

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

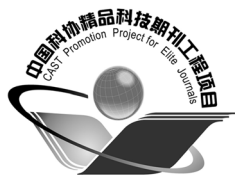


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土 壤 学 报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征 ····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究 ····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响 ····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对 ^{15}N 利用及土壤累积的影响 ····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片：离子型稀土矿废弃地全景（由汤叶涛、刘文深提供）

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响^{*}

海 南^{1, 3} 赵永存^{1, 3†} 田 康^{1, 3} 黄 标¹ 孙维侠¹ 史学正²

(1 中国科学院土壤环境与修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(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 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 以南京市六合区为研究区, 通过完全随机和限制最小采样间距抽样分别设置5个样点系列, 基于每个样点系列100次重复抽样的变异结构推断及空间预测误差结果, 探讨了不同样点数量对土壤有机质(SOM)空间变异表达的影响。结果表明, 两种抽样方式降低样点数量后推断的SOM含量的块金效应(C_0/C_0+C)均随样点数量减少而降低且限制最小采样间距抽样推断的 C_0/C_0+C 要低于完全随机抽样方法, 说明适当的减少样点数量以便降低与SOM变异尺度不匹配的样点对变异结构推断的影响有助于提高SOM空间变异结构表达的可靠性。普通Kriging预测的SOM误差对比则表明, 尽管两种抽样方式下空间预测的均方根误差(RMSE)随样点数量变化而波动, 但均低于全部样点的预测误差; 通过限制最小采样间距减少样点至250个时, SOM空间预测的RMSE最低, 较全部样点预测误差降低了6%, 因此, 为了实现样点密度与SOM变异尺度相匹配, 合理设置土壤采样点的间距及样点数量较单纯的增加采样点数量更为重要。

关键词 土壤有机质; 空间变异性; 完全随机抽样; 限制最小采样间距抽样; 尺度匹配

中图分类号 S159 **文献标识码** A

有机质作为土壤肥力形成的基础, 不但影响土壤质量及功能, 而且在陆地生态系统碳循环中起关键作用^[1-2]。准确把握土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)的空间分布规律是土壤资源管理科学决策的基础^[3-6], 然而, SOM空间变异特征的表达往往与土壤采样布点方案密切相关, 采样点的数量及样点间距变化将直接影响SOM变异结构推断及空间预测精度, 因此, 研究不同样点数量下SOM空间变异特征的变化规律对于科学的设计土壤采样布点方案, 进而在适宜的尺度上实现SOM空间分布的准确定量表达具有重要意义。

近年来学者们采用地统计学方法, 在采样点数量或密度变化对土壤属性空间变异表达的影响方面已做了诸多有益的探索^[7-16]。王志刚等^[9]通过对

江苏省如皋市888个土壤采样点的单次随机抽样设置5个样点系列, 探讨了采样点数量对SOM和有效磷空间变异解析的影响, 认为在长江冲积物形成的土壤上, 针对县级尺度的土壤肥力指标调查采样, 设置250个样点较为合适。赵彦锋等^[10]通过对网格法采集的248个土壤耕层样点设计3种不同采样尺度的抽样方案, 比较了土壤图法和Kriging插值法对SOM、全氮、全磷、缓效钾和速效钾等土壤肥力指标空间预测精度的影响, 提出在土壤调查的初级阶段应当采集少量样点对土种内的土壤属性变异程度做出估计, 以便更好地设计采样方案、预测土壤属性空间分布。王珂等^[11]以英国 Hillsborough 农业研究所附近一块 7.9 hm²的牧草地为研究区, 利用半方差分析及Kriging插值方法对土壤速效钾的

^{*} 国家自然科学基金项目(41471177)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050509)中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN404)资助

[†] 通讯作者, E-mail: yczhao@issas.ac.cn

作者简介: 海 南(1989—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感及土壤空间预测研究。E-mail: nhai@issas.ac.cn

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2015-01-23

空间变异特征进行研究,提出了合理采样点数目(62个)及样点的空间分布模式(规则三角网布点)。赵倩倩等^[12]则利用地统计学与GIS相结合的方法,分析了山东省费县SOM、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾等5种土壤养分的空间变异特征,探讨了县域尺度上的合理采样点数量。

从上述研究可以看出,目前在探讨样点数量对土壤属性空间变异表达的影响方面已经取得了一定的进展,然而,在研究方法特别是如何设置不同数量样点系列上仍有进一步改进的空间。首先,目前的研究主要采用单次随机抽样来设置不同数量的样点系列,即每个样点系列仅从全部样点中随机抽取一次。单次随机抽样具有一定的不稳定性,从而可能导致土壤性质空间变异性结构表达的不确定性增大。其次,完全随机抽样方法设置的不同样点系列难以保证最小样点间距(任一采样点与其周围样点间距的最小值)随样点数量降低而增大,从而可能影响采样点密度与空间变异尺度的匹配。针对以上问题,本研究以南京市六合区SOM为研究对象,通过完全随机和限制最小采样间距两种抽样方法来分别设置不同数量的样点系列,对每种抽样方法的每个样点系列均分别进行100次重复抽样,基于100次重复抽样的变异结构推断及空间预测误差结果,探讨不同样点数量对SOM空间变异表达的影响,以便为区域尺度SOM的采样设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为南京市六合区($32^{\circ}11' \sim 32^{\circ}27' \text{N}$, $118^{\circ}34' \sim 119^{\circ}03' \text{E}$, 图1),全区总面积 1485 km^2 ,属北亚热带季风温湿气候,年平均气温 15.1°C ,年平均降雨量约为 1000 mm 。该区地势北高南低,北部为丘陵、岗地区,中部为河谷平原、岗地区,南部为沿江平原圩区^[17]。土壤类型包括水稻土、潮土、黄棕壤、石灰岩土和基性岩土五个土类。该区农业耕种历史悠久,全区土壤总面积74%以上为水稻土,种植方式以稻麦两熟耕作为主。

1.2 样品采集与分析

土壤采样时间为2006年秋季,共采集了362个表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤样品。土壤样点按以下规则进行设计:首先根据土壤类型及土地利用类型叠加

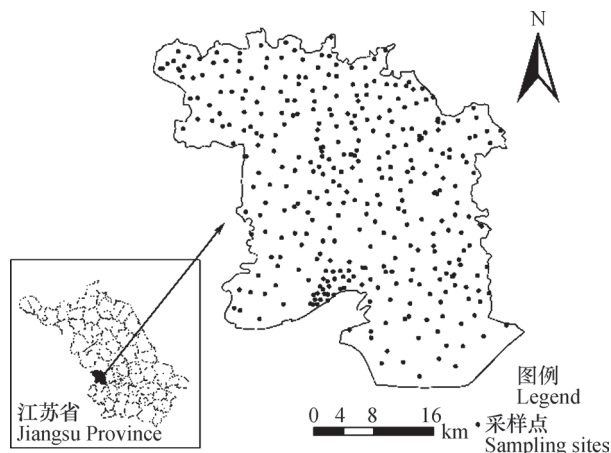


图1 南京市六合区地理位置及采样点分布图

Fig. 1 Geographic location of Luhe and distribution of sampling sites in Nanjing, Jiangsu Province

建立采样布点的子区域,初始样点数量根据每个子区域的面积比例来确定,然后,对子区域中包含蔬菜地及地形变化较大的区域进行适当微调加密布点,同时在整个布点过程中尽可能地保证样点分布的均匀性及对整个研究区覆盖的完整性。样点的经纬度用GPS记录,土壤样点分布如图1。SOM含量采用重铬酸钾氧化—容量法测定^[18]。

1.3 研究方法

由于异常值的存在会导致变量连续表面的中断从而使试验半方差函数发生畸变,影响变量固有的空间结构特征推断^[19-20],因此本研究首先采用 3σ 准则识别异常值,即采用样本平均值 $\bar{x}$ 加减三倍标准差 s ,在区间 $(\bar{x}-3s, \bar{x}+3s)$ 以外的数据均假定为异常值予以剔除,剔除后有效样点为351个。

本研究将剔除异常值后的土壤采样点按照完全随机抽样和限制最小采样间距抽样两种抽样方法分别设置了300、250、200、140、100个共五个样点系列,其中限制最小采样间距抽样按照样点最小间距为 0.5 km 、 1.0 km 、 1.5 km 、 2.0 km 、 2.5 km 分别抽样,每种抽样方法每个样点系列均重复抽样和计算100次。其中,限制最小采样间距抽样分3步实现:(1)随机选取一个样点,以该样点为起始样点筛选符合样点间距条件的所有样点;(2)在步骤(1)中筛选的样点中随机抽样;(3)对于每个最小样点间距及对应的样点数量,分别重复步骤(1)、步骤(2)100次。SOM的空间变异结构采用半方差函数推断,拟合的模型主要考虑球状模型和指数模型,每次抽样中通过拟合误差来筛选最佳

的理论模型, 每种抽样方法每个样点系列的半方差函数拟合结果均采用100次抽样推断的平均变异结构表征。块金常数 C_0 通常表示由于试验误差和小于采样尺度所引起的变异, C_0 与基台值 C_0+C 的比值 C_0/C_0+C 称为块金效应, 块金效应反映了空间变异结构中随机组分所占的比例^[21]。本研究通过理论模型拟合的 C_0/C_0+C 及有效变程变化来判断不同样点数量对SOM空间变异结构推断的影响。SOM的空间预测采用普通克里格法 (Ordinary Kriging, OK), 空间预测误差采用交互验证方法来计算, 即通过比较验证数据点位置 j 上的土壤属性 s_j 的估计值 $\hat{z}(s_j)$ 和实际观测值 $z(s_j)$ 来评价预测精度, 用均方根误差 (RMSE) 来评价预测的准确性。其中RMSE的计算方法如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [z(s_j) - \hat{z}(s_j)]^2} \quad (1)$$

式中, l 为验证数据集中采样点个数。每种抽样方法每个样点系列均采用100次抽样计算的平均RMSE来表达预测误差。此外, 由于不同样点数量下抽取的SOM数据的方差可能存在一定的波动性, 为消除其影响, 本研究在进行空间预测误差比较分析时, 采用标准化的RMSE来评价, 即不同样

点数量下计算的RMSE除以对应抽取样点SOM的标准差。

本研究中随机抽样、限制最小采样间距抽样、半方差函数的自动拟合和Kriging插值的自动计算等均采用R软件及gstat扩展包通过编程来计算; 描述统计分析等非空间分析主要采用SPSS20.0计算。

2 结果与讨论

2.1 SOM含量的基本特征

从研究区351个表层SOM含量的描述统计分析结果来看 (图2), SOM平均含量为 19.82 g kg^{-1} , 最小值为 7.23 g kg^{-1} , 最大值为 53.55 g kg^{-1} , SOM含量的变异系数为32%, 变异性较强。六合区SOM含量的频率分布呈右侧长尾分布 (图2a), K-S检验结果表明不符合正态分布。右侧长尾分布说明SOM数据中存在部分含量较高的样点, 这种非正态分布会对研究区SOM含量的空间变异结构推断产生有偏估计。因此, 为了保证SOM空间变异结构推断的可靠性, 本研究采用自然对数变换对原始的SOM含量数据进行变换。K-S检验结果表明, 经自然对数变换后的SOM含量数据符合正态分布 (图2b)。

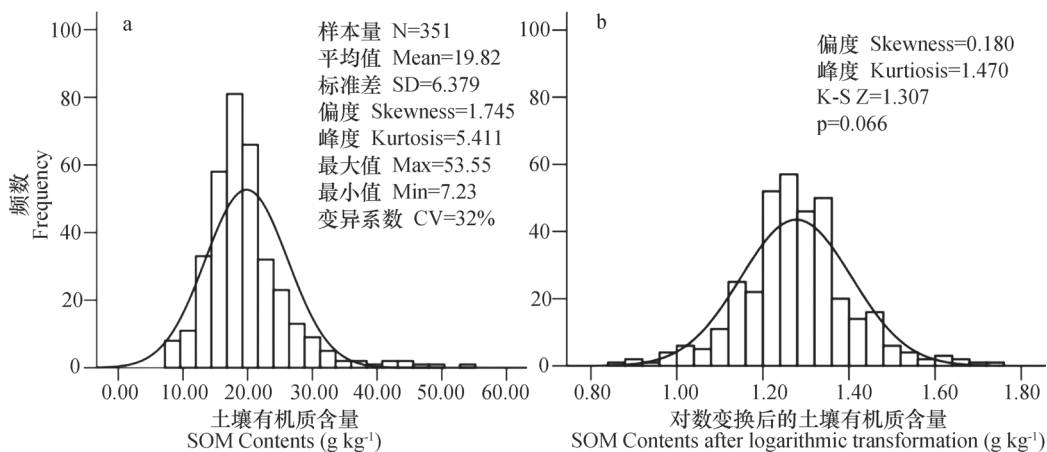


图2 全部样点的有机质含量频率分布直方图及描述统计特征

Fig. 2 Frequency distribution histogram and descriptive statistics of the soil organic matter contents (N=351) of all the sampling sites

2.2 样点数量对SOM空间变异结构推断的影响

全部351个样点SOM含量数据经自然对数变换后推断的半方差图及拟合函数如图3所示, 从图3中可以看出, SOM含量的试验半方差值总体上随样点间距增加先增大, 而随后趋于稳定。拟合的理论半方差模型的 C_0/C_0+C 为88%, 表明全部351个样点所反映出的SOM空间变异结构中随机组分所占比例较

高, 结构性较弱 (表1)。此外, 当样点间距 $<2 \text{ km}$ 时, 计算的试验半方差值波动强烈, 主要表现为异常高的半方差值, 这说明样点间距 $<2 \text{ km}$ 时, 尽管样点对数较多 (0.26 km为27对, 0.74 km为60对, 1.14 km为128对), 但距离很近的两个样点之间的SOM含量差异却很大, 从而导致计算的半方差值异常高。这也表明351个样点中并非所有的样点对于

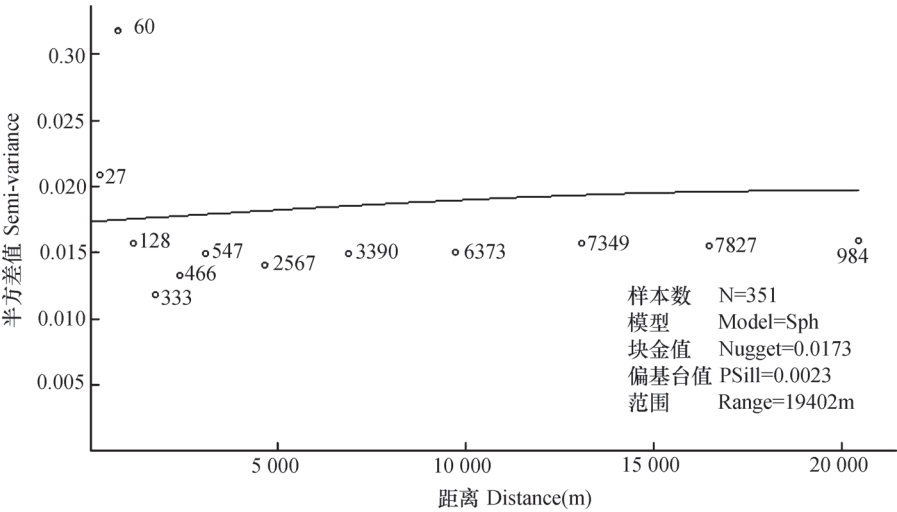


图3 全部样点推断的土壤有机质半方图及拟合函数

Fig. 3 Variograms of soil organic matter (SOM) derived from all the sampling sites as a whole and fitting functions

表1 不同采样点数量及抽样方法下土壤有机质半方差函数的块金效应及有效变程

Table 1 Averagenugget-to-sill ratiosand effectivevariation ranges of soil organic matter relative to number ofsampingsites andwith different sampling method

样本量 Sample size	完全随机抽样 Completely random sampling					限制最小采样间距抽样 Minimum sample distance sampling				
	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台 值 C_0/C_0+C (%)	块金值/基台 值的标准差 SD of C_0/C_0+C	有效变程 Effective range (m)	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台 值 C_0/C_0+C (%)	块金值/基台 值的标准差 SD of C_0/C_0+C	有效变程 Effective range (m)
351	0.0173	0.0197	88.01	—	19402	—	—	—	—	—
300	0.0172	0.0195	88.21	0.017	19792	0.0161	0.0184	87.09	0.013	21642
250	0.0172	0.0197	87.28	0.094	20290	0.0104	0.0130	80.18	0.116	18252
200	0.0169	0.0194	86.92	0.102	19224	0.0060	0.0123	48.68	0.358	12065
140	0.0150	0.0191	78.54	0.228	18334	0.0085	0.0136	63.29	0.315	13851
100	0.0137	0.0189	72.60	0.283	17397	0.0066	0.0139	47.10	0.362	15183

研究区SOM含量不同尺度的变异结构表达均是有效的。本研究中间距<2km的样点数量尽管较多，但依然不足以有效推断<2km尺度的SOM变异性，因此，适当地减少样点数量以便降低与采样方案所反映的SOM含量变异尺度不匹配的样点对变异结构推断的影响，是提高研究区SOM空间变异表达可靠性的潜在途径之一。

从表1可以看出，当采用完全随机抽样和限制最小采样间距抽样两种方法降低样点数量后，无论采用哪种抽样方法，随样点数量的逐渐减少，SOM含量的 C_0/C_0+C 逐渐降低，从而更有利于揭示SOM空间变异结构中连续的结构性组分。但样点数量减

少15%，即减少至300个样点时，两种抽样方法所推断的 C_0/C_0+C 值与全部样点推断结果相比没有明显差异；随着样点数量减少至250及200个时，完全随机抽样方法推断的 C_0/C_0+C 变化依然不大，但限制最小采样间距抽样方法推断的 C_0/C_0+C 降低；当样点数量进一步减少至140及100个时，两种抽样方法推断的 C_0/C_0+C 均降低。此外，不同样点数量下，限制最小采样间距抽样方法推断的 C_0/C_0+C 均要低于完全随机抽样方法。

理论而言，样点数量减少后，样点密度降低，从而导致样点分布变稀疏、样点间的平均间距总体上变大，因此更有利于探测相对较大尺度的变异

性^[9, 16, 22]。实际上, 样点数量减少后, 接近最小样点间距尺度的部分小尺度变异也能够得到一定程度的表达, 但采用完全随机抽样来减少样点数量时, 由于并不能保证最小样点间距随样点数量减少而增大, 样点数量<250个时, 拟合的SOM含量空间相关范围(变程)差异不大; 但>250个样点时拟合的变程却随样点数量减少而降低(表1), 表明随机抽样模式下局部空间异常点对SOM变异结构推断的影响依然存在。同时, 尽管与全部351个样点相比随机抽样推断的 C_0/C_0+C 值在减少, 但相对限制最小采样间距的方法而言, 其推断的随机性组分比例(C_0/C_0+C)仍然较高。采用限制最小采样间距方法来减少样点数量后, 采样点数量随机减少的同时也能保证最小样点间距逐渐增大, 因此, 能在一定程度上消减与采样方案所反映尺度不相匹配的SOM数据对变异结构的影响。从表1可以看出, 限制最小采样间距抽样下, 样点数量<200时, 拟合的SOM变程逐级降低; 而样点数量>200时, 随样点数量减少拟合的SOM变程则逐级变大, 表明局部空间异常点对SOM变异结构推断的影响逐渐减弱。同时, 不同样点数量下限制最小采样间距抽样推断的SOM的 C_0/C_0+C 也均低于完全随机抽样的结果, 因此, 限制最小采样间距抽样更有利于获得可靠的变异性结构推断结果。实际上, 由于采样方案限制导致的 C_0/C_0+C 增大往往较SOM的测定误差影响要大得多。在本研究中, 全部351个样点推断的 C_0/C_0+C 高达88%, 说明使用全部样点表达SOM含量更小尺度的变异性是不可行的。解决这个问题的潜在途径有两个, 一是进一步增加样点数量以便更好地反映小尺度变异; 另一个则是减少样点数量从而降低与SOM含量变异尺度不匹配的样点对变异结构推断的影响。

2.3 不同样点数量下的SOM空间分布及预测误差

不同采样点数量下普通Kriging预测的SOM空间分布的总体格局基本一致(图4), SOM含量均表现为由西北部向东南部逐渐增加的趋势。但限制最小采样间距方法样点数减少至200和100个时的分布格局与351个样点相比存在明显差异, 主要表现为表征局部变异的岛状区域增加, 这与限制最小采样间距抽样在200及100个样点时推断的SOM连续性结构组分比例较大而随机性组分比例较小密切相关。200及100个样点时, 限制样点间距抽样推断

的 C_0/C_0+C 分别仅为48.7%和47.1%(表1), 但两个样点系列 C_0/C_0+C 的标准差均为0.36, 高出限制最小采样间距抽样在250个样点时推断出的 C_0/C_0+C 的标准差(0.12)200%。由此可见, 尽管降低样点数量可以消减与SOM含量变异尺度不匹配的样点对变异结构推断的影响从而降低 C_0/C_0+C , 但样点数量也不能无限制的降低, 因为普通Kriging的预测精度主要受两个因素影响, 即半方差函数推断的可靠性及样点对研究区覆盖的均匀性和完整性。尽管适当减少样点数量后有助于消减小尺度变异的影响, 从而提高SOM的空间结构性组分比例, 但样点对研究区覆盖的空间完整性也会降低, 从而导致空间表达的可靠性降低。

采用完全随机抽样方法降低样点数量, SOM空间预测的RMSE随样点数量的降低而增大; 采用限制最小采样间距的方法降低样点数量, 当样点数量由300个降至250个时, RMSE显著降低。之后随样点数量的进一步降低而增大(图5), 但与全部351个样点的预测结果(RMSE=0.988)相比, 降低样点数量后采样方案的预测误差均要低于全部样点的预测误差。普通Kriging预测SOM的空间分布与2个因素密切相关, 首先是半方差函数推断的空间变异结构的可靠性, 其次是样点对研究区覆盖的均匀性和完整性。在空间变异结构推断可靠的条件下, 样点数量越多、空间分布越均匀、覆盖越完整, 则预测精度越高^[23]。从本研究的结果来看(图5), 300个样点时, 完全随机抽样与限制最小采样间距抽样的预测误差差异不大, 主要是由于两种抽样方法推断的变异结构中随机性组分比例相近(表1), 随着样点数量进一步降低至250、200、140个时, SOM含量空间预测RMSE逐渐增大, 但限制最小采样间距抽样的预测RMSE要低于相对应样点数的完全随机抽样方法, 这主要是由于限制最小采样间距抽样推断的 C_0/C_0+C 较完全随机抽样要低(表1), 并且样点分布更为均匀; 而100个样点时, 尽管限制最小采样间距抽样推断的 C_0/C_0+C 较完全随机抽样要低得多, 但由于样点数量已经很少, 从而导致预测误差差异不大。通过限制最小采样间距减少样点至250个时, 尽管推断的 C_0/C_0+C 并非最小(表1), 但SOM空间预测的RMSE最低, 相对全部样点误差降低了6%, 其主要原因是相对完全随机抽样而言, 限制最小采样间距抽取的250

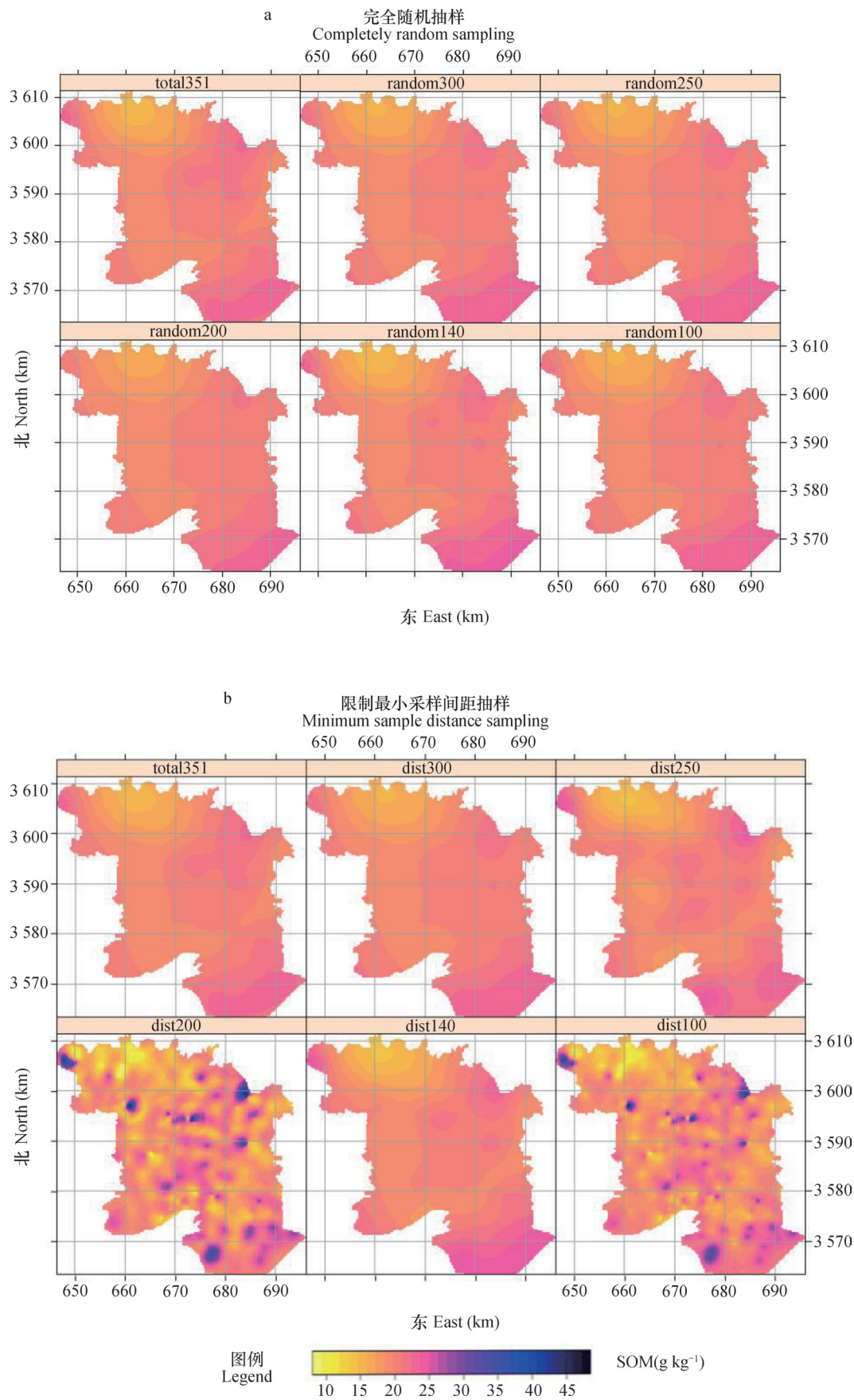


图4 两种抽样方式下不同样点数量的有机质空间分布图 (100次抽样预测结果的平均值)

Fig. 4 SOM spatial distribution map relative to number of sampling sites and sampling method (average of 100 kriged maps)

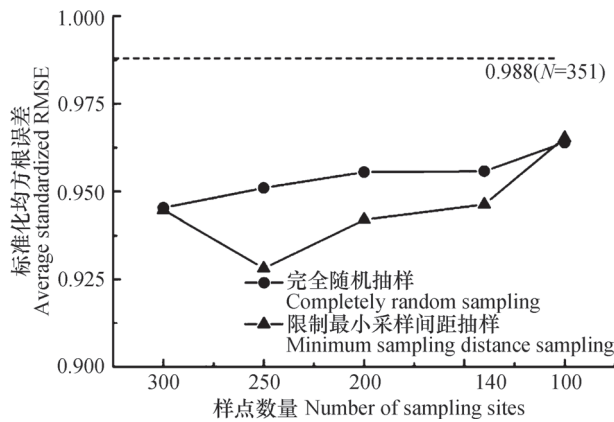


图5 不同样点数量及抽样方法的土壤有机质空间预测交互验证平均标准化RMSE (100次预测结果的平均值)

Fig. 5 Cross-validated mean standardized RMSE of spatial prediction of SOM relatively to number of sampling sites and sampling methods (average of 100 predicting results)

个样点更好地兼顾了变异结构推断的可靠性、样点分布的均匀性及空间覆盖的完整性。由此可见, 为了实现样点密度与变异尺度相匹配, 合理设置土壤采样点的间距及样点数量较单纯地增加采样点数量更为重要。

3 结 论

在南京市六合区SOM的空间变异表达方面, 样点数量并非越多越好, 适当减少样点数量以便降低与SOM含量变异尺度不匹配的样点对变异结构推断的影响是提高SOM空间变异结构推断可靠性的途径之一; 相对完全随机抽样而言, 限制最小采样间距抽样能在一定程度上降低空间异常样点对SOM空间变异结构推断的影响并且空间覆盖均匀, 更有利于在变异结构推断可靠的前提下提高SOM的空间预测精度; 在土壤样点布设中, 为了实现样点密度与SOM变异尺度相匹配, 合理设置土壤采样点的间距及样点数量较单纯地增加采样点数量更为重要。

参 考 文 献

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000. Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [2] Li Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? Geoderma, 2010, 159 (1): 63—75

- [3] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于 RBF 神经网络的土壤有机质空间变异研究方法. 农业工程学报, 2010, 26 (1): 87—93. Li Q Q, Wang C Q, Yue T X, et al. Method of spatial variety of soil organic matter based on radial basis function neural network (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26 (1): 87—93
- [4] Yu D S, Zhang Z Q, Yang H, et al. Effect of soil sampling density on detected spatial variability of soil organic carbon in a red soil region of China. Pedosphere, 2011, 21 (2): 207—213
- [5] 田康, 赵永存, 徐向华, 等. 不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征——基于定位试验数据的Meta分析. 生态学报, 2014, 34 (13): 3735—3743. Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. A meta-analysis of field experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different fertilization treatments in uplands of China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (13): 3735—3743
- [6] 潘成忠, 上官周平. 土壤空间变异性研究评述. 生态环境, 2003, 12 (3): 371—375. Pan C Z, Shanguan Z P. Review of the research on soil spatial variability (In Chinese). Ecological Environment, 2003, 12 (3): 371—375
- [7] Huang B, Sun W, Zhao Y, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. Geoderma, 2007, 139 (3): 336—345
- [8] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用. 北京: 中国农业出版社, 2006. Shi Z, Li Y. The application of geostatistics in soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2006
- [9] 王志刚, 赵永存, 黄标, 等. 采样点数量对长三角典型地区土壤肥力指标空间变异解析的影响. 土壤, 2010, 42 (3): 421—428. Wang Z G, Zhao Y C, Huang B, et al. Effects of sample size on spatial characterization of soil fertility properties in an agricultural area of the Yangtze River delta region, China (In Chinese). Soils, 2010, 42 (3): 421—428
- [10] 赵彦锋, 陈杰, 齐力, 等. 不同采样尺度下土壤图和Kriging 法的空间估值精度比较——以砂姜黑土典型地区的研究为例. 土壤通报, 2011, 42 (4): 872—878. Zhao Y F, Chen J, Qi L, et al. The comparison of soil map and Kriging methods for spatially prediction precision of soil properties with different sample spacings—A case of Shajiang Black Soil area (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (4): 872—878
- [11] 王珂, 沈掌泉, Jong S.B., 等. 精确农业田间土壤

- 空间变异与采样方式研究. 农业工程学报, 2001, 17 (2): 33—36. Wang K, Shen Z Q, Jong S B, et al. Spatial variants and sampling strategies of soil properties for precision agriculture (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2001, 17 (2): 33—36
- [12] 赵倩倩, 赵庚星, 姜怀龙, 等. 县域土壤养分空间变异特征及合理采样数研究. 自然资源学报, 2012, 27 (8): 1382—1391. Zhao Q Q, Zhao G X, Jiang H L, et al. Study on spatial variability of soil nutrients and reasonable sampling number at county scale (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2012, 27 (8): 1382—1391
- [13] 姚丽贤, 周修冲, 蔡永发, 等. 不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及其推估精度研究. 土壤, 2004, 36 (5): 538—542. Yao L X, Zhou X C, Cai Y F, et al. Spatial variability of soil properties at different sampling intensities and accuracy of their estimation (In Chinese). Soils, 2004, 36 (5): 538—542
- [14] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. 土壤, 2004, 36 (4): 376—381. Lei Y W, Wei C Z, Li J H, et al. Characters of soil nutrient spatial variability in different scale (In Chinese). Soils, 2004, 36 (4): 376—381
- [15] 李中元. 贵州喀斯特山区村级尺度下农田土壤养分空间变异与采样设计研究. 贵阳: 贵州大学农学院, 2008. Li Z Y. Study on the soil nutrients spatial variability and reasonable distances of soil sampling design under the village level scale of Karst regions in Guizhou Province (In Chinese). Guiyang: College of Agriculture, Guizhou University, 2008
- [16] Webster R, Welham S J, Potts J M, et al. Estimating the spatial scales of regionalized variables by nested sampling, hierarchical analysis of variance and residual maximum likelihood. Computers & Geosciences, 2006, 32 (9): 1320—1333
- [17] 史照良. 江苏省地图集. 北京: 中国地图出版社, 2004. Shi Z L. Atlas of Jiangsu Province (In Chinese). Beijing: Sinomaps Press, 2004
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [19] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例. 土壤学报, 2004, 41 (1): 20—27. Liu F C, Shi X Z, Yu D S, et al. Mapping soil properties of the typical area of Taihu Lake watershed by geostatistics and geographic information systems—A case study of total nitrogen in topsoil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (1): 20—27
- [20] 周成虎, 裴韬, 等. 地理信息系统空间分析原理. 北京: 科学出版社, 2011. Zhou C H, Pei T, et al. Principles of geographic information system spatial analysis (In Chinese). Beijing: Science Press, 2011
- [21] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. Geoderma, 1999, 89 (1): 1—45
- [22] 苏晓燕, 赵永存, 杨浩, 等. 不同采样点数量下土壤有机质含量空间预测方法对比. 地学前缘, 2011, 18 (6): 34—40. Su X Y, Zhao Y C, Yang H, et al. A comparison of predictive methods for mapping the spatial distribution of soil organic matter content with different sampling densities (In Chinese). Earth Science Frontiers, 2011, 18 (6): 34—40
- [23] Simbahan G C, Dobermann A. Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping. Geoderma, 2006, 133 (3): 345—362

EFFECT OF NUMBER OF SAMPLING SITES ON CHARACTERIZATION OF SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ORGANIC MATTER

Hai Nan^{1, 3} Zhao Yongcun^{1, 3†} Tian Kang^{1, 3} Huang Biao¹ Sun Weixia¹ Shi Xuezheng²

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

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

Abstract Soil organic matter (SOM) is an important soil component playing a critical role in various

chemical and physical processes in soil, and meanwhile, may serve as a crucial index in assessing soil carbon stock, soil fertility and soil quality of an agro-eco-system. Therefore, to reveal the law of SOM spatio-temporal variability is a precondition for realizing sustainable utilization of soil resources. Then how to collect soil samples is the first issue that has to be dealt with in quantitative expression of spatial distribution of SOM content. And moreover, characterization of SOM spatial variability is closely related to size, density and distribution of soil sampling. Changes in the number and distribution of sampling sites may directly influence accuracy of the deduction and prediction of SOM spatial variability. On the other hand, generally speaking, usually the bigger, the number of samples to be collected, the more, the human resources, material and time to be consumed in sampling and lab analysis, but if the number of sampling sites is too small, it is very likely that some important spatial information of soil properties would be missed. Consequently, it is very meaningful to find out how the number of sampling sites affects characterization of SOM spatial variability and it is of some important practical significance to have a scientific designing of soil sample collection in an attempt to save soil sampling cost.

On the basis of the 351 SOM valid data, a field experiment was laid out in Luhe County of Nanjing, Jiangsu Province to have 5 series of sampling designs, different in number of sampling sites, that is, 300, 250, 200, 140 and 100, set in line with the completely random sampling (CRS) and minimum sampling distance sampling (MSDS) methods. Based on deviations in variability deduction and spatial prediction of the 100 repeated samplings at each sampling series, effect of number of sampling sites on characterization of SOM spatial variability was explored. Results show that the nugget-to-sill ratios (C_0/Sill) of SOM derived from soil samples collected using two different sampling methods decreased with decreasing number of soil sampling sites, and it is more obvious with MSDS than with CRS, indicating that properly reducing the number of sampling sites may minimize the effect of sampling sites mismatching to SOM variation scale on variability deduction and hence improve reliability of characterization of SOM spatial variability. Comparison of SOM predictions using OK in deviation shows that using either sampling methods, RMSEs of spatial prediction, though fluctuating with decreasing number of sampling sites, were lower than that derived from all the sampling sites as a whole. The minimum RMSE was achieved when the number of sampling sites was reduced to 250 and the MSDS method was used, and about 6% lower than that of the prediction based on all the sampling sites as a whole. All the above findings imply that rationalizing the layout of sampling sites in number and density to match density of sampling sites to SOM variability scale is more important than simply increasing the number of sampling sites.

Key words Soil organic matter (SOM); Spatial variability; Completely random sampling (CRS); Minimum sampling distance sampling (MSDS); Scale matching

(责任编辑: 檀满枝)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《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：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

