

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21656

灌水和氮肥基追比对旱区马铃薯产量、水肥利用效率和酶活性影响评价

孙富斌¹, 尹娟^{1, 2, 3*}, 魏小东¹, 马正虎¹, 杨莹攀¹, 王顺¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为探明水氮基追施用对马铃薯产量、灌溉水肥利用效率和土壤酶活性等方面的综合影响, 以获取最优水氮基追施用方案。大田试验设置 3 个灌水水平 W1 (900 m³/hm²)、W2 (1350 m³/hm²) 和 W3 (1800 m³/hm²) 以及 3 个氮肥基追比水平 F1 (N_{2:1})、F2 (N_{1:1}) 和 F3 (N_{1:2}), 共 9 个处理, 利用熵权 TOPSIS 法构建宁夏中部旱区马铃薯综合生长评价体系, 并以高产、节水节肥为目标建立马铃薯水氮基追施交互响应数学模型。结果表明, 灌水量和氮肥基追施对马铃薯单株产量、产量、iWUE (灌溉水利用效率)、PFP (肥料偏生产力)、土壤碱性磷酸酶、土壤蔗糖酶均影响显著; 利用熵权 TOPSIS 法建立马铃薯综合评价体系, 得到最优综合响应评分 0.1761, 即为 A7 处理 (1800 m³/hm², N_{2:1}); 由马铃薯综合生长对水氮基追施交互响应模型得出, 水氮基追施单因素对马铃薯综合生长影响均呈开口向下的二次抛物线, 水氮基追施交互影响显著。当施肥编码为 -0.7723 (基肥: 追肥 = 1.6553: 1)、灌水编码为 0.6553 (1697.535 m³/hm²) 时, 综合评分最高。以综合评分 0.16 划分闭合区域得出马铃薯生产上最佳的灌水区间和氮肥的基追施比例分别为 1440 ~ 1935 m³/hm²、1:1 ~ 2.3:1, 此区间最有利于实现马铃薯水氮协同效应最优。

关键词: 马铃薯; 水氮基追比; 土壤酶活性; 产量; 灌溉水肥利用效率; 综合评价模型

马铃薯是世界上重要的粮食作物之一, 也是西北干旱地区主要的粮食、经济作物之一, 在干旱地区具有举足轻重的地位^[1-2]。水肥配合施用有助于提高马铃薯的产量^[3]。大量研究表明, 施氮量不足会导致作物生长减缓、产量降低, 施氮量过多则会造成经济投入大、氮肥流失而导致环境污染^[4]; 依据马铃薯养分需求合理配施可以显著增产, 提高水氮利用率。何建勋等^[5]研究表明, 单因素水肥耦合对马铃薯产量和水分养分利用效率有显著的影响。土壤酶活性可调节土壤有机残留物生物化学转化和土壤养分循环, 改变土壤养分状况, 为作物提供适宜的生长环境, 从而提高马铃薯的产量^[6]。碱性磷酸酶能促进土壤中有机磷化合物的水解, 可以表征土壤的肥力状况, 也是土壤生

物活性和土壤肥力的重要指标^[7]。适量施用有机肥或有机肥与氮肥配施明显提高土壤有机质和氮、磷、钾养分含量, 改善土壤物理性状, 增强土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶的活性; 过量施氮肥造成土壤 pH 值和土壤酶活性降低^[8-9]。因此, 研究不同灌水量及氮肥基追比对马铃薯产量和土壤酶活性的影响, 对提高马铃薯产量及增强土壤酶活性具有重要意义。

目前, 许多学者利用层次分析法、灰色关联法和 TOPSIS 综合评价法等依据作物产量、品质确定灌水施肥量主要集中在玉米、草莓等多种作物^[10-13], 而利用熵权 TOPSIS 综合评价的方法对马铃薯灌水量及氮肥基追比的研究却鲜有报道。因此, 本文在膜下滴灌不同水肥条件下研究不同灌水量及氮肥基追比对宁夏中部干旱带马铃薯产量、灌溉水肥利用效率、土壤酶活性和经济效益的影响, 利用熵权 TOPSIS 综合评价法优选出马铃薯高产的灌溉施肥方案, 为改善宁夏干旱地区的农田土壤生态环境和马铃薯产业可持续发展提供科学依据。

收稿日期: 2021-12-03; 录用日期: 2022-02-26

基金项目: 宁夏大学一流学科项目 (NXYLXK2021A03)。

作者简介: 孙富斌 (1997-), 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用方面的研究。E-mail: 2234823641@qq.com。

通讯作者: 尹娟, E-mail: yj71115@126.com。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年在宁夏回族自治区吴忠市同心县预望镇南塬村 (106° 21' 52.37" E, 36° 48' 0.77" N), 该区位于宁夏中部干旱带, 海拔为 1730 m, 多年平均降水量 200 mm, 属大陆性干旱气候。试验土壤为砂壤, 土壤 pH 值 8.56, 有效磷 3.94 mg/kg, 速效钾 130 mg/kg, 有机质 6.72 g/kg, 全盐 0.6 g/kg, 碱解氮 38 mg/kg。采用覆膜滴灌种植, 试验品种为“青薯九号”。

1.2 试验设计

试验采用两因素完全随机设计, 试验设计方案如表 1 所示。设计 3 个灌溉定额水平 (900、1350、1800 m³/hm²) 和 3 个氮肥基追比水平 (2:1、1:1、1:2), 共 9 个处理, 每个处理设置 3 次重复, 同

时设置 1 个空白对照处理 (不灌水不施肥), 共 30 个试验小区。试验选取相同量的过磷酸钙 (P₂O₅ 12%, 82.5 kg/hm²)、硫酸钾 (K₂O 50%, 150 kg/hm²) 全部作为基肥施入土壤, 尿素 (N 46%, 187.5 kg/hm²) 采用基肥和追肥结合的方式进行施用。其中基肥在播种前进行撒施施入土壤, 追肥则采用水肥一体化技术在块茎形成期分 3 次施入土壤。根据马铃薯生长特性^[14], 整个生育期共灌水 10 次, 如表 2 所示。

采用膜下滴灌种植模式, “一膜两行” 等行距种植, 试验品种为“青薯九号”, 马铃薯种植株行距 0.5 m × 0.6 m, 每一行种植 10 株, 每个小区种植 40 株马铃薯, 马铃薯种植密度为 33329 株 /hm²。试验地各小区面积均为 5.5 m × 3.2 m。四周设小区间保护行宽 1 m, 塑料薄膜宽 1.2 m, 种子埋深 20 cm。

表 1 试验因素编码与试验设计

处理	施肥水平	氮肥基追比	灌水水平	灌水量 (m ³ /hm ²)	试验设计		
					区组 1	区组 2	区组 3
A1	F1	N _{2:1} (1)	W1	900 (1)	A9	A3	A4
A2	F1	N _{2:1} (1)	W2	1350 (0)	A5	A5	A2
A3	F1	N _{2:1} (1)	W3	1800 (-1)	A2	A9	A7
A4	F2	N _{1:1} (0)	W1	900 (1)	A1	A8	A5
A5	F2	N _{1:1} (0)	W2	1350 (0)	A6	A1	A6
A6	F2	N _{1:1} (0)	W3	1800 (-1)	A7	A4	A1
A7	F3	N _{1:2} (-1)	W1	900 (1)	A3	A6	A8
A8	F3	N _{1:2} (-1)	W2	1350 (0)	A8	A2	A3
A9	F3	N _{1:2} (-1)	W3	1800 (-1)	A4	A7	A9
CK	F0	N _{1:0}	W0	0	CK	CK	CK

注: 括号中数字 -1、0 和 1 为试验因素编码。

表 2 马铃薯各生育期灌水量分配百分比

生育期	牙条生长期	幼苗期	块茎形成期	块茎增长期	淀粉积累期	合计
灌水次数	1	2	3	3	1	10
灌水量百分比 (%)	8.85	17.7	31.86	32.74	8.85	100

1.3 测试项目与方法

1.3.1 基本数据测定

1.3.1.1 土壤酶活性的测定^[15] 分别于马铃薯幼苗期 (6 月 10 日)、块茎形成期 (7 月 3 日)、块茎增长期 (7 月 29 日) 和淀粉积累期 (8 月 28 日) 在各试验小区采用五点取样法取土样后风干保存。

蔗糖酶活性测定采用 3, 5- 二硝基水杨酸比色法; 碱性磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法。

1.3.1.2 产量测定 成熟期收获时, 在每个处理的各小区分别选取 4 m² 进行测产并计算。

1.3.2 计算公式

$$\text{灌溉水利用效率 (iWUE)} = Y/I \quad (1)$$

iWUE 为灌溉水利用效率; Y 为马铃薯产量, kg/hm²; I 为马铃薯生育期灌水量, m³/hm²。

$$\text{肥料偏生产力 (PFPP)} = Y/FT \quad (2)$$

PFPP 为肥料偏生产力; Y 为马铃薯产量, kg/hm²; FT 为尿素、过磷酸钙、硫酸钾的总施用量, kg/hm²。

1.3.3 数据分析与处理

采用 DPS 7.05 进行数据分析处理, Duncan 新复极差法进行多重比较, Matlab 2016b 进行模型解析计算并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮基追比处理对马铃薯产量的影响

由图 1 可知, W1 和 W2 水平下, 马铃薯单株

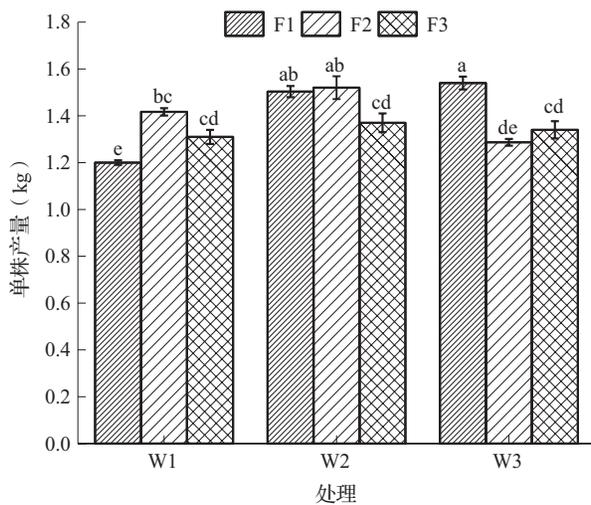


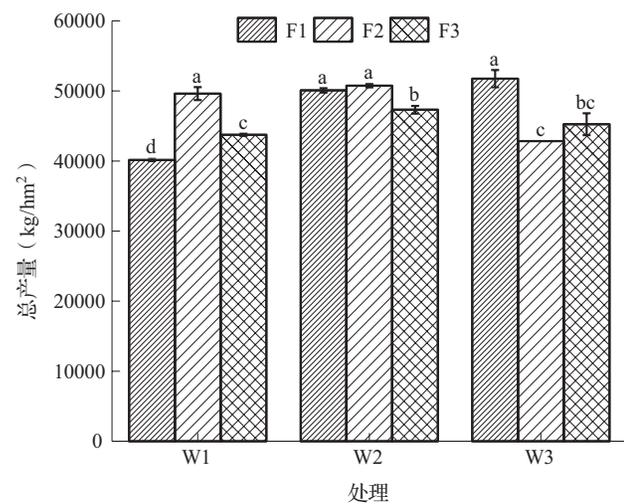
图 1 水氮基追施对马铃薯产量的影响

2.2 不同水氮基追比处理对马铃薯灌溉水利用效率和肥料偏生产力的影响

由图 2 可知, 在 W1、W2 水平下, 灌溉水利用效率呈先增大后减小的趋势; 在 W3 水平下, 灌溉水利用效率由大到小依次为 F1、F3、F2。氮肥基追施比例一定的情况下, 灌水利用效率随着灌水量的增加而减小。整体而言, 灌溉水利用效率 W1F2 最优, 为 55.13 kg/m³。

肥料偏生产力是反映当地土壤基础养分水平和化肥用量综合效应的重要指标。在 W1、W2 水平下, 肥料偏生产力呈先增大后减小的趋势; 在 W3 水平下, 肥料偏生产力大小顺序为: F1>F3>F2。在 F1 水平下, 肥料偏生产力随着灌水量的增加而增加; 在 F2、F3 水平下, 肥料偏生产力随着灌水量的增加呈先增加后减小的趋势。综合分析得出, 肥

产量和总产量均随着氮肥基追施比例减小呈先上升后下降的趋势, F2 表现最好; W3 水平下, 马铃薯单株产量和总产量随着氮肥基追施比例减小呈先下降后上升的趋势, F1 表现最好。单株产量和总产量的最大值均在 A7 (W3F1) 处理, 最小值均在 A1 (W1F1) 处理。从氮肥基追施肥水平来看, F1 水平下, 单株产量和总产量随着灌水量的增加呈增加趋势, W3 单株产量和总产量均最高, 分别为 1.54 kg/株、51753.02 kg/hm²; F2、F3 水平下, 单株产量和总产量随着灌水量的增加先增加后降低, 马铃薯产量大小顺序为: W2>W1>W3。综合来看, 在水肥交互影响下 W3F1 水平表现最优。



料偏生产力在 W2F2 处理下最优, 为 23.91 kg/kg。

2.3 不同水氮基追比处理对土壤酶活性的影响

2.3.1 对马铃薯土壤碱性磷酸酶的影响

不同灌水量及氮肥基追施条件下碱性磷酸酶活性两因素方差分析 (表 3) 表明, 灌水和氮肥交互作用对马铃薯各个生育期土壤碱性磷酸酶活性影响极显著 ($P<0.01$); 灌水对马铃薯各个生育期土壤碱性磷酸酶活性影响极显著 ($P<0.01$); 氮肥基追施对马铃薯苗期、淀粉积累期碱性磷酸酶活性影响显著 ($P<0.05$), 对块茎增长期碱性磷酸酶活性影响极显著 ($P<0.01$)。苗期 A7 与其他处理差异显著, 较 CK 处理高 0.384 mg/(kg·d); 块茎形成期各处理酶活性均有所增加, A7 处理酶活性最高, 为 0.622 mg/(kg·d), 相较于其他处理差异显著; 块茎增长期, A9 在各处理

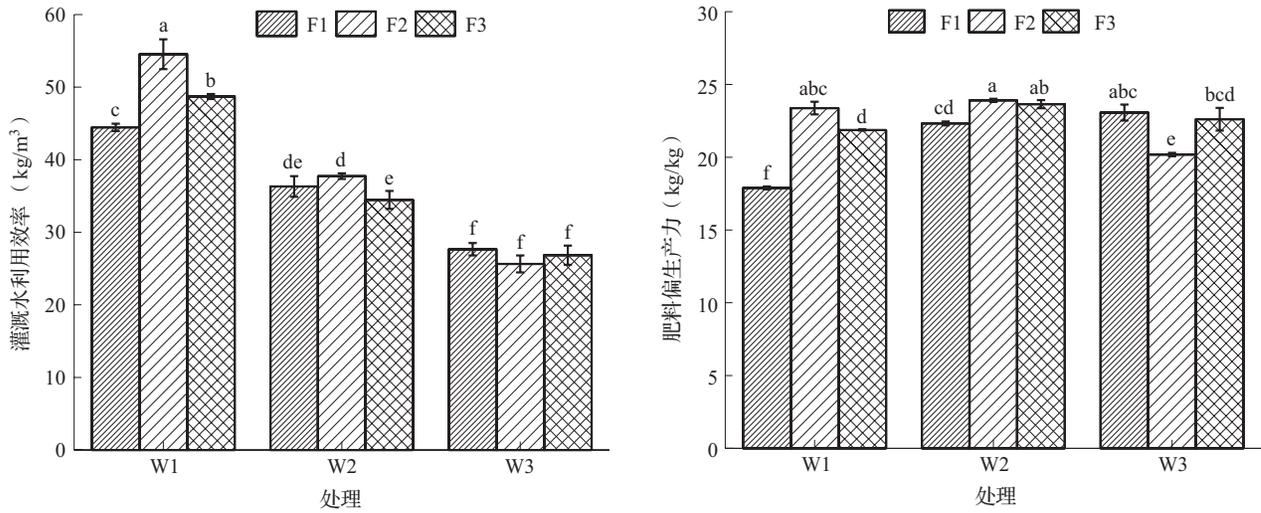


图2 水氨基追施对马铃薯水肥利用效率的影响

间处于最低水平(除CK), A7处于最高水平, 其生育期各处理碱性磷酸酶活性大小顺序为: A7>A2>A1>A4>A8>A3>A6>A5>A9>CK。淀粉积累期, 各处理酶活性相较块茎增长期均有所降低, A2处理达到最大, 与其他处理差异显著。

表3 不同灌水量及氮肥基追比处理对马铃薯0~20 cm 土层土壤碱性磷酸酶活的影响 [mg/(kg·d)]

处理	苗期	块茎形成期	块茎增长期	淀粉积累期
A1	0.389de	0.488def	0.673b	0.480e
A2	0.314f	0.587ab	0.710a	0.695a
A3	0.336ef	0.537bed	0.655bc	0.619b
A4	0.323f	0.448f	0.666bc	0.580bc
A5	0.390de	0.524ede	0.583d	0.531cde
A6	0.417cd	0.537bed	0.632c	0.536cd
A7	0.584a	0.622a	0.713a	0.565cd
A8	0.456bc	0.543bc	0.658bc	0.529cde
A9	0.483b	0.555bc	0.543e	0.516de
CK	0.20	0.29	0.49	0.40
显著性检验				
W	**	**	**	**
F	*		**	*
W × F	**	**	**	**

注: 表中数据为3次试验均值, **表示差异极显著 ($P<0.01$); *表示是差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.3.2 对马铃薯土壤蔗糖酶的影响

由表4可知, 灌水和氮肥基追施交互作用

对马铃薯各生育期土壤蔗糖酶活性影响极显著 ($P<0.01$); 灌水对马铃薯苗期、块茎增长期和淀粉积累期土壤蔗糖酶活性影响极显著 ($P<0.01$); 氮肥基追施对马铃薯苗期、块茎增长期和淀粉积累期土壤蔗糖酶活性影响极显著 ($P<0.01$), 对块茎形成期土壤蔗糖酶活性影响显著 ($P<0.05$)。苗期, A7处理与其他处理差异显著, 最优为15.70 mg/(kg·d); 块茎形成期, A7处理为最优处

表4 不同灌水量及氮肥基追比处理马铃薯0~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性的影响 [mg/(kg·d)]

	苗期	块茎形成期	块茎增长期	淀粉积累期
A1	11.50e	12.15d	13.18g	12.89b
A2	13.28c	14.52b	17.39de	11.23cd
A3	14.28b	14.66b	19.45bc	12.22bc
A4	9.08f	13.68c	16.45e	14.98a
A5	14.30b	13.57c	16.40e	11.82bc
A6	12.90cd	13.38c	14.70f	10.12d
A7	15.70a	16.73a	20.98a	10.60d
A8	12.30de	10.38e	18.59cd	10.24d
A9	14.28b	14.06bc	20.12ab	10.11d
CK	0.20	0.29	0.49	0.40
显著性检验				
W	**		**	**
F	**	*	**	**
W × F	**	**	**	**

理, 与其他处理差异显著, 较 CK 处理高 16.44 mg/(kg·d); 块茎增长期, 各处理蔗糖酶活性均有所增加且达到峰值, A7 处理与其他处理差异显著, 为 20.98 mg/(kg·d); 淀粉积累期较块茎增长期酶活性呈下降趋势, A4 处理与其他处理差异显著。

2.4 不同水氮肥基追比处理下各因素相关性分析
不同灌水量及氮肥基追比处理下各因素相关

性分析如表 5 所示, 苗期土壤碱性磷酸酶活性与灌溉水利用效率呈极显著负相关; 块茎形成期碱性磷酸酶活性与苗期蔗糖酶活性呈极显著相关, 与淀粉积累期蔗糖酶活性呈显著相关; 土壤蔗糖酶活性在苗期与淀粉积累期呈显著相关; 总产量与块茎形成期蔗糖酶活性呈显著相关, 与单株产量呈极显著相关; 肥料偏生产力与单株产量和总产量均呈极显著相关。

表 5 不同灌水量及氮肥基追比处理下各因素相关性分析

相关系数	土壤碱性磷酸酶活性				土壤蔗糖酶活性				单株产量 x9	总产量 x10	PFP x11	iWUE x12
	苗期 x1	块茎形成期 x2	块茎增长期 x3	淀粉积累期 x4	苗期 x5	块茎形成期 x6	块茎增长期 x7	淀粉积累期 x8				
x1	1.00	0.54	-0.12	-0.49	0.56	0.21	0.49	-0.62	-0.03	0.08	0.03	-0.77**
x2	0.54	1.00	0.23	0.36	0.83**	0.53	0.61	-0.75*	0.09	0.30	0.39	-0.06
x3	-0.12	0.23	1.00	0.49	-0.17	0.19	-0.03	0.25	0.04	0.12	-0.21	0.42
x4	-0.49	0.36	0.49	1.00	0.09	0.44	0.30	0.10	0.35	0.41	0.46	0.63
x5	0.56	0.83**	-0.17	0.09	1.00	0.54	0.60	-0.70*	0.08	0.21	0.41	-0.12
x6	0.21	0.53	0.19	0.44	0.54	1.00	0.49	-0.01	0.52	0.65*	0.59	0.20
x7	0.49	0.61	-0.03	0.30	0.60	0.49	1.00	-0.38	0.20	0.27	0.34	-0.37
x8	-0.62	-0.75*	0.25	0.10	-0.70*	-0.01	-0.38	1.00	0.20	0.05	-0.25	0.42
x9	-0.03	0.09	0.04	0.35	0.08	0.52	0.20	0.20	1.00	0.97**	0.79**	-0.02
x10	0.08	0.30	0.12	0.41	0.21	0.65*	0.27	0.05	0.97**	1.00	0.84**	-0.01
x11	0.03	0.39	-0.21	0.46	0.41	0.59	0.34	-0.25	0.79**	0.84**	1.00	-0.01
x12	-0.77**	-0.06	0.42	0.63	-0.12	0.20	-0.37	0.42	-0.02	-0.01	-0.01	1.00

注: ** 表示极显著相关 (P<0.01), * 表示显著相关 (P<0.05)。

2.5 基于熵权 TOPSIS 综合评价模型的宁夏中部干旱带马铃薯高效水肥方案

在寻求宁夏中部干旱带马铃薯最高效的水量和氮肥基追比方案中, 运用熵权 TOPSIS 综合评价模型, 将马铃薯单株产量、总产量、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、iWUE 和 PFP 作为综合考量的 5 个重要指标, 各指标权重设为一致, 而后计算评判指标的理想解和贴合度 CI, 最终选择最贴近理想解的方案为最优决策。

建模求解步骤如下:

(a) 进行标准化处理, $y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}}$, 选取 n

个样本, m 个指标, 其中 y_{ij} 为经过无量纲化处理的第 i 个单位的第 j 个指标值; x_{ij} 为第 i 个单位的第 j 个指标数据;

(b) 定义标准化 $Y_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}$;

(c) 指标信息熵值 e 和信息效用值 d, 第 j 项指标的信息熵值为 $e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln Y_{ij}$, 信息效用值 $d_j = 1 - e_j$;

(d) 评价指标的权重。信息效用值越大, 表明指标越重要, 对评价的重要性就越大。最后可以得

到 j 项指标的权重为 $W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}$;

本文评价模型各指标熵权值计算得 $W_j = (0.1589, 0.2968, 0.1866, 0.0971, 0.2605)$ 。

(e) n 个样本, m 个指标构建矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

对该矩阵正向化得:

$$Z = (z_{xy})_{m \times n}$$

$$z_{xy} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}$$

(f) 定义最大值 $Z^+ (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+)$, 定义最小值 $Z^- (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-)$ 。

第 i (i=1, 2, ..., n) 个评价对象与正理想解 Z_j^+ 加权距离和负理想解 Z_j^- 的加权距离分别为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (Z_j^+ - z_{ij})^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^* (Z_j^- - z_{ij})^2}$$

计算得出第 i 个评价对象的得分 S_i 为:

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

解得:

$S_i = (0.0174, 0.1293, 0.0776, 0.1292, 0.1757, 0.0987, 0.1761, 0.0795, 0.1165)$

S_i 取值范围为 0 到 1, S_i 最大者为优, 不同水氮处理方案贴适度 S_i 从优到劣依次为: A7>A5>A2>A4>A9>A6>A8>A3>A1, A7 处理为最优处理。

2.6 马铃薯生长水氮综合响应模型

2.6.1 单因素效应研究

根据马铃薯综合评分进行回归模拟, 得到以马铃薯水氮综合评分 (Y)、施肥编码 (X_1) 和灌水量编码 (X_2) 的回归模型为:

$$Y = 0.1532 - 0.0318X_1 + 0.0055X_2 - 0.0367X_1^2 - 0.0265X_2^2 - 0.0379X_1X_2 \quad (R^2=0.593, P<0.05) \quad (3)$$

为进一步研究单因素对马铃薯综合生长的影响, 对建立的二元二次回归模型进行降维处理, 分

别得到施肥量、灌水量单因素方程:

$$Y_1 = 0.1532 - 0.0318X_1 - 0.0367X_1^2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 0.1532 + 0.0055X_2 - 0.0265X_2^2 \quad (5)$$

式 4、5 中, Y_1 、 Y_2 分别代表施肥量和灌水量对马铃薯综合评价影响的单因素效应函数。

由图 3 可知, 灌水量和氮肥基追施用量比例对马铃薯综合评分效应均呈开口向下的二次函数, 其综合评分随灌水量或氮肥基追施用量比例的增加呈先增加后减小的趋势, 即灌水量和氮肥基追施用量比例保持在一定范围之内才会有较高评分。随着氮肥基追施用量比例的增加综合评分曲线变化斜率较大, 随着灌水量的增加曲线变化平缓, 说明对氮肥基追施用量比例的变化更敏感。

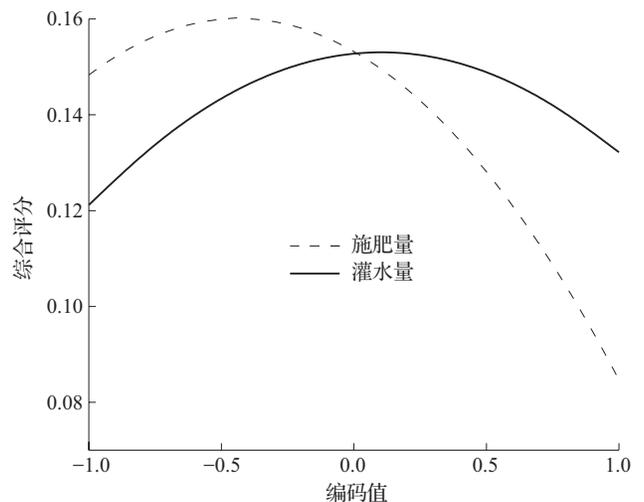


图 3 单因素对马铃薯综合评分的效应曲线

2.6.2 双因素交互效应研究

马铃薯综合生长受灌水和施肥交互作用的影响。根据回归模型做出灌水编码和施肥编码对马铃薯综合生长评分的三维关系图。根据回归方程 (3) 计算达到最优指标时, 综合评分为 0.1673, X_1 为 -0.7723, X_2 为 0.6553, 即灌水量为 $1697.535 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 氮肥基追比例为基肥: 追肥 = 1.6553: 1。

由双因素交互对马铃薯综合生长影响等高线图 (图 4) 可知, 以综合评分 0.16 划分闭合区域得出马铃薯生产上最佳的氮肥基追施比例和灌水区间分别为灌水量 $1440 \sim 1935 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、氮肥基追施比例为 1: 1 ~ 2.3: 1, 此区间最有利于实现马铃薯高产优质。

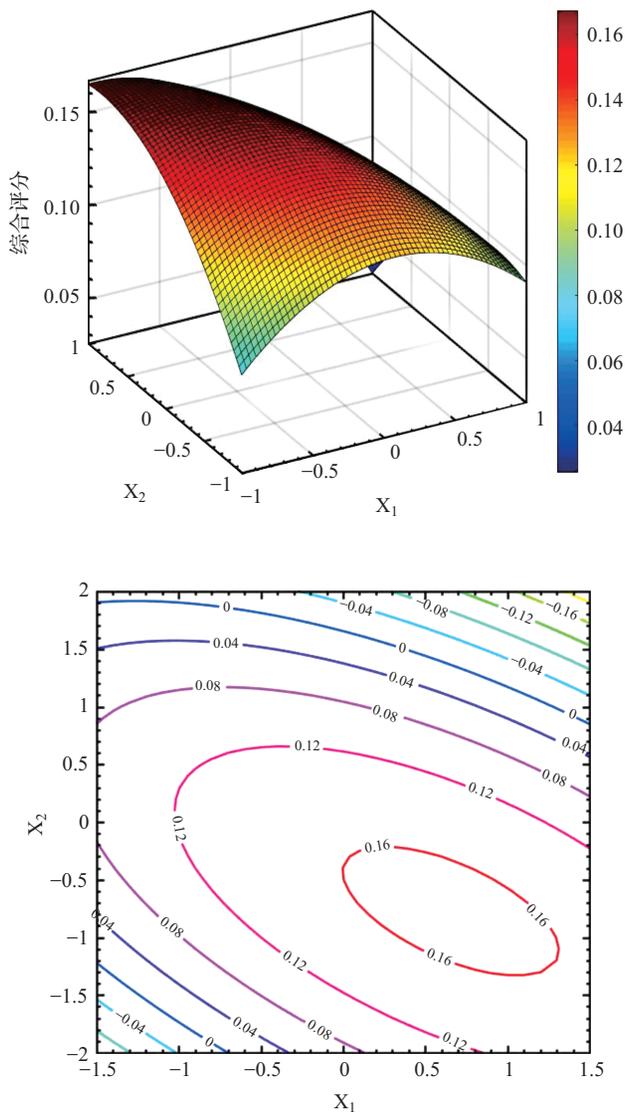


图4 双因素交互对马铃薯综合生长的影响

3 讨论

3.1 不同灌水量及氮肥基追比对土壤酶活性的影响

土壤酶是由土壤微生物生命活动和植物根系所产生的,在土壤物质转化和能量转化过程中起催化作用^[16],其活性更是土壤肥力水平高低的重要生物指标^[17]。碱性磷酸酶是一种水解性酶,酶促作用能够加速土壤中有机磷的脱磷速度,提高土壤磷素的有效性,其活性的高低直接影响到土壤有机磷的生物有效性^[18]。土壤蔗糖酶又称转化酶,参与土壤中碳水化合物的转化,与土壤氮磷含量、微生物数量有关,是表征土壤生物学活性强度的重要酶^[18-19]。试验结果表明,适当增加灌水量与施肥

量都可以有效增加马铃薯的产量和土壤酶活性,这与诸多学者的研究结果相似^[3, 16-17]。在研究土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶对马铃薯全生育期的影响过程中,表现出先增大后降低的趋势,与孙梦媛等^[19]在不同灌水量及施肥状态下对马铃薯在全生育期的酶活性研究一致。整体而言,A7处理蔗糖酶活性最高,这是由于高水高追肥提高了土壤养分含量,从而间接提高了蔗糖酶活性。杨雪艳等^[20]研究发现,土壤酶活性随着水肥配比的增加而增加,不同水肥条件下对土壤酶活性的影响有显著差异。苗期有效的氮肥供给可以促进块茎增长,提高马铃薯产量,施肥方法与需氮规律不合理会降低其产量^[21-22]。本研究中,基追比分别为1:1、1:2和2:1,追肥比例不断提高,对马铃薯碱性磷酸酶活性的影响也各不相同。在同一时期,不同基追比对碱性磷酸酶活性的影响中,基追比1:1影响更为突出,与王弘等^[23]的研究结论基本一致,但对于蔗糖酶活性的影响,基追比2:1更甚之。结果表明,在适宜的氮肥基追比范围内,追施时期对土壤碱性磷酸酶活性的影响显著,且在块茎增长期追肥效果更佳。土壤酶活性和肥力存在直接关系,土壤酶活性的变化也对作物产量和品质产生影响^[24]。赵亚丽等^[25]研究表明,作物产量与相关酶活性之间皆呈显著或极显著相关的关系,与本文研究结果基本相同。

3.2 不同灌水量及氮肥基追比对产量、灌溉水肥利用效率的影响

邓箴等^[26]研究发现,高的 PFP 并不能得到最高的产量,此结论在本试验中也得到了验证。这是由于马铃薯在前期基施期间达不到自身所需的养分,其根部更多地从土壤中吸收了有利于自身的营养,造成土壤养分不足而提高了肥料偏生产力。宋娜等^[2]研究表明,土壤湿润比越大,产量越大。本试验中,灌水量为 $1800\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时的产量较高,与前人研究结果一致。张富仓等^[27]研究表明,同一施肥条件下,水分利用效率逐渐降低,本研究中相同 F 水平下,灌溉水利用效率大小依次为 $W1>W2>W3$ 。

本试验针对灌水量与氮肥基追施比例两因素对马铃薯的产量、酶活性、灌溉水肥利用效率和经济效益进行研究,各指标最优水肥组合处理略有不同,需进行各指标综合评判。其次,本试验考虑到土壤相关环境状况的影响,除此之外,大田试验影

响因素也较多,如气候变化、土壤微生物等,还需进一步深入研究。

4 结论

(1) 灌水量和氮肥基追施对马铃薯单株产量、总产量、iWUE、PFP、土壤碱性磷酸酶、土壤蔗糖酶均影响显著。

(2) 引入熵权法对产量、酶活性、灌溉水肥利用效率等进行赋权,利用TOPSIS法建立马铃薯综合评价体系,得到最优综合响应评分0.1761,即为A7处理。

(3) 通过建立马铃薯综合生长对水氮基追施交互响应模型得出,水氮基追施单因素对马铃薯综合生长影响均呈开口向下的二次抛物线,水氮基追施交互影响显著。当施肥编码为-0.7723(基肥:追肥=1.6553:1)、灌水编码为0.6553(1697.535 m³/hm²)时,综合评分最高。以综合评分0.16划分闭合区域得出马铃薯生产上最佳的灌水区间和氮肥基追施比例分别为1440~1935 m³/hm²、1:1~2.3:1,此区间最有利于实现马铃薯协同效应最优。

参考文献:

- [1] 屈冬玉,谢开云,金黎平,等. 中国马铃薯产业发展与粮食安全[J]. 中国农业科学, 2005 (2): 358-362.
- [2] 宋娜,王凤新,杨晨飞,等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (13): 98-105.
- [3] Mohammad M J, Zuraiqi S. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip-fertigation of garlic [J]. 2002, 26 (9): 1749-1766.
- [4] 薛晓萍,陈兵林,郭文琦,等. 棉花临界需氮量动态定量模型[J]. 应用生态学报, 2006 (12): 2363-2370.
- [5] 何建勋,王永哲,邱小琼,等. 水肥耦合条件下马铃薯生长量对产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55 (7): 1646-1648, 1652.
- [6] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003 (4): 406-410.
- [7] 马宁宁,李天来,武春成,等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (7): 1766-1771.
- [8] 徐晶,陈婉华,孙瑞莲,等. 不同施肥处理对湖南红壤中微生物数量及酶活性的影响[J]. 土壤肥料, 2003 (5): 8-11.
- [9] 王晓军,孙玉琴,杨军学,等. 长期轮作与施肥对马铃薯土壤养分和产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34 (3): 42-46.
- [10] 王海东. 滴灌施肥条件下马铃薯水肥高效利用机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [11] 张智,李曼宁,杨志,等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (2): 267-276.
- [12] Burns R G. Enzyme activity in soil-location and a possible role in microbial ecology [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1982, 14 (5): 423-427.
- [13] 万忠梅,宋长春,郭跃东,等. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. 生态学报, 2008, 28 (12): 5980-5986.
- [14] 宁夏水利厅,宁夏水利科学研究院. 宁夏滴灌工程规划设计导则和优势特色作物滴灌种植技术规程[M]. 宁夏: 宁夏人民出版社, 2017.
- [15] 罗慧,刘水,李伏生. 不同灌水施肥策略对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34 (18): 5266-5274.
- [16] 肖新,朱伟,肖靓,等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (21): 91-98.
- [17] 王冬梅,王春枝,韩晓日,等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2006 (2): 2263-2267.
- [18] 孙建,刘苗,李立军,等. 免耕与留茬对土壤微生物量C、N及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29 (10): 5508-5515.
- [19] 孙梦媛,刘景辉,赵宝平,等. 全膜垄作对旱作马铃薯土壤含水率、酶活性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36 (4): 1-8.
- [20] 杨雪艳,蒋代华,杨钙仁,等. 甘蔗水肥一体化种植对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 139-146.
- [21] 董茜,郑顺林,李国培,等. 施氮量及追肥比例对冬马铃薯块茎品质形成的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23 (5): 1571-1574.
- [22] 韦冬萍,韦剑锋,熊建文,等. 马铃薯氮素营养研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 38 (22): 56-60.
- [23] 王弘,孙磊,梁杰,等. 氮肥基追比例及追施时期对马铃薯干物质积累分配及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30 (24): 224-230.
- [24] 任静,刘小勇,韩富军,等. 施氮水平对旱塬覆沙苹果园土壤酶活性及果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (8): 206-213.
- [25] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (6): 1785-1792.
- [26] 邓箴,尹娟,尹亮. 不同水肥处理对宁夏枸杞产量及水肥利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2021 (3): 25-30.
- [27] 张富仓,高月,焦婉如,等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48 (3): 270-278.

Comprehensive evaluation of effects of irrigation and nitrogen topdressing ratio on potato yield, water & fertilizer use efficiency and soil enzyme activity

SUN Fu-bin¹, YIN Juan^{1, 2, 3*}, WEI Xiao-dong¹, MA Zheng-hu¹, YANG Ying-pan¹, WANG Shun¹ (1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021; 2. Ministry of Education Engineering Center for Efficient Utilization of Agricultural Water Resources in Arid Regions, Yinchuan Ningxia 750021; 3. Ningxia Engineering Technology Research Center for Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation, Yinchuan Ningxia 750021)

Abstract: In order to obtain the optimal irrigation and nitrogen topdressing scheme, the comprehensive effects of irrigation and nitrogen topdressing on potato yield, irrigation water and fertilizer utilization efficiency and soil enzyme activity were investigated. In the field experiment, three irrigation levels of W1 (900 m³/hm²), W2 (1350 m³/hm²) and W3 (1800 m³/hm²) and three nitrogen fertilizer application ratio of base to topdressing of F1 (N_{2:1}), F2 (N_{1:1}) and F3 (N_{1:2}) were set up, with a total of nine treatments. The comprehensive growth evaluation system of potato in Ningxia central arid region was established by entropy weight TOPSIS method, and the interaction response mathematical model of potato irrigation levels and different nitrogen application ratios of base to topdressing was established with the goal of high yield, water saving and fertilizer saving. The results showed that the yield per plant, yield, iWUE (irrigation water use efficiency), PFP (fertilizer partial productivity), soil alkaline phosphatase and soil sucrase were significantly affected by irrigation amount and application ratios of base to topdressing. The comprehensive evaluation system of potato was established by using TOPSIS method, and the optimal comprehensive response score was 0.1761, which was A7 treatment. The interaction response model of potato comprehensive growth to irrigation level and nitrogen application ratios of base to topdressing showed that the single factor of irrigation level or nitrogen application ratios had an open downward quadratic parabola on potato comprehensive growth, and the interaction effect of them was significant. When the fertilization code was -0.7723 (base fertilizer : topdressing = 1.6553 : 1) and the irrigation code was 0.6553 (1697.535 m³/hm²), the comprehensive score was the highest. The comprehensive score of 0.16 was used to divide the closed area, and the optimal irrigation interval and nitrogen application ratio of base to topdressing in potato production were 1 : 1 ~ 2.3 : 1 and 1440 ~ 1935 m³/hm², respectively. This interval was the most conducive to realize the optimal potato synergistic effect.

Key words: potato; irrigation level and different nitrogen application ratios of base to topdressing; soil enzyme activity; yield; utilization efficiency of irrigation water and fertilizer; comprehensive evaluation model