

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

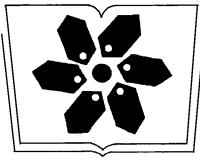
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期
Vol.30 No.21
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第30卷第21期 2010年11月 (半月刊)

目次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应.....	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势.....	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性.....	曾军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康.....	裴雪姣,牛翠娟,高欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系.....	张慧文,马剑英,孙伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果.....	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子.....	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应.....	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局.....	卢训令,胡楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响.....	陈宗瑜,钟楚,王毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化.....	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系.....	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征.....	柏方敏,田大伦,方晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响.....	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征.....	刘克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较.....	朱光玉,吕勇,林辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局.....	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例.....	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析.....	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价.....	高杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较.....	张小飞,王如松,李锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估.....	王萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响.....	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响.....	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较.....	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响.....	李影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化.....	安宗胜,詹婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响.....	韩永强,刘川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响.....	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
专论与综述	
河流水质的景观组分阈值研究进展.....	刘珍环,李猷,彭建 (5983)
研究简报	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响.....	杨兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响.....	曾杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

不同海拔天山云杉叶功能性状 及其与土壤因子的关系

张慧文¹, 马剑英^{2,3,*}, 孙伟⁴, 陈发虎¹

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究所, 兰州 730000; 3. 华盛顿州立大学生物科学学院, 普曼 99163 美国; 4. 怀俄明大学可再生资源系, 怀俄明 82071 美国)

摘要:植物功能性状反映了植物对生长环境的响应和适应,将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能联系在一起。为阐明天山北坡 1420—2300m 天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)的叶片功能性状对环境的适应性变化,研究了天山云杉 10 种叶片功能性状的变化规律以及与土壤因子的关系。结果表明叶长宽比(LL/LW)、叶面积(LA)、气孔密度(SD)、单位干重的叶磷(LPC)和叶钾(LKC)含量沿海拔梯度呈上升趋势。单位干重的叶氮(LNC)含量、叶绿素含量(Chla + b)、叶片饱和含水量(LWC)、叶片干物质含量(LDMC)和比叶重(LMA)随海拔的升高呈现非线性变化,前 3 项在海拔约 2100m 处达到最大值,分别为(15.42 ± 0.38)mg/g、(2.44 ± 0.37)mg/g 和(55.01 ± 0.48)%,后两项在海拔约 2100m 处达到最小值,分别为(451.80 ± 6.28)mg/g、(252.33 ± 3.60)g/m²。逐步回归分析结果显示,海拔梯度上影响 LPC 的主要土壤因子是土壤 pH 值和 SWC,影响 LNC、LKC、Chla + b、LDMC、LMA 和 LWC 的主要土壤因子是 TN,影响 LA、SD 和 LL/LW 的主要土壤因子是 SWC,可见 SWC 和 TN 是天山云杉叶片功能特征沿海拔梯度变化的主要驱动因子。在优越的环境中植物叶片虽然具有较高的光合能力和较高的相对生长速率,但是对资源的利用能力往往较低,在 2100m 附近 LNC、Chla + b、LA 最大,LMA、LDMC 最小,因此判断此海拔附近为天山云杉最适宜的生长范围。

关键词:天山云杉;叶功能性状;海拔;生态适应;土壤因子

Altitudinal variation in functional traits of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* and their relationship to soil factors in Tianshan Mountains, Northwest China

ZHANG Huiwen¹, MA Jianying^{2,3,*}, SUN Wei⁴, CHEN Fahu¹

1 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 School of Biological Sciences, Washington State University, Pullman 99163, USA

4 Department of Renewable Resources, University of Wyoming, Wyoming 82071, USA

Abstract: Plant functional traits, defined as morpho-physio-phenological traits which impact fitness indirectly via their effects on growth, reproduction and survival, the three components of individual performance, link environmental factors, individual plants and ecosystem structures, processes and functions. Variation in leaf functional traits is one of the important strategies that plants used to respond and adapt to changes in environmental conditions. The continuous distribution of *P. schrenkiana* var. *tianschanica*, one of the major tree species in northwestern Chinese alpine and sub-alpine forest, across a range of altitude may have resulted from the combined effects of water-heat conditions and pedological factors. We investigated changes in ratio of leaf length and width (LL/LW), leaf area (LA), stomatal density (SD), leaf nitrogen concentration per unit mass (LNC), leaf phosphorus concentration per unit mass (LPC), leaf potassium

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB421306);中国科学院西部之光人才培养计划一般项目(2009);国家自然科学基金资助项目(40671195,40721061,40971056)

收稿日期:2009-10-12; 修订日期:2010-02-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:jyma@lzb.ac.cn

concentration per unit mass (LKC), pigment contents (Chla + b), leaf dry matter content (LDMC), leaf mass per unit area (LMA) and leaf saturated water content (LWC) in *P. schrenkiana* var. *tianschanica* along an altitudinal gradient (1420, 1505, 1622, 1757, 1850, 1962, 2045, 2110, 2240, 2300 m) on the northern slopes of the Tianshan Mountains in northwest China. The objectives were to understand adaptation of leaf functional traits to varying abiotic factors associated with changes in altitude and to identify the main soil factors driving variation in leaf functional traits along the altitudinal gradient. We used regression analysis to evaluate the relationships between elevation and leaf functional traits and stepwise regression analyses to determine the main soil factors that control variation in leaf functional traits. We observed that all the leaf functional traits differed significantly among different positions along the altitudinal gradient ($P < 0.001$). We also found that LL/LW, LA, SD, LPC, LKC increased linearly with increasing elevation, whereas LNC, Chla + b, LDMC, LMA and LWC varied non-linearly with changes in altitude. Below 2100 m, LNC, Chla + b and LWC increased, while LDMC and LMA decreased, significantly with increasing altitude. The maximum values of LNC (15.42 ± 0.38) mg/g, Chla + b (2.44 ± 0.37) mg/g and LWC (55.01 ± 0.48) % and the minimum values of LDMC (451.80 ± 6.28) mg/g, and LMA (252.33 ± 3.60) g/m² were obtained at an altitude of about 2100 m. Moreover, stepwise regression analysis between leaf functional traits and soil factors suggested that LPC was influenced primarily by pH and soil water content (SWC). LNC, LKC, Chla + b, LDMC, LMA and LWC were mainly influenced by soil total nitrogen (TN). LA, SD and LL/LW were influenced by SWC. TN and SWC were the main drivers of variation in the leaf functional traits in *P. schrenkiana* var. *tianschanica* along the altitudinal gradient. In their superior environment, plants have a relatively high photosynthetic rate and growth rate associated with greater LNC and chlorophyll contents and LA, respectively. However, high photosynthetic and relative growth rates are achieved under lower utilization of resources, which are indicated by low-LDMC and low-LMA. Based on the observed maximum values in LNC, Chla + b and LA and the minimum values in LMA and LDMC at the elevation of 2100 m, we concluded that the best growing elevation for *P. schrenkiana* var. *tianschanica* in the Tianshan Mountains was approximately 2100 m.

Key Words: *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*; leaf functional traits; altitude; ecological adaptation; soil factors

植物特性是植物个体水平,即从细胞到整个有机体水平可测量的物种的形态、生理或物候属性,而植物功能特性则是任何可以通过影响植物个体的生长、繁殖和存活而间接影响到植物个体适合度的植物形态、生理或物候特征^[1]。植物功能性状反映了植物对生长环境的响应和适应^[2],将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能紧密联系起来^[3]。叶片是与环境接触面积最大、对环境变化最为敏感的植物器官,在众多的植物性状中,叶功能性状与植物碳的同化及对资源的利用能力联系紧密,能够反映植物适应环境变化所形成的生存对策,因此,对植物叶功能性状的研究越来越受到研究者的重视^[4-19]。

研究者们主要通过对叶面积、叶长宽比、气孔密度、叶绿素含量、叶片的光合能力、叶片光合氮的利用效率、叶片养分含量、饱和含水量、比叶质量、比叶面积(SLA,为LMA的倒数)、干物质含量、叶厚度、叶片的组织密度、叶寿命等叶性状的研究,探讨植物对环境的响应与适应。研究表明,常绿植物的LMA随着年平均气温和年降水量的增加而降低^[4]。养分贫瘠的环境中,植物叶片较厚,LMA小(SLA大)的植物能很好的适应资源丰富,而LMA大(SLA小)的植物在贫瘠的环境中适应性更强,且往往具有更长的叶寿命^[5-6]。植物叶片中的氮、磷含量极易受环境条件(如土壤的养分含量,生长季的温度及年降水量)的影响,全球452个样点的1280种植物叶片LNC和LPC都随着纬度升高和温度降低而增加,N/P则降低^[7],而且干旱地区植物会有较高的氮、磷含量^[8]。LDMC可以更好地指示某一资源的获取、利用及有效性,而LMA(SLA)则代表了资源综合利用情况^[9-10]。常绿植物有相对长的光合生长期,但光合速率较低,故降低了它对土壤氮素的要求;相反,落叶植物有较高的光合速率,但叶寿命较短,遇到季节性干旱时,它会降低整体蒸腾与呼吸来维持生命^[11-12]。常绿树种的叶片渗透水含量、叶绿素含量均会随着干季到湿季的变化而降低,而LMA、叶片密度会随之增大,

水分还影响着植物光合速率^[13],另外水分条件还是影响中国东北样带羊草(*Leymus chinensis*)SD变化的主要因子^[14]。水热综合因子的增大造成太白红杉(*Larix chinensis*)叶长宽比增加、叶表皮角质膜厚度逐渐变薄,而年降水量增加则使叶厚度、维管束厚度、内皮层厚度、转输组织等变薄^[15]。叶功能性状是理解植物生态功能的关键,综合反映在环境影响下叶表型差异与生理生态功能之间的相互变化关系,以及这种变化对植物生长和生产力的影响,有助于揭示出物种适应生境条件所拥有的本质特征。

海拔差异通常导致温度、降水、光照和土壤等环境因子发生相应的变化,造成热量和水分重新分配,使植物生长的环境条件更为复杂,也使植物叶功能性状对环境产生复杂的适应性变化。研究表明,新西兰南岛118种植物随着海拔升高,叶和根的氮含量降低、厚度增加^[16]。德国黑森州北部4个树种随海拔升高其高度增量减小、LA降低、SD增加^[17]。高山常绿针叶树种的研究较为广泛,高海拔低温、短生长季和低的土壤养分供给使欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)和挪威云杉(*Picea abies* L.)叶寿命随着纬度和海拔的增加呈增加趋势^[18]。对于波兰的挪威云杉来说,由于高海拔低温的影响,造成叶氮含量、叶绿素含量、胡萝卜素含量、净光合效率、暗呼吸,根部干物质分配都增加,而芽的生长减缓^[19]。天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)在生境最为适宜的西部伊犁地区,针叶的长度最大,宽度最小,其性状的变异是对生境适应的结果^[20]。单种植物分布的海拔范围内有其相对适宜的生长环境,LA、SD、LDMC、LMA、LWC、LNC等叶功能特性在此范围内表现出显著的变化,如急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)^[21]、青海云杉(*Picea crassifolia*)^[22-23]、粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)^[24]等。

天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)是亚洲中部山地的特有种,在我国仅见于新疆,并且是新疆山地森林中分布最广、蓄积量最大的树种^[25]。在天山北坡东西长约1000km的中山带仅发育以云杉为建群种的针叶林,针叶林分布的连续性没有被天山北坡东部、中部及西部的不同气候、地形影响下的水热组合条件所打破,这说明除水、热等环境条件外,土壤因素对天山云杉的连续分布起到了关键的控制作用^[26],这必然也引起天山云杉对海拔变化引起的环境条件变异形成叶功能特性的适应性变化,目前关于影响天山云杉叶功能特性变化的土壤环境因子的研究很少有报道,因此本文选取天山云杉的10个有代表性的叶片功能特性指标,研究目的是:(1)叶功能性状在1420—2300m的海拔梯度上所呈现的环境适应性的变化规律;(2)探讨影响不同叶功能性状的主要土壤环境因子;(3)判断天山云杉最适宜生长的海拔范围。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于天山北坡海拔1420—2300m的云杉典型分布区,针叶林分布区多年平均气温范围-2.8—2.5℃,年平均降水量范围400—600mm^[26]。由于天山北坡受中纬度西风带的控制,来自大西洋和北冰洋的湿润气流从西方或者西北方向吹入,受天山阻挡,随海拔升高,气温下降,在中山带出现最大降雨量,这是天山北坡山地针叶林发育的主要因素^[26]。其中5—8月份为生长季,此间集中降水量约占60%^[20]。林下土壤为灰褐色森林土。采样区域内植被以天山云杉纯林为主,林下没有灌木和其它阔叶树种,林下代表性植物种有:天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica* Juz)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* L.)、白花三叶草(*Trifolium repens* L.)、林地早熟禾(*Poa nemoralis* L.)、药用蒲公英(*Taraxacum officinale* Weber.)等。

研究区水热条件随地形及海拔高度重新分配,垂直变化明显。选取离采样点较近的乌鲁木齐气象站、小渠子旅游气象站、天山生态站和后峡气象站数据资料(表1),尽管这些气象站与采样点有一定的距离,气象环境不完全一致,但可以反映出天山云杉分布海拔范围的气候变化趋势。

1.2 采样

2007年9月在天山北坡由若干山体组成连续海拔梯度的云杉典型分布区进行采样,研究区域跨越83°04'41"—87°12'54"E,43°10'57"—44°05'06"N。选取了间隔约100m的10个不同海拔(分别是1420、1505、1622、1757、1850、1962、2045、2110、2240、2300m)分布的种群,在每个海拔中随机选取5株约5m直立、健康、叶片颜色、胸径大小基本一致的成年树,每株取树冠中部生长发育良好的向阳面(以避免光照分布不均造成

的影响)当年生枝条 5 枝,每枝采集枝条顶端至第 20 片中的当年生成熟叶。新鲜叶片装入带盖密封塑料样品瓶,立即放入液氮罐中保鲜,其余叶片存放于布袋用以进行其他指标的分析,每个海拔重复采集每株树下 3 个深度为 0—20cm 的土壤样本,海拔高度由手持 GPS(Magellan GPS315, Magellan, USA)测得。

表 1 研究区气象资料

Table 1 Meteorological data of located stations within the research area

气象站 Station	纬度 N Latitude	经度 E Longitude	时间/a Time	海拔/m Altitude	年均温度/°C Mean annual temperature	年均降雨量/mm Mean annual precipitation
乌鲁木齐 Urumchi	43°78'	87°65'	1961—2000	935	6.8	265.2
小渠子 Xiaoqūzi	43°29'	87°06'	1971—2000	1871.8	2.3	541.5
天山生态站 Tianshan forest ecosystem research station	43°26'	87°28'	2005—2006	1905	2.0	572.7
后峡 Houxia	43°29'	87°07'	1978—2002	2350.4	1.5	444.8

乌鲁木齐气象站气象站数据资料由中国国家气象局气候资料中心提供,天山生态站数据资料选取自文献^[27],小渠子旅游气象站和后峡数据资料选取自文献^[28]

1.3 叶片功能性状的测定

选择叶长宽比(LL/LW)、叶面积(LA)、气孔密度(SD)、单位干重的氮含量(LNC)、磷含量(LPC)和钾含量(LKC)、叶绿素含量(Chla + b)、叶片干物质含量(LDMC)、比叶重(LMA)、饱和含水量(LWC)10 个指标。新鲜叶片取出后放入水中遮阴 6—12h,取出后擦干水分,每个海拔每株树选择 100 片当年生完整新鲜叶片,在电子天平(精度为 0.0001g)上称取饱和鲜重后,用电子数显游标卡尺(精度 0.02mm)测量叶长和叶中部最宽处,计算 LL/LW;然后将上述样品使用透明胶带固定,用 LI-3000A 叶面积仪(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)扫描叶面积;每根针叶各选取 4 个面的中部的 2 个视野区域,通过 200 倍 KEYENCE VHX-Z100R 光学显微镜(Keyence, Japan)进行观察和拍照,计算气孔个数,除以选择区域面积,然后求平均气孔密度(个数/mm²);将测过鲜重和叶面积的叶片在 80℃烘 48h 至恒重,用电子天平(精度为 0.0001g)称取叶干重,计算干物质含量(LDMC = 叶干重/饱和鲜重)和饱和含水量,根据叶面积(LA)计算比叶重(LMA = 叶干重/LA);将烘干后的叶片用研钵粉碎,分别测试氮、磷、钾全量,然后根据叶干重计算出单位干重的氮、磷、钾含量,其中叶氮含量的测定采用凯氏定氮法,叶磷含量采用钒钼黄比色法,叶钾含量采用火焰光度法^[29];另外每个海拔每株树选择 30 片当年生完整新鲜叶片测量叶绿素(a + b)含量,采用 DMF 萃取分光光度法^[30]。每项指标共计 50 组数据。

1.4 土壤养分的测定

选取了 6 个土壤指标:土壤 pH 值用电位法测定,土壤有机质含量(SOM)测定采用 K₂Cr₂O₇容量法,土壤全氮含量(TN)测定采用凯氏定氮法,土壤全磷含量(TP)的测定采用 HClO₄-H₂SO₄消煮-钼锑抗比色法,土壤全钾含量(TK)的测定采用 HF-HClO₄消煮-火焰光度法,土壤含水量(SWC)的测定采用烘干称重法^[31]。每项指标共计 30 组数据。

1.5 数据处理方法

采用 One-Way ANOVA 分析不同海拔梯度间叶片功能特征参数的差异。在绘制散点图的基础上,采用不同的函数对叶片功能特征参数与海拔高度的关系进行回归分析,从各回归式中筛选出回归系数最高者来讨论。用 Pearson 相关系数初步分析叶功能特征之间的互相影响作用,进一步利用多元逐步回归法确定影响叶功能特征的主要环境因子。数据的统计分析、回归分析和多元逐步回归分析采用 SPSS 16.0 软件,图形分析采用 Origin 7.5 绘图软件。

2 结果与分析

2.1 叶功能特性沿海拔梯度的变化

天山云杉叶片功能特征沿海拔梯度变化如图 1 所示,所有指标在海拔梯度上均有显著差异($P < 0.001$)。

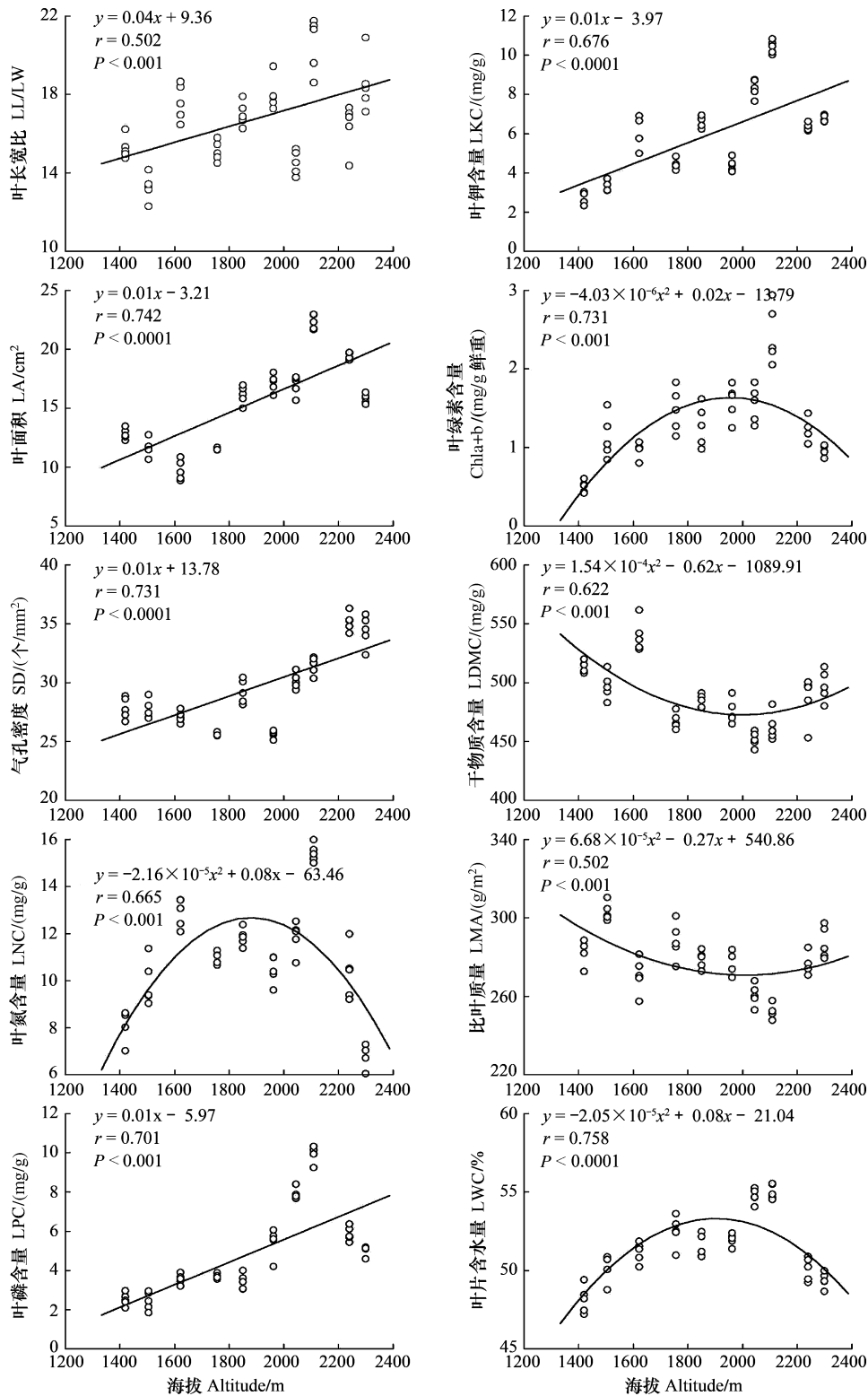


图 1 云杉叶片功能特征沿海拔梯度的变化

Fig. 1 Variation in leaf functional traits in *P. schrenkiana* var. *tianshanica* along the altitudinal gradient in Tianshan mountains $n = 50$

LNC、Chla + b、LWC、LDMC 和 LMA 沿海拔梯度变化呈现曲线变化。在海拔约 2100m 处前三项指标的平均值达到最大,分别为 (15.42 ± 0.38) mg/g、 (2.44 ± 0.37) mg/g 和 (55.01 ± 0.48) % ,超过这个海拔都有下降趋势,LDMC 和 LMA 的变化则与之相反,约 2100m 处分别达到最小值 (451.80 ± 6.28) mg/g 和 (252.33 ± 3.60) g/m²。LL/LW、LA、SD、LPC 和 LKC 等指标沿海拔梯度均呈现线性升高趋势,但多数指标的平均值仍在 2100m 后有所下降。

2.2 叶功能特性之间的相关性

Pearson 相关分析表明了天山云杉叶片功能特征之间的相关性(表 2)。其中 LNC、LPC 和 LKC 之间显著正相关,LNC 与 Chla + b 极显著正相关,LA 与 LL/LW 显著正相关,LA 与 LPC、LKC 分别极显著正相关,LWC 与 LNC、LPC、LKC 和 Chla + b 分别显著正相关,LMA 与 LNC 极显著负相关。从研究区的气象资料(表 1)可以看出,随着海拔升高,温度降低而降水量增加,研究者也指出在 1800—2400m 的中海拔林区是天山云杉的最适生长区域,温度和降水都比较适合^[32],而以上指标都与叶片的光合能力以及增加叶片质量和面积有关,它们的相关说明随着水热条件变得适宜,云杉叶片的功能特性也朝最有利于增进生长的方向发展。

表 2 叶功能特征指标之间的相关性

Table 2 Correlation coefficients among leaf functional traits

指标 Indices	LL/LW	LA /cm ²	SD /(个/mm ²)	LNC /(mg/g)	LPC /(mg/g)
LL/LW	1				
LA/cm ²	0.746 *	1			
SD/(个/mm ²)	0.330	0.581	1		
LNC/(mg/g)	0.455	0.529	-0.115	1	
LPC/(mg/g)	0.740 *	0.832 **	0.435	0.712 *	1
LKC/(mg/g)	0.662 *	0.675 *	0.501	0.715 *	0.860 **
Chla + b/(mg/g)	0.550	0.623 **	-0.038	0.922 **	0.822 **
LDMC/(mg/g)	-0.357	-0.650 *	-0.115	-0.519	-0.644 *
LMA/(g/m ²)	-0.664 *	-0.611	-0.180	-0.799 **	-0.831 **
LWC/%	0.397	0.397	-0.173	0.852 *	0.652 *

指标 Indices	LKC /(mg/g)	Chla + b /(mg/g)	LDMC /(mg/g)	LMA /(g/m ²)	LWC /%
LL/LW					
LA/cm ²					
SD/(个/mm ²)					
LNC/(mg/g)					
LPC/(mg/g)					
LKC/(mg/g)	1				
Chla + b/(mg/g)	0.730 *	1			
LDMC/(mg/g)	-0.431	-0.741 *	1		
LMA/(g/m ²)	-0.785 **	-0.711 *	0.344	1	
LWC/%	0.652 *	0.937 **	-0.731 *	-0.244	1

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ LL/LW 为叶长宽比;LA 为叶面积;SD 为气孔密度;LNC 为单位干重的氮含量;LPC 为单位干重的磷含量;LKC 为单位干重的钾含量;Chla + b 为叶绿素(a + b)含量;LDMC 为叶片干物质含量;LMA 为比叶重;LWC 为叶片饱和含水量

2.3 叶功能特性与土壤因子的关系

图 2 给出了不同海拔土壤因子的属性变化情况,随着海拔升高降水增加,SWC 明显提高,TN 和 TK 则随海拔一直增加到 2100m 后突然减小,TP 变化不明显,SOM 和 pH 有减小趋势。相关分析表明某些叶功能特性与土壤因子间具有一定明显的相关性,再利用逐步回归分析来确定影响叶功能特性的主要土壤因子,结果见表 3。影响各叶功能特性变化的主要土壤因子不同,在海拔梯度上,LNC、LKC、Chla + b、LDMC、LMA 和 LWC

随着 TN 含量的变化而变化, LA、SD 和 LL/LW 随着 SWC 增加而增大, LPC 随着 pH 值的减小和 SWC 的增大而增大。

表 3 叶功能特性与土壤因子之间相关性的逐步回归分析

Table 3 Stepwise regression analyses between leaf functional traits and soil factors

叶片特征 Leaf traits	逐步回归方程 Stepwise regression equations	复相关系数 Multiple R	P
LL/LW	LL/LW = 0.153SWC + 12.152	0.673	0.003
LA/cm ²	LA = 0.329SWC + 5.704	0.774	0.009
SD/(个/mm ²)	SD = 0.301SWC + 20.622	0.850	0.002
LNC/(mg/g)	LNC = 0.374TN + 8.503	0.732	0.016
LPC/(mg/g)	LPC = -3.566pH + 0.304SWC - 31.320	0.897	0.003
LKC/(mg/g)	LKC = 0.447TN + 2.930	0.844	0.002
Chla + b/(mg/g)	Chla + b = 0.078TN + 0.718	0.744	0.014
LDMC/(mg/g)	LDMC = -3.822TN + 513.589	0.674	0.033
LMA/(g/m ²)	LMA = -2.236TN + 292.664	0.712	0.021
LWC/%	LWC = 0.255TN + 49.675	0.678	0.031

LL/LW 为叶长宽比; LA 为叶面积; SD 为气孔密度; LNC 为基于单位叶干重的氮含量; LPC 为基于单位叶干重的磷含量; LKC 为基于单位叶干重的钾含量; Chla + b 为叶绿素(a + b)含量; LDMC 为叶片干物质含量; LMA 为比叶重; LWC 为叶片饱和含水量

3 讨论

海拔梯度上植物的光合能力与光合色素含量的高低关系密切^[33], 而叶绿素是高等植物光合作用中最重要色素, 其含量的多少直接影响植物光合作用的强弱。大部分叶氮存在于叶绿体中, 叶氮的增加直接影响光合酶(如 RuBP 羧化酶)的含量和活性, 进一步增加对 CO₂ 的同化速率, 从而表现出高的光合能力^[33]。叶绿素含量和叶氮含量成正比也基于这种原因, 本研究中这种关系很显著(表 2, $r = 0.922, P < 0.05$), 因此二者海拔上的变化也趋一致: Chla + b 和 LNC 随着海拔升高逐渐增大, 约 2100m 处达到最大, 然后逐渐下降。有研究表明对于在较低海拔分布的辽东栎(*Quercus liaotungensis*)来说, 叶绿素含量的增加是对随海拔升高光照增强的一种适应方式, 以利于在有限的叶面积下充分进行光合作用^[34]。天山云杉光合作用的稳定性高, 对光照的要求仅同光照量相关^[35]。由于天山云杉所在的北坡背阳, 随着海拔升高光照强度增强, Chla + b 在 2100m 以前的增加可能也是对随海拔升高光照增强的适应。高海拔处的太阳总辐射和紫外线辐射均增强, 较低的叶绿素含量可减少叶片对光能的吸收^[36], 使植物免受强辐射的损伤^[37], 因此 2100m 后 Chla + b 下降, LNC 也下降, 因为充足的光照使得植物不必在光合器官中投资太多的氮^[38]。叶绿素含量的变化一方面与植物对光照的适应性有关, 另一方面也受到土壤中矿质元素尤其是氮素的影响^[39], 因为缺氮一方面可能会使叶绿素的生物合成途径受阻, 另一方面可能会引起植物体内活性氧的积累, 导致叶绿素分解加快, 两方面都会减少光合色素含量, 导致光合速率降低^[40]。逐步回归也表明海拔梯度上 TN 是影响天山云杉叶片 Chla + b 的主要因子(表 3, $R = 0.744, P = 0.014$)。有研究指出随着天山海拔梯度上水热条件变好, 腐殖质的积累加强, 造成土壤有机质、全氮和全磷含量随海拔增加^[26], 本文中 TN 也是随海拔升高而增加, 只是 2100m 后突然下降。因为植物叶 N 含量与生长环境中的土壤 N 含量紧密相关, 所以海拔梯度上 TN 也是影响天山云杉 LNC 的主要因子(表 3, $R = 0.732, P = 0.016$), 且变化一致。

植物中的氮、磷和钾是协同元素, 它们之间一般呈现正相关关系^[41], 这在天山云杉中也有体现(表 2)。植物体内的养分主要由根系从土壤养分中吸收, 逐步回归分析表明海拔梯度上 LNC 和 LKC 都受 TN 含量影响, LPC 含量则受土壤 pH 值和 SWC 的共同影响。随海拔升高, 土壤 pH 值降低, SWC 升高, 土壤 pH 值降低可以促进土壤中磷酸钙的溶解, 提高土壤的供磷强度^[42], 因此促进了云杉 LPC 的吸收。磷不仅是核酸、磷脂的组分, 也是许多辅酶的组分, 直接参与氧化磷酸化和光合磷酸化, 因而在能量代谢中起特殊作用, 钾则能够调节水分代谢和能量代谢, 提高植物的抗性^[43]。随海拔的升高, LPC 和 LKC 的含量一直增加, 说明叶的水分

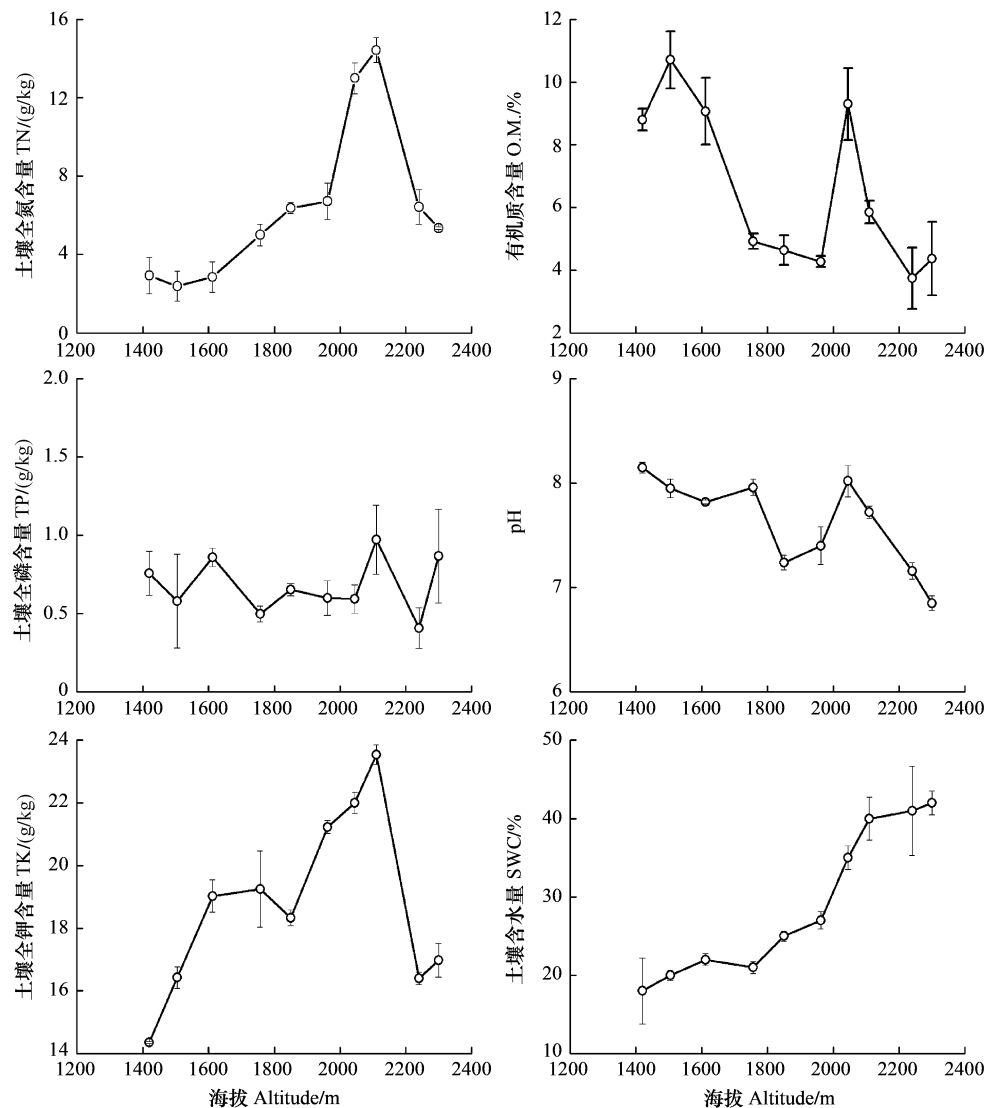


图2 天山 10 个海拔梯度土壤性质

Fig. 2 Soil properties of 10 altitudinal gradients in Tianshan mountains

平均值 \pm 标准差, $n=30$

和能量代谢及抗性也在增强,因为植物会将更多的磷、钾等元素分配到光合器官和保护组织中以适应高海拔处低温、强光照和水分胁迫的环境^[34]。

海拔梯度上植物气孔密度的变化除了与物种本身特性有关外,还受其他环境因子的影响^[14,22-23]。水分以及温度条件是植物气孔密度变化的主要制约因子,温度更是通过水分的变化而起作用^[14]。对于天山云杉则是 SWC 制约 SD 的变化(表 3, $R=0.850$, $P=0.002$),随着海拔升高 SWC 增加使 SD 变大。植物叶片含水量不但与光合作用密切相关,在一定程度上可体现植物生存环境的水热状况^[44]。天山云杉在低海拔高温干旱和高海拔低温所造成的水分胁迫下产生较低的 LWC,而在相对湿润环境的中等海拔地段产生较高的 LWC,这也是外界水热条件的适应,支持了前人的研究结果^[44]。然而相对于环境水热条件, TN 更强烈的影响 LWC (表 3, $R=0.678$, $P=0.031$)。

LDMC 在一定程度上代表了植物对某一环境资源的利用能力,指示叶片建成投入的多少;LMA 则在一定程度上代表了植物对于所获取到资源的返还能力^[3,9-10,45],高 LMA(低 SLA)的植物对于所获取的资源具有较好的保留能力,可以很好的适应资源匮乏的生境;低 LMA(高 SLA)的植物通常具有较高的生产能力,适宜生

活在资源充沛的生境中^[5-6,45]。通常 SLA 与 LNC 正相关,与叶寿命负相关,即低 LMA(低 SLA)的植物叶片厚度小,光捕获面积大,LNC 高,因此具有较高的净光合速率,体现出较高的相对生长速率^[8,46]。而高 LMA(低 SLA)的植物叶中很大一部分物质用于构建保卫建筑或增加叶肉细胞密度,形成厚而小的叶片,增加叶片内部水分向叶片表面扩散的距离或阻力,可以降低植物内部水分散失^[5]。高海拔低温使生长季相对较短,树木生长速度减慢,植物高度降低,分配到光合器中的氮较少,以致其光合能力较低^[47],净生长量变小^[48],植物细胞体积减小,细胞壁变厚^[49],组织密度增加^[50],植物叶片会变得更加坚硬,积累较多的光合产物为越冬和翌年的生长做准备,LMA 增加^[47,51]。本研究中,水热条件和土壤条件随海拔升高逐渐变好,天山云杉叶片的光合能力随着 LNC 和 Chla + b 的增加而增大,LL/LW 的增加说明叶逐渐变长,光合产物被用于叶面积的伸展,所以 LMA 逐渐减小。LWC 增加,使得 LDMC 减小。随着海拔继续升高,低温导致土壤中的水分粘性变大,不易被植物根系所吸收,导致水分胁迫^[24],土壤养分条件也下降,光合能力随着 LNC 和 Chla + b 的减小而下降,LA 和 LWC 也有所减小,LMA 和 LDMC 增加。当 LDMC 和 LMA 均较高时,就代表该树种对于环境资源的利用能力很强,因此我们可以看出天山云杉对资源的利用能力是呈反方向的,环境越是恶劣天山云杉对资源的利用能力越强,而在优越的环境中天山云杉对资源的利用能力往往较低,这与前人所得结论一致^[5-6,9-10,45],可见天山云杉是通过 LDMC、LMA 等叶片功能性状的改变来适应变化的环境。逐步回归也表明作为环境资源的 TN 深刻影响着天山云杉叶片 LDMC 和 LMA(表 3)。

在单种植物分布的海拔范围内有其相对适宜的生长环境,叶特性在此范围内表现出显著的变化,许多研究都得出此结论^[22-24,34,44]。天山云杉林的分布上限降水量虽然最多,但低温多风、发育不良的土壤和较短的生长季常常限制树木的生长和发育,天山云杉林分布下限较少的降雨量和较低的土壤湿度也限制了树木的生长,而在中等海拔降水量多、热量适宜,土壤厚度较大而养分状况良好,温和而湿润的生境成为天山云杉林生长发育的理想场所^[20]。根据本次调查的天山云杉叶片功能指标数据,在海拔 1420—2300m 区域,随着水热条件逐渐变好,土壤含水量和土壤营养矿物含量也随之增加,天山云杉随海拔升高逐渐进入适合生长的区域,因而 LL/LW、LA、SD、叶片营养元素、Chla + b 和 LWC 逐渐增大。LNC、LPC 与 LKC,LNC 与 Chla + b,LA 与 LL/LW,LMA 与 LNC 等与提高光合能力、促进生长和扩展面积的指标之间的显著相关(表 2)也可以进一步证明在一定海拔适宜的水热环境中,天山云杉叶片的光合固碳能力变强,叶片的功能性状朝更加适应环境的方向发展。而在优越的环境中植物叶片虽然具有较高的光合能力和较高的相对生长速率,但是对资源的利用能力往往较低^[3,5-6,46]。在 2100m 附近 LNC、Chla + b、LA 的平均值最大,LMA、LDMC 的平均值最小。LNC 和叶绿素含量高代表光合能力强,LA 高代表相对生长速率快,LMA 和 LDMC 低则代表因处于优越的环境而对资源的利用低,由此判断此海拔附近为天山云杉最适宜的生长范围。

4 结论

天山北坡的天山云杉 LA、LL/LW、SD、LPC 和 LKC 都随海拔升高呈增加趋势,LNC、Chla + b、LDMC、LMA 和 LWC 呈现曲线变化,2100m 为天山云杉生长的最适宜的环境。逐步回归分析表明除了 LPC 受土壤 pH 值和 SWC 的共同影响,Chla + b、LNC、LKC、LDMC、LMA 和 LWC 都受 TN 的影响,LA、SD 和 LL/LW 都受 SWC 的影响,可见 SWC 和 TN 是天山云杉叶片功能特征沿海拔梯度变化的主要驱动因子。

致谢: 兰州大学孙惠玲博士和石河子大学徐文斌同学对采样给予帮助;实验过程中得到兰州大学刘建全教授和陈立同博士的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 2007, 116, 882-892.
- [2] McIntyre S, Lavorel S, Landsberg J, Forbes T D A. Disturbance response in vegetation — towards a global perspective on functional traits. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10, 621-630.
- [3] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A,

- Pausas J G, Poorter H. A hand book of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51, 335-380.
- [4] Wright I J, Reich P B, Cornelissen H C, Falster D S, Groom P K, Hikosaka K, Lee W, Lusk C H, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Warton D I, Westoby M. Modulation of leaf economic traits and traits relationships by climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14: 411-421.
- [5] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, Vose J M, Volin J C, Gresham C, Bowman W D. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span; a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 1998, 114: 471-482.
- [6] Wright I J, Westoby M, Reich P B. Convergence towards higher leaf mass per area in dry and nutrient-poor habitats has different consequences for leaf life span. *The Journal of Ecology*, 2002, 90: 534-543.
- [7] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2004, 101(30):11001-11006.
- [8] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high-and low-rainfall and high-and low-nutrient habitats. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 423-434.
- [9] Wilson J, Thompson K, Hodgson J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plants strategies. *New Phytologist*, 1999, 143, 155-162.
- [10] Vendramini F, Díaz S, Gurvich D E, Wilson P J, Thompson K, Hodgson J G. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 147-157.
- [11] Chabot B F, Hicks D J. The ecology of leaf life spans. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, 13: 229-259.
- [12] Eamus D, Prior L. Ecophysiology of trees of seasonally dry tropics: comparisons among phenologies. *Advances in Ecological Research*, 2001, 32: 113-197.
- [13] Prior L D, Bowman D M J S, Emus D. Seasonal differences in leaf attributes in Australian tropical tree species: family and habitat comparisons. *Functional Ecology*, 2004, 18(5): 707-718.
- [14] Yang L M, Han M, Zhou G S, Li J D. The changes of water-use efficiency and stoma density of *Leymus chinensis* along Northeast China Transect. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 0016-0024.
- [15] Liu Q H, Wang X A, Tian X H, Xiao Y P. Morphological and anatomical characteristics of leaf of *Larix chinensis* and their relationship to environmental factors in Taibaishan Mountain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(5): 885-893.
- [16] Craine J M, Lee W G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal gradient in New Zealand. *Oecologia*, 2003, 134: 471-478.
- [17] Hölscher D, Schmitt S, Kupfer K. Growth and leaf traits of four broad-leaved tree species along a hillside gradient. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 2002, 121: 229-239.
- [18] Reich P B, Oleksyn J, Modrzyński J, Tjoelker M G. Evidence that longer needle retention of spruce and pine populations at high elevations and high latitudes is largely a phenotypic response. *Tree Physiology*, 1996, 16(7): 643-647.
- [19] Oleksyn J, Modrzyński J, Tjoelker M G, Zytowski R, Reich P B, Karolewski P. Growth and physiology of *Picea abies* populations from elevational transects; common garden evidence for altitudinal ecotypes and cold adaptation. *Functional Ecology*, 1998, 12(4): 573-590.
- [20] Liu G F. Preliminary study on the population & community characteristics of *Picea Schrenkiana* Var. *Tianschanica* and its geographic variation. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008: 58-64.
- [21] Lin L. The response of leaf morphology and physiological characteristics to elevation gradient in *Abies georgei* var. *smithii*. Linzhi: Xizang University, 2008: 21-36.
- [22] Qiang W Y, Wang X L, Chen T, Feng H Y, An Z S, He Y Q, Wang G. Variations of stomatal density and carbon isotope values of *Picea crassifolia* at different altitudes in the Qilian Mountains. *Trees*, 2003, 17: 258-262.
- [23] Zhao C M, Chen L T, Ma F, Yao B Q, Liu J Q. Altitudinal differences in the leaf fitness of juvenile and mature alpine spruce trees (*Picea crassifolia*). *Tree Physiology*, 2008, 28: 133-141.
- [24] Luo J X, Zang R G, Li C Y. Physiological and morphological variations of *Picea asperata* populations originating from different altitudes in the mountains of southwest China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221: 285-290.
- [25] Tang G C. *Picea Schrenkiana* Fisch et Mey. var. *tianschanica* in Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1989, 5: 32-33.
- [26] Chen X, Xu W Q, Luo G P, Lin Q, Xiao L X. Soil properties at the tree limits of *Picea schrenkiana* forest in response to varying environmental conditions on the northern slope of Tianshan mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 0053-0061.
- [27] Hao S, Liu P, Zhang Y T, Wang B C, Zhang X P, Liu D. Research of microclimatic characters of Tianshan Mountain spruce forest in the middle location of Tianshan Mountain. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2007, 30(1): 48-52.

- [28] Pu Z C, Zhang S Q, Li J L, Huang X, Sun Y Q, Apaer. Change characteristics of reference crop evapotranspiration in Urumqi River basin. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2(1): 41-45.
- [29] Zhang Z L. *Guidance of Plant Physiology Experiments*. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [30] Robert J P. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls *a* and *b*. *Photosynthesis Research*, 2002, 73: 149-156.
- [31] Bao S D. *Soil Agro-Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [32] Wang T, Liang Y, Ren H B, Yu D, Ni J, Ma K P. Age structure of *Picea schrenkiana* forest along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 267-274.
- [33] Evans J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants. *Oecologia*, 1989, 78: 9-19.
- [34] Qi J, Ma K M, Zhang Y X. The altitudinal variation of leaf traits of *Quercus liaotungensis* and associated environmental explanations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 930-937.
- [35] Li X B, Bai Z Q, Guo Z J, Zhang Y T, Zhang Y. Study on photosynthesis of Tianshan spruce and other main tree species. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2001, 38(2): 62-65.
- [36] Tiesen L L. Comparisons of chlorophyll content and leaf structure in arctic and alpine grasses. *American Midland Naturalist*, 1970, 83: 238-253.
- [37] Han F, Ben G Y, Shi S B. Comparative study on the resistance of *Kobresia humilis* grown at different altitudes in Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(6): 654-659.
- [38] Bazzaz F A. Allocation of resources in plants; state of the science and critical questions//Bazzaz F A, Graceeeds J. *Plant Resource Allocation*. New York: Academic Press, 1997: 1-37.
- [39] Verhoeven A S, Demmin-Adams B, Adams III W W. Enhanced employment of the xanthophylls cycle and thermal energy dissipation in spinach exposed to high light and N stress. *Plant Physiology*, 1997, 113: 817-824.
- [40] Guo W D, Sang D, Zheng J S, Liao H B, Chen W R. Effects of nitrogen deficiency on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and chloroplast ultra structure in fingered citron. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2009, 35(3): 307-314.
- [41] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, Falster D S, Gamier E, Hikosaka K, Lamont B B, Lee W, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Villar R, Warton D I, Westoby M. Assessing the generality of global leaf trait relationship. *New Phytologist*, 2005, 166: 485-496.
- [42] Shen S M. *Soil Fertility of China*. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [43] Bai B Z, Xu K Z, Zhao J Y. *Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001: 46-47.
- [44] Li F L, Bao W K, Liu J H. Leaf characteristics and their relationship of *Cotinus coggygria* in arid river valley located in the upper reaches of Minjiang River with environmental factors depending on its altitude gradients. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2005, 25(11): 2277-2284.
- [45] Van der Werf A, Geerts R H E M, Jacobs F H H, Korevaar H, Oomes M J M, de Visser W. The importance of relative growth rate and associated traits for competition between species during vegetation succession. Inherent variation in plant growth//Lambers H, Poorter H, Van Vuuren M M I. *Physiological Mechanisms and Ecological Consequences*. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 489-502.
- [46] Wright I J, Westoby M. Cross-species relationship between seedling relative growth rate, nitrogen productivity and root vs. leaf function in 28 Australian woody species. *Functional Ecology*, 2000, 14: 97-107.
- [47] Bao L, Liu Y H. Comparison of leaf functional traits in different forest communities in Mt. Dongling of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3692-3703.
- [48] Li M H, Yang J, Kräuchi N. Growth responses of *Picea abies* and *Larix deciduas* to elevation in the subalpine areas as of Tyrol, Austria. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33: 653-662.
- [49] Hoch G, Popp M, Körner C. Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. *Oikos*, 2002, 98: 361-374.
- [50] Li M H, Kräuchi N, Dobbartin M. Biomass distribution of different-aged needles in young and old *Pinus cembra* trees at highland and lowland sites. *Trees*, 2006, 20: 611-618.
- [51] Kärner C. Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 4-17.

参考文献:

- [14] 杨利民, 韩梅, 周广胜, 李建东. 中国东北样带关键种羊草水分利用效率与气孔密度. *生态学报*, 2007, 27(1): 0016-0024.
- [15] 刘全宏, 王孝安, 田先华, 肖娅萍. 太白红杉 (*Larix chinensis*) 叶的形态解剖学特征与环境因子的关系. *西北植物学报*, 2001, 21(5): 885-893.
- [20] 刘贵峰. 天山云杉种群与群落特征及其地理变化规律的初步研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2008: 58-64.

- [21] 林玲. 急尖长苞冷杉叶片形态与生理特征对海拔梯度的响应. 林芝: 西藏大学, 2008: 21-36.
- [25] 唐光楚. 新疆的天山云杉. 新疆农业科学, 1989, 5: 32-33.
- [26] 陈曦, 许文强, 罗格平, 蔺卿, 肖鲁湘. 天山北坡不同环境条件下雪岭云杉 (*Picea schrenkiana*) 林限土壤属性. 生态学报, 2008, 28(1): 0053-0061.
- [27] 郝帅, 刘萍, 张毓涛, 王丙超, 张新平, 刘端. 天山中段天山云杉森林小气候特征研究. 新疆农业大学学报, 2007, 30(1): 48-52.
- [28] 普宗朝, 张山清, 李景林, 黄新, 孙月琴, 阿帕尔. 乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(1): 41-45.
- [29] 张志良. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] 祁建, 马克明, 张育新. 辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶特性沿海拔梯度的变化及其环境解释. 生态学报, 2007, 27(3): 930-937.
- [35] 李行斌, 白志强, 郭仲军, 张毓涛, 张勇. 天山云杉等主要树种光合作用初探. 新疆农业科学, 2001, 38(2): 62-65.
- [37] 韩发, 贲桂英, 师生波. 青藏高原不同海拔矮嵩草抗逆性的比较研究. 生态学报, 1998, 18(6): 654-659.
- [40] 郭卫东, 桑丹, 郑建树, 廖海兵, 陈文荣. 缺氮对佛手气体交换、叶绿素荧光及叶绿体超微结构的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(3): 307-314.
- [42] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [43] 白宝璋, 徐克章, 赵景阳. 植物生理学. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 46-47.
- [44] 李芳兰, 包维楷, 刘俊华. 岷江上游干旱河谷海拔梯度上四川黄栌叶片特征及其与环境因子的关系. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2277-2284.
- [47] 宝乐, 刘艳红. 东灵山地区不同森林群落叶功能性状比较. 生态学报, 2009, 29(7): 3692-3703.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 21 2010

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元