气候和土地利用变化下河南省地下水干旱脆弱性评估与预测[1]

马雨暄[1,2]，刘婕[1]，徐瑞欣[1]，谷蕾[1,2]，刘德新[1,2]

(1.河南大学 地理科学与工程学部，河南 郑州 450046；2.河南大学 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室，河南 开封 475004)

摘　要:【目的】揭示气候与土地利用变化下河南省地下水干旱脆弱性的时空格局及其未来演变，为水资源优化配置与适应性管理提供科学支撑。【方法】采用综合指标评价法，选取地下水开采量、土地利用和降水等 7 个评价因子，利用 GDVI（Groundwater Drought Vulnerability Index）量化评估河南省地下水干旱脆弱性；利用 CMIP6 数据集预测未来不同气候情景下的降水、温度和蒸散量变化，并据此评估未来 GDVI 的分布趋势。【结果】（1）1980—2014 年河南省 GDVI 平均值为 4. 97，整体处于中等干旱脆弱性水平，其中中值区域占比为 32. 68%。（2）极高干旱脆弱性区域呈斑块状分散分布，主要与耕地占比高及农业灌溉强度大相关。（3）未来降水增加对脆弱性的缓解贡献大于蒸散量增加的增旱效应，河南省地下水干旱脆弱性整体呈降低趋势。【结论】未来耕地逐渐从河南省中部向东南部收缩，使得河南省整体地下水抗旱性提升。而在气候变化和土地利用变化的双重影响下，未来河南省 GDVI 分布将呈现单极化趋势。研究结果可为水资源的分配及利用提供理论依据。

关键词:地下水;GDVI;气候变化;未来预测;河南省

中图分类号:P641. 7　　　　**文献标识码**:A

干旱作为全球频发的自然灾害，其复杂性与影响范围随气候变化进一步加剧。据预测，至 2050 年，全球超四分之三的人口将面临干旱威胁，因此，干旱事件的预防和早期预警机制尤为重要[1]。常见的干旱类型主要包括气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱[2]。其中，由气象干旱引发的次生干旱——地下水干旱因其导致的地下水位下降等特征而备受关注[3]，并对自然环境和经济社会产生广泛的负面影响，如植被生长受阻、地质灾害频发和农业结构退化等[4]。

河南省作为我国粮食主产区，其水资源安全至关重要。然而，因受大陆性季风气候影响，河南省降水时空分布不均，旱涝灾害往往交替发生[5]。为保障旱季灌溉需求，河南省地下水长期超采，2023 年超采量达 13.81 亿 m³，已引发地下水漏斗扩展、地面沉降等生态问题[6-7]。尽管政府已在沿黄区域探明后备水源地，但非引黄灌区的地下水采补平衡仍面临严峻挑战，气候变化更增加了未来水资源供给的不确定性。因此，亟需评估河南省地下水干旱脆弱性，制定地下水可持续发展战略。

随着地下水干旱问题的日益突出，地下水系统的抗旱能力及对干旱的敏感性日益受到关注。学者们在传统地下水脆弱性评估的基础上，逐渐将研究视野拓展至面向干旱风险的地下水脆弱性评估。“地下水脆弱性”这一术语最早由法国学者 Margat G[8]于 1968 年提出，最初主要关注污染风险；此后 40 余年间，国内外学者持续完善和发展地下水脆弱性的概念及其评价方法，使其逐渐涵盖了包括干旱在内的多种胁迫因子。其中，早期研究多采用指标叠加法开展地下水脆弱性整体评估[9-10]，Aller L T 等[11]于 1987 年提出的 DRASTIC (Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone and Conductivity of aquifer)评价模型是指标叠加法中较为典型的评估方法。近年来，随着研究的逐步深入，学者们进一步深化地下水脆弱性评估方法，并结合特定区域背

收稿日期/Received:2025-10-21　　**修回日期**/Revised:2026-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41902251)。

第一作者:马雨暄（2003—）,男,博士研究生,从事生态学方面的研究。E-mail:mayuxuan1230@henu.edu.cn。

通信作者:刘德新(1989—),男,副教授,博导,博士,从事环境演变方面的研究。E-mail:dxliu@vip.henu.edu.cn。

景和全球变化影响。如 Abunada Z 等[12]通过 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型模拟沿海含水层的地下水补给过程；Sresto M A 等[13]整合 AHP 层次分析法和改良的 DRASTIC 模型，评估孟加拉国库尔纳区地下水脆弱性；Roy P[14]则明确指出在气候变化下进行地下水脆弱性评估的必要性。国内学者孙法圣等[15]通过对污染物在包气带和含水层中的运移进行模拟，实现尾矿区地下水脆弱性的评价；陈守煜[16]在脆弱性评价中引入模糊数学理论，以处理评价过程中的不确定性问题。

综上，地下水脆弱性评估及其驱动因子分析已形成较为成熟的框架，但针对干旱性、污染度等单一胁迫因子的专项评估与未来预测仍存在不足。基于此，本研究选取典型平原区河南省作为研究区域，建立地下水干旱脆弱性量化评估框架，关注影响地下水水量平衡的关键过程，并基于 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种共享社会经济路径，分析气候和土地利用变化下未来河南省地下水的潜在干旱脆弱性。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河南省灌溉体系以引黄和井灌为主。其中，引黄灌区主要分布在黄河沿岸，灌溉用水高峰期或黄河来水偏枯年份，部分区域需抽取地下水作为补充水源，其地下水供水量约占灌区总用水量的 10%~30%[17]。井灌区主要分布在豫中、豫东平原腹地，该类区域农业灌溉高度依赖浅层地下水，是河南省地下水超采问题最突出的区域。

1.2 研究方法

1.2.1 GDVI 计算

本研究聚焦人为驱动型地下水干旱，选取浅层地下水开采量、与地表水距离（至流量大于 30000 m³ /s 的河流的距离）、土地利用类型、地下水埋深、坡度、降水量和土壤蒸散量等 7 个指标。根据各指标对干旱的影响程度赋予权重，加权求和得到 GDVI (Groundwater Drought Vulnerability Index)：

$$\mathrm{GDVI} = \sum_{i=1}^{n} W_i \times X_i \tag{1}$$

式中：W_i和X_i分别为每个因子的权重和评级。GDVI 可分为 5 类:极低(0,2]、低(2,4]、中等(4,6]、高(6,8]和极高(8,10)，该等级阈值的设定参考了平原区域地下水脆弱性与干旱评估中广泛使用的数值分段框架，并结合河南省地下水动态特征进行调整[18,19]。由于影响因子的维度不同，将其分为积极因子（地下水埋深和降水量）和消极因子（地下水开采量、与地表水距离、坡度和土壤蒸散量），使用 0 到 10 分制进行归一化处理[20]。

基于其他平原区地下水干旱脆弱性评估标准及河南省灌溉特点[1]，地下水开采和土地利用的分级标准总结在表 1。考虑林地和草地均为低灌溉需求以及蒸散发变异趋势相似等特征[21]，将两者合并为林草地类别进行处理。

此外，研究未选取传统指标含水层厚度，因河南省粘土层厚度空间分布均一（均值 4.2 m，变异系数仅 0.21）[22]，其对地下水干旱脆弱性的差异影响较弱，且该影响已通过土地利用类型（耕地翻耕提升入渗）和坡度等指标间接量化。

表 1 部分评价因子分级标准

Tab.1 Grading standard of partial evaluation factors

因子	类别	评级
浅层地下水开采量/(亿 m³)	(0,1.109]	2
	(1.109,7.937]	5
	(7.937,9.305]	6
	(9.305,12.825]	8
土地利用	湿地	0
	未利用土地	1
	林草地	3
	建设用地	5
	耕地	10

1.2.2 权重决策

本研究采用层次分析法计算主观权重，主要包括建立层次判断矩阵，比较确定因子相对重要性；计算各指标权重，并进行一致性检验（CR< 0.10）[23]。

此外，选取 XGBoost 模型计算客观权重，对

于第t轮迭代，模型目标函数可表示为：

$$L^{(t)}=\sum_{i=1}^{n} l\left(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}+f_t(x_i)\right)+\Omega(f_t) \qquad (2)$$

式中：$L^{(t)}$为第 t 轮迭代的目标函数值；l 为损失函数；y_i为第 i 个样本的真实值；$\hat{y}_i^{(t-1)}$为前 t-1 轮迭代后第 i 个样本的预测值；x_i为第 i 个样本的特征向量；$\Omega(f_t)$为模型复杂度正则项。对式(2)进行二阶泰勒展开后，目标函数可化简为：

$$L^{(t)}=\sum_{j=1}^{T}\left[G_j\omega_j+\frac{1}{2}\left(H_j+\lambda\right)\omega_j^2\right]+\gamma T \qquad (3)$$

式中：$G_j=\sum_{i\in I_j} g_i$，$H_j=\sum_{i\in I_j} h_i$；I_j为落入第 j 个叶节点的样本集合；g_i是损失函数对预测值的一阶导数，h_i为二阶导数。

在此基础上，采用 XGBoost 的特征重要性表征各评价因子的客观贡献，并将其归一化得到客观权重。最后利用拉格朗日法得到综合权重，公式如下：

$$W_j=\frac{\sqrt{\omega_j^{*}\omega_j^{'}}}{\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\omega_j^{*}\omega_j^{'}}} \qquad (4)$$

式中：ω_j^{*}为主观权重；$\omega_j^{'}$为客观权重。

1.2.3 气候变化预测

本研究选择全球气候模型（GCMs）中 2 种适用于中国的共享社会经济路径（SSP2-4.5 和 SSP5-8.5）。以 1980—2014 年为基线期，2015—2040（P1）、2041—2065（P2）和 2066—2100（P3）3 个时期为预测期。其中，SSP5-8.5 代表化石能源依赖增强、碳排放快速增长的高排放路径；SSP2-4.5 代表可持续发展进展较慢、排放温和增长的中等路径。

研究利用 Delta 法重建未来气象要素并采用双线性插值法将数据均匀插值到 0.5°×0.5°网格中[24]。具体降尺度过程可表示为:

$$P_f=P_0\cdot\frac{P_{GF}}{P_{G0}},\ T_f=T_0+(T_{GF}-T_{G0}) \qquad (5)$$

式中：P_f和 T_f分别为重建的未来降水和温度序列;P_{GF}和T_{GF}分别为 GCM 预测的未来降水和温度序列;P_{G0}和T_{G0}分别为 GCM 模拟的基线期多年平均降水和温度;P_0和T_0分别为基线期实测的多年平均降水和温度。

1.2.4 全球气候模型选择

为选取适用于研究区的气候预测模型，通过计算相关系数 r、均方根误差 RMSE 和标准差σ，生成 10 个气候预测模型的标准化泰勒图并选取仿真性能较好的模型（FGOALS-g3）。图 1 中越接近红色圆圈，仿真性能越好，各模型通过标准定义为 $r\geq0.5$，RMSE≤1。

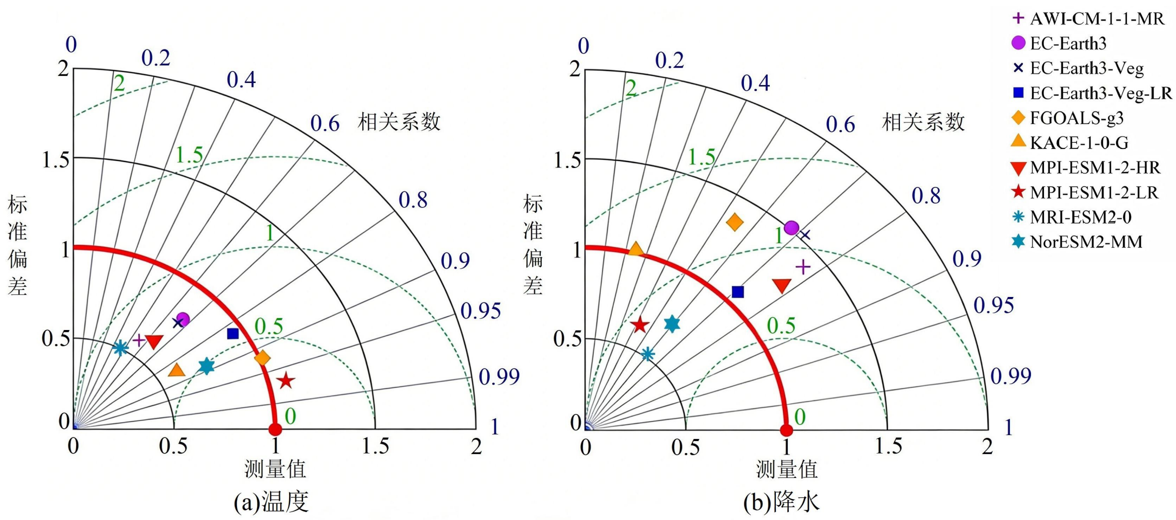

图 1 全球气候模型参数性能泰勒图

Fig.1 Taylor plot of global climate model parameter performance

1.2.5 土地利用预测

本文基于 CA-Markov 模型，采用 IDRISI-Selva 软件对未来 3 个时期的土地利用进行预测[25]。模型使用 2010 和 2015 年的数据模拟 2020 年的土地利用类型，并与 2020 年实际数据进行对比。利用 VALIDATE 模块计算此次模拟的 kappa 指数（k=0.796）来评价预测结果的解码精度，$k\geq0.6$ 则认为预测结果合理。基于此验证通过的模型，以 2015 和 2020 年实际土地利用数据作为基准状态，5 年为间隔预测了未来至 2100 年的土地利用类型分布，并选取 2040、2060 和 2080 年作为代表性年份进行展示。

1.3 数据来源

土地利用数据、河南省行政区划矢量地图和干流矢量数据来自中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）。其中，土地利用数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年土地利用遥感器监测数据，分为耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用土地。河南省流量数据从全国地理信息资源目录服务系统（https://www.webmap.cn）获取。降水和气温的月测量数据来自中国气象局(https://data.cma.cn)，并通过克里金插值法获取格网数据，未来的气候模拟数据集则来自 CMIP6。土壤蒸散发数据通过 GEE 平台对 NASA 的 MOD16A2GF 产品分析获取。地下水埋深和地下水开采量数据则通过河南省水资源公报获得。

2 结果与分析

2.1 评价因子空间分布

根据评价因子性质将其分为地下水依赖性、水文地质条件和气象条件 3 类，具体分类与相关权重见表 2，2022 年的空间分布如图 2 所示。其中，坡度、降水量等评价因子具有明显的空间分异特征。

表 2 评价因子分类及其权重

Tab.2 Classification and weight coefficient of evaluation factor

评价因子		权重		
		AHP	XGBoost	综合权重
地下水依赖性	地下水开采量	0.05	0.087	0.069 6
	与地表水距离	0.08	0.139	0.114 2
	土地利用	0.31	0.284	0.331 7
水文地质条件	地下水埋深	0.09	0.085	0.091 2
	坡度	0.09	0.164	0.132 1
气象条件	降水	0.24	0.134	0.200 7
	土壤蒸散量	0.14	0.107	0.136 1

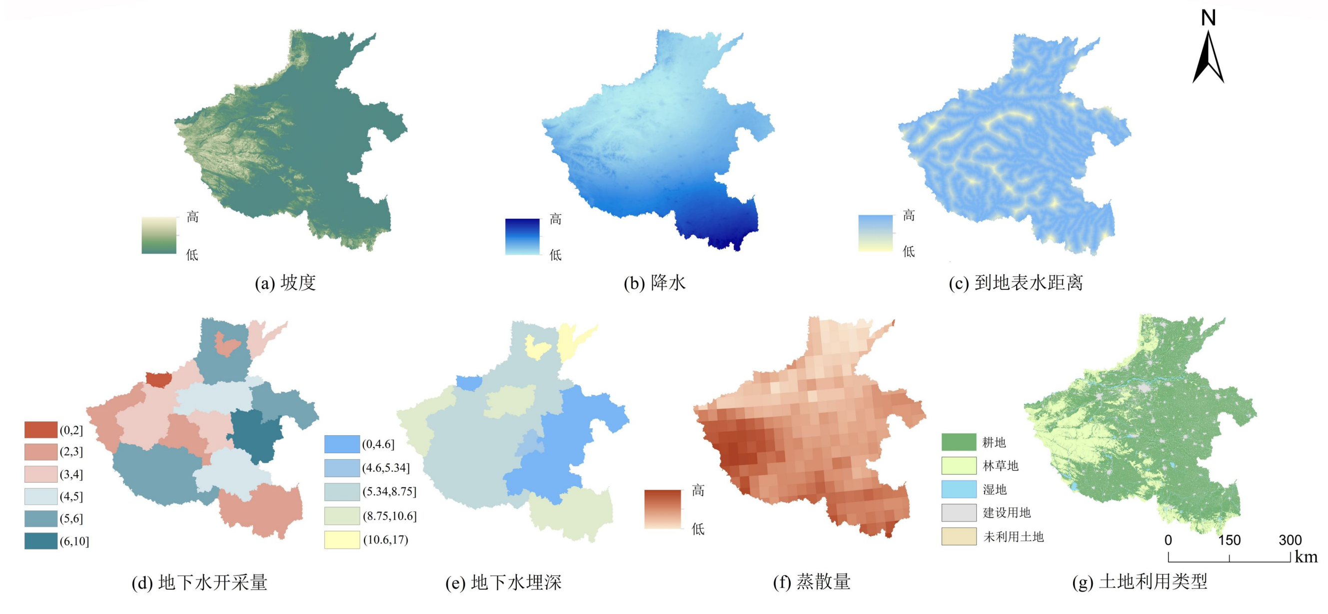

图 2 各评价因子 GDVI 数据层

Fig.2 Different evaluation factors GDVI data layer

2.1.1 地下水依赖性

研究结果表明，地下水开采量高值区主要集中在豫北安阳、鹤壁、新乡以及豫东开封、商丘等地；低值区则主要分布于豫西山地及南部的大别山区。豫北地区作为河南省主要工业基地与农业产区，水资源需求量大，导致地下水开采量较高；而豫西、豫南山区因地形与社会经济条件限制，开采量较低。研究区相关干支流集中分布于东部区域，计算得到的至地表水距离分布图如图 2(c)所示，距离地表水较远的区域则主要集中在河南省中部和西部山区。土地利用情况如图 2(g)所示。基准期间，超过 50%的平原地区被耕地覆盖，极易受到地下水透支影响。

2.1.2 水文地质条件

河南省地下水埋深较浅地区主要分布于东部

平原区，其地下水埋深一般在 3~6 m。而西部山区和北部黄土地区地下水埋深较深，普遍在 8 m 以上。此外，研究区以平原、丘陵地形为主，整体坡度低，土壤蓄水时间长，区域易旱性较低。

2.1.3 气象条件

河南省降水自西北向东南递增（图 2(b)）。土壤蒸散量高值区集中于西部、南部山区。降水通过补充含水层水分，提高了地下水位，而蒸散量则相反，二者的联合效应影响了净补给量的大小及时空分布，进而影响地下水资源的演变趋势。在降水量增长幅度大于蒸散量增长幅度的区域，地下水干旱程度将得到缓解。

2.2 GDVI 的历史评估（1980—2014 年）

根据基线期 GDVI，发现地下水干旱脆弱性分布与地下水位下降分布基本一致（图 3），验证了本研究 GDVI 评估框架的合理性。基线期河南省 GDVI 总体处于中等水平，平均值为 4.97（图 4 和表 3）。其中，超过 30%的区域表现出高或极高 GDVI 值，集中于开封、商丘等豫东平原，究其原因，该区域主要种植小麦和玉米等需水量较高的作物，年灌溉量超过 500 m³/hm²，长期高强度灌溉导致地下水漏斗发育，提升地下水干旱风险。引黄灌区（花园口、赵口灌区）GDVI 以中低值为主（均值 4.2），仅局部高值（中牟县 6.8）；而豫西和豫南山地丘陵区以水库供水占比为主，地下水开采压力较小，GDVI 多为低值。极低 GDVI 值仅占总面积的 2.88%，主要为河流与湿地，其天然储水与补给功能使地下水系统具备较强抗旱能力。

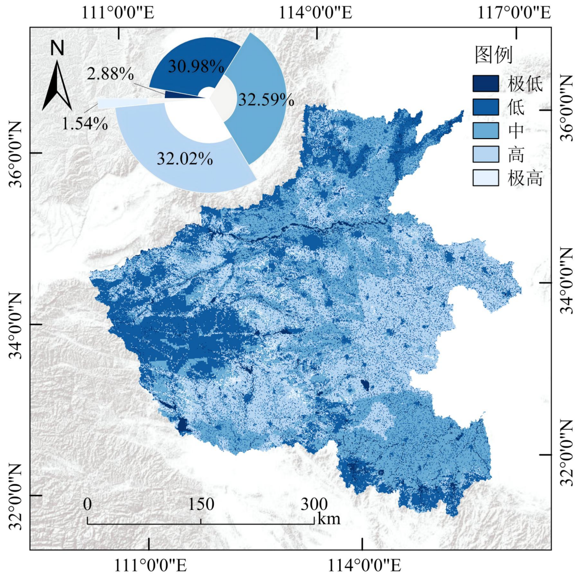

图 3 基线期间地下水干旱脆弱性分布

Fig.3 Distribution of groundwater drought vulnerability during the baseline period

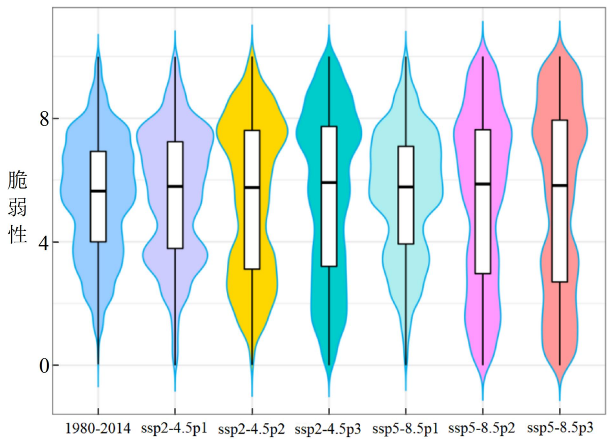

图 4 未来时期地下水干旱脆弱性评级分布

Fig.4 Groundwater drought vulnerability rating distribution in the future period

表 3 不同时期地下水干旱脆弱性评级面积比例

Tab.3 The area ratio of groundwater drought vulnerability rating in different periods

脆弱性/%	基线时期	SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
极低	2.88	2.38	8.00	16.81	4.91	13.46	8.21
低	30.98	24.92	49.75	66.73	37.47	59.27	60.14
中	32.59	24.38	22.84	13.65	34.38	19.82	25.78
高	32.02	44.36	18.76	2.78	22.89	7.41	5.49
极高	1.54	3.96	0.66	0.03	0.35	0.04	0.38

2.3 气候和土地利用变化下 GDVI 未来评估

预测的土地利用情况如图 5 所示。由图 5 可知，与基线期相比，未来耕地将大面积减少，P1 期从 62.5%缓慢下降至 59.6%，P2 和 P3 期迅速下降，最终达到 50.1%。并且不同灌区耕地的结构变化呈现显著差异，减少的井灌区耕地主要通过水源置换

纳入水库灌区覆盖范围。

两种气候情景与土地利用变化耦合作用下，未来 3 个时期的 GDVI 分布如图 6 所示。。

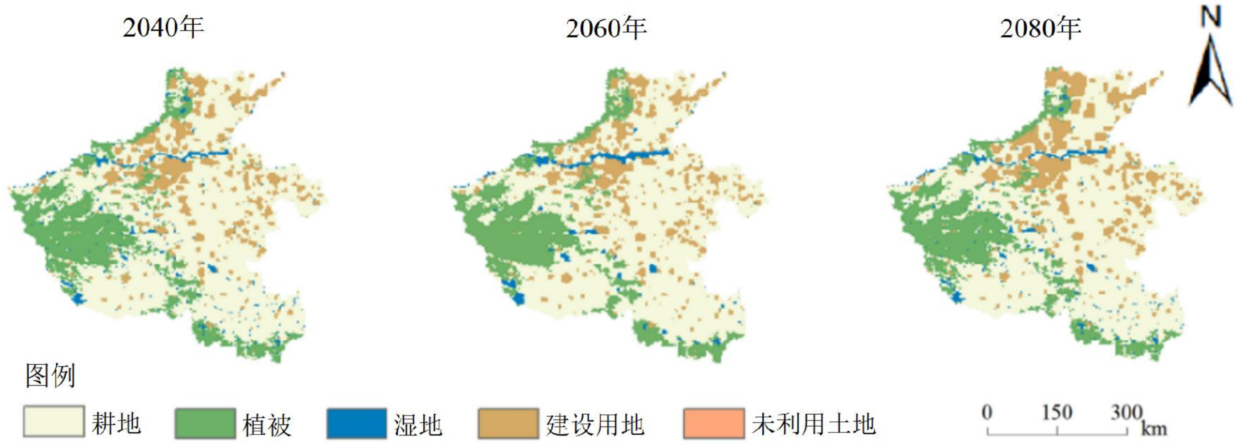

图 5　未来时期土地利用类型预测图

Fig.5　Land use type prediction map in the future period

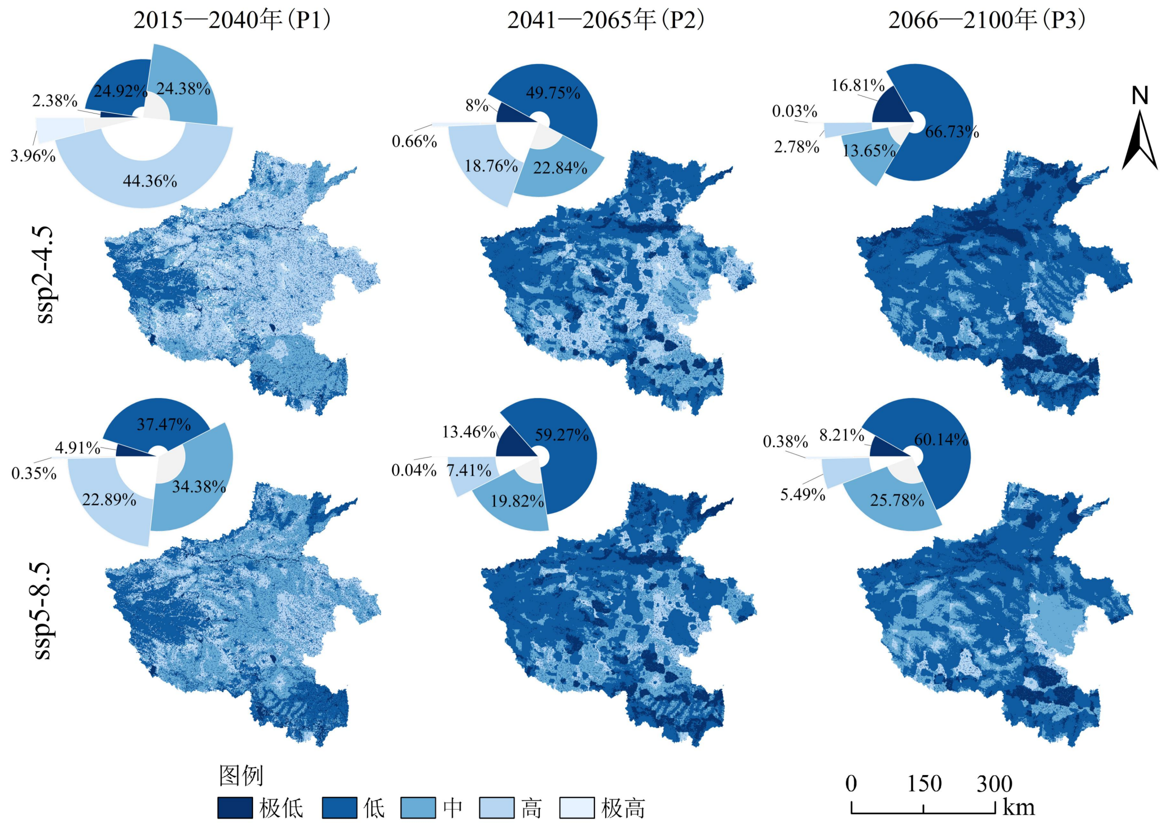

图 6　未来时期地下水干旱脆弱性分布

Fig.6　Groundwater drought vulnerability distribution in the future period

由图 6 可知：①相较于基线期，P1 时期全省平均 GDVI 在 SSP2-4.5 情景下小幅上升至 5.1。高值区面积显著增加，在 SSP2-4.5 情景下达到 44.36%（增加 12.34%），极高值区也增至 3.96%（增加 2.42%）。空间分布上，豫东平原高脆弱区范围扩大且强度增强，如开封市 GDVI 均值升至 7.2。每种脆弱性在不同气候情景中的分布仍有明显差异，相较于基线时期，GDVI 中值区面积减少，地下水易旱面积增加，主要是由于气温升高导致土壤蒸散量的升高。南部 GDVI 较低区域略有增加，主要是由于林地的潮湿和高降水的出现。与基线期相似，P1 期间的 GDVI 分布仅有一个峰值。基线时期的峰值为 6.85，但在 P1 时期，峰值极化程度更强，在高值和低值区有出现新峰值的趋势。②

在 P2 和 P3 时期，高 GDVI 区向低 GDVI 区转变，整体呈单极化趋势，但在 P3 时期，极高 GDVI 区几乎完全消失，出现去极值化趋势，GDVI 的分布更为集中且区域差异进一步凸显：黄淮海平原区在 SSP5-8.5 情景下 GDVI 极高值面积占比达 8.7%；引黄灌区因地表水保障增强，GDVI 中值在 P3 期降至 3.8%；南水北调沿线因农业用地收缩与水源置换政策，SSP2-4.5 情景下低值区面积占比扩大至 45.1%

值得注意的是，P3 时期 GDVI 极高值区域呈缩减趋势，而同期的土地利用数据层保持一致，因此该现象可通过气象因子的差异解释：在发生这种变化的地区，降水量的增幅大于土壤蒸散量的增幅，且降水在 GDVI 计算中的权重较高，导致降水增加的贡献度更高，最终导致地下水干旱脆弱性降低。此外，P3 时期周口市、林州市仍存在部分 GDVI 极高值区域，地下水易受干旱影响。

3　讨论

全球变暖影响下，干旱愈发频繁，严重制约了农业生产。河南省作为我国重要的粮食生产基地，地下水干旱问题突出[26]。本研究从地下水依赖性、水文地质条件及气象条件 3 个维度，揭示了气候与土地利用双重压力下地下水干旱脆弱性的演化规律。本研究构建的 GDVI 指标体系，相较于传统 DRASTIC 等脆弱性模型，强化了与水量收支密切相关的动态过程因子，如直接关联农业用水压力的“土地利用”，以及反映人为调控替代水源能力的“与地表水距离”。这一指标框架更精准地捕捉了地下水系统在干旱风险下的核心脆弱环节。

其中，土地利用在脆弱性评估中发挥关键驱动作用。研究表明，地下水高脆弱性区域与农业区位分布较为一致[27]，而地下水又是河南省灌溉用水的主要来源，因此农业发展对地下水脆弱性评估的影响更为显著。随着全球变暖，未来地下水对径流的贡献率可能下降（SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下平均贡献率分别降至 28.01%和 20.59%），地下水系统抵抗极端气候的能力将减弱[26]。相比之下，地表蒸散量的增加将导致渗透补给和可用于灌溉的地表水减少，进一步提升未来人类对地下水的依赖程度。

在气候响应方面，本研究预测 SSP5-8.5 情景下 P3 期 GDVI 降幅为 12.3%，相较于 Roy P[14]对印度农业区的预测值偏小，主要源于河南省耕地收缩速率较缓。黄淮海平原区因耕地分布密集且替代水源稀缺，GDVI 持续高于全省均值，该现象与马建锋[7]对中原经济区地下水超采直接驱动脆弱性的论断相吻合；而引黄灌区通过地表水调配使局部 GDVI 降低 1.2~2.4，亦验证了高海燕[28]提出的地表水源替代可有效缓解地下水开采压力。而豫东平原高 GDVI 区作为传统粮产区，地下水开采强度大，尽管邻近引黄工程，但因地表水时空分布不均及引黄条件限制，农业灌溉仍高度依赖地下水。2022 年，河南省地下水占总用水量的 43.6%，其中用于农业灌溉的用水量占 59.4%。因此，需根据地下水资源分布特征与开发利用现状，将灌区划分为若干管理分区，制定针对性的地下水开采计划，以保障地下水资源的合理分配与可持续性。

需要注意的是，土地利用预测没有考虑环保措施的影响，仅基于无环保政策调控的最坏情况进行，这有助于政府直观了解未来地下水干旱情况。且预测主要基于历史转换规律，未纳入如《河南省“十四五”水安全保障规划》中提及的大规模引黄能力提升等未来供水工程的影响。这些工程若顺利实施，将有望增强引黄灌区的地表水保障能力，导致未来这些区域的 GDVI 估值比预测结果更低。

未来全球变暖还将对作物产量产生负面影响，耕地面积仍存在扩大可能性，以满足粮食产量需求，因此需进一步模拟地下水开采量动态变化，以分析地下水采补平衡的实现路径。此外，地下水干旱脆弱性图可反映地下水干旱脆弱性的空间分布，但这并不等同于地下水资源储量 [29]。同时，本研究可反映基于历史的未来趋势，但季节变化不容忽视。例如夏季作物用水量在整个生长季中达到最大，但降水的增多在一定程度上缓解了干旱。因此，GDVI 也可能在一年中发生显著变化，开展季节性及月度 GDVI 评估，将更有效地指导短期内地下水资源的可持续利用[30]。

4　结论与展望

本研究构建了包含地下水依赖性、水文地质条件和气象条件 3 类因子的 GDVI 评价体系，对河南省地下水干旱脆弱性的时空分布及未来变化进行了分析。结果表明：

1）1980—2014 年，研究区 66.32%的区域 GDVI 处于中高水平，整体表现为东部平原较高、西部和南部山区较低的空间格局。周口沈丘县、南阳南召县、平顶山舞钢市等地存在极高脆弱性区，主要与耕地分布广、农业灌溉强度大及地下水开采程度较高有关。

2）未来不同发展路径下，研究区耕地总体呈由中部向东南部收缩的趋势，省域地下水抗旱能力有望提升。但受气候变暖影响，蒸散增强和作物需水增加仍将使部分地区持续面临地下水干旱风险，

其中周口市和林州市表现较为突出。

3）在气象变化与土地利用变化的耦合作用下，地下水高脆弱性区域逐步向中低脆弱性区域转变，研究区地下水干旱脆弱性整体呈下降趋势，并表现出一定的单极化演变特征。

未来可进一步结合地下水开采动态、灌区调水工程及季节尺度气象变化，对地下水干旱脆弱性开展更高时空分辨率的模拟与评估，以提升研究结果对区域地下水资源管理和干旱应对的指导作用。

参 考 文 献

[1] Ling Zihan, Shu Longcang, Wang Dingkui, et al. Assessment and projection of the groundwater drought vulnerability under different climate scenarios and land use changes in the Sanjiang Plain, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2023,49(1):101498.

[2] Ding Yibo, Lu Zehua, Wu Linging, et al. Evaluating the spatiotemporal dynamics of driving factors for multiple drought types in different climate regions of China[J]. Journal of Hydrology,2024,640(1):131710.

[3] Schuler P, Campanyà J, Moe H, et al. Mapping the groundwater memory across Ireland: A step towards a groundwater drought susceptibility assessment[J]. Journal of Hydrology,2022,612(1):128277.

[4] Xu Wei, Su Xiaosi. Challenges and impacts of climate change and human activities on groundwater-dependent ecosystems in arid areas–a case study of the Nalenggele alluvial fan in NW China[J]. Journal of Hydrology,2019,573(1):376-385.

[5] 李发鹏,穆文彬,肖恒.北方干旱半干旱地区以水定地问题探析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):104-108. [Li Fapeng, Mu Wenbin, Xiao Heng. Analysis on the problem of land determination by water in arid and semi-arid areas of northern China[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2):104-108.]

[6] 河南省水利厅. 2023 年河南省水资源公报[R]. 郑州：河南省水利厅，2024. [Henan Provincial Department of Water Resources. 2023 Henan Province Water Resources Bulletin[R]. Zhengzhou: HPDWR,2024.]

[7] 马建锋,李彦武,史聆聆,等.中原经济区平原区地下水脆弱性评价[J].环境工程,2016,34(8):149-153,148. [Ma Jianfeng, Li Yanwu, Shi Linging, et al. Vulnerability assessment of groundwater in plain area of Central Plains Economic Zone[J]. Environmental Engineering, 2016,34(8):149-153,148.]

[8] 孟俊贞,杨小权,李志萍.基于遥感技术的地下水埋深和储变量监测评估研究进展[J].华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025,46(5):23-33. [Meng Junzhen, Yang Xiaoquan, Li Zhiping. Research progress on monitoring and evaluation of groundwater depth and storage variables based on remote sensing technology[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(5):23-33.]

[9] Formetta G, Feyen L. Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards[J]. Global Environmental Change,2019,57(5):004.

[10] Sam A S, Kumar R, Kächele H, et al. Vulnerabilities to flood hazards among rural households in India[J]. Natural Hazards,2017,88(1):1133-1153.

[11] Aller L T, Bennett T, Lehr J H, et al. Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings[J]. Journal of the Geological Society of India,1987,29(1).

[12] Abunada Z, Kishawi Y, Alslaibi T M, et al. The application of SWAT-GIS tool to improve the recharge factor in the DRASTIC framework: case study[J]. Journal of Hydrology,2021,592(1):125613.

[13] Sresto M A, Siddika S, Haque M N, et al. Groundwater vulnerability assessment in Khulna district of Bangladesh by integrating fuzzy algorithm and DRASTIC (DRASTIC-L) model[J]. Modeling Earth Systems and Environment,2022,8(3):3143-3157.

[14] Roy P, Pal S C, Chakrabortty R, et al. Climate change and groundwater overdraft impacts on agricultural drought in India: Vulnerability assessment, food security measures and policy recommendation[J]. Science of the Total Environment,2022,849(1):157850.

[15] 孙法圣,程品,张博.基于物理过程的矿区地下水污染风险评价[J].环境科学,2014,35(4):1285-1289. [Sun Fasheng, Cheng Pin, Zhang Bo. Risk assessment of groundwater pollution in mining area based on physical process[J]. Environmental Science,2014,35(4):1285-1289.]

[16] 陈守煜.区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J].中国工程科学,2001,3(2):6.[Chen Shouyi. The theoretical model and method of regional water resources sustainable utilization evaluation[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering,2001,3(2):6.]

[17] 河南省水利勘测设计研究有限公司. 河南省引黄灌区水资源优化配置与节水改造研究报告[R]. 郑州: 河南省水利厅，2022. [Henan Water & Power Engineering

Condulting Co., Ltd. Research report on optimising water resource allocation and implementing water-saving upgrades in Yellow River irrigation districts of Henan Province[R]. Zhengzhou: HPDWR,2022.
[18] Wang Zhiye, Xiong Hanxiang, Ma Chuanming, et al. Assessment of groundwater vulnerability by applying the improved DRASTIC model: a case in Guyuan City, Ningxia, China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(20):59062-59075.
[19] Zhang Lei, Song Wei, Song Wen. Assessment of agricultural drought risk in the Lancang-Mekong region, South East Asia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(17):6153.
[20] Zhao Jing, Chen Xuelong, Zhang Jing, et al. Higher temporal evapotranspiration estimation with improved SEBS model from geostationary meteorological satellite data[J]. Scientific Reports,2019,9(1):14981.
[21] Jain, V.K., Pandey, R.P., Jain, M.K.. Spatio-temporal assessment of vulnerability to drought[J]. Natural Hazards, 2015,76(1):443-469.
[22] 河南省地质调查院.河南省水文地质调查报告（2020）[R].郑州:河南省自然资源厅, 2021. [Henan Institute of Geological Survey. Hydrogeological Survey Report of Henan Province（2020）[R]. Zhengzhou: Hydrogeological Survey Report of Henan Province, 2021.]
[23] Haidara I, Tahri M, Maanan M, et al. Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability[J]. Geoderma,2019,354(1):113853.
[24] Zhu Yun, Luo Jian, Pan Keliang. Reconstruction of integrated hydraulic turbine characteristics curve based on classification weight neural network[J]. Energy Reports, 2023,9(S7):884-896.
[25] Chen Jie, Xu Chongyu, Guo Shenglian, et al. Progress and challenge in statistically downscaling climate model outputs[J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(4):299-313.
[26] Luo Min, Liu Tie, Meng Fanhao, et al. Spatiotemporal characteristics of future changes in precipitation and temperature in Central Asia[J]. International Journal of Climatology,2019,39(3): 1571-1588.
[27] Lin Wenqing, Chen Huopo. Assessment of model performance of precipitation extremes over the mid-high latitude areas of Northern Hemisphere: From CMIP5 to CMIP6[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020,13(6):598-603.
[28] 高海燕.地下水资源可持续利用策略探讨[J].农业灾害研究，2024,14(8):246-248. [Gao Haiyan. Discussion on sustainable utilization strategy of groundwater resources[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2024, 14(8): 246-248.]
[29] Kafle K, Balasubramanya S, Stifel D, et al. Solar-powered irrigation in Nepal: implications for fossil fuel use and groundwater extraction[J]. Environmental Research Letters, 2024,19(8):084012.
[30] 刘中培,张冬青,韩宇平,等. 灌区地下水作为生活饮用水的适宜性演变规律分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(3):103-108. [Liu Zhongpei, Zhang Dongqing, Han Yuping, et al. Analysis on the suitability evolution law of groundwater as drinking water in irrigation area[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2021,42(3):103-108.]

Assessment and Prediction of Groundwater Drought Vulnerability in Henan Province under Climate and Land Use Change

MA Yuxuan[1,2], LIU Jie[1], XU Ruixin[1], GU Lei[1,2], LIU Dexin[1,2]

(1. Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract:【Objective】 Revealing the spatiotemporal patterns and future evolution of groundwater drought vulnerability in Henan Province under climate and land-use changes, providing scientific support for optimizing water resource allocation and adaptive management. **【Methods】** This study employed a comprehensive indicator evaluation approach,

selecting seven assessment factors including groundwater extraction volume, land use, and precipitation. Utilizing existing datasets, the Groundwater Drought Vulnerability Index (GDVI) was applied to quantify groundwater drought vulnerability in Henan Province. The CMIP6 dataset was used to project future changes in precipitation, temperature, and evapotranspiration under different climate scenarios, thereby assessing the distribution trends of future GDVI. **【Results】** (1) From 1980 to 2014, Henan Province's average GDVI value was 4.97, indicating an overall moderate level of drought vulnerability. Areas classified as moderate accounted for 32.68% of the total. (2) Areas with extremely high drought vulnerability exhibited scattered patchy distributions, primarily associated with high proportions of cultivated land and intensive agricultural irrigation practices. (3) Under future scenarios, increased precipitation mitigates vulnerability more effectively than the drought-enhancing effects of elevated evapotranspiration. Consequently, groundwater drought vulnerability in Henan Province shows an overall decreasing trend. **【Conclusion】** Future arable land will gradually contract from central Henan Province toward the southeast, enhancing the province's overall groundwater drought resistance. Under the dual impacts of climate change and land use change, the distribution of GDVI in Henan Province will exhibit a unipolar trend in the future. These findings provide theoretical support for water resource allocation and utilization.
Keywords: groundwater; GDVI; climate change; future prediction; Henan Province