

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

贾浩^{1,2},王振华^{1,2},张金珠¹,李文昊¹,任作利¹,贾哲诚¹
(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘 要:以新疆生产建设兵团第十二师中型灌区为研究对象,采用首尾法测算 2018 年和 2019 年 4 个样点灌区的灌溉水利用系数,在采用主成分分析法对指标体系降维处理的基础上,用 Copula 函数构建 PCA-Copula 评价分析方法,对灌溉水利用系数各影响因素的影响程度和影响规律进行计算分析。结果表明:两年测算数据表明,4 个样点灌区灌溉水利用系数都在 0.63 以上,且最大值达到 0.668,分别高于同期全疆、全国平均水平 5.05%、10.15%;主成分分析得出,渠道衬砌率(0.944)、滴灌灌溉面积比(0.746)、作物需水量(0.635)、实际灌溉面积(0.734)等都具有超过 60%的正贡献率,而葡萄种植比(-0.586)和灌区毛灌溉用水量(-0.645)等具有超过 58%的负贡献率。利用 PCA-Copula 分析评估方法得出,作物种植比例和节水灌溉工程状况对十二师中型灌区灌溉水有效利用系数影响显著($P<0.05$),其中葡萄净灌溉定额和灌区毛灌溉用水量对灌溉水有效利用系数的影响极其显著($P<0.01$),相关系数分别为 0.875、0.742,同时利用 Spearman 等级相关系数检验法和线型回归来检验 PCA-Copula 评价法与熵值法的密切程度,检验结果其相关系数分别为 0.87($P<0.05$)和 0.52($P<0.001$),表明 PCA-Copula 评价方法适用于研究灌溉水利用系数影响因素。

关键词:灌溉水;有效利用系数;影响因素;首尾法;主成分分析法;PCA-Copula

中图分类号:S274 **文献标志码:**A

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

JIA Hao^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHANG Jinzhu¹, LI Wenhao¹, REN Zuoli¹, JIA Zhecheng¹
(1. School of Hydraulic Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Taking the medium-sized irrigation area of the 12th Division of Xinjiang Construction Corps as the research object, we used the first-to-tail method to calculate the irrigation water utilization coefficient of the four sample irrigation areas in 2018 and 2019. Based on the principal component analysis method for dimensionality reduction of the index system, the Copula function was used to construct the PCA-Copula evaluation and analysis method to calculate and analyze each influence factor, its degree as well as its law, of water utilization coefficient. The results showed that according to the two-year calculation and analysis, the irrigation water utilization coefficients of the four sample irrigation areas were all above 0.63, and the maximum value reached 0.668, which was higher than the Xinjiang and national averages of 5.05% and 10.15%, respectively, during the same period. Principal component analysis showed that the channel lining rate (0.944), drip irrigation area ratio (0.746), crop water requirement (0.635), actual irrigation area (0.734), etc. All had a positive contribution rate more than

60%, while the grape growing ratio (−0.586) and irrigation area gross irrigation water consumption (−0.645) had a negative contribution rate of more than 58%. Use the PCA–Copula analysis and evaluation method it was to conclude that the crop planting ratio and water-saving irrigation project status had a significant influence on the effective utilization coefficient of irrigation water in the Twelve Division medium-sized irrigation area ($P<0.05$). The effect of irrigation water effective utilization coefficient was extremely significant ($P<0.01$), with the correlation coefficients 0.875 and 0.742, respectively. At the same time, the Spearman rank correlation coefficient test and linear regression were used to test the closeness of the PCA–Copula evaluation method and the entropy method. The test results were that the correlation coefficients were 0.87 ($P<0.05$) and 0.52 ($P<0.001$), it showed that the PCA–Copula evaluation method was suitable for studying the influencing factors of irrigation water utilization coefficient.

Keywords: irrigation water; effective utilization coefficient; influencing factors; head and tail method; principal component analysis method; PCA–Copula

水资源对生态环境的控制及对国民经济和社会发展的作用无可替代^[1]。我国水资源的现状是总量大而空间分布不均,农业用水占比 62.4%,其中 90%用于农业灌溉^[2],农业生态发展问题依旧突出,尤其在新疆绿洲灌溉农业区,农业用水占比更大。虽然近 5 年内高效节水灌溉面积增长近 1 倍^[3],膜下滴灌技术成为保障以新疆为代表的干旱半干旱地区农业经济快速发展的必要手段,但是农业用水浪费依然严重,灌溉水利用效率仍然较低,这严重制约生态农业的发展,因此,随着我国“一带一路”经济带建设推进,开展农业灌溉水利用系数研究,大力发展现代生态节水农业,实行最严格的水资源管理,提高灌溉水利用系数,促进水资源高效利用,实现农业生产的可持续发展,对于落实新疆水资源的“三条红线”具有十分重要的现实意义^[4]。

灌溉水利用系数是指灌入田间可被作物利用的水量与水源地取用的灌溉总水量的比值^[5],它是评价农业水资源利用、进行区域科学配置、指导节水灌溉发展以及政府部门进行宏观决策的重要依据^[6]。国内外学者从各个方面对灌溉水利用系数进行了研究,Barbara 等^[7]主要基于水足迹法评估了 2005—2011 年西班牙农业灌溉现代化政策对提高灌溉用水效率的影响,国内许多学者^[8–11]认为灌溉水利用系数是分析评价灌溉用水效率和节水潜力、提高灌溉技术和用水管理水平的一项重要综合指标。近年来,周和平、谭芳等^[12–13]分析了灌溉水利用系数相关的自然条件、管理因素、渠道防渗率、节灌面积和种植结构。国内外学者^[14–16]针对 Copula 函数进行了金融风险方面的研究,随着 Copula 函数被多数学者广泛应用,水利相关领域也引入 Copula 函数针对水文事件进行评价分析,其过程精简,方

便快捷。截止目前,利用 Copula 函数分析研究灌溉水有效利用系数的成果较少。因此,本文在应用主成分分析法对指标体系降维处理的基础上,采用 Copula 函数构建 PCA–Copula 评价分析方法,对新疆生产建设兵团十二师的中型水库的灌溉水利用系数进行测算,为分析灌溉水利用系数影响因素提供了一种新方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2018 年和 2019 年在新疆生产建设兵团第十二师(以下简称第十二师)位于($43^{\circ}51' \sim 44^{\circ}03'N, 87^{\circ}15' \sim 87^{\circ}28'E$),属中温带大陆性半干旱气候区,夏热冬寒,昼夜温差大,日照长,光热资源丰富,降水稀少。年均气温 $5^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 有效积温 $2\ 600^{\circ}C$,无霜期为 150 d 左右。年降水量 178~228 mm,年蒸发量 1 814~2 617 mm,年均相对湿度为 57%~63%,年太阳总辐射量 5 100~5 500 $MJ \cdot m^{-2}$,适宜种植葡萄。截止 2017 年底,第十二师共有 4 个中型灌区,其中 667~3 333 hm^2 灌区 1 个,10 000~20 000 hm^2 灌区 3 个,如表 1 所示。为减小试验误差,各个灌区选取 10 a(2008 年定植)成龄无核白葡萄树为试验材料。各个灌区施行统一的施肥制度(施肥比例 $N:P_2O_5:K_2O=2:1:2$),除草、打药等田间农艺管理措施也统一进行,各个灌区葡萄的种植情况、灌溉方式、灌溉制度如表 2 所示。考虑灌区所在区域、灌区面积和灌区管理水平的代表性,在试验区选择 4 个灌区,分别在灌区的上、下游各选取 3 块样点地块,共 24 个样点地块,试验区样点分布如图 1 所示。

表 1 不同规模与水源类型灌区情况

Table 1 Irrigation area of different size and water sources types

灌区规模 Irrigation size	水源类型 Water source type	灌区面积/hm ² Irrigation area	团场名称 Group name	所辖灌区名称 Name of irrigation district under its jurisdiction
中型 Medium	提水、自流引水 Water lifting, gravity flow	667~3333	221 团 221 regiment	大河沿河灌区 Daheyan River Irrigation District
			222 团 222 regiment	引额灌区 Yine Irrigation District
			104 团、西山农牧场	乌鲁木齐河灌区
			104 regiment, Xishan Farm	Urumqi River Irrigation District
			头屯河、五一、三坪农场 Toutunhe, Wuyi and Sanping farms	头屯河灌区 Toutunhe Irrigation District

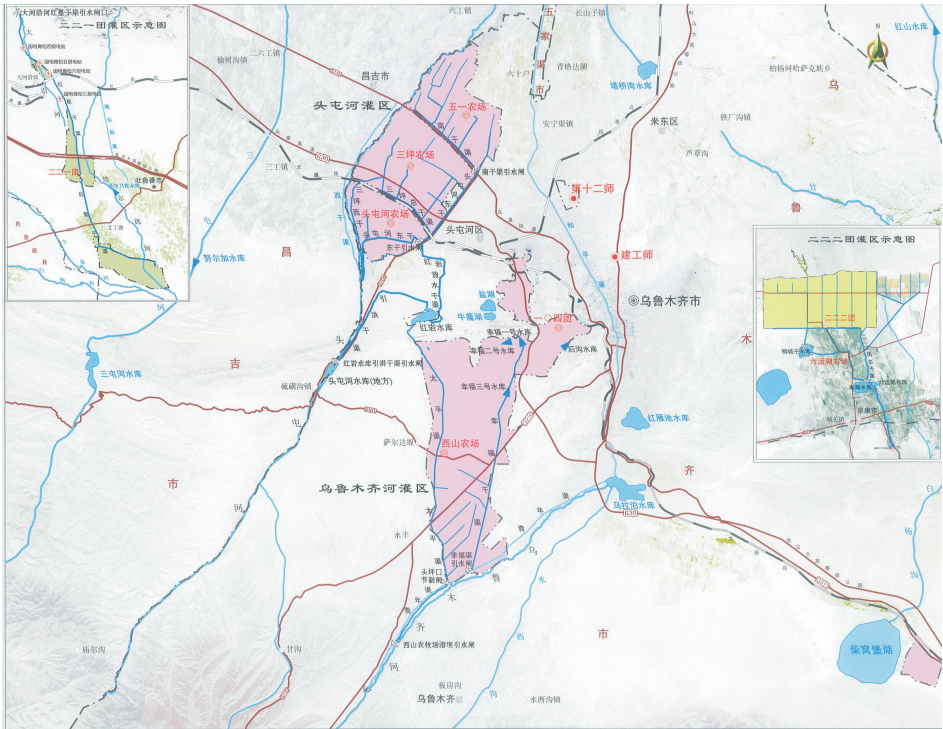


图 1 试验区样点灌区分布

Fig.1 Distribution of sample plots in experimental area

1.2 首尾测算分析法

首尾测算分析法是指直接测量统计灌区从水源引入(取用)的毛灌溉用水总量,通过分析测算得到田间实际净灌溉用水总量,田间实际净灌溉用水总量与毛灌溉用水总量的比值即为灌溉水有效利用系数。首尾测算分析法的好处是可以减少在灌溉水有效利用系数测定过程中的大量繁杂工作,直接从灌溉水源取水量(首端)和灌溉水的利用量(末端)计算灌溉水有效利用系数,避免了渠系水利用系数和田间水利用系数等中间输水过程损失的复杂测量和计算。

田间水利用效率采用实时监测灌前、灌后及全生育期内所选地块土壤含水率,进而计算十二师代表作物葡萄田间水利用效率。利用固定位置(滴灌

带下、距滴灌带各 15 cm 等典型位置)埋设的智墒水温传感器(北京嘉禾 ET60)对葡萄全生育期的地下(0~120 cm)分层监测其含水率变化,记录灌水前、后数据(即为上一个灌水周期)。本次研究数据来源于“中国大型灌区网站”,并通过实地调研数据与统计年鉴数据进行校正。生育期降雨量、作物需水量、灌区毛灌溉用水量、葡萄种植比、葡萄净灌溉定额、渠道衬砌率、滴灌灌溉面积比等根据现有方法和统计数据计算所得^[17-18]。其中灌区田间净灌水量是通过测定的含水率经过典型田块某次每公顷净灌溉用水量计算出典型样点地块整个生育期的净灌溉用水量,通过上、下游求得平均值,之后利用样点地块和面积的加权平均计算求得。具体计算公式如式(1)~(4)。

表 2 各灌区葡萄种植及灌溉方式、灌溉制度统计表

Table 2 Statistics of grape planting and irrigation methods and irrigation systems in various irrigation districts

灌水次数 Irrigation times	引额灌区 Yine Irrigation District			头屯河灌区 Toutunhe Irrigation District			大河沿河灌区 Daheyan River Irrigation District			乌鲁木齐河灌区 Urumqi River Irrigation District		
	平均灌水定额 Average irrigation quota /(m ³ ·hm ⁻²)	灌水时间 Irrigation time/h	灌水日期 Irrigation date (y-m-d)	平均灌水定额 Average irrigation quota /(m ³ ·hm ⁻²)	灌水时间 Irrigation time/h	灌水日期 Irrigation date (y-m-d)	平均灌水定额 Average irrigation quota /(m ³ ·hm ⁻²)	灌水时间 Irrigation time/h	灌水日期 Irrigation date (y-m-d)	平均灌水定额 Average irrigation quota /(m ³ ·hm ⁻²)	灌水时间 Irrigation time/h	灌水日期 Irrigation date (y-m-d)
1	3.5	9	2018-04-25 2019-04-21	2.63	7.5	2018-05-13 2019-05-11	3.03	8	2018-04-20 2019-04-25	2.7	7	2018-05-10 2019-05-08
2	3.5	9	2018-05-18 2019-05-14	2.63	7.5	2018-05-27 2019-05-25	3.03	8	2018-05-10 2019-05-15	2.7	7	2018-05-25 2019-05-22
3	3.5	9	2018-06-07 2019-06-04	2.63	7.5	2018-06-08 2019-06-05	3.03	8	2018-06-02 2019-06-07	2.7	7	2018-06-10 2019-06-08
4	3.5	9	2018-07-04 2019-07-01	2.63	7.5	2018-06-27 2019-06-24	3.03	8	2018-06-25 2019-06-29	2.7	7	2018-06-25 2019-06-22
5	3.5	9	2018-07-29 2019-07-24	2.63	7.5	2018-07-10 2019-07-08	3.03	8	2018-07-13 2019-07-16	2.7	7	2018-07-10 2019-07-07
6	3.5	9	2018-08-13 2019-08-09	2.63	7.5	2018-07-19 2019-07-18	3.03	8	2018-08-01 2019-08-02	2.7	7	2018-07-20 2019-07-18
7	3.5	9	2018-08-20 2019-08-18	2.63	7.5	2018-08-02 2019-08-01	3.03	8	2018-08-15 2019-08-16	2.7	7	2018-08-01 2019-07-30
8				2.63	7.5	2018-08-13 2019-08-12	3.03	8	2018-08-25 2019-08-24	2.7	7	2018-08-10 2019-08-09
9				2.63	7.5	2018-08-23 2019-08-21				2.7	7	2018-08-20 2019-08-18
合计 Total	24.5	63		23.7	67.5		24.27	64		24.3	63	
种植比例/% Planting ratio	35			72.6			65			49.8		
灌溉方式 Irrigation method	滴灌 90% Drip irrigation 90%			滴灌 98% Drip irrigation 98%			滴灌 88.5% Drip irrigation 88.5%			滴灌 85% Drip irrigation 85%		

首尾测算分析法计算公式如下:

$$\eta = \frac{W_{\text{净}}}{W_{\text{毛}}} \tag{1}$$

式中, η 为灌区灌溉水有效利用系数; $W_{\text{净}}$ 为灌区净灌溉用水总量 (m^3); $W_{\text{毛}}$ 为灌区毛灌溉用水总量 (m^3)。

$$w_{\text{田净}i} = 0.667H(\theta_{v2} - \theta_{v1}) \tag{2}$$

式中, $w_{\text{田净}i}$ 为典型田块某次每公顷平均净灌溉用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); H 为灌水期内典型田块土壤计划湿润层深度 (mm); θ_{v2} 为某次灌水前典型田块 H 土层内土壤体积含水率 (%); θ_{v1} 为某次灌水后典型田块 H 土层内土壤体积含水率 (%)。

$$W_{\text{样净}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_{ij} \cdot A_{ij} \tag{3}$$

式中, $W_{\text{样净}}$ 为样点灌区年净灌溉用水总量 (m^3); w_{ij} 为样点灌区 j 个片区内第 i 种作物每公顷平均净灌溉用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); A_{ij} 为样点灌区 j 个片区内第 i 种作物灌溉面积 (hm^2); m 为样点灌区 j 个片区内的作物种类 (种); n 为样点灌区片区数量 (个)。

$$W_{\text{样毛}} = \sum_{i=1}^n W_{\text{样毛}i} \tag{4}$$

式中, $W_{\text{样毛}}$ 为样点灌区年毛灌溉用水总量 (m^3); $W_{\text{样毛}i}$ 为样点灌区第 i 个水源取水量 (m^3); n 为样点灌区水源数量 (个)

1.3 主成分分析法

主成分分析 (principal component analysis, PCA) 是采用降维处理办法, 在充分利用现有数据的基础上把多个指标转化为少数几个综合指标的统计分析方法^[19]。主成分分析方法最重要的是提取研究对象的主要影响因素, 而考虑到本研究所在的地理位置、自然条件、种植条件和节水工程等, 选取以下 8 个变量作为样点灌区的影响因素, 详见表 3。

表 3 灌区灌溉水利用系数影响因素

Table 3 Influencing factors of irrigation water use coefficient in irrigation districts

主要类型 Main types	影响因子 Impact factor	指标变量 Indicator variable
自然条件 Natural conditions	生育期降雨量 Rainfall during the growing period/mm	X_1
	作物需水量 Crop water requirement/mm	X_2
当地种植结构及管理状况 Local planting structure and management status	灌区实灌面积 Irrigation area/ hm^2	X_3
	灌区毛灌溉用水量 Irrigation area gross irrigation water consumption/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	X_4
	葡萄种植比 Grape growing ratio/%	X_5
	葡萄净灌溉定额 Grape net irrigation quota/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	X_6
节水灌溉状况 Water saving irrigation status	渠道衬砌率 Channel lining rate/%	X_7
	滴灌灌溉面积比 Irrigation area ratio of drip irrigation/%	X_8

1.4 Copula 函数

Copula 函数最早由 Sklar 提出, 是定义域为 $[0, 1]$ 的均匀分布的连接函数, 可以通过边缘分布和相关性结构两部分来构造联合分布以描述变量之间的相依性^[20-21]。关于函数的具体介绍、选取、参数估计等问题已有相关文献详细描述, 在此不再进行赘述^[22-23]。Copula 函数形式可具体表述为:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = C_{\theta}(F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_n(X_n)) = C(u_1, u_2, \dots, u_n) \tag{5}$$

式中, F 为 n 维随机变量分布函数, 即 n 为样本容量; C 为代表 Copula 函数; θ 为代表 Copula 参数; $u_1 = F_1(X_1), u_2 = F_2(X_2), \dots, u_n = F_n(X_n)$ 为随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的边缘分布函数。

本文采用 PCA 方法构建评价主成分因子, 各因子之间无相关性, 即主成分因子所构成的新变量之间相互独立, 则相应的 Copula 函数可表述为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = u_1 \cdot u_2 \cdots u_n \tag{6}$$

1.5 边缘分布的确定

以 Kolmogorov - Smirnov (K - S) 检验方法检验拟合效果, 并通过比较均方根误差值 RMSE 和信息准则值 AIC 的大小优选边缘分布, 对于分布线型的优选原则是 RMSE 值及 AIC 值越小则拟合效果越好^[24]。均方根误差值:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^Z d_{rj}^2}{Z}} \tag{7}$$

式中, d_{rj} 为第 r 个主成分因子第 j 年的数据对应的理论频率值与经验频率值之差, 其中经验频率值通过 Gringorten (1963) 公式计算; Z 为第 r 个主成分因子中数据的个数, 即本文所研究的年数。

信息准则值:

$$AIC = z \ln RMSE + 2a \tag{8}$$

式中, a 为所选分布线型中参数的个数。

2 结果与分析

2.1 灌溉水利用系数测算结果

表 4 是 2018 年和 2019 年第十二师样点灌区灌溉水利用系数测算结果。表 4 显示,在 2018 年和 2019 年灌溉水利用系数测算的 4 个灌区中,大河沿河灌区在 2018 年和 2019 年的灌溉水利用系数低于 0.65,这是由于大河沿河灌区位于吐鲁番市高昌区,是极端干旱区,光照充足,热量丰富,降雨稀少,蒸发量大,同时灌区规模大,灌区输配水距离相应加大,导致蒸发严重;其余灌区两年灌溉水利用系数都高于 0.66,其中 2018 年的乌鲁木齐河灌区灌溉水利用系数略低于 0.66,这是因为此灌区节水灌溉面积比例小,灌区种植结构单一。2019 年各灌区灌溉水利用系数都明显优于 2018 年,且两年灌溉水利用系数最优的是引额灌区。采用首尾法测定的样点灌区灌溉水利用系数两年间的年际变化在±1%以内,且有 2 个样点灌区年际变化在±0.3%以内。据资料显示^[17],2018 年全国中型灌区灌溉水利用系数为 0.5984,新疆维吾尔自治区中型灌区灌溉水利用系数为 0.6324,第十二师中型灌区灌溉水利用系数分别高于同期全国、全疆平均水平 10.15%、5.05%,但仍然存在不足,原因在于:(1)第十二师中型灌区各级渠道输水距离长且衬砌率低,导致渗漏量大;(2)第十二师独特的气候特征,即夏季气温的持续增加、降雨量减少,导致作物需水量增加,又因

第十二师灌区分散不集中,渠系级别增多,导致输配水建筑物较多,致使灌溉水利用系数较低;(3)据第十二师 2017 年灌溉年报数据显示,全师滴灌节水工程覆盖率已达 90%左右,随着对现有的渠道升级改造,加大水利投资,输配水渠道损失得到些许控制,但仍存在输水损失;(4)灌区用水管理不足,近年来第十二师开展了一部分中型灌区信息化建设项目,但仍处于初级阶段,配套基础设施不完善,缺乏信息化技术相关人才。

2.2 灌溉水利用系数影响因素分析

2.2.1 主成分分析

(1)从表 5 和表 6 中的初始特征值和累积率可以看出,在两年监测影响十二师中型灌区灌溉水利用系数的众多因素中,前 3 个成分的特征值均超过 1,累积贡献率分别为 95.495%和 95.218%,能基本反映影响灌溉水利用系数的大部分信息。

(2)从表 7 主成分荷载可知,两年试验监测中,各个影响因素通过主成分荷载分析得出:第 1 主成分主要反映灌区种植结构和节水灌溉状况,因为其中葡萄种植比、渠道衬砌率及滴灌灌溉面积比具有较高荷载;第 2 主成分主要反映灌区管理状况,因为其中作物需水量、灌区实际灌溉面积和灌区毛灌溉用水量具有较高荷载;第 3 主成分主要反映灌区所处的自然条件和灌区管理状况,因为其中生育期降雨量和葡萄净灌溉定额具有较高荷载。

表 4 2018 年和 2019 年第十二师样点灌区灌溉水利用系数测算结果

Table 4 Calculation results of irrigation water use coefficients in the 12th Division of Xinjiang Construction Corps Irrigation Area in 2018 and 2019

编号 Number	灌区名称 Irrigation area name	实灌面积/(10 ³ hm ²) Actual irrigation area	灌区毛灌溉总量 Total gross irrigation in		净灌溉水总量 Total net irrigation water		灌溉水利用系数 Irrigation water use coefficient	
			irrigation area/(10 ³ m ³ ·hm ⁻²)		/(10 ³ m ³ ·hm ⁻²)			
			2018	2019	2018	2019	2018	2019
1	乌鲁木齐河 Urumqi river	5.56	8.237	7.443	5.42	4.90	0.658	0.661
2	头屯河 Toutun river	11.10	8.169	7.819	5.40	5.20	0.661	0.665
3	大河沿河 Daheyen river	2.893	8.832	9.028	5.60	5.80	0.634	0.643
4	222 团 222 Regiment	10.247	8.030	7.694	5.34	5.14	0.665	0.668

表 5 特征值及贡献率(2018 年)

Table 5 Characteristic values and contribution rates (2018)

成分 Element	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract square sum load		
	合计 Total	方差 Variance/%	累积 Cumulation/%	合计 Total	方差 Variance/%	累积 Cumulation/%
1	4.845	73.601	73.601	4.845	73.601	73.601
2	1.296	14.888	88.490	1.296	14.888	88.490
3	1.058	7.005	95.495	1.058	7.005	95.495
4	0.424	2.470	97.965			
5	0.218	0.716	98.681			
6	0.133	0.756	99.437			
7	0.021	0.428	99.865			
8	0.005	0.135	100.000			

表 6 特征值及贡献率 (2019 年)
Table 6 Characteristic values and contribution rates (2019)

成分 Element	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract square sum load		
	合计 Total	方差 Variance/%	累积 Cumulation/%	合计 Total	方差 Variance/%	累积 Cumulation/%
1	4.521	65.751	65.751	4.521	65.751	65.751
2	1.341	24.712	90.463	1.341	24.712	90.463
3	1.124	4.755	95.218	1.124	4.755	95.218
4	0.623	2.640	97.858			
5	0.224	1.226	99.084			
6	0.132	0.458	99.542			
7	0.029	0.355	99.897			
8	0.006	0.103	100.000			

表 7 主成分荷载
Table 7 Principal component loads

影响因子 Impact factor	成分 Ingredient (2018)			成分 Ingredient (2019)		
	1	2	3	1	2	3
生育期降雨量 Rainfall during the growing period	0.404	-0.241	0.842	-0.464	-0.197	0.782
作物需水量 Crop water requirement	-0.492	0.586	-0.036	0.073	0.683	-0.015
灌区实灌面积 Irrigation area	0.456	0.793	0.092	-0.431	0.675	0.087
灌区毛灌溉用水量 Irrigation area gross irrigation water consumption	-0.066	-0.636	0.425	-0.073	-0.654	0.414
葡萄种植比 Grape growing ratio	-0.549	0.487	0.245	-0.622	0.398	0.225
葡萄净灌溉定额 Grape net irrigation quota	-0.259	0.423	0.658	-0.255	0.557	0.712
渠道衬砌率 Channel lining rate	0.956	0.275	0.058	0.932	0.359	0.042
滴灌灌溉面积比 Irrigation area ratio of drip irrigation	0.796	0.224	0.112	0.695	0.314	0.153

2.2.2 主成分结果分析

(1)由表 5 和表 6 知,在第 1 主成分中 X_5 (葡萄种植比)、 X_7 (渠道衬砌率)、 X_8 (滴灌灌溉面积比)荷载较大,而这几个因素集中反映当地种植结构和节水灌溉工作状况,与第 2、3 主成分中荷载较大的因素同列相比较,发现其较大荷载的因素都具有较大的正贡献率,且贡献率都高于 50%,可以基本代表所有因素的综合状况,节水灌溉本质就是利用新型灌溉方式来提高灌溉水利用系数,而选择的渠道衬砌率和滴灌灌溉面积比等影响因素正能体现该灌区节水灌溉的现状本质。由于所研究区的葡萄园采用滴灌方式,部分也有漫灌现象,与其他灌溉作物相比,未覆膜处理蒸发严重,故葡萄种植比与灌溉水利用系数呈负相关。

(2)在第 2 主成分中 X_2 (作物需水量)、 X_3 (实际灌溉面积)和 X_4 (灌区毛灌溉用水量)荷载较大,而这些因素主要反映了灌区的管理状况。作物需水量和实际灌溉面积都具有较大的正贡献率,灌区毛灌溉用水量具有较大的负贡献率。分析表明,灌溉、排水和耕作栽培技术等人为措施是影响作物需水量的因素,当人为措施效率提高,致使作物需水量变小,相应灌溉水利用系数就变小;在一定区域规模和种植结构情况下,实际灌溉面积大意味着灌溉水量分配比较均匀,相应灌溉水利用系数也就越

高;灌区面积大,蒸发强烈,渠道渗漏损失严重,导致毛灌溉用水量增大,故灌溉水利用系数变小。

(3)剩余的 X_1 (生育期降雨量)和 X_6 (葡萄净灌溉定额)等影响因素在第 3 主成分中荷载较大,且都是正贡献率,可以反映灌区自然条件的实际情况,由于自然条件的变化会影响人为管理,因此可以说明其对灌溉水利用系数既存在直接影响也存在间接影响。

2.2.3 确定边缘分布函数 根据十二师灌区现状,结合各个灌区灌溉水有效利用系数主成分因子的分布线型进行优选,根据当地实际情况和相关文献^[25],本文选取正态分布 (normal distribution, N)、指数分布、极大值 I 型分布 (I-type maximum distribution, Max I)、极小值 I 型分布 (I-type minimum distribution, Min I) 以及 Gamma 分布分别拟合各灌区主成分因子值^[18]。经检验,正态分布、极大值 I 型分布和极小值 I 型分布均能通过 K-S 检验,同时根据 RMSE 值和 AIC 值的大小最终确定各灌区主成分因子的分布线型^[26],RMSE 值和 AIC 值以及分布线型如表 8 所示。

基于正态分布及各主成分相对应的极值分布类型,进一步获取各边缘分布对应的 RMSE 和 AIC (表 8),可以看出,除头屯河灌区优选正态分布,其余各个灌区优选分布都是极大值 I 型分布,依据边缘

表 8 灌区灌溉水有效利用系数主成分因子的分布线型优选

Table 8 Optimization of distribution line type of principal component factors of effective utilization coefficient of irrigation water in irrigation area										
灌区 Irrigation area	分布 Distribution	主成分因子 1			主成分因子 2			主成分因子 3		
		Principal component factor 1			Principal component factor 2			Principal component factor 3		
		RMSE	AIC	优选分布 Preferred distribution	RMSE	AIC	优选分布 Preferred distribution	RMSE	AIC	优选分布 Preferred distribution
乌鲁木齐河 Urumqi river	正态 Normal	0.08	-13.8		0.06	-17.9		0.07	-18.5	
	极大值 I 型 Maximum value I	0.06	-17.9	Max I	0.05	-28.1	Max I	0.05	-22.5	Max I
	极小值 I 型 Minimum value I	0.12	-15.6		0.10	-19.4		0.11	-14.5	
头屯河 Toutun river	正态 Normal	0.06	-27.8		0.05	-28.1		0.05	-28.3	
	极大值 I 型 Maximum value I	0.09	-22.3	N	0.07	-22.8	N	0.08	-22.5	N
	极小值 I 型 Minimum value I	0.17	-13.8		0.15	-15.2		0.16	-16.2	
大河沿河 Daheyan river	正态 Normal	0.08	-23.8		0.06	-17.9		0.07	-17.2	
	极大值 I 型 Maximum value I	0.08	-22.6	N	0.05	-28.1	Max I	0.06	-27.1	Max I
	极小值 I 型 Minimum value I	0.12	-15.6		0.08	-23.8		0.04	-24.8	
222 团 222 Regiment	正态 Normal	0.13	-16.9		0.10	-19.4		0.05	-25.3	
	极大值 I 型 Maximum value I	0.07	-22.8	Max I	0.04	-29.6	Max I	0.09	-18.9	N
	极小值 I 型 Minimum value I	0.10	-19.4		0.05	-28.1		0.06	-23.5	

注:N、Max I 分别表示正态分布和极大值 I 型分布。
Note: N and Max I represent normal distribution and maximum value I distribution , respectively.

分布的 RMSE 及 AIC 越小拟合效果越好的优选原则,最终确定第十二师中型灌区两年灌溉水有效利用系数的 3 个主成分因子值的最优边缘分布。从表 7 中可以看出,3 个主成分的边缘分布存在差异,但 Copula 函数具有不受单变量服从何种边缘分布的优越性,使其能较好地用于构建 3 个主成分间的联合分布。

2.2.4 PCA-Copula 评价分析 从定性分析的角度来说,考虑灌区地质地貌、气候、水源以及种植结构的影响,当水源类型和气候相似,灌溉水利用系数差别较小。但是随着地质地貌和种植结构的变化,覆膜耕作系统灌溉水有效利用系数优于其他。

从定量分析的角度来说,利用 SPSS Statistic20.0 将灌溉水利用系数与灌区规模、自然条件、灌溉管理及节水状况等相关指标进行偏相关分析可知,灌溉水利用系数与各指标之间均有显著相关性,其相关性如表 9 所示。

由表 9 可知,灌区毛灌溉用水量 and 葡萄净灌溉定额对灌溉水有效利用系数的影响极其显著($P<0.01$),其他影响因素对灌溉水有效利用系数影响显著($P<0.05$)。灌区基本情况对其测算结果影响的原因是:(1)灌区实灌面积越大,渠道衬砌率高,节水灌溉的面积比例升高,导致灌区毛灌溉用水量也增多,最终影响整个灌区的灌溉有效利用系数变大,主要是因为灌区规模影响节水概况发展和管理水平,从而影响灌溉水有效利用系数;(2)灌溉水有效利用系数受降雨量影响显著,主要由于自然条件

表 9 基于 PCA-Copula 的灌溉水利用系数与灌区基本情况的关系

Table 9 Relationship between PCA-Copula-based irrigation water use coefficients and basic conditions of irrigation districts	
指标 Index	偏相关系数 Partial correlation coefficient
生育期降雨量 Rainfall during the growing period	0.409 *
作物需水量 Crop water requirement	0.542 *
灌区实灌面积 Irrigation area	0.589 *
灌区毛灌溉用水量	
Irrigation area gross irrigation water consumption	0.742 **
葡萄种植比 Grape growing ratio	0.05 *
葡萄净灌溉定额 Grape net irrigation quota	0.875 ***
渠道衬砌率 Channel lining rate	0.569 *
滴灌灌溉面积比 Irrigation area ratio of drip irrigation	0.536 *

注: * 表示 0.05 水平显著偏相关, ** 表示 0.01 水平显著偏相关, *** 表示 0.001 水平显著偏相关。
Note: * indicates a significant partial correlation at the 0.05 level, ** indicates a significant partial correlation at the 0.01 level, *** indicates a significant partial correlation at the 0.001 level.

的改变影响人为管理,对灌区的作物净灌溉定额和毛灌溉用水量进行控制,从而影响灌溉水有效利用系数。

本文结合各灌区灌溉水有效利用系数统计资料,利用 PCA-Copula 评价法对 2018 年和 2019 年灌溉水利用系数进行综合评价并排序,两年对比结果如表 10 所示。结果表明,随着灌溉水利用系数数值大小变化,其排序呈现一致的变化,两年数据规律一致且排序无差异。同时,为继续验证其合理性,利用 Spearman 等级相关系数检验法和线型回归来检验 PCA-Copula 评价法与熵值法的密切程度,检验

表 10 2018 年和 2019 年灌溉水利用系数的 PCA-Copula 评价对比分析
Table 10 Comparative analysis of PCA-Copula evaluation of irrigation water use coefficient in 2018 and 2019

灌区 Irrigation area	2018 年灌溉水利用系数 Irrigation water utilization coefficient in 2018		PCA-Copula 评价法 Evaluation method		2019 年灌溉水利用系数 Irrigation water utilization coefficient in 2019		PCA-Copula 评价法 Evaluation method	
	数值 Numerical value	排序 Rank	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序 Rank	数值 Numerical value	排序 Rank	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序 Rank
乌鲁木齐河 Urumqi river	0.658	3	0.648	3	0.661	3	0.735	3
头屯河 Toutun river	0.661	2	0.735	2	0.665	2	0.916	2
大河沿河 Daheyang river	0.634	4	0.521	4	0.643	4	0.685	4
222 团 222 Regiment	0.665	1	0.916	1	0.668	1	0.952	1

结果分别是相关系数为 0.87 ($P<0.05$) 和 0.52 ($P<0.001$),说明两种方法对研究灌溉水利用系数影响因素有相似结果,故 PCA-Copula 评价方法非常适用。

3 讨 论

本文充分利用首尾法的优势,在人员和设备都不完备的情况下,对第十二师中型灌区进行灌溉水利用系数测算。在测算过程中为提高测算精度,在滴灌系统首部安装水表,对流量数据进行检测,获得了良好的效果。针对相关灌溉水有效利用系数的因素,大量学者研究表明,灌区节水工程对灌区灌溉水有效利用系数影响较大^[27]。本研究也得出类似结论,增加灌区节水配套设施可以显著提高农田灌溉水有效利用系数。但是由于新疆气候特殊,蒸发强烈,输配水距离较长,损失严重。葡萄作为第十二师头屯河特色产业,必须解决这一矛盾,一方面要增加葡萄产业收益,另一方面要提高灌溉水利用系数,因此还需努力做好以下工作:(1)继续建议政府加大资金投入,改善输水设施,提升节水工程基础设施建设水平。(2)增强用水管理水平,提升水管工作人员专业技术水平,数据资料收集采用有效的信息化管理模式,避免繁杂的重复工作。(3)加大监管力度,对各个灌区基础数据测算工作进行抽查,同时增强农户节水意识。

本文采用的 PCA-Copula 分析评估方法,为灌溉水利用系数影响因素的分析提供一种新方法,且证明了其在灌溉水利用系数方面的适用性。同时也有许多国内外学者将 Copula 函数理论引入水文水资源研究后得到类似结论,并将其在水利监测中广泛应用^[28]。Salvadori 等^[29]、Hao 等^[30]学者对 Copula 函数在国内水文方面进行研究并取得一些成果,同时 Zhao 等^[31]为分析河流流量与灌溉用水效率的关系,利用 Copula 函数建立了相关的联合分布。本文在主成分分析基础上,提取主成分因子,通过构建边缘分布函数,利用 PCA-Copula 分析评估方法对灌溉水有效利用系数与灌区情况进行分

析评估,分析表明将 PCA-Copula 分析法引入到灌溉水有效系数测算分析环节是可行的。同时,PCA-Copula 的分析结果有利于更直观地区别各灌区灌溉水有效利用系数的影响因素。

4 结 论

1)通过利用首尾法对新疆生产建设兵团第十二师中型灌区 2018 年和 2019 年灌溉水有效利用系数进行测算,样点灌区灌溉水有效利用系数结果普遍在 0.63 以上,分别高于同期全疆、全国平均水平 6.5%、7.4%。

2)利用 PCA-Copula 分析评估方法得出,作物种植比例和节水灌溉工程状况对十二师中型灌区灌溉水有效利用系数影响显著($P<0.05$),渠道衬砌率(0.944)、滴灌灌溉面积比(0.746)、作物需水量(0.635)、实际灌溉面积(0.734)等都具有超过 60%的正贡献率,而葡萄种植比(-0.586)和灌区毛灌溉用水量(-0.645)等具有超过 58%的负贡献率。葡萄净灌溉定额和灌区毛灌溉用水量对灌溉水有效利用系数的影响极其显著($P<0.01$),相关系数分别为 0.875、0.742,其他影响因素对灌溉水有效利用系数影响显著($P<0.05$),因此,针对灌区实际情况,优化种植结构和管理制度,加强节水灌溉工程建设,大力推行覆膜滴灌等节水灌溉技术是提高灌溉水利用系数的主要措施。

3)利用 Spearman 等级相关系数检验法和线型回归来检验 PCA-Copula 评价法与熵值法的密切程度,检验结果是相关系数分别为 0.87 ($P<0.05$) 和 0.52 ($P<0.001$),得出 PCA-Copula 评价方法非常适用于研究灌溉水利用系数影响因素。而本次仅对第十二师中型灌区进行测算,样点灌区较少,测算分析具有局限性且缺乏代表性,后续应以南疆片区、北疆片区、东疆片区分开展大尺度、大规模的测算研究,充分利用 Copula 函数理论构建的 PCA-Copula 分析方法对其进行深入分析。