

长白山高山苔原雪斑大白花地榆群落土壤氮素动态与生产力的关系

徐倩倩 刘琪璟* 张国春

北京林业大学林学院省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 在高山苔原冬季积雪覆盖的群落生长季短, 但明显比周围群落生长茂盛。为了说明雪斑地段群落生长机理, 对长白山苔原雪斑土壤氮素动态以及大白花地榆(*Sanguisorba sitchensis*)群落生产力进行了连续测定。雪斑群落土壤冬季相对温暖, 最低日平均温度 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 裸露地段 $-16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 全年水分条件充足; 积雪期凋落物分解和氮矿化均在进行, 土壤具有很高的氮素含量及矿化速率。大白花地榆地上部分净初级生产力为 $4\ 046\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。正是独特的水热条件和养分条件, 以及具有很大的叶面积同化器官, 高山苔原雪斑地段的大白花地榆群落才得以维持生存并表现出很高的生产力水平。

关键词 群落生产力, 水解氮, 养分循环, 积雪

Soil nitrogen dynamics and productivity of snowpack *Sanguisorba sitchensis* community in alpine tundra of Changbai Mountain, China

XU Qian-Qian, LIU Qi-Jing*, and ZHANG Guo-Chun

Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Department of Forest Sciences, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims Snowpack plant communities in alpine tundra are active in comparison with surrounding vegetation, despite the short growing season due to thick snow cover. Our objective was to understand the growth mechanism of snowpack communities.

Methods The nutrient dynamics and primary productivity of snowpack *Sanguisorba sitchensis* community in alpine tundra of Changbai Mountain was investigated in different seasons.

Important findings Soil temperature under snowpack during winter was warmer than snow-free areas, and the minimum temperature was significantly higher. Litter decomposition and nitrogen mineralization under snowpack were active even in winter, and nitrogen content was high with rapid mineralization. Annual net primary productivity was $4\ 046\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. The unique hydro-thermo conditions, nutrient cycling features and high leaf area index were key factors maintaining community structure and primary productivity.

Key words community productivity, hydrolysable nitrogen, nutrient cycling, snow cover

积雪是高山苔原和北极苔原生态系统中一个很重要的生境因素, 它以各种方式影响着群落气候学特征、植物生长和群落组成。在高寒地带, 由于风和地形的共同作用, 使凹洼地段的积雪明显比周围厚、残留时间长, 称之为雪斑(snowpack, snow patch, snowdrift)。生长在雪斑地段的群落称之为雪斑群落。冬季无积雪覆盖的地段称为非雪斑地段, 其上生长的群落为非雪斑群落(snow-free community)。

大量研究证实, 积雪分布的空间格局和植被类型以及植物种类之间存在密切的联系(Evans *et al.*,

1989; Walker *et al.*, 1993; Odland & Munkejord, 2008)。冬季积雪通过影响土壤温度以及土壤冻结过程控制着土壤生物化学、微生物和植物的生理过程(Campbell *et al.*, 2005; Sturm *et al.*, 2005), 这种控制影响作用一直持续到生长季节。全球气候变暖, 苔原带积雪覆盖变薄, 持续期变短尤其明显(Laternser & Schneebeli, 2003; Mote *et al.*, 2005), 高山苔原雪斑群落如何响应环境变化、人类如何保护受威胁的植物种类, 这些问题应该引起重视, 开展广泛研究。

长白山具有我国唯一典型的高山苔原。据作者

观察, 雪斑地段的积雪时间长, 群落生长季节短, 但群落生长比周围茂盛, 说明雪斑群落具有充分利用短暂生长季节的优势。然而, 雪斑地段是靠什么机制维持群落的茂盛生长, 目前还不是很清楚。本研究测定了雪斑大白花地榆(*Sanguisorba sitchensis*)群落土壤温湿度、养分含量和群落生物量, 以了解积雪对大白花地榆群落生产力形成产生的影响及这种影响是如何发挥作用的。

1 试验地概况和研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于长白山苔原带, 属于苔原-冰缘型生态气候。主要气候特征为严寒、高湿、风大。常年气温低, 冬季严寒漫长, 春季寒冷, 夏季温凉而短促, 没有真正的夏天。环境严酷, 无乔木生长, 只有小灌木、多年生草本、苔藓地衣等植物, 组成了地毯式苔原植被。

研究对象主要为大白花地榆群落, 下文简称地榆群落。地榆, 蔷薇科多年生草本, 营养期无主轴, 只有基生叶, 叶片为复叶, 7–11片小叶。本文将复叶作为株来调查生物量。穗状花序直立, 长圆柱形, 花期7–8月。在长白山北坡选取3个样点, 分别位于海拔2 260 m (06样地, 样点编号06, 128°04′06″ E, 42°02′27″ N)和海拔2 036 m (07样地, 样点编号070601, 128°04′10″ E, 42°02′56″ N)。由于微地形的差异, 样点06的积雪厚度为2–3 m, 样点070601积雪厚度超过4 m。地榆群落沿沟谷两侧呈带状分布, 宽度一般不超过10 m。在背风坡的积雪地段, 群落呈斑块状分布, 一般直径不超过10 m。在样点070601附近全年无积雪的非雪斑地段设样点3, 样点编号070603, 群落类型为高山笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum* var. *alpinum*)群落。大白花地榆群落, 优势种为大白花地榆, 占95%以上, 有少量的高山红景天(*Rhodiola sachalinensis*)。高山笃斯越桔群落, 优势种为高山笃斯越桔, 占90%以上, 其次是宽叶仙女木(*Dryas octopetala* var. *asiatica*)、苞叶杜鹃(*Rhodoendron redowskianum*)、大苞柴胡(*Bupleurum euphorbioides*)、长白岩菖蒲(*Tofieldia coccinea*)、越桔(*Vaccinium vitisidaea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、长白棘豆(*Oxytropis anertii*)。

在海拔2 036 m处观测气温, 记录频度为1 h间

隔。根据2008-07-03至2009-07-03观测结果, 该海拔年平均气温 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 日极端最高气温达 $28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 日极端最低气温达 $-34.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温暖指数 $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 寒冷指数 $-44.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 平均温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数为184天, 平均温度大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数为87天(图1)。

1.2 研究方法

实验从2006年开始, 包括土壤温湿度观测、土壤取样、土壤野外培养和室内培养、土壤与植物养分分析和群落调查等。

土温观测 采用StowAway Tidbit自动记录温度计观测土温(Onset, Menlo Park, USA)。温度计设置深度5 cm, 全年连续观测, 每隔1 h自动记录一次。本研究对温暖指数(月平均温度高于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 部分的累积)和寒冷指数(月平均温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 部分的累积)进行了计算。

土壤湿度观测 采用清胜电子科技有限公司生产的水分记录仪观测土壤水分。水分仪探头长约6 cm, 将其垂直插入样点具有代表性的位置, 插入深度10 cm, 观测频度1 h。样点070601和070603均测定全年土壤水分数据, 观测时间为2007–2008年。

土壤取样 样点070601, 2007和2008年均采样。5、6、8和10月取样, 分别代表地榆群落的融雪期、解冻期、生长旺盛期、落叶休眠期。选取群落的典型地带采集表层土, 搅拌混匀, 在当地冷冻处理后密封状态运回实验室。鲜土状态去除杂质、石块和可见的粗根, 过0.5 mm土壤筛, 然后存放在

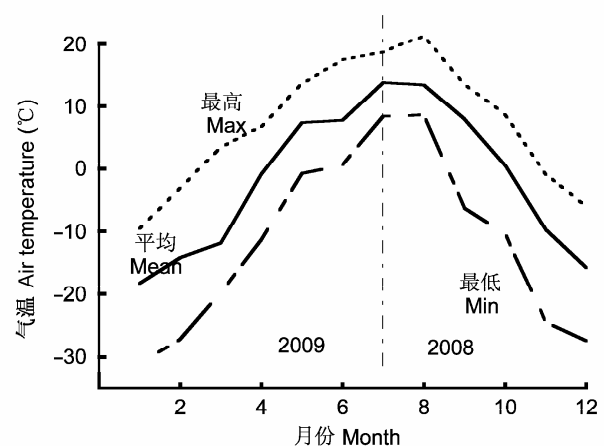


图1 长白山高山苔原月平均气温的变化(海拔2 036 m, 2008-07-03–2009-07-03)。

Fig. 1 Variation of monthly average air temperature in alpine tundra of Changbai Mountain (altitude 2 036 m, 2008-07-03–2009-07-03).

-40 °C 的冰箱以备分析。2008年5月, 样点070601尚是积雪覆盖, 无法在固定样点采样, 而是在雪斑边缘采样(其值作为参考)。关于容重, 用100 cm³体积的环刀取样, 3次重复求平均。

土壤野外培养 土壤野外培养试验目的在于分析雪斑和非雪斑地段土壤养分含量差异是否显著。将从雪斑地榆群落采集的散土混匀, 取一定量分析现状背景值, 其余土样装入若干PVC管中(直径5 cm, 管长10 cm), 保持一定的紧实度, 将一部分装好的PVC管土柱重新放入原土穴中, 即为原位培养, 另一部分PVC管土柱放入非雪斑地段的高山笃斯越桔群落中, 即为移位培养。原位培养和移位培养是对群落有无积雪覆盖的模拟试验。

土壤室内培养 将野外采集的地榆群落现状土, 平均分为5份, 装入自封袋并置于-15、-7.5、-0.5、7.5和15 °C的恒温箱中, 避光培养30天左右。为保持土壤样品的湿度和空气流通, 自封袋口留微缝, 透气保湿。用StowAway Tidbit自动记录温度计监测培养箱体内实际温度。采用离子色谱法测定NH₄⁺和NO₃⁻含量, 每个样品做3次重复, 以确定土样的净矿化速率和硝化速率。计算方法: 土壤净矿化速率 = (培养后的无机氮量-培养前的无机氮量)/培养天数; 土壤净硝化速率 = (培养后的NO₃⁻量-培养前的NO₃⁻量)/培养天数。

养分分析 采用稀释热法测定土壤有机质的含量, 此有机质为活性有机质; 用凯氏定氮法测量土壤中全氮的含量和植物氮含量; 采新鲜土样, 用碱解扩散法测定水解氮含量。每个样品做3次重复。

群落生产力调查 样点070601调查群落特征和地上生物量。共做了4期调查, 分别为2009-07-05、2009-08-01、2008-08-24、2007-08-29。2009-07-05采用地上全收获法; 2009-08-01查数样方内地榆的复叶数, 按高度级别测定单株复叶生物量; 2008-08-24分别营养复叶和果枝查数高度和株数, 同时采集10片以上复叶, 测小叶生物量占总生物量的比例; 2007-08-29调查样方种类、株数和高度。样方面积50 cm × 50 cm, 样方数量3或5个。植物样品在85 °C下烘干至恒重以求算水分系数。

比叶面积与叶面积指数 采摘40片新鲜健康的地榆小叶, 扫描(300 dpi)后, 用图像处理软件计算单片小叶面积, 烘干称重, 计算比叶面积, 根据

群落生物量计算叶面积指数。

凋落物分解 在样点070601, 采集群落的凋落物, 称重后分装入袜袋, 设置在原群落中。把适量凋落物带回实验室, 烘干称重(85 °C), 计算干物质率。此项工作在2008-08-24进行, 每3个样品为一组。于2008-10-16、2009-07-05各取一组, 2009-10-03取剩下的2组。

2 结果

2.1 土壤温湿度特征

样点06年平均温度2.5 °C, 最冷月平均温度-1.4 °C, 最低日平均温度-1.5 °C, 平均温度≥1 °C的日数为109天; 样点070601的年平均温度3.9 °C, 最冷月平均温度-1.0 °C, 平均温度≥1 °C的日数为142日; 样点070603年平均温度-0.1 °C, 最冷月平均温度-14.7 °C, 最低日平均温度-16.9 °C, 寒冷指数-22.9 °C, 平均温度≥1 °C的日数为151天(表1)。将正负0.99 °C范围全部视为积雪, 则样点06积雪日数为178天, 样点070601积雪日数为193天, 样点070603积雪日数为74天。两处雪斑群落土壤寒冷指数均为0 °C, 比非雪斑群落(样点070603)温度条件优越。日平均温度变化, 样点06变动幅度最小为16.6 °C, 样点070601为18.2 °C, 样点070603最剧烈为33.2 °C(图2)。雪斑群落和非雪斑群落, 日平均温度从0 °C以下升高到0 °C以上时, 几乎直线上升, 而且0-10 °C的日数非常少, 仅有10天左右。

样点070601, 雪斑群落地榆土壤含水率全年维持较高的水平, 生长季节高达60%左右, 非雪斑地段高山笃斯越桔群落土壤的含水率基本维持在40%以下。6月3日雪斑地榆群落土壤含水率接近100%, 这是积雪融化的结果。总的来看, 水分因子不是群落生长的限制因子。积雪期间, 土壤尚有一部分液态水, 为微生物活动创造了有利条件。

2.2 养分特征

土壤全氮、有机质 土壤全氮含量在雪斑地段和非雪斑地段差别不显著, 有机碳含量非雪斑地段约为雪斑地段的2倍, C/N雪斑地段为12.61:1, 非雪斑地段为23.86:1。雪斑地段土壤全氮、有机质含量生长季前期最大, 落叶休眠期最小, 呈现随生长季节推移逐渐减少的趋势; 非雪斑地段全氮、有机质含量随季节变化不显著。

水解氮季节动态 地榆群落的土壤容重是0.92

表1 长白山高山苔原土壤温度特征

Table 1 Soil temperature characteristics in alpine tundra of Changbai Mountain

项目 Item	样点06 Sampling point 06	样点070601 Sampling point 070601	样点070603 Sampling point 070603
年平均温度 Yearly average temperature (°C)	2.5	3.9	-0.1
最冷月平均温度 Mean temperature of coldest month (°C)	-1.4	-1.0	-14.7
最热月平均温度 Mean temperature of warmest month (°C)	12.3	13.6	13.0
最低日平均温度 Minimum daily mean temperature (°C)	-1.5	-1.3	-16.9
最高日平均温度 Maximum daily mean temperature (°C)	15.1	16.9	16.3
日极端最高温度 Extreme high mean temperature (°C)	20.5	19.3	21.8
日极端最低温度 Extreme low daily temperature (°C)	-1.5	-1.3	-17.8
温暖指数 Warmth index (°C)	15.6	25.4	21.2
寒冷指数 Coldness index (°C)	0.0	0.0	-22.9
平均温度>0 °C日数 Number of days with daily temperature > 0 °C	187	279	179
平均温度≥1 °C日数 Number of days with daily temperature ≥1 °C	109	142	151
平均温度[-0.99, 0.99 °C]日数 Number of days with daily temperature at [-0.99, 0.99 °C]	178	193	74
平均温度≤-1 °C日数 Number of days with daily temperature ≤-1 °C	79	31	141
平均温度≤0 °C日数 Number of days with daily temperature ≤0 °C	179	87	187
极端最低温度≤0 °C日数 Number of days with extreme low temperature ≤ 0 °C	179	91	211

06, 海拔2 260 m, 雪斑; 070601, 海拔2 036 m, 雪斑; 070603, 海拔2 036 m, 非雪斑。
06, altitude 2260 m, snowpack; 070601, altitude 2 036 m, snowpack; 070603, altitude 2 036 m, snow-free.

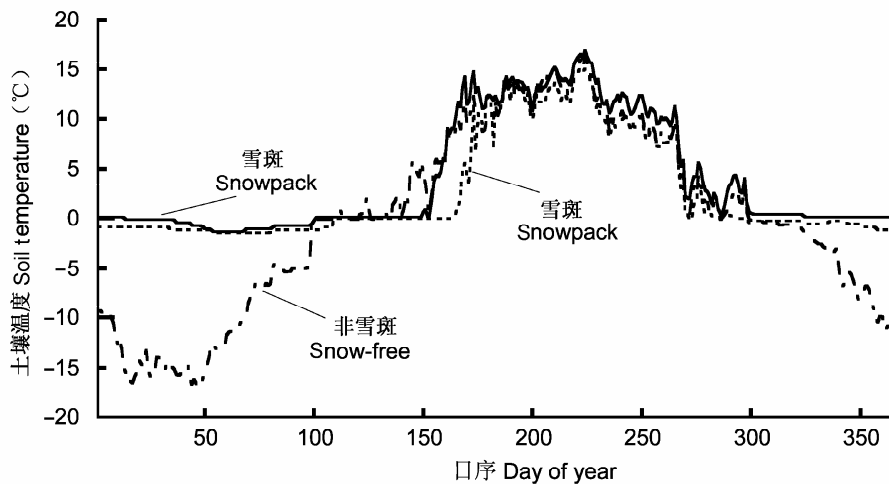


图2 长白山高山苔原土壤日平均温度变化及其与地表状态的关系(2008)。

Fig. 2 Variation of daily soil temperature in relation with surface status in alpine tundra of Changbai Mountain (2008).

g·cm⁻³。样点070601, 2007年采样的地榆群落土壤, 从6月份到10月份, 土壤水解氮逐渐降低, 特别是在2007-06-26–2007-08-30降幅很大, 这一时期又恰好是植物快速生长时期, 吸收了较多的养分。2008年水解氮含量变化趋势与2007年相同, 而且对应月份的绝对含量基本相等(图4)。

土壤野外培养 2个样点冬季有雪覆盖均比无雪覆盖的土壤水解氮含量高。样点06原位培养比移

位培养水解氮含量高出49 kg·hm⁻², 样点070601原位培养比移位培养高出20 kg·hm⁻²(表3)。

土壤室内培养 地榆群落土壤在室内培养条件下, 氮矿化速率随温度升高而增加。低温区-15.20–-0.93 °C, N矿化速率增加了0.177 kg·hm⁻²·d⁻¹, 说明在低温条件下微生物仍然活跃, 存在微生物氮矿化, -0.93–7.58 °C, 氮矿化速率增幅最大, 在这一温度区间段增加3倍多, 7.58–14.83 °C, 氮矿化

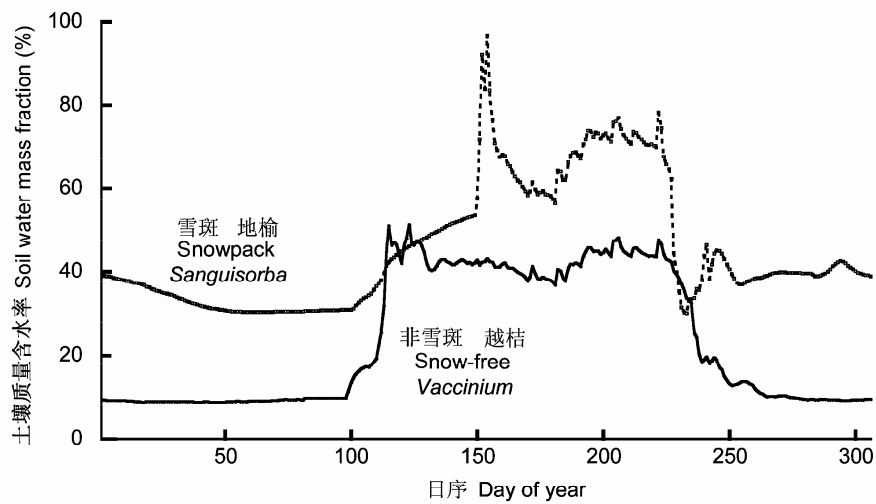


图3 长白山高山苔原土壤质量含水率的季节变化。
Fig. 3 Seasonal dynamics of soil water mass fraction in alpine tundra of Changbai Mountain.

表2 土壤养分与有机质含量
Table 2 Soil nutrients and organic matter content

样地 Site	采样日期 Sampling date	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
雪斑 Snowpack	2007-06-26	4.66	103	59	12.77
雪斑 Snowpack	2008-08-22	3.74	85	49	13.14
雪斑 Snowpack	2007-10-16	2.91	60	35	11.93
平均 Mean		3.77	82	48	12.61
非雪斑 Snow-free	2007-06-26	2.98	135	78	26.32
非雪斑 Snow-free	2008-08-22	3.42	133	77	22.59
非雪斑 Snow-free	2007-10-16	3.99	156	90	22.66
平均 Mean		3.46	141	82	23.86

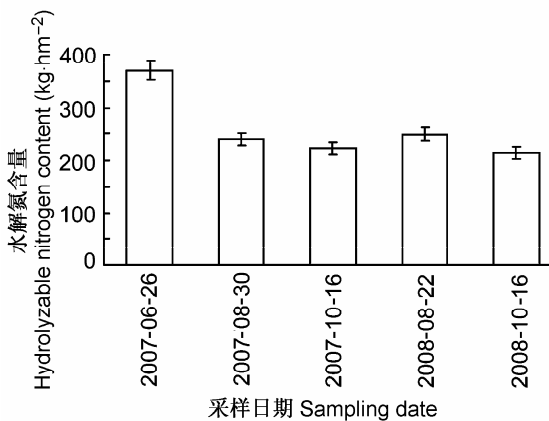


图4 样点070601大白花地榆群落土壤水解氮含量的季节动态(平均值±标准偏差)。
Fig. 4 Seasonal dynamics of soil hydrolyzable nitrogen content in *Sanguisorba sitchensis* community at sampling point 070601 (mean ± SE).

表3 原位和移位培养土壤水解氮比较
Table 3 Soil hydrolyzable nitrogen contents of soil of on-site and off-site incubation

样点 Sampling point	状态 Status	培养时间 Incubation period	水解N含量 Hydrolyzable N content (kg·hm ⁻²)
06	原位 On site	2006-06-28–2008-08-23	441
06	移位 Off site	2006-06-28–2008-08-23	392
070601	原位 On site	2007-08-30–2008-08-21	257
070601	移位 Off site	2007-08-30–2008-08-21	237

样点同表1。
Sampling point see Table 1.

速率增速减小, 最终达最大值1.141 kg·hm⁻²·d⁻¹(图5)。
地榆群落土壤净氮矿化速率随温度变化拟合方程, 选用指数方程和线性方程。指数方程 $y = 0.3702e^{0.0829x}$, $R^2 = 0.9596$, 线性方程 $y = 0.0377x$

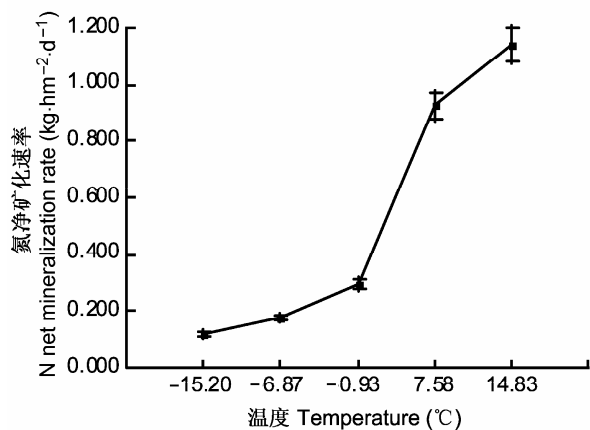


图5 大白花地榆群落土壤室内培养净矿化速率同温度的关系。

Fig. 5 N net mineralization rates of soil from *Sanguisorba sitchensis* community in relation with temperature under indoor incubation.

+ 0.5367, $R^2 = 0.8978$; y 为净氮矿化速率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), x 为日平均温度($^{\circ}\text{C}$)。指数方程拟合效果优于线性方程。将地榆群落样点不同海拔高度(2 260和2 036 m)的土壤日平均温度带入方程累加计算, 得到地榆群落土壤全年氮矿化量, 指数方程结果185.874–212.060 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 线性方程结果231.533–250.112 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 线性方程结果大于指数方程。

凋落物分解 样点070601, 地榆群落凋落物分解率, 生长旺盛期到生长末期为8.6%, 冬季积雪期为9.8%, 相对较高, 说明在整个冬季微生物仍在活动并且存在养分归还现象, 全年分解率为28.7% (表4), 说明地榆虽为草本植物, 但完全分解需要不止一年的时间。

2.3 地榆群落生产力动态

地榆的小叶生物量占地上部分总生物量的63.9%。每片复叶的平均小叶数是9片, 单片小叶平均干重0.032 g, 面积10.30 cm^2 , 比叶面积322.8 $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$, 叶面积指数9.6。

地榆群落平均盖度达98%。生长初期(2009-07-05)群落优势高为9 cm, 生长旺盛期(2008-08-24)时, 群落优势高已经达到40 cm。而且随着生长季节的推进, 单株干重明显增加, 仅8月份就增长了1倍。地榆的年均生长量, 生长旺盛期达3 920 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (表5)。复叶重量和高度呈紧密的线性相关, $y = 0.0186x - 0.2766$, $R^2 = 0.98$, y 为单株干重(g), x 为植株高度(cm)。

表4 大白花地榆群落凋落物的分解率

Table 4 Litter decomposition rate of *Sanguisorba sitchensis* community

时期 Period	分解率 Decomposition ratio (%)
2008-08-24–2008-10-16	0.086
2008-08-24–2009-07-03	0.184
2008-08-24–2009-10-14	0.373

表5 大白花地榆群落结构

Table 5 Structure of *Sanguisorba sitchensis* community

样点070601 Sampling point 070601	2009-07-05	2009-08-01	2008-08-24
密度 Density ($\text{stem}\cdot\text{m}^{-2}$)	392	920	615
高度 Height (cm)	9	50	40
盖度 Coverage (%)	76.7	100.0	98.0
单株干重 Individual dry weight ($\text{g}\cdot\text{stem}^{-1}$)	0.072	0.353	0.637
年生长量 Annual growth ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	280	3 250	3 920

样点同表1。

Sampling point see Table 1.

地榆群落6月上中旬进入生长季节, 此时土温较低, 且尚有少量积雪(2007年观测), 处在萌芽期, 7月份后, 温度适宜, 阳光充足, 进入了生长速生期, 仅7–8一个多月, 生长量增长近91.38%, 达3 247 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。将8月底调查的地上部分生物量作为地榆地上部分净初级生产力4 046 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。地榆植物体氮含量为3.981%。因此, 地榆群落植物体的年氮含量为161 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (表6)。地榆群落土壤6–8月水解氮减少131 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图4), 而植物体内8月末氮含量为161 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 说明在生长季节期间, 植物吸收使土壤氮减少。

3 讨论

本文通过野外土温观测、养分动态测定。生产力调查, 分析了长白山苔原雪斑地榆群落的养分季节动态以及群落特征, 从积雪对土壤温度和养分供应角度, 初步揭示积雪对高山苔原群落的维持作用。雪斑独特的水热条件和养分条件, 加上群落具有很大的叶面积同化器官, 使得生产力处于较高水平。

3.1 雪斑群落土壤氮矿化的影响因素

土壤中高有机质和全氮为生物提供了丰富的矿化底物, 有利于提高土壤微生物的活性, 促进土壤氮矿化 (Kitayama, 1996; Bremer & Kuikman, 1997; Sánchez *et al.*, 1997; 李菊梅等, 2003)。雪斑土

表6 大白花地榆群落地上生物量和植物有机碳和氮储量

Table 6 Biomass, organic C and N content of *Sanguisorba sitchensis* community

采样日期 Sampling date	地上生物量 Aboveground biomass ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	植物有机C Organic C content in plant ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	植物有机N Organic N content in plant ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
2009-07-05	284	142	11
2009-08-01	3 247	1 624	129
2008-08-24	3 979	1 990	158
2007-08-29	4 046	2 023	161

壤和非雪斑土壤有机质含量高达82和141 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表2), 与前人在长白山北坡海拔2 000 ($121 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和2 100 m ($100 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)处的结果在统计意义上不存在显著差异(郝占庆和郭水良, 2003)。长白山苔原带如此高的有机质含量, 与火山灰、较厚的腐殖质层和地毯式植被覆盖有关。有机质中C/N低利于促进土壤有机氮矿化, C/N高则会促进矿质氮的生物固定(李紫燕等, 2008), 外国学者认为, C/N小于15:1时, 在土壤矿化作用一开始, 有机质所提供的有效氮量就会超过微生物同化量, 使植物有可能从有机质矿化过程中获得有效氮的供应(Vitousek *et al.*, 1982)。雪斑土壤C/N在3个季节测定的结果都小于15:1 (表2), 为土壤高矿化量提供了物质基础。

土壤温湿度是影响土壤氮矿化的最主要因素。温度、水分对矿化速率有明显的正交互作用(巨晓棠和李生秀, 1998)。祁连山不同海拔高寒草甸土壤氮矿化研究也表明, 在20%–80%土壤湿度范围内, 温度升高氮矿化速率增加(吴建国等, 2007); 且对长白山两种主要林型(阔叶红松林和云冷杉林)的研究也表明, 土壤净矿化速率与温度呈正相关(周才平和欧阳华, 2001a, 2001b)。土壤氮矿化30%–40%受温湿度相互作用影响, 湿度对表层土壤氮矿化影响较大, 矿化强度随土壤温湿度增加(Leirós *et al.*, 1999)。雪斑地段, 积雪隔绝了土壤与大气的热量交换, 冬季土壤条件明显优于非雪斑地段(表1), 这使土壤在寒冷季节不冻结并且积蓄了较多的热量; 雪斑群落土壤含水率全年都维持较高水平(图3)。冬季相对较高的温度和湿度为土壤氮矿化提供了有利条件, 氮素季节动态结果也证实雪斑群落在整个冬季都有氮矿化(图4)。对北极苔原群落的研究也发现深厚积雪致使土壤温度较高, 不仅增加了冬季氮矿化量, 而且改变了苔原生态系统中植物可利用氮的总量和时间(Schimmel *et al.*, 2004), 我们的研究结果与之相一致。

本试验中, 原位土壤培养在低洼处, 移位试验

是在高处, 本身存在地形差别, 春季伴随着积雪融化, 位于高处的土壤中部分水解氮可能会随着雪水汇入低洼处。但是, 样地的实际情况是雪水融化会沿着沟谷向低处流, 而不会汇集在070601样点, 因此地形差异不是引起雪斑地段高氮矿化量的原因。雪水中的养分输入非常微小, 可以忽略(Hiltbrunner *et al.*, 2005), 本试验也证实了这一结论(刘琪璟等, 2009)。

3.2 氮矿化与生产力之间的关系

氮可利用性限制了植物对土壤氮素的养分利用效率, 直接影响到陆地生态系统的生产力(Binkley & Hart, 1989; Aber *et al.*, 1993)。对森林生态系统的研究表明, 生产力与净氮矿化速率呈正线性相关关系, 土壤质地和净氮矿化速率可以解释年净生产力的83% (Reich *et al.*, 1997); 国内学者的研究也证实森林生态系统初级生产力与氮矿化速率之间相关性最显著(周才平等, 2005); 对草地生态系统的研究也得出类似的结论, 土壤养分对生物量的贡献率达86.73% (左小安等, 2007)。苔原生态系统中属于陆地生态系统的一部分, 由此可以推测, 高山苔原雪斑群落的高生产力与高土壤氮矿化量之间存在直接相关关系。且外国学者对北极苔原人工模拟积雪融化提前试验表明, 积雪时间缩短生长季延长, 植物生长量反而降低(Wipf *et al.*, 2009)。雪斑地段积雪调控土壤水热条件, 进而促进冬季土壤微生物氮矿化, 为群落高生产力提供养分基础。

致谢 国家自然科学基金(40671098)资助。吉林省长白山火山观测站在后勤方面给予大力协助; 刘迎春、马泽清等参加部分野外工作; 徐琼瑶、刘文慧参加室内分析。

参考文献

- Aber JD, Magill AM, Boone R, Melillo JM, Steudler P (1993). Plant and soil responses to three years of chronic nitrogen additions at the Harvard forest, Massachusetts. *Ecological Applications*, 3, 156–166.

- Binkley D, Hart SC (1989). The components of nitrogen availability assessment in forest soils. *Advances in Soil Science*, 10, 57–112.
- Bremer E, Kuikman P (1997). Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen. *Plant and Soil*, 190, 119–126.
- Campbell JL, Mitchell MJ, Groffman PM, Christenson LM, Hardy JP (2005). Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3, 314–322.
- Evans BM, Walker DA, Benson CS, Nordstrand EA, Petersen GW (1989). Spatial interrelationships between terrain, snow distribution and vegetation patterns at an arctic foothills site in Alaska. *Holarctic Ecology*, 12, 270–278.
- Hao ZQ (郝占庆), Guo SH (郭水良) (2003). Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 2000–2008. (in Chinese with English abstract)
- Hiltbrunner E, Schwikowski M, Korner C (2005). Inorganic nitrogen storage in alpine snow pack in the Central Alps (Switzerland). *Atmospheric Environment*, 39, 2249–2259.
- Ju XT (巨晓棠), Li SX (李生秀) (1998). The effect of temperature and moisture on nitrogen mineralization in soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 4, 37–42. (in Chinese with English abstract)
- Kitayama K (1996). Soil nitrogen dynamics along a gradient of long-term soil development in a Hawaiian wet montane rain forest. *Plant and Soil*, 183, 253–262.
- Latenser M, Schneebeli M (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology*, 23, 733–750.
- Leirós MC, Trasar-Cepeda C, Seoane S, Gill-Sotres F (1999). Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 327–335.
- Li JM (李菊梅), Wang CH (王朝辉), Li SX (李生秀) (2003). Significance of soil organic matter, total N and mineralizable in reflecting soil N supplying capacity. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 40, 232–238. (in Chinese with English abstract)
- Li ZY (李紫燕), Li SQ (李世清), Li SX (李生秀) (2008). Organic N mineralization in typical soils of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 4940–4950. (in Chinese with English abstract)
- Liu QJ (刘琪璟), Xu QQ (徐倩倩), Zhang GC (张国春) (2009). Impact of alpine snowpacks on primary productivity in *Rhododendron aureum* community in Changbai Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 4035–4044.
- Mote PW, Hamlet AF, Clark MP, Lettenmaier DP (2005). Declining mountain snowpack in western North America. *American Meteorological Society*, 86, 39–49.
- Odland A, Munkejord HK (2008). Plants as indicators of snow layer duration in southern Norwegian mountains. *Ecological Indicators*, 8, 57–68.
- Reich PB, Grigal DF, Aber JD, Gower ST (1997). Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology*, 72, 335–347.
- Sánchez LF, Garciamiragaya J, Chacón N (1997). Nitrogen mineralization in soil under trees in a protected Venezuelan savanna. *Acta Oecologica*, 18, 27–37.
- Schimel JP, Bilbrough C, Welker JM (2004). Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 217–227.
- Sturm M, Schimel J, Michaelson G, Welker JM, Oberbauer SF, Liston GE, Fahnestock J, Romanovsky VE (2005). Winter biological processes could help convert arctic tundra to shrubland. *BioScience*, 55, 17–26.
- Vitousek PM, Gose JR, Grier CC, Melillo JM, Reiners WA (1982). A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystem. *Ecological Monographs*, 52, 155–177.
- Walker DA, Halfpenny JC, Walker MD, Wessman CA (1993). Long-term studies of snow-vegetation interactions. *BioScience*, 43, 287–301.
- Wipf S, Stoeckli V, Bebi P (2009). Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climate Change*, 94, 105–121.
- Wu JG (吴建国), Han M (韩梅), Chang W (苒伟), Ai L (艾丽), Chang XX (常学向) (2007). The mineralization of soil nitrogen and its influenced factors under alpine meadows in Qilian Mountains. *Acta Prataculture Sinica* (草业学报), 16(6), 39–46. (in Chinese with English abstract)
- Zhou CP (周才平), Ouyang H (欧阳华) (2001a). Influence of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization under two type of forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 12, 505–508. (in Chinese with English abstract)
- Zhou CP (周才平), Ouyang H (欧阳华) (2001b). 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), 21, 1470–1474. (in Chinese with English abstract)
- Zhou CP (周才平), Ouyang H (欧阳华), Song MH (宋明华) (2005). Relationships between net primary production and nitrogen cycling in Chinese forest ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 16, 203–206. (in Chinese with English abstract)
- Zuo XA (左小安), Zhao XY (赵学勇), Zhao HL (赵哈林), Li YQ (李玉强), Guo YR (郭轶瑞), ZhaoYP (赵玉萍) (2007). Changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in Sandy Grassland in Horqin Sand Land. *Environmental Science* (环境科学), 28, 945–951. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 石培礼 责任编辑: 李敏