

黄土高原不同地貌类型区农田土壤有机碳 采样布点方法研究

张圣民¹, 许明祥^{1,2*}, 张志霞², 李彬彬¹

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采样设计是土壤有机碳研究中面临的首要问题。论文对黄土高原不同地貌类型区农田土壤有机碳进行抽样样本代表性评价, 对比分析了不同采样方法的样点布设效率, 结果表明: 1) 高塬区合理采样布点方法应为网格布点法, 采样点布设格网间隔4 km, 网格布点法较随机布点法和联合单元布点法效率分别提高64.3%和31.8%; 2) 平原区合理采样布点方法应为网格布点法, 采样点布设格网间隔2 km, 网格布点较随机布点和联合单元布点效率分别提高64.8%和128.8%; 3) 丘陵区合理采样布点方法应为联合单元布点法, 样点布设密度为1个/1 314 hm², 联合单元布点较随机布点和网格布点效率分别提高205.8%和294.2%。

关键词: 土壤有机碳; 采样布点方法; 样本代表性; 布点效率

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2018)04-0634-10

土壤有机碳在全球气候变化中发挥着重要作用, 作为陆地生态系统最大的碳库, 其小幅变化便可能引起全球范围内较大的气候变化^[1-2]。土壤有机碳库的存储和分布状况是科学家和政府部门关注的基本问题^[3-7]。土壤有机碳的采样设计是土壤有机碳空间分布调查的第一步, 采样架起了模拟世界与虚拟世界的桥梁, 是开展土壤有机碳研究的基础, 但是任何一个土壤有机碳的调查过程都只能是有限的采样过程, 因此在有机碳采样中确定合理的采样数至关重要^[8-11]。

土壤有机碳在空间分布上往往是连续变化的, 由一种典型的土壤类型逐渐变化到另一种土壤类型, 由一种土地利用方式逐渐变化到另一种土地利用方式, 因而在空间中存在着可代表土壤性状变化的代表性样点, 这为土壤有机碳的采样密度筛选提供了依据^[12]。国内外有关土壤有机碳采样方法的研究已有很多, 其中简单随机采样模式、系统网格采样模式、分层随机采样模式以及这三者相互组合的采样布设模式在采样设计中应用最为广泛^[13]。然而, 已有的土壤有机碳研究中采样方法设计多基于研究者的经验、研究区背景资料的可获取性、研究区域尺度等, 采用随机布点、网格布点和分层随机布点等方法, 虽能在一定程度上实现预期研究目标, 但采样设计存在一定的主观性, 可能导致研究结果的不确定性, 或者增大采样工作量^[14-15]。此外, 尽管有研究者利用实地调查数据分

收稿日期: 2017-05-17; 修订日期: 2017-11-17。

基金项目: 科技基础性工作专项 (2014FY210100); 国家重点研发计划课题 (2017YFC0506503)。[Foundation items: Science and Technology Basic Work, No. 2014FY210100; National Key R & D Program of China, No. 2017YFC0506503.]

第一作者简介: 张圣民 (1992-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事黄土高原农田土壤有机碳研究。E-mail: 626188325@qq.com

*通信作者简介: 许明祥 (1972-), 男, 陕西吴起人, 研究员, 主要从事土壤质量演变与调控研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

析采样密度对空间预测精度的影响,并获得较为合理的采样数,但研究结果具有明显的地域局限性^[16-18]。因为地形地貌在土壤有机碳的空间分布和变异中发挥着重要作用,不同地貌条件下土壤有机碳驱动因素不同,其有机碳采样密度也存在差异,不同地形条件下不同的采样设计往往具有差异较大的采样效率,合理的采样设计尤为重要^[19-21]。因此,亟需对不同采样方法进行对比研究,探讨不同采样方法的优缺点、适宜性,尤其是针对复杂地形地貌条件下土壤有机碳采样工作更具有现实意义。

本研究采用传统统计学中样本代表性评价方法,依据气候、地形和农田管理措施等因素在黄土高原区、关中平原区、黄土丘陵沟壑区分别选取宁县、武功、庄浪县作为研究区,探讨3种应用较为普遍的有机碳采样布点方法:随机布点法、网格布点法、“土壤类型-土地利用类型-地貌类型”斑块叠加的“联合单元布点法”(分层随机采样法)在不同地貌类型区下的有机碳采样密度及代表性,旨在为土壤有机碳研究中样点布设方法、布设依据提供参考,对黄土高原不同地貌类型区土壤有机碳采样布点设计有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以位于黄土高原区的宁县、关中平原的武功县、丘陵沟壑区的庄浪县作为典型县。宁县(107°41′~108°34′E, 35°15′~35°52′N)位于庆阳市南部,是甘肃省东南边境县之一,地处关山—六盘山褶皱带移动的鄂尔多斯盆地东南部;地形为东北高、西南低、东西长、南北窄,海拔在860~1 760 m之间,相对高差900 m;地处大陆内部,属暖温带大陆性季风气候,年均温8.7℃,年均降水量565.9 mm,雨热同期;宁县县域土地总面积2 653 km²,其中耕地面积9.5×10⁴ hm²,种植作物以小麦、玉米为主,一年一熟。

武功县(108°01′~108°19′E, 34°12′~34°26′N)位于咸阳市西部,是陕西省中部县区之一,地处关中平原西部,属渭河地貌;地形西北高、东南低,从北向南成阶梯状,分别为一、二、三级阶地,海拔411~600 m,海拔高差189 m;武功县属温带半湿润性气候区,全年平均气温12.9℃,年均降水量633.7 mm,夏季高温多雨,冬春干旱寒冷,四季区别明显;武功县县域面积397.8 km²,其中耕地面积3.4×10⁴ hm²,种植作物以玉米、小麦为主,一年两熟。

庄浪县(105°46′~106°23′E, 35°03′~35°28′N)位于平凉市西南部,是甘肃省中部县区之一,地处六盘山西麓;地势东高西低,海拔1 405~2 857 m,海拔高差1 452 m;庄浪县气候属于大陆性季风区,全年平均气温7.9℃,年均降水量547.8 mm,境内南北气温差异大,降水偏少;庄浪县县域面积1 553.14 km²,耕地面积1.13×10⁵ hm²,种植作物小麦、玉米和马铃薯,一年一熟。

1.2 数据来源与数据处理

以甘肃宁县、庄浪县、陕西武功县全国耕地质量评价数据库作为基础数据源。宁县耕地面积9.5×10⁴ hm²,采样点布设3 065个,均匀密集地覆盖于宁县耕地,平均点布设密度1个/37 hm²[样点布设如图1(a)所示];武功县耕地面积为3.4×10⁴ hm²,采样点布设4 137个,均匀覆盖在武功县耕地上,平均点布设密度为1个/8 hm²[样点布设如图1(b)];庄浪县耕地面积为1.13×10⁵ hm²,采样布设点为3 400个,平均点布设密度为1个/33 hm²[样

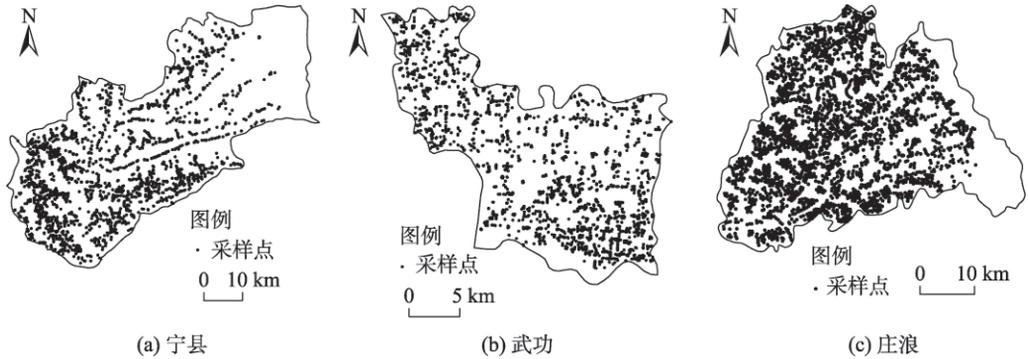


图1 研究区样点布设示意图

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the research region

点布设如1(c)]。采样点布设原则为等量、随机及多点混合,采用“S”型布点,尽量减小由耕作管理、施肥处理不同所产生的误差。样品重量选取多点混合样1 kg,用四分法将多余的样舍弃。

土壤有机碳含量异常值采用域法^[22]进行处理,即剔除与均值偏差超过3倍标准差的值,宁县处理后的样本数为2 572个,武功县处理后的样本数为3 642个,庄浪县处理后的样本数为2 622个。常规统计分析采用SPSS 17.0,地统计分析采用软件ArcGIS 10.2。

随机样点数的划分利用ArcGIS 10.2的Create Subsets模块将原始数据以75%的密度梯度进行随机抽样,探讨随样点数减少精度的变化,确定合理采样数;联合单元布点是将全县按照土地利用方式-地貌-土壤类型联合组成斑块,按照斑块面积比例进行采样点布设,再利用ArcGIS Create Subsets模块以75%的密度进行随机抽样;格网密度通过ArcGIS 10.2 Create Fishnet模块实现。

1.3 研究方法

1.3.1 样本代表性评价方法

样本代表性是指样本对整体的代表程度,抑或是样本结构与总体结构的相似程度,从抽样的角度来看,即样本估计值与总体实际值之间的接近程度^[23-24]。然而样本与总体之间总会存在差异,即抽样误差,抽样误差不可避免,但是样本估计总体时误差越小,对整体的代表程度越好,精度越高。但应注意的是,样本代表性评价是一个整体的概念,而不是单独就某一具体样本而言,而是就抽样分布而言的,换言之,样本代表性指所有样本的平均代表程度。基于此,统计学中设计出检验样本代表性系数:

$$\text{平均数代表性检验系数} = (Y-y)/Y \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{结构的代表性检验的差异率} = (P-p)/P \times 100\% \quad (2)$$

式中:Y为总体平均值,y为样本平均值,即要求样本平均数与总体平均数保持相似性;P为总体成数,p为样本成数,即要求样本分布与总体分布在结构上保持一致性。

通常要求:平均数代表性检验系数以 $\pm 2\%$ 或者 $\pm 3\%$ 以内作为可控范围;结构的代表性差异率以 $\pm 5\%$ 内作为检验应控制的范围。通常所说的样本代表性检验即指以上两方面的检验,如果某个样本与总体之间能同时满足检验系数和差异率的精度要求,就可认为此样本对总体具有足够的代表性。由于土壤是一种复杂的多功能体,无法按照传统的统计学进行结构差异性检验,因此本文选择标准差通过样本与总体离散程度的差异率来代

表结构的代表性差异率,精度控制不变。本文所利用的耕地质量评价数据库样本量庞大,可看作该区域真实的有机碳含量值,来获取待检验样本的可靠性。

1.3.2 采样点布设方法

随机布点法利用 ArcGIS 10.2 的 Create Subsets 模块将原始数据随机划分为两部分:以原始数据集的 75% 随机划为 A1 数据集,把剩余的划为 B1 数据集,并为了设置不同密度梯度,再将 A1 按照 75% 的比例进行随机挑选组成点数据集 A2,依次类推,共设 15 个点密度,依次为 A1, A2, ..., A15 点数据集,探讨随样点数减少精度的变化,确定合理采样数。

联合单元布点是将全县按照土地利用方式-地貌-土壤类型联合组成斑块,通过 ArcGIS Union 模块进行叠加形成斑块,根据斑块面积在斑块内部按照随机样点数划分方法以 75% 的密度进行随机抽样^[25]。

格网密度通过 ArcGIS 10.2 Create Fishnet 模块实现,按照耕地面积将宁县、武功县、庄浪县分别以 1、0.5、1 km 的采样格网间距进行网格布点,选取每个格网内最接近中心点的样点作为此格网的代表点。

综上,按照随机布点法、联合单元布点法、网格布点法 3 种不同的布设方法,随着样点密度下降模拟精度的变化,确定合理的采样数,探讨不同采样方法的优劣。

2 结果与分析

2.1 高塬区样点布设方法效率对比

随机布点法(图2)得出在样本量低于47个时,均值的代表性检验系数不满足其精度要求,其余密度的样本都达到了均值的代表性检验精度($\pm 3\%$),同时当样本量大于258个时,有机碳结构差异率变化稳定,且满足结构代表性差异精度($\pm 5\%$),因此,在同时满足平均数代表性检验精度和结构代表性差异精度的基础上,采样点数量达到258个才可以代表县域整体土壤有机碳状况,此时采样点布设密度为1个/368 hm^2 ;对于网格布点法,只有当网格边长小于4 km,有机碳的均值检验系数和结构代表性差异才能同时满足精度要求,因此,宁县采用网格布点时网格边长最大不应该超过4 km,此时采样点数量为157个,采样点布设密度为1个/605 hm^2 ;联合单元布点法结果显示样本量在大于或等于95个时才能满足均值代表性精度,样本量大于或等于207个才能满足结构代表性差异精度,因此,宁县采用联合单元布点法布设采样点数量应为207个,此时采样点布设密度为1个/459 hm^2 。综上所述,黄土高塬区最优采样布设方法为网格布点法,网格布点法较随机布点方法和联合单元布点方法效率分别提高64.3%和31.8%。网格布设应以4 km为间隔,采样点布设数目不少于157个,采样点布设密度为1个/605 hm^2 。

2.2 平原区样点布设方法对比分析

随机布点法(图3)均值检验系数均在检验精度($\pm 3\%$)范围之内,当样本量小于206个时,有机碳的结构代表性差异率出现较大的波动且超出结构代表性差异精度($\pm 5\%$),因此,结合样本代表性评价标准,武功县采用随机布点方法应设立206个采样点,此时采样点布设密度为1个/165 hm^2 ;由网格布点法分析可得,当格网边长小于2.5 km时,均值代表性检验精度满足要求,网格边长小于等于2 km时结构代表性差异精度满足要求,因此,武功县采用网格布点法网格边长最大不应该超过2 km,此时采样点数量为125

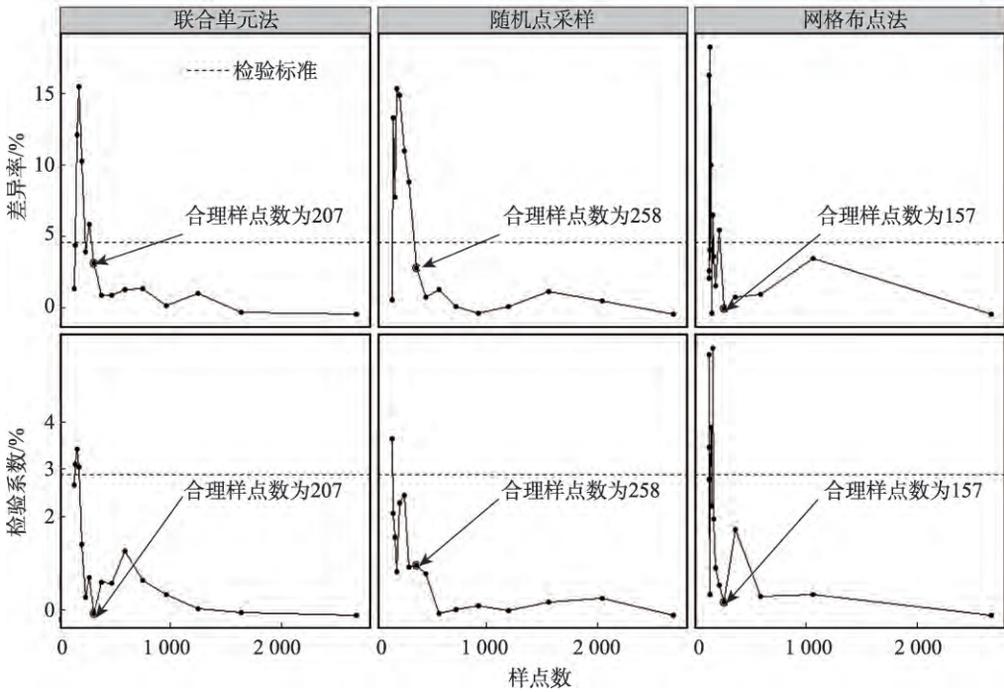


图2 高原区样点布设方法比较

Fig. 2 Comparison of sampling designs in upland region

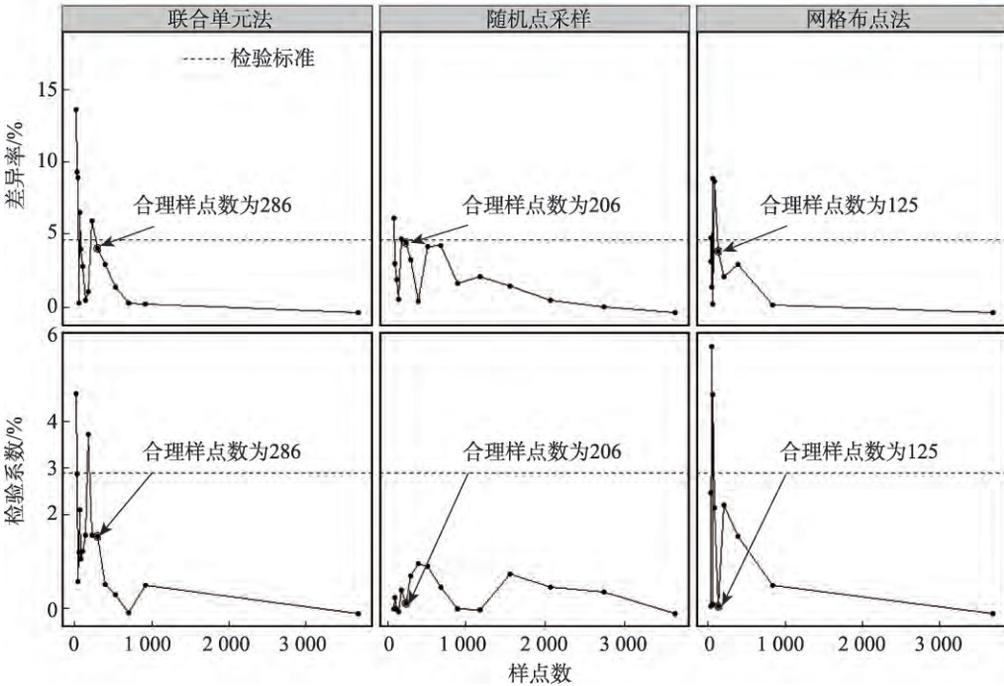


图3 平原区样点布设方法比较

Fig. 3 Comparison of sampling designs in plain region

个, 采样点布设密度为1个/272 hm²; 对于联合单元布点法, 当样本量小于286个, 均值代表性检验系数和结构差异率同时超出精度范围且发生较大波动, 因此采用联合单元布点法采样点至少应达到286个, 此时采样点布设密度为1个/119 hm²。综上所述, 黄土高原平原区农田土壤有机碳采样方法应为网格布点法, 网格布设应以2 km为间隔, 此时采样点布设数目为125个, 采样点布设密度为1个/272 hm², 网格布点较随机布点和联合单元布点效率分别提高64.8%和128.8%。

2.3 丘陵沟壑区样点布设方法对比分析

随机布点法(图4)可以看出均值检验系数变化均在精度范围之内(±3%), 当样本量小于263个, 有机碳的结构代表性差异率出现较大的波动, 因此在同时满足平均数代表性检验精度和结构代表性差异精度的基础上, 庄浪县采用随机布点法至少应选取263个采样点, 此时采样点布设密度为1个/430 hm²; 网格布点法图示分析可得, 在满足样本代表性评价标准要求下, 庄浪县采用网格布点方法网格边长最大不应该超过2 km, 此时采样点数量达到339个, 采样点布设密度为1个/333 hm²; 联合单元布点法分析结果为样本量大于等于86个, 庄浪县有机碳同时满足平均数代表性检验精度和结构代表性差异精度, 因此庄浪县采用联合单元布点方法布设点至少应达到86个, 此时采样点布设密度为1个/1 314 hm²。综上所述, 武功县县域农田土壤有机碳采样方法应为联合单元布点法, 此时采样点布设数目为86个, 采样点布设密度为1个/1 314 hm²; 黄土高原丘陵沟壑区最优采样布设方法为联合单元布点法, 联合单元布点较随机布点和网格布点效率分别提高205.8%和294.2%。

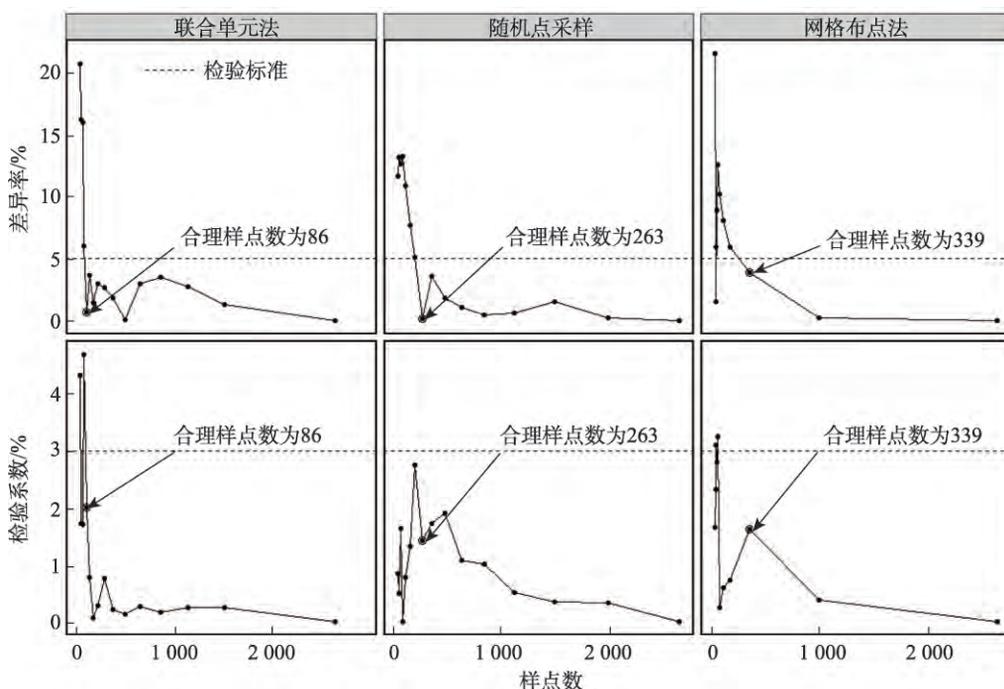


图4 丘陵沟壑区样点布设方法比较

Fig. 4 Comparison of sampling designs in hilly and gully region

3 讨论

采样布点是土壤有机碳调查研究的基础,合理的土壤采样设计在保证土壤研究精度、降低土壤采样支出、提高土壤采样效率方面发挥着重要的作用^[26-27]。传统的土壤有机碳采样方法设计及密度确定往往是根据设计者的研究经验得出,采样设计存在一定的主观性。目前,土壤有机碳采样研究集中于土壤采样密度的检验和校订,对于采样方法的选定缺少理论支撑^[9,17-18]。

针对土壤有机碳采样设计中存在的问题,本文选取采样设计中较普遍的采样布点方法——随机布点法、网格布点法及联合单元布点法(分分布点法)进行比较分析,利用传统统计学中的样本代表性评价,得出不同采样方法下土壤有机碳采样布点的最适密度,并通过对比相同地貌类型区不同采样方法采样密度的大小判断选取最佳采样布点方法,得出黄土高原丘陵区宜采用联合单元布点法,平原区和高塬区应选取网格布点法进行有机碳的采样设计。

理解土壤有机碳累积对生物、物理和人为因素的响应,把握关键控制因子是预测土壤有机碳存储及分布的关键。研究证明地形地貌是影响土壤有机碳空间变异性的关键因素^[28]。在地统计学中,块金系数用来表征系统变量的空间自相关程度,其中以25%、75%作为临界值,<25%表明高度的空间自相关性。地形地貌、海拔、坡度等结构性差异因素在有机碳空间变异中起到至关重要的作用。张志霞等^[29]计算了黄土高原不同地貌类型区农田土壤有机碳块金系数处于9%~12%之间,呈现出高度的空间自相关性,地形地貌等结构性因素在黄土高原农田土壤有机碳的空间分布影响因素中占主导地位。黄土高原地区地貌复杂,不同地貌单元土壤有机碳受不同地貌区结构性差异影响程度不同,因此不同地貌类型区土壤有机碳分布产生空间差异性。

在实际土壤采样中随机布点法、网格布点法及联合单元布点法各有优劣^[14],导致在不同地貌条件下选取的最适采样方法存在差异。随机布点法从统计学基本原理出发,从总体中随机抽取样本,样本之间抽取概率相同且相互独立,保证了抽取的无偏差异性,但缺点是一方面常出现样本不均匀、成堆分布导致样本的不确定性,另一方面在于其相对于另两种方法效率较低;网格布点法能保证样点布设能覆盖整个研究区域,从而能更好地获取整体信息,由于其具有匀质等距的特性,从而使土壤有机碳以较少的数量反映区域整体状况,但缺点是网格布点不能反映地形因素对土壤有机碳的影响,在地形地貌复杂的地区,网格布点法效率较低;联合单元布点法以地形-土壤类型-土地利用方式属性叠加形成的斑块分层抽样,是根据土壤有机碳的结构性影响因素设计的采样方法,地形越平坦,地貌单元结构差异性越小,采用联合单元法采样效率越低,地形越复杂,采样效率越高。在本文中,研究对象是农田土壤有机碳在不同地貌类型区的最优采样方法,农田土壤有机碳受人为影响较为显著,不同的耕作方式及人为管理会对农田土壤有机碳分布造成较大影响^[25]。平原区地形起伏变化较小,地形因素对农田土壤有机碳影响相对较小,且平原区人均耕地较少,不同家庭往往耕作习惯、管理方式相异,造成平原地区农田土壤有机碳分布差异问题;相对于平原区,丘陵沟壑区往往地形起伏较大、土壤类型较多,且因其地貌类型复杂,耕作条件相对较差,农民耕作管理往往简单粗糙,造成其结构性因素往往成为农田土壤有机碳分布的主要影响因素^[29]。因此,基于不同采样方法的优缺点,兼顾采样效率与样本代表性,得出在地貌复杂的丘陵区,土壤有机碳采样选

取联合单元布点法,即结合其地形地貌因素等进行分层抽样;在地形相对平坦、地貌差异较小的平原区和高塬区,选取网格布点法进行布点。

综上所述,黄土高原地区地形复杂,不同地貌单元土壤有机碳分布受地形地貌因素影响程度不同,在进行土壤有机碳储量调查研究的采样布点设计时,应充分考虑影响有机碳分布及变异的地形地貌因素以及不同地貌单元的结构性差异,通过对采样地区地貌单元的调查了解,选择合理的采样布点方法。基于地形地貌复杂程度,相对平坦的地貌类型区农田土壤有机碳采样设计宜采用网格布点法,地形复杂的区域宜采取联合单元布点法。

4 结论

1) 黄土高塬区农田土壤有机碳采样布点方法以网格布点法较好,建议采样点布设格网间隔4 km,网格布点法较随机布点方法和联合单元布点方法效率分别提高64.3%和31.8%。

2) 平原区农田土壤有机碳采样布点方法以网格布点法较好,建议采样点布设格网间隔2 km,网格布点较随机布点和联合单元布点效率分别提高64.8%和128.8%。

3) 黄土丘陵沟壑区农田土壤有机碳采样方法以联合单元布点法较好,建议样点布设密度为1个/1 314 hm²,联合单元布点较随机布点和网格布点效率分别提高205.8%和294.2%。

参考文献(References):

- [1] KIRSCHBAUM M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 21-51.
- [2] HOUGHTON R A. Balancing the global carbon budget [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 313-347.
- [3] 孙波,谢宪丽. 全球变化下土壤功能演变的响应和反馈 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 903-907. [SUN B, XIE X L. Response and feedback of soil function evolution to global change. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 903-907.]
- [4] LIANG S Y, LEHMANN A, WU K N, et al. Planner-Oriented Soil Evaluation in China with TUSEC (Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils) [R]. Conference or Workshop Item (Contribution to "Reports of the DBG"), Kommission VIII: Boden in Bildung und Gesellschaft, 2011.
- [5] ESWARAN H, BERG E V D, REICH P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [6] CHRIS J, CLAIRE M, KEVIN C, et al. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 154-166.
- [7] CAO M K, WOODWARD F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185-198.
- [8] SONG S P, SHAO Y H, DU Y. Survey of sampling methods [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2016, 31 (3): 452-463.
- [9] 张贝尔,黄标,赵永寸,等. 采样数量与空间插值方法对华北平原典型区土壤质量评价空间预测精度的影响 [J]. *土壤*, 2013, 45(3): 540-547. [ZHANG B E, HUANG B, ZHAO Y C, et al. Effects of sampling sizes and spatial interpolation method on spatial prediction accuracy of soil fertility quality index in the major grain-producing region of the North China Plain. *Soils*, 2013, 45(3): 540-547.]
- [10] KERRY R, OLIVER M. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood [J]. *Geoderma*, 2004, 140: 383-396.
- [11] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等. 采样尺度对土壤养分空间变异的影响 [J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 257-262. [PAN

- Y C, LIU Q Q, YAN B J, et al. Effects of sampling scale on soil nutrition spatial variability analysis. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 257-262.]
- [12] 苏晓燕. 采样设计对土壤有机质含量空间预测精度的影响研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2012. [SU X Y. Study on the Influence of Sampling Design on the Spatial Accuracy of Soil Organic Carbon Content. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.]
- [13] WANG X J, QI F. The effects of sampling design on spatial structure analysis of contaminated soil [J]. *The Science of Total Environment*, 1998, 224: 29-41.
- [14] BRUS D J, SABY N P A. Approximating the variance of estimated means for systematic random sampling, illustrated with data of the French Soil Monitoring Network [J]. *Geoderma*, 2016, 279: 77-86.
- [15] ALLEN D E, PRINGLE M J, PAGE K L, et al. A review of sampling designs for the measurement of soil organic carbon in Australian grazing lands [J]. *Rangeland Journal*, 2010, 32(2): 227-246.
- [16] 叶回春, 黄珊珊, 张世文, 等. 土壤有机碳空间变异性对采样密度的响应研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 215-223. [YE H C, HUANG S Y, ZHANG S W, et al. Effects of raindrop energy on runoff, chemicals and sediment transport in red soil type. *Transactions of the CSAM*, 2014, 45(12): 215-223.]
- [17] 李云辉. 土壤有机质采样点布设及空间插值方法对农用地分等成果的影响研究——以龙海市为例 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [LI Y H. Research on the Impact of Soil Organic Matter of Sampling Points Allocation and Spatial Interpolation Method on Agricultural Land Classification Achievements—A Case Study of Longhai City. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]
- [18] 杨琳, 朱阿兴, 张淑杰, 等. 土壤制图中多等级代表性采样采样与分层随机采样的对比研究 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 28-37. [YANG L, ZHU A X, ZHANG S J, et al. A comparative study of multi-grade representative sampling and stratified random sampling for soil mapping. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 28-37.]
- [19] XIONG X. Scale-dependent variability of soil organic carbon coupled to land use and land cover [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 101-109.
- [20] 郭月峰, 姚云峰, 秦富仓, 等. 地形因子对老哈河流域土壤有机碳的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(2): 156-161. [GUO Y F, YAO Y F, FAN F C, et al. Impact of terrain factors on soil carbon in Laoha River Basin. *Journal of Arid Resources and Environment*, 2014, 28(2): 156-161.]
- [21] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 443-453. [SUN W Y, GUO S L, SONG X Y. Effects of topographies and land use on spatial distribution of surface soil organic carbon in hilly region on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 443-453.]
- [22] 张朝生, 章中, 张立成, 等. 长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究 [J]. *环境科学学报*, 2008, 9(10): 2880-2883. [ZHANG C S, ZHANG S, ZHANG L C, et al. Calculation of heavy metal contents in sediments of the Changjiang River system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 9(10): 2880-2883.]
- [23] 李文华. 社会调查研究中样本的代表性问题探讨 [J]. *知识丛林*, 2006(9): 157-158. [LI W H. Discussion on the representation of sample in social investigation. *Knowledge of Jungle*, 2006(9): 157-158.]
- [24] 张志霞. 黄土高原农田土壤有机碳空间变异性 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. [ZHANG Z X. Spatial Variation of Soil Organic Carbon of Croplands on the Loess Plateau. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [25] 张晓伟, 许明祥, 师晨迪, 等. 半干旱区县域农田土壤有机碳固存速率及其影响因素——以甘肃庄浪县为例 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1086-1095. [ZHANG X W, XU M Y, SHI C D, et al. Soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in farmlands of semi-arid regions—A case study in Zhuanglang County, Gansu Province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(5): 1086-1095.]
- [26] HEIM A, WEHRLI L, EUGSTER W, et al. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swis CarboEurope site Lägeren [J]. *Geoderma*, 2009, 149(3): 347-354.
- [27] VAŠÁT R, HEUVELINK G B M, BORŮVKA L. Sampling design optimization for multivariate soil mapping [J]. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 147-153.
- [28] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105. [ZHOU L, LI B G, ZHOU G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advance in Earth Science*, 2005, 20(1): 99-105.]
- [29] 张志霞, 许明祥, 刘京, 等. 黄土高原不同地貌区土壤有机碳空间变异与合理采样数研究 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2103-2113. [ZHANG Z X, XU M X, LIU J, et al. Spatial variation and reasonable sampling number of soil organic carbon under different geomorphic types on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2103-2113.]

Methods of Sampling Soil Organic Carbon in Farmlands with Different Landform Types on the Loess Plateau

ZHANG Sheng-min¹, XU Ming-xiang^{1,2}, ZHANG Zhi-Xia², LI Bin-bin¹

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Sampling design is a critical issue in soil organic carbon research. In this paper, the purpose was to find out the most appropriate sampling method among various sampling designs in farmlands with different landform types. We used the sample representative evaluation in classical statistics to compare the efficiency of most commonly used sampling methods, including random distribution, grid sampling design and joint unit method. The representative samples of soil organic carbon in farmlands with different landform types on the Loess Plateau were evaluated. The results demonstrated that: 1) A reasonable sampling method for Ning County in the upland area of Loess Plateau was grid sampling design with a suggested grid interval of 4 km. The efficiency of grid sampling design was 64.3% and 31.8% higher than the efficiency of random distribution method and joint unit method, respectively. 2) A reasonable sampling method for Wugong County in the plain area of the Loess Plateau was also grid sampling design with a suggested sampling interval of 2 km. The efficiency of grid sampling method was 64.8% and 128.8% higher than the efficiency of random distribution method and joint unit method, respectively. 3) The reasonable sampling method was joint unit layout method in the hilly and gully region of the Loess Plateau, such as in Zhuanglang County. The suggested density of the joint unit layout method in this area was 1 unit/1 314 hm², and the efficiency of joint unit distribution was 205.8% and 294.2% higher than the efficiency of random distribution and grid distribution, respectively.

Key words: soil organic carbon; sampling design; representative of samples; sampling efficiency