

增温条件下生物炭和腐殖酸改良铜污染土壤对小麦吸持养分的影响

云望舒, 刘德鸿, 寇太记, 赖路宽, 夏东方

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:为了评价气候变暖条件下生物炭和腐殖酸对铜(Cu)污染土壤的改良效果,于2020年在河南省洛阳市,利用田间被动式夜间增温系统,以冬小麦为研究材料,设置了不同温度下[常温(NT)与夜间增温(HT)],Cu污染土壤中施用生物炭(CCu)、低用量腐殖酸(F1Cu)、高用量腐殖酸(F2Cu)的双因素盆栽试验,研究了成熟期小麦的干物质积累与分配、氮(N)、磷(P)和铜(Cu)素的吸收利用和转运迁移规律。结果表明,田间被动式增温系统在小麦全生育期平均增温0.56°C,达到了良好的增温效果。Cu污染使得小麦的生长受到抑制,各部位生物量与总生物量显著降低22.3%~76.0%。HT处理提高了冬小麦生物量(22.3%~27.83%),一定程度缓解了Cu污染对小麦生长的抑制效应;HT处理降低了Cu污染土壤中小麦植株的N、P含量在各组织之间的变化幅度,但对平均含量无显著影响;在CK处理下,对于Cu素转运而言,HT显著提升了Cu素由地下部向地上部转运量的229.62%,且显著增加了小麦植株中N、P的积累量(11.1%~45.5%)。施用腐殖酸和生物炭均减轻了Cu污染对小麦生长的抑制作用,在总生物量中表现为F2Cu>F1Cu>CCu。施用腐殖酸(F1Cu、F2Cu)对小麦N、P积累量有提升趋势;相比Cu处理显著提升了小麦植株N积累量的22.2%~100%。添加改良剂均有利于Cu由茎向穗迁移(9.6%~79.8%),而以CCu处理对其转运的促进更加明显。综上,施用腐殖酸、生物炭均可不同程度减缓Cu污染对小麦生长的危害,有助于提升小麦抵御Cu污染胁迫的能力,但改良重金属Cu污染土壤的农业效果可能在未来气候条件下会发生改变。

关键词:冬小麦;夜间增温;土壤铜污染;生物炭;腐殖酸

中图分类号:S512.1;S156;S162.5 **文献标志码:**A

Effects of improving copper-contaminated soil with biochar and humic acid on nutrient uptake of wheat under warming conditions

YUN Wangshu, LIU Dehong, KOU Taiji, LAI Lukuan, XIA Dongfang

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: To evaluate the effects of biochar and humic acid on copper (Cu) contaminated soil under climate warming conditions, a two-factor pot experiment was conducted in Luoyang City, Henan Province, in 2020. The experiment included treatments with biochar (CCu), a low amount of humic acid (F1Cu), and a high amount of humic acid (F2Cu) in Cu-contaminated soil. A passive night-warming system was used in the field, with winter wheat as the study material. The dry matter accumulation and distribution, nitrogen (N), phosphorus (P) and copper (Cu) uptake, utilization, transport and migration of wheat at maturity stage were studied. The results showed that the passive warming system in the field increased the temperature of wheat by an average of 0.56°C during the whole growth period and achieved a good warming effect. Copper pollution inhibited wheat growth, significantly reducing the biomass of all plant parts by 22.3% to 76.0%. Nighttime warming (HT) increased the biomass of winter wheat (22.3%~27.83%), alleviating the inhibitory effect of Cu pollution on wheat growth to a certain extent. HT reduced the variation range of N and P contents of wheat plants among tissues in Cu contaminated soil but

收稿日期:2024-02-22

修回日期:2024-05-06

基金项目:国家自然科学基金青年项目(32401741);河南科技大学A类博士启动基金(13480101);河南省科技研发计划联合基金(应用攻关类2321038100581)

作者简介:云望舒(2000-),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为作物营养与气候环境变化。E-mail:yunwangshu2000@163.com

通信作者:寇太记(1975-),男,河南新乡人,博士,教授,主要从事资源利用与气候变化研究。E-mail:tikou@haust.edu.cn

had no significant effect on the average content. In CK treatment, HT significantly increased the transport of Cu from underground to aboveground by 229.62%, and significantly increased the accumulation of N and P in wheat plants (11.1%~45.5%). The application of humic acid and biochar reduced the inhibitory effect of Cu pollution on wheat growth, and the expression of F2Cu>F1Cu>CCu in total biomass was reduced. The application of humic acid (F1Cu, F2Cu) increased the accumulation of N and P in wheat. Compared with the Cu treatment, the N accumulation of wheat plants was significantly increased by 22.2%~100%. The addition of amendments was beneficial to the migration of Cu from stem to panicle (9.6%~79.8%), and CCu treatment promoted its transport more significantly. In conclusion, the application of humic acid and biochar can mitigate the harmful effects of copper pollution on wheat growth to varying degrees and enhance wheat's ability to resist Cu stress. However, the effectiveness of these treatments in improving Cu-contaminated soil may vary under future climatic conditions.

Keywords: winter wheat; nighttime warming; soil copper pollution; biochar; humic acid

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是我国重要的粮食作物之一, 适宜的气候与土壤是实现其优质稳产的重要环境因子^[1]。由于受到人类活动的影响, 全球地表温度比工业化前上升了约 1℃, 预计从 2030 年到 2052 年增加 1.5℃^[2]。气候变暖呈现显著的非对称性, 即冬春季温度增幅大于夏秋季, 夜间最低温度的增幅大于白天最高温度的增幅, 这与北方冬小麦的生产基本重叠, 使得我国冬小麦生产面临气候变暖尤其是夜间变暖的威胁^[3-4]。普遍认为, 气候变暖将增强小麦的光合作用, 提高生物量^[5-6], 但变暖对小麦生长存在的区域间作用差异明显^[7], 从而导致增温对小麦吸持、转运养分和产量形成的影响不同^[8]。增温试验研究发现, 夜间增温对小麦产量的影响呈现降低^[9]、增加^[10]或者不变^[11]等多种结果。

铜 (Cu) 既是作物生长必需的微量元素又是土壤重金属元素, Cu 过量将对作物生长产生危害^[12]。根据第二次全国土壤普查, 我国耕地土壤重金属 Cu 点位超标率为 4.04%^[13], 部分农田土壤受到 Cu 污染。显然, 我国冬小麦生产面临气候变暖与土壤 Cu 污染的双重胁迫风险。增温可以改变土壤中 Cu 的稳定形态^[14], 并影响小麦幼苗吸持 Cu^[1]。减少气候变暖背景下 Cu 污染土壤对小麦生产的不利影响成为亟待研究的课题。

生物炭是秸秆等物质在厌氧或者无氧条件下经过高温热解而产生的一种富含碳的固态产物^[15], 是一种重要的土壤增碳改良剂。研究表明, 施用生物炭可以改善土壤微生物群落结构, 提高土壤碳氮含量和作物产量^[16]。腐殖酸是由动植物遗骸转化形成的一类大分子有机物质^[17], 具有较大的表面积及内部电荷, 是常见的一种污染土壤改良剂, 具有改善土壤理化性质, 缓解土壤酸化, 提高土壤 pH 值, 提升土壤肥力、有机质含量和作物产量的作用^[18-20]。施用生物炭和腐殖酸改良治理农田土壤

Cu 污染与抵抗极端环境条件已有少量报道^[21-22], 但气候变暖对其改良的效果尚缺乏研究。本研究在多年夜间增温平台试验基础上^[23], 设置不同温度和土壤 Cu 含量处理的盆栽试验, 分析生物炭与腐殖酸对土壤 Cu 污染和冬小麦的物质积累与分配、养分利用的影响, 明确夜间增温条件下生物炭和腐殖酸对 Cu 污染土壤的改良效果, 以期在气候变暖情形下生物炭和腐殖酸在土壤 Cu 污染修复治理方面的应用及其效果评价提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与材料

试验区位于河南省洛阳市的河南科技大学开元校区农场 (34°35' N, 112°24' E)。该地区属于半湿润半干旱大陆性季风气候, 年平均温度为 14.86℃, 年平均降雨量 600 mm, 年无霜期>215 d, 年日照时数>2300 h。该区域土壤为潮褐土, 质地为中壤, 其理化性质下: 全氮 1.06 g·kg⁻¹, 有效磷 3.46 mg·kg⁻¹, 有机质 10.7 g·kg⁻¹, 容重 1.12 g·kg⁻¹, 平均有效 Cu 含量 6 mg·kg⁻¹, pH 值 8.14。供试盆栽土壤采自洛阳的 Cu 单因子污染场地的 0~20 cm 表层, 为 2010 年建立的研究重金属污染土壤中重金属迁移行为与修复的试验地, 土壤 Cu 含量 155 mg·kg⁻¹, 高于国家《土壤环境质量标准 GB 15618—2018》^[24] 中土壤 Cu 污染风险筛选值 (100 mg·kg⁻¹) (6.5<pH<7.5), 存在农用地土壤 Cu 污染风险。生物炭购置于河南三利新能源有限公司, 腐殖酸、小麦种子购买自市场。

1.2 试验设计

采用大田原位盆栽试验, 利用田间被动式夜间增温系统模拟未来不对称的气候变暖, 以夜间增温 (HT) 和正常温度 (NT) 为主处理, 以未污染土壤对照 (CK)、Cu 污染土壤 (Cu)、低用量腐殖酸改良 Cu

污染土壤(F1Cu, 20 g · kg⁻¹)、高用量腐殖酸改良 Cu 污染土壤(F2Cu, 40 g · kg⁻¹)、生物炭改良 Cu 污染土壤(CCu, 10 g · kg⁻¹) 为副处理, 每个副处理 8 次重复, 共 40 个 PVC 盆(直径 50 cm、深 60 cm), 每盆装干土 35 kg, 均在拣去动植物残体、石块等杂物、过 4 mm 筛, 与各处理添加物混匀后分别装盆。将每个副处理各 4 盆共 20 盆随机分成 2 组埋入 HT 与 NT 区域土中, 盆钵上沿高出土表 2 cm。

夜间增温依据被动式红外线反射增温原理实现增温^[1], 在小麦全生育期每天 19:00 至次日 7:00 进行覆膜增温, 降水天气停止覆膜, 避免水分差异对试验造成影响。

供试小麦品种为‘洛旱 11’, 于 2020 年 11 月 11 日开始播种, 每盆种植 35 株, 返青阶段每盆定苗 25 株, 于 2021 年 6 月 1 日完成收获。根据大田施肥标准, 每盆施用尿素 8.6g (220 kg · hm⁻²), 过磷酸钙 10.9 g (75 kg · hm⁻²), 硫酸钾 2.4g (75 kg · hm⁻²)。其中, 磷钾肥溶解于等量水中进行基施, 并对每盆进行补水使得土壤含水量达到 70% 的饱和含水量。氮肥分别于播种前、拔节期、抽穗期按照 4:3:3 的比例施用, 整个生育期中水分管理以雨养为主, 除特别干旱情况下, 为防止植株死亡进行定量灌溉外, 其余管理措施与大田相同。

1.3 测定内容与方法

每盆在播种前埋入 1 个自动温度记录仪 (Elitech, Rc-4, 浙江精创电力科技有限公司), 记录试验期间的土壤 (10 cm) 温度, 间隔为 5 min, 每 20 d 读取 1 次数据, 将每天记录的平均值作为土壤平均温度。日均土壤温度见图 1, 小麦全生育期土壤平均温度随时间的变化都呈现先降低后升高的趋势, 常温 (NT) 和夜间增温 (HT) 的土壤温度变化范围分别为 -2.4~27.0℃ 和 -1.9~29.1℃, 全生育期土壤增温幅度 -0.8~2.3℃, 平均增温 0.56℃。

每个处理在成熟期各选取能代表总体长势且生长较一致的 3 盆带回室内破坏性取样, 将植株分为茎、叶、穗和根, 105℃ 下杀青, 80℃ 烘干至恒重后称干质量, 地上部生物量为茎、叶和穗生物量之和, 总生物量为茎、叶、穗和根生物量之和。而后对各部位的样品进行烘干和磨细处理, Cu 含量使用干灰化法-原子吸收分光光度法测定, 利用原子吸收光谱仪 (PinAAcie900F 火焰原子吸收光谱仪, United States PE) 来进行测定; 全氮测定采用浓硫酸-H₂O₂ 消解-凯氏定氮法; 全磷测定采用浓硫酸-H₂O₂ 消解钒钼黄比色法^[25]。

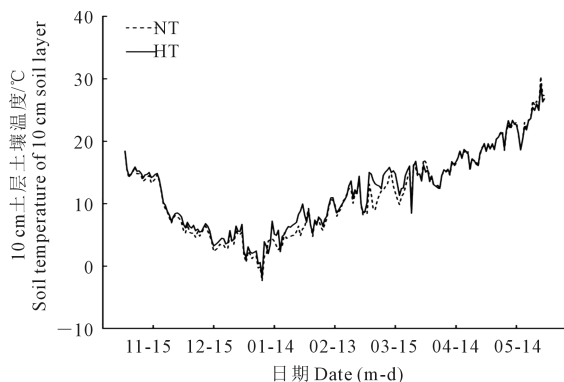


图 1 2020—2021 年田间被动式夜间增温 (HT) 和常温 (NT) 的土壤温度变化

Fig.1 Soil temperature changes in the field from 2020 to 2021 with passive night warming (HT) and normal temperature (NT)

1.4 数据处理

(1) 小麦各部位氮 (磷、铜) 积累量 = 各部位干质量 (g · pot⁻¹) × 各部位氮 (磷、铜) 含量;

(2) 植株氮 (磷、铜) 积累总量为各部位氮 (磷、铜) 积累量总和;

(3) 氮收获指数 (NHI) = 籽粒氮吸收量 (g · pot⁻¹) / 植株氮吸收量 (g · pot⁻¹);

磷收获指数 (PHI) = 籽粒磷吸收量 (g · pot⁻¹) / 植株磷吸收量 (g · pot⁻¹);

铜收获指数 (CuHI) = 籽粒铜吸收量 (mg · pot⁻¹) / 植株铜吸收量 (mg · pot⁻¹)

(4) 茎向叶的铜迁移系数 ($TF_{leaf/stem}$) 按 $TF_{leaf/stem} = C_{leaf}/C_{stem}$ 计算; 茎向穗的铜迁移系数 ($TF_{spike/stem}$) 按 $TF_{spike/stem} = C_{spike}/C_{stem}$ 计算; 根向茎的铜迁移系数 ($TF_{stem/root}$) 按 $TF_{stem/root} = C_{stem}/C_{root}$ 计算。 C_{leaf} 、 C_{spike} 、 C_{stem} 、 C_{root} 分别为叶、穗、茎、根中铜含量 (mg · kg⁻¹)。 TF 数值代表各元素在小麦各部位迁移、再分配的能力。

所有数据均使用 Microsoft Excel 2016 整理, GraphPad Prism 9 作图, SPSS 24 进行方差分析, 选择 Duncan 多重比较法在 $P < 0.05$ 水平进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 增温条件下施用生物炭和腐殖酸对铜胁迫小麦各部位生物量的影响

由表 1 可知, 相比 CK 处理, Cu 污染及添加改良剂处理在 HT 和 NT 条件下均显著降低了小麦各部位的生物量 ($P < 0.05$) (表 1), 表明土壤 Cu 污染对小麦生长具有显著的抑制作用, 施用改良剂可适当减轻其抑制效果。增温显著增加了 CK 处理中小

麦的茎、穗和总生物量约 22.3%~27.83%，但未显著改变 Cu 处理的小麦各部位干质量与总生物量。在 HT 和 NT 环境下，小麦总生物量基本上均表现为 CK>F2Cu>F1Cu>Cu \geq CCu，其中 F2Cu 处理中小麦总生物量比 CK 处理降低 28%~40%，下降幅度最小，而施用生物炭(CCu)下降幅度最大，达 73.6%~76.0%。但增温未显著改变 F2Cu 和 F1Cu 处理的小麦各部位与总生物量，却显著增加了 CCu 处理中小麦的茎、穗和总生物量。因素分析表明，温度与处理的交互效应未显著影响生物量，但处理对小麦生物量影响极显著(表 2)。

2.2 施用腐殖酸和生物炭对铜胁迫小麦植株 N、P 含量及其化学计量特征分析

在 HT 和 NT 环境下，各处理小麦不同组织的 N、P 含量介于 2.87~5.08 g·kg⁻¹和 3.18~4.58 g·kg⁻¹；Cu 污染及添加改良剂处理相比 CK 处理具有增加植株 N 含量和 NP 化学计量比(N:P)的趋势，

但对 P 含量的影响不明显(图 2)。增温提高植株 N 平均含量 48.8%($P<0.05$)和植株 P 平均含量 18.4%($P>0.05$)。增温没有改变 Cu 污染土壤植株平均 N、P 含量，但明显缩小了二者的变化范围，且具有增大化学计量比(N:P)的趋势。相比 Cu 处理，添加改良剂没有明显改变植株的平均 N 含量和化学计量比(N:P)，但 F1Cu 和 F2Cu 却具有减少平均 P 含量趋势。增温对添加改良剂的处理植株 N、P 含量影响未达到显著水平，但在两温度条件下添加土壤改良剂(F1Cu、F2Cu、CCu)均提高了化学计量比(N:P)。

2.3 施用腐殖酸和生物炭对铜胁迫小麦氮、磷、铜积累与分配的影响

不同处理下小麦各部位 N、P、Cu 素的积累量与分配见图 3。与 CK 相比，无论 HT 或 NT 环境下，土壤 Cu 污染及添加改良剂处理均显著降低了成熟期小麦对 N 和 P 的总吸收量，且茎、叶、穗中 N 和 P 的

表 1 不同处理下冬小麦成熟期生物量积累与分配/(g·pot⁻¹)

Table 1 Accumulation and allocation of the biomass of winter wheat under different treatments at mature stage

温度 Temperature	处理 Treatment	生物量 Biomass/(g·pot ⁻¹)				
		根 Root	茎 Steam	叶 Leaf	穗 Spike	总量 Total
NT	CK	1.97±0.15a	31.05±0.92b	6.95±1.39ab	61.80±2.74b	101.77±2.68b
	Cu	0.89±0.24c	12.46±0.89e	4.12±0.98cd	16.18±0.78f	33.66±0.93e
	F1Cu	0.98±0.11cd	15.89±0.39d	3.06±0.20d	22.13±2.75de	42.06±3.22d
	F2Cu	1.50±0.20b	24.28±4.20c	5.43±0.88bc	41.35±7.02c	72.56±12.16c
	CCu	0.98±0.16cd	9.07±0.80f	2.20±0.25e	11.60±1.13g	23.85±2.26f
HT	CK	1.98±0.12a	39.69±3.5a	7.86±0.83a	74.94±1.07a	124.47±4.01a
	Cu	1.12±0.35bcd	11.10±1.77ef	3.85±0.83cd	16.07±1.16f	32.15±2.87e
	F1Cu	1.12±0.07c	15.89±1.21d	2.55±0.29e	27.89±3.39d	47.45±4.56d
	F2Cu	1.16±0.31bcd	24.18±3.99c	5.06±0.90bc	41.24±7.17c	71.64±12.09c
	CCu	0.84±0.07d	12.23±1.73e	1.77±0.09f	18.32±2.89f	33.16±4.58e

注：同列不同字母表示同一温度条件下处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments under the same temperature condition ($P<0.05$). The same below.

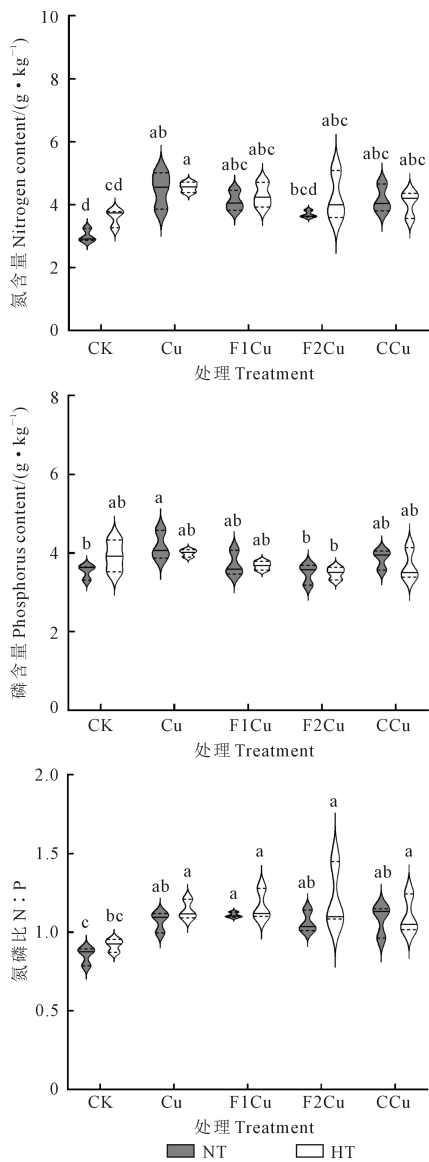
表 2 夜间增温与铜污染修复处理对冬小麦成熟期生物量、收获指数、植株氮磷比等的影响效应

Table 2 Effects of nighttime warming and remediation of copper pollution on biomass, harvest index and nitrogen / phosphorus ratio of winter wheat at mature stage

项目 Item	温度 Temperature		处理 Treatment		温度×处理 Temperature×Treatment	
	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
根干质量 Root dry mass	0.019	0.892	9.273	0.000***	0.643	0.638
茎干质量 Stem dry mass	1.912	0.182	38.095	0.000***	1.461	0.251
叶干质量 Leaf dry mass	0.073	0.790	15.038	0.000***	0.286	0.883
穗干质量 Spike dry mass	4.615	0.044*	71.242	0.000***	1.090	0.388
总生物量 Total biomass	3.312	0.084	67.434	0.000***	1.310	0.300
NHI	1.312	0.266	2.358	0.088	0.784	0.549
PHI	0.450	0.510	1.346	0.288	2.918	0.047*
CuHI	0.954	0.340	109.202	0.000***	0.752	0.568
氮含量 Nitrogen content	2.752	0.113	6.996	0.001**	0.803	0.537
磷含量 Phosphorus content	0.001	0.974	3.605	0.023*	1.056	0.404
氮磷比 N:P	4.092	0.057	6.987	0.001**	0.331	0.854

注：*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平下差异显著。

Note: *, **, and *** indicate significant differences at the levels of $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively.



注:不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters mean significant differences among treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

图 2 不同处理对小麦氮、磷含量及氮磷比的影响

Fig.2 Effects of different treatments on nitrogen and phosphorus contents and nitrogen/ phosphorus ratio in wheat

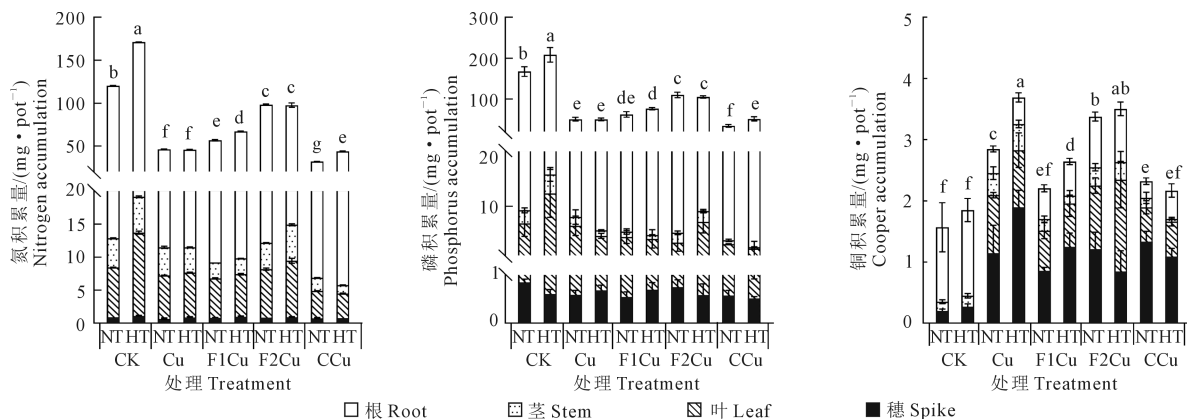


图 3 不同处理对氮、磷、铜素积累与分配量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the accumulation and distribution of nitrogen, phosphorus and copper

积累量均显著下降。HT 或 NT 环境下,土壤 Cu 污染及其改良处理较 CK 处理增加了小麦对 Cu 吸收量,根、茎、叶中积累量显著增加,但穗中积累量则显著下降。与 CK 相比,增温显著增加了茎、穗和总植株中的 N 和 P 积累量。HT 环境下,Cu 处理小麦对 P 的总吸收量显著增加,F1Cu 处理小麦对 N 和 Cu 的总吸收量显著增加;CCu 处理小麦对 N 和 P 的总吸收量显著增加。添加腐殖酸改良剂减弱了 Cu 污染对小麦吸收 N、P 的抑制作用,F2Cu 处理氮磷积累量 $>$ F1Cu 处理氮磷积累量,而施用生物炭改良剂则具有进一步抑制小麦吸收 N、P 的趋势。然而,施用腐殖酸和生物炭改良剂均抑制了 Cu 污染土壤小麦对 Cu 的吸收,其中 CCu 和 F1Cu 处理的抑制效果优于 F2Cu 处理。

2.4 施用腐殖酸和生物炭对铜胁迫小麦氮、磷、铜收获指数与铜迁移系数的影响

土壤 Cu 污染正常环境中降低了小麦中 N、P 和 Cu 的收获指数,其中 P、Cu 素均达到显著水平(图 4)。与 CK 相比,增温显著降低了小麦的 P 素收获指数,但对 N、Cu 的收获指数无显著影响。增温对土壤 Cu 污染及添加改良剂处理的小麦中 N、P 和 Cu 的收获指数均未产生显著影响。土壤 Cu 污染会导致 Cu 收获指数显著降低。因素分析表明,增温与处理对小麦 PHI 具有显著交互作用(表 2)。

如表 3 所示,与 CK 相比,无论 HT 或 NT 环境下,土壤 Cu 污染及添加改良处理均显著降低了成熟期小麦地上部 Cu 迁移系数(茎向叶、茎向穗)($TF_{leaf/stem}$ 、 $TF_{spike/stem}$);相比在 NT 环境中显著增加根向茎的铜迁移系数($TF_{stem/root}$),增温降低了 Cu、F1Cu 和 CCu 处理($TF_{stem/root}$),但却在 F2Cu 处理显著增加($TF_{stem/root}$)。与 CK 相比,增温显著增加了根向茎的 Cu 迁移系数 229.6%,但却显著降低茎向叶、茎向穗的 Cu 迁移系数 63.87% 和 62.48%。增温显

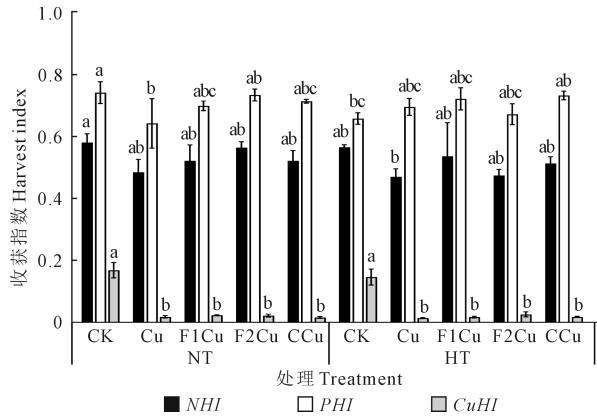


图 4 不同处理对氮、磷、铜收获指数的影响

Fig.4 Effects of different treatments on harvest index of nitrogen, phosphorus and copper

表 3 土壤改良剂应用对铜污染下小麦不同组织间铜迁移系数的影响

Table 3 Effects of soil amendments on copper transport coefficient between different tissues of wheat under copper pollution

温度 Temperature	处理 Treatment	迁移系数 Transport coefficient		
		$TF_{stem/root}$	$TF_{spike/stem}$	$TF_{leaf/stem}$
NT	CK	0.027±0.00e	10.889±2.11a	12.445±2.81a
	Cu	0.068±0.02b	0.318±0.02d	1.156±0.22c
	F1Cu	0.048±0.01bc	0.572±0.11d	1.593±0.45c
	F2Cu	0.055±0.01bc	0.467±0.02d	1.275±0.06c
	CCu	0.045±0.00c	0.387±0.07d	1.110±0.32d
HT	CK	0.089±0.04b	4.085±1.61b	4.497±1.21b
	Cu	0.049±0.00b	0.332±0.03d	1.452±0.38c
	F1Cu	0.041±0.01bcd	0.489±0.12d	1.176±0.18c
	F2Cu	0.105±0.04a	0.364±0.08d	0.984±0.17d
	CCu	0.036±0.00d	0.542±0.05c	0.813±0.05d

著增加了 F2Cu 处理中 Cu 由茎向叶 ($P<0.05$) 和茎向穗的迁移系数 22.8% 和 22.0%。但增温降低了 CCu 处理 Cu 由根向茎的迁移系数 20% ($P<0.05$) 和增加了 Cu 由茎向穗的迁移系数 40.05%。相比 Cu 处理, 无论 HT 或 NT 环境下, 添加改良剂均具有增加 Cu 由茎向穗的迁移系数的作用, 但综合来看, 常温条件下 F1Cu 处理能较大程度增加 Cu 由茎向穗的转运, 而在增温情形下 CCu 对其转运的促进更加明显。

3 讨论

本研究采用的被动夜间增温设施有效提高了农田土壤温度, 使冬小麦全生育期夜间土壤平均温度升高 0.5℃ 左右 (图 1), 实现了自然增温效果^[26]。本研究中 Cu 污染土壤在增温和正常条件下均降低了小麦各部位的生物量, 表明土壤 Cu 含量超标将

危害小麦生长。土壤中过多的 Cu 离子通过根细胞膜中的金属转运蛋白进入植株体内导致植株中 Cu 吸持量增加 (图 3), 在植物体内, Cu^+ 、 Cu^{2+} 与蛋氨酸、半胱氨酸和组氨酸侧链可能错误结合, 导致蛋白等大分子失活, 进而抑制小麦的生长发育, 造成干物质积累减少。土壤 Cu 污染导致小麦 Cu 积累量显著增加, 这可能是由于土壤中有效 Cu 含量的增加导致小麦主动吸收增加, 或过多的 Cu 导致根系细胞膜对 Cu^{2+} 的选择透过功能损伤^[27], 增加了对 Cu 的被动吸收所致。本研究显示, 增温下小麦的物质合成与积累呈增加态势, 这有助于提升小麦抵御 Cu 污染危害的能力。邓祎等^[1]发现夜间增温下小麦通过显著增加茎叶、穗和全株的生物量来缓解土壤 Cu 污染对小麦生长的抑制。但也有研究认为增温作用会导致小麦的抗逆性减弱, 从而使得小麦抵抗 Cu 污染的能力降低^[28]。这可能与小麦抗逆生理机制等有关, 具体有待进一步研究。腐殖酸和生物炭作为含碳有机物因其独特的表面特性及化学性质而常被用于生态修复。本研究表明施用腐殖酸改良 Cu 污染土壤能较大提升生物量, 但生物炭改良 Cu 污染土壤未显著改变小麦的生物量, 这可能一方面与腐殖酸和生物炭对吸附固定重金属 Cu 差异有关, 腐殖酸较高的吸附能力减轻了 Cu 污染对小麦生长的危害, 而且较大的腐殖酸用量能更好促进小麦的生物量 (表 1)。另一方面, 腐殖酸的肥料效应也有助于促进小麦的生长。但腐殖酸改良 Cu 污染土壤对小麦生物量的影响对增温不敏感, 这可能与腐殖酸为性质较稳定的多官能团的大分子有机物质, 其吸附固定重金属 Cu 的效应受增温的影响效应较小。有研究表明施用炭基材料会改变土壤理化性质, 例如 pH 值、电导率与阳离子交换量等^[15, 20, 22], 而增温在肥力不同的土壤上对植物生长表现出差异^[29]。据此推测, 除改良剂差异通过自身吸附固定作用造成重金属 Cu 活性差异外, 其也可能造成土壤供肥性能发生改变, 最终作用于增温与改良剂的复合影响效应。增温下生物炭改良的 Cu 污染土壤上小麦生物量显著增加, 则暗示未来全球变暖情形下一定程度上生物炭改良 Cu 污染土壤的效果将有所提升。

N、P 是植物生长的必需营养元素和植物体遗传物质、糖类、蛋白质等生物大分子的主要成分, 其含量和化学计量特征均能反映出植株养分利用和

元素平衡状况。本研究发现小麦植株中 N:P 比与 Cu 污染和腐殖酸、生物炭修复处理存在显著的相关关系,显然重金属 Cu 污染和土壤改良剂的施用改变了小麦对土壤中 N、P 的吸持,这可能与植物在环境因素变动的情况下会发展出强大的生理生化调节能力以适应环境变化有关。增温促进了小麦对 N、P 的吸收,魏雯琳等^[30]在草地植被上也有类似发现。平台前期研究就发现长期夜间增温会导致土壤无机氮库含量下降^[1,26,31]。增温促进了小麦的生长^[1]将导致小麦对 N 和 P 吸收的增加,但增温造成的小麦 P 素收获指数下降,可能影响小麦的品质。而在增温与常温条件下添加 2 种土壤改良剂均显著提高了小麦中 N:P 比。一方面这是由于植物在适应不同的环境条件时采取的生存策略不同,吸收与利用养分的方式也有很大差异。本研究就发现土壤 Cu 污染降低了小麦中 N、P 和 Cu 的收获指数。另一方面,也可能与土壤中 N 的供应发生改变有关,作物因土壤条件变化而导致养分吸收利用效率发生改变。陈刚等^[31]就发现土壤 Cu 污染浓度与增温和土壤氮库转化具有相关性。增温与改良剂应用对 Cu 污染胁迫下小麦的 P 素收获指数产生显著的交互效应,一方面增温导致正常小麦 P 素收获指数降低(图 4),另一方面土壤中施入生物炭和腐殖酸改良剂可增加土壤有机质、降低土壤容重和增加活性养分含量,二者的影响产生了显著的叠加效应。而植株中 N 和 P 素在不同部位的分配及其总吸收量差异,应该是一种植物适应不同环境的策略体现。

尽管 Cu 污染造成小麦植株中 Cu 积累增加,但增温没有显著增加 Cu 的吸持量,这与邓祎等^[1]研究结果一致,这可能是由于增温促进了小麦生长,导致了一定的“稀释效应”所致。研究表明,腐殖酸可与 Cu、Zn 络合,促进可还原和可交换态 Cu、Zn 转化为可氧化态 Cu、Zn,而生物炭会通过多糖和脂肪族化合物的降解从而抑制 Cu 和 Zn 的失活。土壤中施入生物炭和腐殖酸可增加土壤有机质,其对重金属污染物有着良好的吸附或氧化能力,显著影响重金属污染物的迁移性及其生物可利用度。本研究发现不同腐殖酸用量和生物炭改良材料的施用均可降低小麦地上部和总的 Cu 积累量。这可能由于施用生物炭和腐殖酸改良剂对铜的抑制和降解减少了土壤中 Cu 的有效性,进而减少小麦根外环

境 Cu 胁迫的压力,既减少小麦可吸收的土壤有效铜含量又减轻了 Cu 胁迫对小麦生长的抑制作用,导致植物根、叶和茎中的 Cu 含量与累积量下降,但改良剂的添加并未完成解除土壤中 Cu 污染小麦生物量积累的危害效应。本研究中土壤 Cu 污染与施用改良剂均对小麦 Cu 迁移系数产生影响,抑制了小麦由茎向叶片及穗部的迁移转运,这体现了小麦对 Cu 污染胁迫的适应策略,而小麦 Cu 收获指数的下降表明小麦为了抵御 Cu 污染胁迫将减少 Cu 素在遗传器官中积累。增温下 Cu 迁移系数由根向茎的显著增加和由茎向叶和穗的显著降低,表明小麦在增温环境中改变了对 Cu 的利用分配策略。常温和增温条件下添加改良剂处理均具有增加 Cu 素由茎向穗的迁移系数的作用,但增温显著降低了 Cu、F1Cu 和 CCu 处理由根向茎的 Cu 迁移系数,表明增温一定程度上有助于小麦抵御 Cu 污染胁迫对 Cu 的过度吸收,产生的生理机制尚待进一步研究。但增温下 F2Cu 处理中 Cu 由根向茎的迁移系数的显著增加,则显示添加改良剂用量要适度。增温下小麦 Cu 迁移系数由茎向穗在 F2Cu 处理中下降和在 CCu 处理中增加以及在 F1Cu 中无变化,均表明改良重金属 Cu 污染土壤的效果与改良剂的类型和添加量密切相关,其农业改良效果可能在未来气候条件下会发生改变,但增温未显著影响土壤 Cu 污染及添加改良剂处理的小麦中 Cu 的收获指数,可能暗示试验中升温对小麦的遗传生存策略影响较小。

4 结 论

土壤 Cu 污染将抑制冬小麦作物生长与吸收利用养分,施用腐殖酸改良 Cu 污染土壤能促进作物生长和增加 N、P 的吸收利用,但施用生物炭改良 Cu 污染土壤的效果较差。夜间增温将促进小麦各部位的物质积累,一定程度上缓解 Cu 污染对小麦生长和养分利用的抑制效应,并降低地上部 Cu 素由茎向穗的迁移,缓解 Cu 污染造成的危害。在试验所设定的条件下,夜间增温时施用 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 腐殖酸将更有助于提升小麦作物抵抗 Cu 污染的能力。

参 考 文 献:

- [1] 邓祎,寇太记,赖路宽,等. 夜间增温与农田铜污染对小麦吸持铜的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 903-909.
DENG Y, KOU T J, LAI L K, et al. Effects of night warming and soil

- copper contamination on copper retention in wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2021, 29(5): 903-909.
- [2] IPCC. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability* [R/OL]. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD>.
- [3] 杨广, 孔祥飞, 侯瑞星, 等. 增温对保护性耕作下冬小麦籽粒蛋白质含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 80-88.
YANG G, KONG X F, HOU R X, et al. Effects of warming on the protein content of winter wheat grains under the conservation tillage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(6): 80-88.
- [4] REN G Y, DING Y H, ZHAO Z C, et al. Recent progress in studies of climate change in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 958-977.
- [5] HOU R X, OUYANG Z, LI Y S, et al. Is the change of winter wheat yield under warming caused by shortened reproductive period? [J]. *Ecology and Evolution*, 2012, 2(12): 2999-3008.
- [6] HOU R X, XU X L, OUYANG Z. Effect of experimental warming on nitrogen uptake by winter wheat under conventional tillage versus no-till systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 116-125.
- [7] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1179-1184.
ZHANG J P, ZHAO Y X, WANG C Y, et al. Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1179-1184.
- [8] VOGEL E, DONAT M G, ALEXANDER L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(5): 054010.
- [9] 田思懿, 罗雪顶, 董京铭, 等. 夜间增温及免耕对冬小麦生长及养分吸收利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(9): 111-114.
TIAN S X, LUO X D, DONG J M, et al. Effects of nocturnal warming and no-tillage on growth and nutrient uptake and utilization of winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(9): 111-114.
- [10] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 681-686.
TIAN Y L, CHEN J, DENG A X, et al. Effects of asymmetric warming on the growth characteristics and yield components of winter wheat under free air temperature increased [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 681-686.
- [11] FANG S B, TAN K Y, REN S X, et al. Fields experiments in North China show no decrease in winter wheat yields with night temperature increased by 2.0 - 2.5°C [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(6): 1021-1027.
- [12] 公勤, 康群, 王玲, 等. 重金属铜对植物毒害机理的研究现状及展望[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(3): 469-475.
GONG Q, KANG Q, WANG L, et al. Toxicity mechanism of heavy metal copper to plants: a review [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(3): 469-475.
- [13] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4670-4683.
SHANG E P, XU E Q, ZHANG H Q, et al. Spatial-Temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4670-4683.
- [14] FU Q L, WENG N Y, FUJII M, et al. Temporal variability in Cu speciation, phytotoxicity, and soil microbial activity of Cu-polluted soils as affected by elevated temperature [J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 285-296.
- [15] 黄明逸, 张展羽, 翟亚明, 等. 咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 88-96.
HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHAI Y M, et al. Effects of biochar on coastal saline soil and maize yield under alternate irrigation with brackish and freshwater [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(21): 88-96.
- [16] 管方圆, 刘琛, 傅庆林, 等. 添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(2): 223-230.
GUAN F Y, LIU C, FU Q L, et al. Effects of straw addition on rice yield, soil carbon, nitrogen, and microbial community [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(2): 223-230.
- [17] MUHAMMAD W, BASHIR A, MUHAMMAD A, et al. Evaluation of humic acid application methods for yield and yield components of mungbean [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(15): 2269-2276.
- [18] COLLINS A, JOLANTA K, EWA S, et al. Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality [J]. *Agronomy*, 2022, 12(2): 283-283.
- [19] YEO S W, LING N L, SULAEMAN A. Physico-chemical properties of kaolin-humic acid [J]. *Journal Applied Science Agric*, 2015, 10(5): 13-18.
- [20] 刘志伟, 刘娟, 吴家森, 等. 生物炭和腐殖酸施用对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 220-229.
LIU Z W, LIU J, WU J S, et al. Effects of biochar and humic acid application on global warming potentials of CH₄ and N₂O in a rice-wheat rotation system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 220-229.
- [21] 韩泽邦, 吕玉兰, 邵忠思, 等. 生物炭对于旱胁迫下咖啡苗生长及非结构性碳水化合物化合物的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 87-96.
HAN Z B, LV Y L, SHAO Z S, et al. Effects of biochar on growth and non-structural carbohydrates of coffee seedlings under drought stress [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1): 87-96.
- [22] 黄占斌, 冯俊义, 马浩冉, 等. 腐植酸在旱地农业土壤改良和水肥增效中的作用研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 49-54.
HUANG Z B, FENG J Y, MA H R, et al. Effects of Humic acid on soil improvement and water and fertilizer use efficiency in dryland agriculture [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3):

- 49-54.
- [23] 寇太记, 侯宇朋, 王俪睿, 等. 夜间增温对小麦吸持铅素的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 139-147.
KOU T J, HOU Y P, WANG L R, et al. Effects of night warming on Pb retention of wheat [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 139-147.
- [24] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618-2018[S]. 北京: 中国环境出版集团.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-168.
LU R K. Methods for agrochemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146-168.
- [26] 寇太记, 程相涵, 贺娟, 等. 夜间增温对铅危害下小麦物质积累分配与根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 221-227.
KOU T J, CHENG X H, HE J, et al. Effects of nighttime warming on dry matter accumulation and distribution and root growth of wheat under soil lead stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 221-227.
- [27] 郭仰东, 张磊, 李双桃, 等. 蔬菜作物应答非生物逆境胁迫的分子生物学研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1167-1181.
GUO Y D, ZHANG L, LI S T, et al. Progresses in research on molecular biology of abiotic stress responses in vegetable crops [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(6): 1167-1181.
- [28] 申志强, 元琳, 李梦鸽, 等. 夜间增温对小麦耐铜特性的影响[J]. 现代农业科技, 2019, (13): 6-8, 11.
SHEN Z Q, YUAN L, LI M G, et al. Effect of nighttime warming on copper tolerance of wheat [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, (13): 6-8, 11.
- [29] 冯茜, 金丽惠, 薛海清, 等. 增温和土壤肥力对大豆光合特征和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(35): 111-117.
FENG Q, JIN L H, XUE H Q, et al. Effects of elevated temperature and soil fertility on photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(35): 111-117.
- [30] 魏雯琳, 邱晓杰, 王文瑞, 等. 季节增温对内蒙古半干旱草地土壤化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(8): 1988-1999.
WEI W L, QIU X J, WANG W R, et al. Effects of seasonal warming on soil stoichiometry in semiarid grassland of Inner Mongolia [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 1988-1999.
- [31] 陈刚, 程相涵, 寇太记, 等. 夜间增温与铜污染对麦田土壤无机氮库的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 266-273.
CHEN G, CHENG X H, KOU T J, et al. Effects of nighttime warming and copper pollution on inorganic nitrogen pool in wheatland-soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 266-273.

(上接第 188 页)

- [27] 赵佐平. 陕西苹果, 猕猴桃果园施肥技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHAO Z P. The fertilizer application technology in apple and kiwifruit orchards in Shaanxi province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [28] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, (13): 98-105.
SONG N, WANG F X, YANG C F, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, (13): 98-105.
- [29] ZHANG Z H, TARIQ A, ZENG F J, et al. Nitrogen application mitigates drought-induced metabolic changes in *Alhagi sparsifolia* seedlings by regulating nutrient and biomass allocation patterns [J]. Plant Physiology and Biochemistry: PPB, 2020, 155: 828-841.
- [30] KAHSAY W S, MORAL M T. Effects of nitrogen and phosphorus on potatoes production in Ethiopia: A review [J]. Cogent Food & Agriculture, 2019, 5(1): 2-5.
- [31] 马波, 黄勇, 田军仓. 幼龄期压砂地枸杞产量和品质多指标耦合灌溉制度优化[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 140-147.
MA B, HUANG Y, TIAN J C. Optimization of irrigation scheduling based on yield-quality multi-index coupling at juvenile stage of *Lycium barbarum* L. in gravel-mulched field [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 140-147.
- [32] 李憑峰, 谭煌, 王嘉航, 等. 滴灌水肥条件对樱桃产量、品质和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 236-246.
LI P F, TAN H, WANG J H, et al. Effect of water and fertilizer conditions under drip irrigation on yield, quality of cherry and physicochemical properties of soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 236-246.
- [33] 王燕丛, 刘浩, 孙景生, 等. 调亏灌溉对日光温室青椒品质和耗水规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 73-77.
WANG Y C, LIU H, SUN J S, et al. Effects of regulated deficit irrigation on quality and water consumption of solar greenhouse green eggplant [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 73-77.
- [34] GAO Y L, WANG J H, YIN M H, et al. Appropriate water and nitrogen regulation improves the production of wolfberry [J]. Agronomy, 2024, 14: 607.
- [35] 徐林明, 林志炳, 李美娟, 等. 基于模糊 Borda 法的动态组合评价方法及其应用研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(2): 165-173.
XU L M, LIN Z B, LI M J, et al. A dynamic combined evaluation method based on fuzzy Borda and its application [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(2): 165-173.