

祁连山北坡青海云杉中龄林结构随海拔的变化

张雷¹, 于澎涛^{1*}, 王彦辉¹, 王顺利², 刘贤德², 金铭², 张学龙²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要:在祁连山北坡中段的大野口流域, 沿海拔梯度(2 500~3 300 m)调查了青海云杉中龄林的结构, 并分海拔段(每100 m)进行统计。结果表明:1) 研究区森林密度较大但树木个体较小, 密度、胸径、树高和冠幅直径(平均值±SD)分别为 $1\,550 \pm 628$ 株·hm⁻²、 13.9 ± 6.2 cm、 8.1 ± 3.7 m和 3.3 ± 1.7 m。随海拔升高, 密度降低、平均胸径和冠幅直径增加, 平均树高呈“单峰”变化, 峰值在海拔2 800~2 900 m。2) 研究区森林的径级组成以小树(DBH: 5~12.5 cm)和中树(DBH: 12.5~22.5 cm)为主, 树高(H)以6~12 m的树木为主。随海拔升高, 林内幼树(DBH≤5 cm)比例基本稳定, 小树比例略有下降, 中树比例呈“单峰”变化, 峰值在2 800~2 900 m, 大树(DBH>22.5 cm)比例增加。H≤6 m的树木比例呈“V”字型变化, 在海拔2 800~2 900 m最低, H为6~12 m和H>12 m的树木比例均呈“单峰”变化, 峰值分别在海拔2 600~2 700 m和海拔2 800~2 900 m。3) 林分高径比介于0.45~0.73, 胸高断面面积介于7.86~33.32 m²·hm⁻², 随海拔升高两者均呈“单峰”变化, 峰值在海拔2 800~2 900 m。分析表明, 随海拔升高, 青海云杉林的结构呈明显变化, 并在中间海拔区(海拔2 800~2 900 m)达到最优。因此, 分海拔区段建立森林结构与水文过程的定量关系并进行生态水文模型的参数设置十分必要。

关键词:青海云杉林; 森林结构; 海拔; 祁连山

中图分类号: S715

文献标识码: A

Altitudinal Changes in Structure of Middle-aged *Picea crassifolia* Forests on the Northern Slope of the Qilian Mountains

ZHANG Lei¹, YU Peng-tao¹, WANG Yan-hui¹, WANG Shun-li², LIU Xian-de², JIN Ming², ZHANG Xue-long²

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountain of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: The structures of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in Dayekou watershed on the northern slope of Qilian Mountains were studied along the altitude from 2 500~3 300 m, and the values were calculated with sub-segment elevation (per 100 m a. s. l.). The results are as follows. (1) The forest density was high while the trees were relatively small in the study area. The forest density, DBH, H and crown diameter of stands were $1\,550 \pm 628$ trees·hm⁻², 13.9 ± 6.2 cm, 8.1 ± 3.7 m and 3.3 ± 1.7 m, respectively. With the elevation increasing, the forest density, the average DBH and the crown diameter decreased. The average H showed a “unimodal” change. (2) The saplings (DBH 5~12.5cm) and middle trees (DBH 12.5~22.5cm) were predominant in the forests, and the height of trees were about 6~12 m. With the elevation increasing, the percentage of seedlings (DBH≤5 cm) in forest showed a basic stability, the percentage of saplings decreased slightly, the percentage of middle trees showed a “unimodal” change, which peaked at 2 800~2 900 m a. s. l., the percentage of big trees (DBH >

收稿日期: 2014-10-10

项目基金: 国家自然科学基金项目(91225302, 31360201, 91425301)

作者简介: 张雷, 男, 硕士研究生。主要研究方向: 森林水文, 森林生态。E-mail: jackyutian@126.com

* 通讯作者: 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 森林水文, 生态水文模型。E-mail: yupt@caf.ac.cn

22.5 cm) increased. The percentage of the stands ($H \leq 6$ m) showed a “V” shaped change, which the minimum value appeared at 2 800 ~ 2 900 m a. s. l. . The percentages of the stands ($H: 6 \sim 12$ m) and the stands ($H > 12$ m) showed “unimodal” changes, peaking at 2 600 ~ 2 700 m and 2 800 ~ 2 900 m a. s. l. , respectively. (3) The ratio of height to diameter ranged from 0.45 ~ 0.73 and the breast - height basal area ranged from 7.86 ~ 33.32 $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, with the elevation increasing, both of them showed a “unimodal” change, which peaked at 2 800 ~ 2 900 m a. s. l. . Analysis shows that the stand density, moisture and temperature conditions were leading to the differentiation of the growth in tree diameter and height. The middle segment elevation (2 800 ~ 2 900 m a. s. l.) is the most suitable area for Qinghai spruce forests distribution in this area.

Key words: *Picea crassifolia* forests; forest structure; elevation; Qilian Mountains

山地森林结构不但影响森林本身的稳定性、发育方向和经营价值^[1-3],更强烈影响着山区的水文过程和产水量^[4-6]。然而,随海拔升高,山区的生境条件会发生明显变化,如温度降低和降水增加等^[7],从而导致山地森林结构发生改变^[8,9],进而影响到山区水文功能。祁连山区作为我国第二大内陆河 - 黑河的发源地,其产水功能对我国西北干旱地区的用水安全至关重要^[10]。欲了解和预测祁连山的产水能力则首先需要了解其森林植被的特点,特别是山区森林结构随海拔高度的变化规律。这是评价祁连山区水文过程、产水量及其空间差异的重要基础,同时也为黑河流域分布式生态水文模型的建立提供技术参数,使黑河流域水 - 土 - 植被的综合管理成为可能。

青海云杉(*Picea crassifolia*)林是祁连山区主要的森林类型,面积占该区乔木林总面积的75.7%^[11],垂直分布范围广泛,海拔跨度自2 500 ~ 3 300 m^[12]。因此,随着温度、降水等生境条件的海拔变化^[6],森林结构也将发生改变。然而,以往对于青海云杉林结构的研究多是在样地尺度上分析其种群或群落的结构^[13-17],或是祁连山东、中、西段的种群结构差异^[18]及平均状况^[19]。在海拔梯度上开展的研究却很少,重点也仅关注于种群分布格局这一指标^[11,12]。由此可见,目前对青海云杉林结构随海拔变化的研究尚不完善,关于海拔梯度对林分密度、树木胸径和树高等结构指标的影响也不清楚。这成了确定森林结构与山区水文过程定量关系的瓶颈,阻碍了对祁连山区产水能力的大小和空间差异的预测与评价。

因此,本文以祁连山中段北坡为例,在青海云杉林分布的垂直范围(海拔2 500 ~ 3 300 m)内,通过样地调查,分析和确定青海云杉林结构随海拔高度

的变化规律。以期为祁连山区森林结构与水文过程的定量关系的研究提供基础,同时为黑河流域生态水文模型的建立提供技术参数。

1 研究区概况

祁连山地处中国西北内陆(93°20' ~ 103° E, 36°30' ~ 39°30' N),位于青藏高原、黄土高原和蒙新荒漠的交汇处,是河西走廊南侧边缘山地,海拔最高为5 826.8 m。祁连山地区属于典型的大陆性气候,气候因子随海拔梯度变化显著。因此,植被分布呈明显的垂直地带性,从低海拔到高海拔依次为荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带、山地森林草原植被带、亚高山灌丛草甸植被带、高山寒漠草甸植被带。

研究区设在祁连山中段,位于祁连山水源涵养林生态系统定位研究站西水试验区的大野口小流域内(100°13' ~ 16' E, 38°16' ~ 33' N)。研究区地属天然林保护区,森林受人为干扰的影响很小,仅有部分地区受放牧活动影响。试验区海拔变化在2 400 ~ 4 000 m,属高寒干旱半干旱气候。流域年均气温为5.4℃,最高月平均气温19.6℃,最低月平均气温~12.5℃,年降水量为300 ~ 500 mm,年均蒸发量1 488 mm。土壤主要为山地森林灰褐土、山地栗钙土和亚高山灌丛草甸土,总体特征是土层薄、质地粗,成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色砂页岩等;土壤有机质含量中等,pH值7.0 ~ 8.0。山地森林主要分布在海拔2 500 ~ 3 300 m的阴坡、半阴坡地区,多为青海云杉纯林。林下灌木以箭叶锦鸡儿(*Cargana jubata*)、高山柳(*Salix cupularis*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)和金露梅(*Potentilla fruticosa*)为主,草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa* spp.),林下苔藓主要

有山羽藓(*Abietinella abietina*)等。

2 研究方法

2.1 样地布设

在青海云杉林的分布范围内(海拔 2 500 ~ 3 300 m),选取未受放牧、采伐、林火和病虫害等干扰的典型林分,沿海拔梯度布设样地,共 36 块。其中在森林生长较好的海拔 2 600 ~ 3 200 m 范围内,每 100 m 布设 3 ~ 8 块样地,在森林生长较差的海拔上限(海拔 3 200 ~ 3 300 m)和下限(海拔 2 500 ~ 2 600 m)位置,各布设 2 块样地。样地大小为 20 m × 20 m 或 25 m × 25 m。记录每个样地的海拔高度、坡度、坡向、土壤厚度等生境特征(表 1)。

表 1 样地概况

海拔/m	样地数量	坡向	坡度/°	土厚/cm
2 500 ~ 2 600	2	N	36 ~ 41	40 ~ 65
2 600 ~ 2 700	3	N, NE	33 ~ 43	40 ~ 70
2 700 ~ 2 800	7	N	12 ~ 32	60 ~ 130
2 800 ~ 2 900	8	N, NE	12 ~ 50	60 ~ 80
2 900 ~ 3 000	6	N, NE	15 ~ 34	40 ~ 80
3 000 ~ 3 100	4	N	20 ~ 30	40 ~ 80
3 100 ~ 3 200	4	N	23 ~ 36	40 ~ 60
3 200 ~ 3 300	2	N	34 ~ 35	40 ~ 60

调查样地分布在阴坡或半阴坡,所在坡面的坡度多为 20 ~ 40°,土厚多为 40 ~ 80 cm。样地所在的微地形并不一致,有平缓坡面、凹型坡面、凸型坡面及小山头和小山脊等。

2.2 植被调查

调查林分的郁闭度、密度、年龄。对胸径(*DBH*)

< 1 cm 的树木,量测其高度;对 *DBH* ≥ 1 cm 的树木,测量其胸径和冠幅,记录生长状况(枯立或正常),并用激光测高仪(*Trupulse 200*, *Laser Technology, Inc. Colorado, USA*)测量高度。在样地内选取 3 ~ 5 株平均木,用生长锥钻取树芯,通过数年轮来获得树龄及林龄。记录样地内的林下灌木、草本和苔藓层的盖度。

2.3 数据分析

2.3.1 树木等级划分 根据青海云杉生活史特点,按胸径大小划分为 4 个等级^[19],即:胸径(*DBH*) ≤ 5 cm 为幼树,5 ~ 12.5 cm 为小树,12.5 ~ 22.5 cm 为中树, > 22.5 cm 为大树。由于各海拔段的树高 - 胸径关系并不统一(表 2),无法通过胸径反映树高的海拔变化。所以,本文基于研究区内青海云杉林的树高特征,以 6 m 为间隔将林木分三层统计,即树高(*H*) ≤ 6 m 为下层,6 ~ 12 m 为中层, > 12 m 为上层。

2.3.2 数据处理 文中数据分析在 EXCEL 和 SPSS19.0 下完成。

3 结果与分析

3.1 林分结构基本特征

由表 2 可知,研究区内青海云杉林的密度大,为 $1\ 550 \pm 628$ 株 · hm^{-2} ,林冠郁闭度良好,为 0.7 ± 0.2 。林龄较小,为 80 ± 9 a,属中龄林。受林龄小的影响,林分平均胸径和树高均不大,分别为 13.9 ± 6.2 cm 和 8.1 ± 3.7 m。林分冠幅直径较小,为 3.3 ± 1.7 m,这主要受密度较大的影响。

表 2 青海云杉林结构

海拔/m	密度/(株 · hm^{-2})	林冠郁闭度	林龄/a	胸径/cm	树高/m	冠幅直径/m
2500 ~ 2 600	1 375 ± 460	0.48 ± 0.11	70 ± 4	11.6 ± 0.4	6.7 ± 0.3	3.01 ± 0.41
2600 ~ 2 700	2 017 ± 850	0.71 ± 0.09	77 ± 4	11.1 ± 1.2	7.3 ± 1.3	2.95 ± 0.43
2700 ~ 2 800	1 659 ± 671	0.69 ± 0.12	81 ± 11	13.8 ± 2.3	8.9 ± 1.2	2.92 ± 0.45
2800 ~ 2 900	1 806 ± 718	0.72 ± 0.1	76 ± 9	14.4 ± 3.1	9.4 ± 2.1	3.41 ± 0.74
2900 ~ 3 000	1 694 ± 432	0.7 ± 0.1	79 ± 6	12.9 ± 0.9	7.3 ± 1.4	3.02 ± 0.37
3000 ~ 3 100	1 538 ± 578	0.66 ± 0.1	85 ± 10	13.5 ± 1.1	6.8 ± 0.3	3.48 ± 0.45
3100 ~ 3 200	950 ± 140	0.67 ± 0.09	90 ± 6	17.9 ± 2.8	8.3 ± 1.4	4.3 ± 0.41
3200 ~ 3 300	322 ± 40	0.22 ± 0.03	86 ± 3	15.2 ± 1.4	6 ± 0.6	4.18 ± 0.52
平均值	1 550 ± 628	0.7 ± 0.2	80 ± 9	13.9 ± 6.2	8.1 ± 3.7	3.3 ± 1.7

* 表格中数值为平均数 ± 标准差(SD)

随海拔升高,林分密度随海拔上升呈下降趋势($P < 0.05$)。在海拔 2 600 ~ 3 100 m 林分密度普遍较大,为 $1\ 500$ 株 · hm^{-2} 以上,其中,在海拔 2 600 ~ 2 700 m 密度最大,可达 $2\ 017 \pm 850$ 株 · hm^{-2} 。在

森林分布的上(3 200 ~ 3 300 m)、下限(2 500 ~ 2 600 m)地带,密度较小,尤其到海拔 3 200 ~ 3 300 m 的高海拔区,林分密度仅为 322 ± 40 株 · hm^{-2} 。

郁闭度随海拔的变化趋势与密度基本相同(P

<0.05),表现为在海拔2 600~3 200 m内较大,维持在0.66~0.72,而在上、下林线处明显降低,并在海拔3 200~3 300 m达到最小,为 0.22 ± 0.03 。

青海云杉林的林龄结构单一,林分平均林龄为70~90 a。各海拔区段间的林龄差异不显著($P > 0.05$)。

林分平均胸径随海拔升高呈增加趋势,并随密度减小而增大($P < 0.01$)。在海拔2 600~2 700 m最小,为 11.1 ± 1.2 cm;在海拔3 100~3 200 m最大,为 17.9 ± 2.8 cm。平均树高随海拔升高呈“单峰”变化,在海拔2 800~2 900 m达到最高,为 9.4 ± 2.1 m;在海拔3 200~3 300 m最低,为 6 ± 0.6 m。

树木冠幅直径随海拔上升呈增加趋势($P < 0.01$),在海拔3 100 m以下,冠幅平均直径小于3.5 m,而到海拔3 100 m以上,增加到4 m以上。这主要是因为随海拔上升,林分密度降低的影响($P < 0.01$)。

3.2 树木径级结构及其海拔变化

就整个研究区而言,青海云杉林的径级分布呈明显的“单峰型”(图1)。其中,小树和中树较多,两者在森林中占的数量比例分别为 $39 \pm 11\%$ 和 $37 \pm 12\%$;幼树和大树个体数较少,比例分别为 $10 \pm 6\%$ 和 $14 \pm 11\%$ 。这主要是因为研究区森林林龄小,属于中龄林,所以大树较少。同时,受研究区林分密度和郁闭度较大的影响,林下更新较差,幼树较少。另外,通过比较大、小树数量比例的标准差可知,研究

区内幼树比例的空间差异不大,而大树比例存在较明显的空间差异。这可能是因为研究区内幼树生长普遍受到因郁闭度较大而导致的光照不足的限制,而大树则受多种因素的影响。

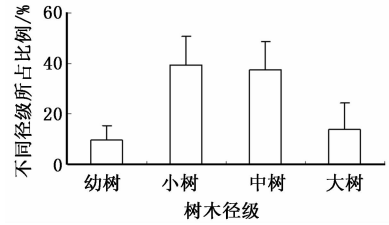


图1 研究区青海云杉林的径级组成

为反映青海云杉林径级结构随海拔的变化,对各海拔的样地分别进行统计(图2)。可以看出,研究区各海拔段内的幼树比例均较低(图2, a),多在10%左右,仅在海拔2 500~2 600 m发育稍好,为 $21 \pm 7\%$,这主要与该区森林的林冠郁闭度普遍较大有关(表2)。小树比例随海拔升高略有下降(图2, b),在海拔2 500~2 600 m处最高,为48%,到海拔3 100~3 200 m最低,为31%。中树比例随海拔升高呈“单峰”变化(图2, c),在2 800~2 900 m最高,为45%,在海拔2 500~2 600 m最低,为19%。大树的株数比例随海拔上升呈增加趋势(图2, d)。在海拔3 000 m以下,大树比例多在10%左右,而到海拔3 000 m以上,大树比例增加到17%以上,并在海拔3 100~3 200 m达到最高,为31%。

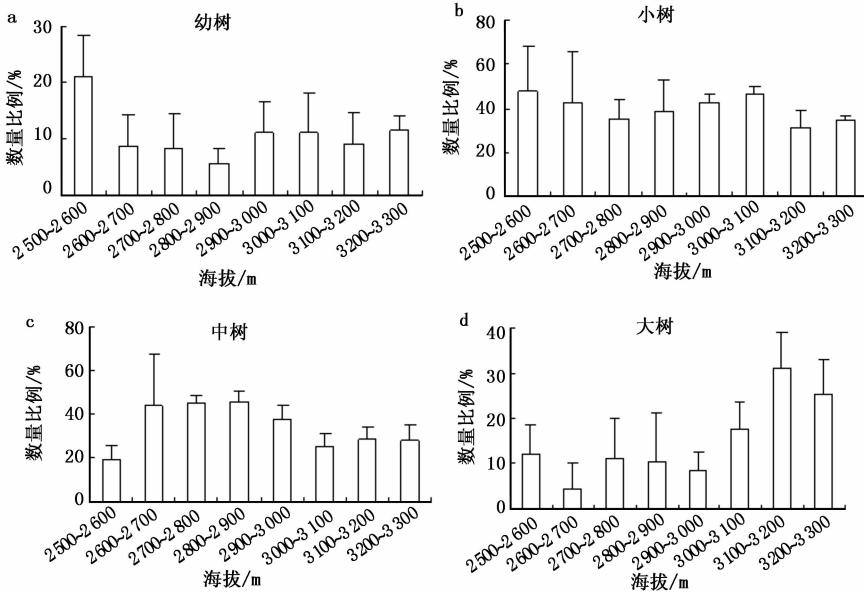


图2 青海云杉林径级结构随海拔的变化

3.3 树高结构及其海拔变化

研究区森林树高的海拔变化与胸径不同。由图3可知, H 为6–12 m的树在研究区森林中占主要部分,其比例为36–68%,平均为 $50 \pm 13\%$ 。随海拔升高,其数量比例呈先增加后降低的“单峰”变化,在海拔2 600–2 700 m达到最高(图3,b)。 H 为0–6 m的树数量次之,所占比例为12–54%,平均为 $26 \pm 16\%$,随海拔升高,呈先降低后增加的“V”型变化,并在海拔2 800–2 900 m处最低(图3,a)。 $H > 12$ m的树数量最少,所占比例仅为11–36%,平均为 $23 \pm 16\%$ 。随海拔上升,其数量比例呈一定的

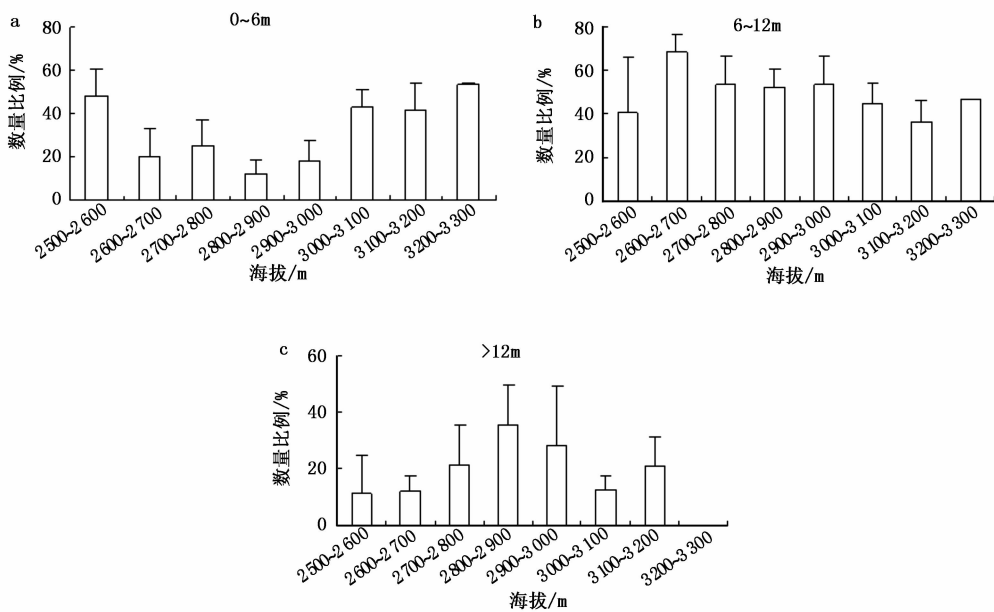


图3 青海云杉林树高结构随海拔的变化

3.4 树木高径比及其海拔变化

林分高径比是指林分平均树高(m)与平均胸径(cm)的比值(m/cm),它决定了林分抵御风雪等灾害的能力,可作为反映林分稳定性大小的结构指标^[20]。研究区内青海云杉林的高径比较为适中,平均值为0.65。随海拔升高,林分高径比呈“单峰”变化(图4)。在海拔2 500–2 600 m的森林分布下限,高径比较小,为0.61。在海拔2 600–2 900 m处高径比增至0.7以上,并在海拔2 800–2 900 m处达到最大,为0.73。到海拔2 900 m以上则随着海拔上升而下降,其中到海拔3 200–3 300 m的高山林线位置,高径比降为最小,仅为0.45,这是因为在森林分布上限,树木的胸径增加而树高降低。

相关分析表明,林分的高径比与林分密度呈显著正相关($P < 0.01$)。随着林分密度增大,高径比

“单峰”变化趋势。在海拔2 800–2 900 m处, $H > 12$ m树的数量比例达到最高,而在森林分布的海拔上、下限,其数量明显减小,到海拔3 200–3 300 m的森林分布上限则几乎没有出现(图3,c),这可能与林线处的生境条件恶劣有关。

通过比较三者的标准差可知, $H < 12$ m树的比例差异较小(图3 a, b),而 $H > 12$ m树的比例差异较大(图3,c)。这在一定程度上说明,在林冠郁闭度良好的情况下,下层和上层木的生长状况差异不大,而上层木则可能因为更易受到林分密度、生境条件等多因素的影响,导致生长状况出现了较大差异。

逐渐增加,两者具有一定的线性关系($R^2 = 0.52$) (图5)。由此可见,密度是决定林分高径比的重要因素。

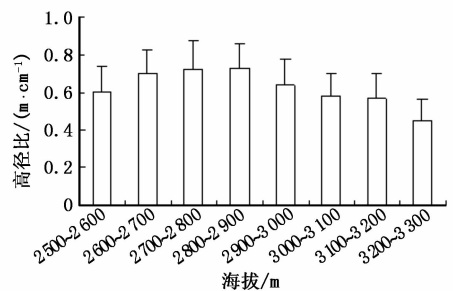


图4 林分高径比随海拔的变化

3.5 林分胸高断面面积及其海拔变化

研究区内青海云杉林胸高断面面积的海拔差异明显,变化于 $7.86 \sim 33.32 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$,平均值为

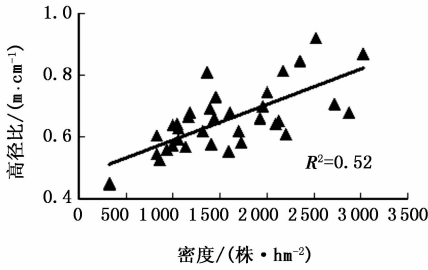


图5 林分高径比与林分密度的关系

24.71 m² · hm⁻² (图6)。随海拔上升,林分胸高断面面积呈“单峰”变化,峰值出现在海拔2 800~2 900 m。与“峰值”所在的中间海拔段相比,森林分布海拔上、下限附近的林分胸高断面面积均较小,但森林分布下限的值(18.66 ± 2.27 m² · hm⁻²)明显高于上限(7.86 ± 1.39 m² · hm⁻²),这主要由于下限的林分密度明显高于上限(表2),同时也说明上限的生境条件较下限更为恶劣。

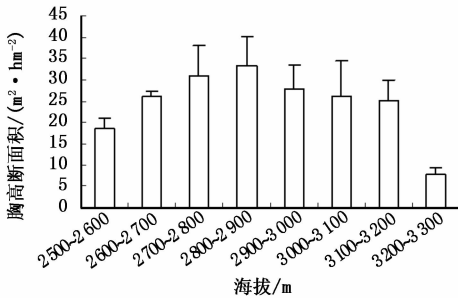


图6 胸高断面面积随海拔的变化

4 讨论

4.1 树高和胸径的生长存在海拔分异

一般而言,树木胸径越大,树高则越高。但在本研究区,随海拔树高,青海云杉的胸径和树高生长的变化趋势却并不一致。其中,树木胸径随海拔上升趋于增大(表2),而树高随海拔上升则呈先增加再降低的“单峰”变化(表2)。具体表现为:大树主要分布在海拔3 000 m以上(图2, d),而树高>12 m的高树主要分布在海拔2 700~3 000 m(图3, c)。这种不一致性可能主要受到林分密度变化的影响。树木胸径与林分密度呈负相关($P < 0.01$),在林分密度最大的海拔2 600~2 700 m,树木平均胸径却最小,而在林分密度较小的地段,如海拔3 100~3 200 m,平均胸径却达到最大(表2)。与胸径相反,高密度往往会促进树高的生长。研究区的高树往往出现在林分密度较大的中间海拔区段,如在海

拔2 700~2 900 m,林分平均树高可达9 m左右(表2),并且 $H > 12$ m的树也主要集中在此区域(图3, c)。其原因可能是高密度会导致林内空间相对不足,树木个体间的竞争加剧,使得胸径生长受阻;同时,林下光照条件变差,树木为争取更多的阳光,加快了树高的生长;与之相反,密度降低使树木间的竞争减弱,同时林下光照条件变好,胸径生长得到一定程度的释放,而树高生长则相对放缓^[21]。

除了密度的影响之外,生境条件也是影响树木胸径和树高生长的重要因素。如在海拔3 200~3 300 m和2 500~2 600 m,虽然两处的密度均较低,但林分平均胸径却比其他海拔处同密度林分的平均胸径小(表2)。这可能是由于在森林分布的海拔上、下限,生境条件恶劣,水分或热量条件亏缺,导致树木生长整体受限^[22]。此外,高海拔区的严寒也会对树木形态产生重要影响。如在海拔3 100 m以上地区,青海云杉的胸径明显增加而树高降低(表2),这可能是因为高海拔区的低温会迫使树木将更多的能量用于胸径的生长而不是树高^[9]。同时,树木也常通过降低高度来减少热量损失,同时通过增加冠幅(表2)来提升光合生产的叶面积,从而抵御高寒气候的不利影响^[23]。

为反映海拔梯度上的树木胸径-树高关系,分海拔段对树木的胸径-树高关系曲线分别进行拟合,表达式为: $H = a \ln(DBH) - b$ 。各海拔区段内的拟合参数,见表3。

表3 各海拔区段内树木胸径-树高关系的拟合参数

海拔/m	a	b	R ²
2 500~2 600	5.26	5.376	0.754
2 600~2 700	6.122	6.403	0.786
2 700~2 800	6.219	5.963	0.783
2 800~2 900	5.972	5.309	0.609
2 900~3 000	4.873	3.921	0.729
3 000~3 100	4.975	4.765	0.831
3 100~3 200	6.148	7.194	0.806
3 200~3 300	3.808	3.567	0.806

4.2 中间海拔区段为森林生长提供了有利条件

温度和水分是决定植被分布和生长的主要因素^[24]。在典型山区,随海拔升高,温度降低、降水增加,形成不同的水热组合,从而导致森林生长状况出现海拔差异^[12,25]。在本研究区,林分胸高断面面积、平均树高、 $H > 12$ m树的比例、高径比等指标均随海拔上升呈“单峰”变化,并在森林垂直分布区的中段(海拔2 800~2 900 m)达到最高(表2,图3,4,6)。这体现了随海拔升高,变化方向不同的水分和温度

条件对林木生长的综合影响。受大陆性气候的影响,祁连山低海拔区的降水量小,海拔 2 600 m 处及以下的多年平均降水量不足 400 mm^[6],接近我国森林分布的最低等降水量线^[26]。同时,由于低海拔区的温度较高、水分蒸发强烈,导致土壤含水量较低,研究区海拔 3 300 m 的年平均土壤含水量是海拔 2 700 m 的 2.6 倍^[27]。由此可见,低海拔区的树木生长受到干旱的极大限制。而在高海拔区,虽然降水增加,但温度降低,研究区海拔 3 300 m 处的年均温度不足 -0.7℃^[28]。这导致植被生长所需的热量不足,有效积温减少,生长期缩短。同时,气温下降使土温降低,阻碍了土壤水分的循环^[29]和土壤有机质的转化^[30],不利于根系对水分和养分的吸收。另外,高海拔区的冻土层也可能会限制幼苗的更新和林分密度的增加等。而在森林分布的中间海拔区段,由于降水和温度条件均相对适宜,并且土壤厚度相对较大(表 1),良好的水热组合状况更利于土壤中水分和养分有效性的发挥^[31],从而形成了青海云杉生长的有利场所。

5 结论

通过对祁连山区青海云杉林林分结构的研究,发现:

(1)研究区森林的平均林龄为 80 ± 9 a,属中龄林。密度、胸径、树高和冠幅直径分别为 $1\,550 \pm 628$ 株·hm⁻²、 13.9 ± 6.2 cm、 8.1 ± 3.7 m 和 3.3 ± 1.7 m。随海拔升高,林龄无显著变化,林分密度呈下降趋势,平均胸径和冠幅直径呈增加趋势,平均树高呈“单峰”变化,峰值出现在海拔 2 800 ~ 2 900 m。

(2)树木径级组成以小树(*DBH*: 5 ~ 12.5 cm)和中树(*DBH*: 12.5 ~ 22.5 cm)为主,所占比例分别为 $39 \pm 11\%$ (变化于 31 ~ 48%) 和 $37 \pm 12\%$ (变化于 19 ~ 45%),树高组成以 *H* 为 6 ~ 12 m 的树为主,所占比例为 $50 \pm 13\%$ (变化于 36 ~ 68%)。随海拔升高,林内幼树(*DBH* ≤ 5 cm)的比例变化不明显,小树比例略有下降,中树比例呈“单峰”变化,在 2 800 ~ 2 900 m 最高,大树(*DBH* > 22.5 cm)比例呈增加趋势,在海拔 3 100 ~ 3 200 m 最高。*H* ≤ 6 m 的树的比例呈“V”字型变化,在海拔 2 800 ~ 2 900 m 最低,*H* 为 6 ~ 12 m 和 *H* > 12 m 的树木比例均呈“单峰”变化,峰值分别在海拔 2 600 ~ 2 700 m 和海拔 2 800 ~ 2 900 m。

(3)林分高径比介于 0.45 ~ 0.73,胸高断面面积

介于 7.86 ~ 33.32 m²·hm⁻²,两者均随海拔呈“单峰”变化,峰值在海拔 2 800 ~ 2 900 m。

(4)综上可知,研究区青海云杉林的结构呈明显的海拔变化规律,并在中间海拔区(海拔 2 800 ~ 2 900 m)达到最优。因此,在建立祁连山区森林结构与水文过程的定量关系时应分海拔区段进行,并对中间海拔区予以重视。此外,分海拔区段设置生态水文模型的参数则可能会取得更好的模拟效果。

参考文献:

- [1] Bachofen H, Zingg A. Effectiveness of structure improvement thinning on stand structure in subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 145(1): 137-149.
- [2] 王占印,于澎涛,王双贵,等.宁夏六盘山区辽东栎林的空间分布及林分特征[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(1): 97-102.
- [3] 陈辉荣,周新年,蔡瑞添,等.天然林不同强度择伐后林分空间结构变化动态[J]. *植物科学学报*, 2012(3): 230-237.
- [4] 王彦辉,金旻,于澎涛.我国与森林植被和水资源有关的环境问题及研究趋势[J]. *林业科学研究*, 2004, 16(6): 739-747.
- [5] Tague C, Zhu J. Interactions between climate change impacts on forest productivity and mortality and stream water quality in the US Western Mountains [C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2013, 1: 06.
- [6] He Z, Zhao W, Liu H, et al. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: a case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(4): 613-621.
- [7] Gaston K J. Global patterns in biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.
- [8] Alves L F, Vieira S A, Scaranello M A, et al. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(5): 679-691.
- [9] Wang X, Fang J, Tang Z, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China[J]. *Forest ecology and management*, 2006, 234(1): 264-274.
- [10] Sakai A, Inoue M, Fujita K, et al. Variations in discharge from the Qilian mountains, northwest China, and its effect on the agricultural communities of the Heihe basin, over the last two millennia[J]. *Water History*, 2012, 4(2): 177-196.
- [11] 张立杰,赵文智,何志斌.青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [12] 张立杰,蒋志荣.青海云杉种群分布格局沿海拔梯度分形特征的变化[J]. *西北林学院学报*, 2006, 21(2): 64-66.
- [13] 赵丽琼,黄华国,梁大双,等.甘肃大野口青海云杉种群的空间分布格局[J]. *北京林业大学学报*, 2010(4): 59-64.
- [14] 李效雄,刘贤德,赵维俊.祁连山大野口流域青海云杉种群结

- 构和空间分布格局[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 960-967.
- [15] 李效雄, 刘贤德, 赵维俊. 祁连山青海云杉林动态监测样地群落特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 94-100.
- [16] 刘建泉, 丁国民, 郝 虎, 等. 青海云杉群落特征和动态的研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 14-17.
- [17] 刘建泉, 孙建忠, 杨开恩, 等. 东大河林区青海云杉种群结构与动态[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 18-21.
- [18] 赵维俊, 刘贤德, 金 铭, 等. 祁连山青海云杉林群落结构分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 615-620.
- [19] 陈银萍, 于 飞, 杨宗娟, 等. 1 东祁连山青海云杉种群大小结构及其动态研究[J]. 广西植物, 2013, 2: 021.
- [20] 郝 佳, 熊 伟, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山华北落叶松人工林雪害的影响因子[J]. 林业科学, 2012, 48(7): 1-7.
- [21] Qi Z, Liu H, Wu X, *et al.* Climate-driven speedup of alpine tree-line forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern China [J]. *Global change biology*, 2014.
- [22] 刘贵峰, 刘玉平, 郭仲军, 等. 天山云杉林生物量及其变化规律的研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 13-17.
- [23] 邓坤枚, 石培礼, 杨振林. 长白山树线交错带的生物量分配和净生产力[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 942-948.
- [24] Zhang W, Jiang Y, Dong M, *et al.* Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 142-149.
- [25] Namgail T, Rawat G S, Mishra C, *et al.* Biomass and diversity of dry alpine plant communities along altitudinal gradients in the Himalayas[J]. *Journal of plant research*, 2012, 125(1): 93-101.
- [26] 葛全胜, 赵名茶, 张雪芹, 等. 过去 50 年中国森林资源和降水变化的统计分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 413-419.
- [27] 张 涛, 车克钧, 王 辉. 祁连山青海云杉林不同海拔梯度土壤水分动态变化[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(5): 1107-1111.
- [28] 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[J]. 西北林学院学报, 2009(z1): 1-3.
- [29] 金 铭, 车宗玺, 敬文茂, 等. 祁连山水源涵养林区降水及温度时空变化研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1071-1076.
- [30] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722-730.
- [31] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.