

▪ 区域农业水管理 ▪

文章编号: 1672-3317(2022)12-0123-08

# 江苏省农田灌溉水有效利用系数 年际变化及其影响因素分析

鞠艳<sup>1</sup>, 杨星<sup>1\*</sup>, 毕克杰<sup>2</sup>, 王怀川<sup>2</sup>, 张雯叶<sup>1</sup>

(1.江苏省水利科学研究院, 南京 210017;

2.无锡市水利局 农村水利与水土保持处, 江苏 无锡 214031)

**摘要:**【目的】分析灌溉水有效利用系数(IWEUC)的变化趋势及其影响因素。【方法】以江苏省为例,分析其IWEUC的变化趋势,同时从自然因素、种植结构、管理水平以及节水工程等4个方面因素,采用偏相关分析和主成分分析,探讨IWEUC的主要影响因素。【结果】①2014—2021年,江苏省不同规模与类型灌区的灌溉水有效利用系数呈稳步增长趋势,且走在全国前列;②从灌区规模来看,灌溉水有效系数及其增长趋势与灌区规模呈负相关关系,从不同水源类型来看,中型自流灌区的系数增速最快;③节水灌溉工程面积对系数的影响最大且极其显著( $P<0.01$ ),节水工程和自然因素的正贡献率较大。【结论】农业水价综合改革推动下的灌区节水制度建立健全以及工程管护水平的提升,对优化和提升灌区管理水平、促进灌溉水有效利用系数提高,具有重要作用。

**关键词:** 农田灌溉水; 有效利用系数; 主成分分析; 农业水价综合改革; 节水灌溉; 灌区

中图分类号: S274.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022102

OSID:



鞠艳, 杨星, 毕克杰, 等. 江苏省农田灌溉水有效利用系数年际变化及其影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 123-130.

JU Yan, YANG Xing, BI Kejie, et al. Annual Variation in Effective Utilization Coefficient of Irrigation Water and Its Determinants in Jiangsu Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 123-130.

## 0 引言

【研究意义】自2006年全国各省开展灌溉水有效利用系数测算以来,农田灌溉水有效利用系数已经成为我国评估农业用水成效和国家实行最严格水资源管理制度的重要指标,也是推进水资源双控行动、建设节水型社会的主要内容<sup>[1]</sup>。分析灌溉水有效利用系数动态变化趋势及其主要影响因素,对合理规划当地农田水利工程建设<sup>[2]</sup>,准确挖掘农业节水潜力,发展节水灌溉等具有积极意义<sup>[3]</sup>。同时为“十四五”期间,全国灌区节水相关的提档升级改造、灌溉总体规划或专项规划提供重要的基础数据。

【研究进展】目前针对灌溉水有效利用系数测算方法主要为首尾测算分析法<sup>[4]</sup>,在一定程度上减少了传统的连乘系数法测定的局限性,为灌溉水有效利用系数工作开展提供了有效途径<sup>[5]</sup>。近年来,国内外学者通过遥感蒸发模型<sup>[6]</sup>、灰色关联度分析<sup>[7]</sup>等改进方

法,对我国不同地区的灌溉水有效利用系数进行分析预测,结果显示:近年来我国灌溉水有效利用系数呈上升趋势,且具有一定的空间结构性<sup>[8]</sup>,其中,西北、华北地区的纯井灌区灌溉水有效利用系数高于南方和东南沿海<sup>[9]</sup>。受自然条件<sup>[10]</sup>、用水管理<sup>[11]</sup>、经济水平<sup>[12]</sup>等多方面因素的影响,不同空间尺度的灌溉水有效利用系数不同<sup>[13]</sup>,通常选用易量化实施的指标因子,基于主成分分析<sup>[14]</sup>、Horton定律<sup>[15]</sup>等研究表明,不同地区的系数影响因素程度存在差异<sup>[16]</sup>。同时,由于大部分因素难以获取数据资料,目前研究多以定性分析为主,定量分析较少。

【切入点】近年来,通过大中型灌区续建配套节水改造、高标准农田建设、新增千亿斤粮食田间工程等政府项目建设,以及农业水价综合改革制度建设,江苏省灌溉水有效利用效率一直走在全国前列,农业节水效益显著<sup>[17]</sup>。但针对江苏省灌溉水有效利用效率的变化趋势,综合剖析其主要影响因素的研究,相对较少。【拟解决的关键问题】为此,以江苏省为例,分析其农田灌溉水有效利用系数年际变化,并采用偏相关分析和主成分分析方法,剖析其影响因素,该项研究成果作为巩固地区节水成效的重要基础依据,既

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019043)

作者简介: 鞠艳(1996-),女,助理工程师,硕士,主要从事农田水利、水文水资源等方面研究。E-mail: 747030693@qq.com

通信作者: 杨星(1978-),男,教授级高工,博士,主要从事农田水利、水资源与水环境、海岸及近海工程等方面研究。E-mail: ydaxue@163.com

有助于进一步巩固和提升江苏省灌溉水利用效率,又可为其他地区灌溉水利用系数的有效提升提供参考。

## 1 研究区农业用水概况

### 1.1 江苏省农业用水需求

江苏省是全国粮食主要产区之一,2021年统计数据显示,江苏省粮食播种面积 542.75 万  $\text{hm}^2$ ,粮食产量达到 374.6 亿 kg,位居全国第 8 位;粮食产量 6 896.55  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,居主产省第 3 位。大中型灌区是其产粮核心区,每年粮食产量占全省总产量的 70% 以上。为此,确保江苏省粮食安全,大中型灌区是重要基础。截止 2021 年底,江苏省大、中型灌区 298 处,其中大型灌区 34 处,占全省耕地面积的 20% 以上,中型灌区 264 处,实际灌溉面积 94.62 万  $\text{hm}^2$ ,另有小型灌区 14 862 个,有效灌溉面积 148.33 万  $\text{hm}^2$ 。苏中苏北地区以大中型灌区为主,苏南地区以小型灌区为主,大型灌区分布如图 1 所示。

2014—2020 年江苏省水资源利用情况(表 1):总用水量为 452.7 亿~493.4 亿  $\text{m}^3$ ,平均用水量为 466.7 亿  $\text{m}^3$ ;农林牧渔等第一产业用水量 266.6 亿~303.1 亿  $\text{m}^3$ ,平均用水量为 281.5 亿  $\text{m}^3$ ,其中农业灌溉平

均用水量 247.0 亿  $\text{m}^3$ ,占总用水量的 52.9%;第二产业和第三产业平均用水量为 126.1 亿、17.1 亿  $\text{m}^3$ ;平均居民生活用水和城镇环境用水分别为 39.0 亿、2.8 亿  $\text{m}^3$ 。江苏省农业灌溉用水需求量很大,但本地水资源紧缺,统计年份中,80% 年份出现了用水缺口问题(图 2)。最大年度缺口出现在 2019 年,达到 261.7 亿  $\text{m}^3$ ,2013 年也达到了 215.4 亿  $\text{m}^3$ ,最小缺口年份 2011 年,也达到了 63.8 亿  $\text{m}^3$ 。用水量缺口较大,单纯依靠本地水资源,农业灌溉用水不能得到有效保障,因此提升灌溉用水效率意义重大。

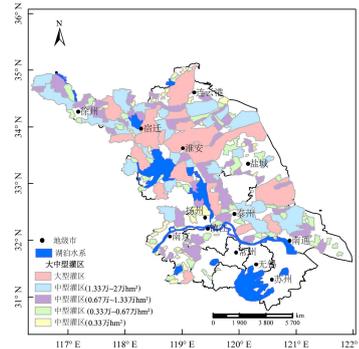


图 1 江苏省大型灌区分布图

Fig.1 Distribution of large irrigation districts in Jiangsu Province

表 1 2014—2020 年江苏省水资源利用情况

Table 1 Water resources utilization in Jiangsu Province from 2014 to 2020

亿  $\text{m}^3$

年份	总用水量	第一产业			第二产业用水	第三产业用水	居民生活用水	城镇环境用水
		用水量	农业灌溉	农业灌溉占比总用水量/%				
2014	480.7	297.8	259.5	54	129.5	14.9	35.8	2.7
2015	460.6	279.1	242.8	52.7	127.3	15.6	36.6	2
2016	453.2	270.1	237.2	52.3	126.6	16.3	37.5	2
2017	465.9	280.6	247.8	53.2	127	17.5	38.7	2.1
2018	460.2	273.4	233.2	50.7	125.8	19.3	39.2	2.5
2019	493.4	303.1	268.1	54.3	125.4	20.5	40.6	3.8
2020	452.7	266.6	240.3	53.1	121.2	15.8	44.3	4.8
平均	466.7	281.5	247.0	52.9	126.1	17.1	39.0	2.8

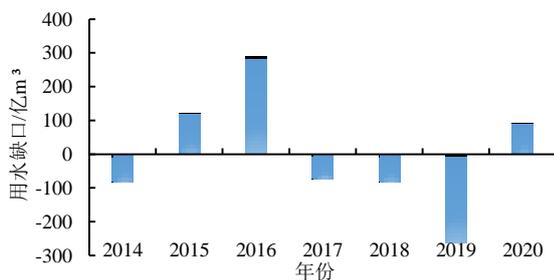


图 2 江苏省年度用水量缺口

Fig.2 Annual water consumption gap in Jiangsu Province

### 1.2 江苏省灌溉水有效利用系数提升潜力

丰水地区如何提升灌溉水利用率是江苏省水价综合改革的难点。深挖节水潜力,提升干群节水意识是关键。作为丰水地区的江苏省,人均本地水资源量 455  $\text{m}^3$ ,不足全国人均占有量的 20%,相对缺水。全省本地水资源保障能力不足,在 2014—2020 年间,

80% 的年份需要引用过境水,调水任务繁重,用水成本高。灌区节水改造发展慢,对节水灌溉特别是高效节水灌溉的总体投入尚显不足,工程标准偏低,配套程度不足,管理粗放。各类节水制约因素影响下,2014 年,全省灌区农田灌溉水有效利用系数大型仅为 0.539、中型仅为 0.547、小型为 0.641,平均 0.590,与江苏省“十四五”“骨干渠系建筑物配套率、完好率达到 90% 以上;灌溉水利用系数大型灌区不低于 0.6、中型灌区不低于 0.63”的灌区现代化建设目标存在明显的差距,节水潜力很大,因此加快灌区现代化节水配套和改造,提升灌溉水有效利用率极为迫切。

## 2 研究方法

### 2.1 灌溉水有效利用系数

根据《全国农田灌溉水有效利用系数测算分析技

术指导细则》和《灌溉水系数应用技术规范》(DB32/T 3392—2018)要求,结合江苏省实际情况,截至2021年共选择了225个样点灌区,其中大型灌区34个,中型灌区41个,小型灌区150个,观测作物种类主要为水稻,采用首尾测算分析法<sup>[5]</sup>计算样点灌区的灌溉水有效利用系数,计算式为:

$$\eta_{\text{样}} = \frac{W_{\text{样净}}}{W_{\text{样毛}}} \quad (1)$$

式中:  $\eta_{\text{样}}$  为样点灌区灌溉水有效利用系数;  $W_{\text{样净}}$  为样点灌区净灌溉用水量 ( $\text{m}^3$ );  $W_{\text{样毛}}$  为样点灌区毛灌溉用水量 ( $\text{m}^3$ )。

依据分类计算,逐级汇总的原则,分别计算大、中、小型灌区灌溉水有效利用系数和毛灌溉用水量,通过加权平均计算江苏省的灌溉水有效利用系数<sup>[2]</sup>,计算式为:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{大}}W_{\text{大}} + \eta_{\text{中}}W_{\text{中}} + \eta_{\text{小}}W_{\text{小}}}{W_{\text{大}} + W_{\text{中}} + W_{\text{小}}} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为江苏省的灌溉水有效利用系数;  $\eta_{\text{大}}$ 、 $\eta_{\text{中}}$ 、 $\eta_{\text{小}}$  分别为江苏省大、中、小型灌区的灌溉水有效利用系数;  $W_{\text{大}}$ 、 $W_{\text{中}}$ 、 $W_{\text{小}}$  分别为江苏省大、中、小型灌区的年毛灌溉用水量 ( $\text{m}^3$ )。

### 2.2 指标体系建立

为了全面客观选取影响因素,以整体最优化为目标,综合考虑江苏省的自然因素、种植结构、管理因素以及节水工程等因素<sup>[13]</sup>,选取了以下9个影响因子进行量化分析,建立了影响因素的指标体系,如表2所示。

表2 灌溉水有效利用系数影响因子

Table 2 Influencing factors of IWEUC

主要类型	影响因素	指标变量	数据来源
自然因素	生育期降雨量/mm	$X_1$	《江苏省水资源公报》
	生育期蒸散发量/mm	$X_2$	
	水稻种植比/%	$X_3$	《江苏省统计年鉴》
种植结构	综合灌溉定额/ $(\text{m}^3 \text{ hm}^{-2})$	$X_4$	《江苏省农业灌溉用水定额》
	实际灌溉面积/万 $\text{hm}^2$	$X_5$	
管理因素	亩均毛灌溉用水量/ $(\text{m}^3 \text{ hm}^{-2})$	$X_6$	各地灌区统计数据
	节水灌溉工程面积/万 $\text{hm}^2$	$X_7$	
节水工程	节水灌溉工程投资/万元	$X_8$	
	渠道衬砌率/%	$X_9$	

### 2.3 主成分分析 (PCA)

通过对各影响因素进行标准化处理,计算其相关系数矩阵,由于本文选取的指标较多,相关关系复杂,其信息上有重叠,因此选择主成分分析方法。该方法是将多个变量通过降维处理的方法,重新组合为少量的几个综合指标,计算其主成分特征值及贡献率,根

据特征值大于1且累积贡献率大于85%的选取要求<sup>[14]</sup>,选择出几个主成分来揭示数据的内部结构,计算式为:

$$F_p = a_{1i}Z_{x_1} + a_{2i}Z_{x_2} + \dots + a_{pi}Z_{x_p} \quad (3)$$

式中:  $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$ ,  $\dots$ ,  $a_{pi}$  为变量的特征向量;  $Z_{x_1}$ ,  $Z_{x_2}$ ,  $\dots$ ,  $Z_{x_p}$  为变量标准化后的值;  $F_p$  为第  $p$  个主成分,通常情况下第一主成分方差较大,  $F_1$  中包含信息越多。

## 3 结果与分析

### 3.1 江苏省灌溉水有效利用系数变化分析

从全国及江苏省2011—2020年的灌溉水有效利用系数(图3)可以发现,自“最严格水资源管理制度”实施以来,全国及江苏省灌溉水有效系数呈逐年增加的趋势,其中全国系数自0.51增长到0.565,增加率为10.78%,江苏省系数自0.567增加到0.616,增幅为8.64%。而灌溉水有效利用系数与当地经济发展水平有一定关系,江苏省作为经济相对发达地区,逐年的系数均高于全国平均水平的9%~11.6%左右,但2016年后与全国差距在逐步减小。

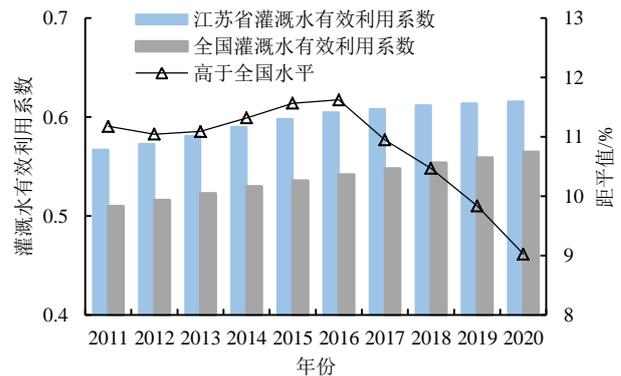


图3 全国及江苏省灌溉水有效利用系数及其变化速率

Fig.3 IWEUC and its trend of China and Jiangsu Province

从增幅变化来看(图3、图4),2011—2014年,江苏省灌溉水有效利用系数增幅呈逐年增长趋势,自2016年开始,系数增幅在逐渐减缓,前期系数提升高于中后期。由于前期阶段,全省大力推广控制灌溉等节水灌溉模式,加之农业水价综合改革的逐步推进,减少了农业用水的浪费,大大提升了灌溉水使用效率,系数提升较快;中后期随着农业水价改革基本完成,农业灌溉用水计量设施建设不断完善和管护水平不断提升,节水灌溉水平进一步提高,系数增长稳定。

从不同规模灌区灌溉水有效利用系数分析可知(图5),2014—2021年同一规模与类型灌区的系数呈稳步增长趋势,系数与灌区规模呈负相关关系,即  $\eta_{\text{大}} < \eta_{\text{中}} < \eta_{\text{小}}$ , 且  $\eta_{\text{中型 } 15-30} < \eta_{\text{中型 } 5-15} < \eta_{\text{中型 } 1-5}$ 。相较于中小型灌区,大型灌区的渠系的级数越多,输水距离

越长, 单位面积的渠道渗漏量越大, 同时, 大型灌区的灌溉周期较长, 河道滞留水量偏多, 实际渗漏时间较长, 沿程耗水损失量偏多<sup>[18]</sup>, 系数相对偏小。从逐年增加趋势来看, 中小型灌区的系数增长趋势高于大型灌区, 由于中小型灌区面积较小, 灌区管理难度较小, 且中小型灌区的单位面积节水投入较多, 2021年江苏省中、小型灌区单位面积投入分别为2759元/hm<sup>2</sup>和3013元/hm<sup>2</sup>, 高于大型灌区的2624元/hm<sup>2</sup>, 节水工程完善率较高, 节水效益发挥较快, 使得系数增长趋势与灌区规模也呈负相关关系<sup>[20]</sup>。

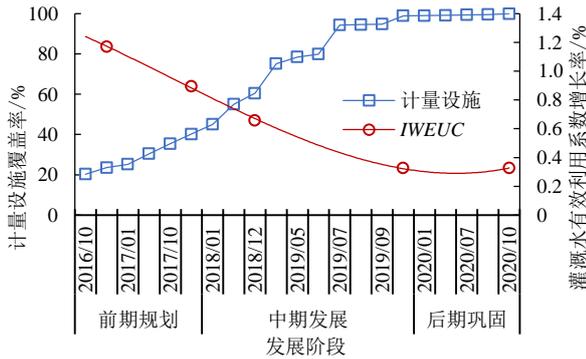


图4 江苏省计量设施建设进度及灌溉水利用系数增长率对比

Fig.4 Comparison between construction progress of metering facilities and increasing rate of IWEUC

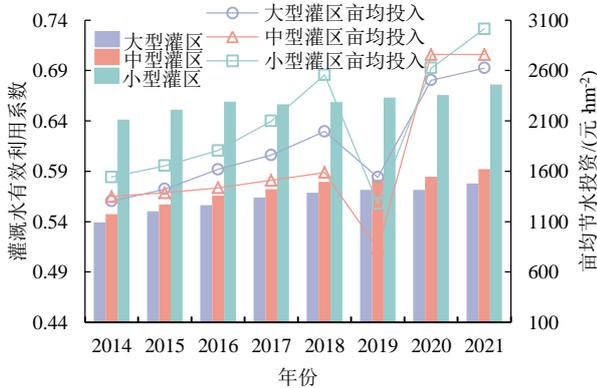


图5 江苏省不同规模灌区灌溉水有效利用系数及亩均节水投资

Fig.5 IWEUC of different scale irrigation districts and water-saving investment in Jiangsu Province

将江苏省灌区按照水源类型分为提水灌区和自流灌区, 图6为不同水源类型灌区的灌溉水有效利用系数箱型图, 从图可以看到, 大型提水灌区的系数差

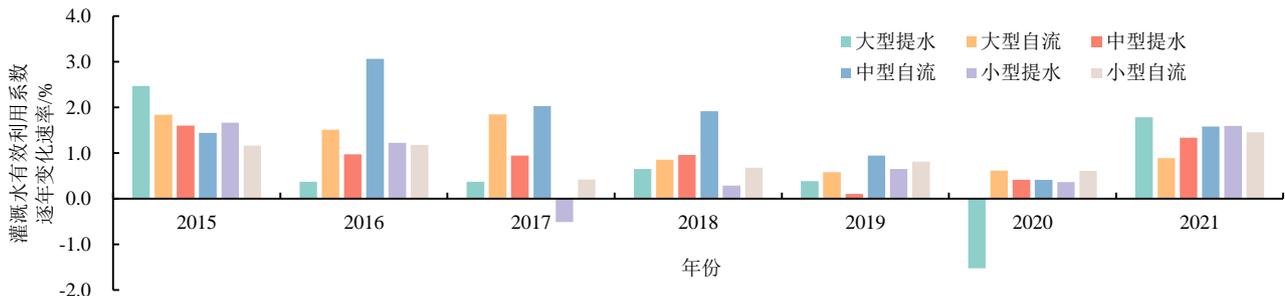


图7 江苏省不同水源类型灌区灌溉水有效利用系数逐年变化速率

Fig.7 Annual change rate of IWEUC of different water source irrigation districts

异性较小, 变幅最小; 中型自流灌区的系数变幅最大。一般提水灌区高于自流灌区, 提水灌区一般采用泵站抽水方式进行灌溉, 成本较高, 灌溉管理措施相对完善, 在一定程度上避免了过度灌溉的情况<sup>[21]</sup>; 而全省大部分自流灌区水源条件相对较好, 来自京杭运河和苏北灌溉总渠的水资源丰富且取水方便, 造成农户节水意识不强, 用水效率相对较低, 同时, 自流灌区一般在无连续降水情况下才实行灌溉, 此时渠道水位较低, 灌溉前需要抬高水位, 灌溉结束后渠道中的滞留水较多, 调查研究表明, 滞留在干、支渠的耗水损失量占总灌溉用水量的12%左右, 干旱年份比例更高<sup>[22]</sup>, 因而造成自流灌区的灌溉水有效利用系数较小。

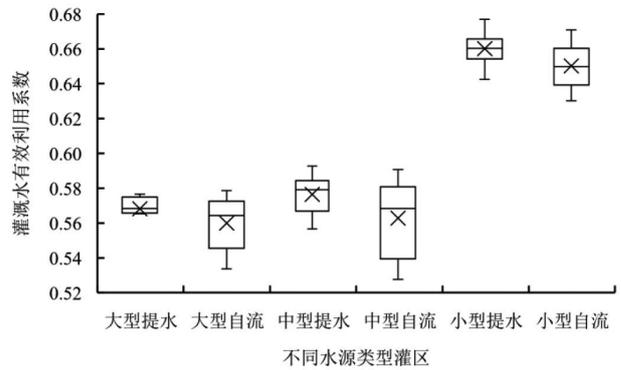


图6 江苏省不同水源类型灌区灌溉水有效利用系数箱型

Fig.6 Boxplot of IWEUC of different water source irrigation districts

如图7所示, 2014—2021年中型自流灌区的系数增速最快, 增幅为11.94%; 大型提水灌区的系数增速最慢, 为4.53%。一般而言, 相同水源类型灌区灌溉水有效利用系数总体呈增长趋势, 但2017年小型自流灌区和2020年大型提水灌区的系数呈负增长, 由于近年来新增了4处大型提水灌区, 前期未实施相应的节水配套改造工程, 基础条件较差, 节水效益发挥较慢。中型自流灌区投资力度相对较大, 且逐步实行农业用水许可, 对灌区的用水总量进行严格控制, 灌溉水利用效率提高较快。

### 3.2 灌溉水有效利用系数影响因素分析

灌溉水有效利用系数的高低受多种因素的综合影响，与灌区自然条件、土壤类型、规模与水源类型、工程投入、管理水平、农户节水意识等有着密切关联<sup>[19]</sup>，从系数和影响因素的偏相关分析（表 3）可以发现，灌区的节水灌溉工程面积对系数的影响极为显著（ $P<0.01$ ），生育期降雨量、实际灌溉面积和节水

灌溉工程投资的影响显著（ $P<0.05$ ），其他因素与灌溉水有效利用系数正相关，但影响不显著。其中，节水工程与系数相关性最好，主要原因：当灌区的实际灌溉面积越大，节水灌溉面积越多，节水灌溉工程发展和管理水平越好，系数越大。其次，由于降水因素的影响，改变作物的毛灌溉用水量，导致灌溉水有效利用系数有所差异。

表 3 灌溉水有效利用系数与影响因素的偏相关分析

Table 3 Partial correlation between IWEUC and its influencing factors

影响因素	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>
偏相关系数	0.453*	0.603	0.716	0.695	0.598*	0.272	0.926**	0.604*	0.113

注 \*为  $P<0.05$ ，\*\*为  $P<0.01$ 。

基于以上分析，为探究影响灌溉水有效利用系数的主要因素，通过主成分分析方法进行研究，根据 KMO 和 Bartlett 球度检验，KMO 值大于 0.5 且显著性水平小于 0.05，表明所选择的代表性变量适合。从表 4 的初始特征值和贡献率可以看到，前 3 成分的特征值均大于 1，且累积贡献率达到 96.10%，主成分提取结果合理，基本能够反映灌溉水有效利用系数的大部分信息。其中，第 1 主成分主要反映了灌区的自然因素和节水工程因素的影响，累积贡献率达到了 60.64%，第 2 主成分主要反映了灌区的管理因素和节水工程影响，其累积贡献率达到 84.76%，第 3 主成分主要反映灌区的种植结构影响。

表 4 特征值及贡献率

Table 4 Eigenvalue and contribution rate

成分	初始特征值			提取荷载平方和		
	特征值	方差百分比/%	累积/%	特征值	方差百分比/%	累积/%
1	5.408	60.642	60.642	5.408	60.642	60.642
2	2.171	24.122	84.764	2.171	24.122	84.764
3	1.110	11.334	96.098	1.110	11.334	96.098
4	0.625	1.640	97.738	-	-	-
5	0.224	1.225	98.963	-	-	-
6	0.133	0.459	99.422	-	-	-
7	0.027	0.355	99.777	-	-	-
8	0.013	0.120	99.897	-	-	-
9	0.005	0.103	100.000	-	-	-

对前 3 成分进一步分析，综合表 4 和表 5 可以看出，第 1 主成分中生育期降雨量（X<sub>1</sub>）、生育期蒸散发量（X<sub>2</sub>）和节水灌溉工程投资（X<sub>8</sub>）荷载较大，且都有着较大的正贡献率，其中，节水灌溉投资荷载最大。近年来，江苏省各级部门不断加大农田水利投入，2021 年用于灌区改造的资金投入较上一年增加了 17.34 亿元，通过标准化建设，灌区的渠道衬砌防渗能力提高，灌溉水利用效率也在逐步提升，节水工程建设对灌溉水有效利用系数有很高的正影响。

表 5 主成分荷载

Table 5 Principal component loads

影响因素	主成分		
	1	2	3
X <sub>1</sub>	0.377	-0.138	0.359
X <sub>2</sub>	0.415	-0.102	0.024
X <sub>3</sub>	-0.212	-0.410	0.582
X <sub>4</sub>	-0.412	0.054	0.253
X <sub>5</sub>	-0.274	0.444	-0.262
X <sub>6</sub>	-0.345	-0.344	-0.223
X <sub>7</sub>	0.289	0.497	-0.059
X <sub>8</sub>	0.421	-0.132	0.063
X <sub>9</sub>	-0.130	0.469	0.085

第 2 主成分中实际灌溉面积（X<sub>5</sub>）、节水灌溉工程面积（X<sub>7</sub>）和渠道衬砌率（X<sub>9</sub>）荷载较大，这些因素主要反映灌区的管理水平和节水工程状况，且均具有较大的正贡献率。研究表明，灌区的灌排技术和灌溉耕作等因素对作物需水量有一定的影响，当实际灌溉面积较大时，通过管理使渠道的灌溉水量分配较为均匀<sup>[22]</sup>。节水灌溉面积增加主要表现为喷灌、微灌、渠道防渗等措施的实施，提升了渠道衬砌率，有效减少田间渗漏和渠道渗漏，提高了灌溉水有效利用系数。

第 3 主成分中水稻种植比（X<sub>3</sub>）、综合灌溉定额（X<sub>4</sub>）和生育期降雨量（X<sub>1</sub>）荷载较大，主要反映灌区的种植结构状况，不同的灌区的种植结构和自然条件的变化会相应地改变人为管理和灌溉习惯，对灌溉水有效利用系数存在直接或间接的影响。

### 3.3 提升灌溉水有效利用系数的建议

近年来江苏省灌溉水有效利用系数稳步提升，反映了全省灌区建设管理水平以及节水灌溉实施取得的成果，结合本文的影响因素分析结果，对后续工作改进提出以下建议：

1) 加大节水灌溉投资。有针对性地对大、中、小型灌区开展不同的工程投入，不断增加对大、中型灌区节水配套改造工程投资，增加小型农田水利重点县项目投资，提高工程质量，逐年稳步提高江苏省系数，发挥高效节水灌溉效益。

2) 加强节水工程建设。因地制宜选择合适的节水输水和灌溉技术,扩大节水灌溉工程面积,对于大、中型灌区,要依托灌区布设自动量水设施和土壤墒情监测设施,完善灌溉水用水计量体系,逐步实现农业灌溉数据信息化,提升灌溉水利用效率;小型灌区投入新型的高效节水工程,改造土渠、石渠等老旧的输水管道,采用先进的低压管灌、提升渠道衬砌率,减少渗漏损失,提高灌溉水利用系数。

3) 提升灌区管理水平。通过建立“灌区+用水者协会+专业化服务组织”的管理体系,逐步形成政策引导、社会化服务支持、用水户自主管理的运行机制,完善工程管护组织建设,提高管理人员业务水平,深化落实农业水价综合改革成果,继续推进农民用水协会管理,调动农民参与管理的积极性,提高用户的节水意识,对系数提升具有积极影响。

## 4 讨论

农田灌溉水有效利用系数是衡量农业用水效率的重要指标,明晰江苏省农田灌溉水有效利用系数的年际变化,综合剖析其主要影响因素,有助于地区农田灌溉用水效率提升、农业节水潜力挖掘和灌区总体规划合理制定。本研究认为灌溉水有效利用系数与当地经济发展水平有一定关系,江苏省作为经济相对发达地区,逐年灌溉水有效利用系数均高出全国平均水平 9%~11.6%左右,这与刘春成等<sup>[13]</sup>研究结论一致;从变化速率来看,江苏省灌溉水有效系数呈逐年增加的趋势,且前期灌溉水有效利用系数提升高于中后期,这与王小军等<sup>[11]</sup>研究结论基本吻合;江苏省不同规模与类型灌区的灌溉水有效利用系数分布,基本符合大、中、小型灌区依次升高的规律,这与吉玉高等<sup>[2]</sup>、张艳芬等<sup>[24]</sup>的研究结论一致。本文结合农业水价改革成果中计量设施覆盖率变化,进一步分析了灌溉水有效利用系数增速变缓的诱因,这是对前人成果进行了补充。

农田灌溉水有效利用系数受多种因素的综合影响,与灌区自然条件、土壤类型、规模与水源类型、工程投入、管理水平、农户节水意识等有着密切关联。本研究认为,灌区的节水灌溉工程面积对灌溉水有效利用系数的影响极其显著( $P<0.01$ ),生育期降雨量、实际灌溉面积和节水灌溉工程投资的影响显著( $P<0.05$ ),基本符合管升明等<sup>[12]</sup>、贾浩等<sup>[14]</sup>的研究结论;节水灌溉工程投资、节水灌溉工程面积和生育期降雨量的主成分荷载较大,且均有较大的正贡献率,基本符合孙龙等<sup>[20]</sup>、朱福民等<sup>[21]</sup>、张威等<sup>[23]</sup>的研究结论。本文结合单因子分析和综合因子分析了影响江苏省灌溉水有效利用系数的主要因素,并从加大节水

灌溉投资、加强节水工程建设和提升灌区管理水平 3 个方面,分别针对江苏省大、中、小型灌区的灌溉水有效利用系数提升给出了建议,目前尚未查阅到较多综合分析针对江苏省灌溉水有效利用系数影响因素及其对策的相关文献,这是对前人成果的补充。

此外,灌溉水有效利用系数的影响因素比较复杂,本文仅从自然因素、种植结构、管理因素以及节水工程这 4 个方面,选取了 9 种指标进行分析,并未充分考虑到土壤类型、农民节水意识、社会经济发展指标等因素的影响,研究局限性较大。同时,江苏省地域广阔,横跨 13 个地级市,省内发展并不均衡,不同地区的经济发展水平、灌溉习惯也不尽相同,导致不同地级市的灌溉水有效利用系数差异明显。基于上述原因,后续研究应通过多源数据和模型分析,进一步研究江苏省的灌溉水有效利用系数的差异性和影响因素,形成科学合理的分析方法,为江苏省的农业可持续发展提供参考。

## 5 结论

1) 较全国而言,江苏省灌溉水利用率较高,灌溉水有效利用系数均呈逐年增加的趋势,2016 年江苏省农业水价改革全面完成,农业灌溉用水计量设施建设不断完善,系数增幅逐渐减缓。

2) 2014—2021 年江苏省不同规模与类型灌区的灌溉水有效利用系数呈稳步增长趋势,从灌区规模来看,系数及其增长趋势与灌区规模呈负相关关系;从不同水源类型来看,中型自流灌区的系数增速最快,大型提水灌区的系数增速最慢。

3) 灌区的节水灌溉工程面积对灌溉水有效利用系数的影响极其显著( $P<0.01$ ),节水灌溉工程投资、节水灌溉工程面积的主成分荷载较大,且均有较大的正贡献率。优化灌区管理水平,加强节水灌溉工程建设,是提升灌溉水有效利用系数的主要方法。

### 参考文献:

- [1] 杨芳,郑江丽,李兴拼. 省级灌溉水有效利用系数测算工作评估方法探讨[J]. 节水灌溉, 2016(9): 129-132.  
YANG Fang, ZHENG Jiangli, LI Xingpin. Exploring the evaluation method of provincial irrigation water effective utilization coefficient measurement[J]. Water Saving Irrigation, 2016(9): 129-132.
- [2] 吉玉高,张健. 江苏省农田灌溉水有效利用系数测算分析研究[J]. 中国水利, 2016(11): 13-15, 29.  
JI Yuga, ZHANG Jian. Calculation and analysis on effective utilization coefficients of irrigation water in Jiangsu Province[J]. China Water Resources, 2016(11): 13-15, 29.
- [3] 李睿冉,刘旭. 国内外灌溉水利用系数研究进展[J]. 节水灌溉, 2011(11): 56-58.  
LI Ruiran, LIU Xu. Advance of research on utilization coefficient of irrigation water[J]. Water Saving Irrigation, 2011(11): 56-58.

- [4] 马文博, 赖斌, 栾清华, 等. 邯郸东部平原田间井灌灌溉水有效利用系数测定与分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 45-49.  
MA Wenbo, LAI Bin, LUAN Qinghua, et al. Measurement and analysis of coefficients of irrigation water utilization in the eastern plain of Handan[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S2): 45-49.
- [5] 崔远来, 谭芳, 王建漳. 不同尺度首尾法及动水法测算灌溉水利用系数对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 5-10.  
CUI Yuanlai, TAN Fang, WANG Jianzhang. Comparison of irrigation efficiency under different scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 5-10.
- [6] 穆贵玲, 郑江丽, 王行汉, 等. 基于遥感蒸发模型的净灌溉水量测算空间尺度研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 26-32.  
MU Guiling, ZHENG Jiangli, WANG Xinghan, et al. Using remote sensing to estimate evapotranspiration from terrestrial ecosystems at different scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 26-32.
- [7] 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.  
CHEN Qijun, ZHANG Rengong, DUAN Yonggang. Prediction of irrigation water effective utilization coefficient based on improved grey system theory[J]. Water Saving Irrigation, 2020(6): 105-107.
- [8] 冯保清. 全国大型灌区灌溉用水有效利用系数空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 42-44.  
FENG Baoqing. Spatial variability of irrigation efficiency of nationwide large-scale irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 42-44.
- [9] 冯保清, 崔静. 全国纯井灌区类型构成对灌溉水有效利用系数的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 50-53.  
FENG Baoqing, CUI Jing. Influence analysis of irrigation area composition of well-irrigation district on irrigation water use efficiency in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 50-53.
- [10] 张茂堂, 蒋有能. 渠道水有效利用系数测试研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 69-73.  
ZHANG Maotang, JIANG Youneng. Water utilization coefficient of channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S2): 69-73.
- [11] 王小军, 张强, 易小兵. 广东省灌溉水有效利用系数年度变化与影响因素关系分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 64-68.  
WANG Xiaojun, ZHANG Qiang, YI Xiaobing. Annual variation of irrigation water effective utilization coefficient and analysis of influencing factors in Guangdong Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(1): 64-68.
- [12] 管升明, 刘方平, 靳伟荣. 江西省农田灌溉水有效利用系数影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 104-106, 110.  
GUAN Shengming, LIU Fangping, JIN Weirong. An analysis of the influence factors on the effective utilization coefficient of irrigation water in Jiangxi Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11): 104-106, 110.
- [13] 刘春成, 朱伟, 庞颖, 等. 区域灌溉水利用率影响主因分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(4): 40-43.  
LIU Chuncheng, ZHU Wei, PANG Ying, et al. Analysis on the key factor of irrigation water use efficiency in different districts[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(4): 40-43.
- [14] 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, 233.  
JIA Hao, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Study on factors influencing irrigation water use coefficient based on principal component analysis and Copula function: Take the medium-sized irrigation area of the 12th Division of Xinjiang Construction Corps as an example[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 167-175, 233.
- [15] 郭丹丹, 张世伟, 吴劲, 等. 基于 Horton 分形的灌区灌溉水有效利用系数影响因素分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 436-444.  
GUO Dandan, ZHANG Shiwei, WU Jin, et al. Factors influencing effective utilization coefficient of irrigation water as determined with Horton fractal[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(3): 436-444.
- [16] 冯保清. 我国不同分区灌溉水有效利用系数变化特征及其影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2013(6): 29-32, 35.  
FENG Baoqing. Characteristics of the change of effective use coefficient of irrigation water in different sub-districts of China and the analysis of its influencing factors[J]. Water Saving Irrigation, 2013(6): 29-32, 35.
- [17] 侯苗, 蒲永伟, 杨星, 等. 江苏农业水价综合改革验收办法评价与改革“回头看”指标构建[J]. 中国农村水利水电, 2022: 1-12.  
HOU Miao, PU Yongwei, YANG Xing, et al. Evaluation of the acceptance method for integrated agricultural water pricing reform in Jiangsu and construction of “looking back reform performance” indicators[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022: 1-12.
- [18] 倪深海, 周凌辉, 华幸超, 等. 平原水网地区农田灌溉水有效利用系数测算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 28-30, 36.  
NI Shenhai, ZHOU Linghui, HUA Xingchao, et al. Methods of measuring irrigation water effective utilization coefficient in the plain water network area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(2): 28-30, 36.
- [19] 蔡晓东, 陈新明, 李普超. 咸阳市农田灌溉水有效利用系数测算与分析[J]. 节水灌溉, 2018(1): 82-85, 89.  
CAI Xiaodong, CHEN Xinming, LI Puchao. Calculation and analysis of effective utilization coefficient of farmland irrigation water in Xianyang[J]. Water Saving Irrigation, 2018(1): 82-85, 89.
- [20] 孙龙, 于宇婷, 杨秀花, 等. 2015—2019年巴彦淖尔市农田灌溉水有效利用系数年际变化趋势及影响因素分析[J]. 内蒙古水利, 2021(4): 66-68.  
SUN Long, YU Yuting, YANG Xiuhua, et al. Analysis of irrigation water effective utilization coefficient and its influencing factors in Bayanzhuoer from 2015 to 2019[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2021(4): 66-68.
- [21] 朱福民, 李博. 兴安盟农田灌溉水有效利用系数测算分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S1): 102-106.  
ZHU Fumin, LI Bo. Calculation and analysis of effective utilization coefficient of irrigation water in Xing'an league[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S1): 102-106.
- [22] 郭相平, 王敏, 陈盛, 等. 江苏省稻作区低压管道灌溉适宜控制规模研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 28-35.  
GUO Xiangping, WANG Min, CHEN Sheng, et al. Study on suitable control scale of low pressure pipeline irrigation in rice growing area of Jiangsu Province full text replacement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 28-35.
- [23] 张威, 邵景安, 刘毅, 等. 重庆市不同规模灌区农灌水有效利用系数测算与对比研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 43-52.  
ZHANG Wei, SHAO Jingan, LIU Yi, et al. A comparative study of the effective utilization coefficients of irrigation water in irrigation areas of different scales in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(3): 43-52.
- [24] 张艳芬, 戈毅, 王剑波, 等. 2013—2017年天津市农田灌溉水有效利用系数年际变化规律分析[J]. 海河水利, 2019(3): 65-67, 70.  
ZHANG Yanfen, GE Yi, WANG Jianbo, et al. Inter-annual variation of effective utilization coefficient of irrigation water in Tianjin from 2013 to 2017[J]. Haihe Water Resources, 2019(3): 65-67, 70.

## Annual Variation in Effective Utilization Coefficient of Irrigation Water and Its Determinants in Jiangsu Province

JU Yan<sup>1</sup>, YANG Xing<sup>1\*</sup>, BI Kejie<sup>2</sup>, WANG Huaichuan<sup>2</sup>, ZHANG Wenye<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Rural Water and Soil Conservation Department of Wuxi Water Conservancy Bureau, Wuxi 214031, China)

**Abstract:** **【Objective】** Improving utilization efficacy of irrigation water (*IWEUC*) is part of sustainable agriculture development. Understanding its determinations and variation is essential to achieving this goal and improving water resources management. In this paper, we analyze the annual variation in *IWEUC* in Jiangsu province as well as its determinants. **【Method】** The analysis considers natural factors, planting structure, management level, and water-saving engineering projects. The factors that impact *IWEUC* most are investigated using partial correlation analysis and principal component analysis. **【Result】** ① *IWEUC* in Jiangsu province is higher than the rest of the country and does not show insignificant increase from 2014 to 2021. *IWEUC* and its change is negatively correlated to the size of irrigation districts. ② In terms of irrigation water sources, the *IWEUC* in gravity-driven irrigation districts has increased more than in other irrigation districts. ③ The areas of water-saving engineering projects in an irrigation district impacts *IWEUC* significantly ( $P < 0.01$ ). The contribution of water-saving engineering projects and natural factors is more than that from others. **【Conclusion】** Establishing and improving water conservation system and management and reforming water pricing plays an essential role in optimizing management of irrigation districts, strengthening construction of water-saving engineering projects, and improving *IWEUC* in Jiangsu province.

**Key words:** irrigation water; effective utilization coefficient; principal component analysis; integrated agricultural water pricing reform; water-saving irrigation; irrigation district

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 113 页)

## Hydrodynamic Flow and Sediment Transport in Bended River with the Presence of Islands

LIU Mingyang<sup>1</sup>, LI Chunguang<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Wenjuan<sup>1</sup>, LYU Suiju<sup>1</sup>, QIAO Qiao<sup>1</sup>

(1. Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** **【Objective】** Some rivers have islands. Their soil composition and geometrical shape influence water flow and sediment transport in the rivers. The purpose of this paper is to study the impact of flow rate and flowing duration on sediment erosion and hydrodynamic flow in a bended river. **【Method】** The study is based on two-dimensional average shallow water flow and sediment transport over riverbeds. Both water flow and sediment transport are solved using the MIKE 21. The model is applied to the section of Yellow River at Yongfeng Ferry in Ningxia province, where there are several small islands. **【Result】** When water flows for 3 hours at rate of  $1\ 545\ \text{m}^3/\text{s}$ , sediment erosion reduces water velocity by  $0.06\sim 0.27\ \text{m/s}$  and water depth by  $0.02\sim 0.32\ \text{m}$ , compared with the results calculated without considering sediment erosion. Continuous erosion tends to stabilize water depth and flow rate. The deepest erosion depth is  $0.16\ \text{m}$  after water flows for 3 hours at rate  $1\ 545\ \text{m}^3/\text{s}$ , and this increases to  $0.24\ \text{m}$  after the flow is increased to 6 hours at the same rate; their associated maximum deposition depth is  $0.12\ \text{m}$  and  $0.23\ \text{m}$  respectively. With the increase in flow rate and flow duration, the riverbed stabilizes, though erosion depth and deposition thickness continue to change. **【Conclusion】** Sediment erosion increases the stability of hydrodynamic flow in the river, and the riverbed morphology does not change after flow rate exceeds a critical rate. These simulated results are consistent and can be used to help improve river management.

**Key words:** Yellow River; sediment; riverbed erosion; continuous bend; numerical simulation

责任编辑: 韩洋