

调亏灌溉下施氮量对农田CO₂固定排放和花生产量的影响

夏桂敏¹ 王瑞敏¹ 黄旭² 聂修平¹ 郑俊林¹ 迟道才¹
(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 抚顺市水利勘测设计研究院有限公司, 抚顺 113008)

摘要: 为探究调亏灌溉条件下施氮量对辽宁地区花生农田CO₂固定排放的影响,于2018、2019年设置测坑裂区试验,研究了不同灌溉模式(全生育期充分灌溉(F)和花针期、饱果期调亏灌溉(D))下施氮量(0 kg/hm²(N0)、50 kg/hm²(N50)、100 kg/hm²(N100)、150 kg/hm²(N150))对花生植株干物质积累量、固碳量及产量等的影响。研究表明,与F处理相比,D处理下花生植株干物质积累量、固碳量及产量分别提高了7.59%、15.08%和7.16%(2年平均)。两种灌溉模式下,花生植株干物质积累量、固碳量及产量均随施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,在100 kg/hm²施氮水平下达到最大值。从苗期至饱果期,花生农田土壤CO₂排放量呈先升高后降低的趋势,在花针期达到最大值。与F处理相比,D处理显著降低了花针期、结荚期及饱果期土壤CO₂平均排放量及全生育期CO₂累积排放量。两种灌溉模式下,土壤CO₂排放量均随施氮量的增加而显著增加。相同施氮水平下,调亏灌溉较充分灌溉处理显著降低了全生育期CO₂累积排放量,DN100处理较FN100处理CO₂累积排放量降低了7.51%(2年平均)。不同水氮处理下,DN100处理花生植株固碳量和产量最大,且CO₂排放量较低,是花生农田生态系统固碳减排的最佳处理。

关键词: 花生农田; 调亏灌溉; 施氮量; 固碳量; 产量

中图分类号: S275.6; S565.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0349-10 OSID: 

Effects of Nitrogen Application Rates on CO₂ Sequestration and Emissions, and Yield in Peanut Field under Regulated Deficit Irrigation

XIA Guimin¹ WANG Ruimin¹ HUANG Xu² NIE Xiuping¹ ZHENG Junlin¹ CHI Daocai¹
(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Water Resources Survey and Design Research Institute Co., Ltd. of Fushun, Fushun 113008, China)

Abstract: To explore the impact of nitrogen application rates on CO₂ sequestration and emissions in peanut field under regulated deficit irrigation in Liaoning Province, a split plot experiment was conducted in lysimeter in 2018 and 2019 to study the effects of different irrigation regimes (full irrigation during the whole growth period (F) and regulated deficit irrigation at the flowering and pod filling stages (F)) and nitrogen application rates (0 kg/hm² (N0), 50 kg/hm² (N50), 100 kg/hm² (N100), 150 kg/hm² (N150)) on dry matter accumulation, carbon sequestration and peanut yield an so on in farmland. The results showed that the dry matter accumulation, carbon sequestration, and peanut yield under the D treatment were 7.59%, 15.08% and 7.16% (two years average) higher than that under the F treatment, respectively. Under the two irrigation regimes, the dry matter accumulation, carbon sequestration and peanut yield were increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rates, and reached the maximum value at the 100 kg/hm² nitrogen level. From the seedling to the pod filling stage, CO₂ emissions in peanut field was increased first and then decreased, and reached the maximum value at the flowering stage. Compared with the F treatment, D treatment significantly reduced the average CO₂ emissions in the soil at the flowering, pod setting, and pod filling stages, and decreased the cumulative CO₂ emissions during the entire growth period. Under the two irrigation regimes, soil CO₂ emissions were increased with the increase of nitrogen application rates. Under the

收稿日期: 2021-10-30 修回日期: 2021-11-24
基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2021-BS-143, 20180550819)和辽宁省教育厅科学研究项目(LJKZ0695, LSNJC202003)
作者简介: 夏桂敏(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事农业与生态节水理论及技术研究, E-mail: xiagm1229@126.com
通信作者: 郑俊林(1990—),男,讲师,博士,主要从事水肥调控与高效利用研究, E-mail: junlinzheng@syau.edu.cn

same nitrogen application level, D treatment significantly reduced the cumulative CO₂ emissions during the whole growth period compared with F treatment. The cumulative CO₂ emissions in the DN100 treatment were 7.51% (two years average) lower than that of the FN100 treatment. Under different irrigation and nitrogen treatments, the DN100 treatment had the largest carbon sequestration and peanut yield, and relatively lower CO₂ emissions, which was the best combination for carbon sequestration and CO₂ emission reduction in peanut farmland ecosystem.

Key words: peanut field; regulated deficit irrigation; nitrogen application rates; carbon sequestration; yield

0 引言

农田生态系统是陆地生态系统碳循环过程中最活跃的碳库^[1],其参与农田碳循环的途径主要有两种,一是利用区域内的植物对空气中的 CO₂ 进行有效固定,二是该生态系统内土壤的呼吸作用会释放出一定量的 CO₂ 和 CH₄,既发挥重要的“碳汇”作用,也是重要的“碳源”^[2]。RAICH 等^[3]研究指出,每年有 1/10 的大气 CO₂ 通过植物的光合作用被固定。土壤水分、氮含量是影响作物碳积累的重要因子,合理调控水、氮供应有利于作物对 CO₂ 的固定。魏廷邦等^[4]研究表明,低水情况下施肥对夏玉米干物质积累量和产量具有明显的调控作用。张忠学等^[5]研究黑土稻田碳循环发现,控制灌溉模式下各施氮量处理水稻各器官固碳量均高于常规淹灌。土壤呼吸是农田生态系统碳循环的一个重要过程。据统计,每年以土壤呼吸的形式向大气中排放的 CO₂ 量约为化学燃料燃烧释放量的 10 倍^[6],是导致大气 CO₂ 浓度增加的一个重要因素。相关研究表明,农田土壤呼吸受到灌溉施肥、土地覆盖及其利用变化等多种因素的综合影响^[7-11]。高德凯^[12]指出,受干旱胁迫处理的葡萄,其土壤呼吸速率远低于高水处理。土壤水分可以改变植物的根系分布,同时也会影响植物根系周围的微生物群落,进而影响土壤呼吸速率^[13]。众多学者研究表明,施氮对农田生态系统土壤 CO₂ 排放具有显著影响^[14-15],但研究结论目前尚不一致。高会议等^[16]研究黄土旱塬区麦田发现施氮量 0~135 kg/hm²时,土壤呼吸速率均随施氮量的增加而增加;当施氮量为 135~180 kg/hm²时,随着施氮量的增加土壤呼吸呈降低趋势。而毕建杰等^[17]则认为麦田土壤 CO₂ 排放量在施氮量为 300 kg/hm²时最高,过量施氮和氮素亏缺均会导致土壤 CO₂ 排放量降低。不同水、氮条件会对农田 CO₂ 固定排放产生不同的影响,不同地区及作物种类也会影响农田生态系统 CO₂ 固定排放对水、氮的响应,因此,针对特定作物因地制宜地开展研究将有助于得到适宜当地的田间水氮管理模式。

花生是我国重要的油料作物,具有抗旱、耐贫瘠、适应性强等特点,是辽宁地区发展旱作农业的首选作物。由于辽宁地区降雨集中、季节性干旱频发,且花生主产区耕地肥力普遍较低、土壤供氮能力差^[18],难以满足花生对水分和养分的需求,致使花生单位面积产量得不到保障,对辽宁地区油料作物安全生产具有一定的威胁。本课题组前期研究表明,调亏灌溉在辽宁地区花生生产中具有显著的节水增产效应^[19-20]。尽管有关水分管理对农田 CO₂ 固定排放影响的研究已有报道^[21-22],然而花生农田 CO₂ 固定排放对调亏灌溉的响应情况尚不明确,相关的研究更是鲜有报道。因此,本研究通过两年测坑试验,研究调亏灌溉条件下不同施氮量对花生植株碳积累量、土壤 CO₂ 排放量及花生产量的影响,以寻求花生农田最佳水、氮处理模式,为实现花生农田固碳减排和水氮资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018、2019 年每年 5—10 月在沈阳农业大学水利学院试验场进行。试验场位于沈阳市东部(41°44'N,123°27'E),属温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。本试验在带有滑动遮雨棚的测坑内进行,共 24 个测坑,每个测坑面积为 3 m² (2 m × 1.5 m)。遇降雨,可关闭遮雨棚,以消除降雨对试验的影响。试验区土质为潮棕壤土,容重 1.38 g/cm³,碱解氮质量比 58.82 mg/kg,速效磷质量比 142.98 mg/kg,全氮质量比 0.33 g/kg,有机质质量比 11.74 g/kg,速效钾质量比 48.32 mg/kg,pH 值 7.95。连续 2 年试验期间,日平均气温如图 1 所示。

1.2 试验材料

供试花生品种为“农花 9 号”,供试氮肥为尿素(纯 N 质量分数为 46%)。每个测坑均为独立小区,采用大垄双行种植模式,每个测坑 2 行,行距 40 cm,株距 15 cm,播种深度 4 cm,每穴 2~3 粒。各测坑均按当地种植标准施入磷肥(过磷酸钙 135 kg/hm²)和钾肥(硫酸钾 105 kg/hm²)。

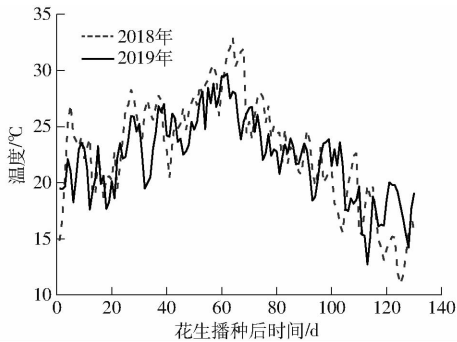


图 1 花生生长季日平均气温变化曲线

Fig.1 Curves of daily mean air temperature during peanut growing stage

1.3 试验设计

采用裂区试验设计,以灌溉模式(全生育期充分灌溉,F;花针期和饱果期调亏灌溉,D)为主区,F、D的灌水上限均为田间持水率 θ_f (占土壤体积百分比),F的灌水下限为(75%~80%) θ_f ,D在花针期和饱果期的灌水下限为(55%~60%) θ_f ,其他生育期同F;施氮水平 N0(0 kg/hm²)、N50(50 kg/hm²)、N100(100 kg/hm²)、N150(150 kg/hm²)为子区,每个处理设置3次重复。每个小区独立控制灌水,滴灌带距离播种行15 cm,覆0.008 cm黑色地膜。采用重力滴灌的方式灌水,灌水时将水引至距地面1.7 m高的塑料桶(容量50 L)内,利用重力作用将塑料桶内的水释放到滴灌带中,使灌溉水均匀流出。当土壤含水率下降至控水下限时进行灌水。

1.4 测定指标

1.4.1 土壤含水率及灌水量

每个小区埋设3根1 m长的Trime管,每5 d测定一次花生根区土壤含水率。测定深度分别为10、20、30、40、50、60 cm,灌水前后加测含水率。当土壤含水率达到灌溉下限时进行灌水。灌水量计算公式为

$$M = 1\,000Hp(\theta_{\max} - \theta_{\min})/\eta \tag{1}$$

式中 M——灌水量,mm

H——土壤计划湿润层深度,m

p——土壤湿润比,以地面以下20~30 cm处湿润面积占总灌溉面积的百分比来表示,取60%^[23]

$\theta_{\max}$ ——设计土壤体积含水率上限

$\theta_{\min}$ ——设计土壤体积含水率下限

η ——灌溉水利用系数,取0.90^[24]

1.4.2 花生干物质质量及固碳量

于花生饱果期在各测坑选取1株具有代表性的花生植株,将植株根、茎、叶、果实分离,放置在干燥箱中105℃杀青30 min后,75℃恒温干燥至质量恒定,完全冷却后称量。之后对花生样品进行粉碎、过0.5 mm筛,利用重铬酸钾-浓硫酸稀释热法^[25]测定

植株各器官全碳含量。植株固碳量计算公式为

$$C_{\text{uptake}} = C_{\text{content}}D_m \tag{2}$$

式中 C_{uptake} ——植株固碳量,g

C_{content} ——植株碳含量,%

D_m ——植株干物质质量,g

1.4.3 土壤 CO₂ 通量

在花生生长期,选择晴朗少云的天气,采用便携式光合仪(LI6400XT-09型,美国LI-COR公司)的土壤测量气室测定田间土壤CO₂通量。每3~7 d测定一次,测定时间为09:00—12:00。测量气室放置在事先已经放入土壤的PVC环上进行测量。每个小区安置2个土壤呼吸PVC圈(直径10 cm、高4 cm),每次对各土壤呼吸圈进行3次测定,取6组数据的平均值作为该小区土壤呼吸速率当日水平值。为减少PVC环安置对测定的干扰,每次均在PVC环安置24 h后进行测定。PVC环埋入土壤后露出地表2 cm以保证测量气室的密闭性,同时去除环内土壤表面活体对测定的影响。各生育期土壤CO₂平均排放量计算公式为

$$C_E = Fd/10.368 \tag{3}$$

式中 C_E ——各生育期CO₂平均排放量,kg/hm²

F——各生育期CO₂排放通量, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

$$1\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = 10.368\,\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$$

d——花生各生育期时间,d

全生育期土壤CO₂累积排放量为

$$R_s = \sum \frac{(F_{i+1} + F_i)(t_{i+1} + t_i)}{2 \times 10.368} \tag{4}$$

式中 R_s ——全生育期土壤CO₂累积排放量,kg/hm²

i——采样次数

t——采样时间,d

1.4.4 产量

花生成熟后单打单收,按照标准含水率14%折算计产,用电子秤(精度为0.01 g)测定花生的百果质量、百仁质量及产量。

1.5 数据分析

数据处理和统计分析采用Excel 2008和DPS 7.05软件,并采用R语言作图。

2 结果与分析

2.1 灌溉模式和施氮量对花生饱果期干物质积累量和固碳量的影响

不同灌溉方式与施氮量对花生饱果期各器官干物质积累量的影响如图2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$),下同)所示。由图2可知,花生饱果期各器官干物质积累量由大到小依次为:荚果、茎、叶、根。与充分灌溉(F)相比,调亏灌

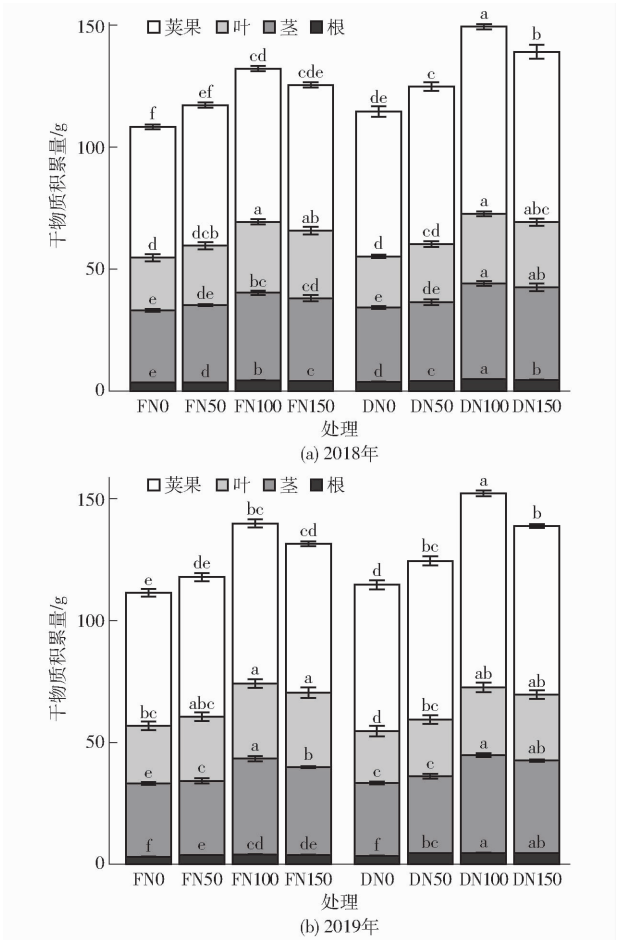


图2 不同灌溉模式和施氮量下花生饱果期各器官干物质积累量及总干物质积累量

Fig.2 Dry matter accumulations of organs and total dry matter accumulation in peanut pod filling stage under different irrigation regimes and N application rates

溉(D)处理下花生荚果、茎、根及总干物质积累量分别增加了15.18%、4.95%、12.78%和7.59%(2年平均),表明调亏灌溉更有利于花生各器官及总干物质的形成。两种灌溉模式下,从N0到N100,花生荚果、茎、叶、根及总干物质积累量均随施氮量的增加而增加,N100处理达到最大值,到N150有所降低。F模式下,与不施氮处理(N0)相比,N100和N150处理花生荚果干物质质量分别提高了18.80%和11.89%,叶干物质质量分别提高了32.05%和28.37%(2年平均)。与N0相比,N50、N100和N150处理下花生茎干物质质量分别提高了4.31%、26.21%和17.51%;根干物质质量分别提高了12.59%、31.19%和22.66%;总干物质积累量分别提高了7.06%、23.86%和17.10%(2年平均)。而D模式下,N100和N150处理下花生叶干物质质量较N0分别提高了33.29%和27.49%,茎干物质质量较N0分别提高了30.80%和25.39%(2年平均)。与N0相比,N50、N100和N150处理下花生荚果干物

质量分别提高了8.46%、31.00%和16.45%;根干物质质量分别提高了21.62%、39.29%和30.30%;总干物质积累量分别提高了8.72%、31.60%和21.24%(2年平均)。结果表明,施氮量100 kg/hm²对花生各器官及总干物质积累量的提升效果更明显。但与F相比,D模式下50 kg/hm²氮肥即显著提升了花生荚果干物质质量,且效果优于充分灌溉。综上,调亏灌溉模式下,施氮量100 kg/hm²更有利于花生各器官及总干物质质量的积累。

灌溉模式和施氮量对花生饱果期各器官及植株总固碳量的影响如图3所示。由图3可知,花生饱果期荚果固碳量最大,茎和叶次之,根固碳量最小。荚果碳积累量占植株体总碳积累量比例最高,说明荚果是花生植株的固碳中心。从灌溉模式主效应来看,与充分灌溉(F)相比,调亏灌溉(D)模式下花生荚果、茎、根及植株总固碳量分别增加了17.67%、16.63%、16.03%和15.08%(2年平均)。两种灌溉模式下,花生各器官及植株总固碳量均随施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,在施氮量为100 kg/hm²时达到最大值。说明适量施氮有利于植株及各器官的

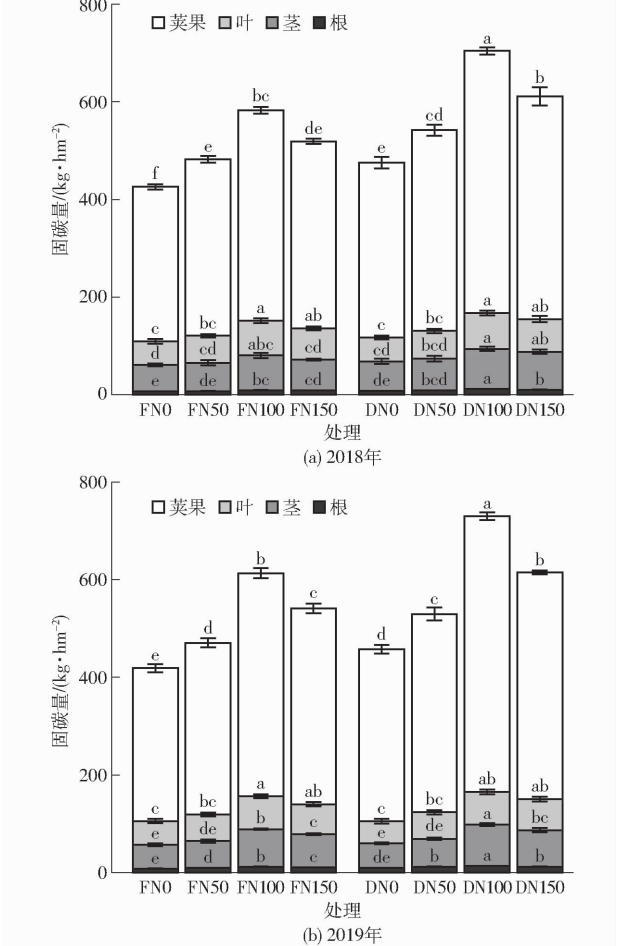


图3 不同灌溉模式和施氮量下花生饱果期各器官固碳量

Fig.3 Carbon sequestration of organs in peanut pod filling stage under different irrigation regimes and N application rates

固碳作用。交互分析表明,F 模式下,与 N0 相比,N100 和 N150 处理下花生叶固碳量分别提高了 44.67% 和 31.51% (2 年平均);茎固碳量分别提高了 43.23% 和 27.16% (2 年平均);2018 年根固碳量分别提高了 40.63% 和 24.83%。与 N0 相比,N50、N100 和 N150 处理下花生荚果固碳量分别提高了 13.24%、38.43% 和 24.40% (2 年平均);2019 年根固碳量分别提高了 17.18%、46.29% 和 28.20%;总植株固碳量分别提高了 12.77%、38.61% 和 25.53% (2 年平均)。D 模式下,与 N0 相比,N100 和 N150 处理下花生叶固碳量分别较 N0 提高了 47.39% 和 37.25% (2 年平均);茎固碳量分别较 N0 提高了 51.95% 和 38.39% (2 年平均);2108 年根固碳量分别提高了 50.75% 和 30.76%。与 N0 相比,N50、N100 和 N150 处理下花生荚果固碳量分别提

高了 15.08%、43.29% 和 29.69% (2 年平均);2019 年根固碳量分别提高了 35.02%、60.32% 和 42.03%;总植株固碳量分别提高了 14.93%、49.51% 和 31.54% (2 年平均)。结果表明,施氮量 100 kg/hm²对于花生各器官及总植株固碳效果更好,而调亏灌溉下增施氮肥对花生固碳作用的改善优于充分灌溉。综合来看,调亏灌溉下增施 100 kg/hm²氮肥可较好地提高花生植株的固碳效应。

2.2 灌溉模式和施氮量对土壤 CO₂ 排放量的影响

2018 年和 2019 年灌溉模式和施氮量及二者交互作用(I × N)对花生花针期、饱果期、全生育期 CO₂ 平均排放量及累积排放量具有极显著的影响(表 1)。施氮量对苗期 CO₂ 排放量产生了极显著的影响,灌溉方式与施氮量主效应均对结荚期 CO₂ 排放量产生极显著影响。

表 1 不同灌溉模式和施氮量下花生农田土壤 CO₂ 排放量

Tab.1 Soil CO ₂ emissions in peanut field under different irrigation regimes and N application rates kg/hm ²							
年份	灌溉模式	施氮量	花针期	结荚期	饱果期	全生育期均值	全生育期累积排放量
2018	F	N0	100.92 ^f	89.52 ^{cd}	45.28 ^{de}	66.67 ^d	286.72 ^e
		N50	112.40 ^d	95.34 ^{abcd}	52.05 ^{bc}	74.66 ^c	324.36 ^c
		N100	121.08 ^b	102.60 ^{ab}	55.05 ^{ab}	79.96 ^b	345.59 ^b
		N150	132.86 ^a	106.50 ^a	58.65 ^a	85.68 ^a	370.08 ^a
	D	N0	90.08 ^h	86.40 ^d	44.48 ^e	62.92 ^e	271.59 ^f
		N50	98.38 ^g	91.38 ^{bcd}	46.65 ^{de}	68.65 ^d	300.12 ^d
		N100	106.20 ^e	97.92 ^{abcd}	47.40 ^{cde}	73.16 ^c	318.88 ^c
		N150	115.76 ^c	101.34 ^{abc}	50.40 ^{bcd}	78.05 ^b	340.55 ^b
方差分析	I		**	*	**	**	**
	N		**	**	**	**	**
	I × N		**		*	**	*
2019	F	N0	99.99 ^e	76.48 ^{ef}	34.87 ^e	61.67 ^e	276.28 ^e
		N50	110.61 ^d	81.12 ^{de}	40.90 ^c	68.03 ^d	305.49 ^d
		N100	128.53 ^b	90.11 ^{bc}	43.82 ^a	76.30 ^a	341.28 ^b
		N150	137.14 ^a	99.29 ^a	47.16 ^b	82.71 ^b	370.13 ^a
	D	N0	89.62 ^f	74.14 ^f	31.30 ^f	57.63 ^f	259.48 ^f
		N50	98.47 ^e	78.48 ^{ef}	35.65 ^e	62.87 ^e	283.47 ^e
		N100	113.31 ^d	87.10 ^{cd}	37.56 ^d	70.30 ^c	316.38 ^c
		N150	117.27 ^c	95.07 ^{ab}	40.02 ^c	75.05 ^b	337.56 ^b
方差分析	I		**	**	**	**	**
	N		**	**	**	**	**
	I × N		**		**	**	**

注:I 和 N 分别表示灌溉模式和施氮量处理。* 和 ** 分别表示差异显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)。下同。

由表 1 可知,在灌溉模式主效应下,与 F 相比,D 显著减少了花针期、结荚期、饱果期、全生育期 CO₂ 平均排放量及累积排放量,减小幅度分别达 13.80%、4.07%、11.54%、8.58%、7.33% (2 年平均),由此可见调亏灌溉较充分灌溉条件下花生农田 CO₂ 排放量更小。在施氮量主效应下,各生育期土壤 CO₂ 排放量、全生育期平均和 CO₂ 累积排放量均随施氮量的增加而增加。与不施氮(N0)相比,

N50、N100、N150 施氮水平下的花针期、饱果期、全生育期平均及 CO₂ 累积排放量提高幅度分别为 10.31% ~ 32.17%、12.82% ~ 26.62%、10.16% ~ 29.29% 及 10.89% ~ 29.69% (2 年平均)。N100、N150 施氮水平下结荚期 CO₂ 平均排放量提高幅度分别为 15.82% 和 23.59% (2 年平均),CO₂ 排放量最大值均出现在 N150 处理。以上结果表明,高氮施入量对土壤中 CO₂ 排放量的增加效果更加明显。

交互分析表明,两种灌溉模式下施氮量均显著提高了花针期和饱果期、全生育期土壤 CO₂ 平均排放量及累积排放量,但调亏灌溉模式下施氮量对土壤 CO₂ 平均排放量和土壤 CO₂ 累积排放量的提升幅度低于充分灌溉,说明调亏灌溉模式可降低施氮引起的土壤 CO₂ 排放。

2.3 灌溉模式和施氮量对花生产量及产量构成的影响

两年试验结果一致表明,灌溉模式和施氮量主效应及其交互效应显著影响花生产量、百果质量和百仁质量(表2)。灌溉模式主效应下,与 F 相比,D 处理花生产量提高了 7.16%(2 年平均)。不同灌溉模式下,花生产量均随施氮量的增加而增加,施氮量为 100 kg/hm² 时产量最高。与 N0 处理相比,N50、N100、N150 处理下花生产量分别提高了 12.76%、28.14%、19.88%(2 年平均)。交互分析表明,调亏灌溉模式下增施 100 kg/hm² 氮肥(N100)较不施氮肥处理(N0)增产 32.02%;充分灌溉模式下 N100 较 N0 处理产量提高了 24.11%(2 年平均)。说明调亏灌溉条件下施氮量 100 kg/hm² 增产效果更加显著,较常规处理(FN0)增产了 37.56%(2 年平均)。

表 2 不同灌溉模式和施氮量下花生产量及产量构成
Tab.2 Yield and yield composition of peanut under different irrigation regimes and N application rates

年份	灌溉模式	施氮量	花生产量/ (kg·hm ⁻²)	百仁质 量/g	百果质 量/g
2018	F	N0	4 267.64 ^e	73.74 ^e	174.29 ^d
		N50	4 794.05 ^d	83.76 ^b	195.30 ^a
		N100	5 289.61 ^b	79.34 ^c	184.36 ^c
		N150	5 022.12 ^c	75.78 ^d	188.45 ^b
	D	N0	4 444.61 ^c	74.51 ^e	176.26 ^d
		N50	5 029.53 ^c	87.09 ^a	198.41 ^a
		N100	5 850.08 ^a	83.13 ^b	194.86 ^a
		N150	5 418.14 ^b	78.89 ^c	190.61 ^b
方差分析	I		**	**	**
	N		**	**	**
	I × N		**	**	*
2019	F	N0	4 296.60 ^e	74.54 ^{de}	170.74 ^f
		N50	4 828.06 ^d	84.13 ^b	184.17 ^d
		N100	5 339.61 ^b	79.94 ^c	195.52 ^b
		N150	5 061.13 ^c	76.38 ^d	188.86 ^c
	D	N0	4 479.17 ^e	74.49 ^c	174.71 ^e
		N50	5 068.37 ^c	87.44 ^a	199.05 ^a
		N100	5 930.88 ^a	83.74 ^b	195.34 ^b
		N150	5 463.85 ^b	75.12 ^c	189.89 ^c
方差分析	I		**	**	**
	N		**	**	**
	I × N		**	**	*

产量构成分析表明,灌溉模式主效应下,与 F 相比,D 处理显著增加了花生百果质量及百仁质量 2.53% 及 2.68%(2 年平均);施氮主效应下,二者均在施氮量 50 kg/hm² 时显著增高。交互分析表明,调亏灌溉条件下施氮量 50 kg/hm² 处理(DN50)花生百仁质量及百果质量最高,该处理下花生百果质量和百仁质量较常规处理(FN0)分别提高了 15.21% 和 17.70%(2 年平均)。

3 讨论

3.1 调亏灌溉条件下施氮量对花生植株干物质积累及固碳量的影响

农田生态系统内植物对空气中 CO₂ 进行有效固定是维持该生态系统碳平衡的关键。饱果期是荚果膨大和籽粒饱满时期,此时期荚果及总干物质积累量的形成决定着花生的最终产量,植株各器官固碳量决定着植株最终的碳积累量和该农田生态系统的碳“汇”强度。本研究表明,调亏灌溉处理提高了花生植株干物质积累量与固碳量。这可能是因为适度水分亏缺产生的干旱,有利于花生根系深扎,增加根冠比,增强了花生自身汲取土壤水分和养分的能力,促进了花生生长,从而提高了干物质积累量^[26]。吴晓茜等^[27] 研究发现,花生任何时期干旱均降低了叶片的光合性能,然而复水后产生的“补偿效应”,能提高花生的净光合速率,其中花针期中度调亏灌溉较充分灌溉复水后显著提高日平均光合速率 8.57%,饱果期调亏灌溉复水后光合速率与充分灌溉无明显差异。这表明花针期、饱果期适度调亏均有利于花生进行光合作用及碳的固定。两种灌溉模式下,各施氮处理植株干物质积累量及固碳量均高于不施氮处理。大量研究表明,施氮会增加植株干物质积累量^[28] 及固碳量^[29],但并非施氮量越多越好,过量施氮反而会降低施氮所带来的正效应。郭佩^[30] 研究表明,在施氮量为 105 kg/hm² 时,花生各器官干物质积累和养分积累效果最佳,但过量施氮效果并不显著。本试验结果表明,花生饱果期干物质积累量及固碳量均随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势。适量施入氮肥能改善花生叶片的光合性能,使花生保持较高的光合速率和叶面积指数,增加植株光合作用产物,有利于植株积累干物质,进而增加植株固碳量。而过量施氮则可能会造成植株茎叶徒长,群体内透光条件变差,光合速率降低,不利于植株干物质的积累。本研究发现,饱果期花生植株干物质积累量、固碳量及产量均是调亏灌溉下施氮量 100 kg/hm² 处理最高。这可能是由于调亏灌溉下适度水分亏缺使花生在复水后产生了“补偿效应”,

此时适量施氮增强了花生汲取土壤水分和养分的能力,二者的协同效应促进了植株的生长及碳积累。

3.2 调亏灌溉条件下施氮量对土壤 CO₂ 排放量的影响

土壤呼吸主要包括土壤中植物根系呼吸、土壤动物和微生物呼吸以及含碳矿物质的化学氧化作用产生并释放 CO₂ 的过程,不仅受温度、水分、土壤养分等自然环境的影响,还受到植物和微生物等生物因素以及人为因素的影响,且这些因素往往又是相互作用、相互影响、共同对土壤呼吸起作用^[31-35]。本研究表明,调亏灌溉较充分灌溉降低了花针期、结荚期、饱果期土壤 CO₂ 平均排放量及累积排放量,这可能是由于调亏灌溉的控水作用导致作物根系层土壤水分亏缺。一方面,作物在土壤水分亏缺情况下会抑制根系代谢活性以适应干旱环境,此时根系活力减弱,根系呼吸速率降低^[36];另一方面,土壤水分影响着土壤微生物的各种生命活动,在水分亏缺的环境中,土壤微生物会因缺少水分而处于休眠状态,活性降低导致呼吸减弱,进而影响 CO₂ 排放^[37]。严俊霞等^[38]研究也表明,在油松林生长期,土壤水分对土壤呼吸有较大影响,土壤干旱对土壤呼吸的抑制作用非常明显,可使土壤呼吸下降 50% 以上。张忠学等^[5]研究指出,不同灌溉模式下施氮处理的水稻各生育期平均土壤总呼吸速率、微生物呼吸速率及根系呼吸速率均高于不施氮处理。本文也得出相似的结论,施氮处理各生育期土壤 CO₂ 排放量及累积排放量均高于不施氮处理,且均随施氮量的增加而增加。这说明高氮处理会促使土壤向大气中排放 CO₂,一方面施氮会促进矿质土壤有机碳的氧化分解,同时促进异养呼吸和根系呼吸;另一方面氮的施入促进了植株根系生长,根系生物量的增加也导致根系分泌物增加,并为微生物提供更多的反应底物;同时凋落物的增加为根系和土壤微生物活性提供了更多的碳底物^[39],从而提高了土壤总呼吸速率,增加了土壤 CO₂ 排放量。总体来看,同一施氮水平,调亏灌溉降低了土壤 CO₂ 排放量。因此,适量施氮条件下采用调亏灌溉,可在一定程度上缓解施氮引起的农田 CO₂ 排放。

3.3 调亏灌溉条件下施氮量对花生产量的影响

有研究表明,适量施入氮肥可显著提高花生产量及产量构成指标^[40-41]。本研究表明,在充分灌溉(F)和调亏灌溉(D)模式下,各施氮量水平较不施氮处理均显著提高了花生产量,施氮量 100 kg/hm²对产量的提升效果最为明显,说明适宜施氮量更有利于花生增产。作物产量的形成取决于干物质积累

及其对果实的分配^[42],适宜的施氮量能在花生生育期内协调植株各器官干物质分配及碳积累,促使干物质积累适时向荚果处转移,从而对作物增产起到积极作用。而过量施氮则会使干物质积累向茎、叶等器官转移,造成营养器官冗余生长,影响荚果形成,导致产量降低^[43]。张俊等^[44]研究表明,任何时期的干旱均会导致花生减产,李明阳等^[45]研究发现,调亏灌溉可以有效减少大豆耗水量,但不会严重降低大豆产量。孟兆江等^[46]以玉米为研究对象,发现适度调亏灌溉能有效促进玉米生长并提高其产量。本研究结果与孟兆江等^[46]研究结果一致,相同施氮量水平下,花生产量均表现为调亏灌溉(D)大于充分灌溉(F)。这可能是由于花针期和饱果期是花生下针与果实形成的关键时期,此时调亏灌溉产生的补偿效应增加了植株光合作用强度,有利于干物质及养分的积累,促进了花生下针及果实饱满,增加了花生百仁质量和百果质量(表 2),从而提高了花生产量。这与夏桂敏等^[47]研究结果类似,该研究表明连续适度调亏灌溉可通过提高花生单株荚果数、百果质量、荚果饱满度,进而提高花生产量。综上,适度水分亏缺条件下施入适量氮肥,可使花生更好地利用土壤中的水分及养分,促进其生殖器官生长,保证荚果的形成与膨大,最终实现花生增产。

4 结论

(1)调亏灌溉条件下施氮量显著提高了花生植株干物质积累量、固碳量及产量,在施氮量为 100 kg/hm²时获得最大值。其原因是适量氮肥的施入会增加土壤有效氮含量,促进作物生长,而适度水分亏缺能使花生产生“补偿效应”,进而更好地利用土壤中的养分,增强花生光合作用,促进干物质积累及碳的固定,最终实现花生增产。

(2)各生育期土壤 CO₂ 平均排放量及累积排放量均随施氮量的增加而增加。与全生育期充分灌溉相比,调亏灌溉降低了花针期、结荚期和饱果期土壤 CO₂ 平均排放量及全生育期累积排放量。同一施氮量水平下,调亏灌溉较充分灌溉处理对 CO₂ 减排的效果更为显著。DN100 处理较传统处理(FN100)全生育期 CO₂ 累积排放量降低了 7.51% (2 年平均)。

(3)调亏灌溉条件下施氮 100 kg/hm² (DN100)处理植株固碳量和产量最高,且 CO₂ 排放量相对较低,是实现花生农田生态系统节水减肥和固碳减排目标的最佳处理。

参 考 文 献

[1] WEI Ren, TIAN Hanqin, TAO Bo, et al. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2945–2957.

[2] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 1–9.
LIU Yu, CHEN Minpeng, CHEN Jining. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 1–9. (in Chinese)

[3] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81–99.

[4] 魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(3): 428–444.
WEI Tingbang, CHAI Qiang, WANG Weimin, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(3): 428–444. (in Chinese)

[5] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 301–308.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil oaddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 301–308. (in Chinese)

[6] IQBAL J, HU Ronggui, LIN Shan, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: a case study in Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3): 292–302.

[7] 孙潇, 郑一丹, 王鑫程, 等. 生物炭施用和灌溉模式对稻田土壤呼吸日变化的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2019, 72(10): 127–131.
SUN Xiao, ZHENG Yidan, WANG Xincheng, et al. The effects of biochar addition and irrigation mode on diurnal variation of soil respiration rate of paddy fields[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, 72(10): 127–131. (in Chinese)

[8] 冯浩, 刘晶晶, 张阿凤, 等. 覆膜方式对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 180–189.
FENG Hao, LIU Jingjing, ZHANG A'feng, et al. Effect of film mulching patterns on carbon sequestration in wheat–maize rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 180–189. (in Chinese)

[9] DENDOOVEN L, PATIÑO-ZÚÑIGA L, VERHULST N, et al. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 152: 50–58.

[10] 王维钰, 乔博, KASHIF Akhtar, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(11): 2136–2152.
WANG Weiyu, QIAO Bo, KASHIF Akhtar, et al. No tillage winter wheat – summer maize rotation straw returning soil respiration water and heat condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(11): 2136–2152. (in Chinese)

[11] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 140–146.
YANG Shihong, WANG Yijiang, XU Junzeng, et al. Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8): 140–146. (in Chinese)

[12] 高德凯. 土壤水分和栽培环境对葡萄品质和土壤呼吸的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
GAO Dekai. Effect of soil moisture and cultural environment on grape quality and soil respiration[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[13] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 14–20.
LI Hu, QIU Jianjun, WANG Ligang. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 14–20. (in Chinese)

[14] 张超, 刘志凯. 稻田不同施氮量对土壤呼吸的效应分析及施氮量方案寻优[J]. *水利科学与寒区工程*, 2019, 2(3): 33–38.
ZHANG Chao, LIU Zhikai. Effect analysis of different nitrogen fertilizer on soil respiration and optimization of nitrogen fertilizer scheme in rice field[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2019, 2(3): 33–38. (in Chinese)

[15] 熊简安然, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施氮水平下玉米农田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(1): 89–95.
XIONG Jiananran, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao, et al. Soil respiration and carbon balance under different nitrogen application levels in maize field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(1): 89–95. (in Chinese)

[16] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 390–396.
GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao, et al. Effects of nitrogen rates on soil respiration in winter wheat cropping system in semi-arid regions on Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 390–396. (in Chinese)

[17] 毕建杰, 王琦, 张衍华, 等. 施肥对不同品种麦田 CO₂ 通量的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 459–463.
BI Jianjie, WANG Qi, ZHANG Yanhua, et al. Effects of fertilizer application on CO₂ fluxes from wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(6): 459–463. (in Chinese)

[18] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
ZHU Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783. (in Chinese)

[19] 胡家齐, 夏桂敏, 张柏纶, 等. 调亏灌溉与施氮对花生产量及水氮利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 187–193, 199.

HU Jiaqi, XIA Guimin, ZHANG Bailun, et al. Effects of regulated deficit irrigation and nitrogen application on growth, yield and water-nitrogen use of peanut[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5): 187 – 193, 199. (in Chinese)

[20] 夏桂敏, 李永发, 王淑君, 等. 生物炭基肥和调亏灌溉互作对花生根冠比及水分利用效率的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(3): 315 – 321.

XIA Guimin, LI Yongfa, WANG Shujun, et al. Effect of biochar-based fertilizer and regulated deficit irrigation on root shoot ratio and water use efficiency of peanut[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(3): 315 – 321. (in Chinese)

[21] 展茗. 不同稻作模式稻田碳固定、碳排放和土壤有机碳变化机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.

ZHAN Ming. Studies on mechanisms of carbon sequestration, carbon emissions and soil organic carbon dynamics in different farming paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[22] CLEMENS S, PETER R G, DAVID W R, et al. Soil N₂O and CO₂ emissions from cotton in Australia under varying irrigation management[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 95(1): 43 – 56.

[23] 中华人民共和国水利部. 微灌工程技术标准: GB/T 50485—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

[24] YAO Fengxian, HUANG Jianliang, CUI Kehui, et al. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2011, 126: 16 – 22.

[25] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[26] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 450 – 456.

DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al. Effects of water stress and nitrogen fertilization on peanut root morphological development and leaf physiological activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 450 – 456. (in Chinese)

[27] 吴晓茜, 夏桂敏, 李永发, 等. 调亏灌溉对黑花生生长、光合特性及水分利用效率的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(1): 57 – 64.

WU Xiaoqian, XIA Guimin, LI Yongfa, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth, photosynthetic characteristics and water use efficiency of black peanut[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(1): 57 – 64. (in Chinese)

[28] 张翔, 张新友, 张玉亭, 等. 施氮量对不同花生品种生长及干物质积累的影响[J]. *花生学报*, 2011, 40(1): 23 – 29.

ZHANG Xiang, ZHANG Xinyou, ZHANG Yuting, et al. Effects of nitrogen rate on growth and dry matter accumulation of various peanut cultivars[J]. *Journal of Peanut Science*, 2011, 40(1): 23 – 29. (in Chinese)

[29] 马建辉, 黄培新, 姜丽娜, 等. 不同秸秆还田方式配施氮肥对麦田碳平衡的影响[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(11): 62 – 69.

MA Jianhui, HUANG Peixin, JIANG Li'na, et al. Effect of combination of different straw returning methods with N application on carbon balance of wheat field[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(11): 62 – 69. (in Chinese)

[30] 郭佩. 施氮量对不同花生品种生长发育及不同氮源供氮特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.

GUO Pei. Effects of nitrogen application on growth and nitrogen characteristics of different nitrogen sources of peanut varieties [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[31] HOUGHTON R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy[J]. *Climate Policy*, 2002, 2(1): 71 – 88.

[32] 熊平生. 陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 1 – 7.

XIONG Pingsheng. Research review of the impact factors on soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 1 – 7. (in Chinese)

[33] WANG Xuhui, PIAO Shilong, CIAIS P, et al. Are ecological gradients in seasonal Q10 of soil respiration explained by climate or by vegetation seasonality? [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(10): 1728 – 1734.

[34] ZHANG Feng, WANG Tao, XUE Xian, et al. Impact of human activities on soil respiration: a review[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2009, 1(4): 287 – 299.

[35] ZHANG Qianbing, YANG Ling, XU Zhenzhu, et al. Effects of cotton field management practices on soil CO₂ emission and C balance in an arid region of Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(4): 468 – 477.

[36] 侯晓林, 吕金印, 山仑. 水分胁迫对抗旱性不同小麦品种叶片光合及根呼吸等生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 37 – 39, 44.

HOU Xiaolin, LÜ Jinyin, SHAN Lun. Effects of water deficit on the rate of leaf photosynthesis and root respiration in two winter wheat of different drought resistance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 37 – 39, 44. (in Chinese)

[37] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(5): 722 – 727.

DENG Dongzhou, FAN Zhiping, WANG Hong, et al. Influences of soil moisture on soil respiration[J]. *Forest Research*, 2009, 22(5): 722 – 727. (in Chinese)

[38] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366 – 6376.

YAN Junxia, QIN Zuodong, ZHANG Yihui, et al. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6366 – 6376. (in Chinese)

[39] 肖列. CO₂ 浓度升高、干旱胁迫和施氮对白羊草生长和根际微生物的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

XIAO Lie. Combined effects of elevated CO₂, drought stress and nitrogen application on the growth of *Bothriochloa ischaemum* and its soil microbial properties[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[40] 司贤宗, 张翔, 毛家伟, 等. 施氮量对花生生产质量及氮肥利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 91 – 96.

SI Xianzong, ZHANG Xiang, MAO Jiawei, et al. Effects of nitrogen application rate on peanut yield and quality and nitrogen

utilization efficiency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(29): 91–96. (in Chinese)

[41] 于俊红, 彭智平, 黄继川, 等. 施氮量对花生养分吸收及产量品质的影响[J]. 花生学报, 2011, 40(3): 20–23.
YU Junhong, PENG Zhiping, HUANG Jichuan, et al. Effects of nitrogen application on nutrient absorption, yield and quality of peanut[J]. Journal of Peanut Sciences, 2011, 40(3): 20–23. (in Chinese)

[42] 张艳艳, 李文金, 陈建生, 等. 麦后直播花生施氮对根瘤生长发育、荚果产量和氮素利用的影响[J]. 花生学报, 2015, 44(1): 18–22.
ZHANG Yanyan, LI Wenjin, CHEN Jiansheng, et al. Effects of nitrogen application rate on nodule growth, pod yield and N utilization of peanuts planted after wheat harvest[J]. Journal of Peanut Science, 2015, 44(1): 18–22. (in Chinese)

[43] FRITSCHI F B, ROBERTS B A, TRAVIS R L, et al. Response of irrigated Acala and Pima cotton to nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(1): 133–146.

[44] 张俊, 刘娟, 臧秀旺, 等. 不同生育时期水分胁迫对花生生长发育和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 93–98.
ZHANG Jun, LIU Juan, ZANG Xiuwang, et al. Effects of drought stress on yield and growth and development at different growth stages of peanut[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(24): 93–98. (in Chinese)

[45] 李明阳, 王丽学, 姜展博, 等. 调亏灌溉和生物炭对大豆生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 1966–1973.
LI Mingyang, WANG Lixue, JIANG Zhanbo, et al. Effects of regulated deficit irrigation and biochar application on growth, yield and water use efficiency of soybean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 1966–1973. (in Chinese)

[46] 孟兆江, 卞新民, 刘安能, 等. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 182–186.
MENG Zhaojiang, BIAN Xinmin, LIU Anneng, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological and photosynthetic characteristics of summer maize and its optimized combination of agronomic techniques[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 182–186. (in Chinese)

[47] 夏桂敏, 汪千庆, 张峻霄, 等. 生育期连续调亏灌溉对花生光合特性和根冠生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 318–328.
XIA Guimin, WANG Qianqin, ZHANG Junxiao, et al. Effect of continuous regulated deficit irrigation in growth period on photosynthetic characteristics and root and crown growth of peanut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 318–328. (in Chinese)

(上接第 225 页)

[37] 刘昕, 杨光, 林群, 等. 基于连续小波变换的蒺藜植被覆盖度预测[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 107–116.
LIU Xin, YANG Guang, LIN Qun, et al. Prediction on the vegetation coverage of *Tribulus terrestris* L. based on the continuous wavelet transform[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 107–116. (in Chinese)

[38] SCHUH W D. The processing of band-limited measurements; filtering techniques in the least squares context and in the presence of data gaps[J]. Space Science Reviews, 2003, 108(1–2): 67–78.

[39] SHAH S H, ANGEL Y, HOUBORG R, et al. A random forest machine learning approach for the retrieval of leaf chlorophyll content in wheat[J]. Remote Sensing, 2019, 11(8): 920.

[40] 王诣, 闫志勇. 人工神经网络和图像处理技术在叶绿素含量检测中的应用[J]. 科技通报, 2018, 34(4): 91–95.
WANG Yi, YAN Zhiyong. Detection of chlorophyll content based on artificial neural network and digital image processing[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(4): 91–95. (in Chinese)

[41] 孙红, 郑涛, 刘宁, 等. 高光谱图像检测马铃薯植株叶绿素含量垂直分布[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 149–156.
SUN Hong, ZHENG Tao, LIU Ning, et al. Vertical distribution of chlorophyll in potato plants based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 149–156. (in Chinese)

[42] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2243–2247.
JIANG Jinbao, CHEN Yunhao, HUANG Wenjiang. Using hyperspectral remote sensing to estimate canopy chlorophyll density of wheat under yellow rust stress[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2243–2247. (in Chinese)

[43] ZHANG J, SUN H, GAO D, et al. Detection of canopy chlorophyll content of corn based on continuous wavelet transform analysis[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2741.

[44] HE R, LI H, QIAO X, et al. Using wavelet analysis of hyperspectral remote-sensing data to estimate canopy chlorophyll content of winter wheat under stripe rust stress[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(12): 4059–4076.

[45] LI D, CHENG T, ZHOU K, et al. WREP: a wavelet-based technique for extracting the red edge position from reflectance spectra for estimating leaf and canopy chlorophyll contents of cereal crops[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 129: 103–117.

[46] RIVARD B, FENG J, GALLIE A, et al. Continuous wavelets for the improved use of spectral libraries and hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 2850–2862.

[47] XIAO C, LI S, WANG K, et al. The response of canopy direction reflectance spectrum for the wheat vertical leaf distributing[J]. Sensor Letters, 2011, 9(3): 1069–1074.