

森林内雾水的水文和化学效应研究现状

刘文杰^{1,2,3} 张一平² 马友鑫² 李红梅²

(1. 中国科学院生态环境研究中心 北京 100085; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园 勐仑 666303;
3. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 从森林对雾水的截留量、雾水对森林分布的影响及雾水的水文和化学效应方面, 阐述国外在该领域的研究动态和取得的成果, 以期推动我国在该领域的研究工作。国外的大量研究表明, 雾水对于植物的生长、分布具有重要的生态意义, 是森林生态系统水分平衡、养分循环不可忽视的输入项, 其生态效应是多方面的。因而, 进一步深入研究森林内雾水的水文和化学效应是必要的。

关键词: 森林; 雾水; 水文和化学效应

中图分类号: S715 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2005)02-0141-06

Advances on Study of Hydrological and Chemical Effects of Fogwater on Forest

Liu Wenjie^{1,2,3} Zhang Yiping² Ma Youxin² Li Hongmei²

(1. *Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Beijing 100085;* 2. *Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS Menglun 666303;* 3. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039*)

Abstract: Researches on the relationships between forests and fogwater in foreign countries, focused on the deposition of fogwater onto vegetation as an important hydrological and chemical input, forest canopy interception from fogwater, influence of fog on the distribution of species and the dynamics of vegetation, and its ecological effects were briefly introduced with the aim of promoting the studies in this field in China. According to the reports, the fogwater is one of the most important environmental factors determining the plants growth and distribution, and an important input for water balance and nutrients cycling of the forest in cloud- or fog-inundated montane regions, and its ecological effects take on many aspects. So it is essential to make further research in this field and the future of ecological requires regarding fogwater should be directed towards quantifying its hydrological as well as chemical significance to fog-inundated ecosystems. Among the study methods, the Dawson's work that applied stable tools, using hydrogen and oxygen isotopic 'signatures' and Brunel's two-compartment isotopic mixing model that made it possible to distinguish the plants' use of deep-ground versus above-ground (i. e. fogwater and precipitation) water, is the best way and can be used in further research.

Key words: forests; fogwater; hydrological and chemical effects

在世界一些多雾的地区, 当可记录的降水量成为植被生存的限制因子时, 植物却能正常生长, 其中雾水 (occult precipitation) 扮演着极其重要的角色 (William, 1984)。虽然与地面相接的饱含大量水微滴的雾层在水平表面没有沉降或被截留, 雨量计也无法记录到, 但当风吹动雾到植物体表面时, 较小的雾滴就会被枝叶截获并逐渐合并成大水滴而流落地面, 这种现象被称为“水平降水” (horizontal precipitation, fog drip and cloud drip) (Ingraham *et al.*, 1988)。

雾水作为森林生态系统的一种水分输入, 其生态效应是多方面的 (如: 对森林生态系统水分平衡、养分循环、环境因子调节等的影响) (Bruijnbeel *et al.*, 1995; Asbury *et al.*, 1994; Ishibashi *et al.*, 1995)。因此, 深入研究雾水与森林的关系, 对进一步揭示森林维持物种多样性的环境机制及其可持续发展、森林生态系统水量平衡和养分循环规律、预测气候波动给系统带来的干扰、寻求最优调控措施, 以及研究森林改造局地水分循环和调节气候的生态效益等方面, 均具有较突出的理论和实际意义。

收稿日期: 2003-03-10。

基金项目: 云南省应用基础研究基金 (2001C0023Q)、国家自然科学基金 (30100019) 和中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A) 资助。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 雾与森林分布

早期研究植物与雾水关系(植物分布等)的大量文献主要是针对加利福尼亚北海岸的红杉林(*Sequoia sempervirens*)。Cannon(1901)发现并认为,因受雾水的影响,红杉林被严格地限制在雾带内。Cooper(1917)则认为尽管大量的夏季雾对红杉林的生长、分布是重要的,但它只是一个附加因素。Byers(1953)发现,在海岸谷地及河滩上生长着最好的红杉林,而红杉矮灌丛只分布在雾层很少到达的海湾坡地上。因此,Byers认为雾带对红杉林的影响不仅是形成雾滴增加水分,还在于雾层通过减少日照而削弱蒸发散及降低日间温度。

Went(1955)发现,加利福尼亚托里氏松树(*Pinus torreyana*)被严格限制在 Santa Rosa 雾岛多地面雾的面向海岸的山坡上部,在山坡下部及更高处则没有此种松树分布;在地中海海岸,沿着海岸边缘仅有 10 m 宽的地带分布有橡树(*Quercus ilex*),而此地带内则是海岸雾的多发带。其他有关雾与森林分布关系的文献也很多,如生长稠密的美国西川红杉林分布区与沿岸重雾带差不多相重合(斯波尔,1982);在墨西哥东部 Sierra Madre 山的东坡 1 300~2 400 m 处多雾地带,生长着浓密茂盛的以橡树为优势种的森林(Vogelmann, 1973);在非洲西南沿岸的边缘沙漠带分布有浓密的灌丛,而在其他无雾的低地或高地则很少有植物生长(Billings, 1970)。热带森林常常是与频繁的雾相联系,频繁的雾沉降和雨水为这些热带森林的生长供应了充足的水源,正如 Grubb 认为的那样:低地山地雨林(lower montane rain forest)与频繁的雾相关,高地山地雨林(upper montane rain forest)则与更为频繁、持久的雾相联系,而这 2 种森林类型均被称为热带山地云雾林(tropical montane cloud forest)(Stadtmuller, 1987)。因此, Brown 和 Stadtmuller 认为,频繁的雾是决定某些山地和沿海森林生态系统特征的最重要的因子。

2 森林的雾水输入与利用

毫无疑问,森林林冠将雾水截留以后,会流落到地面。据研究,当空旷地一般雨量计没有收集到水分时,林下可收集到相当数量的从林冠层滴落的雾水(Nagel, 1956; Vogelmann *et al.*, 1968)。例如 Oberlander(1956)在旧金山半岛夏季 40 d 无雨期间,林下收集到 175~425 mm 的雾水;Ekern(1964)在夏威夷的南美松树(*Araucaria excelsa*)下全年收集的额外降水有 750 mm;Vogelmann 等(1968)在 Vermont 森林树冠下收集到的年降水比空旷地多 86%;Arvidsson(1958)在扎伊尔的一处森林下收集到的年降水比空旷地多 20%。Cavelier 等(1996)对巴拿马西部不同林型 14 个观测点的雾截留研究表明,雾截留量随海拔高度的升高而增多,并受盛行风的影响;雾截留量占森林水量年总输入的 2.4%~60.6%,达 142~2 293 mm。William(1984)研究表明,林冠高度和结构、风向和风速、雾中水分含量、叶面积及形状、叶的表面特征及叶的空间分布,是影响叶丛截留雾水的主要因子。Parsons(1960)整个夏季在 Monterey 火炬松(*P. radiata*)下用雨量计收集到 150 mm 雾水,而林冠旁无降水,而且估计年雾水量可达 254 mm(几乎占年雨量的 50%)。Nicholson(1936)在非洲东部山地森林内测得至少多出年雨量 25% 以上的雾水。Waisel(1960)对许多地中海树木和灌木测定了植物对雾水的吸收状况,结果表明,不同种类植物从夜间雾中得到的水分,可从很微小的量变化到叶子鲜重的 12%。Stone(1957)指出,在土壤湿度为永久萎蔫百分点时,若夜间有雾使叶丛湿润,则若干针叶树的苗木可延长存活几个星期;在新西兰岛一些受雾影响的矮灌木树种对光的利用比高地树种更加有效。Went(1955)甚至认为,干旱地带一些植物具有适应性的小叶,并不是为了通常意义的减少蒸腾,而是为了从雾中吸收更多水分,因为小的叶片有利于截留雾水。

采用不同方法测定雾水量已进行了上百年,其中有的用雨量计或其他容器悬挂在林冠以上,有的用金属杆或细铁丝网,甚至用树枝进行截留水实验(William, 1984)。用这些方法测得的数据被认为是过高的估计了实际并不多的雾水,因而引起较多争论(Kerfoot, 1968)。如 Marloth(1906)在非洲南部的森林林冠上,用许多芦苇杆竖立在雨量计的上部收集雾水,其结果是:所收集的雾水比没有放芦苇杆的雨量计多得多;Dieckmann(1931)用一种典型的雾水收集器(将一个直径为雨量计口径 2/3 的纱网圆筒竖立在距雨量计筒口 35 cm 高处)进行雾水收集,其结果进一步证实了 Marloth 的结论。Grunow(1965)也采用了此种纱网筒型收集方法进行对比实验,发现一年内林下比林外多收集到 10%~20% 的降水,而在林缘则达到 50%;后来他又用大的收集槽在林下实验,发现林下雾水为年降水的 13%,林缘相应为 52%。进一步的研究(Vogelmann, 1973)也证实

了最大雾水出现在森林边缘。用纱网筒型收集器的方法被许多研究者采用或改进(Cavelier *et al.*, 1996), 这些研究表明, 由林冠流落的雾水可占年降水的 3.5%~60.6%。Merriam(1973)用人造树叶在风洞实验中测得了雾截留量的动态变化, 并用经验公式很好地模拟了雾截留量。研究表明, 某些形态的树叶可截留更多的雾水, 针叶树截留雾水比阔叶树更为有效, 愈趋近山顶其量愈多(Hunteley *et al.*, 1997)。

许多研究都注意到了雾水的重要性, 认为在多雾的森林地区, 雾水是一种非常重要的生态环境因子(Ishibashi *et al.*, 1995; Billings, 1970; Vogelmann, 1973; Hunteley *et al.*, 1997)。但是, 雾水生态效应的定量化也仅局限在测定滴落到地表的雾水量方面(Aravena *et al.*, 1989; Dawson, 1998)。然而, 稳定性同位素(^2H 和 ^{18}O) 技术的应用则为雾水对地下水和植被作用的定量化提供了有效的手段(Ingraham *et al.*, 1988; 1990)。

最先将稳定性同位素技术应用到区别雾水和雨水研究上的是 Gonfiantini 等(1962), 他在加拿大的纽芬兰对雾水和雨水的稳定性同位素比率(δD 和 $\delta^{18}\text{O}$) 的研究表明, 雾水始终具有较高的同位素比率。这一现象也被 Ingraham 等(1988; 1990; 1992)的观测所证实, 他们的研究表明, 在 Point Reyes 半岛, 雾季 5% 的大气水分以雾滴的形式降落, 并补充地下水; 同时, 他还研究了雾水对高山泉水的补充量, 并且认为稳定性同位素方法是确定雾水如何贡献于地下水及植被利用雾水的最好方法。Aravena 等(1989)在智利北部采用同样的方法研究了雾水对植物的影响, 比较了雨水、雾水、地下水和桉树(*Eucalyptus* sp.) 叶片水的稳定性同位素。他们发现在早晨浓雾时(蒸发进行之前和同位素富集之前), 叶片水和雾水具有相似的同位素比率。但是, 他并没有证明这种相似是由于雾水与叶片内水的同位素交换造成的, 还是由于渗透到植物浅根处的雾滴被植物根吸收后输送到叶片处造成的。White 等(1985)研究表明: 水分在被植物根系吸收和从根向叶片移动时不发生同位素分馏, 因此, 对比植物水分(根系水、茎干水、木质液)与各种水源(雨水、雾水、土壤水、地下水等)的同位素组成可以确定植物对不同水源的选择性和利用比例。Ingraham 等(1995)在加利福尼亚 Point Reyes 半岛对针叶林内的雾水、雨水、土壤水和植物木质部水进行了稳定性同位素的比较研究, 其定性结果表明: 在沿海地带植物全年都在利用雾水, 在稍远处植物仅在夏季利用雾水, 而在其他地方植物仅仅利用地下水。Dawson(1998)采用稳定性同位素 ^2H 和 ^{18}O 技术, 以 Brunel 等(1995)的二分室混合模型(two-compartment mixing model)为基础, 并做了假设后(和浅层土壤水一样, 对植物利用来说, 雾水(夏季)和雨水(冬季)水分是同等功效的), 对加利福尼亚北海岸红杉林吸收雾水效应的研究表明: 森林平均每年 34% 的水分输入得自雾水, 而空旷地仅为 17%; 整个夏季, 森林上层树木 19% 的水分输入来自雾水, 下层树木则高达 66%, 且对上层树木而言, 其 13%~45% 的年蒸发散来自雾水; 通过根部吸收林冠滴落的雾水是植物利用雾水的主要形式。Dawson 的研究还表明, 在降雨较少的年份, 植物对雾水的依赖性更强。

3 雾水的化学效应

雾的形成不仅凝结水汽、沉降养分进入森林, 同时也释放了凝结潜热而减弱了降温强度(William, 1984), 缩短了日照时间而消减蒸发散, 这对缓解植物干旱、补充养分不足、减弱因低温加剧的光抑制等方面起着重要的作用。林冠截留的雾水对植物体表面分泌物进行溶解、枝叶对雾水中离子的吸收以及雾水对枝叶表面粉尘、微粒等大气沉降物的淋洗, 使得由枝叶流落的雾水化学成分发生了很大变化, 并作为森林水文、化学循环的关键环节而影响养分循环(Bruijnbeel *et al.*, 1995; 1998; Vitousek *et al.*, 1989; Weathers *et al.*, 1997)。由于雾滴内的 CO_2 含量高, 雾滴被林冠截留后对植物体表面有机分泌物的溶解和淋洗, 雾不仅增强了 CO_2 的供应量, 同时也增加了土壤有机质及养分含量(Asbury *et al.*, 1994)。因而, 雾的存在对某些类型森林生态系统的分布起着决定性的作用(斯波尔, 1982), 尤其是热带山地云雾林(Stadtmuller, 1987)。含有较高酸度和养分浓度的雾水对植物叶片的生理生态有着极大的影响(Asbury *et al.*, 1994), 可影响到叶片的光合特性及其与氮的关系(Schier, 1992)。同时, 由于叶片对雾的截留作用, 持久的叶片水层本身就是一种降低某些植物光合作用的因素(Ishibashi *et al.*, 1995)。由于雾的出现, 又可导致光照强度降低 10%~50%, 进而影响光合作用(Asbury *et al.*, 1994)。Gindel(1965)研究表明, 在一些沙漠和亚热带地区, 雾水对森林植物的生存和发展具有非常重要的作用, 植物可从雾水中吸收到一种对其养分循环起非常重要作用的铁离子。在 Puerto Rico 热带森林中, 随雾水沉降的养分元素可提供全年降水(雾水+雨水)携带养分输入的 8%~30%(Asbury *et al.*, 1994), 而 Lovett 等(1982)对北美阿巴拉契亚山脉的冷杉(*Abies balsamea*) 林的研究表明: 森林全年得到的

雾水量为年降雨量的 46% , 随雾水输入森林的养分可达年降水养分的 150%~ 430%。

对某些山地森林生态系统来说, 沉降到森林内的雾水被认为是一种非常重要的化学输入(Lovett *et al.* , 1982; Weathers *et al.* , 1988)。由于人类活动造成的环境污染的加重及对生态系统的干扰, 有关雾水的化学沉降效应的研究也受到了极大的关注和促进, 这些研究主要集中在可能受严重污染的温带多雾地区, 尤其是在北美和欧洲(Lovett *et al.* , 1982; 1990; Mueller *et al.* , 1988; Dollard *et al.* , 1983; Collett *et al.* , 1990)。而在偏远的山区, 特别是热带地区, 有关雾水沉降的研究较少(McDowell, 1988)。这些研究表明, 大部分地区雾水中的化学离子浓度高于雨水 3~ 10 倍, 雾水中高浓度的 H^+ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 离子主要是人类排放的 NO_2 、 NH_3 和 SO_2 所造成(Warneck, 1988; Irving, 1991)。由于化学离子沉降速度与雾的形成紧密联系, 山地森林地区风速大、雾中液态水含量和雾频率高、雾持续时间长, 因而与相邻低海拔地区相比, 山地森林生态系统内沉降雾水的化学离子浓度较高(Asbury *et al.* , 1994; Weathers *et al.* , 1988; Vong *et al.* , 1991; Johnson *et al.* , 1992; Miller *et al.* , 1993)。例如, 在热带山地 Monteverde, 雾水中的 H^+ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 离子浓度分别为 Puerto Rico 地区相应值的 5. 5、1. 7、4. 7 倍(Asbury *et al.* , 1994; Lovett *et al.* , 1990), 但通常又低于北美温带山地的相应值(表 1)(Clark *et al.* , 1998)。然而, 高浓度的 H^+ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 离子的沉降又可能会导致部分地区森林衰退、N 饱和、土壤酸化和地表水中 H^+ 、 NO_3^- 离子浓度的升高(Johnson *et al.* , 1992; Schulze, 1989; Aber, 1992; Stevens *et al.* , 1994; Dies *et al.* , 1995)。

表 1 美洲山地森林部分地区雾水化学
Tab. 1 Cloud water chemistry at montane forest sites in America

地点 Location	离子浓度 Ion concentration/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)						
	H^+	NO_3^-	NH_4^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+
热带地区 Tropical sites							
委内瑞拉 Venezuela Caracas	23	94	177	64	9	29	9
美国 USA Pico del Oeste	20	60	32	650	85	63	25
波多黎各 Puerto Rico	28	64	32	397	44	31	13
哥斯达黎加 Costa Rica Monteverde	132	103	149	365	63	35	31
温带地区 Temperate sites							
美国 USA Whiteface Mountain	122	62	74	3	3	11	3
New York	274	115	124	—	—	—	—
Shaver Hollow	171	94	93	—	—	—	—
Virginia	205	155	84	13	2	5	3
Mnt. Mitchell	335	130	175	—	—	—	—
North Carolina	398	174	184	—	—	—	—
英国 UK Mnt. Moosilauke	263	132	107	—	—	—	—
New Hampshire	270	180	102	32	19	10	11

4 研究趋势

普遍存在的雾水被植物截留或形成在植物表面, 它们对植物的生长、发展和分布必定具有非常深远的影响。对某些森林类型的地理分布来说, 雾可能是最重要的环境因子之一, 尤其是热带山地森林、沿海地区森林和沙漠植被。因此, 在多雾区研究森林集水区水量平衡、养分循环时, 雾水是不可忽视的输入项。

Dawson(1998) 将同位素示踪技术开创性地应用到雾水生态意义研究方面, 无疑对定量分析不同生境下雾水的来源、走向、植物利用雾水的机制等起到极大的推动作用。同样, 同位素示踪技术也为雾水在森林生态系统生物地球化学循环中的作用的研究提供了有效的手段(Weathers, 1999)。显然, 进一步的深入研究应该集中在多雾森林生态系统内的植物是否利用、如何利用和利用多少这部分雾水, 雾和雾水如何影响森林蒸发散、光合作用、能量分配, 以及雾水在森林生态系统生物地球化学循环中的作用。

尽管森林内雾水沉降的实际数量仍然是处于粗略的估计或模拟计算阶段, 但随着大量试验的进行, 其数值是可计算和测量到的, 森林获取雾水水分和养分的机制也会得到揭示。不论这种研究的目的是为了改善气候, 还是增强地区水源的合理利用, 或是揭示雾水对植物分布、动态的影响, 进一步深入研究雾水的生态意义是绝对必要的。

参 考 文 献

- 斯波尔 H (赵克绳等译). 1982. 森林生态学. 北京: 中国林业出版社, 108– 110
- Aber J D. 1992. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Tree*, 7: 220– 224
- Aravena R, Suzuki O. 1989. Coastal fog and its relation to the groundwater in the IV region of Northern Chile. *Chemical Geology (Isotopic Geoscience Section)*, 79: 83– 91
- Arvidsson I. 1958. Plants as dew collectors. In: *International Union of Geodesy and Geophysics*. 2: 481– 484
- Asbury C E, McDowell W H. 1994. Solute deposition from cloud water to the canopy of a Puerto Rican montane forest. *Atmospheric Environment*, 1994, 28: 1773– 1780
- Billings W D. 1970. *Plant, Man and the Ecosystem*. 2nd ed. California: Wadsworth, 40– 55
- Bruijnæel L A, Proctor J. 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical mountain cloud forests: what do we really know? In: Hamilton L S. *Tropical montane cloud forests*. New York: Springer, Berlin Heidelberg, 38– 78
- Bruijnæel L A, Veneklass E L. 1998. Climate conditions and tropical montane forest productivity: the fog has not lifted yet. *Ecology*, 79: 3– 9
- Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. 1995. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 167: 351– 368
- Byers H R. 1953. Coast redwoods and fog drip. *Ecology*, 34: 192– 193
- Cannon W A. 1901. Relation of redwoods and fog. *Torrey*, 1: 137– 139
- Cavelier J. 1996. Fog interception in montane forest across the Central Cordillera of Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 12: 357– 369
- Clark K L, Hackman N M. 1998. Cloud water and precipitation chemistry in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica. *Atmospheric Environment*, 32: 1595– 1603
- Collett J L, Daube B C. 1990. A comparison of 2 cloudwater-fogwater collectors-the rotating arm collector and the Caltech active strand cloudwater collector. *Atmospheric Environment*, 24A: 1685– 1692
- Cooper W C. 1917. Redwoods, rainfall and fog. *Plant world*, 20: 179– 189
- Dawson T E. 1998. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, 117: 476– 485
- Dieckmann A. 1931. An attempt to measure precipitation from drifting fog. *Meteorologische Zeitschrift*, Braunschweig, 48: 400– 402
- Dise N B, Wright R F. 1995. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 71: 153– 161
- Dollard G J, Unsworth M H, Harvey M J. 1983. Pollutant transfer in upland regions by occult precipitation. *Nature*, 302: 241– 243
- Ekem P C. 1964. Direct interception of cloudwater on Lanai Hale, Hawaii. *Soil Sci Soc Am Proc*, 28: 419– 421
- Gindell L. 1965. Irrigation of plants with atmospheric water within the desert. *Nature*, 207: 1173– 1175
- Gonfiantini R, Longinelli A. 1962. Oxygen isotopic compositions of fog and rains from the North Atlantic. *Experientia*, 18: 222– 223
- Grunow J. 1965. Interception in a Spruce stand on the Hohenpeissenberg and methods of measuring it. *Fortwiss Cbl*, 84: 212– 229
- Huntley L B, Doley D. 1997. Water balance of an Australian subtropical rainforest at altitude: the ecological and physiological significance of intercepted cloud and fog. *Aust J Bot*, 45: 311– 329
- Ingraham N L, Matthews R A. 1988. Fog drip as a source of ground water recharge in northern Kenya. *Water Resource Research*, 24: 1406– 1410
- Ingraham N L, Matthews R A. 1990. A stable isotopic study of fog: the Point Reyes Peninsula, California, USA. *Chemical Geology (Isotopic Geoscience Section)*, 80: 281– 290
- Ingraham N L, Shadel C. 1992. A comparison of the toluene distillation and vacuum/heat methods for extracting soil water for stable isotopic analysis. *Journal of Hydrology*, 140: 371– 387
- Ingraham N L, Matthews R A. 1995. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California. *Journal of Hydrology*, 164: 269– 285
- Irving P M. 1991. *Acidic deposition: State of the Science and Technology*. Vol. 1
- Emissions, Atmospheric Processes and Deposition. The U S National Acid Precipitation Assessment Program
- Ishibashi M, Terashima I. 1995. Effects of continuous leaf wetness on photosynthesis: adverse aspects of rainfall. *Plant Cell and Environment*, 18: 431– 438
- Johnson D W, Lindberg S E. 1992. *Atmospheric deposition and nutrient cycling in Forest ecosystems*. New York: Springer
- Kerfoot O. 1968. Mist precipitation on vegetation. *Forestry Abstract*, 29: 8– 20
- Lovett G M, William A R. 1982. Cloud droplet deposition in Subalpine Balsam Fir Forest: Hydrological and chemical inputs. *Science*, 218: 1303– 1304
- Lovett G M, Kinsman J D. 1990. Atmospheric pollutant deposition to high-elevation ecosystems. *Atmospheric Environment*, 24A: 2767– 2786
- Marloth R. 1906. The amounts of water collected by shrubs and trees from drifting fog and clouds. *Meteorologische Zeitschrift*, Braunschweig, 23: 547– 553
- McDowell W H. 1988. Potential effects of acid deposition on tropical terrestrial ecosystems. In: Rodhe H, Herrera R. *Acidification in Tropical Countries*. New York: John Wiley and Sons, 117– 139
- Merniam R A. 1973. Fog drip From artificial leaves in a fog wind tunnel. *Water Resour Res*, 9: 1591– 1598
- Miller E K, Friedland A J. 1993. Atmospheric deposition to forests along an elevational gradient at Whiteface Mountain, NY, USA. *Atmospheric Environment*, 27A: 2121– 2136

- Mueller S F, Weatherford F P. 1988. Chemical deposition to a high elevation red spruce forest. *Water, Air, Soil Pollution*, 38: 345– 363
- Nagel A. 1956. Fog precipitation on Table Mountain. *Q J Roy Met Soc*, 82: 452– 460
- Nicholson J W. 1936. The influence of forests on climate and water supply in Kenya. *E Afr Agric J Belg*, 66: 433– 439
- Oberlander G T. 1956. Summer fog precipitation in San Francisco peninsula. *Ecology*, 37: 851
- Parsons J J. 1960. Fog drip from coastal stratus, with special reference to California. *University of California Publications in Geography*. Berkeley, 10: 113– 200
- Schier G A. 1992. Atmospheric deposition effects on foliar injury and foliar leaching in red spruce. In: Egar C. eds. *Ecology and decline of red spruce in the eastern united states*. Berlin, Germany, 271– 294
- Schulze E D. 1989. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 244: 776– 783
- Stadtmuller T. 1987. Cloud forest in the humid tropics. *Abibliographic review*. The United Nations University, Tokyo, Japan, 23– 33
- Stevens P A, Norris D A. 1994. The impacts of atmospheric nitrogen inputs on throughfall, soil and stream water interactions for different aged forest and moorland catchments in Wales. *Water, Air, Soil Pollution*, 73: 297– 317
- Stone E C. 1957. Dew as an ecological factor. I. A review of the literature. *Ecology*, 38: 407– 413
- Vitousek P M, Shearer G. 1989. Foliar ^{15}N natural abundance in Hawaiian rainforest: patterns and possible mechanisms. *Oecologia*, 78: 383– 388
- Vogelmann H W, Siccama T. 1968. Precipitation from fog moisture in the green mountains of Vermont. *Ecology*, 49: 1205– 1207
- Vogelmann H W. 1973. Fog precipitation in the cloud forest of eastern Mexico. *Bioscience*, 23: 96– 100
- Vong R J, Sigmon J T, Mueller S F. 1991. Cloud water deposition to Appalachian forests. *Environmental Science and Technology*, 25: 1014– 1021
- Waisel Y. 1960. Ecological studies on *Tamarix aphylla* Karst. *Phyton*, 15: 19– 28
- Wameck P. 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. San Diego, California: Academic Press,
- Weathers K C. 1988. Cloudwater chemistry from ten sites in North America. *Environmental Science Technology*, 22: 1018– 1028
- Weathers K C. 1999. The importance of cloud and fog in the maintenance of ecosystems. *Tree*, 14: 214– 215
- Weathers K C, Likens G R. 1997. Clouds in Southern Chile: an important source of nitrogen to nitrogen-limited ecosystems. *Environmental Science Technology*, 31: 210– 213
- Went F W. 1955. Fog, mist, dew and other sources of water. *USDA yearbook of Agriculture*, Washington, DC, 1955: 103– 109
- William R. 1984. Sources of water. In: Kozłowski T T. *Water deficits and plant growth*. New York: Academic Press, 1– 20
- White I W C, Cook E R, Lawrence J R, *et al.* 1985. The D/H ratios of sap in trees: Implications for water sources and tree ring D/H ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 237– 246