

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200976

袁娅娟, 白小明, 朱雅楠, 张毓婧, 闫玉邦, 张才忠, 李玉杰. 甘肃野生草地早熟禾根茎扩展能力与内源激素含量的相关性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1359–1369

YUAN Y J, BAI X M, ZHU Y N, ZHANG Y J, YAN Y B, ZHANG C Z, LI Y J. Correlation between the rhizome expansion ability and endogenous hormones contents of wild *Poa pratensis* in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1359–1369

甘肃野生草地早熟禾根茎扩展能力与内源 激素含量的相关性研究*

袁娅娟, 白小明**, 朱雅楠, 张毓婧, 闫玉邦, 张才忠, 李玉杰

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中美草地畜牧业可持续发展
研究中心 兰州 730070)

摘 要: 草地早熟禾(*Poa pratensis*)是典型的根茎型禾草, 根茎作为其营养物质储藏和营养繁殖的重要器官, 在提高植株地表侵占能力及地下固土能力方面具有重要作用。根茎的发生和发育与内源激素密切相关, 本试验以采自甘肃境内9个不同生态型的野生草地早熟禾为试验材料, 以‘午夜II’草地早熟禾为对照, 分析根茎扩展能力与内源激素含量间的相关性, 以期揭示草地早熟禾根茎扩展的激素调控机理, 为草地早熟禾新品种选育和草坪养护管理提供理论和实践依据。结果表明: 1)不同生态型野生草地早熟禾根茎扩展能力存在显著差异, 榆中草地早熟禾的分蘖数、根茎数、地上生物量和茎节长最大; 西和草地早熟禾的覆盖面积、最长根茎和根茎生物量表现最优, 供试不同生态型草地早熟禾材料根茎综合扩展能力由强到弱依次为榆中>西和>‘午夜II’>渭源>灵台>清水>肃南>秦州>夏河>安定。2)内源激素在草地早熟禾根茎和茎基的分布存在差异, GA₃、IAA 和 ABA 含量均为根茎>茎基, ZT 含量为茎基>根茎, 且两个部位 GA₃ 含量均高于其余激素。3)相关性分析显示, 草地早熟禾根茎扩展能力与 ZT 含量、茎基 ZT/ABA 和 IAA/ABA 极显著正相关($P<0.01$), 与根茎 GA₃/IAA 显著负相关($P<0.05$), 与 IAA、GA₃ 和 ABA 含量相关性不显著($P>0.05$)。综上, 榆中草地早熟禾根茎扩展性最强, 且优于‘午夜II’草地早熟禾(对照), 可作为扩展能力强草地早熟禾新品种选育的优良材料; ZT 含量和 IAA/ABA 与 ZT/ABA 的比值越高, GA₃/IAA 比值越低, 越有利于草地早熟禾根茎扩展。

关键词: 草地早熟禾; 生态型; 根茎; 扩展能力; 内源激素

中图分类号: S688.4

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Correlation between the rhizome expansion ability and endogenous hormones contents of wild *Poa pratensis* in Gansu Province*

YUAN Yajuan, BAI Xiaoming**, ZHU Yanan, ZHANG Yujing, YAN Yubang, ZHANG Caizhong, LI Yujie

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education / Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province / Sino-U.S. Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

* 国家自然科学基金项目(31560667)和甘肃省林草局草原生态修复治理科技支撑项目(GSLC-2020-3)资助

** 通信作者: 白小明, 主要从事草坪科学研究。E-mail: baixm@gsau.edu.cn

袁娅娟, 主要研究方向为草地生物多样性。E-mail: 1239412646@qq.com

收稿日期: 2020-12-09 接受日期: 2021-03-15

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31560667) and the Science and Technology Support Project of Grassland Ecological Restoration and Management of Gansu Forestry and Grass Bureau (GSLC-2020-3).

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

Received Dec. 9, 2020; accepted Mar. 15, 2021

Abstract: *Poa pratensis* is a typical rhizome grass, of which rhizome is an important organ for nutrient storage and vegetative reproduction that plays an important role in improving plant surface invasion and underground soil consolidation. The occurrence and development of rhizomes are closely related to endogenous hormones. This study investigated the hormone regulation mechanism of rhizome expansion by examining the correlation between the rhizome expansion ability and endogenous hormones contents in nine ecotypes of wild *P. pratensis* from different areas of Gansu Province and ‘Midnight II’ *P. pratensis* (the control). The purpose of this study was to provide a theoretical and practical basis for new variety breeding and lawn maintenance and management of *P. pratensis*. The results indicated that: 1) there were differences in the rhizome expansion ability among the wild *P. pratensis* ecotypes. *P. pratensis* from Yuzhong had the largest tiller number, rhizome number, aboveground biomass, and stem node length, whereas *P. pratensis* from Xihe had the largest coverage area, longest rhizome, and highest rhizome biomass. The rhizome expansion ability of *P. pratensis* from strong to weak was *P. pratensis* from Yuzhong > from Xihe > from ‘Midnight II’ > from Weiyuan > from Lingtai > from Qingshui > from Sunan > from Qinzhou > from Xiahe > from Anding. 2) The distribution of endogenous hormones in the rhizome and stem base of *P. pratensis* was significantly different; the gibberellic acid (GA₃), indole-3-acetic acid (IAA), and abscisic acid (ABA) contents were rhizome > stem base; the zeatin (ZT) content was stem base > rhizome; and the GA₃ content in the two parts was significantly higher than that of the other hormones. 3) Correlation analysis showed that the rhizome expansion ability of *P. pratensis* was positively correlated with the ZT content, stem base ZT/ABA, and IAA/ABA ($P < 0.05$) but negatively correlated with rhizome GA₃/IAA ($P < 0.05$). However, there were no correlations between the IAA, GA₃, and ABA contents. In summary, *P. pratensis* from Yuzhong, which has better rhizome expansion ability than ‘Midnight II’, is good for variety breeding; the higher ZT content and ratio of IAA/ABA to ZT/ABA and the lower GA₃/IAA ratio are beneficial to the rhizome expansion.

Keywords: *Poa pratensis*; Ecological type; Rhizome; Expansion ability; Endogenous hormones

草地早熟禾(*Poa pratensis*)是广泛应用于北方地区草坪建植的多年生草坪草,具有发达的根系,适宜在气候冷凉、湿度较大的地区生长^[1]。在自然演化过程中,为了适应周围环境的变化,它形成了有性繁殖能力弱、无性繁殖能力强,以地下茎生长为主的特点^[2]。根状茎,亦称根茎,是一种由茎顶端分生组织发育而来但生长在地下环境中的植物器官,是植物与土壤间进行物质交换和信息交流的重要桥梁,在能量储存、运输和营养繁殖方面具有重要功能,它的发育直接影响植物的生长状况^[3-4]。草地早熟禾的根茎扩展性是指因其有根茎而产生分蘖和再生的能力。根茎的每一个节都可以生出芽,每个芽都有发育出一条根茎或一个分蘖株的潜在能力,通过不断产生新的根茎芽和分蘖来维持其营养繁殖^[5]。大量分蘖枝和根茎的产生有利于扩大植株覆盖面积,增强侵占能力,有效抑制杂草危害。因此,具有根茎的植物能够快速建立起获取水分和养分的竞争力,在长期胁迫中能够持久存在^[6-7]。

植物个体发育中,不论是种子发芽,还是营养生长和繁殖器官形成,以及整个成熟过程,都有激素参与^[8]。迄今为止,已经分离鉴定的植物内源激素有生长素(auxin, IAA)、细胞分裂素(cytokinin, CTK; 玉米素, zeatin, ZT)、赤霉素(ent-gibberellane, GAs)、脱落酸(abscisic acid, ABA)、乙烯(ethylene, ETH)、茉莉酸(jasmonic acid, JA)、独脚金内酯(strigolactone, SL)、油菜素甾醇(brassinosteroid, BR)和水杨酸

(salicylic acid, SA)等 9 种。Yin 等^[9]认为,生长素是茎伸长生长所必需的,生长素亏缺会导致茎伸长受阻。Yoshiaki 等^[10]发现,生长素的合成与水稻(*Oryza sativa*)根冠的形成有重要的关系,且外源施加生长素也可以增加根冠数目。细胞分裂素不仅能够促进细胞的分裂,还能打破休眠,促进种子萌发,延缓叶片衰老,促进侧芽分化、消除顶端优势等。Ferguson 等^[11]研究证实,细胞分裂素不足是导致侧芽不生长的主要原因。赤霉素是一类二萜类化合物,可以促进植物种子萌发和根茎伸长^[12];脱落酸最显著的作用是引起芽休眠、叶子脱落和调控植物对生物与非生物胁迫的应答反应,如盐胁迫、重金属胁迫、低温胁迫和干旱胁迫^[13-15]。越来越多研究证明,植物根茎分蘖的发生和发育与内源激素之间有着紧密的联系。

近年来,对小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、水稻等经济作物分蘖、籽粒灌浆地上器官生长发育与激素相关的报道较多^[16-17]。草地早熟禾的研究主要集中在种子萌发、逆境应答和草坪质量评价等方面^[18-20],有关根茎扩展与其内源激素关系的研究鲜有报道。因此,本试验以采自甘肃境内的野生草地早熟禾为材料,通过对根茎扩展指标与内源激素含量的测定、比较和分析,探讨不同草地早熟禾材料根茎扩展能力的差异以及与内源激素的内在关系,以期揭示草地早熟禾根茎扩展的激素调控机理,为草地早熟禾新品种选育提供优良种质,为草地早熟

禾草坪的养护管理提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地点

试验材料共 10 个, 其中商用品种‘午夜 II’草地早熟禾(对照)由甘肃百绿草业公司提供, 该品种根茎发达, 分蘖能力和抗逆性强, 绿期长; 其余 9 个采自甘肃不同地区, 材料名称及来源如表 1 所示。

试验在甘肃省兰州市甘肃农业大学草坪实训基地(36°5'N, 103°34'E)进行。试验地年平均气温 10.3 °C, 年均降水量 350 mm, 年蒸发量 1664 mm。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验采用单株盆栽, 花盆直径 35 cm、深度 25 cm, 基质由农田土: 沙: 营养土按 8: 1: 1 比例

混合, pH 7.25, 有机质含量 25.3 g·kg⁻¹, 土壤含盐量 1.6 g·kg⁻¹, 速效氮含量 35.72 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 155.68 mg·kg⁻¹, 速效磷含量 42.67 mg·kg⁻¹。施磷酸二铵 40 g·m⁻², 每盆装混合基质 12.5 kg。

2019 年 7 月播种, 每盆播种约 50 粒种子。出苗 2 周后第 1 次间苗, 3 周第 2 次间苗, 5 周后选取生长健壮、均匀一致、无病虫害的幼苗 1 株定苗。试验期间保证充足的水分, 每月施尿素 1 次, 施用量为 5 g·m⁻²。每个材料 8 盆, 4 盆用于根茎扩展指标测定, 4 盆用于内源激素含量的测定, 即各 4 个重复, 共 80 盆, 花盆采用随机排列方式。2019 年 11 月, 各材料取 4 株测定根茎扩展指标; 4 株将整株冲洗干净后根茎和茎基(取距茎和根系连接处 1 cm 样段)分别取样、称重, 用锡纸包裹, 液氮迅速冷冻后置于-80 °C 超低温冰箱冷冻保存, 供内源激素含量的测定。

表 1 供试的 10 个草地早熟禾材料
Table 1 Information of 10 tested materials of *Poa pratensis*

材料名称 Material name	编号 Code	采集地 Collection site						生境 Habitat
		地点 Location	海拔 Altitude (m)	经度 Longitude	纬度 Latitude	年均降水量 Average annual precipitation (mm)	年均温 Average annual temperature (°C)	
野生草地早熟禾 <i>Wild Poa pratensis</i>	PLLT	甘肃省灵台县 Lingtai, Gansu	1227	107°62'E	35°07'N	586.3	9.4	渠边 Canal side
	TSQS	甘肃省清水县 Qingshui, Gansu	1501	106°12'E	34°7'3N	564.5	9.3	河谷 Valley
	TSQZ	甘肃省秦州区 Qinzhou, Gansu	1723	104°35'E	34°05'N	531	10.72	河谷 Valley
	LNXH	甘肃省西和县 Xihe, Gansu	1250	105°30'E	34°02'N	533	8.4	山坡 Hill side
	DXAD	甘肃省安定区 Anding, Gansu	2035	104°62'E	35°58'N	377	7.2	山坡 Hill side
	DXWY	甘肃省渭源县 Weiyuan, Gansu	2401	104°05'E	35°02'N	500	6.8	路边 Roadside
	LZYZ	甘肃省榆中县 Yuzhong, Gansu	1965	104°04'E	35°48'N	400	6.6	沟底 Ditch
	GNXH	甘肃省夏河县 Xiahe, Gansu	3140	102°60'E	34°80'N	516	2.6	高寒草甸 Alpine meadow
	ZYSN	甘肃省肃南县 Sunan, Gansu	2950	99°52'E	38°48'N	257.21	4.2	高山草原 Alpine grasslands
商用‘午夜 II’ Marketed ‘Midnight II’	WY(CK)							

1.2.2 扩展性测定指标与方法

1) 覆盖面积: 制作 1 个 1 m×1 m、中心按花盆口内径大小掏空的 PVC 白板, 平置于花盆边缘之上, 使供试材料地上茎叶处于白板平面。在同一高度垂直拍摄包含全部白板在内的单株照片, 统计叶片覆盖区域占整个图片像素比, 按照比例计算单株覆盖面积, 用 cm²·株⁻¹ 表示。

2) 分蘖数: 测定草地早熟禾地面枝条的数量, 用 蘖·株⁻¹ 表示。

3) 根茎数: 测定草地早熟禾地下根茎数, 用 个·株⁻¹ 表示。

4) 茎节长: 每株随机挑选 10 个一级根茎, 用游标卡尺测定根茎顶端第一节长度, 计算其平均茎节长度, 用 cm·节⁻¹ 表示。

5)最长根茎: 每株找出最长的一级根茎, 用游标卡尺测定其长度, 用 cm 表示。

6)地上和根茎生物量: 采用烘干称重法, 将地上与地下根茎分开, 洗净, 置于 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 电子天平称其干重, 用 g·株⁻¹ 表示。

1.2.3 植物内源激素的提取与测定

提取液的制备参考周艳明等^[21]、王杏等^[22]和杨途熙等^[23]的方法, 并稍作改动。取样品 2 g 加液氮迅速研磨成粉末状, 加入 20 mL 80%的冷甲醇(试验前 4 °C 冰箱中保存), 置于 4 °C 冰箱(DW-86L388J, 青岛)浸提 16 h; 冷冻(4 °C) 10 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 离心过滤后滤渣再次加入 10 mL 80%甲醇, 超声波 30 min 后离心 5 min, 反复操作 3 次后合并上清液。全部上清液于 40 °C 真空浓缩仪(RVC 2-25 CDplus, 德国)中浓缩至原体积(25~30 mL)的 1/3, 加入等体积沸程为 60~90 的石油醚萃取脱色, 摇床振荡 10 min 后离心, 弃去醚相(上层), 反复操作两次后将下层液体继续 40 °C 下减压蒸发浓缩至水溶液, 在此水溶液中含有植物激素。水溶液加入相同体积的乙酸乙酯萃取 2~3 次, 合并上层乙酸乙酯相, 植物激素存在于乙酸乙酯溶液中。上层液在浓缩仪上减压浓缩至干, 用 80%甲醇溶解残渣并定容至 2 mL, 4 °C 避光保存。经 0.22 μm 有机滤膜过滤, 用四元梯度超快速液相色谱仪(ACQUITY Arc, 美国)测定草地早熟禾根茎和茎基中 ZT、GA₃、IAA 和 ABA 含量, 进行高效液相色谱分析(high performance liquid chromatography, HPLC)。

1.2.4 色谱条件及流动相选择

色谱柱: Waters Symmetry® C-18(4.6×250 mm, 5 μm); 柱温: 30 °C; 进样量: 5 μL; 检测波长:

254 nm; 流速: 1.0 mL·min⁻¹; 定量方法: 外标峰面积法。流动相 A: 甲醇; 流动相 B: 0.1%磷酸。程序共运行 14 min; 梯度洗脱时间如表 2 所示。

表 2 激素 HPLC 分析流动相梯度组成

Table 2 Analysis of gradient composition of mobile phase by hormone HPLC

时间 Time (min)	流动相 A Flow phase A (%)	流动相 B Flow phase B (%)
0.00	10.0	90.0
1.00	45.0	55.0
3.00	55.0	45.0
5.00	65.0	35.0
8.00	75.0	25.0
12.00	10.0	90.0
14.00	10.0	90.0

1.2.5 激素标准曲线的制作

采用外标法定量, 准确称取标准品 ZT 0.0013 g、GA₃ 0.0207 g、IAA 0.0012 g 和 ABA 0.0010 g, 用色谱纯甲醇定容至 5 mL, 配制成浓度分别为 260 μg·mL⁻¹、4140 μg·mL⁻¹、240 μg·mL⁻¹ 和 200 μg·mL⁻¹ 的标准储备液, 使用时稀释成系列浓度, 单标定性, 混标定量(由于 GA₃ 在 254 nm 处响应值低, 经多次测定后将其在标液中的含量增加为其他激素的 20 倍)。将系列浓度标准品在上述色谱条件下依次进样, 以浓度(X)为横坐标, 峰面积(Y)为纵坐标, 计算得各个内源激素线性回归方程和相关系数(表 3)。

1.3 统计分析

用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和绘制图表, SPSS 26.0 (IBM, Armonk, NY, USA)进行单因素方差分析(ANOVA)和相关性分析(Pearson), 试验结果表示为平均值±标准差。

表 3 4 种激素的出峰时间及线性方程

Table 3 Peak times and linear equations of four hormones

激素 Hormone	出峰时间 Peak time (min)	回归方程 Regression equation	R ²
玉米素 ZT	4.280	$Y=1.66 \times 10^4 X - 1.98 \times 10^3$	0.999 943
赤霉素 GA ₃	6.030	$Y=4.36 \times 10 X + 1.34 \times 10^3$	0.999 464
生长素 IAA	7.987	$Y=4.58 \times 10^3 X - 2.94 \times 10^2$	0.999 965
脱落酸 ABA	8.794	$Y=2.60 \times 10^4 X - 2.70 \times 10^3$	0.999 934

1.4 数据处理

应用模糊隶属函数法对草地早熟禾扩展能力进行评价^[24], 隶属函数值计算公式为:

$$U_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (1)$$

式中: U_{ij} 表示 i 材料 j 指标的隶属函数值, X_{ij} 表示 i

材料 j 指标的测定值, $X_{j\min}$ 表示所有材料 j 指标的最小值, $X_{j\max}$ 表示所有材料 j 指标的最大值, i 表示某个材料, j 表示某项指标。

根据上述公式先计算出各材料覆盖面积、分蘖数、根茎数、生物量等扩展指标的隶属函数值, 然后取算术平均数作为该材料的平均隶属度, 最后进

行排序。

2 结果与分析

2.1 供试草地早熟禾材料根茎扩展性

2.1.1 草地早熟禾根茎扩展性比较

由表 4 可见, 参试草地早熟禾的覆盖面积、分蘖数、地上生物量、根茎数、茎节长、最长根茎和根茎生物量各材料之间存在差异, LZYZ 根茎扩展性表现突出, 其分蘖数($325 \text{ 蘖} \cdot \text{株}^{-1}$)、地上生物量($11.73 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$)、根茎数($76 \text{ 个} \cdot \text{株}^{-1}$)和茎节长($2.78 \text{ cm} \cdot \text{节}^{-1}$)最大, 分别是 CK 的 1.54 倍、1.57 倍、

1.42 倍和 1.27 倍, 且除地上生物量、茎节长和根茎生物量与 LNXH 差异不显著外, 地上生物量、分蘖数、根茎数、茎节长和根茎生物量均显著大于其他材料($P<0.05$); LNXH 覆盖面积($662.89 \text{ cm}^2 \cdot \text{株}^{-1}$)、最长根茎(17.17 cm)和根茎生物量($1.70 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$) 3 个性状表现最优, 分别是 CK 的 1.98 倍、1.21 倍和 1.18 倍, 且覆盖面积显著大于其他材料($P<0.05$), 最长根茎和根茎生物量显著大于除 LZYZ 以外的其他材料($P<0.05$)。

2.1.2 草地早熟禾根茎扩展性综合评价

根据公式(1)求得各个材料各指标的隶属函数值, 计算平均隶属度并进行排序(表 5)。平均隶属度越高,

表 4 供试草地早熟禾材料根茎扩展性指标比较

Table 4 Comparison of different indexes of rhizome expansion of different materials of *Poa pratensis*

材料 Material	覆盖面积 Coverage area ($\text{cm}^2 \cdot \text{plant}^{-1}$)	分蘖数 Tillers number	地上生物量 Aboveground biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	根茎数 Number of rhizomes	茎节长 Stem internode length (cm)	最长根茎 Longest rhizome (cm)	根茎生物量 Rhizomes biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)
PLLT	467.48±2.10c	157.50±3.50d	8.08±0.91b	18.50±0.50d	1.42±0.25cd	9.20±0.30def	0.40±0.04d
TSQS	444.85±4.73d	116.50±5.50e	7.22±1.45bc	19.00±1.00d	1.69±0.34c	8.70±0.68ef	0.49±0.03d
TSQZ	306.50±5.85g	80.00±9.00f	4.91±1.36cd	12.00±2.65e	1.65±0.12c	13.07±1.46bc	0.26±0.03e
LNXH	662.89±4.44a	173.33±5.03c	11.36±0.73a	60.50±0.50b	2.43±0.19ab	17.17±1.19a	1.70±0.11a
DXAD	281.90±3.77h	92.50±4.50f	4.54±2.44de	12.50±3.50e	1.03±0.39d	9.47±0.65def	0.20±0.03e
DXWY	323.61±5.51f	213.67±6.81b	6.97±1.52bcd	71.50±6.50a	1.66±0.25c	11.03±0.92cde	0.69±0.03c
LZYZ	547.05±4.39b	325.00±15.00a	11.73±1.79a	76.00±3.61a	2.78±0.35a	16.53±1.55a	1.66±0.02a
GNXH	123.17±5.64j	82.50±2.50f	2.18±0.06e	16.00±1.00de	1.37±0.08cd	8.33±1.04f	0.25±0.05e
ZYSN	265.26±5.53i	164.50±8.50cd	4.34±1.83de	17.00±1.00de	1.57±0.44c	11.20±2.08cd	0.16±0.04e
CK	334.55±3.62e	211.00±4.00b	7.46±0.90bc	53.50±2.50c	2.19±0.07b	14.17±1.59b	1.44±0.16b

材料名称详见表 1。同列不同小写字母表示同一指标不同材料间差异显著($P<0.05$)。The names of material are shown in the table 1. Different lowercase letters in the same column indicate that there are significant differences at $P<0.05$ level in the same index among different materials.

表 5 供试草地早熟禾材料根茎扩展性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of expansion ability of different materials of *Poa pratensis*

材料 Material	隶属函数值 Value of subordinate function (SF)							平均隶属度 Average SF	排序 Order
	覆盖面积 Coverage area	分蘖数 Tiller number	地上生物量 Aboveground biomass	根茎数 Number of rhizomes	茎节长 Stem inter- node length	最长根茎 Longest rhizome	根茎生物量 Rhizomes biomass		
PLLT	0.6379	0.3163	0.6171	0.1016	0.2237	0.0981	0.4456	0.3607	5
TSQS	0.5960	0.1490	0.5271	0.1094	0.3748	0.0453	0.4203	0.3303	6
TSQZ	0.3397	0.0000	0.2852	0.0000	0.3537	0.5359	0.0294	0.1967	8
LNXH	1.0000	0.3809	0.9609	0.7578	0.8030	1.0000	0.5434	0.7487	2
DXAD	0.0000	0.0102	0.0000	0.0625	0.1931	0.0000	0.0000	0.0332	10
DXWY	0.3714	0.5456	0.5012	0.9297	0.3576	0.3057	0.2788	0.4461	4
LZYZ	0.7854	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9283	1.0000	0.9642	1
GNXH	0.2941	0.0510	0.2471	0.0078	0.0000	0.1283	0.0272	0.0978	9
ZYSN	0.2633	0.3449	0.2262	0.0781	0.3078	0.3245	0.0236	0.1990	7
CK	0.3916	0.5347	0.5529	0.6484	0.6635	0.6604	0.2821	0.5020	3

材料名称详见表 1。The names of material are shown in the table 1.

根茎扩展性越强。表 5 显示, 10 个草地早熟禾材料的平均隶属度从高到低依次为: LZYZ>LNXH>CK>DXWY>PLLT>TSQS>ZYSN>TSQZ>GNXH>DXAD。LZYZ 和 LNXH 的平均隶属度分别为 0.9642 和 0.7487, 根茎扩展性强, 且优于 CK; 而 TSQZ、GNXH 和 DXAD 3 个材料的平均隶属度均小于 0.3, 根茎扩展能力差。

2.2 供试草地早熟禾材料根茎和茎基内源激素含量

2.2.1 玉米素(ZT)含量

由图 1A 可知, 供试草地早熟禾材料茎基的 ZT 含量均高于根茎。两个部位中, 扩展能力不同的几个野生材料以 LZYZ 的 ZT 含量最高, 分别为 $221.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $258.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; DXAD 含量最低, 为 $66.40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $73.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 两个材料分别是 CK 的 1.63 倍、1.46 倍和 48.83%、41.38%。草地早熟禾的 ZT 含量高低与根茎扩展排序趋势相近, 表明根茎和茎基中高的 ZT 含量可能是促进根茎扩展能力的主要因素。

2.2.2 赤霉素(GA₃)含量

GA₃ 在 4 种内源激素中含量最高, 除 TSQZ 和 LZYZ 外, 其余材料均为根茎含量高于茎基(图 1B)。根茎中, GNXH 的 GA₃ 含量显著高于其他材料 ($P<0.05$), 为 $87.97 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; DXWY 含量最低, 为 $18.89 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 分别是 CK 的 2.82 倍和 60.62%。茎基中, GNXH 的 GA₃ 含量显著高于其他材料 ($P<0.05$), 为 $48.90 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; TSQS 的 GA₃ 含量显著低于除 DXWY 以外的其他材料 ($P<0.05$), 为 $10.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 分别是 CK 的 2.97 倍和 63.61%。

2.2.3 生长素(IAA)含量

供试草地早熟禾材料 IAA 含量均为根茎高于茎基(图 1C)。根茎中, GNXH 的 IAA 含量显著高于其他材料, 为 $1834.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; ZYSN 的 IAA 含量显著低于除 TSQS 以外的其他材料 ($P<0.05$), 为 $453.30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 分别是 CK 的 1.57 倍和 38.69%。茎基中, LZYZ 的 IAA 含量显著高于除 GNXH 和 PLLT 以外的其他材料, 为 $486.63 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; ZYSN 的 IAA 含量显著低于除 TSQZ 以外的其他材料 ($P<0.05$), 为 $187.43 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别是 CK 的 1.55 倍和 60%。

2.2.4 脱落酸(ABA)含量

供试草地早熟禾材料 ABA 含量根茎高于茎基(图 1D)。根茎中, GNXH 的 ABA 含量显著高于其他材料, 为 $263.53 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是 CK 的 2.11 倍; DXAD 含量最低, 仅为 $63.00 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 但与 DXWY、LZYZ 和 ZYSN 差异不显著 ($P>0.05$), 是 CK 的 50.51%。不同材料间 ABA 含量多重比较结果表明, 除 TSQZ 和

CK, DXAD、DXWY、LZYZ 和 ZYSN 之间差异不显著外, 其余各材料间均差异显著 ($P<0.05$)。茎基中, GNXH 含量显著高于除 TSQZ 和 LNXH 以外的其他材料 ($P<0.05$), 为 $112.80 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是 CK 的 1.98 倍; DXWY 含量最低, 为 $56.11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 且与 TSQS、DXAD、LZYZ、ZYSN 和 CK 差异不显著。

2.3 草地早熟禾根茎扩展性与内源激素含量的相关性

对 10 个供试草地早熟禾材料根茎扩展性与内源激素含量之间进行相关性分析, 结果如表 6 所示。除不同部位的 IAA 对草地早熟禾根茎扩展的作用效果相反外, 其余激素作用均一致。从各指标来看, ZT 含量与分蘖数和根茎数呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与地上生物量、茎节长和根茎生物量显著正相关 ($P<0.05$); IAA、GA₃ 和 ABA 含量与各指标的相关性均不显著。茎基 ZT/ABA 与分蘖数和根茎数呈极显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数达 0.891 和 0.799; IAA/ABA 与分蘖数和根茎扩展性显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 0.760 和 0.617; 根茎 GA₃/IAA 与根茎数和分蘖数显著负相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 -0.672 和 -0.635。从总体来看, 草地早熟禾的扩展性与 ZT 含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与茎基 IAA/ABA 和 ZT/ABA 的比值呈显著正相关 ($P<0.05$), 与根茎 GA₃/IAA 显著负相关 ($P<0.05$)。

3 讨论

草坪草的根茎扩展性包括地上扩展和地下扩展两个方面。评价扩展性通常采用的指标包括反映地上扩展能力的覆盖面积、分蘖数、地上生物量, 以及表示地下扩展能力的根茎扩展距离、根茎数量和根茎生物量等^[25]。对于草坪草而言, 分蘖能力代表其竞争力, 其强弱表现在地表枝条密度的高低, 它可以用来衡量草坪草对环境的适应性以及草坪质量; 根茎是无性系种群进行营养繁殖的潜在种群, 根茎生物量则蕴含着植物营养物质的储存状况^[26-27]。本研究中, 供试材料覆盖面积变化范围为 $123.17\sim662.89 \text{ cm}^2\cdot\text{株}^{-1}$, 分蘖数变化范围为 $80\sim325 \text{ 蘖}\cdot\text{株}^{-1}$, 地上生物量变化范围为 $2.18\sim11.73 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$, 根茎数变化范围为 $12\sim76 \text{ 个}\cdot\text{株}^{-1}$, 根茎生物量变化范围为 $0.16\sim1.70 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$, 表明它们在根茎扩展表型性状方面存在很大差异。植物表型多样性是遗传多样性与环境多样性综合作用的外在体现, 地理气候常常对植物生长和繁殖具有长远而深刻的影响^[28]。在植物生长过程中, 为了适应环境往往会通过调整表型特征向有利于物种生存的方向发展, 以最大限

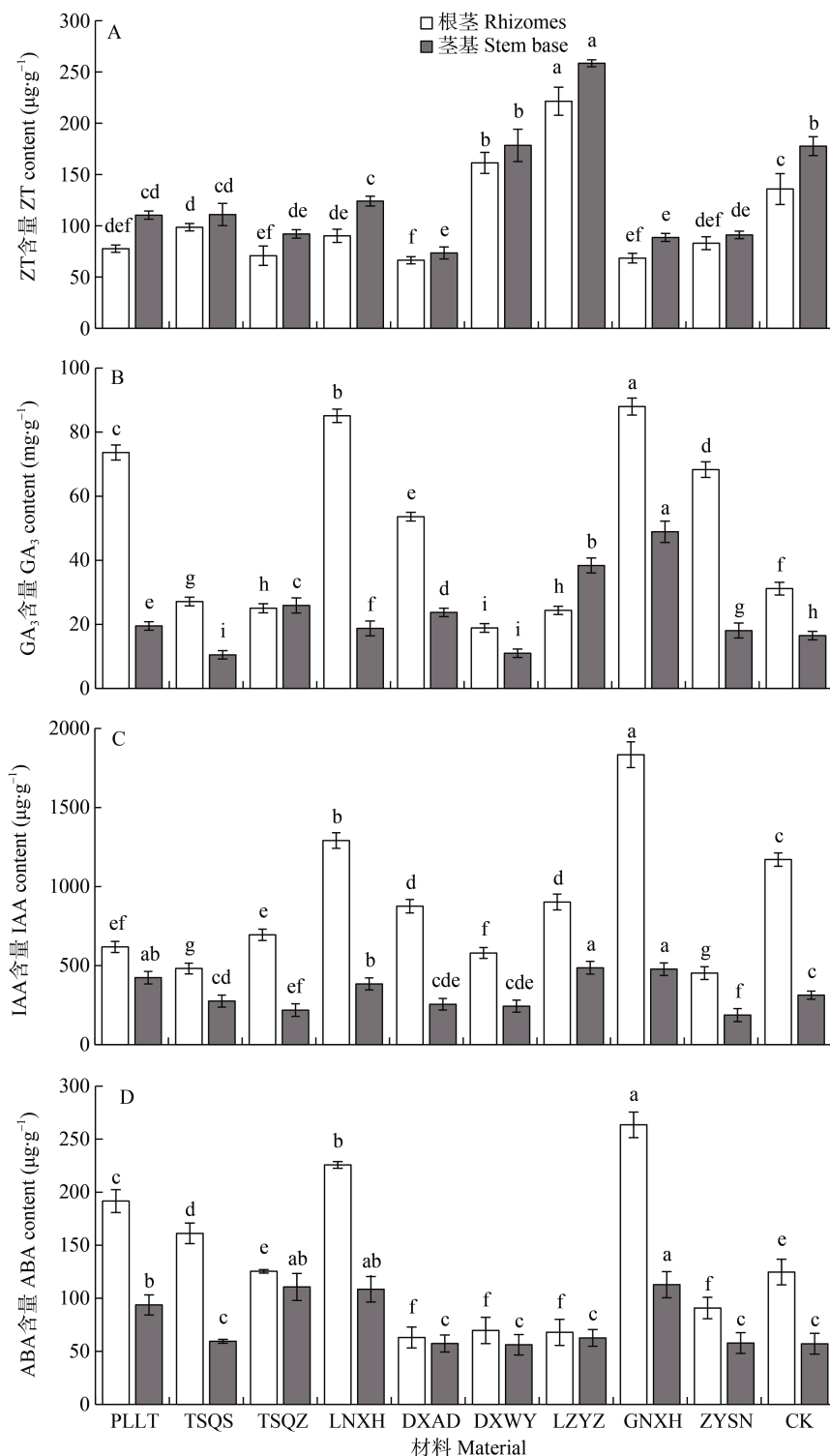


图 1 供试草地早熟禾材料玉米素(ZT, A)、赤霉素(GA₃, B)、生长素(IAA, C)和脱落酸(ABA, D)含量

Fig. 1 Zeatin (ZT, A), gibberellin (GA₃, B), auxin (IAA, C) and abscisic acid (ABA, D) contents of different materials of *Poa pratensis*

材料名称详见表 1。不同小写字母表示不同材料在 $P < 0.05$ 水平差异显著。The names of the material are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different materials.

度地减小恶劣环境对物种生存和繁殖造成的不良影响, 这就造成了不同地区野生草地早熟禾表型的差异^[29-30]。有研究表明, 随着海拔升高, 土壤水分含量降低, 植物会通过减少叶片数和分蘖数、缩小叶面

积、降低生物量来适应环境^[31]。本试验发现, 随着野生草地早熟禾采集地气候由温暖湿润到寒冷干旱, 其分蘖数、根茎数和根茎生物量等扩展指标也随之减小, 根茎扩展能力也逐渐降低。

表 6 草地早熟禾根茎扩展性与根茎和茎基内源激素含量相关性

Table 6 Correlation between endogenous hormones contents in rhizome and stem base and expansion indexes of *Poa pratensis*

部位 Organ	激素 Hormone name	根茎扩展性 Ability of rhizome expansion	扩展指标 Expansion indexes						
			覆盖面积 Coverage area	分蘖数 Tillers number	地上生物量 Above- ground biomass	根茎数 Number of rhi- zomes	茎节长 Internode length	最长根茎 Longest rhizome	根茎生物量 Rhizomes biomass
根茎 Rhizome	玉米素 ZT	0.787**	0.368	0.925**	0.628*	0.858**	0.728*	0.529	0.668*
	赤霉素 GA ₃	-0.229	-0.041	-0.352	-0.193	-0.343	-0.247	-0.161	-0.150
	生长素 IAA	-0.042	-0.175	-0.118	-0.116	-0.101	-0.145	-0.147	-0.284
	脱落酸 ABA	-0.084	0.053	-0.411	-0.082	-0.251	-0.046	-0.147	0.006
	ZT/ABA	0.595	0.209	0.828**	0.455	0.729**	0.507	0.404	0.442
	GA ₃ /ABA	-0.354	-0.215	-0.123	-0.279	-0.303	-0.400	-0.168	-0.323
	IAA/ABA	0.207	-0.074	0.398	0.119	0.395	0.190	0.296	0.310
	GA ₃ /IAA	-0.606*	-0.425	-0.635*	-0.490	-0.672*	-0.566*	-0.512	-0.491
茎基 Stem base	玉米素 ZT	0.851**	0.438	0.940**	0.698*	0.881**	0.800*	0.608	0.760*
	赤霉素 GA ₃	-0.022	-0.303	-0.031	-0.225	-0.093	0.057	0.018	-0.017
	生长素 IAA	0.474	0.299	0.338	0.383	0.298	0.397	0.188	0.446
	脱落酸 ABA	-0.092	0.039	-0.440	-0.098	-0.264	-0.036	0.076	-0.064
	ZT/ABA	0.677*	0.264	0.891**	0.536	0.799**	0.629	0.433	0.605
	GA ₃ /ABA	0.182	-0.175	0.376	-0.003	0.154	0.218	0.157	0.154
	IAA/ABA	0.617*	0.307	0.760*	0.525	0.577	0.524	0.251	0.567
	GA ₃ /IAA	-0.461	-0.577	-0.374	-0.592	-0.468	-0.286	-0.066	-0.448

*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。* and ** show significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels.

生长素(IAA)参与植物生长和发育的诸多进程,如根与茎的发生和伸长、植物的向重力性和向光性等^[32]。已有研究证明,在根系生长过程中,IAA的合成、运输以及浓度梯度的建立发挥着核心调控作用^[33]。经典理论认为,IAA对根系生长作用属于浓度依赖型,即低浓度促进生长,超过一定浓度时表现出抑制作用,且这个浓度的阈值因植物种类不同而不同^[34]。Thimann等^[35]研究表明蚕豆(*Vicia faba*)茎尖产生的IAA从上往下极性运输导致主茎中IAA极性运输流的增加,从而抑制分蘖芽的生长发育。与IAA相反,细胞分裂素(ZT)作为一种促进型激素,在根部或茎部合成,运输至侧芽刺激侧芽生长,它能对抗、消除顶端优势,打破侧芽休眠,刺激分蘖芽萌发,施用外源细胞分裂素类激素可以消除IAA对侧芽生长的抑制作用^[36]。本研究表明,根茎扩展能力强的材料ZT含量均高于扩展力弱的材料,且ZT含量与根茎扩展能力呈极显著正相关,表明ZT含量差异是导致草地早熟禾根茎扩展能力不同的一个重要生理因素,这是由于ZT含量高,促进茎器官分生组织细胞分裂与分化,增加了根茎分蘖数量所致^[37];草地早熟禾根茎IAA含量与扩展能力负相关,与张锁科等^[38]有关草地早熟禾分蘖期IAA含量下降能产生大量分蘖枝的研究结果一致。

脱落酸(ABA)对侧根分生组织的发育和维持具有重要作用,主要通过抑制 *AIR12* 和 *IAA19* 等侧根起始基因表达和侧根原基分生组织来调控侧根的发生^[39]。赤霉素(GA₃)通过促进细胞分裂和细胞伸长来促进植株生长,已作为最常用的外源激素诱导水稻节间伸长^[40]。刘杨等^[41]研究发现,水稻生长期喷施赤霉素几乎可以完全抑制其分蘖芽的发生,从而达到人为控制分蘖的目的。本研究表明,草地早熟禾根茎和茎基 ABA 和 GA₃ 含量与根茎扩展能力负相关,这与马兴林等^[42]、李金梅等^[43]的研究结果一致。

在植物生命周期中,单个激素很难调控基因的表达,植物的生长和代谢是多种激素共同调控的结果。各个激素之间存在着一定的相互作用,通过相互促进或抑制达到一种平衡来共同调控植物的生长发育^[44]。袁冰剑等^[33]发现,ABA在根尖分生区细胞IAA浓度梯度建成方面有重要作用,通过负向调控IAA的合成降低根尖分生区细胞大小及细胞分裂活性,最终抑制植物根系生长。蔡铁等^[45]发现,外源GA₃显著提高了分蘖中IAA含量且抑制ZT含量,导致分蘖生长停滞。本研究显示,单独的IAA、ABA和GA₃与根茎扩展能力之间均无显著相关性,但它们间的相对比值与根茎扩展能力之间存在明显相关性,表明激素对草地早熟禾根茎扩展能力的调控更

以激素间的相对含量来发挥作用,而不仅仅是受它们绝对浓度的控制。 GA_3/IAA 与分蘖数和根茎数呈显著负相关,是因为 GA_3 可以通过促进 IAA 的合成或抑制其分解来增加 IAA 含量,两者共同作用抑制根茎和分蘖的产生^[46]。 IAA/ABA 和 ZT/ABA 的比值与根茎扩展性显著正相关,主要是与分蘖数和根茎数呈正相关,这与前人^[47-48]在水稻和小麦上的研究结果一致,即 ABA/IAA 比值增高不利于根系生长发育、 ZR/ABA 比值降低不利于分蘖成活。

4 结论

供试野生草地早熟禾材料根茎扩展能力存在较大差异,随采集地气候由温暖湿润到寒冷干旱,根茎扩展能力逐渐降低。综合评价结果显示不同生态型野生草地早熟禾材料扩展能力存在较大差异,榆中野生草地早熟禾的根茎扩展能力最强,且明显优于‘午夜 II’草地早熟禾(对照),可作为扩展能力强的草地早熟禾新品种选育优良材料。根茎扩展能力受多个指标的影响,评价指标和综合评价方法还应结合草坪生产实际进一步优化完善,使评价结果更加准确可靠。

草地早熟禾根茎和茎基内源激素含量存在差异, GA_3 、IAA 和 ABA 含量根茎>茎基,ZT 含量茎基>根茎,两个部位 GA_3 含量均显著高于其他激素。根茎扩展能力受内激素含量及其平衡状态的影响,ZT 含量、IAA/ABA 和 ZT/ABA 比值越高, GA_3/IAA 比值越低,越有利于草地早熟禾的根茎扩展。因此,在草地早熟禾生长过程中,可以通过外施 ZT 等措施,调节植株激素水平、控制激素平衡来增强其根茎扩展能力,提高草坪质量。

参考文献 References

- [1] 胡婧,李德颖,朱慧森,等. 草地早熟禾叶和根茎浸提液对 3 种花卉植物种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 178-184
HU J, LI D Y, ZHU H S, et al. Effect of water extractions from the leaves and rhizomes of Kentucky bluegrass on seed germination of three herbaceous ornamentals[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 178-184
- [2] 易津,李青丰,谷安琳,等. 根茎类禾草生物学特性研究进展[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(S1): 1-16
YI J, LI Q F, GU A L, et al. Advances on biology characteristics the rhizomatous grasses[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(S1): 1-16
- [3] YIN X J, YI K, ZHAO Y H, et al. Revealing the full-length transcriptome of Caucasian clover rhizome development[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 1-15
- [4] 莫亿伟,李夏杰,王海,等. IAA 对水稻根毛形成与水通道蛋白基因表达关系的研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4227-4239
MO Y W, LI X J, WANG H, et al. Effect of auxin treatment on root hair formation and aquaporins genes expression in root hair of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4227-4239
- [5] 陈润娟,白小明,郑文博,等. 甘肃地区 11 个野生草地早熟禾材料根茎扩展性研究[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1250-1258
CHEN R J, BAI X M, ZHENG W B, et al. Study on rhizomes extensibility of 11 wild Kentucky bluegrass collected in Gansu Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1250-1258
- [6] TAO D, HU F, YANG Y, et al. A rhizomatous individual obtained from interspecific BC1F1 progenies between *Oryza sativa* and *O. longistaminata*[M]//Advances in Rice Genetics. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2008: 151-152
- [7] SACKS E J, DHANAPALA M P, TAO D Y, et al. Breeding for perennial growth and fertility in an *Oryza sativa/O. longistaminata* population[J]. Field Crops Research, 2006, 95(1): 39-48
- [8] 贾丽欣,杨阳,张峰,等. 不同载畜率下短花针茅分蘖数量对内源激素浓度的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2391-2397
JIA L X, YANG Y, ZHANG F, et al. Response in tiller numbers of *Stipa breviflora* to endogenous hormone concentration under different stocking rates[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2391-2397
- [9] YIN C, GAN L, ZHOU X, et al. Decreased panicle-derived indole-3-acetic acid reduces gibberellin A1 level in the uppermost internode, causing panicle enclosure in male sterile rice Zhenshan 97A[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(10): 2441-2449
- [10] YOSHIKI I, TOMOAKI S, MIYAKO U T, et al. Crown rootless1, which is essential for crown root formation in rice, is a target of an AUXIN RESPONSE FACTOR in auxin signaling[J]. The Plant Cell, 2005, 17(5): 1387-1396
- [11] FERGUSON B J, BEVERIDGE C A. Roles for auxin, cytokinin, and strigolactone in regulating shoot branching[J]. Plant Physiology, 2009, 149(4): 1929-1944
- [12] 黄升财,王冰,谢国强,等. 赤霉素 GA_4 是水稻矮化特征的重要调节因子[J]. 中国农业科学, 2019, 52(5): 786-800
HUANG S C, WANG B, XIE G Q, et al. Enrichment profile of GA_4 is an important regulatory factor triggering rice dwarf[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(5): 786-800
- [13] LI X S, SONG L L. The role of ABA in the responses of wild-type and abscisic acid mutants of *Arabidopsis thaliana* to excess zinc[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(5): 1-8
- [14] SALAZAR-CHAVARRÍA V, SÁNCHEZ-NIETO S, CRUZ-ORTEGA R. *Fagopyrum esculentum* at early stages copes with aluminum toxicity by increasing ABA levels and antioxidant system[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 152: 170-176

- [15] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4333–4343
LUO D D, WANG C K, JIN Y. Stomatal regulation of plants in response to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4333–4343
- [16] 刘海英, 冯必得, 茹振钢, 等. BNS 和 BNS366 小麦雄性不育与内源激素的关系[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 1–18
LIU H Y, FENG B D, RU Z G, et al. Relationship between phytohormones and male sterility of BNS and BNS366 in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(1): 1–18
- [17] 万泽花, 任佰朝, 赵斌, 等. 不同熟期夏玉米品种籽粒灌浆脱水特性和激素含量变化[J]. 作物学报, 2019, 45(9): 1446–1453
WAN Z H, REN B Z, ZHAO B, et al. Grain filling, dehydration characteristics and changes of endogenous hormones of summer maize hybrids differing in maturities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(9): 1446–1453
- [18] 林艳艳, 杨雪梅, 杨云贵. 五氨基乙酰丙酸对逆境下草地早熟禾萌发及生长的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(4): 782–789
LIN Y Y, YANG X M, YANG Y G. Effects of 5-ALA on seed germination and growth of *Poa pratensis* under abiotic stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4): 782–789
- [19] BUSHMAN B S, ROBBINS M D, ROBINS J G, et al. Response to salt stress imposed on cultivars of three turfgrass species: *Poa pratensis*, *Lolium perenne*, and *Puccinellia distans*[J]. Crop Science, 2020, 60(3): 1648–1659
- [20] 魏巍, 周娟娟, 桑旦, 等. 藏北野生驯化早熟禾的生产性能和品质评价[J]. 作物杂志, 2019, (5): 76–81
WEI W, ZHOU J J, SANG D, et al. Evaluation of productivity and quality of wild domestication *Poa annua* L. in northern Tibet[J]. Crops, 2019, (5): 76–81
- [21] 周艳明, 忻雪. 高效液相色谱法测定果蔬中 7 种植物激素的残留量[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 301–304
ZHOU Y M, XIN X. Determination of plant hormone residues in vegetables and fruits by high performance liquid chromatography[J]. Food Science, 2010, 31(18): 301–304
- [22] 王杏, 周小倩, 刘超, 等. 高效液相色谱法同时测定果蔬中 6 种植物激素的残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(20): 5376–5380
WANG X, ZHOU X Q, LIU C, et al. Determination of 6 kinds of plant hormones residues in fruits and vegetables by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(20): 5376–5380
- [23] 杨途熙, 魏安智, 郑元, 等. 高效液相色谱法同时分离测定仁用杏花芽中 8 种植物激素[J]. 分析化学, 2007, 35(9): 1359–1361
YANG T X, WEI A Z, ZHENG Y, et al. Simultaneous determination of 8 endogenous hormones in apricot floral bud by high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(9): 1359–1361
- [24] 陈仁伟, 张晓煜, 丁琦, 等. 基于差热分析技术的 4 个酿酒葡萄品种不同部位抗寒性综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1022–1032
CHEN R W, ZHANG X Y, DING Q, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance in different parts of four wine grape varieties based on different thermal analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1022–1032
- [25] 柴琦, 王彦荣, 孙建华. 坪用草地早熟禾 28 个品种扩展性的比较研究[J]. 草业学报, 2002, 11(4): 81–87
CHAI Q, WANG Y R, SUN J H. Studies on expanding capacity of 28 turf-type varieties of Kentucky bluegrass[J]. Acta Pratacultural Science, 2002, 11(4): 81–87
- [26] 孙建华, 王彦荣, 李世雄. 草地早熟禾不同品种生长与分蘖特性的研究[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 20–25
SUN J H, WANG Y R, LI S X. A comparison on growing and tiller characteristics among varieties of *Poa pratensis*[J]. Acta Pratacultural Science, 2003, 12(4): 20–25
- [27] 焦德志, 姜秋旭, 曹瑞, 等. 扎龙湿地不同生境芦苇种群根茎数量特征及动态[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3432–3440
JIAO D Z, JIANG Q X, CAO R, et al. Quantitative characteristics and dynamics of the rhizome of *Phragmites australis* populations in heterogeneous habitats in the Zhalong Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3432–3440
- [28] 白云乌, 侯向阳, 武自念, 等. 地理气候因素对羊草性状分化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 138–142
BAI W Y, HOU X Y, WU Z N, et al. Effects of geographical and climatic factors on traits differentiation of *Leymus chinensis*[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(11): 138–142
- [29] 李阳, 魏继平, 马红媛. 不同种源羊草表型差异性[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1175–1183
LI Y, WEI J P, MA H Y. Variations of phenotypic characteristics in *Leymus chinensis* among different provenances[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1175–1183
- [30] 陈林, 苏莹, 李月飞, 等. 荒漠草原土壤相对湿度对猪毛蒿表型可塑性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3547–3556
CHEN L, SU Y, LI Y F, et al. Effects of heterogeneous habitats on phenotypic plasticity of *Artemisia scoparia* in the desert steppe of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3547–3556
- [31] 牛雪婧, 聂靖, 赵雪利, 等. 河北木蓝的叶表型可塑性研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(1): 97–104
NIU X J, NIE J, ZHAO X L, et al. Leaf-level phenotypic plasticity of *Indigofera bungeana* Walp[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(1): 97–104
- [32] 吕剑, 喻景权. 植物生长素的作用机制[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(5): 624–628
LÜ J, YU J Q. Mechanism of auxin action[J]. Plant Physiology Communications, 2004, 40(5): 624–628
- [33] 袁冰剑, 张森磊, 曹萌萌, 等. 脱落酸通过影响生长素合成及分布抑制拟南芥主根伸长[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(11): 1341–1347
YUAN B J, ZHANG S L, CAO M M, et al. ABA modulates root growth through regulating auxin in *Arabidopsis thaliana*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(11): 1341–1347
- [34] 张志勇, 王素芳, 田晓莉, 等. 生长素调节植物侧根发育过程的机制[J]. 作物杂志, 2009, (1): 11–13
ZHANG Z Y, WANG S F, TIAN X L, et al. Mechanisms of

- regulation of auxin on plant lateral root development[J]. Crops, 2009, (1): 11–13
- [35] THIMANN K V, SKOOG F. Studies on the growth hormone of plants: III. the inhibiting action of the growth substance on bud development[J]. PNAS, 1933, 19(7): 714–716
- [36] 吕享, 叶睿华, 田海露, 等. 生长素介导细胞分裂素(玉米素)调控杜鹃侧芽萌发[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(11): 1872–1879
- LYU X, YE R H, TIAN H L, et al. Auxin regulated lateral buds germination in *Crematstra appendiculata* via the regulation of cytokinin (zeatin)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2018, 26(11): 1872–1879
- [37] 何旭升, 李麟坤, 赵方东, 等. 日本结缕草(*Zoysia japonica*)修剪后组织与器官再生过程的分子机制[J]. 分子植物育种, 2018, 16(11): 3745–3751
- HE X S, LI L K, ZHAO F D, et al. Molecular mechanism of tissue and organs regeneration after cutting in *Zoysia japonica*[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(11): 3745–3751
- [38] 张锁科, 马晖玲. 激素调控草地早熟禾分蘖及品种间分蘖力比较研究[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 316–321
- ZHANG S K, MA H L. Hormone regulation and tillering ability of different Kentucky bluegrass varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(2): 316–321
- [39] 朱晓琛, 张汉马, 南文斌. 脱落酸调控植物根系生长发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, 53(7): 1123–1130
- ZHU X C, ZHANG H M, NAN W B. Research progress on regulation of ABA in plant root development[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(7): 1123–1130
- [40] 衣琨, 赵一航, 胡尧, 等. GA₃和6-BA对高加索三叶草根蘖芽生长及内源激素含量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(2): 22–30
- YI K, ZHAO Y H, HU Y, et al. Effect of GA₃ and 6-BA on rhizome segment growth and endogenous hormone content of Caucasian clover[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(2): 22–30
- [41] 刘杨, 丁艳锋, 王强盛, 等. 植物生长调节剂对水稻分蘖芽生长和内源激素变化的调控效应[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 670–676
- LIU Y, DING Y F, WANG Q S, et al. Effect of plant growth regulators on the growth of rice tiller bud and the changes of endogenous hormones[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 670–676
- [42] 马兴林, 梁振兴. 冬小麦分蘖衰亡过程中内源激素作用的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(2): 200–207
- MA X L, LIANG Z X. Studies on the effects of endogeneous hormones in winter wheat tillers during the course of senescence[J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(2): 200–207
- [43] 李金梅, 张伟, 赵威军, 等. 喷施赤霉素对甜高粱控蘖效果的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(22): 10–13
- LI J M, ZHANG W, ZHAO W J, et al. Effects of spraying gibberellin on controlling tillers of sweet *Sorghum*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(22): 10–13
- [44] 王晓叶, 王力源, 刘兴菊, 等. 白榆D33雄性不育花芽发育的形态及内源激素的动态变化[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 76–81, 90
- WANG X Y, WANG L Y, LIU X J, et al. Morphological development and dynamic changes of endogenous hormones in male sterile buds of D33 of *Ulmus pumila*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 76–81, 90
- [45] 蔡铁, 徐海成, 尹燕桦, 等. 外源 IAA、GA₃和 ABA 影响不同穗型小麦分蘖发生的机制[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1835–1842
- CAI T, XU H C, YIN Y P, et al. Mechanisms of tiller occurrence affected by exogenous IAA, GA₃, and ABA in wheat with different spike-types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(10): 1835–1842
- [46] PHILLIPS I J. Apical dominance[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1975, 26(1): 341–367
- [47] 郑钊, 杨颖增, 罗晓峰, 等. 植物激素 ABA 调控植物根系生长的研究进展[J]. 植物科学学报, 2019, 37(5): 690–698
- ZHENG C, YANG Y Z, LUO X F, et al. Current understanding of the roles of phytohormone abscisic acid in the regulation of plant root growth[J]. Plant Science Journal, 2019, 37(5): 690–698
- [48] 郝艳玲, 张紫晋, 粟永英, 等. 西南麦区高产多穗型小麦单株分蘖特征研究[J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2248–2257
- HAO Y L, ZHANG Z J, SU Y Y, et al. Morphological characteristics of tillers per plant in high-yield and multi-spike type wheat in southwest China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(11): 2248–2257