

川西亚高山林线过渡带及邻近植被土壤性质

齐泽民^{1,2}, 王开运^{1,*}, 张远彬³, 谢玉华²

(1. 华东师范大学, 上海市城市化过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062; 2. 内江师范学院化学与生命科学系, 内江 641112;
3. 中国科学院成都生物研究所, 成都 61004)

摘要:研究了川西亚高山林线过渡带及邻近植被上缘流石滩草甸与下缘冷杉林残积母质土壤物理、化学和生物学特性。结果表明:从流石滩草甸→林线过渡带→冷杉林, 土层逐渐增厚, 表层土壤(0~30 cm) 粉粒、粘粒、物理性粘粒含量、团聚度、结构系数和自然含水量逐渐增高, 砂粒含量逐渐降低, 阳离子交换量(CEC)、交换性盐基含量、盐基饱和度以及水解性酸含量逐渐增高, pH 值逐渐降低, 有机质及养分库全 P、全 K、有效 N、有效 P 和速效 K 含量逐渐增高, 土壤物理结构和化学性质逐步有所改善, 但亚高山林线过渡带区域残积母质土壤成土过程缓慢。林线过渡带表层土壤细菌、真菌、放线菌及微生物总量, 土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、多酚氧化酶及过氧化氢酶活性高于邻近植被上缘流石滩草甸与下缘冷杉林, 体现了作为生态交错带, 林线过渡带比邻近植被土壤具有相对较强的生物学活性。

关键词:川西亚高山; 林线过渡带; 土壤物理化学性质; 土壤微生物; 土壤酶

文章编号:1000-0933(2009)12-6325-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

The soil properties of the subalpine timberline ecotone and adjacent vegetations in Western Sichuan

QI Ze-Min^{1,2}, WANG Kai-Yun^{1,*}, ZHANG Yuan-Bin³, XIE Yu-Hua²

1 Shanghai Key Laboratory of Urbanization Process and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 Department of Chemistry and Biology, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China

3 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6325 ~ 6332.

Abstract: The upper or alpine timberline(AT) can be either a transitional zone or an abrupt border between continuous forest and herb, shrub and high mountain cushion communities. At present, Although there have been more reports on their positions and dynamics which may be controlled by limitations imposed by abiotic environmental conditions such as low temperature, aridity, wind and snow on the production of viable pollen, viable seeds, seed germination and the survival of saplings and adults, but there is lack of information to understand the effects each other between changing vegetations and their soil properties in this geographical region. Therefore, in a short distance, the physical, chemical and biological properties of the soil mainly taken place in residual deposits in subalpine timberline ecotone, scree meadow and fir forest, were investigated in Wanglang National Nature Reserve in this paper. The results show that from scree meadow to timberline ecotone then to fir forest, with the changement of vegetation some physical structure parameters such as the content of scree, silt, clay and physical clay, aggregate degree, structure coefficient, and some chemical parameters such as the content of soil water, hydrolyzed acid, organic matter, total P, total K, available N, available P and soluble K, exchangeable base content, cation exchangeable capacity content, base saturation percentage and so on in the topsoil(0—30 cm) all were increasing slowly, showing that the soil physical structure and chemical properties were improved but developing slowly on the residual deposits. Furthermore, in the topsoil of the subalpine timberline ecotone, the microbe quantities of bacteria,

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90511008);四川省教育厅青年基金资助项目(08ZB045)

收稿日期:2008-09-16; 修订日期:2008-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kywang@re.ecnu.edu.cn

fungi and actinomycetes, enzymatic activities of acid phosphatases, neutra phosphatase, urease, invertase, catalase and polyphenol oxidase were highest among three vegetations, implying that as a ecotone, the soil biological and chemical activities in subalpine timberline ecotone were more active than them in the adjacent vegetations.

Key Words: subalpine in Western Sichuan; timberline ecotone; soil physical and chemical property; soil microbe; soil enzyme

林线是山地垂直带亚高山和高山植被的分界线,是一类对自然环境因子变化和人为干扰异常敏感的生态过渡带和生态脆弱带^[1]。一直以来,群落的分布格局、种类种间关系、生物多样性、植物生理生态特征、种群适应对策以及其与该区域极端生态因子的相互关系一直是林线生态学研究的主要内容^[2~5]。形成了热量(温度)控制、繁殖更新障碍、碳平衡失调等关于林线成因的各种假说^[6~10]。虽然不同的假说能够部分解释林线的形成及动态,但由于不同的地理区域,高山或亚高山林线也展现出不同的外貌和不同的土壤、温度等非生物环境特征,而且目前对林线系统生态过程的认识还远远不够。因此,关于林线的形成及动态还没有具有普遍意义的解释。

在植被与土壤互动过程中,土壤基质条件决定生长什么样的植物,植物反过来又影响土壤的成土过程及土壤性质^[11]。对于林线这一特殊生态系统,低温等生态因子必然影响土壤物理、化学性质及生物学活性,系统养分循环过程的分解、矿化以及土壤水分状态的转化率等。除低温外,低的土壤养分库以及水、养分的有效性可能也是影响林线植物种子萌发、定植、生长和生理生态及适应对策,进而影响林线的形成和动态的关键因素。但目前还少见这方面的研究报道。因此,本文选择川西亚高山林线过渡带及上下缘流石滩草甸和冷杉林为对象,短距离内初步研究 3 个邻近植被土壤物理、化学和生物学性质,以期为深入了解林线区域植被变化对土壤性质的影响,从生态系统角度理解林线植被与土壤互动机制,林线的形成及动态等提供基础数据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

王朗自然保护区(103°55' ~ 104°10' E, 32°49' ~ 33°02' N, 海拔 2300 ~ 4980 m)位于四川省平武县内,地处青藏高原—四川盆地的过渡地带,属于丹巴—松潘半湿润气候。研究样地设于保护区大窝凼外侧坡亚高山林线交错带代表性“森林—灌丛—草甸”复合地段,设置 5m × 10 m 固定样地 5 个。E 104°01', N 32°59', 海拔 3300 m。年均温 1.0℃, 1 月份气温 -6.6℃, 7 月份气温 8.9℃, 相对湿度 70.0%, 降水量 859 mm。流石滩草甸主要以莎草(*Cyperus* sp.)、苔草(*C. kansuensis*)和羊茅(*F. ovina*)为主,盖度约 16% 左右。在整个林线过渡带,混生少量岷江冷杉(*A. faxoniana*)和糙皮桦(*B. utilis*);灌木层主要分布有高山绣线菊(*S. alpina*)、杜鹃(*Rhododendron* spp.)、高山柳(*S. paraqlesia*)、刚毛忍冬(*C. hispida*)、花楸(*Sorbus* sp.)、蔷薇(*Rosa* sp.), 盖度达 70% 以上;草本层以莎草(*Cyperus* sp.)、苔草(*C. kansuensis*)为主,盖度约 27%。下缘冷杉林乔木层主要为岷江冷杉(*A. faxoniana*),密度为 182 株 · hm⁻², 树高 15m, 胸径 24 cm, 郁闭度 0.56。

1.2 材料与方法

分别在 5 个典型代表性林线过渡带固定样地上,每个样地挖取土壤剖面 1 个,共 5 个土壤剖面样品。分别在林线过渡带上缘无灌木覆盖处深入流石滩草甸 70 m,下缘冷杉树高 > 3m, 树冠对称的树木为界深入冷杉林 70 m 处,按“之”字型随机每隔 5 m 挖土壤剖面 1 个,分别各 5 个土壤剖面。林线过渡带按土层厚度至残积母质分别取 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 47 cm,流石滩草甸至残迹母质分 0 ~ 15、15 ~ 26 cm,下缘冷杉林至残积母质分 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 64 cm 用环刀取样测定土壤容重,另外取土样带回实验室,部分风干供土壤物理性质及养分含量测定,部分鲜样 4℃ 保存,供土壤微生物数量测定。

1.3 测定方法

(1) 土壤物理性质及养分含量测定 环刀样重复 2 次,用于测定土壤自然含水量、土壤容重、孔隙度,室

内分析土样用于测定土壤机械组成、团聚体组成和有机质等土壤肥力因子。土壤自然含水量用酒精烧失法, pH 值用电位法, 土壤机械组成和微团聚体分析用比重计法, 土壤容重、孔隙度等用环刀一次取样连续测定, 有机质含量用 $K_2Cr_2O_7$ 浓硫酸氧化法, 全 N 用半微量凯氏法, 全 P 用钼蓝比色法, 全 K 用火焰光度法, 速效 N 用扩散吸收法, 速效 P 用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法, 速效 K 用乙酸铵浸提火焰光度法^[12]。

(2) 土壤微生物数量测定 细菌用牛肉膏蛋白胨培养基, 接种后培养 4d 后计数, 真菌用查彼克氏培养基, 接种后 26℃ 培养 4d 后计数, 放线菌用改良高氏一号培养基, 接种后 26℃ 培养 4d 后检查计数^[13]。

(3) 土壤酶活性测定 脲酶活性测定用比色法, 蔗糖酶活性测定用比色法, 酸性和中性磷酸酶活性测定用磷酸苯二钠比色法, 过氧化氢酶活性测定用容量法, 多酚氧化酶活性测定用碘量滴定法^[14]。

以上测定均 3 个重复。

1.4 数据分析

林线过渡带及邻近植被土壤物理结构特征中土壤结构系数(%) = $(b - a) / b \times 100\%$, a 、 b 分别为微团聚体和颗粒分析时的粘粒(< 0.001 mm)含量(%), 团聚度(%) = $(a - b) / a \times 100\%$, a 、 b 分别为团聚体和颗粒分析时的砂粒(1~0.05 mm)含量(%)^[10]。利用 SPSS 11.0 软件, 单因素多样本的方差检验(One-way ANOVA)和多重比较(LSD)研究林线过渡带及邻近植被之间不同土层养分、微生物数量及酶活性差异。

2 结果与分析

2.1 林线过渡带及邻近植被土壤物理结构特征

土壤颗粒组成是最基本的土壤物理性质之一。由表 1 可见, 流石滩表层土壤(0~26 cm)石砾、砂粒(1~0.05 mm)含量高, 粘粒(< 0.001 mm)与物理性粘粒(< 0.01 mm)含量极低, 砂粒、粉粒和粘粒所占比例失调, 土壤物理结构差而粗骨化。从流石滩草甸→林线过渡带→冷杉林, 虽然 0~30 cm 表层粘粒与物理性粘粒含量逐渐增高, 石砾含量和砂粒含量持续降低, 但砂粒、粉粒和粘粒所占比例失调, 土壤质地仍然较差。另外, 林线过渡带及上下缘流石滩草甸和冷杉林土壤石砾含量均较高, 细土部分的粘粒含量低, 且分别随土壤深度加深而增高与降低, 说明该区域土壤淋溶和粘化作用弱, 成土过程主要以腐殖质的积累过程为主。从流石滩草甸→林线过渡带→冷杉林, 总空隙度逐渐增大, 土壤团聚度与结构水稳性(结构系数表示)随逐渐增大, 土壤水分含量逐渐增高, 保水性能增强。

表 1 林线过渡带及邻近植被土壤的物理结构特征
Table 1 Soil physical properties of the timberline ecotone and the adjacent vegetations

类型 Type	土层 Layer (cm)	石砾量 (%)	自然 含水量 (%)	总空 隙度 (%)	容重	细土颗粒(mm)组成(%)				团聚体(mm)组成(%)				结构 系数 (%)	团聚度 (%)
						1~ 0.05	0.05~ 0.01	<0.001	<0.01	1~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.001	<0.001		
流石滩草甸	0~15	47.82	35.67	62.74	0.98	52.38	24.46	3.22	19.94	62.09	27.64	7.83	2.44	24.22	15.64
	15~26	94.67	12.49	33.84	1.74	69.34	15.73	2.26	12.67	74.31	21.7	2.12	1.88	16.81	6.69
林线过渡带	0~15	35.49	39.16	68.82	0.82	45.67	20.89	8.95	24.49	60.65	23.88	9.14	6.33	29.27	24.70
	15~30	54.61	42.2	52.85	1.24	48.42	26.24	6.02	19.32	58.32	30.04	7.18	4.46	25.91	16.98
	30~47	85.82	13.89	39.92	1.58	61.12	20.38	2.08	16.42	67.15	26.13	5.05	1.67	19.71	8.98
冷杉林	0~15	26.73	47.26	71.86	0.74	42.35	28.14	11.76	17.75	59.12	27.02	6.34	7.52	36.05	28.37
	15~30	48.52	58.11	44.87	1.45	47.17	30.18	7.81	14.84	56.46	29.19	8.68	5.67	27.40	16.45
	30~64	74.45	18.98	38.4	1.62	58.05	21.58	2.96	17.41	67.03	25.44	5.19	2.34	20.95	13.40

石砾量 The content of scree; 自然含水量 Natural water content; 总空隙度 The total porosity; 细土颗粒组成 The composition of clay; 团聚体组成 The composition of physical clay; 团聚度 Aggregate degree; 结构系数 structure coefficient; 容重 Bulk density; 流石滩草甸 Scree meadow; 林线过渡带 Timberline ecotone; 冷杉林 Fir dominated forest

2.2 林线过渡带及邻近植被土壤化学性质

2.2.1 土壤交换性能与酸度

土壤阳离子交换量(CEC)反映土壤保蓄交换盐基养分的能力。从表 2 可见, 从流石滩草甸→林线过渡带

→冷杉林,土壤 CEC 含量表层土壤(0~30 cm)呈逐渐增加的趋势。土壤 CEC 与交换性盐基及交换性酸含量呈显著正相关(相关系数分别为 0.985** 和 0.762*),土壤交换性盐基和水解性酸的变化在各类型植被间与 CEC 具有一致的变化规律。由于流石滩草甸土壤总空隙度高,物理结构性质差,保水性能差,降水淋溶强度大,因此保肥性能差,养分流失严重,因此其土壤 CEC、水解性酸、交换性盐基含量与盐基饱和度都较低,pH 值较高。从林线过渡带到下缘冷杉林,随着土壤物理结构的逐步改善以及植被盖度和郁闭度的增大,降水淋溶作用有所降低,土壤 CEC、水解性酸、交换性盐基含量与盐基饱和度都较流石滩草甸逐步增高,土壤保水保肥性能增强。虽然针叶林林地土壤的交换性盐基绝对量较多,但针叶由于富含单宁、树脂等成分,其枯落物在冷湿的条件下经生物化学作用所产生的活性腐殖质酸较高,所以其水解性酸也较高,土壤酸化,其土壤 pH 值低于林线过渡带和流石滩草甸。

表 2 林线过渡带及邻近植被土壤交换性能和酸度特性

Table 2 Soil exchange property and acidity of the timberline ecotone and the adjacent vegetations

类型 Types	层次 Layers	pH (H ₂ O:Soil)	水解性酸 (mmol·kg ⁻¹)	交换性盐基 (mmol·kg ⁻¹)	CEC * (mmol·kg ⁻¹)	盐基饱和度 (%)
流石滩草甸 Scree meadow	0~15	6.81	48.76	70.78	119.54	59.21
	15~26	6.96	32.40	28.63	61.03	46.91
林线过渡带 Timberline ecotone	0~15	6.57	79.43	159.69	239.12	66.78
	15~30	6.89	54.26	114.22	168.48	67.79
	30~47	6.82	37.72	51.75	89.47	57.84
冷杉林 Fir dominated forest	0~15	5.92	134.16	198.67	332.83	59.69
	15~30	6.27	96.38	162.94	259.32	62.83
	30~64	6.75	51.01	78.34	129.35	60.56

水解性酸 Hydrolyzed acid; 交换性盐基 Exchangeable base content; 阳离子交换量 Cation exchangeable capacity content; 盐基饱和度 Base saturation percentage. * CEC 由水解性酸加交换性盐基总量计算 CEC is the sum of hydrolytic acidity and total exchangeable base

表 3 林线过渡带及邻近植被土壤养分特性

Table 3 The soil nutrient properties of the timberline ecotone and the adjacent vegetations

类型 Types	层次 Layers	有机质 SOM (g/Kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	有效 N Available N (mg/kg)	有效 P Available N (mg/kg)	速效 K Soluble K (mg/kg)
流石滩草甸 Scree meadow	0~15	54.04a (7.12)	2.79a (0.45)	1.56a (0.34)	18.69a (1.83)	83.57c (6.91)	1.64a (0.57)	145.56a (4.32)
	15~26	5.93b (3.67)	0.47b (0.21)	0.42b (0.08)	9.16b (1.47)	16.46b (3.03)	0.85c (0.38)	43.42b (2.48)
林线过渡带 Timberline ecotone	0~15	180.17c (15.48)	4.50d (0.78)	2.18f (0.34)	17.94a (2.82)	134.78a (8.12)	4.63b (0.92)	198.73c (6.65)
	15~30	79.51f (9.66)	3.27c (0.67)	1.05g (0.46)	22.95g (1.78)	64.17f (6.38)	2.81d (0.76)	125.13f (3.54)
	30~47	12.64d (3.78)	0.56b (0.24)	0.62b (0.27)	14.38c (1.90)	18.72b (4.15)	0.79c (0.41)	64.26g (4.29)
冷杉林 Fir dominated forest	0~15	225.48g (14.56)	3.87f (0.75)	2.90c (0.41)	26.41f (2.35)	167.05g (7.74)	5.76f (0.87)	213.07d (5.35)
	15~30	82.35f (10.38)	2.68a (0.42)	1.72a (0.54)	32.78d (2.06)	94.87 h (3.34)	2.57d (0.56)	150.43a (6.11)
	30~64	14.24d (5.27)	0.64b (0.28)	0.96d (0.23)	15.59c (1.67)	29.08d (4.40)	1.61g (0.74)	96.56 h (3.82)

括号内为标准差,同一列中不同字母代表同一植被和不同植被土层之间的差异显著 ($P < 0.05$, $n = 5$) SD in the bracket, Different letters within a column indicate the significant differences among the soil layers of same and different vegetations ($P < 0.05$, $n = 5$), 下同 the same below

2.2.2 土壤养分性质

由表 3 可知,在土壤垂直分布上,各植被类型总体上均表现为随土壤层次的加深,土壤有机质、全 N、全

P、全 K 和有效 N、P 和速效 K 含量逐渐降低。总体而言,0~30 cm 表层土壤有机质、全 P、全 K、有效 N、P 和速效 K 含量差异显著($P<0.05$),冷杉林>林线过渡带>流石滩草甸,而全 N 林线交错带含量最高。底层土壤除流石滩草甸最低外,林线交错带与下缘冷杉林总体差异不显著。

2.3 林线过渡带及邻近植被土壤微生物数量变化

从表 4 可见,流石滩草甸、林线过渡带和冷杉林不同植被土壤细菌、真菌、放线菌和微生物总数在土壤中的垂直分布均表现为随土层加深数量逐渐降低。从微生物类群数量看,各土层均以细菌数量占优势,占微生物总数的 84.9%~95.7%,真菌数量次之,占微生物总数的 3.4%~12.1%,放线菌数量最少,占 1.4%~4.8%。从植被 0~30 cm 土层变化看,流石滩草甸细菌、真菌、放线菌和微生物总数数量最低,而林线过渡带数量最高,下缘冷杉林数量有所降低,而底层土壤又高于林线过渡带。林线过渡带细菌、真菌和放线菌数量最高,表明其林地与临近流石滩草甸和冷杉林相比更有利于物质的转化。

表 4 林线过渡带及邻近植被土壤微生物数量
Table 4 The quantities of soil microbe in the timberline ecotone and the adjacent vegetations

类型 Types	土层 Layer (cm)	微生物数量 The quantity of microbe($\times 10^5$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$ dry soil)			
		细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomycetes	总数 Total
流石滩草甸	0~15	46.16(6.28) a	2.18(0.97) b	0.72(0.19) a	49.06(5.98) a
Scree meadow	15~26	3.28(1.94) b	0.29(0.14) a	0.18(0.05) b	3.75(1.75) e
林线过渡带	0~15	106.76(9.17) d	14.73(5.65) c	3.92(1.64) d	125.41(7.27) c
Timberline ecotone	15~30	62.68(8.31) f	8.87(3.92) d	2.12(1.81) c	73.67(6.83) f
	30~47	19.17(4.76) e	0.72(0.32) e	0.38(0.17) f	20.27(3.02) b
冷杉林	0~15	87.69(10.68) c	10.58(2.76) f	3.17(1.56) d	101.44(8.10) d
Fir dominated forest	15~30	58.24(4.03) f	8.04(2.98) d	2.25(1.09) c	68.53(4.58) f
	30~64	21.65(5.82) e	0.79(0.24) e	0.67(0.31) a	23.11(5.42) b

2.4 林线过渡带及邻近植被土壤酶活性变化

由表 5 可知,对于亚高山流石滩及冷杉林以及二者的交错带,脲酶、蔗糖酶、酸性及中性磷酸酶,多酚氧化酶和过氧化氢酶等土壤酶活性在土壤剖面垂直分布规律明显,均随土壤深度的加深而降低。与流石滩草甸相比较,林线过渡带 0~15 cm 土层脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、多酚氧化酶以及过氧化氢酶活性分别提高 2.04、2.49、1.91、1.70、2.03 倍和 1.57 倍,15~30 cm 土层分别提高 6.44、8.70、8.03、4.02、2.74 倍和

表 5 林线过渡带及邻近植被土壤酶活性
Table 5 Soil enzymatic activity of the timberline ecotone and the adjacent vegetations

类型 Types	层次 Layers	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	中性磷酸酶 Neutra phosphatase	多酚氧化酶 Polyphenol- oxidase	过氧化氢酶 Catalase
流石滩草甸	0~15	0.435(0.124) a	1.017(0.312) a	0.265(0.101) b	0.182(0.075) b	1.185(0.478) a	2.721(0.728) c
Scree meadow	15~26	0.068(0.012) b	0.214(0.076) c	0.067(0.019) a	0.042(0.008) a	0.459(0.127) b	0.760(0.283) a
林线过渡带	0~15	1.296(0.351) c	2.784(0.419) b	0.736(0.132) f	0.347(0.132) c	2.870(0.624) f	4.968(0.671) b
Timberline ecotone	15~30	0.438(0.098) a	1.862(0.470) e	0.538(0.126) c	0.168(0.080) e	1.259(0.350) a	2.970(0.749) c
	30~47	0.075(0.021) b	0.434(0.103) f	0.089(0.025) d	0.047(0.031) a	0.684(0.267) e	0.905(0.460) a
冷杉林	0~15	0.862(0.173) d	2.127(0.511) d	0.652(0.130) e	0.252(0.109) d	2.187(0.511) d	4.034(1.542) d
Fir dominated forest	15~30	0.311(0.078) e	0.985(0.217) a	0.514(0.083) c	0.162(0.141) e	1.131(0.603) a	3.438(0.420) f
	30~64	0.081(0.023) b	0.472(0.084) f	0.093(0.032) d	0.072(0.064) f	0.920(0.341) h	1.362(0.612) e

Urease ($\text{NH}_4\text{-N mg}\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 24h, 37 $^{\circ}\text{C}$), Invertase ($\text{G mg}\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 24h, 37 $^{\circ}\text{C}$), Acid phosphatase ($\text{P}_2\text{O}_5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 2h, 37 $^{\circ}\text{C}$), Neutra phosphatase ($\text{P}_2\text{O}_5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 2h, 37 $^{\circ}\text{C}$), Polyphenol oxidase ($0.01\text{ mol/L I}_2\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 2min, 30 $^{\circ}\text{C}$), Catalase ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil, 24h, 37 $^{\circ}\text{C}$)

3.91 倍,下缘冷杉林 0~15 cm 土层分别提高 1.36、1.90、1.79、1.38、1.69 倍和 1.48 倍,15~30 cm 土层分别提高 4.57、4.37、6.18、3.82、3.34 倍和 4.52 倍,0~30 cm 土层各酶活性总体表现为流石滩草甸最低,林线过渡带最高,冷杉林次之。对于底层土壤,冷杉林(30~64 cm)土层各土壤酶活性稍高于林线过渡带(30~47 cm)土层,但差异未达显著性水平($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 林线过渡带及邻近植被土壤特性成因

从亚高山流石滩草甸→林线过渡带→冷杉林,虽然土壤质地有所好转,但均表现为土层浅薄,土壤物理机械组成质量差,石砾含量和砂粒含量高,空隙度大,土壤质地粗骨化,土壤水分和养分含量较低。其主要原因可能在于:(1)川西亚高山林线区土壤母质很大程度上都是山峰顶部的崩塌(崩落或剥落)以及滑坡岩石经物理和化学风化后形成的残积母质^[4]。该区域的土壤发育时间较短,成土过程主要以腐殖质的积累过程为主;(2)土壤的形成与母质的特性、物理、化学以及生物的风化速率密切相关^[15~17]。极端低温环境条件下土壤生物风化弱,物理风化作用仍是主要的风化过程;(3)地形陡峭多崩塌,滑坡等活动频繁,常常阻断土壤的发育;(4)林线区域土壤周期性冻融循环影响土壤团聚体的稳定性。林线区域冰冻期长达半年(11月~翌年4月),大多数的研究认为,冰冻对大团聚体(粒径 >0.25 mm)稳定性的破坏程度强于微团聚体,冻融循环降低团聚体的稳定性,导致团聚体的破碎,从而影响土壤的物理、化学及生物学性质^[18,19]。

本研究表明,林线过渡带土壤微生物数量、酶活性总体高于上缘流石滩草甸和下缘冷杉-苔藓林。其原因在于:(1)作为生态交错带,林线过渡区由于边缘效应比邻近植被具有更为丰富的物种多样性^[4,20]。物种多样性越高,生物作用对土壤施加的影响越强烈,土壤微生物、酶活性越高^[21]。(2)林线过渡带植被盖度与郁闭度远低于下缘冷杉林,生长季中,充足的阳光照射使其土壤温度高于林缘冷杉林阴冷土壤。虽然林线及林缘植被的分布均受限于亚高山极端的温度条件,但在短距离内局部的温度差异可能是林线过渡带土壤微生物数量、土壤酶活性高于下缘冷杉林的可能因素。虽然流石滩草甸获得阳光照射更充足,但其过低的土壤有机质等养分条件使其微生物数量及酶活性低于林线过渡带。亚高山林线过渡带土壤微生物数量和酶活性高于邻近植被,体现了林线过渡带这一特殊的生态交错带,具有能流、物流相对活跃的所有生态交错带的一般共性。而随上缘流石滩草甸→林线过渡带→下缘冷杉林植被的变化,土壤物理性质参数、有机质和养分含量等土壤肥力状况逐步有所改善,反映了亚高山残积母质上植被原生演替及土壤发育的部分规律。

3.2 林线区域土壤性质的生态学意义

关于高山林线成因以及动态一直是林线生态学研究领域中最具争议的议题^[22]。高海拔地区,低温是林线形成和动态的关键生态因子,而低海拔林线的形成则与水的可利用性、其他气候因子及人为干扰等相关^[23]。除气候因素外,地貌及土壤基质条件对林线形成及动态影响也很大。如长白山火山灰和砾石母质上的土壤,成土速度慢,土壤瘠薄,在此情形下,小地型的差异和土壤基质状况是决定林线优势种岳桦幼苗更新及向苔原侵展的先决条件^[24]。对高山林线树种幼苗向苔原移栽的试验研究也表明,除了高的太阳辐射与幼苗死亡率有关外,苔原缓慢的成土过程,贫瘠的土壤养分条件不能为种子的散布及萌发提供“安全岛”,土壤低的有效养分含量与幼苗的死亡率密切相关^[25]。同时,林线区瘠薄土壤物理结构性差,保水性能低,水分的可利用性也是林线树种更新和向上侵展的关键因素^[26]。在本研究区域,亚高山林线过渡带性能低下的土壤物理结构、低的水分和养分有效性均可能成为该林线物种光合碳平衡、幼苗定植更新以及生态型矮曲的影响因子。特别是未来气候变暖背景下,上缘流石滩草甸高石砾、粗骨化、低养分的土壤基质条件可能妨碍林线植物繁殖体定居,从而控制着亚高山林线的侵展动态。当然,一切还有待进一步深入研究。许多生物学家把林线作为研究气候变化与植物种群适应机制及群落动态的理想场所,将其称为“大自然的实验室”^[27,28],同时也是研究植被演替与成土过程以及二者相互机制的理想平台。

References:

- [1] Tranquillini W. Physiological ecology of the alpine timberline. New York: Springer-Verlag, 1979. 1-12.

- [2] Tsukaya H K, Fujikawa K, Wu S G, *et al.* Thermal insulation and accumulation of heat in the downy inflorescences of *Saussurea medusa* (Asteraceae) at high elevation in Yunnan, China. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(3): 263—268.
- [3] Li M H, Hoch G, Körner C H. Source/sink removal affects mobile carbohydrates in *Pinus cembra* at the Swiss treeline. *Trees*, 2002, 16: 331—337.
- [4] Shi P L, Li W H, Wang J X, *et al.* Species-abundance relation of herb communities in subalpine timberline ecotone of Wolong Natural Reserve, Sichuan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 384—389.
- [5] Liu H Y, Cao Y L, Tian J, *et al.* Vegetation landscape of the alpine timberline on Mt. Wutai, Guandi, Shanxi Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 263—269.
- [6] Jaime G C. Tree recruitment at the *Nothofagus pumilio* alpine timberline in Tierra del Fuego, Chile. *Journal of Ecology*, 2000, 88: 840—855.
- [7] Klasner F L, Fagre D B. A half century of change in alpine treeline patterns at Glacier National Park, Montana, U. S. A. *Arctic Antarctic Alpine Research*, 2002, 34(1): 49—56.
- [8] Hoch G, Popp M, Körner C H. Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. *Oikos*, 2002, 98(2): 361—374.
- [9] Körner C H. A re-assessment of high elevation tree-line positions and their explanation. *Oecologia*, 1998, 115: 445—459.
- [10] Li M H, Hoch G, Körner C. Source/sink removal affects mobile carbohydrates in *Pinus cembra* at the Swiss treeline. *Trees*, 2002, 16: 331—337.
- [11] Pang X Y, Liu S Q, Liu Q, *et al.* Influence of plant community succession on soil physical properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in Western Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 42—45.
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Analysis of Soil Physics and Chemistry*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 132—136, 142—146.
- [13] Lu R K. *Analytical Methods of Soil Agro-chemistry*. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000. 231—260.
- [14] Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Method*. Beijing: Agricultural Press, 1986. 106—364.
- [15] Cai X B, Qing C, Zhang Q. Characterization of soil biological properties on degraded alpine grasslands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1733—1738.
- [16] Wang D, Fu B J, Chen L D, *et al.* Fractal analysis on soil particle size distributions under different land use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3081—3089.
- [17] Garcia C, Hernander T. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(2): 171—177.
- [18] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 2003, 52(1): 1—8.
- [19] Van Bochove E, Pr vost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1638—1643.
- [20] Myers D, Mittermeier R A, Mittermeier C G, *et al.* Biodiversity hot spots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403: 853—858.
- [21] Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P, *et al.* Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of MT. Jinyun. *Scientia Silvae Science*, 2001, 37(4): 124—128.
- [22] Körner C H, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 2004, 31: 713—732.
- [23] Mast J N, Veblen H T, Linhart Y B. Disturbance and climatic influences on age structure of ponderosa pine at the pine/grassland ecotone, Colorado Front Range. *Journal of Biogeography*, 1998, 25: 743—755.
- [24] Shi P L, Li W H. Boundary form effects of timberline ecotone on colonization of woody plants and timberline dynamics in Changbai Mountain, *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 573—580.
- [25] Hobbie S E, Chapin, F S. An experimental test of limits to tree establishment in Arctic tundra. *Journal of Ecology*, 1998, 86(2): 449—461.
- [26] Gieger T, Leuschner C. Altitudinal change in needle water relations of *Pinus canariensis* and possible evidence of a drought-induced alpine timberline on Mt. Teide, Tenerife. *Flora*, 2004, 199(2): 100—109.
- [27] Hedberg O. Adaptive evolution in a tropical alpine environment. In: Heywood V H ed. *Taxonomy and Ecology*. New York, London: Academic Press, 1975. 71—93.
- [28] Billings W D. High mountain ecosystems. Evolution, structure, operation and maintenance. In: Webber, P L ed. *High Altitude Geocology*. AAAS Select Symp, 1979. 12: 97—125.

参考文献:

- [4] 石培礼, 李文华, 王金锡, 等. 四川卧龙亚高山林线生态交错带群落的种-多度关系. 生态学报, 2000, 20(3): 384 ~ 389.
- [5] 刘鸿雁, 曹艳丽, 田军, 等. 山西五台山高山林线的植被景观. 植物生态学报, 2003, 27(2): 263 ~ 269.
- [10] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 等. 川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响. 水土保持学报, 2003, 17(4): 42 ~ 45.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 132 ~ 136, 142 ~ 146.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 农业科学出版社, 2000. 231 ~ 260.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. 85 ~ 120.
- [15] 蔡晓布, 钱成, 张永清. 退化高寒草原土壤生物学性质的变化. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1733 ~ 1738.
- [16] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2007, 27(7): 3081 ~ 3089.
- [19] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. 林业科学, 2001, 37(4): 124 ~ 128.
- [23] 石培礼, 李文华. 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原侵展和林线动态的关系. 生态学报, 2000, 20(4): 573 ~ 580.