

沉积物—水界面水流通量研究之渗流仪 直接测量法回顾与进展

李刚¹⁾, 李海涛¹⁾, 孙璐¹⁾, 赵凯¹⁾, 李木子¹⁾,
李海龙²⁾, 王学静²⁾, 陈一超¹⁾

1) 中国地质环境监测院, 北京, 100081; 2) 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东深圳, 518055

关键词: 渗流仪; 沉积物-水界面通量; 地下水-地表水交换

湿地沉积物—水界面的地表水—地下水交换通量对水环境的水文循环、水量均衡、水质变化、生化反应和生态环境效应等具有关键作用和重要意义。目前, 在河流、湖泊、海洋等湿地区域的研究中, 越来越多的研究者认识到地表水-地下水交互作用是不可忽略的水文循环过程, 它将大大促进对区域乃至全球性水循环的深入理解。渗流仪是一种直接测量沉积物—水界面的水流通量的仪器装置, 它具有构造简单、容易制作、造价便宜、操作便捷等优点, 一般适合于河流、湖泊和海洋等湿地的近岸小尺度研究。该测量方法起源于 20 世纪 40 年代的美国犹他州农业实验站, 后来被广泛应用于世界各地的河流、河口、湖泊、滨海、渠道和水库等天然和人工湿地中地下水—地表水交换的定量研究。下面将对渗流仪的研究历程、热点前沿进行回顾与展望, 以期使用直接测量法定量研究湿地地下水—地表水交换提供一定的思路。

1 沉积物—水界面水流通量直接测量法——渗流仪的结构原理

20 世纪 40 年代, Israelson 和 Reeve (1944) 发明了一种手工渗流仪, 用于测量灌溉渠的渗漏水流量; Lee (1977) 在 20 世纪 70 年代对它作了一些改进, 并用来用于测定明尼苏达州的萨利湖与地下水的交换量。经典的 Lee 式半桶渗流仪的主要组成部分是一个 208 L 的钢质圆柱形桶, 一端完全开口,

而另一端只在边上有一个很小的开口, 它通过橡胶塞、导水管连着一个 4 L 的塑料袋 (图 1)。

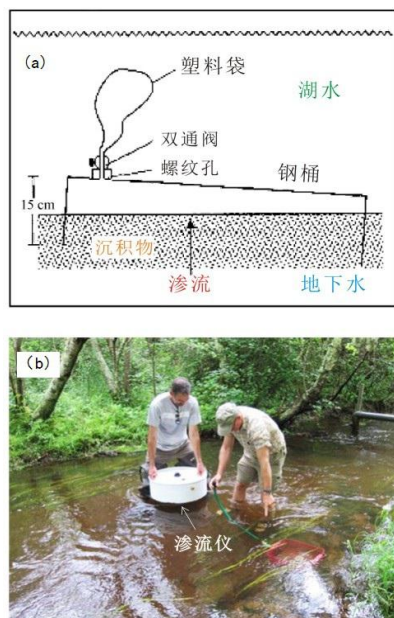


图 1 Lee 式半桶型渗流仪

(a) 结构原理; (b) 野外工作示意照片

测量时把完全开口端插入沉积物中 10~13 cm, 通过某测量时段内塑料袋中的水量变化及其通过的沉积物表面积就可以计算出地下水的渗流速度 (q_i), 见公式 (1):

$$q_i = \frac{(V_f - V_o)}{tA_{barrel}} \quad (1)$$

其中, V_o 和 V_f 分别是塑料袋中测量时段始末水体体积, t 是塑料袋接入钢桶和摘除的时间间隔,

注: 本文为中国地质调查局地质矿产调查评价专项 (编号: DD20189142) 的成果。

收稿日期: 2019-01-10; 改回日期: 2019-03-20; 责任编辑: 刘志强。 Doi: 10.16509/j.georeview.2019.s1.012

作者简介: 李刚, 男, 1989 年生, 博士, 工程师, 水文地质学专业, Email: ligang@mail.cigem.gov.cn。通讯作者: 李海涛, 男, 1979 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质环境地质调查、监测和研究工作, Email: liht@mail.cigem.gov.cn。

A_{barrel} 是钢桶所扣入的沉积物表面积。袋中水量的增加指示着向上的地下水渗流, 相反, 水量的减少代表地表水的渗漏。另外, 在向上渗流环境中, 袋中水体可用于采样分析化学性质。

2 渗流仪应用研究的热点与进展

在过去几十年的研究里使用渗流仪的直接测量法得到了广泛应用(李海龙和王学静, 2015); 它具有安装后工作状态稳定、不受风浪影响的优势, 能够连续记录沉积物—水界面的水流量。然而, 渗流仪的使用和计算能力也存在一定的局限性, 如: ①只能测量局部的水通量, 若需了解区域上地下水-地表水交换的特征与规律, 必须布设较多的测量点; ②使用起来较费时耗力, 需要潜水员到湖床上安放和收回; ③塑料袋的机械性能、圆桶底部的渗漏、流管的摩擦阻力、波浪作用或压力差等会引起一定的测量误差(叶玉玲等, 2006)。渗流仪的上述误差与不足在后续的诸多研究中得到了定量确定和不断改良。

随着渗流仪应用研究的不断深入和科学技术的迅猛发展, 更精确的渗流仪随之产生, 比如: 连续热型自动渗流仪(Continuous heat-type automated seepage meter)、热脉冲型自动渗流仪(Heat pulse-type automated seepage meter)、超声波型自动渗流仪(Ultrasonic-type automated seepage meter)、染料稀释技术渗流仪等。Boyle (1994) 设计制造了一种湖床渗流仪(图 2), 并在北极一个森林湖泊的非沿岸冰层覆盖区进行了实地测试。结果表明该装置对于测量很低的界面渗流速率十分有效, 且有助于摸清湖泊环境中地下水补给与排泄的复杂空间分布情况。

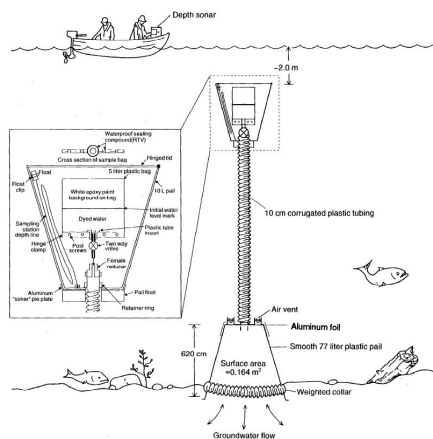


图2 一种用于湖面冰冻的湖床渗流仪

Cable 等(1997)提出可通过在塑料袋中充水以及调整测量时间来减小测量误差, 且通过控制实验(control experiment)可估计出风、波等因素对渗流的影响。Taniguchi 等(2003)在墨西哥湾东北海岸的渗流仪对比实验中得出以下结论: 自动渗流仪与手工渗流仪测得的结果相吻合(80%); 短期测量结果不准确, 而经过几个潮周期的连续自动测量会得到比较可靠的结果; 海底地下水渗流速度离海岸越远越小。Rosenberry 和 Morin (2004)在 Lee 式渗流仪的基础上, 将塑料袋替换为市售的电磁流量计, 改良设计了一种电磁渗流仪(ESM), 用于实时连续自动监测沉积物-水界面的渗流量。对比两种渗流仪在 Mirror Lake 的实测结果发现, 二者结果吻合很好。Rosenberry 和 Donald (2005)将 4 个相同尺寸的半桶式渗流仪串联在一起, 连接到一个收集袋上, 用来测定更大面积的渗流量, 达到了减少劳动力和提高测量数据代表性的目的(图 3)。另外, 一些学者研究表明, 收集袋材质、渗透流量仪直径等因素对测定结果都会产生一定的影响。因此, Rosenberry (2008)还通过将收集袋安装在保护盒中, 避免了地表水体流动的干扰。

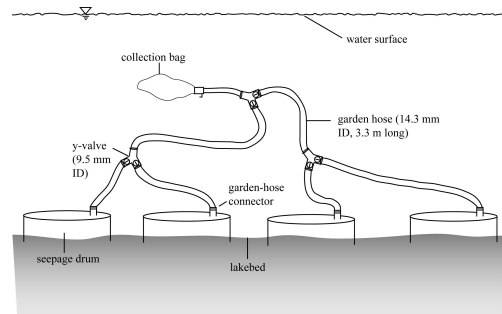


图3 一种串联组装的渗流仪

在吸收国内外研究成果的基础上, 张博等(2015)自行设计和加工了一种渗流仪, 采用砂槽模拟试验分别测定了渗流稳定时间和渗透流量仪校正系数, 并优化了渗透流量仪的尺寸, 最后将标定的渗透流量仪应用于大沽河东岸魏家屯人工湖泊与地下水渗流量的测定, 取得了很好的效果。研究表明: 渗流稳定时间的长短对测定结果影响很大, 渗透流速越小需要的稳定时间越长; 人工湖泊四周均表现为人工湖泊补给地下水, 但其补给速率随位置的变化而改变。去年, 韩国的 Lee 等(2018)设计了一种新型的浮式渗流仪(图 4), 用以在海岸带沉积物—水界面某定位点处进行海底地下水

排泄 (SGD) 速率及伴随的化学物质通量的时间序列测量。

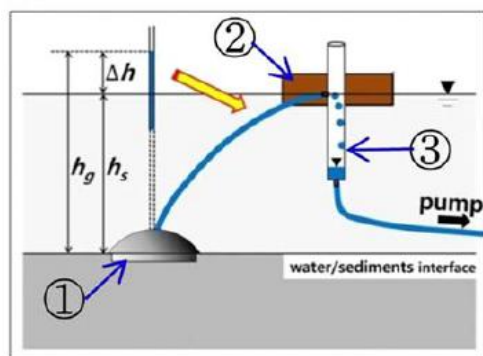


图 4 一种漂浮式渗流仪

3 总结与展望

湿地地表水—地下水之间水量与水质的交互作用是影响湿地水文过程与生态环境的重要机制,但在实际研究中因其隐蔽性且较难确定而常被忽略。渗流仪较早起源于国外,它的出现使得直接定

量测量沉积物—水界面水通量或速率变得简便。国外对渗流仪的研究广泛且科研兴趣不减,他们对渗流仪的结构构造、计算原理进行了不断的改进;渗流仪在 20 世纪后期传入国内后,人们主要用其开展坝基渗漏量测量、河流潜流带河水—地下水交换定量等应用性的研究。随着声、热、电、磁等先进技术的兴起,科学家们基于具体实际问题对渗流仪的结构和测量原理进行了有针对性的持续优化。

水既既可作为资源用于生产生活,又为人类提供了重要的生态环境保障;然而,长期以来地下水和地表水被割裂开而分别开采使用和治理保护。作为水文循环过程中的关键环节之一,沉积物—水界面上的水量交换、水质转化应当予以足够重视。创新研发具有更多实用功能的新型渗流仪,将可实现对地下水—地表水交互作用的实时调查—动态监测—提前预警,应为环境科学家和政府管理者对地表、地下水资源环境的联合优化调配、协同治理修复、可持续开发利用、科学保护和智慧管理作出其应有的贡献。

参 考 文 献 / References

- 李海龙, 王学静. 2015. 海底地下水排泄研究回顾与进展. 地球科学进展, 30(6): 636~646.
- 叶玉玲, 廖小青, 刘贯群. 2006. 国内外地下水入海通量研究现状与趋势. 水文地质工程地质, 33(6): 124~128.
- 张博, 郑西来, 魏杨. 2015. 人工湖泊与地下水界面渗流量测试技术研究. 工程勘察, 43(7): 44~49.
- Boyle D R. 1994. Design of a seepage meter for measuring groundwater fluxes in the nonlittoral zones of lakes—evaluation in a boreal forest lake. *Limnology and Oceanography*, 39(3): 670~681.
- Cable J E, Burnett W C, Chanton J P, Corbett D R, Cable P H. 1997. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 45(3): 367~375.
- Israelson O W, Reeve R C. 1944. Canal lining experiments in the delta area. Utah: Utah Agricultural Experiment Station.
- Lee B J, Lee J H, Kim D H. 2018. An alternative approach to conventional seepage meters: Buoy-type seepage meter. *Limnology and Oceanography: Methods*, 16(5): 299~308.
- Lee D R. 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology and Oceanography*, 22(1): 140~147.
- Rosenberry D O. 2005. Integrating seepage heterogeneity with the use of ganged seepage meters. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3(2): 131~142.

- Rosenberry D O. 2008. A seepage meter designed for use in flowing water. *Journal of Hydrology*, 359(1): 118~130.
- Rosenberry D O, Morin R H. 2004. Use of an electromagnetic seepage meter to investigate temporal variability in lake seepage. *Ground Water*, 42(1): 68~77.
- Taniguchi M, Burnett W C, Smith C F, Paulsen R J, O'Rourke D, Krupa S L, Christoff J L. 2003. Spatial and temporal distributions of submarine groundwater discharge rates obtained from various types of seepage meters at a site in the northeastern gulf of Mexico. *Biogeochemistry*, 66(1~2): 35~53.

LI Gang, LI Haitao, SUN Lu, ZHAO Kai, LI Muzi, LI Hailong, WANG Xuejing, CHEN Yichao: Retrospect and progress on seepage meters for direct measurement of water flux across sediment-water surfaces.

Keywords: seepage meter; sediment-water interface water flux; groundwater-surface water exchange