

## 不同供钾水平下胡麻木质素代谢及其抗倒伏特性研究

刘玄, 董宏伟, 高玉红, 剡斌, 崔政军, 李玥, 吴兵

引用本文:

刘玄, 董宏伟, 高玉红, 等. 不同供钾水平下胡麻木质素代谢及其抗倒伏特性研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(5): 821–832.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200823>

(向下翻页, 阅读全文)

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征

Yellow-mud paddy soil productivity and phosphorus fractions under long-term different phosphorus supply levels in southern China

*中国生态农业学报(中英文)*. 2020, 28(7): 960–968 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200059>

#### 乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响

Effects of ethephon and kinetin on lodging-resistance and yield of maize

*中国生态农业学报*. 2017, 25(9): 1326–1334 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170083>

#### 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响

Effect of sulfur on nitrogen/sulfur uptake/distribution and yield of maize

*中国生态农业学报*. 2017, 25(9): 1298–1305 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170457>

#### 水钾耦合对花生生理性状及产量的影响

The combined effect of irrigation and potassium fertilization on the physiological characteristics and yield of peanut

*中国生态农业学报*. 2016, 24(11): 1473–1481 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160482>

#### 灌溉量和施氮量对油用亚麻茎秆抗倒性能及产量的影响

Effects of irrigation and nitrogen fertilizer rates on oilseed flax stem lodging resistance and yield

*中国生态农业学报*. 2015(5): 544–553 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141087>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200823

刘玄, 董宏伟, 高玉红, 剡斌, 崔政军, 李玥, 吴兵. 不同供钾水平下胡麻木质素代谢及其抗倒伏特性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 821-832

LIU X, DONG H W, GAO Y H, YAN B, CUI Z J, LI Y, WU B. Lignin metabolism and lodging resistance characteristics of oil flax at different potassium levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 821-832

## 不同供钾水平下胡麻木质素代谢及其抗倒伏特性研究\*

刘玄<sup>1</sup>, 董宏伟<sup>1</sup>, 高玉红<sup>2,3</sup>, 剡斌<sup>2,3</sup>, 崔政军<sup>2</sup>, 李玥<sup>4</sup>, 吴兵<sup>1,3\*\*</sup>

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 3. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学信息科学技术学院 兰州 730070)

**摘要:** 为了探讨供钾水平对胡麻抗倒伏特性的调节机理, 以‘陇亚11号(V1)’和‘定亚23号(V2)’为材料, 设不施钾[K0, 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]、低钾[K1, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]、中钾[K2, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]和高钾[K3, 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>] 4个供钾水平, 共8个处理的裂区试验, 分析不同供钾水平对胡麻茎秆木质素含量、木质素合成相关酶活性、茎秆力学特性和抗倒伏指数及产量的影响。结果表明, 不同供钾水平, 植株物理性状与倒伏的关系主要体现在青果期至成熟期, 胡麻抗倒伏指数与茎粗呈显著正相关( $P<0.05$ ), 与株高和重心高度呈负相关。胡麻茎秆木质素含量随生育时期及供钾量不同而有所差异, 苗期至盛花期, 施钾后 V1 和 V2 木质素含量均在 K2 处理下较高; 青果期至成熟期, K3 处理下 V1 和 V2 木质素含量较 K0 处理平均显著增加 17.68%和 23.25%, 其中, 青果期不同品种、施钾及二者互作对木质素含量影响均达极显著水平( $P<0.01$ )。K2 处理提高了现蕾期—青果期胡麻茎秆的苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性及现蕾期 V1 品种酪氨酸解氨酶(TAL)活性, 而 K3 处理提高了 V2 品种 TAL 活性; 钾肥显著影响青果期胡麻茎秆肉桂醇脱氢酶(CAD)活性, 2 个品种 CAD 活性施钾较不施钾分别平均增高 31.96%和 12.09%; V1、V2 品种过氧化物酶(POD)活性提升效应的适宜供钾量分别为 K2、K1 水平。V1 品种茎秆抗折力和抗倒伏指数 K2 和 K3 处理较 K0 分别上升 45.68%、48.90%和 16.86%、31.92%, V2 品种则分别上升 84.32%、77.50%和 1.89%、14.49%。相关分析表明, 青果期, 4 种木质素合成相关酶与木质素和抗倒伏指数存在正相关。施钾后, 2 个品种均在 K3 处理下籽粒产量最高, 分别较 K0 增产 10.71%和 17.77%, V1 供钾处理间产量无显著差异, V2 产量 K2、K3 处理较 K0 分别显著高出 12.24%和 17.77%。可见, 品种是胡麻木质素积累进程中重要的影响因子, 钾肥对木质素含量及其代谢相关酶活性具备一定的协同提升效应。在本试验及类似农田生态类型环境下, 中、高供钾水平[60~90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]有利于促进胡麻茎秆木质素合成积累, 有效地防止胡麻倒伏, 为其高产稳产奠定一定基础。

**关键词:** 胡麻; 供钾水平; 木质素; 抗倒伏特性; 籽粒产量

中图分类号: S565.9

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Lignin metabolism and lodging resistance characteristics of oil flax at different potassium levels\*

\* 国家自然科学基金项目(31760363, 32060437)、现代农业产业技术体系项目(CARS-14-1-16)和甘肃农业大学伏羲杰出人才培育项目(Gaufx-02J05)资助

\*\* 通信作者: 吴兵, 研究方向为作物生长调控与生理生态研究。E-mail: wub@gsau.edu.cn

刘玄, 研究方向为作物分子生理及营养调控。E-mail: 15029209081@163.com

收稿日期: 2020-10-13 接受日期: 2021-02-01

\* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31760363, 32060437), the Modern Agricultural Industrial Technology System Project of China (CARS-14-1-16) and Fuxi Outstanding Talent Cultivation Project of Gansu Agricultural University (Gaufx-02J05).

\*\* Corresponding author, E-mail: wub@gsau.edu.cn

Received Oct. 13, 2020; accepted Feb. 1, 2021

LIU Xuan<sup>1</sup>, DONG Hongwei<sup>1</sup>, GAO Yuhong<sup>2,3</sup>, YAN Bin<sup>2,3</sup>, CUI Zhengjun<sup>2</sup>, LI Yue<sup>4</sup>, WU Bing<sup>1,3\*\*</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Arid Land Crop Science of Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 4. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To explore the effects of potassium supply on the lodging resistance of oil flax, split-plot experiments were conducted with the cultivars ‘Longya No. 11’ (V1) and ‘Dingya No. 23’ (V2) and four potassium (K<sub>2</sub>O) levels: no potassium [K0, 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>], low potassium [K1, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>], medium potassium [K2, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>], and high potassium [K3, 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]. The lignin content, lignin synthesis-related enzyme activities, stem mechanical properties, lodging resistance index of the stem, and yield of oil flax under different potassium supply levels were analyzed. The results showed that under different potassium levels, the relationships between the plant physical characteristics and lodging were mainly observed from the green fruit stage to the maturation stage. The lodging resistance index of oil flax was significantly positively correlated with culm diameter and negatively correlated with plant height and gravity center height. The lignin content of the oil flax stems changed during the growth period and with the potassium supply. The lignin content of V1 and V2 was higher in K2 treatment after potassium application from the seedling stage to the flower stage. Compared with that under K0 treatment, the lignin content of V1 and V2 under K3 treatment increased by 17.68% and 23.25%, respectively, from the green fruit stage to the maturation stage. The effects of cultivar, potassium application, and their interactions on the lignin content at the green fruit stage reached extreme significance ( $P < 0.01$ ). The K2 treatment increased the phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity of the stem from the budding stage to the green fruit stage and the tyrosine ammonia-lyase (TAL) activity of the V1 cultivar at the budding stage; the K3 treatment increased the TAL activity of the V2 cultivar. Potassium fertilizer significantly affected the cinnamyl alcohol dehydrogenase (CAD) activity of the oil flax stem at the green fruit stage. Compared with that in the no potassium treatment, the CAD activity of two cultivars increased by 31.96% and 12.09% on average, respectively, after potassium application. K2 and K1 are the suitable potassium supply levels for peroxidase activity improvement in the V1 and V2 cultivars, respectively. Compared with the indexes at K0, the snapping resistance and lodging resistance indexes of V1 in the K2 and K3 treatments increased by 45.68% and 48.90%, respectively, and by 16.86% and 31.92%, respectively; V2 snapping resistance increased by 84.32% (K2) and 77.50% (K3), respectively, and the lodging resistance index increased by 1.89% (K2) and 14.49% (K3), respectively. Correlation analysis showed that the four lignin related enzymes were positively correlated with lignin content and lodging resistance index at the green fruit stage. After potassium application, the highest grain yield was observed in the K3 treatment, which increased by 10.71% for V1 and by 17.77% for V2 compared with that in the K0 treatment. There was no significant difference in the yield of V1 among different potassium levels. However, the yields of V2 in the K2 and K3 treatments were significantly higher by 12.24% and 17.77%, respectively compared with that of K0. These results indicate that the cultivar is an important influencing factor of the lignin accumulation process of oil flax and that potassium fertilizer has a synergistic promotional effect on the lignin content and the metabolism-related enzyme activities. In this experiment site and the farmlands with similar ecological environments, the use of medium and high potassium fertilizers [60–90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>] promotes the synthesis and accumulation of oil flax stem lignin, prevents oil flax lodging, and establishes a foundation for a high and stable yield.

**Keywords:** Oil flax; Potassium supply level; Lignin; Lodging resistance; Grain yield

适宜的生长环境、促进作物生长和产量提高的措施常会引发倒伏，倒伏已成为诸多作物高产稳产的重要限制因素之一<sup>[1]</sup>。倒伏会造成小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、油菜(*Brassica campestris*)等作物产量降低和品质下降<sup>[2-5]</sup>。小麦倒伏后的穗发芽现象严重，造成小麦容重降低，磨粉品质变差；油菜因倒伏籽粒含油量下降30%~50%<sup>[5-6]</sup>。玉米群体发生倒伏后，光合同化产物减少，籽粒灌浆不足，致使产量减少，品质变差<sup>[7]</sup>。作物倒伏与否，受气候、生态、栽培和植物内在遗传因素影响，其中茎秆机械强度的大小至关重要<sup>[8]</sup>。在小麦、夏玉米作物中均发现，茎秆木质

素含量高的品种抗倒性强<sup>[9-10]</sup>。木质素作为细胞壁的主要组成成分之一，填充于纤维素构架中增强植物体的机械强度，是决定作物茎秆倒伏与否的关键因子之一，其含量的增加有利于增加作物抗压、抗倒伏能力<sup>[8,11-12]</sup>。

胡麻(*Linum usitatissimum*)是世界第五大油料作物，也是我国西北和华北地区重要油料和经济作物之一，因其籽粒含有丰富膳食纤维和多种营养成分而在多个领域被广泛应用，特别是胡麻油中含有大量人体必需的不饱和脂肪酸——亚麻酸和亚油酸，很受人们青睐，也有较大的市场价值<sup>[13-14]</sup>。胡麻作为一种密植作物，生育后期茎秆纤细柔弱且冠层较

大, 易发生倒伏, 造成产量、品质下降, 因此倒伏是制约胡麻产量低而不稳及产业发展的突出难题<sup>[1,15]</sup>。近年来, 有效水肥管理后胡麻单产逐步提升, 但由高氮高水施用引起的倒伏程度加重与提升产量之间的矛盾日益突出, 胡麻生长后期需水量减少与过度降水引发倒伏之间的矛盾日益突出<sup>[16-19]</sup>。已有关于作物倒伏的研究多集中于禾本科作物植株形态、生理生化成分、机械强度等方面<sup>[20-22]</sup>, 初步揭示了倒伏的形态学及生理机制, 而关于大量必需元素对胡麻茎秆木质素代谢及抗倒性的研究起步较晚, 仅见氮肥、灌溉量处理对胡麻木质素合成相关酶活性和倒伏的影响<sup>[23-24]</sup>, 提出了处理的主要作用在于增加营养生长/生殖生长的比例和程度。钾素在作物木质素合成及提高抗倒伏能力方面具有积极作用, 合理施用钾肥是作物保证茎秆质量、维护株型和抵御病菌侵染的重要举措之一<sup>[25]</sup>。已有研究表明, 供钾水平的提高, 增加了小麦、大豆(*Glycine max*)茎秆对钾素的吸收, 促进了植株生长和木质素代谢合成及苯丙氨酸解氨酶(PAL)、酪氨酸解氨酶(TAL)、过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)的活性, 此外, 肉桂醇脱氢酶(CAD)活性也和植株木质素代谢密切相关, 大豆茎秆基部节间粗度、C/N比、细胞壁纤维素、木质素含量、机械强度、抗倒伏指数均随供钾水平的提高而增加, 施钾抑制细胞间隙的增大<sup>[9,26]</sup>, 有利于增加厚壁组织层的厚度<sup>[10,27]</sup>, 使细胞结构更加稳定, 显著影响了茎秆抗倒伏能力<sup>[28-30]</sup>, 有效改善了逆境对植物的不利影响<sup>[31-32]</sup>。目前关于钾素施用后胡麻相关研究多集中在肥料配比、密度等单因素栽培因子对干物质、钾的吸收、籽粒产量和品质等影响方面, 关于施钾后胡麻木质素合成酶学特征变化及与倒伏的关系研究鲜见报道。因此, 在当前区域降水不均衡及农田管理“重氮重水”的背景下, 本试验以陇中地区2个主栽胡麻品种为供试材料, 分析不同供钾水平下其木质素合成关键酶活性变化规律及与茎秆抗倒伏特性间的关系, 旨在为胡麻抗倒伏栽培和高产提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省定西市安定区香泉镇, 依托甘肃省定西农业科学院油料作物试验站进行。当地农业种植为典型雨养农业, 属黄土高原丘陵沟壑区, 平均海拔2050 m, 年平均气温6.3℃。土壤类型为黄绵土, 土壤全氮含量为0.81 g·kg<sup>-1</sup>、全磷含量为

0.69 g·kg<sup>-1</sup>、速效磷为27.43 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾为108.3 mg·kg<sup>-1</sup>、pH 8.14。2018年胡麻生育季降水量及气温变化如图1所示。

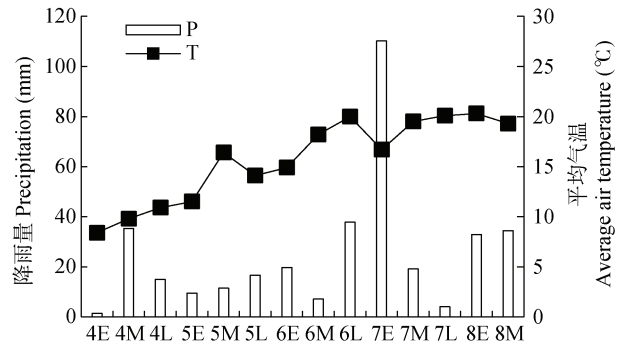


图1 2018年胡麻生育季降水量(P)及气温(T)变化

Fig. 1 Changes in precipitation (P) and temperature (T) in the oil flax growing season in 2018

E、M和L分别表示每月的上旬、中旬和下旬, 其前的数字为月份。E、M and L mean the early, middle and late ten days of each month, data before them are the months.

### 1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计方法, 设胡麻品种和供钾水平2个因素。品种为主区, 钾肥为副区。胡麻品种设2个水平: ‘陇亚11号’(V1), 抗倒性较弱, 由甘肃省农业科学院作物研究所提供; ‘定亚23号’(V2), 抗倒性较强, 由甘肃省定西市农业科学院油料作物研究室提供。供钾水平设4个水平: 不施钾[K0, 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]、低钾[K1, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]、中钾[K2, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]与高钾[K3, 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]。共8个处理, 每处理3次重复, 共24个小区, 小区面积10 m<sup>2</sup> (2 m×5 m), 区组及小区间过道分别宽50 cm、30 cm, 四周设1 m的保护行。种植密度为7.5×10<sup>6</sup>株·hm<sup>-2</sup>, 人工条播, 播深3 cm。前茬种植春小麦均匀地力, 于2018年4月1日播种, 8月15日收获, 生育期135 d。钾肥采用农用硫酸钾(K<sub>2</sub>O含量52%), 施用方式为全部基施。未施用氮、磷肥, 其他管理方式同大田。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 茎秆抗折力及倒伏指数测定

分别于胡麻苗期(60 d)、现蕾期(75 d)、盛花期(85 d)、青果期(110 d)、成熟期(130 d) 5个生育期, 在每小区随机选取10株长势一致的植株, 贴近地表自茎秆基部用剪刀剪取植株, 取各单株水平平衡点, 以直尺测量茎基部至单株平衡点距离为重心高度(cm), 用电子天平(精度0.001 g)测定单株鲜重(g)。以深圳市SANS公司制造CMT2502型微机控制电子万能试验机, 力矩2 cm, 该机最大试验力50 N, 用

以表示茎秆强度。抗倒伏指数参照陈晓光等<sup>[33]</sup>方法计算。

抗倒伏指数=(茎秆强度×1000/9.8)/(茎秆重心高度×茎秆鲜重) (1)

### 1.3.2 茎秆木质素含量测定

分别于胡麻上述各生育期每小区选取具有代表性且长势相近的植株10株,取单株茎秆基部,105℃恒温箱中杀青20 min,之后80℃烘干至恒重,粉碎过60目筛,用于茎秆木质素含量的测定,测定设3次重复。木质素含量测定采用Iiyama等<sup>[34]</sup>法。

### 1.3.3 木质素相关酶活性测定

于胡麻5个生育期分别采集各小区胡麻植株10株,取重心高度处茎秆0.1 g,用液氮速冻后,置于-80℃冰箱保存待测。酶活性测定采用苏州科铭生物技术有限公司生产试剂盒,以BioTek公司Synergy HTX型酶标仪进行测定。苯丙氨酸解氨酶(PAL)催化L-苯丙氨酸裂解为反式肉桂酸和氨,反式肉桂酸在290 nm处有最大吸收值,通过测定吸光值升高速率计算PAL活性;酪氨酸解氨酶(TAL)能分解酪氨酸产生香豆酸,使反应溶液310 nm下的吸光度随反应时间而上升,根据吸光度的变化率计算TAL活性;肉桂醇脱氢酶(CAD)催化肉桂醇和NADP生成肉桂醛和NADPH,在340 nm下测定NADPH生成速率,即可反映CAD活性;过氧化物酶(POD)催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化特定底物,在470 nm有特征光吸收。均以单位质

量样本鲜重计算酶活性。

### 1.4 产量测定

待各小区胡麻70%植株蒴果变黄,每小区随机取样15株,统计株高、茎粗、分茎数、分枝数、蒴果数、果粒数和千粒重等产量构成因子,单打单收,按实际产量计产。

### 1.5 数据处理

数据采用Excel 2010整理,应用SPSS 21.0进行统计分析与显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 供钾水平对胡麻茎秆抗折力和抗倒伏指数的影响

由表1可见,不同胡麻品种茎秆抗折力随供钾水平有所差异。同一供钾水平,V1和V2品种茎秆抗折力随生育时期推进总体呈逐步上升趋势,并至成熟期达最大。现蕾期、盛花期和成熟期,施钾后V1品种茎秆抗折力较不施钾差异显著;其中现蕾期和成熟期在中钾处理下抗折力较大,盛花期在低钾处理下茎秆抗折力较大,分别较不同生育期不施钾处理上升85.72%、99.32%和20.77%;青果期高钾处理后较不施钾显著上升33.89%。V2品种施钾后盛花期、青果期和成熟期茎秆抗折力均较不施钾差异显著,分别高0.37~0.65 N、0.25~0.45 N和1.53~1.74 N。

表 1 不同供钾水平不同胡麻品种不同生育期茎秆抗折力和抗倒伏指数变化

Table 1 Effects of potassium levels on snapping resistances and lodging resistance indexes of different cultivars of oil flax at different growth stages

品种 Cultivar	处理 Treatment	茎秆抗折力 Snapping resistance (N)				抗倒伏指数 Lodging resistance index			
		现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage	现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage
V1	K0	2.74±0.05c	6.68±0.17c	5.59±0.25b	9.28±0.33d	1.79±0.06b	2.48±0.07b	2.28±0.15b	10.85±0.74b
	K1	4.38±0.02b	8.07±0.26a	6.32±0.21b	14.84±0.25c	3.71±0.05a	3.77±0.38a	2.73±0.11ab	9.08±0.18b
	K2	5.09±0.10a	7.38±0.18b	5.90±0.46b	18.49±0.29a	3.89±0.03a	2.90±0.18b	3.04±0.22a	10.91±0.42b
	K3	4.15±0.10b	7.75±0.07ab	7.49±0.44a	16.38±0.43b	3.85±0.07a	2.37±0.04b	2.42±0.12b	14.14±0.69a
V2	K0	4.14±0.37ab	2.84±0.11c	2.81±0.08c	5.48±0.25b	4.57±0.14a	2.18±0.19b	2.10±0.08c	7.83±0.49c
	K1	3.65±0.35b	3.98±0.29b	3.51±0.07b	15.07±0.91a	3.57±0.11a	1.77±0.11b	3.02±0.19b	23.46±0.52a
	K2	5.25±0.25a	3.92±0.10b	4.08±0.06a	14.35±0.61a	4.87±0.05a	1.72±0.05b	3.79±0.18a	15.87±1.59b
	K3	4.91±0.40a	4.70±0.27a	4.06±0.07a	13.89±0.29a	4.35±0.17a	3.22±0.17a	3.15±0.07b	14.38±1.01b

V1和V2分别为胡麻品种‘陇亚11号’和‘定亚23号’。K0、K1、K2、K3供钾量分别为0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>和90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>。同一品种中不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。V1 and V2 are oil flax cultivars ‘Longya No. 11’ and ‘Dingya No. 23’. K0, K1, K2 and K3 are potassium levels of 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> and 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, respectively. Values of the same cultivar within the same line followed by different lowercase letters are significantly different at P<0.05 level.

同一供钾水平V1和V2品种抗倒伏指数均在成熟期较高, 并随胡麻生育时期推进整体呈上升趋势(表1)。现蕾期, V1品种施钾后抗倒伏指数显著高于不施钾处理, 青果期和成熟期最大值分别为中钾、高钾处理, 且分别较同时期不施钾处理显著上升33.28%和30.28%。现蕾期, V2品种K2处理抗倒伏指数最大, 为4.87, 较K0上升6.65%; 盛花期K3处理下较不施钾处理显著上升51.47%; 青果期和成熟期, V2品种施钾后抗倒伏指数比不施钾处理平均高1.21和10.08。同一供钾水平下, 胡麻盛花期至青果期是倒伏敏感期, 此时抗倒伏指数较小, 合理的施钾量有助于提升胡麻茎秆抗折力和抗倒伏指数, 且抗倒伏指数与茎秆抗折力施钾后的变化趋势基本一致, 在胡麻整体生育进程中K2和K3处理V1品种茎秆抗折力和抗倒伏指数较K0处理分别上升51.71%、47.20%和19.08%、30.76%, V2品种则分别上升85.30%、84.76%和58.10%、50.96%。

### 2.2 供钾后胡麻茎秆形态特性与抗倒伏指数的关系

施钾处理可以影响胡麻植株株高和茎粗(表2)。现蕾期和盛花期, 施钾处理V1品种较不施钾株高分别显著降低3.14%~9.62%和5.00%~9.79%。现蕾期, 施钾处理V2品种株高较不施钾显著降低3.92%~12.09%。青果期, 中钾处理下V1和V2品种株高最低, 比K0处理下降4.13%和1.73%。成熟期, K2和K3处理V1品种株高较K0降低, V2品种随着供钾

水平上升, 胡麻株高降低。现蕾期和青果期, V1和V2品种K2处理茎粗较K0处理平均增加24.88%、19.14%和17.33%、22.45% ( $P<0.05$ )。盛花期, 2个品种施钾处理较不施钾茎粗分别增加7.91%~15.02%和2.31%~12.04%。成熟期, V1品种K2和K3处理较K0处理分别显著增加10.5%和13.24%; V2品种K1和K3处理较K0处理分别显著增加18.61%和15.42%。在2个胡麻品种全生育时期K2处理下株高较K0处理有明显降低, 降幅分别为4.16%~9.79%和1.43%~3.92%, 施钾处理的茎粗较不施钾处理增加, 增幅分别为2.73%~13.28%、10.50%~24.88%、10.54%~19.91%和2.22%~18.62%、6.02%~22.46%、4.89%~13.98%。

不同供钾水平下, 胡麻株高、重心高度和茎粗与各生育期的抗倒伏指数密切相关(表3)。但株高、重心高度与抗倒伏指数间未表现出一致规律。现蕾期和青果期, V1品种株高与茎秆抗倒伏指数呈显著( $r=-0.693, P<0.05$ )或极显著( $r=-0.761, P<0.01$ )负相关, 盛花期和成熟期重心高度与抗倒伏指数呈极显著( $r=-0.786, r=-0.740, P<0.01$ )负相关。V2重心高度除在盛花期表现出显著负相关外, 其余时期均无明显相关关系。2个品种的茎粗总体与抗倒伏指数呈正相关, 且V1和V2在青果期( $r=0.602, r=0.589, P<0.05$ )和成熟期( $r=0.602, r=0.630, P<0.05$ )的茎粗与抗倒伏指数呈显著正相关, 表明株高和重心高度在胡麻盛花期对抗倒伏的影响较大, 生育后期胡麻抗倒伏指数与茎秆粗壮程度密切相关。

表 2 不同供钾水平不同胡麻品种不同生育期的植株形态变化

Table 2 Plant morphology changes of different cultivars of oil flax at different growth stages with different potassium levels

品种 Cultivar	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)				茎粗 Culm diameter (mm)			
		现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage	现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage
V1	K0	64.02±0.26a	78.01±0.77a	73.47±0.4a	68.1±2.78a	2.21±0.09c	2.53±0.05b	2.56±0.01c	2.19±0.01c
	K1	57.86±0.53d	74.11±0.58b	69.45±0.21b	71.27±4.21a	2.31±0.12bc	2.73±0.05ab	2.9±0.01ab	2.25±0.09bc
	K2	60.5±0.27c	70.37±0.65c	70.41±1.39b	61.98±2.88a	2.76±0.16a	2.91±0.1a	3.05±0.10a	2.42±0.05ab
	K3	62.01±0.04b	72.64±0.58b	74.41±1.13a	66.95±1.91a	2.65±0.09ab	2.82±0.12ab	2.83±0.03b	2.48±0.04a
V2	K0	61.03±0.51a	63.91±0.34a	60.18±0.42b	60.88±0.28a	2.25±0.06b	2.16±0.05b	2.36±0.18a	1.88±0.09b
	K1	53.65±0.01c	64.42±0.23a	63.09±0.36a	59.77±0.67a	2.3±0.07b	2.21±0.06b	2.77±0.08a	2.23±0.12a
	K2	58.64±0.49b	61.5±0.28a	59.14±0.34b	60.01±0.35a	2.64±0.06a	2.29±0.05ab	2.89±0.11a	2.03±0.03ab
	K3	58.33±0.6b	62.67±1.76a	59.62±0.54b	60.85±0.51a	2.36±0.03b	2.42±0.03a	2.69±0.22a	2.17±0.04a

V1和V2分别为胡麻品种‘陇亚11号’和‘定亚23号’。K0、K1、K2、K3供钾量分别为0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>和90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>。同一品种中不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。V1 and V2 are oil flax cultivars ‘Longya No. 11’ and ‘Dingya No. 23’. K0, K1, K2 and K3 are potassium levels of 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> and 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, respectively. Values of the same cultivar within the same line followed by different lowercase letters are significantly different at P<0.05 level.

表 3 不同胡麻品种不同生育期植株形态与茎秆抗倒伏指数的相关分析

Table 3 Correlation analysis of plant morphology and lodging index of stem of different cultivars of oil flax at different growth stages

	V1				V2			
	现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage	现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Maturation stage
株高 Plant height	-0.693*	-0.155	-0.761**	-0.211	0.504	-0.186	-0.188	-0.455
重心高度 Gravity center height	-0.101	-0.786**	-0.405	-0.740**	0.374	-0.644*	0.412	0.307
茎粗 Culm diameter	0.635*	0.221	0.602*	0.602*	0.467	0.632*	0.589*	0.630*

\*\*与\*分别表示在  $P<0.01$  与  $P<0.05$  水平显著相关。 \*\* and \* indicate significant correlation at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  levels, respectively.

### 2.3 供钾水平对胡麻茎秆木质素含量的影响

木质素含量增加可显著提高茎秆的机械强度, 增加茎秆的抗压和抗倒伏能力。由图2可知, 不同供钾水平对胡麻各生育期木质素含量影响较大。苗期, K1、K2和K3处理下V1木质素含量较K0分别显著上升26.87%、39.73%和41.60%。盛花期和青果期, V1品种木质素含量在K2和K3处理下较K0分别上升

15.95%、13.66%和21.63%、15.91%, V2品种木质素含量K1和K2处理下较K0分别上升7.86%、13.30%和24.39%、15.88%。成熟期, 2个品种均在K3处理下木质素含量最高。苗期和盛花期, 施钾、品种与施钾互作对木质素含量的影响极显著, 青果期, 品种、施钾及二者互作均对木质素含量有极显著影响, 成熟期, 品种和施钾对木质素含量达到极显著影响(表4)。

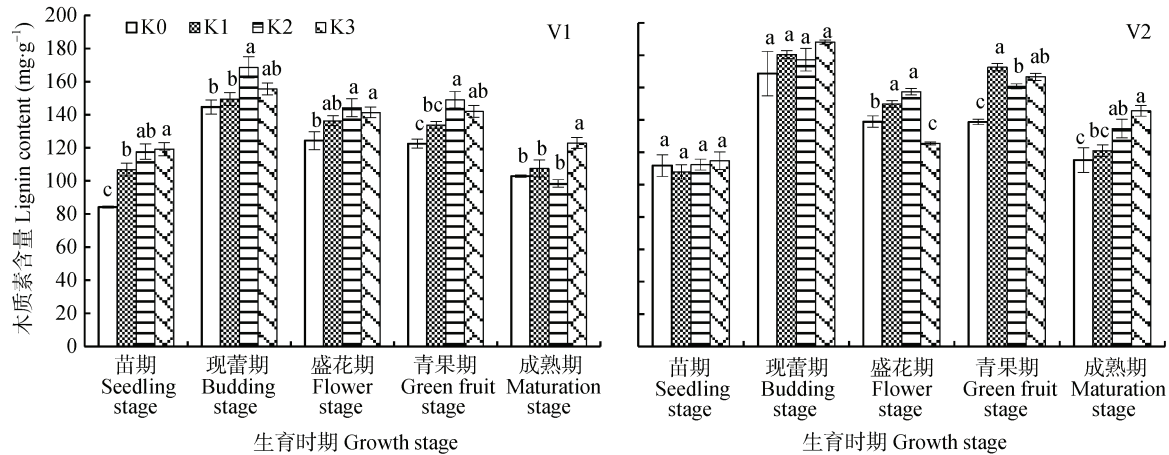


图 2 不同供钾水平不同胡麻品种不同生育期的木质素含量变化

Fig. 2 Stem lignin contents of different cultivars of oil flax at different growth stages with different potassium levels

V1 and V2 分别为胡麻品种‘陇亚 11 号’和‘定亚 23 号’。K0、K1、K2、K3 供钾量分别为  $0 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $30 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $60 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $90 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同一生育期不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。V1 和 V2 是油麻品种‘Longya No. 11’和‘Dingya No. 23’。K0、K1、K2 和 K3 是钾水平分别为  $0 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $30 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $60 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $90 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ , 分别。Different lower-case letters in the same growth stage indicate significant differences at  $P<0.05$  level.

表 4 不同生育期胡麻品种及供钾量对茎秆木质素影响的显著性分析(F 值)

Table 4 Significance analysis (F value) of effects of cultivar and potassium supply and their interaction on lignin content of stem of oil flax at different growth stages

因素 Factor	苗期 Seedling stage	现蕾期 Budding stage	盛花期 Flower stage	青果期 Green fruit stage	成熟期 Matura- tion stage
品种 Cultivar (C)	2.295	19.811**	1.606	32.760**	17.380**
供钾量 Potassium supply level (K)	7.614**	1.072	24.673**	12.578**	8.893**
C×K	6.106**	2.492	8.920**	6.777**	1.987

\*\*与\*分别表示在  $P<0.01$  与  $P<0.05$  水平影响差异。 \*\* and \* indicate significant effects at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  levels, respectively.

### 2.4 供钾水平对胡麻木质素代谢酶活性的影响

#### 2.4.1 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性

由图3可知, 不同供钾水平下胡麻各生育期 PAL活性存在差异, 总体随着生育进程的推进逐渐增加, 在成熟期达最大。施钾提高了胡麻PAL活性, 苗期和成熟期, PAL活性因品种而异, V1品种K3处理较K0处理显著高出44.83%和30.09%, 而V2品种K1处理较K0显著高出27.15%和120.39%; V1和V2品种PAL活性在现蕾期、盛花期和青果期均以K2处理最高, 较K0处理分别高2.76%、8.86%、33.03%和43.56%、55.98%、26.09%。可见, 中、高钾处理均能够提高V1和V2品种PAL活性, 低钾、不施钾处

理间无显著差异, 而中钾处理下PAL活性维持在较高水平。

### 2.4.2 酪氨酸解氨酶(TAL)活性

同一供钾水平, V1和V2品种TAL活性变化不尽相同(图3), 低钾处理下V1品种TAL活性呈先上升后下降的趋势, 不施钾、中钾和高钾处理TAL活性随生育时期推进总体呈先升后降趋势, V2品种TAL活性随生育时期推进呈双峰变化。苗期和现蕾期, V1品种的TAL活性K1和K2处理平均值较K0处理显著上升

45.03%和43.17%; 盛花期和青果期, V1品种TAL活性施钾较不施钾显著上升53.93%和96.27%。V2品种TAL活性第1个峰值是现蕾期, 施钾后TAL活性较不施钾分别显著高4.21 U·mg<sup>-1</sup>(FW)、15.89 U·mg<sup>-1</sup>(FW)和22.21 U·mg<sup>-1</sup>(FW), 第2个峰值出现在青果期, 表现为K1处理TAL活性较大, 为19.17 U·mg<sup>-1</sup>(FW), 较K0、K2和K3高出41.40%、12.02%、33.93%。V1和V2品种TAL活性在现蕾期较大, K2处理提高了V1品种TAL活性, 而K3处理提高了V2品种TAL活性。

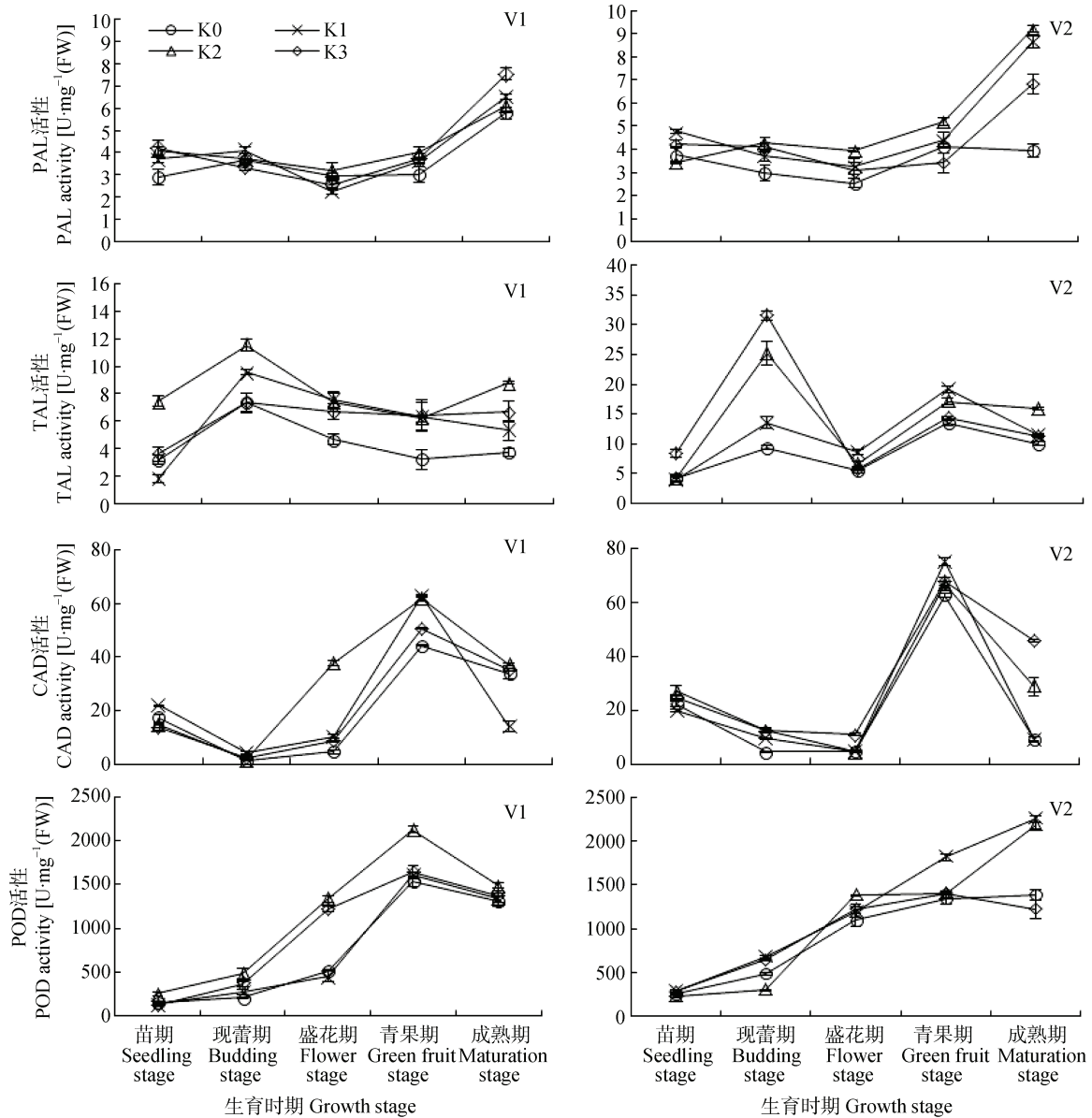


图 3 不同供钾水平下不同胡麻品种不同生育期的茎秆 4 种木质素代谢关键酶活性变化

Fig. 3 Variations of activities of four key enzymes of lignin metabolism of stems of different oil flax cultivars at different growth stages under different potassium levels

PAL: 苯丙氨酸解氨酶; TAL: 酪氨酸解氨酶; CAD: 肉桂醇脱氢酶; POD: 过氧化物酶。V1 和 V2 分别为胡麻品种‘陇亚 11 号’和‘定亚 23 号’。K0、K1、K2、K3 供钾量分别为 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>、60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> 和 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>。PAL: phenylalanine ammonia-lyase; TAL: tyrosine ammonia-lyase; CAD: cinnamyl alcohol dehydrogenase; POD: peroxidase. V1 and V2 are oil flax cultivars ‘Longya No. 11’ and ‘Dingya No. 23’. K0, K1, K2 and K3 are potassium levels of 0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 30 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, 60 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> and 90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>, respectively.



### 2.4.3 肉桂醇脱氢酶(CAD)活性

同一供钾水平下, V1和V2品种CAD活性在胡麻整个生育时期内变化趋势相似, 随生育时期的推进呈“低-高-低”趋势(图3)。苗期和现蕾期平均V1品种CAD活性K1处理较K0、K2和K3分别平均高118.09%、104.06%和64.57%, V2品种CAD活性K2处理较K0、K1和K3分别平均高出100.73%、34.98%和4.92%。CAD活性均在青果期达到最大, 且K1、K2和K3处理CAD活性较K0分别显著上升42.20%、39.22%、14.47%和20.06%、6.77%、8.39%。V1和V2成熟期各处理CAD活性较青果期大幅下降, 分别下降23.87%、77.47%、39.44%、30.44%和85.21%、87.70%、57.50%、33.71%。施钾后, 在青果期2个品种CAD活性较不施钾均有显著差异, V1在盛花期和V2在现蕾期CAD活性也具有显著差异, 表明施钾后胡麻植株CAD活性差异关键期为青果期。

### 2.4.4 过氧化物酶(POD)活性

V1品种POD活性随胡麻生育进程呈先上升后下降的趋势, V2品种POD活性全生育时期除高钾呈先升后降趋势外, 其他处理随生育时期的推进上升(图3)。V1现蕾期至青果期各处理POD活性表现为K2>K3>K1>K0。生育后期, V1品种POD活性有所下降, 成熟期各处理POD活性较青果期分别下降14.45%、16.90%、30.06%和16.21%。V2现蕾期、青果期和成熟期, POD活性K1处理较K0有显著差异, 较不施钾处理高40.03%~63.15%, 且V2现蕾期K3处理POD活性较K0显著高33.66%。盛花期, V1和V2品种K2处理

POD活性较K0分别显著上升816 U·mg<sup>-1</sup>(FW)和291 U·mg<sup>-1</sup>(FW), 中钾处理有利于提升V1品种POD活性, 低钾条件有利于提升V2品种POD活性, 表明施钾处理可以有效提升胡麻茎秆POD活性。

### 2.4.5 木质素代谢关键酶活性与胡麻茎秆抗折力的回归分析

为了更好地明确影响胡麻茎秆抗折力的关键酶和差别, 综合胡麻生育时期4个酶的活性, 选择了V1和V2品种PAL( $x_1$ )、CAD( $x_2$ )、TAL( $x_3$ )和POD( $x_4$ )活性在生育后期与茎秆抗折力做多元回归分析, 建立的回归方程为 V1:  $y=6.66+1.0921x_1-0.031x_2+0.452x_3-0.003x_4$  ( $R^2=0.883$ ,  $N=12$ ,  $P=0.002$ ); V2:  $y=-2.803-0.456x_1+0.129x_2+0.362x_3-0.004x_4$  ( $R^2=0.917$ ,  $N=12$ ,  $P=0.006$ )。表明4种木质素合成相关酶与V1和V2茎秆抗折力之间存在线性相关关系。

### 2.5 供钾后胡麻生育后期木质素含量及相关酶活性与抗倒伏能力的分析

胡麻茎秆木质素含量与茎秆抗折力和抗倒伏指数呈正相关(表5), 表明胡麻木质素含量与抗倒伏能力密切相关。V1木质素含量与PAL活性呈显著正相关, 与TAL和POD活性呈极显著正相关, 抗倒伏指数与PAL和CAD活性呈极显著。V2木质素含量与CAD活性呈极显著正相关, 与TAL和POD活性呈显著正相关, V2抗倒伏指数与木质素相关酶活性呈显著正相关。表明PAL、TAL和CAD活性的提高是木质素含量增加的酶学基础, 有助于增强胡麻茎秆抗折力, 从而提升胡麻抗倒伏力。

表5 不同胡麻品种生育后期木质素含量及相关酶活性与抗倒伏指数的分析

Table 5 Correlation analysis of lignin content, related enzymes activities and lodging index of different oil flax cultivars at late growth stage

品种 Cultivar	项目 Item	木质素含量 Lignin content	酶活性 Enzyme activity			
			PAL	CAD	TAL	POD
V1	木质素含量 Lignin content		0.613*	0.550	0.712**	0.716**
	抗折力 Snapping resistance	0.259	0.513	0.035	0.482	0.271
	抗倒伏指数 Lodging resistance index	0.541	0.766**	0.761**	0.350	0.521
V2	木质素含量 Lignin content		0.044	0.790**	0.647*	0.608*
	抗折力 Snapping resistance	0.668*	0.139	0.311	0.342	0.028
	抗倒伏指数 Lodging resistance index	0.631*	0.334	0.278	0.439	0.026

PAL: 苯丙氨酸解氨酶; TAL: 酪氨酸解氨酶; CAD: 肉桂醇脱氢酶; POD: 过氧化物酶。V1和V2分别为胡麻品种‘陇亚11号’和‘定亚23号’。\*和\*\*分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著相关。PAL: phenylalanine ammoniolyase; TAL: tyrosine ammoniolyase; CAD: cinnamyl-alcohol dehydrogenase; POD: peroxidase. V1 and V2 are oil flax cultivars ‘Longya No. 11’ and ‘Dingya No. 23’. \* and \*\* indicate significant correlation at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively.

### 2.6 不同供钾水平对胡麻籽粒产量影响

由图4可见, 两个品种随供钾水平上升胡麻产量呈上升趋势, V1品种尽管K1、K2、K3处理产量较

K0分别上升1.68%、5.12%、10.72%, 但各处理间产量均未达显著差异。V2品种K2、K3处理产量均较K0分别显著增加12.24%和17.77%, 且K1处理与K0、

K2无显著差异。品种、施钾及二者互作的影响效应表明, 品种和供钾水平对胡麻籽粒产量达极显著水平( $F=774.69$ ,  $F=49.10$ ,  $P<0.01$ ), 二者互作达显著水平( $F=6.03$ ,  $P<0.05$ )。

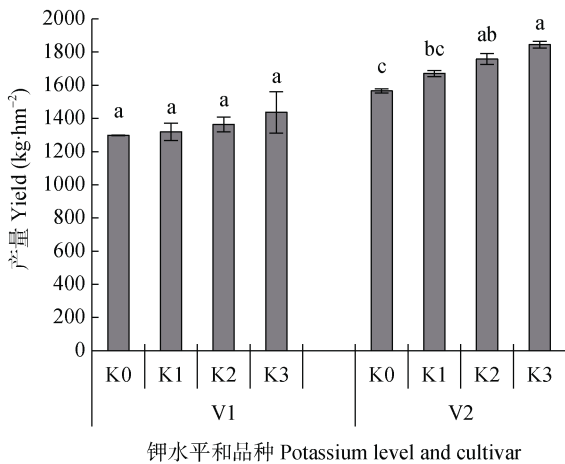


图 4 不同供钾水平下不同胡麻品种产量变化

Fig. 4 Yield variations of different oil flax cultivars under different potassium levels

V1 和 V2 分别为胡麻品种‘陇亚 11 号’和‘定亚 23 号’。K0、K1、K2、K3 供钾量分别为  $0 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $30 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $60 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $90 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同一品种不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。V1 and V2 are oil flax cultivars ‘Longya No. 11’ and ‘Dingya No. 23’. K0, K1, K2 and K3 are potassium levels of  $0 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $30 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $60 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $90 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. Different lowercase letters for the same cultivar indicate significant differences at  $P<0.05$  level.

### 3 讨论与结论

作物的形态、生理、力学以及生物量等因素与抗倒伏能力密切相关<sup>[35]</sup>。钾能促进植物茎秆的茎壁和机械组织厚度, 提高茎秆的抗倒伏性<sup>[36]</sup>。王柱明<sup>[37]</sup>研究表明钾肥能促使向日葵(*Orobancha cumana*)的茎秆增粗变矮, 增强抗倒伏能力。本试验表明, 施钾可以影响胡麻株高, 较不施钾, V1 和 V2 全生育期株高分别平均降低了 2.61%~7.11%和 1.84%~2.71%, 中钾处理下降幅最大; 且 2 品种在生育中后期(盛花—成熟)株高、重心高度均与抗倒伏指数达到负相关。同时, V1 和 V2 品种在施中、高钾时茎秆增粗, 且均在青果—成熟期内与抗倒伏指数呈显著正相关, 表明施钾有利于协同胡麻生育后期株高、茎粗及其与倒伏特性间的关系, 生育后期植株过高易发生倒伏, 而茎粗增加利于抗倒伏指数上升, 这与马青美等<sup>[38]</sup>的研究一致。茎秆特性是决定茎秆是否倒伏的一个最重要的因素, 茎秆的形态结构和生理特征与抗倒性密切相关, 提高茎秆的机械强度, 可以显著提高作物的抗倒伏能力<sup>[39]</sup>。本试验结果表明, 生育

后期, 除 V1 盛花期在低钾处理下茎秆抗折力较大外, 2 个品种均在中、高钾处理下茎秆抗折力较不施钾增大, V1 和 V2 施钾后胡麻植株全生育期的茎秆抗折力和抗倒伏指数较不施钾平均上升 44.37%和 69.88%, 且不同供钾水平对胡麻茎秆抗折力和抗倒伏指数达极显著影响, 这和杨长明等<sup>[40]</sup>、张丰转等<sup>[41]</sup>研究一致, 表明增施钾肥可以增强植株茎秆抗折力, 从而提升抗倒性。木质素作为细胞壁的组成成分, 有助于提高茎秆机械强度, 增强其抗压能力<sup>[42]</sup>。本试验研究表明, 青果期是胡麻倒伏易发生时期, V1 和 V2 施钾后木质素含量均显著高于不施钾处理, 且成熟期 V1 和 V2 高钾处理分别较不施钾木质素含量上升 19.45%和 26.42%, 抗倒伏指数分别显著上升 30.27%和 83.65%。可见, 在胡麻生育后期, 植株重心高度上移, 冠层质量增加, 倒伏敏感度加强, 钾肥施用对木质素含量的提升效应, 加大了茎秆机械强度, 结合其对茎粗等农艺因子的协同优化, 为其抗倒伏能力增强奠定了农艺学基础<sup>[43-44]</sup>。

植物 PAL、TAL、CAD 和 POD 是其木质素合成过程中的重要酶类, 代谢活动中酶活性上升是木质素含量增加的酶学保证, 在植物的抗性反应中发挥重要作用<sup>[45]</sup>。王千等<sup>[46]</sup>研究表明, 施钾有利于提高番茄(*Solanum lycopersicum*)叶片和根系 PAL、POD 活性和木质素的合成。本试验中, 中、高钾处理下 V1 和 V2 全生育期的 PAL 活性较不施钾和低钾处理提升更大, 胡麻现蕾期至青果期, PAL 活性与木质素含量变化趋势一致。V1 品种在中钾处理和 V2 品种在高钾处理 TAL 活性均显著高于不施钾处理, 生育后期, V1 和 V2 品种胡麻木质素含量与 TAL 活性均达显著正相关, TAL 活性升高, 2 个品种胡麻木质素含量也相应增加。施钾后, 胡麻植株 CAD 活性差异主要体现在青果期, 较不施钾差异显著, 且低钾处理下 V1 和 V2 品种 CAD 活性较高, 较不施钾显著提升 42.19%和 17.92%。V1 品种植株整个生育时期 POD 活性在中钾处理下较高, V2 品种则在低钾处理下 POD 活性较高, 这与大豆<sup>[47]</sup>中的研究结果一致, 对作物适当施钾可以增强细胞膜脂过氧化程度, 从而提高 POD 活性。相关分析表明, 生育后期, V1 品种茎秆中的 PAL、TAL 和 POD 活性与木质素含量呈显著或极显著正相关, 且木质素含量与胡麻植株茎秆抗折力和抗倒伏指数相关, V2 品种胡麻茎秆中的 CAD、TAL 和 POD 活性与木质素含量均达到显著正相关, 且木质素含量与胡麻植株茎秆抗折力和抗倒伏指数呈显著正相关。表明木质素相关合

成酶与茎秆抗折力之间存在相关性,同木质素合成酶与茎秆抗折力间回归分析结果一致,表明作物木质素合成酶活性的提高,可以提升茎秆抗折力,促使植株的抗倒伏能力增强。这同陈晓光等<sup>[33]</sup>、王凯等<sup>[48]</sup>研究结果一致。本试验中, V1 和 V2 品种在施钾处理分别平均增产 4.04% 和 7.95%, 高钾处理下 2 个品种籽粒产量均达最高, 中、高钾处理对 V2 品种产量影响显著, 但 V1 品种产量施钾处理间无显著差异。王晓光等<sup>[49]</sup>研究指出, 相同钾肥施用条件下, 大豆种植中不同基因型对钾素吸收效率不同, 钾高效基因型品种产量高于钾低效品种, 本试验结果也有相同趋势, 同施钾量下 V2 品种产量均高于 V1 品种, 而整个生育时期内 V2 品种木质素相关酶活性、木质素含量、抗倒伏指数均高于 V1 品种, 这也在小麦<sup>[33]</sup>和荞麦(*Fagopyrum esculentum*)<sup>[50]</sup>中有相关研究, 抗倒伏能力强的品种, 其酶活性、茎秆抗折力等均大于易倒伏品种, 本试验中 V2 为抗倒性较强品种, 但其是否为钾高效基因型仍有待进一步研究。

本试验中, 供钾处理增大了 2 个品种胡麻茎部直径, 生育前、后期茎木质素含量增幅分别体现在中、高钾处理下, 生育后期木质素与品种、施钾量相关均达到极显著水平。4 种木质素合成相关酶活性与 V1 和 V2 茎秆抗折力存在线性相关关系, 但因品种差异, V1 和 V2 相关酶活性与木质素含量及抗倒伏指数间存在异质性变化, V1 品种 PAL、CAD 与抗倒伏指数呈极显著正相关, 2 品种 TAL、CAD 均与木质素含量呈显著正相关。由此可见, 在本试验条件下, 中、高钾肥[60~90 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>]处理有利于提高胡麻茎秆木质素相关酶活性, 促进茎秆木质素积累和抗倒伏指数提升, 但其增产效应仍需结合品种内在遗传特性综合考虑。

## 参考文献 References

- 田保明, 杨光圣, 曹刚强, 等. 农作物倒伏及其影响因素分析[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 163-167  
TIAN B M, YANG G S, CAO G Q, et al. The performance of lodging and root cause analysis for lodging resistance in crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(4): 163-167
- TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N, et al. Lodging behavior and yield potential of spring wheat (*Triticum aestivum* L.): effects of ethephon and genotypes[J]. Field Crops Research, 2004, 87(2/3): 207-220
- 刘杰. 水稻倒伏的原因及减轻危害的对策[J]. 中国农药, 2013, 9(10): 43-44  
LIU J. Causes of rice lodging and countermeasures to reduce damage[J]. Chinese Pesticide, 2013, 9(10): 43-44
- 王秀凤, 景希强, 葛立胜, 等. 玉米抗倒性研究进展[J]. 杂粮作物, 2009, 29(6): 383-385  
WANG X F, JING X Q, GE L S, et al. The research progress in lodging resistance of maize[J]. Rain Fed Crops, 2009, 29(6): 383-385
- 张建, 陈金城, 唐章林, 等. 油菜茎秆理化性质与倒伏关系的研究[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(5): 763-765  
ZHANG J, CHEN J C, TANG Z L, et al. Study on the physico-chemical properties of stem as related to lodging in rape[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2006, 28(5): 763-765
- 朱新开, 王祥菊, 郭凯泉, 等. 小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(1): 87-92  
ZHU X K, WANG X J, GUO K Q, et al. Stem characteristics of wheat with stem lodging and effects of lodging on grain yield and quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(1): 87-92
- 曹庆军, 曹铁华, 杨粉团, 等. 灌浆期风灾倒伏对玉米籽粒灌浆特性及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1107-1113  
CAO Q J, CAO T H, YANG F T, et al. Effect of wind damage on grain-filling characteristics, grain quality and yield of spring maize (*Zea mays* L.)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(9): 1107-1113
- 刘唐兴, 官春云, 肖君泽, 等. 甘蓝型油菜主茎理化特性与倒伏的关系及抗倒性评价[J]. 河南农业科学, 2007, 36(12): 40-42  
LIU T X, GUAN C Y, XIAO J Z, et al. Relation between physico-chemical properties of stem and lodging and evaluation of lodging resistance in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2007, 36(12): 40-42
- 陈晓光, 石玉华, 王成雨, 等. 氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3529-3536  
CHEN X G, SHI Y H, WANG C Y, et al. Effects of nitrogen and PP<sub>333</sub> application on the lignin synthesis of stem in relation to lodging resistance of wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3529-3536
- 李波, 张吉旺, 崔海岩, 等. 施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(11): 2093-2099  
LI B, ZHANG J W, CUI H Y, et al. Effects of potassium application rate on stem lodging resistance of summer maize under high yield conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(11): 2093-2099
- JONES L, ENNOS A R, TURNER S R. Cloning and characterization of irregular xylem4 (irx4): a severely lignin-deficient mutant of *Arabidopsis*[J]. The Plant Journal, 2001, 26(2): 205-216
- 高原, 陈信波, 张志扬. 木质素生物合成途径及其基因调控的研究进展[J]. 生物技术通报, 2007, (2): 47-51  
GAO Y, CHEN X B, ZHANG Z Y. Advances in research on lignin biosynthesis and its molecular regulation[J]. Biotechnology Bulletin, 2007, (2): 47-51
- 李文珍. 旱地胡麻配方施肥试验[J]. 甘肃农业科技, 2011,

- (2): 39–40  
LI W Z. Test of formula fertilization on dryland oilseed flax[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2011, (2): 39–40
- [14] YOU F M, DUGUID S D, THAMBUGALA D, et al. Statistical analysis and field evaluation of the type 2 modified augmented design (MAD) in phenotyping of flax (*Linum usitatissimum*) germplasm in multiple environments[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(11): 1789–1800
- [15] 郭玉明, 袁红梅, 阴妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 14–18  
GUO Y M, YUAN H M, YIN Y, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 14–18
- [16] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱区气候变暖对胡麻生育和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2635–2642  
YAO Y B, WANG R Y, YANG J H, et al. Effects of climate warming on oil flax growth and water use efficiency in semi-arid region of Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2635–2642
- [17] 陈双恩, 杜汉强. 亚麻抗倒伏性状分析及培土对亚麻抗倒伏的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(1): 83–88  
CHEN S E, DU H Q. Lodging resistance in flax and the effect of ridge plowing on lodging resistance[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(1): 83–88
- [18] 叶春雷, 石有太, 罗俊杰, 等. 种植密度对旱地胡麻产量及品质的影响[J]. 甘肃农业科技, 2014, (4): 11–13  
YE C L, SHI Y T, LUO J J, et al. Effect of planting density on yield and quality of dryland oil flax[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2014, (4): 11–13
- [19] 郭媛, 邱财生, 龙松华, 等. 多效唑对亚麻农艺性状及抗倒伏性的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(10): 1780–1785  
GUO Y, QIU C S, LONG S H, et al. Effects of paclobutrazol on agronomic characters and lodging resistance of flax (*Linum usitatissimum*)[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(10): 1780–1785
- [20] 朱新开, 王祥菊, 郭凯泉, 等. 小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(1): 87–92  
ZHU X K, WANG X J, GUO K Q, et al. Stem characteristics of wheat with stem lodging and effects of lodging on grain yield and quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(1): 87–92
- [21] 袁志华, 李英俊. 小麦茎秆弯曲特性与密度间的关系研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15775+15868  
YUAN Z H, LI Y J. Study on relationship between bending property and density of wheat stem[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(32): 15775+15868
- [22] 李金才, 尹钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(5): 662–666  
LI J C, YIN J, WEI F Z. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(5): 662–666
- [23] 高珍妮, 赵利, 郭丽琢, 等. 灌溉量和施氮量对油用亚麻茎秆抗倒性能及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 544–553  
GAO Z N, ZHAO L, GUO L Z, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilizer rates on oilseed flax stem lodging resistance and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 544–553
- [24] 高珍妮, 郭丽琢, 李丽, 等. 氮肥对胡麻茎秆木质素合成酶活性及其抗倒性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(5): 610–615  
GAO Z N, GUO L Z, LI L, et al. Effects of nitrogen on oilseed flax stem lignin and relative enzyme and lodging resistance[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(5): 610–615
- [25] 王群瑛, 胡昌浩. 玉米茎秆抗倒特性的解剖研究[J]. 作物学报, 1991, 17(1): 70–75  
WANG Q Y, HU C H. Studies on the anatomical structures of the stalks of maize with different resistance to lodging[J]. Acta Agronomica Sinica, 1991, 17(1): 70–75
- [26] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素对玉米茎髓和幼根超微结构的影响及其与茎腐病抗性的关系[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 729–736  
LI W J, HE P, JIN J Y. Effect of potassium on ultrastructure of maize stalk pith and young root and their relation to resistance to stalk rot[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(4): 729–736
- [27] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 等. 小麦抗倒性研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 208–213  
YAO J B, MA H X, YAO G C, et al. Research progress on lodging resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(2): 208–213
- [28] 郝艳娟. 棉花钾素高效的生理机制及其施肥效应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015  
HAO Y S. Physiological mechanisms of high potassium efficiency and fertilization effects of cotton[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015
- [29] 李刘杰, 汪强, 韩燕来, 等. 钾水平对小麦酚类物质、木质素代谢和接种蚜虫群体动态的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 143–148  
LI L J, WANG Q, HAN Y L, et al. Study of effects of potassium levels on phenolic and lignin metabolism of wheat and dynamic of aphid population[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(17): 143–148
- [30] 向达兵, 郭凯, 雷婷, 等. 磷钾营养对套作大豆茎秆形态和抗倒性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3): 395–402  
XIANG D B, GUO K, LEI T, et al. Effects of phosphorus and potassium on stem characteristics and lodging resistance of relay cropping soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(3): 395–402
- [31] MIN Z, LI R Y, CHEN L, et al. Alleviation of drought stress in grapevine by foliar-applied strigolactones[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 135: 99–110
- [32] 孙哲, 史春余, 刘桂玲, 等. 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1071–1078  
SUN Z, SHI C Y, LIU G L, et al. Effect difference of potas-

- sium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1071–1078
- [33] 陈晓光, 史春余, 尹燕桦, 等. 小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系[J]. *作物学报*, 2011, 37(9): 1616–1622  
CHEN X G, SHI C Y, YIN Y P, et al. Relationship between lignin metabolism and lodging resistance in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1616–1622
- [34] Iiyama K, Wallis A F A. An improved acetyl bromide procedure for determining lignin in woods and wood pulps[J]. *Wood Science and Technology*, 1988, 22(3): 271–280
- [35] 周蓉, 王贤智, 陈海峰, 等. 大豆倒伏性及其相关性状的 QTL 分析[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 57–65  
ZHOU R, WANG X Z, CHEN H F, et al. QTL analysis of lodging and related traits in soybean[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 57–65
- [36] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 钾素对小麦茎、叶解剖结构的影响[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(3): 53–57  
XIONG M B, LEI X Z, TIAN Y B, et al. Effects of potassium on wheat stem-leaf anatomical structure[J]. *Acta Tritical Crops*, 2003, 23(3): 53–57
- [37] 王柱明. 不同钾肥用量对水浇地食用向日葵产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2013(23): 100–101  
WANG Z M. Effect of different potassium fertilizer amount on the yield of edible sunflower in irrigated field[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2013(23): 100–101
- [38] 马青美, 许莹莹, 赵美爱, 等. 玉米茎秆抗倒伏相关生理生化指标及关键酶基因的表达分析[J]. *植物生理学报*, 2019, 55(8): 1123–1132  
MA Q M, XU Y Y, ZHAO M A, et al. Physiological and biochemical indexes related to lodging resistance of maize stalk and expression analysis of key enzyme genes[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(8): 1123–1132
- [39] SUN Q, LIU X G, YANG J, et al. MicroRNA528 affects lodging resistance of maize by regulating lignin biosynthesis under nitrogen-luxury conditions[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(6): 806–814
- [40] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 646–650  
YANG C M, YANG L Z, YAN T M, et al. Effects of nutrient and water regimes on lodging resistance of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 646–650
- [41] 张丰转, 金正勋, 马国辉, 等. 水稻抗倒性与茎秆形态性状和化学成分含量间相关分析[J]. *作物杂志*, 2010, (4): 15–19  
ZHANG F Z, JIN Z X, MA G H, et al. Correlation analysis between lodging resistance and morphological characters of physical and chemical components in rice's culms[J]. *Crops*, 2010, (4): 15–19
- [42] DIXON R A. Natural products and plant disease resistance[J]. *Nature*, 2001, 411(6839): 843–847
- [43] 黄杰恒, 李威, 曲存民, 等. 甘蓝型油菜不同抗倒性材料中木质素代谢途径关键基因表达特点[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1339–1344  
HUANG J H, LI W, QU C M, et al. Expression characteristics of key genes in lignin pathway among different lodging resistance lines of *Brassica napus* L.[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1339–1344
- [44] FANG X, LIU X, ZHANG Y, et al. Effects of uniconazole or gibberellic acid application on the lignin metabolism in relation to lodging resistance of culm in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.)[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(4): 414–423
- [45] 解新明, 赵燕慧, 霍松, 等. 象草不同品种木质素合成关键酶活性的动态变化[J]. *草地学报*, 2010, 18(4): 523–527  
XIE X M, ZHAO Y H, HUO S, et al. Dynamic changes of enzyme activities related to lignin biosynthesis for elephantgrass cultivars[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 523–527
- [46] 王千, 依艳丽, 张淑香. 不同钾肥对番茄幼苗酚类物质代谢作用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 706–716  
WANG Q, YI Y L, ZHANG S X. Effects of different potassium on phenol metabolism of tomato seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 706–716
- [47] 王晓光, 王岩, 李兴涛, 等. 低钾胁迫对大豆叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(4): 512–517  
WANG X G, WANG Y, LI X T, et al. Effects of low potassium on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activity of soybean leaves[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32(4): 512–517
- [48] 王凯, 赵小红, 姚晓华, 等. 茎秆特性和木质素合成与青稞抗倒伏关系[J]. *作物学报*, 2019, 45(4): 621–627  
WANG K, ZHAO X H, YAO X H, et al. Relationship of stem characteristics and lignin synthesis with lodging resistance of hulless barley[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(4): 621–627
- [49] 王晓光, 曹敏建, 于海秋, 等. 不同基因型大豆吸收利用钾素的差异分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(5): 520–524  
WANG X G, CAO M J, YU H Q, et al. Difference of potassium uptake and use efficiency between different genotypic soybeans[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(5): 520–524
- [50] 汪灿, 阮仁武, 袁晓辉, 等. 荞麦茎秆解剖结构和木质素代谢及其与抗倒性的关系[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1846–1856  
WANG C, RUAN R W, YUAN X H, et al. Relationship of anatomical structure and lignin metabolism with lodging resistance of culm in buckwheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1846–1856