

· 双清论坛“新时期草学的重大基础科学问题” ·

草坪学研究现状、未来挑战和发展趋势^{*}

产祝龙¹

胡 涛²

王增裕³

邵 安⁴

韩烈保^{5**}

张巨明^{6**}

傅金民^{3**}

1. 华中农业大学 园艺林学学院, 武汉 430070
2. 兰州大学 草地农业科技学院, 兰州 730020
3. 青岛农业大学 草业学院, 青岛 266109
4. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025
5. 北京林业大学 草业与草原学院, 北京 100083
6. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广州 510642

[摘 要] 草坪草与人民生活及生态环境息息相关。我国草坪草种质资源丰富, 科研人员初步建立了草种质资源管理体系, 开展了基因组测序及农艺性状和抗逆性的评价, 探索了现代草坪建植养护技术。但是我国草坪草育种工作起步晚, 绿化用草坪草种 90% 依赖进口。随着我国经济快速发展, 草种需求量总体呈上升趋势。需要加强草坪草种质资源系统收集、精准评价与综合利用; 基于大数据开展草坪草关键农艺性状调控基因挖掘与遗传机制解析; 系统选育草坪草优异种质, 推进基因编辑技术应用, 逐步实现 4.0 时代设计育种。同时在阐明草坪草水分和养分需求规律基础上研发草坪专用肥、农药、机械, 综合运用现代信息与人工智能, 创新、集成并示范草坪建植养护关键技术, 共同促进草坪业的发展。

[关键词] 草坪草; 种质资源; 育种; 基因编辑; 草坪建植养护



产祝龙 华中农业大学教授、博士生导师。入选中国科学院“百人计划”、2020 年爱思唯尔“中国高被引学者”。主要从事草坪草抗逆应答分子调控机制研究。发表学术论文 110 多篇。担任多个学术期刊编委及在学术组织任职。主持、参与国家自然科学基金项目等 10 多项研究课题。



张巨明 华南农业大学教授、博士生导师。兼任中国草学会运动场地专业委员会副主任委员等职务。主要从事草坪草育种、草坪草抗逆生理、运动场草坪建植及管理以及牧草及草地生态研究。发表学术论文 100 余篇。主持、参与国家级和省部级项目 10 余项, 先后获国家级和省部级奖励 7 项。



韩烈保 北京林业大学教授、博士生导师, 草坪研究所所长暨草学学科创建人, 享受国务院政府特殊津贴。曾任中国草学会副理事长、国务院学科评议组成员。获国家科技进步奖二等奖 1 项, 其他省部级奖 6 项。发表学术论文 300 余篇, 出版专著和教材 20 余部。主持国家级和省部级项目 20 余项。



傅金民 青岛农业大学教授、博士生导师, 入选中国科学院“百人计划”。兼任国家林业和草原局草品种审定专业委员会副主任、全国草种质资源技术协作组组长, 担任多个学术期刊编委。主要从事草种质资源与分子育种研究, 培育国家审定草品种 3 个, 发表学术论文 134 篇, 主持国家级和省部级项目 10 余项。

收稿日期: 2023-04-30; 修回日期: 2023-07-21

* 本文根据第 313 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: hanliebao@163.com; jimzh@scau.edu.cn; turfenc@qq.com

本文受到国家自然科学基金项目(32071884)的资助。

草坪业是现代农业的一部分。随着经济发展和人民生活水平的提高,草坪在园林绿化、运动场地、改善环境及生态修复中起着越来越重要的作用。草坪业的发展带动着草坪管理养护、机械装备、灌溉设施、草坪肥料、草坪药剂以及草产品加工等产业的发展。现代草坪业是在美国发展起来的产业,年产草种约60万吨,建成20000多个高尔夫球场,2020年产值超过600亿美元,与电子信息、航空航天等行业并列为全美十大支柱产业。随着我国城市化和工业化进程的推进,我国草坪业呈现出加速发展的趋势,建坪面积逐年扩大,近些年来我国草坪年产值超过100亿元。我国从事草坪业的企业5000多家,草坪行业规模以上企业共300余家,资产总计200多亿元^[1]。涌现出一批如东方园林、蒙草生态、普邦园林等从事草坪相关业务的上市公司。我国草坪业发展起步于20世纪80年代,90年代后期发展迅速,目前已发展成具有一定规模的产业,2020年全国草坪业年产值达2000亿元。然而数据显示,我国绿化用草坪草种90%以上从国外进口,例如,2021年中国草种进口量达9.96万吨,自给率仅为26%^[2]。我国草坪业整体上产业链不完整、优良品种少、种子和草皮生产的产业化程度低、养护管理水平不高等问题,制约着我国草坪业的发展。

1 草坪草种质资源现状与育种进展

草坪草一般指能够形成草皮或草坪,并能耐受定期修剪和人、物使用的一些草本植物种或品种。根据气候与地域分布,草坪草分为暖季型草坪草和冷季型草坪草。前者包括狗牙根、结缕草、假俭草、雀稗等,后者包括早熟禾、黑麦草、高羊茅及剪颖等。

草坪业的发展与草坪草育种密切相关。美国是世界上最大的草种供应国,草种子生产量占全世界的70%。丹麦也是全世界屈指可数的草种子出口大国,丹麦丹农公司的草种子产量占欧洲总量的83%。在育种手段上,发达国家已经将传统的杂交育种方法与现代生物技术相结合,以提高草坪草的抗病、抗旱、抗除草剂等能力。截至2020年,美国共育成草坪草品种1000多个^[1]。美国国会1990年授权开展国家遗传资源计划(National Genetic Resources Program, NGRP),并在此基础上建立了种质资源信息网络(Germplasm Resources Information Network, GRIN),目前收集保存的禾本科、豆科牧草及草坪草种质资源超过3万份。澳

大利亚、新西兰及国际家畜研究所收集保存的资源都在3万份以上^[3]。

我国野生草种质资源十分丰富,全国可作为草坪草和牧草利用的植物资源有246科1545属6704种^[2]。国家林业和草原局2021年公布了《中华人民共和国主要草种目录(2021年)》,共12个科,120个种。其中禾本科59个种,多数可以作为草坪草。丰富的种质资源为选育出具有特定性状(如抗病性、抗虫性、耐践踏性、植株低矮性、抗除草剂性和抗逆性等)的优良草坪草新品种、新品系提供了育种材料。我国草育种工作全面发展始于20世纪80年代,截至2022年,我国共有674个饲草新品种通过审定,其中育成品种257个,草坪草品种仅有65个^[1]。“十二五”以来,在中央财政资金的支持下,我国陆续建立了一批共享平台,包括1个中心库、2个备份库、1个离体库、17个资源圃,组建了国家级草种质资源保存利用体系。

1.1 传统育种技术

传统育种是草坪草育种的基础,包括系统选育、杂交育种、诱变育种等手段。“Tifton10”狗牙根(*Cynodon dactylon*)就是系统选育的,具有返青早、成坪快、耐低温等特性。刘建秀等通过系统选育获得“南京狗牙根”,该品种低矮纤细、质地细密、成坪快且耐寒性强,已先后成功用于开放绿地、足球场及护坡草坪。阿不来提等通过品种比较和系统选育筛选出耐践踏、耐低剪、有较强的抗寒和耐盐碱能力、易管理的草坪兼牧草品种“喀什狗牙根”、“新农1号”和“新农2号”狗牙根。

杂交育种是现代草坪育种的重要途径,例如通过杂交获得狗牙根“Russell”品种。同“Coastal”品种相比,茎间较短、叶片更密、返青较早、成坪更快、抗寒性更强。傅金民等利用杂交技术培育了“鲁滨1号”沟叶结缕草(*Zoysia matrella*)、“鲁滨2号”杂交狗牙根和“鲁滨3号”海滨雀稗(*Paspalum vaginatum*)品种。该系列品种建植速度快,再生能力强,质地致密,坪用性能好,耐盐能力强。属间杂交改良草坪草同样具备可行性。李俊龙等对多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)和苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)进行属间杂交,张新全等对坪用多年生黑麦草(*L. perenne*)和高羊茅进行属间杂交,分别获得属间杂种。

诱变育种也是草坪草传统育种的重要途径之一,目前已在狗牙根、杂交狗牙根、结缕草、海滨雀稗、钝叶草(*Stenotaphrum secundatum*)、假俭草

(*Erenochloa ophiuroides*)、苇状羊茅的新品种选育中得到应用。例如,通过人工诱变获得 Tifgreen II 植株,具有叶色好、抗低温、耐粗放管理、返青早的特点。张巨明等通过辐射诱变育成了“广绿”结缕草和“广星”海滨雀稗。

利用秋水仙素进行染色体加倍的倍性育种也应用在了禾本科草坪草的育种中。欧美国家通过对黑麦草和羊茅属 F1 代材料进行染色体加倍,已育成了同源四倍体材料^[3]。

1.2 分子模块设计育种与现代智能育种

当前我国草坪草育种主要停留在驯化选育的 1.0 时代和杂交选育的 2.0 时代,依赖于传统育种经验,效率低。西方发达国家草坪草育种已步入分子育种的 3.0 时代,缩短了育种进程,提高了育种效率。通过 4.0 时代设计育种,可以精准改良草坪草生态适应性和草坪品质。

在草坪草生物育种方面,首先报道的转基因草坪草是基因枪法转化获得的高羊茅^[4]。丹麦丹农公司将生物技术应用于黑麦草、紫羊茅(*F. rubra*)、早熟禾(*Poa*)草种的培育,并利用转基因技术在抗病、抗旱、延长绿期等方面取得了良好的进展。农杆菌介导转化法在多年生黑麦草、多花黑麦草、匍匐剪股颖(*Agrostis stolonifera*)、细弱剪股颖(*A. tenuis*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、结缕草、狗牙根上获得成功^[5]。目前由于基因漂移现象可能导致抗性杂草产生,造成严重的生态环境问题,相关转基因草坪草的应用需要进行安全性评估。

随着测序技术的更新换代,越来越多的草坪草基因组测序结果公布,催生了生物信息学深度分析、高通量基因分型、高密度遗传图谱构建、分子标记表型关联、标记辅助选择和基因组选择育种等分子育种技术。目前已经报道构建了一年生黑麦草、高羊茅、结缕草等草坪草的高密度遗传图谱,在黑麦草上开展了基因型与表型关联分析研究。新一代生物育种平台为草类育种的快速发展带来巨大的推动作用。

近年来,遥感技术的发展提供了改进的、非破坏性的植物表型分析方法,如可见光成像、光谱成像、红外热成像、距离传感和荧光成像,有望打破植物表型鉴定这一推进育种进程中的瓶颈^[6],推动草坪草传统育种向着人工智能育种方向挺进。

2 草坪草的环境适应机制研究

2.1 草坪草与水分胁迫

草坪生产倡导节水灌溉,而抗旱品种选育是草

坪节水的根本。狗牙根、结缕草等匍匐茎和地下茎丰富的草坪草,具有较强的抗旱性。研究表明,草坪草通过激活蜡质合成途径(草地早熟禾 *PpCER1* 基因)、活性氧代谢途径(多年生黑麦草 *LpLEA3* 和 *LpFeSOD* 基因)、脱落酸(Abscisic Acid, ABA)(高羊茅 ABA 受体基因 *FePYR1*、狗牙根脱水素基因 *CdDHN4*)和非 ABA 依赖途径(狗牙根 *CdNF-YC1* 基因)等相关基因的表达(图 1),以及表观遗传途径,增强其对干旱的耐受性。

水淹胁迫对草坪草生长的影响与水淹程度有关。在浅层水淹条件下,草坪草可通过快速生长,挺出水面。而在深层水淹情况下,草坪草则通过降低代谢速率、改变代谢途径等休眠方式,避免体内代谢物的过度消耗,适应长期水淹。模式植物中 *SK* (SNORKEL) 和 *SUB1* (SUBMER GENCE-1) 是调控耐淹性的重要因子,目前在草坪草中未见报道(图 1)。

2.2 草坪草与温度胁迫

高温条件下脯氨酸、电导率、相对含水量和叶绿素含量等可作为评价草坪草抗热性的指标。高温显著影响了光合作用、抗氧化反应、激素代谢等途径基因表达(多年生黑麦草 *LpNYC1*、*LpNOL*、*LpSGR* 和 *LpPPH* 等)。同时,草坪草在高温条件下激活了依赖于热激转录因子(Heat Shock Transcription Factor, HSF)途径(多年生黑麦草 *LpHSFC1s*、匍匐剪股颖 *HSPs* 等)和不依赖 HSF 途径(多年生黑麦草 *LpHOXs*、狗牙根 *CdABF* 等)的高温胁迫应答(图 1)。外源褪黑素、茉莉酸甲酯、 γ -氨基丁酸等增强草坪草激素信号通路基因表达,提高耐热性。

低温条件下草坪草光合效率、草坪品质、脯氨酸、蛋白质含量、脱水素以及 ABA 的含量增加。通过蛋白质组和转录组等方法,草坪草中大量受低温诱导的蛋白、功能基因及 miRNA 被鉴定出来。草坪草通过依赖 CBF 途径(结缕草 *ZjDREB1*、草地早熟禾 *PpCBF3* 基因和 *ZjICE1* 等)和不依赖 CBF 途径(狗牙根多胺途径相关的 *CdSAMDC1* 和乙烯途径 *CdERF1*)激活低温应答信号(图 1)。ACC、一氧化氮(NO)供体和 ABA 等小分子物质和植物激素处理可以增强草坪草抗寒性。

2.3 草坪草与离子胁迫

我国有 17 亿亩盐碱地,筛选并培育耐盐碱草坪草新种质对于盐碱地治理极为重要。暖季型草坪草的抗盐性比冷季型草坪草强,但存在属间及种间的抗盐性差异。通过转录组学分析,研究人员鉴定了

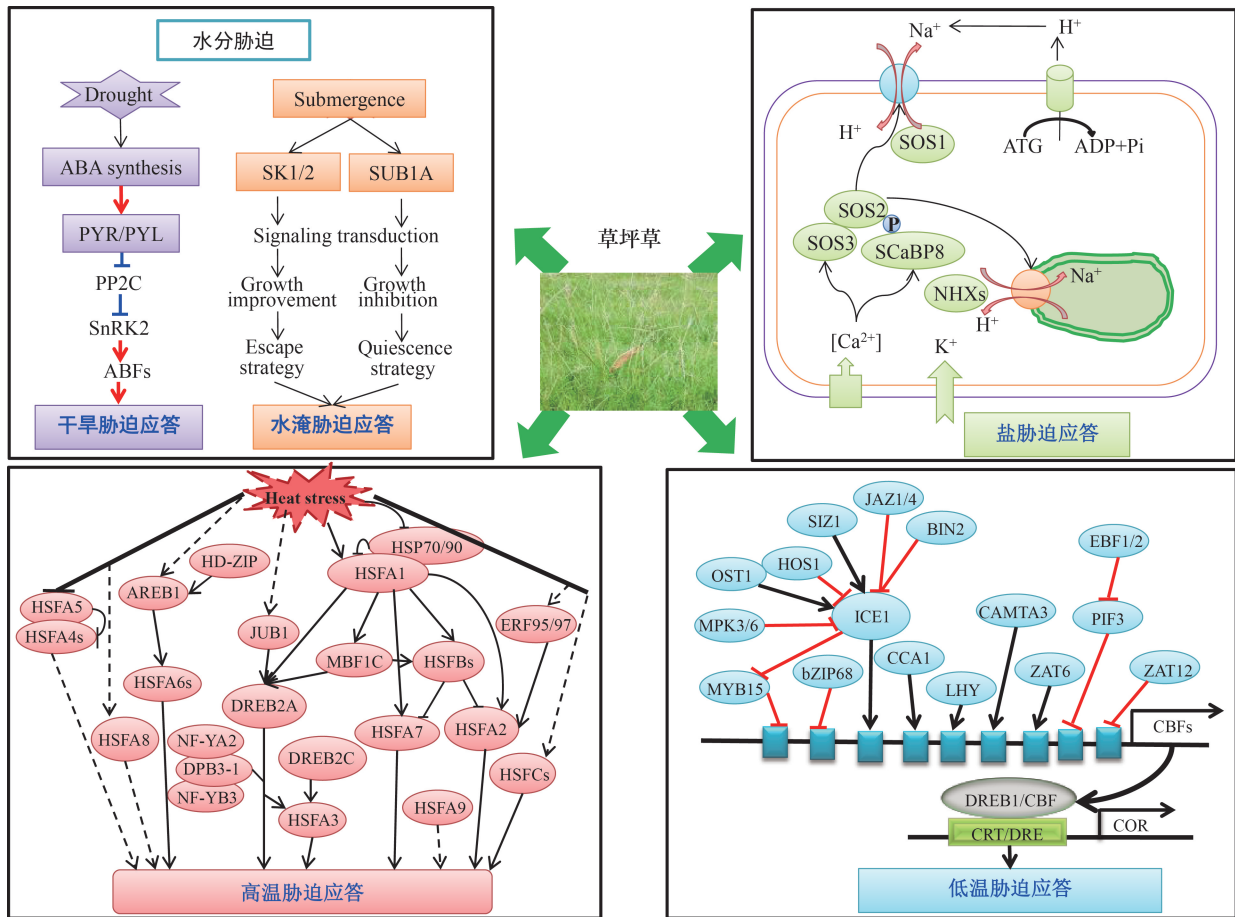


图 1 草坪草逆境应答信号传导途径^①

结缕草、狗牙根等盐胁迫诱导表达的基因。植物盐超敏感(Salt Overly Sensitive, SOS)信号转导途径在盐胁迫应答中起着重要的作用(图 1)。沟叶结缕草中过表达 *ZmVP* 提高了 *NHX1*、*P5CS* 等基因的表达,增强抗盐能力^[7]。狗牙根 *CdWRKY50* 是 *DREB2A* 上游调控因子,降低植物对盐胁迫的耐受性^[8]。

多年生黑麦草、草地早熟禾和高羊茅对镉(Cd)耐受性强,草地早熟禾、高冰草(长穗偃麦草, *Elytrigia elongata*)对铅(Pb)耐受性较强。早熟禾超富集锌(Zn)和 Pb,假俭草和海滨雀稗对 Cd 有超量积累特征,狗牙根对 Cu、Pb、Zn 都有较好的富集作用。Cd 胁迫条件下,草坪草体内大量基因被诱导表达,包括多药及毒性化合物外排转运蛋白(Multidrug and Toxic Compound Extrusion Transporter, MATE)等转运蛋白以及 MYB、AP2/ERF、WRKY、TIFY、bHLH、NAC、MADS、OMT 和 HD-ZIP 等转录因子^[9]。外源小分子物质,如水杨酸,甜菜碱、一氧化氮、硫化氢、油菜素内酯、硅等,

可以有效减缓重金属离子对草坪草的伤害。

3 草坪草基因组与遗传转化研究现状

3.1 草坪草基因组

冷季型草坪草多年生黑麦草目前公布有二代和三代基因组^[10-12]。另外草地早熟禾(*P. pratensis*)与一年生早熟禾(*P. annua*)的染色体级基因组在 2023 年已完成^[13, 14]。暖季型草坪草中,2016 年日本科学家报道了日本结缕草(*Z. japonica*)、沟叶结缕草和细叶结缕草(*Z. pacifica*)的基因组^[15]。普通狗牙根(*C. dactylon*)和非洲狗牙根(*C. transvaalensis*)基因组在我国科学家的努力下,分别在 2022 和 2021 年得以解析^[16, 17]。海滨雀稗和巴哈雀稗(*P. notatum*)的基因组 2022 年发表^[18, 19]。假俭草和弯叶画眉草(*Eragrostis curvula*)基因组则在 2021 和 2019 年完成^[20, 21]。豆科红三叶(*Trifolium pratense*)、地三叶(*T. subterraneum*)及白三叶(*T. repens*)基因组信息也相继释放^[22-24](表 1)。

① 左下“高温胁迫应答”引自: Ohama N, Sato H, Shinozaki K, et al. Transcriptional regulatory network of plant heat stress response. Trends In Plant Science, 2017, 22(1):53-65; 右上“盐胁迫应答”引自: Yang Y, Guo Y. Unraveling salt stress signaling in plants. Journal Of Integrative Plant Biology, 2018, 60(9):796-804.

表 1 草坪草基因组测序信息

草坪草类型	草坪草学名	基因组大小	基因数量	测序国家	
冷季型	多年生黑麦草(<i>Lolium perenne</i>) ^[10]	1 128 Mb	28 455	丹麦	
禾草	多年生黑麦草(<i>L. perenne</i>) ^[11]	2.3 Gb	38 868	瑞典	
	多年生黑麦草(<i>L. perenne</i>) ^[12]	2.55 Gb	54 629	丹麦	
	草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i>) ^[13]	6.09 Gb	256 281	美国	
	一年生早熟禾(<i>P. annua</i>) ^[14]	1.78 Gb	76 420	美国	
	暖季型	日本结缕草(<i>Zoysia japonica</i>) ^[15]	334 Mb	59 271	日本
禾草	沟叶结缕草(<i>Z. matrella</i>) ^[15]	563 Mb	95 079	日本	
	细叶结缕草(<i>Z. pacifica</i>) ^[15]	397 Mb	65 252	日本	
	普通狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>) ^[16]	1.01 Gb	76 879	中国	
	非洲狗牙根(<i>C. transvalensis</i>) ^[17]	423.4 Mb	28 444	中国	
	海滨雀稗(<i>Paspalum Vaginatam</i>) ^[18]	593 Mb	45 843	美国	
	巴哈雀稗(<i>P. notatum</i>) ^[19]	541 Mb	36 511	中国	
	假俭草(<i>Eremochloa ophiuroides</i>) ^[20]	867.4 Mb	36 572	中国	
	弯叶画眉草(<i>Eragrostis curvula</i>) ^[21]	602 Mb	56 469	阿根廷	
	非禾本	红三叶(<i>Trifolium pratense</i>) ^[22]	309 Mb	40 868	英国
	科草	地三叶(<i>T. subterraneum</i>) ^[23]	471.8 Mb	42 706	日本
白三叶(<i>T. repens</i>) ^[24]		1096 Mb	90 128	中国	

3.2 草坪草遗传转化体系

狗牙根、结缕草、匍匐剪股颖、海滨雀稗、多年生黑麦草、高羊茅、草地早熟禾、白三叶等草坪草的再生和遗传转化体系报道较多。以成熟胚、成熟种子、花药、未成熟花序、胚根、胚轴、子叶等作为外植体材料诱导愈伤,通过基因枪或农杆菌侵染方法,获得再生转基因植株。同时多年生黑麦草和高羊茅的CRISPR/Cas9 基因编辑体系也已成功建立^[25-27]。

4 草坪建植及养护管理研究现状

4.1 坪床结构研究

草坪质量主要取决于其坪床结构及其建造质量,而坪床结构与质地的好坏,直接关系到草坪草的生长发育和草坪的坪用性状。运动场草坪多为沙基坪床,不同沙土对比对运动场坪床土壤水分特性和坪观质量有重要影响。美国高尔夫球协会(United States Golf Association,USGA)推荐的果岭坪床结构自上而下依次为:根系层、粗沙过渡层、砾石层和排水系统。根系层是坪床的最表层,厚度为300 mm,主要由沙和改良物混合而成。过渡层通常为50~100 mm,主要由粒径1~4 mm的特粗沙或

细砾石组成。砾石层位于过渡层下方,通常厚为100~150 mm,由粒径6~9 mm的砾石组成。在此基础上,国际足球联合会(Fédération Internationale de Football Association,FIFA)提出了专业足球场草坪推荐坪床结构,主要分为纯沙质根系层、过渡层、砾石层。近年来,基于运动场草坪对高质量和高安全性的需求,加强型混合草坪建植技术得到了广泛的应用和研究,主要由纤维加强型草坪、草垫式混合草坪和植丝式混合草坪三种类型。然而目前对混合草坪的研究还处于技术研发的阶段,不同建植模式下草坪草根土互作机制以及土壤水肥运移特征等作用机理未见报道。绿化草坪坪床多为土壤基质,在今后的科学研究中,应着眼于研发低碳、环保、高效的坪床土壤改良材料,提升绿化草坪质量,降低管理养护成本。

4.2 灌排水系统研究

布设完整的灌排水系统是建植高质量草坪的重要前提。常见的喷灌系统主要有四种:地理自动弹出式喷灌、地上固定式喷灌系统(喷枪式喷灌系统)、地上半固定式喷灌系统、地上自走式喷灌系统。灌溉均匀度、灌溉频率等都会影响到草坪的质地、色泽

以及草坪草根系的生长。相同灌溉制度下不同草坪草的坪观质量也存在较大差异,场地实时含水量与草坪滚动性能、表面硬度、旋转摩擦力系数、球反弹率等指标也直接相关。

排水系统是运动场草坪最重要的基础设施之一。专业足球场草坪的排水系统必须由专业人员根据场址状况、气象数据等对管道选材、布设进行科学论证和决策。排水管道系统的研究还应在管段埋深的优化设计、管线平面布置的优化选择、雨水径流模型的建立等几个方面进一步加强。

4.3 草种选择和幼坪养护研究

草种选择是草坪建植过程的重要步骤之一。适宜的草种能提升草坪坪观质量且缩短建坪时间。草种的选择应考虑以气候和土壤条件类型,草种的外观质量(质地、高度、颜色、均一性)、生态质量(修剪性、绿期、抗逆性)和使用功能(草坪的韧性、弹性、硬度、光滑性、滚动摩擦性能、动滑摩擦性能),草种的经济性(草种价格、养护成本、建植成本)等因素。混合播种是草坪建植过程中经常使用的一种播种方法。现代草坪建植应进一步加强“乡土草种”的选育与应用及基础理论研究。幼坪养护参考草坪管理养护研究。

4.4 草坪水肥管理研究

养护管理是草坪可持续利用的基础,也是草坪质量的重要保障。自1990年北京亚运会以来,我国草坪发展迅速,养护管理技术不断提高,但基础研究缺乏,整体上与欧美等发达国家差距明显,草坪质量难以令人满意。现代草坪养护管理除重视技术的应用,还需要把握技术作用的机理,并关注技术使用后给环境带来的潜在影响,从草坪生态系统整体的角度对草坪进行科学、合理的养护管理,从而实现草坪的可持续利用。

合理施肥是提高草坪质量及保持良好景观的有效措施。目前我国草坪用肥主要是尿素和传统的速效高氮复合肥,养分释放速度快,在短时间内促进草坪的生长。然而速效肥由于挥发、淋洗、流失等损失,利用率在我国普遍低于40%。缓/控释肥由于其养分释放规律能够与作物养分吸收需求相对同步,可以减少肥料施用量以及施肥次数,提高肥料利用效率,具有省工省时、节约运输和施用成本的优势,更适合作为草坪肥料,草坪的生长和质量相对稳定,且对环境友好。

草坪蒸散量是指导草坪合理灌溉的重要指标。美国自1960年代起就开始了草坪草蒸散与抗旱关

系的研究,并于1990年代初基本完成大部分地区 and 大多数草种蒸散率的测定。暖季型草坪草的夏季日平均最大蒸散率为3.0~9.0 mm,而冷季型草坪草的为3.6~12.6 mm^[28]。美国将蒸散率研究成果应用于抗旱、低耗水草种筛选,草坪合理灌溉和综合节水养护管理等方面。我国直到2000年以后才开始草坪草蒸散率的研究,但研究零散,缺乏系统性,研究结果很少用于实际指导草坪灌溉。

4.5 草坪病虫害防治研究

草坪病虫害的发生极大破坏草坪的使用功能和观赏价值。美国已收录的草坪草病害有52种。我国有病害20多种,主要是真菌病害,为害严重的有褐斑病、腐霉枯萎病、叶斑病和大斑病;主要虫害有粘虫、蛴螬、蝼蛄、红火蚁等。杂草以其极强的竞争力同草坪草争夺水分、养分、光照和空间,影响草坪草生长,造成草坪退化,严重影响草坪的景观和使用功能。杂草种类繁多,其中以禾本科杂草和莎草科杂草危害最为严重。杂草危害一般占草坪种植面积的5%以上,严重危害的面积可达10%~40%,甚至更高。因此杂草防除是草坪养护中的一项重要工作。

化学防治是最常用的防治病虫害方法,但容易造成草坪药害、环境污染和抗药性。为此研发有机、环保的绿色农药开始受到重视。在对病虫害杂草防治大量研究的基础上,美国于20世纪80年代就开始实施草坪有害生物综合管理(Integrated Pest Management, IPM)计划^[29],2000年后进一步升级为草坪最佳养护计划^[30]。二者的核心是从生态系统整体的角度出发,前者重点关注病虫害杂草的综合防治,后者关注草坪整体,综合运用各种草坪养护措施,维持健康可持续的草坪,同时不对人类健康和环境造成危害。

5 草坪学未来挑战和发展趋势

草坪因其自身的多功能性和显著的社会、生态、经济效益,产业潜力巨大。国务院在《中国足球中长期发展规划(2016—2050)》中,提出2030年每万人有1块足球场地。草坪建造工程规模约为200亿~500亿元,草坪每年养护费用约50亿~100亿元。《全国国土绿化规划纲要(2022—2030年)》中也明确指出,“十四五”期间的主要目标是城市建成区绿化覆盖率达到43%,村庄绿化覆盖率达到32%,规划完成造林种草等国土绿化5亿亩。生态修复产业的产值每年上千亿元。与草坪相关产业(高尔夫、足

球及绿化、生态修复等)产值可达 2 000 亿元以上,市场潜力巨大,为我国草坪业的发展提供了千载难逢的机遇。

5.1 草坪草种质资源评价利用及关键农艺性状选育

(1) 草坪草种质资源收集评价:为保障我国草坪草种业安全,应尽早完善我国主要草坪草种质资源的收集、评价和利用工作。建立我国草种质资源库和相应的核心种质资源库。建立不同乡土草坪草种的优异性状评价分析体系,针对不同地理位置和环境条件下的乡土草坪草种适应性机制开展研究。综合表型和基因型数据,筛选一批有重要利用价值的草坪草资源,为草坪草遗传育种提供原始材料,同时开展优异资源的推广和利用。

(2) 草坪草基因型数据库和分子标记开发:对草坪草种质资源重要性状协作开展多年多点表型鉴定。基于草坪草基因组信息开展全基因组重测序工作,绘制全基因组变异图谱,揭示重要草坪草核心种质基因组变异及驯化历史。构建表型与基因型数据库,开发分子标记,开展基因分型检测。构建重要草坪草高密度遗传图谱,发掘与抗旱、抗寒、抗热、抗病虫杂草、耐修剪、耐践踏、耐盐碱、耐贫瘠等重要性状关联候选基因的分子标记,建立并完善草坪草分子标记辅助育种技术平台。

(3) 草坪草基因功能解析和育种应用:挖掘控制草坪草重要性状的主效基因和调控因子,解析分子调控模块。阐释抗逆、品质、耐践踏、修剪后再生性等重要农艺性状的遗传机制,阐述泛素化、甲基化、乙酰基化以及糖基化等翻译后修饰调控草坪草应答干旱、高温、低温、盐碱以及水淹胁迫的机理。开展多基因聚合分子设计育种,创制适应多种胁迫环境、有利于节本管理的草坪草新品种。

5.2 草坪草优异资源选育和新种质创制

(1) 多途径系统选育草坪草优异种质:从 20 世纪 50 年代以来,我国在草坪草引种选育上开展了一系列研究工作,但育成品种数量少,育种技术体系不够完善,不能满足产业的需要。立足我国草坪草乡土资源,在引种、系统选育和杂交育种的基础上,广泛开展诱变育种、航天育种,结合现代生物技术,利用分子标记选择育种、转基因技术和基因编辑技术进行重要性状的设计育种。

(2) 推进基因编辑技术在草坪草育种中的应用:完善草坪草遗传转化、基因编辑和分子标记辅助育种技术平台,进一步加快 CRISPR/Cas9 技术在草坪草中的研究,建立和优化重要草坪草种的基因编

辑体系,攻克草坪草多倍体基因敲除难度大、效率低的技术瓶颈。加强高通量多基因遗传转化技术研发。重点开展多基因聚合性状草坪草新品种的选育,健全草种质量认证和检测体系。

5.3 草坪建植、养护管理及草种草皮标准化生产

(1) 草坪草水分和营养需求规律:加强草坪草的需水特性、草坪水分与其他环境因子的耦合关系、草坪水分与运动性能相关性等的基础研究。加强节水等养护管理技术的研发,环保、绿色农药、草坪专用控释肥及微生物肥料研制。针对不同草种、不同用途草坪提出最佳的草坪养护管理技术方案。研究中水对草坪草生长和对环境(土壤和水体)的影响,探讨中水作为灌溉用水的可行性。

(2) 无土草皮生产技术体系和草坪建植养护关键技术研发:草皮是建植草坪的主要材料,针对我国耕地资源非常短缺的现状,开发无土草皮生产技术,从无土草皮基质、建植、养护、收获、运输和铺装等环节开展系统研究,建立可满足不同功能需要、高效低碳无土草皮生产的技术体系及生产模式。开展工厂化立体无土草皮生产技术研究,人工创建和控制草坪草生长的环境,研究无土基质、水分、营养、光照等环境因素对草坪草生长的影响,创建满足草坪草生长人工环境条件,实现工厂化草皮生产,提高草皮生产效率和草皮质量。建立适用于我国不同气候类型、不同档次的环境友好型运动场草坪建植管理技术体系和规程。重点研究足球场草坪耐践踏等关键技术,建立适应于不同类别足球场的建植技术体系和规程。

(3) 草坪专用肥、农药和机械的研发及生产国产化:我国目前没有专门用于草种子的收获机械。种子生产从播种、田间管理到收获、清选、加工贮运机械也大多由农业机械改装,机械化、规模化程度低严重依赖进口。通过加强研发,在关键技术上取得突破,形成具有我国自有知识产权的草坪专用资材和机械设备。研究主要草坪农药的施用浓度、施用方式、施用效果、迁移规律及对环境的影响,为制定科学、合理的农药使用规程提供参考依据。

(4) 现代信息技术与人工智能技术应用:近年来,随着大数据、5G 以及人工智能技术的飞速发展,人工智能草坪养护管理机械设备(无人农药喷洒机、修剪机器人等)的开发利用、智慧草坪养护管理技术成为新的研发方向。研制无人农药喷洒机、修剪机器人等人工智能草坪养护管理机械设备,建立智慧草坪养护管理技术系统,可进一步推动我国草坪产

业的升级换代。

参 考 文 献

- [1] 赵金龙, 唐芳林, 刘永杰. 生态文明建设背景下我国草坪业发展的思考. 草业科学, 2021, 38(10): 2077—2086.
- [2] 金京波, 王台, 程佑发, 等. 我国牧草育种现状与展望. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 660—665.
- [3] 张新全, 马啸, 郭志慧, 等. 国外禾本科草育种研究进展. 草业与畜牧, 2015, 218(1): 1—7.
- [4] Ha SB, Wu FS, Thorne TK. Transgenic turf-type tall fescue (*Festuca ammidinacea* Schreb.) plants regenerated from protoplasts. Plant Cell Reports, 1992, 11(12): 601—604.
- [5] Xu X, Liu WW, Liu XY, et al. Genetic manipulation of bermudagrass photosynthetic biosynthesis using *Agrobacterium*-mediated transformation. Physiologia Plantarum, 2022, 174(3): e13710.
- [6] Vines PL, Zhang J. High-throughput plant phenotyping for improved turfgrass breeding applications. Grass Research, 2022, 2(1): 1—13.
- [7] Chen Y, Zong JQ, Tan ZQ, et al. Systematic mining of salt-tolerant genes in halophyte-*Zoysia matrella* through cDNA expression library screening. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 89: 44—52.
- [8] Huang XB, Ameer M, Chen L. Bermudagrass *CdWRKY50* gene negatively regulates plants' response to salt stress. Environmental and Experimental Botany, 2021, 188: 104513.
- [9] Lai JX, Han LB. Progress and challenges in China turfgrass abiotic stress resistance research. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 922175.
- [10] Byrne SL, Nagy I, Pfeifer M, et al. A synteny-based draft genome sequence of the forage grass *Lolium perenne*. The Plant Journal, 2015, 84(4): 816—826.
- [11] Frei D, Veekman E, Grogg D, et al. Ultralong Oxford nanopore reads enable the development of a reference-grade perennial ryegrass genome assembly. Genome Biology and Evolution, 2021, 13(8): evab159.
- [12] Istvan N, Elisabeth V, Chang L, et al. Chromosome-scale assembly and annotation of the perennial ryegrass genome. BMC Genomics, 2022, 23(1): 505.
- [13] Phillips AR, Seetharam AS, Albert PS, et al. A happy accident: a novel turfgrass reference genome. G3-Genes Genomes Genetics, 2023, 13(6): jkad073.
- [14] Robbins MD, Bushman BS, Huff DR, et al. Chromosome-scale genome assembly and annotation of allotetraploid annual bluegrass (*Poa annua* L.). Genome Biology and Evolution, 2023, 15(1): evac180.
- [15] Tanaka H, Hirakawa H, Kosugi S, et al. Sequencing and comparative analyses of the genomes of zoysiagrasses. DNA Research, 2016, 23(2): 171—180.
- [16] Zhang B, Chen S, Liu JX, et al. A high-quality haplotype-resolved genome of common bermudagrass (*Cynodon dactylon* L.) provides insights into polyploid genome stability and prostrate growth. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 890980.
- [17] Cui FC, Taier GL, Li ML, et al. The genome of the warm-season turfgrass African bermudagrass (*Cynodon transvaalensis*). Horticulture Research, 2021, 8: 93.
- [18] Sun GC, Wase N, Shu SQ, et al. Genome of *Paspalum vaginatum* and the role of trehalose mediated autophagy in increasing maize biomass. Nature Communications, 2022, 13(1): 1—20.
- [19] Yan Z, Liu H, Chen Y, et al. High-quality chromosome-scale de novo assembly of the *Paspalum notatum* 'Flugge' genome. BMC Genomics, 2022, 23: 293.
- [20] Wang JJ, Zi HL, Wang R, et al. A high-quality chromosome-scale assembly of the centipedegrass *Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack. genome provides insights into chromosomal structural evolution and prostrate growth habit. Horticulture Research, 2021, 8(1): 1—13.
- [21] Carballo J, Santos BACM, Zappacosta D, et al. A high-quality genome of *Eragrostis curvula* grass provides insights into Poaceae evolution and supports new strategies to enhance forage quality. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1—15.
- [22] De Vega JJ, Ayling S, Hegarty M, et al. Red clover (*Trifolium pratense* L.) draft genome provides a platform for trait improvement. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1—10.
- [23] Hirakawa H, Kaur P, Shirasawa K, et al. Draft genome sequence of subterranean clover, a reference for genus *Trifolium*. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1—9.
- [24] Wang H, Wu Y, He Y, et al. High-quality chromosome-level de novo assembly of the *Trifolium repens*. BMC Genomics, 2023, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2631739/v1>.
- [25] 姚佳明, 郝欢欢, 张敬, 等. tRNA-sgRNA/Cas9 系统介导多年生黑麦草原生质体的基因编辑. 草业学报, 2023, 32(4): 129—141.
- [26] Zhang YW, Ran YD, Nagy I, et al. Targeted mutagenesis in ryegrass (*Lolium* spp.) using the CRISPR/Cas9 system. Plant Biotechnology Journal, 2020, 18(9): 1854—1856.
- [27] Zhang L, Wang T, Wang GY, et al. Simultaneous gene editing of three homoeoalleles in self-incompatible allohexaploid grasses. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(8): 1410—1415.

- [28] 赵炳祥, 陈佐忠, 胡林, 等. 草坪蒸散研究进展. 生态学报, 2003, 23(1): 148—157.
- [29] Aryal SK, Crow WT, McSorley R, et al. Integrated pest management of nematodes on bermudagrass turf. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 2016, 2(1): 1—9.
- [30] Trenholm LE, Sartain JB. Turf nutrient leaching and best management practices in *Florida*. *HortTechnology*, 2010, 20(1): 107—110.

Research Progress, Future Challenge and Development Trend of Turf Science

Zhulong Chan¹ Tao Hu² Zengyu Wang³ An Shao⁴
 Liebao Han^{5*} Juming Zhang^{6*} Jinmin Fu^{3*}

1. *College of Horticulture & Forest Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070*
2. *College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020*
3. *College of Grassland Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109*
4. *School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025*
5. *School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083*
6. *College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642*

Abstract Turfgrass plays an important role in human life and ecological environment. China has abundant turfgrass germplasm resources. In China, preliminary management system for turfgrass germplasm resources has been established. Genome sequencing and evaluation of agronomic traits and stress tolerance have been carried out. Techniques of lawn construction and maintenance have been explored and improved. However, the breeding history of turfgrass in China is short, with 90% of turfgrass seeds relying on imports. With the rapid development of China's economy, the overall demand for turfgrass seeds is on the rise. In the future, the systematic collection, precise evaluation, and comprehensive utilization of turfgrass germplasm resources will be the first priority. Identification and functional characterization of candidate genes regulating key agronomic traits through mining of big data need to be performed. Systematical selection of superior turfgrass germplasm and application of gene editing technology should be carried out to gradually implement molecular design breeding in the Breeding Era 4.0. Moreover, through elucidating the water and nutrient demand patterns of turfgrass species, we will develop lawn specific fertilizers, pesticides, and machinery, comprehensively utilize modern information technology and artificial intelligence to innovate, integrate and extend key technologies for lawn construction and maintenance, and jointly promote the development of the lawn industry.

Keywords turfgrass; germplasm resources; breeding; gene editing; lawn construction and maintenance

(责任编辑 魏鹏飞 姜钧译)

* Corresponding Author. Email: hanliebao@163.com; jimzhang@scau.edu.cn; turfencn@qq.com