

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.029

基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究

严富来¹ 张富仓¹ 范兴科² 王英¹ 侯翔皓¹ 何琼¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为分析不同水氮供应对宁夏沙土春玉米主要评价指标的影响,采用灌水和施氮2因素交互设计,灌水量设置3个水平(W0.6(0.6 K_cET_0)、W0.8(0.8 K_cET_0)和W1.0(K_cET_0), K_c 为作物系数, ET_0 为潜在作物蒸发蒸腾量),施氮量设置4个水平:N150(150 kg/hm²)、N225(225 kg/hm²)、N300(300 kg/hm²)和N375(375 kg/hm²),进行了大田试验。结果表明:灌水量和施氮量的交互作用对产量、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(PFPN)有极显著影响,对地上部干物质积累量和籽粒氮素积累量有显著影响;在相同灌水条件下,春玉米地上部干物质积累量、产量、WUE均随施氮量的增加先增加后减小。主成分分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法与基于组合赋权的TOPSIS模型两两之间具有良好的相关性,各模型之间相关系数均值为0.465~0.787;基于整体差异组合评价模型得出W0.8N300评价价值最高。考虑试验区年际降雨量分布不均,经回归分析拟合得出,当春玉米生育期内灌水量与有效降雨量之和为544 mm、施氮量为260 kg/hm²时,春玉米综合指标评价价值最高(1.47),为适宜的春玉米滴灌灌水施肥量。本研究可为沙土地区春玉米滴灌施肥过程中水氮科学管理提供指导依据。

关键词: 春玉米; 沙土地区; 滴灌施肥; 水氮互作; 整体差异组合评价模型

中图分类号: S275.6; S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)09-0258-08

OSID:



Optimal Irrigation and Nitrogen Application Amounts for Spring Maize Based on Evaluation Model in Sandy Soil Area in Ningxia

YAN Fulai¹ ZHANG Fucang¹ FAN Xingke² WANG Ying¹ HOU Xianghao¹ HE Qiong¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objectives were to investigate the response of yield, grain nitrogen accumulation rate, water use efficiency (WUE) and nitrogen partial factor productivity (PFPN) of spring maize to irrigation and nitrogen, and explore a comprehensive method for evaluating these indexes. The plot experiments were conducted with two factors of irrigation and nitrogen. There were three irrigation levels (W0.6: 0.6 K_cET_0 ; W0.8: 0.8 K_cET_0 and W1.0: K_cET_0 , K_c was the crop coefficients, ET_0 was the potential reference crops evapotranspiration) and four nitrogen levels (N150: 150 kg/hm²; N225: 225 kg/hm²; N300: 300 kg/hm² and N375: 375 kg/hm²). The results showed that the interaction of irrigation and nitrogen application had extremely significant effects on yield, WUE and PFPN, and significant effects on shoot biomass and grain nitrogen accumulation amount. Under the same irrigation levels, the shoot biomass, yield, and WUE were increased at first, and then decreased with the increase of nitrogen application rate. The average correlation coefficient of the principal component analysis, membership function analysis, grey relational grade analysis and the TOPSIS model based on combination weighting was 0.465~0.787, which had a strong correlation. The combined evaluation model based on overall difference showed that W0.8N300 had the highest score. Further comprehensive analysis, considering

收稿日期: 2019-12-09 修回日期: 2020-01-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403303)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)和教育部高等学校创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 严富来(1995—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: 937429331@qq.com

通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

the uneven distribution of annual rainfall in Ningxia, the results suggested that when the sum of irrigation amount and effective rainfall was 544 mm and nitrogen application rate was 260 kg/hm², the evaluations of comprehensive index could reach the maximum. The research provided a guidance for scientific management of water and nitrogen application for spring maize under the local drip fertigated condition in sandy soil area in Ningxia.

Key words: spring maize; sandy soil area; drip fertigation; water and nitrogen interaction; overall difference combined evaluation model

0 引言

春玉米是宁夏回族自治区(以下简称宁夏)主要粮食作物之一,其种植面积最大、分布范围最广,对保障当地粮食安全和缓解能源危机具有重要意义^[1]。据报道,宁夏沙土面积占其耕地面积的22.3%^[2]。在沙土地地区春玉米种植面积不断增加的同时,由于玉米生产过程中不合理的灌溉方式,导致农田水肥用量过大等现象依然普遍存在,这不仅造成资源浪费和水肥利用效率降低,还会导致作物减产和环境污染等^[3-6]。近年来,在春玉米种植生产过程中,已不再只关注作物产量或者某个单一指标,也开始考虑产量、水肥利用效率和作物养分吸收利用等综合因素。因此,通过改善农田灌溉方式和农业水肥调控获得高产,且节水节肥,提高作物养分吸收效率就显得尤为重要。

利用田间试验手段研究滴灌水肥耦合对作物生长、产量、水肥及养分吸收利用效率的影响是制定高效灌溉施肥制度的重要途径。目前,国内外学者已建立了对各项指标的评价分析模型,其中主成分分析法^[7-8]、层次分析法(AHP)^[9-10]、隶属函数分析法^[11-12]、灰色关联度分析法^[13-14]和基于组合赋权的TOPSIS模型^[15-16]等单一评价方法在农业领域运用较多。然而,在实际评价和分析过程中,由于不同评价模型的机理不同,模型分析数据的角度和侧重点不同,加上评价过程中会存在人为的因素,导致对同一个评价对象会得出不同的评价结果,使得各评价方法之间存在一定的差异性。人为选择任何一种方法都难以得出客观的评价分析结果,从而导致管理者不能作出合理的判断。因此,在解决多种单一独立评价模型评价结果不一致问题的研究中,有学者提出将多个评价模型通过合理的组合算法(即按照一定的准则和规则将其进行组合)将评价结果进行综合分析,使评价结果更为客观^[17]。但这种将多种单一评价模型组合的综合评价方法在农业领域尤其是春玉米水肥管理方面的应用相对较少。

为探讨组合评价方法及其在春玉米综合指标评价中的应用,本文以春玉米滴灌水肥一体化试验为基础,选取产量、氮素吸收累积量及水肥利用效率为

指标,研究不同水氮供应条件对宁夏沙土春玉米生长、产量、氮素吸收累积及水肥利用效率的影响,运用主成分分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法和基于组合赋值的TOPSIS模型对春玉米的各项指标进行独立评价,并在综合评价基本原则的指导下,通过合理的组合算法将单一评价模型的评价结果进行综合分析,按照评价值选出最优处理,探讨春玉米综合评价指标对水氮因素的响应关系,旨在提出较为适宜的滴灌水氮管理制度,为宁夏沙土地地区滴灌春玉米精确水氮管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年4—9月在宁夏回族自治区吴忠市盐池县冯记沟试验基地进行。试验地位于东经106°31',北纬38°34',海拔1204 m,属典型的温带大陆性季风气候。试验区年日照时数为2867 h,年平均气温8.5℃,大于等于10℃积温为2944.9℃,无霜期128 d;年平均降雨量290 mm,且年际变化大,多集中在7~9月,年蒸发量2179.8 mm。试验区土壤为沙土,土壤容重1.55 g/cm³,0~100 cm田间持水率为27.10%(体积含水率),pH值8.60,地下水埋深30 m以上,基础肥力(质量比)为:有机质4.13 g/kg,全氮0.30 g/kg,全磷0.34 g/kg,全钾19.24 g/kg,速效磷5.48 mg/kg,速效钾78.33 mg/kg。试验区玉米生育期(4—9月)有效降雨量为205 mm(图1a)。供试春玉米品种为“先玉1225”,为当地推广的密植品种。2018年4月20日播种,9月26日收获,共160 d。肥料选用农民常用肥,分别为尿素(N质量分数46.4%)、磷酸一铵(N质量分数12%、P₂O₅质量分数61%)和硫酸钾(K₂O质量分数52%)。滴灌施肥系统由水泵、过滤器、施肥罐和输配水管道系统等组成。滴灌带为内嵌式滴灌带,滴头间距30 cm,滴头流量2.5 L/h,滴头工作压力0.1 MPa。

1.2 试验设计

试验以灌水量和施氮量为试验因子,施氮量设置4个水平:N150、N225、N300和N375(施氮量分别为150、225、300、375 kg/hm²),磷肥和钾肥施用量

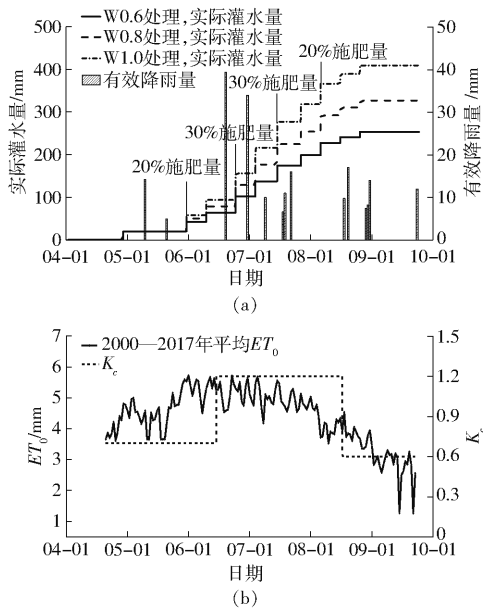


图1 春玉米生育期实际灌水量、施肥量、有效降雨量和多年平均潜在作物蒸腾蒸发量(ET_0)

Fig.1 Actual irrigation amount, fertilizer application rate, multi-year average potential reference crops evapotranspiration (ET_0) and effective rainfall during spring maize growth period

均为 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。将试验区 2000—2017 年春玉米生育期内潜在作物蒸发蒸腾量(ET_0)和作物系数 K_c 相结合(图 1b)。 K_c 根据作物生育阶段而定,苗期取 0.7、拔节—灌浆期取 1.2、乳熟—成熟期取 0.6^[18]。进而推算出试验区春玉米生育期内潜在充分耗水量($K_c ET_0$)为 450 mm,记为 W1.0。以此为依据,设 3 个滴灌水量 W0.6($0.6K_c ET_0$)、W0.8($0.8K_c ET_0$)和 W1.0,共 12 个处理,随机排列,各处理 3 次重复。

试验区采用水肥一体化的滴灌施肥方式,每小区长为 20 m,宽为 6.6 m,小区面积为 132 m^2 ,每个处理 3 次重复。春玉米采用宽窄行播种,宽行玉米间距为 70 cm,窄行玉米间距为 40 cm,玉米株距为 20 cm,种植密度为 $90\,900 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 。滴灌带铺设在窄行玉米中间,一条滴灌带控制 2 行春玉米灌水施肥,为保证灌水施肥的均匀性,采用横向供水方式^[19]。根据春玉米的生长特性,整个生育期共施肥 4 次,每次施肥量占总施肥量分别为 20% (苗期)、30% (小喇叭口期)、30% (抽雄期)和 20% (灌浆期)^[20]。另外,试验区为引黄(水库蓄水)灌区,需采取轮灌工作制度,因此采取 10 d 作为设计灌水间隔^[17]。由于该地区春季极易发生春旱,导致出苗率降低,为了提高出苗率,该地区一般采用干播湿出的玉米播种方法,等到玉米小苗末期才开始灌水,促进根系生长;另外根据该地区历史气象资料,试验区年

际降雨量变化较大,且多集中在 7~9 月。因此,春玉米的灌溉制度需根据实际降雨情况进行灌水量和灌水日期的调整,2018 年春玉米生育期内的实际灌水量分别为 W0.6(253 mm)、W0.8(327 mm)、W1.0(409 mm)。

1.3 测定内容和方法

1.3.1 地上部干物质累积量与籽粒氮素累积量测定

在春玉米成熟期取样,每个小区选取有代表性的 3 株植株,从茎基部与地上部分离,去除表面污垢,放入干燥箱 105°C 杀青 0.5 h, 75°C 干燥至恒定质量,采用电子天平称量并计算单株地上干物质质量,最后换算成群体生物量(kg/hm^2)。称取籽粒的干物质质量后磨碎,用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,并用连续流动分析仪(Auto Analyzer-III,德国 Bran Luebbe 公司)测定植物样品全氮含量^[21]。

1.3.2 产量测定

在春玉米成熟期,随机选取小区 1 条滴灌带控制的 2 行玉米,连续取 20 株,每个小区 3 次重复。晒干脱粒测定其总质量,最终折算成含水率为 14% 的籽粒产量^[22]。

1.3.3 水分利用效率及氮肥偏生产力计算

水分利用效率(WUE)的计算公式为^[22]

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

其中 $ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W$ (2)

式中 Y ——产量, kg/hm^2

ET ——作物耗水量, mm

P_r ——有效降雨量, mm

U ——地下水补给量, mm

I ——灌水量, mm

D ——深层渗漏量, mm

R ——径流量, mm

ΔW ——试验初期和试验末期土壤水分含量的变化量, mm

春玉米播前和收获后,在每个小区内取土,距滴灌带 0、20、40 cm 3 个位置点取样,每 20 cm 取 1 次,土壤剖面范围分别在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,采用干燥法测定土壤含水率,取其平均值作为该小区的土壤含水率(%)。因试验区地势平坦,地下水埋藏较深,根据实测,生育期内 1 m 深土壤含水率变化不大,且滴灌湿润程度较浅, U 、 R 和 D 均可忽略不计。则可将式(2)简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W \quad (3)$$

氮肥偏生产力(FPPN)的计算公式为^[23]

$$FPPN = Y/F_N \quad (4)$$

式中 F_N ——施氮量, kg/hm^2

1.3.4 基于整体差异组合评价模型的春玉米综合指标评价

将主成分分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法和 TOPSIS 分析模型的评价值用矩阵 A (不失一般性, 设 $n \geq 3, m \geq 3$) 表示, 即

$$A = [a_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 n ——评价对象个数

m ——评价方法种数

将式(5)进行标准化处理, 求解实对称矩阵 $H = A^T A$, 求解矩阵 H 的最大特征值及相应的标准特征向量; 根据标准特征向量中各分量的取值情况确定组合权向量; 将权向量代入

$$y_i = \lambda_1 a_{i1} + \lambda_2 a_{i2} + \cdots + \lambda_m a_{im} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (6)$$

式中 y_i ——评价对象的组合评价价值

λ_i ——最大特征值所对应的标准特征向量

计算各评价对象的组合评价价值(组合评价价值越大表明评价对象越优), 并对评价对象按组合评价价值进行排序^[24]。

1.3.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行隶属函数分析法、灰色关联度分析法、TOPSIS 分析模型和整体差异组合模型的计算; 采用 SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行主成分分析法的运算、

Spearman 和 Pearson 相关系数的求解及对试验数据进行方差分析。用 Mathematica 9.0 软件对春玉米综合指标评价价值与水氮供应的关系进行回归分析并进行寻优, 用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对春玉米地上部干物质累积量、产量、水分利用效率及氮肥偏生产力的影响

由表 1 可知, 灌水量和施氮量对地上部干物质累积量、产量、籽粒氮素累积量、水分利用效率 (WUE) 和氮肥偏生产力 (PFPN) (除施氮量) 均有极显著性影响 ($P < 0.01$), 二者的耦合作用对产量、水分利用效率和氮肥偏生产力有极显著性影响 ($P < 0.01$), 对地上部干物质累积量和籽粒氮素累积量有显著性影响 ($P < 0.05$)。在各灌水水平下, 地上部干物质累积量、产量、水分利用效率均随施氮量的增加先增加后减小, 氮肥偏生产力与施氮量呈反比例关系。其中, W0.8N300 处理的产量和 WUE 最大, 分别为 $16\,387\text{ kg/hm}^2$ 和 3.34 kg/m^3 ; W1.0N300 处理的籽粒氮素累积量最大, 为 95.29 kg/hm^2 ; W0.8N150 处理的 PFPN 最大, 为 84.79 kg/kg 。

2.2 不同优化目标下最佳水氮用量组合及单一指标间的相关分析

运用 Mathematica 9.0 软件对春玉米各个指标进行寻优, 灌水量上下限分别设为 W1.0 处理和 W0.6 处理的灌水量, 施氮量的上下限设为 N375 和

表 1 不同水氮处理对地上部干物质累积量、产量、籽粒氮素累积量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响

Tab. 1 Effects of different water and nitrogen treatments on aboveground dry biomass, yield, grain nitrogen accumulation, water use efficiency and nitrogen partial factor productivity

灌水量	施氮量	地上部干物质累积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	籽粒氮素累积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	氮肥偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W0.6	N150	20 133 ^f	11 607 ^{ef}	63.80 ^g	2.57 ^{cdef}	77.38 ^b
	N225	25 591 ^d	12 832 ^{cde}	79.13 ^{cde}	2.79 ^{bcd}	57.03 ^{def}
	N300	20 484 ^{ef}	11 468 ^{ef}	73.01 ^{def}	2.51 ^{defg}	38.22 ^g
	N375	21 282 ^{ef}	10 293 ^f	75.68 ^{cdef}	2.21 ^g	27.44 ^h
W0.8	N150	22 608 ^e	12 720 ^{de}	69.49 ^{fg}	2.64 ^{bcd}	84.79 ^a
	N225	27 167 ^{bcd}	14 166 ^{cd}	84.46 ^{bc}	2.90 ^b	62.95 ^{cd}
	N300	28 504 ^{abc}	16 387 ^a	92.30 ^{ab}	3.34 ^a	54.62 ^{ef}
	N375	26 745 ^{cd}	14 428 ^{bc}	92.56 ^{ab}	2.84 ^{bc}	38.47 ^g
W1.0	N150	26 960 ^{cd}	10 350 ^f	70.34 ^{efg}	1.81 ^h	68.99 ^c
	N225	29 603 ^a	13 725 ^{cd}	90.06 ^{ab}	2.44 ^{efg}	61.00 ^{de}
	N300	29 339 ^{ab}	15 744 ^{ab}	95.29 ^a	2.85 ^{bc}	52.47 ^f
	N375	22 257 ^{ef}	13 016 ^{cde}	80.49 ^{cd}	2.29 ^{fg}	34.70 ^g
ANOVA 检验 F 值	灌水量	57.75 ^{**}	44.98 ^{**}	21.62 ^{**}	68.20 ^{**}	39.13 ^{**}
	施氮量	23.88 ^{**}	24.86 ^{**}	21.64 ^{**}	28.56 ^{**}	1.32
	灌水量 \times 施氮量	10.80 [*]	6.85 ^{**}	3.40 [*]	7.25 ^{**}	5.85 ^{**}

注: 同列不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$), * 表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), 下同。

N150 处理的施氮量,结果见表 2。由表 2 可知,各指标下的最佳灌水量和施氮量存在一定的差异,相同灌水条件下,很难满足 4 个指标同时达到最大值。进一步分析各指标间的相关性可知(表 3,样本量 $n = 12$),地上部干物质累积量与产量显著正相关,与水分利用效率(WUE)极显著正相关;产量与 WUE 和 PFPN 呈极显著正相关;其余各指标间无显著相关性。说明地上部干物质累积量的提高是产量增长的基础,是评价 WUE 的依据,较高的地上部干物质累积量能显著促进春玉米增产;籽粒氮素累积量与各个指标之间无显著相关性。总地来看,春玉米单一指标之间有一定的重叠性,同时又互相不可替代,需要依据各项单一指标建立综合评价体系,对春玉米各项指标进行客观准确的评价。

表 2 不同优化目标下最佳水氮用量组合

Tab.2 Optimal combination of water and nitrogen under different targets for optimization

参数	优化目标			
	产量	籽粒氮素累积量	水分利用效率	氮肥偏生产力
灌水量/mm	350	364	325	325
施氮量/(kg·hm ⁻²)	285	297	270	150

表 4 各模型评价结果

Tab.4 Results of different evaluation models

处理	主成分分析法		隶属函数分析法		灰色关联度分析法		基于组合赋权 TOPSIS 模型		整体差异组合评价模型	
	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名	评价值	排名
W0.6N150	-0.225	8	39.58	8	0.145	9	0.589	4	0.445	8
W0.6N225	0.112	7	51.50	7	0.162	7	0.499	7	0.666	7
W0.6N300	-0.595	10	28.27	10	0.143	10	0.210	11	-0.033	10
W0.6N375	-1.070	12	15.97	12	0.130	12	0.108	12	-0.436	12
W0.8N150	0.155	6	53.04	6	0.161	8	0.674	1	0.791	6
W0.8N225	0.532	3	65.58	3	0.187	4	0.624	2	1.061	3
W0.8N300	1.203	1	84.47	1	0.250	1	0.621	3	1.569	1
W0.8N375	0.369	4	61.43	4	0.193	3	0.401	9	0.827	4
W1.0N150	-0.970	11	23.54	11	0.131	11	0.467	8	-0.145	11
W1.0N225	0.186	5	59.85	5	0.178	5	0.556	6	0.792	5
W1.0N300	0.765	2	75.27	2	0.228	2	0.559	5	1.227	2
W1.0N375	-0.462	9	35.43	9	0.165	6	0.240	10	0.105	9

表 5 各评价模型评价值的相关系数

Tab.5 Correlation coefficients of evaluation values of each evaluation model

	主成分分析法	隶属函数分析法	灰色关联度分析法	基于组合赋权的 TOPSIS 模型	均值
主成分分析法			0.848	0.515	0.787
隶属函数分析法			0.848	0.515	0.787
灰色关联度分析法	0.848	0.848		0.364	0.686
基于组合赋权的 TOPSIS 模型	0.515	0.515	0.364		0.465

价对象越优,结果如表 4 所示。根据整体差异组合评价模型结果可知,模型评价值由大到小依次为 W0.8N300、W1.0N300、W0.8N225、W0.8N375、W1.0N225、W0.8N150、W0.6N225、W0.6N150、W1.0N375、W0.6N300、W1.0N150、W0.6N375;并

表 3 春玉米单一指标间的 Spearman 相关系数

Tab.3 Spearman correlation coefficients between single indicators of spring maize

	地上部干物质累积量	产量	水分利用效率	氮肥偏生产力
产量	0.681 *			
水分利用效率	0.790 **	0.839 **		
氮肥偏生产力	0.351	0.837 **	0.562	
籽粒氮素累积量	0.126	0.013	-0.366	0.064

2.3 基于多种评价分析方法的最优灌水施氮量选取

由于我国目前没有关于春玉米各项指标的统一标准,因此本文采用向量归一化法对春玉米各项指标实测值进行无量纲化处理。分别采用主成分分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法、基于组合赋权的 TOPSIS 模型对春玉米综合指标进行独立评价(表 4)。由表 4 可知,多个处理在不同的单一评价模型中的排名存在一定的差异。因此对 4 种单一评价模型的评价值进行 Kendall 相关性分析(表 5)。由表 5 可知,各单一模型的评价值与其他 3 种间的相关系数均值在 0.465 ~ 0.787 之间。进一步采用整体差异组合模型对这 4 种单一模型的评价值进行综合评价,并按评价值进行排序,评价值越大表明评

且整体差异组合评价模型与该 4 种单一模型之间具有较高的相关性,相关系数均值为 0.841。

2.4 春玉米综合评价指标对水氮供应的响应

考虑试验区年降雨分配不均,运用 Mathematica 9.0 软件将灌水量与有效降雨量之和与施氮量相结

合对春玉米综合指标评价值进行回归分析拟合,得出灌水量与有效降雨量之和与施氮量2个因素和春玉米综合指标评价值 Z 的二次多项式

$$Z = -33.10 + 0.12x - 0.00012x^2 + 0.0076y + 0.000038xy - 0.000055y^2 \quad (7)$$

式中 x ——灌水量与有效降雨量之和,mm

y ——施氮量, kg/hm^2

由式(7)可得灌水量+有效降雨量与施氮量的耦合效应曲面(图2)(图中红点代表实测值)。由图2可以看出,无论灌水量+有效降雨量处于任何水平,评价值均随着施氮量的增加先增加后减小;同样,无论施氮量处于任何水平,春玉米综合指标评价值均随着灌水量+有效降雨量的增加先增加后减小,说明二者的交互作用对春玉米综合指标评价值存在一个最优解。由式(7)计算可知,当灌水量+有效降雨量为544 mm,施氮量为 $260 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,春玉米综合指标评价值最高,为1.47。

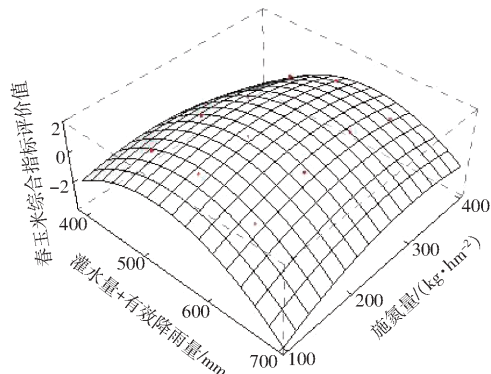


图2 灌水量+有效降雨量和施氮量对春玉米综合指标评价值的耦合效应

Fig.2 Coupling effect of irrigation amount + effective rainfall and nitrogen application on evaluations of comprehensive index of spring maize

3 讨论

构建综合指标评价体系可为提高作物产量、节水、节肥和养分吸收利用效率提供科学依据,提高农业管理水平^[25]。本研究结果表明,水氮供应对产量、水分利用效率和氮肥偏生产力有极显著性影响($P < 0.01$),对地上部干物质累积量和籽粒氮素累积量有显著性影响($P < 0.05$)。相同灌水条件下,地上部干物质累积量、产量和水分利用效率(WUE)均随施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,PFPN与施氮量呈反比,与前人研究结果大致相似^[22,26-27]。根据各项指标的相关系数可知,地上部干物质累积量与产量和WUE呈正相关性,因此可以通过水肥供应调节地上部干物质累积量从而优化产量和WUE。另外,在评价各项指标时,单一处理

不能同时满足各项指标达到最优化,使得各项指标的最优处理差异较大。因而,需要进一步选择恰当的评价指标,建立科学的评价模型对春玉米各项指标进行综合评价。

在作物种植生产和评价体系过程中,选择合适的评价指标,建立正确的评价模型值得继续深入研究。本研究运用系统综合评价的数学模型方法,结合4种单一评价分析模型对本试验各个处理的各项指标进行独立分析,所得出的各个处理之间的评价结果具有一定的差异性,原因可能在于各个单一评价方法对评价对象的分析角度和信息利用的不同。另外,在这4种单一评价模型中,由于基于组合赋权的TOPSIS模型的评价结果与其他3种单一评价模型的综合相关性较弱(表5),评价结果较差,因而并不推荐使用。针对此类问题,部分学者也对独立模型之间相组合的相关性和实用性进行了探讨研究^[28-29],其中包括在组合评价值结论的基础上再进行二次组合评价,通常这种方法也会增加计算和模型的复杂性。本文在4种单一模型评价结果的基础上,分析各模型之间的相关性,得出该4种单一评价模型的相关性系数较高,进而采用整体差异组合评价模型将4种单一评价模型的评价值进行采集和综合评价,从而得出最终的评价结果。整体差异组合评价模型与本文中的4种单一评价模型的相关系数平均值为0.841,具有较高的相关性。这种评价模型和评价结果克服了多种单一评价方法结论不一致的问题,使结果更加客观准确,可用于春玉米的水肥管理决策。基于整体差异组合评价模型的评价结果表明,W0.8N300处理的评价值最高,为本试验研究的最优处理。

进一步分析春玉米综合评价值对水氮供应的响应,并在分析过程中考虑到试验区年降雨分配不均,得出春玉米综合指标评价值与水氮用量的回归模型,表明无论固定灌水量+有效降雨量(施氮量)在任何水平,评价值均随着施氮量(灌水量+有效降雨量)的增加先增加后减小,二者呈抛物线型变化。因而,要获得较高的春玉米产量、水肥利用效率及养分吸收利用率,水氮用量要控制在合适的范围。为提高水氮管理优化结果的适用性,进一步分析春玉米综合评价指标和灌水量+有效降雨量与施氮量之间的关系,得出当灌水量+有效降雨量为544 mm,施氮量为 $260 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,春玉米综合指标评价值最高,为1.47,可推荐为该沙土地地区适宜的春玉米滴灌灌水施氮制度。但本研究只进行了1年的试验,本文采用的整体差异组合评价模型得出的结果的可靠性有待进一步长期的试验结果检验。

4 结论

(1) 水氮耦合作用对产量、水分利用效率和氮肥偏生产力有极显著影响,对地上部干物质积累量和籽粒氮素积累量有显著影响;在相同灌水条件下,地上部干物质积累量、产量、水分利用效率均随施氮量的增加先增加后减小,氮肥偏生产力与施氮量呈反比例关系。

(2) 主成分分析法、隶属函数分析法、灰色关联度分析法与基于组合赋权的 TOPSIS 模型之间的相关系数均值在 0.465 ~ 0.787 之间;基于整体差异组合评价模型得出 W0.8N300 为最优处理;考虑试验区年降雨量分配不均,通过优化水氮管理方案得出,灌水量 + 有效降雨量 544 mm、施氮量 260 kg/hm² 为宁夏沙土地地区适宜的春玉米滴灌水氮施肥制度。本研究成果对宁夏沙土地地区春玉米滴灌水氮管理具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 李新,许志斌,余奎军,等. 宁夏玉米产业的现状和发展[J]. 种子,2009,28(9):104-106.
LI Xin, XU Zhibin, SHE Kuijun, et al. Status and development of maize industry in Ningxia Province[J]. Seed, 2009, 28(9):104-106. (in Chinese)
- [2] 张建业,王奇,夏学智. 宁夏农垦耕地土壤类型与分布规律[J]. 宁夏农林科技,2012,53(10):105-109.
ZHANG Jianyun, WANG Qi, XIA Xuezhi. Soil classes and distribution regularity of farmland in Ningxia agricultural reclamation area[J]. Ningxia Journal of Argi. and Fores. Sci. & Tech., 2012, 53(10):105-109. (in Chinese)
- [3] TANG L S, LI Y, ZHANG J H. Partial root zone irrigation increases water use efficiency, maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10):1527-1533.
- [4] BADR M A, HUSSEIN S D A, ELTOHAMY W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands[J]. Gesunde Pflanzen, 2010, 62(1):11-19.
- [5] 张忠学,刘明,齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):284-291.
ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):284-291. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002031&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.031. (in Chinese)
- [6] 张忠学,尚文彬,齐智娟,等. 不同水氮管理下玉米叶片衰老对氮转移效率的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):297-303,267.
ZHANG Zhongxue, SHANG Wenbin, QI Zhijuan, et al. Effects of different water and nitrogen managements on nitrogen remobilization efficiency during leaf senescence in maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):297-303,267. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.034. (in Chinese)
- [7] 王玉亮,刘贤喜,苏庆堂,等. 多对象特征提取和优化神经网络的玉米种子品种识别[J]. 农业工程学报,2010,26(6):199-204,389.
WANG Yuliang, LIU Xianxi, SU Qingtang, et al. Maize seeds varieties identification based on multi-object feature extraction and optimized neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):199-204,389. (in Chinese)
- [8] 何文铸,杨勤,高强,等. 主成分分析对青贮玉米材料综合评价与筛选的研究[J]. 玉米科学,2008,16(3):26-29.
HE Wenzhu, YANG Qin, GAO Qiang, et al. Screening and evaluation for the silage maize inbred lines by using PCA[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(3):26-29. (in Chinese)
- [9] OMKARPRASAD S V, SUSHIL K. Analytic hierarchy process: an overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1):1-29.
- [10] 张亚琼,张伟,戴思兰,等. 基于 AHP 的中国传统盆栽菊花产业化品种筛选[J]. 中国农业科学,2011,44(21):4438-4446.
ZHANG Yaqiong, ZHANG Wei, DAI Silan, et al. AHP-based screening of traditional potted chrysanthemum for industrialized production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21):4438-4446. (in Chinese)
- [11] 翟新秘,秦利军,项阳,等. 隶属函数分析法对 25 份贵州玉米种质抗旱性评价研究[J]. 种子,2018,37(9):51-55.
ZHAI Xinmi, QIN Lijun, XIANG Yang, et al. Evaluation of drought-tolerance in 25 maize germplasms based on subordinate functional analysis[J]. Seed, 2018, 37(9):51-55. (in Chinese)
- [12] 张士龙,贺正华,黄益勤,等. 主成分分析和隶属函数法对含非洲种质青贮玉米的评价[J]. 湖北农业科学,2016,55(15):3824-3828,3837.
ZHANG Shilong, HE Zhenghua, HUANG Yiqin, et al. Comprehensive evaluation of the silage maize crosses derived from Africa germplasm using principal component analysis and subordinate function method[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(15):3824-3828,3837. (in Chinese)
- [13] 魏锋,马毅,洪德峰,等. 基于灰色关联度分析的玉米新组合产量及相关性状评价[J]. 安徽农业科学,2016,44(32):12-16.
WEI Feng, MA Yi, HONG Defeng, et al. Comprehensive evaluation of yield and correlative traits of new corn combination on the basis of grey correlative analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(32):12-16. (in Chinese)
- [14] 吴荣华,庄克章,张春艳,等. 鲁南地区玉米产量与主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 作物研究,2019,33(6):524-527.

- WU Ronghua, ZHUANG Kezhong, ZHANG Chunyan, et al. Grey correlation degree analysis of maize yield and main agronomic characters in Lunan region[J]. *Crop Research*, 2019, 33(6): 524–527. (in Chinese)
- [15] WANG H D, WANG X K, BI L F, et al. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of Northern China based on TOPSIS[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 55–68.
- [16] SEYEDMOHAMMADI J, SARMADIAN F, JAFARZADEH A A, et al. Application of SAW, TOPSIS and fuzzy TOPSIS models in cultivation priority planning for maize, rapeseed and soybean crops[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 178–190.
- [17] 陈国宏, 李美娟. 基于方法集的综合评价方法集化研究[J]. *中国管理科学*, 2004, 12(1): 101–105.
CHEN Guohong, LI Meijuan. The research on the comprehensive evaluation method integration based on method set[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, 12(1): 101–105. (in Chinese)
- [18] RICHARD G, ALLEN L S P, DIRK R, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [19] 范军亮, 张富仓, 吴立峰, 等. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 96–101.
FAN Junliang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12): 96–101. (in Chinese)
- [20] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 145–155.
ZOU Haiyang, ZHANG Fucang, ZHANG Yuxin, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21): 145–155. (in Chinese)
- [21] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 133–142, 112.
ZHOU Changming, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 133–142, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160218&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.018. (in Chinese)
- [22] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 111–120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigated spring maize in Ningxia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 111–120. (in Chinese)
- [23] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151–3158.
WANG Yilun, LI Chaohai, TAN Jinfang, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3151–3158. (in Chinese)
- [24] 胡田田, 何琼, 洪霞, 等. 基于模糊 Borda 组合模型评价番茄产量及品质对水肥供应响应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 142–151.
HU Tiantian, HE Qiong, HONG Xia, et al. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(19): 142–151. (in Chinese)
- [25] 洪霞, 胡田田, 刘杰, 等. 基于方法集的番茄营养品质组合评价模型构建及其对水肥供应的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 129–138, 148.
HONG Xia, HU Tiantian, LIU Jie, et al. Construction of comprehensive evaluation model for tomato nutrition quality based on method set and its response to water and fertilizer supply[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 129–138, 148. (in Chinese)
- [26] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3679–3686.
GUO Bingyu, GAO Hui, TANG Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3679–3686. (in Chinese)
- [27] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北黑土区膜下滴灌施氮管理对玉米生长和产量的影响[J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 529–536.
LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of nitrogen management on the growth and yield of mulched and drip-irrigated maize in Northeast Black Soil Regions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(5): 529–536. (in Chinese)
- [28] 林元庆, 陈加良. 方法群评价中权重集化问题的研究[J]. *中国管理科学*, 2002, 10(专辑): 20–22.
LIN Yuanqing, CHEN Jialiang. Study on combination method of weight set[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2002, 10(Special Issue): 20–22. (in Chinese)
- [29] 彭张林, 张强, 王素凤, 等. 基于评价结论的二次组合评价方法研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(9): 156–164.
PENG Zhanglin, ZHANG Qiang, WANG Sufeng, et al. Research on a recombination evaluation approach based on the previous evaluation results[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(9): 156–164. (in Chinese)