

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201712013

## 湘西植烟土壤主要养分时空变异特征研究<sup>\*</sup>

向德明<sup>1,2</sup>, 闫晨兵<sup>1</sup>, 黎娟<sup>2</sup>, 向铁军<sup>3</sup>, 田峰<sup>1</sup>, 彭宇<sup>4</sup>, 张黎明<sup>1,2 \*\*</sup>, 李强<sup>2</sup>

(1. 湖南省烟草公司湘西州公司, 湖南吉首 416000; 2. 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128;  
3. 湖南金叶众望科技股份有限公司, 湖南岳阳 414000; 4. 湖南中烟工业有限责任公司, 湖南长沙 410006)

**摘要:**【目的】明确湘西州植烟土壤养分状况, 为植烟土壤的科学管理和实现烟叶优质适产提供理论依据。【方法】以湘西州 2000 年和 2015 年耕地土壤主要养分含量为研究对象, 利用空间自相关、半方差函数及分形维数等方法, 对湘西州土壤主要养分时空变异特征进行了研究。【结果】从基本统计特征和分布频率来看, 15 年来, 湘西植烟土壤碱解氮含量均值由 119.60 mg/kg 上升到 147.01 mg/kg, 增幅达 22.92%; 土壤有效磷含量均值由 7.26 mg/kg 上升到 38.15 mg/kg, 增幅高达 425.62%; 土壤速效钾含量均值由 164.62 mg/kg 上升到 219.34 mg/kg, 增幅度达 33.24%。从时空变异来看, 15 年来, 碱解氮、有效磷和速效钾含量的块金效应数值和分形维数 D 值增大, 空间自相关系数 Moran's I 值下降。从时空分布的变化来看, 2015 年土壤碱解氮含量变得更适于烤烟生产, 适宜和高等级的面积显著增加, 分别增加了 29.53% 和 5.93%; 而低等级则大幅下降, 比 2000 年下降了 35.45%。2015 年土壤有效磷含量高和极高等级的面积显著增加, 分别增加了 25.98% 和 55.30%; 而极低和低等级则大幅下降, 分别比 2000 年下降了 27.49% 和 57.14%。2015 年土壤速效钾含量极低、适宜、高和极高等级的面积均有不同程度的增加, 分别增加了 0.60%、2.90%、19.51% 和 0.89%, 而低等级则大幅下降了 23.91%。【结论】15 年来, 湘西植烟土壤养分增幅较大, 增幅最大的是土壤有效磷, 其次是速效钾, 最后是碱解氮。

**关键词:**植烟土壤; 土壤养分; 时空变异

中图分类号: S 572.06 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X (2019) 05-0852-08

## Temporal and Spatial Variability of the Soil Main Nutrients in Xiangxi Tobacco-planting Area

XIANG Deming<sup>1,2</sup>, YAN Chenbing<sup>1</sup>, LI Juan<sup>2</sup>, XIANG Tiejun<sup>3</sup>, TIAN Feng<sup>1</sup>,  
PENG Yu<sup>4</sup>, ZHANG Liming<sup>1,2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Tobacco Company Xiangxi Branch, Jishou 416000, China;  
2. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;  
3. Hunan Jinye Zhongwang Polytron Technologies Inc, Yueyang 414000, China;  
4. Hunan Tobacco Industry Co., Ltd., Changsha 410006, China)

**Abstract:** [ Purpose] The purpose of this paper was to provide a theoretical basis for scientific management of tobacco planting soil and improvement of tobacco quality. [ Method] Based on the methods of spatial autocorrelation, semi-variance function and fractal dimension, the spatiotemporal

收稿日期: 2017-12-12 修回日期: 2019-07-03 网络首发时间: 2019-10-08 11:18:34

\*基金项目: 湖南省烟草公司项目 (xx16-18Aa02); 湖南省烟草公司湘西自治州公司项目 (州烟司 2012-37)。

作者简介: 向德明 (1964—), 男, 湖南龙山人, 本科, 高级农艺师, 主要从事烟草栽培和管理研究。

E-mail: xdmycgs@163.com

\*\*通信作者 Corresponding author: 张黎明 (1978—), 男, 湖南溆浦人, 硕士, 农艺师, 从事烟草栽培技术研究。E-mail: 24229046@qq.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20191008.0948.001.html>



variation of soil main nutrient from Xiangxi area were studied. Two sets of data were used for analysis in this study in 2000 and 2015. [Result] From the basic statistical characteristics and distribution frequency point of view, in the past 15 years, the average content of alkali hydrolyzable nitrogen in tobacco growing soil in Xiangxi had increased from 119.60 mg/kg to 147.01 mg/kg, with an increase rate of 22.92%. The average content of available phosphorus in tobacco growing soil in Xiangxi had increased from 7.26 mg/kg to 38.15 mg/kg, with an increase rate of 425.62%. The average content of available potassium in tobacco growing soil in Xiangxi had increased from 164.62 mg/kg to 219.34 mg/kg, with an increase rate of 33.24%. The results showed that the soil available potassium increased significantly. From the view of temporal and spatial variation, the nugget effect values of nitrogen, phosphorus and potassium contents and the fractal dimension value of D increased, but the value of Moran's I decreased. From the temporal and spatial distribution changes, in 2015, the content of soil available nitrogen became more suitable for tobacco production, the areas of appropriate and high content levels increased significantly, increased by 5.93% and 29.53%; and the "low" rating dropped to 35.45% lower than in 2000. The content of available potassium in soil in 2015 "high" and "high" level of the area increased significantly, increased by 25.98% and 55.30%; and the "low" and "low" rating declined sharply, respectively, than in 2000 decreased by 27.49% and 57.14%. In 2015, the content of soil available K "very low", "appropriate", "high" and "high" level of the area increased, which increased by 0.60%, 2.90%, 19.51% and 0.89%; and the "low" rating dropped to 23.91% lower than in 2000. [Conclusion] In the past 15 years, the growth of soil nutrient in Xiangxi had increased greatly; the largest increase was the content of available phosphorus in the soil, followed by the content of available potassium, and the content of alkaline nitrogen in the last.

**Keywords:** tobacco-planting soil; soil main nutrient; spatiotemporal variation

土壤是一个时空连续的变异体, 成土过程受到成土母质、生物活动、气候条件以及地形地貌等因素的影响, 所以土壤具有高度的空间异质性<sup>[1-2]</sup>。随着生产力水平的提高, 不同的土壤管理制度下, 人为因素使得植烟土壤养分状况发生了巨大的改变, 在不明确土壤养分的情况下进行农业生产, 不仅不能顺利地进行生产活动, 还会对环境造成严重的负面影响<sup>[3-4]</sup>。因此, 确定土壤养分在时空上的变异及分布特征是进行土壤养分科学管理的前提和基础, 也是实现农业可持续发展的必然要求<sup>[5]</sup>。

近年来, 许多学者利用地统计学方法和克里格插值法对土壤中养分的空间变异和其原因开展了大量研究, 并取得了丰富的成果<sup>[6-9]</sup>。湘西州位于湖南西北部, 是湖南省优质烟叶的重要产区<sup>[10]</sup>。有关湘西植烟土壤中养分地域空间分布的研究一直是热点。田茂成等<sup>[11]</sup>、刘逊等<sup>[12]</sup>、周米良等<sup>[13]</sup>和黎娟等<sup>[14]</sup>分别对湘西州植烟土壤中的有效锰、有机质、交换性钙和交换性镁的含量进行

了空间分布上的研究, 并探究了其影响因素, 但是有关湘西植烟土壤主要养分时空的变异情况的系统研究鲜有报道。因此, 以2000年和2015年两个时期在湘西州烤烟主产区采集的土壤样本为研究对象, 运用地统计学方法和克里格插值法侧重分析湘西植烟土壤15年来时空上的变异情况, 为实现湘西州土壤养分的科学管理及烟叶优质适产<sup>[15]</sup>提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域自然概况

湘西土家族苗族自治州位于湖南省西北部, 全州东西宽约170 km, 南北长约240 km, 国土面积15 462 km<sup>2</sup>, 耕地面积1.99×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>。湘西州地势呈西北高, 东南低的趋势。地形地貌以山原山地为主, 兼有丘陵和小平原。湘西州属亚热带季风湿润气候, 大陆性气候特征明显, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 年均气温16.5~17.5 ℃, 年均降雨量1 290~1 600 mm, 年均日照时间

1 406~1 219 h。湘西州是湖南主要烤烟区之一，基本烟田  $3.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，其中水旱轮作烟田  $1.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，旱地烟田面积  $1.75 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，主要种植烤烟品种为云烟 87 和 K326，全州年均烟叶产量  $2.25 \times 10^4 \text{ t}$ ，种植模式主要为烤烟—绿肥—玉米和烤烟—绿肥—水稻。土壤类型有水稻土、红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土和紫色土等。

## 1.2 样品采集和分析

研究共收集 2 个时期耕地土壤碱解氮、有效磷和速效钾数据。第 1 时期源于 2000 年湘西州第 1 次植烟土壤普查资料；第 2 时期数据于 2015 年 11—12 月采集土壤样品带回实验室分析获得。2015 在土壤冬翻前，选取  $667 \text{ m}^2$  以上的

田块进行取样，首先选取  $667 \text{ m}^2$  以上的田块，用手持式 GPS 定位，记录田块中心的经纬度和海拔，根据采样田块的形状，采取五点取样法或“W”形取样法，用土钻采集耕作层土壤 (0~20 cm)，每个田块确保采集 5 点以上，并用四分法取大约 500 g 土样带回实验室风干、过筛备用。土样核对编号后，经风干、磨细、过筛后制成待测样品，进行土壤养分含量测定，具体测定方法参照鲁如坤<sup>[16]</sup>的方法。2000 年土壤样品为 446 个，2015 年为 1 242 个。

## 1.3 土壤主要养分评价标准

参照前人的研究结果<sup>[17-18]</sup>，制定了湘西烟区养分指标的评价标准，详见表 1。

表 1 湘西州植烟土壤养分分级标准

Tab. 1 Classified standard of soil nutrients content

mg/kg

指标 index	级别 grade				
	极低 very low	低 low	适宜 suitable	高 high	极高 very high
碱解氮 alkali-hydrolyzable N	<60	$\geq 60\sim 110$	$\geq 110\sim 180$	$\geq 180\sim 240$	$>240$
有效磷 available P	<5	$\geq 5\sim 10$	$\geq 10\sim 20$	$\geq 20\sim 30$	$>30$
速效钾 available K	<80	$\geq 80\sim 160$	$\geq 160\sim 240$	$\geq 240\sim 350$	$>350$

## 1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 对 2 个年份的数据进行描述性统计分析，利用 K-S 检验 (Kolmogorov-Smirnov test) 计算参数 K-S  $P$  进行正态分布检验<sup>[19]</sup>，若 K-S  $P > 0.05$ ，则数据符合正态分布。

半方差函数模型的计算和理论模型拟合采用 GS+9.0 软件完成<sup>[20]</sup>，计算块金值、基台值、块金效应、变程、分形维数、Moran's I (空间自相关 Moran 系数)、标准化 Z 值、RMSSE 和 MSE 等参数。克里格插值 (Kriging)、绘图及面积统计均在 ArcGIS 10.2.2 软件实现<sup>[21-23]</sup>。 $C_0$  为块金方差 (块金值) 是间距  $h$  为 0 时的半方差，是由非区域因素 (人为因素) 引起的变异； $C$  为结构方差 (偏基台值)，是由区域因素 (非人为) 的变异； $C_0+C$  为基台值，表示系统内总的变异；块金值与基台值之比  $C_0/(C_0+C)$  为块金效应，用于表征系统变量的空间相关性程度，当比值  $< 25\%$ ，说明系统具有强烈的空间相关性，空间变异主要受区域因素影响；如果比值在  $25\% \sim 75\%$ ，表明系统具有中等的空间相关性；比值  $> 75\%$  则说明系统空间相关性很弱，空间变异主要受非区域因素影响<sup>[20]</sup>；变程用于表征随机变量在空间上的自相

关性尺度，某变量观测值之间的距离大于该值时，则说明它们之间是相互独立的；若小于该值时，则说明它们之间存在着一定的空间相关性<sup>[20]</sup>；分形维数用于变量空间结构特点的定量描述，数值越大表明变量呈现出更多较小尺度上的变异特点，其随机变异比例也越大。Moran's I 为空间自相关系数，Moran's I 系数的取值范围为  $[-1, 1]$ ，当其值小于 0 时，表示空间负相关，等于 0 时表示空间不相关，大于 0 时表示空间正相关。Moran's I 的标准化 Z 值大于 2.58 或小于 -2.58，表明变量在 0.05 统计水平下显著空间自相关，反之则表示变量在区域内关联性不显著，亦即存在较弱的自相关性。MSE 为标准化平均误差，RMSSE 为标准化均方根误差，MSE 数值越接近于 0，RMSSE 接近于 1，则表明插值精度越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 植烟土壤主要养分基本统计特征年代变化

2 个年份土壤主要养分均不符合正态分布，经对数转换后符合正态分布。15 年来，湘西植烟土壤有效养分变化较大，如表 2 所示：2 个年份土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量差异极显著

表2 2000年和2015年湘西植烟土壤主要养分含量状况

Tab. 2 Soil main nutrient in Xiangxi in 2000 and 2015

mg/kg

指标 index	碱解氮 AN				有效磷 AP				速效钾 AK			
	2000	2015	增量 increment	P 值 P value	2000	2015	增量 increment	P 值 P value	2000	2015	增量 increment	P 值 P value
平均值 mean	119.60	147.01	27.41	0.00	7.26	38.15	30.90	0.00	164.62	219.34	54.72	0.00
标准差 SD	24.22	44.49	20.27	—	6.18	34.36	28.18	—	56.71	147.44	90.73	—
变异系数% CV	20.25	30.26	10.01	—	85.09	90.06	4.97	—	34.45	67.22	32.77	—
最小值 Min.	61.00	29.70	-31.30	—	0.30	0.84	0.54	—	63.00	28.00	-35.00	—
最大值 Max.	239.30	366.80	127.50	—	52.60	234.00	181.40	—	385.00	1 296.90	911.90	—
极差 range	178.30	337.10	158.80	—	52.30	233.16	180.86	—	322.00	1 268.90	946.90	—

(P 值均为 0.00)。2015 年土壤碱解氮均值较 2000 年上升了 27.41 mg/kg, 上升幅度达 22.92%, 一直处于适宜水平, 最小值变小, 而变异系数、最大值和极差均变大。土壤有效磷含量大幅增加, 2015 年土壤有效磷均值较 2000 年增加了 30.90 mg/kg, 增幅高达 425.62%, 由低水平变为极高水平, 最小值、变异系数、最大值和极差均变大。土壤速效钾大幅上升, 2015 年土壤速效钾均值较 2000 年上升了 54.72 mg/kg, 增幅达 33.24%, 一直为适宜水平, 最小值变小, 而变异系数、最大值和极差均变大。表明主要养分含量在大幅增加的同时, 其变异也在变大。

## 2.2 植烟土壤有效养分时空变异特征

采用多种函数模型对植烟土壤主要养分指标进行拟合, 获得湘西州植烟土壤有效养分的最佳函数模型及其相关参数(表3), 除 2000 年有效磷最佳函数模型为高斯模型外, 其余年份各有效养分指标的最佳函数模型均为指数模型, 各模型均具有较高的拟合精度(RMSSE 接近 1, MSE 接近 0), 能够很好地反映土壤有效养分的空间结构特征。2 个年份的植烟土壤碱解氮和有效磷的块金效应均在 25%~75%, 而速效钾的块金效应>75%, 表明土壤碱解氮和有效磷的空间变异由随

机因素和结构因素共同决定, 而速效钾的空间变异则主要由随机性因素决定。2015 年各指标的块金效应数值均较 2000 年有所增大, 反映出随机性因素对有效养分的作用变大, 表明植烟土壤有效养分的空间结构性减弱, 随机变异性增强。此外, 还发现 15 年间, 土壤有效养分的 Moran's I 值也有较大下降。经标准化计算, 2 个年份 Moran's I 的标准化 Z 值均大于 2.58, 说明 2 个年份植烟土壤有效养分表现为显著空间自相关, 2015 年标准化 Z 值低于 2000 年, 表明土壤有效养分的空间自相关性在减弱, 随机性因素对各指标的影响在增强。进一步利用分形维数 D 对 2 个时期土壤有效养分的空间结构特点进行定量分析, 发现 2015 植烟土壤有效养分的分形维数均比 2000 年增加, 表明湘西州植烟土壤有效养分呈现出更多较小尺度上的变异特点, 其随机变异所占比例增加。

## 2.3 土壤有效养分时空分布变化

采用普通克里格插值法获取 2000 年和 2015 年湘西州植烟土壤有效养分含量空间分布图(图 1), 并利用 ArcGIS 软件自带的 Arctool box 模块统计不同等级的面积。2 个时期土壤有效养分含量空间分布规律均不明显, 2015 年湘西植烟土

表3 土壤有效养分半方差函数模型及相关参数比较

Tab. 3 The semi-variogram models of soil main nutrient and its parameters

指标 index	年份 year	模型 model	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块金效应 $C_0/(C_0+C)$	变程 range	分形维数 FD	Moran's I	标准化 Z	插值精度	
										RMSSE	MSE
碱解氮 alkali-hydrolyzable N	2000	Exp	125.60	298.43	42.09	0.024	1.956	0.337	14.50	0.975	-0.004
	2015	Exp	196.43	411.66	47.72	0.001	1.993	0.194	8.12	0.944	0.001
有效磷 available P	2000	Gau	23.65	51.35	46.04	0.100	1.915	0.388	13.11	0.988	0.000
	2015	Exp	510.63	777.64	65.66	0.039	1.984	0.096 7	7.32	1.028	0.003
速效钾 available K	2000	Exp	2 398.00	3 163.62	75.80	0.444	1.949	0.265	12.94	0.942	-0.007
	2015	Exp	12 843.41	15 949.81	80.52	0.006	1.986	0.229	8.32	0.896	0.002

壤有效含量分级面积与2000年相比发生较大变化(图1和表4)。

2000年土壤碱解氮含量总体为适宜和低,适宜等级的植烟土壤面积为56.54%,低等级的植烟

土壤面积为43.39%,高等级的植烟土壤面积比例仅为0.07%。2015年植烟土壤碱解氮含量较2000年有增加的趋势,高和适宜等级为主要面积,分别增加至6.00和86.06%,相应地低等级的面积

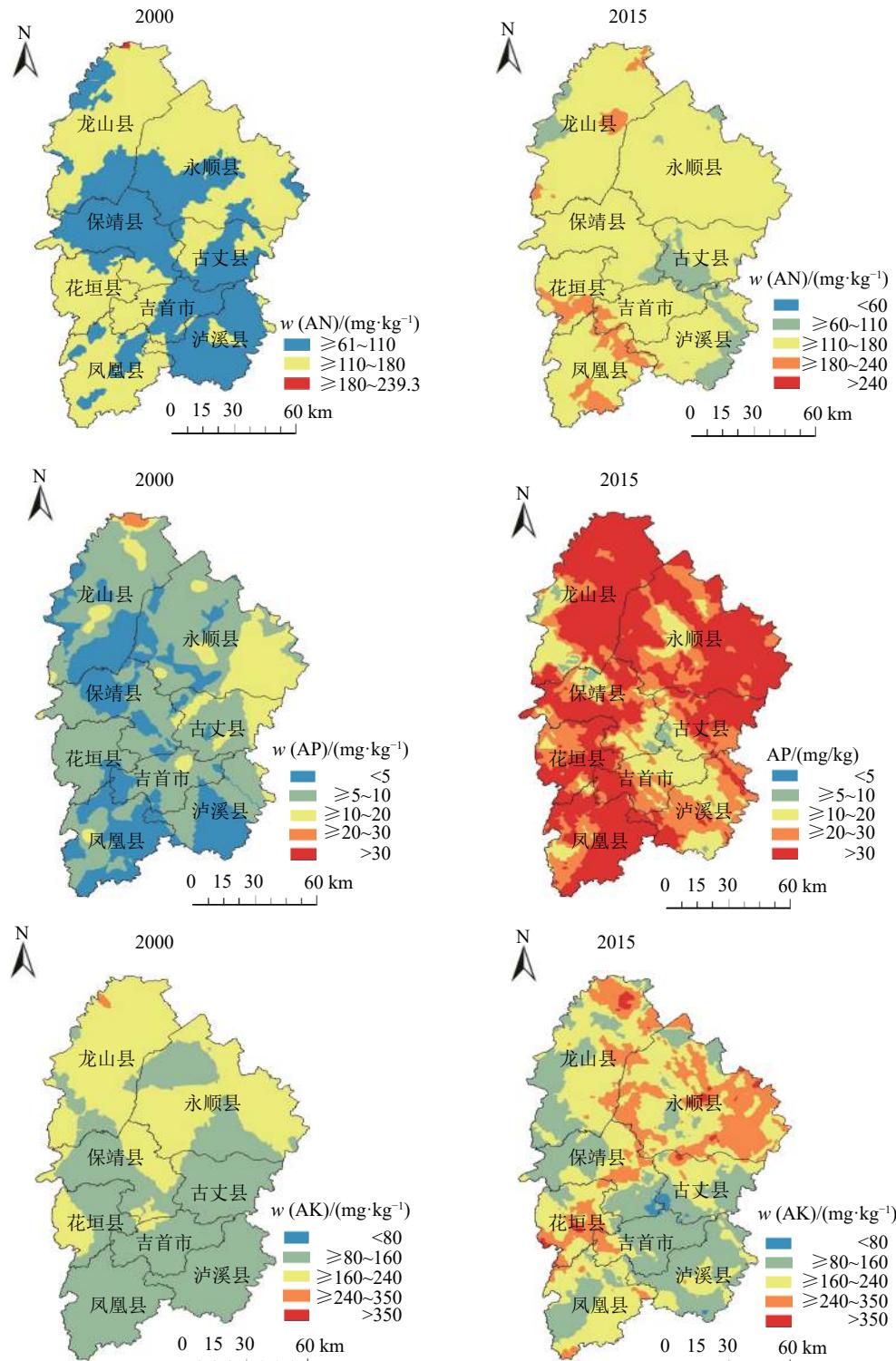


图1 湘西植烟土壤主要养分含量时空分布

Fig. 1 Spatial distribution of the main soil nutrient in Xiangxi

表4 2000年和2015年土壤主要养分各等级面积统计及变化

Tab. 4 Statistics and changes of soil main nutrient in 2000 and 2015

%

等级 grade	碱解氮面积比例 area ratio of AN			有效磷面积比例 area ratio of AP			速效钾面积比例 area ratio of AK		
	2000	2015	增量 increment	2000	2015	增量 increment	2000	2015	增量 increment
极低 very low	—	—	0.00	27.49	0.00	-27.49	—	0.60	+0.60
低 low	43.39	7.94	-35.45	58.64	1.49	-57.14	58.88	34.98	-23.91
适宜 suitable	56.54	86.06	+29.53	13.39	16.75	+3.36	40.93	43.83	+2.90
高 high	0.07	6.00	+5.93	0.47	26.46	+25.98	0.19	19.70	+19.51
极高 very high	—	—	+0.00	—	55.30	+55.30	—	0.89	+0.89

下降至 7.94%。综上所述, 2015 年土壤碱解氮含量变得更适于烤烟生产, 适宜和高等级的面积显著增加, 分别增加了 29.53% 和 5.93%; 而低等级则大幅下降, 比 2000 年下降了 35.45%。15 年来湘西植烟土壤碱解氮含量增加, 这可能与氮肥投入的增加有关。

2000 年土壤有效磷含量总体较低, 低和极低的植烟土壤面积分别高达 58.64% 和 27.49%, 适宜和高的植烟土壤面积比例分别仅为 13.39% 和 0.47%。2015 年植烟土壤有效磷含量较 2000 年有大幅增加的趋势, 新增了大量 2000 年未出现的极高等级面积, 高达 55.30%, 高等级亦由原来的零星分布增加至 26.46%, 适宜等级的面积亦小幅增加至 16.75%。综上所述, 2015 年土壤有效磷含量高和极高等级的面积显著增加, 分别增加了 25.98% 和 55.30%; 而极低和低等级则大幅下降, 分别比 2000 年下降了 27.49% 和 57.14%。15 年来湘西植烟土壤有效磷含量大幅增加, 这与磷肥的持续投入及磷素的长期积累有关。

2000 年土壤速效钾含量总体偏低, 适宜的植烟土壤面积仅为 40.93%, 高等级的植烟土壤面积比例仅有零星分布, 仅为 0.19%, 低等级的植烟土壤面积比例高达 58.88%。2015 年植烟土壤速效钾含量较 2000 年有增加趋势, 新增了 2000 年未出现的极高等级, 面积为 0.89%, 高等级亦由原来的零星分布增加至 19.70%, 适宜等级面积变化不大, 相应地, 低等级的面积下降至 34.98%。综上所述, 2015 年土壤速效钾含量极低、适宜、高和极高等级的面积均有不同程度的增加, 分别增加了 0.60%、2.90%、19.51% 和 0.89%; 而低等级则大幅下降, 比 2000 年下降了 23.91%。15 年来湘西植烟土壤速效钾含量呈增加趋势, 这与钾肥投入增加有关, 但仍有大量植烟土壤缺钾。

### 3 讨论

土壤作为烟叶生产的关键要素和重要基础, 是烤烟生长所需养分的主要来源, 其有效养分含量的高低及比例直接影响烤烟生长发育和烟叶产质量<sup>[24]</sup>。有关湘西植烟土壤养分的研究报道较多, 但多集中在单个年份的养分状况评价和主要养分指标间的相互关系等方面<sup>[10, 25-30]</sup>, 而对湘西植烟土壤养分时空变化的研究未见报道。然而, 植烟土壤有效养分含量不是一成不变的, 而是呈现出长期变化的过程, 土壤养分的变化必然会影响肥料的需求量。从 2000—2015 年 15 年来的湘西植烟土壤养分含量的变化情况来看, 土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均显著增加, 增幅分别达 22.92%、425.62% 和 33.24%, 这与烟草种植区<sup>[30-31]</sup>以及常规耕作区域<sup>[32-35]</sup>的研究结果均一致, 表明长期的耕作和施肥措施会提高土壤的有效养分含量; 从植烟土壤各养分指标的变异情况来看, 各养分指标的最小值均变小, 而变异系数、最大值和极差均变大, 表明植烟土壤养分变异加大, 可能是由于农民施肥量和施肥方法的差异造成的。土壤养分变异由系统变异和随机变异构成, 土壤母质和土壤类型等结构因子导致系统变异, 施肥、灌溉和耕作等人为因子引起随机变异<sup>[22]</sup>。通过地统计学方法计算土壤养分的块金效应, 2 个年份土壤碱解氮和有效磷的块金效应均在 25%~75%, 而 2 个年份速效钾的块金效应>75%, 表明土壤碱解氮和有效磷的空间变异由随机因素和结构因素共同决定, 而速效钾的空间变异则主要有人为因素决定, 15 年来各项养分指标的块金效应均有所增大, 表明人为因素在养分指标变异中起到的作用在增强, 各指标 Moran's I 的标准化 Z 值的下降和分形维数的下降均佐证了人为因

子对养分变异影响的增强<sup>[36]</sup>，可能与植烟土壤人为活动干预越来越剧烈有关，如植烟耕地整理、土壤改良等措施均在其中起到了作用，这与陈涛等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。空间插值的结果很好地显示了各养分指标不同等级的时空分布及其变异，碱解氮适宜等级的面积增加了29.53%，低等级的面积下降了35.45%；有效磷极低和低等级的面积分别下降了27.49%和57.14%，而高和极高等级的面积分别增加了25.98%和55.30%；速效钾低等级的面积减少了23.91%，适宜和高等级的面积分别增加了2.90%和19.51%。

综上所述，植烟土壤碱解氮和有效钾变得更适于烤烟生产，而有效磷大幅增加有可能对植烟环境和烟叶品质造成不利影响。因此建议湘西烟区应该稳定当前的氮肥用量，控制磷肥的投入，适当增加钾肥的施用，确保烤烟优质适产和保护植烟生态环境。

#### [参考文献]

- [1] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 944.
- [2] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 950. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0093.
- [3] 李江舟, 娄翼来, 张立猛, 等. 不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1075. DOI: 10.11674/zwyf.2015.0428.
- [4] 武德传, 王维洁, 施寒丰, 等. 喀斯特山地植烟土壤养分空间变异及分区研究[J]. 核农学报, 2016, 30(8): 1625. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2016.08.1625.
- [5] 史利江. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
- [6] 张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 53. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9369.2010.03.012.
- [7] 贾树海, 张琦, 孟维军, 等. 基于GIS与地统计学土壤养分空间变异特征研究——以辽宁省凌源市6乡镇为例[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 197. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2009.03.022.
- [8] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏, 等. 江西省耕地土壤氮素空间变异特征及其主控因素[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 304. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.047.
- [9] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0136.
- [10] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤pH分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 308. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.051.
- [11] 田茂成, 黎娟, 田峰, 等. 湘西植烟土壤有效锰含量及变化规律研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(17): 4103. DOI: 10.3969/j.issn.0439-8114.2013.17.021.
- [12] 刘逊, 邓小华, 周米良, 等. 湘西植烟土壤有机质含量分布及其影响因素[J]. 核农学报, 2012, 26(7): 1037.
- [13] 周米良, 邓小华, 刘逊, 等. 湘西植烟土壤交换性钙含量及空间分布研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9697. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2012.18.046.
- [14] 黎娟, 邓小华, 周米良, 等. 湘西植烟土壤交换性镁含量及空间分布研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(2): 232. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2286.2012.02.006.
- [15] 李迪秦, 龚湛武, 陈一凡, 等. 不同播种移栽期对烤烟产量与品质影响的多指标模糊评价[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2258. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.11.2258.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] 中国农业科学院烟草研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
- [18] 曹志洪. 优质烤烟生产的土壤与施肥[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991.
- [19] 郝黎仁, 攀元, 郝哲欧. SPSS实用统计分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [20] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] 王淑英, 胡克林, 路萍, 等. 北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征及其环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1290. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2009.04.020.
- [22] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和GIS分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1204. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2005.06.020.
- [23] 吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改. ArcGIS 9地理信息系统应用与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [24] 杨荣生. 曲靖市植烟土壤分析与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [25] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西州植烟土壤pH和中微量元素分布及其相关关系[J]. 烟草科技, 2017, 50(5): 24. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2016.0132.
- [26] 张明发, 田峰, 李孝刚, 等. 基于烤烟生产的湘西植烟土壤质量综合评价[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(3): 87. DOI: 10.16472/j.chinatobacco.2016.294.
- [27] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西植烟土壤pH和主要养分特征及其相互关系[J]. 土壤, 2017, 49(1): 49. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2017.01.008.
- [28] 毛辉, 张黎明. 湘西植烟土壤养分状况分析及施肥建议[J]. 作物研究, 2016, 30(3): 299. DOI: 10.16848/j.cnki.issn.1001-5280.2016.03.15.
- [29] 邓小华, 杨丽丽, 周米良, 等. 湘西喀斯特区植烟土壤速效钾含量分布及影响因素[J]. 山地学报, 2013, 31(5): 519. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2013.05.002.
- [30] 黄俊杰. 大理州植烟土壤养分时空变化特征及烤烟施肥优化[D]. 昆明: 云南农业大学, 2016.
- [31] 王育军, 周冀衡, 孙书斌, 等. 云南省罗平县烟区土壤肥力适宜性评价及养分时空变异特征[J]. 土壤, 2015, 47(3): 515. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2015.03.014.
- [32] 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): 1. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.20171214.001](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.20171214.001).
- [33] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.017](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.017).
- [34] 王秀华, 谢志英, 黄立文, 等. 基于 GIS 的西双版纳州耕地土壤养分时空变化分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2014, 29(5): 727. DOI: [10.3969/j.issn.1004-390X\(n\).2014.05.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-390X(n).2014.05.018).
- [35] 崔贝, 王纪华, 杨武德, 等. 冬小麦—夏玉米轮作区土壤养分时空变化特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2471. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2013.12.008](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2013.12.008).
- [36] 李强, 唐春闺, 李帆, 等. 水旱轮作植烟土壤有效磷的时空变异及风险评估[J]. 烟草科技, 2016, 49(6): 22. DOI: [10.16135/j.issn1002-0861.20160604](https://doi.org/10.16135/j.issn1002-0861.20160604).
- [37] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 554. DOI: [10.5846/stxb201111161745](https://doi.org/10.5846/stxb201111161745).

责任编辑: 何承刚