

文章编号: 1001-1498(2008)02-0161-07

# 祁连山中部云杉林和高寒草甸土壤 N矿化及其影响因素研究

吴建国<sup>1</sup>, 苋伟<sup>1,2</sup>, 艾丽<sup>1,3</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京林业大学, 北京 100083; 3. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:**以正交试验好气培养土壤方法分析了祁连山青海云杉林和高寒草甸下土壤 N 矿化及其与温度、湿度、土层和海拔的关系。结果显示:以土壤 N 矿化量极差计,土层和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化影响最大,其次是温度,湿度影响较小;以土壤 N 矿化比例极差计,温度和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化影响最大,其次是湿度,土层影响较小。温度和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化量影响显著,对土壤 N 矿化比例影响却不显著 ( $P < 0.05$ )。35 下土壤 N 矿化量比 5 和 15 下高,而 25 与 5 和 15 下差异不显著;35 下土壤 N 矿化比例比 15 下高,15 与 5 和 25 差异不显著 ( $P < 0.05$ )。不同湿度下土壤 N 矿化量差异不显著,土壤含水量为 20%时土壤 N 矿化比例比 60%时低 ( $P < 0.05$ )。海拔高度 3 200 m 处森林土壤 N 矿化量比 3 500 m 处高寒灌丛草甸土壤中低 ( $P < 0.05$ ),3 600 m 与 3 400 m、3 200 m 及 3 500 m 与 3 600 m 差异却不显著 ( $P < 0.05$ )。0 ~ 15 cm 土层土壤 N 矿化量比 15 ~ 35 cm 土层高,但两个土层土壤 N 矿化比例差异不显著 ( $P < 0.05$ )。 $Q_{10}$ 在 0.7 ~ 2.0, 5 升高到 15 较低,15 升高到 25 及 25 升高到 35 下较高。说明祁连山高寒草甸和山地森林土壤 N 矿化受温、湿度变化的影响较大。

**关键词:**祁连山;土壤 N 矿化;山地森林;高寒草甸

中图分类号: S714

文献标识码: A

## The Mineralization of Soil Nitrogen and Its Motivating Factors to the Dragon Spruce Forest and Alpine Meadows of the Qilian Mountains

WU Jian-guo<sup>1</sup>, CHANG Wei<sup>1,2</sup>, AILI<sup>1,3</sup>

(1. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Beijing Forestry Universities, Beijing 100083, China;

3. The Science and Technology University of Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To understand the effects of varying soil temperature and changing in soil water content on the decomposition of soil nitrogen, an anaerobic incubation experiment with orthogonal experiment in an artificial climatic chamber was conducted to investigate how the mineralization of soil nitrogen of the slopes under the Qilian Mountains forest (dominated by *Picea crassifolia*) and alpine meadows were affected by temperature, soil water content, soil depth, and mountain altitudes. The results showed that based on the range of soil nitrogen mineralization, the effects of soil depth and interaction between soil water content and temperature on soil nitrogen mineralization were the highest, next was the effects of changing in temperature, and the effects of soil water content on them was the lowest. Based on the range of soil nitrogen mineralization ratio, the effects of soil temperature and interaction between soil water content and temperature on soil nitrogen mineralization ratio were also the highest, next were the effects of changing

收稿日期: 2007-04-10, 修改日期: 2007-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (40543014)

作者简介: 吴建国 (1971—), 男, 甘肃张掖人, 副研究员, 主要研究生态系统碳氮循环和气候变化影响与适应。

in soil water content, and the effects of soil depth on them was the lowest. The effects of soil temperature and interaction between soil water content and temperature on soil nitrogen mineralization were significant, while the effects of these factors on the ratio of soil nitrogen mineralization were not significant ( $P < 0.05$ ). The soil nitrogen mineralization was higher at 35 than at 5 and 15, while there was not significant difference at 25 and 15 or 5 ( $P < 0.05$ ). Additionally, the soil nitrogen mineralization ratio was higher at 35 than at 15, while there was no significant difference at 15 or 25 and at 5 ( $P < 0.05$ ). The difference of soil nitrogen mineralization were not significant among different soil water contents, while soil nitrogen mineralization ratio was lower in soil water content of 20% than that in soil water content of 60% ( $P < 0.05$ ). The soil nitrogen mineralization was lower under mountain forest in altitude of 3 200 m than that under shrub meadows in altitude of 3 500 m, while the difference of soil nitrogen mineralization were not significant among in altitude of 3 600 m, 3 400 m and 3 200 m or between in altitude of 3 500 m and 3 600 m ( $P < 0.05$ ). The soil nitrogen mineralization was higher in 0 - 15 cm soil depth than in 15 - 35 cm soil depth, while the difference of soil nitrogen mineralization ratio among different soil depth was not significant ( $P < 0.05$ ). The  $Q_{10}$  ranged from 0.7 to 2.0, and it was lower from 5 to 15 than that from 15 to 25 or 25 to 35. The results showed that the soil nitrogen mineralization under mountain forest and alpine meadows would be influenced greatly by changing in temperature.

**Key words:** Qilian Mountains; mineralization of soil nitrogen; mountain forest; alpine meadows

土壤 N 的矿化是土壤 N 影响植物生长和陆地植被生产力的关键<sup>[1-2]</sup>。土壤 N 矿化过程受水热要素和植被的影响较大<sup>[3]</sup>。自 19 世纪初,土壤 N 的矿化过程已被认为是土壤 N 循环的核心和控制植物有效 N 的主要过程<sup>[2]</sup>。随着对气候变化和陆地生态系统 C 循环研究的深入,土壤 N 矿化及其影响因素研究倍受关注<sup>[4]</sup>。一方面考虑气候变化后,土壤 N 矿化如何影响陆地植被生产力和土壤有机 C 动态<sup>[5]</sup>。另一方面考虑气候变化和 CO<sub>2</sub> 浓度增加后,土壤 N 矿化改变及其对生态系统 C 汇功能的影响<sup>[6-8]</sup>。为此,土壤 N 矿化及其影响因素成为目前生态系统 C、N 循环研究的热点。

在国外,对土壤 N 矿化研究已广泛展开,包括不同因素对土壤 N 矿化的影响<sup>[9-10]</sup>、森林土壤 N 矿化速率及其影响因素<sup>[11]</sup>、水热因素对土壤 N 矿化影响<sup>[12]</sup>、土壤 N 矿化对气候变化响应<sup>[5]</sup>、植物对土壤 N 矿化影响等<sup>[13]</sup>。不过,对土壤 N 矿化与影响因素关系等认识还存在很大的不确定性<sup>[4]</sup>。在我国,土壤 N 矿化研究也受到重视,但多集中在农田<sup>[14]</sup>、森林<sup>[15-17]</sup>和内蒙古草原<sup>[18-19]</sup>土壤,对西北高山区山地森林和高寒草甸土壤 N 矿化的研究还比较少<sup>[20]</sup>。

青藏高原因海拔高和寒冷,被认为是气候变化的敏感区和脆弱区<sup>[21]</sup>。高原四周存在着对比强烈的气候和植被地带<sup>[22]</sup>。位于其北部边缘的

祁连山,是青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的过渡区,其北坡水热要素差异明显,从低海拔到高海拔依次分布不同土壤类型,高山草甸土和灰褐色森林土是其中分布较为广泛的部分<sup>[23]</sup>。深入研究高寒草甸和山地森林土壤中 N 矿化及其与温、湿度变化关系,对于系统认识高山生态系统功能对气候变化的响应趋势具有重要的理论和现实意义。本研究旨在分析祁连山北坡中部青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.) 林和高寒草甸土壤中 N 矿化与温、湿度变化的关系,希望为进一步深入研究和系统评价气候变化对高寒草甸和山地森林生态系统功能的影响提供一定依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地点

研究地点位于祁连山自然保护区西水自然保护区 (93°30' ~ 103°E, 36°30' ~ 39°30' N),在祁连山北坡中部,属于大陆性高寒半干旱、半湿润森林草原气候。年均气温约 0.5, 年均降水量 435.5 mm。主要植被类型包括荒漠草原、干草原、山地森林、灌丛和高寒草甸,主要土壤类型包括山地灰褐色森林土、山地栗钙土、亚高山草甸土和高山草甸土等。

### 1.2 土壤样品采集和处理

2005 年 9 月,在海拔高度 3 400、3 500、3 600 m 处的高寒草甸和 3 200 m 处的山地森林中设立 4 块

样地,按 S 形法在每块样地内随机布设 20 个点,用土钻(内径 5 cm)依 0~15 cm 和 15~35 cm 土层依次采集不同海拔样地中土壤。同时,应用 GPS 进行

不同样地经纬度和海拔的测定,并估测了每块样地的坡度和坡向,样地基本属性见表 1。

表 1 样地基本性质

样地	海拔 /m	坡度 / (°)	坡向	植被类型	土壤类型	有机 C 含量 / (g · kg <sup>-1</sup> )		全 N 含量 / (g · kg <sup>-1</sup> )		土壤 C/N	
						0~15 cm	15~35 cm	0~15 cm	15~35 cm	0~15 cm	15~35 cm
1	3 600	0~5	北坡	高山草甸	高山草甸土	73.08	46.99	6.634	4.222	11	11
2	3 500	10~20	北坡	亚高山灌丛草甸	亚高山草甸土	144.20	76.36	10.842	5.290	13	14
3	3 400	10~20	北坡	亚高山灌丛草甸	亚高山草甸土	161.77	128.52	9.857	8.350	16	15
4	3 200	10~15	北坡	青海云杉林	山地灰褐色森林土	130.33	98.38	6.952	5.471	19	18

### 1.3 土壤全 N 含量测定

把采集的土壤自然风干后过 0.149 mm 土壤筛,全部样品以凯氏蒸馏法测全 N 含量,单位为 g · kg<sup>-1</sup>[24]。

### 1.4 试验设计

试验因素包括海拔高度(3 600、3 500、3 400、3 200 m,4 个海拔高度)、温度(5、15、25 和

35,4 个水平)、湿度(土壤含水量为 20%、40%、60%和 80%,4 个水平)和土层(0~15 cm 和 15~35 cm,2 个水平),指标为土壤 N 矿化量与矿化速率。选择正交试验设计方法,考虑温、湿度的交互作用,选择正交表头 L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup> × 2<sup>3</sup>)比较合适。根据正交表头,设计表 2 所示的试验方案。

表 2 正交试验设计

试验号	温度 /	海拔 /m	湿度 /%	温度和湿度交互作用	土层 /cm	误差列 1	误差列 2
1	1(5)	1(3 600)	1(20)	1	1(0~15)	1	1
2	1(5)	2(3 400)	2(40)	2	1(0~15)	2	2
3	1(5)	3(3 200)	3(60)	3	2(15~35)	1	2
4	1(5)	4(3 500)	4(80)	4	2(15~35)	2	1
5	2(15)	1(3 600)	2(40)	3	2(15~35)	2	1
6	2(15)	2(3 400)	1(20)	4	2(15~35)	1	2
7	2(15)	3(3 200)	4(80)	1	1(0~15)	2	2
8	2(15)	4(3 500)	3(60)	2	1(0~15)	1	1
9	3(35)	1(3 600)	3(60)	4	1(0~15)	2	2
10	3(35)	2(3 400)	4(80)	3	1(0~15)	1	1
11	3(35)	3(3 200)	1(20)	2	2(15~35)	2	1
12	3(35)	4(3 500)	2(40)	1	2(15~35)	1	2
13	4(25)	1(3 600)	4(80)	2	2(15~35)	1	2
14	4(25)	2(3 400)	3(60)	1	2(15~35)	2	1
15	4(25)	3(3 200)	2(40)	4	1(0~15)	1	1
16	4(25)	4(3 500)	1(20)	3	1(0~15)	2	2

注:括号内为处理指标

### 1.5 土壤 N 矿化的测定

土壤 N 矿化用室内好气培养法。把表 1 不同海拔 0~15 cm 和 15~35 cm 土层风干土依相同海拔和土层充分混合,按表 2 试验设计方案每个处理取 10.0 g 并调整为相应土壤含水量,装在 50 mL 三角瓶内,加入 30 g 石英砂,用聚乙烯膜包扎瓶口,并在膜上扎 2 个小孔,然后放在 4 个不同人工气候箱内,

这些气候箱温度分别控制为 5、15、25 和 35,用称质量法校正水分含量变化。培养 14 d 后,移去薄膜,全部移入 250 mL 三角瓶内,以还原蒸馏法测定土壤中 N 的矿化<sup>[25-26]</sup>。

### 1.6 数据分析

根据正交试验设计数据处理,以极差分析方法对各因素对土壤有机 C 矿化影响进行分析。本试验

设计属于混合水平正交试验,对极差进行订正处理<sup>[27]</sup>。同时,以方差分析方法分析不同因素影响显著性,检验法检验各因素不同水平影响的差异( $P < 0.05$ )<sup>[28]</sup>。用温度影响系数 $Q_{10}$ 分析温度变化对土壤 N 矿化速率的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同因素对土壤 N 矿化的影响

分析土壤 N 矿化量的极差表明(图 1(a)),土

层和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化影响最大,其次是温度,再其次是海拔,湿度影响较小;分析土壤 N 矿化比例极差表明,温度和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化比例影响最大,其次是湿度,再其次是海拔,土层影响较小(图 1(b))。

方差分析表明,温度和温、湿度交互作用对土壤 N 矿化量有影响显著,海拔、土层和湿度影响不显著,各因素对土壤 N 矿化比例影响也不显著( $P < 0.05$ )(表 3)。

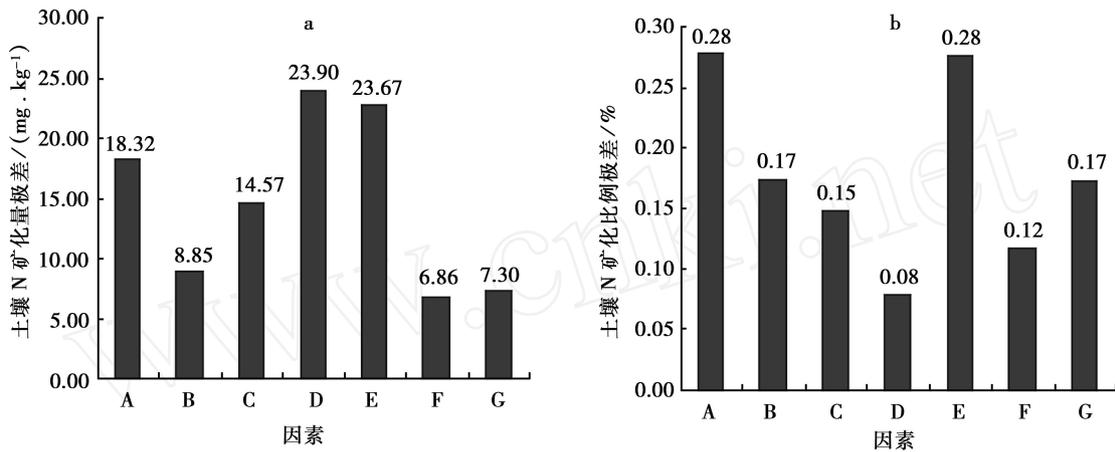


图 1 不同因素下土壤 N 矿化量 (a)和矿化比例 (b)的极差

图中 A、B、C、D、E、F、G 分别表示温度、湿度、海拔、土层、温度与湿度交互作用、误差 1 和误差 2。

表 3 不同因素对土壤 N 矿化影响方差分析

因素	矿化量偏差平方和	矿化比例偏差平方和	自由度	矿化量方差	矿化比例方差	矿化量 F 值	矿化比例 F 值
温度	1 122.79	0.214	3	374.26	0.071	22.57	4.342
湿度	258.03	0.077	3	86.01	0.026	5.19	1.553
海拔	843.84	0.063	3	281.28	0.021	16.96	1.280
土层	566.78	0.006	1	566.78	0.006	11.39	0.124
温、湿度交互作用	1 289.52	0.234	3	429.84	0.078	25.92	4.742
误差 1	15.57	0.014	1	46.70	0.014		
误差 2	17.60	0.030	1	52.80	0.030		
总和	4 114.13	0.638	15				

注:  $F_{0.10}(3,2) = 9.16$ ;  $F_{0.05}(3,2) = 19.16$ ;  $F_{0.01}(3,2) = 99.17$ ;  $F_{0.10}(1,2) = 8.53$ ;  $F_{0.05}(1,2) = 18.51$ ;  $F_{0.01}(1,2) = 98.49$ ; 方差分析中偏差平方和小于误差列的因素直接按误差处理。

### 2.2 不同因素下土壤 N 矿化量

不同温度下,土壤 N 矿化量不同。表 4 显示,在 5~35 范围,14 d 内土壤 N 矿化量达 17~39 mg·kg<sup>-1</sup>。35 下土壤 N 矿化量比 5 和 15 下高,而 25 与 5 和 15 下差异不显著( $P < 0.05$ )。14 d 内土壤 N 矿化比例为 0.23%~0.54%。35 下土壤 N 矿化比例比 5 和 15 下高,但 35 与 25、及 25 与 15 和 5 下差异却不显著( $P < 0.05$ )。

表 4 不同温度和湿度下 14 d 土壤 N 矿化量和矿化比例

温度 /	矿化量 /	矿化比例 /	湿度 /	矿化量 /	矿化比例 /
	(mg·kg <sup>-1</sup> )	%		(mg·kg <sup>-1</sup> )	%
5	18.01 a	0.295 a	20	22.00 a	0.247 a
15	17.73 a	0.230 a	40	21.91 a	0.365 ab
25	27.95 a	0.329 a	60	31.75 a	0.441 b
35	38.08 b	0.539 b	80	26.09 a	0.340 ab

表列中相同字母表示不同水平之间差异不显著,不同字母表示差异显著,表 6 相同。

表 4 显示,在不同湿度下,14 d 内土壤 N 矿化量

达  $21 \sim 32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同湿度下土壤 N 矿化量差异不显著 ( $P < 0.05$ )。14 d 内土壤 N 矿化比例达  $0.25\% \sim 0.45\%$ , 土壤含水量为 20% 下土壤 N 矿化比例显著比 60% 下低, 20% 和 40% 及 80% 与 20% 下差异不显著 ( $P < 0.05$ )。

温度和湿度不同交互作用下, 土壤 N 矿化量不同。表 5 显示, 交互作用 2 下土壤 N 矿化量较低。差异性检验表明, 在交互作用 2 下土壤 N 矿化量及其比例比其它交互作用下低 ( $P < 0.05$ )。

表 5 温、湿度交互作用下 14 d 内土壤 N 矿化

温、湿度交互作用	矿化量 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	矿化比例 / %
1	25.42a	0.394a
2	11.94b	0.142b
3	37.13a	0.449a
4	27.27a	0.409a

海拔高度不同直接反映了生态系统差异。表 6 显示, 海拔高度 3 500 m 与 3 200 m 处土壤 N 矿化量差异显著, 3 600 m 与 3 400 m、3 200 m 及 3 500 m 与 3 600 m 处差异不显著 ( $P < 0.05$ )。根据这些海拔高度对应的生态系统, 3 200 m 处森林土壤 N 矿化量显著比 3 500 m 处高寒灌丛草甸土壤中低, 但不同海拔高度土壤 N 矿化比例差异却不显著 ( $P < 0.05$ )。

不同土层土壤 N 矿化不同。表 6 显示, 0 ~ 15 cm 土层土壤 N 矿化量显著比 15 ~ 35 cm 土层中高, 但两个土层土壤 N 矿化比例差异却不显著 ( $P < 0.05$ )。

表 6 不同海拔与土层下 14 d 内土壤 N 矿化量

海拔 / m	矿化量 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	矿化比例 / %	土层 / cm	矿化量 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	矿化比例 / %
3 600	17.17 ab	0.286 a	0 ~ 15	31.39 a	0.368 a
3 500	33.36 bc	0.450 a	15 ~ 35	19.49 b	0.329 a
3 400	31.93 ac	0.347 a			
3 200	19.30 a	0.310 a			

### 2.3 温度对土壤 N 矿化影响的 $Q_{10}$

$Q_{10}$  表示适宜温度范围内, 温度升高 10, 生物化学反应速度增加的倍数。土壤微生物活动与温度变化相关性服从 Van Hoff 定律。根据这个定律, 温度每升高 10, 反应速度增加 1 ~ 2 倍。本研究中,  $Q_{10}$  系数反映了温度每升高 10, 土壤 N 矿化速率增加的倍数。表 7 显示, 以土壤 N 矿化速率计,  $Q_{10}$  在 0.9 ~ 2.0 间, 5 升高到 15,  $Q_{10}$  较低, 15 升高到 25, 以及 25 升高到 35,  $Q_{10}$  较高。以土

壤 N 矿化速率比例计,  $Q_{10}$  在 0.7 ~ 2.0, 5 升高到 15 下,  $Q_{10}$  较低, 15 升高到 25, 以及 25 升高到 35 下,  $Q_{10}$  较高。

表 7 温度对土壤 N 矿化影响的  $Q_{10}$

温度 /	土壤 N 矿化速率 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$Q_{10}$	土壤 N 矿化速率比例 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$Q_{10}$
5	1.29		0.21	
15	1.27	0.98	0.16	0.78
25	2.00	1.58	0.23	1.43
35	2.72	1.36	0.39	1.64

## 3 讨论

土壤 N 矿化受温度和湿度的影响较大。巨晓棠和李生秀<sup>[29]</sup>研究发现随土壤温度升高, 农田土壤 N 矿化量增加。Leiró 等<sup>[30]</sup>研究发现土壤 N 矿化 30% ~ 40% 受温、湿度相互作用影响, 土壤湿度对表层土壤 N 矿化影响较大, 强度随土壤温、湿度增加而增加。李贵才等<sup>[31]</sup>总结影响森林土壤 N 矿化的因素得出, 土壤温、湿度是影响土壤 N 矿化量的最主要因素, 高温利于土壤 N 矿化。本研究也是这样趋势。土壤 N 矿化比例消除了土壤 N 含量差异, 但不同因素对土壤 N 含量本身的影响也可能使土壤 N 矿化比例差异不同, 并且还可能使不同因素对土壤 N 矿化比例的影响与对土壤 N 矿化量影响存在差异。正交试验设计中以部分试验代替全面试验, 极差和方差分析结果可能存在一定差异。温度变化与土壤 N 矿化的关系并不完全一致, 如 Nadelhoffer 等<sup>[32]</sup>研究发现, 在 3 ~ 9 范围内, 土壤 N 矿化仅对温度变化敏感, 在 9 ~ 15 范围内, 却受多个因子同时影响, 并且不同土壤类型土壤 N 矿化的差异比单一土壤在不同温度下的差异大。这一方面与土壤 N 矿化机制有关, 如土壤有机质稳定性和微生物属性的差异, 另一方面可能与测定方法和土壤其它性质差异有关。

本研究表明温度升高祁连山中部高寒草甸和山地森林土壤中 N 矿化将增加, 土壤含水量为 20% 时的土壤 N 矿化比例比在土壤含水量为 60% 时低。表明土壤 N 矿化受水热因素影响较明显, 与其他研究结果趋势基本一致。Zaman 和 Chang<sup>[12]</sup>把辐射松 (*Pinus radiata* D. Don) 林和农林地土壤培养在 50%、75% 和 100% 田间持水量与 5、25 和 40 条件下, 其中 40 下土壤 N 净矿化速率比 5 和 25 下高, 100% 湿度下土壤 N 矿化速率最高。李贵才等<sup>[31]</sup>总结认为土壤 N 净矿化与土壤湿度呈显

著的正相关关系,土壤 N 矿化随土壤水分增加而增加,但一定程度后土壤 N 矿化速率却随土壤水分增加而下降。巨晓棠和李生秀<sup>[29]</sup>研究发现土壤 N 矿化量随土壤水分含量增加而增加。水热因素交互作用可能对土壤 N 矿化产生影响。本研究表明,土壤 N 矿化量及其比例受水热因素交互作用影响明显,但正交试验分析交互作用方面存在一定不足<sup>[33]</sup>。

海拔高度和生态系统差异对土壤 N 矿化影响显著。Bonito 等<sup>[11]</sup>研究发现美国南部高海拔阔叶硬木林土壤中 N 矿化比低海拔高。本研究表明,海拔 3 500 m 处土壤 N 矿化量比 3 200 m 处高,即 3 200 m 处森林土壤中 N 矿化量比 3 500 m 处高寒草甸中低,但矿化比例差异不大。这与这两种生态系统土壤中 N 含量、C/N 等差异有关。张金霞和曹广明<sup>[20]</sup>研究报道,高寒草甸土壤 N 素含量丰富,有效成分贫乏。李玉中等<sup>[19]</sup>报道,草甸草原、干草原和典型草原土壤中 N 矿化率随季节变化,其中在 7 月份最高,并且未受干扰草地中最高。不同海拔高度土壤 N 矿化差异与土壤全 N 含量有关,但土壤 N 矿化与土壤全 N 相关性也因土壤而异<sup>[34]</sup>。本研究中不同海拔高度矿化比例差异不明显也许因为海拔范围相对不大,并且土壤 N 矿化比例消除了土壤中全 N 含量差异影响,致使差异不大。

不同土层下土壤中 N 矿化不同。Vervaeet 等<sup>[35]</sup>研究了 3 种森林土壤 N 矿化,结果表明土壤 N 净矿化随土层加深而下降。李贵才等<sup>[31]</sup>总结发现土壤 N 矿化随土层加深而下降,巨晓棠和李生秀<sup>[29]</sup>也研究发现这样的趋势。本研究表明,0~15 cm 土层土壤 N 矿化量比 15~35 cm 土层中高,而矿化比例差异不显著。这可能因为许多研究在野外进行,野外不同土层多种因素都存在差异,本研究在实验室培养条件基本相同,不同土层中 N 矿化比例差异不大。

$Q_{10}$ 反映了温度变化对土壤 N 矿化速率的影响。Dalias 等<sup>[36]</sup>研究发现,欧洲不同气候区针叶林土壤培养在 4、10、16、23 和 30 下 550 d,土壤 N 矿化中  $Q_{10}$ 随温度升高而降低,热带区土壤 N 矿化优化温度为 30,寒冷区土壤 N 矿化优化温度低于 30。本研究表明, $Q_{10}$ 在 0.7~2.0,5 升高到 15 较低,15 升高到 25 及 25 升高到 35

相对较高。总之,本研究表明祁连山北坡山地森林和高寒草甸土壤中 N 矿化受水热因素影响较大,其中对土壤表层的影响比对底层大,且山地森林土壤中 N 矿化比亚高山灌丛草甸土壤中低。这预示着

气候变化后,这些生态系统土壤表层 N 矿化将受水热因素变化极大影响,其中对亚高山灌丛草甸土壤 N 矿化的影响比对山地森林土壤 N 矿化的影响要大,这些不同的差异将可能使这些生态系统的植被有不同的响应。不过,需要指出,本研究样品只代表了当年生长末期土壤中 N 矿化趋势,对生长旺季(6—8月)和春季(4—5月)土壤中 N 矿化与不同因素关系尚未开展研究,这些时段土壤中 N 的矿化可能与生长末期有所差异,这些问题还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Reich P B, Grigal D F, Aber J D, *et al* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils[J]. *Ecology*, 1997, 78: 335 - 347
- [2] Aber J, Melillo J. *Terrestrial Ecosystem* [M]. Second Edition San Diego, California, USA: Harcourt Academic Press, 2001
- [3] Knoepp J D, Swank W T. Rates of nitrogen mineralization across an elevation and vegetation gradient in the southern Appalachians[J]. *Plant and Soil*, 1998, 204: 235 - 241
- [4] Schimel J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm[J]. *Ecology*, 2004, 85 (3): 591 - 602
- [5] Ineson P, Taylor K, Harrison A F, *et al* Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soil 1: a transplant approach[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 143 - 152
- [6] Finzi A C, Delucia E H, Hamilton J G, *et al* The nitrogen budget of a pine forest under free air CO<sub>2</sub> enrichment[J]. *Oecologia*, 2002, 132: 567 - 578
- [7] Manurrie R E, Medlyn B E, Dewar R C. Increased understanding of nutrient immobilization in soil organic matter is critical for predicting the carbon sink strength of forest ecosystem over the next 100 years[J]. *Tree Physiology*, 2001, 21: 831 - 839
- [8] Swift M J, Anderson O, Bussard L, *et al* Global change, soil biodiversity, and nitrogen cycling in terrestrial ecosystem: three case studies[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 729 - 743
- [9] Zak D R, Holmes W E, Macdonald N W, *et al* Soil temperature, matrix potential and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1999, 63: 575 - 584
- [10] Weintraub M N, Schimel J P. Interaction between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in arctic tundra soils[J]. *Ecosystem*, 2003, 6: 129 - 143
- [11] Bonito G M, Coleman D C, Haines B L, *et al* Can nitrogen budgets explain differences in soil nitrogen mineralization rates of forest stands along an elevation gradient[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176: 563 - 574
- [12] Zaman M, Chang S X. Substrate type, temperature, and moisture content affect gross and net N mineralization and nitrification rates in agroforestry systems[J]. *Biol Fertile Soils*, 2004, 39: 269 - 279

- [13] van Der Krift T A J, Berendse F. The effects of plant species on soil nitrogen mineralization[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89: 555 - 561
- [14] 巨晓棠, 李生秀. 培养条件对土壤氮素矿化的影响[J]. *西北农业学报*, 1997, 6(2): 64 - 67
- [15] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度变化对暖温带落叶阔叶林土壤氮素矿化的影响[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 204 - 209
- [16] 陈详伟, 陈立新, 刘伟琪. 不同森林类型土壤氮矿化的研究[J]. *东北林业大学学报*, 1999, 27(1): 5 - 9
- [17] 苏波, 韩兴国. 东山油松纯林和油松辽东栎林土壤氮素矿化/硝化作用研究[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 195 - 203
- [18] 王其冰, 李林浩. 气候变化对草甸草原土壤氮素矿化作用影响的实验研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 687 - 692
- [19] 李玉中, 祝廷成, Redmann R E. 三种利用类型羊草草地氮总矿化、硝化和无机氮消耗速率比较研究[J]. *生态学报*, 2002, 22(5): 668 - 673
- [20] 张金霞, 曹广明. 高寒草甸生态系统氮素循环[J]. *生态学报*, 1999, 19(4): 510 - 513
- [21] 汤懋苍, 程国栋. 青藏高原近代气候变化及其对环境的影响[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998
- [22] 孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998
- [23] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [25] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984: 273 - 284
- [26] Robertson G P, Wedin D, Groffman P M, *et al* Soil carbon and nitrogen availability[M]//Robertson G P, Bledsoe C S, Coleman D C, *et al* Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research New York: Oxford University Press, Inc, 1999: 258 - 271
- [27] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [28] 方萍, 何延. 试验设计与统计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003
- [29] 巨晓棠, 李生秀. 土壤氮素矿化的温度水分效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 37 - 42
- [30] Leir M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, *et al* Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 327 - 335
- [31] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187 - 1195
- [32] Nadelhoffer K J, Giblin A E, Shaver G R, *et al* Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in six arctic soils[J]. *Ecology*, 1991, 72(1): 242 - 253
- [33] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [34] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面意义[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 232 - 238
- [35] Vervaeke H, Massart B, Boeckx P, *et al* Use of principal component analysis to assess factors controlling net N mineralization in deciduous and coniferous forest soils[J]. *Biol Fertile Soils*, 2002, 36: 93 - 101
- [36] Dalias P, Anderson J M, Bottner P, *et al* Temperature responses of net nitrogen mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 691 - 701