

## 不同施氮量对高粱生长·生物量和蜀黍氰苷积累的影响

李松柏<sup>1</sup>, 周韩玲<sup>1</sup>, 胡娇<sup>1</sup>, 宋廷富<sup>1</sup>, 李杨华<sup>1,2,3</sup>, 安明哲<sup>1,2,3</sup>, 郑佳<sup>2,3\*</sup> (1. 四川宜宾五粮液股份有限公司, 四川宜宾 644000; 2. 固态发酵资源利用四川省重点实验室, 四川宜宾 644000; 3. 中国轻工业浓香型白酒固态发酵重点实验室, 四川宜宾 644000)

**摘要** 以辽糯 11 高粱为供试材料, 研究了 5 个不同施氮水平对其生长发育、生物量及蜀黍氰苷积累的影响。结果表明, 不同施氮水平对株高的影响不显著, 随着施氮量的增加, 高粱的茎粗、叶长、叶宽及鲜质量、干质量等表现为先增大后稳定, 根、茎、叶等部位中的蜀黍氰苷含量随着施氮量的增加先增加后降低。

**关键词** 高粱; 氮肥; 蜀黍氰苷; 生长; 生物量

中图分类号 S514 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0150-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.033



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Effects of Different Nitrogen Rates on Sorghum Growth, Biomass and Cyanoside Accumulation

LI Song-bai, ZHOU Han-ling, HU Jiao et al (Wuliangye Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644000)

**Abstract** Liaonuo 11 sorghum was used as experimental material to study the effects of 5 different nitrogen application levels on its growth, biomass and cyanoside accumulation. The results showed that different nitrogen application levels had no significant effect on plant height. With the increase of nitrogen application rate, the stem diameter, leaf length, leaf width, fresh weight and dry weight of sorghum increased first and then stabilized. The content of zein cyanoside in roots, stems and leaves also increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rate.

**Key words** Sorghum; Nitrogenous fertilizer; Cyanoside; Growth; Biomass

高粱是禾本科高粱属作物, 因具有耐旱、耐瘠薄、适应性强、生长快、营养丰富等特点, 栽培范围较广, 是重要的谷物和牧草作物。高粱籽粒可供人类食用, 也可用作白酒酿造和牲畜饲料, 其秸秆在造纸、动物饲料等方面具有广泛的应用价值<sup>[1-4]</sup>。

高粱是一种含氰作物, 所含生氰糖苷种类为蜀黍氰苷, 当植物组织遭到破坏时, 蜀黍氰苷可被酶降解并释放出有毒的氰化氢<sup>[5-6]</sup>。研究表明, 在湿重基础上, 当高粱中的 HCN 水平超过 200 mg/kg 时, 则对牲畜有害<sup>[7-8]</sup>。高粱中蜀黍氰苷含量受内源因素和外源因素的共同影响, 其中, 内源因素有植物所处生长发育阶段和参与蜀黍氰苷合成相关酶的数量等<sup>[9]</sup>, 外源因素主要包括植株种类、种植地气候特点和土壤肥力状况等<sup>[10]</sup>。研究表明, 施用氮肥可促进高粱茎、叶的生长, 提高生物量<sup>[4, 11]</sup>, 然而, 较高的氮肥施用可能增加高粱组织中蜀黍氰苷含量, 从而引起动物中毒<sup>[12-13]</sup>。

四川宜宾盛产酿酒专用糯高粱, 是优质浓香型白酒主产区<sup>[14]</sup>, 也是四川农区肉牛生产区之一, 近年来, 在政府推动下, 肉牛养殖业蓬勃发展, 饲料需求量较大<sup>[15]</sup>, 宜宾地区种植的高粱籽粒多用来作为白酒酿造原料, 秸秆则可用于制作青储饲料, 供肉牛食用。因此, 研究和探讨不同施氮量对高粱生长、生物量和蜀黍氰苷<sup>[16]</sup>积累的影响, 可指导高粱种植并为牲畜提供优质安全饲料来源提供科学依据。

## 1 材料与方法

**1.1 材料与试剂** 蜀黍氰苷(95%), Sigma-Aldrich 公司; 甲醇(LC-MS 级), Merck 公司; 硫酸钾(农业用, K<sub>2</sub>O ≥ 52.0%, S

≥ 16%), 山东青上化工有限公司; 过磷酸钙(农业用, 有效磷含量 ≥ 12%), 江苏美乐肥料有限公司; 尿素(农业用, 总养分 ≥ 45%), 云南云天化股份有限公司; 辽糯 11 号高粱(杂交品种), 辽宁省农业科学院选育。

**1.2 仪器与设备** ExionLC-5500 型三重四级杆液相色谱-质谱联用仪, 美国 AB Sciex 公司; Milli-Q 型超纯水仪, 美国 Millipore 公司; ML1602 型百分之一分析天平、AE200 型万分之一分析天平, 梅特勒-托利多公司; FSJ-II 型锤片式粮食粉碎机, 中储粮成都粮食贮藏科学研究院; YM-060S 型超声波清洗机, 深圳市雨盟超声波清洗机设备厂; GT200 型震动球磨仪, 北京格瑞德曼仪器设备有限公司; LDO-9246A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海龙跃仪器设备有限公司。

**1.3 试验设计** 试验在宜宾市南溪区大观镇宜宾市农业科学院大观科研基地进行。试验地属于中亚热带湿润季风气候, 年平均气温约 18 °C, 年平均降水量为 1 050~1 618 mm, 全年日照时间为 1 000~1 130 h, 无霜期为 334~360 d。试验地前茬作物为甘薯, 土壤类型为紫色土, 肥力均匀, pH 6.12。0~20 cm 土壤养分状况为有机质 28.7 g/kg, 全氮 1.67 g/kg, 速效磷 30.3 mg/kg, 速效钾 69.0 mg/kg。

供试高粱品种为辽宁省农业科学院选育的辽糯 11 杂交糯高粱, 采用单因素随机区组设计, 设置 3 次重复, 5 个施氮(尿素)水平, 空白组为 0 kg/hm<sup>2</sup>, 试验组为 120、240、360、480 kg/hm<sup>2</sup>, 分别用 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 表示(表 1)。磷肥(过磷酸钙)统一为 300 kg/hm<sup>2</sup>, 钾肥(硫酸钾)统一为 100 kg/hm<sup>2</sup>。采用育苗盘对辽糯 11 高粱进行育苗, 4 叶龄时进行移栽种植, 行距 50 cm, 株距 35 cm, 每穴 2 株, 种植密度为 112 500 株/hm<sup>2</sup>, 按高产田进行田间管理。

**1.4 测定指标** 拔节期(第二次施肥前)、抽穗期和成熟期每小区取样 5 株, 计数叶片数, 用标尺测定株高, 称量鲜重,

基金项目 四川宜宾五粮液股份有限公司项目。

作者简介 李松柏(1994—), 男, 四川广元人, 助理工程师, 硕士, 从事食品分析研究。\* 通信作者, 工程师, 博士, 从事食品分析研究。

收稿日期 2022-11-28

置于 55 °C 培养箱中烘干后称干质量。

表 1 各个施肥时期及施肥量

Table 1 Fertilization period and amount 单位:kg/hm<sup>2</sup>

| 处理<br>Treatment | 移栽期<br>Transplanting<br>stage | 返青期<br>Regreening<br>stage | 拔节期<br>Jointing stage          |         |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------|
|                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 尿素 Urea                    | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 尿素 Urea |
| N <sub>0</sub>  | 450                           | 0                          | 150                            | 0       |
| N <sub>1</sub>  | 450                           | 75                         | 150                            | 45      |
| N <sub>2</sub>  | 450                           | 75                         | 150                            | 165     |
| N <sub>3</sub>  | 450                           | 75                         | 150                            | 285     |
| N <sub>4</sub>  | 450                           | 75                         | 150                            | 405     |

表 2 拔节期高粱生长和生物量

Table 2 Growth and biomass of sorghum at jointing stage

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height<br>cm | 单株叶片数<br>Number of leaves<br>per plant | 茎粗<br>Stem diameter<br>cm | 单株鲜质量<br>Fresh weight<br>per plant//g | 单株干质量<br>Dry weight<br>per plant//g |
|-----------------|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 空白组 Blank group | 15.50±0.50               | 9.00±1.00                              | 0.68±0.10                 | 29.84±0.30                            | 4.37±0.10                           |
| 试验组 Test group  | 15.30±0.80               | 9.00±1.00                              | 0.67±0.10                 | 28.97±0.20                            | 4.39±0.10                           |

表 3 拔节期高粱各部位蜀黍氰苷含量

Table 3 Content of cyanoside in sorghum at jointing stage

单位:g/kg

| 处理<br>Treatment | 根<br>Root | 茎<br>Stem | 倒 1 和倒 2 叶片<br>Inverted 1<br>and 2 blades | 倒 3 和倒 4 叶片<br>Inverted 3<br>and 4 blades | 倒 5 和倒 6 叶片<br>Inverted 5<br>and 6 blades | 幼叶<br>Young leaf |
|-----------------|-----------|-----------|---|---|---|------------------|
| 空白组 Blank group | 15.3±0.2  | 27.7±0.3  | 26.7±0.2                                  | 24.2±0.3                                  | 19.2±0.1                                  | 19.9±0.2         |
| 试验组 Test group  | 14.5±0.3  | 26.3±0.5  | 24.7±0.1                                  | 26.0±0.2                                  | 23.0±0.2                                  | 20.9±0.3         |

从表 2 可以看出,空白组和试验组高粱的单株叶片数、茎粗、单株鲜质量和单株干质量均无显著差异 ( $P>0.05$ ),表明在返青期施用氮肥对高粱幼苗生长没有影响,幼苗时期的高粱对氮肥的需求量较少,土壤中的氮肥可满足植株生长要求。

从表 3 可以看出,试验组和对照组高粱幼苗各部位蜀黍氰苷含量无显著差异 ( $P>0.05$ ),研究发现蜀黍氰苷在幼苗中的积累量最高<sup>[19-20]</sup>,研究表明,高粱中蜀黍氰苷含量取决于植物的年龄和生长条件,高粱种子萌发后不久,植株中氰化物电位达到最高值,蜀黍氰苷含量较高,在此阶段,氮肥的施用对蜀黍氰苷的积累没有影响<sup>[21-23]</sup>。表明返青期施

将烘干后植株的茎、各部位叶片分别剪下,剪成 0.5 cm 小段,以球磨机粉碎,过 120 目筛,每种样品称取 1.50 g,分别采用 20 mL 甲醇水溶液 (95 : 5, V/V) 超声提取 1 h, 8 000 r/min 离心 10 min,取上清液 0.4 mL,用超纯水稀释 3 倍,经 0.2 μm 滤膜过滤后进三重四级杆液相色谱-质谱联用仪,分析各生长期高粱茎、叶中蜀黍氰苷含量<sup>[17-18]</sup>。

1.5 数据分析 采用 Excel 和 SPASS 22.0 对试验数据进行处理和分析。

## 2 结果与分析

2.1 不同氮肥施用量对拔节期高粱生长、生物量和蜀黍氰苷积累的影响 于第二次施用氮肥前取样,测定空白组和试验组高粱生长参数和各部位蜀黍氰苷含量,结果见表 2 和表 3。

用氮肥对幼苗时期高粱中蜀黍氰苷积累没有影响。

2.2 不同氮肥施用量对抽穗期高粱生长、生物量和蜀黍氰苷积累的影响 测定各处理下抽穗期高粱生长参数和生物量,结果见表 4,除去枯萎叶片,高粱各部位蜀黍氰苷含量见表 5。

从表 4 可以看出,氮肥施用量对株高和单株叶片数没有明显影响,但随着氮肥施用量的增加,茎粗、单株鲜质量和单株干质量有所增加。氮肥能促进植物进行光合作用,促使叶片生长,提高植物对营养的吸收,从而提高植物的产量和质量<sup>[24-25]</sup>。

从表 5 可以看出,随着氮肥的增加,高粱各部位蜀黍氰苷含量总体呈上升趋势,在抽穗期,氮肥促进植株生长,同时也促进蜀黍氰苷含量的增加。

表 4 抽穗期高粱生长和生物量

Table 4 Growth and biomass of sorghum at heading stage

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height<br>cm | 单株叶片数<br>Number of leaves<br>per plant | 茎粗<br>Stem diameter<br>cm | 单株鲜质量<br>Fresh weight<br>per plant//g | 单株干质量<br>Dry weight<br>per plant//g |
|-----------------|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| N <sub>0</sub>  | 110±2                    | 10±1                                   | 1.59±0.13                 | 530±3                                 | 167±3                               |
| N <sub>1</sub>  | 110±3                    | 9±1                                    | 1.71±0.22                 | 540±5                                 | 172±2                               |
| N <sub>2</sub>  | 112±4                    | 9±1                                    | 1.81±0.24                 | 550±2                                 | 178±3                               |
| N <sub>3</sub>  | 96±3                     | 8±1                                    | 2.05±0.17                 | 552±3                                 | 179±2                               |
| N <sub>4</sub>  | 117±1                    | 10±1                                   | 2.23±0.25                 | 558±4                                 | 182±3                               |

表 5 抽穗期高粱各部位蜀黍氰苷含量

Table 5 Content of cyanoside in different parts of sorghum at heading stage

单位:g/kg

| 处理<br>Treatment | 根<br>Root  | 茎<br>Stem | 倒 1 和倒 2 叶片<br>Inverted 1<br>and 2 blades | 倒 3 和倒 4 叶片<br>Inverted 3<br>and 4 blades | 倒 5 和倒 6 叶片<br>Inverted 5<br>and 6 blades | 倒 7 和倒 8 叶片<br>Inverted 7<br>and 8 blades |
|-----------------|------------|-----------|---|---|---|---|
| N <sub>0</sub>  | 4.03±0.13  | 0.20±0.06 | 0.68±0.11                                 | 1.50±0.09                                 | 0.65±0.12                                 | 0.83±0.16                                 |
| N <sub>1</sub>  | 5.49±0.25  | 0.63±0.26 | 3.55±0.26                                 | 2.86±0.11                                 | 5.00±0.16                                 | 6.23±0.33                                 |
| N <sub>2</sub>  | 19.74±0.21 | 0.52±0.17 | 11.41±0.18                                | 9.25±0.22                                 | 7.95±0.28                                 | 10.93±0.25                                |
| N <sub>3</sub>  | 22.16±0.19 | 1.50±0.32 | 11.31±0.19                                | 11.91±0.42                                | 10.06±0.36                                | 11.77±0.32                                |
| N <sub>4</sub>  | 19.27±0.23 | 2.34±0.22 | 11.72±0.13                                | 11.04±0.48                                | 16.15±0.08                                | 10.37±0.24                                |

2.3 不同氮肥施用量对成熟期高粱生长、生物量和蜀黍氰苷积累的影响 测定各处理下成熟期高粱生长参数和生物量,

结果见表 6,除去枯萎叶片,高粱各部位蜀黍氰苷含量见表 7。

表 6 成熟期高粱生长和生物量

Table 6 Growth and biomass of sorghum at mature stage

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height<br>cm | 单株叶片数<br>Number of leaves<br>per plant | 茎粗<br>Stem diameter<br>cm | 单株鲜质量<br>Fresh weight<br>per plant//g | 单株干质量<br>Dry weight<br>per plant//g |
|-----------------|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| N <sub>0</sub>  | 160±2                    | 10±1                                   | 1.73±0.33                 | 303±2                                 | 182±3                               |
| N <sub>1</sub>  | 162±1                    | 9±1                                    | 2.05±0.26                 | 312±3                                 | 189±3                               |
| N <sub>2</sub>  | 163±3                    | 9±1                                    | 2.23±0.36                 | 350±2                                 | 200±5                               |
| N <sub>3</sub>  | 159±2                    | 10±1                                   | 1.90±0.09                 | 353±4                                 | 203±2                               |
| N <sub>4</sub>  | 161±1                    | 10±1                                   | 2.15±1.56                 | 352±3                                 | 205±3                               |

表 7 成熟期高粱各部位蜀黍氰苷含量

Table 7 Content of cyanoside in different parts of sorghum at mature stage

单位:g/kg

| 处理<br>Treatment | 根<br>Root  | 倒 1 和<br>倒 2 叶片<br>Inverted 1<br>and 2 blades | 倒 3 和<br>倒 4 叶片<br>Inverted 3<br>and 4 blades | 倒 5 和<br>倒 6 叶片<br>Inverted 5<br>and 6 blades |
|-----------------|------------|---|---|---|
| N <sub>0</sub>  | 3.69±0.33  | 0.74±0.19                                     | 2.41±0.23                                     | 3.04±0.28                                     |
| N <sub>1</sub>  | 7.74±0.42  | 0.26±0.11                                     | 2.84±0.32                                     | 5.69±0.36                                     |
| N <sub>2</sub>  | 15.03±0.36 | 1.57±0.25                                     | 5.43±0.30                                     | 7.21±0.22                                     |
| N <sub>3</sub>  | 18.50±0.54 | 1.43±0.29                                     | 2.37±0.27                                     | 6.86±0.42                                     |
| N <sub>4</sub>  | 16.23±0.29 | 0.74±0.34                                     | 2.41±0.30                                     | 3.04±0.53                                     |

从表 6 可以看出,成熟期的高粱氮肥对株高、单株叶片数的影响无明显规律,但其中茎粗、单株鲜质量、单株干质量受到施氮量的影响明显。成熟期 N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 施氮量的植株长势明显优于 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>,且相比之下,未施氮的植株 N<sub>0</sub> 明显长势不好。表明对于植株性状而言,最适合的施氮量为 N<sub>2</sub>。

从表 7 可以看出,不同施氮量显著影响了成熟期叶片和根部的蜀黍氰苷含量;对于单株叶片而言,随施氮量的增加,新长出的顶端叶片蜀黍氰苷含量最低,在生长过程中,蜀黍氰苷含量不断积累,植株本身不能消化蜀黍氰苷。对于不同施氮量而言,N<sub>0</sub>~N<sub>2</sub> 植株各部位蜀黍氰苷含量升高;N<sub>2</sub>~N<sub>4</sub> 植株各部位蜀黍氰苷含量降低,其中 N<sub>2</sub> 施氮水平下,植株各部位的蜀黍氰苷含量最高。

### 3 讨论

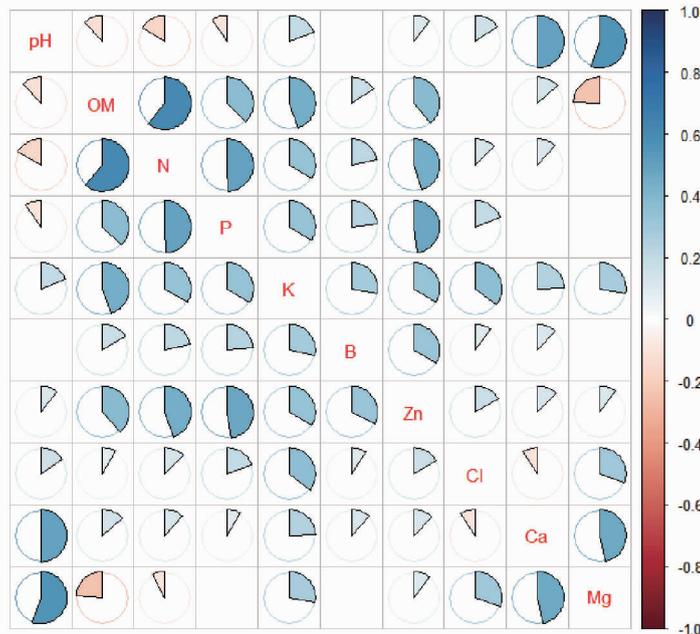
该研究通过设置 5 个施氮梯度,对施氮量对辽糯 11 号品种高粱生长性状和蜀黍氰苷含量的影响进行研究。不同施氮量下,高粱的株高、茎粗、叶片数、单株鲜质量和干质量的差异显著。该研究结果表明,施氮显著提高了高粱各部位

的生长发育,但过低的施氮量会导致植株的氮素不足,限制植株的生长,过高的施氮量也会抑制植株的生长发育,导致植株不能到达最好的生长条件,其中 N<sub>2</sub> 生长状态最好。对于植株蜀黍氰苷含量,拔节期施氮对其几乎没有影响;而在抽穗期,由于植株处于生长阶段,施氮水平刺激植株生长水平产生差异,而施氮量越多,生长发育最快,蜀黍氰苷积累最快,所以各部位随着施氮量的增加而增加;在成熟期,施氮量在 N<sub>0</sub>~N<sub>2</sub>,植株生长水平随着施氮量增加而增加,在 N<sub>2</sub>~N<sub>4</sub>,生长水平基本不变;在成熟期,蜀黍氰苷在 N<sub>0</sub>~N<sub>2</sub> 施氮水平逐渐增加,在 N<sub>2</sub>~N<sub>4</sub> 逐渐降低,表明高施氮量有助于抑制植株蜀黍氰苷的积累。针对高粱用于饲料的生产,不考虑籽粒的产出,可以适当采用高施氮量。

### 参考文献

- [1] ZAGROBELNY M, BAK S, RASMUSSEN A V, et al. Cyanogenic glucosides and plant-insect interactions[J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(3): 293-306.
- [2] 张丹, 王楠, 李超, 等. 甜高粱——一种优质的饲料作物[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(5): 2-8.
- [3] 段桂荣, 南建福. 高粱的干物质生产及其需水规律的研究[J]. *山西农业大学学报*, 1988, 8(2): 156-161.
- [4] 倪玉琼, 张强, 曹方强, 等. 不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 95-99, 105.
- [5] BELAND F A, BENSON R W, MELLICK P W, et al. Effect of ethanol on the tumorigenicity of urethane (ethyl carbamate) in B6C3F<sub>1</sub> mice[J]. *Food and chemical toxicology*, 2005, 43(1): 1-19.
- [6] DELLEDONNE D, RIVETTI F, ROMANO U. Developments in the production and application of dimethylcarbonate[J]. *Applied catalysis A: General*, 2001, 221(1/2): 241-251.
- [7] WANG D P, YANG B L, ZHAI X W, et al. Synthesis of diethyl carbonate by catalytic alcoholysis of urea[J]. *Fuel processing technology*, 2007, 88(8): 807-812.
- [8] REZAUL H M, HOWARD B J. Total cyanide determination of plants and foods using the picrate and acid hydrolysis methods[J]. *Food chemistry*, 2002, 77(1): 107-114.

(下转第 161 页)



注:上半部分为满足  $P < 0.01$  的相关系数,下半部分为满足  $P < 0.05$  的相关系数,圆饼内填充颜色区域大小代表相关系数。

Note: The upper part is the correlation coefficient that satisfies  $P < 0.01$ , and the lower half is the correlation coefficient that satisfies  $P < 0.05$ . The size of the filled color area in the pie represents the correlation coefficient.

图 5 相关系数

Fig.5 Correlation coefficient

源污染,同时节约肥料投入。

#### 参考文献

- [1] 玉溪市人民政府烟草产业办公室,玉溪市土壤肥料工作站,玉溪市烟草专卖局.玉溪烤烟土壤管理与施肥[M].昆明:云南科技出版社,2008.
- [2] 艾华林,李明,台希,等.玉溪烤烟生产中镁元素的状况分析[J].玉溪师范学院学报,2009,25(4):30-32.
- [3] 潘金华,王美艳,史学正,等.玉溪烟区土壤钾镁交互作用对烤烟化学及感官品质的影响[J].土壤,2022,54(3):490-497.
- [4] 王树林,向盼来,高攀,等.玉溪烤烟单叶重现状分析与烟叶质量提升对策[J].农业与技术,2022,42(5):39-41.
- [5] 杨继周,谢新乔,朱安琪,等.玉溪烤烟气候适宜性分析的方法研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(5):832-840.
- [6] 朱安琪.生态因子对玉溪地区烤烟品质影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.

- [7] 云南省烟草科学研究所,云南省土壤肥料测试中心.云南烟草中微肥营养与土壤管理[M].昆明:云南科技出版社,1995.
- [8] 陈检锋,陈华,尹梅,等.玉溪烤烟适产养分临界值施肥体系研究[J].中国农学通报,2020,36(11):43-48.
- [9] 自由路,金继运,杨俐苹.我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J].土壤肥料,2004(2):3-5.
- [10] 付亚丽,李宏光,付国润,等.红河植烟土壤中微量元素含量分析[J].云南农业大学学报(自然科学),2012,27(1):73-79.
- [11] 于建军,叶贤文,董高峰,等.土壤与烤烟中微量元素含量的相关性[J].生态学杂志,2010,29(6):1127-1134.
- [12] LI Z Y,TAO H,ZHAO D,et al.Three-dimensional empirical Bayesian kriging for soil PAHs interpolation considering the vertical soil lithology[J].CATENA,2022,212:1-9.
- [13] WEI T,SIMKO V.R package "corrplot": Visualization of a correlation matrix[Z].2021.
- [14] HARRELL F E,JR.Hmisc:Harrell miscellaneous[Z].2022.

(上接第 152 页)

- [9] EL-ESSAWI T M,MASHALI S A.Effect of balanced manuring on Sorghum growth and increasing utilization of nutrients [J].Egyptian journal of soil science,1995,35(3):253-264.
- [10] 梁涛.基于土壤基础地力的施肥推荐研究:以重庆水稻和玉米为例[D].重庆:西南大学,2017.
- [11] 钱晓刚,陆引罡,魏成熙,等.贵州酒用高粱对氮磷钾养分的吸收规律[J].土壤通报,1997,28(1):31-33.
- [12] 吴家梅,霍莲杰,纪雄辉,等.不同施肥处理对土壤活性有机碳和甲烷排放的影响[J].生态学报,2017,37(18):6167-6175.
- [13] 熊丽娜,陆柏益.农产品中壬糖苷安全性及减控技术研究进展[J].中国食品学报,2014,14(2):208-216.
- [14] 苏富源,郝明德,张晓娟,等.施肥对甜高粱产量、养分吸收及品质的影响[J].西北农业学报,2016,25(3):396-405.
- [15] 王劲松,董二伟,武爱莲,等.灌溉时期与施氮量对矮秆高粱产量和品质的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(S2):1-8.
- [16] 张桂香,史红梅,张海燕.高粱主要品质性状的基因型与环境及互作效应分析[J].中国农学通报,2010,26(5):68-71.
- [17] EBBS S D,KOSMA D K,NIELSON E H,et al.Nitrogen supply and cyanide concentration influence the enrichment of nitrogen from cyanide in

- wheat (*Triticum aestivum* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L.) [J]. Plant, cell & environment,2010,33(7):1152-1160.
- [18] ZHANG X,DAVIDSON E A,MAUZERALL D L,et al.Managing nitrogen for sustainable development[J].Nature,2015,528(7580):51-59.
- [19] SHARMA BTMOLDEN D,COOK S,et al.Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends [R].IWMI Books Reports, 2015:39-64.
- [20] 刘鹏,武爱莲,王劲松,等.不同基因型高粱的氮效率及对低氮胁迫的生理响应[J].中国农业科学,2018,51(16):3074-3083.
- [21] MILLER R E,STEWART M,CAPON R J,et al.A galloylated cyanogenic glycoside from the Australian endemic rainforest tree *Elaeocarpan sericeoptalus* (Elaeocarpaceae) [J].Phytochemistry,2006,67(13):1365-1371.
- [22] 王劲松,董二伟,武爱莲,等.不同肥力条件下施肥对粒用高粱产量、品质及养分吸收利用的影响[J].中国农业科学,2019,52(22):4166-4176.
- [23] 高丽敏,田倩,苏晶,等.施氮水平对甜高粱干物质产量及氮肥利用率的影响[J].草业学报,2020,29(4):192-198.
- [24] 孔建国,张晓娟.氮肥不同用量对甜高粱生长及产量的影响[J].农业科学研究,2015,36(4):37-40.
- [25] 渠晖,程亮,陈俊峰,等.施氮水平对甜高粱主要农艺性状及其与干物质产量相关关系的影响[J].草业学报,2016,25(6):13-25.