

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.017

洞庭湖环湖区地下水依赖型生态系统的综合评价

王 允^{1,2}, 王思翔^{1,3}, 刘亚磊^{1,2}, 王 清^{1,2}

WANG Yun^{1,2}, WANG Si-Xiang^{1,3}, LIU Ya-Lei^{1,2}, WANG Qing^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质学会中南地区地质安全风险监测预警与防控技术创新基地, 湖北 武汉 430205; 3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Geological Safety Risk Monitoring, Early Warning and Prevention and Control Technology Innovation Base in the Central and Southern Regions of the Geological Society of China, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Institute of Geological Survey,

China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 为了构建适用于洞庭湖环湖区地下水依赖型生态系统(Groundwater Dependent Ecosystems, GDEs)的综合评价指标体系, 本文采用栅格叠加法, 通过对多个生态指标的评分计算, 建立了一套包括地下水位埋深、植被覆盖度、蒸散发、地形湿度指数及土壤有机碳含量等因子的评价体系。各因子的评分结果在 GIS 平台上进行空间叠加, 得到洞庭湖区域 GDEs 的综合评价指数, 并据此划分不同的依赖程度等级。研究结果表明, 洞庭湖环湖区域 GDEs 的依赖程度差异显著, 其中高度依赖地下水的区域主要分布在湖泊北部和西南部的湿地和沼泽地, 覆盖率为 67.78%。经成功率曲线法检验, 评价结果合理, 可为洞庭湖地下水资源的可持续管理及生态保护提供科学依据, 同时也为其他湿地生态系统的评价和保护提供参考。

关键词: 地下水依赖型生态系统; 综合评价; GIS; 洞庭湖环湖区

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0207-09

Wang Y, Wang S X, Liu Y L and Wang Q. 2025. Comprehensive Evaluation of Groundwater Dependent Ecosystems in the Surrounding Area of Dongting Lake. *South China Geology*, 41(1): 207–215.

Abstract: To construct a comprehensive evaluation index system suitable for Groundwater-Dependent Ecosystems (GDEs) in the Dongting Lake surrounding area, this study adopts a grid overlay method to establish a set of evaluation systems including factors such as groundwater depth, vegetation cover, evapotranspiration, topographic wetness index, and soil organic carbon content, etc., by scoring several ecological indicators. These indicators are spatially integrated on a GIS platform to generate an integrated evaluation index for GDEs in the Dongting Lake region. This enables the classification of varying degrees of groundwater dependency. The results show significant spatial heterogeneity in groundwater dependency levels across the study area. Notably, regions with high groundwater dependency, predominantly in the wetlands and marshes of the northern and southwestern parts of the lake, account for 67.78% of the total area. The evaluation results, validated using the success rate curve method, demonstrate high reliability, offering a

收稿日期: 2024-11-02; 修回日期: 2024-12-22

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221777)

第一作者: 王允(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事遥感与 InSAR 技术的应用研究工作, E-mail: 852292109@qq.com

robust scientific foundation for the sustainable management of groundwater resources and the ecological conservation of Dongting Lake. Furthermore, this study provides a valuable reference for the assessment and protection of other wetland ecosystems.

Key words: Groundwater Dependent Ecosystems; comprehensive evaluation; GIS; Dongting Lake surrounding area

洞庭湖环湖区域生态系统种类繁多,其中一部分依赖地下水维持其功能,称为地下水依赖型生态系统(Groundwater Dependent Ecosystem, GDEs)。随着人类活动的增加和气候变化的影响,地下水资源的数量和质量正在发生显著变化,这对GDEs的健康和可持续性产生了不容忽视的影响(高小雲和李慧, 2024)。因此,科学评估地下水依赖型生态系统的现状及其依赖地下水的程度,对保护洞庭湖环湖区的生态环境具有重要意义。

然而,当前关于地下水对这些生态系统的具体支持程度及其健康状况的综合评价还缺乏系统性研究。特别是在洞庭湖这样具有典型湿地特征的地区,地下水对湿地生态系统的支持作用可能会直接或间接影响该区域的生态服务功能和水资源管理政策。因此,建立一套科学、系统且适用的综合评价指标体系,不仅有助于深入理解地下水对环湖区生态系统的支持作用,还能够为相关部门提供科学依据,优化地下水资源的管理和利用。

国际上对地下水依赖型生态系统的研究起步较早,主要集中在地下水资源的可持续利用、生态系统的响应机制及水资源管理等方面(Rampheri et al., 2023)。例如,印度等国家已提出一系列地下水生态系统保护和管理的评估框架,涉及水量和水质指标、生态多样性评估及人类活动影响等方面(Pandey et al., 2023)。而在中国,尽管近年来湿地生态系统研究有所增加,但专门针对地下水依赖型生态系统的研究仍处于起步阶段,缺乏系统的评价指标和区域性研究(刘强和梁丽乔, 2020)。尤其是在洞庭湖区域,关于地下水对生态系统的影响研究多集中于水资源监测和湿地保护领域(刘广宁等, 2022; 李月等, 2024),尚未形成针对地下水依赖型生态系统的综合评价体系。

本研究旨在构建适用于洞庭湖环湖区的地下水依赖型生态系统的综合评价指标体系,探索地

下水对该区域生态系统的支持机制。研究结果可为洞庭湖环湖区地下水资源的可持续利用和生态环境保护提供科学依据,也为中国其他类似区域的生态系统评价和管理提供参考。

1 研究区概况

本文的研究区为湖南省北部的洞庭湖环湖地区,区域范围涵盖了洞庭湖周边的多个县市。该区域位于东经 $111^{\circ}19'$ ~ $113^{\circ}10'$ 、北纬 $28^{\circ}30'$ ~ $30^{\circ}20'$ 之间(图 1)。研究区地处中纬度,属于亚热带季风气候区,年平均降水量为 1200 ~ 1600 mm,主要集中在 5 月至 8 月的汛期,占全年总降水量的 70% 以上(袁玉洁, 2017)。洞庭湖区的地质结构较为复杂,主要由第四纪沉积层构成,包括砂砾层、粉砂层和黏土层等沉积物(陈立德, 2019)。该区地下水系统主要分布于这些沉积层中,形成了含水层,地下水类型主要包括孔隙水、裂隙水及基岩裂隙水。洞庭湖地区的地下水补给主要来自湖水渗漏、降水入渗及地表水入渗等,地下水的流动性较强,且在季节性降水和湖水水位波动的影响下表现出周期性的水位波动(肖攀等, 2017)。

洞庭湖环湖地区的湿地生态系统丰富,是重要的生物多样性保护区,栖息着众多水鸟、鱼类、植物和湿地生物。湿地生态系统类型多样,包括草本湿地、灌木湿地及季节性湿地等。由于洞庭湖的水位周期性变化,许多湿地植被和生物群落依赖地下水作为稳定的水源来维持生长和生存,形成了典型的地下水依赖型生态系统。这些湿地不仅在区域水质净化和土壤保持中发挥了关键作用,还为大量迁徙鸟类提供了重要的栖息地。地下水的补给状况和质量对这些湿地生态系统的健康至关重要,其波动直接影响到湿地的结构与功能(刘惠良和刘红峰, 2021)。

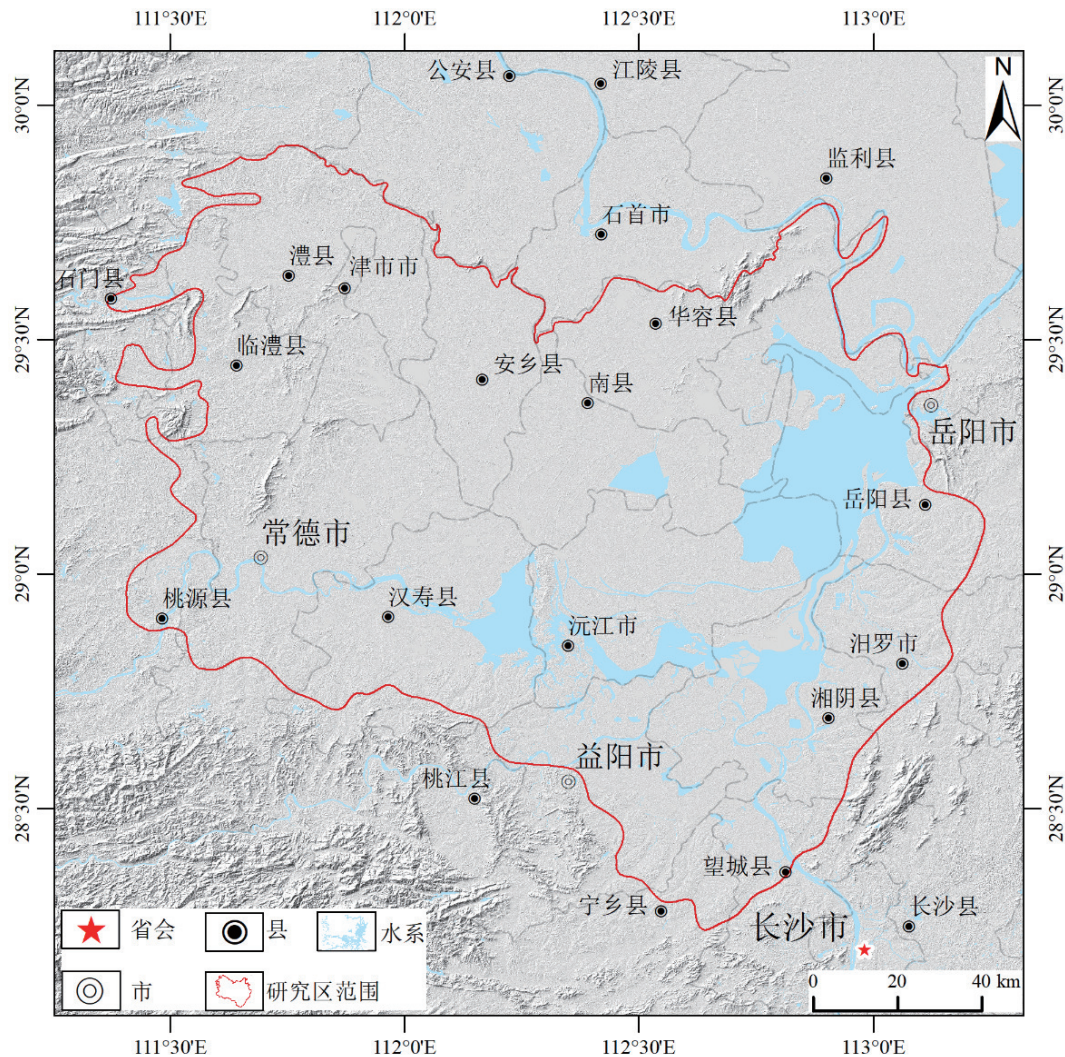


图 1 洞庭湖环湖区位置图

Fig. 1 Location of Dongting Lake surrounding area

2 评价方法与指标选取

2.1 评价方法

栅格叠加法能够将多个因子的影响均衡地反映在最终的评价结果中, 适合用于包含多个关键因子的生态系统评价, 各因子的权重在此方法中被默认为等同(吴林等, 2005)。

董佳秋等(2024)综合利用地表、地下信息, 探索建立了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。参考其 GDEs 指标分级方法, 赋予相应指标 1-5 的评分, 这些评分根据各因子的定量标准或自然间断点法分级计算而得。将各个因子对应的栅格图层在 GIS 平台上进行空间

叠加, 使每个栅格单元包含所有评价因子的评分信息。对于每个栅格单元的综合评分, 计算其各评价因子的算术平均值, 以得到该栅格单元的综合评价指数。根据算术平均值 R 的大小, 将其分为不同的等级, 如非常低、低、中等、高和非常高(表 1)。

2.2 评价因子选取及分级

在洞庭湖环湖区 GDEs 评价中, 需从地下水资源、生态环境等方面选取科学合理的评价指标。为科学有效地评估洞庭湖环湖区地下水依赖型生态系统, 本研究选取了 6 个核心评价指标: 地下水位埋深、土壤类型、植被覆盖度、蒸散发、地形湿度指数和土壤有机碳含量。这些指标结合了区域水文地质条件、植被生长特性以及土壤水分属性, 能够全面反映地下水对湿地植被的支撑作用。

表 1 植被对地下水依赖程度综合指数评价等级划分

Table 1 Classification of comprehensive index for vegetation dependence on groundwater

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	$R \leq 1.75$	$1.75 < R \leq 2.5$	$2.5 < R \leq 3.25$	$3.25 < R \leq 4.0$	$R > 4.0$

(1) 地下水位埋深

根据以往的研究,在地下水埋深较浅的低洼地区,植被以湿生、喜水、耐盐植被为主,这些低洼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(曹思佳等, 2023; 张燕等, 2024)。因此,地下水埋深是判断植被对地下水是否依赖的重要因素,可以将其作为地下水依赖项生态系统(GDEs)评价的主要指标之一。已有研究表明,地下水位埋深在 1~5 m 时,对地表的植物生长具有一定的影响(金晓媚等, 2013)。根据 2022 年 8 月获取的地下水位统测数据,本次按照 >10 m、[10 m, 5.7 m)、[5.7 m, 3.7 m)、[3.7 m, 1 m)及 ≤1 m 的等级进行分级,并按 I-V 级评分赋值,得到地下水位埋深等级分区图(图 2a、表 2)。

(2) 植被覆盖度

每年的 6 月份洞庭湖流域植被已经完成新枝生长,降雨量还未达到年内丰沛期。喜水植被等依赖地下水生长发育旺盛,有利于地下水依赖型生态系统(GDEs)的识别和评价。因此,本研究选择 2022 年 6 月份的 NDVI(植被覆盖度指数)数据计算植被覆盖度。参考植被指数时空分布研究(张绪财等, 2019),植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 等级进行评分赋值,得到植被覆盖度等级分区图(图 2b、表 2)。

(3) 土壤类型

从宏观上来说,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,土壤类型与植被类型分布也存在相关性(米湘成等, 1999; Troch et al., 2013)。从微观结构上可将土壤分为砂质土、黏质土、壤土三种类型。三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 1:100 万中华人民共和国土壤图(数字地球开放平台),数据来源可靠,均经过了大量的野外调查和实地采样进行核实,该数据采用了传统的“土壤发生分类”系统,研究区主要有水稻土、潮土、红壤等土壤。

按照中国土壤分类与代码(GB/T 17296-2009)(国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2009),研究区包括 24 种土壤亚类。考虑植被生长发育所需的土壤水分条件,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。根据土壤中黏质含量的高低,将土壤按持水能力由低到高划分为 5 类:湖泊、水库等非土壤类;潮土、水稻土类;红壤类;水稻土、红壤类;沼泽土类。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 2c、表 2)。

(4) 蒸散发

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,一般为地下水位埋深浅、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。利用自然间断点法,本研究按蒸散发量 <5 mm/d、[5 mm/d, 7.8 mm/d)、[7.8 mm/d, 10.3 mm/d)、[10.3 mm/d, 12.7 mm/d)、≥12.7 mm/d 的等级分为五级,得到蒸散发等级分区图(图 2d、表 2)。

(5) 地形湿度指数

地形湿度指数(Topographic Wetness Index, TWI)是一种用于评估地形对土壤湿度影响的指标。它综合了局部地形特征和水文过程,用于预

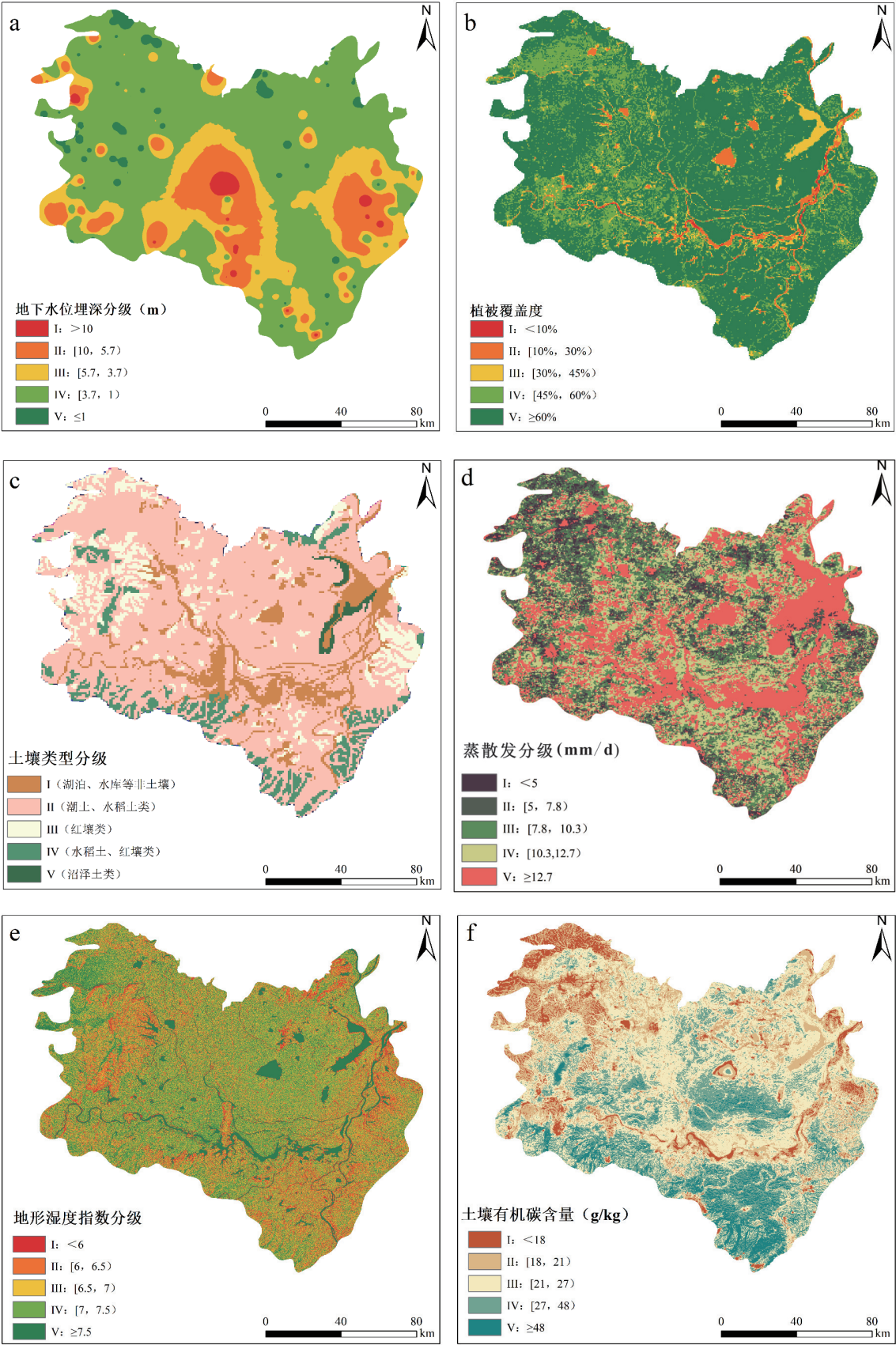


图 2 洞庭湖环湖区 GDEs 评价分级图

Fig. 2 Grading of GDEs evaluation in the Dongting Lake surrounding area

表 2 洞庭湖环湖区 GDEs 评价指标及其量化分级

Table 2 GDEs evaluation indicators and the quantitative classification in the Dongting Lake surrounding area

评价指标	分级					备注
	非常低	低	中等	高	非常高	
	I (1分)	II (2分)	III (3分)	IV (4分)	V (5分)	评分标准按5级分类
地下水位埋深(m)	>10	[10, 5.7)	[5.7, 3.7)	[3.7, 1)	≤1	依据常见地下水位埋深分区, 结合植被与地下水位关系确定
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
土壤类型	湖泊、水库等	潮土、水稻土类	红壤类	水稻土、红壤类	沼泽土类	根据土壤黏质含量的高低, 将土壤按持水能力由低到高划分
蒸散发(mm/d)	<5	[5, 7.8)	[7.8, 10.3)	[10.3, 12.7)	≥12.7	根据数据统计特征, 按照自然间断点法划分
地形湿度指数	<6	[6, 6.5)	[6.5, 7)	[7, 7.5)	≥7.5	根据数据统计特征, 按照自然间断点法划分
土壤有机碳(g/kg)	<18	[18, 21)	[21, 27)	[27, 48)	≥48	根据数据统计特征, 按照自然间断点法划分

测和解释土壤湿度的空间分布(张彩霞等, 2005; 赵卫东等, 2019)。TWI 主要通过数字高程模型来计算, 并考虑了坡度和汇流区面积的影响。GDEs 依赖于稳定的地下水供应, 这些供应可能来自地下水的补给或地表水的渗透。TWI 高的区域反映了地表水向地下水的补给潜力, 有助于补充地下水, 支持地下水依赖生态系统的存在。同样利用自然间断点法, 本研究按地形湿度指数<6、[6, 6.5)、[6.5, 7)、[7, 7.5)、≥7 的等级分为五级, 得到地形湿度指数等级分区图(图 2e、表 2)。

(6)土壤有机碳

土壤有机碳(SOC)是土壤中有有机物质的重要组成部分, 作为生态系统的重要资产, 在全球碳平衡中发挥着关键的作用(周国逸和熊鑫, 2019)。土壤有机碳的形成途径多样, 植物残体分解是核心来源, 例如植物的根、茎、叶、果实等器官在死亡后通过生物化学作用逐渐转化为有机碳; 同时土壤微生物的代谢活动会促进有机物质的转化与固定; 此外, 人类农业活动如施用有机肥、作物轮作等也持续向土壤输入有机碳(周莉等, 2005)。SOC 与 GDEs 密切相关: SOC 通过促进养分循环, 为植物和微生物提供必要的养分, 这些养分进一步渗透到地下水, 影响 GDEs 的生物多样性和生产力; SOC 改善土壤结构和水文特性, 增强土壤的渗透性和保水能力, 从而增加地下水补给, 维持 GDEs 的水资源。本文使用的土壤有机碳数据来源于中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集, 空间分辨率为 250 m, 土壤深度为 0 ~

5 cm (Liu F et al., 2022)。同上述指标分级方法, 本研究按土壤有机碳<18 g/kg、[18 g/kg, 21 g/kg)、[21 g/kg, 27 g/kg)、[27 g/kg, 48 g/kg)、≥48 g/kg 的等级分为五级, 得到土壤有机碳等级分区图(图 2f、表 2)。

3 评价结果及验证

3.1 评价结果分析

根据表 2 中划分的依赖程度级别, 得到研究区植被对地下水依赖程度分区图(图 3)。对图 3 进行统计(表 3)得出, 在研究区内, 植被对地下水的依赖程度表现出明显的差异。首先, 无依赖程度非常低的区域, 表明该区域不存在植被对地下水的极低依赖情况。其次, 依赖程度低的区域面积为 111 km², 占总面积的 0.63%, 相对较小; 依赖程度中等的区域面积为 5 616 km², 占比 31.59%, 表明该区域内有较多植被对地下水存在一定的依赖; 高与极高依赖程度的区域面积最大, 达到 12 048 km², 占比 67.78%, 显示大部分植被在生长过程中高度依赖地下水。

依赖程度非常高的区域主要分布在洞庭湖的周边, 尤其是湖泊的北部和西北部, 以及一些主要河流的沿岸地区。这些区域靠近湖泊和河流, 地下水位较高, 水资源丰富, 植被更容易获得地下水。这些地区可能包括湿地、沼泽地和季节性淹没区, 植被类型也多为湿生或耐湿性植物, 这些植物高度依赖地下水的稳定供应。依赖程度高的区域为环绕洞庭湖的广大区域。这些区域虽然离湖

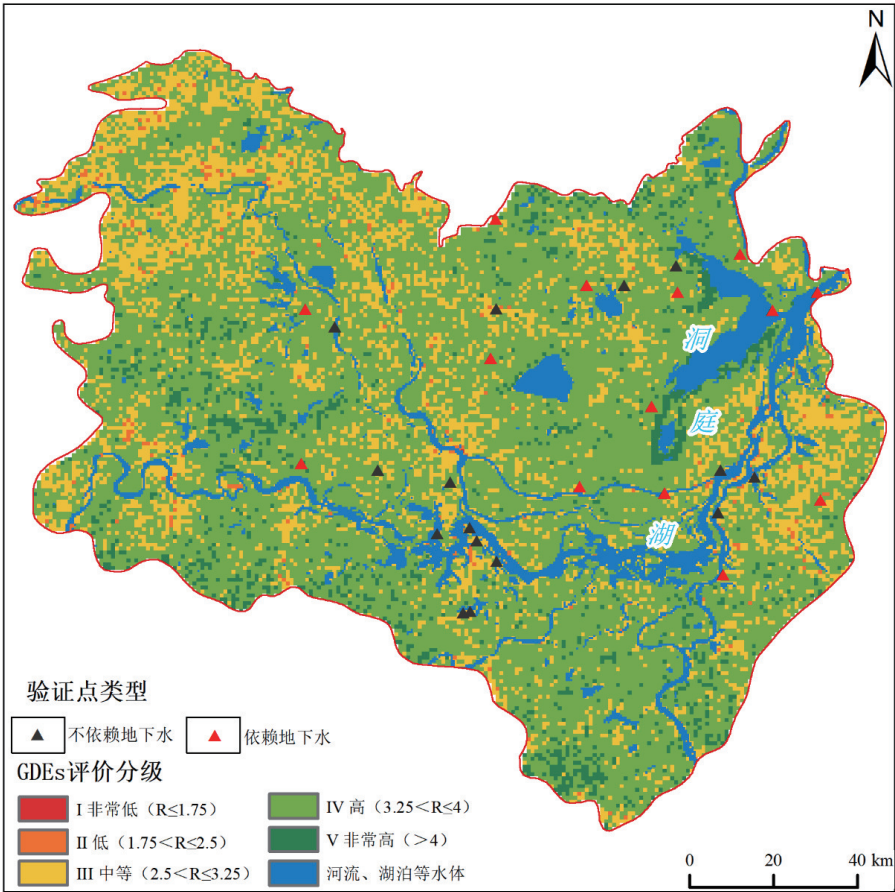


图 3 洞庭湖环湖区植被对地下水依赖程度分区图及 GDEs 评价验证点分布

Fig. 3 Zoning of vegetation dependence on groundwater and distribution of verification points for GDES evaluation in the Dongting Lake surrounding area

表 3 洞庭湖环湖区植被对地下水依赖程度评价结果图统计

Table 3 Statistical results of vegetation dependence on groundwater evaluation in the Dongting Lake surrounding area

类型	非常低		低		中等		高		非常高	
	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)
	0	0	111	0.63	5616	31.59	10558	59.39	1490	8.39

泊和主要河流稍远,但仍在地下水影响范围内。土壤的含水量较高,能够较好地保持水分,支持植被的生长。

依赖程度低的区域主要分布在研究区的西北部,以及各个城区的周边地区,城市区域植被对地下水的依赖程度较低主要是由于城市化带来的不透水层增加、地下水过度开采、绿地和植被有限以及土壤改造等因素所致。这些因素共同作用,使得城市区域的植被主要依赖降水和人工灌溉,而非地下水。

3.2 评价结果验证

成功率曲线是一种有效的预测模型验证方

法,适用于检验评价模型与样本的拟合程度。可对本次地下水依赖型生态系统综合评价的精度进行验证。基于成功率曲线法的基本原理,在洞庭湖实地野外调查过程中,对评价结果开展了野外验证,验证点覆盖地下水高依赖与低依赖区域,并结合湿地、灌木和农田等不同生态系统类型,通过实际调查判断其地下水依赖性。共在研究区选取了 29 处验证点(图 3),其中依赖地下水 14 处,不依赖地下水 15 处。验证点明确的"依赖/不依赖"判定结果作为成功率计算基准,同时验证点坐标信息用于空间匹配,将模型预测的依赖程度分级图与实地验证结果进行栅格单元对应。

在图 4 中,横坐标表示研究区地下水依赖程度从非常高到非常低区域的累积面积百分比,纵坐标表示研究区野外验证点的生态系统对地下水的依赖发生频率。计算曲线与横坐标轴之间的面积值(AUC),当 $AUC > 0.5$,且越接近 1 时,表示评价结果的精度越高;当 AUC 值在 0.7~0.9 之间时,表明评价结果较为准确。本次综合评价的成功率曲线 AUC 值为 0.805,表明基于多源数据的地下水依赖型生态系统评价结果合理,方法可行。

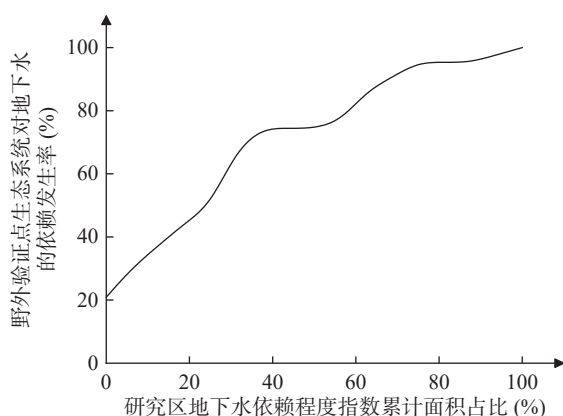


图 4 洞庭湖环湖区 GDEs 评价结果成功率曲线

Fig. 4 Success rate curve of GDEs evaluation results in the Dongting Lake surrounding area

4 结论

本文利用 GIS 中的栅格叠加分析法,选取地下水位埋深、植被覆盖度、蒸散发、地形湿度指数及土壤有机碳含量等因子,建立了一套评价指标体系,深入分析了洞庭湖环湖区 GDEs 的现状及其对地下水的依赖程度。形成如下结论:

(1)在洞庭湖环湖区,植被对地下水的依赖程度非常低的区域面积为 0 km^2 ;依赖程度低的面积为 111 km^2 ,占比 0.63%;依赖程度中等的面积为 5616 km^2 ,占比 31.59%;高依赖程度的面积最大,达到 10558 km^2 ,占比 59.39%;依赖程度非常高的面积为 1490 km^2 ,占比 8.39%。

(2)洞庭湖的生态系统依赖地下水的程度存在显著差异,其中环湖湿地和部分低洼地区表现出较高的依赖性,这些区域的生物多样性和生态功能与地下水供应密切相关。依赖地下水的高与

非常高的区域集中分布在靠近湖泊及主要河流沿岸的湿地和沼泽地,显示出地下水对这些生态系统的支撑作用不可或缺。

(3)经成功率曲线法检验,曲线的 AUC 值为 0.805,表明基于多源数据的地下水依赖型生态系统评价结果较为准确,符合洞庭湖生态系统的实际情况,可为洞庭湖地区地下水资源的可持续利用和生态保护提供科学依据,同时也为其他类似湿地区域的地下水依赖型生态系统的管理和保护提供借鉴。

参考文献:

- 曹思佳,李云良,陈静,姚静,赵贵章,李志萍.2023.2022 年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响[J]. 中国环境科学,43(12):6601-6610.
- 陈立德.2019.江汉—洞庭地区与黄广—九江地区更新统划分与对比[J]. 中国地质调查,6(5):21-27.
- 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.
- 高小云,李慧.2024.基于地下水依赖型生态系统分布图的全球旱地保护需求研究[J]. 水利水电快报,45(9):4.
- 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.2009.中国土壤分类与代码(GB/T17296-2009)[S].
- 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.
- 李月,彭博,林韶恺,李洋,周盈,曾剑威.2024.基于景观类型及其生态风险评价的巢湖流域生态安全格局优化建议[J]. 华南地质,40(3):548-558.
- 刘广宁,吴亚,王世昌,廖金,余绍文,伏永朋,杜尧,陈柳竹.2022.长江中游典型河湖湿地主要水环境问题及生态环境地质风险评价区划[J]. 华南地质,38(2):226-239.
- 刘惠良,刘红峰.2021.洞庭湖湿地生物多样性保护的价值评估[J]. 中南林业科技大学学报,41(10):140-147.
- 刘强,梁丽乔.2020.依赖地下水生态系统的生态水文研究评述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),56(5):693-699.
- 米湘成,张金屯,张峰,上官铁梁,李爱华,郑凤英.1999.山西高原植被与土壤分布格局关系的研究[J]. 植物生态

- 学报,23(4):336-344.
- 吴林,张鸿辉,王慎敏,周寅康.2005.基于栅格数据空间分析的土地整理生态评价——以江西省南康市凤岗镇为例[J]. 中国土地科学,19(3):24-28.
- 肖攀,喻望,胡光明,赵幸悦.2017.江汉-洞庭平原地下水功能评价与区划[J]. 人民长江,48(1):6-11+19.
- 袁玉洁. 2017. 变化环境下洞庭湖水文情势的演变及湿地保护研究[D]. 湖南大学博士学位论文.
- 张彩霞,杨勤科,李锐.2005.基于DEM的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. 地理科学进展,24(6):116-123.
- 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.
- 张燕,尹立河,王旭升,王浪,王璐晨,张俊,李福杰,张鹏伟.2024.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,31(4):259-270.
- 赵卫东,龚俊豪,赵纪堂,杨文韬,高飞.2019.顾及平原区微地貌的地形湿度指数及其地表水环境意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),42(1):113-118.
- 周国逸,熊鑫.2019.土壤有机碳形成机制的探索历程[J]. 热带亚热带植物学报,27(5):481-490.
- 周莉,李保国,周广胜.2005.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展,20(1):99-105.
- Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, Li D C, Yang J L, Song X D, Shi Z, Zhu A X, Zhang G L. 2022. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin, 67(3): 328-340.
- Pandey H K, Singh V K, Singh S K, Sharma S K. 2023. Mapping and validation of groundwater dependent ecosystems (GDEs) in a drought-affected part of Bundelkhand region, India[J]. Groundwater for Sustainable Development, 23(Suppl): P100979.
- Rampheri M B, Dube T, Dondofema F, Dalu T. 2023. Identification and delineation of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) in the Khakea-Bray transboundary aquifer region using geospatial techniques[J]. Geocarto International, 38(1): 1-24.
- Troch P A, Carrillo G, Sivapalan M, Wagener T, Sawicz K. 2013. Climate-vegetation-soil interactions and long-term hydrologic partitioning: signatures of catchment co-evolution[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 17(6): 2209-2217.