

施磷深度与施磷量水平对燕麦产量、光合特性及品质的影响

梁晓宇¹,高凯^{1,2*},丛龙丽¹,刘之浩¹,刘忠国¹,朱铁霞¹

(1. 内蒙古民族大学,内蒙古 通辽 028000;2. 生态文明与绿色发展研究院,内蒙古 通辽 028000)

摘要:【目的】探讨磷肥对饲用燕麦产量、品质及光合特性的影响,为燕麦科学施肥提供参考。【方法】以燕麦(*Avena sativa*)为研究对象,设置不同的施磷量和施磷深度,测定燕麦产量、品质和光合特性,【结果】D15P15处理燕麦生物量最高,为5 122.82 kg/hm²;净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率最大值分别出现在D15P15、D20P10、D5P15处理,分别为12.97 μmol/(m²·s)、2.31 mol/(m²·s)、7.16 μmol/mol;叶、茎、穗的粗蛋白含量最大的处理分别为D20P20、D20P20、D10P20处理,其值分别为27.31%、12.68%、24.52%;叶、茎、穗的中性洗涤纤维含量最小的处理分别为D20P0、D15P0、D10P0处理,其值分别为28.67%、47.96%、43.50%;叶、茎、穗的酸性洗涤纤维含量最小的处理分别为D20P0、D20P0、D10P0处理,其值分别为15.37%、30.60%、20.18%;叶、茎、穗的粗脂肪含量最大的处理分别为D10P15、D15P15、D15P15处理,其值为13.60%、10.10%、13.62%。【结论】燕麦最佳施磷深度为15 cm、施磷量为306 kg/hm²。

关键词:磷肥下移;燕麦;产量;光合特性;品质;

中图分类号:S544.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)05-0046-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2023.05.007



磷是作物生长所必需的营养元素之一,在作物产量形成中起着关键作用^[1]。磷不仅是细胞质、细胞核和核苷酸的重要组成成分,而且对碳水化合物、氮和脂肪代谢、运输及植物的抗寒、抗旱等逆境胁迫能力的提高均有重要作用^[2]。在作物栽培中施加磷肥是重要的管理手段之一,如何科学合理地施加磷肥来提高产量是作物栽培研究的重点内容。学者们通过单施磷肥、氮-磷混施、磷-钾混施、氮-磷-钾混施、磷-水耦合等相关措施的研究和实践,初步明确了最佳施磷量、施磷时间和施磷组合,分析了相关功能特

性指标与产量之间的关系^[3-7],为磷肥管理提供了技术支持。

然而,在科学研究和生产实践中发现由于土壤中磷素移动性差、且多以表层或浅层方式施加,深层根系无法充分吸收,引起磷在土壤中垂直分布存在表层富集而下层不足的特点,致使磷肥利用效率降低,造成土壤污染^[8]。基于上述原因,学者们通过调整磷肥施加深度(磷肥下移)的方法,有效地提高了磷肥吸收效率,避免由于磷肥施加过量(或长期累积)给土壤和生态环境造成污染,达到了“减肥增效”的目的^[9]。如玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)等大田作物通过磷肥下移能够显著改善根系结构、根冠比、叶面积指数,有利于构建合理群体、提高水分和主要营养物质(氮、磷、钾)吸收利用效率,提高作物产量^[10-12]。由此可见,调节磷肥施加深度(磷肥下移)是进一步优化磷肥管理,避免磷富集的有效措施。

燕麦(*Avena sativa*)属禾本科燕麦属一年生草本植物,具有产量高,品质优良的特点,是广泛种植的粮

收稿日期:2022-06-14;修回日期:2022-09-29

基金项目:内蒙古自治区草原英才项目(CYYC20005)、科尔沁草地生态修复治理关键技术研究示范(S22001)、开鲁县退化草原毒害草治理试验示范项目(S21010)

作者简介:梁晓宇(1999-),男,吉林长春人,硕士研究生。

E-mail:1044642817@qq.com

*通信作者。E-mail: gaokai555@126.com

饲兼用作物之一^[13]。天然草地饲料资源相对匮乏、年际间变化大,饲草缺口逐年增加,已严重制约畜牧业发展,进一步加剧草畜矛盾,极大地影响了我国的粮食安全^[14]。如何通过栽培管理措施提高燕麦产量和品质一直是科研工作者和生产者所关心的问题,目前研究主要集中在燕麦栽培与管理、燕麦与其他牧草混播、播种期、物候期、抗逆性等方面^[15-23]。如纪亚君等^[21]对位于青藏高原东北部青海省高寒地区的燕麦进行了研究,结果发现氮、磷、钾不同水平的燕麦种子产量差异显著,种子产量均有不同程度的增加。韩美善等^[22]在五寨试验站田间试验区内进行了两年的旱作燕麦氮磷平衡施肥试验,研究结果表明施磷肥对燕麦生长发育、产量形成均有促进作用,高磷水平比低磷水平平均增产3.2%,而氮肥在磷肥的作用下对燕麦生长发育、产量形成的促进作用发挥更充分、更彻底。但关于分层施磷对燕麦的产量、光合特性及品质的研究相对较少。鉴于此,本研究选用燕麦品种牧达作为试验材料,在盆栽条件下对燕麦产量、光合特性及品质进行测定并分析,探讨合理的施磷深度和施磷量,为燕麦生产实践及农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

燕麦为北京正道生态科技有限公司提供的 Forage Oat (来源于美国,编号为C-133-19-MO),磷肥用磷酸二氢钠(NaH_2PO_4 ,分析纯),盆土采用无营养物质的蛭石与田间沙土(过0.5 mm筛)1:1混合,花盆规格为上内直径30 cm,下内直径25 cm,高35 cm。

1.2 试验设计

双因素随机设计,根据生产实践经验设5个施磷量:0、102、204、306、408 kg/hm^2 ,用P0、P5、P10、P15、P20表示;4个施磷深度:5、10、15、20 cm,分别用D5、D10、D15、D20表示。共20个处理,每个处理4次重复,总计80盆。

2021年4月18日进行燕麦种植,按照试验方案要求准备80个规格相同的花盆,放在室外自然环境中,将提前准备好的盆土装入花盆中,每个花盆装5 cm深盆土后进行一次压实,当花盆深度分别到达10、15、20 cm后,按照试验设计要求一次性撒入相应的磷肥,

每盆均匀撒入燕麦种子25粒,苗长5 cm后定株,每盆15株,出苗后每间隔5 d在各盆倒入无磷营养液500 mL,营养液中除磷以外的大量元素和微量元素参照 HoagLand 和 Snyder 等^[14-16]的通用配方,其他时间根据情况进行相同的田间管理。

1.3 测定指标与方法

生物量:燕麦进入乳熟期对整盆燕麦进行齐土面刈割,并进行茎、叶、穗分离,带回实验室,在105 °C烘箱中杀青30 min后65 °C烘干、称重。

光合特性:在燕麦抽穗期进行光合指标的测定。在每盆花盆中选择生长正常、长势均匀的植株(5株),选择晴朗无风天气于上午9:00~11:00,采用LI-6400便携式光合仪(LI-COR Inc,美国)测定燕麦倒二叶的净光合速率(net photosynthetic rate, Pn)和蒸腾速率(transpiration rate, Tr)。

粗蛋白质(Crude Protein, CP)含量采用凯氏定氮法^[23]测定。

酸性洗涤纤维(Acid Detergent Fiber, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral Detergent Fiber, NDF)含量采用范氏(Van Soest)的洗涤纤维分析法^[24]测定。

粗脂肪(Ether Extract, EE)含量采用索氏浸提法^[25]测定。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理并制表、作图,使用DPS 7.05进行双因素方差分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 上进行比较。

2 结果与分析

2.1 施磷深度与施磷水平对燕麦生物量的影响

施磷深度与施磷水平与对照相比对燕麦生物量有显著影响($P < 0.05$)(图1-2),相对而言,施磷水平对燕麦株高的影响更为显著。在D15P15处理燕麦生物量达到最高,为5 084.48 kg/hm^2 ,显著高于D5P0、D5P5、D5P10、D10P0、D15P0、D20P0、D20P5 ($P < 0.05$);生物量最小值为1 162.57 kg/hm^2 ,为D5P0处理,除与D10P0、D15P0、D20P0差异不显著,与其余处理差异均显著(表1)。随着施磷深度的增加燕麦生物量呈现先增加后降低的变化趋势,其中,D10处理生物量最高,显著高于D5($P < 0.05$),与D15、D20差异均不显著;D0处理生物量最低,显著低于其它处

理($P<0.05$)(图1);随着施磷量的增加燕麦生物量呈现先增加后降低的变化趋势,其中,P15处理生物量最高,显著高于P0和P5($P<0.05$),与P10和P20差异均不显著;P0处理生物量最低,显著低于其他处理(图2)。

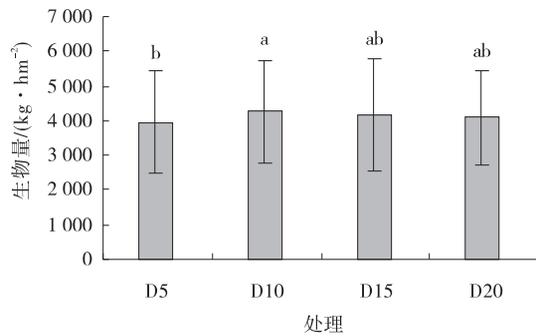


图1 不同施磷深度下的燕麦生物量

Fig. 1 Oat biomass under different phosphorus application depths

注:图中不同小写字母表示在($P<0.05$)水平下差异显著,

下同

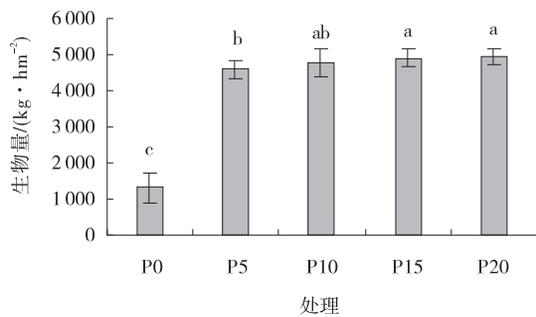


图2 不同施磷水平下的燕麦生物量

Fig. 2 Oat biomass under different phosphorus application level

2.2 施磷深度与施磷水平对燕麦光合特性及水分利用效率的影响

施磷深度和施磷水平对燕麦光合特性各指标以及水分利用效率的影响各不相同,净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率最大的处理分别为D15P15、

D20P10、D5P15,其值分别为12.97 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、2.31 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、7.16 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,最小值分别出现在D20P0、D5P0、D20P10,其值分别为7.00 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1.25 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、4.23 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,且各处理之间差异均不显著($P<0.05$)(图3-4、表2)。随着施磷深度的增加燕麦净光合速率、蒸腾速率呈现先增加后降低的变化趋势,均在D15处理达到最大值,D15处理蒸腾速率显著高于D5($P<0.05$),与其他处理差异不显著($P>0.05$);随着施磷深度的增加燕麦水分利用效率呈现先降低后增加再降低的变化趋势,在D5处理达

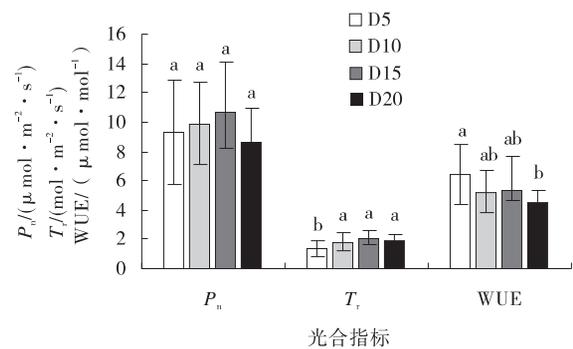


图3 不同施磷深度下的燕麦 P_n 、 T_r 、WUE

Fig. 3 P_n , T_r and WUE of oat under different P application depths

注: P_n 为净光合速率; T_r 为蒸腾速率;WUE为水分利用效率

到最大值,显著高于D20($P<0.05$),与其他处理之间差异不显著(图3);随着施磷量的增加燕麦净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率均呈现先增加后降低的变化趋势,最大值分别为P15、P10、P15处理,净光合速率P15处理显著高于P0($P<0.05$),与其他处理差异不显著;蒸腾速率P10处理显著高于P0,与其他处理差异不显著;水分利用效率各处理之间差异均不显著(图4)。

表1 施磷深度与施磷水平交互作用下的燕麦生物量

Table 1 Oat biomass under phosphorus application depth interaction with phosphorus application level

kg/hm²

处理	D5	D10	D15	D20
P0	1 162.57±406.32 ^c	1 431.65±272.97 ^e	1 171.41±195.37 ^e	1 540.75±496.23 ^c
P5	4 503.57±64.36 ^{bcd}	4 900.92±137.91 ^{abcd}	4 493.98±328.05 ^{bcd}	4 457.86±25.56 ^{cd}
P10	4 355.39±138.25 ^d	4 945.15±73.75 ^{abcd}	5 084.48±334.84 ^{ab}	4 759.38±257.12 ^{abcd}
P15	4 826.46±88.03 ^{abcd}	4 925.98±369.65 ^{abcd}	5 122.82±186.84 ^a	4 787.39±142.83 ^{abcd}
P20	4 871.43±210.84 ^{abcd}	5 081.53±35.03 ^{ab}	4 952.52±310.74 ^{abc}	4 858.90±125.16 ^{abcd}

注:表中不同小写字母表示在($P<0.05$)水平下差异显著,下同

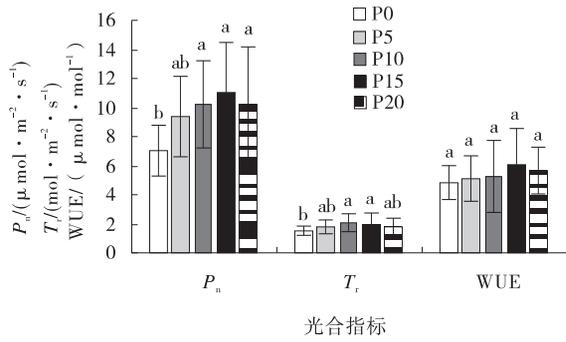


图 4 不同施磷水平下的 P_n 、 T_r 、WUE

Fig. 4 P_n 、 T_r 、WUE of oat under Effects of different p application levels

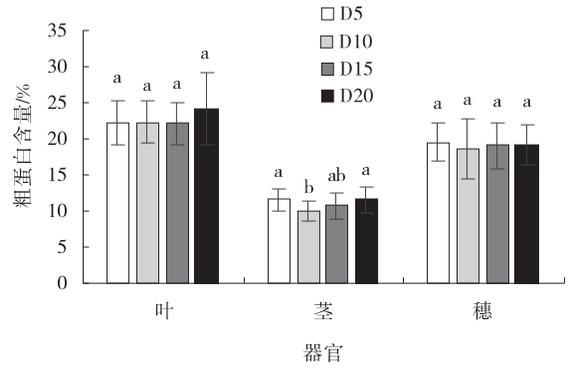


图 5 不同施磷深度下的燕麦粗蛋白含量

Fig. 5 Crude protein content of oat under different phosphorus application depths

2.3 施磷深度与施磷水平对燕麦各器官品质的影响

2.3.1 施磷深度与施磷水平对燕麦粗蛋白含量的影响 施磷深度和施磷水平的交互作用对燕麦叶、茎、穗粗蛋白含量有显著影响($P < 0.05$)。叶、茎、穗粗蛋白含量的最大值分别为 D20P20、D20P20、D10P20 处理,其值为 27.31%、12.68%、24.52%,最小值分别出现在 D10P0、D10P15、D10P0 处理,其值分别为 18.33%、9.28%、14.11%(表 3)。随着施磷深度的增加燕麦叶、茎、穗粗蛋白含量分别呈现出先增加后

降低再增加、先降低再增加、先降低再增加的变化趋势。叶粗蛋白含量在 D20 处理达到最大值,与其他处理差异不显著;茎粗蛋白含量在 D20 处理达到最大值,显著高于 D10($P < 0.05$),与其他处理之间差异不显著;穗粗蛋白含量在 D5 处理条件下达到最大值,与各处理之间差异不显著。随着施磷量的增加燕麦叶、茎、穗粗蛋白含量分别呈现先增加后降低、先增加后降低再增加、先增加后降低再增加的变化趋势。叶粗

表 2 施磷深度与施磷水平交互作用下的燕麦光合特性及水分利用效率

Table 2 Photosynthetic characteristics and water use efficiency of oats under phosphorus application depth and phosphorus application level interactions

处理		净光合速/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水分利用效率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
D5	P0	7.01±1.89 ^a	1.25±0.11 ^a	5.35±1.05 ^a
	P5	9.39±1.76 ^a	1.45±0.49 ^a	6.53±1.46 ^a
	P10	9.97±4.67 ^a	1.53±0.65 ^a	6.52±3.38 ^a
	P15	10.14±1.90 ^a	1.40±0.35 ^a	7.16±0.57 ^a
	P20	10.11±4.33 ^a	1.43±0.66 ^a	6.37±1.66 ^a
D10	P0	7.06±0.76 ^a	1.46±0.37 ^a	5.06±0.97 ^a
	P5	9.62±3.29 ^a	1.75±0.27 ^a	4.79±1.33 ^a
	P10	9.89±0.46 ^a	2.20±0.43 ^a	4.71±0.74 ^a
	P15	11.23±2.06 ^a	2.16±0.78 ^a	5.47±2.01 ^a
	P20	11.55±2.83 ^a	1.66±0.31 ^a	6.28±0.40 ^a
D15	P0	7.25±1.64 ^a	1.58±0.16 ^a	4.32±1.11 ^a
	P5	10.48±2.48 ^a	2.24±0.22 ^a	4.31±0.77 ^a
	P10	11.27±2.18 ^a	2.27±0.39 ^a	5.48±2.03 ^a
	P15	12.97±3.10 ^a	2.09±0.85 ^a	6.90±3.21 ^a
	P20	11.26±3.75 ^a	2.24±0.39 ^a	5.83±1.46 ^a
D20	P0	7.00±1.67 ^a	1.50±0.23 ^a	4.82±0.71 ^a
	P5	8.04±1.08 ^a	1.65±0.12 ^a	4.76±0.59 ^a
	P10	9.95±0.69 ^a	2.31±0.21 ^a	4.23±0.51 ^a
	P15	9.97±3.79 ^a	2.23±0.45 ^a	4.74±0.97 ^a
	P20	7.96±0.82 ^a	1.82±0.35 ^a	4.29±0.62 ^a

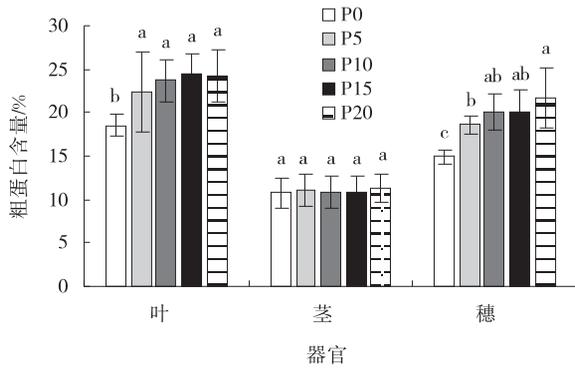


图6 不同施磷水平下的燕麦粗蛋白含量

Fig. 6 Crude protein content of oat under different phosphorus application levels

蛋白含量在 P15 处理达到最大值, 显著高于 P0 ($P < 0.05$); 茎粗蛋白含量在 P20 处理达到最大值, 与其他处理差异不显著; 穗粗蛋白含量在 P20 处理达到最大值, 显著高于 P0、P5 ($P < 0.05$) (图 6)。

2.3.2 施磷深度与施磷水平对燕麦中性和酸洗洗涤纤维含量的影响 施磷深度和施磷水平的交互作用对燕麦叶、茎、穗中性洗涤纤维含量有显著影响 ($P < 0.05$)。叶、茎、穗的中性洗涤纤维含量最大值分别出现在 D15P5、D5P20、D15P20 处理, 其值为 46.60%、69.50%、53.51%, 最小值分别出现在 D20P0、D15P0、

D10P0 处理, 其值为 28.67%、47.96%、43.50% (表 4)。随着施磷深度的增加燕麦叶、茎、穗中性洗涤纤维含量分别呈现出先降低后增加再降低、先降低再增加、先降低后增加再降低的变化趋势 (图 7), 叶中性洗涤纤维含量在 D5 处理达到最大值, 显著高于 D10、D20 ($P < 0.05$); 茎中性洗涤纤维含量在 D15 处理达到最大值, 显著高于 D15 ($P < 0.05$); 穗中性洗涤纤维含量在 D15 处理达到最大值, 与其他处理差异不显著 ($P < 0.05$); 随着施磷量的增加燕麦叶、茎、穗中性洗涤纤维含量均呈现先增加后降低再增加的变化趋势

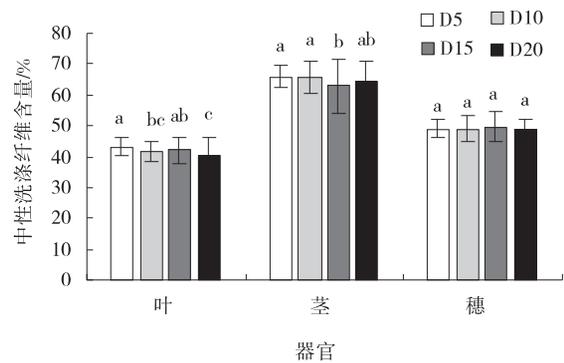


图7 不同施磷深度下的燕麦中性洗涤纤维含量

Fig. 7 Neutral detergent fiber content of oat under different phosphorus application depths

表3 施磷深度与施磷水平交互作用对燕麦粗蛋白含量的影响

Table 3 Crude protein content of oats under interaction between phosphorus application depth and phosphorus application level

处理		叶	茎	穗
D5	P0	18.47 ± 0.38 ^d	10.71 ± 1.15 ^a	15.77 ± 0.72 ^{ef}
	P5	22.09 ± 3.10 ^{abcd}	12.65 ± 0.94 ^a	19.94 ± 0.36 ^{bcd}
	P10	21.46 ± 2.02 ^{abcd}	11.06 ± 1.39 ^a	22.07 ± 1.04 ^{ab}
	P15	23.10 ± 2.35 ^{abcd}	11.79 ± 1.08 ^a	20.75 ± 1.54 ^{ab}
	P20	24.17 ± 2.60 ^{abcd}	11.33 ± 1.73 ^a	20.62 ± 1.07 ^{bcd}
D10	P0	18.33 ± 1.58 ^d	10.79 ± 0.33 ^a	14.14 ± 0.58 ^f
	P5	20.66 ± 0.77 ^{bcd}	10.22 ± 0.58 ^a	17.62 ± 0.50 ^{def}
	P10	23.14 ± 0.80 ^{abcd}	9.53 ± 1.22 ^a	19.71 ± 1.94 ^{bcd}
	P15	25.41 ± 1.55 ^{abc}	9.28 ± 1.20 ^a	16.83 ± 1.98 ^a
	P20	23.57 ± 1.65 ^{abcd}	10.57 ± 1.55 ^a	24.52 ± 3.10 ^{bcd}
D15	P0	18.33 ± 1.40 ^d	10.95 ± 2.55 ^a	15.01 ± 0.30 ^{ef}
	P5	23.59 ± 1.77 ^{abcd}	10.47 ± 2.56 ^a	18.08 ± 0.58 ^{cde}
	P10	24.88 ± 1.36 ^{abc}	10.82 ± 0.94 ^a	19.43 ± 0.78 ^{bcd}
	P15	22.81 ± 1.08 ^{abcd}	10.88 ± 1.05 ^a	21.66 ± 0.70 ^{abc}
	P20	20.46 ± 0.74 ^{cd}	10.71 ± 0.31 ^a	21.01 ± 4.21 ^{abcd}
D20	P0	18.98 ± 0.60 ^d	10.53 ± 0.64 ^a	14.98 ± 0.40 ^{ef}
	P5	22.47 ± 7.48 ^{abcd}	10.88 ± 0.58 ^a	19.30 ± 0.60 ^{bcd}
	P10	26.21 ± 1.76 ^{abc}	11.65 ± 2.48 ^a	19.66 ± 2.19 ^{bcd}
	P15	26.37 ± 0.83 ^{ab}	11.84 ± 1.64 ^a	20.94 ± 1.14 ^{abc}
	P20	27.31 ± 1.49 ^a	12.68 ± 1.24 ^a	20.53 ± 2.37 ^{bcd}

表 4 施磷深度与施磷水平交互作用下的燕麦中性洗涤纤维含量

Table 4 Fiber content of normal washing of oats under phosphorus application depth interaction with phosphorus application level

%

处理		叶	茎	穗
D5	P0	38.71±1.04 ^{fg}	60.79±2.33 ^{bc}	47.04±3.83 ^{abcde}
	P5	44.22±2.09 ^{abc}	67.15±1.80 ^{ab}	52.49±0.27 ^{ab}
	P10	44.89±2.14 ^{abc}	66.95±2.24 ^{ab}	48.95±1.26 ^{abcde}
	P15	43.66±0.42 ^{abcde}	65.29±0.62 ^{abc}	47.19±0.64 ^{abcde}
	P20	43.73±1.75 ^{abcde}	69.50±1.84 ^a	49.48±2.62 ^{abcde}
D10	P0	36.44±0.19 ^{gh}	60.07±7.02 ^c	43.50±4.00 ^c
	P5	43.26±1.51 ^{bcde}	68.37±1.74 ^a	50.87±3.44 ^{abcd}
	P10	41.68±0.85 ^{cde}	67.74±2.39 ^a	50.36±3.35 ^{abcd}
	P15	40.55±1.21 ^{ef}	63.04±1.76 ^{abc}	49.05±1.87 ^{abcde}
	P20	44.95±1.39 ^{ab}	69.28±2.04 ^a	51.17±0.79 ^{abc}
D15	P0	35.33±2.21 ^h	47.96±3.81 ^d	46.84±1.54 ^{bcde}
	P5	46.60±1.39 ^a	69.01±0.47 ^a	52.44±5.16 ^{ab}
	P10	44.18±1.83 ^{abc}	68.53±2.88 ^a	50.94±2.97 ^{abcd}
	P15	41.85±0.96 ^{bcde}	61.00±3.30 ^{bc}	44.62±3.92 ^{de}
	P20	42.42±0.60 ^{bcde}	68.44±1.26 ^a	53.51±0.93 ^a
D20	P0	28.67±1.34 ⁱ	53.43±2.58 ^d	49.62±0.14 ^{abcde}
	P5	43.99±1.12 ^{abcd}	69.35±2.33 ^a	51.74±1.93 ^{abc}
	P10	43.40±1.20 ^{abcde}	67.73±2.90 ^a	50.77±1.30 ^{abcd}
	P15	40.85±0.13 ^{def}	63.45±1.98 ^{abc}	45.63±3.76 ^{cde}
	P20	44.27±1.08 ^{abc}	66.80±3.24 ^{ab}	46.81±1.57 ^{bcde}

(图 8),叶、茎中性洗涤纤维含量在 P20 处理达到最大值,显著高于 P0、P15($P<0.05$);穗中性洗涤纤维含量在 P5 处理达到最大值,显著高于 P0、P15 ($P<0.05$)。

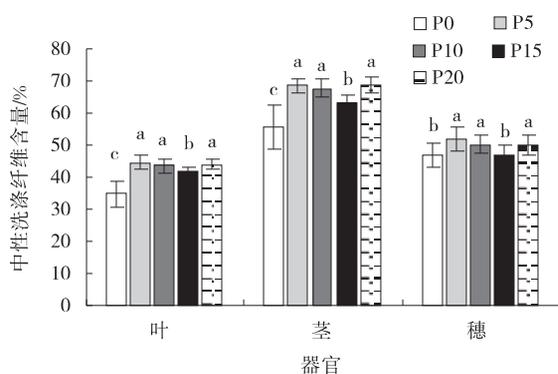


图 8 不同施磷水平下的燕麦中性洗涤纤维含量

Fig. 8 Neutral detergent fiber content of oat under different phosphorus application levels

施磷深度和施磷水平的交互作用对燕麦叶、茎、穗酸性洗涤纤维含量有显著影响($P<0.05$)。叶、茎、穗的酸性洗涤纤维含量最大值均为 D15P5 处理,其值为 23.86%、39.32%、23.60%,最小值分别为 D20P0、D20P0、D10P0 处理,其值为 15.37%、30.60%、

20.18%(表 5)。随着施磷深度的增加燕麦叶、茎、穗酸性洗涤纤维含量分别呈现出先降低后增加再降低、先增加后降低再增加、先降低后增加再降低的变化趋势(图 9),叶酸性洗涤纤维含量在 D15 处理达到最大值,显著高于 D20($P<0.05$);茎酸性洗涤纤维含量在 D10 处理达到最大值,与其他处理差异不显著;穗中性洗涤纤维含量在 D15 处理达到最大值,与其他处理差异不显著。随着施磷量的增加燕麦叶、茎、穗酸性洗涤纤维含量均呈现先增加后降低再增加的变化趋势,

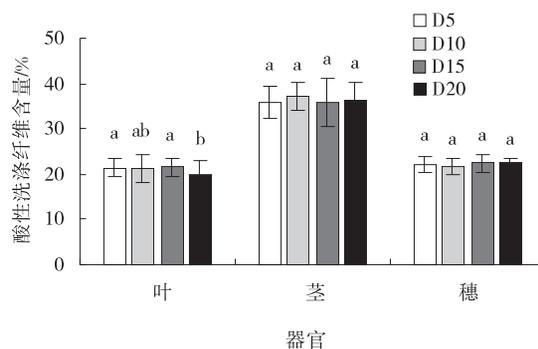


图 9 不同施磷深度下的燕麦酸性洗涤纤维含量

Fig. 9 Acid detergent fiber content of oat under different phosphorus application depths

表5 施磷深度与施磷水平交互作用下的燕麦酸性洗涤纤维含量

Table 5 Interaction on the fiber content of oat acid washing under phosphorus application depth and phosphorus application levels

%

处理		叶	茎	穗
D5	P0	18.81±0.90 ^c	32.51±6.32 ^{abc}	21.29±2.33 ^{ab}
	P5	22.32±0.52 ^{ab}	37.28±1.56 ^{ab}	23.59±0.33 ^a
	P10	22.08±1.06 ^{ab}	36.48±0.78 ^{ab}	22.78±0.55 ^{ab}
	P15	20.99±1.47 ^{abc}	35.19±1.26 ^{abc}	21.00±0.65 ^{ab}
	P20	22.68±1.84 ^{ab}	37.77±0.79 ^a	21.64±1.47 ^{ab}
D10	P0	15.65±1.57 ^d	33.12±4.19 ^{abc}	20.18±1.93 ^b
	P5	23.18±1.29 ^{ab}	38.94±0.98 ^a	22.80±2.02 ^{ab}
	P10	22.73±1.30 ^{ab}	38.26±0.87 ^a	22.19±1.95 ^{ab}
	P15	21.82±0.53 ^{ab}	36.12±1.33 ^{ab}	21.02±0.13 ^{ab}
	P20	22.44±1.85 ^{ab}	38.92±0.60 ^a	22.20±0.17 ^{ab}
D15	P0	18.58±0.73 ^c	28.93±7.16 ^c	21.51±0.86 ^{ab}
	P5	23.86±0.60 ^a	39.32±0.80 ^a	23.60±2.80 ^a
	P10	22.08±0.68 ^{ab}	38.91±0.51 ^a	23.05±1.73 ^{ab}
	P15	20.87±0.60 ^{abc}	34.28±1.08 ^{abc}	20.70±0.99 ^{ab}
	P20	22.32±1.65 ^{ab}	37.30±2.37 ^{ab}	23.51±0.39 ^{ab}
D20	P0	15.37±0.29 ^d	30.60±5.51 ^{bc}	22.85±0.74 ^{ab}
	P5	22.48±2.68 ^{ab}	38.19±2.62 ^a	23.04±0.97 ^{ab}
	P10	21.42±1.22 ^{abc}	38.01±0.90 ^a	22.51±0.47 ^{ab}
	P15	20.24±1.45 ^{bc}	36.78±1.55 ^{ab}	21.46±0.90 ^{ab}
	P20	21.09±0.59 ^{abc}	37.16±0.98 ^{ab}	21.93±1.54 ^{ab}

叶、茎、穗酸性洗涤纤维含量均在P5处理达到最大值，显著高于P0、P15 ($P<0.05$) (图10)。

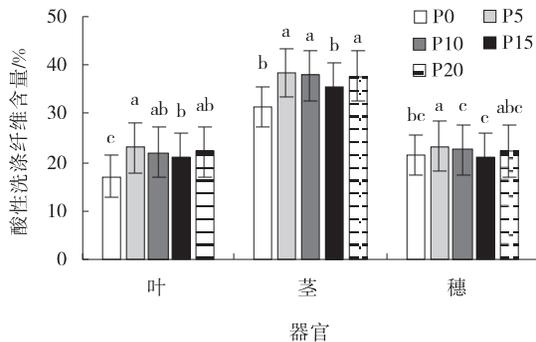


图10 不同施磷水平下的燕麦酸性洗涤纤维含量

Fig. 10 Acid detergent fiber content of oat under different phosphorus application levels

2.3.3 施磷深度与施磷水平对燕麦粗脂肪含量的影响 施磷深度和施磷水平的交互作用对燕麦叶、茎、穗粗脂肪含量有显著影响 ($P<0.05$) (表6)。叶、茎、穗的最大值分别出现在D10P15、D15P15、D15P15处理，分别为13.60%、10.10%、13.62%，最小值分别出现在D5P0、D5P20、D5P0处理，分别为9.79%、5.79%、8.66%。随着施磷深度的增加燕麦叶、茎、穗粗脂肪含量分别呈现出先降低后增加、先增加后降低

再增加、先降低后增加再降低的变化趋势(图11)，叶粗脂肪含量在D15处理达到最大值，与其他处理差异不显著；茎粗脂肪含量在D20处理达到最大值，显著高于D5 ($P<0.05$)，与其他处理之间差异不显著；穗粗脂肪含量在D5处理达到最大值，显著高于D20 ($P<0.05$)，与其他处理之间差异不显著。随着施磷量的增加燕麦叶、茎、穗粗蛋白含量均呈现先增加后降低的变化趋势，最大值均出现在P15处理，叶粗脂肪含量在P15处理显著高于P0、P5、P20 ($P<0.05$)，与P10

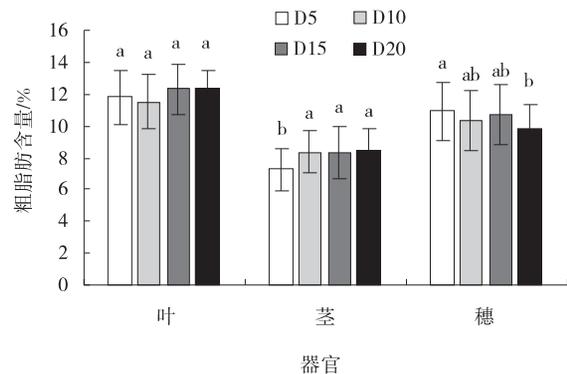


图11 不同施磷深度下的燕麦粗脂肪含量

Fig. 11 Crude fat content of oat under different P application depths

表 6 施磷深度与施磷水平交互作用下的燕麦粗脂肪含量

Table 6 Crude fat content of oats under interaction between phosphorus application depth and phosphorus application levels

处理		叶	茎	穗	%
D5	P0	9.79±0.94 ^d	6.63±0.63 ^{de}	8.66±0.88 ^e	
	P5	11.39±0.40 ^{abcd}	7.12±0.44 ^{cde}	10.84±1.06 ^{bcde}	
	P10	12.15±1.42 ^{abcd}	7.82±1.11 ^{abcde}	11.91±0.38 ^{abcd}	
	P15	13.32±1.25 ^a	8.91±0.77 ^{abcd}	12.84±1.36 ^{ab}	
	P20	12.32±1.01 ^{abcd}	5.79±0.74 ^e	10.85±0.48 ^{bcde}	
D10	P0	9.89±0.47 ^{cd}	7.03±0.59 ^{cde}	9.34±0.94 ^{de}	
	P5	11.39±0.71 ^{abcd}	8.26±0.71 ^{abcd}	10.10±1.12 ^{cde}	
	P10	12.19±1.56 ^{abcd}	8.38±1.06 ^{abcd}	10.99±1.28 ^{bcde}	
	P15	13.60±0.94 ^a	9.84±0.50 ^{ab}	12.15±1.88 ^{abc}	
	P20	10.32±0.70 ^{bed}	8.32±1.19 ^{abcd}	9.16±1.86 ^{de}	
D15	P0	11.92±1.40 ^{abcd}	7.63±0.50 ^{abcde}	9.23±0.71 ^{de}	
	P5	12.46±1.47 ^{abc}	7.89±1.67 ^{abcde}	9.57±1.18 ^{cde}	
	P10	12.58±0.86 ^{ab}	8.44±1.49 ^{abcd}	10.58±0.88 ^{bcde}	
	P15	13.13±1.01 ^a	10.10±1.49 ^a	13.62±0.76 ^a	
	P20	11.38±1.88 ^{abcd}	7.55±0.99 ^{bcde}	10.48±1.01 ^{bcde}	
D20	P0	11.44±0.84 ^{abcd}	7.26±0.49 ^{cde}	9.03±0.27 ^e	
	P5	12.23±0.30 ^{abcd}	8.40±0.93 ^{abcd}	9.84±1.42 ^{cde}	
	P10	12.88±1.08 ^{ab}	8.99±1.95 ^{abcd}	9.87±1.81 ^{cde}	
	P15	13.33±0.79 ^a	9.51±0.94 ^{abc}	11.05±1.12 ^{abcde}	
	P20	11.80±1.06 ^{abcd}	8.19±0.66 ^{abcde}	9.45±0.96 ^{cde}	

之间差异不显著;茎、穗粗脂肪含量P15处理显著高于其他各处理($P<0.05$)(图12)。

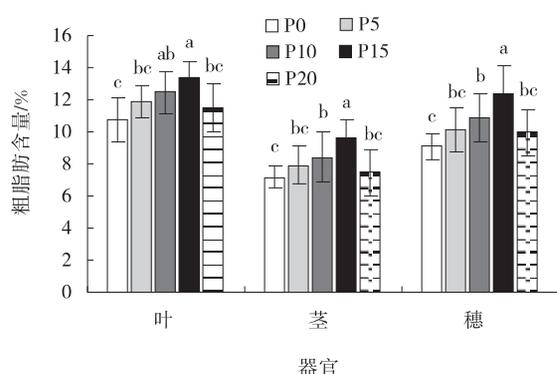


图 12 不同施磷水平下的燕麦粗脂肪含量

Fig. 12 Crude fat content of oat under different P application levels

3 讨论

磷素能促进植株的生长发育,直接参与光合作用中的光合磷酸化和碳水化合物的合成与运转,促进干

物质的积累,从而提高产量^[26]。Singh等^[27]的研究表明,作物在5~7 cm和10~15 cm土层施磷肥,会使其增产结果更佳。同时也有研究报道表明,磷肥深施可以提高小麦和大豆对磷的吸收和利用,从而提高作物的产量^[28-29]。本研究结果表明,在适宜的深度增施磷肥可以提高燕麦净光合速率、蒸腾速率以及水分利用效率,促进干物质积累,从而提高产量。席天元等^[11]研究结果表明,分层施磷明显促进了冬小麦生长发育,提高了地上部和根系干重,增加了下层根比例;与深层施磷、表层施磷和单施磷肥相比,分层施磷处理产量分别增加7.46%、16.16%和75.81%,磷素农学利用率分别提高156.20%、43.71%和297.11%。康利允^[9]对冬小麦进行分层施磷,结果表明施磷位置对冬小麦光合性能和产量的影响不同,适宜的施磷深度以及施磷水平有利于提高生育后期(孕穗期、开花期和灌浆期)叶绿素相对含量、叶片光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)及产量,其研究与本文研究结果较为一致。

本试验中,适宜深度增施磷肥能够提高燕麦的营养品质,主要体现在显著提高了其根茎、叶、穗中粗蛋白和粗脂肪的含量($P < 0.05$),降低了其粗纤维含量。牧草营养品质很大程度上取决于粗蛋白和粗纤维的含量,在国际通用的干草评定标准中,较高的粗蛋白与较低的粗纤维含量是评价牧草优良与否的主要指标^[30]。同时国内对燕麦营养的研究已做了大量的工作,从其播种阶段、发育时期管理及收获、储藏方式分析了燕麦品质的影响,但由于所研究的地点、方法不同,结论也不尽相同^[5,16,19,31-32]。如王丽学^[32]研究不同行距和不同施肥水平对饲用燕麦产量和营养成分的影响,结果表明不同处理条件下粗蛋白质含量差异显著,变化范围为16.28%~21.84%,本试验的4个施磷深度,5个施磷水平条件下,粗蛋白含量变化范围为18.33%~26.37%,与其研究结果较为相似。

在不同施磷深度与施磷水平的研究中发现,燕麦产量随着施磷深度与施磷水平的增加整体呈现出先升高后降低的变化趋势,适宜的施磷深度与施磷水平能够促进植株的光合蒸腾速率以及水分利用效率,促进同化物的积累,但若过量施肥,则会导致植株吸收同化的磷元素在营养器官中过度的集中,让植株处于逆境,不利于植物干物质的积累,从而影响燕麦产量和品质。

4 结论

本试验不同施磷深度与施磷水平处理饲用燕麦生物量、光合特性、粗蛋白含量、粗纤维含量、粗脂肪含量均表现出差异。生物量、净光合速率、茎和穗的粗脂肪含量在施磷深度为15 cm、施磷量为306 kg/hm²达到最大值;叶、茎的粗蛋白含量在施磷深度为20 cm、施磷量为408 kg/hm²达到最大值;叶、茎、穗的中性、酸性洗涤纤维含量均在不施磷肥处理下达到最小值。综合考虑想获得较多且营养品质高的叶片、茎秆、穗作为动物饲料,燕麦最适施磷深度为15 cm、施磷量为306 kg/hm²较好。

参考文献:

- [1] 艾超. 长期施肥下根际碳氮转化与微生物多样性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
- [2] 李明军. 植物与植物生理[M]. 重庆:重庆大学出版社,2015.
- [3] 李新乐,侯向阳,穆怀彬,等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报,2015,24(8):218-224.
- [4] Jerri Lynn Henry, William E McClain, Melissa A Remley. Phosphorus Improves Leaf Nutrient Concentrations in Wheat, Oat, and Cereal Rye [J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*,2019,2(1):1-6.
- [5] 魏巍,拉巴,杨文才,等. 氮、磷肥配施对青引1号燕麦产量和品质的影响[J]. 作物杂志,2016(1):120-124.
- [6] 刘德平,杨树青,史海滨,等. 氮磷配施条件下作物产量及水肥利用效率[J]. 生态学杂志,2014,33(4):902-909.
- [7] 庞春花,张紫薇,张永清. 水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(21):4107-4117.
- [8] 盛海君,夏小燕,杨丽琴,等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J]. 生态学报,2004,24(12):2837-2840.
- [9] 康利允. 分层供水施磷对冬小麦生长及产量的调控效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [10] 范秀艳,杨恒山,高聚林,等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):312-320.
- [11] 席天元,李永山,谢三刚,等. 分层施磷对冬小麦生长及产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2016,18(3):112-118.
- [12] Rafiullah, Khan M J, Muhannad D, *et al.* Phosphorus Nutrient Management through Synchronization of Application Methods and Rates in Wheat and Maize Crops [J/OL]. *Plant*, 2000, 9 (1389). DOI: 10.3390/plants9101389.
- [13] 梁国玲,秦燕,魏小星,等. 青藏高原高寒区I-D燕麦品系饲草生产性能及品质评价[J]. 草地学报,2018,26(4):917-927.
- [14] 赵哲. 草牧业生产中的效率问题研究[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [15] Shreeparna, Saha. Effect of Nutrient Management on Growth, Productivity and Quality of Oats with Special Emphasis on Zinc & Boron [J]. *International Journal of Bioresource Science*,2020,7(1):25-31.
- [16] 宋雨桐,王建丽,刘杰淋,等. 施肥和种植密度对5个燕麦品种产量和品质的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(6):149-156+164.
- [17] 秦燕,刘勇,张永超,等. 不同混播比例对燕麦和箭筈豌豆

- 豆混播草地植物生长特征的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(6):1768-1774.
- [18] 周萍萍,赵军,颜红海,等. 播期、播种量与施肥量对裸燕麦籽粒产量及农艺性状的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(3):433-441.
- [19] 王彦超,宋磊,张凡凡,等. 不同燕麦品种生育期农艺性状、生产性能及品质的比较[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(2):254-263.
- [20] 马斌,刘景辉,杨彦明,等. 连续施用保水材料对旱作条件下土壤特性及燕麦生长的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(17):5650-5661.
- [21] 纪亚君,陆家芬. 高寒地区氮磷钾肥配施对燕麦产量的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(5):6-9.
- [22] 韩美善,崔林,韩启亮,等. 旱作燕麦氮磷配合平衡施肥技术试验[J]. 杂粮作物, 2010, 30(1):50-52.
- [23] 国家饲料质量监督检验中心. 饲料粗蛋白质的测定: GB/T6432-1994[S]. 北京:中国标准出版社, 2000.
- [24] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术第2版[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003:33-35.
- [25] 国家饲料质量监督检验中心. 饲料中粗脂肪的测定: GB/T6433-2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [26] 张福锁,王激清,张卫峰. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 55(5):915-924.
- [27] Singh D K, Sale P W G, Routley R R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: rationale for deep placement and the effects with various crops[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1/2):35-44.
- [28] Hairston J E, Jones W F, McConnaughey P K, *et al.* Tillage and fertilizer management effects on soybean growth and yield on three Mississippi soils[J]. Journal of Production Agriculture, 1990, 3(3):317-323.
- [29] Sander D H, Eghball B. Planting date and phosphorus fertilisereffectson winter wheat [J]. Agronomy Journal, 1999, 91(4):707-712.
- [30] 余有贵,贺建华. 牧草的营养品质及其评价[J]. 中国饲料, 2004(23):34-35.
- [31] 吴志. 饲用燕麦的营养价值及利用探析[J]. 现代农业科技, 2020(12):223-225.
- [32] 王丽学,陈龙宾,芦娜,等. 行距和施肥对饲用燕麦产量和营养品质的影响[J]. 中国饲料, 2021(13):98-102.

Effects of phosphorus fertilizer on yield, photosynthetic characteristics and quality of oat

LIANG Xiao-yu¹, GAO Kai^{1,2*}, CONG Long-li¹, LIU Zhi-hao¹, LIU Zhong-guo¹,
ZHU Tie-xia¹

(1. Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028000, China; 2. Institute of Ecological Civilization and Green Development, Tongliao 028000, China)

Abstract: [Objective] In the course of scientific research and production practice, it has been observed that the limited mobility of phosphorus in the soil, coupled with its predominantly superficial or shallow application, hinders the full utilization of phosphorus by deep-rooted crops. This leads to a vertical distribution of phosphorus in the soil characterized by surface enrichment and insufficient lower layer distribution, resulting in reduced phosphorus fertilizer efficiency and soil pollution. [Method] In light of this, this study focuses oats as the research object and explore the effects of varying phosphorus application rates and depths on oat yield quality and photosynthetic characteristics. By measuring these parameters, the study aims to provide valuable insights for the scientific measurement of oat fertilization. [Result] The study yield the following key findings: 1) The highest oat biomass was achieved under the D15P15 treatment, with a value of 5 122. 82 kg/hm². Maximum values for net photosynthetic rate, transpiration rate and moisture utilization efficiency were observed in the D15P15, D20P10 and D5P15, respectively, with values of 12. 97 μmol/(m²·s), 2. 31 mol/(m²·s), and 7. 16 μmol/mol, respectively. 2) The highest crude protein content in

leaves, stems and panicles was recorded under the treatment conditions of D20P20, D20P20 and D10P20, respectively, with values of 27.31%, 12.68% and 24.52%, respectively. 3) The lowest levels of neutral detergent fiber in leaves, stems and panicles were observed under the treatment conditions of D20P0, D15P0 and D10P0, respectively, with values of 28.67%, 47.96% and 43.50%, respectively. The lowest acid detergent fiber content in leaves, stems and ears occurred under the treatment conditions of D20P0, D20P0 and D10P0, respectively, with values of 15.37%, 30.60% and 20.18%, respectively. 4) The highest crude fat content in leaves, stems and ears was recorded under the treatment conditions of D10P15, D15P15 and D15P15, respectively, with values of 13.60%, 10.10% and 13.62%, respectively. **【Conclusion】** The optimal phosphorus approach for oat phosphorus fertilization is to apply phosphorus at a depth of 15 cm with a rate of 306 kg/hm². This method maximises oat yield and quality while enhancing its photosynthetic characteristics.

Key words: downward movement of phosphate fertilizer; oats; production; photosynthetic characteristics; quality