

林冠附生物对水分的截留及对环境的监测

徐海清<sup>1, 2</sup>, 刘文耀<sup>1</sup>

(1 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 作为森林生态系统中重要的组成成分, 林冠附生物自 70 年代以来引起了生态学家的广泛关注。研究表明林冠附生物在营养物质循环、水循环等方面均对森林生态系统有重要影响。综述了湿性森林中附生物对云雾水的截留、对水分循环影响的研究进展, 以及附生物在森林环境监测中作用的研究现状, 为我国今后附生物研究积累资料。

关键词: 附生物; 水分截留; 环境监测; 森林

中图分类号: S 715.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)02-0116-05

Water Interception and Monitoring for Environment Changing of Epiphytes

XU Hai-qing<sup>1, 2</sup>, LU Wen-yao<sup>1</sup>

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science Kunming 650223, China

2 Graduated School of Chinese Academy of Science Beijing 100039, China)

**Abstract** As an important compound of forest, epiphytes had drawn increasing attention since 1970s. Despite its high biodiversity and huge biomass, epiphytes could also affect nutrient cycling and water cycling. Since epiphytes were sensitive to environment changing, some studies use epiphytes to monitor the effect of climate changing imposed on forest construction. The history background and the research development of the effect of epiphytes on water cycling in forest ecosystem and using epiphytes to monitor the climate changing are summarized. At last suggestions are given for future direction of epiphytes researching in China.

**Key words** epiphytes; water interception; environmental monitor; forest

自 Schimpers 1888 年对新热区系中林冠附生物成分进行研究以来<sup>[1]</sup>, 附生物已吸引大量生态学家和生物学家的关注。有报道指出附生物在农业、园艺、医学等领域中都发挥着重要作用<sup>[2~4]</sup>。更由于林冠附生物巨大的生物量和丰富的生物多样性, 林冠附生物已经成为现代森林生态系统研究的热点之一<sup>[3, 5]</sup>。20 世纪 70 年代 Johanson 等人发现附生物对森林生态系统水循环有影响<sup>[5]</sup>, 使人们对林冠附生物在森林生态系统中的作用有了一个新的认识<sup>[6]</sup>。其后人们对附生物的水量、云雾水的截留<sup>[7]</sup>, 及其环境的监测进行全面研究<sup>[8]</sup>, 积累了大量的资料。特别是 1995 年 Lowman 和 Nadkarni 编著出版的《林冠学》(Forest Canopies)是对之前林冠附生物研究成果的全面总结<sup>[7]</sup>。

近年, 国际上趋向于将林冠附生物作为一个生态系统来研究, 其中附生物对森林生态系统水循环的影响及其对环境的监测又是研究的热点, 国外常有报道<sup>[9, 10]</sup>。鉴于国内鲜见

这方面的文章, 特将国外研究综述如下。

1 林冠截留研究背景与方法

林冠对云雾水的截留是指云雾经过林冠时, 云雾中的一部分水分滞留并富积在林冠上的现象。不同的文章中对它提法又有所不同, 如云沉降、雾沉降等<sup>[11]</sup>。国际上有关林冠截留研究相对生物多样性的探索来说开展的较晚。一方面是因为林冠的界面非常复杂, 林冠截留面在水平和垂直面上都有差异, 造成在很小的范围内会发生很大的变化。另一方面原因是很难找到一个合适的测量云沉降的方法来模拟截留过程。早期林冠截留水的研究主要集中在美国北部和欧洲等一些云量较多的国家, 如 Azevedo 和 Morgan 1974 年在 Humboldt 研究表明: 森林中林冠截留发生在日落到次日太阳出来之前这段时间中, 林冠截留量在不同月份不相同<sup>[12]</sup>。在欧洲, Kork 与 Winkler 发现: 对于一些森林生态系统, 林冠

① 收稿日期: 2004-07-13  
基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金“哀牢山山地湿性常绿阔叶林附生物生物量及其空间分布的研究”; 云南省基金重点项目(编号: 2002C004Z)的资助  
作者简介: 徐海清(1978-), 男, 云南大理人, 硕士生, 主要研究方向为恢复生态学。

截留水可占森林中降雨输入水量的 20% ~ 150%<sup>[13]</sup>。随着研究的深入, 人们在 Costorix, Colombia 等地开展了更多的工作, 并试图建立模型来定量研究水分截留的分布和过程<sup>[14]</sup>。模型的建立使人们更好的认识了沉降过程, 并发现林冠截留不仅在景观尺度上有差别, Lovett 研究模型指出造成林冠截留在小尺度空间上的差异性受很多因素影响, 风速、云雾水含量、云雾大小等都会影响林冠截留<sup>[14]</sup>。即使在同一森林的不同树之间也有差异, 但由于这些模型都建立在不同的人工云雾收集装置上, 再加上收集过程中并没有排除降水的影响, 因而很多数据不具有可比性。鉴于研究的需要 Schenauer 和 Cereceda 在 1994 年设计了一个云雾收集装置<sup>[15]</sup>。此装置整体用直径为 1 cm 的金属构成一个 100 cm × 100 cm × 10 cm 的框架, 在框架下面是一个深约 10 cm 的云雾水收集槽, 金属框架中, 装有口径为 0.5~ 1.5 mm 的网格, 整个装置由一个高 2 m 的支架支撑。此林冠截留器的发明, 使人们可以在不同森林类型中开展可比性的云沉降定量研究。但此装置也存在缺点: 首先由于林冠截留器只是由一个 2 m 高的支架支持, 所以不可能把它放在森林中进行实验, 它模拟的林冠截留只是发生在空旷地或林边, 所得的结果和实际情况有一定的差别; 其二受金属架中网格材料的限制, 不能很好反应云雾经过林冠时发生的截留过程, 因而可能低估林冠对云雾的截留能力。进一步改进由 A. Jarvis 完成<sup>[11]</sup>, 2000 年他利用湿度传感器以及一个由附生物覆盖, 450 cm × 50 cm 的云雾水收集器对 Colombian 热带山地云雾林进行了研究, 发现林冠附生物强烈影响林冠的林冠截留。附生物的存在极大地增加了林冠对云雾的截留面积, A. Jarvis 的发现使人们对附生物的截留能力有了新认识。

2 附生物对水的吸收

2.1 附生物范围及一些生物特性

林冠附生物是个复杂的整体, 它指生长于林冠、无维管与土壤和寄主相连的植物及其残体, 一般只出现在风速较低且常有云雾的林中<sup>[8]</sup>。研究发现, 它主要有地衣类、苔藓类、维管植物(种子植物、蕨类)、植物残体及腐殖质、真菌类、藻类等组成<sup>[5, 8, 10, 16]</sup>。其中苔藓因其巨大的生物量等原因在附生物组成上作用不容忽视, 如湿性雨林中树木上由苔藓和腐殖质等形成的片层有时可达 14 cm<sup>[17]</sup>。由于苔藓吸水量最高可达植物体干重的 13 倍<sup>[18]</sup>, 因而当它密集丛生于湿性雨林树冠上时对保持水分有重要作用。

2.2 附生物吸水机理

附生物长在林冠层, 不能直接利用根系从土壤吸起水分, 对环境依赖性较高, 所以附生物特别是苔藓类大多生长在空气湿度较大的森林中<sup>[19, 20]</sup>。由于长期生活于林冠, 森林中附生物形成特殊的吸水机理以适应环境, 以为机体提供所必需的水分。吸水机制中, 以苔藓和凤梨科最为引人注目。苔藓植物绝大部分都非常矮小, 体表面积大, 吸水量多<sup>[18]</sup>, 由于体表具有密集能吸水的毛状结构<sup>[21]</sup>, 因而空气湿度到达

一定程度时此结构就能从空气中直接吸取水分。另据研究, 苔藓植物的叶枯萎后并不脱离茎干, 而是成层状依附于植株体, 这些枯叶中含有较多吸水能力强的死细胞<sup>[22]</sup>, 能从空气中吸取水分。凤梨科植物的吸水构造也很特别, 它们成绒毛状, 此结构由几个盾形的死细胞覆在一串突出的活细胞上而形成<sup>[23]</sup>(图 1)。空气中的水分与死细胞接触时, 水分就会被吸入其中, 随后这些水分又会被下层的活细胞所吸收, 进而通过输导组织运到植物全体, 这样空气中的水分就被保存到了林冠层内。另外在兰科植物中, 也有另外一种同样由死细胞形成, 可直接由空气中吸收水分的结构<sup>[24]</sup>。附生物中的腐殖质在吸水 and 保水方面同样具有重要作用。一方面它结构松散, 孔隙度大, 空气中水分含量到一定程度时腐殖质发生机械吸水; 另一方面它可以保持较高的含水量, 例如在有的地方腐殖质的含水量可达 93%<sup>[25]</sup>, 因而在云沉降过程中它可以截留大量的水分。附生物整体在林冠形成一个密集的截留界面, 云雾经过林冠上空时, 所含水滴受重力作用向下沉, 遇到附生物密集的吸水表面时, 云雾中所含水份被附生物吸收而得以保留, 云雾水一部分作为水滴降到地面, 另一部分储藏在附生物中在适当的时候有释放出来, 增加空气的湿度。

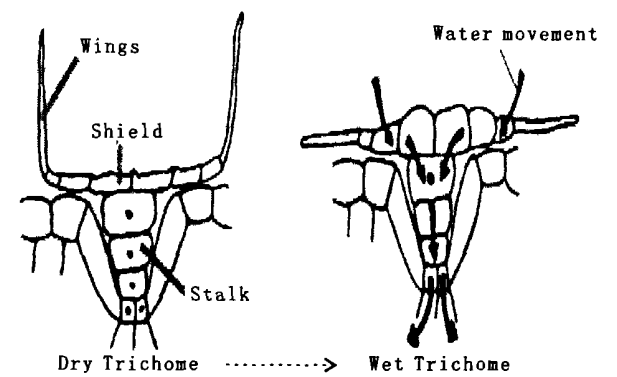


图 1 绒毛状吸水组织的结构 (Smith 1987<sup>[23]</sup>)

2.3 附生物对水分的吸收及影响因子

水分在生态系统中一直被认为是重要的限制因子<sup>[26]</sup>, 土壤中水分含量的改变和空气湿度的变化都会影响森林群落的组成及结构<sup>[1, 27, 28]</sup>, 因而森林生态系统中水分的输入量就显得非常重要。森林中水分输入主要有两种: 其一是降雨, 其二是通过林冠对云雾中水分的截留<sup>[29]</sup>。在湿性森林中这种云雾对水分的补偿就尤为重要。例如在哥伦比亚南部的 Caribbean 全年降雨量为 853 mm/a 而云雾水的补给量就达到了 796 mm/a<sup>[30]</sup>, 几乎相当于水分全部输入量的 1/2。湿性森林中的云雾层形成在一定的高度, 当在森林上空形成后它就会长时间出现在林冠之上<sup>[29]</sup>, 而后林内的水分输入会明显增加<sup>[31]</sup>。

湿性森林林冠对云雾水的截留发生在晚上<sup>[31]</sup>, 此时云雾层很低, 林冠对云雾水的截留量很大<sup>[35]</sup>。由于林冠对云雾水的截留受林冠截留效率的影响<sup>[11]</sup>, 因而在不同的森林中林冠对水分的截留各不相同, 如在 Costa Rica 附生物每年截留的云雾水可达 1 840 mm, 在 Colombia 此截留量可达 2 754 mm/a<sup>[25]</sup>。另据 Wen Yao Liu 与 John E. D. Fox 等报道, 即使

在同一片森林中不同的季节里林冠对云雾水的截留也不相同: 在干季时对云雾的截留是森林水分的主要来源占水分总输入量的 81%, 雨季时只占 20% [36]。影响林冠截留效率的因素中附生物的作用最为引人注意, Andy Jarvis 研究表明林冠对云雾的截留率与附生物的持水量有关 [11]:

$$I_R = -3.16S + 371.3$$

式中:  $I_R$ ——截留率;  $S$ ——持水量。

表 1 不同森林类型对云雾水的截留量		
地点	对云雾水的 年截留量 /mm	截留水占年水分总输 入水量的百分比 %
cen tral Cordillera of		
Panama (500~ 1 300 m) [32]	42~ 2952	2.4~ 60.6
徐家坝 云南 (2 400~ 2 600 m) [13]	1886	87.1
Sou theast of Queensland [33]	450	40
Jamaica (1 550 m) [34]	2385	91.7
Colombia [30]	786	48

这表明随着附生物持水量的降低, 林冠对云雾水分的截留量直线上升。更由于附生物在林冠上形成了一个特殊片层, 增加了林冠的表面积, 加强了对云雾水的截留。截留的水一部分储于附生物的腐殖质中, 而大部分流向土壤 [11], 这对保持土壤的含水量有重要作用, 如 Jaime Cavelier 报道在 Guajira Peninsula 即使每天有 8.0~ 11.7 mm 的蒸发量, 但森林中土壤表层 10 cm 的含水量在早晨和下午并没有显著的变化, 因为每天都有林冠截留水的补给 [29]。附生物不但强烈影响林冠对云雾水的截留, 它巨大的生物量在森林水循环中的作用也不容忽视。Mulligan 和 Jarvis 报道林冠附生物的生物量在附生物系数为 0.744 时存在下列函数关系: 附生物生物量 ( $t/hm^2$ ) =  $-7.44 + 0.00274 + 0.48DBH + 14.5Sp_c$  [11]

式中:  $a$ ——海拔;  $DBH$ ——胸径;  $Sp_c$ ——坡面斜率。

所以在湿性森林中一定范围内, 随着海拔的上升和树木胸径的增大, 林冠附生物会有很高的生物量, 如德国的 E Cuador 森林中附生物的生物量可达  $6.0 kg/m^2$  相当于  $19.2 t/hm^2$  [17], 在美国的 Olypic 达  $6.7 t/hm^2$  [32]。而据 Veneklaas 研究表明附生物的持水量通常为其生物量的 5.91 倍 [38]。由于附生物巨大的生物量, 因而它在森林中持有大量的水分, 再加上它对云雾水截留, 使附生物在林冠中形成了一个巨大的水分库 [39], 如在有的地方附生物的持水量可达  $15\ 000 L/hm^2$ , 更有  $50\ 000 L/hm^2$  的惊人持水量的记录 [6]。附生物在上述特性, 决定了附生物在森林生态系统水循环中必然有重要的作用 [17]。云雾截留发生在林冠上 [40], 林冠层失去附生物后, 森林中将丢失一个重要的截留云雾水分的片层, 此后有云雾通过林冠时, 森林因缺乏附生物, 不能对云雾水进行有效截留 [25], 从而失去云雾层中水分补给的机会, 生态系统长期得不到这部分水分, 森林中群落组成和结构会因环境过分干燥而发生改变, 最终引起森林群落的演替变化。

### 3 附生物对环境的监测

森林各个片层中, 林冠附生物因其特殊构造而被人们用来作为气候变化的生物指示器。因为其一: 附生物具有丰富的生物多样性, 如在 Sãil 林冠上仅附生维管束植物种数就达 33~ 65 种 树 [41], 附生物中有着不同生活型和不同生态型的植物种类, 它们有各自的适应机制及最适的环境条件, 然而又都作为整体出现于林冠中, 只是在不同的环境中优势种不同, 附生物生长环境变化后, 优势种所依赖的环境发生改变, 导致它种群数量下降, 而其它物种因环境适宜而大量出现, 成为优势种, 从而对环境产生响应; 其二: 附生物没有根系和土壤相联, 森林生态系统中的林冠附生物全部都暴露在空中, 当环境干燥时容易丧失水分, 对周围空气的水分含量非常敏感, 尤其是苔藓等低等植物 [27]。当森林环境发生变化时, 无论是气温升高、日照强度增加或云雾层的消失, 最终结果都会导致环境中空气水分含量的改变。这种变化作用于林冠, 势必引起附生物多样性、生物量发生变化 [42], 因而通过对林冠附生物多样性、生物量的动态研究可以知道森林的气候变化情况。

### 4 结 语

林冠附生物是目前国际生态研究的重点之一, 它广泛分布于湿性的森林环境, 特别是山地湿性雨林中 [3], 国外对它进行了多方面的深入研究 [43~ 45], 并出版了学术期刊。如在美国 1975 年就出现了重点刊登林冠附生物研究论文的期刊 Selbyana 此工作一直延续到现在。综合当前国际林冠附生物研究动态可看出它主要集中在三方面: 第一是各种生态环境中林冠附生物的生物量、生物多样性的变化, 第二是环境变化对附生物的影响, 第三是林冠附生物在森林生态系统中的作用。林冠附生物是森林中的一个特殊片层, 当前国际上趋向于将它作为一个生态系统来处理。有报道指出它为森林中的鸟和昆虫等提供了食物及栖息场所 [46, 47], 将群落生态位向空间发展。进一步深入研究附生物的空间格局变化及其传播途径、建立机制等, 对我们了解森林生态系统有重要意义。

我国地域广阔, 气候、植被类型多样, 具有林冠附生物的代表植被类型在我国大多数都存在, 包括有很高生物多样性的热带雨林和季雨林。然而近年由于人们对森林的过度砍伐和开垦山地等活动, 致使我国植被遭到大规模破坏。特别在山地湿性阔叶林和热带雨林区, 原生森林出现了片断化分布, 附生物多样性降低 [48]。但令人担忧的是我国有关附生物的研究非常少 [49, 50], 如在我国原生湿性常绿阔叶林中面积最大保存最完好的哀牢山, 研究过林冠附生物的文章也只有两篇 [36, 51]。因而我国应加强对林冠附生物在生物多样性、营养循环、建立机制等方面的研究, 这有利于我们更好的了解我国各类森林的状况, 为我们更好地保护森林生态系统积累资料, 同时也有利于我国生态学发展与国际同步。

参考文献:

[1] Barthlott W, Schmitz-Neuerburg V, Nieder J, Engwald S. Diversity and abundance of vascular epiphytes: a comparison of secondary vegetation and primary montane rain forest in the Venezuelan Andes[J]. Plant Ecology, 2001, 152: 145– 156

[2] Bennett B C. Uses of epiphytes, lianas, and parasites by the Shuar People of Amazonian Ecuador[J]. Selbyana, 1992, 13: 99– 114

[3] Nadkarni N M. The conservation of epiphytes and their habitats: summary of a discussion at the international symposium on the biology and conservation of epiphytes[J]. Selbyana, 1992, 13: 140– 142

[4] Rauh W. Are T illandsias endangered plants? [J]. Selbyana, 1992, 13: 138– 139.

[5] Johansson D. Ecology of vascular epiphytes in west African rain forest[J]. Acta Phytogeographica Suecica, 1974, 59: 1– 136

[6] Pócs T. The epiphytic biomass and its effect on the water balance of two rain forest types in the Uluguru Mountains (Tanzania East Africa) [J]. Acta Botanica Academiae Scientiarum Hungaricae, 1980, 26: 143– 167

[7] Lowman D M, Nadkarni N M. Forest Canopies[M]. New York: Academic Press, 1995.

[8] Hoffman G R, Kazmierski R. An ecology study of epiphytic bryophytes and lichens of *Pseudotsugamenziesii* on the Olympic Peninsula Washington II. Diversity of the vegetation[J]. The Bryologist, 1969, 74: 413– 427

[9] Hofstede R M, Wolf J H D, Benzing D H. Epiphytic biomass and nutrient status of a Colombian upper montane rain forest[J]. Selbyana, 1993, 14: 37– 45.

[10] Nadkarni N M. Epiphyte biomass and nutrient capital of a neotropical elfin forest[J]. Biotropica, 1984, 16: 249– 256

[11] Jarvis A. Measuring and modeling the impact of land-use change in tropical hillsides: The role of cloud interception to Epiphytes[J]. Advances in Environmental Monitoring and Modelling, 2000, 1(1): 118– 148

[12] Azevedo J, Morgan D L. Fog precipitation in coastal California forest[J]. Ecology, 1974, 25(6): 1135– 1141

[13] Vong R J, Signon J T, Mueller S F. Cloud water deposition to Appalachian forest[J]. Environment Science and Technology, 1991, 25(6): 1014– 1021.

[14] Lovett G M. Rates and mechanisms of cloud water deposition to a subalpine balsam fir forest [J]. Atmosphere Environment, 1984, 18: 361– 371

[15] Schenavener R S, Cereceda P. A proposed standard fog collector for use in high-elevation region[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 1313– 1322

[16] Smith R L, Smith T M. Elements of Ecology[M]. San Francisco: Benjamin Cummings Science Publishing, 2000

[17] Martin F, Elke F. Epiphyte diversity and biomass in the canopy of lowland and montane forests in Ecuador[J]. Journal of Tropical Ecology, 2000, 16: 673– 688

[18] Silvola J, Aaltonen H. Water content and photosynthesis in peat mosses *Sphagnum fuscum* and *S. angustifolium* [J]. Annual Botany of Fennia, 1984, 21(1): 1– 6

[19] Kooijman A M. Causes of the replacement of *Scorpidium scorpioides* by *Calliergonella cuspidata* in eutrophicated fens: 2 Experimental studies[J]. Lindbergia, 1993, 18: 123– 130

[20] Stadtmüer T. Cloud Forests in the Humid Tropics [M]. Costa Rica: The United National University, 1987.

[21] Solomon E P, Berg L R, Martin D W. Biology[M]. USA: Saunders College Publishing, 1999.

[22] Starr C, Taggart R. Biology: the unity and diversity of life (9th ed) [A]. U S A, Ven Hoffmann Press, 2001

[23] Smith J A C. Epiphytic Bromeliads in LUTTGE, U (Editor). Vascular Plants as Epiphytes [M]. Evolution and Ecophysiology[M]. New York: Springer-Verlag, 1987.

[24] Dressler R L. The Orchids: Nature history and classification[M]. London: Harvard University Press, 1981.

[25] Nadkarni N M, Solano R. Potential effects of climate change on canopy communities in a tropical cloud forest: an experimental approach[J]. Oecologia, 2002, 131: 580– 586

[26] Ramos J G, Grace J. The effects of shade on the gas exchange of seedlings of four tropical trees from Mexico [J]. Functional Ecology, 1990, 4: 667– 677.

[27] Runkel J R. Canopy tree turnover in Old-Growth mesic forests of eastern north America[J]. Ecology, 2000, 81(2): 554– 567

[28] Freiberg M, Freiberg E. Epiphyte diversity and biomass in the canopy of lowland and montane forests in Ecuador[J]. Journal of Tropical Ecology, 2000, 16: 673– 688

[29] Cavelier J, Tanner E, Santan a J. Effect of water, temperature and fertilizers on soil nitrogen net transformations and

- tree growth in an elfin cloud forest of Colombia[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2000, 16: 83–99.
- [30] Cavelier J, Goldstein G. Mist and fog interception in elfin cloud forest in Colombia and Venezuela [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 1989, 5: 309–322.
- [31] Kitayama K. An altitudinal transect study of the vegetation on Mount Kinabalu, Borneo [J]. *Vegetatio*, 1992, 102: 149–171.
- [32] Cavalier J, Solis D, Jaramillo M. A. Fog interception in montane forest across the central Cordillera of Panama [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 1996, 12: 357–369.
- [33] Hutley L B, Doley D, Yates D J, et al. Water balance of an Australian subtropical rainforest at altitude: the ecological and physiological significance of intercepted cloud and fog [J]. *Australian Journal of Botany*, 1997, 114(3–4): 259–275.
- [34] Tanner E V J. Four montane rain forests of Jamaica: a quantitative characterization of the floristics, the soils and the faunamineral levels, and a discussion of the interrelation [J]. *Journal of Ecology*, 1977, 65: 883–918.
- [35] Cavelier J. El ciclo del agua en los bosques matorrales [A]. In: *Bosques de Niebla de Colombia* [M]. Bogotá: Banco de Occidente, 1991: 69–83.
- [36] Wen Yao Li, John E D Fox, ZaiFu Xu. Nutrient fluxes in bulk precipitation, throughfall and stem flow in montane subtropical moist forest on Ailao Mountains in Yunnan, Southwest China [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2002, 18: 527–548.
- [37] Grier C, Nadkarni N M. The role of epiphytes in the nutrient cycles of two rain forest ecosystems [A]. In: *Lugo A E, et al (eds) People and the Tropical Forest* [M]. Washington, DC: U. S. Gov Printing Office, 1987.
- [38] Veneklaas E J, Zagt R J, Leerdam M, Ek R, Broekhoven A J, Genderen M. Hydrological Properties of the epiphyte mass of a montane tropical rain forest Colombia [J]. *Vegetatio*, 1996, 89: 183–192.
- [39] Still C J, Foster P N, Schneider S H. Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests [J]. *Nature*, 1999, 789: 608–610.
- [40] Clark K L, Nadkarni N M, Schaefer D, et al. Atmospheric deposition and net retention of ions by the canopy in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 1998, 14: 27–45.
- [41] Freiberg M. Spatial distribution of vascular epiphytes on three emergent canopy trees in French Guiana [J]. *Biotropica*, 1996, 28: 345–355.
- [42] Turner I M, Tan H T W, Wee Y C, et al. A study of plant species extinction in Singapore: Lessons for the conservation of tropical biodiversity [J]. *Conservation Biology*, 1994, 8(3): 705–712.
- [43] Rao D N. Response of bryophytes to air pollution [A]. In: *Smith A J E (ed). Bryophyte Ecology* [M]. London: Chapman and Hall, 1982: 445–471.
- [44] Ingram S W, Nadkarni N M. Composition and distribution of epiphytic organic matter in a neotropical cloud forest, Costa Rica [J]. *Biotropica*, 1993, 25: 370–383.
- [45] Wolf J D H. Diversity patterns and biomass of epiphytic bryophytes and lichens along an altitudinal gradient in the northern Andes [J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1993, 80: 928.
- [46] Nadkarni N M, Matelson T J. Bird use of epiphyte resources in neotropical trees [J]. *Condor*, 1989, 91: 891–907.
- [47] Brown D H, Hawksworth D L. Alectoria and allied genera in North America [J]. *Opera Botany*, 1977, 42: 1–164.
- [48] 李保贵, 朱华, 王洪. 西双版纳“龙山”片断雨林蕨类植物的变化 [J]. *武汉植物研究*, 2000, 18(6): 479–486.
- [49] 郭水良, 曹同. 长白山森林生态系统树附生苔藓植物分布与环境关系研究 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 922–931.
- [50] 曹同, 郭水良. 长白山主要生态系统苔藓植物的多样性研究 [J]. *生物多样性*, 2000, 8(1): 50–59.
- [51] Wen Yao Li, John E D Fox, ZaiFu Xu. Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao mountain, Yunnan, Southwest China [J]. *Ecological Research*, 2000, 15: 435–447.