

干旱胁迫对不同春小麦田产量及土壤特性的影响^①

方 静^{1,3,4}, 赵小庆^{1,2,3,4}, 史功赋¹, 魏淑丽^{1,2,3,4}, 程玉臣^{2,3,4}, 张向前^{2,3,4}, 王建国^{2,3,4},
马 婕^{1,3,4}, 路战远^{1,2,3,4*}

(1 内蒙古大学生命科学学院, 牧草与特色作物生物技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010020; 2 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031; 3 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010031; 4 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)

摘要: 为了探究干旱对作物不同品种产量及土壤性状的影响, 选用抗旱性程度不同的 6 个春小麦品种为研究对象, 进行干旱(旱棚防雨)和对照(调控补水)2 种水分控制处理, 系统分析干旱胁迫下不同春小麦产量及土壤性状的差异。结果显示: 干旱显著影响了土壤养分含量、酶活性、微生物生物量和春小麦产量($P<0.05$)。其中, 在干旱处理下, 土壤全氮、有机碳含量, 蔗糖酶、碱性磷酸酶活性以及微生物生物量碳、氮、磷显著降低, 而全钾、全磷含量以及过氧化氢酶、脲酶活性则显著增高。C:N、C:P、N:P 变化范围分别为 10.23 ~ 14.13、4.03 ~ 7.42、0.39 ~ 0.56。龙麦 36 和龙麦 33 各指标变化幅度较小, 且干旱下龙麦 36 的产量最高为 5 699.14 kg/hm²。主成分分析和相关性分析表明, 干旱是造成春小麦产量及土壤指标差异的主要因素, 且有机碳是影响春小麦产量的关键土壤因子。综上所述, 龙麦 36 和龙麦 33 在减轻干旱对土壤养分平衡及产量的不利影响方面表现出一定的潜力, 是大兴安岭西麓旱作区适宜种植的春小麦品种。

关键词: 干旱胁迫; 春小麦; 产量; 土壤养分; 土壤生物学性状

中图分类号: S155.4 文献标志码: A

Effects of Drought Stress on Yields and Soil Characteristics in Different Spring Wheat Fields

FANG Jing^{1,3,4}, ZHAO Xiaoqing^{1,2,3,4}, SHI Gongfu¹, WEI Shuli^{1,2,3,4}, CHENG Yuchen^{2,3,4}, ZHANG Xiangqian^{2,3,4},
WANG Jianguo^{2,3,4}, MA Jie^{1,3,4}, LU Zhanyuan^{1,2,3,4*}

(1 School of Life Science, Inner Mongolia University, Key Laboratory of Herbage and Endemic Crop Biotechnology, Ministry of Education, Hohhot 010020, China; 2 Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3 Key Laboratory of Black Soil Protection and Utilization (Hohhot), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot 010031, China; 4 Inner Mongolia Key Laboratory of Degradation Farmland Ecological Restoration and Pollution Control, Hohhot 010031, China)

Abstract: To investigate the impacts of drought on the yields and soil characteristics of different crop varieties, this study selected six spring wheat varieties with varying degrees of drought resistance. Two water control treatments, namely drought (rainproof shelter) and control (regulated watering), were implemented, and the differences in yields and soil characteristics under drought stress among the spring wheat varieties were systematically analyzed. The results showed that drought significantly affected soil nutrient contents, enzyme activity, microbial biomass, and wheat yield ($P<0.05$). Under drought conditions, the contents of soil total nitrogen and organic carbon, the activities of sucrase and alkaline phosphatase, and microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus were significantly reduced, while the contents of total potassium and phosphorus, and the activities of catalase and urease were significantly increased. C:N, C:P, and N:P ratios ranged from 10.23 to 14.13, 4.03 to 7.42, and 0.39 to 0.56, respectively. Both Longmai 36 and Longmai 33 showed relatively small variations in these indicators, with Longmai 36 achieved the highest yield (5 699.14 kg/hm²) under drought conditions. Principal component analysis and correlation analysis indicated that drought was the primary factor causing differences in yield and soil indicators, with organic carbon being a key soil

^①基金项目: 内蒙古自治区农牧业科学院创新基金项目(2022CXJJN08, 2023CXJJN17)、国家自然科学基金项目(U23A20195, 31860356, 32260457)和内蒙古自治区草原英才科技计划项目资助。

* 通讯作者(lzhy2811@163.com)

作者简介: 方静(1996—), 女, 河北阳原人, 博士研究生, 主要从事作物抗逆生理与旱作农田土壤养分研究。E-mail: fangjing721@163.com

factor influencing spring wheat yield. In summary, Longmai 36 and Longmai 33 showed certain potentials in alleviating the adverse effects of drought on soil nutrient balance and yield and are suitable spring wheat varieties for planting in the dry farming areas of the western Greater Khingan Mountains.

Key words: Drought stress; Spring wheat; Yield; Soil nutrient; Soil biological character

干旱是影响植物生长发育最主要的自然灾害^[1]。据预测,到 21 世纪末,全球旱地面积将增加 11%~23%,对农业生态系统造成持续且难以恢复的影响^[2]。小麦(*Triticum aestivum L.*)作为全球重要的粮食作物及我国的主要商品粮,目前干旱已成为制约小麦生长和发育的主要非生物胁迫之一^[3]。因此,培育和筛选具有高抗旱性的小麦品种,不仅是应对干旱的有效手段^[4],同时也是提升小麦产量的关键途径。

土壤养分的有效性是决定植物生长状况的关键因素^[5-6]。然而,干旱胁迫不仅会限制土壤养分的迁移,还会导致土壤微生物生物量碳、氮和铵态氮等含量大幅减少^[7-8]。土壤元素化学计量比中,C:N、C:P、N:P 也可在一定程度上表征土壤养分的可获得性及植物的生长状况^[9-10]。干旱显著降低植物的光合速率,改变植物体内有机物质积累和转化过程,从而降低植物对土壤中 N、P 元素的利用效率及化学计量特征^[11-12]。另一方面,土壤酶活性在土壤物质能量代谢中起着关键作用,对环境胁迫极为敏感。一定程度的干旱胁迫对土壤酶具有激活作用,可对土壤生态系统起到预警和指示^[13]。如轻度水分胁迫对蔗糖酶具有促进作用,而重度干旱则对其有抑制作用^[14]。Song 等^[15]研究发现,水分胁迫对耐旱和非耐旱玉米的土壤脲酶、磷酸酶活性在多个生长阶段均无显著影响。

总之,干旱胁迫会改变土壤养分、土壤生物学性状等从而影响作物生长发育,不同作物对干旱的响应存在显著差异。从作物产量和土壤特性等多个方面出

发挖掘抗性品种,对于保障作物产量及维持土壤养分具有重要意义。基于此,本研究选用 6 个抗旱性程度不同的春小麦品种,进行干旱(旱棚防雨)和对照(调控补水)2 种水分控制处理,系统研究干旱胁迫对不同春小麦田土壤养分、生物学性状及产量的影响,阐明干旱胁迫下不同春小麦田土壤养分、生物学性状、土壤元素化学计量比及产量应对水分匮乏的变化及相关关系,以期筛选出适宜该地种植的高产稳产抗旱性强的春小麦品种,为抗旱春小麦品种的筛选和抗旱性鉴定提供依据,并为大兴安岭西麓旱作区春小麦的生产提供资源保障。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区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), 该区地处中温带半干旱气候区, 年平均气温约为 2.2 ℃, 无霜期 90~105 d, 年平均日照时数 2 589 h。2019 年春小麦全生育期降水量为 223.9 mm(图 1)。土壤类型为黑钙土, 是典型内蒙古农牧交错带大兴安岭西麓黑土地代表。试验区播种前 0~20 cm 土层土壤基础肥力见表 1。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 5 月 5 日开展,采用裂区设计,共 12 个处理,主处理为 2 种水分处理: 干旱(HC)、对照(CK); 副处理为 6 个抗旱性不同的春小麦品种

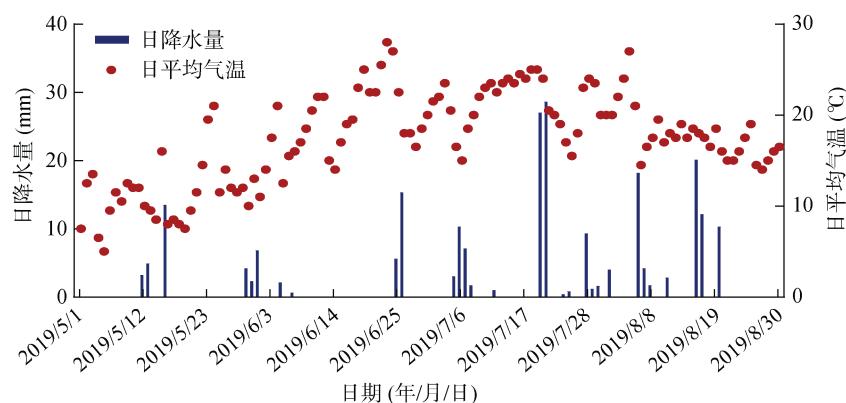


图 1 2019 年春小麦全生育期日降水量及日平均气温分布图

Fig. 1 Distributions of daily precipitation and mean temperature during the whole growth period of spring wheat in 2019

表 1 2019年试验区 0~20 cm 土壤基础肥力
Table 1 Soil basic fertility of 0~20 cm soil in the test area in 2019

土层 (cm)	有机质 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	pH
0~20	57.82	37.26	21.25	195.83	2.39	0.60	6.8

(表2)。每个处理3次重复,共计36个小区,每个小区面积为9 m²,区组间距为0.5 m,设置1 m宽保护行。播种前,机械旋耕平衡土壤养分,保证试验处理前各小区土壤肥力处于同一水平。采用机械播种,播种量为300 kg/hm²,尿素、磷酸二铵、硫酸钾以种肥施入,施入量依次为60、180、30 kg/hm²,后期不追

肥。试验监测了0~20 cm耕层土壤的质量含水量并在该土层进行样品采集。干旱处理于春小麦拔节期(7月4日)开始到春小麦开花后期(7月25日)结束,共22 d。对照与干旱处理均在旱棚内进行,干旱处理土壤质量含水量控制在8%~12%,对照处理土壤质量含水量控制在25%~30%(表3)。

表 2 6个春小麦品种名称及来源
Table 2 Names and origins of 6 spring wheat varieties

序号	品种名称	审定编号	来源
1	龙麦36号(LM36)	黑审麦2013001	黑龙江
2	龙麦33号(LM33)	国审麦2010022	黑龙江
3	定西40号(DX40)	国审麦2009032	甘肃
4	农麦2号(NM2)	国审麦2006030	内蒙古
5	巴麦12号(BM12)	蒙审麦2015002	内蒙古
6	巴丰5号(BF5)	国审麦2009028	内蒙古

表 3 干旱处理下春小麦田土壤质量含水量监测(%)
Table 3 Soil mass water contents in spring wheat fields under drought treatment

处理	2022年7月4日	2022年7月10日	2022年7月15日	2022年7月22日	2022年7月26日
CK	18.33	19.85	25.30	29.89	29.12
HC	18.33	16.15	13.84	11.01	10.83

注: CK 处理共补水两次(7月11日、7月16日), 补水量为每个处理3次重复共2 m³。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 土壤质量含水量监测 采用“S”形取样法,用土钻取0~20 cm土层的土壤样品,重复3次,用铝盒烘干法进行土壤质量含水量测定,将放有土样的铝盒放置105 °C烘箱中烘至恒重,计算土壤质量含水量。在干旱处理的22 d内,共进行5次土壤质量含水量监测(表3)。

1.3.2 土壤样品采集 干旱处理下于春小麦田土壤质量含水量达到预设范围后,开始进行土壤样品的采集。每个小区采用“S”形取样法,表层浮土去除后,用土钻采集0~20 cm土层的土壤样品,每个处理重复3次。用于土壤微生物生物量测定的土壤样品立即放于4 °C低温保存。

1.3.3 土壤指标测定 土壤样品风干后,将土壤通过1 mm不锈钢网筛筛选后,使用点位法测定土壤pH,土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶)分别采用靛酚蓝比色法、3,5-二硝基水杨酸比

色法、高锰酸钾定法和磷酸苯二钠比色法进行测定^[16]。使用0.15 mm不锈钢网筛将土壤筛选后,使用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量,碱熔法测定全磷含量,火焰光度计法测定全钾含量,重铬酸钾容量法测定有机碳含量^[17]。对于存放在4 °C低温条件下的土壤样品,通过2 mm不锈钢网筛筛选后,调整其水分含量至田间持水量的50%左右,利用氯仿熏蒸提取法测定土壤微生物生物量^[18]。

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行试验数据计算及统计分析;利用SPSS Statistics 22软件进行单因素方差(ANOVA)和独立样本t检验分析比较两处理之间的差异显著性($\alpha=0.05$);采用GraphPad Prism 8与OriginPro 2021作图。对春小麦田土壤性状及产量各指标进行相关性网络热图分析,用Mantel test检验两个矩阵相关关系,使用R version 4.1.3中的ggplot2、linkET等软件包进行数据分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同春小麦品种产量的影响

与对照(CK)相比, 干旱(HC)处理对不同春小麦品种产量及其构成因素具有显著的影响($P<0.05$), HC 处理下春小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量均显著降低(表 4)。其中, 6 个春小麦品种产量下降幅度由大到小依次为 BM12>NM2>LM33>BF5>DX40> LM36; 且 BM12 穗粒数下降幅度最大, 为 51.61%, NM2 次之, 为 48.48%。结果表明, 干旱胁迫对春小麦 BM12、NM2 产量影响较大。

2.2 干旱胁迫对不同春小麦田土壤养分及元素化学计量特征的影响

2.2.1 干旱胁迫对不同春小麦田土壤养分含量的影响

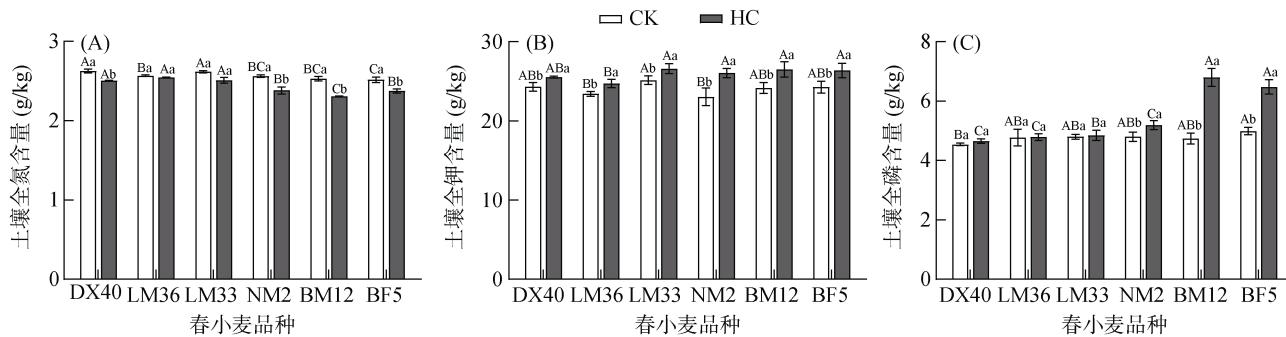
土壤养分含量是判断作物生长的关键, 也是作物抵御逆境危害的必要保障。与 CK 相比, HC 处理显著增加了春小麦田土壤全钾含量($P<0.05$), 而土壤全氮含量与全磷含量在不同春小麦田的变化不同(图 2)。其中, HC 处理下 BM12 土壤全氮含量降低幅度最大, 为 8.83%, 而 LM36 降低幅度最小, 为 0.78%(图 2A); DX40、LM36、LM33 土壤全钾含量分别增加了 5.08%、5.70%、5.84%, 而 NM2 增加幅度最大, 为 13.02%(图 2B); NM2、BM12、BF5 土壤全磷含量分别增加了 8.14%、43.43%、29.89%(图 2C)。结果表明, 干旱胁迫下 LM36、LM33、DX40 春小麦田土壤全氮、全钾、全磷含量变化幅度较小, 具有一定的抗旱性。

表 4 干旱胁迫对不同春小麦品种产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of drought stress on yields and its component factors of different spring wheat varieties

处理	品种	穗数 ($10^6/\text{hm}^2$)	每穗粒数	千粒重 (g)	籽粒产量 (kg/hm^2)
CK	LM36	4.77 ± 0.02 a	39 ± 0.82 ab	41 ± 0.82 b	7 555.52 ± 427.49 a
	LM33	4.78 ± 0.03 a	42 ± 0.82 a	44 ± 1.70 b	7 321.17 ± 650.26 a
	DX40	4.84 ± 0.05 a	37 ± 2.16 bc	49 ± 2.83 a	7 109.85 ± 407.42 ab
	NM2	4.75 ± 0.02 a	33 ± 3.56 cd	43 ± 2.94 b	6 257.24 ± 586.76 ab
	BM12	4.38 ± 0.03 b	31 ± 2.83 d	43 ± 2.16 b	5 609.36 ± 176.90 b
	BF5	4.74 ± 0.10 a	32 ± 1.41 d	33 ± 1.63 c	5 013.97 ± 568.50 c
HC	LM36	4.51 ± 0.03 a	32 ± 2.49 a	35 ± 0.82 b	5 699.14 ± 523.35 a
	LM33	4.53 ± 0.07 a	30 ± 2.16 ab	36 ± 1.41 b	4 662.41 ± 91.58 b
	DX40	4.55 ± 0.02 a	27 ± 1.41 b	34 ± 0.82 b	4 707.52 ± 263.38 b
	NM2	4.35 ± 0.11 b	17 ± 0.82 cd	40 ± 2.16 a	3 424.65 ± 626.11 c
	BM12	4.50 ± 0.07 ab	15 ± 1.41 d	35 ± 3.74 b	2 529.04 ± 242.48 d
	BF5	4.47 ± 0.05 ab	20 ± 0.82 c	26 ± 2.94 c	2 459.48 ± 167.23 d

注: 同列数据后小写字母不同表示同一水分处理下不同春小麦品种间差异达 $P<0.05$ 显著水平。



(图中小写字母不同表示同一春小麦品种不同水分处理下差异达 $P<0.05$ 显著水平, 大写字母不同表示同一水分处理下不同春小麦品种间差异达 $P<0.05$ 显著水平; 下图同)

图 2 干旱胁迫对不同春小麦田土壤养分含量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on soil nutrient contents in different spring wheat fields

2.2.2 干旱胁迫对不同春小麦田土壤元素化学计量特征的影响 土壤有机碳是土壤肥力的主要组成部分, 也是土壤健康的重要体现。与 CK 相比, HC 处理显著降低了春小麦田土壤有机碳含量

($P<0.05$), 其中 BM12 下降幅度最大, 为 15.41%(图 3A)。春小麦田土壤 C : N、C : P、N : P 变化幅度范围为 10.23 ~ 14.13、4.03 ~ 7.42、0.39 ~ 0.56(图 3B ~ 3D)。与 CK 相比, HC 处理下 BM12、BF5 土

壤 C:N、C:P、N:P 显著降低。在 C:P 中, BM12 下降幅度最大, 为 41.08%; LM33 下降幅度最小, 为 6.30% (图 3C)。DX40、LM36、LM33 土壤 N:P 在 CK 与 HC 处理下差异不显著 (图 3D), 其中 DX40 增幅最大为 1.41%。表明, 干旱胁迫对春小麦田土壤有机碳及 C:N、C:P、N:P 影响较大, 尤其是 BM12 和 BF5 对干旱胁迫更为敏感。

综上, 耐旱性不同的春小麦品种的土壤养分及元素化学计量特征在干旱胁迫下变化幅度不同。LM36、LM33 对干旱胁迫的耐受性较好, 而 BM12、BF5 对土壤氮素、磷素、钾素的吸收受到干旱限制。

2.3 干旱胁迫对不同春小麦田土壤酶活性的影响

由图 4 可知, HC 处理下 6 个春小麦田土壤过氧化氢酶、脲酶活性显著高于 CK ($P<0.05$)。其中 HC 处理下, BM12 土壤过氧化氢酶活性增幅最大, 为 9.55%; LM33 增幅最小, 为 7.12% (图 4A)。土壤脲酶活性增幅由大到小依次为 DX40>BF5>BM12>NM2>LM36>LM33 (图 4D)。而与 CK 相比, HC 处理下土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性则降低, 其中, BM12

土壤蔗糖酶活性下降幅度最大, 为 2.52%, DX40 下降幅度最小, 为 0.42% (图 4C); BM12 土壤碱性磷酸酶活性降低了 14.51% (图 4B), 达到显著差异 ($P<0.05$)。由此表明, 不同春小麦田土壤酶活性对干旱胁迫的响应不同, 春小麦品种 LM33 的土壤酶活性受干旱胁迫影响较小。

2.4 干旱胁迫对不同春小麦田土壤微生物生物量的影响

由图 5 可知, 与 CK 相比, HC 处理显著降低了春小麦田土壤微生物生物量碳、氮、磷含量 ($P<0.05$)。HC 处理下, 春小麦田土壤微生物生物量碳含量下降幅度由大到小依次为 BF5>BM12>LM36>NM2>DX40>LM33 (图 5A); NM2 春小麦田土壤微生物生物量氮含量下降幅度最大, 为 13.61%, LM33 下降幅度最小, 为 1.28% (图 5B); LM36、LM33 春小麦田土壤微生物生物量磷含量在 6 个春小麦田中下降幅度较小, 分别为 23.77%、24.10% (图 5C)。表明, LM36、LM33 等春小麦品种可能可以有效缓解干旱对土壤养分库造成危害。

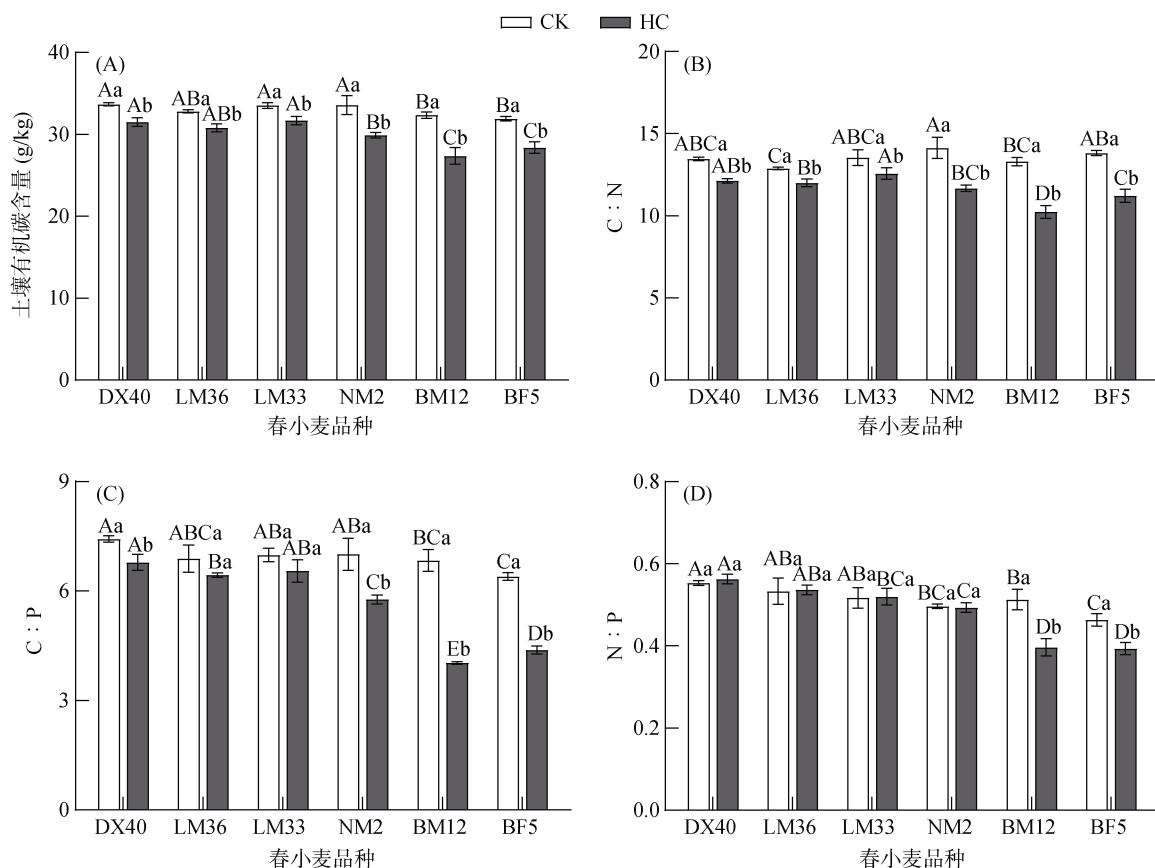


图 3 干旱胁迫对不同春小麦田土壤元素化学计量特征的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on the stoichiometric characteristics of soil elements in different spring wheat fields

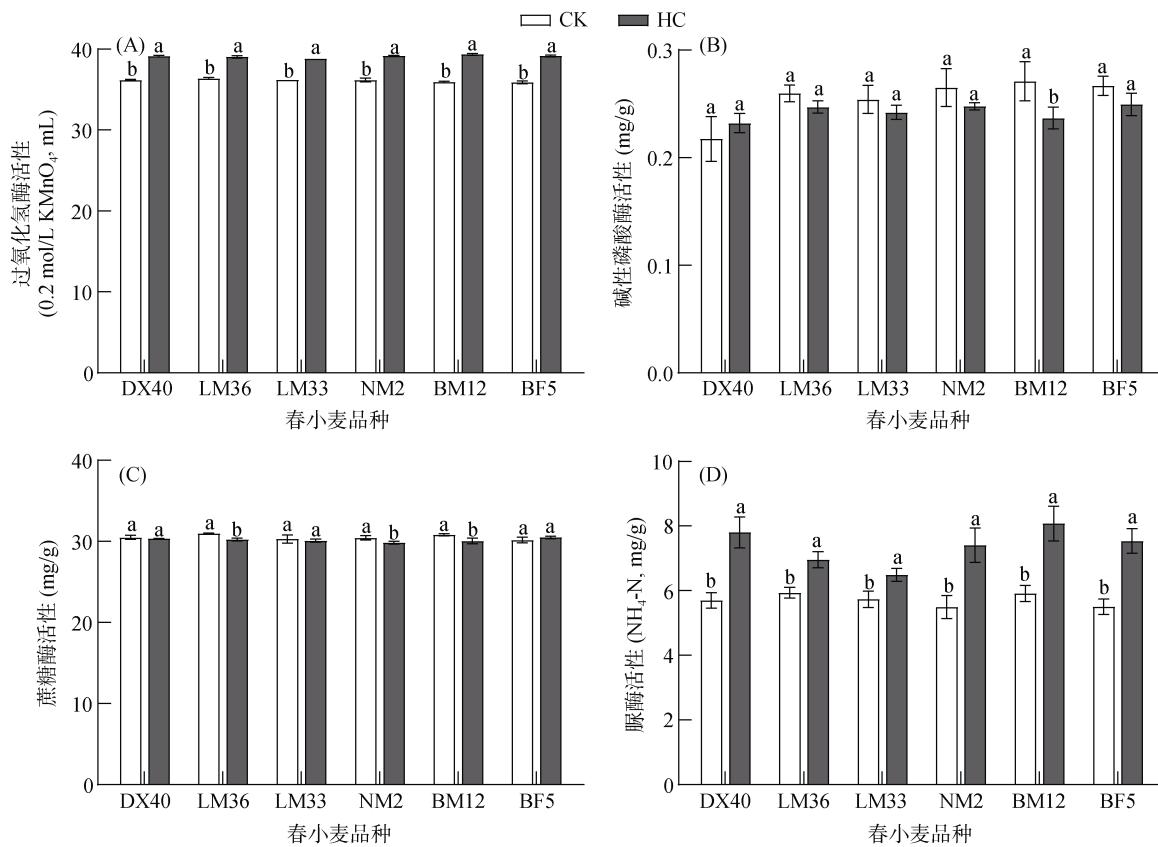


图 4 干旱胁迫对不同春小麦田土壤酶活性的影响
Fig. 4 Effects of drought stress on soil enzyme activities in different spring wheat fields

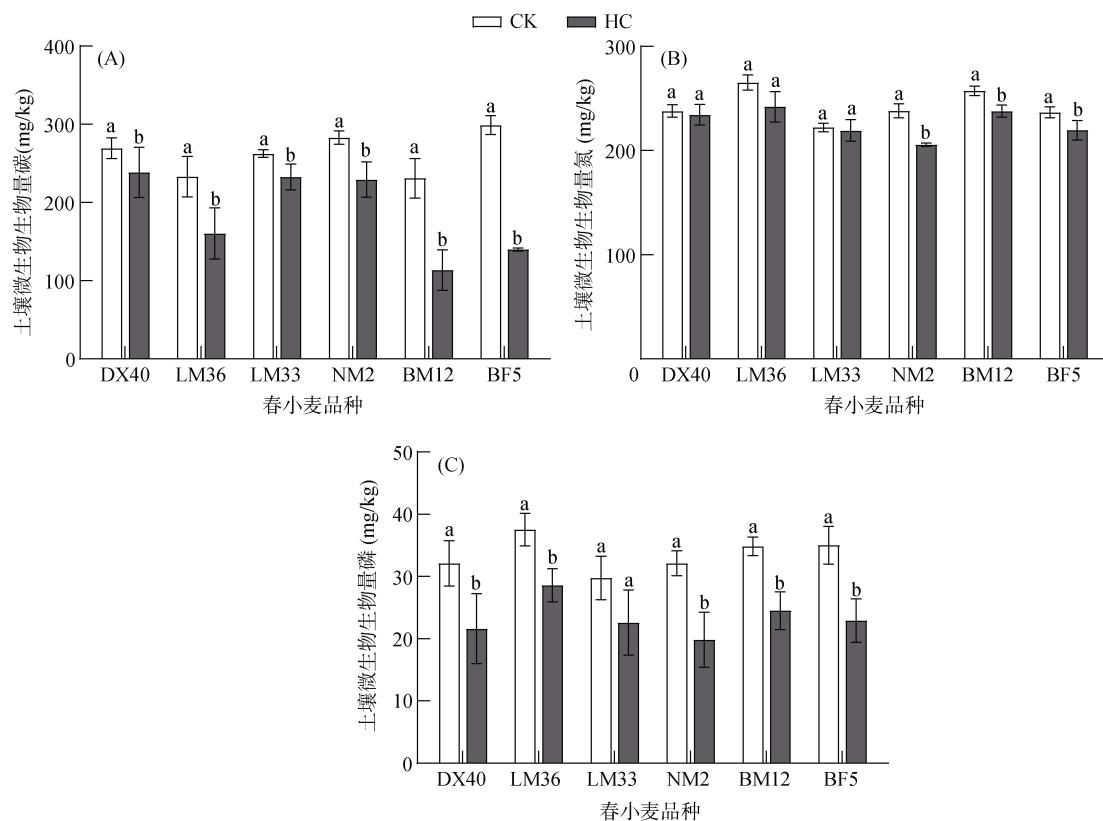
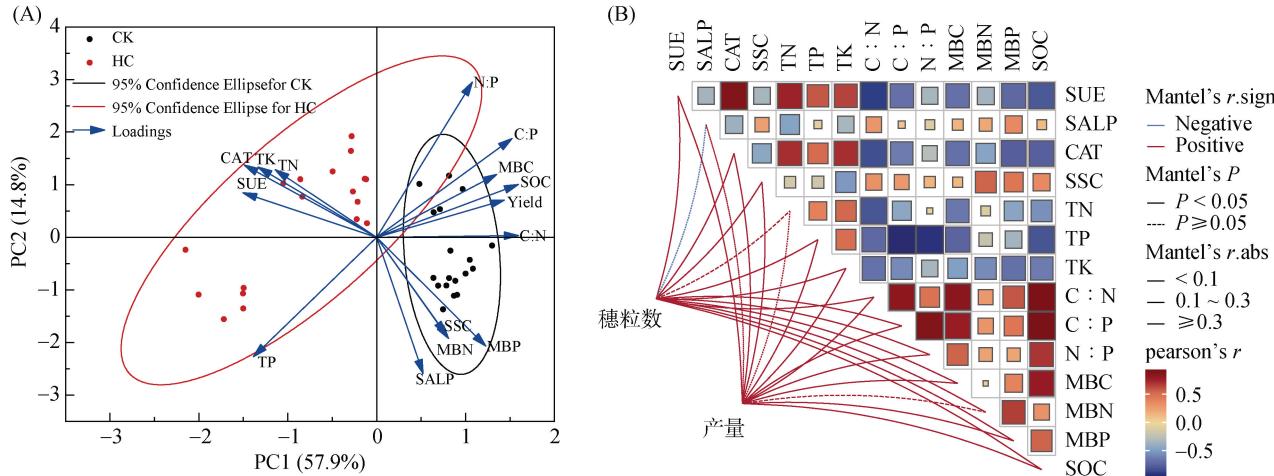


图 5 干旱胁迫对不同春小麦田土壤微生物生物量的影响
Fig. 5 Effects of drought stress on soil microbial biomass in different spring wheat fields

2.5 不同春小麦产量与土壤性状各指标相关性

对春小麦产量及各土壤指标进行主成分分析发现, 干旱处理是造成不同春小麦产量及土壤指标存在差异的主要因素(图 6A)。利用 Pearson 相关系数对春小麦穗数、产量与土壤各指标进行相关性网络热图分析发现, 产量与 C : P($r=0.784$)、土壤有机碳($r=0.780$)、



(SOC: 有机碳; MBP: 微生物生物量磷; MBN: 微生物生物量氮; MBC: 微生物生物量碳; N : P: 氮磷比; C : P: 碳磷比; C : N: 碳氮比; TK: 全钾; TN: 全氮; TP: 全磷; SSC: 蔗糖酶活性; CAT: 过氧化氢酶活性; SALP: 碱性磷酸酶活性; SUE: 脲酶活性)

图 6 不同春小麦产量与土壤各指标主成分分析(A)及相关性网络热图分析(B)

Fig. 6 Principal component analyses (A) and correlation network heat map analyses (B) of different spring wheat yield and soil indexes

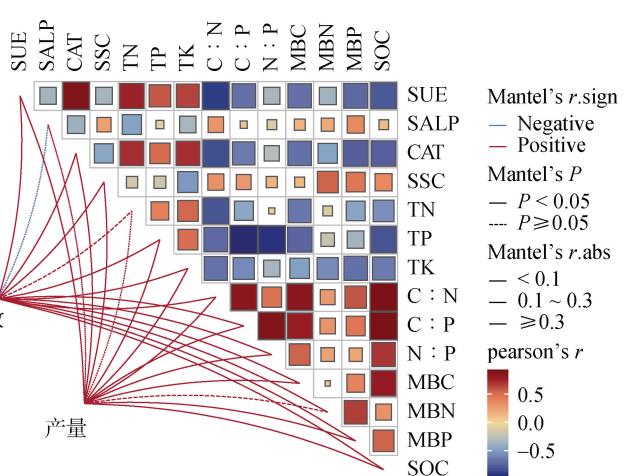
3 讨论

3.1 耐旱春小麦能够缓解干旱对土壤养分平衡造成的影响

碳、氮和磷是生物地球化学物质循环的必需元素^[19]。本研究发现不同春小麦田土壤养分及土壤元素化学计量特征对干旱胁迫的响应不同。干旱胁迫会降低春小麦田全氮与有机碳含量, 增加其全钾、全磷含量, 其中 BM12 土壤全氮及有机碳含量降低幅度最大, 分别为 8.83% 和 15.41%。Zhu 等^[20]研究表明, 干旱降低了高寒草地 0~10 cm 表层土壤有机碳、全氮含量, 本研究结果与此一致。此外, 土壤微生物是土壤养分循环的主要驱动力, 其受作物类型和土壤环境的影响, 且不同作物对干旱的响应不同, 土壤养分的匮乏也会存在一定差异^[21~22]。干旱不仅可以通过影响作物地上及地下部的碳输入, 还会影响土壤有机质的矿化, 进而改变土壤有机碳的积累^[23]。本研究结果显示, 干旱胁迫下不同春小麦田土壤有机碳含量显著下降。这也表明当植物受到干旱危害时, 其可能会通过改变土壤有机碳等养分含量来适应逆境。

土壤元素的化学计量是影响植物养分获取的关键因素, 也是判断土壤质量和养分供应能力的重要指

全磷($r=0.712$)呈极显著正相关关系。穗粒数与土壤有机碳($r=0.746$)呈极显著正相关。各土壤指标中土壤有机碳与 C : N, C : P, N : P, 土壤微生物生物量碳、磷呈极显著正相关关系(图 6B)。表明, 土壤有机碳对于土壤养分维持至关重要, 是春小麦产量形成的关键土壤因子。



标^[24]。有研究表明土壤 C : N 较高时, 土壤有机质矿化可以得到有效缓解, 土壤 C : N 在一定程度上可以反映土壤有机质矿化速率^[25]。本研究发现干旱胁迫下 BM12 土壤有机碳含量最低, 可能是其 C : N 显著下降的结果。我国土壤 C : N、C : P、N : P 的平均值分别为 12、61 和 5^[26~27], 而本试验得出的土壤 C : N、C : P、N : P 的比值变化范围分别为 10.23~14.13、4.03~7.42、0.39~0.56, C : N 值与我国土壤 C : N 均值相似, 而 C : P、N : P 与我国平均值差距较大, 表明干旱胁迫下不同春小麦田土壤碳、氮元素对土壤的限制程度不断加重, 且土壤磷的有效性较高。

3.2 干旱胁迫显著影响不同春小麦田土壤生物学性状指标

土壤酶作为微生物养分需求和代谢过程的指示指标之一, 在土壤碳、氮、磷、硫等元素循环中起着重要作用, 是陆地生态系统应对气候变化的核心^[28]。本研究发现, 干旱胁迫下春小麦田土壤过氧化氢酶、脲酶活性显著增加。有研究指出, 干旱胁迫下土壤过氧化氢酶活性变化不显著, 而脲酶活性呈下降趋势^[29]。本研究结果与此有一定差异。然而, Sall 等人^[30]发现脲酶等其他酶的活性并不总是与土壤水分的可用性相关。干旱导致脲酶活性增高的原因可能与作物及土

壤类型、土壤微生物物种结构和组成变化等有关,具体原因还需进一步研究。干旱胁迫对春小麦田土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶活性的影响相对较小,但 BM12 的土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶活性下降幅度最大,受干旱胁迫的影响最显著。干旱和养分富集等全球环境变化因素,已被证实会减少土壤微生物生物量^[31]。在本研究中也得到了相同结果,干旱显著降低春小麦田土壤微生物生物量碳、氮、磷含量。土壤水分是土壤微生物的重要调节因子^[32],可以在短期内影响土壤微生物生理代谢^[33],这可能是干旱对土壤微生物生物量影响显著的原因。

3.3 干旱胁迫下维持一定养分条件对春小麦稳产具有积极影响

本研究表明,干旱胁迫下土壤有机碳与 C:N, C:P, N:P, 土壤微生物生物量碳、磷呈极显著正相关关系。土壤有机碳的矿化过程关系到土壤呼吸潜力、CO₂气体的排放及土壤有机碳库存,而土壤微生物生物量碳参与有机质的分解和腐殖质的形成^[23]。这也说明微生物生物量碳与有机碳存在紧密联系,在元素积累及消耗过程中呈现出相对统一的变化。春小麦产量与 C:P、全磷、土壤有机碳呈极显著正相关关系这可能与土壤养分和水分对植物吸收养分发挥重要作用有关。当土壤有机碳含量增多且土壤内部通气良好时,植物对养分的吸收利用作用增强,根系吸收矿质元素能力提高,并将吸收的土壤养分向地上部分传输,促进作物对养分的吸收利用,进而提高产量^[12]。另一方面春小麦可能通过根系分泌物影响土壤酶活性和微生物生物量的变化,进而影响土壤养分含量。此外,这些分泌物可能具有较多的水溶性化合物,有利于保持土壤中的水分能够被春小麦高效利用,也在一定程度上维持春小麦的正常生理活动,进而减少作物减产^[34]。因此,干旱胁迫下指标之间的相互作用表明了良好的土壤条件对于作物产量提高的重要性以及利于作物抵御一定干旱危害的积极意义。

4 结论

1) 干旱胁迫下不同春小麦田土壤养分、微生物生物量及土壤元素化学计量特征存在显著差异($P < 0.05$),其中春小麦田全氮、有机碳含量,土壤 C:N、C:P, 微生物生物量碳、氮、磷均显著降低,而全钾、全磷含量显著增加。BM12 等品种对土壤氮、磷、钾的吸收严重受到干旱胁迫的限制。

2) 与对照相比,干旱处理显著降低了不同春小麦田土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,而过氧化氢酶、

脲酶活性显著提高($P < 0.05$)。春小麦品种 LM33 土壤酶活性受干旱胁迫的影响较小。

3) 主成分分析表明,干旱是造成不同春小麦田产量和土壤指标存在差异的主要因素,有机碳是影响春小麦产量的关键土壤因子。作物可以通过调节养分状况,改善土壤微环境,提升产量,LM36、LM33 是适宜大兴安岭西麓旱作区种植的春小麦品种。

致谢:此次大田试验数据的获取得到了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(特泥河试验站)的大力支持和中国气象局科学数据中心提供的降水量数据支撑,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Gampe D, Zscheischler J, Reichstein M, et al. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 772–779.
- [2] Yin J B, Gentile P, Slater L, et al. Future socio-ecosystem productivity threatened by compound drought–heatwave events[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 259–272.
- [3] Vadez V, Grondin A, Chenu K, et al. Crop traits and production under drought[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5: 211–225.
- [4] Pfeifer M, Kugler K G, Sandve S R, et al. Genome interplay in the grain transcriptome of hexaploid bread wheat[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 1250091.
- [5] 董青君, 董玉兵, 李卫红, 等. 不同绿肥对土壤肥力及后茬水稻养分吸收的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 554–561.
- [6] 杨继芬, 李永梅, 李春培, 等. 不同种植模式对坡耕地红壤团聚体中酶活性及养分含量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 787–794.
- [7] Maestre F T, Delgado-Baquerizo M, Jeffries T C, et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(51): 15684–15689.
- [8] 杨昌钰, 张芮, 薛宝军, 等. 水分胁迫对设施延迟栽培葡萄根际土壤有机氮及土壤酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1376–1384.
- [9] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527–1539.
- [10] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541–1551.
- [11] Yan W M, Zhong Y, Shangguan Z P. Responses of different physiological parameter thresholds to soil water availability in four plant species during prolonged drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 311–319.

- [12] 张娟, 李广, 袁建钰, 等. 水氮调控对旱作春小麦土壤、叶片养分含量的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1750–1759.
- [13] García-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B, et al. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2137–2145.
- [14] Zhou F, Wang J, Yang N, et al. Effects of lead and water stress on soil enzyme activities from two plant species[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2014, 13(1): 31–36.
- [15] Song F B, Han X Y, Zhu X C, et al. Response to water stress of soil enzymes and root exudates from drought and non-drought tolerant corn hybrids at different growth stages[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 501–507.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 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.
- [19] Fisher J B, Badgley G, Blyth E. Global nutrient limitation in terrestrial vegetation[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(3): GB3007.
- [20] Zhu E X, Cao Z J, Jia J, et al. Inactive and inefficient: Warming and drought effect on microbial carbon processing in alpine grassland at depth[J]. Global Change Biology, 2021, 27(10): 2241–2253.
- [21] Mariotte P, Canarini A, Dijkstra F A. Stoichiometric N: P flexibility and mycorrhizal symbiosis favour plant resistance against drought[J]. Journal of Ecology, 2017, 105(4): 958–967.
- [22] Fry E L, Johnson G N, Hall A L, et al. Drought neutralises plant-soil feedback of two mesic grassland forbs[J]. Oecologia, 2018, 186(4): 1113–1125.
- [23] Zhou X H, Zhou L Y, Nie Y Y, et al. Similar responses of soil carbon storage to drought and irrigation in terrestrial ecosystems but with contrasting mechanisms: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 228: 70–81.
- [24] Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Soil and plant components ecological stoichiometry in four steppe communities in the Loess Plateau of China[J]. CATENA, 2016, 147: 481–488.
- [25] 田耀武, 和武宇恒, 翟淑涵, 等. 陶湾流域草本植物土壤及土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1643–1650.
- [26] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139–151.
- [27] Sun Y, Wang C T, Chen H Y H, et al. Asymmetric responses of terrestrial C: N: P stoichiometry to precipitation change[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(8): 1724–1735.
- [28] Zuccarini P, Asensio D, Ogaya R, et al. Effects of seasonal and decadal warming on soil enzymatic activity in a P-deficient Mediterranean shrubland[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3698–3714.
- [29] 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.
- [30] Sall S N, Chotte J L. Phosphatase and urease activities in a tropical sandy soil as affected by soil water-holding capacity and assay conditions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, 33(19/20): 3745–3755.
- [31] Thakur M P, Milcu A, Manning P, et al. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors[J]. Global Change Biology, 2015, 21(11): 4076–4085.
- [32] Serna-Chavez H M, Fierer N, van Bodegom P M. Global drivers and patterns of microbial abundance in soil[J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(10): 1162–1172.
- [33] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. Ecology, 2007, 88(6): 1386–1394.
- [34] 李月明, 杨帆, 韩沛霖, 等. 植物根系分泌物响应非生物胁迫机理研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(5): 1384–1392.