

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

寇太记¹,程相涵¹,贺娟¹,王俪睿¹,张慧智^{2,3},陈俊红^{2,3}

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023;2.北京市农林科学院农业信息与经济研究所 北京 100097;
3.农业部华北都市农业重点实验室,北京 100097)

摘要:为揭示气候变暖与土壤铅污染对农作物及其地下根系生长的影响,利用夜间增温系统研究了4种土壤铅水平下冬小麦关键生育期的干物质积累及其地上地下分配、收获指数、根系活性的变化。结果表明,夜间增温提升小麦全生育期的土壤温度0.6~1.4℃,增温效果明显。未污染处理的小麦蜡熟期总生物量与籽粒产量在夜间增温下显著提高,但收获指数却显著降低。铅污染加重造成小麦籽粒产量与总生物量下降,但夜间增温使铅污染处理小麦的产量显著增加14.7%~19.1%、总生物量显著增加13.0%~26.5%,其收获指数增加,表明夜间增温提高了小麦抗铅污染危害的能力。增温对提高小麦根干物质积累表现为正效应而铅污染胁迫则表现为负效应,增温具有增加小麦根系干重及根冠比的趋势,但受铅污染程度、作物生长时期制约。小麦根系活性随土壤铅污染加重而下降,而夜间增温具有提高低铅土壤小麦各时期根系活性的趋势,夜间增温在抽穗期显著提高了4个铅处理的小麦根系活性(12.2%~40.2%),增温下根系活性的增强有助于作物抵御铅污染危害。研究结果表明增温对小麦地下系统的正效应影响有助于提高其抵御铅污染胁迫的能力。

关键词:夜间增温;冬小麦;土壤污染;铅;干物质;根系生长

中图分类号:S512.1; S162.5 **文献标志码:**A

Effects of nighttime warming on dry matter accumulation and distribution and root growth of wheat under soil lead stress

KOU Taiji¹, CHENG Xianghan¹, HE Juan¹, WANG Lirui¹, ZHANG Huizhi^{2,3}, CHEN Junhong^{2,3}

(1. Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

2. Institute of Agricultural Information and Economics, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

3. Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Effects of climate warming and soil lead (Pb) contamination on growth of crops and their underground roots remain as urgent concerns. In this study, responses of winter wheat (vs. Zhongmai 175) in dry matter accumulation and its distribution of the above and belowground, harvest index and its root activity in key growth period to nighttime warming (NW) and lead (Pb) contamination were investigated. Results showed that the NW obviously enhanced average soil temperature with range of 0.6~1.4℃ during wheat growth period. The NW significantly increased total biomass and yield of wheat in non-Pb pollution at dough stage, while harvest index was observably decreased. Compared with decreases of total biomass and yield along with the increasing Pb concentration under control environment, the NW significantly increased wheat yield by 14.7%~19.1%, total biomass by 13.0%~26.5% and harvest index, further indicating that the NW improved the ability of wheat resisting the Pb pollution hazard. The NW basically showed a positive effect on dry matter accumulations of roots, while Pb pollution stress did a negative effect on those. The NW basically raised root dry matter and the ratios of root to shoot biomass, but they were restricted by the level of Pb pollution and wheat growth stage. The root activities of wheat decreased with increasing Pb concentration in soil. However, lower soil Pb concentration basically improved the root activities at

different growth periods under the NW. The NW significantly increased the root activities by 12.2%~40.2% of four Pb treatments in heading stage. The enhancement of root activities under the NW helped the crop resist Pb stress. Our findings shed light on the positive effects of the NW on wheat root system, contributing to improve the ability of wheat resisting soil Pb stress.

Keywords: nighttime warming; winter wheat; soil pollution; lead; dry matter; root growth

我国北方冬小麦生产区春冬季和夜间升温明显^[1-2],而且部分农业土壤重金属铅(Pb)等超标^[3-4],冬小麦生产遭受气候变暖与Pb胁迫等多重压力。绝大多数增温试验发现,气候变暖有利于我国北方冬小麦生产^[5-7],并且夜间增温改变了冬小麦对养分的吸收利用状况^[7-8]。Pb危害作物生长既受其含量制约^[9-10],又与作物抗Pb胁迫的阈值有关^[11-12],土壤Pb危害每年均会导致部分小麦中Pb含量超标^[13]。寇太记等^[11]发现夜间增温改变了小麦对Pb的吸收分配,气候变暖给判断土壤Pb胁迫对小麦安全生产的影响提出了新挑战。根系作为植株吸收养分和水分的重要器官,是植物响应气候变暖与土壤重金属胁迫的调节器^[14],它的发育影响植株地上部生长与优质生产。阐明小麦生长与地下根系对增温与土壤Pb污染双重胁迫的响应特征,对于理解冬小麦的抗逆响应机理具有重要意义。现有文献证实,夜间增温影响小麦的根系形态分布^[15]和麦田土壤呼吸速率^[16]。根系活性是表征作物抗逆响应的重要指标,且密切影响小麦产量形成^[5,16],但增温以及增温下Pb胁迫对小麦根系影响的研究还少见报道。因此,本试验借助多年夜间增温平台^[11],通过盆栽试验研究土壤Pb胁迫下关键生育期小麦物质积累及其地下分配、根系活性对夜间增温的响应特征,为全球变暖与重金属污染风险加剧背景下认知冬小麦抗逆响应和制定安全生产调控策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与增温平台系统概况

研究区属于暖温带半干旱半湿润季风气候,年均气温13.7℃,降水量650.2 mm左右,以雨养冬小麦-夏玉米连作农业为主。田间增温实验系统位于河南科技大学周山校区农场(34°38'N,112°22'E),由增温区(NW)与常温对照区(CK)两部分构成,本研究增温区采用被动式夜间增温模式,即NW于增温时段(19:00到次日7:00)在小麦冠层正上方20 cm处覆盖反射膜但四周无遮挡,在冬小麦全生育期(除降水时段停止)增温,其设计与控制参见文献^[11]。试验土壤采自我国重要的工业基地洛阳某

金属Pb矿冶炼厂附近,属铅污染土壤,选择与冶炼厂距离不同但理化性质和肥力较一致的农田耕层,土壤类型为褐土,供试土壤理化性质为:容重1.12 g·cm⁻³、pH 7.8、有机质9.1 g·kg⁻¹、全氮1.28 g·kg⁻¹、有效磷2.4 mg·kg⁻¹、速效钾105.5 mg·kg⁻¹、全Pb 36.8~415.7 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

田间盆栽试验采用裂区设计,增温处理为主处理,分夜间增温环境(NW)与正常环境(CK)2个水平;Pb处理为副处理,设置Pb_{ck}(对照,背景值11.4 mg·kg⁻¹)、Pb₀(36.8 mg·kg⁻¹)、Pb₁(153.4 mg·kg⁻¹)、Pb₂(415.7 mg·kg⁻¹)4个浓度,12次重复。参照国家《土壤环境质量标准(GB15618—2018)》,Pb_{ck}、Pb₀、Pb₁均低于土壤Pb污染风险筛选值170 mg·kg⁻¹(pH>7.5),而Pb₂介于风险筛选值与管控值(1 000 mg·kg⁻¹,pH>7.5)之间。试验盆钵为市售PVC大桶(高60 cm,直径50 cm),装盆前,拣去土壤中根茬、石块等侵入物,每个Pb浓度土壤均过2 cm孔径筛后装盆,每盆装干土35 kg。在NW和CK区域按南北方向挖取可摆放各48个盆钵(分4列平行摆放)的长方形土坑,将盆栽随机排列埋入土中,以盆钵上沿高出土表2 cm为宜,共96盆。每盆施纯氮2.0 g(约合135 kg·hm⁻²)、纯磷(P₂O₅)1.4 g(约合90 kg·hm⁻²)和纯钾(K₂O)1.4 g(约合90 kg·hm⁻²)无机肥,其中,50%氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙)、钾肥(氯化钾)一次性溶解于水后浇于各盆中,并向每盆中补水使土壤含水量为70%饱和含水量,剩余50%氮肥在返青定植后溶水施入;浇水2 d后,于2015年10月19日按每盆35株播种冬小麦(中麦175),返青期每盆定植25株,于2016年5月27日收获。在盆栽四周种植保护行10行。分别在苗期(2015年11月19日)、拔节期(2016年3月23日)、抽穗期(2016年4月25日)、蜡熟期(2016年5月21日)共4个时期采集植株样品,每处理随机选取生长均匀一致的3盆进行测定。整个生育期除特别干旱防止植株死亡进行每盆等量水(2 L)灌溉外,基本不进行人工灌水。

从冬小麦播种到收获除降水的19 d外增温累积191 d,全生育期利用温湿度记录仪(Elitech, Re-

4,浙江精创电力科技有限公司)连续监测冠层温度和耕层土壤温度,每 10 min 记录 1 次,日均土壤温度见图 1,NW 和 CK 的土壤温度变化范围分别为 1.0~19.0℃和 0.4~17.6℃,全生育期土壤增温幅度为 0.6~1.4℃,平均增温 1.08℃。

1.3 测定内容和方法

2016 年 5 月 30 日小麦按地上和根系不同组织部位分别进行收获,取样时将整盆从土壤中取出并剪去小麦植株地上部分,将根系从盆中挖出后用水冲洗去残余泥土,收集根系样品并用蒸馏水冲洗处理。然后将每株根系样品分成 2 份,分别测定鲜重,并计算各自占总根鲜重的比例,1 份用于测定根系活力,1 份烘干用于测定根系干重,并通过后者鲜重及占比折算获得根系总干重;地上部分为茎、叶、颖(包括颖壳、穗轴)、籽粒,分别称量干重;总生物量为地上部与根系生物量之和;收获指数为单株籽粒重与地上部生物量之比;根冠比为根系与地上部生物量之比。根系活力采用改良氯化三苯基四氮唑(TTC)-比色法测定^[17]。干重测定则先以 105℃ 的温度杀青 30 min,随后以 70℃ 烘 48 h 后称重获得。

1.4 统计分析方法

数据利用 SPSS 16.0 统计软件,通过 ANOVA 对不同温度与 Pb 污染因素的效应进行方差统计分析,显著水平为 $P < 0.05$,利用 Excel 2003 和 Origin 75 制图。

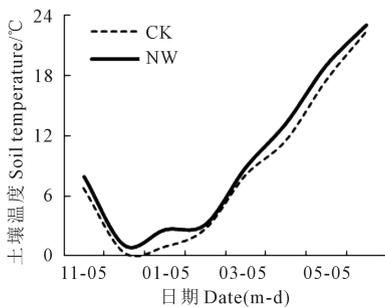


图 1 2015—2016 年田间被动式夜间增温(NW)和对照(CK)的土壤温度变化

Fig.1 Dynamic of soil temperature by passive nighttime warming (NW) and control (CK) in field during 2015 to 2016

2 结果与分析

2.1 夜间增温与铅污染对蜡熟期小麦生物量与籽粒产量的影响

由表 1 知,Pb_{ck}处理下,夜间增温显著增加了蜡熟期小麦籽粒产量 8.5%、总生物量 12.4%,尽管显著降低了收获指数,但增强了小麦抵抗 Pb 污染危害的能力。正常与夜间增温环境下,小麦叶重、籽粒产量与总生物量基本上均随 Pb 含量的增加呈降低趋势,而收获指数则呈升高趋势。在 CK 环境中,Pb 污染显著降低了单株小麦籽粒产量 7.0%~26.4%和总生物量 6.7%~19.9%,未显著影响收获指数。相比 CK 环境,夜间增温显著增加 Pb 污染处理下单株小麦茎重(10.2%~15.0%)、叶重(28.6%~33.3%)、籽粒产量(8.5%~43.2%)、总生物量(12.4%~26.6%)和收获指数(除 Pb_{ck}处理),增加颖重 8.8%~16.2%(仅 Pb₁和 Pb₂处理下达显著差异)。表 2 的因素分析也表明,增温与 Pb 污染因素均显著影响蜡熟期的叶重、颖重、籽粒产量和总生物量,Pb 污染因素显著影响收获指数,二者对颖重、总生物量和收获指数呈显著的交互效应。

2.2 夜间增温与铅污染对小麦根系干重的影响

各处理小麦根干重从苗期到蜡熟期均呈先增后降特征并在抽穗期达到最大值,但其对夜间增温的响应受生育期与土壤 Pb 污染程度制约(表 2,表 3)。Pb 污染具有抑制根干物质积累的趋势,抑制程度随污染程度增大而加重(表 3),在苗期、抽穗期、蜡熟期 Pb 因素显著影响根干物质积累(表 2)。与 Pb_{ck}相比,生长中后期(抽穗期、蜡熟期)Pb 污染下根干重分别显著降低 6.8%~44.5%(CK)和 21.7%~41.8%(NW)。增温因素显著影响苗期、抽穗期的根干物质积累(表 2),与 CK 环境相比,夜间增温在苗期、抽穗期分别显著增加全部处理的根干重 22.2%~60.0%、5.5%~7.7%和蜡熟期 Pb_{ck}处理的根干重 15.8%。双因素分析表明,夜间增温、Pb 污染及其二

表 1 夜间增温和铅污染对蜡熟期小麦总生物量、籽粒产量和收获指数的影响

Table 1 Effects of nighttime warming and soil Pb pollution on total biomass, grain and harvest index of wheat in dough stage

处理 Treatment	茎重/(g·株 ⁻¹) Stem weight /(g·plant ⁻¹)		叶重/(g·株 ⁻¹) Leaf weight /(g·plant ⁻¹)		颖重/(g·株 ⁻¹) Glume weight /(g·plant ⁻¹)		籽粒产量/(g·株 ⁻¹) Grain yield /(g·plant ⁻¹)		总生物量/(g·株 ⁻¹) Total biomass /(g·plant ⁻¹)		收获指数 Harvest index	
	CK	NW	CK	NW	CK	NW	CK	NW	CK	NW	CK	NW
Pb _{ck}	1.33±0.03a	1.53±0.03a	0.21±0.01a	0.27±0.01a	0.45±0.02a	0.49±0.02a	2.01±0.05a	2.18±0.01a	4.18±0.09a	4.70±0.06a	0.503±0.006ab	0.489±0.002a
Pb ₀	1.22±0.03b	1.35±0.03b	0.19±0.01ab	0.25±0.01ab	0.44±0.01a	0.48±0.03a	1.87±0.04b	2.15±0.05ab	3.90±0.03b	4.41±0.02b	0.502±0.001b	0.507±0.002b
Pb ₁	1.20±0.02b	1.34±0.02b	0.18±0.01b	0.24±0.01bc	0.42±0.01a	0.47±0.01a	1.79±0.04b	2.13±0.02b	3.75±0.03c	4.35±0.04b	0.503±0.000b	0.509±0.003b
Pb ₂	1.18±0.03b	1.30±0.03b	0.17±0.01b	0.22±0.01c	0.37±0.01b	0.43±0.01b	1.48±0.04c	2.12±0.01b	3.35±0.01d	4.24±0.03c	0.509±0.001a	0.519±0.001c

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letters in the column indicate differences among treatments at the 0.05 level. The same as below.

表 2 夜间增温与铅污染对小麦生物量分配、根冠比和根活性的影响效应

Table 2 Influencing effects of temperature and soil Pb pollution on the accumulation and allocation of biomass, the ratio of root to shoot and root activity of wheat

项目 Item	生育期 Growth period	Temperature		Pb		Temperature×Pb	
		<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
茎重 Stem weight		49.726	0.000	1.621	0.116	0.716	0.559
叶重 Leaf weight		115.488	0.000	11.125	0.001	0.157	0.923
颖重 Glume weight	蜡熟期	190.039	0.000	23.037	0.000	14.476	0.000
籽粒产量 Grain yield	dough stage	13.844	0.002	5.097	0.014	0.181	0.907
总生物量 Total biomass		396.170	0.000	71.997	0.000	7.938	0.002
收获指数 Harvest index		1.167	0.298	6.896	0.004	4.098	0.028
根重 Root weight	苗期 Seedling stage	8.310	0.012	9.337	0.001	0.258	0.854
	拔节期 Jointing stage	4.591	0.080	0.336	0.799	0.118	0.948
	抽穗期 Heading stage	10.517	0.006	25.042	0.000	0.633	0.606
	蜡熟期 Dough stage	1.056	0.321	6.459	0.006	4.217	0.025
根冠比 Root-shoot ratio	苗期 Seedling stage	412.833	0.000	38.334	0.000	15.805	0.000
	拔节期 Jointing stage	2.618	0.128	1.994	0.105	0.921	0.456
	抽穗期 Heading stage	0.429	0.523	218.851	0.000	2.003	0.160
	蜡熟期 Dough stage	13.577	0.002	33.872	0.000	5.183	0.013
根活性 Root activity	苗期 Seedling stage	0.141	0.713	0.314	0.815	8.337	0.002
	拔节期 Jointing stage	0.056	0.817	0.627	0.609	0.881	0.475
	抽穗期 Heading stage	9.061	0.009	2.294	0.123	0.197	0.897
	蜡熟期 Dough stage	0.597	0.453	0.796	0.516	1.178	0.354

注: Temperature: 夜间增温; Pb: Pb 污染。

Note: Temperature; night warming; Pb; soil Pb pollution.

表 3 夜间增温和铅污染对小麦根系干重的影响/(g·株⁻¹)Table 3 Effects of nighttime warming and soil Pb pollution on root dry matter accumulation/(g·plant⁻¹)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		蜡熟期 Dough stage	
	CK	NW	CK	NW	CK	NW	CK	NW
Pb _{ck}	0.021±0.001a	0.032±0.001a	0.033±0.001a	0.034±0.001a	0.363±0.002a	0.383±0.006a	0.190±0.005a	0.230±0.005a
Pb ₀	0.020±0.001ab	0.032±0.001a	0.033±0.001a	0.033±0.001a	0.247±0.007b	0.263±0.005b	0.177±0.005b	0.180±0.003b
Pb ₁	0.019±0.001ab	0.025±0.002b	0.030±0.001b	0.032±0.001a	0.223±0.004c	0.237±0.005c	0.167±0.005b	0.170±0.007bc
Pb ₂	0.018±0.001b	0.024±0.001b	0.030±0.001b	0.032±0.001a	0.207±0.005d	0.223±0.004d	0.153±0.002c	0.163±0.003c

因素的交互效应对拔节期的根干物质积累均无影响,但其交互效应在蜡熟期显著影响根干物质积累(表 2)。

2.3 夜间增温与铅污染对小麦根冠比的影响

小麦根冠比(RSR)是反映根系与地上部干物质积累是否协调的重要指标。随生育期的推进,各处理的 RSR 在 4 个生育期基本呈现大-小-次大-最小的变化规律(表 4)。Pb 污染降低了苗期、抽穗期和蜡熟期小麦的 RSR(蜡熟期 CK 环境下 Pb₀ 处理除外),尽管 Pb₁ 和 Pb₂ 处理的 RSR 在 NW 和 CK 环境下 4 个时期较 Pb_{ck} 和 Pb₀ 处理显著降低,但 Pb₁ 和 Pb₂ 处理间的 RSR 几乎无显著差异;Pb₀ 较 Pb_{ck} 处理的 RSR 在 CK 环境中下均无差异,而在 NW 环境中则显著降低(拔节期除外)(表 4)。相比 CK, NW 显著增加 4 个时期 Pb_{ck} 处理的 RSR 5.6%~20.0%,也显著增加了苗期(5.9%~14.3%)、拔节期(12.5%~25.0%)Pb 处理(Pb₀, Pb₁, Pb₂) 的 RSR 和抽穗期的

RSR 7.1%~18.2%(Pb₂ 处理除外, $P=0.056$)。增温与 Pb 污染在苗期和蜡熟期对 RSR 的影响呈显著的交互效应(表 2)。

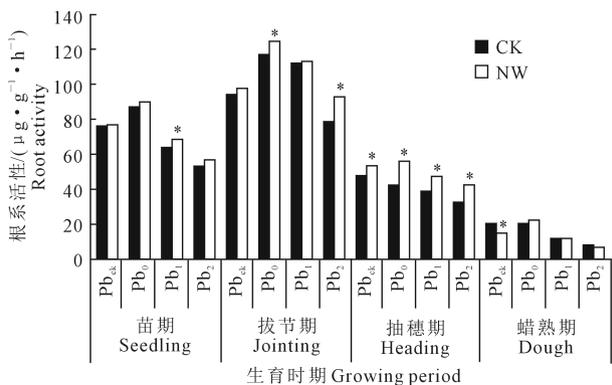
2.4 夜间增温与铅污染对小麦根系活性的影响

各处理的小麦根系活性均随生育期推进呈现先增后降的特征,在拔节期达到高峰后快速下降,表现为生长前期高于生长中后期,增温在蜡熟期以前具有增加小麦根系活性的趋势(图 2)。随着土壤 Pb 含量增加,CK 环境下小麦根系活性在苗期、拔节期呈先增后降变化规律并在 Pb₀ 处理达到最大,在抽穗期和蜡熟期则基本呈现逐渐降低态势, Pb_{ck} 处理下达到最大;而 NW 环境下小麦根系活性在 4 个生育期均表现为先增后降的变化特征,均在 Pb₀ 处理达到最大。忽略 Pb 浓度差异,增温显著增加了苗期 Pb₁ 处理(8.2%)、拔节期 Pb₀(5.9%)和 Pb₂ 处理(18.1%)、抽穗期各 Pb 浓度处理(12.2%~40.2%)和显著降低蜡熟期 Pb_{ck} 处理(29.6%)的小麦根系活性。

表 4 夜间增温和铅污染对小麦根冠比的影响

Table 4 Effects of nighttime warming and soil Pb pollution on root-shoot ratio

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		蜡熟期 Dough stage	
	CK	NW	CK	NW	CK	NW	CK	NW
	Pb _{ck}	0.18±0.006a	0.19±0.002a	0.08±0.003a	0.10±0.004a	0.14±0.004a	0.15±0.003a	0.05±0.004a
Pb ₀	0.17±0.004a	0.18±0.004b	0.08±0.003a	0.10±0.002a	0.11±0.003b	0.13±0.004b	0.05±0.002a	0.05±0.003b
Pb ₁	0.15±0.005b	0.17±0.004c	0.08±0.008a	0.10±0.001a	0.10±0.004c	0.11±0.005c	0.04±0.002b	0.04±0.002c
Pb ₂	0.14±0.005b	0.16±0.006c	0.08±0.001a	0.09±0.004b	0.09±0.006c	0.10±0.005c	0.04±0.001b	0.04±0.001c



注: * 表示相同处理增温与对照间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: * indicates differences at the 0.05 level in the same treatment between nighttime warming and no warming treatments.

图 2 夜间增温与铅污染处理对小麦根系活性的影响

Fig.2 Effects of nighttime warming and soil Pb pollution on root activity at different growth stages

双因素分析进一步表明(表 2),增温显著影响抽穗期的根系活性,增温与 Pb 污染因素在苗期对小麦根系活性的影响呈显著的交互效应。

3 讨论

野外自然条件下的生态系统模拟增温试验可以定量分析和评估气候变暖对作物的影响及其机理^[18]。夜间被动式增温模式因其可以模拟非对称增温^[1-2],且其更接近于真实环境以及低成本而被国内外广泛应用^[19]。本研究所采用的夜间被动式增温在冬小麦生育期达到了较好的增温幅度与效果(图 1),且被本平台^[11,20]和其他研究^[21]的前期增温结果所佐证。由于温度是作物生长发育的关键环境要素之一,本研究发现夜间增温增加了小麦蜡熟期的总生物量与籽粒产量,其他模拟增温试验在成熟期也有类似发现^[18]。尽管各研究存在时期差异,但均是由于温度增加促进了小麦生长与干物质的积累所致。然而,夜间增温降低了小麦的收获指数,暗示增温尽管促进了作物光合物质合成与籽粒生产,但降低了光合同化物转化为籽粒的能力,增加的光合产物更多储存在营养器官中。土壤 Pb 污染加剧不利于蜡熟期的叶重、颖重、籽粒产量和总

生物量的提高,这是 Pb 胁迫对植物生长危害的结果^[9]。本研究发现,随 Pb 含量增加小麦收获指数增加,表明作物在逆境中会优先确保种子生成以保证物种延续,而增温与 Pb 污染所呈现的对颖重、总生物量和收获指数影响的显著交互效应,则更进一步说明气候变暖将促进小麦碳水化合物合成,但其被更多转移到生殖器官用于确保遗传物质的生产来抵御 Pb 胁迫危害。

根系已成为植物应对气候变化的重要研究因子^[14],是确保植物良好生长与物质形成的重要器官和基本保证^[22];本研究即发现较高的小麦总生物量与籽粒产量均对应一个高的根系干物质积累,这与正常或是增温环境无关。夜间增温影响冬小麦根系干物质的积累与分配,其他研究也有类似发现^[8,21,23]。尽管有研究认为根干重和次生根数不如根系活性与产量的关系密切^[16],但根干重与 RSR 仍是反映同化产物在植物体内分配及逆境条件下植物自身调节情况的重要指标。本研究发现,RSR 在 4 个生育期基本呈现大-小-次大-最小的变化特征,表明在苗期小麦优先促进根系生长,拔节期地上部快速生长导致 RSR 变小,抽穗期 RSR 又变大可能与营养生长转向生殖生长有关,一方面根系生长加速以满足肥水需求,另一方面地上部生长放缓,地下被动增加光合产物贮存,而蜡熟期根系逐渐衰亡^[24]导致 RSR 下降明显。夜间增温下各时期的小麦 RSR(表 4)和根干重均较大,Liu 等^[23]认为这是植物响应增温时优先地下分配所致。尽管生育后期小麦根系逐渐衰亡^[24],但夜间增温下小麦在中期积累的较大生物量与较高的 RSR^[16]仍导致了蜡熟期夜间增温下无 Pb 处理小麦的根干重相对较大。重金属 Pb 胁迫将对植物造成伤害^[9]。本研究中随着 Pb 含量增加蜡熟期小麦籽粒产量与总生物量降低,由于 Pb 胁迫会抑制茎根生长,这是地下根系生长随 Pb 胁迫程度增加受到更大程度的抑制^[9-10,25]所致。各时期小麦的 RSR 与根干重随着 Pb 污染程度的增加而降低也印证了这一点。夜间增温下 Pb 污染处理小麦的 RSR 和根干重(如苗

期)显著增加,而且增温与 Pb 污染在蜡熟期对 RSR 和根干重的影响呈现显著交互效应,表明气候变暖使植物将更多的光合碳分配到地下促进根系生长以确保植物的抗逆生长,这有利于小麦抵御 Pb 胁迫。不同生育期小麦根干重积累对夜间增温与 Pb 的响应有所不同,其他研究者也有类似发现^[8,10-11,14-15],这主要是由于小麦的适应差异造成的。

根系活力是植物旺盛生长的基础^[26]。本研究中根系活力随生育进程的变化特征与前人研究一致^[24]。在小麦生育前期根系旺盛生长,确保了水肥供应与物质快速积累,生长中后期根系活力随着老化进程下降是必然的趋势。本研究发现,土壤中少量 Pb($36.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)会提高小麦营养生长期的根系活性,Pb 含量继续增加则抑制根系活性;而生长后期则随 Pb 含量的增加小麦根系活性下降,这可能是由于 Pb 在作物主动或被动吸收其他微量元素过程中产生了竞争^[9],促进了前期的根系活性,而生育后期 Pb 胁迫对小麦根系损害的累积效应与根系自然老化导致根系活性降低。胡智勇等^[27]认为温度升高会促进根系活性,但本研究发现增温下根系活性在营养生长阶段增强而在生殖生长末段下降。这种差异应是由于观测阶段的不同和增温使作物早熟导致根系过早老化^[8]所致。然而,夜间增温使少量 Pb 含量下小麦的根系在全生育期均呈现最高的活性,且具有增加 Pb 污染处理小麦根系活性的趋势,表明夜间增温通过促进作物根系的前期生长与延缓后期老化来适应 Pb 胁迫影响,并从增温下根干物质积累与 RSR 相比 CK 环境处理较高的结果上(表 3)得以印证。而增温与 Pb 污染因素在苗期对小麦根系活性的影响呈显著的交互效应,暗示气候变暖可以通过提升小麦幼苗期的根系活性来抵御 Pb 胁迫的不利影响,这将增强小麦幼苗在 Pb 污染下的生存能力。寇太记等^[11]前期研究已明确夜间增温能降低铅胁迫农田小麦地上部植株铅积累量,即减少粮食遭受铅污染的潜在风险。夜间增温环境中小麦根系活性增强下根系吸持重金属 Pb 及减缓 Pb 向地上部转移的机制,则有待进一步研究。

4 结 论

1) 土壤中 Pb 污染增加会降低小麦生物量与籽粒产量,夜间增温会促进土壤 Pb 污染下小麦的物质积累与产量形成,提高小麦抗 Pb 污染危害的能力。

2) 土壤 Pb 污染不利于小麦生物量的地下分配和根系的干物质积累,较低 Pb 含量可促进夜间增温小麦环境下全生育期的根系活力,正常环境下抽穗-蜡熟期的根系活力随 Pb 污染加剧而降低。

3) 夜间增温通过提高小麦生育早中期的根系活力、各时期的干物质积累与地下分配量,来抵御 Pb 污染胁迫对小麦干物质积累的不良影响,但其受 Pb 污染程度、作物生长时期制约。

参 考 文 献:

- [1] KANG S, ELTAHIR E A B. North China plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2894.
- [2] YUAN N M, LU Z H. Warming reduces predictability[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(1): 13-14.
- [3] 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.
- [4] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). <http://www.gov.cn/govweb/foot/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination [EB/OL]. (2014-04-17). <http://www.gov.cn/govweb/foot/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [5] 程相涵, 寇太记, 王俯睿, 等. 夜间增温对小麦-土壤系统影响的研究进展[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(6): 23-28. CHENG X H, KOU T J, WANG L R, et al. Research progress in the effects of nighttime warming on wheat ecosystem[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(6): 23-28.
- [6] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 238: 106238.
- [7] 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 night warming and no-tillage on growth and nutrient uptake and utilization of winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(9): 111-114.
- [8] 张明乾, 陈金, 郭嘉, 等. 夜间增温对冬小麦根系生长和土壤养分有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 445-450. ZHANG M Q, CHEN J, GUO J, et al. Effects of nighttime warming on winter wheat root growth and soil nutrient availability [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 445-450.
- [9] 段德超, 于明革, 施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 287-296. DUAN D C, YU M G, SHI J Y. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants [J]. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 287-296.
- [10] 巴青松, 宋瑜龙, 张兰兰, 等. 根施水杨酸对铅胁迫下小麦根系生长发育的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 208-213.
BA Q S, SONG Y L, ZHANG L L, et al. Effects of root-applying salicylic acid on the growth and development of wheat roots under lead stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1): 208-213.
- [11] 寇太记, 侯宇朋, 王偲睿, 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.
- [12] 匡少平, 徐仲, 张书圣. 玉米对土壤中重金属铅的吸收特性及污染防治[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(1): 28-31.
KUANG S P, XU Z, ZHANG S S. Phytoavailability of corns to heavy metal Pb content in the soils and its benefit to the environmental amelioration[J]. Journal of Safety and Environment, 2002, 2(1): 28-31.
- [13] 郭健, 姚云, 赵小旭, 等. 粮食中重金属铅离子、镉离子的污染现状及对人体的危害[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(3): 33-35, 85.
GUO J, YAO Y, ZHAO X X, et al. Pollution status of lead and cadmium ions in grain and its harm to human [J]. Grain Science and Technology and Economy, 2018, 43(3): 33-35, 85.
- [14] OBER E S, ALAHMAD S, COCKRAM J, et al. Wheat root systems as a breeding target for climate resilience[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2021, 134(6): 1645-1662.
- [15] HOU R, OUYANG Z, HAN D, et al. Effects of field experimental warming on wheat root distribution under conventional tillage and no-tillage systems[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(5): 2418-2427.
- [16] 张彭良. 模拟增温对春小麦生长发育、根区土壤呼吸速率及酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(10): 55-59.
ZHANG P L. Effects of simulated enhancement of temperature on growth and root soil respiration rate and enzyme activity of spring wheat [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(10): 55-59.
- [17] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1990.
ZHANG Z L. Experimental guidance of Plant Physiology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [18] FANG S B, TAN K Y, REN S X, et al. Field 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.
- [19] 张锦源, 李彦生, 于镇华, 等. 作物-土壤氮循环对大气 CO₂ 浓度和温度升高响应的研究进展[J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1684-1701.
ZHANG J Y, LI Y S, YU Z H, et al. Nitrogen cycling in the crop-soil continuum in response to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature—a review [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(8): 1684-1701.
- [20] 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.
- [21] 陈金, 杨飞, 张彬, 等. 被动式夜间增温设施设计及其增温效果[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2288-2294.
CHEN J, YANG F, ZHANG B, et al. Passive nighttime warming (PNW) system, its design and warming effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2288-2294.
- [22] 刘佳熠, 魏迪, 张璇, 等. 小麦苗期和灌浆中期根系性状与地上形态及产量性状的相关性[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 875-882.
LIU J Y, WEI D, ZHANG X, et al. Correlation study on root traits and shoot morphology, yield traits of wheat at seedling and mid-grain filling stage [J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(7): 875-882.
- [23] LIU H Y, WANG H, LI N, et al. Phenological mismatches between above- and belowground plant responses to climate warming [J]. Nature Climate Change, 2022, 12(1): 97-102.
- [24] 邹定辉, 萧凯, 张荣铎, 等. 小麦生育后期根系活性变化的研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 1996, 22(5): 427-432.
ZOU D H, XIAO K, ZHANG R X, et al. Study on the changes of wheat roots activity at later growth stage [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 1996, 22(5): 427-432.
- [25] WANG Y Y, REN Q, LI T, et al. Influences of modified biochar on metal bioavailability, metal uptake by wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) and the soil bacterial community [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 220: 112370.
- [26] PUCCIO G, INGRAFFIA R, GIAMBALVO D, et al. Morphological and physiological root traits and their relationship with nitrogen uptake in wheat varieties released from 1915 to 2013 [J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1149.
- [27] 胡智勇, 陈孝杨, 陈敏, 等. 土壤与大气温度及 CO₂ 浓度变化对根系呼吸影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 1-5.
HU Z Y, CHEN X Y, CHEN M, et al. Research progress in the effect of changes in soil and atmosphere temperature and CO₂ concentration on root respiration [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 1-5.