

天山中段冰川环境变迁与高山土壤的 形成演化*

胡双熙 章家恩** 马玉贞 王乃昂 张宇田

(兰州大学地理系, 兰州 730000)

刘 潮 海

(中国科学院冰川冻土研究所, 兰州 730000)

摘 要 天山中段乌鲁木齐河源区, 经历多次冰川作用, 冰碛物自冰川末端外延 12km。其上土壤发育与生物发展同步进行。在光秃的冰碛石表面, 首先出现微生物群落和藻类群落, 继之生长地衣和苔藓, 最后演化为高山和亚高山草甸植被。与植物同步进化的原始土、新成土、寒冻锥形土, (A)-C型在先, A-C型继后, 最终发育成 A-(B)-C型。这些土壤具有负温和含冰的土体, 土壤冻结-融化-冻结, 常发生冰-水-冰的相态变化, 表土产生冻胀丘、石环、A 层呈鳞片状结构, 土壤腐殖化程度低, 矿物分解弱, 粗骨性强。剖面分异状况由弱到强, 原始土壤无发育层次, 寒冻正常新成土腐殖层明显, 草毡寒冻锥形土的 A 层和 B 层发育较为完善。

关键词 天山中段, 冰川环境变化, 高山土壤形成演化

天山中段乌鲁木齐河源区, 经多次冰川作用, 自海拔 3740m 的现代冰川末端到海拔 3000m 的望峰道班之间, 新老冰碛绵延 12km, 其上广泛进行着原始成土过程和腐殖质积累过程, 形成了原始土壤、寒冻正常新成土、草毡寒冻锥形土(中国土壤系统分类修订方案)。本文拟讨论这些土壤的形成和发展, 试图从冰川环境的变化, 高山土壤的进化模式, 揭示高山土壤发育的阶段性及其主要特性。研究区位于山地阴坡, 高山土壤发育于永久冻土带。

1 土壤发育与冰川环境变化的关系

天山中段高山土壤的形成演化在很大程度上取决于气候冷暖波动变化和冰川环境变迁的作用, 它们共同决定着高山土壤的发育过程与形成特征, 控制着土壤的发生发展方向及其演化进程。

* 中国科学院天山冰川站基金资助项目。

** 章家恩现为华南农业大学博士后研究人员。

收稿日期: 1996-01-28; 收到修改稿日期: 1997-08-01

1.1 高山土壤发育与气候变化的关系

由于青藏高原的不断抬升,我国西北部气候旱化逐渐加强。乌鲁木齐河源区小冰期以来的 400 年间气温升高 1—1.3℃,年降水量减少 50—60mm,有 19 条冰川消失,最长的 1 号冰川近 30 年后退 117m^[1]。现代冰川末端年均气温 -7.5℃,这就意味着过去古冰川到达的地段年平均气温一般低于 -7.5℃,而现在的新冰期冰碛区段(大西沟气象站)年均气温为 -5.4℃,末次冰期冰碛区段(望峰)年均温 -2.5℃,与 -7.5℃ 相比,高 2—5℃。气温的敏感变化,引发各条冰川都在衰退,这为高山土壤的发育提供了一定的环境背景。

1.2 高山土壤发育与冰碛环境的关系

乌鲁木齐河源区,先后经历了末次冰期、新冰期、小冰期和现代的冰川环境变化,形成了不同时代的冰碛物及其冰碛环境,这些冰碛物成为高山土壤和植被发育的载体和基质,决定着土壤的形成年代与发育程度。

1.2.1 现代冰碛 通常指近 30 年来的冰川退缩碛,半环于冰川末端,分布于海拔 3730—3740m,长百米左右。如 1 号冰川前端 1963—1993 年形成的现代冰碛长 103 米,下部埋藏死冰,地表多巨型冰碛石,碎屑物堆积于巨石顶面、侧旁或冰碛石间的缝隙中,年平均气温 -7.5℃,年降雨量 400mm,钻孔 19m 深,地温 -3.9℃^[2]。地表多融冻冻结壳、石环和冻胀丘,无高等植物生长,仅有细菌、放线菌、真菌等微生物群落及原球藻(*Protococcus*)、粘球藻(*Gloeocapsa*)、兰球藻(*Chroococcus*)、多列藻(*Stigouema*)等藻类群落存在。该带为永冻冰碛石环、冻胀丘景观带。

1.2.2 小冰期冰碛 该冰碛是 16—19 世纪的冰川退缩碛,脱离冰川作用已 100—400 年,半环于现代冰碛外侧,延展 550—600m,海拔为 3650—3730m。岩石表面除棕褐色的微生物群落和藻类群落外,已出现斑点状灰白色的鸡皮衣(*Pertusaria rupestris*)、红橙色的红橙衣(*Caloplaca elegans*(link) Th. Fr)、淡绿色的地图衣(*Rhizocarpon geographicum*)等多种地衣。冰碛石间水分充足的碎屑物上生长真藓(*Bryum caespitium*)、银藓(*Anomobryum filiforme*)、黄丝瓜藓(*Pohlia mutans*)等苔藓植物,并侵入少量的高山早熟禾(*Poa alpina*)、糙点地梅(*Androsae squarrosula*)、四蕊梅(*Sibbaldia tetrandra*)等植物。年均温 -6.9℃,年降水量 410mm,20m 深钻孔土温 -1.8℃^[2]。形成永冻冰碛地衣苔藓座垫植被景观带。

1.2.3 新冰期冰碛 由小冰期冰碛末端外延 4km,分布于海拔 3400—3650m,为全新世温暖时期的冰川退缩碛,距今 2800—6000 年。巨型冰碛石表面泛生鸡皮衣、红橙衣、地图衣、梯氏冷地衣(*Cetraria tilesii*)、白冷地衣(*C. nivalis*)、枝状冷地衣(*C. cucullata*)。一些地衣上面生长毛尖金发藓(*Polytrichum piliferum*)。不少藓类植物上出现了高山早熟禾、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、冷龙胆(*Gentiana algida*)等。小块冰碛石上及冰碛碎屑物上密生线叶嵩草(*Cobresia capilliformis*)、细叶嵩草(*C. filifolia*)、硬叶嵩草(*C. capillifolia*)、垂穗苔(*Carex atrata*)、珠芽蓼、葶苈(*Draba alpina*)、高山委陵菜(*Potentilla gelida*)、冷龙胆(*Gentiana algida*)、报春(*Primulo fedtschenkoi*)、大花虎耳草(*Saxifraga hirculus*)、冷红景天(*Rhodiola algida*)等植物。年均温 -5.9℃,年降水量 430mm,20m 深钻孔土温 -1.6℃^[2],形成寒冻高山草甸植被景观带。

1.2.4 末次冰期冰碛 分布于海拔 3000—3400m, 上接新冰期冰碛, 下至望峰道班绵延 7 公里。冰碛石及冰碛碎屑物几乎全被高山草甸植被所覆盖。除细叶嵩草、线叶嵩草、冷龙胆、凤毛菊 (*Saussurea cana*)、火绒草 (*Leontopodium*)、高山早熟禾外, 尚有垂穗披碱草 (*Clinelymus mutans*)、高山狐茅 (*Festuca supina*) 等的加入。年均温 -2.5 — -3°C , 年降水量 410mm, 11—24m 深钻孔土温 -0.7 — -1.0°C ^[2], 构成寒冻亚高山草甸植被景观带。

1.3 高山土壤发育与冰碛母质脱离冰川作用时间的关系

高山土壤的发生发展是一个独立历史自然体的渐变过程。由原始土壤发展到石灰草毡寒冻锥形土, 土壤中物质含量呈线性变化。石灰草毡寒冻锥形土与原始土壤比较, 粉粒含量增加 1.4 倍, 粘粒含量增加 6 倍, 有机质含量增加 34 倍, 全氮含量增加 34 倍, 绿泥石含量增加 1.5 倍, 蒙脱石和高岭石含量增加 60—80 倍, 磁化率提高 9 倍。上述物质呈线性增长。而且粗细粒含量降低 5.5 倍, 伊利石含量降低 1.4 倍, $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ 、伊利石 / 绿泥石、伊利石 / 高岭石比值变窄, 呈线性下降。

2 高山土壤的演化模式和成土年代与剖面构造

2.1 高山土壤的演化模式

天山中段高山带, 多年冻土厚度, 在海拔 3800m 地带为 120m, 3500m 地带为 70—100m, 3000m 地带为 10—20m^[1]。因此, 天山中段高山土壤是在多年冻土夏季表层融冻交替的条件下发生发展的。土壤的发育模式是: 冰碛石、植物群落和土壤类型等自然体随温度条件的变化有序同步演化。乌鲁木齐河源区, 1 号冰川末端到望峰道班之间的 U 形谷中, 有序的成链状沉积一套新老冰碛物, 植物群落的演替和土壤类型的发育有明显的四个阶段: 初期是最新冰碛物上微生物群落和藻类群落下发育的原始土壤; 第二阶段是先锋植物—地衣、苔藓和座垫植物群落下形成的石灰寒冻正常新成土; 第三阶段是地衣、苔藓和座垫植物及初期出现的高山草甸植被下发育的石灰寒冻正常新成土; 第四阶段是高山草甸植被和亚高山草甸植被下形成的石灰草毡寒冻锥形土。这些土壤中, 初期形成的原始土壤极其简单, 最后阶段形成的寒冻锥形土性质较为复杂。它们之间, 前一阶段的生物—土壤为后一阶段的生物—土壤创造了发育的物质基础, 后一阶段的生物—土壤是前阶段生物土壤的延续和深化, 彼此之间有发生和继承上的联系。顶极植物群落和顶极土壤类型为石灰草毡寒冻锥形土。图 1 是不同时代冰碛物与高山土壤演化模式图 (图中数字 1—10 为现代冰川编号)。

2.2 高山土壤的成土年代与剖面构造

天山中段高山带, 现代冰碛年龄 30—40 年, 发育的原始土壤, 剖面为 (A)—C 型; 小冰期冰碛地衣年龄 218—410 年^[3], 发育的石灰寒冻正常新成土, 剖面为 (A)—C 型; 新冰期晚期冰碛¹⁴C 年龄为 2800 ± 66 年^[2], 发育石灰寒冻正常新成土, 剖面构造为 A(A)—C 型构造; 新冰期中期和早期冰碛¹⁴C 年龄分别为 4090 ± 150 年和 5680 ± 150 年^[2], 发育石灰草毡寒冻锥形土, 剖面为 A—(B)—C 型构造; 末次冰期冰碛¹⁴C 年龄 14920 ± 750 年^[2], 发育石灰草毡寒冻锥形土, 剖面构造为 A—(B)—C 型。

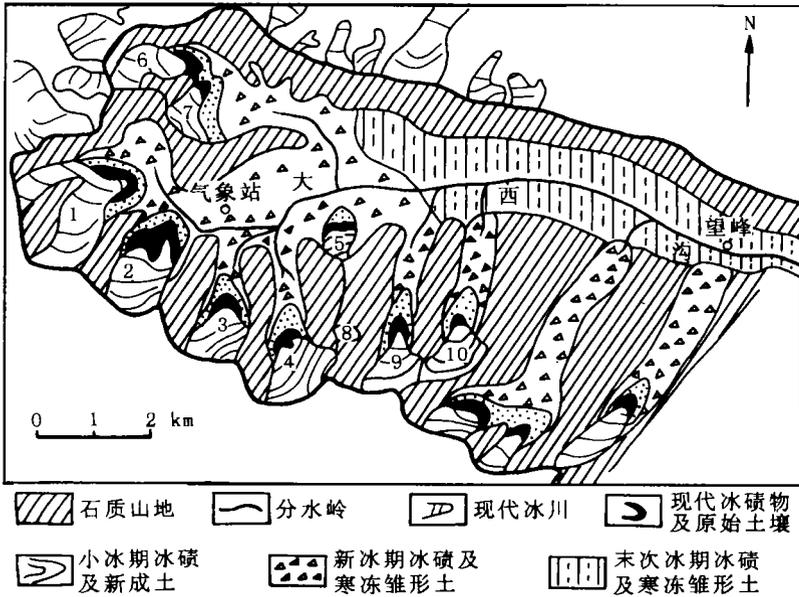


图1 冰川母质与高山土壤演化模式

Fig.1 The pattern of evolution of alpine soils on different moraines

3 高山土壤

根据冰碛母质脱离冰川作用的时间长短, 植被类型的差异和土壤发育的不同阶段, 土壤中物质积累与土层的分化, 可将乌鲁木齐河源区高山土壤划分为原始土壤、石灰寒冻正常新成土和石灰草毡寒冻锥形土^[4]。

3.1 原始土壤

是指地表至 100cm 范围内具有永冻温度, 并发育在微生物、藻类、地衣及苔藓植物群落下的土壤, 主要出现于现代冰碛物上。冬夏地表土壤冻结和消融、常形成融冻壳、石环和冻胀丘。母质大于 2mm 的巨石、石块和砂粒达 600—800g / kg; 细粒中细砂和粉砂占主导成分, 粘粒含量低(表 1), 粗细颗粒无层次分选。土壤无发育层次, 仍保持母质特征, 剖面呈 (A)–C 型构造。但在光秃的冰碛石表面及冰碛碎屑物上, 微生物和藻类首先定居, 组成原始土壤的生命体。微生物中细菌占绝对优势, 其次为真菌和放线菌(表 2)。冰碛物脱离冰川作用的时间愈长, 微生物的种类愈丰富, 而且数量愈多。如 1992 年当年沉积的冰碛物每克土总菌数为 10 万个以上, 1940—1950 年前后沉积的冰碛物每克土总菌数百万个以上。微生物能适应高山寒冷周期性干旱及缺乏有机质与氮素的环境, 其自身具有同化大气中氮素和合成氮素的功能, 为原始土壤积累了丰富的营养物质。

在微生物创造的营养物质基础上, 相继出现原球藻、粘球藻和多列藻, 导致冰碛石表面呈棕褐色。由于藻类群落不断进行光合作用和滞留水分, 增加了土壤有机质的含量, 但储量很低, 有机质和全氮含量分别为 3—5g / kg 和 0.17—0.21g / kg; 阳离子代换量、碳酸钙及易溶盐含量也比较低, pH 值为 8.04—8.09, 土壤呈碱性反应(表 3)。

表1 土壤机械组成
Table 1 Mechanical composition of the soils

土壤 类型	采样地点	深度 (cm)	吸湿水 (g/kg)	洗失量 (g/kg)	>1mm粗 骨土重 (g/kg)	颗粒组成(直径: mm) (g/kg)							
						Mechanical composition							
						Size: mm							
Soil type	Sampling site	Depth	Hydro- scopic water	Leaching loss	Coarse soil content	1— 0.25	0.25— 0.05	0.05— 0.01	0.01— 0.005	0.005— 0.001	< 0.001	<0.005mm (g/kg)	
原始 土壤	距冰川末端	5m	0—10	9.0	49	812	32	298	209	143	107	212	319
	距冰川末端	107m	0—15	8.0	26	844	13	751	133	18	19	66	85
石灰 寒冻	距冰川末端	406m	0—15	6.0	—	832	14	576	232	68	34	76	110
	停车场侧碛		0—15	9.0	—	828	20	270	210	198	162	140	302
正常 新成土	红橙衣下土壤		0—0.4	28.0	—	—	—	18	298	277	293	114	407
	岩面地衣下土壤		0—0.4	27.0	—	—	5	38	337	265	244	111	355
	岩面苔藓下土壤		0—1	25.0	—	—	3	37	348	249	263	100	363
	空冰斗水文观 测站		0—9	50.0	—	—	6	524	262	98	48	62	110
	空冰斗百叶箱		9—26	35.0	—	—	20	210	282	198	180	110	290
			0—7	17.0	—	—	—	9	362	208	168	172	340
			7—21	18.0	—	—	8	74	290	218	230	180	410
石灰 草毡	冰川站	100m处	0—8	42.0	—	—	—	420	202	156	132	90	222
			8—26	33.0	—	—	—	25	257	292	191	135	326
寒冻 锥形土	冰川站西	1km	0—10	49.0	—	—	—	340	215	179	176	90	266
	处岩石顶面		10—18	38.0	—	—	—	145	252	193	268	142	410
	望峰道班西		0—22	46.0	—	—	1	593	255	65	68	72	140
	500m处		22—54	34.0	—	—	7	128	227	220	272	146	418
			54—73	31.0	—	—	3	47	242	198	320	190	510

表2 原始土壤微生物群落组成及其数量(万个/g土)

Table 2 The composition and amounts of microbiota community in the primitive soil($\times 10000/g$)

冰碛物岩石 组成	冰碛物沉积 年代(年)	与冰川末端 距离(m)	细菌		放线菌	真菌	微生物 总量
			Bacterium				
			Formation time of moraines	Distance from the end of No.1 glacier	无芽孢细菌 Asporous bacterium	芽孢细菌 Bacillus	Actinomyces
眼球状	1992	1	10.3626	0.0070	0.0067	0.0143	10.6426
片麻岩、	1991	5	25.3766	0.0067	0.0147	0.0251	25.4142
石英片岩	1989	10	46.7758	0.0085	0.0285	0.0263	46.8391
云母片岩	1983	30	154.1127	0.0200	0.0296	0.0306	154.1929
花岗闪长岩	1978	50	187.8440	0.0998	0.0731	0.0499	188.0668
灰绿岩	1973	65	240.4632	0.1677	1.0216	0.0268	241.6763
	1962	107	260.3944	0.2244	6.1018	0.1915	266.9121
	1950	406	480.3881	0.2586	25.2152	0.1167	505.9780

表3 土壤理化分析

Table 3 Physical and chemical properties of alpine soils

土壤类型	采样地点	冰碛物时代	深度 (cm)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	C/N	代换量 c mol CEC	CaCO ₃ g/kg	全盐 (g/kg)	pH	磁化率 (SI)
Soil type	Sampling site	Age of moraine	Depth	Organic matter	Total nitrogen				Total salt		
原始土壤	距冰川末端5m	现代	0—10	5.545	0.21	15.31	1.94	52.3	0.21	8.04	6.33
石灰土壤	距冰川末端107m	冰碛	0—15	3.186	0.17	10.87	1.68	14.6	0.51	8.09	5.33
正常新成土	距冰川末端406m	小冰期	0—15	5.505	0.21	15.19	2.71	28.8	0.45	8.57	5.24
寒冻	停车场侧碛		0—15	7.779	0.37	12.19	6.02	26.5	0.60	8.92	5.11
正常新成土	红橙衣下土壤	新冰期	0—0.4	436.54	7.30	34.69	—	15.4	—	6.93	18.66
岩面地衣下土壤			0—0.4	351.28	9.30	21.90	—	31.2	—	6.91	51.01
岩面苔藓下土壤			0—4	287.95	6.24	26.76	—	31.6	—	7.02	
空冰斗水文观			0—9	211.92	7.85	15.67	28.56	40.9	0.42	6.86	
测站			9—18	108.81	4.54	13.81	11.96	11.4	0.46	7.04	
空冰斗百叶箱			0—7	57.927	1.90	17.68	18.22	28.9	0.38	7.68	31.33
			7—12	35.318	1.32	15.52	15.12	29.2	0.52	7.34	35.33
石灰草毡	冰川站100m处		0—8	177.58	8.07	17.76	43.95	28.6	0.47	7.85	18.06
寒冻	冰川站西1km处		8—26	74.97	2.98	14.59	33.99	33.7	0.65	8.73	38.67
锥形土	岩石顶面		0—10	204.00	6.98	16.95	47.05	40.9	0.47	6.61	16.33
			10—18	114.79	3.84	17.34	31.67	30.1	0.36	6.65	35.32
	望峰道班西500m处	末次冰期冰碛	0—22	187.41	8.25	13.18	44.72	43.8	0.69	7.72	18.33
			22—54	84.80	3.77	12.85	35.03	27.8	0.62	7.79	48.10
			54—73	62.92	3.28	11.12	32.70	29.2	0.68	7.88	41.32

粘土矿物组成中,伊利石达 815—875g / kg, 次为绿泥石, 含量为 120—180g / kg (表 4), 蒙脱石和高岭石含量甚微。土体化学组成中 SiO_2 / R_2O_3 值为 5.69—8.51 (表 5), 表明土壤风化程度很弱。土壤磁化率是土壤在外磁场感应中所产生的磁化强度。风化程度高发育良好的土壤磁化率值大, 如黑垆土和灰钙土的磁化率分别为 28—46 (SI) 和 16—34 (SI); 风化程度弱发育程度低的土壤磁化率值小, 原始土壤发育程度低。磁化率值仅为 5.3—6.3 (SI) (表 3)。

3.2 石灰寒冻正常新成土

土壤发育程度微弱, 具冰碛母质特征, 土温低寒, 呈石灰性。

发育在小冰期冰碛物上的石灰寒冻正常新成土, 由于微生物、藻类、地衣、苔藓及稀疏的垫状植被作用加强, 土壤进化程度较原始土壤有长足进展。有机质及氮素含量增加; 代换量提高; 机械组成中砂粒含量降低, 粉砂含量增多; 粘土矿物组成中伊利石含量降低, 绿泥石含量增大; 土壤化学组成中 Al, Fe, P, Mg, Mn, Ti 的氧化物含量增高, 这些变化反映土

表4 粘土矿物组成及其含量

Table 4 The Composition and contents of clay minerals in the soils

土壤 类型 Soil types	采样 地点 Sampling site	深度 (cm) Depth	粘 土 矿 物 (g/kg) Clay minerals				伊利石/绿 泥石 Illite/Chlorite	伊利石/高 岭石 Illite/Kaolinite
			伊利石 Illite	绿泥石 Chlorite	蒙脱石 Montmorill- onite	高岭石 Kaolinite		
			原始 土壤	距冰川末端 5m 距冰川末端107m	0—10 0—15	875 876	124 53	少 少
石灰 寒冻	距冰川末端 406m 停车场侧碛	0—15 0—15	825 815	147 184	少 少	少 少	5.76 4.41	— —
正常 新成土	空冰斗水文观 测站	0—9 9—12	574 588	194 185	162 155	69 72	2.95 3.18	8.32 8.17
	空冰斗百叶箱	0—7 7—12	561 596	195 182	184 175	60 67	2.88 3.27	9.35 8.96
石灰 草毡	冰川站 100m处	0—8 8—26	556 578	188 196	186 158	70 68	2.96 2.95	7.94 8.50
寒冻 锥形土	冰川站西 1km处 岩石顶面	0—10 10—18	595 558	177 183	154 188	74 71	3.36 3.05	8.04 7.80
	望峰道班西	0—22	637	187	81	95	3.41	6.71
	500m处	22—54 54—73	645 668	186 191	77 68	92 73	3.47 3.50	7.01 9.15

壤矿物风化程度进一步深化(表 1, 3—5)。

但原始成土过程在小冰期冰碛物上仍继续进行,表现为岩面植物由红橙衣、地图衣、叶状地衣演替到苔藓群落。它们的出现给土壤带入了更丰富的营养成分。其中所含 N, P, Fe, Mg, Zn, Cu 等元素依植被类型出现的先后逐渐加大。如 N, P, Zn 元素,红橙衣中分别为 7.3g / kg, 1.21g / kg, 0.06g / kg, 地图衣含量增高,叶状地衣含量再增大,苔藓植物可高达 12.0g / kg, 2.01g / kg, 1.1g / kg(表 6)。生长在冰碛碎屑物上的苔藓植物所含上述元素比岩面苔藓植物含量低。总体反映石灰寒冻正常新成土发育过程中,地衣和苔藓植物具有强烈积累营养物质的功能。

发育在新冰期晚期冰碛物上的石灰寒冻正常新成土,巨型冰碛石表面由白灰色、红橙色、黑灰色、黄绿色多种地衣叠加构成一个约 0.6—1.2cm 厚的地衣覆盖层,覆盖度 50—80%,地衣层下风化土层厚度加深到 0.4—0.5cm。机械组成中粉粒及粗粒含量占 80% 左右;土体化学组成中 SiO₂ 含量为 432—540g / kg,较一般矿质土壤含量低,这和土壤有机质含量高有关;铝和铁的氧化物含量较低,硅铁铝率比值较高(表 5),反映土壤风化过程仍很弱。CaCO₃ 积累量不高,仅为 15.4—31.6g / kg, pH 值 6.93—7.02,呈中性反应。有机质和氮含量较高,分别达到 246—436g / kg 和 7.3—12.0g / kg,是同一地段草甸植被下土壤

表5 土体全量分析

Table 5 Total analysis of the soils

土壤类型 Soil type	采样地点 Sampling site	深度 (cm) Depth	烧失量 (g/kg) Ignition loss	吸湿水 (g/kg) Hydroscopic water	土体化学组成 (g/kg) Chemical composition												
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂
原始土壤	距冰川末端 5m	0—10	22.3	22.9	691.1	150.6	63.4	1.9	30.3	22.4	34.4	24.8	1.1	7.9	7.12	5.69	
	距冰川末端 107m	0—15	25.2	1.3	693.9	127.2	38.5	1.8	23.6	13.6	37.0	23.7	0.7	5.2	9.64	8.15	
	距冰川末端 406m	0—15	26.4	5.0	674.5	138.7	57.8	2.3	11.9	21.0	33.0	18.9	0.9	7.4	8.27	6.54	
石灰寒冻	停车场测点	0—15	39.1	9.6	614.1	152.5	77.1	2.4	13.9	29.3	32.9	17.6	1.3	8.7	6.83	5.17	
	岩面红橙衣下土壤	0—0.4	278.6	44.1	432.4	102.9	52.6	1.6	63.9	18.7	18.2	14.7	0.8	5.9	7.20	5.41	
正常	岩面地图衣下土壤	0—0.4	212.1	33.4	496.1	121.1	58.8	1.7	29.4	23.3	23.6	16.6	1.1	6.6	6.95	5.30	
	岩面苔藓植物下土壤	0—1.0	154.7	28.2	545.3	131.3	64.6	2.2	20.2	26.5	25.5	18.2	1.4	7.3	7.05	5.38	
新成土	空冰斗百页箱	0—7	83.8	23.2	604.5	143.3	67.0	2.3	18.6	29.3	25.7	20.2	1.4	8.6	7.20	5.54	
	空冰斗水文观测站	7—21	66.1	22.7	611.1	150.9	70.2	2.1	17.3	31.1	26.3	20.3	1.5	8.7	6.89	5.31	
石灰草毡	冰川站西 1km 岩石	0—9	234.6	67.2	475.0	130.3	64.7	2.7	26.6	25.8	22.1	15.3	1.2	7.5	6.19	4.71	
	顶面	9—26	140.0	40.8	526.8	142.9	75.5	2.5	22.1	30.5	22.4	18.9	1.5	9.0	6.27	4.60	
寒冻	天山站北 100m	0—10	223.8	62.1	478.3	135.7	63.3	2.6	22.1	25.7	24.6	14.3	1.3	7.0	7.05	4.61	
	望峰道班西 500m	10—18	141.6	46.6	542.3	152.4	71.1	2.9	16.7	27.4	27.0	16.6	1.5	7.7	6.07	4.68	
锥形土	8—26	208.9	48.3	487.8	135.6	61.4	2.4	29.3	25.7	25.7	27.6	14.7	1.3	6.8	6.11	4.75	
	望峰道班西 500m	8—26	111.4	35.3	567.8	155.1	70.1	2.6	19.0	28.0	30.3	16.1	1.5	7.7	6.17	4.79	
锥形土	望峰道班西 500m	0—22	210.3	53.3	503.8	131.5	58.3	2.3	25.4	23.5	25.4	16.1	1.3	7.1	6.63	4.93	
	望峰道班西 500m	22—54	118.1	39.9	551.7	149.0	66.5	2.2	23.6	26.2	27.6	18.5	1.5	8.3	6.30	4.89	
锥形土	望峰道班西 500m	54—73	101.3	32.9	570.4	155.1	68.9	2.4	21.3	27.3	30.4	17.2	1.7	8.0	6.61	5.09	
	望峰道班西 500m	54—73	101.3	32.9	570.4	155.1	68.9	2.4	21.3	27.3	30.4	17.2	1.7	8.0	6.61	5.09	

的 3—5 倍。岩生地衣比岩生苔藓植被下土壤中有有机质积累高。这一现象表明,岩生地衣比岩生苔藓具更强积累有机质的能力(表 3)。

冰碛碎屑物上水分充足的地段,囊种草(*Thylalospermum caespitosum*)、四蕊梅、线叶嵩草、冷龙胆、苔藓等植物形成不连续的草毡层,覆盖度 30—50%。草毡层厚 4—9cm,根系密织,占体积总量的 50% 以上,其中含多量未分解的死根。有机质含量 35.32—219.92g / kg; 全氮含量 1.32—7.85g / kg; CaCO₃ 含量较低,为 11.4—40.9g / kg,剖面上下变化不明显。pH 值 6.9—7.0,中性反应。全盐含量微弱,只有 0.40—0.52g / kg。土体化学组成中 Al₂O₃, Fe₂O₃ 和 P₂O₅ 含量比小冰期冰碛物上土壤和岩生植被下土壤高(表 6),硅铁铝率降低。粘土矿物组成仍以伊利石和绿泥石为主,还出现了较多的蒙脱石和高岭石,反映土壤风化程度进一步深化。

表 6 地衣、苔藓化学元素含量

Table 6 The contents of chemical elements in lichen and moss

地衣、苔藓名称 Type of lichen or moss	化学元素含量 (g/kg) Content of chemical element							
	N	P	Fe	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu
岩面红橙衣	7.3	1.21	18.8	118.9	5.0	0.184	0.06	8.5
岩面地图衣	9.3	15.2	12.30	86.1	3.2	0.160	0.075	11.9
岩面叶状地衣	10.5	1.35	5.90	85.3	1.4	0.085	0.082	9.6
岩面毛尖金发藓	12.0	2.01	34.30	11.7	11.4	0.770	1.100	10.5
岩隙真藓、银藓、平珠藓	6.36	2.13	1.40	2.4	0.8	0.311	0.800	9.5

3.3 石灰草毡寒冻锥形土

土壤温度低寒、土壤呈石灰性、具有草毡表层和融冻特征。

发育在新冰期早期与中期的石灰草毡寒冻锥形土,其地表覆盖了以线叶嵩草为主的高山草甸植被,覆盖度为 80—90%,促使土壤发育的生物学过程进一步加强。

直径大于 1m 的冰碛石成为绿色高山草甸植被带的孤岛。角度大的岩面细土不易保留,仍生长地衣和苔藓植物。但在平凹的顶面,岩生微生物、藻类、地衣、苔藓及以后侵入的高山草甸植物长期共同作用下,加深了岩石的风化强度,增进了矿物颗粒及有机质的积累,再加上凹平岩面和草被从风雨中截留有机物和矿物质,土层厚达 18cm。

冰碛碎屑物和直径小于 50cm 的冰碛石,经生物的、生物化学的和物理的作用,岩石风化程度加深,细粒增多,特别是融冻泥流沿坡面下移,碎屑物几乎完全掩盖了冰碛平台、终碛及侧碛。这些碎屑物质就成为高山草甸植被生长和土壤发育的基质。

石灰草毡寒冻锥形土,草毡层厚 8—10cm,根系密织,占土壤体积的 50% 以上,粒状及层片状结构,有机质含量 170—204g / kg,全氮含量 6.9—8.0g / kg, CaCO₃ 含量为 11—40g / kg, pH 值为 6.6—8.3,中性到碱性反应,易溶盐含量低,为 0.36—0.65g / kg。机械组成中细粒和粉粒含量占 60—70%,粘粒含量只占 10—20%(表 1)。腐殖质层厚 8—18cm,粒片状结构,细粉粒和粘粒含量较草毡层高;有机质和全氮含量较上层低;CaCO₃ 和易溶盐含量同上层比无大差异;Al, Fe, P, K 较上层高;硅铁铝率 4.6—4.7,与上层基本相同;粘土矿物中伊利石和绿泥石仍占主要成分,含量比上层低,蒙脱石和高岭石比上层增

大。腐殖质层以下为冰碛母质,无明显淀积物,反映土壤发育还处于幼年阶段。

发育在末次冰期冰碛物上的石灰草毡寒冻锥形土,局部地段覆盖 30—40cm 厚的黄土层。巨型冰碛石半掩埋在土被中,岩面生长地衣、苔藓及高山草甸植被,小岩块、碎石及冰碛碎屑物全被线叶嵩草等植被和土被所覆盖。但植被组成中已有垂穗披碱草侵入,表明高山草甸植被向亚高山草甸植物群落转化。

草毡层 10—22cm,盘结的根系占土体 50% 以上,有机质含量 187.4g / kg,全氮量 6.25g / kg,代换量 44.7cmol(+) / kg, CaCO₃ 含量 4.38g / kg, pH 值 7.72,碱性反应。土壤粒级组成较粗,细砂和粉砂含量占 70% 以上,粘粒含量 < 10%。腐殖质层厚 30cm,有机质和氮含量较上层少,粉砂和粘粒含量增大。粘化层厚 20cm,粘粒含量增到 19%,与表层粘粒含量之比 ≥ 1.2,无淀积胶膜,属次生粘化。Al, Fe, P, Mg, K, Na, Mn 的氧化物有淀积趋势。CaCO₃ 无淀积,在蒸发作用下表层比中下层含量高;pH 值和 SiO₂ / R₂O₃ 比值表层小于下层;易溶盐含量上下层变化不明显,有机质、氮和代换量表层高于下层。粘土矿物组成中,伊利石和绿泥石仍然为主,高岭石明显增多。

致谢: 本文承蒙南京土壤研究所高以信教授审阅,并提出修改意见,深表谢意。

参 考 文 献

1. 刘潮海,张寅生,任炳辉. 中国天山冰川站手册. 甘肃科技出版社, 1991. 66—69
2. 赵 林,丘国庆,金会军. 天山乌鲁木齐河源末次冰期以来气候变化与多年冻土的形成. 冰川冻土, 1993, 15(1): 103—109
3. 陈吉阳. 天山乌鲁木齐河源全新世冰川变化的地衣年代学等若干问题之初步研究. 中国科学, B 辑, 1988, (1): 96—104
4. 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类(修订方案). 中国农业科技出版社, 1995. 169—175

FORMATION AND EVOLUTION OF ALPINE SOILS AND THE GLACIER ENVIRONMENT CHANGES OF CENTRAL TIANSHAN MOUNTAINS

Hu Shuang-xi Zhang Jia-en Ma Yu-zhen Wang Nai-ang Zhang Yu-tian

(Dept. of Geography, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Liu Chao-hai

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Summary

The source area of the Urumqi River in the central part of Tianshan Mountains underwent several glacier environmental changes. Tills extended outwards 12 km from the end part of the No.1 glacier. Soil development kept pace with the biological evolution. On the bare surface of moraines, microbial and algae communities appeared firstly, then lichen and moss grew, finally they evolved into alpine meadow. With the same pace of vegetation development, the alpine soils first were (A)-C profile firstly, then developed to A-C profile and finally became A-(B)-C profile. Alpine soils have negative temperature and icy soil body, undergoing a freezing-thawing-freezing process with state changes of ice-water-ice. Frost heaving and stone polygons appear on the soil surface with squamose structure, and soils have weak humification and decomposition of minerals. Alpine soils have different degrees of profile formation. No profiles in primitive soils, obvious humic horizons in Cryic-orthic Entisols, and perfect A and B horizons in Mattic-cryic Cambisols can be found.

Key words Central Tianshan Mountain, Glacier environment changes, Evolution of alpine soils