

夜间增温与铜污染对麦田 土壤无机氮库的影响

陈刚¹,程相涵¹,寇太记¹,夏东方¹,云望舒¹,宋振伟²

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023;2.中国农业科学院作物科学研究所,北京 100081)

摘要:基于夜间增温(设增温、常温两个水平)与铜污染[设CK($6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、LP($43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、MP($155\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、SP($209\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)4个梯度]复合因素的7a旱地定位试验,结合室内 20°C 和 30°C 下恒温培养91d,分析了麦田土壤硝态氮、铵态氮和无机态氮含量的变化及其稳定特征。研究表明:土壤硝态氮、铵态氮和无机态氮随着土壤中铜含量的增加均表现为先增后降趋势,夜间增温下CK土壤硝态氮和无机态氮含量分别显著降低10.8%和5.7%,在LP、MP处理下硝态氮含量分别显著下降17.4%、15.2%,但在SP处理下土壤硝态氮、铵态氮分别显著增加6.9%和15.1%,增温与铜含量对土壤无机态氮和硝态氮的影响呈现显著的交互效应。 20°C 和 30°C 恒温培养使无机态氮含量增加1.6~4.6倍、铵态氮含量增加5.2~13.3倍,却使硝态氮含量减少40.3%~65.1%, 20°C 比 30°C 恒温培养后土壤中有较高的无机态氮、铵态氮含量和铵/硝比。夜间增温使土壤净氮矿化作用、氨化作用的 Q_{10} 值均有所提高,但硝化作用的 Q_{10} 值显著降低16.8%,适当的铜含量(LP: $43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)将加快土壤氮的氨化、矿化和硝化速率。因此,夜间增温提高了旱地麦田土壤氮矿化作用温度敏感性,降低了无机态氮库稳定性,土壤铜污染与土壤氮库转化和增温响应的关系具有浓度效应。

关键词:夜间增温;铜污染;麦田土壤;无机态氮库; Q_{10} 值

中图分类号:S512;S154;X171 **文献标志码:**A

Effects of nighttime warming and copper pollution on inorganic nitrogen pool in wheatland soil

CHEN Gang¹, CHENG Xianghan¹, KOU Taiji¹, XIA Dongfang¹, YUN Wangshu¹, SONG Zhenwei²

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

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Nighttime warming (2 levels, warming and no-warming) and copper pollution [four gradients, CK ($6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), LP ($43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), MP ($155\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and SP ($209\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)] dual-factor positioning experiment in wheat field, combining with constant temperature culture (91 d, 20°C and 30°C) indoors were carried out to analyze the changes and stability characteristics of soil nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and inorganic nitrogen content. These results found that, a significant difference on nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil were observed by two-factor interaction of warming and copper pollution. With increase of amount of copper applied in soil, soil nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and inorganic nitrogen had the characteristics of first increase and then decrease. Nighttime warming led to a significant decrease in soil nitrate nitrogen and inorganic nitrogen by 10.8% and 5.7%, respectively. Nitrate nitrogen significantly decreased by 17.4% and 15.2% under LP and MP treatments, respectively, while SP resulted in a higher content of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen by 6.9% and 15.1%, respectively. Constant temperature cultivation at 20°C and 30°C increased the content of inorganic nitrogen by 1.6~4.6 times and the content of ammonium nitrogen by 5.2~13.3 times but reduced the content of nitrate nitrogen by 40.3%~65.1%. Compared to the constant temperature culture at 30°C , the constant temperature

culture at 20°C promoted a larger content of inorganic nitrogen and ammonium nitrogen and a higher ratio of ammonium to nitrate in the soil. The nighttime warming, enhanced the Q_{10} value of soil nitrogen net mineralization and ammonification but decreased the Q_{10} value of nitrification by 16.8%, respectively. Suitable copper content (LP: 43 mg · kg⁻¹) in soil accelerated the rate of ammonification, mineralization and nitrification of soil nitrogen. Our findings revealed that nighttime warming boosted the temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization in dryland wheat field and reduced the stability of inorganic nitrogen pools. The relationship between soil copper pollution and soil nitrogen pool transformation and response to nighttime warming had a concentration effect.

Keywords: nighttime warming; soil copper pollution; wheatland soil; inorganic nitrogen pool; Q_{10} value

气候变暖与减排温室气体抑制气候变暖升幅成为重要的生态环境热点问题,我国气温 1951—2007 年间增加 1.4°C 并预计仍将上升^[1-2],北方多年来冬、春季气温上升明显,夜间最低温增幅显著高于白天最高温增幅^[3],其时段恰好与冬小麦生产重叠。而《全国土壤污染状况调查公报》^[4]显示我国北方部分农田铜含量超标。显然,我国北方部分冬小麦生产正遭受气候变暖与重金属铜污染双重威胁。

农田土壤氮库既是粮食优质稳产的保证也是温室气体 N₂O 等重要的排放源,土壤无机态氮(硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N))周转会对作物生长和全球气候变化产生诸多影响^[5]。众多研究发现,增温改变了小麦对氮素的吸收利用^[6,7]和土壤微生物活性^[8],硝化和净氮矿化速率在 15~25°C 范围内随温度增大将显著提高^[9],这势必影响土壤氮素的保持与转化。类似现象已在藏北草甸系统中被观察到^[10],但也有研究认为增温对草甸土壤氮转化过程的作用极小^[11]。可见,气候变暖对农田土壤氮库转化及稳定特征的影响程度尚无定论。

铜污染将影响土壤中微生物的群落结构与活性^[12]并对土壤氮矿化作用^[13]、反硝化作用^[14]及固氮作用^[15]产生抑制效应,而且铜含量过高、过低均影响植物生长^[16],将间接作用于植物吸氮^[17],因此重金属铜污染可通过影响植物吸持氮素和氮转化的微生物过程来调控土壤氮素的转化与固持。尽管夜间增温对农田冬小麦吸收氮素的影响已有相关报道^[6-7],但缺乏增温及其与铜污染复合作用针对农田土壤氮库转化与保持特征的相关报道。理解气候变暖与重金属铜污染对农田土壤氮转化与保持的影响,对气候变化背景下农田土壤氮循环的现状和降低未来气候预测的不确定性均有一定参考价值。因此,在当前农业系统面临气候变暖与农业土壤重金属污染双重挑战时,本研究基于夜间增温与铜污染复因素多年定位试验,探究二者对麦田土壤无机态氮含量及其构成的影响,并借助室内恒

温培养试验分析土壤氮转化特征,可望揭示增温下铜污染农田土壤氮素的供应强度、转化、保持与稳定特征,为气候环境变化背景下我国北方农田土壤氮素管理措施制定及其环境效应评价提供科学依据。

1 材料与方法

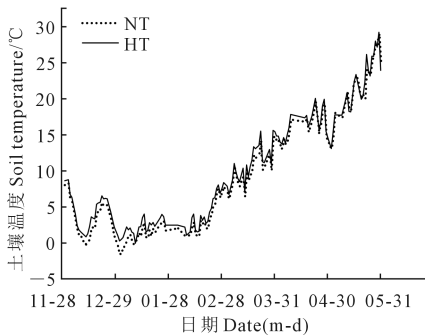
1.1 研究区域概况

研究区位于豫西低山丘陵区,属于暖温带半干旱半湿润季风气候,年均气温 13.7°C,年降水量 650.2 mm 左右,以雨养冬小麦-夏玉米轮作农业为主。增温与土壤铜污染定位复合因素试验位于河南科技大学开元校区农场(34°38'N,112°22'E),始于 2013 年,以增温处理(HT)和常温对照(NT)为主因子,铜处理[设对照 CK(6 mg · kg⁻¹)、低含量 LP(43 mg · kg⁻¹)、中含量 MP(155 mg · kg⁻¹)、高含量 SP(209 mg · kg⁻¹)4 个水平]为副因子,共设置 24 个微区,每区 1 m²。该研究田间增温采用夜晚(19:00—次日 7:00)减少长波辐射的遮盖冠层的被动式增温模式进行,具体在冬小麦生长期每天的增温时段,通过在小麦冠层上方 20 cm 处覆盖反射膜实现增温,在冬小麦全生育期降水时段停止增温,其详细设计与控制参见文献^[2,18]。铜污染土壤采自我国重要的工业基地洛阳废弃的某金属铜材加工厂草坪土壤,除铜超标外无其他重金属元素检测超标,按不同比例将铜污染土壤与其土壤理化性质和肥力一致的农田耕层土壤混合,配制成不同铜浓度处理土壤来种植小麦开展相关研究。参照国家土壤环境质量标准(GB15618-2018)^[19],CK、LP 处理低于而 MP、SP 处理高于土壤铜污染风险筛选值 100 mg · kg⁻¹(6.5<pH<7.5),根据国家农用地风险管控值使用规定,CK、LP 造成农用地土壤污染的风险低,而 MP、SP 处理可能存在农用地土壤铜污染风险。自 2013 年以来,每年在小麦生长季均持续开展增温研究,多年来采用相同的农艺管理措施,选用种植本地抗旱高产小麦品种‘洛旱 11’,磷、钾肥

分别选用磷酸钙(含 P_2O_5 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和硫酸钾(含 K_2O $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)播前基施,氮肥选用尿素(含纯氮 $220\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),按播前:拔节期:抽穗期为 $4:3:3$ 施用,以雨养为主,仅当过早可能造成小麦死亡时各小区进行等量灌溉,其他管理同当地大田常规管理措施。供试土壤为褐土,质地为中壤,基础理化性状指标为:全氮 $1.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $3.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $135.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全铜 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机质 $10.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、容重 $1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,pH 值 7.4。

1.2 试验设计

增温与土壤铜污染定位试验在 2012—2019 年冬小麦栽培季连续开展。2018—2019 年小麦生育期内土壤增温幅度在 $0.2\sim2.3^\circ\text{C}$ 之间,平均增温 0.7°C ,实现了麦田增温效果(图 1)。在试验持续开展第 7 季即 2019 年冬小麦收获后,采用 5 点取样法采集各小区耕层土壤混合样,共收集 24 个样品。将土壤样品自然风干、拣出杂物后过 2 mm 筛,利用四分法取一部分过 20 目筛以备无机氮测定,其余部分用于无机态氮稳定性测定。



注:NT:常温; HT:夜间增温。下同。
Note: NT: Normal temperature; HT: Nighttime warming.
The same below.

图 1 2018—2019 年夜间增温与常温下麦田土壤温度的变化
Fig.1 Changes of soil temperature under nighttime warming and normal temperature during winter wheat growth in 2018–2019

无机态氮稳定性测定通过培养试验进行,即 24 个样品各称取两份过 2 mm 筛的 30 g 风干土样分别放于 50 ml 小口棕色瓶内,按田间持水量 85% 加入去离子水,瓶口封上保鲜膜,并打上规则小孔便于空气流通,放入 25°C 的培养箱内闭光预培养 7 d ,之后将各样品的两个棕色瓶分别在 20°C 和 30°C 恒温箱中进行 91 d (13 周)^[20] 的正式培养,培养期间定期对损耗的水分通过称重法进行补充。培养结束后取出土样,风干过 20 目筛后用于无机氮测定,分析增温情形下土壤氮库的温度敏感性及其稳定特征。

1.3 测定内容与方法

NO_3^--N 、 NH_4^+-N 测定:称取 5 g 过 20 目筛的土样利用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KCl}$ 浸提(土水比为 $1:10$,W/V),于 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下震荡 1 h ,过滤,使用 AA3 全自动连续流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定。无机态氮为 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 之和。

1.4 数据处理与统计分析

(1)土壤净氨化速率、净硝化速率及净氮矿化速率 V_1 、 V_2 、 V_3 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)^[21]:

$$V_1 = [C(\text{NO}_3^--\text{N})_n - C(\text{NO}_3^--\text{N})_0] / n$$

$$V_2 = [C(\text{NH}_4^+-\text{N})_n - C(\text{NH}_4^+-\text{N})_0] / n$$

$$V_3 = [C(\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NH}_4^+-\text{N})_n - C(\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NH}_4^+-\text{N})_0] / n$$

式中, C 为硝态氮或铵态氮浓度; n 为培养天数,本文 $n=91\text{ d}$ 。

(2)温度敏感系数 Q_{10} ^[22]:

$$Q_{10} = V(30^\circ\text{C}) / V(20^\circ\text{C})$$

式中, $V(30^\circ\text{C})$ 和 $V(20^\circ\text{C})$ 分别表示 30°C 和 20°C 培养下土壤净硝化速率(V_1)、净氨化速率(V_2)或净氮矿化速率(V_3)。

采用 Excel 2016 进行数据整理和图表制作,SPSS 2017 进行双因素方差分析和 Duncan 多重比较显著性分析($P<0.05$),Origin 2017 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 夜间增温下铜污染土壤的无机态氮含量

土壤无机态氮含量在正常环境下随着土壤中铜含量的增加表现为先增后降特征,并在 LP 处理含量最高,在夜间增温环境下则略呈逐渐增加态势(表 1)。夜间增温环境下,对照(CK)处理中土壤无机态氮含量显著降低了 5.7% ,表明夜间增温将会增加土壤—作物系统无机态氮的损耗;在 LP 处理下土壤无机氮含量显著降低 9.6% ,但在 SP 处理下则显著增加 10.4% 。统计表明,土壤铜含量显著影响土壤无机态氮含量,增温效应与铜含量呈现显著的交互效应。

土壤铵态氮含量在正常与增温环境下、土壤硝态氮含量在正常环境下随着土壤中铜含量的增加呈现出与土壤无机态氮类似的变化规律。夜间增温环境下土壤硝态氮含量表现为先降后增态势,在 LP 处理下含量最低。与正常环境相比,夜间增温显著降低 CK、LP 和 MP 处理下的土壤硝态氮含量 $10.8\%\sim18.8\%$,但在 SP 处理下则显著增加了 6.9% ;夜间增温显著增加 MP 和 SP 处理下的土壤铵态氮含量 $14.9\%\sim15.1\%$,但在 CK、LP 处理下却未达到

显著增加水平。因素分析表明,增温效应与铜含量对土壤硝态氮含量、铵态氮含量均有极显著影响,但二者仅对土壤硝态氮含量呈现出显著的交互效应。

表 1 夜间增温与铜污染下土壤无机态氮的含量

Table 1 Content of soil inorganic nitrogen under nighttime warming and soil copper pollution				
夜间增温 Nighttime warming	铜浓度 Copper concentration	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	无机态氮 Inorganic nitrogen /(mg·kg ⁻¹)
NT	CK	11.571±0.358ab	6.163±0.217e	17.733±0.301c
	LP	11.776±0.090a	8.855±0.058a	20.632±0.148a
	MP	11.383±0.224b	7.694±0.041c	19.077±0.207b
	SP	9.825±0.045e	7.290±0.003d	17.115±0.045d
HT	CK	10.317±0.064d	6.398±0.050e	16.715±0.021e
	LP	9.556±0.185f	9.100±0.321a	18.656±0.505b
	MP	9.818±0.117ef	8.840±0.474ab	18.657±0.377b
	SP	10.500±0.092c	8.395±0.133b	18.895±0.152b
因素效应 Factor effects	Cu	6.7316**	52.119**	27.780**
	Warming	76.673**	18.646**	4.213 ^{NS}
	Cu×Warming	24.943**	2.613 ^{NS}	16.044**

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。NS 表示差异不显著,* and ** 分别表示因素效应在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences at $P<0.05$ level. NS means no significance. * and ** mean significance of factor effects at the $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively. The same as below.

2.2 不同恒温培养对土壤无机态氮组分的影响

由表 2 可知,20℃ 和 30℃ 恒温培养后土壤中无机态氮、铵态氮和硝态氮的含量以及铵/硝比随土壤铜含量增加的变化特征不尽相同,受农田是否增温、无机氮形态以及培养温度制约。因素分析也表明,恒温培养温度、土壤铜水平、增温效应 3 个因子对无机氮含量及其构成、铵/硝比均有显著及极显著的影响。20℃ 恒温培养后,正常与增温环境下的土壤中无机态氮、铵态氮含量以及铵/硝比随土壤铜含量增加均呈现出先增后降的态势,并均在 MP 处理下达到最大值;相比正常环境下的持续下降,土壤中硝态氮含量随土壤铜含量增加在增温环境下则呈先增后降态势,并在 LP 处理中含量最高,比 CK 显著增加 5.5%。30℃ 恒温培养后,相比正常环境下随土壤铜含量增加的持续降低,土壤中无机态氮、铵态氮含量在增温环境下则呈先增后降态势,并在 LP 处理中含量最高,且比 CK 分别显著增加 16.1%、15.3%;而土壤硝态氮在正常与增温环境中随土壤铜含量增加均呈先增后降趋势,并均在 LP 处理中达到最大值,比 CK 显著高 26.5%~45.6%;

相比正常环境下的先降(LP 处理最低)后增变化,铵/硝比随土壤铜含量的增加在增温环境下则持续下降。

相比基础土壤(表 1),20℃ 和 30℃ 恒温培养后土壤中无机态氮含量增加 1.6~4.6 倍、铵态氮含量增加 5.2~13.3 倍,但硝态氮含量减少 40.3%~65.1%,温度增加促进了土壤有机态氮的矿化转化,增加了无机态氮含量,但不利于硝态氮的保持。然而,与 20℃ 恒温培养相比,30℃ 恒温培养后相同处理土壤中无机态氮(-29.4%~-48.6%)与铵态氮含量(-31.8%~-51.4%)以及铵/硝比(-22.2%~-53.4%)降低明显,土壤中硝态氮含量在 CK 处理中减少 6.57%~17.3%和在 LP 和 MP 处理中增加 4.05%~14.79%,暗示过高的温度可能不利于有机氮的矿化或者促进铵态氮的损失,造成土壤中无机态氮含量减少,但一定的土壤铜含量将促进硝态氮的保持。因素分析发现,增温与土壤铜含量的复合因素效应显著影响土壤无机氮含量、硝态氮含量及铵/硝比,培养温度、增温与铜含量三因素也呈现出显著的交互作用。

2.3 不同恒温培养对土壤净氮矿化(氨化、硝化)速率的影响

由表 3 可知,在两个培养条件下,CK 处理增温环境比正常环境的土壤净氮矿化速率、氨化速率(30℃ 培养条件下除外)显著增加,而土壤硝化速率受抑制程度显著降低,表明夜间增温将改变土壤的氨化、硝化及矿化过程。随着土壤铜含量增加,20℃ 恒温培养条件下,正常与增温环境下的土壤矿化、氨化速率均呈先增后降态势,均在 MP 处理下达到最大并显著高于 CK 处理。30℃ 恒温培养条件下,相比正常环境下的先降后增(土壤净氮矿化速率)与持续降低(氨化速率),增温环境下土壤矿化速率与氨化速率随土壤铜含量的增加均呈现先增后降趋势,并在 LP 处理达最大值,而两个环境下土壤铜污染均促进了土壤硝化。与 20℃ 恒温培养相比,同一处理的土壤矿化速率与氨化速率在 30℃ 下均显著降低,表明过高的温度不利于土壤的矿化与氨化作用。

2.4 夜间增温对铜污染土壤无机氮稳定性的影响(Q_{10} 值)

Q_{10} 值是表征土壤有机碳(氮)矿化速度的温度敏感性的重要指标。由图 2 可知,夜间增温与土壤铜污染水平影响土壤净氮矿化、氨化、硝化作用对温度的敏感性。在 CK 处理下,夜间增温环境下土壤氨化和净氮矿化的 Q_{10} 值显著增加,而土壤硝化作

表 2 恒温培养后土壤无机态氮含量及其构成

Table 2 Content and composition of inorganic nitrogen in soil after cultivated at different temperatures						
培养温度 Culture temperature/℃	增温处理 Nighttime warming	铜浓度 Copper concentration	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	无机态氮 Inorganic nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	铵/硝比 Ammonium to nitrate ratio
20	NT	CK	5.331±0.143b	88.247±0.204c	93.577±0.270e	16.591±0.439e
		LP	5.152±0.020bc	92.118±0.229b	97.269±0.247d	17.882±0.035c
		MP	5.135±0.001c	97.641±0.100a	102.776±0.100b	19.014±0.018a
		SP	4.982±0.006d	87.231±0.168c	92.213±0.762f	17.512±0.176cd
	HT	CK	4.747±0.126f	89.312±0.172c	94.059±0.272e	18.854±0.484ab
		LP	5.201±0.006b	95.790±0.300ab	100.991±0.301c	18.417±0.056b
		MP	5.160±0.161bc	98.011±0.071a	103.171±0.232a	19.048±0.554a
		SP	4.999±0.007e	87.915±0.169c	92.914±0.175f	17.588±0.021d
	NT	CK	4.032±0.160g	56.532±0.152ef	60.564±0.280j	14.085±0.539f
		LP	5.871±0.112a	48.864±0.025g	54.735±0.115k	8.332±0.159k
		MP	5.252±0.136b	47.424±0.055h	52.676±0.174 l	9.047±0.220j
		SP	4.713±0.007f	46.527±0.033i	51.240±0.035m	9.872±0.015i
30	HT	CK	4.720±0.225f	56.653±0.241ef	61.373±0.376i	12.100±0.597g
		LP	5.970±0.046a	65.313±0.253d	71.283±0.221g	10.942±0.117h
		MP	5.860±0.222a	58.528±0.169e	64.389±0.147h	10.032±0.395i
		SP	5.338±0.182b	54.485±0.148f	59.824±0.148j	10.245±0.379i
	Culture temperature(CT)		87017.573 **	4.105 *	68020.233 **	2011.402 **
	Cu		566.066 **	32.939 **	522.419 **	19.244 **
	Warming		1637.833 **	8.664 **	1386.157 **	13.254 **
	Cu × CT		420.455 **	21.639 **	287.998 **	39.075 **
因素效应 Factor effects	Warming × CT		850.001 **	23.454 **	786.511 **	0.474 ^{NS}
	Warming × Cu		233.713 **	1.298 ^{NS}	184.424 **	3.865 *
	Warming×Cu×CT		139.534 **	3.722 *	93.308 **	17.089 **

表 3 不同温度下土壤净氮矿化(氨化、硝化)速率的变化/(mg·kg⁻¹·d⁻¹)

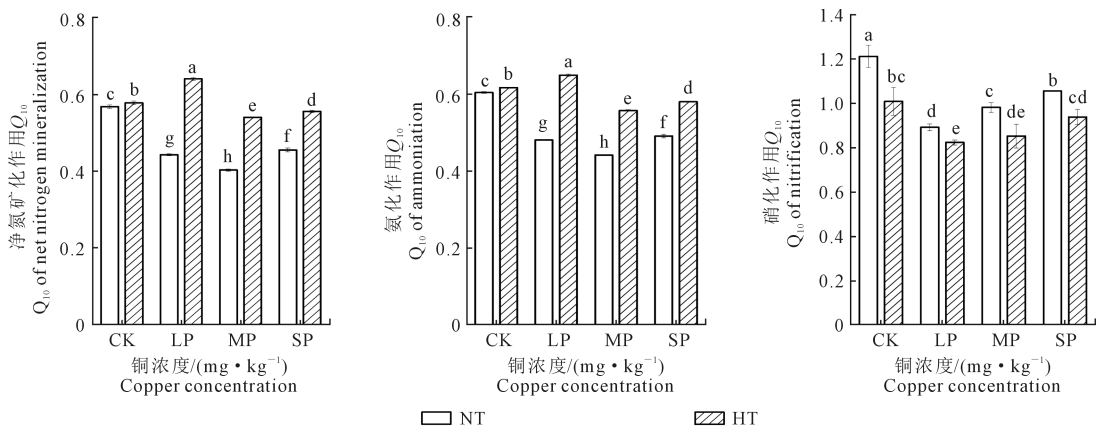
Table 3 Changes in the rate of soil net nitrogen mineralization (ammonification, nitrification) under different temperatures					
培养温度 Culture temperature/℃	增温处理 Nighttime warming	铜浓度 Copper concentration	硝化速率 Nitrification rate	氨化速率 Ammonization rate	矿化速率 Mineralization rate
20	NT	CK	-0.069±0.001i	0.902±0.002e	0.833±0.003f
		LP	-0.061±0.001f	0.915±0.002d	0.842±0.003e
		MP	-0.069±0.001i	0.989±0.001a	0.920±0.001a
		SP	-0.053±0.001d	0.879±0.008f	0.826±0.008f
	HT	CK	-0.061±0.001f	0.911±0.002d	0.850±0.003d
		LP	-0.048±0.001bc	0.953±0.003c	0.905±0.003c
		MP	-0.051±0.002cd	0.980±0.001b	0.929±0.002b
		SP	-0.060±0.001ef	0.874±0.002f	0.814±0.002g
	NT	CK	-0.083±0.002j	0.554±0.002h	0.471±0.003k
		LP	-0.065±0.001gh	0.440±0.001k	0.375±0.001m
		MP	-0.067±0.001hi	0.437±0.001l	0.369±0.002n
		SP	-0.056±0.001e	0.431±0.001m	0.375±0.001m
30	HT	CK	-0.062±0.003fg	0.552±0.003h	0.491±0.004j
		LP	-0.040±0.001a	0.618±0.003g	0.578±0.002h
		MP	-0.044±0.003ab	0.546±0.002i	0.503±0.002i
		SP	-0.057±0.002e	0.506±0.002j	0.450±0.002l

用的 Q_{10} 值显著降低。相比 CK 处理,正常气候条件下土壤铜污染使土壤净氮矿化、氨化和硝化的 Q_{10} 值显著分别降低了 19.5%~28.9%、20.0%~28.0%和 13.1%~26.4%,表明土壤铜含量过多将降低土壤的净氮矿化、氨化和硝化强度。与常温相比,增温条件下铜污染土壤净氮矿化、氨化强度的 Q_{10} 值分别显著提高 21.6%~43.6%、18.1%~35.0%,硝化强度

的 Q_{10} 值显著降低 7.6%~12.5%。

3 讨 论

本研究平台所采用的夜间增温设施实现了自然增温效果,使冬小麦全生育期夜间土壤平均温度升高 0.5℃左右,已被课题组的研究证明^[2,17-18]。本研究发现多年夜间增温下旱地麦田土壤无机态氮库



注:不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Note: Different lowercase letters mean significant differences among treatments at $P < 0.05$ level.

图 2 不同铜浓度土壤中无机氮的温度敏感系数

Fig.2 Temperature sensitivity coefficient of soil inorganic nitrogen with different copper concentrations

消减,可能有以下几个原因:(1)夜间增温使小麦吸收更多的氮。同平台前期研究发现夜间增温使小麦生物量增加^[2,17]和小麦氮素积累量增加^[17],闫艳艳等^[23]也发现增温将导致小麦植株氮素含量增加。田霄鸿等^[24]研究认为小麦是喜硝作物。增温导致的小麦植株氮素增加极大可能源于小麦增加了对硝态氮的吸收,进而造成土壤硝态氮的下降(表 1),而土壤铵态氮变化不大,最终造成了无机氮库容量的下降。(2)夜间增温造成土壤硝态氮的损失增加^[25]。土壤无机氮库主要由土壤硝态氮、铵态氮组成,均受土壤氮转化微生物活性影响,其对温度变化反应十分敏锐^[8,26]。本研究发现夜间增温下土壤硝态氮含量显著下降但铵态氮含量变化不大,其他研究也发现增温会导致硝态氮含量下降^[10],可能部分原因为温度升高时土壤反硝化细菌活性大于矿化细菌活性^[27],造成硝态氮损失所致。

铜既是植物必需的微量营养元素又是农田土壤主要的重金属污染元素,其在土壤中形成污染时将会对参与土壤氮循环的微生物产生影响。先前研究发现,随着铜浓度的升高,土壤硝化作用^[28]和反硝化作用^[27]均会受到显著抑制。陈中云等^[29]研究发现 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土中的铜能促进土壤反硝化作用,但继续增加铜含量则反硝化作用抑制效应随之增强。这表明土壤中适宜的铜能促进硝态氮的保持。本研究发现铜浓度超过 GB15618-2018^[19] 农田土壤铜污染风险筛选值 2 倍才会造成土壤硝态氮显著降低,而土壤铜含量为污染风险筛选值的约 0.4、1.5 和 2 倍均显著增加了铵态氮含量,黄正等^[30]也有类似发现。这暗示铜污染对土壤氮转化存在一定的影响阈值,并非完全是推荐的风险筛选

值,这有待深入研究。在厌氧条件下硝态氮主要被反硝化为 N_2 损失掉,碳源较丰富时也有一部分可被产芽胞细菌(如梭状芽胞杆菌等)还原为 NH_3 ,由于反硝化过程被重金属离子抑制,而耐受力更强的一些产芽胞细菌,将没有反硝化的硝态氮还原为铵态氮^[30],这可能是导致重度铜污染土壤硝态氮含量下降、铵态氮含量上升的主要原因。

夜间增温与土壤铜污染对土壤硝态氮和铵态氮转化的不同作用,最终表现为土壤无机氮含量的变化。本研究发现夜间增温将会增加土壤-作物系统无机态氮的损耗,但对土壤铵态氮和硝态氮的保持存在明显的差异影响。增温效应与铜污染对土壤硝态氮、无机态氮含量呈显著的交互效应,表明气候变暖背景下土壤遭受铜污染将会导致旱地土壤中硝态氮与无机态氮更大的损失。相比常温环境下,土壤无机态氮含量随土壤铜浓度的增加呈先增后降趋势并在 LP 处理达最大值,夜间增温环境下则呈先降后升趋势并在 LP 处理达到最低。可能由于一方面夜间增温会促进小麦的生长^[2,17],同时较低的土壤铜含量可能更有利于小麦生长,进而增加了小麦对土壤硝态氮的利用强度,但随着铜含量的增加抑制效应增强,土壤硝态氮的植物固持减少;另一方面增温将改变土壤微生物参与的硝态氮、铵态氮转化过程^[8]。这与本研究中所发现的增温因素显著影响土壤硝态氮、铵态氮含量一致。夜间增温显著提高了铜污染土壤铵态氮的含量,一方面可能由于温度增加促进了土壤氮素的矿化^[27],使有机氮转化为铵态氮,另一方面可能因为在铜作用下硝化作用受到抑制^[29-30],两者共同作用使铵态氮含量增加。

夜间增温与铜污染复合作用下的土壤在温度由 20℃ 升高至 30℃ 时,硝态氮含量(硝化速率)显著增加,可能由于 30℃ 相较于 20℃ 更有利于硝化作用的进行,Taylor 等^[31]的发现支撑本猜想;而铵态氮和无机态氮总量(氨化和矿化速率)显著降低,表明 20℃ 时有利于氮矿化和氨化作用,其他研究^[32]也有类似发现。培养温度、增温与铜含量三因素对氮转化所呈现出的显著交互作用,则进一步揭示增温与土壤铜水平影响无机氮库的保持与稳定,且一定程度土壤铜污染对土壤氮氨化、矿化和硝化速率的影响作用在未来气候变暖背景下可能发生改变,这与土壤氮矿化的温度系数(Q_{10} 值)变化相印证(图 2)。

土壤氮矿化的温度系数(Q_{10})常用来评价土壤氮矿化对温度响应的敏感性系数,也是衡量土壤氮矿化对未来气候变化响应的重要参数^[33]。本研究中夜间增温环境反映土壤硝化能力的 Q_{10} 值显著降低,而反映土壤氨化和净氮矿化作用的 Q_{10} 值显著提高,这表明气候变暖会显著提高农田土壤的氨化和净氮矿化作用对温度的敏感性,可能由于增温提高了土壤微生物的活性促进了有机氮的转化,韩玮等^[33]研究发现增温会增强氮矿化与氨化微生物的活性。而增温下土壤硝化作用对温度的敏感性下降,可能与转化底物不足或硝化细菌受到抑制有关。在土壤铜污染下,夜间增温提高了铜污染土壤净氮矿化和氨化作用的温度敏感性,但随着土壤中铜含量的增加使增温的影响效应降低(图 2)。这可能由于增温对氮转化微生物活性的正向作用大于铜污染产生的负向作用而表现为正效应,但随着铜浓度增加带来的负效应增大,最终让增温与铜污染的复合影响效应互相趋向抵消,其具体机制有待更深入研究。

4 结 论

土壤铜污染可通过增加土壤铵态氮含量进而提高无机态氮总量,但均随着土壤有效铜含量增加呈下降趋势,轻度土壤铜污染对土壤硝态氮含量影响不大,但重度铜污染则使之显著下降,适当的铜含量($LP:43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)将加快土壤氮的氨化、矿化和硝化速率。多年夜间增温增加了旱地农田土壤氮矿化作用的温度敏感性,使旱地麦田土壤硝态氮含量与无机态氮总量减少,无机态氮库稳定性下降,夜间增温使土壤氮库转化与保持对土壤铜污染的响应变得复杂,这为制定气候变化下铜污染农田土壤氮素管理策略和评价其环境效应提出了挑战。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 寇太记, 侯宇朋, 王佰睿, 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.

[3] SILLMANN J, KHARIN V V, ZHANG X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 1. Model evaluation in the present climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(4): 1716-1733.

[4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014, (5): 10-11.

CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Report on thenational general survey of soil contamination[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, (5): 10-11.

[5] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 焦健宇, 郑粉莉, 王婧, 等. CO₂ 浓度与温度升高对谷子各生育期土壤微生物生物量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 104-112, 122.

JIAO J Y, ZHENG F L, WANG J, et al. Effects of CO₂ concentration and temperature elevation on soil microbial biomass at different millet growth stages[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 104-112, 122.

[9] 赵宁, 张洪轩, 王若梦, 等. 放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4234-4241.

ZHAO N, ZHANG H X, WANG R M, et al. Effect of grazing intensity on temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization in Zoigè alpine meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4234-4241.

[10] 刘美, 马志良. 模拟增温对青藏高原东部高寒灌丛土壤氮转化的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2045-2052.

LIU M, MA Z L. Effects of experimental warming on soil nitrogen transformation in alpine scrubland of eastern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2045-2052.

[11] SONG W M, CHEN S P, ZHOU Y D, et al. Rainfall amount and timing jointly regulate the responses of soil nitrogen transformation processes to rainfall increase in an arid desert ecosystem[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114197.

[12] BROOKES P C, MCGRATH S P. Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. *Journal of Soil Science*, 1984, 35(2): 341-346.

[13] XU X N, SHIBATA H, ENOKI T. Decomposition patterns of leaf

- litter of seven common canopy species in a subtropical forest: dynamics of mineral nutrients [J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(1): 1-6.
- [14] SIQUEIRA M C, KANASHIRO S, DOMINGOS M, et al. The dynamics of macro- and micronutrients in native tree species affected by copper contamination[J]. *Florestae Ambiente*, 2021, 28(4): e20210036.
- [15] ABAYE D A, LAWLOR K, HIRSCH P R, et al. Changes in the microbial community of an arable soil caused by long-term metal contamination[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(1): 93-102.
- [16] 薛盈文, 王玉凤, 赵长江, 等. 铜胁迫对小麦种子萌发及幼苗抗氧化系统的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2016, 38(1): 54-59.
- XUE Y W, WANG Y F, ZHAO C J, et al. Effects of copper stress on germination and antioxidant system in wheat seedlings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38(1): 54-59.
- [17] 程相涵. 夜间增温对小麦抵御土壤铜污染危害的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- CHENG X H. Effect of nighttime warming on wheat resistance to soil-copper pollution stress[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [18] 邓伟, 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.
- [19] 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(试行): GB15618-2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB15618-2018[S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2019.
- [20] 张丹丹, 张晋京, 李翠兰, 等. 模拟增温对农田土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2019, 41(5): 569-576.
- ZHANG D D, ZHANG J J, LI C L, et al. Effects of experimental warming on organic carbon mineralization and humus composition in farmland soils[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(5): 569-576.
- [21] 李光敏, 陈伏生, 徐志文, 等. 间伐和林下植被剔除对毛竹林土壤氮矿化速率及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4106-4115.
- LI G M, CHEN F S, XU Z W, et al. Effects of thinning and under-story removal on soil nitrogen mineralization rate and temperature-sensitivity in a moso-bamboo plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4106-4115.
- [22] 桂慧颖, 李雪江, 王景燕, 等. 温度和水分对华西雨屏区毛竹林土壤氮矿化的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(6): 758-764.
- GUI H Y, LI X J, WANG J Y, et al. Effects of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization of phyllostachys heterocycla plantation in the rainy area of western China[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(6): 758-764.
- [23] 闫艳艳, 胡晨曦, 樊永惠, 等. 冬春季夜间增温对冬小麦植株氮代谢和籽粒蛋白质形成的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(2): 203-212.
- YAN Y Y, HU C X, FAN Y H, et al. Effect of night warming in winter and spring seasons on plant nitrogen metabolism and grain protein formation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 203-212.
- [24] 田霄鸿, 李生秀, 王朝辉. 冬小麦等4种作物对铵、硝态氮的吸收能力[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(1): 29-37.
- TIAN X H, LI S X, WANG Z H. Uptake capacity of ammonium and nitrate to several crops [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(1): 29-37.
- [25] ZHANG Y, ZHANG N, YIN J J, et al. Simulated warming enhances the responses of microbial N transformations to reactive N input in a Tibetan alpine meadow [J]. *Environment International*, 2020, 141: 105795.
- [26] 唐海龙, 王景燕, 黄帅, 等. 华西雨屏区常绿阔叶林土壤氮矿化对温度和湿度变化的响应[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(2): 124-131.
- TANG H L, WANG J Y, HUANG S, et al. Responses of soil nitrogen mineralization of evergreen broad-leaved forest in rainy area of western China to moisture and temperature[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(2): 124-131.
- [27] 王帝里, 孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 583-591.
- WANG L L, SUN B. Effects of temperature and soil type on nitrogen mineralization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 583-591.
- [28] 王振兴. 重金属在污泥蚯蚓堆肥中的变化及对土壤硝化活性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- WANG Z X. Changes of heavy metals during the vermicomposting of sewage sludge and its effect on soil nitrification[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [29] 陈中云, 闵航, 张夫道, 等. 4种重金属污染对稻田土反硝化细菌的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(3): 305-310.
- CHEN Z Y, MIN H, ZHANG F D, et al. Effect of four kinds of heavy metal contamination on denitrifying bacteria in paddy soils[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(3): 305-310.
- [30] 黄正, SAKADEVAN K, BAVOR J. Cd^{2+} , Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对人工湿地反硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2000, 21(4): 110-112.
- HUANG Z, SAKADEVAN K, BAVOR J. Cd^{2+} , Cu^{2+} , and Zn^{2+} influence on denitrification in constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(4): 110-112.
- [31] TAYLOR A E, OTTOMAN C, CHAPLEN F. Implications of the thermodynamic response of soil mineralization, respiration, and nitrification on soil organic matter retention[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 651210.
- [32] 石冰洁, 李世清. 地表覆盖对旱作玉米农田土壤氮素矿化的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 1-6, 14.
- SHI B J, LI S Q. Effect of surface mulching on soil nitrogen mineralization in dry farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 1-6, 14.
- [33] 韩玮, 孙晨曦, 苏敬. 模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(12): 1117-1124.
- HAN W, SUN C X, SU J. Effects of elevated temperature and simulated acid rain on enzyme activity and temperature sensitivity of paddy soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1117-1124.