

中国矮曲林的分布特征及生态意义

姚永慧¹, 张百平^{1,2*}, 赵超^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:矮曲林是山地森林带在严酷的自然环境影响下发展演化而成的特殊植物群落, 对中国山地植被和垂直带的研究具有重要的地理和生态意义。本文选择20世纪30年代以来在国内外文献中发表的52个矮曲林数据, 结合Worldclim气候数据等, 对中国矮曲林的类型和分布及其相应的气候条件进行了研究。结果表明: ①中国的矮曲林主要包括山顶苔藓矮曲林、寒温性偃松矮曲林和岳桦矮曲林3类; 其中, 山顶苔藓矮曲林主要分布于秦巴山区以南的山地, 而偃松矮曲林和岳桦矮曲林主要分布于东北地区。②山顶苔藓矮曲林主要由亚热带、热带地区的常绿阔叶林在山顶或山脊受山顶效应等的影响演化而来; 而寒温性矮曲林主要由寒温性针叶林或针阔混交林在山顶或山脊条件下长期演化而来。山顶苔藓矮曲林自东向西随地势升高, 其分布的海拔高度也逐渐升高; 寒温性偃松矮曲林和岳桦矮曲林分布高度自南向北逐渐降低。③矮曲林分布在气候林线以下的山地, 其气候条件足以支撑山地森林的发育, 但由于山顶效应的存在(如强风、气候干冷或湿冷及土壤贫瘠等), 只能发育矮曲林而非垂直地带性的山地森林。④中国东南部的很多山地高度小于3000 m, 山顶效应明显, 矮曲林广泛发育, 造成了假林线的普遍存在。

关键词: 山顶苔藓矮曲林; 偃松矮曲林; 岳桦矮曲林; 林线; 分布特征; 山顶效应

1 引言

矮曲林(cripple tree 或 elfin forest/wood)一词最初出自德语“krummholz”(Schröeter, 1908; Hegi, 1958), 随后被欧美植物学家广泛使用, 用来描述落基山和欧洲山地林线上限附近矮小、变形的针叶树层或用来指森林和苔原的过渡带(Clausen, 1963; Wardle, 1965, 1973; Baig et al, 1976; Holtmeier, 1981)。矮曲林多分布在高山、亚高山的山顶或山脊, 由于强烈而持续的大风、贫瘠的土壤、昼夜温差大、坡陡及冬春积雪较多, 树木变形弯曲或矮化, 甚至匍匐地面、然后倾斜向上生长, 形成耐瘠薄土壤、萌生力强、树种组成单一、呈单层外貌的矮曲林(吴征镒等, 1980)。矮曲林也常常被称为“山顶矮林”、“高山矮林”、“蟠蛇林”或“雾林”(叶居新, 1994), 是

在长期演替过程中发育成熟且相对稳定的植物群落类型。国外对矮曲林的研究相对较多, 尤其是对阿尔卑斯山(Schröeter, 1908; Ellenberg, 1978, 1988)、落基山(Daubenmire, 1943; Marr, 1977)和科罗拉多山(Ives, 1973; Holtmeier, 1981)的矮曲林的物种组成、区系成分、生境特点和成因等进行了详细地研究。有些研究则详细对比了欧洲山地尤其是阿尔卑斯山与科罗拉多山矮曲林的区别, 并对矮曲林的定义和名称进行了探讨(Holtmeier, 1981)。此外, 在研究山顶效应(summit syndrome)或林线的分布时也多有提及矮曲林(Holtmeier, 1981; Körner et al, 2004; Holtmeier et al, 2005)。

国内对矮曲林专门系统的研究较少。根据《中国植被》(吴征镒, 1995)中矮曲林的物种组成、群落特征, 中国矮曲林总体可分为寒温性矮曲林和亚热

收稿日期: 2016-07; 修订日期: 2016-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571099, 41001278)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41571099; No. 41001278]。

作者简介: 姚永慧(1975-), 女, 湖北安陆人, 博士, 副研究员, 研究方向为地理时空数据分析, E-mail: yaoyh@reis.ac.cn。

通讯作者: 张百平(1963-), 男, 研究员, 研究方向为山地地理, E-mail: zhangbp@reis.ac.cn。

引用格式: 姚永慧, 张百平, 赵超. 2017. 中国矮曲林的分布特征及生态意义[J]. 地理科学进展, 36(4): 491-499. [Yao Y H, Zhang B P, Zhao C. 2017. Geographical distribution of cripple tree forest and its importance for forest line in China[J]. Progress in Geography, 36(4): 491-499.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.04.010

带山顶苔藓矮曲林2类。寒温性矮曲林主要分布在中国温带、寒温带地区如东北部地区的山顶或山脊,以偃松矮曲林(Form. *Pinus pumila*)和岳桦矮曲林(Form. *Betula ermanii*)为代表。偃松矮曲林属寒温性针叶林植被型、寒温性常绿针叶林植被亚型、寒温性松林群系组。偃松矮曲林组成的树种极单纯,仅在偃松丛间有呈团状分布的低矮的匍匐状的瘦桦(*Betula exilis*)、兴安刺柏(*Sabina davurica*)等,其林下与林间植物主要是各种地衣和藓类(吴征镒, 1995)。岳桦矮曲林属落叶阔叶林植被型、山地杨桦林植被亚型、桦木、柃木林群系组。岳桦矮曲林的组成极单纯,呈单层外貌,往往呈一株多干,倾斜生长,树高平均为7~12 m;林内混生树种极少,仅伴生少量的花楸(*Sorbus pohuashanensis*)、东北赤杨(*Alnus mandshurica*)及鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、长白山落叶松(*Larix olgensis* var. *changpaiensis*)和臭冷杉等;林下灌木稀少,仅见散生的笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、西伯利亚刺柏(*Juniperus sibirica*)、蓝靛果(*Lonicera caerulea* var. *edulis*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)、牛皮杜鹃(*Rhododendron xanthostephanum*)等(吴征镒, 1995)。岳桦矮曲林因分布于高寒地带,很少有竞争者,且具有很强的有性和无性繁殖能力,可以占据云杉、冷杉所不能分布的生境,成为一种稳定的群落。

山顶苔藓矮曲林是中国亚热带山地常绿阔叶林和热带山地季风常绿阔叶林在山顶和山脊的环境条件下,自然演替的特殊群落变型,属常绿阔叶林植被型、山顶苔藓矮曲林植被亚型。其生境条件非常特殊,主要是山风强烈、日照少、气温低、气温的日变化大、云雾多、湿度大,土层浅薄,具有独特的群落学特征:①林木生长稠密、分枝低矮且粗壮;②叶型为小型叶或中型叶、革质且多茸毛;③小枝和叶片多具鳞片等旱生特征;④枝干或叶片上密被有附生的苔藓植物(吴征镒, 1995)。山顶苔藓矮曲林包括杜鹃矮曲林和吊钟花矮曲林2个群系组,其中杜鹃矮曲林包括猴头杜鹃、美丽马醉木、冷箭竹林(Form. *Rhododendron simiarum*, *Pieris formosa*, *Sin arundinaria fangiana*),猴头杜鹃、厚皮香林(Form. *Rhododendron simiarum*, *Ternstroemia gymnanthera*),大喇叭杜鹃、沙巴乌饭林(Form. *Rhododendron excellens*, *Vaccinium chapaense*),秀雅杜鹃矮曲林(Form. *Rhododendron concinnum*),都枝杜鹃矮曲林(Form. *Rhododendron shanii*)共5个群系;吊

钟花矮曲林有吊钟花、锦杜鹃(Form. *Enkianthus quinqueflorus*, *Thododendron fortunei*)1个群系(吴征镒, 1995)。

在中国矮曲林的研究中,除对山顶苔藓矮曲林的物种组成、区系成分、基本生境特点、土壤种子库和生物量等有较详细的研究外(谢寿昌, 1987; 叶居新, 1994; 施济普, 2007; 徐捷等, 2010),对其他类型的矮曲林只是在植被分类或本底调查中略加描述(吴征镒等, 1980; 侯学煜, 1988; 杨小波等, 1994, 1995; 王映明, 1995a, 1995b; 彭华等, 1998),详细的研究很少。近年来,有些研究对中国山顶苔藓矮曲林的分布和特征进行了较全面的归纳和分析(徐捷等, 2010)。但对各类矮曲林在全国的分布和植物地理特征等方面的研究较少。由于矮曲林常分布在山地森林的上部边缘,是在具备发育山地森林的气温和降水条件下,山地森林带受山顶效应的影响而形成的一种特殊植被类型,对于山地植被垂直带、植被生态与环境研究等具有重要的生态意义,尤其对于解释中国东部林线分布特征具有重要的意义,因此有必要系统全面地研究中国矮曲林地理分布规律及其成因特征。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

(1) 矮曲林数据。本文选择了52个自20世纪30年代以来在国内外文献中发表的矮曲林数据,对中国矮曲林的分布特征进行研究。这些数据主要收集于以下书籍和论文:《Geocology of the High Mountain Regions of Eurasia》(Troll, 1972),《珠穆朗玛峰地区科学考察报告》(郑度, 1975),《西藏植被》(中国科学院植物研究所, 1988),《云南植被》(吴征镒等, 1987),《中国植被地理及优势植物化学成分》(侯学煜, 1982),《中国植被》(吴征镒等, 1980),《广西大瑶山自然资源考察》(广西大瑶山自然资源综合考察队, 1988),“我国山地环境的自然特点及开发利用”(赵松乔, 1983),“湖北植被地理分布的规律性”(王映明, 1995a, 1995b),“略论川西山地的自然垂直带”(郑远昌等, 1984),“伏牛山森林群落物种多样性研究(一). 群落垂直分布与物种丰富度”(叶永忠等, 1999),“我国山地植被的垂直分布规律”(刘华训, 1981),“白石砬子山南北坡森林植被垂直分布的研究”(宋军等, 2005),“海南五指山森林的垂直分

布及其特征”(符国媛等, 1995), “广东乳阳八宝山自然保护区的植被特点”(张金泉, 1993)等文献和资料。矮曲林数据点覆盖青藏高原南部、云贵高原、秦岭及东部、东北地区(图1)。

(2) 气候数据本文所使用的气温和降水数据来自 Worldclim 数据集, 下载自 <http://www.worldclim.org/>。该数据集空间分辨率为 1 km, 为由 Hijmans 等(2005)根据全球气象台站观测数据(GHCN 数据集、WMO CLINO 数据集、FAOCLIM 数据集及其他区域性、地方性的气候观测数据集), 利用 ANUSPLIN 软件中的“样条条(the thin-plate smoothing splines)”内插方法内插的全球气温、降水数据集。文中矮曲林的气温和降水数据均取自该数据集。

2.2 研究方法

首先, 对于收集到的矮曲林数据, 一部分有较精确的经纬度, 或者根据山峰所在的位置能够获得精确的经纬度坐标; 有些没有详细经纬度的数据, 则按其分布区域, 取区域经纬度的中间值。在上述 52 个矮曲林数据点中, 具有较精确经纬度坐标的数据共有 21 个, 其中寒温性矮曲林 8 个, 常绿苔藓矮曲林 13 个。然后, 根据气温和降水数据、地形数据等, 用 ArcGIS 软件及空间分析工具, 计算和提取具有精确经纬度坐标的矮曲林数据点位置(21 个数据点)的气温和降水信息、矮曲林带上下限数据等, 在此基础上, 对矮曲林的空间分布规律及其成因特征进行研究。

3 结果分析

3.1 矮曲林的地理空间分布规律

3.1.1 山顶苔藓矮曲林

根据所收集到的数据, 山顶苔藓矮曲林主要分布于中国亚热带地区, 包括青藏高原东南部和喜马拉雅山一带、云南、贵州、海南、广东、广西、湖南、湖北、浙江和安徽南部等南方大部分省区。本文山顶苔藓矮曲林的最北界为小秦岭主峰老鸦岔坨(图1), 也有研究认为其最北界在伏牛山一带(徐捷等, 2010), 因此其最北界应位于秦巴山区。由于山顶苔藓矮曲林是亚热带常绿阔叶林在山顶或山脊大风、多雾和低温等条件下长期演化形成的一种特殊植被类型, 其分布与中国亚热带常绿阔叶林和山地常绿阔叶林分布区相一致; 并受地形分布的影响, 自东向西逐渐升高。在中国东南沿海(浙江、福建

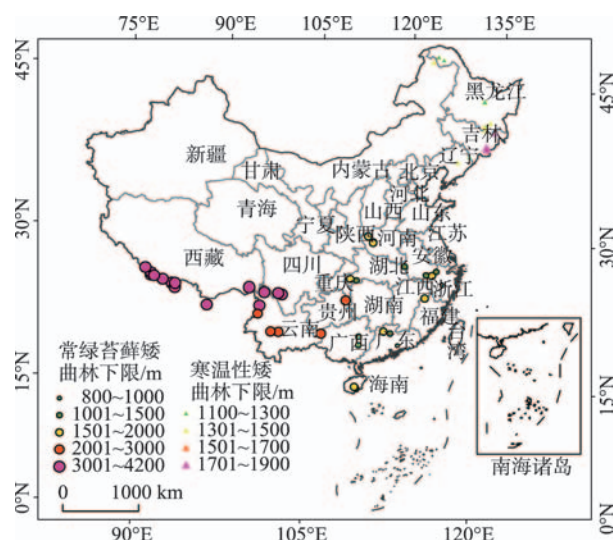


图1 中国矮曲林空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of cripplle trees in China

和广东), 由于地势低平, 山顶苔藓矮曲林的一般分布于海拔 800~1200 m 高度上; 向西至中国第三级阶梯的内陆地区, 如浙江西部、安徽、江西、湖北、湖南和广西, 随着地势逐渐升高, 山顶苔藓矮曲林一般于海拔 1000~1800 m 高度上; 向西至第二阶梯的重庆、贵州和云南, 山顶苔藓矮曲林的分布高度也继续升高, 一般分布于海拔 1500~3000 m; 至第一阶梯藏东南地区及喜马拉雅山一带则基本分布在海拔 3000~4500 m(图1)。

3.1.2 寒温性矮曲林

寒温性矮曲林主要分布于中国东北部的辽宁、吉林、黑龙江及内蒙古北部等寒温带地区。其中, 偃松矮曲林是发育于寒温性针叶林(松林)上限附近的一种植被类型, 在中国分布范围不大, 主要分布于大兴安岭北部地区(吴征镒, 1995), 且其分布高度自南向北逐渐降低, 如在奥库里堆山分布于海拔 1400~1520 m, 向北至白卡鲁山则降低至海拔 1240 m 以上(图1); 在长白山地区则常镶嵌于岳桦矮曲林之间。岳桦矮曲林分布于针阔混交林区域或落叶阔叶林上限附近, 成为森林上限。在中国东北部分布广泛, 尤其是在长白山上形成独特的岳桦林景观(吴征镒, 1995)。岳桦矮曲林自长白山向小兴安岭, 其分布高度由南向北逐渐降低: 在长白山一带基本上分布在海拔 1800~2100 m(偃松矮曲林大概在海拔 1900~2000 m), 向北至张广才岭(大秃顶子、老秃顶子)一带则分布于海拔 1180~1800 m, 至小兴安岭白石砬子山则下降到海拔 1100~1300 m(图1)。

3.2 矮曲林分布的影响因素及生态意义

3.2.1 矮曲林分布区的气候条件

从现有的寒温性矮曲林分布地点的气温和降水数据来看,寒温性矮曲林分布地点的最热月气温(7月)介于15~20℃,年降水量在500~800 mm之间,基本上满足山地森林发育的气温和降水条件;但最冷月气温(1月)则非常低,通常在-20℃以下,年均温也基本上在0℃以下(-6.5~-0.2℃)(表1),生长季较短、冬季的气温较低。有研究表明,-10~-15℃的低温就会影响树干的发育(Wardle, 1971; Sakai, 1975),霜冻破坏极限(frost damage limit)和成熟极限(ripening limit)等都会影响林线的发育(Hutchins, 1947; Tuhkanen, 1980),再加上这些山顶的山风极其强烈、土壤条件瘠薄等因素的影响,树木为了适应这种恶

劣的环境条件,逐渐发育成低矮的矮曲林。

本文收集的山顶苔藓矮曲林数据中,具有较精确经纬度坐标的共13个,主要分布于中东部地区(第三级阶梯的内陆地区),遗憾的是云贵高原及青藏高原的矮曲林数据基本上没有记录精确的地理位置。根据这13个山顶苔藓矮曲林分布地点的气温来看(表2),最热月气温(7月)介于17~22℃之间;最冷月气温(1月)除海南、广东、广西和江浙等沿海一带能达到4~12℃外,其他地方的1月气温基本上都低于0℃;山顶苔藓矮曲林分布区的年平均气温要低于所在省份的年均气温,除海南、广东、广西和江浙一带基本上在10℃以上(10~17℃)外,其他地区均低于10℃(5~10℃)。从年降水量上来看,除秦岭南部低于1000 mm(600~1000 mm),其他地区的年

表1 寒温性矮曲林最冷月、最热月及年平均气温、年降水量

Tab.1 Air temperature of the coldest month (January) and the warmest month (July), mean annual temperature, and annual precipitation for the cold temperate cripple trees

山地名称	经度/°E	纬度/°N	1月气温/℃	7月气温/℃	年均温/℃	年降水量/mm	下限/m	上限/m
奥克里堆山	122.20	51.83	-30.20	15.40	-6.05	502	1400	1520
大兴安岭白卡鲁山	123.17	52.34	-30.50	15.20	-6.47	527	1240	1528
大兴安岭北端	123.90	51.95	-28.70	16.80	-4.68	505	1200	1300
长白山(东北北部)	127.95	42.12	-19.30	16.90	-0.26	791	1800	2100
张广才岭大秃顶子	128.20	44.42	-23.50	16.20	-2.25	781	1400	1780
黄泥河自然保护区老白山南坡	128.24	44.05	-22.80	16.00	-2.09	780	1400	1650
老秃顶子自然保护区	128.36	44.38	-21.50	18.20	-0.20	715	1180	1250
小兴安岭白石砬子	128.96	46.91	-23.40	19.60	-0.08	670	1100	1270

表2 山顶苔藓矮曲林最冷月、最热月及年平均气温、年降水

Tab.2 Air temperature of the coldest month (January) and the warmest month (July), mean annual temperature, and annual precipitation for the mossy cripple trees

山地名称	经度/°E	纬度/°N	1月气温/℃	7月气温/℃	年均温/℃	年降水量/mm	下限/m	上限/m
海南五指山	109.70	18.90	12.3	20.4	17.13	2017	1400	1867
广西大瑶山圣堂山	110.11	23.96	5.8	22.1	14.79	1628	1500	1979
广东乳阳八宝山	113.13	24.43	6.8	24.0	16.01	1761	1600	1700
武夷山主峰黄岗山	117.78	27.86	0.1	19.0	9.57	2293	1750	2000
贵州梵净山	108.69	27.92	-2.6	17.2	7.52	1525	2240	2400
浙江北山	119.91	29.06	4.0	27.3	15.70	1549	800	1310
湖北星斗山	109.13	30.03	1.2	22.0	11.80	1524	1600	1751
安徽清凉峰	118.86	30.10	-2.4	19.4	8.72	1969	1580	1730
安徽黄山光明顶	118.16	30.13	-2.4	18.6	8.46	2229	1500	1650
浙江龙王山	119.40	30.38	-1.7	21.1	9.83	1681	1400	1587
河南伏牛山玉皇顶	111.82	33.64	-5.5	18.2	6.68	974	1900	2100
河南伏牛山老君山	111.64	33.72	-6.5	17.1	5.54	999	2000	2200
小秦岭老鸦岔脑	111.40	34.40	-1.8	24.9	12.14	604	1900	2000

降水量基本上在 1500~2300 mm 之间。已有的研究表明,亚热带常绿阔叶林的上限常常与最冷月均温-2~1℃等温线相当(Wolfe, 1980; Ohsawa, 1990),最冷月气温对常绿阔叶林上限分布具有重要的影响,这也是这些山顶发育了苔藓矮曲林的一个重要原因。同寒温性矮曲林的气温和降水量相比,山顶苔藓矮曲林分布区的气温略高,但降水量较大。湿冷多雾、强风、土壤贫瘠是山顶苔藓矮曲林形成的重要影响因素(吴征镒, 1995)。

3.2.2 山顶效应是矮曲林发育的重要影响因素

无论是寒温性矮曲林,还是亚热带山顶苔藓矮曲林,绝大部分矮曲林分布在本来可以发育山地森林带的地方,但由于山顶或山脊的大风与贫瘠陡峭的地表,因而只能发育矮曲林。从表 1 和表 2 中最热月(7 月份)气温和年降水量来看,无论是寒温性矮曲林还是山顶苔藓矮曲林发育的山顶,最热月平均气温都远远大于 10℃,年降水量>500 mm,可满足森林发育的热量和水分条件(Troll, 1973),但都没有进一步发育山地森林。除最冷月气温和年均温较低的限制和影响外,山顶效应在矮曲林的形成和发育中起着重要的作用(吴征镒等, 1980; Leuschner, 1996; Holtmeier et al, 2005)。首先,这些相对孤立的山顶或山脊,山风极其强烈,树木多匍匐在地生长或形成旗树;其次,这些山顶的土壤非常贫瘠,不仅土层薄,而且土壤中的有机质含量和矿物质等也非常少(Grubb, 1971);此外,中国亚热带山地多雾和日照少、湿度大,也是山顶苔藓矮曲林发育的重要影响因素。因此,矮曲林在生态学上标志着山地森林带的上限,但其下限并不是真正的林线或气候林线,而是指由于山体的高度或山顶效应的影响,出现的一种特殊的植物群落,也可称为假林线,具有重要的生态意义。

从植物区系和演化来看,山顶苔藓矮曲林是中国亚热带山地常绿阔叶林和热带山地季风常绿阔叶林在山顶效应这种极端环境下长期演化而来;而寒温性矮曲林则是中国寒温性针叶林或针阔混交林等在山顶效应的环境性逐渐演化形成的植物群落。总的来讲,矮曲林是地带性植被在山顶效应这种非地带性因素的影响下形成的一种特殊植被类型,也有人称其为地形顶极、半地带性的植被类型(叶居新, 1994)。矮曲林的出现也表征了山顶效应的存在,在地理学上具有重要的研究意义。另外,由于矮曲林分布的海拔较高,较少受到的人类干

扰,多数群落保留了较原始的状态,这为研究中国山地植被的基本分布和生态等提供了一个很好的对象。

3.2.3 矮曲林对中国东南部山地林线研究的意义

根据已有的研究和文献资料,中国东南部山地的林线除台湾玉山的林线高度可达 3600 m 外,一般都在 2000 m 以下,个别山地的林线能达到 2000 m 以上。但按照气温和降水条件,中国东南部的气候林线可以达到 2200~3600 m(张百平等, 2015),部分研究估算的中国东南部的气候林线可达 3000~4000 m(蒋复初等, 2004),但实际林线远低于气候林线(图 2)。中国东南部地区由于处于东南季风影响区,并且很多山地高度小于 3000 m,山顶效应作用明显,矮曲林发育,造成了假林线的普遍存在。这也可从另一个侧面解释了为何中国东南部林线远远低于西南部的林线高度。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 中国的矮曲林主要包括山顶苔藓矮曲林和寒温性偃松矮曲林和岳桦矮曲林;其中,秦巴山区是一条重要的分界线,以南的广大亚热带、热带山

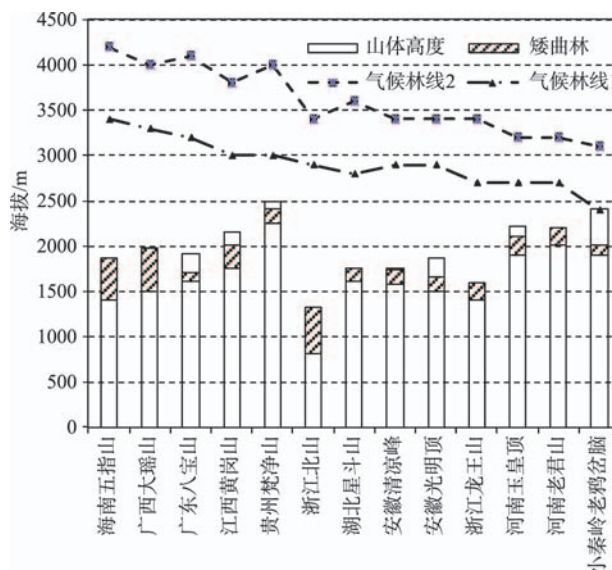


图2 中国东南部部分山地的气候林线及矮曲林分布高度(气候林线1引自张百平等(2015),气候林线2引自蒋复初等(2004))

Fig.2 Climate forest line and the distribution altitude of cripple-tree forest for mountains in southeastern China (climate forest line 1 was cited from Zhang et al (2015); climate forest line 2 was cited from Jiang et al (2004))

地主要分布山顶苔藓矮曲林,而偃松矮曲林和岳桦矮曲林则主要分布于东北地区。秦巴山区是中国亚热带和温带的分界线,再向北,由于气温较低,因而限制了山顶苔藓矮曲林向北发展。

(2) 山顶苔藓矮曲林主要由亚热带、热带地区的常绿阔叶林在山顶或山脊受山顶效应等的影响演化而来;而寒温性矮曲林(偃松矮曲林和岳桦矮曲林)则主要由寒温性针叶林或针阔混交林在山顶或山脊条件下长期演化而来。山顶苔藓矮曲林自东向西随地势升高,其分布的海拔高度也逐渐升高,寒温性偃松矮曲林和岳桦矮曲林分布的海拔高度自南向北逐渐降低。

(3) 山顶效应即山顶或山脊强风、较低的气温及贫瘠的土壤等生境条件,是矮曲林形成的主导因素。无论是热带、亚热带山顶苔藓矮曲林,还是寒温性偃松矮曲林和岳桦矮曲林,都是在山脊或山顶地带,由于山风大且气温低、土层瘠薄、岩石裸露的生境条件下,由适应山顶这种严酷生存条件的树种经过长期自然演化而形成的。

(4) 矮曲林的分布位置远低于气候林线,其下限并非真正的林线或气候林线。矮曲林分布区的年降水和最热月气温都表明其环境条件是可以发育森林的(年降水量 $>500\text{ mm}$,最热月平均气温都远远大于 10°C)。中国东南部的很多山地高度小于 3000 m ,山顶效应作用明显,矮曲林发育,造成了假林线的普遍存在。

4.2 讨论

(1) 矮曲林形成的生境非常特殊,山顶效应起着非常重要的作用,但由于局地的气候因素难以获取,相关研究较少。目前,随着观测手段和仪器设备的提升,有条件进行较为详细的调查研究。首先,通过测风仪、测温仪、土壤水分自动监测系统,可以获取包括风速、气温、日照、湿度、土壤条件等的观测数据;另外,由于遥感热红外技术的发展,为快速精确地获取地表温度、降水等创造了条件,尤其是将调查观测数据与遥感热红外数据相结合,可以反演矮曲林发育的气候环境条件,从而对矮曲林发育环境进行详细研究。同时,山顶效应的影响研究,对于揭示中国东部林线的分布特征具有重要的意义,也是自然地理学非地带性作用的重要研究内容。

(2) 本文所用的数据均来源于已发表的文献资料,由于一部分数据并没有提供精确的经纬度坐

标,可能在空间定位上有些误差,但从宏观区域尺度上来看,所得结果仍可反映矮曲林在中国的总体分布趋势。此外,由于收集到的数据多来自垂直带谱研究的相关文献资料,本文没有详细地研究矮曲林的物种组成、植物的区系组成等群落特征。另外,文献数据基本上都是20世纪80年代以前的调查数据,在人类活动和气候变化的影响下,矮曲林的分布也相应地发生变化,迫切需要最新的详细调查数据加以补充。尤其是在数据比较稀缺的西部地区以及2类矮曲林的过渡带地区(秦巴山区)更应该开展详细调查,获取最新的矮曲林分布数据。鉴于矮曲林生境的独特性和分布的特殊性,在详细调查的基础上,只有对其生境和分布规律进行系统、深入地研究,才能进一步揭示矮曲林的生态意义。

参考文献(References)

- 符国瑗, 冯绍信. 1995. 海南五指山森林的垂直分布及其特征[J]. 广西植物, 15(1): 57-69. [Fu G A, Feng S X. 1995. The vertical distribution and characteristics of forest of Wuzhishan, Hainan[J]. Guihaia, 15(1): 57-69.]
- 广西大瑶山自然资源综合考察队. 1988. 广西大瑶山自然资源考察[M]. 上海: 学林出版社. [Comprehensive Investigation Team of Natural Resources for the Dayaoshan in Guangxi. 1988. Guangxi Dayaoshan ziran ziyuan kaocha [M]. Shanghai, China: Forestry Press.]
- 侯学煜. 1982. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京: 科学出版社. [Hou X Y. 1982. Zhongguo zhibei dili ji youshi zhiwu huaxue chengfen[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 侯学煜. 1988. 中国自然地理: 植物地理(下册)[M]. 北京: 科学出版社. [Hou X Y. 1988. Zhiwu dili (II) [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 蒋复初, 吴锡浩, 王书兵, 等. 2004. 中国大陆森林线空间分布特征及其与多年冻土线、气候雪线的关系[J]. 地质力学学报, 10(4): 289-299. [Jiang F C, Wu X H, Wang S B, et al. 2004. Features of space distribution of the forest line and relations between the forest line and climatic limit of permafrost and climatic snowline in China[J]. Journal of Geomechanics, 10(4): 289-299.]
- 刘华训. 1981. 我国山地植被的垂直分布规律[J]. 地理学报, 36(3): 267-279. [Liu H X. 1981. The vertical zonation of mountain vegetation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 36(3): 267-279.]
- 彭华, 吴征镒. 1998. 无量山中山湿性常绿阔叶林及其植物

- 区系的初步研究[J]. 云南植物研究, 20(1): 12-22. [Peng H, Wu Z Y. 1998. The preliminary floristical study on mid-montane humid evergreen broad-leaved forest in Mt. Wuliangshan[J]. Acta Botanica Yunnanica, 20(1): 12-22.]
- 施济普. 2007. 云南山顶苔藓矮林群落生态学与生物地理学研究[D]. 云南: 中国科学院研究生院. [Shi J P. 2007. Community ecology and biogeography of the mossy dwarf forest in Yunnan[D]. Yunnan, China: Graduate School of Chinese Academy of Sciences.]
- 宋军, 李伟, 王军, 等. 2005. 白石砬子山南北坡森林植被垂直分布的研究[J]. 辽宁林业科技, (4): 18-21, 49. [Song J, Li W, Wang J, et al. 2005. Forest vegetation vertical distribution in south and north slopes of Baishilazi Mountain[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, (4): 18-21, 49.]
- 王映明. 1995a. 湖北植被地理分布的规律性(上)[J]. 武汉植物学研究, 13(1): 47-54. [Wang Y M. 1995a. The geographically distributional regularity of the vegetation in Hubei Province (I) [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 13(1): 47-54.]
- 王映明. 1995b. 湖北植被地理分布的规律性(下)[J]. 武汉植物学研究, 13(2): 127-136. [Wang Y M. 1995a. The regularity of geographical distributions of the vegetation in Hubei Province (II) [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 13(2): 127-136.]
- 吴征镒. 1995. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社. [Wu Z Y. 1995. Zhongguo zhibei[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 吴征镒, 侯学煜. 1980. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社. [Wu Z Y, Hou X Y. 1980. Zhongguo zhibei[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 吴征镒, 朱彦丞, 姜汉侨. 1987. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社. [Wu Z Y, Zhu Y C, Jiang H Q. 1987. Yunnan vegetation[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 谢寿昌. 1987. 云南景东哀牢山山顶苔藓矮林优势种: 倒卵叶石栎[J]. 植物学报, 29(3): 331-335. [Xie S C. 1987. The dominant species of the dwarfing mossy forest on the summit of Mt. Ailao in Jingdong, Yunnan: *Lithoc Arpus Pachyphyloides*[J]. Acta Botanica Sinica, 29(3): 331-335.]
- 徐捷, 王希华. 2010. 中国山顶苔藓矮曲林的分布及其特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, (4): 44-57. [Xu J, Wang X H. 2010. Distribution and characteristics of the mossy dwarf forests in China[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, (4): 44-57.]
- 杨小波, 林英, 梁淑群. 1994. 海南岛五指山的森林植被 I: 五指山的森林植被类型[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 12(3): 220-236. [Yang X B, Lin Y, Liang S Q. 1994. The forest vegetation of Wu-zhi Shan Mountain in Hainan Island I: The forest vegetation types of Wu-zhi Shan Mountain in Hainan Island[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 12(3): 220-236.]
- 杨小波, 林英, 梁淑群. 1995. 海南岛五指山的森林植被 II: 五指山森林植被的植物种群分析与森林结构分析[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 12(4): 311-323. [Yang X B, Lin Y, Liang S Q. 1995. The forest vegetation of Wu-zhi Shan Mountain in Hainan Island II: The plant population analysis of forest structures analysis of the vegetation Wu-zhi Shan Mountain in Hainan Island[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 12(4): 311-323.]
- 叶居新. 1994. 中国的猴头杜鹃矮林[J]. 武汉植物学研究, 12(2): 170-174. [Ye J X. 1994. On the Rhododendron Simiarum elfin forest of China[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 12(2): 170-174.]
- 叶永忠, 杨清培, 翁梅, 等. 1999. 伏牛山森林群落物种多样性研究 I: 群落垂直分布与物种丰富度[J]. 河南科学, 17(增刊 1): 61-64. [Ye Y Z, Yang Q P, Weng M, et al. 1999. Studies on forest community diversity in Funiushan Mountain I: Vertical distribution of community and species richness[J]. Henan Science, 17(S1): 61-64.]
- 张百平, 姚永慧. 2015. 山体效应研究[M]. 北京: 中国环境出版社. [Zhang B P, Yao Y H. 2015. Studies on mass elevation effect[M]. Beijing, China: China Environment Press.]
- 张金泉. 1993. 广东乳阳八宝山自然保护区的植被特点[J]. 生态科学, (1): 39-124. [Zhang J Q. 1993. Vegetation characters of the Ruyang Babao Mountain Nature Reserve, Guangdong Province[J]. Ecological Science, (1): 39-124.]
- 赵松乔. 1983. 我国山地环境的自然特点及开发利用[J]. 山地学报, 1(3): 1-9. [Zhao S Q. 1983. Physical feature of China's mountain environment and economic problem of its utilization[J]. Mountain Research, 1(3): 1-9.]
- 郑度. 1975. 珠穆朗玛峰地区的自然带气候特征[M]//珠穆朗玛峰地区科学考察报告. 北京: 科学出版社. [Zheng D. 1975. Zhumulamafeng diqu de zirandai qihou tezheng[M]// Zhumulamafeng diqu kexue kaocha baogao. Beijing, China: Science Press.]
- 郑远昌, 高生淮. 1984. 略论川西山地的自然垂直带[J]. 山地学报, 2(4): 237-244. [Zheng Y C, Gao S H. 1984. Trial discussion on the vertical natural zone of the mountains in

- west Sichuan[J]. Mountain Research, 2(4): 237-244.]
- 中国科学院植物研究所. 1988. 西藏植被[M]. 北京: 科学出版社. [Institute of Plant Science, Chinese Academy of Sciences. 1988. Xizang zhibei[M]. Beijing, China: Science Press.]
- Baig M N, Tranquillini W. 1976. Studies on upper timberline: Morphology and anatomy of Norway spruce (*Picea abies*) and stone pine (*Pinus cembra*) needles from various habitat conditions[J]. Canadian Journal of Botany, 54(14): 1622-1632.
- Clausen J. 1963. Tree lines and germ plasm-a study in evolutionary limitations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 50(5): 860-868.
- Daubenmire R F. 1943. Vegetational zonation in the Rocky Mountains[J]. The Botanical Review, 9(6): 325-393.
- Ellenberg H. 1978. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen [M]. Stuttgart, Germany: Ulmer.
- Ellenberg H. 1988. Vegetation ecology of central Europe[M]. New York: Cambridge University Press.
- Grubb P J. 1971. Interpretation of the 'Massenerhebung' effect on tropical mountains[J]. Nature, 229: 44-45.
- Hegi G. 1958. Alpenflora[M]. München, Germany: Verlag Der Wissenschaften.
- Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 25(15): 1965-1978.
- Holtmeier F K. 1981. What does the term 'krummholz' really mean? Observations with special reference to the Alps and the Colorado Front Range[J]. Mountain Research and Development, 1(3-4): 253-260.
- Holtmeier F K, Broll G. 2005. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales[J]. Global Ecology and Biogeography, 14(5): 395-410.
- Hutchins L W. 1947. The bases for temperature zonation in geographical distribution[J]. Ecological Monographs, 17(3): 325-335.
- Ives J D. 1973. Studies in high altitude Geocology of the Colorado Front Range: A review of the research program of the Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado[J]. Arctic and Alpine Research, 5(3): A67-A75.
- Körner C, Paulsen J. 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures[J]. Journal of Biogeography, 31(5): 713-732.
- Leuschner C. 1996. Timberline and alpine vegetation on the tropical and warm-temperate oceanic islands of the world: Elevation, structure and floristics[J]. Vegetation, 123(2): 193-206.
- Marr J W. 1977. The development and movement of tree islands near the upper limit of yree growth in the Southern Rocky mountains[J]. Ecology, 58(5): 1159-1164.
- Ohsawa M. 1990. An interpretation of latitudinal patterns of forest limits in South and East Asian mountains[J]. Journal of Ecology, 78(2): 326-339.
- Sakai A. 1975. Freezing resistance of evergreen and deciduous broad-leaf trees in Japan with special reference to their distributions[J]. Japanese Journal of Ecology, 25(2): 101-111.
- Schröeter C. 1908. Das pflanzenleben der Alpen: Eine schilderung der hochgebrigsflora[M]. Zurich, Switzerland: Verlag von Albert Raustein.
- Troll C. 1972. The three-dimensional zonation of the Himalayan system[M]//Troll C. Geoecology of the high-mountain regions of Eurasia. Wiesbaden, Germany: Franz Steiner Verlag GmbH.
- Troll C. 1973. The upper timberlines in different climatic zones [J]. Arctic and Alpine Research, 5(3): 3-18.
- Tuhkanen S. 1980. Climatic parameters and indices in plant geography[M]. Uppsala, Sweden: Acta Phytogeographica Suecica, 67: 105.
- Wardle P. 1965. A comparison of alpine timber lines in New Zealand and North America[J]. New Zealand Journal of Botany, 3(2): 113-135.
- Wardle P. 1971. An explanation for alpine timberline[J]. New Zealand Journal of Botany, 9(3): 371-402.
- Wardle P. 1973. New Zealand timberlines[J]. Arctic and Alpine Research, 5(3): A127-A135.
- Wolfe J A. 1980. Tertiary climates and floristic relationships at high latitudes in the Northern Hemisphere[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 30: 313-323.

Geographical distribution of cripple tree forest and its importance for forest line in China

YAO Yonghui¹, ZHANG Baiping^{1,2*}, ZHAO Chao^{1,3}

(1. State key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cripple trees that often lie between the upper montane forest and the alpine belt and normally grow at isolated summit locations or mountain ridges is a type of vegetation community shaped by the severe environmental conditions or the summit syndrome. The classification of cripple trees and their geographical distribution are important for the study of mountain altitudinal belts and mountain environment. Based on 52 cripple-tree datasets published in the literature since the 1930s and the climate data of Worldclim, this study analyzed the spatial distribution characteristics of cripple trees in China and their importance for identifying forest lines. The results show that: (1) Cripple trees in China are mainly consisted of mossy cripple trees and cold temperate cripple trees (including the *Pinuspumila* cripple trees and the *Betulaermanii* cripple trees). The Qinling-Daba Mountains are the boundary between mossy cripple trees and cold temperate cripple trees. Mossy cripple trees are distributed to the south of the Qinling-Daba mountain area, and cold-temperate cripple trees are distributed in northeast China. (2) With the increase of relief from east China to the west, the distribution altitude of mossy cripple trees increases gradually. The distribution altitude of mossy cripple trees on the southeast coast of China (Guangdong, Fujian, and Zhejiang) is about 800~1200 m, and west into the inland region such as west Zhejiang, Anhui, Jiangxi, Hubei, and Hunan, the altitude increases to about 1000~1800 m; in Chongqing, Guizhou, and Yunnan, the altitude increases to about 1500~3000 m, and higher than 3000~4500 m in the southeast of the Tibetan Plateau and the Himalayas. (3) The distribution altitude of the cold temperate cripple trees decreases from south to north. The distribution altitude of the *Pinuspumila* cripple trees decreases from 1400~1520 m at the Aokulidui Mountain to 1240 m at the Baikal Mountain in the Greater Khingan Range; the altitude of the *Betulaermanii* cripple trees decreases from 1800~2100 m at the Changbai Mountain to 1100~1300 m at the Lesser Khingan Mountains. (4) The summit syndrome (strong winds, lower temperatures, and poor soils on the mountain summits or ridges) controls the formation of cripple trees. Mossy cripple trees are evolved from the subtropical montane evergreen broad-leaved forests or the tropical montane monsoon evergreen broad-leaved forests under the influence of the summit syndrome, and cold temperate cripple trees are evolved from the cold temperate coniferous forests or the coniferous and broad-leaved mixed forests in China under the influence of the summit syndrome. (5) The distribution altitude of cripple trees is often lower than the location of the forest climate line; their lower limits are not real forest line or climate forest line. Temperature in the warmest month (July) and annual precipitation for the distribution area of cripple trees (greater than 10°C and above 500 mm) verify that the climate condition of the cripple-tree distribution area can be suitable for forest growing. Most mountains in southeastern China are lower than 3000 m and cripple trees are present under the influence of the summit syndrome, therefore the forest lines in southeast China normally are not the real forest lines.

Key words: mossy cripple trees; *Pinuspumila* cripple trees; *Betulaermanii* cripple trees; forest line; geographical distribution; the summit syndrome