

# 基于主成分分析的油葵微咸水调亏灌溉灌水效果评价\*

贺新<sup>1</sup> 杨培岭<sup>1</sup> 任树梅<sup>1</sup> 程满金<sup>2</sup> 张义强<sup>3</sup> 蒋光昱<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020;

3. 内蒙古巴彦淖尔市水利科学研究所, 临河 015000)

**摘要:** 以高油酸含量的油用向日葵为试验材料,应用主成分分析方法将各评价指标的加权和作为微咸水灌水效果的综合主成分指标,并利用该指标评价和分析灌水效果。结果表明,灌水效果综合主成分可以代表93.29%的灌水效果变异信息,且服从正态分布,具有较好的代表性与客观性,可用于油葵微咸水调亏灌溉的评价。河套灌区油葵微咸水灌溉的临界矿化度为3.5 g/L,最适宜进行水分亏缺的时期为现蕾期。当微咸水矿化度处于较低水平时(<3.5 g/L),微咸水调亏灌溉对油葵产量与品质的影响较小。当微咸水矿化度达到3.5 g/L时,最为适宜的灌溉制度为现蕾期灌80%充分灌溉的灌水定额,其他生育期充分灌溉。

**关键词:** 微咸水 调亏灌溉 主成分分析 油葵 灌水效果 品质控制

**中图分类号:** S274.1; S565.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0162-06

## 引言

随着河套灌区引黄水量的日益减少,改变传统的灌溉模式已刻不容缓。调亏灌溉是一种有效的农业节水、调质方式,可以在节约灌溉用水的同时,改善果实品质,提高水分利用效率与经济效益<sup>[1]</sup>。另外内蒙古蕴藏大量的地下微咸水资源<sup>[2]</sup>,2~5 g/L的微咸水资源量达到88.6亿m<sup>3</sup>。合理的利用地下微咸水资源作为农业灌溉用水是缓解淡水资源短缺的一个有利措施。向日葵是内蒙古河套灌区主要经济作物之一。葵花油是世界上最主要的植物油之一,可以用在食品工业及商业产品上,甚至最近发现其具有作为生物柴油的潜力。油酸含量较高的葵花油被认为是健康的食用油,其在煎炸和延长保质期过程中的稳定性使其不宜形成反式脂肪酸,有助于减少心脑血管疾病<sup>[3]</sup>。另外向日葵具有较强的耐盐、耐旱性使其成为微咸水灌溉与调亏灌溉的首选。已有大量研究表明,由微咸水灌溉或者调亏灌溉所引起的盐分胁迫或水分胁迫能够在一定程度上抑制向日葵的长势和产量,但同时也会增加其油酸含量及油酸与亚油酸的比值,进而改变向日葵的食用品质<sup>[4-6]</sup>。然而广泛使用微咸水灌溉会增加土壤盐碱化的可能性。因此如何协调微咸水与水分亏缺对产量和品质的影响,寻求二者之间的平衡点,成为

油葵优质与高产种植的关键。微咸水调亏灌溉效果是一个综合概念,包含指标众多,且指标间彼此相关,这给微咸水调亏灌溉评价及效益评定带来一定难度。主成分分析是研究如何将多指标问题转化为较少几个综合指标的一种多元统计方法,这些综合指标是原来多个指标的线性组合,彼此互不相关,从而实现用较少指标反映原来众多指标的主要信息,因而在许多领域的综合评价中被广泛应用<sup>[7-15]</sup>。目前,将主成分分析应用于微咸水调亏灌溉条件下油葵综合灌水效果评价的研究还较少。因此,本研究以微咸水调亏灌溉的油葵(TO12244)为试验材料,应用主成分分析法评价灌水综合效果,寻求基于水分-产量-品质响应关系的油葵微咸水调亏灌溉制度,为油葵的优质、高效种植提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

试验在内蒙古巴彦淖尔市临河区曙光试验站完成。该试验站位于北纬40°46',东经107°24',海拔为1039.9 m。试验站地处河套灌区中游,多年平均气温6.9℃,0~20 cm土层多年平均地温9.4℃,风速2.71 m/s,日照时数3189 h,相对湿度51%。土壤最大冻结深度1.31 m,无霜期160 d(最短129 d),多年平均降雨量为142.1 mm,年均蒸发量为

收稿日期:2014-08-01 修回日期:2014-08-22

\* 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301094、201401078)

作者简介:贺新,博士生,主要从事水资源与水文学研究,E-mail:hx\_cau0609@126.com

通讯作者:杨培岭,教授,博士生导师,主要从事灌溉理论与技术、水资源与水环境、水土保持与荒漠化防治研究,E-mail:yangpeiling@126.com

2 306.5 mm。

## 1.2 试验设计

试验选用的油葵品种为 TO12244,是由中国种子集团有限公司独家引进瑞士先正达公司油用向日葵杂交种。其为中熟品种,春播生育期 100~110 d,夏播 80~90 d;株高 160~175 cm,叶片数 24 片左右;植株生长整齐,茎粗 2.5 cm 左右;花盘形状好,无空心,盘径 20~22 cm;含油率 49% 左右;易于人工或机械收获。TO12244 抗列当,耐霜霉病、锈病、叶斑病,耐干旱、耐盐碱。

采用盆栽试验,共设置 17 个处理(表 1),每个处理 11 个重复。试验选用的花盆为直径 36 cm、高 30 cm 的塑料桶。塑料桶底部开 3 个小孔,以保证土壤的渗透性和防止微咸水在塑料桶底部积累。试验用土选自内蒙古曙光试验站表层土壤,自然风干后过 2 mm 筛,按 1.35 kg/m<sup>3</sup> 分 3 层填装。试验过程中每隔 1 d 采用称量法测量土壤含水率。

表 1 试验处理

Tab.1 Description of irrigation treatments

处理	描述
CK <sub>1.0</sub>	充分灌溉(I),灌水矿化度为 1.0 g/L
CK <sub>3.5</sub>	充分灌溉(I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T1	现蕾期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 2.0 g/L
T2	开花期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 2.0 g/L
T3	成熟期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 2.0 g/L
T4	现蕾期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 5.0 g/L
T5	开花期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 5.0 g/L
T6	成熟期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 5.0 g/L
T7	现蕾期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 1.0 g/L
T8	开花期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 1.0 g/L
T9	成熟期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 1.0 g/L
T11	现蕾期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T12	开花期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T13	成熟期中度亏缺(60% I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T14	现蕾期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T15	开花期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 3.5 g/L
T16	成熟期轻度亏缺(80% I),灌水矿化度为 3.5 g/L

注:I表示灌水定额,依据土壤水分上下限确定。

试验设置 4 种微咸水矿化度,分别为 1.0、2.0、3.5 和 5.0 g/L,当地地下水矿化度为 1.0 g/L,其他矿化度灌溉水利用当地地下水混合 NaCl 配置而成。由于油葵苗期的耐盐性差,故所有处理在苗期均统一采用 1.0 g/L 的地下水灌溉,现蕾期、开花期和成熟期采用微咸水灌溉。灌水定额 I 采用依据土壤水分上下限的灌水方式,设置土壤田间持水量(FC)的 60% 为灌水下限,即当土壤水分达到 FC 的 60% 时开始灌水,灌水上限为 FC 的 90%。试验共设置 2 个水分亏缺水平,分别为 60% I 和 80% I。同时每个处理

的水分亏缺只发生在某一个指定生育期。为了保证试验的顺利开展,不同生育期进行 60% 水分亏缺的处理,采用 1.0、2.0 和 3.5 g/L 的微咸水,80% 水分亏缺的处理,采用 3.5 和 5.0 g/L 的微咸水。另外设置 2 个全生育期均采用灌水定额灌溉的充分灌溉对照处理,灌水矿化度分别为 1.0 和 3.5 g/L。油葵于 6 月 10 日播种,6 月 15 日定株苗期开始,到 7 月 20 日苗期结束。现蕾期从 7 月 21 日开始,8 月 12 日结束,开花期为 8 月 13—24 日,成熟期为 8 月 25 日—9 月 8 日。

## 1.3 测定项目与方法

### (1) 单株产量、百粒质量

当油葵成熟后,每个处理留取 3 株油葵进行测产。人工收割后,进行晾晒,手工拨粒,称取每株油葵的籽实质量,取 5 个重复的平均值作为各处理的产量。并从各处理随机数出 5 个 100 粒种子,分别称量,求其平均值,作为各处理的百粒质量。

### (2) 含油率和脂肪酸(油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸)组成

取各处理的籽实,利用 ECD Agilent 6890N 型气象测谱仪分析测定含油率和脂肪酸(油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、山俞酸)组成。

油葵中脂肪酸组成分析参照 GB/T 17376—2008 动植物油脂-脂肪酸甲酯制备,以及 GB/T 17377—2008 动植物油脂-脂肪酸甲酯的气相色谱分析<sup>[16]</sup>。

气相色谱分析条件:仪器采用 Agilent 6890N 型气相色谱仪,检测器为氢火焰离子化检测器(FID);毛细管柱为 BPX-70 型,规格为 30.0 m × 320 μm × 0.50 μm,SGE。进样口温度为 230℃,柱温为 210℃,检测器温度为 300℃;氮气流速为 1.0 mL/min,氢气流速为 35 mL/min,空气流速为 400 mL/min。

### (3) 生育酚(VE)测定

高效液相色谱法测定 VE 的色谱条件<sup>[16]</sup>:检测器采用 RF-10AXL 型荧光检测器,色谱柱为大连依利特 NH2 柱(250 mm × 4.6 mm,5 μm),流动相为正己烷:异丙醇=98:2(体积比),流速为 1.0 mL/min,柱温是 40℃,柱压为 20 kPa,激发波长为 298 nm,发射波长为 325 nm,进样量取 5 μL。

## 1.4 品质评价指标选择与数据处理

试验选择能整体表征微咸水调亏灌溉效果的 9 个指标作为评价变量,分别为单株产量(Y)、百粒质量(HW)、油酸脂肪酸含量(OA)、亚油酸脂肪酸含量(LA)、硬脂酸脂肪酸含量(SA)、棕榈酸脂肪酸含量(PA)、含油率(OR)、生育酚(VE)、土壤平均电导率(EC)。用 EXCEL 和 SAS 8.2 软件进行数据

处理。

## 2 微咸水调亏灌溉灌水效果的主成分分析与评价方法

主成分分析与评价是一种多元统计方法,通过求解主成分,可以在少损失原有指标信息的情况下,实现减少变量个数与综合评价的目的。具体计算与评价步骤如下。

假定有  $n$  个评价对象,每个对象有  $p$  个测定指标,记为  $x_1, x_2, \dots, x_p$ ,形成数据矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)为保证评价指标的优劣方向一致,需要对低劣指标进行同趋化处理,方法为在低劣指标前加负号,即  $x'_{ij} = -x_{ij}$ 。

(2)为消除不同评价指标的量纲影响,需对同趋化处理后的评价指标分别进行标准化

$$Z_{ij} = (x'_{ij} - \bar{x}'_j) / S'_j \quad (2)$$

其中

$$\bar{x}'_j = \sum_{i=1}^n x'_{ij} / n$$

$$S'_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_{ij} - \bar{x}'_j)^2 / (n-1)}$$

式中  $Z_{ij}$ —— $x'_{ij}$ 的标准化值

$\bar{x}'_j$ ——某指标在  $n$  个评价对象上的平均值

$S'_j$ ——某指标在  $n$  个对象上的标准偏差

(3)计算标准化评价指标  $\mathbf{Z}_j = (Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{nj})^T$  的相关系数矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{np} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中  $r_{jk}$ ——标准化评价指标变量  $\mathbf{Z}_j$  和  $\mathbf{Z}_k$  之间的相关系数,  $k=1, 2, \dots, p$

(4)计算  $\mathbf{R}$  的特征值  $\lambda_k$  和特征向量  $\boldsymbol{\alpha}_k = (\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \dots, \alpha_{kp})^T$ , 并得到第  $k$  个主成分  $f_k$ 。

(5)各主成分的方差贡献率及计算值。第  $k$  个主成分  $f_k$  的方差贡献率为  $\eta_k = \frac{\lambda_k}{p}$ , 主成分为

$$f_{ik} = \alpha_{k1} Z_{i1} + \alpha_{k2} Z_{i2} + \cdots + \alpha_{kp} Z_{ip} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中  $Z_{ip}$ ——标准化处理后的评价指标

为达到获取主要信息并减少指标数量的目的,一般只选择累积方差贡献率  $\sum_{k=1}^m \eta_k \geq 85\%$  的少数  $m$  ( $m < p$ ) 个主成分作为主要主成分进行综合评价。

(6)以各处理评价指标主成分向量与最大主成

分量及最小主成分向量的加权距离来计算各灌水处理的灌水效果综合主成分

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (f_{ij} - f_j^+)^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (f_{ij} - f_j^-)^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中  $w_j$ ——第  $j$  个主要主成分的方差贡献率

$f_j^+, f_j^-$ —— $n$  个评价对象中第  $j$  个主要主成分的最大值和最小值

(7)综合效果评价指标的构建。以各灌水处理主要主成分向量和最大主成分向量的相对接近度作为各处理综合灌水效果 ( $Q_i^{**}$ ) 的度量

$$Q_i^{**} = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$Q_i^{**}$  愈接近于 1, 油葵微咸水调亏灌溉的综合灌水效果越好。

## 3 结果与分析

### 3.1 灌溉效果指标的同趋化与相关矩阵

以不同处理微咸水调亏灌溉的灌水效果作为评价对象,各个指标进行标准化处理及对硬脂酸、棕榈酸和土壤平均电导率进行同趋化处理(转化为高优指标)后,各微咸水调亏灌溉灌水效果评价指标的统计量如表 2 所示,样本相关系数矩阵  $\mathbf{R}$  如表 3 所示。

表 2 灌水质量评价指标统计

Tab. 2 Statistics of evaluation indexes of irrigation performance

质量指标	统计量				
	处理数	平均值	最小值	最大值	标准差
产量(Y)/g	17	12.081	6.426	25.056	4.745
百粒质量(HW)/g	17	2.614	2.070	3.642	0.429
油酸(OA)/%	17	60.152	55.233	66.542	3.820
亚油酸(LA)/%	17	28.543	21.858	32.966	3.881
硬脂酸(SA)/%	17	3.965	3.440	4.500	0.288
棕榈酸(PA)/%	17	5.139	4.690	5.450	0.232
含油率(OR)/%	17	34.771	29.800	44.800	4.065
生育酚(VE)/(mg·(100g) <sup>-1</sup> )	17	22.217	17.100	31.200	3.956
土壤平均电导率(EC)/(dS·m <sup>-1</sup> )	17	1.259	0.851	1.723	0.260

### 3.2 特征值、特征向量与灌溉效果综合主成分

利用 SAS 软件的 Princomp 程序对相关系数矩阵  $\mathbf{R}$  进行主成分分析,所得特征值和特征向量如表 4 所示。结果表明,前 4 个主成分的累积方差贡献率为 93.29%,包含了原始数据的大部分变异信息,选

择前 4 个主成分作为主要主成分,可以起到降低变量个数且保留大部分原始信息的目的。其中,第 1 主分量  $f_1$  单独综合了原始变异信息的 57.85%,主要包括土壤平均电导率(EC)、百粒质量(HW)、单株产量(Y)和含油率(OR)等指标的变异信息,第 2 主分量  $f_2$  主要反映微咸水调亏灌溉下与油葵不饱和

脂肪酸有关的变异信息,如油酸(OA)和亚油酸(LA)等指标。而硬脂酸(SA)和棕榈酸(PA)以及生育酚(VE)由  $f_3$  和  $f_4$  反映。不同微咸水调亏灌溉条件下灌水综合主成分计算结果(表 5)表明,采用矿化度为 1 g/L 的淡水灌溉的 4 个处理(CK<sub>1.0</sub>、T7、T8、T9)的灌水综合效果最高,属于第 1 梯队。

表 3 灌水效果评价指标的相关矩阵

Tab.3 Correlation coefficients matrix of evaluation indexes of irrigation performance

	Y	HW	OA	LA	SA	PA	OR	VE	EC
Y	1.000								
HW	0.940**	1.000							
OA	0.299	0.396	1.000						
LA	-0.314	-0.405	-0.996**	1.000					
SA	-0.700**	-0.678**	-0.350	0.411	1.000				
PA	0.580*	0.618**	0.235	-0.196	-0.277	1.000			
OR	0.666**	0.649**	0.425	-0.463	-0.787**	0.284	1.000		
VE	-0.375	-0.297	-0.235	0.249	0.472	-0.283	-0.491*	1.000	
EC	0.689**	0.800**	0.793**	-0.800**	-0.636**	0.471	0.673**	-0.397	1.000

注: \* 表示行变量和列变量之间达显著相关水平( $P < 0.05$ ); \*\* 表示行变量和列变量之间达极显著相关水平( $P < 0.01$ )。

表 4 主要主成分的系数特征值和贡献率

Tab.4 Calculation coefficient and cumulative contribution proportions of main principle component

主成分	Y	HW	OA	LA	SA	PA	OR	VE	EC	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
$f_1$	0.366	0.382	0.305	-0.312	-0.349	0.246	0.356	-0.231	0.409	5.206	57.85	57.85
$f_2$	0.342	0.251	-0.572	0.564	-0.180	0.280	0.108	-0.142	-0.180	1.516	16.84	74.69
$f_3$	0.153	0.268	0.097	-0.034	0.358	0.562	-0.366	0.551	0.112	0.958	10.65	85.34
$f_4$	0.172	0.200	-0.085	0.028	-0.292	-0.511	0.221	0.726	0.020	0.716	7.95	93.29

表 5 各处理主要主成分、综合主成分、综合灌水效果及排序

Tab.5 Principle component, comprehensive principle component and comprehensive of irrigation performance and rank

处理	主要主成分				综合主成分		综合灌水效果 $Q_i^{**}$	排序
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$d_i^+$	$d_i^-$		
T1	2.06	-1.34	-0.20	-1.20	6.925	10.961	0.613	5
T2	0.79	-0.83	-0.68	-0.26	8.670	8.136	0.484	8
T3	0.68	-1.03	0.83	1.30	8.585	12.197	0.587	6
T4	-1.37	0.25	-1.71	-0.04	12.905	7.256	0.360	12
T5	-2.40	0.52	-0.16	-0.98	14.890	5.200	0.259	17
T6	-2.48	0.09	0.44	0.84	14.966	8.680	0.367	11
T7	3.60	-1.01	-1.17	0.55	5.226	16.179	0.756	3
T8	2.78	-0.96	-0.04	-0.43	5.447	13.642	0.715	4
T9	2.46	0.85	1.85	0.56	3.902	14.720	0.790	2
CK <sub>1.0</sub>	3.93	2.39	0.65	-0.26	1.827	17.082	0.903	1
T11	-0.16	-1.93	0.27	-0.66	10.980	7.640	0.410	9
T12	-2.53	-0.51	0.28	-0.21	15.300	6.227	0.289	16
T13	-2.68	-1.26	0.63	1.39	15.788	9.616	0.379	10
T14	0.21	1.88	-1.41	1.34	9.093	12.249	0.574	7
T15	-1.31	1.11	0.53	-0.96	12.274	6.648	0.351	14
T16	-2.10	0.81	1.17	-0.73	14.012	6.408	0.314	15
CK <sub>3.5</sub>	-1.48	0.98	-1.27	-0.25	12.896	7.181	0.358	13
权重	0.57	0.16	0.11	0.08				
$f_j^+$	3.93	2.39	1.85	1.39				
$f_j^-$	-2.68	-1.93	-1.71	-1.20				

微咸水调亏灌溉处理中,2 g/L 现蕾期中度亏缺处理、2 g/L 成熟期中度亏缺处理和 3.5 g/L 现蕾期轻度亏缺处理排在前三位,综合灌水效果分别为 0.613、0.587 和 0.574。T14 处理与 CK<sub>3.5</sub> 相比,综合灌水效果增加 60.34%。说明灌溉水矿化度达到一定程度(3.5 g/L)后,现蕾期适当的水分亏缺有利于提高灌水效果。而其他生育期进行水分亏缺对灌水效果有抑制作用。

### 3.3 综合灌水效果的正态性检验

对表中各微咸水调亏灌溉处理的灌水效果指标综合灌水效果(均值为 0.501,标准差为 0.198)使用 SAS 软件进行 Shapiro - Wilk (W 检验)和 Kolmogorov - Smimov (D 检验),得出 Shapiro - Wilk 值为 0.904 717 ( $P = 0.081 5$ ),Kolmogorov - Smimov 值为 0.206 094 ( $P > 0.053 2$ )。而 SAS 规定:当样本容量  $n \leq 2 000$  时,结果以 Shapiro - Wilk (W 检验)为准,当样本容量  $n > 2 000$  时,结果以 Kolmogorov - Smimov (D 检验)为准<sup>[17]</sup>。由表 1 可知,本资料样本容量  $n = 17$  例,W 检验的值为 0.904 717 ( $P = 0.082$ ),计算出的 W 值确定的概率  $P > 0.05$ ,不能拒绝检验假设,可以认为该样本资料服从正态分布。说明综合灌水效果具有较好的代表性和客观性,可以作为各微咸水调亏灌溉效果的评定指标。

### 3.4 油葵耗水量、产量与水分利用效率

微咸水调亏灌溉条件下,由于抗逆蛋白的作用,油葵的品质可得到一定提高,但随着灌溉过程中水、盐胁迫程度的加深,油葵产量会表现出明显下降的趋势。各处理油葵耗水量、产量和水分利用效率如表 6 所示。结果表明,除开花期水分亏缺处理外,其他矿化度为 1.0 g/L 的淡水处理的产量与水分利用效率均高于微咸水灌溉处理。与灌水综合效果所表现的结果一致。而灌水综合效果较高的 3 个微咸水灌溉处理,其产量分别为 0.80、0.79 和 0.91 t/hm<sup>2</sup>,水分利用效率(WUE)为 0.30、0.29 和 0.32 kg/m<sup>3</sup>,且 3 个处理间产量与 WUE 无显著差异。T14 与其他微咸水调亏灌溉处理相比,其产量和 WUE 显著高于矿化度为 3.5 g/L 开花期和成熟期中度亏缺处理和矿化度为 5 g/L 开花期轻度亏缺处理。这说明矿化度为 3.5 g/L 的水是可以用来进行微咸水调亏灌溉的,但水分亏缺时期需为现蕾期,且应选择轻度水分亏缺,本试验灌水量采取的是 80% 充分灌溉灌水定额。这种条件下 3.5 g/L 微咸水的灌水效果与 2.0 g/L 微咸水灌水效果相当。不论何种灌溉水矿化度及亏缺程度,开花期均为敏感时期,不宜进行任

何亏缺处理,这与前人的结论相一致<sup>[18-19]</sup>。

表 6 油葵的耗水量、产量和水分利用效率  
Tab. 6 Water consumption, yield and water use efficiency of oil sunflower

处理	耗水量/ mm	产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	251.64	0.80 <sup>edef</sup>	0.30 <sup>ede</sup>
T2	265.77	0.74 <sup>edefg</sup>	0.27 <sup>edef</sup>
T3	256.85	0.79 <sup>edef</sup>	0.29 <sup>ede</sup>
T4	244.52	0.55 <sup>efgh</sup>	0.22 <sup>defg</sup>
T5	251.26	0.43 <sup>h</sup>	0.17 <sup>g</sup>
T6	253.24	0.62 <sup>efgh</sup>	0.24 <sup>edefg</sup>
T7	268.53	1.24 <sup>b</sup>	0.42 <sup>b</sup>
T8	277.88	0.96 <sup>c</sup>	0.33 <sup>c</sup>
T9	282.15	1.29 <sup>b</sup>	0.44 <sup>b</sup>
CK <sub>1.0</sub>	301.42	1.69 <sup>a</sup>	0.55 <sup>a</sup>
T11	264.50	0.55 <sup>fgh</sup>	0.22 <sup>defg</sup>
T12	258.61	0.48 <sup>gh</sup>	0.18 <sup>ef</sup>
T13	251.39	0.56 <sup>efgh</sup>	0.21 <sup>efg</sup>
T14	278.28	0.91 <sup>cd</sup>	0.32 <sup>cd</sup>
T15	261.50	0.64 <sup>defgh</sup>	0.23 <sup>edefg</sup>
T16	261.68	0.77 <sup>defg</sup>	0.28 <sup>edef</sup>
CK <sub>3.5</sub>	271.45	0.84 <sup>cde</sup>	0.29 <sup>cde</sup>

注:不同字母表示处理之间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

## 4 结论

(1) 采用主成分分析方法对微咸水调亏灌溉条件下不同灌水质量指标进行评价,可以在不损失或较少损失原有指标变异信息的情况下,将多个灌水效果指标转换为一个灌水效果综合主成分评价变量,且服从正态分布,和灌水效果损失指标相比具有较好的代表性与客观性,可用于不同矿化度微咸水结合不同调亏灌溉时期对灌水效果影响的评价和比较。

(2) 运用灌水效果综合主成分指标评价灌水效果,表明微咸水结合调亏灌溉可以用于油葵的种植生产,但是淡水灌溉较微咸水灌溉有更好的灌水效果,油葵开花期为水盐响应敏感时期,应避免微咸水及亏缺灌溉。

(3) 综合考虑油葵产量、品质与土壤安全等因素,河套灌区油葵微咸水调亏灌溉的临界矿化度为 3.5 g/L,最适宜进行水分亏缺的生育期为现蕾期。当微咸水矿化度处于较低水平时( $< 3.5$  g/L),微咸水调亏灌溉对油葵的影响较小。当达到 3.5 g/L 时,最为适宜的灌溉制度为现蕾期灌 80% 充分灌溉的灌溉定额,其他生育期充分灌溉。

## 参 考 文 献

- 1 郑健,蔡焕杰,王健,等. 温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型[J]. 农业机械学报,2011,42(7):124-129.  
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Fuzzy evaluation to integration benefit of regulated deficit irrigation of mini-watermelon based on information entropy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 124-129. (in Chinese)
- 2 王卫光,王修贵,沈荣开,等. 微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉,2003(2):9-11  
Wang Weiguang, Wang Xiugui, Shen Rongkai, et al. Progress of research on light salt water irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2003(2): 9-11. (in Chinese)
- 3 Krajcovicova-Kudlackova M, Simoncic R, Bederova A, et al. Plasma fatty acid profile and alternative nutrition[J]. Annals of Nutrition and Metabolism. 1997, 41: 365-370.
- 4 Demir A O, Göksoy A T, Büyükcangaz H, et al. Deficit irrigation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in a sub-humid climate[J]. Irrigation Science, 2006, 24(4): 279-289.
- 5 Karam F, Lahoud R, Masaad R, et al. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(3): 213-223.
- 6 Flagella Z, Rotunno T, Tarantino E, et al. Changes in the seed yield and fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to sowing date and water regime[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17: 221-230.
- 7 袁志发,周静芋. 多元统计数据分析[M]. 北京:科学出版社,2002:188-190.
- 8 杨坚,童华荣,贾利蓉. 豆腐乳感官和理化品质的主成分分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):131-135.  
Yang Jian, Tong Huarong, Jia Lirong. Principal composition analysis of sensory and physiochemical quality of fermented bean curd[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 131-135. (in Chinese)
- 9 岳田利,彭帮柱,袁亚宏,等. 基于主成分分析法的苹果酒香气质量评价模型的构建[J]. 农业工程学报,2007,23(6):223-227.  
Yue Tianli, Peng Bangzhu, Yuan Yahong, et al. Modeling of aroma quality evaluation of cider based on principle component analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 223-227. (in Chinese)
- 10 姚杰,郭宗楼,陆琦. 灌区节水改造技术经济指标的综合主成分分析[J]. 水利学报,2004,35(10):106-111.  
Yao Jie, Guo Zonglou, Lu Qi. Comprehensive principal components analysis on technical and economic index of water saving reform for irrigation area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 106-111. (in Chinese)
- 11 白志英,李存东,孙红春,等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2008,41(12):4264-4272.  
Bai Zhiying, Li Cundong, Sun Hongchun, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4264-4272. (in Chinese)
- 12 Róth E, Berna A, Beullens K, et al. Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(1): 11-19.
- 13 张洪霞. 基于稻米力学指标主成分分析的质量评价模型[J]. 农业工程学报,2009,25(2):251-255.  
Zhang Hongxia. Model for evaluating paddy rice quality based on principal component analysis of its mechanical indexes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 251-255. (in Chinese)
- 14 王峰,杜太生,邱让建. 基于品质主成分分析的温室番茄亏缺灌溉制度[J]. 农业工程学报,2011,27(1):75-80.  
Wang Feng, Du Taisheng, Qiu Rangjian. Deficit irrigation scheduling of greenhouse tomato based on quality principle component analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 75-80. (in Chinese)
- 15 李世瑶,蔡焕杰,陈新明. 基于主成分分析的畦灌质量评价[J]. 农业工程学报,2013,29(24):86-93.  
Li Shiyao, Cai Huanjie, Chen Xinming. Evaluation of border irrigation performance based on principal component analyses[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 86-93. (in Chinese)
- 16 刘玉兰,陈刘杨,汪学德,等. 不同压榨工艺对芝麻油和芝麻饼品质的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(6):382-386  
Liu Yulan, Chen Liuyang, Wang Xuede, et al. Effects of different pressing processingses on the quality of sesame oil and cakes[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 382-386. (in Chinese)
- 17 刘庆武,胡志艳. 如何用 SPSS,SAS 统计软件进行正态性检验[J]. 湘南学院学报:自然科学版,2005,7(3):56-58.  
Liu Qingwu, Hu Zhiyan. How to use SPSS,SAS statistical software for normality test[J]. Journal of Xiangnan University: Natural Sciences, 2005, 7(3): 56-58. (in Chinese)
- 18 毕远杰,王全九,雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油葵产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):83-89.  
Bi Yuanjie, Wang Quanjiu, Xue Jing. Effects of ground coverage measure and water quality on soil water salinity distribution and helianthus yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 83-89. (in Chinese)
- 19 毕远杰,王全九,雪静. 微咸水造墒对油葵生长及土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(7):39-44.  
Bi Yuanjie, Wang Quanjiu, Xue Jing. Effect of saline water for increasing soil water before sowing on helianthus growth and saline distributional characteristics of soil[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 39-44. (in Chinese)

watershed of Binzhou. With DEM data and remote sensing image, the main routes of pollution from non-point sources, i. e. , surface runoff and soil erosion of different land use types were estimated based on SCS – CN model and RUSLE model. The precision of the model was validated and analyzed and heavy metal copper (Cu), lead (Pb) pollution loads from non-point sources in the watershed of Yellow River were estimated. The results showed that big differences existed among the soil heavy metal concentration background values from different land use types in the study area: in industrial land, mining land and grassland, the background value of Cu and Pb was high; in woodland, the value was low. The total loads of Cu and Pb was about 6 519. 13 kg/a and 2 680. 04 kg/a. The variation ranges of heavy metal pollution loads from soil erosion were large as well: the values in sparse woodland and grassland were the highest; in woodland and irrigable land were the lowest. The value of heavy metal pollution loads from surface runoff also differed greatly: the value in grassland and sparse woodland was much higher than in woodland and dry land. The research could be used for further analyzing the characteristics of the transfer of heavy metals, studying the heavy metal loads from non-point source, and adjusting the land use structure reasonably.

**Key words:** Heavy metal Non-point sources pollution Pollution load Surface runoff Soil erosion

(上接第 167 页)

## Evaluation of Regulated Deficit Irrigation Performance with Saline Water Based on Principal Component Analysis

He Xin<sup>1</sup> Yang Peiling<sup>1</sup> Ren Shumei<sup>1</sup> Cheng Manjin<sup>2</sup> Zhang Yiqiang<sup>3</sup> Jiang Guangyu<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Water Conservancy Science Research of Inner Mongolia, Huhhot 010020, China

3. Water Conservancy Research Institute of Bayannaoer, Linhe 015000, China)

**Abstract:** In order to find optimal regulated deficit irrigation scheduling with saline water for better oil quality, higher yield and safer management of high oleic oil sunflower, a pot experiment was conducted and the principle component analysis method was used to establish a comprehensive irrigation quality index of saline water by the weighted sum of different evaluation indices. Then, this index was applied to evaluate and analyze the performance of saline water deficit irrigation effect. The results showed that comprehensive irrigation quality principle component obeyed normal distribution significantly, and included 93.29% primordial quality attribute variation information with better representation and objectivity, and thus it could be used as the overall oil sunflower regulated deficit irrigation with saline water evaluation index. The critical concentration of saline water for oil sunflower in Hetao Irrigation District is 3.5 g/L, and the most suitable period of water deficit is the floral initiation stage. When the concentration of saline water is low (less than 3.5 g/L), the regulated deficit irrigation with saline water has less effect on the yield and quality of oil sunflower. When the concentration is 3.5 g/L, irrigation scheduling with mild deficit (80% I) in floral initiation stage and 278.28 mm water amount during the total growth period should be the optimal irrigation pattern for saline water of regulated deficit irrigation with the coordinated yield and quality of oil sunflower.

**Key words:** Saline water Regulated deficit irrigation Principal component analysis Oil sunflower Irrigation performance Quality control