

模拟降雨量变化与 CO₂ 浓度升高对 小麦光合特性和碳氮特征的影响

王 佳¹, 冯晓森¹, 聿书贞², 容海亮³

(1. 石家庄学院 资源与环境科学学院, 石家庄 050035; 2. 河南农业大学,
郑州 450000; 3. 石家庄职业技术学院电气与电子工程系, 石家庄 050081)

摘 要:以小麦为试材,连续 3 年采用盆栽试验和开顶式控制气室模拟 CO₂ 浓度变化(350 $\mu\text{mol/mol}$ 和 700 $\mu\text{mol/mol}$)研究了小麦光合特性与碳氮特征对降水变化减少 30%、减少 15%、自然降水、增加 15% 和增加 30% (−30%、−15%、0、15%、30%) 的响应。结果表明:(1) 降雨量变化和 CO₂ 浓度的交互作用显著影响小麦的净光合速率,地上生物量、地下生物量、根冠比和不同器官碳氮含量。在相同 CO₂ 浓度时,随着降雨量的增加,小麦地上生物量、地下生物量和 C/N 显著增加,而根冠比相应地降低。(2) CO₂ 浓度上升明显地促进了小麦根、茎、叶中的碳含量,显著性地抑制了小麦根、茎、叶中氮含量,降雨量增加或减少也显著性地促进或抑制了这一作用。(3) 在降雨量相同条件下,CO₂ 浓度倍增显著性地促进了小麦叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr),降雨量增加促进了小麦叶片净光合速率(Pn)和胞间 CO₂ 浓度(Ci),而抑制了小麦叶片气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。(4) 在未来 CO₂ 浓度升高的背景下,高降雨量对生物量的积累并无显著促进作用,CO₂ 浓度升高可以补偿低水分条件对小麦生长发育所造成的不利影响。

关键词:降雨变化; CO₂; 光合特性; 碳氮; 冬小麦

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)01-0328-07

Influence of Elevated CO₂ and Precipitation Regimes on the Characteristics of Photosynthesis and C, N of Wheat

WANG Jia¹, FENG Xiaomiao¹, MI Shuzhen², RONG Hailiang³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China; 2. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China; 3. Shijiazhuang University of Applied Technology, Department of Electronic and Electrical Engineering, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Atmospheric CO₂ concentrations are predicted to happen from approximately 350 $\mu\text{mol/mol}$, today to over 700 $\mu\text{mol/mol}$ in the late 21st century. A pot experiment was conducted to study the interaction of elevated CO₂ concentration and precipitation changing with the characteristics of photosynthetic characteristics, biomass allocation, and carbon and nitrogen content characteristics in roots, stem, and leaf of wheat. The main plots included two CO₂ concentrations (350 and 700 $\mu\text{mol/mol}$) and five conditions of the precipitation patterns (natural precipitation control 0, 30%, −30%, and 15% of the precipitation (−15%, 15%], and 30%). The results showed that: (1) the interaction between increased CO₂ and precipitation had the significant effects on photosynthetic parameters, below-ground biomass and root: shoot ratio; at 350 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ concentrations, above-ground biomass, below-ground biomass and C/N significantly increased, and root: shoot ratio significantly decreased; (2) the elevated CO₂ increased the carbon and decreased N of different organs, while precipitation regimes promoted or inhibited these results; (3) the elevated CO₂ increased photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs) and intercellular CO₂ concentration (Ci), while precipitation regimes promoted Pn and Ci, and inhibited Gs and transpiration rate; (4) these results suggest that higher precipitation will not increase the biomass of wheat at the future ambient CO₂ levels, furthermore, CO₂ may partly compensate for the negative effect of low precipitation on the growth and development of wheat.

收稿日期: 2018-01-09

修回日期: 2018-03-02

资助项目: 石家庄市科学技术研究与发展计划项目“山地型旅游区生态健康研究与示范”(181790048A)

第一作者: 王佳(1981—), 女, 河北省石家庄人, 讲师, 硕士, 研究方向: 环境与生态方向。E-mail: wangjia5745@sina.com

通信作者: 聿书贞(1980—), 女, 河南南阳人, 副教授, 博士, 研究方向: 全球气候生态学。E-mail: Mishuzhen_HN@163.com

Keywords: precipitation regimes; CO₂; photosynthetic characteristics; C, N; wheat

近半个世纪以来,随着工业的快速发展和有害气体的排放,大气中二氧化碳(CO₂)浓度持续增加^[1-3]。伴随着 CO₂ 浓度的增加,温室效应进一步加剧,导致植物的光合作用增强,地上植被生产力逐渐累积^[4],同时植被的生长发育和生理特性等都受到 CO₂ 浓度增加的影响。已有研究显示,CO₂ 浓度增加会提高农作物的产量^[5-6]。也有部分研究显示,不同光合途径的植物(C3 和 C4 植物)对 CO₂ 浓度增加的响应模式不尽一致,相对于 C3 植物,C4 植物由于特有的光合途径(CO₂ 泵),对 CO₂ 浓度增加的响应较为敏感。然而也有部分研究显示 CO₂ 浓度增加对植物的光合特征作用并不明显,甚至降低了植被的光合作用^[8]。碳和氮是植物重要的营养元素,作物为了适应 CO₂ 浓度增加,在自身生长过程中自动调节各器官碳和氮的比例关系以应对气候变化^[9-10]。其中氮是合成植物蛋白的主要元素,主要通过植被的光合作用被吸收,进入植物后会在植物体内转化为各种含氮有机物,进而影响植物的碳循环等过程^[11]。

大气 CO₂ 浓度增加也会导致植物水分利用效率增加,由此改变植物体内水分周转和碳氮的再分配模式^[12]。例如,有研究表明:干旱胁迫和 CO₂ 浓度增加的交互作用会导致植物地下部分碳水(碳水化合物等)投资比例,进而增加植物根冠比,以适应当前气候变化^[13]。与此同时,碳水化合物在地下部分进一步的累积,对氮素的吸收产生了一定的抑制作用,从而降低了植物地下氮含量和氮素利用效率,限制了植被的生长^[14]。也有相关研究表明:在湿润区,干旱胁迫和 CO₂ 浓度增加促进了植物的光合作用,促进了植物对营养元素的吸收,进而提高了植被生产力和固碳量和固氮量^[15]。由此可知不同区域和不同植物对降水变化 CO₂ 浓度增加的响应模式不尽一致。在未来全球气候变化条件下,降水变化和 CO₂ 浓度增加会协同作用于植物的光合作用和碳氮平衡等过程,二者是同时发生的,然而就当前的研究来看,大量研究将降水变化和 CO₂ 浓度增加对植被的响应区分开来^[16]。因此探讨 CO₂ 升高和降雨变化协同条件下对农作物光合作用的影响对全球碳平衡作用显得尤为重要。

我国是农业大国,作为我国主要的粮食作物之一,小麦具有良好的抗逆性、丰产性、多类性等,受到广大科研工作者和农民的青睐;同时,小麦对于调节生态环境和气候变化具有重要意义^[17]。长江下游平原是我国小麦的主要生产地之一,近半个世纪以来,随着工业化的推进,CO₂ 浓度升高,表现出了明显的温室效应,随着日照时间的增加,该区域小麦产量也逐年下降^[18]。虽然前人对小麦根系、叶片、产量、光合特征、生物量分配以及

碳氮平衡等方面取得了一系列的研究成果^[19]。然而,当前在 CO₂ 浓度升高和降水变化背景下,小麦的生长特征和光合特征如何变化以及对全球变化的响应模式还有待深入探讨。鉴于此,以小麦为试材,连续 3 年采用盆栽试验和开顶式控制气室模拟 CO₂ 浓度变化(350 μmol/mol 和 700 μmol/mol)研究小麦光合特性与碳氮特征对降水变化减少 30%、减少 15%、自然降水、增加 15% 和增加 30%(-30%,-15%,0,15%,30%)的响应,旨在探讨在未来气候变化背景下长江下游平原地区关于小麦的发展和适应对策。

1 材料与方法

1.1 试验设计

在河南农业大学校内试验基地,开展本次试验。试验时间为 2015—2017 年 4 月—11 月。苗圃 4 月底选取幼苗,在种植盒内移栽培育。种植盒高 50 cm,长 30 cm,宽 60 cm。每盒栽种 8 株。土壤选取农田 0—20 cm 土层。为防止水泄漏,排水孔在种植盒底部,排水孔下套塑料袋。降水处理以及 CO₂ 熏气时间,选择待缓苗 1 个月后于 5 月初开始进行。

为了进行相关的试验效果对比,本试验采取不同 CO₂ 浓度下的试验分析,经过测定发现目前浓度为 345~355 μmol/mol,试验中设置浓度为 690~7 105 μmol/mol,同时为了提升对比准确性,不同的浓度之下分别进行三次试验,同时设置开顶式 CO₂ 控制气室,长、宽、高分别为 2.5,1.5,1.5 m,气源置于液体钢瓶,控制系统进行全天候的监控;光源为自然光,温度控制在室外温度的±1.5℃,并对温度及湿度进行测量。通过数据统计发现,该地区 5—9 月的降雨量就达到了全年的 85%以上,其月均降雨量近 70 mm,多年的降雨数据显示该地区年均降雨量增减幅度约在 30%,本试验根据不同的 CO₂ 浓度水平选取不同的降水设置,且进行降水量±15%,±30%,对照(0)的处理,控制 5 个降水梯度,月均降雨量作为基准,并换算各月的总灌水量,灌水次数为 10 次。此外,我们每半个月置换两个气候室内的花盆,同时更改 CO₂ 处理的设置以尽量减少气候室差异造成的系统误差。

1.2 测定方法

检测气体交换光合生理特征,使用便携式光合作用测量系统(LI-6400 系列,美国 LI-COR 公司生产)。每隔两小时测定一次,从 2015—2017 年 7 月下旬,具体开始于早上 7:00,结束是晚上 7:00。连续重复测定 3 日。每株选取年生的成熟叶片。重复测定,每个处理选择 3 株健康油茶。从植株顶部数完全展开的成熟叶,第 3~6 片。为消除时间误差,进行轮流测定。测定选取充分受

光、叶位一致的叶片进行,上、中、下当年生成熟叶。空气相对湿度 24.6%~45.7%,辐射强度(PAR)为 112~1 371 mol/(m²·s),CO₂流量为 400 mol/L。红蓝光源光照设定为 1 000 mol/(m²·s)。不同测定日期温度变化为 22.1~35.4℃。以外界条件为准,为 PAR 和 CO₂浓度。光照强度(PAR)、环境 CO₂浓度(Ca)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO₂浓度(Ci)、净光合速率(Pn),用仪器记录。

采取 5 株完整的小麦,测定生物量,烘干根、茎和叶,分别检测。在每个开顶式 CO₂控制气室,以及相同时间选取。然后粉碎,对氮含量、碳含量、根、茎和叶进行检测。

数据采用 Excel 2007.0 记录,并使用 SPSS 18.0 进行分析,进行显著性检验,采用最小显著法(LSD)、单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 降雨量变化和 CO₂浓度升高对小麦生物量积累的影响

小麦的地上生物量、总生物量和根冠比,与 CO₂浓度升高显著相关,小麦的总生物量,以及地上、地下生物量与降雨量变化有显著的关系,但对于根冠比来

说,CO₂浓度升高、降雨量变化的交互作用,没有明显的关系(表 1)。CO₂浓度升高,降雨量从由正常水平,不断上升,增加到高水平,根冠比没有明显的差异,也没有增加小麦单株的总生物量,以及地上、地下生物量。CO₂浓度升高,降雨量由低水平,上升到正常水平,根冠比显著减少,明显增加小麦单株的总生物量,地上、地下生物量。目前的 CO₂水平,随着降雨量的增加,增加小麦单株的总生物量,以及地上、地下生物量。表明,对于根冠比、地下生物量,降雨量增加,CO₂浓度升高,有拮抗效应。

CO₂浓度倍增,对小麦生物量有明显的促进作用。降雨量减少,使小麦地上、地下生物量减少。降雨增加,对小麦地上、地下生物量有促进作用。对小麦根冠比,并没有明显的影响($p>0.05$)。CO₂浓度升高,高降雨量,以及正常降雨量下,小麦的根冠比明显减少($p<0.05$)。在低降雨量时,CO₂浓度升高,对增加小麦的总生物量有明显的影响。但高降雨量时,CO₂浓度升高,对小麦的总生物量没有影响。正常降雨量时,CO₂浓度升高,对地上生物量有明显的促进作用。在干旱时,CO₂浓度升高,会增加根系的分配,使水分吸收。在水分适宜的条件下,CO₂浓度升高,对小麦地上植被的生长有促进作用。

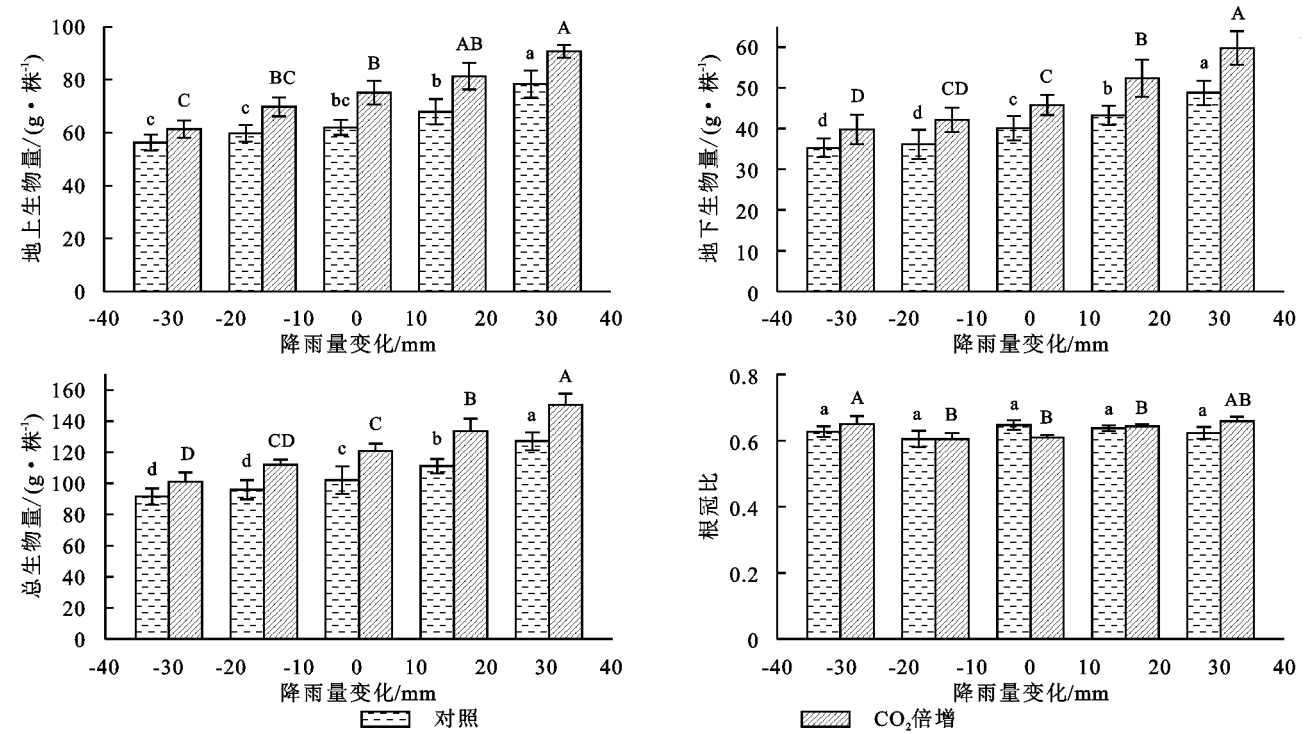


图 1 不同 CO₂浓度和降雨量下小麦生物量和根冠比的变化

2.2 降雨量变化和 CO₂浓度升高对小麦根、茎、叶中碳氮含量特征的影响

如表 2 所示,进行双因素方差分析,结果显示,小麦根、茎、叶碳含量,受 CO₂浓度升高、降水量变化,

以及交互作用的明显影响($p<0.05$)。降雨量增加,对小麦根茎叶的碳含量有明显的促进作用,降雨量减少,对小麦根茎叶的碳含量有明显的抑制作用,CO₂浓度倍增,小麦根、茎、叶的碳含量明显增加,如图 2

所示。在-30%，-15%，0，15%，30%这五种降雨条件下，根碳含量比自然 CO₂ 浓度下，有明显增加，-30%条件下是 44.86%，叶碳含量增加 32.51%，茎碳含量增加 9.36%，-15%是 44.82%，叶碳含量增加35.56%，茎碳含量增加 12.50%；0 是 41.07%，叶碳含量增加 35.56%，茎碳含量增加 9.96%；15%是 37.23%，叶碳含量增加 33.95%，茎碳含量增加 13.84%；30%是 30%，叶碳含量增加 31.86%，茎碳含量增加 15.79%。可以看出，CO₂倍增条件下，降雨量增加时，小麦根、茎、叶中的碳含量积累比降雨量减少是高。

双因素方差分析结果显示，小麦茎、叶氮含量，与降水量变化、CO₂ 浓度升高交互作用，以及单独作用都有明显相关关系($p<0.05$)。小麦根氮含量受降水量变化及与 CO₂ 的交互作用明显影响($p<0.05$)，但与 CO₂ 浓度升高没有明显关系($p>0.05$)。降雨量增加可促进小麦根、茎、叶的氮含量增加。随着 CO₂ 浓度倍增，小麦根、茎、叶的氮含量明显下降。在-30%，-15%，0，15%，30%这五种降雨条件下，-30%时，根氮含量比自然 CO₂ 浓度下降低 12.21%，叶氮含量降低 72.60%，茎氮含量降低了 38.05%；-15%时，根氮含量降低 13.30%，叶氮含量降低 72.37%，茎氮含量降低了 37.07%；0 时，根氮含量降低 16.57%，叶氮含量降低 91.03%，茎氮含量降低了 37.07%；15%时，根氮含量降低 11.22%，叶氮含量降低 76.22%，茎氮含量降低了 29.60%；30%时，根氮含量降低 17.73%，叶氮含量降低 62.91%，茎氮含量降低了 22.46%。由此看出，CO₂ 浓度倍增条件下小麦茎和根系氮的含量下降，明显低于叶片中氮的含量下降幅度。

表 2 CO₂ 浓度升高及降水变化对小麦根、茎、叶中碳氮含量的双因素方差分析结果

项目		CO ₂ 浓度		降雨量		CO ₂ 浓度×降雨量	
		<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
碳含量	根	69.58	<0.01	68.93	<0.01	56.28	<0.01
	茎	53.24	<0.01	82.57	<0.01	62.39	<0.01
	叶	37.25	<0.01	15.62	0.628	29.87	<0.01
氮含量	根	56.98	<0.01	32.69	<0.01	65.02	<0.01
	茎	63.15	<0.01	9.85	0.061	59.78	<0.01
	叶	42.78	<0.01	61.38	<0.01	11.13	0.058
C/N	根	13.06	0.052	74.69	<0.01	61.03	<0.01
	茎	54.77	<0.01	9.23	0.069	7.56	0.069
	叶	53.02	<0.01	10.41	0.053	6.98	0.061

2.3 降雨量变化和 CO₂ 浓度升高对小麦叶片光合特性的影响

如表 3 所示，小麦叶片净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、气孔导度(Gs)，与 CO₂ 浓度升高、降雨量变化有明显的影响($p<0.05$)。在

表 1 CO₂ 浓度升高及降水变化对小麦生物量和根冠比影响的双因素方差分析结果

项目	CO ₂ 浓度		降雨量		CO ₂ 浓度×降雨量	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
地上生物量	68.98	<0.01	52.03	<0.01	68.15	<0.01
地下生物量	79.23	<0.01	68.47	<0.01	56.30	<0.01
总生物量	90.24	<0.01	35.17	<0.01	42.78	<0.01
根冠比	5.27	0.068	62.01	<0.01	9.85	0.074

双因素方差分析结果显示，CO₂ 浓度升高，与小麦根碳氮比明显相关($p<0.05$)，降水量变化、CO₂ 浓度升高交互作用、单独作用，都明显影响小麦茎、叶碳氮含量($p<0.05$)。小麦根碳氮与降水量变化、CO₂ 浓度升高交互作用没有明显的关系。降雨量增加可促进小麦根、茎、叶的 C/N。随着 CO₂ 浓度倍增，小麦根、茎、叶的 C/N 明显增加。在-30%，-15%，0，15%，30%这五种降雨条件下，-30%时，相比自然 CO₂ 浓度下，根 C/N 增加 50.86%，叶碳氮比增加 60.90%，茎 C/N 增加 34.35%；-15%时，根 C/N 增加 47.76%，叶碳氮比增加 62.62%，茎 C/N 增加 36.16%；0 时，根 C/N 增加 49.45%，叶碳氮比增加 67.14%，茎 C/N 增加 30.53%；15%时，根 C/N 增加 35.62%，叶碳氮比增加 62.52%，茎 C/N 增加 31.07%；30%时，根 C/N 增加 28.28%，叶碳氮比增加 58.17%，茎 C/N 增加 28.28%。因此，CO₂ 浓度倍增条件下叶片中氮的含量下降幅度比小麦茎和根系氮的含量下降幅度高。CO₂ 增加，降雨量减少时，小麦根茎叶 C/N 增幅比降雨量增加时更高。CO₂ 浓度倍增，茎和根系中氮含量下降幅度，比叶片中低，C/N 增加幅度比叶片中明显小。

目前 CO₂ 水平下，增加降雨量，蒸腾速率增长的幅度高于净光合速率，蒸腾速率、气孔导度、净光合速率明显上升。相比正常降雨量、低降雨量条件下，在高降雨量时，水分利用效率更低($p<0.001$)。在 CO₂ 倍增时，相比正常降雨量，高降雨量条件下净光合速率

更高,但差异不显著。

如图 3 所示,CO₂浓度倍增显著性地促进了小麦叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr),降雨量增加促进了小麦叶片净光合速率(Pn)和胞间 CO₂ 浓度(Ci),而抑制了小麦叶片气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr),5 种降雨条件下(−30%、−15%、0、15%、30%)小麦叶片净光

合速率(Pn)分别比自然 CO₂ 浓度下增加了 31.44%, 29.04%, 24.64%, 21.27% 和 12.53%;胞间 CO₂ 浓度(Ci)分别增加 44.22%, 40.60%, 39.16%, 40.65% 和 41.33%;气孔导度(Gs)分别降低了 20.93%, 23.21%, 16.67%, 25.20% 和 18.62%;蒸腾速率(Tr)分别降低了 64.21%, 74.79%, 136.99%, 131.63% 和 119.75%。

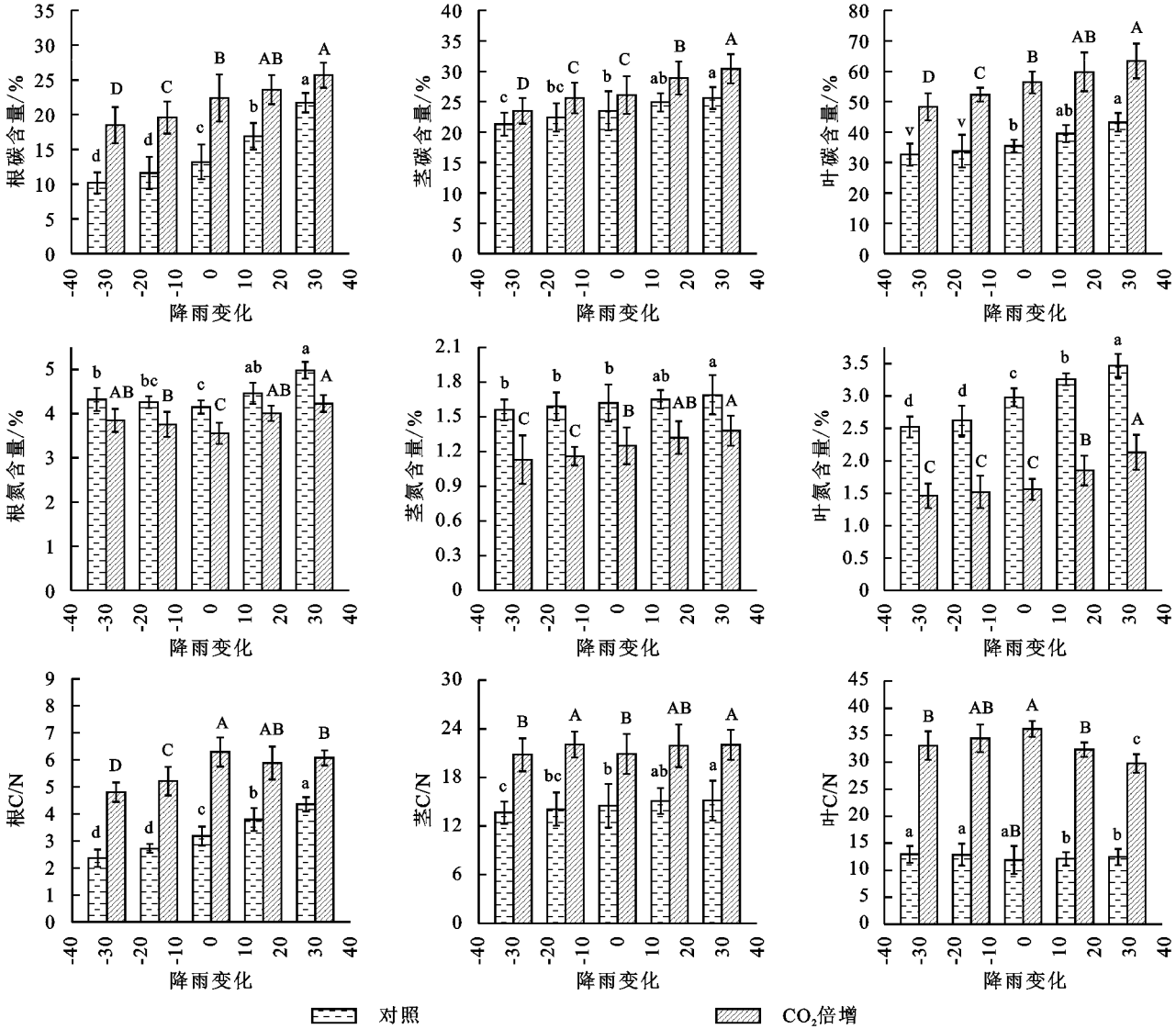


图 2 不同 CO₂ 浓度和降雨量下小麦根、茎、叶中碳氮含量

表 3 CO₂ 浓度升高及降水变化对小麦叶片光合特性的双因素方差分析结果

项目	CO ₂ 浓度		降雨量		CO ₂ 浓度×降雨量	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
光合速率 Pn/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	89.26	<0.01	72.13	<0.01	106.32	<0.01
气孔导度 Gs/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	83.02	<0.01	65.98	<0.01	85.13	<0.01
胞间 CO ₂ 浓度 Ci/(μl ⁻¹ ·L ⁻¹)	75.16	<0.01	83.05	<0.01	92.17	<0.01
蒸腾速率 Tr/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	91.45	0.068	87.44	<0.01	70.31	0.074

3 讨论

在 CO₂ 浓度为 760 μmol/mol 时,高降雨量、正

常降雨量条件下净光合速率没有明显的差异。CO₂ 浓度为 380 μmol/mol 时,降雨量下降时净光合速率明显下降,反之亦然。净光合速率的变化,类似于生

物量的变化趋势。在高降雨量时,CO₂ 浓度升高,对促进小麦叶片的光合作用,表现十分微弱。因此,可为小麦长期的适应提供相应的对策^[23]。在高 CO₂ 浓度的背景下,由于小麦长期适较干旱环境,增加较多的降雨量,并不会明显促进小麦的净光合速率以及生物量累积。

本次研究显示,降雨量增加,茎叶中碳的积累比根中碳的积累高。CO₂ 浓度倍增下根、茎、叶碳氮比明显增加,氮含量明显降低,小麦根、茎、叶的碳含量明显上升。由于产生了“稀释效应”,CO₂ 浓度增加,小麦生物量也明显上升。植株碳积累和生物量的增长,可提升氮素利用

效率,建立新的碳氮分配格局^[24]。叶片中 C/N 明显上升,氮含量明显下降。高浓度 CO₂ 时,植物响应可重新分配碳、氮。植物光合速率上升,增加糖、淀粉等非结构性碳水化合物,稀释组织中的氮素含量,从而降低氮含量,但可增加叶片中的碳水化合物,较多稀释氮素,降低氮含量。叶片中的 C/N 增加也最多^[25]。在低降雨量时,CO₂ 浓度升高,影响小麦的净光合速率最明显,可能是由于减少蒸腾作用,底物浓度增加,促进植物的光合速率^[26],使底物浓度增加,高降雨量时,对植物的净光合速率没有明显的影响,气孔导度迅速降低,会对 CO₂ 的进入发生阻碍作用。

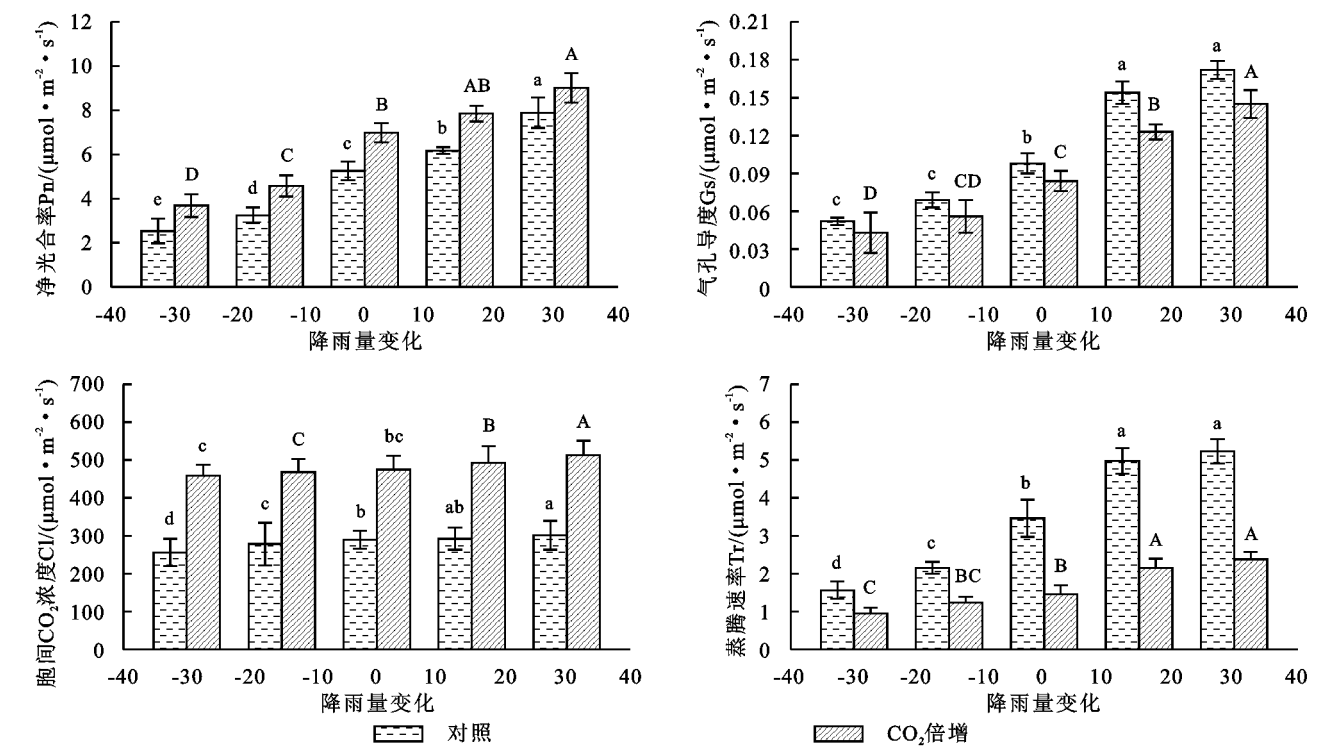


图 3 不同 CO₂ 浓度和降雨量下小麦叶片光合特性

小麦对碳的固定加强,表现在净光合速率的增加。CO₂ 浓度升高,增加小麦单株的总生物量。在正常降雨量和高降雨量时,小麦的根冠比下降,在低降雨量时,小麦的根冠比上升,这一结果与前人的研究结论相同^[27]。可能是由于 CO₂ 的作用,使小麦的水分利用效率上升,但在低降雨量时,土壤的保水能力增加,小麦受到干旱胁迫,为供应地上部分植株的生长,会使地下生物量吸收的养分和水分更多^[28]。CO₂ 浓度上升,低降雨量条件下,CO₂ 作为光合底物,发挥共同作用,促进植株水分利用效率,以及小麦的碳吸收,实现小麦生长和生物量的积累^[29]。总之,本次研究结果显示,CO₂ 浓度上升,降雨量增加到一定程度后,并不会明显促进小麦生物量的积累,并且会使根系的投入减少。目前的 CO₂ 浓度条件下,增加降雨量,会增加小麦生物量,并提高净光合速率。

4 结论

(1) 降雨量变化和 CO₂ 浓度的交互作用显著影响小麦的净光合速率、地上生物量、地下生物量、根冠比和不同器官碳氮含量。在相同 CO₂ 浓度时,随着降雨量的增加,小麦地上生物量、地下生物量和 C/N 显著增加,而根冠比相应降低。

(2) CO₂ 浓度上升显著性地促进了小麦根、茎、叶中的碳含量,显著性地抑制了小麦根、茎、叶中氮含量。

(3) 在降雨量相同条件下,CO₂ 浓度倍增显著性地提高小麦叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr),降雨量增加促进了小麦叶片净光合速率(Pn)和胞间 CO₂ 浓度(Ci),而抑制了小麦叶片气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。

(4) 在未来 CO₂ 浓度升高的背景下,高降雨量

对生物量的积累并无显著的促进作用, CO_2 浓度升高可以补偿低水分条件对小麦生长发育所造成的不利影响。

参考文献:

- [1] Xu Z, Shimizu H, Ito S, et al. Effects of elevated CO_2 , warming and precipitation change on plant growth, photosynthesis and peroxidation in dominant species from North China grassland[J]. *Planta*, 2014, 239(2):421-435.
- [2] Reyes-Fox M, Steltzer H, Trlica M J, et al. Elevated CO_2 further lengthens growing season under warming conditions[J]. *Nature*, 2014, 510(7504):259-262.
- [3] 白莉萍, 周广胜. 小麦对大气 CO_2 浓度及温度升高的响应与适应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(4):23-26.
- [4] Reich P B, Hobbie S E, Lee T D. Plant growth enhancement by elevated CO_2 eliminated by joint water and nitrogen limitation[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12):920-924.
- [5] García-Palacios P, Vandegehuchte M L, Shaw E A, et al. Are there links between responses of soil microbes and ecosystem functioning to elevated CO_2 , N deposition and warming? A global perspective [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4):1590-1600.
- [6] 尹飞虎, 李晓兰, 董云社, 等. 干旱半干旱区 CO_2 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2):235-244.
- [7] 孟凡超, 张佳华, 郝翠, 等. CO_2 浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(7):2126-2135.
- [8] 刘玉洁, 陶福祿. 气候变化对小麦生物量影响的概率预测和不确定性分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(3):337-345.
- [9] O'leary G J, Christy B, Nuttall J, et al. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO_2 under a free-air CO_2 enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7):2670-2686.
- [10] Ukkola A M, Prentice I C, Keenan T F, et al. Reduced streamflow in water-stressed climates consistent with CO_2 effects on vegetation [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(1):75-78.
- [11] 田展, 刘纪远, 曹明奎. 气候变化对中国黄淮海农业区小麦生产影响模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(4):598-607.
- [12] Kauwe M G, Medlyn B E, Zaehle S, et al. Forest water use and water use efficiency at elevated CO_2 : a model-data intercomparison at two contrasting temperate forest FACE sites [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6):1759D1779.
- [13] 柴如山, 牛耀芳, 朱丽青, 等. 大气 CO_2 浓度升高对农产品品质影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10):2765-2775.
- [14] Newingham B A, Vanier C H, Charlet T N, et al. No cumulative effect of 10 years of elevated CO_2 on perennial plant biomass components in the Mojave Desert [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(7):2168-2181.
- [15] Meier I C, Pritchard S G, Brzostek E R, et al. The rhizosphere and hyphosphere differ in their impacts on carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO_2 [J]. *New Phytologist*, 2015, 205(3):1164-1174.
- [16] Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, et al. Rice cultivar responses to elevated CO_2 at two free-air CO_2 enrichment (FACE) sites in Japan [J]. *Functional Plant Biology*, 2013, 40(2):148-159.
- [17] Poulter B, Frank D, Ciais P, et al. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle [J]. *Nature*, 2014, 509(7502):600-603.
- [18] Brussaard C P D, Noordeloos A A M, Witte H, et al. Arctic microbial community dynamics influenced by elevated CO_2 levels [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2):719-731.
- [19] Evans R D, Koyama A, Sonderegger D L, et al. Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO_2 [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5):394-397.
- [20] Cai C, Yin X, He S, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO_2 and temperature in FACE experiments [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2):856-874.
- [21] Newton P C D, Lieffering M, Parsons A J, et al. Selective grazing modifies previously anticipated responses of plant community composition to elevated CO_2 in a temperate grassland [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1):158-169.
- [22] Vaughan M M, Huffaker A, Schmelz E A, et al. Effects of elevated CO_2 on maize defence against mycotoxigenic *Fusarium verticillioides* [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(12):2691-2706.
- [23] Fulweiler R W, Maguire T J, Carey J C, et al. Does elevated CO_2 alter silica uptake in trees [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 5:793.
- [24] Duursma R A, Gimeno T E, Boer M M, et al. Canopy leaf area of a mature evergreen *Eucalyptus* woodland does not respond to elevated atmospheric [CO_2] but tracks water availability [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4):1666-1676.

60 cm 土壤含水率差异达到显著性水平($p>0.05$)。

(2) 黑色地膜在低温季节的增温保温效果显著,且在高温季节和时段具有一定的降温效应,使得作物免遭高温危害。

(3) 地膜覆盖条件有效促进了玉米植株的生长发育,生育前期覆膜处理地上部生物量均显著高于不覆膜处理($p<0.05$),玉米进入抽雄吐丝期以后,覆膜效应及近丧失,各处理间差异减弱。

(4) 两种颜色地膜覆盖处理间穗长、穗粗和穗粒数产异性不显著($p>0.05$),但均显著高于不覆膜处理($p<0.05$)。且黑色地膜覆盖百粒重和产量最高,百粒重平均较白色地膜和不覆膜高 6.37%和 11.95%,产量高 5.12%和 22.90%。

参考文献:

[1] 赵靖丹,李瑞平,史海滨,等.滴灌条件下地膜覆盖对玉米田间土壤水热效应的影响[J].节水灌溉,2016(1):6-9,15.

[2] 李仙岳,彭遵原,史海滨,等.不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):97-103.

[3] 李尚中,樊廷录,王勇,等.旱地玉米抗旱覆膜方式研究[J].核农学报,2009,23(1):165-169.

[4] 倪东宁,史海滨,李瑞平,等.春玉米覆膜垄作沟灌条件下土壤水热效应及对产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(2):89-94.

[5] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].农业工程学报,2008,24(4):99-102.

[6] Zaongo C G L, Wendt C W, Lascaono R J, et al. Interactions of water, mulch and nitrogen in Niger. [J]. Plant and Soil, 1997,197(1):119-126.

[7] 董朝阳,杨晓光,杨婕,等.中国北方地区春玉米干旱的时间演变特征和空间分布规律[J].中国农业科学,2013,46(20):4234-4245.

[8] 张琴.不同颜色地膜覆盖对玉米土壤水热状况及产量的影响[J].节水灌溉,2017(4):57-61.

[9] Miles C, Wallace R, Wszelaki A, et al. Deterioration of potentially biodegradable alternatives to black plastic mulch in three tomato production regions[J]. Hort Science, 2012,47(9):1270-1277.

[10] 周丽娜,于亚薇,孟振雄,等.不同颜色地膜覆盖对马铃薯生长发育的影响[J].河北农业科学,2012,16(9):18-21.

[11] 路海东,薛吉全,郝引川,等.黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J].生态学报,2016,36(7):1997-2003.

[12] 严涛.常温可逆温致变色农用塑料薄膜光谱透射率及其对温度的影响[J].安徽农业科学,2009,37(15):6822-6824.

[13] 乔海军,黄高宝,冯福学,等.生物全降解地膜的降解过程及其对玉米生长的影响[J].甘肃农业大学学报,2008,10(5):71-75.

[14] 郑和祥,郭克贞,郝万龙.作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J].水土保持研究,2011,18(3):210-212.

[15] 霍铁珍,郭彦芬,韩翠莲,等.不通覆膜处理对土壤水热效应及春玉米产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(5):124-128.

(上接第 334 页)

[25] AbdElgawad H, Peshev D, Zinta G, et al. Climate extreme effects on the chemical composition of temperate grassland species under ambient and elevated CO₂: a comparison of fructan and non-fructan accumulators [J]. Plos One, 2014,9(3):e92044.

[26] Mette K, Kühl S, Düdder H, et al. Stable performance of Ni catalysts in the dry reforming of methane at high temperatures for the efficient conversion of CO₂ into syngas[J]. Chemcatchem., 2014,6(1):100-104.

[27] Eller F, Lambertini C, Nguyen L X, et al. Increased invasive potential of non-native Phragmites australis: elevated CO₂ and temperature alleviate salinity effects

on photosynthesis and growth[J]. Global Change Biology, 2014,20(2):531-543.

[28] Bauweraerts I, Wertin T M, Ameye M, et al. The effect of heat waves, elevated CO₂ and low soil water availability on northern red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings[J]. Global Change Biology, 2013,19(2):517-528.

[29] Eisenhauer N, Dobies T, Cesarz S, et al. Plant diversity effects on soil food webs are stronger than those of elevated CO₂ and N deposition in a long-term grassland experiment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(17):6889-6894.