

南方丘陵区土壤氮素尺度效应的影响因素

张世熔<sup>1 2</sup> 孙 波<sup>1,\*</sup> 赵其国<sup>1</sup> 李 婷<sup>2</sup> 陈红琳<sup>2</sup> , 黄丽琴<sup>2</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所 , 江苏南京 210008 ; 2. 四川农业大学资源环境学院 , 四川雅安 625014 )

摘要 利用 GPS、GIS 和随机过程抽样技术 , 研究了江西省兴国县潯水河流域土壤氮素在小、中和大 3 种研究尺度下的分布特征及其影响因素。结果表明 , 土壤全氮和有效氮尺度效应明显 , 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是 0.60 g kg<sup>-1</sup>、0.73 g kg<sup>-1</sup> 和 0.83 g kg<sup>-1</sup> , 有效氮含量为 64.8 mg kg<sup>-1</sup>、66.3 mg kg<sup>-1</sup> 和 80.2 mg kg<sup>-1</sup>。成土母质、土壤类型、土地利用和土壤侵蚀状况是影响氮素尺度效应的重要因素。3 种尺度下母质与土壤氮素含量关系复杂 , 但均以花岗岩坡残积物发育土壤最低。在不同尺度下 , 水稻土全氮和有效氮均显著或极显著高于红壤 , 但大尺度下的石灰岩土与前二种土壤差异均不显著。在小尺度和中尺度下水田全氮显著或极显著高于旱地和林地 , 在大尺度下它显著高于旱地而与林地差异不显著 , 水田有效氮显著或极显著高于林地 , 但与旱地除小尺度下差异达显著水平外 , 中、大尺度下差异不显著。土壤侵蚀状况对土壤全氮和有效氮含量的影响与尺度大小有关 , 且随尺度增加差异显著性逐渐增强。

关键词 全氮 ; 有效氮 ; 尺度效应 ; 丘陵区

文章编号 : 1000-0933 (2007)10-4057-08 中图分类号 S154.4 文献标识码 A

Analysis on influence factors for scale effect of soil nitrogen in hilly region

ZHANG Shi-Rong<sup>1 2</sup> , SUN Bo<sup>1,\*</sup> , ZHAO Qi-Guo<sup>1</sup> , LI Ting<sup>2</sup> , CHEN Hong-Lin<sup>2</sup> , HUANG Li-Qin<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 625014 , Sichuan , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (10) 4057 ~ 4064.

Abstract : Nitrogen is an essential nutrient element for the plant. Its transformation affects the quality of a regional environment and the eco-process for it is the main matter of greenhouse gas and water pollutants. It is well known that soil nitrogen shows obviously spatial variation with the heterogeneity of landform , parent material , landuse and fertilization , but its scale effect began to be known in the recent years. We adopted the microscale (slope scale) , mesoscale (small valley scale) and macroscale (valley scale) to study the spatial distribution characteristic for soil total nitrogen and available nitrogen on the SPSS12.0 software platforms in Lianshui Basin , Xingguo County , Jinagxi Province , China.

Lianshui Basin (the macroscale region) lies between 115°30'50"E to 115°52'12"E longitude and 26°18'04"N to 26°36'48"N latitude with the area of 579km<sup>2</sup>. The tectonics from east to west are Zitong Anticline , Meijiao Syncline , Jiuloudong Anticline , Gulonggang Syncline , Yelongjian Anticline and Xinglian Syncline. Topography in the northeast is higher than that in the southwest. Flat ground , low-hill , mid-hill and high-hill occupy 10% , 21% , 27% and 42% of the basin area , respectively. The climate of the region is mid-subtropical. Monthly mean atmosphere temperature ranges from 7.2 °C to

基金项目 国家自然科学基金重大资助项目 (30590381) ; 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2005CB121108)

收稿日期 2006-08-10 ; 修订日期 2007-03-28

作者简介 张世熔 (1963 ~ ) 男 , 四川泸县人 , 博士 , 教授 , 主要从事农业资源调查及评价. E-mail : rsz01@163.com

\* 通讯作者 Correspondina author. E-mail : bsun@issas.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by the National Natural Science Fundation of China (No. 30590381) and the state key fundamental research development plan program (No. 2005CB121108)

Received date 2006-08-10 ; Accepted date 2007-03-28

Biography ZHANG Shi-Rong , Ph. D. , Professor , mainly engaged in survey and evaluation of agricultural resources. E-mail : rsz01@163.com

29.3 ℃. Annual rainfall is 1500mm and concentrates on April to June. The remaining secondary forest is conifer after original every broadleaf forest was destroyed. Parent materials are composed of alluvium , and residual and slope deposit of granite , limestone and phyllite. Soil types are red soil ,paddy soil and limestone soil. The mesoscale district is the typical agro-forest zone with 2635.84 hm<sup>2</sup> in the valley , and the area of the microscale transect is 3.88 hm<sup>2</sup> in the zone.

According to environmental and social economy difference , sample points were devised by grid and hierarchical approaches. Among them ,46 samples for the microscale plot ,52 ones for the mesoscale district and 74 ones for the macroscale region were located by GPS (Global Position System) . The topsoil samples in the 0—30cm were tested in the laboratory. Soil total nitrogen (STN ) was determined by semi-micro Kjeldahl method and soil available nitrogen (SAN ) was tested by NaOH hydrolysable method.

The results showed that the mean contents of STN and SAN increased with scales or research areas spread. Parent material ,soil type ,landuse and soil erosion were the main influence factors for the nitrogen contents in the multiscales. The relationship of the STN and the SAN with parent materials was very complex in the multiscales ,but the nitrogen contents were the lowest in the soil from the slope-residual deposit of granite. On the three scales ,STN and SAN in paddy soil were remarkably or very remarkably higher than that in red soil. However the difference of the nitrogen contents in limestone soil was not obvious with paddy soil and red soil in the macroscale. In the micro- and meso-scales ,STN of paddy field was significantly or very significantly higher than those of arid and forest land ,but it was only remarkably higher than the content of arid land and not obviously different from that of forest land in the macroscale. SAN of the paddy field was significantly or very significantly higher than those of the forest land in the multiscales and arid land in microscale ,however the difference from the contents of arid land was not obvious in meso- and macro-scales. The influence of soil erosion intensities on STN and SAN was close to the research scale ,and increased with the scale-up.

**Key Words** :total nitrogen ;available nitrogen ;scale effect ;hilly region

土壤氮素不仅与生态过程密切相关 ,也是多种温室气体和水体污染的重要来源<sup>[ 2 ]</sup>。尽管因地形、母质、植被、土地利用、施肥等影响因素的异质性而导致土壤氮素空间变异性已有较多报道<sup>[ 3-4 ]</sup> ,但是这种空间变异性与研究尺度或研究区域大小的关系只是近年来才逐渐引起关注<sup>[ 5-7 ]</sup>。赵海霞等研究了皇甫川流域中小地形和小流域两种景观尺度下土壤全氮的含量变化<sup>[ 8 ]</sup> ,赵军等报道了东北黑土农田 90 m×90 m 和 5 km×5 km 两种间距下速效氮变异函数理论模型及其参数的差异<sup>[ 9 ]</sup>。但是 ,关于土壤氮素在不同尺度下的表现特征即尺度效应 (Scale effect )及其影响因素却鲜见报道。

潞水河流域位于江西省兴国县东北部 ,为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 年列为中国南方丘陵水土流失治理与生态环境重建的试验区后 ,该流域在退耕还林、植树造林和天然林保护等方面开展了大量的工作。经过近 20a 的封山育林和严禁砍伐 ,目前该流域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<sup>[ 10 ]</sup>。因此 ,探索该流域土壤全氮和有效氮的尺度效应及其主要影响因素将有助于了解中国南方广大丘陵地区生态恢复与重建过程对土壤氮素含量的影响 ,也可为区域氮素管理提供理论依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

本文选择的大尺度 (Macroscale )研究区为江西省兴国县东北部的潞水河流域 (图 1a ) 地理位置位于东经 115°30′50″至 115°52′12″ ,北纬 26°18′04″至 26°36′48″ ,流域面积 579.3km<sup>2</sup>。区内水系发达 ,呈树枝状。该区从东到西地质构造分布为子同山背斜、梅窖向斜、酒婆栋背斜、古龙岗向斜、夜龙尖背斜和兴莲向斜。地形为东北高西南低 ,流域最大高差 965m。流域内各地貌分布面积比例为低丘 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 1500 mm ,多集中在 4~6 月份 ,年均气温为

18.9℃,1月份平均气温7.2℃,7月份平均气温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。其土壤类型主要以红壤、水稻土和石灰岩土为主。

中尺度(Mesoscale)研究区位于湫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2635.84hm<sup>2</sup>。

小尺度(Microscale)研究区是在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3.88hm<sup>2</sup>。区内土地利用类型分布有林地、旱地和水田。

1.2 土壤样品的采集及化验分析

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进行设计<sup>[11]</sup>,在野外结合实际情况运用GPS进行调整、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40m)、52个(样点间距约为500m或1000m)和74个(样点间距约为4000m)。每个样点待测土样除小尺度外由同一地块3个随机位点0~30cm的表层土样混合而成。

土壤全氮(STN)含量分析采用半微量开氏法,有效氮(SAN)含量分析采用碱解扩散法<sup>[12]</sup>。

1.3 数据统计分析

采用SPSS12.0软件包中的单因素方差分析(ANOVA)来检验土壤全氮和有效氮含量在不同成土母质、土壤类型、土地利用类型和土壤侵蚀状况之间的差异。若有显著性差异,进一步进行多重比较。

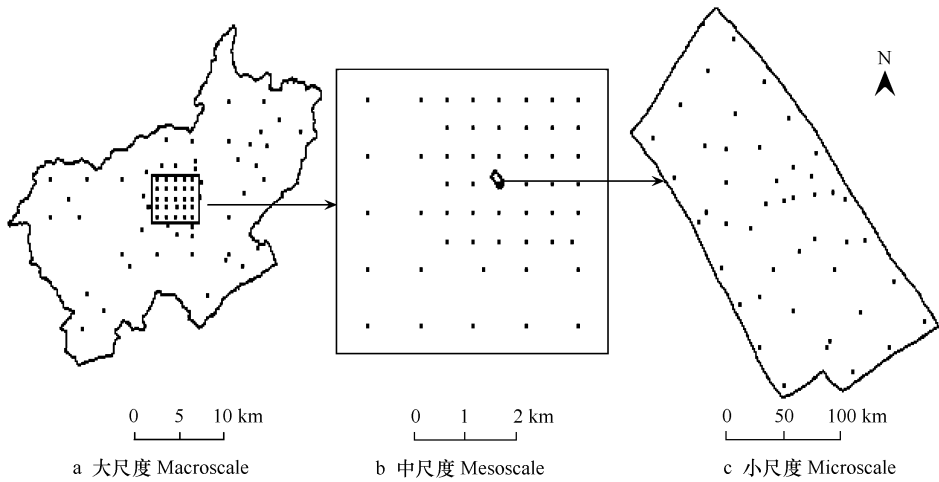


图1 不同尺度采样区土壤样点分布

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

2 结果与分析

2.1 土壤氮素含量的统计特征

采用单一样本K-S检验的结果表明,江西兴国县湫水河流域小、中和大3种不同尺度下土壤全氮(STN)含量均呈正态或对数正态分布(表1),它们的含量依次为 $0.60\text{ g kg}^{-1} \pm 0.54\text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.73\text{ g kg}^{-1} \pm 0.49\text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.83\text{ g kg}^{-1} \pm 0.50\text{ g kg}^{-1}$ ,表现出随研究尺度或区域的扩大土壤全氮逐渐增加的趋势。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1),其含量分别为 $64.8\text{ mg kg}^{-1} \pm 32.1\text{ mg kg}^{-1}$ 、 $66.3\text{ mg kg}^{-1} \pm 44.5\text{ mg kg}^{-1}$ 和 $80.2\text{ mg kg}^{-1} \pm 45.9\text{ mg kg}^{-1}$ ,也表现出随研究尺度或区域的扩大平均含量逐渐增加的趋势。这是由于3种尺度研究区水土流失治理的差异造成的。尽管湫水河流域即大尺度区水土流失治理总体成效明显,但其区内农林交错带即中尺度区水土流失仍较严重;小尺度区则是中尺度区内坡面水土流失最严重的条形样区。因此,全氮和有效氮含量随研究区域扩大均呈逐渐增加的趋势。方差分析表明3种尺度区土壤全氮含量间存在显著差异( $F_{2,69} = 3.105^*$ ,  $P = 0.047$ )。其中,小尺度区的含量显著低

于大尺度区含量,但中尺度区含量与前二者间差异均不显著。尽管3种尺度区土壤有效氮含量间差异不显著 ( $F_{(2,169)} = 2.485$ ,  $P = 0.086$ ),但小尺度区的含量仍显著低于大尺度区含量,中尺度区含量则与前二者间差异均不显著。

表1 不同尺度下土壤全氮和有效氮统计特征  
Table 1 Statistical characters of STN and SAN in different scales

项目 Item	尺度 Scale	样点数 Sampling No.	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
土壤全氮 Soil total nitrogen	小 Microscale	46	Lognormal	0.06	2.08	0.60	0.54	1.117	0.307
STN (g kg <sup>-1</sup> )	中 Mesoscale	52	Normal	0.10	2.10	0.73	0.49	0.457	-0.514
土壤有效氮 Soil available nitrogen	大 Macroscale	74	Normal	0.10	2.17	0.83	0.50	0.677	0.304
STN (g kg <sup>-1</sup> )	小 Microscale	46	Normal	13.1	151.2	64.8	32.1	0.997	0.977
SAN (mg kg <sup>-1</sup> )	中 Mesoscale	52	Normal	3.0	148.7	66.3	44.5	0.248	-1.207
SAN (mg kg <sup>-1</sup> )	大 Macroscale	74	Normal	12.6	212.2	80.2	45.8	0.569	-0.136

\* 下同 the same below

2.2 影响因素分析

影响土壤氮素的空间分布的因素较多,包括成土母质、土壤类型、土地利用类型、施肥管理、水土流失程度、坡度等。江西潯水河流域因自然和社会经济条件以及水土流失治理的差异而导致土壤氮素分布差异明显。下面仅就不同尺度下成土母质、土壤类型、土地利用方式和侵蚀状况对氮素含量分布的关系进行探讨。但在这4种影响因素中,由于某种因子的具体类型之间(如土地利用类型中林地、旱地和水田)的调查样点数并不相同,因此不能进行多因素的方差分析,而只能进行单因素的方差分析。

2.2.1 母质

在潯水河流域,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。统计表明,不同尺度下土壤母质对土壤氮素含量的影响有所不同。

由于小尺度区的面积小,出露的成土母质仅为花岗岩坡残积物及其残坡积物,前者主要分布于丘陵的中上部,后者主要分布于丘陵的中下部。统计结果表明,花岗岩坡残积物发育形成的土壤全氮为0.44g kg<sup>-1</sup> ( $n_1 = 23$ ),而花岗岩残坡积物发育形成的土壤全氮是0.93g kg<sup>-1</sup> ( $n_2 = 15$ ),即前者极显著低于后者 ( $P = 0.003$ )。但是,花岗岩坡残积物和残坡积物发育形成的土壤有效氮含量则分别为59.2mg kg<sup>-1</sup>和76.1mg kg<sup>-1</sup>,二者间差异不明显 ( $P = 0.095$ )。

随着研究区面积的扩大,在中尺度区内分布有河流冲积物、花岗岩坡残积物、花岗岩残坡积物、石灰岩残坡积物和千枚岩残坡积物5种母质(图2a)。方差分析表明,这5种母质形成的土壤全氮含量间存在显著差异 ( $F_{(4,47)} = 2.955^*$ ,  $P = 0.029$ )。采用最小显著差数法对它们的平均值进行多重比较的结果为河流冲积物(1.13g kg<sup>-1</sup>,  $n_1 = 11$ )极显著高于花岗岩坡残积物(0.54g kg<sup>-1</sup>,  $n_3 = 12$ ),其概率  $P = 0.003$ ;它也显著高于石灰岩残坡积物(0.56g kg<sup>-1</sup>,  $n_4 = 4$ )、千枚岩残坡积物(0.64g kg<sup>-1</sup>,  $n_5 = 7$ )和花岗岩残坡积物(0.67g kg<sup>-1</sup>,  $n_2 = 18$ ),它们的概率  $P$  分别为0.011、0.029和0.035。但花岗岩坡残积物、花岗岩残坡积物、石灰岩残坡积物和千枚岩残坡积物4种母质间土壤全氮含量差异不明显。

在中尺度研究区,5种母质发育形成土壤的有效氮含量之间也存在差异(图2a),其方差统计值  $F_{(4,47)} = 3.776^{**}$ , 概率  $P = 0.010$ 。采用最小显著差数法对它们的平均值进行多重比较的结果为河流冲积物(101.0mg kg<sup>-1</sup>,  $n_1 = 11$ )极显著高于花岗岩坡残积物(43.7mg kg<sup>-1</sup>,  $n_3 = 12$ )和花岗岩残坡积物(54.9mg kg<sup>-1</sup>,  $n_2 = 18$ ),它们的概率  $P$  分别为0.001和0.004;河流冲积物与石灰岩残坡积物(72.2mg kg<sup>-1</sup>,  $n_4 = 4$ )和千枚岩残坡积物(82.0mg kg<sup>-1</sup>,  $n_5 = 7$ )差异不显著,它们的概率  $P$  分别为0.218和0.325。此外,千枚岩残坡积物显著高于花岗岩坡残积物 ( $P = 0.047$ )。

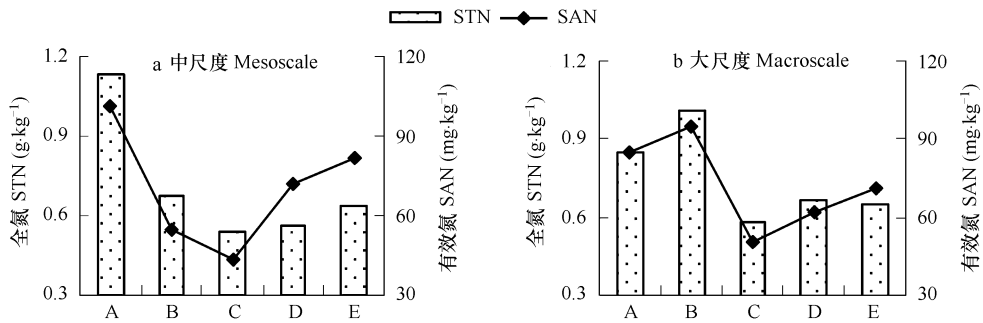


图2 成土母质与土壤氮素含量

Fig.2 Parent materials and soil nitrogen contents

A. 冲积物 Alluvial deposit ;B. 花岗岩残坡积物 Residual and slope deposit of granite ;C. 花岗岩坡残积物 Slope and residual deposit of granite ;D. 石灰岩残坡积物 Residual and slope deposit of limestone ;E. 千枚岩残坡积物 Residual and slope deposit of phyllite

在大尺度区内分布的成土母质仍然为河流冲积物、花岗岩坡残积物、花岗岩残坡积物、石灰岩残坡积物和千枚岩残坡积物 5 种 (图 2b)。虽然它们之间土壤全氮的方差未达显著水平 ( $F_{(4, 69)} = 2.447, P = 0.054$ ), 但它们的平均数还是有一定差异。其花岗岩残坡积物 ( $1.01 \text{ g kg}^{-1}, n_2 = 34$ ) 显著高于石灰岩残坡积物 ( $0.66 \text{ g kg}^{-1}, n_4 = 12$ ), 千枚岩残坡积物 ( $0.65 \text{ g kg}^{-1}, n_5 = 13$ ) 和花岗岩坡残积物 ( $0.58 \text{ g kg}^{-1}, n_3 = 7$ ), 它们的概率  $P$  分别为 0.037、0.035 和 0.026, 而与河流冲积物 ( $0.85 \text{ g kg}^{-1}, n_1 = 8$ ) 差异不明显 ( $P = 0.385$ )。

在大尺度研究区, 尽管各种母质发育形成土壤的有效氮含量差异未达显著水平 ( $F_{(4, 69)} = 2.430, P = 0.056$ ), 但是花岗岩残坡积物 ( $95.2 \text{ mg kg}^{-1}, n_2 = 34$ ) 仍显著高于花岗岩坡残积物 ( $50.9 \text{ mg kg}^{-1}, n_3 = 7$ ) 和石灰岩残坡积物 ( $62.1 \text{ mg kg}^{-1}, n_4 = 12$ ), 其概率分别为 0.018 和 0.028。但它与河流冲积物 ( $84.7 \text{ mg kg}^{-1}, n_1 = 8$ ) 和千枚岩残坡积物 ( $70.9 \text{ mg kg}^{-1}, n_5 = 13$ ) 差异不显著, 二者的概率水平分别为 0.548 和 0.096。

2.2.2 土壤类型

湊水河流域分布的土壤类型主要为红壤、水稻土和石灰岩土, 但小尺度和中尺度研究区分布的土壤仅有红壤和水稻土。其中, 红壤主要由花岗岩残坡积物及其坡残积物、千枚岩残坡积物发育而成, 水稻土除前几种母质外, 还有部分由河流冲积物和石灰岩残坡积物发育而成。下面分别就 3 种尺度研究区不同土壤类型的氮素含量进行统计分析。

统计表明, 小尺度区水稻土和红壤的全氮含量分别为  $1.62 \text{ g kg}^{-1} (n_1 = 5)$  和  $0.47 \text{ g kg}^{-1} (n_2 = 41)$ , 前者极显著高于后者 ( $df = 44, t = 5.935, P = 0.000$ )。由于区内水稻土在农业耕地管理中施肥较多, 旱地红壤施肥较少且林地红壤几乎不施肥。因此, 水稻土和红壤的土壤有效氮含量分别为  $101.3 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $60.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , 前者也极显著高于后者 ( $df = 44, t = 2.915, P = 0.006$ )。

在中尺度研究区, 其土地利用方式和施肥管理水平与小尺度区相似。因此, 该区水稻土和红壤的全氮和有效氮变化趋势与小尺度区类似。其中, 水稻土和红壤的全氮含量分别为  $1.14 \text{ g kg}^{-1} (n_1 = 17)$  和  $0.53 \text{ g kg}^{-1} (n_2 = 35)$ , 前者极显著高于后者 ( $df = 50, t = 5.177, P = 0.000$ )。二者的土壤有效氮含量分别为  $94.1 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $53.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 前者也极显著高于后者 ( $df = 50, t = 3.439, P = 0.001$ )。

由于大尺度区涉及整个湊水河流域, 区内分布的土壤除水稻土和红壤外, 还有石灰岩土 (图 3)。方差分析

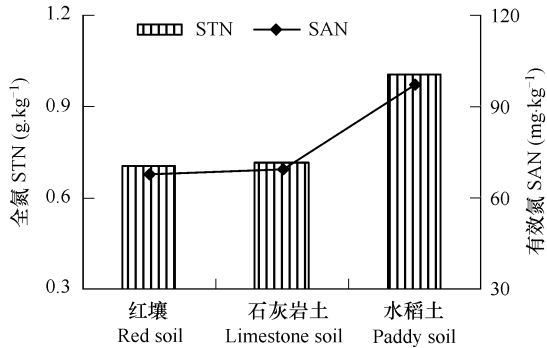


图3 大尺度研究区土壤类型与土壤氮素

Fig.3 Soil types and nitrogen content in the macroscale

表明,这3种土壤全氮含量呈显著差异( $F_{(2,71)}=3.362^*,P=0.040$ )。其中,水稻土 $1.01\text{ g kg}^{-1}$  ( $n_1=31$ )显著高于红壤 $0.71\text{ g kg}^{-1}$  ( $n_2=36$ ),石灰岩土 $0.72\text{ g kg}^{-1}$  ( $n_3=7$ )与水稻土和红壤的差异不显著。这3种土壤类型的有效氮含量变化也与全氮类似,差异明显( $F_{(2,71)}=3.910^*,P=0.024$ )。其中,水稻土 $97.1\text{ mg kg}^{-1}$  ( $n_1=31$ )显著高于红壤 $67.8\text{ mg kg}^{-1}$  ( $n_2=36$ ),石灰岩土 $69.3\text{ mg kg}^{-1}$  ( $n_3=7$ )与水稻土和红壤的差异均不显著。

2.2.3 土地利用

由于潯水河流域是国家水土流失治理的重点试验区,其农业土地利用主要为林地、旱地和水田,其它土地利用类型较小且分布较为零星。因此,本文重点分析区内林地、水田和旱地3种利用方式下土壤氮素含量的差异(表2)。

表 2 不同尺度下土地利用类型与土壤氮素含量

Table 2 The relationship of STN and SAN with landuse types in the three scales												
项目 Items	小尺度 Microscale				中尺度 Mesoscale				大尺度 Macroscale			
	水田 Paddy field	旱地 arid land	林地 Forest	F 值 F value	水田 Paddy field	旱地 arid land	林地 Forest	F 值 F value	水田 Paddy field	旱地 arid land	林地 Forest	F 值 F value
样点数 Sample No.	5	9	32		20	6	26		31	12	31	
STN (g kg <sup>-1</sup> )	1.62 A	0.79 B	0.38C	24.47 **	1.13aA	0.68bB	0.43bB	20.66 **	1.01a	0.69b	0.72ab	3.37 *
SAN (mg kg <sup>-1</sup> )	101.3aA	67.3bAB	58.3bB	4.53 *	97.0aA	74.7abAB	42.2bB	13.43 **	97.1aA	75.6ab	65.2bB	4.18 *

多重比较采用最小显著差数法,小写字母代表0.05显著水平,大写字母代表0.01显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著,\*代表F检验的0.05显著水平,\*\*代表F检验的0.01显著水平

In multiple comparisons ,Lowercase represents  $\alpha=0.05$  ,capital letter represents  $\alpha=0.01$  ;Average values followed by the same letter in the table are not different at  $\alpha=0.05$  or  $\alpha=0.01$  using LSD test ; \* represents significance of analysis of variance at the 0.05 probability level ; \*\* represents significance of analysis of variance at the 0.01 probability level

在小尺度区内,水田分布于该研究区的边缘部分,面积较小;旱地分布于丘陵下部或丘脚,植被以马尾松为主的成片林地分布于丘陵顶部、中部及中下部。统计表明,这3种土地利用类型之间土壤的全氮含量呈极显著差异( $F=24.47^{**}$ ),有效氮含量呈显著差异( $F=4.53^*$ )。从全氮含量看,水田的 $1.62\text{ g kg}^{-1}$ 极显著高于旱地的 $0.79\text{ g kg}^{-1}$ 和林地的 $0.38\text{ g kg}^{-1}$ (表2),而旱地也极显著高于林地。但是,有效氮含量则是水田( $101.3\text{ mg kg}^{-1}$ )极显著高于林地( $58.3\text{ mg kg}^{-1}$ ),显著高于旱地( $67.3\text{ mg kg}^{-1}$ ),但旱地与林地之间差异不显著。

在中尺度区内,林地仍然是分布最广的农用地,但水田占区域面积的比例则较小尺度区明显增加,而旱地比例明显减少。统计表明,这3种土地利用类型之间土壤的全氮和有效氮含量均呈极显著差异(表2),方差分析的F值分别为20.66\*\*和13.43\*\*。从全氮含量看,水田( $1.13\text{ g kg}^{-1}$ )极显著高于旱地( $0.68\text{ g kg}^{-1}$ )和林地( $0.43\text{ g kg}^{-1}$ ),但旱地与林地差异不明显。有效氮含量则是水田( $97.0\text{ mg kg}^{-1}$ )极显著高于林地( $42.2\text{ mg kg}^{-1}$ ),旱地( $74.7\text{ mg kg}^{-1}$ )与前二者之间差异均不显著。

在潯水河流域即大尺度区,林地主要分布于区内中丘或高丘中上部,旱地多分布于低丘或中丘中下部,水田则集中分布于丘陵沟谷中。它们的面积分别占区域面积的75.88%、0.20%和19.65%。方差分析表明,林地、旱地和水田三者的土壤全氮和有效氮含量均呈显著差异(表2)。其中,全氮含量的差异表现为水田( $1.01\text{ g kg}^{-1}$ )显著高于旱地( $0.69\text{ g kg}^{-1}$ ),但林地( $0.72\text{ g kg}^{-1}$ )与前二者差异均不显著。有效氮则为水田( $97.1\text{ mg kg}^{-1}$ )极显著高于林地( $65.2\text{ mg kg}^{-1}$ ),旱地( $75.6\text{ mg kg}^{-1}$ )与前二者差异均不显著。

2.2.4 侵蚀状况

在野外调查过程中,本研究根据各样点所在小区域的地貌、坡度、母质、土地利用及植被覆盖条件将其土壤侵蚀状况划分为轻度、中度和强度三级。其中,轻度侵蚀指经过生态修复,侵蚀小沟深度在1m以下,片蚀及细沟发育,裸露沙石地表仅有零星分布,植被覆盖度达70%以上或是冲沟中平缓且长年种植作物的农田。强度侵蚀是指有较大面积分布的石质坡地或沙石裸露地表,侵蚀沟深度多为1~3m且面积大于小区面积的

30% ,植被覆盖度小于 30%。中度侵蚀介于前二者之间。下面分别就不同侵蚀状况下土壤全氮和有效氮的关系进行分析。

在小尺度区内 ,强度侵蚀分布于丘陵顶部和中上部。其植被多为直径小于 10cm 的马尾松疏林地 ,地表沙石裸露 ,植被盖度小于 30%。中度侵蚀分布于丘坡中部及中下部 ,植被盖度比强度侵蚀区略高。轻度侵蚀分布于丘脚和冲沟 ,因地势平缓 and 土层深厚 ,现多为修复较好的青杠林和马尾松林以及部分农田。统计表明 ,不同侵蚀程度之间土壤的全氮含量呈极显著差异 ( $F_{Q,43} = 12.15^{**}$ ) ,轻度侵蚀 ( $1.00\text{ g kg}^{-1}$ )和中度侵蚀 ( $0.75\text{ g kg}^{-1}$ )均极显著高于强度侵蚀 ( $0.23\text{ g kg}^{-1}$ ) ,但前二者之间无明显差异 (图 4)。不同侵蚀程度之间土壤有效氮含量差异不明显 ( $F_{Q,43} = 1.09$ ) ,轻度侵蚀、中度侵蚀和强度侵蚀的土壤有效氮分别为  $71.3\text{ mg kg}^{-1}$ 、 $70.1\text{ mg kg}^{-1}$ 和  $56.5\text{ mg kg}^{-1}$  (图 5)。

中尺度区是湊水河流域内典型的农林交错带 ,也是整个流域中生态恢复较差的区域。统计表明 3 种侵蚀程度之间土壤的全氮呈极显著差异 ( $F_{Q,49} = 53.84^{**}$ )。从全氮含量看 (图 4) ,轻度侵蚀 ( $1.13\text{ g kg}^{-1}$ )极显著高于中度侵蚀 ( $0.62\text{ g kg}^{-1}$ )和强度侵蚀 ( $0.20\text{ g kg}^{-1}$ ) ,且中度侵蚀也极显著高于强度侵蚀。与小尺度区不同的是该区 3 种侵蚀程度之间土壤有效氮含量差异达极显著水平 , $F_{Q,49} = 21.52^{**}$  (图 5)。其中 ,轻度侵蚀 ( $89.3\text{ mg kg}^{-1}$ )和中度侵蚀 ( $81.1\text{ mg kg}^{-1}$ )极显著高于强度侵蚀 ( $23.0\text{ mg kg}^{-1}$ ) ,但前二者之间差异则不显著。

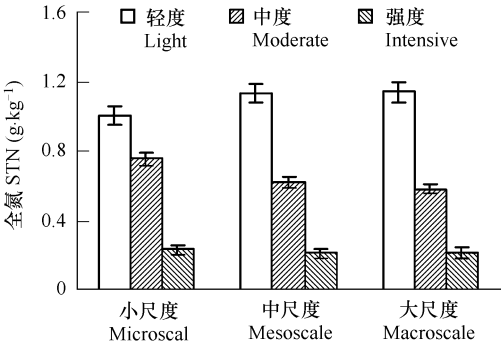


图 4 不同尺度研究区土壤侵蚀程度与全氮含量

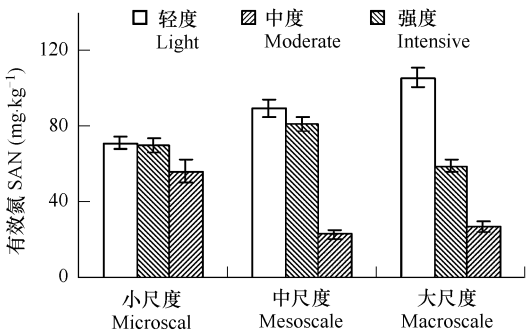


图 5 不同尺度研究区土壤侵蚀程度与有效氮含量

Fig. 4 Soil erosion and STN content in the multiscales ( $\text{g kg}^{-1}$ ) Fig. 5 Soil erosion and SAN content in the multiscales ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

在大尺度区或整个湊水河流域 ,植树造林和封山育林产生的生态修复成效较明显。强度侵蚀和中度侵蚀的面积比例明显减少 ,而轻度侵蚀的面积比例却相应提高。方差分析表明 ,强度侵蚀、中度侵蚀和轻度侵蚀三者的土壤全氮和有效氮含量均呈极显著差异 (图 4 和图 5) ,全氮  $F_{Q,71} = 36.76^{**}$  ,有效氮  $F_{Q,71} = 28.33^{**}$ 。其中 ,全氮含量的差异表现为轻度侵蚀 ( $1.14\text{ g kg}^{-1}$ )极显著高于中度侵蚀 ( $0.58\text{ g kg}^{-1}$ )和强度侵蚀 ( $0.21\text{ g kg}^{-1}$ ) ,且中度侵蚀极显著高于强度侵蚀。土壤有效氮则为轻度侵蚀 ( $105.8\text{ mg kg}^{-1}$ )极显著高于中度侵蚀 ( $59.2\text{ mg kg}^{-1}$ )和强度侵蚀 ( $26.9\text{ mg kg}^{-1}$ ) ,但中度侵蚀仅显著高于强度侵蚀。

综上所述 ,从这 4 种影响因素的单因素方差分析结果看 ,在 3 种尺度下对土壤全氮和有效氮的影响为侵蚀状况 > 土地利用 > 土壤类型 > 母质。但若从它们在不同研究尺度下对土壤全氮和有效氮的影响程度看 ,小尺度下为土壤类型 > 土地利用 > 母质和侵蚀状况 ;中尺度下除母质的影响为显著外 ,其余三者皆为极显著影响 ;大尺度下为侵蚀状况 > 土壤类型和土地利用 > 母质。但是 ,这是在未考虑这 4 种因素相互影响条件下所得的统计结果。

3 结论与讨论

(1)湊水河流域是 1980 年代中国南方丘陵水土流失治理的重点试验区。经过近 20a 的生态恢复与重建后 ,区内水土流失已明显减少。其小、中和大 3 种尺度下土壤全氮和有效氮含量的样点平均值均表现出随尺度或研究区域的扩大而增加的趋势。这主要是小尺度和中尺度研究区都是典型的农林交错带 ,且水土流失是

该流域相对仍较严重的区域。因此 ,大尺度下全流域生态重建效果要优于小、中尺度区 ,植被特别是森林的恢复导致土壤全氮和有效氮含量的平均值高于后二者。

2 )母质、土壤类型、土地利用类型和侵蚀状况是影响不同尺度下土壤氮素含量分布的主要因素。在小、中和大 3 种尺度下 ,母质对土壤全氮和有效氮的影响关系复杂 ,但均以花岗岩坡残积物发育土壤含量最低。不同尺度下 ,施肥较多的水稻土全氮和有效氮均显著或极显著高于红壤 ,而大尺度下的石灰岩土则与前二者差异均不显著。在小尺度和中尺度下水田全氮显著或极显著高于旱地和林地 ,在大尺度下它显著高于旱地而与林地差异不显著 ,水田有效氮显著或极显著高于林地 ,但与旱地除小尺度下差异达显著水平外 ,中、大尺度下差异不显著。土壤侵蚀状况对土壤全氮和有效氮含量的影响与研究尺度大小有关 ,且有随尺度增加差异显著性逐渐增加的趋势。

References :

[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 ] Zhu Z L ,Sun B ,Yang L Z ,et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. Science &Technology Review , 2005 ,23 (4 ) :47 — 51.

[3 ] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil I . The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. J. Soil Sci. , 1980 ,34 :477 — 492.

[4 ] Frank S G ,Bradley M Y ,Mary B A. 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.

[5 ] Mat as L R ,Germ n A B ,Robert G H ,et al. Spatial variability of the Illinois soil nitrogen test :Implications for soil sampling. Agronomy Journal , 2005 ,97 (6 ) :1485 — 1492.

[6 ] 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. Journal of Soil and Water Conservation ,2005 ,19 (5 ) :105 — 108.

[7 ] 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.

[8 ] Zhao H X ,Li B ,Liu Y H ,et al. The soil properties along landscape heterogeneity on different scales in Huangfuchuan Watershed. Acta Ecologica Sinica ,2005 25 (8 ) 2010 — 2018.

[9 ] Zhao J ,Liu H J ,Sui Y Y ,et al. Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in blacksoil crop area with different scales. Journal of Soil and Water Conservation ,2006 ,20 (1 ) :41 — 44.

[10 ] 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.

[11 ] Sharon L L. Sampling :Design and analysis. Beijing :China Statistics Press ,2002. 39 — 42.

[12 ] Institute of Soil Science , Chinese Academy of Sciences , Nanjing. Analysis of Soil Physics and Chemistry. Shanghai :Shanghai Science and Technology Press ,1983. 62 — 80.

参考文献 :

[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.

[6 ] 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.

[8 ] 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.

[9 ] 赵军 ,刘焕军 ,隋跃宇 等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析. 水土保持学报 2006 20 (1 ) :41 ~ 44.

[12 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海 :上海科学技术出版社 ,1983. 62 ~ 80.