

# 祁连山大通河源区高寒植被物种多样性 随冻土地温梯度的变化特征

张秀敏 盛煜 吴吉春 陈继 李静 曹元兵 李昆

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冻土工程国家重点实验室)

**摘要:** 采用样方法对祁连山大通河源区高寒植被生态系统进行了调查, 计算了丰富度指数、多样性指数和均匀度指数等表征物种多样性的定量指标。根据已有的等效高程模型得到植被采样点的冻土地温, 并基于冻土地温时空转换模式得到一个温度从低到高的温度梯度带, 通过分析高寒植被物种多样性随冻土地温梯度的变化探讨了多年冻土环境变化对高寒植被的影响。结果表明: 随着冻土地温的升高, 物种丰富度、物种多样性、均匀度呈上升—降低—上升趋势, 并在季节冻土区内达到最大值; 植被类型由高山稀疏植被向高寒草甸演替, 高寒草甸向高寒沼泽草甸演替, 最终向高寒草甸演替。相同植被类型在不同地温带具有不同的物种多样性分布特征, 高山稀疏植被和高寒灌丛随着地温的升高呈现先增加后降低的变化趋势; 高寒沼泽草甸植物群落多样性指数、丰富度指数、均匀度具有先降低后上升的变化趋势; 高寒草甸的 3 个多样性指数随地温的升高呈上升趋势; 而且在较高冻土地温环境下, 高寒草甸的 3 个多样性指数高于高寒沼泽草甸。

**关键词:** 物种多样性; 冻土地温; 大通河源区

中图分类号: S759.93; Q948.11; 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2012)05-0086-08

ZHANG Xiu-min; SHENG Yu; WU Ji-chun; CHEN Ji; LI Jing; CAO Yuan-bing; LI Kun. **Changes of species diversity indices along the ground temperature of permafrost in the source region of Datong River in the Qilian Mountains, northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) 34(5) 86-93 [Ch, 29 ref.] State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, P. R. China.

The study analyzed the changes of species diversity indices (richness index, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index) along the ground temperature of permafrost based on investigation data from 199 vegetation spots sampled and permafrost temperatures from an equivalent-elevation model in the Datong River source region, northeastern Qinghai-Tibet Plateau in China. The results showed that with the increase of permafrost temperature, the species diversity indices firstly ascended, then decreased and finally ascended, meanwhile the maximum reached in the seasonal frozen zone. Warmed permafrost caused shift in plant succession in different temperature zones, i. e. the succession from alpine sparse vegetation to alpine meadow, and then from alpine meadow to alpine swamp meadow and finally from alpine swamp meadow to alpine meadow. Same vegetation community had different characteristics along the temperature gradient. Alpine sparse vegetation and alpine shrub firstly ascended and then decreased, whereas the values of alpine swamp meadow had an opposite trend. Alpine meadow had an ascend trend with the increase of permafrost temperature, and the biodiversity indices of alpine swamp meadow were lower than that of alpine meadow in the warmer zones compared with the values of the two vegetation types.

**Key words** species diversity; permafrost temperature; source region of Datong River

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951402)、国家自然科学基金项目(40871040)。

第一作者: 张秀敏, 博士。主要研究方向: 冻土生态学。电话: 0931-4967453 Email: zhangxm@lzb.ac.cn 地址: 730000 甘肃省兰州市东岗西路 320 号中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。

责任作者: 盛煜, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 冻土工程和普通冻土。电话: 0931-4967271 Email: sheng@lzb.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

在高寒环境下土的冻结和融化作用所塑造出的冷生土壤、植被类型及与冻土有关的水热变化过程及其在该环境下形成的协同发展的生态系统,即高寒生态系统<sup>[1-3]</sup>。植被和土壤是生态系统的主要构成要素,在高寒生态系统中,寒冷的气候是其突出的特征,冻土则是其存在和发育的物质基础<sup>[4]</sup>;因而多年冻土的状态变化将对其上层植被和土壤产生影响,进而影响到寒区生态系统的稳定与演替。而多年冻土又是一种对温度敏感和易变的特殊地质体,尤其对气候变化十分敏感。在全球气候变暖的影响下,多年冻土环境变得更加脆弱并出现了退化问题(活动层加深、地温升高、分布下界上升、岛状冻土和不连续冻土区的多年冻土层消失)<sup>[5-8]</sup>。多年冻土退化改变了土壤的水热环境,打破了原有的水热平衡,并引起一系列生态、水文变化进而对植被生长、分布、物种组成、群落结构、多样性和演替动态产生深刻的影响<sup>[9-11]</sup>,使植被发生逆向演替<sup>[12-13]</sup>,植物群落组成发生变化,造成新物种的入侵和部分种的消失,最终改变植物群落中物种多样性<sup>[14]</sup>。而物种多样性对维持全球和区域生态平衡、可持续发展等方面具有重要的影响<sup>[15-16]</sup>,因而研究冻土变化影响下的物种多样性对维持寒区生态平衡和稳定具有重要的指导作用。

目前,国内外学者利用植被演替和物种多样性从定性和定量2个方面研究了多年冻土退化对植物群落的影响。国外学者利用长时间序列的冻土资料研究了冻土退化对植被演替的影响,结果表明,冻土退化影响了植被的生长、分布和类型<sup>[9-10,17]</sup>。我国青藏高原多年冻土是世界中低纬度地带海拔最高、面积最大的多年冻土区,占我国多年冻土面积的67%<sup>[18]</sup>,同时该区又是我国重要的畜牧业基地之一<sup>[12]</sup>。由于我国开展青藏高原多年冻土研究时间较晚,多年冻土监测工作不连续,难以获取长时间序列的冻土观测资料,进行多年冻土退化背景下的植被演替时间序列研究有一定的困难,因而国内一些学者利用植物类型的空间序列演替来说明冻土退化对植被的影响,假设在冻土退化的过程中,植被从高寒沼泽草甸演替为高寒草甸,最终演变为高寒荒漠<sup>[11-14,19,24]</sup>。由于在植被的生长过程中不仅仅受多年冻土的影响,还受其他因素(气候、水分、地形)的影响,因此仅用植被类型的变化说明冻土对植被的影响具有一定的片面性。

多年冻土作为气候的产物,对气候变化十分敏感,在目前气候变暖的背景下多年冻土正经历着地温升高的变化。冻土地温作为表征多年冻土常态的一个关键参数,一定程度上体现了冻土动态变化特

征;因而随着多年冻土时间上的持续退化,冻土的空间分布类型将发生相应的变化。在这一前提下,首先按照多年冻土地温由低至高的顺序建立地温变化序列,并假设该系列反映了固定区域多年冻土温度由低至高上升时多年冻土环境的变化趋势,从而实现空间格局转换为时间演替的预测思想;因此本文基于冻土地温时空转换模式从空间上得到一个温度从低到高的温度梯度,拟通过分析高寒植被物种多样性随冻土地温梯度的变化特征来探讨冻土地温热状态变化对高寒植被的影响。此方法利用了能体现冻土动态变化特征的地温数据,从空间上说明冻土本身的热状态变化对高寒植被的影响,具有更好地针对性和适应性;再者,通过认识冻土和植被之间的相互关系和互馈机制,对深入了解多年冻土环境和评估多年冻土环境发展变化趋势具有重要意义。

目前对青藏高原植被物种多样性的研究主要集中在东北边缘的森林群落<sup>[20-22]</sup>,以及东部、北部和中部的寒旱草地<sup>[5,11-14,23-24]</sup>,而对祁连山区高寒植被的群落物种多样性及冻土变化对其影响的研究尚未见到报道。祁连山位于青藏高原的东北缘,作为青藏高原一个独特的构造单元,冻土类型以山地多年冻土为主,山谷、山麓中分布中-深季节冻土,其中东部的大通河源区地处岛状多年冻土到片状连续多年冻土过渡带,为我国中低纬度高海拔多年冻土的典型分布区<sup>[18]</sup>。源区从木里较为寒冷区域的连续多年冻土经中段江仓区域的高温多年冻土至下段柴达尔区域的岛状多年冻土区,空间上形成了多年冻土退化进程逐步加剧的分布格局,使得多年冻土环境预测和演替研究成为可能。另外,近年来,随着该区域采矿业和各类工程建设的发展,有关冻土的研究项目增多,已经积累了较多的冻土研究资料,为准确把握研究区域多年冻土的特征和规律奠定了基础。本研究通过对祁连山大通河源区的群落类型、群落结构特征及物种多样性沿冻土地温梯度的动态变化规律的分析,探讨冻土热状态对植被的影响,期为分析冻土变化对高寒生态系统的影响提供基础。

## 1 研究区概况

研究区处于青海省祁连县、天峻县和刚察县的交界处,地理范围为东经98.9°~100.6°、北纬37.6°~38.3°之间,区内高程介于3 314~5 061 m,流域面积约4 555 km<sup>2</sup>。区内有木里煤矿、江仓煤矿和热水煤矿等大型煤矿分布,是青海省煤炭资源的集中分布区之一。本区属于高原温带半干旱气候

区 根据祁连山区气象资料统计的结果,大通河源区年均气温为  $-3.4 \sim 14.6$  °C 之间,最高和最低气温分别出现于7月份和1月份,其中热水、江仓和木里的年均气温分别约为  $-2$ 、 $-4$  和  $-5$  °C,年均降水量为  $485 \sim 605$  mm 之间<sup>[18]</sup>。研究区的植被类型以高寒草甸和高寒沼泽草甸2个类型为主,在山的阴坡及河谷地带有金露梅(*Potentilla fruticosa*)高寒灌丛分布,在高大山体上部分布垫状与稀疏流石坡植被。本研究区为祁连山区沼泽草甸植被类型最为发育的地区之一,也是海北地区的主要牧场。

## 2 研究方法

### 2.1 野外数据采集及处理

2010年和2011年分别于高寒植被生长旺盛期的7月底至8月上旬对大通河源区开展了野外数据的采集工作。基于代表性和随机性的原则,调查样地都布设在生境条件、植物群落种类组成、群落结构、利用方式和利用强度等具有相对一致性典型区域内,同时样地之间具有异质性;但每个样地能够控制的最大范围内,地貌、植被等条件一般具有同质性,此外考虑到交通的便利,植被调查样点多选定于区域的道路周边。在选定的样地内,采用传统样线和样方相结合的方法进行采样,即各样地分别设置1条50m的样线,每条样线上再随机的布置5个1m×1m的样方(间隔为10m)。每个样方记录的内容包括植被类型、群落结构、植物种类、群落总盖度、分种盖度、平均株高等群落特征,并利用手持GPS同时测定并记录样方所在地的经纬度、海拔高度、坡度、坡向等地理信息。各样线上取各个样方相关参数的算术平均值进行计算分析,并将各个平均值作为样地的相关参数值。2次野外共采集995个样方,199个样地,其中样地包括93个高寒草甸样地,84个高寒沼泽草甸样地,9个高寒灌丛样地和12个高山稀疏植被样地,1个稀疏草原样地。为了便于分析,将稀疏草原归入到高山稀疏植被中。

室内准确鉴定植物标本,并对其进行科、属、种的划分和归类。利用 Shannon-Wiener 指数( $H$ )、均匀度指数( $E$ )和丰富度指数( $R$ )<sup>[25]</sup>反映群落的物种多样性。具体计算公式如下:

丰富度指数  $R$  指出现在样条内的物种总数,即

$$R = S \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数  $n$  的计算公式为

$$n = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (2)$$

群落均匀度指数  $E$  的计算公式为

$$E = n / \ln S \quad (3)$$

式中: $S$ 为群落中的总物种数。由于草本植物的个体数统计较为困难,本文采用各物种的重要值代替个体数进行计算。 $p_i$ 为种 $i$ 的相对重要值, $p_i = N_i / N$ ;  $N_i$ 为种 $i$ 的绝对重要值, $N$ 为种 $i$ 所在样方的各个种的重要值之和。

### 2.2 地温数据

基于高斯曲线模型的理论基础<sup>[26]</sup>,盛煜等<sup>[27]</sup>提出了等效高程模型,并成功应用于祁连山疏勒河上游地区的冻土分布,取得了较为理想的分类结果。等效高程是指在高程对多年冻土分布作用的基础之上,将纬度对多年冻土分布的影响转化为等量高程值的形式并叠加在实际高程之上,具体计算公式如式(4)、式(5)所示。李静<sup>[28]</sup>通过分析大通河源区已有的冻土调查资料发现植被类型是制约大通河源区多年冻土分布的主要因素。基于植被类型的冻土地温与等效高程的分析,分别得到了高寒沼泽草甸和高寒草甸的地温-等效高程模型(式(6)、式(7))。对于其他区域的冻土地温的处理采用就近一致的原则。

$$H = 3650 \exp[-0.003(\varphi - 25.37)^2] + 1428 \quad (4)$$

$$h' = h + (H - H_0) \quad (5)$$

$$t_1 = -0.006h'_1 + 14.933, \quad R^2 = 0.9431 \quad (6)$$

$$t_2 = -0.004h'_2 + 22.621, \quad R^2 = 0.7776 \quad (7)$$

式中: $H$ 为下界高度,m; $h$ 为实际高程,m; $H_0$ 为高程的基准值,m; $h'$ 为等效高程,m; $t_1$ 和 $t_2$ 分别为高寒沼泽草甸和高寒草甸的预测冻土地温,°C; $h'_1$ 和 $h'_2$ 分别为高寒沼泽草甸和高寒草甸的等效高程,m。

### 2.3 方差分析

在统计软件 SPSS13 的支持下,利用 one-way ANOVA(one-way analysis of variance)来检验各群落物种多样性差异显著性、不同地温带的物种多样性差异显著性及相同植被类型物种多样性在不同冻土地温带间的差异显著性,在分析前进行方差齐性检验,若方差为奇性并用 LSD(least-significant difference)法进行多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 冻土地温带

根据已有的等效高程(式(6)、式(7)),得到199个样地的冻土地温,地温值介于  $-4.12 \sim 1.52$  °C 之间。周幼吾等<sup>[18]</sup>发现在热水地区,海拔每升高100m,冻土地温下降0.6°C;李静<sup>[28]</sup>得到大通河源区的高寒沼泽草甸和高寒草甸区冻土地温随海拔变

化的地温梯度,分别为6和4℃/km。因而本文在他们研究的基础上采用5℃/km作为间隔对冻土地温进行分区。基于平均间隔的方法,将冻土地温分为13个冻土地温带。程国栋等<sup>[26]</sup>提出了青藏高原多年冻土分带方案,其中地温 $\leq -3$ ℃的冻土为稳定型多年冻土,冻土处于稳定状态,外界因素对其的干扰可忽略,而当地温 $\geq 0.5$ ℃时,冻土为季节冻土。本文根据这一冻土分类方法,对13个冻土地温带重新进行了归纳合并,最终得到9个地温带,从低到高分别定名为A、B、C、D、E、F、G、H和I地温带。对各个地温带的样地分布情况进行了统计分析,结果如表1所示。6个样地处于A地温带,包含5个高山稀疏植被样地和1个高寒灌丛样地;在B地温带,共6个样地,包括1个高山稀疏植被样地、1个高寒沼泽草甸和4个高寒草甸样地;在C地温带,

共9个样地,包含3个高山稀疏植被样地、1个高寒灌丛样地、3个高寒沼泽草甸样地和2个高寒草甸样地;在D地温带,共11个植被样地,1个高山稀疏植被样地、7个高寒沼泽草甸样地和3个高寒草甸样地;在E地温带,共31个植被样地,包含2个高山稀疏植被样地、15个高寒沼泽草甸样地和14个高寒草甸样地;在F地温带,共39个植被样地,包含1个高寒灌丛样地、25个高寒沼泽草甸样地和13个高寒草甸样地;在G地温带,共38个植被样地,包含1个稀疏草原样地、1个高寒灌丛样地、16个高寒沼泽草甸样地和20个高寒草甸样地;在H地温带,共36个植被样地,包含1个高寒灌丛样地、17个高寒沼泽草甸样地和18个高寒草甸样地;在I地温带,共23个植被样地,包含4个高寒灌丛样地和19个高寒草甸样地。

表1 植被采样样地在不同地温带的分布

Tab. 1 Summary statistics for vegetation spots in the different permafrost temperature zone and plant community of the study area

地温带/℃	植被样地数				
	总计	高山稀疏植被	高寒灌丛	高寒沼泽草甸	高寒草甸
$\leq -3$ (A地温带)	6	5	1	0	0
$-3 \sim -2.5$ (B地温带)	6	1	0	1	4
$-2.5 \sim -2$ (C地温带)	9	3	1	3	2
$-2 \sim -1.5$ (D地温带)	11	1	0	7	3
$-1.5 \sim -1$ (E地温带)	31	2	0	15	14
$-1 \sim -0.5$ (F地温带)	39	0	1	25	13
$-0.5 \sim 0$ (G地温带)	38	1	1	16	20
$0 \sim 0.5$ (H地温带)	36	0	1	17	18
$0.5 \sim 2$ (I地温带)	23	0	4	0	19

### 3.2 高寒植被类型间的物种组成及物种多样性

根据野外调查资料,大通河源区共出现植物79种,隶属于53属,22科。其中:种类最多的科为菊科(Asteraceae),含有16种物种;禾本科(Poaceae),出现8种物种;蔷薇科(Rosaceae),出现8种物种;含有6种物种的是莎草科(Cyperaceae)。统计表明,高寒草甸的物种组成以中生的高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为主,伴生种主要有矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*)、矮火绒草(*Leontodonnanum*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、多裂委陵菜(*Potentilla multifida*)、美丽凤毛菊(*Saussurea pulchra*)等;具有种类组成比较丰富、草层低矮、结构简单、层次分化不明显的特征。高寒沼泽草甸主要是以湿生的藏嵩草(*Kobresia tibetica*)为主,伴生种主要有矮生嵩草、青藏苔草、海乳草(*Glaux maritima*)、无尾果(*Coluria longifolia*)、麻花苣(*Gentiana straminea*)、云生毛茛(*Ranunculus longicaulis*)等。高寒灌丛位于山地阴坡及河谷地带,且沿地形走势呈条带状分布,主要是由于这些部

位水热条件相对优越,易形成适宜高寒灌丛生生长的小气候条件,其以金露梅(*Potentilla fruticosa*)、山生柳(*Salix oritrepha*)为主;青藏苔草、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、小花棘豆(*Oxytropis glabra*)等为伴生种。高山稀疏植被主要分布在水热条件较差的高大山体中上部,主要以耐寒耐旱的垫状点地梅(*Androsace tapete*)为主,并伴生有红景天(*Rhodiola rosea*)、矮垂头菊(*Cremanthodium humile*)等(表2)。

物种丰富度、多样性和均匀度指数作为描述群落结构特征的可测度指标,是定量反映群落生态组成及生理生态学特性的依据,对认识和比较群落的复杂性和资源丰富度具有重要的意义。其中均匀度是指一个群落或生境中全部种的个体数目的配置情况,它反映了各物种个体数目配置的均匀程度,其值越低说明群落中优势种的作用越强。多样性指数包含2个因素:其一是种类数目,其二是种类间个体配置的均匀性,因此种类数目越多,多样性越大;同样,种间个体分配的均匀性增加,也会使多样性提高。基于式(1)~(3)得到了每个样方的丰富度、多样性

表2 大通河源区不同植被类型的特征

Tab. 2 Biodiversity indices of different plant communities in the study area

植被类型	建群种	主要伴生种	物种丰富度	多样性指数	均匀度
高山稀疏植被	垫状点地梅	红景天、矮垂头菊	7.8 ± 3.88c	0.70 ± 0.29c	0.35 ± 0.09c
高寒灌丛	金露梅、山生柳	青藏苔草、草地早熟禾、小花棘豆	14.8 ± 3.46a	1.49 ± 0.26ab	0.56 ± 0.11ab
高寒沼泽草甸	藏嵩草	矮生嵩草、青藏苔草、海乳草、无尾果、麻花苣、云生毛茛	11.1 ± 3.72b	1.32 ± 0.34b	0.56 ± 0.09b
高寒草甸	高山嵩草	矮生嵩草、雪白委陵菜、矮火绒草、青藏苔草、多裂委陵菜、美丽凤毛菊	12.5 ± 3.99a	1.63 ± 0.30a	0.62 ± 0.08a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同此。

和均匀度 3 个指数值, 计算每个样地内所有样方的丰富度、多样性和均匀度算术平均值, 并将 3 个平均值作为样地的 3 个物种多样性指数值, 再根据每个样地所属的植被类型进行分类, 最后进行 one-way ANOVA 方差分析, 在方差为奇性的条件下, 用 LSD 法进行多重比较。得到的结果如表 2 所示: 3 个物种多样性指数在不同群落间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 其中高寒草甸和高寒灌丛的物种丰富度、多样性指数及均匀度较大, 高山稀疏植被的物种丰富度、多样性指数、均匀度最小, 高寒沼泽草甸的 3 个多样性指数居中。

造成 4 种植被类型物种多样性和群落组成差异的主要原因为地理空间的分布不同。高山稀疏植被多分布于高寒、干旱、大风等严酷生境条件下的山体上部及顶部, 植株低矮、稀疏, 群落结构简单, 种类组成单调, 建群种占有优势地位; 因此物种丰富度、多样性指数和均匀度最低。高寒灌丛位于水热条件相对优越的山地阴坡及河谷地带, 并有地表草本层植物伴生, 组成种类多, 物种丰富度、多样性指数和均匀度较高。高寒沼泽草甸主要分布在地势低洼、地表潮湿、通气不佳的河流阶地及河漫滩, 以耐寒湿生和湿中生多年地面芽和地下芽植物为主要物种, 群落结构较简单, 层次分化不显著, 建群种占有优势地位, 其他伴生种较少, 3 个多样性指数较低。高寒草甸主要分布在排水良好、中等湿度的滩地、河谷和平缓地, 群落外貌整齐, 组成种类多, 并且各个种群在群落内的分布相对均匀, 3 个多样性指数较高。相比于高寒沼泽草甸和高山稀疏植被, 高寒草甸和高寒灌丛的物种较丰富, 同时各个物种配置较均匀; 因此高寒草甸和高寒灌丛的多样性指数要高于高寒沼泽草甸和高山稀疏植被的多样性指数。

王根绪等<sup>[19]</sup>提出了多年冻土退化过程中高寒沼泽草甸的原生演替模式: 随着多年冻土的持续退化, 由高寒沼泽草甸向高寒草甸演替; 冻土继续退化, 由高寒草甸演替为高寒草原化草甸; 由于土壤持续暖干化导致冻土消失, 进而使中生草甸植被消失和耐旱植被得以发展, 在极度干旱生境条件下, 植被最终演替为稀疏草原, 甚至沙化。基于这一演替模

式, 本文研究了群落演替过程中物种多样性变化来说明冻土退化对植被的影响。由于高寒灌丛是局地小气候条件下生长的植被, 不具有代表性; 高山稀疏植被主要分布于地温较低及冻土变化较小的地带, 主要是由于基岩埋藏浅, 土层较薄, 地表较干影响了其生长, 因而对高寒灌丛和高山稀疏植被物种多样性的研究没有考虑。在以上分析的基础上, 得到本文的植被空间序列的演替模式为高寒沼泽草甸演替为高寒草甸, 高寒草甸演变为稀疏草原。

对 3 个群落间的丰富度、多样性指数和均匀度数据进行了统计分析, 得到的结果如图 1 所示。在冻土退化过程中, 群落间 3 个物种多样性指数的变化均表现为先增加后降低的趋势, 即高寒沼泽草甸 < 高寒草甸 > 稀疏草原。得到的结果与在青藏高原其他区域的研究结果相一致<sup>[5, 11-14, 23-24]</sup>。

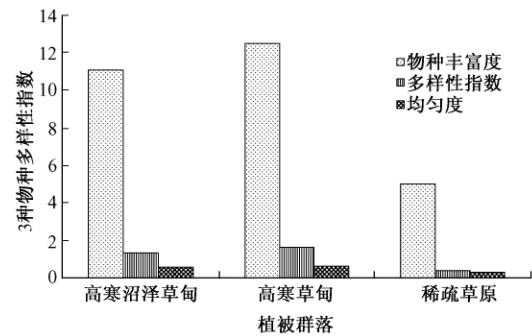


图1 大通河源区冻土退化过程中不同植被类型的物种多样性特征

Fig. 1 Biodiversity indices of different plant communities during the degradation of permafrost in the study area

### 3.3 不同冻土地温带高寒植被的群落组成及物种多样性

针对大通河源区缺乏长期冻土地温观测数据的缺憾, 采用冻土地温时空转换的方法来说明多年冻土退化过程中高寒植被的变化特征。根据时空转换的前提条件, 即在气候变暖的影响下, 随着多年冻土时间上的持续退化, 冻土的空间分布类型将发生相应的变化; 因而, A 地温带逐渐升温将变为 B 地温带, B 地温带演变为 C 地温带, 依次类推, 最终从 H 地温带转变为 I 地温带, 导致多年冻土向季节冻土转化。通过对比分析不同冻土带的群落组成和物种

多样性数据来说明冻土退化对高寒植被的影响。

A地温带以高山稀疏植被为主,并伴有高寒灌丛;B地温带主要为高山稀疏植被和高寒草甸2种;C地温带4种植物均有分布;D地温带以高寒草甸和高寒沼泽草甸为主,高山稀疏植被为辅;E地温带以高寒沼泽草甸和高寒草甸为主,局部地区有高山稀疏植被分布;F地温带以高寒沼泽草甸为主,高寒灌丛和高寒草甸为辅;G地温带以高寒沼泽草甸为主,高寒灌丛和高寒草甸为辅,并出现了稀疏草原;H地温带和I地温带以高寒草甸为主,高寒灌丛和高寒沼泽草甸为辅,并且在I地温带,高寒沼泽草甸消失(表3)。随着冻土地温的升高,群落的优势地位发生了明显改变,主要表现为原有优势种的种类减少,成为群落的伴生种类,进而导致植被类型发生变化,由旱生的高山稀疏植被向湿生的高寒沼泽草甸演替。随着多年冻土地温的升高,活动层的厚度加大,受重力的作用,土壤表层水分呈减少趋势,导致高寒沼泽草甸向高寒草甸演替,如湿生植物(云生毛茛、海乳草等)消失,而中生或中旱生植物(高山嵩草、矮火绒草等)出现。

通过对比不同地温带的物种丰富度、多样性指

数和均匀度分布特征,可以得到I地温带的3个指数最大,A地温带的3个指数最小。随着冻土地温的升高,3个多样性指数呈增加—降低—增加趋势(表3)。随着冻土地温的升高,微生物的活动性增强,土壤养分增多,再者上限附近高含冰量多年冻土的融化,为中生植物种类的入侵和发展提供了生长条件,同时也限制了高寒垫状稀疏植被的生长,使群落结构发生了变化,进而高寒草甸逐渐占优势地位;因此3个多样性指数随着地温的升高呈增加趋势(A地温带—B地温带)。随着冻土地温的持续升高,土壤表层含水量和养分进一步增加,湿植被被逐渐占主导地位,3个多样性指数随着地温的升高呈减小趋势(B地温带—F地温带)。随着冻土地温的继续升高,在土壤养分分解加快和水分向下迁移的作用下,地表趋于干旱化,中生植物种类如高山嵩草、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)等逐渐占优势地位,并有苔草(*Carex tristachya*)、草地早熟禾、矮火绒草、多裂萎陵菜和龙胆(*Gentiana* spp.)等伴生。各个种群在群落内的分布相对均匀,因而物种丰富度、均匀度和多样性指数随着冻土地温的升高,呈增加趋势(F地温带—I地温带)。

表3 大通河源区不同地温带的植被类型的物种丰富度、多样性指数、均匀度

Tab.3 Biodiversity indices of different permafrost temperature zones in the study area

地温带	植被类型	物种丰富度	多样性指数	均匀度
A地温带	高山稀疏植被,高寒灌丛	9.33 ± 4.885bc	0.82 ± 0.33d	0.38 ± 0.10c
B地温带	高山稀疏植被,高寒沼泽草甸,高寒草甸	12.17 ± 3.251c	1.20 ± 0.37cd	0.48 ± 0.11c
C地温带	高山稀疏植被,高寒灌丛,高寒沼泽草甸,高寒草甸	11.89 ± 5.419bc	1.10 ± 0.48d	0.45 ± 0.15c
D地温带	高山稀疏植被,高寒沼泽草甸,高寒草甸	9.55 ± 4.034bc	1.19 ± 0.41bc	0.54 ± 0.11b
E地温带	高山稀疏植被,高寒沼泽草甸,高寒草甸	11.87 ± 3.757abc	1.39 ± 0.38b	0.57 ± 0.11b
F地温带	高寒灌丛,高寒沼泽草甸,高寒草甸	11.79 ± 3.826abc	1.37 ± 0.33bc	0.56 ± 0.09b
G地温带	高山稀疏植被,高寒灌丛,高寒沼泽草甸,高寒草甸	12.34 ± 4.174b	1.44 ± 0.39b	0.58 ± 0.10b
H地温带	高寒灌丛,高寒沼泽草甸,高寒草甸	13.97 ± 3.334a	1.66 ± 0.27a	0.63 ± 0.06a
I地温带	高寒灌丛,高寒草甸	14.65 ± 2.948a	1.69 ± 0.32a	0.63 ± 0.11a

基于上述分析,可见冻土变化对群落演替和物种多样性产生了重大影响。究其原因在于多年冻土作为广泛分布的弱透水层,对源区高寒植被的活动层水分和养分保持起关键作用,因而多年冻土的变化会引发一系列的生态环境效应。多年冻土层作为一个隔水层,能阻止地表水和土壤水分的下渗迁移,并且土壤的低温条件有益于有机质积累,活动层淋溶或淋滤的多种营养成分多聚集在此,为植物生长提供了水分和养分条件<sup>[4-5]</sup>;再者,冻土地温作为冻土环境变化的重要因子,对高寒区的植被生长和土壤理化性质具有重要的影响。因此,冻土地温的升高,打破了活动层中原有的水热平衡,使季节融化深度加深,导致多年冻土上限下降,进而在重力作用下活动层中水分向下迁移,使地表层土壤水分含量明

显降低,地表环境变干。随着冻土活动层厚度的加大,冻结层上水水位变低、补给量变少,毛细上升高度不能达到植被根系分布的浅层土壤中,植被生长环境干旱化,一些不适应这种较为干燥生境的湿生植物消失;而另一些旱生植物开始入侵,从而发生了一个植物群落被另一个植物群落所代替的演替过程。

对比高纬度冻土区和大通河源区高寒植被对冻土退化的响应,发现二者有不同的变化趋势。在高纬度多年冻土区,一些研究表明,由于高含冰量多年冻土消融形成的热融洼地形成汇水负地形,加剧了地表沼泽化过程,使植被类型从陆生生态系统向水生和湿地生态系统演替,并以水生的禾本科植物为主<sup>[5,13,26,29]</sup>。

### 3.4 相同植被类型的物种多样性随冻土地温温度梯度的变化

统计分析了相同植被类型在不同地温带的物种多样性分布特征,如图2所示。由于高山稀疏植被和高寒灌丛在一些冻土地温带内只有1个样点分布,不符合使用LSD方法进行多重比较的条件,但一定程度上仍表明2种植被类型的多样性随冻土地温的升高呈先升高后降低趋势(图2a、2b)。高寒沼泽草甸的3个多样性指数在各个冻土地温带的差异性显著( $P < 0.05$ ),其随冻土地温的升高表现出先降低后增加的趋势(图2c);高寒草甸的物种丰富度指数在各个地温带的差异性不显著,而物种多样性指数和均匀度在各个地温带的差异性显著( $P < 0.05$ );高寒草甸的3个多样性指数随冻土地温的升高呈上升趋势(图2d)。对比不同地温带的高寒沼

泽草甸和高寒草甸的多样性指数,可以发现在温度较高的地温带高寒沼泽草甸的值低于高寒草甸的值,说明高寒沼泽草甸的群落结构比高寒草甸结构简单,物种组成成分低于高寒草甸。

植被类型是在一定时间和空间上由不同种类组成的组合体。在低温冻土环境下,占据优势种的藏嵩草种群在空间占有明显的生态位优势;但是随着冻土地温升高和表层土壤干化,藏嵩草等原生湿生植被遭到破坏,而改变的生境条件使一些湿生物种开始被淘汰并退出该生境,如沼泽草甸在季节冻土区消失。但土壤表层干化的生境条件却为一些中生和中旱生植物的入侵和生长发育创造了有利的条件,随着冻土地温的升高,高寒草甸逐渐占据优势地位,植物种群数量不断增加,物种丰富度和物种多样性升高。

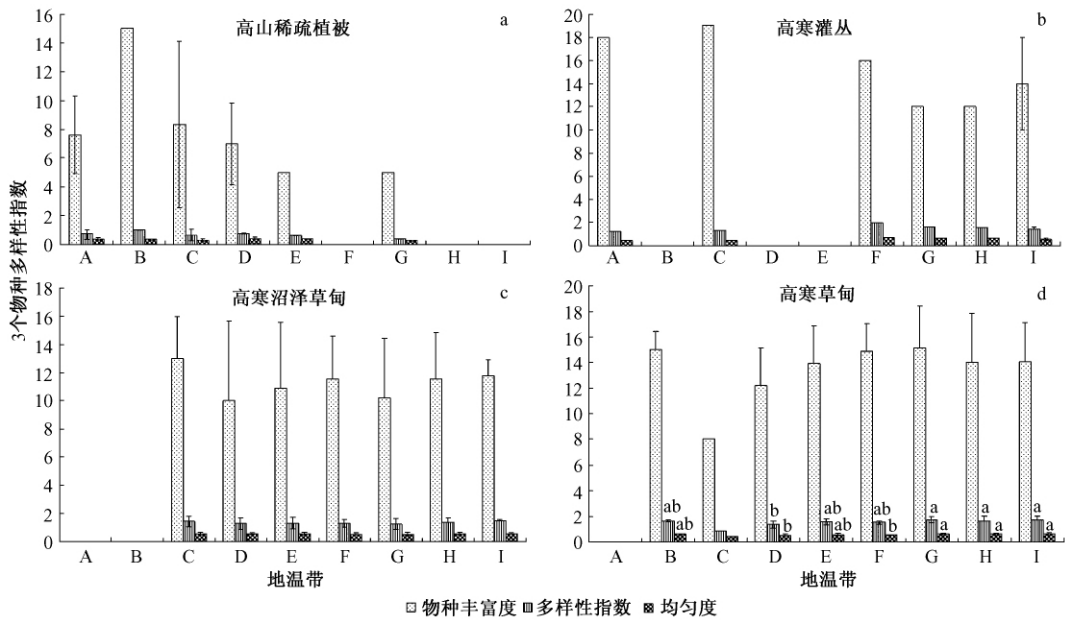


图2 大通河源区相同植被类型在不同地温带的物种丰富度、均匀度、多样性指数  
Fig.2 Biodiversity indices of one plant communities in different permafrost temperature zones

在研究中发现,从E地温带到G地温带( $-1.5 \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )是各种物种多样性指数随地温变化趋势的转折带。根据程国栋等<sup>[26]</sup>的冻土分带方案,发现处于此地温带的冻土属于过渡型和不稳定性多年冻土,对外界的反映比较敏感,同时又是多年冻土的下界分布区;因而当多年冻土逐渐转变为季节冻土时,活动层的水热条件变化最为剧烈,对地表植被的影响最为显著。但是定量分析冻土退化过程中水热变化对高寒生态系统的影响以及建立二者之间的定量关系仍然是我们面对的最大挑战。这是由于多年冻土和高寒生态系统之间存在复杂、动态的相互作用,因而植被对于多年冻土退化的响应应该是渐变的动态过程。对于这种动态响应过程,理论上最

适合的研究方法是基于样方调查的长时间序列的动态观测研究。今后,计划在大通河源区建立长期的定位观测和研究体系,定期监测,以便更好的定量监测、模拟和预测物种多样性的变化趋势,为探讨多年冻土退化过程中的高寒生态系统的变化提供数据。

## 4 结 论

利用祁连山大通河源区的野外调查资料计算了不同群落的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数等,并基于冻土地温时空替代的方式来探讨物种多样性沿冻土地温梯度的变化特征,得到以下结论。

1) 基于植被空间演替序列模式的方法,结果表明,在冻土退化过程中,物种丰富度、多样性指数和

均匀度的变化均表现为先增加后降低的趋势,即高寒沼泽草甸 < 高寒草甸 > 稀疏草原。

2) 随着冻土地温的升高,高寒植被的群落组成和物种多样性发生了变化。植被类型先由高山稀疏植被向高寒草甸演替,再由高寒草甸向高寒沼泽草甸演替,最终由高寒沼泽草甸演化为高寒草甸;群落组成从旱生向中生转变,再从中生向湿生或中湿生逐渐转变,最后转变为中生、中旱生植物;物种丰富度、物种多样性和均匀度均呈上升—降低—上升趋势,并在季节冻土区(I地温带)内达到最大值。

3) 相同植被类型的物种多样性沿冻土地温梯度具有不同变化特征。高山稀疏植被和高寒灌丛的3个多样性指数随着地温的升高呈现先增加后降低的变化趋势;与高山稀疏植被和高寒灌丛的变化趋势相反,高寒沼泽草甸随着地温的升高具有先降低后上升的变化趋势;高寒草甸随着地温的升高呈上升趋势;对比不同地温带的高寒沼泽草甸和高寒草甸的物种多样性指数,发现在较高冻土地温环境下,高寒草甸的多样性指数高于高寒沼泽草甸。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2002, 32(6): 514-520.
- [2] WALKER D A, JIA G J, EPSTEIN H E, *et al.* Vegetation-soil thaw-depth relationships along a low-arctic bioclimatic gradient, Alaska: Synthesis of information from the ATLAS studies [J]. *Permafrost and Periglacial Process*, 2003, 14: 103-123.
- [3] 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2006, 36(8): 743-754.
- [4] 杨建平, 丁永健, 陈仁生, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 278-285.
- [5] 朱元林, 吴紫汪, 刘永智, 等. 青藏高原东部多年冻土对环境的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(3): 129-136.
- [6] 金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 161-173.
- [7] 南卓铜, 高泽深, 李述训, 等. 近30年来青藏高原西大滩多年冻土变化[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 817-823.
- [8] NAN Z T, LI S X, CHENG G D. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(6): 797-804.
- [9] JORGENSEN M T, RACINE C H, WALTERS J C, *et al.* Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska [J]. *Climatic Change*, 2001, 48: 551-579.
- [10] STURM M, RACINE C, TAPE K. Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic [J]. *Nature*, 2001, 11(6837): 546-547.
- [11] 郭正刚, 程国栋, 王根绪. 青藏高原北部高海拔地区嵩草草甸植物多样性分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 95-100.
- [12] 郭正刚, 王根绪, 沈禹颖, 等. 青藏高原北部多年冻土区草地植物多样性[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 149-155.
- [13] 郭正刚, 刘慧霞, 王根绪, 等. 人类工程对青藏高原北部草地群落β多样性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 384-388.
- [14] 郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3294-3301.
- [15] 陈灵芝, 钱迎倩. 生物多样性科学前沿[J]. 生态学报, 1997, 17(6): 565-572.
- [16] 王永健, 陶建平, 张炜银, 等. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1028-1036.
- [17] LLOYD A H, YOSHIKAWA K, FASTIE C L, *et al.* Effects of permafrost degradation on woody vegetation at Arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska [J]. *Permafrost Periglacial Process*, 2003, 14: 93-101.
- [18] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [19] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 江河源区的生态环境变化及其综合保护研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
- [20] 王国宏. 祁连山北坡中段植物群落多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 2002, 10(1): 7-14.
- [21] 王多尧. 祁连山(北坡)青海云杉群落物种多样性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- [22] 谢宗平, 倪永清, 李志忠, 等. 祁连山北坡及河西走廊蝶类垂直分布及群落多样性研究[J]. 草业学报, 2009, 8(4): 195-201.
- [23] 包维楷, 张德铨, 王乾, 等. 青藏高原东部采伐迹地早期人工重建序列梯度上植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 330-338.
- [24] 杨兆平, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原多年冻土区高寒植被物种多样性和地上生物量[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 617-623.
- [25] SHANNAON C E, WEINER W. *The mathematical theory of communication* [M]. Urbana: Unknown Distance Function, Illinois Press, 1949.
- [26] 程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. 冰川冻土, 1982, 4(2): 12-16.
- [27] 盛煜, 李静, 吴吉春, 等. 基于GIS的疏勒河流域上游多年冻土分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 32-39.
- [28] 李静. 祁连山区典型流域的多年冻土分布模型与地温分带特征研究[D]. 北京: 中国科学院, 2010: 86-90.
- [29] OSTERKAMP T E, VIERECK L, SHUR Y, *et al.* Observations of thermokarst and its impact on boreal forests in Alaska, USA [J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2000, 32(3): 303-315.

(责任编辑 赵 勃)