

DOI: 10.5846/stxb201504210822

高灯州, 闵庆文, 陈桂香, 章文龙, 胡伟芳, 王维奇. 联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征. 生态学报, 2016, 36(21): - .
Gao D Z, Min Q W, Chen G X, Zhang W L, Hu W F, Wang W Q. Spatial variability of soil nutrients in the agricultural heritage systems of Lianhe terraced fields. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征

高灯州^{1,2}, 闵庆文³, 陈桂香^{1,2}, 章文龙^{1,2}, 胡伟芳^{1,2}, 王维奇^{1,2,*}

1 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

2 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 研究稻田土壤养分(有机质(OM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK))空间分布特征对稻田的科学管理具有重要意义。选取联合梯田稻田土壤作为研究对象, 基于半变异方差函数分析土壤养分的空间变异性, 并进一步分析地形因子对其影响。结果表明: (1) 联合梯田稻田土壤 OM、AN、AP 和 AK 含量范围分别为 3.6—49.9 g/kg、67—423 mg/kg、3.1—79.6 mg/kg 和 15—300 mg/kg; 其变异系数范围 24.23%—63.9%, 均属于中等变异水平; (2) 将土壤养分分为 5 级, 包括偏高(I)、丰富(II)、中等(III)、缺乏(IV)和偏低(V), 区内土壤 OM 和 AN 丰富, II 级以上水平分别占 94.5% 和 88.5%; 而 AP 和 AK 则较为缺乏, IV 级以下水平分别占 37% 和 51.5%; (3) 土壤 OM、AN 和 AP 具有强烈的空间自相关性, 表明其主要受结构因素影响; 而 AK 为中等强度的空间自相关, 表明其同时受结构和随机因素控制; AN 和 AK 空间自相关尺度较大, 且在步长小于 2000 m 和 1600 m 时, 各方向(0°、45°、90°和 135°)变化平稳, 为各向同性, 而 OM 和 AP 变程较小, 且各方向变化复杂, 为各向异性。这些结果表明, 政府需加强施肥指导, 合理增加磷肥和钾肥, 适当降低氮肥施用和秸秆还田量。此外, 在后续调查采样时, 适当加密 OM 和 AP 采样点布设, 而 AN 和 AK 采样可以在此基础上适当减少样点。

关键词: 土壤养分; 空间结构; 地统计学; 联合梯田

Spatial variability of soil nutrients in the agricultural heritage systems of Lianhe terraced fields

GAO Dengzhou^{1,2}, MIN Qingwen³, CHEN Guixiang^{1,2}, ZHANG Wenlong^{1,2}, HU Weifang^{1,2}, WANG Weiqi^{1,2,*}

1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

3 Institute of Geographic Sciences and Nature Resource Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China

Abstract: Terraced fields are an important part of agricultural heritage systems and play a vital role in agricultural production. Soil nutrients (organic matter [OM]; available nitrogen [AN]; available phosphorus [AP]; available potassium [AK]) are essential for improving the physical and chemical properties of soil, for protecting the environment, and for sustaining agricultural development. However, developments in terrace agriculture, such as changes in the cropping system, cultivation measures, and fertilization levels, lead to changes in soil nutrients. However, little information is available regarding the spatial variability of soil nutrients in terraced fields. As part of China's Important Agricultural Heritage Systems, the Lianhe terraced fields are worth protecting and developing. The aim of this study was to better understand the spatial variability of soil nutrients (OM, AN, AP, and AK) for the scientific management of the Lianhe terraced fields. The field study was carried out in the Lianhe terraced fields, and the spatial variability of soil nutrients was analyzed based on a semivariogram, and the effects of topographic factors (elevation, gradient, topographic wetness index, topography relief, and sediment transport index) on soil nutrients were further analyzed. The results showed that the concentrations of OM, AN, AP, and AK varied in the ranges of 3.6 to 9 g/kg, 67 to 423 mg/kg, 3.1 to 9.6 mg/kg, and 15 to 300 mg/kg, with the coefficient of variation being 24.23%—63.9%, respectively. The soil nutrient levels were divided

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571287, 31000209); 福建省科技厅重点项目(2014Y0054, 2014R1034-3); 福建省自然科学基金(2014J01119); 福建省尤溪县人民政府委托项目:“全球重要农业文化遗产申报书”

收稿日期: 2015-04-21; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangweiqi15@163.com

into five grades, which were slightly higher (I), abundant (II), medium (III), deficient (IV), and low (V). Most of the rice fields were rich in OM and AN, which accounted for 94.5 and 88.5% above the II nutrient level. Some areas were lacking AP and AK, which accounted for 37 and 51.5% below the IV nutrient levels. The ratio of nugget ($C_0/(C_0+C)$) of OM, AN, and AP were 12.09, 16.89, and 11.76%, respectively, and these results showed strong spatial autocorrelation, which indicated that OM, AN, and AP were mainly affected by structural factors; however, the ($C_0/(C_0+C)$) of AK was 50%, which showed a modest degree of autocorrelation, implying that AK was controlled by both structural and random factors. The spatial autocorrelation scale of AN and AK was larger compared with that of the other nutrients; the ranges of spatial autocorrelation were 4399 to 2230 m, and they were isotropic within the range 2000 to 1600 m, respectively. The spatial autocorrelation scale of OM and AP was 870 and 930 m, respectively, and changed in the direction of 0, 45, 90, and 135°, which were significant in anisotropy. These results indicate there is a need for the government to strengthen its guidance on fertilization, including a moderate increase in phosphorus and potassium, and a reasonable reduction in nitrogen fertilizer and field straw residue. Moreover, the sampling density of OM and AP should be increased, while the sampling density of AN and AK could be appropriately reduced in future investigations of soil nutrients.

Keywords: soil nutrient; spatial structure; geostatistics; Lianhe terraced fields

稻作梯田作为农业文化遗产的重要组成部分,在农业生产中的地位愈显重要。认识稻作梯田土壤养分的空间特征是土地科学管理和施肥的基础,对改善土壤理化性质、保护环境、农作物生长以及农业可持续发展等具有重要作用^[1]。然而随着梯田农业发展,如种植制度、耕作措施和施肥水平的变化,耕地土壤养分也会发生变化^[2]。因此,开展稻作梯田土壤养分空间变异的研究具有重要的理论和现实意义。

近年来,GIS 技术结合地统计学在土壤养分空间分异研究中得到越来越广泛的应用^[3],如杨奇勇等^[4]以黄淮平原耕地土壤为研究对象,分析了不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征;邓欧平等^[5]探讨了地形因素下,丘陵土壤养分(有机质、碱解氮、有效磷和速效钾)空间变异情况;除此之外,部分学者对草地^[6-7]和林地^[8-9]等土壤也作了相应的研究。目前,有关农业文化遗产稻作梯田土壤养分研究也日益受到关注^[10-12],但当前针对稻作梯田土壤养分研究相对比较零散,对空间分异特征的研究也鲜见报道。因此,有必要对稻作梯田农业文化遗产土壤养分空间分异特征开展研究,以期对土壤养分与农业文化遗产物质生产功能的维系提供重要参考。

联合梯田作为中国重要农业文化遗产,其农业具有独特的价值,拥有特色鲜明的濒危作物品种、牲畜品种、绿肥品种、土制农药品种,对我国传统农业可持续发展具有重要意义。因此,本文以联合梯田稻田土壤为研究对象,分析联合梯田稻田土壤养分含量、等级指标、分布以及空间分异特征,旨在为联合梯田稻田土壤管理与施肥提供科学依据,同时这一研究也可对联合梯田农业文化遗产的保护与发展提供重要的指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

联合梯田属福建省西部地区尤溪县北部山区,土质优良,以黄泥田、灰泥田为主,土壤整体较为肥沃,呈微酸性。该区属亚热带季风性湿润气候,年平均温度为 15.8—19.6℃,无霜期 280d,年平均降雨量约 1600 mm,多集中在 5—9 月。植物、动物的种类繁多,其中共有植物种类 500 余种,动物种类 100 余种。联合梯田耕地面积为 918.73 hm²,种植诸多传统水稻品种,如矮脚白、白头莲、石榴红和胡早等,且农业独具特色,现今保存着传统耕作技术、管理方式及梯田生态机制^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

联合梯田稻田土壤养分(有机质(OM)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AN))来源于福建省农业厅农业服务系统,其样地的选取以联合梯田核心区为主线,沿着梯田分布采集有代表性的样点,共选取 12 个村庄 200 个样点。利用 Arcgis10.1 平台在 ASTER GDEM 提取相应的高程、坡度、地形湿度指数、地形起伏度和沉积运输指数。其中,地形湿度指数是指单位等高线长度上的汇流面积与局地坡度比值的自然对数,可以较准确刻画地形的变化及其对土壤径流的影响^[14];地形起伏度即为相对高度,表示在特定区域内最高海拔与最低

海拔的差值,可以描述特定区域地形特征的宏观性指标;沉积物运输指数(Sediment transport index, *STI*)是指在地形作用下地表物质的沉积运输能力,是反映特定区域中水分和沉积物运移的综合地形变量,可以较好预测土壤属性的变化,其提取公式如下^[15]:

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{13} \quad (1)$$

式中, A_s 为单位长度等高线上地表水所流经的上游区域面积, β 为地形坡度。

1.2.2 数据处理与分析方法

通过描述统计特征值(最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数(*CV*))反映土壤养分的平均水平和总变异程度。当 $CV < 10\%$ 时,为弱变异, $10\% \leq CV \leq 100\%$ 时,为中等变异, $CV > 100\%$ 时,为强变异^[16]。另外,根据福建省土壤肥力丰缺指标^[2],将土壤养分分为偏高(I),丰富(II),中等(III),缺乏(IV)和偏低(V)五种等级水平。

半变异函数可以有效描述土壤特性变异特征,区分结构性因素与随机因素对养分空间变异的影响,是空间结构分析的基础,当区域化变量满足二阶平稳性假设和本征假设时,计算公式为:

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

式中, $\gamma(h)$, h , $N(h)$, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为变异函数,滞后距离或步长,距离等于 h 时的样点对数, $Z(x)$ 在位置 x_i 的数值和在距离 x_i+h 处的数值。半变异函数包括几个重要参数,如块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、变程(a),可一定程度揭示变量空间变异和相关性^[17]。其中,块金值和基台值的比值($C_0/(C_0+C)$)表示块金效应,反映变量的空间相关性。当 $C_0/(C_0+C) < 25\%$ 时,说明变量空间自相关性很强,其变异性主要受结构因素(地形、气候、土壤母质等)影响;当 $25\% \leq C_0/(C_0+C) \leq 75\%$ 时,说明变量具有中等空间自相关性,受结构和随机因素(施肥、种植方式或耕作措施等)共同作用;当 $C_0/(C_0+C) > 75\%$ 时,说明变量空间自相关性很弱^[18],主要受随机因素影响。

采用 SPSS 19.0 对土壤养分含量进行描述性统计和正态分布 Shapiro-Wilk(s-w) 检验,用 Minitab 16 对非正态分布数据进行转化,以符合统计分析的条件;采用 GS+7.0 进行空间自相关分析和半变异函数分析。用 Arc Gis 10.1 和 Origin 8.0 作图。

2 结果分析

2.1 土壤养分统计特征

由表 1 可知,联合梯田稻田土壤 OM、AN、AP 和 AK 含量分别介于 3.6—49.9 g/kg, 67—423 mg/kg, 3.1—79.6 mg/kg, 15—300 mg/kg, 平均含量分别为 30.93 g/kg, 245.78 mg/kg, 21.53 mg/kg 与 90.65 mg/kg。从标准差和 *CV* 看,各养分离散程度较大,*CV* 在 24.23%—63.9% 之间,都属于中等变异水平,其中 OM、AN 的 *CV* 较小,分别为 24.23%, 26.87%, 而 AP 和 AK 的 *CV* 较大,分别为 63.9% 和 60.49%。另外,从描述统计特征 P_{s-w} 可以看出,AN 数据样本近似正态分布,OM、AP 和 AK 数据样本经转换后符合正态分布。

2.2 土壤养分含量等级指标及分布特征

联合梯田稻田土壤养分分布不均(表 2 和图 1),土壤 OM 含量总体较高,I 级和 II 级水平分别占 56% 与 38.5%,III 级、IV 级和 V 级水平共占 5.5%,零星分布在区域内;区域内土壤 AN 含量也相对较高,I 级和 II 级水平分别占 78% 和 10.5%,III 级、IV 级和 V 级水平共占 11%,主要分布在惠州村北部地区;而 AP 和 AK 含量各等级指标空间分比较离散,其中 IV 级和 V 级水平比例较大,AP 的 IV 级和 V 级水平比例共为 37%,而 AK 高达 51.5%。

2.3 土壤养分空间变异特征

表 3 为土壤养分各向同性下半变异方差函数理论模型及参数。由表 3 可知,OM 和 AP 最优拟合模型为

指数模型,而 AN 和 AK 最优拟合模型分别为高斯模型和球状模型。土壤 OM、AN 和 AP 的块金效应分别为 12.09%、16.89% 和 11.76%,均小于 25%,区域内具有强烈空间相关性,而土壤 AK 块金效应为 50%,区域内存在中等空间相关性。从变程看(表 3),各养分之间变程差异较大(820—4399 m),其中土壤 OM 和 OP 的变程较小,分别为 870 m 和 930 m,速效钾变程为 2230 m,AN 的变程最大,为 4399 m,这说明 AN 具有强烈空间相关性的范围非常广泛,而 OM 和 AP 区域内存在强烈空间相关性,但是范围较小,超出范围空间自相关性也将消失。

表 1 联合梯田稻田土壤养分描述统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrients in Lianhe terraced fields

指标 Index	最大值 Minimum	最小值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	CV/%	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	P_{s-w} 检验 P_{s-w} test
有机质 Organic matter/(g/kg)	49.9	3.6	30.93	7.5	24.23	-0.19*	-0.08*	0.28*
碱解氮 Available nitrogen/(mg/kg)	423	67	245.78	66.04	26.87	0.12	0.5	0.07
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	79.6	3.1	21.53	13.76	63.9	-0.04**	-0.11**	0.65**
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	300	15	90.65	54.83	60.49	0.49**	-0.16**	0.47**

* 的数据为 Box-Cox 转换后的数据结果,** 的数据为对数转换后的数据结果

表 2 联合梯田稻田土壤养分等级指标及分布

Table 2 soil nutrient level index and distribution in Lianhe terraced fields

指标 Index	项目 Item	偏高 High (I)	丰富 Abundance (II)	中等 Medium (III)	缺乏 Lack (IV)	偏低 Low (V)
有机质 Organic matter/(g/kg)	标准	>30	30—20	20—10	10—5	<5
	比例/%	56	38.5	4	1	0.5
碱解氮 Available nitrogen/(mg/kg)	标准	>200	200—150	150—100	100—50	<50
	比例/%	78	10.5	9	2	0
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	标准	>25	25—20	20—15	15—12	<12
	比例/%	29	16.5	17.5	10	27
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	标准	>120	120—100	100—80	80—60	<60
	比例/%	24.5	11.5	12.5	23	28.5

表 3 土壤养分半方差函数理论模型及相关参数

Table 3 Semivariogram theoretical models and parameters for soil nutrients

指标 Index	模型 Model	C_0	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C) (%)$	a/m	R
有机质 Organic matter	I	0.11	0.91	12.09	870	0.65
碱解氮 Available nitrogen	II	1000	5922	16.89	4399	0.97
有效磷 Available phosphorus	I	0.008	0.068	11.76	930	0.75
速效钾 Available potassium	III	0.03	0.06	50	2230	0.72

I: 指数模型, II: 高斯模型 III: 球状模型

进一步计算了 E—W(0°), NE—SW(45°), S—N(90°) 和 EN—WN(135°) 4 个方向的半方差函数, 如图 2 所示, 土壤各养分不同方向(0°, 45°, 90° 和 135°) 的变异函数差异较大, 总体上表现出明显的方向性特征。进一步来看, OM 和 AP 在步长范围内(0—7000 m) 各方向变异函数波动性较为剧烈; 而 AN 和 AK 在步长小于 2000 m 和 1600 m 时, 半方差变化较平稳, 增加比较缓慢, 各个方向的变异函数基本重合, 一定程度上表现为各向同性。

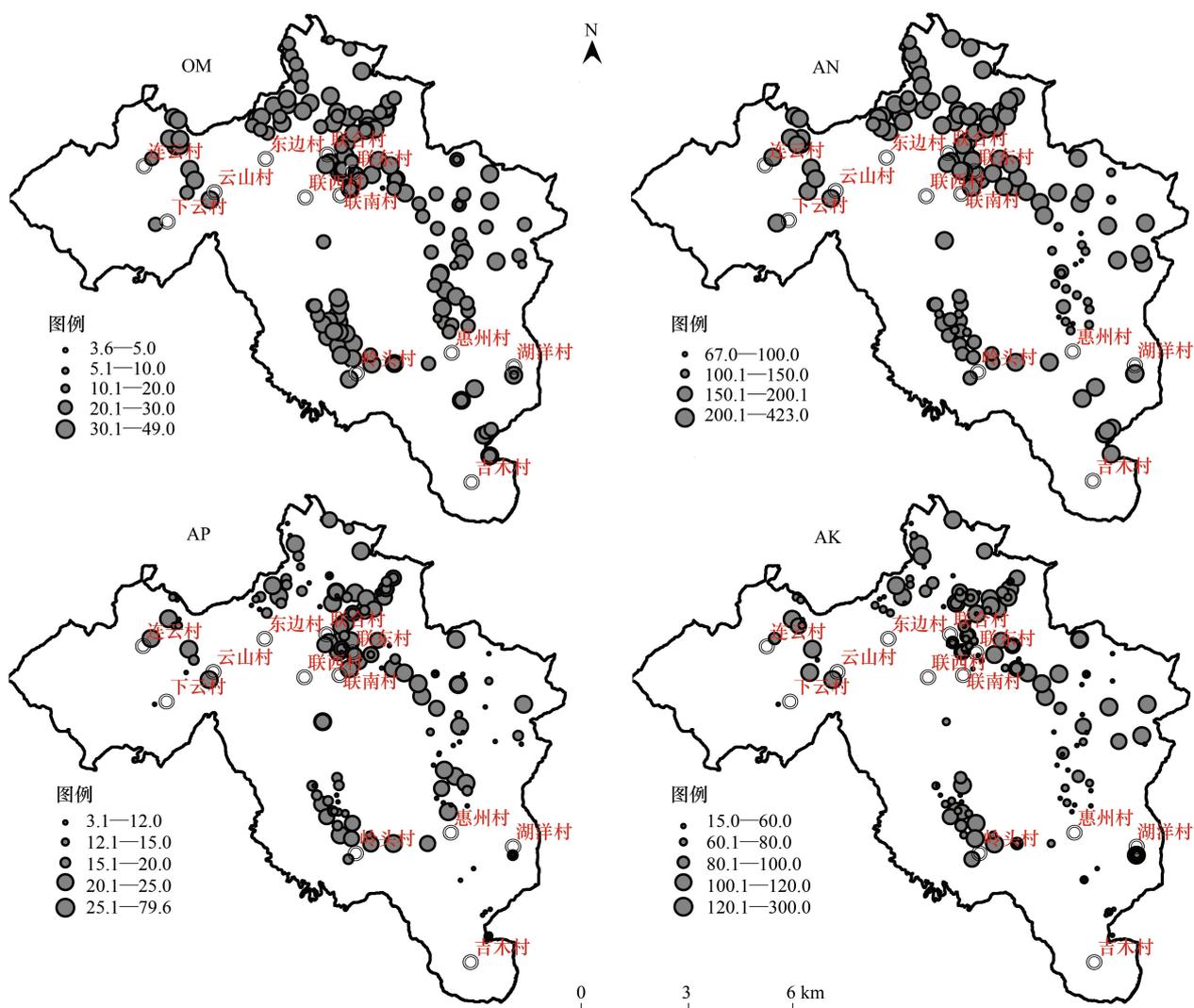


图 1 联合梯田稻田土壤养分含量分布

Fig.1 Soil nutrient distribution in Lianhe terraced fields

2.4 土壤养分与地形因子相关关系

土壤养分与地形因子(高程、坡度、地形湿度指数、地形起伏度和沉积运输指数)相关分析(表 4)可见,OM 与坡度、地形湿度指数呈显著相关($P<0.05$),与其他因子相关性不显著,AN 和 AP 与各地形因子相关性均不显著,而 AK 与高程、地形湿度指数和地形起伏度呈显著相关($P<0.05$)。

表 4 土壤养分与地形因子相关关系

Table 4 The relationship between soil nutrients and terrain factors

地形因子 Topographic factors	有机质 Organic matter	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
高程 Elevation	-0.03	0.079	-0.04	0.16*
坡度 Gradient	-0.18*	-0.04	-0.04	0.13
地形湿度指数 Topographic wetness index	0.16*	0.104	-0.06	-0.17*
地形起伏度 Topography relief	-0.12	-0.09	-0.09	0.19*
沉积运输指数 Sediment transport index	-0.08	0.002	-0.08	-0.04

* 表示 $P<0.05$, $N=200$

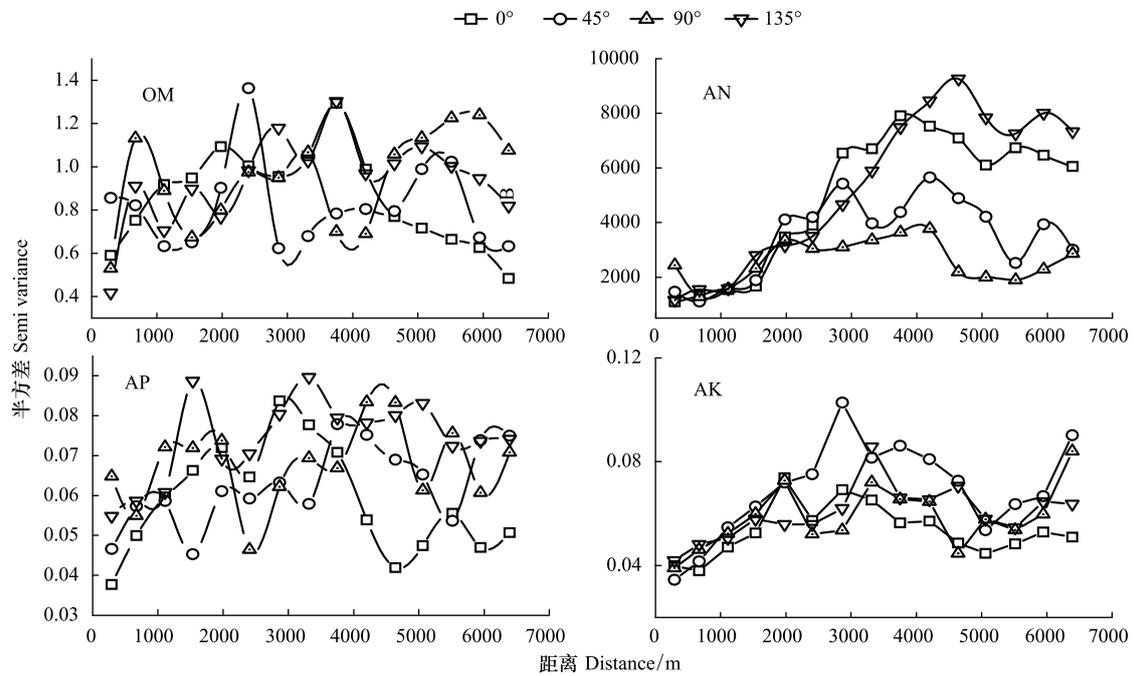


图2 土壤养分各向异性半方差函数图

Fig.2 Anisotropic semivariogram of soil nutrients

3 讨论

3.1 土壤养分总体特征

联合梯田稻田土壤 OM 和 AN 平均水平较高,其平均值分别达到 30.93 g/kg 和 245.78 mg/kg,属于土壤肥力 I 级水平,同时也均不同程度高于四川、重庆、山东、江苏等地区耕地或农田土壤(表 5)。这可能与联合梯田秸秆还田有一定关系,有研究表明,有效的秸秆还田可以为土壤中的微生物提供充足的碳源,从而刺激微生物活性,提高土壤 OM 含量^[19],同时矿化的秸秆组分能促进土壤氮循环和矿化,提高氮素有效性^[20],本研究调查统计发现,联合梯田稻田秸秆产量年均合计约 5754 t,直接(粉碎)还田比例高达 75%,与联合乡全乡秸秆还田水平相当(秸秆产量约 6204 t,直接还田约 4649 t,约占 74%)^[21],因而使得该区稻田土壤 OM 和 AN 含量较高。区域内土壤 AP 平均含量为 21.53 mg/kg,属于土壤肥力 II 级水平,一定程度高于四川、重庆、山东和江苏等地耕地土壤,但低于福建闽侯与晋江县域耕地土壤,这可能是由于联合梯田以传统耕作方式为主,化肥施

表 5 不同地区耕地土壤养分情况

Table 5 The conditions of soil nutrient in different areas

研究区域/对象 Study areas/object	有机质 Organic matter/ (g/kg)	碱解氮 Available nitrogen/ (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	速效钾 Available potassium/ (mg/kg)	参考文献 References
福建闽侯/耕地 Minhou, Fujian/cultivated land	25	162.18	45.53	90.94	[2]
福建晋江/耕地 Jinjiang, Fujian/cultivated land	22.3	101.05	33.99	83.62	[2]
四川绵阳/耕地 Mianyang, Sichuan/cultivated land	19.6	87.25	22.45	69.49	[5]
重庆江津/农田 Jiangjin, Chongqing/farmland	11.55	100.15	12.25	94.5	[23]
山东广饶/耕地 Guangrao, Shandong/cultivated land	12.08	—	16.12	178.95	[24]
苏南地区/稻田 Southern regions of Jiangsu/rice field	26.25	—	8.23	62.68	[25]
福建三明/稻田 Sanming, fujian/rice field	30.93	245.78	21.53	90.65	本文

加强度较低原因造成的。而土壤 AK 平均含量(90.65 mg/kg)明显低于山东广饶耕地土壤外,与各地土壤相当。此外,本研究对土壤养分各等级指标所占的比例发现,OM 和 AN 的 I 级水平分别占 56%和 78%,IV 级和 V 级水平所占比例小,而 AP 和 AK 的 IV 级和 V 级水平所占比例分别为 37%和 51.5%,这表明联合梯田大部分稻田土壤 OM 和 AN 存在盈余,而土壤 AP 和 AK 在部分稻田相对缺乏,这表明耕作施肥应充分考虑地区间土壤养分含量本底差异,若不考虑养分含量本底差异而平均施肥,将可能造成区域之间养分差异进一步扩大。因而,有必要对联合梯田有针对性的进行施肥管理,合理增施磷肥和钾肥,适当降低氮肥施用和秸秆还田量,充分发挥耕地土壤养分的潜力,陈冬林^[22]基于湖南水稻田秸秆还田量研究表明在免耕(覆盖耕作、耨耕和不耕)条件下宜实行 2/3 秸秆还田,而联合梯田稻田每年还田量 4317.75 t,占总秸秆量的比例高达 3/4,因而可以适当降低其秸秆还田量,降低至 3836 t 左右。

3.2 土壤养分空间变异性

耕地土壤养分除受气候、地形、母质和生物等自然因素影响外,还受种植制度、耕作措施、施肥水平等人为因素的影响,这导致耕地土壤养分随空间位置的变化而有差异^[2,4]。本研究对样本描述性统计研究发现,福建联合梯田稻田土壤 OM、AN、AP 和 AK 均属于中等变异水平,与多数学者对丘陵耕地^[5]、林地^[8]和草地^[6]等研究结果相似,这说明区域内耕地土壤养分含量有一定差异。土壤特性描述性特征可以一定程度说明样本整体状况,但不能有效反映样本空间结构特征^[26]。因此,本研究进一步进行土壤养分半变异方差函数分析,结果表明区内稻田土壤均具有良好的空间结构,在空间自相关范围内,OM、AN 和 AP 表现为强烈的空间自相关(块金效应分别为 12.09%、16.89%和 11.76%),说明其主要受气候、地形、母质或土壤类型等结构性因素的影响,随机因素(施肥、种植方式或耕作措施等)影响较小;而 AK 块金效应为 50%,表现为中等强度的空间自相关,说明其可能与结构性因素和随机性因素共同作用有关。而孔庆波等^[2]对福建闽侯和晋江县域耕地土壤养分空间变异研究发现,除闽侯土壤 AK 外,其他养分均呈中等空间自相关,而陈伏生^[6]和张伟^[8]基于草地和林地土壤养分进行空间变异研究,结果显示 OM 和 AK 等养分也呈中等空间自相关。本文土壤养分除 AK 外,其他养分都呈现强烈空间自相关,与前述学者研究结果^[2,6,8]有所不同,原因可能在于联合梯田水稻种植辅以传统耕作方式为主,化肥施用强度较小也相对均一,使得区域内土壤养分受施肥、种植和耕作方式等随机因素影响较小,受地形、土壤类型和母质等结构因素影响较大。本文基于土壤养分与地形因子相关分析发现(表 3),OM 与坡度和地形湿度指数呈显著相关,其中与坡度呈显著负相关,与地形湿度指数呈显著正相关,与其他因子相关性不显著,而 AN 和 AP 与各地形因子相关性均不显著,此外,AK 与高程、地形湿度指数和地形起伏度均呈显著相关。这表明联合梯田稻田土壤 OM 的空间变异特征受地形因子(坡度和地形湿度指数)影响较大,这主要是由于其土壤 OM 主要来源于秸秆等植物分解,其富集与流失受水分和坡度影响较大,当坡度增大时,表层土壤 OM 容易受到淋洗作用而损失^[27],而土壤水份增加可使得有机质等酸性物质富集而增加土壤 OM 含量,有研究表明地形湿度指数与土壤水分含量呈直线相关,可以很好表征土壤水分变化^[28],因此地形湿度指数增加,可以促进土壤 OM 富集。而 AN 和 AP 空间分布受地形因子的影响不大,可能受土壤类型和母质等因素影响较大,另外,AN 存在强烈空间自相关可能与稻田管理也有一定关系,较大强度的秸秆还田,使得 AN 含量总体上较大(表 2 和图 1),使得空间上差异小。AK 空间分布受地形、母质等结构和施肥、管理等随机因素共同影响,由于 AK 吸附能力较弱,流动性较强^[5],因此在结构因素中容易受地形因子,如高程、起伏度等的影响。此外,本研究对土壤养分各向异性研究发现,OM 和 AP 变异函数在各方向上变化复杂,表现为各向异性,而 AN 和 AK 在步长小于 2000 m 和 1600 m 时,各方向上变异函数基本重合,为各向同性。区域内土壤特性各向异性半方差分析的研究,不仅可以进一步了解土壤空间变异特征,对后续调查研究中指导土壤采养具有重要意义^[29]。因此,本研究结果显示,在后续调查采样时,样点布设要考虑密度和方向性,适当加密有机质和有效磷的采样,而 AN 和 AK 采样可以在此基础上适当减少样点。

3 结论

本文以联合梯田稻田土壤作为研究对象,基于描述统计和半变异方差函数分析土壤养分的空间分布特

征,并进一步分析了地形因子对其影响,主要结论如下:

(1)联合梯田稻田土壤 OM、AN、AP 和 AK 均属于中等变异水平;区域内大部分稻田土壤 OM 和 AN 存在盈余,而土壤 AP 和 AK 在部分稻田相对缺乏。

(2)土壤 OM、AN 和 AP 为强烈空间自相关,结构变异占主导,AK 为中等强度的空间自相关,受结构因素和随机因素共同作用;另外,OM 和 AP 在各方向上变化复杂,均表现为各向异性,而 AN 和 AK 在步长小于 2000 m 和 1600 m 时,各方向上变异函数基本重合,为各向同性。

(3)充分发挥区域内土壤肥力,需有针对性进行施肥管理,加强指导施肥,合理增加磷肥和钾肥施用强度,适当降低氮肥施用和秸秆还田强度。

(4)在后续调查采样时,样点布设要考虑方向性和密度,OM 和 AP 采样样点布设应更为全面,而 AN 和 AK 采样可以在 OM 和 AP 采样基础上适当减少样点。

参考文献(References):

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] 孔庆波, 章明清, 姚宝全, 李娟, 张青. 福建县级区域耕地土壤养分时空变异研究. 热带作物学报, 2010, 31(10): 1686-1691.
- [3] Kuhnšlová J, Kuhnšl F, Kroulík M, Matějková Š. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. Precision Agriculture, 2011, 12(6): 813-830.
- [4] 杨奇勇, 杨劲松. 不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征. 水土保持学报, 2010, 24(3): 100-104.
- [5] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 邓良基. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究. 资源科学, 2013, 35(12): 2434-2443.
- [6] 陈伏生, 曾德慧. 科尔沁沙地退化草场土壤养分的空间结构分析. 草业学报, 2004, 13(1): 39-44.
- [7] Steffens M, Kölbl A, Totsche K U, Kögel-Knabner I. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P. R. China). Geoderma, 2008, 143(1/2): 63-72.
- [8] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 陈洪松, 王克林, 韦国富. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101.
- [9] Yemefack M, Rossiter D G, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. Geoderma, 2005, 125(1/2): 117-143.
- [10] 文波龙, 任国, 张乃明. 云南元阳哈尼梯田土壤养分垂直变异特征研究. 云南农业大学学报, 2009, 24(1): 78-81.
- [11] 邱宇洁, 许明祥, 师晨迪, 张志霞, 张帅. 陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 87-98.
- [12] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2930-2935.
- [13] 尤溪县志编纂委员会. 尤溪县志: 中华人民共和国地方志丛书. 福州: 福建省地图出版社, 1989.
- [14] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116-123.
- [15] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. 生态学报, 2008, 28(3): 946-954.
- [16] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 张飞, 王飞. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例. 生态学报, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [17] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] Wang Y D, Feng N N, Li T X, Zhang X Z, Liao G T. Spatial variability of soil cation exchange capacity in hilly tea plantation soils under different sampling scales. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(1): 96-103.
- [19] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 李洪杰, 仲惟磊, 李增嘉. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373-378.
- [20] Tosti G, Benincasa P, Farneselli M, Pace R, Tei F, Guiducci M, Thorup-Kristensen K. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 136-146.
- [21] 国家统计局尤溪调查队, 尤溪县统计局. 尤溪县统计年鉴(2014). 三明: 福建省尤溪县创新彩色印刷有限公司, 2014. (未链接到本条文献信息, 请核对)
- [22] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 屠乃美. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1722-1728.
- [23] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 刘洪斌. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测. 农业工程学报, 2013, 29(6): 113-120.
- [24] 李文璐, 赵庚星, 许志伟. 乡镇级耕地土壤养分精细化管理分区及配方施肥研究. 自然资源学报, 2011, 26(5): 746-754.
- [25] 李荣刚, 杨林章, 皮家欢. 苏南地区稻田土壤肥力演变、养分平衡和合理施肥. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1889-1892.
- [26] Liu X M, Zhao K, Xu J M, Zhang M H, Si B, Wang F. Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in southeast China. Environmental Geology, 2008, 53(5): 1139-1147.
- [27] 解倩, 王莹, 齐瑞鹏, 张应龙, 高玲玲, 郑纪勇. 毛乌素沙区退化湿地土壤剖面水分和养分特征. 水土保持学报, 2015, 29(3): 150-155, 288-288.
- [28] Güntner A, Seibert J, Uhlenbrook S. Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. Water Resources Research, 2004, 40(5): 1-19.
- [29] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 赵玉国, 王德彩. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究. 地理科学, 2013, 33(1): 83-89.