

# 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征\*

张世熔<sup>1,2</sup> 孙 波<sup>1†</sup> 赵其国<sup>1</sup> 李 婷<sup>2</sup> 陈明明<sup>2</sup> 黄丽琴<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014)

**摘 要** 利用 GPS 和 GIS 技术,研究了江西省兴国县湓水河流域小、中和大 3 种尺度下土壤氮素的空间分布特征。结果表明,土壤全氮和有效氮在小、中和大 3 种尺度下呈正态或对数正态分布,但二者均值随研究尺度的扩大而增加。其中,土壤全氮平均含量分别为  $0.60 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.73 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.83 \text{ g kg}^{-1}$ ,有效氮含量为  $64.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $66.3 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $80.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 。这 3 种尺度区土壤全氮和有效氮含量的空间变异函数参数和空间分布特征并不相同。因此,二者空间变异表现出明显的尺度效应。网格抽样和分层抽样相结合的采样方法均适合丘陵区小、中和大 3 种尺度下土壤氮素分布的研究。它们的合理采样数在 90%置信度下分别为原采样方案样点数的 82.6%、71.2% 和 58.1%,在 95%置信度下分别是原采样方案样点数的 95.7%、94.2% 和 89.2%。

**关键词** 土壤全氮;土壤有效氮;空间变异;尺度;丘陵区

**中图分类号** S154.1

**文献标识码** A

氮素是植物生长的必需元素,其迁移不仅影响区域大气和水体环境<sup>[1~4]</sup>,而且也影响生态过程。在农场实施精确施肥管理以及进行区域氮素迁移环境风险评价中均需要了解不同区域尺度下土壤氮素的空间变异及其变化。已有研究表明,氮素等土壤养分受植被、地形、土地利用和施肥管理措施的影响而导致其明显的空间变异性<sup>[5,6]</sup>,且在不同尺度上的变化特征以及主要影响因子也不尽相同<sup>[7~9]</sup>。由于土壤氮素含量的空间变异性是引起区域氮素迁移转化过程模拟不确定性的一个重要原因<sup>[10~12]</sup>,因此模拟与氮素迁移有关的生态过程不仅要考虑研究的空间尺度<sup>[13,14]</sup>,而且还要设计与之适应的调查样本数<sup>[15,16]</sup>。所以,根据区域的自然和社会经济条件进行样点设计,了解不同空间尺度下氮素的分布特征及其控制因子是研究区域氮素循环的重要基础工作。但是,相关研究只是近年来才开始有所报道<sup>[16~18]</sup>。

我国南方红壤丘陵区地形复杂、土壤和土地利用方式多变,氮素等土壤养分变异较大<sup>[19]</sup>,且存在随水土流失的风险<sup>[20]</sup>。在流域水土保持和综合管理方面,需要根据土壤氮素的空间特征进行土地利用规划和土壤养分管理。湓水河流域位于江西省兴国县东北部,是我国南方丘陵的典型分布地区。20 世纪 70

年代流域内水土流失曾十分严重,土壤肥力衰退。但从 1983 年起,该流域成为中国南方丘陵水土流失治理与生态环境重建的试验区。经过近 20a 的封山育林,目前该区水土流失面积明显减少,森林覆盖率从 28.8% 提高到 56.5%,生态环境明显改善。本文在前期分析流域尺度土壤有机碳时空变化的基础上<sup>[21]</sup>,研究不同尺度下土壤氮素含量的分布特征,分析不同尺度采样方法的精度,为评价南方丘陵区水土流失治理对土壤和环境的影响提供采样方法的依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

大尺度研究区为江西省兴国县东北部的湓水河流域(图 1a),地理位置位于东经  $115^{\circ}30'50'' \sim 115^{\circ}52'12''$ ,北纬  $26^{\circ}18'04'' \sim 26^{\circ}36'48''$ ,流域面积  $579.3 \text{ km}^2$ 。区内水系发达,呈树枝状。地形为东北高西南低,流域最大高差 965 m。流域内各地貌分布面积比例分别为低丘 21%,中丘 27%,高丘和低山 42%,河谷平原 10%。气候类型为中亚热带湿润季风气候,年均降雨量 1 500 mm,多集中在 4 月至 6 月,年均气温为 18.9 °C,1 月平均气温 7.2 °C,7 月平

\* 国家自然科学基金重大项目(30590381)和国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121108)资助

† 通讯作者, E-mail: bsun@mail.issas.ac.cn

作者简介:张世熔(1963~),男,四川泸县人,教授,博士。主要从事农业资源调查及评价。E-mail: rrszol@163.com

收稿日期:2006-05-22;收到修改稿日期:2006-08-10

均气温 29.3。植被主要为常绿阔叶林和以马尾松林为主的针叶林。土壤母质主要是花岗岩残坡积物、坡残积物和第四系近代河流冲积物,局部有石灰岩和千枚岩残坡积物分布。其土壤类型主要以水稻土、红壤为主。

中尺度研究区位于湓水河流域中部龙岗镇龙岗村(图 1b),是大尺度研究区内地貌、水土流失治理和土地利用均具有代表性的农林交错带,其面积为 2 636 hm<sup>2</sup>。

小尺度研究区位于中尺度研究区中包含有丘谷两种微地貌的农林交错带条形样区(图 1c),面积为 3.88 hm<sup>2</sup>。区内土地利用类型分布有水田、旱地、果园、有林地、疏林地、灌木林地和荒草地。

## 1.2 土壤样品采集与分析

土壤样点根据研究区的自然环境及社会经济差

异采用不同精度的网格抽样和分层抽样在比例尺为 1:10 000 的地图上进行设计,在野外到达预定调查点采取样品,但若遇房屋、裸岩等不适合采样点则移位采样。采样时均用 GPS map 76(差分精度 < 5m)进行定位(图 1)。在小、中和大 3 个不同尺度研究区分别采取土样 46 个(样点间距约为 40 m)、52 个(样点间距约为 500 m 或 1000 m)和 74 个(样点间距约为 4000 m)。

土壤全氮(TN)含量分析采用半微量开氏法,有效氮(AN)含量分析采用碱解扩散法。

## 1.3 插值分析

在 ArcGIS9.0 平台上,土壤全氮和有效氮含量的半方差分别用球状、指数和高斯等模型进行拟合,根据拟合误差大小选出最适模型,然后用普通克里格法(Ordinary kriging)内插获得等值线图。

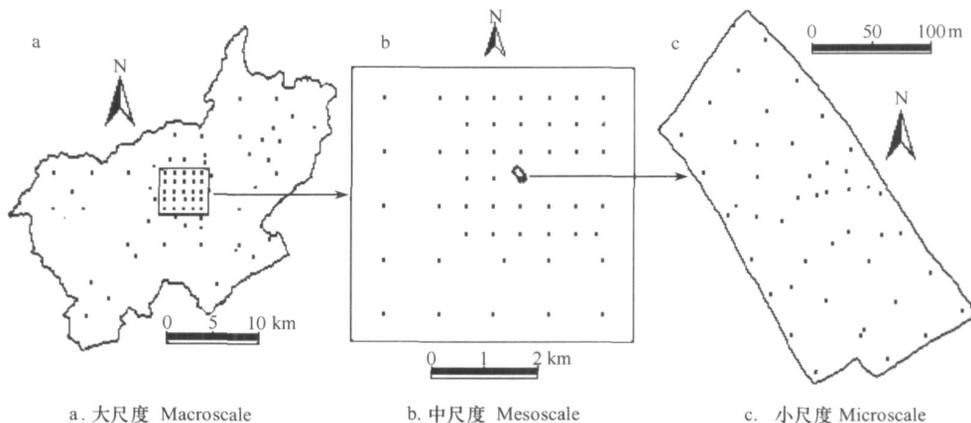


图 1 不同尺度采样区土壤样点分布

Fig. 1 Scenarios for soil sampling points in the regions of the micro, meso and macro scales

## 1.4 土壤合理样点数的确定方法

按照区域随机抽样理论<sup>[22]</sup>,区域土壤合理样点数  $n$  的计算公式为:

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

式(1)中, 
$$n_0 = \left( \frac{t \times S}{\bar{x}} \right)^2 \quad (2)$$

式(2)中 
$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式(1)、式(2)和式(3)中  $x_i$  为样点  $i$  的氮素含量;  $\bar{x}$  为总体样本的平均值;  $t$  为根据自由度在  $t$  统计表上特定置信度下的检验值;  $\bar{x}$  为平均含量水平  $\bar{x}$  的最少偏差;  $N$  为总体样点数目;  $S$  为总体平均含量标准偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤氮素含量的统计特征

2.1.1 土壤全氮 在统计软件 SPSS 平台上采用单一样本 K-S 检验的结果表明,江西兴国县湓水河流域小、中和大 3 种不同尺度下土壤全氮含量呈正态分布或对数正态分布(表 1),它们的含量依次为  $0.60 \pm 0.54 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.73 \pm 0.49 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.83 \pm 0.50 \text{ g kg}^{-1}$ ,表现出随研究尺度或区域的扩大土壤全氮呈逐渐增加的趋势。从统计直方图的偏度看(图 2),3 种尺度区的土壤全氮含量分布均呈正偏,但就土壤全氮含量分布的正偏程度而言,小尺度最大(1.117),中尺度最小(0.457);但若从土壤全氮含量分布的峰度统计结

果看,小尺度和大尺度的数据分布集中,显得尖锐;中尺度数据分布比标准正态明显低平(-0.514)。

表 1 不同尺度下土壤全氮统计特征

Table 1 Statistical characters of soil total nitrogen in different scales

尺度 Scale	样点数 Sampling No.	K-S 值		分布类型 Distribution type	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Std. Dev.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
		K-S Value								
		Z	P							
小尺度 Microscale	46	0.718	0.682	对数正态 Lognormal	0.06	2.08	0.60	0.54	1.117	0.307
中尺度 Mesoscale	52	0.797	0.550	正态 Normal	0.10	2.10	0.73	0.49	0.457	-0.514
大尺度 Macroscale	74	0.765	0.602	正态 Normal	0.10	2.17	0.83	0.50	0.677	0.304

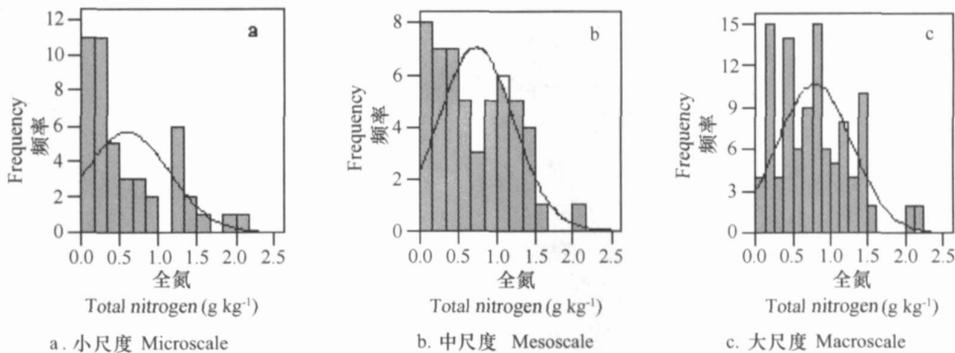


图 2 3 种尺度下土壤全氮的统计直方图

Fig. 2 Statistical histogram of soil total nitrogen content in the three scales

2.1.2 土壤有效氮 采用 K-S 统计检验表明,该流域小、中和大 3 种不同尺度下土壤有效氮 (SAN) 含量均呈正态分布 (表 2), 它们的含量依次为  $64.8 \pm 32.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $66.3 \pm 44.5 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $80.2 \pm 45.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 表现出随研究尺度或区域的扩大土壤有效氮平均含量呈逐渐增加的趋势。从统计直方图的偏度看 (图 3), 3 种尺度区的土壤有效氮含量分布

均呈正偏, 但就其正偏程度而言, 小尺度区最大 (0.997), 中尺度区最小 (0.248); 但若从土壤有效氮含量分布的峰度统计结果看, 小尺度区数据因分布集中而显得尖锐 (0.977), 中尺度区数据分布较标准正态明显低平, 大尺度区数据较为接近标准正态分布。

表 2 不同尺度下土壤有效氮统计特征

Table 2 Statistical characters of soil available nitrogen in the different scales

尺度 Scale	样点数 Sampling No.	K-S 值		分布类型 Distribution type	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Std. Dev.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
		K-S Value								
		Z	P							
小尺度 Microscale	46	1.148	0.143	正态 Normal	13.1	151.2	64.8	32.1	0.997	0.977
中尺度 Mesoscale	52	1.129	0.156	正态 Normal	3.0	148.7	66.3	44.5	0.248	-1.207
大尺度 Macroscale	74	0.717	0.683	正态 Normal	12.6	212.2	80.2	45.8	0.569	-0.136

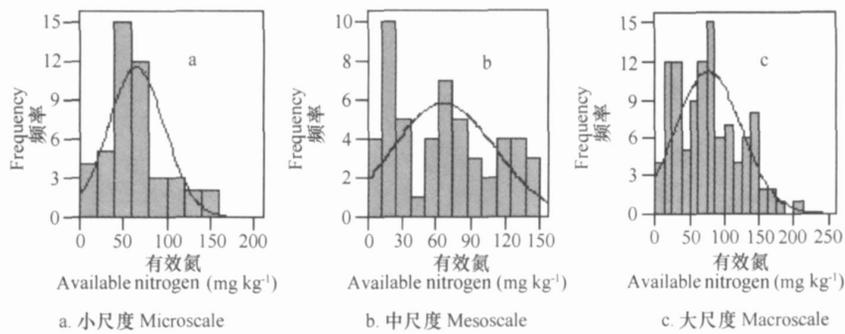


图3 3种尺度下土壤有效氮的统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of soil available nitrogen content in the three scales

## 2.2 不同尺度下土壤氮素的空间变异特征

为了观察3种尺度下土壤全氮和有效氮的空间变化特征,本文拟从它们的空间变异函数结构、空间分布和分级面积统计三个方面进行讨论。

**2.2.1 变异函数结构分析** 本研究将小、中和大3个尺度区的土壤全氮数据分别用球状、指数和高斯等模型进行变异函数的套合模型模拟。模拟结果表明,它们的空间变异都表现出明显异向性特征,且均以球状模型的拟合效果最好(表3)。其中,小尺度区球状模型的长轴轴向约为东-西向,基本与该样带小区的横坡方向一致;与坡向一致的短轴约为北-

南方向,体现了坡面地形对土壤全氮空间变异性的影响。中尺度区的长轴为北西-南东向,与丘、谷蜿蜒延伸方向接近,体现了地貌类型和土地利用类型两种因素与土壤全氮含量的空间分布关系。大尺度区的长轴则近似为北-南向,与流域内土地利用类型的延伸分布大体一致。它们的长、短轴之比分别为1.50、1.66和1.96,即随研究区的扩大由地形、母质和土地利用等引起的异向性增加。三者变异函数块金值与基台值之比介于0.22~0.73。其中,小尺度区的空间变异以结构性变异为主,但中、大尺度区则均以随机变异为主。

表3 3种尺度下土壤氮素的变异函数模型

Table 3 Semivariance models of soil nitrogen in the three scales

项目 Item	尺度 Scale	拟合模型 Fitting model	变程 Range (m)		长轴方位角 Direction of long axis (°)	C	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> / (C <sub>0</sub> + C)
			长轴 Long axis	短轴 Short axis				
全氮 Total nitrogen	小尺度 Microscale	球状 Spherical	285	190	88	0.294	0.085	0.22
	中尺度 Mesoscale	球状 Spherical	3951	2378	320	0.067	0.177	0.73
	大尺度 Macroscale	球状 Spherical	11878	6056	9	0.097	0.176	0.64
有效氮 Available nitrogen	小尺度 Microscale	球状 Spherical	285	225	99	824.93	518.87	0.39
	中尺度 Mesoscale	球状 Spherical	3749	1120	290	506.99	1431.9	0.74
	大尺度 Macroscale	球状 Spherical	15692	7687	53	519.32	1710.8	0.77

在小、中和大3种尺度区,土壤有效氮的变异函数的结构变化与同区域的全氮变化类似(表3),仅大尺度区土壤有效氮长轴轴向不同于该区全氮,为北东-南西向。它与流域内地质构造的轴向延伸方

向相似。这是因为区域地质构造影响地形、母质、土地利用类型以及水土流失程度或生态重建与恢复的程度,因而也影响土壤有效氮的分布。位于向斜槽部的区域因地貌多为平坝、冲沟或低丘,现多为农耕

地为主的农区,水土流失仍然严重,其土壤有效氮含量总体较低;向斜两翼区域因地势起伏较大,多为农林交错带,水土流失较槽部低,土壤有效氮含量比槽部高;背斜核部区因相对高差较大,多为林地或林草地,水土流失较轻,土壤有效氮含量高。这3个尺度区的长、短轴之比分别为1.27、3.35和2.04,即中尺度区的土壤有效氮异向性特征最明显。在三者的空间变异中,小尺度区仍以结构性变异为主,中、大尺

度区则以随机变异为主。

**2.2.2 空间分布** 在小尺度区,土壤全氮含量的空间分布总体特征为以该区中北部的低值( $< 0.30 \text{ g kg}^{-1}$ )带为中心(图4a),并向北、南两个方向逐渐呈带状增加至 $1.00 \sim 1.20 \text{ g kg}^{-1}$ (北部)或 $> 1.20 \text{ g kg}^{-1}$ (南部)。其分布变化趋势表明土壤全氮从丘陵顶部随地势降低至丘脚或沟谷而逐渐增加。

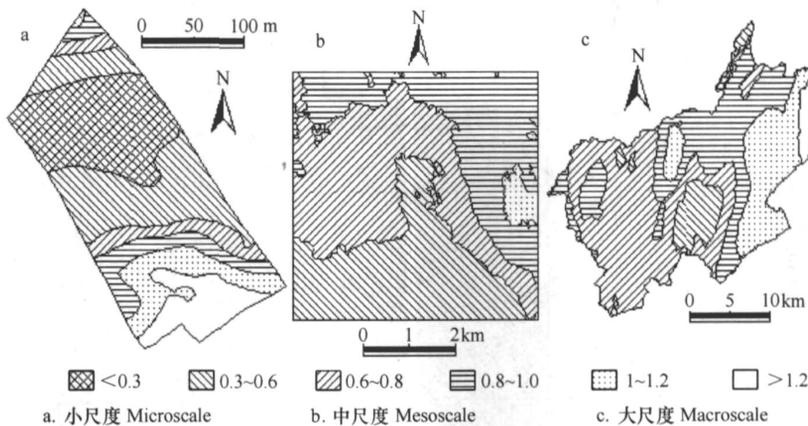


图4 3种尺度下土壤全氮的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions for soil total nitrogen in the three scales ( $\text{g kg}^{-1}$ )

在中尺度区,土壤全氮含量的空间分布特征表现为区域中部及中南部为 $0.30 \sim 0.60 \text{ g kg}^{-1}$ 的低值区(图4b),并从该低值区向东或向北两个方向呈带状或块状增加至 $1.00 \sim 1.20 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $< 0.30 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $> 1.20 \text{ g kg}^{-1}$ 两个含量级均难以成图表达。

在大尺度区,湫水河流域土壤全氮含量的空间分布呈现以区内中南部古龙岗镇南郊为低值中心( $0.30 \sim 0.60 \text{ g kg}^{-1}$ )的环状或条带状分布(图4c),并从该低值中心向四周逐渐增加。其中,从该低值中心向东,土壤全氮分别从 $0.30 \sim 0.60 \text{ g kg}^{-1}$ 逐渐增至 $> 1.20 \text{ g kg}^{-1}$ ,流域东部大面积分布全氮含量 $> 1.00 \text{ g kg}^{-1}$ 的土壤;从该低值中心向西,土壤全氮含量则明显低于流域东部,主要为 $0.60 \sim 0.80 \text{ g kg}^{-1}$ 级别分布,仅局部小区有 $0.80 \sim 1.00 \text{ g kg}^{-1}$ 级别分布。

在小尺度区,土壤有效氮含量的低值中心位于东部边缘( $40 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ ),并由此低值中心向北、西和南三个方向逐渐呈带状增加(图5a),表明了土壤有效氮从丘陵顶部随地势降低而逐渐增加的趋势。

在中尺度区,该区土壤有效氮含量除东北部均

为含量 $> 60 \text{ mg kg}^{-1}$ 的较高含量区外,其余大部分区域呈现以西南部 $> 80 \text{ mg kg}^{-1}$ 为高值中心并向两侧条带状减少的分布特征(图5b)。其中,从该高值中心向东北逐渐减少至 $40 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ ,而向西南方向则逐渐减少至 $< 40 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

在大尺度区,湫水河流域土壤有效氮含量的空间分布总体上呈现以中南部的古龙岗镇南郊为低值中心( $< 60 \text{ mg kg}^{-1}$ )的环状或条带状分布(图5c),并从该低值中心向四周逐渐增加。其中,从该低值中心向东,土壤有效氮分别从 $< 60 \text{ mg kg}^{-1}$ 逐渐增至 $> 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ,且以 $80 \sim 100 \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤分布较多;从该低值中心向西,仍以有效氮含量 $80 \sim 100 \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤分布较多,仅流域西南部一带有 $70 \sim 80 \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤分布。

**2.2.3 分级面积统计** 由图4分级面积统计结果表明(表4),3种研究区的土壤全氮不同含量级的分布面积构成比例存在差异,同一含量级在不同研究区的分布面积比例也不尽相同。其中,在小尺度研究区,由于丘顶部分为侵蚀严重的垄岗地,全氮含量 $< 0.6 \text{ g kg}^{-1}$ 的土壤占该区面积的57.63%, $> 1.0 \text{ g kg}^{-1}$ 的土壤仅占15.84%。在中尺度研究区,全氮

含量  $< 0.3 \text{ g kg}^{-1}$  和  $> 1.2 \text{ g kg}^{-1}$  两个含量级的土壤均达不到 0.01% 的上图面积, 而主要集中分布于  $0.3 \sim 0.6 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.6 \sim 0.8 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.8 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$  三个级别上。在大尺度研究区, 全氮含量  $< 0.6 \text{ g kg}^{-1}$  的土壤面积仅占 8.61%, 主要集中分布  $0.6 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$  的土壤, 且还有约 1/4 的土壤全氮含量  $> 1.0 \text{ g kg}^{-1}$ 。

由图 5 分级面积统计结果表明(表 5), 3 种研究区的土壤有效氮不同含量级的分布面积构成比例存在差异, 同一含量级在不同研究区的分布面积比例

也不尽相同。其中, 在小尺度研究区, 由于丘顶部分为侵蚀严重的垄岗地, 有效氮含量为  $50 \sim 70 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤占该区面积的 60.44%,  $70 \sim 90 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤占该区面积的 27.81%, 其余含量级的面积均很小。在中尺度研究区, 有效氮各含量级的分布比小尺度研究区相对分散, 但含量级为  $60 \sim 80 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤仍占该区面积的 48.75%。在大尺度研究区, 有效氮含量  $< 70 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤面积比例显著小于小、中尺度区, 而  $> 90.0 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤面积比例则明显扩大, 占该区面积的 37.57%。

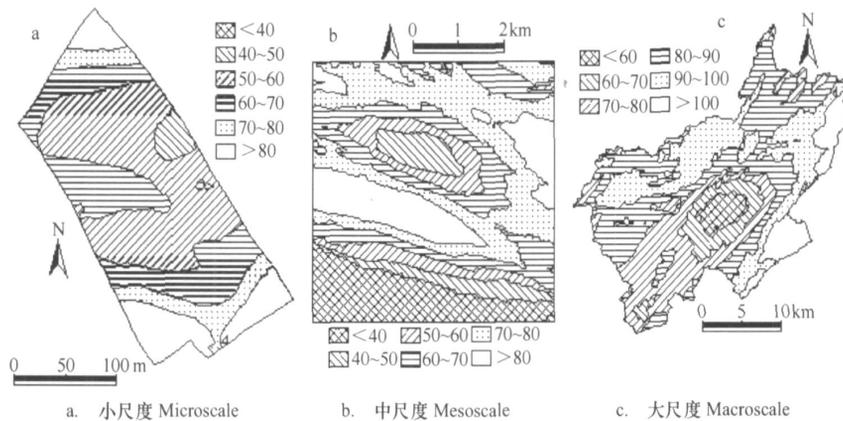


图 5 3 种尺度下土壤有效氮的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions for soil available nitrogen in the three scales ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

表 4 土壤全氮分级面积统计

Table 4 Grading statistics of soil total nitrogen contents (%)

尺度 Scale	土壤全氮 Soil total nitrogen content					
	$< 0.3$ $\text{g kg}^{-1}$	$0.3 \sim 0.6$ $\text{g kg}^{-1}$	$0.6 \sim 0.8$ $\text{g kg}^{-1}$	$0.8 \sim 1.0$ $\text{g kg}^{-1}$	$1.0 \sim 1.2$ $\text{g kg}^{-1}$	$> 1.2$ $\text{g kg}^{-1}$
小尺度 Microscale	16.18	41.45	14.65	11.88	6.67	9.17
中尺度 Mesoscale	0.00	31.00	37.32	28.76	2.92	0.00
大尺度 Macroscale	0.00	8.61	35.45	30.30	16.82	8.82

表 5 土壤有效氮分级面积统计

Table 5 Grading statistics of soil available nitrogen contents (%)

尺度 Scale	土壤有效氮 Soil available nitrogen content							
	$< 40$ $\text{mg kg}^{-1}$	$40 \sim 50$ $\text{mg kg}^{-1}$	$50 \sim 60$ $\text{mg kg}^{-1}$	$60 \sim 70$ $\text{mg kg}^{-1}$	$70 \sim 80$ $\text{mg kg}^{-1}$	$80 \sim 90$ $\text{mg kg}^{-1}$	$90 \sim 100$ $\text{mg kg}^{-1}$	$> 100$ $\text{mg kg}^{-1}$
小尺度 Microscale	0.00	3.85	30.92	29.52	13.95	13.86	7.77	0.13
中尺度 Mesoscale	15.24	8.51	10.85	20.27	28.47	12.75	3.91	0.00
大尺度 Macroscale	0.00	8.93	1.70	6.33	15.80	29.67	17.82	19.75

表 6 不同置信水平下土壤全氮和有效氮的合理样点数

Table 6 Necessary number of samples at the different confidence levels

尺度 Scale	土壤全氮 Soil total nitrogen content		土壤有效氮 Soil available nitrogen content	
	90 %置信水平	95 %置信水平	90 %置信水平	95 %置信水平
	90 % confidence level	95 % confidence level	90 % confidence level	95 % confidence level
小尺度 Microscale	38	44	28	37
中尺度 Mesoscale	37	49	37	46
大尺度 Macroscale	43	66	41	58

### 2.3 不同尺度下土壤合理样点数

本研究按照区域随机抽样理论分别计算出湓水河流域不同尺度下 90 %和 95 %两种置信水平下土壤全氮和有效氮的合理样点数(表 6)。在小尺度下,90 %置信水平的土壤全氮和有效氮的合理采样数分别是 38 和 28,使两者都能保证精度的采样数应为 38,为原样点数的 82.6 %;同样,同时保证二者在 95 %置信水平的采样数是 44,为原样点数的 95.7 %。在中尺度下,保证土壤全氮和有效氮 90 %置信水平的合理采样数均为 37,是原样点数的 71.2 %;而保证二者在 95 %置信水平的采样数是 49,为原样点数的 94.2 %。在大尺度下,90 %置信水平的土壤全氮和有效氮的合理采样数分别是 43 和 41,使两者都能保证精度的采样数应为 43,是原样点数的 58.1 %;同样,同时保证二者在 95 %置信水平的采样数应为 66,为原样点数的 89.2 %。

综合 3 种尺度下土壤氮素的合理样点数分析可知,随着研究区域的扩大合理的样点数增加,但可减少的样点数也随之增加。

## 3 结 论

在江西省兴国县湓水河流域,土壤全氮和有效氮含量在小、中和大 3 种尺度下呈正态或对数正态分布,但它们的均值和标准差均随研究尺度的扩大而增加。不同尺度下土壤全氮和有效氮含量的空间变异函数参数和空间分布特征并不相同,明显与研究尺度有关或具有明显的尺度效应。因此,土壤氮素迁移的系统研究也应考虑其研究尺度的大小。网格抽样和分层抽样相结合的综合采样方法均适合本研究区小、中和大 3 种尺度下土壤氮素分布特征的研究,其合理采样数随着研究区域的扩大仅略有增加,但相对于原采样方案,优化减少的样点数也增加。但综合采样及其优化方法是否适合中国南方丘陵区的其他区域,有待于进一步的研究证实。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Ritter E, Starr M, Vesterdal L. Losses of nitrate from gaps of different sizes in a managed beech (*Fagus sylvatica*) forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(2): 308 ~ 319
- [ 2 ] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施. *科技导报*, 2005, 23(4): 47 ~ 51. Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China (In Chinese). *Science & Technology Review*, 2005, 23(4): 47 ~ 51
- [ 3 ] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 257 ~ 262. Sun B, Wang X X, Zhang T L. Influencing factors of leaching nutrients in red soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 257 ~ 262
- [ 4 ] Driscoll C, Whitall D, John A, et al. Nitrogen pollution: Sources and consequences in the U. S. northeast. *Environment*, 2003, 45(7): 8 ~ 23
- [ 5 ] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil. Sci.*, 1980, 34: 477 ~ 492
- [ 6 ] Rooij G H, Stagnitti F. Spatial variability of solute leaching: Experimental validation of a quantitative parameterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 499 ~ 504
- [ 7 ] 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, 391. Lei Y M, 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, 391
- [ 8 ] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析——以横山县为例. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 105 ~ 108. Liu S L, Guo X D, Lian G, et al. Multi-scale analysis of spatial variation of soil characteristics in Loess Plateau—Case study of Hengshan County (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 105 ~ 108
- [ 9 ] 盛建东, 肖华, 武红旗, 等. 不同取样尺度农田土壤速效养分空间变异特征初步研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 63 ~ 67. Sheng J D, Xiao H, Wu H Q, et al. Primary study of spatial variable soil nutrients in farmland with different sampling intervals (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 63 ~ 67
- [ 10 ] Gilliam F S, Yurish B M, Adams M B. Temporal and spatial variation of nitrogen transformations in nitrogen-saturated soils of a central Appalachian hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*,

- 2001,31(10):1768~1785
- [11] Dharmakeerthi R S, Kay B D, Beauchamp E G. Factors contributing to changes in plant available nitrogen across a variable landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69(2):453~462
- [12] Murat I, Madhu K. Variable-rate nitrogen application under uncertainty: Implications for profitability and nitrogen use. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2002, 27(1):61~76
- [13] Ruffo M L, Boltero G A, Heft R G, *et al.* Spatial variability of the Illinois soil nitrogen test implications for soil sampling. *Agronomy Journal*, 2005, 97(6):1485~1492
- [14] 松下文经, 杨翠芬, 陈晋, 等. 广域空间尺度上植被净初级生产力的精确推算. *地理学报*, 2004, 59(1):80~87. Bunkei M, Yang C F, Chen J, *et al.* Accurate estimation of net primary productivity of terrestrial ecosystem at a regional scale (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1):80~87
- [15] Levin S A. Self-organization and the emergence of complexity in ecological systems. *Bioscience*, 2005, 55(12):1075~1079
- [16] Rothe A, Kermit C Jr, Resh C S, *et al.* Soil carbon and nitrogen changes under Douglas-fir with and without red alder. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66(6):1988~1995
- [17] 赵海霞, 李波, 刘颖慧, 等. 皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状. *生态学报*, 2005, 25(8):2010~2018. Zhao H X, Li B, Liu Y H, *et al.* The soil properties along landscape heterogeneity on different scales in Huangfuchuan Watershed (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8):2010~2018
- [18] Dharmakeerthi R S, Kay B D, Beauchamp E G. Spatial variability of in-season nitrogen uptake by corn across a variable landscape as affected by management. *Agronomy Journal*, 2006, 98(2):255~264
- [19] 孙波, 赵其国, 闫国年. 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, 2002, 39(2):190~198. Sun B, Zhao Q G, Lu G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2):190~198
- [20] Pan J J, Zhang T L, Zhao Q G. Dynamics of soil erosion in Xingguo County, China, determined using remote sensing and GIS. *Pedosphere*, 2005, 15(3):356~362
- [21] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, *et al.* Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem. *Pedosphere*, 2004, 14(4):501~508
- [22] Sharon L L. *Sampling: Design and Analysis*. Beijing: China Statistics Press, 2002. 39~42

## DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF SOIL NITROGEN AT MULTISCALES IN HILLY REGION IN SOUTH CHINA

Zhang Shirong<sup>1,2</sup> Sun Bo<sup>1†</sup> Zhao Qiguo<sup>1</sup> Li Ting<sup>2</sup> Chen Mingming<sup>2</sup> Huang Liqin<sup>2</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract** With GPS and GIS method, the distribution of soil nitrogen at microscale, mesoscale and macroscale was studied in Lianshui Basin, Xingguo County, Jiangxi Province. The results suggest that both the total nitrogen and available nitrogen showed normal or lognormal distribution at the three different scales, but their means increased along the scale up. In the multi-scales, mean total nitrogen contents were 0.60 g kg<sup>-1</sup>, 0.73 g kg<sup>-1</sup> and 0.83 g kg<sup>-1</sup> respectively, and mean available nitrogen were 64.8 mg kg<sup>-1</sup>, 66.3 mg kg<sup>-1</sup> and 80.2 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The spatial variability of soil total nitrogen and available nitrogen showed obvious scale effect with the different semivariogram parameters and spatial distribution for the multiscales. The combined sampling method of gridding with stratifying is suitable for the study of spatial variability of soil nitrogen at the multi-scales in hilly area. Their reasonable sample points were 82.6%, 71.2% and 58.1% of the initial sampling points under the 90% confidence level, and those were 95.7%, 94.2% and 89.2% under the 95% confidence level, separately.

**Key words** Soil total nitrogen; Soil available nitrogen; Spatial variability; Scale; Hilly region