

# 西北干旱地区凝结水试验研究

郭占荣<sup>1,2</sup>, 韩双平<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 厦门大学海洋系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 采用称重法, 分别在非冻结期和冻结期, 对不同土质的土样进行凝结水观测试验, 分析讨论凝结水发生的条件、凝结水发生的时间、凝结水形成的主要影响因素、积雪条件下的凝结水、凝结水的数量及其变化以及凝结水的生态环境意义, 研究成果对于认识干旱地区凝结水的形成机制及其生态环境意义具有重要价值。

**关键词:** 凝结水; 形成机制; 生态环境; 干旱地区; 西北

**中图分类号:** P 426.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2002)05-623-06

干旱地区降水稀少、蒸发强烈、生态环境脆弱, 凝结水在生态环境中有着重要的生态意义。据调查, 荒漠地区的稀疏植物主要依赖于凝结水而生存, 尤其是浅根系植物。目前, 虽然许多学者已经意识到凝结水在干旱地区中的重要地位, 但对其研究还很薄弱。“七五”期间, 原地矿部科技攻关项目在河西走廊张掖市的平原堡、吐鲁番盆地、塔里木河中游群克地区进行了凝结水试验研究。不过, 这些试验均是采用地渗仪来观测凝结水的数量和变化。由于地渗仪本身的缺陷, 即其蒸发筒内, 潜水位处缺少通气管, 无法避免气压变化对潜水位的影响, 因而入渗量和蒸发量观测值是有误差的。因为客观上每天的凝结量本身很少, 甚至小于气压变化所引起的测量误差, 因此采用地渗仪进行凝结水的试验研究, 其成果的可靠性在学术界始终是有争议的。相比较而言, 采用称重法进行凝结水试验, 被越来越多的学者所接受, 其精度可达到0.001g。迄今为止, 利用称重法在干旱地区进行凝结水试验研究的成果还非常少, 据所掌握的资料, 干旱地区先后在河西走廊民勤治沙试验站<sup>[1]</sup>、宁夏沙坡头沙漠试验站水分平衡场<sup>[2,3]</sup>和内蒙古科尔沁沙地<sup>[4]</sup>这三个地方利用称重法进行了凝结水试验研究, 他们的试验均是针对沙地, 而针对非沙地凝结水以及冻结期凝结水的试验研究至今尚无人问津。本文试图采用称重法通过内陆盆地平原区土壤温度和凝结水的观测试验, 定量分析讨论不同岩性土壤在非冻结期和冻结期的凝结水形成机理及其生态意义, 为干旱地区进行水资源评价和保护生态环境提供科学依据和基础技术参数。

## 1 试验装置和方法

凝结水试验在天山北麓三屯河流域昌吉地下水均衡试验场进行。试验利用了试验场装有砂砾石、细砂、粉质轻粘土的观测筒, 筒面积为2m<sup>2</sup>, 其中细砂筒中安装一组温度传感器来测定地温, 传感器的埋设深度为: 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm, 100 cm, 160 cm。

收稿日期: 2001-08-10; 修订日期: 2001-11-12

基金项目: “九五”国家重点科技攻关项目 (96-912-01-03)

作者简介: 郭占荣(1965-), 男, 内蒙古人, 研究员, 博士, 主要从事地下水资源评价和地下水生态环境研究。

地温由数据自动采集系统定时采集，时间间隔为 1 h。

凝结水的观测采用土壤蒸发器，直径 70 mm，内填试土厚度分别是 2 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm。每种厚度的蒸发器又分为两类：一类用尼龙筛网封底；另一类将底封死。试验时将装有砂砾石、细砂、粉质轻粘土的蒸发器放入相应岩性的筒中，使蒸发器口与土壤表面齐平。每隔一定时间观测一次，用感量为 0.001 g 电子天平快速称重，以测定某一时段内蒸发器的重量变化。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 凝结水发生的时间

根据 7 月份至翌年 1 月份的凝结水观测，凝结水基本上发生在晚上 20 00 至凌晨 8 00 这段时间内，而以凌晨 6 00~7 00 凝结量最大，白天未发现凝结水发生。

近地表温度达到露点，即近地表空气中水汽达到饱和湿度，是凝结水发生的必要条件。可以推测，西北干旱地区一年之内凝结水发生的时间，应该是近地面空气相对湿度较大和日温差较大的季节。从昌吉地区多年地面气象资料分析，11 月~翌年 3 月份，相对湿度较大，达到 76%~86%，而 4~10 月份日温差较大，多年平均月内日温差大于 15 的天数超过 12 d(表 1)。可见，从理论上分析该地区一年中几乎每天晚上均存在凝结水发生的可能。但是，凝结水形成还会受其它次要因素的干扰，如风速大的晚上和阴天的晚上很难形成凝结水。1997 年 7 月至 1998 年 1 月的凝结量观测表明，除个别晚上外，绝大部分晚上或多或少有凝结水产生。

表 1 昌吉地区多年月平均相对湿度、日温差统计(1987 - 1998)

Table 1 Statistics on relative moisture and daily temperature variation in Changji

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相对湿度/ %	84	84	76	48	49	46	50	50	49	56	78	86
日温差大于 15 的天数/d	5	2	3	19	15	14	13	17	16	17	4	1

### 2.2 凝结水的水汽来源

凝结水的水汽来源有两个方面：一是来源于空气中的水汽，包括近地表空气中的水汽、植物蒸腾和呼吸作用散逸的水汽、地面蒸发的水汽。白天大部分时间内地表温度明显高于空气温度，到晚间气温和地温下降，但是，地温下降速率明显高于气温。当气温高于地表温度时，水汽在温度梯度作用下由空中向地表运移，成为地面凝结水的水汽来源。凝结水汽的另一来源是地表以下某一深度以上的土壤孔隙中的水汽。众所周知，温度梯度是孔隙中水汽运动的主要驱动力。在地表降温过程中，也引起地表以下土壤温度的下降，但地表降温速率高于地表以下降温速率，在地表以下形成发散型热量零通量面，并随时间而改变深度，在温度梯度的驱动下，热零通量面以上的水汽向上运移，成为表层土壤凝结水的水汽来源。昌吉试验场的细砂地层实测地温资料表明，1997 年 7 月 17 日 20 00 时土壤热传导呈下传型，热量向下传导，到 21 00 时，在地表以下 5 cm 处形成了一个向下发育的发散型热量零通量面，在 5 cm 以上水汽向上运移，5cm 以下水汽向下运移。次日 8 00 时，发散型热量零通量面又发育到 30 cm 处，在地表以下 30cm 范围内水汽向上运移，成为表层土壤凝结水的一部分水汽来源(图 1)。

图 2 是粉质轻粘土凝结量观测值，可以看出未封底的蒸发器的凝结量大于封底的，进一步说明凝结水中有一部分水汽来源于地表以下一定深度的孔隙。经计算，由孔隙中水汽形成的凝结水量占总凝结水量的比例是：粉质轻粘土 39.1%、细砂 25.1%、砂砾石 30.6%。

那么，地表以下究竟多大深度范围内的水汽作为凝结水的水汽来源呢？昌吉试验场地温观测表明，一日内土壤不同深度的地温变化差别很大，如图 3 是一日内细砂地层地温变化过程线，从中看出，地表温度变化幅度最大，最高温度出现在 16 00 左右，最低温度出现在 7 00 左右，5 cm 深度的地温变化幅度次之，最高温度出现在约 17 00，最低温度出现在约 8 00。随着深度的增加，地温变化幅度依次降低，最高地温和最低地温出现的时间也依次向后推移。如 20 cm 深度处最高地温出现的时间为 9 日 0 00，比地表最高温度出现时间滞后 8 h。40 cm 深度以下地温变化已较小。由此可见，凝结水的水汽大致来源于地表以下 40 cm 以内的土壤孔隙中。

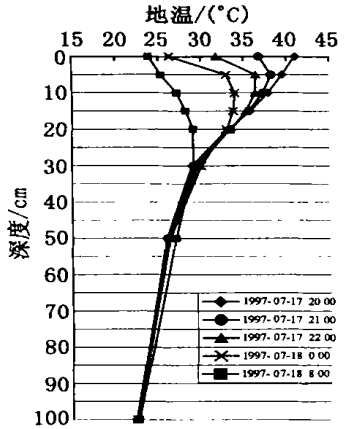


图 1 细砂地层某日内地温垂向分布  
Fig. 1 Vertical distribution of the earth temperature for the fine sand on one day

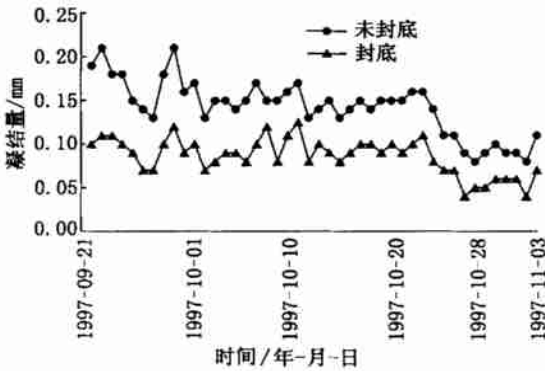


图 2 粉质轻粘土地层实测凝结量过程线

Fig. 2 Measured procedure curve of condensation water

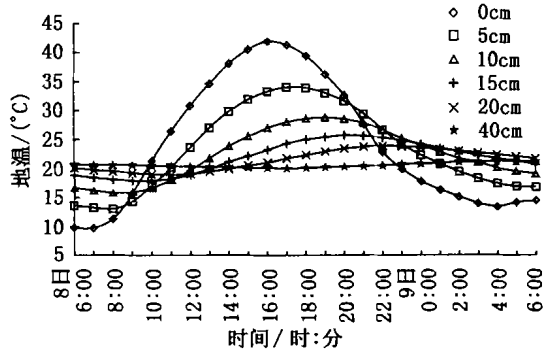


图 3 细砂地层日地温变化过程线

Fig. 3 Daily variation curve of earth temperature

### 2.3 积雪条件下的凝结水

西北内陆干旱区冬季气候寒冷，气温有较长时间在零度以下。冻结期一般地表有积雪覆盖，冻结期多年平均降雪量 51 mm，最厚积雪可达 30 cm。从昌吉市 1997 年 12 月 25 至 28 日的积雪条件下凝结 - 蒸发作用过程线看(图 4)，积雪表面在夜间能获得一定的凝结量，图中上升段表示凝结，下降段表示蒸发。积雪条件下水汽凝结的规律是夜间雪面温度低于露点，空气中的水汽在雪面凝结，白天雪面温度高于露点(图 5, 1997 年 11 月 25 ~ 30 日)，夜间形成的凝结水又被蒸发耗散，这种凝结 - 蒸发的交互作用不断进行。

根据昌吉试验场 1997 年 11 ~ 12 月和翌年 1 月的凝结量观测，积雪期日平均凝结量 0.15 mm 左右。凝结水弥补了积雪的蒸发损耗，使得积雪能够较长时间保存，对冬小麦安全越冬起到积极作用，并为春季植物发芽、生长提供较好的水分条件。

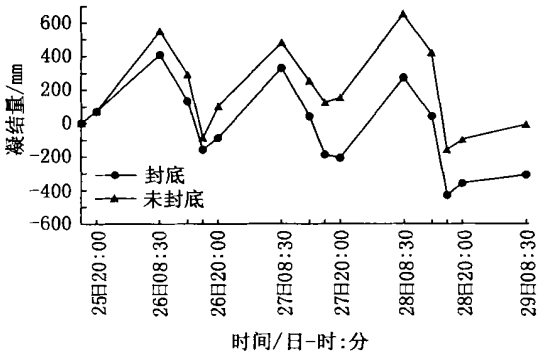


图 4 1997 年 12 月积雪条件下的凝结 - 蒸发作用过程线  
Fig. 4 Condensation- evaporation procedure curve under accumulated snow conditions in Dec. , 1997

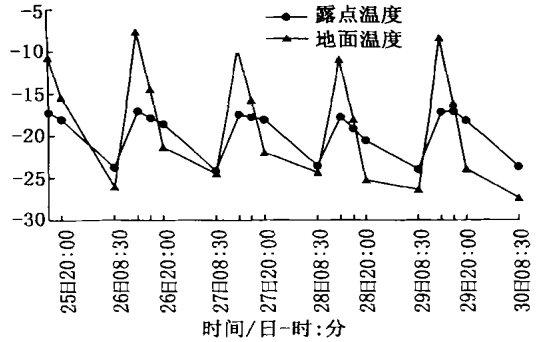


图 5 1997 年 11 月地面温度与露点温度过程线  
Fig. 5 Procedure curve of earth temperature and dew point temperature in Nov. , 1997

2. 4 凝结水的数量

干旱地区次凝结水量有多大，一年中平均能形成多少凝结水，这些凝结水能否被植物利用，凝结水能否满足耐旱植物对水分的最低要求。从前面凝结水发生的条件可知，温度达到露点温度是凝结水发生的必要条件，此外，土壤质地、潜水埋深、风力等也对凝结水的形成有一定影响。

(1) 土壤质地对凝结水量的影响 在其它条件基本相同时，土壤的机械组成(土壤颗粒大小和结构)愈粘重，凝结水量就愈多。一方面是因为粘性土壤中支持毛细管上升高度较大；造成地表层相对湿度较大；另一方面是因为土壤颗粒越细，表面积越大，吸附力越强，凝结水一旦形成不易蒸发。表 2 是不同岩性土壤的凝结量观测值，粉质轻粘土的凝结量约为砂砾石的 3 倍。

表 2 不同岩性土壤的凝结水量观测值

Table 2 Observed condensation waters for the different lithological soils

岩 性	全期凝结量/mm	日均凝结量/mm	观测时间
粉质轻粘土	6.24	0.145	1997.9.21 ~ 11.3
细 砂	2.75	0.064	1997.9.21 ~ 11.3
砂砾石	2.35	0.055	1997.9.21 ~ 11.3

(2) 年内凝结水数量估算 在一年中，凝结水并不是每天都能形成，它只是在有利于其发生的条件下发生，完全取决于气象条件。即使有凝结水发生，也会出现凝结水量有多有少的情况。根据前面的分析，昌吉地区一年中至少有 10 个月每天晚上均存在凝结水发生的可能。如按一年有 10 个月发生凝结水考虑，非冻结期考虑 6 个月，冻结期考虑 4 个月。非冻结期和冻结期日均凝结量以实测数据为依据，估算全年凝结量为：粉质轻粘土 44.1 mm、细砂为 29.5 mm、砂砾石为 27.9 mm。全年凝结量占当地多年平均降水量的比例为：粉质轻粘土 24.5 %、细砂 16.4 %、砂砾石 15.5 % (表 3)。

从全年凝结量的累计数量来看，多者可达到 44 mm，数量比较可观。但是，蒸发与凝结总是交替进行，一旦凝结结束，蒸发马上开始，每次凝结水很难在土壤中保存下来，但可供植物在此期间吸收利用，不过利用十分有限。因此，考虑如何将凝结水保留下来免遭蒸发，以便供植物充分利用，这是今后需研究的一个重要课题。

表3 全年凝结量估算

Table 3 Estimated condensation waters in a whole year

岩性	非冻结期		冻结期(积雪期)		全期凝结量 / mm	占多年平均降水 量百分比/ %
	日均凝结量 / mm	全期凝结量 / mm	日均凝结量 / mm	全年凝结量 / mm		
粉质轻粘土	0.145	26.1	0.15	18.0	44.1	24.5
细砂	0.064	11.5	0.15	18.0	29.5	16.4
砂砾石	0.055	9.9	0.15	18.0	27.9	15.5

(3) 凝结水对土壤含水量及地下水的影响 凝结水形成后,在未蒸发之前,转化为土壤水,使地表层土壤含水量发生变化。根据观测,凝结水影响的深度为0~5 cm,如果按照细砂平均日凝结量0.064 mm计算,表层0~5 cm土壤含水量可达到0.43%(加上白天干燥沙地土壤含水量一般0.3%左右)。

以上分析可知,凝结水影响深度主要是表层0~5 cm,沙地土壤含水量一般只能达到0.4%左右,远远低于土壤的持水量。因此,可以判断凝结水对地下水没有补给作用。

### 2.5 凝结水的生态环境意义

只要气象条件具备凝结水发生的条件,就会有凝结水发生。但是,对于降水多、地表水和地下水丰富的地区来说,由于凝结水量相对微小,因而其生态环境意义就不十分突出,尚未引起人们的注意。然而,对于干旱地区植被来说,尤其是荒漠区浅根耐旱植物,凝结水的生态环境意义就显得十分重要。

植物的叶片虽能吸收水分,但吸收数量有限。夜间凝结水在植物叶片形成,正好满足了叶片吸水的需要。但是植物维持生存所需要的绝大多数水分还是靠根部吸收的,那么凝结水能否被植物根系吸收利用呢?根据H.B. 诺巴诺夫和卡内斯基的研究,植物可以利用含水量低于凋萎湿度的水分,虽然利用有很大困难。H.B. 诺巴诺夫确定植物有一个“凋萎范围”,而凋萎系数仅是其上限,此范围的下限约等于最大吸湿量<sup>[1]</sup>。根据张兴鲁在民勤沙地的调查,沙生植物有发达的水平根系,分布在沙丘表层,沙丘耐旱植物的凋萎系数约为0.4%<sup>[1]</sup>;又据冯金朝等研究,沙坡头地区固沙植物的凋萎系数约为0.6%<sup>[3]</sup>。按照上面的计算,日均凝结水量可以使细砂表层0~5 cm范围含水量达到0.43%,接近沙地耐旱植物凋萎系数,能够勉强维持这类植物生存。

由此可见,凝结水可以提供一些浅根性耐旱植物生存所需的最低限度的水分条件,它是荒漠区浅根性耐旱植物赖以生存的重要保证。由于这些植被的存在,起到一定程度固沙防风作用,阻止或减缓了沙化的发生和发展。可见,凝结水具有重要的生态环境意义。

## 3 结论

(1) 地表温度达到露点,即地表空气中水汽达到饱和湿度,是凝结水发生的必要条件。凝结水主要发生在20 00至次日8 00时段内,其中6 00~7 00凝结量最大,白天不发生凝结水。按气象条件初步推测,昌吉地区一年中绝大部分晚上都存在凝结水产生的可能;

(2) 地温变化速率较气温快,地温变化主要发生在地表0~40 cm范围,而凝结水主要发生在地表0~5 cm深度内。来自于地下孔隙中的水汽凝结量占总凝结量的比例是:粉质轻粘土

39.1 %、细砂 25.1 %、砂砾石 30.6 %；

(3) 日平均凝结量粉质轻粘土为 0.145 mm，细砂为 0.064 mm，砂砾石为 0.055 mm。估算全年累计凝结量粉质轻粘土为 44.1 mm，细砂为 29.5 mm，砂砾石为 27.9 mm，分别占当地多年平均降水量的 24.5 %、16.4 %、15.5 %；

(4) 冻结期积雪条件下，日均凝结量约为 0.15 mm。凝结水弥补了积雪的蒸发损耗，使得积雪能较长时期保存，对冬小麦安全越冬及植物春季生长发育具有重要意义；

(5) 按照细砂日平均凝结量 0.064 mm 计算，凝结水可以使沙地土壤表层 0~5 cm 范围含水量达到 0.43 % 左右，接近荒漠耐旱植物凋萎系数，凝结水可勉强维持荒漠地区浅根耐旱植物的生存，但凝结水对地下水无补给意义；

(6) 凝结水能够提供一些浅根性耐旱植物生存所需的最低限度的水分条件，它是荒漠地区浅根性耐旱植被赖以生存的重要保证。由于这些植被的存在，起到一定程度固沙防风作用，阻止或减缓了沙化的发生和发展，这正是干旱区凝结水生态环境意义的重要性之所在。

#### 参考文献：

- [1] 张兴鲁. 干旱地区沙丘水汽凝结及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1986, 6:39 - 42.
- [2] 陈荷生, 等. 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.
- [3] 冯金朝, 等. 沙坡头地区土壤水分吸湿凝结的动态观测与理论计算[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1):10 - 15.
- [4] 蒋 瑾, 等. 沙地凝结水及在水分平衡中作用的研究[J]. 干旱区研究, 1993, 10(2):1 - 9.

## Experimental study on the condensation water in arid area, Northwestern China \*

GUO Zhan-rong<sup>1,2</sup>, HAN Shuang-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;

2. Department of Oceanography Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The weighing method is adopted in condensation of the water observation. The condensation water for the different kinds of soil samples are observed during the freezing period and non-freezing period respectively. The necessary conditions and time occurring the condensation water, the main influence factors forming the condensation water, the condensation water under the accumulated snow circumstances, the amount of the condensation water and its variation, and the eco-environmental significance of the condensation water are all analyzed and discussed. The research achievements have great significance to recognize the formation mechanism of the condensation water and the eco-environmental benefit of the condensation water in the arid areas, Northwestern China.

**Key words:** condensation water; formation mechanism; eco-environment; arid area; Northwestern China

\* The project is supported by a Key Scientific Research Programme in the 9th Five-Year Plan of China(96-912-01-03).