

doi: 10.12029/gc20220320002

赵敏敏,王思源,韩双宝,王赛,李甫成,李海学,袁磊,马涛,魏世博,吴玺,蔺鹏飞,鲍晶. 2023. 节水灌溉对黄河流域宁夏引黄灌区水平衡的影响机制及其生态效应[J]. 中国地质, 50(1): 26–35.

Zhao Minmin, Wang Siyuan, Han Shuangbao, Wang Sai, Li Fucheng, Li Haixue, Yuan Lei, Ma Tao, Wei Shibo, Wu Xi, Lin Pengfei, Bao Jing. 2023. Influence mechanism and ecological effect of water saving irrigation on water balance in the Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. Geology in China, 50(1): 26–35(in Chinese with English abstract).

节水灌溉对黄河流域宁夏引黄灌区水平衡的影响机制及其生态效应

赵敏敏¹,王思源¹,韩双宝¹,王赛¹,李甫成¹,李海学¹,袁磊¹,马涛¹,
魏世博¹,吴玺¹,蔺鹏飞²,鲍晶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. 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃兰州 730000;3. 东华理工大学,江西南昌 330013)

提要:【研究目的】宁夏引黄灌区是中国重要的粮食生产基地之一,自实施节水灌溉以来,渠系衬砌、田间节水等节水工程影响了区域水平衡状况,研究节水灌溉对水平衡的影响机制及其生态效应对于区域水资源优化管理具有重要意义。【研究方法】通过构建宁夏引黄灌区“水-土-气-生”多元化数据库,运用秩相关分析和 Spearman 相关分析方法,研究了 2000—2020 年宁夏引黄灌区的水平衡要素演变趋势、水平衡演化机制及其生态效应。【研究结果】宁夏引黄灌区社会经济发展主要依赖过境黄河水,节水灌溉后水循环通量显著减少,2000—2020 年农业用水量减少 $21.38 \times 10^8 \text{ m}^3$,引黄水量减少 $19.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,排水量减少 $19.11 \times 10^8 \text{ m}^3$;节水灌溉是水平衡演化的主要驱动因子,农业用水量减少直接导致引黄水量与地表水体补给地下水资源量减少($P < 0.01$);节水灌溉后地表水体补给地下水水量减少 $8.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水资源量减少 $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水位普遍下降,盐渍化程度有所减轻,但改变了湖泊和地下水的水力联系,导致生态需水量增加。【结论】节水灌溉后农业用水效率得到提高,水循环通量显著减少,地下水位下降对生态环境造成一定影响,建议以生态安全为底线进一步优化节水方案,相关研究成果为区域自然资源管理及生态保护修复提供支撑。

关键词:节水灌溉;水平衡;生态效应;宁夏引黄灌区;水文地质调查工程;黄河

创 新 点:(1)基于水文循环要素的长时间序列资料,运用多种统计学方法,分析了节水灌溉后水平衡要素的演变趋势,厘清了节水灌溉对水平衡演化的驱动机制;(2)以节水灌溉后地下水位埋深下降为主线,分析节水灌溉对生态环境的多重影响,为区域水资源优化管理提供借鉴。

中图分类号:X821 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)01-0026-10

Influence mechanism and ecological effect of water saving irrigation on water balance in the Yellow River irrigation area of Ningxia

收稿日期:2022-03-20;改回日期:2022-06-06

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221754)资助。

作者简介:赵敏敏,女,1990年生,博士,工程师,主要从事生态水文研究;E-mail: zminmin@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者:王思源,男,1989年生,博士,高级工程师,主要从事环境地质研究;E-mail: wangsiyuan@mail.cgs.gov.cn。

ZHAO Minmin¹, WANG Siyuan¹, HAN Shuangbao¹, WANG Sai¹, LI Fucheng¹, LI Haixue¹,
YUAN Lei¹, MA Tao¹, WEI Shibo¹, WU Xi¹, LIN Pengfei², BAO Jing³

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China;
2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. East
China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

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

[Objectives] The Yellow River irrigation area of Ningxia is one of the important grain production bases in China. Since the implementation of water-saving irrigation, projects such as canal lining and field water-saving have affected the regional water balance. It is of great significance to study the influence mechanism and ecological effect of water-saving irrigation on water balance for the optimal management of regional water resources. **[Methods]** By constructing the water-soil-gas-generation diversified database of the Yellow River irrigation area of Ningxia, adopting rank correlation analysis and Spearman correlation analysis methods, the evolution trend of water balance elements, water balance evolution mechanism and ecological effect of the Yellow River irrigation area of Ningxia from 2000 to 2020 were studied. **[Results]** The economic development of the Yellow River irrigation area of Ningxia mainly depends on the Yellow River water. Since the implementation of water-saving irrigation, the water circulation flux decreased significantly. From 2000 to 2020, the amount of agricultural water intake, water diversion and water discharge decreased by $21.38 \times 10^8 \text{ m}^3$, $19.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $19.11 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. Water-saving irrigation is the main driving factor of water balance evolution, and the decrease of agricultural water intake directly leads to the decrease of the amount of water diversion and groundwater recharged by surface water ($P < 0.01$). After the implementation of water-saving irrigation, the amount of groundwater recharged by surface water decreased by $8.68 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the amount of groundwater resources decreased by $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$. The groundwater table decreased, and the degree of salinization reduced. In addition, the decline of the groundwater table changed hydraulic connection between lakes and groundwater, resulting in an increase in ecological water demand. **[Conclusions]** After the implementation of water-saving irrigation, the utilization efficiency of agricultural water has been improved, water circulation flux has been significantly reduced, and the decline of groundwater table has affected the ecological environment. It is suggested to further optimize the water-saving scheme based on ecological security. Relevant research results provide support for regional natural resource management and ecological protection and restoration.

Key words: water-saving irrigation; water balance; ecological effect; the Yellow River irrigation area of Ningxia; hydrogeological survey engineering; Yellow river

Highlights: (1) Based on the long time series data of hydrological cycle elements, the evolution trend of water balance elements after the implementation of water-saving irrigation is analyzed by using a variety of statistical methods, and the driving mechanism of water-saving irrigation on the evolution of water balance is clarified; (2) Taking the decline of groundwater table after the implementation of water-saving irrigation as the main line, we analyzes the multiple impacts of water-saving irrigation on the ecological environment, and provide reference for the optimal management of water resources.

About the first author: ZHAO Minmin, female, born in 1990, doctor, engineer, engaged in eco-hydrological research; E-mail: zminmin@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WANG Siyuan, male, born in 1989, doctor, senior engineer, engaged in environmental geology research; E-mail: wangsiyuan@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190333).

1 引言

宁夏引黄灌区位于黄河上游干旱区,包括银川平原和卫宁平原,在2000多年的引黄灌溉过程中形成了以人工植被为主体的绿洲生态系统。引黄灌

区年均降水量不足200 mm,自产地表水资源匮乏,区域社会发展主要依赖引用过境黄河水,形成了独特的水资源取-用-耗-排格局,是中国重要的粮食生产基地。近年来,黄河来水持续偏枯,社会经济发展水资源刚性需求量不断增大,缺水导致水

资源供需失衡。水问题是制约宁夏经济社会发展的根本所在,1997年黄河断流达226 d,为历时最长断流,为有效缓解水资源需求与供给之间的矛盾,宁夏引黄灌区开始实行节水灌溉,采用了渠系衬砌、田间节水等多种节水措施后,区域引黄水量大幅减少(张金萍等,2010)。

引黄灌区是维系区域生产生活的重要场所,但这些地区往往毗邻荒漠,生态环境极为脆弱。引黄河水除了满足灌区日常生产、生活所需以外,还兼具调节盐分、维持自然生态平衡的作用(韩双宝等,2021)。虽然宁夏引黄灌区自产地表水资源匮乏,但受引黄灌溉入渗补给的地下水资源相对丰富,是地表生态环境演变的主控因子之一,地下水位埋深过浅时容易引起次生盐渍化、地下水位埋深过深时容易引起植被退化(刘圣等,2014; Liu et al., 2016; 徐英等,2019; 王晓玮等,2020)。随着节水灌溉工程地推进,主要受田间灌溉补给的地下水资源减少,地下水位埋深下降,对地表生态环境产生一定影响。因此,引黄水量减少不但对水平衡产生显著影响,还进一步影响了区域生态格局(Chen et al., 2021; Song et al., 2021)。探究节水灌溉对宁夏引黄灌区水平衡的影响机制及其生态效应对于区域水资源优化管理具有重要意义。

目前,国内外大多数研究都集中在天然状态下的流域水平衡方面(张腾等,2016; Beran et al., 2019; Imran and Mostafa, 2019; Prävālie et al., 2019; 甘月云等,2019),尤其是气候变化对干旱区水量平衡的影响(Zhong et al., 2016),主要采用的方法有统计分析与模型模拟等。然而以往研究较少关注人类活动对水平衡的影响(Beran et al., 2019; Prävālie et al., 2019; 宋博等,2021)。宁夏引黄灌区是一个受人类活动干扰强烈的地区,其水平衡要素演变及水平衡机制与天然状态有别,它受到人类活动和自然环境的双重影响,属于典型的自然-社会二元水循环系统,节水灌溉不但对区域水平衡产生显著影响,还影响了生态环境格局。开展以节水灌溉为背景的干旱区水平衡演化机制研究对水资源管理及生态保护修复具有重要意义。

本文以黄河流域宁夏引黄灌区为研究区,以大型节水灌溉工程建设为背景,获取了“水-土-气-生”多元化数据库,结合多种统计学方法,根据水文

循环要素的长时间序列资料,从历史演进的角度着手,分析节水灌溉后水平衡要素的演变趋势,厘清水平衡要素演变的驱动机制,探究水平衡演变引发的生态效应,为区域水资源优化管理提供借鉴。

2 研究区概况

宁夏引黄灌区(地理坐标 $105^{\circ}1'24''E\sim 106^{\circ}52'23''E$, $37^{\circ}26'32''N\sim 39^{\circ}12'20''N$)位于宁夏回族自治区的北部,沿着黄河两岸呈“J”形分布,总面积达 6573 km^2 (孙玉芳,2019)(图1)。以青铜峡水利枢纽分界,北部为青铜峡灌区,南部为卫宁灌区。引黄灌区由黄河冲积形成,具有土壤深厚、地势平坦的特点,利于进行自流灌溉。黄河年均过境水量达到 $300\times 10^8\text{ m}^3$,具有良好的光、热、水、土配置,为发展灌溉农业提供了极其有利的条件。宁夏引黄灌区位于中温带干旱区,多年平均降水量不足 200 mm ,蒸发量高达 1000 mm 以上,自产水资源贫乏,社会经济发展主要依赖过境黄河水。悠久的灌溉历史推动农业发展的同时,也因排水不畅抬升地下水位加剧盐渍化,制约

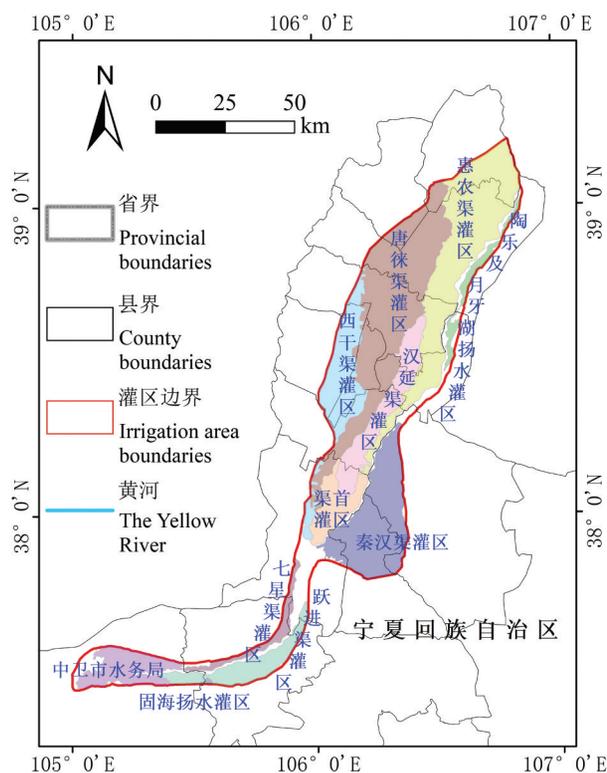


图1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

了引黄灌区的农业发展。近年来,节水工程推进导致引黄水量减少,对区域水循环及生态环境产生一定影响,节水灌溉对水平衡的影响机制及其生态效应成为国内外学者关注的热点问题之一。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 引黄灌区自然-社会二元水循环水平衡方程构建

水平衡包括输入量和输出量两个重要部分,对闭合流域来讲,输入量为降水量,输出量为腾发量,两者差值为径流量与蓄变量。然而宁夏引黄灌区不是闭合流域,引黄灌区水循环系统为由天然水循环和以作物灌溉为目标的“取水-引水-用水-排水”水分运动过程共同构成的自然-人工复合型的陆面二元水循环系统(岳勇等,2008)。该区域降水量较少,引用黄河水为主要水源,外加微量山前侧渗补给,经生产、生活、生态等腾发后通过排水渠进入黄河。在参考相关文献(阮本清等,2008;张金萍等,2010;张亮,2010;翟家齐等,2016)的基础上,构建宁夏引黄灌区自然-人工二元水平衡方程如下:

$$P+D+M=(E+F)+\Delta R \quad (1)$$

其中, P 为降水量, D 为引水量, M 为山前侧渗补给量, E 为腾发量, F 为排水量, ΔR 为蓄变量。

3.1.2 Spearman 秩相关分析

一个水平衡要素会随着时间推移表现出一定趋势性,Spearman 秩相关检验法主要是通过分析水文要素与时序的相关性而检验该水文要素演化是否具有趋势性。为判断节水灌溉后水平衡要素演变是否具有趋势,对其开展了 Spearman 秩相关分析,具体公式(朱红兵和卢纹岱,2011):

$$r=1-\frac{6\sum_{i=1}^n(R_i-S_i)^2}{n^3-n} \quad (2)$$

其中, r 为秩相关系数, n 为序列长度, R_i 为水文序列的秩, S_i 为时间序列的秩。

3.1.3 Pearson 相关分析

当两个变量 x 和 y 均服从或者近似服从正态分布的时候,两个连续变量间的线性相关性用 Pearson 相关系数来衡量。为了阐释水平衡演化机制,首先厘清各个水平衡要素间的相关关系,因此开展了 Pearson 相关分析,计算公式(朱红兵和卢纹岱,

2011)为:

$$S_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}} \quad (3)$$

其中, x_i 与 y_i 分别是变量 x 与 y 的第 i 个观测值; \bar{x} 与 \bar{y} 分别是变量 x 与 y 的平均值。由以上公式, S_{xy} 的范围介于-1至1之间,当 $S_{xy}>0$ 时,则称为正相关,反之则称为负相关,其绝对值越大则表明变量 x 与 y 的线性相关程度越高。

3.1.4 相关分析检验

由于变量 x,y 来自某个总体的样本值,据此得到的相关系数,只是总体相关系数的估计值,所以,从同一个总体抽取的不同样本会得到不同的相关系数,即相关系数间存在变异性。因此,须对相关系数进行检验。设定检验的原假设 H_0 为总体样本中两个变量的相关系数为0,用来进行检验的统计量为:

$$t=\frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}r \quad (4)$$

其中, r 是样本的相关系数, n 是样本的观测量。在原假设下,如果观测的显著性水平 $P<0.05$,则拒绝原假设,认为两个变量之间存在显著相关性,否则不能拒绝原假设,即认为两个变量之间不存在相关性。

3.2 数据来源

水资源数据来自《宁夏水资源公报》(宁夏回族自治区水利厅,2000—2020),下垫面数据来自GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com/>),经济数据来自《宁夏统计年鉴》(宁夏回族自治区统计局,2000—2020),地下水位埋深数据来自项目组2020年地下水统测数据。

4 结果与分析

4.1 水平衡要素及其变化

宁夏引黄灌区多年平均降水量不足200 mm,年际间波动较大。2000—2020年宁夏引黄灌区年均降水量为184.05 mm(折合资源量为 $12.10\times 10^8\text{ m}^3$),相较于1956—2000年多年平均值178.50 mm增长5.55 mm。此外,宁夏引黄灌区降水量年际间波动较大,如2012年降水量为265 mm,是2005年的3倍有余。Spearman的秩相关分析结果表明2000—2020年区域降水量未呈现显著的变化趋势($P>0.05$)(表1)。

黄河引水是维持灌区农业发展的命脉,随着节

表1 宁夏引黄灌区水平衡要素的Spearman相关系数

Table 1 Spearman correlation coefficients of water balance elements in the Yellow River irrigation area of Ningxia

Spearman	秩相关分析	降水量	引水量	社会腾发量	农业腾发量	排水量
	<i>r</i>	0.11	-0.75 **	-0.54 *	-0.77 **	-0.66 **
	<i>P</i>	0.62	0.00	0.01	0.00	0.00

注:*表示显著性水平为0.05,**表示显著性水平为0.01。

水灌溉的稳步推进,近年来黄河引水量呈现下降趋势。黄河引水经过先增后减两个阶段:受1997年黄河断流超过200 d的影响,灌区开始逐步推进节水灌溉,2000年引水量为 $78.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,至2020年引水量已不足 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中2003年引水量仅为 $55.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要与2003年为枯水年有关。Spearman的秩相关分析结果表明区域引水量随时间呈现显著下降趋势($P < 0.01$)(表1)。

本文将腾发量分为两个部分:①自然腾发量(未进入社会水循环系统中的水资源腾发量),即降水量除下渗补给含水层、转化为地表径流外的量;②社会腾发量(进入社会水循环系统中的水资源腾发量),主要分为四部分:农业腾发量(耕地、林地、园地、鱼塘补水、牲畜用水等产生的腾发量)、生活腾发量(城镇和农村居民生活用水及公共用水产生的腾发量)、工业腾发量(工矿企业用于制造、加工、冷却、净化等方面的用水产生的腾发量)、其他腾发量(人为供给河湖、湿地补水等所产生的腾发量)(宁夏回族自治区水利厅,2000—2020)。2000—2020年宁夏引黄灌区由降水产生的年均自然腾发量为 $9.79 \times 10^8 \text{ m}^3$;年均社会腾发量为 $33.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中农业腾发量占比高达93.87%。2000—2020年年均社会腾发量总体较为稳定,但其结构发生转变:随着节水灌溉推进,农业腾发量呈下降趋势;随着产业结构的调整,城镇生活腾发量呈现增加趋势。Spearman的秩相关分析结果表明社会腾发量呈现显著的下降趋势($P < 0.05$),其中农业腾发量下降趋势更为显著($P < 0.01$)(表1,图2)。

宁夏引黄灌区排水量主要受引水量的影响,约占引水量的一半左右。2000—2020年年均排水量为 $32.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,随着引水量的减少,排水量由2000年的 $43.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降为2020年的 $24.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于节水灌溉后农业用水效率提升,排水量占引水量的比例逐渐下降,由2000年的56.03%下降为2020年的42.13%。Spearman的秩相关分析结果表

明区域排水量呈现显著的下降趋势($P < 0.01$),但其秩相关系数低于引水量(表1)。

4.2 水平衡演变趋势

降水和引黄河水为区域主要的水资源输入量,蒸散和排泄为灌区主要的水资源输出量,据此构建宁夏引黄灌区水平衡模型,2000—2020年宁夏引黄灌区多年平均降水量仅为 $12.10 \times 10^8 \text{ m}^3$,引黄水量是区域主要的水源,高达 $64.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,排水量为 $32.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,其他则以腾发形式消失,其中自然腾发量为 $9.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,社会腾发量为 $33.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,蓄变量为 $0.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000—2020年区域水循环通量呈现下降趋势,引水量减少24.91%,农业腾发量减少15.08%,排水量减少43.53%,表明随着节水灌溉的实施,农业水资源利用效率得到显著提高(表2)。

4.3 水平衡要素演变的驱动机制

4.3.1 气候变化

由于宁夏引黄灌区2000—2020年温度变化较小,而降水量年间变幅较大,因此以降水量衡量气候变化对水平衡要素演变的驱动机制。Pearson

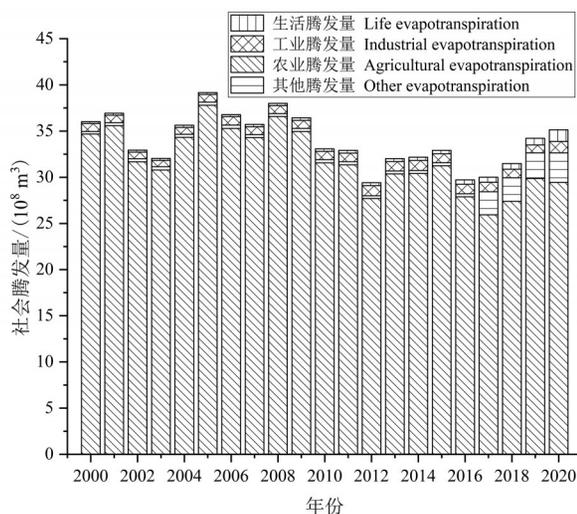


图2 宁夏引黄灌区社会腾发量变化

Fig.2 Changes in social evapotranspiration in the Yellow River irrigation area of Ningxia

表2 宁夏引黄灌区水平衡要素变化

Table 2 Changes in water balance elements in the Yellow River irrigation area of Ningxia

年份	输入量/(10 ⁸ m ³)			输出量/(10 ⁸ m ³)					
	降水	引水	山前侧渗补给	降水腾发	农业腾发	工业腾发	生活腾发	其他腾发	排水
2000	9.62	78.36	0.19	7.75	34.67	0.86	0.20	0.29	43.90
2010	11.24	64.60	0.04	8.95	31.56	0.91	0.27	0.35	33.19
2020	11.93	58.84	0.03	10.08	29.44	1.24	1.25	3.20	24.79
2000—2020年 平均值	12.10	64.44	0.08	9.79	31.86	0.92	0.53	0.79	32.27

相关分析结果表明降水量与农业腾发量间相关系数为-0.53($P<0.05$),表明两者呈中等负相关关系,即当降水量较多时,农业腾发量较少;降水量与引水量的Pearson相关系数为-0.31,但该系数未通过显著性检验,表明两者无显著相关性(图3)。由以上不难看出,降水量虽然对区域水平衡产生一定影响,但是其影响程度较小。

4.3.2 人类活动

人类活动主要通过改变下垫面格局及实施节水灌溉工程等影响区域水平衡:2000—2020年宁夏引黄灌区下垫面变化显著(图4),其中建设用地和河湖湿地面积显著增加,建设用地面积增加了437.07 km²,增长率高达112.39%,主要来源于耕地(表3)。由于硬化的地面入渗能力削弱,地下水接受降水入渗补给的能力降低,2000年降雨入渗补给系数为0.08,至2020年时则降为0.05(图5)。此外,人工造湖、鱼塘养殖等促使湿地和水体面积快速增长,2000—2020年引黄灌区湿地面积由10.67 km²增长至41.29 km²,水体面积由292.13 km²增长至

332.10 km²,均主要来源于耕地;湿地和水体面积增长致使生态需水量增加。近10年来,引黄水量表现出减小趋势,生态用水量急剧增加与引黄量减少叠加,水资源分配捉襟见肘,加剧地区用水矛盾。

人类活动主要从用水结构和用水效率两个方面影响区域水平衡。一方面,随着经济社会发展和科学技术水平提升,区域用水结构有所调整。2000—2020年引黄灌区第一产业比重下降,第二、第三产业比重上升,工业制造水平的提升使得万元工业增加值用水量呈现显著下降趋势,工业用水量从2000年的2.82×10⁸ m³降为2020年的1.65×10⁸ m³。同时随着第三产业比重的提升,生活用水量从2001年的0.83×10⁸ m³增长至2020年的2.75×10⁸ m³。

近年来宁夏不断改善灌溉设施条件,采取小畦灌溉、水稻节水、激光平地等多种措施推进节水灌溉,对区域水平衡产生显著影响。节水灌溉是影响农业用水量的主要因子,因此以农业用水量表征节水灌溉对水平衡的影响。Pearson相关分析结果表明农业用水量和引水量之间的相关程度较高($S=0.99, P<0.01$)(图5,图6),表明随着农业用水量下降,引黄水量下降,区域水循环通量减少。此外,地表水体补给占地下水总补给量的90%以上,农业用水量下降后,地表水体补给地下水资源量减少($S=0.87, P<0.01$),地下水资源量大幅降低(图6)。以上表明节水灌溉是影响区域水平衡的主控因子,节水灌溉后地下水资源量减少,地下水位下降,地下水是区域地表生态演变的主控因子之一,地下水对地表生态环境造成一定影响。

5 讨论

节水灌溉显著减少了宁夏引黄灌区水循环通量,对区域水平衡和生态环境造成了一定影响。节水灌溉后,农业用水效率提高,农业用水量减少,地表水体(渠系、田间灌溉入渗)补给地下水资源量减

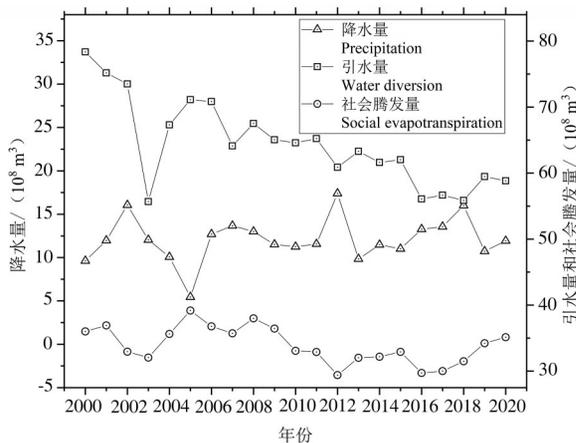


图3 降水量、引水量与社会腾发量变化
Fig.3 Changes in the amount of precipitation, water diversion and social evapotranspiration

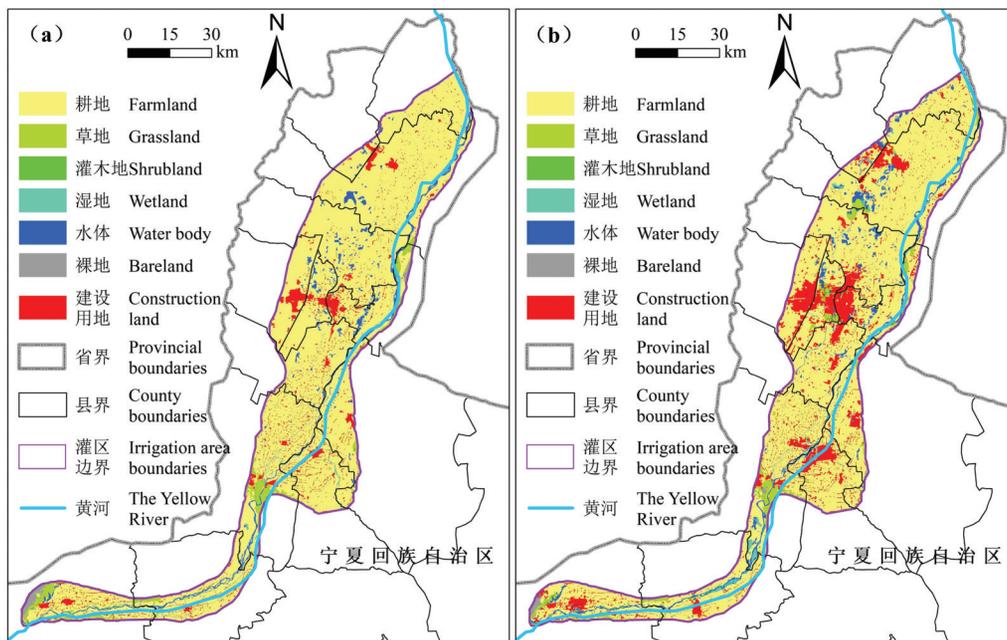


图4 土地利用图(a, 2000年;b, 2020年)
Fig.4 Land use maps for 2000(a) and 2020(b)

少。引黄灌区地下水除了接受大气降水补给和少量山前洪水侧渗补给外,地表水体补给占补给总量的90%以上,Pearson相关分析表明两者间高度相关($S=0.99, P<0.01$),2000—2020年地表水体补给地下水减少了 $8.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水资源量减少了 $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水位普遍下降1~2 m,大部分区域地下水位埋深由小于2 m增大到2~4 m(靳晓辉等,2021)。地下水是干旱区地表生态演变的主控因子之一,地下水位下降对区域生态环境产生多重影响

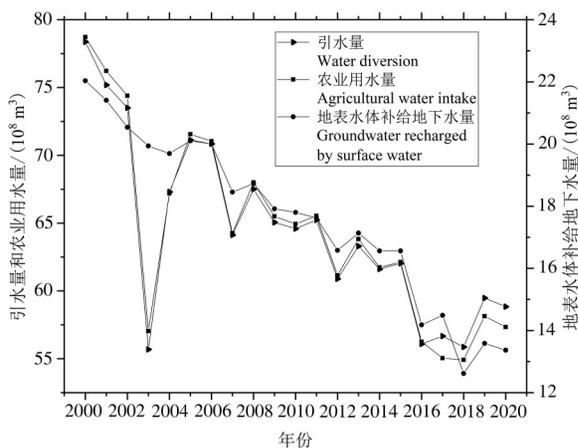


图5 引水量、农业用水量和地表水体补给地下水量变化
Fig.5 Changes in the amount of water diversion, agricultural water intake, and groundwater recharged by surface water

(图6)(Zhang and Wang, 2020)。

首先,在干旱区地下水位与盐渍化分布密切相关。由于宁夏引黄灌区气候干旱,土壤蒸发作用强烈(Liu et al., 2016),潜水蒸发是地下水排泄的主要方式之一,地下水在向上运移时也带来了溶解在地下水中的盐分。因降水稀少,很难将这些盐分通过下渗淋滤作用带回地下水,造成盐分不断在土壤浅表层积累形成盐渍化,成为影响农业生产的最大障碍(徐英等, 2019; Zhang et al., 2022b)。地下水位埋深越浅,区域盐渍化程度越严重。近20年来,引黄灌区地下水位埋深普遍由小于2 m增大至2~4 m,减少了潜水蒸发向地表携带的盐分积累,区域盐渍化程度减轻,重度盐渍化转轻,无盐渍化面积增加,内蒙古河套灌区在推进节水灌溉后盐渍化程度同样有所减轻(翟家齐等, 2016; 郭姝姝, 2018; 孙玉芳, 2019)。

同时,由于干旱区降水稀少,植被主要依靠根系吸收地下毛细水,地下水位埋深同样控制着干旱区植被的分布格局,当地下水位埋深过大时,毛细水带能够提供给植被根系的水分较少,天然植被发生退化,为周围沙漠的扩张创造了条件(刘圣等, 2014; Jin et al., 2021; Wang et al., 2021)。Zhang et al. (2022a)基于多种生态指标构建模型确定内蒙古引黄灌区最适宜地下水位为1.87 m;金晓媚等(2009)通过地下

表3 2000—2020年土地利用转移矩阵

Table 3 Land-use transfer matrix from 2000 to 2020

类型	2000年土地利用面积/km ²								
	耕地	草地	灌木地	湿地	水体	建设用地	裸地	总计	
2020年土地利用 面积/km ²	耕地	4829.92	41.06	1.41	6.13	121.34	62.34	19.63	5084.02
	草地	70.09	144.77	3.47	0.11	11.03	3.13	4.52	237.23
	灌木地	0.78	2.93	4.40	0.01	0.06	0.06	0.01	8.24
	湿地	31.26	0.12	0.00	0.25	9.61	0.04	0.00	41.29
	水体	182.14	4.62	0.30	3.60	139.56	1.54	0.16	331.98
	建设用地	467.19	15.65	0.57	0.56	10.33	320.94	10.10	825.62
	裸地	2.42	8.70	0.15	0.00	0.01	0.61	29.84	41.85
	总计	5585.28	219.04	10.35	10.67	292.05	388.73	64.46	6573.38

水位模拟和植被覆盖率的对应关系研究得出银川平原最适宜天然植被生长的水位埋深是3.0 m左右,水位埋深大于4.0 m时地下水对植被补给能力变弱,不利于植被生长,大于8.0 m时天然植被无法生长。当前区域地下水水位埋深虽尚未处于生态灾变水位以下,但进一步下降后可能导致植被退化。

此外,地下水位下降改变了湖泊和地下水间的水力联系,部分湖泊与地下水形成脱节或半脱节状态,湖泊由天然地下水补给向人工输水补给转变,甚至逆转成为地下水的补给源(黄小琴等,2019;罗杰,2020;Fan et al., 2022)(图7)。当前河湖湿地水量平衡和生态健康主要依靠人工补水维系,2020年生态补水量达到 $3.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,建议以生态环境底线约束为前提,统筹考虑节水效益与生态安全的关系,进一步优化区域水资源管理方案。

6 结论

本文综合运用多种统计学方法,分析了节水灌溉后宁夏引黄灌区水平衡要素的演变规律,探究了

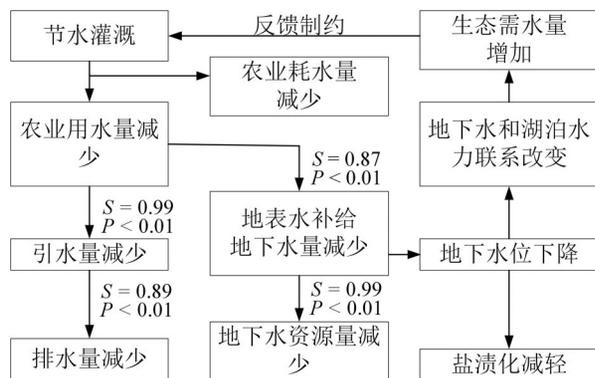


图6 宁夏引黄灌区水平衡演变机制

Fig.6 Water balance evolution mechanism in the Yellow River irrigation area of Ningxia

水平衡要素演变的驱动机制,分析了水平衡要素演变对生态环境的影响,主要得到以下结论:

(1)宁夏引黄灌区自产水资源量少,主要依靠过境黄河水维持经济社会发展。节水灌溉后区域水循环通量减少,通过渠系衬砌、田间节水等措施提升农业用水效率、减少农业用水量,引黄水量、排水量随之减少。农业用水量减少后,主要受灌溉补给的地下水资源量随之减少。

(2)宁夏引黄灌区水平衡主要受气候变化和人类活动的影响,其中降水量主要影响农业腾发量,建设用地面积增长主要影响降雨入渗补给量,科技发展、经济结构转变主要影响工业和生活用水量。由于灌区农业用水占比超过85%,节水灌溉后农业用水量下降成为影响灌区水平衡演化的主要因子。

(3)引黄水量减少后,主要受灌溉入渗补给的地下水资源量减少,地下水位埋深增加。地下水位埋深增加后潜水蒸发量减少,盐渍化程度减轻,但

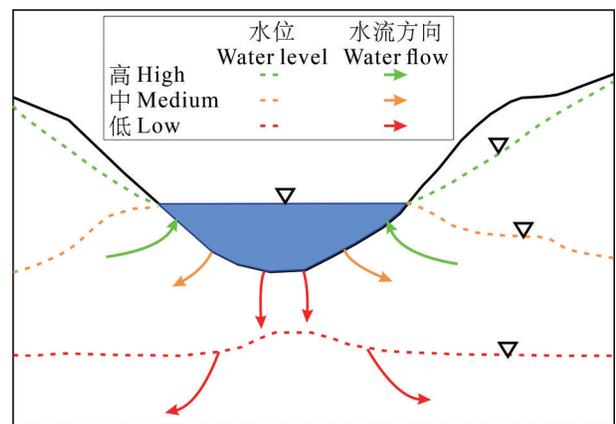


图7 湿地地表水-地下水交互模式简图(据罗杰,2020修改)

Fig.7 The interaction model between surface water and groundwater in wetland (modified from Luo Jie, 2020)

同时导致了湖水和地下水脱节等问题,水位埋深进一步下降将可能引发植被退化,因此,建议以生态安全为底线,统筹考虑水资源的经济效益和生态效益,进一步优化节水方案。

注释:

①宁夏回族自治区水利厅. 2000—2020. 宁夏水资源公报[R]. 银川: 宁夏回族自治区水利厅.

References

- Beran A, Hanel M, Nesládková M, Vizina A, VyskočP, Kožín R. 2019. Climate change impacts on water balance in western Bohemia and options for adaptation[J]. *Water Science and Technology*, 19(1/2): 323–335.
- Chen Sheming, Liu Futian, Zhang Zhuo, Zhang Qian, Wang Wei. 2021. Changes of groundwater flow field of Luanhe River Delta under the human activities and its impact on the ecological environment in the past 30 years[J]. *China Geology*, 4(3): 455–462.
- Fan G, Zhang D, Zhang J, Li Z, Sang W, Zhao L, Xu M. 2022. Ecological environmental effects of Yellow River irrigation revealed by isotope and ion hydrochemistry in the Yinchuan Plain, Northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 135: 108574.
- Gan Yueyun, Wang Kaiyan, Gan Shengwei. 2019. Analysis of the water balance in the Taihu Basin in recent years[J]. *Journal of China Hydrology*, 39(1): 89–92 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shushu. 2018. Study on Spatiotemporal Evolution and Regulation of Soil Salinization in Hetao Irrigation Districe, Inner Mongolia, China Using Remote Sensing and CLUE–S Model[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1–124 (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).
- Huang Xiaoqin, Zhang Yibing, Li Ying, Zhang Bo, Meng Xuchen, Xu Lei. 2019. Conversion relationship between lake and groundwater in Yinchuan City: A case study for the Yuehai Lake[J]. *Arid Zone Research*, 36(6): 1344–1356 (in Chinese with English abstract).
- Imran K, Mostafa A. 2019. Potential changes to the water balance of the Teesta River Basin due to climate change[J]. *American Journal of Water Resources*, 7(3): 95–105.
- Jin H, Chen X, Wang Y, Zhong R, Zhao T, Liu Z, Tu X. 2021. Spatio-temporal distribution of NDVI and its influencing factors in China[J]. *Journal of Hydrology*, 603(Part D): 127129.
- Jin Xiaohui, Fan Yumei, Duan Hao, Yang Jian, Song Changji, Jia Qian, Hu Yawei. 2021. Temporal and spatial response of groundwater depth in Yinchuan Plain to the integrated water regulation of the Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 32(4): 45–51 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaomei, Hu Guangcheng, Shi Xiaojie. 2009. Relationship between soil salinization and the vegetation growing, groundwater depth in the Yinchuan Plain[J]. *Geoscience*, 23(1): 23–27 (in Chinese with English abstract).
- Liu Sheng, Lou Huajun, Jia Shaofeng, Yan Guozhen, Xiang Yangxu. 2014. Quantitative relationship between vegetaiton and groundwater depth in Mahai Oasis area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 12(6): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Chen H, Huo Z, Wang F, Shock C C. 2016. Analysis of the contribution of groundwater to evapotranspiration in an arid irrigation district with shallow water table[J]. *Agricultural Water Management*, 171: 131–141.
- Luo Jie. 2020. Hydrogeochemical Characteristics and Ecological Effects of Lake–Groundwater Hyporheic Zone in Yuehai Lake, Yinchuan Plain[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–94 (in Chinese with English abstract).
- Práválie R, Piticar A, Roșca B, Sfică L, Bandoc G, Tiscovschi A, Patriche C. 2019. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013[J]. *Catena*, 172: 295–312.
- Ruan Benqing, Zhang Renduo, Li Huiian. 2008. Study on Water Balance Mechanism and Water Consumption in Hetao Irrigation District[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Song Bo, Zhang Fawang, Yang Hui Feng, Liu Chunlei, Meng Ruifang, Nan Tian. 2021. Ecological priority–based source–division evaluation and application on water resources carrying capacity: Take Baoding plain of Hebei Province as a case study[J]. *Geology in China*, 48(4): 1156–1166 (in Chinese with English abstract).
- Song Ge, Huang Jinting, Ning Bohan, Wang Jiawei, Zeng Lei. 2021. Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of western China[J]. *China Geology*, 4(3): 527–535.
- Statistics Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. 2000–2020 Ningxia Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press (in Chinese).
- Sun Yufang. 2019. Study on soil salinization dynamics in Yinchuan Plain based on remotesending monitoring index model[J]. *Ground Water*, 41(5): 80–82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaowei, Shao Jingli, Wang Zhuoran, Cui Yali, Zhang Qiuli. 2020. A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: A case study of the Minqin Basin[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(2): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Wang W, Zhang Z, Hou X, Yao D. 2021. Assessment of the effect of water–table depth on riparian vegetation along the middle and lower reaches of the Manasi River, Northwest China[J].

- Hydrogeology Journal, 29(2): 1–11.
- Xu Ying, Ge Zhou, Wang Juan, Li Wei, Feng Shaoyuan. 2019. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 35(1): 123–130 (in Chinese with English abstract).
- Yue Yong, Hao Fanghua, Li Peng, Ma Guifen, Du Xiaowen. 2008. The land water circle mode in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 27(3): 69–71 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Jiaqi, Zhang Yue, He Guohua, Ren Changjia, Fu Wenqi. 2016. Influences of water saving on regional water and salt balance in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 37(6): 24–29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Wang X S. 2020. The impact of groundwater depth on the spatial variance of vegetation index in the Ordos Plateau, China: A semivariogram analysis[J]. Journal of Hydrology, 588: 125096.
- Zhang Jinping, Guo Bingtuo, Hou Hongyu, Liu Junge. 2010. Research on water balance mechanism for Yellow River irrigation area in Ningxia [J]. China Rural Water and Hydropower, 338(12): 38–41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang. 2010. Proportion Analysis of Natural and Artificial Water Circulation Fluxes in Manas River Basin[D]. Shihezi: Shihezi University, 1–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang R, Wu J, Yang Y, Peng X, Li C, Zhao Q. 2022a. A method to determine optimum ecological groundwater table depth in semi-arid areas[J]. Ecological Indicators, 139: 108915.
- Zhang Teng, Zhang Zhen, Xu Yan. 2016. Simulation and emulation on the equilibrium of supply and demand of water resources in Haidian District based on the SD model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 37(2): 29–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Hou K, Qian H, Gao Y, Fang Y, Xiao S, Tang S, Zhang Q, Qu W, Ren W. 2022b. Characterization of soil salinization and its driving factors in a typical irrigation area of Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 837: 155808.
- Zhong X, Sun F, Wu C, Shi J, Zhan J. 2016. The impact of land use change on water balance in Zhangye city, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth Parts, 96: 64–73.
- Zhu Hongbin, Lu Wendai. 2011. Application Statistics and SPSS Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 甘月云, 王凯燕, 甘升伟. 2019. 近年来太湖流域水量平衡分析[J]. 水文, 39(1): 89–92.
- 郭妹妹. 2018. 基于遥感及 CLUE-S 模型的内蒙古河套灌区土壤盐渍化时空演变与调控研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1–124.
- 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.
- 黄小琴, 张一冰, 李英, 张勃, 孟旭晨, 徐磊. 2019. 银川市湖泊—地下水转化关系——以阅海湖为例[J]. 干旱区研究, 36(6): 1344–1356.
- 靳晓辉, 樊玉苗, 段浩, 杨健, 宋常吉, 贾倩, 胡亚伟. 2021. 银川平原地下水位对黄河流域水量统一调度的时空响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 32(4): 45–51.
- 金晓媚, 胡光成, 史晓杰. 2009. 银川平原土壤盐渍化与植被发育和地下水埋深关系[J]. 现代地质, 23(1): 23–27.
- 刘圣, 娄华君, 贾绍凤, 闫国振, 项洋旭. 2014. 马海绿洲区植被与地下水埋深的定量关系[J]. 南水北调与水利科技, 12(6): 1–5.
- 罗杰. 2020. 银川平原阅海湖—地下水交互带水文地球化学特征及生态效应[D]. 西安: 长安大学, 1–94.
- 宁夏回族自治区统计局. 2000–2020. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 阮本清, 张仁铎, 李会安. 2008. 河套灌区水平衡机制及耗水量研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 宋博, 张发旺, 杨会峰, 刘春雷, 孟瑞芳, 南天. 2021. 基于生态优先的水资源承载力分源评价及应用——以河北保定平原为例[J]. 中国地质, 48(4): 1156–1116.
- 孙玉芳. 2019. 基于遥感监测指数模型的银川平原土壤盐渍化动态研究[J]. 地下水, 41(5): 80–82.
- 王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰. 2020. 西北地区地下水水量—水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例[J]. 水文地质工程地质, 47(2): 17–24.
- 徐英, 葛洲, 王娟, 李伟, 冯绍元. 2019. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 35(1): 123–130.
- 岳勇, 郝芳华, 李鹏, 马桂芬, 杜晓文. 2008. 河套灌区陆面水循环模式研究[J]. 灌溉排水学报, 27(3): 69–71.
- 翟家齐, 张越, 何国华, 任长江, 付雯琪. 2016. 内蒙古河套灌区节水对区域水盐平衡的影响分析[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 37(6): 24–29.
- 张金萍, 郭兵托, 侯红雨, 刘俊阁. 2010. 宁夏引黄灌区水平衡机制研究[J]. 中国农村水利水电, 338(12): 38–41.
- 张亮. 2010. 玛纳斯河流域天然水循环通量和人工水循环通量比例分析研究[D]. 石河子: 石河子大学, 1–62.
- 张腾, 张震, 徐艳. 2016. 基于 SD 模型的海淀区水资源供需平衡模拟与仿真研究[J]. 中国农业资源与区划, 37(2): 29–36.
- 朱红兵, 卢纹岱. 2011. 应用统计与 SPSS 应用[M]. 北京: 电子工业出版社.