

doi: 10.12029/gc20220526002

董佳秋, 张俊, 顾小凡, 高海波, 杨波, 杨晓东, 赵春光, 张铁钢, 尹立河, 王晓勇. 2024. 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, 51(6): 1855–1867.

Dong Jiaqiu, Zhang Jun, Gu Xiaofan, Gao Haibo, Yang Bo, Yang Xiaodong, Zhao Chunguang, Zhang Tiegang, Yin Lihe, Wang Xiaoyong. 2024. Groundwater dependent ecosystems assessment in catchment scale of semi-arid regions: A case study in the Hailiutu catchment of the Ordos Plateau[J]. Geology in China, 51(6): 1855–1867(in Chinese with English abstract).

## 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

董佳秋<sup>1,2</sup>, 张俊<sup>1,2</sup>, 顾小凡<sup>1,2</sup>, 高海波<sup>3</sup>, 杨波<sup>4</sup>, 杨晓东<sup>4</sup>,  
赵春光<sup>5</sup>, 张铁钢<sup>6</sup>, 尹立河<sup>1,2</sup>, 王晓勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 乌审旗水利局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 鄂尔多斯市水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 5. 鄂尔多斯市水旱灾害防御技术中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 6. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:**【研究目的】综合利用地表、地下信息, 探索建立适用于半干旱区流域尺度植被依赖地下水程度评价的新方法, 以期为干旱区地下水合理开发利用与生态保护修复提供技术支撑。【研究方法】以黄河流域中游鄂尔多斯高原海流兔河流域为研究区, 选取地下水位埋深、土壤类型、干旱期蒸散发、植被覆盖度等涵盖水、土、气、生 4 个圈层的评价指标, 以野外数据采集和遥感解译为主要手段, 获取以上指标的空间分布, 最后在 GIS 平台中采用综合评价的方法确定依赖地下水生态系统的分布及依赖程度分级。【研究结果】评价结果表明, 依赖地下水程度非常高和高的植被分布面积占流域总面积的 10.2%。尽管依赖地下水植被生态系统在整个流域占比不高, 但由于地下水提供了比降水更加稳定的供水水源, 该地区的生物多样性与生物量远高于其他地区, 具有极其重要的生态价值。【结论】通过场地尺度地下水依赖程度的对比, 该方法评价的结果是可靠的, 在其他的半干旱区也具有一定的适用性; 指标灵敏度分析表明, 土壤类型与地下水位埋深是最敏感的指标, 因此在野外调查时应加强这两类指标的数据采集。

**关键词:** 地下水依赖型生态系统; 评价; 半干旱; 植被; 生态; 水文地质调查工程; 海流兔河流域; 鄂尔多斯高原; 内蒙古

**创新点:** (1) 开发了适用于半干旱区域尺度依赖地下水生态系统的评价新方法; (2) 综合利用地表、地下信息, 从水圈、土壤圈、大气圈和生物圈多圈层选取评价指标, 指标选取同时考虑全面性、代表性、可获取性和可量化性; (3) 流域尺度评价结果与场地尺度的研究结果具有较好的一致性, 表明在其他的半干旱区也具有一定的适用性。

中图分类号: P641; Q948 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)06–1855–13

## Groundwater dependent ecosystems assessment in catchment scale of semi-arid regions: A case study in the Hailiutu catchment of the Ordos Plateau

收稿日期: 2022–05–26; 改回日期: 2022–07–22

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(2021GG0198)、陕西省创新能力支持计划(2019TD–040)、国家自然科学基金项目(41877199)、陕西省重点研发计划(2021ZDLSF05–01, 2022SF–327)及中国地质调查局项目(DD20190351, DD20221751)联合资助。

作者简介: 董佳秋, 女, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事生态水文地质研究; E-mail: djiaqiu@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 张俊, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事生态水文地质研究; E-mail: zjun@mail.cgs.gov.cn。

DONG Jiaqiu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, GU Xiaofan<sup>1,2</sup>, GAO Haibo<sup>3</sup>, YANG Bo<sup>4</sup>, YANG Xiaodong<sup>4</sup>,  
ZHAO Chunguang<sup>5</sup>, ZHANG Tiegang<sup>6</sup>, YIN Lihe<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyong<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Groundwater and Ecology in Arid Regions of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Wushen Water Conservancy Bureau, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. Ordos Water Conservancy Development Center, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 5. Ordos Flood and Drought Disaster Prevention Technology Center, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 6. Institute of Pastoral Water Resources, Ministry of Water Resources, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

**[Objective]** A new evaluation method for catchment scale dependent groundwater ecosystem in semi-arid region was established. The method will include both surface and sub-surface information and provides a technical support to groundwater resources development and ecosystem protection in semi-arid areas. **[Methods]** Taking the Hailiutu catchment in the Ordos Plateau as the study area. Four indicators including depth to water table, soil types, vegetation coverage and evapotranspiration were selected and the spatial distributions of these indicators were determined based on field survey and remote sensing interpretation. Finally, a systematic assessment was performed in a GIS platform to identify the distribution of GDE and the degree of dependency. **[Results]** The results indicate that the areas very high and high dependent on groundwater accounts for 10.2%. Although the areas are small, biodiversity and bio-mass in such place are much higher with high ecological value than the that of others due to the contribution of groundwater to vegetation growth. **[Conclusions]** Based on the comparison between this study and site studies, the results have a good agreement and are reliable, indicating that the proposed method is applicable to other similar regions. The sensitivity analysis shows that the most sensitive parameters are soil types and depth to water table that should be paid more attention during data collection in field works.

**Key words:** groundwater-dependent ecosystems (GDEs); assessment method; semi-arid; vegetation; ecology; hydrogeological survey engineering; Hailiutu catchment; Ordos Plateau; Inner Mongolia

**Highlights:** (1) A new method was developed suitable for groundwater dependent ecosystems at catchment scale in semi-arid regions. (2) Indicators were selected from hydrosphere, pedosphere, atmosphere and biosphere by integrating surface and underground information. Comprehensiveness, representativeness, accessibility and quantification were considered in the selection of indicators. (3) A good agreement was reached between the results from the proposed method and site studies, indicating that it is applicable to other semi-arid areas.

**About the first author:** DONG Jiaqiu, female, born in 1984, senior engineer, mainly engaged in eco-hydrogeological survey and research in arid regions; E-mail: [djiaqiu@mail.cgs.gov.cn](mailto:djiaqiu@mail.cgs.gov.cn).

**About the corresponding author:** ZHANG Jun, male, born in 1982, Ph.D, senior engineer, mainly engaged in eco-hydrogeological survey and research in arid regions; E-mail: [zjun@mail.cgs.gov.cn](mailto:zjun@mail.cgs.gov.cn).

**Fund support:** Supported by Science and Technology Program of Inner Mongolia Autonomous Region (No.2021GG0198), Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2019TD-040), Natural National Science Foundation (No.41877199), Shaanxi Key Research and Development Program (No.2021ZDLSF05-01, No.2022SF-327) and China Geological Survey (No.DD20190351, No.DD20221751).

## 1 引 言

中国干旱半干旱区占国土面积的 52.5%，但水资源缺乏，生态环境脆弱，由于区内降雨稀少，蒸发强烈，在地下水位比较浅的地区，地下水成为维持植被生态系统的主要水源，被称为“依赖于地下水

的生态系统” (Groundwater Dependent Ecosystems, 简称 GDEs) (Gou et al., 2015; 刘鹤等, 2018)。根据含水层与生态系统的联系，将 GDEs 划分为“泉水生态系统”、“河湖生态系统”、“湿地生态系统”和“陆生生态系统”四种类型 (Bertrand et al., 2012)。依赖地下水的植物最早出现在三叠纪，在英国西

南部的碳酸岩中发现 (Purvis and Wright, 2009)。GDEs 具有较高的物种丰富度和极佳的固碳能力, 生态服务价值很高, 是旱区生态屏障的重要组成部分。地下水不合理开采, 极易引起 GDEs 退化。识别 GDEs 的空间分布与对地下水的依赖程度评价区划, 以及生态保护修复和水资源可持续开发利用具有重要意义。

GDEs 研究已成为国际生态水文学研究的热点问题, 目前将依赖地下水型生态系统明确列入法律予以保护的只有澳大利亚和欧盟, 其中澳大利亚是开展相关研究最多的国家, 已通过遥感手段完成了全澳大利亚依赖地下水型生态系统的识别, 并可以通过互联网访问 (<http://www.bom.gov.au/water/groundwater/gde>), 南非也完成了全国依赖地下水型生态系统的识别 (Münch and Conrad, 2007), 美国目前只有几个州开展了类似的工作, 如加州 (Howard et al., 2010)、俄勒冈州等 (Brown et al., 2011)。中国目前在区域层面开展依赖地下水型生态系统区划的工作接近空白, 目前已有的工作大多是集中在场地尺度的依赖地下水型生态系统的识别。

对于区域尺度地下水与生态的关系, 不少学者通过建立水位埋深与 NDVI 或植被覆盖度的关系, 以水位埋深作为植被对地下水依赖性评价分级的划分指标, 取得了一定效果 (金晓媚等, 2013; 党学亚等, 2019; Wang et al., 2021)。又如张俊等 (2014) 根据土壤含盐量和含水量建立了物种生存阈, 预测地下水位变化后植被物种的演替趋势。然而, 植被对地下水的依赖程度与地下水、地貌、土壤、植被类型等众多因素有关, 单一的评价指标不能全面准确评价植被对地下水的依赖性, 因此, 本文尝试采用多个评价指标, 进行综合评价, 以提高评价的合理性和准确性。目前使用最多的是利用遥感技术, 在 GIS 平台中进行综合分析 (Eamus et al., 2015), 使用较多的指标包括 NDVI、绿度、蒸散发等反映地表信息的指标 (Gou et al., 2015; Glanville et al., 2016; Yin et al., 2021), 利用土壤类型、地下水位埋深等地下信息参与评价的实例研究相对较少。本文以鄂尔多斯高原海流兔河流域为研究区, 探索建立利用多种地表、地下信息要素评价依赖地下水型生态系统的区域分布新方法, 以期为干旱半干旱区地下水合理开发利用与生态保护修复提供技术支撑。

可以用于评价 GDEs 分布的潜在参数比较多, 通过对发表的 158 篇相关文献梳理, 最近的研究筛选出近 20 个用于评价 GDEs 分布的指标 (Iongel et al., 2022), 大部分为反映地表特征的参数 (如地貌、土地利用类型、植被指数等)。除了这些反映地表参数的指标外, 前人也认为水位埋深、干旱期的高蒸散发区和土壤类型也是评价 GDEs 分布的重要指标 (Eamus and Freund, 2006; Liu et al., 2021; Song et al., 2021)。因此结合流域地处半干旱区的实际情况, 以及数据的可获得和可利用性, 本次选取水位埋深 (水)、土壤类型 (土)、蒸散发 (气) 和植被覆盖度 (生) 4 个评价参数指标, 通过综合评价确定 GDEs 的等级与空间分布。

## 2 研究区概况

海流兔河流域位于黄河流域中游鄂尔多斯高原, 地理位置为 108°38'E~109°19'E, 38°02'N~38°51'N, 流域面积 2600 km<sup>2</sup>, 地处陕北黄土高原与毛乌素沙漠之间的过渡带。全区海拔 1100~1440 m, 地势北高南低、东西高、中间低, 最高点位于乌审旗东北方向的巴彦敖包二队, 海流兔河河谷最低 (图 1), 最大相对高差约为 500 m。区内降雨稀少, 多年平均降雨量约为 350 mm, 年际变化大, 丰水年降水量是枯水年的 2~4 倍 (雷磊等, 2015)。降水主要集中在每年的夏季和秋季, 约占全年降水量的 70%。区内蒸发强烈, 多年平均蒸发量为 2100 mm (中国气象数据网 <http://data.cma.cn>), 属典型的半干旱气候。研究区内的主要河流海流兔河, 为无定河支流, 全长 85 km, 多年平均径流量约为 0.8 亿 m<sup>3</sup> (周生辉等, 2021)。地表水系除了河流外, 区内也分布众多的小型湖泊, 一般是由地下水渗流及降水形成的地表径流汇聚形成, 比较大的季节性湖泊为流域北部的宝寨泊 (金晓媚等, 2013)。区内地下水的水位埋深较浅, 植被生长与地下水关系密切。地下水主要赋存于第四系孔隙含水层和白垩系裂隙孔隙含水层中, 两者之间没有区域隔水层, 构成统一的巨厚含水层 (侯光才等, 2007)。区内植被以旱生植物种群为主, 除了一些草本植物外, 常见的灌木包括沙柳、柠条、沙蒿等, 乔木主要是旱柳、小叶杨等, 植被多样性以及生物量均与地下水具有一定的关系 (朱丽等, 2017)。

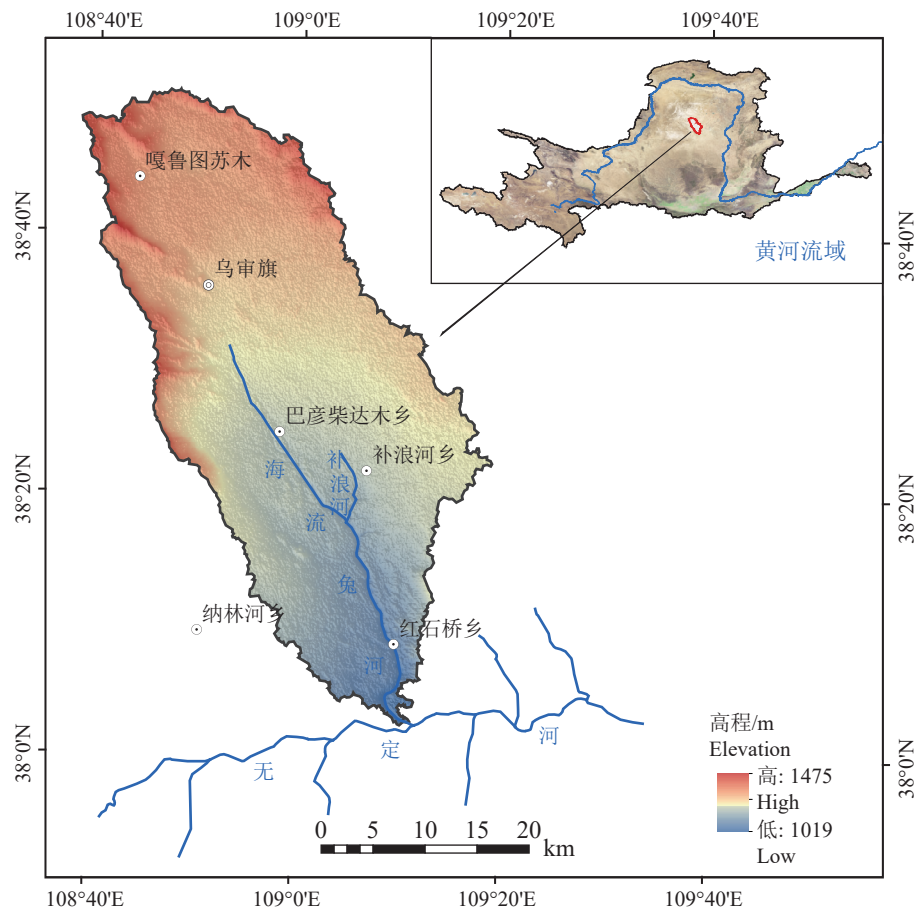


图1 研究区地理位置图

Fig.1 Location of the study area

### 3 评价方法

#### 3.1 评价指标选取

##### 3.1.1 水位埋深

干旱半干旱区,地下水位埋深较浅的低洼地区,植被以湿生、喜水、耐盐植被为主,这些低湿地植被对地下水的依赖程度较高,地下水位下降对这些植被的生存有很大的影响。因此,地下水位埋深是判断植被对地下水是否依赖的重要因素,可以将其作为依赖地下水生态系统(GDEs)评价的主要指标之一。海流兔河流域已有研究也表明,水位埋深在 1~5 m 时,对地表的植物生长具有一定的影响(金晓媚等, 2013)。本次水位埋深数据来源为鄂尔多斯盆地海流兔河流域生态水文地质调查工作在 2013—2015 年获取的地下水位实测数据,共观测约 170 口水井的水位,依据水位高程绘制了潜水地下水等水位线,最后依据 1:5 万地形图与该等水

位线相减获得研究区的水位埋深图,并经实测水位埋深验证和校正。

##### 3.1.2 土壤类型

宏观上,西北地区降水稀少,植被生长发育与地貌类型有密切关系,不同地貌类型控制着不同土壤类型分布。因此,土壤类型与植被类型分布存在相关性。从微观结构上可将土壤分为砂质土、黏质土、壤土 3 种类型。3 种土壤类型土壤含水率与毛细上升高度存在明显差别,对植被生长发育所需的水分条件有直接影响。一般来说,砂质土毛细上升高度小,持水能力差,在相同的条件下比壤土区更不适宜依赖地下水的生态系统。因此,土壤类型可以作为识别和评价依赖地下水生态系统(GDEs)的指标。本次土壤类型数据来源于 1:5 万土壤类型图数据库,由中国科学院南京土壤研究所于 2014 年建成,该数据集包括土壤定名和表层 1 m 土壤的沙粒、粉粒、黏粒的比例,海流兔河流域涉及内



内蒙古自治区乌审旗和陕西榆林地区 1:5 万土壤类型数据。

### 3.1.3 植被覆盖度

干旱半干旱区,地下水位埋深与植被覆盖度都是判断植被是否依赖地下水的重要依据。尽管两者在特定条件下(如地下水浅埋带)具有相关关系(张俊等,2013),但这种相关性并不是对所有地区都适用。如前人研究发现,在海流兔河流域,植被覆盖度与地下水位埋深呈相关关系,可近似用负指数函数描述,即植被覆盖度随着地下水深度的增加而减小。但当地下水位埋深超过 10 m 时,植被的覆盖度和多样性均显著降低,不再与地下水密切相关(吕京京,2013)。但对于根系比较深的依赖地下水的植物,可能存在地下水埋深大,但依然依赖地下水的情况,因此国内外很多学者将旱季植被覆盖度高的地区定义为潜在依赖地下水的地区(Eamus et al., 2006; Gou et al., 2015)。植被指数反映了植被的状况,同植被覆盖度有良好的相关关系。通过计算 NDVI(归一化植被指数),建立 NDVI 同植被覆盖度之间关系的经验公式,是计算植被覆盖度常用的方法(张志强等,2021)。

本次研究采用中等分辨率的 MODIS NDVI 数据,其时间分辨率为 16 d,空间分辨率是 250 m。该数据由地球观测系统(EOS)计划的网站免费发布(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>),对已有的植被指数进行修正,不仅减少了其他因素的干扰、增强了系统对植被的敏感性,而且使用新的合成算法减小了几何因素对植被指数的影响。同时,应用分子散射、臭氧吸收、气溶胶修正等算法生成 NDVI 的格点资料(Hute et al., 1996; King and Greengrove, 1999)。目前,MODIS NDVI 数据已被广泛应用于研究区域生态环境的变化(Jin and Sader, 2005; Knight et al., 2006)。本次采用的是植物生长最为旺盛的 6 月 NDVI 数据。

### 3.1.4 蒸散发(ET)

蒸散发是指地面上植物的叶面散发(蒸腾)与植株间土壤蒸发量之和。空间上,蒸散发高值分布的区域,一般为水位埋深浅,潜水蒸发、植被蒸腾及土面蒸发强的地区。因此,蒸散发高值区是依赖地下水的植被可能分布的地区(特别是在气候比较干旱的季节),可以将蒸散发作为评价依赖地下水生态

系统(GDEs)的指标。

本次研究采用美国 Terra 卫星中分辨率成像光谱辐射仪(MODIS)数据,利用表面能量平衡模型(SEBS 模型)计算蒸散量,前人也利用该原理计算过海流兔河流域的蒸散量(崔旭东等,2011;张雨航等,2012)。SEBS 模型中涉及到的 MODIS 影像产品主要是 MOD09、MOD11,其中 MOD09 是地表反射率产品,空间分辨率为 500 m;MOD11 是地表比辐射率与地表温度产品,空间分辨率为 1000 m。在研究过程中,为了保持数据的一致性,对 MODIS 地表反射率数据和地表比辐射率与地表温度数据进行了投影变换与重采样,地理坐标采用 ENVI 环境中 Geographic Lat/Lon,像元大小设定为 0.005 b,分辨率约 500 m(王晓勇等,2014)。气象、土壤水和地下水的监测表明,7 月是当地最为干旱的季节,植被对地下水的依赖程度最高(Yin et al., 2015)。因此,本次数据计算使用 7 月份的产品。

### 3.2 综合评价

综合评价前,首先利用 ArcGIS 软件,将水位埋深、土壤类型图层通过格式转换工具,转换为栅格数据,然后将各指标栅格图层空间分辨率统一为 250 m,并重新投影至统一的坐标系下。

随后对各个指标进行量化分级。上述 4 个评价指标中,除土壤类型外,均可进行量化分级,土壤类型根据持水能力划分等级(表 1)。利用 ArcGIS 软件,对各图层进行评分赋值,生成包含所需评价指标的单要素等级分区图层。

最后通过栅格计算器,将单要素图层按照综合指数计算公式或模型,经过图层叠加计算后生产综合评价图层。由于各个评价指标分属不同圈层,对依赖性程度均有相对独立的影响,因此,本次评价采用等权重确定。在栅格计算器中,将 4 个评分赋值后的栅格图层进行叠加计算,按照算术平均值公式计算。根据计算出的评价指数,按照表 2 划分依赖程度级别,从而生成综合评价图层。需要说明的是,依赖性程度评价目的是区分依赖程度的相对大小,等级划分的综合评价指数阈值具有相对性,可根据实际评价目的或评价区特点进行调整。

为了进一步验证评价结果的可靠性与不确定性,对评价结果进行敏感性分析,定量分析每个评价指标对评价结果的影响。根据实地调查数据和

表 1 依赖地下水植被 (GDEs) 评价指标及其量化分级

Table 1 Indices and their classification of groundwater dependent ecosystems assessments

依赖程度分级 评价指标	非常低 I (1分)	低 II (2分)	中等 III (3分)	高 IV (4分)	非常高 V (5分)	备注
水位埋深/m	>15 m	10~15 m	5~10 m	2~5 m	<2 m	依据常见水位埋深分区, 结合植被与地下水位关系确定
土壤类型	1	2	3	4	5	根据土壤中砂质和黏质含量的高低, 将土壤按持水能力由低到高划分
植被覆盖度/%	<10%	10%~30%	30%~45%	45%~60%	>60%	依据常用植被覆盖度划分标准
蒸散发ET/(mm/d)	<1.2	1.2~2.1	2.1~3.0	3.0~4.9	>4.9	根据数据统计特征, 按照自然断点法 (Natural Breaks-Jenks) 划分

表 2 植被对地下水依赖程度综合指数评价等级划分

Table 2 Index classification of comprehensive groundwater dependent ecosystems assessments

评价指数	依赖程度分级				
	I (非常低)	II (低)	III (中等)	IV (高)	V (非常高)
R	$R \leq 1.75$	$1.75 < R \leq 2.5$	$2.5 < R \leq 3.25$	$3.25 < R \leq 4.0$	$R > 4.0$

前人的相关评价结果, 确定点尺度上植被对地下水的依赖程度, 与本方法评价的结果进行对比, 验证评价指标体系及评价结果的合理性和准确性。

## 4 结果分析

### 4.1 单指标量化分级与评价

#### 4.1.1 水位埋深

根据前期研究结果, 陕北风沙滩地区维持生态安全的地下水位埋深为 1.5~5 m (杨泽元等, 2006)。在海流兔河流域, 当地下水位埋深小于 2 m 时, 优势植被以芦苇、芨芨草等湿生植被为主, 植被长势较好, 植被对地下水依赖程度高, 属于一级敏感区; 当地下水位埋深在 2~5 m 时, 优势植被以旱柳、沙柳等为主, 植被对地下水依赖程度较高, 属于二级敏感区; 当地下水位埋深在 5~10 m 时, 植被以沙蒿、柠条等沙生植被为主, 局部零散分布有以杨树为主的乔木, 属于非敏感区 (金晓媚等, 2013)。在毛乌素沙漠地区, 当地下水位埋深在 10~15 m 时, 属于沙地旱生植被生态区, 只适宜一些特殊的沙生植被生长, 如油蒿、杨柴等, 其生长主要靠降雨维系 (侯光才和赵振宏, 2017)。但受地形起伏影响, 在地形低洼处, 地下水位埋深相对较浅的局部区域可能存在依赖地下水的植被。而地下水位埋深 >15 m 的区域, 主要为靠灌溉生存的农田区, 原生旱生植被与地下水几乎无关 (张茂省和党学亚, 2014)。因此将水位埋深栅格图层按照 >15 m、10~15 m、5~10 m、2~5 m、<2 m 的等级进行分级, 并按 I—V 级评分赋值, 得到水位埋深等级分区图 (图 2)。

#### 4.1.2 土壤类型

按照《中国土壤分类与代码》(GB/T 17296—2009), 乌审旗包括 52 种土壤类型, 榆林地区包括 115 种土壤类型。考虑植被生长发育所需的土壤水分条件, 根据土壤中砂质和黏质含量的高低, 将土壤按持水能力由低到高划分为 5 类, 并直接按评分赋值分级 (表 3)。砂质含量越高, 持水能力越小, 水分条件越差, 植被以旱生沙生植被为主, 对地下水的依赖程度越低。黏质含量越高, 持水能力越强, 水分条件越好, 植被以湿生喜水植被为主, 对地下水的依赖程度越高。按照土壤类型图进行评分赋值后得到土壤类型等级分区图 (图 3)。

#### 4.1.3 植被覆盖度

中国西北地区, 6 月份植被已经完成新枝生长, 降雨量还未达到年内丰沛期, 与低湿地喜水植被等依赖地下水植被覆盖度相比较, 旱生沙生等不依赖地下水的植被覆盖度较低, 二者覆盖度区别度明显, 有利于依赖地下水生态系统 (GDEs) 的识别和评价。因此, 挑选 2013 年 6 月的 NDVI 数据计算植被覆盖度。利用常用 NDVI 转换植被盖度计算公式为:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \quad (1)$$

式中,  $NDVI_{MAX}$  为研究区最大 NDVI 值, 代表植被完全覆盖地表。  $NDVI_{MIN}$  为研究区裸土的最小 NDVI 值。代表地表没有植被。

参考干旱半干旱区植被指数时空分布研究 (张绪财等, 2019), 同时结合本文研究区实际情况, 植

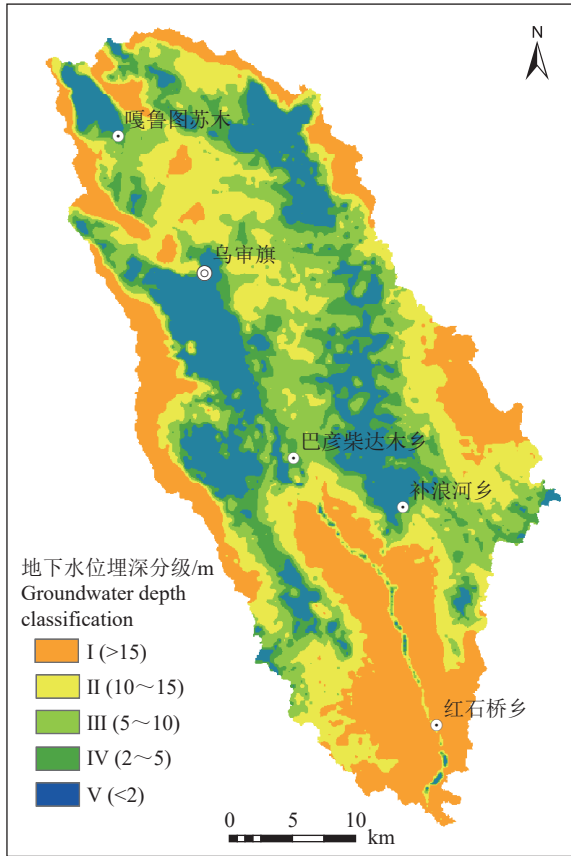


图 2 海流兔河流域水位埋深等级分区图  
Fig.2 Classification of depth to water table in the Hailiutu River catchment

被覆盖度分级标准为: 裸地 (<10%)、低覆盖 (10%~30%)、中低覆盖 (30%~45%)、中覆盖 (45%~60%) 和高覆盖 (>60%)。并按 I—V 级进行评分赋值, 得到植被覆盖度等级分区图 (图 4)。

4.1.4 蒸散发

获得蒸散发数据后, 根据数据统计特征, 利用 ArcGIS 软件中的自然断点法 (Natural Breaks-Jenks) 进行等级划分, 并按 I—V 级进行评分赋值, 得到蒸散发等级分区图 (图 5)。自然断点法运用了聚类的思维, 原则是使数据每一组内部的相似性最

大, 而外部组与组之间的相异性最大。通过迭代每个分组组合, 然后计算各分组中元素的均值与观测值之间的偏差平方之和, 用偏差平方之和的大小来比较分类的好坏, 从而确定最优的分类结果。其计算步骤如下:

(1) 计算数组“平均值的偏差平方和”(SDAM)。

(2) 迭代每个范围组合, 计算“类别均值的偏差平方和”(SDCM\_ALL)。

(3) 计算“方差拟合优度”(GVF), 即:  $GVF = (SDAM - SDCM) / SDAM$ 。GVF 的值是在 0~1, 1 表示拟合极好, 0 表示拟合极差。

另外, 当看数据分布特征时, 可以比较明显的发现断裂之处, 这些断裂之处和 Natural Breaks 方法算出来也是一致的。因而这种分类法很“自然”。

4.2 综合指数评价

根据表 2 划分依赖程度级别, 得到海流兔河流域植被对地下水依赖程度分区图 (图 6)。结果表明, 依赖程度高的地区主要分布在流域中上游地势低洼带及北部湖盆滩地区内。由于这些区域地势平缓, 地下水流动滞缓, 区域地下水位埋深小, 且大面积分布有黏质含量较高的沙潮土、沙质沼泽土, 土壤持水能力强, 依赖地下水生长的低湿地草本及旱柳等乔木分布密度较大, 因此该区域植被对地下水的依赖程度高。海流兔河下游受河谷深切影响, 加强了地下水的排泄作用, 部分含水层呈疏干状态, 地下水位埋深较大, 植被根系难以到达地下水表面, 植被很难利用地下水, 因此该区域植被对地下水的依赖程度低。而河谷区及河岸带, 地下水位埋深小, 植被覆盖度大, 植被对地下水的依赖程度较高。

根据植被对地下水依赖程度评价结果图统计得出, 该流域范围内, 依赖地下水程度非常高的地区面积占比为 0.9%, 高的为 9.3%, 中等的为 20.2%,

表 3 研究区土壤类型分级

Table 3 Classification of soil type in the study area

等级	赋值评分	主要土壤类型
I (非常低)	1	侵蚀黄砂土、固定半固定风砂土、沙质草甸风砂土、多砾绵砂土等
II (低)	2	黄绵土、绵砂土、轻沙泥田等
III (中等)	3	沙化栗钙土、变质栗钙土、料姜硬红土等
IV (高)	4	侵蚀黄土、沙黑炉土、沙盖红黄土等
V (非常高)	5	沙潮土、沙质沼泽土、轻度马尿盐化草甸土、夹沙壤质灰淤土等



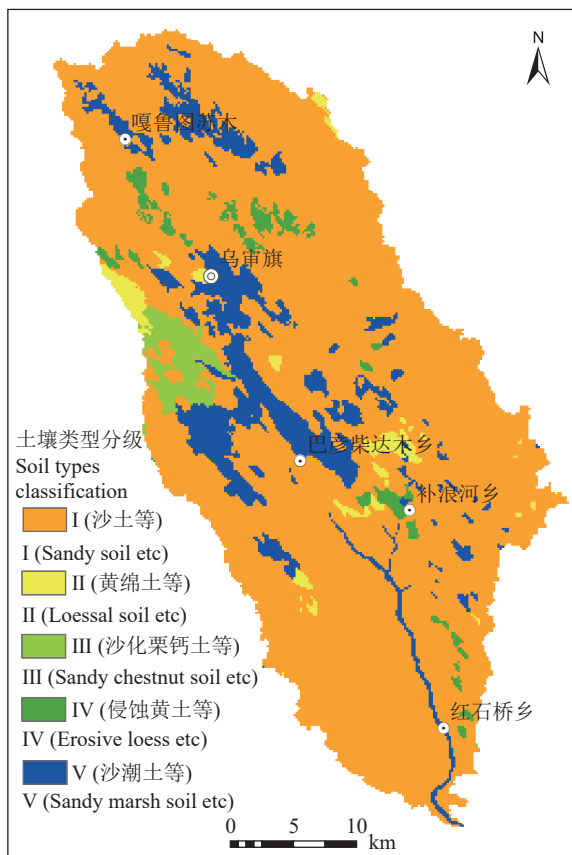


图3 海流兔河流域土壤类型等级分区图

Fig.3 Classification of soil types in the Hailiutu River Catchment

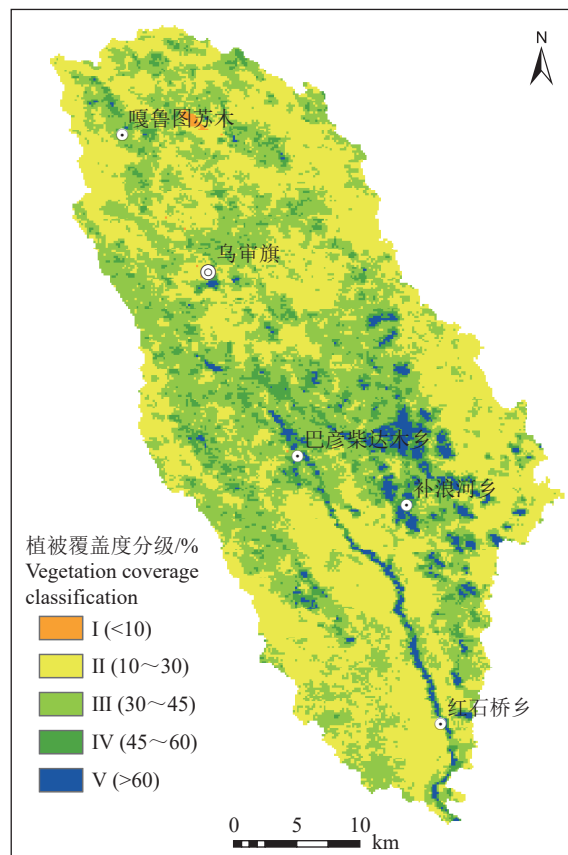


图4 海流兔河流域植被覆盖度等级分区图

Fig.4 Classification of vegetation coverage in the Hailiutu River Catchment

低的为 48.3%，非常低为 21.3%。评价结果可看出研究区内依赖地下水的生态系统面积占比仅有 10%。前人研究也表明，地处于干旱半干旱区的鄂尔多斯高原，植被分布与长势主要受降雨影响(房世波等, 2009)。研究区内也只有乔木和部分灌木依赖地下水(侯光才和赵振宏, 2017)，而这些依赖地下水的植被，在雨季也主要是依赖降水形成的土壤水，对土壤水的利用可占总用水量的 80% 以上(Yin et al., 2015)。

## 5 评价方法合理性分析及结果验证

### 5.1 评价方法合理性分析

本次采用因子剔除法进行敏感度分析，评价每个指标对综合评价指数的影响。具体方法如下：

(1) 基于全部指标计算的综合指数，根据评价结果统计各依赖程度等级所在区域分布面积占流域总面积的百分比( $U_i$ )。

(2) 剔除某个评价指标后，重新计算综合指数，统计各依赖程度等级所在区域分布面积占流域总面积的百分比( $V_i$ )。

(3) 根据公式(2)定义各评价指标的敏感度( $S$ )，量化计算出剔除某个指标的评价结果( $V_i$ )与采用全部指标的评价结果( $U_i$ )的差异性，以此评价各指标的敏感度。 $S$  越大，表明剔除该评价指标后，各依赖程度等级空间分布变化越大，该指标的敏感度越高。

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - U_i)^2 \quad (2)$$

式中， $V$  代表剔除一个评价指标后计算的综合评价指数； $U$  代表利用全部指标计算的综合评价指数； $i$  代表依赖程度等级； $n$  代表依赖程度等级个数，本次评价中， $n=5$ ； $V_i$  代表剔除一个指标后，各依赖程度等级所在区域的面积占比； $U_i$  代表利用全部指标评价结果中，各依赖程度等级所在区域的面积占比。

根据计算结果，敏感度排序为土壤类型>水位



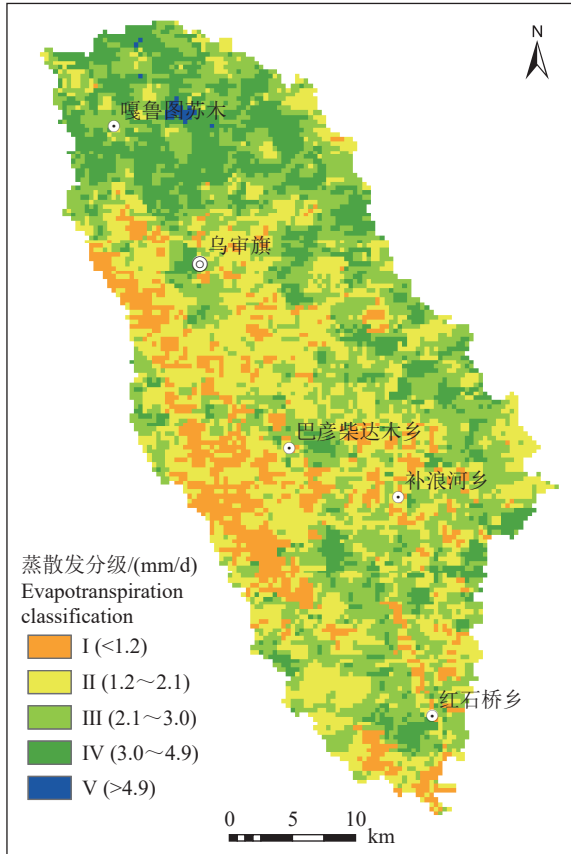


图 5 海流兔河流域蒸散发等级分区图  
Fig.5 Classification of evapotranspiration in the Hailiutu River Catchment

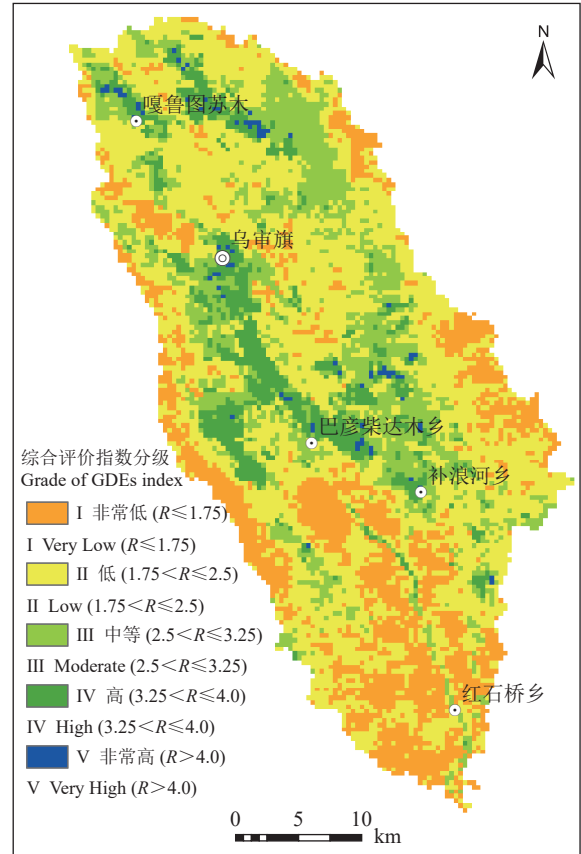


图 6 海流兔河流域植被对地下水依赖程度分区图  
Fig.6 Degree of groundwater dependent ecosystems in the Hailiutu River Catchment

埋深>蒸散发>植被覆盖度(图 7)。

同时每剔除一个评价指标图层后,生成新的依赖程度分区图(图 8)。对比综合评价分区图也可看出,当剔除土壤类型指标图层后,各依赖程度等级空间分布变化最为显著,说明土壤类型指标的敏感度最高。水位埋深次之,而植被覆盖度对评价结果影响最小,敏感度最低。此外,剔除土壤类型和蒸散发两个因子之后,利用 ArcGIS 中的 Band collection statistics 模块,对水位埋深和植被覆盖度图层进行相关性分析,得出相关系数为 0.294,表明在整个流域上两者的空间相关性不强。

土壤类型在一定程度上与地貌条件、水位埋深及水分条件都有一定关系,反映多重因素对植被的综合影响,因此,土壤类型指标的敏感度最高,符合一般认识规律。水位埋深指标的敏感度次之,说明水位埋深是植被依赖地下水程度的最重要和最直接因素。采用因子剔除敏感度分析结果表明,剔除

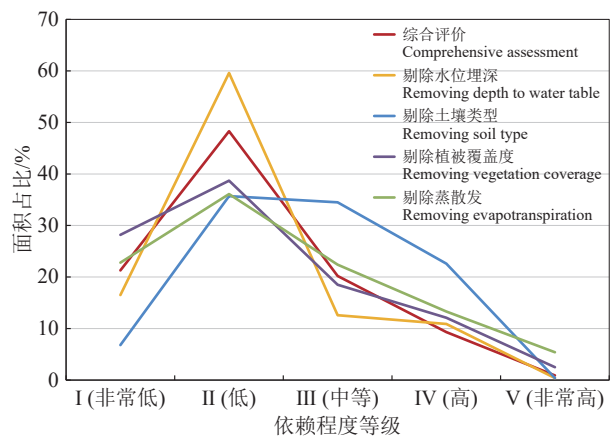


图 7 评价敏感性分析结果  
Fig.7 Sensitivity analysis of groundwater dependent ecosystems assessment

每一个评价指标都会对综合评价指数产生影响,采用 4 个评价指标进行综合评价更能全面准确地评价植被对地下水依赖程度。

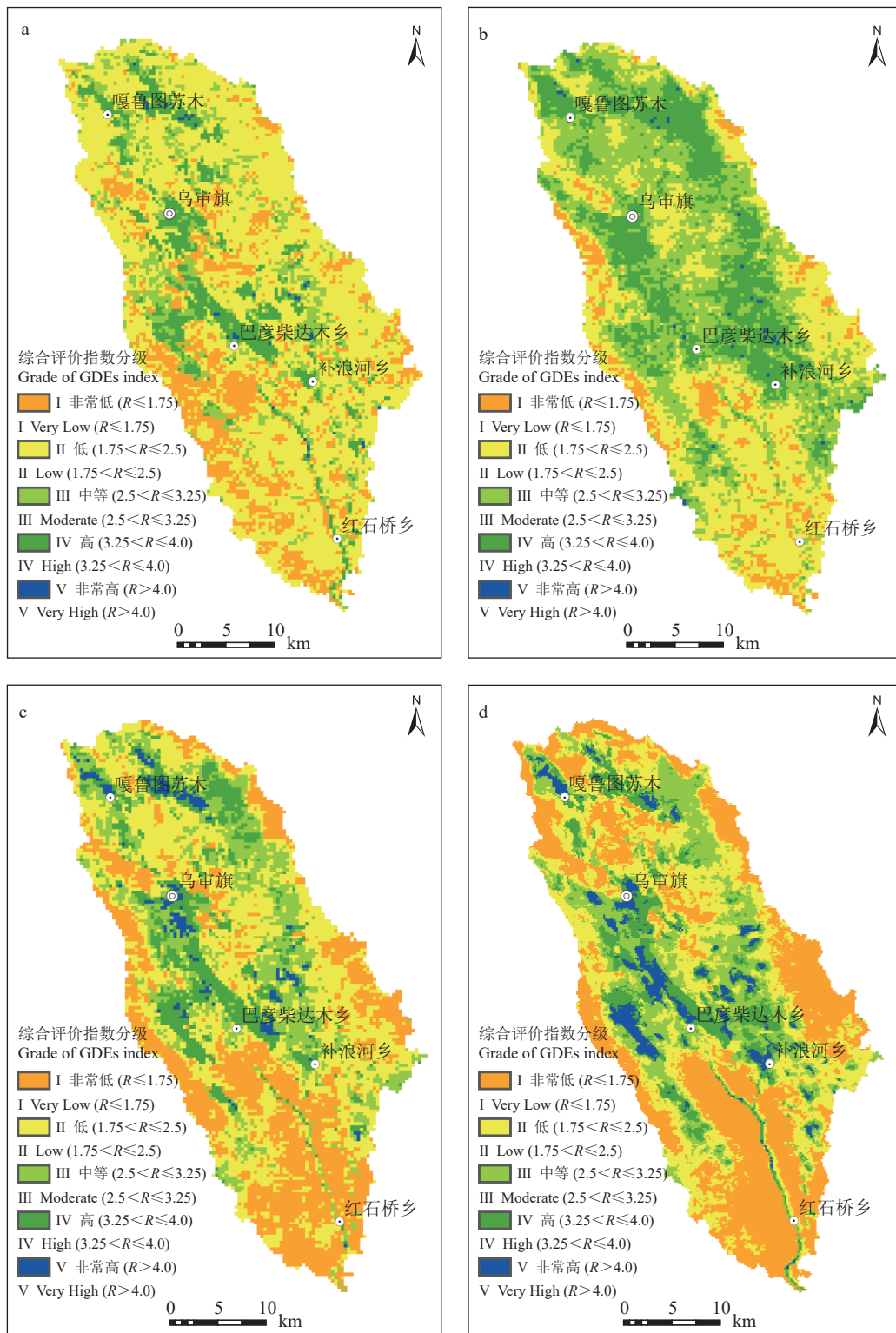


图8 各指标图层评价敏感性分析结果

a—剔除水位埋深; b—剔除土壤类型; c—剔除植被覆盖度; d—剔除蒸散发

Fig.8 Groundwater dependent ecosystems assessment by removing one index

a—Removing depth to water table; b—Removing soil type; c—Removing vegetation coverage; d—Removing evapotranspiration

## 5.2 评价结果对比验证

本次验证主要是根据前人已开展的工作, 在用其他方法确定依赖地下水的生态系统的地区开展对比。数模模拟和同位素分割研究表明, 位于流域内的榆林市榆阳区补浪河乡那泥滩村属于植被对地下水的高依赖区, 5—7 月间旱柳耗水的 50% 以上来自地下水 (Yin et al., 2015)。本次评价结果表明, 这个地区也属于依赖程度高值区。

相关研究也表明, 在毛乌素沙漠地区, 水位埋深小于 1 m 时, 可以观测到明显的昼夜波动, 这说明植被对地下水具有一定的依赖性 (Jia et al., 2021)。根据本次地下水埋深单要素图层和综合评价结果可看出, 地下水位埋深 < 2 m 的区域几乎都属于植被对地下水的依赖区, 这也与前人研究地下水埋深与植被的关系所得出的结论基本一致, 即地下水浅埋区植被物种丰富、生物量大 (朱丽等, 2017)。对比研究区北部宝寨淖尔的相关研究也表明, 湖盆滩地区存在依赖地下水的沙柳, 当地下水水位埋深小于 1.5 m 时, 植物利用地下水作为水源 (赵明, 2021)。根据本次评价结果, 在研究区北部, 也存在植被对地下水依赖程度高的区域。

从以上的对比以及结合综合评价结果可以看出, 评价结果比仅仅依据地下水位埋深或植被覆盖度的评价更为精细和可靠。如前人利用 NDVI 与地下水位埋深的关系判定地下水位埋深在 10 m 以内植物都有可能与地下水有关系 (Lü et al., 2013), 按此推断流域内依赖地下水的植物分布区要非常大。但从本次的评价结果来看, 有可能这些地区并非是非依赖地下水的植被分布区, 因为 NDVI 高值区, 不一定代表是依赖地下水的生态系统, 通过野外调查发现在地下水位埋深比较大的梁地, 沙蒿的覆盖度也非常高, 推断降水是其主要的水分来源, 因为前人的研究表明, 降水是海流兔河流域 NDVI 最大的影响因素 (雷磊等, 2015)。本次研究的结果表明, 流域内依赖地下水的植被所占的面积相对较小, 这说明植被主要是利用由降水补给形成的土壤水, 这与前人的研究结果也是一致的。

## 6 结论

(1) 提出了一种可以评价区域植被对地下水依赖程度的新方法, 该方法通过采用选取地下水位埋

深、土壤类型、干旱期蒸散发、植被覆盖度等涵盖水、土、气、生 4 个圈层的评价指标开展依赖地下水的程度和区域分布的综合评价。评价结果的验证表明, 该方法比仅仅依据地下水位埋深或植被覆盖度等单要素的评价更为精细和可靠。

(2) 以鄂尔多斯高原海流兔河流域为示范区开展了评价, 结果表明依赖地下水程度非常高和高以上的地区面积占比为 10.2%, 中等的为 20.2%, 低和非常低的为 69.6%。虽然依赖地下水的生态系统所占面积不大, 但是由于地下水提供了额外的水源, 生物多样性最为丰富, 具有重要的生态意义。

(3) 评价结果在空间上明确了依赖地下水生态系统的范围, 对于地下水的高依赖区不宜大规模地开发利用地下水, 避免水位下降导致的生态退化, 评价结果对于水资源合理开发利用和生态保护修复具有重要的指导意义。

## References

- Bertrand G, Goldscheider N, Gobat J M, Hunkeler D. 2012. Review: from multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems[J]. *Hydrogeology Journal*, 20: 5–25.
- Brown J, Bach L, Aldous A, Wyers A, DeGagné J. 2011. Groundwater-dependent ecosystems in Oregon: An assessment of their distribution and associated threats[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(2): 97–102.
- Cui Xudong, Tao Zhengping, Zhang Jun, Wang Xiaoyong. 2011. Regional evapotranspiration calculation using SEBS method and its reliability analysis: A case study of Hailu River in Ordos Plateau[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 4(6): 10–12 (in Chinese with English abstract).
- Dang Xueya, Lu Na, Gu Xiaofan, Jin Xiaomei. 2019. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Eamus D, Froend R. 2006. Groundwater-dependent ecosystems: The where, what and why of GDEs[J]. *Australian Journal of Botany*, 54(2): 91–96.
- Eamus D, Froend R, Loomes R, Hose G, Murray B. 2006. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater-dependent vegetation[J]. *Australian Journal of Botany*, 54(2): 97–114.
- Eamus D, Zolfaghar S, Villalobos-Vega R, Cleverly J, Huete A. 2015. Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,



- 19(10): 4229–4256.
- Fang Shibo, Tan Kaiyan, Liu Jiandong, Zhang Xinshi. 2009. Vegetation cover and its relationship with environmental factors at different scales in the Ordos region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(1): 25–33 (in Chinese with English abstract).
- Glanville K, Ryan T, Tomlinson M, Muriuki G, Ronan M, Pollett A. 2016. A method for catchment scale mapping of groundwater-dependent ecosystems to support natural resource management (Queensland, Australia)[J]. *Environmental Management*, 57(2): 432–449.
- Gou S, Gonzales S, Miller G R. 2015. Mapping potential groundwater-dependent ecosystems for sustainable management[J]. *Ground Water*, 53(1): 99–110.
- Hou Guangcai, Zhao Zhenhong. 2017. *Groundwater and Ecological Environment of Ordos Energy Base*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hou Guangcai, Zhang Maosheng, Wang Yonghe, Zhao Zhenhong, Liang Yongping, Tao Zhengping, Yang Yuncheng, Li Qing, Yin Lihe, Wang Xiaoyong, Wang Dong, Li Ying. 2007. Groundwater resources of the Ordos Basin and its development and utilization[J]. *Northwestern Geology*, 40(1): 7–34 (in Chinese with English abstract).
- Howard J, Merrifield M, Maya M A. 2010. Mapping groundwater dependent ecosystems in California[J]. *Plos One*, 5(6): e11249.
- Hute A, Justice C, Leewen W V. 1996. MODIS Vegetation Index (MODIS13) Algorithm Theoretical Basis Document[M]. New York: NASA Press.
- Ionel D L, José L A, Loretto A. 2022. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile[J]. *Science of the Total Environment*, 816: 1–14.
- Jia W H, Yin L H, Zhang M S, Zhang X X, Zhang J, Tang X P, Dong J Q. 2021. Quantification of groundwater recharge and evapotranspiration along a semi-arid wetland transect using diurnal water table fluctuations[J]. *Journal of Arid Land*, 13(5): 455–469.
- Jin Xiaomei, Zhang Qiang, Yang Chunjie. 2013. Research on vegetation distribution and its relationship with topography and groundwater depth in the Hailiutu River Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 227–233 (in Chinese with English abstract).
- Jin S M, Sader S A. 2005. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects[J]. *Remote Sensing and Environment*, 99(4): 462–470.
- Knight J F, Lunetta R S, Ediriwickrema J, Khorram S. 2006. Regional scale land-cover characterization using MODIS-NDVI 250 m multi-temporal imagery: A phenology based approach[J]. *Mapping Sciences & Remote Sensing*, 43(1): 1–23.
- King M D, Gremenstone R. 1999. *EOS Reference Handbook: A Guide to NASA's Earth Science Enterprise and the Earth Observing System*[M]. Greenbelt: NASA/GSFC.
- Lei Lei, Wang Shuangming, Huang Jinting, Pan Guixing. 2015. The relationship between the vegetation coverage of growing season and climate factors of Hai Liutu River basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 45(2): 327–332 (in Chinese with English abstract).
- Liu C, Liu H, Yu Y, Zhao W, Yetemen O. 2021. Mapping groundwater-dependent ecosystems in arid Central Asia: Implications for controlling regional land degradation[J]. *Science of the Total Environment*, 797(10): 149027.
- Liu Hu, Zhao Wenzhi, Li Zhongkai. 2018. Ecohydrology of groundwater dependent ecosystems: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 33(7): 741–750 (in Chinese with English abstract).
- Lü J J, Wang X S, Zhou Y X, Qian K Z, Wan L, Eamus D, Tao Z P. 2013. Groundwater-dependent distribution of vegetation in Hailiutu River catchment, a semi-arid region in China[J]. *Ecohydrology*, 6(1): 142–149.
- Lü Jingjing. 2013. *Effect of Groundwater on Vegetation Index in Hailiutu River Catchment*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–127 (in Chinese with English abstract).
- Münch Z, Conrad J. 2007. Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa[J]. *Hydrogeology Journal*, 15(1): 19–28.
- Purvis K, Wright V P. 2009. Calcretes related to phreatophytic vegetation from the Middle Triassic Otter Sandstone of South West England[J]. *Sedimentology*, 38(3): 539–551.
- Song G, Huang J T, Ning B H, Wang J W, Zeng L. 2021. Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of western China[J]. *China Geology*, 4(3): 527–535.
- Wang Z, Wang L J, Shen J M, Nie Z L, Meng L Q, Cao L, Wei S B, Zeng X F. 2021. Groundwater characteristics and climate and ecological evolution in the Badain Jaran Desert in the southwest Mongolian Plateau[J]. *China Geology*, 4(3): 421–432.
- Wang Xiaoyong, Yin Lihe, Dai Zebing, Gao Feng, Yang Zhong. 2014. A study of evapotranspiration in Hailiutu River Basin, Ordos[J]. *Northwestern Geology*, 47(1): 244–248 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeyuan, Wang Wenke, Huang Jinting, Duan Lei. 2006. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 34(8): 67–74 (in Chinese with English abstract).
- Yin L H, Xu D D, Jia W H, Zhang X X, Zhang J. 2021. Responses of phreatophyte transpiration to falling water table in hyper-arid and arid regions, Northwest China[J]. *China Geology*, 4(3): 410–420.
- Yin L H, Zhou Y X, Huang J T, Wenninger J, Zhang E Y, Hou G C, Dong J Q. 2015. Interaction between groundwater and trees in an arid site: Potential impacts of climate variation and groundwater abstraction on trees[J]. *Journal of Hydrology*, 528: 435–448.
- Zhang Jun, Zhao Zhenhong, Ma Hongyun, Wang Dong. 2014. Study on relationship between groundwater and vegetation in arid and semiarid region based on survival regions of plant species[J].

- Research of Soil and Water Conservation, 21(5): 240–243 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Zhao Zhenhong, Wang Dong, Ma Hongyun, Guo Li. 2013. The quantitative relationship between vegetations and groundwater depth in shallow groundwater area of Ordos Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 27(4): 141–145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Dang Xueya. 2014. Water Resources and Environmental Problems in Arid and Semi-arid Areas: A Case Study of Yulin Energy and Chemical Industry Base in Northern Shaanxi Province [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang Xucai, Jin Xiaomei, Zhu Xiaoqian, Zhang Jing. 2019. Spatial-temporal characteristics of vegetation index and its impact factors in the Golmud River Basin[J]. Geoscience, 33(2): 461–468 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuhang, Wang Xiaolin, Hu Guangcheng. 2012. Evapotranspiration estimation of Hailiutu River Basin based on MODIS data[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 37(2): 375–380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, Yu Jintao, Li Yang. 2021. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000–2019[J]. Resources Science, 43(4): 849–858 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming. 2021. Interaction Mechanism between Subsurface Hydrological Process and Vegetation Ecology in Mu Us Sandy Land[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Shenghui, Liu Tingxi, Duan Limin, Ji Ru, Zhang Chunyu. 2021. Hydrogeological characteristics of underwater aquifer in the Hailiutu River Basin[J]. Journal of Desert Research, 41(5): 103–110 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Li, Xu Guiqing, Li Yan, Tang Lisong, Niu Ziru. 2017. Relationships among plant species diversity, biomass and the groundwater table in the Hailiutu River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 37(6): 1912–1921 (in Chinese with English abstract).
- 崔旭东, 陶正平, 张俊, 王晓勇. 2011. 基于 SEBS 方法的蒸散量计算及可靠度分析——以鄂尔多斯高原海流兔河为例[J]. 勘察科学技术, 4(6): 10–12.
- 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚. 2019. 柴达木盆地生态植被的地下水  
 阈值[J]. 水文地质工程地质, 46(3): 1–7.
- 房世波, 谭凯炎, 刘建栋, 张新时. 2009. 鄂尔多斯植被盖度分布与环境因素的关系[J]. 植物生态学报, 33(1): 25–33.
- 侯光才, 赵振宏. 2017. 鄂尔多斯能源基地地下水及生态环境[M]. 北京: 地质出版社.
- 侯光才, 张茂省, 王永和, 赵振宏, 梁永平, 陶正平, 杨郦城, 李清, 尹立河, 王晓勇, 王冬, 李璞. 2007. 鄂尔多斯盆地地下水资源与开发利用[J]. 西北地质, 40(1): 7–34.
- 金晓媚, 张强, 杨春杰. 2013. 海流兔河流域植被分布与地形地貌及地下水位关系研究[J]. 地学前缘, 20(3): 227–233.
- 雷磊, 王双明, 黄金廷, 潘桂行. 2015. 海流兔河流域植被生长季的覆盖度与气候因子关系研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 45(2): 327–332.
- 刘鹤, 赵文智, 李中恺. 2018. 地下水依赖型生态系统生态水文研究进展[J]. 地球科学进展, 33(7): 741–750.
- 吕京京. 2013. 海流兔河流域地下水对植被指数分布的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–127.
- 王晓勇, 尹立河, 戴泽兵, 高峰, 杨忠. 2014. 鄂尔多斯盆地海流兔河流域地表蒸散发研究[J]. 西北地质, 47(1): 244–248.
- 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 段磊. 2006. 陕北风沙滩地区生态安全地下水埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 34(8): 67–74.
- 张俊, 赵振宏, 马洪云, 王冬. 2014. 基于物种生存域的干旱半干旱区地下水与植被关系研究[J]. 水土保持研究, 21(5): 240–243.
- 张俊, 赵振宏, 王冬, 马洪云, 郭莉. 2013. 鄂尔多斯高原地下水浅埋区植被与地下水埋深关系[J]. 干旱区资源与环境, 27(4): 141–145.
- 张茂省, 党学亚. 2014. 干旱半干旱地区水资源及其环境问题: 陕北榆林能源化工基地例析[M]. 北京: 科学出版社.
- 张绪财, 金晓媚, 朱晓倩, 张京. 2019. 格尔木河流域植被指数时空分布及其影响因素研究[J]. 现代地质, 33(2): 461–468.
- 张雨航, 王晓林, 胡光成. 2012. 基于 MODIS 数据的海流兔河流域蒸散量的计算[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(2): 375–380.
- 张志强, 刘欢, 左其亭, 于锦涛, 李阳. 2021. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 43(4): 849–858.
- 赵明. 2021. 毛乌素沙地植被生态与地下水文过程互馈机制研究[D]. 西安: 长安大学, 1–165.
- 周生辉, 刘廷玺, 段利民, 冀如, 张春雨. 2021. 毛乌素沙地海流兔河流域水文地质特征[J]. 中国沙漠, 41(5): 103–110.
- 朱丽, 徐贵青, 李彦, 唐立松, 牛子儒. 2017. 物种多样性及生物量与地下水位的关系——以海流兔河流域为例[J]. 生态学报, 37(6): 1912–1921.

## 附中文参考文献

- 崔旭东, 陶正平, 张俊, 王晓勇. 2011. 基于 SEBS 方法的蒸散量计算及可靠度分析——以鄂尔多斯高原海流兔河为例[J]. 勘察科学技术, 4(6): 10–12.
- 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 金晓媚. 2019. 柴达木盆地生态植被的地下水