中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 31 卷 第 5 期　　2011 年 3 月　(半月刊)

目　　次

专论与综述

研究简报

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2011-03

生 态 学 报 2011,31(5):1213—1220
Acta Ecologica Sinica

森林不同土壤层全氮空间变异特征

张振明[1,2],余新晓[2*],王友生[2],宋思铭[2],吴海龙[2]
(1. 北京林业大学 自然保护区学院,北京 100083;2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:应用经典统计学和地统计学方法,分析了八达岭地区土壤全氮(TN)在不同层次(A,B,C)的空间变异特征。同时结合地理信息系统(GIS),分析了该地区植被类型和土壤 TN 之间的关系。应用分类回归树模型(classification and regression trees, CART)分析了土壤 TN 和海拔与植被分布格局的关系。得到以下结论:(1)TN 在 A、B、C 层平均值分别为 2.94、1.30、0.63 g/kg,变异系数(CV)分别为 33%、33%、45%,都表现为中等变异。(2)TN 在不同土层的变异函数理论模型符合球状模型,TN 在 A 层为弱空间相关,在 B、C 层为中等空间相关。(3)泛可里格插值表明,TN 在不同层次都表现出了明显的空间分布趋势。不同植被类型所对应土壤全氮的空间分布则各不相同。(4)CART 研究结果表明,该区植被类型分布格局可大致划分为四大部分。可初步确定海拔 725m,TN 含量 4.23 g/kg 和 5.69 g/kg 为影响该区植被分布格局的重要参考值。

关键词:地统计学;土壤全氮;空间变异;分类回归树模型

Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers

ZHANG Zhenming [1,2], YU Xinxiao[2,*], WANG Yousheng [2], SONG Siming [2], WU Hailong [2]

1. *College of Nature Conservation*, *Beijing Forestry University*, 100083, *China*

2. *Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*

Abstract: Spatial variability causes uneven soil resource distribution and controls species distribution and recruitment in terrestrial ecosystems. Quantification of the spatial variability is essential for understanding the relationship between soil properties and environmental factors and to estimate attributes at unsampled locations. Spatial variability of soil nutrient can provide guidance for the proper management of forest ecosystem. According to forest resource inventory subplot maps of China, 121 subplots were established. Soil samples for the experiment were collected from soil profiles in the central portion of each plot. Three replicate samples of each horizon at every plot were mixed with roots and stones removed by hand. Soil total nitrogen (TN) was measured using sulfate-perchlorate acid heating digestion-azotometer distillation titration method. All statistical analysis was performed using the open source software R (version 2.7.0). TN spatial distribution predicted by kriging was exported to ArcGIS 9.2 to produce maps. Spatial variability of soil total nitrogen under different layers was examined using classical statistics and geostatistics in Badaling. At the same time, geostatistics combined with geographic information system (GIS) were applied to analyze the relationship of vegetation type and soil total nitrogen. Relationship between elevation, TN of soil and vegetation distribution pattern was evaluated by classification and regression trees (CART). The results showed that: (1) The means of TN were 2.94 g/kg, 1.30 g/kg, 0.63 g/kg in three different layers, respectively. Coefficient of Variation (CV) of TN were 33%, 33%, 45%, respectively. So they showed medium variability. (2) Optimal theoretical models of TN were spherical model in different layers. Spatial correlation distances of TN-A, TN-B and TN-C were 804m, 1038m and 1400m, respectively. The nugget/sill $C_0/(C_0+C)$ ratio for TN-B and TN-C were 55% and 63%, respectively, suggesting moderate spatial correlation. TN-A has a weak spatial correlation with the

基金项目:林业公益性行业科研专项(201104005);国家青年科学基金项目(41001024);教育部博士点基金项目(20100014120011);"十二五"国家科技支撑计划(2011BAD38B05)

收稿日期:2010-05-13; **修订日期**:2011-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxx.bjfu@yahoo.com.cn

$C_0/(C_0+C)$ (78%). The spatial variability of TN-B and TN-C may be affected by intrinsic and extrinsic factors. However, the spatial variability of TN-A may be affected by extrinsic factors. (3) University kriging indicated that spatial distribution TN showed district geographic trends in different layers. The overlay analysis of spatial patterns and vegetation type were used to understand different soil nutrients distributions with different vegetation types. TN had a high distribution in the southwest and northeast of research area and the rest of high content were strips and patches. (4) The CART indicated that the vegetation type distribution pattern of this district can be divided as four main parts, it can be primarily determined that the elevation of 725m, the TN of 4.23 g/kg and 5.69 g/kg were the importance value. As reforestation is a key component of China's long term environmental and conservation strategy, spatial distribution in soil nitrogen contents of different layers can equip the micromanagement decision-making process in determining the proper size of a management unit. The correlation between soil nitrogen and vegetation type is an important factor in selecting tree species for reforestation. Our study provides a general guideline for the selection process.

Key Words: geostatistics; soil total nitrogen; spatial variability; classification and regression trees(CART)

土壤氮作为森林生态系统的限制性养分,不仅影响森林生态系统的生产力,而且影响生物地球化学循环[1-2]。在森林生态系统中植物和微生物最直接的氮库来源于土壤[3]。土壤全氮的异质性往往会影响到该区域植被的分布、物种丰富度和个别有机体的性能。因此,研究土壤全氮的空间变异性对于了解森林群落结构和生态系统进程有着极其重要的作用[4-5]。

自从20世纪80年代以来,国内外对于土壤特性空间变异性进行了大量的研究[6-16],研究对象主要集中在森林土壤、湿地土壤及农田土壤养分。近年来,国内外研究者用地统计学方法对土壤全氮的空间变异性进行了大量的研究,研究范围涉及不同的研究尺度[17-28]。Yost 等[29]运用地统计学方法研究了大尺度下夏威夷土壤化学性质的空间相关性,研究结果表明土壤 P、K、Ca、Mg 含量的空间相关距离在32—42m,土壤层0—15cm 的土壤属性区域相似性比30—45cm 大。Baúrdossy 和 Lehmann[30]在尺度为6.3 km^2的小流域,研究了土壤水分的空间变异性,认为土壤水分的空间变异性受地形和土地利用类型的影响。Wang 和 Liu[31]分析了在不同尺度下黄河三角洲土壤盐分的空间变异性,表明土壤盐分受海拔和土地利用类型的影响而表现为强空间变异性。刘付程等[32]认为地貌变化对土壤全氮空间分布有一定的影响。

综观国内外研究,不难发现,大部分研究都集中在小尺度下的农田土壤全氮变异性研究,而对于大尺度下的不同土壤层森林土壤全氮变异性的研究甚少。因此,本研究以八达岭森林土壤为研究对象,将地统计学和地理信息系统(GIS)有效结合,尝试研究大尺度下森林不同土壤层全氮空间变异性,通过分类回归树模型(CART)揭示土壤全氮与海拔和植被类型的关系,从而为该区森林景观配置和土壤健康经营提供科学的依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

项目区位于北京市八达岭林场的西沟(延庆县境内),为中山地形区,面积为546.70 hm^2,平均海拔780 m,最高海拔1238 m。坡度多为30°—35°,各坡向均有分布。年平均气温10.8℃,无霜期仅为160 d 左右,年均降水量为454 mm,多集中在7、8月,约占年降水量的59%,且多暴雨。全年总蒸发量1585.9 mm,是降水量的3倍。土壤主要为褐土、棕壤,土层厚100 cm 左右。植被类型主要是20世纪50年代后营造的人工林、自然恢复的灌草丛和灌木丛,在中山地带有少量的天然次生林。其主要类型有元宝枫(*Acer truncatum*)、油松(*pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黄栌(*Cotinus coggygnia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等。该区山地垂直地带性较明显,从山下到山顶,分布有针叶林、落叶林和灌丛,是北京地区森林垂直谱系分布比较完整和典型的地区之一。根据该区的植被类型特点,该区的植被类型分为五类,分别为:0为疏林地,1为灌木林,2为针叶林,3为阔叶林,4为针阔混交林,该区植被类型分布见图1。

1.2　研究方法

1.2.1　数据的采集及其处理

在北京八达岭林场项目区进行踏查的基础上,根据植被类型和地形特点,将研究区划分为 121 个小班(0.99—10.34hm^2),在每一个小班的中心位置,选取 3 个有代表性的部位挖掘土壤剖面,根据土壤颜色、结构、质地、紧实度、根系含量和石砾含量等特点,将土壤剖面划分为 A、B、C3 层,3 个土层的厚度分别为 0—10cm,10—20cm,20—40cm。分别在每一剖面按发生层采集土壤分析样本,并把同一层次土壤样本进行混合。通过 GIS 生成采集样点点图层并生成地统计分析的采集样点分布图。土壤全氮采用硫酸-高氯酸消煮-定氮仪蒸馏滴定法[33]。

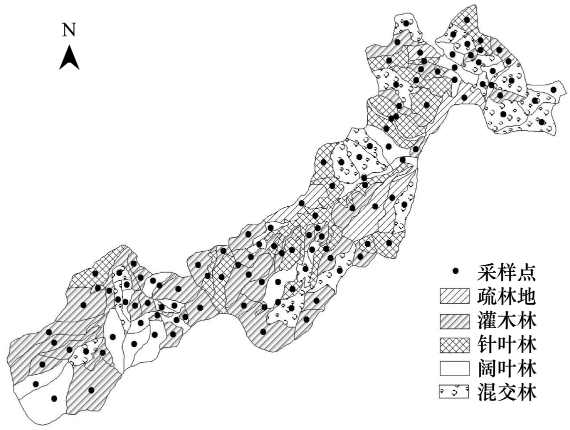

图 1　研究区植被类型图

Fig.1　The vegetation type in studied area

1.2.2　数据分析方法

采用经典统计学变异系数、地统计学半方差函数、插值分析以及分类回归树模型(CART)进行分析。经典统计学、半方差函数和 CART 使用 R 2.7.2 (http://www.r-project.org)。泛可里克插值和图层叠加使用 ArcGIS 9.2。

2　结果与讨论

2.1　土壤全氮描述性统计特征

从表 1 可以看出,土壤全氮在 A、B、C 层的均值分别为 2.94、1.30、0.63 g/kg;A 层均值分别为 B、C 层的 2.26、4.67 倍。上述 3 层的变异系数分别为 33%,32%,44%。Wei 等[34]通过对中国东北通双小流域的研究表明,土壤 TN(表层 0—20cm)的空间变异系数为 32%。可见,他们的研究结果与本文的结果类似。根据变异系数的划分,当 CV<10% 时,表现为弱变异性;当 CV=10%—100% 之间时,表现为中等变异;当 CV>100% 时,表现为强变异性。可见,该地区土壤全氮在不同层次都表现为中等变异。但从 A、B、C3 层来看,C 层土壤变异系数高于 A、B 两层,A 层与 B 层变异系数相同。

表 1　土壤全氮描述性统计

Table 1　Descriptive statistics of soil nitrogen

土壤特性 Soil layer	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)								
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	中值 Median	标准差 SDD^a	变异系数 CV^b	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 值 K-S^c
A	1.33	7.16	2.94	2.85	0.97	33	1.40	3.44	1.48
B	0.18	3.56	1.30	1.39	0.42	33	0.76	6.06	1.34
C	0.12	1.68	0.63	0.57	0.28	45	1.07	1.72	1.71

a 标准差, b 变异系数, c K-S 检验

2.2　土壤全氮空间结构特征

从表 2、图 2 可以看出,土壤全氮在不同层次变异函数理论模型均很好地符合球形模型。根据地统计学理论,根据块金值和基台值 $C_0/(C_0+C)$ 比值大小的划分,当该比值小于 25% 时,空间相关性强;当该比值为 25%—75% 时,空间相关性中等;当该比值大于 75% 时,空间相关性弱[35]。土壤全氮在该研究尺度下,A 层表现为弱空间相关性(78%),B、C 层表现为中等空间相关性(55%,63%),说明在该研究区域,土壤全氮在 A 层空间相关性主要是由随机部分的变化所控制,比如该区长期的森林作业经营、土壤健康经营和人为活动等均可能是影响土壤 A 层空间相关性的原因。而土壤 B、C 层的空间相关性变化则为自相关部分(土壤形成因子,如气候、地形、土壤类型等等)和随机部分共同所控制的结果。

变程是变异函数达到基台值所对应的距离,反映属性因子空间自相关范围的大小,在变程范围之内,变量具有空间自相关特性,反之则不存在。所以,变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度[11]。从表 2 可以看出,土壤全氮在 A、B、C3 层变程分别为 804、1 038、1 400m,土壤变程随着土层的深度依次增大。

表 2 土壤全氮变异函数理论模型及其相关参数

Table 2 Semivariograms model of soil nitrogen and its related parameters

土壤层 Soil layer	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)				
	模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C+C_0$	变程 Range/m	块金值/基台值 $C_0/C+C_0$
A	Spherical	0.075	0.095	804	0.78
B	Spherical	0.072	0.13	1038	0.55
C	Spherical	0.14	0.22	1400	0.63

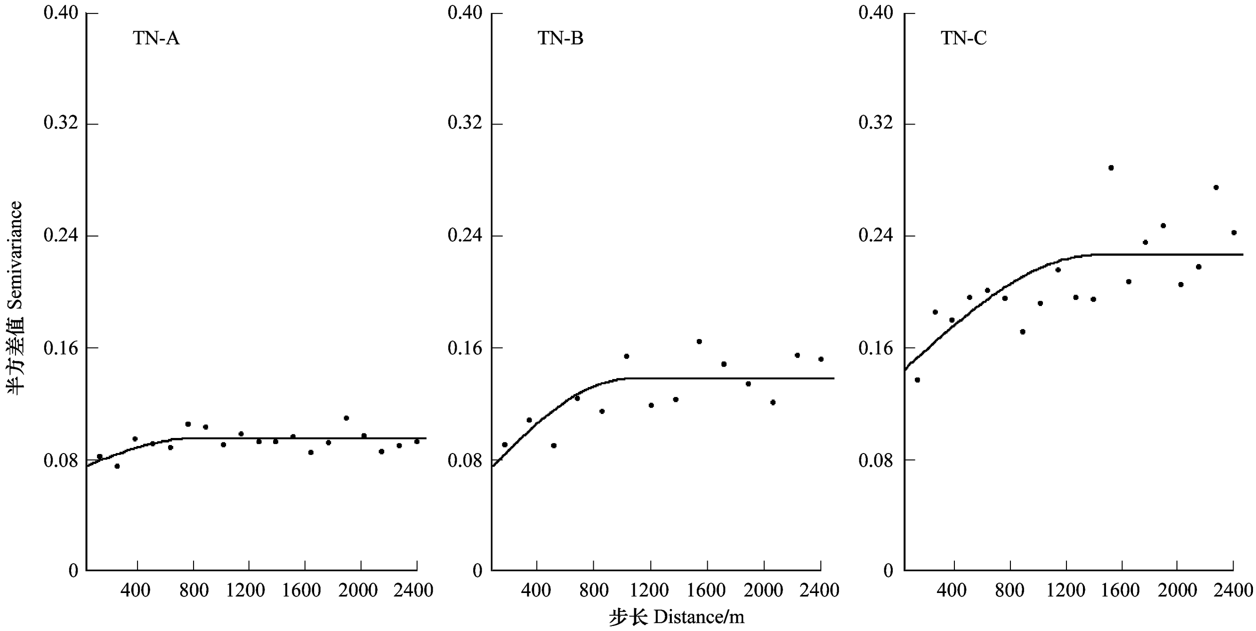

图 2 土壤全氮的半方差函数图

Fig. 2 Semivariograms for soil total nitrogen (TN) in three different soil layers

2.3 土壤全氮空间分布特征

根据泛可里格插值方法,得到土壤全氮在 A、B、C 层的空间分布趋势图(图 3)。从图中可以看出,这 3 个层次土壤全氮均表现出了明显的空间分布趋势,土壤全氮在研究区沿西南和东北方向含量较高。

将这 3 层土壤全氮含量进行重新分类,每层含量都分为十大类。叠加植被类型分布图和土壤全氮空间分布图,得到不同植被类型下土壤养分的空间分布情况(表 3—表 5)。从表可以看出,该研究区疏林地、灌木林、针叶林、阔叶林和针阔混交林分别占总面积的 8%、36%、20%、18% 和 20%。

从表 3 可以看出,在土壤 A 层,疏林地、灌木林、针叶林、阔叶林和针阔混交林土壤全氮含量分别集中分布在 2.46—2.69 g/kg、2.93—3.16g/kg、2.46—2.69 g/kg、3.16—3.40g/kg 和 2.46—2.69 g/kg 区间。在本研究区内,24% 的面积土壤 A 层全氮含量主要分布在 2.46—2.69 g/kg 区间;灌木林和阔叶林土壤 A 层全氮含量较高。从表4 可以看出,在土壤 B 层,疏林地、灌木林、针叶林、阔叶林和针阔混交林全氮含量分别集中分布在 1.08—1.17 g/kg、1.46—1.55 g/kg、1.08—1.17 g/kg、1.36—1.46 g/kg 和 1.08—1.17 g/kg 区间。疏林地、针叶林和针阔混交林土壤 B 层全氮含量主要分布在 1.08—1.17 g/kg 区间,同样在该层灌木林和阔叶林土壤全氮含量较高。从表 5 可以看出,这 5 种植被类型土壤 C 层全氮含量主要分布在 0.45—0.51 g/kg、0.51—0.57 g/kg、0.45—0.51 g/kg、0.63—0.69 g/kg 和 0.82—0.88 g/kg 区间。

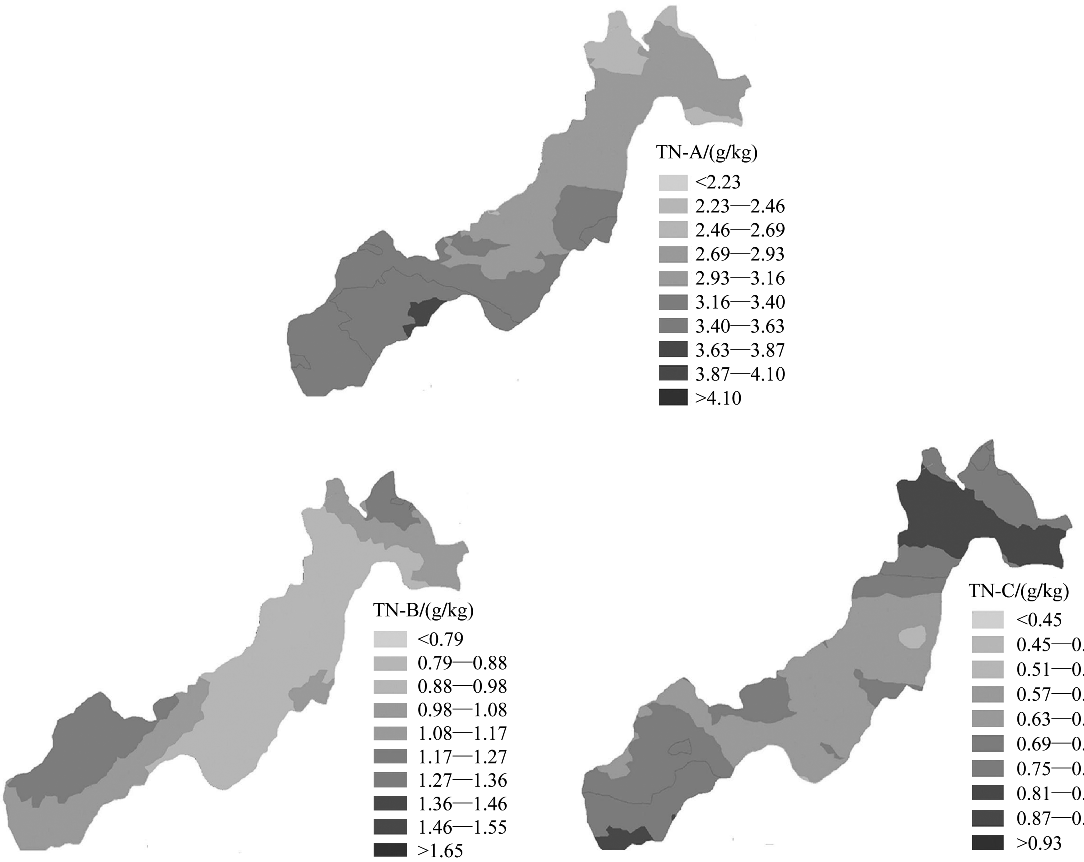

图 3　土壤全氮空间插值分布图

Fig. 3　Spatial interpolation of soil nitrogen distribution

表 3　不同植被类型土壤全氮在 A 层不同含量的分布面积

Table 3　Distribution of different total nitrogen (TN-A) content on various vegetation types (hm^2)

植被类型 Vegetation type	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)										总面积 Total area
	<2.23	2.23—2.46	2.46—2.69	2.69—2.93	2.93—3.16	3.16—3.40	3.40—3.63	3.63—3.87	3.87—4.10	>4.10	
0	0.00	3.08	16.79	9.68	11.59	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	41.74
1	0.07	8.82	11.16	34.70	48.26	74.00	11.59	4.75	1.37	0.07	194.78
2	1.64	10.94	40.37	29.72	12.13	9.74	2.90	0.09	0.00	0.00	107.53
3	0.00	0.23	22.30	15.23	9.34	21.78	16.36	9.92	1.01	0.00	96.17
4	0.05	10.44	43.07	27.25	15.59	9.11	2.52	0.00	0.00	0.00	108.02
合计 Total	1.76	33.50	133.67	116.57	96.91	115.25	33.37	14.76	2.39	0.07	548.24

0 为疏林地,1 为灌木林,2 为针叶林,3 为阔叶林,4 为针阔混交林

表 4　不同植被类型土壤全氮在 B 层不同含量的分布面积

Table 4　Distribution of different total nitrogen (TN-B) content on various vegetation types (hm^2)

植被类型 Vegetation type	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)										总面积 Total area
	<0.79	0.79—0.88	0.88—0.98	0.98—1.08	1.08—1.17	1.17—1.27	1.27—1.36	1.36—1.46	1.46—1.55	>1.55	
0	0	0	0.00	6.59	17.71	12.11	1.80	3.17	0.36	0.00	41.74
1	0	0	0.00	7.16	43.63	25.07	22.48	35.17	56.77	4.52	194.78
2	0	0	0.00	17.98	41.67	15.35	11.23	5.69	14.31	1.31	107.53
3	0	0	0.00	8.93	15.05	2.99	14.60	38.23	12.29	4.07	96.17
4	0	0	1.69	16.54	20.59	20.54	19.96	10.78	15.05	2.88	108.02
合计 Total	0.00	0.00	1.69	57.20	138.65	76.05	70.07	93.04	98.78	12.78	548.24

0 为疏林地,1 为灌木林,2 为针叶林,3 为阔叶林,4 为针阔混交林

表 5 不同植被类型土壤全氮在 C 层不同含量的分布面积

Table 5 Distribution of different total nitrogen (TN-C) content on various vegetation types(hm^2)

植被类型 Vegetation type	土壤全氮/(g/kg) Soil total nitrogen										总面积 Total area
	<0.45	0.45—0.51	0.51—0.57	0.57—0.63	0.63—0.69	0.69—0.75	0.75—0.81	0.81—0.87	0.87—0.93	>0.93	
0	7.81	11.34	8.69	0.00	1.40	0.23	1.98	6.98	3.33	0.00	41.74
1	3.74	35.98	63.88	40.70	18.68	7.70	12.11	5.09	6.01	0.92	194.78
2	0.59	27.61	26.87	11.39	7.09	2.12	8.24	5.49	13.30	4.86	107.53
3	1.28	9.97	13.82	9.90	22.34	11.48	16.52	4.77	6.10	0.00	96.17
4	3.58	13.34	19.17	11.30	12.69	7.43	12.85	20.50	2.23	4.95	108.02
合计 Total	16.99	98.24	132.41	73.28	62.19	28.94	51.68	42.82	30.96	10.73	548.24

0 为疏林地,1 为灌木林,2 为针叶林,3 为阔叶林,4 为针阔混交林

2.4 基于海拔和土壤全氮的植被分布特征

许多研究已经表明,土壤特性的异质性往往是由于环境因子和植被的相互作用所引起,个别植物体或群落可作为引起土壤特性异质性的非生物或生物体的指示物种[36]。反过来,土壤特性的空间异质性又是反映植被和群落分布格局最基本的要素[37-38]。以往的研究往往都集中在土壤特性与植被的关系和环境因子与植被的关系。本研究应用分类回归树模型很好的将土壤全氮与海拔和植被类型分布三者结合到一起,从而阐明了研究区在海拔和土壤全氮的控制下,植被的分布情况。根据分类回归树模型(图 4),当海拔小于 725m,全氮含量小于 4.23g/kg 时,该区植被类型为疏林地、灌木林和针叶林;当海拔小于 725m,全氮含量大于 4.23g/kg 时,疏林地与灌木林消失,主要分布为阔叶林与针阔混交林;当海拔过渡到大于 725m,土壤全氮含量小于 5.69g/kg 时,植被类型为灌木林与针叶林;当海拔大于 725m,土壤全氮含量大于 5.69g/kg 时,该区域植被类型为灌木林、阔叶林与针阔混交林。本研究区植被类型分布格局根据海拔和土壤全氮含量可大致划分为 4 大部分(图 5),可以看出海拔 725m 和土壤全氮含量 4.23 g/kg 和 5.69g/kg 是控制本地区植被类型分布格局变化的主要点,因此,根据海拔和土壤全氮含量可将这些点初步作为影响该区植被分布格局变化的重要参考值。

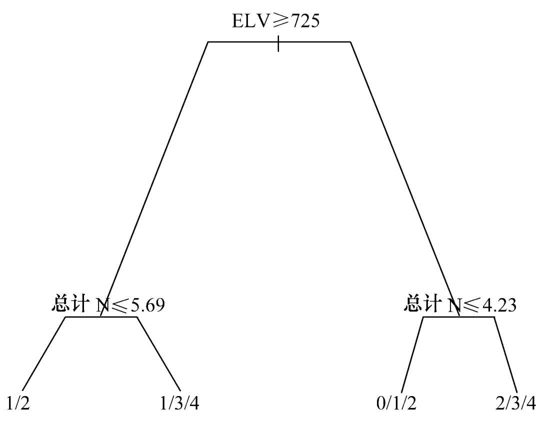

图 4 分类回归树模型

Fig. 4 Classification and regression tree model

0:疏林地,1:灌木林,2:针叶林,3:阔叶林,4:针阔混交林

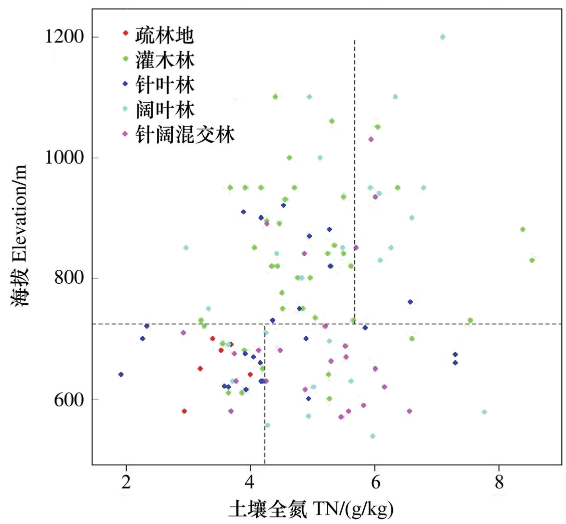

图 5 全氮、海拔与植被类型分布图

Fig. 5 T Distribution vegetation type in different total nitrogen (TN) and elevation

3 结论

(1)通过经典统计学分析,TN 含量在 A、B 和 C3 个层次平均值分别为 2.94、1.30、0.63 g/kg,变异系数(CV)分别为 33%、33% 和 45%,都表现为中等变异,C 层土壤变异系数高于 A、B 两层。

(2)3 个层次土壤全氮的变异函数理论模型为球形模型。土壤全氮在 A、B 和 C3 个层次的块金值和基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 78%、55%、63%,表明土壤全氮在 A 层具有弱空间相关性,土壤全氮在 B、C 层有中等空间相关性。土壤全氮在 A、B、C3 层变程分别为 804、1 038、1 400m,变程随着土层深度的增加而增大。

(3)泛可里格插值表明,土壤全氮在 A、B、C 层均表现出了明显的空间分布趋势。不同植被类型所对应土壤全氮在不同层次的空间分布不同,灌木林和阔叶林在 A、B 层土壤全氮含量较高,阔叶林和针阔混交林土壤全氮在 C 层含量较高。

(4)分类回归树模型研究结果表明,该区植被类型分布格局可大致划分为 4 大部分。可初步确定海拔 725m,全氮含量 4.23g/kg 和 5.69g/kg 为影响该区植被分布格局的重要参考值。

References:

[1] Tamm C O. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems. Berlin Heidelberg: Springer, 1991.

[2] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO_2. Nature, 2006, 440(7086):922-925.

[3] Kimmins J P. Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Forest Management and Environmental Ethics in Forestry. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

[4] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247(4946):1043-1048.

[5] Tilman D. Constraints and tradeoffs: toward a predictive theory of competition and succession. Oikos, 1990, 58:3-15.

[6] Hu K L, Li B G, Lin Q M, Li G T, Chen D L. Spatial variability of soil nutrient in wheat field. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(3):33-38.

[7] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, Zhang W, Kong X L. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of Karst hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(12):6334-6343.

[8] Sun B, Zhao Q G, Lu G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2):190-198.

[9] Lian G, Guo X D, Fu B J, Hu C X. Spatial variability and prediction of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 946-954.

[10] Jiang Y J, Zhang C, Yuan D X. Temporal-spatial varibility of soil fertility and its affecting factors of variability in Karst region: a case study of Xiaojiang watershed,Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2288-2299.

[11] Xiao D N, Li X Y, Song D M, Yang G J. Dynamic simulation of groundwater exploitation of space-time in Minqin areas. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(6):567-578.

[12] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Hou Y, Zhang X G. Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5168-5175.

[13] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. Oikos, 1995, 73(2):280-284.

[14] Gross K L, Pregitzer K S, Burton A J. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities. Journal of Ecology, 1995, 83: 357-367.

[15] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 1986, 38:45-94.

[16] Webster R, Oliver M A. Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. England: Oxford University Press, 1990.

[17] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale heterogeneity of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58:1501-1511.

[18] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under Shorea robusta in lateritic region. Indian Journal of Forestry, 1995, 18 (2): 144-152.

[19] Yanai J, Mishima A, Furakawa S, Akshalov K, Kosaki T. Spatial variability of organic matter dynamics in the semi-arid croplands of northern Kazakhstan. Soil Science and Plant Nutrition, 2005, 51 (2): 261-269.

[20] Xu S P, Tao S, Cao J. Spatial structure pattern of soil pH, clay and organic matter contents in the Inner Mongolia area. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32 (4): 145-148.

[21] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, Wen D Z, Chen W B. Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun District, Shenyang City. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (10): 1673-1676.

[22] Li X Y, Zhang S W, Wang Z M, Zhang H L. Spatial variability and pattern analysis of soil properties in Dehui city of Jilin province. Acta Geographica Sinica, 2004, 59 (6) : 989-997.

[23] Huang Y F, Zhou Z Y, Yuan X Y, Zhang H Y. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12):2776-2781.

[24] Li M H,Peng S L, Shen W J, Lin Y B, Liu Z K. Spatial variability of soil nutrients in a hill-pond landscape. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24

(9):1839-1845.

[25] Lu P, Huang D Y, Song B L, Huang M, Liu S L, Su Y R, Xiao H A, Wu J S. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical subtropical red soil hilly areas. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (8): 181-183.

[26] Zhao Y F, Shi X Z, Yu D S, Huang B, Wang H J, Zhao Y C, Ingrid B, Karin B. Spatial variation of soil nutrients and its affecting factors at small scale-a case study of peri-urban areas in Wuxi Jiangsu Province. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37 (2): 214-218.

[27] Wang H, Zhao W Z, Chang X X. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis acetone in the middle reaches of Heihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5):1731-1739.

[28] Wang S Y, Lu P, Wang J L, Yang L, Yang K, Yu T Q. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu County, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10):4957-4964.

[29] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas Ⅰ. semi-variograms. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 1028-1032.

[30] Bárdossy A, Lehmann W. Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. Journal of Hydrology, 1998, 206(1/2):1-15.

[31] Wang H, Liu G H. Geostatistical analysis on multi-scale variations of soil salinity in the Yellow River Delta//the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE. Shanghai: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008:4669-4673.

[32] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. Geographical Research, 2004, 23(1):63-70.

[33] Lu R K. Chemical Analysis of Soil Agricultural. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[34] Wei J B, Xiao D N, Zeng H, Fu Y K. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. Environmental Geology, 2008, 53(8): 1663-1672.

[35] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. Soil Science, 1997, 162(4):291-298

[36] Jackson R B, Manwaring J H, Caldwell M M. Rapid physiological adjustment of roots to localized soil enrichment. Nature, 1990, 344(6261): 58-60.

[37] Fowler N. The role of competition in plant communities in arid and semiarid regions. Annual Review of Ecology and Systematics, 1986, 17: 89-110.

[38] Chapin F S, Walker L R, Fastie C L, Sharman L C. Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska. Ecological Monographs, 1994, 64:149-175.

参考文献:

[6] 胡克林, 李保国, 林启美, 李贵桐, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征. 农业工程学报, 1999, 15(3):33-38.

[7] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟, 孔祥丽. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异. 生态学报, 2008, 28(12):6334-6343.

[8] 孙波, 赵其国, 闾国年. 低丘红壤肥力的时空变异. 土壤学报, 2002, 39(2):190-198.

[9] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. 生态学报, 2008, 28(3):946-954.

[10] 蒋勇军, 章程, 袁道先. 岩溶区土壤肥力的时空变异及影响因素——以云南小江流域为例. 生态学报, 2008, 28(5):2288-2299.

[11] 肖笃宁, 李小玉, 宋冬梅, 杨国靖. 民勤绿洲地下水开采时空动态模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(6):567-578.

[12] 张伟, 陈洪松, 王克林, 侯娅, 张继光. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异. 生态学报, 2007, 27(12):5168-5175.

[20] 徐尚平, 陶澍, 曹军. 内蒙古土壤 pH 值、粘粒和有机质含量的空间结构特征. 土壤通报, 2001, 32 (4): 145-148.

[21] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中, 陈文波. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究. 应用生态学报, 2003, 14 (10): 1673-1676.

[22] 李晓燕, 张树文, 王宗明, 张惠琳. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局. 地理学报, 2004, 59 (6): 989-997.

[23] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 张红艳. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. 生态学报, 2004, 24(12):2776-2781.

[24] 李明辉, 彭少麟, 申卫军, 林永标, 刘振乾. 丘塘景观土壤养分的空间变异. 生态学报, 2004, 24(9):1839-1845.

[25] 路鹏, 黄道友, 宋变兰, 黄敏, 刘守龙, 苏以荣, 肖和艾, 吴金水. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征. 农业工程学报, 2005, 21 (8): 181-183.

[26] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 黄标, 王洪杰, 赵永存, Ingrid Oborn, Karin Blomback. 小尺度土壤养分的空间变异及其影响因素探讨——以江苏省无锡市典型城乡交错区为例. 土壤通报, 2006, 37 (2): 214-218.

[27] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异. 生态学报, 2007, 27(5):1731-1739.

[28] 王淑英, 路苹, 王建立, 杨柳, 杨凯, 于同泉. 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):4957-4964.

[32] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. 地理研究, 2004, 23(1):63-70.

[33] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 5 March, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

Scientific Note

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

编辑部主任：孔红梅　　**执行编辑**：刘天星　段　靖

生　态　学　报
（SHENGTAI　XUEBAO）
（半月刊　1981 年 3 月创刊）
第 31 卷　第 5 期　（2011 年 3 月）

编　辑　《生态学报》编辑部
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085
电话：(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主　编　冯宗炜
主　管　中国科学技术协会
主　办　中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085
出　版　科　学　出　版　社
地址：北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
印　刷　北京北林印刷厂
发　行　科　学　出　版　社
地址：东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
电话：(010)64034563
E-mail：journal@cspg.net
订　购　全国各地邮局
国外发行　中国国际图书贸易总公司
地址：北京 399 信箱
邮政编码：100044
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31　No. 5　2011

Edited by Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933 05

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q
国内外公开发行　**国内邮发代号** 82-7　**国外发行代号** M670　**定价** 70.00 元