

文章编号: 1000-4025(2011)04-0788-07

祁连山冷龙岭南坡移地植物叶片的碳氮特征

李英年^{1,3}, 赵新全^{1,3}, 张法伟^{1,3}, 杜明远², 汪诗平¹, 贺金生¹

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2 日本农业环境技术研究所, 日本筑波 3058604; 3 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001)

摘要: 在祁连山冷龙岭南麓坡地进行不同海拔高度土壤(0~40(30) cm 土层)和植被的整体双向移地实验, 以探讨气候变化对主要物种和群落碳、氮特征的影响。结果表明, 3 200 m 的麻花苳移地至高海拔时, 叶片碳、氮含量分别呈现出先增加后减少和一直增加的趋势, 而碳/氮值下降明显。3 400 m 的兰石草、珠芽蓼、垂穗披碱草、金露梅和鹅绒委陵菜 5 种植物大部分叶片碳、氮素含量及碳/氮呈现出随海拔增高而下降的趋势。3 600 m 的矮蒿草、雪白委陵菜和重齿风毛菊 3 种植物叶片碳、氮含量及碳/氮在各海拔之间变化不明显。3 800 m 的矮蒿草和矮火绒草的叶片碳、氮含量随海拔高度增加而增加, 碳/氮下降。整个群落来讲碳含量随海拔升高而降低, 氮含量和碳/氮比变化较小。研究发现, 各群落和物种对移地的响应方式因物种组成、原生状态不同而存在差异; 温度条件(以海拔升降模拟温度降升)对植被群落及主要植物叶片碳、氮含量和碳/氮比有一定影响, 尤其是当高海拔稀疏植被移地到低海拔时, 其叶片碳、氮和碳氮比与原生状况的植被群落及主要植物种相对变化较大。

关键词: 祁连山冷龙岭南麓; 移地实验; 植物碳、氮; 碳氮比

中图分类号: Q948.11 文献标志码: A

Response of Carbon and Nitrogen of Alpine Plant Leaves to Translocation Experiment along the Elevation Gradient in the Southern Slope of Lenglongling, Qilian Mountains

LI Ying-nian^{1,3}, ZHAO Xir-quan^{1,3}, ZHANG Fa-wei^{1,3},
DU Ming-yuan², WANG Shi-ping¹, HE Jin-sheng¹

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2 National Institute for Agro-Environmental Science, Tsukuba 3058604, Japan; 3 Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: Along the elevation gradients in the southern slope of Lenglongling, Qilian Mountains, we conducted a reciprocal translocation experiment on coherent quadrats of soil (0~40(30) cm) and turf, and analyzed responses of carbon and nitrogen of alpine dominant plant species and community to simulated climate change. The results showed that carbon contents of *Gentiana straminea* from 3 200 m increased and reached its peak at 3 600 m then declined, while its nitrogen contents were enhanced, and then its C:N (carbon nitrogen ratio) declined significantly along the elevation hoisting. The carbon, nitrogen contents and C:N of *Lancea tibetica*, *Polygonum viviparum*, *Elymus nutans*, *Potentilla fruticosa*, *Potentilla anserina* from 3 400 m showed the tendency of descending with altitude climbing. The carbon, nitrogen and C:N of *Kobresia humilis*, *Potentilla nivea*, *Saussurea katochaete* from 3 600 m changed undetectably to translocation experiment. The contents of carbon and nitrogen of *Kobresia humilis*, *Leontopodium nanum* from 3 800 m

*收稿日期: 2010-06-09; 修改稿收到日期: 2010-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070437); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB833501)

作者简介: 李英年(1962), 男(汉族), 研究员, 主要从事全球变化生态学研究。E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

increased, and C: N descended with elevation rising. The carbon contents of community was enhanced, nitrogen and C: N fluctuated little along with elevation rising. There were difference of response to reciprocal translocation experiment between plant species and community, due to species composition and primary location. The thermal factor (simulated warming from higher elevation to lower sites, vice versa, cooling) influenced the carbon, nitrogen and C: N of dominated species and plant community. The carbon, nitrogen and C: N of sparse vegetation fluctuated much more when transferred to lower elevation, because it was inhabited the maximum elevation of native species distribution.

Key words: Southern Slope of Lenglongling; Qilian Mountain; translocation experiment; plant carbon and nitrogen; C: N ratio

全球气候变化影响着陆地植被的生理活动和生态功能, 尤其在高寒高海拔地区, 植物的响应最为敏感^[1-3]。其中, 植物营养元素对气候变化的响应是研究的热点之一, 多年来研究者利用不同方法探讨模拟气候变化对植物群落等的影响, 如基于‘开顶温室’等^[4-7]进行的研究。但由于‘开顶温室’底面积较小, 降水、辐射均有所改变, 难以获取真实而全部的植被营养元素的响应信息。青藏高原由于其海拔高而生态系统脆弱, 在整个陆地生态系统中起到极为重要的作用, 进而成为全球变化研究的一个重要的理想平台。而基于高海拔山体自然梯度进行移栽实验, 由于其对生态系统扰动较少, 是研究植被对气候变化响应较好的方法^[7-8], 但对于青藏高原高寒草甸地区移栽实验的研究目前仍处于空白状态^[9]。

植物碳、氮在草地生态系统中的分布、储量和循环直接关系到草地生态系统功能的正常发挥, 且与生态系统的维持、发展和稳定性机制等有密切联系。但由于植被类型的多样性和各地区植物种类的差异, 植物碳素含量存在不一致性, 就是同类型植被在不同海拔高度其植物的碳、氮含量受温暖化程度的不同而存在一定差异^[10]。在高寒生态系统中营养元素是限制生态系统的结构、功能与稳定的主要成分之一^[11], 气候温暖化将加大土壤矿化速率, 进而深刻影响着植物的生理活动和物质循环^[12], 但这方面的研究较为不足。本研究于 2007 年 5 月在青藏高原东北缘祁连山南坡的自然海拔梯度, 对当地的 4 种植被类型(高草草甸、灌丛草甸、杂草类高寒草甸和稀疏植被)进行了不同高度土壤(0~40(30) cm 土层)和植被整体移栽(称土壤-植被移栽)的实验, 以期揭示不同海拔高度的土壤-植被移栽后植物碳氮对气候变化(随着海拔高度增加或下降而温度降低或升高)的响应。本研究报道了土壤-植被移栽 2 年后几种普遍存在的主要植物种的叶片碳、氮变化状况。

1 研究区自然概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷, 地理位置为 37°29′~37°45′N, 101°12′~101°23′E。该区地处大陆腹地, 属典型的高原大陆性气候, 年内无明显四季之分, 仅有冷暖两季之别。暖季湿润、短暂而凉爽, 冷季干燥、寒冷而漫长。年平均气温-1.7℃, 年极端最高气温 27.6℃, 极端最低气温-37.1℃, 年降水量 560 mm, 其中 80% 分布于植物生长季的 5~9 月。年平均日照 2 462.7 h^[13]。

1.2 材料与方法

试验区设在自海北站(3 200 m)开始向东 9 km 处祁连山冷龙岭南麓坡顶(4 400 m), 每升高 200 m 为一梯度, 建立 8 m×20 m 样地。3 200 m 海拔处为矮高草草甸, 优势种有矮高草(*Kobresia humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等, 计 19 科 40 属 54 种植物; 3 400 m 海拔处为金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸, 优势种除金露梅外, 还有垂穗披碱草、异针茅、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)等, 共 15 科 37 属 47 种植物; 3 600 m 和 3 800 m 分别为杂草类高寒草甸和稀疏植被, 群落主要优势种为青藏苔草、矮高草、早熟禾、异针茅、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)等, 共 12 科 24 属 31 种植物。试验区土壤以草毡寒冻雏形土(Mat-Cryic Cambisols, 3 200 m)和暗沃寒冻雏形土(Molt-Cryic Cambisols, 3 400~3 800 m)为主。3 900 m 以上因多为流石坡, 本研究未涉及。

2007 年 5 月对土壤-植被进行双向移栽试验, 即不同高度土壤(0~40(30) cm 土层)和植被整体按 1 m×1 m 大小, 移栽至其他海拔高度, 并将另外不同高度的相同大小的土柱反向移回, 每个移栽为

3次重复。为了消除移地挖掘对植被生长的可能影响,在每个高度处也按相同方法进行了挖掘平行移栽处理。于2008年8月下旬植物旺盛生长期收集移栽样方内群落多度较高的几种主要植物种的叶片,所有样品密封在塑料封口袋内带回实验室,微波炉杀青,在65℃恒温条件下烘至恒重后研磨,送北京大学测定植物有机碳和全氮。采用C/N元素分析仪(2400 II CHNS/O, Perkin Elmer, USA)测量碳、氮量(%干重)。其中每个样本取5~6 mg干粉末,燃烧温度为950℃,反应温度为640℃^[14]。对植物碳、氮含量及碳氮比随海拔高度的变化进行方差分析(差异性检验)和比较。需要说明的是:移地试验区水平距离仅在9 km范围内,可视降水变化不明显,又因山体坡向一致,可视光照强度基本相同;对有明显偏差(大于5倍标准差)的实验数据未列入分析。

2 结果与分析

2.1 移地植物各海拔高度主要种的叶片碳、氮和碳/氮比变化

从海拔3 200 m移往各海拔的移地样方中,选取麻花苳(*Gentiana straminea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、垂穗披碱草和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)的叶片进行碳、氮和碳氮比测定(表1)。其中,麻花苳叶片碳含量随海拔升高先增加后减少,3 200 m与3 600 m之间差异显著,其他各海拔高度之间差异不显著;其叶片氮含量随海拔高度

升高而逐渐增加,但3 200 m与3 400 m、3 600 m与3 800 m之间差异不显著;叶片碳氮比随海拔高度升高而逐渐降低,但3 600 m与3 800 m之间差异不显著。美丽风毛菊叶片碳含量在各海拔高度间差异不显著,叶片氮含量在3 200 m处显著高于其他海拔;叶片碳氮比随海拔高度升高先增加后下降。垂穗披碱草、鹅绒委陵菜叶片碳、氮和碳氮比随海拔高度变化不显著。

从3 400 m移往各海拔高度样方中,测定了兰石草(*Lancea tibetica*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、垂穗披碱草、金露梅和鹅绒委陵菜叶片碳、氮和碳氮比(表2)。其中,移栽后兰石草叶片碳、氮和碳氮比随海拔高度变化不显著,但叶片氮含量表现出随海拔高度升高先增加后降低的趋势,并在3 400 m海拔高度含量最高,3 200 m海拔含量最低,而叶片碳氮比表现为相反的趋势。珠芽蓼叶片碳含量随海拔升高有所降低,并以3 400 m最大,3 600 m最小,且3 400 m和3 600 m之间差异显著;氮含量随海拔升高有所增加,碳氮比随海拔高度升高逐渐降低,叶片氮含量和碳氮比在3 200 m与3 400 m之间差异不显著。垂穗披碱草叶片碳含量随海拔升高而降低,但3 200 m与3 400 m、3 600 m与3 800 m之间差异不显著;叶片氮含量随海拔升高而降低,碳氮比则随海拔升高而升高,叶片氮含量及碳氮比在3 200 m与3 800 m之间差异显著,其他各海拔高度之间差异不显著。金露梅叶片碳含量随海拔增加而降低;氮含量随海拔增加而增加,碳氮比则表现为随

表1 从海拔3 200 m移地到4个海拔高度的4种典型植物叶片的碳、氮含量及碳/氮变化特征

Table 1 The leaf carbon and nitrogen contents and C: N ratios of 4 typical plant species transplanted to 4 altitude levels from 3 200 m

植物种类 Species	指标 Character	海拔 Elevation/ m			
		3 200	3 400	3 600	3 800
麻花苳 <i>Gentiana straminea</i>	碳 C (%)	46.65±0.29b	47.06±0.28ab	47.46±0.09a	47.22±0.12ab
	氮 N (%)	2.38±0.11b	3.35±0.19b	4.59±0.19a	5.41±0.42a
	碳氮比 C/N	16.55±0.62a	14.15±0.81b	10.37±0.45c	8.83±0.64c
美丽风毛菊 <i>Saussurea superba</i>	碳 C (%)	45.07±0.25a	44.05±0.17a	44.10±0.66a	44.93±0.14a
	氮 N (%)	2.22±0.17a	1.88±0.095b	2.12±0.055b	2.21±0.041b
	碳氮比 C/N	20.30±0.24b	23.55±1.19a	20.84±0.83b	20.32±0.43b
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	碳 C (%)	45.49±0.0067a	45.40±0.16a	45.23±0.19a	45.03±0.34a
	氮 N (%)	2.51±0.087a	2.30±0.20a	2.91±0.32a	2.70±0.20a
	碳氮比 C/N	18.16±0.61a	20.03±1.69a	15.88±1.53a	16.84±1.30a
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	碳 C (%)	46.16±0.89a	46.30±0.32a	46.26±0.22a	
	氮 N (%)	2.06±0.034a	2.04±0.11a	2.45±0.39a	
	碳氮比 C/N	22.38±0.33a	22.80±1.03a	19.83±2.92a	

注:同行不同字母表示海拔水平间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters represent the significant difference among altitude levels at 0.05 level. The same as below.

表 2 从海拔 3 400 m 移地到 4 个海拔的 5 种典型植物叶片的碳、氮及碳/氮变化特征

Table 2 The leaf carbon and nitrogen contents and C: N ratios of 5 typical plant species transplanted to 4 altitude levels from 3 400 m altitude zone

植物种类 Species	指标 Character	海拔 Elevation/ m			
		3 200	3 400	3 600	3 800
兰石草 <i>Lancea tibetica</i>	碳 C(%)	47.54±0.27a	47.37±0.68a	47.55±0.38a	48.12±0a
	氮 N(%)	2.10±0.099a	2.52±0.47a	2.22±0.15a	2.17±0a
	碳氮比 C/N	22.70±0.99a	20.09±3.43a	21.59±1.34a	22.18±0a
珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	碳 C(%)	46.07±0.14ab	46.51±0.067a	45.91±0.28b	
	氮 N(%)	2.64±0.036b	2.88±0.099b	3.33±0.075a	
	碳氮比 C/N	17.46±0.27a	16.21±0.55a	13.81±0.23b	
垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	碳 C(%)	44.89±0.11a	44.63±0.13a	43.89±0.16b	43.75±0.43b
	氮 N(%)	4.67±0.41a	4.24±0.99ab	2.75±0.18ab	2.43±0.085b
	碳氮比 C/N	9.76±0.79b	12.23±3.66ab	16.10±0.94ab	18.07±0.81a
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	碳 C(%)	48.42±0.22a	48.60±0.21a	47.64±0.084b	47.41±0.28b
	氮 N(%)	2.74±0.13b	2.78±0.099b	3.87±0.11a	4.26±0.35a
	碳氮比 C/N	17.76±0.89a	17.50±0.57a	12.34±0.35b	11.28±0.87b
鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	碳 C(%)	46.41±0.31a	46.46±0.15a	44.99±0.73b	
	氮 N(%)	2.15±0.10a	2.16±0.043a	2.13±0.10a	
	碳氮比 C/N	21.67±0.91a	21.56±0.50a	21.15±0.65a	

表 3 从海拔 3 600 m 移地到 4 个海拔的 3 种典型植物叶片的碳、氮及碳/氮变化特征

Table 3 The leaf carbon and nitrogen contents and C: N ratios of 3 typical plant species transplanted to 4 altitude levels from 3 600 m

植物种类 Species	指标 Character	海拔 Elevation/ m			
		3 200	3 400	3 600	3 800
矮蒿草 <i>Kobresia humilis</i>	碳 C(%)	45.51±0.10a	45.42±0a	45.85±0.30a	45.37±0.14a
	氮 N(%)	1.79±0.029a	1.73±0a	1.88±0.075a	1.92±0.31a
	碳氮比 C/N	25.43±0.35a	26.25±0a	24.50±1.14a	24.86±3.88a
雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	碳 C(%)	45.10±0.16a	44.51±0.39a		44.45±0.038a
	氮 N(%)	3.30±0.13a	3.07±0.17a		2.84±0.018a
	碳氮比 C/N	13.69±0.59a	14.59±0.76a		15.63±0.084a
重齿风毛菊 <i>Saussurea katochaete</i>	碳 C(%)	42.25±0.34a	41.84±0.74a	41.52±0.54a	41.67±0.20a
	氮 N(%)	2.32±0.19a	2.63±0.075a	2.35±0.10a	2.74±0.25a
	碳氮比 C/N	18.27±1.31a	15.90±0.73a	17.74±0.93a	15.42±1.26a

海拔升高而降低趋势。鹅绒委陵菜叶片碳含量在 3 200 m 和 3 400 m 之间无显著差异, 但高于 3 600 m 处; 叶片氮含量和碳氮比随海拔高度的增加变化不显著。

从 3 600 m 移往各海拔的植被移地样方中, 选取矮蒿草、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*) 和重齿风毛菊(*Saussurea katochaete*) 的叶片进行叶片碳、氮和碳/氮测定(表 3)。其中, 矮蒿草叶片碳、氮含量和叶片碳氮比随海拔高度增加而变化不显著; 雪白委陵菜叶片碳、氮含量及碳氮比在各海拔高度之间差异性不显著, 但叶片碳、氮含量随海拔高度增加有所下降, 碳氮比随海拔高度升高有所增加。重齿风

毛菊叶片碳、氮和碳氮比在各海拔高度之间差异性不显著, 只是叶片碳含量随海拔升高先减少再增加, 并以 3 200 m 最大, 3 600 m 最小; 叶片氮随海拔升高呈现增加-减少-增加的趋势, 且在 3 800 m 处最大, 3 200 m 处最小; 叶片碳氮比随海拔高度升高表现为减少-增加-减少的趋势, 并在 3 200 m 处最大, 3 800 m 处最小。

从 3 800 m 移往各海拔的植被移地样方中, 选取矮蒿草和矮火绒草(*Leontopodium nanum*) 的叶片碳、氮和碳/氮进行测定(表 4)。由表 4 可知, 矮蒿草叶片碳、氮含量均随海拔升高而增加, 叶片碳氮比则随海拔升高而降低; 叶片氮在 3 800 m 与 3 200

表 4 从海拔 3 800 m 移地到 4 个海拔的 2 种典型植物叶片的碳、氮及碳/氮变化特征
Table 4 The leaf carbon and nitrogen contents and C: N ratios of 2 typical plant species transplanted to 4 altitude levels from 3 800 m altitude zone

植物种类 Species	指标 Character	海拔 Elevation/ m			
		3 200	3 400	3 600	3 800
矮嵩草 <i>K. humilis</i>	碳 C (%)	45.64±0.25a	45.84±0.10a	46.02±0.091a	46.12±0.12a
	氮 N (%)	1.99±0.043c	2.31±0.055bc	2.57±0.10ab	2.78±0.27a
	碳氮比 C/N	22.92±0.58a	19.90±0.52b	17.99±0.77b	16.77±1.56b
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	碳 C (%)	44.67±0.55a	43.57±0.43ab	44.55±0.64a	41.55±1.14b
	氮 N (%)	2.33±0.11b	2.53±0.14b	2.93±0.23ab	3.31±0.37a
	碳氮比 C/N	19.24±0.76a	17.30±0.92ab	15.35±0.94b	12.83±1.34c

m 和 3 400 m 之间差异显著, 3 200 m 海拔高度处的碳氮比与其他海拔高度处碳氮比也差异显著。矮火绒草叶片碳含量随海拔高度升高表现出先减少再增加而后再减少的趋势, 并在 3 200 m 处最大, 3 800 m 处最小, 且除 3 200 与 3 800 m 之间差异显著外, 其他各高度间差异不显著; 叶片氮含量随海拔高度升高逐渐增加, 且除 3 800 m 与 3 200 m、3 400 m 之间差异显著外, 其他各海拔高度之间差异不显著; 叶片碳氮比随海拔高度升高逐渐减低, 并且除 3 400 m 与 3 200 m、3 600 m 之间差异不显著外, 其他各海拔之间差异均达到显著水平。

2.2 移地植物群落的碳、氮含量及碳氮比的变化特征

移地样地植物群落的叶片碳含量变化如图 1, a 所示。从 3 200 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落碳含量随海拔高度升高而逐渐降低, 并在 3 200 m 与 3 800 m 海拔高度之间差异显著, 其他各海拔之间差异不显著; 从 3 400 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落碳含量随海拔高度升高呈现先减少再增加的趋势, 并在海拔 3 600 m 处最低, 3 200 m 处最高, 且 3 200 m 与 3 600 m 海拔高度之间差异显著, 而其他各海拔之间差异不显著; 从 3 600 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落的植物碳含量随海拔高度升高先降低再增加后又降低, 并于 3 400 m 海拔处最小, 3 200 m 海拔处最大, 但各海拔之间差异不显著; 从 3 800 m 海拔移往各海拔高度的植物群落的植物碳含量随海拔高度升高而先减少再增加, 并以 3 600 m 处最小, 3 200 m 处最大, 且除 3 600 m 与 3 200 m、3 400 m 之间差异显著外, 其他各海拔之间差异不显著。

由移地样地植物群落的植物氮含量变化情况 (图 1, b) 可知, 从 3 200 m 海拔高度移往各海拔高度的群落的植物氮含量随海拔升高表现为减少-增加-减少的趋势, 且在 3 400 m 海拔处最低, 3 600 m

海拔处最高, 但各海拔高度间差异不显著; 从 3 400 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落的植物氮含量随海拔高度升高而先减少再增加后又减少, 并在 3 400 m 海拔处最低, 3 200 m 海拔处最高, 且各

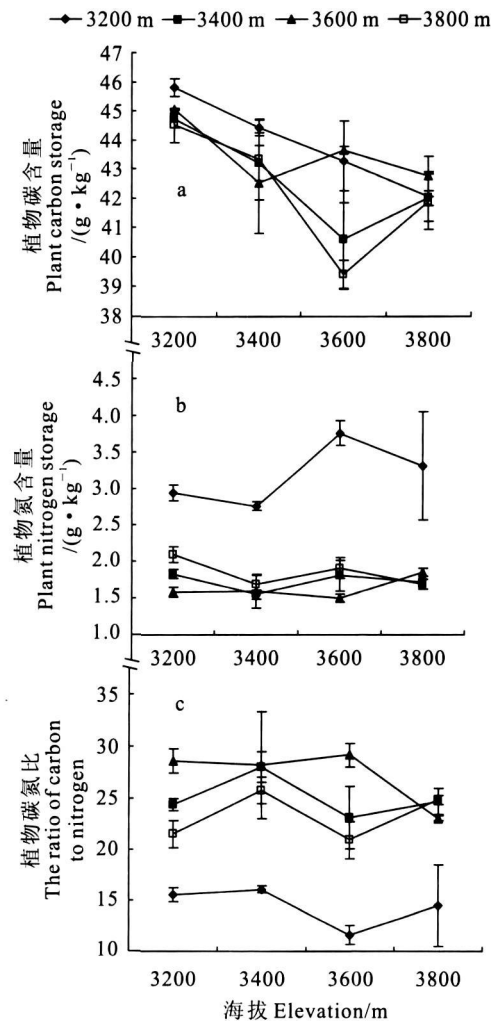


图 1 植物群落的植物碳(a)、氮(b)及碳氮比(c)的变化特征
图例表示植物的原生地

Fig. 1 Plant carbon content (a), nitrogen content (b) and C: N ratios variation in different plant communities

The label indicates the original habitat

海拔之间差异不显著; 从 3 600 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落的植物氮含量随海拔高度升高表现出增加-减少-增加的趋势, 其中的 3 600 m 海拔处最小, 3 800 m 海拔处最大, 但各海拔之间差异不显著; 从 3 800 m 海拔高度移往各海拔高度的植物群落的植物氮含量随海拔高度升高而呈现先减少再增加后又减少的趋势, 并以 3 400 m 海拔处最小, 3 200 m 海拔处最大, 且 3 200 m 与 3 400 m、3 800 m 海拔之间差异显著, 而其他各海拔之间差异不显著。

图 1, c 显示, 从 3 200 m 海拔移往各海拔高度的移地样地内植物群落的碳氮比随海拔高度升高呈先增加再减少而后又增加的趋势, 3 600 m 海拔最低, 3 400 m 海拔最高, 各海拔之间差异不显著; 从 3 400 m 海拔移往各海拔高度的植物群落的植物碳氮比随海拔高度升高先增加再减少后又增加, 并在 3 600 m 海拔最低, 于 3 400 m 海拔最高, 但各海拔之间差异不显著; 从 3 600 m 海拔移往各海拔高度的植物群落的植物碳氮比随海拔高度升高而呈现减少-增加-减少的变化趋势, 并且于 3 800 m 海拔处最小, 3 600 m 海拔处最大, 但各海拔之间差异不显著; 从 3 800 m 海拔移往各海拔高度的植物群落的植物碳氮比随海拔高度升高呈增加-减少-增加的趋势, 并以 3 600 m 海拔处最小, 3 800 m 海拔处最大, 且除 3 800 m 与 3 200 m、3 600 m 海拔之间差异显著外, 其他各海拔之间差异不显著。

3 讨论与结语

气候因子和海拔高度可能通过影响植物的生长期长短以及环境养分的可利用性间接调控植物叶元素的计量变化^[15-16], Han 等^[17]的研究表明随着纬度增加(年均温度降低), 植物叶氮磷含量增加。一般来说, 随着海拔/纬度的增加, 植物叶寿命和单位面积的叶氮含量都随之增加, 碳含量降低, 但也有研究认为单位重量的叶氮含量在草本和落叶木本植物中也具有随海拔增高而增加的特点^[18]。本移栽实验研究区年平均气温从 3 200 m (-0.4℃) 到 3 800 m (-1.6℃) 共下降 1.2℃, 而在植物生长期温度下降更为明显, 如 7 月的月平均气温从 3 200 m (10.1℃) 到 3 800 m (7.6℃) 下降了 2.5℃, 同时因研究区距离仅在 9 km 范围内, 可认为降水分布变化基本均匀, 同时移栽实验同处同一坡向, 光照也一致。因而, 随海拔高度不同引起的温度变化导致了植物的碳、氮及碳氮比发生改变。但移地实验也发现, 移栽后几种主要植物叶片碳和氮含量随海拔高度的变化

规律不尽相同, 其中随海拔升高表现的先降低再升高后又降低的物种较多, 也有随海拔高度的升高而降低的, 与上述研究^[18]有一定区别, 可能与不同的生态系统对模拟气候变化的长期和短期响应的不同有关^[7, 12]。

通过移地实验发现, 植被从海拔 3 200、3 400 和 3 800 m 移往各海拔高度后其植物群落碳含量变化出现一定差异, 表现出移到 3 600 m 海拔的低于 3 200 m 处。植物群落氮含量与碳氮比虽然随海拔高度有一定的变化, 但从差异性分析来看, 只有 3 800 m 高度的植被移地后植物群落氮含量与碳氮比有部分随海拔高度不同有一定的差异, 其他 3 个高度的植被类型移地后所发生的差异性很小或不显著。从 3 200 m 平行或移到更高海拔的植被中, 麻花苻、美丽风毛菊、垂穗披碱草和鹅绒委陵菜 4 种植物叶片碳素含量除麻花苻随海拔高度变化较大外, 其他 3 种植物变化不甚明显; 而 4 种植物中麻花苻与美丽风毛菊的叶片氮素含量、碳氮比均随高度不同发生了变化, 垂穗披碱草、鹅绒委陵菜变化不大。从 3 400 m 平行或移栽到 4 个不同海拔高度的植被中, 兰石草、珠芽蓼、垂穗披碱草、金露梅和鹅绒委陵菜 5 种植物叶片移地后碳素含量除兰石草在各海拔高度之间无显著差异外, 其他 4 种植物叶片碳素在各海拔间存在显著差异; 4 种植物中除兰石草与鹅绒委陵菜的叶片氮素、碳氮比在各海拔之间无显著差异外, 其他 2 种在各海拔间差异显著。从 3 600 m 平行或移栽到 4 个不同海拔高度的植被中, 矮蒿草、雪白委陵菜和重齿风毛菊 3 种植物叶片的碳、氮、碳/氮在各海拔之间都不存在显著差异。而从 3 800 m 平行或移栽到 4 个不同海拔高度的矮蒿草和矮火绒草群落, 其矮蒿草的叶片碳含量在不同海拔高度之间差异不显著, 而矮火绒草则出现一定的差异性。以上结果印证了不同植物物种具有不同的响应方式, 即使同一物种其原始状态不同也可导致其响应出现差异^[12], 从另一方面也说明了高寒生态系统响应的复杂性^[2]。

虽然移地 2 年后观测分析了植被群落及主要植物叶片碳、氮和碳氮比的变化情况, 但发现移地 2 年植被群落及主要植物叶片碳、氮和碳氮比在不同海拔高度发生了一定的变化。同时, 我们对移地 2 年后土壤碳氮的短期变化特征分析发现^[19], 土壤-植被移植后土壤因原生状态不同而存在差异, 移地后土壤有机质含量总体表现出随海拔升高而升高, 部分移植后在海拔 3 600 到 3 800 m 处略有下降, 而

土壤全氮变化比较复杂;从不同高度移植到各海拔高度后,除从 3 400 m 移到各海拔的土壤碳氮比先升高后降低外,其他 3 个高度移植后土壤碳氮比随海拔升高而升高。显示出受气候影响和原生植被类型差异,土壤碳、氮及碳氮比波动变化明显。这些说明温度条件(随海拔升高温度降低,或反向温度升高)对植被群落及主要植物叶片碳、氮和碳氮比有一定影响。特别是高海拔植物由于长期处在当地植物生长上限,是长期适应当地恶劣环境的产物,当移到

低海拔(下移变暖)时,与原生状况的植被群落及主要植物叶片碳、氮和碳氮比相比变化较大。移地后温度的影响更为敏感。同时发现,随物种的不同其植被群落及主要植物叶片碳、氮和碳氮比表现不同。由于本实验首次在青藏高原北部南坡进行,可填补青藏高原植被移地实验的空白,但气候对植被和土壤碳氮影响是一个长期的过程,为此,其研究结果有一定时间尺度的局限,对于移地后长期的影响还有待随移地时间的延长进行进一步研究和分析。

参考文献:

- [1] ALSOS I G, EIDSEN P B, EHRICH D, *et al.* Frequent long distance plant colonization in the changing Arctic[J]. *Science*, 2007, 15: 1 606– 1 609.
- [2] WALKER M D, WAHREN C H, HOLLISTER R D, *et al.* Plant community responses to experimental warming across the tundra biome [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103: 1 342– 1 346.
- [3] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, *et al.* Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416: 389– 395.
- [4] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7: 1 170– 1 179.
- [5] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17: 541– 557.
- [6] LIU WEI (刘伟), WANG CH T (王长庭), ZHAO J ZH (赵建中), *et al.* Responses of quantity characteristics of plant community to simulating warming in alpine *Kobresia humilis* Meadow Ecosystem[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2010, 30(5): 995– 1 003(in Chinese).
- [7] WOOKEY P A, AERTS R, BARDGETT R D, *et al.* Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of arctic and alpine ecosystems to environmental change[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15: 1 153– 1 172.
- [8] XU ZH F (徐振锋), HU T X (胡庭兴), ZHANG Y B (张远彬), *et al.* Freezing damage in early spring induced by simulated global warming: a case study in *Abies faxoniana* [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, 29(11): 6 275– 6 280(in Chinese).
- [9] XUE X J (薛晓娟), LI Y N (李英年), ZHANG F W (张法伟), *et al.* The clonal growth characteristics of *Poa annua* in transplanted experiment on vertical zone southern slope of Lenglongling, Qilian Mountains[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2009, 29(10): 2 070– 2 075(in Chinese).
- [10] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 44– 77.
- [11] CHAPIN F, SHAVER G R. Physiological and growth responses of arctic plants to field experiments simulating climatic change[J]. *Ecology*, 1996, 77: 822– 840.
- [12] JAGERBRAND A K, ALATALO J M, CHRIMES D, *et al.* Plant community responses to 5 years of simulated climate change in meadow and heath ecosystems at a subarctic alpine site[J]. *Oecologia*, 2009, 161: 601– 610.
- [13] LI Y N (李英年), ZHAO X Q (赵新全), CAO G M (曹广民), *et al.* Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station[J]. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2004, 23(4): 558– 567(in Chinese).
- [14] HAN W X (韩文轩), WU Y (吴漪), TANG L Y (汤璐瑛), *et al.* Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (Nat. Sci. Edi.) (北京大学学报·自然科学版), 2009, (5): 855– 860(in Chinese).
- [15] MENG T T (孟婷婷), NI J (倪健), WANG G H (王国宏). Plant functional traits, environments and ecosystem functioning[J]. *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, 31(1): 150– 165(in Chinese).
- [16] QI J (祁建), MA K M (马克明), ZHANG Y X (张育新). Comparisons on leaf traits of *Quercus liaotungensis* Koidz on different slope positions in Dongling Mountain of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, 28(1): 122– 128(in Chinese).
- [17] HAN W X, GUO D L, ZHANG Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 377– 385.
- [18] WOODWARD F I. Ecophysiological studies on the shrub *Vaccinium myrtillus* L. taken from a wide altitudinal range[J]. *Oecologia*, 1986, 70(4): 580– 586.
- [19] LI Y N (李英年), ZHANG F W (张法伟), XUE X J (薛晓娟), *et al.* The initial response of soil carbon and nitrogen to reciprocal transplantation on the southern slope of Lenglongling in Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2010, 32(4): 810– 815(in Chinese).