

## 天山北坡三工河流域中山带森林发育 与气候土壤的关系

李艳忠<sup>1,2</sup>, 罗格平<sup>1\*</sup>, 许文强<sup>1</sup>, 尹昌应<sup>1,2</sup>, 韩其飞<sup>1,2</sup>, 冯异星<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 开展干旱区山地森林发育状况及其土壤因素影响的分析, 对干旱区乃至全球山地森林带的成因研究具有重要的理论意义。以天山北坡三工河流域为研究区, 主要利用森林调查与遥感影像数据, 确定该流域森林带的分布状况, 并结合流域气象与土壤采样数据, 重点分析气候土壤因素对森林发育的影响。结果表明: 1. 该流域森林带位于海拔 1 510~2 720 m, 胸径与树高随海拔增加呈双峰曲线; 其中胸径两个峰值分别位于约海拔 2 000 m 与 2 550 m, 而树高峰值分别为海拔 2 100 m 与 2 600 m, 均稍高于胸径的峰值海拔高度; 2. 在森林带内, 年均温随海拔高度增加呈线性下降趋势, 最冷月均温(1 月)则表现先增加后减小趋势; 与其他地区相比, 该流域高山林线年均温较高, 最冷月均温相差较大, 而最热月均温差异不明显; 年降水量呈先增加后减小的趋势, 且在海拔 2 000 m 左右达到最大值。土壤属性随海拔递增呈规律性的变化趋势: 森林带内海拔约 2 000~2 700 m 树木发育较好, 其有机质、全磷及全氮含量较高;  $\text{CaCO}_3$ , pH 值及电导率最小值与海拔 2 000 m 的最大降水带恰好吻合; 土壤 A 层(0~10 cm)有机质、全磷及全氮含量与 B(10~30 cm)、C(>30 cm)层差异显著, 表明营养物质“表聚现象”明显, 成土条件作用于土壤的深度较浅, 而  $\text{CaCO}_3$ , pH 值与电导率各层间差异不显著。3. 森林带分布格局是由降水、温度、海拔以及土壤营养等因素综合控制, 方差分析表明土壤理化性质为限制森林带内雪岭云杉生长发育的主导因子, 各生态因子对森林发育影响的作用地位为: 土壤营养>降水>海拔>温度。

**关键词:** 天山北坡; 三工河流域; 气候条件; 土壤属性; 高山林线

**中图分类号:** Q142, Q948, S718.5

**文献标识码:** A

森林作为陆地生态系统的重要组成部分, 对改善生态环境、维护生态平衡具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>, 特别是干旱区森林生态系统对生态环境的建设具有重要作用<sup>[2]</sup>。山地森林气候由于随海拔升高呈现规律性变化, 并导致植被结构、土壤属性以及整个自然地理综合体的垂直分异, 从而形成差异鲜明的植被垂直带。反过来, 植被对环境因素也有很强的指示作用, 全球气候变化的背景下, 山地森林对环境变化作出了积极的响应, 其中最具有代表性的

为森林带上下线的变化<sup>[3]</sup>, 而高山林线(alpine timberline)作为亚高山森林与高山草甸之间的一条生态过渡带, 为山地垂直带上的一条重要的分界线, 由于其海拔高, 受人为干扰较少, 且对气候变化十分敏感, 被认为具有监测气候变化的综合作用, 引起了国内外植被生态学者的关注<sup>[4-10]</sup>。故而, 对影响森林植被发育状况的环境因子的探讨, 有助于进一步认识和研究在未来气候变化对植被的影响, 并为区域生态管理提供科学依据, 这对于维护我国西北干旱

收稿日期(Received date): 2010-03-01; 改回日期(Accepted): 2010-10-28。

**基金项目**(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40971066), 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2008AA12Z112), 国家重点基础研究发展规划(973 计划)(2009CB825105)资助项目。[Project supported by National Natural Science Foundation of China(40971066), National High-tech R&D Program of China(863 Program)(2008AA12Z112) and National Program on Key Basic Research Project(973 Program)(2009CB825105).]

**作者简介**(Biography): 李艳忠(1984-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。[Li Yanzhong(1984-), male, born in Heze city of Shandong province, Post graduate, mainly conducting application research on Remote Sense and Geographic Information System.] E-mail: liyz\_egi@sina.cn

\* 通讯作者(Author for correspondence): 罗格平, 男, 研究员。[Luo Geping, male, Research Fellow.] E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn

区脆弱的生态系统显得尤为重要。

在全球气候变化背景下,近 30 a 亚洲中部干旱区温度和降水呈增加趋势<sup>[13-16]</sup>,其植被结构正经历着显著变化<sup>[17-18]</sup>。有学者通过植物孢粉研究,发现在距今 2000—1300 a 前,天山北坡雪岭云杉林的下限相对现今下移约 330 m<sup>[17]</sup>。一些学者认为森林分布的上限受低温控制,而分布的下限受降水量控制<sup>[12-19]</sup>,而干旱区天山北坡的针叶林分布的上限和下限受温度和降水综合影响<sup>[20-22]</sup>。除水热条件外,土壤作为植被生长发育所需营养元素的来源,其理化性质也显著影响着森林植被的生长发育<sup>[23]</sup>。在山区随着海拔增加温度逐渐降低,所形成低温以及干旱等极端气候条件限制了林线植被种子萌发、生长和更新,同时降低了植物体对土壤库中营养物质(包括 N、P、K 以及各种微量元素)的吸收能力<sup>[12-24]</sup>。然而,这些研究主要对单个因素进行探讨,对不同海拔梯度森林内水热条件及土壤因素综合特征及其对森林发育影响的地位级探讨较少。此外,开展干旱区气候与土壤因素对森林带发育综合影响的研究,对全球干旱区森林带成因研究以及森林土壤-植被-气候连续体的物质与能量的交换系统研究具有重要的意义。因此,本文选择亚洲中部干旱区典型的天山北坡三工河流域为研究区,基于高分辨率遥感影像与实地调查资料,提取森林分布状况及获取树木发育特征,重点分析流域森林带内的水热条件和土壤属性特征,并对限制森林发育的

生态因子地位级进行探讨。研究目标包括:1. 识别三工河流域山地森林带分布状况,获取不同海拔树木胸径及树高发育特征;2. 分析森林带内气候土壤属性特征;3. 探讨气候土壤属性等多个生态因子对森林发育影响的地位级。本研究将为干旱区森林植被对环境变化的响应机制提供理论依据。

## 1 研究区概况

三工河流域(87°47'~88°17'E, 43°09'~45°29'N)位于天山北麓中段东部,准噶尔盆地南缘,由新疆阜康市辖区的水磨河,三工河和四工河组成(图 1)。三工河流域南部山区为天山-阴山巨型纬向构造带,北部为准噶尔盆地,著名的古尔班通古特沙漠位于盆地中央。整个流域地势南高北低,由东南向西北倾斜<sup>[25]</sup>。

研究区位于三工河流域南部山区,包括著名的博格达山脉和天池风景区,可分为高山带(>2 700 m)、中山带(1 600~2 700 m)和低山丘陵带(700~1 600 m)。中山带全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 2 100 $^{\circ}\text{C}$ ,多年平均气温 0.18 $^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 -37 $^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 33 $^{\circ}\text{C}$ ;年降水量 486.68 mm,降水以降雨为主,占降水量的 70%,降水频率高而强度小;年蒸发量约为 1 339 mm,干燥度 0.3~1.0。中山带阳坡为黑钙土,生长着野麦草、柴胡、黄花蒿、苔草、糙苏、三叶草等,覆盖度在 70%~90%;阴坡为天山雪

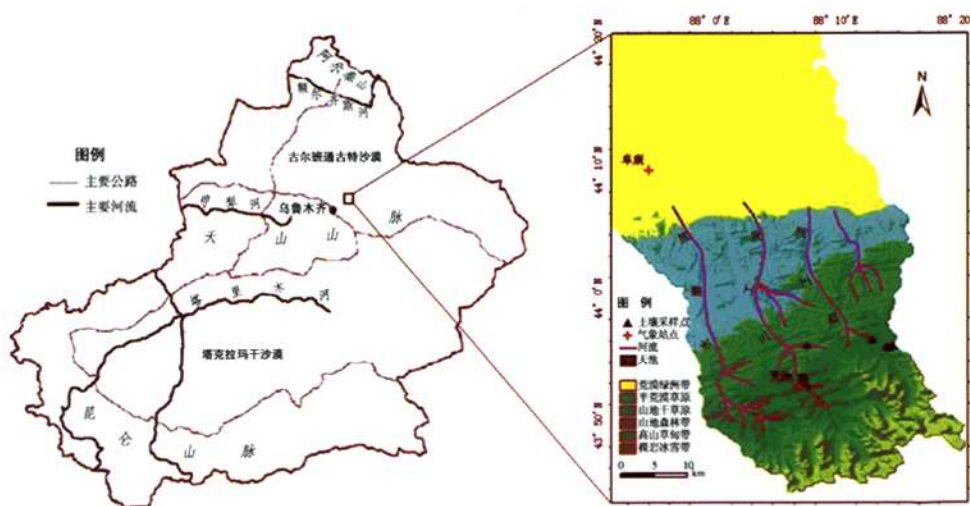


图 1 天山北坡三工河流域示意图

Fig. 1 The sketch map of Sangong River watershed in the northern slope of Tianshan Mountains

岭云杉林,土壤类型为灰褐土,林下为阴生性灌木和草本植物。高山、亚高山草甸、草甸草原带(2 650 ~ 3 500 m)主要土壤类型为肥力较高的高山草甸土、亚高山草甸土和亚高山草甸草原土,夏季植被返青,主要为禾本科,有苔草、斗篷草、高山早熟禾、小唐松草、点地梅等,覆被度达40% ~ 90%。

## 2 数据与方法

### 2.1 遥感数据

选取三工河流域 2008 - 06 - 15 Quick Bird (0.61 m) 及 2009 - 08 - 22 SPOT (2.5 m) 遥感影像,进行几何、辐射校正等处理,并借助 Google Earth 网络平台上提供的高分辨率遥感影像(1 ~ 2.5 m),对森林的分布格局及植被特征进行高精度识别。通过目视机助解译获取森林带分布格局,主要包括森林带分布的高度及植被类型,特别是对高山林线的高精度识别(郁闭度 > 0.3 森林,矮曲林、灌木林等)。

### 2.2 森林植被调查数据

工作主要于 2009 - 08 中旬开展,次年 6 月上旬再次对数据进行了补充。试验中沿三工河流域森林带自上而下,采取梯度格局法选取样地,每隔 50 m 的垂直高差机械布设一定面积的样地,本次研究中沿等高线水平设置样带,共选择 24 个样地,每个样地内选择 10 ~ 12 棵树木,共记录 252 棵。记录每一个样地的海拔,经纬度,坡度、坡向等基本信息,以及每个样地内所有种群个体数量、组成、基径、胸径、株高、郁闭度等特征,同时记录群落学的有关特征,如群落类型及主要种类组成、盖度、多度等。胸径用测绳测定,树高用测高仪测定,冠幅用皮卷尺测定,同时测定样方内灌木和草本覆盖度并记录幼树株数。调查每个样地的微地形、坡度、坡向等环境因子。

### 2.3 气象资料

气象数据来自中科院新疆生地所地理信息系统实验室数据库。选取三工河流域内 5 个气象站(包括 3 个自动气象站)及周边 6 个气象站数据。除 3 个自动气象站数据时间序列为 2003—2005 年,其余均为 1979—2009 年。其中山区有中国科学院阜康荒漠生态野外站在海拔 1 065 m、2 000 m、3 008 m 布设的自动气象站数据和位于中山森林带的中国科学院乌鲁木齐齐冰雪站的气象数据,以及天池气象站(1 943 m)、小渠子气象站(2 160 m)和大西沟气象

站(3 539 m)的温度、降水、辐射等序列数据。

由于气象数据年限不统一,需要对其进行归一化处理。本研究选取 1979—2009 年的逐月温度、降水、辐射、气压等气象要素,利用自动气象站数据各月均温及降水与其他气象站数据做相关分析,相关系数均在 0.98 以上(图 2),从而通过气象要素插值得到自动气象站缺值年份的气象数据。然后利用山区气象站数据气象站月资料,推算出三工河流域森林带内不同海拔的气候特征。

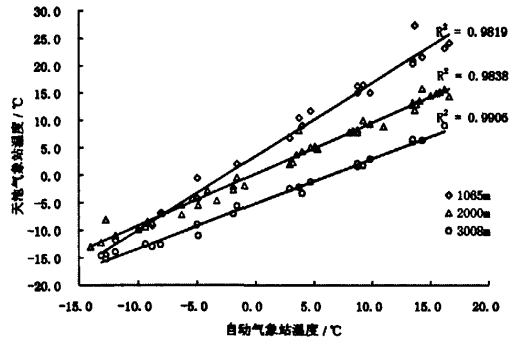


图 2 三个自动气象站月均温与天池气象站的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of monthly mean temperature between automatic weather station

### 2.4 土壤采样与处理

根据三工河流域森林带内气候、地形等环境条件的差异,在森林下限至高山草甸不同海拔位置选取 6 个土壤剖面采样(见图 1),各采样点的土壤剖面形态特征如表 1 所示。所有样品经自然风干后过 2 mm 土壤筛,然后送实验室分析。土壤 pH 值采用电位法测定,有机质含量用重铬酸钾氧化 - 外加加热法测定,全氮用半微量开氏法测定,全磷用硫酸 - 高氯酸消煮 - 钼锑抗比色法测定,电导率采用电导法测定。

所有土壤数据的汇总与分析是通过数理统计分析软件 SPSS 15.0 完成。不同森林上下限的气候指标间是否具有显著差异,将通过单因素方差分析(One-way ANOVA)完成。对不同深度的有机质、全磷、全氮等土壤属性数据分别进行统计分析,并用 F 检验( $P < 0.05$ )分析不同深度的土壤数据是否具有显著的差异性。森林发育受多种生态因子的限制,为了定量研究其影响,通过方差分析比较了各生态因子对林分胸径生长的影响。

3 结果与分析

3.1 不同海拔森林发育状况

通过高分辨率遥感影像以及实地勘察,发现三工河流域森林分布的最低位置位于海拔高度 1 510 m 附近,森林郁闭度 0.15 左右,并且只在阴坡的沟凹处呈零星块状分布,无法形成连续的森林,与山地干草原交错分布;上升至海拔 1 620 m 左右,森林的郁闭度明显增加,并且形成连续成片的森林,林隙面积减小,林下草本盖度较低,土壤湿度明显增加。达到海拔 2 600 m 左右森林密度逐渐降低,林窗的数量增加明显,灌丛盖度增加,并且约海拔 2 720 m 以上无树木发育,只有矮状的灌丛分布,故而,该流域森林下限与高山林线的范围分别为海拔 1 510 ~ 1 620 m 与 2 600 ~ 2720 m。

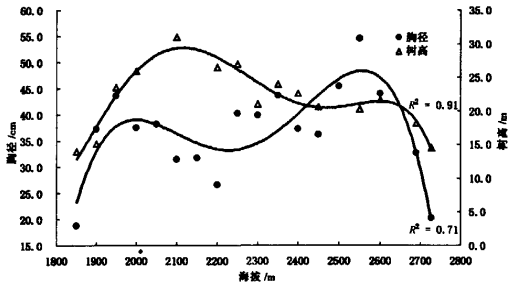


图3 三工流域不同海拔胸径与树高曲线

Fig. 3 The curve of DBH and tree height at different altitudes

在森林的植被类型特征中,乔木树种的胸径、树高及树轮宽度能较好的指示森林带温度和降水特征<sup>[14,30]</sup>。故而,在获取该流域森林分布特征的基础上,对不同海拔的树木进行每木调查,并绘制了不同海拔树木胸径与树高关系的拟合曲线(图3),均达到显著水平( $p < 0.05$ )。由图3可知,树高和胸径随着海拔梯度的增加均呈现为“双峰曲线”。胸径的两个峰值约位于海拔 2 000 m 与 2 600 m,且在 2 600 m 左右胸径明显大于其他位置,在两峰值之间差异不显著;而树高在海拔约 2 100 m 出现明显的高峰,约在 2 650 m 位置出现较小的峰值,但整体趋势在海拔 2 100 m 两侧位置均呈减小趋势,以上位置减少较缓慢。2 600 m 以上为高山林线过渡区域,其胸径与树高减小较为显著,一定程度上表明了高山林线附近的树木个体的形态发育和树高、胸径

的生长受到了环境胁迫。但在林线附近发现了较多的幼苗,说明该处气候对树木的繁殖更新无显著的影响。

3.2 森林带内气候与土壤特征

3.2.1 气候特征

根据三工河流域内以及周边 11 个气象站数据推算出森林带内气候(表 1)可知,森林带下限与上限年均温相差约 5.8℃,受冬季逆温层的影响在海拔 1 500 ~ 2 000 m 温度直减率为  $-0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,而海拔 2 000 m 以上温度直减率平均为  $-0.56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。最热月均温(7 月)森林带上下限相差 8.3℃,大于年均温而小于最冷月均温(1 月)的差值。由于冬季受到逆温的影响,1 月温度在海拔 1 500 ~ 2 000 m 呈略微上升趋势,递增率约为  $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ;而海拔 2 000 m 以上则为递减趋势,直减率约为  $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,森林带的上下限温差也减小为 1.3℃左右,这在一定程度上对于森林带树木及幼苗顺利渡过寒冷的冬季提供了良好的温度条件。

表 1 三工河流域森林带内不同海拔气候指标

Table 1 The climatic indices at different altitudes in the forest

海拔 /m	年均温 /℃	7 月均温 /℃	1 月均温 /℃	年降水量 /mm
1 500	4.76	18.98	-11.91	388
2 000	2.82	15.06	-11.75	543
2 200	1.70	13.82	-12.17	528
2 600	-0.54	11.34	-13.01	495
2 700	-1.10	10.72	-13.22	489

森林带内年降水量随海拔增加呈现先增加后减小的变化趋势,在海拔 2 000 m 左右达到最大值,且在海拔 1 500 ~ 2 000 m 降水递增率约为  $31\text{ mm}/\text{hm}$ ,而海拔 2 000 m 以上递减率约为  $-7.8\text{ mm}/\text{hm}$ ,独特的降水模式为中山带森林发育提供了充足的水分条件。

与我国小五台山地区森林带内气候<sup>[28]</sup>相比,三工河流域森林带各海拔年均温要高些,这可能是由两地降水量的显著差异所造成。而在高山林线区域,三工河流域 1 月均温要高于小五台山(约  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,低于藏东南地区( $-6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[10]</sup>近  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这表明最冷月均温不能作为限制三地森林发育的统一因素。而对比高山林线内最热月均温发现,三工河流域( $10.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ )与小五台山地区( $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

最为接近,稍高于藏东南地区(9.4℃)以及全国均值<sup>[9]</sup>(9.7℃)与阿尔卑斯山、落基山地区气候指标<sup>[3,12,29]</sup>(10℃),这可能是由于三工河流域地处西部干旱区,降水量明显小于其他地区,且下垫面以沙地和石砾为主,比热容较低,造成整个干旱区夏季温度上升较快。

3.2.2 土壤特征

在森林中,植物与土壤之间构成了一个具有周期性的生物循环。森林带内植被生长发育除受到水热组合条件的限制外,土壤作为重要的“营养库”,源源不断地为森林植被提供着生长发育所需要的各种营养物质(如N,P,K等),其理化性质对森林生长起着重要作用<sup>[24]</sup>。树木根系从土壤中吸取各种矿物质营养元素以满足其生长发育需要的同时,又以枯枝落叶的形式归还给土壤。这样,矿质营养元素就以吸收、存留和归还等形式参加生物循环,成为生物地球化学循环的一个重要组成部分<sup>[30]</sup>。为了解三工河流域森林土壤肥力的状况及其与林木生长与植被演替的关系,对其森林带土壤属性随海拔梯度变化的特征研究是必要的。

三工河流域森林带内不同海拔土壤有机质、全氮、全磷、CaCO<sub>3</sub>、pH值以及电导率的均值和标准方差如表2所示。随着海拔增加,有机质与全氮含量变化趋势基本一致,即“先增大后减小”。森林上下限区域含量较低,而森林带内部含量高。高山林线区域有机质与全氮含量分别约为12.411%,0.457%,稍高于整个森林带内土壤有机质(约11.466%)、全氮(约0.415%)含量;全氮含量约为0.063%,与森林带内全氮含量(约0.066%)相当,但高山林线内三项指标与罗格平<sup>[11]</sup>在该流域内冲

积平原绿洲内研究的土壤营养物质含量间存在显著差异( $p<0.05$ )。有机质含量在高山林线内约海拔2700m左右达到最大值,这主要是由于森林内温度随着海拔的增加而迅速下降(见表1),而土壤微生物活动的最适温度范围大约为25℃~35℃<sup>[1]</sup>,在三工河流域的林线区域内年均温低于0℃,微生物及各种酶的活性受到明显抑制,土壤有机物的分解速度减慢且周转时间增加,从而导致进入土壤的有机物质含量多于从土壤中损失的量,土壤有机质含量不断积累。上升到2715m(树线附近),有机质含量与郁闭林(海拔2000~2500m)内相比迅速下降,这主要是由于在郁闭林内高大的乔木阻挡了阳光照射到地表,使得林下土壤温度较低,而在树线附近则以低矮的草本植物为主,光照条件较好,土壤温度要高于林下土壤温度,土壤微生物的活性增强,有机质分解速度增加。而森林下限有机质与全氮含量较低,原因为下限降水稀少,植被发育受到限制,另一方面年均温较高,微生物活动强烈,枯枝落叶分解速度快,不利于其积累。

全磷含量除树线较低外,其余位置则随海拔增加呈缓慢增加趋势,且在高山林线区域内海拔2700m左右达到极大值。由于采样点选择不当,造成CaCO<sub>3</sub>含量在海拔2301m出现异常值,但整体仍呈下降趋势。高山林线区域CaCO<sub>3</sub>含量约为0.25%,在海拔2000m左右含量达到最低,该海拔基本与三工河流域年最大降水带恰好重合,故而在阴暗潮湿的针叶林下,森林凋落物形成粗腐殖质,发生酸性下渗水流,导致土壤矿物的分解及盐基Ca<sup>2+</sup>的向深层淋溶和淀积<sup>[40]</sup>。pH值则为森林带上下限的碱性强于森林带内部。森林下限附近pH值达到

表2 三工河流域不同海拔森林土壤属性  
Table 2 The forest soil characteristics at different altitudes

海拔 /m	有机质 /%	全氮 /%	全磷 /%	CaCO <sub>3</sub> /%	pH (1:5)	电导率 /ms·cm <sup>-1</sup>
1527	4.504	0.129	0.065	7.212	8.043	0.155
2000	13.537	0.445	0.068	0.068	6.832	0.146
2301	10.493	0.365	0.065	3.415	7.364	0.216
2508	15.444	0.640	0.073	0.130	7.067	0.292
2701	17.966	0.612	0.077	0.135	7.325	0.314
2715	6.855	0.302	0.048	0.364	7.565	0.224
均值	11.466	0.415	0.066	1.887	7.366	0.225
标准方差	5.158	0.193	0.010	2.915	0.418	0.069

8.043,为森林带碱性最强的区域。高山林线内 pH 值约为 7.445,稍低于下限,呈弱碱性,且稍弱于森林带的酸碱性( $\text{pH}=7.366$ )。除在海拔 2 000 m 左右为弱酸性( $\text{pH}=6.832$ )外,其余位置均呈现弱碱性,原因是该高度降水丰富,土壤及其母质的淋溶作用强烈,金属离子向下运移,土壤吸收性复合体上的  $\text{H}^+$  增加,使得土壤盐基饱和度下降,氢饱和度增加,酸性增加<sup>[31]</sup>。电导率在高山林线以下呈增加趋势。高山林线内海拔 2 700 m 左右达到最高,且在海拔 2 000 m 为最低值,这可能与盐基含量较低有关。

森林下限附近有机质、全氮与全磷含量较低,而高山林线内海拔 2 700 m 左右有机质、全氮与全磷含量高于森林下限。高山林线内土壤呈弱碱性,碱性稍强于森林带下限;电导率在森林下限显著低于高山林线区域,而  $\text{CaCO}_3$  含量、pH 值与电导率最低值均位于最大降水带(海拔 2 000 m 左右)。此外,有机质与  $\text{CaCO}_3$  的标准方差较大,说明其有机质的空间变异性较大,而全磷、全氮、pH 值及电导率的空间变异性不明显。

森林内土壤属性在不同深度也存在较大差异,对三工河流域不同海拔不同深度的土壤属性进行了对比分析(图 4)。森林土壤 A 层(0~10 cm)的有机质与全氮含量随着海拔的递增均呈“增加-稳定-减小”的变化趋势,且高山林线内约海拔 2 600~2 700 m 位置的含量较高,此海拔至树线位置有机质含量下降较快;森林下限附近有机质含量与树线附近相当,但全氮含量要低于高山林线区域。全磷含量在海拔 2 000 m 达到最大值,此高度以上呈下降趋势,且在高山林线内全磷含量下降较平缓,树线附近的全氮含量与森林下限(约 1 530 m)含量相当。高山林线内土壤 A 层  $\text{CaCO}_3$  含量与森林下限附近差异较大,而与其他高度无显著区别。森林带土壤 A 层 pH 值均大于 7,呈弱碱性,随海拔增加呈“先减小再增加”趋势,海拔 2 500 m 至树线附近酸性变化微弱,在森林下限附近碱性较强。

森林土壤 B 层(10~30 cm)有机质与全氮含量随高度变化趋势基本与 A 层类似,亦呈现“增加-稳定-减小”的趋势,但两层含量均值在 0.05 信度水平上差异显著(表 3)。海拔 2 500~2 700 m 土壤 B 层全磷含量较高,树线与森林下限附近达到最低,且与 A 层含量存在显著差异。森林带土壤 B 层的  $\text{CaCO}_3$  含量与 A 层变化趋势基本一致,无显著差异。高山林线及森林下限附近 pH 值呈弱碱性,其他位

置则呈弱酸性。森林带土壤 B 层电导率与 A 层无显著差异。

土壤 C 层有机质、全氮及全磷含量在高山林线区域高于其他其位置,在树线附近含量明显降低。森林带内土壤三项指标随海拔增加变化较为平缓,且与 B 层均无显著性差异,而与土壤 A 层在 0.05 显著性水平上存在显著差异。土壤 C 层  $\text{CaCO}_3$  含量在海拔 2 301 m 处出现异常,这与采样点选择有关,其他位置含量与 A、B 两层无显著差异。土壤 C 层酸碱性与 A 层比较相近,呈弱碱性,而电导率与 A、B 层间存在显著差异,但三者之间差异并不显著。

中山森林土壤 A 层土壤有机质、全氮、全磷含量较高,且空间变异性较大;随着土壤深度增加(B 层)其含量降低较为明显,至 C 层变化较微弱,表现出了较强的“表聚现象”,即林木土壤表层累积有机质和矿质养料的规律。这是由于乔木、灌丛以及草本植物以枯枝落叶的形式归还土壤表层,在表层形成较厚的枯枝落叶层,经分解转换在 A 层富集有机质、全氮等营养元素; $\text{CaCO}_3$  含量除在海拔 2 301 m 土壤 C 层异常外,森林下限含量要显著高于其他海拔位置,而海拔 2 000 m 以上各层含量均较低,主要是由于在此高度之上降水较为丰富, $\text{Ca}^{2+}$  有向下层土壤强烈淋失的倾向<sup>[40]</sup>。高山林线下限向树线过渡中,其 C 层  $\text{CaCO}_3$  含量有稍微增加趋势,主要是一方面受降水量限制淋溶强度减缓,另一方面由于高山林线内以灌丛和草本主导,根系固定矿质元素等能力低于森林,造成溶解出来的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等随雨水流失<sup>[31]</sup>。

### 3.3 生态因子对云杉发育的影响

胸径、树高、年龄、胸高断面以及郁闭度等指标为衡量森林发育状况的常用指标,而林木的胸径分布状况是反应林分是否合理以及研究群落是否遭受干扰破坏的重要指标<sup>[32]</sup>,且由于其简单易测,在林业调查中常被作为重要参数。故而,种群的林木胸径分布状况可以看作自然环境因子对雪岭云杉林木影响的综合表现。本研究通过对胸径与生态因子进行方差分析结果如表 4 所示。

土壤理化性质的变化对中山森林带雪岭云杉胸高直径的影响存在显著差异,其次为降水与海拔梯度,而年均温对其影响则不显著。土壤属性中除全氮及  $\text{CaCO}_3$  含量变化对胸径影响不显著外,其余指标均对其影响显著( $p<0.05$ ),有机质、pH 及全磷

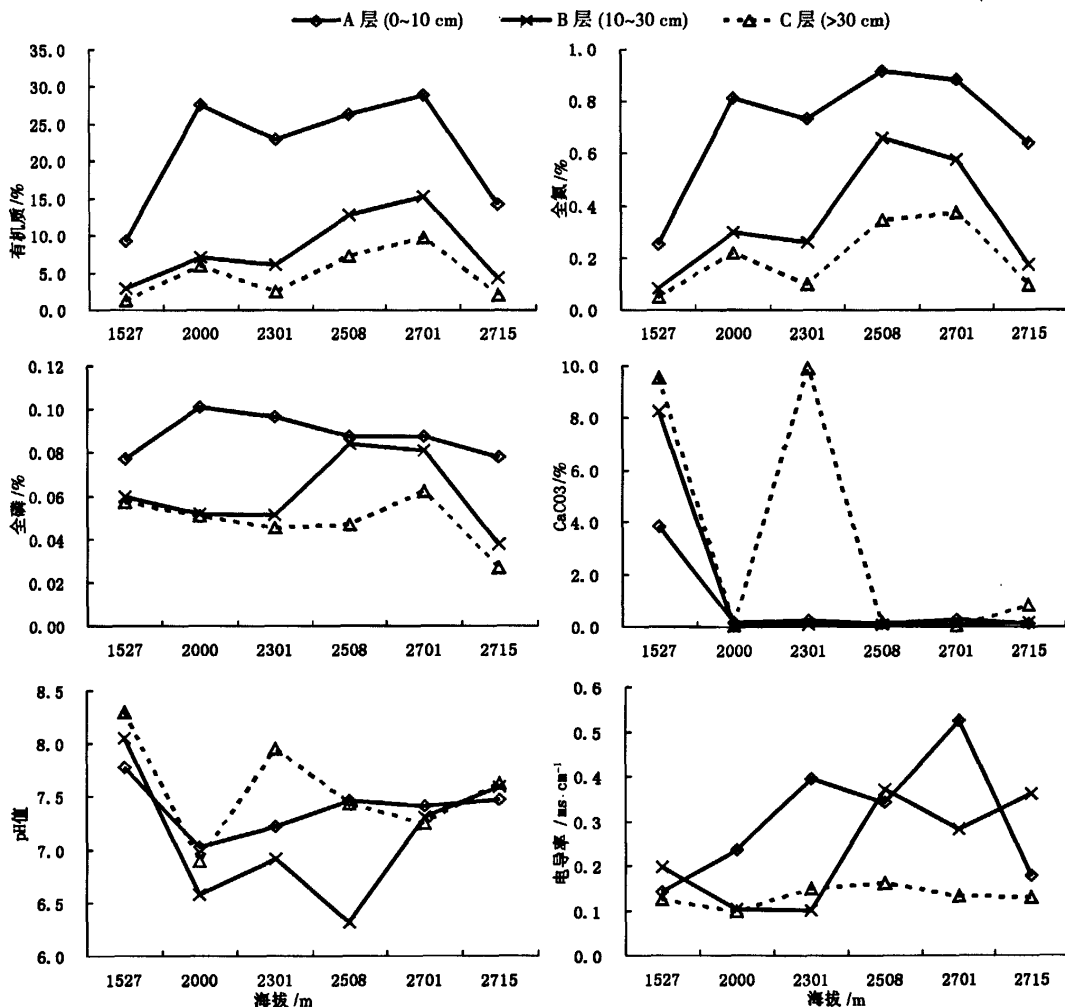


图 4 三工河流域不同海拔高度不同深度土壤属性

Fig. 4 The soil characteristics at different depths and altitudes

表 3 三工河流域森林土壤不同深度间的差异性水平

Table 3 The difference level between each two layers in Sangong River watershed

	有机质	全氮	全磷	CaCO <sub>3</sub>	pH	电导率
A 层	21.539a	0.7065a	0.0882a	0.7945a	7.3967a	0.3038a
B 层	8.079b	0.3422b	0.0610b	1.4495a	7.1279a	0.2364a
C 层	4.781b	0.1977b	0.0485b	3.4182a	7.5758a	0.1332b
平均值	11.466	0.415 5	0.065 9	1.887 4	7.366 8	0.224 5
标准差	9.207	0.294 7	0.021 4	3.510 3	0.504 2	0.126 1
F 值	14.317	9.496	12.957	0.897	1.233	3.663
P	0.000	0.002	0.001	0.429	0.319	0.051

F 值与 P 值表示三层之间差异显著性水平;同一列中,不同字母表示同一种土壤属性不同深度之间差异显著(P<0.05)。



表 4 生态因子对胸径影响显著性分析  
Table 4 The significance analysis of ecology factor to DBH

变异来源	海拔 /m	年均温 /℃	降水量 /mm	有机质 /%	全氮 /%	全磷 /%	CaCO <sub>3</sub> /%	pH	电导率 /ms·cm <sup>-1</sup>
F 值	4.799	1.900	5.633	6.115	2.127	11.318	3.557	11.658	4.874
P 值	0.006	0.184	0.003	0.009	0.150	0.001	0.073	0.003	0.019

含量对其影响达到极显著水平( $P < 0.01$ )。把方差分析中  $F$  值作为影响中山森林发育大小指标,则  $R$  (土壤理化性质) =  $1/6(6.115 + 2.127 + 11.318 + 3.557 + 11.658 + 4.874) = 6.608$  表示土壤理化性质对其影响,那么可对影响中山森林带树木生长发育的生态因子进行排序为:土壤营养 > 降水 > 海拔 > 温度,可见土壤营养物质变化为限制三工河流域中山森林带发育的关键环境因子。

4 结论与展望

本文通过遥感影像解译与实地调查、采样结合,对三工河流域森林带内树木发育状况及其与气候土壤因素的关系进行了探讨,结果表明:森林分布于海拔 1 510 ~ 2 720 m,胸径与树高随海拔变化呈双峰曲线;其中胸径两个峰值分别位于海拔 2 000 m 附近与海拔 2 550 m 左右,而树高的峰值分别为 2 100 m 与 2 600 m,均稍高于胸径的峰值海拔高度;森林下限位于海拔约 1 510 ~ 1 620 m,高山林线范围约为海拔 2 616 ~ 2 727 m。随海拔梯度增加,森林土壤属性呈规律性的变化,海拔 2 000 ~ 2 700 m 有机质、全磷及全氮含量较高,而森林下限以及树线附近减低。CaCO<sub>3</sub>, pH 值及电导率最小值与海拔 2 000 m 的最大降水带恰好吻合。土壤 A 层(0 ~ 10 cm)有机质、全磷及全氮含量与 B(10 ~ 30 cm)、C(> 30 cm)层差异显著,营养物质“表聚现象”明显,而 CaCO<sub>3</sub>, pH 值与电导率各层间差异不显著。土壤营养物质含量为该流域森林带内部植被发育的关键环境因子,各生态因子地位级进行排序为:土壤营养 > 降水 > 海拔 > 温度。森林带的上限与下限受环境胁迫明显,其中下限受水分胁迫较大,而上限受温度影响较大,对其定量研究有待进一步深入。

森林的上限与下限对气候变化表现敏感,也是研究森林植被发育对气候响应的首选区域。故而,要进一步揭示森林发育与环境因子的定量关系,需要加强森林带上限的定点定位观测。此外,由于

过去高山地区气象观测数据较少,给研究工作带来了不便,故而可以考虑利用遥感反演技术进行提取地表参数,并借助地面数据同化技术将观测值和反演值转化为具有时空一致性的数据<sup>[33-34]</sup>,提高了森林环境因子的预测精度,为山地森林植被历史气候数据获取提供一条新思路。

参考文献 (References)

[1] Zhang Wan Ru. China forest soil. Beijing [M]: Science Press, 1986 [张万儒. 中国森林土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1986]

[2] Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Liu Yong. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 157 - 161 [赵传燕, 冯兆东, 刘勇. 干旱区森林水资源涵养生态服务功能研究进展[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 157 - 161]

[3] Louis A. Scuderi. Late - Holocene upper timberline variation in the southern Sierra Nevada[J]. Nature, 1987, 15(325): 242 - 244

[4] Hoch G, Popp M, Körner C H. Altitudinal increase of mobile carbon pools in Pinus cembra suggest sink limitation of growth at the Swiss treeline[J]. Oikos, 2002, 98(2): 361 - 374

[5] Germino M J, Smith W K, Resor A C. Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone[J]. Plant Ecology, 2002, 162: 157 - 168

[6] Körner C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures[J]. Journal of Biogeography, 2004, 31: 713 - 732

[7] Shi P, Körner C H, Hoch G. A test of the growth-limitation theory for alpine tree line formation in evergreen and deciduous taxa of the eastern Himalayas[J]. Functional Ecology, 2008, 22: 213 - 220

[8] Shi Peili, Li Wenhua, Wang Jinxi, et al. Species-abundance relation of herb communities in subalpine timberline ecotone of Wolong Natural Reserve, Sichuan Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 384 - 389 [石培礼, 王金锡. 四川卧龙亚高山林线生态交错带群落的种—多度关系[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 384 - 389]

[9] Wang Xiangping, Zhang Ling, Fang Jingyun. Geographical Differences in Alpine Timberline and Its Climatic Interpretation in China [J]. Acta Geographica Sinica. 2004, 59(6): 71 - 879 [王襄平, 张玲, 方精云. 中国高山林线的分布高度与气候的关系[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 71 - 879]

[10] He Jicheng, Luo Tianxiang, Xu Yuqing. Characteristics of eco-climate at smith fir timberline in the Sergiyemla Mountains, southeast Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 37 - 46



- [何吉成,罗天祥,徐雨晴. 藏东南色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林线的生态气候特征[J]. 生态学报. 2009, 29(1):37-46]
- [11] Luo Ceping, Xu Wenqiang, Chen Xi. Effect of different land-use systems on soil properties in the Alluvial Plain-oasis in the Arid Land [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5):779-790 [罗格平, 许文强, 陈曦. 天山北坡绿洲不同土地利用对土壤特性的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(5):779-790]
- [12] Tranquillini W. *Physiological Ecology of Alpine Timberline* [M]. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1979:118-149
- [13] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3):219-226 [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3):219-226]
- [14] Chen Shaoyong, Guo Jiangyong, Han Tong, et al. Climate warming of autumn air temperature in arid and semiarid region in Northwest China over the recent 46 years [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(3):544-550 [陈少勇, 郭江勇, 韩通, 等. 中国西北干旱区半干旱区近 46a 秋季气候变暖分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3):544-550]
- [15] Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Assessment of climate and environment changes in China (I): Climate and environment changes in China and their projection [J]. *Advances in Climate Change Research*. 2005, 1(1):4-9 [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估(I): 中国气候与环境变化未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1):4-9]
- [16] Nicholson, S. E.. Application of remote sensing to climatic and environmental studies in arid and semi-arid lands, *Geoscience and Remote Sensing Symposium* [J]. *IGARSS 01. IEEE 2001 International*, 2001, 3(3):985-987
- [17] Zhang Yun, Kong Zhaochen, Yan Shun, et al. Fluctuation of *Picea* timberline and paleo-environment on the northern slope of Tianshan Mountains during the late Holocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(14):1747-1756
- [18] Zhang Baiping, Zhou Chenghu, Chen Xupeng. The Geo-info-spectrum of Montane Altitudinal Belts in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2):163-171 [张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨[J]. 地理学报, 2003, 58(2):163-171]
- [19] Fall, P. Timber fluctuation and late Quaternary paleoclimates in the Southern Rocky Mountains, Colorado [J]. *Geol Sci Am Bull*, 1997, 109(10):1306-1320
- [20] Zhu Haifeng, Wang Lili, Shao Xuemei, et al. The Ring-width Response of *Picea schrenkiana* to Climate Change [J]. *Acta Geographica Sinica*. 2004, 59(6):863-870 [朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2004, 59(6):863-870]
- [21] Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. The responses of growth ring variations of *Larix sibirica* Ledeb. to climatic change in eastern Tianshan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(8):2723-2731 [彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析[J]. 生态学报, 26(8):2723-2731]
- [22] Sang Weiguo, Wang Yunxia, Su Hongxin, et al. Response of tree-ring width to rainfall gradient along the Tianshan Mountains of northwestern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(21):2954-2962
- [23] Chen Xi, Xu Wenqiang, Luo Ceping et al. Soil properties at the tree limits of *Picea schrenkiana* forest in response to varying environmental conditions on the northern slope of Tianshan mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2008, 28(1):53-61 [陈曦, 许文强, 罗格平, 等. 天山北坡不同环境条件下雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林限土壤属性[J]. 生态学报. 2008, 28(1):53-61]
- [24] Chang Zhihai, Sun Jikun. Forest soil of xinjiang mountain region [M]. Urumqi: Xinjiang Science Technology and Hygiene Press, 1995:152-198 [常宜海, 孙继坤. 新疆山地森林土壤[M]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社, 1995:152-198]
- [25] Hu Ruji. The physical geography of Tianshan Mountains in China [M]. Beijing: China Environment Science Publishing House. 2004:122-163 [胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2004:122-163]
- [28] Yu Pengtao, Liu Hongyan, Cui Haiting. Vegetation and its relation with climate conditions near the timberline of Beitail, the Xiaowutai Mts., Northern China [J]. *Chinese Journal Of Applied Ecology*, 2002, 13(5):523-528 [于澎涛, 刘鸿雁, 崔海亭. 小五台台北台林线附近的植被及其与气候条件的关系分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5):523-528]
- [29] Grace J. Climatic tolerance and the distribution of plants [J]. *The New Phytologist*, 1987, 106(suppl.):113-130
- [30] Luo Ruying. *Forest soil science (problems and methods)* [M]. Beijing: Science Press, 1983 [罗汝英. 森林土壤学(问题和方法)[M]. 北京:科学出版社, 1983]
- [31] Huang Changyong. *Pedology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008:32-49 [黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2008:32-49]
- [32] Li Yide. Community characteristics of tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1997, 5(1):18-26
- [33] Li Xin, Huang Chunlin, Che Tao, et al. Progress and prospects of land data assimilation system in china [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2):163-173 [李新, 黄春林, 车涛, 等. 中国陆地数据同化系统研究的进展与前瞻[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2):163-173]
- [34] Njoku E. G., Chan T. K., Nghiem S. V. Soil moisture retrieval from AMSR-E [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2):215-329

## Forest Development and Their Relationships with Climatic and Soil in the Mid-mountain Area of Sangong River Watershed, Northern Slope of Tianshan Mountains

LI Yanzhong<sup>1,2</sup>, LUO Geping<sup>1</sup>, XU Wenqiang<sup>1</sup>, YIN Changying<sup>1,2</sup>, HAN Qifei<sup>1,2</sup>, FENG Yixing<sup>1,2</sup>

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** It has important theoretical significance to the cause of arid region even the world forest belt to carry out the forest development characteristic and their relationship with climatic and soil factors in arid area. The forest distribution patterns development characteristic were confirmed by field survey and Remote Sense in Sangong River watershed, and the analysis of climate and soil factors on the forest development was carried out combining meteorological and soil data. The result shows that: (1) The forest belt was 1 510 m to 2 720 m, both the DBH and tree height showed a bimodal pattern along altitude. The two peaks of DBH were located at about 2 000 m and 2 550 m respectively, while the peaks of tree height at 2 100 m and 2 600 m, little higher than the DBH (diameter at breast height). (2) the annual temperature in the forest belt showed linearity decline along the altitude increased, while the annual precipitation showed increase first then decline, and came to the climax at 2 150 m. Compared to other forest area, the alpine timberline in Sangong river watershed was higher, little difference in mean temperature for the warmest month. The soil characteristic took on regular change along the altitude increase. The forest developed better between 2 000 to 2 700 m, which organic matter, total phosphorus and total nitrogen than other altitudes. The minimum of  $\text{CaCO}_3$ , pH value and the electrical conductivity just located at the the maximum precipitation belt. The content of soil organic matter, total phosphorus and total nitrogen at layer A (0 – 10 cm) were significant differences of layer B (10 – 30 cm) and layer C (> 30 cm), which revealed that the soil nutrients have significant surface convergence phenomenon and the soil-forming conditions act on the shallow layer. The  $\text{CaCO}_3$ , pH value and the electrical conductivity took no significant differences between each layer. (3) The environmental factors controlling the forest distribution pattern and its pattern were the combined effects of altitude, precipitation, temperature and soil nutrition. Comparing the change of DBH to environmental factors along altitude and correlating them by variance analysis revealed that soil nutrition was the key factor of controlling growth and development of *Picea schrenkiana*, and the ecology factor status were soil nutrition > precipitation > altitude > temperature.

**Key words:** north slope of Tian Mountain; Sangong River watershed; climate condition; soil properties; alpine timberline

作者: 李艳忠, 罗格平, 许文强, 尹昌应, 韩其飞, 冯异星, LI Yanzhong, LUO Geping, XU Wenqiang, YIN Changying, HAN Qifei, FENG Yixing  
作者单位: 李艳忠, 尹昌应, 韩其飞, 冯异星, LI Yanzhong, YIN Changying, HAN Qifei, FENG Yixing(中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐830011; 中国科学院研究生院, 北京100039), 罗格平, 许文强, LUO Geping, XU Wenqiang(中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐, 830011)  
刊名: 山地学报 ISTIC PKU  
英文刊名: JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE  
年, 卷(期): 2011, 29(1)

## 参考文献(32条)

1. 张万儒 中国森林土壤 1986
2. 赵传燕;冯兆东;刘勇 干旱区森林水资源涵养生态服务功能研究进展[期刊论文]-山地学报 2003(02)
3. Louis A;Scuderi Late-Holocene upper timberline variation in the southern Sierra Nevada 1987(325)
4. Hoch G;Popp M;K(o) mer C H Altitudinal increase of mobile carbon pools in Pinus cembra suggest sink limitation of growth at the Swiss treeline 2002(02)
5. Germino M J;Smith W K;Resor A C Conifer seeding distribution and survival in an alpine-treeline ecotone[外文期刊] 2002(2)
6. KB mer C;Paulsen J A world-wide study of high altitude treeline temperatures 2004
7. Shi P;KB mer C H;Hoch G A test of the growth-limitation theory for alpine tree line formation in evergreen and deciduous taxa of the eastern Himalayas[外文期刊] 2008
8. 石培礼;王金锡 四川卧龙亚高山林线生态交错带群落的种-多度关系[期刊论文]-生态学报 2000(03)
9. 王襄平;张玲;方精云 中国高山林线的分布高度与气候的关系[期刊论文]-地理学报 2004(06)
10. 何吉成;罗天祥;徐雨晴 藏东南色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*) 林线的生态气候特征[期刊论文]-生态学报 2009(01)
11. 罗格平;许文强;陈曦 天山北坡绿洲不同土地利用对土壤特性的影响[期刊论文]-地理学报 2005(05)
12. Tranquillini W Physiological Ecology of Alpine Timberline 1979
13. 施雅风;沈永平;胡汝骥 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[期刊论文]-冰川冻土 2002(03)
14. 陈少勇;郭江勇;韩通 中国西北干旱区半干旱区近46a秋季气候变暖分析[期刊论文]-中国沙漠 2009(03)
15. 秦大河;丁一汇;苏纪兰 中国气候与环境演变评估(1):中国气候与环境变化未来趋势[期刊论文]-气候变化研究进展 2005(01)
16. Nicholson, S.E Application of remote sensing to climatic and environmental studies in arid and semi-arid lands, Geoscience and Remote Sensing Symposium 2001
17. Zhang Yun;Kong Zhaochen;Yan Shun Fluctuation of Picea timberline and paleo-environment on the norhem slope of Tianshan Mountains during the late Holocene[期刊论文]-Chinese Science Bulletin 2006(14)
18. 张百平;周成虎;陈述彭 中国山地垂直带信息图谱的探讨[期刊论文]-地理学报 2003(02)
19. Fall P Timber fluctuation and late Quaternary paleoclimates in the Southern Rocky Mountains, Colorado[外文期刊] 1997(10)

20. [朱海峰;王丽丽;邵雪梅](#) [雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 2004(06)
21. [彭剑峰;勾晓华;陈发虎](#) [天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析](#)[期刊论文]-[生态学报](#) 2006(08)
22. [Sang Weiguo;Wang Yunxia;Su Hongxin](#) [Response of tree-ring width to rainfall gradient along the Tianshan Mountains of northwestern China](#)[期刊论文]-[Chinese Science Bulletin](#) 2007(21)
23. [陈曦;许文强;罗格平](#) [天山北坡不同环境条件下雪岭云杉\(Picea sehrenkiaria\)林限土壤属性](#)[期刊论文]-[生态学报](#) 2008(01)
24. [常直海;孙继坤](#) [新疆山地森林土壤](#) 1995
25. [胡汝骥](#) [中国天山自然地理](#) 2004
26. [于澎涛;刘鸿雁;崔海亭](#) [小五台山北台林线附近的植被及其与气候条件的关系分析](#)[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2002(05)
27. [Grace J](#) [Climatic tolerance and the distribution of plants](#) 1987(suppl)
28. [罗汝英](#) [森林土壤学\(问题和方法\)](#) 1983
29. [黄昌勇](#) [土壤学](#) 2008
30. [Li Yide](#) [Community characteristics of tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island](#) [期刊论文]-[Journal of Tropical and Subtropical Botany](#) 1997(01)
31. [李新;黄春林;车涛](#) [中国陆地数据同化系统研究的进展与前瞻](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2007(02)
32. [Njoku E.G;Chan T.K;Nghiem S.V](#) [Soil moisture retrieval from AMSR-E](#)[外文期刊] 2003(02)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201101006.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101006.aspx)