

文章编号: 1000-4025-(2000)06-1063-07

乌鲁木齐河源区高寒冰缘植物 化学元素的含量特征^{*}

安黎哲^{1, 2}, 刘艳红³, 冯虎元², 冯国宁², 程国栋¹

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 2 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000; 3 甘肃省高科技创业服务中心, 兰州 730000)

摘 要: 分析了乌鲁木齐河源区 35 种冰缘植物 16 个元素含量的特征。含量 $> 5\,000\ \mu\text{g/g}$ 的元素为 Ca, 在 $1\,000\sim 5\,000\ \mu\text{g/g}$ 之间的元素有 K、Mg、Na、Fe, 在 $10\sim 200\ \mu\text{g/g}$ 之间的元素有 Zn、Mn、Sr、Cr、Pb, 含量 $< 10\ \mu\text{g/g}$ 的元素有 Cu、Ag、Co、Li、Cd、Ni。元素含量特点是 $\text{Ca} > \text{K}$ 型。大多数冰缘植物的 Fe、Sr、Mn、Cr、Cd 的含量高于一般的自然含量, 但 Cu 的含量低于陆生植物必需浓度。不同的植物元素含量变异较大。高山草甸、高山垫状植被、高山流石堆植物 3 个垂直分布带的冰缘植物吸收各元素含量的趋势基本一致, 顺序为 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Sr}$, 高山流石堆植物的 Ca、Na 的平均含量明显高于高山草甸、高山垫状植被, 而 K 的平均含量低于这 2 个植被带的植物, 这 3 个植被带的植物吸收各元素的含量的差异, 反映了冰缘植物与高寒环境相适应的特征。

关键词: 冰缘植物; 植物元素含量; 乌鲁木齐河源区

中图分类号: Q 948.12 **文献标识码:** A

Studies on the characteristics of element contents of altifrigetic subnival vegetation at the source area of Urumqi River

AN Lirzhe^{1, 2}, LIU Yan-hong³, FENG Hu-yuan², FENG Guo-ning², CHEN G Guo-dong¹

(1 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, Lanzhou 730000, China; 2 School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 73000, China; 3 High-Tech Innovation Service Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The characteristics of the contents of 16 elements (Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Sr, Pb, Cd, Ag, Li, Cr) in 35 plant species in alpine periglacial environments

^{*} 收稿日期: 1999-10-25

基金项目: 中国科学院重点项目 B(KZ952-S1-216)、中国科学院兰州冰川研究所冻土工程国家重点实验室基金和新疆阜康荒漠生态系统定位站基金资助项目(9808)。

作者简介: 安黎哲(1963—), 男(汉族), 博士, 副教授。

collected from the source area of Urumqi River were investigated. The average content of Ca was higher than $5\,000\ \mu\text{g/g}$, that of K, Mg, Na and Fe ranged between $1\,000$ and $5\,000\ \mu\text{g/g}$, and that of Zn, Mn, Sr, Cr and Pb ranged between 10 and $200\ \mu\text{g/g}$, and that of Cu, Ag, Co, Li, Cd and Ni were less than $10\ \mu\text{g/g}$. The main character of the element contents was of the $\text{Ca} > \text{K}$ type. The element contents of Fe, Sr, Mn, Cr and Cd in most plant species were higher than average natural contents and the lowest content of Cu of altifrigetic subnival vegetation was lower than that of terrestrial vegetation. The sequence absorbing elements of alpine meadow, alpine cushion vegetation and alpine talus plant species in periglacial environments from three vertical distribution zones was consistent and that was $\text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Sr}$. The element contents of Ca and Na in alpine talus plant species were higher than that of other two zones and it had lower content of K. There were greater differences in the element contents of plant species collected from different zones. The results showed that altifrigetic subnival vegetation had the characteristics to adapt to geographical environments.

Key words: subnival plants; element contents; the source area of Urumqi River

乌鲁木齐河源区, 是进行高山冰川、冻土、干旱区高山地理研究的理想场所, 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^[1], 而对寒区冰缘植物的研究较少, 在一些地区仅进行了传统的分类学和简单的形态结构学研究, 此外, 在植物群落的发育、类型、生态特征、植物的适应性特征等生物过程及其与环境关系方面的研究已有报道^[2]。本研究作为乌鲁木齐河源区高寒冰缘植被系列研究的一部分, 对这一地区冰缘植物中元素含量特征进行了分析。旨在探讨寒区冰缘植物与环境之间的相互关系, 这对充实和发展冰川冻土、寒区植物的发育、演化和寒区生态学有着重要的意义, 为植物地球化学研究和冰缘植物的开发利用提供重要的科学依据。

1 自然环境概况

本研究区域位于新疆天山中段乌鲁木齐河源区, 野外调查与采样位于海拔 $3\,100\sim 3\,940\ \text{m}$ 之间的高山草甸、高山垫状植被和高山石堆稀疏植被区域内。由于长期经受第四纪冰川作用, 冰蚀、冰积现象保存尚好, 在海拔 $3\,500\ \text{m}$ 以上的山谷可见成层槽谷、岩坎与岩盆、冰斗、羊背岩—毛卷岩等冰蚀地形。在海拔 $2\,800\ \text{m}$ 以上的谷地中, 还保存着各个冰川作用阶段的碛垅或冰碛物, 冰碛环境显著。本区阳坡海拔 $3\,250\ \text{m}$ 以上和阴坡 $2\,900\ \text{m}$ 以上, 发育着高山多年冻土, 在此海拔以下, 发育着季节性冻土。岩屑坡、倒石坡、石冰川、融冻泥流、冻分选作用、多年生冻土上冰锥、热融坍塌等冰缘作用在该区较为普遍, 由于冰蚀、冰积和冰缘作用, 地表形态较为复杂, 并造成了许多向阳背阴、沼泽、阴湿寒冷的小环境。

该区年均气温为 $-5.5\ ^\circ\text{C}$, 气温差为 $35.9\ ^\circ\text{C}$, 植物生长期 $6\sim 9$ 月气温高于 $0\ ^\circ\text{C}$, 但低于 $5\ ^\circ\text{C}$, 其余各月均为负温, 年降水量为 $431.2\ \text{mm}$ 。降雪量占全年总降水量的 74.5% , 降水主要集中在夏季 $5\sim 8$ 月, 植物生长期 $5\sim 8$ 月为 $277\ \text{mm}$, 占全年的 65% 左右。年蒸发量为 $479.7\ \text{mm}$, 干旱指数为 1.25 , 相对湿度一般在 $60\%\sim 70\%$ 之间。紫外辐射强烈, 风

大。土壤为与植被发育同步的冻土锥形土。

2 材料与方法

2 1 样品采集

采集植物为群落优势种和主要伴生种的叶片或嫩枝叶。样品采回后风干, 细心清理样品上的尘土, 粉碎后待测定。

2 2 样品分析

每个植物样品平行 3 份, 经酸溶后, 用 ICP 等离子体光谱测定元素含量。

3 结果和讨论

3 1 乌鲁木齐河源区冰缘植物元素含量的特征

表 1 乌鲁木齐河源区冰缘植物的元素含量(μg/g DW)

Table 1 Summary statistics of the contents (μg/g DW) of elements in 35 alitfrigetic subnival vegetation collected from the source area of Tianshan Urumqi River

序号	Ca	Mg	Na	K	Fe	Zn	Mn	Cu
1	2412	1127	727	2634	1134 5	81. 66	53. 04	16. 03
2	1050	387. 6	312. 4	1650	126. 2	12. 02	9. 45	3. 65
3	11900	4466	447. 2	5956	2235. 5	49. 36	72. 27	7. 9
4	6696	4544	471. 2	2664	2832. 3	47. 49	81. 6	10. 73
5	21000	4550	8406	650	756	256. 6	220	13. 67
6	29500	4776	12800	123	1327. 5	51. 81	2976	9. 46
7	6300	3770	335. 8	4166	546. 6	85. 36	35. 88	12. 2
8	11900	4994	409. 2	6246	765. 3	31	38. 63	5. 97
9	6994	4646	391. 4	4146	1241. 6	49. 3	66. 24	6. 16
10	4528	2572	378	2660	536	100	58	40. 48
11	10800	4134	459. 8	9756	711. 3	32. 85	108. 9	5. 73
12	21180	3478	7755	156	1289. 6	38	57. 6	5. 2
13	6130	4864	373. 4	6968	764. 77	45. 1	47. 6	3. 89
14	5788	4386	339. 4	5130	1309. 3	39. 84	41. 77	3. 71
15	20420	3442	12500	106. 5	404. 91	63. 9	74. 49	3. 52
16	5538	4140	301. 4	5500	302. 9	68. 3	45. 3	5. 22
17	3028	4866	445	4692	685. 1	74. 9	791. 95	4. 73
18	9378	3982	546. 5	4704	272. 8	70	32. 39	6. 63
19	7972	4610	5036	5912	817. 9	106. 2	484	6. 76
20	5094	3922	1216	5594	441. 6	103. 97	43. 6	4. 28
21	5228	4454	1572	6348	1069. 4	83. 3	113. 7	7. 11
22	6172	4258	390	5892	499. 6	64. 67	60. 1	5. 67
23	3958	4852	870	6042	312. 3	94. 6	28. 99	5. 96
24	2938	1053	954. 4	5298	312. 1	69. 89	123. 9	5. 96
25	4198	4700	373	5608	1098. 2	11. 51	78. 69	5. 09
26	4750	4202	526. 8	6000	1620. 3	56. 65	54. 3	6. 6
27	9398	4660	370. 8	5304	1044. 4	53. 01	25. 96	3. 96
28	3848	429	421. 8	5770	620. 1	82. 68	27. 43	4. 77
29	1299	987. 8	450. 8	4214	335. 6	52. 58	41. 75	6. 96
30	3556	4496	380. 2	6962	1434. 4	82. 3	34. 32	6. 24
31	5680	4422	692	5716	4364. 7	78. 22	146. 6	8. 73
32	4144	4716	424. 4	5680	6546	63. 35	146. 6	3. 31
33	10340	4466	890. 8	6936	477. 86	81. 81	42. 08	7. 47
34	13980	5252	2308	10424	986. 83	46. 11	36. 65	4. 34
35	12780	5816	4008	5814	1582. 6	48. 92	46. 48	7. 67

续表 1 Continued table 1

序号	Ag	Pb	Cd	Sr	Ni	Co	Cr	Li
1	0.69	75.94	6.49	13.74	6.11	4.58	12.6	0.69
2	0.18	7.52	1.22	5.4	1.49	1.49	4.05	0.11
3	0.51	11.85	5.13	59.24	9.08	6.71	12.64	1.34
4	1	34.1	3.07	24.52	8.81	6.13	17.76	1.72
5	10.35	126.67	23.33	90	36.67	33.33	12	0.33
6	1.66	15.88	4.16	110.1	10.97	8.32	11.7	1.06
7	0.45	8.71	3.14	27.2	8.71	4.88	10.1	0.7
8	0.72	10.75	3.98	43.4	6.37	5.97	11.15	0.6
9	0	8.86	2.7	19.26	6.93	5.39	12.32	1
10	0	22	6.4	44	14	14	9	2
11	0.34	10.31	4.2	68.76	9.55	6.49	11.5	0.57
12	0.52	12	3.6	91.6	8.4	7.6	11.6	0.84
13	0.16	9.37	3.11	8.56	6.22	5.06	11.28	0.47
14	0.16	9.67	3.48	22.8	5.42	4.25	12.38	0.81
15	0.15	10.21	4.54	97.93	8.7	6.43	10.21	0.45
16	0	41.51	4.15	13.2	4.9	3.77	10.18	0.19
17	0	11.83	3.15	15.77	7.1	5.91	11.83	1.05
18	0	8.46	3.31	38.65	5.89	5.15	9.94	0.11
19	0	10.74	5.57	34.61	7.96	5.97	11.1	0.8
20	0	15.97	4.28	26.48	4.28	4.28	10.51	0.51
21	0	13.8	3.95	14.2	7.9	6.71	11.85	0.59
22	1.32	13.2	3.78	20.8	5.67	5.29	11.7	1.13
23	1.39	12.71	3.57	31.19	4.77	4.77	11.52	0.48
24	0.71	11.91	4.37	11.12	5.16	3.97	10.72	0.04
25	1.37	16.8	4.31	18.79	4.7	5.48	12.53	0.98
26	0.16	14.36	4.27	19.4	6.6	5.82	11.64	11.25
27	31.65	16.62	4.75	49.85	6.73	5.54	10.68	0.59
28	1.03	13.12	4.77	21.07	6.67	5.57	10.73	4.37
29	0	8.51	3.87	6.19	4.64	3.87	11.21	0.39
30	0.47	12.87	4.68	16.38	7.8	3.9	11.7	0.9
31	0	18.99	7.59	13.15	14.74	7.97	14.43	2.73
32	0	19.92	5.58	13.15	14.74	6.77	18.33	4.3
33	0	13.77	5.51	32.25	7.47	3.98	10.62	0.04
34	0	17.73	5.52	52.02	7.88	5.9	9.85	0.59
35	0	0.74	7.19	46	9.1	6.71	12.94	0.72

注: 1. 鳞叶龙胆; 2. 线高蒿草; 3. 裸茎金腰子; 4. 凤毛菊; 5. 雪莲; 6. 黄花夏至草; 7. 高山唐松草; 8. 高山红景天; 9. 厚叶美花草; 10. 大拟鼻马先蒿; 11. 矮火绒草; 12. 毛建草; 13. 无瓣女娄菜; 14. 四蕊山莓草; 15. 高山离子芥; 16. 细管芹; 17. 准噶尔蓼; 18. 桔黄罂粟; 19. 黄头小甘菊; 20. 天山瘤果芹; 21. 沼泽毛茛; 22. 云生毛茛; 23. 猪牙蓼; 24. 蒿草; 25. 高山葶苈; 26. 鸟足毛茛; 27. 高山报春; 28. 山羊臭虎耳草; 29. 黑花苔草; 30. 细花獐牙菜; 31. 黄白火绒草; 32. 柔子草; 33. 二色蒿本; 34. 藏报春; 35. 侧卧兔耳草。

Note: 1. *Gentiana squarrosa*; 2. *Kobresia capillifolia*; 3. *Chrysosplenium nudicaule*; 4. *Saussurea pygmaea*; 5. *Saussurea involucreata*; 6. *Lagopsis flava*; 7. *Thalictrum alpinum*; 8. *Rhodiola coccinea*; 9. *Callianthemum alatavicum*; 10. *Pedicularis rhinathoides* ssp. *labellata*; 11. *Leontopodium nanum*; 12. *Dracecephalum imberbe*; 13. *Melandrium apetalum*; 14. *Sibbaldia tetranda*; 15. *Chorispora bungeana*; 16. *Stenocoelium popovii*; 17. *Polygonum songoricum*; 18. *Papaver croceum*; 19. *Cancrinia chrysocephala*; 20. *Trachydium tianschanicum*; 21. *Ranunculus pulchellus*; 22. *Ranunculus nephelogenes*; 23. *Polygonum viviparum*; 24. *Kobresia bellardii*; 25. *Draba alpina*; 26. *Ranunculus brotherusii*; 27. *Primula algida*; 28. *Saxifraga hirculus*; 29. *Carex melanantha*; 30. *Swertia graciliflora*; 31. *Leontopodium ochroleucum*; 32. *Thylacospermum caespitosum*; 33. *Ligusticum biolor*; 34. *Primula tibetica*; 35. *Lagotis decumbens*

3 1 1 元素含量水平 由表 1 可看出本区 35 种植物 16 种元素的含量水平。由表 2 可以看出, 平均> 1 000 $\mu\text{g/g}$ 的有 5 个, 含量从大到小的顺序为 $\text{Ca}> \text{K}> \text{Mg}> \text{Na}> \text{Fe}$, 在 10 ~ 200 $\mu\text{g/g}$ 的元素有 5 个, 含量从大到小的顺序为 $\text{Mn}> \text{Zn}> \text{Sr}> \text{Pb}> \text{Cr}$, < 10 $\mu\text{g/g}$ 的元素有 6 个, 从大到小的含量顺序为 $\text{Ni}> \text{Cu}> \text{Co}> \text{Cd}> \text{Ag}> \text{Li}$ 。从整体上看, 乌鲁木齐河源区冰缘植物的元素特点是 $\text{Ca}> \text{K}$ 型。

从表 1 还可以看出, 生长在高山草甸植被带的伞形科植物, 由于其自然条件相似, 细管芹和天山瘤果芹的 Ca 、 Mg 、 K 、 Fe 等元素含量相近。对于生长在高山流石堆的菊科植物, 黄头小甘菊和雪莲却由于自身的遗传因素, 吸收元素的含量差异很大。雪莲的 Ca 、 Na 、 Zn 、 Ni 、 Co 、 Pb 、 Cd 、 Sr 含量都很高, K 含量比小甘菊却小一个数量级。相似自然条件下的不同植物, 同一元素的含量更为不同。线叶嵩草有最低的 Ca 、 Mg 、 Mn 、 Fe 、 Ni 、 Sr 、 Cr 含量和很低的 Cu 含量, 而大拟鼻马先蒿有最高的 Cu 含量。黄花夏至草对 Ca 、 Na 、 Sr 、 Fe 、 Mn 等多种元素具有很高的富集力, 藏报春富集 Ca 、 K , 柔子草强烈富集 Fe 。大多数冰缘植物叶片内含 Ca 量随海拔升高而含量升高。

与所报道的陆生植物中的元素含量相比较(表 2), Ca 、 K 、 Na 、 Fe 、 Zn 、 Sr 、 Mn 的平均含量均高出陆生高等植物元素的平均含量^[3, 4], 其中 Fe 高出 5 倍。 Fe 、 Mn 的含量范围超过所报道的含量范围的上限, K 、 Mg 的含量范围低于所报道的含量范围的下限, Zn 、 Mn 、 Cu 的含量最低值低于陆生植物必需浓度。

表 2 乌鲁木齐河源区冰缘植物元素含量背景值($\mu\text{g/g DW}$)

Table 2 Background of element contents ($\mu\text{g/g DW}$) of plant species in periglacial environments from the source area of Tianshan Urumqi River

元素 Elements	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	陆生植物元素平均含量 Mean contents of terrestrial plants
Ca	8302.2	29500	1050	5000
Mg	4008.0	5816	387.6	5000
Na	1969.0	12800	301.4	1000
K	4897.8	10240	106.5	3000
Fe	1165.89	6546	126.2	200
Zn	65.35	256.6	11.51	50
Mn	181.43	2976	9.45	100
Cu	7.59	40.48	3.31	20
Sr	34.87	110.1	5.4	2
Ni	8.34	36.67	1.49	40
Co	6.51	33.33	1.49	0.5
Cd	4.93	23.33	1.22	0.05
Ag	1.57	31.65	0	0.05
Cr	11.55	18.33	4.05	0.05
Pb	19.07	126.67	0.74	50
Li	1.27	11.25	0.04	0.1

3 1 2 元素含量的变异量 由表 2 可以看出, 不同植物中元素含量从最大值和最小值的差异倍数, 相差最大的 Mn , 差异倍数达到 300 倍以上。其次是 Li 、 Pb 、 K 、 Fe , 它们的相差倍数在 50~ 300 倍之间。 Na 、 Ag 、 Ca 、 Ni 、 Zn 、 Co 、 Cd 、 Sr 、 Ni 、 Mg 等元素的相差倍数在 10~ 20 倍之间, Cr 、 Cu 的相差倍数最小, 说明它们在本区植物中的含量变化小于其它元素。

3 2 植物化学元素的吸收与地理环境的关系

从表 3 可以看出, 高山草甸植物的化学元素吸收顺序为Ca> K> M g> Na> Fe> M n> Zn> S r, 高山垫状植物的化学元素吸收顺序为Ca> K> M g> Na> Fe> M n> Zn> S r, 而高山流石堆植物的化学元素吸收顺序为Ca> Na> M g> K> Fe> M n> Zn> S r。 尽管该地区不同种属的冰缘植物中各元素的含量变化很大, 但乌鲁木齐河源区 3 个垂直分布带^[3]的冰缘植物吸收各化学元素含量趋势基本一致。 这与昆仑山高山植物和长白山苔原植物吸收各化学元素含量的趋势也基本一致^[5, 6]。

表 3 乌鲁木齐河源区冰缘植物 3 个垂直分布带的元素含量特征(μg/g DW)

Table 3 Characteristics of element contents (μg/g DW) in three vertical distribution zones of alitrifrigetic subnival vegetation collected from the source area of Tianshan U muqi River

元素 Elements	高山草甸植物 A l p i n e m e a d o w p l a n t		高山垫状植物 A l p i n e c u s h i o n p l a n t		高山流石堆植物 A l p i n e t a l u s p l a n t	
	植物种数 N u m b e r o f s p e c i e s	元素含量均值 M e a n	植物种数 N u m b e r o f s p e c i e s	元素含量均值 M e a n	植物种数 N u m b e r o f s p e c i e s	元素含量均值 M e a n
Ca	23	6588.3	8	7266.5	6	21335.3
M g	23	3709.7	8	4702.8	6	4571.0
N a	23	870.3	8	901.6	6	10502.0
K	23	5128.8	8	5605.3	6	2779.4
Fe	23	958.0	8	1914.7	5	803.5
Co	23	5.50	8	5.78	5	12.11
N i	23	7.06	8	7.59	5	14.77
Zn	23	67.00	8	4.829	5	102.27
M n	23	88.09	8	63.54	6	657.67
Cu	23	8.06	8	5.61	6	7.6
Sr	23	27.38	8	27.71	5	80.28
Cr	23	10.96	8	12.98	6	11.36
Pb	23	16.89	8	14.80	6	32.90
Cd	23	4.28	8	4.95	6	7.69
Ag	23	1.66	8	1.11	6	2.40
Li	23	1.21	8	1.76	6	0.62

植物的化学成分,在很大程度上取决于土壤成分,但又不是土壤成分的重复。冰缘植物选择吸收其生理生化所必需的元素,是植物长期生长在冰缘环境下而采取的生态对策的结果。乌鲁木齐河源区 3 个垂直分布带植物的 K、Ca、Na 含量的吸收顺序明显不同,与其对应土壤中元素含量顺序相一致,土壤中 K、Na 的含量随海拔升高而增加,Ca 的含量却随海拔的升高而降低^[7]。高山流石堆植物的 Ca、Na 的平均含量明显高于高山草甸和高山垫状植物,其中 Ca、Na 的含量也高于其在土壤中的含量,而 K 的含量正好相反,大大低于其在土壤中的含量。M g 的平均含量与其土壤的含量相近,在 3 个垂直带的植物中含量变化不大。与 Ca 具有类似生理功能的 S r 以及作为许多生化反应酶辅助因子的 M n、Zn、N i、C o 在高山流石堆植物中的含量也高于草甸和高山垫状植物。以往的研究发现,低温下膜脂的变化与抗冻性有关,而 Ca²⁺ 浓度的变化调节磷脂酶 D 的活性^[8, 9]。低温下 Ca²⁺ 浓度升高能减轻膜脂过氧化,保护膜系统^[10], 同时还有减轻其它离子,主要是 Na⁺ 的含量过高的毒害作用^[11]。Fe、M n 影响着叶绿体结构的形成。高山流石堆植物强烈地富集 Ca、Na、

Mn、Zn、Ni、Co、Sr, 有助于提高植物生理代谢机能, 增强对冰缘寒旱环境的适应性具有重要生理意义。

对于非必需元素 Pb、Cd 在植物中富集是由于土壤中高含量和在土壤中迁移性差而造成的, 这种富集对植物无益, 甚至是有害的。对非必需元素 Na 和 Fe、Ca 等元素的选择性富集, 与土壤和冰缘环境密切相关, 主要与低温和强烈的紫外辐射有关。大多数冰缘植物的含 Cu 量较低, 含 Fe 量较高, 说明了这一地区土壤中 Cu 的缺乏或可供植物利用的 Cu 的有效态不足和 Fe 的丰足。

总之, 冰缘植物的化学元素的吸收与生态环境、土壤环境及植物自身的遗传因素也密切, 冰缘植物适应冰缘环境也不会是完全依赖单一因子作用, 而是形态和功能的综合反应。冰缘植物通过富集 Ca、Na 含量, 同时降低 K 含量来增加抗冻性和抗辐射的机制还需进一步研究。

致谢: 野外实验得到天山冰川观测试验站的大力支持, 在此深表谢忱。

参考文献:

- [1] 姚檀栋, 施雅凤. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势[J], 中国科学(B 辑), 1988, 18(6): 657-666
- [2] 安黎哲, 刘艳红, 冯国宁, 等. 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
- [3] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京: 科学出版社, 1982
- [4] 多布罗夫斯基 B.B. 微量元素地理学[M]. 朱颜明, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] 孔令韶, 等. 喀喇昆仑、昆仑山地区植物中一些元素的自然含量特征[J]. 植物生态学报, 1995, 19(1): 13-22
- [6] 黄锡畴. 自然地理与环境研究[A]. 黄锡畴论文选集[C]. 北京: 科学出版社, 1996
- [7] 刘耕年, 等. 高山冰缘环境中冰碛母质土壤的发生与演化[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 204-211.
- [8] BRAAM J, SISTRUNK M L, POLISENSKY D H, *et al*. Cold-shock regulation of Arabidopsis TCH genes and the effects of modulating intracellular calcium levels[J]. **Plant Physiol**, 1996, 111: 1271-1279
- [9] Life in changing world: TCH gene regulation of expression and responses to environmental signals[J]. **Physiol Plant**, 1998: 909-916
- [10] KNIGHT M R, CAMPBELL A K, SMITH S M, *et al*. Transgenic plant aequorin reports the effects of touch and cold-shock and elicitors on cytoplasmic calcium [J]. **Nature**, 1991, 352: 524
- [11] EMUANUEL E. Mineral metabolism of halophytes[A]. In: RORISON I H ed. Ecological aspects of the mineral nutrition of plants[C]. 1969: 215-236