

# 长白山高山苔原带雪斑地段牛皮杜鹃群落的土壤氮矿化与净初级生产力\*

张国春 刘琪璟\*\* 徐倩倩 刘 燕

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

**摘 要** 采用土壤温度连续观测和土壤原位培养,研究了长白山高山苔原带雪斑地段牛皮杜鹃群落的土壤温度、土壤氮矿化及净初级生产力.结果表明:在非生长季的积雪期(10月下旬—5月上旬),土壤养分呈上升趋势,土壤以氮矿化为主,为翌年植物的生长提供了充足的氮素.其中雪斑地段土壤(平均温度 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的氮矿化能力更强,速效氮增加量为 $3.88\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,非雪斑地段(平均温度 $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为 $1.21\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ .在生长季节(5月中旬—8月下旬),土壤氮素含量下降,以固持为主;秋季植物停止生长后,土壤速效氮又呈上升趋势;到冬季,由于积雪的作用,雪斑地段土壤温度维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右或略低,促进了土壤氮的矿化,而非雪斑地段土壤温度则处于冻结状态.氮素矿化能力的差异是雪斑地段牛皮杜鹃群落净初级生产力高于非雪斑地段群落的主要原因,也是植被空间分异的重要驱动因子.

**关键词** 雪斑 水解性氮 净初级生产力 土壤温度 长白山高山苔原带

**文章编号** 1001-9332(2010)09-2187-07 **中图分类号** Q145;S718 **文献标识码** A

**Soil nitrogen mineralization and primary productivity in *Rhododendron aureum* community of snowpacks in alpine tundra of Changbai Mountain.** ZHANG Guo-chun, LIU Qi-jing, XU Qian-qian, LIU Yan (Department of Forest, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(9): 2187–2193.

**Abstract:** Based on continuous observation of soil temperature and *in situ* incubation, this paper studied the effects of snow packs on soil temperature, soil nitrogen (N) mineralization, and primary productivity of *Rhododendron aureum* community alpine tundra in Changbai Mountain. During the snow-covered period of non-growth season (from last October to early May), test soil had an increasing N content, and accumulated sufficient mineralized N for plant growth in the coming year. The soil under snow packs in snow-covered period had a mean temperature  $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and its N mineralization was more vigorous, with available N increased by  $3.88\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; while the soil with no snowpack had a mean temperature  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the available N only increased by  $1.21\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . During growth season (from mid May to late August), soil N content decreased. In autumn when plants stopped growing, soil available N content tended to increase. In winter, the soil temperature under snowpacks kept at around  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  or a little lower, which promoted soil N mineralization, while that with no snowpack was in a frozen status. The difference in soil N mineralization was the key factor resulting in the higher primary productivity of snowpack *Rh. aureum* community and the driving force for the spatial variation of vegetation.

**Key words:** snow pack; hydrolyzable nitrogen; net primary productivity; soil temperature; alpine tundra of Changbai Mountain.

长白山高山苔原带地势低洼处分布着季节性雪斑,由于积雪覆盖,生长季短暂;而此处的植物群落却非常茂密,具有较高的生产力.由于积雪时间的差

异,不同地段土壤的水热状况和群落组成不同.积雪对寒冷条件下维持土壤水分和温度<sup>[1-2]</sup>及微生物活性<sup>[3-4]</sup>、控制土壤冻结深度<sup>[5]</sup>、保护植物免受冻害等均有显著影响.土壤养分条件,特别是速效氮含量直接关系到植物的生长状况<sup>[6-8]</sup>.土壤中的无机氮

\* 国家自然科学基金项目(40671098)资助.

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

2010-01-27 收稿,2010-06-30 接受.

主要依靠矿化,而氮矿化又受土壤有机质、C/N、微生物种类和活性、土壤水热状况等因子的影响,其中土壤温度和水分对氮矿化的影响最大,在一定范围内呈正相关,并且有交互作用<sup>[9-11]</sup>. 较高的土壤温度能维持土壤氮矿化的快速进行<sup>[12-13]</sup>,而雪斑在寒冷季节能改善土壤的水热状况. 当积雪厚度达 25 cm 时, -5 ℃ 的近地面气温对土壤水热状况的影响可以忽略,显示恒温状态<sup>[14]</sup>. 雪斑地段的植物群落结构与生境条件同周围差异明显,说明雪斑处的群落有着独特的生态过程,特别是养分循环(如氮的矿化与固持)特征. 冬、夏季节的雪斑土壤氮矿化速率不同,冬季氮矿化作用比较旺盛<sup>[15]</sup>. 关于长白山区土壤氮矿化时空动态、氮矿化速率与温度和湿度之间的关系有过一些报道<sup>[16-18]</sup>,但有关雪斑地段土壤的氮矿化特征及其与生产力关系的研究未见报道. 本研究选取典型的雪斑地段牛皮杜鹃(*Rhododendron aureum*)群落,调查分析其土壤温度、地上生物量、植物养分含量及土壤养分动态,试图阐明长白山高山苔原带雪斑地段土壤氮矿化规律及其与净初级生产力的关系,揭示群落初级生产力的空间分异机理,为全球变化情景下高山苔原生物多样性保护提供理论依据.

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于我国东北部的长白山国家级自然保护区内. 长白山高山苔原带分布在海拔 2000 m 以上,为苔原-冰缘型气候,常年低温,冬季严寒漫长,夏季温凉短暂. 年平均气温 -1.6 ℃,日极端最高气温 28.1 ℃,日极端最低气温 -34.8 ℃(表 1 和表 2). 年均降水量在 1100 ~ 1400 mm,降水季节分配不均,多集中在夏季,年均雾天和大风天均在 260 d 以上. 植物以杜鹃花科的种类占优势,群落类型以高山笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum* var. *alpinum*)群落为主,群落高度一般在 10 cm 左右,苔藓层十分发达. 由于小地形或微地形的差异,在大面积的高山笃斯越桔群落中间镶嵌着其他群落类型. 调查区植被无人干扰.

样地设置在长白山国家级自然保护区高山苔原带北坡(42°02'56" N, 128°04'10" E),海拔 2036 m. 选取的样地为典型的雪斑地段牛皮杜鹃群落,为一个椭圆形斑块,面积 40 m<sup>2</sup> 左右,群落中心地形微凹,植株茂密,高度 50 cm 左右,种类单一. 与雪斑群落相毗邻的为非雪斑地段高山笃斯越桔群落,地形

略凸起、迎风,植株矮小(10 cm)但密度较大. 伴生种有:宽叶仙女木(*Dryas octopetala* var. *asiatica*)、苞叶杜鹃(*Rh. redowskianum*)、大苞柴胡(*Bupleurum euphorbioides*)、长白岩菖蒲(*Tofieldia coccinea*)、越桔(*V. vitisidaea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)和长白棘豆(*Oxytropis anertii*)等. 非雪斑地段冬季没有积雪,用作对照.

苔原植被的物候大致分为:积雪融化期(5 月初—5 月中旬)、植物生长期(5 月下旬—8 月中旬)、植物成熟落叶期(8 月下旬—10 月中旬)、积雪期(10 月中旬—翌年 5 月初). 其中牛皮杜鹃群落的积雪时间可持续到 5 月初,长达 6 个月以上. 在小沟谷或背风处,积雪时间可以持续到 7 月初(但是牛皮杜鹃并非群落优势种),个别地段在 8 月中旬仍可见积雪. 牛皮杜鹃群落的积雪融化时间一般不晚于 5 月末.

雪斑地段的土壤有机层一般都超过 20 cm,暗棕色,母质为粗砂伴有碎石或大块风化岩石,为坡积物. 非雪斑地段的土壤有机层一般不超过 10 cm,暗棕色,母质层为粗砂或不明显,呈 AD 结构,土层下面即为火山熔岩形成的玄武岩基岩.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 群落调查** 在样地的 2 个群落中分别设置 5 个样方,牛皮杜鹃群落样方的面积为 50 cm×50 cm,高山笃斯群落样方的面积为 25 cm×25 cm. 2008 年 8 月 24 日和 2009 年 8 月 1 日,调查群落的密度、高度和当年地上生物量. 牛皮杜鹃以顶芽数量代表群落密度,高山笃斯越桔以地面处的分枝数量代表群落密度. 根据研究需要,生物量仅测定当年生长的部分,采用全收获法,采集样方内所有植物个体的当年生枝叶. 采集的样品 85 ℃ 烘干称量,分析植物样品中的含氮量.

**1.2.2 土壤温度和气温观测** 分别在雪斑样地和非雪斑样地各放置一个 StowAway TidBit 袖珍温度记录仪(美国 Onset 公司),测定土壤温度(探头设置深度为 5 cm),并在样地附近布置一个气温计,数据记录的时间间隔为 1 h. 2007 年 6 月—2009 年 10 月,气温和每个样地的土壤温度各采集约 1.6 万个记录.

**1.2.3 土壤取样** 2007 年 10 月—2009 年 8 月,每年采样 3—4 次. 随机选点,采集 0 ~ 10 cm 厚表层土壤(不包括半分解层),每个样地采样量为 2 kg 左右. 样品中去除凋落物和杂质后,冷冻状态运回实验室,清除石砾和细根,过 3 mm 筛后混匀装袋,放入

-40 ℃ 冰箱内冷冻保存, 备测.

**1.2.4 土壤原位培养** 土壤氮矿化测定大致分为 3 个时期: 积雪期(10 月下旬—次年 5 月上旬)、植物生长期(5 月中旬—8 月下旬)和植物成熟落叶期(8 月下旬—10 月下旬). 2007 年 10 月—2008 年 10 月, 在雪斑样地和非雪斑样地随机选点, 采集 10 cm 厚表层土, 去除凋落物和杂质, 充分混匀后, 用 PVC 管(直径 5 cm、长 8 cm 左右)分装, 放回原位培养. 培养分为: 2007 年 10 月—2008 年 5 月、2008 年 5—8 月和 2008 年 8—10 月 3 个时期. 在每个培养期培养开始和结束时各取 3 个土柱, 测定和计算不同季节氮的矿化量和矿化速率. 氮矿化量 = 培养后水解性氮含量 - 培养前水解性氮含量.

**1.2.5 土壤与植物养分测定** 采用碱解扩散法分析鲜土中水解氮含量, 用凯氏定氮法测定植物和土壤中全氮含量. 土壤有机碳测定采用稀释热法. 为了便于比较, 单位面积土壤养分含量和矿化量均换算成 10 cm 厚表层土壤含量.

表 1 不同样地土壤温度与空气温度的季节变化

Tab.1 Seasonal variation of soil and air temperatures in different sites (℃)

温 度 Temperature	全 年 Yearly			积雪期 Snow-covered			非积雪期 Snow-free		
	平均 Mean	变幅 Variation	标准差 SD	平均 Mean	变幅 Variation	标准差 SD	平均 Mean	变幅 Variation	标准差 SD
气 温 Air temperature	-1.6	52.5	12.4	-9.5	44.9	9.5	9.7	27.6	5.3
雪 斑 Snowpack	1.4	25.9	6.6	-3.0	14.1	3.7	7.7	15.2	4.5
非雪斑 Non-snowpack	-0.7	35.7	10.0	-7.5	23.4	6.9	8.9	15.5	4.2

表 2 不同样地土壤温度特征

Tab.2 Soil temperature features in different sites

参 数 Parameter	雪斑地段 Snowpack	非雪斑地段 Non-snowpack	裸露地段 Exposed	气温 Air temperature
日极端最高温度 Extreme high temperature (℃)	18.7	19.8	25.8	28.1
日极端最低温度 Extreme low temperature (℃)	-11	-20.5	-23.7	-34.8
日均温>0 ℃ 积温 Cumulated temperature of daily temperature >0 ℃ (℃)	1 178.0	1 383.9	1 545.0	1 688.0
日均温<0℃ 积温 Accumulated temperature of daily temperature <0 ℃ (℃)	-670.7	-1 657.8	-1 964.4	-2 263.4
温暖指数 Warmth index (WI,℃)	16.5	21.3	24.9	25.6
寒冷指数 Coldness index (CI,℃)	-5.7	-30.0	-37.2	-44.9
均温(-1,0) ℃ 日数 Days with temperature at (-1,0) ℃ (d)	94	13	21	8
均温>0 ℃ 日数 Days with daily temperature >0 ℃ (d)	162	199	179	184
均温≤0 ℃ 日数 Days with daily temperature ≤0 ℃ (d)	204	167	187	181

$WI = \sum (T_i - 5)$ .  $T_i$ (月平均温度 Monthly average temperature) > 5 ℃;  $CI = \sum (T_i + 5)$ .  $T_i < -5$  ℃. 土壤温度特征为 2008 年数据, 气温为 2008—2009 年数据 Soil temperature features were data of 2008, and air temperatures were data of 2008–2009.

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 16 软件进行数据分析, 用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系.

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤温度特征

由表 1 可以看出, 长白山高山苔原带不同生境土壤年平均温度为雪斑样地高于非雪斑样地, 而非雪斑样地全年日平均温度的变动幅度大于雪斑样地. 雪斑土壤热量状况好于非雪斑土壤, 而且变动幅度较小. 以土壤日平均温度>0 ℃ 日数表示植物生长季长短, 雪斑群落植物生长季为 162 d, 比非雪斑群落(199 d)短 37 d(表 2). 冬季土壤的温度高于气温, 其中雪斑土壤温度比气温高 6.5 ℃.

在整个积雪期, 非雪斑样地土壤日平均温度变动幅度大于雪斑土壤(表 1 和表 2). 由于积雪的隔热作用, 雪斑样地土壤热量状况好于非雪斑样地. 与土壤温度相比, 气温的变动幅度最大.

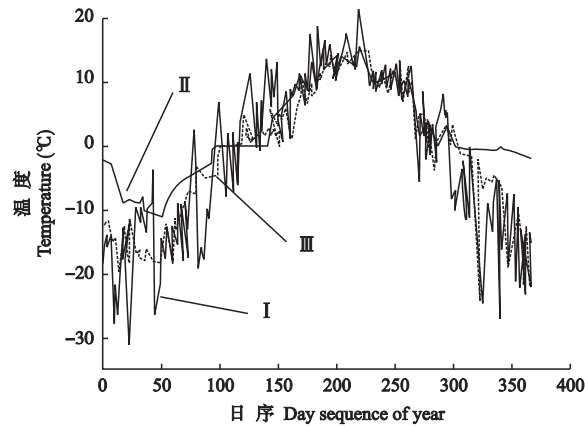


图1 不同样地土壤日平均温度季节变化  
Fig.1 Seasonal changes of daily mean soil temperature in different sites.  
I :气温 Air temperature; II :雪斑 Snowpack; III :非雪斑 Non-snow-pack.

积雪期雪斑样地土壤温度维持在 0℃ 附近或略低(图 1). 由于本研究调查的牛皮杜鹃群落地形下凹不深,积雪较薄,严寒季节仍然受到气温的影响. 以土壤平均温度≤0℃ 日数表示寒冷期长短,则雪斑样地为 204 d,非雪斑样地为 167 d(表 2). 以平均温度在(-1,0)℃ 范围の日数代表积雪期长短,雪斑样地积雪期达 94 d,占整个寒冷期的 46%. 需要说明的是,本文对非雪斑样地(冬季无积雪覆盖)以及气温也使用了“积雪期”一词,是指与雪斑地段积雪相对应的时期.

非积雪期,不同样地间日平均土壤温度的变动幅度相同,以雪斑地段略小(表 1 和表 2). 雪斑地段温度变动幅度主要受茂密冠层的调控,而非雪斑地段有发达而且潮湿的苔藓层覆盖,对缓冲温度变化起到重要作用. 与冬季相反,该时期的土壤平均温度低于气温 1℃~2℃.

2.2 不同生境土壤养分季节动态

由表 3 可以看出,5 月初—8 月下旬,不同样地土壤养分含量均迅速递减,8 月下旬—10 月中旬快速回升,10 月中旬—次年 5 月初平缓增长. 经过一个冬季的恢复,土壤氮素含量达到最大值. 雪斑和非雪斑土壤全氮都表现为 5 月最高(分别为 0.674% 和 0.459%)、8 月最低(分别为 0.459% 和 0.337%),10 月居中(分别为 0.548% 和 0.399%). 这与植物发育节律相一致. 植物生长期土壤氮素含量减少,以固持为主;植物成熟期和积雪期土壤养分含量恢复,土壤氮以矿化为主. 生长季开始,植物吸收消耗氮素;到了晚秋,植物停止生长,氮素积累大于消耗.

表 3 雪斑与非雪斑样地土壤氮素与有机碳含量  
Tab.3 Concentrs of nitrogen and organic carbon in snow-pack and non-snowpack soils

样地 Site	日期 Date	有机碳 Organic carbon (g·m <sup>-2</sup> )	全氮 Total N (g·m <sup>-2</sup> )	水解氮 Hydro- lyzable N (g·m <sup>-2</sup> )	C/N
雪斑 Snowpack	2007-10-17	4238	268	22.60	15.8
	2008-05-07	5971	317	26.48	18.8
	2008-08-22	4484	216	17.32	20.8
	2008-10-16	4341	236	19.26	18.4
	2009-07-03	—	—	10.15	—
非雪斑 Non- snowpack	2009-08-01	—	—	12.11	—
	2007-06-23	4055	152	19.51	26.7
	2008-05-08	5120	239	22.89	21.4
	2008-08-22	3955	175	21.68	22.6
	2008-10-16	4654	205	—	22.7
	2009-07-03	—	—	12.35	—

— 未测定或无数值 No measured or no value.

雪斑样地土壤养分水平总体上高于非雪斑样地,C/N 则略低于非雪斑样地. 10 月下旬—翌年 5 月初,雪斑样地表层 10 cm 土壤全氮净增量为 48 g·m<sup>-2</sup>(雪斑和非雪斑样地土壤容重分别为 0.47 和 0.52 g·cm<sup>-3</sup>,下同),非雪斑样地为 33 g·m<sup>-2</sup>. 说明积雪期雪斑样地土壤氮素的恢复能力强于非雪斑样地.

不同样地土壤的水解氮以 5 月最高、7 月最低,其中雪斑地段土壤的变化范围在 10.15~26.60 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,非雪斑地段在 12.35~22.89 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. 水解氮占全氮含量的 8.3%(雪斑)和 10.5%(非雪斑).

雪斑样地(sp)和非雪斑样地(nsp)全年土壤水解氮(y, g·m<sup>-2</sup>)与全氮含量(x, g·m<sup>-2</sup>)均呈紧密线性正相关,回归方程式为:

$$y_{sp}=0.091x-2.186 \quad (r=0.9982, P<0.01, n=4)$$
$$y_{nsp}=0.035x+14.840 \quad (r=0.9097, P<0.10, n=3)$$

全年土壤全氮和水解氮与土壤有机碳含量总体变化趋势一致(雪斑样地: r=0.7908, P<0.05, n=7;非雪斑样地: r=0.6768, P<0.10, n=7). 但无论是雪斑样地还是非雪斑样地,土壤全氮同土壤有机碳的线性关系都不显著(雪斑样地: r=0.8085, n=4;非雪斑样地: r=0.9466, n=3),土壤水解氮与土壤有机碳的线性关系也不显著(雪斑样地: r=0.7685, n=4;非雪斑样地: r=0.7222, n=3).

由土壤全氮与水解氮的线性方程换算可得,雪斑样地 7 月(2009-07-03)土壤全氮为 136 g·m<sup>-2</sup>,而同期(2007-06-23)非雪斑样地土壤全氮含量为



152 g · m<sup>-2</sup> (表 3). 植物生长期, 雪斑样地土壤全氮净减少量最多可达 181 g · m<sup>-2</sup>, 非雪斑地段则为 86 g · m<sup>-2</sup>, 二者相差 95 g · m<sup>-2</sup>; 植物成熟落叶期, 雪斑样地土壤全氮净增量可达 133 g · m<sup>-2</sup>, 而非雪斑地段为 53 g · m<sup>-2</sup>, 二者相差 80 g · m<sup>-2</sup>. 这说明雪斑样地土壤在植物生长期的供氮能力和植物成熟落叶期的氮素水平恢复能力都明显强于非雪斑样地土壤.

2.3 不同植物生长期土壤氮矿化动态

雪斑样地积雪期的土壤净氮矿化量为 3.88 g · m<sup>-2</sup>, 大于植物生长期至成熟落叶期氮矿化量之和; 非雪斑样地的土壤速效氮积累量为 1.34 g · m<sup>-2</sup>, 占全年总氮矿化量的 17.3% (表 4). 这表明积雪期土壤积累的速效氮对雪斑地段群落初级生产力有巨大贡献; 非雪斑地段群落净初级生产力与冬季土壤中速效氮积累量的关系不如雪斑群落明显.

从全年尺度看, 雪斑样地积雪期土壤氮矿化速率明显高于非雪斑样地, 而植物生长期和植物成熟落叶期又明显低于非雪斑样地 (表 4). 雪斑样地土壤净氮矿化量占全氮净增量的 8.0%, 而非雪斑土壤净氮矿化量仅占全氮净增量的 4.0%.

2.4 雪斑群落净初级生产力与氮吸收量

调查发现, 雪斑样地内只有牛皮杜鹃 1 个物种, 盖度为 99%, 密度为 398 株 · m<sup>-2</sup>, 当年地上生物量 (近似为净初级生产力) 为 450 g · m<sup>-2</sup>, 当年生枝叶的全氮含量为 1.24%. 非雪斑样地也为高山笃斯越桔 1 个物种, 盖度为 91%, 密度在 1226 ~ 1296 株 · m<sup>-2</sup>, 当年地上净初级生产力为 372 g · m<sup>-2</sup>, 当年生枝叶的全氮含量为 3.08%. 虽然前者的地上净初级生产力高于后者, 但后者的氮吸收量 (11.45 g · m<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>) 明显高于前者 (5.56 g · m<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>). 这说明非

表 4 不同时期各样地土壤氮矿化  
Tab.4 Soil N mineralization in different periods

样地 Site	物候期 Phenology	净氮矿化 Net N mineralization (g · m <sup>-2</sup> )	净氮矿化 速率 Net N mineralization rate (g · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )
雪 斑	积雪期 Snow	3.88	0.019
Snowpack	植物生长期 Plant growing	1.76	0.016
	成熟落叶期 Mature or leaf-off	1.21	0.023
	合计 Total	6.85	0.019
非雪斑	积雪期 Snow	1.34	0.007
Non-	植物生长期 Plant growing	3.80	0.036
snowpack	成熟落叶期 Mature or leaf-off	2.62	0.047
	合计 Total	7.76	0.021

表 5 群落地上净初级生产力与氮吸收量  
Tab.5 Aboveground net primary productivity and N absorption of communities

样地 Site	日期 Date	生产力 Productivity (g · m <sup>-2</sup> )	氮吸收量 N absorption (g · m <sup>-2</sup> )
雪斑	2009-08-01	328	4.05
Snowpack	2008-08-24	450	5.56
非雪斑	2009-08-01	242	7.45
Non-snowpack	2008-08-24	372	11.45

雪斑群落更容易受到氮素不足的限制.

以群落当年地上生长部分氮吸收量表示群落氮需求量, 8 月 (以 2009-08-01 代表 8 月初, 2008-08-24 代表 8 月末) 雪斑群落氮需求量为 1.51 g · m<sup>-2</sup>, 占植物群落氮需求量 (2008-08-24) 的 27.2%; 非雪斑群落为 4.00 g · m<sup>-2</sup>, 占需求量 (2008-08-24) 的 34.9% (表 5). 非雪斑群落 8 月氮需求量是雪斑群落的近 2.7 倍. 如果以 3 个时期的净氮矿化量总和 (表 4) 代表土壤供氮能力, 雪斑土壤能够满足植物生长的需要, 而非雪斑土壤则表现出养分亏缺.

3 讨 论

本研究结果表明, 在冬季, 雪斑群落的温度条件优越, 从枯枝落叶分解到有机质还原都处在旺盛期, 土壤矿化速率明显高于非雪斑群落; 在夏秋季节, 雪斑地段的土壤温度略低于非雪斑样地土壤, 矿化速率也呈相同趋势. 而且雪斑地段呈凹形, 无论是冬季还是夏季都有利于水分的汇集. 雪斑土壤优越的水热条件是促进土壤氮矿化的重要环境因子. 这与以往的研究报道一致<sup>[14]</sup>, 即雪斑土壤在整个冬季处于氮素形态转化的旺盛阶段<sup>[19-20]</sup>; 而到夏季, 由于植物的大量吸收, 土壤氮素减少, 表现为固持状态<sup>[21-23]</sup>. 但是, 氮的固持并不完全是植物吸收的结果, 微生物的吸收利用也占有相当的比重. 冬季和夏季土壤氮素动态的差异表明不同季节土壤微生物具有完全不同的功能群, 其中冬季进行有机物分解的微生物类群在春季融雪阶段迅速死亡, 并且通过细胞溶解释放氮素<sup>[24]</sup>. 由于研究手段的限制, 关于苔原土壤微生物功能群的研究有待进一步探讨.

土壤有机质对氮矿化的影响比较复杂, 有机质含量和 C/N 同时左右着氮素动态. 较低的 C/N 有利于氮矿化<sup>[25-27]</sup>, 但是有机物是微生物赖以生存的重要物质基础, 而且全氮中的主要部分存在于有机质中. 本研究中, 土壤矿化量与全氮含量呈正相关, 与以往报道相吻合<sup>[28]</sup>. 本研究区域的群落凋落物生

物量( $1.378 \sim 2.476 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[29]</sup>虽然远不如森林生态系统,但是由于全年温度比较低,土壤有机物的积累量较大,各季节的 C/N 比值均大于 15. C/N 比值既受土壤中有有机物输入量的影响,也因外界的氮素输入降低而使矿化得到促进<sup>[30]</sup>. 但研究区域的大气氮沉降一般比较小.

土壤氮素水平是决定群落生产力的关键因子. 本研究对高山苔原带两种群落的生产力和氮矿化的关系进行了初步分析. 从植物吸收量和土壤氮矿化量的关系看,雪斑土壤的氮素水平比较充足,而非雪斑土壤则相对不足. 非雪斑土壤的矿化量较小,而植物对氮素的需求量却较大. 这可能是雪斑与非雪斑群落生产力差异的主要原因. 如果以植物生长量和氮素吸收量的比值作为氮素利用效率,则雪斑群落为 82,而非雪斑群落为 32,说明非雪斑群落生产力更容易受到氮素不足的限制. 雪斑土壤对速效氮的储备在时间进程上与非雪斑土壤明显不同,前者在春季积雪全部融化时储备了大量的速效氮. 这与雪斑群落在积雪融化后生长迅速相一致,同时也是生态系统对养分和能量利用上的一种对策.

本研究在计算土壤氮素储量时以 10 cm 土壤深度换算进行比较. 而位于雪斑样地的牛皮杜鹃群落的有机土层一般在 20 cm 以上,所以雪斑群落的土壤氮素储量要远远高于文中给出的数据. 尽管牛皮杜鹃的根系几乎都在表层 5 cm 以内,但是土壤中丰富的氮库成为维持群落生产力的营养保障.

由于小地形或微地形导致的土壤养分与水热条件的差异,决定了高山苔原带独特的群落镶嵌格局,其中小沟谷等背风凹洼处存留大量的积雪,为那些喜冷凉但不耐严寒的物种提供了避难场所. 随着全球的变暖,高山苔原带雪斑的存留时间会缩短甚至消失,而需要积雪保护的物种面临着新的威胁. 因此,对气候变化情景下高山生态系统格局的动态变化及保护对策研究,尚需要开展长期的监测.

**致谢** 长白山火山观测站给予大力协助,刘迎春、马泽清等参加部分野外工作,徐琼瑶、刘文慧参加部分室内分析,一并致谢.

## 参考文献

- [1] Williams CJ, McNamara JP, Chandler DG. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: The signature of snow and complex terrain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**: 1325–1336
- [2] Liu Q-J (刘琪璟), Xu Q-Q (徐倩倩), Zhang G-C (张国春). Impact of alpine snowpacks on primary productivity in *Rhododendron aureum* community in Changbai Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(8): 4035–4044 (in Chinese)
- [3] Liu YQ, Yao TD, Jiao NZ, *et al.* Bacterial diversity in the snow over Tibetan Plateau Glaciers. *Extremophiles*, 2009, **13**: 411–423
- [4] Sullivan PF, Welker JM, Arens SJT, *et al.* Continuous estimates of CO<sub>2</sub> efflux from arctic and boreal soils during the snow-covered season in Alaska. *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences*, 2008, **113**: G04009
- [5] Yang MX, Yao TD, Nelson FE, *et al.* Snow cover and depth of freeze-thaw on the Tibetan plateau: A case study from 1997 to 1998. *Physical Geography*, 2008, **29**: 208–221
- [6] Aber JD, Magill A, Boone R, *et al.* Plant and soil responses to chronic nitrogen additions at the Harvard Forest, Massachusetts. *Ecological Applications*, 1993, **3**: 156–166
- [7] Reich PB, Grigal DF, Aber JD, *et al.* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology*, 1997, **78**: 335–347
- [8] Liu Y, Muller RN. Above ground net primary productivity and nitrogen mineralization in a mixed mesophytic forest of eastern Kentucky. *Forest Ecology and Management*, 1993, **59**: 53–62
- [9] Wang C-H (王常慧), Xing X-R (邢雪荣), Han X-G (韩兴国). The effects of temperature and moisture on the soil net nitrogen mineralization in an *Aneulolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24** (11): 2472–2476 (in Chinese)
- [10] Zhou C-P (周才平), Ouyang H (欧阳华), Song M-H (宋明华). Relationships between net primary production and nitrogen cycling in Chinese forest ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 203–206 (in Chinese)
- [11] Leirós MC, Trasar-Cepeda C, Seoane S, *et al.* Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 327–335
- [12] Brooks PD, Williams MW, Schmidt SK. Snowpack controls on soil nitrogen dynamics in the Colorado alpine// Tonnessen KA, Williams MW, Tranter M, eds. *Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchments*. Proceedings of a Boulder Symposium, Wallingford, UK: IAHS Press, 1995, **228**: 283–292
- [13] Wang CH, Wan SQ, Xing XR, *et al.* Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineraliza-

- tion in temperate grassland in Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 1101–1110
- [14] Yang Z-C (杨忠臣), Wei D (魏 丹), Chen D (陈丹), *et al.* Soil freeze status and water transfer under different snow-cover conditions. *Water conservancy Science and Technology and Economy* (水利科技与经济), 2007, **13**(6): 365–367 (in Chinese)
- [15] Sjögersten S, Wookey PA. The role of soil organic matter quality and physical environment for nitrogen mineralization at the forest-tundra ecotone in Fennoscandia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, **37**: 118–126
- [16] Liu Y-L (刘艳玲), Lu P-L (陆佩玲). Temporal and spatial variation of soil nitrogen mineralization in the forest ecosystems in Changbai Mountain. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology* (河北林业科技), 2008(3): 4–6 (in Chinese)
- [17] Zhou C-P (周才平), Ouyang H (欧阳华). Effect of temperature on nitrogen mineralization at optimum and saturated soil water content in two types of forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(9): 1469–1473 (in Chinese)
- [18] Zhou C-P (周才平), Ouyang H (欧阳华). Influence of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization under two types of forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 505–508 (in Chinese)
- [19] Giblin AE, Nadelhoffer KJ, Shaver GR, *et al.* Biogeochemical diversity along a riverside toposequence in arctic Alaska. *Ecological Monographs*, 1991, **61**: 415–435
- [20] Schmidt IK, Jonasson S, Michelsen A. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment. *Applied Soil Ecology*, 1999, **11**: 147–160
- [21] Christenson M, Manz H, Gyalistras D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**: 671–686
- [22] Haraldsson HV, Ólafsdóttir R. Simulating vegetation cover dynamics with regards to long-term climatic variations in sub-arctic landscapes. *Global and Planetary Change*, 2003, **38**: 313–325
- [23] Schimel JP, Billbrough C, Welker JM, *et al.* Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 217–227
- [24] Nemergut DR, Costello EK, Meyer AF, *et al.* Structure and function of alpine and arctic soil microbial communities. *Research in Microbiology*, 2005, **156**: 775–784
- [25] Vourlitis GL, Zorba G, Pasquini SC, *et al.* Chronic nitrogen deposition enhances nitrogen mineralization potential of semiarid shrubland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 836–842
- [26] Bowden C, Spargo J, Evanylo G. Mineralization and N fertilizer equivalent value of composts as assessed by tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Compost Science & Utilization*, 2007, **15**: 111–118
- [27] Chaves B, Neve SD, Boeckx P, *et al.* Manipulating nitrogen release from nitrogen-rich crop residues using organic wastes under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 1240–1250
- [28] Wu TY, Ma BL, Liang BC. Quantification of seasonal soil nitrogen mineralization for corn production in eastern Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, **81**: 279–290
- [29] Wei J (魏 晶), Wu G (吴 钢), Deng H-B (邓红兵). Researches on nutrient return of litterfall in the alpine tundra ecosystem of Changbai Mountains. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(10): 2211–2216 (in Chinese)
- [30] Vourlitis GL, Zorba G. Nitrogen and carbon mineralization of semi-arid shrubland soil exposed to long-term atmospheric nitrogen deposition. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **43**: 611–615

---

**作者简介** 张国春,男,1985年生,硕士研究生.主要从事陆地生态系统生物地球化学循环、生态系统生态学、群落生态学研究. E-mail: gordonwy@163.com

---

**责任编辑** 李凤琴

---