

DOI: 10.5846/stxb201504300895

郭金停, 韩凤林, 布仁仓, 胡远满, 马俊, 聂志文, 朱菊兰, 任百慧. 大兴安岭北坡多年冻土区植物群落分类及其物种多样性对冻土融深变化的响应. 生态学报, 2016, 36(21): - .

Guo J T, Han F L, Bu R C, Hu Y M, Ma J, Nie Z W, Zhu J L, Ren B H. Classification of plant communities and species diversity responses to changes in the permafrost depths of the north slope of the Great Khingan Mountain valley of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

大兴安岭北坡多年冻土区植物群落分类及其物种多样性对冻土融深变化的响应

郭金停^{1,2}, 韩凤林^{1,2}, 布仁仓^{1,*}, 胡远满¹, 马俊^{1,2}, 聂志文^{1,2}, 朱菊兰³, 任百慧^{1,2}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 沈阳师范大学, 沈阳 110034

摘要: 气候变化背景下冻土环境对地上植物群落的影响备受关注。鉴于此, 本研究选择了大兴安岭北坡作为研究区, 应用双向指示种分析 (TWINSpan) 和典范对应分析法 (CCA) 对大兴安岭北坡不同冻土融深的 30 个样地进行了群落分类, 分析了物种多样性对冻土融深的响应。结果表明, 1) 研究区 30 个沟谷冻土样地植物群落可划分为 3 个群丛组, TWINSpan 的分类结果很好的反映了群丛组的分布与冻土融深的关系, 即随着冻土融深由浅变深, 群落由柴桦 (*Betula fruticosa*) + 狭叶杜香 (*Ledum palustre* var. *angustum*) - 苔草 (*Carex subpediformis*) 群丛组逐渐过渡到柴桦 (*Betula fruticosa*) - 苔草 (*Carex subpediformis*) 群丛组和柴桦 (*Betula fruticosa*) + 细叶沼柳 (*Salix rosmarinifolia*) - 苔草 (*Carex subpediformis*) 群丛组, 并在 CCA 二维排序图上得到了验证; 2) 地上植物群落的物种多样性指数随着冻土融深的增加表现出先上升后下降的单峰变化趋势; 在 50cm < PMD ≤ 150cm 时, 物种多样性指数较高。本研究结果对冻土区的森林管理以及生物多样性保护具有一定地指导意义。

关键词: 大兴安岭北坡; 冻土融深; 物种多样性; TWINSpan; CCA

Classification of plant communities and species diversity responses to changes in the permafrost depths of the north slope of the Great Khingan Mountain valley of Northeast China

GUO Jinting^{1,2}, HAN Fenglin^{1,2}, BU Rencang^{1,*}, HU Yuanman¹, MA Jun^{1,2}, NIE Zhiwen^{1,2}, ZHU Julan³, REN Baihui^{1,2}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shenyang normal university, Shenyang 110034, China

Abstract: The Great Khingan Mountains, located in northeastern China, feature zonal permafrost. Lying on the southern edge of the Eurasian permafrost boundary, the permafrost region of the northeast portion of the Great Khingan Mountains is one of the plant communities most sensitive to the effects of global warming. Permafrost is gradually degrading from south to north, because of the effects of human activity and environmental changes such as global warming. The degradation of permafrost leads to changes in the characteristics of permafrost plant communities, such as species composition, species diversity, and biomass. The impacts of permafrost on vegetation have become a key research topic in the field of climate

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CBA01807); 先导专项 (XDA05050200); 国家自然科学基金项目 (41371198)

收稿日期: 2015-04-30; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: burc@iae.ac.cn

change research. However, previous studies of permafrost have mostly focused on the distribution of permafrost, and so the mechanistic connection between permafrost and environmental factors, and the impacts of permafrost degradation on community composition and structure have not been the focus of much quantitative research. Thus, the plant communities of 30 plots on the north slope of the Great Khingan Mountains were classified according to permafrost depth, using two-way indicator species analysis (TWINSpan) and canonical correspondence analysis (CCA). Accordingly, the effects of permafrost depth on plant species diversity were analyzed using these plots. The results indicate the following. (1) Plant communities were categorized into three plant associations, and as the permafrost depths changed along a gradient from shallow to deep, plant associations changed from *Betula fruticosa* + *Ledum palustre* var. *angustum*-*Carex subpediformis* to *Betula fruticosa*-*Carex subpediformis* and *Betula fruticosa* + *Salix rosmarinifolia*-*Carex subpediformis*. These relationships were validated by CCA ordination. In addition, permafrost melting depth (PMD), topography, and soil moisture could together explain 38% of the community change. Their combined effect was the biggest explanatory factor for community change. (2) The species diversity index increased trend initially (in shallow permafrost) and decreased as the permafrost melting depth increased. It reached its maximum value at about 50—150 cm deep. When $PMD \leq 50$ cm and $PMD > 150$ cm, the species richness and diversity index are low, and the significant difference. Patrick index and melting permafrost depth has significant correlation ($R^2 = 0.58$, $P < 0.58$). When $PMD \leq 50$ cm, the species richness of the communities was higher, at 23.83 ± 2.44 ; when $50 < PMD \leq 150$ cm, it was 26.36 ± 2.01 ; and when $PMD > 150$ cm, it fell sharply to 21.14 ± 1.57 . The Pielou index and Shannon-Wiener index with the increase of the permafrost melts deep appeared a trend of reducing the rise, and when $50 < PMD < 150$ cm, the Pielou index and Shannon-Wiener index value were significantly higher than those of other permafrost melts deep under the index value. The Simpson index values fell significantly when $PMD > 150$ cm. This study provides a theoretical basis for the prediction of trends in the variation of plant community composition after the degradation of permafrost. It is also important for the development and implementation of agriculture and forestry in permafrost areas. In addition, it would be an effective guide for forest management and biodiversity conservation efforts in permafrost regions.

Key Words: The Great Khingan Mountains; permafrost deeps; species diversity; TWINSpan; CCA

高寒生态系统是高寒环境下多年冻土的冻融交替作用发展起来的一种特殊生态系统^[1],多年冻土的发育程度是维持其生态平衡的物质基础。大兴安岭位于欧亚大陆多年冻土带南缘,也是我国多年冻土的发育地之一,具有地温高、冻土厚度浅、热稳定性差、对气候变暖的反应十分敏感等特点^[2-3]。由于气候变暖,大兴安岭多年冻土正在由南向北逐步消退^[4-5],主要表现为最大季节融化深度增大、冻土厚度减薄、地温升高、融区扩大以及多年岛状冻土消失等^[6]。这种变化将对区域生态系统产生巨大影响,主要表现为植物群落结构、物种多样性以及物种分布等诸多结构和生态功能发生不同程度的变化^[7-9],并由此导致高寒生态系统消退加速^[10-12],继而对整个生态系统产生影响^[13-14]。因此认清植物群落对冻土融深变化的响应特征是研究大兴安岭冻土区植被恢复和物种多样性保护的首要工作。

迄今为止,对大兴安岭冻土的研究多局限于冻土分布、冻土的退化模拟、资源保护等^[15-18],而关于物种多样性对冻土融深变化响应的研究尚见报道。为此,本文应用双向指示种分析法(TWINSpan)和典范对应分析法(CCA),对大兴安岭北坡冻土区的30个植被群落进行了排序和分类,并分析了群落变化的主要影响因子以及物种多样性对冻土融深的变化规律,旨在为冻土退化及其对全球变化的响应研究提供理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区的自然概况

研究区地处大兴安岭北坡($N50^{\circ}01'01''$ — $53^{\circ}26'25''$, $E119^{\circ}07'02''$ — $121^{\circ}49'17''$),海拔620—960m。该地

区属寒温带大陆性季风气候,冬季严寒而漫长,年均气温 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $350\sim 550\text{mm}$,无霜期 $80\sim 100\text{d}$ 。研究样地位于草地生态系统与森林生态系统的过渡带,物种组成较为丰富,多数物种属于寒温带物种,少数属于温带物种;植物群落的垂直结构比较简单,成层现象明显,分别由乔木层、灌木层、草本层和地被层四个层次组成。其中乔木层由兴安落叶松(*Larix gmelinii*)老头林和少量白桦(*Betula platyphylla*)组成;灌木层物种较多,其中柴桦(*Betula fruticosa*)、狭叶杜香(*Ledum palustre var. angustum*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)等为冻土植被群落的特征种;草本层物种最多,其中苔草(*Carex subpediformis*)等为草本层的优势种;地被层主要由中位泥炭藓和白齿泥炭藓等各种泥炭藓所覆盖^[19];土壤类型主要是草甸土和沼泽土,有机质含量较高,水分、养分丰富,土质较疏松,地表有积水^[20]。

1.2 样方调查

2014年7月,采用系统取样方法,在研究区内选择基本相似生境条件下的30块样地进行调查(表1为调查样地基本情况)。每个样地随机设置 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 灌木样方6个, $1\text{m}\times 1\text{m}$ 草本样方9—12个,以确保每个样地90%的物种被调查到。对于高度小于2m或胸径小于2.5cm的乔木,作为灌木调查。在每个样方中记录植物的名称、多度、盖度、高度等数量指标,以及样地所在的经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向、冻土融深等环境因子,并对每个样地活动层进行了土壤采样。

表1 调查样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling plots

样地 Sample	经度/ $(^{\circ})$ Longitude	纬度/ $(^{\circ})$ Latitude	海拔/m Alt	土壤含水量/% SWC	坡度/ $(^{\circ})$ Slo	融深/cm PMD
1	120.676	51.3124	630	0.402	0	3
2	120.677	51.3137	625	0.421	0	7
3	120.675	51.3110	638	0.410	7	12
4	120.677	51.3121	670	0.406	9	15
5	120.679	51.3139	665	0.392	12	18
6	120.680	51.3153	643	0.397	8	27
7	120.675	51.3154	652	0.373	7	29
8	120.673	51.3148	699	0.387	10	34
9	120.672	51.3140	690	0.396	13	40
10	120.677	51.3165	687	0.395	0	42
11	120.676	51.3171	705	0.386	0	45
12	120.671	51.5184	732	0.390	0	50
13	120.670	51.5177	774	0.355	20	58
14	120.699	51.5172	798	0.326	25	60
15	120.716	51.5241	807	0.311	20	75
16	120.715	51.5234	889	0.299	29	90
17	120.975	51.2511	871	0.340	28	108
18	120.975	51.2544	856	0.347	16	120
19	120.972	51.2629	893	0.298	19	128
20	120.735	51.1440	905	0.316	20	140
21	120.733	51.1461	921	0.305	16	142
22	120.729	51.1486	933	0.299	14	147
23	120.728	51.1497	942	0.264	30	—
24	120.954	51.1733	908	0.256	32	—
25	120.955	51.1753	885	0.244	30	—
26	120.957	51.1765	921	0.197	28	—
27	120.951	51.1775	903	0.208	25	—
28	120.953	51.1758	941	0.255	30	—
29	120.952	51.1786	938	0.199	28	—
30	120.950	51.1788	951	0.202	37	—

“—”代表在 $0\sim 150\text{cm}$ 范围内没有挖到冻土

1.3 研究方法

1.3.1 地理数据的获取

通过 GPS 获取每个样点的经度、纬度、海拔高度、坡度(表 1)。

1.3.2 土壤数据的获取

将取土样放置烘箱,烘至恒重,土壤水分中自由态水以蒸汽形式全部散失掉,再称重量从而获得土壤含水量。采用直接挖深法获得每个样点的冻土融深(表 1)。

1.3.3 群落分类

采用双向指示种分析法(TWINSPAN)和典范对应分析法(CCA)^[21],对大兴安岭北坡 30 个沟谷冻土湿地的植物群落进行数量分类和排序分析,将冻土植被群落分成 3 个群丛组,两种方法分别用国际通用软件 WinTWINSPAN 2.3 和 CANOCO for Windows 4.5 完成,并对群落变化的影响因子进行分析,所用软件为 R 3.0.2vegan 程序包。

1.3.4 不同群丛组物种组成分析

以重要值(*IV*)表示物种在 3 个群丛组的综合型数量指标,其计算公式如下:

$$IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$$

1.3.5 物种多样性对冻土融深的响应分析

数据分析时将每个群丛组的若干样方的调查结果进行平均,选择能反应群丛组状况的多样性指数,采用 Patrick 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数^[22],指数计算公式如下:

Patrick 丰富度指数:

$$R = S$$

Simpson 多样性指数:

$$\lambda = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

式中,*S* 为样方物种总数,*P_i* 表示第 *i* 个种的多度比例,即 $P_i = \frac{N_i}{N}$,*N_i* 为第 *i* 个物种的个体数,*N* 为全部种的个体数。

2 结果与分析

2.1 大兴安岭北坡冻土植被群落的 TWINSPAN 分类和 CCA 排序

应用 TWINSPAN 分类和 CCA 排序对大兴安岭北坡冻土植被群落 30 个样地进行了群落分类,结果显示,根据冻土融深由浅到深,研究区群落可分为 3 个群丛组,群丛组的定义以及群落的分类原则和系统,这 3 个组分别代表 3 个植物群丛组,即植物群丛组 I、II、III(I 柴桦+狭叶杜香-苔草群丛组、II 柴桦-苔草群丛组、III 柴桦+细叶沼柳-苔草群丛组)(图 1)。

由分类结果显示,冻土融深(PMD)和海拔高度(Alt)、坡度(Slo)有线性正相关关系,与土壤含水量(SWC)有线性负相关关系(图 1)。4 个排序轴的特征值分别为 0.487、0.376、0.322 和 -0.433,CCA 排序结果图能很好地反应 3 个群丛组与环境的关系,在冻土融深由浅到深的连续变化上,群落组也由群丛组 I 逐渐变化到群丛组 II 和群丛组 III(图 1)。

研究结果显示,土壤含水量随冻土融深的增加呈现出明显的降低趋势,土壤含水量(SWC)与冻土融深(PMD)之间存在明显的负相关关系($R^2 = 0.74, P < 0.01$)(图 1)。

研究结果显示,冻土融深(PMD)、地形和土壤含水量三个因子对群落变化的解释率为 38%,其中地形因

子、冻土融深(PMD)和土壤含水量三者的综合效应为群落变化的最大解释因子(图2),除冻土融深、地形和土壤含水量以外还有其它因素也影响群落的变化,还有待于进一步研究。

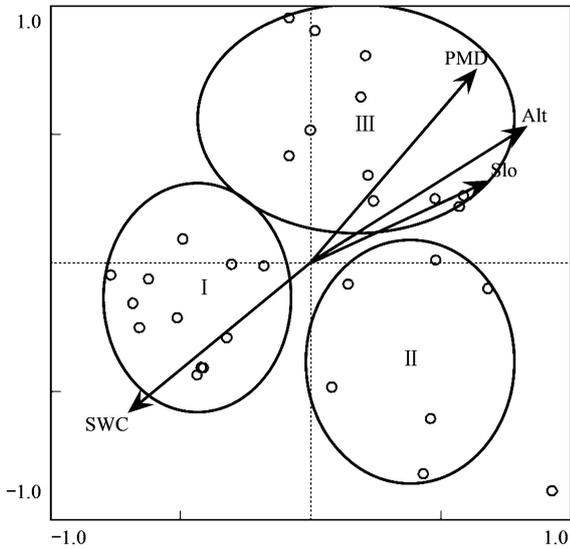


图1 研究区冻土植物群落的 CCA 二维排序图

Fig.1 Two-dimensional CCA ordination diagram of plant communities in the study area

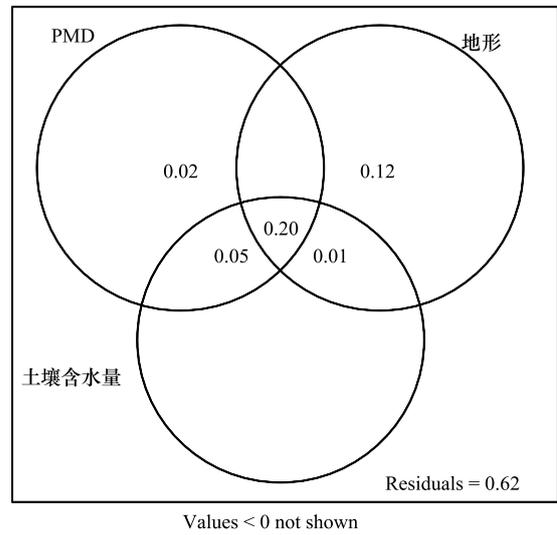


图2 不同环境因素对群落变化的解释率

Fig.2 Different environmental factors on the interpretation of the community change rate

2.2 不同群丛组物种组成分析

植物群丛组 I 为柴桦+狭叶杜香-苔草群丛组。该群丛组主要分布于冻土融深为 0—50cm 范围内,属于冻土融深较浅的群落类型。灌木层以柴桦和狭叶杜香为优势种,其盖度分别为 30%—45% 和 15%—60%,并伴有笃斯越桔和兴安落叶松等伴生种;草本层以白毛羊胡子草和大叶樟等作为优势种,并伴有三叶鹿药、北悬钩子、草问荆等伴生种(表 2)。

表 2 研究区各群丛组中优势种和主要伴生种重要值

Table 2 Importance values of main species in the association groups in the study area

物种 Species	重要值 Importance value/%			自由度 Degree of freedom	F 值 F value
	群丛组 I Association group I	群丛组 II Association group II	群丛组 III Association group III		
柴桦 <i>Betula fruticosa</i> [#]	4.16a	5.61a	8.99b	2	5.473 *
狭叶杜香 <i>Ledum palustre</i> var. <i>angustum</i> [#]	4.76a	0.80b	0.67b	1	12.389 *
细叶沼柳 <i>Salix rosmarinifolia</i> [#]	0.90a	1.94a	6.11b	2	5.132 *
苔草 <i>Carex subpediformis</i> [#]	4.00a	2.78a	1.78a		
笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i> [#]	2.52a	2.79a	0.45b	2	6.375 *
柳叶绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> [#]	0.14a	1.29a	0.95a		
白毛羊胡子草 <i>Eriophorum vaginatum</i> [#]	3.96a	1.46ab	1.12b	2	7.413 *
大叶樟 <i>Calamagrostis langsdorffii</i> [#]	2.68a	2.64a	1.13a		
小白花地榆 <i>Sanguisorba parviflora</i> [#]	0.63a	1.42a	1.13a		
大穗苔草 <i>Carex rhynchophysa</i> [#]	0.26a	0.66a	0.62a		
小叶杜鹃 <i>Phododendron parvifolium</i>	1.06a	0.81a	0.45a		
金老梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	0.86a	1.09a	0.91a		
越桔柳 <i>Salix myrtilloides</i>	0.82a	1.57a	0.73a		
五蕊柳 <i>Salix pentandra</i>	0.08a	0.22a	1.78b	2	4.936 *
互叶金腰 <i>Chrysosplenium altemifolium</i>	0.48a	0.21a	0.27a		

续表

物种 Species	重要值 Importance value/%			自由度 Degree of freedom	F 值 F value
	群丛组 I Association group I	群丛组 II Association group II	群丛组 III Association group III		
三叶鹿药 <i>Smilacina trifolia</i>	2.11a	0.66b	0.43b	2	12.945 *
北悬钩子 <i>Rubus arcticus</i>	0.42a	0.75a	0.73a		
狭叶当归 <i>Angelica anomala</i>	0.75a	0.68a	1.00a		
草问荆 <i>Equisetum pratense</i>	0.74a	0.49a	0.32a		
野古草 <i>Arundinella hirta</i>		1.38a	0.59a		
五脉山黧豆 <i>Lathyrus quinquerivius</i>		0.49a	0.91a		
北方拉拉藤 <i>Galium boreale</i>		0.59a	1.37a		
地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>			0.403		
东北羊角芹 <i>Aegopodium alpestre</i>			0.111		
马蔺 <i>Iris lactea var. chinensis</i>			0.139		
二歧银莲花 <i>Anemone dichotama</i>			0.169		
裂叶蒿 <i>Artemisia tanacetifolia</i>			0.072		

* $P < 0.05$; #: 优势种或共优种; 同行数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

植物群丛组 II 为柴桦-苔草群丛组。该群丛组主要分布于冻土融深为 50—150cm 范围内,属于冻土融深较深的群落类型。灌木层以柴桦、笃斯越桔和柳叶绣线菊为优势种,且狭叶杜香为主要伴生种,除此以外还有细叶沼柳和小叶杜鹃等;草本层除群丛组 I 的伴生种外还有野古草、五脉山黧豆和北方拉拉藤等伴生种。

植物群丛组 III 为柴桦+细叶沼柳-苔草群丛组。该群丛组主要分布于冻土融深大于 150cm 范围内,属于岛状冻土的群落类型。灌木层以柴桦、细叶沼柳为优势种,且笃斯越桔和金老梅等为主要伴生种,除此以外还有越桔柳和五蕊柳等;草本层以大穗苔草大叶樟、苔草等为优势种并伴有五脉山黧豆、草问荆、小白花地榆、北方拉拉藤等伴生种。

2.3 物种多样性对冻土融深的响应

Patrick 指数与冻土融深具有显著的相关性 ($R^2 = 0.58, P < 0.01$)。PMD ≤ 50 cm 时,物种种类较为丰富,物种数为 23.83 ± 2.44 ; $50\text{cm} < \text{PMD} \leq 150\text{cm}$ 时,物种数为 26.36 ± 2.01 ; $\text{PMD} > 150\text{cm}$ 时,物种数急剧下降至 21.14 ± 1.57 。Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数随冻土融深的增加出现先升高后降低的趋势,且 $50\text{cm} < \text{PMD} \leq 150\text{cm}$ 的 Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数值显著高于其他冻土融深下的该指数值, $\text{PMD} \leq 50\text{cm}$ 与 $\text{PMD} > 150\text{cm}$ 两指数差异不显著。Simpson 指数与冻土融深在 $\text{PMD} \leq 50\text{cm}$ 和 $50\text{cm} < \text{PMD} \leq 150\text{cm}$ 两个层次上差异不显著,但在融深大于 150cm 后有显著降低的趋势。这说明冻土融深对物种丰富度和多样性指数影响并非单调性降低,但总体规律是 $50\text{cm} < \text{PMD} \leq 150\text{cm}$ 时物种丰富度和多样性指数较高, $\text{PMD} \leq 50\text{cm}$ 和 $\text{PMD} > 150\text{cm}$ 时物种的丰富度和多样性指数较低,且差异显著(图 3)。

3 讨论

3.1 大兴安岭北坡多年冻土区植物群落的 TWINSpan 分类和 CCA 排序

本文运用了 TWINSpan 分类和 CCA 排序将群落分为 3 个群丛组并得到了相互验证。由图 1、图 2 和图 3 可以看出:在景观尺度范围内,海拔高度及坡度均是冻土发育的地形条件,地势较低的平缓地带是冻土发育的客观条件,冻土融深的大小也会直接影响到土壤含水量,融深较浅的土壤含水量较高^[23-25],冻土融深由浅到深群丛组也由 I 柴桦+狭叶杜香-苔草群丛组逐渐过渡到 II 柴桦-苔草群丛组和 III 柴桦+细叶沼柳-苔草群丛组,该分类结果较客观的反映了植物群落类型的分布与环境因子的关系。3 个群丛组间的明显过渡表明群落类型对生境的变化规律有显著地响应,由以上的 4 个因素差异造成了冻土区不同群丛组的群落组成存在一定的间断性。

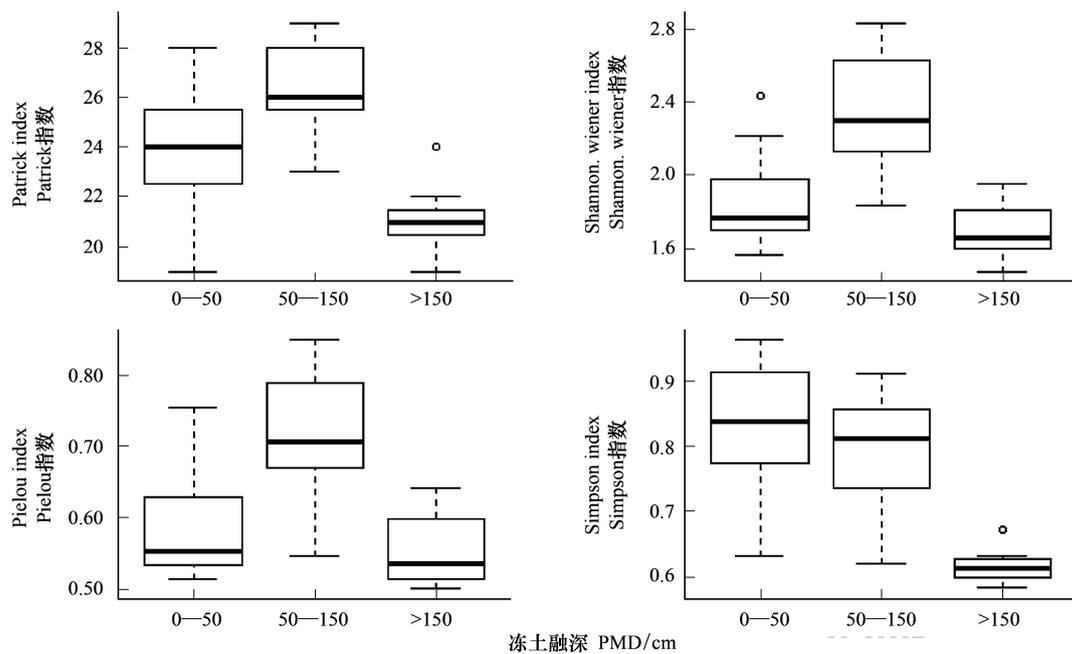


图3 不同活动层埋深下物种多样性的变化

Fig.3 Variations of plant species diversities with different depths of active layer of permafrost

3.2 气候变化情境下冻土群落变化

群丛组 I、群丛组 II 和群丛组 III 分别代表 3 个不同的群丛组,不同的群丛组所对应的冻土融深范围也不相同,随着冻土融深由浅变深,部分物种的重要值明显减小,如狭叶杜香、白毛羊胡子草、大叶樟等;另外一些物种的重要值明显增加,如柴桦、细叶沼柳等;随着冻土融深的增加,一些在冻土融深较浅的环境下不存在的物种也相继出现,如野古草、五脉山黧豆、北方拉拉藤、地榆、东北羊角芹、马蔺、二歧银莲花、和裂叶蒿等。气候变化情境下,冻土融深由浅变深甚至部分岛状冻土消失,由空间序列代替时间序列,群落也由群丛组 I 逐渐变化到群丛组 II 和群丛组 III。

3.3 物种多样性对冻土融深的响应

目前就多样性与生境之间的关系已有大量报道,研究表明物种多样性与生境条件密不可分^[26-29]。更有学者对生境条件对物种多样性影响进行了总结和综述^[30-33],指出了土壤水热条件对物种多样性有重要的作用,本研究发现,冻土的不同发育程度对土壤含水量有直接的影响,冻土融深小于 50cm 时土壤含水量较大,由于植物根系无法汲取土壤水分导致物种多样性指数较小,随着冻土融深的增加 50cm<PMD≤150cm 时,土壤含水量适中且植物根系能够很好地汲取土壤水分,物种多样性指数达到峰值,当 PMD>150cm 时土壤含水量较小,此时水分成为物种多样性指数下降的限制因子。因此,多年冻土区冻土融化是土壤水的重要来源,物种多样性随冻土融深的变化趋势实则土壤含水量随冻土融深的变化趋势。当然,多年冻土区影响物种多样性的因子有很多,非生物因子也非常重要^[34-36],因此这是一个值得进一步深入探讨的科学问题。

参考文献 (References):

- [1] Wang G X, Li S N, Hu H C, Li Y S. Water regime shifts in the active soil layer of the Qinghai-Tibet Plateau permafrost region, under different levels of vegetation. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 280-289.
- [2] 金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 郭东信, 李英武. 大小兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 467-475.
- [3] Torre Jorgenson M, Racine C H, Walters J C, Osterkamp T E. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 551-579.
- [4] 鲁国威, 翁炳林, 郭东信. 中国东北部多年冻土的地理南界. *冰川冻土*, 1993, 15(2): 214-218.
- [5] 顾钟炜, 周幼吾. 气候变暖和人为扰动对大兴安岭北坡多年冻土的影响-以阿木尔地区为例. *地理学报*, 1994, 49(2): 182-187.

- [6] 常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 杨思忠, 于少鹏, 吕兰芝, 郭东信, 王绍令, 康兴成. 中国东北大兴安岭多年冻土与寒区环境考察和研究进展. 冰川冻土, 2008, 30(1): 176-182.
- [7] Bhiry N, Payette S, Robert É C. Peatland development at the arctic tree line (Québec, Canada) influenced by flooding and permafrost. Quaternary Research, 2007, 67(3): 426-437.
- [8] Lloyd A H, Yoshikawa K, Fastie C L, Hinzman L, Fraver M. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14(2): 93-101.
- [9] Schuur E A, Crummer K G, Vogel J G, Mack M C. Plant species composition and productivity following permafrost thaw and thermokarst in Alaskan tundra. Ecosystems, 2007, 10(2): 280-292.
- [10] Bakalin V A, Vetrova V P. Vegetation-Permafrost relationships in the zone of sporadic permafrost distribution in the Kamchatka Peninsula. Russian Journal of Ecology, 2008, 39(5): 318-326.
- [11] Nguyen T N, Burn C R, King D J, Smith S L. Estimating the extent of near-surface permafrost using remote sensing, Mackenzie Delta, Northwest Territories. Permafrost and Periglacial Processes, 2009, 20(2): 141-153.
- [12] Wania R, Ross I, Prentice I C. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 1. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(3): GB3014.
- [13] Kokfelt U, Rosén P, Schoning K, Christensen T R, Förster J, Karlsson J, Reuss N, Rundgren M, Callaghan T V, Jonasson C, Hammarlund D. Ecosystem responses to increased precipitation and permafrost decay in subarctic Sweden inferred from peat and lake sediments. Global Change Biology, 2009, 15(7): 1652-1663.
- [14] Sannel A B K, Kuhry P. Long-term stability of permafrost in subarctic peat plateaus, west-central Canada. The Holocene, 2008, 18(4): 589-601.
- [15] 张武文, 马秀珍, 丁国栋, 崔向新. 大兴安岭水湿地改造对土壤和植被的影响. 东北林业大学学报, 1996, 24(6): 9-13.
- [16] 牟长城, 孙晓新, 倪志英, 杨明, 张娜. 大兴安岭林区沼泽_森林人工造林效果综合评估. 林业科学, 2007, 43(10): 51-58.
- [17] 庄凯勋, 侯武才. 大兴安岭东部国有林区的湿地资源现状及保护对策. 东北林业大学学报, 2006, 34(1): 83-86.
- [18] 吕久俊, 李秀珍, 胡远满, 王宪伟, 孙菊. 冻结数模型在中国东北多年冻土分区中的应用. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2271-2276.
- [19] 周梅, 余新晓, 冯林, 王林和, 那平山. 大兴安岭林区冻土及湿地对生态环境的作用. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 91-93.
- [20] Tan Y Y, Wang X, Yang Z F, Wang Y L. Research progress in cold region wetlands, China. Sciences in Cold and Arid Regions, 2011, 3(5): 441-447.
- [21] Hill M O. DECORANA: A FORTRAN Program for Detrended Correspondence Analysis and Reciprocal Averaging [D]. New York: Cornell University, 1979.
- [22] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [23] 刘庆仁, 孙振昆, 崔永生, 刘俊德, 程东方. 大兴安岭林区多年冻土与植被分布规律研究. 冰川冻土, 1993, 15(2): 246-251.
- [24] 孙菊, 李秀珍, 胡远满, 王宪伟, 吕久俊, 李宗梅, 陈宏伟. 大兴安岭沟谷冻土湿地植物群落分类、物种多样性和物种分布梯度. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2049-2056.
- [25] 孙菊, 李秀珍, 王宪伟, 吕久俊, 李宗梅, 胡远满. 大兴安岭冻土湿地植物群落结构的环境梯度分析. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1165-1173.
- [26] Davies R G, Orme C D L, Webster A J, Jones K E, Blackburn T M, Gaston K J. Environmental predictors of global parrot (Aves: Psittaciformes) species richness and phylogenetic diversity. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(2): 220-233.
- [27] Humphries C J, Densham P J, Lampinen R, Hagemeyer W J M, Mitchell-Jones A J, Gasc J P. Would environmental diversity be a good surrogate for species diversity? Ecography, 2001, 24(1): 103-110.
- [28] Keller A, Rödel M O, Eduard Linsenmair K, Ulmar Grafe T. The importance of environmental heterogeneity for species diversity and assemblage structure in Bornean stream frogs. Journal of Animal Ecology, 2009, 78(2): 305-314.
- [29] Trakhtenbrot A, Kadmon R. Effectiveness of environmental cluster analysis in representing regional species diversity. Conservation Biology, 2006, 20(4): 1087-1098.
- [30] Dai Y C, Yang Z L, Cui B K, Yu C J, Zhou L W. Species diversity and utilization of medicinal mushrooms and fungi in China (Review). International Journal of Medicinal Mushrooms, 2009, 11(3): 287-302.
- [31] Levin L A, Etter R J, Rex M A, Gooday A J, Smith C R, Pineda J, Stuart C T, Hessler R R, Pawson D. Environmental influences on regional deep-sea species diversity. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32(1): 51-93.
- [32] 李禄军, 曾德慧. 物种多样性与生态系统功能的关系研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2010-2017.
- [33] Orlov N L, Nguyen S N, Ho C T. Description of a new species and new records of Rhacophorus genus (Amphibia: Anura: Rhacophoridae) with the review of amphibians and reptiles diversity of Ghu Yang Sin National Park (Dac Lac Province, Vietnam). Russian Journal of Herpetology, 2008, 15(1): 67-84.
- [34] Trombulak S C, Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. Conservation Biology, 2000, 14(1): 18-30.
- [35] Kemper J T, Macdonald S E. Effects of contemporary winter seismic exploration on low Arctic plant communities and permafrost. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2009, 41(2): 228-237.
- [36] Kokelj S V, Zajdlík B, Thompson M S. The impacts of thawing permafrost on the chemistry of lakes across the subarctic boreal-tundra transition, Mackenzie Delta region, Canada. Permafrost and Periglacial Processes, 2009, 20(2): 185-199.