

江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其主控因素

张 晗^{1,2}, 欧阳真程^{1,2}, 赵小敏^{1,4}, 郭 熙^{1,2}, 李伟峰^{1,2}, 匡丽花⁴, 叶英聪^{1,3}

(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, 南方粮油作物协同创新中心, 南昌 330045;

2. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 3. 江西农业大学林学院, 南昌 330045;

4. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘要: 根据江西省采集的 16 823 个耕层(0—20 cm)土壤样点数据, 运用实地调查、经典统计学及地统计学等分析方法, 对江西省耕地土壤氮素含量的空间变异特征及其影响因素进行了深入探讨。结果表明: 江西省土壤全氮(TN)含量和碱解氮(AN)平均含量分别为 1.57 g/kg 和 164.13 mg/kg, 两者均处于丰富级水平。通过半方差函数分析, 土壤 TN 和 AN 的块金基台比分别为 62.03% 和 78.97%, 两者空间变异特征受到结构性因素和随机性因素的共同影响, 但受到随机性因素的影响更大; Kriging 插值结果显示, 研究区土壤 AN 与 TN 含量在空间分布上基本一致, 均表现出北高南低的空间分布趋势。回归分析表明, 成土母质、土壤类型、地形因子、土壤侵蚀、秸秆还田方式、农田利用方式和氮肥施用量对土壤 TN 和 AN 空间变异均有极显著影响($P < 0.01$)。地形因子中高程和河流动能指数与土壤 AN 与 TN 含量呈显著负相关关系($P < 0.05$); 成土母质对 TN 和 AN 空间变异具有 6.1% 和 4.1% 的独立解释能力, 土壤类型对 TN 和 AN 的空间变异的独立解释能力分别在 4.2%~4.7% 和 3.1%~4.0%, 地形因子对 TN 和 AN 空间变异具有 4.2% 和 2.8% 的独立解释能力, 土壤侵蚀程度对 TN 和 AN 空间变异具有 6.2% 和 3.5% 的独立解释能力, 秸秆还田方式对 TN 和 AN 空间变异的具有 27.3% 和 3.3% 的独立解释能力, 农田利用方式对 TN、AN 空间变异具有 2.9% 和 2.0% 的独立解释能力, 氮肥施用量对 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 18.8% 和 5.6%。因此, 秸秆还田方式和氮肥施用量是引起江西省土壤氮素空间变异性的主控因素。

关键词: 江西省; 耕地; 土壤氮素; 地统计学; 空间变异; 主控因素

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)05-0304-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.047

Spatial Variation of Soil Nitrogen and Its Main Controlling Factors in Cultivated Land of Jiangxi Province

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

GUO Xi^{1,2}, LI Weifeng^{1,2}, KUANG Lihua⁴, YE Yingcong^{1,3}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology, Jiangxi Agricultural University, Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Nanchang, 330045; 2. College of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 3. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 4. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: Based on the soil data of 16 823 plow layer (0—20 cm) samples of cultivated land soil collected in Jiangxi Province, the spatial variation characteristics of soil nitrogen and the affecting factors at a province scale were studied by field survey, mathematical statistics analysis and geostatistics analysis methods. The results showed that the average contents of soil total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) were 1.57 g/kg and 164.13 mg/kg, respectively, which indicated that both the TN and AN in the study area were at a rich level. According to semi-variance function analysis, the values of the nugget to sill ratio were 62.03% and 78.97%, respectively, which suggested that the spatial variation of TN and AN in Jiangxi Province were determined by the co-effects of structural and random factors, but the random factors played a more important role. The contents of TN and AN were basically the same in the spatial distribution, which were much higher in the north area than those of south area by using ordinary kriging interpolation. The regression anal-

收稿日期: 2018-02-20

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)开放基金项目(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研究。E-mail: zhanghan0307@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研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

ysis results showed that soil parent materials, soil types, topography, soil erosion, straw returning pattern, farmland use types and nitrogen fertilization rates had very significant impacts on spatial variation of soil TN and AN ($P < 0.01$). Soil TN and AN contents showed significant negative correlations with elevation and river dynamic index ($P < 0.05$). The soil parent materials were able to independent explain 6.1% and 4.1% of soil TN and AN spatial variation, and the independent interpretation ability of soil types to TN and AN spatial variation was 4.2% to 4.7% and 3.1% to 4%, respectively, and topographic factors explained 4.2% of TN variation and 2.8% of AN spatial variation. Soil erosion explained 6.2% and 3.5% of soil TN and AN spatial variation. Straw returning pattern explained 4.2% and 3.3% of spatial variation of TN and AN, respectively. Farmland use types explained soil TN and AN spatial variation by 2.9% and 2.0%, respectively. The independent explanatory ability of nitrogen fertilizer application on spatial variation of TN and AN were 18.8% and 5.6%, respectively. Thus, the straw returning pattern and annual nitrogen fertilizer application rates were the main factors in controlling the spatial variation of soil nitrogen in Jiangxi Province.

Keywords: Jiangxi Province; cultivated land; soil nitrogen; geo-statistics; spatial variability; main controlling factor

氮素是构成一切生命体的重要元素。作为植物生长发育的关键限制因子,土壤氮素不仅是土壤养分循环转化的核心,也是陆地土壤氮库的重要组成部分,其转化和迁移能显著影响区域大气环境、水体环境、碳氮平衡等诸多生态环境过程^[1]。土壤氮素及影响因素研究因其涉及的领域十分广泛,已逐渐成为农业可持续发展和全球气候变化问题的热点之一^[2-3]。迄今为止,关于土壤氮素空间变异特征研究主要集中在沼泽湿地、林地、草地、园地等生态系统^[4-6],针对土壤氮素影响因素的研究多以成土母质、土壤类型、地形地貌、耕作施肥、秸秆还田、土地利用方式等单因素分析和定性描述为主,而量化和全面分析不同因素对土壤氮素空间变异影响程度的研究鲜有报道。在前人的研究过程中,较少考虑秸秆还田方式、氮肥施用量、年均气温及年降水量等外部环境对土壤氮素空间变异的影响;当前,国内外专家学者^[3,7-9]对土壤氮素的空间变异特征进行了广泛研究,虽已取得了丰富的研究成果,但其研究尺度多为小流域、乡镇、县域和市域等中、微观尺度,因土壤取样方法和精度等的限制,在较大的地理空间尺度(如省域尺度)系统地探讨土壤氮素及其影响因素的研究依然相对缺乏,难以有效地指导农业生产。因此,准确掌握较大地理空间尺度下土壤氮素空间分布特征及其影响因素对于区域内的氮肥精准管理、环境污染防控和生物地球化学循环具有重大的指导意义。

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,耕作模式主要为水田、旱地和水旱轮作,粮食作物以水稻为主,经济作物种植面积广布。近年来,随着人地矛盾的加剧、土地利用方式和施肥方式等的不合理,大量施用氮磷钾肥等化肥,导致江西省耕地化肥利用率不高,土壤板结、养分失衡、酸化严重和面源污

染等问题日益突出^[10]。因此,本文从耕地生态系统入手,综合运用经典统计学、地统计学以及 GIS 等技术,对江西省耕地土壤全氮、碱解氮空间变异特征及其空间分布格局的结构性和随机性因素进行定性和定量的分析,以期在省域尺度下的土壤养分管理、碳氮调控、氮肥管理、农业面源污染监测及生态环境保护等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省位于中国东南部,地处长江中下游交接处的南岸,地理坐标北纬 24°29′14″—30°04′41″,东经 113°34′36″—118°28′58″。江西省下辖 11 个区市,共计 101 个县(市、区),全省总人口 4 542.16 万,总面积 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$,耕地面积 $3.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中水田 $2.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$,旱地 $5.61 \times 10^5 \text{ hm}^2$,水浇地 $1.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。全省平均气温 16.4~19.4℃,年降水量 1 751~2 523 mm,降水主要集中在 4—8 月,日照时间 1 395~1 679 h,属典型的亚热带湿润气候。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 3 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。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、石英岩类风化物和泥质岩类风化物等。研究区土地利用类型以耕地(水田和旱地)为主,农田利用方式可分为水旱轮作、1 季旱地、2 季旱地、1 季水田和 2 季水田 5 种。粮食作物以水稻为主,小麦、玉米次之,还盛产油菜、花生、油茶等经济作物。

1.2 土壤样品采集与分析

于 2012 年 11 月至 2013 年 12 月农作物收获后在江西省进行土壤样品采集,采样时应用“S”形采样法随机

设置 8 个点,采样地大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,共采集农田耕层(0—20 cm)土壤样点 16 823 个(图 1)。土壤样品经室内自然风干、剔除杂物和研磨过筛等前期处理后,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,每个样点采用 GPS 记录其地理坐标和海拔,详细记

录样点周围的地表环境信息。土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定,碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定,有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定,土壤 pH 采用玻璃电极法测定(水土比为 2.5 : 1),土壤容重采用环刀称质量法测定^[11]。

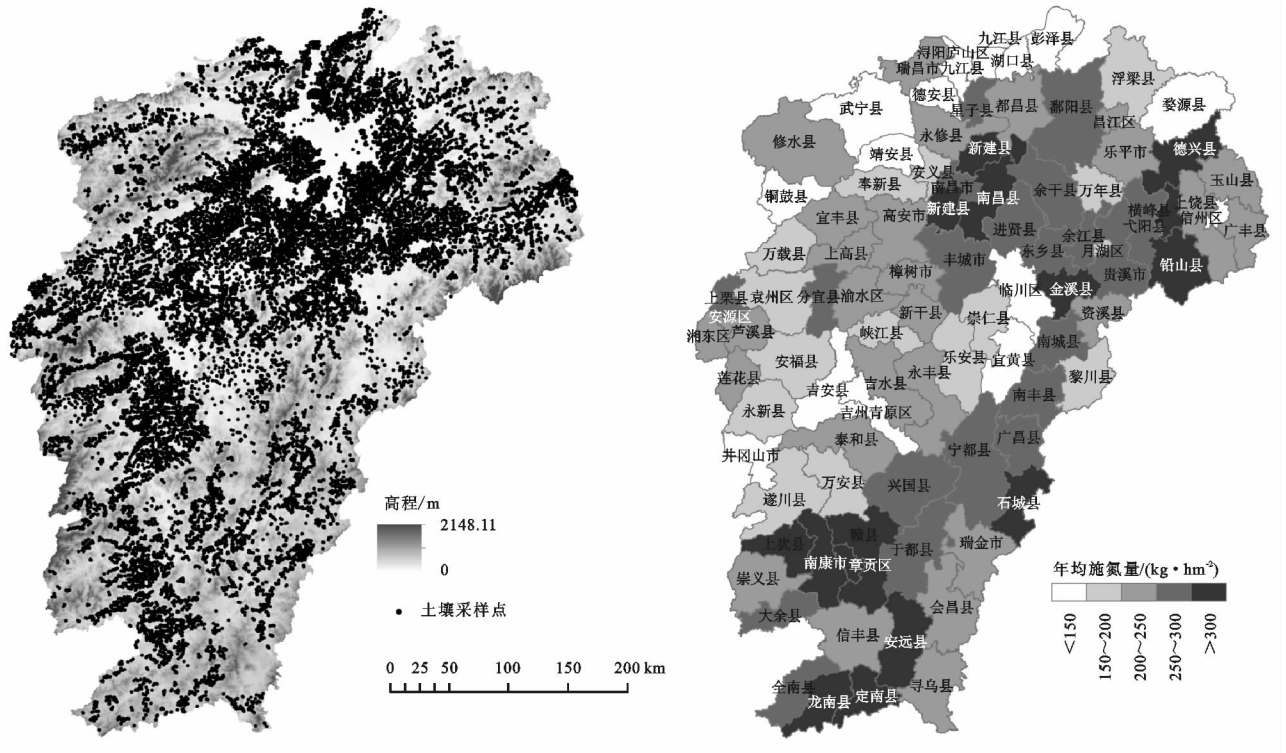


图 1 江西省 DEM、土壤样点及年均施氮量空间分布

1.3 数据处理与数据来源

研究区 16 823 个土壤样点数据来源于 2012 年农业部开展的“江西省测土配方施肥”项目中的田间采样数据。江西省成土母质和土壤类型来自于第二次土壤普查数据。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 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 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 Arc GIS 10.2 软件平台提取出高程(H)、坡度(S)、坡向(A)、平面曲率(C_p)、剖面曲率(C_h)、地形湿度指数(Ψ)和河流动能指数(Ω)等地形因子,具体计算公式见文献[12]。年平均温度(MAT)和年降水量(MAP)数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供。

在数据分析之前采用域值法对离群值初步识别,发现 TN 和 AN 含量分别有 25,162 个样本点数据为离群值,然后用正常的最大和最小值代替离群值^[13]。应用 K—S 法检验原始数据是否符合正态分布,如不符合则需对其进行转换。成土母质、土壤类型、土壤侵蚀程度、秸秆还田方式、农田利用方式和氮肥施用量均为多分类变量,本文采用虚拟变量进行赋值^[7]。土壤氮素含量的

描述性统计、单因素分析(One-Way ANOVA)、Pearson 相关分析、回归分析等经典统计分析均在 SPSS 22.0 软件中完成。采用 GS+7.0 软件输出 TN 和 AN 含量的空间结构信息,在 Arc GIS 10.2 平台中将土壤 TN 和 AN 进行普通克里格插值分析。

2 结果与分析

2.1 江西省土壤全氮、碱解氮含量的描述性分析

由表 1 可知,研究区耕层土壤全氮含量为 0.29~2.95 g/kg,平均值为 1.57 g/kg,土壤碱解氮含量为 0.40~342.04 mg/kg,平均值为 164.13 mg/kg,土壤 TN 和 AN 含量与江西省第二次土壤普查平均值相比(1.46 g/kg,145 mg/kg)分别提高了 0.11 g/kg 和 19.13 mg/kg,表明江西省土壤 TN、AN 含量均属于丰富级水平。从变异强度来看,土壤 TN 和 AN 的变异系数分别为 28.92% 和 34.65%,均处于中等变异程度,土壤 AN 的变异程度较土壤 TN 强,说明研究区土壤 TN 和 AN 在空间分布上并不均质。对土壤氮素进行单一样本 K—S($P>0.05$)正态检验时发现,研究区土壤全氮和碱解氮均服从正态分布,符合地统计学和空间插值分析的要求。

表 1 研究区土壤 TN 和 AN 含量统计特征

土壤养分	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏斜度	峰度	K—S 值	分布类型
全氮	16823	0.29	2.95	1.57	0.46	28.9	−0.11	−0.17	0.24	正态分布
碱解氮	16823	0.40	342.04	164.13	56.88	34.7	0.35	0.78	0.41	正态分布

注:全氮和碱解氮含量最小值、最大值、平均值、标准差单位分别为 g/kg 和 mg/kg。下同。

2.2 江西省耕地土壤全氮、碱解氮空间结构特征

半方差函数能准确地刻画土壤 TN 和 AN 含量空间分布格局的随机性和结构性特征,考虑到研究区土壤 TN 和 AN 指标的空间异质性和趋势性,经过 GS+7.0 软件反复模拟选取土壤氮素的最优拟合函数,最终获得其空间结构信息。由图 2 和表 2 可知,江西省土壤 TN 符合指数模型,AN 符合线性模型,其决定系数 R^2 分别为 0.931 和 0.835,两者的残差

RSS 分别为 5.813×10^{-6} 和 7.602×10^{-5} (均趋近于 0),表明其拟合精度较高,拟合模型能很好表征土壤氮素的空间结构特征。土壤 TN 和 AN 块金基台比分别为 62.03%和 78.97%,属中等程度的空间自相关,表明其空间变异特征主要由随机因素和结构性因素共同引起,但随机性因素影响更大。土壤 TN 和 AN 含量的变程分别为 114.06,314.89 km,说明 AN 的空间自相关范围较大,远远高于 TN。

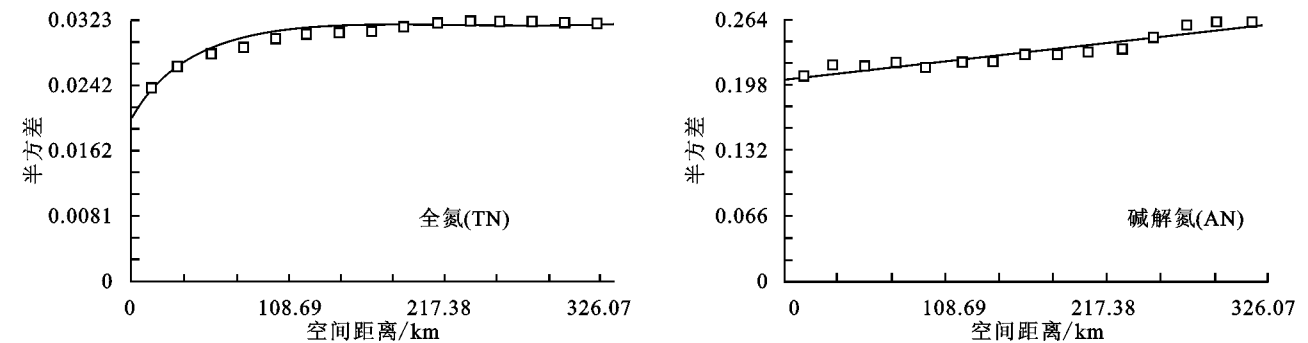


图 2 江西省土壤 TN 和 AN 含量半方差函数

表 2 江西省土壤 TN 和 AN 含量半方差函数及其相应参数

土壤养分	拟合模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金基台比 $[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/km	决定系数 R^2	残差 RSS
TN	指数模型	0.0196	0.0316	62.03	114.1	0.93	5.813×10^{-6}
AN	线性模型	0.2030	0.2570	78.97	314.9	0.84	7.602×10^{-5}

2.3 江西省土壤氮素空间分布特征

根据半方差函数的最佳拟合模型及相应参数,在 Arc GIS 10.2 软件平台对研究区土壤 TN 和 AN 进行普通克里格 (Ordinary Kriging) 差值,生成江西省土壤 TN 和 AN 含量空间分布图。由图 3 可知,研究区土壤 TN 和 AN 含量分别集中在 1.30~1.80 g/kg 和 150~200 mg/kg, TN 与 AN 的空间分布特征总体上较为一致,均表现出北高南低的分布格局,且多呈条带状或斑块状分布,高值区与低值区之间过渡较为平缓,这主要由于土壤 TN 与 AN 之间具有较强的相关性。TN 含量较 AN 含量的高值区相对集中,土壤氮素的高值区主要分布在鄱阳湖东北部、鄱阳湖平原区、沿浙赣线的平原与盆地区、赣中南丘陵盆地以及赣东山地丘陵区;低值区主要呈团块状分布在鄱阳湖西北部平原的低丘岗地区、赣中吉泰盆地和赣南山地丘陵区等地区。

着土壤氮素含量的差异。由表 3 可知,不同成土母质类型下土壤 TN 和 AN 含量差异明显 ($P<0.05$)。土壤 TN 含量以第四纪红色黏土最高 (1.66 g/kg), 下蜀系黄土状物最低 (1.03 g/kg), 最大最小均值差值为 0.82 g/kg。土壤 AN 含量均值以基性结晶岩类风化物最高 (183.76 mg/kg), 下蜀系黄土状物最低 (131.07 mg/kg), 最大最小均值差值达 52.69 mg/kg。从变异系数来看,研究区各母质类型下土壤 TN 和 AN 处于 25.9%~44.7%, 均表现为中等程度的变异性。

2.4 江西省土壤氮素影响因素分析

2.4.1 成土母质 成土母质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,从而影

2.4.2 土壤类型 由表 4 可知,不同土壤类型对江西省土壤 TN 和 AN 含量均有显著差异 ($P<0.05$), 5 个土类中,土壤 TN 和 AN 含量均值大小依次为水稻土 (1.59 g/kg, 164.90 mg/kg) > 红壤 (1.52 g/kg, 164.57 mg/kg) > 石灰土 (1.51 g/kg, 155.03 mg/kg) > 潮土 (1.25 g/kg, 133.40 mg/kg) > 黄褐土 (0.93 g/kg, 124.33 mg/kg)。江西省 10 个亚类中,土壤 TN 含量以潜育型水稻土最高 (1.64 g/kg), 黏盘黄褐土最低 (0.93 g/kg), 而土壤 AN 含量以淹育

型水稻土(194.13 mg/kg),黏盘黄褐土最低(124.33 mg/kg)。从土属来看,黄砂泥红壤和黄泥红壤等土属的 TN 含量处于较高水平,TN 均值分别为 1.82,1.75 g/kg,马肝泥土和草洲沙泥土的 TN 含量较低,分别为 0.91,0.95 g/kg;潜育型水稻土和红砂泥红

壤的 AN 含量较高,分别为 183.88,175.40 mg/kg,马肝泥土、粘盘黄褐土的 AN 含量较低,分别为 120.60,135.91 mg/kg。各级土壤分类下土壤 TN 和 AN 含量的变异系数均介于 15.6%~53.7%,表现为中等变异程度。

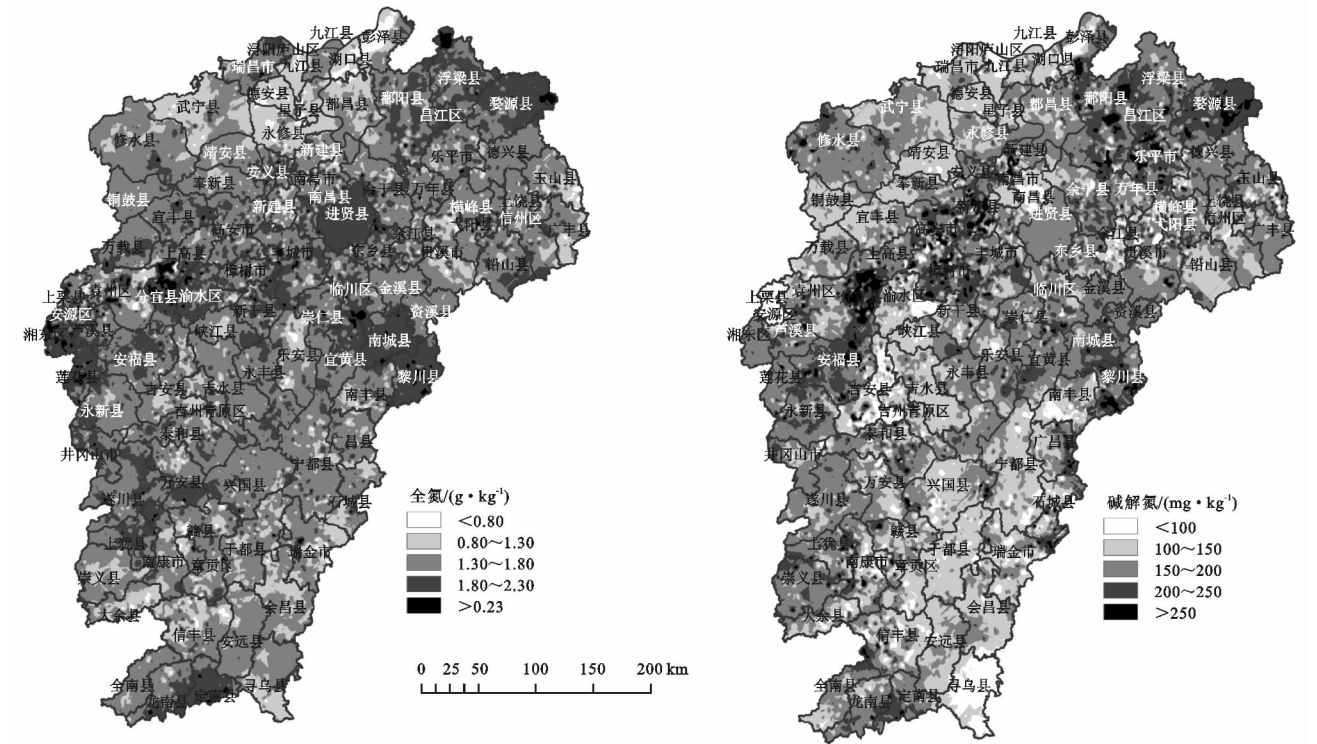


图 3 江西省土壤 TN、AN 空间分布特征

表 3 不同母质类型土壤 TN、AN 含量统计特征

成土母质	样点数	全氮			碱解氮		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
第四纪红色黏土	2766	1.66b	0.43	25.9	169.07a	59.62	35.3
河湖沉积物	3222	1.57d	0.44	28.0	162.90a	54.82	33.7
红砂岩类风化物	2431	1.49e	0.44	29.3	155.90b	54.95	35.3
基性结晶岩类风化物	24	1.39e	0.62	44.7	183.76a	56.88	31.0
泥质岩类风化物	3896	1.60c	0.45	28.0	170.71a	54.26	31.8
石英岩类风化物	1033	1.58c	0.47	29.9	156.58b	61.07	39.0
酸性结晶岩类风化物	2038	1.60c	0.43	27.0	165.25a	52.15	31.6
碳酸盐岩类风化物	458	1.72a	0.57	33.5	179.52 a	74.31	41.4
下蜀系黄土状物	359	1.03f	0.45	43.3	131.07c	41.36	31.6
紫色岩类风化物	596	1.54d	0.45	29.4	154.95b	64.47	41.6

注:同列不相同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4.3 地形因子 地形条件是引起地表水热条件、成土母质和土壤养分含量重新分配的重要因素。Pearson 相关性分析表明(表 5),研究区土壤 TN 和 AN 含量与高程、河流动能指数的相关系数分别为-0.019,-0.059 和-0.021,-0.017,表明海拔较低处土壤 TN 和 AN 含量比海拔较高处高,水的排泄和土壤侵蚀能力越强的地方土壤 TN 和 AN 含量越低。土壤 TN 含量与坡向呈显著正相关关系($r=0.018$),说明随着坡向由阳坡(南坡)转向阴坡(北坡)时,土壤 TN 表现出不断增大的趋势,而土壤 AN 含量与坡度、坡度变率呈显著负相关关系($r=-0.015,r=-0.017$),这说明了当坡度和坡

度变率增大时,土壤 AN 含量表现出不断减少的趋势,这反映出研究区地势起伏较大,坡度越大的区域地表径流作用越强烈,土壤易被冲刷侵蚀,土壤 AN 容易随水流失。总体而言,高程和河流动能指数是引起江西省土壤氮素空间变异特征的主要地形因子。

2.4.4 土壤侵蚀状况 土壤侵蚀能显著地改变土壤 TN 和 AN 等养分的空间分布状态。由表 6 可知,各土壤侵蚀状况之间土壤氮素含量差异显著($P<0.05$),土壤 TN 含量表现为轻度侵蚀(1.580 g/kg) $\approx$ 中度侵蚀(1.580 g/kg) $>$ 无明显侵蚀(1.579 g/kg) $>$ 强度侵蚀(1.515 g/kg),土壤 AN 含量与 TN 含量相类

似,这可能与江西省人口密集,地形较为复杂,土地垦殖系数较高,降雨量集中且季节变化大有关。从变异系数来看,土壤 AN 含量的变异系数普遍高于土壤 TN,但两者均属于中等程度的变异性。

表 4 不同土壤类型土壤 TN、AN 含量统计特征

土壤类型	亚类	土属	样点数	全氮			碱解氮		
				平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
潮土	(酸)灰潮土	土类合计	128	1.25C	0.50	40.2	133.40B	44.29	33.2
		壤质灰潮土	71	1.26fg	0.53	41.8	124.49g	31.65	25.4
		灰潮土	34	1.41ef	0.44	31.0	147.68ef	58.10	39.3
		湿潮土	23	0.95h	0.37	39.2	139.79fg	49.59	35.5
黄褐土	黏盘黄褐土	土类合计	201	0.93D	0.47	50.5	124.33B	38.17	30.7
		马肝泥土	152	0.91h	0.49	53.7	120.60g	35.56	29.5
		黏盘黄褐土	49	0.99h	0.40	40.7	135.91fg	43.72	32.2
石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土	61	1.51ABde	0.57	37.6	155.03Aef	74.59	48.1
		土类合计	585	1.52B	0.47	31.1	164.57A	51.84	31.5
		亚类合计	300	1.71	0.41	24.2	169.67	54.81	32.3
红壤	红壤	红砂泥红壤	98	1.58cd	0.41	26.1	175.40bcd	56.18	32.0
		黄泥红壤	130	1.75ab	0.40	23.1	171.60cd	49.32	28.7
		黄砂泥红壤	72	1.82a	0.39	21.6	158.37def	61.13	38.6
	棕红壤	亚类合计	285	1.33	0.45	34.1	159.20	48.04	30.2
		黄泥棕红壤	113	1.33f	0.45	34.0	146.32f	41.10	28.1
		鳝泥棕红壤	172	1.33f	0.46	34.3	167.66cd	50.44	30.1
水稻土	潜育型水稻土	土类合计	15848	1.59A	0.45	28.1	164.90A	57.02	34.6
		亚类合计	756	1.64	0.45	27.6	166.28	49.59	29.8
		潮沙泥田	175	1.58cd	0.50	31.3	164.31de	52.93	32.2
		红沙泥田	52	1.69abc	0.42	25.0	168.94cde	37.52	22.2
		黄泥田	118	1.68b	0.37	21.9	161.84de	48.65	30.1
		麻沙泥田	230	1.66b	0.44	26.5	172.46c	48.61	28.2
		鳝泥田	181	1.64bcd	0.48	29.4	162.46de	50.79	31.3
		亚类合计	56	1.53	0.40	26.3	194.13	53.69	27.7
	淹育型水稻土	红沙泥田	23	1.47ef	0.23	15.6	224.21a	58.64	26.2
		黄泥田	33	1.57cd	0.49	31.1	173.17bcde	38.56	22.3
		亚类合计	15036	1.59	0.45	28.2	164.72	57.35	34.8
		潮沙泥田	2919	1.58c	0.43	27.1	164.11d	55.00	33.5
	潜育型水稻土	红沙泥田	2258	1.48e	0.44	29.6	154.06ef	54.58	35.4
		黄泥田	2459	1.66b	0.43	25.6	169.26c	61.04	36.1
		黄沙泥田	909	1.58cd	0.47	29.9	157.86e	62.34	39.5
		麻沙泥田	1776	1.60c	0.43	26.9	164.45d	52.47	31.9
		马肝泥田	158	1.15g	0.38	32.9	139.64fg	43.73	31.3
		鳝泥田	3543	1.61bc	0.44	27.4	171.28c	54.58	31.9
		石灰泥田	394	1.74ab	0.57	32.7	183.88b	73.41	39.9
		紫泥田	620	1.54d	0.46	30.1	156.07ef	64.39	41.3

注:同列不相同大写字母表示不同土壤类型合计间差异显著($P<0.05$)。

表 5 土壤 TN、AN 含量与地形因子的相关性分析

土壤养分	高程	坡度	坡向	坡度变率	坡向变率	平面曲率	剖面曲率	地形湿度	河流动能指数
全氮	-0.019**	-0.006	0.018*	-0.003	0.005	-0.015	-0.006	-0.003	-0.021**
碱解氮	-0.059**	-0.015*	-0.008	-0.017*	-0.005	-0.012	0.000	-0.002	-0.017*

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

表 6 不同侵蚀状况下土壤 TN、AN 含量统计特征

土壤侵蚀程度	样点数	全氮			碱解氮		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
无明显侵蚀	12487	1.579a	0.46	28.9	164.86a	57.29	34.8
轻度侵蚀	1552	1.580a	0.46	28.9	167.49a	54.42	32.5
中度侵蚀	1705	1.580a	0.45	28.7	159.67b	55.39	34.7
强度侵蚀	1079	1.515b	0.44	29.1	157.92b	57.06	36.1

2.4.5 秸秆还田方式 秸秆还田通过改变土壤的水分、肥力、空气和热量等状况来影响土壤有机质和氮

素含量。由表 7 可知,不同秸秆还田方式间土壤氮素含量具有显著差异($P<0.05$),土壤 TN 含量呈现出翻压还田(1.59 g/kg)>覆盖还田(1.56 g/kg)>不还田(1.56 g/kg),土壤 AN 含量则呈现出覆盖还田(168.26 mg/kg)>翻压还田(163.83 mg/kg)>不还

田(161.82 mg/kg)。不还田和覆盖 2 种还田方式下 TN 含量无显著差异,反映出该区覆盖还田方式和管理水平有待于进一步提高。不同秸秆还田方式下土壤 TN 和 AN 含量的变异系数均处于 28.4%~35.7%,表现为中等程度的变异性。

表 7 不同秸秆还田方式下土壤 TN、AN 含量统计特征

秸秆还田 方式	样点数	全氮			碱解氮		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
不还田	4479	1.56b	0.47	30.0	161.82c	56.22	34.7
翻压还田	9176	1.59a	0.45	28.4	163.83b	58.55	35.7
覆盖还田	3168	1.56b	0.45	29.0	168.26a	52.49	31.2

2.4.6 农田利用方式 农田利用方式主要通过控制土壤养分的输入输出关系来深刻影响土壤氮素的累积率和有效性。由表 8 可知,农田利用方式对土壤 TN 和 AN 含量均有显著的影响($P<0.05$),土壤 TN 均值大小依次为 2 季水田(1.61 g/kg)>1 季水田(1.56 g/kg)>水旱轮作(1.52 g/kg)>1 季旱地(1.48 g/kg)>2 季旱地(1.25 g/kg),而土壤

AN 均值大小与 TN 相似,表现为 1 季水田(169.90 mg/kg)>水旱轮作(164.40 mg/kg)>2 季水田(163.41 mg/kg)>1 季旱地(154.39 mg/kg)>2 季旱地(149.16 mg/kg)。从变异系数来看,TN、AN 的变异系数处于 27.9%~41.3%,这反映出不同农田利用条件下 TN 和 AN 含量均表现为中等程度的变异性。

表 8 不同农田利用方式下土壤 TN、AN 含量统计特征

农田利用 方式	样点数	全氮			碱解氮		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
水旱轮作	1377	1.52c	0.46	30.0	164.40b	53.87	32.8
1 季旱地	500	1.48c	0.53	35.9	154.39c	58.14	37.7
2 季旱地	484	1.25d	0.51	41.3	149.16d	47.77	32.0
1 季水田	3408	1.56b	0.44	27.9	169.90a	51.89	41.3
2 季水田	11054	1.61a	0.45	27.9	163.41b	58.78	36.0

2.4.7 氮肥施用量 氮肥施用量不仅可以调节土壤氮素的供需状况和氮素形态之间的转化速率,还能够控制各种形态的氮在土壤中的含量变化。由表 9 可知,氮肥施用量对研究区土壤氮素水平有极显著影响($P<0.01$)。土壤 TN 含量随着氮肥施用量的增加呈现出上升的趋势,而不同氮肥施用量分组之间碱解氮含量与全氮含量存在一定差异,氮肥施用量在 250~

300 kg/hm² 时,AN 含量最高(169.32 mg/kg),氮肥施用量小于 150 kg/hm² 时,AN 含量最低(135.39 mg/kg)。TN 和 AN 在氮肥施用量 150~200,200~250 kg/hm² 无显著差异,表明江西省的氮肥投入与管理水平有待于进一步提高。从变异系数来看,不同氮肥施用量下 TN 与 AN 含量范围为 25.7%~39.3%,均处于中等变异程度。

表 9 不同氮肥施用量 TN、AN 含量描述性统计特征值

氮肥施用量/ (kg·hm ⁻²)	样点数	全氮			碱解氮		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
<150	1460	1.31d	0.46	35.4	135.39d	53.25	39.3
150~200	3548	1.56c	0.40	25.7	167.78b	48.08	28.7
200~250	5005	1.57c	0.46	29.5	167.21b	57.51	34.4
250~300	4522	1.62b	0.45	28.0	169.32a	58.90	34.8
>300	2288	1.69a	0.45	26.5	159.81c	60.53	37.9

2.5 不同因素的影响程度分析

由表 10 可知,研究区不同影响因素对江西省耕地土壤 TN 和 AN 空间变异的影响程度均达到极显著水平($P<0.01$),这说明本研究中选取的 9 个影响因素对江西省土壤 TN 和 AN 含量均有不同程度的影响。在结构性因素中,土壤侵蚀程度和成土母质对土壤 TN、AN 空间变异的独立解释能力相对较高,分别为 6.2%,3.5%和 6.0%,4.0%;土壤类型其次,土

类、亚类和土属对土壤 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 4.2%,4.5%,4.7%和 3.1%,3.8%,4.0%,说明土壤类型的独立解释能力随分类级别降低而升高;地形因子最低,其独立解释能力分别为 4.2%和 2.8%。在随机性因素中,秸秆还田方式对土壤 TN、AN 空间变异的独立解释能力最高,分别为 18.7%和 5.6%;氮肥施用量次之,分别为 4.1%和 3.2%;农田利用方式最低,分别为 2.9%和 2.0%。由此可知,江西省土

壤 TN 和 AN 空间变异主要受到随机性因素的影响, 间变异的主要影响因素,这与表 2 半方差分析中的
秸秆还田方式和氮肥施用量是研究区土壤氮素空 研究结果一致。

表 10 各影响因素对土壤 TN、AN 的回归分析

影响因素	全氮				碱解氮			
	F 值	决定系数	校正决定系数	Sig.	F 值	决定系数	校正决定系数	Sig.
成土母质	155.59	0.061	0.060	<0.01	75.34	0.041	0.040	<0.01
土类	373.65	0.043	0.042	<0.01	180.31	0.031	0.031	<0.01
亚类	265.52	0.045	0.045	<0.01	75.34	0.039	0.038	<0.01
土属	208.87	0.047	0.047	<0.01	71.05	0.041	0.040	<0.01
地形因子	105.15	0.042	0.042	<0.01	246.51	0.028	0.028	<0.01
土壤侵蚀程度	123.52	0.062	0.062	<0.01	101.59	0.035	0.035	<0.01
秸秆还田方式	121.03	0.274	0.273	<0.01	142.19	0.033	0.032	<0.01
农田利用方式	166.16	0.029	0.029	<0.01	114.21	0.020	0.020	<0.01
氮肥施用量	83.72	0.188	0.187	<0.01	418.3	0.057	0.056	<0.01

3 讨论

3.1 各影响因素对土壤氮素含量的影响

省域尺度下土壤中氮素的含量受多种因素的综合影响其空间变异性很大,由表 2 可知,江西省土壤 TN 含量受到结构性因素和随机性因素共同影响,但主要受随机性因素的调控。江西省成土母岩大部分由砾岩、砂岩、页岩和砂砾风化物等构成,不同岩组之间虽矿物风化和迁移速率不一使土壤各级颗粒含量有所差异,但土壤机械组成总体上较为相似^[14],因而成土母质对江西省土壤 TN 和 AN 空间变异的影响受到限制。土壤分类级别越低,反映的不同发育阶段各类土壤的基本性质、土壤发生上的联系和环境背景信息也就越丰富,对土壤氮素空间变异的独立解释能力越高,这与其他区域的研究结果基本一致^[7,15]。本研究中,土壤氮素除与高程和河流动能指数显著相关外,与大部分地形因子相关性并不显著,且独立解释能力低,这与高凤杰等^[8]的研究结果较为一致。从土壤侵蚀程度来看,江西省土壤氮素含量低值区主要分布在鄱阳湖流域及其子流域上游的土壤侵蚀程度较强区域;而高值区则分布在地形平坦的鄱阳湖平原和吉泰盆地等土壤侵蚀强度低的沉积区域(图 3),这与前人^[16]的研究结论一致。已有研究^[17]表明,施用作物残体,推广秸秆还田,有助于土壤有机无机复合体和微团聚体形成,促进作物根系生长,提高土壤微生物活性,增加土壤碳氮含量,从而有效促进土壤中碳氮的良性循环。本研究表明,农田利用方式对研究区土壤氮素的影响程度较低,这可能是因为江西省城市化进程加快、农业产业结构调整、化肥大量投入及种植规模化削弱了农田利用方式对土壤氮素的空间变异程度。陈婧^[18]研究发现,我国南方水稻的经济适宜施氮量为 104~192 kg/hm²,将研究区土壤氮素含量(图 3)与氮肥施用量(图 1)进行对比时发现,江西省土壤 TN 含量随着氮肥施用量的增加总体上也呈逐渐上升的趋势,而 AN 含量的变

化随氮肥施用量的变化不明显,这与前人^[19]研究结果略有差异。土壤 TN 的高值区主要分布在氮肥施用量较高的南昌市、吉安市、赣州市和宜春市等区域,而这些区域 AN 含量较低,说明虽然氮肥施用量的增加一定程度上能提高土壤全氮含量,但是氮肥利用率有待进一步提升在年均氮肥施用量<200 kg/hm² 的浮梁县、婺源县、遂川县、安福县和抚州市等区域,其土壤 TN 和 AN 含量均处于较高水平,说明这些区域若合理补充氮肥和有机肥有助于土壤氮素的蓄积和有效性。耕地生态系统土壤表层相对于林地、园地、草地等生态系统而言几乎没有凋落物覆盖。可见,大量秸秆还田和人为施用氮肥是研究区土壤氮素补给的主要来源,也表明在分析江西省土壤氮素调控措施时应重点考虑秸秆还田方式和氮肥施用量对土壤 TN 和 AN 的影响。因此,对研究区土壤氮素的调控和氮肥管理应有针对性的分片区进行和差异化管理,同时大力推广秸秆和根茬还田,合理补充有机肥和含氮化肥,广种绿肥,这是提高江西省土壤氮素含量和促进农田土壤氮素良性循环的重要措施。

3.2 其他因素对土壤氮素含量的影响

通过与土壤理化性质、气候及环境因子的相关性分析发现,SOM、CEC(阳离子交换量)、土壤 pH、土壤容重、耕层厚度、温度及降水量等对土壤中的氮素循环有着显著或极显著影响(表 11)。土壤 CEC 与土壤 TN 和 AN 含量有极显著的正相关关系,表明土壤 CEC 含量越高,土壤对阳离子的吸附能力也会增强,进而提高了土壤氮素的供肥能力^[20]。土壤 pH 与 TN、AN 含量均呈极显著的负相关关系,表明土壤过酸或过碱都将会严重影响土壤微生物活性及群落结构,从而影响土壤氮素的矿化分解和累积速率^[10,13]。土壤容重反映了土壤的松紧状况,直接影响土壤通气性和植物根系的发育。江西省土壤氮素与土壤容重有极显著的负相关性,这可能与研究区耕

地土壤植被覆盖度低,根系密度较小,土质偏松,保水保肥能力差,易漏风跑墒,土壤氮素易随水流失密切相关。本研究中土壤氮素含量均随耕层厚度(0—20 cm)的增加逐层增加,这是由于耕地表层(0—20 cm)土壤肥力最高,土壤氮素最为富集,有利于氮素的积累,而随耕层厚度的增加,土壤疏松层增加,容易造成土壤氮素的径流、淋洗及反硝化损失。在较大的地理

空间尺度上,土壤氮素含量对气候变化较为敏感,特别是温度和降雨量。本研究中,土壤 TN、AN 与年平均气温、降水量分别呈极显著负相关和正相关关系($P<0.01$),究其原因,土壤氮素主要来源于生物固氮和大气降水,江西省地处中亚热带气候区,高温环境下加速了土壤氮素的矿化分解,而降雨量多的地方则有利于氮素的固定和积累。

表 11 江西省土壤 TN 和 AN 含量影响因子相关性

土壤养分	TN	AN	SOM	CEC	土壤 pH	土壤容重	耕层厚度	年平均气温	年降水量
TN	1.000	0.369**	0.945**	0.026**	-0.066**	-0.036**	0.092**	-0.079**	0.160**
AN	0.369**	1.000	0.359**	0.025**	-0.019*	-0.024**	0.018*	-0.059**	0.127**

4 结 论

江西省耕地土壤表层(0—20 cm)中 TN 和 AN 平均值分别为 1.57 g/kg 和 164.13mg/kg,两者均属于丰富级水平。半方差函数分析显示,江西省土壤 TN 和 AN 含量均属于中等程度的空间变异性,其空间分布特征受结构性因素和随机性因素的共同影响,但受随机性因素影响更大。空间分布上,研究区土壤 TN 和 AN 具有相同的空间分布趋势,表现出北高南低的空间分布特征。回归分析表明,成土母质、土壤类型、地形因子、土壤侵蚀程度、土地利用方式、秸秆还田方式和年均施氮量对江西省耕地土壤氮素的空间变异均有极显著影响($P<0.01$)。在所有因素中,秸秆还田方式和氮肥施用量对 TN 和 AN 空间变异的独立解释能力最高,分别为 18.8%,27.4%和 3.3%,5.7%,明显高于其他各因素,是研究区土壤氮素空间变异的主控因素。除此之外,有机质、CEC、土壤 pH、土壤容重、耕层厚度、年平均气温及年降水量等对土壤氮素的分布特征也具有深刻地影响($P<0.01$)。

参考文献:

[1] 张世熔,孙波,赵其国,等.南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J].土壤学报,2007,44(5):885-892.

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

[3] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.

[4] 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,53(5):1160-1169.

[5] 张佳慧,王兴昌,王传宽.帽儿山温带森林演替初期土壤碳、氮、磷计量特征的变化[J].应用生态学报,2016,27(10):3189-3195.

[6] Ma J, Li L H, Guo L P, et al. Variation in soil nutrients in grasslands along the Kunes River in Xinjiang, China [J]. Chemistry & Ecology, 2015, 31(2): 111-122.

[7] 罗由林,李启权,王昌全,等.川中丘陵县域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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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[J].水土保持研究,2018,25(2):58-65.

[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] 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,2018,36(6):2487-2498.

[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] 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.

[16] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波.基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J].中国环境科学,2011,31(7):1197-1203.

[17] 俞巧钢,杨艳,邹平,等.有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):170-175.

[18] 陈婧.基于统计模型的中国南方稻区适宜施氮量及氮素损失估算[D].南京:南京农业大学,2011.

[19] 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.

[20] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等.秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J].中国农业科学,2014,47(2):366-373.