

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210474

# 小型分散湿地可利用水资源量计算方法研究

陈文君<sup>1,2</sup>, 申淑娟<sup>3</sup>, 苏慧<sup>1</sup>, Tom LOTZ<sup>1,2</sup>, 黄莹<sup>4</sup>, 徐文祥<sup>5</sup>

(1.金陵科技学院,江苏南京 211169; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所 中科院流域地理学重点实验室,江苏南京 210008; 3.浙江省测绘科学技术研究院,浙江杭州 311000; 4.河海大学 农业科学与工程学院,江苏南京 211100; 5.南京元时空地理信息技术有限公司,江苏南京 210046)

**摘要:**小型分散湿地发挥着多种生态系统服务功能,其科学、合理地保育利用对资源环境可持续发展有着重要意义。本文针对小型分散湿地数量多、分布广、利用频繁的特点,结合水资源管理业务需求,以统计区间内高频率水位的最大值作为生态水位,提出其可利用水资源量的快速计算方法;设计并实现基于WebGL水资源利用实况模拟的小型分散湿地水资源管理系统。以句容茅山地区为实验区,通过确定生态水位、构建湿地三维地形、计算定水位水量三个主要步骤,快速获得小型分散湿地的可利用水资源量,直观展示取用水的动态过程,以此应对小型分散湿地科学管理、可持续利用的社会需求,促进我国湿地水资源管理的系统化和规范化。

**关键词:**小型分散湿地;水资源;可利用水量;生态水位;信息系统

**中图分类号:**TP391;TV214;P333 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2023)03-0045-07

## 0 引言

湿地提供着水文调节、水质净化、生物多样性保护等生态系统服务功能,其保育利用是实现全球可持续发展目标的重要内容<sup>[1]</sup>。在我国南方,分布着非常多的小型水库、蓄水山塘、灌溉水塘、村边水塘等小型分散湿地。它们涵养水源,调节局地温湿度,供给灌溉与生活用水,保持物种多样性,具有较高的生态价值<sup>[2]</sup>。这些水体通常面积较小,水深较浅<sup>[3]</sup>,但相比湖泊、水库,具有同样重要的水资源贡献<sup>[4]</sup>。

近年来,我国东部、南部地区洪旱灾害、面源污染等问题愈加突出<sup>[5]</sup>,与湿地功能退化联系密切<sup>[6]</sup>。例如,流域上游大量年久失修的水塘被淤积填平,蓄洪抗旱、截污去垢等功能无法发挥<sup>[7]</sup>。针对小型分散湿地,欧美国家已经实施了国家层面的保护措施。例如,美国春季池塘协会、法国千年生态系统评估、英国池塘行动,以及欧洲池塘保护网络等跨国机构,对小

型分散湿地的可利用水资源量,及其可持续的开发、保育进行了规范和指导。但是,我国系统性的研究和实践还较为匮乏<sup>[8]</sup>。

目前,管理部门建设的湿地管理系统大多缺乏湿地水资源时空特性的动态刻画,缺乏水资源可利用量的计算与模拟,难以为湿地水资源管理提供有效支撑。本文从湿地水量平衡方程出发,提出小型分散湿地可利用水资源量的快速计算方法。然后,综合运用三维GIS技术、空间数据库、分布式文件系统等混合存储架构,设计开发了小型分散湿地水资源管理系统,促进其科学管理与可持续利用,提升我国湿地水资源管理的系统性和规范性。

## 1 湿地可利用水资源量快速计算方法

湿地可利用水资源的常用计算方法为扣损法<sup>[9-11]</sup>,即从总量中扣除不可利用的水量。就单个湿地而言(图1),其水量补给来源包括降水 $P$ 、地表入流 $S_m$ 、地下

收稿日期:2021-11-13

网络首发日期:2023-06-13

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20230612.1350.016.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(42101476);江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养项目;江苏省水利科技项目(2021058);江苏省高校自然科学研究项目(21KJB170025);江苏省政府决策咨询研究项目(JSZY202109)

作者简介:陈文君(1986—),男,江苏南京人,博士,副教授,主要研究方向为流域模拟、智慧水利、湿地保育。E-mail:chenwenjun@niglas.ac.cn

通信作者:申淑娟(1985—),女,河北秦皇岛人,硕士,工程师,主要研究方向为地理信息采集与应用。E-mail:252822008@qq.com

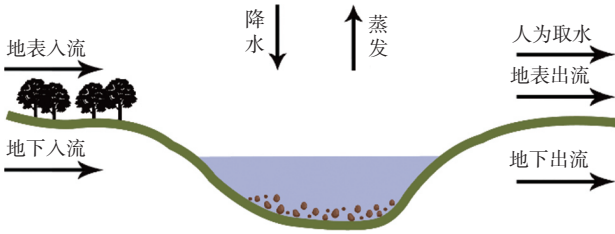


图1 小型分散湿地水量平衡示意图  
Fig.1 Water balance of a small, scattered wetland

入流  $G_{in}$ ; 水量损失包括地表出流  $S_{out}$ 、地下出流  $G_{out}$ 、蒸发  $E$ 、人为取用水  $V_u$ ; 上述物理量与湿地实时水量  $V$ 、生态水量  $V_e$ , 组成水量平衡方程见式(1)。其中, 人为取用水视为可利用的水资源量。

$$V_u = V + P + S_{in} + G_{in} - V_e - S_{out} - G_{out} - E \quad (1)$$

小型湿地占地面积小, 与周边人为取用水、水文气象的关联较强, 逐月的水位波动较为明显。因此, 本研究基于逐日水位监测, 计算逐月水资源可利用量。式(1)  $P$ 、 $E$  采用气象监测数据乘以水域面积获得;  $V$  通过实时水位结合下述三维场景计算;  $S_{in}$ 、 $G_{in}$ 、 $S_{out}$ 、 $G_{out}$  随一年内水文时期、降雨等级、季节等条件的变化而改变。对于周边土地利用变化较小的湿地来说, 历年同一时期的地表和地下出入流相对接近。因此, 上述物理量以其期望值  $E(x)$  代替, 转化为多元一次方程函数, 通过历史观测数据拟合求解<sup>[2]</sup>。最终, 应用式(1)的难点在于计算  $V_e$ 。

本研究采用高频水位的最大值作为小型分散湿地的生态水位<sup>[12-13]</sup>。以序列化的水位监测数据为输入<sup>[14-15]</sup>, 流程如下:

(1) 构建水位序列: 整理历史数据, 剔除非正常变化过程(如人工排水之后, 需恢复到稳定水位), 组成水位序列  $U$ 。

(2) 确定极值: 找出水位序列中, 逐月的最大值  $u_{max}$ 、最小值  $u_{min}$ 。

(3) 划分子区间: 为逐月的水位序列, 选择适当的  $a$ 、 $b$ 、 $\Delta u$  数值。 $a$  略小于这个月水位序列的  $u_{min}$ ,  $b$  略大于这个月水位序列的  $u_{max}$ , 由此将逐月的水位序列分成  $n$  个子区间, 每个区间的长度为  $\Delta u$ 。

(4) 统计频率: 将历年、逐月的水位序列分布至各子区间内, 统计历史水位在各子区间的出现频率。

(5) 绘制频率直方图: 以水位子区间、历史水位的出现频率为  $X$ 、 $Y$  轴, 绘制直方图, 获取逐月的高频率水位区间, 以该区间的最大值为当月生态水位, 高于该水位的水量为可利用水资源量。

基于湿地生态水位、下述三维场景, 计算生态水量(图2)。具体采用融合周边地形、水下地形的不规则三角网, 对投影至水位面、三棱柱体表达的离散水体进行体积求和。其中, 三维场景基于不规则三角网构建, 精度较高<sup>[16-17]</sup>。实时水位与湿地三维场景求交, 计算湿地的实时水域面积、水量。将湿地水位监测数据带入式(1), 结合降雨、蒸发观测、出入流拟合结果, 得到逐月的可利用水资源量(图3)。

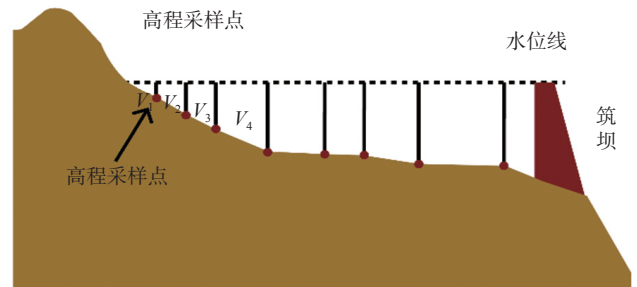


图2 基于不规则地形三角网的湿地水量计算示意图  
Fig.2 Wetland water quantity calculation based on TIN

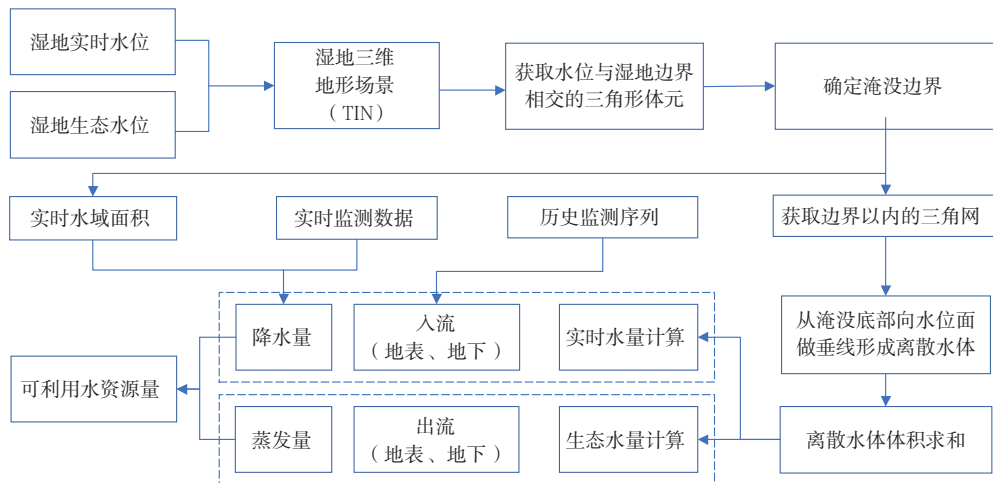


图3 湿地可利用水资源快速计算流程  
Fig.3 Rapid calculation of available wetland water resources

## 2 基于 WebGL 的水资源利用实况模拟

湿地水资源的取用是水量从多到少、水位下降的过程,可看作洪水淹没的逆过程。基于水位观测,小型湿地水域范围可看作给定水位的有源淹没<sup>[18]</sup>,即从已知水位面开始,标记所有低于水位面、存在连通的低洼地。WebGL技术能够进行淹没模拟的体元计算,动态渲染结果<sup>[19-20]</sup>,包括获取顶点坐标、图元装配和光栅化三个步骤。本研究地形不规则三角网可作为计算、渲染的基本图元,后续光栅化过程由片元着色器自动完成。因此,需要解决图元装配环节的下述两个关键内容:

(1)淹没点计算。被水位面淹没(也可以理解为切割)的地形三角形体元,按其顶点与水位面的相对位置可以分为5类(图4、表1)。其中,A类直接获取与水位等高的两个三角形顶点;D类获取最低的三角形顶点;根据等比定理计算B、C、E类水位线与三角形边的交点。最终,连接这些交点,形成一条或多条连续封闭的水位淹没线。

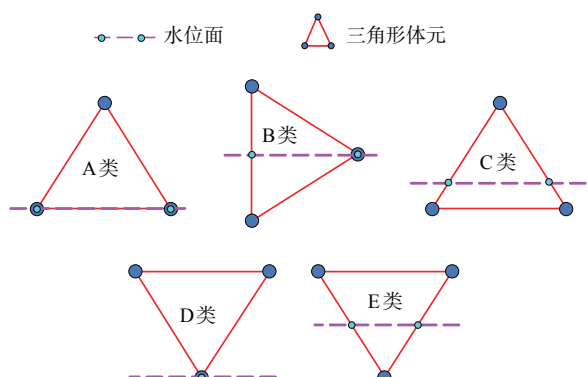


图4 三角形体元被水位面淹没示意图  
Fig.4 TIN element inundated by a given water level

表1 三角形网格被水位面淹没分类

Table1 Classification of TIN element inundated by a given water level

分类代码	水上顶点数	水面顶点数	水下顶点数	分类代码	水上顶点数	水面顶点数	水下顶点数
A	1	2	0	D	2	1	0
B	1	1	1	E	2	0	1
C	1	0	2				

设定三角形体元某条边AB的上下两端点分别为 $A(x_1, y_1, z_1)$ 与 $B(x_2, y_2, z_2)$ ,水位面高程为 $Z$ 。若 $Z$ 位于 $z_1, z_2$ 高程值之间,也就是 $(z_1 - Z) \times (Z - z_2) > 0$ ,则该边一定被水位面切割。按照等比定理,根据下式求得淹没点坐标 $(x, y, z)$ 。

$$\begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} \\ \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \end{cases} \quad (2)$$

(2)面元快速检索。设计顶点矩阵、边矩阵、三角形矩阵的数据结构,分别存储地形不规则三角网顶点、边、面(图5、表2),以此构建三维地形,辅助淹没点计算。其中,顶点矩阵中的顶点坐标来源于三维地形,也就是不规则三角网中存储的坐标信息(可采用ArcGIS提取);三角形矩阵包含邻接面元的标识信息,以实现有源淹没算法中的快速检索与范围蔓延。

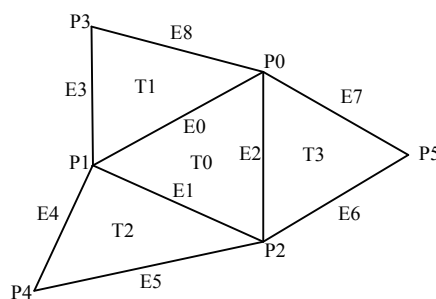


图5 地形三角网示意图  
Fig.5 TIN of pond topography

表2 地形三角网矩阵数据格式

Table2 Matrix data format for a TIN  
(a)顶点矩阵格式

名称	内容					
顶点序号	P0	P1	P2	P3	P4	P5
X坐标	456 405.58	456 379.16	456 416.49	456 368.27	456 364.69	456 430.60
Y坐标	569 46.53	56 929.13	56 909.13	56 964.08	56 885.45	56 933.91
Z坐标	27.79	27.64	26.29	30.56	26.99	26.71

注:单位为m。X、Y坐标采用公里网参考系。

(b)边矩阵格式

名称	内容								
边序号	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
顶点1序号	P0	P1	P0	P1	P1	P2	P2	P0	P0
顶点2序号	P1	P2	P2	P3	P4	P4	P5	P5	P3

(c)三角形矩阵格式

名称	内容				名称	内容			
三角形序号	T0	T1	T2	T3	边2序号	E1	E3	E4	E6
顶点1序号	P0	P0	P1	P0	边3序号	E2	E8	E5	E7
顶点2序号	P1	P1	P2	P2	邻接三角形1序号	T1	-1	T0	-1
顶点3序号	P2	P3	P4	P5	邻接三角形2序号	T2	-1	-1	T0
边1序号	E0	E0	E1	E2	邻接三角形3序号	T3	T0	-1	-1

注:-1表示不存在邻接三角形,即该三角形为地形边缘。



### 3 系统设计与实现

#### 3.1 系统需求与架构设计

湿地水资源管理中,用户向管理部门提交用水申请,获得用水批复,执行规范用水。管理人员掌握湿地基本概况、实时水资源量、生态水资源量、日常用水情况等;接到用水申请后,快速计算各湿地的可利用水量;根据用水需求、水源情况,合理分配取水水源,并以直观、便捷的方式监督。数据维护人员采集地形数据、接入监测数据、分析历史变化,为水资源管理决策提供技术支持。

因此,本系统将提供小型分散湿地相关数据的管理与更新,用水申请的提交与批复,用水方案的自动生成与派发,可利用水资源量快速计算,用水过程实时三维可视化、水位超限预警、空间分析等功能。系统服务对象为取水用户、水资源管理人员、数据维护人员。

小型分散湿地水资源管理系统采用B/S(Browser/Server,浏览器/服务器)架构,包括表现层、应用层、服务层、数据层、采集层(图6)。

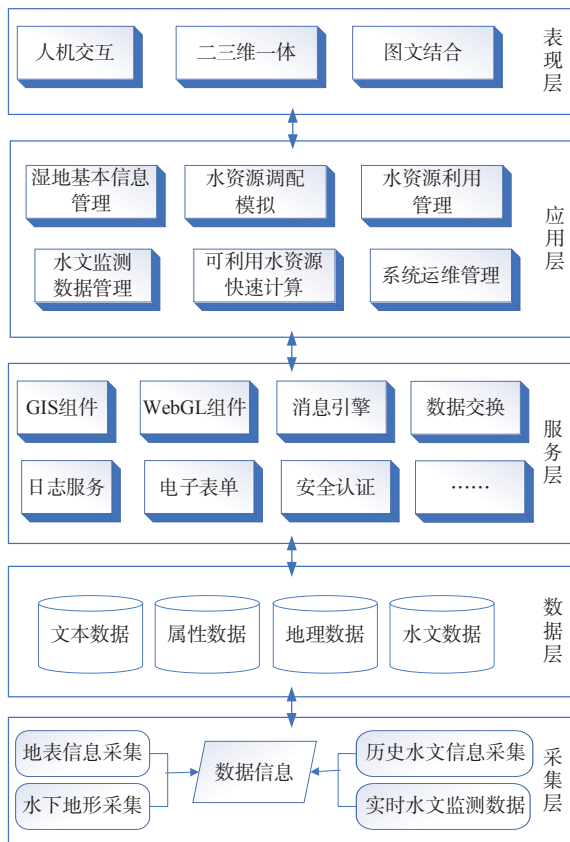


图6 系统架构  
Fig.6 System architecture

(1)表现层:由各类界面元素与交互组件构成。通过图文结合、二三维一体化的方式展示湿地水资源状况,接收用户业务请求,并传递给应用层。

(2)应用层:在服务层支持下,实现小型分散湿地水资源管理功能,包含湿地基本信息管理、水资源调配模拟、水资源取用管理、水文监测数据管理、可利用水资源快速计算、系统运维管理。

(3)服务层:由GIS与WebGL组件、消息引擎、数据交换服务、日志服务、电子表单、安全认证等构成。将系统资源整合,封装成服务,建立服务目录,方便服务消费者查找,并管控服务注册、发布、修改、调用的全生命周期。

(4)数据层:是系统底层的数据基础,负责监测数据、空间数据、属性数据的预处理、存取与管理,维护数据关系,并保障数据安全。

(5)采集层:包括地表信息采集、水下地形采集,以及水位、降雨、蒸发监测。地表、水下地形数据通过人工建模,发布数据服务;监测数据通过网络与数据层进行存取通讯。

#### 3.2 系统功能与数据组成

小型分散湿地水资源管理系统的功能包括:湿地基本信息管理、水资源调配模拟、水资源利用管理、水文监测数据管理、可利用水资源量快速计算。具体描述如下:

(1)湿地基本信息管理:结合影像地图,直观展示湿地空间分布与形态特征,实现二三维可视化、地图与图表联动,以及水文监测信息的浏览,湿地基本信息的增、删、改、查。

(2)水资源调配模拟:分析湿地水资源供、用、耗、排环节涉及到的要素及其作用方式,实现小型湿地的地形、水体等元素的三维动态模拟;使用WebGL无插件开发技术,实现对湿地水资源利用状况的可视化仿真。

(3)水资源利用量管理:实现水资源申请、审核,生成用水方案。用户提交用水申请,获得批复;管理人员快速生成用水方案;结合水文监测、三维模拟,监督取用水情况;水位接近生态水位时,触发告警。

(4)水文监测数据管理:管理小型分散湿地的实时和历史的水位、降雨、蒸发监测数据。实时接入或者以交换文件格式导入监测数据,支撑水资源快速计算和调配模拟。

(5)可利用水资源量快速计算:实现可利用水资

源量的快速计算模型,滚动计算各个湿地的生态水位。需要载入近期监测数据,结合三维地形快速计算可利用水资源量,并对结果符号化表达、图表输出。

由此,小型分散湿地水资源管理系统的数据库组成如图7所示,包括湿地基本信息、水文监测、用水管理、系统管理。

(1)湿地基本信息,包括编号、名称、位置、管理单位、生态水位、湿地三维场景等。其中,湿地深度、容积、面积等参数在三维场景中同步保存。

(2)水文监测,包括降水、蒸发、湿地水位监测。按固定时间间隔记录,形成水文监测序列,用于计算生态水位、可利用水资源量。

(3)用水管理,包括特定取水用户的用水申请、用水方案、用水审批。该项业务信息用于规范取用水流程、科学调配。

(4)系统管理,包括用户、角色、权限等,用于管理各类用户。通过维护用户档案,支持其他场景构建、分析。



图7 系统数据组成  
Fig.7 Data composition

### 3.3 系统实现与验证

以句容茅山地区水塘水资源管理为例,采用Java语言、ArcGIS 10.5二次开发包、Three.js 三维引擎开发本系统(图8)。试点区共有254个水塘,水域总面积约1.6 km<sup>2</sup>,是长江下游小型分散湿地密集分布的典型区域。周边地形数据以机载Lidar拍摄获得,空间分辨率2 m;水下地形以无人船载单波束测深仪观测,空间分辨率设为0.5 m;融合水面上下地形采样点,构建不规则三角网。降雨、蒸发数据由试点区中部的微型气象站获取,数据精度0.2、0.1 mm。水塘水位由安装在底部的HOBO压力式水位计连续监测,精度0.01 m。

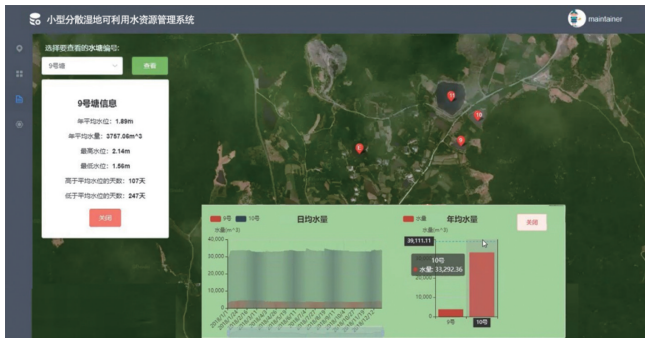


图8 系统界面  
Fig.8 Software interface

以2018年6月至2020年5月为实验期,选取上中下游三个典型水塘,测算可利用水资源量(图9)。由于水塘水位变幅较小,根据前人建议<sup>[14]</sup>,逐月的水位序列分为8个子区间。各个水塘可利用水资源量呈现出与水位变化近似的趋势。由于入流和形态差异,上游蓄水山塘的可利用水量随季节的变幅最大;在水稻种植期的部分时段(如5月返青期、10月抽穗期与灌浆期),中游灌溉水塘的水量存在明显下降;下游村边水塘的水量、变幅均最小。由于小型分散湿地生态水位、可利用水资源量暂未纳入政府管理,本研究通过村委会、周边农户的调研访谈,从水量的数量级、变化

趋势上定性验证了结果的合理性,以此展示系统的计算与分析能力。

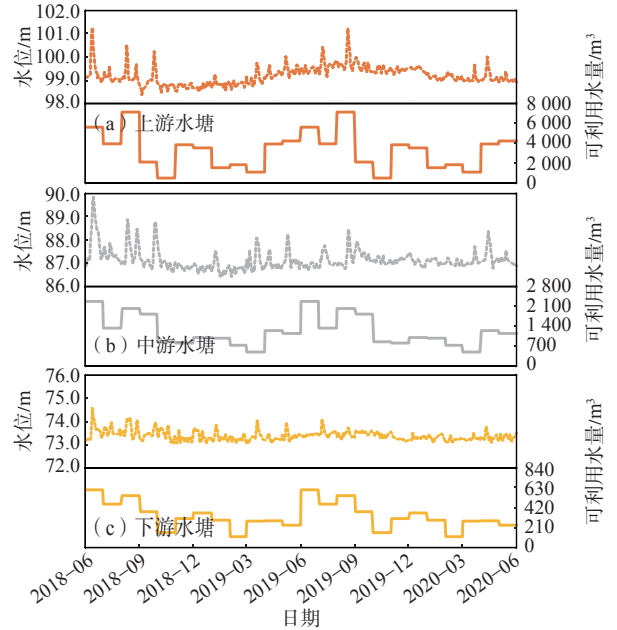


图9 小型分散湿地可利用水资源量  
Fig.9 Available water resources of typical small scattered wetlands

### 4 结语

本研究面向广泛分布的小型分散湿地,探讨其可利用水资源量的计算方法。通过确定生态水位、构建湿地三维地形、计算定水位-水量关系三个主要步骤,快速获得小型分散湿地的可利用水资源量;借助三维可视化与系统设计开发,直观展示小型分散湿地的水资源动态,满足湿地科学管理、可持续利用的社会需求。以句容茅山地区为试点,验证方法的可行性,为我国南方小型分散湿地密集区域的水资源利用提供参考。

本研究基础数据种类较少,易于获得,但水文数据需要长期积累。在提出的系统架构下,湿地生态水位、可利用水资源计算可进一步纳入多种方法,交叉验证。随着河长制、湖长制等水资源管理措施的落实,以及物联网设备成本的降低,我国将更加重视小型分散湿地水文监测及其规范化。此外,遥感手段具有范围覆盖广、时间序列长、环境影响低的优势,研究基于多时序遥感影像的水资源监测体系、估算方法,也是未来的发展方向。

#### 参考文献:

[1] CHENG F Y, VAN METER K J, BYRNES D K, et al. Maximizing US nitrate removal through wetland protection and restoration[J]. Nature,

- 2020, 588: 625–630.
- [2] CHEN W, HE B, NOVER D, et al. Farm ponds in southern China: Challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1322–1334.
- [3] CHEN W, NOVER D, YEN H, et al. Exploring the multiscale hydrologic regulation of multipond systems in a humid agricultural catchment [J]. *Water Research*, 2020, 184: 115987.
- [4] TIMOTHY S, MILLER J. The American Pond Belt: An untold story of conservation challenges and opportunities [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19: 501–509.
- [5] 皋鹏飞, 李玉凤, 刘红玉, 等. 水塘系统的水源涵养贡献力评估: 以风岭流域为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, (6): 94–100.
- [6] 聂小飞, 李恒鹏, 李新艳. 巢湖典型子流域上下游水塘对暴雨径流氮磷去除效率比较[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(1): 89–95.
- [7] 农村小水利“欠账”急需补[EB/OL]. <https://news.sina.com.cn/c/2013-09-11/082028186784.shtml>
- [8] 李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展[J]. *生态学报*, 2016(9): 2482–2489.
- [9] 俞孔坚, 姜芊孜, 王志芳, 等. 陂塘景观研究进展与评述[J]. *地域研究与开发*, 2015, 34(3): 130–136.
- [10] 贾绍凤, 周长青, 燕华云, 等. 西北地区水资源可利用量与承载能力估算[J]. *水科学进展*, 2004, 15(6): 801–807.
- [11] 王建生, 钟华平, 耿雷华, 等. 水资源可利用量计算[J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 549–553.
- [12] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1033–1040.
- [13] 梁婕, 彭也茹, 郭生练, 等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(3): 330–334.
- [14] 袁平, 杨志峰, 崔保山, 等. 白洋淀湿地生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(8): 1119–1126.
- [15] 陈玉敏, 吴钱娇, 巴倩倩, 等. 多尺度地表水动态模拟及应用[J]. *测绘学报*, 2015(S1): 36–41.
- [16] 周买春, 黎子浩, JAYAWARDENA A W. 数值地形图的生成及其水文地貌特征评价[J]. *水利学报*, 2002(2): 71–74.
- [17] 陈文君. 中小型水库雨洪高水位预报及三维GIS模拟[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2019.
- [18] 朱军, 尹灵芝, 曹振宇, 等. 时空过程网络可视化模拟与分析服务—以溃坝洪水为例[J]. *地球信息科学学报*, 2015(2): 215–221.
- [19] 王星捷, 卫守林. WebGL技术的三维WebGIS平台研究与应用[J]. *遥感信息*, 2019, 34(3): 134–138.
- [20] 袁武彬, 廖明伟, 廖明, 等. 鄱阳湖区域风场矢量的Web三维动态可视化[J]. *地理与地理信息科学*, 2020(1): 22–26.

## Research on Calculation Method of Available Water Resources in Small Scattered Wetlands

CHEN Wenjun<sup>1,2</sup>, SHEN Shujuan<sup>3</sup>, SU Hui<sup>1</sup>, Tom LOTZ<sup>1,2</sup>, HUANG Xuan<sup>4</sup>, XU Wenxiang<sup>5</sup>

(1. *Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;* 2. *Key Laboratory of Watershed Geographic Science,*

*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

3. *Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou 311000, China;*

4. *College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;*

5. *Nanjing Meta-Space-Time Information Technology Corporation, Nanjing 210046, China)*

**Abstract:** Small scattered wetlands are numerous, widely distributed, and frequently used. They provide many ecosystem services and are essential to the sustainable development of resources and environment. In view of the requirements of water resources management, we proposed a fast calculation method of available water resources in small scattered wetlands. The method was based on the maximum value of high-frequency water levels in statistical intervals. We designed and implemented the method in a WebGL-based simulation and management system of water resource utilization for small scattered wetlands. The application of the system includes three main steps: (1) determination of ecological water level, (2) construction of a 3D wetland model, and (3) calculation of water quantity at fixed water levels. Taking the Maoshan region, Jurong City, as a case study, the proposed method can meet the requirements of scientific management and sustainable utilization of small scattered wetlands. It can also promote the systematization and standardization of wetland water resource management in China.

**Keywords:** small scattered wetlands; water resources; water availability; ecological water level; information system