

CO₂ 浓度升高下冬小麦-土壤碳氮化学计量特征

鲍秀蕊,白家韶,韩雪,居辉,张馨月

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要:为探究 CO₂ 浓度升高下冬小麦-土壤碳(C)、氮(N)化学计量特征及其关联关系,依托北京昌平试验站长期开放式 CO₂ 浓度升高试验平台(FACE),测定和分析了常规 CO₂ 浓度(aCO₂:400 μmol·mol⁻¹)和高 CO₂ 浓度(eCO₂:550 μmol·mol⁻¹)条件下冬小麦不同器官(叶片、茎秆、籽粒)和土壤的 C、N 元素含量。结果表明,冬小麦植株和土壤 C、N 元素含量及计量比对 CO₂ 浓度升高的响应不一致。冬小麦各器官 C、N 含量、C:N 不受 CO₂ 浓度升高的影响;CO₂ 浓度升高后土壤全碳(TC)含量显著增加,全氮(TN)含量和全碳氮比(TC:TN)未发生显著变化。冬小麦-土壤 C、N 化学计量特征在小麦生育期的变化程度高于 CO₂ 升高的影响。从拔节至成熟期,叶片和茎秆 C:N 不断增加,籽粒 C:N 则从灌浆至成熟期显著降低。冬小麦整体 C 元素的内稳性高于 N 元素,不同器官元素内稳性存在一定差异,表现为籽粒的元素内稳性高于叶片和茎秆。aCO₂ 处理下,土壤与冬小麦叶片或茎秆 C、N 计量特征间存在强烈的相关关系,但 eCO₂ 处理下土壤与冬小麦叶片和茎秆间关联关系消失或削弱,说明未来气候变化可能导致小麦地上-地下关系的不确定性增加。

关键词: CO₂ 浓度上升;冬小麦;碳氮化学计量;农田生态系统

中图分类号:S512.1

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0688-09

Carbon and Nitrogen Stoichiometry in Winter Wheat-Soil under Elevated CO₂

BAO Xiurui, BAI Jiashao, HAN Xue, JU Hui, ZHANG Xinyue

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the winter wheat-soil carbon(C) and nitrogen(N) stoichiometry, we measured the concentrations of C and N in different winter wheat organs(e. g. leaf, stem and grain) and soil, as well as their response to elevated CO₂. This study was conducted at the long-term free air carbon dioxide enrichment platform(FACE) in Changping, Beijing. Two CO₂ concentration treatments were conducted, which were ambient CO₂ (aCO₂: 400 μmol·mol⁻¹) treatment and elevated CO₂ (eCO₂: 550 μmol·mol⁻¹) treatment. Results showed that the responses of wheat and soil C and N stoichiometry to elevated CO₂ differed. The leaf, stem and grain C and N stoichiometry were not affected by elevated CO₂. However, the soil total carbon(TC) content significantly increased in response to eCO₂ treatment, while the total nitrogen(TN) content and the TC:TN ratio remained unchanged. In comparison to elevated CO₂ treatment, the winter wheat and soil C and N stoichiometry showed greater sensitivity to changes in crop stages. The C:N ratio of leaf and stem increased from the jointing stage to the maturity stage, while the grain C:N ratio decreased from the filling stage to the maturity stage. The homeostasis of the C element was higher than that of the N element in winter wheat. There were differences in the homeostasis of winter wheat organs, with the grain showing a higher level compared to the leaf and stem. Under aCO₂ treatment, the correlation between soil and winter wheat leaf and

收稿日期:2024-04-04 修回日期:2024-05-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0607403);国家自然科学基金项目(31901174);中国农业科学院科技创新工程农业绿色低碳科学中心专项项目(CAAS-CSGLCA-202301);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(BSRF202202)

第一作者 E-mail:82101222001@caas.cn(鲍秀蕊)

通讯作者 E-mail:zhangxinyue@caas.cn(张馨月)

stem C and N stoichiometry was significant. However, the strong correlation between soil and winter wheat C and N stoichiometry was no longer exist or weakened under eCO₂ treatment. These findings indicated that future climate change might enhance the obscure of the relationship between aboveground and belowground.

Keywords: Elevated CO₂; Winter wheat; Carbon and nitrogen stoichiometry; Agricultural ecosystem

化学计量学是通过研究化学元素在有机体中的比例关系及其随生物和非生物因素的变化关系来揭示生态过程和功能的一门学科^[1]。内稳态理论则是化学计量学的一个核心概念和基础理论,认为植株的内稳态可反映其对土壤养分变化的适应策略^[2]。碳(C)和氮(N)是植物和土壤中含有最大的两种关键元素。C是植物体内最主要的构成元素,是植物生理生化过程的能量来源;N是蛋白质的重要组成成分,与植物生产、植物养分吸收和土壤养分供应等过程密切相关^[3]。碳氮化学计量关系(C:N)在植物中可表征植物C、N代谢的协调程度及养分利用效率,较高的C:N比值往往表示较高的N素利用效率和较低的生长速率^[4];土壤C:N则是衡量土壤质量的重要指标。在气候变化背景下,研究陆地植物和土壤C、N化学计量特征及内稳态,可以增进对不同系统之间的能量转化和养分循环的认识。

人类活动导致的大气CO₂浓度升高,已经对植物-土壤系统中能量转化和养分循环产生一定影响。CO₂浓度升高在短期内会促进植物光合作用,增加地上部生物量,同时增强对土壤养分的需求,从而改变植物和土壤C、N含量及其C:N比值^[5]。大部分研究表明,CO₂浓度升高对植物的影响表现为C含量增加,N含量下降,C:N相应增加^[6]。但是,CO₂浓度升高对土壤的影响则呈现较大变异,即存在C、N含量都增加,C:N不变^[7],也有C、N含量及C:N都较为稳定的情况^[8]。土壤C、N元素对CO₂浓度升高的响应受植被类型、小气候条件及CO₂升高浓度等不同因素的影响^[9]。Wang等^[10]通过同步探讨地上、地下对CO₂浓度升高的响应,发现农田生态系统中植物和土壤C含量和C:N都增加,而N含量则分别呈下降和增加趋势。以往的化学计量研究集中在森林、草地、湿地等自然生态系统开展,并主要关注植物叶片的化学计量特征^[11],而在农田开展化学计量的研究相对有限^[12],并且农田不仅关注叶片,其他植物器官尤其是籽粒化学计量特征也非常重要,可以反映作物的产量及品质特性。

作物不同器官中养分的形成和转运对最终产量品质的形成至关重要,作物籽粒对CO₂浓度升高往往存在负面响应^[13],这对未来气候变化情景下粮食的营养安全造成潜在威胁。植物-土壤化学计量特征间高度相关,但植物-土壤C、N之间的耦合和循环会受到外界环境的影响而发生变化^[14]。来自自然生态系统的研究证明,提高土壤受限元素(主要为N元素)的可供应性,会引起植物-土壤系统间相互关系出现解耦合^[15-16]。考虑到农田土壤以C限制为主,CO₂浓度升高引起的C可供应性的增加,是否也会造成地上地下解耦合,值得进一步验证。此外,植物内稳性受环境条件和植株器官的影响而有所不同^[17],农田生态系统存在较强的人为管理干扰,是否会导致作物不同器官的内稳态特征受影响,也需要进一步研究。

综上所述,本研究以华北地区典型主粮作物冬小麦为研究对象,依托北京昌平试验基地长期开放式CO₂浓度升高试验(Free-air CO₂ enrichment, FACE)平台系统,系统开展冬小麦不同器官(叶片、茎秆、籽粒)和土壤C、N元素化学计量特征研究,以期明确CO₂浓度升高对农田冬小麦不同器官和土壤的C、N化学计量特征及其二者关联关系的影响,并同时探讨生育期内冬小麦不同器官的内稳态特征,以期增进对未来气候变化下作物与土壤间养分循环的认识。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020—2022年在北京市昌平区中国农业科学院FACE试验基地(116.14°E, 40.13°N)进行,基地海拔31.3 m,属于暖温带、半湿润大陆性季风气候区,多年平均气温为11.9℃,年日照时数2714 h,年降雨量616 mm。土壤属壤质褐潮土,0~20 cm土壤容重约1.3 g·cm⁻³,pH值为8.2,有机质含量14.1 g·kg⁻¹,全氮含量1.3 g·kg⁻¹,速效磷含量56.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量138.2 mg·kg⁻¹,中等偏上肥力,种植制度以冬小麦/夏玉米一年两熟制为主。

1.2 试验设计

试验基于开放式 CO₂ 富集平台 (FACE) 开展,该平台自 2007 年建立持续运行至今。FACE 试验设置两组 CO₂ 浓度水平,分别是对照组常规 CO₂ 浓度 (aCO₂: 400 ± 15 μmol · mol⁻¹) 和 FACE 组高 CO₂ 浓度 (eCO₂: 550 ± 15 μmol · mol⁻¹)。田间试验重复三次,即包括 3 个对照圈和 3 个 FACE 试验圈,单圈直径为 4 m,各圈之间的间隔均在 16 m 以上,以防止 CO₂ 浓度交叉影响。FACE 试验圈由 8 根释放 CO₂ 的气体管围成正八边形,放气管面向圈内一侧均匀分布孔径约 0.7 mm 的小孔,为保证作物冠层上方有足够的高浓度 CO₂ 扩散空间,随着作物生长不断调节放气管的高度,确保始终处于作物冠层上方 20~30 cm 处。FACE 圈预定升高 CO₂ 浓度由计算机根据风速和风向实时调控,考虑到节约成本和光合作用主要发生阶段,仅在白天释放气体,夜间关闭,开关时间根据每天日出和日落时间自动进行。CO₂ 气体从冬小麦返青后开始释放直至收获结束。本试验所用冬小麦品种为中麦 175,由中国农业科学院国家种质资源库提供,该品种自 2014 年开始播种使用,来年成熟后将对照圈和 FACE 圈收获的籽粒继续播种到对应处理中,如此往复。本研究冬小麦分别于 2020 年 10 月 6 日和 2021 年 10 月 9 号播种,并在 2021 年 6 月 11 日和 2022 年 6 月 19 日收获。田间管理措施一致:播种前一天将复合肥 (N:P₂O₅:K₂O=23.74:22.68:7.20) 做底肥施入,复合肥施用量 600 kg · hm⁻²,拔节期追施尿素 (N),追肥量为 90 kg · hm⁻²。冬小麦全生育期灌溉量为 750 m³ · hm⁻²,分别在越冬期和拔节期追肥时进行喷灌。

1.3 样品采集与测定

本研究在冬小麦四个关键生育时期连续两年进行样品采集,具体采样时期及日期分别为拔节期 (2021 年 4 月 1 日;2022 年 4 月 3 日)、开花期 (2021 年 5 月 7 日;2022 年 5 月 7 日)、灌浆期 (2021 年 5 月 21 日;2022 年 5 月 22 日) 及成熟期 (2021 年 6 月 11 日;2022 年 6 月 10 日)。在每个对照圈和 FACE 圈内随机采集 15~20 株小麦,并同步取根系周围 0~10 cm 的地下土壤,2020—2022 两年、冬小麦四个生育时期、两组 CO₂ 浓度处理及三次重复后共获得 48 份植株和土壤样品。采集回的植株样品放入烘箱中 105 °C 杀青 30 min 后,在 65 °C 下烘干至恒重,然后按照叶片、茎秆及籽粒器官分样、研磨后过 0.15 mm 网筛,混

合均匀备用。田间取回的鲜土过 2 mm 孔径的网筛并除去肉眼可见的杂物,将其风干、研磨后装入自封袋中以备元素测定。小麦不同器官 C、N 元素含量及土壤 TC、TN 含量采用元素分析仪 (Vario PYRO cube, Elementar, 德国) 测定。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 R 软件 (4.2.1) 进行数据处理和统计分析。利用 R 软件中的 nlme 包和方差分析法 (ANOVA) 检验总体 CO₂ 处理、生育时期和二者交互作用对冬小麦叶片、茎秆、籽粒和土壤 C、N 含量及计量比的影响。Tukey 法分别检验 aCO₂ 处理和 eCO₂ 处理下冬小麦-土壤 C、N 化学计量特征在生育期内的差异显著性。T 检验法比较同一生育期内不同 CO₂ 浓度处理间的差异。利用皮尔逊法 (Pearson) 分别对两组 CO₂ 处理下冬小麦叶片、茎秆、籽粒和土壤 C、N 化学计量特征进行相关性分析。所有统计图均用 R 软件绘制。

内稳态指数 (Homeostasis index, *H*) 依据生态化学计量内稳性模型^[18] 计算,公式如下:

$$Y = cX^{1/H}$$

式中,*Y* 为叶片、茎秆和籽粒 C、N 含量 (g · kg⁻¹) 或 C:N 值,*X* 为对应的土壤 TC、TN 含量 (g · kg⁻¹) 或 TC:TN 值;*c* 为拟合常数;*H* 为内稳态指数。利用 R 中 ggTrendline 包完成内稳态指数分析,依据 Pearson 等^[18] 的分类,当方程拟合不显著 (*P* > 0.1) 时认为是绝对稳态;当方程拟合显著时,可将植株 *H* > 4、2 < *H* < 4、1.33 < *H* < 2、*H* < 1.33 分别划分为稳态、弱稳态、弱敏感态和敏感态 4 种类型。

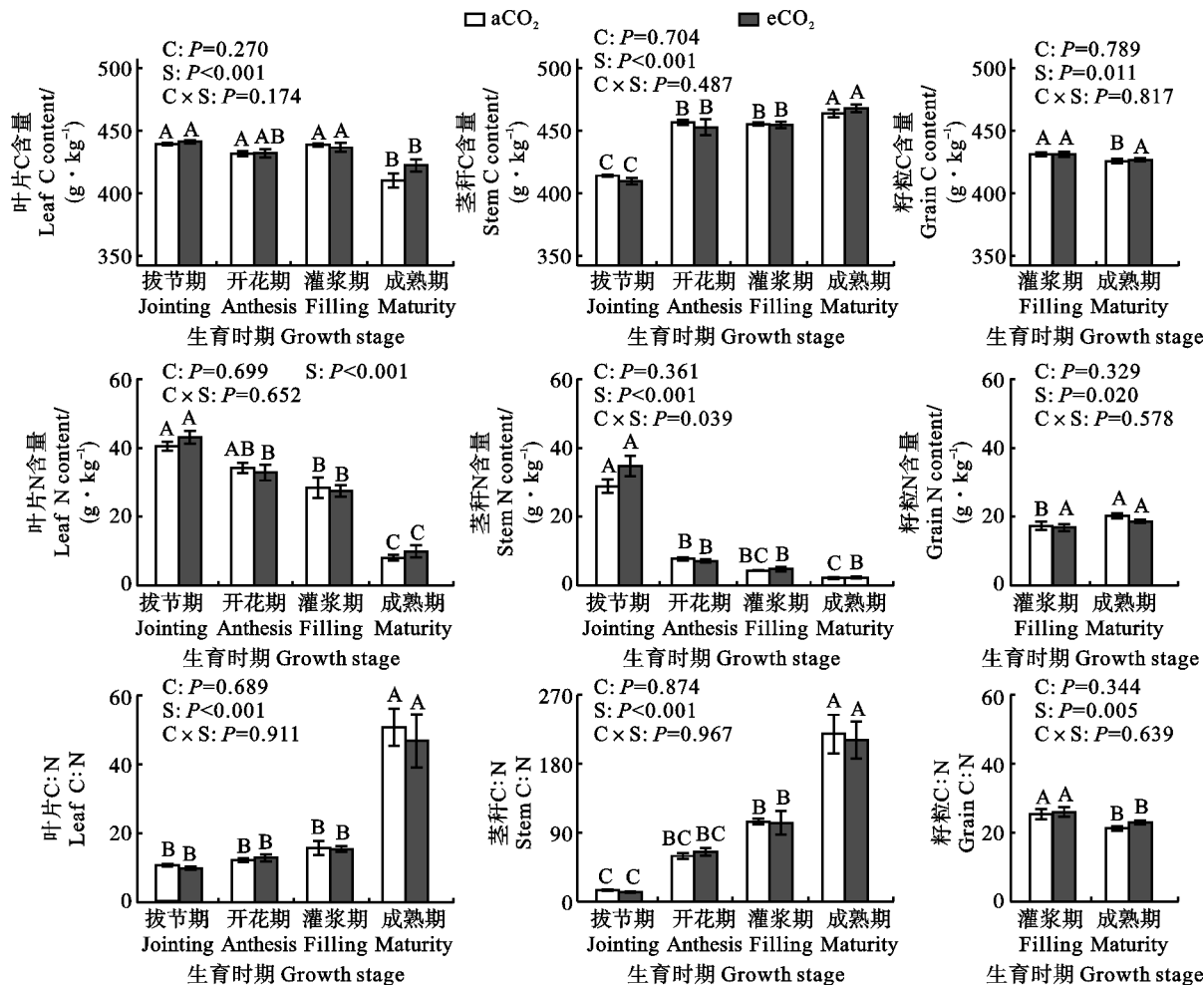
2 结果与分析

2.1 冬小麦不同器官碳氮化学计量特征

总体上,不同器官 C、N 含量及 C:N 未对 eCO₂ 处理产生显著响应,但随小麦生育期变化存在显著的时间动态 (图 1)。叶片、茎秆和籽粒 C 含量的变化范围分别为 405.4 ~ 442.3、401.8 ~ 470.4 和 424.1 ~ 433.3 g · kg⁻¹;N 含量的变化范围分别为 7.4 ~ 45.5、2.1 ~ 44.0 和 15.2 ~ 21.4 g · kg⁻¹ (图 1)。在拔节、开花、灌浆及成熟期,冬小麦叶片、茎秆和籽粒 C、N 含量在 aCO₂ 和 eCO₂ 处理间均无显著差异。两种 CO₂ 浓度处理下,从灌浆至成熟期,叶片 C 含量显著下降,茎秆 C 含量显著上升;籽粒 C 含量在 aCO₂ 处理下显著下降,但在 eCO₂ 处理下无明显差异。从拔节至成熟期,叶片和茎秆 N 含量都不断降低,

但是两者 N 含量减少的主要阶段出现在不同生育时期,其中叶片 N 含量减少主要出现在成熟期,而茎秆 N 含量减少主要发生在开花期(图 1)。生育时期和 eCO₂ 对茎秆 N 含量存在交互作用,主要表现为拔节期 eCO₂ 处理促进了茎秆 N 含量。从灌浆到成熟期,籽粒 N 含量在 aCO₂ 处理下增加 2.1%,但在 eCO₂ 处理下未发生显著变化,成熟期籽粒 N 含量平均值为 19.5±0.5 g·kg⁻¹。

冬小麦叶片、茎秆和籽粒 C:N 值的变化范围分别为 9.8~56.4、9.1~224.2 和 20.0~28.5,同一生育时期内不同器官 C:N 值在两种 CO₂ 浓度处理间都不存在显著差异。随生育期变化,叶片和茎秆 C:N 值不断增加,成熟期平均值分别为 51.4 和 214.6;籽粒 C:N 值则从灌浆至成熟显著下降至 22.0,这种变化规律不受 CO₂ 浓度升高的影响(图 1)。



C: 二氧化碳处理; S: 生育时期; 不同大写字母表示在 aCO₂ 或 eCO₂ 处理下不同生育时期之间差异显著(P<0.05)。图 2 同。

C: CO₂ treatment; S: Growth stage. Different capital letters show significant differences between the growth stages under aCO₂ or eCO₂ treatments(P<0.05). The same in figure 2.

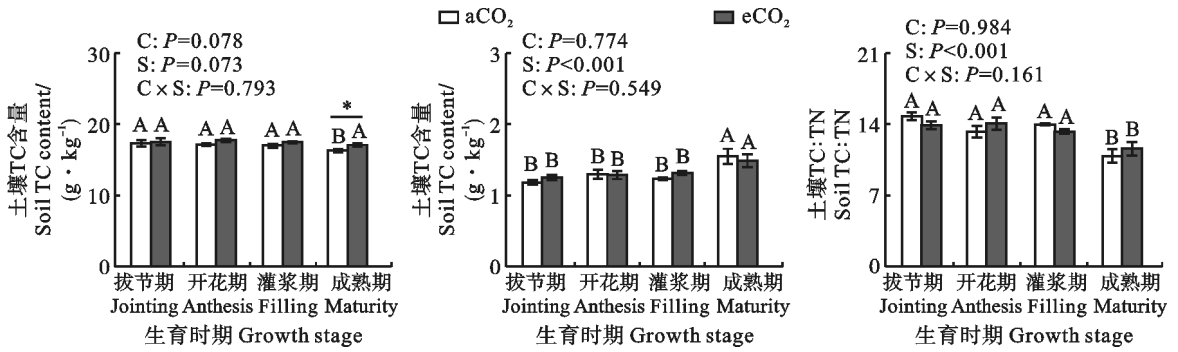
图 1 两种 CO₂ 处理下冬小麦器官不同生育期 C、N 含量及 C:N 值

Fig. 1 C and N contents and C:N ratio of winter wheat organs at different growth stages under two CO₂ treatments

2.2 土壤碳氮化学计量特征

土壤 TC 含量平均为 17.2 g·kg⁻¹, eCO₂ 处理的土壤 TC 含量较 aCO₂ 处理增加约 3.1%。拔节、开花及灌浆期中 eCO₂ 处理对土壤 TC 含量无影响,但成熟期 eCO₂ 处理较 aCO₂ 处理显著增加,增幅 4.9%(P<0.05)。小麦生育期内,土壤 TN 含量在 aCO₂ 和 eCO₂ 处理下都约为 1.3 g·kg⁻¹,同一生育时期内土壤 TN 含量均未响应 CO₂ 浓度升高。总体上,土壤 TC:TN 值在 9.8~

15.3 范围内变化,不受 CO₂ 浓度升高的影响。具体到生育时期,拔节、开花、灌浆及成熟期土壤 TC:TN 值在两种 CO₂ 浓度处理间同样不存在显著差异。不同生育时期的采样结果显示,土壤 TC、TN 含量及 TC:TN 值均存在显著的时间动态(图 2)。成熟期土壤 TC 含量在 aCO₂ 处理下显著降低,而在 eCO₂ 处理下无显著差异;土壤 TN 含量在两种 CO₂ 浓度处理下都在成熟期达到最大。土壤 TC:TN 值显著变化的时间不受 eCO₂



* : 表示同一生育期内在 aCO₂ 和 eCO₂ 处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。
 * : Significant differences between aCO₂ and eCO₂ treatments at the same growth stage ($P < 0.05$).

图2 两种 CO₂ 处理下不同生育时期土壤 TC、TN 含量及 TC:TN 值

Fig. 2 TC and TN contents and TC:TN ratio of soil at different growth stages under two CO₂ treatments

处理影响,从拔节至成熟期不断降低,成熟期平均值为 11.2。

2.3 冬小麦不同器官随土壤养分变化的内稳态分析

通过内稳性模型模拟发现,生育期内冬小麦整体 C 元素的内稳性相对 N 元素较高,且不同器官内稳性存在一定差异(图 3)。冬小麦营养器官内稳态特征相似。叶片所有指标稳态性的回归结

果显著 ($P < 0.1$),C 元素稳态,N 元素和 C:N 敏感态。茎秆 C 元素稳态性的回归结果不显著,为绝对稳态;N 元素和 C:N 回归结果显著 ($P < 0.1$),为敏感态。繁殖器官即籽粒 N 元素稳态性的回归结果不显著,为绝对稳态;其他指标回归结果显著 ($P < 0.1$),表现为籽粒 C 元素稳态,C:N 弱稳态。

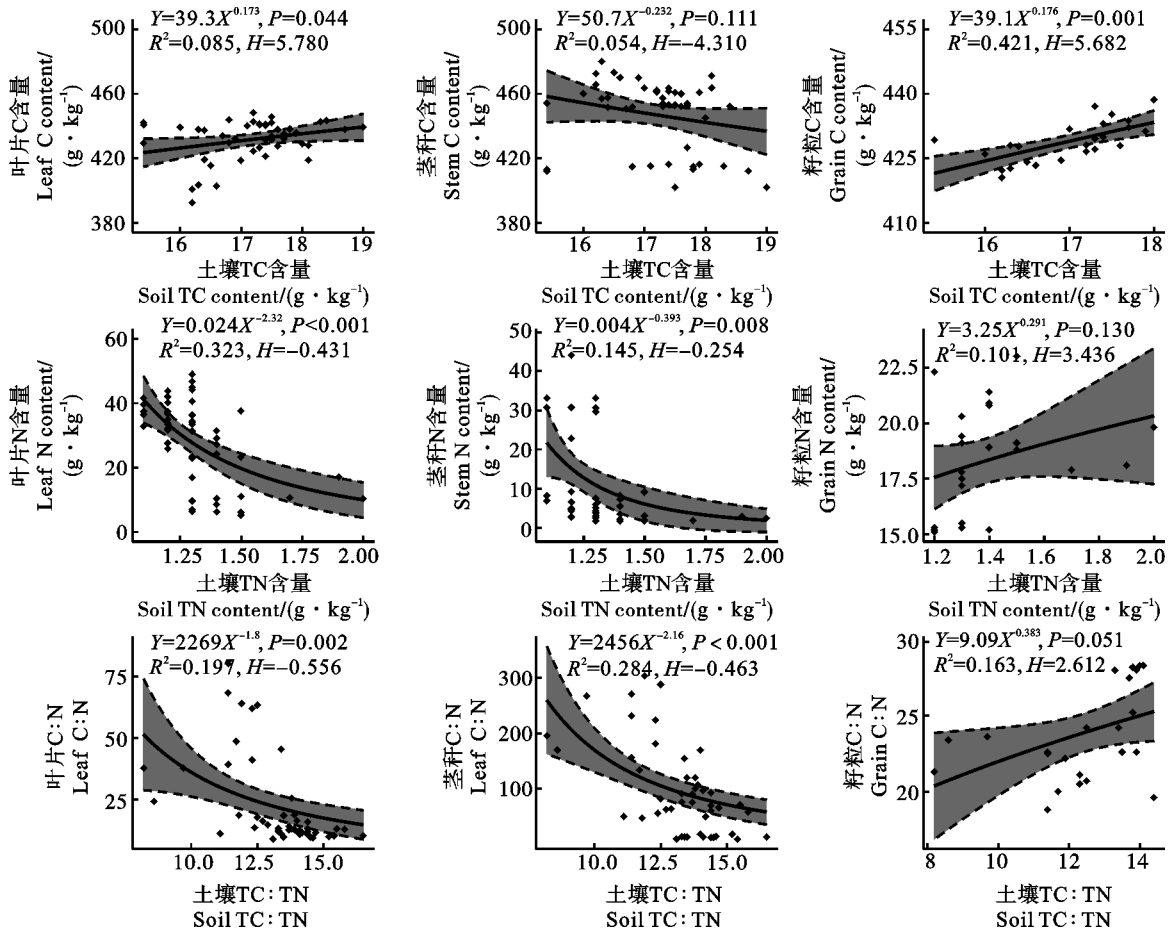


图3 冬小麦器官与土壤之间的内稳态指数分析

Fig. 3 Homeostatic analysis of winter wheat organs and soil

2.4 冬小麦-土壤碳氮化学计量特征关系

由表 1 可知,两种 CO₂ 浓度处理下,小麦与土壤碳氮化学计量特征的相关关系明显不同。aCO₂ 处理下,土壤 TC 含量与叶片 N 含量、叶片 C:N 分别呈显著正相关和负相关($P < 0.05$)。土壤 TN 含量与叶片 C、N 含量呈极显著负相关($P < 0.01$),与叶片 C:N、茎秆 C 含量和茎秆 C:N 分别呈显著正相关和极显著正相关。土壤

TC:TN 与叶片 C、N 含量和籽粒 C 含量分别呈极显著正相关和显著正相关,与叶片 C:N、茎秆 C:N 和茎秆 C 含量分别呈极显著和显著负相关。eCO₂ 处理下,土壤 TN 含量、TC:TN 与叶片 N 含量或叶片 C:N 之间同样存在较强的相关关系,但其余器官 C、N 含量或 C:N 与土壤 TC、TN 含量和 TC:TN 间显著的相关关系均不显著。

表 1 两种 CO₂ 处理下冬小麦-土壤 C、N 化学计量特征之间的皮尔森相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients between C and N stoichiometry of winter wheat and soil under two CO₂ treatments

指标 Index	aCO ₂			eCO ₂			
	TC	TN	TC:TN	TC	TN	TC:TN	
叶片 Leaf	C	0.304	-0.850***	0.865***	0.233	-0.336	0.326
	N	0.445*	-0.579**	0.723***	0.266	-0.511*	0.576**
	C:N	-0.428*	0.455*	-0.612**	-0.225	0.383	-0.468*
茎秆 Stem	C	0.094	0.523*	-0.539*	0.117	0.209	-0.108
	N	-0.113	-0.391	0.398	-0.235	-0.246	0.143
	C:N	-0.270	0.558**	-0.657**	-0.123	0.396	-0.431
籽粒 Grain	C	0.626*	-0.537	0.655*	0.848***	-0.237	0.400
	N	0.187	0.247	-0.245	0.437	0.304	-0.256
	C:N	-0.124	-0.341	0.348	-0.328	-0.375	0.347

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

3 讨论

3.1 冬小麦-土壤碳氮化学计量特征及对 CO₂ 浓度升高的响应

本研究中,农田地上和地下系统的 C 元素对 CO₂ 浓度升高的响应不同,而 N 元素相对一致,表现为冬小麦各器官 C、N 和土壤 TN 含量在两种 CO₂ 浓度处理下无明显差异,但土壤 TC 含量受 eCO₂ 处理影响显著增加。有研究表明,CO₂ 作为植物光合作用的底物,其浓度升高会在短期内促进植物对 C 素的吸收,导致营养元素如 N 素含量下降,即出现“稀释效应”^[19];但长期高 CO₂ 浓度下植物会逐渐适应,高浓度 CO₂ 的促进作用则会减弱或消失,植物表现为“光合适应”的现象^[20]。地上植株系统中,本研究所得冬小麦各器官 C、N 含量不受 eCO₂ 处理影响的结果,可能与所依托的 FACE 平台自 2007 年建立并持续稳定释放 CO₂ 运行至今有关,使得植株对高浓度 CO₂ 环境产生了适应性。Zhang 等^[21] 探讨不同 CO₂ 浓度升高持续时间下棉花生理特性的响应,发现

短时间(45 d)CO₂ 浓度升高后棉花 N 含量显著下降,C:N 值显著增加,但在 75 和 105 d 后 N 含量和 C:N 值的变化则不显著。此外,毛晋花等^[22] 研究表明,CO₂ 浓度升高下,植物自身的呼吸和蒸腾作用及根系分泌物释放过程会增加对 CO₂ 的损耗,因此 CO₂ 浓度升高并不一定意味着植株的 C、N 浓度会相应产生变化。在土壤系统中,本研究观测 CO₂ 浓度升高促进了土壤 C 元素的积累,与 Yu 等^[23] 同样在农田生态系统开展的 10 年 FACE 试验研究结果类似。另一项在草地开展的持续 10 年的 CO₂ 浓度升高试验也发现草地土壤 C 含量产生了明显的升高响应^[24]。而一项来自于欧洲白杨林为期 6 年的研究则发现,CO₂ 浓度升高减少了土壤 C 含量^[25]。总体来说,CO₂ 浓度升高对土壤 C 含量的影响仍存在较大不确定性,会因生态系统类型或试验持续时间等出现差异^[6]。本研究结果表明,尽管土壤碳库的增加幅度较小,长期 CO₂ 浓度升高仍对农田土壤 C 固持存在正效应。

本研究中,总体上冬小麦不同器官 C:N 值和

土壤 TC:TN 值都不响应 CO₂ 浓度升高,但随着冬小麦生长,存在显著的时间变化规律。无论是 aCO₂ 处理还是 eCO₂ 处理下,植株和土壤 C、N 元素计量比都表现出一定的时间变化规律,与唐美玲等^[26]的研究结果一致。由于 N 元素在全生育期内的波动相对 C 元素更明显,因此冬小麦-土壤 C、N 元素计量比随作物生育期的变化主要受 N 元素的影响。有研究认为植物 C:N 值与其生长速率成反比例关系^[27]。而本研究观测到,从拔节至成熟期,冬小麦叶片和茎秆 C:N 值不断增加,而籽粒 C:N 值在其形成阶段则显著下降。这说明冬小麦在生长过程中从营养生长到生殖生长阶段,其叶片和茎秆的生长速率逐渐降低,而籽粒则与之相反。土壤 TC:TN 值在冬小麦生育期内的时间动态特征主要表现为成熟期时显著下降,其比值小于作物不同器官的 C:N 值,与赵航等^[28]的研究结果一致。总体来说,冬小麦-土壤 C、N 化学计量特征在作物生育期内的变化程度高于对 CO₂ 浓度处理的响应。

3.2 冬小麦内稳性特征及与土壤碳氮化学计量特征间相关性

植物内稳态是有机体对外界环境作出反应时许多潜在生理和生化调整的结果^[17]。本研究发现在整体冬小麦各器官中,C 元素的内稳性相对于 N 元素较高,这与有机体中含量较多元素的内稳性要高于含量较少元素的结论一致^[17]。这也表明了该区域冬小麦生长中容易受到土壤养分变化的影响,提高土壤养分含量对作物生长具有积极作用^[11]。冬小麦不同器官 C、N 元素及其 C:N 值的内稳性存在差异,其中籽粒的内稳性相对较高,而叶片和茎秆对土壤环境变化的响应较为迅速。冬小麦在叶片和茎秆生长发育阶段主要通过根系吸收土壤源的养分供应,因此与土壤养分之间关系密切。而作物籽粒形成所需的养分大部分来自叶片或茎秆中的养分转运,故与土壤养分的直接联系不紧密,在面对土壤环境变化时,有叶片和茎秆养分转运的缓冲,具备更强的稳定性^[29]。

植物的生长发育与其生长环境密切相关,土壤养分是植物赖以生长的基础资源,相关性分析能揭示植物-土壤系统不同组分 C、N 化学计量特征指标之间的协调关系^[30]。本研究发现,不同 CO₂ 浓度处理下,冬小麦各器官与土壤 C、N 元素含量及其比值之间的关系存在一定差异。在 aCO₂ 处理下,土壤 TC、TN 含量及 TC:TN 值与

冬小麦叶片和茎秆 C、N 含量及 C:N 值在一定程度上呈现出显著或极显著的相关性,其中土壤 TC:TN 值与叶片和茎秆 C:N 值间极显著或显著的负相关关系与彭亚敏等^[12]研究结果一致。研究发现,土壤与冬小麦籽粒 C、N 含量及其计量比之间的相关关系却相对叶片和茎秆较弱,在一定程度上也证实了本研究关于冬小麦籽粒内稳性较高的结果。在 eCO₂ 处理下,本研究观测到土壤与冬小麦不同器官 C、N 含量和 C:N 值之间显著或极显著的相关关系转变为不显著,植株和土壤 C、N 化学计量特征之间较强的相关关系明显削弱。在 N 限制亚热带森林生态系统中长期提供外源 N 输入,结果发现植物和土壤的化学计量向不同方向演化,导致植物和土壤之间发生解耦合^[15]。基于类似的思考,本研究发现向 C 限制为主的农田系统中,长期进行外源 C 输入(即 CO₂ 浓度升高),冬小麦-土壤化学计量特征间的相关关系也发生了一定程度的解耦合。这种解耦合可以解释为外源性养分元素输入生态系统后,植物和土壤之间已有的稳定化学计量关系被打破,使得其体内的养分失衡,最终导致植物和土壤的化学计量对外界环境变化的响应不一致^[31]。考虑到植物自身遗传特性在植物和土壤相互关系中发挥着重要作用^[32],因此本研究结果在其他小麦品种或作物中是否适用,仍需要更多的研究证据。本部分研究结果反映出,未来气候变化可能增强地上地下关联关系的不确定性。

4 结论

(1)农田冬小麦和土壤的 C、N 化学计量特征对 CO₂ 浓度升高的响应存在差异。CO₂ 浓度升高不影响冬小麦各器官 C、N 含量和 C:N 值,以及土壤 TN 含量和 TC:TN,但显著增加了土壤 TC 含量,表明长期高 CO₂ 浓度环境下,土壤系统对于 C 的固持仍表现为增加。

(2)冬小麦和土壤 C、N 计量特征在作物生育期的变化程度高于对 CO₂ 处理的响应。从拔节期到成熟期,冬小麦叶片和茎秆 C:N 值不断增加,而籽粒在形成阶段其 C:N 值则显著下降,这种变化规律并未受到 CO₂ 浓度升高的影响。

(3)冬小麦整体 C 元素的内稳性高于 N 元素,作物不同器官的内稳性存在差异,繁殖器官(籽粒)的内稳性高于营养器官(叶片和茎秆)。

(4)土壤元素与冬小麦营养器官元素含量之

间存在较强的相关关系,但与籽粒之间的相关性较弱,这可能与籽粒元素部分来自营养器官元素转运有关;在CO₂浓度升高下,冬小麦营养器官和土壤的关联关系被明显削弱,表明环境扰动可能造成地上地下相互关系的解耦合。

参考文献:

- [1]王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937.
- [2]李敏,孙杰,陈雪,等.荒漠植物叶片-土壤化学计量及植物内稳态特征[J].干旱区研究,2024,41(1):104.
LI M, SUN J, CHEN X, et al. Leaf-soil stoichiometry and homeostasis characteristics of desert-related plants [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(1): 104.
- [3]YANG Y, LIU B R, AN S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. *CATENA*, 2018, 166: 328.
- [4]王晓琳,王寅,何奕成,等.黑河下游植物碳氮化学计量特征及其影响因素[J].北京林业大学学报,2023,45(4):50.
WANG X L, WANG Y, HE Y C, et al. Stoichiometric characteristics of carbon and nitrogen in plants and their influencing factors in the lower reaches of the Heihe River, northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(4): 50.
- [5]LI Y, YU Z, YANG S, et al. Impact of elevated CO₂ on C:N:P ratio among soybean cultivars [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133784.
- [6]DU C, WANG X, ZHANG M, et al. Effects of elevated CO₂ on plant C-N-P stoichiometry in terrestrial ecosystems: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 697.
- [7]LIN J, HUANG Y, ZHAO H, et al. Consistent responses of microbial C and N metabolic processes to elevated CO₂ across global terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(2): 403.
- [8]AL-TRABOULSI M, WILSEY B, POTVIN C. The effect of long-term CO₂ enrichment on carbon and nitrogen content of roots and soil of natural pastureland [J]. *Folia Oecologica*, 2021, 48(2): 180.
- [9]YUE K, FORNARA D A, YANG W, et al. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: A global synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2450.
- [10]WANG C, SUN Y, CHEN H Y H, et al. Effects of elevated CO₂ on the C:N stoichiometry of plants, soils, and microorganisms in terrestrial ecosystems [J]. *CATENA*, 2021, 201: 105219.
- [11]田地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682.
TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(7): 682.
- [12]彭亚敏,武均,蔡立群,等.免耕及秸秆覆盖对春小麦-土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].生态学杂志,2021,40(4):1062.
PENG Y M, WU J, CAI L Q, et al. Effects of no-tillage and straw mulching on carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in spring wheat and soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1062.
- [13]孔祥飞,李超,杨广,等.基于Meta分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响[J].农业工程学报,2023,39(11):118.
KONG X F, LI C, YANG G, et al. Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using Meta-analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 118.
- [14]CHEN B, CHEN L, JIANG L, et al. C:N:P stoichiometry of plant, litter and soil along an elevational gradient in subtropical forests of China [J]. *Forests*, 2022, 13(3): 372.
- [15]LI Z, QIU X, SUN Y, et al. C:N:P stoichiometry responses to 10 years of nitrogen addition differ across soil components and plant organs in a subtropical *Pleioblastus amarus* forest [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148925.
- [16]LIU W, JIANG L, HU S, et al. Decoupling of soil microbes and plants with increasing anthropogenic nitrogen inputs in a temperate steppe [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 116.
- [17]张婷婷,刘文耀,黄俊彪,等.植物生态化学计量内稳性特征[J].广西植物,2019,39(5):701.
ZHANG T T, LIU W Y, HUANG J B, et al. Characteristics of plant ecological stoichiometry homeostasis [J]. *Guihaia*, 2019, 39(5): 701.
- [18]PERSSON J, FINK P, GOTO A, et al. To be or not to be what you eat: Regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs [J]. *Oikos*, 2010: 741.
- [19]王亮,朱建国,曾青,等.大气CO₂浓度升高对水稻氮代谢影响的研究进展[J].土壤,2010,42(3):344.
WANG L, ZHU J G, ZENG Q, et al. Responses of nitrogen metabolism in rice plant to elevated atmospheric CO₂: A research review [J]. *Soils*, 2010, 42(3): 344.
- [20]王为民,王晨,李春俭,等.大气二氧化碳浓度升高对植物生长的影响[J].西北植物学报,2000,20(4):676.
WANG W M, WANG C, LI C J, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on growth of plants [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(4): 676.
- [21]ZHANG S, FU W, ZHANG Z, et al. Effects of elevated CO₂ concentration and temperature on some physiological characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaves [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 133: 108.

- [22]毛晋花,邢亚娟,王庆贵.外源碳氮对植物生态化学计量特征的影响研究进展[J].中国农学通报,2018,34(5):54.
MAO J H, XING Y J, WANG Q G. Exogenous carbon and nitrogen; Effects on plant ecological stoichiometry characteristics [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(5):54.
- [23]YU H, HAN M, CAI C, *et al.* Soil organic carbon stability and exogenous nitrogen fertilizer influence the priming effect of paddy soil under long-term exposure to elevated atmospheric CO₂ [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(46):102313.
- [24]ROSS D J, NEWTON P C D, TATE K R, *et al.* Impact of a low level of CO₂ enrichment on soil carbon and nitrogen pools and mineralization rates over ten years in a seasonally dry, grazed pasture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58:265.
- [25]HOOSBEEK M R. Elevated CO₂ increased phosphorous loss from decomposing litter and soil organic matter at two FACE experiments with trees [J]. *Biogeochemistry*, 2016, 127(1):89.
- [26]唐美玲,肖谋良,袁红朝,等. CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5708.
TANG M L, XIAO M L, YUAN H Z, *et al.* Effect of CO₂ doubling and different plant growth stages on rice carbon, nitrogen, and phosphorus and their stoichiometric ratios [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12):5708.
- [27]张尚文,李广,闫丽娟,等.灌水量和追氮方式对春小麦生态化学计量特征的影响[J].麦类作物学报,2020,40(8):945.
ZHANG S W, LI G, YAN L J, *et al.* Effect of irrigation amount and nitrogen fertilization methods on ecological stoichiometry of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(8):945.
- [28]赵航,贾彦龙,王秋风.中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征[J].第四纪研究,2014,34(4):803.
ZHAO H, JIA Y L, WANG Q F. Statistical characteristics of c-n-p stoichiometry in Chinese zonal forest and farmland ecosystems [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4):803.
- [29]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.
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.
- [30]李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].环境科学,2015,36(8):2988.
LI T, DENG Q, YUAN Z Y, *et al.* Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8):2988.
- [31]张世虎,张悦,马晓玉,等.大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述[J].生态学报,2022,42(4):1252.
ZHANG S H, ZHANG Y, MA X Y, *et al.* Mechanisms underlying loss of plant biodiversity by atmospheric nitrogen deposition in grasslands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4):1252.
- [32]王明明,庄伟伟.荒漠短命植物不同生长期化学计量特征与生境土壤因子关系分析[J].植物研究,2022,42(1):138.
WANG M M, ZHUANG W W. The stoichiometric characteristics of desert ephemeral plants in different growth periods and its association with soil factors [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2022, 42(1):138.