

长白山北坡土壤氮矿化时空分异特征

刘琪璟^{1,*}, 徐倩倩¹, 张国春¹, 周才平²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 利用土壤温度连续观测数据, 基于文献报道的土壤氮矿化测定数据, 对长白山主要林型的年矿化量进行模拟计算, 同时修正了以往利用气温计算造成的偏差以及相关模型中的参数错误。根据长白山各植被带的土壤温度观测数据, 对各植被带的矿化量进行估计。位于基带的针阔混交林的矿化量为 $58.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 红松云冷杉林为 $34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 岳桦云冷杉林为 $28.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 苔原为 $19.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。建立了通用于各植被带的土壤矿化对温度 (t) 的综合回归模型 ($y = 0.038255e^{(0.1392t)}$)。同时用所建立的综合方程, 模拟计算了各海拔高度土壤氮矿化季节变化, 并指出海拔每升高 100m 矿化速率降低 $2.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 阔叶红松林; 云冷杉林; 土壤温度; 季节变化; 氮素动态

文章编号: 1000-0933(2009)10-5656-09 中图分类号: Q142, S712.5, S718.5 文献标识码: A

Temporal and spatial variation of soil nitrogen mineralization in northern slope of Changbai Mountain in Northeast China

LIU Qi-Jing^{1,*}, XU Qian-Qian¹, ZHANG Guo-Chun¹, ZHOU Cai-Ping²

1 Department of Forest Sciences, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5656 ~ 5664.

Abstract: Soil nitrogen mineralization of the dominant vegetation types in Changbai Mountain, Northeast China, was simulated based on continuously observed soil temperature and published experiment data. Significant errors and biases, which were caused by unreasonable calculation and parameterization, in previous reports were verified. In this study, the nitrogen mineralization rates in different vegetation zones were estimated with temperature-dependent regression models. The mineralization rates were $58.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in the conifer-broad leaf mixed forest which distributed in the foot of the mountain, $34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in the pine-spruce-fir mixed forest of subalpine, $28.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in birch-spruce-fir mixed forest, and $19.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in tundra. Based on the continuous records of soil temperature (t), an integrated regression model for estimating nitrogen mineralization rate ($y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), $y = 0.038255e^{(0.1392t)}$, was established. The seasonal and vertical variation of nitrogen mineralization were also estimated with the regression model. The nitrogen mineralization was estimated to decline at a rate of $2.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ per 100m with elevation increase.

Key Words: broad-leaved conifer mixed forest; spruce-fir forest; soil temperature; seasonal change; nitrogen dynamics

土壤氮矿化的主要过程是微生物分解有机物过程中对氮的释放。氮矿化速率受很多因素影响, 主要有环境因子、氮素形态、土壤生物类群及数量, 其中环境因子包括土壤温度、土壤湿度、pH 值^[1]、透气性^[2]、机械组成等^[3], 而温度和湿度是影响土壤氮素矿化的最重要的环境要素, 并且温度的影响要高于湿度, 二者有明

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40671098)

收稿日期: 2009-04-02; 修订日期: 2009-07-28

致谢: 吉林省长白山火山监测站为本研究提供后勤支持

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqijing@gmail.com

显的交互作用^[4-6]。当温度受限制时,水分变化的影响不大^[7]。关于温度对 N 矿化的影响研究比较多,而且得出的结论基本一致,即随着温度的升高,微生物活性增强,呼吸加速。多数研究都证明,在水分条件适宜条件下,土壤 N 矿化最大速率出现在 20 ~ 35℃ 之间^[8-10]。

对于特定类型的土壤,影响 N 矿化的主要因子为温度和水分,因为水热条件影响微生物活性,进而影响矿化。所以,很多研究探索呼吸对温度、湿度的相应规律,并建立相关模型。其中应用比较多的是指数模型^[11]。N 矿化的测定耗时费力,所以建立矿化速率同温度等生境因子之间的回归模型,对于研究群落养分循环以及生产力驱动机制等具有重要意义,特别是能够为开展相关研究提供重要而且实用的工具。

本研究的地点长白山具有多种生态系统类型。多年来,关于该区的植被组成结构^[12,13]、生产力^[14]、养分循环^[15]以及群落动态机理等方面研究开展了大量工作。各植被带土壤理化性质研究有比较全面的报道^[16],其中较早的资料^①见于 1963 年。关于养分循环的研究主要集中在凋落物归还方面,而关于土壤氮矿化研究较少。其中基于实验观测的研究^[17]为土壤养分动态评价积累了基础资料。后来,根据实验室培养建立了矿化速率-温度响应模型,并估计了全年的矿化量,阔叶红松林的矿化速率为 $111.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,针叶林为 $57.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[18, 19]。其中的矿化速率-温度响应方程(简称周氏方程)为估算不同季节养分动态提供了有价值的工具。刘艳玲等^[20]利用周氏方程对不同植被带的土壤氮矿化量进行了计算。

周才平等^[18,19]研究存在 3 方面问题:(1)估算年矿化量使用的温度数据不合理。在建立方程时使用的是培养箱的温度,即土壤本身的温度,而在估计全年矿化量时,使用的却是空气温度数据。这可能是因为当时没有连续的、高密度的土壤温度观测数据。显然,这会过高估计氮矿化量。原文如果能够在后面的讨论中加以强调,可以提醒读者在引用相关数据或结论时要谨慎。(2)有的方程参数可能有误。利用文章中的数据检验方程模拟结果发现,有的方程参数存在计算错误,所以利用该方程进行全年矿化量的估算^[20]也必然会产生很大偏差。方程参数需要重新求算。(3)拟合方程的温度上限过高,脱离实际温度范围太远,会导致较大的估算误差。

为了提高研究区域的土壤养分动态参数的可靠性,同时揭示氮矿化在时间和空间上的分布规律。本研究利用文献报道的模型和数据,结合土壤温度连续观测数据,对以往文献发表的结果进行修正,分析了不同海拔的氮矿化季节特征,并建立了矿化量同海拔、年平均温度关系等回归模型。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

研究区域为长白山自然保护区,包括从下部的阔叶红松林到林线以上的高山苔原。关于各植被带的组成结构,有很多报道^[12]。本研究观测地点位于长白山北坡各植被带,包括了长白山的主要群落类型(表 1)。为了简洁,关于群落名称,本文在插图或表格里将阔叶红松林简称为“红松”,把红松云冷杉林简称为“云冷杉”。

1.2 数据获取

本研究的数据来源分 2 部分,土壤温度数据为直接观测,氮矿化速率数据来自周氏论文^[18, 19]。

(1)土壤温度观测 从 2004 年开始,在长白山各植被带选择典型地段,测定土壤温度。使用的土壤温度计为 HOBO StowAway (Onset Co. Ltd.)。将温度计埋设在 5cm 深度,观测频率为 1h, 1a 的数据大约为 9000 个记录。观测的群落类型有:阔叶红松林、红松云冷杉林、岳桦云冷杉林、高山苔原(高山笃斯越橘群落),6 个样点共获取数据 10 万个记录,用于本研究的数据为 5.2 万个记录。

(2)文献数据获取 根据周氏论文报道的相同地点氮矿化对温度的相应曲线数据,重新建立回归模型。周氏论文是基于 5 ~ 35℃ 之间的温度培养实验建立模型,其中指出,在 25℃ 之前 2 个林型的矿化速率基本相同。笔者在整理土壤温度数据时发现,长白山各植被带的土壤温度日平均值全部在 20℃ 以下,所以,利用

① 李贻铨. 长白山林区的土壤. 中国林业科学研究院科学技术情报室印. 中国科学院地理科学与资源研究所馆藏, 1963.

25℃ 以内的数据拟合的方程就可以满足对全年矿化量的估计, 并且会有更可靠的精度。

表 1 观测样地概况
Table 1 Description of research sites

样点名称 Code	群落类型 Community	海拔(m) Altitude(m)	优势种 Dominant
Plot1	阔叶红松林 Korean pine mixed forest	740 ^b	红松(<i>Pinus koraiensis</i>), 紫椴(<i>Tilia amurensis</i>), 水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)
Plot2	红松云冷杉林 Korean pine – spruce – fir forest	1260 ^b	鱼鳞云杉(<i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>), 红皮云杉(<i>P. koraiensis</i>), 臭冷杉(<i>Abies nephrolepis</i>)
Plot3	岳桦云冷杉林 erman birch – spruce – fir forest	1680	鱼鳞云杉(<i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>), 臭冷杉(<i>Abies nephrolepis</i>), 岳桦(<i>Betula ermanii</i>)
Plot4	岳桦林 erman birch forest	1940	岳桦(<i>Betula ermanii</i>)
Plot5	高山笃斯越桔群落 <i>Vaccinium</i> community	2250	高山笃斯越桔(<i>Vaccinium uliginosum</i> var. <i>alpinum</i>), 毛毡杜鹃(<i>Rhododendron confertissimum</i>)
P0706	岳桦林 erman birch forest	1760	岳桦(<i>Betula ermanii</i>)

b 周氏取样地点

把周才平^[18,19]原图扫描后在图像处理软件上读取矿化速率曲线上每个折点的像素坐标。经过换算, 得到不同林型在不同温度时的矿化量数据。根据读取的数据拟合矿化-温度响应方程。

1.3 数据处理与模型建立

(1) 氮矿化-温度响应模型的评价与重新建立: 本文分别几种组合进行拟合, 并比较估测精度。①利用原来的 4 个温度点(5、15、25、35℃)拟合。原理上这样拟合的方程应该和原文给出的方程一致, 同时可以对原文方程进行检验; ②将温度区间缩小, 利用 5 ~ 25℃ 数据对不同林型分别拟合; ③将二个林型的 5 ~ 25℃ 矿化数据合并在一起拟合, 建立一个综合方程或称通用方程。通过观察周氏论文的矿化速率图可见, 25℃ 以前 2 个林型(分别为阔叶红松林和红松云冷杉林)的矿化速率几乎完全重合(图 1), 这一点原文也提到。说明 2 个林型的土壤矿化特征没有差别, 可以利用一个方程进行估计。利用文献中的实测值, 对本研究建立的模型以及文献模型的估测结果进行比较, 将模拟值与实测值最接近的模型确定为最佳模型。本文使用的 N 矿化“实测值”为文献报道的测定值, “估计值”为利用模型计算的理论值。

(2) 土壤温度数据统计分析: 根据观测的土壤温度数据, 计算日平均温度、月平均温度、积温等。将逐日平均数据代入文献报道的矿化-温度响应方程周氏方程计算逐日矿化量, 累加后获得各月以及全年氮矿化量。

2 结果

2.1 各植被带土壤温度季节变化

阔叶红松林的土壤年平均温度最高, 为 5.7℃, 随海拔的升高逐渐降低, 苔原为 -1.8℃(海拔 2250m)。日平均温度最高值也出现在阔叶红松林, 为 19.3℃, 最低值为苔原, -16.5℃。从季节变化看, 7 ~ 8 月份的温度最高, 同气温变化^[20]一致。温度变化还显示, 5 ~ 10 月份的温度除苔原外都在 0℃ 以上, 其他月份基本都处于冻结状态(表 2)。由于观测的年度不完全一致, 同一地点不同年份的土壤温会有一定差异, 但总体反

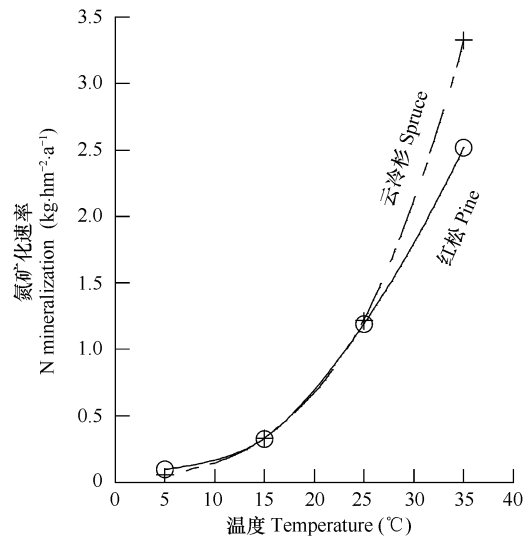


图 1 阔叶红松林和云冷杉林的氮矿化速率和温度的关系
Fig. 1 Daily soil nitrogen mineralization rate of two forest types in relation with temperature in Changbai Mountain, China
根据周才平等转绘 Based on Zhou et al. 2001

映了温度同海拔的关系。

表 2 不同海拔各月土壤平均温度

Table 2 Seasonal change of soil temperature in the main community types in Changbai Mountain						
月份 Month	样地 1 Plot1	样地 2 Plot2	样地 3 Plot3	样地 4 Plot4	样地 5 Plot5	样地 0706 Plot0706
1	-2.9	-4.2	-2.8	-2.5	-12.6	-1.2
2	-2.4	-4.5	-4.4	-4.7	-11.9	-2.2
3	-0.8	-3.4	-2.0	-4.5	-9.6	-0.8
4	0.5	-0.3	-0.6	-0.3	-6.9	-0.1
5	8.2	3.6	2.9	0.6	-0.9	2.0
6	13.7	10.3	9.8	5.8	5.0	8.4
7	15.5	15.1	13.9	12.4	8.8	12.6
8	17.2	15.2	13.1	12.9	11.1	13.5
9	13.1	10.5	8.0	8.3	6.0	9.4
10	7.2	3.9	1.3	1.0	-0.2	3.5
11	1.6	-1.6	-0.4	-2.3	-2.7	1.2
12	-2.3	-6.1	-1.7	-4.8	-8.1	-0.3
平均温度 Mean	5.7	3.2	3.1	1.8	-1.8	3.8
最小 Min	-4.7	-7.9	-4.9	-7.7	-16.5	-2.6
最大 Max	19.3	18.3	16.6	16.7	14.5	15.4
海拔 Alt. (m)	740	1260	1680	1940	2260	1760
年份 Year	2005	2007	2008	2005	2005	2008

Plot3 和 Plot0706 观测时间为 2007-09 ~ 2008-08; Observation time for Plot3 and Plot0706 was from Sep. 2007 to Aug. 2008

经过拟合,海拔同最热月平均温度呈紧密直线相关,而同年平均温度的相关紧密程度要差一些。分别利用 8 月份平均温度(t_8)和年平均气温(t_y)拟合了温度-海拔(h)关系方程:

$$t_8 = 20.082 - 0.003889h \quad R = 0.99, P < 0.0001 \quad (8 \text{ 月份温度})$$

$$t_y = 9.13 - 0.004049h \quad R = 0.86, P < 0.0001 \quad (\text{年平均温度})$$

从方程系数看,8 月份土壤温度随海拔升高每 100m 的递减速率为 0.39℃,而年平均温度的递减速率为 0.41℃。

2.2 氮矿化的温度响应方程

阔叶红松林,利用周氏方程计算的结果(表 3 中的模型(7))同其论文中给出的实测值(图 1)相比差别很大,可能是原文给出的参数有笔误。原方程适用区间为 5 ~ 35℃,但是实际温度为 20℃ 以下,而且多数在

表 3 根据不同上限温度拟合的矿化速率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)对温度(t)的响应方程

Table 3 Regressive equations of nitrogen mineralization rate ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) in relation with different temperature(t) ranges				
数据类型 Community	适用区间 Range(℃)	数据来源 Data source	编号 Code	方程 Equation
红松 Pine	5 ~ 25	查图 ^a	(1)	$Y = 0.050663e^{(0.12584t)}$
云冷杉 Spruce	5 ~ 25	查图 ^a	(2)	$Y = 0.028886e^{(0.15257t)}$
综合 Integrated	5 ~ 25	查图 ^a	(3)	$Y = 0.038255e^{(0.1392t)}$
红松 Pine	5 ~ 35	查图 ^a	(4)	$Y = 0.063e^{(0.1109t)}$
云冷杉 Spruce	5 ~ 35	查图 ^a	(5)	$Y = 0.03556e^{(0.13475t)}$
综合 Integrated	5 ~ 35	查图 ^a	(6)	$Y = 0.046311e^{(0.12282t)}$
红松 Pine	5 ~ 35	原方程 ^b	(7)	$Y = 0.079e^{(0.059t)}$
云冷杉 Spruce	5 ~ 35	原方程 ^a	(8)	$Y = 0.03e^{(0.14t)}$

a: Data for regression analysis were picked from the figure by Zhou *et al*^[18]; b: a Cited equation^[18]

15℃以下。经过比较,较大适用区间的方程估计误差偏大。例如,云冷杉林 25℃矿化速率,实测值为 $1.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。利用周氏方程和 5~25℃区间拟合的方程计算结果分别为 1.03 和 $1.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,后者更接近实测值。所以首先确定使用 5~25℃区间拟合的方程进行估算。2 个林型数据综合建立的方程估测值也比较接近实测值。不同温度区间数据拟合的方程见(表 3),估计结果见(表 4)。

不同方程估算的结果同实测值的比较见图 3。其中,“实测”是根据周氏论文图上查得的数据;“查图拟合”为根据周氏论文中图上查得的数据所建方程的估计值;“原方程”为周氏方程的估计值。用 25℃以下数据拟合的方程来估算区间以外(35℃)的矿化速率时误差很大,说明方程的外延有很大风险。但低温区矿化很微弱(接近零),外延带来的误差可以忽略。对各林型的矿化模型以及综合模型共 3 个方程的估测值之间进行差异显著性检验,相互之间均为差异不显著,所以可以利用任意方程对土壤氮矿化进行估算。在本文,阔叶红松林带和云冷杉林带使用各自的方程进行估算,其他植被带使用综合方程。

表 4 二种森林类型土壤氮矿化温度响应方程估算结果($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)比较

Table 4 Comparison of estimated and measured values of nitrogen mineralization rates($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) with different regressive equations

群落 Community	数据源 ^a Data source	适用区间 Range(℃)	5℃	15℃	25℃	35℃
红松 Pine	实测 Measured		0.0963	0.3262	1.1925	2.5187
红松 Pine	查图拟合 Re-estimated	5~25	0.0950	0.3346	1.1776	4.1447
红松 Pine	查图拟合 Re-estimated	5~35	0.1097	0.3325	1.0079	3.0553
红松* Pine	原方程 Estimated	5~35	0.1061	0.1914	0.3453	0.6229
云冷杉 Spruce	实测 Measured		0.0576	0.3292	1.2181	3.3251
云冷杉 Spruce	查图拟合 Re-estimated	5~25	0.0619	0.2848	1.3098	6.0228
云冷杉 Spruce	查图拟合 Re-estimated	5~35	0.0698	0.2684	1.0327	3.9738
云冷杉 Spruce	原方程 Estimated	5~35	0.0604	0.2450	0.9935	4.0287
综合 Integrated	查图拟合 Re-estimated	5~25	0.0767	0.3087	1.2417	4.9954
综合 Integrated	查图拟合 Re-estimated	5~35	0.0856	0.2923	0.9981	3.4087

a: 实测值为图上查得; * 红松林原方程估计结果和其实测值差异很大,可能参数有误; 岳桦林与苔原均使用云冷杉林的氮矿化方程 Measured, Estimated and Re-estimated stand for measured value, simulated value by previously reported equation and that by reestablished equation with reported data, respectively. All original data were from Zhou *et al.* [18]; * The estimated values for Korean pine forest were significantly different from the measured one, and thus the coefficients in the equation are supposed to be fault; The equation for spruce forest was also adopted to both erman birch forest and tundra soil

2.3 土壤氮矿化的时空变化

各植被带的夏季矿化速度最大,其中 5~10 月份(夏半年)的矿化量均占全年的 80% 以上,苔原带为 87%。冬季 1 月份阔叶红松林的矿化量为 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,苔原为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。阔叶红松林在夏季最热月 8 月的矿化量可达 $13.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,苔原为 $5.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 5)。冬季虽然各植被带的矿化速率都很低,但是不同植被带之间的相对差异更大。如夏季(8 月份)苔原的矿化量是阔叶红松林的 0.42 倍,而冬季(1 月份)则降低到 0.19 倍。

由于温度和海拔之间的密切关系,年矿化量和海拔之间呈显著的直线相关($R = 0.94$, $P < 0.0001$),相关方程为: $y = 70.92 - 0.023104h$,式中 h 为海拔(m)(图 2)。从方程的系数看,海拔每升高 100m,矿化速率的递减率为 $2.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

周才平等^[18, 19]根据所建立的方程并利用气温数据计算的矿化量为,阔叶红松林 $111.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,红松云冷杉林 $57.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而本研究利用周氏的实验数据计算得出的结果分别为 $58.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。和本文的结果相比,周氏论文估算的阔叶红松林氮矿化量高出 91%,红松云冷杉林高出 66.6%。显然,利用气温代替土壤温度计算的结果误差非常大。此外,由于周氏论文给出的阔叶红松林的土壤氮矿化方程系数偏离实际较大,刘艳玲等^[20]用周氏方程计算的结果为 $44.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (利用相同数据

进行了验证), 低于本文得出的数值($58.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

表 5 各植被带土壤氮矿化($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$) 季节变化
Table 5 Seasonal pattern of mineralization rate($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$) in the vertical vegetation zones of Changbai Mountain

月份 Month	Plot1	Plot2	Plot3	Plot4	Plot5	Plot09
1	1.09	0.48	0.59	0.84	0.21	1.01
2	1.06	0.41	0.43	0.57	0.21	0.81
3	1.41	0.54	0.66	0.64	0.32	1.07
4	1.66	0.84	0.80	1.11	0.44	1.13
5	4.49	1.63	1.51	1.30	1.06	1.62
6	8.73	4.39	4.08	2.69	2.46	3.82
7	11.16	9.23	7.57	6.99	4.08	6.89
8	13.77	9.66	7.04	7.58	5.73	7.86
9	8.01	4.47	3.26	3.84	2.73	4.32
10	4.07	1.78	1.13	1.46	1.18	2.01
11	1.91	0.75	0.82	0.84	0.80	1.36
12	1.18	0.37	0.70	0.64	0.39	1.14
每年 Annual	* 58.54	* 34.54	28.56	28.49	19.63	33.04
海拔 Alt. (m)	740	1260	1680	1940	2260	1760
年份 Year	2007	2005	2008	2005	2005	2008

* Plot1 和 Plot2 的矿化量周氏论文计算值分别为 111.8 和 57.4 Mineralization rates for Plot1 and Plot2 by Zhou *et al.* ^[18] are 111.8 and 57.4, respectively

2.4 年矿化量和热量条件的关系

为了能够更加方便地估算全年的矿化量, 利用不同温度或热量参数进行回归模型可靠性的比较。如上所述, 矿化速率和温度呈明显的正相关, 实际是热量的关系。经过统计分析, 不同形式的有效积温更能反映全年 N 矿化量。其中, 大于 0°C 的有效积温以及温暖指数(月平均温度大于 5°C 的总和)表现的紧密程度最高。年平均温度和积温均包括零下温度, 用其拟合的方程虽然也达到显著, 但是比利用零上温度拟合的效果稍差。年矿化量同 8 月份的平均温度关系密切, 而同 1 月份平均温度的相关不紧密。所以, 在土壤温度数据不全的情况下, 可以利用 8 月份的温度进行估算。以上结果和文献报道的结论一致^[21]。

把年矿化量同低温条件进行相关分析, 包括寒冷指数(月平均温度小于 -5°C 的总和)、负积温等, 虽然也显示出随着温度升高而增加的趋势, 但相关系数很低。这也证明, 矿化主要是温暖季节的贡献。表 6 是利用不同温度或热量参数拟合的方程参数, 均通过显著性检验($P < 0.0001$)。

3 讨论

本文利用高密度的土壤温度监测数据, 基于现有的矿化对温度的响应方程, 分析了长白山各植被带的土壤氮矿化特征, 其中对以往利用空气温度代替土壤温度的估算结果进行了订正, 利用土壤温度进行计算, 使对矿化的估计更加可靠。本文根据文献提供的矿化数据以及野外温度观测结果重新拟合了方程, 更正了

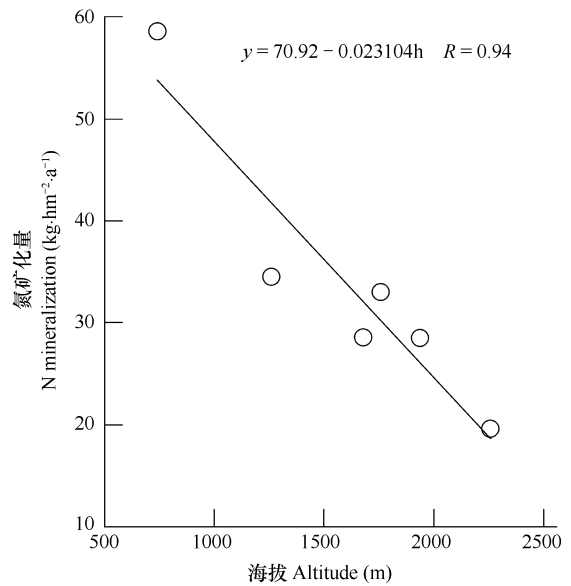


图 2 土壤年氮矿化量和海拔的关系
Fig. 2 Annual soil nitrogen mineralization in relation with altitude

文献中关于长白山森林土壤氮矿化速率的计算方法并更新了方程参数,使估算结果从理论上更接近实际。关于研究区域的氮矿化问题,今后应该在下面几个方面加以改进,以提高估计可靠性。

表 6 长白山土壤不同植被带年 N 矿化量同土壤温度关系回归模型参数

Table 6 Regressive parameters for annual soil nitrogen mineralization rate in relation with thermal conditions

自变量 Independent variables	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
年平均温度 Mean <i>T</i> of year (°C)	22.647	0.13089	0.92
8 月份平均温度 Mean <i>T</i> of August (°C·d)	3.2763	0.16467	0.97
温暖指数 Warmth index (°C·month)	14.612	0.030265	0.98
积温 Accumulated <i>T</i> (°C·d)	22.542	0.0003562	0.92
有效积温 Effective accumulated <i>T</i> (°C·d)	10.145	0.00072567	0.98
方程 Equation: $y = ae^{(bt)}$, ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)			

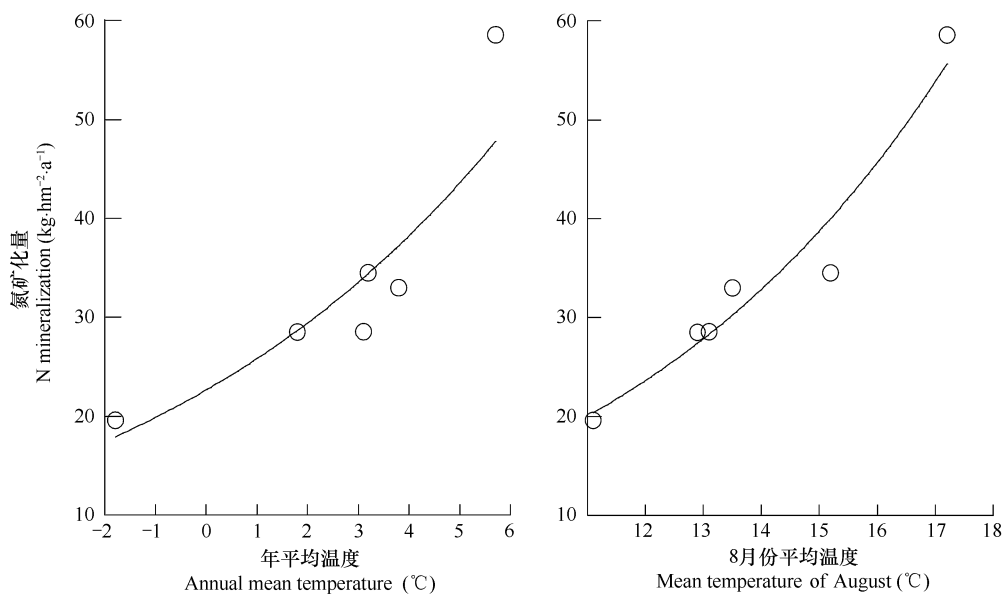


图 3 年矿化量和土壤温度的年平均以及 8 月份平均值关系

Fig. 3 Annual nitrogen mineralization in relation with soil temperature of the main plant communities in Changbai Mountain

(1) 土壤物理性质差异 本文在计算氮矿化时没有考虑不同土壤类型容重的差异。实际上,各植被带的土壤物理性质有很大差异^[22],不同季节的水分状况也不同^[23]。为了更加准确计算矿化量,应该分别不同土壤类型测定容重,然后计算矿化量。

(2) 矿化率的空间分异 不同土壤类型的矿化特征会有差异,尽管针叶林和针阔混交林土壤的矿化特征非常相似,但其他植被带的土壤矿化规律仍然需要通过实验验证,建立各自的矿化-温度反应方程。所以,今后需要在高山带以及岳桦林带开展相关研究,补充和完善氮矿化的空间分异特征模型所需参数,使矿化预测更加可靠。

(3) 现有矿化方程式的可靠性 本研究没有对文献报道的现有方程式进行实验验证,因为这种验证比较费时。周氏论文虽然说明了土样是在一定温度下培养的,但是没有交代是否为箱体内的实际温度。培养箱的显示温度和样品所处的实际温度有时不一致,应该设置仪器监测。培养箱的显示温度和内部实际温度有时相差很大,甚至不同部位的温度也不相同。

(4) 综合研究矿化的影响因子 土壤矿化的影响因子很多,其中水分条件和热量条件交互或共同作用是一般规律。正如周才平等^[18]实验所显示,不同湿度条件下的矿化速率差别很大,体现在方程的系数上。所以,在估算土壤氮矿化水平时,除了连续监测土壤温度外,还要同时观测土壤湿度的时间变化,从而更加客

观地揭示研究区域不同生态系统类型土壤养分动态规律。

(5)最好的方法 为了反映土壤矿化的实际情况,需要在现有土壤温度连续监测的样地,进行野外 N 矿化试验,基于野外 N 矿化试验结果及温度监测结果,建立模型;以此对现有文献的验证、对未来 N 矿化预测等将有重大意义。

References:

- [1] Curtin D, Campbell C A, Jilil A. Effects of acidity on mineralization: PH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 57—64.
- [2] Groffman P M, Eagan P S. Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity. *Plant and Soil*, 1996, 183: 61—67.
- [3] Li G. C, Han X G, Huang J H *et al.* A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001 (7), 21:1187—1195.
- [4] Puri G, Ashman M R. Relationship between soil microbial biomass and gross N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 251—256.
- [5] Ju X T, Li S X. The effect of temperature and moisture on nitrogen mineralization in soils. *Plant Nutrient and Fertilizer*, 1998, 4(1): 37—42.
- [6] Wang C H, Xing X R, Han X G. The effects of temperature and moisture on the soil net nitrogen mineralization in an *Aneurolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2472—2476.
- [7] Jennifer D K, Wayne T S. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization. *Biology Fertility of Soils*, 2002, 36: 177—182.
- [8] Nicolardot B, Fauvet G, Cheneby D. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 253—261.
- [9] Stark J M, Firestone M K. Kinetic characteristics of ammonium oxidizer communities in a California oak woodland-annual grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 1307—1317.
- [10] Grundmann G L, Rossol R P, Bardin R. Differential effects of soil water content and temperature on nitrification and aeration. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1342—1349.
- [11] Dou Z, Toth J D, Jabro J D, Fox R H *et al.* Soil nitrogen mineralization during laboratory incubation: Dynamics and model fitting. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 625—632.
- [12] Liu Q J, Kondoh A, Takeuchi N. The forest vegetation and its differentiation under disturbance in a temperate mountain, China. *Journal of Forest Research(Japan)*, 1998, 3: 111—117.
- [13] Wada N, Liu Q J, Kawada K. Seasonal variations in soil temperature on the alpine tundra community in Mt. Changbai in Northeast China: Comparison with Mt. Tateyama in Central Japan. *Far Eastern Studies*, 2006, 5: 35—43.
- [14] Li W H, Deng K M, Li F. Study on biomass and primary productivity of main ecosystems in Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem*, 1981, 2: 34—55.
- [15] Cheng B R, Xu G S, Ding G F, *et al.* Intensity of biological cycle and litters in the broad leaved and Korean pine mixed forest and coniferous forest in the northern slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem*, 1992, 6: 200—209.
- [16] Cheng B R, Xu G S, Ding G F, *et al.* The main soil groups and their properties of the natural reserve on northern slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem*, 1981, 2: 196—206.
- [17] Liu Z Z, Zhang L H, Ma C X, *et al.* Soil nitrogen turnover in two types of forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(Supp. B): 61—67.
- [18] Zhou C P, Ou Y H. Influence of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization under two types of forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4): 505—508.
- [19] Zhou C P, Ou Y H. Effect of temperature on nitrogen mineralization at optimum and saturated soil water content in two types of forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1469—1473.
- [20] Liu Y L, Lu P L. Temporal and spatial variation of soil nitrogen mineralization in the forest ecosystems in Changbai Mountain. *Forest Science of Hebei Province*, 2008, (3): 4—6.
- [21] Clough T J, Jarvis S C, Hatch D J. Relationships between soil thermal units, nitrogen mineralization and dry matter production in pastures. *Soil Use and Management*, 1998, 14: 65—69.
- [22] Yang H, Li Z, Pei T F, *et al.* Soil hydro-physical properties under broadleaved Korean pine and dark coniferous forests on northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 587—591.

- [23] Yang H, Pei T F, Guan D X, *et al.* Soil moisture Dynamics under Broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 587–591.

参考文献:

- [3] 李贵才, 韩兴国, 黄健辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187–1195.
- [5] 巨晓棠, 李生秀. 土壤氮素矿化的温度水分效应. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 37–42.
- [6] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响. *生态学报*, 2004, 24(11): 2472–2476.
- [14] 李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物生产量的研究. *森林生态系统研究*, 1981, 2: 34–55.
- [15] 程伯荣, 许广山, 丁桂芳, 等. 长白山北坡针叶林和阔叶红松林的凋落物和生物循环强度. *森林生态系统研究*, 1992, 6: 200–209.
- [16] 程伯荣, 许广山, 丁桂芳, 等. 长白山北坡自然保护区主要土壤类型及其基本特征. *森林生态系统研究*, 1981, 2: 196–206.
- [17] 刘增柱, 张立宏, 马成新, 等. 长白山两种林型下土壤氮流通的动态. *生态学报*, 1995, 15(Supp. B): 61–67.
- [18] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 505–508.
- [19] 周才平, 欧阳华. 长白山两种主要林型下土壤氮矿化速率与温度的关系. *生态学报*, 2001, 21(9): 1469–1473.
- [20] 刘艳玲, 陆佩玲. 长白山森林生态系统土壤氮矿化时空动态特征. *河北林业科技*, 2008, (3): 4–6.
- [22] 杨弘, 李忠, 裴铁璠, 等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 587–591.
- [23] 杨弘, 裴铁璠, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林土壤水分动态研究. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 587–591.