

# 东北地区旱地土壤全氮空间变异性 对幅度拓展的响应\*

王丹丹<sup>1</sup> 岳书平<sup>1</sup> 林芬芳<sup>1</sup> 史学正<sup>2†</sup> 于东升<sup>2</sup>

(1 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044)

(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)

**摘要** 土壤氮素不仅是作物必需的营养元素, 还是重要的生态元素。不同幅度上土壤全氮含量空间变异的研究是正确评价土壤质量和精确估算土壤氮库的基础。基于中国东北地区第二次土壤普查的1 041个旱地剖面数据, 设定三种类型的幅度, 即行政区幅度(县、市、省和大区)、土壤分类幅度(土属、亚类、土类和土纲)和土壤类型(地带性土壤和非地带性土壤)-行政区幅度, 研究了该区旱地土壤表层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)全氮含量的变异性及其对幅度拓展的响应。结果表明, 三种类型幅度上, 表层和剖面的平均土壤全氮含量变异性均随着幅度的拓展而增大。在行政区幅度, 旱地面积或行政区面积与平均土壤全氮含量变异系数具有较强的对数关系。在土壤分类幅度上, 不同土纲的平均土壤全氮含量的变异随幅度变化的趋势、变幅等均存在差异。在土壤类型—行政区幅度, 地带性土壤与非地带性土壤的全氮含量随幅度的变化趋势一致, 但变化速率有差别, 旱地面积与平均非地带性土壤全氮含量变异系数具有较强的对数关系。该结果可为东北地区不同幅度下基于土壤类型聚类的旱地土壤氮库估算、土壤资源调查时采样数目的确定提供理论指导。

**关键词** 土壤全氮; 空间变异; 幅度; 旱地

**中图分类号** S151.9 **文献标识码** A

土壤氮素是土壤学中历史较久且又十分活跃的一个研究领域<sup>[1]</sup>。作为土壤组成的重要部分, 土壤氮素是限制农业生态系统生产的重要因素, 也是多种温室气体和水体污染的重要来源<sup>[2]</sup>。同时土壤是陆地生态系统中最大的氮库, 对地球生物化学循环起重要作用<sup>[3]</sup>, 但是关于土壤氮库的估算仍旧留有异议, 其根本原因在于土壤氮素的分布存在较大的空间变异性<sup>[4]</sup>, 弄清楚土壤氮素的空间变异性是实施精准农业管理的基础<sup>[5]</sup>。

目前, 基于经典统计学和地统计学方法的土壤氮素空间变异特征在某确定区域的研究已取得了较大进展<sup>[6-7]</sup>。研究证实土壤属性的空间变异特征是具有尺度依赖性的, 即随尺度不同而发生变化<sup>[8]</sup>。因此, 近些年土壤属性空间变异的尺度效应问题逐渐引起国内外学者的广泛关注, 尤其是对于

土壤有机碳和土壤氮素的研究<sup>[9-11]</sup>。空间尺度在不同学科中有不同的含义。在景观生态学中, 尺度以粒度(相当于土壤学中的采样密度或间距)和幅度(研究区域大小)来表达<sup>[12]</sup>, 与之对应的尺度效应可能在以下情况下发生: (1) 仅改变幅度, 如刘世梁等<sup>[13]</sup>研究了黄土高原土壤在县域(2 951 km<sup>2</sup>)和小流域(3.5 km<sup>2</sup>)两个幅度下土壤全氮等养分的空间变异性; Jenerette等<sup>[9]</sup>分析了美国亚利桑那州凤凰城土壤全氮在斑块以及景观幅度(6 400 km<sup>2</sup>)上的空间变异情况。李从娟等<sup>[11]</sup>从根际(10<sup>-3</sup> m ~ 10<sup>-2</sup> m)、个体(10<sup>-1</sup> m ~ 10<sup>0</sup> m)、种群(10<sup>0</sup> m ~ 10<sup>1</sup> m)、地貌(10<sup>1</sup> m ~ 10<sup>2</sup> m)和区域(10<sup>3</sup> m ~ 10<sup>4</sup> m)五个作用因子所在的幅度对古尔班通古特沙漠土壤全氮、速效氮等的空间异质性进行了研究; 张黎明等<sup>[14]</sup>基于行政区和土壤区两种幅度划分方法, 研究了不同幅度下中国水稻土氮素空间变异性的变

\* 国家自然科学基金创新群体项目(40921061)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(Y052010005)、南京信息工程大学科研基金资助

† 通讯作者, E-mail: xzshi@issas.ac.cn

作者简介: 王丹丹(1980—), 女, 吉林四平人, 博士, 讲师, 主要从事遥感应用和土壤资源管理研究。E-mail: wdd\_0813@126.com, Tel: 15996213362

收稿日期: 2011-09-30; 收到修改稿日期: 2012-03-06

化情况;(2)仅改变粒度,如姚丽贤等<sup>[15]</sup>和盛建东等<sup>[16]</sup>分别在农田中选取了3种采样密度对土壤氮素等的空间变异性进行分析,表明采样密度对其空间变异性影响不明显;Steffens等<sup>[17]</sup>在内蒙古锡林郭勒草原(0.24 km<sup>2</sup>)的持续放牧草地上进行小密度(50 m采样间距)和大密度(15 m采样间距)的土壤有机碳和全氮等的空间变异性研究;Sahrawat等<sup>[18]</sup>在印度东南部5 km<sup>2</sup>小流域内,采用分层随机采样的方法采集土壤样品114个,并通过依次减少5个样点的方法,研究不同采样密度下土壤有机碳和全氮等的空间变异性;(3)同时改变幅度和粒度,如雷咏雯等<sup>[19]</sup>和张世熔等<sup>[20]</sup>在三个不同幅度上,采用三种不同采样密度,分别分析了农田(棉花地)和江西兴国县湓水河流域土壤氮素的空间变异特征;王淑英等<sup>[21]</sup>研究了北京郊区面积为1 075 km<sup>2</sup>的中等幅度(平谷区)和面积为28.8 km<sup>2</sup>的小幅度(马昌营镇),采样密度分别为400 m×400 m和100 m×100 m时的农田土壤全氮空间变异特征。

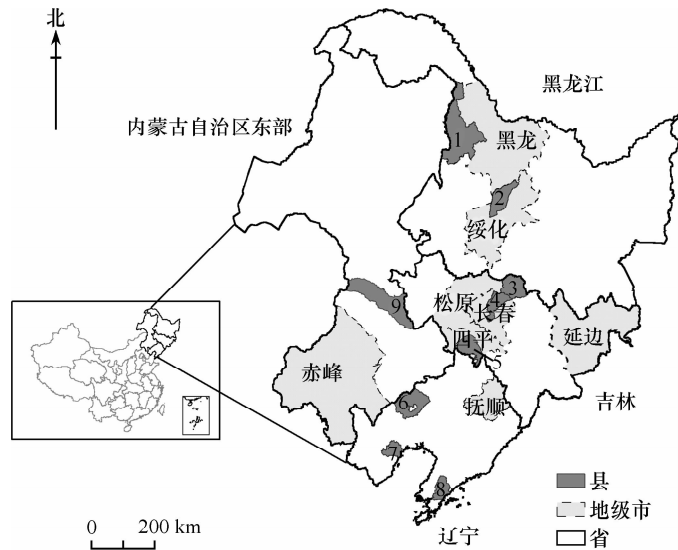
由上可知,虽然近些年关于不同幅度上土壤氮素空间变异的研究有一定进展,但是对于不同幅度上的研究仍旧有限,并且研究的幅度均是在很小的田块以下的范围或上千平方千米有限范围内进行的,而对于更大的上万甚至上百万平方千米范围内的研究相对较少<sup>[14]</sup>,有研究显示随着幅度从分子到全球的拓展,对于土壤碳氮循环问题的理解下降<sup>[22]</sup>。目前对于旱地土壤氮素的变异性是如何随幅度发生变化的尚不明确。因此,本文以我国东北地区旱地为例,在全国第二次土壤普查数据基础上,采用景观生态学中幅度的概念<sup>[12]</sup>,基于三种幅度划分即行政区幅度、土壤分类幅度和行政区一类型幅度,研究不同幅度上土壤全氮的空间变异特征及其随幅度拓展的变化趋势,以期为该地区土壤质量调查取样,土壤氮库的估算提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

中国东北地区(38°40′~53°30′N,115°05′~135°02′E)(图1)包括黑龙江、吉林、辽宁三省和内蒙古自治区东部,土地总面积约124万km<sup>2</sup>,区内旱地面积32.5万km<sup>2</sup>(2000年)。本区属于温带季风气候,由于地域辽阔,气候南北差异较大,从北至南(1 600 km)又可分为寒温带、温带和暖温带,本区大

部分地区处于温带气候区,受经度地带性影响,由东至西(1 400 km)又依次划分为湿润、半湿润和半干旱气候区。年均温-4~11℃,年降水量350~1 100 mm。该区是一个比较完整而又相对独立的自然地理区域,东、西、北三面分别被长白山、大兴安岭和小兴安岭环绕,中间是向南敞开的大平原。松嫩平原位于东北地区中心,平原的东部和北部山前台地分布着著名的黑土(Phaeozems, WRB; Isohumosols, Chinese Soil Taxonomy (CST))<sup>[23-24]</sup>带,是东北地区最肥沃的土壤之一,也是粮食的主要产区。平原中西部是黑钙土(Phaeozems, WRB; Isohumosols, CST)<sup>[23-24]</sup>分布区,草甸土(Cambisols, WRB; Cambosols, CST)<sup>[23-24]</sup>分布也很广泛。玉米、大豆、甜菜等是该区的主要农作物。



注:数字1~9代表典型县分别为嫩江、海伦、榆树、德惠、梨树、阜新、锦西、新金和科右中旗 Note: The number from 1 to 9 refers to Nenjiang, Hailun, Yushu, Dehui, Lishu, Fuxin, Jinxi, Xinjin, and Keyouzhongqi County, respectively

图1 研究区内典型市县的地理位置示意图

Fig. 1 Location of some typical cities and counties in the study area

### 1.2 数据来源

本研究的数据引自全国第二次土壤普查,包括《中国土种志》和东北地区各省、地市和县土种志,共计土壤剖面1 041个,全部为旱地。根据中国土壤发生分类系统(genetic soil classification of China, GSCC),这些土壤剖面分属于102个土属、56个亚类、17个土类和7个土纲,其中地带性土类有8个,非地带性土类有9个。这1 041个土壤剖面,其中归属于草甸土的最多有309个,较多的还有棕壤(Luvisols, WRB; Argosols, CST)<sup>[23-24]</sup>161个,黑土126个,

黑钙土 138 个,最少的是火山灰土 (Andosols, WRB; Andosols, CST)<sup>[23-24]</sup> 仅 2 个。典型土壤剖面的信息包含有采样地的村镇地理位置、经度和纬度、土壤类型、成土母质、土壤物理性质如土壤颗粒组成和土壤质地等,土壤化学性质如 pH、有机质含量等,土壤养分如全氮、全磷、全钾等。其中全氮含量的测定方法为凯氏蒸馏法<sup>1)</sup>。

行政区面积和旱地面积分别从中国科学院资源与环境数据中心提供的 1:50 万《中华人民共和国行政区》数字化图件(1999 年版)和全国 1:10 万土地利用图(2000 年)中提取。

### 1.3 幅度设计

**1.3.1 行政区幅度** 采用行政区幅度,共设定为四级,即大区、省级、地市级和县级,大区指整个东北地区,省区包括黑龙江、吉林、辽宁和内蒙东部 4 个,由于该地区地级市有 40 个,县有 225 个。根据各区内地级市分布、剖面数目的多少以及行政区所处地理位置选择 8 个地级市和 9 个县作为典型区(详见表 1)。省级、地市级和县级幅度上的土壤全氮含量变异系数分别用 4 个省,8 个地级市和 9 个县的平均值来表示。

**1.3.2 土壤分类幅度** 根据中国土壤发生分类系统,选择土纲、土类、亚类和土属四级分类单元表征四个幅度。由于部分类型土壤剖面数目有限,土纲、土类、亚类和土属幅度的土壤全氮含量变异系数分别用 6 个土纲、15 个土类和 39 个亚类和 63 个土属的平均值表示。

**1.3.3 土壤类型—行政区幅度** 土壤类型—行政区幅度是指先划分地带性与非地带性土壤后,再根据行政区幅度从整个东北地区、省、地级市到县,分别计算地带性土壤和非地带性土壤在不同行政区幅度的平均土壤全氮含量变异系数。地带性土壤包括的土类有暗棕壤 (Cambisols, WRB; Argosols, CST)、白浆土 (Luvisols, WRB; Argosols, CST)、棕壤、褐土 (Cambisols, WRB; Argosols, CST)、黑土、黑钙土、栗钙土 (Kastanozems, WRB; Isohumosols, CST) 和栗褐土 (Cambisols, WRB; Argosols, CST),非地带性土壤包括潮土 (Cambisols, WRB; Cambosols, CST)、草甸土、沼泽土 (Gleysols, WRB; Gleyosols, CST)、泥炭土 (Histosols, WRB; Histosols, CST)、碱土 (Solonetz, WRB; Halosols, CST)、新积土 (Fluvisols, WRB; Primosols, CST)、风沙土 (Arenosols, WRB; Primosols,

CST)、红黏土 (Regosols, WRB; Argosols, CST) 和火山灰土<sup>[23-25]</sup>。

### 1.4 统计分析

在各级幅度上分表层 (0~20 cm) 和剖面 (0~100 cm) 计算土壤全氮含量的最小值、最大值、平均值和变异系数 (% CV),表征不同幅度上的变异程度。为了对比不同行政区幅度上的土壤全氮含量变异性的差异,计算了不同幅度间的变异度<sup>[9]</sup>,公式如下:

$$CVratio = \left[ \frac{(CV_1 - CV_2)}{(CV_1 + CV_2)} \right]^2 \quad (1)$$

式中,  $CV_1$  和  $CV_2$  分别表示两个不同幅度上土壤全氮的变异系数。随变异度的增大,不同幅度上土壤全氮变异程度的差异增加。

统计分析是在 SPSS13.0 和 Origin7.5 下进行的。运用回归分析,建立土壤全氮变异性与旱地面积或者行政区面积间的定量关系,探索土壤全氮变异性对幅度拓展的响应。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同行政区幅度上土壤全氮含量及其变异特征

东北地区不同幅度上旱地土壤全氮含量及其变异特征如表 1 所示。土壤中氮的含量是评价土壤氮素肥力的一个重要指标,我国东北地区旱地表层土壤平均全氮含量为  $1.41 \text{ g kg}^{-1}$ ,明显高于全国耕地土壤耕层的  $1.05 \text{ g kg}^{-1}$ <sup>[26]</sup>,表明我国东北地区旱地土壤氮素肥力高于全国平均水平。在省级、地级市和县级幅度上,无论是 0~20 cm 表层还是 0~100 cm 剖面平均土壤全氮含量的分布表现出从北至南逐渐递减的趋势,这主要是受气温在我国东北地区由北往南递增影响,与 Yang 等<sup>[4]</sup> 的研究结果类似。

在不同行政区幅度上,无论是表层还是剖面,平均土壤全氮含量的变异性均较大,但空间分布趋势不明显。除黑龙江省、内蒙古东部、海轮和新金县外,平均土壤全氮含量的变异系数均是剖面大于表层,变异性高将给剖面土壤氮库的估算带来很大的统计不确定性<sup>[27]</sup>,而且需要较高的样本数目。在省级、市级和县级幅度上,表层平均土壤全氮含量变异系数最高值分别为其最低值的 1.55 倍、5.15

倍和 5.20 倍,在剖面分别为 2.04 倍、4.87 倍和 3.47 倍。由表 1 可以看出,在省级(吉林的剖面,辽宁)、地市级(延边和抚顺)和县级(德惠和新金)幅

度上均有土壤全氮含量的变异系数超过 100% 高于大区幅度变异的值,这可能是由于个别土壤剖面受所处位置的微地形或地下水等非地带性因素影响<sup>[25]</sup>。

表 1 不同行政区幅度上的旱地土壤全氮含量分布特征

Table 1 Distribution of soil TN content in the uplands at different administration region scales

幅度 Scale	行政区 Administration region	剖面数 Profile number	0 ~ 20 cm 全氮含量 TN Content					0 ~ 100 cm 全氮含量 TN Content				
			均值	最小值	最大值	标准差	变异系数	均值	最小值	最大值	标准差	变异系数
			Mean (g kg <sup>-1</sup> )	Min (g kg <sup>-1</sup> )	Max (g kg <sup>-1</sup> )	Std. Dev.	CV (%)	Mean (g kg <sup>-1</sup> )	Min (g kg <sup>-1</sup> )	Max (g kg <sup>-1</sup> )	Std. Dev.	CV (%)
大区 Region	东北区 Northeast China	1 041	1.41	0.030	18.70	1.34	94.98	0.96	0.051	13.10	0.96	100.1
省级 Province	黑龙江 Heilongjiang	192	2.43	0.20	18.70	1.94	79.69	1.42	0.19	6.46	0.88	61.75
	吉林 Jilin	412	1.38	0.05	15.81	1.11	80.70	0.99	0.05	13.10	1.14	115.4
	辽宁 Liaoning	347	0.93	0.03	15.00	0.93	99.41	0.69	0.05	11.75	0.73	105.1
	内蒙东 Eastern Inner Mongolia	90	1.19	0.14	3.76	0.76	64.16	0.83	0.26	2.41	0.47	56.68
地市级 City	绥化市 Suihua	32	3.30	1.52	5.84	1.04	31.51	1.96	0.72	3.82	0.70	35.92
	黑河市 Heihe	34	2.48	0.88	9.75	1.55	62.64	1.67	0.80	6.46	1.08	64.79
	长春市 Changchun	121	1.34	0.30	6.49	0.66	49.12	1.16	0.30	10.16	1.12	97.10
	松原市 Songyuan	61	1.17	0.21	2.02	0.41	34.97	0.73	0.11	1.53	0.27	36.61
	四平市 Siping	91	1.09	0.29	2.57	0.40	36.55	0.79	0.12	1.79	0.33	41.97
	抚顺市 Fushun	38	1.45	0.31	15.00	2.35	162.1	1.04	0.25	11.75	1.82	174.8
	赤峰市 Chifeng	42	0.71	0.14	1.65	0.30	42.60	0.57	0.26	1.41	0.24	42.77
	延边市 Yanbian	43	2.13	0.45	15.81	2.41	112.8	1.33	0.25	12.88	1.96	147.1
县级 County	嫩江 Nenjiang	15	3.04	1.78	3.97	0.81	26.68	1.87	1.04	3.07	0.61	32.64
	海伦 Hailun	15	2.93	0.88	9.75	2.27	77.37	2.10	0.83	6.46	1.50	71.48
	榆树 Yushu	31	1.49	0.34	2.63	0.53	35.29	1.09	0.34	2.55	0.43	39.58
	德惠 Dehui	66	1.34	0.37	6.49	0.78	57.69	1.30	0.30	10.16	1.47	113.2
	梨树 Lishu	58	1.04	0.40	1.82	0.29	28.29	0.79	0.18	1.54	0.31	39.17
	阜新 Fuxin	29	0.75	0.34	1.84	0.35	46.20	0.61	0.25	2.70	0.44	71.47
	锦西 Jinxi	50	0.71	0.23	1.70	0.29	41.01	0.63	0.12	3.08	0.48	77.21
	新金 Xinjin	35	0.78	0.03	6.35	1.08	138.8	0.59	0.05	3.70	0.63	106.9
	科右中旗 Keyouzhongqi	17	1.64	0.64	2.73	0.63	38.08	0.97	0.38	1.98	0.49	50.38

## 2.2 土壤全氮含量变异对行政区幅度拓展的响应

根据表 1 的数据,县级、地市级、省级土壤全氮含量的变异分别用各县、各地级市、各省土壤全氮含量变异系数的平均值来表示,图 2 为平均土壤全氮含量变异系数随幅度增大的变化结果。可以看出,在 0 ~ 20 cm 表层和 0 ~ 100 cm 剖面,平均土壤

全氮含量的变异系数均随着幅度的增加而增大,并且剖面上的变异大于表层的变异,这可能是受人为耕作的影响造成。表层和剖面平均土壤全氮含量的变异系数从最小的县级幅度 54.38% 和 66.90%,增大至地市级幅度的 66.54% 和 80.13%,再增加至省级幅度的 80.99% 和 84.74%,在东北地区变异达

到最大为 94.98% 和 100.1%。

土壤及其属性的空间变异性与一定的生态过程相联系<sup>[28]</sup>。东北地区旱地土壤全氮含量的变异性随幅度的增加而增大,说明在不同幅度上控制土壤属性变异的主要生态过程不同。影响土壤属性空间变异性的各种自然和人为因素在不同幅度上的重要性并不均等<sup>[29]</sup>。通常认为在较小的幅度上,如田块,土壤属性空间变异主要受人类活动的影响,例如土地利用、农田管理措施等<sup>[30]</sup>,而在较大幅度,则主要受气候、母质等因素控制<sup>[31]</sup>。因此,不同幅度上土壤全氮含量变异性的主控因素是土壤属性尺度效应研究的重点问题之一。

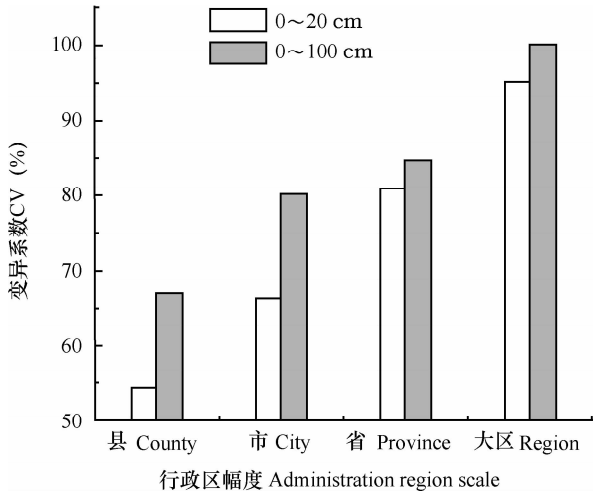


图2 土壤全氮含量在不同行政区幅度上的变异  
Fig. 2 Variability of soil TN content at different administration region scales

为了进一步探索土壤全氮含量变异随幅度的变化趋势,将 9 县、8 地市和 4 省级的行政区面积和旱地面积分别取均值代表县级、地市级和省级幅度大小,并分别建立基于行政区面积和旱地面积表征的县级、地市级、省级和大区级幅度与土壤全氮含量变异系数的关系,结果如图 3 所示。土壤全氮含量的变异系数与行政区面积和旱地面积在表层和剖面均为对数关系,其中表层的关系好于剖面,与旱地面积的关系好于行政区面积,这可能与所研究的土壤均为旱地土壤有关。当幅度较小时,随幅度增加,土壤全氮含量变异的变化相对较快,而当幅度较大时,随幅度增加,土壤全氮含量变异增加得相对较慢,并且剖面土壤全氮含量的变异随幅度增大的变化较表层慢。以与行政区面积的关系为例来说明,如在县级幅度上,当行政面积增加 6 000 km<sup>2</sup>时,表层土壤全氮含量的变异系数增加了 9.95%,剖面增加了 7.55%,而在省级幅度上增加同样大小的面积,则其变异系数在表层仅增加了 0.72%,剖面仅增加了 0.54%。如果让东北地区旱地土壤全氮含量变异减少 50%,需将以行政区面积和旱地面积表征的幅度分别减少 6 个和 5 个数量级。同样的关系在其他土壤属性的研究中也具有类似报道,如 Conen 等<sup>[32]</sup>和 Wang 等<sup>[33]</sup>均发现幅度与平均土壤有机碳密度之间存在对数关系。该关系的存在为土壤有机碳和全氮含量变异的尺度上推和下推提供可能。

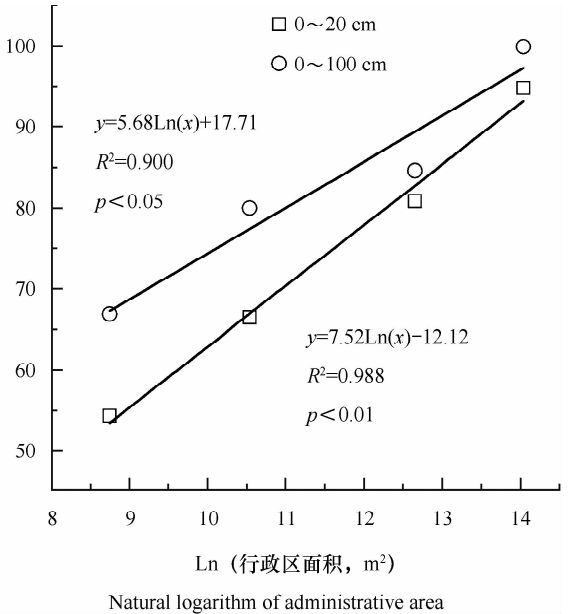
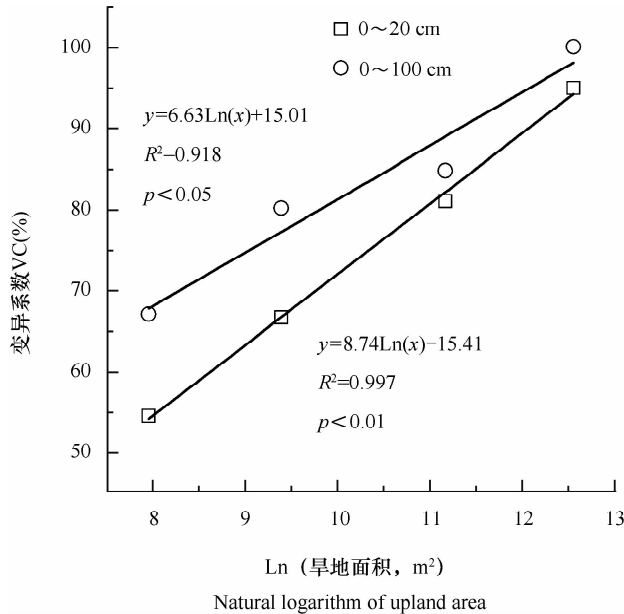


图3 土壤全氮含量变异对幅度拓展的响应

Fig. 3 Response of soil TN content variability to the expansion of scale

由于土壤全氮含量在不同幅度上的变异存在差异,在进行尺度推绎时会带来较大的不确定性,因此弄清楚土壤全氮含量变异程度在不同幅度间的差异是进行尺度上推的前提。这种差异可用变异度来表示,结果如图4所示。变异度数值越小,表明两个幅度间土壤全氮含量变异的差别越小,反之,数值越大,则表明两个幅度间土壤全氮含量变异的差别越大。对于表层土壤而言,向上拓展的级

别不同,变异度间差异较大。当从县级、地市级和省级幅度分别向上拓展一个级别时,其变异度相差不大,最大为0.0033,从县级至省级或者从地市级至大区级拓展两个级别时,变异度相差0.0076;而剖面则不同,除了从市级至省级外,拓展一个或两个级别时,其变异度也类似,最大达0.054。从县级至大区的拓展变异度最大,尤其是表层。因此,相邻幅度之间的尺度推绎相对较容易,当幅度之间的差异越大时,土壤全氮含量变异的尺度推绎越难。如何将土壤属性及其生态过程从小幅度(如田块)上推至大幅度(如整个生态系统)亦是景观生态学中非常重要和目前研究的问题之一<sup>[10]</sup>。

### 2.3 土壤全氮含量变异对土壤分类幅度拓展的响应

旱地土壤全氮含量在不同分类级别(土属、亚类、土类和土纲)的变异情况如图5所示。基于所有剖面,土壤分类幅度上平均土壤全氮含量的变异性随着土壤分类幅度升高而增大,并且从亚类至土类,再至土纲级别尤为明显。表层和剖面的土壤全氮含量变异分别从土属的46%和48%增加至土纲的78.78%和68.35%,表层和剖面分别增加了33%和20%左右。小于基于行政区幅度的土壤全氮含

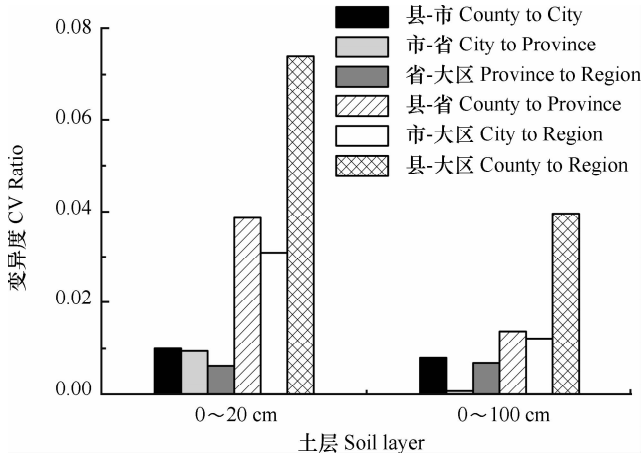


图4 不同幅度间土壤全氮含量变异的差异

Fig. 4 Differences variability of soil TN content between different scales

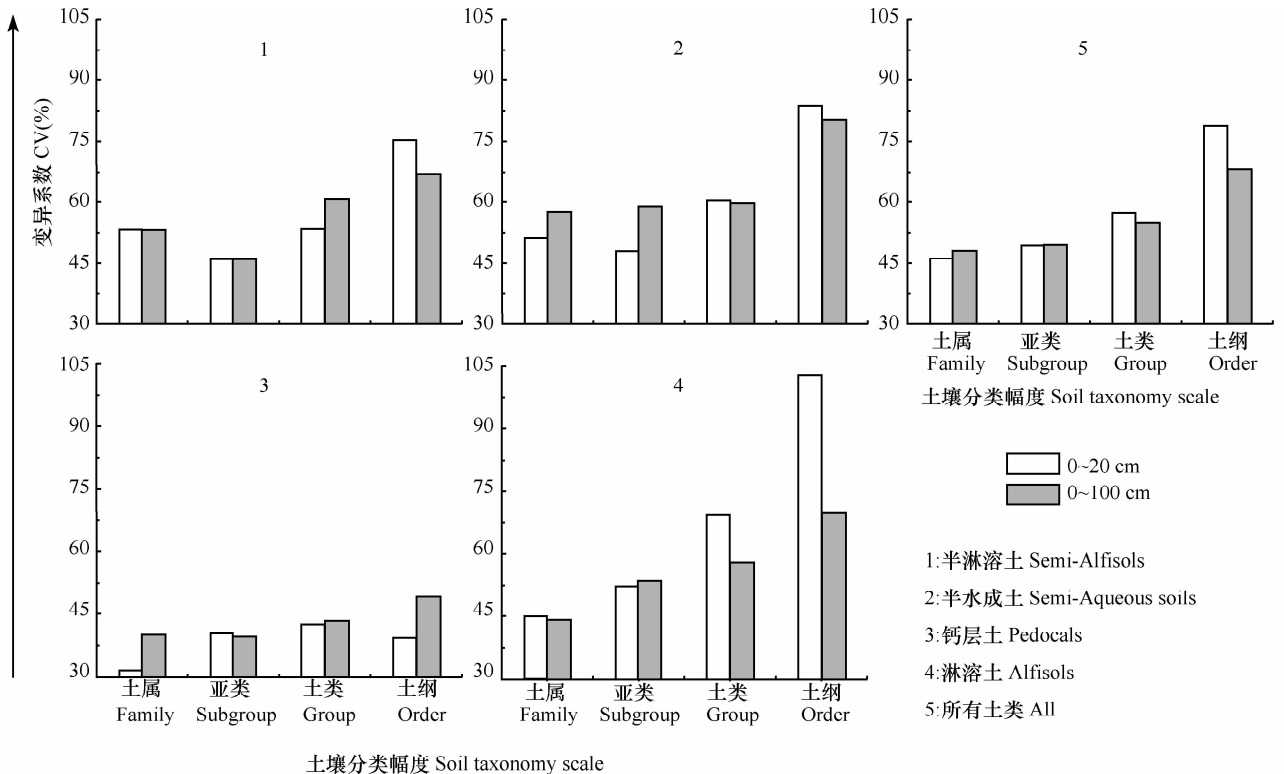


图5 基于土壤分类幅度的土壤全氮含量变异

Fig. 5 Variability of soil TN content at the soil taxonomy scale

量变异水平(表 2)。这可能是基于行政区幅度仅考虑了空间因素,而基于土壤分类幅度,不同土纲、土类、亚类或土属之间的划分是依据成土因素、成土过程以及土壤属性的差异进行的,

高级别土壤分类幅度反映了土壤发生学方面的差异,而低级别土壤分类幅度则较多地考虑了土壤在生产利用上的差别<sup>[34]</sup>,较基于行政区幅度所考虑的因素更多,相对更均质。

表 2 不同类型幅度表层土壤全氮含量变异系数

Table 2 Variability of soil TN content in the surface layer at different scales

行政区幅度 Administration region scale	变异系数 CV(%)	土壤分类幅度 Soil taxonomy scale	变异系数 CV(%)	土壤类型—行政区幅度 Soil type-administration region scale	
				变异系数 <sup>1)</sup> CV(%)	变异系数 <sup>2)</sup> CV(%)
县级 County	54.38	土属 Family	46.17	40.94	50.00
地市级 City	66.54	亚类 Subgroup	49.20	46.29	73.55
省级 Province	80.99	土类 Group	57.22	58.99	94.94
大区 Region	94.98	土纲 Order	78.78	82.17	111.0

1)地带性土壤 Zonal soil;2)非地带性土壤 Intrazonal and azonal soil

由图 5 可知,土壤全氮含量的变异随分类幅度的变化情况在不同土纲之间有所差异。首先,随着分类级别的升高,平均土壤全氮含量变异的变化趋势不同,例如半淋溶土(Cambisols, WRB)<sup>[23]</sup>的平均土壤全氮含量变异在土属至亚类级别略有减小,而后逐渐增大;半水成土(Cambisols, WRB)<sup>[23]</sup>仅表层土壤全氮含量变异在土属至亚类级别略有减小;对钙层土(Calcisols, WRB)<sup>[23]</sup>而言,剖面土壤全氮含量变异与半水成土的表层类似,在土属至亚类级别减小,之后逐渐增大,而表层的变异在土属至土类级别逐渐升高,至土纲时又减少;淋溶土(Luvisols, WRB)<sup>[23]</sup>的全氮含量变异的规律较为一致,随分类级别的升高,土壤全氮含量变异逐渐增大。其次,平均土壤全氮含量的变异随土壤分类幅度变化的变幅在不同土纲间有较大差别,钙层土的变幅最小,在表层和剖面均不足 10%。而半淋溶土的变幅最大,在表层和剖面的变幅分别约为 58% 和 26%。

目前国内外对于土壤氮储量的估算方法有两种,一种是采用 C/N 的方法由土壤有机碳推算,另一种是直接根据土壤类型图和土壤剖面直接计算土壤氮储量。不同类型土壤的全氮含量变异程度将影响土壤氮储量的估算精度。研究表明,土壤分类幅度越小,土壤全氮含量变异性越小,氮库的估算结果越精确。但是分类幅度越小时,估算氮库所需的剖面数目越多。此外,不同土纲土壤全氮含量变异有差异,因此在估算土壤氮库时,需要权衡不同土壤分类幅度上的全氮变异程度和剖面数

目大小,来选择一个合适的聚类水平,而且还要考虑土纲之间的差异,如果估算东北地区旱地土壤氮库时,钙层土可采用土纲进行聚类,其他土纲则需要选择土类或亚类等进行聚类。

## 2.4 土壤全氮含量变异对土壤类型—行政区幅度拓展的响应

通过以上研究可知,土壤全氮含量变异性均随行政区幅度和土壤分类幅度拓展而增大,为此,综合考虑行政区和土壤类型,对东北地区旱地土壤全氮含量变异对土壤类型—行政区幅度拓展的响应进行了分析(图 6)。结果显示,除 0~100 cm 剖面地带性土壤在地市级幅度上的平均土壤全氮含量变异系数减少外,在表层和剖面,地带性土壤和非地带性土壤的平均土壤全氮含量变异系数均随着幅度增加而增大。除了在县级幅度,地带性与非地带性土壤全氮含量变异系数间的差异较小外,其他三种幅度上,非地带性土壤的全氮含量变异均明显高于地带性土壤。这可能是因为非地带性土壤主要受地方性因素,比如地形、水文地质条件影响,在较小行政区幅度,如县级,控制非地带性土壤的地方性因素基本一致,而在较大的行政区幅度内,既包括受水分条件控制的有机质含量较高的沼泽土、泥炭土,也有发育于风成沙性母质有机质含量较少的风沙土等,从而导致在较大行政区幅度上非地带性土壤全氮含量变异高于地带性土壤。

土壤全氮含量变异性的研究可为土壤氮素管理与评价过程中的采样设计提供理论指导。通过对比不同类型幅度下表层土壤全氮含量变异系数

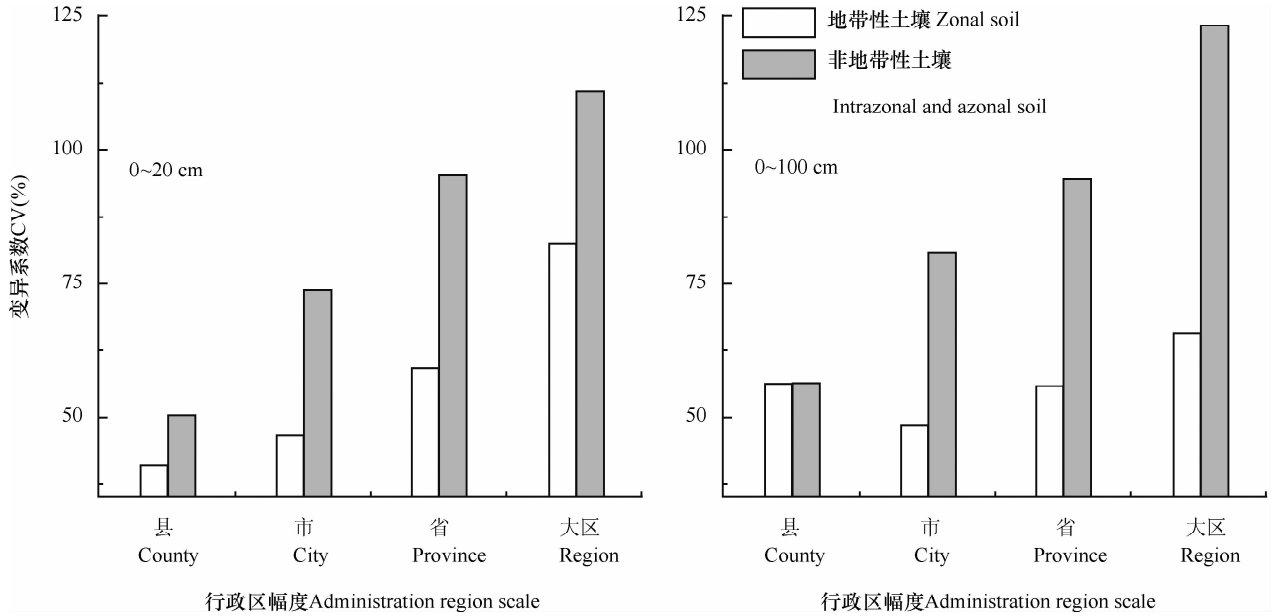


图 6 地带性土壤和非地带性土壤全氮含量在不同幅度上的变异

Fig. 6 Variability of soil TN content at the soil type-administration region scale

可知,在三种类型幅度中,当幅度较小时(县级、市级或土属、亚类),基于地带性土壤—行政区幅度得到的土壤全氮含量的变异较小,当幅度较大时(省级、大区或土类和土纲),基于土壤分类幅度的土壤全氮含量变异最小。在各级行政区幅度,非地带性土壤全氮含量的变异均较大。因此在进行该区不同幅度旱地土壤资源调查时,需综合考虑行政区幅度和土壤分类来确定采样数目。当行政区幅度的等级相同时,与地带性土壤相比,非地带性土壤往

往需要更多的样本数。所以,从东北地区旱地土壤全氮含量的变异情况来看,基于土壤分类进行土壤资源调查好于按照行政区或土壤类型(是否地带)行政区幅度。

基于旱地面积表征的县级、地市级、省级和大区级幅度与地带性土壤和非地带性土壤的平均全氮含量变异系数建立的定量关系如图 7 所示。其结果可以用于揭示不同类型土壤全氮含量变异对行政区幅度拓展的响应。在表层,平均土壤全氮含量

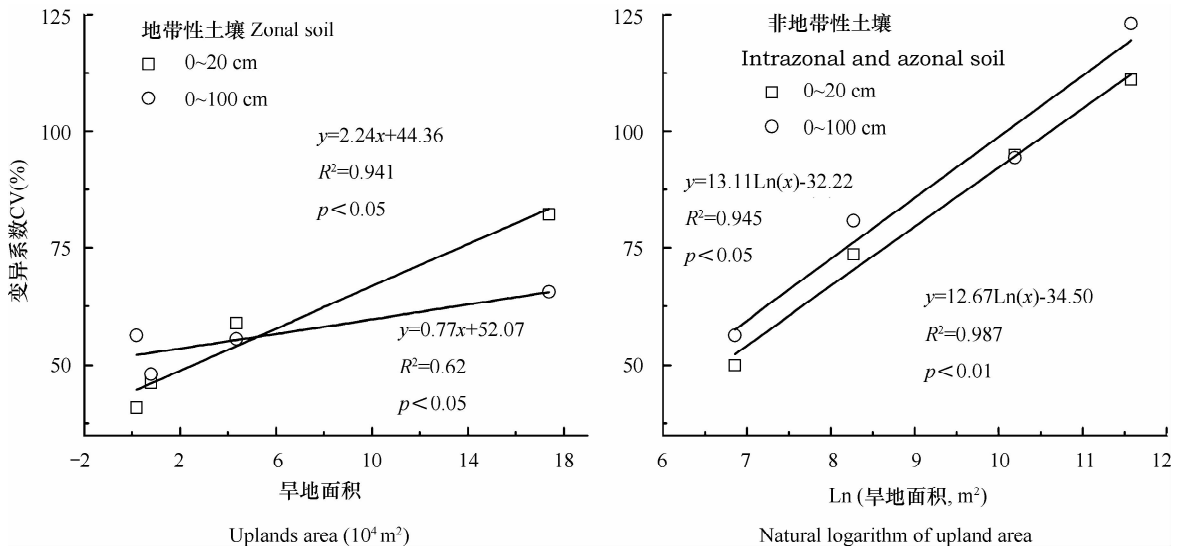


图 7 地带性土壤和非地带性土壤全氮含量变异对幅度拓展的响应

Fig. 7 Response of variability of soil TN content in zonal, intrazonal and azonal soils to the expansion of scales



变异系数与旱地面积间表现为显著的线性关系 ( $R^2 = 0.94, p < 0.05$ ), 而剖面则不显著 ( $p > 0.05$ )。非地带性土壤无论在表层还是剖面均呈现为显著的对数关系 ( $p < 0.05$ ), 当幅度由小至大变化时, 平均土壤全氮含量变异系数增加的趋势逐渐变慢, 并且剖面的变化较表层快。如在县级幅度基础上, 当旱地面积增加  $1\ 000\ \text{km}^2$  时, 非地带性土壤表层平均全氮含量的变异系数增加了  $9.1\%$ , 剖面增加了  $9.4\%$ , 在省级幅度上, 增加相同的旱地面积时, 则非地带性土壤表层和剖面平均全氮含量变异系数仅分别增加  $0.47\%$  和  $0.48\%$ 。

所有类型土壤的平均全氮含量变异与行政区的幅度的关系优于地带性和非地带性土壤。因此, 土壤全氮含量变异的尺度推绎时应基于所有类型的土壤进行。但是本研究存在一定的误差和不确定性。一方面, 在研究中由于剖面数目限制, 仅选择了剖面数目较多的典型地级市和县, 其代表性仍有待验证, 由此得到的变异系数可能会偏低; 另一方面, 三种类型幅度均只有 4 个水平的幅度, 只能粗略研究土壤全氮含量空间变异对幅度拓展的响应, 存在一定的局限。而且本研究的结果是基于旱地土壤得到的, 不能应用于其他土地利用类型下的土壤。为此, 对于土壤全氮含量变异性的探索仍需进一步进行方法论的研究。

### 3 结 论

东北地区旱地土壤全氮含量变异随着幅度的增加逐渐增大, 但在不同类型幅度间的变化有所差异, 说明在不同幅度上控制土壤全氮含量的主要生态过程不同。在行政区幅度, 无论表层还是剖面, 旱地面积或行政区面积与平均土壤全氮含量变异系数具有较强的对数关系, 明显好于土壤类型—行政区幅度, 为不同幅度土壤全氮含量变异的尺度推绎提供可能, 虽然存在一定的误差和不确定性, 但初步的结果表明, 在进行该区土壤全氮含量变异的尺度推绎时, 基于所有类型的土壤较分别基于地带性土壤或非地带性土壤的效果好, 并且跨越幅度的等级越多, 尺度推绎的难度越大; 在土壤分类幅度, 不同土纲的平均土壤全氮含量的变异随幅度变化的趋势、变幅等均存在差异, 其中钙层土变异的变化最小, 半淋溶土最大, 此结果可为基于土壤类型聚类的土壤氮库估算提供理论指导。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 朱兆良. 土壤氮素研究的现状和展望. 中外科技政策与管理, 1994(11): 94—97. Zhu Z L. Current status and perspective of researches on soil nitrogen (In Chinese). Science and Technology Policy and Management, 1994(11): 94—97
- [ 2 ] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778—783. Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778—783
- [ 3 ] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage. Nature, 1985, 317: 613—616
- [ 4 ] Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China. Pedosphere, 2007, 17(6): 776—785
- [ 5 ] Wei Y, Bai Y, Jin J, et al. Spatial variability of soil chemical properties in the reclaiming marine foreland to Yellow Sea of China. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(9): 1 103—1 111
- [ 6 ] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤氮素空间分布特征及其影响因素. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1 497—1 503. Pang S, Li T X, Wang Y D, et al. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in croplands at county scale and related affecting factors (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1 497—1 503
- [ 7 ] Tesfahunegn G B, Tamene L, Vlek P L G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 124—139
- [ 8 ] Schöning I, Totsche K U, Kögel-Knabner I. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. Geoderma, 2006, 136: 631—642
- [ 9 ] Jenerette G D, Wu J G, Grimm N B, et al. Points, patches, and regions: scaling soil biogeochemical patterns in an urbanized arid ecosystem. Global Change Biology, 2006, 12: 1 532—1 544
- [ 10 ] Garten Jr C T, Kang S, Brice D J, et al. Variability in soil properties at different spatial scales (1 m—1 km) in a deciduous forest ecosystem. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 2 621—2 671
- [ 11 ] 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. 土壤学报, 2011, 48(2): 302—310. Li C J, Li Y, Ma J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut Desert (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 302—310
- [ 12 ] Wu J G, Li H B. Concepts of scale and scaling, in scaling and uncertainty analysis in ecology: Methods and applications//Wu J G, et al. Dordrecht: Springer, 2006: 3—16
- [ 13 ] 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
- [ 14 ] 张黎明, 林金石, 史学正, 等. 中国水稻土氮密度变异性的

- 幅度效应研究. 生态环境学报, 2011, 20(1): 1—6. Zhang L M, Lin J S, Shi X Z, et al. The effect of different extents on variation of nitrogen density of paddy soils in China (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 1—6
- [15] 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
- [16] 盛建东, 肖华, 武红旗, 等. 不同取样间距农田土壤全量养分空间变异特征研究. 土壤通报, 2006, 37(6): 1 062—1 064. Sheng J D, Xiao H, Wu H Q, et al. Spatial variability of total nutrients in arable soil as affected by different sampling distances (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1 062—1 064
- [17] Steffens M, Kölbl A, Giese M, et al. Spatial variability of topsoils and vegetation in a grazed steppe ecosystem in Inner Mongolia. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(1): 78—90
- [18] Sahrawat K L, Regoa T J, Wania S P, et al. Stretching soil sampling to watershed: Evaluation of soil-test parameters in a semi-arid tropical watershed. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(19/20): 2 950—2 960
- [19] 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
- [20] 张世熔, 孙波, 赵其国, 等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征. 土壤学报, 2007, 44(5): 885—892. Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in south China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 885—892
- [21] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征——以北京市平谷区为例. 生态学报, 2008, 28(10): 4 957—4 964. Wang S Y, Lu P, Wang J L, et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu County, Beijing (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4 957—4 964
- [22] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, et al. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-From molecular to global scale. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 702—717
- [23] Shi X Z, Yu D S, Xu S X, et al. Cross-reference for relating Genetic Soil Classification of China with WRB at different scales. Geoderma, 2010, 155(3/4): 344—350
- [24] Shi X Z, Yu D S, Yang G X, et al. Cross-reference benchmarks for translating the Genetic Soil Classification of China into the Chinese Soil Taxonomy. Pedosphere, 2006, 16(2): 147—153
- [25] 张凤荣. 土壤地理学. 北京: 中国农业出版社, 2002. Zhang F R. Soil geography (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2002
- [26] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2005: 547. Chen H M. Environmental soil science (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005: 547
- [27] Yang X M, Drury C F, Wander M M, et al. Evaluating the effect of tillage on carbon sequestration using the minimum detectable difference concept. Pedosphere, 2008, 18(4): 421—430
- [28] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007. Wu J G. Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2007
- [29] Grüneberg E, Schöning I, Kalko E K V, et al. Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons. Geoderma, 2010, 155(3/4): 426—433
- [30] Yemefack M, Rossiter D G, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. Geoderma, 2005, 125: 117—143
- [31] Schulp C J E, Veldkamp A. Long-term landscape-land use interactions as explaining factor for soil organic matter variability in Dutch agricultural landscapes. Geoderma, 2008, 146(3/4): 457—465
- [32] Conen F, Zerva A, Arrouays D, et al. The carbon balance of forest soils: Detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and boreal forests//Griffith H, Jarvis P G. The carbon balance of forest biomes. London: Garland Science/BIOS Scientific Publishers, 2004: 233—247
- [33] Wang D D, Shi X Z, Lu X X, et al. Response of soil organic carbon spatial variability to the expansion of scale in the uplands of Northeast China. Geoderma, 2010, 154(3/4): 302—310
- [34] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2010: 311. Huang C Y, Xu J M. Pedology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2010: 311

## RESPONSE OF SPATIAL VARIABILITY OF SOIL TOTAL NITROGEN TO EXPANSION OF UPLANDS IN SCALE IN NORTHEAST CHINA

Wang Dandan<sup>1</sup> Yue Shuping<sup>1</sup> Lin Fenfang<sup>1</sup> Shi Xuezheng<sup>2†</sup> Yu Dongsheng<sup>2</sup>

(1 College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

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

**Abstract** Soil nitrogen is not only an essential nutrient element for crops, but also an important ecological element.

The study on spatial variability of soil total nitrogen content at different scales is the basis for evaluating soil quality and predicting nitrogen storage in soil accurately. Based on the data of 1 041 soil profiles obtained during the second soil survey in Northeast China, three scales were set in this study, namely, administration region scale (county, city, province and region), soil taxonomy scale (family, sub-group, great group and order of soil) and soil type-administration scale (zonal soil and intrazonal and azonal soil), to study variability of soil total nitrogen (STN) content in the surface soil layer (0 ~ 20 cm) and the soil profile (0 ~ 100 cm) and its response to expansion of upland in scale. Results show that variability of STN content in the surface layer and in the profile increased with the expansion of scale. At the administration scale, a strong logarithmic relationship was found between the area of uplands or of the administrative region and the mean CV of STN content. At the taxonomy scale, though the mean CV of STN content of each soil order increased with the extension of scale from family to order, amplitude of the variation varied. At the soil type-administration region scale, zonal, intrazonal and azonal soils displayed a similar trend in variability of STN content, but differed in variation rate, and a strong logarithmic relationship between the area of uplands and the mean CV of intrazonal and azonal STN content was observed. These findings may provide a basis for assessing soil nitrogen storage in uplands clustered by soil type at various scales in Northeast China, and some theoretical guidance for determining the number of soil samples to be taken in investigation of soil resources in that region.

**Key words** Soil total nitrogen; Spatial variability; Scale; Uplands