

南方典型丘陵山区不同高程耕地土壤养分变化特征分析

林建平^{1,2} 邓爱珍³ 赵小敏^{1,2} 江叶枫² 韩逸² 谢雨²

(1. 江西农业大学林学院, 南昌 330045; 2. 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, 南昌 330045;
3. 江西应用技术职业学院测绘地理信息学院, 赣州 341000)

摘要: 为探讨不同高程下的耕地土壤养分空间变异特征, 选择南方典型丘陵山地区——江西省赣州市为研究区, 基于2012—2013年测土配方项目不同高程下采集处理的2 928个耕层(0~20 cm)土壤养分数据, 运用经典统计、相关性分析、方差分析和协同克里格差值方法, 分析了耕地土壤养分含量与高程的空间耦合关系。结果表明: 土壤有机质、全氮、全钾含量与高程呈正相关关系, 全磷、有效磷含量与高程呈负相关关系, 速效钾含量与高程相关性不显著。高程分组方差分析结果进一步显示, 在小于250 m高程范围内, 有机质和全氮含量随高程上升而增加, 高值区主要分布在研究区周边海拔较高地区, 当高程大于250 m时, 养分含量变化差异不显著; 在小于200 m高程范围内, 全磷和有效磷含量随高程上升而降低, 高值区主要分布在研究区中部低海拔地区, 当高程大于200 m时, 养分含量变化差异不显著; 全钾含量随高程上升而增加, 但有效钾含量随高程变化波动较大, 二者规律性不明显。土壤养分含量随高程变化是不同高程下的成土母质、土壤类型、土地利用方式、土壤侵蚀等共同作用的结果。研究结果有助于探明耕地土壤养分随高程垂直变化规律, 对实现土壤养分的精准管理和保障我国粮食安全具有重要意义。

关键词: 耕地土壤养分; 高程; 空间变异; 方差分析; 南方丘陵山区

中图分类号: S158.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0300-10

Variation Characteristics of Soil Nutrients of Cultivated Land in Different Elevation Fields in Typical Hilly Areas of Southern Mountains

LIN Jianping^{1,2} DENG Aizhen³ ZHAO Xiaomin^{1,2} JIANG Yefeng² HAN Yi² XIE Yu²

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2. Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology, Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3. Department of Surveying and Geo-Informatics, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to investigate the variation characteristics of soil nutrients of cultivated land in different elevation fields, a typical south hilly area—Ganzhou City of Jiangxi Province was selected as research case. Based on the data of totally 2 928 soil nutrient samples collected in the topsoil layer (0~20 cm) of the farmlands at different altitudes in 2012—2013, classical statistical analysis, variance analysis and co-Kriging method were employed to analyze the spatial coupling relation between soil nutrients of cultivated land and different elevations. The result showed that the correlation relationship between soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total potassium (TK) and elevation were overwhelmingly positive. Meanwhile, there was a remarkable negative correlation between total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and elevation. However, altitude was irrelevant to available potassium (AK). According to the variance analysis of soil nutrients, the content of SOM and TN was increased with the rise of elevation when the elevation was below 250 m. But the changes of soil nutrient content became inapparent above 250 m. The spatial distribution map showed clearly that high value area was mainly distributed in area of high elevation around the research area. On the other side, the content of TP and AP was decreased with the rise of elevation when the elevation was below 200 m. High value area was mainly distributed in area of middle and low elevation around the research area

收稿日期: 2018-10-24 修回日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361049)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室基金项目(0812201202)

作者简介: 林建平(1977—),男,博士生,主要从事土地资源利用、土壤信息研究,E-mail: linjianping0530@163.com

通信作者: 赵小敏(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事土地可持续利用、土地规划与信息技术研究,E-mail: zhaoxm889@126.com

according to the spatial distribution map. Likewise, the changes of soil nutrient content were not significant above 200 m. TK content was increased with elevation, however, the content of AK was fluctuated greatly. Yet their pattern was inapparent. The spatial variation of soil nutrients was due to the interaction of parent materials, soil types, land use patterns and soil erosion at different elevations. The research results could help to find out the vertical changing law of soil nutrients at different elevations, which was of great significance for ensuring grain security of China.

Key words: soil nutrients of cultivated land; elevation; spatial variation; variance analysis; hilly areas of southern mountains

0 引言

耕地土壤养分是农作物生长的必要条件,是表征耕地质量与肥力的重要指标,其含量直接影响作物的整个生长过程^[1]。高程被认为是影响土壤养分流失与累积的关键因素之一^[2]。高程变化导致水热资源在空间分布上存在差异,这些差异会影响土壤养分的矿化、降解、迁移和累积,进而导致不同高程下土壤养分含量存在较大空间异质性^[3-4]。具体地,在低海拔地区,水热条件优越,土壤物质循环加速,养分的利用率高而沉积较少;在高海拔地区,气温下降,微生物分解速度减慢,造成有机质以及氮、钾等养分含量累积较多^[5]。因此,深入了解土壤养分空间变异与高程的耦合关系,对于实现土壤养分的精准管理和耕地地力的提升具有重要意义。

近年来,国内外学者针对不同高程土壤属性空间变异特征做了大量研究,研究尺度主要集中在县域、小流域和一些特定山区,土地利用类型包括森林^[6]、草地^[7]和农田土壤^[8],研究内容包括不同高程土壤理化性质^[9-10]、土壤侵蚀^[11]和土壤微生物及酶活性变化^[12]等。如TANG^[13]在对峨眉山的研究发现,不同高程下植被和土壤性质均存在一定差异。丛静等^[14]以神农架自然保护区为研究对象,研究发现,高程上升,土壤微生物和微生物生物量碳、氮增加。黄婷等^[15]对云南省曲靖县植烟区不同高程下土壤属性分析表明,土壤pH值及土壤养分与高程显著相关。吴崇书等^[16]分析了杭州市滨海平原、水网平原、河谷平原和丘陵山地4个地貌区耕地地力,结果显示,不同高程地貌区耕地土壤肥力差异明显。上述结果表明,高程对土壤属性空间变异会产生重要影响。

南方红壤丘陵区是我国重要的农业生产基地,该区土地总面积约占全国土地面积的1/5,人口占全国的40%,耕地占全国的30%,负担了我国近一半人口的粮食^[17],耕地分布具有明显的垂直地带性特征,揭示该区不同高程下耕地土壤养分的空间变异特征及其影响因素,对保障我国粮食安全、防止水土和养分流失、实现土壤养分的精细管理具有重要

参考意义。为此,本文以我国南方典型红壤丘陵区——江西省赣州市为研究区,基于2012—2013年测土配方项目不同高程采集的3098个耕层(0~20 cm)土壤数据,通过测定土壤有机质(Soil organic matter, SOM)、全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)、有效磷(Available phosphorus, AP)、全钾(Total potassium, TK)、有效钾(Available potassium, AK)养分含量,运用相关分析、单因素方差分析和协同克里格(Co-Kriging)插值法,探讨不同高程耕地土壤养分含量空间变异特征,以期为南方丘陵地区耕地表层土壤养分调控和耕地的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赣州市位于江西省南部,又称“赣南”,地理坐标介于24°29'~27°09'N,113°54'~116°38'E之间,土地总面积39362.96 km²,辖18个县(市、区)。赣州市属中亚热带湿润季风型气候,气候温和,日照充足,雨量充沛,年平均气温18.9℃,年平均日照时数1748.7 h,年降雨量1639.8 mm。研究区土地利用类型主要为林地、耕地和园地(图1a)。地形地貌以山地、丘陵为主,总体格局为周高中低、南高于北,四周群山环绕,中部丘陵与平原交错分布。全市耕地空间分布存在明显的垂直地带性,主要分布在100~650 m高程范围内(图1b)。研究区成土母质主要为酸性结晶岩类风化物、石英岩类风化和泥质岩类风化物(图1c);土壤类型主要为水稻土、红壤、草甸土、石灰(岩)土、紫色土和山地黄壤6个土类(图1d)。作为典型的红壤区,该区水土流失较为严重,土壤侵蚀以水力侵蚀为主(图1e)。

1.2 样品采集及分析

土壤样品采集按照NY/T 1634—2008《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》要求,在考虑研究区地形地貌、土壤类型和成土母质等自然条件的前提下确定采样点位(图1b)。2012—2013年,通过实地采集0~20 cm耕层土样,每个采样点采集4个点,充分混匀后按照四分法留取1 kg样品,初始

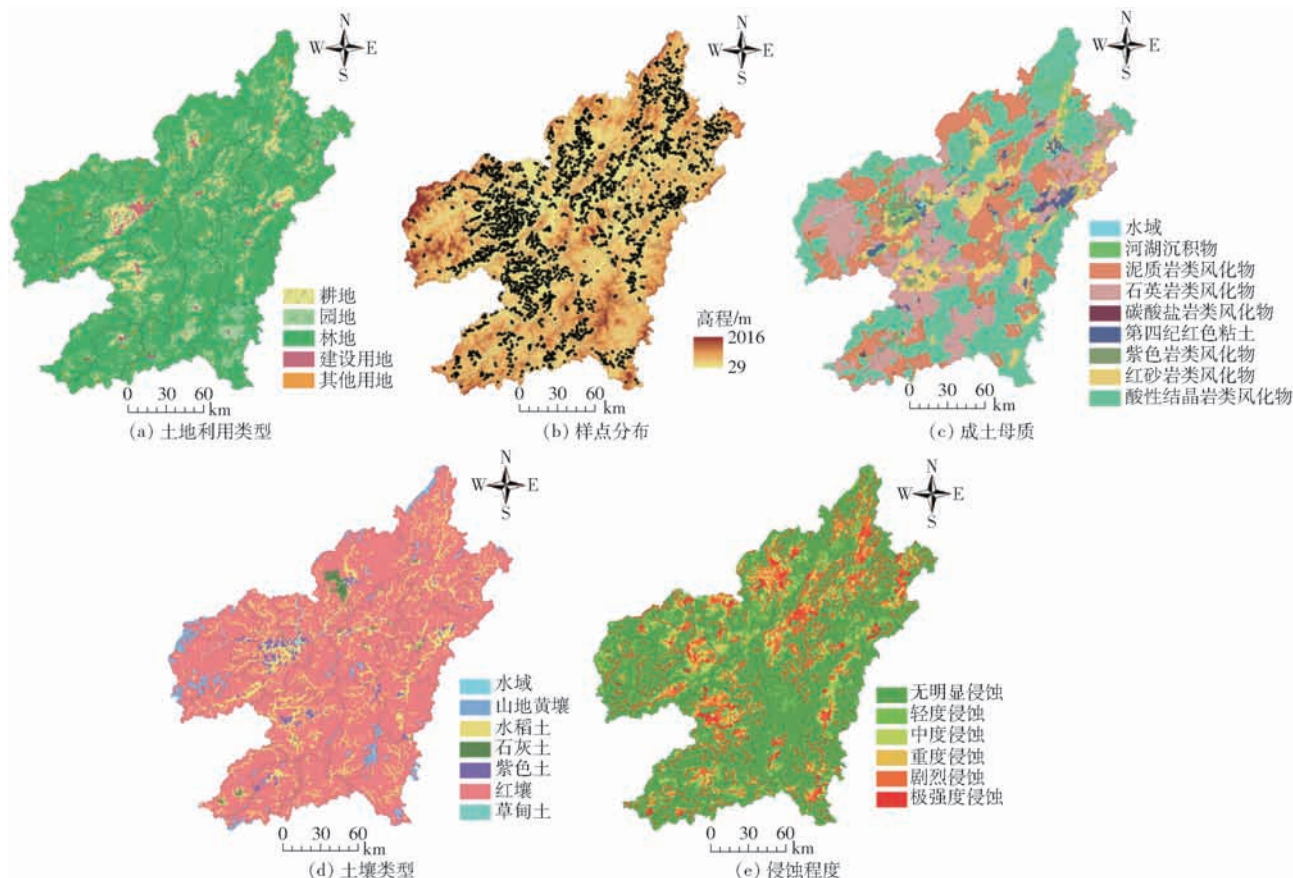


图1 研究区土地利用类型、样点分布、成土母质、土壤类型和土壤侵蚀程度图

Fig. 1 Distribution maps of land use type, soil sampling site and digital elevation model (DEM) data, parent material, soil types and soil erosion

采集表层土壤样点 3 098 个,每个采样点均以 GPS 记录其经纬度坐标,并详细记录该点的高程、成土母质、土地利用类型和土壤类型等信息。土壤样品经室内自然风干、剔除杂物和研磨,统一过 0.25 mm 尼龙筛。分别采用高温重铬酸钾氧化容量法测定 SOM 含量;全自动凯氏定氮仪 (Kjeltec8400 型, Foss, 瑞典) 测定 TN 含量;钼锑抗比色法测定 TP、AP 含量;火焰光度法测定 TK、AK 含量。

1.3 数据处理

受采样及实验室分析误差的影响,土壤养分含量测量结果可能存在离群值,本文采用域值法(3 倍标准差)^[18]对离群值进行剔除,剔除后总样点为 2 928 个。采用 SPSS 22 软件,将高程与土壤养分含量进行 Pearson 相关性分析^[19];采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行差异性检验;采用 GS+ 7.0 进行半变异函数计算和模型拟合;运用 ArcGIS 10.2 进行协同克里格插值生成土壤养分含量空间分布图。高程数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 下载的赣州市 30 m 的数字高程模型 (Digital elevation model, DEM) 数据。土壤侵蚀图由水利部调查的江西省土壤侵蚀图处理提取。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量描述性统计

对照第二次全国土壤普查土壤养分分级标准,从表 1 可以看出,总体上,研究区 AP 含量处于 2 级 (0.02 ~ 0.04 g/kg) 丰富水平,养分含量均值 0.02 g/kg, 值域范围为 0.003 ~ 0.08 g/kg; SOM、TN 含量处于 3 级 (20 ~ 30 g/kg、1 ~ 1.5 g/kg) 中等水平,均值分别为 28.91、1.47 g/kg,值域范围分别为 12.10 ~ 61.10 g/kg、0.33 ~ 3.52 g/kg; TP、TK、AK 含量处于 4 级 (0.4 ~ 0.6 g/kg、10 ~ 15 g/kg、0.05 ~ 0.1 g/kg) 缺乏水平,均值分别为 0.51、11.16、0.07 g/kg,值域范围分别为 0.22 ~ 1.04 g/kg、2.70 ~ 22.80 g/kg、0.02 ~ 0.26 g/kg。

从变异系数看,土壤养分呈中等变异^[20],养分变异系数由大到小依次为 AP (66.47%)、AK (56.86%)、TK (39.61%)、TN (31.97%)、SOM (31.68%)、TP (31.37%)。总体上,TP 相对稳定,变异系数较小,受成土母质的影响较大;而 AP 和 AK 变异系数最大,这可能与 AP 和 AK 为速效态养分有关。郭宏等^[21]研究表明,速效态养分由于迁移性强和稳定性较差的特性,导致其变异程度较大。

从分布类型看, TN 养分分布的 K-S 检验系数为 0.24, 符合正态分布; SOM、TP、AP、TK、AK 对数转换

后 K-S 检验系数分别为 0.19、0.17、0.09、0.11、0.21, 也符合正态分布, 满足地统计学研究要求。

表 1 赣州市土壤养分含量(质量比)描述性统计特征
Tab. 1 Descriptive statistics of soil nutrient content in Ganzhou City

土壤养分	样点数/个	最小值/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数/ %	分布类型	K-S
SOM	2 928	12.100	61.10	28.91	9.16	31.68	对数正态	0.19
TN	2 928	0.330	3.52	1.47	0.47	31.97	正态	0.24
TP	2 928	0.220	1.04	0.51	0.16	31.37	对数正态	0.17
AP	2 928	0.003	0.08	0.02	0.01	66.47	对数正态	0.09
TK	2 928	2.700	22.80	11.16	4.42	39.61	对数正态	0.11
AK	2 928	0.020	0.26	0.07	0.04	56.86	对数正态	0.21

2.2 土壤养分含量与高程的相关性分析

将高程与土壤养分含量进行 Pearson 相关分析(表 2), 结果表明, 高程与 SOM、TN、TK 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.159 ($p < 0.01$)、0.156 ($p < 0.01$)、0.048 ($p < 0.01$), 可解释为海拔越高, SOM、TN、TK 含量越高, 这主要是海拔越高、温度越低, 低温阻碍了土壤矿化作用, 为养分的累积提供了条件。江叶枫等^[22]对南方丘陵区土壤养分的研究也得出了类似结果。高程与 TP、AP 呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.090 ($p < 0.01$) 和 -0.222 ($p < 0.01$), 表明地势越低, TP、AP 含量越高, 这主要是由于磷含量随高程受成土母质和施肥水平共同影响, 易在低洼处积累^[23]。高程与 AK 相关性不强, AK 作为易淋溶养分, 受人为活动干扰较大。

表 2 土壤养分与高程 Pearson 相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between elevation and soil nutrients

养分	SOM	TN	TP	AP	TK	AK
高程	0.159**	0.156**	-0.090**	-0.222**	0.048**	0.021

注: **表示极显著相关($p < 0.01$)。

2.3 不同高程分组土壤养分含量的方差分析

高程与土壤养分含量相关性分析虽然能在总体上反映土壤养分随高程的变化关系, 但局部信息描述不够。为详细地分析高程与耕地土壤养分含量的关系, 利用 DEM 数据, 按照自然断点法, 将高程由低至高分成 6 个组别: 0~150 m、150~200 m、200~250 m、250~300 m、300~350 m 和大于 350 m, 分别对不同高程组别下的土壤养分均值进行单因素方差分析(表 3)。从表 3 可以看出:

(1) SOM、TN 养分含量均值随高程组别上升而增加, 与表 2 相关性分析结果一致。SOM、TN 养分含量在小于 150 m 组别最小, 均值分别为 26.88、1.36 g/kg, 随着高程的增加, SOM、TN 均值在大于 350 m 组别时达到最大, 均值分别为 32.26、1.62 g/kg,

分别比最低高程组别(0~150 m)均值高 5.38、0.26 g/kg。从不同组别养分含量变异系数看, SOM、TN 变异系数分别为 28.11%~33.56%、28.65%~33.24%, 属中等变异。方差分析结果表明, 当高程小于 250 m 时, SOM 和 TN 含量随高程上升而呈上升趋势, 但大于 250 m 时, 差异性并不显著。

(2) TP 和 AP 养分含量均值随高程上升呈先下降后上升趋势, 与表 2 结果较为一致。其中, TP 在小于 300 m 各组别养分含量均值随高程上升而下降, 在 250~300 m 高程组别达最低值, 为 0.48 g/kg; 当高程达到 300~350 m 和大于 350 m 组别时, 养分均值又分别上升至 0.50、0.52 g/kg; AP 与 TP 类似, 小于 350 m 各组别养分均值随高程上升而下降, 在 300~350 m 高程组别达最低值, 为 17.80 mg/kg, 当大于 350 m 时, 养分均值又上升至 18.90 mg/kg。从变异系数看, TP、AP 变异系数分别为 26.65%~32.27%、50.85%~72.77%, 属中等变异。方差分析结果表明, 当高程小于 200 m 时, TP 和 AP 含量随高程上升而呈下降趋势, 但大于 200 m 时, 差异性并不显著。

(3) TK 和 AK 养分含量均值随高程组别上升有所波动。TK 养分总体随高程组别上升而上升, 养分均值由高至低依次为大于 350 m (12.65 g/kg)、300~350 m (11.90 g/kg)、0~150 m (11.42 g/kg)、200~250 m (11.20 g/kg)、150~200 m (10.79 g/kg)、250~300 m (10.64 g/kg); AK 养分均值随高程组别上升波动较大。从变异系数看, TK、AK 变异系数分别为 32.07%~42.91%、49.22%~57.91%, 属中等变异。方差分析结果表明, TK 在 200~350 m 高程范围内组间有显著差异, 而在 0~150 m、150~200 m 和大于 300 m 组间无显著差异; AK 在高程大于 350 m 与其他高程组间均有显著差异。

2.4 不同高程下土壤养分的空间分布特征分析

为直观反映土壤养分含量在不同高程的空间分布, 首先进行半方差函数分析, 确定土壤养分变异的

表3 不同高程组土壤养分含量均值统计

Tab.3 Statistics of mean value of soil nutrient contents in different elevation groups

高程/m	样本数/ 个	SOM			TN			TP		
		平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异系数/ %	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异系数/ %	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异系数/ %
0~150	602	26.88 ^d	8.33	31.00	1.36 ^d	0.44	32.42	0.55 ^a	0.18	32.27
150~200	933	28.11 ^e	9.43	33.56	1.43 ^e	0.47	33.24	0.51 ^b	0.16	31.84
200~250	648	29.09 ^b	8.91	30.62	1.48 ^b	0.48	32.64	0.49 ^b	0.15	30.68
250~300	387	31.09 ^a	9.20	29.58	1.58 ^a	0.47	29.62	0.48 ^b	0.13	26.65
300~350	213	31.31 ^a	8.98	28.67	1.60 ^a	0.46	28.65	0.50 ^b	0.15	30.19
>350	145	32.26 ^a	9.07	28.11	1.62 ^a	0.47	28.80	0.52 ^b	0.15	27.86

高程/m	样本数/ 个	AP			TK			AK		
		平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数/ %	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异系数/ %	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数/ %
0~150	602	28.87 ^a	14.68	50.85	11.42 ^{bc}	4.28	37.51	73.56 ^{bc}	42.36	57.59
150~200	933	23.75 ^b	15.58	65.58	10.79 ^c	4.32	40.04	75.96 ^b	43.99	57.91
200~250	648	18.92 ^c	13.54	71.56	11.20 ^c	4.60	41.05	73.47 ^{bc}	40.92	55.70
250~300	387	18.29 ^c	13.31	72.77	10.64 ^d	4.56	42.91	70.46 ^c	40.14	56.97
300~350	213	17.80 ^c	12.31	69.13	11.90 ^{ab}	4.31	36.21	74.90 ^{bc}	43.17	57.64
>350	145	18.90 ^c	12.68	67.08	12.65 ^a	4.06	32.07	84.69 ^a	41.69	49.22

注:同一列平均值后的小写字母相同,表示数据间未达到 $p=0.01$ 水平上的显著性差异,下同。

最优理论空间插值模型;其次,根据最优理论空间插值模型,以高程为协变量进行协同克里格插值,得到土壤养分空间分布预测图;最后,将预测图与高程图进行叠加分析,得到不同高程土壤养分分布图。

2.4.1 土壤养分含量空间分布拟合模型

半方差函数能够很好地反映引起土壤养分空间变异的随机性和结构性特征。结构性因素主要是指高程、成土母质、土壤类型等自然环境因素,随机性因素则是指土地利用方式等人为活动因素。通常用块金效应值($C_0/(C_0+C)$)说明样本间空间的相关性及由随机性因素引起的空间变异程度^[24]。从

图2可看出,TP、TK的最优模型分别为高斯模型和球状模型,其他养分最优模型均为指数模型。从模型的参数来看(表4),研究区SOM、TN块金效应小于25%,说明其具有较强的空间相关性,空间变异主要由高程等结构因素引起;TK、AK、TP、AP块金效应在25%~75%之间,具有中等强度的空间自相关性,变异由随机和结构因素共同引起,结构因素大于随机因素。模型决定系数均在0.72以上,模型总体拟合较好。SOM、TN、TP、AP、TK、AK的变程分别为15.00、16.20、22.52、39.60、41.80、34.50 km,变程相对较大,这与赣州山地丘陵复杂的地形地貌

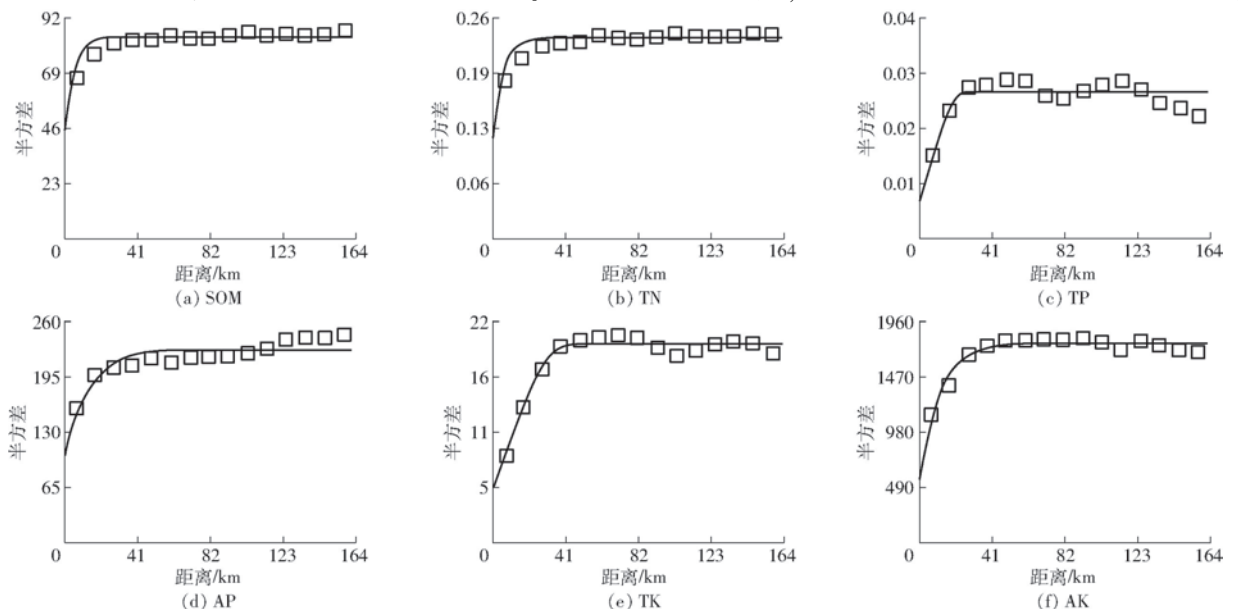


图2 赣州市土壤养分半方差函数图

Fig.2 Isotropic semi-variogram of soil nutrient in Ganzhou City

表4 土壤养分半方差函数模型参数

Tab.4 Parameters of semi-variogram models for soil nutrients

土壤养分	理论模型	块金值	基台值	块金效应	变程/km	决定系数	残差
		C_0	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C) / \%$			
SOM	指数	10.200	84.090	12.130	15.00	0.855	0.001
TN	指数	0.029	0.227	12.775	16.20	0.852	0.001
TP	高斯	0.011	0.027	40.741	22.52	0.724	0.002
AP	指数	97.200	227.400	42.744	39.60	0.779	0.003
TK	球状	4.990	19.810	25.189	41.80	0.967	0.002
AK	指数	517.000	1774.000	29.143	34.50	0.929	0.002

空间结构相符合。

2.4.2 不同高程下土壤养分的空间分布

将土壤养分进行协同克里格插值,交叉验证结果表明(表5):SOM、TN、TP、AP、TK、AK 预测值与实测值的相关系数 R 分别为 0.713、0.676、0.899、0.864、0.962、0.853,相关系数越大,表明预测精度越高^[25]。均方离比差(MSDR)分别为 1.395、1.814、1.072、0.950、0.839、0.963,MSDR 系数越接近于 1,说明精度越高^[26]。总体上,协同克里格插值结果较为可信。土壤养分含量插值后,按照第二次全国土壤普查土壤养分分级标准进行重分类并与高程进行叠加,得到不同高程土壤养分含量分布图(图3)。从图3可以看出:①不同土壤养分各等级分布面积不同。SOM、TN、AP 集中分布在 2~3 级(丰富~中等),分别占研究区总面积的 95.69%、95.46%、93.46%;TP 养分含量主要集中在 3~4 级

(中等~缺乏),占研究区总面积的 80.95%。TK、AK 集中分布在 4~5 级(缺乏~很缺乏),分别占研究区总面积的 80.70%、86.30%,与表 1 分析结果一致。②不同高程土壤养分含量有不同的空间分布格局。SOM、TN、TK 养分含量高值区主要分布在高海拔地区,养分含量分布格局由外向内随高程降低呈周边高、中间低、逐渐下降的分布趋势。而 TP、AP 正好相反,养分含量总体随高程上升而下降,分布格局由外向内随高程降低呈周边低、中间高、逐渐上升的分布趋势。AK 养分含量随高程分布规律不明显,这与表 3 分析结果比较一致。其中,SOM 和 TN 的空间分布较为相似(图 3a、3b),高低分布趋势相当,这主要是因为两者有较强的空间耦合关系^[27]。同时,大部分土壤养分含量的空间分布为突变而非渐变,能在一定程度上体现养分含量分布的空间异质性。

表5 土壤养分含量空间插值交叉验证结果

Tab.5 Cross-validation results of spatial estimation of soil nutrients

验证指标	SOM	TN	TP	AP	TK	AK
相关系数 R	0.713 **	0.676 **	0.899 **	0.864 **	0.962 **	0.853 **
均方离差比 MSDR	1.395	1.814	1.072	0.950	0.839	0.963

3 讨论

3.1 丘陵山区土壤养分的空间变异

受地形、母质、气候、生物和人类活动等因素的共同影响,丘陵山区土壤养分存在空间变异性。从研究区来看,SOM、TN 均处 3 级中等水平,这与南方长期高温多雨的亚热带季风气候环境一致,这种气候条件有利于植物生长并促进植物凋落物转化为 SOM,潮湿的空气也易产生嫌气条件,使微生物的活动降低,促进 SOM、TN 的累积;TP、TK、AK 普遍处于 4 级缺乏水平,TP、TK 剔除人为因素的影响,主要来源于土壤中含磷、钾矿物,南方砖红壤和红壤粘粒中含磷、钾矿物以高岭石为主^[28],磷、钾含量和释放量较低,加上南方地区高温高湿多雨易造成钾素的大量流失;AP 处于 2 级含量丰富水平,一个重要原因可能是水田较多,占研究区耕地的 80%。在淹水条

件下,磷的释放率提高且不易淋失,与杨文等^[29]对脱甲河小流域土壤碳氮磷研究结论一致;同时,研究区磷肥和有机肥(如猪粪等)施用量增加也是 AP 含量累积的重要原因。从半方差函数分析可以看出,土壤养分的块金值与基台值之比由小到大分别为 SOM(12.130%)、TN(12.775%)、TK(25.189%)、AK(29.143%)、TP(40.741%)、AP(42.744%),其中,土壤 SOM、TN 块金效应均小于 25%,说明两者含量具有强烈的空间相关性,其空间变异主要受结构性因子影响;而 TK、AK、TP、AP 块金效应在 25%~75%之间,说明其具有中等空间相关性,其空间变异受结构性因子和随机性因子共同影响,但受高程等结构因素影响更大。从变异系数看,土壤养分变异系数由大到小依次为 AP(66.47%)、AK(56.86%)、TK(39.61%)、TN(31.97%)、SOM(31.68%)、TP(31.37%),其中以 AP 和 AK 变异系

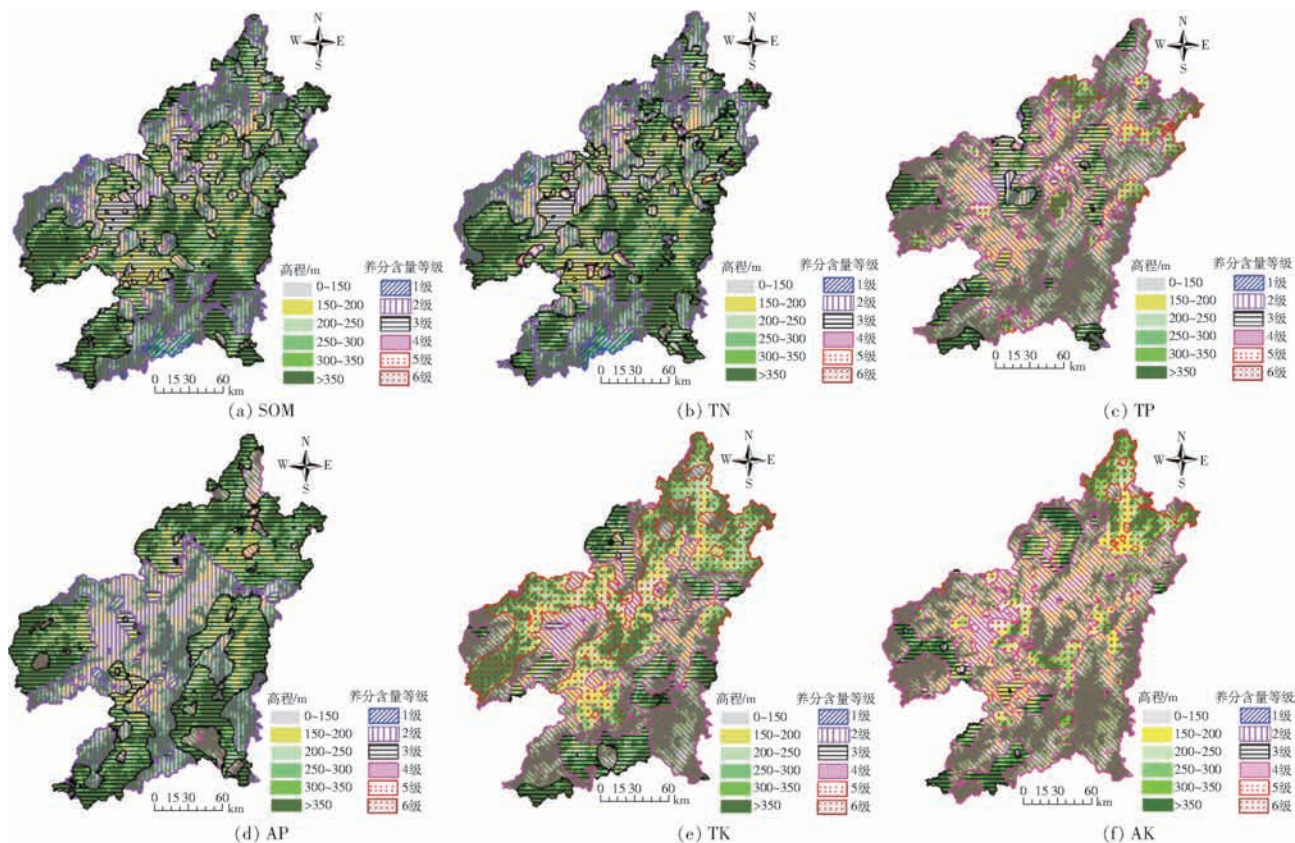


图3 不同高程土壤养分含量分布图

Fig. 3 Soil nutrient distribution maps at different elevations

数最大,这可能与 AP 和 AK 均为速效态养分迁移性强和稳定性较差的特性有关。

3.2 高程对土壤养分空间变异的影响

不同高程土壤养分空间变异规律和程度存在差异,影响因素也不同,可能的原因如下:

(1) 高程对 SOM、TN 含量的影响。南方丘陵山区耕层土壤 SOM、TN 含量随海拔升高而增加,养分含量在大于 350 m 高程组平均值达到最大值。究其原因,主要是 SOM、TN 含量主要受植物残体、动物废弃物归还和矿化速率的影响:①不同高程下秸秆还田量不同。秸秆作为植物残体是农田有机物来源的重要组成部分,还田后可积累土壤有机质。但不同高程耕地秸秆还田量不一,海拔较低处,耕地集中连片程度高,耕作、交通等条件较海拔较高处要好,因而,大量秸秆收集用于工业造纸或喂养牲畜,而海拔较高处田块分散且细碎,加上交通不便,根茬残留量和秸秆就地还田量要比海拔较低处要多,从而使更多秸秆转变为土壤有机质。②不同高程植物残体矿化的速率不同。植物残体矿化的速率受温度、湿度和微生物等的影响较大,而高程通过影响光、温、水、热资源的分配,导致局部小气候发生变化,从而影响土壤中 SOM、TN 的分解和积累。一般而言,海拔越高,土壤温度越低,土壤湿度越大,土壤微生物活动会受到抑制,分解速度减慢,从而矿化作

用减弱,因而,海拔较高处有利于有机质的积累。李丹维等^[30]对太白山以及陈桂秋等^[31]对湖南省、广西壮族自治区不同温度长期定位实验也得出相似结论。③少耕、免耕技术的推广,也是农田土壤 SOM、TN 增加的重要原因。吴建富等^[32]对江西省南部稻区的研究表明,免耕 1 年后,较翻耕处理土壤有机质含量增加 1.22 g/kg。研究区海拔较高处,很多耕地由于气温及人类活动的影响,只种植一季水稻,减少了耕作次数,因而有利于有机质的累积。

(2) 高程对 TP、AP 含量的影响。研究区 TP、AP 含量随高程上升而下降,TP、AP 养分均值均在小于 150 m 达到最大值。出现上述规律的可能原因是:①不同高程成土母质不同,高程与成土母质存在一定的耦合关系。从图 1c 可以看出,赣南土壤成土母质主要为酸性结晶岩类、泥质岩类风化物,紫色岩类、红砂岩类、石英类风化物以及第四纪红色粘土。研究表明,不同成土母质含磷量变化较大,并随岩土酸性程度的增加而下降^[33]。将高程(图 1b)与成土母质图(图 1c)进行叠加分析得出,不同高程成土母质分布存在明显差异,研究区海拔较高的地区,广泛分布着花岗岩及石灰性岩类母质,由于含云母、长石矿物较多,且土壤质地较粗,因此,磷的含量较低。研究区海拔较低的中部地区,由河湖沉积物发育形成的土壤磷含量显著高于第四纪红土和泥质岩类风

化残积—坡积物发育形成的土壤,赣州市土壤志表明该类成土母质含磷量较多,由此形成的土壤熟化程度也较高,且质地为壤土,对磷的富集起着一定作用。总体上,不同高程成土母质发育的土壤磷含量均表现出明显的从上往下依次递减规律,并具有较强的表聚性。②不同高程下土地利用方式不同,对土壤磷的分布产生重要影响^[34]。研究区耕地的土地利用方式主要为水旱轮作、一季旱地、两季旱地、一季水田和两季水田,耕地的土地利用方式与高程密切相关,随着高程的上升,研究区土地利用方式逐渐由两季水田、两季旱地或水旱轮作过渡到一季旱地或一季水田。相比两季种植,一季种植施肥量少,田间管理措施、投入管理水平没有两季精细,且一季种植摆荒时易生长杂草,通过杂草生长也带走部分养分,因而,总体上,研究区磷的含量表现出随高程增加而逐渐降低的趋势。

(3)高程对TK、AK含量的影响。研究区TK含量随高程上升而增加,可能原因:不同高程发育不同土壤类型、成土母质和土壤类型对钾含量的影响较大,从图1d可以看出,研究区土壤类型主要有水稻土、红壤、草甸土、石灰(岩)土、紫色土和山地黄壤,各种土壤的供钾能力大小不一^[35]。从高程与土壤类型叠加分析结果可以看出,海拔较低处,分布着一定数量的花岗岩红壤和第四纪红土红壤,花岗岩土壤砂性强、保水保肥能力较弱、钾离子相对容易淋失,第四纪红土红壤虽然粘性强、土壤吸附性能好,但由于土壤胶体几乎全部被 H^+ 或 AL^{3+} 饱和,从而使盐基离子很难在土壤胶体中保持下来,土壤对钾素养分的保持能力亦相对较弱。在海拔较高处,分布着一定数量的微碱性紫色土,该土壤阳离子交换量较大、交换性盐基离子含量较高,对钾素的保持和供应能力亦较强,故土壤中出现了钾的累积。AK含量随高程变异较大,规律性不明显,主要原因是AK为易淋溶养分,易受到施肥、水流和土壤侵蚀的影响。南方丘陵区是典型的红壤区,降雨充沛且汛期集中,是我国水土流失最严重的区域之一^[36],土壤侵蚀带走大量泥土的同时,也带走了土壤养分。将DEM高程图与土壤侵蚀图(图1e)进行空间叠加分析可以看出,随着高程的增加,高程与土壤侵蚀大致呈倒“U”形关系,即随着高程的上升,土壤侵蚀加剧,上升到一定高度后又下降,由于南方丘陵区复杂的地形地貌,以及速效钾的易淋溶特征,使AK含量随高程变化规律异常复杂,与赵明松等^[37]对安徽省速效钾养分流失评估、邓欧平等^[38]对四川省紫色土速效钾的研究结论基本一致。

3.3 高程对土壤养分含量空间变异影响的启示

高程是土壤养分含量空间变异的重要影响因素之一,高程通过改变生态环境的光、热、水、气等条件,影响土壤的物理、化学和微生物性质,从而使不同高程土壤养分含量存在明显的差异并呈现一定的规律变化。研究高程与耕地土壤养分的相关性及其垂直分布特性,分析海拔高度对土壤养分的影响,可为不同地形地貌耕地地力评价、农用地分等定级、土地利用潜力评价、土壤改良措施制定、水土流失评价等提供依据。从不同高程土壤养分空间变异特征分析,可以得出如下启示和建议:①根据山地丘陵区不同海拔高程耕地土壤养分分异结果,可对土壤养分实行分高程梯度精准管理,不断提升耕地质量,实现农作物高产稳产。②土壤侵蚀在研究区大于350 m高程带以中度及以上侵蚀为主,易淋溶养分流失最严重,是土壤侵蚀治理的重点区域,建议对该区域耕地土地利用方式进行转型,如将坡耕地转变为果园、林地,或在耕作的基础上进一步采取坡改梯等工程措施和生物等水保措施,防止水土和养分流失。③为进一步细化高程对土壤养分的影响,掌握不同高程耕地土壤养分的运移及累积规律,建议在以后的研究中,在不同高程建立土壤养分含量长期定位调查,并与土地利用方式、土壤类型等相结合,针对土壤养分变化与作物生长状况,制定适宜的耕地利用方式,维持山地丘陵区耕地土壤养分和生态平衡。

4 结论

(1)统计分析表明,南方丘陵区AP养分含量丰富,均值为0.02 g/kg;SOM、TN含量处中等水平,均值分别为28.91、1.47 g/kg;TP、TK、AK含量缺乏,均值分别为0.51、11.16、0.07 g/kg。

(2)相关分析结果表明,高程与SOM、TN、TK养分含量呈极显著正相关,相关系数分别为0.159($p < 0.01$)、0.156($p < 0.01$)、0.048($p < 0.01$);与TP、AP呈极显著负相关,相关系数分别为-0.090($p < 0.01$)和-0.222($p < 0.01$);与AK显著性不明显。

(3)方差分析结果表明,不同高程分组下土壤养分含量均值存在显著差异。SOM、TN、TK养分含量随高程组上升而增加;TP、AP养分含量均值随高程上升而降低;AK随高程分组无明显规律性。

(4)空间插值与高程叠加分析表明,SOM、TN和TK养分含量高值区分布在研究区周边高海拔区形成的连片区域;TP、AP养分含量高值主要分布在研究区中部低海拔区域;AK养分含量分布规律不明显。

参 考 文 献

- [1] MASSEY P A, CREAMER R E, SCHULTE R P O, et al. The effects of earthworms, botanical diversity and fertilizer type on the vertical distribution of soil nutrients and plant nutrient acquisition [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49 (8):1189 - 1201.
- [2] 孙彦铭, 刘克桐, 贾良良, 等. 河北省冀中南平原区典型农田土壤肥力演变特征[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(9):164 - 169. SUN Yanmin, LIU Ketong, JIA Liangliang, et al. Soil fertility change of typical farmland in the middle and south plain area of Hebei Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(9):164 - 169. (in Chinese)
- [3] DAI N, YOSHIHIKO H, YUKIRA M. Influence of micro-landforms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest [J]. *Ecological Research*, 2003, 18(5): 533 - 547.
- [4] 徐宪根, 周焱, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤氮矿化对温度变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(7):1298 - 1302. XU Xian'gen, ZHOU Yan, RUAN Honghua, et al. Responses of soil nitrogen mineralization to temperature change a long an elevation gradient in Wuyi mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7):1298 - 1302. (in Chinese)
- [5] 李超, 李文峰. 高原耕地土壤养分空间分布与影响因子相关性研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(5):1113 - 1118. LI Chao, LI Wenfeng. Study on the relations between the spatial distributions of plateau cultivated soil nutrients and impact factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1113 - 1118. (in Chinese)
- [6] 刘二永, 刘健, 余坤勇, 等. 基于环境因子和 R - STPS 的林地土壤有机质预测模型[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1):133 - 137. LIU Eryong, LIU Jian, YU Kunyong, et al. Spatial prediction of forest soil organic matter based on environmental factors and R - STPS interpolation methods [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):133 - 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150120&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.020. (in Chinese)
- [7] 王瑞永, 刘莎莎, 王成章, 等. 不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析[J]. *草地学报*, 2009, 17(5):621 - 628. WANG Ruiyong, LIU Shasha, WANG Chengzhang, et al. Analysis on soil physicochemical indices at different altitudes in alpine rangeland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(5):621 - 628. (in Chinese)
- [8] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(1):83 - 89. ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al. Spatial variability of soil organic matter and factor analysis in the south of middle Jiangsu plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(1):83 - 89. (in Chinese)
- [9] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5):188 - 194. ZHANG Sumei, WANG Zongming, ZHANG Bai, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 188 - 194. (in Chinese)
- [10] 李丹, 王京文, 杨文叶, 等. 杭州市滨江区耕地土壤养分现状及变化特征[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(8):192 - 196. LI Dan, WANG Jingwen, YANG Wenye, et al. Status of farmland soil nutrients and its variation characteristics in Binjiang district, Hangzhou [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(8):192 - 196. (in Chinese)
- [11] 李睿康, 李阳兵, 文雯, 等. 典型流域土壤侵蚀演变的高程、坡度空间差异比较[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):99 - 107. LI Ruikang, LI Yangbing, WEN Wen, et al. Comparative study on spatial difference of elevation and slope in soil erosion evolution in typical watershed [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):99 - 107. (in Chinese)
- [12] 陈志芳, 刘金福, 吴则焰. 不同海拔土壤理化性质与酶活性研究[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2014, 30(1):38 - 42. CHEN Zifang, LIU Jinfu, WU Zeyan. Soil physicochemical properties and enzyme activities at different elevation gradients [J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2014, 30(1):38 - 42. (in Chinese)
- [13] TANG C Q. Forest vegetation as related to climate and soil conditions at varying altitudes on a humid subtropical mountain, Mount Emei, Sichuan, China [J]. *Ecological Research*, 2006, 21(2):174 - 180.
- [14] 丛静, 刘晓, 卢慧, 等. 神农架自然保护区土壤微生物生物量碳、氮沿海拔梯度的变化及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12):3381 - 3387. CONG Jing, LIU Xiao, LU Hui, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen along the altitude gradient and its influence factors in Shennongjia natural reserve [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12):3381 - 3387. (in Chinese)
- [15] 黄婷, 周冀衡, 李强, 等. 不同海拔高度植烟土壤 pH 值分布情况及其与土壤养分的关系——以云南省曲靖市为例[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1):105 - 110. HUANG Ting, ZHOU Jiheng, LI Qiang, et al. The pH distribution and its relationship with soil nutrient at different altitudes—a case study of tobacco fields in Qujing, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1):105 - 110. (in Chinese)
- [16] 吴崇书, 倪中应, 刘永红, 等. 杭州市不同农业地貌区耕地土壤肥力的差异及施肥对策[J]. *农学学报*, 2015, 5(6):59 - 64. WU Chongshu, NI Zhongying, LIU Yonghong, et al. Differences in soil fertility of cultivated land in different landforms of Hangzhou region and its fertilization countermeasures [J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(6):59 - 64. (in Chinese)
- [17] 蒋端生. 红壤丘陵区耕地肥力质量演变规律及其影响因素研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2008. JIANG Duansheng. Studies on the evolution law of the fertility quality of arable land and its influencing factors in red soil [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [18] 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(7):1173 - 1184. ZHANG Zhixia, XU Mingxiang, SHI Chendi, et al. Scaling effect on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the loess hilly region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7):1173 - 1184. (in Chinese)
- [19] 宋正姍, 史学正, 王美艳, 等. 南方侵蚀治理区土壤碳分布及主控因素研究[J]. *土壤*, 2013, 45(5):850 - 855. SONG Zhengshan, SHI Xuezheng, WANG Meiyang, et al. Regional distribution of soil organic carbon and its controlling factors in the severely eroded region of south China[J]. *Soils*, 2013, 45(5):850 - 855. (in Chinese)

- [20] 王丹丹,史学正,于东升,等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J]. 生态环境学报,2009,18(3):1049-1053.
WANG Dandan, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Main natural factors controlling soil organic carbon density in the uplands of North-east China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(3):1049-1053. (in Chinese)
- [21] 郭宏,刘天鹏,杜毅飞,等. 黄土高原县域苹果园土壤养分空间变异特征研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):21-27.
GUO Hong, LIU Tianpeng, DU Yifei, et al. Spatial variability of soil nutrients in the apple orchards on the scale of county in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):21-27. (in Chinese)
- [22] 江叶枫,孙凯,郭熙,等. 南方红壤区不同侵蚀程度下土壤有机质空间变异的影响因素研究[J]. 自然资源学报,2018,33(1):149-160.
JIANG Yefeng, SUN Kai, GUO Xi, et al. Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(1):149-160. (in Chinese)
- [23] 王永壮,陈欣,史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报,2013,24(1):260-268.
WANG Yongzhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(1):260-268. (in Chinese)
- [24] 王正权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:71-99.
- [25] 姚荣江,杨劲松,杨奇勇,等. 禹城地区土壤铅含量空间分布的指示克里格估值[J]. 生态环境学报,2011,20(12):1912-1918.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong, YANG Qiyong, et al. Indicator Kriging of spatial distribution of soil Pb content in Yucheng City[J]. Ecology and Environmental Sciences,2011,20(12):1912-1918. (in Chinese)
- [26] GUO Xi, JIANG Yefeng. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2047-7>.
- [27] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):140-148.
ZHAO Yeting, CHANG Qingrui, LI Zhipeng, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei tableland area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):140-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140823&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.023. (in Chinese)
- [28] 潘大伟,梁成华,杜立宇. 土壤含钾矿物的释钾研究进展[J]. 土壤通报,2005,36(2):253-258.
PAN Dawei, LIANG Chenghua, DU Liyu. Progress in research on potassium release from K-bearing minerals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science,2005,36(2):253-258. (in Chinese)
- [29] 杨文,周脚根,王美慧,等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报,2015,52(6):1336-1344.
YANG Wen, ZHOU Jiaogen, WANG Meihui, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C,N and P in a small hilly watershed in subtropics of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(6):1336-1344. (in Chinese)
- [30] 李丹维,王紫泉,田海霞,等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报,2017,54(1):160-170.
LI Danwei, WANG Ziquan, TIAN Haixia, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation[J]. Acta Pedologica Sinica,2017,54(1):160-170. (in Chinese)
- [31] 陈桂秋,黄道友,苏以荣,等. 红壤丘陵区土地不同利用方式对土壤有机质的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(2):256-260.
CHEN Guiqiu, HUANG Daoyou, SU Yirong, et al. Effects of soil organic matter in hilly red soils from mid-subtropics region under various utilization patterns[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005,24(2):256-260. (in Chinese)
- [32] 吴建富,潘晓华,王璐,等. 双季抛栽条件下连续免耕对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(15):3159-3167.
WU Jianfu, PAN Xiaohua, WANG Lu, et al. Effects of continuous no-tillage on crop yield and soil fertility in double rice cropping system [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2010,43(15):3159-3167. (in Chinese)
- [33] 刘全友,孙建中,黄银晓,等. 海河流域土壤中磷的库存量与通量研究[J]. 生态学报,1994,14(2):121-127.
LIU Quanyou, SUN Jianzhong, HUANG Yinxiao, et al. Storage and flux of phosphorus in soil in the Haihe river basin [J]. Acta Ecologica Sinica,1994,14(2):121-127. (in Chinese)
- [34] 徐光荣,张世熔,钟钦梅,等. 岷江上游典型土壤磷的迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报,2018,37(8):1741-1747.
XU Guangrong, ZHANG Shirong, ZHONG Qinmei, et al. Phosphorus movement characteristics of typical soils in the upper reaches of the Minjiang river,China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8):1741-1747. (in Chinese)
- [35] 陶其骧,刘光荣,罗奇祥,等. 江西省红壤旱地土壤钾素含量分布研究[J]. 江西农业学报,1994,6(2):93-99.
TAO Qixiang, LIU Guangrong, LUO Qixiang, et al. Study on the distribution of potassium of red upland soil in Jiangxi Province [J]. Acta Agricultural Jiangxi, 1994,6(2):93-99. (in Chinese)
- [36] 肖龙. 红壤严重侵蚀区不同生态修复类型的土壤侵蚀控制作用[J]. 亚热带水土保持,2016,28(4):5-8.
XIAO Long. Control functions to the soil erosion by different ecological restoration types in the serious red soil erosion areas [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016,28(4):5-8. (in Chinese)
- [37] 赵明松,李德成,张甘霖,等. 基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报,2016,53(1):28-38.
ZHAO Mingsong, LI Decheng, ZHANG Ganlin, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model [J]. Acta Pedologica Sinica,2016,53(1):28-38. (in Chinese)
- [38] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. 资源科学,2013,35(12):2434-2443.
DENG Ouping, ZHOU Xi, HUANG Pingping, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan[J]. Resources Science, 2013,35(12):2434-2443. (in Chinese)