

河南省沿黄城市水土资源时空匹配特征及预测分析

郭辉¹, 夏帆², 张晓立³, 姜欣言³, 孙新华⁴, 赵路朋⁵

(1. 华北水利水电大学 水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210024; 4. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016;
5. 河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 河南 郑州 450008)

摘要:【目的】水土资源是经济社会发展最重要的基础性资源。明确水土资源的时空匹配关系及变化特征, 为区域水土资源优化配置提供决策参考。【方法】以河南省沿黄城市为例, 基于一阶动力系统, 以2010—2022年的历史数据建立系统动力学模型, 预测2020—2035年区域用水情况, 并以此作为PLUS模型的约束条件, 模拟2020—2035年区域土地利用格局, 并分别计算农业水土资源和城镇水土资源的匹配系数。【结果】①2020—2035年河南省沿黄城市总用水量呈现增长趋势, 其中郑州、开封和新乡的用水量增加趋势显著。②2010—2020年建设用地的转入面积显著高于其他土地利用类型的, 其中耕地是转为建设用地面积最大的类型。③2030—2035年, 农业水土资源和城镇水土资源的匹配系数分别为0.186万m³/hm²和0.513万m³/hm², 与2025—2030年的相比分别增加10.06%和4.7%。④郑州、洛阳、三门峡、济源等工业型城市城镇水土资源匹配状况较好, 农业水土资源匹配状况较差; 开封、新乡、焦作、濮阳等农业型城市的城镇水土资源匹配状况较差, 农业水土资源匹配状况较好。【结论】2020—2035年河南省沿黄城市的农业水土资源匹配系数和城镇水土资源匹配系数先减小后增加, 水土资源匹配程度将得到改善。

关键词: 水资源; 土地资源; 水土匹配系数; 河南省沿黄城市

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 2096-6792(2025)06-0034-10

水土资源是人类社会生存和发展的基础资源。当前, 在经济社会高速发展背景下, 工业化和城市化进程加快, 人类对水土资源的需求和开发利用程度显著提高, 导致水土资源的供需矛盾日益突出^[1-2], 进而影响社会-经济-生态环境的平衡。水土资源匹配不均衡所产生的负面影响, 已成为制约区域经济社会可持续发展的瓶颈^[3-5]。因此, 开展水土资源平衡调控研究, 减轻水土资源失衡带来的不利影响, 推进水土资源优化配置, 已成为当前水土资源研究的核心方向之一。

已有研究将洛伦兹曲线和基尼系数引入水土资源匹配与协调关系分析中, 用于评价水土资源的均衡状态^[6-8]。该方法可直接反映水土资源的匹配状况, 丰富了水土资源匹配研究内容, 但难以反映水土资源承载力的变化, 同时无法识别其影响因

素。通过构建熵权逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 模型^[9], 可对区域农业水土资源承载力的演变特征及影响因素进行动态分析与定量诊断。另有研究从水足迹角度出发, 结合水土资源匹配系数与空间计量模型^[10], 探讨农业水土资源匹配对农业经济发展的影响。基于水足迹理论的水土资源时空匹配特征分析, 还能够反映农作物实际生产过程中水土资源在时空上的一致性分布^[11]。

科学评价水土资源匹配特征, 是实现水土资源与经济社会均衡发展的重要前提^[12-13]。已有研究围绕农业生产安全对耕地与水资源匹配关系进行了探讨, 主要采用数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 模型^[14]、水土匹配系数^[15]、集对分析^[16]、基尼系数^[17]等方法, 基于历史数据从区域、

收稿日期/Received: 2024-06-07

修回日期/Revised: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42201017); 河南省水利科技攻关项目 (GG202403)。

第一作者: 郭辉 (1991—), 男, 讲师, 博士, 从事水文水资源、气象水文方面的研究。E-mail: xjguohui@hotmail.com。

通信作者: 夏帆 (1992—), 男, 工程师, 博士, 从事水文水资源方面的研究。E-mail: doctor_xia2018@sina.com。

流域或全国尺度,评价水土资源匹配的综合效率和匹配程度,并分析其波动原因,为农业水土资源合理配置提供了参考依据。

水土资源平衡不仅关乎农业,还涉及工业发展和城市化进程中对水土协调的需求,需面向未来进行科学评价。鉴于此,在现有研究基础上,以河南省沿黄城市为例,基于历史数据,采用系统动力学方法预测未来水资源状况,以水资源为约束条件,耦合斑块生成土地利用模拟(Patch-generating Land Use Simulation, PLUS)模型,模拟土地利用变化情况,并基于水土匹配系数,从农业水土匹配和城镇水土匹配两个维度评价未来水土资源匹配程度,以期对未来水土资源优化调控提供参考。

1 研究区概况

河南省沿黄城市(110°21'E~116°06'E、33°41'N~36°06'N)地处黄河中下游过渡带,包括三门峡、洛阳、济源、焦作、新乡、开封和濮阳 8 个市,地理位置如图 1 所示。研究区整体地势西高东低,年降水量为 500~900 mm,平均气温为 12~16℃。花园口站 1956—2020 年实测多年平均径流量为 369.8 亿 m³。2022 年,研究区总人口为 4 080 万人, GDP 总量为 31 337.87 亿元,是河南省重要的经济带、人口集聚区和产业发展中心。然而,该区域水资源短缺、用水需求较大,在气候变化及人类活动的共同影响下,区域水土资源供需矛盾日益突出,严重制约了区域高质量发展。

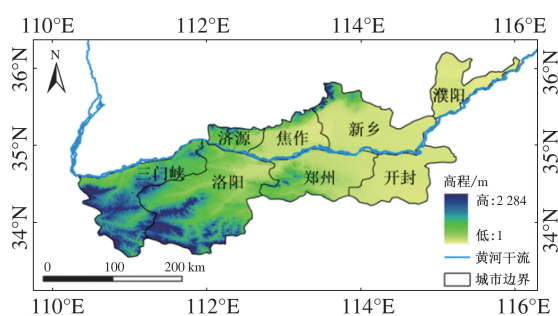


图 1 河南省沿黄城市区位图

Fig. 1 Location of cities along Yellow River in Henan Province

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分

辨率为 30 m。水资源数据出自《河南省水资源公报》以及《黄河水资源公报》(<http://www.yrcc.gov.cn/>)。社会经济数据取自《河南省统计年鉴》。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化特征

土地利用转移矩阵是定量表征土地利用类型间相互转化数量和方向的主要方法^[18-19]。该方法能够揭示土地利用变化的结构特征和各类型面积转移的方向,从而更好反映其时空演变过程。土地利用转移矩阵 S 的表达式为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{i1} & \cdots & S_{i2} & \cdots & S_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为研究时段内 i 类土地类型到 j 类土地类型的转换面积, km²; n 为一个时期土地利用类型总数。

2.2.2 基于系统动力学的用水量预测

系统动力学(System Dynamics, SD)最早于 1956 年由 FORRESTER J W 提出,以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为手段,用于研究复杂系统的结构、功能与动态行为间的关系,适用于长期性、动态性和战略性问题研究^[20]。在对水资源承载力进行系统分析的基础上,从供给与需求的角度出发,将水土资源承载系统划分为水资源供给、生活用水、生产用水和生态用水 4 个子系统。各子系统以水资源为纽带,相互联系、相互制约,共同影响区域水土资源的平衡状态^[21]。本研究采用一阶系统动力学方法对河南省沿黄城市未来用水量进行预测,系统流图如图 2 所示。

农业需水系统主要由灌溉用水需求构成,其中,各类农产品产量的变化设定为速率变量,其余变量为辅助变量或常量。工业需水系统以工业产值和工业用水强度为主要变量,工业产值为状态变量,工业用水强度为速率变量,其余为辅助变量或常量。生活需水系统以人口变化为主要变量,人口数量为状态变量,其余为辅助变量或常量。生态需水系统包括城镇生态环境需水与湿地需水。

供水系统的数据来源于本研究前期工作中 SWAT 模型模拟所得的未来水资源量,以供水量为约束条件。供水系统与需水系统之间通过水资源供需比建立联系。根据各变量之间的关系,确定系

统动力学方程。河南省沿黄城市需水系统 SD 模型的主要方程如下,方程中 INTEG 表示积分函数。

1)农产品产量 = INTEG (农产品产量年变化量), 万 t;

2)农产品需水量 = 农产品产量 × 农产品单位虚拟蓝水含量, 万 m³;

3)农业需水量 = 小麦需水量 + 玉米需水量 + 大豆需水量 + 花生需水量 + 蔬菜需水量 + 瓜果需水量, 万 m³;

4)工业 GDP = INTEG (工业 GDP 年变化量), 亿元;

5)工业需水量 = 工业 GDP × 工业用水强度, 万 m³;

6)生活需水量 = 城镇生活需水量 + 农村生活需

水量, 万 m³;

7)城镇生活需水量 = 城镇人口 × 城镇居民用水定额, 万 m³;

8)农村生活需水量 = 农村人口 × 农村居民用水定额, 万 m³;

9)人口数量 = INTEG (人口年变化量), 万人;

10)城镇人口 = 人口数量 × 城镇化率, 万人;

11)农村人口 = 人口数量 - 城镇人口, 万人;

12)生态需水量 = 城镇生态环境需水量 + 湿地需水量, 万 m³;

13)总需水量 = 农业需水量 + 工业需水量 + 生活需水量 + 生态需水量, 万 m³;

14)水资源供需比 = 供水量 / 总需水量;

15)供水量 = 可利用水资源量, 万 m³。

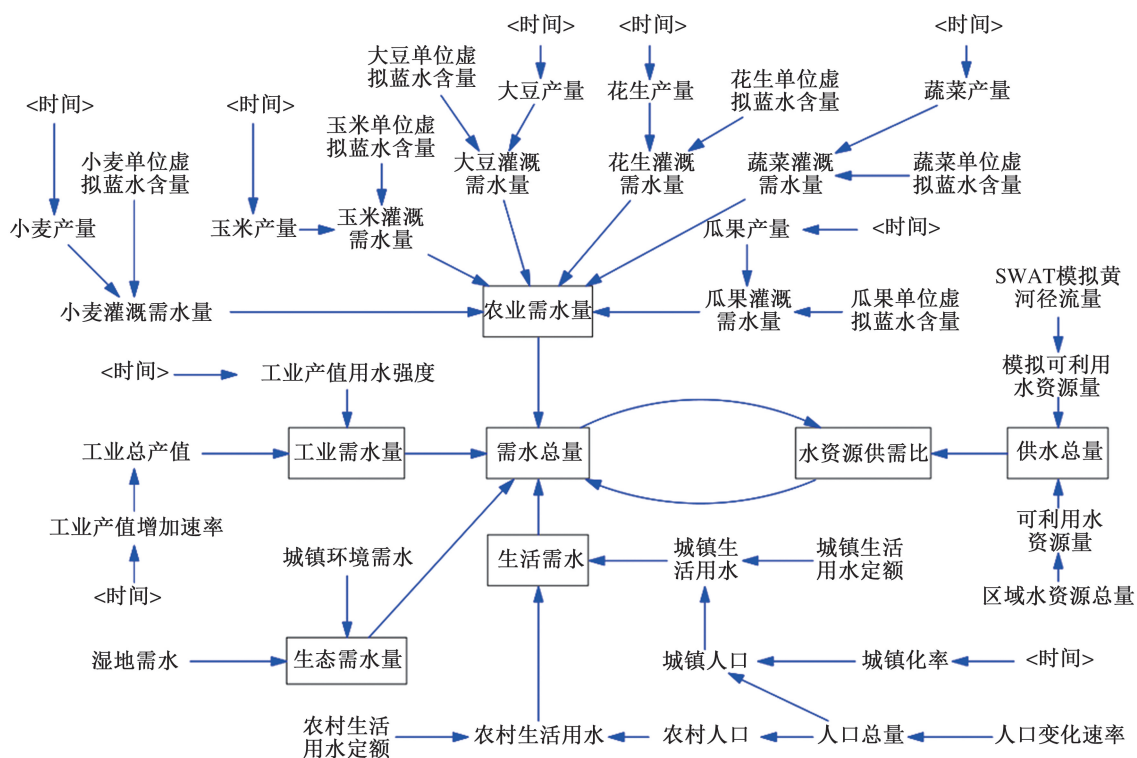


图2 河南省沿黄城市需水量预测系统流图

Fig. 2 Flowchart of water demand prediction system in cities along Yellow River in Henan Province

2.2.3 基于PLUS模型的土地利用模拟

以系统动力学模型预测的2025—2035年用水情况为约束条件,耦合PLUS模型,模拟未来的土地利用情景。PLUS模型包括用地扩张分析策略(Land Expansion Analysis Strategy, LEAS)和基于多类随机斑块种子的CA模型(CA based on Multiple Randomseeds, CARS)两个模块。通过提取历史时期各土地利用类型的扩张面积,借助LEAS模块包含的随机森林算法,可分析各类用地扩张的驱动机制与发展趋势,从而生成各类土地利用类型的发展

概率图^[22-24]。

2.2.4 水土资源匹配系数

水土资源匹配系数是指区域内平均每公顷土地占有的水资源量,反映区域内水资源和土地资源的组合状况以及水资源对土地资源的满足程度^[25-26]。河南省沿黄城市的水土资源匹配系数计算公式如下:

$$R_{ij} = \frac{W_{ij}}{S_{ij}}, \quad (2)$$

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i W_{ij}}{\sum_{i=1}^n Q_i S_{ij}} \quad (3)$$

式中: R_{ij} 为第 i 个城市第 j 部门的水土资源匹配系数,万 m^3/hm^2 ; W_{ij} 为第 i 个城市第 j 部门的用水量,万 m^3 ; S_{ij} 为第 i 个城市第 j 部门的土地面积, hm^2 ; R_j 为第 j 部门的水土资源匹配系数,万 m^3/hm^2 ; Q_i 为第 i 个城市的权重; i 为城市编号; n 为城市数量; j 为农业部门或者工业和生活部门。

考虑到各城市在产业结构及功能定位上存在差异,从水资源量、用水量、人口、GDP、用水效率 5 个方面选择计算指标。对各指标进行标准化处理后,采用熵权法^[27] 计算城市间匹配系数的权重。熵权法计算公式如下:

$$P_{ki} = \frac{A_{ki}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m A_{ki}}}, \quad (4)$$

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{k=1}^m P_{ki} \ln P_{ki}, \quad (5)$$

$$Q_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)}. \quad (6)$$

式中: P_{ki} 为第 k 个指标在第 i 个城市的比重; A_{ki} 为标准化处理后的指标值; E_i 为第 i 个城市的熵值; m 为指标个数。

根据河南省沿黄城市水土资源匹配系统集散的分异特点,并参考相关研究成果^[28-30],将水土资源匹配系数的相对匹配程度划分为 5 个等级:Ⅰ级 ($0.000 \leq R_{ij} < 0.100$),表示级差;Ⅱ级 ($0.100 \leq R_{ij} < 0.250$),表示较差;Ⅲ级 ($0.250 \leq R_{ij} < 0.350$),表示一般;Ⅳ级 ($0.350 \leq R_{ij} < 0.500$),表示良好;Ⅴ级 ($R_{ij} \geq 0.500$),表示较优。

3 结果分析

3.1 土地利用现状分析

河南省沿黄城市 2010 年、2015 年、2020 年三期的土地利用面积见表 1。

由表 1 可知:2010—2020 年,河南省沿黄城市各类土地利用类型中,耕地的面积最大,平均占研究区总面积的 53% 以上,但 2020 年的耕地面积较 2010 年的减小了 3.57%;林地 of 第二大土地利用类型,平均约占研究区总面积的 21.00%,10 年间林地面积呈增加趋势,但增幅不明显;建设用地为面积增加最为明显的土地利用类型,10 年间共增

加了 14.75%;其余土地利用类型的面积相对较小,且变化幅度不大。

表 1 河南省沿黄城市 2010—2020 年土地利用面积
Tab.1 Land use area in cities along Yellow River in Henan Province (2010–2020)

km ²			
土地类型	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	31 963.61	31 573.95	30 823.28
林地	12 388.91	12 377.45	12 457.67
草地	4 744.69	4 733.23	4 727.50
水域	1 438.31	1 512.80	1 524.26
建设用地	6 761.75	7 105.57	7 758.83
未利用地	11.46	5.73	11.46
总计	57 308.73	57 308.73	57 303.00

2010—2020 年研究区土地利用转移情况如图 3 所示。

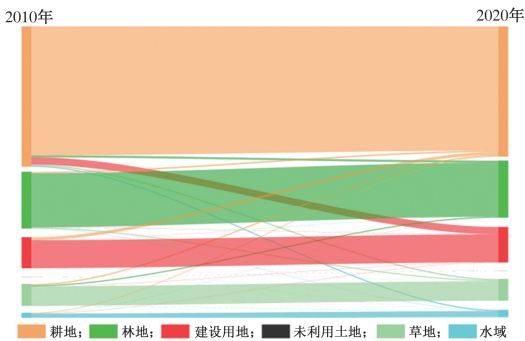


图 3 2010—2020 年土地利用转移情况
Fig.3 Land use transfer (2010–2020)

由图 3 可知:①耕地是转移面积最大的土地利用类型,其转出方向主要为建设用地;林地的转移面积次之,其后依次为建设用地、草地、水域和未利用地。②2020 年,建设用地的转入面积显著高于其他土地利用类型的。③整体上看,大部分土地维持其原有的土地利用类型,表明土地利用结构较为稳定。

3.2 水土资源匹配系数现状分析

2010—2022 年河南省沿黄城市的农业水土资源匹配系数和城镇水土资源匹配系数分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知,2010—2022 年间,研究区耕地面积虽减少 1 494.1 km^2 ,但农业水土资源匹配系数始终保持在一定的区间内,表明河南省沿黄城市用于农业生产的水资源与耕地资源处于相对稳定状态。在此期间,研究区农业水土资源匹配系数多介于Ⅰ~Ⅲ级,匹配程度相对较差。

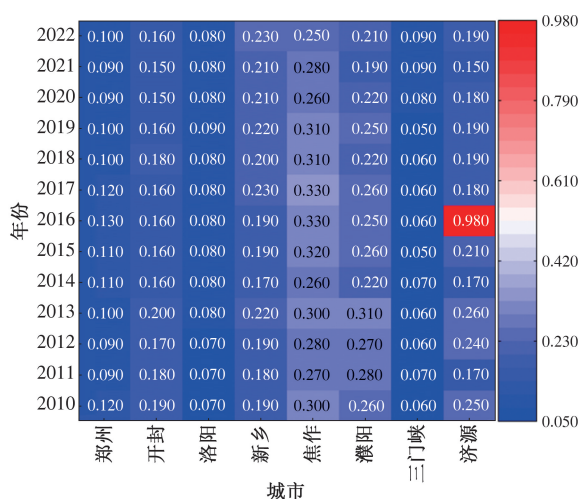


图 4 2010—2022 年河南省沿黄城市农业水土资源匹配系数 (单位: $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)

Fig. 4 Agricultural water-land resource matching coefficient in cities along Yellow River in Henan Province (2010–2022) (unit: $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)

由图 5 可知:2010—2018 年间研究区城镇水土资源匹配系数维持在较高水平,平均值为 $0.713 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$;2019—2022 年间明显下降,平均值为 $0.484 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。2010—2017 年间,研究区建成区面积增长速度缓慢,水资源相对丰富,使得城镇水土资源匹配系数整体较为稳定;2019—2022 年建成区面积增长迅速,引起城镇水土资源匹配系数降低。2010—2022 年间,城镇水土资源匹配系数属于Ⅳ级以上等级,表明该时段内城镇水土资源匹配状况良好。

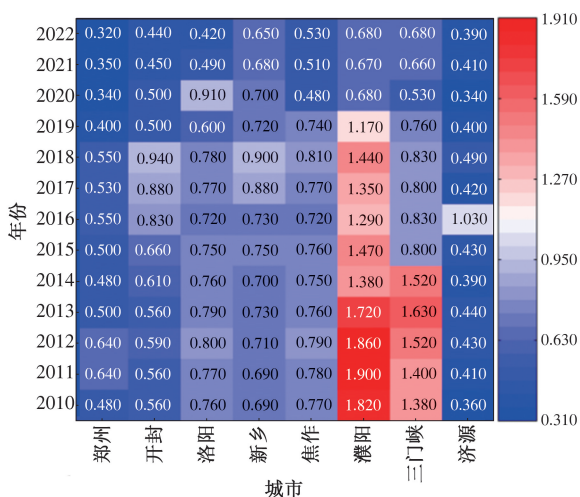


图 5 2010—2022 年河南省沿黄城市城镇水土资源匹配系数 (单位: $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)

Fig. 5 Urban water-land resource matching coefficient in cities along Yellow River in Henan Province (2010–2022) (unit: $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)

整体来看,城镇水土资源匹配系数高于农业水土资源匹配系数,研究期内各年份城镇水土资源匹

配系数均为农业水土资源匹配系数的 2~3 倍。这一差异说明河南省沿黄城市建设用地的水资源保障程度高于农业的,其原因也与河南省沿黄城市耕地面积远大于建设用地面积的现状有关。

从各城市情况来看,焦作和济源农业水土资源匹配程度相对较好,建议在维持现状的基础上寻求更为合理的水土资源利用方案。洛阳和三门峡的农业水土资源匹配系数最低,匹配状况差,需重视农业水土资源的合理调控与利用格局优化。

在城镇水土资源匹配方面,河南省沿黄城市整体的匹配系数较高。除郑州和济源的匹配系数多数年份为Ⅳ级(匹配程度良好)外,其余六市在多数年份均达到Ⅴ级,匹配程度较好。总体来看,研究区城镇水土资源匹配现状较好,水资源量能较好地满足建设用地需求。

3.3 水土资源时间匹配特征

利用 SD 模型,基于 2010—2022 年的数据预测各城市 2020—2035 年用水量,并将 2020—2022 年的模拟结果与统计数据进行对比验证。各城市用水量变化情况如图 6 所示,河南省沿黄城市总用水量变化情况如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,郑州、开封和新乡的用水量呈增加趋势,河南省沿黄城市总用水量呈现非线性增长趋势。

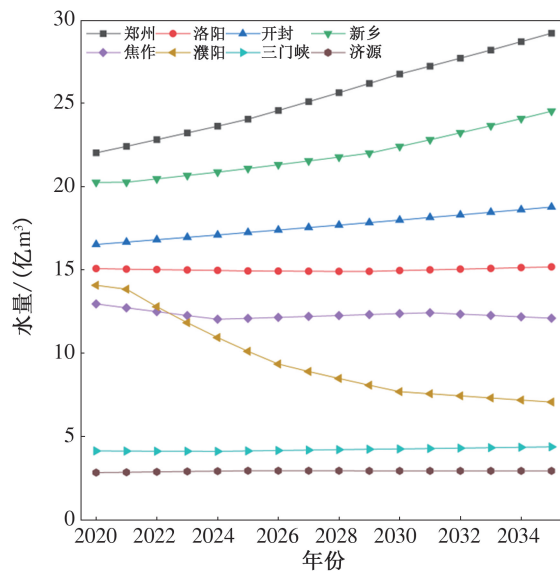


图 6 2020—2035 用水量变化情况

Fig. 6 Changes in water consumption (2020–2035)

总用水量的上升,一方面由于区域发展迅速,对水资源需求增加;另一方面也得益于水系网络的完善与水资源配套挖潜工程的建设,区域水资源供给能力不断得到提升。在最严格水资源管理制度约束下,尽管需水总量呈增长态势,但增幅较小,说明未来总用水量能够得到有效控制,水资源利用效

率有望进一步提升。

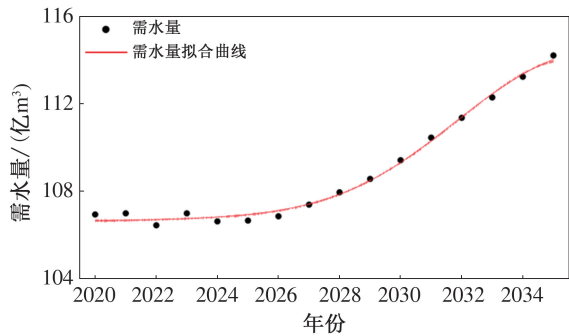


图 7 2020—2035 总用水量变化情况
Fig. 7 Changes in total water consumption
(2020—2035)

农业与城镇水土资源匹配系数的预测结果见表 2。由表 2 可知,河南省沿黄城市水土资源匹配系数的变化呈现出一定的规律性。2020—2035 年农业水土资源匹配系数总体呈现先降低后增加的趋势,由 2020—2025 年的 $0.173\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 下降到 2025—2030 年的 $0.169\text{ m}^3/\text{hm}^2$,匹配程度较差;2030—2035 年增加至 $0.186\text{ m}^3/\text{hm}^2$,匹配程度得到改善。

表 2 水土资源匹配系数预测结果
Tab. 2 Prediction results of water-land resource
matching coefficients $\text{万 m}^3/\text{hm}^2$

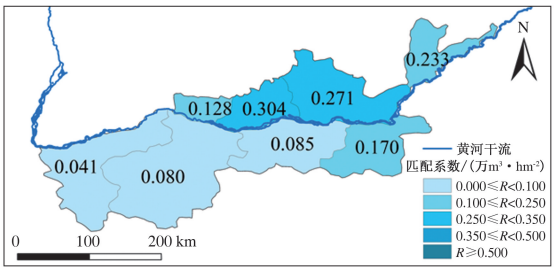
年份	农业水土资源 匹配系数均值	城镇水土资源 匹配系数均值
2020—2025	0.173	0.509
2025—2030	0.169	0.490
2030—2035	0.186	0.513

2020—2035 年河南省沿黄城市的城镇水土资源匹配系数与农业水资资源匹配系数变化态势相似。2020—2030 年城镇水土资源匹配系数均值从 $0.509\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 减少为 $0.490\text{ m}^3/\text{hm}^2$,2030—2035 年增加至 $0.513\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。结合 SD 模型模拟结果,人口增速放缓,城镇需水量增加较少;农村人口减少,导致生活需水量降低。二者共同作用使得城镇水土资源匹配系数最终实现增长。

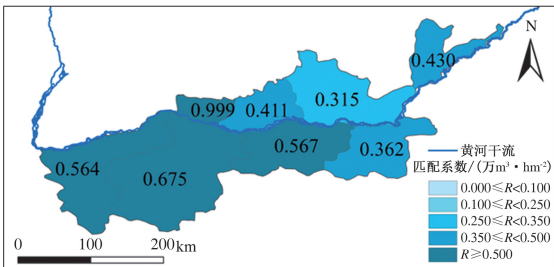
未来随着经济社会发展,在生产水平提高、水利设施不断完善与政府宏观调控等共同推动下,研究区水土资源匹配程度整体上得到提高,有助于改善水土资源严重不匹配的现状,有利于实现区域可持续发展。但是水土资源匹配系数的整体增加较为缓慢,水土资源仍将长期处于不匹配状态,可能继续影响生产效率并伴随一定的资源浪费。

3.4 水土资源空间匹配特征

2020—2025 年河南省沿黄城市的水土资源匹配系数空间分布情况如图 8 所示。



(a) 农业水土资源匹配系数



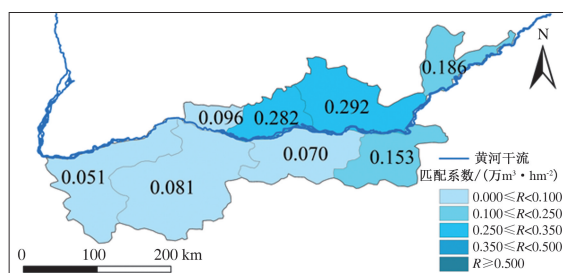
(b) 城镇水土资源匹配系数

图 8 2020—2025 年研究区水土资源匹配
系数空间分布情况

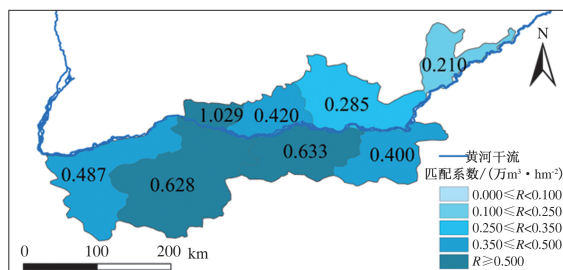
Fig. 8 Spatial distribution of water-land resource matching
coefficient in study area (2020—2025)

结合表 2 和图 8 分析可知:①农业水土资源匹配系数的平均值为 $0.173\text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。郑州、洛阳和三门峡的农业水土资源匹配程度仍处于 I 级,匹配程度极差。这表明:在当前水土资源利用状况下,郑州、洛阳和三门峡两市仍面临农业水土资源不平衡问题,主要表现为水资源对农业用地的满足程度较低,需考虑现有农业水土资源分配方案的合理性,或通过实施引调水工程增加区域水资源量,从而缓解水土资源不匹配的局面。②城镇水土资源匹配系数的分布情况与农业水土资源匹配系数的分布情况相反。2020—2025 年,研究区各市城镇水土资源匹配系数的平均值为 $0.509\text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。郑州、济源、洛阳、三门峡等城市的城镇水土资源匹配系数高于区域平均值,表明其水资源对建设用地的保障程度较高,对城镇发展具有积极的支撑作用。相比之下,开封、新乡、濮阳等城市的匹配系数相对较低。这主要是由于上述区域农业用水需求量大,工农用水矛盾较为突出,导致水资源对城镇发展的保障能力不足,在一定程度上制约了城镇化的进程。

2025—2030 年河南省沿黄城市的水土资源匹配系数空间分布情况如图 9 所示。



(a) 农业水土资源匹配系数



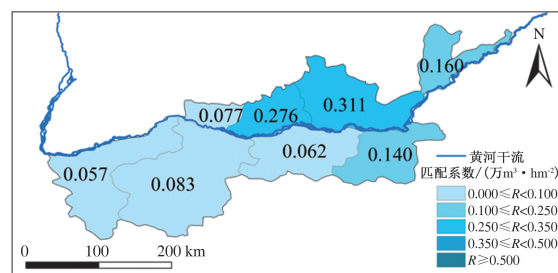
(b) 城镇水土资源匹配系数

图 9 2025—2030 年研究区水土资源匹配系数空间分布情况

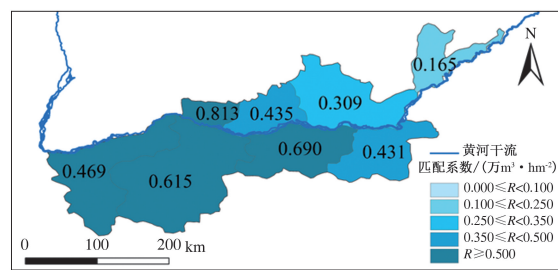
Fig. 9 Spatial distribution of water-land resource matching coefficient in study area (2025–2030)

结合表 2 和图 9 分析可知:该阶段研究区农业水土资源匹配系数的平均值为 $0.169 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$, 城镇水土资源匹配系数的平均值为 $0.490 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。2025—2030 年研究区水土资源匹配系数的空间分布规律与 2020—2025 年的相同:①农业水土资源匹配系数在东部农业生产水平较高的城市较高,在中西部农业生产水平较低的城市较低,说明研究区面临的农业水土资源危机仍较为严峻。②城镇水土资源匹配系数在经济较为发达的中部地区及建设用地较少且水资源丰富的西部地区较高。2025—2030 年城镇水土资源匹配程度的变化趋势延续 2020—2025 年的,郑州、焦作、济源、开封和濮阳的城镇水土资源匹配系数持续增长,而三门峡、洛阳和新乡的呈减少趋势,但下降速度有所减缓,表明当地实施的水土调控措施初显成效。

2030—2035 年河南省沿黄城市的水土资源匹配系数空间分布情况如图 10 所示。结合表 2 和图 10 分析可知:该阶段研究区农业水土资源匹配系数的平均值为 $0.186 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$, 城镇水土资源匹配系数的平均值为 $0.513 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。水土资源匹配系数的整体格局没有发生变化,仍然存在不均衡问题。农业水土资源匹配程度总体稳定且略有改善,其中新乡的在未来可能达到Ⅲ级。城镇水土资源匹配程度整体好转,2020—2030 年间新乡和濮阳的下降速度得到控制。



(a) 农业水土资源匹配系数



(b) 城镇水土资源匹配系数

图 10 2030—2035 年研究区水土资源匹配系数空间分布情况

Fig. 10 Spatial distribution of water-land resource matching coefficient in study area (2030–2035)

4 建议

水土资源问题的本质在于水资源时空分布不均与土地资源开发利用结构不匹配,造成水资源利用效率不高。预测结果显示,新乡、焦作的农业水土资源匹配系数较高,具有较高水土资源均衡利用水平,但也需要重视洪涝灾害对农业的影响。建议一方面加强水利基础工程建设,提升农田防洪抗灾能力;另一方面强化区域间水系连通,通过兴修水库调蓄水资源,提高水资源利用效率。郑州、洛阳、济源和三门峡等市农业水土资源匹配系数较低,呈现“地多水少”的资源不均衡格局。建议一方面从土地利用角度改善灌溉条件,提高灌溉效率;另一方面调整作物种植结构,扩大耗水量相对较小农产品的种植规模,提高农业用水效益。开封和濮阳的农业水土资源匹配系数较为均衡,应在维持水资源和耕地资源现状格局的基础上,积极通过一系列工程和非工程的措施进一步调整农业结构,以期继续优化水土资源匹配水平。郑州和洛阳的经济较为发达,其城镇水土资源匹配系数较高,应在保障水资源可持续利用的前提下,继续促进当地经济发展。三门峡和济源的城镇水土资源匹配系数也较高,主要得益于建设用地面积较小,工业和生活用水需求量较小,未来有很大的经济发展潜力,政府可以调整工业发展布局,鼓励企业落户,以

宏观手段调整水土资源匹配格局。开封、新乡、焦作和濮阳的城镇水土资源匹配系数较低,应在未来城市规划中注重产业结构调整。

按照“四水四定”原则,未来沿黄城市供水需求将保持相对稳定。在此约束条件下进行土地利用分布格局调控,可以有效提升水土资源匹配程度。为进一步促进区域水土资源匹配均衡,建议建立多元化的水源管理系统,将地表水、地下水、再生水及外调水等不同水源联合调配,提高供水灵活性、保证水资源供给稳定。同时继续推广节水型技术应用,农业方面加强节水灌溉设施使用,工业方面加大中水重复利用,降低行业单位用水量,生活方面推广使用节水器具,提高用水效率。此外,还可以探索水价改革等措施,引导行业合理用水,有效提升水资源节约力度,从而实现水资源利用效率最大化与供需动态平衡,最终提升水土资源匹配水平。

同一地区的不同产业是密不可分的整体,在研究区域水土资源格局、改善区域水土资源不匹配现状时,必须同时考虑农业水土资源和城镇水土资源等多方面的匹配关系,合理制定用水政策,大力推进水资源监管制度,积极支持科技发展,提高水资源利用效率。在保证生态和经济平衡的基础上,大力发展经济,逐步实现区域水土资源平衡,推动区域经济社会和生态环境均衡发展,为保障区域居民生活水平和国家粮食安全提供支撑。

5 结论

以河南省沿黄城市为研究区,预测了未来用水量,模拟了耕地面积和建设用地面积演变,在此基础上计算了农业水土资源匹配系数和城镇水土资源匹配系数。主要结论如下:

1) 河南省沿黄城市的现状水土资源匹配系数较低,反映出农业水土资源存在严重的不匹配问题,城镇水土资源匹配状况优于农业水土资源的。

2) 2025—2035年土地利用预测结果显示:与2020年相比,2025年水域、未利用地和建设用地的面积基本保持不变,耕地增加,林地、草地面积呈减少趋势;2030年建设用地、水域面积进一步扩大,耕地和林地、草地面积与2025年的基本持平;到2035年,建设用地面积进一步增加。

3) 2025—2035年研究区的农业水土资源匹配系数和城镇水土资源匹配系数持续减小的趋势将逆转,农业水土资源匹配系数从 $0.173 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 增至 $0.186 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$,城镇水土资源匹配系数从 $0.509 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 增至 $0.513 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ 。水土资源

匹配系数的空间格局为:郑州、洛阳、三门峡、济源等工业型城市城镇水土资源匹配状况较好;开封、新乡、焦作、濮阳等农业型城市农业水土资源匹配系数较高。

参 考 文 献

- [1] 曹连海,刘晓博,张志强,等. 基于CRITIC-TOPSIS的许昌市农业水土资源评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 56-61. [CAO L H, LIU X B, ZHANG Z Q, et al. Evaluation on agricultural water and soil resources in Xuchang City based on CRITIC-TOPSIS[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 56-61.]
- [2] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等. 国内外区域水土资源匹配研究综述[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 20-24, 74. [LIU J, BAO Z X, LIU C S, et al. Review of the study on the matching of regional land and water resources at home and abroad[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 20-24, 74.]
- [3] HUANG X, FANG H, WU M Y, et al. Assessment of the regional agricultural water-land Nexus in China: a green-blue water perspective[J]. Science of The Total Environment, 2022, 804: 150192.
- [4] 刘雁慧,李阳兵,梁鑫源,等. 中国水资源承载力评价及变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1080-1091. [LIU Y H, LI Y B, LIANG X Y, et al. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1080-1091.]
- [5] LUO J M, ZHANG H M, QI Y Q, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing Tianjin Hebei region, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107326.
- [6] SHEN Y, ZHANG Y, SCANLON R B, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013: 181133-181142.
- [7] ERIK N, HEATHER S, PETER H, et al. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models[J]. PloS One, 2010, 5(12): e14327.
- [8] 吴宇哲,鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2023(5): 123-125. [WU Y Z, BAO H J. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023(5): 123-125.]
- [9] 文倩,孙江涛,范利瑶,等. 基于熵权TOPSIS的河南省农业水土资源承载力时空分异与关联分析[J]. 水土保持研

- 究,2022,29(1):333-338. [WEN Q, SUN J T, FAN L Y, et al. Evaluation of agricultural soil-water resources carrying capacity (ASWCC) and relation analysis based on entropy weight TOPSIS in Henan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1):333-338.]
- [10] 樊慧丽,付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长:以长江经济带为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10):193-203. [FAN H L, FU W G. Analysis of water and soil resources matching and agricultural economic growth in China from the perspective of water footprint: taking the Yangtze River Economic Belt as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(10):193-203.]
- [11] 杨静,周冬梅,马静,等. 疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6):982-992. [YANG J, ZHOU D M, MA J, et al. Spatial and temporal matching characteristics of agricultural land and water resources in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6):982-992.]
- [12] 王建华,何国华,何凡,等. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4):1-8. [WANG J H, HE G H, HE F, et al. Utilization and matching patterns of water and land resources in China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4):1-8.]
- [13] DU J, YANG Z, WANG H, et al. Spatial-Temporal matching characteristics between agricultural water and land resources in Ningxia, Northwest China [J]. Water, 2019, 11(7):1460.
- [14] 黄克威,袁鹏,刘刚. 基于 DEA 的四川省水土资源匹配研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10):58-61, 65. [HUANG K W, YUAN P, LIU G. Research on water and soil resources matching in Sichuan Province Based on DEA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10):58-61, 65.]
- [15] 刘统兵,方瑜,黄峰,等. 中国广义农业水土资源匹配及利用状况动态评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10):56-65. [LIU T B, FANG Y, HUANG F, et al. Dynamic evaluation of the matching degree and utilization condition of generalized agricultural water and arable land resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10):56-65.]
- [16] 周亮广,金菊良,周玉良,等. 基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4):118-125, 186. [ZHOU L G, JIN J L, ZHOU Y L, et al. Matching of agricultural water and soil resources in Jianghuai Hilly Area based on set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):118-125, 186.]
- [17] 王亚迪,左其亭,刘欢,等. 河南省水土资源匹配特征及均衡性分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(4):55-59, 64. [WANG Y D, ZUO Q T, LIU H, et al. Equilibrium analysis of the matching characteristics of water and soil resources in Henan Province [J]. Yellow River, 2018, 40(4):55-59, 64.]
- [18] 刘露,朱得胜,夏帆,等. 延河流域土地利用变化特征分析[J]. 地理空间信息, 2021, 19(5):38-41, 4. [LIU L, ZHU D S, XIA F, et al. Characteristic analysis of land use changes in Yan River Basin [J]. Geospatial Information, 2021, 19(5):38-41, 4.]
- [19] 廖慧,舒章康,金君良,等. 1980—2015 年黄河流域土地利用变化特征与驱动力[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1):129-139. [LIAO H, SHU Z K, JIN J L, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River basin from 1980 to 2015 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1):129-139.]
- [20] 姜秋香,赵蚰竹,王子龙,等. 系统动力学在水土资源系统中的应用研究进展[J]. 东北农业大学报, 2017, 48(7):91-96. [JIANG Q X, ZHAO Y Z, WANG Z L, et al. Research advance on the system dynamics used in the soil and water resources [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(7):91-96.]
- [21] 赵汝鹏,王昕,李庆国,等. 基于系统动力学模型的山东省农业供需水优化[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(6):653-658, 667. [ZHAO R P, WANG X, LI Q G, et al. Optimization of agricultural water supply and demand in Shandong Province based on system dynamics model [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(6):653-658, 667.]
- [22] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.
- [23] 李琛,高彬嫔,吴映梅,等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1):84-94. [LI C, GAO B P, WU Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(1):84-94.]
- [24] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等. 基于 PLUS-SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4):1246-1258. [JIANG X F, DUAN H C, LIAO J, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS-SD coupling model [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4):1246-1258.]
- [25] 姜秋香,付强,王子龙,等. 三江平水土资源空间匹配格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2):270-277. [JIANG Q X, FU Q, WANG Z L, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2):270-277.]
- [26] 夏帆,陈莹,窦明,等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):52-57. [XIA F,

- CHEN Y, DOU M, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1): 52–57.]
- [27] 张帆, 尹萌, 张金霞. 基于熵权 TOPSIS 的黄河流域甘肃段水资源承载力评价[J]. *人民黄河*, 2024, 46(4): 79–85. [ZHANG F, YIN M, ZHANG J X. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Gansu section of the Yellow River Basin based on Entropy-Weight-TOPSIS Model[J]. *Yellow River*, 2024, 46(4): 79–85.]
- [28] 李慧, 周维博, 庄妍, 等. 延安市农业水土资源匹配及承载力[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 156–162. [LI H, ZHOU W B, ZHUANG Y, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an City[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 156–162.]
- [29] 王悦, 蒋志辉, 褚家琦, 等. 塔里木河流域农业水土资源时空匹配关系研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 360–370. [WANG Y, JIANG Z H, CHU J Q, et al. Study on the spatiotemporal matching relationship of agricultural water and land resources in the Tarim River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 360–370.]
- [30] 侯淑涛, 袁伟豪, 陈建龙, 等. 黑龙江省农业水土资源匹配格局与区域调控[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 150–157, 165. [HOU S T, YUAN W H, CHEN J L, et al. Matching pattern and regional regulation of agricultural water and land resources in Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 150–157, 165.]

Spatiotemporal Matching Characteristics and Prediction Analysis of Water-Land Resources in Cities along Yellow River in Henan Province

GUO Hui¹, XIA Fan², ZHANG Xiaoli³, JIANG Xinyan³, SUN Xinhua⁴, ZHAO Lupeng⁵

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450016, China; 5. Construction Administration Bureau of the Xixiayuan Water Control Complex Water Conveyance and Irrigation Project, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: [Objective] Water and land resources are the most fundamental resources for economic and social development. This study aims to clarify the spatiotemporal matching relationships and variation characteristics of water and land resources, thereby providing a decision-making reference for the optimal allocation of regional water and land resources. **[Methods]** Taking the cities along the Yellow River in Henan Province as a case study, a system dynamics model was established based on a first-order dynamic system and historical data from 2010 to 2022. This model was used to predict regional water consumption from 2020 to 2035. The prediction results were then used as a constraint for the PLUS model to simulate the regional land use patterns from 2020 to 2035. Additionally, the matching coefficients of agricultural water-land resources and urban water-land resources were calculated respectively. **[Results]** (1) The total water consumption in cities along the Yellow River in Henan Province showed an increasing trend from 2020 to 2035, among which Zhengzhou, Kaifeng, and Xinxiang exhibited a significant increasing trend. (2) From 2010 to 2020, the area transferred into construction land was substantially larger than that of other land use types, with cropland being the primary source of such transfer. (3) During 2030–2035, the matching coefficient of agricultural and urban water-land resources were $1\ 860\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ and $5\ 130\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, respectively, representing increases of 10.06% and 4.7% compared to the 2025–2030 period. (4) In industrial cities such as Zhengzhou, Luoyang, Sanmenxia, and Jiyuan, the matching status of urban water-land resources was relatively good, while that of agricultural water-land resources was poor. In agricultural cities such as Kaifeng, Xinxiang, Jiaozuo, and Puyang, the matching status of urban water-land resources was relatively poor, while that of agricultural water-land resources was good. **[Conclusion]** From 2020 to 2035, the agricultural and urban water-land resource matching coefficients in the cities along the Yellow River in Henan Province initially decrease and then increase, indicating an overall improvement in the degree of water-land resource matching.

Keywords: water resources; land resources; water-land resource matching coefficient; cities along Yellow River in Henan Province

(编辑:马伟希)