

# 长白山阔叶红松林土壤无机氮空间异质性\*

徐媛<sup>1,2</sup> 张军辉<sup>1\*\*</sup> 韩士杰<sup>1</sup> 王树堂<sup>1</sup> 王存国<sup>1</sup> 王树起<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 利用地统计学方法,研究了长白山阔叶红松林内土壤表层(0~10 cm)铵态氮和硝态氮的空间异质性。结果表明:长白山阔叶红松林内土壤表层铵态氮和硝态氮的半方差函数可用球状模型或高斯模型拟合。土壤表层铵态氮和硝态氮的空间分布均呈现中等程度的空间自相关,结构比范围分别在0.70%~41.47%和32.26%~52.66%;铵态氮的空间自相关尺度小于硝态氮,变程分别为8.87和9.76 m。土壤表层铵态氮和硝态氮在空间上呈斑块状分布;铵态氮的空间异质性程度高于硝态氮,硝态氮与土壤水分呈显著负相关关系( $r = -0.3743$ ,  $P < 0.05$ ),而铵态氮与土壤水分无显著的相关关系。

**关键词** 阔叶红松林 铵态氮 硝态氮 空间异质性 长白山

**文章编号** 1001-9332(2010)07-1627-08 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

**Spatial heterogeneity of soil inorganic nitrogen in a broadleaved-Korean pine mixed forest in Changbai Mountains of Northeast China.** XU Yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-hui<sup>1</sup>, HAN Shi-jie<sup>1</sup>, WANG Shu-tang<sup>1</sup>, WANG Cun-guo<sup>1</sup>, WANG Shu-qi<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; <sup>2</sup>*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(7): 1627-1634.

**Abstract:** Geostatistic methods were applied to study the spatial heterogeneity of top soil (0-10 cm) ammonium N and nitrate N in a broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains, Northeast China. The semi-variogram of soil ammonium N and nitrate N could be well fitted by spherical or Gaussian model. The spatial distribution of soil ammonium N and nitrate N all exhibited moderate autocorrelation, with the structural ratio being 0.70%-41.47% and 32.26%-52.66%, and the autocorrelation degree of soil ammonium N was smaller than that of soil nitrate N, with the variation distance being 8.87 and 9.76 m, respectively. Spatially, soil ammonium N and nitrate N were distributed in patches, and the spatial heterogeneity of soil ammonium N was higher than that of soil nitrate N. There was a significant negative correlation between soil nitrate N and soil moisture content, while soil ammonium N had less correlation with soil moisture.

**Key words:** broadleaved-Korean pine mixed forest; ammonium N; nitrate N; spatial heterogeneity; Changbai Mountains.

在自然生态系统中,土壤氮素是一种限制植物生长的重要元素,是调节生态系统生产量、结构和功能的关键性元素<sup>[1-3]</sup>。在森林土壤中,铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)是植物从土壤中可以直接吸收利用的主要无机氮素形态<sup>[4]</sup>。受地形、母质、植被、土壤侵蚀状况及坡度等因素的影响,土壤物理化学属性在空间上表现出高度的空间异质

性<sup>[5-6]</sup>。研究显示,土壤氮素异质性影响幼苗更新<sup>[7]</sup>、植物之间的共存与竞争<sup>[8]</sup>和植被的演替过程<sup>[9]</sup>。陆地生态系统的碳循环受养分元素特别是氮元素的制约<sup>[10-12]</sup>。由于生态系统中碳氮循环的相互作用<sup>[13-14]</sup>,土壤氮素异质性也影响着生态系统碳循环过程<sup>[15]</sup>。

目前有关生态系统土壤无机氮空间异质性的研究结果差异很大。Gallardo等<sup>[16]</sup>和Gross等<sup>[9]</sup>研究表明,土壤铵态氮和硝态氮存在空间结构性,并且铵态氮的空间变程大于硝态氮;而Cain等<sup>[17]</sup>和Lister等<sup>[18]</sup>研究发现,土壤硝态氮呈现空间结构性,铵态

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX-YW-Z-1022, KZX2-YW-416)和国家自然科学基金项目(40975071, 40930107)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: jhzhang@iae.ac.cn

2010-01-26 收稿,2010-04-29 接受。

氮则不具有空间结构性. 李菊梅等<sup>[19]</sup>认为,红油土耕层土壤硝态氮没有空间结构性,而铵态氮存在空间变异结构;王军等<sup>[20]</sup>发现,在黄土高原小流域,土壤全氮、有效氮存在空间相关性;Wang 等<sup>[21]</sup>在四川青藏高原东坡次生常绿阔叶林内研究发现,土壤铵态氮和硝态氮均呈现空间异质性现象,并且铵态氮的空间自相关范围大于硝态氮. 目前关于土壤氮素的空间格局和异质性的描述大多在农田、湿地或人工次生林中进行,对原始森林内土壤铵态氮和硝态氮的空间分布格局研究很少. 而未经干扰的原始森林的土壤氮素的变程和空间异质性格局可能与农田及人工次生林的结构不同.

长白山阔叶红松林是我国东北东部中温带湿润气候区最主要的原始森林植被类型,在调节区域气候和维系区域陆地生态平衡方面有着重要意义. 本文以长白山北坡阔叶红松林为研究对象,采用地统计学方法定量研究林内土壤无机氮素含量的空间变异特征,以期对长白山阔叶红松林土壤氮循环和森林生态系统生产力研究提供科学依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为位于吉林省东南部的长白山自然保护区内 (41° 42′ 45″—42° 45′ 18″ N, 127° 33′ 30″—128° 16′ 48″ E),属典型的温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂温暖多雨,春季风大干燥,秋季凉爽多雾,年均气温在 4.9℃~7.3℃,年降水量 600~900 mm. 试验地点在位于长白山自然保护区北坡的中国科学院长白山森林生态系统定位站阔叶红松林永久标准样地附近,林分郁闭度 0.8,海拔 740 m.

阔叶红松林内主要乔木树种有:红松 (*Pinus koraiensis*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、色木槭 (*Acer mono*)、糠椴 (*Tilia mandshurica*) 和枫桦 (*Betula costata*) 等;主要灌木为:毛榛子 (*Corylus mandshurica*)、东北山梅花 (*Philadelphus schurica*)、东北溲疏 (*Deutzia amurensis*) 和刺五加 (*Eleutherococcus senticosus*) 等;主要草本植物有:山茄子 (*Brachybotrys paridiformis*)、透骨草 (*Phryma leptostachya*)、水凤仙 (*Impatiens noli-tangere*) 和单穗升麻 (*Cimicifuga simplex*) 等. 样地土壤类型为暗棕色森林土,其成土母质主要为花岗岩、玄武岩和坡积物及部分第四纪湖积冲积物,成土过程主要为弱酸性淋溶过程和温带湿润森林下腐殖质积累过程,腐殖质层土壤 pH 值为 5.5~6.5. 土壤剖面形

态:0~4 cm 为枯枝落叶层;4~6 cm 为半腐败枯枝落叶层;6~11 cm 为深灰色或深灰棕色腐殖质枯枝落叶层,粘壤土,土壤颜色向下过渡明显,根系分布很多;11~32 cm 为白浆化暗棕色粘土,根系分布多,但向下明显减少;32~105 cm 为暗棕色粘土,核块状结构,基本没有根系分布<sup>[22-23]</sup>.

1.2 研究方法

1.2.1 采样 采用网格近点法 (lattice plus close pairs)<sup>[24]</sup> 取样. 在阔叶红松林永久标准地东侧选取 3 块地势较平坦的试验样地,面积均为 50 m×50 m. 将 1 号样地等间距划分为 100 个 5 m×5 m 的小样方,从中随机抽取 40 个小样方,小样方的中心点定为取样点,取样;然后从 40 个小样方中随机抽取 20 个小样方,每个小样方内随机加入一个距中心点不超过 2 m 的取样点,取样点总数为 60 个 (40+20). 采用同样方法在 2 号和 3 号样地分别选取 45 个 (30+15) 采样点. 除去土壤表层凋落物,用内径 3.9 cm 的土钻钻取土样,取样深度为 0~10 cm. 1 号样地土样在运输过程中有 10 个土样受到污染,将其剔除,测定剩余的 50 个土样.

1.2.2 样品测定 在样品中取部分土壤,采用烘干法测定水分含量,然后将土样过 2 mm 筛. 取 50 g 土样 (准确到 0.01 g) 置于振荡瓶中,加入 100 ml 氯化钾溶液 (2 mol·L<sup>-1</sup>),塞紧塞子后在振荡机上振荡 1 h,取出静置,待土壤-氯化钾悬浊液澄清后,将上清液过滤到 100 ml 的小瓶中备用. 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用镀铜镉-重氮化偶合比色法测定<sup>[25]</sup>.

1.3 数据处理

1.3.1 地统计学基本原理 地统计学中用来表征区域化随机变量空间变异结构的工具是变异函数 (semi-variogram), 其有 3 个重要参数即块金值 ( $C_0$ )、基台值 ( $C_0+C$ )、变程 ( $a$ )<sup>[26]</sup>. 块金值与基台值的比值 [ $C_0/(C_0+C)$ ] 为结构比,是衡量区域化随机变量的空间变异程度的重要指标. 如果结构比 <25%,表明系统具有强烈的空间相关性;结构比在 25%~75%,系统具有中等强度的空间相关性;结构比 >75% 则系统具有弱的空间相关性<sup>[27]</sup>.

将样地划分成 10000 个 0.5 m×0.5 m 的小栅格,利用变异函数所提供的区域化变量空间自相关程度,结合已测点的原始数据,采用 Kriging 插值法对研究区域的未测点进行无偏估计. 由于贝叶斯理论估计综合考虑了样本信息、先验信息和后验信息,考虑到一次抽样可能带来的误差,同时采用贝叶斯

理论估计长白山阔叶红松林内土壤无机态氮的变程。

**1.3.2 GAM 模型**  GAM 模型是分析生态学空间格局的常用方法之一。它是通过决定变量的平滑累加函数来构建回归函数,每个决定变量都有一个平滑累加函数。其一般形式为:

$$G\{E(Y)\}=b_0+f_1(X_1)+\cdots+f_m(X_m)$$

式中: $f_1\cdots f_m$  为  $m$  个变量  $X$  的平滑函数,可用三次样条函数来估计<sup>[28]</sup>。

**1.3.3 数据分析**  试验数据的空间分析处理采用 R 2.8.1 版统计分析软件中 geoR (Ribeiro and Diggle, 2001) 和 gstat (Pebesma and Wesseling, 1998) 程序包进行。数据的正态性用 Shapiro-Wilk 检验,对不满足正态分布的数据经 Box-Cox 转化成正态分布。

2 结果与分析

2.1 阔叶红松林土壤无机态氮的经典统计学分析

在不考虑空间位置和取样间距的情况下,研究区铵态氮和硝态氮含量的统计特征差异显著(表 1)。每块样地土壤硝态氮含量的变化范围均大于铵态氮,极差分别是 31.22 和 5.92  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤铵态氮和硝态氮含量变异系数分别在 10.16% ~ 49.50% 和 30.50% ~ 87.92%,呈中等强度变异性,硝态氮在每块样地内的变异强度高于铵态氮。

研究区内无机态氮均呈偏态分布( $P<0.05$ ),经 Box-Cox 转化后的数据经 Shapiro-Wilk 检验呈正态分布(表 1 中 P1 值),满足了地统计学分析要求。

2.2 阔叶红松林土壤无机态氮含量的空间异质性

研究样地最大空间距离内土壤无机态氮变异函数随着空间的加大而逐渐升高,然后趋于平稳(图 1)。从结构比  $C_0/(C_0+C)$  来看(表 2),1 号样地土壤铵态氮的空间异质性主要由结构性因素引起(99.3%),且其空间自相关性显著;其余两块样地内的土壤铵态氮呈现中等强度的空间相关性,由随

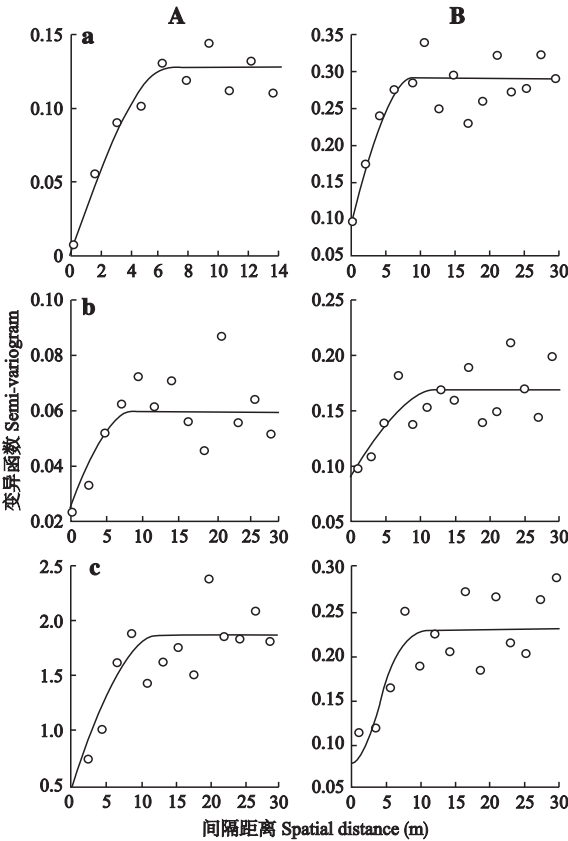


图 1 长白山阔叶红松林土壤铵态氮(A)和硝态氮(B)的半方差图

**Fig.1** Semi-variogram of soil ammonium (A) and nitrate (B) in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains. a) 样地 1 Plot 1; b) 样地 2 Plot 2; c) 样地 3 Plot 3. 下同 The same below.

机因素和结构性因素共同作用;土壤硝态氮由结构性因素引起的变异范围为 47.34% ~ 67.74%,在研究区域内表现为中等强度的空间自相关。总体上土壤铵态氮的空间自相关程度显著强于硝态氮。

由表 2 可以看出,铵态氮和硝态氮的空间自相关尺度(变程)分别为 6 ~ 12 m 和 8 ~ 12 m。根据相关研究对土壤无机态氮的估计范围<sup>[16]</sup>,假设铵态氮和硝态氮的变程范围均在 1 ~ 30 m,结合先验信息和后验信息,利用贝叶斯方法对土壤无机氮含量的

表 1 长白山阔叶红松林土壤无机态氮的经典统计  
**Tab.1 Descriptive statistics of soil inorganic nitrogen in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )**

样地 Plot	氮形态 N form	平均 Mean	最大 Max	最小 Min	标准差 SD	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	变异系数 CV(%)	P 值 P value	P1 值 P1 value
1	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	2.39	6.76	0.84	1.16	8.24	2.03	48.39	0.003	0.45
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	2.08	13.20	0.30	1.83	31.10	4.73	87.92	0.030	0.19
2	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	0.19	0.24	0.15	0.02	4.75	0.28	10.16	0.009	0.49
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	0.16	0.26	0.09	0.05	1.99	0.72	30.50	0.020	0.23
3	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	1.70	4.76	0.23	0.84	5.61	0.86	49.50	0.001	0.30
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	8.32	32.80	1.58	6.71	6.28	1.79	80.70	0.001	0.07

表 2 长白山阔叶红松林土壤铵态氮和硝态氮的半方差模型参数  
Tab.2 Parameters for the semivariogram model of soil ammonium and nitrate in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains

样地 Plot	氮形态 N form	拟合模型 Model	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	结构比 $C_0/(C_0+C)$	变程 Range (m)	对数似然值 L-likelihood
1	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	I	0.001	0.128	0.0070	6.7	108.8
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	I	0.094	0.290	0.3241	8.5	130.2
2	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	I	0.025	0.060	0.4147	8.0	94.4
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	I	0.089	0.169	0.5266	11.9	53.0
3	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	I	0.474	1.804	0.2627	11.9	155.9
	$\text{NO}_3^--\text{N}$	II	0.070	0.217	0.3226	8.8	169.9

I : 球状模型 Spherical model; II : 高斯模型 Gaussian model.

变程进行估计(表3). 两种方法结果除硝态氮含量变程在3号样地差异较显著外,其余样地的估计结果均较接近,且地统计结果均在95%的置信区间内.

2.3 阔叶红松林土壤无机态氮空间分布格局

研究样地土壤表层(0~10 cm)养分含量具有

高度的空间异质性,并决定了其空间分布格局的存在,由插值结果(图2)可以看出,各样地土壤无机态氮斑块大小、形状和空间分布等差异显著. 其中,1号样地铵态氮和硝态氮含量的高值区域在空间分布上呈斑块分布,且铵态氮的空间异质性显著强于硝

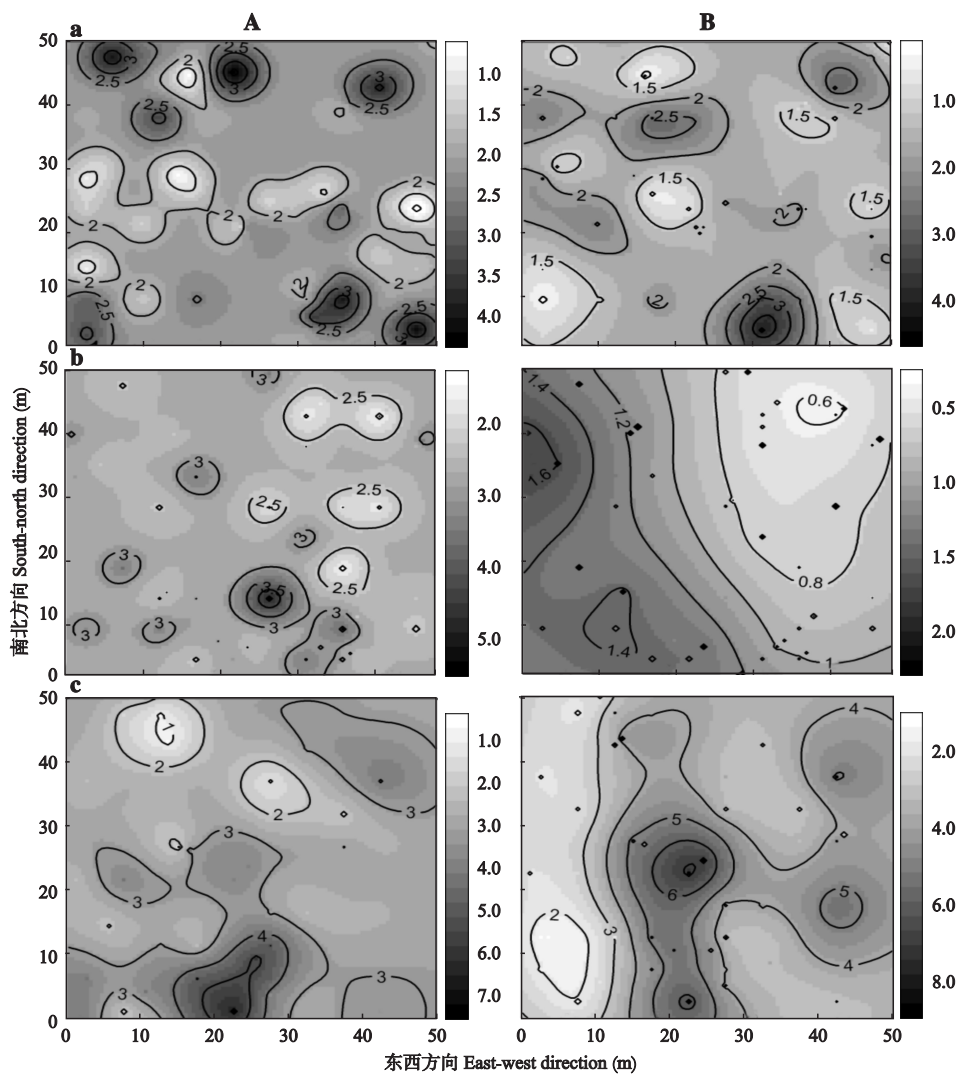


图 2 长白山阔叶红松林土壤铵态氮(A)和硝态氮(B)的空间分布格局  
Fig.2 Spatial distribution pattern of soil ammonium (A) and soil nitrate (B) in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains.



表 3  长白山阔叶红松林土壤铵态氮和硝态氮变程的贝叶斯估计

Tab. 3  Range of soil ammonium and nitrate in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains predicted by Bayes method

样地 Plot	氮形态 N form	变程平均值 Mean of range(m)	95% 置信区间 Confidence intervals of 95%	概率 Probability (%)
1	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	6. 8	[ 1,17]	14. 9
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	7. 2	[ 2,14]	12. 0
2	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	8. 7	[ 3,23]	12. 8
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	9. 2	[ 2,23]	14. 5
3	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	11. 5	[ 4,27]	15. 7
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	2. 7	[ 1,9]	30. 0

态氮;2 号样地的土壤无机态氮空间异质性小于 1 号样地,1、2 号样地内铵态氮分别占总无机氮含量的 53. 5% 和 54. 3% ,土壤无机氮的空间异质性均由

铵态氮的空间异质性来表现;3 号样地内铵态氮的空间异质性小于硝态氮,硝态氮占总无机氮含量的 83. 0% ,土壤无机氮的空间异质性主要由硝态氮的空间异质性体现.

图 3 结果表明,1、2 号样地土壤无机态氮的克立格估计标准差在 0. 5 左右,3 号样地内克立格估计标准差在 1 左右. 距离采样点越近,克立格估计的标准差越低,表明预测精度越高;相反,随着预测点与采样点的距离增加,预测的精度相对降低. 显然,克立格插值的精度受到样本容量和采样密度的影响,采样点越多,插值精度越高.

传统研究多采用随机取样简单求平均值的方法估计样地的速效氮含量,在样本量较少的情况下,其估算具有较大的不确定性. 从表 4 可以看出,就土壤无机态氮平均值估算而言,空间插值与简单平均结

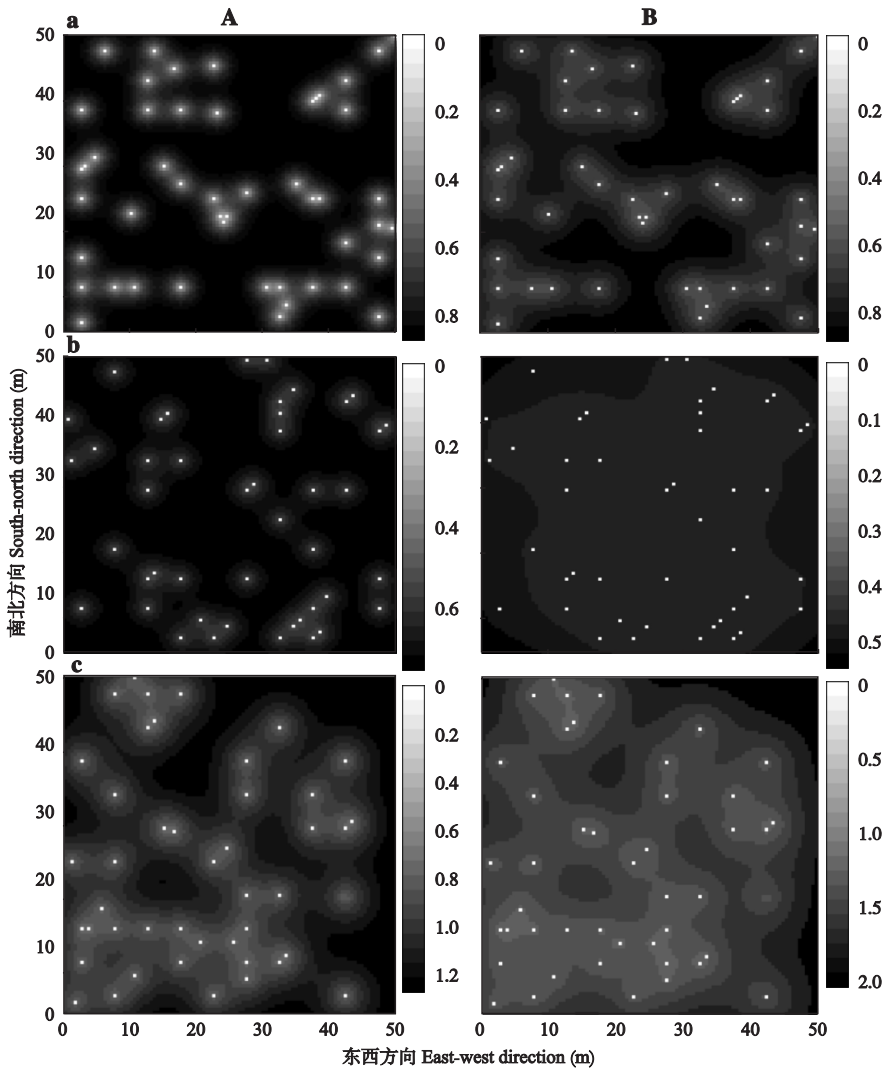


图 3  长白山阔叶红松林土壤铵态氮(A)和硝态氮(B)的克立格插值标准差

Fig. 3  The SD of Kriging interpolation of soil ammonium (A) and soil nitrate (B) in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains.

表 4 长白山阔叶红松林土壤铵态氮和硝态氮两种预测结果的比较  
Tab.4 Comparison of two predictions for soil ammonium and nitrate in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains (mg · kg<sup>-1</sup>)

样地 Plot	氮形态 N form	克立格均值 Kriging mean	简单均值 Simple mean	差异 Difference
1	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2.236	2.202	0.034
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1.827	1.851	0.024
2	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2.767	2.740	0.027
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1.132	1.043	0.089
3	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2.902	2.899	0.003
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	3.685	3.642	0.043

果的差异在 0.003 ~ 0.089 mg · kg<sup>-1</sup>, 在可接受范围之内. 然而, 就预测结果的不确定性(以预测结果平均标准差刻画)而言, 空间插值结果远小于简单平均方法. 以 1 号样地的硝态氮含量为例通过 bootstrape 随机抽样方法模拟采样数量对土壤无机态氮含量估算的不确定性(以预测标准差刻画, 图 4). 结果显示, 空间插值估算结果的不确定性小于传统简单平均方法, 随采样数量的增加, 这种差异越加显著, 此外, 空间插值不确定性本身亦随采样数量的增加而下降. 这说明本文在研究区域上的采样密度及样本容量在技术上是合理的.

2.4 土壤无机态氮与水分的相关性分析

水分是影响土壤养分空间分布的一个重要因子. 由于水分和无机态氮的空间分布受地理位置等其他因子的影响, 为避免地理位置的影响效应屏蔽相关关系, 本文采用 GAM 模型将影响因子剔除后, 对土壤无机态氮和水分含量做相关分析. 由表 5 可以看到, 在研究区域内, 土壤水分与铵态氮之间无显

表 5 长白山阔叶红松林土壤无机态氮和水分的相关性  
Tab.5 Correlation between soil inorganic nitrogen and water in broadleaved-Korean pine mixed forest of Changbai Mountains

样地 Plot	氮形态 N form	r	自由度 df	P
1	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.0722	48	0.622
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.4022	48	0.003
2	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.2627	43	0.081
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.3720	43	0.011
3	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.0441	43	0.773
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.3489	43	0.018

著负相关关系( $P>0.05$ ), 而与硝态氮呈显著负相关( $r=-0.3743, P<0.05$ ). 这与宋海星等<sup>[29]</sup>研究结果相符, 即土壤水分明显影响硝态氮的迁移和分布, 而对铵态氮并无显著影响. 土壤含水量与速效氮之间的这种关系可能是因为硝态氮不易为土壤颗粒吸附并且易溶于水随其流动; 此外, 在水分含量高的地方土壤的通透性差, 导致某些厌氧微生物如反硝化细菌生长活跃, 从而也导致部分硝态氮被反硝化以气体形式散失掉<sup>[30]</sup>, 使其与水分含量呈现负相关关系, 而铵态氮易吸附在土壤胶体表面的物理特性导致土壤含水量对其并无显著影响.

3 讨 论

在研究区域上, 长白山阔叶红松林内铵态氮和硝态氮具有显著的空间异质性, 是随机因素和结构性因素综合作用的结果, 是二者的物理化学属性的差异及土壤生态过程之间相互作用在空间分布上的综合表现.

铵态氮由结构性因素引起的空间异质性为 58.53% ~ 99.30%, 硝态氮为 47.34% ~ 67.74%, 表明土壤无机态氮的空间异质性主要受结构性因素如土壤矿物、地形、植被影响, 而随机因素影响较小. 本研究中, 长白山阔叶红松林内铵态氮空间异质性显著强于硝态氮, 这与 Callardo 等<sup>[16]</sup>的研究结果不同, 其原因可能是研究对象的植被结构不同所致. Callardo 等<sup>[16]</sup>研究的区域为草地、灌丛和次生林, 其林木分布相对均一; 而长白山阔叶红松林内除大乔木分布较均匀之外, 林下小乔木、灌木呈斑块状分布<sup>[31]</sup>, 使土壤表层和内部凋落物分布不均且质量各异, 而土壤无机氮则主要来源于凋落物的矿化过程.

土壤透气性的空间变异亦会显著影响土壤无机氮的空间差异. 森林土壤铵态氮主要来源于凋落物的矿化过程, 然后经过硝化作用生成硝态氮, 进一步

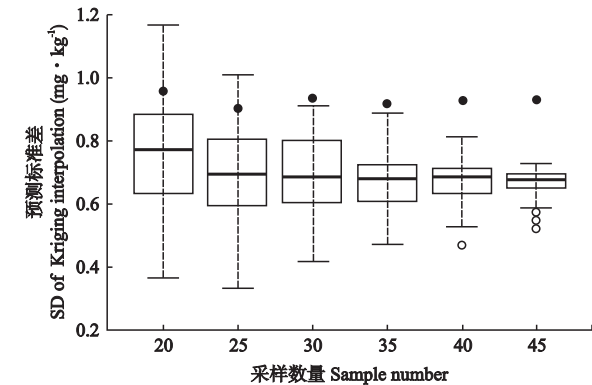


图 4 1 号样地土壤硝态氮空间插值预测标准差随采样数量的变化  
Fig.4 SD of Kriging interpolation of soil nitrate in plot 1 changed with sample number.  
黑点为相应样品 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 标准差 Macula was the KSD of corresponding NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N sample.

在反硝化细菌作用下以  $N_xO_x$  形式散发到空气中, 两个作用过程均与土壤的通气状况密切相关. 受地形、植物及微生物等条件的空间异质性影响, 阔叶红松林土壤物理性质如土壤水分、容重、毛管持水量和孔隙度具有明显的空间异质性<sup>[32]</sup>, 因而土壤透气性也表现出较强的空间变异.

铵态氮与硝态氮在土壤中迁移方式的差异也是造成二者空间结构差异的重要原因之一. 铵态氮可以为土壤胶体吸附, 在水溶液中的含量很少, 其迁移主要靠扩散而非质流<sup>[33]</sup>; 而硝态氮极易随水流失而不易被土壤胶体所吸附, 其扩散方式主要为质流, 这就使铵态氮的空间异质性大于硝态氮.

铵态氮和硝态氮在空间分布还可能与根系的觅食行为有关<sup>[29, 34]</sup>. 梅莉等<sup>[35]</sup>研究发现, 水曲柳、落叶松细根生物量与土壤铵态氮和硝态氮均呈正相关关系, 而对比本样地内细根的空间异质性特征分布(王树堂等, 个人交流), 土壤铵态氮的高值区域与细根生物量的高值区域互补, 而土壤硝态氮则与细根分布无明显相关关系. Farley 等<sup>[36]</sup>对英国阔叶林地中土壤资源的空间变化研究发现, 在 20 cm 的小尺度上土壤溶液硝酸根、铵离子的浓度差异达 2~5 倍, 这足以对植物根系的养分吸收产生影响, 因此根系的觅食行为可能导致土壤铵态氮和硝态氮在空间分布上的差异<sup>[16, 29, 34, 36]</sup>.

## 4 结 论

长白山阔叶红松林土壤铵态氮和硝态氮具有显著的空间自相关性, 土壤铵态氮由结构性因素引起的空间异质性为 58.53%~99.30%, 土壤硝态氮为 47.34%~67.74%, 表明土壤无机态氮的空间异质性主要受结构性因素如土壤矿物、地形、植被影响; 土壤铵态氮和硝态氮在空间上呈现中等程度及以上的变异性, 空间分布具有明显的方向性和连续性, 呈现斑块状分布. 结合地统计学分析和贝叶斯理论估计长白山阔叶红松林内土壤铵态氮和硝态氮的变程范围是 6~12 m 和 8~12 m. 由于土壤氮素的变程是其空间自相关范围的测度, 变程对土壤无机态氮的取样设计有一定的指导意义, 因为取样间距在变程以外抽样才具有独立性, 所以在长白山阔叶红松林内, 如为经典统计分析积累空间独立的数据, 土壤无机态氮的取样尺度均要大于 12 m; 如为土壤无机态氮的景观制图服务, 则取样间距应小于其变程.

## 参考文献

[1] Vitousek PM, Gosz JR, Grier CC, *et al.* A comparative

- analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecological Monographs*, 1982, **52**: 155–177
- [2] Chapin FS, Vitousek PM, Cleve KV. The nature of nutrient limitation in plant communities. *American Naturalist*, 1986, **127**: 148–158
- [3] Nasholm T, Ekblad A, Nordin A, *et al.* Boreal forest plants take up organic nitrogen. *Nature*, 1998, **392**: 914–916
- [4] Li X (李霞), Yan X-F (阎秀峰), Liu J-F (刘剑峰). Effects of nitrogen forms on nitrogen metabolism-related enzymes and growth of *Phellodendron amurense* seedlings. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 2006, **23**(3): 255–261 (in Chinese)
- [5] Shao M-A (邵明安), Wang Q-L (王全力), Huang M-B (黄明斌). *Soil Physics*. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [6] Brady NC, Weil RR. *The Nature and Properties of Soil*. 12th Ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 1999
- [7] Mou P, Fahey TJ, Hughes JW. Effects of soil disturbance on vegetation recovery and nutrient accumulation following whole-tree harvest of a northern hardwood ecosystem. *Journal of Applied Ecology*, 1993, **30**: 661–675
- [8] Gallardo A, Rodriguez-Saucedo JJ, Covelo F, *et al.* Soil nitrogen heterogeneity in a Dehesa ecosystem. *Plant and Soil*, 2000, **222**: 71–82
- [9] Gross KL, Pregitzer KS, Burton AJ. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities. *Journal of Ecology*, 1995, **83**: 357–367
- [10] Hungate BA, Dukes JS, Shaw MR, *et al.* Nitrogen and climate change. *Science*, 2003, **302**: 1512–1523
- [11] Reich PB, Hobbie SE, Lee T, *et al.* Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to  $CO_2$ . *Nature*, 2006, **400**: 922–925
- [12] Beedlow PA, Tingey DT, Phillips DL, *et al.* Rising atmospheric  $CO_2$  and carbon sequestration in forests. *Frontier in Ecology and the Environment*, 2004, **2**: 315–322
- [13] Ceulemans R, Janssens IA, Jach ME. Effects of  $CO_2$  enrichment on trees and forest: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. *Annals of Botany*, 1999, **84**: 577–590
- [14] Norby RJ, Wullschlegel SD, Gunderson CA, *et al.* Tree responses to rising  $CO_2$  in field experiments: Implications for the future forest. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**: 683–714
- [15] Holland EA, Braswell BH, Jean-François L, *et al.* Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, **102**: 15849–15866
- [16] Gallardo A, Rodriguez-Saucedo JJ. Soil ammonium vs. nitrate spatial pattern in six plant communities: Simulated effect on plant populations. *Plant and Soil*, 2005, **277**: 207–219

- [17] Cain ML, Subler S, Evans JP. Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia*, 1999, **118**: 397–404
- [18] Lister AJ, Mou P, Jones RH, *et al.* Spatial patterns of soil and vegetation in a 40-year-old slash pine (*Pinus eliottii* Engelm) forest in the Coastal Plain of South Carolina, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 145–155
- [19] Li J-M (李菊梅), Li S-X (李生秀). Spatial heterogeneity of several nutrients in the soil. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1998, **16**(2): 58–63 (in Chinese)
- [20] Wang J (王 军), Fu B-J (傅伯杰), Qiu Y (邱扬), *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(8): 1173–1177 (in Chinese)
- [21] Wang L, Mou P, Huang J, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nitrogen in a subtropical forest in China. *Plant and Soil*, 2007, **295**: 137–150
- [22] Cheng B-R (程伯容), Xu G-S (许广山), Ding G-F (丁桂芳), *et al.* The main soil groups and their properties of the natural reserve on northern slope of Changbai Mountains// The Research Station of Changbai Mountain Forest Ecosystem, Chinese Academy of Science(中国科学院长白山森林生态系统定位站), ed. Research of Forest Ecosystem. Beijing: China Forestry Press, 1981: 196–206 (in Chinese)
- [23] Li J-Z (李金中), Pei T-F (裴铁播), Li X-Y (李晓晏), *et al.* Models of soil saturated infiltration coefficient and effective porosity in forest catchment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(6): 597–602 (in Chinese)
- [24] Diggle PJ, Tawn JA, Moyeed RA, *et al.* Model-based geostatistics, discussion. Authors' reply. *Applied Statistics*, 1998, **47**: 299–350
- [25] Compiling Committee of Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network (中国生态系统研究网络观测与分析标准方法编委会). Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles. Beijing: China Standards Press, 1996 (in Chinese)
- [26] Wang Z-Q (王政权). Geostatistics and Its Application in Ecology. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [27] Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Journal of Soil Science*, 1994, **58**: 1501–1511
- [28] Gawsey EM. Regional vegetation mapping in Australian: A case study in the practical use of statistical modeling. *Biodiversity and Conservation*, 2002, **11**: 2239–2274
- [29] Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). Effects of root uptake function and soil water on  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N distribution. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(1): 96–101 (in Chinese)
- [30] Aulakh MS. Legume residue and soil water effects on denitrification in soils of different textures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**: 1161–1167
- [31] Guo Q-X (国庆喜). Characteristics of canopy patches related to natural regeneration of broadleaved Korean pine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(12): 1541–1543 (in Chinese)
- [32] Wang Z-Q (王政权), Wang Q-C (王庆成). The spatial heterogeneity of soil physical properties in forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(6): 945–950 (in Chinese)
- [33] Richter J, Anauf R, Burrough-Boenisch J. The Soil as Reactor: Modelling Processes in the Soil. Cremlingen, Germany: Catena Verlag, 1987
- [34] Huo C-F (霍常富), Sun H-L (孙海龙). Physiological process and major regulating factors of nitrogen uptake by plant roots. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(6): 1356–1364 (in Chinese)
- [35] Mei L (梅 莉), Wang Z-Q (王政权), Cheng Y-H (程云环), *et al.* Relationships between fine roots distribution and soil nitrogen availability in Manchurian Ash and Korean Larch Plantation. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2008, **27**(1): 117–121 (in Chinese)
- [36] Farley RA, Fitter AH. The response of seven co-occurring woodland herbaceous perennials to localized nutrient-rich patches. *Journal of Ecology*, 1999, **87**: 688–697

---

作者简介 徐 媛,女,1982 年生,硕士.主要从事森林生态系统碳分配研究. E-mail: xy07012390@126.com

责任编辑 李凤琴

---