

# 树轮生态学研究进展\*

王树芝<sup>1,2</sup> 赵秀海<sup>1</sup>

(1 北京林业大学, 北京 100083; 2 中国社会科学院考古研究所, 北京 100710)

**摘要:** 树轮生态学是现代树轮年代学的重要分支, 在全球气候变化引起的资源、环境等压力日益增大的今天, 越来越显示出树轮生态学研究的理论和现实意义。文中简要概述了树轮分析在森林干扰、群落动态、森林结构、林分更新方式以及高山林线研究方面的进展。树轮生态学将对我国树木个体生长情况和群落动态的研究, 虫灾、火灾、风灾和森林动态的关系以及森林管理相关的研究发挥重要作用。

**关键词:** 树轮生态学, 森林干扰, 群落动态, 林分更新方式, 高山林线

**中图分类号:** S 718.42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001 - 4241 (2010) 02 - 0017 - 05

## Advances in Dendroecology Research

Wang Shuzhi<sup>1,2</sup> Zhao Xiuhai<sup>1</sup>

(1 College of Forest Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China)

**Abstract:** Dendroecology is one of the most important branches of modern dendrochronology. With the increasing pressure on resources and environment caused by global climate change, the theoretical and practical significance of dendroecological study is greater. This paper briefly outlined the advance of dendroecology research in terms of forest disturbance, population dynamics, forest structure, forest regeneration patterns and alpine timberline. Dendroecology will play an important part in the study on individual tree growth, population dynamics, the relation of fire, insect, wind disaster to forestry dynamics, and forestry management.

**Key words:** dendroecology, forest disturbance, population dynamics, forest regeneration patterns, alpine timberline

树轮生态学是现代树轮年代学的重要分支。现代树轮年代学不仅包含了树轮定年的学科如考古学, 还包含了研究树轮和环境关系的所有学科, 如树轮气候学、树轮水文学、树轮冰川学等, 即广义的树轮生态学<sup>[1]</sup>。狭义的树轮生态学是一门利用树木年轮数据及相关资料来评价过去与现在森林环境变迁的科学, 用树轮年代学的技术、方法研究一系列森林生态问题<sup>[2]</sup>。自上世纪 80 年代以来, 树木年轮分析广泛应用于森林生态研究中, 并取得了长足的进展。这些研究在全球气

候变化引起的资源、环境等压力日益增加的今天, 越来越显示出其理论和现实意义。

## 1 森林干扰事件的研究

### 1.1 异常年轮结构

年轮的异常结构包括反应木、霜轮、浅轮、火伤、裂痕、伪轮等。这些异常年轮结构大都与特殊生境或极端环境事件密切相关。利用异常年轮结构估计自然灾害发生的地点和时间方面已经取得了可喜的成果<sup>[3]</sup>, 为重建历史上大尺度的

\* 收稿日期: 2009 - 12 - 22

基金项目: 国家文物局项目 (20050107)

作者简介: 王树芝, 女, 河北辛集人, 副研究员, 主要研究方向: 树轮年代学, E-mail: shuzhiwang@163.com

通讯作者: 赵秀海, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 森林生态系统, E-mail: bfuz@163.com

极端环境事件奠定了基础。

在异常年轮结构中,霜轮的发生尤其引起研究者的重视。生长季内的温度突然下降到摄氏零度以下时,植物形成层的活动将受到严重影响,由形成层分化出的未成熟木质部细胞将无法完成次生壁加厚和木质化过程。霜冻还促进了细胞外冰晶的形成和细胞内的脱水,使得未正常发育的细胞受挤压而变形,从而形成了与正常年轮细胞结构不同的明显标志即霜轮。在对一地区特定树种的形成层的活动规律了解相当清楚的前提下,根据霜害在树木年轮内出现的位置,可以较精确地推测霜害发生的时间,其误差在一至两周的范围内。如火山喷发会向大气中释放大量的火山灰,挡住太阳光线,致使大气温度急剧下降,形成霜轮<sup>[4]</sup>。LaMarche 研究发现,霜轮的发生与所记载的近代火山喷发的时间基本一致,并且他们利用霜轮的出现频率推测史前时期发生在爱琴海中的一次大规模火山喷发时间可能是公元前 1628—1626 年<sup>[5]</sup>。该研究开拓了树轮年代学研究火山喷发等极端环境事件的新时代。大规模火山爆发对树轮的影响除了从解剖结构如霜轮表现出来外,也能从每年树轮的生长参数如年轮宽度,尤其是最大晚材密度<sup>[6-7]</sup>和树轮化学元素如钙、铝、锌和铜<sup>[8]</sup>方面表现出来。

贝利对爱尔兰栎树树轮的研究认为,在 3195 BC, 2345 BC, 1628 BC, 1159 BC, 207 BC 和 540 AD 可能发生过大规模火山爆发。尤其在 536 AD 和 540 AD,不仅在爱尔兰,在西伯利亚、瑞典、芬兰、北美和南美都暗示曾经发生过大规模温度降低事件,而且与古埃及和中国古代的历史事件相吻合<sup>[9]</sup>。Salzer 等发现,美国西部森林上限地域刺果松年表近 5 000 年的许多窄年轮与已知的大规模的火山爆发和过去火山爆发的冰心信号巧合<sup>[10]</sup>。B riffa 等利用北半球大规模的最大晚材密度进行的温度重建表明,大规模的火山爆发引起北半球温度降低<sup>[11]</sup>。利用瑞典中南部<sup>14</sup>C 定年的松树建立 200 年的浮动年表(1695 BC—1496 BC),年表中有 4 个连续的窄年轮,与美国加利福尼亚树轮和欧洲树轮表现出的由于 1628 BC/1627 BC 的火山爆发形成的霜轮一样,并认为,这次火山爆发虽然对瑞典南部年轮生长有显著影响,但在瑞典北部未发现对树轮有影响<sup>[12]</sup>。

森林火灾是森林工作者重要的研究课题。早在 20 世纪 50 年代初,林学家 Weaver 便开始了这方面的研究。70 年代以来,这项工作受到重视,目前许多国家从事这项研究<sup>[13-14]</sup>。火伤是树木受火烧后在树木木质部留下的痕迹,易在年轮的解剖结构特征上表现出来,根据年轮的情况可以判断出火烧的年度以及距今的时间长短,建立准确的火灾年表,从而研究过去和现在的火灾变化规律。国外树木年轮火历史研究主要集中在以下几个方面:1)火历史的时空格局特征;2)火灾历史与全球气候变化的关系,主要包括火灾与温度和降水的关系;3)火历史与人为活动及土地利用的关系,战争和人口增加容易引发火灾,而放牧活动却降低火灾发生频率,20 世纪以来的森林火降低了火灾发生的频率却增加了大火发生的可能性<sup>[15]</sup>。可利用树木年轮计算出火灾发生的平均轮回期和中值间隔期<sup>[16]</sup>,Swetnam 根据 5 个样地巨杉林火伤出现的时间和空间变化模式,成功重建了美国加利福尼亚州东部内华达山脉一带距今 2 000 年的火灾历史<sup>[17]</sup>。有研究表明,火灾发生当年相对干旱、温度较高,而火灾发生的前几年则相对湿润、温度适宜<sup>[18]</sup>。

风暴是中欧最严重的山林干扰。2009 年 Ziebnka 等利用树木年代方法确定了 529 棵挪威云杉和 103 棵欧洲落叶松树桩在过去 200 年的年龄结构和增长模式。在重建期内云杉有多种年龄结构,而落叶松只有两个 20 年再生的年龄结构,落叶松的再生与生长释放在时间上是一致的,表明有过严重的干扰事件发生。他认为应压木的出现和树脂的大量积累同时产生,说明风是最有可能的干扰因素<sup>[19]</sup>。

经常发现,火干扰常是烧死小树,留存一部分大树,同时由于烧死了下层的植被可为新一代的发生创造条件。新的幼树的发生期与火烧干扰期大体是吻合的。风干扰常是吹倒大树,留下下层的中等林木和幼树,有时也会造成新的空间,使林分的年龄结构变得非常复杂<sup>[20]</sup>。在后一种条件下,仅是少部分幼树的发生期与暴风造成的风倒时期大致吻合。

此外,还可以根据虫害对木材细胞结构特征的影响研究森林受虫害干扰的强度以及频度等,重建树木虫害发生期。由于昆虫危害造成的树

木异常通常表现为年轮宽度较正常年轮窄。20 世纪 60 年代开始进行这方面的研究<sup>[21]</sup>,80 年代后一些科学家利用树轮分析准确地断定昆虫危害的年份和程度<sup>[22]</sup>。1996 年美国的 Perkins 研究了美洲白皮松的树木年轮年表,认为由山地松甲危害引起的美洲白皮松死亡峰出现在 1930 年<sup>[23]</sup>。1997 年美国的 Czokajlo 应用树木年代学方法估测了外来的纵坑切梢小囊对未经营过的 35 年生欧洲赤松枝危害的影响,回溯该害虫侵入纽约州尼加拉县欧洲赤松的可能时间在 1982 年之前。根据对欧洲赤松危害的估计和小囊虫对北美地区一些树种的喜好,表明纵坑切梢小囊将传播到北美的主要松树分布区,并导致严重的危害<sup>[24]</sup>。1997 年加拿大的 Krause 通过分析教堂建筑木材,重建了过去 3 个世纪云杉卷叶蛾大发生的历史<sup>[25]</sup>。2004 年加拿大的 Boulanger 利用树轮年代学重建了圣洛朗魁北克地区东南部云杉卷叶蛾 450 年的疫情史<sup>[26]</sup>。

由此可见,异常年轮结构特征有助于判定森林火灾、虫害和火山喷发等极端环境事件对树木生长的影响,为重建历史上大尺度的极端环境事件奠定基础,是研究森林干扰的物理证据。

### 1.2 林木的年龄结构

根据林木的年龄结构还可推断林分经历的干扰历史<sup>[27]</sup>。因为干扰可破坏林地上一部分或全部林木,并同时为新一代的发生创造条件。经多次干扰的林分在林分年龄结构图中常可明显看出能分为若干代,每一代都可能包括若干年,不同代之间可能有间隔。因此,从年龄结构图中可大致判断出干扰发生的次数和年度。许多干扰都可能产生死亡的树木,可以采用交叉定年技术来研究其死亡年代,从而判断干扰发生的次数和年代<sup>[28]</sup>,如 1988 年 Foster 等通过对活木和死木年轮的分析,对森林的干扰历史、群落结构等的动态变化作了深入的研究<sup>[29]</sup>。

### 1.3 树木生长抑制及释放

对树木生长过程中生长抑制与释放事件的判定,是用来研究森林干扰、林窗变化等森林生态问题的一种重要方法。生长抑制事件即树木径向生长率显著低于平均生长率的阶段,是指当某种干扰事件发生时,树木因干扰事件的冲击而生长受到抑制、生长率降低的现象;生长释放事

件即树木径向生长率显著高于平均生长率的阶段,是指在某种干扰事件发生后,依然存活的树木因可利用资源增多而使自身生长加速的现象。

有 4 种方法确定生长释放事件:1)目测法,在树木年轮宽度序列中直接找出生长加速的阶段<sup>[30]</sup>。2)先用目测法初步确定生长释放事件,之后将该时期的平均年轮宽度与整条序列的平均年轮宽度相比较,加以验证<sup>[31]</sup>。3)年轮宽度平均值法,在某一特定时间尺度上,当年轮宽度滑动平均值的增幅达到某一特定百分率时,确定为一个生长释放事件<sup>[32]</sup>。4)年轮中值法,从干扰事件的次数和干扰轮回期看,用中值比用平均值确定干扰事件要好。对临近 10 年的中值进行比较,径向生长超过 25% 或 50% 时,认为有干扰事件发生<sup>[33]</sup>。1997 年夏冰等在重建云南碧塔海亚高山云冷杉混交林树木生长压制与释放的历史中,先用二次多项式剔除树龄变化对树木生长的长期影响,生成年轮宽度变化的指数序列,然后对每株树木的年轮宽度指数序列进行 10 年滑动平均,并定义:在 10 年滑动平均曲线上持续 10 年以上的生长指数下降称为生长压制;继生长压制之后出现持续 10 年以上的生长指数上升,且在 10 年滑动平均生长指数上升过程中的最高点比最低点大 0.2 以上称为生长释放。曲线上生长压制期最低点之后的第一年为生长释放开始期。该定义的一个显著特点是将生长释放与生长压制紧密联系在一起,突出干扰事件对树木生长的双重影响<sup>[34]</sup>。这些研究为建立干扰事件与群落动态的关系进行了有益的尝试。

## 2 群落动态、群落结构和林分更新状况等森林生态学研究

树木年龄结构分析广泛用于群落动态、群落结构和林分更新状况等研究中,是评价森林脆弱性的重要指标。分析树木种群年龄结构、径生长方式及空间分布方式等,能成功描述并分析森林更新动态。2003 年 Polmann 在智利南部的一个群落内研究了两种假山毛榉的更新方式及动态,发现在过去 400 年内,两树种更新强度及方式并不一致。暴风、火山活动以及部分老树的枯萎等能频繁地在群落内形成大小不等的林窗,从而为临近树木提供较充足的阳光,两种假山毛榉的更

新主要依赖于这些不同尺度大小林窗的形成。同时,大多数树木在生长过程中都出现一次甚至多次生长释放事件,也指示树木在林窗形成后生长会加速,以尽快达到林冠层争取更多的阳光<sup>[35]</sup>。2004年 Bigler等对斯洛文尼亚一个银枞林进行树木年轮的生长方式分析,通过比较健康树木与衰败树木的平均轮宽生长曲线发现,所建立的树木死亡率模型能较好地预测未来群落动态,并帮助人们及时采取措施以控制群落死亡率<sup>[36]</sup>。

### 3 高山林线的研究

关于高山林线的定义有多种。一般意义上高山林线是指一条介于长势良好、树高大于 2 m 郁闭森林与树线之间的过渡地带<sup>[37]</sup>。Bliss认为高山林线是森林和高山冻原带之间包括树岛和矮曲林的广阔生态过渡带<sup>[38]</sup>。高山林线因其所处的特殊地理位置,成为植被与气候变化关系研究的理想场所<sup>[39]</sup>。如 Slatyer等研究过高山树线和林线过渡带的动态情况,明确指出这种特殊的过渡带对于研究植被与气候的关系有重要作用<sup>[40]</sup>。传统的高山林线研究主要是一些经典的生态学野外调查方法,进行一些群落分布格局、植被结构和组成等定性描述研究,随着树木年代学和年轮水文学研究的日益完善,利用林线附近树木年轮,采用树木年代学和年轮水文学技术研究树木年轮的生长,进行年轮形成时生态系统的气候重建,调查气候变化的原因,构建林线物种的种群动态等方法被高山林线研究者所选用<sup>[41]</sup>。树轮生态学研究表明,在高海拔地区物种的生长主要受气候的影响而不是取样点的影响<sup>[42]</sup>。对垂直分布的研究表明,森林上限树木年轮序列中记录了较多的环境信号,而中部的年轮序列中所包含的环境信号最少<sup>[43]</sup>。对祁连山中部不同海拔青海云杉的年表进行分析发现,随着海拔的升高,年表的平均敏感性降低,年表与气候因子的相关性逐步降低,尤以森林上限的相关性最低<sup>[44]</sup>。该结论与目前人们普遍认同的森林上限树木生长主要受气温影响,而下限树木生长主要受降水影响并不一致。因此在进行高山林线对气候变化响应的研究时,选取合适的高山林线很重要<sup>[45]</sup>。

### 4 小结

综上所述,树轮生态学在森林结构、种群动态、林分更新方式、森林干扰事件的周期与强度以及高山林线等方面的研究已有了长足发展,并有巨大的发展潜力,而在我国对树木个体生长情况和群落动态,如树木生长量改变、更新率和死亡率的变化以及林线动态等的树轮生态学研究相对较少,对虫灾、火灾、风灾和森林动态的关系以及与森林管理相关的研究就更少,因此树轮生态学这一研究手段必将会有用武之地。

### 参考文献

- [1] Schweingruber F H. Tree rings and environment dendroecology [M]. Vienna: Haupt, 1996: 15 - 20.
- [2] Fritts H C, Swetnam T W. Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments [J]. Advances in Ecological Research, 1989, 19: 111 - 188.
- [3] Stoffel M, Bollschweiler M. Tree - ring analysis in natural hazards research: an overview [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8: 187 - 202.
- [4] LaMarche V C Jr, Hirschboeck K K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions [J]. Nature, 1984, 307(5946): 121 - 126.
- [5] Pollmann W. Stand structure and dendroecology of an old - growth Nothofagus forest in Conguillio National Park, south Chile [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 176(1/3): 87 - 103.
- [6] Johnson E A, Fryer G I. Population dynamics in lodgepole pine - Engelmann spruce forests [J]. Ecology, 1989, 70(5): 1335.
- [7] Villalba R, Boninsegna J A, Veblen T T, et al. Recent trends in tree - ring records from high elevation sites in the Andes of Northern Patagonia [J]. Climate Change, 1997, 36(3/4): 425 - 454.
- [8] Schweingruber F H. Tree rings basics and applications of dendrochronology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1988: 276.
- [9] Baillie M G L. Dendrochronology raises questions about the nature of the AD 536 dust - veil event [J]. The Holocene, 1994, 4(2): 212 - 217.
- [10] Salzer M W, Hughes M K. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr [J]. Quaternary Research, 2007, 67(1): 57 - 68.
- [11] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large - scale temperature inferences from tree rings: a review [J]. Global and Planetary Change, 2004, 40(1/2): 11 - 26.
- [12] Grudd H, Briffa K R, Gunnarson B E, et al. Swedish tree rings provide new evidence in support of a major, widespread environmental disruption in 1628 BC [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(18): 2957 - 2960.
- [13] 吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 351.

- [14] Stambaugh M C, Guyette R P, Godfrey R, et al. Fire, drought and human history near the western terminus of the Cross Timbers, Wichita mountains, Oklahoma, USA [J]. *Fire Ecology*, 2009, 5 (2): 51 - 65.
- [15] 王晓春, 及莹. 树木年轮火历史研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33 (3): 587 - 597.
- [16] Fbyd M L, Romme W H, Hanna D D. Fire history and vegetation pattern in Mesa Verde National Park, Colorado, USA [J]. *Ecological Applications*, 2000 (10): 1666 - 1680.
- [17] Swetnam T W. Fire history and climate change in giant sequoia groves [J]. *Science*, 1993, 262 (5135): 885 - 889.
- [18] Drobyshev I, Niklasson M, Angelstam P. Contrasting tree - ring data with fire record in a pine - dominated landscape in the Komi Republic (Eastern European Russia): recovering a common climate signal [J]. *Silva Fennica*, 2004, 38 (1): 43 - 53.
- [19] Ziebnka T, Mcalher P. The dynamics of a mountain mixed forest under wind disturbances in the Tatra Mountains, central Europe: a dendroecological reconstruction [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39 (11): 2215 - 2223.
- [20] Tran J K, Thomas R Q, Weller S T, et al. Forest structure and the effects of tree - falls on heterogeneity in four types of tropical forest in Costa Rica [M]. *Dartmouth Studies in Tropical Ecology*, Hanover: Dartmouth College, 2004: 160 - 165.
- [21] Blais J R. Trends in the frequency, extent, and severity of spruce budworm outbreaks in eastern Canada [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983 (13): 539 - 547.
- [22] Paritsis J, Veblen T T, Kitzberger T. Assessing dendroecological methods to reconstruct defoliation outbreaks on *Nothofagus pumilio* in northwestern Patagonia, Argentina [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39 (9): 1617 - 1629.
- [23] Perkins D L, Swetnam T W. Dendroecological assessment of whitebark pine in the Sawtooth - Salmon River region, Idaho [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26 (12): 2123.
- [24] Czakajlo D, Wink R A, Warran J C, et al. Growth reduction of Scots pine, *Pinus sylvestris*, caused by the larger pine shoot beetle, *Tanipinipipenda* (Coleoptera, Scolytidae) in New York State [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27 (9): 1394 - 1397.
- [25] Krause C. The use of dendrochronological material from buildings to get information about past spruce budworm outbreaks [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27 (1): 69.
- [26] Boulanger Y, Arseneault D. Spruce budworm outbreaks in eastern Quebec over the last 450 years [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34 (5): 1035 - 1043.
- [27] Foster D R. Disturbance history, community organization and vegetation dynamics of the old - growth Pisgah forest, southwestern new hampshire, USA [J]. *Journal of Ecology*, 1988, 76 (1): 105 - 134.
- [28] Lorimer C G. The role of fire in the perpetuation of oak forests [C] // Johnson J E (ed). *Proceedings: Challenges in oak management and utilization* Madison, WI Extension Service, University of Wisconsin, 1985: 8 - 25.
- [29] Foster D R. Disturbance history, community organization and vegetation dynamics of the old - growth Pisgah forest, southwestern new hampshire, USA [J]. *Journal of Ecology*, 1988, 76 (1): 105 - 134.
- [30] Cherubini P, Piussi P, Schweingruber F H. Spatiotemporal growth dynamics and disturbances in a subalpine spruce forest in the Alps: a dendroecological reconstruction [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26 (6): 991 - 1001.
- [31] Arquillie S, Filion L, Gajewski K, et al. A dendroecological analysis of eastern larch (*Larix laricina*) in subarctic Quebec [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20 (9): 1312.
- [32] Abrams M D, Ruffner C M, Deneo T E. Dendroecology and species co - existence in an old - growth Quercus - Acer - Tilia talus slope forest in the central Appalachians, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 106 (1): 9 - 18.
- [33] Rubino D L, McCarthyz B C. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events [J]. *Dendrochronologia*, 2004, 21 (3): 97 - 115.
- [34] 夏冰, 贺善安, 兰涛, 等. 亚高山云冷杉混交林树木生长释放与干扰分析 [J]. *植物资源与环境*, 1997, 6 (1): 1 - 8.
- [35] Pollmann W. Stand structure and dendroecology of an old - growth *Nothofagus* forest in Conguillio National Park, south Chile [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176 (1/3): 87.
- [36] Bigler C, Gricar J, Bugmann H, et al. Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 199 (2/3): 183 - 190.
- [37] Holmeier F K. Ecological aspects of climatically caused timberline fluctuations [M] // Beniston M (ed). *Mountain environments in changing climates* London: Routledge, 1994: 220.
- [38] Bliss L C. Alpine [M] // Chabot B F, Mooney H A (ed). *Physiological ecology of North America plant communities* London: Chapman and Hall, 1985: 41 - 65.
- [39] 戴君虎, 崔海亭. 国内外高山林线研究综述 [J]. *地理科学*, 1999, 19 (3): 243 - 249.
- [40] Slatyer R O, Noble I R. Dynamics of montane treelines [M] // Hanson A J, di Casri F (ed). *Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows* New York: Springer - Verlag, 1992: 346 - 359.
- [41] 王晓春, 周晓峰, 孙志虎. 高山林线与气候变化关系研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (3): 301 - 305.
- [42] Nola P. A dendroecological study of larch at timberline in Central Italian Alps [J]. *Dendrochronologia*, 1994, 12: 77 - 91.
- [43] 袁玉江, 李江凤. 新疆伊犁地区树轮年表特征初探 [J]. *干旱区地理*, 1993, 16 (3): 45 - 51.
- [44] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (1): 172.
- [45] Urbanska K M. Biodiversity assessment in ecological restoration above the timberline [J]. *Biodiversity and Conservation*, 1995, 4 (7): 679 - 695.