

# 多水平贝叶斯模型预测森林土壤全氮

张振明<sup>1,2</sup>, 余新晓<sup>1,\*</sup>, 朱建刚<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083)

**摘要:**多水平贝叶斯方法阐明了预测中观测值、模型和参数的不确定性,被越来越多的生态学家所使用。应用多水平贝叶斯方法建立了北京八达岭地区森林土壤全氮模型,分析了模型参数及其不确定性,并对该区不同土壤层(A、B、C)全氮含量进行了预测。得到如下结论:(1)该区森林土壤全氮多水平贝叶斯模型为 $y_i \sim N(\beta_{[i],k[j]}^0 + \beta_{[i],k[j]}^1 x_i, \sigma_y^2)$ 。(2)对模型参数和其曲线不确定性分析表明,该模型能够很好的预测该区土壤全氮含量。(3)模型预测表明:土壤 A 层,随着海拔的增加,全氮含量递增。土壤 B 层,随着海拔的升高,植被类型 0、1、2、3 土壤全氮含量递增,而植被类型 4 土壤全氮含量出现递减现象。土壤 C 层,随着海拔的增加,植被类型 0 土壤全氮含量递增,而植被类型 1、2、3、4 土壤全氮含量均表现为递减。各植被类型土壤全氮含量都随着土层的深度而减少。

**关键词:**多水平贝叶斯模型;土壤全氮;预测

文章编号:1000-0933(2009)10-5675-09 中图分类号:Q141,S159,S718.5 文献标识码:A

## Hierarchical Bayesian model for predicting the soil nitrogen of forest

ZHANG Zhen-Ming<sup>1,2</sup>, YU Xin-Xiao<sup>1,\*</sup>, ZHU Jian-Gang<sup>1</sup>

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

2 College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, 100083 Beijing, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5675 ~ 5683.

**Abstract:** Hierarchical Bayesian method is increasingly being used by ecologists. Methods to accomplish such predictions could explain uncertainties in observation, sampling, models, and parameters. Soil nitrogen model was built using Hierarchical Bayesian method that accommodates uncertainties of data and model provides a richer understanding of the model in Badaling region. At the same time, soil nitrogen content was predicted in different soil layers(A, B, C). The results show that: (1) Soil nitrogen modeling is  $y_i \sim N(\beta_{[i],k[j]}^0 + \beta_{[i],k[j]}^1 x_i, \sigma_y^2)$  for the research area. (2) Uncertainties of data and model indicated that the model is good to predict soil nitrogen content. (3) Prediction of soil nitrogen content showed that soil nitrogen content of A layer was increased with increasing of elevation. It was found that soil nitrogen content of plant type 0,1,2,3 were increased with the increase of elevation in B layer, however, soil nitrogen content of plant type 4 was decreased with the increase of elevation in the layer. With the increase of elevation, there was a increase observed in soil nitrogen of the vegetation type 0, while a decrease in that of vegetation types 1,2,3,4 in layer C. Soil nitrogen content of layer A was the greatest, followed by layer B and layer C. The result indicated that soil nutrient content decreased with increasing depth.

**Key Words:** Hierarchical Bayesian model; soil nitrogen; prediction

**基金项目:**国家林业局重点科研资助项目(2006-69); 国家科技部国际科技合作资助项目(2006DFA01780); 国家林业公益性行业科技专项经费资助项目(200804022); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A02); 北京市科委重大资助项目(D0706001000091)

收稿日期:2008-06-09; 修订日期:2009-04-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxinxiao111@126.com

预测生态系统进程和变化时,生态学家越来越感觉到影响生态系统预测的最大挑战不仅仅是预测,而是实践推理<sup>[1-5]</sup>。人们逐渐发现从模型得到预测区间估计和数据结构是非常困难的。然而,生态学是研究生物有机体的分布和丰度及其之间的交互作用,以及环境因子对其分布和丰度的影响。这些都不可避免地需要测量变量并分析它们之间的关系。陆地生态系统物种组成、物种多样性和基本生产力都受生态系统氮素的影响<sup>[6-9]</sup>。土壤氮不仅是植物体生长所需的必需营养元素,而且它已成为评价土壤肥力和土地生产力的重要指标之一。Holger 等<sup>[10]</sup>根据土壤-水-热关系,通过气象数据、土壤基本物理和生化特性、农作物的管理措施等建立了不同层次下农田土壤全氮矿化动态和损失模型。Corre-Hellou 等<sup>[11]</sup>应用传统的统计方法,建立了不同根系层次影响下农作物土壤全氮含量模型。研究已表明植物物种是影响生态系统氮素十分重要的非生物因素,也有研究表明森林景观和氮素循环有很大的关系,在地形变量中,海拔对土壤全氮含量的影响最大,不同的土壤层土壤全氮含量也不同<sup>[12-18]</sup>。

20 世纪 90 年代,多水平贝叶斯理论的发展提供了一个可以容纳几乎所有高维问题的框架结构<sup>[19,20]</sup>。它灵活的结构,不仅可以通过杂乱的数据来解决复杂的问题,而且也提供了对生态过程和未知参数的探究方法。尤其是近几年,贝叶斯多水平模型在生态学中的应用越来越多:Elstner 和 Jagger<sup>[21]</sup>应用多水平贝叶斯方法预测了季节性飓风模型,通过该模型可预测飓风的季节性。James 等<sup>[22]</sup>使用该方法对树木生长进行了预测,Majumdar 等<sup>[23]</sup>通过该方法建立了土壤养分和碳密度空间模型。Grimm 等<sup>[24]</sup>建立了城市、农业和荒漠生态系统下的多水平贝叶斯土壤养分模型。纵观以往研究:首先,土壤全氮模型主要集中在农田研究,对于林地的研究还很少。其次,大部分模型参数的输入量需要大量的气象和生态数据,输入参数的复杂性大大降低了模型的实用性。再者,虽然有些模型考虑了植被类型和地形对土壤全氮的影响,但很少有研究考虑土壤层次对土壤全氮的影响。

基于以上原因,本文通过贝叶斯多水平方法,试图通过植被类型、海拔、土壤层次及植被类型与土壤层次的交互作用为模型的输入量,建立森林土壤全氮模型,并对模型进行不确定性分析。通过该模型的建立,探求不同植被类型、土壤层次和海拔对研究区土壤全氮的影响,从而为该区森林健康经营提供科学的理论依据。

## 1 研究区概况

北京市八达岭林场位于北京市延庆县境内,全场总面积 2940 hm<sup>2</sup>。平均海拔 780 m,最高海拔 1238 m。年平均气温 10.8℃,无霜期仅为 160 d 左右,年均降水量为 454 ml,多集中在 7、8 月份,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。本区土壤类型主要为褐土和棕壤。植被主要类型有元宝枫(*Acer truncatum*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等。该区的植物种类十分丰富,据植物调查统计为:蕨类植物门有 8 科 18 种、裸子植物有 3 科 8 种、被子植物 83 科 513 种,共计有植物种类为 549 种植物。根据该区的植被类型特点,将该区的植被类型分为 5 类,分别为:0 为疏林地,1 为灌木林地,2 为针叶林地,3 为阔叶林地,4 为混交林地,各植被类型所占研究区比例分别为 8%、36%、20%、18%、20%。

## 2 研究方法

### 2.1 数据的采集及其处理

在对北京八达岭林场西沟进行踏查的基础上,根据植被类型和地形特点,将研究区划分为 121 个小班。围绕每一个小班的中心位置,选择 3 个有代表性的部位挖掘土壤剖面,(图 1),依据土壤剖面的形态特征,将土壤剖面按照发生层划分为 A、B、C 3 个层次。分别在每一



图 1 八达岭土壤养分样点分布图  
Fig. 1 Sampling sites of soil nitrogen in Badaling

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。土壤全氮采用硫酸-高氯酸消煮-定氮仪蒸馏滴定法<sup>[25]</sup>。

### 2.2 贝叶斯多水平模型

贝叶斯多水平模型是回归模型的一个扩展,它的数据结构可分组并且组间系数是互不相同的。科学的发展往往就是人们把新的信息叠加到了前人的研究成果中,包括前人的研究、试验、非试验的观测、理论等。多水平贝叶斯方法允许把不同视觉的信息放到同一个框架中来比较,它为综合所有的信息提供了一个合理的方法。随着研究问题的复杂性,模型本身也增加了其不确定性。根据贝叶斯理论,最终通过前验分布和模型的似然估计得到每个参数的后验概率分布:

$$p(\theta | y) = \frac{p(y | \theta)p(\theta)}{p(y)} = \frac{p(y | \theta)p(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} p(y | \theta)p(\theta) d\theta} \tag{1}$$

$$p(\theta | y) \propto p(y | \theta)p(\theta) \tag{2}$$

## 3 结果与分析

### 3.1 模型的建立

建立模型最有效的方式是先建立模型的结构图。结构图给出了组成模型的变量、关系、参数和先验信息等。变量通常可以通过观测值得到,数据模型通过变量到观测值之间的箭头连接。图2为土壤全氮模型的结构关系图,数据  $y$  受进程、参数和超参数的影响,是 121 个样地 3 个不同层次土壤全氮含量  $(y_i, i = 1, 2, \dots, 363)$ 。

$\beta$  是一个矢量矩阵,即  $\beta = (\beta_{j[i],k[i]}^0, \beta_{j[i],k[i]}^1)$ 。根据模型的结构,可以得到土壤全氮模型表达式:

$$y_i \sim N(\beta_{j[i],k[i]}^0 + \beta_{j[i],k[i]}^1 x_i, \sigma_y^2)$$

$$\sigma_y \sim N(0, \delta^2)$$

对于模型的截距和斜率分解如下:

$$\begin{pmatrix} \beta_{j,k}^0 \\ \beta_{j,k}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{0j}^{type} \\ \gamma_{1j}^{type} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{0k}^{layer} \\ \gamma_{1k}^{layer} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{0jk}^{type \times layer} \\ \gamma_{1jk}^{type \times layer} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{0j}^{type} \\ \gamma_{1j}^{type} \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma^{type}\right), \quad j = 1, \dots, J$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{0k}^{layer} \\ \gamma_{1k}^{layer} \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma^{layer}\right), \quad k = 1, \dots, K$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{0jk}^{type \times layer} \\ \gamma_{1jk}^{type \times layer} \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma^{type \times layer}\right), \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K$$

在这个模型中,  $y_i = \log(N)$  为土壤全氮含量的对数,  $x_i = \log(ELV_i - \overline{ELV})$  为第  $i$  次海拔减去海拔平均值的对数,  $i$  为样本数目 ( $i = 1, 2, \dots, 363$ ),  $j$  为植被类型 ( $j = 0, 1, 2, 3, 4$ ),  $k$  为土壤层次 ( $k = 1, 2, 3$ )。根据似然估计和前验分布,可以得到该模型中每一个参数的后验概率分布:

$$p(\beta, \sigma^2 | y_i, x_i) \propto p(y_i | X\beta, \sigma^2) \times p(\beta | \mu_\beta, \tau^2) p(\sigma^2 | s_1, s_2) \tag{3}$$

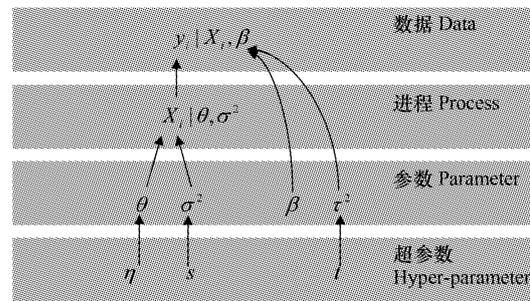


图2 多水平贝叶斯模型结构图  
Fig.2 Structure of Hierarchical Bayesian model

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{p(\theta, X, \beta, \sigma^2, \tau^2 | y, \eta, s, t)}_{\text{后验分布}} \propto \\
 & \underbrace{\times p(y | X, \beta, \tau^2) p(X | \theta, \sigma^2)}_{\text{似然估计}} \\
 & \underbrace{\times p(\theta | \eta) p(\sigma^2 | s) p(\tau^2 | t)}_{\text{前验分布}}
 \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.2 模型的不确定性分析

模型的不确定性分析,主要有两部分,第一部分为获得所求参数的不确定性分析,第二部分为所求模型曲线的不确定性。在拟合模型参数时,用特卡洛马尔科夫链(MCMC)随机抽样的方法来估计每个参数的后验概率分布。经过10000次数据的随机采集,最终得到该模型中每个参数的后验概率分布。并对模型中每一个参数进行不确定性分析。从图3和表1可以看出,各参数估计值都落在其95%的置信区间内。

表1 多水平贝叶斯模型参数估计从海拔、植被类型和土壤层次来预测土壤全氮含量

Table 1 Parameter estimate for Hierarchical Bayesian model predicting soil nitrogen from elevation, vegetation type and soil layer

植被类型 Vegetation type	土壤层 Soil layer					
	A		B		C	
	$\hat{\beta}_{j,1}^0$	$\hat{\beta}_{j,1}^1$	$\hat{\beta}_{j,2}^0$	$\hat{\beta}_{j,2}^1$	$\hat{\beta}_{j,3}^0$	$\hat{\beta}_{j,3}^1$
0	0.84 [0.642, 1.04]	1.11 [0.84, 1.38]	-0.10 [-0.30, 0.10]	0.59 [0.32, 0.86]	-0.81 [-1.01, -0.061]	0.24 [-0.03, 0.51]
1	1.03 [0.86, 1.20]	0.36 [0.14, 0.58]	0.29 [0.12, 0.46]	0.058 [-0.17, 0.28]	-0.57 [-0.74, -0.40]	-0.46 [-0.68, -0.24]
2	0.97 [0.80, 1.15]	0.64 [0.41, 0.87]	0.085 [-0.09, 0.26]	0.19 [-0.09, 0.26]	-0.54 [-0.72, -0.37]	-0.058 [-0.29, 0.17]
3	1.10 [0.93, 1.27]	0.50 [0.28, 0.72]	0.22 [0.05, 0.39]	0.059 [0.05, 0.39]	-0.50 [-0.67, -0.33]	-0.31 [-0.53, -0.09]
4	1.09 [0.92, 1.26]	0.39 [0.17, 0.61]	0.23 [0.059, 0.40]	-0.044 [0.059, 0.40]	-0.49 [-0.66, -0.32]	-0.40 [-0.62, -0.18]

对于所求模型进行不确定分析,随机挑选数据模拟中的20组数据对其进行预测(图4),得到20条预测曲线。从 $y$ 的预测结果可以看出,该模型能很好的反映通过植被类型、海拔和土壤层次来预测土壤全氮含量。但并不能很好的反映植被类型0,这可能与植被类型0数据过少有关。

### 3.3 模型的预测

#### 3.3.1 相同土壤层海拔、植被类型与土壤全氮关系

从表1可以看出,该研究区土壤A层,随着海拔的升高,全氮的含量增加,但不同的植被类型增加的程度不同。研究区海拔平均值为769m,当海拔为770m时,各植被类型模型斜率为 $\log(770 - 769) = 0$ ,这时植被类型0,1,2,3,4土壤全氮均值分别为 $e^{0.84} = 2.32\text{g/kg}$ 、 $e^{1.03} = 2.80\text{g/kg}$ 、 $e^{0.97} = 2.64\text{g/kg}$ 、 $e^{1.10} = 3.00\text{g/kg}$ 、 $e^{1.09} = 2.97\text{g/kg}$ (表2、图5)。从该预测结果可以看出,植被类型1,3,4在A层表现出了比较高的全氮含量,并且各植被类型土壤全氮差异较显著。土壤全氮主要来源于土壤有机质,而在森林土壤中,有机物质又主要来源于森林植物的凋落物,因此,土壤全氮含量在A层有明显的积累<sup>[26]</sup>。各植被类型下土壤全氮差异较显著,可能与不同植物凋落物积累数量以及转化过程的快慢有密切的关系。氮在土壤中的累积和淋溶受很多因素的影响,如:土壤性质(土壤质地、土体构型、游离Al、Fe含量等)、气候因子(降水量、降水强度等)、水文地理因子(坡度、地下水位等)、林业管理措施(植被类型、经营措施等)的影响。在本预测中,土壤类型为褐土,海拔相同,地理因素相差不大。因此,引起该层土壤全氮差异的主要原因为植被类型的差异。

土壤层次B,随着海拔的升高,植被类型0,1,2,3全氮含量递增,而植被类型4的含量出现递减现象。同理可以求得海拔770m时,植被类型0,1,2,3,4土壤全氮均值分别为 $e^{-0.10} = 0.90\text{g/kg}$ 、 $e^{0.29} = 1.34\text{g/kg}$ 、

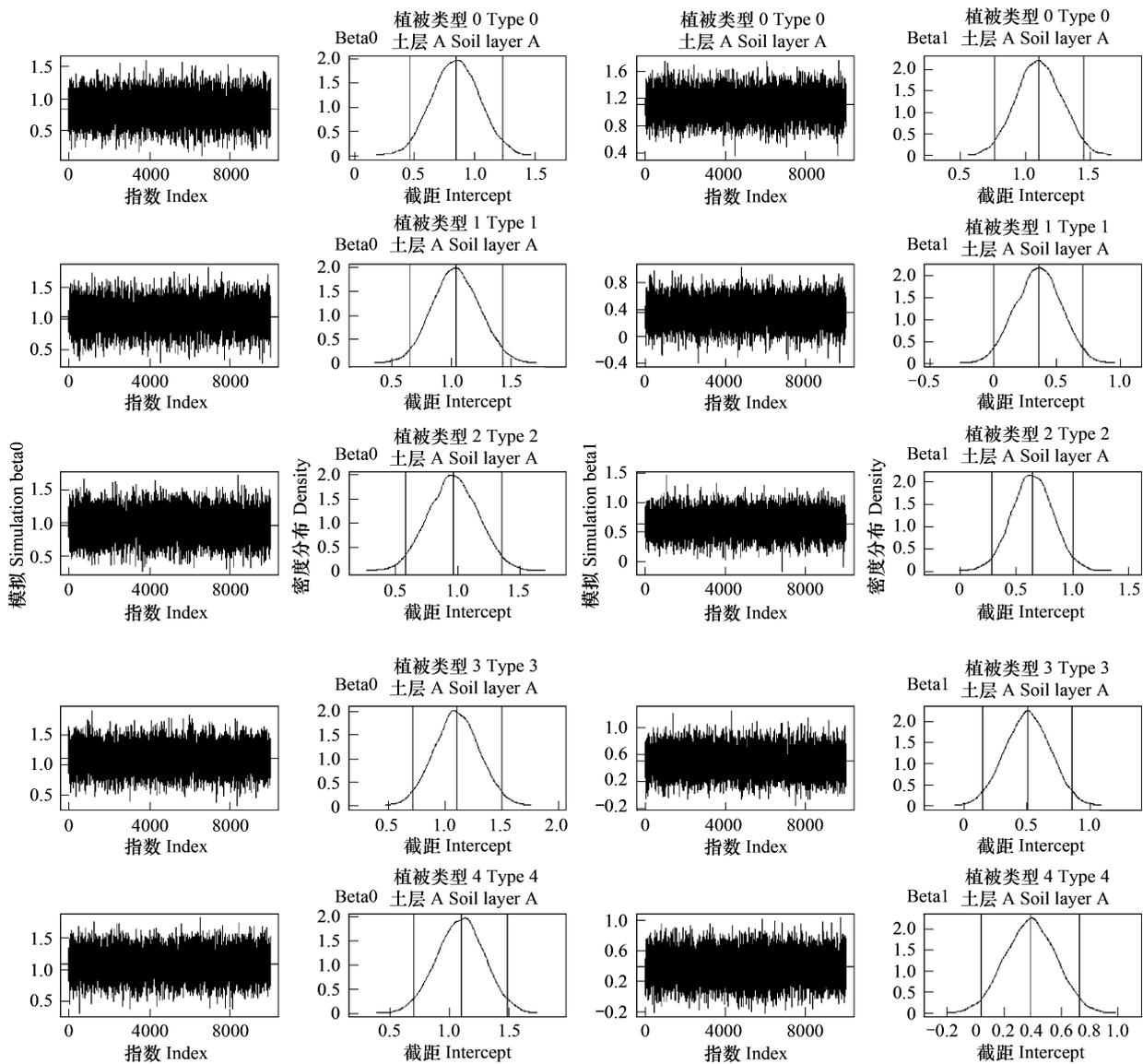


图3 参数的不确定性

Fig. 3 Parameters for uncertainty

$e^{0.085} = 1.09\text{g/kg}$ 、 $e^{0.22} = 1.25\text{g/kg}$ 、 $e^{0.23} = 1.25\text{g/kg}$ 。该层植被类型 1、3、4 表现出了比较高的含量,各植被类型土壤全氮含量在该层差异显著。这可能是因为土壤全氮与有机物质淋洗的强度、根系及根系分泌物、有机氮素的矿化过程有密切的关系。植物体对光、水和养分的竞争,不仅发生地上部分,而且发生在地下部分。很多研究已经表明了地上部分对光的竞争<sup>[27-29]</sup>,但很少有人关注地下部分对养分和水分的竞争。因此,该预测间接的反映了不同植被类型地下部分对养分的竞争有所不同。

土壤层为 C 层时,随着海拔的升高,植被类型 0 全氮含量为递增,植被类型 1,2,3,4 都表现为递减。同理可以求得海拔 770m 时,植被类型 0,1,2,3,4 在 C 层土壤全氮含量分别为为  $e^{-0.81} = 0.44\text{g/kg}$ 、 $e^{-0.85} = 0.56\text{g/kg}$ 、 $e^{-0.54} = 0.59\text{g/kg}$ 、 $e^{-0.50} = 0.60\text{g/kg}$ 、 $e^{-0.48} = 61\text{g/kg}$ 。从该层的模拟可以看出,不同植被类型对全氮的影响并不明显。这可能与土壤母质层受生物成土因素的影响比较小有关。

### 3.3.2 不同土壤层海拔、植被类型与土壤全氮关系

植被类型为 0 时,随着海拔升高,土壤全氮含量在 A、B、C 层都为递增。当海拔为 770m,植被类型 0 在 A、B、C 土壤全氮含量分别为 2.3 g/kg、0.9 g/kg、0.44 g/kg。植被类型 1,2 和 3,随着海拔的升高,土壤全氮在

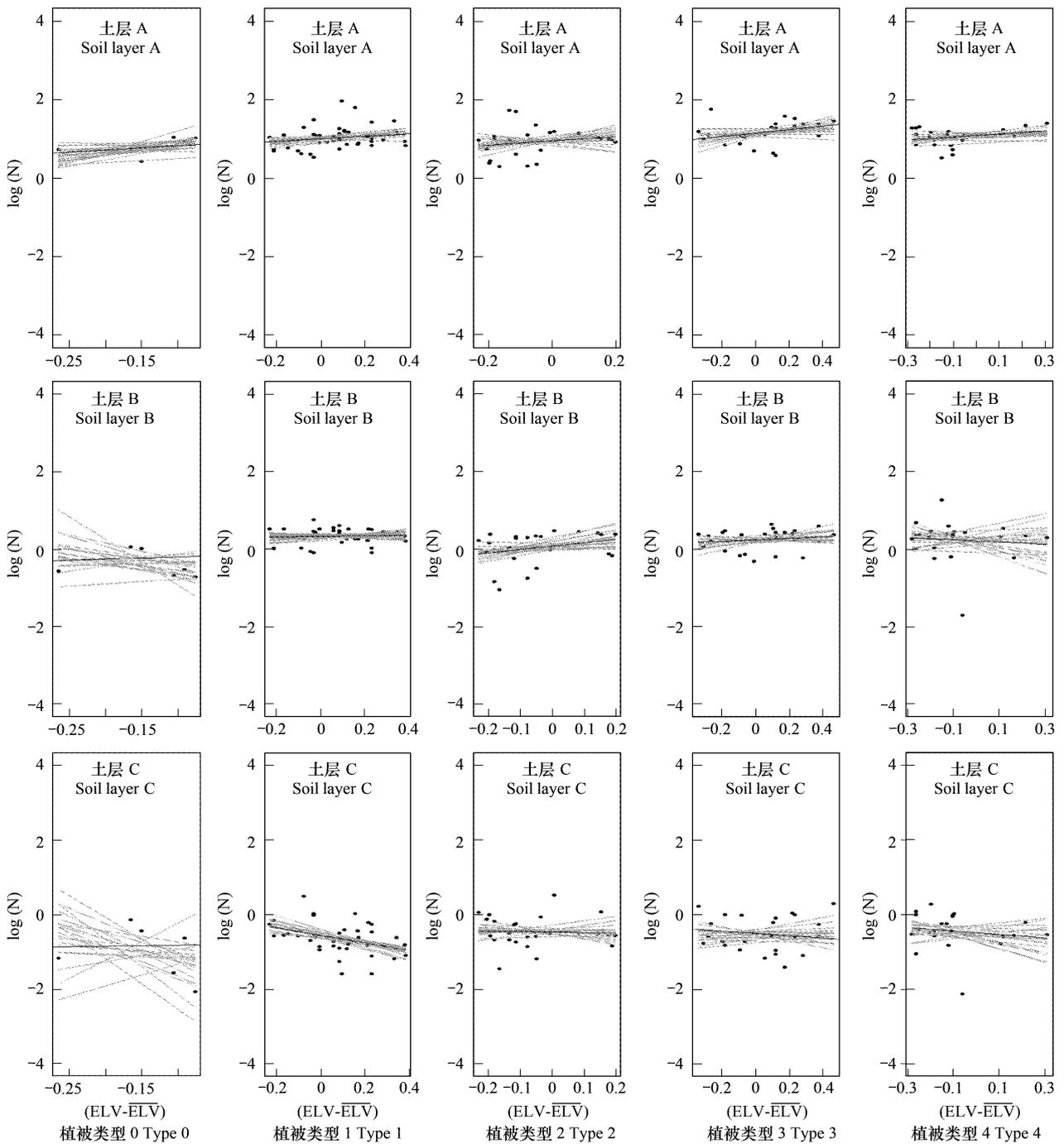


图4 模型  $y = \beta_{j,k}^0 + \beta_{j,k}^1 x$ ,  $y$  为土壤全氮对数,  $x$  为海拔均值调整值,  $j$  为 5 类不同植被类型,  $k$  为 3 个土壤层次

Fig. 4 Model lines  $y = \beta_{j,k}^0 + \beta_{j,k}^1 x$ , for log soil total nitrogen  $y$  given mean-adjusted elevation  $x$ , for five plant type  $j$  and three soil layers  $k$   
 灰线表明了模型的不确定性 The gray lines indicate uncertainty in the fitted model

A、B 层递增,在 C 层递减。植被类型 1、2、3 在 A、B、C 土壤全氮含量分别为 2.8 g/kg、1.3 g/kg、0.56 g/kg; 2.6 g/kg、1.1 g/kg、0.59 g/kg; 3.0 g/kg、1.3 g/kg、0.6 g/kg。植被类型 4 随着海拔的增加,土壤全氮在 A 层递增,在 B、C 层递减。植被类型 4 在 A、B、C 土壤全氮含量分别为 3.0 kg/kg、1.3 kg/kg、0.61 kg/kg。从该模型可以看出,所有的植被类型全氮含量都随着土层的增加而减少。

James 等<sup>[30]</sup>在 1990 年对瑞士林地土壤研究中发现了同样的结论。后来,许多研究也都证明了这一结果<sup>[31]</sup>。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)根据模型结构图和各参数建立研究区土壤全氮模型: $y_i \sim N(\beta_{j[i],k[i]}^0 + \beta_{j[i],k[i]}^1 x_i, \sigma_y^2)$ ,  $\sigma_y \sim N(0, \delta^2)$ 。并通过各参数似然估计和前验分布得到模型中每一个参数后验概率分布。

(2)通过对模型参数的不确定性分析,得到参数估计值都落在其 95% 置信区间内。通过对模型曲线的不确定分析可知,该模型不能很好的预测植被类型 0。

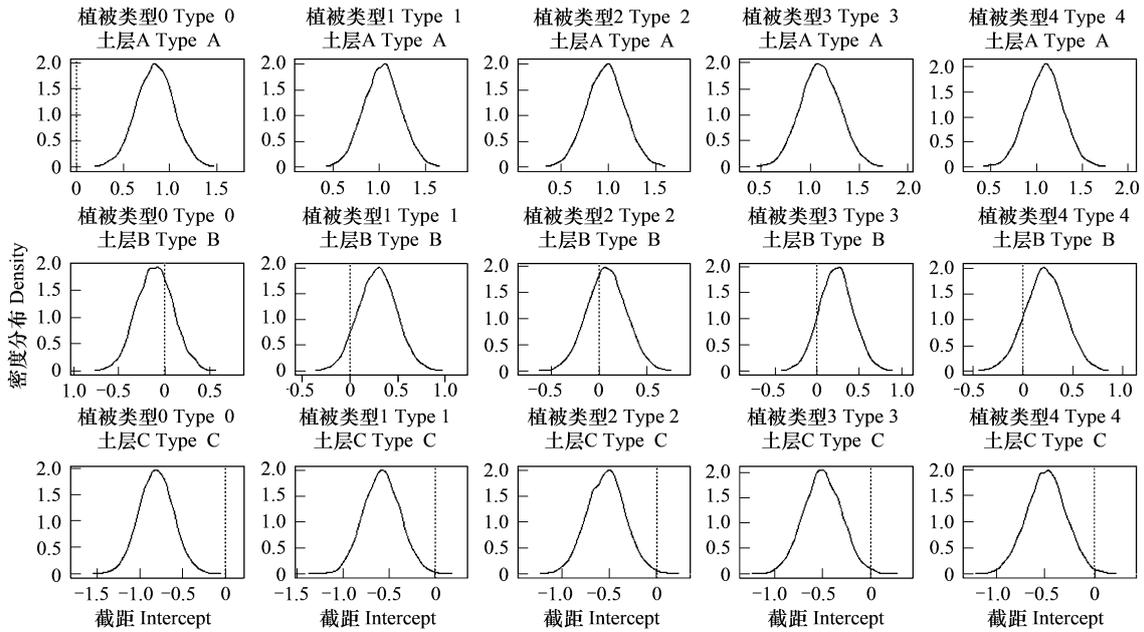


图 5 预测值的不确定性

Fig. 5 Prediction for uncertainty

表 2 模型预测曲线估计\*

Table 2 Model estimates of soil nitrogen

Log(N)	均值 Mean	置信曲线 Confidence interval		N	均值 Mean	置信曲线 Confidence interval	
		2.5%	97.5%			2.5%	97.5%
$y_{01}$	0.84	0.64	1.04	$N_{01}$	2.32	1.90	2.83
$y_{11}$	1.03	0.86	1.20	$N_{11}$	2.80	2.36	3.32
$y_{21}$	0.97	0.80	1.15	$N_{21}$	2.64	2.23	3.16
$y_{31}$	1.10	0.93	1.27	$N_{31}$	3.00	2.53	3.56
$y_{41}$	1.09	0.92	1.26	$N_{41}$	2.97	2.51	3.53
$y_{02}$	-0.10	-0.30	0.10	$N_{02}$	0.90	0.74	1.11
$y_{12}$	0.29	0.12	0.46	$N_{12}$	1.34	1.13	1.58
$y_{22}$	0.085	-0.09	0.26	$N_{22}$	1.09	0.91	1.30
$y_{32}$	0.22	0.05	0.39	$N_{32}$	1.25	1.05	1.48
$y_{42}$	0.22	0.059	0.39	$N_{42}$	1.25	1.06	1.48
$y_{03}$	-0.81	-1.01	-0.61	$N_{03}$	0.44	0.36	0.54
$y_{13}$	-0.58	-0.74	-0.40	$N_{13}$	0.56	0.48	0.67
$y_{23}$	-0.54	-0.72	-0.37	$N_{23}$	0.58	0.49	0.69
$y_{33}$	-0.51	-0.67	-0.33	$N_{33}$	0.60	0.51	0.72
$y_{43}$	-0.48	-0.66	-0.32	$N_{43}$	0.62	0.52	0.73

\* 模型  $y_{ik} = \beta_{j,k}^0 + \beta_{j,k}^1 x$ ,  $y$  表中  $y_{jk}$  为土壤全氮对数,  $N_{jk}$  为土壤全氮,  $j$  为 5 类不同植被类型,  $k$  为 3 个不同土壤层次 Model lines  $y_{ik} = \beta_{j,k}^0 + \beta_{j,k}^1 x$ , for log soil nitrogen  $y_{jk}$ , for soil nitrogen  $N_{jk}$ , for five plant type  $j$  and three soil layers  $k$

(3)从模型预测可知,土壤 A 层,随着海拔的升高,全氮含量呈增加趋势,且受植被类型影响较大。土壤 B 层,随着海拔的升高,植被类型 0,1,2,3 全氮含量递增,而植被类型 4 全氮含量出现递减现象。土壤 C 层,随着海拔的升高,植被类型 0 为递增,植被类型 1,2,3,4 都表现为递减,该层土壤全氮受植被类型影响不大。

(4)植被类型为 0 时,随着海拔升高,土壤全氮含量在 A、B、C 层都为递增。植被类型 1,2 和 3,随着海拔的升高,土壤全氮在 A、B 层递增,在 C 层递减。植被类型 4 随着海拔的升高,土壤全氮在 A 层递增,在 B 和 C 层递减。土壤全氮含量随着土层深度的增加而递减。

## 4.2 讨论

(1)因为自然界中的现象存在不确定性,使得生态预测往往十分困难。由于测量存在误差,很难从一个给定的自然现象中发现隐藏在它下边的真正的规律。多水平贝叶斯模型已经逐渐被生态学家所接受,贝叶斯理论提供了一个直观和清楚的方法来评估模型参数和表达参数与模型不确定性的程度。经典统计学评估一个数据发生的可能性,会给一个特定的假设( $P(Y|H)$ ),而贝叶斯则提供了一个使得假设为真的数量化方法( $P(H|Y)$ )。该方法考虑了数据和模型存在的不确定性,而传统的方法则不对此进行说明,图 4 和图 5 中分别对模型的参数和模型进行了不确定性分析。

(2)由于生态系统的尺度和复杂性,生态数据往往存在很多误差,而生态学家则需要从杂乱的数据中区分出正确的反映。本研究采取同一时期采样,模型输入因子很好的去除了时间序列。本文的研究目的是通过植被类型、海拔、土壤层次来预测林地土壤全氮的变化。从研究结果来看,该模型能很好地预测了同一时期森林土壤的全氮。但我们知道,模型精度的提高往往需要整合许多额外的信息,不确定性的正确处理对于时间序列来说特别重要。因此,建立土壤全氮贝叶斯状态空间模型是今后的研究方向。

## References:

- [ 1 ] Carpenter S R. Ecological futures: building an ecology of the long now. *Ecology*, 2002, 83:2069—2083.
- [ 2 ] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387:253—260.
- [ 3 ] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, DC,1997.
- [ 4 ] Peterson G D, Carpenter S R, Brock W A. Uncertainty and the management of multistate ecosystems: an apparently rational route to collapse. *Ecology*, 2003, 84:1403—1411.
- [ 5 ] Pielke R A, Conant R T. Best practices in prediction for decision-making: lessons from the atmospheric and earth sciences. *Ecology*, 2003, 84: 1351—1358.
- [ 6 ] Berendse F. Organic matter accumulation and N mineralization during secondary succession in heathland ecosystems. *Journal of Ecology*, 1990, 78:413—427.
- [ 7 ] Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11:233—260.
- [ 8 ] Olf H, Berendse F, de Visser W. Changes in N mineralization, tissue nutrient concentrations and biomass compartmentation after cessation of fertilizer application to mown grassland. *Journal of Ecology*, 1994, 82:611—620.
- [ 9 ] Wedin D A, Tilman D. Species effects on nitrogen cycling: a test with perennial grasses. *Oecologia*, 1990, 84:433—441.
- [ 10 ] Holger J, Lars B, Per-Erik J P. Simulated Nitrogen Dynamics and Losses in a Layered Agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1987, 18:333—356.
- [ 11 ] Corre-Hellou G, Brisson N, Launay M, *et al.* Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research*, 2007, 103:76—85
- [ 12 ] Van M M, Aerts R, Berendse F, *et al.* N mineralization in heathland ecosystems dominated by different plant species. *Biogeochemistry*, 1992, 16: 151—166.
- [ 13 ] Christ M J, Peterjohn W T, Cumming J R, *et al.* Nitrification potentials and landscape, soil and vegetation characteristics in two Central Appalachian watersheds differing in  $\text{NO}_3$  export. *For Ecol Man*, 2002, 159: 145—158.
- [ 14 ] Ferrari J B. Fine-scale patterns of leaf litterfall and nitrogen cycling in an old-growth forest. *Can. J. For. Res.*, 1990, 29: 291—302.
- [ 15 ] Knoepp J D, Swank W T. Rates of nitrogen mineralization across an elevation and vegetation gradient in the southern Appalachians. *Plant and Soil*, 1998, 204: 235—241.
- [ 16 ] Ollinger S V, Smith M L, Martin M E, *et al.* Regional variation in foliar chemistry and N cycling among forests of diverse history and composition.

- Ecol, 2002, 83:339—355.
- [17] Peterjohn W T, Foster C J, Christ M J, *et al.* Patterns of nitrogen availability within a forested watershed exhibiting symptoms of nitrogen saturation. *For Ecol Manage*, 1990, 119: 247—257.
- [18] Fu B J, Liu S L, Ma K M, *et al.* Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China. *Plant and Soil*, 2004, 261: 47—54.
- [19] Carlin B P, Louis T A. *Bayes and Empirical Bayes Methods for data Analysis*. Chapman and Hall, Boca Raton, Florida, 2000.
- [20] Gelfand A E, Smith A M. Sampling-based approaches to calculating marginal densities. *Journal of the American Statistical Association*, 1990, 85: 398—409.
- [21] Elsner J B, Jagger T H. A Hierarchical Bayesian Approach to Seasonal Hurricane Modeling. *Journal of Climate*, 2004, 17: 2813—2827.
- [22] James S C, Michael W, Michael D, *et al.* Miranda Welsh and Brian Kloeppel. Tree Growth Inference and Prediction From Diameter Censuses and Ring Widths. *Ecological Applications*, 2007, 17(7): 1942—1953.
- [23] Majumdar A, Kaye J P, Gries C, *et al.* Hierarchical Spatial Modeling and prediction of Multiple Soil Nutrients and Carbon Concentrations. *Communication in Statistics-Simulation and Computation*, 2008, 37: 434—453.
- [24] Grimm N B, Hope D, Jenerette G D, *et al.* Hierarchical Bayesian Scaling of Soil Properties Across Urban, Agriculture and Desert Ecosystems. *Ecological Applications*, 2008, 18(1): 132—145.
- [25] Lu R K. *Chemical analysis of agricultural soil*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [26] Geng Y Q, Yu X X, Sun X Y, *et al.* Characteristics of soil fertility under pure *Pinus tabulaeformis* forest sand shrubs in Badaling Mountain Area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 50—54.
- [27] Faurie O, Soussana J F, Sinoquet H. Radiation interception, partitioning and use in grass-clover mixtures. *Ann Bot*, 1996, 77: 35—45.
- [28] Keating B A, Carberry P S. Resource capture and use in intercropping: solar radiation. *Field Crop Res*, 1993, 34: 273—301.
- [29] Sinoquet H, Bonhomme R. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. *Agric For Meteorol*, 1992, 62: 219—240.
- [30] James O, Klemmedson, Peter B. Effect of high nonexchangeable aluminium on nitrogen and phosphorus availability in a humus-rich acid forest soil. *Plant and Soil*, 1990, 126: 277—285.
- [31] Hans P, Yuehua V F, Hooshang M, *et al.* Root distribution in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application. *Plant and Soil*, 1995, 168-169: 161—165.

#### 参考文献:

- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [26] 耿玉清, 余新晓, 孙向阳, 等. 北京八达岭地区油松与灌丛林土壤肥力特征的研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 50—54.