

基于遥感与GIS技术的流域水资源时空分布特征及演变规律

贺俊伟

(青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810000)

摘要 为揭示流域水资源时空演化规律, 以某流域为研究对象, 基于1980-2020年长时间序列遥感数据、气象水文实测数据和基础地理数据, 采用遥感反演模型和GIS空间分析等方法, 对流域核心水资源要素空间分异特征和时空演化规律进行系统研究, 旨在为流域水资源的合理开发、优化配置和可持续管理提供参考。研究结果表明: 流域水资源在空间上由西向东逐渐增大, 平原区水资源密度比山地和丘陵区都大, 与地理因子如海拔、植被盖度等相关; 水资源总量在时间上呈现出明显的波动下降趋势, 年均下降 $0.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1998年出现了一个突变点, 在此之后, 下降速度进一步加快。

关键词 水资源; 时空分布; 遥感; GIS技术

中图分类号: TP7; X87

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.041

0 引言

水资源是生态系统稳定和区域发展的核心要素, 时空分布特征和演化规律直接关系到水资源的供需平衡和可持续利用。受气候变化和人类活动的共同影响, 流域水资源演变过程变得更加复杂, 供需矛盾更加突出。遥感和GIS技术以其高效率、宏观性和动态性等优点, 成为研究水资源时空分布规律的核心技术手段。本文以某流域为研究载体, 构建多源数据体系, 采用遥感反演和空间分析相结合的方法, 对流域水资源的时空分异规律和时空演化特征进行分析, 为流域水资源的精细化调控和科学管理提供理论依据。

1 案例流域背景与数据准备

某流域面积为 $8\ 260 \text{ km}^2$, 地形为西北高东南低, 呈阶梯状分布, 地形类型包括山地、丘陵和平原等多种类型, 其土地利用类型主要为耕地、林地、草地和建设用, 在空间分布上表现为山地林地密集, 平原耕地和建设用地密集。该流域为温带大陆性季风气候区, 年降水量 586 mm , 降水多在6-9月, 汛期降水量超过72%, 枯水期水资源补给不足, 区域水资源供需矛盾突出。该流域水系发育良好, 干流及支流贯穿上下游, 形成枝状水系网络, 为区域工农业生产和生产生活提供重要水源。利用1980-2020年多源遥感数据(Landsat 5/7/8/9)和MODIS等多源遥感数据, 用于反演降水、蒸发、土壤含水量等核心水资源要素; 同时采集12个

气象站点的气温和降水数据、1:10万土地利用图、1:25万水系图、行政区划图等基础地理数据。对所采集的数据进行格式转换、离群剔除、投影归一化和时空尺度匹配, 以保证数据的完整性、一致性和准确性, 为后续的遥感反演、GIS技术的空间分析和演化规律研究打下坚实的基础。

2 案例流域水资源遥感反演与GIS数据构建

2.1 核心水资源要素遥感反演模型

以降水、蒸发和土壤含水量这三个核心水资源要素为研究对象, 构建适用于流域下垫面特性的遥感反演模型。降水反演采用改进型增强植被指数-降水模型, 表达式为 $P=a \times EVI^2+b \times EVI+c \times LST+d$, 其中 P 为降水量, EVI 为增强植被指数, LST 为地表温度, a 、 b 、 c 、 d 为经实测数据校准的模型参数, 分别取值-0.82、3.65、-0.04、28.31^[1]。以SEBS模型为基础, 利用遥感数据提取地表反照率、植被覆盖度等参数, 与气象数据相结合, 反演实际蒸散发。本文拟以微波植被光学厚度模型为基础, 采用MODIS微波数据和光学数据联合反演土壤含水量, 引入地表粗糙度校正系数, 提高反演精度。

2.2 遥感反演结果验证与精度评估

利用该流域12个气象站点及8个水文观测站点的实测数据, 对遥感反演结果平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)进行定量检验。结

作者简介: 贺俊伟(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水文与水资源工程。

果表明,各核心要素反演结果与实测数据吻合较好,可满足后续研究对数据精度的需求。表 1 显示了具体的验证结果。

表 1 具体验证结果

水资源要素	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)	决定系数 (R^2)
降水	18.6 mm	25.3 mm	0.89
蒸发	12.4 mm	16.7 mm	0.85
土壤含水量	3.2%	4.5%	0.83

在反演过程中发现,地形复杂地区的降水反演精度略高于平原地区,主要原因是地形遮挡对遥感数据灵敏度的影响。

2.3 基于 GIS 的流域水资源空间数据库构建

以 ArcGIS 为技术平台,建立基于 GIS 的流域水资源空间数据库。基础地理数据层由 DEM、土地利用、水系分布、行政区划等矢量及栅格数据组成,统一采用阿尔伯斯投影系统^[2]。遥感反演数据层分别存储了 1980-2020 年不同季节的降水、蒸散发和土壤含水量的栅格数据,空间分辨率达到 30 m。实测数据层将气象站点、水文观测站点的长时序实测数据进行融合,构建属性与空间位置相关的矢量数据集。以地理信息数据库为基础,构建数据索引与关联规则,实现不同类型数据的高效查询、叠加分析及时空可视化,为水资源空间分布特征分析提供数据支撑。

2.4 数据标准化与时空尺度统一处理

针对多源异构数据在时间与空间上的差异,开展标准化与尺度统一处理。在时间尺度上,将遥感数据与气象实测数据进行统一插值,利用线性插值方法对部分缺失数据进行补充,利用滑动平均方法对数据中的噪声进行平滑处理,保证时间序列的连续性与一致性^[3]。在空间尺度上,将多源遥感数据整合到 30 m 空间尺度上,利用最近邻法进行再采样,利用双线性内插的方法提高空间细节。在数据标准化方面,对降水、蒸发等要素进行极值归一化处理,消除量纲差异带来的影响;同时,利用投影变换,实现全部空间数据的坐标系统一,保证空间分析精度。

3 案例流域水资源空间分布特征分析

3.1 核心水资源要素空间分异规律

流域核心水资源要素在空间分布上表现出明显的梯度分异。降水的空间分布从西北到东南逐渐增大,高值区集中在平原—丘陵过渡带,年均降雨量 650 ~ 700 mm;低值区位于西北山区,年平均降雨量 420 ~ 480 mm,区域差异可达 280 mm。西北地区由于海拔高、风速大,

蒸发量 850 ~ 920 mm,而东南部平原区由于植被覆盖率高和湿度大,蒸发量在 680 ~ 750 mm 之间。土壤含水量的空间分异受到地形、植被等因素的影响,在平原和河谷地区,土壤含水量含量高(18% ~ 25%),而山地林地和丘陵坡地土壤含水量含量低(10% ~ 16%),空间分异系数为 0.32。

3.2 不同地貌单元水资源分布差异

各地貌单元水资源分布存在显著差异,表现为平原)丘陵)山区的梯度分布。平原地形单元具有平坦的地形,具有较强的降雨入渗能力和较好的集流条件,年平均水资源总量为 $42.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源密度为 $51.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$;同时,耕地与建设用地是植被覆盖的主要类型,蒸发损失小,水资源供需状况良好。由于地形的影响,降水时空分布不均匀,局部地区存在季节性缺水现象。山地地形单元具有高海拔、高坡度等特点,降雨以径流的形式流失,多年平均水资源总量只有 $19.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

3.3 不同土地利用类型下水资源空间匹配特征

不同土地利用类型和水资源在空间上的匹配性差异较大。林地多分布于山区,虽然总降水量少,但是植被涵养水源的能力很强,土壤含水量和植被的需水匹配系数达到 0.78,水资源利用率高。耕地集中于平原丘陵地区,雨量充沛,水资源丰富,但是农业用水量大,灌溉方式粗放,供需匹配系数仅为 0.65,在一定程度上造成了水资源浪费。草地分布于丘陵坡地,降雨条件中等,植被需水量小,水资源匹配系数 0.72,总体供需平衡;建设用地多分布于平原河谷地区,水资源丰富,但人口密度高,产业密集,用水量大,污水排放影响水质,水资源质和量的综合匹配系数只有 0.58,是水资源供需矛盾最为突出的土地利用类型^[4]。

3.4 水资源空间分布与地理环境因子关联性分析

水资源空间分布与地理环境因子有较强的相关关系,经 Pearson 相关分析发现,海拔、坡度、植被盖度和土壤类型是影响水资源空间分布的主要因素。海拔与降水量之间存在着显著的负相关关系,相关系数为 -0.81;在高海拔地区,强辐射和强大风条件下,水分蒸发增强,相关系数达 0.76。随着坡度的增大,降雨入渗减少,地表产流速率加快,土壤含水率降低。研究表明,植被覆盖率和水资源储量之间存在着显著的正相关关系,相关系数达 0.68,表明植被覆盖率较高的地区可以通过截雨和缓流来提高土壤的蓄水能力。壤土区域水资源储量最高,砂壤土次之,砂土最低,不同类型土壤持水能力的差异对水资源的空间分布有直接影响。

4 案例流域水资源时间演变规律分析

4.1 水资源时间序列变化特征

1980-2020年流域水资源总量呈现波动下降趋势, 年际变化幅度较大, 变异系数为0.23。不同年代水资源总量变化特征存在差异, 具体变化情况如表2所示。

从季节尺度来看, 水资源总量呈现夏季(秋季)春季)冬季的分布特征, 夏季为45.2%, 冬季为8.3%;

表2 1980-2020年流域水资源总量变化情况

时段	多年平均水资源总量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	最大值 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	最小值 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	极差 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)
1980-1989年	89.6	108.3	72.5	35.8
1990-1999年	82.4	97.6	68.9	28.7
2000-2009年	76.8	92.4	63.2	29.2
2010-2020年	71.5	85.7	58.6	27.1

小于显著性水平0.01对应的临界值-2.58, 显示出流域水资源总量在不断减少。Sen's斜率估计值为 $-0.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$, 即每年水资源总量减少 $0.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。采用滑动t检验方法对突变点进行分析, 1998年是总水资源变化的突变年, 1998年后下降速率增至 $-0.53 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$, 突变后下降趋势更为显著, 与区域气候变化和人类活动强度增加密切相关^[5]。

4.3 不同时段水资源演变差异

不同时间尺度的水资源演变, 变化速度、波动特征及空间格局均存在显著差异。在1980-1998年间, 该地区的水资源总量由 $92.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 $80.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 累计下降 $11.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 下降速度较慢, 在空间上表现出全域均衡下降的特点, 各地区的降幅相差不大, 最大差值不超过10%。1999-2020年是流域水资源急剧下降时期, 流域水资源总量由 $79.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 降至 $71.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 累计下降了 $8.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 下降速度比上一时期高70.9%, 空间上呈现差异化下降特征, 平原建设用地集中区域下降幅度最大, 达15.2%, 山地林地面积下降幅度最小, 仅6.8%。另外, 在前一段时间内, 水资源的年变异系数为0.27, 而后一段时间的变异系数为0.18, 显示出水资源系统的稳定性处于逐渐变化的状态。

4.4 时间演变与气候因子响应关系

流域水资源时空演化与气象要素之间存在着明显的响应关系, 利用灰色关联度分析方法, 得出降水、温度和相对湿度是影响流域水资源演化的主导因子, 相关系数分别为0.87, 0.72, 0.68。流域降水量与总水资源之间存在着显著的正相关关系, 相关系数为0.883, 1980-2020年, 流域年均降水量以年均 $-1.2 \text{ mm}/\text{年}$ 的速度递减, 这直接导致了地表径流及地下水补给的减少, 是流域水资源减少的主要气候驱动因素。气温升高使蒸

在年变化方面, 1980-1995年水资源总量有较大的波动, 1996年以后有所下降, 但下降幅度较大, 2010年以后下降速率趋缓。

4.2 水资源演变趋势检验

采用Mann-Kendall非参数检验法和Sen's斜率估计法, 对1980-2020年流域水资源总量时间序列进行趋势检验。研究结果表明, Mann-Kendall统计量 $Z=-3.86$,

发量每年增加0.8 mm, 水资源损失加剧。相对湿度与总水资源之间存在着显著的正相关关系, 相关系数达0.65。极端气候事件频发, 干旱年份增加, 暴雨强度增加, 对水资源时空演化有重要影响, 加剧了水资源供需矛盾。

5 结束语

本文以遥感和GIS技术为主要技术手段, 对流域水资源时空分布特征和演化规律进行研究。从空间上看, 水资源具有明显的地域分异, 受地形地貌和植被覆盖等地理环境因素的综合作用; 不同土地利用类型和水资源在空间上的匹配性存在显著差异, 其中建设用地供需矛盾最为突出。从时间上看, 1980-2020年, 流域水资源总量呈现明显的下降趋势, 且存在1998年的突变点, 其主要驱动因子为降水减少和气温上升。本文所构建的技术方法和数据体系, 对类似流域的水资源优化配置和可持续管理具有积极的意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 尚雨. 基于多源遥感数据的渭河流域水资源模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [2] 钟绍卓. 洱海流域水资源价值核算和生态补偿机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [3] 陈伊娜. 流域水资源横向生态补偿方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [4] 聂兵兵. 安宁河流域水资源脆弱性评价研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
- [5] 王月健. 干旱区湖泊流域水资源变化及其对生态安全的影响研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2018.