

张忠启, 于东升, 胡丹, 等. 县域尺度土壤全氮空间变异及合理采样点数量[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 798-802.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.014

县域尺度土壤全氮空间变异及合理采样点数量

张忠启^{1,2}, 于东升^{2,3}, 胡丹¹, 程瑶¹

(1. 江苏师范大学城市与环境学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于2 500 m×2 500 m规则网格在江苏省沛县全县范围内采集土壤样品 212 个, 研究了土壤全氮空间变异性, 并在此基础上对揭示该县全氮空间变异性所需合理采样点数量进行了估算。研究表明, 该县全氮平均含量为 0.96 g/kg, 其 4 个主要土壤类型中, 淤土的全氮含量最高, 轻盐碱土含量最低, 分别为 1.08 g/kg、0.81 g/kg, 而沙土和两合土居于两者之间; 从空间分布来看, 该县中东部和西北部地区全氮含量较高, 而西南部和北部地区含量较低; 在 5%、10% 和 15% 三种设定误差等级及 95% 和 90% 两个置信水平上, 估算全县土壤全氮变异性所需的合理采样点数量分别为 152、38、17 和 107、27、12。本研究结果可为区域土壤调查方案的制定提供参考。

关键词: 土壤全氮; 空间变异; 合理采样点数量; 县域尺度

中图分类号: S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0798-05

Spatial variability and reasonable sampling size of soil total nitrogen at county scale

ZHANG Zhong-qi^{1,2}, YU Dong-sheng^{2,3}, HU Dan¹, CHENG Yao¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, 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: On the basis of regular grids of 2 500 m×2 500 m, 212 soil samples were collected throughout Peixian county of Jiangsu province, and the soil total nitrogen (TN) variability was analyzed and the reasonable sampling size was estimated in the study area. The results showed that the mean value of TN in Peixian county was 0.96 g/kg. Among the four main soil genres, miry soil had the largest TN content (1.08 g/kg), light saline soil had the least content (0.81 g/kg), and the contents of sandy soil and mixed soil were in between. The mid-east and northwest region had higher TN content, while the southwest and north region had lower TN content. At two confidence levels of 95% and 90%, the reasonable sampling sizes of TN were 152, 38, 17 and 107, 27, 12 with three estimated error levels of 5%, 10% and 15% respectively.

The results is valuables for making regional soil survey plans.

Key words: soil total nitrogen; spatial variability; reasonable sampling size; county scale

收稿日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201213、41571206); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目(Y20160008); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划重点项目(201410320036Z)

作者简介: 张忠启(1978-), 男, 江苏丰县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤资源与环境方面的研究。(E-mail) zhangzq128@126.com

通讯作者: 于东升, (E-mail) dshyu@issas.ac.cn

氮素是作物生长发育所必需的营养元素, 也是陆地生物圈最普遍的限制因素^[1-3], 在维持农业生态系统的组成、结构和功能中发挥着重要的作用^[4-5], 是评价土壤质量的重要指标之一^[6], 其空间

变异性研究受到土壤学家的重视。由于土壤氮素受到复杂的成土因子和日益增强的人类活动的影响,通常具有较强的空间变异性^[7-8],掌握其空间变异性是制定合理农业和环境管理措施的前提。当前,揭示土壤氮素的空间变异性依然主要是通过野外土壤样品采集和实验室分析,以获得区域土壤氮素的空间变异特征^[9]。通常土壤采样点数量愈多,揭示的土壤氮素空间分布的不确定性愈小,反之不确定性愈大^[10]。然而,土壤采样点的多少直接关系到土壤氮素的采样和实验室分析成本。因此,布设较合理采样点数量,可既节省研究成本又能高效揭示土壤属性的空间变异特征,已成为当前土壤学的重要研究内容。鉴于此,本研究选择江苏省重要的商品粮生产基地沛县作为研究区,通过全县高密度采样,研究潮土区县域土壤全氮空间分布特征及高效揭示其变异性的合理采样点数量,为潮土区未来土壤调查提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沛县位于江苏省最北端,地处东经 116°41'~117°09',北纬 34°28'~34°59',总面积约 1 291 km²。北与山东省鱼台县毗邻,西和南分别与江苏丰县和铜山县接壤,东临微山湖,大沙河从其西部穿过(图 1)。该地区属暖温带半湿润季风气候,气候温和,四季分明,年日照时数和无霜期均较长,年平均降水量 766 mm,年平均气温为 13.8℃。全县属黄泛冲积平原,地势较为平坦,西南略高于东北,土地利用方式以旱地和水田(稻-麦轮作)为主,林果园零散分布。黄泛冲积物为本县土壤的主要成土母质,东部沿湖低洼区以湖相沉积物为成土母质。该地土壤为潮土类,包括黄潮土和盐潮土 2 个亚类,其中又以沙土、两合土、淤土和轻盐碱土 4 个土属为主。该地区主要种植作物为小麦、玉米、水稻、大豆和棉花等^[11]。

1.2 土壤样品采集及实验室分析

本研究所用土壤样品分为 2 个部分:预测样点和验证样点。预测样点通过规则网格法在沛县范围内采集土壤样品,网格大小为 2 500 m×2 500 m,在靠近网格中心位置取样,具体做法为在中心点周围 50 m 范围内的 4~5 个点取土,充分混合后用四分法取 500 g 作为 1 个土壤样品,共计 212 个($n=212$),

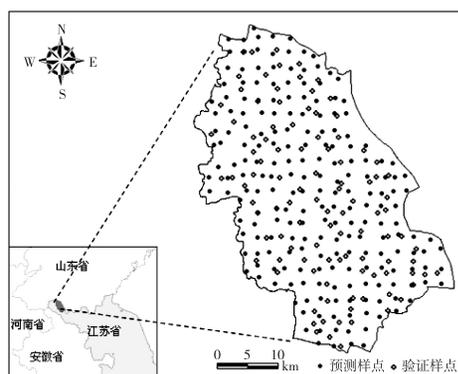


图 1 研究区位置及采样点空间分布图

Fig.1 Location of study area and sampling sites

该部分土壤样品用于进行土壤全氮的空间预测。验证样点是在全县范围内随机均匀布设,共采集样点 89 个($n=89$),用于土壤全氮空间预测的不确定性评价。所有土壤样品均在 2009 年 7 月份农作物收割后采集,采集深度均为 0~20 cm,并使用 GPS 记录各采样点的经纬度坐标,同时描述其土壤类型、成土母质和土地利用等有关信息。土壤全氮含量用半微量开氏法测定^[12]。

1.3 土壤全氮的空间预测及不确定性评价

利用土壤类型信息和克里格相结合的方法(KST)对研究区土壤全氮进行空间插值。先将土壤样品按土壤类型分为沙土、两合土、淤土和轻盐碱土 4 种类型,进而每个样品的土壤全氮含量值 $z(x_{kj})$ 可以被分为土壤类型均值 $\mu(t_k)$ 和残差 $r(x_{kj})$ 2 个部分,见公式(1)。

$$z(x_{kj}) = \mu(t_k) + r(x_{kj}) \quad (1)$$

式中, t_k 为所属土壤类型, x_{kj} 是样品 $z(x_{kj})$ 所在位置。通过此方法将各样点全氮含量值的方差分为 2 个部分,即类型内的残差方差和类型间均值方差,其中残差方差反映的是土壤类型内部全氮的变异性,均值方差反映的是类型间的变异性^[7]。进而将全氮残差值作为新的随机变量进行克里格预测,其变异函数 $\gamma_r(h)$ 和未知点 x_{kj} 的预测方法见公式(2)和(3):

$$\gamma_r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [r(x_{kj}) - r(x_{kj} + h)]^2 \quad (2)$$

$$r^*(x_{kj}) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n(j)} \lambda_{kj} z(x_{kj}) \quad (3)$$

各未知点的全氮含量预测值 $z^*(x_{kj})$ 为残差估计值与 $r^*(x_{kj})$ 类型均值 $\mu(t_k)$ 之和,即 $Z^*(x_{kj}) = \mu(t_k) +$

$r^*(x_{kj})$ 。

土壤全氮空间预测的不确定性通过 89 个验证点进行评价。通过验证样点的预测与实测值散点图回归方程的相关系数 (r) 及其均方根误差 ($RMSE$)^[2] 进行评价, r 值越大或 $RMSE$ 越小, 则预测精度越高, 反之精度越低。

1.4 合理采样点数量的确定

通过区域随机抽样理论确定研究区全氮合理采样点数量 n ^[13], 计算公式为:

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0/N} \quad (4)$$

$$n_0 = \left| \frac{t \times S}{\sigma} \right|^2 \quad (5)$$

式中, S 为总体全氮平均含量标准偏差, N 为总样点数量, t 是依据特定置信水平和相应自由度在 t 值表查得的检验值, σ 为相对于土壤全氮平均含量水平的误差水平。

表 1 不同土壤类型全氮含量的统计特征值

Table 1 Descriptive statistics of soil total nitrogen content in various soil types

土壤类型	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数	偏态系数	峰度系数
轻盐碱土	6	0.69	0.91	0.81c	0.09	0.11	-0.95	1.14
两合土	124	0.37	1.65	0.90bc	0.27	0.29	-0.05	0.43
沙土	42	0.33	1.67	1.02ab	0.31	0.30	0.35	0.72
淤土	40	0.47	1.82	1.08a	0.34	0.32	-0.33	0.73
总计	212	0.33	1.82	0.96	0.30	0.31	0.16	0.33

任意两类型间全氮含量无相同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 全氮数据的地统计分析

由于土壤类型间全氮含量差异显著 ($P < 0.05$) (表 1), 直接使用克里格方法进行空间预测会产生较强的平滑效应, 为减少误差本研究采用 KST 方法用各样点全氮含量减去其所属类型均值后的残差值进行克里格差值和空间预测。分析结果表明, 残差数据的半方差函数符合指数模型 (图 2), 其拟合模型的块金值 (C_0) 为 0.312, 基台值为 1.009, 块金方差与基台值之比 ($C/C_0 + C$) 为 0.691, 表明其空间自相关水平为中等强度^[7, 16]。模型的变程为 7 890 m, 说明其最大自相关距离为 7 890 m, 超过本研究所设定的采样间距 (2 500 m), 说明本研究的采样间距是可以满足揭示全县范围全氮含量的地统计要求。

本研究 89 个验证样点全氮含量实测值与预测值

2 结果与分析

2.1 土壤全氮含量的描述性统计

表 1 是研究区各土壤类型预测样点的土壤全氮含量统计结果。可以看出在 212 个采样点中, 全氮含量的最大值和最小值分别为 1.82 g/kg 和 0.33 g/kg, 前者约为后者的 5.5 倍。其全氮含量平均水平为 0.96 g/kg, 低于全国平均水平^[14]; 全部样点全氮含量的变异系数为 0.31, 按照变异系数的水平等级, 属于中等水平, 跟其他地区的研究结果类似^[15]。从 4 种主要的土壤类型看, 全氮含量的大小顺序依次为淤土 > 沙土 > 两合土 > 轻盐碱土, 其中淤土的含量约为轻盐碱土的 1.33 倍。均值比较结果表明, 4 种土壤类型间全氮含量均值差异达显著水平 ($P < 0.05$)。各土壤类型中淤土全氮的变异系数最高, 轻盐碱土最低, 沙土和两合土居于两者之间。4 种土壤类型及全部样点的全氮数据分布均大致呈正态分布。

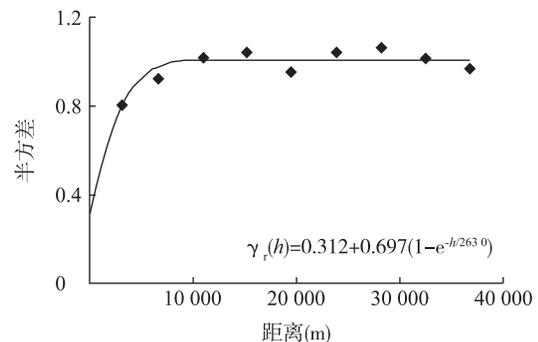


图 2 预测样点全氮残差数据的半方差函数图

Fig.2 Semivariance of residual data of total nitrogen prediction in the sampling sites

的散点分布见图 3。预测值和实测值的回归方程为: $Y = 0.433x + 0.547$, 方程斜率为 0.433。预测值和实测

值的相关系数为 0.53,达到显著水平($P<0.05$)。从预测结果的均方根误差看,其 $RMSE$ 值为 0.22 g/kg,约为全部预测样点全氮均值的 23%,表明空间插值结果能较准确地反映全县全氮空间分布特征。

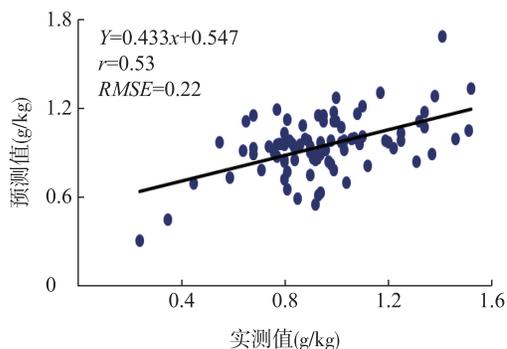


图3 验证点全氮预测值与实测值散点图

Fig.3 Scattered plot of predicted and measured nitrogen content of sampling sites for validation

2.3 土壤全氮空间分布特征

通过结合土壤类型信息的克里格方法(KST)预测得到全县土壤全氮空间分布特征(图4)。从空间分布来看,土壤全氮存在较强的空间变异特征,研究区北部和西南部地区全氮含量较低,而中东部和西北部地区含量较高。从土壤类型的分布来看,该县轻盐碱土和两合土的土壤全氮含量整体偏低,相对而言,淤土的全氮含量较高,其次是沙土。同时,该县土壤全氮含量也与土地利用方式有密切关系,其中东部和西北部地区的水旱轮作区土壤全氮含量明显高于旱作区。

2.4 土壤全氮合理采样点数量

依据区域随机抽样理论,设定95%和90%2种置信水平,以及相对于全县全氮含量均值的5%、10%和15%3种允许误差等级,分别计算了揭示全县土壤全

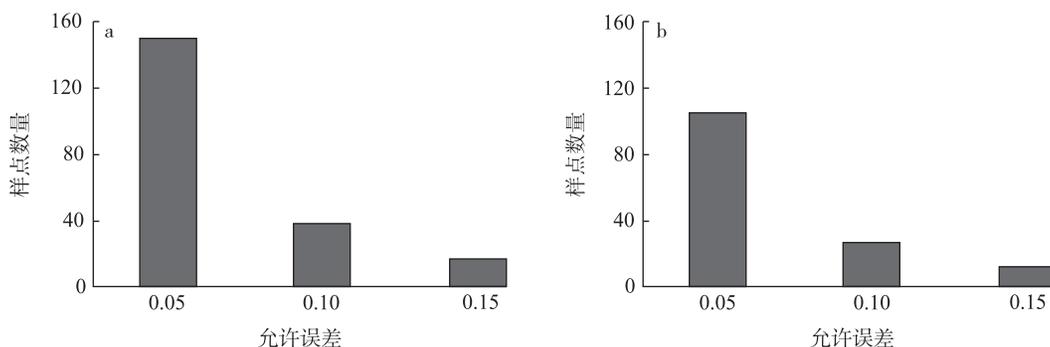


图5 95%(a)和90%(b)置信水平的合理采样点数量

Fig.5 Reasonable sampling size at 95% (a) and 90% (b) confidence levels

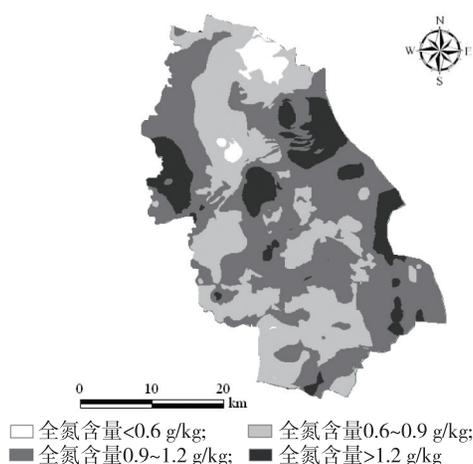


图4 研究区全氮空间分布预测图

Fig.4 Predicted spatial distribution of total nitrogen in study area

氮空间分布所需的合理采样点数量(图5)。基于95%的置信水平,若允许5%、10%和15%的误差,全县所需采样点数量应分别为152、38和17;而在90%置信水平上,3种允许误差条件下所需采样点数量分别为107、27和12。在两置信水平上,所需采样点数量均随允许误差的增加而迅速减少,其中误差由5%增加为10%时,采样点减少幅度最大。同时,置信水平由95%降为90%时,3种允许误差等级所需采样点数量均大幅减少,样点数分别减少45、11和5。

3 讨论

本研究通过对江苏省沛县212个土壤采样点的统计分析发现,土壤类型对土壤全氮含量有着重要影响。研究区4种主要土壤类型中,淤土的全氮含量最高(为1.08 g/kg),轻盐碱土含量最低(为0.81 g/kg),沙土和两合土全氮含量分别为1.02 g/kg和

0.90 g/kg,居于前两者之间。通过土壤类型和克里格相结合的 KST 方法得到了研究区全氮空间分布图,发现该县中东部和西北部靠近水源的地方全氮含量较高,而以旱地为主的西南部和北部地区含量较低。该县北部地区的土壤类型主要为轻盐碱土,表层土壤盐分含量较高,不利于作物生长,该区域一直是农作物低产区,影响农户耕作积极性和养分投入,导致该地区土壤肥力水平在该县一直较为低下。西南部地区的土壤类型主要为沙土,粘粒含量较少,不利于水肥保持,其养分含量亦一直不高。而中东部和西北部地区全氮含量较高,主要与其靠近水源及种植水稻有密切关系。中东部地区靠近微山湖,其成土母质为湖相沉积,质地较细,肥力水平较高,而西北部地区位于大沙河东岸。由于便于灌溉,中东部和西北部地区种植模式多为稻-麦轮作,由于种植水稻的经济收益较高,农户的积极性较高,农户的投入较多,加上水田土壤的水气条件优越,该地区的土壤肥力一直高于其他地区。这说明在进行土壤全氮空间预测时,土壤类型间全氮含量的差异不能忽视,若直接通过普通克里格插值方法预测该区域全氮空间分布,该方法固有的平滑效应会影响空间预测的精度,增加预测结果的不确定性,利用土壤类型信息作为克里格方法的辅助因子可有效提高全氮的空间预测精度。除此之外,土地利用方式对全氮空间分布也有较大影响,研究发现同一土壤类型中,水旱轮作种植模式的全氮含量明显高于旱作地区,这也是今后预测该地区土壤全氮空间分布时需要引起注意的。

合理确定采样点数量是制定区域土壤调查方案的重要内容,而区域土壤属性的空间变异特征是确定合理采样点数量的基础。通过获得的全县土壤全氮数据,在 95%和 90% 2 个置信水平上估算了 5%、10%和 15% 3 种设定的估算误差等级所需的合理采样点数量分别为 152、38、17 和 107、27、12,表明在土壤全氮变异性大小确定的前提下,置信水平的设定和调查采样的允许误差会对采样点数量的估算结果有较大影响。可见,在对揭示全县土壤全氮变异性所需样点数量的估算时,除了区域土壤全氮含量的方差或变异性大小对合理采样点数量的确定有重要影响外,置信水平和允许误差的设定对计算揭示区域土壤全氮空间分布所需的采样点数量也有着不

可忽视的影响。因此,在为揭示区域土壤全氮变异性而制定土壤采样方案时,采样点数量的确定应结合土壤全氮的空间变异性大小,研究所需的置信水平和允许误差来共同确定区域合理采样点数量。

参考文献:

- [1] VITOUSEK P M, HOWARTH R W. Nitrogen limitation on land and in the sea-how can it occur [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87-115.
- [2] WRIGHT A L, HONS F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 141-147.
- [3] 梁斌,赵伟,杨学云,等.小麦-玉米轮作体系下氮肥对长期不同施肥处理土壤氮含量及作物吸收的影响[J].*土壤学报*, 2012, 49(4): 748-757.
- [4] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J].*土壤学报*, 2008, 45(5): 778-783.
- [5] 陈书信,王国兵,阮宏华,等.苏北沿海不同土地利用方式土壤氮矿化季节变化特征[J].*生态学杂志*, 2014, 33(2): 276-282.
- [6] 刘骁倩,涂仕华,孙锡发,等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J].*生态学报*, 2013, 33(17): 5210-5218.
- [7] 张忠启,史学正,于东升,等.南方红壤丘陵区土壤有机质和全氮含量的空间预测研究[J].*生态学报*, 2010, 30(19): 5338-5345.
- [8] 王丹丹,岳书平,林芬芳,等.东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应[J].*土壤学报*, 2012, 49(4): 625-635.
- [9] ZHANG Z Q, YU D S, SHI X Z, et al. Effect of sampling classification patterns on SOC variability in the red soil region, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110: 2-7.
- [10] YU D S, ZHANG Z Q, SHI X Z, et al. Effect of sampling density on detecting the temporal evolution of soil organic carbon in hilly red soil region of South China [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 207-213.
- [11] 江苏沛县土壤普查办公室.沛县土种志[M].北京:中国农业出版社,1985:5-7.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:108-111.
- [13] SHARON L L. Sampling: design and analysis[M]. Beijing: China Statistics Press, 2002: 39-42.
- [14] 张福锁,崔振岭,王激清,等.中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J].*植物学通报*, 2007, 24(6): 687-694.
- [15] 杨东,刘强.基于 GIS 和地统计学的张掖市甘州区土壤全氮、有机质的空间变异特征分析[J].*土壤通报*, 2011, 42(3): 593-597.
- [16] 张建杰,李富忠,胡克林,等.太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素[J].*生态学报*, 2009, 29(6): 3163-3172.

(责任编辑:张震林)