

doi: 10.12029/gc20220401001

马涛,李文莉,韩双宝,张红强,王文科,李甫成,李海学,贺旭波,赵梅梅. 2023. 黄河流域陕西省地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力[J]. 中国地质, 50(5): 1432-1445.

Ma Tao, Li Wenli, Han Shuangbao, Zhang Hongqiang, Wang Wenke, Li Fucheng, Li Haixue, He Xubo, Zhao Meimei. 2023. Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin[J]. Geology in China, 50(5): 1432-1445(in Chinese with English abstract).

黄河流域陕西省地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力

马涛¹,李文莉^{2,3},韩双宝^{1,4},张红强^{2,3},王文科⁵,李甫成¹,
李海学¹,贺旭波^{2,3},赵梅梅^{2,3}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 自然资源部陕西西安地裂缝地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质环境监测总站(陕西省地质灾害中心), 陕西 西安 710054; 4. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055; 5. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710018)

摘要:【研究目的】陕西省是黄河流域的重要省份,揭示黄河流域陕西省地下水资源禀赋,探究地下水资源分布特征、影响因素及开发利用潜力可为黄河流域生态保护和高质量发展提供重要支撑。【研究方法】本文以黄河流域陕西省为研究区,划分评价单元,评价地下水资源量;引入泰尔指数从人口和面积两方面评估各区域地下水资源分布差异;通过灰色关联分析探究地下水资源分布的影响因素及影响程度;利用水资源负载指数和开采潜力指数,定量评价各行政区地下水资源开发利用程度及潜力。【研究结果】黄河流域陕西省多年平均地下水资源量为 $77.59 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,地下水资源分布差异较大,各评价单元中关中盆地地下水资源人口和面积分布差异最大,行政区中延安市与西安市地下水资源分布差异最大。降水是全区地下水资源最主要的影响因素,其次为人类活动尤其农业灌溉,地表水因素对渭南市、榆林市有较大影响,蒸散发对延安、榆林、宝鸡地下水资源有一定影响。研究区地下水开采潜力指数介于0.8~2.5,地下水资源负载指数呈现上升趋势,较全国属于高负载区,各行政区开发利用潜力差异明显,开发程度较高区域集中在关中城市群,西安市开发程度最高,铜川市开发利用程度最低。【结论】黄河流域陕西省地下水资源及开发潜力分布差异大、影响因素多元,应进一步加强水资源优化配置与分区分类调控,构建更加协调的资源发展格局。

关键词:地下水资源;分布差异;开发利用潜力;水文地质调查工程;黄河流域;陕西省

创 新 点:重新构建黄河流域陕西省地下水资源评价分区,提出最新评价成果;基于数理统计等方法系统化分析地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力,为区域地下水资源研究与合理利用提供重要参考。

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1432-14

Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin

收稿日期: 2022-04-01; 改回日期: 2023-03-01

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190333)、陕西省地质调查院公益性地质调查项目(202111)、陕西省自然资源生态修复保护专项《陕西省地下水资源监测评价》联合资助。

作者简介: 马涛,男,1991年生,工程师,主要从事地下水资源调查评价工作;E-mail: matao@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 韩双宝,男,1983年生,高级工程师,主要从事水文地质与水资源调查研究工作;E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn。

MA Tao¹, LI Wenli^{2,3}, HAN Shuangbao^{1,4}, ZHANG Hongqiang^{2,3}, WANG Wenke⁵,
LI Fucheng¹, LI Haixue¹, HE Xubo^{2,3}, ZHAO Meimei^{2,3}

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Geological Environment Monitoring Station (Shaanxi Geological Disaster Center), Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 5. College of Water Resources and Environment, Chang'an University, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

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

[Objective] Shaanxi Province is an important province where the Yellow River flows. Revealing groundwater resource endowment, exploring distribution characteristics, influencing factors and exploitation and utilization potential of groundwater resources can provide important support for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. **[Methods]** Taking Shaanxi Province of Yellow River Basin as the study area, the groundwater resources are evaluated by dividing evaluation units. The Thiel index is introduced to assess differences in the distribution of groundwater resources by region in terms of both population and area. Grey correlation analysis is used to explore the influencing factors and degree of groundwater resource distribution. The exploitation and utilization degree and potential of groundwater resources in each administrative region are evaluated quantitatively by means of water resource load index and exploitation potential index. **[Results]** The annual average groundwater resource in Shaanxi Province of the Yellow River Basin is 77.59×10^8 m³/a. The regional distribution of groundwater resources varies greatly. The population and area distribution of groundwater resources in Guanzhong Basin area of each evaluation unit has the largest difference, and the difference of groundwater resources distribution between Yan'an City and Xi'an City is the largest. Precipitation is the most important factor affecting groundwater resources in the whole region, followed by human activities, especially agricultural irrigation. Surface water factors have a great impact on Weinan and Yulin cities, and evapotranspiration has a certain impact on groundwater resources in Yan'an, Yulin and Baoji. The groundwater exploitation potential index of the study area is between 0.8 and 2.5, and the groundwater resource load index shows an upward trend, which is a high load area compared with the whole country. The spatial difference of development and utilization potential of each administrative region is obvious. The region with high development degree is concentrated in Guanzhong City Group. Xi'an City has the highest development degree, whereas Tongchuan City has the lowest development and utilization degree. **[Conclusions]** The distribution of groundwater resources and development potential in Shaanxi Province of the Yellow River Basin is very different, and the influencing factors are multiple. Therefore, it is necessary to further strengthen the optimal allocation of water resources, zoning and classification regulation, and build a more coordinated pattern of resource development.

Key words: groundwater resources; distribution difference; exploitation potential; hydrogeological survey engineering; the Yellow River Basin; Shaanxi Province

Highlights: The evaluation zone of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River basin is reconstructed and the latest evaluation results are put forward. Based on mathematical statistics and other methods, the distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources are systematically analyzed, which provides an important reference for the research and rational utilization of regional groundwater resources.

About the first author: MA Tao, male, born in 1991, engineer, engaged in the investigation and evaluation of groundwater resources; E-mail: matao@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: HAN Shuangbao, male, born in 1983, senior engineer, engaged in the research of hydrogeology and water resources; E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190333), Public Welfare Geological Survey Project of Shaanxi Geological Survey Institute (No.202111), Shaanxi Special Project for Ecological Restoration and Protection of Natural Resources "Monitoring and Evaluation of Groundwater Resources in Shaanxi Province".

1 引 言

黄河流域生态保护和高质量发展已成为国家重大发展战略,陕西省作为黄河的重要流经省份,是中国重要的能源基地、粮食生产区和生态保护区。水资源是陕西省经济社会发展的动脉,地下水资源是这条动脉中不可或缺的鲜活血液,在经济社会发展中的作用至关重要。近年来,诸多学者针对陕西省及其重点区域水资源开展了评价研究工作,其中既包含对水资源基础特征如资源量(段磊,2004)、水位动态(陶虹等,2017)、水均衡(朱俊海等,2018;张铭,2019)的评价工作,也有对于水资源影响因素(程肖侠等,2012)、脆弱性(任源馨等,2020)、开发利用潜力(张淑兰等,2021)、承载能力(夏玮静等,2020)、供求指数(任怡等,2017)的进一步分析以及在相关评价指标分析基础上提出优化配置(熊江龙,2018)、可持续开发利用(康艳等,2005)等建议。

近年来对工作区的研究多着眼于水资源整体,针对地下水资源的研究主要集中于20世纪初期,为掌握黄河流域陕西省地下水资源最新分布状况、探究气象和人类活动等因素对地下水资源的影响以及地下水资源开发利用潜力,本文结合区域水文地质等条件划分评价单元,利用最新调查监测数据评价黄河流域陕西省地下水资源量,在此基础上利用数学统计指标对黄河流域陕西省地下水资源分布特征进行分析,探究不同评价单元、不同行政单元的地下水资源分布状况,同时研究气候、下垫面条件和人类活动等因素对黄河流域陕西省地下水资源的影响,最终利用负载指数和开采潜力指数分析各行政区地下水资源开发利用潜力,为地下水资源开发利用和保护规划提供参考。

2 研究区概况

2.1 自然地理

陕西省地处中国内陆腹地,黄河中游。全省以秦岭为界分属黄河流域和长江流域,其中黄河流域陕西省面积 $13.33 \times 10^4 \text{ km}^2$,按地形地貌特征可分为陕北风沙滩区、陕北黄土高原区和关中盆地三部分。研究区属于典型的大陆性季风气候,全省多年平均降水量为563.59 mm,由北向南呈递增趋势。

秦岭以北河流皆属黄河水系,陕西直接入黄的较大支流有皇甫川、窟野河、秃尾河、无定河、渭(泾、洛)河等,其中渭河是黄河的第一大支流。

2.2 水文地质概况

黄河流域陕西省地下水类型涵盖松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水三类(图1)。松散岩类孔隙水主要分布在陕北高原和关中盆地,含水层主要为第四系冲湖积粉细砂层、冲洪积砂砾石及亚砂土互层(Hou et al., 2017),黄土台塬区黄土层也具有供水意义(Li et al., 2021)。碎屑岩类孔隙裂隙水主要分布在北山以北的陕北黄土梁峁区、宝鸡陇县山区,多被黄土覆盖,仅出露于沟谷及部分山区。碳酸盐岩类裂隙岩溶水主要分布在陕北府谷及吴堡黄河谷地、关中盆地北部渭北低山丘陵,主要由寒武系、奥陶系碳酸盐岩构成,富水性地域差别较大。全区除接受降水补给外,还接受山前侧向及河流入渗补给,农灌区还接受灌溉回渗补给,陕北风沙滩区接受凝结水季节性补给,排泄方式除人工开采和侧向流出外,平原区尤其地下水浅埋带存在潜水蒸发排泄。

3 研究方法数据来源

3.1 地下水资源评价方法

本文所研究地下水资源量,是指与当地降水和地表水体有直接水力联系、参与水循环且可以逐年更新的水量。地下水资源量以地区地下水天然补给量(若以排泄量法评价计算则选取总排泄量)为基础,选取 $\text{TDS} \leq 2 \text{ g/L}$ 范围水资源作为该区域地下水资源量。此次评价利用最新区域水文地质调查及统测监测数据(李文鹏,2022),结合地下水系统理论与水文地质条件等因素将黄河流域陕西省地下水资源评价单元划分1—6级,逐级细化,形成二级分区2个,三级分区4个,四级分区9个,五级分区27个,六级分区34个(崔亚莉等,2004;侯光才等,2009;韩双宝等,2021)。评价参数依托地下水监测工程钻孔水文地质试验结果及地区原位试验场参数成果进行划定,区内地貌和包气带岩性对降水入渗系数、给水度等参数有一定影响,整体河谷低阶地区和风沙滩区参数值高于黄土塬区及黄土丘陵区。不同评价单元采用适宜评价方法,其中关中盆地地区采用均衡法、陕北黄土高原区采用排泄量

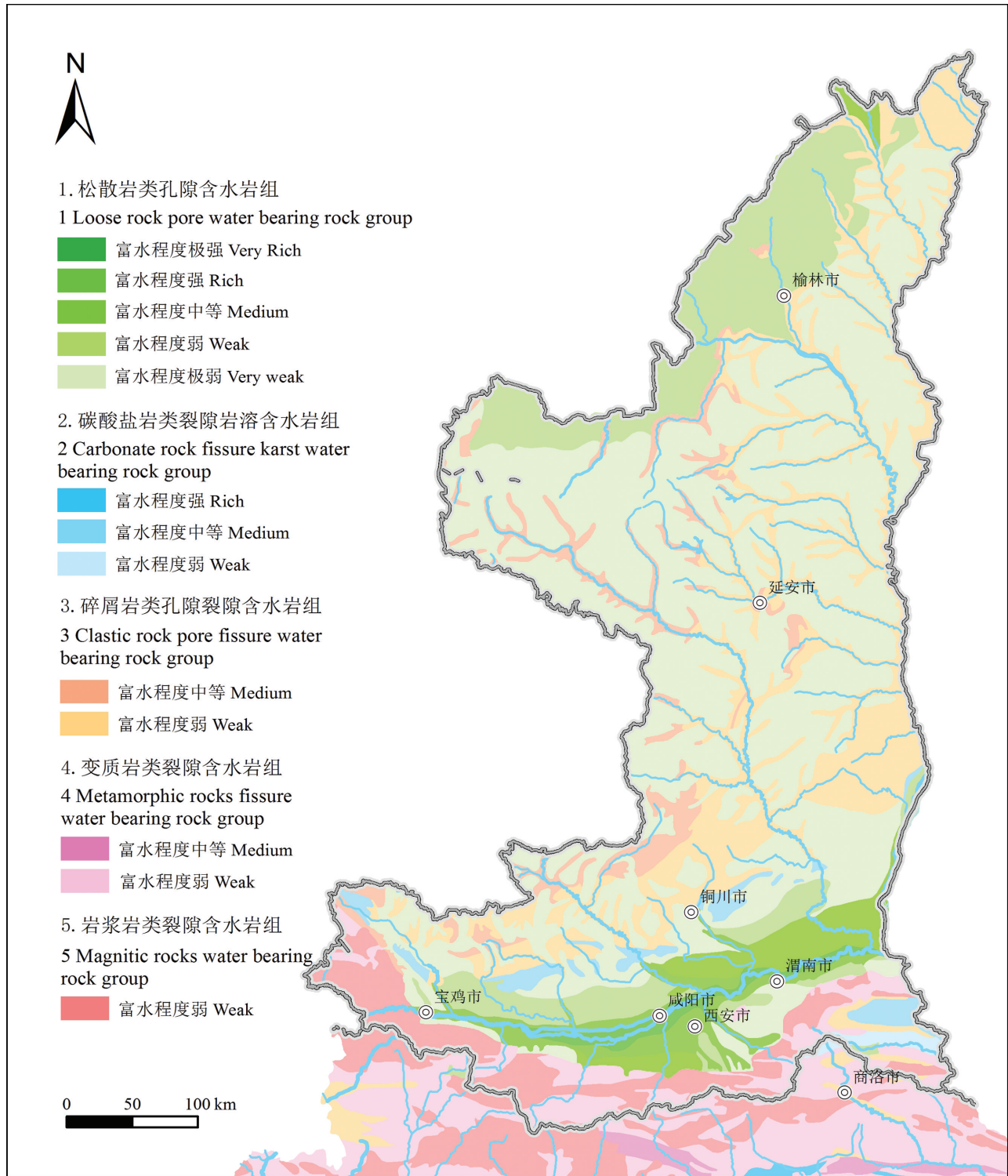


图1 黄河流域陕西省水文地质图
Fig.1 Hydrogeological map of Shaanxi Province of the Yellow River Basin

法、陕北风沙滩区采用补给量法进行评价(王文科等,2006;侯光才等,2008)。

$$\text{总补给量: } Q_{\text{总补}} = Q_{\text{降水}} + Q_{\text{河补}} + Q_{\text{回渗}} + Q_{\text{库塘}} + Q_{\text{侧向}} \quad (1)$$

$$\text{总排泄量: } Q_{\text{总排}} = Q_{\text{开采}} + Q_{\text{河排}} + Q_{\text{蒸发}} + Q_{\text{侧排}} \quad (2)$$

$$\text{补排差: } \Delta Q = Q_{\text{总补}} - Q_{\text{总排}} \quad (3)$$

$Q_{\text{降水}}$ 为降水入渗补给量, $Q_{\text{河补}}$ 为河流侧向补给量, $Q_{\text{回渗}}$ 为渠灌回渗量, $Q_{\text{库塘}}$ 为库塘渗漏量, $Q_{\text{侧向}}$ 为侧向流入量; $Q_{\text{开采}}$ 为地下水开采量, $Q_{\text{河排}}$ 为河流排泄量, $Q_{\text{蒸发}}$ 为潜水蒸发量, $Q_{\text{侧排}}$ 为侧向流出量。

3.2 泰尔指数

泰尔指数借助信息熵理论,量化区域间和区域之内的差异与不平衡关系,近年来在测算地理事物区域差异中得到广泛应用(何伟和王语苓,2021;李光勤和方徐兵,2021)。此次将泰尔指数引入分布特征差异性分析,实现了差异性的量化分析,便于特征对比与资源配置决策。同时,黄河流域陕西省地下水资源评价采用分级分区评价,利用泰尔指数可以做分级测算的优势,可更好体现地下水资源、地下水补给资源和降水之间的分布差异,体现不同分级评价区之间及其内部的分布差异,体现考虑不同行政分区人口和面积因素下的分布差异。泰尔指数具体公式为:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i/\bar{y}) \lg(y_i/\bar{y}) \quad (4)$$

式中: T 为地下水资源分布的泰尔指数, y_i 和 \bar{y} 分别为第*i*区域地下水资源量和各区域地下水资源平均值。泰尔指数绝对值越大,表明地下水资源分布差异越大。进一步将泰尔指数分解为区域内泰尔指数(TIN)和区域间泰尔指数(TRE),从而分析得出按照评价分区和按照行政分区的地下水资源量分布差异,具体公式为:

$$T = \text{TIN} + \text{TRE} \quad (5)$$

$$\text{TIN} = \sum_{k=1}^N y_k \lg\left(\frac{y_k}{N_k/N}\right) \quad (6)$$

$$\text{TRE} = \sum_{k=1}^K y_k \sum_{i=1}^{N_k} \frac{y_i}{y_k} \lg\left(\frac{y_i/y_k}{1/N_k}\right) \quad (7)$$

式中: K 为第一级分区数量; y_k 与 y_i 为第一级分区和二级分区的地下水资源量, N_k 为二级分区数量。

3.3 灰色关联分析

灰色关联分析利用指标因素之间发展趋势的

相似或相异程度来衡量其相关性,默认因素之间并非直接影响,存在一定的不确定性和灰色关系(燕琳等,2020)。本次从气象、下垫面与人类活动三方面选取相关指标构建分析体系,所选指标便于决策分析且并非直接参与或构成地下水资源,与地下水资源存在灰色关系,灰色关联分析方法适用于对地下水资源分布演化的影响因素判别。方法公式为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (8)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (9)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为关联系数, r_i 为关联度。 $y(k)$ 为归一化参数值; $x_i(k)$ 为归一化比较值, i 为比较数列的个数($i=1,2,\dots,n$), k 为每个比较对象的指标个数($k=1,2,\dots,m$); ρ 为分辨系数,通常取值0.5。关联系数越大,影响程度越强。

3.4 负载指数

水资源负载指数综合考虑区域降水、人口和农业灌溉面积等与水资源关系,基于经济和人口角度评判区域水资源开发利用程度和开发潜力(李丽等,2021),现常以国内生产总值代替农业灌溉面积进行评判。本次参考前人公式及分级计算标准计算水资源负载指数,同时专门针对地下水资源结合地下水资源贡献度提出其负载指数计算公式:

$$C = K \sqrt{P \cdot G} / W \quad (10)$$

$$L = K \sqrt{P \cdot G \cdot I} / U \quad (11)$$

$$I = Su/S \quad (12)$$

$$K = \begin{cases} 1.0 & R \leq 200 \\ 1.0 - \frac{0.1(R-200)}{200} & 200 < R \leq 400 \\ 0.9 - \frac{0.2(R-400)}{400} & 400 < R \leq 800 \\ 0.7 - \frac{0.2(R-800)}{800} & 800 < R \leq 1600 \\ 0.5 & R > 1600 \end{cases} \quad (13)$$

式中: C 为水资源负载指数; L 为地下水资源负载指数; P 为人口数值(10^4 人); G 为国内生产总值(10^8 元); W 为水资源总量(10^8 m^3); U 为地下水资源量(10^8 m^3); I 为地下水供水贡献率; Su 为地下水供水量; S 为供水总量; K 为降水缓解系数; R 为降水量(mm)。

地下水资源负载指数分级参照全国三级流域

表1 水资源负载指数分级标准
Table 1 Classification standard of water resources load index

级别	指数值	利用程度与开发潜力	开发评价
I	>10	很高,潜力很小	开发条件很困难、有条件需外部调水
II	5~10	高,潜力小	开发条件困难
III	2~5	中等,潜力较大	开发条件中等
IV	1~2	较低,潜力大	开发条件较容易
V	<1	低,潜力很大	兴修中小工程,开发容易

尺度标准(表1,张丹等,2008)。

3.5 数据来源

本次分析数据主要来源于地质调查最新统测成果、全国地下水监测工程及地方监测站点水质长期检测数据、气象部门收集的陕西全省域长时间序列气象数据、遥感反演手段获取的地表蒸散发数据、水利部门收集的地表水文长时间序列径流数据、陕西水利统计年鉴获取的开发利用数据、陕西统计年鉴获取的经济指标数据等,数据精度满足资源评价及相关分析需求(表2)。

4 结果与分析

4.1 地下水资源及分布

黄河流域陕西省2000—2020年多年平均地下水资源量为 $77.59 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图2),地下水总补给量为 $88.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (表3)。地下水资源量区域分布不均衡,关中盆地地下水资源量占比最高,比重为49.45%,市级行政区中榆林市地下水资源占比最

大,比重为29.97%,铜川市占比最小。对比1956—1983年(一期)和1984—1999年(二期)评价结果,1956—2020年黄河流域陕西省整体地下水资源呈现先增后减演变过程,2000—2020年地下水资源量相较一期增加 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,较二期减少 $11.83 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。不同水文地质单元资源量演化存在差异,陕北地区降雨量增加使得黄土丘陵区地下水资源量呈现增加趋势,风沙滩区地下水开采增加是其地下水资源减少的主要原因。关中盆地地下水资源2000年前基本保持稳定,2000年开始呈下降趋势,该区域降水多年平稳波动,伴随城市化进程加快,开采量逐渐加大,近年趋于平稳,地表水工程兴建、河渠衬砌加固及节水灌溉推行大幅减小地表水及回灌水对地下水的补给,地下水资源相较二期减少 $5.60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

长时间序列水质评价显示,黄河流域陕西省地下水化学类型以 HCO_3^- 型水分布最广,其次为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4$ 型水,关中盆地东北部及定边—靖边县南部部分地区分布 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型水和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型水,这些区域对应TDS大于1 g/L,其余研究区地下水TDS以小于1 g/L为主。2020年相比2000年,全区TDS含量总体呈下降趋势,在关中盆地东部和陕北中西部一带,TDS大于3 g/L的区域明显减小。研究区地下水典型超标离子包含锰、氯化物、氟化物(Liu et al., 2021)、溶解性总固体、硫酸盐、六价铬、三氮、铁等,整体呈现增多趋势(Li et al., 2019),水质综合评价显示I、II、IV、V类水占比分别为1.94%、

表2 基础数据内容与来源
Table 2 Basic data content and source

数据类型	数据描述	数据来源
气象数据	气象站点逐日数据 (99站点 2000—2020年)	国家气象监测站
水文数据	水文站点流量数据 (62站点 2000—2020年)	水利部门收集
蒸散发数据	MODIS 遥感数据集 (2000—2020年空间分辨率500 m)	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
水位数据	地下水统测数据 (2000—2020年)	地质调查实测、省级监测站点收集、监测工程实测
水质数据	水质监测数据(2000—2020年)	省级监测站点监测
开发利用数据	水资源开发利用数据 (2000—2020年)	陕西省水资源公报、陕西省水利统计年鉴
经济数据	GDP、人口等数据 (2000—2020年)	陕西省统计年鉴

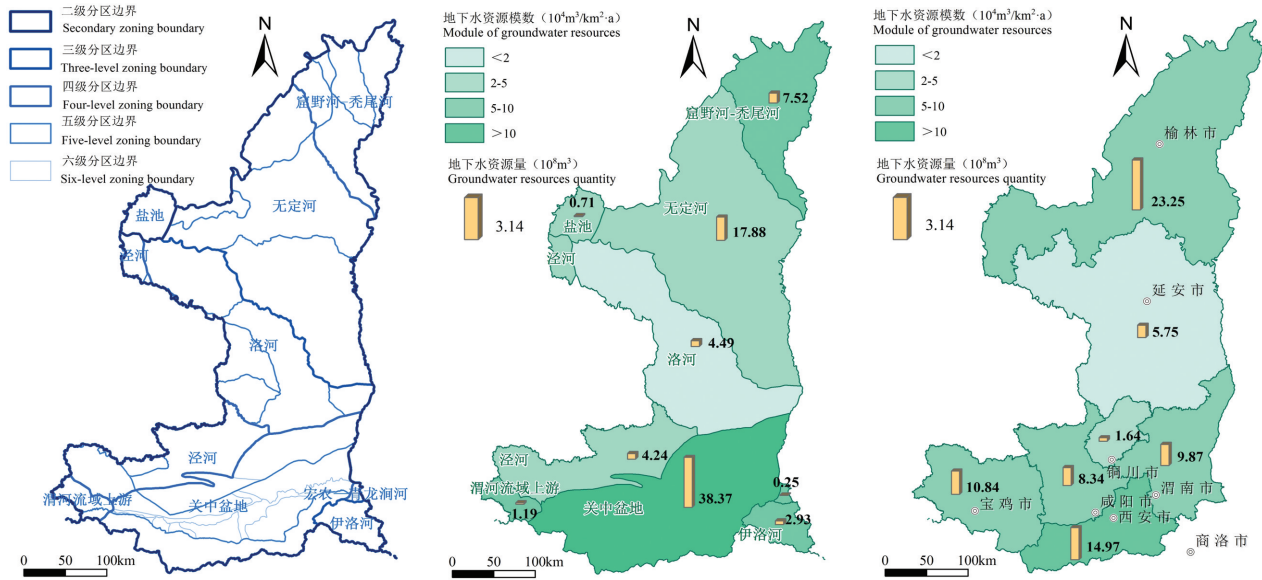


图2 地下水资源评价分区与模数图
Fig.2 Groundwater resources assessment zoning and modal map

16.11%、63.89%、18.06%，地下水整体以IV类水为主。

4.2 地下水资源分布差异性

研究区地下水资源量和地下水补给资源量的地区分布差异性接近，受下垫面条件和地形地质条

件影响，资源量分布差异显著大于降水量。关中盆地作为区域内主要人口聚集地区，地下水资源利用情况复杂，地下水资源区域化差异最大，空间分布较不均衡，地下水资源分布泰尔指数为0.134；黄土高原区范围较广，地形与地质条件复杂，人口与水资源开发利用分布不均，地下水资源泰尔指数0.102，分布差异性较大；陕北风沙滩区面积较小，含水层结构较为单一，地下水资源赋存与开发模式相对稳定，地下水资源的区域化差异最小(图3)。

借助泰尔指数可做次一级分级计算的特点，得出关中平原、陕北黄土高原与风沙滩区三个地区次一级27个五级评价分区的泰尔指数(图3)。关中平原区地下水资源分布差异性最强，其次为渭北岩溶区，秦岭北麓基岩山区地下水资源分布差异性较小；陕北黄土高原区地下水资源分布差异性最强区域为延河流域，泾河、洛河、千河、秃尾河和窟野河流域的地下水资源分布差异性相对较小；陕北风沙滩区地下水资源分布差异性依次为无定河沙漠滩区 > 秃尾河沙漠滩区 > 窟野河沙漠滩区(图4)。全区地下水资源分布差异最突出的三个地区依次为关中平原、无定河流域沙漠区和延河流域，关中平原差异性主要因为资源富集条件的差异，不同地貌单元地下水资源富集条件差异较大，平原中部漫滩阶地区地下水资源赋存优于南北两侧黄土塬区

表3 黄河流域陕西省地下水资源量表(2000—2020年)
Table 3 Groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin (2000—2020)

分区	地下水补给量/亿m ³	地下水资源量/亿m ³	可开采资源量/亿m ³
盐池	1.92	0.71	0.67
窟野河—秃尾河	7.55	7.52	1.46
无定河	18.87	17.88	4.43
渭河流域上游	1.17	1.19	0.04
泾河	5.09	4.24	0.15
洛河	4.96	4.49	0.08
关中盆地	44.96	38.37	26.07
宏农—青龙涧河	0.19	0.24	0.05
伊洛河	3.71	2.93	0.16
宝鸡市	11.40	10.84	4.11
延安市	6.63	5.75	0.33
榆林市	25.62	23.25	6.23
西安市	17.20	14.97	8.53
咸阳市	9.67	8.34	5.71
渭南市	12.70	9.87	7.33
铜川市	1.49	1.64	0.70
商洛市	3.71	2.93	0.16

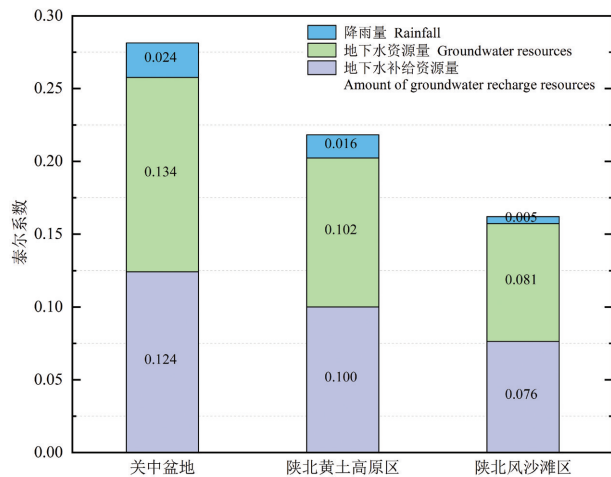


图3 分区分类泰尔指数对比
Fig.3 Thiel index comparison by region

及渭北岩溶区,开发利用关中平原地下水资源过程中应参考此差异性,对渭北岩溶区及秦岭山前加以保护。延河流域差异性原因一方面由于区内降水差异大,另一方面该流域以农业灌溉为主,灌溉用地主要集中在区域西南部,地区用水差异大。无定河流域沙漠区差异性主要源于区内降水差异,自东部神木榆阳区至西部定边靖边降水量逐渐减少,降水是该区地下水最主要的补给来源,因此降水差异致使该区域地下水资源分布呈现较大差异。

从各行政分区地下水资源分布情况(表4)可知,榆林市基于人口的泰尔指数值最大,表明其在水资源的人口分配上优于其他地区。西安市、咸阳市和渭南市泰尔指数为负值,说明其地下水资源的人口分配弱于平均水平,在水资源配置中应加强此类区域配置比例,渭南市与铜川市泰尔指数绝对值最小,对应地下水资源人口分布差异性最小。从面积分布差异角度分析,延安市和西安市的地下水资源量和补给资源量泰尔指数绝对值最大,反映面积分布差异最大,资源量与空间面积匹配不均衡,区内水资源开发利用应结合其差异特征进行合理空间调配,延安市泰尔指数为负值,表明该区资源禀赋弱于平均水平,而西安市地下水资源拥有先天禀赋优势,在陕西省各市级行政区属资源富集区域(Zhang et al., 2020)。延安市降水的人口差异化分布最大,侧面反映了延安市地广人稀特征。榆林市降水量的面积分布差异最大,反映了该区域降水的空间变化较大。

4.3 影响因素分析

4.3.1 指标选取

黄河流域陕西省各行政单元地下水资源呈现不同分布特点,为进一步探究分布差异原因,对各行政区地下水资源的影响因素进行分析。研究区地下水资源主要受气象、下垫面条件和人类活动等因素影响,气象因素中降水是研究区最重要的补给来源之一,降水量大小对地下水资源有重要影响(Hu et al., 2019),蒸散发是区内地下水重要排泄方式,是气温、日照、地表植被覆盖(Song et al., 2021)等诸多因素共同作用结果,推测对地下水资源量有重要影响。下垫面条件方面,区内地貌岩性差别造成地下水资源赋存差异,水文因素反映基流量情况,另一方面体现河流与地下水的转化关系,土地利用格局对地下水资源分布有重要影响,从研究区水资源用水供水特征可以看出,农业是研究区最重要的用水主体,推测灌溉面积等农业类指标对地下水资源产生影响。人类活动方面,从地下水资源取、补两个角度选取地下水开采量和地表引水量两项内容,同时引入表征地区发展的人均GDP经济指标,共同用于关联分析。

综合以上分析,选取3类7项指标构建体系进行影响程度分析,7项指标分别为气象类指标:降水量、蒸散发量;下垫面指标:径流深、有效灌溉面积;人类活动指标:地下水开采量、地表引水量和人均GDP经济指标。

4.3.2 影响程度分析

选取地下水资源作为参考序列,降水等7个指标为比较序列,建立黄河流域陕西省区地下水资源影响因素的灰色关联模型。分析结果显示(图5),降水量对研究区地下水资源量影响最大,灰色关联度为0.91,其次地下水开采和农业灌溉对地下水资源也有较大影响,灰色关联度分别为0.85和0.86,整体上除人均GDP指标外,其他指标灰色关联度均大于0.6,可作为地下水资源的重要影响因素,影响程度级次:降水量>有效灌溉面积>地下水开采量>蒸散发>径流深>地表引水量。

各行政分区来看,西安市地下水资源受降水量影响较大,其次为蒸散发和地表径流,西安市内发育有泾灞沔河、大小峪河等,两水转化频繁,地表径流对地下水有较强影响,西安市地下水开采量在地

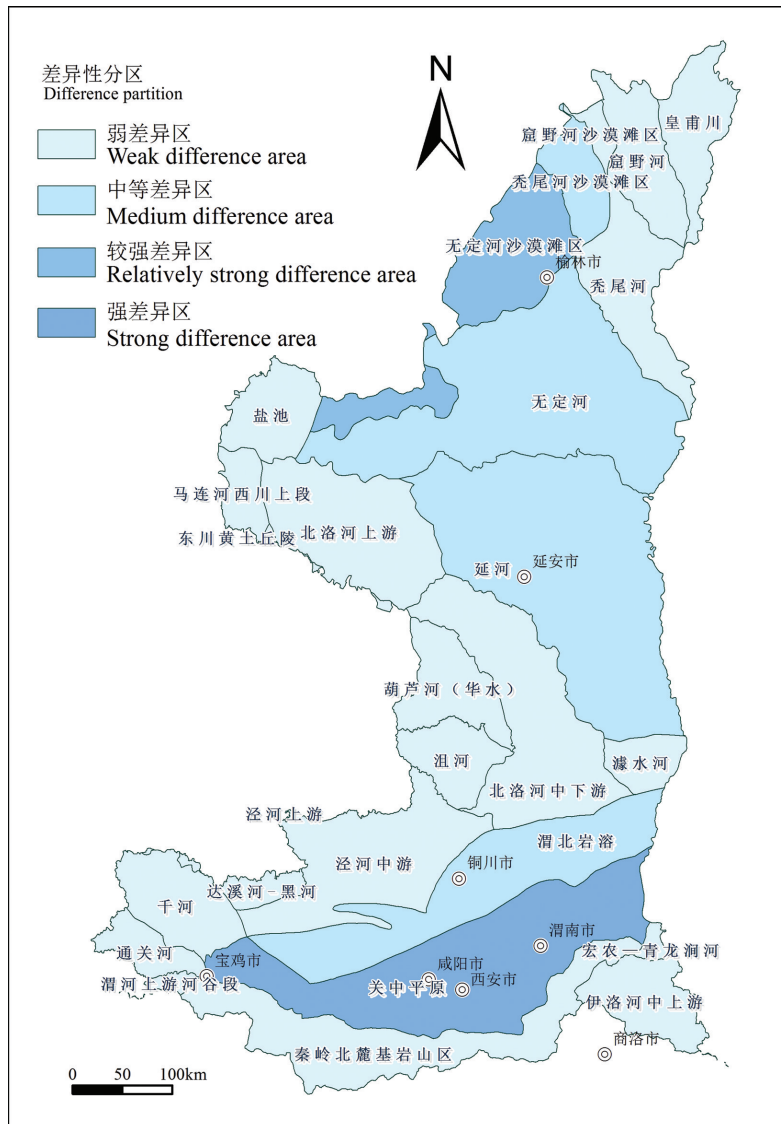


图4 地下水资源差异性分区

Fig.4 Different zoning of groundwater resources

区用水比例由2000年72.95%下降至2020年37.94%，地下水开采对地下水资源量的影响程度弱于气象因素；降水和地下水开采对铜川市地下水资源量影响最大，灰色关联度分别为0.84和0.80，铜川市灌区较少，农田灌溉对地下水资源的影响最小，灰色关联度为0.68；宝鸡市地下水资源与降水量关联度最大，灰色关联度为0.93，其次为蒸散发和农业灌溉；咸阳市地下水资源除受降水影响较大外，地表水对地下水资源影响作用较大，咸阳紧邻渭河，泾河贯穿全市，地表地下水交互作用强烈，径流深、地表引水量和地表蒸散发指标与地下水资源关联度均较大；地表径流和降水量对渭南市地下水资源

影响最大，区内河流主要为渭河和北洛河，径流深指标对地下水资源影响作用较强；降水、蒸散发和地表引水量是影响延安市地下水资源的最重要因素，除蒸散发指标外，榆林市地下水资源量与降水、开发利用和地表径流均有较强相关性，分析数据发现，延安市和榆林市地表蒸散发整体呈现增加趋势，且增幅略高于地下水资源增幅，蒸散发增加反映了区域下垫面尤其植被种植结构变化，一定程度上影响了区域地下水资源演化。

4.4 开发利用潜力分析

依据水均衡法、开采系数法获取研究区地下水可开采量，计算区域开采潜力指数。黄河流域陕西

表4 黄河流域陕西省各行政区地下水资源分布情况

Table 4 Distribution of groundwater resources in administrative regions of Shaanxi Province of the Yellow River Basin

类别	行政分区	地下水补给资源量泰尔指数	地下水资源量泰尔指数	降水量泰尔指数
按人口分布	榆林市	0.152	0.143	0.053
	延安市	0.004	0.007	0.156
	咸阳市	-0.007	-0.005	-0.009
	西安市	-0.065	-0.065	-0.059
	渭南市	-0.001	-0.009	-0.003
	铜川市	0.001	0.002	0.003
	宝鸡市	0.025	0.033	0.018
按面积分布	榆林市	0.003	-0.001	-0.040
	延安市	-0.043	-0.044	-0.003
	咸阳市	0.015	0.018	0.012
	西安市	0.041	0.044	0.007
	渭南市	0.025	0.013	0.022
	铜川市	-0.002	-0.001	0.000
	宝鸡市	0.027	0.035	0.020

省地下水开采潜力指数介于0.8~2.5,依据>2为开采潜力大区、1.1~2为可增强开采区、0.9~1.1为采补平衡区、<0.9为调减开采区的标准(张文强,2017),研究区各区市开采潜力存在差异,铜川市开采潜力

指数最大,其次为榆林市、宝鸡市和渭南市,这些区域地下水开采仍有一定空间,可适当增强开采,咸阳市为采补平衡区,建议维持现状开采水平,西安市与延安市地下水开采量已超可开采水平,需控制

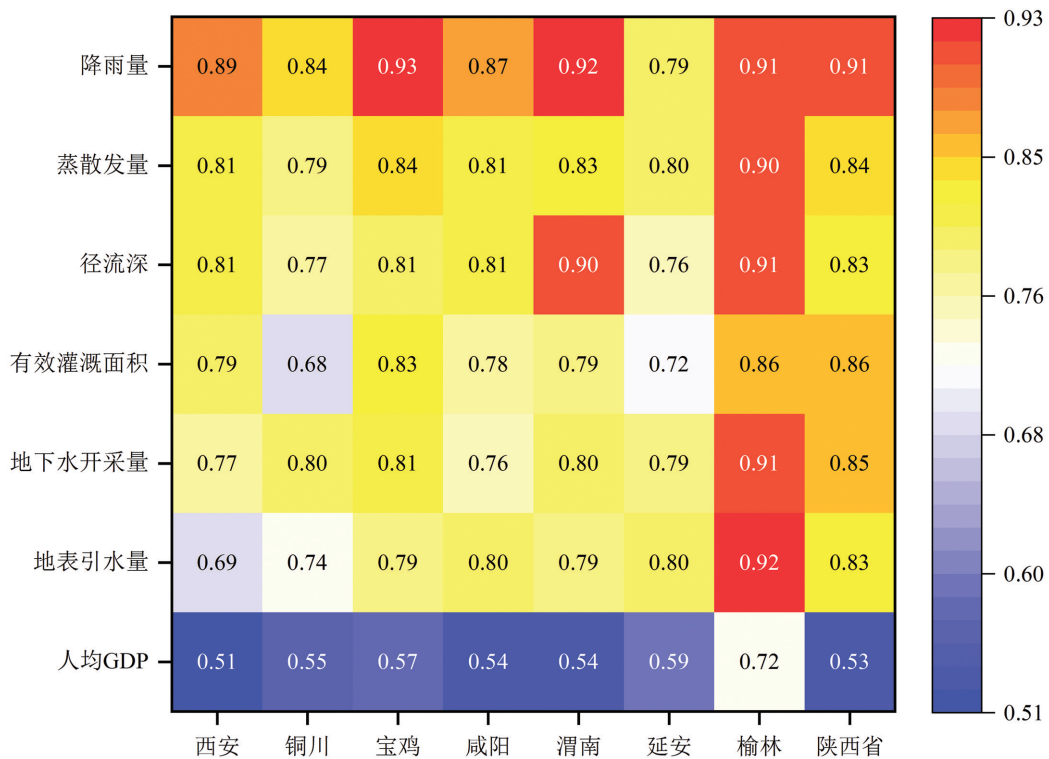


图5 各行政区地下水资源量与相关指标灰色关联度

Fig.5 Grey correlation degree between groundwater resources of each administrative region and related indexes

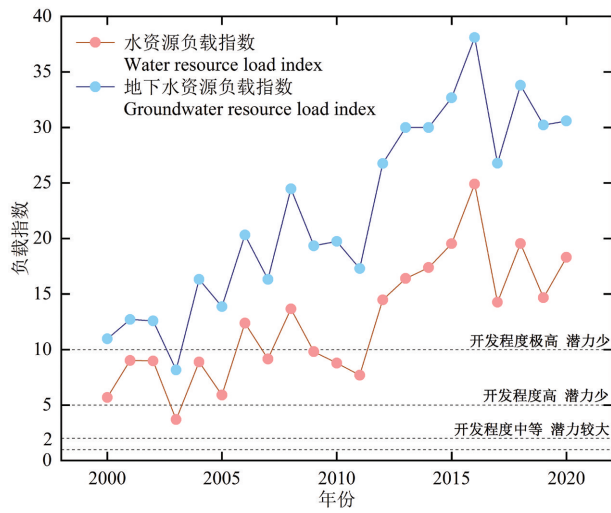


图6 水资源与地下水资源负载指数变化趋势(2000—2020年)
Fig.6 Trends of load indices of water resources and groundwater resources (2000-2020)

开采量并适当进行调减。

2000—2020年水资源与地下水资源负载指数整体呈现上升后稳定的趋势,地下水负载整体加重(图6)。各区市地下水资源负载指数均位于I级区,较全国属于高负载水平(高波,2007),基于人口经济的地下水开发前景较小。研究区地下水资源负载指数呈现差异分布,负载较高区域集中在关中城市群,西安市地下水资源负载指数达138.3,西安市以7.9%的地下水资源量支撑陕西省32.8%的人口和38.3%的GDP建设,开发前景有限,其次为渭南市和咸阳市,负载指数分别为57.8和52.4,榆林市与延安市开发利用潜力相近,铜川市开发利用程度相对较低,负载指数27.1。

各区市开采潜力指数与负载指数分布基本吻合(图7),西安市、咸阳市等负载指数较高区域开采潜力相对较低,铜川市负载指数相对较低,其开采潜力

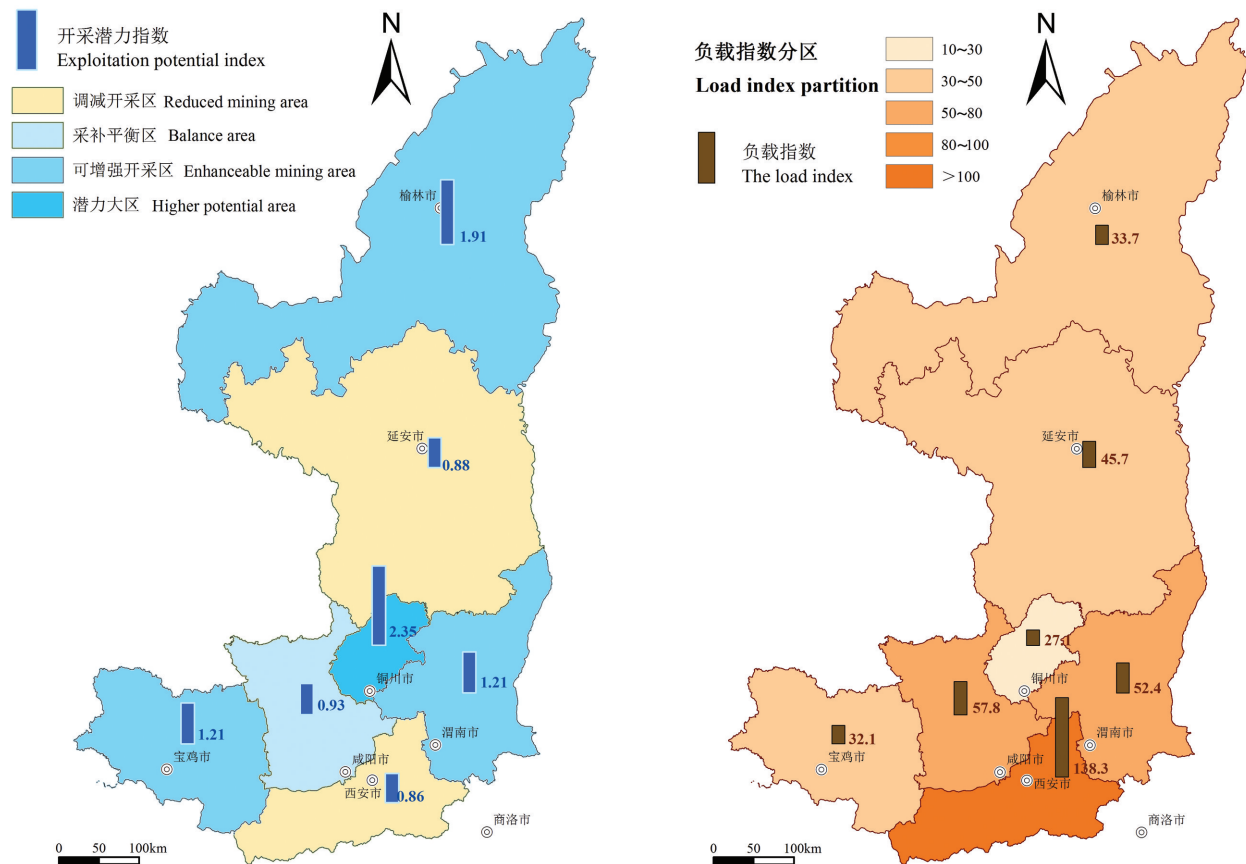


图7 地下水开发利用潜力分区
Fig.7 Potential zoning of groundwater development and utilization

在研究区各市处于较高水平,延安市因地貌等下垫面条件影响可开采资源有限,开采潜力较低,同时延安市人口经济压力相较其他区市较小,因此负载指数低于处在关中城市圈的西安、咸阳和渭南等市(图7)。基于开采潜力指数与负载指数分析,西安市与延安市需进一步控制地下水开采,西安市、咸阳市和渭南市等区域在未来发展中应进一步加强协调经济增长与地下水开发的关系,同时从地下水资源角度,针对超负载局面需要进一步分区分类精细调控,优化地下水资源配置,协调地表水地下水供应关系,协调地区经济发展与水资源承载能力,在城市超采区和农灌超采区要进一步采取限采、压采、区外调水等措施,以期减轻地下水资源负载,促进区域生态环境良性发展。

5 结 论

(1)黄河流域陕西省多年平均地下水资源量为 $77.59 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,资源量分布不均衡,关中盆地地下水资源占比最高,陕北风沙滩区地下水资源量最少,行政分区上榆林市地下水资源量最大,铜川市地下水资源量最小。降水入渗是全区地下水资源最重要补给来源。

(2)研究区地下水资源量与补给资源量分布差异性接近且明显大于降水地区差异性,关中盆地地下水资源量区域化差异最大,陕北黄土高原区延河流域、陕北风沙滩区中无定河沙漠区区域化差异大。榆林市地下水资源人口分布差异性最大,渭南市与铜川市地下水资源人口分布差异性最小。延安市与西安市地下水资源面积分布差异最大,资源量与空间匹配不均衡,西安市拥有先天地下水资源禀赋,延安市地下水资源禀赋弱于平均水平。

(3)降水量对全区地下水资源影响最大,除此之外,地表蒸散发对西安市、宝鸡市、延安市、榆林市地下水资源有较强影响,地表水及其利用与咸阳市、渭南市、西安市、延安市地下水资源有较强相关性,地下水开采对西安市、铜川市、宝鸡市地下水资源有较强影响。

(4)研究区水资源与地下水资源负载整体呈现上升趋势,较全国属于高负载水平。开采潜力分布存在差异,开发程度较高区域集中在关中城市群,西安市开发程度最高,铜川市开发利用程度相较最

低。针对超负载局面需进一步加强地下水资源配置与分区分类调控,协调地表水地下水供应关系、经济发展与水资源承载力关系。

Reference

- Cheng Xiaoxia, Sun Xian, Fang Jiangang, Mao Mingce, Liang Qichen. 2012. Impacts of climate change on water resources in Shaanxi Province during past fifty years based on regression models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 32(2): 114–121 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yali, Zhang Ge, Shao Jingli. 2004. Classification and characteristics of groundwater system in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 26(2): 2–8 (in Chinese with English abstract).
- Duan Lei. 2004. Evaluation and Analysis of Groundwater Resources in Shaanxi Province of Yellow River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Gao Bo. 2007. Evaluation of Sustainable Utilization of Water Resources in Shaanxi Province Based on DPSIR Model [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University (in Chinese with English abstract).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. Geology in China, 48(4): 1001–1019 (in Chinese with English abstract).
- He Wei, Wang Yuling. 2021. Calculation of urban water resources utilization efficiency in the Yellow River basin and analysis of its influencing factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 41(11): 4761–4770 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guangcai, Liang Yongping, Yin Lihe, Tao Zhengping, Zhao Zhenhong, Yang Yuncheng, Wang Xiaoyong. 2009. Groundwater systems and water resources potential in the Ordos Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 36(1): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guangcai, Zhang Maosheng, Liu Fang. 2008. Groundwater Exploration in Ordos Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hou G C, Yin L H, Xu D D. 2017. Hydrogeology of the Ordos Basin, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 5(2): 104–115.
- Hu W, Wang Y Q, Li H J, Huang M B, Hou M T, Li Z, She D L, Si B C. 2019. Dominant role of climate in determining spatiotemporal distribution of potential groundwater recharge at a regional scale[J]. Journal of Hydrology, 578: 124042.
- Kang Yan, Cai Huanjie, Song Songbai. 2005. Comprehensive evaluation on sustainable utilization of water resources of Shaanxi Province by fuzzy matter-element model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 16(3): 25–28 (in Chinese with English abstract).

- Li Guangqin, Fang Xubing. 2021. Spatio-temporal evolution characteristics of green development level in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 41(4): 129–139 (in Chinese with English abstract).
- Li H X, Han S B, Wu X, Wang S, Liu W P, Ma T, Zhang M N, Wei Y T, Yuan F Q, Li F C, Wu B, Wang Y S, Zhao M M, Yang H W, Wei S B. 2021. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the Loess Plateau, China[J]. *China Geology*, 4(3): 509–526.
- Li Li, Liu Shiqi, Wang Ping, Qiao Yuan, Wang Tao, Wang Tianye, Li Zehong, Tcogto Bazarzhapov. 2021. Evaluation of water resource exploration potential of the China–Mongolia–Russia Economic Corridor based on carrying capacity[J]. *Arid Zone Research*, 38(4): 910–918 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng. 2022. Achievements of investigation program on hydrogeology and water resources of CGS[J]. *Hydrogeology and Engineering*, 49(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Xiao J, Evaristo J, Li Z. 2019. Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China[J]. *Environmental Pollution*, 254(Part A): 113006.
- Liu R P, Zhu H, Liu F, Dong Y, EI–Wardany R M. 2021. Current situation and human health risk assessment of fluoride enrichment in groundwater in the Loess Plateau: A case study of Dali County, Shaanxi Province, China[J]. *China Geology*, 4(3): 487–498.
- Ren Yi, Wang Yimin, Chang Jianxia, Huang Qiang. 2017. The spatial and temporal distribution of drought in Shaanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 32(1): 137–151 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yuanxin, Lin Qing, Han Ting, Li Gaiping, Zhou Qi. 2020. Evaluation on the vulnerability of water resources in Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, (2): 227–232 (in Chinese with English abstract).
- 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: 527–535.
- Tao Hong, Li Yong, Ding Jia, Tao Fuping, Li Wenli, He Xubo, Qiang Fei. 2017. Study on groundwater dynamics in Shaanxi Province[C]//Promoting Scientific and Technological Innovation to help the three first-class: 2017 Academic Exchange Conference of Shaanxi Geological Environment Monitoring Station abstract compilation (in Chinese).
- Wang Wenke, Wang Yanlin, Duan Lei. 2006. *Groundwater Environmental Evolution and Renewable Maintenance in Guanzhong Basin*[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press (in Chinese).
- Xia Weijing, Wang Ninglian, Shen Yue. 2020. Water resource carrying capacity in Shaanxi Province at the scales of watersheds[J]. *Arid Land Geography*, 43(3): 602–611 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Jianglong. 2018. Study on Water Consumption Structure and Forecast of Weihe River Basin, in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yan Lin, Ma Lan, Pan Chengzhong, Zhang Dong, Sun Zhanwei, Zhang Jinge, Liu Jinjing, Li Junyou. 2020. Naturalness evaluation of rivers based on the fuzzy comprehensive evaluation and the grey correlation analysis [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 37(3): 480–488 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dan, Feng Zhiming, Liu Dengwei. 2008. Evaluation of water resource in Third-Order basins in China based on carrying capacity [J]. *Resources Science*, (10): 1471–1477 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ming. 2019. Study on the Change of Water Reserves in Shaanxi Province Based on GRACE Satellite Data[D]. Nanchang: East China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhang M S, Wang H Q, Dong Y, Li L, Sun P P, Zhang G. 2020. Evaluation of urban underground space resources using a negative list method: Taking Xi'an City as an example in China[J]. *China Geology*, 3(1): 124–136.
- Zhang Shulan, Zhang Haijun, Zhang Hejing, An Bin, Huang Zhigui. 2021. Analysis on ecological footprint of water resources in Shaanxi Province and its sustainable utilization[J]. *Yangtze River*, 52(4): 130–136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenqiang. 2017. Study on the Groundwater Resources Assessment and Rational Development in Yishu Basin[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhu Junhai, Lin Tao, Qian Hui. 2018. Study on spatio-temporal equilibrium of water resources in Shaanxi Province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 39(1): 63–67 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程肖侠, 孙娴, 方建刚, 毛明策, 梁奇琛. 2012. 基于评估模型的陕西省水资源气候影响分析[J]. *水土保持通报*, 32(2): 114–121.
- 崔亚莉, 张戈, 邵景力. 2004. 黄河流域地下水系统划分及其特征[J]. *资源科学*, 26(2): 2–8.
- 段磊. 2004. 黄河流域陕西省地下水资源评价及其解析[D]. 西安: 长安大学.
- 高波. 2007. 基于 DPSIR 模型的陕西水资源可持续利用评价研究[D]. 西安: 西北工业大学.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1001–1019.
- 何伟, 王语苓. 2021. 黄河流域城市水资源利用效率测算及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 41(11): 4761–4770.
- 侯光才, 梁永平, 尹立河, 陶正平, 赵振宏, 杨勋城, 王晓勇. 2009. 鄂

- 尔多斯盆地地下水系统及水资源潜力[J]. 水文地质工程地质, 36(1): 18-23.
- 侯光才, 张茂省, 刘方. 2008. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 康艳, 蔡焕杰, 宋松柏. 2005. 用模糊物元模型综合评价陕西省水资源可持续利用程度[J]. 水资源与水工程学报, 16(3): 25-28.
- 李光勤, 方徐兵. 2021. 黄河流域绿色发展水平时空演变特征[J]. 中国沙漠, 41(4): 129-139.
- 李丽, 刘诗奇, 王平, 乔源, 王涛, 王田野, 李泽红, Tcogto Bazarzhapov. 2021. 基于负载指数的中蒙俄经济走廊水资源开发潜力评价[J]. 干旱区研究, 38(4): 910-918.
- 李文鹏. 2022. “水文地质与水资源调查计划”进展[J]. 水文地质工程地质, 49(2): 1-6.
- 任怡, 王义民, 畅建霞, 黄强. 2017. 陕西省水资源供求指数和综合干旱指数及其时空分布[J]. 自然资源学报, 32(1): 137-151.
- 任源鑫, 林青, 韩婷, 李改萍, 周旗. 2020. 陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水土保持研究, (2): 227-232.
- 陶虹, 李勇, 丁佳, 陶福平, 李文莉, 贺旭波, 强菲. 2017. 陕西省地下水动态研究[C]/推动科技创新助力三个一流: 2017陕西省地质环境监测总站学术交流会议论文摘要汇编.
- 王文科, 王雁林, 段磊. 2006. 关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M]. 郑州: 黄河水利出版社.
- 夏玮静, 王宁练, 沈月. 2020. 基于流域的陕西省水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 43(3): 602-611.
- 熊江龙. 2018. 陕西省渭河流域用水结构及用水量预测研究[D]. 西安: 西安理工大学.
- 燕琳, 马岚, 潘成忠, 张栋, 孙占薇, 张金阁, 刘京晶, 黎俊佑. 2020. 基于模糊综合评价与灰色关联分析的河流自然性评价[J]. 浙江农林大学学报, 37(3): 480-488.
- 张丹, 封志明, 刘登伟. 2008. 基于负载指数的中国水资源三级流域分区开发潜力评价[J]. 资源科学, (10): 1471-1477.
- 张铭. 2019. 基于GRACE卫星数据对陕西省水储量变化的研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 张淑兰, 张海军, 张鑫傲, 安彬, 黄志贵. 2021. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江, 52(4): 130-136.
- 张文强. 2017. 伊舒盆地地下水资源评价与合理开发利用研究[D]. 西安: 西北大学.
- 朱俊海, 林涛, 钱会. 2018. 陕西省水资源时空均衡研究[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 39(1): 63-67.