

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2021.0097

栾清华,王旖,张海,等.华北平原典型灌区农田水循环健康评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):930-940.  
LUAN Q H, WANG Y, ZHANG H, et al. Healthy evaluation of farmland water-cycle in a typical irrigated area of North China Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 930-940. (in Chinese)

# 华北平原典型灌区农田水循环健康评价

栾清华<sup>1,2</sup>, 王旖<sup>1</sup>, 张海<sup>3</sup>, 刘田伟<sup>1</sup>, 董森<sup>1</sup>, 何帅<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098;  
3. 邯郸市水利局农村水利水电处, 河北 邯郸 056001)

**摘要:**为了“诊断”华北平原典型灌区农田水循环的“病症”和“病状”,在解析灌区农田水循环结构的基础上,提出农田健康水循环的概念,选用层次分析-熵权组合法计算权重,构建灌区尺度农田水循环健康评价体系;分别采用综合指数法和改进的灰色关联分析对比评价军留灌区2010—2019年农田水循环健康状况。指标评价结果显示:军留灌区在灌溉水质、化肥及农药非点源污染、灌溉水利用系数等方面多呈现“病态”,结果为“一般”及以上的指标总个数由2010年的4个增长至2019年的9个;维度评价结果显示,退排水子过程的健康状况最差,基本处于“病态”,水源、取输水子过程、用耗水子过程的水循环健康状况得到逐年提升。总体而言,军留灌区水循环状态近10年得到了逐年改善,并且2种方法的维度或综合评价结果的变化趋势基本一致。研究结果可为华北平原灌区精细化管理和绿色高质量发展提供科学依据和决策参考。

**关键词:**农田健康水循环;灌区;层次分析-熵权组合法;综合指数法;灰色关联分析

中图分类号:TV93 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



在我国华北平原等粮食主产区,农业用水需求增大,农田水利工程不断修建,使得灌区迅速发展,灌区农田水循环的“自然-社会”二元属性愈加凸显。灌区作为人工取用水较为频繁的单元,大多被关注的是水资源的经济效益,区域水循环自然规律及其可持续性却没有被重视,引发了诸如井灌区地下水超采及生态环境恶化等“病状”,影响了灌区农业高质量生产。在这种背景下,亟须“把脉”灌区农田水循环状态的“症候”,并“诊断”其变化趋势。

水循环健康与否的概念由我国学者<sup>[1-2]</sup>于21世纪初提出,但对健康水循环的定义并未统一。如:张杰<sup>[2]</sup>认为健康的水循环为上游用水不影响下游水体功能,且社会水循环不违背自然水循环的客观规律;刘俊良等<sup>[3]</sup>认为健康的水循环即循环过程的完整性、流畅性、稳定性和可持续性;许向君等<sup>[4]</sup>指出健

康的城市水循环包括健全循环和良性循环。尽管众专家学者对于健康水循环的概念表述不尽相同,但其核心观点较为一致,均强调了社会水循环与自然水循环的协调性与可持续性。

在健康水循环概念研究的基础上,不少专家学者纷纷展开了水循环健康评价研究:Pal等<sup>[5]</sup>探讨了城市水循环路径,并评估了各污染物对水循环健康的影响;张士政<sup>[6]</sup>以南四湖流域作为研究区域构建了自然条件、城市化水平、河流水循环及综合水安全格局四维度的流域水循环健康评价指标体系。京津冀是国内水问题最为突出的区域,因此,许多学者对该区域开展了水循环健康评价:王富强等<sup>[7]</sup>构建了基于水资源、水环境、水生态、水效用和水灾害的水循环指标体系并展开了健康评价;Zhang等<sup>[8]</sup>从生态系统完整性、水质、水资源丰度、水资源利用等

收稿日期:2021-05-06 修回日期:2021-07-14 网络出版时间:2021-07-19

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210719.1021.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401401);国家自然科学基金项目(51879066)

作者简介:栾清华(1978—),女,河北井陘人,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:carol97011202@163.com

通信作者:张海(1975—),男,河北涞水人,高级工程师,主要从事农田水利学研究。E-mail:hdszh@163.com

4个维度构建了水循环健康评价体系;栾清华等<sup>[9]</sup>构建了基于水质、水量、生态及极端事件的城市水循环健康评价体系;此后段娜<sup>[10]</sup>、裴梦桐<sup>[11]</sup>分别从城市水循环过程的子环节及城市降水产汇流过程出发,解析了健康水循环相关概念,构建了相应的评价体系,并以河北邯郸主城区为例进行了评价。就灌区的相关评价研究而言,有相关专家学者从灌区的某个方面,如现代化程度<sup>[12]</sup>、生态功能<sup>[13]</sup>或节水<sup>[14]</sup>等,进行了一些区域的评价研究,但极少从整个水循环过程的角度系统开展评价。

综上所述,从健康水循环系统研究角度来看,目前研究主要集中在城市区域,鲜有涉及灌区这一人工取水同样较为频繁的区域,仅有学者<sup>[15-16]</sup>剖析了农田水循环的二元属性及其驱动力和路径。从路径来看,灌区与城市的水循环具有一定的相似性,同具显著的“自然-社会”属性。基于此,借鉴城市健康水循环概念及相关成果<sup>[15-16]</sup>,在系统分析灌区农田水循环结构特征的基础上,解析农田健康水循环的概念,构建农田水循环健康评价指标体系,并对华北平原典型灌区——河北魏县军留灌区近10年水循环健康状态进行评价,以期对灌区水资源管理和高质量发展提供依据。

## 1 农田健康水循环内涵

### 1.1 农田水循环结构及路径分析

农田水循环涉及地表水循环、地下水循环以及

土壤水循环等多个子循环过程<sup>[16]</sup>。在无人工灌溉的天然状态下,农田水循环主要包括降水、蒸散发及土壤水分三大因素。降水是农田水分的主要补给来源,而蒸散发则是农田水分消耗的主要形式。降水在太阳辐射及重力势能等的驱动下,经由冠层截留、地表洼地蓄留、地表径流、蒸散发、入渗、壤中流和地下径流等一系列过程<sup>[15]</sup>,部分重新回到大气,部分排入水域,并再次通过蒸发等过程重新进入农田水循环,如此循环往复。天然农田水循环路径见图1。

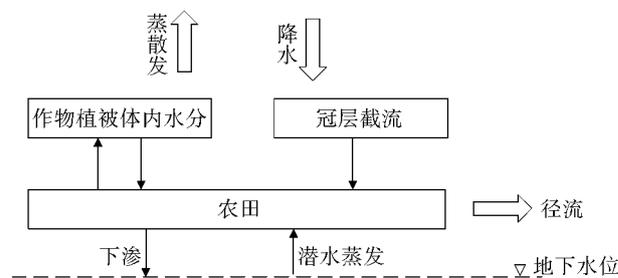


图1 天然农田水循环路径

Fig. 1 Natural process of farmland water-cycle

在灌区,人工灌溉补给水分成为农田水分的一个重要来源,并引发了蓄引水、取提水、用耗水、退排水等一系列子过程,严重扰动并改变了自然状态下的农田水循环的特征,而逐渐呈现出“自然-社会”二元性(见图2),两者相互交错、协调作用,共同支撑农作物的生长。

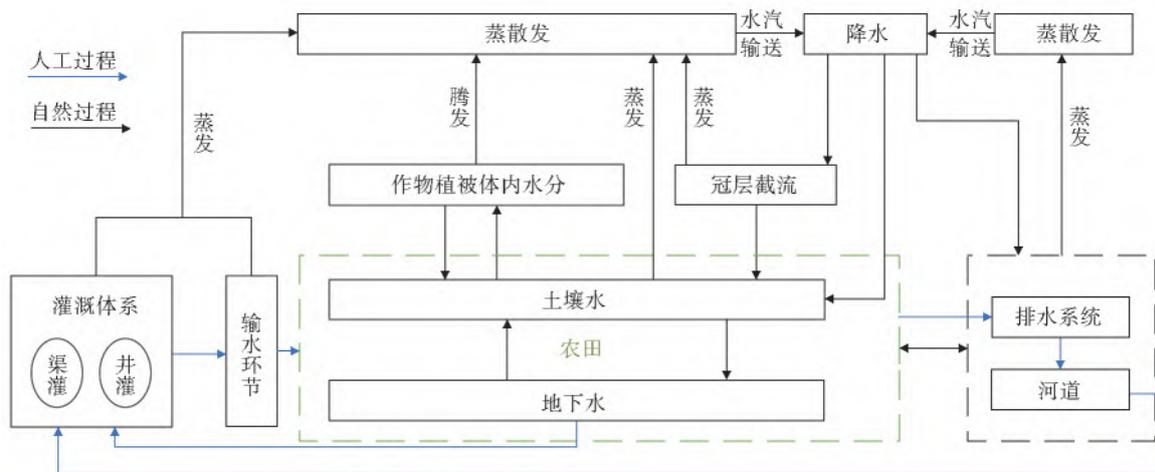


图2 灌区二元农田水循环路径

Fig. 2 Dual process of farmland water-cycle in irrigated area

由图2可知,灌溉水源主要包括地表水及地下水,其相应的灌溉体系分为井灌与渠灌,通过农田水利工程引水或提水来克服水的重力,干预农田自然水循环,将灌溉水源引入农田水循环过程,使得降水及人工灌溉成为灌区农田作物的主要水分来源。此

外,土壤深层水分以潜水蒸发的形式向上运动也可以在一定程度上补充作物所需水分;部分水分被作物吸收再以腾发方式进入大气而循环,部分水分直接蒸发进入大气,还有一部分水分入渗至土壤,参与地下水循环;多余水分进入农田排水系统,保障农田

水分处于适宜状态。

尽管灌区农田水循环的蒸发蒸腾、入渗、产汇流等仍遵循自然水循环路径及规律,但由于高强度灌溉引发新增了“取-用-排”等子过程而加大了蒸散发、下渗等原有的自然子过程的通量大小,加快了农田水循环速度,并逐渐影响了区域(流域)水循环的结构、路径和特征。此外,农田水循环除了受人工驱动影响外,还受到相关政策以及经济方面的社会因素影响,如我国为缓解水资源短缺以及水环境恶化等问题采取的强制性农业节水政策以及推进建立水权制度等,均会通过约束水量、用水效率进行约束从而影响灌区的农田水循环过程。

### 1.2 农田健康水循环概念

对比分析不同类型农田水循环的结构及路径(图 1、2),参考城市健康水循环内涵,提出健康的农田水循环为自然水循环与社会水循环相互协调、共同作用,水循环各子过程均呈现健康且系统达到和谐的状态,即水源多样且配置合理、灌溉用水保质保量、取输水高效节水、用耗水高效高产、退排水过程快速且少污染。具体解析如下:

水源。既不过分干扰河流、地下水等天然水源的本底状态,又能满足对农田对水质水量的用水要求,即水源多样且配置合理,地下水埋深适宜,水质

及水量满足农田用水要求。

取输水子过程。灌区提水、取水、输水工程设施完善,并尽可能减少这些过程的水量损失,保障输水高效节水。

用耗水子过程。在灌溉水量一定的条件下,尽可能提高灌溉水利用效率,保障灌区内粮食产量,提高灌区经济效益,即用水高效率高效益。

退排水子过程。退排水人工过程与自然过程相互协调,共同作用于灌区退排水,保障退排水过程迅速不影响作物生长,且农药化肥施用合理,尽量减少面源污染。

## 2 农田水循环健康评价体系

### 2.1 指标体系

依据层次分析法原理,将灌区农田水循环健康状态作为目标层;基于灌区农田水循环结构(图 2)的解析,划分维度层为水源、取输水子过程、用耗水子过程、退排水子过程;依据指标筛选科学性、全面性与代表性、定性与定量相结合的原则,重点从水质、水量、输配水能力、水资源效率及效益几个方面考虑,同时兼顾指标的独立性及其基础数据资料的获取性,最终选取了 15 个指标,与上述维度层、指标层一并构建了华北平原灌区尺度农田水循环健康评价体系,见图 3。

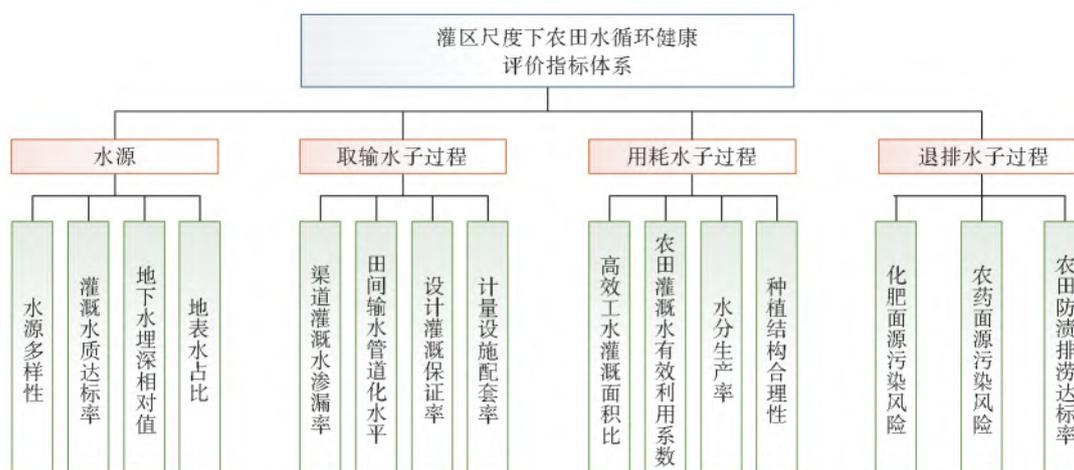


图 3 灌区尺度下农田水循环健康评价指标体系

Fig. 3 Evaluation index system of farmland water-cycle in irrigated area

### 2.2 指标权重

指标权重的确定主要分主观赋权法及客观赋权法<sup>[17]</sup>。层次分析法是主观赋权法最具代表性的方法,其赋权主要依赖决策者对评价对象的了解程度,具有一定的主观性<sup>[7]</sup>。客观赋权法,如熵权法则完全依赖客观数据,忽视数据的物理意义,其结果有可能与实际并不完全相符<sup>[18]</sup>。为降低层次分析法在人为确定指标相对重要性方面的主观性,并减少熵

权法极值赋权而造成评价结果与实际的不一致性,采用层次分析-熵权组合赋权法进行权重的确定,提高权重的客观性和准确性。各指标权重计算结果见表 1,详细计算公式见参考文献<sup>[7]</sup>。

### 2.3 阈值体系

农田水循环健康评价体系阈值即为该体系的评价标准,是农田水循环健康评价的重要依据。阈值体系的确定首先考虑参考国家相关部门发布的国家

标准及行业标准;若无相关标准,则重点参考已有研究成果,通过现场充分调研踏勘以及咨询当地相关专家,结合不同水平区域的统计年鉴相关数据,参照

国际先进水平、国家先进水平、国家平均水平的顺序进行等级划分。不同等级农田水循环健康评价体系阈值见表 2。

表 1 指标体系权重  
Tab. 1 Weight of evaluation index system

维度	指标	熵权法	层次分析法	组合权重	维度权重
水源	水源多样性	0.075	0.067	0.083	0.268
	灌溉水质达标率	0.074	0.036	0.061	
	地下水埋深相对值	0.017	0.043	0.031	
	地表水占比	0.062	0.098	0.092	
取输水子过程	渠道灌溉水渗漏率	0.047	0.115	0.087	0.315
	田间输水管道化水平	0.063	0.107	0.096	
	设计灌溉保证率	0.015	0.036	0.028	
	计量设施配套率	0.235	0.033	0.104	
用耗水子过程	高效节水灌溉面积比	0.063	0.105	0.095	0.304
	农田灌溉水有效利用系数	0.039	0.080	0.066	
	水分生产率	0.028	0.074	0.054	
	种植结构合理性	0.176	0.033	0.089	
退排水子过程	化肥面源污染风险	0.018	0.069	0.042	0.153
	农药面源污染风险	0.074	0.069	0.084	
	农田防渍排水达标率	0.015	0.035	0.027	

表 2 农田水循环健康评价指标体系阈值  
Tab. 2 Healthy threshold of evaluation index system of farmland water-cycle

指标层	不同等级阈值					确定依据
	健康	亚健康	一般	病态	严重病态	
水源多样性	5	4	3	2	1,0	参考文献[10]
灌溉水质达标率/%	100	[90,100)	[80,90)	[65,80)	[0,65)	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)及参考文献[12]
地下水埋深相对值	0	(0,1.5]	(1.5,6]	(6,10]	>10	《灌溉与排水工程设计标准(GB 50288—2018)》
地表水占比/%	[70,100]	[60,70)	[45,60)	[30,45)	[0,30)	《农田灌溉建设项目水资源论证导则(SL/T 769—2020)》
渠道灌溉水渗漏率/%	[0,10]	(10,22]	(22,35]	(35,50]	(50,100]	《灌溉与排水工程技术管理规程(SL/T 246—2019)》及参考文献[19]
田间输水管道化水平/%	[50,100]	[40,50)	[30,40)	[15,30)	[0,15)	《灌溉与排水工程设计标准(GB 50288—2018)》及分析国际国内管道化水平
设计灌溉保证率/%	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[50,70)	[0,50)	《灌溉与排水工程设计标准(GB 50288—2018)》及参考文献[20]
计量设施配套率/%	[95,100]	[85,95)	[70,85)	[55,70)	[0,55)	参考文献[12]
高效节水灌溉面积比/%	[60,100]	[50,60)	[40,50)	[20,40)	[0,20)	水利部《节水型社会评价标准(试行)》、《灌溉与排水工程技术管理规程(SL/T 246—2019)》及参考文献[14]
农田灌溉水有效利用系数	[0.75,0.85]	[0.65,0.75)	[0.55,0.65)	[0.45,0.55)	<0.45	参考文献[21]
水分生产率/(kg·m <sup>-3</sup> )	≥2	[1.6,2)	[1.2,1.6)	[0.8,1.2)	<0.8	参考文献[22,23]
种植结构合理性	非常合理	合理	一般	不合理	较差	参考文献[24]
化肥面源污染风险(折纯)/(kg·hm <sup>-2</sup> )	≤50	(50,150]	(150,250]	(250,350]	≥350	参考文献[25]
农药面源污染风险/(kg·km <sup>-2</sup> )	[0,150)	(150,200]	(200,250]	(250,300]	>300	参考文献[13,26]
农田防渍排水达标率/%	100	[95,100)	[80,95)	[60,80)	[0,60)	参考文献[27]

参考有关水循环健康评价的研究成果<sup>[10]</sup>,将农田水循环健康划分为 5 个等级,分别为:健康、亚健康、一般、病态、严重病态,对应的分值或取值范围分别为:[5, [4, 5)、[3, 4)、[2, 3)、[1, 2),并参考气象部门预警等级的划分确定各等级对应颜色,见表 3。

表 3 农田水循环健康等级划分

Tab. 3 Healthy classification of farmland water-cycle

健康等级划分	健康	亚健康	一般	病态	严重病态
阈值	5	[4, 5)	[3, 4)	[2, 3)	[1, 2)
代表颜色					

## 2.4 评价方法

开展评价相关的方法较多,常用方法有综合指数法和灰色关联分析等。综合指数法将指标得分加权求和,即可得到维度及综合评价结果,方法简单易行,且能体现评价的综合性、整体性及层次性<sup>[28]</sup>。灰色关联分析将数据模型化、抽象化、简化,通过分析比较参考数列与比较数列的关联程度进行等级评价,对数据的数量以及样本规律性无较多要求,但结果的递进性和层次性欠佳<sup>[29]</sup>。在此选择 2 种方法进行对比分析,相互印证,以提高评价结果的客观性。

综合指数法计算公式为

$$H = \sum_{i=1}^n h_i \times w_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $H$  表示评价总得分; $h_i$  表示各评价指标分值; $w_i$  表示评价指标权重。

选用改进的灰色关联分析法,评价阈值由区间进行关联计算<sup>[30]</sup>,具体步骤为

(1) 参考数列(母数列)确定

$$X_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

(2) 比较数列(子数列)确定

$$X_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}, (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

(3) 关联系数求解

$$\alpha_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + d \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + d \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (4)$$

若定义  $x_i(k) = a_i(k), b_i(k), a_i(k)$  与  $b_i(k)$  分别为指标  $k$  第  $i$  个级别的下限与上限,则

$$\Delta_i(k) = \begin{cases} a_i(k) - x_0(k) & x_0(k) < a_i(k) \\ 0 & a_i(k) \leq x_0(k) \leq b_i(k) \\ x_0(k) - b_i(k) & x_0(k) > b_i(k) \end{cases} \quad (5)$$

(4) 关联度求解

$$V_i = \sum_{k=1}^n \omega_k \alpha_i(k) \quad (6)$$

式中: $\omega_k$  为指标权重。

(5) 关联度大小排序

对计算的关联度由大到小进行排序,根据相关原理<sup>[30]</sup>,关联度越大,说明参考数列与比较数列越接近,最大关联度对应的等级即为评价对象的健康等级。

## 3 典型灌区案例分析

### 3.1 研究区概况与数据来源

军留灌区位于河北省邯郸市魏县东南部,位于华北平原粮食主产区的腹地,设计灌溉面积 23.3 万  $\text{hm}^2$ ,是具有地表、井灌和外调水源的大型灌区。其中,地表灌溉水源以军留扬水站以及留固扬水站提取卫河水,井灌水源即当地地下水,2010 年引黄入邯以来增加了外调水作为灌溉水源。

灌区南部以卫河为界,北面以漳河为界,东风渠贯穿其中,东部与邯郸大名县及河南省南乐县相连,位于北纬  $36^\circ 03' 06'' \sim 36^\circ 17' 38''$ 、东经  $114^\circ 50' 28'' \sim 115^\circ 07' 24''$ ,属于大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,整体气候比较适宜农作物的生长。灌区年平均气温为  $13.7^\circ\text{C}$ ,全年无霜期约为 210 d,年降水量为  $333.8 \sim 746.2 \text{ mm}$ ,多年平均降水量为  $525.2 \text{ mm}$ ,且降水量分布不均衡;夏季降水占全年降水量的  $65\% \sim 75\%$ ;秋季降水要多于春季;冬季降水最少。灌区地处黄河与漳河的冲积平原,地势平坦开阔,呈现西南高东北低的特点,地面坡降为  $1/1\ 000 \sim 1/4\ 000$ 。其具体位置见图 4。

在 2006 年实施了灌区续建配套与节水改造项目及 2014 年实施地下水超采综合治理地表水灌溉项目以来,结合近年来的其他工程建设,军留灌区已初步形成了具有一定规模的灌排工程体系,为保障灌区内农业增产、农民增收和农村经济的可持续发展奠定了基础。

数据是开展评价分析的前提,依据指标体系(图 3、表 2),搜集计算所需数据并进行归纳分类,其中水源种类、水质数据、灌溉用水量、灌溉水有效利用系数等数据来源于《邯郸市水资源公报》《魏县水资源公报》,计量设施、作物产量、渠道及输水管道、设计灌溉保证率、化肥农药施用量、农田渍涝及降水等相关数据主要来源于《邯郸统计年鉴》《魏县统计年鉴》,高效节水面积、地下水位埋深、种植结构等相关数据主要来源于邯郸市水利局农村水利水电处有关地下水超采综合治理的相关报告。最终,利用搜集到的军留灌区 2010—2019 年共 10 年的相关数据,开展典型灌区农田水循环健康评价。



图4 研究区域位置及水系

Fig. 4 Study region location and river system

### 3.2 评价结果与分析

#### 3.2.1 指标评价结果

在对数据进行归一化、标准化处理的基础上,参照表2 阈值体系,即可得出农田水循环各指标逐年健康状况,详见图5。从整体来看,近10年健康状况未发生变化的指标主要包括农田防渍排涝达标率、设计灌溉保证率、地下水埋深相对值、计量设施配套率、农药面源污染风险等5个指标。其中:农田防渍排涝达

标率一直处于“亚健康”状态,评价结果较好,究其原因主要是在华北平原,地下水超采严重,导致包气带增厚,土壤入渗存蓄能力增加,加之区域降水量相对较少,发生农田渍涝问题的风险较低;地下水埋深相对值、计量设施配套率、农药面源污染风险一直处于“严重病态”,设计灌溉保证率一直处于“病态”,反映了近10年灌区地下水超采形势依旧严峻,农户井灌计量还未跟进以及喷药过量等问题。

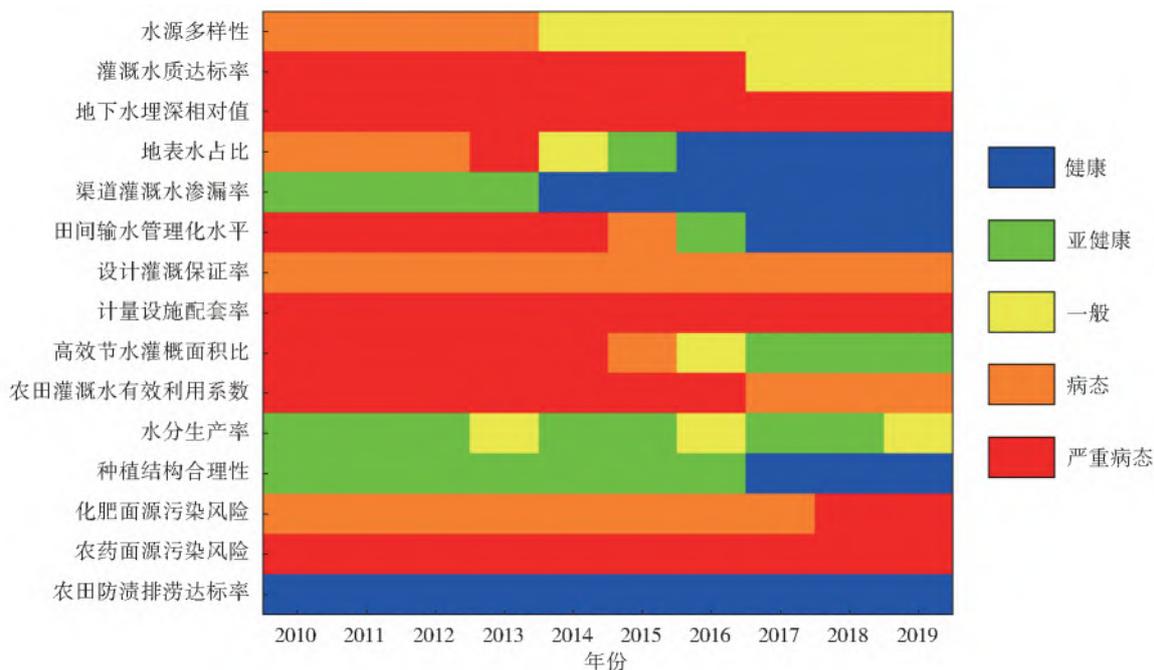


图5 灌区农田水循环指标健康评价结果

Fig. 5 Healthy grades of farmland water-cycle index in irrigated area

近 10 年状况逐年向好的水循环指标主要有水源多样性、灌溉水质达标率、渠道灌溉水渗漏率、田间输水管道化水平、高效节水灌溉面积比、农田灌溉水有效利用系数及种植结构合理性这 7 个指标。水源多样性、灌溉水质达标率、渠道灌溉水渗漏率、田间输水管道化水平、高效节水灌溉面积比以及种植结构合理性指标达标率等 6 个指标自 2017 年以来均处于“一般”及以上状态,农田灌溉水有效利用系数也由 2010 年的“严重病态”好转为 2017 年的“病态”,这些变化间接反映了河北省地下水超采综合治理和灌区节水改造的工程效果;种植结构的逐年改善,反映了地下水超采综合治理有关农业项目的效果,也体现了地下水压采的政策倒逼灌区逐渐实施“以水定地”,逐步优化种植结构。

军留灌区是地表、地下水混合水源灌区,由于地表水受区域降雨丰枯影响较大,水分生产率指标的健康状况在“亚健康”及“一般”中波动。同样受降水丰枯影响,2014 年以前,地表水占比的健康状况也呈现波动,但随着地下水压采水源置换工程的实施,

该指标自 2014 年后呈现逐年上升趋势,并于 2016 年以后达到“健康”状态。与其他指标状况的变化趋势不同,化肥面源污染风险的健康状况在近 10 年间呈现恶化趋势,由最初的“病态”降为 2018 年和 2019 年的“严重病态”,不仅反映出农户过量施用化肥的行为,也间接反映出灌区土壤肥力近 2 年有所下降。

综合各指标来看,近年来,健康状况处于“一般”及以上的指标个数逐渐增多:2010 年仅 4 个指标健康状况为“一般”及以上,分别为渠道灌溉水渗漏率、水分生产率、种植结构合理性及农田防渍排涝达标率;至 2019 年健康状况为“一般”及以上的指标增至 9 个,其中新增加的指标为水源多样性、灌溉水质达标率、地表水占比、田间输水管道化水平和高效节水灌溉面积比等 5 个指标,这也说明了军留灌区农田水循环的健康状况整体上在往好的方向发展。

### 3.2.2 维度评价结果

根据第 2.5 节所述,分别利用综合指数法及灰色关联分析,评价军留灌区农田水循环维度健康状况,结果见表 4。

表 4 2010—2019 年灌区农田水循环维度评价结果

Tab. 4 Evaluation grades of farmland water-cycle dimension in irrigated area from 2010 to 2019

维度	评价方法	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
水源	综合指数法	1.91	1.96	1.83	1.89	2.53	2.86	3.18	3.65	3.61	3.63
	灰色关联分析	V	V	V	V	III	III	III	III	III	III
取输水子过程	综合指数法	2.17	2.20	2.26	2.31	2.51	2.74	3.16	3.44	3.62	3.62
	灰色关联分析	V	V	V	V	V	V	V	II	II	II
用耗水子过程	综合指数法	2.76	2.79	2.89	2.85	2.99	3.22	3.36	3.93	3.91	3.86
	灰色关联分析	V	V	V	V	V	IV	III	II	II	II
退排水子过程	综合指数法	2.14	2.13	2.13	2.13	2.13	2.10	2.08	2.11	1.80	1.95
	灰色关联分析	IV									

注:依据表 3,上述不同颜色表明了评价结果对应的健康等级。

由表 4 可知,2 种方法对各维度的评价结果基本呈现相同的变化趋势,仅有少部分等级判定结果存在一些差异。具体来看,水源维度逐年健康等级均由 2010 年的“严重病态”好转为 2016 年及以后的“一般”,但与灰色关联分析的阶梯式上升不同,综合指数法的评价结果是由“严重病态”到“病态”再好转为“一般”的缓慢上升状态。

取输水子过程的健康状况均呈现逐渐上升趋势,综合指数法的结果为由 2010 年的“病态”逐渐上升为 2016 年及以后的“一般”;而灰色关联分析的阶梯状上升结果则更加显著,由 2010 年的“严重病态”跳跃到 2017 年及以后的“亚健康”状态。

就用耗水评价逐年变化趋势来看:两类结果都

呈现逐年递增趋势,但最终的等级评价略有不同,其中:综合指数法的结果呈现由 2010 年的“病态”好转为 2015 年及以后的“一般”的逐渐递增趋势;而灰色关联分析结果则经历“严重病态”“病态”“一般”,并最终于 2017 年达到“亚健康”状态。需要指出的是,尽管 2017 年综合指数法的评价等级为“一般”,但其评分均在 3.90 左右,已非常趋近“亚健康”等级。

退排水过程评价结果近 10 年来无较大变化,大多数处于“病态”,其中:综合指数法的评价结果在 2018 年开始出现轻微恶化趋势;而灰色关联分析结果则无趋势,一直呈现“病态”。

基于上述内容,结合第 3.2.1 节的结果可知,维

度评价与指标评价结果息息相关。水源维度中,除地下水埋深相对值的健康状况近年来无变化外,其余指标均呈现出逐年向好的趋势,因而该维度整体呈现逐年好转的趋势;取输水维度中设计灌溉保证率、计量设施配套率的健康状况近年来无变化,而其余 2 指标的健康状况逐年改善并最终达到健康状态,对于该维度健康的逐年向好具有较大的贡献;用耗水维度的水分生产率评价结果虽然出现波动,但整体评价较好,其余 3 个指标健康状况近年来均有不同程度的改善,因而该维度健康状况逐年改善;化肥面源污染风险和农药面源污染风险 2 个指标一直处于病态,影响了整个退排水维度的评价结果,成为农田水循环健康的薄弱环节。对比维度健康的变化趋势,近年来魏县及灌区采取的一系列措施对水源、取输水子过程、用耗水子过程等 3 个维度的健康改善较为显著,此后加强农业面源污染的治理、改善退排水过程的健康状况是灌区乃至未来邯郸市农田绿色高质量发展的提升改进重点。

### 3.2.3 综合评价结果

分别利用综合指数法及灰色关联分析,评价军留灌区农田水循环 2010—2019 年逐年健康综合状况,评价结果见图 6。



图 6 综合评价结果

Fig. 6 Comprehensive evaluation grades

由图 6 可知,近 10 年来,军留灌区农田水循环健康状况有所好转,2 种方法的总体变化趋势相似。其中:灰色关联分析评价结果变化稍大,其评价结果显示,2010—2015 年该灌区农田水循环健康状况均为“严重病态”,此后开始逐渐得到改善,2016 年健康状态提升为“一般”,2017 年及以后达到稳定状态,健康状况为“亚健康”;综合指数法评价结果的变化幅度较小,分值范围为 2.36~3.58,对应的健康等级为由 2010 年的“病态”逐渐好转为 2016 年及以后的“一般”,但 2017 年及以后的评分相对较高,均超过了 3.50。

对比综合指数法与灰色关联分析的等级评定差异可知:综合指数法由于等级界定规则,即便评分已经趋好并逼近临界值,但状态评价仍然不能升级;灰色关联分析的等级评价结果相比更加合理。然而在趋势走向上,由于灰色关联分析仅以数据判定,所以变化趋势上或呈现跳跃性,或呈现同一性,相比之下,综合指数法在整个趋势走向的表征上与实际更加相符。

## 4 结 论

通过解析灌区农田水循环结构,剖析了农田健康水循环的概念,选用层次分析-熵权组合法计算权重,构建了基于水源-取输水-用耗水-退排水循环过程的灌区农田水循环健康评价指标体系,分别采用综合指数法及灰色关联分析法评价了军留灌区 2010—2019 年农田水循环健康状况,主要得出以下结论:

(1) 提出健康的农田水循环为水源多样且配置合理、灌溉用水保质保量、取输水高效节水、用耗水高效高产、退排水过程快速且少污染的水循环。

(2) 近 10 年来,军留灌区农田水循环健康状态逐年向好,评价结果为“一般”及以上的指标总个数由 2010 年的 4 个增长至 2019 年的 9 个;水源、取输水子过程、用耗水子过程的水循环健康状况得到逐年显著提升,退排水子过程的健康状况最差,大部分时间处于“病态”。

(3) 无论维度或综合评价,两种方法的变化趋势基本一致,在等级评定上略有差异。对比而言,灰色关联分析在评分逼近临界值时的等级评定较为合理,而综合指数法在整个趋势走向的表征上相对客观。

目前农田水循环健康评价研究仍然处于发展探究阶段,指标体系还需要进一步完善和不断优化。此外,灌区农田水循环涉及因素繁杂,数据收集难度较大,若推广到多个灌区具有较大的挑战;以后可采用基础资料搜集和水文模型模拟输出相结合的办法,为大尺度区域开展农田水循环健康评价提供数据支撑。

### 参考文献(References):

[1] 张杰,曹开朗. 城市污水深度处理与水资源可持续利用[J]. 中国给水排水, 2001, 17(3): 20-21. (ZHANG J, CAO K L. Advanced treatment of urban sewage and sustainable utilization of water resources [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(3): 20-21. (in Chi-

- nese))
- [2] 张杰. 我国水环境恢复与水环境学科[J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(2): 178-183. (ZHANG J. Water environmental recovery and subject in China[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2002, 28(2): 178-183. (in Chinese))
- [3] 刘俊良, 王鹏飞, 臧景红, 等. 城市用水健康循环及可持续城市水管理[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 29-32. (LIU J L, WANG P F, ZANG J H, et al. Healthy urban water cycle and sustainable urban water management[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 29-32. (in Chinese))
- [4] 许向君, 汪中华, 刘志峰, 等. 关于建立城市水健康循环的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 609-614. (XU X J, WANG Z H, LIU Z F, et al. Research in the establish of healthy city water cycle[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2006, 37(4): 609-614. (in Chinese))
- [5] PAL A, HE Y, JEKEL M, et al. Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle[J]. Environment International, 2014, 71: 46-62. DOI: 10.1016/j.envint.2014.05.025.
- [6] 张士政. 基于健康水循环的南四湖流域城镇体系规划[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. (ZHANG S Z. Urban system planning based on healthy hydrological cycle in Nansi Lake basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))
- [7] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 67-74. (WANG F Q, MA S Y, ZHAO H, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle in Beijing-Tianjin-Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method[J]. South-to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0006.
- [8] ZHANG S, FAN W, YI Y, et al. Evaluation method for regional water cycle health based on nature-society water cycle theory[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551(SI): 352-364. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.013.
- [9] 栾清华, 张海行, 刘家宏, 等. 基于 KPI 的邯郸市水循环健康评价[J]. 水利水电技术, 2015, 46(10): 26-30. (LUAN Q H, ZHANG H X, LIU J H, et al. KPI-based health assessment for water cycle of Handan[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(10): 26-30. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.10.006.
- [10] 段娜. 邯郸市主城区水循环健康评价与演变分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019. (DUAN N. Health assessment and evaluation of water cycle in the main urban area of Handan City[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese))
- [11] 裴梦桐. 降雨产汇流过程下城市水循环监测与评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. (PEI M T. Health assessment of urban water cycle during stormwater runoff process: A case study of Handan metropolis[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese)) DOI: 10.27104/d.cnki.ghbjy.2020.000142.
- [12] 许欣然. 灌区现代化评价体系与数学模型研究[D]. 天津: 天津农学院, 2018. (XU X R. Study on evaluation index system and mathematical model of modernization irrigation district[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2018. (in Chinese))
- [13] 郑越. 基于生态安全评价的武汉市乡村发展策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. (ZHENG Y. Research on Wuhan rural development strategy based on ecological security evaluation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)) DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2019.002428.
- [14] 蔡玉. 北京市节水型社会建设评价指标体系研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019. (CAI Y. The evaluation index system of water-saving society construction research of Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019. (in Chinese)) DOI: 10.26943/d.cnki.gbjzc.2019.000020.
- [15] 邵薇薇, 李海红, 韩松俊, 等. 海河流域农田水循环模式与水平衡要素[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 15-20, 25. (SHAO W W, LI H H, HAN S J, et al. Agricultural water cycle scheme and flux in Haihe River basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 15-20, 25. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2013.05.004.
- [16] 高学睿. 基于水循环模拟的农田土壤水效用评价方法与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (GAO X R. Theory and application of the evaluation on agricultural soil water utility base on water cycle simulation[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research (IWHR), 2013. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 姜龙, 马军霞, 等. 黄河流域高质量发展判断

- 准则及评价体系[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 1-8, 22. (ZUO Q T, JIANG L, MA J X, et al. Judgment criteria and evaluation system for high-quality development of the Yellow River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 1-8, 22. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2020465.
- [18] 闫峰, 张兴磊, 唐贝, 等. 熵权法在地下水环境质量评价中的局限性[J]. 南昌大学学报(工科版), 2019, 41(1): 11-14. (YAN F, ZHANG X L, TANG B, et al. Disadvantages of entropy weighting model in the groundwater quality evaluation[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2019, 41(1): 11-14. (in Chinese)) DOI: 10. 13764/j. cnki. ncdg. 2019. 01. 003.
- [19] 楼豫红, 康绍忠, 崔宁博, 等. 基于集对分析的区域节水灌溉发展水平综合评价模型构建与应用: 以四川为例[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 20-28. (LOU Y H, KANG S Z, CUI N B, et al. Application of set pair analysis in the comprehensive water-saving irrigation development level evaluation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2014, 46(2): 20-28. (in Chinese)) DOI: 10. 15961/j. jsuese. 2014. 02. 020.
- [20] 柯劲松. 江西省大型灌区运行状况综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2008(10): 64-68. (KE J S. A comprehensive evaluation of large-scale irrigation areas in Jiangxi Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(10): 64-68. (in Chinese))
- [21] 刘沛衡. 京津冀地区水循环健康评价[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020. (LIU P H. Assessment of water circulation health in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese)) DOI: 10. 27144/d. cnki. ghbsc. 2020. 000394.
- [22] 操信春, 杨陈玉, 何鑫, 等. 中国灌溉水资源利用效率的空间差异分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 128-132. (CAO X C, YANG C Y, HE X, et al. Assessing the spatial variation of irrigation water use efficiency in grain production of China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 128-132. (in Chinese))
- [23] 黄永江. 大型灌区用水效率综合评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. (HUANG Y J. Study on comprehensive evaluation of water use efficiency of large-scale irrigation district: With the Yellow River irrigation district of Inner Mongolia for example [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese)) DOI: 10. 27229/d. cnki. gnmnu. 2020. 000007.
- [24] 高明杰, 罗其友. 水资源约束地区种植结构优化研究: 以华北地区为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 204-210. (GAO M J, LUO Q Y. Study on cropping structure optimization in region short of water: A case study of north China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 204-210. (in Chinese))
- [25] 刘钦普, 孙景荣, 濮励杰. 中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 9-16. (LIU Q P, SUN J R, PU L J. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 9-16. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2020. 14. 002.
- [26] 杨柳. 陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (YANG L. Ecological environment problems analysis and regulation study in the development of Jinghui Canal irrigation district in Shaanxi Province [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [27] 闫玉婷. 四川省农村水利建设标准与评价方法研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013. (YAN Y T. The study on standard and evaluation method of rural water conservancy construction in Sichuan Province [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013. (in Chinese))
- [28] 司锦锦, 王世东. 基于组合赋权法的焦作矿区生态安全评价与时空分异[J]. 水土保持研究, 2021, 38(3): 348-354. (SI J J, WANG S D. Ecological security evaluation and spatiotemporal differentiation of Jiaozuo mining area based on combined weighting method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 38(3): 348-354. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2021. 03. 038.
- [29] 王洋洋, 黄锦楼. 基于绿视率的城市生态舒适度评价模型构建[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2170-2179. (WANG Y Y, HUANG J L. Construction of evaluation model of urban ecological comfort index based on green view index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2170-2179. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb202005121189.
- [30] 沈珍瑶, 谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文, 1997(3): 14-16. (SHEN Z Y, XIE T F. An improved grey association analysis method and its application in water environmental quality assessment [J]. Journal of China Hydrology, 1997(3): 14-16. (in Chinese)) DOI: 10. 19797/j. cnki. 1000-0852. 1997. 03. 003.

## Healthy evaluation of farmland water-cycle in a typical irrigated area of North China Plain

LUAN Qinghua<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Hai<sup>3</sup>, LIU Tianwei<sup>1</sup>, DONG Sen<sup>1</sup>, HE Shuai<sup>1</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Department of Agriculture Water Conservancy and Handan

Bureau of Water Conservancy, Hydropower, Handan 056021, China)

**Abstract:** With the rapid increase of population, agricultural water demand has increased largely, which resulted in the continuous construction of irrigation and water conservancy projects. The effect of artificial drive force on farmland water cycle has become more and more prominent, especially in the main grain-producing areas such as the North China Plain, which led to the "nature-society" duality of the farmland water cycle in the irrigated areas. In past years, the irrigation managers only focused on human living and economic benefits, while ignored the natural law and farmland sustainability, caused groundwater over-pumping and ecological environment deterioration, then influenced the high-quality agricultural production in the irrigated area. Thus, to solve the above problems, it is crucial to systematically illustrate the farmland water-cycle "health" and scientifically "diagnose" the related "symptoms".

Based on the analysis on the structure and the corresponding health conception of farmland water-cycle in irrigation areas, the evaluation index system of farmland water-cycle health including four dimensions (water source, water transporting, water consumption, and water withdrawal & drainage) and fifteen indexes were established, according to the selection principle of Analytic Hierarchy Process. The indexes' weight through the combined Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Method were calculated to improve the corresponding objectivity. The threshold values of different health grades in the evaluation index system of farmland water-cycle were set according to the relevant national standards and reference to the related researches. Junliu irrigated area of Wei county, Hebei province was selected as the typical one of the North China Plain. The health of regional farmland water-cycle from 2010 to 2019 was evaluated through comprehensive index method and modified grey correlation analysis, respectively.

The index evaluation results show that: the water quality, non-point water pollution of fertilizer and pesticide, and utilization coefficient of irrigation water are mostly "ill"; the indexes such as water source diversity, the leakage proportion of canal irrigation water, the piping proportion of field irrigation water, the high-efficiency proportion of water-saving irrigation and reasonableness of planting structure have improved year by year in recent years. The total number of "normal" and healthier grades increased from four in 2010 to nine in 2019. The dimension evaluation results show that the health of water withdrawal and drainage is the worst and most of all are in "sick"; while the health of the water source, water transport, and water consumption was improved year by year. The two comprehensive evaluation results both show that the water cycle in the Junliu irrigation area has been improved gradually in the recent decade. The evaluation results of grey correlation analysis show that the health grades of farmland water-cycle are "seriously ill" from 2010 to 2015, then upgraded to "normal" in 2016, and reached a stable grade in 2017 and later maintain "sub-health". The scores of the comprehensive index method range from 2.36 to 3.58, and the corresponding health grade was gradually improved from "sick" in 2010 to "normal" after 2015.

It is indicated that the comprehensive health of farmland water-cycle in Junliu irrigation area has gradually improved in the recent ten years due to the integrated management of groundwater over-pumping. The non-point water pollution of fertilizer and pesticide is the critical focus for the irrigation. The comprehensiveness and dimension health trends of grey correlation analysis and comprehensive index method are similar. By contrast, the results of grey correlation analysis are more reasonable as the healthy scores approach the critical value, while the results of the comprehensive index method are relatively objective to the whole trend indication. The results could provide a scientific basis and decision-making reference to the management and high-quality development of irrigated areas in the North China Plain.

**Key words:** healthy farmland water cycle; irrigated area; AHP-Entropy weight method; comprehensive index method; grey correlation analysis