DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.02.007

# 人为因素下灌溉水有效利用系数驱动机制
## ——以宁夏自流灌区为例

黑正军[1,2], 张红玲[3], 杜 斌[3], 唐 莲[1,4*]
(1.宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021;2.宁夏吴忠市水务局河湖服务中心,宁夏 吴忠 751100;
3.宁夏回族自治区水利科学研究院,宁夏 银川 750021;
4.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,宁夏 银川 750021)

**摘 要:**影响农田灌溉水有效利用系数的因素众多,其中人为因素影响较大。收集了宁夏自流灌区2015—2019年资料,构建STIRPAT模型,利用不同人为因素对各自流灌域进行动态评价。结果表明:节水灌溉面积占比、渠道衬砌率、防渗渠系占比和节水灌溉投资具有促进作用,实际灌溉面积和水稻占比具有抑制作用。主成分分析结果表明,节水灌溉状况为第一主成分,当地管理运营状况及种植结构为第二主成分;回归分析表明,各灌域受人为因素影响较大的为节水灌溉面积占比、渠道衬砌率及节水灌溉投资。灰色预测模型结果表明,到2026年农田灌溉水有效利用系数未能达到期望规划值0.6,需进行调控。根据回归方程,总计对宁夏自流灌区节水灌溉面积占比平均需增加5.01%,节水灌溉投资需增加16.719亿元,水稻占比平均需减少14.43%。

**关键词:**人为因素;农田灌溉水有效利用系数;STIRPAT模型;调控策略;宁夏自流灌区
**中图分类号:**S274.3 **文献标志码:**A

农田灌溉水有效利用系数作为衡量灌区水资源转化效能的核心指标,其数值高低不仅反映了技术层面的节水潜力,更深刻映射着人水关系的协调程度[1-2],在提升农业灌溉效率方面存在十分重要的意义[3]。影响农田灌溉水有效利用系数的因素有很多,主要有自然因素和人为因素[4],自然因素包括供水条件、气象条件、水质、土壤质地等[5],人为因素有防渗渠系长度、灌溉投资、当地灌溉制度、灌区管理水平、渠道衬砌及节水面积等[6]。目前国内有大量学者对农田灌溉水有效利用系数的影响因素进行了研究。例如:王丽等[7]利用主成分分析和线性回归方程法分析了降雨量、种植结构等因素对农田灌溉水有效利用系数的影响程度;吴七斤等[8]利用首尾法和主成分分析法对灌区渠道长度、衬砌率等因素进行了分析;刘翠等[9]利用多元线性回归方程对灌区配套设施、引水量、地下水资源模数等因素进行了分析。但目前已有研究中大多针对自然条件及部分人为影响因素,关于人为因素及其影响程度的分析尚显不足,且针对人为因素驱动机制的调控策略研究较少。由于不同灌区发展不平衡,其影响因素及程度各有差异,如何综合各方面人为影响因素分析其对不同灌区农田灌溉水有效利用系数的影响程度,并进一步提出差异化调控策略,显得尤为必要。

宁夏灌区按面积规模及水源类型划分为大型、中型、小型及纯井灌区。大型自流灌区以骨干渠道为单位划分为唐徕渠灌域、西干渠灌域、惠农渠灌域、汉延渠灌域、河东灌域、中卫灌域和七星渠灌域,

**收稿日期:**2023-03-02
**基金项目:**宁夏自然科学基金项目(2023AAC03138);宁夏科技重点研发计划项目(2023BEG02055);宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)项目(NXYLXK2025A03)
**作者简介:**黑正军(1999—),男,硕士,主要从事水资源调控的研究(1070814031@qq.com)。
* **通信作者:**唐莲(1975—),女,教授,博士,主要从事旱区水资源调控理论及技术的研究(nxdxtl@126.com)。
**引用格式:**黑正军,张红玲,杜斌,等.人为因素下灌溉水有效利用系数驱动机制[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(2):153-158,167.

总引水量达到 33.88 亿 $m^3$,其中唐徕渠灌域引水量最大,达到 10 亿 $m^3$,占总引水量的 1/3,七星渠灌域最小,仅 2.79 亿 $m^3$。宁夏自流灌区耗水以农业为主,占总耗水量约 83.5%,各灌区以黄河水为主要水源,占总引水量的 98%,其余为地下水[10]。宁夏自流灌区较扬水灌区规模更大[11],受人为因素影响更显著,因此本文针对宁夏自流灌区的 7 个自流灌域,采用 STIRPAT 模型及灰色预测模型,基于人为因素对农田灌溉水有效利用系数进行研究,并提出相应调控策略。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究指标及数据来源

农田灌溉水有效利用系数驱动机制是复杂要素共同作用的结果,主要人为因素有灌区规模与类型、种植方式与结构、渠系特征及长度等[6-9]。在气候及灌区基本条件无显著变化的情况下,通过调控灌区人为因素提高农田灌溉水有效利用系数是有效的途径。姬小敏等[10]以宁夏自流灌区汉延渠灌域为例,指出渠系砌护改造及作物种植优化使该灌区农田灌溉水有效利用系数提升。张丽等[12]则认为投资与节水面积对灌区灌溉水有效利用系数作用显著。为对不同人为因素进行量化分析,综合考虑宁夏灌区实际情况,引入以下指标参数,如表 1 所示。

本文数据来源于 2015—2019 年《宁夏统计年鉴》《宁夏回族自治区农田灌溉水有效利用系数测算分析成果报告》《宁夏水资源公报》等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 *影响因素及驱动机制研究方法* 目前 STIRPAT 模型已广泛应用于能源消耗、碳排放、生态水足迹[13]等环境领域,该模型由 Dietz 和 Rosa 基于广泛认可的 IPAT 模型发展而来[14]。已有研究表明,该方法对影响因素及驱动机制的研究较为有效[15-19]。模型计算公式为

$$I=aZ_1^bZ_2^cZ_3^dZ_4^eZ_5^fZ_6^gZ_7^hZ_8^i\varepsilon。\tag{1}$$

式中:$I$ 为农田灌溉水有效利用系数;$Z_1$、$Z_2$、…、$Z_8$ 为不同人为影响因素;$a$ 为模型系数;$b$、c、$d$、$e$、$f$、$g$、$h$、$i$ 分别为各人为影响因素的弹性系数。

将方程转化为对数形式,可得

$$\ln I=\ln a+b\ln Z_1+c\ln Z_2+d\ln Z_3+\cdots+i\ln Z_8+\ln\varepsilon。\tag{2}$$

式中:$\ln I$ 为因变量;$\ln a$ 为常数项;$\ln\varepsilon$ 为误差项。根据弹性系数定义,当各人为因素 $Z_1$、$Z_2$、…、$Z_8$,每发生 1% 的变化时,分别引起 $I$ 发生 $b$%、$c$%、$d$%、$e$%、$f$%、$g$%、$h$%、$i$%的变化。

1.2.2 *农田灌溉水有效利用系数预测方法* 灰色系统理论是研究少数据、信息不确定性等问题的方法,通过处理原始数据建立灰色预测模型,科学定量预测系统的未来状态[20],在农田灌溉水有效利用系数预测方面亦有应用[21]。

(1)构建 2015—2019 年不同灌区农田灌溉水有效利用系数动态变化序列,$X^{(0)}=[X^{(0)}(1),X^{(0)}(2),\cdots,X^{(0)}(n)]$,且对其进行一次累加,即

$$X^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}X^{(0)}(i),k=1,2,\cdots,n。\tag{3}$$

(2)定义 d($k$)为 $X^{(1)}(k)$的灰导数,即

$$\mathrm{d}(k)=X^{(0)}(k)=X^{(1)}(k)-X^{(1)}(k-1),\quad k=1,2,\cdots,n。\tag{4}$$

令 $H^{(1)}(k)$为数列 $X^{(1)}(k)$ 的邻值生成数列,即

$$H^{(1)}(k)=\alpha X^{(1)}(k)+(1-\alpha)X^{(1)}(k-1)。\tag{5}$$

式中:$\alpha$ 为发展系数。

定义 GM(1,1)模型相应的微分方程为

**表 1 各人为因素变量研究指标**

**Tab. 1 Research indicators for various human factor variables**

| 变量符号 | 指标 | 单位 | 内涵与意义 |
|---|---|---|---|
| $I$ | 农田灌溉水有效利用系数 | % | 反映灌区渠系状况及管理水平 |
| $Z_1$ | 有效灌溉面积 | 666.7 $hm^2$ | 反映地区水利化程度 |
| $Z_2$ | 实际灌溉面积 | 666.7 $hm^2$ | 反映灌区农田灌溉水有效利用系数可靠程度 |
| $Z_3$ | 节水灌溉面积占比 | % | 反映地区灌溉技术水平 |
| $Z_4$ | 水稻占比 | % | 反映水稻种植率 |
| $Z_5$ | 渠道衬砌率 | % | 反映干渠衬砌率 |
| $Z_6$ | 防渗渠系占比 | % | 反映防渗工程水平 |
| $Z_7$ | 节水灌溉投资 | 亿元 | 反映地区经济投入程度 |
| $Z_8$ | 净灌溉用水量 | 万亿 $m^3$ | 反映作物需水程度 |

$$X^{(0)}(k)+\alpha H^{(1)}(k)=u。\tag{6}$$

式中:$u$ 为灰作用量。

(3)利用最小二乘法得到预测模型,公式为

$$X^{(1)}(k+1)=(X^{(0)}(1)-\frac{u}{\alpha})e^{\alpha(-k)}+\frac{u}{\alpha},\quad k=1,2,\cdots,n。\tag{7}$$

(4)利用后验差检验法对模型进行测试,以判断其合理性,计算公式为

$$C=\frac{S_2}{S_1}。\tag{8}$$

式中:$S_1$ 为原始数据序列标准差;$S_2$ 为残差标准差;$C$ 为后验差比值,$C<0.35$ 表示模型精度高。

## 2　结果与分析

### 2.1　农田灌溉水有效利用系数驱动机制分析

为确定各个灌域农田灌溉水有效利用系数选取指标是否具有显著差异,本文借助 SPSS 软件进行偏相关分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知:总体上各个灌域有效灌溉面积($Z_1$)和净灌溉用水量($Z_8$)变化幅度不大,相关性不明显,后续分析中剔除这两个对农田灌溉水有效利用系数影响不大的因素;节水灌溉面积占比($Z_3$)、渠道衬砌率($Z_5$)、防渗渠系占比($Z_6$)和节水灌溉投资($Z_7$)呈正的相关性,表明这些因素对系数具有促进作用;实际灌溉面积($Z_2$)、水稻占比($Z_4$)与系数呈负相关,表明这些因素对系数具有抑制作用。

通过偏相关分析发现,部分因素间存在显著相关性,这可能会造成共线性影响,因此需要对数据进行多重共线性检验。当方差膨胀因子(VIF)检验值大于 10 时,表明数据间存在明显的共线性。通过 SPSS 软件进行线性分析显示,不同影响因素 VIF 均存在大于 10 的情况。为消除因素间的共线性影响,本文采用主成分分析法对其进行分析,主成分方差贡献率如表 3 所示。由表 3 可知,第一主成分 $F_1$ 与第二主成分 $F_2$ 累积方差贡献率达到 85.581%,且特征值均大于 1,表明前两个主成分能较好地反映影响因子的详细信息。其中,第一主成分 $F_1$ 主要代表灌区节水状况,第二主成分 $F_2$ 主要代表管理运营状况及种植结构。

通过主成分分析发现,主成分 $F_1$、$F_2$ 涵盖大部分信息,效果良好。将 $kI$ 作为因变量表示农田灌溉水有效利用系数,$F_1$、$F_2$ 为解释变量,运用 SPSS 软件建立线性回归模型,得到不同灌域人为影响因素与农田灌溉水有效利用系数的回归方程,如表 4 所示。由回归方程可知,这些影响因素每增加 1% 时,农田灌溉水有效利用系数将相应增加其所对应回归系数值的百分数变化,反映出各个影响因素在不同自流灌域对农田灌溉水有效利用系数的影响程度存在差异。

**表2　灌域相关性分析表**

**Tab. 2　Irrigation area correlation analysis table**

| 灌域名称 | $Z_1$ | $Z_2$ | $Z_3$ | $Z_4$ | $Z_5$ | $Z_6$ | $Z_7$ | $Z_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 唐徕渠灌域 | —0.059 | —0.771* | 0.981** | —0.784* | 0.799* | 0.837** | 0.952** | 0.089 |
| 西干渠灌域 | 0.088 | —0.822* | 0.683* | —0.949* | 0.940** | 0.622* | 0.678* | 0.059 |
| 惠农渠灌域 | —0.082 | —0.795* | 0.729* | —0.738* | 0.949* | 0.949* | 0.638* | 0.136 |
| 汉延渠灌域 | 0.024 | —0.779* | 0.751* | —0.667* | 0.632* | 0.837* | 0.809* | 0.290 |
| 河东灌域 | 0.042 | —0.839* | 0.748* | —0.628* | 0.837* | 0.837* | 0.891** | 0.368 |
| 中卫灌域 | 0.039 | —0.718* | 0.755* | —0.787* | 0.632* | 0.632* | 0.879** | —0.154 |
| 七星渠灌域 | 0.051 | —0.669* | 0.739* | —0.788* | 0.837* | 0.837* | 0.689* | —0.021 |

注:"**"表示在0.01水平显著相关,"*"表示在0.05水平显著相关。

**表3　各指标主成分的方差贡献率**

**Tab. 3　Variance contribution rate of each indicator's principal component**

| 主成分 | 特征值 | 方差贡献率 | 累积贡献率/% |
|---|---|---|---|
| $F_1$ | 3.817 | 59.167 | 59.167 |
| $F_2$ | 1.704 | 26.414 | 85.581 |

表 5 中回归方程的回归系数反映了各因素对灌域的影响程度。为了便于比较人为影响因素对各灌域的影响程度及灌域间各因素的作用强度,本文利用回归方程绘制了宁夏自流灌区人为因素影响程度占比图,如图 1 所示。

根据 STIRPAT 模型,由表 4 和图 1 可知,人为因素对各灌域影响程度存在差异。总体而言,各灌域影响较大的人为因素为节水灌溉面积占比、渠

表 4 农田灌溉水有效利用系数回归方程表

Tab. 4 Regression equation table of effective utilization coefficient of farmland irrigation water

| 灌域名称 | 主成分回归方程 |
|---|---|
| 唐徕渠灌域 | $kI$=−0.015ln $kZ_2$+0.038ln $kZ_3$−0.012ln $kZ_4$+0.02ln $kZ_5$+0.023ln $kZ_6$+0.017ln $kZ_7$ |
| 西干渠灌域 | $kI$=−0.012ln $kZ_2$+0.041ln $kZ_3$−0.016ln $kZ_4$+0.03ln $kZ_5$+0.04ln $kZ_6$+0.019ln $kZ_7$ |
| 惠农渠灌域 | $kI$=−0.017ln $kZ_2$+0.038ln $kZ_3$−0.037ln $kZ_4$+0.031ln $kZ_5$+0.025ln $kZ_6$+0.042ln $kZ_7$ |
| 汉延渠灌域 | $kI$=−0.025ln $kZ_2$+0.013ln $kZ_3$−0.011ln $kZ_4$+0.022ln $kZ_5$+0.026ln $kZ_6$+0.018ln $kZ_7$ |
| 河东灌域 | $kI$=−0.011ln $kZ_2$+0.035ln $kZ_3$−0.002ln $kZ_4$+0.012ln $kZ_5$+0.013ln $kZ_6$+0.016ln $kZ_7$ |
| 中卫各渠灌域 | $kI$=−0.014ln $kZ_2$+0.027ln $kZ_3$−0.012ln $kZ_4$+0.053ln $kZ_5$+0.045ln $kZ_6$+0.033ln $kZ_7$ |
| 七星渠灌域 | $kI$=−0.012ln $kZ_2$+0.004ln $kZ_3$−0.007ln $kZ_4$+0.002ln $kZ_5$+0.006ln $kZ_6$+0.028ln $kZ_7$ |

表 5 农田灌溉水有效利用系数预测表

Tab. 5 Prediction table for effective utilization coefficient of farmland irrigation water

| 灌域名称 | 农田灌溉水有效利用系数 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2021 年 | 2022 年 | 2023 年 | 2024 年 | 2025 年 | 2026 年 | 2027 年 | 2028 年 | 2029 年 | 2030 年 |
| 唐徕渠灌域 | 0.546 | 0.549 | 0.553 | 0.557 | 0.560 | 0.562 | 0.564 | 0.568 | 0.569 | 0.571 |
| 西干渠灌域 | 0.543 | 0.549 | 0.551 | 0.553 | 0.556 | 0.562 | 0.564 | 0.565 | 0.568 | 0.569 |
| 惠农渠灌域 | 0.547 | 0.549 | 0.552 | 0.553 | 0.556 | 0.559 | 0.561 | 0.562 | 0.564 | 0.565 |
| 汉延渠灌域 | 0.513 | 0.516 | 0.518 | 0.521 | 0.524 | 0.528 | 0.531 | 0.533 | 0.538 | 0.542 |
| 河东灌域 | 0.511 | 0.515 | 0.518 | 0.522 | 0.525 | 0.529 | 0.534 | 0.535 | 0.538 | 0.539 |
| 中卫各渠灌域 | 0.480 | 0.483 | 0.486 | 0.489 | 0.502 | 0.504 | 0.508 | 0.511 | 0.513 | 0.516 |
| 七星渠灌域 | 0.491 | 0.496 | 0.501 | 0.506 | 0.507 | 0.509 | 0.512 | 0.515 | 0.516 | 0.519 |

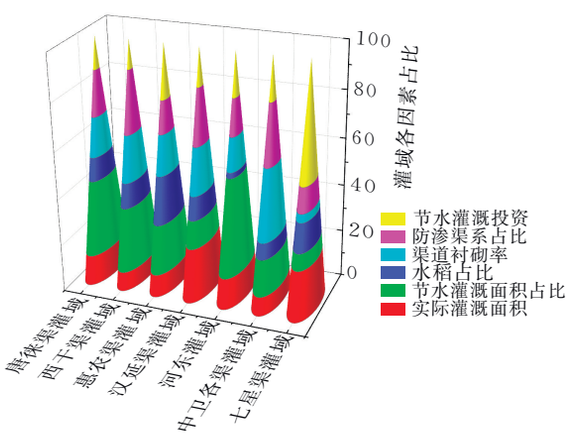



图 1 宁夏自流灌区人为因素影响程度占比图

Fig. 1 Proportion of influence degree from human factors in artesian irrigation districts of Ningxia

道衬砌率及节水灌溉投资。具体分析:唐徕渠灌域、西干渠灌域及河东灌域受节水灌溉面积占比影响最大,这是由于近年来宁夏大力发展高效节水灌溉,这 3 个灌域总节水面积从 2015 年的 2.24 万 $hm^2$ 增加到 2019 年的 4.94 万 $hm^2$,节水灌溉面积占比提升了 5%。这在一定程度上节约了水资源,显著提升了研究区域内水资源利用效率。惠农渠灌域和七星渠灌域受节水灌溉投资影响最大,汉延渠灌域和中卫各渠灌域分别受防渗渠系占比和渠道衬砌率影响最大,表明各灌域间差异显著,问题各异,发展不平衡现象突出。

## 2.2 农田灌溉水有效利用系数预测

农田灌溉水有效利用系数对灌区优化种植结构、水资源合理配置具有重要指导作用,亦是引导灌区科学规划的重要依据[22]。对该系数未来发展趋势进行预测分析,不仅可掌握其整体的发展态势,也可为农田灌溉水有效利用系数的进一步提升提出相应调控策略。

基于 GM(1,1)预测模型和 2015—2019 年宁夏大型自流灌区农田灌溉水有效利用系数数据,本文对预测值与原始数据进行残差检验。检验结果表明,后验差比值 $C$=0.12<0.35,平均精度 $p$=94.3%<95%,模型拟合程度较高,符合要求。采用该预测模型预测未来宁夏不同自流灌域农田灌溉水有效利用系数,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,按照目前灌域节水水平及管理状况,由于灌域间发展不平衡、基础条件存在差异,不同自流灌域农田灌溉水有效利用系数存在差异,但总体呈现上升趋势,这与宁夏灌区基本情况相符。

为提升宁夏自流灌区水资源利用效率,本文设定农田灌溉水有效利用系数在 2026 年达到期望规划值 0.6 这一目标,并据此提出调控策略。

### 2.3　调控策略

针对各灌域预测值与期望规划值之间的差异,基于上述不同自流灌域人为因素对农田灌溉水有效利用系数影响程度的分析及各灌域发展不平衡的现象,结合当地灌域基础条件,制定调控策略。调控总体原则为:①保持渠道衬砌率、防渗渠系占比、实际灌溉面积等对经济要求较高的因素不变,或短期内不大幅发生变化;②进一步提升节水灌溉面积及效率,提高水资源利用率。根据灰色预测模型中各灌域预测值与期望规划值 0.6 之间的差距,利用回归方程系数增减各个人为影响因素的百分数,再结合灌域基础数据得到百分数所对应的变化值,以此缩小与期望规划值之间的差距,从而提高各灌域农田灌溉水有效利用系数,最终达到或超过期望规划值 0.6,具体调控策略如表 6 所示。

**表6　不同自流灌域调控策略一览表**

**Tab. 6　Table of regulation strategies for different gravity irrigation districts**

| 各因素变化值 | 唐徕渠灌域 | 西干渠灌域 | 惠农渠灌域 | 汉延渠灌域 | 河东灌域 | 中卫各渠灌域 | 七星渠灌域 | 总计/平均 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 节水灌溉面积占比增加值/% | 2.5 | 2.3 | 2.9 | 3.8 | 5.6 | 4.3 | 13.7 | 5.01 |
| 节水灌溉投资增加值/亿元 | 1.138 | 0.712 | 1.328 | 1.84 | 2.84 | 1.997 | 6.864 | 16.719 |
| 水稻占比减少值/% | —13.8 | —4.7 | —22.9 | —13.8 | —16.6 | —13.4 | —15.8 | —14.43 |

由表 6 可知:节水灌溉面积占比平均增加 5.01%,其中七星渠灌域增幅最大,说明节水灌溉面积占比对该灌域影响显著;节水灌溉投资共增加 16.719 亿元,其中七星渠灌域增幅最大,表明该地区经济投入不足,发展水平相对滞后;水稻占比平均减少 14.43%,其中惠农渠灌域降幅最大,说明该地区水稻种植比例最高,水稻占比对该灌域影响最显著。

## 3　结论

(1)本文采用 STIRPAT 模型对灌溉水有效利用系数驱动机制的人为影响因素进行了分析。由于数据存在多重共线性,经过相关性分析、主成分及回归分析得到回归方程。结果表明,节水灌溉面积占比、渠道衬砌率、防渗渠系占比和节水灌溉投资因素具有促进作用,实际灌溉面积和水稻占比因素具有抑制作用;整体上各灌域影响较大的人为因素为节水灌溉面积占比、渠道衬砌率及节水灌溉投资,这与灌区实际发展情况相一致。但由于自流灌域之间发展不平衡、不充分,基础条件各异,不同灌域的人为因素对农田灌溉水有效利用系数的影响差异显著。

(2)通过灰色模型预测分析可知,各灌域农田灌溉水有效利用系数总体呈逐年增加的趋势,符合宁夏农田灌溉水有效利用系数的变化特征。为进一步提高农田灌溉水有效利用系数、节约水资源,实现 2026 年期望规划值 0.6 的目标,需对不同灌域采取差异化的调控策略。本文依据各因素的影响程度,在维持渠道衬砌率等经济要求较高因素不变的前提下,对其他相关因素进行调控以提升农田灌溉水有效利用系数。总计宁夏自流灌区节水灌溉面积占比平均增加 5.01%,节水灌溉投资增加 16.719 亿元,水稻占比平均减少 14.43%,这与宁夏发展节水灌溉及水稻优化种植的政策相符。

(3)农田灌溉水有效利用系数的期望目标值并非终极目标,其受多种因素影响。应在积极发挥灌区渠道生态补水作用的基础上,克服气候变化带来的不确定性,调整灌区种植结构,发展经济型节水灌溉方式,增加节水灌溉面积,降低水稻占比,为进一步提高引黄灌区灌溉水利用效率提供依据。

## 参考文献:


[1] 韩振中, 裴源生, 李远华, 等. 灌溉用水有效利用系数测算与分析[J]. 中国水利, 2009(3): 11-14.

[2] 贾宏伟, 郑世宗. 灌溉水利用效率的理念、方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[3] 姬小敏. 宁夏灌溉水利用系数影响因素研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.

[4] Liu D, Guo D D, Fu Q, et al. Analysis on the influencing factors of effective utilization coefficient of irrigation water in irrigation districts based on Horton fractal theory[J]. Water Supply, 2019, 19(6): 1695-1703.

[5] 汤井婷, 周明球, 汪练练, 等. 灌溉水利用系数主要影响因子浅析: 以江苏省灌南县为例[J]. 中国水利, 2017(11): 25-28.

[6] Krueger E S, Yimam Y T, Ochsner T E. Human fac-

tors were dominant drivers of record low streamflow to a surface water irrigation district in the US southern Great Plains [J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 93-104.

[7] 王丽, 黄勇, 丁涛, 等. 基于主成分与多元线性回归分析的新疆兵团第八师灌溉用水有效利用系数影响因素[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(9): 100-105.

[8] 吴七斤, 顾太义, 王甫. 小型灌区灌溉水利用系数测定及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 244-248.

[9] 刘翠, 赵海滨, 靳晓颖, 等. 三义寨灌区灌溉水有效利用系数影响因素分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 140-144.

[10] 姬小敏, 唐莲, 张红玲. 宁夏汉延渠灌区灌溉水利用系数测算分析与评价[J]. 水资源开发与管理, 2021, 7(3): 29-33.

[11] Du J, Yang Z H, Wang H, et al. Spatial-temporal matching characteristics between agricultural water and land resources in Ningxia, northwest China[J]. Water, 2019, 11(7): 1460.

[12] 张丽, 张红玲. 宁夏2016年灌溉水利用系数测算分析与评价[J]. 中国水利, 2017(11): 21-24.

[13] Jia J S, Deng H B, Duan J, et al. Analysis of the major drivers of the ecological footprint using the STIRPAT model and the PLS method: A case study in Henan Province, China[J]. Ecological Economics, 2009, 68(11): 2818-2824.

[14] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on $CO_2$ emissions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(1): 175-179.

[15] 鲁钰, 赵银娣, 董霁红. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1354-1367.

[16] 许燕琳, 李子君. 基于DEA和STIRPAT模型的山东省农业生态效率评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 293-299.

[17] 郭承龙, 徐蔚蓝. 基于STIRPAT模型的江苏省碳排放影响因素研究[J]. 中国林业经济, 2022(1): 89-93.

[18] 关敏捷, 袁艳红, 冉木希, 等. 基于STIRPAT模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9): 48-55.

[19] 郭雅雯, 赵敏娟. 基于STIRPAT模型的陕西省耕地面积变化社会经济驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 197-201.

[20] Xiao X P, Guo H, Mao S H. The modeling mechanism, extension and optimization of grey GM (1, 1) model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(5/6): 1896-1910.

[21] 陈启军, 张仁贡, 段永刚. 基于改进型灰色系统理论的农田灌溉水有效利用系数预测[J]. 节水灌溉, 2020(6): 105-107.

[22] 贾浩, 王振华, 张金珠, 等. 基于主成分分析和Copula函数的灌溉水利用系数影响因素研究: 以新疆建设兵团第十二师中型灌区为例[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 167-175.

(下转第167页)