

# 北京山区林地凝结水特征研究

刘文娜<sup>1</sup>, 贾剑波<sup>2</sup>, 涂志华<sup>3</sup>, 余新晓<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083;  
2. 中南林业科技大学 林学院, 湖南 长沙 410004; 3. 辽宁石油化工大学 生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001)

**摘要:** [目的] 研究北京山区林地凝结水的发生情况及分布特征, 为该地区的水资源合理利用提供科学依据。[方法] 利用首都圈森林生态定位站的大型称重式蒸渗仪对北京山区4种林地的凝结水进行2 a连续观测, 同时监测林地各项气象因子, 分析不同林地凝结水的分布特征以及影响因子。[结果] (1) 北京山区非生长季凝结水出现天数和凝结水量较生长季多, 非生长季月平均凝结水量约4.5 mm, 生长季月平均凝结水量约1.6 mm; (2) 4种林分年凝结水量大小关系表现为草地(38 mm) > 栓皮栎(36 mm) > 油松(30 mm) > 侧柏(25 mm), 与年凝结水出现天数大小关系相同, 灌草丛是产生凝结水的主要场所, 阔叶林产生的凝结水远高于针叶林; (3) 空气温度和相对湿度对凝结水的产生起到决定性作用。[结论] 北京山区林地凝结水在时间上分布不均, 受环境因子和植被因子的综合影响。

**关键词:** 凝结水; 蒸渗仪; 时空分布特征; 温度梯度; 叶表面属性

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0298-05

**中图分类号:** S157.2

**文献参数:** 刘文娜, 余新晓, 贾剑波, 等. 北京山区林地凝结水特征研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 298-302. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.050

## Condensed Water Characteristics of Forest Land in Beijing Mountainous Areas

LIU Wenna<sup>1</sup>, JIA Jianbo<sup>2</sup>, TU Zhihua<sup>3</sup>, YU Xinxiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Education Ministry, School of Soil Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. School of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hu'nan 410004, China; 3. Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the occurrence and distribution characteristics of condensed water of forest land in Beijing mountain areas in order and to provide a support for rational utilization of water resources. [Methods] We used four high precision weighing lysimeters at a site of China forest ecosystem research network (CFERN) during 2011—2012 to observe the distribution characteristics of woodland condensed water and meteorological factors in Beijing mountain area, and to analyze the distribution characteristics and the impact factors of condensed water in different kinds of woodlands. [Results] (1) There existed significant difference of woodland condensed water for different seasons in Beijing mountain area. The days and amounts of condensed water in the autumn and winter were far longer and higher than the corresponding values observed in spring and summer. The mean amount of monthly condensation water was about 4.5 mm in non-growing season, was 1.6 mm in growing season. (2) The order of the condensation water capacity in four forests was: grassland (38 mm) > *Quercus variabilis* plantations (36 mm) > *Pinus tabulaeformis* pure plantations (30 mm) > *Platycladus orientalis* plantations (25 mm). The amount of condensed water of grassland was more than that of trees, and the broadleaf forest was more than the value of coniferous forest. (3) We can learn from the amount, the spatial and temporal characteristics of those different species that the temper-

收稿日期: 2015-02-13

修回日期: 2015-04-07

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“基于稳定同位素的典型森林生态系统水、碳过程及其耦合机制研究”(41430747); 国家自然科学基金青年项目(41401013); 科技创新服务能力建设—协同创新中心—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011协同创新中心)(市级)(PXM2016\_014207\_000038)

第一作者: 刘文娜(1994—), 女(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为森林水文与水土保持。E-mail: lwnfdxl@163.com。

通讯作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要从事森林水文与水土保持方面的研。E-mail: yuxinxiao8888@163.com。

ature gradient, relative humidity and the leaf surface properties were the most important affecting factors on air water condensation. [Conclusion] The temporal distribution of condensed water of forest land is non-uniform in Beijing mountain areas, and the condensed water distribution was affected both by environmental and vegetation factors.

**Keywords:** condensed water; lysimeter; spatial and temporal characteristics; temperature gradient; leaf surface properties

凝结水对于降雨稀少地区植物的生长具有非常重要的影响,凝结水被植物叶片拦截,可降低叶片表面温度,减少植物蒸腾的水分耗损<sup>[1]</sup>,甚至有研究<sup>[2-4]</sup>表明,植物叶片可以直接吸收凝结水,从而降低内部水分亏缺。虽然凝结水日凝结量较小,但其作为一种长期稳定的水资源,在干旱时期维持植物生长、保证生态系统稳定性等方面起着重要的作用<sup>[5]</sup>。人类对凝结水的研究明显具有区域性。目前,国内外对干旱区半干旱和热带雨林地区的凝结水的研究较多,对干旱区半干旱去凝结水产量和产生规律有一定的研究<sup>[6-9]</sup>。而对低海拔区暖温带的华北平原地区报道较少<sup>[5]</sup>,对凝结水总量的分析目前还没有报道。且最近 40 a 来,北方非生长季(秋冬季)寒潮减弱,微量降水事件显著减少,使得非生长季成为干旱时期<sup>[10]</sup>。一般认为凝结水的产生有两种形式:一是植物或地表直接从空气中获得凝结露水,属于水分纯输入;二是由于植物自身吐水形成,是水分发生转移的过程。传统的凝结水收集方法主要有微型测渗仪法和人造凝结面法<sup>[11-12]</sup>等,两种方法都存在不足:微型测渗仪大多都是自制测渗仪<sup>[13]</sup>,只能测小植株的凝结水,而不能进行大型乔木凝结水测量,且大部分关于植物表面凝结露水的研究均没有将凝结露水与植物吐水分别开来<sup>[14]</sup>;人造凝结面法吸收凝结水的凝结面是玻璃板<sup>[12]</sup>,这与植物的叶片表面属性不同,无法代表林地下凝结水。大型称重蒸渗仪利用称重系统连续而精确的测定土壤与植被水分的变化量,能够排除植物吐水形成的露水,而且是整体测量,排除了设立适宜高度测定的难题,被认为是测定凝结水的最好方法<sup>[15]</sup>。本研究利用大型蒸渗仪,对位于华北平原半湿润半干旱代表区的北京山区林地凝结水的特征量进行连续 2 a 的观测与统计,记录到露、雾、霜等所有形式的凝结水,研究该地区不同林地的凝结水发生情况、凝结水量以及时空分布特征,对精确计算北京地区水量输入量具有重要的参考价值,也可为该地区的水资源合理利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概 况

本研究试验区位于北京林业大学西山教学实习

林场,距离北京市区西 30 km 处,北纬 $40^{\circ}3'46.13''$ — $40^{\circ}3'46.79''$ ,东经 $116^{\circ}5'45.47''$ — $116^{\circ}5'44.71''$ 。海拔 145 m,气候属于暖温带半湿润季风型大陆性气候,年均温 $8.5\sim 9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $3\ 385\sim 4\ 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 150 d 左右,多年平均降水量 700 mm,其中 7—9 月占全年降水量的 70% 以上。试验区油松和侧柏、栓皮栎纯林较多,土层厚度 40—60 cm,通气透水性较差。林下灌木有荆条(*Vitex negundo*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、孩儿拳头(*Grewia biloba*)和构树(*Broussonetia papyrifera*),盖度 80% 以上。

### 1.2 研究方 法

所用的大型称重式蒸渗仪由土体、称重系统和水分监测系统组成,表面积为 $4\text{ m}^2$ ( $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ ),总深度为 2.3 m,用原状土填满。最小分辨率为 40 g,对应能分辨出 0.01 mm 水深。4 台蒸渗仪按照矩形模式排列,分别为草地、侧柏、栓皮栎和油松。每一台周围为分别种植长势良好的同一树种形成纯林,林分密度大致为 $2\ 500\text{ 株}/\text{hm}^2$ ,草地周围不种。观测时间为 2011 年 1 月到 2012 年 12 月,观测频率为 10 min/次。同时,在蒸渗仪旁边布设了 HOBO 全自动小型气象站,可实时采集距地表不同高度的温度(5, 10, 30, 100, 200 cm)、湿度、风速、太阳辐射、雨量、气压、露点等多项微气象因子信息,观测频率为 10 min/次。另外,利用叶面积仪(LI-3000 C 便携式叶面积仪,美国 LI-COR 公司),冠层分析仪(LAI-2200C 植物冠层分析仪,美国 LI-COR 公司)和土壤水分测定仪(EC H<sub>2</sub>O 土壤含水量监测系统,美国 Decagon 公司)分别测定同频率的叶面积、叶面积指数(LAI)和表层土壤水分。

凝结水的测定用无降水输入时蒸渗仪重量的增加量来表示,但重量的增加并不都是凝结水引起的。因此,根据凝结水的形成过程,符合以下条件即作为凝结水量:(1)净辐射 $\leq 0$ 的时段(夜间);(2)一个夜晚增重不大于 $200\text{ g}$ ( $0.05\text{ mm}$ );(3)相对湿度 90% 以上;(4)平均风速 $\leq 0.5\text{ m/s}$ ;(5)晴朗少云<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分 析

### 2.1 凝结水天数时间分布特征

图 1—2 分别为 2011 和 2012 年 4 种林地各月凝

结水天数统计图。整体趋势为非生长季多、生长季少。北京山区非生长季温度较低,早晚温差大,使得夜间温度常常低于露点温度,因此出现凝结水的夜晚数量明显多于生长季。据统计,2011 和 2012 年出现凝结水的夜晚数量约占整年的 45% 左右。其中,2011 年非生长季(1—2 月和 9—12 月)侧柏、油松、栓皮栎和草地出现凝结水夜晚数量分别为 107,106,139 和 142 d,分别占到全年的 62.6%,58.7%,66.8%和 67.7%。2012 年非生长季(1—2 月和 9—12 月)侧柏、油松、栓皮栎和草地出现凝结水夜晚数量分别为 133,98,154 和 179 d,分别占到全年的 52.9%,51.3%,57.1%和 60.7%。同时,从各月来看,非生长季出现凝结水的夜晚约占到整月的 82%~85%左右,生长季约占 20%~25%之间。

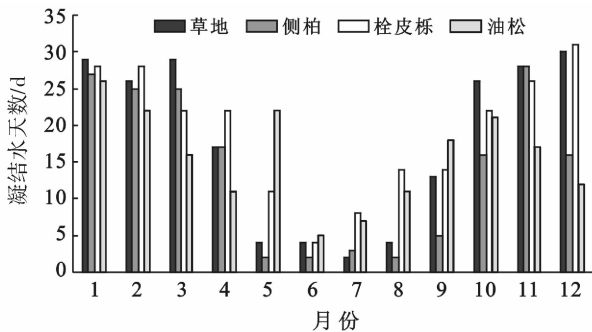


图 1 研究区 2011 年 4 种林地凝结水天数统计

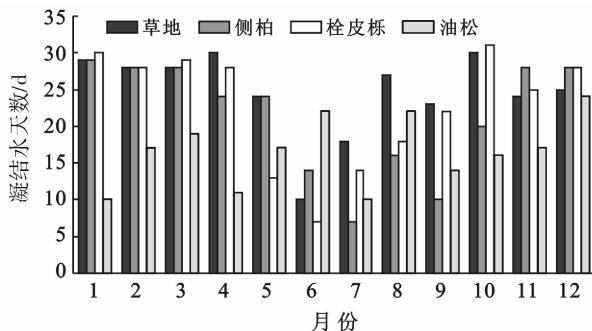


图 2 研究区 2012 年 4 种林地凝结水天数统计

通过 SPSS 13.0 方差分析,发现两年内草地出现凝结水的天数与侧柏、油松出现天数方差分析的 Sig 值分别为 0.001 和 0.000,均小于 0.05,说明草地与侧柏、油松出现凝结水天数有显著性差异;栓皮栎与侧柏、油松方差分析的 Sig. 值分别为 0.009 和 0.003,均小于 0.05,说明其存在显著性差异。定量分析发现,草地出现凝结水的天数要多于 3 种乔木。尤其是非生长季,出现天数占 90% 以上。全年出现天数平均达到了 240 d 以上,比栓皮栎多 10 d 左右,比油松和侧柏多 40~50 d 左右。侧柏和油松曲线的波

动性较大,主要是因为针叶树叶面积变化的规律性没有阔叶树和草地明显。

生长季的栓皮栎(阔叶树)出现凝结水天数大于油松、侧柏(针叶树)出现天数,分析原因可能是叶面积指数不同。在生长季,对 3 台蒸渗仪中栓皮栎、油松、侧柏取 20 片叶子进行叶面积指数(LAI)测定。测得结果为,栓皮栎平均 LAI 为 3.32,油松平均 LAI 为 2.43,侧柏平均 LAI 为 2.98,栓皮栎(阔叶树)平均 LAI 大于油松、侧柏(针叶树),使栓皮栎的叶表面更容易沉降水汽。在非生长季,由于栓皮栎属温带落叶阔叶,其枯枝落叶脱落至地表,覆盖在土壤表层,使得地面接收到的辐射、温度和土壤蒸发力存在差异,土壤贴地层的温度降低,更接近露点温度,夜间出现凝结水可能性较大,而油松、侧柏属温带常绿针叶林,非生长季地表无枯枝落叶覆盖,贴地层温度较栓皮栎高,因此夜间凝结水出现天数较少。

## 2.2 凝结水量时间分布特征

图 3—4 分别为 2011 和 2012 年侧柏、油松、栓皮栎和草地各月凝结水量的统计结果。与各月凝结水天数的整体趋势相同,非生长季的平均月水量为 4.5 mm 左右,而生长季只有 1.6 mm 左右。最大值出现在 12 月或 1 月,最小值出现在 6—7 月。年内凝结水总量约为 33 mm 左右,全年曲线表现为凹形。由此可以看出,温度变化依然是水汽沉降的最关键因素。据统计,2011 和 2012 年的凝结水量分别平均约占全年降水量的 4.61% 和 4.23% 左右。其中,2011 年间侧柏、油松、栓皮栎和草地全年凝结水量分别为 26.2,30,37.9 和 38.7 mm,分别占到全年降水量的 3.64%,4.16%,5.26% 和 5.37%。2012 年间侧柏、油松、栓皮栎和草地全年凝结水量分别为 24.39,30.47,35.25 和 41.06 mm,分别占到全年降水量的 3.15%,3.92%,4.55% 和 5.29%。由于 2012 年 1—2 月无降水输入,导致空气相对湿度明显低于 2011 年,因此各树种凝结水量也低于 2011 年同期,表明空气的相对湿度也是影响水汽沉降的重要因素。

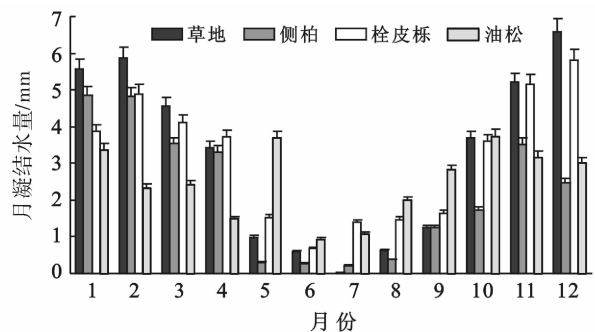


图 3 研究区 2011 年 4 种林地的月凝结水量统计

通过 SPSS 13.0 方差分析,发现侧柏的月凝结水量与草地、栓皮栎的月凝结水量方差分析的 Sig 分别为 0.039, 0.027 均小于 0.05,说明侧柏月凝结水量与草地、栓皮栎存在差异。定量分析发现,草地凝结水量要多于 3 种乔木,11—12 月凝结水量平均达到 5 mm 左右。分析原因主要包括:(1) 草地的覆盖率与乔木密度不同。3 种乔木的林分密度大致为 2 500 株/hm<sup>2</sup>,草地盖度为 85%,较高盖度的草覆盖在地表,增大空气与植被的接触面积,增大凝结水量;(2) 草地贴地层温度更接近露点温度。利用气象站对地表处和距地面 5, 10, 30, 100, 200 cm 处温度的测量发现,30 cm 以下的贴地层空气温度存在明显的梯度,距地面越近,温度越低,接近露点温度。因此可以推断,由于秋冬季夜晚贴地层温度远低于 30 cm 以上空气温度,使得贴地 30 cm 以上空气中的水汽很容易冷凝沉降在植物叶片表面,而冠层高度的空气与贴地层空气之间存在温度梯度,因此水汽冷凝沉降的时间相应的缩短。所以草地产生的凝结水量要高于 3 种乔木;(3) 草地土壤的干燥程度大。利用土壤水分测定仪测定 4 种植被下表层土壤水分,发现秋冬季的草地土壤比其他林地土壤含水率低,因此空气中的水汽不仅仅冷凝于植物体表,同时也被土壤吸收。

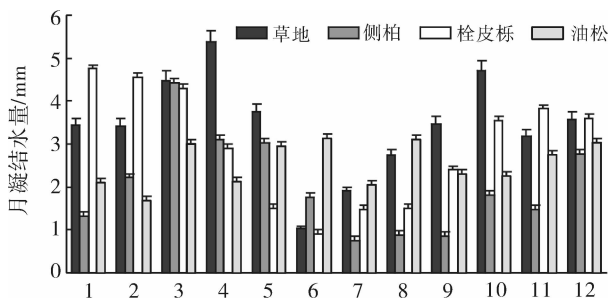


图 4 研究区 2012 年 4 种林地的月凝结水量统计

从针阔叶树种间对比来看,栓皮栎产生的凝结水量高于油松和侧柏,年平均凝结水量比侧柏和油松多 10 mm 左右。其与凝结水出现天数的规律相同,原因也相同。同时,栓皮栎的凝结水产生量呈明显的季节性,曲线的规律性明显而稳定,而侧柏和油松的变化虽然符合秋冬多、春夏少的规律,但季节性不太明显,曲线的波动性较大,表明针叶树凝结水量的影响因素不仅仅是由于叶片的数量、面积大小以及叶表面属性占主导影响,温度、相对湿度和辐射等气象因子的影响也较为明显。

### 2.3 凝结水量与气候因子的关系

2.3.1 凝结水量与相对湿度的关系 可用线性方程对平均凝结水量与相对湿度进行很好地拟合( $R^2 =$

0.713 2)。通过拟合分析结果可以看出,相对湿度是影响凝结水量的一个重要因子,凝结水量与相对湿度存在正相关关系,相对湿度越大,空气中水汽含量越多,凝结水的量也就越大。当某一地区相对湿度大于 55% 的时候,就会产生凝结水。

2.3.2 凝结水量与平均温度的关系 可用线性方程对平均凝结水量与平均温度进行很好地拟合( $R^2 = 0.782 2$ )。通过拟合分析结果可以看出,温度对凝结水量的影响显著,凝结水量与平均温度存在负相关关系,平均温度越高,蒸发量越大,凝结水的量越小。高温会加速辐射冷却,但大气逆辐射也会增大,削弱冷却,导致凝结水量降低。

## 3 结论与讨论

(1) 北京山区非生长季凝结水夜晚数量约占全月的 82%~85% 左右,凝结水量月平均为 4.5 mm,生长季凝结水夜晚数量约占全月的 20%~25% 左右,凝结水量月平均为 1.6 mm,全年出现凝结水的夜晚数量约占整年的 45% 左右,凝结水年平均占总降水量的 3% 左右,这说明山区林地在非生长季出现凝结水的的天数和凝结水量都较生长季的多。刘文杰等<sup>[9]</sup>在西双版纳热带季节雨林里观测林冠穿透雾水时发现,雾水极大的弥补了降雨量的不足,且在降雨少的年份,这种作用更为重要。这说明凝结水对于北京山区生态系统水分输入有一定的影响,尤其是非生长季无降水的情况下,凝结水可以为浅根性植物提供少量水资源,维持补给土壤水分。

(2) 不同林地比较来看,凝结水出现天数和凝结水量大小关系均表现为:草地>栓皮栎>油松>侧柏。草地年凝结水量约为 38 mm 左右,要明显高于乔木林 31 mm,阔叶林年凝结水量约为 36 mm 左右,要高于针叶林的 26 mm。从各树种之间凝结水天数与量表现出的差异可以看出,凝结水发生天数多少和凝结水量大小除了受季节变化的影响外,还受下垫面植被的影响,这与叶有华等<sup>[17]</sup>的研究结论一致。

(3) 草地出现凝结水天数和凝结水量大于乔木的主要原因是盖度、贴地层温度和土壤水分的影响,贴地 30 cm 空气中的水汽很容易冷凝沉降在植物叶片表面,草地的叶片处在贴地 30 cm 内,因此可以推断出灌草丛是产生凝结水的主要场所;阔叶树出现凝结水天数和凝结水量大于针叶树的主要原因是生长季的叶面积指数不同,阔叶树叶面积指数大,沉降的水汽多,非生长季枯落物层厚度和枯落物量不同,使得地面接收到的辐射、温度和土壤蒸发力存在差异,所以不同树木的土壤产生的凝结水量也不尽相同。

综合上面的规律,研究不同树种沉降凝结水的能力,对增加地区凝结水量有重要的参考价值。因此,对于北方非生长季干旱时期,增加地表植被的覆盖,还有利于促进凝结水的沉降,增加大气湿度。

(4) 从各树种凝结水量与空间分布差异可知,温度梯度和相对湿度是影响凝结水的最主要因素,温度越高,越不利于凝结水的形成;相对湿度也对凝结水的产生有较大影响,相对湿度越高,凝结水形成越多。因此,空气温度和相对湿度对凝结水的产生起到决定性作用。2012 年非生长季的凝结水量和凝结天数平均值均小于 2011 年非生长季,分析可能由于近年来气候变暖导致冬季气温升高,降水减少,有可能会导导致凝结水的含量下降,影响生态系统水分输入,这些方面仍需进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈荷生,康跃虎.沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义[J].干旱区资源与环境,1992,6(2):63-72.
- [2] Martin C E, Von Willert D J. Leaf epidermal hydathodes and the ecophysiological consequences of foliar water uptake in species of *Crassula* from the Namib desert in southern Africa[J]. Plant Biology, 2000,2(2):229-242.
- [3] Munne-bosch S, Nogues S, Alegre L. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two evergreen shrubs growing in Mediterranean field conditions[J]. New Phytology, 1999,144(1):109-119.
- [4] Stone E C. Dew as an ecological factor(I): A review of the literature[J]. Ecology, 1957,38(3):407-413.
- [5] 冯欣,高业新,张亚哲.华北平原典型区域土壤凝结水观测及其影响因素研究[J].南水北调与水利科技,2013,5(11):132-135.
- [6] 王哲,梁煦枫,王德建,等.鄂尔多斯风沙滩地区土壤凝结水试验研究[J].地下水,2006,28(6):28-31.
- [7] Delprado R, Sancho L G. Dew as a key factor for the distribution pattern of the lichen species *Teloschistes lacunosus* in the Tabernas Desert(Spain) [J]. Flora, 2007,202(5):417-428.
- [8] Beysens D, Ohayon C, Muselli M, et al. Chemical and biological characteristics of dew and rain water in an urban coastal area(Bordeaux, France) [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(20):3710-3723.
- [9] 刘文杰,张一平,刘玉洪,等.西双版纳热带季节雨林林冠穿透雾水的观测研究[J].植物生态学报,2003,27(6):749-755.
- [10] 张秀丽,郑祚芳.北京气候变暖与极端天气事件的格兰杰检验[C].北京:北京气象学会.奥运气象预报与服务技术研讨会论文集.北京气象学会,2006:151-158.
- [11] 刘新平,何玉惠,赵学勇,等.科尔沁沙地不同生境土壤凝结水的试验研究[J]应用生态学报:2009,20(8):1918-1924.
- [12] 庄艳丽,赵文智.干旱区凝结水研究进展[J].地球科学进展,2008,23(1):31-38.
- [13] 郭占荣,刘建辉.中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述[J].干旱区研究,2005,22(4):576-580.
- [14] Monteith J L, Unsworth M H. Principles of Environmental Physics [M]. Second edition, London, UK: Edward Arnold, 1990.
- [15] Rosenberg K J. Microclimate, The Biological Environment [M]. US: John Wiley & Sons, Inc, 1973:136-144.
- [16] 刘文杰,曾觉民,王昌命,等.森林与雾露水关系研究进展[J].自然资源学报,2001,16(6):571-576.
- [17] 叶有华,周凯,彭少麟,等.广东从化地区晴朗夜间露水凝结研究[J].热带地理,2009,29(1):26-30.