

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0099

郑荣伟,程明瀚,张航,等.基于PCA和ArcGIS空间分析的河北省农业节水区划[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):178-184,192. ZHENG R W, CHENG M H, ZHANG H, et al. Agricultural water-saving zoning of Hebei Province based on PCA and ArcGIS spatial analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 178-184, 192. (in Chinese)

基于 PCA 和 ArcGIS 空间分析的河北省农业节水区划

郑荣伟¹,程明瀚²,张航³,范海燕³,金斌斌¹

(1. 浙江同济科技职业学院,杭州 311231;2. 河海大学 农业工程学院,南京 210098;
3. 北京市水科学技术研究院,北京 100048)

摘要:农业节水区划是区域农业规划的前提。针对河北省水资源匮乏的问题,选取灌溉需水指数、农田生产潜力、作物净初级生产力、土壤类型、地下水利用情况、地形地貌、人口及 GDP 等 8 项指标,通过 ArcGIS 的空间分析功能结合主成分分析法,构建了河北省节水区划模型,对河北省进行合理的农业节水区划,以提高灌溉水利用效率和农业生产效率。结果显示,河北省各县/区间模型评价结果差异明显,根据模型评分将河北省 149 个县/区划分为农业节水急切发展区、农业节水重要发展区和农业节水暂缓发展区 3 类区域,总体上河北省东南部农业节水建设需求高于西北部。最后根据各类区域特点,提出了各区存在的问题及未来发展建议。

关键词:农业节水区划;主成分分析法;空间分析;节水模式

中图分类号:S275.5 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Agricultural water-saving zoning of Hebei Province based on PCA and ArcGIS spatial analysis

ZHENG Rongwei¹, CHENG Minghan², ZHANG Hang³, FAN Haiyan³, JIN Binbin¹

(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China;
2. Agricultural Engineering College, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Agricultural water-saving zoning is the premise of regional agricultural planning. In view of the shortage of water resources in Hebei Province, rational agricultural water-saving zoning is an effective means to improve the efficiency of irrigation water use and agricultural production. In this paper, we selected eight indexes including irrigation water demand index, farmland productivity potential, net primary productivity of crops, soil type, utilization of groundwater, topography, population, and GDP, and we built a water-saving zoning model of Hebei Province through the spatial analysis function of ArcGIS and principal component analysis. According to the model, 149 counties/districts in Hebei Province are classified into 3 types: urgent, important, and deferred areas for agricultural water-saving. According to the characteristics of each region type, we pointed out their existing problems and put forward suggestions for future development.

Key words: agricultural water-saving zoning; principal component analysis; spatial analysis; water-saving model

收稿日期:2019-04-09 修回日期:2019-05-22 网络出版时间:2019-06-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190605.1158.008.html>

基金项目:北京市科委项目(Z171100000717011)

作者简介:郑荣伟(1988—),男,浙江江山人,讲师,从事水土资源与环境方面研究。E-mail: zjzrw0910@126.com

通信作者:金斌斌(1976—),女,浙江嘉兴人,副教授,从事农业水土修复等方面研究。E-mail: kinbinbin@163.com

农业节水区划是通过综合分析一个地区的农业灌溉需求、农业水资源利用现状及农业发展规划等方面,参照该地区的自然资源与环境,将该地区划分为不同类型的农业节水发展区,针对不同类型的农业节水发展区,因地制宜地提出适合各区域的农业节水发展方向、发展布局及对应措施。合理的农业节水区划是一个地区节水灌溉规划的制定依据^[1]。近些年,我国学者通过数学统计的方法对我国诸多地区进行农业节水区划研究,巩书鑫等^[2]将 PSR 模型运用到黑龙江省的农业节水区划中;范海燕等^[3]通过层次分析法结合 ArcGIS 研究分析了对北京市各地区的农业节水发展区划;赵伟霞等^[4]基于土壤可利用水量的变量灌溉分区管理作出研究,而目前使用较多的方法为模糊聚类法、因子分析法^[5-7],在空间计算及表达上的支撑不足。

前人在河北省水资源及农业用水方面的研究表明^[8-11],河北省作为我国北方产粮大省,水资源日趋紧张,河北省多年平均水资源总量为 205 亿 m^3 ,其中地表水资源量 120 亿 m^3 ,地下水资源量为 123 亿 m^3 ,人均水资源量仅为 307 m^3 ,仅为全国人均水资源量的 1/7,且河北省水资源总量呈减少态势^[8-9]。2016 年,全省农业用水量为 128 亿 m^3 ,达到总用水量的 70%,农业节水潜力大,因此对农业用水合理规划,提高农业用水效率,是促进河北省经济社会发展必不可少的一步^[10-11]。

主成分分析法(PCA)是将多个指标简化为少数几个综合指标的一种统计分析方法,在河北省农业节水区划研究中能够合理的对多指标进行降维,本文运用主成分分析法(Principal component analysis, PCA)结合 ArcGIS 软件中栅格重分类、栅格计算等功能,选取地形地貌、灌溉需水指数、粮食生产潜力、净初级生产力、土壤类型、地下水超采情况以及 GDP 和人口等 8 项指标,对河北省的农业节水区划进行分析研究,并对农业节水发展方向提出建议。

1 研究区概况

河北省地处东经 $113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50'$,北纬 $36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}40'$,位于我国华北地区,兼跨内蒙古高原。河北省下辖 11 个地级市,共有 20 个县级市,101 个县(含 6 个少数民族自治县),47 个市辖区(其中 17 个郊区,因面积较大,本文作为独立的研究单元),总面积达到 18.88 万 km^2 (数据来源于河北省人民政府 <http://www.hebei.gov.cn>)。全省整体呈现西北地势高,多为山区;东南地势低,多为平原,地貌

形式复杂(图 1)。河北水源多来自北部燕山及太行山脉,多条河流穿过河北汇入渤海,这些河流主要分属 4 个水系,分别是辽河、滦河、海河以及内陆河。河北省境内季节分明,为典型的大陆性季风气候,年平均降水量为 484.5 mm,但降水量时空分布不均,整体呈现东南平原多、西北山区少;春夏季节多、秋冬季节少。

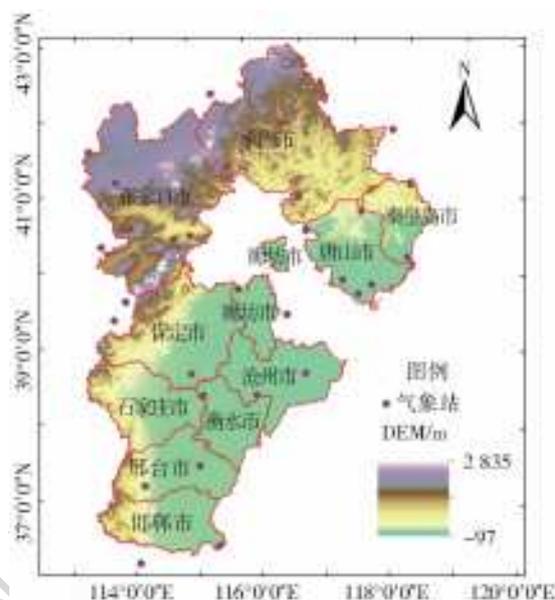


图 1 河北省地形地貌

Fig. 1 Topography and landform of Hebei Province

2 材料与方法

2.1 数据来源

本文所涉及的气象数据均来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),所选取的河北省 31 个气象站点分布见图 1,河北省粮食生产潜力、净初级生产力及土壤类型分布数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),地下水超采区分布参考《河北省人民政府关于公布地下水超采区、禁止开采区和限制开采区范围的通知》,河北省数字高程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);河北省人口及 GDP 分布数据来源于河北省统计局统计年鉴。

2.2 指标体系构建

本文从自然条件、农业生产潜力及地区发展状况等方面作为河北省农业节水区划的依据。其中灌溉需水量、土壤类型、地形地貌及地下水使用情况为河北省各地区自然条件的表征指标;选取河北省粮食生产潜力及净初级生产力表征河北省各地区农业发展潜力;选取人口及 GDP 表征河北省各地区的社会发展状况。各指标的具体意义及

计算方法如下。

2.2.1 灌溉需水指数

灌溉需水指数 (IRI) 是指灌溉需水量和作物需水量的比值, 表征该地区作物生长对灌溉的依赖程度, 灌溉指数越大, 作物对灌溉水的依赖性越高, 反之则越低。IRI 的计算公式为

$$IRI = IR / ET_c \quad (1)$$

式中: IR 表示灌溉需水量 (mm), 计算见式 (2)、(3); ET_c 为作物耗水量 (mm), 本文采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算作物的耗水量, 计算见式 (4)、(5)。

$$IR = ET_c - P_e \quad (2)$$

$$P_e = \begin{cases} P & P \leq ET \\ ET & P > ET \end{cases} \quad (3)$$

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{273 + T} \times u_2 \times (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)} \quad (4)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中: P_e 为旬有效降水量 (mm); P 为旬实际降水量 (mm); ET_c 为旬作物蒸发蒸腾量 (mm); K_c 为作物系数, 与作物生长状况有关, 河北省不同地区的 K_c 见表 1; ET_0 为参考作物的蒸发蒸腾量; Δ 为饱和水汽压-温度曲线上的斜率 (kPa/°C); R_n 为净辐射 [MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量 [MJ/(m²·d)]; γ 为温度计常数 (kPa/°C); T 为平均气温 (°C); e_a 为空气实际水汽压 (kPa); e_d 为饱和水汽压 (kPa); u_2 为距地面 2 m 高处的风速 (m/s)。

通过上述计算得河北省 IRI 分布, 见图 2。

表 1 河北省作物系数 K_c 取值^[12]

Tab. 1 Values of crop coefficient K_c in Hebei Province

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
冀北	0.82	0.91	0.86	1.77	1.43	0.41	1.33	1.42	1.12	1.14	1.14	1.19
冀中	0.82	0.69	0.81	1.31	1.89	1.28	1.25	1.45	1.24	0.51	0.88	0.89
冀南	1.20	1.19	1.63	1.02	1.56	1.13	1.27	1.33	1.05	0.65	1.10	1.38

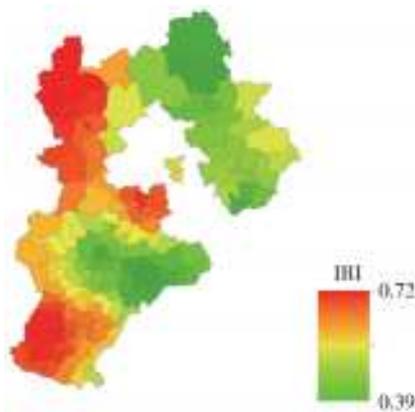


图 2 河北省 IRI 分布

Fig. 2 IRI distribution in Hebei Province

2.2.2 粮食生产潜力

粮食生产潜力是评价一个地区农业生产力的重要指标, 数据单位为 kg/hm², 为 GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) 模型计算所得, 综合考虑了光、温、水、CO₂ 质量浓度、病虫害、农业气候限制、土壤、地形等多方面因素^[14]。河北省粮食生产潜力分布见图 3。

2.2.3 净初级生产力

净初级生产力 (NPP) 是指植被通过光合作用生成的有机质总量在除去自养呼吸消耗后的剩余部分^[15], 可作为评价作物生产水平和估算地区生产潜力的一项重要指标, 单位为 g/(m²·a)^[16]。本文选取河北省 NPP 多年均值作为评价指标。河北省

NPP 分布见图 4。

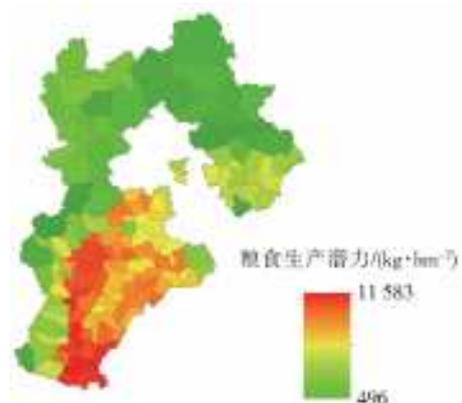


图 3 河北省粮食生产潜力分布

Fig. 3 Grain productivity potential distribution in Hebei Province

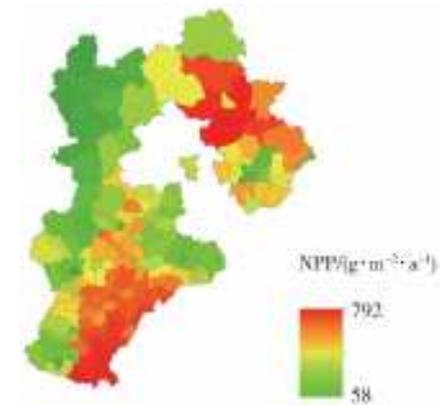


图 4 河北省 NPP 分布

Fig. 4 NPP distribution in Hebei Province

2.2.4 土壤类型

不同土壤类型其土壤渗透系数及持水性均不同,土壤类型直接影响种植作物的种类以及用水效率。河北省土壤类型主要分为粗砂土、面砂土、砂壤土和黏质土,其空间分布见图 5。根据土壤类型对作物的适宜程度,参考前人研究进行量化^[3],结果见表 2。

2.2.5 地下水超采区分布

河北省地下水年均超采量达到 59.65 亿 m³,地下水位持续下降,评价河北省农业节水潜力需考虑各地的地下水利用情况。参考《河北省人民政府关于公布地下水超采区、禁止开采区和限制开采区范围的通知》,将河北省各县/区按照地下水利用情况分为禁止开采区、限制开采区、一般超采区和基本平

衡区,其空间分布见图 6,参考前人研究进行量化^[3],结果见表 2。

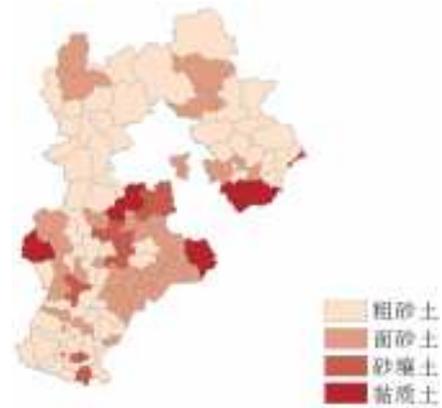


图 5 河北省土壤类型分布

Fig. 5 Soil type distribution in Hebei Province

表 2 定性指标量化

Tab. 2 Qualitative indicators quantification

土壤类型	量化值	地下水超采类型	量化值	地形地貌	量化值
粗砂土	1	基本平衡区	1	山地	1
面砂土	2	一般超采区	2	丘陵	2
砂壤土	3	限制开采区	3	平原	3
黏质土	4	禁止开采区	4		

2.2.6 地形地貌

地形地貌影响土壤保水及作物生长效果^[17],因此将地形地貌情况作为节水区划的一项指标。根据

河北省地形及高程分布,将河北省分成山地、丘陵和平原三种地形(图 7),参考前人研究进行量化^[18],结果见表 2。



图 6 河北省地下水超采类型分布

Fig. 6 Distribution of groundwater overexploitation types in Hebei

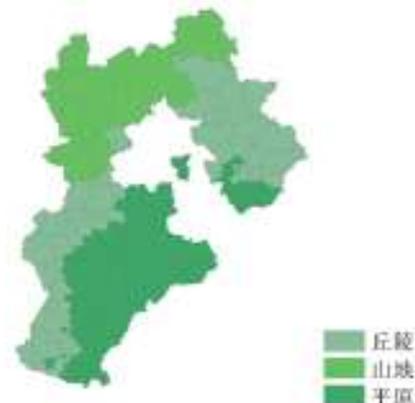


图 7 河北省地形地貌划分

Fig. 7 Topographic and geomorphological division of Hebei

2.2.7 GDP 和人口

GDP 是社会经济发展、区域规划和资源环境保护的重要指标之一,作为农业节水区划评价指标,其反映农业生态建设的经济能力。人口则是反映各县/区对农业生产的需求程度的一项指标。河北省各县/区 GDP 与人口分布见图 8、图 9。

2.3 PCA 评价模型建立

通过主成分分析法,能够有效消除各评价指标

间信息的重叠,实现多指标降维进而达到综合评价的目的^[19]。主要步骤如下^[20]。

(1)数据标准化。将 149 个县/区的 8 项指标所组成的矩阵标准化,消除由于量纲的不同造成对评价结果的影响。

(2)计算相关系数矩阵。根据第一步中的标准化数据计算其相关系数矩阵,计算公式见式(6)。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (6)$$

式中： r_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标的相关系数； x_{ij} 为标准化矩阵对应数据。

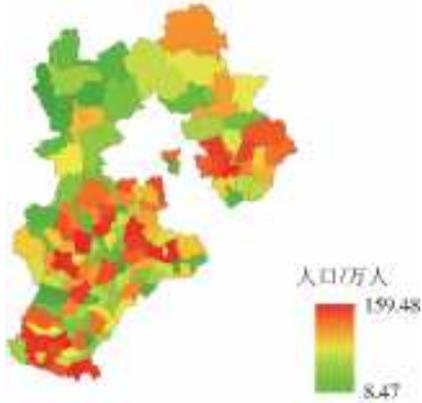


图 8 河北省人口分布

Fig. 8 Population distribution of Hebei Province

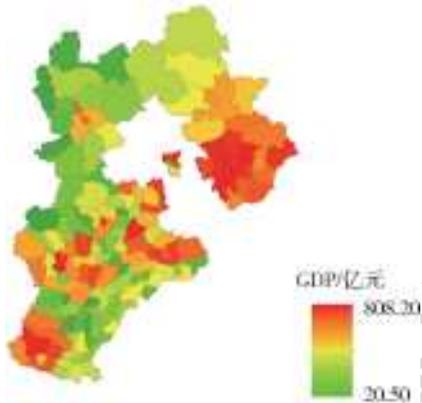


图 9 河北省 GDP 分布

Fig. 9 GDP distribution of Hebei Province

(3) 计算主成分贡献率。通过相关系数矩阵计算求出特征值 λ_i ，并按大小排序， $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n$ 。再根据特征值求出对应的特征向量的第 j 个分量 e_{ij} 。根据特征值计算成分贡献率及累计贡献率。计算见式(7)、(8)。

$$P = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (7)$$

$$\sum P = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (8)$$

式中： P 、 $\sum P$ 分别为贡献率和累计贡献率，其他符号意义同前。

(4) 计算主成分得分。根据主成分分析公式(9)，可得到三个主成分和各指标的线性组合，然后根据公式(10)计算各处理的综合评分^[21]。

$$Z_k = e_{k1}x_1 + e_{k2}x_2 + \dots + e_{kn}x_n \quad (9)$$

$$Z = Z_1P_1 + Z_2P_2 + \dots + Z_kP_k \quad (10)$$

式中： e_{ki} 、 X_i 分别表示第 k 个主成分下第 i 个特征向量及其对应的标准化数据； P_k 表示第 k 各主成分的贡献率。

3 结果与分析

通过主成分分析法和 ArcGIS 中栅格重分类、栅格计算器等地理信息统计功能，综合分析后，将河北省划分为 3 种节水区划类型，分别是农业节水暂缓发展区、农业节水重要发展区、农业节水急切发展区，详见图 10 和表 3。

3.1 农业节水急切发展区

从图 10 可以看出，农业节水急切发展区主要集中在河北省南部平原区，包括 35 个县/区，这些区域特点是农业发展潜力大，但水资源紧缺，多处于地下水禁采区。根据这些区域的不同点将农业节水急切发展区分为 2 类：一类是灌溉需水较大型，这一类型由于气候条件等自然因素，作物耗水及灌溉需水指数较大，对灌溉依赖程度高，农业节水发展的必要性强，应适当调节种植结构，推广农艺节水措施；另一类是农业生产潜力较大型，这一类型区域 NPP 和农田生产潜力大，农业发展潜在效益高，应当加强工程节水措施，如提高输水效率、提高灌溉水利用率，解决该类区域由水资源匮乏引起的农业生产问题。总之，政府可优先考虑农业节水急切发展区的节水灌溉工程投资区域。

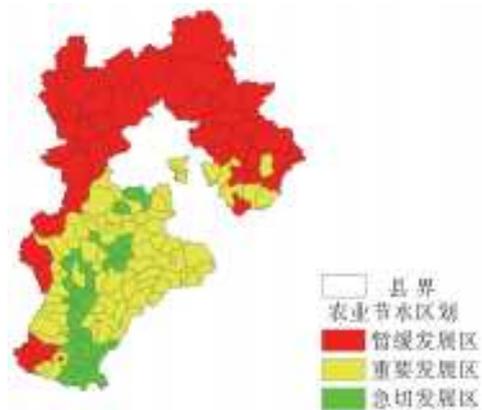


图 10 河北省农业节水区划

Fig. 10 Agricultural water-saving zoning map of Hebei Province

3.2 农业节水重要发展区

农业节水重要发展区主要集中在河北省东部平原及部分丘陵区，包括 74 个县/区，这些区域特点是发展潜力与发展迫切性不对称。将农业节水重要发展区可分为 2 类，第一类为潜力大于迫切性型，这一类区域有较高的 NPP 和农田生产潜力，但这类区域

表 3 河北省农业节水区划方案

Tab. 3 Agricultural water-saving zoning scheme of Hebei Province

分区及类型	包括的分区单元	
农业节水急切发展区	灌溉需水程度较大型	大名县、成安县、肥乡县、馆陶县、广平县、鸡泽县、临西县、临漳县、隆尧县、邱县、南和县、平乡县、曲周县、任县、魏县、永年县
	农业生产潜力较大型	正定县、栾城区(石家庄市)、安平县、饶阳县、无极县、晋州市、肃宁县、新乐市、高阳县、博野县、宁晋县、蠡县、固安县、涿州市、望都县、高邑县、定兴县、赵县、柏乡县
农业节水重要发展区	潜力大于迫切性型	霸县、沧州市(市区)、泊头市、大城县、东光县、阜城县、故城县、广宗县、海兴县、河间市、黄骅市、衡水市(市区)、景县、冀县、孟村回族自治县、巨鹿县、廊坊市(市区)、南皮县、南宮市、青县、清河县、任丘市、深州市、水清县、威县、文安县、吴桥县、武强县、武邑县、献县、辛集市、新河县、枣强县、盐山县
	迫切性大于潜力型	卢龙县、完县、鹿泉区(石家庄市)、邢台市(市区)、邢台县、石家庄市(市区)、灵寿县、玉田县、保定市(市区)、唐县、丰润县、磁县、邯郸市、易县、安新县、行唐县、涞水县、乐亭县、曲阳县、丰南市、滦南县、大厂回族自治县、沧县、香河县、临城县、三河市、赞皇县、容城县、沙河市、徐水县、满城县、雄县、藁城市、清苑县、安国市、新城县、元氏县、内丘县、定州市
农业节水暂缓发展区	张家口市(市区)、怀安县、崇礼县、万全县、阳原县、宣化县、康保县、围场县、赤城县、蔚县、丰宁满族自治县、尚义县、涿鹿县、涞源县、沽源县、涉县、阜平县、怀来县、迁西县、井陘县、张北县、迁安县、承德市(市区)、宽城县、平泉县、青龙满族自治县、武安市、隆化县、遵化县、承德县、秦皇岛市(市区)、邯郸市(市区)、滦平县、兴隆县、抚宁县、平山县、滦县、唐海县、唐山市(市区)、昌黎县	

注:表中涉及的 11 个地级市均指市区范围,不含下辖的县级市、县及郊区。

多处于地下水开采基本平衡区,水资源问题较为缓和,人口需求及经济发展处于河北省中游水平,其发展优先程度应低于农业节水急切发展区;第二类是迫切性大于潜力型,和第一类相反,这一类型区域发展潜力一般,但处于地下水禁采区或限采区,存在水资源匮乏的问题,且作物依赖于灌溉,需要通过农业节水来缓和。针对农业节水重要发展区,政府可适当考虑投资,同时,也应健全完善种植结构,推广秸秆还田等农艺措施改良土壤,提高土壤保墒能力。

3.3 农业节水暂缓发展区

农业节水重要发展区主要集中在河北省北部山区及部分丘陵区,包括 40 个县/区,这些区域大都位于地下水开采基本平衡区,缺水程度较低,且农业发展潜力较为一般,农业节水发展效益不高。农业节水暂缓发展区可推广秸秆还田、覆膜保墒、水肥一体化等投资较低的农艺措施,也鼓励适当发展高效节水工程,提高灌溉用水效率,该类区域的发展优先级可低于农业节水急切发展区和重要发展区。

4 结论

(1)从省自然条件、地形地貌、土壤类型、农业发展潜力及社会经济情况等 8 项指标考虑,构建了河北省农业节水评价指标体系,进而构建了基于 PCA 和 ArcGIS 的河北省农业节水区划评价模型,得到了以县/区为最小单元的农业节水区划图。根据农

业节水区划结果可知,河北省各地区间对农业节水需求程度存在差异,东南部的需求整体高于西北部。

(2)结合各地区农业节水区划结果及各地区特点,将河北省各县/区划分为农业节水急切发展区、农业节水重要发展区和农业节水暂缓发展区 3 类区域,并根据各类区域特点,指出其存在的问题且提出未来农业节水发展的建议,为未来河北省农业发展决策提供参考和依据。

参考文献(References):

- [1] 李英能,水土资源评价与节水灌溉规划[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998:93. (LI Y N, Water and soil resources evaluation and water saving irrigation planning[M]. China Water Resources and Hydropower Press, Beijing, 1998:93. (in Chinese))
- [2] 巩书鑫,邓彩云,王红瑞,等. 基于 PSR 和 RS 的黑龙江省农业节水区划空间格局研究[J]. 中国农村水利水电,2018(4): 28-33, 39. (GONG S X, DENG C Y, WANG H R, et al. Agricultural water-saving zoning in Heilongjiang Province based on PSR and Rough set[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 28-33, 39. (in Chinese))
- [3] 范海燕,朱丹阳,郝仲勇,等. 基于 AHP 和 ArcGIS 的北京市农业节水区划研究[J]. 农业机械学报,2017, 48(3): 288-293. (FAN H Y, ZHU D Y, HAO Z Y, et al. Agricultural water-saving zoning in Beijing based on AHP and ArcGIS[J]. Transactions of the Chinese So-

- ciety for Agricultural Machinery, 2017, 48 (3): 288-293. (in Chinese)) doi: 10. 6041 /j. issn. 1000-1298. 2017. 03. 036.
- [4] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等. 基于土壤水分空间变异的变量灌溉作物产量及节水效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 1-7. (ZHAO W X, LI J S, YANG R M, et al. Yields and water-saving effects of crops as affected by variable rate irrigation management based on soil water spatial variation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 1-7. (in Chinese)) doi: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2017. 02. 001.
- [5] 褚琳琳. 基于因子分析与聚类分析的江苏省节水农业分区研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 137-140. (CHU L L. Arricultural water-saving regionalization using factor analysis in Jiangsu Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33 (03): 137-140. (in Chinese))
- [6] 马立辉, 赵玲, 张会芹, 等. 模糊-动态聚类法在河北省农业节水区划中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006(1): 42-44. (MA L H, ZHAO L, ZHANG H Q, et al. Application of fuzzy-dynamic clustering method in agricultural water-saving regionalization of Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006 (1): 42-44. (in Chinese))
- [7] 吴景社, 康绍忠, 王景雷, 等. 基于主成分分析和模糊聚类方法的全国节水灌溉分区研究[J]. 农业工程学报, 2004(4): 64-68. (WU J S, KANG S Z, WANG J L, et al. Study on national water-saving irrigation zoning based on principal component analysis and fuzzy clustering method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004 (4): 64-68. (in Chinese))
- [8] 孙素艳, 李云玲, 郭东阳, 等. 河北省供用水现状及水资源平衡分析[J]. 水利规划与设计, 2018(10): 62-67. (SUN S Y, LI Y L, GUO D Y, et al. [J]. Analysis of water supply and utilization status and water resources balance in Hebei Province[J]. Water Resources Planning and Design 2018 (10): 62-67. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /j. issn. 1672-2469. 2018. 10. 017.
- [9] 郝跃颖. 河北地区农业水资源承载力及结构调整探讨[J]. 水利规划与设计, 2017(7): 21-23. (HAO Y Y. Discussion on carrying capacity and structural adjustment of agricultural water resources in Hebei[J]. Water resources planning and design, 2017 (7): 21-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /j. issn. 1672-2469. 2017. 07. 008.
- [10] 袁再健, 谢栌乐, 张秉文, 等. 河北平原农田净灌溉耗水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 780-784. (YUAN Z J, XIE Q L, ZHANG B W, et al. Study on net irrigation water consumption of farmland in Hebei plain[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology[J]. 2015, 13 (4): 780-784. (in Chinese)) DOI: 10. 13476 / j. cnki. nsbdqk. 2015. 04. 038.
- [11] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载能力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 342-349. (LI Y L, GUO X N, GUO D Y, et al. Research and application of water resources carrying capacity evaluation methods[J]. Progress in Geography, 2017, 36 (3): 342-349. (in Chinese))
- [12] 罗金耀. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 125. (LUO J Y, Water-saving irrigation theory and technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 125. (in Chinese))
- [13] 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. (LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water demand for major crops in China[J]. Ransactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (12): 6-12. (in Chinese))
- [14] LUO L, XU X L, CHEN X. Assessing the impact of urban expansion on potential crop yield in China during 1990-2010[J]. Food Security, 2015, 7 (1): 33-43.
- [15] 赵唯茜, 杜华明, 董廷旭, 等. 2005—2014 年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 236-241. (ZHAO W X, DU H M, DONG T X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of net primary productivity in the agro-pastoral ecotone of south China from 2005 to 2014 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (6): 236-241. (in Chinese))
- [16] 王莺, 夏文韬, 梁天刚, 等. 基于 MODIS 植被指数的甘南草地净初级生产力时空变化研究[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 201-210. (WANG Y, XIA W T, LIANG T G, et al. Spatial and temporal changes of net primary productivity of grassland in Gannan based on MODIS vegetation index[J]. Journal of Grassland Industry, 2010, 19 (1): 201-210. (in Chinese))
- [17] 刘建华, 李铭亮, 苏剑波, 等. 有机质含量、地形坡度对土壤保水效果及作物产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2017(1): 16-18. (LIU J H, LI M L, SU J B, et al. Effects of organic matter content and topographic gradient on soil water conservation and crop yield[J]. Hunan Agricultural Science, 2017 (1): 16-18. (in Chinese)) DOI: 10. 16498/j. cnki. hnnykx. 2017. 001. 005.

(下转第 192 页)

- Ltd, 2005: 227-270.
- [15] 肖惠民. 基于计算流体力学的水轮机及水电站尾水系统数值研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (XIAO H M. Numerical simulation of hydraulic turbine and hydropower station tailrace system based on the computational fluid dynamics[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [16] 刘超, 成立, 汤方平, 等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2002(6): 53-55. (LIU C, CHENG L, TANG F P, et al. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002(6): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2002.06.016.
- [17] 成立. 泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (CHENG L. Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [18] RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division II, 1980: 44-46.
- [19] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIU C. Pump and pump station[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009. (in Chinese))
- [20] 刘超, 梁豪杰, 金燕, 等. 立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 33-41. (LIU C, LIANG H J, JIN Y, et al. PIV measurement of intake flow field in axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 33-41. (in Chinese)) DOI: 10.641/j.issn.1000-1298.2015.08.006.
- [21] 金燕. 贯流泵内部流动的数值模拟与三维 LDV 测量研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010. (JIN Y. Study on the Numerical simulation and 3D-LDV measurement of tubular pump[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese))

(上接第 184 页)

- [18] 刘玉凤, 黄介生, 伍靖伟. 基于最大树法的华北地区节水型农业分区[J]. 中国农村水利水电, 2013(12): 80-84. (LIU Y F, HUANG J S, WU J W. Water-saving agricultural zoning in north China based on maximum tree method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(12): 80-84. (in Chinese))
- [19] 程明瀚, 郝仲勇, 杨胜利, 等. 膜下滴灌条件下温室青椒的水氮耦合效应[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 50-56, 68. (CHENG M H, HAO Z Y, YANG S L, et al. Water-nitrogen coupling effect of green pepper in greenhouse under drip irrigation under mulch [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 50-56, 68. (in Chinese))
- [20] 邢英英. 温室番茄滴灌施肥水肥耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. (XING Y Y. Study on coupling effect of fertilizer, water and Fertilizer on drip irrigation of Tomato in greenhouse [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry, 2015. (in Chinese))
- [21] 夏建国, 李廷轩, 邓良基, 等. 主成分分析法在耕地质量评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2000(2): 51-55. (XIA J G, LI T X, DENG L J, et al. Application of principal component analysis in evaluation of cultivated land quality[J]. Journal of Southwest Agriculture, 2000(2): 51-55. (in Chinese))