

ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

土壤学报

第五十二卷

第一期

二〇一五年一月

科学出版社



中国土壤学会  
科学出版社

主办  
出版

2015

第52卷 第1期

Vol.52 No.1

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

|     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 丁维新 | 巨晓棠 | 王敬国 | 王朝辉 | 史 舟 | 宇万太 | 朱永官 |
| 李永涛 | 李芳柏 | 李保国 | 李 航 | 吴金水 | 沈其荣 | 张玉龙 |
| 张甘霖 | 张福锁 | 陈德明 | 邵明安 | 杨劲松 | 杨明义 | 杨林章 |
| 林先贵 | 依艳丽 | 周东美 | 周健民 | 金继运 | 逢焕成 | 胡 锋 |
| 施卫明 | 骆永明 | 赵小敏 | 贾仲君 | 徐国华 | 徐明岗 | 徐建明 |
| 崔中利 | 常志州 | 黄巧云 | 章明奎 | 蒋 新 | 彭新华 | 雷 梅 |
| 窦 森 | 廖宗文 | 蔡祖聪 | 蔡崇法 | 潘根兴 | 魏朝富 |     |

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948 年创刊)

第 52 卷 第 1 期 2015 年 1 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 1 Jan., 2015

编 辑 《土 壤 学 报》编 辑 委 员 会  
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008  
电话: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总 发 行 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717  
电话: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国 外 发 行 中国国际图书贸易总公司  
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



0 1>

9 770564 392156

DOI:10. 11766/trxb201407110352

土壤制图中多等级代表性采样与分层随机采样的  
对比研究\*

杨 琳<sup>1</sup> 朱阿兴<sup>1,2,3,4†</sup> 张淑杰<sup>1</sup> 安艺明<sup>1,5</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101)  
(2 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023)  
(3 南京师范大学地理科学学院,南京 210023)  
(4 Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA)  
(5 中国科学院大学,北京 100049)

**摘 要** 采样设计是土壤地理研究中备受关注的重要问题。本文以区域尺度土壤属性制图为例,将多等级代表性采样与经典采样中的分层随机采样进行对比研究。以安徽宣城研究区的表层砂粒含量为目标要素,采集数量均为 59 个的两套样点,设计不同数量(46、58 和 59)的样点分组,采用两种制图方法进行制图并利用独立验证点进行评价。结果表明:1)无论是采用多元线性回归方法还是基于环境相似度的制图方法,在同等样点数量下,利用代表性样点所得土壤图精度均高于利用随机样点所得精度,并且利用少量代表性样点(46 个)所得土壤图精度也高于利用多量随机样点(59 个)所得精度;2)随着代表性较低样点的增加,土壤制图精度基本有一个提高的趋势,而采用随机样点所得土壤图的精度波动较大。因此,可认为多等级代表性采样方法是一种可用于区域尺度土壤调查的有效采样方法,且比分层随机采样高效、稳定。

**关键词** 土壤制图;土壤采样;多等级代表性采样;分层随机采样;区域尺度  
**中图分类号** P934 **文献标识码** A

采样是获取土壤基础数据的基本手段,是土壤调查与制图中的重要环节。一方面,采样设计会直接影响到基于样点进行土壤制图的结果和精度;另一方面,采样需要耗费大量的财力和人力,通常是土壤调查中花费最高的环节<sup>[1]</sup>。因此,采样设计成为土壤地理研究中备受关注的重要问题,如何高效的进行采样,即利用较少的样点获得较高精度的土壤图,是研究者们所追求的目标。

常用于土壤制图的采样方法包括基于专家知识的目的性采样、基于概率理论的经典采样和基于地统计学的空间采样。目的性采样是根据研究目的,通过有经验的专家选择少量具有“代表性”样点的采样策略<sup>[1-3]</sup>。这种采样策略适用于先验知识丰富的区域,可通过相对少量的样点了解所需目标要素的信息,然而,所取样本能否正确反映总体特征,依赖于调查者的主观信息,没有客观的评价体系。

基于概率理论的采样中最基本的一种策略是简单随机采样,该采样策略从总体中随机抽取每个样点,且每个样点被抽取的概率相同。这种采样的优点是对总体样本所需知识少,易于操作,常用于先验知识很少或没有的区域<sup>[4-6]</sup>。当研究区可明确进行地理分区(层)时,例如具有不同的土地利用类型或母质类型,可在区域分层的基础上再进行随机采样,即分层随机采样。由于分层可在一定程度上避免随机采样中样点的空间聚集,因而通常可提高采样效率<sup>[7]</sup>。基于地统计学的空间采样以最小化预测误差方差(如平均或最大克里格方差)为目标函数设计样点<sup>[8-9]</sup>。尽管这类采样方法考虑了目标要素的空间自相关特性,但预测误差方差信息的获取依赖于需大量先验样本才能建立的空间变差函数(variogram)<sup>[10-11]</sup>,因而对于大部分没有样点数据的区域而言并不实用。

\* 国家自然科学基金项目(41471178,41023010,41431177)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(Y052010002)、资源与环境信息系统国家重点实验室青年人才培养基金项目资助

† 通讯作者, E-mail: axing@lreis. ac. cn  
作者简介:杨琳(1982—),女,山东文登人,博士,主要从事数字土壤制图研究。E-mail: yanglin@lreis. ac. cn  
收稿日期:2014-07-11;收到修改稿日期:2014-10-05

随着大数据时代的到来,易获取的土壤协同环境因子越来越多,例如,数字高程模型(DEM)及其衍生变量,来自于遥感影像的多种变量数据等。基于土壤与环境因子存在协同关系这一理论,这些环境因子数据可用于辅助采样设计,以提高采样效率<sup>[12-16]</sup>。

在环境因子辅助采样设计的多种方法中,Zhu等<sup>[14]</sup>提出了一种高效的目的性采样方法。该方法假设土壤空间变化的典型类型与特定的环境因子组合相对应,通过对环境因子进行聚类寻找环境因子组合来寻找土壤空间变化的典型类型,并在环境因子组合的中心位置设计典型样点。这种方法在多种环境因子数据和现代计算技术的辅助下,克服了基于专家知识的目的性采样中样点选择具有主观性这一局限。在这一采样方法的基础上,从地理要素的空间分布规律入手,Yang等<sup>[15]</sup>提出了一种多等级代表性采样方法。该方法通过环境因子的聚类分析捕捉地理要素在空间变化不同等级特征,以设计不同等级代表性样点。应用于小流域尺度的土壤类型制图案例表明,通过代表性等级最高的少量样点可获取研究区大部分主要土壤类型,且制图精度较高;随着代表性等级较低样点的加入,土壤图精度提高;但当样点增加到一定数量时,土壤图的精度变化不大。

目前,对于多等级代表性采样方法的应用非常有限,特别是在成土环境复杂的大区域中,且其与经典采样方法的对比效率还不清楚。基于此,本文以区域尺度的土壤属性制图为例,将多等级代表性采样与经典采样中的分层随机采样进行对比研究,一方面对比两种采样策略设计样点及其所得制图结果和精度的不同,另一方面,通过设计不同的样点数量,对比随样点增加时土壤图精度的变化。

## 1 研究方法

### 1.1 实验设计

本研究的总体实验流程如下:

首先,分别利用多等级代表性采样和分层简单随机采样两种方法设计相同数量的样点,如  $m$  个。

第二步,将样点分组。

对于代表性样点,将样点根据代表性(等级)进行分组,分组原则为依次加入代表性等级较低的样点。以具有三个代表性等级的采样为例说明,其中代表性等级最高、次高和最低的样点分别为  $m_1$ 、 $m_2$

和  $m_3$  个,将代表性等级最高的样点称为第一组样点( $m_1$  个),将代表性最高和次高的样点称为第二组样点( $m_1 + m_2$  个),将代表性等级为最高、次高和最低的样点称为第三组样点,即所有代表性样点( $m_1 + m_2 + m_3 = m$  个)。

对于随机样点,分组数量和组内样点数量与代表性样点保持一致,分组规则如下:第一组样点为从  $m$  个总体样点中随机抽取的  $m_1$  个样点,第二组样点为第一组样点加上从剩余( $m - m_1$ )个样点中随机抽取的  $m_2$  个样点,第三组样点为所有  $m$  个随机样点。从总体中随机抽样可能会获得不同的样点分布,为了模拟可能发生的不同随机样点抽取结果,将上述分组过程重复三次,得到三套随机样点分组。

第三步,对两种采样方案的多组样点,均选择一种或多种制图方法进行土壤制图,本文中 choice 多元线性回归模型和基于环境相似度的推理制图方法两种。

第四步,采集野外独立验证点对两种采样方案的多组样点所得土壤图的精度进行验证,对比两种采样策略所得土壤图精度及其随样点数量的变化。

以下是对两种采样方法、所选制图方法和评价指标的具体阐述。

### 1.2 多等级代表性采样方法

多等级代表性采样的基本思路是设计不同等级的代表性样点以捕捉不同尺度的土壤空间变化特征,即代表性等级高的样点设计在代表土壤变化主要特征的位置上,代表性较低的样点设计在代表土壤局域细节特征的位置上<sup>[15]</sup>。根据这一思路,该方法的主要步骤如下:

(1) 选择并获取可反映目标要素空间变化的协同环境因子;(2) 对环境因子数据进行模糊  $c$  均值聚类<sup>[17]</sup>,设定多个聚类数,得到多个聚类数下的环境因子组合的聚类结果,即环境因子组合模糊隶属度分布图;(3) 设定隶属度阈值确定环境因子组合的中心位置;(4) 将多聚类数下环境因子组合类的中心位置进行叠加,生成中心位置频率分布图,根据频率来确定代表性级别的高低;(5) 对于同一代表性等级的像素而言,其环境因子组合中心位置出现的次数相同,但环境因子组合类型可能不同,将每一像素上出现的多个聚类数下的环境因子组合类以链的形式表达,生成环境因子组合链以区分这种不同;(6) 采样设计遵照如下原则:先按照代表性等级排序,在同一代表性等级下按照面积排序,再在

每一环境因子组合链内选择平均隶属度值高的位置设计样点,完成不同代表性等级的采样方案设计。

若研究区所选环境因子中具有类型变量(如母质),则先将区域进行分层,再在每层中实施(2)~(6)步骤设计样点。该方法每一步骤的详细细节可参见 Yang 等<sup>[15]</sup>。

### 1.3 分层随机采样方法

分层随机采样方法的步骤和设计规则如下:  
首先,根据目标要素的成土特点将研究区进行分层(区),例如可利用母质分层。然后,在每层中进行不放回(无替代)随机抽样,使样点的数量与各层面积成正比,且每层最少设计一个样点。最终所设计的随机样点总数量与多等级代表性样点总数量保持相同。

### 1.4 土壤制图方法

**1.4.1 多元线性回归方法** 多元线性回归是一种比较简单的统计预测方法,在土壤制图中应用广泛<sup>[18-19]</sup>。在本研究中,选择所有的环境因子(与代表性采样所选因子一致)作为自变量。当环境因子中存在类型变量(如母质)时,类型变量不能直接用于建立回归方程,需要进行哑变量的处理。例如,类型变量母质共有八类,则可设置七个哑变量,当进行回归分析时,这七个哑变量统一被放入同一区组(block)中。

本文中线性回归方程的建立 在软件 SPSS16.0

$$V_{ij} = S_{ij}^l \times V_l + (1 - S_{ij}^l) \times \frac{S_{ij}^1 \times V_1 + S_{ij}^2 \times V_2 + \cdots + S_{ij}^{l-1} \times V_{l-1} + S_{ij}^{l+1} \times V_{l+1} + \cdots + S_{ij}^n \times V_n}{S_{ij}^1 + S_{ij}^2 + \cdots + S_{ij}^{l-1} + S_{ij}^{l+1} + \cdots + S_{ij}^n}$$

(2)

式中, $V_{ij}$ 为待推测点( $i,j$ )的土壤属性值, $S_{ij}^l$ 和 $V_l$ 分别为相似度最高的样点的环境相似度与土壤属性值。

### 1.5 验证样点与评价指标

利用系统采样方法所得独立验证点对所得土壤属性图进行验证,采用均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价指标。

## 2 研究区和协同环境因子数据

研究区是位于安徽省宣城区域的三个县市(宣州市、广德县、郎溪县),面积约为 5 900 km<sup>2</sup>。该区属于亚热带湿润季风气候,年均温 11~16℃,年均降水量为 1 200~1 800 mm。区域西北部为平原区,东北和南部为低山丘陵区(图 1)。母质多样,母岩类型复杂,包括页岩、花岗岩、砾岩、石灰岩、砂岩风化物 and 第四纪生成的粉砂-砂砾-黏土物等。按土壤发生学分类,该区的主要土壤类型是红壤和水稻

中完成,所有环境因子采用强行进入(Enter)方法全部进入回归方程。土壤属性图在 ArcGIS10.0 中生成。

**1.4.2 基于环境相似度的推理制图方法** 基于环境相似度的推理制图方法将样点看作包含特定土壤-环境关系的案例,在两点环境条件越相似、土壤属性就越相似的假设下,认为每一个样点可以代表与其环境条件相似的地区,且其代表程度可通过两点环境的相似程度来度量,因此依据环境相似度来推测待推点的土壤属性值<sup>[20-21]</sup>。该方法已在土壤有机质、土壤粒径等属性的制图中取得了较好的应用<sup>[20-23]</sup>。

该方法包括以下两个步骤:

(1) 计算待推样点与已采样点间的环境相似度。计算待推样点( $i,j$ )与已采样点 $k$ 间的环境相似度通过两个层面实现:一是基于单个环境因子的相似度,二是综合各个环境因子的相似度得到两点间的环境相似度。具体计算方法参见刘京等<sup>[23]</sup>。最终该步骤可得到一个环境相似度向量(式(1)),表达待推样点对所有已采样点的相似度:

$$\vec{S}_{ij} = (S_{ij}^1, S_{ij}^2, \cdots, S_{ij}^k, \cdots, S_{ij}^n)$$

(1)

式中, $n$ 为已采样点数量。

(2) 基于环境相似度进行土壤属性推测。将环境相似度作为权重,通过线性加权的方式来计算待推点的土壤属性值<sup>[23-24]</sup>。具体方程如下式所示:

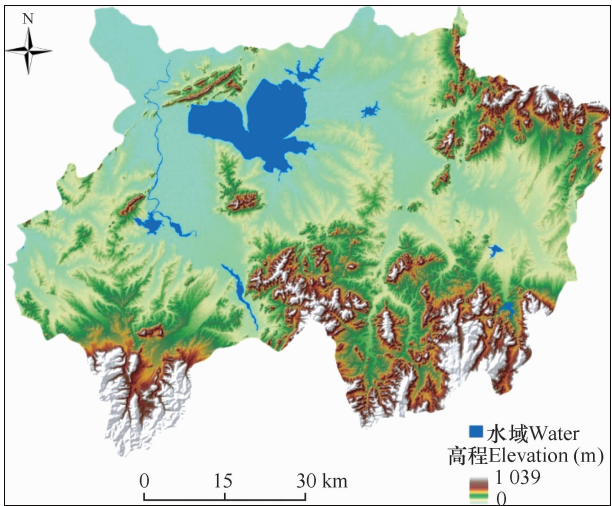


图 1 研究区 DEM 图

Fig. 1 DEM of the study area

土。该区土地利用类型以农田和森林为主。其中农田主要为水稻田,多种植于平原区和山间平坦沟

谷区,林地分布在低山区,以竹林、杉树和灌丛为主,大部分林地为次生林或人工种植林地。

研究区成土环境复杂,土壤的形成与发展主要受复杂的母质和多样的地形所控制,此外,也受到气候因素的影响。因而,针对土壤表层砂粒含量这一属性,从母质、地形、气候三个方面来考虑,选择7个协同环境因子:母质(岩)、坡度、沿剖面曲率、沿等高线曲率、地形湿度指数、年均温和年均降水,并生成环境因子数据库(90 m 栅格分辨率)。

该区没有详细的母质数据,利用 1: 500 000 中国地质图根据岩石类型和年龄生成“替代”母岩类型图,并将其进行栅格化,空间分辨率与从 SRTM 网站(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)所下载的 90 m 分辨率数字高程模型(DEM)(图 1)一致。该区共有 8 种母岩类型。

四个地形因子由 SRTM DEM 派生生成,其中坡度、沿剖面曲率、沿等高线曲率在地形分析软件

3DMapper([www.terrainanalytics.com](http://www.terrainanalytics.com))中生成。由于地形平缓,地形湿度指数采用根据多流向算法(MFD-md)计算得到的上游汇流面积<sup>[25-26]</sup>来计算。

两个气候因子来源于中国农业科学院中国生态环境数据库,原始空间分辨率为 1 km,在 ArcInfo 软件中将其重采样到 90 m。

### 3 结 果

#### 3.1 样点设计与采集结果

根据所述两种样点设计方法,以母岩类型对研究区进行分层,在每层中分别设计多代表性样点和随机样点。对于代表性样点,在每一母岩类型下得到按照代表性等级高低和面积大小排序的环境因子组合链表。按照环境因子组合链的排序,依次在其平均隶属度图(图 2 为示例图)上设计具有不同代表性等级(可指示采集顺序)的样点。

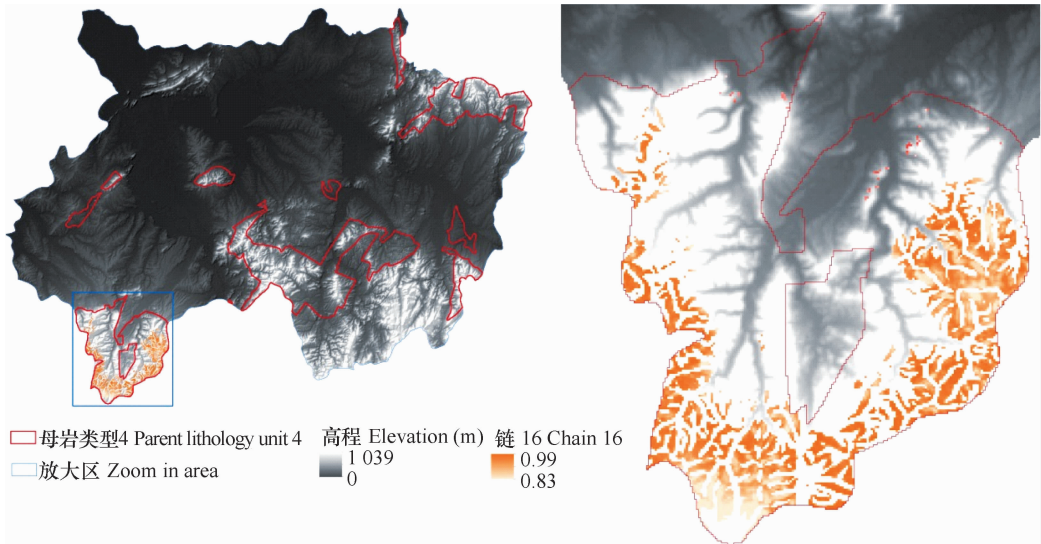


图 2 母岩类型 4 的环境因子组合链 16 的平均隶属度分布图

Fig. 2 Average membership map of environmental cluster chain 16 for Type 4 parent rock

野外采样后,获得数量均为 59 个的代表性样点和随机样点(图 3)。其中,代表性样点共包含三个等级,代表性最高、次高和最低的样点分别为 46 个、12 个和 1 个。代表性样点、随机样点和所有样点(包含代表性样点、随机样点和验证样点)的表层砂粒含量统计特征值如表 1 所示。可以看出,整个区域表层砂粒含量变化较大。表 2 列出了所有样点表层砂粒含量与环境因子的相关系数。从该表中可以看出,砂粒含量与年均降雨、年均温、沿剖面曲率、坡度呈极显著相关,这也证明了所选环境因子对表层砂粒含量具有较好的指示作用。尽管沿等

高线曲率和地形湿度指数(TWI)相关性不显著,但这两个因子是刻画地形的重要因子,是常用的数字土壤制图环境因子<sup>[14-15, 20-21]</sup>,从成土过程的角度而言对于刻画表层砂粒含量的空间分布具有重要作用,因而也作为环境因子入选。

#### 3.2 两套样点对地理和属性空间覆盖的对比

由样点分布图(图 3)可以看出,随机样点在空间分布比较均匀。而与随机样点相比,代表性样点则在东南部低山坡上布设了更多样点,在北部平原地区布设了较少样点。这主要是因为,东南部低山相较于北部平原具有更多的景观环境变化(也对应

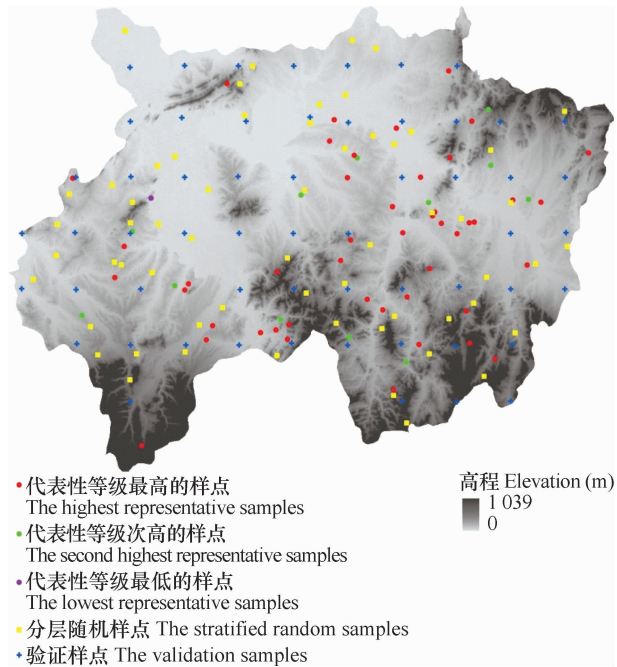


图 3 样点分布图  
Fig. 3 Sample sites distribution map

了土壤属性的变化),而代表性样点的优势也在于能捕捉这些变化特征。

表 3 列出了原始环境因子和采样点的环境因子统计特征值。可以看出,通过随机样点和代表性样点基本可以较好地覆盖原始环境因子属性空间,除有些环境因子(如曲率、坡度)的极值部分。除年均

温外,代表性样点表现较随机样点略好一些或相差不多。

综上,整体而言,两套方案均能较好地代表研究区,就属性空间覆盖性而言,代表性采样方案对坡度和地形湿度指数的覆盖性要略好于随机采样方案,其他环境因子差别不明显。此外,代表性样点通过代表性等级的不同可以区分其代表的环境特征的不同等级,对样点采集顺序、统筹采样资源具有指导性意义。

3.3 土壤制图结果及其对比

根据研究方法中所述分组规则,46 个代表性等级最高的样点为第一组样点,46 个代表性等级最高和 12 个代表性等级次高的样点为第二组样点,所有 59 个样点为第三组样点。同样根据随机样点分组规则,得到三套三组数量分别为 46、58 和 59 的随机样点。

利用两种制图方法,基于多组代表性样点和随机样点进行土壤表层砂粒含量制图。图 4 给出了利用第三组样点(即全部样点)的土壤表层砂粒含量图。由图 4 可以看出,除了所有四图均显示在花岗岩、花岗闪长岩这一母岩类型具有较高砂粒含量这一趋势外,采用不同的方法和样点所得土壤表层砂粒含量图差异较大。采用线性回归基于随机样点所得土壤图(图 4a)较平滑,而其他土壤图显示了更多与环境因子相关的细节,但相差较大。

表 1 表层砂粒含量的统计特征值  
Table 1 Descriptive statistics of topsoil sand content

| 样点<br>Samples      | 样点数量<br>Number of samples | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max | 均值<br>Mean | 标准差<br>Standard deviation |
|--------------------|---------------------------|------------|------------|------------|---------------------------|
| 代表性样点 <sup>①</sup> | 59                        | 6.94       | 85.47      | 30.91      | 15.66                     |
| 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                        | 3.97       | 83.33      | 33.67      | 16.68                     |
| 所有样点 <sup>③</sup>  | 175                       | 0.31       | 85.47      | 31.98      | 17.27                     |

①Multi-grade representative sample sites, ②Random sample sites, ③All sample sites

表 2 表层砂粒含量与环境因子的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between topsoil sand content and environmental variables

|                                                     | 年均降雨<br>Annual average<br>precipitation | 年均温<br>Annual average<br>temperature | 沿剖面曲率<br>Profile curvature | 沿等高线曲率<br>Contour curvature | 坡度<br>Slope | 地形湿度指数<br>Topographic<br>wetness index |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------------------|
| Pearson 相关系数<br>Correlation<br>coefficient <i>r</i> | 0.27 **                                 | -0.49 **                             | 0.26 **                    | 0.11                        | 0.44 **     | -0.03                                  |
| 显著性 Sig.                                            | 0                                       | 0                                    | 0.001                      | 0.149                       | 0           | 0.691                                  |

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关 Note: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

表 3 原始环境因子和采样点的环境因子统计特征值

Table 3 Statistical eigenvalues of original environmental factors and environmental factors of the sampling sites

| 环境因子<br>Environmental factors        | 样点<br>Samples      | 样点数量<br>Number of points | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max | 25% 分位数<br>25% Quartile | 中值<br>Median | 75% 分位数<br>75% Quartile | 均值<br>Mean |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------|
| 坡度 Slope                             | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | 0          | 64. 26     | 0. 7                    | 1. 8         | 5. 09                   | 4. 38      |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | 0          | 24. 36     | 0. 69                   | 1. 53        | 3. 57                   | 3. 45      |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | 0          | 26. 47     | 1. 17                   | 1. 95        | 4. 51                   | 4. 43      |
| 地形湿度指数<br>TWI                        | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | 4. 21      | 26. 24     | 7. 75                   | 9            | 11. 42                  | 10. 18     |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | 6. 23      | 23. 74     | 8. 27                   | 9. 97        | 11. 82                  | 11. 02     |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | 5. 67      | 22. 21     | 8. 04                   | 8. 9         | 11. 01                  | 9. 95      |
| 沿剖面曲率<br>Profile curvature           | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | -0. 006 2  | 0. 006 3   | -0. 000 1               | 0            | 0. 000 2                | 0. 000 1   |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | -0. 000 4  | 0. 002 9   | 0                       | 0. 000 1     | 0. 000 3                | 0. 000 3   |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | -0. 000 4  | 0. 001 8   | 0                       | 0            | 0. 000 2                | 0. 000 1   |
| 沿等高线曲率<br>Contour curvature          | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | -0. 31     | 0. 41      | -0. 004                 | 0            | 0. 003                  | 0          |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | -0. 015    | 0. 117     | -0. 004                 | 0            | 0. 005                  | 0. 003     |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | -0. 025    | 0. 023     | -0. 004                 | -0. 001      | 0. 003                  | 0          |
| 年均降水<br>Annual average precipitation | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | 1 243. 2   | 1 799. 9   | 1 335. 7                | 1 389. 8     | 1 454. 7                | 1 401. 7   |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | 1 280. 64  | 1 567. 16  | 1 340. 21               | 1 407. 97    | 1 462. 54               | 1 407. 57  |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | 1 288. 67  | 1 663. 78  | 1 347. 75               | 1 393. 83    | 1 452. 44               | 1 402. 25  |
| 年均温<br>Annual average temperature    | 原始数据 <sup>①</sup>  | 687 887                  | 11. 58     | 15. 78     | 15. 07                  | 15. 45       | 15. 59                  | 15. 22     |
|                                      | 随机样点 <sup>②</sup>  | 59                       | 13. 38     | 15. 73     | 15. 11                  | 15. 47       | 15. 62                  | 15. 24     |
|                                      | 代表性样点 <sup>③</sup> | 59                       | 13. 38     | 15. 64     | 15. 15                  | 15. 44       | 15. 52                  | 15. 25     |

①Original data, ②Random sample sites, ③Multi-grade representative sample sites

表 4 列出了回归方程的决定系数( $R^2$ )和修正决定系数(Adjusted  $R^2$ )。由表可以看出,当样点较少(46)时,基于随机样点的回归方程  $R^2$  较大,但当样点增加时,基于随机样点的回归方程  $R^2$  降低明显,而基于代表性样点的回归方程  $R^2$  比较稳定,且样点数量较多时,其  $R^2$  大于基于随机样点的  $R^2$ 。尽管修正决定系数数值上较决定系数要低,但其展现的规律与决定系数非常类似。

3.4 土壤图精度对比

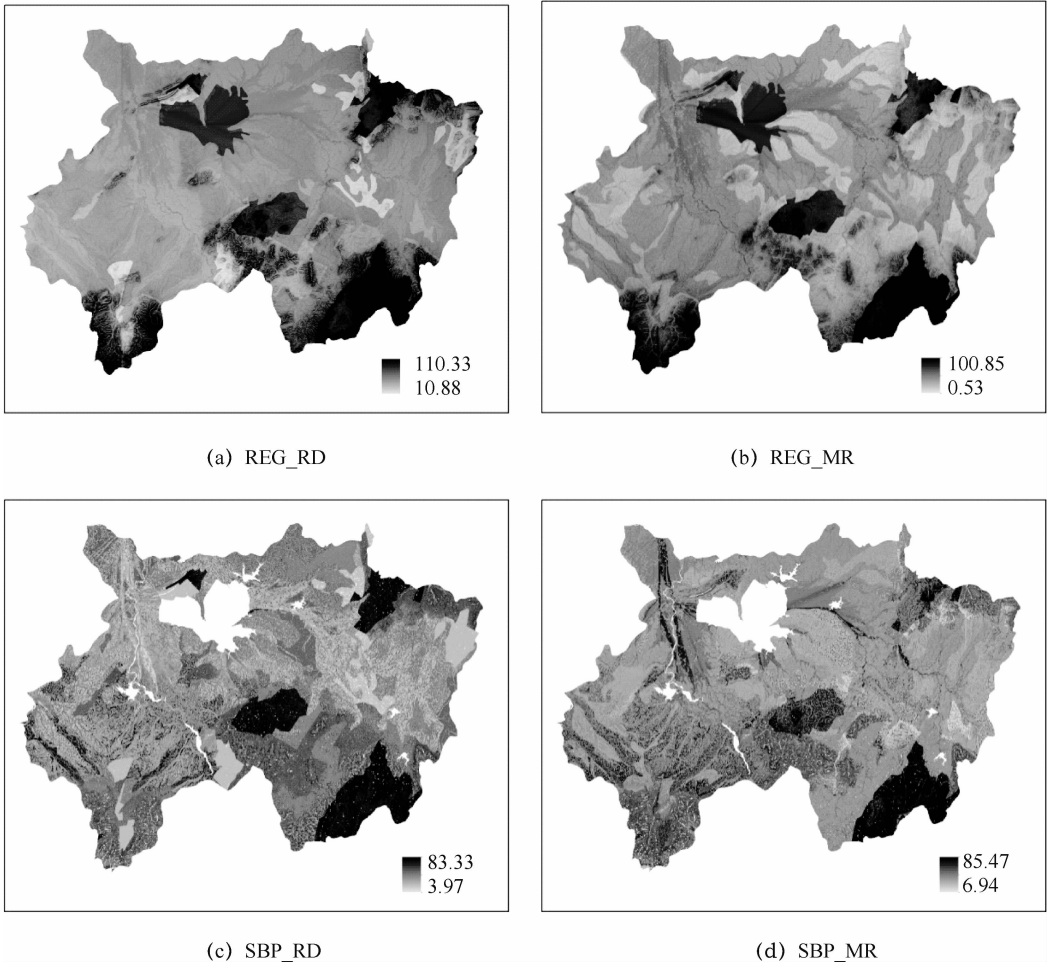
利用 57 个规则验证点(图 3)对所得土壤图进行评价,验证点 RMSE 随代表性或随机样点数量增加的变化结果如图 5 所示。可以看出,无论是采用多元线性回归模型还是基于环境隶属度的制图方法,代表性样点制图结果的 RMSE 均低于随机样点制图结果的 RMSE。在同等样点数量下,三套随机样点所得 RMSE 之间差异较大,特别是当样点数量较小时。同时,随着代表性较低样点的增加,RMSE

基本有一个降低的趋势,由于第三组样点仅较第二组样点多一个,两组样点所得土壤图的验证结果差异非常小。而随着样点增加,随机样点制图结果的 RMSE 变化不稳定、波动较大,特别是利用基于环境隶属度的制图方法。

4 讨 论

4.1 多等级代表性采样在小流域尺度和区域尺度的比较

多等级代表性采样在小流域尺度<sup>[15]</sup>和区域尺度(本文的研究)应用时,其相似之处在于,随着代表性等级较低的样点增加,土壤图精度提高,且从不同代表性等级样点的分布位置看出,代表性等级较高的样点可捕捉土壤要素空间变化的主要类型(特征),代表性等级较低的样点可捕捉局域类型(特征)。



注:RD:随机样点,MR:多等级代表性样点;REG:多元线性回归模型,SBP:基于环境相似度的制图方法。下同 Note: RD: random samples, MR: multi-grade representative samples; REG: regression model, SBP: the similarity-based predicting method. The same below

图 4 基于 59 个随机样点和代表性样点用两种制图方法所得土壤表层砂粒含量图  
Fig. 4 Soil sand content maps based on two sampling strategies and two soil mapping methods with 59 sample sites

表 4 不同数量样点所建立的回归方程的决定系数 ( $R^2$ ) 和修正决定系数 (Adjusted  $R^2$ )

Table 4  $R^2$  and adjusted  $R^2$  of regression models based on different size of samples

| 样点数量<br>Number of samples |     | 决定系数<br>$R^2$ |    |       | 修正决定系数<br>Adjusted $R^2$ |       |    |       |
|---------------------------|-----|---------------|----|-------|--------------------------|-------|----|-------|
| 46                        | RD1 | 0. 55         | MR | 0. 42 | RD1                      | 0. 37 | MR | 0. 19 |
|                           | RD2 | 0. 57         |    |       | RD2                      | 0. 40 |    |       |
|                           | RD3 | 0. 44         |    |       | RD3                      | 0. 21 |    |       |
| 58                        | RD1 | 0. 40         |    |       | RD1                      | 0. 22 |    |       |
|                           | RD2 | 0. 42         | MR | 0. 45 | RD2                      | 0. 25 | MR | 0. 29 |
|                           | RD3 | 0. 41         |    |       | RD3                      | 0. 23 |    |       |
| 59                        | RD  | 0. 41         | MR | 0. 45 | RD                       | 0. 24 | MR | 0. 29 |

注:RD:随机样点,RD1、RD2、RD3:随机样点的三次重复;MR:多等级代表性样点 Note: RD: random samples, RD1, RD2, RD3: three replicates of random sampling sites; MR: multi-grade representative samples

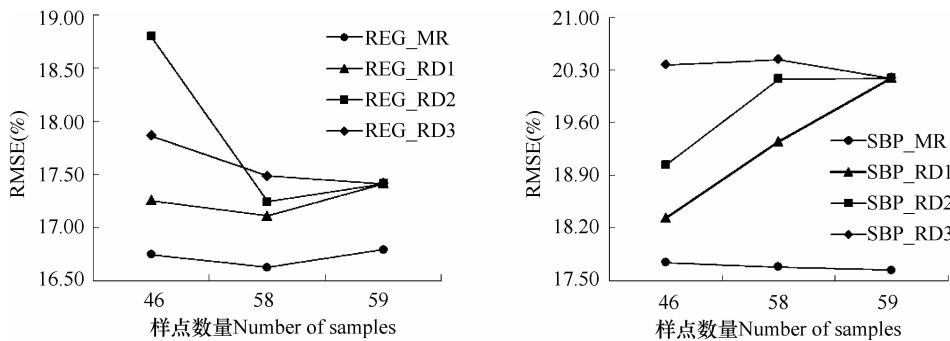


图 5 验证点土壤砂粒含量 RMSE 随代表性或随机样点数量增加的变化  
Fig. 5 Variation of RMSEs of validation sample sites in soil sand content with increasing number of sampling sites using representative and random sampling methods

不同之处在于,所得代表性等级的不同,这主要是与研究区环境条件变化的程度有关。对于本研究区的大部分母岩类型,样点代表性等级只有两个,而在鹤山农场小流域所得样点的等级则有四个。这主要是因为,尽管本文研究区的地形等环境条件多样,但进行母质分层之后,大部分层内的地形或主要是平原,或是由平原到陡峭低山的突然转变,且层内气候因子变化不大。而在母质基本均一、成土过程主要由地形控制的鹤山农场小流域,具有从坡顶、坡肩、背坡、坡脚到河谷平原的一系列变化,经由聚类所得结果充分体现了多样的坡位类型,因而所设计的代表性样点等级也多一些。

#### 4.2 土壤制图方法

本文选择了两种制图方法。由于本区地形和母质变异较大,且样点数较少(第一组至第三组分别为 46、58 和 59),本文并未选择应用较多的克里格插值方法。

由土壤表层砂粒含量图(图 4)可以看出,即使选择同一种采样策略,采用不同的制图方法所得土壤属性图也不同,其总体趋势和规律基本相似,但细节差异较大。相较于多元线性回归方法,基于环境相似度的制图方法所得土壤图体现了更多的细节,和与环境因子的相关性。而通过独立验证点这种验证方式的评价结果(图 5)可以看出,在本区采用多元线性回归方法比基于环境相似度的制图方法精度要高,这可能是由于回归建模的方法由样点驱动,而基于环境相似度的制图方法所选择的度量环境相似度的方法则有待于进一步优化。但基于环境相似度的制图方法已在多个区域取得了较好的制图精度,很难由一个研究案例来说明其制图效果的优劣,特别是与其他制图方法相比较时。制图方法精度的高低与区域特点有关,常用的多种制图

方法的优缺点和适用性需进一步探讨研究,不作为本文的研究重点。

### 5 结 论

本研究以安徽省宣城研究区的表层土壤砂粒含量制图为例,将多等级代表性采样与分层随机采样进行对比研究,共采集两套数量均为 59 个的样点,选择两种制图方法进行制图并利用独立验证点进行评价。结果表明:1)无论是采用多元线性回归方法还是基于环境相似度的制图方法,在同样样点数量下,利用代表性样点所得土壤图精度均明显高于利用随机样点所得土壤图的精度,并且利用少量代表性样点(46 个)所得土壤图精度也均明显高于利用多量随机样点(59 个)所得土壤图精度;2)随着代表性较低样点的增加,土壤属性制图精度基本有一个增加的趋势,而采用随机样点所得土壤图的精度波动较大,特别是利用基于环境相似度的制图方法。因此,可认为多等级代表性采样方法是一种可用于区域尺度土壤调查的高效采样方法,且比分层随机采样高效、稳定。

未来的研究应包括多等级代表性采样方法在更多区域的应用及其与基于地统计学的空间采样方法的对比。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Webster R, Olivier M A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford: Oxford University Press, 1990
- [ 2 ] Webster R. Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Oxford: Clarendon Press, 1979
- [ 3 ] Trochim W. Research methods knowledge base. 3rd ed. Atomic Dog Pub Inc., 2006
- [ 4 ] Oliver M A, Webster R. Combining nested and linear sampling

- for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables. *Geographical Analysis*, 1986, 18: 227—242
- [ 5 ] Grinand C, Arrouays D, Laroche B, et al. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma*, 2008, 143: 180—190
- [ 6 ] Pringle M J, Allen D E, Dalal R C, et al. Soil carbon stock in the tropical rangelands of Australia: Effects of soil type and grazing pressure, and determination of sampling requirement. *Geoderma*, 2012, 167/168: 261—273
- [ 7 ] Brus D J. Improving design-based estimation of spatial means by soil map stratification. A case study of phosphate saturation. *Geoderma*, 1994, 62(1/3): 233—246
- [ 8 ] van Groenigen J W, Stein A. Constrained optimization of spatial sampling using continuous simulated annealing. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 1078—1086
- [ 9 ] Sacks J, Schiller S. Spatial designs//Gupta S S, Berger J O. Statistical decision theory and related topics IV, vol. 2. New York: Springer Verlag, 1988: 385—399
- [ 10 ] Webster R, Oliver M A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *European Journal of Soil Science*, 1992, 43(1): 177—192
- [ 11 ] Simbahan G C, Dobermann A. Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping. *Geoderma*, 2006, 133: 345—362
- [ 12 ] Brus D J, Heuvelink G B M. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 2007, 138: 86—95
- [ 13 ] Minasny B, McBratney A B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 1378—1388
- [ 14 ] Zhu A X, Yang L, Li B L, et al. Purposive sampling for digital soil mapping for areas with limited data//Hartemink A E, McBratney A B, Mendonça-Santos M L. Digital soil mapping with limited data. New York: Springer-Verlag, 2008: 233—245
- [ 15 ] Yang L, Zhu A X, Qi F, et al. An integrative hierarchical stepwise sampling strategy and its application in digital soil mapping. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(1): 1—23
- [ 16 ] Mulder V L, de Bruin S, Schaepman M E. Representing major soil variability at regional scale by constrained Latin Hypercube Sampling of remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 301—310
- [ 17 ] Bezdek J C, Ehrlich R, Full W. FCM: The fuzzy *c*-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences*, 1984, 10(2/3): 191—203
- [ 18 ] Razakamanarivo R H, Grinand C, Razafindrakoto M A, et al. Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: A multiple regression approach. *Geoderma*, 2011, 162: 335—346
- [ 19 ] Selige T, Böhner J, Schmidhalter U. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*, 2006, 136: 235—244
- [ 20 ] Shi X, Zhu A X, Burt J E, et al. A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 885—894
- [ 21 ] 刘京. 基于样点个体代表性的大范围土壤属性制图方法研究. 北京: 北京师范大学, 2010. Liu J. Mapping soil properties using individual representativeness of samples over large area (In Chinese). Beijing: Beijing Normal University, 2010
- [ 22 ] Wen W, Wang Y F, Yang L, et al. Mapping soil organic carbon using auxiliary environmental covariates in a typical watershed in the Loess Plateau of China: A comparative study based on three kriging methods and a soil land inference model (SoLIM). *Environmental Earth Sciences*, 2014, DOI:10.1007/s12665-014-3518-9
- [ 23 ] 刘京, 朱阿兴, 张淑杰, 等. 基于样点个体代表性的大尺度土壤属性制图方法. *土壤学报*, 2013, 50(1): 12—20. Liu J, Zhu A X, Zhang S J, et al. Large-scaled soil attribute mapping method based on individual representativeness of sample sites (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 12—20
- [ 24 ] Zhu A X, Band L E, Vertessy R, et al. Derivation of soil properties using a soil land inference model (SoLIM). *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 523—533
- [ 25 ] Qin C Z, Zhu A X, Pei T, et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture*, 2011, 12(1): 32—43
- [ 26 ] Qin C Z, Zhu A X, Pei T, et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(4): 443—458

A COMPARATIVE STUDY OF MULTI-GRADE REPRESENTATIVE SAMPLING  
AND STRATIFIED RANDOM SAMPLING FOR SOIL MAPPING

Yang Lin<sup>1</sup> Zhu A-Xing<sup>1,2,3,4†</sup> Zhang Shujie<sup>1</sup> An Yiming<sup>1,5</sup>

(1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(3 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(4 Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA)

(5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

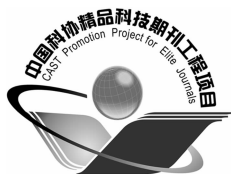
**Abstract** Sampling design has long been a key issue of concerns in the study of Soil Geography. How to take samples efficiently is now an important problem that investigators or researchers are tackling. As more and more synergic environmental data become easily available, they can also be used to assist designing of sampling so as to improve sampling efficiency. For that end, a multi-grade representative sampling method is developed. Using this method, investigators can catch patterns of soil spatial variability at different scales through designing different representative grades based on the relationship between soil and its environmental covariates. This method has been testified as an effective sampling method in a case study of watershed scale soil mapping. However, the application of this method is very limited, especially for mapping regional soil with more complicated pedogenesis. It is also unknown how it is when comparing with classic sampling methods, such as stratified random sampling. In this paper the multi-grade representative sampling method is compared with the stratified random sampling method in regional scaled soil property mapping, in the following two aspects: 1) designing of sampling sites, and result and accuracy of mapping; and 2) variation of accuracy of mapping with increased number of sampling sites.

The case study was laid out in Xuancheng of Anhui Province, China, covering an area of 5900 km<sup>2</sup>. Seven environmental variables were selected, i. e. parent material (rock), slope gradient, profile curvature, contour curvature, topographic wetness index, annual average precipitation, and annual average temperature. The data of parent rock was used to stratify the study area. For representative sampling, FCM was employed to cluster the environmental variables of each stratum for designing representative sampling sites. Consequently a total of 59 sampling sites featuring three representative grades were defined. For random sampling, the number of sampling sites in each stratum was proportional to its area and also a total of 59 sampling sites were marked out. The two sets of sampling sites were sorted separately into three groups, each consisting of 46, 58 and 59 sites. For representative sampling, the first group of sampling sites was the highest in representativeness grade. The second group was the first group adding the sampling sites with the second highest representative grade. And the third group was the total sample set. For random sampling, the first group of sampling sites was 46 sampling sites picked out randomly from the set. The second group was the first group adding 12 sampling sites randomly drawn from the remaining (59 - 46) samples. And the third group was the total sample set. Soil surface layer sand content maps were plotted using two different soil mapping methods, i. e. multivariate linear regression and similarity-based mapping. The resultant soil maps were evaluated with independent validation sites and RMSE as evaluation index.

Results show: 1) no matter which mapping method was used, in the case of the same sampling size, the representative sampling method was lower than the random sampling method in RMSE and even the former with fewer sampling sites (46) was lower than the latter with more sampling sites (59); 2) with increased number of sampling sites that were lower in representativeness, RMSE displayed a basically declining trend, while in random sampling method, increased number of sampling sites would aggravate the fluctuation of RMSE. It is, therefore, held that the multi-grade representative sampling method is more efficient and stable than the stratified random sampling.

**Key words** Soil mapping; Soil sampling; Multi-grade representative sampling; Stratified random sampling; Regional scale

(责任编辑:陈德明)



## 综述与评论

农业土壤学研究:侯光炯学术思想形成之考察——纪念侯光炯先生诞辰 110 周年..... 申丽娟 丁恩俊 陈绍兰等(1)

土壤多样性研究趋势与未来挑战 ..... 任圆圆 张学雷(9)

土壤磷酸盐氧同位素分析方法和应用研究进展 ..... 张 晗 王佳妮 郭庆军等(19)

## 研究论文

土壤制图多等级代表性采样与分层随机采样的对比研究 ..... 杨 琳 朱阿兴 张淑杰等(28)

河南省典型淋溶土土系划分研究 ..... 鞠 兵 吴克宁 李 玲等(38)

黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟 ..... 吴淑芳 刘政鸿 霍云云等(48)

黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征 ..... 高晓东 吴普特 张宝庆等(57)

科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究 ..... 孙 丽 刘廷玺 段利民等(68)

砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响 ..... 张 磊 齐瑞鹏 张应龙等(77)

稳定同位素<sup>202</sup>Hg 稀释技术测定土壤汞有效性——与化学提取方法比较 ..... 郑顺安 徐志宇 王 飞等(87)

土壤提取液中酰基高丝氨酸内酯的气相色谱-质谱检测方法优化 ..... 生弘杰 宋 洋 卞永荣等(95)

复合污染土壤中土霉素的吸附行为及其对土壤重金属解吸影响的研究 ..... 陈励科 马婷婷 潘 霞等(104)

污染区千金子和酢浆草根际土壤中 PAHs 结合态残留的梯度分布 ..... 王意泽 高彦征 彭安萍等(112)

土壤磷解吸特性对菜稻轮作田间渗漏水总磷浓度的影响 ..... 章明清 李 娟 孔庆波(120)

湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究 ..... 谭德水 江丽华 谭淑樱等(128)

鄱阳湖洲滩湿地土壤-水-植物系统中磷的静态迁移研究 ..... 徐 进 徐力刚 丁克强等(138)

菇菜套作对土壤微生物群落的影响 ..... 陈 敏 王军涛 冯有智等(145)

黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例 ..... 褚洪龙 李 莎 唐 明(154)

硅介导番茄青枯病抗性的土壤定量蛋白质组学研究 ..... 陈玉婷 林威鹏 范雪滢等(162)

有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响 ..... 许小伟 樊剑波 陈 晏等(174)

氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 ..... 李林森 程淑兰 方华军等(183)

长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究 ..... 何翠翠 王立刚 王迎春等(194)

火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响 ..... 吴君君 杨智杰 刘小飞等(203)

## 研究简报

碳氮稳定同位素检测能力的验证——2013 年实验室间比对分析结果的汇总 ..... 曹亚澄 韩 勇 唐昊冶等(212)

土壤厚度的划分标准与案例研究 ..... 易 晨 李德成 张甘霖等(220)

积盐条件下土壤酸化过程的特异性研究 ..... 王媛华 段增强 赵 宇等(228)

四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究 ..... 张 智 王伟妮 李 昆等(234)

小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响 ..... 李宗超 胡 霞(242)

## 信息

《土壤学报》2013 年度优秀论文评选揭晓 ..... (241)

封面图片:黄土坡面细沟形态发育过程(由吴淑芳提供)

# CONTENTS

## Reviews and Comments

|                                                                                                                                                 |                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Agricultural soil science research: Formation of Hou Kuangchun's academic thought—Celebrate 110th anniversary of Mr Hou Kuangchun's birth ..... | Shen Lijuan, Ding Enjun, Chen Shaolan, et al. (8) |
| Study on pedodiversity: Status quo and future challenges .....                                                                                  | Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei(17)                    |
| Advance in study on method for oxygen isotopic analysis of phosphate in soil and its application .....                                          | Zhang Han, Wang Jiani, Guo Qingjun, et al. (26)   |

## Research Articles

|                                                                                                                                                                                  |                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| A comparative study of multi-grade representative sampling and stratified random sampling for soil mapping .....                                                                 | Yang Lin, Zhu A-xing, Zhang Shujie, et al. (37)       |
| Classification of Typical Argosols of Henan Province at soil series level of Chinese Soil Taxonomy .....                                                                         | Ju Bing, Wu Kening, Li Ling, et al. (47)              |
| Development of rill erosion on loess slope and its simulation .....                                                                                                              | Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. (55)    |
| Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau .....                                           | Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhang Baoqing, et al. (66)     |
| Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of Horqin with pedo-transfer functions method .....                     | Sun Li, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. (75)           |
| Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve and evaporation .....                                                     | Zhang Lei, Qi Ruipeng, Zhang Yinglong, et al. (85)    |
| Comparison between stale isotope <sup>202</sup> Hg dilution technique and chemical extraction in determining Hg availability in two typical soils of China .....                 | Zheng Shunan, Xu Zhiyu, Wang Fei, et al. (94)         |
| Optimization of determination of N-acyl-homoserine lactones in soil solution with Gas-Chromatography-Mass Spectrometry .....                                                     | Sheng Hongjie, Song Yang, Bian Yongrong, et al. (102) |
| Sorption behavior of oxytetracycline in complex contaminated soil and its effects on desorption of heavy metals in the soil .....                                                | Chen Like, Ma Tingting, Pan Xia, et al. (111)         |
| Gradient distribution of bound-PAH residues in different layers of rhizosphere soils of moleplant and wood sorrel growing in polluted regions .....                              | Wang Yize, Gao Yanzheng, Peng Anping, et al. (118)    |
| Soil P desorption characteristics and their effects on total P concentration in percolating water in fields under vegetable-rice rotation system .....                           | Zhang Mingqing, Li Juan, Kong Qingbo(127)             |
| Effects of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region .....                                            | Tan Deshui, Jiang Lihua, Tan Shuying, et al. (137)    |
| Static transfer of phosphorus in the soil-water-plant system of beach wetlands in Poyang Lake .....                                                                              | Xu Jin, Xu Ligang, Ding Keqiang, et al. (144)         |
| Changes in soil microbial community in response to tomato- <i>Agaricus bisporus</i> interplanting .....                                                                          | Chen Min, Wang Juntao, Feng Youzhi, et al. (152)      |
| Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr. growing on Loess Plateau— A case study of Huanglongshan forest farm ..... | Chu Honglong, Li Sha, Tang Ming(161)                  |
| Soil quantitative proteomic analysis of silicon-mediated resistance of tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) to <i>Ralstonia solanacearum</i> .....                             | Chen Yuting, Lin Weipeng, Fan Xueying, et al. (172)   |
| Effect of manure combined with chemical fertilizer application on yield, kernel quality and physiological characteristics of peanut to red soil in subtropical China .....       | Xu Xiaowei, Fan Jianbo, Chen Yan, et al. (181)        |
| Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau .....                                        | Li Linsen, Cheng Shulan, Fang Huajun, et al. (192)    |
| Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil .....                                                               | He Cuicui, Wang Ligang, Wang Yingchun, et al. (202)   |
| Effect of prescribed burning and reservation of logging residues on soil organic carbon mineralization .....                                                                     | Wu Junjun, Yang Zhijie, Liu Xiaofei, et al. (210)     |

## Research Notes

|                                                                                                                     |                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Testing of proficiency for measurement of carbon and nitrogen stable isotopes ...                                   | Cao Yacheng, Han Yong, Tang Haoye, et al. (218)   |
| Criteria for partition of soil thickness and case studies .....                                                     | Yi Chen, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. (227)   |
| Specificity of soil acidification affected by salt accumulation .....                                               | Wang Aihua, Duan Zengqiang, Zhao Yu, et al. (233) |
| Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province .....                            | Zhang Zhi, Wang Weini, Li Kun, et al. (240)       |
| Effects of shrub ( <i>Caragana microphylla</i> Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland ..... | Li Zongchao, Hu Xia(248)                          |

**Cover Picture:** Rill morphological development process on loess slope (by Wu Shufang)