

文章编号:1000-0240(2012)05-1134-08

# 天山乌鲁木齐河源1号冰川退缩地植物群落演替规律及机理研究

刘光琇<sup>1</sup>, 李师翁<sup>2</sup>, 伍修锐<sup>1</sup>, 张昺林<sup>1</sup>, 张宝贵<sup>1</sup>,  
龙昊知<sup>1</sup>, 台喜生<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州交通大学 化学与生物工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以空间代时间的方法,研究了天山乌鲁木齐河源1号冰川退缩地植物群落的演替。结果表明,1号冰川退缩地现代冰期冰碛物上共出现被子植物15科50种,以菊科、禾本科、石竹科和莎草科为主。植物群落演替可明显分为4个阶段,并且表现出菊科→石竹科→禾本科→莎草科的基本演替规律。在时间序列上,物种数、物种丰富度、物种个体数、多样性指数和群落盖度等重要值都与演替时间呈显著正相关。该区域内植物种的分布主要受风力种子传播驱动,种子小而多、易于通过风力传播、且株型低矮抗逆性强的植物种类优先出现,而土壤发育程度则是植物群落演替的直接决定因素。

**关键词:**1号冰川;冰川退缩地;植物群落;演替

**中图分类号:**Q948.15 **文献标识码:**A

## 0 引言

植物群落的形成与演替是植物与环境相互作用的产物,长期以来是植物生态学研究的重要领域。植物群落的形成经历一个从先锋阶段到相对稳定的顶极阶段的演替过程,并伴随物种多样性的变化。随演替进展,群落结构及物种组成的复杂性逐渐增加,群落演替的这种动态变化反映了生态系统形成过程中环境的变化和生物多样性对这种变化的响应过程<sup>[1]</sup>。

自小冰期后,全球气温持续性变暖,冰川作为气候变化最敏感的区域之一,在全球范围内发生了大面积退缩,形成了冰川前缘的原生裸地。这种原生裸地具有土壤物理、化学和生物梯度的时间序列<sup>[2]</sup>,可以冰川末端退缩距离代表演替时间,沿着空间梯度研究生物群落演替的过程<sup>[3]</sup>。因此,冰川前缘是研究原生演替的理想场地。冰川前缘退缩原生裸地上植物群落的演替是典型的原生演替,这种演替是石生演替系列的土壤性演替<sup>[4]</sup>。高山冰缘地带作为一种特殊的景观单元,由于长期处于高寒的

冰缘环境背景之下,其生态系统的发育与演替呈现出特殊的景观特征。目前,有关冰川前缘植物群落及其演替的研究是生态研究的热点领域之一。

天山乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川,86°49' E, 43°06' N)地处欧亚大陆腹地的天山山脉中段,是国际冰川监测网中亚洲中部干旱半干旱区冰川的代表,也是我国研究最早的冰川之一,因而被世界冰川监测服务处(WGMS)选为全球十条代表性冰川之一。自1959年天山冰川站建立以来,在冰川、水文气象、冰雪物理、冻土与冰缘、地貌、气候变化、第四纪冰川环境等方面进行了深入的研究,并取得了大量的研究成果<sup>[5]</sup>。在全球气候变暖的大背景下,1987年起新疆以天山西部为主要地区,年均气温呈现升温趋势,山前平原区年均升温幅度远大于山区,冬季升温明显<sup>[6]</sup>,气候变暖导致天山冰川出现明显退缩,其中1号冰川年均退缩达4.2~4.6 m<sup>[7]</sup>。据此以及冰碛测年和遥感数据的分析,建立了自小冰期以来冰川退缩的明确的时间序列<sup>[8-10]</sup>。因此,天山1号冰川是我国开展冰

收稿日期:2012-03-16;修订日期:2012-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40971034;31170465)资助

作者简介:刘光琇(1962—),男,甘肃民勤人,研究员,2004年在兰州大学获博士学位,现主要从事全球变化生物学方面的研究。

E-mail: liugx@lzb.ac.cn

缘研究及其植物群落演替的最理想区域<sup>[11-14]</sup>。闫顺等<sup>[15]</sup>报道了乌鲁木齐河源区植被有高山草甸和高山垫状植被, 主要植物群系有苔草草甸、嵩草草甸、高山莓草群第、高山红景天群系和莱籽草群系等; 刘光琇等<sup>[16]</sup>系统研究了乌鲁木齐河上游植被与环境关系; 章家恩等<sup>[17]</sup>的研究表明, 天山 1 号冰川前缘地植被和土壤同步演替, 并表现出一定的模式。本文采用空间代替时间的研究方法, 以天山 1 号冰川退缩地为研究区域, 运用对应分析排序(CA)研究了植物群落演替的动态和方向, 并对群落演替中物种组成、数量变化和多样性的变化进行耦合分析, 以期揭示研究区域植物群落原生演替的规律和机理。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

1 号冰川位于天山中段天格尔 II 峰北坡(86°49'E, 43°06'N), 是亚洲干旱及半干旱区冰川的代表。该地区年平均气温-5.2℃, 负温月长达 7—8 个月, 最冷月(1 月份)平均气温-15.6℃, 最热月(7 月份)为 4.9℃, 年平均降水量 441.1 mm<sup>[9]</sup>。自 1959 年有观测记录以来, 1 号冰川一直处于退缩状态, 东、西两支冰舌在 1993 年完全分离, 成为独立的两支冰川<sup>[18]</sup>。研究区海拔 3 750~3 660 m, 冰川退缩地地表形态为流石滩、空冰斗、冰碛丘陵等, 分布着大量冰碛沉积物, 不稳定矿物以普通角闪石为主, 较稳定矿物以绿帘石为主; 轻矿物主要为石英, 碱性长石和斜长石等<sup>[19]</sup>。不同时代的冰碛物及其碎屑物成为生态系统发育的基质。

### 1.2 取样方法

研究分别于 2010 年 8 月和 2012 年 8 月进行, 采用路线调查法与样方调查法相结合的方法, 以 1 号冰川东支退缩前缘为研究区。以冰川末端为起点每约 50 m 范围设置一样点区, 在样点区内间距 5~10 m 选择有植物生长处设置了 3 个平行样方, 样方面积为 1 m×1 m, 进行植物种类、盖度、高度、种数、个体数记录, 对丛生禾草和根茎禾草个体计数以相对分离构件为单位<sup>[20]</sup>, 对垫状植物按丛计数, 结果列入表 1。

### 1.3 数据处理

参考杨利民等<sup>[20]</sup>和李师翁等<sup>[21]</sup>方法对调查所得数据进行物种频度(species frequentness)、物种重要值(importance value)、物种丰富度(species richness)和 Shannon-Wiener 多样性指数计算, 具

体计算方法如下:

物种频度为:

$$S_v = S_i/S \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数为:

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (2)$$

物种重要值为:

$$I_v = N_i/S \quad (3)$$

物种丰富度为:

$$R_r = \ln N_s \quad (4)$$

式中:  $S_i$  为  $i$  种植物出现的样方数;  $S$  为总样方数;  $n_i$  为  $i$  种植物在样方中的个体数;  $N$  为样方中物种个体总数;  $N_i$  为  $i$  种植物在所有样方中的个体总数;  $N_s$  为样方中物种总数。

根据样方内植物分布频度和重要值选取其中频度值和重要值较大的 21 种主要物种, 用趋势对应分析(CA)进行排序, 以分析植被演替的趋势和梯度。CA 和 PCA 分析采用通用软件 CANOCO4.5 软件完成。

## 2 研究结果

### 2.1 冰川退缩地上植物种类、物种重要性及其数量变化

调查共记录研究区域内被子植物 15 科 36 属 50 种, 其中禾本科 9 种、菊科 8 种、莎草科 5 种, 石竹科和玄参科 4 种, 十字花科和虎耳草科各 3 种, 景天科、蔷薇科、伞形科、龙胆科、蓼科和毛茛科各 2 种, 豆科和罂粟科各 1 种(表 1)。植物科组成分析表明, 该区域分布的被子植物科主要为禾本科、菊科和莎草科(图 1)。基于植物个体数的物种重要值计算表明, 在该区域内具有重要性的物种依次为: 菊科火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、鼠麴雪兔子(*Saussurea gnaphalodes*)、萎软紫菀(*Aster flaccidus*)和黄头小甘菊(*Cancriinia chrysocephala*), 石竹科囊种草(*Thylacospermum caespitosum*)和隐瓣蝇子草(*Silene gonosperma*), 虎耳草科山羊臭虎耳草(*Saxifraga hirculus*), 景天科四裂红景天(*Rhodiola quadriifida*), 禾本科新疆早熟禾(*Poa versicolor subsp. Relaxa*)、高原早熟禾(*P. pratensis subsp. Alpigena*)和穗三毛(*Trisetum spicatum*), 莎草科黑褐穗薹草(*Carex atrofusca subsp. Minor*)、黑鳞薹草(*C. melanocephala*)和嵩草(*Kobresia myosuroides*)等。在冰川退缩的时间梯度上, 研究区每个物种的个体数量和样方内植被的盖度都呈线性增加(表 1)。

表 1 1 号冰川退缩地植物种类、个体数量及其在时间序列上的演替

Table 1 The variation of plant species, individual number in the forefield of the Tianshan Mountain Glacier 1 along a chronosequence

| 样点编号                                                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9               | 10              | 11              | 12              | 13     | 14              | 15              | 16   | 17              | 18    | 19   | 20   | 21   | 物种<br>个体<br>总数 | 物种<br>重要<br>频度<br>值 |
|---------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-------|------|------|------|----------------|---------------------|
| 海拔 /m                                                   | 3743 | 3743 | 3735 | 3735 | 3735 | 3724 | 3727 | 3726 | 3716            | 3716            | 3716            | 3700            | 3680   | 3661            | 3661            | 3661 | 3699            | 3696  | 3696 | 3703 | 3703 |                |                     |
| 样点至冰川沿距离 /m                                             | 34   | 55   | 65   | 80   | 95   | 155  | 200  | 250  | 297             | 350             | 395             | 450             | 500    | 550             | 600             | 650  | 700             | 750   | 800  | 850  | 1000 |                |                     |
| 年代 /a                                                   | 8    | 13   | 15   | 19   | 23   | 38   | 50   | 60   | 74              | 88              | 100             | 150             | 200    | 250             | 300             | 330  | 365             | 400   | 3000 |      |      |                |                     |
| 基质                                                      | 石质   | 石质   | 石质   | 石质   | 石质   | 石质   | 石质   | 石质   | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质     | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质+<br>原始<br>土壤 | 石质   | 石质+<br>原始<br>土壤 | 土壤    | 土壤   | 土壤   | 土壤   |                |                     |
| 地衣 Lichen                                               |      |      |      |      |      |      |      |      | +               |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | +++             | +     | ++   | ++   |      |                | 15.9                |
| 藓 Funaria                                               | +    | +    | +    | +    | +    | +    |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | +++             | +     | +    |      |      |                | 17.5                |
| 蕨 Pteridiaceae                                          |      |      |      |      |      | +    |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 |       |      |      |      |                | 3.2                 |
| 珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>                          |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | 3++             | 3++++ |      | 1+   |      | 7              | 0.11 9.5            |
| 山蓼 <i>Oxyria digyna</i>                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | 2++             | 1+    | 1+   |      |      | 4              | 0.06 6.3            |
| 鸟足毛茛 <i>Ranunculus brotherusii</i>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 | 1+    |      | 1+   |      | 2              | 0.03 3.2            |
| 高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>                         |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 |       | 1+   |      |      | 1              | 0.02 1.6            |
| 灰毛罂粟 <i>Papaver canescens</i>                           |      |      |      |      |      |      |      |      | 1+              |                 |                 | 1+              |        |                 |                 |      | 1+              |       |      |      | 1+   | 2              | 0.03 3.2            |
| 无心菜 <i>Arenaria serpylli folia</i>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |                 | 1+              |                 | 4++             |        | 2++             | 3+              | 6++  | 2++             |       |      |      |      | 3              | 0.05 4.8            |
| 隐瓣蝇子草 <i>Silene gonosperma</i>                          |      | 19+  | 16+  | 10+  | 12+  | 1+   | 2++  | 4+   | 4++             | 3++             | 1+              | 1+              | 1+     |                 |                 |      |                 |       |      |      |      | 89             | 1.41 33.3           |
| 卷耳 <i>Cerastium arvense</i>                             |      |      |      |      | 1+   |      |      |      |                 |                 |                 | 1+              |        |                 |                 |      |                 |       |      |      |      | 2              | 0.03 3.2            |
| 囊种草 <i>Thylacospernum caespitosum</i>                   |      |      | 20+  |      |      | 40++ | 40++ | 40++ | 120             | 40++            | 40++            | 60              | 80     | 100             | 60              | 140  | 40++            |       |      |      |      | 740            | 11.75 42.9          |
| 四裂红景天 <i>Rhodiola quadri fida</i>                       |      |      |      |      |      |      |      |      | 1+              | 1+              | 1+              | 2+              | 2++    | 1+              | 1+              | 6++  | 21+             | 25+   | 30   | 6+++ | 23   | 117            | 1.86 30.2           |
| 长瓣红景天 <i>Rhodiola gelida</i>                            |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | 12++            | 6++   | 1+   |      | 1+   | 28             | 0.44 20.6           |
| 裸茎金腰 <i>Chrysoplenium nudicaule</i>                     |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 | 2++    | 1+              | 1+              |      |                 |       |      |      |      | 2              | 0.03 3.2            |
| 山羊臭虎耳草 <i>Saxi fraga hirculus</i>                       |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 | 11++++ |                 |                 | 30++ | 2+              | 16++  | 32   | 2+   | 41   | 134            | 2.13 22.2           |
| 球茎虎耳草 <i>Saxi fraga sibirica</i>                        |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 | 1+    | 1+   | 6+++ |      | 7              | 0.11 6.3            |
| 高原委陵菜 <i>Potentilla pamiroalaica</i>                    |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 | 1+    | 1+   |      | 11++ | 12             | 0.19 4.8            |
| 四蕊山莓草 <i>Sibbaldia tetrandra</i>                        |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 | 30+             |        |                 |                 |      | 60++            | 30+   | 30+  | 60++ | 90   | 300            | 4.76 15.9           |
| 米尔克棘豆 <i>Oxytropis merckensis</i>                       |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 | 1+    | 1+   | 1+   | 1+   | 3              | 0.05 4.8            |
| 天山梭子芹 <i>Pleurospermum lindleyanum</i>                  |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 | 1+    | 1+   | 1+   | 1+   | 4              | 0.06 6.3            |
| 岩生梭子芹 <i>Pleurospermum rupestre</i>                     |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | 1+              | 1+    | 1+   |      |      | 3              | 0.05 4.8            |
| 新疆龙胆 <i>Gentiana prostrata</i><br>var. <i>karelinii</i> |      |      |      |      | 1+   |      |      |      |                 |                 | 1+              |                 |        |                 |                 |      | 2++             |       |      | 2++  |      | 6              | 0.10 9.5            |
| 镰萼喉毛花 <i>Comastoma falcatum</i>                         |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      | 1+              |       |      | 1+   |      | 2              | 0.03 3.2            |
| 碎米蕨叶马先蒿 <i>Pedicularis cheilanthesifolia</i>            |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 |       |      | 1+   |      | 1              | 0.02 1.6            |
| 欧氏马先蒿 <i>Pedicularis oederi</i>                         |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 |       | 1    | 5    | 1    | 16             | 0.25 6.3            |
| 拟鼻马先蒿 <i>Pedicularis rhinanthoides</i>                  |      |      |      |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |                 |        |                 |                 |      |                 |       | 1+   | 2+   | 1+   | 4              | 0.06 4.8            |

表 1 1 号冰川退缩地植物种类、个体数量及其在时间序列上的演替(续)

Table 1 The variation of plant species, individual number in the forefield of the Tianshan Mountain Glacier 1 along a chronosequence(Continued)

| 样点编号                                                      | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 物种<br>总数 | 物种<br>重要<br>值 | 物种<br>频度<br>/% |
|-----------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|---------------|----------------|
| 长果婆婆纳 <i>Veronica ciliata</i>                             |     |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 1+    |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    |       |       | 3        | 0.05          | 7.9            |
| 阿尔泰葶苈 <i>Draba altaica</i>                                |     |       |       | 1+    |       |       |       | 1+    | 1+    |       |       | 2++   |       |       |       | 1+    | 2+    |       |       |       | 2++   | 10       | 0.16          | 15.9           |
| 喜山葶苈 <i>Draba oreades</i>                                 |     |       |       |       |       |       |       | 1+    | 1+    |       |       | 2++   |       |       |       | 1+    | 1+    |       |       |       | 1+    | 7        | 0.11          | 11.1           |
| 高山离子芥 <i>Chorispora bungeana</i>                          |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    |       |       |       |       |       |       |       | 1        | 0.02          | 1.6            |
| 萎软紫菀 <i>Aster flaccidus</i>                               |     |       |       |       |       |       |       | 1+    |       | 32++  | 11    | 32    | 39    | 19++  | 21++  | 35    | 44    | 69++  |       |       |       | 303      | 4.81          | 39.7           |
| 黄头小甘菊 <i>Cancrinia chryscephala</i>                       | 1+  | 4+    | 3+    | 2++   | 6++   | 1+    | 3     | 3     | 18    | 4++   | 10++  | 7     | 1+    | 3++   | 6     | 6     | 14    |       |       |       |       | 91       | 1.44          | 55.6           |
| 火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>                   |     |       |       |       | 1+    | 1+    | 1+    | 2++   |       | 57    | 5     | 55    | 36    | 122   | 15    | 12    | 21    | 44    | 4++   | 5+    |       | 383      | 6.08          | 55.6           |
| 雪莲花 <i>Saussurea involucrata</i>                          |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 1+    |       |       |       |       |       |       |       |       | 2        | 0.03          | 3.2            |
| 阿尔泰蒲公英 <i>Taraxacum altaicum</i>                          |     |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 33++  | 26+   | 31+   |       | 10+   | 61++  | 117++ | 36++  |       |       | 28+   | 343      | 5.44          | 22.2           |
| 鼠麴雪兔子 <i>Saussurea gnaphalodes</i>                        |     |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 2+    | 3++   | 3++   |       |       |       | 3++   |       |       |       | 2+    | 11       | 0.17          | 15.9           |
| 天山风毛菊 <i>Saussurea larionovii</i>                         |     |       |       |       |       |       |       | 1+    |       |       |       | 2+    |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 3        | 0.05          | 4.8            |
| 菊科 spl                                                    |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 4     | 95       | 1.51          | 46.0           |
| 高山早熟禾 <i>Poa alpina</i>                                   |     |       |       |       | 6+++  | 1+    | 1+    | 2++   | 3++   | 9++   | 5+    | 11++  | 13++  | 8+++  | 13++  | 5++   | 11++  | 3++   |       |       |       |          |               |                |
| 高原早熟禾 <i>Poa pratensis</i>                                |     |       |       |       | 10+++ | 1+    | 1+    | 2++   | 5++   | 10++  | 5+    | 3+    | 3+    | 2+    | 18++  | 3+    | 10++  | 16++  |       |       | 3     | 92       | 1.46          | 39.7           |
| subsp. <i>Alpigena</i>                                    |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 5+++  |       |       |          |               |                |
| 胎生早熟禾 <i>Poa attenuata</i> var. <i>virens</i> <i>para</i> |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 6     | 12       | 0.19          | 9.5            |
| 新疆早熟禾 <i>Poa versicolor</i>                               |     |       |       |       |       | 1+    | 1+    | 1+    | 4+    | 6+    |       | 2+    | 10++  | 6+    | 31++  | 5+    | 2+    | 46+++ |       |       |       | 115      | 1.83          | 28.6           |
| subsp. <i>Relaxa</i>                                      |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |               |                |
| 花丽早熟禾 <i>Poa calliopsis</i>                               |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 3+++  |       |       |       |       |       | 2+    |       |       | 5        | 0.08          | 4.8            |
| 穗三毛 <i>Trisetum spicatum</i>                              | 1+  |       | 1+    |       | 3+    |       | 1+    | 4     | 7++   | 2+    | 11    | 13    | 2+    | 5++   | 12++  | 3++   | 1+    | 30    | 1+    |       |       | 97       | 1.54          | 42.9           |
| 疏花针茅 <i>Stipa penicillata</i>                             |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |               |                |
| 短叶羊茅 <i>Festuca brachyphylla</i>                          |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 2+    | 1+    | 1     | 4        | 0.06          | 4.8            |
| 微药羊茅 <i>Festuca nitidula</i>                              |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 2+    | 6++   | 2++   | 2++   | 1+    |       |       | 13       | 0.21          | 12.7           |
| 黑鳞薹草 <i>Carex melanoccephala</i>                          |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1+    | 4++   | 1+    | 2++   |       |       |       | 8        | 0.13          | 9.5            |
| 黑褐薹草(白尖苔草) <i>Carex atrofusca</i> subsp. <i>Minor</i>     |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 20++  | 30+   | 14+   | 64       | 1.02          | 4.8            |
| 蒿草 <i>Kobresia myosuroides</i>                            |     |       |       |       |       |       |       | 60+   |       |       |       |       |       | 20+   |       | 20+   | 20+   |       | 40++  | 50++  | 35+   | 245      | 3.89          | 15.9           |
| 线叶蒿草 <i>Kobresia capilli folia</i>                        |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 20++  | 10+   | 30+   | 60       | 0.95          | 4.8            |
| 矮生蒿草 <i>Kobresia humilis</i>                              |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 20++  | 20+   | 10+   | 50       | 0.79          | 4.8            |
| 总个体数                                                      | 1   | 24    | 20    | 14    | 42    | 8     | 11    | 26    | 106   | 133   | 89    | 166   | 150   | 206   | 146   | 211   | 301   | 304   | 208   | 174   | 228   |          |               |                |
| 物种数                                                       | 1   | 4     | 4     | 5     | 11    | 8     | 7     | 13    | 13    | 15    | 14    | 17    | 15    | 14    | 16    | 19    | 29    | 21    | 26    | 19    | 25    |          |               |                |
| 物种丰富度                                                     | 0   | 0.602 | 0.699 | 1.041 | 0.903 | 0.845 | 1.114 | 1.114 | 1.176 | 1.146 | 1.230 | 1.176 | 1.146 | 1.204 | 1.279 | 1.462 | 1.322 | 1.415 | 1.279 | 1.398 | 0.602 |          |               |                |
| Shannon-Wiener 多样性指数                                      | 0   | 0.268 | 0.266 | 0.389 | 0.820 | 0.828 | 0.857 | 1.059 | 0.658 | 0.766 | 0.885 | 0.894 | 0.861 | 0.674 | 1.011 | 0.983 | 0.968 | 0.976 | 1.031 | 0.932 | 1.090 |          |               |                |
| 植被盖度/%                                                    | 0.5 | 1     | 2     | 2     | 4     | 4     | 6     | 7     | 8     | 10    | 10    | 11    | 16    | 23    | 22    | 17    | 55    | 60    | 85    | 90    | 90    |          |               |                |

注: +表示物种只在 1 个样方出现, ++表示物种在 2 个样方出现, +++表示物种在 3 个样方出现。

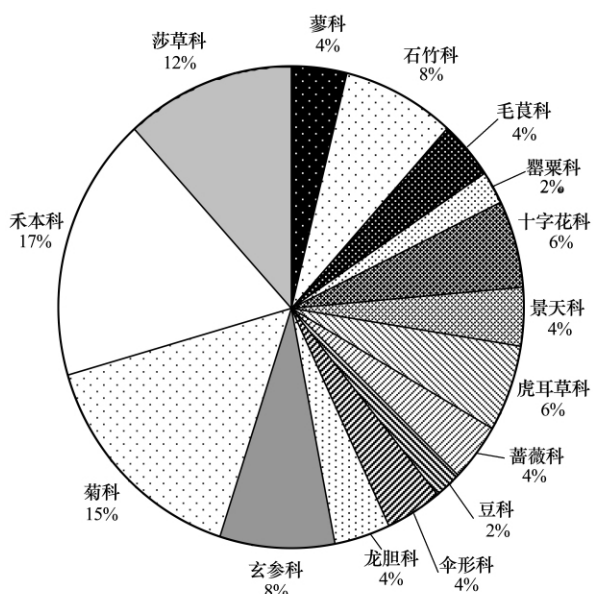


图1 1号冰川退缩地被子植物科的组成

Fig.1 The Family compositions of angiosperm in the forefield of the Tianshan Mountain Glacier No.1.

## 2.2 冰川退缩地上植物的演替规律

通过物种频度分析表明(表1),在最近的现代冰碛物上(10~20 a)最早出现的被子植物种为菊科火绒草和黄头小甘菊、石竹科囊种草和隐瓣蝇子草、景天科红景天、禾本科早熟禾和穗三毛。在中期现代冰碛物上(50~100 a)出现的被子植物种有菊科萎软紫菀和鼠麴雪兔子、虎耳草科山羊臭虎耳草、石竹科无心菜(*Arenaria serpyllifolia*)和卷耳(*Cerastium arvense*)、蔷薇科四蕊山莓草(*Sibbaldia tetrandra*)、龙胆科新疆龙胆(*Gentiana prostrata* var. *karelinii*)、十字花科阿尔泰葶苈(*Draba altaica*)、玄参科长果婆婆纳(*Veronica ciliata*)、莎草科黑褐穗藁草等。在小冰期冰碛物上(100~400 a),在局部平缓处有一些土壤发育,一些土生被子植物开始出现,如蓼科珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)和山蓼(*Oxyria digyna*)、玄参科欧氏马先蒿(*Pedicularis oederi*)、伞形科岩生棱子芹(*Pleurospermum rupestre*)、禾本科胎生早熟禾(*Poa attenuata* var. *vivipara*)、短叶羊茅(*Festuca brachyphylla*)和微药羊茅(*Festuca nitidula*)等。在新冰期冰碛物上(3 000 a以上),土壤发育程度深化,土壤有机质增加,土壤厚度达到20~30 cm,草甸植被发育较好,盖度达85%已上,新出现的植物主要有莎草科黑褐穗藁草、黑鳞藁草、嵩草、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)和矮生嵩草(*K. humilis*)等,形成苔草草甸、嵩草草甸和山梅草草甸等植被

类型。CA 排序分析表明(图2),研究区域植物群落的演替可明显分为4个阶段:第1阶段(8~50 a)出现黄头小甘菊和隐瓣蝇子草等极少数植物种;第2阶段(50~200 a)出现的典型物种有囊种草、火绒草、鼠麴雪兔子、萎软紫菀和穗三毛等;第3阶段(200~400 a)的代表植物种有四蕊山莓草、山羊臭虎耳草、四裂红景天、新疆早熟禾和黑褐穗藁草;第4阶段(3 000 a以上)代表植物种有黑鳞藁草、嵩草、矮生嵩草和线叶嵩草。综上可以看出,植物种的演替具有由菊科→石竹科→禾本科→莎草科的典型特征,这与植物繁殖特性和对极端环境的适应特征密切相关。

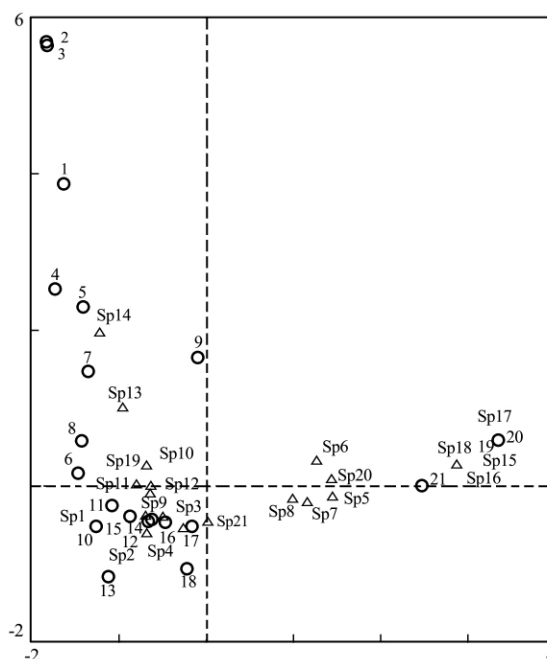


图2 不同演替阶段群落样地与物种分布的 CA 排序

图中1~21为样地编号; Sp1~Sp21为主要物种编号

Fig.2 CA ordination graph of the community at the different successional stages

## 2.3 冰川退缩地上植物种丰富度和多样性指数随年代的变化

研究结果表明,在冰川退缩的时间梯度上,研究区植物种的丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均随退缩年代的增加而增加。由于退缩地上局部地域内土壤发育程度的显著差异,如冰碛垄顶部主要为巨石,很少有土壤发育,而在冰碛垄沟平缓处存在不同发育程度的土壤基质,因而造成物种的丰富度和多样性指数出现波动(图3)。这充分说明在以流石为主要基质的冰川退缩地上,植被的发育完全依赖于土壤的发育,而植物种类和多样性的变化则决定于适应这一区域的环境气候因素。PCA

分析表明(图 4), 以时间序列为第 1 轴可以解释植物群落各重要值的 95.6%, 充分说明在研究区域内, 植物种数、个体数、物种丰富度、物种多样性指数和植被盖度等都与时间序列呈正相关, 且各重要值间也呈显著正相关。

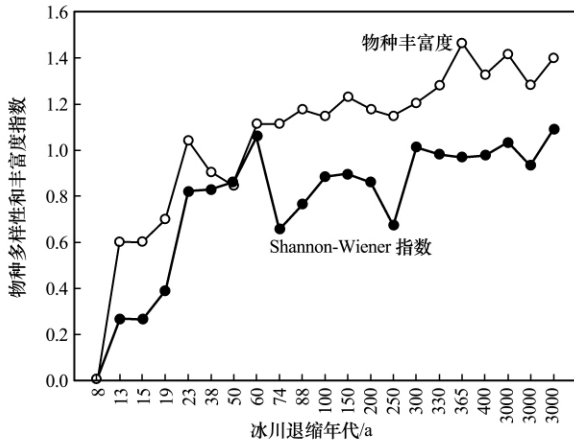


图 3 1 号冰川退缩地植物种的丰富度和多样性指数随时间的变化

Fig. 3 The variation of plant species diversity and richness index in the forefield of the Tianshan Mountain Glacier No. 1 along the chronosequence

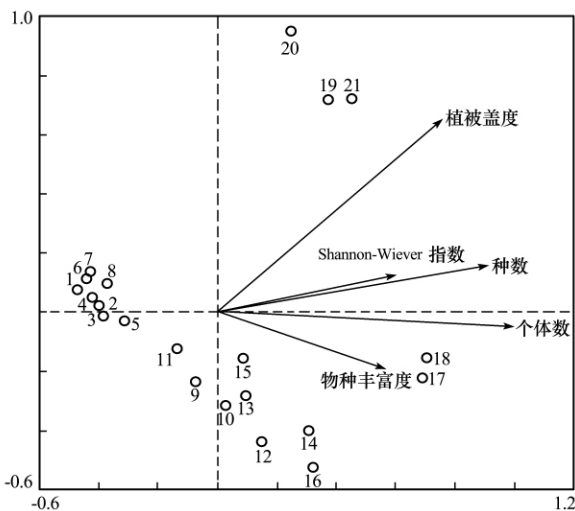


图 4 植物群落的主要特征值随年代变化的 PCA 分析  
图中 1~21 为样地编号

Fig. 4 PCA graph of the community eigenvalues along the chronosequence

### 3 讨论

高山冰川前缘地带系指经历多次冰川环境变化, 冰川退缩后形成的新老冰碳物的绵延地带, 是环境变化的敏感地带。高山冰缘地带作为一种特殊的景观单元, 由于长期处于高寒的冰缘环境背景之下, 其生态系统的发育与演替呈现出特殊的景观

特征。

1 号冰川退缩地上, 从现代冰川冰碛、小冰期冰碛到新冰期冰碛的范围内均为流石滩和流石丘陵, 土壤的发育非常原始。在现代冰川冰碛的局部地域, 冰川作用和冻融作用共同形成石灰岩沙状物基质, 开始有植物生长。随着年代的增加和气候变暖, 石灰岩沙状物基质湿度增加, 苔藓类植物开始繁育, 植物腐烂物出现并逐年积累, 从而出现了原始土壤的发育。在冰碛物暴露 100 a 以后, 其上才出现地衣类的茂盛生长繁育, 但其对岩石的分化作用非常微弱。真正的土壤发育形成出现在新冰期冰碛上, 在经历了 3 000 多年的发育, 这一区域内土壤厚度已达到 20~30 cm, 苔草草甸和嵩草草甸的发育基本完成。植物群落的演进, 促进了土壤的发育和土壤肥力的提高, 同时土壤肥力的提高<sup>[22]</sup>, 又为群落物种生长、竞争与物种更替提供了驱动力。在冰川退缩地上, 植物群落演替明显反映出时间序列特征, 而土壤的发育则是植物群落演替的直接驱动力。

从现代冰川冰碛、小冰期冰碛到新冰期冰碛的范围内, 虽然时间跨度达 400 a, 但植被发育和演替仍处于原始演替阶段, 植物种类少, 生长缓慢, 平均植被盖度在 5% 以下。随着演替的进行, 土壤的发育也不断增加, 植物种类开始增多, 物种多样性升高。这与其他植物群落演替过程中物种多样性的变化规律一致<sup>[23]</sup>, 即物种的多样性随演替进行而升高, 但最高值常出现在演替中后期, 随后略有下降。研究区域内植物群落演替过程中物种丰富度的变化格局, 符合经典学说, 即物种丰富度随演替逐渐增加, 至演替后期时物种丰富度达最大<sup>[24]</sup>。但是该区域植物群落演替并未达到稳定阶段。

研究区域内植物的演替具有明显的规律, 植物种的演替具有由菊科→石竹科→禾本科→莎草科的典型特征。风力种子传播是植物扩大分布区的唯一途径, 种子小且多、易于通过风力传播, 且低矮抗逆性强的植物种类优先出现, 菊科、禾本科、石竹科和景天科一些种具有优势, 如菊科的火绒草、黄头小甘菊、鼠麴雪兔子、萎软紫菀等, 具有植株低矮被毛, 抗逆性强, 种子具冠毛极易传播等特征。景天科长鳞红景天和四裂红景天, 种子小具翅, 抗逆性极强, 因而较早出现。石竹科囊种草为典型垫状植物, 隐瓣蝇子草种子圆形具翅, 禾本科早熟禾和穗三毛耐低温, 易种子繁殖。这些植物种均可在石质基质上和石缝中生长, 因而率先出现在冰碛物

上。苔草和嵩草需生长在湿润发育较好的土壤基质上,因而出现在新冰期冰碛上。调查发现,由于新冰期冰碛上分布的草甸植被已被充分放牧,禾本科植物尚未结实之前就被羊采食,使得这类植物种子繁殖途径被阻断,一定程度上延缓和改变着冰川退缩地上植物的演替。

# 参考文献(References):

- [1] Zhang Jiyi, Zhao Halin, Zhang Tonghui, *et al.* Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin Sandy Land[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28** (1): 86—92. [张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(1): 86—92.]
- [2] Sigler W V, Zeyer J. Colony-forming analysis of bacterial community succession in deglaciated soils indicates pioneer stress-tolerant opportunists[J]. *Microbial Ecology*, 2004, **48**: 316—323.
- [3] Diana R N, Suzanne A, Cory C C, *et al.* Microbial community succession in an unvegetated, recently deglaciated soil[J]. *Microbial Ecology*, 2006, **53**: 110—122.
- [4] Ren Hai, Cai Xian, Rao Xinquan, *et al.* The theory on succession of plant community[J]. *Ecologic Science*, 2001, **20** (4): 59—67. [任海, 蔡锡安, 饶兴权, 等. 植物群落的演替理论[J]. *生态科学*, 2001, **20**(4): 59—67.]
- [5] Li Zhongqin, Ye Baisheng. Ten years of progress in the Tianshan Glaciological Station[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3): 280—286. [李忠勤, 叶柏生. 天山冰川观测试验站 10 年来的回顾与展望[J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(3): 280—286.]
- [6] Wang Guoya, Shen Yongping, Mao Weiye. Climate warming at headwater of Ürümqi River, Xinjiang in past 44 years and its impact on glacier shrinking[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(6): 813—818. [王国亚, 沈永平, 毛炜峰. 乌鲁木齐河源区 44 年来气候变暖特征及其对冰川的影响[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(6): 813—818.]
- [7] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, *et al.* A summary of 40 year observed variation facts of climate and glacial No. 1 at headwater of Ürümqi River, Tianshan, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 117—123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40 年观测事实[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 117—123.]
- [8] Yi Chaolu, Jiao Keqing, Liu Kexin, *et al.* ESR dating on tills and the last Glaciation at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(4): 389—393. [易朝路, 焦克勤, 刘克新, 等. 冰碛物 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源末次冰期系列[J]. *冰川冻土*, 2001, **23**(4): 389—393.]
- [9] Jiao Keqing, Jing Zhefan, Han Tianding, *et al.* Variation of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(3): 253—260. [焦克勤, 井哲帆, 韩添丁, 等. 42 年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化及趋势预测[J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(3): 253—260.]
- [10] Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Li Zhongqin. Glacial geomorphology and glaciations at the headwaters of the Ürümqi river, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **23**(1): 118—125. [赵井东, 施雅风, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河流域冰川地貌与冰期研究的回顾与展望[J]. *冰川冻土*, 2011, **23**(1): 118—125.]
- [11] An Lizhe, Liu Yanhong, Feng Guoning, *et al.* Studies on ecological properties of alitfrigetic subnival vegetation at the source area of Ürümqi River [J]. *Acta Botanica Boreali—Occidentalia Sinica*, 2000, **20**(1): 98—105. [安黎哲, 刘艳红, 冯国宁. 乌鲁木齐河源区高寒冰缘植被的生态特征研究[J]. *西北植物学报*, 2000, **20**(1): 98—105.]
- [12] Wu Xiukun, Zhang Wei, Liu Guangxiu, *et al.* Bacterial diversity in the foreland of the Tianshan Glacier No. 1, China [J]. *Environment Research Letters*, 2012, **7**(1): 014038.
- [13] Zhang Wei, Zhang Gaosen, Liu Guangxiu, *et al.* Diversity and its temporal-spatial characteristic of eukaryotic microorganisms on Glacier No. 1 at the Ürümqi river head, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **23**(5): 906—913. [张威, 张高森, 刘光琇, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川中真核微生物多样性分布及时空变化研究[J]. *冰川冻土*, 2010, **23**(5): 906—913.]
- [14] Zhang Gaosen, Zhang Wei, Liu Guangxiu, *et al.* Distribution of aerobic heterotrophic bacteria managed by environmental factors in glacier foreland[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 965—971. [章高森, 张威, 刘光琇, 等. 环境因素主导着冰川前沿裸露地好氧异养细菌群落的分布[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 965—971.]
- [15] Yan Shun, Jia Baoquan, Xu Yingqin, *et al.* The surface sampling of vegetation and pollen in source area of the Ürümqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, **18** (Supplement): 264—272. [闫顺, 贾宝全, 许英勤, 等. 乌鲁木齐河源区植被及表土花粉[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(增刊): 264—272.]
- [16] Liu Guangxiu, An Lizhe, Chen Guichen. Research on Relationship between Vegetation and Environment in the Upper Reaches of Ürümqi River[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2004: 4, 24—29. [刘光琇, 安黎哲, 陈桂琛. 乌鲁木齐河上游植被与环境关系研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2004: 4, 24—29.]
- [17] Zhan Jiaen, Hu Shuangxi. The development and evolution of landscape in front of alpine glacier—A case study from the front area of No. 1 glacier in Tianshan Mountain[J]. *Arid Zone Research*, 1997, **14**(4): 38—43. [章家恩, 胡双熙. 高山冰川前缘地带景观生态的发育与演替——以天山 1 号冰川为例[J]. *干旱区研究*, 1997, **14**(4): 38—43.]
- [18] Jiao Keqing, Wang Chongzu, Han Tianding. A strong negative mass balance appeared in the headwater of the Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(1): 62—64. [焦克勤, 王纯足, 韩添丁. 天山乌鲁木齐 1 号冰川新近出现大的物质负平衡[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(1): 62—64.]
- [19] Luo Hongzhen. Hydrochemical features of the Glacier No. 1 in the source region of Ürümqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, **5**(2): 55—64. [骆鸿珍. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的水化学特征[J]. *冰川冻土*, 1983, **5**(2): 55—64.]
- [20] Yang Liming, Hanmei, Li Jiandong. Plant diversity change in

- grassland communities along a grazing disturbance gradient in the Northeast China transect[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(1): 110—114. [杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(1): 110—114.]
- [21] Li Shiwen, Xue Lingui, Feng Huyuan, *et al.* The studies on the plant diversity of natural grassland in hilly region of the Loess Plateau in Gansu Eastern[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, **27**(2): 238—242. [李师翁, 薛林贵, 冯虎元, 等. 陇东黄土高原丘陵沟壑区天然草地植物多样性研究[J]. *植物研究*, 2007, **27**(2): 238—242.]
- [22] Zuo Xiaolan, Zhao Xueyong, Zhao Halin. Effects of shrub on understory herbaceous plants and soil properties in the restoration processes of degraded vegetation in Horqin Sand Land [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 643—647. [左小安, 赵学勇, 赵哈林. 沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 643—647.]
- [23] Otto R, Krusi B O, Burga C A. Old field succession along a precipitation gradient in the semi-arid coastal region of Tenerife[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **65**: 156—178.
- [24] Chitra B B, Torstein S, Ole R V. Temporal changes in species diversity and composition in abandoned fields in a trans-Himalayan landscape, Nepal[J]. *Plant Ecology*, 2009, **201**(2): 383—399.

## Studies on the Rule and Mechanism of the Succession of Plant Community in the Retreat Forefield of the Tianshan Mountain Glacier No.1 at the Headwaters of Ürümqi River

LIU Guang-xiu<sup>1</sup>, LI Shi-weng<sup>2</sup>, WU Xiu-kun<sup>1</sup>, ZHANG Bing-lin<sup>1</sup>, ZHANG Bao-gui<sup>1</sup>, LONG Hao-zhi<sup>1</sup>, TAI Xi-sheng<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. School of Chemical and Biological Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** The succession of plant community in the retreat forefield of the Tianshan Mountain Glacier No. 1 was investigated by the method of the distance substitute for ages. The results showed that there are 50 species belong to 15 families that grow in this region and the main families are Compositae, Gramineae, Caryophyllaceae, and Cyperaceae. The succession of plant community can be divided into four stages that shows the rule of the species appearance following Compositae→Caryophyllaceae→Gramineae→Cyperaceae. The species number, species richness, species individual number,

diversity index and vegetation coverage show a significant positive correlation with the succession chronosequence. The distribution expansions of the plant species in this region are driven by seed dispersal which can spread with the wind force. Therefore, the pioneer plants are those species that possess a lot of small seeds which is able to easily spread with wind force, and possess a dwarf plant type and a strong stress resistance. The development level of the soil in this region is the key factor that limit the succession of plant community.

**Key words:** the Tianshan Mountain Glacier No. 1; glacier retreat forefield; plant community; succession