

降水与人类活动对山西省6大盆地地下水的影

申瑜¹, 王电龙^{2,3}

(1.山西省水文水资源勘测总站, 山西太原 030001; 2.太原工业学院 环境与安全工程系, 山西太原 030008; 3.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100086)

摘要: [目的] 探究山西省6大盆地地下水场演变的影响因素与机制, 为该区地下水资源可持续利用提供理论依据。[方法] 采用地学统计、投影寻踪回归技术等研究方法, 分析降水量变化和人类活动对山西6大盆地地下水系统演变的影响特征。[结果] ①降水量与地下水位变幅呈直线相关关系, 降水量每增加100 mm, 太原、运城、大同、忻州、临汾和长治盆地地下水位下降幅度分别减少了0.45, 0.46, 0.20, 0.28, 0.22, 0.73 m; ②地下水位与地下水系统蓄变量呈直线相关关系, 地下水超采量每增加 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$, 运城、太原、大同、忻州、临汾和长治盆地平均地下水位分别下降0.18, 0.36, 0.25, 0.55, 0.40和2.0 m; ③不同区位影响地下水资源量的相关因素的贡献度有明显差异。降水量是影响地下水资源量的首要因素, 贡献度均超过了40%; 在运城和大同盆地, 耕地变化是第二影响因子, 贡献度均为22.55%; 太原、忻州、临汾和长治盆地, 建设用地变化是第二影响因子, 贡献度分别为19.12%, 17.57%, 16.56%, 22.43%。[结论] ①可通过适时开展人工降雨, 增大降水量, 增加地下水补给量, 减缓地下水位下降幅度; ②在地下水超采区应适当压减地下水开采量, 增大地下水系统蓄变量, 逐步恢复地下水位; ③应采取有力措施抑制耕地不断减少及建设用地过快增大, 从而减少土地利用类型变化对地下水资源量造成的影响。

关键词: 降水变化; 人类活动; 地下水; 影响特征; 山西省6大盆地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0362-09

中图分类号: P641

文献参数: 申瑜, 王电龙. 降水与人类活动对山西省6大盆地地下水的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 362-370. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240719.002; Shen Yu, Wang Dianlong. Impacts of precipitation and human activities on groundwater in six basins of Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 362-370.

Impacts of Precipitation and Human Activities on Groundwater in Six Basins of Shanxi Province

Shen Yu¹, Wang Dianlong^{2,3}

(1. Shanxi Provincial Hydrological and Water Resources Survey Station, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 2. Department of Safety and Environmental Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030008, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100086)

Abstract: [Objective] The factors and mechanisms influencing the evolution of groundwater flow fields were analysed to provide a theoretical basis for the sustainable utilisation of groundwater resources in the study area. [Methods] Using geostatistics, the projection pursuit regression technique, and other research methods, the impacts of precipitation changes and human activities on the evolution of groundwater systems in six basins in Shanxi Province were analysed. [Results] ① Precipitation showed a linear correlation with fluctuations in the groundwater levels. For every 100 mm increase in precipitation, the groundwater levels in the Taiyuan, Yuncheng, Datong, Xinzhou, Linfen, and Changzhi basins decreased by 0.45, 0.46, 0.20, 0.28, 0.22, 0.73 m respectively. ② Groundwater levels showed a linear correlation with the variations in

收稿日期: 2024-03-18

修回日期: 2024-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“气候突变模式下华北农业区地下水保障能力响应特征”(41702263); 中国地质调查局地质调查项目“海河流域南系水文地质与水资源调查评价”(DD20221752); 山西农业大学科技创新基金项目“水利工程对石家庄都市区地下水流场影响特征与机理研究”(2015ZZ04)

第一作者: 申瑜(1981—), 女(汉族), 山西省长治市人, 高级工程师, 主要从事水文与水资源研究。Email: sxswjsy@163.com。

通信作者: 王电龙(1981—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源可持续利用方面的研究。Email: sxndwdl@163.com。

groundwater storage. For every increase of $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ in groundwater overexploitation volume, the average groundwater levels in the Yuncheng, Taiyuan, Datong, Xinzhou, Linfen, and Changzhi basins decreased by 0.18, 0.36, 0.25, 0.55, 0.40, 2.0 m respectively. ③ The contributions of the different factors affecting groundwater resources vary significantly across different regions. Precipitation was the primary factor affecting the groundwater resources, with a contribution rate exceeding 40% in all areas. In the Yuncheng and Datong basins, land changes caused by cultivation were the second most influencing factor, with a contribution rate of 22.55%. In the Taiyuan, Xinzhou, Linfen, and Changzhi basins, land changes caused by construction were the second most influencing factor, with contribution rates of 19.12%, 17.57%, 16.56%, and 22.43%, respectively. [Conclusion] ① Artificial rainfall can be conducted in a timely manner to increase precipitation and groundwater recharge, thereby slowing the rate of groundwater level decline. ② In areas experiencing groundwater overextraction, groundwater extraction should be appropriately reduced and efforts should be made to increase the groundwater system storage capacity to gradually restore groundwater levels. ③ Effective measures should be taken to restrain the continuous decrease and rapid expansion of cultivated and construction lands, respectively, thereby reducing the impact of land change due to land use types on groundwater resources.

Keywords: precipitation change; human activities; groundwater; influence characteristics; six basins of Shanxi Province

在中国北方地区,地下水是重要的用水水源之一。近30 a来,山西省盆地地下水流场发生了较大变化,部分区域地下水超采严重,地下水位持续下降,岩溶泉流量锐减甚至断流。据统计,山西省集中连片的地下水超采区共22个,超采区面积10 609 km²,占该省总面积的6.79%,其中,严重超采区面积1 848 km²[1]。降水量和开采量变化是地下水位变化的重要原因,气候旱化,两者双重叠加影响驱动地下水位快速下降[2-4],对农业区来说,春季降水量的增减,对地下水位影响最为显著[5-7];张光辉等[8-10]认为降水连年偏枯时段的春灌期大规模集中开采浅层地下水,是冀中山前平原农业区浅层地下水位不断下降的主要动因;束龙仓等[11]认为降水和开采变化是三江平原地下水位变化重要原因。土地利用变化是区域地下水位变化的另一重要原因,刘坤等[12]认为昌吉州平原区地下水位埋深动态变化是对土地利用变化(尤其是耕地面积变化)与气候干旱因素的联合响应;孙青言等[13]认为采取土地利用管控措施,可有效改善三江平原地下水系统超采现状;胡鑫等[14]认为呼图壁县地下水位埋深动态变化与耕地面积变化高度相关;于翔[15]量化了三江平原水田、旱地、湿地的地下水补给量,分析了该区土地利用变化对地下水资源量的影响。Bi-bhasvata D等[16]认为土地利用方式的变化会改变降水、地表水与地下水的水文联系方式,从而导致地下水资源量的变化。从以上分析可以看出,目前已有较多有关降水、开采及土地利用变化对地下水系统影响的研究,但有关识别山西省6大盆地地下水位升降与降水变化均衡点,量化降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地及建设用

面积对不同区位地下水资源贡献度的成果薄弱。为此,本研究在查明山西省6大盆地地下水位时空演变特征基础上,辨识不同区位地下水位变化与降水变化均衡点,揭示开采变化对不同区位地下水位影响特征,识别降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地及建设用地面积变化对地下水资源影响贡献度,以为研究区地下水超采治理及地下水资源的可持续利用提供理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

山西省位于黄河中游左岸,华北平原西面的黄土高原上,东以太行山为界,与河北为邻,西、南隔黄河与陕西、河南省相望,北以外长城为界与内蒙古自治区毗连。从北到南分布有大同、忻州、太原、临汾、长治和运城盆地等6大盆地(图1),为该省政治、经济、文化集聚区,也是地下水开采集中区,近30 a来,各盆地的土地利用类型均发生了显著变化,耕地面积急剧缩小,建设用地面积则大幅扩张(图2)。各盆地自然地理及水文地质情况为:①太原盆地,面积6 195 km²,多年平均降水量420 mm左右,潜水含水层分布于盆地全区,主要为全新统和上更新统的冲洪积砂砾石和砂,厚度10~30 m,中深承压含水层含水介质为中、下更新统和上更新统的冲洪积层和湖积砂卵石;②大同盆地,面积7 440 km²,多年平均降水量390 mm左右,含水层埋深在200 m以上,以中、上更新统的洪积、冲积砂砾石层为主;③忻州盆地,面积3 385.2 km²,多年平均降水量410 mm左右,潜水含水层组由全更新统和上更新统组成,厚度7~50 m,

中深层含水层厚度 10~40 m。④临汾盆地,面积 6 338.82 km²,多年平均降水量 495 mm,潜水含水层主要分布于黄河、汾河、浍河低阶地,受地形、地貌、水文、气象和人工开采控制,中深层承压水分布于整个盆地,埋藏较深;⑤运城盆地,面积 4 946.6 km²,多年平均降水量 520 mm,潜水含水层主要分布于涑水河河谷与青龙河河谷及姚暹渠两侧冲湖积平原区、山前倾斜平原区和黄河低阶地,中深层承压水则主要分布于冲湖积平原区和黄河低阶地区;⑥长治盆地,面积 1 976 km²,多年平均降水量 560 mm,潜水含水层为全新统、上更新统冲积、洪积砂砾石及砂层,中层承压水为中、下更新统,岩性以亚黏土、黏土和亚砂土为主。

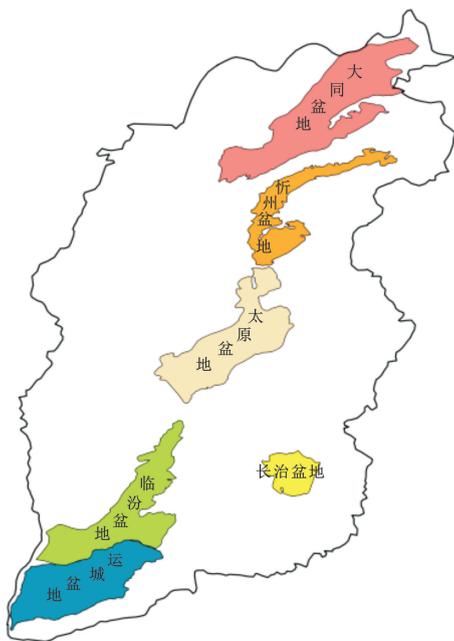


图 1 山西省 6 大盆地地理位置

Fig.1 Location of six basins in Shanxi Province

1.2 研究方法

本文采用地学统计及相关分析等方法分析降水量及地下水开采量对地下水位的影响,辨析降水量与地下水位变化均衡点。

本文利用投影寻踪回归技术预测不同区位地下水资源量,基本形式如公式(1)。基于 1990—2022 年地下水资源量、降水量及土地利用数据,建立地下水资源量与降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地及建设用地面积的投影寻踪回归模型,并计算上述因素对不同区位对地下水资源量的影响权重。

$$E(Y|X_1, X_2 \cdots X_p) = \mu_y + \sum_{m=1}^M \beta_m \varphi_m(\alpha_m^T x) \quad (1)$$

式中: X_k 为影响因子, ($k=1, 2, 3 \cdots p$); Y 为预报因

子; α_m 为投影方向, ($m=1, 2, 3 \cdots M$), $\|\alpha_m\|=1$; $u_y = E(y)$; Φ_m 为岭函数(具体计算过程中,将其标准化,即 $\varphi_m(\alpha_m^T x)$ 的均值为 0, 方差为 1)。投影寻踪回归建模过程是选择 β_m , Φ_m , α_m , 使目标函数 $E[y - \mu_y - \sum_{m=1}^M \beta_m \varphi_m(\alpha_m^T x)]^2$ 极小化。

投影寻踪回归模型基本计算步骤如下(本文计算过程在 DPS 18 软件上完成)^[17]:

(1) 首先,对投影方向 α_1 给出一个初始值,并计算在当前值时的 $\alpha_1^T x_i$ 。然后,利用平滑技术^[18-19] 确定岭函数 φ_1 。

(2) 通过不断改变 α_1 极小化公式(2)。

$$RSS = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi_1(\alpha_1^T x_i)]^2 \quad (2)$$

式中:RSS 为残差平方和。

(3) 不断重复上述步骤,直到 M 个投影方向构成为止,最终拟合结果为:

$$y_i = \bar{y} + \sum_{m=1}^M \beta_m \varphi_m(\alpha_m^T x) \quad (3)$$

式中: β_m 通过方程 $y_i - \bar{y} - \beta_m \varphi_m(\alpha_m^T x_i) = 0$, 利用最小二乘法求解。

基于 MAPE(平均相对误差)准则评估上述预测模型的有效性:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

式中: \hat{y}_i 为模型预测值。

采用公式(5)~(6) 计算降水量及上述耕地等土地利用数据对地下水资源量影响贡献度。

$$I_j = E \left| \sum_{m=1}^M \beta_m \alpha_{jm} \varphi_m'(\alpha_m^T x) \right| \quad (5)$$

$$C_j = \frac{|I_j|}{\sum_{j=1}^p |I_j|} \quad (j=1, 2 \cdots p) \quad (6)$$

式中: I_j ($j=1, 2, 3 \cdots 8$) 为降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地、建设用地对地下水资源量影响权重; C_j ($j=1, 2, 3 \cdots 8$) 为降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地、建设用地对地下水资源量影响贡献度。

1.3 数据来源

研究区 1990—2022 年地下水资源量、地下水水位、地下水开采量、面降水量数据均引自山西省水行政主管部门公开发布的《山西省水资源公报》(1990—2022 年,数据系列连续、无缺失,且经过了山西水文水资源勘测总站及山西省水行政主管部门的率定校核,精度较高), 1990—2022 年不同区位土地利用现状数据下载自国家青藏高原科学数据中心(tpdc.ac.cn)。

2 结果与分析

2.1 不同区位土地利用演变特征

由图 2 可以看出,近 30 a 来,研究区不同区位土地利用类型变化显著。

不同区位耕地面积均呈急剧减少趋势,其中,太原盆地耕地面积比率由 1990 年的 80.31% 缩减至 2020 年的 67.55%,运城盆地由 80.11% 缩减至 74.73%,大同盆地由 77.61% 缩减至 74.09%,忻州盆

地由 80.91% 缩减至 77.16%,临汾盆地由 85.78% 缩减至 76.47%,长治盆地由 79.57% 缩减至 68.28%;建设用地则呈急剧扩张趋势,太原盆地建设用地面积比率由 1990 年 10.88% 扩大至 2020 年的 25.69%,运城盆地由 5.0% 扩大至 11.7%,大同盆地由 4.4% 扩大至 10.8%,忻州盆地由 4.28% 扩大至 9.85%,临汾盆地由 8.38% 扩大至 20.18%,长治盆地由 3.69% 扩大至 16.33%。其他用地类型,如林地、灌木地、草地、水域、未利用地等变化不明显。

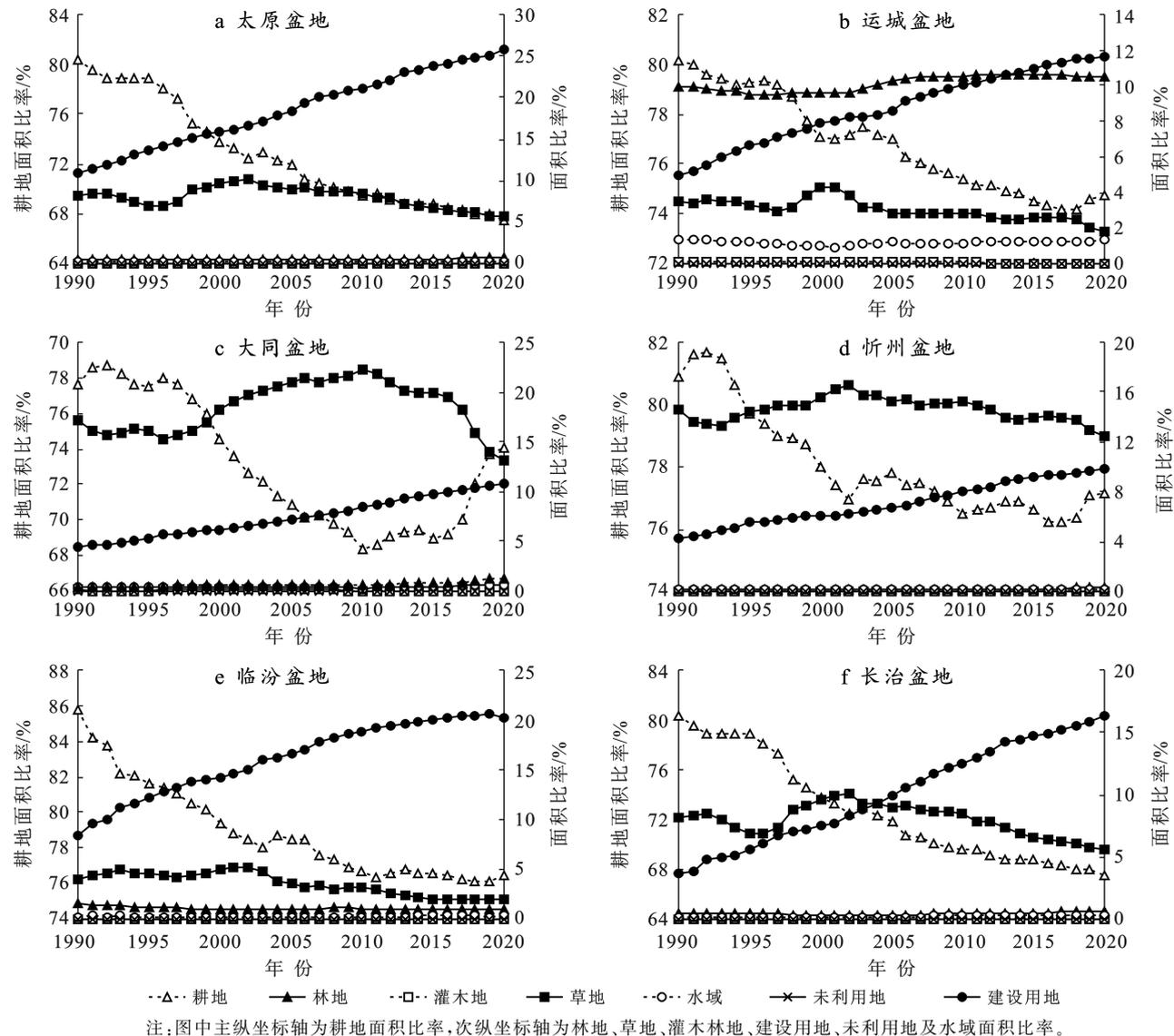


图 2 山西省 6 大盆地土地利用变化

Fig.2 Land use change in six basins of Shanxi Province

2.2 不同区位地下水位演变特征

在气候变化与人类活动双重影响下,不同区位的地下水位均发生显著变化,且呈现出明显的时代特征。由图 3 可以看出,在 20 世纪 90 年代,太原盆地地下水位埋深以 2~6 m 分布区为主,大于 20 m 的分布区仅占 8%;2000 年以后,全区演变为以埋深大于

20 m 的分布区为主;2015 年以后,大于 20 m 分布区比率有所减少,至 2020 年缩小至 35.1%。在 20 世纪 90 年代初,运城盆地和忻州盆地地下水位埋深均以 2~6 m 的分布区为主,临汾盆地则以 10~20 m 的分布区为主;至 1995 年,运城盆地和忻州盆地演变为以 10~20 m 的分布区为主,临汾盆地则以大于 20 m 的

分布区为主。大同盆地从 20 世纪 90 年代至 21 世纪 00 年代均以地下水位埋深在 2~6 m 的分布区为主, 至 2010 年以后以埋深大于 20 m 的分布区为主, 2015

和 2020 年的比率分别为 33.93% 和 35.48%。长治盆地地下水位埋深多在 2~20 m 之间, 小于 2.0 m 和大于 20 m 的分布区面积很小。

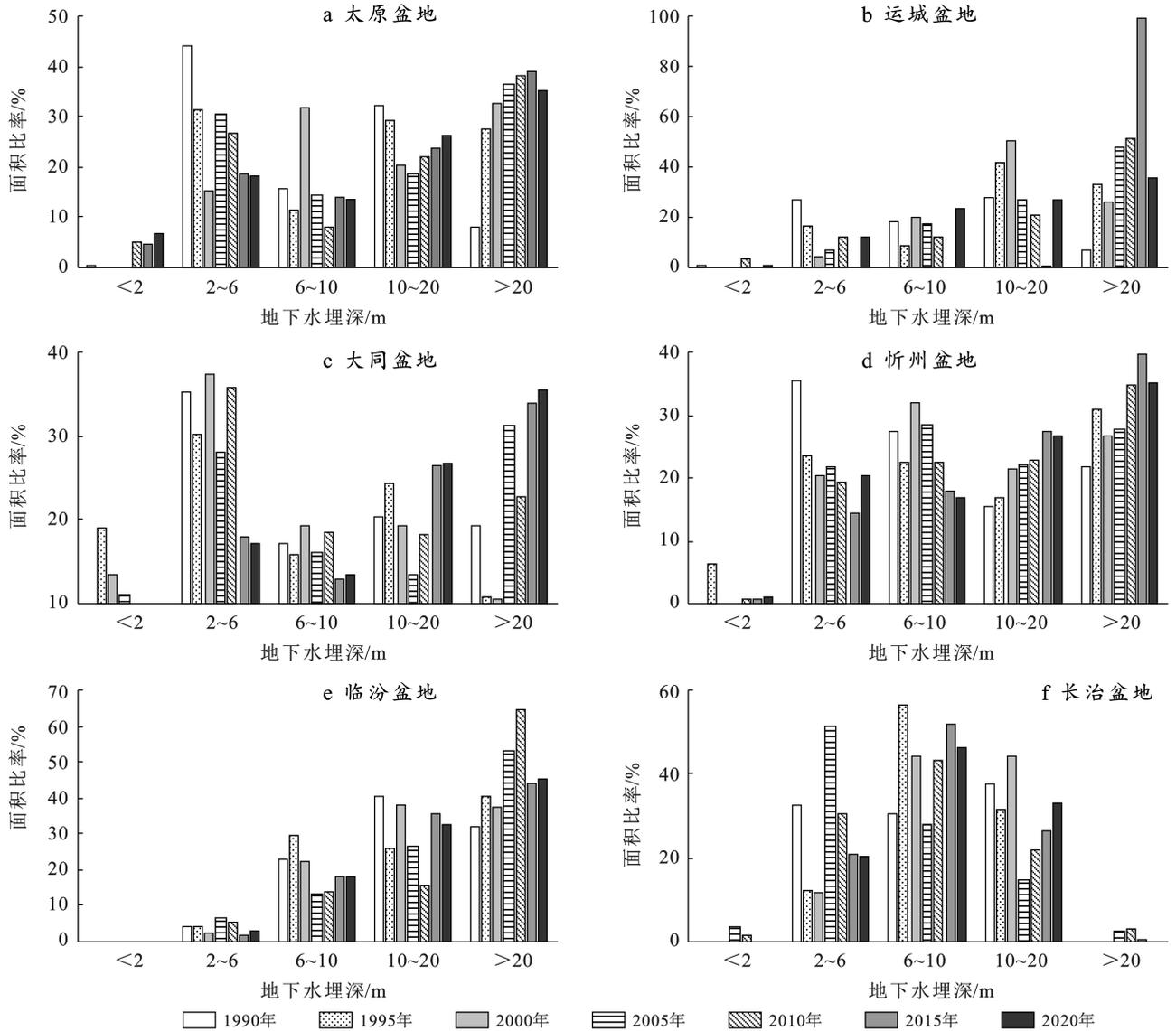


图 3 山西省 6 大盆地地下水位埋深时空分布特征

Fig.3 Spatiotemporal distribution characteristics of groundwater level in six basins of Shanxi Province

2.3 降水变化对不同区位地下水位的影响

降水入渗补给量是地下水系统重要补给项, 降水变化必然导致地下水位变动。从图 4 可以看出, 随着降水量的增大, 不同区位地下水位变化幅度均呈减小趋势, 且地下水位升降与降水量之间的均衡点存在明显差异。太原盆地和运城盆地的均衡点约在 580 mm 左右, 当降水量增大至 580 mm 以上时, 多数年份地下水位止降回升, 当降水量减少至 400 mm 以下时, 地下水位下降幅度达 0.5 m 以上。在大同、忻州、临汾和长治盆地, 均衡点分别约在 480, 550, 600 和 620 mm 左右, 当降水量小于均衡点时, 多数年份地

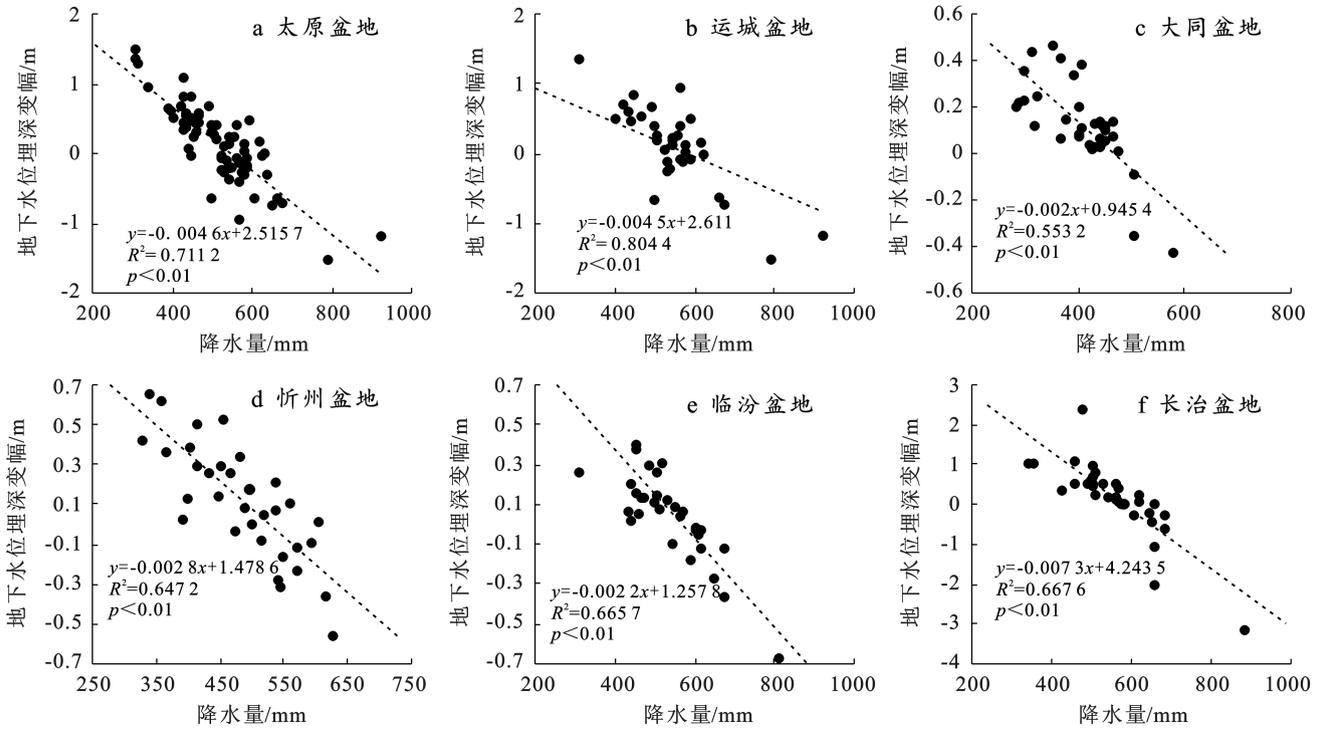
下水位呈下降趋势, 反之, 当降水量大于均衡点时, 地下水位呈抬升趋势。从图 4 还可以看出, 不同区位地下水位随降水量变化的敏感程度不同, 降水量每增大或减少 100 mm, 长治盆地地下水位平均变幅最大, 达 0.73 m, 其次是太原盆地和运城盆地, 地下水位变化幅度分别为 0.46 和 0.45 m, 大同盆地、临汾盆地和忻州盆地较小, 分别为 0.20, 0.22 和 0.28 m。

2.4 开采量变化对不同区位地下水位的影响

开采量是地下水系统重要排泄项, 但是, 地下水位的升降并不与开采量增减直接相关, 而与含水层的蓄变量(超采量: 区域地下水资源量减去开采量为负

值;增补量;地下水资源量减去开采量为正值)密切相关,当地下水系统增补,地下水位抬升,反之,当地下水系统超采,地下水位下降,从图 5 可以看出,地下水系统增补量每增加 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,运城、太原、大同、

忻州、临汾和长治盆地的地下水位分别上升 0.18, 0.36, 0.25, 0.55, 0.40 和 2.0 m, 反之,超采量每增加 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,山西省 6 大盆地的地下水水位分别下降 0.18, 0.36, 0.25, 0.55, 0.40 和 2.0 m。



注:图中“负值”表示地下水水位回升,“正值”表示地下水水位下降。下同。

图 4 山西省 6 大盆地不同区位区平均地下水位随降水量变化

Fig.4 Variation of average groundwater level with precipitation in six basins of Shanxi Province

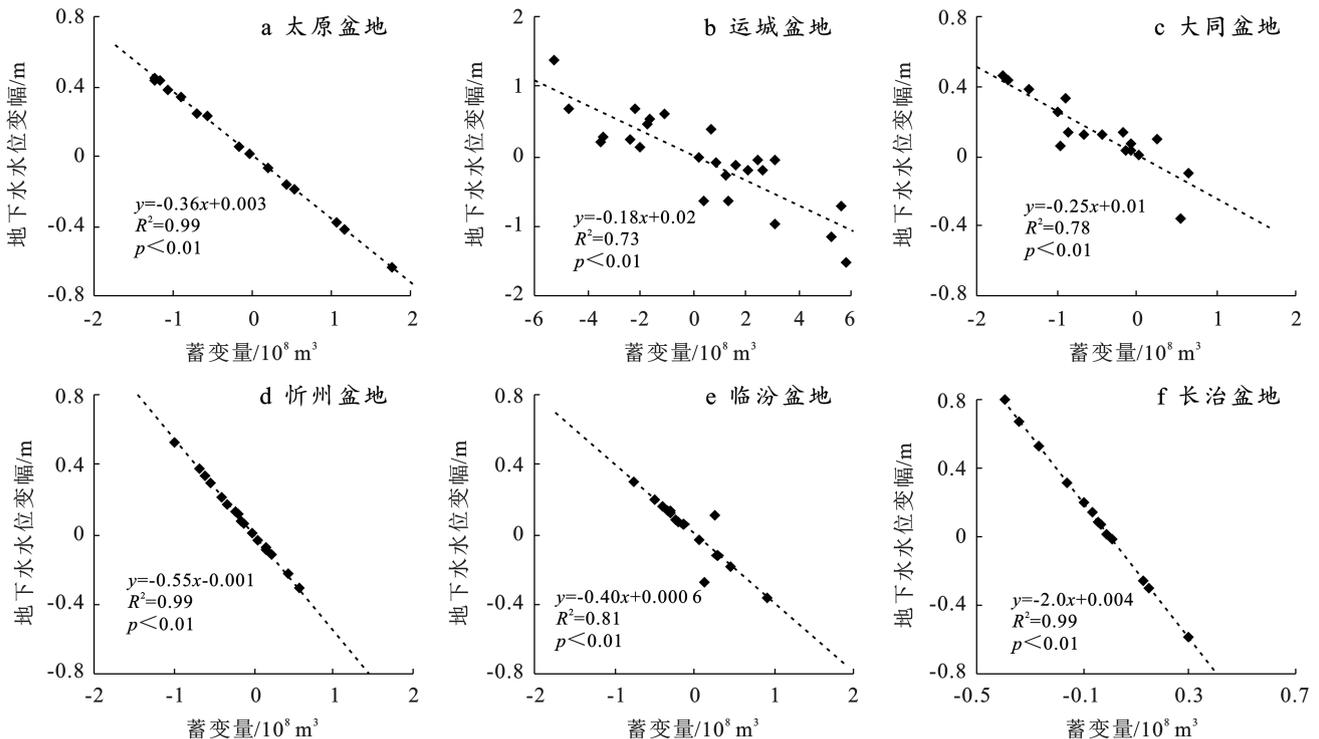


图 5 山西省 6 大盆地地下水位变幅与地下水系统蓄变量关系

Fig.5 Relationship between groundwater level variation and groundwater system storage variables of Shanxi Province

2.5 土地利用及降水量对地下水资源量影响贡献度

采用上文所述方法建立了地下水资源量与降水量、耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地及建设用地面积的投影寻踪回归模型,计算了降水量与土地利用变化对地下水资源量影响权重;采用公式(5—6)计算了降水量变化和耕地、林地、灌木地、草地、水域、未利用地及建设用地面积变化对地下水资源量影响贡献度。由图 6 可以看出,不同区位的地下水资源量的实测值与预测值基本一致,太原、运城、大同、忻州、临汾及长治盆地的相对误差(MAPE)分别为 1.18%、

2.13%,1.14%,3.33%,0.99%和 2.60%。图 7 为降水量及耕地、林地、灌木林地、草地、水域、未利用地、建设用地等因素变化对研究区地下水资源量影响的贡献度。由图 7 可以看出,降水量是影响不同区位地下水资源量的第一因素,贡献度均超过了 40%,其中,忻州盆地最大,为 60.63%,其次为太原和 大同盆地,分别为 52.86%和 50.28%;在运城和 大同盆地,耕地变化是第二影响因子,贡献度均为 22.55%;在太原、忻州、临汾和长治盆地,建设用地变化是第二影响因子,贡献度分别为 19.12%,17.57%,16.56%和 22.43%。

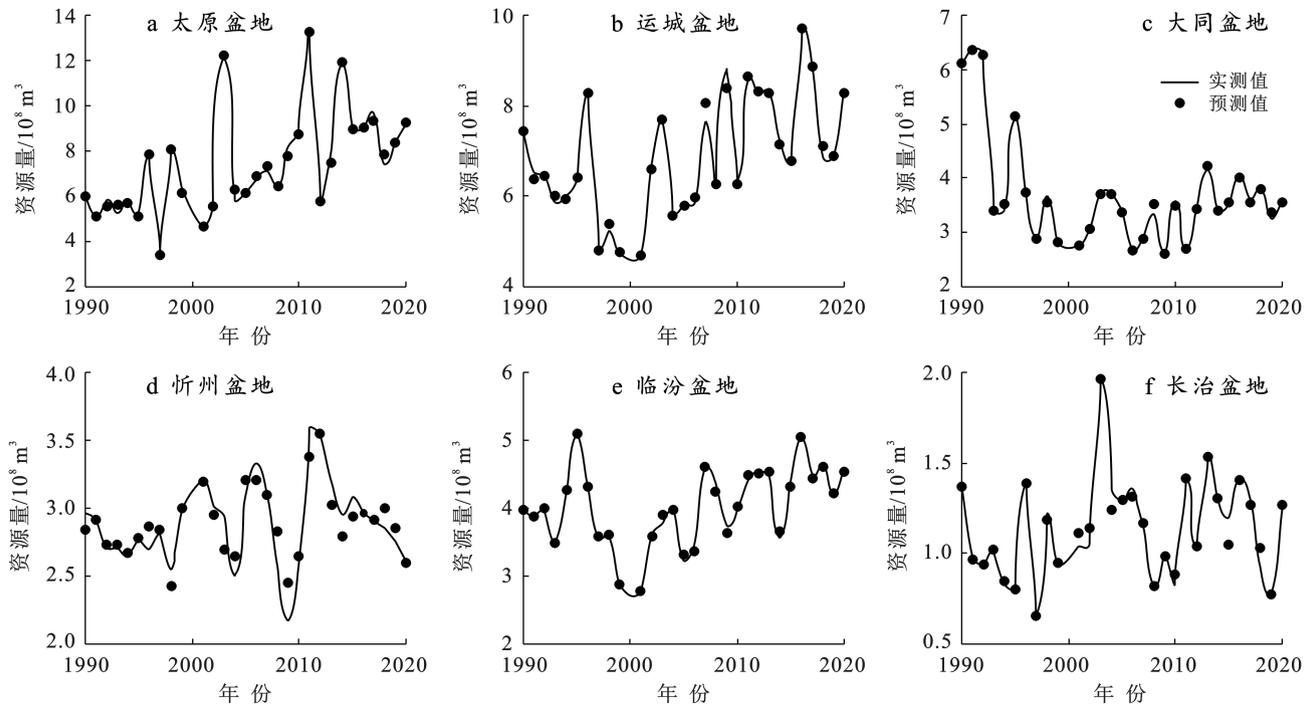


图 6 山西省 6 大盆地地下水资源量实测值与预测值对比

Fig.6 Comparison between measured and predicted groundwater resources in six basin of Shanxi Province

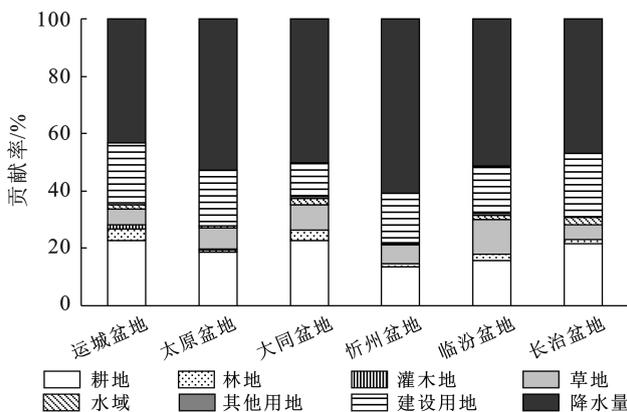


图 7 山西省 6 大盆地土地利用及降水对地下水资源量影响贡献度
Fig.7 Contribution of land use and precipitation on groundwater resources in six basin of Shanxi Province

3 讨论

降水量与不同区位地下水水位相关关系不显著,而

与地下水水位的变化幅度密切相关,当降水量增大至一定临界值时,地下水水位回升,低于该临界值时,地下水水位下降。根据地下水水位动态法计算模型(公式 7),当地下水系统蓄变量大于 0 时(地下水系统处于正均衡状态),地下水水位回升,反之,当地下水系统蓄变量小于 0 时(地下水系统处于负均衡状态),地下水水位下降,随着降水量的增大,降水入渗补给量增大,地下水开采量则减少,地下水系统逐渐朝正均衡状态发展,地下水水位下降幅度减小,当增大至降水临界值,地下水系统补给量大于排泄量时,地下水水位回升,也就是说,不管降水量如何变化,只要小于临界值,地下水水位下降,反之,大于临界值,则回升。

$$\Delta Q = \Delta H \mu F \quad (7)$$

式中: ΔQ 为地下水系统蓄变量(m^3); ΔH 为地下水水位变幅(m); μ 为地下水水位变幅带内给水度; F 为计

算单元面积(km²)。

地下水开采量与地下水位并不呈明显的正(负)相关关系,这是因为当地下水压采后实际开采量仍大于地下水系统补给量时($\Delta Q < 0$),地下水位仍呈下降趋势,只是下降幅度较压采前有所减少,只有当压采至开采量与补给量平衡时,地下水水位才能回升。另外,由图4—5还可以看出,不同区位地下水水位变幅随降水量变化及地下水系统蓄变量变化的敏感程度不同,这主要是由不同区位的给水度(μ)不同造成的,蓄变量相等的情况下, μ 值越小,地下水位变幅越大,反之,则越小。

由图7可以看出,土地利用方式的改变也是影响地下水系统的重要因素,与已有研究成果的结论相同^[20-24]。这是因为土地利用方式与地下水系统的补给量密切相关,建设用地(硬化)面积的增长,必然会减少降雨入渗补给,而耕地面积的缩小在减少降雨入渗补给的同时,也减少了田间渗漏补给和渠系渗漏补给;另外,林地、灌木林地、草地等占地类型的增减,会增大(减少)植被截留量及地表径流,从而影响降水入渗补给及河道渗漏补给;水域面积的增减会影响河道及水库等水域的渗漏补给。

4 结论

(1) 随降水量的增大,研究区不同区位地下水位下降幅度均呈减缓趋势,当降水量增大至580,600,480,550,600,620 mm,太原、运城、大同、忻州、临汾和长治盆地多数年份的地下水位均止降回升。

(2) 地下水位与地下水系统的蓄变量呈直线相关关系,地下水系统蓄变量每增加 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,运城、太原、大同、忻州、临汾和长治盆地的地下水位分别上升0.36,0.18,0.25,0.55,0.40,2.0 m。

(3) 降水是影响不同区位地下水资源量动态变化的首要因素,贡献度均超过了40%,其中,忻州盆地最大,为60.63%,其次为太原和长治盆地,分别为52.86%和50.28%;在运城和长治盆地,耕地变化是第2影响因子,在太原、忻州、临汾和长治盆地,建设用地变化是第2影响因子。

参考文献(References)

[1] 徐晓琳,邓敬一,张天宇.山西省地下水超采治理成效分析[C]//广东广州:第十一届中国水生态大会论文集,2023.
Xu Xiaolin, Deng Jingyi, Zhang Tianyu. Analysis of the effectiveness of groundwater overexploitation control in Shanxi Province [C] // Guongzhou, Guangdong: Proceedings of the 11th China Water Ecology Confer-

ence, 2023.

- [2] Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405 (3/4): 532-560.
- [3] Yoo S H, Choi J Y, Lee S H, et al. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 43-54.
- [4] Moiwu J P, Yang Yonghui, Li Huilong, et al. Impact of water resource exploitation on the hydrology and water storage in Baiyangdian Lake [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(21): 3026-3039.
- [5] 冯慧敏,张光辉,王电龙,等.近50年来石家庄地区地下水流域演变驱动力分析[J].*水利学报*, 2014, 45(2): 180-186.
Feng Huimin, Zhang Guanghui, Wang Dianlong, et al. Analysis on driving force for groundwater flow field evolution in Shijiazhuang Area in recent 50 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(2): 180-186.
- [6] 胡玮,严昌荣,李迎春,等.气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J].*生态学报*, 2014, 34(9): 2367-2377.
Hu Wei, Yan Changrong, Li Yingchun, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2367-2377.
- [7] Lauffenburger Z H, Gurdak J J, Hobza C, et al. Irrigated agriculture and future climate change effects on groundwater recharge, northern high plains aquifer, USA [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 69-80.
- [8] 张光辉,王茜,田言亮,等.冀中山前平原农业区浅层地下水位对连年少雨响应特征与机制[J].*地球科学与环境学报*, 2015, 37(3): 68-74.
Zhang Guanghui, Wang Qian, Tian Yanliang, et al. Response characteristic and mechanism of shallow groundwater level on the successive years with less rainfall in the agricultural areas of the central Hebei piedmont plain [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(3): 68-74.
- [9] 张光辉,费宇红,刘春华,等.华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J].*农业工程学报*, 2013, 29(1): 1-10.
Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Liu Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 1-10.

- [10] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 43-48.
Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Liu Keyan, et al. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 43-48.
- [11] 束龙仓, 王哲, 袁亚杰, 等. 近 40 年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 896-906.
Shu Longcang, Wang Zhe, Yuan Yajie, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 896-906.
- [12] 刘坤, 高凡, 吴彬, 等. 2000—2020 年昌吉州东部平原区地下水位埋深对土地利用及干旱时空演变的动态响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 150-159.
Liu Kun, Gao Fan, Wu Bin, et al. Dynamic response of groundwater depth to land use and temporal-spatial evolution of drought in the eastern Plains of Changji prefecture from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 150-159.
- [13] 孙青言, 陆垂裕, 郭辉, 等. 三江平原土地利用变化对水量平衡的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 694-706.
Sun Qingyan, Lu Chuiyu, Guo Hui, et al. Effects of land use change on water balance in the Sanjiang Plain [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 694-706.
- [14] 胡鑫, 吴彬, 高凡, 等. 呼图壁县地下水位动态对土地利用变化响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 227-234.
Hu Xin, Wu Bin, Gao Fan, et al. Response of groundwater level dynamics to land use change in Hutubi County [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 227-234.
- [15] 于叶翔. 土地利用变化影响下的三江平原地下水补给量研究[D]. 吉林 长春: 吉林大学, 2023.
Yu Yexiang. Study of groundwater recharge in the Sanjiang Plain under the influence of land use change [D]. Changchun, Jilin: Jilin University, 2023.
- [16] Dasgupta B, Sanyal P. Linking Land Use Land Cover change to global groundwater storage [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158618.
- [17] 唐启义, 唐睿. DPS 数据处理系统(第二卷): 现代统计及数据挖掘[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2020.
Tang Qiyi, Tang Rui. DPS data processing system (Volume II): Contemporary statistics and data mining [M]. Fifth Edition. Beijing: Science Press, 2020.
- [18] 武安绪, 林向东, 蒋长胜, 等. 基于粒子群优化算法与厄米多项式构建地震综合预测投影追踪回归模型[J]. 地震学报, 2009, 31(6): 671-683.
Wu Anxu, Lin Xiangdong, Jiang Changsheng, et al. A projection pursuit regression model for synthetic earthquake prediction based on particle swarm optimization and Hermite polynomial fitting [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(6): 671-683.
- [19] 于晓虹, 叶晶, 洪赢政, 等. 地震死亡人数评估的投影追踪回归建模研究[J]. 华北地震科学, 2022, 40(4): 19-27.
Yu Xiaohong, Ye Jing, Hong Yingzheng, et al. Earthquake casualty assessment model based on projection pursuit regression technique [J]. *North China Earthquake Sciences*, 2022, 40(4): 19-27.
- [20] 孙继能, 王万洲, 燕鑫, 等. 黄土区长武塬地下水埋深动态特征及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 90-97.
Sun Jineng, Wang Wanzhou, Yan Xin, et al. Dynamics of groundwater in Changwu loess tableland and its determinants [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(10): 90-97.
- [21] 刘波, 樊成芳, 束龙仓, 等. 气候变化与人类活动对三江平原典型区地下水埋深影响预估[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 63-69.
Liu Bo, Fan Chengfang, Shu Longcang, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on groundwater in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 63-69.
- [22] 张玉珊, 舒栋才, 李瑞, 等. 赤水河流域生态水文过程对土地利用/覆被变化的响应[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 56-65.
Zhang Yushan, Shu Dongcai, Li Rui, et al. Responses of ecohydrological processes to land use/cover change in the Chishui River basin [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 56-65.
- [23] 张云, 李升, 高远, 等. 干旱半干旱地区地下水埋深与土地利用变化关系分析: 以喀什三角洲为例[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 38-44.
Zhang Yun, Li Sheng, Gao Yuan, et al. An analysis of the relationship between the groundwater depth and the land use change in arid and semi-arid areas: Taking Kashgar delta as an example [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(5): 38-44.
- [24] 章文亭, 杨鹏年, 彭亮, 等. 2005—2017 年焉耆盆地平原区地下水时空演变规律及其与土地利用的关系[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 276-283.
Zhang Wenting, Yang Pengnian, Peng Liang, et al. Spatiotemporal evolution of groundwater and its relationship with land use in plain area of Yanqi basin during 2005—2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 276-283.