

灌溉方式与生物炭对花生根系、磷素利用及产量的影响

夏桂敏 王宇佳 王淑君 杨情峰 迟道才
(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 为确定花生最佳灌溉方式和生物炭用量,于2018—2019年连续2年在辽西北阜新蒙古族自治县实验站开展大田试验。以小白沙1016花生为材料,采用2因素裂区设计,主区设置沟灌(F)、滴灌(D)和膜下滴灌(M)3种灌溉方式,副区设置0 t/hm²(B0)、10 t/hm²(B10)、20 t/hm²(B20)、40 t/hm²(B40)4个生物炭用量水平,研究不同灌溉方式和生物炭用量互作对土壤有效磷含量、花生根系形态及磷素积累量的影响。结果表明:灌溉方式和生物炭用量存在显著互作效应。10 t/hm²生物炭处理在膜下滴灌下获得最高产量,2年平均增产14.2%。生物炭能够有效促进花生根系形态的优化,且在膜下滴灌下施用10 t/hm²生物炭可明显增加花生的根长、根表面积和根体积。与不施生物炭相比,10 t/hm²生物炭处理显著提高表层土壤有效磷含量和植株磷素积累量,其中以膜下滴灌与10 t/hm²生物炭耦合处理的提升效果最为明显。因此,MB10处理为本试验最佳耦合模式,此模式可以充分发挥互作效应,通过创造良好花生根系形态,增强表层土壤有效磷含量,进而促进植株对磷素的吸收积累,最终实现花生增产。

关键词: 花生; 膜下滴灌; 生物炭; 根系形态; 产量; 磷素

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0316-11 **OSID:** 

Effects of Irrigation Methods and Biochar on Peanut Root, Phosphorus Utilization and Yield

XIA Guimin WANG Yujia WANG Shujun YANG Qingfeng CHI Daocai
(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to determine the optimal irrigation method and biochar application rate for peanut, field experiments were conducted in Fuxin Mongolian Autonomous County Experimental Station of Northwest Liaoning Province for two consecutive years from 2018 to 2019. In this experiment, Xiaobaisha 1016 peanut was used as the material, and the split plot design with two factors was used, the main plots included three irrigation methods: furrow irrigation (F), drip irrigation (D) and mulched drip irrigation (M), the sub-plots within each of main plots included four biochar application rates: 0 t/hm² (B0), 10 t/hm² (B10), 20 t/hm² (B20) and 40 t/hm² (B40). The effects of different irrigation methods and biochar application rates on soil available phosphorus content, peanut root morphology and phosphorus accumulation were studied. The results showed that there was a significant interaction effect between irrigation method and biochar application rate. The highest yield of 10 t/hm² biochar was obtained under mulched drip irrigation, and the average yield increase in two years was 14.2%. Biochar could effectively promote the optimization of peanut root morphology, and the application of 10 t/hm² biochar under mulched drip irrigation could significantly increase the root length, root surface area and root volume. Compared with no biochar application, 10 t/hm² biochar application significantly increased the available phosphorus content and plant phosphorus accumulation, and the coupling effect of mulched drip irrigation with 10 t/hm² biochar application was the most obvious. Therefore, MB10 treatment was the best coupling mode in this experiment. This mode can give full play to the interaction effect. By creating a good peanut root morphology, increasing the available phosphorus content in the surface soil, and then promoting the absorption and accumulation of phosphorus by plants, and finally achieving peanut yield increase.

Key words: peanut; mulched drip irrigation; biochar; root morphology; yield; phosphorus

收稿日期: 2021-02-01 修回日期: 2021-03-04

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20180550819)和辽宁省教育厅科学研究项目(LSNJC202003)

作者简介: 夏桂敏(1973—),女,教授,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: 迟道才(1964—),男,教授,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: chidaocai@syau.edu.cn

0 引言

花生作为一种耐旱耐瘠的重要油料作物,是促进旱作农业发展的理想作物^[1]。辽宁省是我国花生主要产区之一,其中约有 50% 的种植面积分布于辽西北风沙区^[2],该区域优越的光热资源和典型的干旱半干旱气候类型,能够为花生生长提供有利的自然条件。磷素是花生生长所必需的营养元素之一,主要来源于土壤有效磷的供应。作为能被直接吸收利用的土壤有效磷,其含量是评价土壤供磷能力的一个重要指标,但由于土壤对磷有着强烈的固定作用^[3],致使植株可直接吸收利用的土壤有效磷含量较低;另外,辽西北风沙区的土质类型为砂壤土,该土壤保水保肥能力差,磷素流失容易,严重限制了该地区花生的生产潜力。因此,改善该地区土壤磷素有效性,促进花生产业的可持续发展,已成为亟待解决的关键问题。

研究表明,土壤水分状况对土壤磷素的形态转化及有效性有着重要的影响^[4]。不同灌溉方式下,土壤水分状况表现不同,土壤磷素的有效性也随之不同。这可能是因为土壤水分条件能够影响土壤磷素迁移速率^[5]以及根际土壤闭蓄态磷含量^[6],进而影响根系附近土壤有效磷含量。除水分外,施用生物炭亦可提高土壤中磷的有效性^[7-9]。生物炭作为一种新型环保的吸附剂和改良剂,是生物质在无氧条件下热解的产物。施用生物炭能提高土壤磷含量,是由于生物炭的灰分中含有一定的磷,施入土壤后直接提高土壤有效磷含量;同时,生物炭具有丰富的阴阳离子交换位点,可与 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 竞争吸附磷酸根离子,从而降低铁铝氧化物对磷的固定作用;另外,生物炭对土壤 pH 值的改变可提高磷素的生物可利用性^[10]。CHINTALA 等^[11]报道了玉米秸秆生物炭对磷的吸附能力高于以其他原材料制成的生物炭。高天一等^[12]通过 5 年连续施用生物炭发现,施用生物炭可显著提高土壤中的有效磷含量。许多研究表明,生物炭对提高酸性土壤中有效磷含量的效果更为明显^[13]。生物炭对作物(玉米、小麦、苜蓿和花生)产量的影响已被广泛报道,但不同生物炭施用量下作物产量变化却有不同表现^[14-17]。因此,有必要在不同区域不同作物上探究出其最佳的生物炭施用量。

作物的根系形态对土壤磷素的吸收利用发挥着重要作用,为了更多地获取土壤中的磷,作物通过促进根系生长,以增加土壤磷的有效性^[18]。然而,目前有关从根系角度研究不同灌溉方式和生物炭用量互作对作物磷素吸收利用的报道相对较少。基于

此,本试验通过连续 2 年在不同灌溉方式下施用不同用量生物炭,从土壤、根系、植株方面深入探究花生各生育期根系形态、土壤有效磷含量和植株磷吸收对不同灌溉方式下生物炭施用量的响应,以期改善辽西北风沙区土壤肥力、提高花生生产力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018—2019 年在辽宁省阜新蒙古族自治县实验站(北纬 $41^{\circ}42'$ ~ $42^{\circ}55'$,东经 $121^{\circ}2'$ ~ $122^{\circ}54'$,海拔 213 m)进行。该地属于北温带半干旱季风大陆性气候区,多年平均降雨量 493.1 mm,年平均气温 7.2°C ,作物生育期平均气温 20.2°C ,试验地土壤类型为砂壤土,容重为 1.45 g/cm^3 ,pH 值 5.96,有机质质量比 8.38 g/kg、全氮质量比 0.62 g/kg、有效磷质量比 18.14 mg/kg、速效钾质量比 141.83 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验采用裂区设计,设置灌溉方式和生物炭施用量 2 因素,主区为灌溉方式,包括沟灌(F)、滴灌(D)和膜下滴灌(M)3 种灌溉方式,灌溉标准为在花针期和结荚期当土壤含水率降至田间持水率的 55% 时,灌水至田间持水率的 90%,苗期和饱果期不进行灌溉。子区为生物炭施用量,包括 0 t/hm^2 (B0)、 10 t/hm^2 (B10)、 20 t/hm^2 (B20) 和 40 t/hm^2 (B40)4 个水平,3 次重复,共 36 个处理。小区面积为 $7.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。

花生品种为小白沙 1016。玉米秸秆生物炭购自沈阳隆泰生物工程有限公司,该生物炭是在无氧条件下 600°C 高温裂解 30 min 制成。生物炭 pH 值为 8.14,碳质量分数 18.87%,全氮质量分数 0.58%,有效磷和速效钾质量比为 0.33、4.76 g/kg。在 2018 年播种前,将生物炭均匀混合施入 0 ~ 20 cm 土壤中。采用大垄双行种植模式,种植密度为 1.67×10^5 穴/ hm^2 。施肥方式为播种时一次性施入 $\text{N } 50\text{ kg/hm}^2$ 、 P_2O_5 169.6 kg/hm^2 和 $\text{K}_2\text{O } 156.0\text{ kg/hm}^2$ 。灌溉水源来自地下水,用水表控制各小区灌水量,其他管理同当地田间管理一致。

1.3 测定指标

1.3.1 根系形态

于苗期、花针期、结荚期和饱果期,每个小区选取生长一致的代表性花生植株 3 株,以茎秆为中心,用平板铲挖取(长、宽、深分别为 15、15、40 cm,其中 40 cm 为有效根深度^[19])土块,利用缓水流洗净,其下放置 100 目尼龙网袋以避免脱落的根被冲走。利

用 WinRHIZO Pro LA2400 型根系扫描仪进行图像扫描;再用 WinRHIZO 根系分析系统对图像进行分析,并计算根长 (cm)、根表面积 (cm²) 和根体积 (cm³)。

1.3.2 干物质及磷素积累量

于各生育期末,采集各小区长势一致的代表性花生植株 3 株,将其分成根、茎、叶、针、果 5 部分后置于干燥箱中,105℃ 杀青 30 min 后,再调至 80℃ 干燥至质量恒定,干燥冷却后用电子天平称取干物质量。干燥的植株各器官经粉碎过筛后,经浓 H₂SO₄-H₂O₂消煮至无色透明后定容过滤,利用德国 SEAL AA3 型连续流动分析仪测定植株各器官全磷含量。各器官磷素积累量计算式为

$$M = \frac{10\,000NM_im}{S} \tag{1}$$

式中 M ——各器官磷素积累量,kg/hm²
 M_i ——各器官全磷含量(质量比),mg/kg
 m ——各器官干物质量,g/株
 N ——一个小区花生数,株
 S ——一个小区面积,为 7.5 m²

植株磷素积累量为各器官磷素积累量之和。

1.3.3 土壤有效磷含量

各生育期末,在每个小区随机采集 3 点 0 ~ 20 cm 土层土样并混合,风干后过 100 目筛,用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提,利用德国 SEAL AA3 型连续流动分析仪测定磷含量,有效磷含量计算式为

$$P = CK \tag{2}$$

式中 P ——土壤有效磷含量(质量比),mg/kg
 C ——从标准曲线求得的磷质量浓度,mg/L
 K ——浸提时的液土比,为 50 mL: 2.50 g

1.3.4 产量及产量构成因子

花生成熟后,在每个小区中心选取无缺苗且长势整齐的 1 m² 计产区,单打单收,将荚果风干至含水率为 14%,再测定荚果产量、籽仁产量、百果质量、百仁质量、总果数和饱果数,并计算出仁率、饱果率。

1.4 统计与分析

用 Microsoft Excel 2016 整理数据。采用 SAS 9.0 软件进行裂区方差分析,其中灌溉方式为主区,生物炭施用量为子区,利用 Turkey’s HSD 检测对主因子及交互因子不同水平间均值进行多次比较 ($P < 0.05$)。采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式和生物炭用量对花生根系形态的影响

2.1.1 灌溉方式和生物炭用量对花生根长的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对花生全生育期根长的影响如表 1 所示。结果表明,灌溉方式显著影响各生育期(除苗期外)花生根系长度,生物炭用量则极显著影响全生育期花生根系长度,二者交互效应对花针期和 2018 年结荚期影响显著 ($P < 0.05$)。同一生物炭用量(除 B40 外)下,膜下滴灌的花生根

表 1 不同灌溉方式和生物炭用量下全生育期花生根长

Tab.1 Root length of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates								
cm								
处理	2018 年				2019 年			
	SS	FS	PSS	PFS	SS	FS	PSS	PFS
FB0	480.02 ^{cd}	1 147.94 ^d	1 320.03 ^e	665.28 ^d	451.71 ^d	892.78 ^e	1 095.64 ^f	547.27 ^e
FB10	592.69 ^{abc}	1 471.54 ^{bc}	1 918.85 ^{abc}	822.80 ^{bcd}	574.23 ^{ab}	1 221.54 ^{bcd}	1 551.07 ^{cd}	721.06 ^{bc}
FB20	622.71 ^a	1 338.05 ^{bed}	1 691.34 ^{bed}	768.52 ^{bed}	550.94 ^{abc}	1 222.19 ^{bed}	1 473.65 ^{cde}	766.05 ^{ab}
FB40	502.45 ^{bed}	1 221.22 ^d	1 609.25 ^{cde}	719.90 ^{cd}	497.71 ^{bed}	1 017.60 ^{bede}	1 259.09 ^{ef}	717.81 ^{bed}
DB0	478.02 ^d	1 142.33 ^d	1 370.47 ^{de}	717.84 ^{cd}	445.61 ^d	898.67 ^{de}	1 191.69 ^f	581.49 ^{de}
DB10	616.28 ^{ab}	1 546.97 ^b	2 059.66 ^a	869.97 ^{bc}	581.06 ^a	1 239.22 ^{bc}	1 676.84 ^{abc}	779.49 ^{ab}
DB20	617.39 ^a	1 378.62 ^{bed}	2 014.64 ^{ab}	781.46 ^{bed}	549.41 ^{abc}	1 187.70 ^{bede}	1 571.25 ^{bed}	751.99 ^{bc}
DB40	495.46 ^{cd}	1 297.52 ^{cd}	1 571.60 ^{de}	761.51 ^{bed}	487.40 ^{cd}	1 051.63 ^{bede}	1 317.51 ^{def}	674.60 ^{bede}
MB0	484.25 ^{cd}	1 192.81 ^d	1 474.01 ^{de}	844.47 ^{bc}	451.76 ^d	1 148.43 ^{bede}	1 206.42 ^{ef}	614.98 ^{cde}
MB10	635.75 ^a	1 817.82 ^a	2 239.51 ^a	1 079.59 ^a	593.67 ^a	1 696.89 ^a	1 853.93 ^a	896.37 ^a
MB20	610.22 ^{ab}	1 383.63 ^{bed}	2 192.66 ^a	908.93 ^b	584.10 ^a	1 309.19 ^b	1 824.97 ^{ab}	801.70 ^{ab}
MB40	559.52 ^{abcd}	1 305.33 ^{bed}	2 023.67 ^{ab}	802.80 ^{bed}	487.76 ^{cd}	943.30 ^{cde}	1 562.40 ^{bed}	772.08 ^{ab}
I		*	*	**		*	**	*
F	B	**	**	**	**	**	**	**
I × B		*	*			**		

注:SS 表示苗期;FS 表示花针期;PSS 表示结荚期;PFS 表示饱果期。 I 表示灌溉方式; B 表示生物炭用量;* 表示差异显著 ($P < 0.05$),** 表示差异极显著 ($P < 0.01$);同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平。下同。

长始终表现为较高水平,各生育期(除苗期外)表现一致,其中花针期 B10 处理下的膜下滴灌花生根长显著高于沟灌和滴灌。同一灌溉方式下,花生根长均随着生物炭用量的增加,表现为先增加后降低的变化趋势,在生物炭用量 10 t/hm²或 20 t/hm²时获得较高的花生根长,2 年各生育期沟灌和滴灌条件下二者差异不显著,但 2 年花针期膜下滴灌下 10 t/hm²生物炭处理的花生根长均显著大于 20 t/hm²。交互分析表明,各生育期花生根长最大值均出现在 MB10 处理,10 t/hm²生物炭处理较不施生物炭处理花生根长 2 年平均提高了 31.3% (苗期)、50.1% (花针期)、52.8% (结荚期)、36.8% (饱果期)。由此说明,膜下滴灌下施用 10 t/hm²生物炭对花生根长具有最佳的促进作用。

2.1.2 灌溉方式和生物炭用量对花生根表面积的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对花生全生育期根表面积的影响如表 2 所示。结果表明,灌溉方式显著影响各生育期(除苗期外)花生根表面积,生物炭

用量则极显著影响全生育期花生根表面积,二者交互效应对结荚期影响显著($P < 0.05$)。同一 B10 和 B20 处理下,各生育期(除苗期外)花生根表面积较大值均出现在膜下滴灌,其中花针期和结荚期 B10 处理下膜下滴灌花生根表面积显著高于沟灌,且 2 年试验结果表现一致。同一灌溉方式下,花生根表面积均随生物炭用量的增加呈先升后降的变化规律,除花针期以外,其余各生育期沟灌条件下均在 B20 处理时得到较大的花生根表面积,但与 B10 处理的差异并不显著,其余各生育期(除苗期外)3 种灌溉方式下花生根表面积的最大值均为 B10 处理。交互分析表明,除苗期外的各生育期膜下滴灌条件下施用 10 t/hm²生物炭对花生根表面积的提升效果最为明显,且 2 年试验结果表现一致。例如在结荚期,与不施生物炭处理相比,10 t/hm²生物炭处理的提高幅度(2 年平均值)为 33.0% (F)、30.5% (D)、44.6% (M),并达到显著性水平($P < 0.05$)。说明膜下滴灌和 10 t/hm²生物炭的耦合处理对花生根表面积的提升效果最佳。

表 2 不同灌溉方式和生物炭用量下全生育期花生根表面积

Tab.2 Root surface area of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates								
cm ²								
处理	2018 年				2019 年			
	SS	FS	PSS	PFS	SS	FS	PSS	PFS
FB0	80.95 ^{bc}	234.44 ^d	233.23 ^e	112.41 ^b	59.28 ^b	151.80 ^{cd}	201.90 ^f	92.74 ^{bc}
FB10	109.02 ^{ab}	270.85 ^{bcd}	330.50 ^{bc}	120.82 ^b	82.51 ^{ab}	172.94 ^{bcd}	250.87 ^{bcd}	107.36 ^{abc}
FB20	111.32 ^a	262.20 ^{bcd}	336.96 ^{abc}	126.55 ^{ab}	89.95 ^a	168.38 ^{bcd}	251.46 ^{bcd}	111.95 ^{abc}
FB40	80.74 ^{bc}	258.89 ^{bcd}	284.56 ^{cde}	116.36 ^b	68.82 ^{ab}	164.32 ^{bcd}	228.41 ^{def}	107.07 ^{abc}
DB0	76.23 ^c	241.40 ^{cd}	250.51 ^e	110.25 ^b	58.67 ^b	141.72 ^d	206.22 ^f	91.88 ^{bc}
DB10	103.63 ^{abc}	307.25 ^{ab}	321.50 ^{bcd}	131.24 ^{ab}	81.25 ^{ab}	180.92 ^{abc}	273.66 ^{abc}	115.50 ^{abc}
DB20	111.13 ^a	268.34 ^{bcd}	313.92 ^{bcd}	121.08 ^b	84.81 ^a	169.98 ^{bcd}	240.27 ^{cdef}	113.00 ^{abc}
DB40	89.25 ^{abc}	252.55 ^{cd}	289.51 ^{cde}	118.31 ^b	76.34 ^{ab}	152.56 ^{cd}	210.52 ^{ef}	106.77 ^{abc}
MB0	84.42 ^{abc}	269.07 ^{bcd}	266.26 ^{de}	114.68 ^b	60.17 ^b	168.32 ^{bcd}	210.48 ^{ef}	89.29 ^c
MB10	111.93 ^a	346.79 ^a	393.41 ^a	159.57 ^a	91.99 ^a	217.54 ^a	297.52 ^a	131.04 ^a
MB20	103.03 ^{abc}	288.97 ^{bc}	357.69 ^{ab}	128.47 ^{ab}	86.68 ^a	200.68 ^{ab}	283.83 ^{ab}	120.16 ^{ab}
MB40	98.65 ^{abc}	263.91 ^{bcd}	283.96 ^{cde}	125.63 ^b	75.12 ^{ab}	186.73 ^{abc}	260.42 ^{abcd}	109.99 ^{abc}
I		*	*	*		*	*	**
F	B	**	**	**	**	**	**	**
I × B			*				*	

2.1.3 灌溉方式和生物炭用量对花生根体积的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对花生全生育期根体积的影响如表 3 所示。结果表明,灌溉方式显著影响花针期和结荚期的花生根体积,生物炭用量则极显著影响全生育期花生根体积,二者交互效应仅对 2019 年结荚期影响极显著($P < 0.01$)。除 B0 处理以外,同一生物炭用量下,花生根体积均在膜下滴灌条件下取得较大值,各生育期(除苗期外)表现一致,其中在 B10 处理下,花针期和结荚期膜下滴灌

花生根体积与沟灌的差异达到显著性水平($P < 0.05$)。同一灌溉方式下,花生根体积亦随着生物炭用量的增多呈先增后减的趋势,其中花针期和结荚期沟灌条件下施用 20 t/hm²生物炭的花生根体积均高于其他生物炭处理,其余各生育期(除苗期外)不同灌溉方式下的花生根体积均在生物炭用量为 10 t/hm²时达到最大,但 B10 和 B20 间的差异并不明显。由此可知,膜下滴灌和适量的生物炭均可提高花生根体积,综合考虑经济成本,10 t/hm²处理表现最佳。

表 3 不同灌溉方式和生物炭用量下全生育期花生根体积

Tab.3 Root volumn of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates								
cm ³								
处理	2018 年				2019 年			
	SS	FS	PSS	PFS	SS	FS	PSS	PFS
FB0	1. 17 ^c	2. 58 ^d	3. 56 ^e	1. 19 ^c	0. 64 ^{bc}	1. 90 ^c	3. 34 ^d	1. 16 ^{cd}
FB10	1. 36 ^{abc}	3. 22 ^{bcd}	4. 39 ^{bcd}	1. 65 ^{ab}	0. 92 ^a	2. 08 ^{bc}	4. 03 ^{cd}	1. 35 ^{abc}
FB20	1. 68 ^{ab}	3. 46 ^{abc}	4. 56 ^{abcd}	1. 49 ^{bc}	1. 00 ^a	2. 11 ^{bc}	4. 75 ^{abc}	1. 27 ^{bcd}
FB40	1. 29 ^{abc}	3. 12 ^{bcd}	4. 18 ^{cde}	1. 46 ^{bc}	0. 87 ^{abc}	2. 02 ^{bc}	3. 16 ^d	1. 24 ^{bcd}
DB0	1. 14 ^c	2. 87 ^{cd}	3. 99 ^{de}	1. 35 ^{bc}	0. 60 ^c	1. 81 ^c	3. 80 ^{cd}	1. 15 ^{cd}
DB10	1. 42 ^{abc}	3. 57 ^{ab}	5. 14 ^{ab}	1. 63 ^{ab}	1. 01 ^a	2. 30 ^{abc}	5. 05 ^{ab}	1. 43 ^{ab}
DB20	1. 74 ^a	3. 23 ^{bcd}	4. 54 ^{abcd}	1. 53 ^b	0. 93 ^a	2. 22 ^{abc}	4. 11 ^{bcd}	1. 35 ^{abc}
DB40	1. 21 ^{bc}	3. 18 ^{bcd}	4. 18 ^{cde}	1. 47 ^{bc}	0. 88 ^{ab}	2. 02 ^{bc}	3. 86 ^{cd}	1. 20 ^{bcd}
MB0	1. 20 ^{bc}	2. 95 ^{bcd}	3. 91 ^{de}	1. 43 ^{bc}	0. 78 ^{abc}	1. 96 ^c	3. 76 ^{cd}	1. 04 ^d
MB10	1. 46 ^{abc}	3. 94 ^a	5. 27 ^a	1. 92 ^a	1. 04 ^a	2. 72 ^a	5. 69 ^a	1. 55 ^a
MB20	1. 68 ^{ab}	3. 48 ^{abc}	4. 86 ^{abc}	1. 63 ^{ab}	0. 93 ^a	2. 47 ^{ab}	5. 16 ^a	1. 44 ^{ab}
MB40	1. 29 ^{abc}	3. 28 ^{abc}	4. 49 ^{abcd}	1. 55 ^b	0. 79 ^{abc}	2. 08 ^{bc}	3. 95 ^{cd}	1. 31 ^{abc}
<i>I</i>		**	*			**	*	
<i>F</i>	<i>B</i>	**	**	**	**	**	**	**
	<i>I × B</i>						**	

2.2 灌溉方式和生物炭用量对花生干物质积累的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对全生育期花生干物质积累的影响如表 4 所示。由表 4 可知,随着生育进程的推进,花生干物质积累量呈逐渐增加趋势。结果表明,灌溉方式对各生育期(除苗期外)干物质积累有显著影响,生物炭用量则对全生育期干物质积累均有极显著影响,交互作用对花针期和结荚期以及 2019 年饱果期影响极显著($P < 0.01$)。同一生物炭用量下,各生育期花生植株干物质积累量最大值多出现在膜下滴灌,其中在 B10 水平下,植株

干物质积累量变化趋势表现为在花针期至饱果期膜下滴灌显著高于沟灌,在花针期和结荚期膜下滴灌显著高于滴灌。同一灌溉方式下,各生育期干物质积累量均随生物炭用量的增加呈先增后降的变化趋势,且在 B10 或 B20 时达到峰值,与 B0 处理相比,2 年增幅分别为 13.3% ~ 50.2% 和 13.1% ~ 60.9%。交互分析表明,花针期至饱果期干物质积累量最大值均出现在 MB10 处理,与不施生物炭处理相比,膜下滴灌下施用生物炭 10 t/hm²对花生植株干物质积累量的提升效果最为明显,并达到显著性水平($P < 0.05$)。由此可见,MB10 耦合处理更有利于提高花

表 4 不同灌溉方式和生物炭用量下花生干物质积累量

Tab.4 Dry matter accumulation of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates								
kg/hm ²								
处理	2018 年				2019 年			
	SS	FS	PSS	PFS	SS	FS	PSS	PFS
FB0	482. 84 ^c	2 714. 73 ^f	5 802. 61 ^f	7 999. 05 ^d	411. 08 ^c	2 138. 56 ^b	3 929. 37 ^g	6 388. 72 ^{fg}
FB10	578. 27 ^{ab}	3 054. 92 ^{ef}	6 784. 99 ^{cdef}	9 063. 07 ^{bcd}	456. 83 ^{abc}	2 799. 85 ^{def}	5 832. 83 ^{def}	7 952. 86 ^{de}
FB20	620. 25 ^{ab}	3 431. 42 ^{bcd}	7 184. 45 ^{bcd}	8 753. 53 ^{cd}	496. 78 ^{ab}	3 119. 26 ^{cde}	5 960. 51 ^{de}	7 531. 47 ^{def}
FB40	552. 85 ^{bc}	3 151. 37 ^{cdef}	6 393. 95 ^{ef}	8 400. 11 ^d	472. 23 ^{abc}	2 741. 02 ^{efg}	4 989. 60 ^f	5 881. 34 ^g
DB0	491. 41 ^c	2 848. 36 ^f	6 418. 22 ^{ef}	8 296. 69 ^d	434. 47 ^{bc}	2 226. 37 ^{gh}	5 338. 66 ^{ef}	6 908. 03 ^{efg}
DB10	590. 04 ^{ab}	3 238. 52 ^{cdef}	7 715. 22 ^{bcd}	9 952. 55 ^{abc}	483. 27 ^{ab}	3 095. 30 ^{cdef}	7 682. 25 ^b	9 412. 99 ^{abc}
DB20	641. 60 ^a	3 666. 30 ^{bc}	7 763. 74 ^{bc}	9 031. 04 ^{bcd}	491. 40 ^{ab}	3 548. 94 ^{bc}	6 719. 62 ^{cd}	8 422. 48 ^{cd}
DB40	543. 70 ^{bc}	3 205. 26 ^{cdef}	6 890. 64 ^{cdef}	8 472. 45 ^{cd}	475. 43 ^{abc}	2 777. 62 ^{ef}	5 736. 52 ^{ef}	6 432. 75 ^{fg}
MB0	489. 23 ^c	3 080. 63 ^{def}	7 121. 26 ^{cde}	8 455. 60 ^d	429. 82 ^{bc}	2 570. 19 ^{fgh}	5 563. 08 ^{ef}	7 503. 58 ^{def}
MB10	632. 31 ^a	4 626. 17 ^a	9 304. 92 ^a	11 153. 48 ^a	509. 42 ^a	4 136. 36 ^a	8 888. 03 ^a	10 598. 59 ^a
MB20	636. 23 ^a	3 922. 69 ^b	8 275. 92 ^{ab}	10 364. 58 ^{ab}	498. 09 ^{ab}	3 850. 93 ^{ab}	7 643. 46 ^{bc}	9 674. 75 ^{ab}
MB40	584. 96 ^{ab}	3 598. 91 ^{bcd}	6 653. 67 ^{def}	9 371. 45 ^{bcd}	471. 36 ^{abc}	3 325. 39 ^{bcd}	6 103. 44 ^{de}	9 166. 78 ^{bc}
<i>I</i>		**	**	**		**	**	**
<i>F</i>	<i>B</i>	**	**	**	**	**	**	**
	<i>I × B</i>		**	**		**	**	**

生干物质的生产能力。

2.3 灌溉方式和生物炭用量对花生磷素积累量的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对全生育期花生植株磷素积累量的影响如图 1 (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同)所示。结果表明,灌溉方式和交互效应对各生育期(除苗期外)磷素积累量影响显著,生物炭用量则对全生育期磷素

积累量影响显著 ($P < 0.05$)。由图 1 可知,全生育期磷素积累量变化趋势为:生育前期迅速增加,结荚期后则趋于平缓增加,至饱果期达到峰值,且 2 年表现一致。同一生物炭用量下,各生育期(除苗期外)花生植株磷素积累量均在膜下滴灌下取得最大值。以花针期为例,膜下滴灌较沟灌和滴灌 2 年平均提高了 36.8% 和 23.3%。同一灌溉方式下,各生育期施用 10 t/hm² 和 20 t/hm² 生物炭均能促进磷素积累

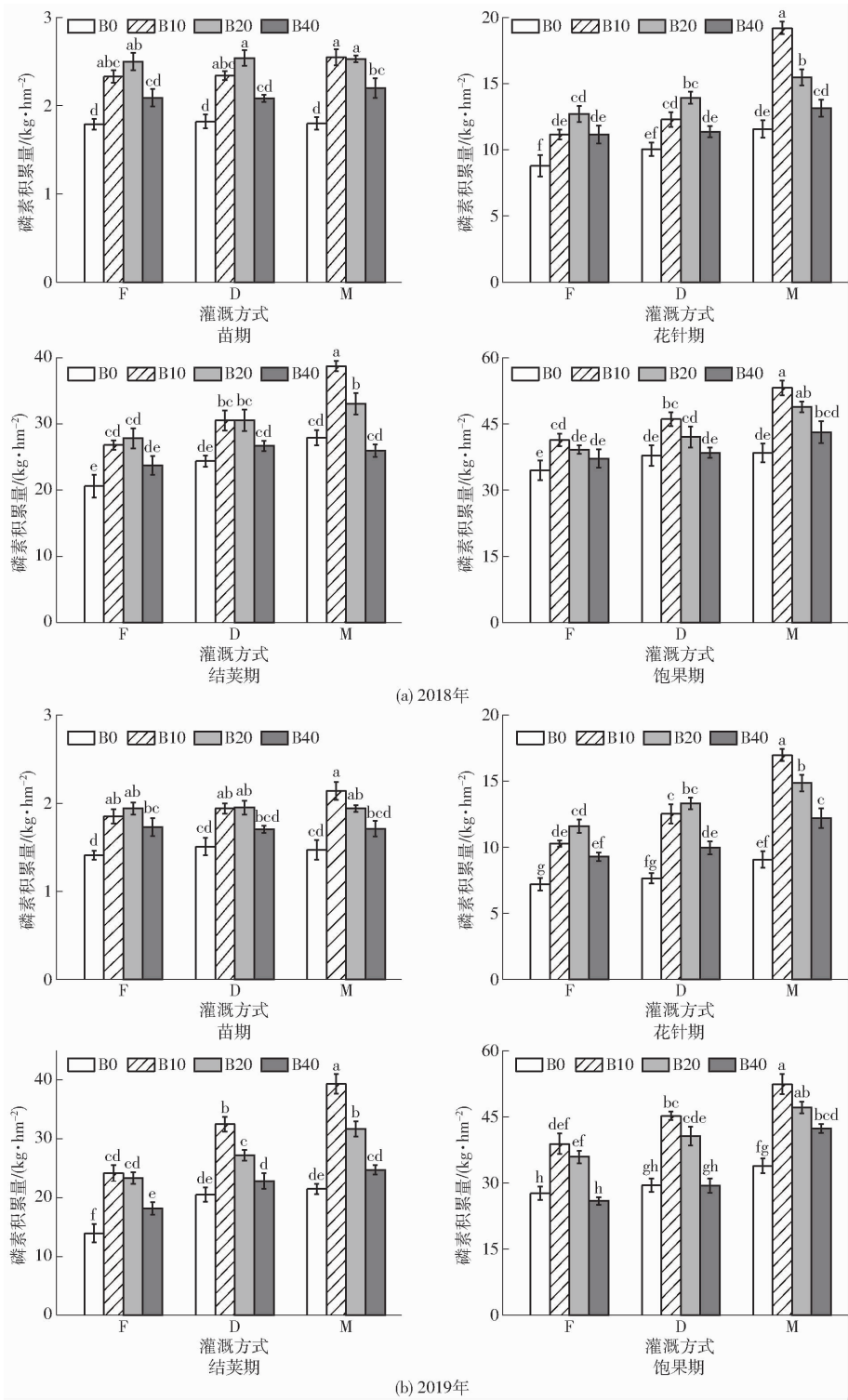


图 1 不同灌溉方式和生物炭用量下全生育期花生磷素积累量

Fig. 1 P accumulation of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates

量的提高,其中在花针期和结荚期膜下滴灌条件下, B10 处理显著高于 B20 处理。交互分析表明,各生育期 MB10 处理对磷素积累量的提升效果最为明显,并达到显著性水平($P < 0.05$)。以饱果期为例,与 B0 相比,B10 处理 2 年平均显著提高了 30.2% (F)、37.6% (D)、46.4% (M)。说明膜下滴灌和生物炭均有利于花生对磷素的吸收利用,并且以 MB10 耦合作用的提升效果最佳。

2.4 灌溉方式和生物炭用量对土壤有效磷含量的影响

不同灌溉方式和生物炭用量对全生育期土壤表层有效磷含量的影响如图 2 所示。结果表明,灌溉方式及交互作用均显著影响各生育期(除苗期外)土壤有效磷含量,生物炭用量则对全生育期土壤有效磷含量影响显著($P < 0.05$)。同一 B10 和 B20 生物炭用量下,全生育期膜下滴灌土壤有效磷含量始

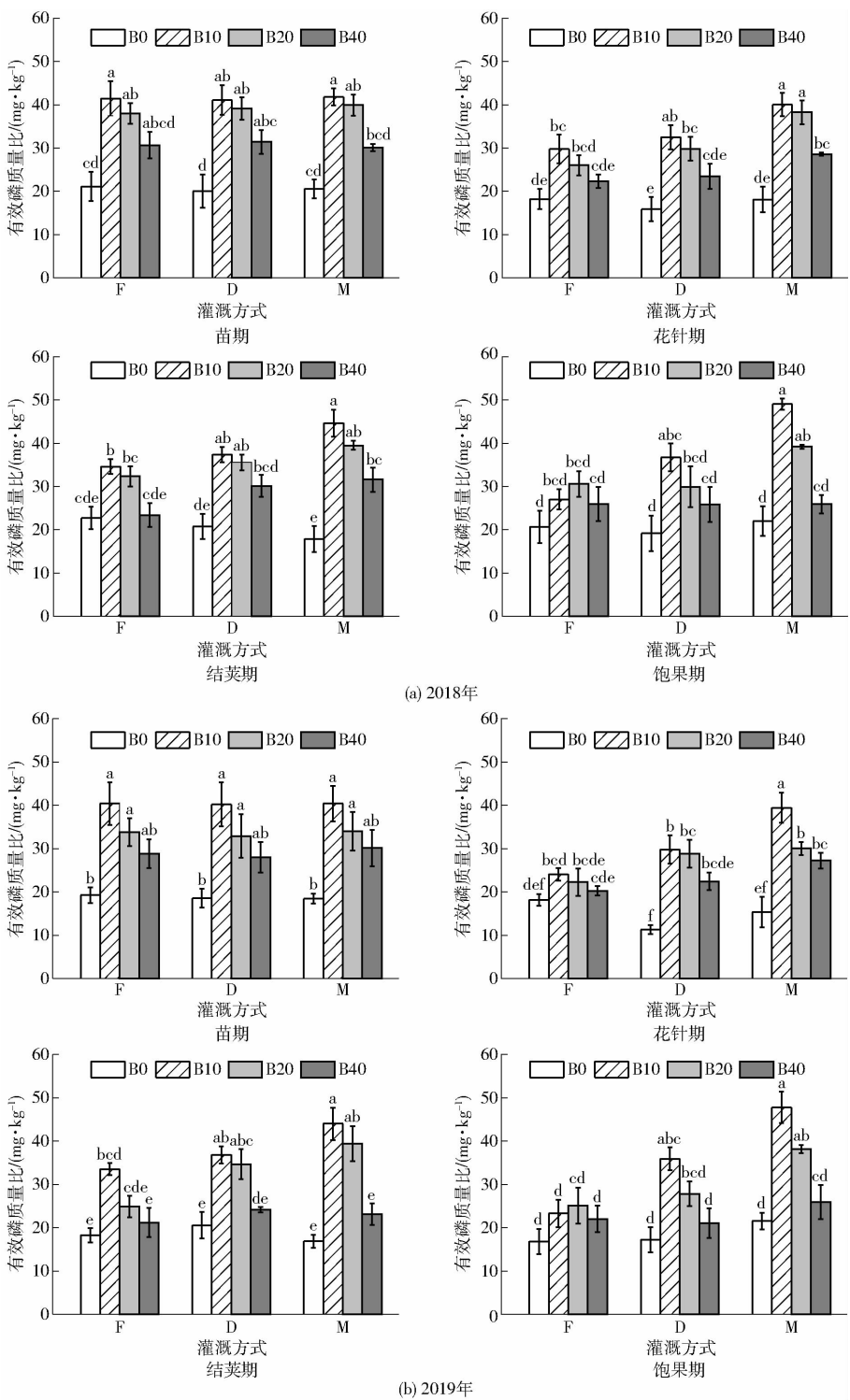


图 2 不同灌溉方式和生物炭用量下全生育期土壤有效磷含量

Fig. 2 Soil available P of peanut in whole growth period under different irrigation methods and biochar application rates

终保持较高水平,与沟灌相比,2 年平均显著提高了 45.1% (花针期)、35.2% (结荚期)、66.7% (饱果期);与滴灌相比,2 年平均提高了 22.2% (花针期)、16.0% (结荚期)、33.7% (饱果期)。同一灌溉方式下,随着生物炭用量的增多,各生育期土壤有效磷含量呈先升后降的变化趋势,除饱果期沟灌条件外,各生育期 3 种灌溉方式下的土壤有效磷含量均在生物炭用量为 10 t/hm²时达到最大值。交互分析表明,膜下滴灌下施用 10 t/hm²生物炭时对土壤有效磷含量的提升幅度最大,与 B0 处理相比,2 年增幅平均为 139.3% (花针期)、155.3% (结荚期)、122.5% (饱果期),并达到显著性水平 ($P < 0.05$)。由此说明,膜下滴灌和生物炭对土壤有效磷含量有着较高的增幅能力,且 MB10 耦合处理对土壤有效磷含量的提升效果最佳。

2.5 灌溉方式和生物炭用量对花生产量及产量构成的影响

不同水平下花生产量及产量构成多重比较分析如表 5 所示。从产量构成分析可知,花生增产的原因主要是膜下滴灌和生物炭显著影响了花生的出仁率和饱果率,一方面膜下滴灌的出仁率显著高于其他两种灌溉方式,另一方面与 B0 处理相比,B10 处理可显著提高花生的出仁率和饱果率 ($P < 0.05$)。由表 5 可知,灌溉方式和生物炭用量以及二者交互效应均对花生产量影响显著 ($P < 0.05$)。结果表明 (图 3),同一生物炭用量下,膜下滴灌的花生产量均高于其他两种灌溉方式,尤其在 B10 处理下,达到了显著性水平 ($P < 0.05$),与沟灌和滴灌相比,2 年增幅平均值分别为 10.9% 和 7.1%。同一灌溉方式下,花生产量随生物炭用量的增多呈先升后降的趋势,当生物炭用量为 10 t/hm²时达到最大值,与不施生物炭处理相比,2 年增幅平均值为 11.9%,并达到显

著性水平 ($P < 0.05$)。交互分析表明,连续 2 年最高产量均为 MB10 处理(2 年均值达到 6 369.3 kg/hm²),且 MB10 耦合处理对花生的增产效果最为明显,与 MB0 处理相比,2 年平均增产 14.2%。

表 5 各主因子不同水平下花生产量及产量构成多重比较分析

Tab.5 Multiple comparison of peanut yield and its component among different levels of each main factor

年份	主效应	百果 质量/g	百仁 质量/g	出仁率/ %	饱果率/ %	产量/ (kg·hm ⁻²)
2018	F	190.14 ^a	84.26 ^a	67.21 ^b	87.85 ^a	5 593.6 ^b
	D	193.22 ^a	85.20 ^a	67.21 ^b	88.69 ^a	5 748.2 ^b
	M	197.04 ^a	86.02 ^a	69.71 ^a	88.94 ^a	6 043.3 ^a
	B0	191.98 ^a	84.46 ^a	67.07 ^b	86.37 ^b	5 468.4 ^c
	B10	196.60 ^a	86.29 ^a	69.19 ^a	89.89 ^a	6 152.0 ^a
	B20	193.74 ^a	85.16 ^a	68.08 ^{ab}	89.58 ^{ab}	5 992.9 ^b
	B40	191.56 ^a	84.71 ^a	67.84 ^b	88.14 ^{ab}	5 566.9 ^c
	I			*		**
F	B			**	*	**
	I × B			*		*
2019	F	180.62 ^a	76.72 ^a	64.01 ^b	81.03 ^a	5 393.5 ^b
	D	182.65 ^a	77.83 ^a	65.22 ^b	82.95 ^a	5 565.2 ^{ab}
	M	186.36 ^a	79.50 ^a	67.45 ^a	83.82 ^a	5 823.0 ^a
	B0	178.64 ^a	76.06 ^a	64.73 ^b	78.83 ^b	5 282.9 ^b
	B10	187.08 ^a	79.09 ^a	66.64 ^a	84.98 ^a	5 888.1 ^a
	B20	188.28 ^a	80.47 ^a	66.15 ^{ab}	83.69 ^a	5 835.0 ^a
	B40	178.85 ^a	76.45 ^a	64.72 ^b	82.91 ^{ab}	5 369.5 ^b
	I			*		*
F	B			*	*	**
	I × B			*		*

3 讨论

3.1 不同灌溉方式下施用生物炭对花生根系形态的影响

根系形态对作物吸收养分的能力起着决定性作

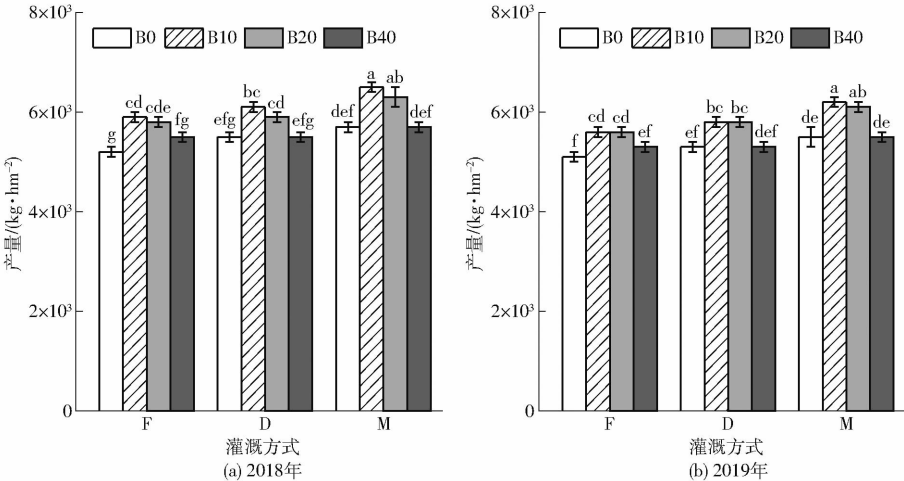


图 3 不同灌溉方式和生物炭用量下花生产量
Fig.3 Peanut yield under different irrigation methods and biochar application rates

用。本研究表明,各生育期(除苗期外)膜下滴灌的花生根系形态可取得较好的优化效果,这与 WANG 等^[20]研究结论类似。究其原因是沟灌条件下的根系层土壤水分含量相对较高,土壤通气性较差^[21],膜下滴灌和滴灌符合“少量多次”的灌水原则,通过改善土壤孔隙度和通气性,增加根际土壤的氧气含量,此外,相对于不覆膜滴灌,膜下滴灌土壤水分蒸发强度较低,具有更好的增温保墒效果,该灌溉方式下有利的生长环境,使花生根系获得较大的根系形态参数,进而提高了花生根系获取土壤磷素的机会。张伟明等^[22]在盆栽试验中研究发现,生物炭促进水稻生育前期的主根长和根体积,提高根系总吸收面积和活跃吸收面积;相关研究也发现^[23],生物炭能改变作物的根系形态,有利于细根增殖,增加比根长。本试验结果表明,各生育期施用适量生物炭处理均能显著优化花生的根长、根表面积以及根体积。这是因为在土壤中施入多孔隙结构的生物炭,能够降低土壤容重,增加土壤孔隙,改善土壤微环境,为根系生长提供良好的空间;同时生物炭巨大比表面积和较高阳离子交换量等特性,使其可吸附、缓释土壤和肥料中的养分^[24-25],以供应花生根系生长所需,进一步为优化植株根系形态起到促进作用,使根系能从土壤中吸收更多的水分和磷素养分。本试验研究还发现,各生育期(除苗期外)花生根系形态均以膜下滴灌和 10 t/hm²生物炭耦合处理的优化效果最佳。这说明适量的生物炭在膜下滴灌条件下更有利于促进花生根系下扎,增大根系与土壤的接触面积,从而通过根系提高作物对水分和养分的吸收能力,进而促进最终产量的增加。

3.2 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤有效磷的影响

土壤作为作物所需磷素的主要来源,其中的水分状况不仅能够影响植株根系的生长发育,还能通过影响土壤磷的有效性进而影响作物对磷素的吸收积累^[26]。水分是土壤磷运移的良好载体,主要与磷在土壤中具有较差的移动性有关^[27]。本研究表明,在施用一定量的生物炭时,各生育期(除苗期外)膜下滴灌的土壤有效磷含量明显高于其他两种灌溉方式,主要是因为相对于沟灌和滴灌,地膜覆盖的膜下滴灌土壤含水率较高,更有利于促进磷在土壤中的扩散速率^[28],同时对提高土壤磷的有效性也有着更为积极的影响,这在朱齐超^[29]的研究中也有类似结论。生物炭能够进一步提高土壤磷素的有效性,主要是一方面生物炭自身含有丰富的磷^[30],施入土壤后可直接增加土壤有效磷含量,另一方面因为生物炭具有强吸附能力和较高的离子交换量,可有效固持土壤磷流失,并降低土壤对磷的固定作用,从而促

进提高土壤磷素有效性^[31-32]。本研究表明,3 种灌溉方式下施用生物炭可提高土壤有效磷含量,并且有效磷含量随生物炭用量增多呈先升高后降低的变化,其中膜下滴灌和 10 t/hm²生物炭的耦合处理对土壤有效磷含量具有最为显著的提高效果,而高生物炭用量的有效磷含量较低主要是因为生物炭自身碳氮比较高,过量施用则会导致土壤对磷的固定,反而降低了土壤磷的有效性^[33-34]。因此,膜下滴灌下施用一定量的生物炭能够明显提升土壤有效磷含量,进而提高花生磷素吸收积累以及产量的增加。

3.3 不同灌溉方式下施用生物炭对花生磷素积累量及产量的影响

相关分析表明,根系形态、土壤有效磷与植株磷素含量具有显著正相关关系^[26,35],说明发达的根系形态特征和充足的土壤有效磷含量是作物磷高效的重要基础。研究表明,膜下滴灌或生物炭均能单独优化花生根系形态以及提高土壤有效磷含量,在膜下滴灌下进一步施用一定量生物炭更能协同改善土壤水、气、热条件,通过优化花生根系形态加大根系与土壤的接触面积,从而吸收更多的土壤有效磷,促进花生植株的磷吸收以及最终产量的形成。此外,膜下滴灌和生物炭的交互效应对土壤有效磷含量影响显著,二者协同促进土壤有效磷的转化,以供应花生根系生长和植株磷素的吸收积累。本研究表明,3 种灌溉方式下,花针期至饱果期施生物炭处理下的花生植株磷素积累量均有所提升,并在生物炭用量为 10 t/hm²时的提升效果最为显著,张宏等^[36]研究得出相似结果,即在连续 2 年施入生物炭后,明显提高了土壤有效磷含量和春小麦植株磷养分的吸收利用,并随生物炭施用量的增加,土壤肥力先增后减。本研究还表明,生物炭用量 10 t/hm²在膜下滴灌下可得到最高的花生磷素积累量,可见 MB10 耦合处理的促进效果最佳。

2 年试验结果表明,施用生物炭能够明显提高花生产量,且随生物炭用量的增多呈先增后减的趋势,最高产量出现在 10 t/hm²生物炭处理,并显著高于不施生物炭处理($P < 0.05$),这与前人研究结果一致。张宏等^[36]研究发现,生物炭对春小麦产量及其构成具有促进作用,作物产量随生物炭用量的增加先增后减;孙海妮等^[37]研究也发现,生物炭施用量并不是越多越好,当超过一定量时,产量表现为下降趋势。由此说明生物炭的增产效应具有一定阈值,过量施用则会对产量及产量构成产生不利影响。在上述结果基础上,本研究表明,在膜下滴灌条件下,增施 10 t/hm²生物炭可得到最高的花生产量,可见通过良好的土壤水分和适宜生物炭用量的共同调

控,明显优化花生根系形态,改善土壤磷素有效性,促进花生磷素的吸收积累,提高出仁率及饱果率,对花生高产有着重要意义。

4 结论

(1)灌溉方式和生物炭用量存在显著互作效应。MB10 处理得到花生最高产量,2 年平均值达到 6 369.3 kg/hm²,2 年平均增产 14.2%,为本试验最优耦合模式。

(2)膜下滴灌和生物炭能协同创造花生良好的根系形态,一定量生物炭处理有利于提高全生育期花生根长、根表面积和根体积,且在膜下滴灌下的优化效果更为明显。

(3)施用一定量生物炭可显著增加土壤有效磷含量,促进花生植株的磷素积累量,并在膜下滴灌下施用生物炭有着最为显著的提升效果,对花生最终增产具有一定促进作用,综合考虑,10 t/hm²为本试验最佳的生物炭用量。

参 考 文 献

[1] 张智猛,万书波,戴良香,等.不同花生品种对干旱胁迫的响应[J].中国生态农业学报,2011,19(3):631-638.
ZHANG Zhimeng, WAN Shubo, DAI Liangxiang, et al. Response of different peanut varieties to drought stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 631-638. (in Chinese)

[2] 王淑君,夏桂敏,李永发,等.生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):285-290,301.
WANG Shujun, XIA Guimin, LI Yongfa, et al. Effect of biochar-based fertilizer and water stress to peanut yield, water consumption and nutrition uptake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):285-290,301. (in Chinese)

[3] 白玉超,邓宝元,史海莉,等.改性稻壳炭和改性沸石对红壤磷有效性影响[J].中国土壤与肥料,2020(2):31-39.
BAI Yuchao, DENG Baoyuan, SHI Haili, et al. The effect of modified rice husk charcoal and modified zeolite on the phosphorus efficiency in red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(2):31-39. (in Chinese)

[4] 夏丽丹,曹升,张虹,等.不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(5):1101-1111.
XIA Lidan, CAO Sheng, ZHANG Hong, et al. Effect of biochar on phosphorus forms and phosphatase activity in red soil under different water conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5):1101-1111. (in Chinese)

[5] RODRIGUEZ D, GOUDRIAN J, OYARZABAL M, et al. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(1):11.

[6] 张晓建,李兆君,何俊瑜,等.土壤水分对玉米根际磷素组分的影响[J].西南农业学报,2011,24(2):654-657.
ZHANG Xiaojian, LI Zhaojun, HE Junyu, et al. Effects of soil moisture on phosphorus transformation in maize rhizosphere[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(2):654-657. (in Chinese)

[7] ZHANG Y L, CHEN L J, ZHANG Y G, et al. Examining the effects of biochar application on soil phosphorus levels and phosphatase activities with visible and fluorescence spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(7):2325-2329.

[8] ATKINSON C J, FITZGERALD J D, HIPPS N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils:a review[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1-2):1-18.

[9] 郑琴,王秀斌,宋大利,等.生物炭对潮土磷有效性、小麦产量及吸磷量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(3):130-136.
ZHENG Qin, WANG Xiubin, SONG Dali, et al. Effects of biochar on phosphorus availability and wheat yield in a fluvo-aquic soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(3):130-136. (in Chinese)

[10] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):285-294.
WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):285-294. (in Chinese)

[11] CHINTALA R, THOMAS E, LOUIS M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil biochar mixtures [J]. Clean-Soil Air Water, 2014, 42(5):626-634.

[12] 高天一,李娜,彭靖,等.连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(9):1451-1460.
GAO Tianyi, LI Na, PENG Jing, et al. Effect of consecutive application of biochar on phosphate morphology and availability in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9):1451-1460. (in Chinese)

[13] XU N, TAN G, WANG H, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 74(3):1-8.

[14] 王智慧,殷大伟,王洪义,等.生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J].东北农业科学,2019,44(3):14-19.
WANG Zhihui, YIN Dawei, WANG Hongyi, et al. Effects of different amounts of biochar applied on soil nutrient, soil enzyme activity and maize yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(3):14-19. (in Chinese)

[15] 谢迎新,刘宇娟,张伟纳,等.潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J].农业工程学报,2018,34(14):115-123.
XIE Yingxin, LIU Yujuan, ZHANG Weina, et al. Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14):115-123. (in Chinese)

[16] 张进红,吴波,王国良,等.生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(8):285-294.
ZHANG Jinhong, WU Bo, WANG Guoliang, et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):285-294. (in Chinese)

[17] 徐晓楠,陈坤,冯小杰,等.生物炭提高花生干物质与养分利用的优势研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):444-453.
XU Xiaonan, CHEN Kun, FENG Xiaojie, et al. Preponderant effect of biochar application in peanut dry matter accumulation and fertilizer nutrient use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2):444-453. (in Chinese)

- [18] HINSINGER P, BENGOUH A G, VETTERLEIN D, et al. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2): 117 – 152.
- [19] XIA G M, WANG Y J, HU J Q, et al. Effects of supplemental irrigation on water and nitrogen use, yield, and kernel quality of peanut under nitrogen-supplied conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106518.
- [20] WANG J T, DU G F, TIAN J S, et al. Effect of irrigation methods on root growth, root-shoot ratio and yield components of cotton by regulating the growth redundancy of root and shoot[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 234: 106120.
- [21] 姚任科. 不同灌溉方式下施钾方式对设施土壤钾素分布和番茄产量、品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- YAO Renke. Regulation of potassium application methods on soil potassium distribution, tomato yield and quality under various irrigation in greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445 – 1451.
- ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445 – 1451. (in Chinese)
- [23] PURAKAYASTHA T J, BERA T, BHADURI D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: pathways to climate change mitigation and global food security[J]. *Chemosphere*, 2019, 227(13): 345 – 365.
- [24] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 137 – 142.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 137 – 142. (in Chinese)
- [25] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 468 – 475.
- YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 468 – 475. (in Chinese)
- [26] 唐宏亮, 马领然, 张春潮, 等. 水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 582 – 589.
- TANG Hongliang, MA Lingran, ZHANG Chunchao, et al. Coupled effect of water and phosphorus on root growth and phosphorus uptake of maize at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(5): 582 – 589. (in Chinese)
- [27] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(3): 547 – 562.
- [28] 王昕, 李海港, 程凌云, 等. 磷与水分互作的根土界面效应及其高效利用机制研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1054 – 1064.
- WANG Xin, LI Haigang, CHENG Lingyun, et al. Advances of root-soil interface effect of phosphorus and water interaction and mechanisms of their efficient use[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1054 – 1064. (in Chinese)
- [29] 朱齐超. 膜下滴灌水稻养分积累规律及生理响应[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- ZHU Qichao. Rice nutrition characteristic and physiological response to fertilization under drip irrigation with film mulch[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- [30] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1361 – 1369.
- LI Ming, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361 – 1369. (in Chinese)
- [31] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 119 – 124.
- LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 119 – 124. (in Chinese)
- [32] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 12.
- [33] 刘磊, 廖萍, 王海媛, 等. 生物炭对双季水稻产量、养分吸收和土壤性状的残留效应[J]. *中国稻米*, 2020, 26(1): 63 – 66.
- LIU Lei, LIAO Ping, WANG Haiyuan, et al. Residual effects of biochar on yield, nutrient uptake and soil properties in double rice-cropping system[J]. *China Rice*, 2020, 26(1): 63 – 66. (in Chinese)
- [34] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 309 – 320.
- WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil structure and soybean yield on slope farmland in black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 309 – 320. (in Chinese)
- [35] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1185 – 1193.
- ZHAN Ya'nan, WANG Zhi, MENG Yali. Biochar soil phosphorus availability: a meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1185 – 1193. (in Chinese)
- [36] 张宏, 李俊华, 高丽秀, 等. 生物炭对滴灌春小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(2): 55 – 60.
- ZHANG Hong, LI Junhua, GAO Lixiu, et al. Effects of biochar on yield of spring wheat with drip irrigation and soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(2): 55 – 60. (in Chinese)
- [37] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 159 – 167.
- SUN Haini, WANG Shiwen, LI Yulin, et al. Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 159 – 167. (in Chinese)