

赵明,刘家琪,刘威辰,等.从固体潮角度再思考利用地下水位波动计算蒸散发量[J].中国沙漠,2026,46(3):275-283.

从固体潮角度再思考利用地下水位波动 计算蒸散发量

赵明^{abc},刘家琪^{ab},刘威辰^{ab},钟梦婷^{ab},黄佑恒^{ab}

(长安大学 a土地工程学院, b.陕西省土地整治重点实验室, c.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054)

摘要:在水文地质研究中,为便捷估算蒸散发量,常采用基于日尺度地下水位波动特征的White法,该方法以植物耗水引发的水位变化为前提。然而,White法依赖的“四大假设条件”在实际应用中存在明显局限性。为评估该方法的合理性,本研究通过分析不同场址的地下水位动态数据,辨析水位波动的内在驱动机制。结果表明:无论裸地还是植被覆盖条件下,地下水位均呈现日尺度周期性波动,说明将水位变化单纯归因于植被耗水缺乏充分依据。进一步分析显示,地下水位波动的周期与固体潮周期一致,指示着地下水位波动受地月引力的驱动。因此,采用White法基于地下水位波动估算蒸散发量存在显著不确定性。本研究从固体潮角度出发,对White法的适用性提出质疑,旨在为相关领域学者提供批判性参考,推动该方法的进一步完善。

关键词:地下水位波动; White法; 固体潮; 地月引力; 蒸散发

文章编号: 1000-694X(2026)03-275-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00234

中图分类号: X523

文献标志码: A

0 引言

地下水是旱区重要的水资源,控制着区域表生生态格局^[1-2]。旱区地下水依赖型植被与地下水存在着密切联系,植被的蒸散过程会直接或间接地引起地下水位的变化。根据日尺度地下水波动与植被蒸散发之间的关系,White^[3]于1932年提出了利用地下水位观测数据来计算植被蒸散速率的方法,简称White法。由于方法简单易行,且高频率、高精度的地下水位监测数据易获取,White法已成为干旱半干旱区植被蒸散发定量研究常用的方法^[4-5]。

地下水位除了受水量增减发生变化外,也与地壳中的应力状态变化有关^[6]。在日、月引潮力作用下,地球会发生周期性的压缩与膨胀,造成含水层内部压力随之增大与减小,最终导致井水位发生周期性波动,即固体潮效应^[7]。因而,日尺度上地下水位波动的原因尚不能定论。尤其White法在估算植被蒸散发量时,有“四大假设条件”,使得其在应用

过程中具有局限性,其合理性也有待进一步评估。因此,本研究拟通过分析不同条件下潜水监测井地下水位动态,甄别地下水位日波动的原因,进一步探讨利用地下水位波动计算蒸散发量的合理性。

1 相关概念

1.1 White法的提出与基本假设

1932年,White发现植物蒸腾会引起地下水动态昼夜变化,以此提出了基于地下水位波动估算蒸散发量,即White法(图1)。

$$ET = S_y(24r + \Delta S) \quad (1)$$

式中:ET为地下水日蒸散发量(mm); S_y 为含水层给水度($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$); r 为00:00—04:00地下水位平均上升速率($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); ΔS 为24 h内地下水位净上升或下降高度(mm)。

White法在应用时,需满足以下条件:①地下水位日动态变化归因于植物蒸腾;②00:00—04:00间

收稿日期:2025-04-20; 改回日期:2025-09-22

资助项目:国家自然科学基金项目(42407087);中国博士后科学基金面上资助项目(2022M720535);陕西省创新能力支撑计划创新团队项目(2024RS-CXTD-55);大学生创新创业训练计划项目(X202410710600)。

作者简介:赵明(1992—),男,河南商丘人,博士,副教授,主要从事旱区生态水文过程研究。E-mail:zm199231@chd.edu.cn

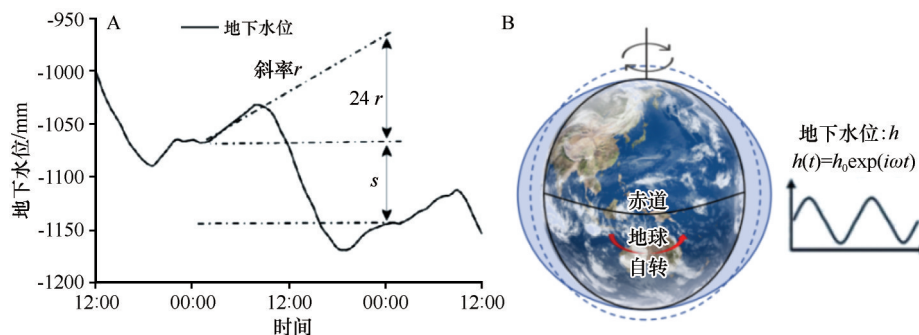


图1 White方法示意图(A)和固体潮示意图(B)

Fig.1 Schematic diagram of the White method (A) and the earth tides (B)

植物不存在蒸腾作用,其间的地下水补给速率可代表当日平均补给速率;③地下水补给速率为常数;④土壤水力参数给水度为一可精确计算的定值。而White法的局限性主要体现在其假设条件上,即:①00:00—04:00的地下水位变化率代表随时间变化的地下水侧向补给速率这一假设存在一定误差^[8-9]。②式中给水度是一个与含水层岩性结构有关,且受地下水位深度、地下水位波动幅度、地下水排水时间等因素影响的高变异性变量,其准确性关系到蒸散量定量计算的准确性^[10-12]。③地下水位动态在空间上存在较大差异^[13-14],通过单井地下水位观测资料估算区域尺度上植被蒸散量存在一定的不确定性^[15]。④认为午夜到凌晨植被的蒸散量几乎为零,这一假设与野外观测发现植物在夜间仍有水分流失相悖^[16-17]。有研究表明忽略夜间植被的蒸腾作用,会导致蒸散发估算误差高达25%^[18]。学者不断改进White法,Hays^[19]假设蒸散发只在地下水位下降时发生,然后估算出日蒸散发量。Loheide^[12]在考虑地下水位波动区内外连续地下水流动的影响下,采用去趋势法估算小时尺度蒸散量。Soylu等^[20]基于傅里叶变换改进了White法。然而,White法中假设条件的局限性仍未得到根本解决。

1.2 固体潮的提出与基本特征

固体潮(Earth Tides)的概念最早可追溯到19世纪中后叶,Kelvin^[21]在1863年首次从理论上论证了地球固体部分在日月引力作用下会产生周期性形变(图1)。1883年,Darwin^[22]对海潮观测中长时间分量的数据进行比较,发现它只有理论值的2/3,他认为所损失的1/3是由于地球的固体表面发生与海水类似的周期性涨落所致,从而验证了固体潮的存在。20世纪50年代,随着精密仪器的出现,特别是

有了精密重力仪,固体潮的观测和研究才有了实际的可能。在水文地质领域,Jacob^[23]首次提出含水层对固体潮响应的数学模型,奠定了地下水潮汐效应的理论基础。Bredehoeft^[24]通过观测井水位变化,首次将固体潮理论应用于地下水动态研究,揭示了含水层弹性形变与水位波动的定量关系。地下水位的动态变化除了受水量的增减影响,还受含水层应力-应变状态变化的影响而表现出微小变化。有学者指出潮汐应力引起含水层实体骨架的周期性弹性变形,使地下水随着实体骨架的压缩和膨胀而流入和流出含水层,从而引起水位的周期性微动力变化^[25-27]。

2 材料与方法

2.1 试验方案

本研究通过不同立地条件下的实测地下水位数据,以及全球不同经度地区的地下水位数据资料,深入分析地下水位波动特征及其与植被蒸散发和固体潮的关系。其中,实测地下水位数据由蒸渗仪试验和原位监测试验获得,试验位于内蒙古南部乌审旗境内(37°38'—39°23'N, 108°17'—109°40'E),地处毛乌素沙地腹部(图2),地势由西北向东南倾斜,海拔1300~1400m。区内地貌类型以剥蚀地形、堆积地形和风积地形为主,形态分为梁地、湖淖、滩地,流动与半流动沙丘和河谷等。大部分为梁地、滩地、沙地相间,沙漠、滩地、梁地呈西北—东南条带状分布。

2.1.1 蒸渗仪试验

蒸渗仪试验场位于内蒙古乌审旗河南乡气象站内。试验装置由2个圆柱形蒸渗仪组成,其侧壁与底部封闭,顶部敞口(图2)。每个蒸渗仪内径为

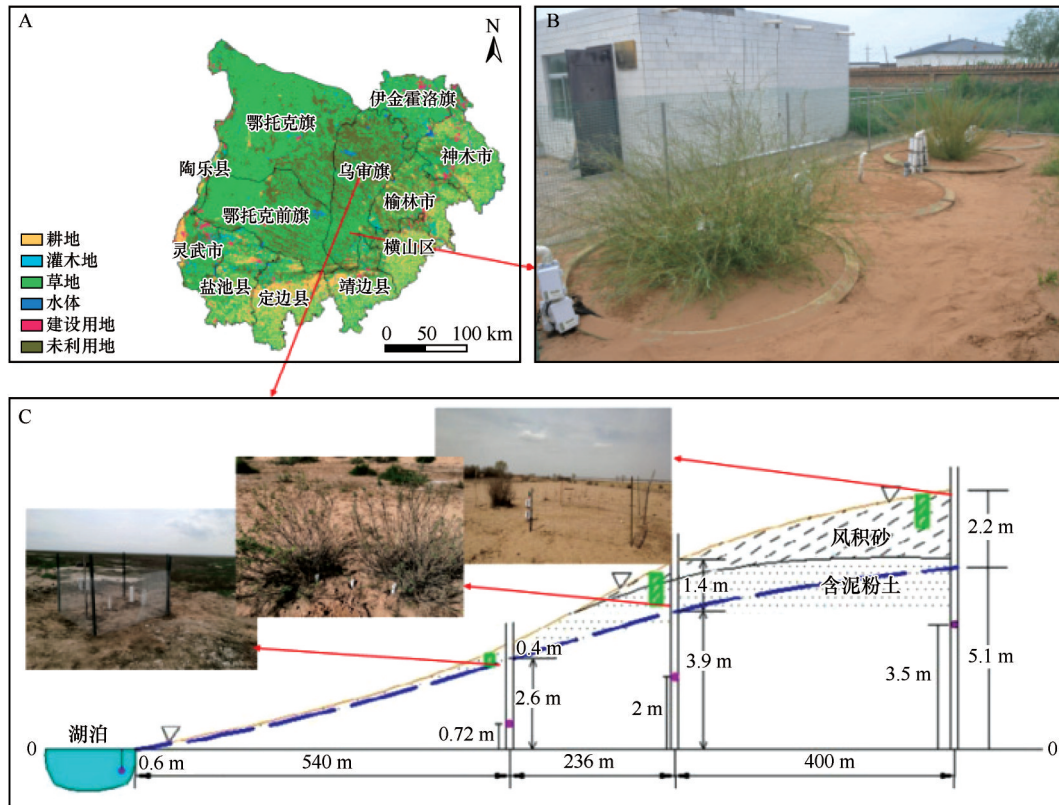


图2 毛乌素沙地试验地位置(A)、蒸渗仪试验(B)、原位监测试验(C)

Fig.2 Lysimeter experiment (B), in-situ monitoring experiment (C) in Mu Us Sandy Land (A)

200 cm, 高度为400 cm, 埋于地下, 顶部开口与地表齐平, 以模拟真实地表边界条件。为减少壁面优先流的发生, 蒸渗仪内壁经打毛处理, 并回填当地原状风积沙作为填充介质。回填过程中遵循分层压实原则, 自下而上逐层均匀压实, 使填充沙体的容重接近天然状态, 以保持其原有水力特性。2015年, 在两个蒸渗仪中分别进行不同处理: 其中一个蒸渗仪种植研究区典型灌木沙柳, 另一设置为裸地对照。每个蒸渗仪侧壁设有专用地下水观测孔。试验开始前, 通过观测孔注水, 将两个蒸渗仪内的初始地下水位控制在埋深约200 cm处, 并保持基本一致。待水位稳定后, 停止人为干预, 确保后续水位波动完全受自然水文过程驱动。水位监测采用DI501型地下水自记传感器(量程20 m, 精度 $\pm 0.05\%$), 安装于观测孔底部, 用于连续记录水压变化; 同时在观测孔顶部安装BARO-DIVER大气压力传感器(量程10 m, 精度 $\pm 0.05\%$), 以校正大气压对水位读数的影响。通过双传感器同步监测, 可准确计算实际地下水位动态。数据监测及采集频率设定为每5分钟1次。本研究分析所采用的数据为2016年全年监测所得。

2.1.2 原位监测试验

原位监测试验场位于内蒙古乌审旗宝寨淖滨岸带, 该区域具有明显的植被带状分布特征: 由湖心向外围辐射, 依次为草甸带、灌丛带和灌木带(图2), 土壤类型为风积沙。各区带土壤基质均为风积沙, 但植被类型、盖度及水文条件存在显著差异。其中, 草甸带紧邻湖泊, 主要植被为赖草(*Leymus secalinus*)和寸草苔(*Carex duriuscula*)等低矮草本, 植被盖度超过80%。该带地下水位埋深较浅, 常年维持在30~50 cm, 低于风积沙的毛细上升高度, 因此浅层土壤含水率长期接近饱和状态。灌丛带位于草甸带外侧, 植物以碱草(*Elymus canadensis*)和沙蒿(*Artemisia arenaria*)为主, 植被盖度约为36%。该带地下水位埋深约140 cm, 大致处于风积沙毛细上升高度的临界范围, 土壤水分条件受毛细作用和植被耗水共同影响。灌木带的植物类型以多年生沙柳(*Salix psammophila*)和柠条(*Caragana microphylla*)为主, 植被盖度低于15%, 该区域地下水位埋深较大, 约240 cm, 已超过风积沙的毛细上升高度, 因此浅层土壤水分通常较低(平均体积含水率不超过 $0.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), 土壤水分动态对降水事件的

响应较为敏感。为监测不同植被带地下水动态,本研究在各带内分别布设地下水位观测孔,并安装DI501型自记水位传感器(监测性能与蒸渗仪试验一致),以5分钟间隔连续采集水位数据。大气压校正通过同步安装的BARO-DIVER传感器实现,以获取经校正的实际水位值。本研究所采用数据为2019年全年监测结果。

2.1.3 全球地下水位波动数据

本研究通过系统性的文献调研与数据检索,收集了全球不同经度分布的潜水井地下水位观测数据,共计获取11个有效监测站点(表1)。所有站点均位于中低纬度,但其经度分布范围较广,为解析

经度效应提供了良好的基础。这些站点的数据此前已应用于采用White方法估算区域蒸散发量的研究。基于地月引力势场及其引起的固体潮汐现象具有与地球经度和时间密切相关的固有周期性这一理论基础,本研究旨在深入探讨该引力效应对日尺度地下水动态的影响机制。为此,研究将采用以下严谨的分析方法:首先对高频地下水位时序数据进行预处理;其次定量识别并提取周期性波动的特征参数(如振幅和频率);最后,通过构建相位与时间之间的回归模型,进行跨站点的对比与相关性分析,旨在确证地月引力是驱动日尺度地下水位周期性变化的核心物理因素。

表1 用White法估算蒸散发量的地下水观测井地理位置信息

Table 1 The geographical location information of groundwater observation wells for estimating evapotranspiration using the White method

序号	观测井位置	国家	观测井经纬度坐标	海拔/m	数据获取时间	参考出处
1	河西走廊-黑河流域	中国	38°59'12"N,99°51'33"E	1 504	2017年8月	王京晶等(2021) ^[28]
2	黑河下游额济纳	中国	41°59'N,101°10'E	921	2014年和2020年6—8月	张琦等(2022) ^[29]
3	毛乌素沙地	中国	38°23'27"N,109°11'42"E	1 288	2012年6月	Jiang等(2017) ^[30]
4	巴丹吉林沙漠	中国	39°04'15"N,101°34'02"E	1 194	2018年8月	李琳等(2022) ^[31]
5	鄂尔多斯盆地苏贝淖流域	中国	38°20'21"N,108°40'23"E	966	2014年8月	李洪波等(2012) ^[32]
6	苏丹裂谷盆地	苏丹	17°01'32"S,30°40'11"E	553	2006年8月	Abdalla (2010) ^[33]
7	罗斯托克站点	德国	54°03'N,12°10'E	89	2004年10月	Mould等(2010) ^[34]
8	堪萨斯州1号	美国	37°03'55"N,97°02'23"W	601	2002年8月	Loheide等(2005) ^[35]
9	堪萨斯州2号	美国	37°03'55"N,97°02'23"W	601	2004年9月	Butler等(2007) ^[36]
10	内布拉斯加州1号	美国	40°55'31"N,98°20'18"W	790	2014年7月	Yue等(2016) ^[37]
11	内布拉斯加州2号	美国	40°55'31"N,98°20'18"W	790	2014年7月	Loheide等(2008) ^[38]

2.2 数据预处理

首先,所选数据为连续晴天的地下水位动态,排除降水对地下水的影响。其次,在利用水位数据进行分析前,通过减去大气压值,以排除气压因素的干扰。最后,对数据中的高频干扰加以去除。滑动平均是滤波处理中常用的信号处理方法,适用于处理时序数据以消除噪声。其通过计算数据的平均值实现噪声抑制。

$$MA_t = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{t-i} \quad (2)$$

式中: MA_t 是第 t 时刻的地下水位滑动平均值; N 是每次计算平均值包含的数据点数量, N 的选择至关重要, N 大小会影响平滑效果以及对信号特征的保留程度,在本研究中,如果信号变化慢,相邻数据点

之间的差异较小, N 值设为20,如果信号变化快, N 值设为5; x_{t-i} 是第 $t-i$ 时刻的数据值。

3 结果与讨论

3.1 日尺度地下水位波动特征

图3显示了一维蒸渗仪内裸地情景和沙柳地景观测的地下水位动态,可以发现两种立地条件下地下水位在日尺度上都呈现明显的近似正弦函数的周期性波动。其中,裸地情景地下水位整体呈现上升趋势,这是由于水位较深且超过土壤极限蒸发深度,地下水不参与土壤蒸发过程,降水入渗能够有效补给地下水,引起地下水位上升^[27]。沙柳地情景地下水位整体呈现下降趋势,归因于植被根系耗

水直接或间接利用地下水,引起地下水位下降^[39]。传统上,基于地下水位日波动估算植被蒸散发量的方法(如White法)建立在一个关键假设之上:夜间特定时段(通常为00:00—04:00)内植被蒸腾作用停止,该时段的水位回升可归因于地下水净补给。然而,本研究观测到无植被覆盖的裸地情景下仍存在显著的地下水日周期波动,这与将地下水位的日波动特征归结于植物根系利用地下水的结论相

悖^[36,40]。因此,日尺度地下水位周期性波动不能直接归因于植被蒸散发对地下水的作用。通过对裸地和沙柳地情景的地下水位去趋势化进一步发现,两种立地条件下地下水位在日尺度上的波动频率基本一致。有区别的是沙柳地情景的地下水位相较于裸地情景,波动幅度略大,且存在约1.0 h的滞后,意味着植被蒸散发作用在一定程度上会影响地下水位的周期性波动。

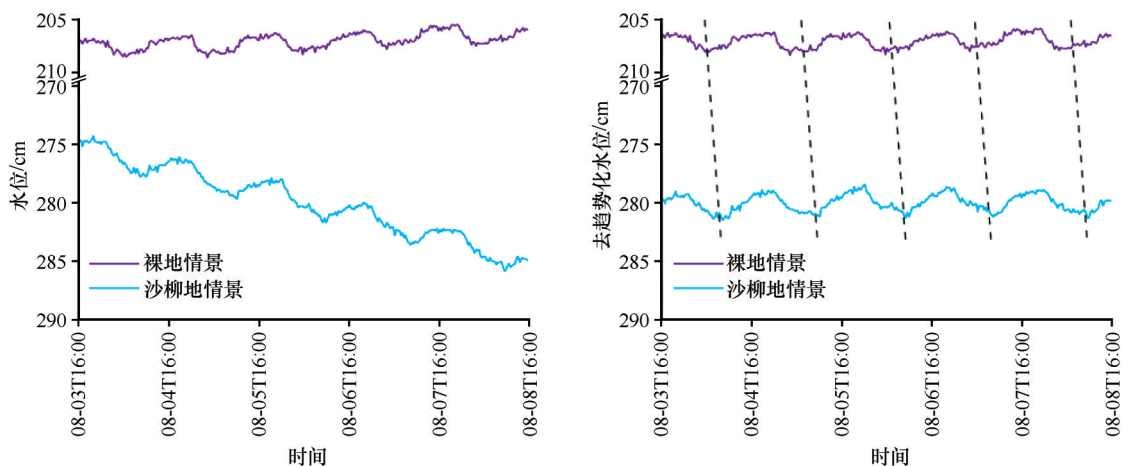


图3 裸地情景和沙柳地情景下的地下水位动态及其去趋势化

Fig.3 Groundwater level dynamics in bare land scenarios and *Salix* land scenarios and their detrendization

3.2 侧向流对地下水位波动的影响

在蒸渗仪试验中,地下水只受降水和蒸发作用在垂向一维的影响。为进一步验证地下水位日尺度周期性波动是否受侧向流的影响,本研究通过原位监测试验中滨湖带不同植被类型分区的地下水位动态进行分析,结果如图4所示。可以看出,3个植被类型分区的地下水位整体上均呈现下降趋势。在距离湖泊最近的草甸区,地下水位整体呈现下降趋势,6天内下降了20.1 cm,并存在明显的日尺度波动特征,波动幅度为7.5 cm左右;在远离湖泊的灌丛区,地下水位整体也呈现下降趋势,6天内下降了17.4 cm,日尺度波动幅度较草甸区有所减小,为2.8 cm左右;而在距离湖泊最远的灌木区,地下水位6天内下降了11.9 cm,日尺度波动幅度较灌丛区又有明显减少,为1.3 cm左右。日尺度上植物对地下水的消耗导致水位逐渐下降,使得河岸带与补给源区之间的地下水水力梯度发生变化。

原位监测试验中的3个监测点的地下水存在水力联系,地下水沿灌木区-灌丛区-草甸区-湖泊方向流动,各监测点接受来自上游的地下水侧向补

给^[9]。通过对湖岸带不同植被覆盖区的地下水位去趋势化(图4)分析可以发现,3个监测点的地下水位动态响应一致,几乎不存在响应滞后时间,意味着侧向流不会影响地下水波动的周期性,仅存在波动幅度的差异,正如Buttle等^[36]发现在靠近河岸带的地区,地下水位日尺度波动在生长季节明显,而在远离河岸带的地区,地下水位无明显的日尺度波动。

3.3 地下水位波动的周期性

通过对不同地区地下水位波动特征的对比分析,本研究进一步探讨了日尺度地下水位波动的驱动机制。图5展示了日尺度水位波动的周期性特征与相对时间(行政时间)之间的关系,揭示了其与地球经度及周期性出现的地月引力作用之间的内在联系。结果显示,全球各监测点所记录的地下水位日波动具有高度一致的周期性规律,且波动形态符合地月引力周期性变化诱导的正余弦模式。该周期性波动的平均振幅约为3.15 cm,平均周期约为23.9小时。时间与相位滞后之间的回归模型可表达为 $y=3.15 \times \sin(h-6.1)$,表明日尺度水位波动在相位上与经度(体现为时间)显著吻合。这一结果进一

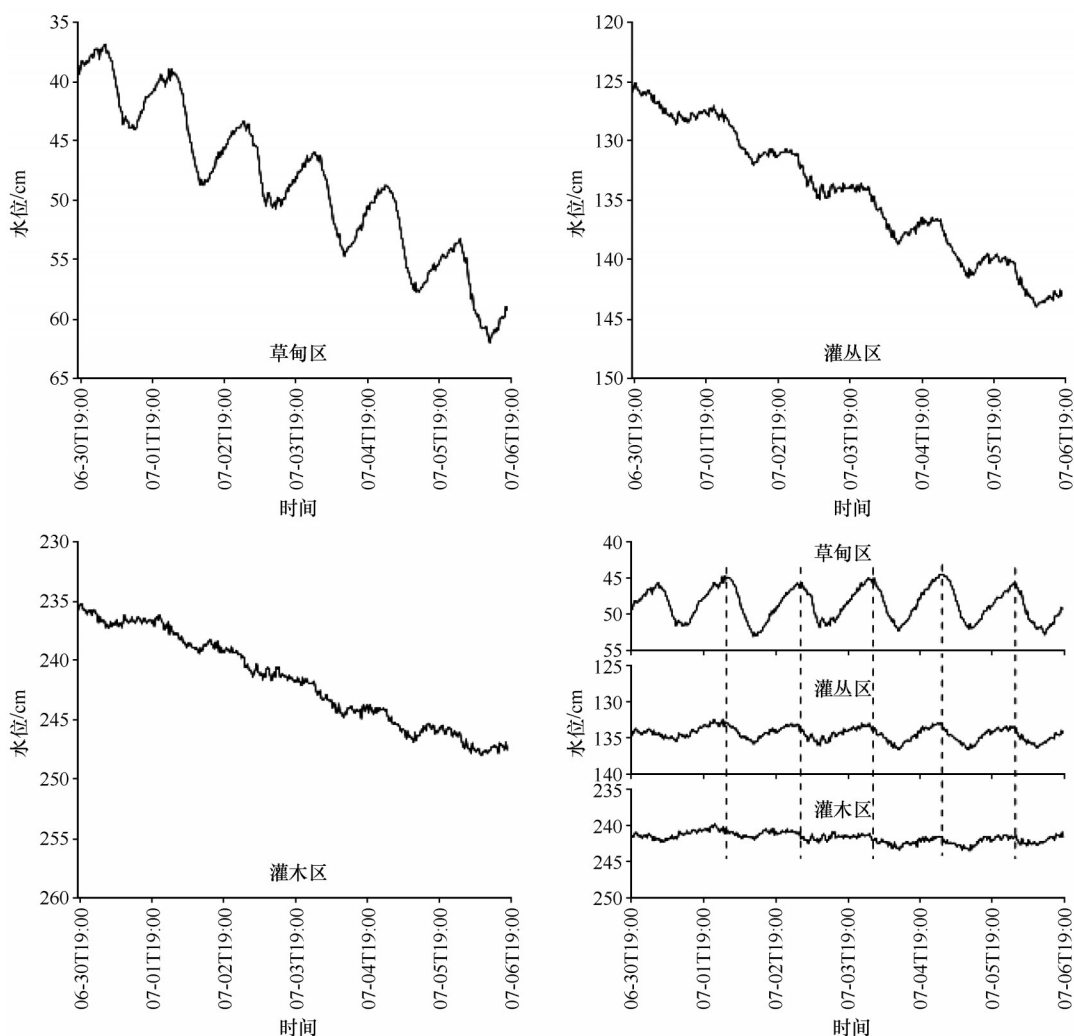


图4 不同植被覆盖区地下水位埋深动态及其去趋势化

Fig.4 The dynamics of water table depth and their detrendization in different vegetation coverage areas

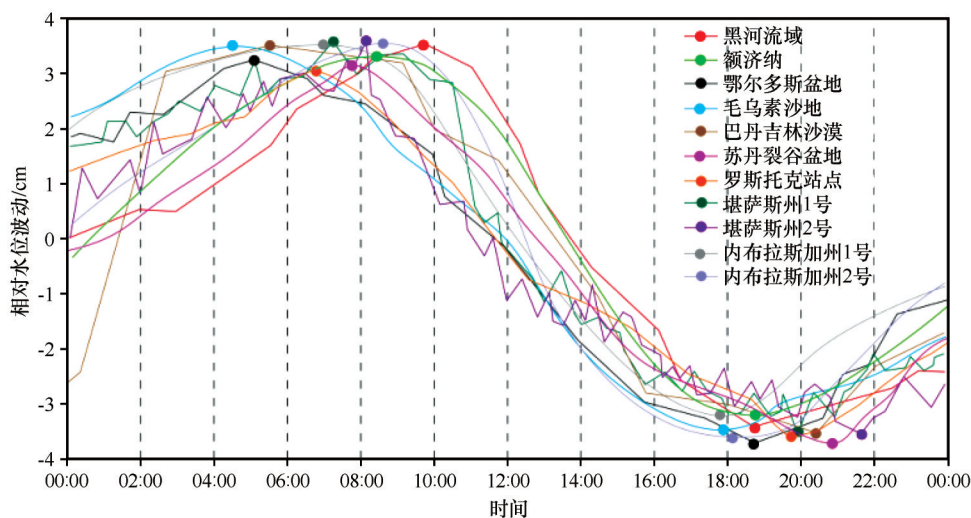


图5 不同地点日尺度地下水位波动特征

Fig.5 The fluctuation characteristics of water levels at different locations on daily scale

步支持了地月引力是驱动日尺度地下水位周期性波动的关键因素。有研究指出受周期性地月引力

变化,含水层发生弹性变形,于是地下水位出现日尺度波动^[41-42]。正如王金维^[43]指出井水位变化与固

体潮有关,且井水位峰谷变化的方向与重力固体潮的方向相同。

White法假设夜间蒸散发量为零,从而以00:00—04:00内的地下水位变化来估算全天下水补给速率。然而该时段的选择具有主观性,会对蒸散发造成明显的影响^[29]。图5显示的地下水位日尺度波动与固体潮引起的含水层弹性变形周期高度吻合,这一发现对上述假设提出了根本性质疑。Zhang等^[44]利用新疆塔里木河流域的水位数据,发现00:00—06:00估算结果精度最高。Yin等^[45]发现利用22:00至翌日08:00时段估算水位恢复速率最优。在与Hays方法和Soylu方法等改进的蒸散发估算方法对比中,White方法精度最低,归因于人为主观选取计算地下水恢复速率时段,且实际夜间蒸散发量并不为0,导致White方法估算的蒸散发与实际相比被低估^[17,29]。可见,White法中第二条假设认为植物的蒸腾速率在00:00—04:00内为零不合理,其忽略了地球绝对时间与地月关系周期的一致性,固体潮作为全球性、周期性的地球物理现象,通过地月引力对含水层骨架产生周期性应力,导致孔隙水压力变化,从而引起地下水位在日尺度上发生规律性波动,与植被蒸腾无关。这意味着,若不剥离这一背景信号,直接将全部水位波动归因于蒸散发,将导致估算结果存在显著偏差。

进一步分析表明,固体潮驱动的波动具有固定周期性与经度依赖性,其相位与绝对时间严格对应,而非人为划定的行政时间。从图5显示的不同监测点地下水位波动特征可以发现,某些地区的时间采用本国家或地区的行政时间,使得该时间阈值对植物固有的蒸腾特性存在偏差。而且当前White法在应用中普遍采用行政时间划定“零蒸腾”窗口,忽略了监测点实际经度带来的时差效应。例如,统一采用北京时间处理新疆准格尔盆地与黄土高原(两地经度相差 $24^{\circ}\sim 30^{\circ}$,1.5~2小时)的水位数据,会错误判断固体潮的波谷与波峰时段,误将引力导致的水位下降判读为蒸腾消耗,或将含水层弹性恢复判读为净补给,从而引入系统性误差。

综上,尽管White方法及其后续改进方案在水文研究中得到了广泛应用,但其适用场景和时间分辨率仍存在显著局限性^[29]。究其根本,在于传统方法对地下水波动驱动机制的简化处理。蒸散发并非引起地下水位或土壤水分日波动的唯一源项;气压波动、温度变化、湿度效应、随机性的降水补给以

及固体潮等,均会干扰水位动态。White方法及其改进形式在机理上未能充分纳入这些复杂因素,因此难以从根本上克服实际应用中面临的不确定性^[29]。因此,为提升蒸散发的估算精度,必须对传统方法进行系统性修正与增强。未来的研究应采用频谱分析或滤波技术,从原始水位序列中识别并剥离由地月引力引起的固体潮等周期性成分,从而分离出主要反映蒸散发、降水及补给等水文过程的非周期性信号。其次,在应用White法时,应依据监测站点的地理经度换算出地方绝对时间,使分析时间窗口与固体潮相位精确对齐,消除因时区偏差导致的信号混淆与误判。

本研究不在于完全否定White法估算蒸散发量的合理性,而是发现了地下水位日波动受固体潮驱动的强有力证据,提出在高精度蒸散发估算中,需考虑固体潮对地下水波动的影响。本研究仍存在以下不足之处:研究虽通过周期性“一致性”推测固体潮是驱动日尺度水位波动的关键因素,但所提供的直接证据仍显不足。本研究选取的监测站点在数量上相对有限,且其地理分布和气候背景不够广泛。因此,研究结论在更广泛的地理区域和气候带下的普适性仍需未来通过布设更多样、更大量的站点来进一步验证。本研究重点讨论了固体潮效应,但在实际环境中,地下水位日波动同时受到气压波动、温度变化、随机降水补给等多种因素的复合影响。后续研究需要有效分离这些共存的干扰信号,以进一步提升固体潮效应识别的准确性以及后续蒸散发估算的精度。

4 结论

在自然条件下,地下水位常表现出明显的昼夜周期性波动,基于此现象衍生的White方法被广泛用于估算蒸散发量。尽管White方法在提出后历经多次改进,但其基本假设仍存在值得商榷之处。本研究通过对比有植被与无植被条件下的地下水位动态数据,发现日尺度水位波动与植物蒸腾并无直接必然联系。进一步基于全球多站点地下水时序数据的分析表明,此类日波动与地月引力所致的固体潮周期高度吻合。因而,利用地下水位日动态变化估算蒸散发量的White法的合理性亟需重新审视。将固体潮效应纳入地下水文过程模型,应成为改进蒸散发估算精度的重要方向。这一认识不仅有助于提升植被耗水与地下水补给评估的准确性,

也对于干旱区水资源可持续管理及生态恢复策略的制定具有重要的理论与实践价值。

参考文献:

- [1] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702-718.
- [2] 卜凡蕊, 刘颖, 邹学勇, 等. 中国东部典型沙地植被稳定性与水资源关系特征[J]. 中国沙漠, 2024, 44(4): 111-125.
- [3] White W. A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil: results of investigation in Escalante Valley, Utah [R]. US Geological Survey, Water Supply Paper 659. Washington D C, USA: A United States Department of the Interior, 1932.
- [4] Carling G, Mayo A, Tingey D, et al. Mechanisms, timing, and rates of arid region mountain front recharge[J]. Journal of Hydrology, 2012, 428-429(4): 15-31.
- [5] 王平, 张学静, 王田野, 等. 估算干旱区地下水依赖型植物蒸散发的 White 法评述[J]. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1159-1170.
- [6] 张昭栋, 郑金涵, 耿杰, 等. 地下水潮汐现象的物理机制和统一数学方程[J]. 地震地质, 2002, 24(2): 208-214.
- [7] 李克, 赵仲和, 宋彦云, 等. 地震地下流体理论基础与观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [8] Troxell H. The diurnal fluctuation in the ground-water and flow of the Santa Ana River and its meaning[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1936, 17(4): 496-504.
- [9] Gribovszki Z, Kalicz P, Szilágyi J, et al. Riparian zone evapotranspiration estimation from diurnal groundwater level fluctuations[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(1/2): 6-17.
- [10] Chen X, Song J, Wang W. Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(3/4): 379-388.
- [11] Fahle M, Dietrich O. Estimation of evapotranspiration using diurnal groundwater level fluctuations: comparison of different approaches with groundwater lysimeter data[J]. Water Resources Research, 2014, 50(1): 273-286.
- [12] Loheide S, Butler J, Gorelick S. Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: a saturated-unsaturated flow assessment [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): W07030.
- [13] Rosenberry D, Winter T. Dynamics of water-table fluctuations in an upland between two prairie-pothole wetlands in North Dakota[J]. Journal of Hydrology, 1997, 191(1): 266-289.
- [14] Martinet M, Vivoni E, Cleverly J, et al. On groundwater fluctuations, evapotranspiration, and understory removal in riparian corridors[J]. Water Resources Research, 2009, 45(5): W05425.
- [15] Wang P, Grinevsky S, Pozdniakov S, et al. Application of the water table fluctuation method for estimating evapotranspiration at two phreatophyte-dominated sites under hyper-arid environments[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2289-2300.
- [16] Green S, McNaughton K, Clothier B. Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 48(3): 251-261.
- [17] Fisher J, Baldocchi D, Misson L, et al. What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California [J]. Tree Physiology, 2007, 27(4): 597-610.
- [18] Fan J, Ostergaard K, Guyot A, et al. Estimating groundwater evapotranspiration by a subtropical pine plantation using diurnal water table fluctuations: Implications from night-time water use[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 679-685.
- [19] Hays K B. Water use by saltcedar (Tamarix sp.) and associated vegetation on the Canadian, Colorado and Pecos Rivers in Texas [D]. College Station, Texas, USA: Texas A & M University, 2003.
- [20] Soylu M, Lenters J, Istanbuluoglu E, et al. On evapotranspiration and shallow groundwater fluctuations: a Fourier-based improvement to the White method[J]. Water Resources Research, 2012, 48(6): W06506.
- [21] Kelvin M L. On the tides[J]. Notes & Queries, 1904, (40). DOI: 10.1093/nq/s10-II.40.269-h.
- [22] Darwin G. A new theory of the tides of terrestrial oceans[J]. Nature, 1902, 66: 444-445.
- [23] Jacob C. Flow of groundwater [M]//Rouse H. Engineering Hydraulics. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 1950: 321-386.
- [24] Bredehoeft J D. Response of well-aquifer systems to earth tides [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(12): 3075-3087.
- [25] 张卉, 王广才, 史浙明, 等. 基于地下水位微动态反演含水层水文地质参数研究进展[J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 138-146.
- [26] Mcmillan T, Rau G, Timms W, et al. Utilizing the impact of Earth and atmospheric tides on groundwater systems: A review reveals the future potential[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(2): 218-315.
- [27] Ma Z, Wang W, Zhang Z, et al. Avaliando a evaporação do solo nu de diferentes profundidades do lençol freático usando lisímetros e um modelo numérico na Bacia de Ordos, China[J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27(7): 2707-2718.
- [28] 王京晶, 刘鹤, 徐宗学, 等. 基于昼夜水位波动法估算地下水蒸散发量的研究: 以河西走廊典型绿洲为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 59-67.
- [29] 张琦, 苏永红, 冯起, 等. 以地下水位估算的荒漠河岸胡杨 (*Populus euphratica*) 生态系统地下水蒸散发[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 243-254.
- [30] Jiang X, Sun Z, Zhao K, et al. A method for simultaneous estimation of groundwater evapotranspiration and inflow rates in the discharge area using seasonal water table fluctuations [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 498-507.
- [31] 李琳, 刘鹤, 孙程鹏, 等. 基于地下水位与土壤含水量的地下水蒸散发估算[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 277-287.

- [32] 李洪波,侯光才,尹立河,等.基于改进White方法的地下水蒸散发研究[J].地质通报,2012,31(6):989-993.
- [33] Abdalla O A E .Groundwater discharge mechanism in semi-arid regions and the role of evapotranspiration[J].Hydrological Processes,2010,22(16):2993-3009.
- [34] Mould D J, Frahm E, Salzmann T, et al.Evaluating the use of diurnal groundwater fluctuations for estimating evapotranspiration in wetland environments: case studies in southeast England and northeast Germany [J]. Ecohydrology, 2010, 3 (3) : 294-305.
- [35] Loheide S P, Butler Jr J J, Gorelick S M.Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: a saturated-unsaturated flow assessment[J].Water Resources Research 2005,41(7):372-385.
- [36] Butler J, Kluitenberg J, Whittemore O, et al.A field investigation of phreatophyte-induced fluctuations in the water table[J]. Water Resources Research,2007,43(2):W02404.
- [37] Yue W, Wang T, Franz E, et al.Spatiotemporal patterns of water table fluctuations and evapotranspiration induced by riparian vegetation in a semiarid area [J]. Water Resources Research, 2016,52(3):1948-1960.
- [38] Loheide S P II.A method for estimating subdaily evapotranspiration of shallow groundwater using diurnal water table fluctuations[J].Ecohydrology,2008,1(1):59-66.
- [39] Zhao M, Wang W, Ma Z, et al.Soil water dynamics based on a contrastive experiment between vegetated and non-vegetated sites in a semiarid region in Northwest China[J].Journal of Hydrology,2021,603:1-14.
- [40] Eamus D, Zolfaghar S, Villalobos-Vega R, et al.Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies[J].Hydrology and Earth System Sciences,2015,19(10):4229-4256.
- [41] 杨再兴.海潮波动对滨海地区地下水水位的影响[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [42] 阮传霞.海岸带潮汐效应地下水水位动态研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.
- [43] 王金维.由井水位的固体潮效应反演含水层参数[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [44] Zhang P, Yuan G, Shao M, et al.Performance of theWhite method for estimating groundwater evapotranspiration under conditions of deep and fluctuating groundwater[J].Hydrological Processes,2016,30(1):106-118.
- [45] Yin L, Zhou Y, Ge S, et al.Comparison and modification of methods for estimating evapotranspiration using diurnal groundwater level fluctuations in arid and semiarid regions[J]. Journal of Hydrology,2013,496:9-16.

Rethinking the rationality of evapotranspiration calculated by using water table fluctuation from the angle of earth tides

Zhao Ming^{abc}, Liu Jiaqi^{ab}, Liu Weichen^{ab}, Zhong Mengting^{ab}, Huang Youheng^{ab}

(a. School of Land Engineering / b. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering / c. MOE Key Laboratory of Underground Hydrology and Ecological Effects in Arid Regions, Chang'an University, Xi'an 710054 China)

Abstract: In hydrogeological studies, the White method, which relies on diurnal groundwater level fluctuations, is commonly used for convenient estimation of evapotranspiration. This method presupposes that such fluctuations result primarily from plant water uptake. However, the “four fundamental assumptions” underlying the White method exhibit significant limitations in practical applications. To evaluate the rationality of this approach, this study analyzes groundwater level dynamics from multiple sites to elucidate the intrinsic drivers of water level fluctuations. The results indicate that diurnal periodic fluctuations occur under both bare soil and vegetated conditions, suggesting that attributing water level changes solely to plant water use lacks sufficient basis. Further analysis reveals that the periodicity of groundwater fluctuations aligns with that of Earth tides, indicating the influence of Earth-Moon gravitational forces. Consequently, estimating evapotranspiration using the White method based on groundwater fluctuations entails considerable uncertainty. By questioning the applicability of the White method from the perspective of Earth tides, this study aims to provide critical insights for researchers in related fields and promote further refinement of the methodology.

Key words: water table fluctuation; White method; earth tides; earth-moon gravity; evapotranspiration