

刘波,姜彤,翟建青,等. 新型蒸渗仪及其对陆面实际蒸散发过程的观测研究[J]. 气象,2010,36(3):112-116.

新型蒸渗仪及其对陆面实际蒸散发过程的观测研究^{*}

刘 波^{1,2,3} 姜 彤^{2,3} 翟建青^{2,3} 张文红⁴

1 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

2 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

3 国家气候中心, 北京 100081

4 江西省南昌县气象局, 南昌 330020

提 要: 水量平衡和蒸散发过程研究是水文循环研究的重要方面。正确的观测和计算地表实际蒸散发量对认识气候变化条件下的水循环特征、实现区域水资源的可持续开发利用具有非常重要的意义。传统蒸渗仪功能单一, 不仅安装费用较高, 日常维护和观测需要大量的人力物力, 观测精度也常常受到仪器系统误差或人为因素的影响。围绕着陆面蒸散发观测和解决“蒸发悖论”的科学问题, 设计了用于研究气候变化对水循环、陆面蒸散发影响的野外自动观测实验的新系统, 站址选择在江西省南昌县生态实验站。该新型蒸渗仪(Lysimeter)系统采用先进的高分辨率称重系统(陆面蒸散发观测精度:0.01 mm)、高精度土壤水分水势传感器(pf:0-7, 国际专利号:102004010518.9)和动态IP解析技术的GPRS数据采集器(24 bit, 512 k), 通过地表气象站、土壤水分水势、蒸渗仪和地下水位等独立的观测实验对比, 确定陆地表面实际蒸散发量以及蒸散发过程的有关参数。该系统无论在测量的精度及频次上都比传统观测方法有极大的提高。另外, 除了应用于陆面实际蒸散发量的观测外, 该系统装置了2004年获得国际专利的新型土壤水分、温度和水势传感器, 观测精度较高, 观测频次可调节幅度较大, 且适应多种环境条件, 能够根据不同的科学目标进行新的组合和设计。

关键词: 蒸渗仪, 陆面实际蒸散发, 自动观测, GPRS数据采集器

New Design and Observation of Lysimeter on Actual Evapotranspiration

LIU Bo^{1,2,3} JIANG Tong^{2,3} ZHAI Jianqing^{2,3} ZHANG Wenhong⁴

1 Hohai University, Nanjing 210098

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

3 National Climate Center, Beijing 100081

4 Meteorological Station of Nanchang County, Nanchang 330020

Abstract: Research on water balance and evapotranspiration (ETa) process is an important part in water cycle research. Observation and assessment on ETa over land surface are of great significance for the understanding of water cycle and sustainable development of water resources under climate change conditions. However, traditional lysimeter is usually of simple function, limited precision, and is expensive in installation and daily operation. To observe ETa over land surface and understand the ‘evaporation paradox’, the authors designed this new lysimeter system, which is located in the Ecological Experiment Station of Nanchang County in Jiangxi Province, to study the impacts of climate change on water cycle and ETa over land surface. With many hi-techs such as high resolution weighting system (0.01 mm), pf-meters (pf: 0-7) and observation GPRS loggers (24 bit, 512 k), ETa over land and its process are measured based on the observation of soil water potential (Matrix potential), lysimeter and groundwater level. Be-

* 中国科学院百人计划项目, 国家自然科学基金项目(40601017, 40701028, 40771040), 中国气象局气候研究开放实验室基金(LCS-2006-07)等联合资助

2008年12月16日收稿; 2009年12月15日收修定稿

第一作者: 刘波, 主要从事气候变化与水资源研究. Email: bobo3705@163.com

sides higher precision and frequency compared to traditional lysimeter, this new system can observe ETa process, the new loggers for soil moisture and water potential, which got the international patent in 2004 thus it is of high precision, observation frequency and wide adaption to environment, and therefore can be used to a wide range of application based on different targets and new version of design.

Key words: lysimeter, actual evapotranspiration over land, automatic observation, GPRS Dynamic IP Logger

引言

水量平衡和蒸散发的合理评估是水文循环中的一个重要环节。理论上说,全球变暖将导致陆地上水体蒸发量上升,势必引起水循环的一系列变化^[1]。但目前分析蒸发皿观测的蒸发量时,却发现有些区域平均的蒸发皿观测的蒸发量存在稳定的下降趋势^[1-2],与理论分析不相符合,这一现象被称为“蒸发悖论”^[3]。1998年,Brutsaert等^[3]考虑地面蒸散发与蒸发皿观测的蒸发量的区别,认为蒸发皿观测的蒸发量的减少是由于地面蒸散发量增加的结果。2002年,Roderick等^[4]对蒸发皿观测的蒸发量变化的研究进行了评述,特别强调地表实际蒸发量的变化趋势;认为实际蒸散发变化方向不是由温度惟一确定的;指出蒸发皿观测的蒸发量趋势仅仅提供了认识实际蒸散发变化方向的线索;还应注意蒸发皿观测的蒸发同水面蒸发、蒸发潜力以及地表实际蒸散发(陆面及海面)的关系和区别。因此,正确的观测和计算地表实际蒸散发量对认识气候变化条件下的水循环特征^[5]、进而实现区域水资源的可持续开发利用具有非常重要的意义^[6-7]。

然而,由于技术方法的限制,目前还没有较为通用的方法直接测量地面实际蒸散发量。通常对实际蒸散发量的估算仍采用间接方法,主要包括以下几大类^[8],即通过潜在蒸散发换算,基于能量平衡原理,主要包括彭曼公式和Bowen比法等;以及基于水量平衡原理计算。在长期地面气象观测中,对陆气间水量交换的观测,各级气象台站广泛使用的仪器是20 cm口径小型蒸发器,以及更新的E6-1型蒸发器^[9],但上述传统型蒸发器在实际观测^[10]以及对蒸散发量的换算与估算^[11]等方面,尽管进行了一系列的改进^[12]和相关研究^[13],仍然存在一定的局限。因此,对实际蒸散发的观测较为公认的方法是采用基于水量平衡原理的称重式蒸渗仪法。然而,传统的实际蒸散发观测往往由于选址地点、土样深

度、观测时间等因素的限制,无法满足水文循环及气候变化研究的要求。而且,传统蒸渗仪的仪器架设、观测及运行维护成本较高,无法广泛开展。

为了开展气候变化对区域水循环的影响研究以及气候水文模式地表过程物理参数的率定研究等,作者利用江西省南昌县生态实验站的观测场地,根据德国Juerlich国家中心设计的Lysimeter的设计思路,设计和建设了地表蒸散发过程监测系统。该系统通过地表气象站、土壤水分水势、小型蒸渗仪和地下水位等独立的观测实验对比,确定陆地表面实际蒸散发过程的有关参数。该系统于2007年8月5日安装完毕,8月8日完成调试,开始正式观测。陆面蒸散发精度达到0.01 mm,观测数据采样频次最高可达1分钟,并可在线分析观测的数据,并存储记录。该系统具有极高的稳定性,相对造价较为低廉,且非常易于维护,设计观测寿命达10年以上。

本文将在介绍新型称重式蒸渗仪系统工作原理的基础上,详细介绍蒸渗仪的站址环境、系统设计结构、工作原理及其特点,简要展示系统工作的软件环境及观测数据,并对该观测系统的应用前景做出展望。

1 蒸渗仪测量原理

蒸渗仪对实际蒸散发的测量基于水量平衡原理。首先在选择具有代表性的地点,进行仪器安装。选择适当体积的土样(原状土)置于蒸渗仪称量体中,并分离回填。对于蒸渗仪中被分离的原状土柱,其水量平衡方程为:

$$\Delta S = P + I + Q - \Delta R - ET \quad (1)$$

式中 ΔS 为分离土柱的土壤蓄水量变化量(折算为mm), P 为降水量(mm), I 为灌溉水量(mm), Q 为地下水流(mm), ΔR 为净地表径流量(mm), ET 为蒸腾蒸发量(mm)。对于蒸渗仪, ΔR 一般可忽略,于是方程(1)可改写为:

$$ET = P + I + Q - \Delta S \quad (2)$$

式中,降水量 P 和灌溉量 I 很容易由雨量计和水表

直接测得。地下水流 Q 代表由蒸渗仪供排水系统供进和排出土柱的水量。传统方法一般通过土柱内水位与周围环境地下水位的比较,利用土壤含水量公式计算。土壤蓄存水量的变化量(ΔS)代表降水或灌溉后水分的增加,或蒸散发作用导致水分的损失,蒸渗仪即通过一台高精度的称重系统来测定 ΔS 。由此,式(2)右边各项均可通过观测直接或间接获得,从而计算得到实际蒸散发量。

2 蒸渗仪设计与结构

此套蒸渗仪系统安装站址选择在江西省南昌县生态实验站的观测场地。南昌县位于江西省南昌市郊,地处 $28^{\circ}36'N, 115^{\circ}55'E$,海拔高度 47 m,1951—2001 年多年平均降水量 1615 mm,多年平均温度 $17.6^{\circ}C$,四季分明,属于季风气候。试验站位于城市郊区,受城市化影响较小,周围地势平坦,地表海拔高度起伏 <10 m;站址周边土地利用以水稻田为主,类型较为单一;站址处地表覆被有均匀生长的草地,单片面积约为 $500 m^2$,日常以降水灌溉为主,不施以人工灌溉。实验场地具有较好的代表性,受地形坡度和风速的影响较小,且试验站北侧约 30 m 即为南昌县气象站站址,日常气象观测资料可以作为同期校验数据,对试验站观测结果进行辅助分析和检验,因此适宜将其作为蒸渗实验站址。

结合上述蒸渗仪系统的设计,式(2)可简化为:

$$ET = P + Q - \Delta S \quad (3)$$

式(3)左侧,降水量可选用南昌气象站观测数据,渗漏量和 ΔS 由蒸渗仪系统直接测得,从而能够计算出观测时段内的实际蒸散发量。

该系统可分为 3 大部分:测量部分、数据传输部分和终端显示部分。

测量部分由土壤、钢筒、称重系统平台、称重系统、称重传感器、附属气象因子同步测量仪器组成(如图 1 所示),能够同时对蒸散发、气温、风速、渗漏量、地下水位、地表以下 25 cm 及 50 cm 的土壤含水量等指标进行观测。采用 GPRS 动态 IP 解析技术的数据采集器对观测结果记录并进行远距离传输。该蒸渗仪系统,为使测量的水分运动过程符合实际情况,钢筒中的土壤选择站址附近的原状土,土样体积 $1 m^3$,土样深度 1 m,直径约为 112.8 cm,埋设称重系统后“原状土”回填;该称重系统精度达到 0.01 mm,因此能够测量包括蒸散发、以及结露、结霜、及微量蒸散发等水量变化。同时,称重仪底部安装有集水装置,通过导管可收集土样的渗漏水量,通过与之相连的翻斗式雨量计,则能够直接测得排出土柱的水量。这与传统的通过土壤含水量换算的方法相比,不仅简便易行,而且概念更加明确,减小了由于测量土样中地下水位及土样空隙度等的差异所带来的误差,也使观测结果不易受到周围环境的影响。土样旁边的地表安装有高度为 1 m 的支架,架设多参数的自动气象站,测量同期的温湿度、风速等气象指标;选择有代表性的原状土壤剖面,根据土壤特性,在分别距离地表 25 cm 处和 50 cm 处安置 TDR

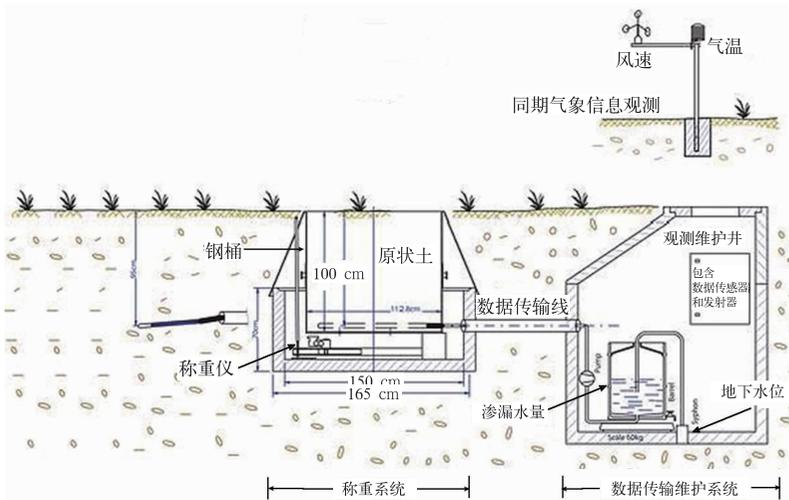


图 1 蒸渗仪测量系统结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of lysimeter system

原理和土壤摩尔热容原理的土壤水分水势传感器,检测两个深度土壤含水量的变化;另外,在距离土样约 5 m 处设置一深度约为 3 m 的系统维护竖井,并由横管将称重仪的电源线及数据线与竖井内装置相连,根据地下水流计算,系统安装完成后经过一定时间,地下水充分浸润回填土壤,竖井对称重系统周围地下水流场的影响较小;竖井内安装用于测量土柱渗漏水量的雨量筒,以及用于测量地下水位的竖管,竖管总长 6 m,其中探头放置深度为 5 m,能够测量地表以下 8 m 范围内的地下水位变动情况。同时,竖井内设有数据采集、传输系统,内置的小型存储器(内存为 512 k)及 GPRS 通讯系统,负责将所采集的数据进行集中存储备份,并进行无线发送。所有数据的采样时间为每小时 1 次。通过中国科学院南京地理与湖泊研究所的服务器进行数据传输和实时数据监测服务。

512 k(可以扩展到 2 M)的低耗电(12 V 电池,2 年充电一次)和高精度(24 bit)的数据采集器中,在现场可以通过 RS232 接口收集数据与此同时,观测数据可以自由设置扫描传输频次及传输时间,通过 GPRS 动态 IP 解析技术进行数据传输。在南昌生态试验站,具体设置为每 24 小时传输一次数据,每日凌晨 02:00 进行数据传输。采用不同的网络服务器许可,能够存储不同长度的数据序列。对南昌站,服务器能够存储最近 6 个月的每日观测数据,其后自动删除最久以前的数据记录。传输到服务器上后,可随时登录和直接下载。图 2 即为服务器上下载的数据格式,对试验站的具体观测数据内容包括:测次编号、观测日期及时刻、渗漏水总量、地下水埋深、气温、相对湿度、土柱重量、25 cm、50 cm 土壤含水量、以及电池电压。具体的监测变量及变量的单位,均可在仪器安装调试阶段进行调整,以满足不同监测目的的要求。对已下载的数据,可以根据用户自身需求,选用不同的数据处理软件进行后期分析处理。

3 观测成果及分析

蒸渗仪系统观测的数据可以存储在内存为

以 2008 年 7 月为例,对该月份降水量、蒸散发量及地下水位变化过程的统计分析如图 3 所示。⁷

```

GP-BusLogger II #N20088 - Incremental Data (Pos: 93342) - GSM/GPRS Signal: 10 (Parameter Set: '.....par')
<GSM GPRS OK, Signal: 12
* * * * *
* * * * *      #C40061 #C40061 #C40061
* * * * *      #15;U4-Node #15;U4-Node #15;U4-Node
Nr      Time      #1;Count;mm #6;Un;mm #12;Dig.Temp;oC #13;Dig.Hum;% (nn) % % #HK-Bat;U #HK-BkBat;U
1      08.03.2008 02:00:00 5582.0 1.9429 8.28 91.3 1668.80 28.60 32.20 12.054 3.708
2      08.03.2008 03:00:00 5582.0 1.9418 8.30 91.5 1669.70 28.50 32.20
.....
.....
.....
23     09.03.2008 00:00:00 5582.0 1.9270 7.80 91.0 1670.70 29.30 32.10
24     09.03.2008 01:00:00 5582.0 1.9259 7.58 90.5 1669.90 29.30 32.10 12.052 3.708
24 Lines extracted
  
```

图 2 蒸渗仪监测服务器下载数据样本
Fig. 2 Sample data downloaded from lysimeter data server

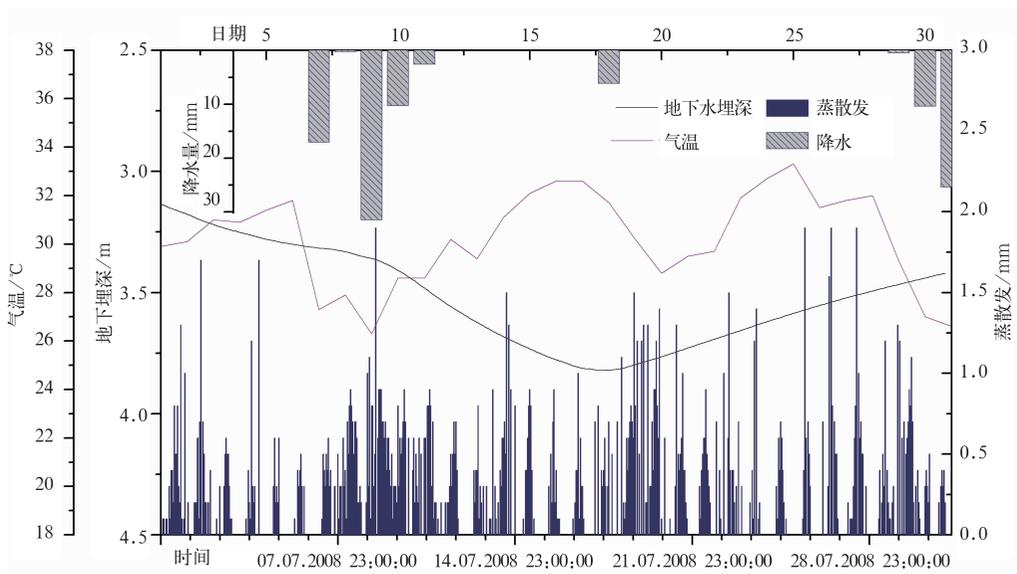


图 3 2008 年 7 月蒸渗仪系统观测陆面蒸散发、地下水埋深动态过程
Fig. 3 Dynamic process of evapotranspiration over land and groundwater depth observed by lysimeter system in July 2008

月该站点平均气温 30.3 ℃,总降水量 104.3 mm,总蒸散发量 110.9 mm,水量平衡为负值。具体来看,7月9日左右有一次降水过程,总降水量 62 mm,气温随之有所降低,期间水分充足,实际蒸散发增加,接近蒸发能力,全天蒸散发量均较大。7月降水与温度的对应关系较好,降水过程一般对应一定的温度下降,同时,降水期间的1天蒸散发量有所增加,每小时的观测表明这是由于降水期间夜间蒸散发量增加造成的。另外,地下水位对9日降水过程的响应直到17日左右才开始显现,表明该地区地下水流动速度相对较慢,降水入渗补给至4 m埋深需要7~8天左右的时间。通过上述蒸渗仪观测与气象台站观测的结果互相参照分析,能够清楚地反映降水—气温—蒸散发之间的关系,及其对地下水的综合影响,为正确认识区域水循环变化特征提供科学依据,同时也为进一步分析土壤水运移参数、实际蒸散发参数等提供的实际观测和“蒸发悖论”的科学问题数据基础。

4 结 论

传统蒸渗仪日常维护和观测也需要大量的人力物力,观测精度也常常受到仪器或人为因素的影响。本文介绍的新型陆面蒸散发监测系统,采用先进的高分辨率称重系统,配置了智能数据采集器和获得欧洲专利的土壤水分水势温度传感器,可同时准确地测量蒸腾蒸发量、土壤水的渗漏量及地下水位等多种参数,测量的精度及频次都比传统方法大为提高。同时,系统能够通过 GPRS 动态 IP 解析技术(为目前国际上第一个 GPRS 动态 IP 数据采集器)实现远程无线数据采集和传输,实现测量的数据的实时在线快速记录、存储,大大节省了人力投入;系统安装成本较低,对环境的适应能力较强,应用范围非常广泛。

围绕如何精确测定陆面蒸散发和回答“蒸发悖论”的科学问题,本文的陆面实际蒸散发监测系统,通过对位于南昌县试验站内的地表气象站、土壤温度水分水势(国际专利号:102004010518.9)、小型蒸渗仪和地下水位等要素进行观测频次仅为1h的独立观测实验对比,对降水过程、气温过程、蒸散发过程以及相应的地下水位变化过程进行了详细观测,并以2008年7月的观测结果为例,对其相互关系进

行分析,认为能够清楚地反映降水—气温—蒸散发之间的关系,及其对地下水的综合影响。上述数据对确定陆地表面实际蒸散发量、改进蒸散发计算方法以及蒸散发过程的有关参数具有较为重要的意义^[14]。

除了应用于本文介绍的实际蒸散发量的观测,由于本文提到的新型观测探头观测精度较高,观测频次可调节幅度较大,能够适应多种环境条件,因此能够根据不同的观测目的进行新的组合和设计。具体应用范围涉及河流湖泊等的地表水位观测、地下水位观测、土壤含水量观测以及水质观测等,能够在水文、地质、环境、气象、生态等很多领域,为科学研究提供更加丰富可靠的观测数据。

参考文献

- [1] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. *Science*, 2002, 298: 1345-1346.
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [3] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox[J]. *Nature*, 1998, 396: 30-31.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [5] 李林,朱西德,周陆生,等.三江源地区气候变化及其对生态环境的影响[J]. *气象*, 2004, 30(8): 18-22.
- [6] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, 294: 2119-2124.
- [7] 王绍武,龚道溢.中国气候变化的研究[J]. *气候与环境研究*, 2002, 7(2): 137-145.
- [8] 武夏宁,胡铁松,王修贵,等.区域蒸散发估算测定方法综述[J]. *农业工程学报*, 2006. 10.
- [9] 黄秋红. E601型与小型蒸发器对比观测分析[J]. *气象*, 2000, 26(10): 45-48.
- [10] 邱小伟,孙莉莉. E601-B型蒸发器观测值出现负值原因分析[J]. *气象*, 1999, 25(1).
- [11] 裴步祥,邹耀芳.利用小型蒸发器观测水面蒸发量的几个问题[J]. *气象*, 1989, 15(6): 48-51.
- [12] 夏金元,王世华,王玉泉.蒸散发改进及观测资料分析[J]. *气象*, 2005, 31(2): 86-87.
- [13] 裴步祥,邹耀芳.三种计算可能蒸发方法的比较[J]. *气象*, 1986, 10(7): 26-30.
- [14] 邱新法,刘昌明,曾燕.黄河流域近40a蒸发量的气候变化特征[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 437-441.