

# 江西省不同农田利用方式对土壤养分状况的影响

张 晗<sup>1,2</sup>, 赵小敏<sup>1,4</sup>, 欧阳真程<sup>1,2</sup>, 郭 熙<sup>1,2</sup>, 匡丽花<sup>4</sup>, 叶英聪<sup>1,3</sup>

(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:** 为了全面掌握江西省土壤养分的状况, 基于江西省 16 823 个农田耕层(0—20 cm)土壤样点数据, 运用实地采样、数理统计与地统计学等分析方法, 对研究区不同农田利用方式(水旱轮作、一季旱地、两季旱地、一季水田和两季水田)下土壤养分含量进行了研究。结果表明: 通过半方差函数研究发现, 江西省土壤养分的空间变异主要是由随机因素引起的, 耕层(0—20 cm)土壤全氮(TN)和碱解氮(AN)含量分别为 1.25~1.61 g/kg, 149.27~169.90 mg/kg, 全磷和有效磷含量为 0.49~0.54 g/kg 和 17.94~21.30 mg/kg, 全钾(TK)和速效钾含量为 11.55~12.19 g/kg 和 72.67~106.41 mg/kg, 有机质含量和土壤 pH 值为 27.09~31.52 g/kg, 5.12~5.52; 不同土地利用方式下土壤化学性质差异达到极显著水平, 其影响程度由大到小依次为土壤 pH 值>全氮>速效钾>有机质>有效磷>碱解氮>全磷>全钾; Pearson 相关性分析发现, 土壤中有有机质含量和与全氮、碱解氮、全钾、速效钾、有效磷含量以及 pH 值有显著( $p < 0.05$ )或极显著的相关性( $p < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.945, 0.359, -0.014, 0.033, 0.028, 0.061, -0.061, 说明土壤有机质含量与其他养分含量关系密切, 可以作为指示土壤肥力的敏感因子。研究结果对于江西省采取合理的土地利用方式、施肥方式以及提高土壤养分水平、土地生产力等方面具有极其重要的意义。

**关键词:** 土地利用方式; 农田; 土壤养分; 江西省

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0053-08

## Effects of Different Farmland Use Types on Soil Nutrients in Jiangxi Province

ZHANG Han<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaomin<sup>1,4</sup>, OUYANG Zhencheng<sup>1,2</sup>,  
GUO Xi<sup>1,2</sup>, KUANG Lihua<sup>4</sup>, YE Yingcong<sup>1,3</sup>

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

**Abstract:** To better understand nutrient status of the soil in the Middle-Lower Yangtze Plain area, based on 16 823 Samples in Jiangxi Province, the effects of five land use types (paddy-upland rotation, single dry land, double dry land, single cropping paddy field and double cropping paddy field) on soil nutrients were studied through field survey, mathematical statistics analysis method and Geo-statistics analysis methods. The results showed that: Soil nutrient spatial variation in Jiangxi Province is mainly caused by random factors by semivariance function analysis. The contents of soil total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), total potassium (TK), available potassium (AK), soil organic matter (SOM) and pH value were 1.25~1.61 g/kg, 149.27~169.90 mg/kg, 0.49~0.54 g/kg, 17.94~21.30 mg/kg, 11.55~12.19 g/kg, 72.67~106.41 mg/kg, 27.09~31.52 g/kg and 5.12~5.52, respectively; the soil chemical properties under difference land use types were highly significant, the effect degrees of soil nutrients decreased in the order: soil pH value>TN>AK>SOM>AP>AN>TP>TK; Pearson coeffi-

收稿日期: 2017-12-20

修回日期: 2018-01-08

资助项目: 国家自然科学基金(41361049); 江西省自然科学基金(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(0812201202)

第一作者: 张晗(1992—), 男, 江西永丰人, 硕士研究生, 研究方向为土地(壤)遥感与信息、耕地质量监测和土壤养分循环。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, 主要从事土壤遥感与信息、土地资源利用等研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

cients analysis among soil nutrient found that the SOM and pH value had the significant ( $p < 0.05$ ) or very significant correlation ( $p < 0.01$ ) with TN, AN, AP, TK and AK. The correlation analysis showed that SOM content was closely related to TN, AN, AP, TK and AK, their relative coefficients were 0.945, 0.359, -0.014, 0.033, 0.028, 0.061, -0.061, respectively, and could be a sensitive indicator factor on soil fertility. The results are of extremely important significance in planning reasonable land use types, using fertilization modes and improving the level of soil nutrients, land productivity for Jiangxi Province.

**Keywords:** land use types; farmland; soil nutrients; Jiangxi Province

物质循环和能量流动是生态系统的两大基本功能,而养分循环是生态系统最重要的功能之一<sup>[1]</sup>。农田生态系统中养分循环和平衡状况既影响着生态系统的生产力和可持续性,又影响着人类赖以生存的环境<sup>[2]</sup>。土壤养分是土壤生态系统的重要组成部分和土壤肥力的重要物质基础,是土壤物理、化学和生物性质的综合反映,直接关系到土壤或土地生产力的高低,也是植物生长所需营养元素的基本来源。土地利用方式作为人类利用土地各种活动的综合反映,土地利用的变化可引起自然要素、生态系统结构和地球化学循环过程的变化,从而导致土壤管理措施、水分、土壤侵蚀等的改变,进而对土壤环境的变迁和土壤质量的高低产生重要影响。农田是受人为活动影响最强、对人类生存发展最为重要的土地资源类型之一,因此,不同农田利用方式对土壤理化性状的影响研究尤为重要。迄今为止,有关不同土地利用方式对土壤养分或土壤肥力的影响研究已成为全球变化研究的热点之一,得到了诸多认识。国内外专家学者在南方红壤区<sup>[3]</sup>、黄土高原区<sup>[4]</sup>、川中丘陵区<sup>[5]</sup>、紫色丘陵区<sup>[6]</sup>、荒漠绿洲区<sup>[7]</sup>、青藏高原区<sup>[8]</sup>、喀斯特山区<sup>[9]</sup>、松嫩平原区<sup>[10]</sup>等生态环境脆弱地区进行了大量研究,以上结果表明,不同土地利用方式和管理措施可以改变土壤的理化性质以及土壤环境状况,对土壤养分及其循环有着极为重要的影响。目前,国内外有关不同土地利用方式下土壤养分状况的研究较多集中在湿地<sup>[11]</sup>、林地<sup>[12]</sup>、草地<sup>[13]</sup>、海洋<sup>[14]</sup>等生态系统,但有关农田生态系统下不同土地利用方式对土壤养分变化状况的资料相对缺乏,且研究尺度多涉及小流域、乡镇、县域和市域等中、微观尺度<sup>[15]</sup>,因土壤取样方法和精度限制,从省域尺度系统的阐述不同农田利用方式对土壤养分状况的影响研究鲜有报道。长江中下游地区是我国重要的粮、油、棉主产区,江西省作为国家农业大省,也是长江中下游地区人口最为密集的典型农业区,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,也是全国重要的商品粮基地之一。但是,近些年来,随着人地矛盾突出引发的土地利用方式和施肥方式的

不合理,大量施用氮磷钾肥等化肥,导致江西省农田土壤化肥利用率不高,土壤板结、养分失衡、水土流失、土壤酸化和面源污染等问题日益突出。因此,本文从农田生态系统入手,以农业部“测土配方施肥项目”中江西省 2012 年采集的农田耕层土壤样品为基础,分析不同农田利用方式对耕地土壤养分状况的影响及其空间分异特征,以期在省域尺度下的生态系统养分循环、土壤养分管理以及农业面源污染监测等方面提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江西省简称“赣”,位于中国东南部,地处长江中下游交接处的南岸,地理位置位于北纬  $24^{\circ}29'14''$ — $30^{\circ}04'41''$ ,东经  $113^{\circ}34'36''$ — $118^{\circ}28'58''$ 。江西省下辖 100 个县(市、区),全省总人口为 4 542.16 万,总面积为  $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,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 万  $\text{hm}^2$ 。全省平均气温为  $16.4 \sim 19.4^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为  $1\,751 \sim 2\,523 \text{ mm}$ ,日照时数为  $1\,395 \sim 1\,679 \text{ h}$ ,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。该区域土壤类型主要为红壤、水稻土、黄壤和黄棕壤,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。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、一季旱地、两季旱地、一季水田和两季水田 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、茶叶、黄麻、苧麻和柑橘等经济作物。

### 1.2 土壤样品采集

本文主要研究江西省不同利用方式对土壤养分积累的影响,采样地主要在江西省各县区,采样方法参照《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T1634—2008),采样时间为 2012 年 11 月—2013 年 12 月,主要测定土壤氮素、磷素、钾素、有机质和 pH

值等 8 个养分指标的含量。综合考虑研究区各地区土壤的成土母质、地形地貌、土壤质地、土壤类型等自然条件,应用“S”形采样法随机设置 8 个点,共采集耕层土壤样点 16 823 个(图 1),其中水旱轮作地 1 377 个,一季旱地 501 个,两季旱地 483 个,一季水田 3 408 个,两季水田样点 11 054 个。土壤样品经室内自然风干、剔除杂物,研磨和过 100 目 0.25 mm 尼龙筛等前期处理后,制成待测土样,充分混匀后用四分法每层留取 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、成土母质、土地利用方式、土壤类型、种植制度、施肥状况和秸秆还田量等地表环境信息,并将带有坐标的样点数据在 ArcGIS 10.3 平台转换为具有空间坐标的点。全氮采用凯氏定氮法、全磷采用酸溶—钼锑抗比色法、全钾采用酸溶—原子吸收法、碱解氮采用碱解扩散法、有效磷采用 Bray 法、速效钾采用乙酸铵提取法、有机质采用重铬酸钾容量法、pH 值采用玻璃电极法(水土比为 2.5:1)。

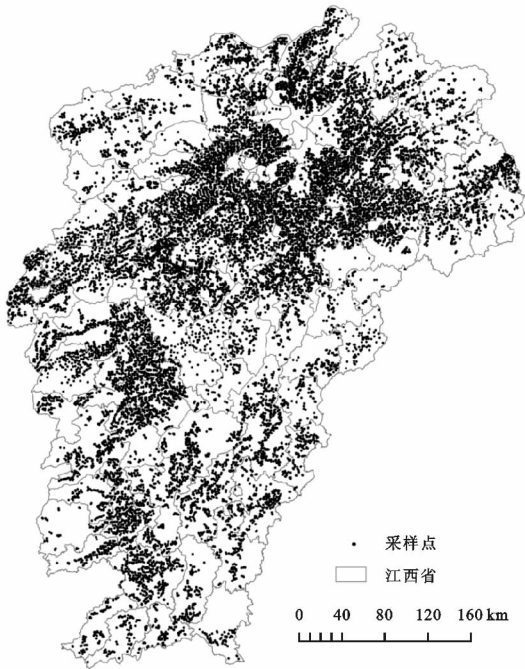


图 1 江西省土壤样点分布

1.3 数据处理与统计分析

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行整理和统计分析。在数据分析之前采用域值法(即样本平均值加减 3 倍标准差)对离群值初步识别,然后用正常的最大和最小值代替离群值<sup>[16]</sup>。通过应用 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。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)中最小显著差数法(LSD)分析不同土地利用方式对土壤养分的影响,若数据方差不齐时,则进行多重比较检验。同时,利用 Pearson 相关分析方法对土壤养分间的指标进行相关性分析。采用 GS+ 7.0 软件对研

究区土壤养分的半方差函数和结构参数模型进行最优拟合,在 ArcGIS 10.3 平台中将样点数据进行转换,并建立空间属性数据库,坐标系采用 1980 西安平面坐标系和 1985 国家高程基准。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤养分总体特征

通过采用 SPSS 22.0 对研究区各养分指标进行描述性统计时发现:2012 年土壤全氮、碱解氮、全钾和有机质均服从正态分布,而全磷、有效磷、速效钾和 pH 值经自然对数转换后服从正态分布。从变异强度看,不同农田利用方式下土壤全氮、碱解氮、速效磷和速效钾等 8 种土壤养分的变异系数为 10.10%~73.08%,均处于中等变异程度,其变异强度大小顺序依次为有效磷>速效钾>碱解氮>全钾>全磷>全氮>有机质>土壤 pH 值,说明受到人类活动(田间管理措施和施肥水平)的干扰各指标的变异均比较大。由表 1 可知,不同农田利用方式中,两季水田土壤全氮、有机质和有效磷含量最高,pH 值最低;一季水田中的碱解氮含量最高,有效磷最低;两季旱地中全磷含量最高,全氮和有机质含量最低;一季旱地的速效钾含量最高,全磷含量最低;水旱轮作中有效磷含量相对较高,全钾和速效钾含量最低。耕地土壤中两季水田的碱解氮和有效磷的标准差最高,分别为 58.78,14.41,全磷最低,为 0.17;一季水田全磷的标准差最高,为 0.19,全氮最低,为 0.44;两季旱地土壤 pH 值的标准差最高,为 0.81,碱解氮、有效磷和有机质最低,分别为 47.77,12.09,8.45;一季旱地全氮、全钾、速效钾和有机质的标准差最高,分别为 0.53,5.03,49.65,9.81。

采用 GS+ 7.0 软件进行各养分指标半方差函数模型拟合,考虑研究区各养分指标的异质性和趋势性,经过反复模拟最终选取最优拟合函数,获得其半方差函数及结构参数(表 2)。由表 2 可知,全磷最佳拟合模型为高斯模型(Gaussian),有机质最佳拟合模型为球状模型(Spherical),其余 5 种养分的最佳拟合模型为指数模型(Exponential),研究区 8 种土壤养分的决定系数  $R^2$  均在 0.81 以上,说明拟合模型能很好地反映土壤各指标的空间异质性。

研究区各土壤指标的块金值/基台值依次为速效钾>全钾>有效磷>碱解氮>有机质>全磷>全氮>pH 值,除土壤全氮和 pH 值的块金基台比小于 75%外,其他养分均大于 80%,反映出江西省土壤养分的空间自相关性相对较弱,受随机因素(如土地利用方式、施肥、灌排、耕作措施、种植制度及秸秆还田等人活动)影响较为明显。由表 2 可知,研究区土

壤养分的变程差异较大,全氮的变程最大,pH 值次之,速效钾最小,土壤养分的空间依赖性排序依次为:全氮>pH 值>有效磷>碱解氮>有机质>全钾>速效钾>全磷。

表 1 江西省不同农田利用方式下土壤养分的描述性统计特征

农田利用方式	统计特征值	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
水旱轮作 (n=1377)	平均数	1.52	164.40	0.49	20.86	10.76	72.67	30.10	5.28
	标准差	0.46	53.87	0.17	13.31	4.29	35.38	8.86	0.55
	最小值	0.45	3.00	0.09	0.01	2.40	21.00	10.00	4.00
	最大值	2.77	342.06	1.05	64.02	22.20	225.55	49.70	6.95
	变异系数/%	30.00	32.77	34.08	63.78	39.90	48.68	29.43	10.36
	偏斜度	0.14	0.20	0.85	1.01	0.31	1.53	0.03	0.89
	峰度	-0.27	1.16	0.30	0.49	-0.83	3.10	-0.79	0.93
一季旱地 (n=501)	平均数	1.48	154.28	0.49	19.44	11.78	106.41	29.77	5.30
	标准差	0.53	58.13	0.19	13.18	5.03	49.65	9.81	0.81
	最小值	0.29	20.40	0.04	1.10	1.90	22.00	10.00	3.60
	最大值	2.94	342.06	1.05	64.02	22.60	225.55	57.10	6.95
	变异系数%	35.95	37.68	38.37	67.79	42.67	46.66	32.97	15.23
	偏斜度	-0.18	0.56	0.66	1.21	0.03	0.72	0.09	0.56
	峰度	-0.55	0.64	0.13	1.04	-1.04	-0.28	-0.80	-0.51
两季旱地 (n=483)	平均数	1.25	149.27	0.54	19.67	12.19	98.68	27.09	5.52
	标准差	0.52	47.77	0.18	12.09	4.46	47.74	8.45	0.81
	最小值	0.32	57.00	0.20	3.10	2.50	24.00	10.90	3.50
	最大值	2.53	280.00	1.05	64.02	23.40	225.55	49.10	6.95
	变异系数%	41.20	32.00	33.52	61.45	36.56	48.38	31.20	14.60
	偏斜度	0.23	0.42	0.44	1.78	0.05	0.95	0.62	0.43
	峰度	-0.62	-0.04	-0.40	3.71	-0.71	0.07	-0.27	-0.93
一季水田 (n=3408)	平均数	1.56	169.90	0.51	17.94	11.87	87.74	30.36	5.22
	标准差	0.44	51.90	0.19	13.11	4.88	43.17	8.85	0.55
	最小值	0.39	0.60	0.02	0.02	1.60	21.00	10.00	3.70
	最大值	2.94	342.06	1.05	64.02	23.00	225.55	56.80	6.95
	变异系数%	27.88	30.54	36.67	73.08	41.15	49.21	29.16	10.57
	偏斜度	-0.03	0.54	0.58	1.52	0.02	1.09	0.02	0.99
	峰度	-0.04	0.94	-0.31	2.23	-1.11	1.12	-0.56	1.35
两季水田 (n=11054)	平均数	1.61	163.41	0.52	21.30	11.55	88.10	31.52	5.12
	标准差	0.45	58.78	0.17	14.41	4.61	45.65	9.00	0.52
	最小值	0.29	0.40	0.09	0.01	2.40	21.00	10.00	3.41
	最大值	2.94	342.06	1.05	64.02	23.00	225.55	58.04	6.95
	变异系数%	27.83	35.97	33.46	67.63	39.91	51.82	28.55	10.10
	偏斜度	-0.13	0.33	0.70	1.20	0.15	1.07	-0.08	1.08
	峰度	-0.15	0.69	-0.29	0.96	-1.04	0.79	-0.62	2.20

2.2 农田利用方式对土壤氮素的影响

由方差分析和均值比较结果可以看出,土地利用方式对土壤的全氮和碱解氮含量均有极显著的影响( $p<0.01$ ,表 3)。按照江西省第二次土壤普查土壤养分的分级标准<sup>[17]</sup>,研究区土壤全氮含量分布在 1.25~1.61 g/kg 范围,属丰富级或中等水平,碱解氮含量为 149.27~169.90 mg/kg,处于丰富级水平。由表 3 可知,5 种不同农田利用方式下土壤全氮含量表现为:两季水田(1.61±

0.45 g/kg)>一季水田(1.56±0.44 g/kg)>水旱轮作(1.52±0.46 g/kg)>一季旱地(1.48±0.53 g/kg)>两季旱地(1.25±0.52 g/kg)。这是由于大量氮肥和有机肥施入水田,水田中有机物质残留的数量较多而使其土壤全氮含量明显增加。从土壤碱解氮含量来看,5 种农田利用方式下碱解氮含量变化特征为:一季水田(169.90±51.90 g/kg)>水旱轮作(164.40±53.87 g/kg)>两季水田(163.41±58.78 g/kg)>一季旱地

(154. 28±58. 13 g/kg) > 两季旱地 (149. 27±47. 77 g/kg)。一季水田每年只种植一季中稻, 水稻收获后处于冬闲状态, 被作物所吸收利用的碱解氮要少于其他 4 种耕作方式。水旱轮作地干湿交替频繁, 土壤微生物活性增强, 促进了土壤养分的有效性和土壤有机质

的更新与积累, 进而有利于碱解氮的分解, 使得一季水田和水旱轮作土壤中碱解氮含量明显高于两季水田、一季旱地和两季旱地。在水稻连作的情况下, 由于长期淹水, 耕作层变得紧实, 通气不良, 土壤微生物活性差, 有机质更新慢, 碱解氮的有效性有所降低。

表 2 研究区土壤养分半变异函数及其参数主要特征

养分指标	拟合模型	块金值	基台值	(块金值/基台值)/%	变程/km	决定系数 $R^2$	残差 RSS	分布类型
全氮	Exponential	0. 108	0. 215	50. 23	127. 80	0. 960	$3. 64 \times 10^{-4}$	N
碱解氮	Exponential	0. 024	0. 028	86. 20	48. 17	0. 828	$2. 48 \times 10^{-5}$	N
全磷	Gaussian	0. 026	0. 032	81. 25	18. 19	0. 891	$2. 16 \times 10^{-6}$	lgN
有效磷	Exponential	0. 468	0. 538	86. 98	60. 79	0. 834	$1. 72 \times 10^{-2}$	lgN
全钾	Exponential	0. 183	0. 210	87. 14	42. 30	0. 946	$2. 51 \times 10^{-4}$	N
速效钾	Exponential	0. 225	0. 255	88. 24	31. 20	0. 878	$4. 02 \times 10^{-6}$	lgN
有机质	Spherical	0. 029	0. 035	82. 86	45. 57	0. 816	$2. 39 \times 10^{-5}$	N
pH 值	Exponential	0. 209	0. 418	50. 10	78. 87	0. 939	$1. 61 \times 10^{-3}$	lgN

注: N 为正态分布, LgN 为对数正态分布。

2.3 农田利用方式对土壤磷素的影响

江西省不同农田利用方式下耕层土壤全磷含量范围为 0. 49~0. 54 g/kg, 属中等水平, 有效磷含量为 17. 94~21. 30 mg/kg, 处于极丰富或丰富级水平。由表 2 可以看出, 在 5 种不同利用方式下土壤中全磷含量依次为: 两季旱地 (0. 54±0. 18 g/kg) > 两季水田 (0. 52±0. 17 g/kg) > 一季水田 (0. 51±0. 19 g/kg) > 水旱轮作 (0. 49±0. 17 g/kg) ≈ 一季旱地 (0. 49±0. 19 g/kg)。全磷含量在两季旱地、一季旱地和水旱轮作有明显差异, 但与一季水田和两季水田中并无显著差异 ( $p>0. 05$ )。一方面, 由于农民对两季旱地多种植经济作物和瓜果蔬菜等, 农民习惯施用草木灰和火土灰, 且磷肥投入量较大, 使得土壤全磷含量较高; 另一方面, 两季旱地土壤对磷的吸附能力较强, 水旱轮作地和一季旱地的流失风险高于两季旱地, 同时, 土壤淹水能够增加土壤有效磷含量, 提高土壤磷素有效性和溶解性, 水旱轮作与一季旱地均值相近。5 种农田利用方式下耕层土壤有效磷含量依次为: 两季水田 (21. 30±14. 41 mg/kg) > 水旱轮作 (20. 86±13. 31 mg/kg) > 两季旱地 (19. 67±12. 09 mg/kg) > 一季旱地 (19. 44±13. 18 mg/kg) > 一季水田 (17. 94±13. 11 mg/kg)。有效磷含量在一季旱地和两季旱地无显著差异, 这可能由于旱地中对经济作物施用大量磷肥, 而土壤中磷素的迁移性较差, 旱地作物无法完全吸收。从速效磷含量状况来看, 土壤在连续淹水和长期干湿交替条件下, 稻田氧化还原电位降低, 磷酸铁被还原为磷酸亚铁, 晶形磷酸铁转化为无定型磷酸铁, 含水氧化铁与有机酸螯合, 减少了磷的固结, 使土壤磷素活化, 增加了磷素的有效性, 但不同耕作方式

下各作物间施肥量的差异, 使得总磷和有效磷含量存在较大差异。

2.4 不同农田利用方式对土壤钾素的影响

不同土地利用类型全钾和有效钾含量比较见表 3。从土壤全钾和有效钾含量来看, 江西省耕地土壤全磷含量范围为 11. 55~12. 19 g/kg, 属中量水平, 有效钾含量为 72. 67~106. 41 mg/kg, 处于丰富或中量级水平。方差分析显示, 不同农田利用方式下土壤钾素含量差异显著, 说明土壤全钾和有效钾含量受土地利用方式影响明显。研究区 5 种农田利用方式下土壤全钾含量表现出两季旱地 (12. 19±4. 46 g/kg) > 一季水田 (11. 87±4. 88 g/kg) > 一季旱地 (11. 78±5. 03 g/kg) > 两季水田 (11. 55±4. 61 g/kg) > 水旱轮作 (10. 76±4. 29 g/kg)。一季水田和两季旱地的全钾含量并无显著差异, 反映出江西省大多数农户在从事农业生产时对一季水田和两季旱地中钾肥的投入量不足, 管理水平有待进一步提高。研究区 5 种农田利用方式下土壤速效钾含量表现出一季旱地 (106. 41±49. 65 g/kg) > 两季旱地 (98. 68±47. 74 g/kg) > 两季水田 (88. 10±45. 65 g/kg) > 一季水田 (87. 74±43. 17 g/kg) > 水旱轮作 (72. 67±35. 38 g/kg)。一般来说, 耕作熟化程度越高的农田, 其土壤养分含量也较为丰富, 但随着耕作年限的增加和复种指数的提高, 偏施氮肥和氮磷肥促进了农作物产量的上升的同时也加剧了对土壤钾素的消耗, 导致江西省水田土壤钾素含量普遍偏低。

2.5 不同农田利用方式对土壤有机质含量及 pH 值的影响

从表 3 可以看出, 江西省土壤有机质含量为 27. 09~

31.52 g/kg,受到土壤中肥料和植物残体的影响,不同利用方式下土壤有机质含量和全氮含量较为一致,处于丰富级水平,均表现出两季水田( $31.52 \pm 9.00$  g/kg) > 一季水田( $30.36 \pm 8.85$  g/kg) > 水旱轮作( $30.10 \pm 8.86$  g/kg) > 一季旱地( $29.77 \pm 9.81$  g/kg) > 两季旱地( $27.09 \pm 8.45$  g/kg)。有机质在水旱轮作、一季旱地和一季水田耕作方式中无显著差异,水田有机质含量整体上要高于水旱轮作地和旱地。旱地的有机质含量最低的原因可能是频繁耕作(农业翻耕)和过量施肥破坏了土壤结构,土壤侵蚀严重,加速了土壤有机质的分解。

土壤酸碱度是土壤的基本化学性质之一,是反映

表 3 不同农田利用方式下耕层土壤养分含量平均值及方差分析

农田利用 方式	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	pH 值
水旱轮作(n=1377)	1.52±0.46c	164.40±53.87b	0.49±0.17d	20.86±13.31ab	10.76±4.29c	72.67±35.38d	30.10±8.86b	5.28±0.55b
一季旱地(n=501)	1.48±0.53d	154.28±58.13c	0.49±0.19c	19.44±13.18b	11.78±5.03ab	106.41±49.65a	29.77±9.81b	5.30±0.81b
两季旱地(n=483)	1.25±0.52e	149.27±47.77d	0.54±0.18a	19.67±12.09b	12.19±4.46a	98.68±47.74b	27.09±8.45c	5.52±0.81a
一季水田(n=3408)	1.56±0.44b	169.90±51.90a	0.51±0.19b	17.94±13.11c	11.87±4.88a	87.74±43.17c	30.36±8.85b	5.22±0.55c
两季水田(n=11054)	1.61±0.45a	163.41±58.78b	0.52±0.17b	21.30±14.41a	11.55±4.61b	88.10±45.65c	31.52±9.00a	5.12±0.52d
F	89.38	21.32	18.75	39.03	16.41	68.69	42.20	105.55
p	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**	0.0000**

注:n 代表样本数量,各土壤养分含量为平均值±标准差,每列平均值含有相同字母之间无显著差异( $p>0.05$ ),\*\* 表示极显著水平,\* 表示显著水平。

### 3 讨论

土地利用方式是自然和人类各种活动相互作用的综合过程,是土壤质量与土壤环境变化中最普遍、最直接、最深刻的影响因素<sup>[18]</sup>,也是影响陆地生态系统土壤养分有效性和流动性的主控因素。土地利用方式的改变,一方面导致进入土壤中肥料和植物残体的数量及性质发生改变,另一方面通过改变植被类型、排灌条件、轮作制度以及耕作方式等人类活动强度,由此影响和改变了土壤养分含量。

土壤有机质是土壤氮素的主要来源,有机质矿化会释放大量氮素,有机质含量升高促使土壤氮素含量也有所提高。由表 3 可知,旱地土壤有机质和氮素释放率普遍比水田高,5 种农田利用方式下有机质含量与氮素的变化趋势较为相似,表现出两季水田 > 一季水田 > 水旱轮作 > 一季旱地 > 两季旱地,说明该地区土地利用方式对有机质、全氮和碱解氮含量有显著的影响( $p<0.01$ )。这与胡玉福<sup>[5]</sup>、唐国勇<sup>[19]</sup>、刘占仁<sup>[20]</sup>等的研究结果较为一致,水田中土壤有机质、全氮和碱解氮含量整体上较高,水旱轮作地其次,旱地最低。由于管理模式及耕作方式的差异,水田在淹育条件下,土壤中的好氧微生物停止活动,土壤有机质

土壤养分状况的重要指标,不仅影响土壤微生物活性,对土壤养分的形成、转化、迁移和释放等均有显著的影响。表 3 中可以看出,江西省耕地土壤 pH 值为 5.12~5.52,属酸性水平。方差分析表明,土地利用方式对 pH 值变化呈极显著水平,其变化依次为:两季旱地( $5.52 \pm 0.81$ ) > 一季旱地( $5.30 \pm 0.81$ ) > 水旱轮作( $5.28 \pm 0.55$ ) > 一季水田( $5.22 \pm 0.55$ ) > 两季水田( $5.12 \pm 0.52$ )。一季旱地和水旱轮作中土壤 pH 值无显著变化。受到经济效益的驱使,农户为提高作物产量,大量施用农药与化肥,特别是长期耕作下生理酸性肥料和半腐熟有机肥料的施用,导致了水田土壤呈现逐渐酸化的趋势,pH 值有所降低。

分解比较缓慢,土壤氧化酶活性不断提高,旱作土壤在热化过程中有机质分解较快,尤其是旱地的种植制度使土壤孔隙度和氧气含量增加,好氧型微生物活性增强,加速了有机质的分解。一季水田和两季水田长期处于淹水状态,碳、氮的积累对矿化有显著影响,使其耕层土壤的全氮含量显著高于水旱轮作、一季旱地和两季旱地。5 种不同土地利用方式下土壤 pH 值和有机质以及氮素含量表现出的趋势截然相反,旱地的 pH 值较高,水旱轮作地其次,水田最低。不同土地利用方式下土壤 pH 值差异显著( $p<0.01$ ),这说明了水稻的种植一定程度上能够降低土壤的 pH 值。江西省耕作模式以种植水稻为主,土壤微环境较潮湿,土壤盐基离子容易被淋失,导致 H<sup>+</sup> 积累在土壤胶体上,土壤 pH 值较低<sup>[21]</sup>。

与江西省第二次土壤普查相比,虽然江西省土壤全氮和有机质含量处于较丰富水平,但土壤磷、钾含量急剧下降,土壤 pH 值酸化较为严重,土壤养分整体上仍处于失衡状态。研究区土壤主要以泥质岩类风化物、河湖沉积物和第四纪红色黏土等成土母质发育而成,土壤类型以水稻土和红壤为主,土壤养分的物质来源相对单一,因而,土地利用方式(耕作制度)的不同是造成土壤养分差异的主要原因。1978 年以

前,江西省实施了“单季变双季、中稻变早稻、旱地变水田”的稻田耕作制度改革,利用方式以水田为主,耕作制度为单季稻或双季稻;1978—1989 年江西省调减双季稻,将长期复种连作的肥—稻—稻改为绿肥—双季稻的套作模式;1990 年以来,江西省为优化种植结构,将传统的水稻单一种植的种植结构,发展为多种作物复合种植;近年来,农户为追求更高的经济利益,加之受到秋旱的影响,将部分水田改为旱地(如油菜、花生、棉花及瓜果蔬菜等),耕作制度也由原来的稻—稻—肥和稻—肥变为稻—稻—闲和稻—闲。因此,由土地利用方式改变所引起的耕作制度的差异以及土壤结构、水分、施肥等条件的改变可能是导致研究区土壤养分含量差异的原因之一,这与黄国勤等<sup>[22]</sup>的研究结论相一致。据国家统计局调查显示,1985—2012 年以来,江西省开展了测土配方施肥,农用氮肥施用折纯量由 1985 年的 38.90 万 t 提高至 2012 年的 42.88 万 t,磷肥施用折纯量由 1985 年的 14.40 万 t 提升到 2012 年的 22.67 万 t,钾肥施用折纯量由 1985 年的 8.80 万 t 提升到 2012 年的 21.14 万 t,由此可知,江西省耕作土壤偏施氮肥,施磷、钾肥不足,这是研究区土壤养分差异的另一重要原因<sup>[23]</sup>。两季水田和一季水田作为江西省最主要的土地利用方式,自第二次土壤普查以来,江西省大部分地区实行秸秆还田措施,大量施用化肥,加上配施有机肥和绿肥,不仅改善了土壤的理化性状,释放出较高的氮磷钾等养分,还有效地补充了水田有机质的含量,提高土壤的生物活性。土壤在高温多雨的气候条件下,受到盐基离子、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 强烈淋洗以及氮的硝化的

影响,加剧了土壤的自然酸化。一方面,近年来,江西省经济快速发展,工业化水平不断提高,化石燃料大量消耗,工业污染问题严重,大气中 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 等致酸物质的浓度较高,酸雨分布范围逐年扩大,大气酸沉降明显,加速了耕层土壤的酸化。另一方面,化学肥料的大量施用,特别是氮肥、硫肥及含氯化肥的过量使用,有机肥的施用量相对较少,也是导致全省土壤酸化的重要原因。

土壤养分间的 Pearson 相关性分析时发现(表 4),研究区不同农田利用方式下 8 种土壤养分之间显著相关。土壤有机质含量除与全磷相关性较差外,与其余 7 种养分均显著相关( $p<0.01$ ),其中又与全氮的相关性最高,这与王雪梅等<sup>[7]</sup>的研究结果一致,表明土壤有机质是土壤养分的重要来源,是表征土壤质量与土壤肥力的重要指标,能够提高土壤养分的有效性。土壤 pH 值除与磷素相关性不显著外,与其他 6 种土壤养分均显著( $p<0.05$ )或极显著( $p<0.01$ )相关,表明土壤 pH 值与其他养分含量密切相关,能显著影响其土壤氮素、钾素和有机质等养分含量,这与张世熔<sup>[24]</sup>、秦川<sup>[25]</sup>等研究结果一致,表明土壤有机质含量和 pH 值与养分含量关系密切,可以作为指示土壤肥力的敏感因子。土壤 pH 值与全氮呈极显著负相关,可见,土壤 pH 值降低与大量施用氮肥有关,因此,该区应进一步增施有机肥和配施绿肥,实施秸秆还田,以增加土壤的有机质含量,这也是提升土壤养分的核心和关键,但应根据作物的需肥规律和土壤的供养规律,避免大量施肥对土壤酸化的影响,从而进一步提高土壤养分的循环和有效性。

表 4 土壤养分指标的 Pearson 相关系数

指标	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾	有机质	土壤 pH
全氮	1.000							
碱解氮	0.369**	1.000						
全磷	-0.019*	0.031**	1.000					
有效磷	0.030**	0.022**	0.001	1.000				
全钾	0.035**	0.020*	0.179**	-0.001	1.000			
速效钾	0.061**	0.041**	0.030**	0.178**	0.059**	1.000		
有机质	0.945**	0.359**	-0.014	0.033**	0.028**	0.061**	1.000	
pH 值	-0.068**	-0.016*	-0.003	-0.006	0.038**	0.057**	-0.061**	1.000

注:\*\*表示在  $p<0.01$  水平上显著相关,\*表示在  $p<0.05$  水平上显著相关(双侧检验)。

4 结论

江西省耕地土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾和土壤 pH 值分别为 1.25~1.61 g/kg, 149.27~169.90 mg/kg,0.49~0.54 g/kg,17.94~21.30 mg/kg,11.55~12.19 g/kg,72.67~106.41

mg/kg,27.09~31.52 g/kg 和 5.12~5.52,其养分含量属于中等偏上水平,均表现出中等程度的空间变异性,水田、水旱轮作地比旱地具有更高的土壤肥力。经半方差函数显示,江西省农田土壤除全氮和 pH 值受到结构性因素和随机性因素的共同影响外,其余养分均受到随机性因素的影响。研究结果表明,不同农田

利用方式对江西省土壤养分含量具有极显著的影响,土壤有机质和全氮含量从高到低依次为两季水田>一季水田>水旱轮作>一季旱地>两季旱地,碱解氮与全氮含量相类似,全磷含量依次为两季旱地>两季水田>一季水田>水旱轮作≈一季旱地,有效磷含量依次为两季水田>水旱轮作>两季旱地>一季旱地>一季水田,全钾含量表现出两季旱地>一季水田>一季旱地>两季水田>水旱轮作,速效钾含量表现出一季旱地>两季旱地>两季水田>一季水田>水旱轮作,土壤 pH 值大小依次为两季旱地>一季旱地>水旱轮作>一季水田>两季水田。农田利用方式对土壤养分的影响程度由大到小依次为土壤 pH 值>全氮>速效钾>有机质>有效磷>碱解氮>全磷>全钾,土壤 pH 值受农田利用方式的影响最大,全钾含量最低。研究区养分规律很大程度上受到农田利用方式、耕作制度、秸秆还田措施及氮肥施用量等因素的影响。Pearson 相关分析发现,土壤有机质与有效磷、全钾和速效钾有极显著的相关性( $p<0.01$ );土壤 pH 值与全钾和速效钾有极显著的正相关性( $p<0.01$ ),与全氮、碱解氮有显著的负相关性( $p<0.05$ ),与全磷、有效磷的相关性相对较弱( $p>0.05$ )。表明土壤有机质能敏感表征土地利用方式的改变,是衡量土壤质量的重要指标。研究表明,增施有机肥、适度施用化肥及发展以一季水田、两季水田和水旱轮作为主的耕作模式是维持江西省农田土壤养分平衡的重要举措。

#### 参考文献:

- [1] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数[J]. 土壤通报,1996,27(4):145-150.
- [2] 石孝均.水旱轮作体系中的养分循环特征[D].北京:中国农业大学,2003.
- [3] 王飞,王卫,陈安磊,等.红壤坡地不同土地利用方式下表层土壤活性碳、氮特征[J]. 水土保持学报,2014,28(2):215-220.
- [4] 张宏,刘建军.黄土沟壑区不同土地利用方式下土壤养分及其与土壤颗粒组成关系[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(11):80-85.
- [5] 胡玉福,邓良基,张世熔,等.川中丘陵区不同利用方式的土壤养分特征研究[J]. 水土保持学报,2006,20(6):75-78.
- [6] 张国平,郭澎涛,王正银,等.紫色土丘陵区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报,2013,29(6):113-120.
- [7] 王雪梅,柴仲平,杨雪峰.荒漠绿洲区不同土地利用方式下土壤养分差异分析[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(1):91-96.
- [8] 黄先飞,周运超,张珍明.喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. 水土保持学报,2017,31(5):215-221.
- [9] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands[J]. Biogeosciences Discussions, 2010,25(5):549-560.
- [10] 王宗明,张柏,宋开山,等.不同利用方式对松嫩平原典型县耕地土壤养分状况的影响[J]. 生态环境,2008,17(2):704-707.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 汤爱坤,刘汝海,许廖奇,等.昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布[J]. 水土保持通报,2011,31(3):88-93.
- [15] 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.
- [16] 欧阳玲,王宗明,贾明明,等.基于遥感的吉林省中西部耕地数量和质量空间格局变化分析[J]. 农业工程学报,2016,32(13):234-242.
- [17] 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.
- [18] 李秀娟,赵庚星,李涛,等.山东青州市耕地利用方式对土壤养分状况影响研究[J]. 地域研究与开发,2005,24(3):107-111.
- [19] 唐国勇,彭佩钦,苏以荣,等.洞庭湖区不同利用方式下农田土壤有机碳含量特征[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(2):219-222.
- [20] 刘占仁,王立志.不同土地利用方式对土壤养分及肥力的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(6):72-76.
- [21] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [22] 黄国勤,张桃林,赵其国.中国南方耕作制度[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [23] 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.
- [24] 张世熔,黄元仿,李保国,等.黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征[J]. 生态学报,2002,22(12):2041-2047.
- [25] 秦川,何丙辉,蒋先军.三峡库区不同土地利用方式下土壤养分含量特征研究[J]. 草业学报,2016,25(9):10-19.