

土地整理后土壤理化性状和烤烟产质量空间变异^①

张久权¹, 张瀛², 黄一兰², 林建麒^{2*}, 陈德鑫¹, 陈守木³, 赵鹏超³

(1 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101; 2 福建省烟草公司三明市公司, 福建三明 365000;

3 三明市烟草公司宁化分公司, 福建宁化 365400)

摘要:为了弄清土地整理后土壤理化性状指标、微生物数量以及烤烟产量和质量的空间变异情况, 在福建三明烟区整理后烟田进行了大田取样分析和定点调查。结果显示, 土地整理后土壤有效养分比全量养分空间变异大, 变异系数超过 30%; 土壤微生物计数及多样性指数变异系数在 66.17%~111.71%, 均属于强变异; 土地整理对烤烟产、质量均质性影响最大的是上、中等烟比例和糖碱比, 烤烟产、质量的变异以 285.91 m 小范围为主。总之, 土地整理后土壤理化性状和微生物数量空间变异明显, 对烤烟产量和质量的均质性影响较大, 需要进行改良。

关键词: 土地整理; 烤烟; 空间变异; 地统计学

中图分类号: S572.061 文献标识码: A

土地整理是将面积较小、形状不规则、灌溉设施和交通条件较差的零散地块归并为较规整的均质化田块的过程, 并进行土地平整、土壤改良、道路和沟渠等的综合建设, 以便于机械化操作和田间管理。西方国家如日本已在 20 世纪 50 年代在全国范围内完成了土地整理工作。我国在 20 世纪初开始重视土地整理工作, 近年来由国土资源部牵头, 投入了大量的物力和财力开展这项工作, 并作为长期的工作重点之一^[1]。从长远来看, 土地整理对作物生产具有重大意义, 但短期内会有一些负面效果, 如土壤有效养分含量降低、物理性质变差、微生物群落结构遭到破坏等^[2-4]。对植烟土壤, 土地整理所进行的土壤翻压和客土填埋, 会导致土壤结构、土壤肥力和微生物群落的空间变异增大, 从而导致所产烟叶质量不均匀, 不能满足卷烟配方对烟叶质量尽量保持一致的要求。在烟田土壤整理后土壤物理、化学和生物学属性变化方面国内已有一些研究报道^[4-13], 但关于整理后土壤属性空间变异方面的研究报道不多, 尤其是关于土壤属性与烤烟产/质量的空间变异方面报道甚少, 如徐大兵等^[5,12]采用 GIS 技术和地统计学方法研究了湖北恩施州土地整理后烟田土壤有机质和土壤养分的空间变异特征, 廖超林等^[13]对湘中南土地整理后烟田土壤养分的空间变异特征进行研究发现各肥力指标均属于中

等变异。赵明松等^[14]研究了江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征, 张智等^[15]对长江中游农田土壤微量元素养分空间分布进行了研究, 但这些都不是针对植烟土壤进行的。金明清等^[16]对四川盐源植烟土壤中大量元素氮磷钾含量的空间变异进行了研究, 李珊等^[17]在四川泸州烟区对土壤中的微量元素有效养分含量的空间变异进行了研究, 虽然他们的研究对象是烤烟种植区, 但不是针对土地整理后的土壤养分的空间变异情况。为此, 本研究运用经典统计学和地统计学方法, 以福建三明宁化县植烟土壤为例, 研究了土地整理后土壤肥力等指标和烤烟产、质量等空间变异情况, 旨在揭示其空间变异规律, 为土地整理后制定适宜的土壤改良措施和烤烟生产管理方案提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究于 2015—2016 年在福建省宁化县湖村凉伞岗农场($116^{\circ}52'25.7''$ E, $26^{\circ}22'18.6''$ N)进行, 该区海拔 417.40~423.26 m, 平均为 420.45 m, 烤烟/水稻轮作, 土壤为水稻土(水耕人为土), 整个农场面积约 100 hm²。2014 底年完成土地整理, 2016 年 2—6 月种植烤烟, 品种为“云烟 87”。选取土地整理时间、整理方法、地形地貌相对一致的 8.5 hm² 区域作为研

基金项目: 中国烟草总公司面上项目(2013-149)资助。

* 通讯作者(ljq0108@163.com)

作者简介: 张久权(1965—), 男, 湖北松滋人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤肥力和烟草栽培方面的研究。E-mail: zhangjiuquan@caas.cn

究对象(图1)，包括31个田块，其中26个田块的面积为 $0.2\sim0.3\text{ hm}^2$ ，在每个田块内确定1个取样单元，其余5个田块面积 $0.3\sim0.5\text{ hm}^2$ ，在每个田块内确定2个取样单元，合计36个取样单元。每个取样单元尺度为 $30\text{ m}\times50\text{ m}$ ，各点用GPS仪精确定位。

1.2 取样与分析

土壤肥力指标样品于2015年1月22日翻耕施基肥前取样，采集耕层 $0\sim20\text{ cm}$ 土壤，在每个取样单元内按S型取5个点，充分混匀成为1个样品，并采用四分法留取1kg，经风干、去杂、研磨和过筛后用于肥力指标测定。土壤物理特性于2016年3月2日烤烟移栽后在取样单元中心点定点，采用 100 cm^3 环刀取 $0\sim20\text{ cm}$ 土层原状土带回实验室，按标准方法LY/T1215—1999^[18]测定和计算土壤容重、田间持水量、土壤通气度等指标。土壤微生物群落于2016年7月1日(烤烟顶叶成熟期)取样测定，在每个取样单元按S型5点法取混合样，装袋冷冻后带回实验室测定。



图1 取样点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling sites

土壤肥力指标(包括pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾、交换性钙和镁、有效态微量元素(铁、锰、锌、铜)按文献[19]的方法进行测定，土壤活性有机质含量按文献[20-21]方法测定；土壤微生物采用稀释平板法进行计数^[22]，多样性指数计算参见文献[4]。

各取样单元选取有代表性的20株烟株挂牌作标记，统计有效叶片数，单独计产、分级，计算产量和上、中等烟比例。在按部位烘烤的基础上，选留C3F的烟叶，每份样品1.0 kg，采用Nicolet Antaris傅立叶近红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技有限公司)按标准[23-27]测定烟叶化学成分。

1.3 数据处理和统计分析

采用SAS 9.4软件对数据进行描述性统计分析，采用地统计学软件GS+ 9.0对数据进行半方差函数

计算和模型拟合。模型的选择主要考虑决定系数(R^2)和残差(RSS)，具体方法详见参考文献[28-29]。

2 结果与讨论

2.1 土壤肥力指标

研究区域内36个单元土壤肥力指标描述性统计结果见表1，可以看出，pH等10个指标为正态分布，其余6个指标经过对数转换后也呈正态分布。按照变异系数(CV)大小，可粗略地将变异程度分为3级：CV>30%为强变异性；10%<CV<30%为中等变异性；CV<10%为弱变异性^[30]。据此，研究区域内土壤肥力指标空间变异非常明显。CV>30%属于强变异的指标其CV从高到低依次为土壤有效锰>活性有机质>有效磷>速效钾>有效铁>交换性钙>交换性镁>有效锌>缓效钾，说明土地整理对这些指标的空间变异影响很大；CV介于20%~30%属于中等变异的指标其CV从高到低依次为土壤全磷>有机质>有效铜>全钾>碱解氮>全氮；仅土壤pH为弱变异，其CV为4.39%，说明土壤pH在土地整理后很稳定。从绝对值差值来看，活性有机质变异程度最高，其含量范围为0.37~9.46 g/kg；其次是土壤有效锰含量，为22.83~405.22 mg/kg；再则是有效磷含量，为3.65~59.60 mg/kg。各指标空间变异程度存在差异，可能与其在土壤中的可移动性、整理前养分分布、整理操作过程等有关。本研究结果表明，在一般情况下，有效养分在土壤中的移动性强，造成了空间变异大；全量养分如土壤全磷在土壤中的移动相对较弱，空间变异中等。

按照土壤肥力指标丰缺标准^[31-32]，土壤pH处于较低到适中的范围；土壤有机质、全磷、有效磷、交换性钙含量覆盖极低至极高的范围；全氮含量为适中至极丰；全钾含量为极缺至缺；碱解氮、速效钾含量为缺至极丰；缓效钾含量为极丰；交换性镁含量为缺至丰富；有效铁含量为极丰富；有效锰、有效锌、有效铜含量为丰富至极丰富。由此可见，在研究区域内，各肥力因子丰缺跨度较大，表明养分空间上不均衡，需要考虑精准施肥。

对各指标进行半方差分析和模型拟合，所得模型主要包括指型、高斯型、球型和直线型4种，其结果示例见图2。半方差模型有4个重要参数：块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、基底效应和变程。在本研究中，块金值表示各取样点间分离距离为0时的半方差，是由试验误差和土地整理操作、耕作制度、施肥等随机因素引起的变异。基台值(C_0+C)表示系统内总变异，

表 1 土壤肥力指标描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil fertility indices

| 肥力指标 | 分布类型 | 最小值 | 最大值 | 极差 | 均值 | 标准差 | CV(%) |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| pH | 正态分布 | 4.68 | 5.80 | 1.12 | 5.11 | 0.23 | 4.39 |
| 有机质(g/kg) | 正态分布 | 8.24 | 40.57 | 32.33 | 24.60 | 6.58 | 26.76 |
| 活性有机质(g/kg) | 对数正态 | 0.37 | 9.46 | 9.09 | 2.30 | 1.55 | 67.52 |
| 全氮(g/kg) | 正态分布 | 1.06 | 2.36 | 1.29 | 1.61 | 0.33 | 20.81 |
| 全磷(g/kg) | 正态分布 | 0.34 | 1.10 | 0.76 | 0.71 | 0.20 | 28.53 |
| 全钾(g/kg) | 正态分布 | 6.20 | 15.50 | 9.30 | 10.09 | 2.34 | 23.15 |
| 碱解氮(mg/kg) | 正态分布 | 38.60 | 160.50 | 121.90 | 111.88 | 24.68 | 22.06 |
| 有效磷(mg/kg) | 正态分布 | 3.65 | 59.60 | 55.95 | 31.01 | 15.12 | 48.77 |
| 速效钾(mg/kg) | 对数正态 | 60.00 | 290.00 | 230.00 | 145.64 | 67.80 | 46.55 |
| 缓效钾(mg/kg) | 对数正态 | 255.00 | 800.00 | 545.00 | 504.86 | 158.01 | 31.30 |
| 交换性钙(mg/kg) | 对数正态 | 145.41 | 640.63 | 495.22 | 297.47 | 109.34 | 36.76 |
| 交换性镁(mg/kg) | 对数正态 | 17.29 | 65.94 | 48.65 | 30.52 | 9.63 | 31.55 |
| 有效铁(mg/kg) | 正态分布 | 58.58 | 771.14 | 712.56 | 441.42 | 168.44 | 38.16 |
| 有效锰(mg/kg) | 对数正态 | 22.83 | 405.22 | 382.39 | 105.50 | 78.47 | 74.38 |
| 有效锌(mg/kg) | 正态分布 | 1.21 | 5.09 | 3.88 | 3.04 | 0.96 | 31.53 |
| 有效铜(mg/kg) | 正态分布 | 1.37 | 4.17 | 2.80 | 2.69 | 0.71 | 26.44 |

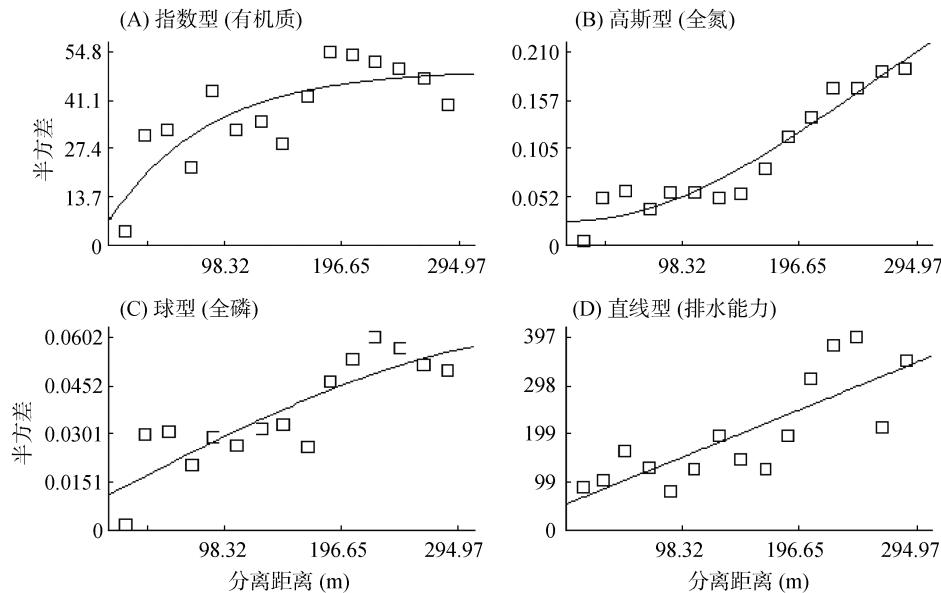


图 2 半方差函数拟合示例图
Fig. 2 Semivariograms of selected studied soil fertility indices

为块金值和拱高(C)之和。拱高是由土壤母质、地形等非人为因素引起的变异。基底效应即块金值与基台值之比,表示由随机性因素引起的空间变异性占系统总变异的比例。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准,当基底效应<25%时,变量具有强烈的空间相关性;基底效应在25%~75%,变量具有中等的空间相关性;而基底效应>75%时,变量空间相关性很弱,且空间变异主要受随机性因子影响^[33]。变程是

指最大相关距离,反映空间自相关范围的大小,它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤属性的各种生态过程、人为因素、自然条件等都有关^[5]。

进行半方差分析时,数据需要满足正态分布的要求^[34]。本研究土壤肥力指标数据均为正态分布或通过对数转换后成正态分布(表1),因此这些数据都满足半方差分析的要求。

表 2 列出了土壤肥力指标拟合所得最佳半方差

函数理论模型及其特征参数，可以看出，土壤 pH、全氮、全钾、有效磷、速效钾、缓效钾、有效铁、有效铜最佳半方差函数理论模型为高斯型；全磷、碱解氮、交换性钙、交换性镁最佳半方差函数理论模型为球型；有机质、活性有机质、有效锰、有效锌最佳半方差函数理论模型为指指数型。从基底效应值来看，只有土壤有效锰和有效锌超过 25%，空间相关性中等，其空间变异受随机因素和结构因素双重影响；其他肥力指标的基底效应值都小于 25%，且有效铜>交换性镁>全磷>活性有机质>碱解氮>有机质>速效钾>pH>全氮>全钾>缓效钾>交换性钙>有效磷>有效铁。基底

效应值越小，说明其空间相关性越强，来自非人为因素造成的影响越大。表 2 的结果还表明，各指标间变程差异很大，且 pH<有效铁<有效磷<活性有机质<交换性镁<交换性钙<碱解氮<有机质<有效铜<全磷<缓效钾<速效钾<全氮<全钾<有效锌<有效锰。pH 最佳半方差函数变程最小，为 26.5 m，说明其变异以小范围为主，即土壤 pH 在 26.5 m 的范围内存在空间自相关性；有效锰最佳半方差函数变程最大，为 1 832.7 m，说明其变异以大块状为主，即土壤有效锰含量在 1 832.7 m 的范围内存在空间自相关性；其他各肥力指标空间自相关性位于 26.5 ~ 1 832.7 m。

表 2 土壤肥力指标的半方差模型及拟合参数
Table 2 Semi-variance models and fitting parameters of soil fertility indices

| 指标 | 模型 | 块金值 C_0 | 基台值 C_0+C | 基底效应(%) | 变程(m) | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|-------------|-----|-----------|-------------|---------|----------|------------|------------------------|
| pH | 高斯 | 0.003 2 | 0.046 20 | 6.93 | 26.50 | 0.141 | 1.84×10^{-3} |
| 有机质(g/kg) | 指指数 | 6.40 | 49.71 | 12.87 | 250.2 | 0.646 | 927.0 |
| 活性有机质(mg/g) | 指指数 | 0.050 1 | 0.336 2 | 14.90 | 138.00 | 0.385 | 0.0839 |
| 全氮(g/kg) | 高斯 | 0.026 | 0.40 | 6.50 | 621.80 | 0.926 | 3.919×10^{-3} |
| 全磷(g/kg) | 球型 | 0.011 2 | 0.06 | 18.67 | 387.50 | 0.734 | 9.634×10^{-4} |
| 全钾(g/kg) | 高斯 | 1.13 | 22.25 | 5.08 | 688.14 | 0.814 | 28.0 |
| 碱解氮(mg/kg) | 球型 | 104.00 | 737.00 | 14.11 | 207.60 | 0.482 | 625 779.0 |
| 有效磷(mg/kg) | 高斯 | 0.10 | 234.7 | 0.04 | 37.24 | 0.351 | 62 929.0 |
| 速效钾(mg/kg) | 高斯 | 0.043 | 0.593 | 7.25 | 549.06 | 0.926 | 0.012 |
| 缓效钾(mg/kg) | 高斯 | 0.011 5 | 0.242 | 4.75 | 399.93 | 0.978 | 1.28×10^{-3} |
| 交换性钙(mg/kg) | 球型 | 0.000 10 | 0.152 2 | 0.07 | 166.40 | 0.524 | 0.0277 |
| 交换性镁(mg/kg) | 球型 | 0.019 5 | 0.097 | 20.10 | 149.20 | 0.435 | 8.643×10^{-3} |
| 有效铁(mg/kg) | 高斯 | 10.0 | 29 200.0 | 0.03 | 33.42 | 0.231 | 1.22×10^9 |
| 有效锰(mg/kg) | 指指数 | 0.294 | 0.786 | 37.40 | 1 832.70 | 0.214 | 0.163 |
| 有效锌(mg/kg) | 指指数 | 0.579 | 1.371 | 42.23 | 872.70 | 0.510 | 0.30 |
| 有效铜(mg/kg) | 高斯 | 0.163 | 0.797 | 20.45 | 346.24 | 0.883 | 0.071 2 |

2.2 土壤物理性状

本研究所测定的土壤物理指标包括土壤容重、最大持水量、田间持水量、毛管孔隙度、土壤通气度和排水能力。最大持水量是指土壤孔隙都充满水时的含水量，此时，土壤通气受阻，对作物根系生长发育不利。田间持水量是土壤中毛管悬着水达到最大量时的土壤含水量，包括吸湿水、膜状水和毛管悬着水 3 部分。当灌溉或降水使土壤水分超过田间持水量时，超出部分将流失，因而田间持水量是土壤有效水分的上限值^[35]。土壤通气度是指土壤孔隙除去被水占用的部分。用最大持水量减去最小持水量即为排水能力。研究区域内 36 个单元土壤容重等物理性质描述性统计结果见表 3，可以看出，土壤容重、最大持水量、田间持水量、毛管孔隙度、排水能力等为正态分布；土壤通气度通过 BoxCox 转换后也为正态分布。

从变异系数来看，土壤通气度超过 30%，为强变异；排水能力和最大持水量在 20% ~ 30%，为中等变异；田间持水量、土壤容重和毛管孔隙变异系数小于 20%，属于弱变异的范畴。从差值来看，土壤通气度介于 4.50% ~ 43.03%，空间变异最大。

研究区域内土壤容重等土壤物理性质拟合所得半方差函数理论模型及其特征参数见表 4。可以看出，土壤容重、最大持水量、土壤通气度最佳半方差函数理论模型为高斯型；田间持水量和毛管孔隙度为球型。基底效应田间持水量最高，最大持水量和土壤通气度次之，排水能力最低。6 个指标中，仅毛管孔隙度和排水能力 2 个指标基底效应小于 25%，说明这些指标的变异主要由人为因素造成。变程各指标间差异较大，范围从最小的田间持水量 123.90 m 到土壤容重 566.90 m，从小范围到中等范围均存在。

表 3 土壤物理性状描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of soil physical properties

| 指标 | 分布类型 | 最小值 | 最大值 | 极差 | 均值 | 标准差 | CV(%) |
|--------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 土壤容重(g/cm^3) | 正态分布 | 0.88 | 1.38 | 0.50 | 1.11 | 0.13 | 12.09 |
| 最大持水量(g/kg) | 正态分布 | 331.36 | 738.15 | 406.79 | 537.47 | 113.83 | 21.18 |
| 田间持水量(g/kg) | 正态分布 | 194.95 | 366.22 | 171.27 | 279.74 | 37.41 | 13.37 |
| 毛管孔隙度(V/V , %) | 正态分布 | 35.00 | 55.11 | 20.11 | 45.52 | 4.75 | 10.43 |
| 土壤通气度(V/V , %) | BoxCox 正态 | 4.50 | 43.03 | 38.53 | 29.29 | 9.52 | 32.52 |
| 排水能力(mm) | 正态分布 | 19.40 | 84.22 | 64.82 | 54.67 | 14.86 | 27.18 |

表 4 土壤物理性状的半方差模型及拟合参数
Table 4 Semi-variance models and fitting parameters of soil physical properties

| 指标 | 模型 | 块金值 C_0 | 基台值 C_0+C | 基底效应(%) | 变程(m) | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|--------------------------------|----|-----------|-------------|---------|--------|------------|------------------------|
| 土壤容重(g/cm^3) | 高斯 | 0.010 85 | 0.036 70 | 29.56 | 566.90 | 0.608 | 1.989×10^{-4} |
| 最大持水量(g/kg) | 高斯 | 6 080.0 | 17 330.0 | 35.08 | 296.00 | 0.651 | 1.10×10^8 |
| 田间持水量(g/kg) | 球型 | 599.0 | 1 490.0 | 40.20 | 123.90 | 0.378 | 1 257 502 |
| 毛管孔隙度(V/V , %) | 球型 | 6.21 | 28.69 | 21.65 | 178.40 | 0.606 | 415 |
| 土壤通气度(V/V , %) | 高斯 | 5 290.0 | 15 380.0 | 34.40 | 271.42 | 0.566 | 1.35×10^8 |
| 排水能力(mm) | 直线 | 53.86 | 335.47 | 16.06 | 285.51 | 0.64 | 39 261.0 |

2.3 土壤微生物

研究区域内 36 个取样单元土壤微生物计数描述性统计结果见表 3, 可以看出, 真菌计数和多样性指数为正态分布; 细菌和放线菌计数通过对数转换后也为正态分布。所有指标的变异系数 CV 都超过 30%,

为强变异; 变异程度放线菌计数>细菌计数>多样性指数>真菌计数。从差值来看, 细菌计数空间变异最大, 变化范围为 $6.05 \times 10^4 \sim 622.18 \times 10^4 \text{ cfu/g}$, 说明土地整理后各取样点间土壤微生物数量空间变异非常明显。

表 5 土壤微生物计数及多样性指数描述性统计
Table 5 Descriptive statistics of soil micro-organism counts

| 指标 | 分布类型 | 最小值 | 最大值 | 极差 | 均值 | 标准差 | CV(%) |
|------------------------------------|------|------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 细菌($\times 10^5 \text{ cfu/g}$) | 对数正态 | 0.61 | 62.22 | 61.61 | 19.34 | 19.30 | 99.79 |
| 真菌($\times 10^2 \text{ cfu/g}$) | 正态分布 | 2.76 | 68.02 | 65.26 | 30.32 | 20.06 | 66.17 |
| 放线菌($\times 10^3 \text{ cfu/g}$) | 对数正态 | 4.85 | 389.55 | 384.7 | 95.53 | 106.72 | 111.71 |
| 多样性指数 | 正态分布 | 0.01 | 0.87 | 0.86 | 0.32 | 0.26 | 79.38 |

表 6 土壤微生物计数的半方差模型及拟合参数
Table 6 Semi-variance model and fitting parameters of soil micro-organism counts

| 指标 | 模型 | 块金值 C_0 | 基台值 C_0+C | 基底效应(%) | 变程(m) | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|------------------------------------|----|-----------|-------------|---------|--------|------------|-----------------------|
| 细菌($\times 10^5 \text{ cfu/g}$) | 球形 | 0.057 | 1.815 0 | 3.14 | 166.80 | 0.665 | 0.806 |
| 真菌($\times 10^2 \text{ cfu/g}$) | 高斯 | 1.00 | 414.60 | 0.24 | 54.21 | 0.148 | 142 420 |
| 放线菌($\times 10^3 \text{ cfu/g}$) | 球形 | 0.179 | 1.580 | 11.33 | 104.81 | 0.074 | 9.03 |
| 多样性指数 | 高斯 | 0.017 8 | 0.087 0 | 20.46 | 168.00 | 0.621 | 2.17×10^{-3} |

表 6 列出了土壤微生物计数和多样性指数拟合所得半方差函数理论模型及其特征参数。细菌和放线菌计数最佳半方差函数理论模型为球型, 真菌和多样性指数为高斯型。基底效应以多样性指数最高, 放线菌次之, 细菌和真菌都很低。4 个指标的基底效应值都小于 25%, 说明其空间相关性大, 来自非人为因素造成的关系性比重高。变程真菌最小, 其

余 3 个指标的变程在 100 ~ 170 m, 主要以小范围变异为主。

2.4 烤烟产量和质量

研究区域内 36 个取样单元烤烟产量和质量描述性统计结果见表 7, 可以看出, 有效叶片数、上等烟比例、中等烟比例、烟叶总氮含量、钾含量、氯含量、钾氯比、两糖比 8 个指标为正态分布; 烟叶烟碱含量、

总糖含量、还原糖含量、糖碱比、氮碱比5个指标经对数转换后也呈正态分布；烟叶产量通过BoxCox转换后为正态分布。变异系数CV从高到低为上等烟比例>糖碱比>中等烟比例>有效叶片数>烟碱含量>产量>氯含量>钾含量>钾氯比>总氮>总糖含量>还原糖含量>氮碱比>两糖比。上等烟比例和糖碱比2个指标的变异系数超过30%，为强变异，说明土地整理对这些指标的影响较大，不同取样点养分含量差异大。两糖比变异系数小于10%，为弱变异；其余指标变异系数在20%~30%范围内，为中等变异。如果从差值来看，上等烟比例最低的为0，最高的

为29.9%；中等烟比例最高的是最低的5.32倍，相差极大。

表8列出了烤烟产量和质量指标拟合所得半方差函数理论模型及其特征参数，可以看出，有效叶片数、产量、总氮含量、烟碱含量、总糖含量、还原糖含量、氯含量、糖碱比、两糖比最佳半方差函数理论模型为球型，上等烟比例、烟叶钾含量为高斯型；氮碱比为指数型；中等烟比例和钾氯比为直线型。从决定系数看，所有模型都不理想。一般地，半方差函数拟合模型的决定系数要超过0.80，但这些模型的决定系数最高的为0.637，低于0.80。

表7 烤烟产量、质量描述性统计
Table 7 Descriptive statistics of yield and quality of tobacco leaves

| 指标 | 分布类型 | 最小值 | 最大值 | 极差 | 均值 | SD | CV |
|-------------------------|-----------|--------|----------|----------|----------|--------|-------|
| 有效叶片数(片/株) | 正态分布 | 4.20 | 14.60 | 10.40 | 10.37 | 2.58 | 24.91 |
| 产量(kg/hm ²) | BoxCox 正态 | 684.56 | 1 921.19 | 1 236.65 | 1 351.25 | 328.67 | 24.32 |
| 上等烟(%) | 正态分布 | 0.00 | 29.90 | 29.90 | 12.61 | 7.87 | 62.44 |
| 中等烟(%) | 正态分布 | 15.07 | 80.23 | 65.16 | 55.52 | 15.01 | 27.03 |
| 总氮(%) | 正态分布 | 1.68 | 3.11 | 1.43 | 2.35 | 0.40 | 17.05 |
| 烟碱(%) | 对数正态 | 2.41 | 5.50 | 3.09 | 3.75 | 0.91 | 24.38 |
| 总糖(%) | 对数正态 | 19.78 | 32.75 | 12.97 | 24.68 | 3.73 | 15.12 |
| 还原糖(%) | 对数正态 | 19.19 | 31.03 | 11.84 | 23.48 | 3.38 | 14.39 |
| 钾(%) | 正态分布 | 1.56 | 3.80 | 2.24 | 2.74 | 0.53 | 19.38 |
| 氯(%) | 正态分布 | 0.40 | 1.02 | 0.62 | 0.68 | 0.16 | 23.83 |
| 糖碱比 | 对数正态 | 3.961 | 13.299 | 9.337 | 7.135 | 2.576 | 36.11 |
| 氮碱比 | 对数正态 | 0.5 | 0.917 | 0.417 | 0.64 | 0.083 | 12.94 |
| 钾氯比 | 正态分布 | 2.942 | 5.756 | 2.814 | 4.142 | 0.729 | 17.60 |
| 两糖比 | 正态分布 | 0.896 | 0.999 | 0.102 | 0.953 | 0.022 | 2.29 |

表8 烤烟产、质量的半方差模型及拟合参数
Table 8 Semi-variance model and fitting parameters of yield and quality of tobacco leaves

| 指标 | 模型 | 块金值 C ₀ | 基台值 C ₀ +C | 基底效应(%) | 变程(m) | 决定系数 R ² | 残差 RSS |
|-------------------------|----|--------------------|-----------------------|---------|--------|---------------------|------------------------|
| 有效叶片数(片/株) | 球型 | 0.87 | 7.62 | 11.42 | 110.70 | 0.258 | 123.0 |
| 产量(kg/hm ²) | 球型 | 1 300 000 | 58 100 000 | 2.24 | 80.10 | 0.280 | 6.01×10 ¹⁵ |
| 上等烟(%) | 高斯 | 0.100 | 57.60 | 0.17 | 51.79 | 0.624 | 1549.0 |
| 中等烟(%) | 直线 | 122.73 | 252.47 | 48.61 | 285.51 | 0.536 | 17717.0 |
| 总氮(%) | 球型 | 0.000 10 | 0.195 2 | 0.05 | 156.40 | 0.586 | 0.0414 |
| 烟碱(%) | 球型 | 0.006 3 | 0.064 6 | 9.75 | 135.10 | 0.506 | 3.354×10 ⁻³ |
| 总糖(%) | 球型 | 0.002 83 | 0.025 96 | 10.90 | 180.10 | 0.522 | 6.578×10 ⁻⁴ |
| 还原糖(%) | 球型 | 0.003 14 | 0.023 08 | 13.60 | 176.50 | 0.476 | 5.723×10 ⁻⁴ |
| 钾(%) | 高斯 | 0.061 | 0.382 | 15.97 | 165.41 | 0.631 | 0.109 |
| 氯(%) | 球型 | 0.002 97 | 0.029 34 | 10.12 | 119.70 | 0.374 | 1.166×10 ⁻³ |
| 糖碱比 | 球型 | 0.010 | 0.148 | 6.76 | 164.40 | 0.518 | 0.0224 |
| 氮碱比 | 指数 | 0.001 79 | 0.015 08 | 11.87 | 32.10 | 0.065 | 1.235×10 ⁻⁴ |
| 钾氯比 | 直线 | 0.512 36 | 0.512 36 | 100.00 | 285.91 | 0.001 | 0.356 |
| 两糖比 | 球型 | 0.000 11 | 0.000 54 | 20.37 | 162.60 | 0.637 | 1.258×10 ⁻⁷ |

从基底效应值来看，烟叶钾氯比的最高，为 100.00%，说明烟叶钾氯比空间相关性极弱，空间变异主要受随机性因子影响。烟叶中等烟比例的基底效应值为 48.61%，处于 25%~75% 范围内，说明其空间相关性属于中等，其空间变异主要受随机因素和结构因素双重影响；其他指标的基底效应值都小于 25%，且两糖比>钾含量>还原糖含量>氮碱比>有效叶片数>总糖含量>氯含量>烟碱含量>糖碱比>产量>上等烟比例>烟叶总氮含量。基底效应值越小，说明其空间相关性越大，来自非人为因素造成的关系性比重越高。表 8 的结果还表明，各指标间变程差异较大，且氮碱比<上等烟比例<产量<有效叶片数<氯含量<烟碱含量<总氮含量<两糖比<糖碱比<钾含量<还原糖含量<总糖含量<中等烟比例<钾氯比。氮碱比变程最小，为 32.10 m，说明其变异以小范围为主，即氮碱比在 32.10 m 的范围内存在空间自相关性；钾氯比最大，为 285.91 m，说明其变异以大块状为主，即钾氯比在 285.91 m 的范围内存在空间自相关性；其他各指标空间自相关性位于 32.10~285.91 m。

3 结论

1) 土地整理后，移动性较强的土壤有效养分空间变异最大；其次是全量养分，为中等程度的变异；土壤 pH 变异最小。除土壤有效锰和有效锌含量外，本研究中所测定的土壤肥力指标均存在较大的空间自相关性，受结构性因素的影响较明显。

2) 土地整理导致土壤通气度等土壤物理指标发生空间变异最大，毛管孔隙度、排水能力空间相关性较大，主要受结构性因素的影响。

3) 土壤微生物计数及多样性指数在土地整理后表现为强变异，其基底效应值均小于 20.46%，空间自相关性较强。

4) 土地整理对烤烟产、质量均质性影响最大的是上、中等烟比例和糖碱比，影响最小的为两糖比。烟叶钾氯比的基底效应值最高，其次是中等烟比例，其空间变异主要受随机性因子影响。烤烟产、质量的变异以小范围为主。

参考文献：

- [1] 董晓敏. 土地整理对我国耕地保护的意义[J]. 吉林农业, 2015(7): 94~95
- [2] 蒲元瀛, 张光辉, 全景川, 等. 恩施州基本烟田土地整理建设模式研究与实践[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(6): 1~6
- [3] 许安定, 周鑫斌, 苏婷婷, 等. 土地整理对烟田土壤理化及生物学性状的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 156~164

- [4] 张久权, 张瀛, 黄一兰, 等. 土地整理后土壤理化性状、重金属含量和微生物数量变化[J]. 福建农业学报, 2017, 32(6): 665~669
- [5] 徐大兵, 刘冬碧, 佴国涵, 等. 整治区植烟土壤有机质空间变异特征及肥力等级评价[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(19): 4601~4604, 4607
- [6] 于庆涛, 廖超林, 刘丁林, 等. 金称市镇土地整理对垦复烟田耕作层土壤主要养分含量变化的影响[J]. 湖南农业科学, 2013(9): 50~54
- [7] 黄渤. 烟稻轮作区土地整理后烟田土壤肥力特征与施肥效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015
- [8] 张鹏博. 土地整理后烟田土壤有效中、微量养分状况与烤烟施用中、微肥的效应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016
- [9] 肖汉乾, 张鹏博, 张杨珠, 等. 邵阳县土地整理后烟田土壤的有效钙、镁、硫状况[J]. 湖南农业科学, 2017(2): 35~38
- [10] 肖汉乾, 张鹏博, 张杨珠, 等. 邵阳县土地整理后烟田土壤的有效微量元素状况[J]. 湖南农业科学, 2017(3): 45~49
- [11] 彭军, 马啸, 岑小红, 等. 丰都县土地整理对植烟土壤养分状况的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(3/4): 54~56
- [12] 徐大兵, 邓建强, 刘冬碧, 等. 整治区植烟土壤养分空间变异及肥力适宜性等级评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 790~796
- [13] 廖超林, 傅灵芝, 张鹏博, 等. 湘中南土地整理后烟田土壤肥力指标评价及空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 105~111
- [14] 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
- [15] 张智, 任意, 鲁剑巍, 等. 长江中游农田土壤微量元素空间分布特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1489~1496
- [16] 金明清, 彭月月, 王佩, 等. 四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素[J]. 土壤, 2016, 48(5): 984~991
- [17] 李珊, 李启权, 张浩, 等. 泸州植烟土壤有效态微量元素含量空间变异及其影响因素[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1215~1222
- [18] 国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T1215—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [19] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [20] 于荣, 徐明岗, 王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料, 2005(2): 49~52
- [21] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156(1): 399~402
- [22] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010
- [23] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品水溶性糖的测定连续流动法: YC/T159—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [24] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品总植物碱的测定连续流动法: YC/T 160—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002

- [25] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品总氮的测定连续流动法: YC/T 161—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [26] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品氯的测定连续流动法: YC/T162—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011
- [27] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品钾的测定连续流动法: YC/T217—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
- [28] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 2014. 江淮丘陵区农田表层土壤有机碳空间变异——以定远县为例[J]. 土壤, 2014, 46(4): 638–643
- [29] 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. 土壤, 2011, 43(1): 44–49
- [30] 薛正平, 杨星卫, 段项锁, 等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. 农业工程学报, 2012, 18(4): 6–9
- [31] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 87–212
- [32] 陈江华, 李志宏, 刘建利, 等. 全国主要烟区土壤养分丰缺状况评价[J]. 中国烟草学报, 2004, 11(3): 14–18
- [33] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501–1511
- [34] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. GIS 支持下的马龙县植烟土壤有效态微量元素评价 [J]. 中国烟草学报, 2011, 17(4): 56–61
- [35] 江培福, 雷廷武, 刘晓辉, 等. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 1–5

Spatial Variation of Soil Physiochemical Properties and Tobacco Yield and Quality of Consolidated Land

ZHANG Jiuquan¹, ZHANG Ying², HUANG Yilan², LIN Jianqi^{2*},
CHEN Dexin¹, CHEN Shoumu³, ZHAO Pengchao³

(1 *Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Qingdao, Shandong 266101, China*; 2 *Sanming Tobacco Company of Fujian Province, Sanming, Fujian 365000, China*; 3 *Ninghua Tobacco Company of Fujian Province, Ninghua, Fujian 365400, China*)

Abstract: Soil samples were collected and measured from Ninghua of Fujian Province in order to identify the spatial variation in soil nutrients, physical properties, microbes and tobacco yield and quality after land consolidation. The results showed that soil available nutrient contents had larger spatial variation than those of total nutrients, with CV higher than 30%. The CV of soil microbe counts and diversity index were from 66.17% to 111.71%, indicating strong variations. Land consolidation mainly influenced the ratios between upper and middle grade leaves, between sugar and nicotine. Tobacco yield and quality varied mainly in range of 285.91 m. In conclusion, land consolidation can result in huge spatial variations in soil nutrients, physical properties and microbe counts, and can influence obviously tobacco yield and quality, so soil amelioration is necessary after land consolidation.

Key words: Soil consolidation; Tobacco; Spatial variation; Geostatistics