叶志豪,黄龙浩,周 欣,等.依赖地下水生态系统判定方法与识别评价研究进展 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4491-4500.
Ye Z H, Huang L H, Zhou X, et al. Research progress on determination methods and identification evaluation of groundwater ecosystems [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4491-4500.

依赖地下水生态系统判定方法与识别评价研究进展

叶志豪[1,2],黄龙浩[1,2],周 欣[1*],郑明霞[1],何连生[1**],孟 睿[1],张晓宇[1],周 强[1] (1.中国环境科学研究院,北京 100012；2.重庆交通大学河海学院,重庆 400000)

摘要：依赖地下水生态系统(GDEs)在维持生态平衡与提供生态服务方面发挥着重要作用,但在环境变化下 GDEs 正面临日益严重的威胁.GDEs 的识别评价是对其进行监测、管理和保护的基础.综述了 GDEs 的发展历程、分类划定和识别评价的研究方法,总结了 GDEs 识别评价模型框架,探讨了以 GIS 为典型工具的地理空间技术与 Landsat、Sentinel、MODIS 等提供的遥感数据在 GDEs 识别中的应用,提出了目前研究的局限性与未来发展方向.当前,GDEs 的识别评价研究从使用水位监测、同位素解析等单一判定方法发展到水文地质数据、生态指标、气象数据等多源数据整合的综合性方法,结果表征也由传统分类算法转变为运用耦合机器学习、随机森林模型等.然而,如何准确识别 GDEs 空间分布、高精度监测其动态变化及完善适应性管理策略仍是亟待解决的问题.未来应推动 GDEs 识别评价方法体系的理论创新,在整合多源数据上实现方法创新,在探究深度学习算法的运用和人工智能融合上实现技术创新,以期提高 GDEs 的管理水平和保护修复效率.

关键词：地下水依赖生态系统(GDEs)；地理空间技术(GIS)；识别制图；环境管理；跨学科研究
中图分类号：X87 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4491-10

Research progress on determination methods and identification evaluation of groundwater ecosystems. YE Zhi-hao[1,2], HUANG Long-hao[1,2], ZHOU Xin[1*], ZHENG Ming-xia[1], HE Lian-sheng[1**], MENG Rui[1], ZHANG Xiao-yu[1], ZHOU Qiang[1] (1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；2.The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4491~4500

Abstract：Groundwater Dependent Ecosystems (GDEs) have played a vital role in maintaining ecological balance and providing ecological services, but they are facing increasingly severe threats under environmental changes. The identification and assessment of GDEs have been the basis for their monitoring, management, and protection. In this paper, the development, classification, delineation, and research methods for the identification and assessment of GDEs were reviewed. The framework of GDE identification and assessment models was summarized. The application of geospatial technologies, with GIS as a typical tool, and remote-sensing data provided by Landsat, Sentinel, MODIS, etc., in the identification of GDEs was explored. The current research limitations and future directions were put forward. The research on the identification and assessment of GDEs has evolved from using single determination methods, such as water level monitoring and isotopic analysis, to a comprehensive approach that integrates multiple data sources, including hydrogeological data, ecological indicators, and meteorological data. The representation of results has also shifted from traditional classification algorithms to the use of machine-learning-coupled algorithms, such as random forest models. However, how to accurately identify the spatial distribution of GDEs, precisely monitor their dynamic changes, and improve adaptive management strategies remain urgent issues to be resolved. In the future, theoretical innovation in the methodological system for GDE identification and assessment should be promoted. Innovation in methods should be achieved by integrating multi-source data, and technological innovation should be realized by exploring the application of deep-learning algorithms and the integration of artificial intelligence, so as to enhance the management level and efficiency of protection and restoration of GDEs.

Key words：groundwater-dependent ecosystems (GDEs)；geospatial technologies (GIS)；identification and mapping；environmental management；Interdisciplinary research

部分或全部用水需求依赖地下水的生态系统统称为依赖地下水生态系统(GDEs)[1].作为干旱区生态系统的核心组分,GDEs 展现出不可替代的独特性:其通过连接地下水和陆地生态系统,不仅具有高物

收稿日期：2025-01-13
基金项目：科技部国家重点研发计划(2022YFC3703104)
* 责任作者，工程师，zhouxin_1991@126.com; ** 正高级工程师，heliansheng08@126.com

种丰富度和固碳能力,还通过稳定地下水−植被互馈机制保障生物群落多样性[2];同时,GDEs 特有的水文调节能力可有效缓解极端水文事件(如骤发洪水)的冲击,并在盐碱化、污染物滞留等典型干旱区环境问题中发挥显著消减作用[3].

研究者对 GDEs 的认识经历了多个阶段,从研究地下水与植被、土壤、地表水等要素的相互作用[4-7],到探讨气候变化与人类活动对其影响[8-10],再到监测其动态变化进行精细化调控[11-14].而识别 GDEs 为研究的首要问题,也经历了定性表征到定量分析多个阶段,最初主要集中在描述 GDEs 的基本特征从而提出推论[15-16],进而到实地观测开展应用[17-19].随着遥感和 GIS 技术的发展,研究者逐渐能够对 GDEs 进行更为精确的识别[20-24],这一技术转变在很大程度上推动了 GDEs 研究的深入.当前 GDEs 识别评价研究的主要趋势包括对遥感技术的深化[25-27]、多源数据集成[28-30]、人工智能[1,31-32]等新技术的运用和跨学科研究的兴起.

近年来,在全球气候变化和人为活动的双重影响下,GDEs 正面临一系列危机,如地下水过度开采导致水资源短缺,荒漠化、盐碱化和湿地萎缩等生态问题导致其脆弱性加剧[33],从而影响区域生态安全与资源可持续利用目前,对 GDEs 的识别评价研究主要集中在澳大利亚[12-13,23,34-36]、南非[37-38]、美国[30,39-41]等国家.全球干旱区 GDEs 面积约为 176 万 km^2,但其中 79%的 GDEs 处于完全无保护措施的状态[1].我国由于对 GDEs 的研究起步较晚且受数据量的限制,识别评价研究相对较少,GDEs 在中国的分布和规模尚未明晰,仅在渭河[42]、浪溪河[25]、海流兔河[27]与开孔河[14]等流域对 GDEs 识别进行了探索.

当前,关于 GDEs 的判定和评价方法尚不完善,导致对其生态功能、分布与变化的认知存在空白,这不仅阻碍了理论研究的深入,也为现实中资源管理和生态保护带来了困难.如果缺乏准确的识别评价,决策者将难以有效评估 GDEs 的生态价值和环境风险,从而影响生态保护措施的科学性和针对性,可能导致地下水资源过度开采和生态系统退化的加剧.鉴于此,本文从 GDEs 的分类、判定方法、识别评价等方面展开评述,以实现准确识别 GDEs 的空间分布,评估其地下水依赖程度,并对未来开展 GDEs 的识别评价技术方法进行展望,为合理制定保护修复措施提供科学依据.

1 依赖地下水生态系统分类

GDEs 主要有 2 种分类体系.五级分类系统主要根据生态系统对地下水的依赖程度进行划分[43],其依赖程度的梯度特征要求建立包含地下水埋深、植被水分利用率、生态响应滞后周期等的识别评价体系.为区分对地下水的依赖方式,Eamus 等[44]提出基于不同生态系统类型的分类框架,该分类系统在近年来有关 GDEs 研究中较为常用.这类框架需要根据三类不同生态系统的的结构特征,分别构建基于水文连通性、地表水−地下水相互关系以及根系吸水层位等的评价体系.需要说明的是,不同分类系统对应的生态水文特征和其驱动机制存在显著差异,这也决定了在判定和识别评价方法体系中的指标选择必须建立分类响应机制.

表 1 依赖地下水生态系统的分类

Table 1 Classification of groundwater-dependent ecosystems

分类标准	分类名称	具体描述
生态系统对地下水的依赖程度	完全依赖地下水的生态系统	生态系统对地下水的依赖性极强,微小变化会导致结构和功能完全丧失
	高度依赖地下水的生态系统	生态系统对地下水的依赖性较强,中等变化会导致结构和功能显著变化
	部分依赖地下水的生态系统	生态系统在地下水变化时,结构和功能会发生相应的变化,但不具阈值型响应
	限制性依赖地下水生态系统	生态系统对地下水的依赖较弱,地下水的作用重要但非强制性
	看似依赖地下水的生态系统	实际上完全依赖雨水和地表水流动,不依赖地下水
生态系统对地下水的依赖方式	地下水生物所在的含水层和洞穴生态系统	包括地下水生态系统和洞穴生态系统,也包括低流区的河流和洪泛区
	依赖地下水溢出流存在的生态系统	如泉水、湿地、河流基流、依赖地下水排放的河口和近岸海洋生态系统等
	利用浅层地下水的陆地植被生态系统	植物通过延伸根系至地下水位或其毛细边缘获取地下水,维持陆地生态系统

2 依赖地下水生态系统的判定

GDEs 的判定也经历了从早期基于推论的方法发展到具体实地调查的阶段.最初是通过一系列问题推测 GDEs 的存在,但这些方法未能详细描述地下水系统特征.随后,实地调查技术如地下水埋深与植物根系层深度调查、地下水位昼夜波动分析等直

接判定方法,以及动物群取样、叶面积指数法等间接判定方法被开发出来,为 GDEs 的识别提供了更精确的科学依据.

2.1　GDEs 的早期推论

早期 GDEs 的判定通常依赖于一系列推论[12-13,23,34-36],若符合一项或多项推论,则可以推测生态系统中至少部分物种可能依赖地下水.基于流域水均衡结果的推论包括:水资源的使用、损失、排水总和是否显著大于降水与汇水量;河流是否能在缺水条件下全年流动;地表水不汇入时河流下游水量是否增加;地下水是否能稳定排放到地表.基于植被的时空差异的推论包括:在相同气候条件下且无地表水源时,叶面积指数是否表现出独特的季节性变化;干旱季节植被是否保持生长良好;与地下水相关的植被特征是否与未接触地下水的植被存在差异.基于植被用水特征的推论包括:非径流汇水区植物的年蒸腾量是否显著大于年降水量;非雨季植被水分压是否较小;植被是否为地下水的重要排放路径[45];地下水水位或毛细水是否位于植物生根深度范围.基于特定生态统区域的判定推论包括:无淡水输入的河口生态系统中地下水盐度是否低于海水盐度;湿地生态系统的地下水水位抗旱水位维持能力.

尽管这些推理方法提供了初步识别 GDEs 的依据,但它们不足以明确揭示依赖性生态系统的具体性质.例如,生态系统是强制性依赖地下水还是兼性依赖地下水.此外,也未能详细描述地下水系统的特征,如地下水可用性的时间模式、植物对地下水的实际利用量、地表水的分布情况,以及地下水排放所需的地下水位压力等因素.

2.2　GDEs 的判定方法

基于以上推理,发展出一系列方法用于判定生态系统是否属于 GDEs.这些判定方法主要分为直接判定方法和间接判定方法两类(表 2).两类方法主要在原理和适用场景存在差异,需根据研究目标和环境条件合理选择.直接判定方法是指通过观测和测量地下水对生态系统的直接影响来识别依赖地下水的生态系统,其目的是直接获取地下水对生态系统作用的证据,以更准确地评估生态系统的依赖程度.这些方法优势在于直接揭示地下水供给机制,但普遍面临数据获取成本高、环境干扰敏感或普适性不足等挑战.间接判定方法通常不直接测量地下水对生态系统的影响,而是通过其他相关指标和间接证据来推测地下水的作用,其目的是通过生态系统中其他可观察的特征来间接推断地下水的影响,从而为评估提供更广泛的视角.此类方法操作灵活、成本可控,但推断结果易受多因素干扰,且需结合其他证据增强可靠性.

表 2　GDEs 直接/间接判定方法优缺点分析

Table 2　Advantages and disadvantages of direct/indirect GDEs determination methods were analyzed

判定类型	方法	优点	缺点	应用地区
直接判定	调查地下水埋深与植物根系层深度	①可清晰反映地下水依赖程度. ②方法直观,易于理解.	①缺乏实地验证,可能不准确. ②可能高估地下水依赖程度.	澳大利亚的墨累-达令盆地[46]
	地下水位昼夜波动特征	①直观反映地下水与植物关系. ②能有效评估地下水供水作用.	①受降水、气候等多因素干扰. ②仅凭波动判断存在不确定性.	印度恒河流域[47]
	基于水平衡的方法	①可评估水分动态,适用广泛. ②遥感技术可覆盖大范围区域.	①需大量数据,成本高. ②外推困难,精度难平衡.	南非半干旱地区[48]、中国的华北平原[49]
	同位素方法	①能精确识别水源. ②可适用特定地区和植被.	①采样量大,成本高. ②结果缺乏普适性.	美国亚利桑那州大峡谷国家公园[50]
间接判定	动物群取样	①生态证据直观. ②成本低,操作简便.	①受环境因素制约. ②空间范围有限.	坦桑尼亚马拉区[51]
	叶面积指数法(LAI)	①可间接评估水资源可用性. ②适用于陆地生态系统.	①受季节、年际影响. ②湿地等生态系统适用性差.	中国内蒙古浑善达克沙地[52]
	黎明前叶片水势测量	①简单且经济. ②有效评估植物对地下水的依赖.	①无法直接量化地下水使用量. ②大规模应用时需要频繁测量.	意大利托斯卡纳[52]、希腊克里特岛[54]
	地下水数值模拟	①可预测地下水资源可用性. ②可分析气候与土地利用的影响.	①准确性依赖数据质量和模型假设. ②数据不足时结果不确定.	英国伦敦泰晤士河流域[55]
	地下水与地表水的相互作用分析	①评估地下水对地表水的影响. ②揭示地下水补给的关键作用.	①需要长期监测数据. ②监测设备复杂且成本高.	法国南部冲积平原[56]、希腊皮尼奥斯河三角洲[57]

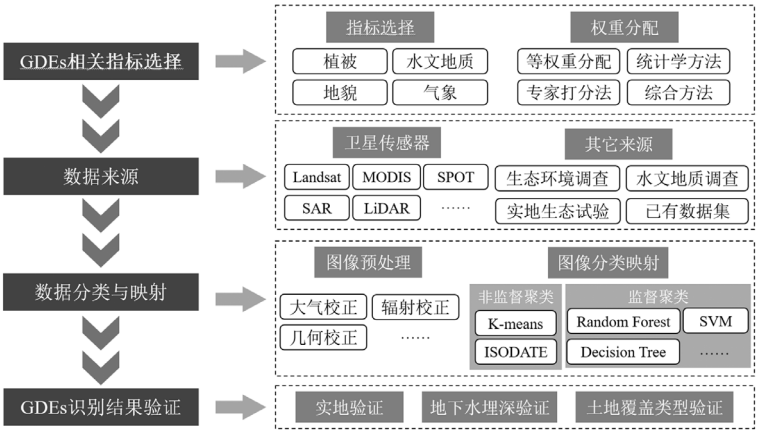


图 1 基于 GIS 和遥感技术的 GDEs 识别评价模型框架示意

Fig.1 Schematic diagram of the GDEs identification and assessment model framework based on GIS and remote sensing technologies

3 依赖地下水生态系统的识别评价研究

GDEs 的判定主要在其识别评价过程中评价指标体系的构建方面提供科学依据,不同判定方法对应不同的响应指标,进而影响下一步数据获取和映射集成.得益于地理信息系统(GIS)和遥感技术的发展,空间分析和遥感图像被用于 GDEs 的识别评价,虽然遥感方法无法提供与实地调查同样的精准信息,但其可以进行快速和广泛监测,为解释较大尺度上植被-地下水相互作用关系及其影响因素提供了支撑[26].GDEs 识别评价方法经历了由传统使用单一的判定方法过渡到基于 GIS 技术的多指标综合识别的过程,识别精度也得到了提升[2].本文在根据 Tweed 等[58]在景观尺度识别 GDEs 的方法流程基础上,结合现有方法总结形成基于 GIS 和遥感技术的 GDEs 识别评价模型框架(图 1).识别评价过程主要包括指标的选择、卫星传感器的选择、图像的映射与集成表征、识别结果验证等关键步骤.

3.1 指标选取

GDEs 的识别评价过程中,选择合适的识别指标并合理分配其权重,有助于提高结果的精度.利用遥感指标在 GDEs 识别中的应用广泛.归一化差值植被指数(NDVI)利用红色和近红外波段来确定给定区域的植被状态和光合作用活动,由于能够代表在长时间干旱期间保持一致的绿色生态系统已在多项研究中用于识别依赖地下水的陆地生态系统和湿地[14,34-35,59].Páscoa 等[59]通过使用从 MODIS 卫星数据计算的植被指数 NDVI 识别了西班牙伊比利亚半岛中的潜在以来地下水植被.干旱区降水稀少、地表水匮乏,GDEs 的植被能够在长期的干旱中保持一致的光合活性和湿度,一些干旱区特有的指标增强型植被指数(EVI)、叶面积指数(LAI)、归一化差值湿度指数(NDWI)和地形湿度指数(TWI)等也常被用于 GDEs 识别.Box 等[35]利用遥感数据和奇异值分解(SVD)技术,通过 NDVI、EVI、NDWI 指数在澳大利亚干旱区识别 GDEs,成功绘制了依赖地下水的生态系统分布图.El-Hokayem 等[60]也结合 NDVI、NDWI、EVI 及生物物理参数,在地中海地区识别依赖地下水植被(GDV),实现了对 GDV 的高精度局部识别.为了克服单一指标的局限性,近年来越来越多的研究开始将遥感数据结合与实地数据集合.一些实地数据可通过 GIS 实现空间可视化,地下水埋深(WTD)、实际植物蒸腾年和降水之比(ETaP)、干旱指数(AI)以及土壤含水量(SMC)等常与遥感指标结合进行 GDEs 识别.Fildes 等[23]在澳大利亚大自流盆地的研究中,利用 Landsat 数据和多图像监督分类,结合 LTZ 等实地指标,提出了一种综合遥感制图方法,有效识别了与漫射排放相关的 GDEs.Xu 等[42]在渭河流域研究中,通过 NDVI 和实地的 WTD 等指标,结合空间核密度函数,成功识别和绘制了潜在 GDEs.

识别指标确定后,合理分配指标的权重同样不可忽视.不同的权重分配方法会影响 GDEs 识别的精度.研究初期,许多 GDEs 识别方法采用等权重分配的方式,即假设所有指标对 GDEs 的判定具有相同的重要性[13-14].这种方法操作简便且不需要大量

数据支持,但其缺点在于忽略了各个指标之间可能存在的差异性.随着数据分析技术的发展,研究开始运用统计学的方法,如相关性分析和显著性分析,对指标权重进行合理分配[24,61-62],这些方法能够量化分析各指标的相对重要性.在数据稀缺或不完整的情况下,专家的专业知识能够补充数据分析的不足,可为复杂的生态系统提供更合理的权重分配.近年来,也有研究尝试将数据分析与专家知识结合,通过综合方法对指标权重进行分配.Rampheri 等[37]使用分析层次过程(AHP)技术根据 NDVI、NDWI、土地利用类型、坡度等对 GDEs 分别为各个专题图层分配权重,并结合加权叠加绘图方法,识别和划定了 Khakea-Bray 跨界含水层地区依赖地下水的生态系统.Duran-Llacer 等[63]采用专家打分法确定各指标权重,通过整合不同数据和专家意见,使用 GIS 的多条件加权叠加方法,成功绘制了智利半干旱环境中依赖地下水的生态系统区.

3.2　多维遥感识别技术

用于 GDEs 识别的卫星或传感器众多,所获取的遥感影像能够较为精确的反应地表条件和长时间序列下的变化情况,进而识别出与地下水相关地貌及其光学特征[64].以往对 GDEs 的识别研究利用了不同类型的卫星传感器,包括合成孔径雷达(SAR)和光探测与测距雷达(LiDAR)等主动传感器,以及 Landsat、Sentinel、MODIS 和 SPOT 等被动传感器,这些传感器各有其特点及优势[21].

以雷达(Rader)为主的主动传感器可用作与 GDEs 有关的信息提取.其中 SAR 在提供有关水分的时间和空间格局、地下水位季节性波动、植被格局以及自然与及人为干扰影响信息方面特别成功[65-68].Castellazzi 等[69]利用 SAR 技术,构建了三个数据立方体,并提出了一种新的合成孔径雷达图像衍生指数 SARGDE,以识别和监测澳大利亚各地的 GDEs.LiDAR 图像可用于生成高精度数字高程模型,对于获坡度、坡向和地形湿度指数取等地形指标至关重要[58,63].Guirado 等[70]利用 LiDAR 衍生的地形模型以及地质数据对基岩裂隙的分布并结合灌木的分析制图结果识别了区域对地下水的依赖性.

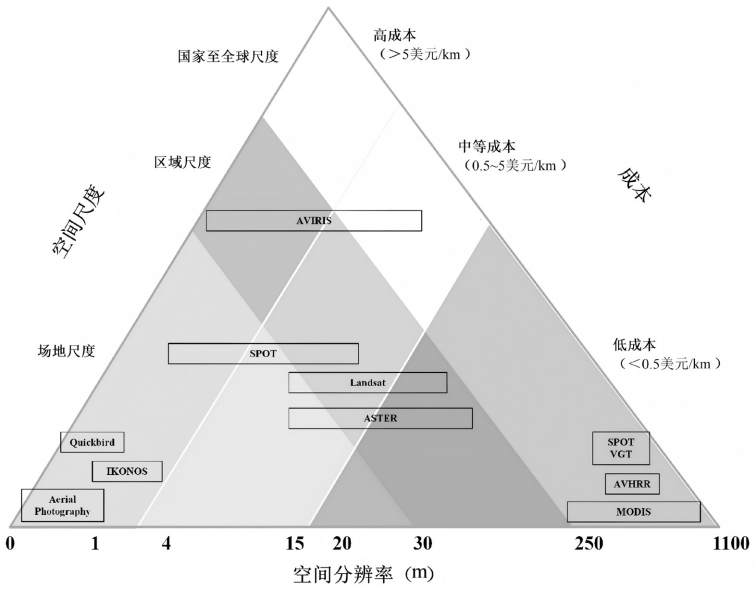


图 2　常用于 GDEs 测绘和监测的卫星传感器(根据 Pérez Hoyos 等[33]的作图译制)

Fig.2　Satellite sensors commonly used for mapping and monitoring of GDEs (translated from Perez Hoyos et al[33])

类似于 Landsat、Sentinel、MODIS 和 SPOT 这样的被动传感器具有全球范围内的覆盖区域,能够运用到众多从地方到全球关于 GDEs 制图的研究中.相比与其他中等分辨率图像,Landsat 图像提供了最佳的空间、光谱分辨率与具有竞争力的价格优势[71].并且 Landsat 图像还提供正在调查的自然资源的历史信息,这有利于长期监测这些生态系统[72-75].MODIS 是对更高时间分辨率的卫星传感器,其空间分辨率为 250m,并在 36 个光谱分辨率波段中几乎做到了每日更新[75-76],现有研究中常常结合使用

Sentinel 及 MODIS 传感器满足其需要的时间及空间分辨率.Hoogland 等[62]使用 Landsat 和 MODIS 卫星传感器,通过多元线性回归模型和地统计学方法,成功绘制了荷兰地下水位深度随时间变化的地图,评估了 GDEs 的干燥程度.Gou 等[39]在德克萨斯州利用 Landsat 和 MODIS 卫星传感器,结合 K-means 聚类分析,开发了一个新的指数系统,识别了潜在的 GDEs.

在 GDEs 识别中,选择合适的传感器主要取决于传感器的功能,即空间、时间、辐射和光谱分辨率等.因此,使用遥感进行 GDEs 识别时需要选择合适的数据集,以满足在所需的空间和时间分辨率下提供具有所需质量的信息.但在实际使用时还应充分考虑其使用成本,图 2 中显示了常用卫星传感器在空间尺度、空间分辨率与成本特征.

3.3 图像映射与集成表征

利用 GIS 技术绘制 GDEs 地图需进行图像映射处理,过程包括利用 GDEs 与周边区域之间的潜在区别,提取相应信息或派生指标对遥感影像进行解释.总体而言,图像的映射过程涉及图像预处理和图像分类.图像的预处理包括去除噪声并提高数据可解释性,例如大气校正[10].当多个场景用于给定研究以进行多时态分析、变化检测或评估包含多个场景的大面积区域时,图像的预处理尤为重要[21].

图像分类指使用传统分类算法或改进的分类器从遥感信息中提取类或集群,是研究 GDEs 的有效技术,其包括非监督分类、监督分类和基于对象的图像分析方法等[21,64].非监督聚类方法包括 K-means 和 ISODATA 等,与监督学习算法不同,非监督学习算法的使用不依赖于事先标注好的训练数据集(即确定的区域),而是根据数据本身的结构进行分类(即根据像素的光谱值相似性将像素分组).Barron 等[61]使用 ISODATA 算法来识别地表覆盖类型的自然集群,使通过非监督分类技术,成功识别并绘制了澳大利亚 Ellen Brook 地区的 GDEs. Pandey 等[77]在印度 Bundelkhand 地区,运用基于专家判断的多标准决策制定过程和 ArcGIS 加权叠加方法,成功绘制了该地区的 GDEs.监督聚类算法由于可以根据训练数据集事先标注好的信息进行指导精度,因此通常比非监督分类算法表现更好,被广泛应用于 GDEs 识别[21],包括了支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、决策树(Decision Tree)及随机森林(Random Forest)等.Hoyos 等[41]运用随机森林模型,结合加权叠加分析技术,通过 WTD、地形数据和气候数据等指标,成功预测了地下水位深度,并确定了生态系统成为地下水依赖的潜力.Martínez-Santos 等[32]使用了机器学习中的多种方法,包括支持向量机(SVM)、决策树(Decision Tree)和随机森林(Random Forest),并通过 MLMapper 2.0 软件,通过训练已知样本的监督分类算法,成功开发基于点源地面真实数据的预测地图,提高了 GDEs 识别的准确性

GIS 技术是集成表征遥感和实地数据之间的主要手段.在许多情况下,为了识别 GDEs,需要使用地统计方法处理和分析实地数据来实现其在地图空间的可视化.地统计是一组使用概率模型来表征空间属性的数值技术[47].通过使用插值方法(如全局和局部多项式、克里金法和径向基函数)从地面观测值生成可视化地图,可以将影响地下水依赖性的主要变量按权重进行叠加分析以识别 GDEs[23,56].

3.4 识别结果验证

由于 GDEs 的空间分布和生态特征受诸多因素影响,验证结果的准确性是识别过程的必要环节.验证的常见方法主要有实地验证、地下水埋深验证以及土地覆盖类型验证等.实地验证是最为直接且常用的验证方法,通过对研究区内的生态系统进行现场调查,获取实际的生态状况数据,从而验证遥感图像分析或模型预测的结果.这一方法可以有效补充遥感数据中的不确定性,特别是在一些难以通过遥感技术直接识别的区域.El-Hokayem 等[60]采用实地植被调查和叶绿素含量测量的方法来验证遥感识别结果,通过比较依赖地下水植被和非依赖地下水植被在生态水文指标值、叶解剖和植物覆盖方面的差异来验证遥感方法,并将分类结果与实地调查数据进行比较.地下水埋深验证也是常用的一种验证手段,尤其在干旱和半干旱地区,地下水的深度直接影响生态系统的水源依赖程度.通过测定地下水埋深,研究人员可以验证特定区域是否与地下水存在关联.Xu 等[42]通过研究 NDVI 和 WTD 之间的空间协同作用、NDVI 与上个月降水之间的相关性以及 ET 和降水之间的差异对渭河流域的 GDEs 识别结果进行了验证.土地覆盖类型验证是指其变化与 GDEs 的分布密切相关,尤其是在湿地、森林、草地

等生态系统中,土地覆盖类型能够直接反映地下水依赖的特征.例如,湿地生态系统通常与地下水位密切相关,而草地生态系统可能更依赖于表层水源.在进行 GDEs 的识别时,结合土地覆盖类型的变化进行验证,可以有效减少误识别的风险.遥感影像分析方法通常通过分类算法(如监督分类和无监督分类)识别土地覆盖类型,并与实地调查数据进行对比,从而验证遥感提取的 GDEs 区域是否真实反映了地下水依赖的生态环境.张燕等[14]结合地貌特征法、河流影响带法和水位埋深阈值法综合评估了新疆开孔河流域遥感识别的潜在 GDEs 的准确性.

4　总结及展望

GDEs 的判定和识别评价研究已经从早期推论阶段发展到地理信息与遥感技术驱动、地理空间数据与实地观测数据多元整合应用的阶段.遥感技术的发展极大地推动了 GDEs 的识别制图研究,使得能够在较大尺度上识别 GDEs 并分析其动态变化.本研究在前人的基础上,总结了 GDEs 识别评价模型框架,通过构建指标体系,根据需求整合适当的卫星传感器和数据源,应用 GIS 技术集成制图,最后对识别结果进行验证,可以实现对 GDEs 的快速和广泛识别.

尽管 GDEs 判定和识别研究近 40 年中取得了巨大的发展,但仍存在一定的缺陷.首先,如何准确定位 GDEs 的分布尚不充分.遥感方法的精度受到传感器分辨率和数据质量的限制,难以提供实地的精准信息.现场调查受经济和时间成本的限制,缺乏实地数据,也同样影响识别的精度.其次,在对 GDEs 的长序列变化的监测能力上仍需加强,尤其气候变化加剧和人类活动加强影响下的动态变化,也会影响识别评价的精准度.此外,缺乏对水资源管理的考量,尤其是在水资源稀缺的情况下,如何加入社会化指标以有效平衡生态需求与社会发展需求.

未来,GDEs 识别评价研究应在深化评估指标、促进多源数据整合、推动跨学科合作、加强大模型和人工智能的运用方面进行深入探索.除现有的生态、水文等指标外,还应加强对生物多样性、生态功能、社会功能等方面的指标研究.在促进多源数据整合与跨学科合作方面,需要贯通生态学、水文学、地质学、地理信息学、计算机科学等领域,通过构建更加科学和精确的模型,整合同化遥感、地面测量和气候等多源数据,还需要融合经济学和社会学知识,以加强对对水资源管理策略的指导.在加强大模型和人工智能的运用方面,可深入研究和开发适用于 GDEs 识别的深度学习算法,如使用卷积神经网络(CNN)对高分辨率遥感影像进行特征提取和分类以更精准识别 GDEs 的植被类型和分布范围,以及借助变体长短期记忆网络(LSTM)处理时间序列数据分析 GDEs 动态变化规律.同时,还应推动人工智能技术与 GDEs 识别评价模型进行有效集成,评估集成结果的置信度,形成互补,以实现对 GDEs 的更准确和高效的识别.通过上述这些综合措施,未来 GDEs 识别评价研究有望取得更大突破,从而为 GDE 的管理和保护修复提供更加精准有效的决策支持.

参考文献:

[1] Rohde M M, Albano C M, Huggins X, et al. Groundwater‐dependent ecosystem map exposes global dryland protection needs [J]. Nature, 2024,632(8023):101‐107.

[2] Perez Hoyos I C. Identification of phreatophytic groundwater dependent ecosystems using geospatial technologies [D]. New York: The City College of New York, 2016.

[3] Yang X Y, Liu J. Assessment and valuation of groundwater ecosystem services: A case study of Handan city, China [J]. Water, 2020,12(5): 1455.

[4] Chen Y, Pang Z, Chen Y, et al. Response of riparian vegetation to water‐table changes in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China [J]. Hydrogeology Journal, 2008,16(7):1371‐1379.

[5] Doble R, Simmons C, Jolly I, et al. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation‐induced groundwater discharge on a semi‐arid floodplain, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2006,329(1): 75‐97.

[6] 孟令华.基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 [J]. 环境科学, 2024,45(4):2096‐2106.
Meng L H. Recharge source and evolution process of karst groundwater in Tai'an urban areabased on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes [J]. Environmental Science, 2024,45(4): 2096‐2106.

[7] 刘靖宇,王　浪,卜丽娟,等.荒漠绿洲过渡带地下水氢氧稳定同位素、水化学特征及演化机理研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2023,37 (12):92‐102.
Liu J Y, Wang L, Bu L J, et al. Study on hydrogen and oxygen stable isotopes, water chemical characteristics and evolution mechanism of groundwater in desert oasis transition zone [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(12):92‐102.

[8] Kløve B, Ala‐Aho P, Bertrand G, et al. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems [J]. Journal of Hydrology,

2014,518:250−266.

[9] Tomlinson M, Boulton A. Ecology and management of subsurface groundwater dependent ecosystems in Australia − A review [J]. Marine and Freshwater Research, 2010,61:936−949.

[10] Pérez Hoyos I C, Krakauer N Y, Khanbilvardi R. Estimating the probability of vegetation to be groundwater dependent based on the evaluation of tree models [J]. Environments, 2016,3(2):9.

[11] Rohde M M, Stella J C, Singer M B, et al. Establishing ecological thresholds and targets for groundwater management [J]. Nature Water, 2024,2(4):312−323.

[12] Gow L, Brodie R, Green R, et al. Identification and monitoring GDEs using MODIS time series: Hat Head National Park − A case study [J]. Groundwater 2010: the Challenges of Sustainable Management, 2010, 11:1−7.

[13] Glanville K, Ryan T, Tomlinson M, et al. A method for catchment scale mapping of groundwater−dependent ecosystems to support natural resource management (Queensland, Australia) [J]. Environmental Management, 2016,57(2):432−449.

[14] 张 燕,尹立河,王旭升,等.新疆开孔河流域地下水依赖型植被生态系统的遥感识别 [J]. 安全与环境工程, 2024,31(4):259−270.
Zhang Y, Yin L H, Wang X S, et al. Mapping groundwater dependent vegetation ecosystems by remote sensing in Kaidu−Kongque River Basin, Xinjiang [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024,31 (4):259−270.

[15] Eamus D, Froend R, Loomes R, et al. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater−dependent vegetation [J]. Australian Journal of Botany, 2006,54(2):97−114.

[16] Eamus D, Fu B, Springer A E, et al. Groundwater dependent ecosystems: classification, identification techniques and threats [C]. Berlin: Springer International Publishing, 2016.

[17] Eamus D. Identifying groundwater dependent ecosystems: A guide for land and water managers [C]. Land & Water Australia, 2009.

[18] Spałek K, Prockow J. Karst springs as habitats for rare and protected plant species: A new inland locality of a halophyte plant batrachium baudotii (ranunculaceae) in a karst spring in Central Europe [J]. Journal of Cave and Karst Studies the National Speleological Society Bulletin, 2011,73:158−162.

[19] Gribovszki Z, Szilágyi J, Kalicz P. Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation − A review [J]. Journal of Hydrology, 2010,385(1):371−383.

[20] Eamus D, Zolfaghar S, Villalobos−Vega R, et al. Groundwater−dependent ecosystems: recent insights from satellite and field−based studies [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2015,19(10):4229−4256.

[21] Pérez Hoyos I C, Krakauer N Y, Khanbilvardi R, et al. A review of advances in the identification and characterization of groundwater dependent ecosystems using geospatial technologies [J]. Geosciences, 2016,6(2):17.

[22] Rampheri M B, Dube T, Dondofema F, et al. Progress in the remote sensing of groundwater−dependent ecosystems in semi−arid environments [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2023,130:103359.

[23] Fildes S G, Doody T M, Bruce D, et al. Mapping groundwater dependent ecosystem potential in a semi−arid environment using a remote sensing−based multiple−lines−of−evidence approach [J]. International Journal of Digital Earth, 2023,16(1):375−406.

[24] Castellazzi P, Gao S, Pritchard J, et al. Detecting springs and groundwater−dependent vegetation in data−scarce regions of Australia combining citizen science, GRACE, and optical/radar imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2024,313:114345.

[25] Li M, Li F, Fu S, et al. Identification, mapping, and eco−hydrological signal analysis for groundwater−dependent ecosystems (GDEs) in Langxi River Basin, north China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024,28(20):4623−4642.

[26] Liu C, Liu H, Yu Y, et al. Mapping groundwater−dependent ecosystems in arid Central Asia: Implications for controlling regional land degradation [J]. Science of the Total Environment, 2021,797: 149027.

[27] 董佳秋,张 俊,顾小凡,等.半干旱区流域尺度植被依赖地下水程度评价:以鄂尔多斯高原海流兔河流域为例 [J]. 中国地质, 2024, 51(6):1855−67.
Dong J Q, Zhang J, Gu X F, et al. Groundwater dependent ecosystems assessment in catchment scale of semi−arid regions: A case study in the Hailiutu catchment of the OrdosPlateau [J]. Geology in China, 2024,51(6):1855−1867.

[28] Otoo N G, Sutanudjaja E H, Van Vliet M T H, et al. Mapping groundwater dependent ecosystems using a high−resolution global groundwater model [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2025,29(8):2153−2165.

[29] El−Hokayem L, De Vita P, Usman M, et al. Mapping potentially groundwater−dependent vegetation in the Mediterranean biome using global geodata targeting site conditions and vegetation characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2023,898:166397.

[30] Brown J, Bach L, Aldous A, et al. Groundwater−dependent ecosystems in Oregon: An assessment of their distribution and associated threats [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011,9(2):97−102.

[31] Gomes Marques I, Nascimento J, Cardoso R M, et al. Mapping the suitability of groundwater−dependent vegetation in a semi−arid Mediterranean area [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(9):3525−3552.

[32] Martínez−Santos P, Díaz−Alcaide S, De La Hera−Portillo A, et al. Mapping groundwater−dependent ecosystems by means of multi−layer supervised classification [J]. Journal of Hydrology, 2021,603:126873.

[33] 李福林,陈华伟,王开然,等.地下水支撑生态系统研究综述 [J]. 水科学进展, 2018,29(5):750−758.
Li F L, Chen H W, Wang K R, et al. Review on Groundwater Supported Ecosystem Research [J]. Advances in Water Science, 2018,29(5):750−758.

[34] Doody T M, Barron O V, Dowsley K, et al. Continental mapping of groundwater dependent ecosystems: A methodological framework to integrate diverse data and expert opinion [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017,10:61−81.

[35] Brim Box J, Leiper I, Nano C, et al. Mapping terrestrial groundwater−dependent ecosystems in arid Australia using Landsat−8time−series data and singular value decomposition [J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2022,8(4):464−476.

[36] Matic V, Costelloe J F, Western A W. An integrated remote-sensing mapping method for groundwater dependent ecosystems associated with diffuse discharge in the Great Artesian Basin, Australia [J]. Hydrogeology Journal, 2020,28(1):325-342.

[37] Rampheri M B, Dube T, Dondofema F, et al. Identification and delineation of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) in the Khakea–Bray transboundary aquifer region using geospatial techniques [J]. Geocarto International, 2023,38(1):2172217.

[38] Owolabi S T, Madi K, Kalumba A M, et al. A groundwater potential zone mapping approach for semi-arid environments using remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and analytical hierarchical process (AHP) techniques: a case study of Buffalo catchment, Eastern Cape, South Africa [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13(22):1184.

[39] Gou S, Gonzales S, Miller G R. Mapping potential groundwater-dependent ecosystems for sustainable management [J]. Groundwater, 2015,53(1):99-110.

[40] Howard J, Merrifield M. Mapping groundwater dependent ecosystems in California [J]. PLOS One, 2010,5(6):1-14.

[41] Hoyos I, Krakauer N Y, Khanbilvardi R. Random forest for identification and characterization of groundwater dependent ecosystems [J]. Water Resources Management, 2015,196:89-100.

[42] Xu W, Kong F, Mao R, et al. Identifying and mapping potential groundwater-dependent ecosystems for a semi-arid and semi-humid area in the Weihe River, China [J]. Journal of Hydrology, 2022,609: 127789.

[43] Hatton T, Evans R. Dependence of ecosystems on groundwater and its significance to Australia [M]. Canberra: Land and Water Resources Research and Development Cooperation, 1998:18-20.

[44] Eamus D, Froend R, Loomes R, et al. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater-dependent vegetation [J]. Australian Journal of Botany, 2006,54(2):97-114.

[45] Cook, P G, Hatton, T J, Pidsley D, et al. Water balance of a tropical woodland ecosystem, Northern Australia: A combination of micro-meteorological, soil physical and groundwater chemical approaches [J]. Journal of Hydrology, 1998,210(1-4):161-177.

[46] Dijk V I A, Hairsine B P, Arancibia P J, et al. Reforestation, water availability and stream salinity: A multi-scale analysis in the Murray-Darling Basin, Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 251(1):94-109.

[47] Broekhoven V G J F, Griffioen J, Dekker C S, et al. Linking recharge water sources to groundwater composition in the Hindon subbasin of the Ganges River, India. [J]. The Science of the Total Environment, 2024,954:176399.

[48] E. S M, Timothy D, Nebo J, et al. Using the water balance approach to understand pool dynamics along non-perennial rivers in the semi- arid areas of South Africa [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,44:101244.

[49] Wu M, Wu J, Liu J, et al. Effect of groundwater quality on sustainability of groundwater resource: A case study in the North China Plain [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2015,179:132-147.

[50] Beisner K R, Paretti N V, Jasmann J R, et al. Utilizing anthropogenic compounds and geochemical tracers to identify preferential structurally controlled groundwater pathways influencing springs in Grand Canyon National Park, Arizona, USA [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,48:101461.

[51] Juliette K, Stef L, Markus H, et al. Seasonal inundation dynamics and water balance of the Mara Wetland, Tanzania based on multi-temporal Sentinel-2image classification [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022,109:102766.

[52] 刘 鑫,张晨春,王 琛,等.浑善达克沙地植被叶面积指数时空动态变化及驱动因素分析 [J]. 西部资源, 2024,(5):135-137.

[53] Mauro R, Marco D, Giulio B. Nationwide groundwater recharge evaluation for a sustainable water withdrawal over Italy [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,43:101172.

[54] Kourgialas N N, Karatzas P G, Dokou Z, et al. Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands - The case of Crete, Greece [J]. Science of the Total Environment, 2018,615:381-389.

[55] Ali J A, Ahmed A A, Abbod F M. Groundwater level predictions in the Thames Basin, London over extended horizons using Transformers and advanced machine learning models [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,484:144300.

[56] Texier J, Gonçalvès J, Stieglitz T, et al. Groundwater-surface water exchanges in an alluvial plain in southern France subjected to pumping: A coupled multitracer and modeling approach [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024,56:101995.

[57] Matiatos I ,Paraskevopoulou V, Lazogiannis K, et al. Surface–ground water interactions and hydrogeochemical evolution in a fluvio-deltaic setting: The case study of the Pinios River delta [J]. Journal of Hydrology, 2018,561:236-249.

[58] Tweed S O, Leblanc M, Webb J A, et al. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia [J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(1):75-96.

[59] Páscoa P, Gouveia C M, Kurz-Besson C. A simple method to identify potential groundwater-dependent vegetation using NDVI MODIS [J]. Forests, 2020,11(2):147.

[60] El-Hokayem L, De Vita P, Conrad C. Local identification of groundwater dependent vegetation using high-resolution Sentinel-2data-A Mediterranean case study [J]. Ecological Indicators, 2023, 146:109784.

[61] Barron O V, Emelyanova I, Van Niel T G, et al. Mapping groundwater-dependent ecosystems using remote sensing measures of vegetation and moisture dynamics [J]. Hydrological Processes, 2014,28(2): 372-385.

[62] Hoogland T, Heuvelink G B M, Knotters M. Mapping water-table depths over time to assess desiccation of groundwater-dependent ecosystems in the Netherlands [J]. Wetlands, 2010,30(1):137-147.

[63] Duran-Llacer I, Arumí J L, Arriagada L, et al. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile [J]. Science of the Total Environment, 2022,816: 151528.

[64] Rampheri M B, Dondofema F, Dalu T. Progress in the remote sensing

of groundwater-dependent ecosystems in semi-arid environments [J]. Physics and Chemistry of The Earth, 2023,130:103359.

[65] Castañeda C, Ducrot D. Land cover mapping of wetland areas in an agricultural landscape using SAR and Landsat imagery [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(7):2270-2277.

[66] Hess L L, Melack J M, Novo E M L M, et al. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon Basin [J]. Remote Sensing of Environment, 2003,87(4):404-428.

[67] Reschke J, Bartsch A, SCHLAFFER S, et al. Capability of C-band SAR for operational wetland monitoring at high latitudes [J]. Remote Sensing, 2012,4(10):2923-2943.

[68] Lang M W, Kasischke E S, Prince S D, et al. Assessment of C-band synthetic aperture radar data for mapping and monitoring Coastal Plain forested wetlands in the Mid-Atlantic Region, U.S.A [J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(11):4120-4130.

[69] Castellazzi P, Doody T, Peeters L. Towards monitoring groundwater-dependent ecosystems using synthetic aperture radar imagery [J]. Hydrological Processes, 2019,33(25):3239-3250.

[70] Guirado E, Alcaraz-Segura D, Rigol-Sánchez J P, et al. Remote-sensing-derived fractures and shrub patterns to identify groundwater dependence [J]. Ecohydrology, 2018,11(6):1-11.

[71] Münch Z, Conrad J. Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa [J]. Hydrogeology Journal, 2007,15(1):19-28.

[72] Thamaga K H, Dube T, Shoko C. Advances in satellite remote sensing of the wetland ecosystems in Sub-Saharan Africa [J]. Geocarto International, 2022,37(20):5891-5913.

[73] Huntington J, Mcgwire K, Morton C, et al. Assessing the role of climate and resource management on groundwater dependent ecosystem changes in arid environments with the Landsat archive [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:186-197.

[74] Timothy D, Onisimo M, Riyad I. Quantifying aboveground biomass in African environments: A review of the trade-offs between sensor estimation accuracy and costs [J]. Tropical Ecology, 2016,57(3):393-405.

[75] Chen L, Jin Z, Michishita R, et al. Dynamic monitoring of wetland cover changes using time-series remote sensing imagery [J]. Ecological Informatics, 2014,24:17-26.

[76] Landmann T, Schramm M, Colditz R R, et al. Wide area wetland mapping in semi-arid africa using 250-meter MODIS metrics and topographic variables [J]. Remote Sensing, 2010,2(7):1751-1766.

[77] Pandey H K, Kumar Singh V, Kumar Singh S, et al. Mapping and validation of groundwater dependent ecosystems (GDEs) in a drought-affected part of Bundelkhand region, India [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2023,23:100979.

作者简介：叶志豪(2000-),男,湖北宜昌人,重庆交通大学硕士研究生,主要从事依赖地下水生态系统识别研究.发表论文 3 篇. yezhihao2000@foxmail.com.