

江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其影响因素^{*1}

江叶枫^{1, 2} 饶磊¹ 郭熙^{1, 2*} 叶英聪¹ 孙凯¹

(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/国土资源与环境学院, 江西南昌 330045;

2. 南方粮油作物协同创新中心, 湖南长沙 410000)

【摘要】:为定量探讨省域尺度下土壤氮素空间变异特征及其影响因素。以江西省 2012 年测土配方施肥项目采集的 16582 个耕地表层(0~20cm)土壤样点数据,运用普通克里格、单因素方差分析与回归分析方法,对土壤氮素空间变异特征及其影响因素进行分析。结果表明:(1)江西省土壤全氮(TN)含量在 0.26~3.75g/kg 之间,平均值为 1.58g/kg,变异系数为 31.01%;碱解氮(AN)含量值域范围为 11.60~399.70mg/kg,平均值为 164.31mg/kg,变异系数为 34.60%;二者均呈中等程度的变异性。(2)经半方差分析,TN 与 AN 的变程分别为 314.89 和 30.30km,TN 的空间自相关范围大而 AN 较小。(3)在空间分布上,高值区主要分布在新余市、抚州市与景德镇市。(4)回归分析与单因素方差分析结果表明,地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和秸秆还田方式对土壤氮素空间变异影响极显著($P<0.01$)。秸秆还田方式对土壤 TN 与 AN 空间变异的独立解释能力最高,分别为 27.1%与 4.2%,是影响江西土壤氮素空间变异的主要因素。

【关键词】:定量;江西省;土壤氮素;空间变异;影响因素

【中图分类号】:X144 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)01-0070-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201801009

氮素是植物矿物质营养和有机营养的主要来源之一,也是生态环境系统中构成生命体的重要成分,其含量和动态变化不仅影响土地生产力与生态系统的氮循环,而且影响区域环境与生态过程^[1~4]。目前国内外学者对氮素研究的焦点已然由单一的粮食增产转变成高产高效与可持续发展^[5~7]。土壤碳氮容易受环境、施肥与耕作方式等因素的影响,导致存在明显的空间异质性^[8~10]。氮素含量的过高与过低均会引起农作物产量下降和品质降低、水体和环境污染等一系列农业问题^[11, 12]。因此,研究土壤氮素空间变异特征及其影响因素对农业生产和可持续发展具有重要意义。

土壤全氮(TN)均在不同程度上影响土壤 TN 与 AN 的空间变异。但较少有研究定量分析定性因素对土壤氮素空间变异的影响程度。顾成军等^[23]、胡玉福等^[15]、罗由林等^[24]、李婷等^[25]在对土壤碳氮空间变异的定性因素定量化研究方面进行了探索。对

¹ 收稿日期:2017-04-05; 修回日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金(41361049);江西省自然科学基金(20122BAB204012);江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

作者简介:江叶枫(1994~),男,硕士研究生,主要从事土壤环境与系统模拟。E-mail:jiangyfo308@163.com

***通讯作者** E-mail:xig435@163.com

定性因素进行量化的研究越来越受到国内外学者的重视与关注，前人研究表明^[7, 24, 26]，定性因素定量研究对准确获取土壤氮素变异信息、精确估算土壤氮库、区域资源优化利用以及环境保护方面具有重要作用。

江西省地处中国东南部，是长江中下游地区农业人口较为密集的农业区，也是南方红壤区典型的农业大省。土地生产力关系到粮食安全，土壤氮素含量是评价土地生产力的重要因素之一，掌握其空间变异特征及其影响因素是有效应对粮食安全和农业可持续发展的重要依据^[7, 26~29]。目前对土壤氮素空间变异的研究报道主要集中在小流域尺度和县域尺度上^[3, 7, 11, 12, 15~22, 24~26]，有关省域尺度的研究则相对较少^[23]。本研究以江西省为案例区，分析省域尺度下土壤 TN 与 AN 空间变异及其影响因素，结合地形因子、成土母质、土壤类型、耕地利用方式和秸秆还田方式，运用单因素方差分析、回归分析和普通克里格法对江西省土壤 TN 与 AN 空间变异特征及其影响因素进行分析，以期对江西省农业可持续生产管理和指导环境保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

江西省地理坐标介于 24° 29' 14" ~ 30° 04' 41" N, 113° 34' 36" ~ 118° 28' 58" E 之间，总面积为 1.67×105km²，人口 4566 万，辖 11 个地级行政区、100 个县级行政区、1 个国家级新区。东邻浙江省、福建省，南连广东省，西接湖南省，北毗连湖北省、安徽省，且共接长江。年平均气温 20~30℃，雨量充沛，年均降水量 1340~2000mm；全年无霜期约 240~300d，为亚热带湿润气候。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 3.09×106hm²，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。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。

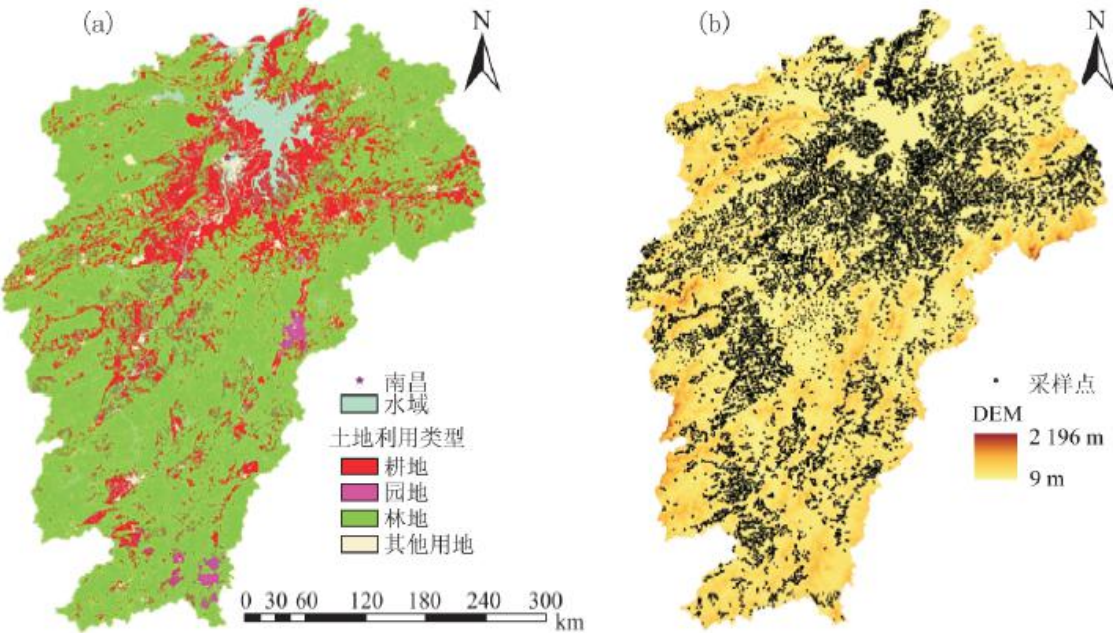


图 1 江西省土地利用类型图、样点分布图以及 DEM

Fig. 1 Land-use types, distribution of soil sampling sites, DEM in Jiangxi province

1.2 土壤采样

土壤样品按照《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》采集于 2012 年 11 月至 2013 年 2 月，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 个点进行充分混合，用四分法留取 1kg 土样，并运用 GPS 记录该样点经纬度，同时详细记录该样点土壤类型、成土母质、耕地利用方式和秸秆还田方式等信息，共采集耕地表层(0~20cm)土壤样点 16582 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 FossKjelttec8400 全自动凯氏定氮仪测定 TN 含量^[30]，AN 含量采用碱解扩散法进行测定^[31]。

1.3 数据处理

采用拉依达准则法(3 倍的标准差)对采样点数据的土壤 TN 与 AN 含量进行处理^[32]，剔除后总耕地样点为 16109 个，本文相关内容的研究均采用剔除异常值后的数据。基于全省 1：10 万的地形图生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。高程(H)、坡度(S)、坡度变率(SOS)、坡向(AS)、坡向变率(SOA)、地形起伏度(QFD)、曲率(C)、河流动能指数(Ω)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^[9, 33]。耕地利用方式、成土母质、土壤类型和秸秆还田方式为定性变量，采用哑变量^[34]进行赋值。Pearson 相关性分析用于揭示土壤 TN 与 AN 与地形因子的相关性，单因素方差分析用于说明不同定性变量之间土壤 TN 与 AN 是否存在显著差异；回归分析用于定量表达各定性变量对土壤 TN 与 AN 空间变异的独立解释能力。常规性统计分析均在 SPSS(version22)中完成。在 GS+软件对 TN 与 AN 进行半方差分析与模型拟合，运用 Arc GIS 软件中普通克里格法对江西省土壤氮素进行空间插值。

2 结果与分析

2.1 土壤全氮和碱解氮的常规性统计分析

根据江西省 16109 个土壤样点数据统计分析结果表明(表 1)，土壤 TN 含量范围为 0.26~3.75g/kg，平均值为 1.58g/kg，略高于我国平均含量(1.54g/kg)^[10]，高出 0.04g/kg；土壤 AN 值域在 11.60~399.70mg/kg 之间，平均含量为 164.31mg/kg。按照全国第二次土壤普查土壤养分分级标准，TN 含量为二级水平，AN 含量为一级水平。土壤 TN 与 AN 含量均较为丰富。变异系数分别为 31.01%和 34.60%，均呈中等程度的变异性。从 K-S 检验的 P 值大于 0.05 可以得出 TN 与 AN 均符合正态分布，可以进行半方差分析和地统计学分析。

表 1 江西省耕地土壤全氮和碱解氮的描述性统计特征

土壤属性	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	K-S/Sig.	分布类型
全氮(g/kg)	16 109	0.26	3.57	1.58	0.49	31.01	0.62	正态
碱解氮(mg/kg)	16 109	11.60	399.70	164.31	56.85	34.60	0.26	正态

2.2 半方差分析

半方差函数能较好地描述土壤 TN 和 AN 空间分布的随机性和结构性，是描述土壤属性空间变异最有效的方法。从图 2 和表 2 可以看出，TN 的最优模型为线性模型，AN 的最优模型为指数模型，各模型的拟合效果较好，拟合系数均在 0.70 以上。从模型的参数来看(表 2)，TN 和 AN 的块金效应(随机性因素引起的总空间变异占系统变异的比值)^[35, 36]分别为 80.77%和 12.70%，表明 TN 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，而 AN 呈强空间相关性，受结构性因素影响大于随机性因

素。TN 与 AN 的变程分别为 314.89 和 30.30km，表明 TN 的空间自相关范围较大而 AN 相对较小，这是因为 AN 主要反映水田氮素含量，受农户施肥影响；而 TN 除施肥因素外，更受自然以及成土因素的影响。

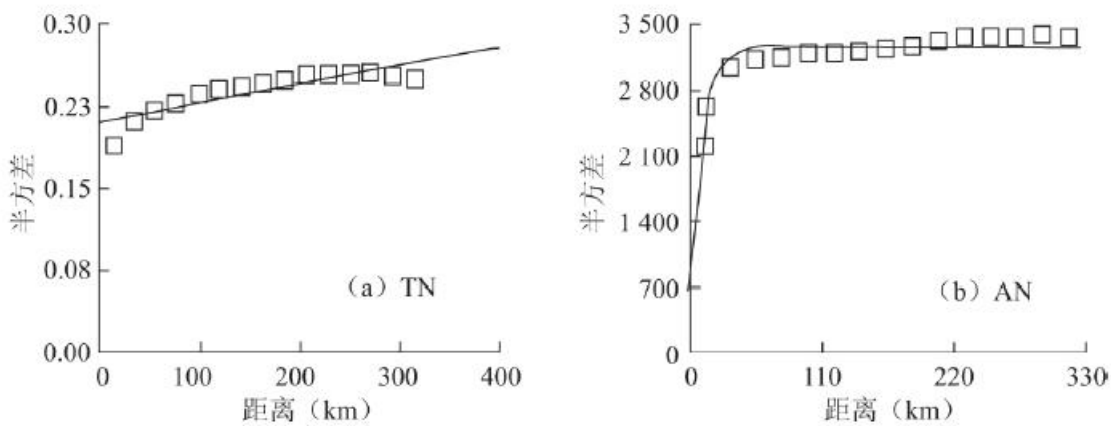


图 2 土壤全氮、碱解氮半方差函数

Fig. 2 Isotropic semivariogram of total nitrogen and available nitrogen

表 2 土壤全氮和碱解氮的半方差函数参数

土壤属性模型		块金值	基台值	块金效应 (%)	变程 (km)	拟合系数残差	
全氮	线性	0.21	0.26	80.77	314.89	0.736	0.001
碱解氮	指数	413.00	3 251.00	12.70	30.30	0.769	0.012

2.3 空间变异特征

在半方差函数拟合的基础上运用普通克里格法对江西省耕地土壤 TN 和 AN 进行空间插值，进而得到二者的空间分布。为验证普通克里格法空间分布预测图的精度，随机抽取 80%(12887)作为建模点，20%(3222)作为验证点对插值精度进行验证。对 3222 个验证点的预测与实测值进行回归分析，得到 TN 和 AN 的校正决定系数分别为 65.4%和 57.1%，取得了较好的精度。

如图 3 所示，TN 和 AN 的空间分布图较为相似，高低值分布较为突兀，呈斑块和零星点的分布，能在一定程度上体现二者的空间异质性。TN 含量主要分布在 1.0~2.0g/kg 之间，AN 含量分布在 100~200mg/kg 之间的区域所占面积最大，总体处于较高水平；二者高值区域主要分布在新余市、抚州市和景德镇市，主要分布在海拔相对较低或鄱阳湖平原地区(图 1(b))，与地形因子和土壤氮素的 Pearson 相关性结果(表 3)一致，低值区域主要分布在九江市、赣州市与吉安市，与赵小敏等^[37]对江西省氮素空间分布研究结果相似。

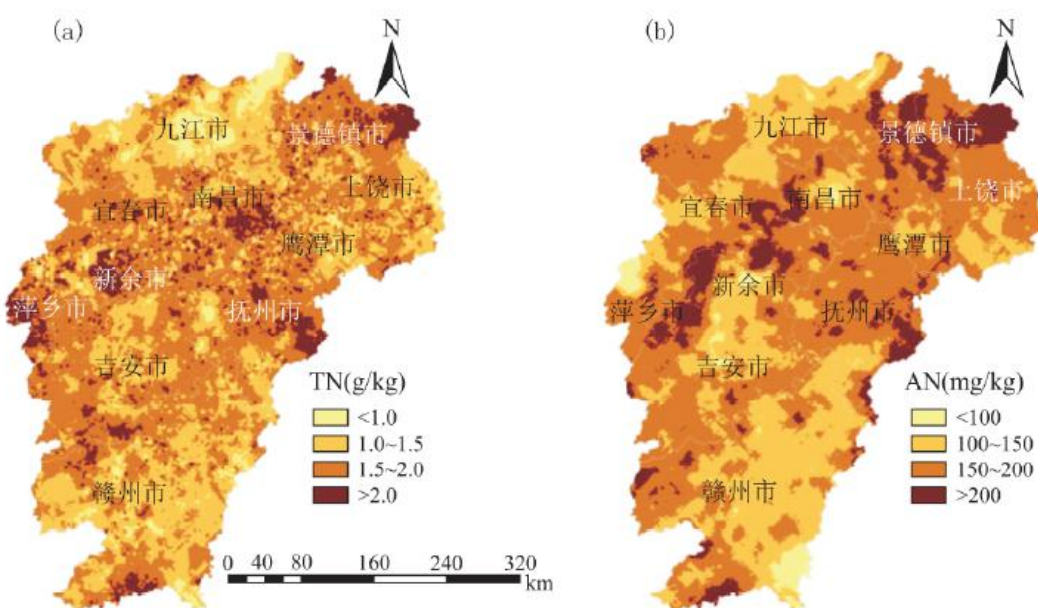


图 3 江西省耕地土壤全氮和碱解氮空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of total nitrogen and available nitrogen in Jiangxi province

2.4 土壤氮素空间变异的影响因素

土壤氮素空间变异的影响因素可分为随机性因素和结构性因素，半方差分析表明氮素空间变异主要受随机性因素影响，但各因素对氮素空间变异的影响程度需进一步分析。本研究以地形因子、成土母质和土壤类型作为结构性因素，耕地利用方式和秸秆还田方式为随机性因素，探索不同因素对土壤氮素空间变异的独立解释能力。

2.4.1 地形因子

地形因子通过影响土壤中水热资源的再分配与土壤生态系统的物质循环过程与强度来影响土壤氮素分布。Pearson 相关性分析结果表明(表 3)，江西耕地土壤 TN 和 AN 与高程呈极显著的负向相关关系($P < 0.01$)，相关系数分别为 -0.044 和 -0.030 ，相关系数较低，这与以往研究结果一致^[21, 24, 26]。与其他地形因子相关性均不显著，这与以往研究有所不同^[9, 20, 21, 24, 26]。这可能与本文研究尺度有关，以往研究大多集中在小流域和县域尺度，地形因子变化较为单一，而省域尺度下由于复杂的地形地貌导致地形因子较县域以及小流域尺度而言较模糊。

表 3 地形因子与土壤全氮和碱解氮之间的 Pearson 相关系数

土壤属性	高程	坡度	坡向	曲率	坡度变率	坡向变率	河流动能指数	地形起伏度
全氮	-0.044^{**}	-0.009	0.013	0.001	-0.010	0.012	0.006	-0.012
碱解氮	-0.030^{**}	0.006	0.012	0.001	0.004	0.008	0.009	0.011

2.4.2 成土母质

成土母质通过影响土壤团聚体结构、物理化学风化过程等而引起土壤氮素含量的差异。成土母质对江西省土壤氮素空间变异影响极显著 ($P<0.001$, 表 4)。不同成土母质类型间均值差异明显 (表 5)。TN 以碳酸岩类风化物发育而来的土壤最高 (1.72g/kg), 下蜀系黄土状物发育而来的土壤最低, 为 1.01g/kg; 不同母质间 TN 均值差异显著 ($P=0.000$)。AN 均值含量范围为 130.76~181.41mg/kg, 均值差异显著 ($P=0.000$)。从变异系数来看, 不同成土母质发育的土壤 TN 和 AN 的变异系数均值 25%~75% 之间, 均为中等程度的变异性。

表 4 不同因素对土壤全氮与碱解氮的回归分析

影响因素	全氮				碱解氮			
	F	决定系数	调整决定系数	P	F	决定系数	调整决定系数	P
地形因子	32.62	0.004	0.004	<0.01	47.12	0.008	0.008	<0.01
耕地利用方式	64.95	0.023	0.022	<0.001	20.83	0.006	0.006	<0.001
成土母质	109.30	0.040	0.038	<0.001	41.60	0.019	0.017	<0.001
土类	134.55	0.024	0.024	<0.001	60.60	0.007	0.006	<0.001
亚类	127.60	0.030	0.030	<0.001	42.08	0.008	0.007	<0.001
土属	113.25	0.0411	0.039	<0.001	35.05	0.011	0.009	<0. (8) 1
秸秆还田方式	3 132.05	0.274	0.271	<0.001	766.80	0.044	0.042	<0.001

表 5 不同成土母质类型土壤全氮和碱解氮描述性统计特征

成土母质类型	样点数	全氮 TN			碱解氮 AN		
		均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
第四纪红色粘土	2 456	1.65	0.47	28.48	167.75	58.89	35.11
河湖沉积物	3 002	1.57	0.48	30.57	163.25	55.25	33.84
红砂岩类风化物	2 425	1.49	0.48	32.21	156.80	54.13	34.52
泥质岩类风化物	3 649	1.60	0.49	30.63	170.67	55.07	32.27
石英岩类风化物	1 010	1.58	0.52	32.91	158.37	61.50	38.83
酸性结晶岩类风化物	2 159	1.62	0.47	29.01	166.33	52.68	31.67
碳酸岩类风化物	428	1.72	0.60	34.88	181.41	75.71	41.73
下蜀系黄土状物	340	1.01	0.45	44.55	130.76	43.32	33.13
紫色岩类风化物	640	1.55	0.49	31.61	155.31	60.94	39.24

2.4.3 土壤类型

土壤类型对江西省土壤氮素空间变异影响极显著 ($P < 0.001$, 表 4)。从表 6 可以看出, 5 个土类中 TN 均值大小依次为水稻土 (1.59g/kg) > 石灰土 (1.57g/kg) > 红壤 (1.54g/kg) > 潮土 (1.26g/kg) > 黄褐土 (0.92g/kg); AN 均值在 123.29~164.91mg/kg 之间。从变异系数来看, TN 变异系数范围为 30.82%~48.91%; AN 变异系数在 28.02%~46.29%; 均表现中等变异性。在水稻土的 3 种亚类中, 淹育型水稻土 TN 含量最低 (1.52g/kg), 而 AN 含量最高 (180.85mg/kg); TN 含量最高的为潜育型水稻土, 为 1.65g/kg, AN 含量最低的为潜育型水稻土 (164.71mg/kg); 这说明了水稻土不同亚类之间由于土壤的理化性质和附加的成土过程导致其氮素含量已出现了一定的差异。从土属来看, 以马肝泥土的 TN 和 AN 含量最低 (0.89), 黄泥 TN 含量最高 (1.75)。不同土壤类型之间 TN 与 AN 均值差异显著 ($P = 0.000$)。

表 6 不同土壤类型土壤全氮与碱解氮描述性统计特征

(土类	亚类	土属	样点数	全氮 TN			碱解氮 AN		
				均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 CV (%)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
水稻土	潜育型 水稻土	土类合计	15 320	1.59	0.49	30.82	164.91	57.00	34.56
		亚类合计	617	1.65	0.50	30.30	167.36	52.61	31.44
		潮沙泥田	251	1.60	0.55	34.38	164.87	55.69	33.78
		麻沙泥田	366	1.68	0.45	26.79	169.06	49.40	29.22
		亚类合计	89	1.52	0.45	29.61	180.85	54.11	29.92
	淹育型 水稻土	红沙泥田	64	1.49	0.38	25.50	187.18	56.60	30.24
		麻沙泥田	25	1.59	0.56	35.22	164.68	44.89	27.26
		亚类合计	14 614	1.59	0.49	30.82	164.71	57.22	34.74
	潜育型 水稻土	潮沙泥田	3 796	1.58	0.47	29.75	164.25	55.45	33.76
		红沙泥田	2 273	1.48	0.47	31.76	154.72	53.58	34.63
		黄泥田	2 363	1.65	0.47	28.48	167.76	60.34	35.91
		勤職	2815	1.60	1.48	30.00	163.86	56.45	34.45
		W 獵	3367	1.62	0.50	30.86	170.54	58.27	34.17

			土类合计	454	1.54	0.50	32.47	151.26	49.67	32.84
			亚类合计	213	1.64	0.42	25.61	161.20	50.47	31.31
红壤	红壤	黄泥	125	1.75	0.42	24.00	173.86	44.02	25.32	
		黄沙泥	87	1.50	0.52	34.67	144.87	44.21	30.52	
			亚类合计	241	1.29	0.45	34.88	155.76	48.28	31.00
			棕红壤 靖泥	143	1.12	0.42	37.50	163.68	43.63	26.66
			黄泥	98	1.53	0.51	33.33	144.21	43.04	29.85
			土类合计	186	0.92	0.45	48.91	123.29	39.32	31.89
黄褐土	粘盘黄	粘盘黄褐土	40	1.01	0.42	41.58	133.87	74.10	32.94	
	褐土	马肝泥土	146	0.89	0.46	51.69	120.39	37.39	31.06	
石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土	47	1.57	0.59	37.58	158.29	73.28	46.29	
			土类合计	102	1.26	0.51	40.48	138.38	38.77	28.02
潮土	壤质潮土	壤质潮土	62	1.28	0.58	45.31	129.91	28.40	21.86	
	潮沙泥土	潮沙泥土	40	1.23	0.40	32.52	161.94	62.53	38.61 ?	

2.4.4 耕地利用方式

耕地利用方式的改变会导致土壤肥料和植物残体的数量和性质、作物管理方式和耕作措施的不同进而影响和改变土壤氮素含量。从表 7 可以看出，TN 含量大小依次为：两季水田 (1.61g/kg) > 水旱轮作 (1.60g/kg) > 一季水田 (1.56g/kg) > 一季旱地 (1.37g/kg) > 两季旱地 (1.23g/kg)。AN 含量大小依次为：一季水田 (169.32mg/kg) > 水旱轮作 (168.74mg/kg) > 两季水田 (163.54mg/kg) > 两季旱地 (149.26mg/kg) > 一季旱地 (142.93mg/kg)。TN 的变异系数处于 30.43%~42.28%之间；AN 的变异系数为 31.22%~38.28%；均呈中等程度的变异性。

表 7 不同耕地利用方式土壤全氮与碱解氮描述性统计特征

耕地利用方式	样点数	全氮	碱解氮
--------	-----	----	-----

		均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
一季水田	3 364	1.56	0.48	30.77	169.32	52.87	31.22
两季水田	11 480	1.61	0.49	30.43	163.54	58.71	35.90
一季旱地	336	1.37	0.56	40.88	142.93	54.72	38.28
两季旱地	431	1.23	0.52	42.28	149.26	47.08	31.54
水旱轮作	498	1.60	0.51	31.88	168.74	56.39	33.42

2.4.5 秸秆还田方式

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的发育和提高氮肥利用率来提高土壤氮素含量与改善耕地土壤肥力。从表 8 可以看出，秸秆不还田与还田 TN 和 AN 含量差异明显，秸秆还田比不还田土壤氮素增加 19.01%~55.86% 之间。翻压还田和覆盖还田方式下 TN 均值存在显著差异 ($P=0.000$)，AN 差异不显 ($P=0.088$)。从变异系数的范围可知，不同秸秆还田方式下土壤 TN 与 AN 均呈中等空间变异性。

表 8 不同秸秆还田方式下土壤全氮与碱解氮描述性统计特征值

秸秆还田方式	样点数	全氮			碱解氮		
		均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 CV (%)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)
不还田	3 924	1.11	0.41	36.94	142.84	53.70	37.59
翻压还田	9 518	1.69	0.42	24.85	170.53	56.87	33.35
覆盖还田	2 667	1.73	0.43	24.86	172.59	53.33	30.90

2.4.6 各因素影响程度

为定量揭示随机性因素和结构性因素对土壤全氮与碱解氮空间变异的影响水平，对地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和秸秆还田方式进行回归分析(表 4)。从 TN 的回归分析结果看：地形因素对土壤 TN 空间变异的独立解释能力较低，仅为 0.4%；耕地利用方式次之，为 2.2%；成土母质的解释能力为 3.8%；土类、亚类和土属分别能解释 2.4%、3.0%和 3.9%的土壤 TN 空间变异，土壤类型的独立解释能力随分类级别降低而升高，这与其他区域研究结果一致；这是因为级别越低，反映的成土过程、母岩特性、土体构型等信息越多，因而其独立解释能力越高。秸秆还田方式的独立解释能力最高，为 27.1%。从 AN 的回归分析结果看：耕地利用方式对 AN 的独立解释能力最低，为 0.6%；地形因子次之，为 0.8%；土类、亚类和土属分别能解释 0.6%、

0.7%和0.9%的土壤AN空间变异,与TN有所不同,AN随土壤分类级别影响较小,这与顾成军等^[23, 24]研究结果基本一致。成土母质的解释能力为1.7%,秸秆还田方式的解释能力最高,为4.2%。在土壤氮素空间变异的影响因素中,随机性因素的影响水平大于结构性因素的影响水平,这与方差分析结果一致。这表明土壤氮素空间变异主要受随机性因素影响。

3 讨论

土壤TN与AN空间变异受多种因素共同影响,本研究结果显示TN受随机性因素影响大于结构性因素,而AN受结构性因素影响大于随机性因素。Pearson相关性分析和回归分析结果表明,土壤TN与AN除与高程有显著相关外,与其他地形因子相关性并不显著;独立解释能力低,这与人研究结果较为一致^[26]。其原因可能是耕地大多分布在平原地区且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。从耕地利用方式看,两季水田的土壤TN最高,两季水田一般氮肥施用量和作物管理水平较高;水旱轮作条件下土壤干湿交替促使土壤TN矿化,加速TN分解,而导致水旱轮作条件下TN含量略低于两季水田。旱地由于土壤通气条件较好,TN易于分解,这使得土壤TN处于相对较低水平^[26]。而AN表现为水田大于旱地的总体趋势,这是:因为AN易溶于水,而水田一般淹水时间长,旱地含水量要低于水田,因此AN含量表现为水田大于旱地的总体趋势。耕地利用方式对土壤TN与AN的独立解释能力远远低于顾成军等^[23]、罗由林等^[24, 26]研究结果,原因可能是不同土地利用方式下土壤TN与AN差异显著可能与N的积累速度^[20, 38~40]以及有机物本身的化学性质的差异有关,而本研究只针对耕地。

从秸秆还田来看,秸秆还田对土壤TN与AN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TN与AN变化取决于土壤N的输入和输出的相对关系,即有机物质的分解矿化损失和腐殖化、团聚作用累积的动态平衡与土壤物质迁移淀积平衡的统一。土壤TN与AN大多数以有机N的形式存在于有机质中,而目前研究均表明秸秆还田不仅能为耕地提供丰富的碳源,刺激微生物活性;同时秸秆还田能够维持耕地正常的碳氮比例,降低作物吸收氮素的能力,减少氮素淋洗损失^[22, 41]。但不同还田方式对微生物活性影响程度不一,不同还田方式会影响秸秆腐解与矿化速率,导致对秸秆有机物质释放和土壤氮素积累的效果形成一定的差异。秸秆添加给土壤增加新鲜有机质,为微生物提供生活基质,但碳氮比过大;微生物分解秸秆过程中需固定一定量的矿质氮,所以秸秆还田时需配合施加一定量氮肥,调节土壤微生物碳氮比,协调土壤氮素的固持与供应状态,使氮素的供应与作物吸氮相吻合。

在影响土壤氮素空间变异的因素中,耕地利用方式和秸秆还田方式等均在一定程度上反映出人为耕作活动对土壤氮素空间变异的影响。有研究表明,氮肥施用量的上升会导致农业面源污染^[42]。针对江西省耕地表层土壤氮素含量高于全国平均水平,因此氮素调控重点应放在提高氮素的有效率方面而非盲目的加大或减少氮肥投入。一方面,通过测土配方施肥项目改进氮素的管理水平,提高氮肥的利用率,降低施氮肥带来的环境风险。另一方面,合理的调节人为耕作活动以减少氮素累积或富集带来的一系列农业和环境问题,如水旱轮作转变为两季水田、或将不宜耕作和坡度较大的水田改为旱地以及碳氮比较高耕地的秸秆不还田等。以此促进土壤、农业和生态的循环与可持续发展。

4 结论

江西省耕地土壤TN与AN表现出中等程度的变异性,空间变异受随机性因素和结构性因素共同影响,但随机性因素影响大于结构性因素。TN与AN的空间分布较为相似,高值区主要分布在新余市、抚州市和景德镇市。地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和秸秆还田方式对江西省耕地土壤TN与AN空间变异影响极显著($P < 0.01$),对TN的独立解释能力分别为0.4%、2.2%、3.8%、2.4%~3.9%和27.1%;对AN的独立解释能力分别为0.8%、0.6%、1.7%、0.6%~0.9%和4.2%。在所有因素中秸秆还田方式对土壤TN与AN空间变异的独立解释能力最大,远远大于其他影响因素,是影响江西省耕地土壤氮素空间变异的主要因素。

参考文献:

[1] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 基于 GIS 的土壤全氮空间分布估算——以江西省兴国县为例 [J]. 地理研究, 2007, 26(1) : 110—116.

CHENG X F, SHI X Z, YU D S, et al. Spatial estimation of soil total nitrogen using GIS: a case study in Xingguo county, Jiangxi Province [J]. Geographical Research, 2007, 26(1) :110—116.

[2] LUTZE J L, GIFFORD R M, ADAMS H N. Litter quality and decomposition in *Danthonia richardsonii* swards in response to CO₂ and nitrogen supply over four years of growth [J]. Global Change Biology, 2000, 6(1) : 13—24.

[3] 徐国策, 李占斌, 李鹏, 等. 丹江鹦鹉沟小流域土壤总氮空间变异特征研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(5) :59—63.

XU G C, LIU Z B, LI P, et al. Study on TN spatial variability of Yingwugou small watershed in Dan river [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5) : 59—63.

[4] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990 ~ 2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化 [J]. 地理学报, 2004, 59(4) :483—496.

LIU J Y, WANG S Q, CHEN J M, et al. Storages of soil organic matter carbon and nitrogen and land use changes in china:1999—2000 [J]. Acta Geographical Sinica, 2004, 59(4) :483—496.

[5] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5) : 778—783.

ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5) : 778—783.

[6] 李林森, 程淑兰, 方华军, 等. 氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52(1) : 183—193.

LI L S, CHENG S L, FANG H J, et al. Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-tibetan plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1) : 183—193.

[7] 高凤杰, 马泉来, 张志民, 等. 黑土区小流域土壤氮素空间分布及主控因素研究 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(8) :2990—2999.

GAO F J, MA Q L, ZHANG Z M, et al. Spatial distribution of soil nitrogen and its main driving factors in a mollisol watershed of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8) :2990—2999.

[8] 蔡乾坤. 长期施用氮肥对杉木人工林土壤 C、N、P 的影响 [D]. 南昌: 南昌工程学院, 2015.

CAI Q K. Impacts of long-term nitrogen fertilization on soil C, N and P in a Chinese fir plantation [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2015.

-
- [9] 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.
- ZHANG S M, WANG Z M, ZHANG B, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5) : 189—194.
- [10] 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 [J]. 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 [J]. Geographical Research, 2010, 29(11) : 1981—1992.
- [11] 司涵, 张展羽, 吕梦醒, 等. 小流域土壤氮磷空间变异特征分析 [J]. 农业机械学报, 2014, (03) : 90—96.
- SI H, ZHANG Z Y, LV M X, et al. Spatial variability of soil nitrogen and phosphorus in small watershed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2014, (03) : 90—96.
- [12] 杨小林, 李义玲, 朱波, 等. 紫色土小流域不同土地利用类型的土壤氮素时空分异特征 [J]. 环境科学学报, 2013(10) : 2807—2813.
- YANG X L, LI Y L, ZHU B, et al. Spatial and temporal variations of soil nitrogen under different land uses in a small watershed in the purple soil area, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013(10) : 2807—2813.
- [13] ZHANG S, YAN L, HUANG J, et al. Spatial heterogeneity of soil C: N Ratio in a Mollisol Watershed of Northeast China [J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(2) : 295—304.
- [14] ZHANG S, ZHANG X, HUFFMAN T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89(3) : 427—438.
- [15] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(3) : 70—75.
- HU Y F, DENG L J, ZHANG S R, et al. Study on spatial variability and its influential factors of soils nitrogen in typical small watershed in the hilly region of the middle Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (3) : 70 —75.
- [16] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤氮素空间分布特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(6) : 1497—1503.
- PANG S, LI T X, WANG Y D, et al. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in croplands at county scale and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6) : 1497—1503.
- [17] 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.

LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al. Last 30a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of mid-Sichuan basin, southwest China [J]. Soils, 2016, 48(4) : 726—733.

[18] 孟晓云, 于兴修, 泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6) : 1789—1794.

MENG X Y, YU X X, PAN X Q. Impact of the land-use change on the non-point source nitrogen load in Yunmeng lake watershed [J]. Environmental Science, 2012, 33(6) : 1789—1794.

[19] 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(7) : 1173—1184.

ZHANG Z X, XU M X, SHI C D, et al. Scaling effects on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the loess hilly region [J]. Journal of Natural resources, 2014, 29(7) : 1173—1184.

[20] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(7) : 1214—1223.

ZHANG Y J, GUO S L, NAN Y F, et al. The changes and influencing factors of soil C: N Ratio in small watershed of hilly region of Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7) : 1214—1223.

[21] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素 [J]. 土壤学报, 2016, 53(3) : 582—593.

LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al. Spatio-temporal variations of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen and driving factors in purple soil Hilly Area of Mid-Sichuan Basin in the past 30 Years [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3) : 582—593.

[22] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5) : 526—535.

PAN J L, DAI W A, SHANG Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5) : 526—535.

[23] 顾成军, 史学正, 于东升, 等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子—土壤类型与土地利用比较 [J]. 土壤学报, 2013, 50(3) : 425—432.

GU C J, SHI X Z, YU D S, et al. Main factors controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3) : 425—432.

[24] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵区土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(1) : 177—185.

LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al. Spatial variability of soil C / N ratio and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1) : 177—185.

[25] 李婷, 张世熔, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. 土壤学报, 2011, 48(4) : 863—868.

LI T, ZHANG S R, LIU X, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang river basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4) : 863—868.

[26] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵区土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(2) : 652—660.

LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al. Spatial variability of soil nitrogen and related affecting factors at a county Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin [J]. Environmental Science, 2015, 36(2) : 652—660.

[27] SARMIENTO L, BOTTLNER P. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. [J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(1) : 79—89.

[28] 王永旭, 陈波浪, 袁郁文, 等. 耕地土壤养分空间变异特征研究 [J]. 新疆农业科学, 2015, 52(1) : 145—150.

WANG Y X, CHEN B L, YUAN Y W, et al. Soil Nutrients Spatial Variability of the Farmland in Yuepuhu County, Southern Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(1) : 145—150.

[29] 杨玲, 何勇, 卢俊宇, 等. 天全河流域土壤氮素的空间分布特征及其影响因素分析 [J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(3) : 326—331.

YANG L, HE Y, LU J Y, et al. Spatial distribution of soil nitrogen and its influencing factors in the Tianquan river basin [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(3) : 326—331.

[30] 毛达如. 植物营养研究方法 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.

MAO D R. Plant nutrition research methods [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.

[31] 鲁如坤. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

[32] 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 [J]. 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 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3) : 1049—1053.

[33] WANG B W, ZHOU W J, MA S, et al. Regression-kriging of soil organic matter using the environmental variables derived from MODIS and DEM [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, 13(4) : 838—842.

[34] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用 [J]. *数理医药学杂志*, 2006, 19(1) : 51—53.

LI L X, GAO Y H, ZHANG Y. The application of dummy variable in statistics analysis [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2006, 19(1) : 51—53.

[35] HERNANDEZSTEFANONI J L, PONCEHERNANDEZ R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest:comparison of spatial interpolation methods [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2006, 117(1—3) : 307—334.

[36] ZHU Q, LIN H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5) : 594—606.

[37] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近 30 年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(4) :723—730.

ZHAO X M, SHAO H, SHI Q H, et al. Spatio-temporal variation of total content in farmland soil of Jiangxi province in the past 30 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4) :723—730.

[38] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响 [J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1) : 97—105.

MA Y H, GUO S L, YANG Y L, et al. The effects of vegetation types on soil organic carbon at Yangou catchment in the loess hilly-gully region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1) : 97—105.

[39] O' BRIEN S L, JASTROW J D, GRIMLEY D A, et al. Moisture and vegetation controls on decadal-scale accrual of soil organic carbon and total nitrogen in restored grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(9) : 2573—2588.

[40] FU X L, SHAO M G, WEI X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 155(1—2) : 31—35.

[41] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2015, 41(1) : 160—167.

CHEN J, TANG Y H, YIN Y P, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1) : 160—167.

[42] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. *环境科学学报*, 1997, 17(1) :39

—47.

MA L S, WANG Z Q, ZHANG S M, et al. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu lake, Jiangsu [J] . Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1) : 39—47.