

DOI: 10.5846/stxb201409141820

江肖洁, 耿春女, 韩建秋, 周玉梅. 增温对长白山苔原植物叶片和土壤矿质元素含量的影响. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Jiang X J, Geng C N, Han J Q, Zhou Y M. Effects of warming on mineral element contents in leaves of dominant species and in soils in Changbai Mountain tundra. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

增温对长白山苔原植物叶片和土壤矿质元素含量的影响

江肖洁, 耿春女, 韩建秋, 周玉梅*

上海应用技术学院生态技术与工程学院, 上海 201418

摘要: 温度变化会影响植物对养分的吸收以及自身养分含量变化, 尤其对长期处于低温条件下的苔原植物。采用开顶箱增温法, 研究了 1 个生长季增温对长白山苔原 3 种代表植物—牛皮杜鹃 (*Rhododendron aureum* Pall)、笃斯越桔 (*Vaccinium uliginosum*) 和东亚仙女木 (*Dryas octopetala* var. *asiatica*) 叶片及土壤矿质元素钾 (K)、铝 (Al)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、镁 (Mg)、锰 (Mn)、锌 (Zn) 和钙 (Ca) 含量的影响。结果表明: 1) 增温明显改变了土壤矿质元素含量, 使土壤 Fe、Al 和 K 含量分别增加 0.44%、2.76% 和 4.88%, 而 Cu、Mg、Mn、Zn 和 Ca 含量分别降低 2.63%、5.07%、7.46%、21.95% 和 15.60%; 2) 整个生长季, 增温使牛皮杜鹃叶 K 含量增加 8.17%, 且具有明显的月变化, 其叶 Mg 和 Mn 含量也分别比对照组高 66.39% 和 14.73%; 3) 与对照相比, 增温使笃斯越桔叶 K、Al 和 Zn 含量分别增加 15.24%、5.45% 和 87.45%, 生长季不同月份, 其叶 K、Al、Mg、Mn、Zn 和 Ca 含量差异明显; 4) 增温并没有明显改变东亚仙女木叶片各矿质元素含量, 但其叶 K、Cu 和 Ca 含量具有明显月波动。因此, 不同物种矿质元素含量变化对增温的响应方式不同, 增温对苔原植物的影响也存在一定的物种差异性。

关键词: 长白山; 苔原; 增温; 矿质元素

Effects of warming on mineral element contents in leaves of dominant species and in soils in Changbai Mountain tundra

JIANG Xiaojie, GENG Chunnv, HAN Jianqiu, ZHOU Yumei*

Ecological Technique and Engineering College, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

Abstract: According to the fifth report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the average global temperature has increased by 0.78 °C between 2003 and 2013, compared with that between 1900 and 1950. It is well known that boreal or high latitude areas are more sensitive to warming. The vegetations in the tundra ecosystem have adapted to low temperatures and grown in conditions of limited nutrition. However, temperatures can influence the absorption and content of the nutrients. The aim of this study is to examine the responses of the mineral elements in the leaves of tundra plants to warming. The hexagon open-top chamber system was used to increase the air and soil temperatures during the growing season (June to September). The mean air temperature was increased by 1.41 °C, and the soil temperature at depths of 5 cm and 10 cm was increased by 1.74 and 1.78 °C, respectively, during the growing season in 2013. The potassium (K), aluminum (Al), copper (Cu), iron (Fe) and magnesium (Mg), manganese (Mn), zinc (Zn), and calcium (Ca) contents in the soil and the leaves of *Rhododendron aureum* Pall, *Vaccinium uliginosum*, and *Dryas octopetala* var. *Asiatica*, three dominant plants in the Changbai Mountain tundra, were determined after warming treatment during three growing seasons. The results showed that: 1) warming significantly affected the mineral element content in the soils. The Fe, Al, and K contents

基金项目: 国家自然科学基金 (31170461)

收稿日期: 2014-09-14; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouyumei73@126.com

increased by 0.44%, 2.76%, and 4.88%, respectively. In contrast, the Cu, Mg, Mn, Zn, and Ga contents decreased by 2.63%, 5.07%, 7.46%, 5.07%, and 7.46%, respectively. 2) The K content in the leaves of *Rhododendron aureum* showed a significant seasonal change, with an average increase of 8.17% after warming during the whole growing season; however, this was not observed for the other mineral elements contents. Warming increased the Mg and Mn contents of the leaves of *Rhododendron aureum* by 66.39% and 14.73%, respectively, compared with the control. 3) The contents of K, Al, and Zn in the leaves of *Vaccinium uliginosum*, grown in the open-top chambers, were 15.24%, 5.45%, and 87.45% higher, respectively, than were those of the control. There were significant differences in the K, Al, Mg, Mn, Zn, and Ga contents in the *Vaccinium uliginosum* leaves for the different months. 4) Warming did not significantly affect all mineral elements' contents in the leaves of *Dryas octopetala* var. *Asiatica*. The K, Cu, and Ga contents of the leaves of *Dryas octopetala* var. *Asiatica* showed obvious seasonal fluctuations, ranging from 8.48 to 15.83mg/g, 0.14 to 0.30mg/g, and 8.91 to 11.41mg/g, respectively. Overall, the contents of the mineral elements in the different plant species responded differently to the warming. Although the warming increased the K, Al, and Fe contents in the soils, the leaves of *Rh. aureum*, *V. uliginosum* and *Dr. octopetala* var. *Asiatica* did not show a similar increasing trend. This finding indicates the hysteresis effects of the soil nutrition. Therefore, the mineral elements in the soils responded to warming in different ways, while the responses to warming of the mineral element in the leaves were specific to the plant species. Our results could improve the understanding of the effects of global warming on the nutritional dynamics in soils and the metabolism in the plants of the tundra.

Key Words: Changbai Mountain; tundra; warming; mineral element

IPCC^[1]第五次气候变化报告显示,2003—2013 年全球平均气温比 1900—1950 年上升了 0.78 °C,全球变暖对冰冻圈的影响更明显。高山苔原作为全球变暖的敏感区,其植被生长更易受到温度影响^[2],低温^[3-4]和养分的相对缺乏^[5-6]共同限制了高海拔高纬度地区植物的生长。温度改变能影响植物的新陈代谢以及内部养分元素的分配,从而改变各元素在植物器官中的转移和再分配^[7-8]。矿质元素对植物生长是至关重要的,植物生长过程中必须的矿质元素含量变化能在一定程度上反映植物的生理和生长特性。此外,许多矿质元素具有和生物有机分子形成稳定化合物的趋势,并可长时间停留在植物组织中^[9]。因此,研究增温对植物矿质元素的影响,对进一步理解全球变暖后高山苔原植被养分状况、生长趋势具有积极作用。

钾 (K)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、镁 (Mg)、锰 (Mn)、锌 (Zn) 和钙 (Ca) 是植物生长的必需矿质元素。K、Fe、Ca、Mn 在调节渗透压、促进酶活性、蛋白质合成、提高光合能力及植物抗性等方面具有重要作用^[10-11]。Sardans 和 Peñuelas^[12] 研究表明,增温有利于植物对矿质元素的吸收,因为温度升高使土壤中酶的活性增强,同时也提高了光合能力以及植物对养分元素再分配的能力^[13]。但微量矿质元素的增加对植物的生长将产生不同的影响,植物叶片中某些微量矿质元素,如 Cu 元素含量的增加,将抑制植物的生长^[14],并降低植物的繁殖能力^[15]。也就是说,增温条件下,土壤和植物中微量矿质元素含量的增加也会对植物的生产力产生负作用。相反,某些微量矿质元素,如 Al 元素含量的降低则有利于提高植物的生产力^[16],从而增强植物抵御未来气候变暖的能力。

土壤温度随昼夜和季节周期的变化而变化,这种变化强烈影响着土壤养分的可利用性和植物的吸收^[17]。当土壤水分不受限制时,温度升高通常使土壤可利用的养分含量增加,因为增温提高了土壤微生物的活性,加速了化学反应速率,使土壤中的有效矿质元素得到释放,提高了土壤的矿化率^[18-19]。短期内,这些过程可以增加土壤的养分利用率,但长期温度升高后,土壤养分的储存可能会呈现降低趋势^[17],并进一步导致植物生长受限。

在北极苔原、加拿大高山苔原等地,已经做了一些增温对苔原植物和土壤微生物量以及 C、N、P 等大量元素含量影响的研究,发现增温使苔原地区植物的覆盖度增加^[18,20-21],温度升高加剧了 P 素对长白山苔原地区

植物生长的限制^[22]等。但也有研究认为,苔原地区常绿灌木对增温所产生的效应与该地区其它植物相比敏感度较低^[23-24],且增温对植物的生长没有产生显著的影响^[25]。因此,增温对植物的影响存在一定的差异性。本研究以长白山苔原三种代表植物—牛皮杜鹃(*Rhododendron aureum* Pall)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)和东亚仙女木(*Dryas octopetala* var. *asiatica*)为实验对象,研究生长季增温对苔原土壤和植物叶片矿质元素含量的影响,以揭示在全球气候变暖条件下,苔原土壤与植被养分变化模式。

1 实验方法

1.1 实验设计

在吉林省长白山国家自然保护区海拔 2028m 苔原生态系统建立 8 个正六边形开顶箱(OTC),开顶箱设计采用国际苔原标准(International Tundra Experiment, ITEX),箱体高 45 cm,底边长 65 cm^[26]。开顶箱的增温原理是,由于有机玻璃的阻挡,箱内风速降低,热量不易散失,加之玻璃纤维可以使红外线更好的穿过,使箱内温度升高^[27]。8 个开顶箱按照大约间隔 5 m 距离排列,并在每个开顶箱平行位置 1 m 处,划定等同面积的对照地。增温前,开顶箱与对照样地植被覆盖度基本相同,且土壤理化性质没有明显差异性(未发表数据)。任意选取一个开顶箱及相应的对照样地(CK),在箱体内外安装自动控制系统,记录光合有效辐射、空气和土壤温湿度(HOBO Data Logger),土壤传感器分别放置于地下 5 cm 和 10 cm 处。空气温湿度记录仪从 2013 年 6 月起至 2013 年 8 月止进行连续记录,数据记录时间间隔为 30 min。土壤地下 5 cm 和 10 cm 温度记录仪的记录时间间隔为 2 h。

1.2 研究地概况

实验地位于吉林省长白山国家自然保护区苔原生态系统(127.67°—128.27° E, 41.58°—42.42° N, 海拔 2028 m),属于苔原-冰缘型气候,常年低温,年平均气温—7.3 °C,冬季漫长,寒冷而干燥,夏季短暂,凉爽而潮湿,全年多云雾^[28]。年平均降水量 1400—1800 mm,降水量主要集中在 6—9 月,积雪时间达 6 个月以上。苔原植被主要为笃斯越桔、牛皮杜鹃、东亚仙女木、黑穗薹草(*Carex atrata*)、倒根蓼(*Polygonum ochotense*)等,其中笃斯越桔、牛皮杜鹃和东亚仙女木为苔原生态系统优势物种,其平均覆盖度分别为 29 %、7 % 和 56 %^[22]。

1.3 样品采集及处理

2013 年 7 月 6 日、8 月 7 日、9 月 2 日,在开顶箱和对照样地内分别取约 15 g 等量三种植物叶片,取回后立即于 100 °C 杀青并于 60 °C 下烘干至恒重,粉碎过筛备用。开顶箱和对照样地土壤仅在生长季末 9 月 2 日进行取样,0—10 cm 土层土壤取后风干,过筛待测。

1.4 研究方法

植物与土壤样品置于 PTFE 烧杯中,用 HNO₃、H₂O₂ 和 HF 在 180 °C 条件下消煮,并用 HClO₄ 除去多余 F⁻ 离子采用 ICP—AES 进行矿质元素含量测定^[29]。

1.5 数据分析

利用 SPSS17.0 软件,采用单因素方差法,分析每个月份增温对土壤和每种植物叶片 Al、Cu、Fe、Mg、Mn、Zn、K 和 Ga 矿质元素含量的影响,以及不同物种间各元素含量差异;采用双因素方差法,分析增温和月份对每种植物叶片各矿质元素含量的交互影响。

2 结果

2.1 开顶箱增温效应

2013 年生长季,对与对照地相比,开顶箱内平均空气温度增加 1.41 °C,空气湿度增加 1.19 %,地下 5 cm 和 10 cm 土壤温度分别增加 1.74 °C 和 1.78 °C (表 1)。

表 1 生长季增温与对照条件下空气平均温度、空气平均相对湿度,地下 5 cm 和 10 cm 土壤平均温度

Table 1 The mean air temperature, air relative mean humidity, soil mean temperature at 5cm and 10cm soil depth in the open-top chambers and control plots during growing season

因素 Factor	开顶箱 OTC	对照样地 CK	差值 Difference
空气温度 Air temperature/℃	24.13	22.72	+1.41
空气相对湿度 Air relative humidity/%	86.56	85.37	+1.19
地下 5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth/℃	22.66	20.92	+1.74
地下 10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth/℃	21.74	19.96	+1.78

*, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$.

2.2 增温对土壤矿质元素含量的影响

由表 2 可以看出,增温使土壤 K、Al 和 Fe 元素含量分别升高 4.88 %、2.76 %和 0.44 %, Mn、Ga、Zn 含量的变化幅度较大,比对照组分别降低了 7.46 %、15.6 %和 21.95 %。

表 2 增温与对照条件下土壤矿质元素含量。(Mean $\pm$ SD, mg/g)Table 2 Mineral element contents in soils in open top chambers (OTC) and the control plots (CK). (Mean $\pm$ SD, mg/g)

处理 Treatment	Al	Cu $\times 10^{-2}$	Fe	Mg	Mn	Zn $\times 10^{-2}$	Ga	K
开顶箱 OTC	12.64(0.07) ^A	1.85(0.00) ^A	15.86(0.08) ^A	2.06(0.27) ^A	0.62(0.03) ^A	9.28(0.00) ^A	7.79(0.21) ^A	1.72(0.02) ^A
对照 CK	12.30(0.23) ^B	1.90(0.00) ^B	15.79(0.27) ^B	2.17(0.03) ^B	0.67(0.01) ^B	11.89(0.01) ^B	9.23(0.01) ^B	1.64(0.00) ^B

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 增温对植物叶片矿质元素含量的影响及月份动态变化

三种植物叶片 K 元素含量在生长季均呈现先升高后降低 (图 1),月变化明显 (表 3),且三种植物对照组的叶 K 含量变化趋势一致。牛皮杜鹃叶片其它矿质元素含量在生长季各月份间变化较小,彼此差异不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。由图 1 可知,牛皮杜鹃 K 含量的变化范围为 10.19—14.38 mg/g,增温明显改变了其叶片的 K 元素含量 ($P < 0.05$) (表 3),整个生长季,增温使牛皮杜鹃叶 K 含量平均增加 8.17 %。虽然增温对牛皮杜鹃叶片中的其它矿质元素含量没有产生明显影响,但由表 3 可以看出,除 Ga 元素外,增温条件下的叶 Al、Cu、Fe、Mg、Mn 和 Zn 含量的平均值均高于对照组。

表 3 生长季内增温和月份对每种植物叶片 K、Ga、Mg、Al、Fe、Cu、Zn 和 Mn 含量影响的重测量方差分析结果

Table 3 The statistical results of effects of warming and month on K、Ga、Mg、Al、Fe、Cu、Zn and Mn contents of leaves of three plant species using repeated measures ANOVA during growing season

变异来源 Source of variation	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ca	K
牛皮杜鹃								
增温 Warming (W)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
月份 Month (M)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
增温 $\times$ 月份 W $\times$ M	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	**
笃斯越桔								
增温 Warming (W)	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	**
月份 Month (M)	**	ns	ns	**	**	**	*	**
增温 $\times$ 月份 W $\times$ M	**	ns	ns	ns	*	**	ns	**
东亚仙女木								
增温 Warming (W)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
月份 Month (M)	ns	*	ns	ns	ns	ns	**	**
增温 $\times$ 月份 W $\times$ M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**
物种 Species (S)	**	**	**	ns	**	ns	ns	**

*, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$, ns, $P > 0.05$.

整个生长季,增温条件下的笃斯越桔叶片 K、Al 和 Zn 含量的变化范围分别为 8.67—13.02 mg/g、5.85 $\times$

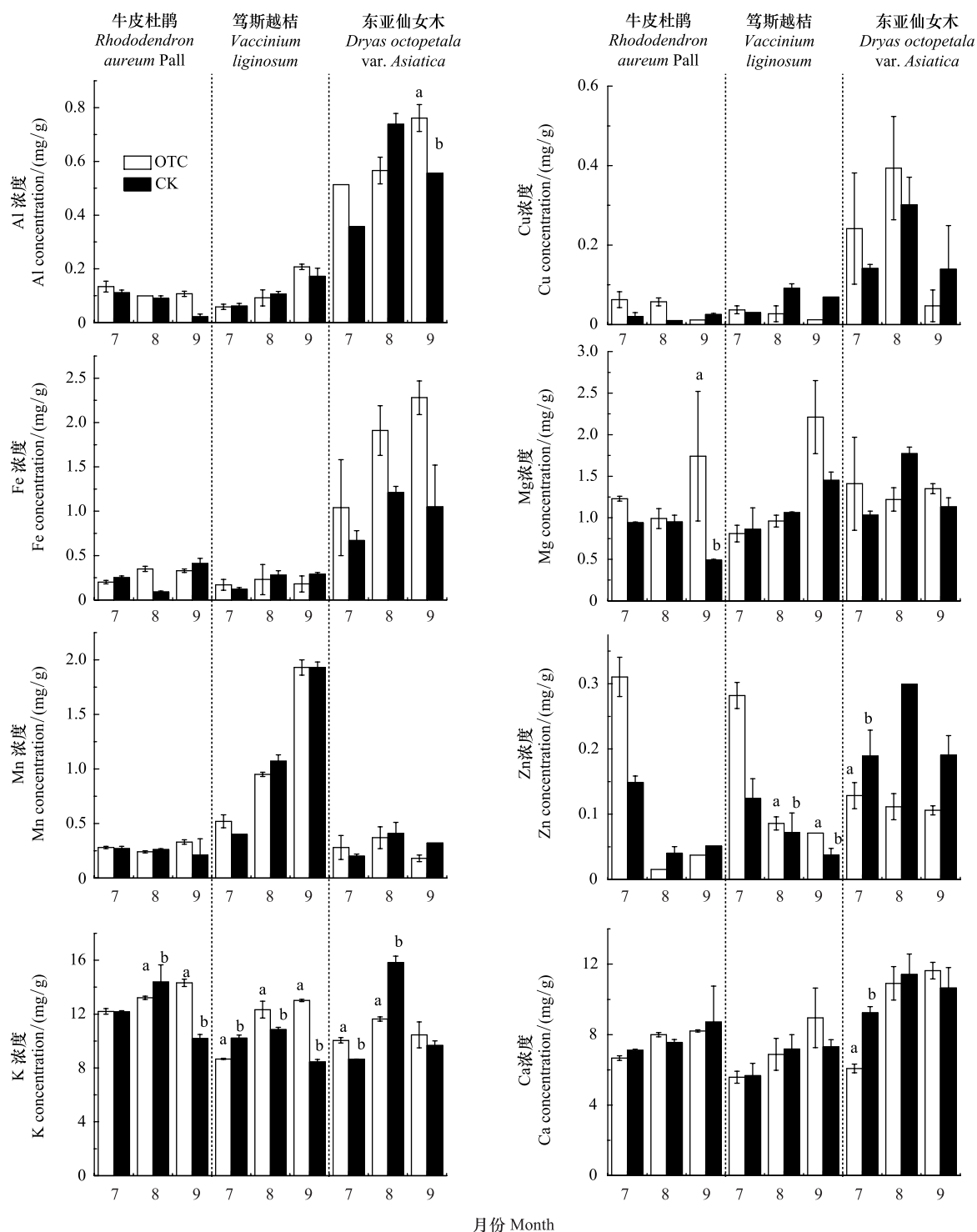


图1 生长季增温与对照条件下牛皮杜鹃、笃斯越桔和东亚仙女木叶片各矿质元素含量 (Mean $\pm$ SD, mg/g)

Fig. 1 Mineral element contents in leaves of *Rhododendron aureum* Pall, *Vaccinium uliginosum* and *Dryas octopetala* var. *Asiatica* grown in open top chambers (OTC) and the control plots (CK) during growing season (mean $\pm$ SD, mg/g)

每种植物相同月份增温与对照条件下不同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

10^{-2} g— 20.75×10^{-2} mg/g、 28.2 mg/g— 7.1 mg/g (图1), 且分别比对照组高 15.24 %、5.45 % 和 87.45 % ($P < 0.05$)。与对照相比, 增温条件下的笃斯越桔叶片 Fe 和 Cu 含量虽然分别减少了 15.94 % 和 60.10 %, 但差异并不显著 (表3)。笃斯越桔叶片中的 Al、Mg、Mn、Zn 和 Ga 含量在不同月份含量差异较大, Al、Mg、Mn 和 Ga 含量变化趋势相同, 随生长季含量逐渐增加, 但 Zn 含量则相反, 一直呈降低趋势。

与牛皮杜鹃和笃斯越桔不同,增温对东亚仙女木叶片各矿质元素含量都没有产生显著影响,但在不同月份,增温对其叶片中的 K 和 Ga 含量影响不同(表 3)。7 月份,增温条件下的东亚仙女木叶 Ga 含量比对照组低 34.20%,叶 K 含量的变化与 Ga 恰好相反,在生长旺盛的 7、8 月份,增温与对照条件下东亚仙女木叶 Ga 的含量存在明显差异,但 9 月份差异不明显,7 月份,增温条件下叶 K 含量比对照组高 16.18%,但 8 月份,则比对照组低 26.53%。东亚仙女木的 Cu 和 Ga 含量在生长季内都表现为先升高而在生长季末降低的变化趋势。增温与对照条件下,笃斯越桔叶片 Mn 含量以及东亚仙女木叶片的 Ga 含量,在生长季内一直呈增加趋势,其含量范围分别是 0.40—1.93 mg/g 和 6.08—11.63 mg/g(图 1)。

2.4 三种植物叶片矿质元素含量的比较

增温或对照条件下,笃斯越桔、牛皮杜鹃、东亚仙女三种植物叶片的 K、Al、Cu、Fe、Zn、Ca 含量彼此存在明显差异($P < 0.01$),增温条件下,牛皮杜鹃叶 K 含量以及东亚仙女木叶 Al、Cu 和 Fe 最高。对照条件下的三种植物叶 Mg 和 Mn 元素含量也明显不同($P < 0.01$),对照条件下,东亚仙女木的叶 Mg 含量比牛皮杜鹃和笃斯越桔分别高出 65.13%和 16.62%。而对照条件下,笃斯越桔的 Mn 含量则比牛皮杜鹃和东亚仙女木高出 359.26%和 265.48%。另外,增温条件下,牛皮杜鹃比笃斯越桔叶 Mg 含量低 0.51%,牛皮杜鹃比东亚仙女木叶 Mg 含量低 0.51%($P < 0.05$),但在增温条件下并无明显差异($P > 0.05$)。

3 讨论

高山苔原生态系统中,土壤温度通常低于该地区植物生长所需的最适温度^[30],Sanchez 研究显示^[31],长期的土壤温度升高能加速土壤的风化和分解速率,降低土壤有机质的含量,这些改变将会使土壤向以 Fe、Al 氢氧化物为主且 Ga、Mg、Cu 等植物生长所需的矿质元素含量较低的高度风化粘土转变,这些转化的粘土具有较低的阳离子交换能力,因此土壤维持养分的能力也降低^[32]。这与本研究增温使土壤 Fe、Al 含量升高, Ga、Mg、Cu 含量降低的研究结果是一致的。

本研究中,增温与对照条件下三种植物叶片的 K 含量分别在 8.67—14.32 mg/g 和 8.65—15.83 mg/g 范围内变化,高于我国灌丛植被叶 K 含量的平均值(8.38 mg/g)^[33]。由于 K 元素流动性较大,易受雨水淋溶,所以具有明显的季节动态变化,本研究在生长季呈先升高后降低的趋势。这可能是由于长白山苔原在 7、8 月雨水相对集中,而土壤 K 含量的变化可能有一定的滞后性;另外,生长季末期, K 浓度下降也可能是由于碳水化合物含量增加引起的稀释效应, Sun 和 Chen^[34] 也发现辽东栎叶片经雨水淋溶后 K 含量降低。增温使牛皮杜鹃和笃斯越桔叶片的 K 含量平均值增加,但东亚仙女木的叶 K 含量平均值却降低,而且增温条件下,三种植物的叶 K 含量在不同月份的变化也没有表现出一致性。因此,三种植物叶片 K 含量对增温的响应具有一定的差异性。

植物叶片中某些矿质元素含量的变化基本都与植物的光合作用以及生长有关^[35-36]。Mg、Mn 是光合和呼吸作用过程中重要酶的组成成分或辅酶因子,可以影响叶片的光合作用和呼吸作用,同时 Mg 又是叶绿素的重要组成部分。对笃斯越桔来说, Mg 含量在展叶初期相对较低,随着叶片生长、叶绿素含量增加以及光合作用的增强,其浓度逐步上升,这与 Llorens 等^[35-36]的结论一致。但牛皮杜鹃和东亚仙女木叶片 Mg 含量在 8 月份略降低,而后又升高,这可能与植物的旺盛生长导致的大量消耗或碳水化合物的增加引起的稀释效应有关。

增温对三种植物叶 Ga 含量都没有产生显著影响,笃斯越桔和东亚仙女木的叶 Ga 含量在生长季内保持增加趋势。Ga 作为细胞壁的主要成分,生长期间需求增大,所以浓度增大^[34];另外, Ga 属于不易移动、转移度较低的养分元素,从种子萌发到叶片凋落, Ga 元素一直处于累积状态^[37],所以在生长季末含量最高。

图 1 可以看出,增温使笃斯越桔叶片的 Al 和 Zn 含量增加, Sardans 等^[13] 也发现增温使 *E. multiflora* 叶中 Al 和 Zn 含量分别升高 42%和 50%。Zn 作为植物体多种酶的组成成分,参与植物的呼吸作用和碳水化合物转化,温度升高会增强植物的呼吸作用,所以植物通过增加 Zn 的含量来满足自身的呼吸需求。而在在生长季末,三种植物叶片中的 Zn 含量达到最低值,主要是由于 Zn 已逐渐向根转移,使地上部分的 Zn 含量减少^[38]。

温度升高使三种植物叶片 Al 含量都增加。虽然 Ying 等^[16] 研究发现, Al 含量的增加将降低植物对 Ga 的

吸收和运输,同时使植物 N、P、K 等养分元素的吸收受阻,从而影响植物的正常发育和生长。但本研究中 Al 含量的增加并未引起 K、Ga 等元素吸收受阻,说明在短期增温条件下,Al 含量的增加不会抑制牛皮杜鹃、笃斯越桔和东亚仙女木的生长。

土壤养分元素的含量与植物的生长息息相关,虽然增温使土壤 K、Al 和 Fe 元素含量增加,但三种植物叶中相应的矿质元素并没有都呈增加的趋势,这可能是土壤养分状况对植物生长的影响具有一定滞后性。另外,不同植物的相同种矿质元素对增温产生的效应并不完全相同,说明增温对苔原植物的影响存在一定的差异性,且具有一定的物种差异性。

4 结论

低温^[3-4]和养分的缺乏^[5-6]是限制高海拔、高纬度地区植物生长的主要因素,牛皮杜鹃、笃斯越桔和东亚仙女木作为长白山苔原优势植物,其矿质元素含量的变化可以在一定程度上说明增温对长白山苔原植被的影响。之前的研究显示^[22],短期的模拟增温加剧了 P 素对这三种植物生长的限制。本研究中,短期增温使牛皮杜鹃的 K 含量和笃斯越桔叶的 K、Al 和 Zn 含量发生明显变化,叶 K、Al 和 Zn 含量的增加将有利于增强植物的光合作用,促进植物的生长^[39]。同时三种植物叶的 K 含量、笃斯越桔叶 Al、Mg、Mn、Zn 和 Ga 含量以及东亚仙女木叶 Cu 和 Ga 含量受月份影响较大。为了更好的揭示增温对苔原植物的影响,长期而全方位的定位监测是尤为必要的。

参考文献 (References):

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group 1// Stocker T, Qin D H, Plattner G K, eds. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013: 1535-1535.
- [2] Billings W D, Mooney H A. The ecology of arctic and alpine plants. Biological Review, 1968, 43(4): 481-529.
- [3] Bliss L C. Adaptations of arctic and alpine plants to environmental conditions. Arctic and Alpine Research, 1962, 15(2): 117-144.
- [4] Körner C. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [5] Callaghan T V, Jonasson S, Nichols H, Heywood R B, Wookey P A. Arctic terrestrial ecosystems and environmental change. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1995, 352(1699): 259-276.
- [6] Klanderud K, Totland Ø. Simulated climate change altered dominance hierarchies and diversity of an alpine biodiversity hotspot. Ecology, 2005, 86(8): 2047-2054.
- [7] Gavito M E, Olsson P A, Rouhier H, Medina-Penñafiel A, Jacobsen I, Bago A, Azcón-Aguilar C. Temperature constraints on the growth and functioning of root organ cultures with arbuscular mycorrhizal fungi. The New Phytologist, 2005, 168(1): 179-188.
- [8] Jónsdóttir I S, Khitun O, Stenström A. Biomass and nutrient responses of a clonal tundra sedge to climate warming. Canadian Journal of Botany, 2005, 83(12): 1608-1621.
- [9] Sardans J, Peñuelas J, Prieto P, Estiarte M. Drought and warming induced changes in P and K concentration and accumulation in biomass and soil in a Mediterranean shrubland. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 261-271.
- [10] 周卫, 林葆. 土壤与植物中硫行为的研究进展. 土壤与肥料, 1997, (5): 8-11.
- [11] 张玉龙, 王喜艳, 刘鸣达. 植物硅元素与土壤硅素肥力研究现状和展望. 土壤通报, 2004, 35(6): 785-788.
- [12] Sardans J, Peñuelas J. Introduction of the factor of partitioning in the lithogenic enrichment factors of trace element bioaccumulation in plant tissues. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 115(1/3): 473-498.
- [13] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Warming and drought change trace element bioaccumulation patterns in a Mediterranean shrubland. Chemosphere, 2007, 70(5): 874-885.
- [14] Xiong Z T, Liu C, Geng B. Phytotoxic effects of copper on nitrogen metabolism and plant growth in *Brassica pekinensis* Rupr. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 64(3): 273-280.
- [15] Brun L A, Le Corff J, Maillet J. Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. Environmental Pollution, 2003, 122(3): 361-368.
- [16] 应小芳, 刘鹏, 徐根娣. 土壤中的铝及其植物效应的研究进展. 生态环境, 2003, 12(2): 237-239.

- [17] Pregitzer K S, King J S. Effects of soil temperature on nutrient uptake// BassiriRad H, ed. Nutrient Acquisition by Plants: An Ecological Perspective, Ecological Studies Volume 181. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 277-310.
- [18] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, Norby R J, Mitchell M J, Hartley A E, Cornelissen J H C, Gurevitch J. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543-562.
- [19] Emmett B A, Beier C, Estiarte M, Tietema A, Kristensen H L, Williams D, Peñuelas J, Schmidt I, Sowerby A. The response of soil processes to climate change; results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems*, 2004, 7(6): 625-637.
- [20] Walker M D, Wahren C, Hollister R D, Henry G H, Ahlquist L E, Alatalo J M, Bre-Harte M S, Calef M P, Callaghan T V, Carroll A B, Epstein H E, Jónsdóttir I S, Klein J A, Magnússon B, Molau U, Oberbauer S F, Rewa S P, Robinson C H, Shaver G R, Suding K N, Thompson C C, Tolvanen A, Totland Ø, Turner P L, Tweedie C E, Webber P J, Wooker P A. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5): 1342-1346.
- [21] Natali S M, Schuur E A G, Rubin R L. Increased plant productivity in Alaskan tundra as a result of experimental warming of soil and permafrost. *Journal of Ecology*, 2012, 100(2): 488-498.
- [22] 江肖洁, 胡艳玲, 韩建秋, 周玉梅. 增温对苔原土壤和典型植物叶片碳、氮、磷化学计量学特征的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 941-948.
- [23] Hollister R D, Webber P J, Tweedie C E. The response of Alaskan arctic tundra to experimental warming: differences between short- and long term responses. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 525-536.
- [24] Wahren C H A, Walker M D, Bret-Harte M S. Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow manipulation experiment. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 537-552.
- [25] Hudson J M G, Henry G H R. High Arctic plant community resists 15 years of experimental warming. *Journal of Ecology*, 2010, 98(5), 1035-1041.
- [26] Marion G M, Bockheim J G, Brown J. Arctic soils and the ITEx experiment. *Global Change Biology*, 1997, 3(S1): 33-43.
- [27] Debevec E M, MacLean S F J. Design of greenhouses for the manipulation of temperature in tundra plant communities. *Arctic and Alpine Research*, 1993, 25(1): 56-62.
- [28] 杨美华. 长白山的气候特征及北坡垂直气候带. *气象学报*, 1981, 39(3): 311-320.
- [29] 王小平. 不同分解方法对 ICP-AES 测定植物样品中元素含量的影响. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(4): 563-566.
- [30] Cernusca A. Bestandesstruktur, Bioklima und Energiehaushalt von alpinen Zwergstrauchbeständen. *Oecologia Plantarum*, 1976, 11: 71-102.
- [31] Sanchez P A. Properties and management of soils in the tropics. *Soil Science*, 1977, 124: 187-187.
- [32] BassiriRad H. Nutrient Acquisition by Plants: An Ecological Perspective. Ecological Studies Volume 181. Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K: Springer-Verlag, 2005.
- [33] 秦海, 李俊祥, 高三平, 李铨, 李蓉, 沈兴华. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征. *生态学报*, 2010, 30(5): 1247-1257.
- [34] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 76-82.
- [35] Llorens L, Peñuelas J, Estiarte M. Ecophysiological responses of two Mediterranean shrubs, *Erica multiflora* and *Globularia alypum*, to experimentally drier and warmer conditions. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119(2): 231-243.
- [36] Llorens L, Peñuelas J, Estiarte M, Bruna P. Contrasting growth changes in two dominant species of a Mediterranean shrubland submitted to experimental drought and warming. *Annals of Botany*, 2004, 94(6): 843-853.
- [37] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. London: Academic Press, 1995.
- [38] 满秀玲, 蔡体久. 东北山地灌木沼泽植物铜、锌分布特征及季节动态. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 32-36.
- [39] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学 (第六版). 北京: 高等教育出版社, 2008.