

DOI: 10.11766/trxb201911110116

秦发侣, 郭春平, 陈红, 柳德江, 田育天, 谢新乔, 李湘伟, 王世航. 杞麓湖盆地土壤有机质多时相空间分布与演变[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1548–1555.

QIN Falü, GUO Chunping, CHEN Hong, LIU Dejiang, TIAN Yutian, XIE Xinqiao, LI Xiangwei, WANG Shihang. The Multi-Phase Tempo-Spatial Distribution and Variation of Soil Organic Matter in the Qiluhu Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1548–1555.

杞麓湖盆地土壤有机质多时相空间分布与演变^{*}

秦发侣^{1, 2}, 郭春平³, 陈 红¹, 柳德江^{1†}, 田育天⁴, 谢新乔⁴, 李湘伟⁴,
王世航⁵

(1. 玉溪师范学院地理与国土工程学院, 云南玉溪 653100; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 玉溪市土壤与肥料工作站, 云南玉溪 653100; 4. 红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南玉溪 653100; 5. 安徽理工大学测绘学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 基于四期土壤采样点数据, 结合样点调查和统计年鉴数据, 采用普通克里格、多元回归和探索性回归方法预测杞麓湖盆地土壤有机质(SOM)空间分布并分析其影响因素。结果表明指数和椭球模型分别较好地拟合了2008和2011年、2013和2015年的SOM的空间变异性。四个时相的SOM均由西南到中部再到东北部呈现出低-高-低的分布特征, 并且高值核心区的位置不变, 但高值区范围逐年扩大。前三个时间段内SOM连续增加的区域面积是连续减小的区域面积的两倍多。土壤亚类类型、农业设施和土壤质地各解释SOM变异的14.3%、2.6%和1.3%。SOM的降低主要由粮食和蔬菜的高产出所致, 适当地减少氮肥施用量并增加复合肥施用量能在一定程度上维持甚至提升SOM含量。

关键词: 土壤有机质; 普通克里格; 多时相; 时空分布与变化

中图分类号: P962 **文献标志码:** A

The Multi-Phase Tempo-Spatial Distribution and Variation of Soil Organic Matter in the Qiluhu Basin

QIN Falü^{1, 2}, GUO Chunping³, CHEN Hong¹, LIU Dejiang^{1†}, TIAN Yutian⁴, XIE Xinqiao⁴, LI Xiangwei⁴,
WANG Shihang⁵

(1. School of Geography and Engineering of Land Resources, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan 653100, China; 2. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Soil and Fertilizer Station of Yuxi, Yuxi, Yunnan 653100, China; 4. Hongta Group, China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Yuxi, Yunnan 653100, China; 5. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

* 国家自然科学基金项目(4180070048, 31700369)和土壤与农业可持续发展重点实验室开放课题(Y812000002)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 4180070048, 31700369) and the State Key Lab of Soil and Sustainable Agriculture Foundation (No. Y812000002)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liudejiang@yxnu.edu.cn

作者简介: 秦发侣(1986—), 男, 云南玉溪人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土壤质量空间制图与演变模拟研究。E-mail: qinfl@yxnu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-11; 收到修改稿日期: 2020-06-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-25

Abstract: Of the data of the sites for the four-round soil sampling, and the data gathered during the field survey of the sample sites and published in the statistical yearbook, ordinary kriging, multiple regression and exploratory regression were performed to predict spatial distribution of SOM in the Qiluhu Basin and to analyze its influential factors. Results show that the exponential model outperformed the spherical model in fitting the spatial variation of SOM in 2008 and 2011, while the spherical model behaved better in 2013 and 2015. In all the four time phases, the distribution of SOM showed a saddle-shaped curve, that is, low, high and low in content, going from the southwest to the center and then to the northeast in the area. Moreover, the peak stayed unchanged in position, while expanding in area year by year. During the first three time phases, the area with SOM keeping on increasing was twice as large as the area with SOM decreasing continuously. Soil subclasses, agricultural facilities and soil textures explained 14.3%, 2.6% and 1.3% of the variability of SOM, respectively. The decline in SOM content could be attributed to the increase in the yield of the cereal and vegetable crops. And the practice of properly reducing the application rate of nitrogen fertilizers and increasing that of compound fertilizers helped maintain or even raise the content of SOM in the area.

Key words: Soil organic matter; Ordinary kriging; Multi-phase; Spatio-temporal distribution and variation

土壤有机质 (Soil organic matter, SOM) 含量直接影响耕地质量和功能, 同时影响陆地碳库的丰减^[1-2]。准确量化区域 SOM 的空间分布以及时间演变状况不仅能为农田土壤质量演变监测提供翔实数据, 也能为识别土壤固碳的有效作物种植模式 (如作物的种类、不同品种的种植分布等) 和耕作管理措施 (如施肥、灌溉等) 提供基础数据, 从而为区域土壤资源可持续利用、农产品增收和减缓全球气候变化做出积极贡献^[3-7]。

众多学者已针对国家、省级、县级和流域尺度的 SOM 的时空演变与分布做了研究。如杨帆等^[8]对比 2005—2014 年的测土配方施肥项目数据和全国第二次土壤普查数据, 量化了近 30 年中国农田耕层 SOM 的变化情况。Dai 等^[3]根据 2000 年代和 20 世纪 80 年代的采样数据, 对比了不同的土壤类型、土地利用方式以及自然地理单元的表层 SOM 的变化情况。赵明松等^[9]基于全国第二次土壤普查资料和 2006 年采样数据, 使用地统计方法进行 SOM 的空间插值, 并通过差减 2006 年和 20 世纪 80 年代的 SOM 空间分布数据, 分析了江苏省多类型土壤表层 (0~20 cm) SOM 的时空变异特征。张忠启等^[10]结合中国科学院耕地土壤质量分等定级与生产潜力评估项目中 2007 年数据和全国第二次土壤普查数据, 明晰了江西省余江县 1982—2007 年 SOC 含量的空间分布和时间演变特征。

然而, 以上研究均利用时间跨度大于 10 年的两期数据进行差减, 仅以较粗时间分辨率反映 SOM 的变化率, 难以细致且真实地反映 SOM 年际变化。这

主要归因于区域土壤调查成本较高而使历史数据积累不足。因此, 有必要在数据较翔实区域基于多期细粒度土壤调查数据量化区域 SOM 年际变化。

通海县是首批入选“云南省高原特色农业示范县”的县城之一。其农业耕作模式对于全省乃至我国西南高原区现代农业的发展具有典型示范作用。而杞麓湖盆地是通海县的主要农业耕作区, 详尽表征该区域内 SOM 的空间分布与时间演变状况能为区域农业的信息化、精细化管理提供翔实的土壤基础数据。

本研究基于杞麓湖盆地 2008 年、2011 年、2013 年和 2015 年的密集土壤采样数据, 应用普通克里格 (Ordinary kriging, OK) 预测该区域四个时相耕作表层的 SOM 空间分布, 量化区域的 SOM 年际空间变化情况; 并结合统计年鉴中各自然村的蔬菜种植总面积、粮食种植总面积、化肥 (氮、磷、钾、复合肥) 施用量数据, 使用多元回归 (Multiple regression) 和探索性回归 (Exploratory regression) 方法分析了耕作表层 SOM 变化的影响因素。研究结果可为监测区域土壤质量演变提供翔实基础底图, 也有助于明晰区域 SOM 变化影响因素, 最终为区域土壤资源可持续利用决策提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杞麓湖盆地位于云南省通海县 (102°34'~102°52'E, 24°6'~24°12' N), 属亚热带半湿润高原

季风气候区。区内四季温差小、早晚温差大、干湿季分明、雨热同季,多年平均降雨量900 mm,多年平均气温16℃,年日照时间2 274 h。地势由西南向东北逐渐降低,坡度3°~10°,海拔1 796~1 820 m。盆地内主要作物为蔬菜、粮食、油料、烤烟和花卉。全国第二次土壤普查划分的土壤类型为水稻土,水稻土亚类为潴育型、潜育型、淹育型以及沼泽型^[11]。

1.2 样品采集与分析

为调查土壤属性的空间分布,玉溪市土壤肥料工作站分别于2008年、2011年、2013年和2015年随机采集了杞麓湖盆地耕作层(0~20 cm)679、804、484和362个土壤样品(图1)。并采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)氧化—滴定法测定了SOM含量^[12-13],提取了各样点的土壤亚类(潴育型、潜育型、淹育型、

沼泽型)、土壤质地(砂壤、壤土、黏壤、黏土)、农业设施等级(不配套、基本配套、完全配套)以及灌溉程度(无灌、有灌溉潜力、能灌、保灌)信息。

1.3 离群值处理

离群值的存在会影响样本的概率分布,从而影响根据样本数据估计的半方差图^[14]。且回归分析和普通克里格插值均在数据服从近似正态分布时能获得更准确的结果。因此采用Hamble方法^[15]根据样本的中值(Median)和中值绝对偏差(Median Absolute Deviation, MAD)来识别并剔除四个时相SOM的离群值(outliers)。基本原则是当样本中的数值大于(或小于)中值加上(或减去)3倍中值绝对偏差时,则视为离群值。剔除离群值后分别剩余667、788、469和359个土壤样品。

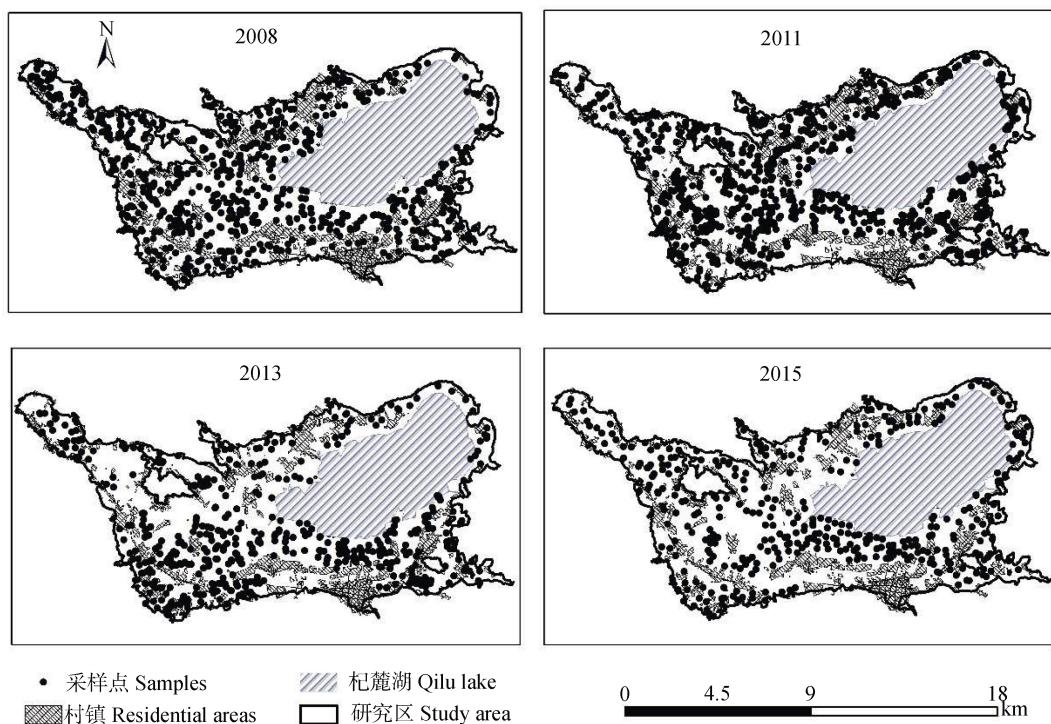


图1 杞麓湖盆地四个时相的土壤采样点分布情况

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Qiluhu basin relative to time phase

1.4 半方差模型拟合与克里格插值

为了将尽可能多的土壤样点用于半方差模拟的拟合,从而获得稳定的半方差模型,本研究通过留一交叉验证(Leave One Out Cross Validation, LOOCV)比较土壤研究中常用的指数和椭球模型。选取的量化指标包括误差均值(Mean errors, ME)、误差平方的均值(Mean squared errors, MSE)、克

里格插值方差均值(Mean kriging variances, $\bar{\sigma}_k^2$),以及预测值与观测值离差率平方的中值(Median squared deviation ratio, MSDR)。

1.5 统计年鉴数据收集与整理

从《通海县统计年鉴》中收集并整理了杞麓湖盆地内共47个自然村的2008年、2011年、2013年和2015年的蔬菜种植总面积、粮食种植总面积、氮

肥施用量、磷肥施用量、钾肥施用量、复合肥施用量数据, 并将这些数据与村级行政区划图连接, 形成空间属性一体的矢量文件。统计每个自然村 2008—2015 年的蔬菜种植总面积平均变化量、粮食种植总面积平均变化量、化肥(氮、磷、钾和复合肥)施用量平均变化量。

1.6 土壤有机质影响因素分析

基于 2008 年、2011 年、2013 年和 2015 年四期土壤样点数据, 以 SOM 为因变量, 将土壤亚类、土壤质地、农业基础设施和灌溉程度作为自变量并按各因子的等级赋予哑变量 (dummy variables), 进行多元回归分析。此外, 基于四期 SOM 插值数据, 以自然村为单元统计四个年份的 SOM 均值, 并计算平均变化量。以四期 SOM 均值平均变化量结合各村的蔬菜总产量平均变化量、粮食总产量平均变化量和化肥(氮、磷、钾和复合肥)施用平均变化量, 进行探索性回归。该方法通过普通最小二乘法 (Ordinary Least Squares, OLS) 评估所有待选因子组合, 并依据调整 R^2 (Adjust R^2)、系数显著性 P (Coefficient P value)、方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 和雅克贝拉显著性 P (Jarque-Bera P value, JB) 来选择较为合适的回归模型。

1.7 数据处理与分析

数据的探索性分析和多元回归分析使用 R 软件^[16]的基础包完成, 土壤数据的半方差模型拟合及普通克里格插值使用 R 软件的 gstat 软件包^[17]完成, 探索性回归和部分地图的制作在 ArcMap 10.5 中完成。

2 结果

2.1 SOM 基本统计特征

2008 年、2011 年、2013 年和 2015 年的原始样本的 SOM 偏度和峰度均较大, 概率分布为右向长尾。虽然剔除离群值后剩余的土壤样本 (667、788、469 和 359) 的概率分布并不完全服从正态分布, 但四期样本概率分布的偏度均小于 0.5, 而峰度均明显降低, 较处理前更接近于正态分布。用剔除离群值后的样本的变异系数 CV 来表征数据的变异性, 可见四期 SOM 的变异性均大于 35%。根据 Wilding^[18] 推荐的分类指标, 当 $CV > 35\%$ 时为强度变异性, $CV > 15\%$ 为中等变异性, $CV < 15\%$ 为轻微变异性。

统计对比剔除离群值后四个时相的样本, 结果表明相对 2008 年, 2011 年的 SOM 均值显著降低; 而相对 2011 年, 2013 年和 2015 年 SOM 均值显著增加。不同年份 SOM 均值差异的 95% 置信区间最大范围为均值 $\pm 3.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此值将作为下文中统计 SOM 变化面积的临界参考值。

2.2 SOM 的空间结构特征

数量不小于 100 且在研究区内分布均匀的采样点可以较为稳定且真实地估算区域变量的半方差函数从而反映其空间相关关系^[19-20]。根据剔除离群值后样本拟合四个时相 SOM 的半方差的指函数和椭球模型^[21]的块金值 (Nugget)、偏基台 (Partial sill)、变程值 (Range) 以及块金-基台比 (表 1)。用 ME、MSE、MSDR 和 R^2 比较指函数和椭球模型的适用性。其中 ME 应接近于 0, 而 MSE 则应越小越好; 衡量

表 1 根据杞麓湖盆地四个时相土壤有机质调查值拟合的指函数和椭球半方差模型的基本参数

Table 1 Basic parameters of the exponential and spherical semi-variance models inferred from the soil survey on soil organic matter in the Qiluohu Basin during the four time phases

年份 Year	指函数模型 Exponential model				椭球模型 Spherical model			
	块金 $C / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	偏基台 $C_0 / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	变程 Range / m	块金/基台 $C / (C + C_0)$	块金 $C / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	偏基台 $C_0 / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	变程 Range / m	块金/基台 $C / (C + C_0)$
2008	99.55	173.65	3535.4	0.364	107.26	143.26	6612.7	0.428
2011	88.85	187.06	3106.9	0.322	99.56	160.27	6525.4	0.383
2013	95.97	170.10	3254.6	0.361	102.64	141.68	5983.0	0.420
2015	88.26	186.36	3084.4	0.321	101.70	160.94	6865.4	0.387

模型好坏的最主要指标为 MSDR 和 R^2 , 其值越接近于 1, 对应模型拟合的越好。结果表明指数模型较椭球模型能更好地拟合 2008 年 (MSDR 和 R^2 分别为 0.988 和 0.986) 和 2011 年 (MSDR 和 R^2 分别为 0.956 和 0.947) SOM 的半方差函数, 而椭球模型在拟合 2013 年 (MSDR 和 R^2 分别为 1.065 和 0.973) 和 2015 年 (MSDR 和 R^2 分别为 1.032 和 0.988) SOM 时略好于指数模型。

2.3 SOM 时空分布特征

本研究采用普通克里格方法, 基于指数模型预测 2008 年和 2011 年、椭球模型预测 2013 年和 2015 年 SOM 的空间分布, 并输出粒度为 50 m×50 m 的 SOM 分布图 (图 2)。可以看出, 杞麓湖盆地 SOM 的空间分布特征在不同年份总体格局相似, 但局部差异明显。总体上四个时相的 SOM 从西南向东北呈现出低-高-低的分布特征。局部来看, 盆地西北角的 SOM 从 2008 年至 2011 年有较小程度的降低, 而在 2013 年和 2015 年均呈现出明显的增加; 中部高值核心区位置基本一致, 但高值区的辐射范围从 2008 年至 2011 年表现为收缩, 而 2011 年至 2013 年和 2015 年则表现为逐渐扩张。

为了明晰不同年份间 SOM 的空间变化情况, 以 2008 年的 SOM 数据为基底, 比较 2011 年、2013 年和 2015 年的 SOM 空间变化 (图 3)。相比 2008 年, SOM 增加的区域面积有逐年扩大的趋势, 增加的区域主要集中在盆地的西北角、西南角、南部以及杞麓湖的西北岸和南岸大部。据插值结果统计, 杞麓湖盆地 2011 年、2013 年和 2015 年相对于 2008 年的 SOM 的变化值的范围为 $-21.87 \sim 17.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。如依据上文中不同年份 SOM 均值差异的 95% 置信区间将 $0 \pm 3.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 确定为 SOM 减少或增加的临界区, 并将 SOM 划分为 $<10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10 \sim -3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-3 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $>10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 L1~L5 五个等级, 则各等级面积的变化情况明显 (图 4)。从 2008 年至 2015 年的三个时间段内 SOM 连续增加的区域面积约占 68.7%, 为 SOM 连续减少的区域面积的两倍多。

2.4 耕层土壤有机碳的影响因素

将土壤亚类、土壤质地、农业基础设施和灌溉程度作为自变量并赋予哑变量后进行回归分析。结果表明, 除灌溉程度对土壤有机质的贡献不显著外, 土壤亚类、土壤质地和农业基础设施这三个因子均

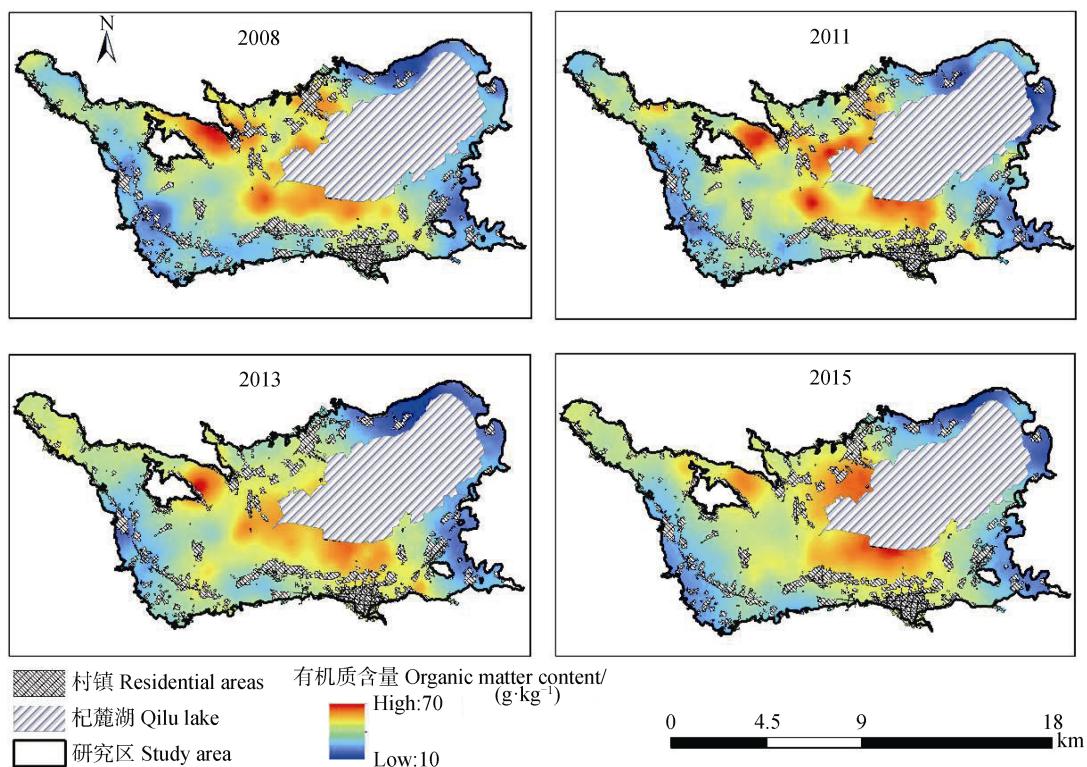


图 2 土壤有机质的 50 m×50 m 预测值分布图

Fig. 2 Predicted SOM distribution map with 50 m×50 m resolution

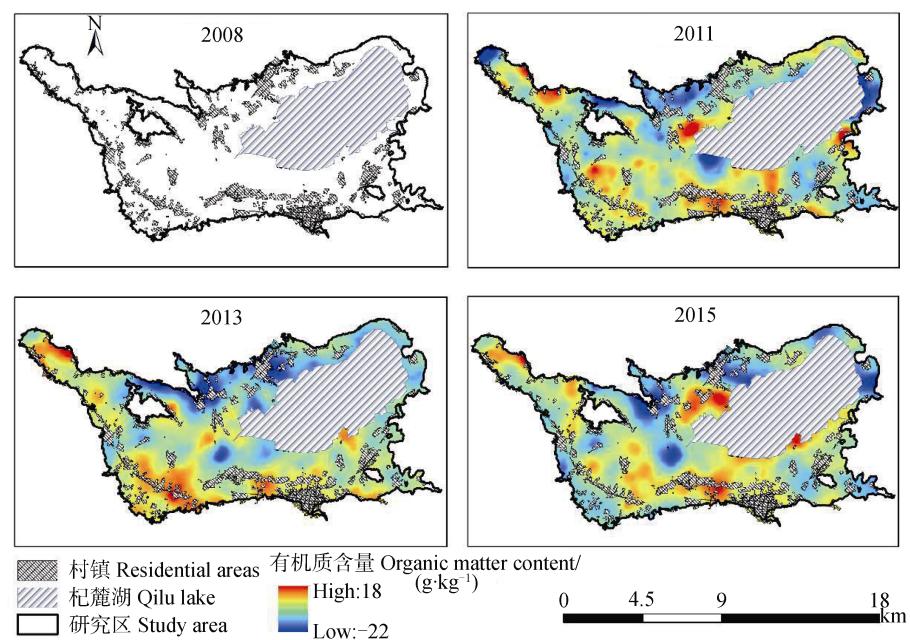
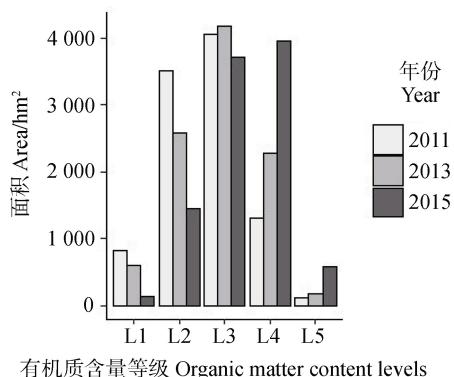


图3 四个时期土壤有机质变化分布图

Fig. 3 Soil organic matter distribution map relative to time phase



注 Note: L1: $<10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; L2: $10\sim3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; L3: $3\sim10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; L4: $10\sim3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; L5: $>10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图4 杞麓湖盆地五个土壤有机碳变化等级的面积
Fig. 4 Areas of the five levels of soil organic matter variation in the Qilu Basin

呈现出显著的影响 ($P<0.001$)。其中, 对杞麓湖盆地耕层 SOM 影响最大的是土壤亚类的类型, 一共能解释 14.3%; 而农业设施和土壤质地分别能解释 2.6% 和 1.3%。在水稻土亚类中, 潘育型、潜育型和沼泽型分别较淹育型高出 10.94 ± 0.74 、 21.12 ± 1.59 和 $25.36\pm1.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相对于没有配套农业设施的农田, 基本配套和完全配套的农田耕层 SOM 均有所提高, 但前者提高的程度未达到统计显著性。相对于砂壤, SOM 在壤土和黏壤中的含量显著更高 ($P<0.001$), 但黏土并未呈现出与砂壤显著差异。

探索性回归分析结果表明, 在不同的候选因子组成的模型中, 由粮食作物总产量平均变化量、蔬菜总产量平均变化量、氮肥施用量平均变化量和复合肥施用量平均变化量四个因子组成的模型的调整 R^2 最大 (0.23), 其中前两个因子达到显著性 ($P<0.001$), 而后两个因子未达到显著性。四个因子的 VIF (2.95) 并未超过阈值 7.5, 因子间的共线性不明显。但 JB 值 ($P=0.000$) 表明该模型拟合后的残差不符合正态性分布, 说明仍有除了以上四个因子之外的其他重要因子影响村级的 SOM 的分布。

3 讨 论

若按全国第二次土壤普查时设定的标准, 将耕层 SOM 按大于 $40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $30\sim40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20\sim30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10\sim20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $6\sim10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、小于等于 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 标准划分为六级^[8]。那么, 杞麓湖盆地耕层 SOM 均值除 2011 年处于第二级外, 其余三个时相均为第一级, 说明整个盆地的耕层 SOM 均值处于较高的水平。与杨帆等^[8]研究结果比较, 杞麓湖盆地的 SOM 显著高于全国耕层 SOM 平均水平 ($24.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 接近我国耕层 SOM 最高的黑龙江省的平均水平 ($40.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著高于云南省耕层 SOM 平均水平 ($35.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

从影响机制来看, 粮食作物总产量平均变化量、

蔬菜总产量平均变化量和氮肥施用量平均变化量对杞麓湖盆地耕层 SOM 的影响为负作用,而复合肥施用量平均变化量的影响为正作用。在杞麓湖盆地内粮食和蔬菜产量持续增加的自然村,由于蔬菜的高复种指数(多数为四茬)、粮食作物的高秸秆移除率(除根系外基本全部移除)以及高度依赖化肥投入而轻视有机肥的施用导致了 SOM 的降低;而调整化肥施用中氮肥和复合肥的占比情况,适当减少氮肥占比并增加复合肥的占比在一定程度上有利于维持甚至提升 SOM 含量。

根据已有研究,为了进一步提高杞麓湖盆地的耕层 SOM,可以尝试有机肥与化肥的科学配比施用^[22];在地理环境类似的研究结果表明,降低化肥施用量,同时增加有机肥的施用量能确实提高蔬菜地的耕层 SOM^[23]。此外,冬季休耕或少耕也被证明能有效地提高滇中地区耕层 SOM 总量^[24]。当然,科学地选择耕作管理措施需要综合考虑生态效益、农民的经济效益及由此带来的社会效益。因此,在未来的研究工作中应加强长期定位对比实验的研究,以此来共同促进杞麓湖盆地耕层 SOM 的科学管理。

4 结 论

借助普通克里格插值方法能获得杞麓湖盆地 2008 年、2011 年、2013 年和 2015 年四个时相 SOM 的空间分布图。指数和椭球半方差模型在空间插值的精度评价方面差别较小,前者更适用于 2008 年和 2011 年的 SOM 数据,而后者更适用于 2013 年和 2015 年的数据。整个盆地的 SOM 分布从西南到中部再到东北部呈现出低-高-低的分布特征,并且在时间系列上 SOM 高值核心区的位置并未呈现显著变化,但其辐射范围有逐年扩大的趋势。从 2008 年到 2015 年的三个时间段内, SOM 呈现出连续增加的区域面积为 SOM 连续减小的区域面积的两倍多。据土壤样点调查数据分析,土壤亚类类型对整个区域内 SOM 的变异起主要影响作用,可解释变异的 14.3%,而农业设施和土壤质地分别能解释 2.6% 和 1.3%。以自然村为基础单元, SOM 的降低主要由粮食和蔬菜的高产出所导致,而适当的减少氮肥施用量并增加复合肥施用量能在一定程度上维持甚至提升 SOM 含量。

参考文献 (References)

- [1] Roßkopf N, Fell H, Zeitz J. Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks[J]. *Catena*, 2015, 133: 157—170.
- [2] Sollins P, Gregg J W. Soil organic matter accumulation in relation to changing soil volume, mass, and structure: Concepts and calculations[J]. *Geoderma*, 2017, 301: 60—71.
- [3] Dai F Q, Su Z G, Liu S Z, et al. Temporal variation of soil organic matter content and potential determinants in Tibet, China[J]. *Catena*, 2011, 85 (3): 288—294.
- [4] Liu S L, An N N, Yang J J, et al. Prediction of soil organic matter variability associated with different land use types in mountainous landscape in southwestern Yunnan Province, China[J]. *Catena*, 2015, 133: 137—144.
- [5] Ou Y, Rousseau A N, Wang L X, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—A case study of the Black Soil Region of Northeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems& Environment*, 2017, 245: 22—31.
- [6] Liang Z Z, Chen S C, Yang Y Y, et al. National digital soil map of organic matter in topsoil and its associated uncertainty in 1980's China[J]. *Geoderma*, 2019, 335: 47—56.
- [7] Dong W, Wu T J, Luo J C, et al. Land parcel-based digital soil mapping of soil nutrient properties in an alluvial-diluvia plain agricultural area in China[J]. *Geoderma*, 2019, 340: 234—248.
- [8] Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1047—1056. [杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1047—1056.]
- [9] Zhao M S, Zhang G L, Wu Y J, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 448—458. [赵明松, 张甘霖, 吴运金, 等. 江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力研究[J]. 土壤学报, 2014, 51 (3): 448—458.]
- [10] Zhang Z Q, Yu F Z, Yu D S, et al. Temporal variability of soil organic carbon and rational sample size in red soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 891—900. [张忠启, 于法展, 于东升, 等. 红壤区土壤有机碳时间变异及合理采样点数量研究[J]. 土壤学报, 2016, 53 (4): 891—900.]
- [11] Soil Survey Office of Yunnan Province. Soils in Yuxi municipality[M]. 1986. Internal information. [云南省土壤普查办公室. 玉溪地区土壤[M]. 内部资料. 1986.]
- [12] Ministry of Agriculture of People's Republic of China. Soil testing Part 6: Method for determination of soil

- organic matter [P]. NY/T 1121.6-2006. [中华人民共和国农业部. 土壤检测第 6 部分: 土壤有机质的测定[P]. NY/T 1121.6-2006.]
- [13] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [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.]
- [14] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging[J]. *Catena*, 2014, 113: 56—69.
- [15] Leys C, Ley C, Klein O, et al. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the Median[J]. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2013, 49 (4): 764—766.
- [16] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing[OL]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018, URL <https://www.R-project.org/>.
- [17] Pebesma E J. Multivariable geostatistics in S: The gstat package[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30 (7): 683—691.
- [18] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys[M]. //Nielsen D R, Bouma J. *Soil Spatial Variability*. Pudoc, Wageningen, Netherlands, 1985.
- [19] Webster R, Oliver M A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43 (1): 177—192.
- [20] Lark R M, Marchant B P. How should a spatial-coverage sample design for a geostatistical soil survey be supplemented to support estimation of spatial covariance parameters?[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 89—99.
- [21] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89 (1/2): 1—45.
- [22] Wang H X, Xu J L, Liu X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104382.
- [23] Chen X W, Yan H, Ni M, et al. Effect of long-term applying organic matter on vegetable field productivity in Erhai Lake basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27 (4): 1577—1581. [陈兴位, 闫辉, 倪明, 等. 长期施用有机肥对洱海流域蔬菜地生产力的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27 (4): 1577—1581.]
- [24] Zhang G S, Ni Z W. Winter tillage impacts on soil organic carbon, aggregation and CO₂ emission in a rainfed vegetable cropping system of the mid-Yunnan plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 294—301.

(责任编辑: 檀满枝)