doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2015.04.001

长期增温对高寒草甸植物群落和土壤养分的影响

赵艳艳[1,4]，周华坤[1*]，姚步青[1]，王文颖[2]，董世魁[3]，赵新全[1]
(1.中国科学院西北高原生物研究所，青海 西宁 810008；2.青海师范大学，青海 西宁 810008；
3.北京师范大学，北京 100875；4.中国科学院大学，北京 100049)

摘要：采用国际冻原计划模拟增温效应的方法，研究了连续增温 16 年后高寒草甸和高寒灌丛的植物群落结构、地上地下生物量、物种多样性、土壤养分含量的响应，以期揭示长期增温对植物群落特征和土壤养分的影响。结果表明：与对照相比，长期增温使高寒草甸植物群落高度增加 18.4%，盖度降低 5%；灌丛群落高度增加 42.8%，盖度增加 12.9%。草甸群落地上生物量减少 23.6%，0～10，10～20，20～30 cm 的地下生物量分别减少 22.2%，38.6%，52.1%；灌丛群落地上生物量增加 15.1%，0～10，10～20，20～30 cm 的地下生物量分别增加 4.9%，17.5%，3.1%。草甸群落物种数减少 7%，灌丛群落的物种数减少 30%。长期增温使草甸和灌丛的土壤速效磷和全磷增加，而全钾降低，其他元素含量变化不一致。长期增温改变了高寒草甸和高寒灌丛的群落结构以及土壤养分含量，但对二者的影响不完全相同。

关键词：高寒草甸；高寒灌丛；开顶式生长室；增温；群落结构；生物量；土壤养分
中图分类号：S812 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-0435(2015)04-0665-07

The Influence of Long-term Simulating Warming to the Plant Community and Soil Nutrient of Alpine Meadow

ZHAO Yan-yan[1,4], ZHOU Hua-kun[1*], YAO Bu-qing[1],
WANG Wen-ying[2], DONG Shi-kui[3], ZHAO Xin-quan[1]
(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810008, China;
2. Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 3. Beijing Normal University, Beijing 100875;
4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The responses of plant community structure, aboveground biomass, belowground biomass, species diversity, soil nutrient content of alpine meadow and shrub to the continuous research warming of 16 years were studied by adopting the method of International Tundra Experiment (ITEX) in order to reveal the effects of long-term warming effects on community characteristics and soil nutrients. The results showed that compared with no warming plot, the community height of alpine meadow increased by 18.4%, the coverage reduced by 5%; the community height of alpine shrub increased by 42.8%, the coverage increased by 12.9%, the aboveground biomass of meadow community reduced by 23.6% and that of shrub community increased by 15.1%. The species number of alpine meadow reduced by 7%, while that of shrub reduced by 30%. Simulated warming caused available phosphorus and total phosphorus of meadow and shrub increased, the total potassium decreased, the changes of other nutrient contents were not consistent. Therefore, long-term warming changes the community structure and soil nutrient content of both alpine meadow and alpine shrub, but it is not exactly the same effect.

Key words: Alpine meadow; Alpine shrub; Open-top chamber; Warming; Community structure; Biomass; Soil nutrition

政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)第 4 次评估报告预

收稿日期：2014-06-25；**修回日期**：2014-08-31
基金项目：国家自然科学基金项目(31172247)(31201836)(31472135)；青海省自然科学基金项目(2013-Z-916)；中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202)；国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02)(2014BAC05B03)；青海省重点实验室发展专项资金计划(2013-Z-Y07)(2014-Z-Y01)资助
作者简介：赵艳艳(1989-)，女，河南兰考人，硕士研究生，研究方向为高寒草地气候变化生态学，E-mail：zhaoyanyan2013@126.com；*通信作者 Author for correspondence，E-mail：729492987@qq.com

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测，到本世纪末，全球平均气温升高 1.8～4.0℃[1]，而中国的平均气温将升高 1.9～5.5℃[2]。随着全球气候变暖和人类活动的加剧，青藏高原高海拔地区的平均气温在过去的 30 年内以每 10 年 0.25℃的速率增加[3]。青藏高原平均海拔 4000 m 以上，是世界上最高的高原，有“世界屋脊”和“第三极”之称。青藏高原高寒草甸生态系统极其脆弱，对人类干扰和由于温室效应引起的全球气候变化极其敏感，并对这些干扰和变化的响应具有超前性，成为全球变化的敏感区域和生物多样性的重点保护区[4]。因此研究高寒生态系统植被群落对模拟气候变化的响应对于理解群落响应温度升高的内部机制，及预测其在未来气候变化的背景下的动态有着重要的作用和意义。

20 世纪末，国际冻原计划(international tundra experiment, ITEX)使用统一的开顶式生长室(open top chamber, OTC)模拟增温对植被影响的试验方法研究了高纬度苔原生态系统对模拟气候变化的响应，发现温度升高对植物物候、生长、生殖、物种组成及群落结构均有着显著的影响[5-8]。温度控制着生态系统中许多生物化学反应过程的速率，且影响几乎所有的生物学过程，因此温度升高在很大程度上刺激高寒植物的生长发育，进而改变群落的组成和结构，已有的许多模拟气候变暖的定位试验研究都证明了该结论[9-10]。定位控制试验目前仍是研究全球变化最重要的手段[11]。为此，研究高寒草甸植被在全球变化中的响应与适应等过程也就成为诸多科学家所关注的问题。有关研究表明青藏高原草地植被活动在增强，并且植被活动的变化与气候变化(尤其是温度上升)密切相关[12]。本项研究以高寒草甸和灌丛为研究对象，采用国际冻原计划(ITEX)模拟增温效应对植被影响的方法研究了长期增温后高寒草甸和灌丛的群落结构、地上地下生物量、土壤养分含量的变化，以探讨高寒草甸和灌丛对长期模拟增温的响应，为预测全球气候变化对高寒草甸和灌丛的影响提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地区自然概况

研究地点在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站，其地处青藏高原东北隅的青海海北藏族自治州境内，祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河谷西段，N 37°29′～37°45′，E 101°12′～101°33′，海拔 3200～3250 m。居亚洲大陆腹地，具明显的高原大陆性气候，夏季风影响微弱。受高海拔条件的制约，仅有冷暖 2 季之别，干湿季分明；年平均气温 −1.7℃，1 月平均气温 −14.8℃，7 月平均气温 9.8℃。年平均降水量 600 mm，降水量主要集中在上半年，约占年降水量的 80%，蒸发量 1160.3 mm。10 月到翌年 4 月长达 7 个月时间的降水仅占年降水量的 20%。日照充足，在植物生长期日平均达 6.5 h，基本满足植物生长发育所要求的光照时间。无绝对无霜期，相对无霜期 20 d 左右，冷季寒冷、干燥和漫长，暖季凉爽、湿润和短暂。

1.2 样地设置

1997 年，在海北站矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛样地(大小均为 30 m×30 m)围栏封育，用开顶式生长室进行增温。分别建立圆台形开顶式玻璃纤维增温小室(OTC，图 1)8 个，每个 OTC 的基面积 1.66 m^2，顶面积 0.77 m^2，高度 0.4 m。同时在围栏内 OTC 外未增温的样方作为对照。

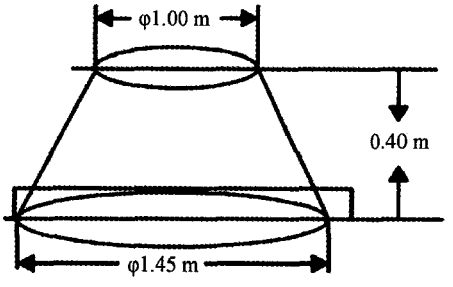

图 1 圆台形开顶式生长室示意图

Fig. 1 The sketch of the open top chamber

1.3 测定内容和方法

2012 年 7 月 20 日—23 日，用样方法在每个样地 OTC 内外，进行群落调查和地上生物量获取，并用根钻法获取地下生物量和土样。OTC 温室内气温比对照升高 1.0～2.0℃[13-14]。样方面积为 25 cm ×25 cm。

1.3.1 *群落结构* 在植物生长盛期分别统计 OTC 内及对照样方各种群的盖度和高度，重复 10 次。

1.3.2 *生物量* 地上生物量获取是在植物生长高峰期齐地面剪草，按不同植物种分开，80℃的恒温箱中烘干至恒重，并称重，归类。地下生物量用根钻获取。

1.3.3 *土壤养分含量* 分别在草甸和灌丛群落样地的 OTC 内外各随机选取 6 个重复，用土钻按 0～

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

10，10～20，20～30 cm 分层取土样，土样按测试项目的要求风干、磨碎过筛、装瓶供室内测试。分析项目为土壤有机质、全氮、全磷、全钾和速效的氮、磷、钾等。有机质用重铬酸钾外热法；全氮用凯氏定氮法；磷用 HCL-HF 消化钼锑抗比色法；钾用原子吸收分光光度计法；速效氮用碱解扩散法；速效钾用乙酸铵浸提法；速效磷用 Brayl 法[15-16]测定。

1.3.4 *物种多样性*　记录每个样方的物种数，统计平均值，计算 Shannon-Wiener 多样性指数。

物种多样性指标用物种丰富度（S）和 Shannon-Wiener 指数（H）表示。

2　结果与分析

2.1　增温对植物群落结构的影响

增温小室改善了植物群落的小气候环境，一定程度上满足了植物对热量的需求，改变了植物的生长和发育，对群落结构产生了一定的影响。但草甸和灌丛群落对增温的响应不完全相同。经 OTC 连续 16 年的增温处理后，与对照相比，OTC 内草甸、灌丛群落平均高度显著高于对照（$P<0.05$）（图 2）。增温下的灌丛群落平均盖度比对照增加 12.9%，差异达到显著水平（$P<0.05$），而增温下的草甸群落平均盖度比对照降低了 5%，未达到显著水平（图 3）。

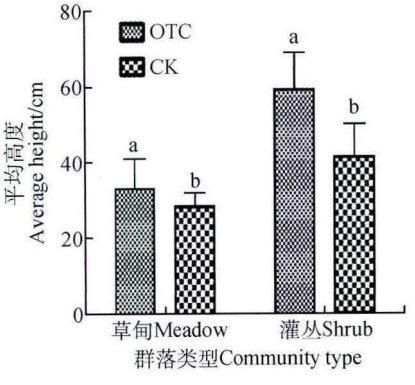

图 2　草甸、灌丛群落平均高度

Fig. 2　Average heights of meadow and shrub

2.2　增温对植物群落生物量的影响

模拟增温对不同群落的作用效果不同，长期增温使矮嵩草草甸的平均地上生物量比对照降低了 23.6%，未达到显著水平。而 OTC 温室内金露梅灌丛群落的平均地上生物量比对照增加了 15.1%，未达到显著水平（图 4）。

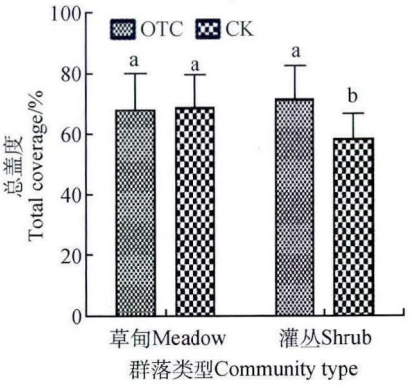

图 3　草甸、灌丛群落总盖度

Fig. 3　Total coverage of meadow and shrub

注：不同小写字母表示同一群落的增温和对照达到 5%水平，下同

Note: Different small letters mean significant difference at 5% level in the same community, the same as below

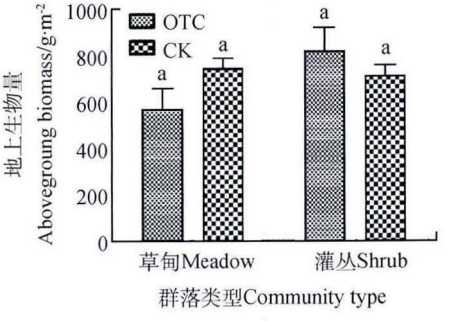

图 4　草甸、灌丛群落地上生物量

Fig. 4　Aboveground biomass of meadow and shrub

如图 5 所示，增温条件下草甸群落的各层地下生物量较对照均有所降低，未达到显著水平。就分配比例而言，OTC 内 0～10 cm 土层的地下生物量占总地下生物量的 70.7%，其比例大于对照样地的 65.2%，OTC 内外的 10～20 cm 地下生物量分配比例较接近，分别为 18.7% 和 20.2%，但在 20～30 cm 的分配比例中，OTC 内（10.6%）的分配比例要小于对照（14.7%）。而增温条件下金露梅灌丛的各层地下生物量均有所增加（图 6），未达到显著水平。就分配比例而言，增温与对照 2 个处理的各层生物量占总生物量的比例都比较接近，但就垂直分布而言，总体上都呈现从上到下地下生物量分布减少的规律。这种空间分布格局与土壤养分状况及高海拔地区土壤特性关系密切，大部分有机质和养分都储存于土壤表层，植物的主要根系生长于该层以尽量获取更多的资源以满足生长发育的需求。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

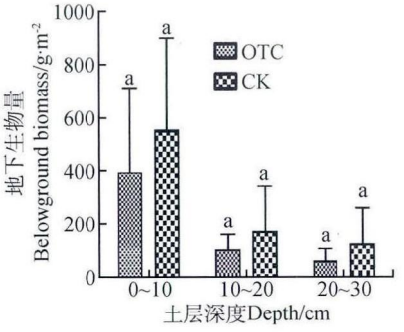

图5 草甸群落地下生物量

Fig. 5 Belowground biomass of meadow

2.3 增温对植物群落物种数的影响

与对照相比，增温使草甸群落物种数降低，而其Shannon-Wiener指数却增加了1%，未达到显著水平。OTC温室内金露梅灌丛群落的平均物种数比对照样地降低30%，Shannon-Wiener指数降低13%，差异达到显著水平($P<0.05$)(图7)。这种增温后不同群落表现出的不同结果与群落所处生长环境以及所含物种不同有关。

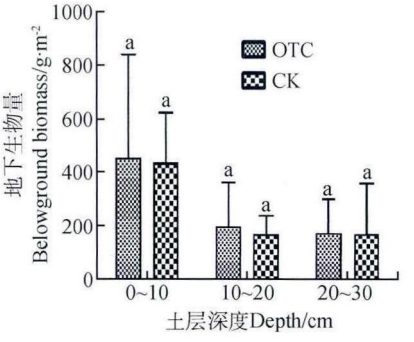

图6 灌丛群落地下生物量

Fig. 6 Belowground biomass of shrub

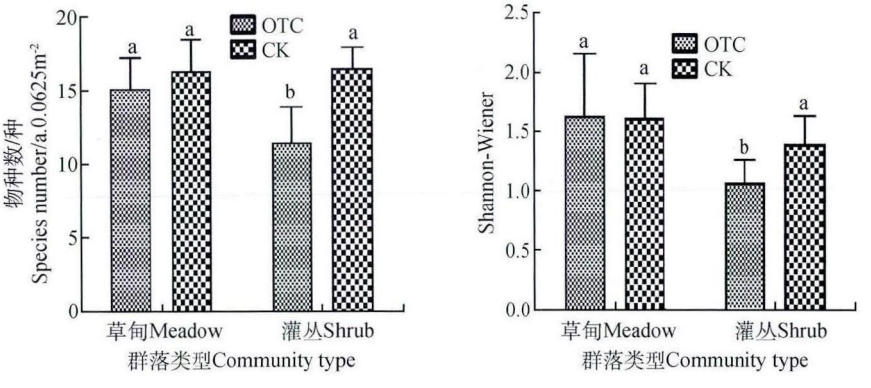

图7 草甸、灌丛群落多样性

Fig. 7 Diversities of meadow and shrub

2.4 模拟增温对土壤养分含量的影响

与对照相比，OTC内草甸群落0～10 cm的土壤养分含量中，速效氮、速效磷、速效钾和全磷增加，全氮、全钾、有机质降低，其中全磷的变化达到显著水平($P<0.05$)，速效钾的变化达到极显著水平($P<0.01$)。10～20 cm的土壤养分含量中，速效氮、速效磷、速效钾和全磷增加，全氮、全钾、有机质降低，其中全磷的变化达到极显著水平($P<0.01$)，速效钾的变化达到显著水平($P<0.05$)。20～30 cm的土壤养分含量中，速效钾、速效磷和全磷增加。速效氮、全氮、全钾和有机质降低。其中全磷和速效钾的含量变化达到显著水平($P<0.05$)。增温后土壤有机质、养分含量的减少，速效养分的增加，说明增温后土壤养分进行了分解，土壤供应养分的潜在水平降低。土壤全磷主要取决于土壤母质及质地，说明增温后加快了土壤母质磷的转化，磷的供应能力增加，土壤中不同元素含量的分配发生了变化。

OTC内灌丛群落0～10 cm的土壤养分含量中，速效磷、速效钾和全氮、全磷、有机质增加，速效氮和全钾降低，含量变化均未达到显著水平。10～20 cm的土壤养分含量中，速效磷、速效钾和全氮、全磷、有机质增加，速效氮和全钾降低，含量变化均未达到显著水平。20～30 cm的土壤养分含量中，速效磷和全氮、全磷、有机质增加，速效氮、速效钾和全钾的含量降低，其中速效磷的含量变化达到显著水平($P<0.05$)。土壤氮元素含量主要取决于植物生物量的归还，灌丛群落土壤全氮含量增加而速效氮养分含量降低，增温后降低了氮养分的分解能力。钾的全养分含量降低，增温后供应钾的潜在能力降低。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　草甸、灌丛群落土壤养分含量平均值

Table 1　The average nutrient contents in soil of meadow and shrub

	土层深度 Soil depth/ cm	有机质 Organic matter/ $g \cdot kg^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $g \cdot kg^{-1}$	全磷 Total phosphorous/ $g \cdot kg^{-1}$	全钾 Total potassium/ $g \cdot kg^{-1}$	速效氮 Available nitrogen/ $mg \cdot kg^{-1}$	速效磷 Available phosphorous/ $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $mg \cdot kg^{-1}$
草甸增温 Meadow warming	0～10	110.075	7.870	3.187	19.368	398.098	940.020	217.967
	10～20	135.132	7.915	3.599	19.275	393.558	888.107	213.767
	20～30	131.550	8.343	3.174	19.468	376.002	769.310	219.817
草甸对照 Meadow contrast	0～10	142.275	8.408	2.375	20.100	387.212	744.061	156.150
	10～20	139.568	8.453	2.145	20.282	386.432	470.814	158.133
	20～30	134.992	8.345	2.134	20.312	391.793	490.072	151.083
灌丛增温 Shrub warming	0～10	147.072	8.503	1.606	21.583	409.295	158.450	175.129
	10～20	160.727	7.983	1.413	22.033	445.860	171.817	139.747
	20～30	133.215	8.262	1.491	21.183	413.905	157.733	164.608
灌丛对照 Shrub contrast	0～10	122.350	7.585	1.370	21.943	512.375	153.917	121.058
	10～20	111.803	7.035	1.289	22.243	606.127	163.833	116.210
	20～30	105.400	6.502	1.182	22.573	673.210	160.100	88.817

3　讨论与结论

3.1　增温对植物群落结构的影响

本研究中,开顶式生长室起到了增温的作用。其设计允许棚内外空气的自由交换流通,并尽可能减少不利的生态影响,如:低光照条件、温度极值、非自然降水、CO_2 浓度聚集及湿度的影响等[17]。因为温室的阻挡作用,室内风速降低、空气湍流减弱,使热量不易散失,起了聚热作用,加之玻璃纤维被太阳辐射中红外线穿透的能力较好,所以小室内温度升高[13,18]。

研究结果表明,经温室处理的植物群落结构发生了明显的变化。增温后的草甸群落平均高度较对照区显著提高,而盖度差异不明显,因为外界环境(如温度、水分、CO_2 等)调控的影响作用于土壤,进而又影响了植物的生长,使植物类群发生变化,那些长势相对较高的物种的数量增多,所以出现盖度差异不显著,而高度增加、地上生物量降低的情况。同时,温度变化会影响植物对水分和养分的吸收,进而影响其生物量和生产力等的改变[19-20]。已有研究表明,增温对高寒草甸植物群落生物量、盖度、植物功能群、多样性指数等特征有不同程度影响,植物群落不同物种对空间和资源的竞争增强,其结果是有利于优势种的生长,改变了群落的平均高度[21-22]。

植物群落盖度和高度的变化反映了群落对空间资源特别是光资源的竞争程度。研究中增温后的灌丛群落的高度和盖度均显著高于对照,这与草甸群落的反应不完全相同,说明增温对不同群落的影响不同,16 年的长期增温更有利于灌丛群落的生长。而 Alward 等[23]的研究也表明,不同群落物种对增温的响应不同,有的对温度升高的响应更为敏感,从而破坏种间竞争关系,引起群落的优势种和组成改变。

3.2　增温对植物群落生物量的影响

生物量是生态系统重要的特征,也是衡量物种竞争的重要指标[24]。研究结果表明,增温处理使植物群落地上、地下部分生物量均发生了变化,首先表现为不同群落生物量变化趋势不一样,在草甸群落地上和地下生物量均降低,灌丛群落地上和地下生物量均增高。

由于环境、营养以及物种的差异,生物量生产对增温的响应表现各异。例如,Morgan 等[25]指出,在未来温度升高 2.6℃ 的条件下,美国矮草草原的生产力将增加。模拟全球变暖带来的温度升高和降水变化对植被生产力和土壤水分的影响表明,温度升高造成环境适应差的野古草(*Arundine hirta*)生产力显著下降,致使整个群落的生产力降低;将相同的自然植被用渗漏测定计移入海拔 50 m 的生产力显著低于移入高海拔 460 m 的生产力试验点,而对铁

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

杆蒿(*Artemisia sacrorum*)和黄背草(*Themdea japonica*)的影响较小[26]。本研究中,在没有额外水分和营养补充的条件下,长期增温有利于高寒灌丛群落的生长而不利于草甸群落的生长,这将会使高寒生态系统植被群落组成发生变化,进而对本地的畜牧业产生一定的影响。

3.3 增温对植物群落物种多样性及功能群多样性的影响

物种多样性的研究既是遗传多样性研究的基础,又是生态系统多样性研究的重要方面[27]。本研究发现增温使草甸和灌丛群落物种数均降低,草甸群落的 Shannon-Wiener 指数略有增加,而灌丛的 Shannon-Wiener 指数显著降低。这是因为草甸群落大多为一些低矮细小的物种,增温后物种数虽减少,但其多样性却略有增加。而灌丛群落的物种较草甸群落物种高大而且相对粗壮,增温后优势种在高度和盖度上都显著增加,对其他物种遮挡作用增加,抑制了其他物种的生长,物种数与多样性降低,这也说明增温对植物群落的作用因群落的不同而产生不同的影响。增温使植物群落组成发生了改变,而李英年等[28]研究也发现,增温对植物种演替的影响是重要的,原来以适应寒冷、湿中生境的矮嵩草为主的草甸植被类型逐渐退化,有些物种甚至消失,被以旱生为主的植被类型所替代。这些都势必会影响植物群落盖度、高度等的变化。

3.4 增温对土壤养分含量的影响

生态系统中植物的主要养分来源是土壤,所以土壤养分影响着地上植被的结构和生产能力。不同的土壤环境由不同植被类型组成,不同植被类型进而影响了土壤有机质的含量。增温后灌丛群落的生物量较草甸群落的高,也进一步促进了有机质含量的积累。由于草地土壤本身所具有复杂性、滞后性和缓冲性以及所处的土壤性质、植物组成等的不同,各个养分含量变化不一致。草甸群落植物凋落物进入土壤中的有机质量大于由于温度升高造成的土壤有机质的分解量,使土壤有机质含量增加,灌丛群落土壤有机质分解速度大于根系凋落物分解进入土壤中的有机质量,而使根系层有机质含量减少。

研究结果表明,草甸群落的各层全氮、全钾、有机质含量均降低,而其各层速效钾、速效磷含量均增加,说明增温改变了其养分总体组成含量,加速了养分的分解利用。灌丛群落各层的全氮、全磷、有机质、速效磷均增加,而其各层全钾、速效氮均降低,说明增温使灌丛群落对钾的利用增加,而增加了其他养分含量的储存。很多研究都表明,土壤类型、地形地貌以及水分等环境因子不同都会造成养分含量分布的变化[15,29]。土壤养分等指标的变化造成了植物群落生长环境的改变,影响了植物群落组成以及结构的变化,土壤是植物生长的基质,植物生长对土壤养分的吸收和利用反过来又促进土壤环境的改变,土壤和植被正是在这种相互影响相互作用中进行整体的改变。

综上所述,由于草甸和灌丛群落的生长环境和功能特性有所差别,其植物群落结构、生物量、物种多样性以及土壤养分含量对长期增温有不同的反应。长期增温改变了高寒草甸的植物群落特征及其土壤养分含量。

参考文献

[1] Metz B. Climate Change 2007-Mitigation of climate change: Working Group III Contribution to the fourth assessment report of the IPCC[R]. Cambridge University Press, 2007

[2] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等. 中国气候与环境演变评估(1)中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2005,1(1):4-9

[3] 姚檀栋,刘晓东. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报,2000,45(1):98-106

[4] 周华坤,周立,赵新全,等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究[J]. 科学通报,2006,51(1):63-69

[5] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, *et al*. Shifting plant phenology in response to global change[J]. Trends In Ecology & Evolution,2007,22(7):357-365

[6] Ding M, Zhang Y, Sun X, *et al*. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009 [J]. Chinese Science Bulletin,2012,58(3):396-405

[7] Na L, Genxu W, Yan Y, *et al*. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Soil Biology and Biochemistry,2011,43(5):942-953

[8] Yang Y, Wang G, Klanderud K, *et al*. Plant community responses to five years of simulated climate warming in an alpine fen of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Plant Ecology & Diversity,2014,161(3):601-610

[9] 刘伟,王长庭,赵建中,等. 矮嵩草草甸植物群落数量特征对模拟增温的响应[J]. 西北植物学报,2010,30(5):995-1003

[10] 徐振锋,胡庭兴,张远彬,等. 川西亚高山林线交错带糙皮桦和岷江冷杉幼苗物候与生长对模拟增温的响应[J]. 植物生态学报,2008,32(5):1061-1071

[11] 牛书丽,韩兴国,马克平,等. 全球变暖与陆地生态系统研究中

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的野外增温装置[J]. 植物生态学报,2007,31(2):262-271

[12] Xu W, Liu X. Response of vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau to global warming [J]. Chinese Geographical Science, 2007,17(2):151-159

[13] 周华坤,周兴民,赵新全. 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究[J]. 植物生态学报,2000,24(5):547-553

[14] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Dynamic and complex microclimate responses to warming and grazing manipulations[J]. Global Change Biology,2005,11(9):1440-1451

[15] 薛敬意,唐建维,沙丽清,等. 西双版纳望天树林土壤养分含量及其季节变化[J]. 植物生态学报,2003,27(3):373-379

[16] 李立平,张佳宝,邢维芹,等. 土壤速效氮磷钾测定进展[J]. 土壤通报,2003,34(5):483-488

[17] Hollister R D, Webber P J. Biotic validation of small open-top chambers in a tundra ecosystem[J]. Global Change Biology, 2000,6(7):835-842

[18] Marion G, Henry G, Freckman D, *et al*. Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems[J]. Global Change Biology,1997,3(S1):20-32

[19] Yang H, Wu M, Liu W, *et al*. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe[J]. Global Change Biology,2011,17(1):452-465

[20] Cantarel A M, Bloor J M G, Soussana J F. Four years of simulated climate change reduces aboveground[J]. Vegetation Science,2013,24(1):113-126

[21] Zheng Y, Yang W, Sun X, *et al*. Methanotrophic community structure and activity under warming and grazing of alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2012,93(5):2193-2203

[22] Wang S, Duan J, Xu G, *et al*. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow[J]. Ecology,2012,93(11):2365-2376

[23] Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming[J]. Science,1999, 283(5399):229-231

[24] 周国英,陈桂琛,赵以莲,等. 施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究[J]. 草业学报,2004,13(1):26-31

[25] Morgan J A, Lecain D R, Mosier A R, *et al*. Elevated CO2 enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C3 and C4 grasses of the Colorado shortgrass steppe [J]. Global Change Biology,2001,7(4):451-466

[26] 杨永辉. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(6):667-671

[27] 汪永华,陈北光. 物种多样性研究的进展[J]. 生态科学,2000, 19(3):50-54

[28] 李英年,赵亮,赵新全,等. 5 年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化[J]. 草地学报,2004,12(2):236-239

[29] 庞夙,李廷轩,王永东,等. 土壤速效养分变异及其分布特征[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1):114-120

(责任编辑　赵　欢)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net