

降水对华北农业区地下水保障能力的影响

王电龙^{1,2}, 张光辉³, 冯慧敏⁴, 狄帆⁵, 张西珠¹, 杜旭婷¹

(1.太原工业学院 环境与安全工程系, 山西 太原 030012; 2.中国水利水电科学研究院
流域水循环与调控国家重点实验室, 北京 100086; 3.中国地质科学院 水文地质环境地质研究所,
河北 石家庄 050801; 4.山西农业大学 城乡建设学院, 山西 太谷 030801; 5.太原理工大学, 山西 太原 030002)

摘要: [目的] 评估降水对华北农业区地下水保障能力的影响, 为该区地下水资源可持续利用提供理论依据。[方法] 建立地下水保障能力(F)评价理论体系, 采用地学统计、关联度分析等方法, 分析降水对地下水保障能力影响的时空特征。[结果] ①随降水量变化, F 值空间分布变化明显, 多年平均和丰水年以“基本保障”分布为主, 枯水年则以“难以保障”为主; ②随降水量变化, 不同区位 F 发生频次亦不同。在燕山山前平原和太行—冀中平原, 当降水频率分别 $>75\%$ 和 $>50\%$ 时, F 值均在 0.5 以下; 太行—豫北平原, 当降水频率 $<75\%$ 时, F 值升高至以大于 1.0 的频次为主; 中部—豫北平原, 当降水频率 $<50\%$ 时, F 值均增大至 1.0 以上; 当降水频率 $<25\%$ 时, 中部—鲁北平原和滨海平原 F 值均增大至 0.5 以上, 而中部—冀中平原只有少数年份 F 大于 0.5。[结论] 降水是影响地下水保障能力的重要因素, 对平水年和枯水年仍为“较高保障”的区域可适当扩大农业种植规模, 对丰水年为“难以保障”和“较低保障”的区域, 应适当压缩农业种植规模。

关键词: 降水变化; 农业区; 地下水; 保障能力; 华北平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0276-07

中图分类号: S274.3

文献参数: 王电龙, 张光辉, 冯慧敏, 等. 降水对华北农业区地下水保障能力的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 276-282. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.033; Wang Dianlong, Zhang Guanghui, Feng Huimin, et al. Impacts of precipitation on groundwater preservation capacity of agricultural regions in North China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 276-282.

Impacts of Precipitation on Groundwater Preservation Capacity of Agricultural Regions in North China

Wang Dianlong^{1,2}, Zhang Guanghui³, Feng Huimin⁴, Di Fan⁵, Zhang Xizhu¹, Du Xuting¹

(1. Department of Safety and Environmental Engineering, Taiyuan

Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030012, China; 2. State Key Laboratory of

Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water

Resources and Hydropower Research, Beijing 100086, China; 3. Institute of Hydrogeology and

Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050800, China;

4. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

5. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: [Objective] The impacts of precipitation on the groundwater preservation capacity for agricultural regions in North China were studied in order to provide a theoretical basis for the sustainable use of groundwater resources in this region. [Methods] We established a theoretical system for evaluating groundwater preservation capacity (F) and determined the influence of precipitation changes on F value in agricultural regions of North China using methods such as geoscience statistics and correlation analysis. [Results] ① The spatial distribution of F value changed dramatically as precipitation changed. The multi-year average and wet years were dominated by the “basic guarantee” distribution, while the dry years were dominated by the “difficult to guarantee”

收稿日期: 2023-01-17

修回日期: 2023-04-14

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”(4170226); 山西省高等学校科技创新项目(2021L559); 太原工业学院青年(后备)学科带头人支持计划项目(202104)

第一作者: 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。

通讯作者: 冯慧敏(1980—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农田水利与水资源可持续利用等方面的研究。Email: fenghuimin1997@163.com。

distribution; ② As precipitation changed, the frequency of F value also varied in different locations. In the Yanshan Plain and the Taihang-Hebei Plain, when the precipitation frequency was greater than 75% and 50%, respectively, the F value was less than 0.5; in the Taihang-Henan Plain, when the precipitation frequency was less than 75%, the F value was greater than 1.0; in the Central Henan Plain, when the precipitation frequency was less than 50%, the F value increased to 1.0; in the Central Shandong Plain and Littoral Plain, when the precipitation frequency was less than 25%, the F value was greater than 0.5; in the Central Hebei Plain, there were only a few years where the F value was greater than 0.5. [Conclusions] Precipitation is an important factor that affects groundwater preservation capacity. For areas that can be “highly preserved” even during normal and dry years, the scale of agricultural planting can be appropriately expanded to ensure ample food production. However, for areas that are “difficult to preserve” and have “lower preservation” capacity during wet years, the scale of agricultural planting should be appropriately reduced to alleviate the pressure of groundwater overexploitation.

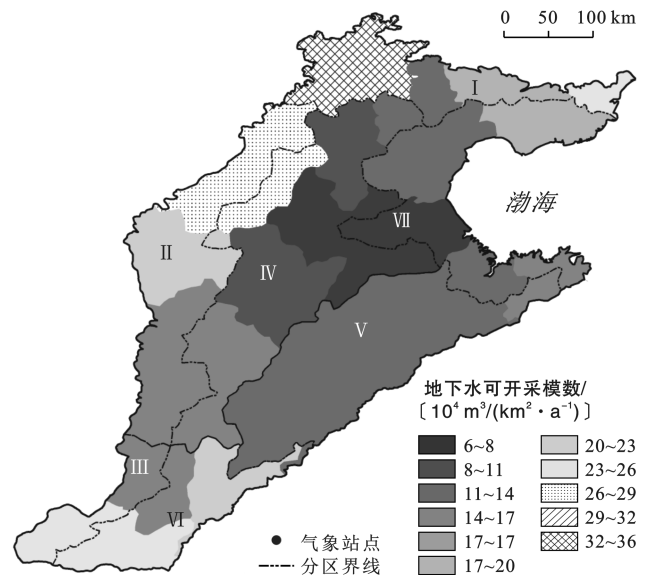
Keywords: precipitation change; agricultural region; groundwater; preservation capacity; North China Plain

华北平原是中国小麦、玉米等粮食作物主产区,粮食总产量占全国的 10.6%^[1]。该区灌溉农业以开采地下水供给为主,农业开采量占华北地下水总开采量的 60%以上^[2]。农业灌溉用水及其开采地下水的强度和超采程度,与降水变化密切相关^[3-4]。降水变化不仅影响作物灌溉需水量^[5-6],而且还显著影响农业开采量和地下水补给量变化^[7-8],尤其连年降水枯水或连年降水丰水,对农业区地下水水流场及其保障能力的影响十分明显^[9],是一个重要研究课题。深入开展降水变化条件下地下水保障能力研究,对华北农业区地下水资源合理开发利用和保障国家粮食安全具有重要意义。目前,已有部分学者对华北农业区的地下水保障能力开展了相关研究。张光辉等^[10]建立了地下水保障能力评价 ABC 法,评价了黄淮海多年平均年份下的地下水保障能力,认为黄淮海平原西北部,尤其是河北平原,灌溉农业的地下水保障能力较弱,黄河以南地区地下水保障能力较强;田言亮等^[11]评价了多年平均年份黄淮海平原灌溉农业对地下水的依赖程度及保障能力,认为灌溉农业是该区地下水超采的主要因素;王电龙等^[12]评价了未来气候情景下华北井灌区地下水保障能力;刘敏等^[13]评价了华北平原的地下水承载能力,认为农业灌溉是该区地下水水位下降的重要因素;Wang 等^[14]提出了一套基于云计算的地下水承载力计算方法。从已有研究成果可以看出,目前灌溉农业地下水保障能力研究成果多是针对多年平均年份进行静态评价。本文基于前人研究基础,改进了地下水保障能力评价方法,使之能够适用于不同降水年型、不同降水量条件,揭示了不同降水年型、不同降水量条件下华北农业区地下水保障能力时空特征与机制。研究成果对于缓解华北农业区地下水超采趋势,提高该区地下水资源可持续性,保障国家粮食安全有重要意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

华北农业区地处太行山脉以东,燕山山脉以南,自北、西、南 3 个方向倾向渤海湾,海拔不超过 100 m,地形坡降由山前的 1%~2% 逐渐变缓为 0.1%~0.2%。从山麓至渤海海岸线,分布着山前冲积—洪积平原(以下简称“山前平原”)、中部冲积—湖积泛滥平原(以下简称“中部平原”)和东部冲积—海积滨海平原(以下简称“滨海平原”)。本文根据研究区不同区位水文地质条件及气象条件差异分 7 部分开展研究(图 1)。



注: I 燕山山前平原; II 太行—冀中平原; III 太行—豫北平原; IV 中部—冀中平原; V 中部—鲁北平原; VI 中部—豫北平原; VII 滨海平原。

图 1 华北农业区水文条件及气象站点分布

Fig.1 Distribution of hydrologic condition and meteorological stations of agricultural region in North China

华北平原属欧亚大陆东岸暖温带半干旱季风气候区,多年平均降水量 556.48 mm,降水年内分配不均匀,主要集中在 7—9 月,占年内总降水量的 75% 左右,多年平均气温介于 10~14 °C 之间。华北平原可分为滦河、海河和古黄河三大地下水系统,含水层平面上可划分为单层和多层结构分布区,单层结构分布区主要分布于山前平原上部,多层结构分布区主要分布在山前平原前缘地带、中部平原和滨海平原区,可统一划分为 4 个含水层组。华北平原是中国重要的粮食生产基地,冬小麦和夏玉米一年两季轮作种植是当地最为主要的农作物种植方式,占该区农作物总播种面积的 80% 以上。

1.2 农业区地下水保障力计算方法

1.2.1 指标体系 为了能够研究评价研究区不同降水年型、不同降水量条件下农业区的地下水保障能力,基于前人研究成果^[10-11],本研究建立了适用于不

同降水条件下的农业区地下水保障力(F)评价指标体系。

由表 1 可知, F 值越大,保障能力越高,反之, F 值越小,保障能力越低,并根据任宪韶等^[15]人在太行—冀中平原的研究成果(灌溉需求满足率小于 25% 时,作物产量大幅降低,减产幅度超过 40%,满足率 100% 及以上则可以完全满足作物灌溉需求,实现高产稳产)对 F 进行了分级(表 1)。

$$F = \frac{1}{\alpha} \times \frac{Q_{re}}{IR} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{Q_{ex}}{IR} \quad (2)$$

式中:IR 为不同区位灌溉需水模数 $[\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; Q_{re} 为农业可开采资源模数 $[\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; α 不同区位地下水灌溉保障率(%); Q_{ex} 为近 5 a 地下水农业开采模数 $[\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 。

表 1 地下水保障能力评价指标体系

Table 1 Assessment index of groundwater supporting system

评结果分级	地下水保障能力指标(F)	指标意义
较高保障	>1.00	可用于农业灌溉的地下水资源量能够满足农业区作物灌溉需求,实现高产稳产。可以适当扩大灌溉农业
基本保障	$0.50 \sim 1.00$	可用于农业灌溉的地下水资源量不能完全满足灌溉用水需求。可大力发展节水灌溉,维持农业灌溉可持续性
较低保障	$0.25 \sim 0.50$	可用于农业灌溉的地下水资源量不足灌溉用水需求的 50%。应加快作物种植结构调整,积极发展旱作农业
难以保障	<0.25	可用于农业灌溉的地下水资源量不足灌溉用水需求的 25%,作物大幅减产。应减少农业种植规模,引进“客水”缓解农业开采压力

1.2.2 灌溉需水模数的计算 采用作物生育期内蒸散量(ET_c)减去有效降水量的方法计算灌溉需水量,计算公式为:

$$IR = ET_c - P_e \quad (3)$$

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (4)$$

式中:IR 为灌溉需水量(mm),代入公式(1)~(2)时换算为 $[\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; ET_0 为参照作物蒸散量(mm); K_c 为作物需水系数^[16]; P_e 为作物生育期内有效降水量(mm)。

ET_0 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的方程式彭曼—蒙蒂斯(Penman-Monteith)进行计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma 900 U_2 (e_s - e_a) / (T + 273)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (5)$$

式中: R_n 为地表净辐射(MJ/m^2); G 为土壤热通量(MJ/m^2); T 为 2.0 m 高度处的平均气温($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2.0 m 高度处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

有效降水量为作物生育期内降水所能满足的作物蒸散发量。采用如下公式进行计算,计算时段为旬:

$$P_e = \begin{cases} P & (P \leq ET_c) \\ ET_c & (P > ET_c) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 为作物生育期内降水量(mm)。

1.2.3 关联度分析 采用关联系数法分析计算参考数列:地下水保障能力 $F(X_0)$ 与比较数列:最高气温(X_1)、最低气温(X_2)、日照时数(X_3)、相对湿度(X_4)、风速(X_5)、降水量(X_6)、地下水可开采资源量(X_7)的关联度。假定每个数列均有 N 个同期的动态观测值,即:参考数列 $\{X_0(i)\}$, $i=1, 2, \dots, N$; 比较数列 $\{X_k(i)\}$, $k=1, 2, 3, \dots, 7$; $i=1, 2, \dots, N$, 则关联系数 $\xi_k(i)$ 可由下列公式算出。

$$\xi_k(i) = \frac{\Delta_{\min}(i) + \zeta \Delta_{\max}(i)}{\Delta_k(i) + \zeta \Delta_{\max}(i)} \quad (7)$$

式中: ζ 为分辨系数,一般在 0~1 之间,通常取 0.5。 $\xi_k(i)$ 为第 k 条比较曲线 X_k 与参考曲线 X_0 在 i 时刻

的关联系数, $0 \leq \xi_k \leq 1$; ξ_k 愈接近于 1, 说明它们的关联性愈好。 $\Delta_{\min}(i)$, $\Delta_{\max}(i)$ 为 7 条比较曲线在 $[1, N]$ 区间, i 时刻与参考曲线距离的最小值和最大值, 即 $\Delta_{\min}(i) = \min |X_0(i) - X_k(i)|$, $k = 1, 2, 3 \dots 7$; $\Delta_{\max}(i) = \max |X_0(i) - X_k(i)|$, $k = 1, 2, 3 \dots 7$; $\Delta_k(i)$ 为 i 时刻第 k 条比较曲线与参考曲线的距离, 即 $\Delta_k(i) = |X_0(i) - X_k(i)|$, $k = 1, 2, 3 \dots 7$ 。

于是, 关联度 (γ_k) 可由下列公式算出:

$$\gamma_k = \frac{1}{N} \sum_i \xi_k(i) \quad (8)$$

式中: γ_k 为比较数列 X_k 对参考数列 X_0 的灰色关联度, γ_k 值越接近 1, 说明关联性越好。

1.3 数据来源

农业可开采模数采用 7 个分区内各地级市地下水可开采模数的 70% 作为评价的基值, 基值充分考虑了研究区不同区位生活、工业及生态用水权重。地下水可开采模数采用《中国主要粮食基地地下水保障能力与评价理论方法》^[17] 计算数据(地下水可开采模

数, 如图 1 所示)。不同区位农业开采量源自相应地区水行政主管部门发布的水资源公报和农业统计年鉴。采用 63 个气象站 1971—2020 年逐日降水、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数和近地风速等气象数据[中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)], 计算作物灌溉需水量。

2 研究结果

2.1 不同降水年型对地下水保障能力的影响

由公式(1)—(6) 计算得到华北农业区在多年平均年份、丰水年(降水频率 25%)、枯水年(降水频率 75%) 等 3 种降水年型下的地下水保障能力空间分布(图 2—3)。由图 2—3 可以看出, 多年平均年份, 地下水保障能力以 F 值在 0.5~1.0 的“基本保障”分布为主, 主要分布在中部—鲁北平原、中部—豫北平原和滨海平原; “较高保障”区主要分布在太行—豫北平原, 保障能力为 1.12; “难以保障”区主要分布在中部—冀中平原, 保障能力为 0.21(图 3)。

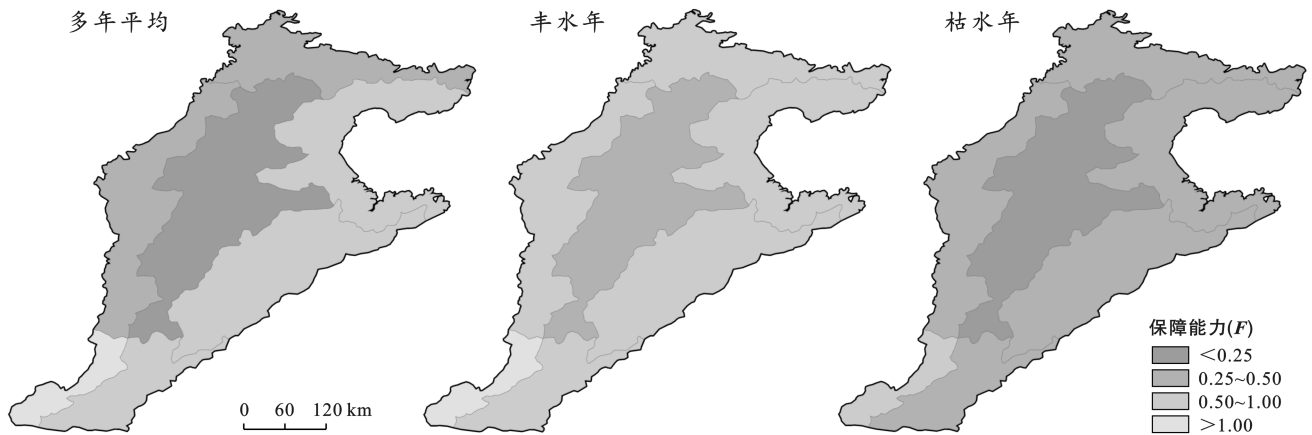


图 2 研究区不同降水年型地下水保障能力空间分布

Fig.2 Spatial characteristics of F value in study area in different precipitation years

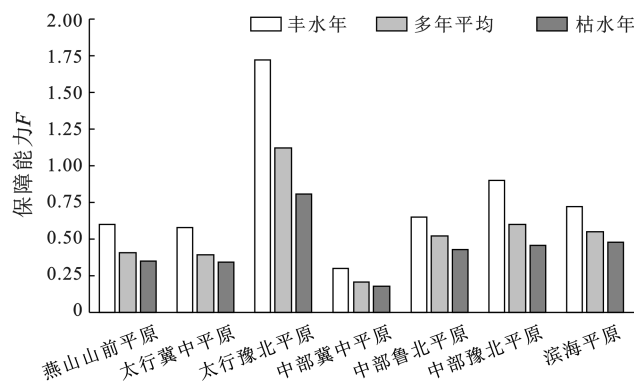


图 3 研究区不同降水年型下 7 个分区地下水保障能力

Fig.3 The F value of seven sub-regions in study area in different precipitation years

丰水年全区仍以“基本保障”分布为主, 但分布范围较多年平均年份进一步扩大至滨海平原和太行—

冀中平原, “较高保障”区仍主要分布在太行—豫北平原, 但保障能力增大至 1.72; 中部—冀中平原保障能力增大至 0.30(图 3), 为“较低保障”。枯水年较多年平均年份, “难以保障”分布区范围急剧扩大, 而“基本保障”分布范围则急剧减少; 中部—冀中平原保障能力减小至 0.18, 为“难以保障”; 太行—豫北平原保障能力减小至 0.81(图 3), 为“基本保障”。

2.2 降水年型对不同分级地下水保障能力发生频次的影响

图 4 为近 50 a(1971—2020 年) 不同区位在不同降水年型下地下水保障能力发生频次。由图 4 可以看出: ①燕山山前平原区 F 在 0.25~1.0 之间, 在枯水年(降水频率 $> 75\%$, 15 a), F 值均在 0.25~0.50 之间, 为“较低保障”; 在平水年偏丰年份(降水频率

25%~50%)、平水年偏枯年份(降水频率 50%~75%)和丰水年(降水频率 < 25%),“较低保障”发生频次分别为 9 次、8 次和 8 次,无明显差异;非丰水年

份地下水保障能力也有年份达到“基本保障”,但只有当降水量超过 691 mm(降水频率 < 25%)时,“基本保障”发生频次才能出现较大提升。

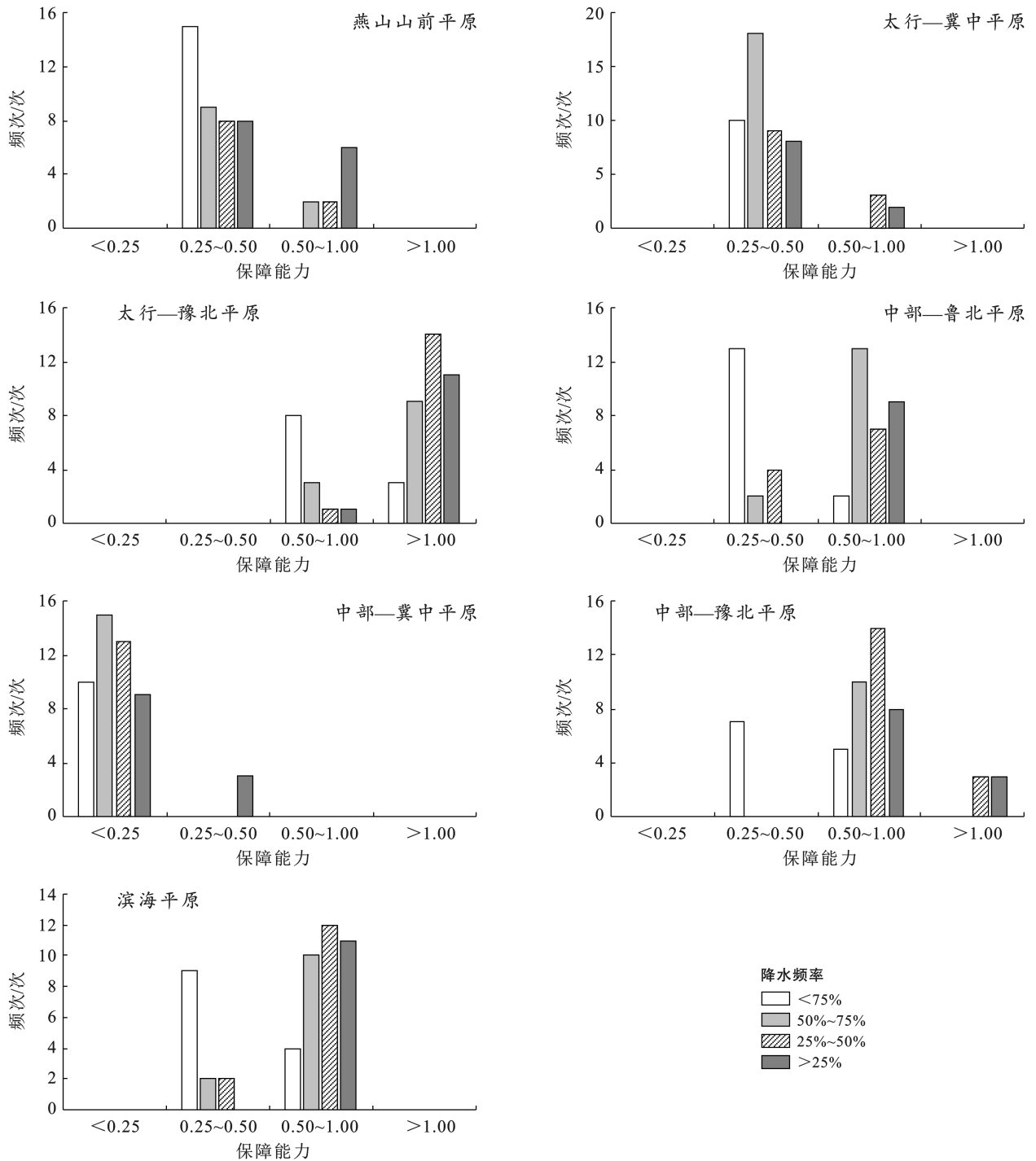


图 4 研究区不同降水年型地下水保障能力发生频次

Fig.4 Frequency of F value in study area in different precipitation conditions

②太行—冀中平原地下水保障能力在 0.25~1.0 之间,当降水量小于 504 mm 时(枯水年、平水偏枯年份),地下水保障能力均为“较低保障”,只有在平水年偏丰年份和丰水年 F 才有少量年份可增大至 0.5 以上,但是发生频次依然较低;③太行—豫北平原地下

水保障能力为“基本保障”和“较高保障”,当降水频率大于 75% 时,多数年份为“基本保障”,发生频次为 8 次,少数年份为“较高保障”,发生频次为 3 次,在平水年偏枯年、平水年偏丰年和丰水年,频次则以“较高保障”为主,分别为 9 次、14 次和 11 次,“基本保障”只

有 3 次、1 次和 1 次。④中部—鲁北平原地下水保障能力在 0.25~1.0 之间,枯水年,以“较低保障”为主,发生频次为 13 次,“基本保障”频次只有 2 次,在平水年偏枯年份和平水年偏丰年份则以“基本保障”为主,发生频次分别为 13 次和 7 次,而“较低保障”只有 2 次和 4 次,降水量增大至 633 mm(丰水年)以上时,地下水保障能力均提升至“基本保障”;⑤在中部—冀中平原,当降水量小于 586 mm 时(枯水年、平水年偏枯水年型和平水年偏丰年型),所有年份均为“难以保障”,只有丰水年,才有较少年份为“较低保障”;⑥在中部—豫北平原,枯水年, F 值在 0.25~1.00 之间,且以“较低保障”为主,发生频次为 7 次,在平水年偏枯年型, F 均在 0.50~1.00 之间,当降水量增大至 654 mm 以上时(平水年偏丰年份和丰水年),仍以“基本保障”为主,但部分年份地下水保障能力可提升至“较高保障”。⑦滨海平原地下水保障能力在 0.25~1.00 之间,且在枯水年,以“较低保障”为主,发生频

次为 9 次,“基本保障”发生频次为 4 次,在平水年偏枯水年型和平水年偏丰年型,则以“基本保障”为主,频次分别为 10 次和 12 次,“较低保障”为 2 次,当降水量大于 661 mm(丰水年)时,地下水保障能力均相应提升至“基本保障”。

2.3 降水量对不同区位地下水保障能力变化趋势的影响

图 5 为研究区不同区位地下水保障能力与降水量相关关系图。可以看出,随着降水量增大,不同区位地下水保障能力均呈增大趋势,反之,降水量减少,地下水保障能力则呈减小趋势。降水量每增大 100 mm,燕山山前平原 F 值平均增大 0.04,太行—冀中平原增大 0.03,太行—豫北平原增大 0.14,中部—鲁北平原增大 0.06,中部—冀中平原增大 0.03,中部—豫北平原增大 0.05,滨海平原增大 0.08。太行—豫北平原 F 值对降水变化响应最为敏感,其次为滨海平原。

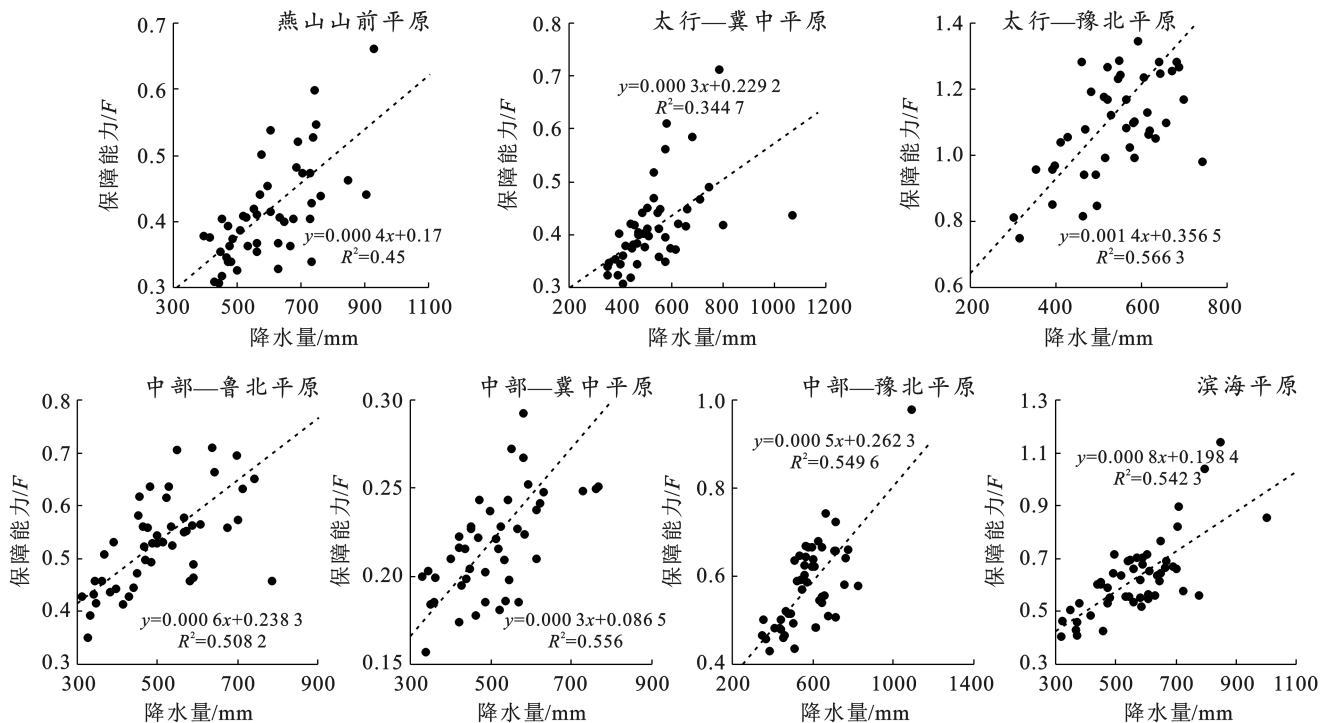


图 5 研究区降水量与地下水保障能力相关关系

Fig.5 Relationship between F value and precipitation in study area

3 讨论

基于前人研究基础,改进了农业区地下水保障能力评价方法,对比图 2 与前人研究成果^[10-11]可以发现,采用公式(1)—(2)及表 1 所计算的多年平均年份下华北农业区地下保障能力与已有研究成果基本一致,说明本文所用计算方法是准确的。由图 2—5 可以看出,降水量和降水年型对地下水保障能力影响明

显,且不同区位地下水保障能力随降水变化敏感程度也存在显著差异,这是因为农业区地下水保障能力除受降水影响外,还受地下水可开采模数、相对湿度、最高气温、最低气温、风速、日照时数等因素影响。由公式(7)—(8)可计算得到地下水保障能力与地下水可开采模数的关联度最高,为 0.79,其次是降水量、风速、相对湿度、日照时数、最低气温和最高气温,分别为 0.76,0.73,0.72,0.71,0.70 和 0.66,由于研究区不

同区位地下水可开采模数(图 1)及各气象参数均存在明显差异^[18],导致了不同区位地下水保障能力随降水量变化敏感程度亦存在明显不同。

4 结论

(1) 降水年型对华北农业区地下水保障能力空间分布特征影响明显。在多年平均年份,地下水保障能力以 F 在 0.5~1.0 的“基本保障”分布为主;丰水年,地下水保障能力仍以“基本保障”分布为主,但分布范围进一步扩大至燕山山前平原、太行—冀中平原;枯水年,地下水保障能力 F 以小于 0.25 的“难以保障”分布为主。对枯水年仍为“基本保障”或“较高保障”的区域,如太行—豫北平原,可适当扩大灌溉农业规模,以增加粮食产量,保障粮食安全,对丰水年为“较低保障”或“难以保障”的区域,如中部—冀中平原,应压减作物种植规模,或调引“客水”,缓解地下水开采压力。

(2) 降水年型对华北农业区地下水保障能力发生频次影响明显。在燕山山前平原, F 值在 0.25~1.00 之间,当降水频率 $<25\%$ 时, F 值在 0.50~1.00 区间的“基本保障”频次大幅增大;在太行—冀中平原,当降水频率 $<50\%$ 时,小部分年份 F 值可增大至 0.50 以上;在太行—豫北平原,当降水频率 $<75\%$ 时, F 大于 1.0 的“较高保障”频次大幅增加;在中部—鲁北平原,当降水频率 $<25\%$ 时,所有年份 F 值均相应增大至 0.5 以上;在中部—冀中平原,当降水频率 $<25\%$ 时,少部分年份 F 值可超过 0.5;在中部—豫北平原,当降水频率 $<50\%$ 时,部分年份地下水保障能力可提升至“较高保障”;在滨海平原,当降水频率 $<25\%$ 时,所有年份 F 值均大于 0.5。

(3) 随降水量的增大,地下水保障能力均呈增大趋势,反之,降水量减少,则呈减小趋势,但不同区位对降水量变化敏感程度有很大差异。太行—豫北平原 F 值对降水变化最为敏感,降水量每增大 100 mm, F 值增大 0.14,其次为滨海平原。通过关联度分析得到造成区域差异的主要因素为地下水可开采模数不同。

致谢: 特别感谢太原工业学院环境与安全工程系赵凯、于娇等同学在论文收集资料及数据处理过程中付出的辛勤努力。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Mz A, Aa A, Ib B, et al. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran [J]. Global and Planetary Change, 2011,78(3/4):137-146.
- [4] 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.
- [5] Seung H Y, Jin Y C, Sang H L, 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(1):43-54.
- [6] Zhu Xiufang, Zhao Anzhou, Li Yizhan, et al. Agricultural irrigation requirements under future climate scenarios in China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(2):224-237.
- [7] Bekele E G, Knapp H V. Watershed modeling to assessing impacts of potential climate change on water supply availability [J]. Water Resources Management, 2010,24(13):3299-3320.
- [8] Moiwo J P, Yang Y H, Li H L, et al. Impact of water resource exploitation on the hydrology and water storage in Baiyangdian Lake [J]. Hydrological processes, 2010, 24(21):3026-3039.
- [9] 冯慧敏,张光辉,王电龙,等.近 50 年来石家庄地区地下水流场演变驱动力分析[J].水利学报,2014,45(2):180-186.
- [10] 张光辉,费宇红,王茜,等.灌溉农业地下水保障能力评价方法研究:以黄淮海平原为例[J].水利学报,2016,47(5):608-615.
- [11] 田言亮,张光辉,王茜,等.黄淮海平原灌溉农业对地下水依赖程度与保障能力[J].地球学报,2016,37(3):257-265.
- [12] 王电龙,张光辉,冯慧敏,等.华北平原典型井灌区地下水保障能力空间差异[J].南水北调与水利科技,2015,13(4):622-625.
- [13] 刘敏,聂振龙,王金哲,等.华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J].水土保持通报,2014,34(6):311-315.
- [14] Wang Daqing, Xu Haoli, Shi Yue. The groundwater potential assessment system based on cloud computing: a case study in islands region [J]. Computer Communications, 2021,178:83-87.
- [15] 任宪韶,户作亮,曹寅白,等.海河流域水资源综合评价[M].北京:中国水利水电出版社,2007:170-175.
- [16] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(12):6-12.
- [17] 张光辉,严明疆,田言亮,等.中国主要粮食基地地下水保障能力与评价理论方法[M].北京:科学出版社,2018.
- [18] 王电龙,冯慧敏,张宝忠,等.降水对华北主要粮食作物灌溉需求影响特征[J].农业机械学报,2023,54(1):298-305.