

水氮调控对宁夏中部旱区马铃薯产量与土壤质量的影响

杨莹攀¹ 尹娟^{1,2} 朱银浩¹ 李升¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程中心, 银川 750021)

摘要: 针对宁夏中部干旱区马铃薯产量不高和土壤质量较低等问题, 本研究探讨和评价宁夏中部旱区马铃薯农田土壤质量状况, 马铃薯产量与农田环境因子的相互关系, 以提高马铃薯产量和农田土壤质量。以马铃薯农田为研究对象, 2年试验采用三因素完全随机设计, 灌溉处理设置灌溉定额 ($2\,250\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W3)、节水 20% ($1\,800\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W2)、节水 40% ($1\,350\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W1); 施氮处理设置施氮量 ($195\text{ kg}/\text{hm}^2$, N3)、减氮 20% ($156\text{ kg}/\text{hm}^2$, N2)、减氮 40% ($117\text{ kg}/\text{hm}^2$, N1), 以当地不施氮肥和不灌水为 CK 处理, 测定土壤养分含量、酶活性、微生物量碳氮磷含量及产量, 并将其纳入土壤质量指数 (SQI), 与马铃薯产量进行拟合分析。结果表明: 水氮调控对土壤速效钾、有效磷、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷、全钾、有机质含量均有显著影响, 不同水氮调控下 0~20 cm 土层过氧化氢酶活性 (SP)、蔗糖酶活性 (SS)、土壤脲酶活性 (SU)、土壤碱性磷酸酶活性 (SAP) W2N2 处理最大, 较 CK 处理增加 23.66%、86.28%、58.66%、56.92%, 并随土壤深度增加呈逐渐降低趋势。马铃薯产量、土壤微生物量碳氮磷含量及化学计量在 W2N2 ($1\,800\text{ m}^3/\text{hm}^2$, $156\text{ kg}/\text{hm}^2$) 处理最大。通过 SQI 得出中水中氮 (W2N2) 土壤质量等级最高, 通过拟合发现 W2N2 处理能够协同提升土壤综合质量与马铃薯产量, 该研究结果可为中国北方干旱地区马铃薯可持续生产和土壤质量提升提供理论依据。

关键词: 马铃薯产量; 土壤化学性质; 灌溉定额; 施氮量; 土壤质量指数

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0358-13

OSID:



Effect of Water and Nitrogen Regulation on Potato Yield and Soil Quality Evaluation

YANG Yingpan¹ YIN Juan^{1,2} ZHU Yin hao¹ LI Sheng¹

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To address the problems of low potato yield and low soil quality in the central arid zone of Ningxia, the interrelationship between potato yield and farmland environmental factors was investigated and evaluated. Aiming to explore and evaluate the soil quality condition of potato farmland in the central arid zone of Ningxia, and the interrelationship between potato yield and farmland environmental factors, with a view to improving potato yield and farmland soil quality, taking potato farmland as the research object, the two-year experiment was conducted in a three-factor completely randomised design, with irrigation treatments set at irrigation quota ($2\,250\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W3), 20% water saving ($1\,800\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W2), and 40% water saving ($1\,350\text{ m}^3/\text{hm}^2$, W1); and nitrogen application treatments set at nitrogen application ($195\text{ kg}/\text{hm}^2$, N3), and 20% nitrogen reduction ($156\text{ kg}/\text{hm}^2$, N2), 40% nitrogen reduction ($117\text{ kg}/\text{hm}^2$, N1), with no local N fertiliser and no irrigation as CK treatment, soil nutrients, enzyme activities, microbial carbon, nitrogen, phosphorus and yield were measured and included in the soil quality index (SQI), which was fitted to potato yield. The results showed that water and nitrogen regulation had significant effects on soil quick potassium, effective phosphorus, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and organic matter, and catalase activity (SP), sucrase activity (SS), soil urease activity (SU), and soil alkaline phosphatase activity

收稿日期: 2024-03-02 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 杨莹攀(1996—), 男, 博士生, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究, E-mail: ypan312@163.com

通信作者: 尹娟(1970—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: yj7115@126.com

(SAP) in the 0 ~ 20 cm soil layer were the largest under different water and nitrogen regulation in the W2N2 treatment, which was increased compared with that of the CK treatment by 23.66%, 86.28%, 58.66%, 56.92%. And it showed a trend of gradual decrease with the increase of soil depth. Potato yield, soil microbiota carbon nitrogen phosphorus and stoichiometry were maximum in W2N2 (1 800 m³/hm², 156 kg/hm²) treatment. The highest soil quality grade of W2N2 treatment was obtained by SQI, and it was found that W2N2 treatment could synergistically improve the comprehensive soil quality and potato yield by fitting, and the results of this study can provide theoretical references for the sustainable production of potato and the improvement of soil quality in arid regions of northern China.

Key words: potato yield; soil chemical properties; irrigation quota; nitrogen application; soil quality index

0 引言

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是一种主要的全球粮食作物,在粮食安全、减少贫困和改善人类营养方面发挥重要作用^[1]。然而,马铃薯种植和产量受到多种因素的影响,其中干旱胁迫是马铃薯生产的一个重要限制因素,因为马铃薯依赖于适当的水供应以获得优质高产^[2]。马铃薯块茎产量受施氮量的强烈影响是制约马铃薯产业的另一个因素^[3],分次施用氮(N)肥是提高马铃薯块茎产量和氮肥吸收效率的关键,尤其是在质地粗糙的土壤中^[4]。土壤质量指数(SQI)因其可定量和灵活性而被广泛用于评估人为因素和自然因素对土壤质量的影响^[5],引入 SQI 对有效评价不同水氮调控下农田土地的土壤质量具有重要意义。

SQI 是一种衡量标准,用于根据土壤物理、化学、生物特性对其进行评估^[6]。SQI 也是中国用于评估土壤状况和利用潜力规模上广泛使用的形式^[7]。基于主成分分析(PCA)结果选择最小土壤数据集(MDS),最终根据 MDS 指标筛选结果建立土壤质量评价模型,可以有效评价不同土地利用类型的土壤质量^[8]。与传统土壤测试相比,本研究的目的是通过多标准应用选择土壤特性,在更短时间内促进土壤质量的确定。水氮调控对农田生态系统内稳性及土壤质量健康诊断具有重要意义^[9]。REN 等^[10]研究发现,施氮显著增加了土壤和植物中的氮和磷浓度,从而降低了氮和磷的吸收效率,并具有显著的相互作用。农业系统中土壤管理不当和养分利用效率低下会导致养分大量流失,从而对环境造成诸多影响,通过优化施肥和减少大量化肥使用来缓解,控释或缓释尿素可以提高许多农业生产系统中作物氮的利用效率和产量^[11]。研究发现 N 添加对土壤总 C、N、P 含量及其化学计量比的影响较大,可以通过增加灌水来调节^[12]。MUHAMMAD 等^[13]研究发现,较高的灌水和施氮量对玉米生长和性能产生负面影响,降低氮肥使用和低灌水量不会影

响产量效益和酶活性。不同生境水分和养分供应水平下植物-土壤系统养分的循环、土壤微生物生物量及化学计量非常重要^[14]。然而,目前尚不清楚水氮调控对马铃薯农田土壤性质和土壤生态系统功能的影响。

本研究在灌溉定额和施氮量条件下,分析水氮调控下土壤养分、酶活性和土壤微生物量碳氮磷变化规律,探讨土壤指标之间的相互作用关系及土壤指标与马铃薯产量之间的关系,利用 SQI 揭示农田土壤环境因子与产量的定量关系,以期为中国北方干旱地区水氮调控下马铃薯农田土壤质量提升、实现农业高效增产、减少水氮资源浪费和促进马铃薯产业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022—2023 年在中国西北宁夏中部干旱带典型区域预旺镇(36°48'02"N,106°21'53"E,海拔 1 489 m)进行,位置如图 1a 所示。试验区属于大陆性干旱气候,昼夜温差大,干旱少雨,水分蒸发强烈,多年平均降雨量约 270 mm,年蒸发量约 2 325 mm,地下水埋深 10 m 以下,试验地土壤为沙壤土,播前耕作层 0 ~ 40 cm 土壤基本理化性质为:容重 1.41 g/cm³、田间持水率 21.8%、pH 值 8.57、全盐质量比 0.6 g/kg、有机质质量比 6.65 g/kg、碱解氮质量比 38 mg/kg、速效磷质量比 3.94 mg/kg、速效钾质量比 130 mg/kg、全氮质量比 0.27 g/kg、全磷质量比 0.64 g/kg、全钾质量比 17.4 g/kg。

1.2 试验设计

本试验膜下滴灌的灌溉定额参考文献[15]中推荐值,试验设计 3 个灌溉定额与 3 个施氮量,设置对照组 CK(当地管理水平,无灌溉施氮)。2 年试验采用三因素完全随机设计,灌溉处理设置灌溉定额(2 250 m³/hm², W3)、节水 20%(1 800 m³/hm², W2)、节水 40%(1 350 m³/hm², W1);施氮处理设置推荐施氮量(195 kg/hm², N3)、减氮 20%(156 kg/hm²,

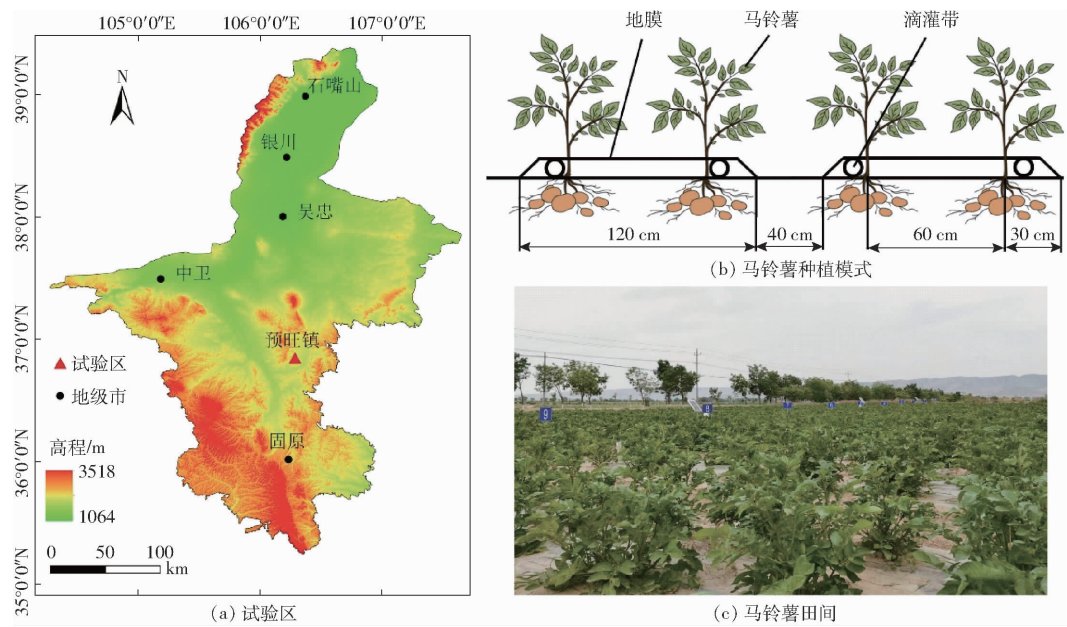


图 1 试验区位置及马铃薯种植模式示意图

Fig.1 Schematic of location of experimental area and potato planting pattern

N2)、减氮 40% (117 kg/hm², N1), 其中氮肥选用尿素 (含氮量 46%)。采用水肥一体化进行多次追施, 追施时期按幼苗期、块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期 (1:2:2:1) 6 次进行, 灌水按照芽条生长期、幼苗期、块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期 (1:2:3:3:1) 10 次进行, 如表 1 所示。马铃薯具体灌溉量和施氮量累积量如图 2 所示。马铃薯生长阶段降雨量与气温如图 3 所示。

表 1 马铃薯各生育期灌水量、施氮量分配比例

Tab.1 Allocation ratio of irrigation and N application for each fertility period of potato						%
生育期	芽条生长期 (5 月 10 日—6 月 5 日)	幼苗期 (6 月 6 日—25 日)	块茎形成期 (6 月 26 日—7 月 25 日)	块茎增长期 (7 月 26 日—8 月 20 日)	淀粉积累期 (8 月 21 日—10 月 5 日)	合计
灌水量比例	8.85 (1 次)	17.7 (2 次)	31.86 (3 次)	32.74 (3 次)	8.85 (1 次)	100
施氮量比例	0	16.7 (1 次)	33.3 (2 次)	33.3 (2 次)	16.7 (1 次)	100

注:括弧内表示各生育期灌水次数。

马铃薯播种日期分别为 2022 年 5 月 1 日和 2023 年 4 月 30 日,收获日期为 2022 年 10 月 3 日和 2023 年 10 月 2 日。供试品种为“青薯 9 号”,采用膜下滴灌种植模式 (图 1b),“一膜两行”等行距种植,塑料薄膜宽 1.2 m,种子埋深 10 cm。马铃薯种植株距 50 cm,行距 60 cm,每一行种植 10 株,每个小区种植 40 株马铃薯,种植密度 33 345 株/hm²。基础肥料选用过磷酸钙 (含磷量 12%, 82.5 kg/hm²)、硫酸钾 (含钾量 50%, 150 kg/hm²),施加方式为一次性基施。试验小区面积均为 17.6 m²,长 5.5 m,宽 3.2 m,四周设保护行,小区间保护行宽为 1 m,外围保护行宽为 2 m,每个处理均设置 3 次重复,共计 30 个小区。每个小区设独立的支管控制单元,包括水表、闸阀、压力表等各 1 只,滴灌管采用嵌入式,内径 16 mm,壁厚 0.15 mm,工作压力 0.1 kPa,滴头流量 2 L/h,滴头间距 50 cm,即 1 个滴头控制 1 株马铃薯。田间除草和打药等管理措施按照该地区推荐的农艺措施进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 马铃薯根际土壤养分含量和酶活性测定

在收获期分 3 层 (0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm) 取土,放在室内通风自然风干,研磨粉碎,过 0.5 mm 筛后进行测定。参照《土壤农化分析》^[16] 方法,土壤全氮含量采用半微量凯氏法测定 (P44);土壤全磷含量采用碱溶法-钼锑抗比色法测定 (P76);土壤全钾含量采用 NaOH 碱熔-火焰光度计法测定 (P101);有机质含量采用重铬酸钾-硫酸外加加热法测定 (P30);硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定 (P50);铵态氮含量采用 2 mol/L KCl 浸提-蒸馏法测定 (P53);速效钾含量采用乙酸铵-火焰光度计法测定 (P106);有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提-钼锑抗比色法测定。

在收获期分 3 层 (0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm) 取土。土壤酶活性根据《土壤酶及其研究法》^[17] 的测定方法进行测定,土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;土壤碱性磷酸酶活性采

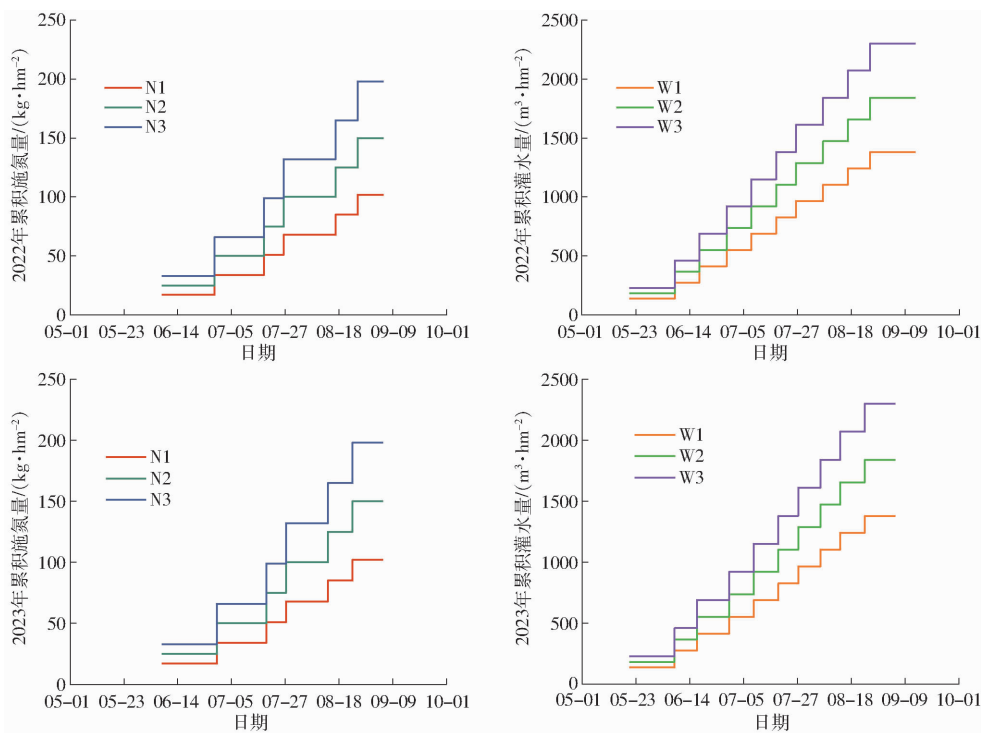


图 2 马铃薯生育期累积施氮量和累积灌水量

Fig. 2 Cumulative nitrogen application and cumulative irrigation during potato reproductive period

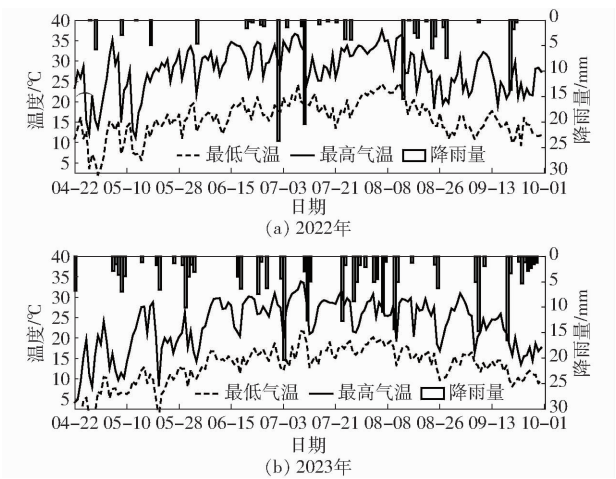


图 3 试验区马铃薯生育期逐日平均气温和降雨量
Fig. 3 Day-by-day average temperature and rainfall during potato reproductive period in experimental area

用苯磷酸二钠比色法测定；土壤蔗糖酶活性采用 3,5 二硝基水杨酸比色法测定；土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。

1.3.2 马铃薯根际土壤微生物量碳氮磷及化学计量

在马铃薯淀粉累积期末采集 0 ~ 40 cm 土壤样品，将样品充分混匀，剔除土壤中石砾及植物残茬等杂物后，将一部分土壤样品迅速装入自封袋中并放置于冰盒中，送至实验室，在 4℃ 冰箱中保存，用于测定土壤微生物量碳、氮、磷含量。微生物量氮含量 (SMBC) 和微生物量氮含量 (SMBN) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定，微生物量磷含量 (SMBP) 采用氯仿熏蒸-NaHCO₃浸提法测定^[18-19]。化学计量^[20]分

别为 SMBC；SMBN = SMBC/SMBN；SMBC；SMBP = SMBC/SMBP；SMBN；SMBP = SMBN/SMBP。

1.3.3 马铃薯产量

成熟期收获时，从每个试验小区随机框选 2 m × 2 m 长势均匀的马铃薯，采用电子天平 (精度 0.01 g) 称量，测定单株块茎产量，然后计算每公顷总产量。

1.4 土壤质量评价

1.4.1 总数据集和最小数据集构建

本研究以宁夏旱区马铃薯农田土壤为研究对象，将测定的 18 个指标作为总数据集指标，考虑到土壤微生物量、养分含量和酶活性对土壤质量影响的敏感性，对每个指标进行单因素方差分析 (One-ANOVA)，选择具有显著差异 ($P < 0.05$) 的作为最小数据集 (MDS) 指标^[21]。将数据标准化后利用主成分分析 (PCA) 及各指标的 Norm 值，确定进入 MDS 的指标。MDS 指标选择原则为：提取特征值大于等于 1 的主成分，将指标载荷大于 0.5 的分为一组。如果某一指标在不同主成分中的载荷均大于 0.5，则将其并入与其他指标相关性较低的一组。计算各组指标的 Norm 值，选取每组中 Norm 值在该组中最大 Norm 值的 10% 范围内的指标。如同一组中保留多个指标，则使用 Pearson 相关系数确定是否需要保留每个指标，如指标间相关系数 r 小于 0.5，则所有指标均可保留，如各指标在主成分内显著相关 ($r > 0.5$)，则选择 Norm 值最高的指标进入 MDS^[22]。Norm 值计算公式为

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 e_k)}$$

(1)

式中 N_{ik} ——第 i 个指标在特征值大于 1 的前 k 个主成分的 Norm 值
 u_{ik} ——第 i 个指标在第 k 个主成分上的荷载
 e_k ——第 k 个主成分特征值

1.4.2 指标权重

采用客观加权变异系数法确定指标权重。由于各指标的维度不同,无法直接比较其变异程度,因此使用指标的变异系数来比较其变异程度^[23]。

1.4.3 指标得分

通过线性函数计算土壤参数线性得分,将每个指标转换为分数,对进入最小数据集的指标求隶属度值^[21]。计算公式为

$$F(X) = \begin{cases} 1 & (X \geq X_2) \\ 0.9 \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} + 0.1 & (X_2 > X > X_1) \\ 0.1 & (X \leq X_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 X ——土壤质量指标实际测量值
 X_1 ——最小值 X_2 ——最大值
 $F(X)$ ——指标标准化后值

1.4.4 土壤质量指数计算

在每个关键的土壤质量指标中,通过使用 D' HOSE 等^[24]描述的评分函数,将每个指标标准量化为 0~1 标度,对 MDS 中的所有指标进行评分和加权后,计算土壤质量指数,计算式为

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i Q_i$$

(3)

式中 W_i ——每个指标分配权重
 Q_i ——每个指标得分
 n ——最终 MDS(最小数据集)中指标数

土壤质量指数取值范围为 0~1,指数越大,土壤肥力水平越高。根据研究区土壤质量指数进行分级,分为高(1~0.8)、较高(0.6~0.8)、中(0.4~0.6)、较低(0.2~0.4)和低(0~0.2)5 个等级。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和土壤质量指数计算,Origin 2021 进行绘图,SPSS 26 进行 Duncan 多重比较进行显著性检验($P < 0.05$)和主成分分析,R(V.4.3.1)进行相关性分析和相关性图绘制。

2 结果与分析

2.1 水氮调控对膜下滴灌马铃薯土壤养分含量的影响

水氮调控对膜下滴灌马铃薯土壤养分的影响如图 4(图中 * 表示显著相关($P < 0.05$),** 表示极

显著相关($P < 0.01$),ns 表示不显著;不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$);W 表示灌溉定额、N 表示施氮量;下同)所示。土壤速效钾(SAK)、有效磷(SEP)、硝态氮(SNN)、铵态氮(SAN)、全氮(STN)、全磷(STP)、全钾(STK)、有机质(SOM)含量(质量比)随着土壤深度的增加呈逐渐降低趋势。由于马铃薯根系在 0~20 cm 最为发达,且土壤养分含量变化显著,作为重点分析对象。由图 4a、4b 可知,SAK 含量随灌溉定额和施氮量变化均有显著影响,相同施氮量下灌溉定额为 W3 的马铃薯成熟期土壤速效钾含量明显优于 W2、W1,土壤速效钾含量的累积依赖于灌溉定额的增加及水分运移。由图 4c、4d 可知,不同水氮调控下 SEP 含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层变化较为显著,在 40~60 cm 土层变化不显著,这是由于水氮变化和作物根系未能达到该区域,未能对深层土壤产生影响。2 年 0~20 cm 土层中速效钾含量变化范围为 3.55~7.59 mg/kg,W2N2 处理最高,W2N2 处理 2 年平均较 CK 处理增加 91.22%。这是因为水氮对 SEP 含量具有显著调控作用。由图 4e、4f 可知,不同水氮调控下 SNN 含量在整个土层变化均显著,2 年变化范围为 17.87~38.53 mg/kg。0~20 cm 土层,相同灌水量条件下,SNN 含量随着施氮量增加呈先增大后降低趋势。相同施氮量条件下,SNN 含量随灌水量增加呈增加趋势。由图 4g、4h 可知,不同水氮调控下 SAN 含量在整个土层变化均显著,0~20 cm 土层变化范围在 22.80~33.99 mg/kg 之间。W3N1 处理 2 年平均值最大,W3N1 处理较 CK 处理增加 49.17%。0~20 cm 土层 SAN 含量在相同灌水量下随施氮量增加逐渐增大。这是因为随着施氮量的增加,土壤中氮肥浓度也相应增加,导致更多的氮肥转化为铵态氮,变化显著。由图 4i、4j 可知,不同水氮调控下 STN 含量在整个土层变化均显著,2 年变化范围在 0.24~0.42 g/kg 之间。其中 W2N2 处理最大,较 CK 处理增加 61.22%。由图 4k、4l 可知,不同水氮调控下 STP 含量在整个土层变化均显著,2 年变化范围在 0.40~0.52 g/kg 之间。W2N3 处理最高,较 CK 处理增加 20.84%。由图 4m、4n 可知,不同水氮调控下 STK 含量在整个土层变化均不显著,2 年变化范围在 17.34~18.71 g/kg 之间。W2N2 处理 STK 含量最高,较 CK 处理增加 6.13%。由图 5o、5p 可知,不同水氮调控下有 SOM 含量在整个土层变化均显著,2 年变化范围在 4.81~7.96 g/kg 之间,所有处理与 CK 处理比较均显著增加,这说明灌溉和施氮对土壤保持肥力仍有积极意义。

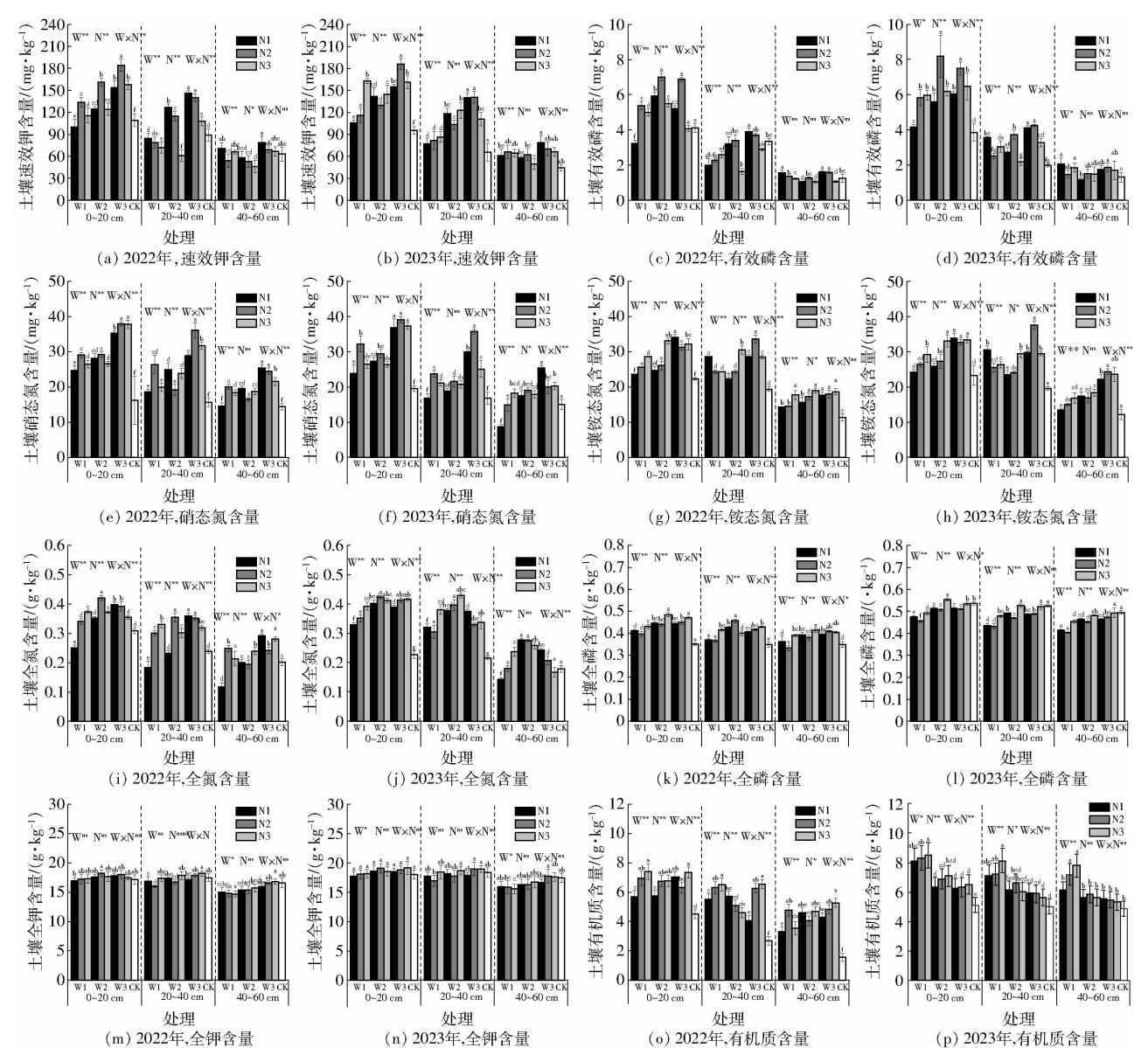


图4 水氮调控对膜下滴灌马铃薯土壤养分含量的影响

Fig. 4 Effect of water and nitrogen regulation on soil nutrient content of drip-irrigated potatoes under membrane

2.2 水氮调控对膜下滴灌马铃薯土壤酶活性的影响

土壤酶活性是评估土壤质量和健康状况的重要指标之一,过氧化氢酶活性(SP)、蔗糖酶活性(SS)、土壤脲酶活性(SU)、碱性磷酸酶活性(SAP)的变化如图5所示,土壤酶活性整体上随土壤深度呈降低趋势,表层酶活性变化最大,随着土层深度的增加呈逐渐降低趋势。0~20 cm土壤过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性随水氮变化规律基本一致,2年变化范围分别为5.01~6.24 mg/(g·d)、14.62~27.72 mg/(g·d)、0.46~0.72 mg/(g·d)、0.43~0.67 mg/(g·d)。W1灌溉定额下,随施氮量增加呈增大趋势,W2和W3灌溉定额下,随施氮量增加呈先增大后降低趋势;相同施氮量下随灌溉定额增加呈先增后减趋势,其中W2N2处理最大,较CK处理增加23.66%、

86.28%、58.66%、56.92%。说明过量施氮和灌水都不利于土壤酶活性。

2.3 水氮调控对马铃薯土壤微生物量碳氮磷的影响及化学计量比特征

土壤微生物生物量是土壤有机氮的重要组成部分,其数量虽少,但却控制着土壤中碳、氮养分循环,对土壤养分的供给以及有机无机养分转化起着非常重要的作用^[25]。2年土壤耕层的土壤微生物量碳(SMBC)、微生物量碳(SMBN)和微生物量碳(SMBP)含量如图6a~6f所示,水氮调控下土壤微生物量碳氮磷含量变化趋势基本一致。相同施氮量下土壤微生物生物量碳氮磷含量随灌水量增加呈先增后降趋势;相同灌溉定额下,随施氮量增加W1处理土壤微生物生物量呈增加趋势、W2和W3处理呈先增加后降低趋势,在W2N2处理下显著高于其他处

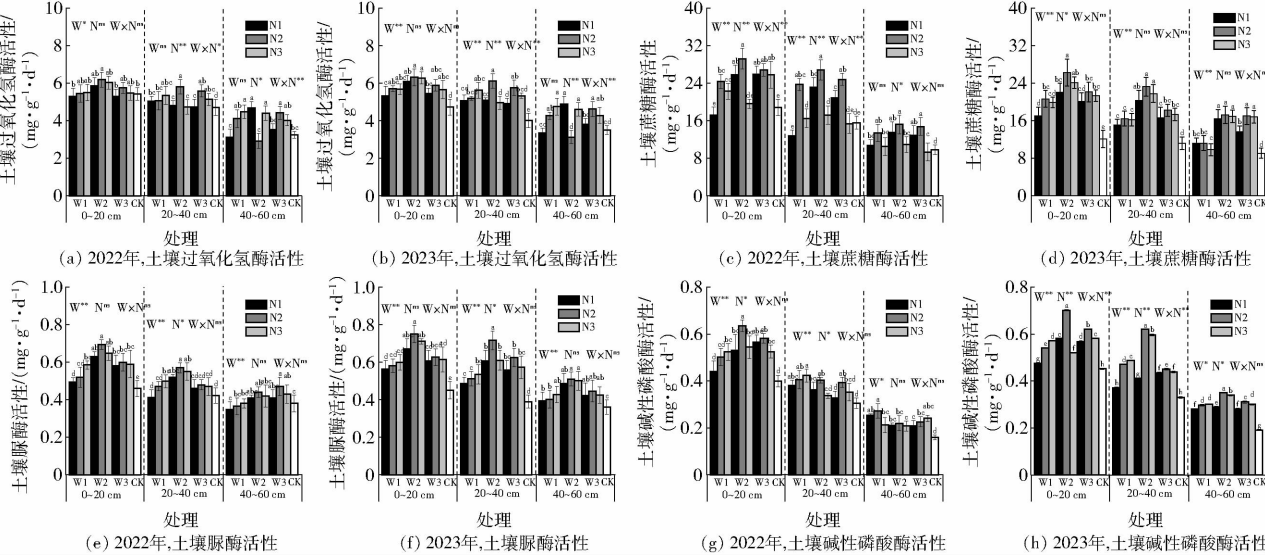


图 5 水氮调控对土壤酶活性的影响

Fig. 5 Effect of water and nitrogen regulation on soil enzyme activities

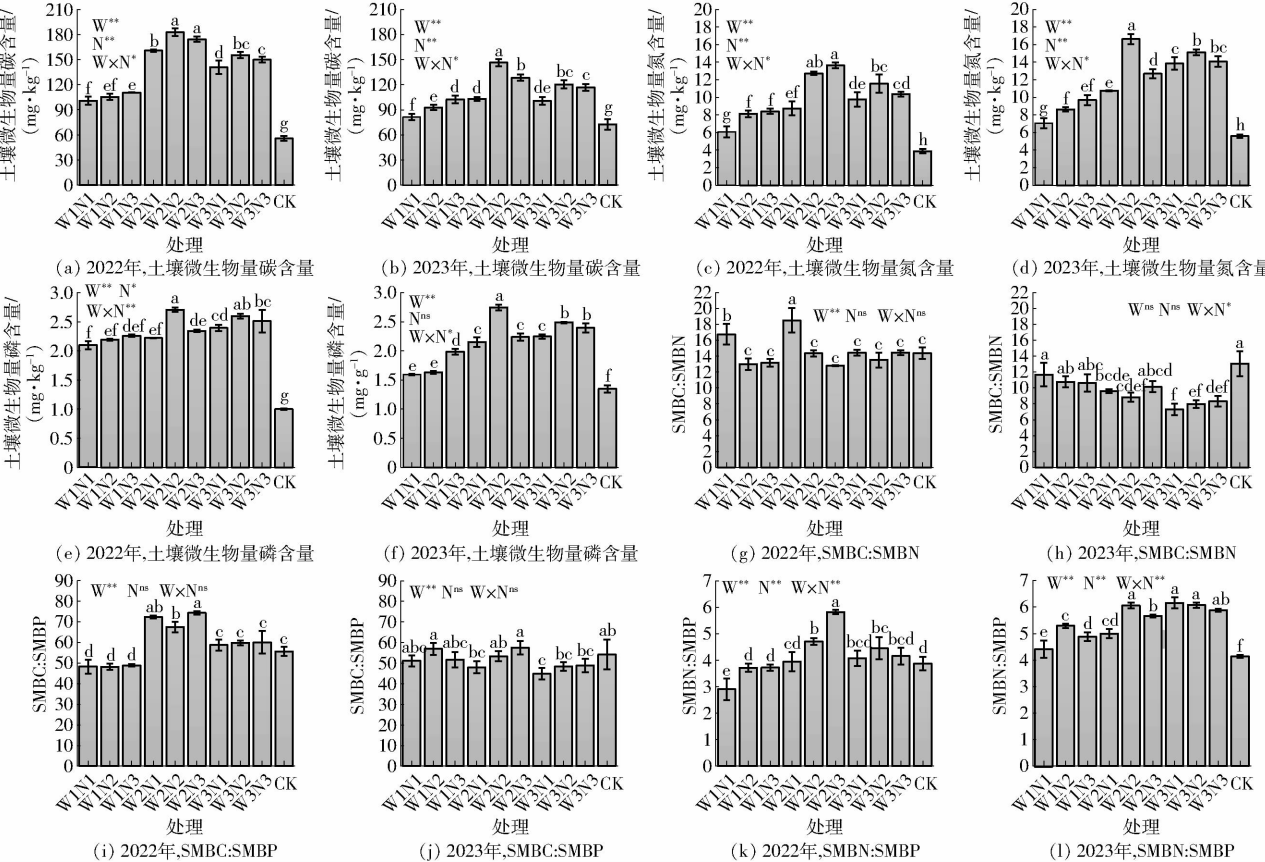


图 6 土壤微生物量碳氮磷含量及化学计量

Fig. 6 Carbon, nitrogen and phosphorus content and stoichiometry of soil microbiota

理并达最大值,SMBC 含量为 164.47 mg/kg,SMBN 含量为 15.13 mg/kg,SMBP 含量为 2.73 mg/kg。

水氮调控对 2 年土壤耕层 SMBC:SMBN 的影响如图 6g、6h 所示,2 年试验中,W1N1、W2N1 处理显著高于其他处理,其他处理无显著变化。水氮调控对 SMBC:SMBP 的影响如图 6i、6j 所示,2022 年 SMBC:SMBP 在相同施氮量下随着灌水量增加出现

先增加后降低趋势,在灌水量相同时,随着施氮量增加各处理无显著变化,2023 年各处理 SMBC:SMBP 变化并不明显。水氮调控对 SMBN:SMNP 的影响如图 6k、6l 所示,总体上,2022 年 W2N3 处理最大,2023 年 W2N2 处理最大,2 年试验中 SMBN:SMNP 最大时,灌溉定额相同说明适量的灌溉可以提高土壤微生物量氮磷的平衡,2 年试验结果不一致说明

土壤磷含量主要受施氮量的影响较大。

2.4 水氮调控对膜下滴灌马铃薯产量的影响

不同灌水定额和施氮量对 2 年产量均有显著影响(图 7)。水氮调控下 2 年平均产量 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 处理较 CK 处理增加 25.57%、41.40%、41.96%、64.33%、86.32%、70.91%、64.21%、77.48%、69.33%。2022 年试验中,马铃薯产量在相同灌水条件下各处理随着施氮量增加呈先增加后降低趋势;在相同施氮量条件下,水氮调控下各处理马铃薯产量均随着灌溉定额增加呈先增加后降低趋势。2023 年试验中,在 W1 处理下随着施氮量增加呈增加趋势,W2 和 W3 各处理随着施氮量增加呈先增加后降低趋势;在相同施氮量条件下各处理变化趋势与 2022 年试验一致。其中 W2N2 处理马铃薯总产量最大,这说明在大田环境中适宜的灌溉定额和适量的氮肥可以提高产量,过量施氮反而会造成产量明显下降和氮肥浪费,对土壤环境不利。

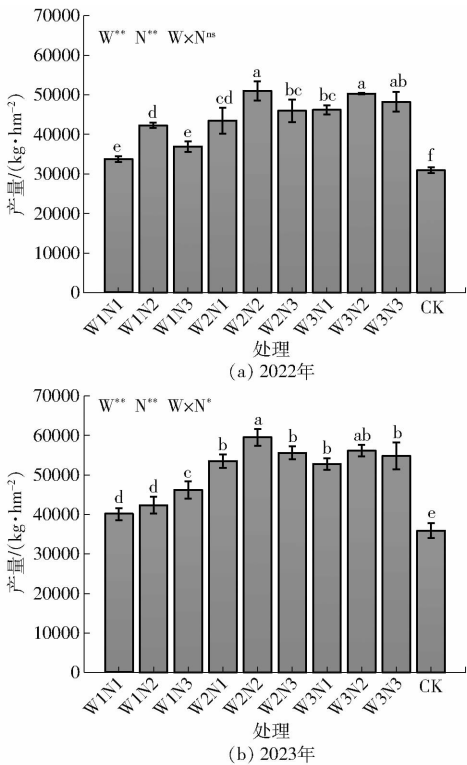


图 7 水氮调控对膜下滴灌马铃薯产量的影响
Fig.7 Effect of water and nitrogen regulation on potato yield under drip irrigation under membrane

2.5 马铃薯产量与土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的 Pearson 相关性分析

农田生态系统具有较大的空间异质性,土壤养分状况、微生物活动及土壤酶活性变化单一过程很难反映土壤质量状况、评估某一田间管理方式的科

学性,为进一步明确马铃薯农田土壤养分含量、酶活性及微生物生物量之间的相互作用以及马铃薯产量与土壤指标之间的关系,对土壤各指标和马铃薯产量进行 Mantel 检验分析(图 8,图中 Y 表示马铃薯产量),由于马铃薯根系深度为 45 cm,所以选用 0 ~ 40 cm 土层深度平均值进行相关性分析。2022 年土壤各指标和马铃薯产量的 Mantel 检验分析结果如图 8a 所示,土壤 SOM 和 SP 指标与马铃薯产量的重合性较差(Mantel $r < 0.4$),说明 SOM 和 SP 指标对产量影响较小;土壤其他指标与马铃薯产量的重合性较好(Mantel $r \geq 0.4$),且与马铃薯产量具有较强的相关性(Mantel $P \leq 0.05$),说明 SAK、SEP、SNN、SAN、STN、STP、STK、SU、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 均对马铃薯产量影响较大。土壤各指标存在相关关系,达到显著水平(Pearson's $r < 0.05$),说明土壤各指标之间有促进作用。由图 8b 可知,2023 年土壤 SOM 和 STP 指标与马铃薯产量的重合性较差(Mantel $r < 0.4$),土壤其他指标与马铃薯产量的重合性较好(Mantel $r \geq 0.4$),说明 STP 对马铃薯产

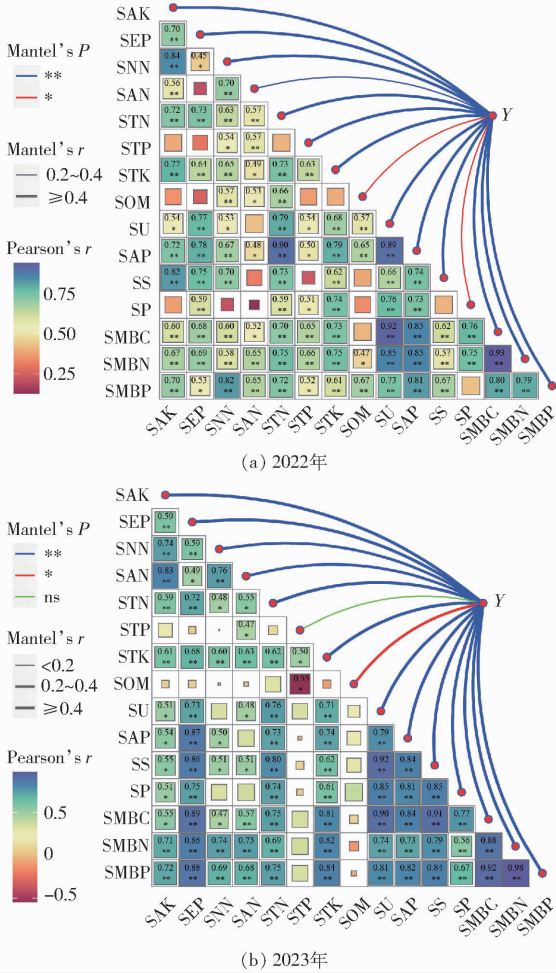


图 8 土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的 Pearson 相关性分析

Fig.8 Pearson correlation analysis of soil nutrient content, enzyme activity and microbial biomass

量影响较小;土壤 STP 指标与马铃薯产量相关性较弱 (Mantel $P > 0.05$) 外,土壤其他指标与马铃薯产量均具有较强的相关性 (Mantel $P \leq 0.05$),这进一步验证了 2022 年得出的结论。因此,通过 Pearson 相关性分析阐明了水氮调控下土壤各指标 (SAK、SEP、SNN、SAN、STN、STK、SU、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP) 之间有较强的相关关系,阐明土壤养分含量、微生物量、酶活性之间的相关性,为构建农田土壤质量评价体系提供参考依据。

表 2 土壤指标与马铃薯产量的相关系数
Tab.2 Correlation coefficients between soil indicators and potato yield

土壤指标	产量		土壤指标	产量	
	2022 年	2023 年		2022 年	2023 年
速效钾含量 (SAK)	0.877 8 **	0.702 9 *	脲酶活性 (SU)	0.805 9 **	0.877 8 **
有效磷含量 (SEP)	0.723 6 *	0.870 5 **	碱性磷酸酶活性 (SAP)	0.905 1 **	0.817 0 **
硝态氮含量 (SNN)	0.813 2 **	0.609 4 *	蔗糖酶活性 (SS)	0.818 9 **	0.890 2 **
铵态氮含量 (SAN)	0.643 2 *	0.683 4 *	过氧化氢酶活性 (SP)	0.578 0	0.822 6 **
全氮含量 (STN)	0.788 5 **	0.900 2 **	微生物量碳含量 (SMBC)	0.890 4 **	0.917 9 **
全磷含量 (STP)	0.752 4 **	0.385 2	微生物量氮含量 (SMBN)	0.892 1 **	0.955 4 **
全钾含量 (STK)	0.853 1 **	0.891 8 **	微生物量磷含量 (SMBP)	0.838 0 **	0.977 2 **
有机质含量 (SOM)	0.586 7	-0.153 5			

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

表 3 主成分分析旋转因子载荷、特征值与累计方差贡献率

项目	2022 年		2023 年		2022、2023 年平均值	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
产量	0.969	0.102	0.974	-0.064	0.984	-0.009
速效钾含量 (SAK)	0.848	0.123	0.754	0.524	0.859	0.418
有效磷含量 (SEP)	0.802	-0.508	0.944	-0.094	0.901	-0.223
硝态氮含量 (SNN)	0.766	0.547	0.704	0.577	0.755	0.563
铵态氮含量 (SAN)	0.650	0.595	0.716	0.588	0.686	0.606
全氮含量 (STN)	0.878	-0.224	0.929	0.020	0.965	-0.001
全钾含量 (STK)	0.912	-0.298	0.882	0.021	0.924	-0.075
脲酶活性 (SU)	0.879	-0.212	0.848	-0.440	0.876	-0.390
碱性磷酸酶活性 (SAP)	0.975	-0.114	0.877	-0.217	0.944	-0.205
蔗糖酶活性 (SS)	0.833	-0.160	0.908	-0.300	0.943	-0.176
微生物量碳含量 (SMBC)	0.903	0.003	0.929	-0.280	0.939	-0.224
微生物量氮含量 (SMBN)	0.910	0.071	0.975	0.042	0.978	-0.005
微生物量磷含量 (SMBP)	0.858	0.269	0.981	-0.050	0.966	-0.005
特征值	9.711	1.237	10.145	1.383	10.664	1.190
贡献率/%	74.696	9.515	78.039	10.635	82.031	9.152
累计贡献率/%	74.696	84.211	78.039	88.674	82.031	91.183

将各项有效指标进行 PCA 分析,得出 PCA 分析结果,采用特征值大于 1 识别了两个主成分 (PC1 和 PC2),如表 3 所示。由最大方差法旋转后的主成分加载矩阵、特征值、贡献率与累计贡献率表明,2022、2023 年和 2 年平均值第 1 主成分的贡献率为 74.696%、78.039% 和 82.031%,2022 年的 Y、STK、SAP、SMBC、SMBN 在第 1 主成分上具有较大载荷,

2.6 土壤质量综合评估

对 2 年数据分别进行土壤指标与产量相关性分析,根据显著性 ($P < 0.05$),选择 SAK、SEP、SNN、SAN、STN、STK、SU、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 及产量为有效指标 (表 2),进行主成分分析 (表 3),保留 PC 中高加权因子载荷绝对值在最高因子载荷的 10% 内作为最小数据集,通过隶属度函数将土壤质量指标测定值标准化为 0~1 之间的无量纲值,计算土壤质量指数 (SQI),结果如图 9a、9b 所示。

分别为 0.969、0.912、0.975、0.903、0.910;2023 年的 Y、SEP、STN、SS、SMBC、SMBN、SMBP 在第 1 主成分上具有较大载荷,分别为 0.974、0.943、0.929、0.908、0.929、0.975、0.981;2 年平均值的 Y、SEP、STN、STK、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 在第 1 主成分上具有较大载荷,分别为 0.984、0.901、0.965、0.924、0.944、0.943、0.939、0.978、0.966。将 2 年

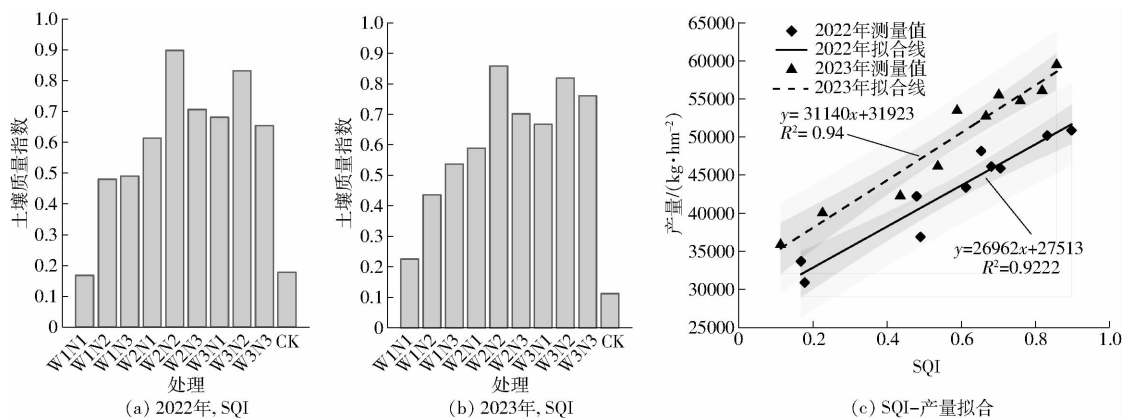


图9 水氮调控下不同处理间 SQI 差异与 SQI-产量拟合线

Fig.9 SQI differences between treatments under water and nitrogen regulation and SQI-yield fitting line

结果进行统计分析进一步推断 STK、SEP、STN、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 是限制植物生长,从而限制宁夏旱区膜下滴灌马铃薯产量的关键土壤物理化学条件,其中 SMBN 对决定马铃薯产量的土壤健康非常重要,在主成分分析中,占较高载荷。

通过不同水氮调控来增加马铃薯农田 SQI。如图 9a、9b 所示,2 年 SQI 均有明显变化。其中不灌水不施肥 (CK 处理) SQI 非常低。2022 年 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3、CK 处理土壤质量分别为低、中、中、较高、高、较高、较高、高、较高、低,各处理较 CK 处理增加 -5.48%、170.05%、175.95%、244.99%、405.47%、297.61%、283.43%、368.47%、268.01%。2023 年 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3、CK 处理土壤质量分别为较低、中、中、中、高、较高、较高、高、较高、低,各处理较 CK 处理增加 100.71%、287.47%、377.50%、423.93%、662.83%、523.87%、493.08%、628.05%、575.57%。2 年试验中 W2N2 处理产量和 SQI 均显著高于其他处理。

SQI 与马铃薯产量显著呈正相关 (图 9c),SQI-产量拟合曲线均为线性关系,2022 年 SQI-产量方程为 $y = 26962x + 27513$, R^2 为 0.9222,2023 年 SQI-产量方程为 $y = 31140x + 31923$, R^2 为 0.94,2 年 R^2 均大于 0.92,说明通过水氮调控可以很好地改善土壤质量,并且与产量增加有着密切关系。

3 讨论

土壤中各种养分含量时刻变化,受到耕种、施肥、气候等因素的影响,但在农业种植过程中,水氮影响较为显著,了解土壤中的养分含量能有效提高施肥的精准性,提升土壤地力,改良土壤生态,提高肥料利用率和作物产量,实现节省劳力、节支增收的目的^[26]。在本研究中,土壤养分含量随着土壤深度

增加呈逐渐降低趋势,这是因为土壤表层的生物活动较为频繁,植物根系和微生物活动等都会促进养分的累积和循环,施氮和灌溉等使表层土壤中的养分得到补充,随着土壤深度的增加,土壤结构的影响逐渐减弱,导致土壤下层的养分含量逐渐降低^[27]。相同灌水量条件下,SNN 含量随着施氮量增加呈先增大后降低趋势;相同施氮量条件下,SNN 含量随灌水量增加呈增加趋势,这可能是因为灌水量和施氮量增加造成土壤中有机态氮增加和氮转化率降低^[28]。不同水氮调控下 SOM 含量在整个土层变化均显著,这是因为灌水是影响土壤有机质的重要因素之一,适量灌溉可以促进微生物活性,加速有机质分解和矿化,从而增加土壤中的养分供应;施氮量促进植物生长发育,导致作物底层叶子脱落,从而增加植物残体向土壤的输入,氮素还可以影响土壤微生物活性,进而影响有机质的分解和转化,在过多的水分或氮素供应下,土壤有机质含量可能会降低,因为过度的水分可能抑制微生物活性,而过度的氮素可能导致植物过度生长而减少有机质的累积^[29-30]。因此,在农业生产中,为了保持土壤养分的平衡和稳定,应进行合理的施肥和灌溉,促进土壤养分累积和循环,提高土壤肥力和作物产量。

土壤酶活性是土壤酶催化物质转化的能力,是土壤质量的重要评价指标之一^[31]。在本研究中,土壤酶活性整体上随土壤深度呈降低趋势,这是因为土壤表层有机质含量较大,有机质是土壤酶的主要来源之一,因此表层土壤酶活性较高;随着土壤深度的增加,有机质含量逐渐减少,导致酶活性降低^[32-33]。在较低的灌水量下(W1 处理),随着施氮量的增加土壤酶活性呈增大趋势,这是因为氮素是植物生长的重要营养元素,也是土壤微生物活动所必需的元素,在施氮量增加时土壤中的氮素含量会相应提高,从而刺激植物根系和土壤微生物活性,进而促进酶的产生和分泌。W1 和 W2 灌水量下随施

氮量增加土壤酶活性呈先增大后降低趋势,这是由于灌溉为马铃薯生长提供了良好的环境,但是过量的施氮量导致 pH 值下降及抑制了酶活性,从而导致土壤酶活性下降,这与马嵩科等^[34]研究结果一致。相同施氮量下土壤酶活性随着灌溉定额的增加呈先增加后降低趋势,这是由于适量灌溉有助于保持土壤良好的水分状况,促进植物根系生长,水分是土壤酶催化反应的重要介质,适量水分有利于酶与底物的接触和反应,过多水分可能导致土壤通气性变差,抑制微生物的呼吸作用和酶的分泌,过多水分还可能导致土壤中的酶被稀释,降低酶浓度和活性^[35]。通过合理施肥和灌溉可以有效减少过大施氮量对土壤酶活性的不利影响,维护土壤生态系统的稳定性和可持续性。

土壤微生物量能够灵敏、准确地反映土壤质量变化,可综合反映土壤肥力和环境质量状况^[36-37]。相同施氮量下随灌水量增加呈先增后降趋势,由于水分较低微生物代谢活动受到一定的限制,随着灌水量的增加,土壤水分达到适宜微生物生长的范围,微生物的代谢活动得以加强,微生物量碳氮磷含量也会随之增加;当较大灌水量时,超过适宜微生物生长的范围时,土壤中的氧气含量会逐渐减少,导致土壤处于厌氧状态,微生物的代谢活动受到抑制,从而导致微生物量碳氮磷含量下降^[38]。相同灌溉定额下,W1 处理下随着施氮量增加土壤微生物生物量呈增加趋势,这是因为在较小灌水条件下施氮促进了微生物量累积;N2 和 N3 处理呈先增加后降低趋势,这说明灌溉较施氮对土壤微生物量更为敏感,适当的灌水施氮量可以维持土壤微生物健康^[39]。生态化学计量学是评价植物健康状况及表征土壤对植物生长养分供应情况的重要指标,植物生长速度可由碳氮和氮磷体现,植物对土壤 N 和 P 的利用效率由其比值确定,而对生产力起限制作用的营养元素可由氮磷比决定^[40]。本研究中,水氮调控对马铃薯 SMBC:SMBN 的影响 W1N1、W2N1 处理显著高于其他处理,其他处理无显著变化,说明较低灌水量和较低施氮量导致土壤微生物生物量碳氮比例失衡,这是因为在土壤体系中这两种元素之间具有很好的耦合关系,对同一环境因素的响应总是同步进行的。SMBC:SMBP 在相同施氮量下随着灌水量增加出现先增加后降低趋势,在灌水量相同时,随着施氮量增加各处理无显著变化,2023 年各处理 SMBC:SMBP 变化并不明显,这是因为碳磷在土壤中均比较稳定存在,灌水量可以导致 SMBC:SMBP 变化。水氮调控对 SMBN:SMNP 变化不一致,这是因为 2 年试验中土壤氮磷比变化很大,使得土壤氮磷含量及其比

值的空间变异性较大,这是因为土壤磷主要受施氮量的影响,变异较大。

水氮调控是提高产量的重要措施之一^[41-42],在本研究中,马铃薯产量在相同灌水条件下各处理随着施氮量增加呈先增加后降低趋势,在相同施氮量条件下各处理随着灌溉定额增加呈先增加后降低趋势,这与王顺等^[43]研究结果一致。这是因为适量水分和氮素供应可以促进马铃薯的生长和发育,提高马铃薯产量;过量灌溉定额和氮素也会导致马铃薯生长过旺,出现徒长现象,反而降低产量,因此适量水分和氮素供应可以促进马铃薯的生长和发育,提高马铃薯产量^[44]。另外本研究还发现灌溉定额对马铃薯产量的影响比施氮量大。在本研究中,通过产量与土壤各指标的相关性分析,发现土壤 STK、SEP、STN、SAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 是限制马铃薯生长及产量的重要指标,通过水氮调控可以改善土壤化学性质,提高土壤质量,在本文条件下优选 SMBN 为决定马铃薯产量的指标。计算得出 SQI 与产量的关系为显著正相关,这与魏彦凤等^[45]研究结果基本一致,证明 SAK、SEP、SNN、SAN、STN、STK、SU、SSAP、SS、SMBC、SMBN、SMBP 可以作为有效指标进行土壤质量评价。研究结果进一步阐明了在水氮调控下选用适量灌溉定额和施氮量(1 800 m³/hm²、156 kg/hm²)条件下可以明显改善干旱区或半干旱区土壤质量,当土壤质量评价指数越高,说明土壤综合质量越好,通过水氮调控改善土壤质量,有利于马铃薯的生长和发育,提高土壤肥力,为马铃薯生长和发育提供良好的土壤环境,实现农业生产的可持续发展。

4 结 论

(1)在水氮调控下土壤养分含量随着土壤深度增加呈逐渐降低趋势,土壤养分含量随灌溉定额和施氮量变化均有显著影响。土壤酶活性整体上随土壤深度呈降低趋势,不同水氮调控下 0~20 cm 土层 4 种酶活性(SP、SS、SU、SAP)2 年变化范围分别为 5.01~6.24 mg/(kg·d)、14.62~27.72 mg/(kg·d)、0.46~0.72 mg/(kg·d)、0.43~0.67 mg/(kg·d),水氮调控下 W2N2 处理最大,较 CK 处理增加 23.66%、86.28%、58.66%、56.92%。马铃薯微生物量碳氮磷含量在 W2N2 处理下显著高于其他处理并达最大值(164.47、15.13、2.73 mg/kg)。

(2)马铃薯产量在相同灌水条件下各处理随着施氮量增加呈先增加后降低趋势,在相同施氮量条件下各处理随着灌溉定额增加呈先增加后降低趋势。2 年试验中 W2N2 处理马铃薯总产量最大,较

CK 处理平均增加 86.32%。2 年试验中 W2N2 处理 (处理)SQI 非常低,SQI 与马铃薯产量呈显著正相关 SQI 均显著高于其他处理,其中不灌水不施肥 (CK 关系,SQI-产量拟合曲线均为线性关系。

参 考 文 献

[1] GEORGE T S, TAYLOR M A, DODD I C, et al. Climate change and consequences for potato production: a review of tolerance to emerging abiotic stress[J]. Potato Research, 2017,60(3-4): 239-268.

[2] RUDACK K, SEDDIG S, SPRENGER H, et al. Drought stress-induced changes in starch yield and physiological traits in potato [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2017,203(6): 494-505.

[3] NURMANOV Y T, CHERNENOK V G, KUZDANOVA R S. Potato in response to nitrogen nutrition regime and nitrogen fertilization[J]. Field Crops Research, 2019,231: 115-121.

[4] SILVA A L B R, ZOTARELLI L, DUKES M D, et al. Nitrogen fertilizer rate and timing of application for potato under different irrigation methods[J]. Agricultural Water Management, 2023,283: 108312.

[5] KARACA S, DENGIZ O, DEMIRAĞ T O, et al. An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem[J]. Ecological Indicators, 2021,121: 107001.

[6] BISWAS S, HAZRA G C, PURAKAYASTHA T J, et al. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders[J]. Geoderma, 2017,292: 34-48.

[7] YU P, HAN D, LIU S, et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland[J]. CATENA, 2018, 171: 280-287.

[8] SADIQ F K, MANIYUNDA L M, ADEGOKE K A, et al. Evaluating quality of soils formed on basement complex rocks in Kaduna State, northern Guinea savanna of Nigeria[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021,193(7): 383.

[9] YIN J, MA Z, YANG Y, et al. Water and nitrogen coupling on the regulation of soil nutrient-microbial biomass balance and its effect on the yield of wolfberry (*Lycium barbarum* L.)[J]. Plants, 2023,12(15): 2768.

[10] REN H, KANG J, YUAN Z, et al. Responses of nutrient resorption to warming and nitrogen fertilization in contrasting wet and dry years in a desert grassland[J]. Plant and Soil, 2018,432(1-2): 65-73.

[11] JAKRAWATANA N, NGAMMUANGTUENG P, GHEEWALA S H. Linking substance flow analysis and soil and water assessment tool for nutrient management[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,142: 1158-1168.

[12] NIU G, ZHONG B, WANG R, et al. Effects of nitrogen and water addition on soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, and their stoichiometry along soil profile in a semi-arid steppe[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023,23(9): 3298-3309.

[13] MUHAMMAD I, LV J Z, YANG L, et al. Low irrigation water minimizes the nitrate nitrogen losses without compromising the soil fertility, enzymatic activities and maize growth[J]. BMC Plant Biology, 2022,22(1): 159.

[14] SU B, SHANGGUAN Z, BAI E. Stoichiometric homeostasis in response to variable water and nutrient supply in a *Robinia pseudoacacia* plant-soil system[J]. Journal of plant ecology, 2022,15(5): 991-1006.

[15] 宁夏水利厅, 宁夏水利科学研究院. 宁夏特色作物种植技术规范[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2017: 49.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-199.

[17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 274-338.

[18] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982,14(4): 319-329.

[19] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987,19(6): 703-707.

[20] ANDERSON J P E, DOMSCH K H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1978,10(3): 215-221.

[21] LI P, ZHANG T, WANG X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2013,126: 112-118.

[22] ZHOU Y, MA H, XIE Y, et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China[J]. Ecological Indicators, 2020,118: 106743.

[23] SUN G, HU T, LIU X, et al. Optimizing irrigation and fertilization at various growth stages to improve mango yield, fruit quality and water-fertilizer use efficiency in xerothermic regions[J]. Agricultural Water Management, 2022,260: 107296.

[24] D'HOSE T, COUGNON M, DE Vlieghe A, et al. The positive relationship between soil quality and crop production: a case study on the effect of farm compost application[J]. Applied Soil Ecology, 2014,75: 189-198.

[25] 李倩, 巴图, 李玉龙, 等. 保水剂施用方式对土壤含水量和微生物生物量及马铃薯产量的影响[J]. 西北农业学报, 2017,26(10): 1453-1460.

LI Qian, BA Tu, LI Yulong, et al. Effects of application methoths of super absorbent polymers on soil moisture content and microbial biomass and potato yield[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017,26(10): 1453-1460. (in Chinese)

[26] 董秋瑶, 温皓天, 宋超, 等. 河南南阳盆地东南耕区表层土壤养分地球化学综合评价及影响因素[J]. 现代地质, 2022,36(2): 449-461.

DONG Qiuyao, WEN Haotian, SONG Chao, et al. Comprehensive evaluation and influencing factors of surface soil nutrient chemistry in southeastern cultivated area of the Nanyang basin, Henan Province[J]. Geoscience, 2022,36(2): 449-461.

(in Chinese)

[27] 刘颖,顾昀铎,张伟杨,等. 水分与氮素及其互作调控小麦产量和水氮利用效率研究进展[J]. 作物杂志, 2023(4): 7 – 15.
LIU Ying, GU Yunyi, ZHAG Weiyang, et al. Research advances in the effects of water and nitrogen and their interaction on the grain yield, water and nitrogen use efficiencies of wheat[J]. Crops, 2023(4): 7 – 15. (in Chinese)

[28] 张俊,王小昌,崔晓路,等. 灌溉量和氮肥增效剂对夏玉米产量及水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 123 – 132.
ZHANG Jun, WANG Xiaochang, CUI Xiaolu, et al. Effects of irrigation amount and nitrogen synergists on yield and utilization of water and fertilizer of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 123 – 132. (in Chinese)

[29] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188 – 190.
LI Xuezhuang, FAN Guisheng. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 188 – 190. (in Chinese)

[30] 图纳热,红梅,叶贺,等. 降水变化和氮沉降对荒漠草原土壤丛枝菌根真菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1251 – 1260.
TU Nare, HONG Mei, YE He, et al. Effects of precipitation change and nitrogen deposition on soil arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) community structure in desert steppe[J]. Soils, 2023, 55(6): 1251 – 1260. (in Chinese)

[31] 李茜,徐瑞蔓,陈迪,等. 不同栽培年限人参根际土壤细菌群落与土壤理化性质和酶活性的相关性[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 313 – 324.
LI Xi, XU Ruiman, CHEN Di, et al. Correlation of bacterial community with soil physicochemical properties and enzyme activities in rhizosphere soil under different cultivation years of ginseng (*Panax ginseng* C. A. Mey.) [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 313 – 324. (in Chinese)

[32] 隽英华,何志刚,刘慧屿,等. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1223 – 1229.
JUAN Yinghua, HE Zhigang, LIU Huiyu, et al. Regulation effects of straw returning and nitrogen application management on farmland brown soil microbial biomass and enzyme activities[J]. Soils, 2023, 55(6): 1223 – 1229. (in Chinese)

[33] 梅孔灿,程蕾,张秋芳,等. 不同植物来源可溶性有机质对亚热带森林土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(12): 1273 – 1284.
MEI Kongcan, CHENG Lei, ZHANG Qiufang, et al. Effects of dissolved organic matter from different plant sources on soil enzyme activities in subtropical forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(12): 1273 – 1284. (in Chinese)

[34] 马嵩科,霍克,张冬霞,等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(6): 120 – 133.
MA Songke, HUO Ke, ZHANG Dongxia, et al. Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(6): 120 – 133. (in Chinese)

[35] 金彩悦,李海林,瞿广飞,等. 土壤微生物代谢模式及其环境影响研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(9): 3188 – 3198.
JIN Caiyue, LI Hailin, QU Guangfei, et al. Developments in the research of soil microbial metabolic patterns and their environmental impacts[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(9): 3188 – 3198. (in Chinese)

[36] 潘孝晨,唐海明,肖小平,等. 不同耕作和秸秆还田模式对紫云英-双季稻土壤微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1585 – 1595.
PAN Xiaochen, TANG Haiming, XIAO Xiaoping, et al. Effects of different soil tillage and returning crop residues systems on soil microbial biomass carbon and nitrogen under Chinese milk vetch and double-cropping rice field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(8): 1585 – 1595. (in Chinese)

[37] 秦子元,张忠学,杜思澄,等. 水氮耦合下黑土稻作碳氮磷累积分配和化学计量特征[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 326 – 339.
QIN Ziyuan, ZHANG Zhongxue, DU Sicheng et al. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and distribution and stoichiometric characteristics of rice in black soil under coupling of water and nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 326 – 339. (in Chinese)

[38] 唐仲霞,银敏华,齐广平,等. 水氮耦合对无芒雀麦产量及氮磷钾化学计量特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 532 – 545.
TANG Zhongxia, YIN Minhua, QI Guangping, et al. Effects of optimal irrigation and nitrogen coupling on *Bromus inermis* yield, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometric characteristics[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(3): 532 – 545. (in Chinese)

[39] 刘玉颖,沈丰,杨劲峰,等. 长期施肥棕壤大豆产量的演变及土壤氮素分布特征[J]. 中国农业科学, 2023, 56(10): 1920 – 1934.
LIU Yuying, SHEN Feng, YANG Jinfeng, et al. Variation characteristics of soybean yield and soil nitrogen distribution in brown soil under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(10): 1920 – 1934. (in Chinese)

版社,2018.

[27] 中国国家标准化管理委员会. 压力容器 第4部分:制造、检验和验收:GB/T 150.4—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.

[28] 刘培坤, 张瑞, 杨兴华, 等. 涡轮式与推进式搅拌釜的数值模拟研究[J]. 化工机械, 2017, 44(1): 84–87,96.
LIU Peikun, ZHANG Rui, YANG Xinghua, et al. Numerical simulation of turbo-type and push-type stirred tanks[J]. Chemical Engineering and Machinery, 2017, 44(1): 84–87,96. (in Chinese)

[29] 王凯, 虞军. 搅拌设备[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.

[30] 汪家琼, 冯文浩, 钱文飞, 等. 磁力泵磁力联轴器传动的影响因素[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(3): 244–249.
WANG Jiaqiong, FENG Wenhao, QIAN Wenfei, et al. Influencing factors of magnetic coupling transmission of magnetic pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(3): 244–249. (in Chinese)

[31] 赵克中. 磁力耦合传动技术及装置的理论设计与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2018.

[32] 黄长江, 肖家宾, 李新堂. 光纤测温技术现状研究及发展趋势[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(2): 102–108.
HUANG Changjiang, XIAO Jiabin, LI Xintang. Research status and development trend of optical fiber temperature measurement technology[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(2): 102–108. (in Chinese)

[33] 陈作炳, 罗传威, 郑欢. 立式发酵机搅拌阻力矩计算模型的搭建和修正[J]. 机械设计与制造, 2022(4): 10–13.
CHEN Zuobing, LUO Chuanwei, ZHENG Huan. Establishment and modification of the calculation model of stirring resistance moment in vertical fermentation machine[J]. Machinery Design and Manufacture, 2022(4): 10–13. (in Chinese)

[34] 邹鹏程, 金光远, 崔政伟, 等. 一种具有搅拌桨的微波夹层反应釜内多物理场特性研究[J]. 化学工业与工程, 2022, 39(3): 98–106.
ZOU Pengcheng, JIN Guangyuan, CUI Zhengwei, et al. Study of multi-physical field characteristics in a microwave reactor with an interlayer and a stirring blade[J]. Chemical Industry and Engineering, 2022,39(3): 98–106. (in Chinese)

[35] 张开兴, 李科, 张开峰, 等. 搅拌式高精度恒温槽设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 418–426.
ZHANG Kaixing, LI Ke, ZHANG Kaifeng, et al. Design and test of high precision thermostat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):418–426. (in Chinese)

[36] JIAO Y, TANG J, WANG S J, et al. Influence of dielectric properties on the heating rate in free-running oscillator radio frequency systems[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 197–203.

[37] XIE Y, ZHANG Y, XIE Y, et al. Radio frequency treatment accelerates drying rates and improves vigor of corn seeds[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126597.



(上接第 370 页)

[40] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. 植物生态学报, 2021,45(7): 682–713.
TIAN Di, YAN Zhengbing, FANG Jingyun. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021,45(7): 682–713. (in Chinese)

[41] LI J, ZHANG Z, YAO C, et al. Improving winter wheat grain yield and water-/nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021,20(2): 606–621.

[42] 李仙岳, 辛懋鑫, 史海滨, 等. 干旱盐渍化地区控释肥水氮耦合效应与制度优化[J]. 农业机械学报, 2022,53(8): 397–406.
LI Xianyue, XIN Maoxin, SHI Haibin, et al. Coupling effect and system optimization of controlled-release fertilizer and water in arid salinized areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(8):397–406. (in Chinese)

[43] 王顺, 尹娟, 张海军, 等. 不同水氮处理对马铃薯土壤酶活性和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(8): 67–73.
WANG Shun, YIN Juan, ZHANG Haijun, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on soil enzyme activity and yield of potato[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 67–73. (in Chinese)

[44] 张帆, 陈梦茹, 邢英英, 等. 基于熵权法和 TOPSIS 对马铃薯施肥和滴灌量组合的优化[J]. 植物营养与肥料学报, 2023,29(4): 732–744.
ZHANG Fan, CHEN Mengru, XING Yingying, et al. Optimization of fertilizer and drip irrigation levels for efficient potato production based on entropy weight method and TOPSIS[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(4): 732–744. (in Chinese)

[45] 魏彦凤, 申佳丽, 安明远, 等. 不同物料配施对微咸水灌溉黄瓜土壤质量及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 95–104.
WEI Yanfeng, SHEN Jiali, AN Mingyuan, et al. Effects of different materials on soil quality and yield of cucumber under brackish irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(5): 95–104. (in Chinese)