



魏淑丽, 方静, 谢锐, 张向前, 任永峰, 陈立宇, 赵坤, 刘嘉伟, 刘志雄, 赵小庆, 路战远. 轮作促进春小麦田土壤质量提升及缓解干旱效应研究[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 199-212.

WEI Shuli, FANG Jing, XIE Rui, ZHANG Xiangqian, REN Yongfeng, CHEN Liyu, ZHAO Kun, LIU Jiawei, LIU Zhixiong, ZHAO Xiaoqing, LU Zhanyuan. Effects of crop rotation on soil quality in spring wheat fields and its effect on alleviating drought[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 199-212.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.17

轮作促进春小麦田土壤质量提升及缓解干旱效应研究

魏淑丽¹ 方静^{1,2} 谢锐¹ 张向前¹ 任永峰¹ 陈立宇¹ 赵坤¹ 刘嘉伟¹
刘志雄¹ 赵小庆^{1*} 路战远^{3*}

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室/
内蒙古自治区退化农田生态修复与污染治理重点实验室, 呼和浩特 010031;
2. 内蒙古农业大学 农学院 呼和浩特 010019;
3. 内蒙古大学 生命科学学院 呼和浩特 010020)

摘要 为探究长期不同轮作模式下农田土壤质量的变化趋势及其缓解干旱胁迫的效应,在大兴安岭西麓基于春小麦-马铃薯(R₁)、春小麦-马铃薯-油菜(R₂)、春小麦-油菜(R₃)、春小麦连作(C₁)4种长期(2016—2022年)定位轮作模式基础上,设置正常水分(NC)和干旱胁迫(HC)2个水分处理,共8个处理。按作物轮作顺序,2022年各模式均种植春小麦‘龙麦36’,测定不同处理的土壤理化性状、酶活性、微生物量、小麦产量等指标,分析不同轮作模式下土壤质量指标变化对干旱胁迫的响应。结果表明:在土壤性状上,2种水分处理的R₁、R₂、R₃土壤质量含水率、总孔隙度、有机质、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、蔗糖酶、碱性磷酸酶、微生物量磷均显著高于C₁($P<0.05$);与NC相比,HC中R₁、R₂、R₃的土壤物理化学、酶活性、微生物学等指标变化幅度均小于C₁,其中R₁对干旱胁迫下土壤有效磷含量和过氧化氢酶活性的缓解效应均为最好,分别为66.27%和13.27%,R₂对干旱胁迫下土壤质量含水率、速效钾、蔗糖酶的缓解效应最好,分别为3.77%、50.38%、44.99%,R₃对干旱胁迫下土壤碱性磷酸酶活性的缓解效应最高,为57.29%,NC和HC中R₁、R₂、R₃模式土壤质量系数(SQI)均显著高于C₁($P<0.05$),R₁、R₂、R₃之间无显著差异。在产量上,2种水分处理中R₁、R₂、R₃的产量差异不显著,但均显著高于C₁($P<0.05$),HC中C₁、R₁、R₂、R₃的产量分别较NC低24.13%、12.95%、16.59%、18.98%,R₁缓解干旱的效应最好,效应值为46.33%;春小麦产量与质量含水率、总孔隙度等土壤物理性状,有机质含量、碱解氮等土壤养分指标,蔗糖酶、碱性磷酸酶等土壤酶活性,土壤微生物量磷等均呈显著正相关。综上,春小麦-马铃薯(R₁)、春小麦-马铃薯-油菜(R₂)、春小麦-油菜(R₃)轮作模式均可显著提高大兴安岭西麓农田土壤耕地质量,进而缓解干旱对春小麦的水分和养分利用的限制,并可显著提高春小麦的产量,其中R₁、R₂缓解干旱胁迫效果较好。

关键词 干旱胁迫; 轮作模式; 春小麦; 土壤质量; 产量

中图分类号 S155.4

文章编号 1007-4333(2025)12-0199-14

文献标志码 A

Effects of crop rotation on soil quality in spring wheat fields and its effect on alleviating drought

WEI Shuli¹, FANG Jing^{1,2}, XIE Rui¹, ZHANG Xiangqian¹, REN Yongfeng¹, CHEN Liyu¹,
ZHAO Kun¹, LIU Jiawei¹, LIU Zhixiong¹, ZHAO Xiaoqing^{1*}, LU Zhanyuan^{3*}

收稿日期: 2025-04-13

基金项目: 内蒙古自治区2022年科技领军人才项目(2022LJRC0010);内蒙古自治区科技计划(2025KYPT0006);国家自然科学基金联合基金(U23A20195);内蒙古农牧业青年创新基金(2022QNJJN01);内蒙古自治区草原英才科技计划

第一作者: 魏淑丽(ORCID:0009-0002-7571-684X),副研究员,主要从事作物-土壤-微生物协作抗旱机理以及农田轮作制度的选择与优化研究,E-mail: wslweishuli@163.com

通讯作者: 路战远(ORCID:0009-0006-0862-4813),研究员,中国工程院院士,主要从事耕地保护与利用研究,E-mail: lzhy2811@163.com

赵小庆(ORCID:0000-0002-6631-2870),研究员,主要从事植物功能基因组及抗逆生理与多组学分析研究,E-mail: zhaoqx204@163.com

- (1. Key Laboratory of Black Soil Protection and Utilization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Ecological Restoration and Pollution Control of Degraded Farmland in Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031 China;
2. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019 China;
3. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010020 China)

Abstract To explore the long-term trend of soil quality changes in farmland under different crop rotation patterns and their effects on alleviating drought stress, four long-term (2016-2022) fixed location rotation models, spring wheat-potato (R_1), spring wheat-potato-rape (R_2), spring wheat-rape (R_3), and continuous spring wheat (C_1), were established on the western slope of the Great Khingan Mountains. Two water treatments, normal moisture (NC) and drought stress (HC), were designed, resulting in a total of eight treatments. In order of crop rotation, spring wheat 'Longmai 36' was planted in all rotation models in 2022. The soil physicochemical properties, enzyme activities, microbial biomass, and wheat yield under different treatments were determined, and the response of soil quality indicators under different rotation systems to drought stress, and the mitigation effects were analyzed. The results showed that: In terms of soil properties, under both water treatments, R_1 , R_2 and R_3 had significantly higher soil moisture content, total porosity, organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium, sucrase, alkaline phosphatase, and microbial biomass phosphorus than those of C_1 ($P < 0.05$). Compared with NC, the variation amplitudes of soil physicochemical properties, enzyme activities, and microbial indicators in R_1 , R_2 and R_3 under HC were all smaller than those in C_1 . Among which, R_1 showed the best mitigation effect on available phosphorus content and catalase activity under drought stress, with mitigation values of 66.27% and 13.27%, respectively. R_2 had the best mitigation effect on soil moisture content, available potassium, and sucrase activity under drought stress, with values of 3.77%, 50.38%, and 44.99%, respectively. R_3 had the highest mitigation effect on alkaline phosphatase activity under drought stress, reaching 57.29%. Under both NC and HC conditions, the soil quality index (SQI) of R_1 , R_2 and R_3 was all significantly higher than that of C_1 ($P < 0.05$), with no significant differences among R_1 , R_2 and R_3 . In terms of yield, under both water treatments, the yield differences among R_1 , R_2 and R_3 were not significant, but were all significantly higher than that of C_1 ($P < 0.05$). Under HC, the yields of C_1 , R_1 , R_2 and R_3 decreased by 24.13%, 12.95%, 16.59%, and 18.98%, respectively, compared with NC, with R_1 showing the best drought mitigation effect (46.33%). The yield of spring wheat shows a significant positive correlation with soil physical properties such as mass water content and total porosity, soil nutrient indicators including organic matter content and available nitrogen, soil enzyme activities like sucrase and alkaline phosphatase, as well as soil microbial biomass phosphorus. In conclusion, spring wheat-potato (R_1), spring wheat-potato-rape (R_2), spring wheat-rape (R_3) rotation patterns can significantly improve the quality of farmland soil arable land in the western foothills of the Great Khingan Mountains, thereby alleviate the limitations of water and nutrient use by spring wheat under drought, and significantly increase spring wheat yield. R_1 and R_2 have better effects on alleviating drought stress.

Keywords drought stress; crop rotation mode; spring wheat; soil quality; yield

大兴安岭西麓耕地是我国重要粮食生产基地,对保障国家粮食安全发挥着关键作用^[1]。该地区属于半干旱地区,降水较少,导致农业生产损失巨大,干旱已成为限制该区域农业生产发展的主要因素^[2]。因此,采取适宜的保护性耕作措施缓解干旱对土壤质量的影响,对春小麦抗逆稳产具有重要意义。

干旱不仅抑制作物生长,降低其对土壤养分的吸收利用,还会破坏土壤物理结构,并影响土壤酶

活性^[3]。有研究表明,干旱会降低土壤氮、磷的有效性,阻碍植物吸收速效氮和有效磷,且随着干旱加剧,磷循环会受到显著的影响^[4];王梓轩等^[5]发现,甘蔗根际土壤的脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和酸性蛋白酶的活性在干旱胁迫下均表现为下降;此外,李越等^[6]研究表明,干旱胁迫会抑制燕麦土壤微生物量碳、氮、磷的积累。轮作作为改善农田生态环境、培肥地力、缓解粮食生产结构失衡等问题的有效措施,被许多国家和地区广泛采用^[7-10]。因此,

对轮作改善土壤环境及其缓解干旱的能力进行研究具有重要意义。

轮作结合合理的耕作措施,能有效地保护和改善土壤环境^[7],陈子明等^[8]研究发现,轮作能提高土壤保墒能力,降低土壤容重,增加土壤通透性,改善团聚体结构。轮作还可以提高土壤孔性,从而改善土壤的物理性状^[9],促进水分的高效利用和作物间养分的均衡利用,从而增加了耕地肥力、提高了耕地生产力^[10],还可显著增加土壤养分积累,平衡氮、磷、钾等养分,稳定土壤 pH^[11]。徐培智等^[12]研究表明,轮作土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性可升高 48.1% 和 27.2%,并有效降低土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶活性。玉米-豌豆轮作可显著提高玉米连作田土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶的活性^[13]。徐阳春等^[14]研究发现,长期(16 年)水旱轮作(稻-麦)可有效增加 0—5 cm 土层土壤微生物量碳、氮、磷的含量。综上,轮作可以改善土壤理化、生物学性状,而有关大兴安岭沿麓农田的研究多集中于耕作方式对土壤结构、土壤养分等方面的影响,针对轮作缓解干旱效应的研究鲜有报道。本研究基于 2016—2022 年 4 种长期定位轮作模式,在大兴安岭

西麓黑土地,通过测定不同轮作模式下土壤理化性状、酶活性、微生物量及小麦产量等指标,分析不同轮作模式的土壤质量指标变化对于干旱胁迫的响应及其缓解干旱胁迫的效应,旨在研究不同轮作方式下,长期定位农田的土壤质量演变及对于干旱胁迫的缓解作用,以期为大兴安岭沿麓土壤地力提升及小麦的抗逆高效生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于内蒙古自治区农牧业科学院特泥河土壤管理与生态修复科学观测试验站(120°48' E, 49°55' N, 海拔 650 m)。该地区地处中温带半干旱大陆性草原气候区,年无霜期 90~105 d。2022 年平均气温 -0.38 °C,平均降水量 259.4 mm,5—8 月降水量占全年降水量的 71.13%,年日照时数 2 828.3 h,试验地小麦生育期 5—8 月的降雨量和平均气温的动态变化见图 1。试验点耕地土壤类型为黑钙土,土壤养分:有机质 54.84 g/kg、碱解氮 0.32 g/kg、速效钾 0.21 g/kg、有效磷 0.038 g/kg, pH 6.97。

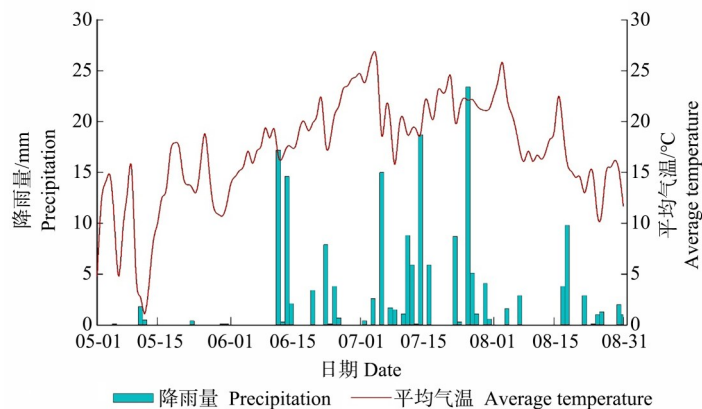


图 1 2022 年 5—8 月试验地气候动态变化

Fig. 1 Climate dynamics of the test site from May to August in 2022

1.2 试验设计

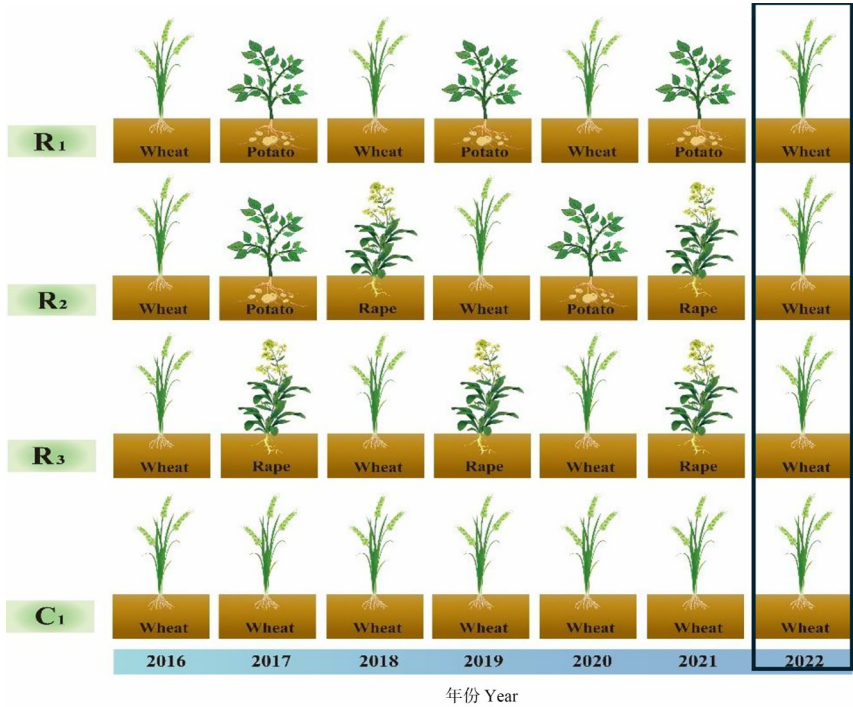
供试春小麦品种为‘龙麦 36’,由试验站提供,该品种具有高产、优质、多抗、广适性的特点,耐旱也耐寒。轮作定位从 2016 年开始,以春小麦、油菜、马铃薯为主栽作物设置的 4 种长期定位轮作模式分别为:春小麦-马铃薯(R_1),春小麦-马铃薯-油菜(R_2),春小麦-油菜(R_3),春小麦连作(C_1)(图 2)。2016—2022 年作物均在雨养条件下生长,2022 年

(第 7 年)按照作物轮作顺序定位田均种植春小麦‘龙麦 36’,春小麦拔节后,设置正常水分(保持土壤质量含水率在 25%~28%,NC,田间最大持水量的 70%~80% 为标准计算^[15])和干旱胁迫(土壤质量含水率在 9%~12%,HC,以田间最大持水量的 25%~35% 为标准计算^[15])2 个水分梯度;试验采用随机区组设计,共 8 个处理,每个处理设 3 次重复,共 24 个小区,每个小区 9 m²,设置 1 m 宽保护行,试

验地面积约 240 m²。每个处理只施用基肥,不施用追肥,基肥尿素 60 kg/hm²、磷酸二铵 165 kg/hm²和硫酸钾 30 kg/hm²,其中 N 28 kg/hm²、P 75.90 kg/hm²、K 15 kg/hm²,其他管理方法同当地大田。

于春小麦拔节后期(2022-07-04)开始进行水分处理,正常水分和干旱胁迫均使用旱棚来控制,为保持试验小区通风,大棚塑料棚膜两侧距离地面 1.5 m,处理期间每天对 0—20 cm 土壤质量含

水量进行监测,干旱胁迫处理在处理期间未进行灌水,正常水分处理期间进行人工补水,使土壤质量含水率保持在 25%~28%,每次灌溉量固定为 900 m³/hm²计算,C₁和 R₃在 07-08 和 07-24 进行人工灌溉,R₁和 R₂在 07-21 和 07-24 进行人工灌溉;直到 2022-07-27,连作模式的土壤质量含水率降至 9%~12%,处理完成。2022-07-28 对 8 个处理同时取样。



R₁, 春小麦-马铃薯轮作;R₂, 春小麦-马铃薯-油菜轮作;R₃, 春小麦-油菜轮作;C₁, 春小麦连作。下同。
R₁, spring wheat-potato rotation; R₂, spring wheat-potato-rape rotation; R₃, spring wheat-rape rotation; C₁, spring wheat continuous crop. The same below.

图2 轮作周期示意图
Fig. 2 Crop rotation sequence diagram

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 土壤物理化学和生物学指标

0—20 cm 的土壤容重及孔隙度采用环刀法^[16]测定。土壤化学性状、酶活性、微生物量样品均采用五点取样法^[17],将土壤表层浮土去除,用土钻取 0—20 cm 土层的土壤样品,每个小区 3 次重复。将 3 次重复的土样均匀混合后,分别装入 5 个自封袋内,将土壤样品在实验室内阴干后,一部分用 1 mm 不锈钢网筛将土壤过筛,用于测定土壤 pH 和土壤酶的活性;一部分用 0.15 mm 不锈钢网筛将土壤过筛,用于测定土壤化学指标;将用于测定土壤微生物量的 2 袋土壤样品立即置于 4 ℃ 保存;后续采用电位法、重铬酸钾滴定法、全自动凯氏定氮仪法、HClO₄-H₂SO₄法、NaOH 熔融-火

焰光度法、扩散吸收法、NaHCO₃法、NH₄OAc 浸提-火焰光度法^[18]分别测定土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾。土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法、靛酚蓝比色法测定^[19]。土壤微生物量碳、微生物量氮采用氯仿熏蒸提取-TOC 法,微生物量磷采用氯仿熏蒸提取-全磷测定法^[20]测定。

1.3.2 缓解干旱胁迫效应值

与正常水分(NC)相比,干旱胁迫下 4 种模式春小麦土壤性状指标呈显著增加或降低,将此增加或降低的幅度计算为百分数,再将 R₁、R₂、R₃ 3 个模式百分数与 C₁百分数相比的增加或降低幅度作为缓

解干旱胁迫的效应值。设 C_1 模式的变化百分数为 P_{C1} , R_1 、 R_2 、 R_3 模式的变化百分数分别为 P_{R1} 、 P_{R2} 、 P_{R3} , 则 R_1 的缓解干旱效应值见公式(1), 公式如下:

$$E_{R1} = \left(\frac{P_{C1} - P_{R1}}{P_{C1}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_{R1} , 干旱效应值; P_{C1} , C_1 模式的变化百分数; P_{R1} , R_1 模式变化的百分数。

1.3.3 土壤质量指数(SQI)

首先对各处理数据标准化。正向指标使用标准化公式(2), 负向指标使用公式(3), 通过主成分分析(PCA)对不同指标进行赋权得到不同指标的权重 W_i , 之后通过公式(4)计算土壤质量指数(SQI)^[21]。公式如下:

$$Z_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$Z_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

$$SQI = \sum_{i=1}^{18} (Z_i \times W_i) \quad (4)$$

式中: Z_i , 第 i 个标准化的数值; X_i , 第 i 个原始数据; $X_{\min}$, 数据集中的最小值; $X_{\max}$, 数据集中的最大值; W_i , 权重; SQI, 土壤质量指数。

1.4 统计分析

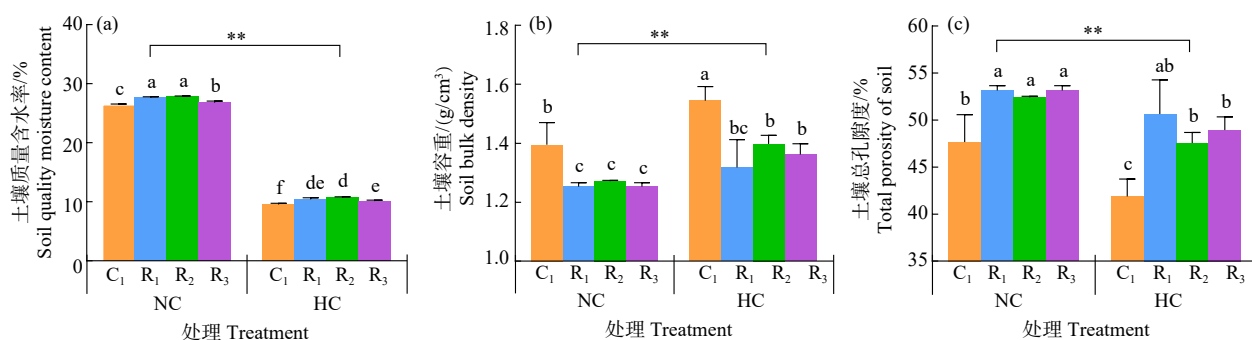
采用 Excel 整理数据; 使用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析、独立样本 t 检验、双因素方差分析作图采用 GraphPad 9.0。单因素方差分析采用 LSD

法, 相关分析和绘图使用 OriginPro 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 春小麦田土壤物理性状变化

由图 3 可知, 与正常水分处理(NC)相比, 干旱胁迫处理(HC)的土壤质量含水率、总孔隙度均极显著降低($P < 0.01$), 土壤容重则极显著增加($P < 0.01$)。NC 和 HC 的春小麦-马铃薯(R_1)、春小麦-马铃薯-油菜(R_2)、春小麦-油菜(R_3)模式的土壤质量含水率比春小麦连作(C_1)分别高出 4.58%、5.12%、1.31% 和 9.05%、12.12%、6.01% ($P < 0.05$); HC 的 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤质量含水率分别比 NC 各轮作模式低 63.90%、62.35%、61.49%、62.22%, R_1 、 R_2 、 R_3 缓解干旱的效应值分别为 2.43%、3.77%、2.63%, R_2 的效应值最高; 2 种水分处理中 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤容重均显著低于 C_1 ($P < 0.05$), 与 NC 相比, HC 的 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 分别增加 10.70%、5.22%、9.94%、8.73%, R_1 的土壤容重变化最小。2 个水分处理中 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤总孔隙度均显著高于 C_1 ($P < 0.05$), HC 的 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 总孔隙度分别较 NC 组降低 11.90%、4.68%、9.16%、7.82%, R_1 土壤总孔隙度变化较小。与 C_1 相比, R_1 、 R_2 、 R_3 积极调控缓解了干旱胁迫对土壤物理结构的破坏, 其中 R_1 、 R_2 缓解干旱胁迫的能力较好。



NC 和 HC 分别为正常水分和干旱胁迫处理。不同小写字母代表不同轮作模式间差异显著 ($P < 0.05$); *, ** 分别表示正常水分和干旱胁迫处理间存在显著差异 ($P < 0.05$) 和极显著差异 ($P < 0.01$)。下同。

NC and HC are normal moisture and drought stress group, respectively. Different lowercase letters represent significant differences between rotation patterns ($P < 0.05$). * and ** indicate significant difference ($P < 0.05$) and highly significant difference ($P < 0.01$) between normal moisture group and drought stress groups, respectively. The same below.

图 3 不同处理的春小麦田土壤质量含水率(a)、土壤容重(b)及孔隙度(c)

Fig.3 Soil quality moisture content (a), bulk density (b), and porosity (c) in spring wheat fields under different treatments

2.2 春小麦田土壤养分变化

2.2.1 土壤 pH

由图 4 可知, 干旱胁迫处理(HC)中的春小麦连作模式(C_1)的土壤 pH 极显著高于正常水分处理(NC)

($P < 0.01$)。NC 中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤 pH 均显著低于 C_1 , R_1 和 R_2 均显著低于 R_3 ($P < 0.05$), HC 中 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤 pH 均显著低于 C_1 ($P < 0.05$)。与 NC 相比, HC 中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤 pH 分别增加 14.81%、13.65%、

0.15%、9.35%, R_2 的土壤 pH 变化幅度最小, 受到干旱胁迫影响小。

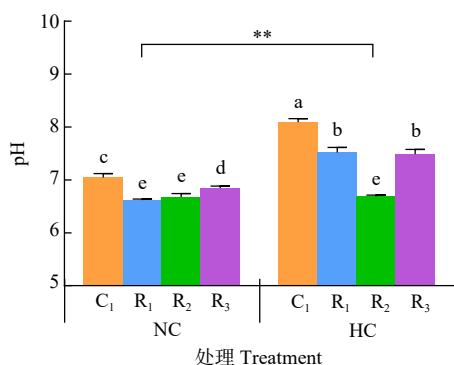
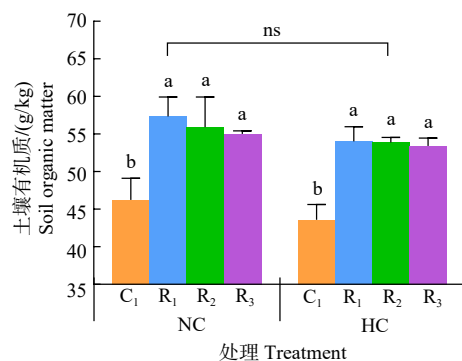


图4 不同处理的春小麦田的土壤 pH

Fig. 4 Spring wheat field soil pH under different treatments

2.2.2 土壤有机质含量

由图5可知,与NC相比,HC的土壤有机质含量无显著变化。2个水分处理的 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤有机质含量差异不显著,但均显著高于 C_1 ($P < 0.05$),NC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤有机质含量分别较 C_1 增加23.98%、20.95%、18.98%,HC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤有机质含量分别较 C_1 增加24.00%、23.62%、22.57%,轮作模式 R_1 土壤有机质含量最高,为57.33g/kg。与NC相比,HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤有机质含量分别降低5.76%、



ns表示NC和HC间无显著差异。下同。
ns indicates no significant difference. The same below.

图5 不同处理的春小麦田土壤有机质含量

Fig. 5 Soil organic matter content in spring wheat fields under different treatments

5.74%、3.68%、2.92%。

2.2.3 土壤全氮、碱解氮含量

由图6可知,NC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的全氮含量显著低于 C_1 。NC中 R_1 、 R_2 碱解氮含量显著高于 C_1 ,且 R_1 、 R_2 均显著高于 R_3 ($P < 0.05$),HC中 R_2 、 R_3 的碱解氮含量显著高于 C_1 ($P < 0.05$);HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 的碱解氮含量分别较NC低1.55%、5.70%、4.01% ($P < 0.01$), R_3 则无显著变化;干旱胁迫下 R_3 的土壤氮素供应稳定。

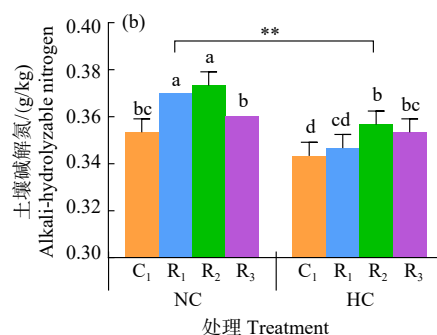
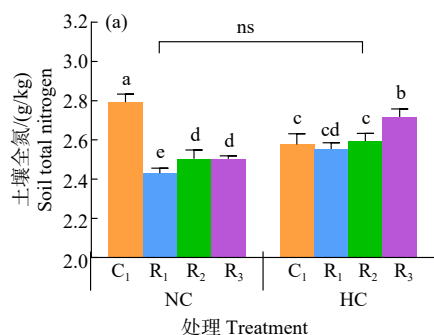


图6 不同处理的春小麦田土壤全氮(a)和碱解氮(b)含量

Fig. 6 Total nitrogen (a) and alkaline hydrolysable nitrogen (b) content in spring wheat field soil under different treatments

2.2.4 土壤全磷、有效磷含量

由图7可知,HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤全磷含量较NC降低19.31%、19.01%、20.17%、35.50% ($P < 0.05$), R_1 全磷含量降低幅度最小,受干旱胁迫影响小。有效磷含量的变化较全磷敏感,HC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的有效磷含量显著高于 C_1 ($P < 0.05$);HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 土壤有效磷含量较NC降低21.75%、7.34%、10.30%、9.68%, R_1 、 R_2 、 R_3 缓解干旱的效应值分别为66.27%、52.65%、55.51%, R_1 缓解干旱胁迫能力最

好,磷素供应能力稳定。

2.2.5 土壤全钾、速效钾含量

由图8可知,与NC相比,HC中的全钾含量无显著变化;速效钾含量变化较全钾敏感,2种水分处理中 R_1 、 R_2 、 R_3 的速效钾含量均显著高于 C_1 ($P < 0.05$)。HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 速效钾分别比NC低25.03%、13.62%、12.42%、15.72%, R_2 的速效钾含量降低幅度最小,缓解干旱的效应为50.38%。

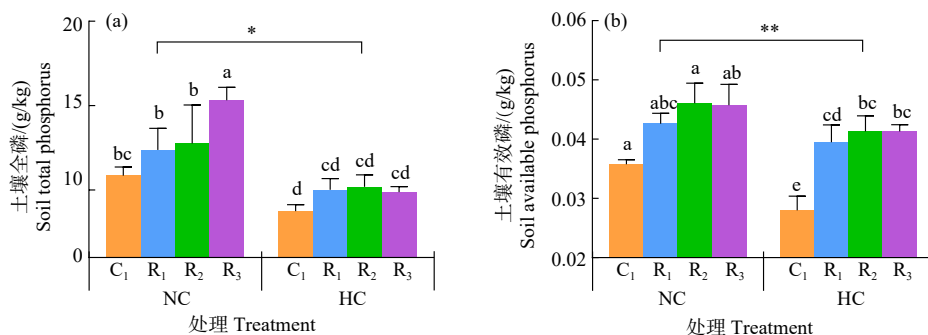


图 7 不同处理的春小麦田土壤全磷(a)和有效磷(b)含量

Fig. 7 Soil total phosphorus (a) and available phosphorus (b) content of spring wheat field under different treatments

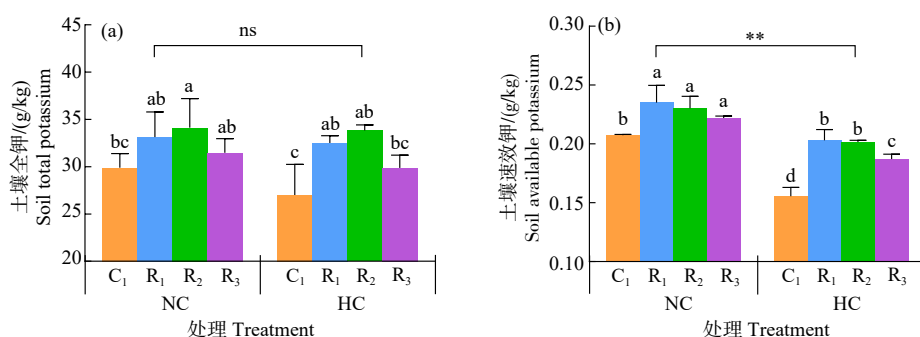


图 8 不同处理的春小麦田土壤全钾(a)和速效钾(b)含量

Fig. 8 The content of total potassium (a) and available potassium (b) in the soil of spring wheat fields under different treatments

2.3 春小麦田土壤酶活性变化

由图 9 可知,正常水分处理(NC)和干旱胁迫处

理(HC)中 R₁、R₂、R₃ 的蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活

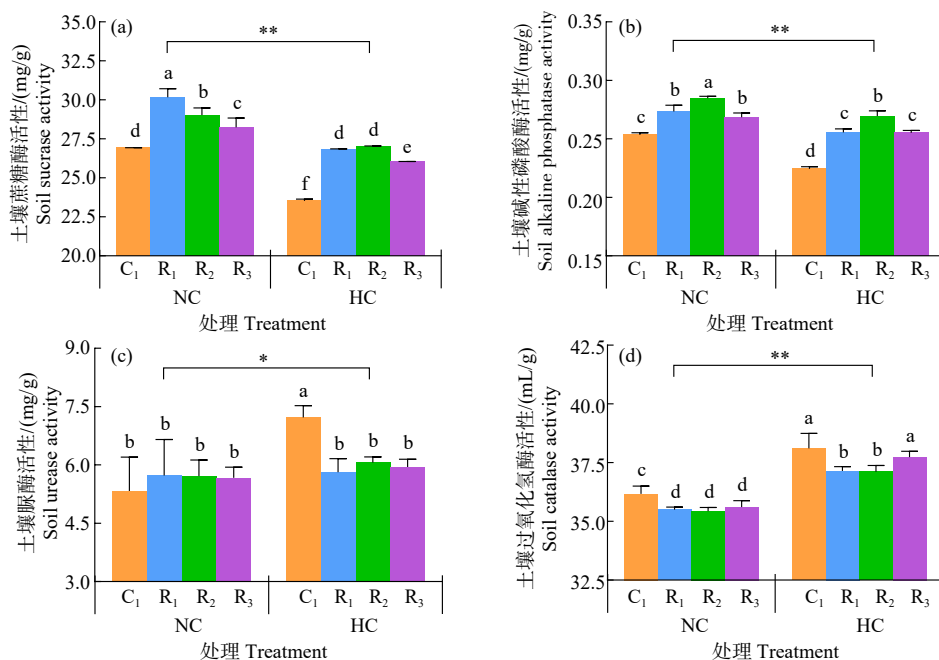


图 9 不同处理的春小麦田土壤蔗糖酶(a)、碱性磷酸酶(b)、脲酶(c)、过氧化氢酶(d)的活性

Fig. 9 Activities of soil sucrase (a), alkaline phosphatase (b), urease (c) and catalase (d) of spring wheat fields under different treatments

R_1 、 R_2 、 R_3 的蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性均极显著降低($P<0.01$), R_2 缓解干旱对蔗糖酶活性影响的效应最好,效应值为44.99%, R_3 缓解干旱对碱性磷酸酶活性影响的效应最好,效应值为57.29%。NC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的过氧化氢酶(CAT)活性均显著低于 C_1 ($P<0.05$),HC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的脲酶活性及 R_1 、 R_2 的CAT活性均显著低于 C_1 ($P<0.05$),与NC相比,HC中 C_1 的脲酶活性增加35.45%, R_1 、 R_2 、 R_3 的脲酶活性则均无显著变化,HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 的过氧化氢酶活性与NC相比分别增加5.35%、4.64%、4.75%、5.98%($P<0.05$), R_1 、 R_2 、 R_3 脲酶活性受干旱胁迫影响较小,且 R_1 缓解干旱对CAT活性影响的效果最好,效应值13.27%。

2.4 春小麦田土壤微生物量变化

由图10可知,干旱胁迫处理(HC)中微生物量

碳、氮、磷较正常水分处理(NC)极显著降低($P<0.01$)。NC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的微生物量碳均显著低于 C_1 ($P<0.05$),而HC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的微生物量碳均显著高于 C_1 ;与NC相比,HC中 C_1 、 R_2 、 R_3 土壤微生物量碳分别低71.49%、20.42%、54.06%, R_1 无显著差异, R_1 缓解干旱胁迫对土壤微生物量碳影响的效果最好。NC中 C_1 、 R_2 、 R_3 的微生物量氮均显著高于 R_1 ($P<0.05$),HC中 R_1 的微生物量氮最高,为11.73 mg/kg;HC中 C_1 、 R_2 、 R_3 的微生物量氮分别比NC低34.66%、29.97%、30.75%, R_1 的微生物量氮含量差异不显著。2种处理中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤微生物量磷均显著高于 C_1 ($P<0.05$), R_2 显著高于 R_1 、 R_3 ($P<0.05$);HC中 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 的微生物量磷较NC分别低40.89%、52.45%、42.19%、55.23%。

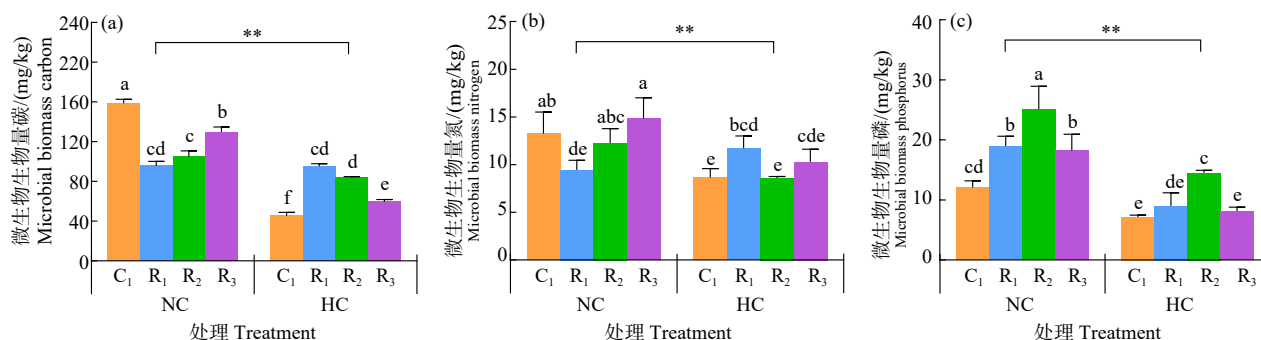


图10 不同处理的春小麦田土壤微生物量碳(a)、微生物量氮(b)和微生物量磷(c)含量

Fig. 10 The content of soil microbial biomass carbon (a), microbial biomass nitrogen (b) and microbial biomass phosphorus (c) in spring wheat fields under different treatments

2.5 产量变化

由图11可知,与NC相比,HC的春小麦产量显著降低($P<0.05$)。2种处理中, R_1 、 R_2 、 R_3 的产量差异不显著,但均显著高于 C_1 ($P<0.05$),HC中 C_1 、

R_1 、 R_2 、 R_3 的产量分别较NC低24.13%、12.95%、16.59%、18.98%, R_1 的产量降幅最小,缓解干旱的效应最好,效应值为46.33%。

2.6 春小麦田土壤质量指标与产量的相关性分析

由图12可知,土壤质量含水率(SMC)、总孔隙度(TPOR)与土壤pH、CAT均呈极显著负相关,与土壤有机质(SOM)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、蔗糖酶(SUC)、碱性磷酸酶(ALP)、微生物量磷(MBP)呈极显著正相关;土壤养分SOM、AN、TP、AP、AK与土壤酶活性SUC、ALP、MBP呈极显著正相关,与CAT呈极显著负相关;春小麦产量与微生物量碳(MBC)、TPOR、SOM、AN、TP、AP、AK、SUC、ALP、MBP均呈极显著正相关,与土壤容重(BD)、pH、CAT则呈极显著负相关。

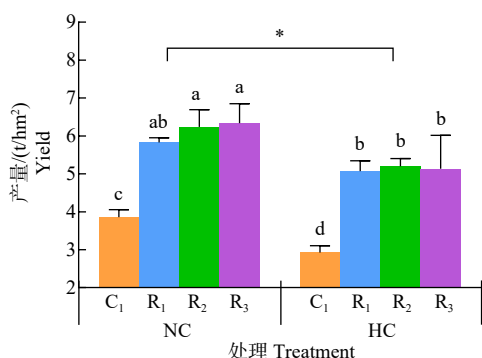
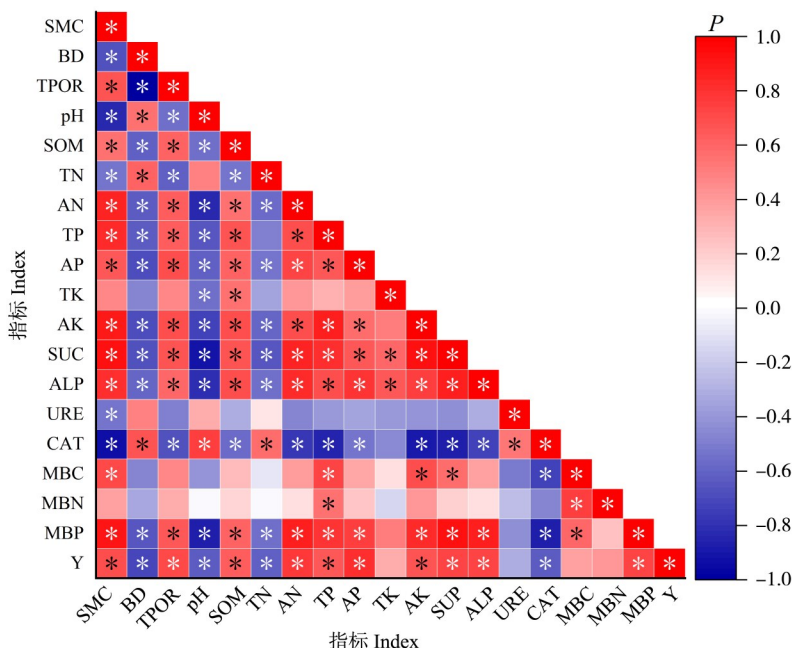


图11 不同处理的春小麦产量

Fig. 11 Spring wheat yield under different treatments



SMC, 土壤质量含水率; BD, 土壤容重; TPOR, 土壤总孔隙度; SOM, 土壤有机质; TN, 全氮; AN, 碱解氮; TP, 全磷; AP, 有效磷; TK, 全钾; AK, 速效钾; SUC, 蔗糖酶; ALP, 碱性磷酸酶; URE, 土壤脲酶; CAT, 过氧化氢酶; MBC, 微生物量碳; MBN, 微生物量氮; MBP, 微生物量磷。

SMC, soil mass water content; BD, bulk density of soil; TPOR, total porosity of soil; SOM, soil organic matter; TN, total nitrogen; AN, alkaline hdrolysable nitrogen; TP, total phosphorus; AP, available phosphorus; TK, total potassium; AK, available potassium; SUC, sucrase activity; ALP, alkaline phosphatase activity; URE, urease activity; CAT, catalase activity; MBC, microbial biomass carbon; MBN, microbial biomass nitrogen; MBP, microbial biomass phosphorus; Y, Yield.

图 12 土壤质量指标间及其与产量的相关关系

Fig. 12 The correlation between soil quality indicators and their relationship with crop yield

2.7 不同轮作模式土壤质量指数综合评价

由表 1 可知,不同轮作方式对土壤质量指数 (SQI)产生了显著影响,正常水分处理(NC)和干旱

胁迫处理(HC)中 R_1 、 R_2 、 R_3 模式的 SQI 均显著高于 C_1 ($P < 0.05$), R_1 、 R_2 、 R_3 之间无显著差异。

表 1 不同轮作模式的土壤质量指数 (SQI)

Table 1 Soil quality index (SQI) under different rotation modes

水分处理 Water treatment	轮作模式 Rotation mode			
	C_1	R_1	R_2	R_3
NC	0.48 ± 0.027^b	0.63 ± 0.024^a	0.65 ± 0.058^a	0.61 ± 0.029^a
HC	0.26 ± 0.008^b	0.46 ± 0.035^a	0.47 ± 0.004^a	0.45 ± 0.018^a

3 讨 论

3.1 轮作模式对于干旱胁迫下春小麦田土壤物理性状的影响

已有研究认为,保护性耕作措施有利于降低土壤容重^[22]。本研究发现,在正常水分(NC)和干旱胁迫(HC)2种处理中,春小麦-马铃薯(R_1)、春小麦-马铃薯-油菜(R_2)、春小麦-油菜(R_3)土壤容重均显

著低于春小麦连作(C_1),土壤总孔隙度均显著高于 C_1 ,且在干旱胁迫下优势更加明显, R_1 、 R_2 、 R_3 土壤容重在 HC 增加幅度较 C_1 小,这可能是由于长期的连作,使得土壤耕层变浅、土壤板结,最终导致土壤容重增加、土壤总孔隙度下降^[23],不同的轮作作物因其根系生长发育特性不同,促使土壤物理性状发生变化,轮作能够改善土壤疏松度,增加其通透性,本研究与刘战东等^[24]的研究结果一致,适宜的耕作栽

培技术可提高土壤贮水量和水分利用率,起到蓄水保墒作用。本研究中, R_1 、 R_2 、 R_3 春小麦田在干旱胁迫处理下土壤质量含水率显著高于 C_1 ,说明3种轮作模式在同样的干旱处理下均具有保水作用,麻秀粉等^[25]研究结果表明,科学合理的保护性耕作措施能够优化土壤的理化结构,提高土壤保水保肥能力,进而促进高产,与本研究结果一致。

3.2 轮作模式对干旱胁迫下春小麦田土壤化学性状的影响

土壤pH、有机质、氮磷钾含量等土壤理化性质是评价土壤质量的重要指标^[26]。本研究中, C_1 土壤pH显著高于 R_1 、 R_2 、 R_3 ,呈弱碱性,可能是连作导致土壤结构紧实,土壤通气性和透水性变差,影响有机质的分解和酸性物质的产生,从而使土壤pH上升。本试验结果表明,水分对土壤有机质含量无显著影响,与Bell等^[27]在北美沙漠研究中的发现不同,其随着干旱程度的增加,土壤有机碳显著降低,可能是因为土壤类型不同,所以变化趋势不同,但本研究中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤有机质含量显著高于 C_1 ,这与李林蓉等^[28]研究结果一致。土壤速效养分主要来自土壤有机质的矿化和施入土壤中肥料的速效成分,这部分养分是作物养分的直接来源,也是反映土壤近期内养分供应的指标^[29]。本研究中, R_1 、 R_2 、 R_3 的全氮、碱解氮含量均显著高于连作(C_1),可能是由于连作模式下小麦对氮的需求更高;土壤有效磷、速效钾变化较全磷、全钾敏感,全磷含量变化平稳而有效磷变化较为显著,这是由于作物对于有效磷的吸收利用更为快速和直接,全磷含量主要受施肥的影响,而有效磷含量受施肥种类、作物种类,以及施肥和作物的交互作用影响^[30],闫非凡等^[31]研究表明,轮作种植方式中土壤的全磷、有效磷含量均低于连作种植方式中土壤的全磷、有效磷含量,与本研究全磷和有效磷变化趋势相反,可能是由于本研究中 C_1 土壤养分偏低,对于土壤中的养分转化率需求更高,因此土壤中的磷残留量少。本研究中速效钾变化显著,全钾无显著变化,这是由于作物在短期内吸收钾的形式主要为速效钾,土壤中的全钾含量基本保持稳定。

3.3 轮作模式对干旱胁迫下春小麦田土壤酶活性的影响

土壤酶积极参与土壤的代谢过程,可以参与到土壤各个生物化学反应之中,一方面可以促进土壤

有机物转化,另一方面也可以为植物提供营养元素^[32]。本研究显示,干旱胁迫对各轮作模式土壤的蔗糖酶活性均有显著抑制作用,此结果与周芙蓉等^[33]研究结论存在一定的差异,可能与植物活体及残体分泌物等因素有关^[34]。此外,在本研究中,干旱胁迫提高了脲酶的活性,这与肖新等^[35]的研究结论一致;而Sardans等^[36]的研究发现,土壤脲酶和蛋白酶活性均随着土壤湿度的减小而降低,可能是由于不同作物对土壤养分消耗存在差异,导致残留养分不同,从而引起土壤酶活性的差异。陶佳^[37]以苹果幼树为研究对象,发现干旱处理可以使土壤碱性磷酸酶活性降低,但却可以显著提高过氧化氢酶活性,这与本试验结果相似,说明植物在处于逆境环境时,过氧化氢酶活性的增加有助于消除逆境对小麦的不利影响。本研究中, R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶均高于 C_1 ,且在干旱胁迫时无显著变化,这与赵春夺等^[17]研究结果一致,不同作物轮作能够增强土壤酶的活性。

3.4 轮作模式对干旱胁迫下春小麦田土壤微生物量的影响

土壤微生物量碳、氮、磷可直接驱动微生物参与的养分循环过程,并形成土壤肥力^[38],是衡量土壤肥力水平和土壤质量的重要生物学指标^[39],本研究中,HC中 R_1 、 R_2 、 R_3 的土壤微生物量碳、氮、磷均显著低于NC,可能是由于干旱胁迫限制了微生物获取营养物质的能力,并在很大程度上抑制微生物生长,从而影响土壤微生物量碳、氮^[40]。另外,本研究中HC的 R_1 、 R_2 土壤微生物量碳、氮、磷高于 C_1 ,这与张娟^[41]对轮作、间作和连作3种模式的研究结果一致,轮作模式能够有效改善土壤微生物区系结构组成,并且显著提高土壤微生物量碳、氮,效果优于间作和连作模式,可能是由于轮作制度改善了土壤环境,增加了土壤微生物多样性,丰富了土壤中碳源、氮源、磷源的转化途径,从而提高了土壤中微生物量碳、氮、磷含量^[42]。

3.5 土壤质量指标间的相关性

土壤物理性状、土壤酶的活性与土壤养分之间存在密切关系^[43]。本研究中土壤质量含水率(SMC)、土壤总孔隙度(TPOR)与土壤有机质(SOM)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、蔗糖酶(SUC)、碱性磷酸酶(ALP)、微生物量磷(MBP)均呈显著正相关;土壤SOM、

AN、TP、AP、AK 与土壤酶 SUC、ALP、MBP 活性也均呈显著正相关,这与刘彦伶等^[44]的研究结果一致。土壤物理性状影响着土壤养分的吸附、固定、转化和释放,适宜的水分有利于养分的转化和植物生长,适宜的孔隙度有利于植物根系伸展,提高养分的吸收能力^[45],当土壤有机质含量较高时,也利于形成良好的土壤团粒结构,这种结构有利于保持土壤水分^[46]。土壤中的酶活性对有机物的降解和营养元素的周转起到了关键作用,酶活性越强,表明有机物质分解和养分转化的速度越快,土壤养分供应能力越强^[47]。另外,本研究中,土壤养分与产量之间存在极显著正相关。这与 Magar 等^[48]研究结果一致,土壤性状是植物生长的基础,植物从土壤中吸收养分来支持其生长和发育,养分含量高或稳定,利于作物生长发育。

综上,与 C₁相比,R₁、R₂、R₃均可缓解干旱胁迫对土壤物理性状、土壤养分、土壤酶活性及土壤微生物量的负面影响,本研究中 3 种轮作模式的 SQI 也显著高于春小麦连作,说明轮作模式提高了土壤质量,这与张斯佳^[5]等的研究结果一致;在产量上,本研究中轮作模式的产量较高,这与田秀平等^[49]研究一致。因此,轮作模式通过提高土壤质量,进而促进作物生长发育,一定程度上缓解了干旱对春小麦生长的影响,维持产量稳定。今后应以养分循环过程调控等为研究重点,具体分析相关功能基因及土壤微生物对土壤质量的提升作用,从微观角度深层次揭示轮作模式对干旱的缓解机制。

4 结 论

干旱胁迫(HC)和正常水分(NC)处理下,春小麦-马铃薯(R₁)、春小麦-马铃薯-油菜(R₂)、春小麦-油菜(R₃)的土壤质量含水率、总孔隙度、有机质、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、蔗糖酶、碱性磷酸酶、微生物量磷均显著高于 C₁($P < 0.05$)。与 NC 相比,HC 中 R₁、R₂、R₃土壤物理化学、酶活性、微生物学等指标的差异均较 C₁小,缓解干旱胁迫效应较好。NC 和 HC 中,R₁、R₂、R₃模式土壤质量系数(SQI)均显著高于 C₁($P < 0.05$)。R₁、R₂、R₃的产量差异不显著,但均显著高于 C₁($P < 0.05$)。综上,R₁、R₂、R₃3 种轮作方式均可改善大兴安岭西麓干旱胁迫下土壤质量含水量、孔隙度等土壤物理性状,提升土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶等活性,促进土壤微

生物量碳、氮、磷的积累,增加土壤有机质、速效氮磷钾等养分积累,提高了土壤耕地质量,进而缓解干旱对春小麦的水分和养分利用的限制,并可显著提高春小麦的产量,其中 R₁、R₂缓解干旱胁迫的效果较好。

参考文献 References

- [1] 刘雅杰, 张天娇, 张向前, 路战远, 刘战勇, 程玉臣, 武迪, 李金龙. 秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(17): 3408-3423
Liu Y J, Zhang T J, Zhang X Q, Lu Z Y, Liu Z Y, Cheng Y C, Wu D, Li J L. Effects of tillage methods under straw returning on the labile organic carbon fractions and carbon pool management index in black soil farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(17): 3408-3423 (in Chinese)
- [2] 焦玉光, 张连云, 刘健, 窦杰凤, 张海涛, 毛国伟. 呼伦贝尔市旱作节水技术与推广成效[J]. 中国农技推广, 2020, 36(12): 56-58
Jiao Y G, Zhang L Y, Liu J, Dou J F, Zhang H T, Mao G W. Water-saving technology of dry farming in Hulunbeier city and its popularization effect[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2020, 36(12): 56-58 (in Chinese)
- [3] Fang J, Ma J, Wen T, Niu G Q, Wei S L, Su S F, Yi L X, Cheng Y C, Yuan J, Zhao X Q. Cry for help from rhizosphere microbiomes and self-rescue strategies cooperatively alleviate drought stress in spring wheat[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, (2025-04-07). DOI: doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109813
- [4] 周来良. 干旱对根际土壤酶、氮磷钾及根部有机酸的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009
Zhou L L. Effects of drought stress on rhizosphere enzyme, N, P, K and Root organic acid[D]. Chongqing: Southwest University, 2009 (in Chinese)
- [5] 王梓轩. 干旱胁迫下不同品种甘蔗根际土壤环境差异性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020
Wang Z X. Study on the difference of rhizosphere soil environment of different sugarcane varieties under drought stress[D]. Nanning: Guangxi University, 2020 (in Chinese)
- [6] 李越, 李利, 张斌, 吕玉峰, 冯美臣, 王超, 宋晓彦, 杨武德, 张美俊. 接种 AMF 提高干旱胁迫下土壤微生物活性和燕麦抗旱能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1135-1149
Li Y, Li L, Zhang B, Lv Y F, Feng M C, Wang C, Song X Y, Yang W D, Zhang M J. AMF inoculation positively regulates soil microbial activity and drought tolerance of oat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(6): 1135-1149 (in Chinese)
- [7] 张斯佳, 杨杰, 赵帅, 李莉威, 王贵彦. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(2): 238-251
Zhang S Y, Yang J, Zhao S, Li L W, Wang G Y. The impact of diversified crops and wheat-maize rotations on soil quality in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(2): 238-251 (in Chinese)
- [8] 陈子明, Peck T R, Boast C W. 美国玛洛试验地的种植制度和施肥措施对

- 土壤理化性状和产量的影响[J]. 土壤学报, 1987, 24(1): 86-93, 99-100
- Chen Z M, Peck T R, Boast C W. Effects of cropping system and fertilization on the chemical and physical properties of the soils of morrow plots[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(1): 86-93, 99-100 (in Chinese)
- [9] Nour A, Lee J, Yin X H, Saxton A M, Tyler D D, Sykes V R, Arelli P. Crop species in no-tillage summer crop rotations affect soil quality and yield in an Alfisol[J]. *Geoderma*, 2019, 345: 51-62
- [10] Benitez M S, Osborne S L, Lehman R M. Previous crop and rotation history effects on maize seedling health and associated rhizosphere microbiome[J/OL]. *Scientific Reports*, (2017-11-16), DOI: 10.1038/s41598-017-15955-9
- [11] Aparicio V, Costa J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 155-165
- [12] 徐培智, 解开治, 陈建生, 唐拴虎, 张发宝, 黄旭, 李康活. 一季中晚稻的稻菜轮作模式对土壤酶活性及可培养微生物群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 923-928
- Xu P Z, Xie K Z, Chen J S, Tang S H, Zhang F B, Huang X, Li K H. Effect of rice-vegetable cropping system with a mid-late rice on soil enzyme activity and cultured microbial diversity [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2008, 14(5): 923-928 (in Chinese)
- [13] 张成君, 康文娟, 张翠梅, 薛雨彤, 周彤, 刘畅, 肖海龙, 师尚礼. 基于主成分-聚类分析评价不同轮作模式对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 292-300
- Zhang C J, Kang W J, Zhang C M, Xue Y T, Zhou C, Liu C, Xiao H L, Shi S L. Evaluation of the effects of different rotation patterns on soil fertility based on principal component-cluster analysis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 292-300 (in Chinese)
- [14] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 83-90
- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 83-90 (in Chinese)
- [15] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973, 24: 519-570
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [17] 赵春夺, 李玉娥, 刘友杰, 王新航, 赵伟, 黄永成, 李虎林, 姬文秀. 轮作与连作对烟草根际土壤养分、酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 生物技术通报, 2025, 41(4): 312-322
- Zhao C D, Li Y E, Liu Y J, Wang X H, Zhao W, Huang Y C, Li H L, Ji W X. Effects of rotating cropping and continuous cropping on soil nutrients, enzyme activities and microbial community structure of rhizosphere soil in Tobacco[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2025, 41(4): 312-322 (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版, 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- Guan S Y. *Soil Enzymes and Its Research Methods* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [20] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 贺纪正, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006
- Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, He J Z, Xiao H A. *Determination Method of Soil Microbial Biomass and Its Application* [M]. Beijing: Meteorological Publishing Press, 2006 (in Chinese)
- [21] Zhu M K, Ai X Y, Sheng M H, Ai S H, Miao N, Ai Y W. Using a soil quality index to evaluate the artificial soil quality response to rehabilitation time[J/OL]. *Ecological Engineering*, (2024-03-20). DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107234
- [22] 谢军红, 张仁陟, 李玲玲, 罗珠珠, 蔡立群, 柴强. 耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1384-1393
- Xie J H, Zhang R Z, Li L L, Luo Z Z, Cai L Q, Chai Q. Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11): 1384-1393 (in Chinese)
- [23] 贾振江, 刘学智, 李王成, 刘巧玲, 陈继虹, 姚晓翠, 徐天渊. 旱区连作砂田土壤质量和土地生产力演变与调控研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2136-2148
- Jia Z J, Liu X Z, Li W C, Liu Q L, Chen J H, Yao X C, Xu T Y. Evolution and regulation of soil quality and land productivity in continuous cropping gravel-sand mulched field in arid region: Progress and perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5): 2136-2148 (in Chinese)
- [24] 刘战东, 刘祖贵, 宁东峰, 秦安振, 南纪琴, 张霄, 肖俊夫. 深松耕作对玉米水分利用和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 6-12
- Liu Z D, Liu Z G, Ning D F, Qin A Z, Nan J Q, Zhang X, Xiao J F. Effects of subsoiling tillage on water utilization and yield of maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(5): 6-12 (in Chinese)
- [25] 麻秀粉. 玉米-大豆轮作对作物产量及土壤质量的影响[J]. 种子科技, 2025, 43(7): 222-224
- Ma X F. Effects of corn-soybean rotation on crop yield and soil quality[J], *Seed Science & Technology*, 2025, 43(7): 222-224 (in Chinese)
- [26] 郭迎新, 陈永亮, 苗琪, 范志勇, 孙军伟, 崔振岭, 李军营. 洱海流域植烟土壤养分时空变异特征及肥力评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 1987-1999
- Guo Y X, Chen Y L, Miao Q, Fan Z Y, Sun J W, Cui Z L, Li J Y. Spatial-Temporal variability of soil nutrients and assessment of soil fertility in Erhai Lake Basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 1987-1999 (in Chinese)
- [27] Bell C W, Acosta-Martinez V, McIntyre N E, Cox S, Tissue D T, Zak J C. Linking microbial community structure and function to seasonal differences in soil moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58(4): 827-842
- [28] 李林蓉, 冯建路, 刘苗苗, 梅昊, 康振辉, 蔡青年. 作物种植模式对土壤微生物和农田有害生物的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(29): 99-106
- Li L R, Feng J L, Liu M M, Mei H, Kang Z Y, Cai Q N. Effect of crop planting patterns on soil microorganisms and crop pests in farmland[J].

- Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(29): 99-106 (in Chinese)
- [29] 赵军, 孟凯, 隋跃宇, 韩秉进, 张玥, 李宏伟. 海伦黑土有机碳和速效养分空间异质性分析[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 487-492.
- Zhao J, Meng K, Sui Y Y, Han B J, Zhang Y, Li H W. Analysis for spatial heterogeneity of organic carbon and available nutrients in black soil region of Hailun County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 487-492 (in Chinese)
- [30] 丁建莉. 长期施肥对黑土微生物群落结构及其碳代谢的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017
- Ding J L. Black soil microbial community structure and carbon metabolism in response to long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017 (in Chinese)
- [31] 闫非凡. 玉米-大豆轮作对大豆产量及土壤微生物群落的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2021
- Yan F F. Effects of maize-soybean rotation on soybean yield and soil microbial community[D]. Yanji: Yanbian University, 2021 (in Chinese)
- [32] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 魏林源, 李发明. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12-21
- Wang L D, Wang F L, Guo C X, Han F G, Wei L Y, Li F M. Review: Progress of soil enzymology research[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 12-21 (in Chinese)
- [33] 周芙蓉, 王进鑫, 杨楠, 张青. 水分和铅胁迫对土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 479-484
- Zhou F R, Wang J X, Yang N, Zhang Q. Effects of water and lead stress on soil enzyme activities[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3): 479-484 (in Chinese)
- [34] Zhang X C, Dippold M A, Kuzyakov Y, Razavi B S. Spatial pattern of enzyme activities depends on root exudate composition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 21(133): 83-93
- [35] 肖新, 朱伟, 肖靛, 邓艳萍, 赵言文, 汪建飞. 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
- Xiao X, Zhu W, Xiao L, Deng Y P, Zhao Y W, Wang J F. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 91-98 (in Chinese)
- [36] Sardans J, Peñuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 455-461
- [37] 陶佳. 断根与干旱对苹果幼树生长发育及根际环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- Tao J. Effect of root pruning and drought on growth and rhizosphere of young apple tree[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015 (in Chinese)
- [38] 王慧颖, 徐明岗, 马想, 段英华. 长期施肥下我国农田土壤微生物及氨氧化菌研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (2): 1-12
- Wang H Y, Xu M G, Ma X, Duan Y H. Research advances of microorganism and ammonia oxidizing bacteria under long-term fertilization in Chinese typical cropland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(2): 1-12 (in Chinese)
- [39] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-944
- Liu M Q, Hu F, He Y Q, Li H X. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 937-944 (in Chinese)
- [40] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(6): 790-797
- Xu H, He M Z, Sun Y. Response of soil enzyme activities to precipitation regulation in arid desert areas[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2018, 54(6): 790-797 (in Chinese)
- [41] 张娟. 不同种植模式对砂田土壤微生物学性状及作物的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2014
- Zhang J. Effect of different planting patterns on soil microbiological characteristics and crop in gravel-sand mulched field[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014 (in Chinese)
- [42] 李晓婷, 李立军, 李杨, 刘晓芳. 轮作方式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(9): 68-73
- Li X T, Li L J, Li Y, Liu X F. Effect of different crop rotation methods on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(9): 68-73 (in Chinese)
- [43] 袁亮. 不同轮耕模式对豫东地区小麦—花生轮作田土壤质量、团聚体组成及稳定性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(15): 245-252
- Yuan L. The effects of different rotation tillage patterns on soil quality, aggregate composition, and stability in wheat-peanut rotation fields of in eastern Henan Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(15): 245-252 (in Chinese)
- [44] 刘彦伶, 李渝, 熊涵, 张雅蓉, 黄兴成, 杨叶华, 朱华清, 张萌. 长期不同轮作模式对黄壤区稻田土壤碳氮养分及酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(1): 209-217
- Liu Y L, Li Y, Xiong H, Zhang Y R, Huang X C, Yang Y H, Zhu H Q, Zhang M. Effects of different cropping patterns on soil carbon, nitrogen nutrients and enzyme activities in paddy fields of yellow soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(1): 209-217 (in Chinese)
- [45] Zhang X F, Yang W L, Xin X L, Zhu A N, Ding S J. Poor physical structural components restrict soil fertility and crop productivity for wheat-maize cropping[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 117(2): 169-184
- [46] Ankenbauer K J, Lohide S P. The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(4): 891-901
- [47] Wang X, Lu P, Yang P. Effects of micro-drip irrigation on soil enzymatic activities and nutrient uptake, and cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(12): 1621-1633
- [48] Magar S T, Fujino T, Han T K K. Effect of irrigation regime and soil nutrients on the growth of the paddy weed heteranthera reniformis and rice grain yield[J/OL]. *Environments*, (2024-03-14). DOI:doi.org/10.3390/environments11030056

[49] 田秀平, 张之一, 翟瑞常. 轮作、连作对白浆土养分及农作物产量的影响[J].

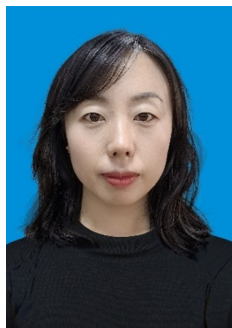
中国农学通报, 2002, 18(5): 82-84

Tian X P, Zhang Z Y, Zhai R C. Effects of rotation and continuous

cultivation on nutrient in albic soils and crop yield[J]. *Chinese Agricultural*

Science Bulletin, 2002, 18(5): 82-84 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 魏淑丽, 博士, 内蒙古自治区农牧业科学院副研究员, 从事作物-土壤-微生物协作抗旱机理以及农田轮作制度的选择与优化等方面的研究工作。5年来主持和参与国家、省部级科技项目近20项, 其中主持内蒙古自治区科技计划、内蒙古农牧业青年创新基金、农业农村部黑土地保护与利用重点实验室开放性课题各1项; 发表论文15篇, 其中SCI 7篇, 主编著作1部, 授权专利35项, 制定地方标准5项, 审定品种5个, 登记软件著作权3项。



通讯作者简介: 赵小庆, 博士, 内蒙古自治区农牧业科学院研究员, 长期从事植物功能基因组及抗逆生理与多组学分析等方面的研究。先后主持和参与国家自然科学基金, 国家重点研发计划、内蒙古自然科学基金重点项目等30余项; 获内蒙古科学技术进步奖特等奖1项、神农中华农业科技奖一等奖1项、内蒙古农牧业丰收奖一等奖1项; 2023年被授予“内蒙古自治区青年创新人才奖”, 发表论文80余篇, 其中SCI 36篇; 授权专利90余项; 撰写标准7项, 登记软著30余项。



通讯作者简介: 路战远, 博士, 中国工程院院士, 现任内蒙古自治区农牧业科学院党委副书记、院长, 研究员, 内蒙古大学和河北农业大学博士研究生导师。长期从事耕地保护与利用研究, 系统攻克农牧交错区退化农田风蚀防治、地力定向培育和产能稳定提升三大科技难题。兼任中国生态学学会会士、国家农业科学土壤质量武川观测实验站站长、国家农业环境四子王观测实验站站长、农业农村部黑土地保护与利用重点实验室主任、农业农村部大豆玉米带状复合种植(北方)全程机械化科研基地主任等学术兼职; 先后主持国家重点研发计划、国家科技支撑计划、国家自然科学基金联合基金、内蒙古科技重大专项等科研项目30余项; 先后获国家科技进步奖二等奖3项(第一、一、四完成人)、内蒙古科学技术特别贡献奖1项, 以第一完成人获内蒙古科技进步奖特等奖1项, 省部级科技奖一等奖6项; 获全国创新争先奖、何梁何利奖、中华农业英才奖; 被评为国家“万人领军”人才、全国杰出专业技术人才、神农领军英才、全国优秀科技工作者; 此外, 发表论文281篇(其中以第一作者和通讯作者身份发表151篇)、主编著作16部, 授权发明专利57件, 制定标准75项。