成土母质、土壤类型、耕地

利用方式、秸秆还田方式和氮肥施用量对江西省耕地土壤N/P空间变异均有显著影响($p < 0.01$)。在所有因素中,氮肥施用量对土壤N/P空间变异的影响程度最大,远远大于其他因素,是影响江西省耕地土壤N/P空间变异的主要因素。

参考文献

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2002: 225—226
- [2] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40 (3) : 523—534
- [3] Verhoeven J T, Koerselman W, Meuleman A F. Nitrogen- or phosphorus-limited growth in herbaceous, wet vegetation: Relations with atmospheric inputs and management regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 1996, 11 (12) : 494—497
- [4] 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. *生态学报*, 2008, 28 (8) : 3937—3947
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements (In Chinese) . *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8) : 3937—3947
- [5] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168 (2) : 377—385
- [6] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. *中国沙漠*, 2010, 30 (2) : 296—302
Wu W, He X D, Zhou Q X. Review on N: P stoichiometry in eco-system (In Chinese) . *Journal of Desert Research*, 2010, 30 (2) : 296—302
- [7] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征. *应用生态学报*, 2013, 24 (12) : 3399—3406
Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, et al. Soil N/P ratio distribution characteristics of alpine grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau (In Chinese) . *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (12) : 3399—3406
- [8] Jenny H J. The factors of soil formation. New York: McGraw-Hill, 1941
- [9] 卢同平, 张文翔, 牛洁, 等. 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究. *土壤学报*, 2017, 54 (3) : 681—691
- Lu T P, Zhang W X, Niu J, et al. Study on spatial variability and driving factors of stoichiometry of nitrogen and phosphorus in soils of typical natural zones of China (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3) : 681—691
- [10] 陈思宇, 于惠, 冯琦胜, 等. 甘南高原土壤氮磷比空间异质性研究. *草地学报*, 2013, 21 (1) : 30—36
Chen S Y, Yu H, Feng Q S, et al. Spatial heterogeneity of soil N/P ratio on Gannan Plateau (In Chinese) . *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21 (1) : 30—36
- [11] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 199—200
Huang C Y. Soil science (In Chinese) . Beijing: China Agriculture Press, 2000: 199—200
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese) . Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [13] 王丹丹, 史学正, 于东升, 等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究. *生态环境学报*, 2009, 18 (3) : 1049—1053
Wang D D, Shi X Z, Yu D S, et al. Main natural factors controlling soil organic carbon density in the uplands of Northeast China (In Chinese) . *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18 (3) : 1049—1053
- [14] 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. *农业工程学报*, 2010, 26 (5) : 188—194
Zhang S M, Wang Z M, Zhang B, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data (In Chinese) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (5) : 189—194
- [15] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (1) : 34—42
Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province (In Chinese) . *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23 (1) : 34—42
- [16] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析. *地理研究*, 2010, 29 (11) : 1981—1992
Li Q Q, Yue T X, Fan Z M, et al. Spatial simulation of topsoil TN at the national scale in China (In Chinese) .

- Geographical Research, 2010, 29 (11): 1981—1992
- [17] Zhu Q, Lin H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere*, 2010, 20 (5): 594—606
- [18] 江西省土地利用管理局. 江西土壤. 北京: 中国农业科技出版社, 1991
- Administration Bureau of Land, Soil Survey Staff Office of Jiangxi Province. *Soils of Jiangxi Province* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991
- [19] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区城墙岩群和蓬莱镇组紫色岩上土壤性质研究. *土壤通报*, 2007, 38 (6): 1076—1080
- Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, et al. The soil properties of soils developed from K_{leg} and J_{3p} in central hill region of Sichuan basin (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (6): 1076—1080
- [20] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline: The undervalued role of land management. *Geoderma*, 2009, 152 (1/2): 74—84
- [21] 夏品华, 孔祥量, 喻理飞. 草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响. *环境科学学报*, 2016, 36 (8): 2983—2989
- Xia P H, Kong X L, Yu L F. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (8): 2983—2989
- [22] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8 (4): 345—360
- [23] 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. *生态学报*, 2015, 35 (20): 6694—6702
- Zhou Z H, Wang C K, Zhang Q Z. The effect of land use change on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in northeastern China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (20): 6694—6702
- [24] 张文彦, 樊江文, 钟华平, 等. 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究. *草地学报*, 2010, 18 (4): 503—509
- Zhang W Y, Fan J W, Zhong H P, et al. The nitrogen: phosphorus stoichiometry of different plant functional groups for dominant species of typical steppes in China (In Chinese). *Acta Agricola Sinica*, 2010, 18 (4): 503—509
- [25] 江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素. *环境科学*, 2017, 38 (9): 3840—3850
- Jiang Y F, Guo X, Sun K, et al. Spatial variability of farmland soil C/N ratio of Jiangxi Province (In Chinese). *Environmental Science*, 2017, 38 (9): 3840—3850
- [26] 陈琦. 农户水稻施肥现状调查与分析. 南京: 南京农业大学, 2013
- Chen Q. Investigation and analysis of farmers' fertilization status on rice-taking Jiangxi Province and Jiangsu Province as examples (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013
- [27] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, et al. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50 (3): 401—412
- [28] Smith V H. Effects of nitrogen: Phosphorus supply ratios on nitrogen fixation in agricultural and pastoral ecosystems. *Biogeochemistry*, 1992, 18 (1): 19—35
- [29] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 921—933
- Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio: Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 921—933
- [30] 张兴义, 隋跃宇, 张少良, 等. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性. *水土保持通报*, 2008, 28 (2): 1—5
- Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang S L, et al. Spatial heterogeneities of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28 (2): 1—5
- [31] 王维奇, 全川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *水土保持学报*, 2010, 24 (3): 238—242
- Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (3): 238—242
- [32] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军. 不同草地利用方式对土壤有机碳、全氮和全磷的影响. *草原与草坪*, 2012, 32 (5): 26—35
- Li Y J, Cao G M, Long R J. Effects of grassland using

- models on soil carbon, nitrogen and phosphorus content (In Chinese). *Grassland and Turf*, 2012, 32 (5): 26—35
- [33] 王晶苑, 王绍强, 李幼兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的C: N: P化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35 (6): 587—595
- Wang J Y, Wang S Q, Li R L, et al. C: N: P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35 (6): 587—595

Spatial Variability of Ecological Stoichiometry of Soil Nitrogen and Phosphorus in Farmlands of Jiangxi Province and Its Influencing Factors

JIANG Yefeng^{1, 2} YE Yingcong² GUO Xi^{1, 2†} RAO Lei^{1, 2} SUN Kai^{1, 2} LI Weifeng^{1, 2}

(1 *Academy of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*)

(2 *Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China*)

Abstract 【Objective】 Nitrogen (N) and Phosphorus (P) are two essential mineral nutrients for plant growth, and important parts of organic nutrient and soil fertility. As two restrictive elements in the terrestrial ecosystem, they play important roles in growth and development of plants, community composition of the vegetation and structure and function of the ecosystem as well. As ecosystems vary in soil microbial activity, they do in recycling and transformation of soil N and P and in decomposition and accumulation rate of organic matter, thus leading to significant variation of the ecological stoichiometry of soil N/P. Therefore, the study on spatial variability of the ecological stoichiometry of soil N/P and its influencing factors in the terrestrial ecosystem at a provincial scale is the fundamental basis of the study on changes in trophic structure, population succession and chemical elements recycling in the terrestrial ecosystem.

【Method】 Based on the data of the 16 582 soil samples collected in the topsoil layer (0~20 cm) of the farmlands during implementation of the project of soil-test-based formulated fertilization in Jiangxi Province in 2012, values were assigned to the qualitative factors, i.e. parent material, soil type, farmland-use type, straw incorporation pattern and nitrogen fertilization (divided into 4 levels), and one-way variance analysis, ordinary kriging analysis and regression analysis were done of the data to quantify the ability of each factor to explain spatial variability of the ecological stoichiometry of soil N/P ratio independently.

【Result】 Results show as follows: ①The soil N/P ratio in the topsoil layer ranged from 0.28 to 13.63, with an average of 3.38, which indicates that the soil N/P in the cultivated land ecosystem of Jiangxi Province is at the level of medium on the lower side, and that the biological nitrogen fixation rate in the cultivated land ecosystem is at a quite high level. The coefficient of variation was 45.56%, indicating that soil N/P is moderate in variability. The nugget/sill ratio was 60.54%, indicating that soil N and P is weak in spatial dependence, varying between structural factor and stochastic factor, and the latter played a more important role in spatial variability of soil N/P ratio. ②Soil N/P ratio was significantly related to elevation ($p < 0.01$, $r = -0.38$), TN ($p < 0.01$, $r = 0.681$) and TP ($p < 0.01$, $r = -0.665$), suggesting that elevation is a major factor affecting spatial distribution of soil N/P and that soil N/P depends mainly on TN and TP contents. ③The spatial distribution of soil N/P ratio appeared to be quite smooth relatively, with high values over in Wuyuan of Shangrao, Jinxiang of Nanchang, Xiangdong and Lianhua of Pingxiang, Fenyi of Xinyu, Lichuan of Fuzhou and Dingnan of Ganzhou. ④The five factors, parent material, soil type, farmland-use type, straw incorporation pattern and nitrogen fertilization rate, all had significant impacts on spatial variability of soil N/P ratio ($p < 0.01$), but varied in degree. Parent material explained 2.4% of the variability; type, sub-type and genus

of the soil did 1.8%, 2.2% and 3.0%, respectively; farmland-use type did 2.2%; straw incorporation pattern did 13.0%; and N fertilization rate did 27.2%. 【Conclusion】 The factor of N fertilization rate is far more capable of explaining independently spatial variability of the soil N/P ratio than the other factors, indicating that it is the main factor determining soil N/P ratio in the topsoil layer of Jiangxi Province. Therefore, in order to improve the ability of the farmland ecosystem to fix nitrogen biologically and sequester nitrogen, here are two suggestions. One is to devote more efforts to improving farmers' knowledge about the use of chemical fertilizers, especially Nitrogen fertilizer, through propaganda and related technical training, vigorously extrapolating the soil-test-based formulated fertilization technology and stimulating farmers to rationalize fertilizer usage. And the other is to raise subsidies and implement preferential policies for use of organic manure and accelerate development of the green manure industry coupled with the extension of straw incorporation.

Key words Jiangxi Province; Soil N/P ratio; Ecological stoichiometry; Spatial variability; Nitrogen fertilization rate

(责任编辑: 陈荣府)