

# 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

张晗<sup>1,2</sup>, 赵小敏<sup>1,3</sup>, 朱美青<sup>1,2</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>1,2</sup>, 黄聪<sup>1,2</sup>, 汪晓燕<sup>1,2</sup>, 李伟峰<sup>1,2</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. 南京农业大学 公共管理学院, 南京 210095)

**摘要:**为了掌握南方丘陵山区耕作土壤养分的时空演变规律,以江西省为例,利用1985年江西省第二次土壤普查数据和2012年测土配方施肥项目采集的大量耕层(0—25 cm)土壤样点数据,借助SPSS经典统计方法、ArcGIS地统计学和半方差分析技术,运用全局空间自相关(Global Moran's *I*)和普通克里金(Ordinary Kriging)插值分析相结合的方法,对比分析了近30年耕地土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有机质(SOM)和酸碱度(pH值)5种养分要素的时空变异特征。结果表明:1985—2012年,江西省耕地土壤养分存在较大的时空差异,2012年土壤养分Moran's *I*指数和块金系数较1985年表现为具有较强的空间正相关集聚特性。1985年除土壤pH值符合球状模型外,其余4种养分要素属于指数模型,2012年土壤TN、TP和SOM符合球状模型,TK和pH值符合指数模型,两个时期交叉验证结果均达到显著水平。30年来,研究区耕作土壤养分有升有降,以升为主。土壤TN和SOM处于丰富级水平,其含量显著上升,平均级别分别提升了0.41、0.44个单位;TP处于中等水平,全磷水平上升较为显著,平均级别提升了0.39个单位;TK处于低量级水平,全钾含量急剧下降,平均级别降低了0.89个单位;土壤pH值处于酸性水平,pH值下降较为明显,平均级别降低了0.66个单位。近年来,由于受到人为耕作方式、施肥结构、秸秆还田、工业污染及酸性沉降物等的影响,江西省耕地土壤TN、SOM和TP含量有所提升,TK含量急剧降低,土壤严重酸化。研究结果为江西省土壤养分分区管理、精准高效施肥、土壤养分可持续利用和提升耕地质量提供基础理论和科学依据。

**关键词:**耕地; 土壤养分; 空间自相关; 克里金插值; 时空变异; 江西省

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0058-08

## Characteristics of Spatiotemporal Variability of Cultivated Soil Nutrients in the Southern Hilly Area of China in the Past 30 Years —A Case Study of Jiangxi Province

ZHANG Han<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaomin<sup>1,3</sup>, ZHU Meiqing<sup>1,2</sup>, OUYANG Zhencheng<sup>1,2</sup>,  
GUO Xi<sup>1,2</sup>, KUANG Lihua<sup>4</sup>, YE Yingcong<sup>1,2</sup>, HUANG Cong<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyan<sup>1,2</sup>, LI Weifeng<sup>1,2</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 Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** This study aimed to understand the spatiotemporal evolution patterns of cultivated soil nutrients of Jiangxi Province from 1985 to 2012. The data were obtained from the second national soil survey (SNSS) in 1985 and the soil test and fertilizer recommendation in 2012 in Jiangxi Province. Classical statistics of SPSS, geo-statistics and semi-variance function of ArcGIS were used to process data, the global Moran's *I* and ordinary Kriging method were applied to analyze the characteristics of spatiotemporal variability of TN, TP,

收稿日期: 2017-05-18

修回日期: 2017-06-22

资助项目: 国家自然科学基金(41361049); 江西省自然科学基金资助项目(201222BAB204012); 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, 研究方向为土地遥感与信息、土地利用规划和耕地质量监测。E-mail: zhanghan0307@163.com

通信作者: 赵小敏(1962—), 男, 江西上高人, 教授, 博导, 主要从事农业遥感与信息技术、土地规划和土地资源利用等研究。E-mail: zha-oxm889@126.com

TK, SOM and pH value of the cultivated soils during the past 30 years. The results showed that there were major differences in cultivated soil nutrients of Jiangxi Province from 1985 to 2012, global Moran's  $I$  value and Nugget/Sill of soil nutrients presented as the strong positive spatial autocorrelation in 2012 compared with that in 1985. In 1985, the variograms of cultivated soil nutrients belonged to exponential model except that soil pH value fitted the spherical model. TN, TP, and SOM fitted the spherical model in 2012, while TK and pH value fitted the exponential model. All the results of cross-validation reached significant level during the two periods. During 30 years, cultivated soil nutrient contents of study area dropped or rose, showing the dominant rise as a whole. TN and SOM were at the high levels and the increases were particularly obvious, average grades increased 0.41 and 0.44 units, respectively. TP was at the middle level and the rise was more significant, average grade increased 0.39 units. TK was at the lowest level and the increase sharply dropped, average grade decreased 0.89 units. Soil pH value was at the acid level and dropped obviously, average grade decreased 0.66 units. In recent years, the increases of TN, SOM and TP contents, the decreases of TK content and pH value should be attributed to the effects of different tillage methods and fertilization, straw returning, industrial pollution, together with acid precipitation. The results of the study can provide theoretical supports and the scientific basis for soil regionalized soil nutrient management, high efficiency fertilization, soil nutrient sustainable utilization and cultivated land quality improvement in Jiangxi Province.

**Keywords:** cultivated land; soil nutrients; spatial autocorrelation; ordinary Kriging; spatiotemporal variability; Jiangxi Province

土壤是人类赖以生存的最基本的生产资料。土壤养分是土壤的重要属性之一,也是衡量土壤综合生产力的重要指标,影响土壤的因素主要有气候、母质、土壤理化性质、土壤类型、地形地貌、土地利用类型、农田水肥管理和土壤侵蚀等影响因素<sup>[1-4]</sup>,因而土壤养分是具有高度变异性的时空连续体<sup>[5]</sup>。近些年来,土壤养分流失、土壤环境恶化、土壤碳库变化和土壤酸化等问题日趋严重,土壤养分空间变异性特征研究已成为国内外土壤科学研究的热点<sup>[6-7]</sup>。目前,针对土壤属性空间变异特征分析主要采取经典统计方法、GIS与地统计分析、分形维数和人工神经网络模型(RBFNN,GRNN)等研究方法<sup>[8-10]</sup>。国内外学者在耕地土壤养分空间变异的尺度研究上取得了一定的进展,但主要集中在市级、县级、乡镇级、村级、田块以及流域等中、小及微尺度<sup>[11-16]</sup>,因土壤取样方法和精度限制,在省级尺度的耕地土壤养分的空间变化特征的相关研究鲜有报道。江西省是国家农业大省,农作物以水稻等粮食作物为主,是全国重要的商品粮基地之一,但是近些年来,随着施肥方式的不合理,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、酸化严重和面源污染等问题日益突出。基于此,本文尝试将GIS与地统计学相结合的方法,采取空间自相关和克里金插值等手段,以不同时空尺度下近30 a江西省耕地土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有机质(SOM)和酸碱度(pH值)属性变化为切入点,分析江西省耕地土壤养分的时空演变特征,以期为江西省土壤养分分区管理、精

准高效施肥、土壤养分可持续利用和提升耕地质量等提供基础理论和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江西省简称“赣”,位于中国东南部,属南方丘陵区,处于长江中下游交接处的南岸,地处北纬 $24^{\circ}29'14''$ — $30^{\circ}04'41''$ ,东经 $113^{\circ}34'36''$ — $118^{\circ}28'58''$ 。2012年全省面积 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,耕地4.1万 $\text{ km}^2$ ,总人口4500余万人,下辖11个设区市、100个县(市、区)。全省平均气温为 $16.4 \sim 19.4^{\circ}\text{C}$ ,降水量为1751 mm,日照为1679 h。全年气候温暖,光照充足,雨量充沛,无霜期长,是典型的亚热带湿润气候。江西省地形以丘陵山地为主,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,自南而北,渐次向鄱阳湖倾斜的趋势。全境有大小河流2400余条,河流总长18400 km,主要河流有5条,即赣江、抚河、信江、修河、饶河,鄱阳湖是全国最大的淡水湖。红壤和水稻土为江西省主要的土壤类型。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、苕麻和柑橘等经济作物。

### 1.2 数据来源

本文两个时期数据分别来源于数字化后1985年的江西省第二次土壤普查土壤数据、基础图件和2012年农业部开展的江西省测土配方施肥大量土壤样品数据。空间分辨率为30 m的江西省DEM(数字

高程模型)数据来源于中国科学院地理空间数据云提供的数字高程数据,经 ArcGIS 软件处理提取出研究区的坡度、坡向、地形和高程等数据。土壤图来源于全省 1:50 万土壤数据库,土地利用现状图来源于江西省第二次土地资源调查数据,分别将江西省第二次普查的土壤养分数据与 1:75 万土地利用变更调查数据进行叠加分析,获得 1985 年江西省耕地全氮、全磷、全钾、有机质和酸碱度养分等级图(附图 1)。2012 年测土配方施肥样点数据经过 ArcGIS 10.3 进行空间自相关分析,然后对样点数据采用地统计模块的普通克里金插值法(ordinary Kriging),利用 GS+9.0 进行半方差函数模型拟合,对变异函数模型实施交叉验证(Cross-Validation),利用自然断点法对养分栅格重分类(Reclassify),最后与 2012 年江西省土地利用现状图进行叠加分析,得到 2012 年江西省耕地土壤养分等级图(附图 2)。

### 1.3 样品采集与分析

结合研究区各地区的土地利用现状图、地形图等,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,在耕地中应用“S”形采样法均匀随机采取 8 个点,共采集 2012 年 0—25 cm 耕层土壤采样点 16 283 个,土壤样品采集后经自然风干、剔除异物,研磨和过筛(0.074 mm)等前期处理,制成待测土样,将采集的样点土壤充分混匀后,用四分法留取 1 kg 土样装袋以备分析,每个采样点均以 GPS 记录其经纬度坐标和海拔高度,将 GPS 测得的带有坐标记录的采样点数据转换为具有空间坐标的点。半微量凯氏定氮法用于测定土壤 TN 含量;NaOH 熔融—钼锑抗比色法用于测定土壤 TP 含量;NaOH 熔融—火焰光度计法用于测定土壤 TK 含量;重铬酸钾容量法氧化外加热法用于测定土壤 SOM 含量;采用玻璃电极法(水土比为 2.5:1)测定土壤 pH 值含量。

### 1.4 研究方法

采用 SPSS 22.0 统计软件对 1985 年和 2012 年的耕地土壤养分指标进行描述性统计分析,运用 ArcGIS 10.3 软件对 1985 年土壤养分分布进行数字化(附图 1),采用 ArcGIS 地统计学和 GS+9.0 软件分别对两个时期土壤养分数据进行普通克里金插值和半方差分析以及全局空间自相关分析,最后按等级形成两个时期的耕地土壤养分等级专题分布图(附图 1—2)。

1.4.1 空间自相关分析 空间自相关是指同一个变量在不同空间位置上的相关性<sup>[17]</sup>,空间自相关分析是进行地统计分析的基础和前提,Moran's  $I$  指数反映了邻近区域单元属性的空间相似度和依赖度。全

局 Moran 指数,取值范围为 $[-1,1]$ , $I>0$  表示空间正相关,研究对象趋于空间聚合特征; $I<0$  表示空间负相关,研究对象趋于空间离散特征; $I=0$  表示则表示研究对象随机分布。Moran's  $I$  指数的表达式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (2)$$

式中: $n$  为研究对象的个数; $W_{ij}$  为要素  $i$  和要素  $j$  的权重,相邻接取值为 1,否则为 0; $x_i - \bar{x}$  和  $x_j - \bar{x}$  分别为第  $i, j$  个空间单元上的观测值与平均值的偏差; $Z$  为标准化统计量的临界值; $E(I)$  为观测变量自相关性的期望; $\text{var}(I)$  为方差。

1.4.2 半方差函数 地统计分析的核心是根据样点来确定研究对象随空间位置而变化的规律,以此估测未知点的属性值,这个规律也称变异函数。研究对象的空间变异性可以通过半方差函数来描述,半变异函数是地统计分析的核心工具,也是克里金插值的基础。其计算模型如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (3)$$

式中: $\gamma(h)$  为半方差函数; $h$  为样点空间间隔; $N(h)$  为间隔距离为  $h$  的样点数; $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  分别为区域化变量  $Z(x_i)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i+h$  的实测值。

半变异函数是地统计学中分析土壤异质性所特有的函数,变异函数的理论模型包括球状模型、指数模型、高斯模型等。半变异函数有 3 个重要参数:块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0+C$ )和变程  $\alpha$ 。块金值  $C_0+C$  代表变量的块金效应,反映了系统内部研究变量随机性的可能程度。 $C$  为结构方差,又称偏基台值, $C_0+C$  为基台值,表示由系统内总的变异。变程  $\alpha$  也称为土壤养分空间最大自相关距离。块金值/基台值( $C_0/C_0+C$ )又称块金基台比,表示空间异质性程度或土壤属性的空间依赖性。研究表明<sup>[5]</sup>,块金基台比  $<25\%$  时,表示变量具有强烈的空间自相关性;块金基台比在  $[25\%, 75\%]$  范围内,表示变量具有中等水平的空间自相关性;块金系数  $>75\%$ ,表示变量具有较弱的空间自相关性,变异主要由随机变异组成。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地土壤养分指标描述性分析

根据全国第二次土壤普查养分分级标准,对各养分指标统一进行分级,土壤酸碱度分级方法将土壤 pH 值分为 6 级,1 级:pH 值  $>8.5$  (强碱性),2 级:

pH 值 7.5~8.5(微碱性),3 级:pH 值 6.5~7.5(中性),4 级:pH 值 5.5~6.5(微酸性),5 级:pH 值 4.5~5.5(酸性),6 级:pH 值<4.5(强酸性)。其余 5 项土壤养分指标丰缺度分为 6 级水平,分别为 1 级(很丰富),2 级(丰富),3 级(中等),4 级(缺乏),5 级(很缺乏),6 级(极缺乏),详见表 1。

表 1 全国第二次土壤普查养分分级标准对照

等级	TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TP/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TK/ (g·kg <sup>-1</sup> )	SOM/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
1 级	>2	>1	>25	>40	>8.5
2 级	1.5~2	0.8~1	20~25	30~40	7.5~8.5
3 级	1~1.5	0.6~0.8	15~20	20~30	6.5~7.5
4 级	0.75~1	0.4~0.6	10~15	10~20	5.5~6.5
5 级	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10	6~10	4.5~5.5
6 级	<0.5	<0.2	<5	<6	<4.5

江西省 1985 年和 2012 年耕层土壤样点养分统计特征见表 2,通过采用 SPSS 22.0 对比分析 1985 年和 2012 年研究区耕层土壤养分含量均值和变异系数等数据,进行 K-S 正态检验时发现:1985 年土壤养分和 2012 年土壤全氮、全钾和有机质均服从正态分布,而 2012 年土壤全磷和 pH 值则服从对数正态分布;1985 年土壤全氮、全磷、全钾、有机质和酸碱度平均养分级别分别为 2.81,4.32,3.29,2.87,4.17,2012 年土壤全氮、全磷和有机质养分等别平均值均有所下降,表明其养分含量在 2012 年有所上升,分别上升了 0.41,0.39,0.44 个级别,同时土壤全钾和 pH 值养分级别分别上升了 0.89,0.66 个级别,表明研究区土壤全钾含量有所下降,土壤呈现了较明显的酸化现象;30 年来,江西省耕地土壤养分变异系数为 12.26%~43.00%,除全氮和有机质的变异系数增大外,其他养分的变异系数都有所减小,说明江西省土壤养分总体上呈现中等强度的空间分异规律,且随着耕作制度、施肥方式和田间管理措施等人为因

素的影响,土壤养分的空间变异特征表现为逐渐减弱的趋势。

## 2.2 耕地土壤养分含量空间结构变化

运用 GS+9.0 对土壤样点养分空间变异性进行半方差分析,对比分析土壤各个养分模型的决定系数和残差,1985 年耕地土壤 pH 值和 2012 年全氮、全磷和有机质的最佳理论模型为球状模型(Spherical),而 1985 年土壤 TN,TP,TK,SOM 和 2012 年 TK,pH 值的最佳模型为指数模型(Exponential)。块金值与基台值之比表示由随机因素引起的空间变异程度大小,是研究变量空间相关性程度的分类依据。根据两个时期土壤养分变异函数及相关参数,1985 年耕地土壤 TN 为较弱的空间自相关,主要由随机性影响因素(如灌溉、施肥、耕作措施和土壤改良等各种人为活动)引起的。其余 4 种养分要素的空间自相关性呈中等水平,主要受结构因素(土壤、母质、地形、气候等非人为区域因素)和随机因素两者共同的影响;2012 年土壤 TN,TP,TK 和 SOM 块金系数均小于 25%,表现为强烈的空间相关性,表明土壤全磷、全钾和有机质的空间分异主要由结构性因素引起的;土壤 pH 值块金系数为 56.79%,呈现中等强度的空间变异性,主要由结构性因素和随机性因素共同引起的。变程的大小反映区域变化量自相关范围的大小,2012 年土壤 TN,TP,TK 的变程与 1985 年相比明显变大,表示其空间自相关范围变大,而 SOM 和 pH 值变程则显著变小,表示其空间自相关范围减小。采用公式(1)对两个时期 5 种土壤养分含量的空间自相关指数进行计算,其 Moran's *I* 指数在 0.22~0.75,30 年来耕层土壤中的养分具有中等的空间自相关,土壤养分的分布具有良好的空间结构,并且表现为空间聚合的分布特征。但从两个时期 Moran's *I* 数值来看,2012 年 5 种土壤养分集聚程度较 1985 年更强。

表 2 1985—2012 年江西省耕地土壤养分含量描述性统计

年份	养分指标	样本数/个	最小值	最大值	平均数	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
1985	TN	1924	1	6	2.81	1.04	37.15	0.52	0.25	正态分布
	TP	1766	1	6	4.32	1.04	24.17	-0.71	0.59	正态分布
	TK	2018	1	6	3.29	1.31	39.67	-0.27	-0.91	正态分布
	SOM	2155	1	6	2.87	0.98	34.04	0.33	-0.09	正态分布
	pH 值	1404	2	6	4.17	0.81	19.33	-0.54	0.16	正态分布
2012	TN	16823	1	6	2.4	1.03	43.00	0.82	1.02	正态分布
	TP	16823	1	6	3.93	0.95	24.10	-0.53	-0.31	对数正态分布
	TK	16823	2	6	4.18	0.96	22.89	-0.12	-0.70	正态分布
	SOM	16823	1	5	2.43	0.93	38.23	0.07	-0.76	正态分布
	pH 值	16823	2	6	4.83	0.59	12.26	-1.59	4.75	对数正态分布

表 3 江西省两个时期土壤养分半变异函数理论模型及相应参数

年份	养分指标	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块金值/基台值/%	变程/km	决定系数 $R^2$	残差 RSS	Moran's $I$ 值
1985	TN	Exponential	0.88	1.13	77.77	18.92	0.74	0.0055	0.31
	TP	Exponential	0.50	0.94	52.82	28.77	0.63	0.0018	0.39
	TK	Exponential	0.74	1.63	45.32	55.83	0.66	0.0022	0.31
	SOM	Exponential	0.65	0.95	68.12	73.70	0.77	0.0009	0.22
	pH 值	Spherical	0.40	0.61	64.93	52.06	0.70	0.0016	0.48
2012	TN	Spherical	0.00	0.12	22.38	30.17	0.61	0.0006	0.64
	TP	Spherical	0.01	0.03	6.09	57.24	0.58	0.0002	0.39
	TK	Exponential	0.82	13.07	6.23	78.85	0.72	0.0022	0.41
	SOM	Spherical	3.14	52.10	6.02	36.34	0.60	0.0132	0.32
	pH 值	Exponential	0.14	0.25	56.79	16.24	0.50	0.0001	0.75

### 2.3 江西省耕地土壤养分时空演变规律

2.3.1 1985 年土壤养分空间分布特征分析 根据江西省耕地土壤养分专题制图结果,1985 年江西省土壤养分含量整体处于中等水平,土壤 pH 呈现出微酸化趋势。从江西省耕地土壤全氮含量等级划分状况可知(附图 1A),全省全氮丰富级(1 级和 2 级,下同)水平的耕地面积有  $1.52 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 43.43%, 主要分布在萍乡、宜春、南昌和景德镇 4 个市。全氮中等(3 级和 4 级,下同)水平的耕地面积有  $1.70 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 48.63%, 在全省 11 个设区市均有分布。全氮低量级(5 级和 6 级,下同)水平的耕地面积有  $2.77 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 7.93%, 零星分布在全省各个市。全省全磷丰富级(1 级和 2 级,下同)水平的耕地面积有 9.09 万  $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 2.6%, 主要分布在上饶市、抚州市、和赣州市。全磷中等(3 级和 4 级,下同)水平的耕地面积有  $1.30 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 37.22%, 主要分布在宜春市、上饶市和赣州市。全磷低量级(5 级和 6 级,下同)水平的耕地面积有  $2.11 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 60.18%, 主要分布在宜春市、上饶市、吉安市和南昌市, 其他市均有零星分布。全省全钾丰富级(1 级和 2 级,下同)水平的耕地面积有  $1.29 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 36.75%, 主要分布在上饶市和赣州市。全钾中等(3 级和 4 级,下同)水平的耕地面积有  $1.55 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 44.15%, 在全省 11 个设区市均有分布, 主要分布在吉安市和宜春市。全钾低量级(5 级和 6 级,下同)水平的耕地面积有  $6.67 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 19.10%, 全省 11 个设区市均有零星分布。全省有机质处丰富级(1 级和 2 级,下同)水平的耕地面积有  $1.0 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 28.65%, 主要分布在萍乡市、宜春市和抚州市。有机质含量中等(3 级和 4 级,下同)水平的耕地面积有  $2.40 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 68.64%, 在全省各市均有分布。有机质含量低量级

(5 级和 6 级,下同)水平的耕地面积有 9.47 万  $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 2.71%, 零星分布在赣州市、吉安市和新余市等市。全省土壤强碱至微碱性水平的耕地面积为 8.10 万  $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 2.32%, 零星分布在萍乡市和九江市, 中性土壤面积  $2.34 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地的 6.69%, 主要分布在萍乡市, 全省耕地微酸至强酸性土壤面积为  $3.18 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 90.99%, 其中又以微酸性和酸性为主, 分别占全省耕地的 46.29% 和 50.39%, 在全省各市均有集中分布。

2.3.2 2012 年土壤养分空间分布特征分析 在 ArcGIS 10.3 中采用 Ordinary Kriging 插值法对 2012 年江西省耕地土壤养分进行空间插值。2012 年江西省耕地土壤养分含量较为丰富, 但是土壤 pH 值酸化较为严重。从江西省耕地土壤全氮含量等级划分状况可知(附图 2A), 全省全氮丰富级水平的耕地面积有  $2.48 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 60.46%, 主要分布在鄱阳湖东北部(上饶市)、南部(南昌市)、西南部(宜春市和新余市)、沿浙赣线的平原与盆地区(萍乡市、抚州市)及吉泰盆地(吉安市)及赣州盆地; 全氮中等水平的耕地面积有  $1.55 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 37.83%, 主要分布在鄱阳湖西北部的九江市、赣南的鹰潭市和赣州市; 全氮低量级水平的耕地面积有 6.98 万  $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 1.70%, 主要分布在九江市。全省全磷丰富级水平的耕地面积有  $1.86 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 4.53%, 零星分布在全省各个市; 全磷中等水平的耕地面积有  $3.02 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 73.63%, 主要分布在环鄱阳湖周边城市、沿赣江河谷冲击平原地区(抚州市和赣州市)及浙赣线沿线地区; 全磷低量级水平的耕地面积有  $8.95 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 21.84%, 主要分布在九江市和景德镇市。全省全钾丰富级(只有第 2 级)水平的耕地面积有  $5.96 \times 10^3$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 0.15%, 零星分布在全省各

市;全钾中等水平的耕地面积有  $2.46 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 60.08%, 在全省各市均有较集中分布, 中等水平的耕地在各市所占比例都超过 50%; 全钾低量级水平的耕地面积有  $1.63 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 39.77%, 主要分在鹰潭市和萍乡市。全省有机质含量丰富级水平的耕地面积有  $2.28 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 55.58%, 主要分布在鄱阳湖南部的南昌市、东部的上饶市和浙赣线沿线的宜春市及新余市; 有机质含量中等水平的耕地面积有  $1.85 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 44.31%, 主要分布在九江市、鹰潭市和赣州市; 有机质含量低量级(只有第 5 级)水平的耕地面积有  $4.55 \times 10^3$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 0.11%, 主要分布在九江市和景德镇市。全省土壤强碱至微碱性(只有第 2 级)水平的耕地面积为  $4.96 \times 10^3$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 0.12%, 只分布在九江市; 中性土壤面积 6.73 万  $\text{hm}^2$ , 占全省耕地的 1.64%, 主要分布在萍乡市, 在吉安、宜春、新余和景德镇市均有少量分布。全省耕地微酸至强酸性土壤面积为  $4.03 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省耕地面积的 98.24%, 其中又以酸性为主, 占全省耕地面积的 83.68%, 除萍乡市外, 其他市均有大量分布。

2.3.3 1985—2012 年土壤养分时空分布特征 利用 ArcGIS 10.3 空间分析平台, 将 1985 年和 2012 年两个时期的耕地土壤养分图进行空间叠加分析, 得到两个时期的耕地土壤养分等级时空演变特征(表 4 和附图 3)。30 年来江西省土壤全氮、全磷和有机质总体含量都有较为显著的提升, 但是全钾含量有所降低, 且土壤 pH 值呈现出弱酸化的趋势。

(1) 全氮时空变化。从 1985—2012 年江西省全氮含量有显著的提高, 平均等级从 2.81 级提高至 2.4 级, 提高了 0.41 个级别, 整体处于丰富级水平。1985 年耕地 TN 含量 1~6 级水平均有分布, 主要集中在 2 级(1.5~2.0 g/kg)和 3 级水平(1~1.5 g/kg), 占耕地总面积的 68.96%, 主要分布在赣州市、吉安市、宜春市和上饶市。2012 年 TN 含量有较大提升, 主要为丰富级水平, 占耕地总面积的 60.46%, 大面积分布在江西省北部区域, 丰富级水平基本覆盖全省, 而 TN 含量  $< 0.5$  g/kg 的耕地仅占总面积的 0.36%。由表 3 和附图 3A 可知, TN 含量等级提高的面积  $2.58 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 62.87%, 主要集中在吉安市、上饶市和宜春市; 处于稳定状态的面积为  $6.64 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占比 16.21%, 主要分布在上饶市和宜春市; TN 含量降低的等级面积为  $8.58 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占比 20.92%, 主要分布在南昌市和上饶市。

(2) 全磷时空变化。对比分析两个时期的耕地全磷含量, 全磷水平提升较为快速, 平均等级从 1985

年的 4.32 级提高至 2012 年的 3.93 级, 提高了 0.39 个级别, 整体处于中等水平。1985 年耕地 TP 含量主要集中在 4 级(0.4~0.6 g/kg)和 5 级水平(0.2~0.4 g/kg), 占耕地总面积的 80.54%, 主要分布在宜春市、上饶市、吉安市和南昌市; 2012 年 TP 含量等级未发现为 1 级( $> 1$  g/kg)的耕地, 大部分处于中等水平, 占总面积的 73.63%, 在全省都有较大范围的分布。从表 3 和附图 3B 可以发现, TP 含量上升的耕地面积为  $2.51 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 61.29%, 主要分布在南昌市、上饶市和吉安市; 级别不变的面积为  $5.56 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 13.57%, 全省都有较大面积的分布; 全磷等级下降的耕地面积为  $1.03 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占比为 25.14%, 主要分布在赣州市、宜春市和吉安市。

(3) 全钾时空变化。全钾含量总体水平呈显著下降的态势, 平均等级从 1985 年的 3.29 级下降至 2012 年的 4.18 级, 降低了 0.89 个级别, 整体处于下降水平。1985 年 TK 含量 1—6 级水平均有分布, 2012 年全省未发现 TK 含量处 2 级以上( $> 20 \sim 25$  g/kg)水平的耕地。1985 年耕地 TK 含量主要为中等水平, 占耕地总面积的 44.15%, 主要分布在鄱阳湖北部的九江市和景德镇市; 2012 年全钾等级主要为 4 级和 5 级水平, 占耕地总面积的 73.22%, 大面积分布在赣州市、吉安市和上饶市。从表 3 和附图 3C 可以发现, TK 含量上升的耕地面积为  $4.08 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 仅占耕地总面积的 9.95%, 主要分布在宜春市、上饶市和吉安市; 级别不变的面积为  $3.71 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 9.06%, 主要分布在宜春市、上饶市; 全钾等级下降的耕地面积为  $3.32 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占比为 80.99%, 等级下降区域大幅度扩大至全省范围内。

(4) 有机质时空变化。30 年来江西省有机质含量有显著的提高, 平均等级从 2.87 级提高至 2.43 级, 提高了 0.44 个级别, 整体处于丰富级水平。1985 年耕地 SOM 含量 1—6 级水平均有分布, 而 2012 年未发现 5 级以下( $< 6 \sim 10$  g/kg)的耕地, 1985 年主要集中在中等水平, 占耕地总面积的 68.64%, 主要分布在鹰潭市、上饶市和南昌市。2012 年有机质含量有较大提升, 主要为丰富级水平, 占耕地总面积的 55.58%, 集中分布在上饶市、宜春市和南昌市。由表 3 和附图 3D 可知, SOM 含量上升的面积有  $2.51 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 61.22%, 主要集中在赣州市、上饶市和宜春市; 级别不变的面积为  $6.14 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 14.97%, 主要分布在吉安市、上饶市和宜春市; SOM 含量降低的等级面积为  $9.76 \times$

$10^5 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 20.92%, 主要分布在宜春市、南昌市和吉安市。

(5) 酸碱度时空变化。30 年来江西省耕作土壤 pH 值整体呈降低的趋势, 酸化较为严重, 平均等别从 4.17 级降低至 4.83 级, 降低了 0.66 个级别, 土壤酸化程度增加。1985 年耕地土壤 pH 值处于 2—5 级水平, 而 2012 年未发现 2 级以上 ( $>7.5$ ) 的耕地。1985 年土壤 pH 值主要处于 4 级 (5.5~6.5) 和 5 级水平 (4.5~5.5), 占耕地总面积的 85.89%, 主要集

中在宜春市、上饶市和吉安市; 2012 年土壤酸化现象不断加剧, 主要为 5 级水平, 占耕地总面积的 83.68%, 集中分布在南昌市、抚州市和吉安市。由表 3 和附图 3E 可知, pH 值含量上升的面积为  $6.76 \text{ 万 hm}^2$ , 占耕地总面积的 1.65%, 零星分布于全省; pH 值含量不变的面积为  $7.06 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 17.23%, 主要分布在上饶市和宜春市; pH 值含量降低的等级面积为  $3.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 81.12%, 主要分布在宜春市、南昌市和吉安市。

表 4 江西省两个时期耕地土壤养分级别变化情况

养分指标项目		下降 5 级	下降 4 级	下降 3 级	下降 2 级	下降 1 级	不变	上升 1 级	上升 2 级	上升 3 级	上升 4 级	上升 5 级
全氮	面积/ $\text{hm}^2$		5196.08	49916.99	175654.05	626851.63	664483.74	486663.97	1173524.16	794802.47	97113.44	24772.45
	比例/%		0.13	1.22	4.29	15.29	16.21	11.87	28.63	19.39	2.37	0.60
全磷	面积/ $\text{hm}^2$	97.13	3169.05	61895.42	276023.72	689361.67	556129.53	167258.60	117756.06	504918.29	1233613.60	488755.93
	比例/%	0.00	0.08	1.51	6.73	16.82	13.57	4.08	2.87	12.32	30.10	11.92
全钾	面积/ $\text{hm}^2$	874734.49	878569.79	834984.79	318857.53	412609.22	371470.12	264072.87	104244.50	2419.56	37016.11	
	比例/%	21.34	21.43	20.37	7.78	10.07	9.06	6.44	2.54	0.06	0.90	
有机质	面积/ $\text{hm}^2$	295.12	6505.24	43522.10	215922.09	709806.80	613708.86	407272.08	1052212.27	907088.86	138587.16	4058.41
	比例/%	0.01	0.16	1.06	5.27	17.32	14.97	9.94	25.67	22.13	3.38	0.10
酸碱度	面积/ $\text{hm}^2$	4438.64	327562.84	48840.51	1989582.64	954856.73	706097.81	67233.80	366.02			
	比例/%	0.11	7.99	1.19	48.54	23.29	17.23	1.64	0.01			

### 3 讨论

2012 年耕地土壤 TN 含量较 1985 年有了一定的提高, 其空间聚集程度也有所增强, 这与赵小敏<sup>[12]</sup>和鲁如坤<sup>[17]</sup>等研究结论较为一致。相关研究表明, 土壤全氮、全磷、全钾、有机质、pH 值与施肥方式、土地利用类型、母质、地形地貌、土壤质地、气候水热条件等因素具有显著相关性<sup>[2-3, 6-9, 17-21]</sup>。沿鄱阳湖平原、赣西平原及赣南平原与盆地, 地形平坦, 耕作土壤主要为红壤和水稻土, 土壤质地以中壤土和重壤土为主, 保蓄性能和耕作性能相对较好, 土壤氮素释放率较高, 提高了土壤氮素供应强度和利用率。据调查结果显示, 江西省氮肥使用量由 1985 年的 14.11 万 t 提升到 2012 年的 42.88 万 t, 氮肥施用量急剧上升, 氮肥与氮磷肥、有机肥配合施用, 秸秆还田量大幅度增加, 耕作熟化程度高, 便于氮素和有机质的积累, 使得沿鄱阳湖平原、赣西平原及赣南平原的土壤有机质和氮素含量较为丰富。江西省大部分区域土壤类型以水稻土为主, 水稻土由于受到水的浸润, 土壤磷素水平也会相应升高。伴随着家庭联产承包责任制的推广, 广大农户加大了对磷肥的投入, 但是磷素主要以磷酸铁、磷酸铝的形式存在于酸性红壤之中, 且磷素养分在土壤中以沉淀为主, 使得全省磷素养分利用率普遍偏低。红壤为省内典型的地带性土壤, 亚热带季风气候使含钾矿物风化淋溶较深且强烈, 成土母质类型以泥质岩类、酸性结晶

盐类和石英岩类风化物为主, 大部分以矿物钾的形式存在土壤中, 土壤全钾含量和释放量较低。随着农业的发展, 偏施氮肥和磷肥以及耕作熟化程度促进了农产品产量和品质的不断提高, 复种指数大, 土壤钾素消耗剧增, 导致江西省土壤严重缺钾。第二次土壤普查以来, 研究区大部分耕作土壤呈酸性, 土壤的酸化是一个极其复杂的过程, 受到自然因素和人为因素的影响。一方面, 江西省地处亚热带, 成土母质类型以泥质岩类、酸性结晶盐类和石英岩类风化物为主, 土壤类型以红壤和水稻土为主, 土壤本身特性偏中性和酸性, 对酸性缓冲能力弱。同时, 高温多雨的气候条件, 加速了盐基离子、 $\text{NO}_3^-$  强烈淋洗以及氮的硝化, 加剧了土壤的自然酸化。另一方面, 30 年来, 江西省经济发展, 工业化水平不断提高, 宜春市、南昌市和吉安市等城市化石燃料大量消耗, 工业污染问题严重, 大气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  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。同时, 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, 有机肥的施用量减少, 也是导致全省土壤严重酸化的一个重要原因。

### 4 结论

(1) 第二次土壤普查以来, 研究区耕地土壤养分含量有了一定的提高, 但是土壤养分的总体水平有待进一步提升。其养分含量总体上表现为土壤全氮和

有机质含量显著上升,全磷水平提高较为显著,但全钾含量急剧下降,土壤 pH 值酸化较为严重。从 1985—2012 年,土壤全氮提升了 0.41 个级别,耕地土壤全氮级别上升的面积占耕地总面积的 62.87%;有机质含量提高了 0.44 个级别,耕地有机质级别上升的面积占耕地总面积的 61.22%;全磷含量提升了 0.39 个级别,耕地土壤全磷级别上升的面积占耕地总面积的 61.29%;全钾降低了 0.89 个级别,耕地土壤全钾级别下降的面积占耕地总面积的 80.99%;pH 值降低了 0.66 个级别,耕地土壤 pH 值级别下降的面积占耕地总面积的 81.12%。

(2) 江西省耕作土壤养分含量有较强的时空变异规律,对比两个时期土壤养分水平,30 年来,土壤 TN 和 SOM 处于丰富级水平,TP 处于中等水平,TK 处于低量级水平,pH 值处于酸性和微酸性水平。1985 年江西耕地 TN 和 SOM 丰富级主要分布在鄱阳湖、赣西平原及赣南平原与盆地,2012 年 TN 和 SOM 丰富级水平分布范围有所扩展,在整个鄱阳湖平原、沿浙赣线及赣南平原与盆地均有大范围分布。1985 年耕地全磷含量中等水平主要分布在宜春市、上饶市、吉安市和南昌市,到 2012 年全磷含量中等水平在全省都有较大范围的分布。1985 年耕地全钾含量为中等水平,主要分布在吉安市、宜春市和上饶市,到 2012 年全钾等级中等偏低水平,大面积分布在赣州、吉安、上饶、宜春和九江 5 个市。1985 年土壤 pH 值处于酸性水平主要集中在宜春市、上饶市和吉安市,到 2012 年酸性水平主要分布在赣中和赣西南等市,以南昌市、抚州市、赣州市和吉安市最为集中。

(3) 30 年来江西省耕地土壤养分含量时空变化主要受人为因素和自然条件的综合影响,但是人为因素对研究区养分的变化具有主导作用。1985 年 5 种土壤养分表现为中等的空间自相关特性,2012 年土壤 TN 和 pH 值表现为较强的空间自相关特性,其余为中等的空间自相关特性。1985—2012 年,耕作土壤养分空间变异的极大值由 TK 转变为 TN,pH 值两个时期的空间变异最小,除全氮和有机质的变异系数增大外,其他养分的变异系数都有所减小,说明随着耕作制度、施肥方式和田间管理措施等人为因素的影响,土壤养分的空间变异特征表现为逐渐减弱的趋势。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和氮磷肥,施钾肥不足,而作物需肥特性要求钾肥施用量大于磷肥,导致土壤全氮、全磷含量提高,全钾含量下降的主要因素。同时,有机肥、冬季绿肥的施用及水稻秸秆还田的推广,使得全省有机质含量大幅度增加,但过量施用氮磷钾肥、大量能耗化石燃料、工业污染及酸性沉降物等也加剧了土壤的酸化。

#### 参考文献:

- [1] Berndtsson R, Bahri A, Jinno K. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: II. Geostatistical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(5):289-295.
- [2] 朱菊兰,刘森,张阳,等. 浑河太子河流域地形和土地利用对表层土壤养分空间变异的影响[J]. 生态学杂志, 2016,35(3):621-629.
- [3] 陈肖,张世熔,黄丽琴,等. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007,13(1):1-7.
- [4] 张彬,杨联安,杨粉莉,等. 苹果主产区土壤养分空间分布特征及其影响因素:以陕西省礼泉县为例[J]. 土壤, 2016,48(4):777-784.
- [5] 程先富,史学正,于东升,等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(1):64-67.
- [6] 刘建玲,贾可,廖文华,等. 太行山山麓平原 30 年间土壤养分与供肥能力变化[J]. 土壤学报,2015,52(6):1325-1335.
- [7] 于洋,赵业婷,常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. 土壤学报,2015,52(6):1251-1261.
- [8] 刘国顺,常栋,叶协锋,等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J]. 生态学报,2012,33(8):2586-2595.
- [9] 贾振宇,张俊华,丁圣彦,等. 基于 GIS 和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异:以周口为例[J]. 应用生态学报, 2016,27(4):1211-1220.
- [10] 李启权,王昌全,张文江,等. 丘陵区土壤有机质空间分布预测的神经网络方法[J]. 农业环境科学学报,2012, 31(12):2451-2458.
- [11] 白树彬,裴久渤,李双异,等. 30 年来辽宁省耕地土壤有机质与 pH 值时空动态变化[J]. 土壤通报,2016,47 (3):636-644.
- [12] 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.
- [13] 赵吉霞,和寿甲,张庆,等. 近 20 年来旱地耕层土壤全氮和 pH 值的变化特征:以云南墨江县为例[J]. 土壤通报,2016,47(4):868-875.

坡面产流量随着初始解冻深度的增加大致呈逐渐增加趋势。

(2) 降雨强度由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产沙量增加了 0.78~4.22 倍;随着初始解冻深度的增加,不同雨强下的坡面产沙量变化规律不同,表明降雨强度、初始解冻深度对坡面产沙量的影响存在交互作用。

(3) 坡面产流量主要受降雨强度的影响,而坡面产沙量主要受降雨强度、降雨强度—初始解冻深度交互作用的影响。根据试验数据,建立了坡面产流量与雨强的经验关系式以及坡面产沙量与降雨强度、降雨强度—初始解冻深度交互作用的经验关系式。

(4) 本文研究了降雨强度和初始解冻深度对解冻期黄绵土坡面产流产沙的影响。考虑到黄土高原黄绵土区不同的地形特点以及解冻期坡面特点,今后仍需进一步分析不同坡长、坡度以及不同前期土壤含水量等对解冻期坡面产流产沙的影响。

#### 参考文献:

- [1] 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. 中国水土保持, 2003(10):17-18.
- [2] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4):50-55.
- [3] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6):1-5.
- [4] 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2):442-452.
- [5] Klaveren R W V, McCool D K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil[J]. Transactions of the Asae, 1998, 41(5):1315-1321.
- [6] Frame P A, Burney J R, Edwards L. Laboratory measurement of freeze thaw, compaction, residue and slope effects on rill erosion[J]. Canadian Agricultural Engi-

neering, 1992, 34(2):143-149.

- [7] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):105-112.
- [8] 冯大光, 范昊明, 王铁良. 基于最优回归子集的土壤解冻期降雨侵蚀模拟试验分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(1):124-128.
- [9] 周丽丽, 王铁良, 范昊明, 等. 未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6):1-4.
- [10] 范昊明, 张瑞芳, 武敏, 等. 草甸土近地表解冻深度对坡面降雨侵蚀影响研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):5-8.
- [11] 周丽丽, 范昊明, 武敏, 等. 白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):574-578.
- [12] Jane C. Froese, Richard M. Cruse, Mohammadreza Ghaffarzadeh. 冻融侵蚀机理[J]. 水土保持科技情报, 2001(3):26-28.
- [13] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U. S. Corn Belt. [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2000, 55(4):487-494.
- [14] Oygarden L. Rill and gully development during extreme winter runoff event in Norway[J]. Catena, 2003, 50(2/4):217-242.
- [15] Ban Y, Lei T, Chen C, et al. Study on the facilities and procedures for meltwater erosion of thawed soil [J]. International Soil & Water Conservation Research, 2016, 4(2):142-147.
- [16] 朱显谟, 祝一志. 试论中国黄土高原土壤与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] 郑秀清, 樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6):52-55.
- [18] 范昊明, 张瑞芳, 周丽丽, 等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6):48-53.

(上接第 65 页)

- [14] 乐丽红, 朱安繁, 侯英杰, 等. 余干县耕地土壤养分时空变化特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(5):986-994.
- [15] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征:以安徽省定远县为例[J]. 土壤, 2016, 48(4):762-768.
- [16] 董立宽, 方斌, 施龙博, 等. 茶园土壤速效磷乡镇尺度下空间异质性对比分析:以江浙地区优质名茶种植区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10):1576-1584.
- [17] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33

(2):63-67.

- [18] Harter T, Davis H, Mathews M C, et al. Shallow groundwater quality on dairy farms with irrigated forage crops[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 55(3):287-315.
- [19] Erisman J W, Bleeker A, Galloway J N, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment [J]. Environmental Pollution, 2007, 150(1):140-149.
- [20] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):114-120.
- [21] 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.