

基于 APSIM 模型的低纬高原蔗区甘蔗生产潜力

张跃彬^{1,2}, 毛 钧^{2,3*}, 李如丹², 刀静梅², 余凌翔⁴, 王 靖³

(1. 中国农业大学农学院, 北京 100193; 2. 云南省农业科学院甘蔗研究所, 开远 661699;
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 4. 云南省气候中心, 昆明 650034)

摘要: 针对中国(云南)低纬高原蔗区甘蔗产业高质量发展受限于不同生态条件下的甘蔗生产潜力缺乏系统评估的问题, 该研究基于低纬高原不同生态蔗区 17 个代表站点 1981–2010 年的气象资料, 采用大田试验数据统计结合 APSIM (agricultural production systems simulator) 作物模型模拟的方法, 分析了典型播期充分灌溉和雨养条件下甘蔗主栽品种的蔗茎产量和糖分差异, 并对不同水平的甘蔗生产潜力进行了系统评估。结果表明, 无论在灌溉模式还是雨养模式下, 不同生态蔗区的甘蔗生产潜力和产量差均存在差异, 特别是半湿润蔗区的灌溉模式与雨养模式之间产量差异显著 ($P < 0.05$), 增产潜力大; 典型春播种植模式下, 湿润区的潜在产量为 123.1~134.6 t/hm², 半湿润区的潜在产量为 99.3~132.7 t/hm², 当前农户平均单产已达 72.0 t/hm², 仍有 25.2%~45.4% 的蔗茎增产潜力, 7.4%~11.1% 的糖分增产潜力, 以及 25.5%~49.7% 的蔗糖增产潜力。蔗区生态气候、播期水氮管理优化和良种推广是影响和提升甘蔗生产潜力的重要因素。在生态气候上, 湿润蔗区降雨充足, 灌溉模式与雨养模式之间的潜在产量差小, 进行补充灌溉对蔗茎产量的增产效果不明显, 还会降低蔗茎糖分, 适合采用雨养模式为主, 注重高产稳产的种植策略; 半湿润蔗区降雨不足, 灌溉模式与雨养模式之间的潜在产量差大, 灌溉模式较雨养模式增产增糖效果明显, 适合采用节水灌溉为主, 注重高糖高效的种植策略。在播期和水氮优化上, 春植蔗生育期长度适中 (360 d), 水氮需求适中 (施氮 120 kg/hm², 湿润区灌水 656 mm, 半湿润区灌水 970 mm), 远低于秋植蔗的生育期时间 (480 d) 和水氮需求 (施氮 240 kg/hm², 湿润区灌水 964 mm, 半湿润区灌水 1 342 mm), 但仍可获得较高的产量 (122~133 t/hm²), 因此, 以春植蔗为主的播期和水氮优化种植模式在低纬高原蔗区被广泛接受, 是促进甘蔗产业提质增效的有效措施。在良种推广上, 云蔗 05-51 产量表现突出, 在湿润蔗区和半湿润蔗区均可作为主推品种; 桂柳 05-136 糖分表现突出, 可作为湿润蔗区的主推品种。研究结果为低纬高原蔗区甘蔗产业可持续发展特别是节水抗旱栽培提供依据。

关键词: 作物; 模型; 灌溉; 气候; 产量; 蔗糖分

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210149

中图分类号: S566.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-03-0123-11

张跃彬, 毛钧, 李如丹, 等. 基于 APSIM 模型的低纬高原蔗区甘蔗生产潜力[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 123-133.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210149 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Yuebin, MAO Jun, LI Rudan, et al. Simulating sugarcane yield potential in the low latitude plateau of China based on APSIM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(3): 123-133. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210149 <http://www.tcsae.org>

0 引言

甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 隶属禾本科甘蔗属, 原产于热带和亚热带地区, 是中国主要的糖料作物, 年种植面积达 139.07 万 hm², 产量 10 627.3 万 t, 蔗糖产量 902.0 万 t, 占中国食糖产量的 85% 以上^[1]。云南低纬高原作为全国第二大甘蔗产区, 地理位置特殊, 地形地貌复杂, 受印度洋西南季风与太平洋东南季风的影响, 全省蔗区形成了南亚热带与北热带, 湿润与半湿润相结合的蔗区生态类型^[2]。全省不同生态蔗区年甘蔗种植面积达 24.61 万 hm², 占全国甘蔗种植面积的 17.70%^[3]。从蔗区

类型划分, 灌溉型甘蔗面积为 6.15 万 hm², 占全国甘蔗种植面积的 25%, 雨养型旱地甘蔗 18.46 万 hm², 占 75%。甘蔗是高生物量的 C4 作物, 对水分的需求量很大, 云南低纬度高原地区平均年降雨量在 700~2 200 mm, 但时空分布不均, 滇西南湿润区年降雨量达 1 100~2 200 mm, 滇东南半湿润区的年降雨量仅为 700~1 100 mm; 不论是湿润蔗区还是半湿润蔗区, 均表现为冬春干旱, 夏秋多雨, 5–10 月为雨季, 其降雨量占全年的 80% 以上, 11 月至次年 4 月为旱季, 其降雨量仅为全年的 20% 左右, 冬春少雨干旱, 土壤相对含水量低, 加之水肥管理技术落后和品种布局不科学等因素影响, 致使区域内甘蔗长年低产且不稳定^[4]。

近年来, 以气候生态环境为基础, 结合水肥管理和品种等要素, 分析研究不同生态区域的甘蔗生产潜力, 并为甘蔗节水抗旱、高产高效种植提供相应的解决方案, 已成为甘蔗产业可持续发展中的热门研究课题。作物生长模型不仅能够进行单点尺度上作物生长发育的动态模拟, 而且能够从系统角度评价作物生长状态与环境要素

收稿日期: 2022-10-19 修订日期: 2023-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860341), 云南省科技人才与平台计划 (202205AM070001) 资助

作者简介: 张跃彬, 博士, 研究员, 研究方向为甘蔗栽培技术研究。

Email: ynzyb@sohu.com

*通信作者: 毛钧, 博士, 副研究员, 研究方向为甘蔗种质资源利用与甘蔗生产系统模拟研究。Email: mj_raincat@163.com

的关系^[5]。在甘蔗模型方面,国际上主要有 APSIM-Sugar、DSSAT-CANEGRO、QCANE、AUSCANE 等甘蔗生长模型^[6-10],其中 AUSCANE 是由澳大利亚联邦科学院和糖业试验总局联合美国农业部共同开发并最早应用的甘蔗生长模型,该模型在甘蔗生物学方面的模拟精度较差,目前已被淘汰;QCANE 是澳大利亚糖业试验总局单独研发的甘蔗生长模型,其优势在于能模拟甘蔗的碳循环、蔗茎质量和糖分含量等,但其他模块相对简单,在应用方面没有 DSSAT-CANEGRO 和 APSIM-Sugar 模型广泛^[10]。DSSAT-CANEGRO 是由美国农业部联合多所大学和科研机构联合开发的农业技术转移决策支持系统系列模型中的甘蔗生长模型,而 APSIM-Sugar 是由澳大利亚联邦科学院和昆士兰大学主导开发的农业生产系统模拟器系列模型中的甘蔗模型,这两个模型是目前开发较为完善、应用较广的代表性甘蔗模型,其中 DSSAT 模型的优势在于图形化操作界面简单明了、容易上手;而 APSIM-Sugar 模型的优势在于其灵活的“即插即用”的模块化设计,且软件更新较快^[10-11]。在 APSIM-Sugar 模型的本地化应用上,已有学者对 APSIM-Sugar 模型在云南半湿润和湿润蔗区的适应性进行了评价,对关键品种参数进行了优化和模拟精度评价,结果显示 APSIM-Sugar 模型能够较准确的模拟不同甘蔗品种在典型播期下的产量和含糖量变化趋势,产量模拟相对误差在 15%以内^[12-13]。

在甘蔗生产潜力研究方面,广西、广东两省早在 20 世纪 80、90 年代就开始利用数学模型估算甘蔗的理论气候生产潜力^[14-15],而云南省直到 2000 年以后才陆续在德宏州等局部蔗区开展基于数学模型估算甘蔗生产潜力的

研究^[16]。2014 年王雪丽等^[17]基于地理信息系统和农业生态区域法估算了广西甘蔗光温生产潜力和气候生产潜力;2018 年阮红燕^[18]基于 APSIM-Sugar 模型模拟了气候变化条件下的广西甘蔗生产潜力。随后,毛钧等^[12-13]也开始应用 APSIM-Sugar 模型在云南蔗区开展甘蔗产量糖分模拟和影响因素分析,但主要局限在 1~2 个站点的模拟结果,缺乏对不同生态蔗区多站点甘蔗生产潜力的系统评估。因此,本文基于 APSIM-Sugar 甘蔗生长模型平台,通过输入云南主产蔗区 17 个代表站点的太阳辐射、温度、降雨、土壤等生境参数、甘蔗主栽品种遗传参数和栽培管理方法,模拟研究当前主栽品种和种植模式下云南低纬高原地区的甘蔗生产潜力,以期当地甘蔗产业的发展提供决策和技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究站点与材料

1) 研究站点与气候土壤数据:中国低纬高原蔗区主要分为湿润蔗区和半湿润蔗区两大生态类型,从湿润蔗区所在县(市)选择了 12 个研究站点、半湿润蔗区所在县(市)选择了 5 个研究站点,各站点自然气候条件见表 1,地理位置见图 1。其中瑞丽和开远两站基础设施完备、地理位置相距较远、气候条件差异较大,且分别代表了典型的湿热多雨(年均温大于 20 °C,降雨大于 1 000 mm)和干热少雨(年均温大于 20 °C,降雨小于 1 000 mm)气候,同时还包括了低纬高原蔗区两种代表土壤类型(砖红壤、赤红壤),因此,选择上述两个站点作为甘蔗大田试验主栽品种调参验证站点。

表 1 研究站点及自然气候生态条件(1981—2010)
Table 1 Basic information of research stations (1981-2010)

生态类型 Ecotype	站点 Stations	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m	年平均气温 Average annual temperature/°C	相对湿度 Relative humidity/%	降雨量 Precipitation/mm	日照时数 Duration of sunshine/h	蒸发量 Evaporation capacity/mm
湿润区 Humid region	耿马	23.55° N, 99.40° E	1 104.9	19.4	75	1 315.5	2 217.4	1 674.5
	镇康	23.77° N, 98.82° E	995.3	18.8	82	1 623.7	1 947.8	1 501.5
	陇川	24.07° N, 97.82° E	959.1	18.8	81	1 618.0	2 220.4	1 497.2
	盈江	24.70° N, 97.95° E	826.7	19.7	79	1 545.3	2 249.2	1 860.9
	瑞丽	24.00° N, 97.85° E	762.9	20.7	77	1 450.2	2 297.3	1 695.3
	龙陵	24.62° N, 98.68° E	1 528.0	15.0	85	2 112.6	2 118.9	1 490.5
	澜沧	22.57° N, 99.93° E	1 054.8	19.7	77	1 586.5	2 177.3	1 521.0
	景谷	23.50° N, 100.70° E	913.2	20.5	77	1 320.1	2 002.2	1 816.6
	勐海	21.92° N, 100.42° E	1 176.3	18.9	79	1 318.5	2 032.8	1 897.8
	勐腊	21.48° N, 101.57° E	633.4	21.8	83	1 513.0	1 870.3	1 651.4
	广南	24.07° N, 105.07° E	1 249.6	17.0	78	1 000.6	1 561.0	1 603.6
	富宁	23.65° N, 105.63° E	685.8	19.8	78	1 103.5	1 641.8	1 629.9
半湿润区 Semi-humid region	元江	23.63° N, 101.98° E	400.9	23.9	69	804.3	2 264.1	2 541.0
	新平	24.07° N, 101.97° E	1 497.5	17.5	74	951.5	2 261.2	2 035.0
	开远	23.72° N, 103.25° E	1 051.8	20.1	71	770.6	2 093.3	1 971.3
	红河	23.37° N, 102.43° E	974.5	20.6	74	832.0	1 984.7	2 105.6
	巧家	26.92° N, 102.92° E	893.9	20.8	60	829.2	2 113.7	2 404.9

注:数据来源云南省气象档案馆。

Note: Data source Yunnan Meteorological Archives.

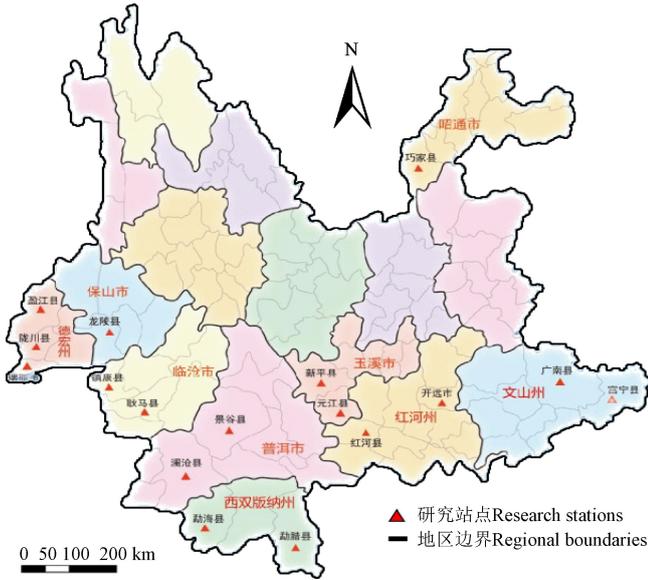


图 1 研究站点地理位置
Fig.1 Geographical location of research stations

2) 研究材料与品种参数：选择 5 个代表性主栽甘蔗品种，包括新台糖 22 (ROC22)、云蔗 05-51 (YZ0551)、福农 41 (FN41)、桂糖 42 (GT42) 和桂柳 05-136 (GL05136)，分别在湿润区瑞丽站和半湿润区开远站开展了上述品种的大田分期播种水肥管理试验^[13]和大田春植品种比较试验^[12,19]，详细田间试验设计见参考文献^[12-13,19]。基于瑞丽和开远站大田品比试验中不同甘蔗品种的产量、糖分实测值和 APSIM-Sugar 模型模拟值进行对比统计分析，并采用试错法^[12-13]进行调参验证，最终获得参试甘蔗品种的模型参数见表 2。基于甘蔗大田试验站点气候土壤的相似性，半湿润区 5 个站点品种调参数据主要来自开远站；湿润蔗区 12 个站点品种调参数据主要来自瑞丽站。模型参数率定验证结果表明 APSIM-Sugar 模型在不同生态蔗区均具有较好的适用性，在湿润区瑞丽站^[13]，蔗糖产量模拟值与实测值的均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 小于 1.1 t/hm²，标准化均方根误差 (normalized root mean squared error, NRMSE) 小于 7.0%，决定系数 R² 大于 0.93；在半湿润区开远站^[12, 19]，蔗糖产量模拟值与实测值 RMSE 小于 1 t/hm²，NRMSE 小于 11.0%，决定系数 R² 大于 0.88。

表 2 参试甘蔗品种模型参数
Table 2 Model parameters of studied sugarcane cultivars

参数名称 Parameter names	品种 Cultivar					
	ROC22	YZ0551	FN41	GT42	GL05136	
蒸腾效率系数 Transpiration efficiency coefficient/ (kg·kPa ⁻¹ ·kg ⁻¹)	0.008 7	0.008 7	0.008 7	0.008 7	0.008 7	
出苗到成茎期积温 Thermaltime from emergence to stem stage/ (°C·d)	1 500	1 500	1 500	1 800	1 800	
蔗茎生物量分配系数 Cane stem biomass partitioning fraction/ (g·g ⁻¹)	0.68	0.7	0.69	0.69	0.69	
蔗茎糖分分配系数 Stem sucrose biomass partitioning fraction/ (g·g ⁻¹)	0.55	0.58	0.59	0.6	0.61	
糖分积累最小蔗茎生物量 Minimum stem biomass before sucrose commences/ (g·m ⁻²)	900	800	800	700	600	
最大绿叶数 Maximum green leaves number	13	13	13	12	12	
叶序对应的最大单叶面积 Maximum single leaf area corresponding to leaf order/ mm ²	1 15 25 35	1 000 17 000 52 000 42 000	1 000 18 000 60 000 55 000	1 000 15 000 70 000 42 000	1 000 12 000 50 000 50 000	1 000 15 000 55 000 55 000
叶序对应的分蘖叶面积扩展系数 Expansion coefficient of tiller leaf area corresponding to leaf order	20 30 35	1.3 2.0 0.5	1.5 2.5 0.3	1.8 2.0 0.5	1.2 2.6 0.5	1.2 2.5 0.6

注：表中仅列出主要基础参数和差异参数；模型参数包括新植、宿根 2 种植模式下辐射利用效率，分别为 1.80、1.65 g·MJ⁻¹·m⁻²。
Note: The table just list the basic parameters and the specific parameters; Model parameter include the radiation utilization efficiency (RUE) of new and perennial planting modes, which are 1.80 and 1.65 g·MJ⁻¹·m⁻², respectively.

1.2 模型模拟与数据分析方法

1.2.1 APSIM-Sugar 模型生产潜力模拟情景与输入输出设定

本研究采用 APSIM-Sugar v7.10 进行不同情景下的甘蔗生产潜力模拟研究，输入的气象日值数据包括太阳辐射、最高温、最低温、降雨量等。其中播期和水氮管理模拟情景采用代表品种云蔗 05-51 在代表站点（开远、瑞丽）的春夏秋冬 4 个典型播期下进行模拟种植，具体分期播种时间为 2 月 20 日春植，5 月 20 日夏植，10 月 20 日秋植，1 月 20 日冬植；灌溉量为 200~1 500 mm；施氮量为 0~480 kg/hm²。甘蔗生产潜力模拟时段为 1981-2010 年，于模型中设定首轮播种时间为 1981 年 2

月 20 日，将 5 个甘蔗品种在 17 个站点分别进行模拟播种，此后以 1 a 新植 (360 d) 和 1 a 宿根 (360 d) 为周期进行轮作模拟，从而获得多年多点的甘蔗产量和糖分数据。其中蔗茎产量 (t/hm²)，蔗茎糖分 (%)，生育期耗水量 (m³) 为模型直接输出结果，蔗茎产量与蔗茎糖分得到蔗糖产量 (t/hm²)，水分利用效率 (kg/m³) 为蔗茎产量与生育期耗水量比值。

1.2.2 产量潜力与产量差定义及估算方法

产量潜力，也称灌溉潜在产量 (Y_p)，是作物在良好的生长状况下，不受水分、氮肥限制以及病虫害的胁迫，并采用适宜作物品种获得的产量^[20]。产量差 (Y_g) 通常被定义为农田实际产量与试验站潜在产量的差距，根据

不同水平的潜在产量和实际产量可划分不同等级的产量差^[21]。实际产量 (Y_a) 是指一个区域内农户实际产量的平均状况,反映了在当地气候条件、土壤、品种以及农民实际栽培管理措施下获得的产量^[22]。对于雨养作物,水分限制下的雨养潜在产量 (R_f),其定义与 Y_p 相似,不同点在于作物生长受到水分供应的限制,也受土壤类型、作物根系以及地表径流的影响^[23]。基于上述定义,同时考虑到低纬高原复杂多样的气候生态和旱地雨养型甘蔗为主体的种植模式,本研究中首先使用 APSIM-Sugar 模型在充分灌溉和雨养条件下进行多年多点情景模拟,获取湿润区和半湿润区代表站点甘蔗模拟产量数据,通过与文献记录的农户实际产量进行分析比较来评估云南低纬高原蔗区的灌溉和雨养生产潜力和产量差。对不同种植模式下潜在产量和产量差的分析可反映气候、土壤、品种、栽培管理措施等因素对产量的限制程度,本研究基于 Y_p 、 R_f 和 Y_a 讨论以下 3 个水平的产量差:灌溉模式与雨养模式间的潜在产量差 Y_{g1} ($Y_p - R_f$),雨养模式潜在产量与农户产量差 Y_{g2} ($R_f - Y_a$),灌溉模式潜在产量与农户产量差 Y_{g3} ($Y_p - Y_a$)。产量差还可以用产量差距的绝对值占最大潜在产量的百分比,即归一化处理后的百分比值来表示以方便比较,本研究通过计算灌溉模式与雨养模式间的相对产量差 Y'_{g1} ,雨养潜在产量与农户产量相对产量差 Y'_{g2} 和灌溉潜在产量与农户产量相对产量差 Y'_{g3} 来比较不同生态蔗区不同种植模式下的增产潜力,计算式如下:

$$Y'_{g3} = \frac{|Y_p - Y_a|}{\max(Y_p, R_f)} \quad (1)$$

$$Y'_{g2} = \frac{|R_f - Y_a|}{\max(Y_p, R_f)} \quad (2)$$

$$Y'_{g3} = \frac{|Y_p - Y_a|}{\max(Y_p, R_f)} \quad (3)$$

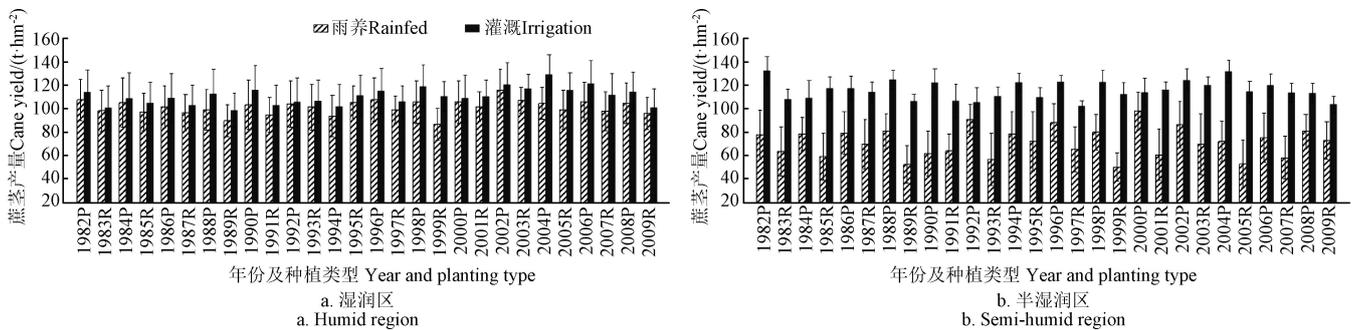
1.3 数据统计分析相关软件

首先用 Excel 2016 对原始数据进行表格化整理并统一数字格式和单位,然后导入 SAS JMP 13 进行描述性统计和作图。

2 结果与分析

2.1 不同生态蔗区的甘蔗生产潜力与产量差

在典型春植 (360 d) 和 1a 新植 1a 宿根种植情景下,通过对 17 个站点 5 个品种 30 a (1981—2010) 14 轮 28 组甘蔗产量进行模拟和分组统计,获得湿润和半湿润区灌溉和雨养条件下的新植和宿根甘蔗产量模拟值(图 2)。由图 2 可知,在湿润蔗区,新植蔗平均产量为 104.5~113.9 t/hm²,高于宿根蔗平均产量 97.9~107.1 t/hm²,灌溉模式和雨养模式间的平均产量差异较小 (<10 t/hm²) 且年际变化不大。在半湿润蔗区,新植蔗平均产量为 80.2~119.8 t/hm²,同样高于宿根蔗产量 61.6~110.7 t/hm²,灌溉模式和雨养模式间的产量差异较大 (>40 t/hm²),且年际变化大。



注:年份后的字母 P 表示新植蔗, R 表示宿根蔗。

Note: The character after years of "P" means new plant cane, "R" means ratoon cane.

图 2 不同生态蔗区的甘蔗模拟产量

Fig.2 Simulated yields in different ecological regions of sugarcane

文献[24]报道目前云南低纬高原蔗区新植甘蔗平均单产已突破了 72 t/hm²,平均蔗糖分达 15.1%,根据统计结果,该地区灌溉和雨养条件下甘蔗平均单产差异约为 20 t/hm²,平均糖分差异约为 0.2%,由此估算出灌溉条件下的蔗茎产量、蔗茎糖分和蔗糖产量 3 个指标对应的农户实际产量分别为 82 t/hm²、15.0%、和 12.3 t/hm²;雨养条件下分别为 62 t/hm²、15.2%、9.4 t/hm²;基于上述农户实际产量统计值与模型新植蔗潜在产量模拟值,分别以蔗茎产量、蔗茎糖分和蔗糖产量为评价指标对区域水平的生产潜力和产量差进行分析,结果见表 3。

由表 3 可知,在湿润蔗区,蔗茎产量潜力为 123.1~134.6 t/hm²,蔗茎糖分潜力为 16.9%~17.1%,蔗糖产量

潜力为 20.3~21.9 t/hm²;雨养条件下的蔗茎产量和蔗糖产量较灌溉产量略低,但蔗茎糖分较高 (17.1%)。产量差方面,湿润蔗区蔗茎产量和蔗糖产量的灌溉模式和雨养模式间产量差相对值较小,分别为 8.5%和 7.3%;蔗茎产量和蔗茎糖分的雨养模式农户产量差分别为 61.1 和 10.9 t/hm²,均大于对应的灌溉模式农户产量差,湿润蔗区雨养模式下甘蔗增产潜力较大,产量相对值达 45.4%。

在半湿润蔗区,蔗茎产量潜力为 99.3~132.7 t/hm²,蔗茎糖分潜力为 16.2%~16.4%,蔗糖产量潜力为 15.5~20.8 t/hm²;雨养条件下的蔗茎产量和蔗糖产量明显低于湿润蔗区,但灌溉条件下的蔗茎产量、蔗糖产量与和蔗茎糖分潜力与湿润蔗区基本相当。产量差方面,半湿润

蔗区蔗茎产量和蔗糖产量的灌溉模式和雨养模式间产量差相对值高达 25.2%和 25.5%；蔗茎产量和蔗糖产量的雨养模式农户产量差分别为 37.3 和 6.1 t/hm²，均小于对应的灌溉模式农户产量差，可见半湿润蔗区灌溉模式下甘蔗增产潜力较大，产量相对值达 38.2%。

表 3 区域尺度上的甘蔗生产潜力

Table 3 Sugarcane yield potential at different region scale

生态区 Ecological region	评价指标 Evaluated index	蔗茎产量 Cane yield		蔗茎糖分 Sugar content		蔗糖产量 Sucrose yield	
		绝对值 Absolute value/ (t·hm ⁻²)	相对值 Relative value/ %	绝对值 Absolute value/ %	相对值 Relative value/ %	绝对值 Absolute value/ (t·hm ⁻²)	相对值 Relative value/ %
		Y_p	134.6	100.0	16.9	98.8	21.9
	R_f	123.1	91.5	17.1	100.0	20.3	92.7
湿润区 Humid region	Y_a	72.0±10.0	53.5±7.4	15.1±0.1	88.3±0.6	10.9±1.5	49.8±6.8
	Y_p-R_f	11.5	8.5	0.2	1.2	1.6	7.3
	R_f-Y_a	61.1	45.4	1.9	11.1	10.9	49.7
	Y_p-Y_a	52.6	39.1	1.9	11.1	9.6	43.8
	Y_p	132.7	100.0	16.2	98.8	20.8	100.0
	R_f	99.3	74.8	16.4	100.0	15.5	74.5
半湿润区 Humid region	Y_a	72.0±10.0	54.3±7.5	15.1±0.1	92.1±0.6	10.9±1.5	52.4±7.2
	Y_p-R_f	33.4	25.2	1.2	7.4	5.3	25.5
	R_f-Y_a	37.3	28.1	1.2	7.4	6.1	29.2
	Y_p-Y_a	50.5	38.2	1.9	11.1	8.5	40.9

注：以湿润区为例，灌溉模式下，农户实际蔗茎产量 $Y_a(t·hm^{-2})$ =基准值(72.0)+校正值(10.0)，农户实际蔗茎糖分(%)=基准值(15.1%)-校正值(0.1%)；雨养模式下，农户蔗茎产量 $Y_a(t·hm^{-2})$ =基准值(72.0)-校正值(10.0)，农户蔗茎糖分(%)=基准值(15.1%)+校正值(0.1%)。 Y_p 、 R_f 、 Y_a 分别为甘蔗灌溉潜在产量、雨养潜在产量和实际产量。

Note: Take the humid area as an example, under irrigation condition, the farmer actual cane yield $Y_a(t·hm^{-2})$ = base value (72) + correction value (10), and the farmer actual sugar content (%) = base value (15.1%) - correction value (0.1%). Under rainfed condition, the farmer actual cane yield $Y_a(t·hm^{-2})$ = base value (72) - correction value (10), the farmer actual sugar content (%) = base value (15.1%) + correction value (0.1%). Y_p , R_f , Y_a are the potential yield of irrigation sugarcane, the potential yield of rainfed sugarcane and the farm actual yield respectively.

2.2 不同生态蔗区代表站点的灌溉-雨养产量差与水分利用效率

从站点尺度对灌溉和雨养产量差和水分利用效率进行分析，结果如表 4 所示。在湿润区 12 个站点上，灌溉产量较雨养产量提高不大，蔗茎产量仅提高 0.3~18.9 t/hm²；除龙陵外其他站点的蔗糖产量，小幅提高 0.5~2.9 t/hm²；除瑞丽和龙陵 2 个站点外，其他站点的蔗茎糖分小幅降低 0.1%~0.9%；灌溉模式较雨养模式增加的需水量相对较少，为 102.1~203.9 mm；灌溉模式下水分利用效率较低，为 0.1~2.8 kg/m³。在半湿润蔗区，5 个站点的灌溉产量较雨养产量均大幅提高，蔗茎产量提高 17.6~61.1 t/hm²，蔗糖产量提高 2.6~9.1 t/hm²，同时蔗茎糖分提高 0.1%~1.6%；灌溉模式较雨养模式增加的需水量相对较大，为 235.1~613.7 mm；灌溉模式下水分利用效率较高，为 2.2~3.7 kg/m³。

2.3 影响甘蔗生产潜力和产量差的因素

2.3.1 站点地理位置与气候差异

以蔗糖产量为甘蔗生产潜力综合指标，基于研究站点的经纬度、海拔、温度、降雨量等环境指标，分别在

灌溉（图 3a）和雨养（图 3b）条件下作图分析高产站点的地理分布及影响蔗糖产量的关键环境因子。结果表明，在灌溉和雨养条件下均呈现红色的高产站点主要分布在 25°N 以南，101.9°E 以西的滇西南湿润蔗区，包括盈江、陇川、瑞丽、镇康、耿马、澜沧、景谷和勐海，此类站点海拔适中（700~1 200 m），气候温暖湿润温差小（湿度 75%~83%，温度 18.8~22 °C），光照条件好（1 800~2 300 h），降雨量充足（1 300~1 700 mm），属于高产优势湿润蔗区。该区域唯一的蓝色低产站点为龙陵，其蔗茎产量并不是最低（>70 t/hm²），但由于高海拔（>1 500 m）、低温（15.0 °C）和过量降雨（>2 100 mm）严重影响了光合作用和糖分积累，导致蔗茎糖分仅为 11.1%。半湿润蔗区的 5 个站点集中分布在 101.9°E 至 104°E 之间，其中新平、元江、红河、开远位于 25°N 线以南，巧家位于 25°N 以北。此类站点多数海拔偏低（<1 100 m），降雨量少（<1 000 mm）、气候干燥炎热温差大（湿度 60%~74%，温度 17.5~24 °C）、光照条件好（1 900~2 300 h），雨养产量偏低，灌溉产量较高，发展节水灌溉的潜力较大。广南和富宁 2 个站点位于 25°N 以南，104°E 以东的滇东南湿润蔗区，此类站点降雨量中等（1 000~1 100 mm）、气候湿润凉爽温差小（湿度 78%，温度 17.0~19.8 °C）、光照条件较差（<1 700 h），雨养产量和灌溉产量中等，灌溉模式和雨养模式间产量差小，发展节水灌溉的潜力不大。

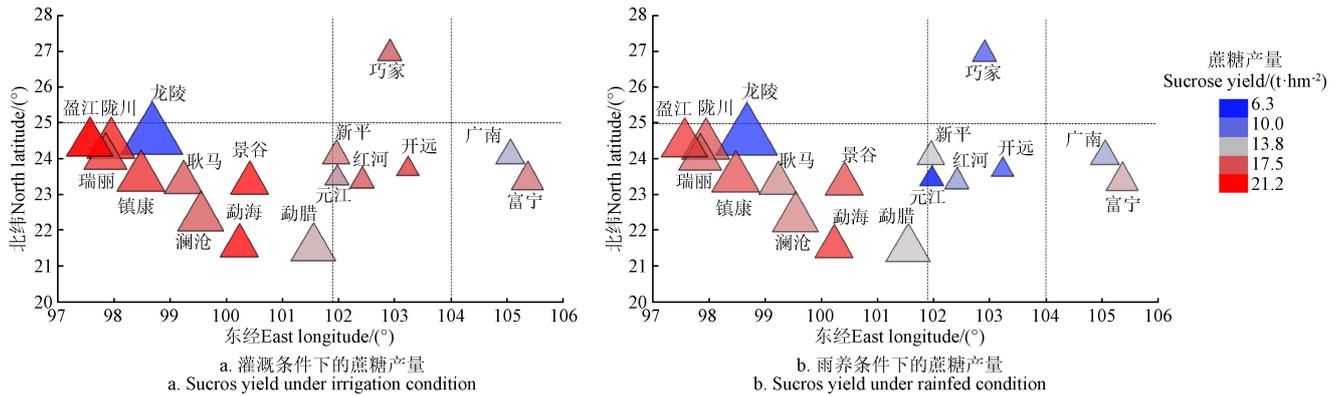
表 4 站点尺度上的灌溉-雨养产量差及其水分利用效率

Table 4 Yield gap between irrigated and rainfed condition and its water use efficiency at different stations scale

生态区 Ecological region	站点 Station	蔗茎产量差 Cane yield gap/ (t·hm ⁻²)	蔗茎糖分差 Sugar content gap/%	蔗糖产量差 Sucrose yield gap/ (t·hm ⁻²)	需水量差 Water demand gap/mm	水分利用效率 Water use efficiency/ (kg·m ⁻³)
湿润区 Humid region	耿马	10.2	-0.1	1.5	180.1	1.7
	镇康	7.4	-0.1	1.0	154.9	1.4
	陇川	10.8	-0.2	1.5	181.0	1.8
	盈江	18.9	-0.1	2.9	203.9	2.8
	瑞丽	8.7	0.0	1.3	170.9	1.5
	龙陵	0.3	0.0	0.0	102.1	0.1
	景谷	12.2	-0.2	1.7	203.5	1.8
	澜沧	8.1	-0.1	1.2	174.1	1.4
	勐海	8.0	-0.1	1.2	160.7	1.5
	勐腊	6.9	-0.1	0.9	119.6	1.7
	广南	5.7	-0.4	0.5	114.9	1.5
	富宁	14.4	-0.9	1.4	162.8	2.7
半湿润区 Semi-humid region	开远	56.0	1.4	9.0	457.0	3.7
	红河	37.7	0.2	5.6	314.2	3.6
	元江	61.1	1.6	9.1	613.7	3.0
	新平	17.6	0.1	2.6	235.1	2.2
	巧家	49.4	1.0	7.7	491.5	3.0

注：蔗茎糖分差为负值表示该站点灌溉条件下的蔗茎糖分低于雨养条件下的蔗茎糖分。

Note: The negative indicates that the sugar content under the irrigation condition of the site is lower than that under the rainfed condition.



注：三角符号代表站点，三角形大小代表降雨量多少；颜色代表蔗糖产量，红色为高产，蓝色为低产。

Note: The triangle symbol represents station, the size of the triangle represents the amount of precipitation; the colors of site represent sucrose yield, red for high yield and blue for low yield.

图3 站点地理位置和气候特征对灌溉和雨养蔗糖产量的影响

Fig.3 Effects of geographic location and climatic characteristics of site on sucrose yield under irrigated and rainfed conditions

2.3.2 水氮管理对甘蔗产量的影响

利用 APSIM-Sugar 模型的自动灌溉和定量施肥功能，在无水分胁迫条件下模拟不同播期 5 种施氮水平（0, 60, 120, 240, 480 kg/hm²）的甘蔗产量，进而分析湿润蔗区（图 4a）和半湿润蔗区（图 4b）甘蔗高产高效所需的水氮优化组合。从图 4a 可知，湿润蔗区不同施氮水平的蔗茎产量总体表现为：秋植（45~208 t/hm²）>春植（41~142 t/hm²）>冬植（39~139 t/hm²）>夏植（34~82 t/hm²）。不施氮（N=0）条件所需的灌溉量最少（185~795 mm），蔗茎产量也最低，仅 34~50 t/hm²；施氮 60 kg/hm²，需要 229~910 mm 灌溉量，可获得 52~116 t/hm² 蔗茎产量；施氮 120 kg/hm²，最大灌溉量增加到 1 072 mm，最大可收获 176 t/hm² 蔗茎产量；施氮 240~480 kg/hm²，最大灌溉量和最大可收获蔗茎产量差异很小，分别为 1181~1 195 mm，206~208 t/hm²。从图 4b 可知，半湿润蔗区不同施氮水平的蔗茎产量同样表现为：秋植（43~203 t/hm²）>春植（42~157 t/hm²）>冬植（40~150 t/hm²）>夏植（28~96 t/hm²）。不施氮（N=0）条件所需的灌溉量较湿润区多（318~918 mm），蔗茎产量较低，仅 28~49 t/hm²；施氮 60 kg/hm²，需要 424~1 146 mm 灌溉量，可获得 52~121 t/hm² 蔗茎产量；施氮 120 kg/hm²，最大灌溉量增加到 1 419 mm，最大可收获 176 t/hm² 蔗茎产量；施氮 240~480 kg/hm²，最大灌溉量和最大可收获蔗茎产量差异也很小，分别为 1 523~1 541 mm，202~203 t/hm²。

从线性拟合方程的斜率上也可看出，随着施氮水平的提高，增加灌溉量获得的产量收益也随之提高，其中 60 kg/hm² 的施氮水平下，灌水利用效率系数（斜率）较低，湿润区为 0.015~0.023，半湿润区为 0.011~0.050，施氮量为 120~240 kg/hm² 时，各播期甘蔗的灌水利用效率系数（斜率）迅速提高（>0.051），湿润区最高达 0.077，半湿润区最高达 0.065；施氮量为 240~480 kg/hm² 时，雨养产量和灌水利用效率系数（斜率）均开始有所下降，灌溉产量基本达到峰值。综合分析后得出不同生态蔗区

各播期甘蔗高产高效的水氮优化组合如下：

在半湿润蔗区，春植蔗生育期为 360 d，在 120 kg/hm² 的施氮量和 970 mm 的灌溉量下，可获得 133 t/hm² 的蔗茎产量；夏植蔗生育期为 270 d，在 60 kg/hm² 的施氮量和 598 mm 的灌溉量下，可获得 73 t/hm² 的蔗茎产量；秋植蔗生育期为 480 d，在 240 kg/hm² 的施氮量和 1 342 mm 的灌溉量下，可获得 188 t/hm² 的蔗茎产量；冬植蔗生育期为 360 d，在 120 kg/hm² 的施氮量和 1 015 mm 的灌溉量下，可获得 128 t/hm² 的蔗茎产量。

在湿润蔗区，春植蔗生育期为 360 d，在 120 kg/hm² 的施氮量和 656 mm 的灌溉量下，可获得 122 t/hm² 的蔗茎产量；夏植蔗生育期为 270 d，在 60 kg/hm² 的施氮量和 347 mm 的灌溉量下，可获得 66 t/hm² 的蔗茎产量；秋植蔗生育期为 480 d，在 240 kg/hm² 的施氮量和 964 mm 的灌溉量下，可获得 188 t/hm² 的蔗茎产量；冬植蔗生育期为 360 d，在 120 kg/hm² 的施氮量和 694 mm 的灌溉量下，可获得 117 t/hm² 以上的蔗茎产量。

2.3.3 品种差异对甘蔗产量的影响

品种基因型差异也会对甘蔗产量和糖分产生影响，在半湿润蔗区（表 5），参试品种的蔗茎产量均值为 93.8~104.5 t/hm²，变异系数较湿润区大，为 24.3%~25.9%；蔗茎糖分为 13.6%~15.8%，变异系数较湿润区小，为 5.9%~8.4%；蔗糖产量为 14.2~15.9 t/hm²，变异系数较湿润区大，为 5.9%~8.4%。其中云蔗 05-51 的蔗茎产量略高于对照 ROC22，糖分和蔗糖产量显著优于对照品种 ROC22，且变异系数较小，可作为半湿润蔗区的主推品种。福农 41 蔗茎产量与对照相当，糖分和蔗糖产量均优于对照，但变异系数相对较大。桂糖 42 和桂柳 05-136 的蔗茎产量低于 ROC22，但糖分和蔗糖产量优于对照，且变异系数相对较小。

在湿润蔗区（表 6），参试品种的平均蔗茎产量为 101.9~116.5 t/hm²，变异系数较半湿润区小（16.2%~19.1%）；蔗茎糖分为 14.3%~16.1%，变异系数较湿润区大（9.0%~13.8%）；蔗糖产量为 15.9~18.9 t/hm²，变

异系数较湿润蔗区小 (22.0%~26.4%)。其中云蔗 05-51 蔗茎产量、糖分和蔗糖产量均显著优于对照 ROC22, 且变异系数最小, 可作为湿润蔗区的主推品种。桂柳 05-136 产量与对照相当, 糖分显著优于对照, 蔗糖产量优于对

照但不显著, 变异系数较小, 也可作为湿润蔗区的主推品种之一。福农 41 和桂糖 42 的蔗茎产量均低于对照, 但桂糖 42 的糖分显著高于对照, 两者的蔗糖产量与对照相当, 但变异系数较大。

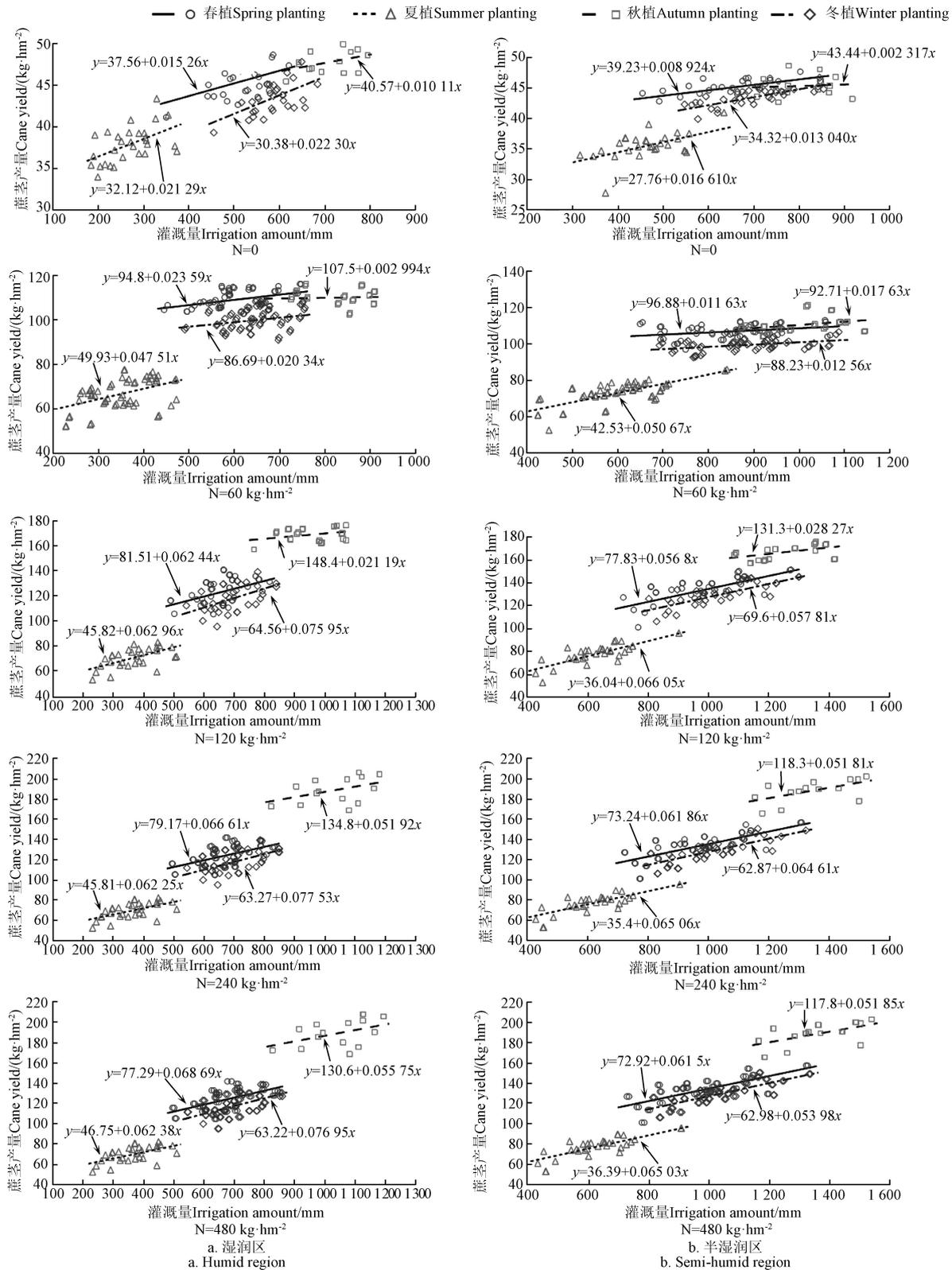


图 4 不同施氮水平下灌溉量对蔗茎产量的影响

Fig.4 Effect of irrigation amount on cane yield at different fertilizer-N levels

表 5 半湿润区品种基因型对产量糖分的影响

Table 5 Effect of cultivar genotype on yield and sugar content in semi-humid region

品种 Cultivar	蔗茎产量 Cane yield		蔗茎糖分 Sugar content		蔗糖产量 Sucrose yield	
	MV/ (t·hm ⁻²)	CV/%	MV/%	CV/%	MV/ (t·hm ⁻²)	CV/%
ROC22	103.0 a	25.9	13.6 c	8.4	14.2 c	29.8
FN41	102.6 a	25.5	14.9 b	7.2	15.4 a	28.6
GT42	93.8 b	24.3	15.7 a	6.9	14.9 bc	27.9
GL05136	95.9 b	25.3	15.8 a	5.9	15.2 ab	26.7
YZ0551	104.5 a	25.2	15.1 b	6.7	15.9 a	27.8

注: 同列不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$)。MV 代表均值; CV 代表变异系数。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between varieties ($P<0.05$). MV represents mean value; CV represents coefficient of variation. The same below.

表 6 湿润区品种基因型对产量糖分的影响

Table 6 Effect of cultivar genotype on yield and sugar content in humid region

品种 Cultivar	蔗茎产量 Cane yield		蔗茎糖分 Sugar content		蔗糖产量 Sucrose yield	
	MV/ (t·hm ⁻²)	CV/%	MV/%	CV/%	MV/ (t·hm ⁻²)	CV/%
ROC22	112.7 b	17.6	14.3 c	11.2	16.4 bc	25.2
FN41	102.2 c	19.1	14.5 c	12.4	15.9 c	26.4
GT42	101.9 c	18.8	15.4 b	13.8	16.0 c	25.4
GL05136	112.8 b	17.3	15.2 b	12.5	16.7 b	24.4
YZ0551	116.5 b	16.2	16.1 a	9.0	18.9 a	22.0

3 讨论

2021 年周一帆等^[25]基于统计数据和文献研究认为, 云南蔗区的农户平均单产(蔗茎产量)为 62.0 t/hm², 甘蔗生产潜力为 147.2 t/hm², 仍有 57.9% 的产量潜力可发挥。本研究基于 APSIM 模型模拟研究认为, 典型春播条件下, 云南低纬高原湿润区的产量潜力为 123.1~134.6 t/hm², 半湿润区的产量潜力为 99.3~132.7 t/hm², 尽管当前农户平均单产已提高到 72 t/hm², 但仍有 25.2%~49.6% 的增产空间。该研究结果在数值上较周一帆等文献统计结果偏低, 主要原因包括以下两个方面: 一方面是由于调参试验数据集并非来自完全消除水氮胁迫和病虫害影响的高产试验田, 当前模型参数设置对 RUE 等关键参数取值偏低(新植 1.8, 宿根 1.65), 特别是 APSIM-Sugar 模型对宿根蔗的模拟一直不够理想, 亟待改进; 另一方面与田间管理模块不完善和数据缺失有很大关系, 其结果就是模型对实际产量的模拟较为准确, 但在模拟潜在产量时系统性偏低, 这是当前作物模型研究中普遍存在的一个共性问题。生产试验数据也证实了模型模拟结果在多数非极端胁迫试验条件下是比较可靠的, 特别是在品种与环境互作影响的评估方面, 但对精细管理的高产示范试验田产量模拟结果偏低。以云南低纬高原蔗区实际为例, 2018 年, 云蔗 05-51 在春播条件下, 在耿马县万亩连片示范中, 实现单产 137.55 t/hm²^[26], 模型模拟出云蔗 05-51 在耿马县的最大单产为 137 t/hm², 与实际产量相当接近。2022 年, 新品种云蔗 08-1609 在春播条件, 在富宁县万亩连片示范中, 实现单产 146.2 t/hm²^[27],

模型中目前尚未构建云蔗 08-1609 的遗传参数, 但大田试验证明, 通过生态区划、品种改良和水肥管理优化, 云南蔗区的甘蔗产量还有很大的提升空间。近年来通过云南蔗区生态区划和高标准蔗园建设, 播期水肥条件优化和品种改良, 甘蔗单产和糖分提高较快^[28], 在此过程中, 甘蔗模型本地化应用发挥了重要作用, 尽管还存在诸多需要改进的问题和应用局限, 但未来发展趋势和应用前景可观。

从气候环境因素看, 云南低纬高原蔗区立体气候特征突出, 影响甘蔗潜在产量的 3 个关键环境因子日照、积温和降雨与海拔关系密切。滇西南湿润蔗区属于高产优势蔗区, 该地区气候湿润温暖, 降雨充沛, 光照条件好, 雨养型和灌溉型甘蔗均可获得较高的蔗糖产量; 但海拔过高 (>1 500 m), 降雨过量 (>2 100 mm) 也可能导致积温不足, 甘蔗倒伏, 造成产量糖分损失; 在滇东南湿润蔗区阴雨天气和低日照时数 (<1 700 h) 是最大的产量糖分限制因子。而滇中半湿润蔗区气候多为干热少雨、日照充足, 降雨不足 (<1 500 mm) 成为最大的产量限制因子, 特别是冬春干旱严重, 但该地区灌溉-雨养产量差大, 昼夜温差大, 非常有利于甘蔗节水灌溉和高糖生产潜力的发挥。

从水氮优化管理看, 半湿润蔗区水分利用效率较高, 灌溉-雨养潜在产量差大, 通过灌溉甘蔗产量提高 17.6~61.1 t/hm², 蔗糖分提高 0.06%~1.60%, 适合发展节水灌溉高产高糖种植模式; 而湿润蔗区, 灌溉-雨养潜在产量差小, 通过灌溉蔗茎产量提高 0.31~18.9 t/hm², 但蔗茎糖分减少 0.01%~0.90%, 适合发展播期调控雨养型稳产高糖种植模式。上述结论在大田生产实践方面已有验证, 如刘少春等^[29]在半湿润蔗区(开远), 比较分析了 3 个不同灌溉量对产量和蔗糖分的影响, 结果表明灌溉 150、75、45 m³/hm² 三种灌溉处理的甘蔗产量均极显著高于不灌溉+覆膜和不灌溉不覆膜 2 个处理, 灌溉量 150 m³/hm² 的甘蔗产量显著高于灌溉 75 m³/hm², 极显著高于灌溉 45 m³/hm²; 郭家文等^[30]也证实, 提高 0~40 cm 土层的土壤含水率, 可显著提高甘蔗的株高和产量; 赵俊等^[31]在半湿润区元江开展的 8 个品种 2 个处理(干旱雨养和正常灌溉)试验研究表明, 多数甘蔗品种的蔗糖分均表现为正常灌溉高于干旱雨养。王鞠萱等^[32]利用湿润蔗区勐腊县连续 3 个榨季的气象数据及 4 个甘蔗主栽品种蔗糖分数据进行的相关分析结果显示, 降雨量、相对湿度与甘蔗蔗糖分呈显著负相关, 在湿润蔗区进行灌溉会导致蔗糖分下降。

在品种基因型差异上, 在半湿润区, 模拟分析的云蔗 05-51 蔗糖产量和糖分潜力显著优于对照品种 ROC22, 且变异系数相对较小, 可作为半湿润蔗区的主推品种。在湿润蔗区桂柳 05-136、云蔗 05-51 的糖分潜力显著优于对照品种 ROC22, 且变异系数相对较小, 可作为湿润蔗区的主推品种, 而福农 41 号、桂糖 42 号产量和糖分潜力与对照品种 ROC22 号比较, 蔗糖差异不显著, 推广潜力小。研究结果与李如丹等^[19]对中国主栽甘蔗品种生物

学特性的研究相一致, 云蔗 05-51 具有较高的产量, 推广潜力大, 桂柳 05-136 宿根蔗具有较好的单位面积产糖量, 两个在低纬高原蔗区结合气候条件和栽培模式, 可以大规模推广。从低纬高原蔗区实际的品种推广应用面积来看, 2022 年, 云蔗 05-51 推广面积已达 33 460 hm^2 , 主要适宜于半湿润蔗区和旱地蔗区, 桂柳 05-136 推广面积 32 666 hm^2 , 主要适合于滇西南湿润蔗区。特别是云蔗 05-51, 模拟蔗茎产量和蔗糖产量均居最高水平, 该品种可深入研究其抗旱生理和机制研究, 为低纬高原抗旱品种筛选和抗旱栽培提供依据。

4 结论

基于中国低纬高原生态蔗区 17 个代表站点 1981—2010 年的气象资料, 采用田间试验数据调查结合甘蔗模型模拟分析的方法, 解析甘蔗生产潜力和产量差, 得到以下结论:

1) 中国低纬高原不同生态蔗区的甘蔗生产潜力和产量差存在显著差异, 且年际变异较大。湿润蔗区的灌溉生产潜力为 134.6 t/hm^2 , 雨养生产潜力为 123.1 t/hm^2 , 灌溉-雨养产量差为 11.5 t/hm^2 ; 半湿润蔗区的灌溉生产潜力为 132.7 t/hm^2 , 雨养生产潜力为 99.3 t/hm^2 , 灌溉-雨养产量差为 33.4 t/hm^2 。以当前农户实际灌溉产量 62 t/hm^2 和实际雨养产量 82 t/hm^2 为基准进行估算, 湿润蔗区的雨养-农户蔗茎产量差为 61.1 t/hm^2 , 灌溉-农户产量差为 52.6 t/hm^2 , 增产潜力为 39.1%~45.4%; 半湿润蔗区的雨养-农户产量差为 37.3 t/hm^2 , 灌溉-农户产量差为 50.5 t/hm^2 , 增产潜力为 28.1%~38.2%。

2) 在站点水平的水分利用效率上, 半湿润蔗区灌溉产量较雨养产量提升明显 (17.6~61.1 t/hm^2), 虽然灌溉需水量较大, 但水分利用效率高, 收益大 (2.2~3.7 kg/m^3), 合理灌溉可增加糖分 0.1%~1.6%。湿润蔗区灌溉产量较雨养产量提升幅度较小 (0.3~18.9 t/hm^2), 虽然灌溉需水量较少, 但水分利用效率低, 收益差 (0.1~2.8 kg/m^3), 并且可能造成 0.1%~0.9% 的糖分损失。

3) 蔗区生态气候、播期水氮管理优化和良种推广是影响和提升甘蔗生产潜力的重要因素。在生态气候上, 湿润蔗区降雨充足, 灌溉-雨养潜在产量差小, 灌溉条件下增产效果不明显, 还可能降低糖分, 适合采用自然雨养为主, 注重高产稳产的种植策略; 半湿润蔗区降雨不足, 灌溉-雨养潜在产量差大, 灌溉条件下增产增糖效果明显, 适合采用节水灌溉为主, 注重高糖高效的种植策略。在播期和水氮优化上, 春植蔗生育期长度适中 (360 d), 水氮需求适中 (施氮 120 kg/hm^2 , 湿润区灌水 656 mm, 半湿润区灌水 970 mm), 远低于秋植蔗的生育期时间 (480 d) 和水氮需求 (施氮 240 kg/hm^2 , 湿润区灌水 964 mm, 半湿润区灌水 1 342 mm), 但仍可获得较高的产量 (122~133 kg/hm^2), 因此以春植蔗为主的播期和水氮优化种植模式在低纬高原蔗区被广泛接受, 是促进甘蔗产业提质增效的有效措施。在良种推广上, 云蔗 05-51 产量表现突出, 可作为湿润蔗区和半湿润蔗区主推品种, 桂柳 05-136 糖分表现突出, 可作为湿润蔗区主推品种。

[参 考 文 献]

- [1] 张跃彬. 现代甘蔗糖业[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 张跃彬, 樊仙, 毛钧, 等. 中国主产蔗区气候生态空间分布特征研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2281-2288. ZHANG Yuebin, FAN Xian, MAO Jun, et al. Ecological region division for China's main sugarcane producing area through meteorological and ecological characters[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences. 2021, 34(10): 2281-2288. (in Chinese with English Abstract)
- [3] 张跃彬, 邓军, 胡朝晖. “十三五”我国蔗糖产业现状及“十四五”发展趋势[J]. 中国糖料, 2022, 44(1): 71-76. ZHANG Yuebin, DENG Jun, HU Zhaohui. The 13th five-year plan of cane sugar industry in china and development trend of the 14th five-year plan[J]. Sugar Crops of China, 2022, 44(1): 71-76. (in Chinese with English Abstract)
- [4] 张跃彬. 低纬高原甘蔗产高糖高效理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [5] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444-459. SUN Yangyue, SHEN Shuanghe. Research progress in application of crop growth mode[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 444-459. (in Chinese with English Abstract)
- [6] KEATING B A, ROBERTSON M J, MUCHOW R C, et al. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module[J]. Field Crop Research, 1999, 61(3): 253-271.
- [7] O'LEARY G J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield[J]. Field Crops Research, 2000, 68: 97-111.
- [8] LISSON S N, INMAN-BAMBER N G, ROBERTSON M J, et al. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems[J]. Field Crop Research, 2005, 92: 321-335.
- [9] THORBURN P J, MEIER E A, PROBERT M E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems recent advances and applications[J]. Field Crop Research, 2005, 92: 337-351.
- [10] 杨昆, 蔡青, 刘家勇, 等. 甘蔗生长模型研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 29-34. YANG Kun, CAI Qing, LIU Jiayong, et al. Advances in simulation models of sugarcane growth[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2015, 41(1): 29-34. (in Chinese with English Abstract)
- [11] 毛钧, INMAN-BAMBER N G, 杨昆, 等. 甘蔗农业生产系统模拟模型模块化设计与应用研究进展[J]. 中国糖料, 2017, 39(1): 44-50. MAO Jun, INMAN-BAMBER N G, YANG Kun, et al. Modular design and application of agricultural system simulating model for sugarcane (APSIM-Sugar)[J]. Sugar Crops of China. 2017, 39(1):44-50. (in Chinese with English Abstract)
- [12] 毛钧, INMAN-BAMBER N G, 陆鑫, 等. APSIM-Sugar 模型在云南半湿润半干旱蔗区的适应性研究[J]. 西南农

- 业学报, 2018, 31(12): 2506-2513.
- MAO Jun, INMAN-BAMBER N G, LU Xin, et al. Adaptability of APSIM-Sugar model in semi-humid semiarid climate region of Yunnan province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(12): 2506-2513. (in Chinese with English Abstract)
- [13] 毛钧, 王靖, 黄明霞, 等. 云南蔗区播期与水氮耦合对甘蔗产量和糖分影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 134-144.
- MAO Jun, WANG Jing, HUANG Mingxia, et al. Effects of sowing date, water and nitrogen coupling management on cane yield and sugar content in sugarcane region of Yunnan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(16): 134-144. (in Chinese with English Abstract)
- [14] 玉树斌, 姚克敏, 梁洪海. 广西甘蔗的气候生产力特征分析[J]. *甘蔗糖业*, 1987(8): 8-15, 21.
- YU Shubing, YAO Kemin, LIANG Honghai. Analysis of climate productivity characteristics of sugarcane in Guangxi[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 1987(8): 8-15, 21. (in Chinese with English Abstract)
- [15] 何春林, 陈彪. 雷州半岛旱坡蔗地的自然生产潜力及限制因子分析[J]. *中国糖料*, 1996(3): 17-23.
- HE Chunlin, CHEN Biao. Analysis on nature productive potential and restrictive factors of drysloping sugarcane fields in Leizhou peninsula[J]. *Sugar Crops of China*, 1996(3): 17-23. (in Chinese with English Abstract).
- [16] 杨洪昌, 范源洪, 吴才文, 等. 德宏州甘蔗高产潜力分析[J]. *甘蔗糖业*, 2007(1): 13-15.
- YANG Hongchang, FAN Yuanhong, WU Caiwen, et al. Analysis of yield potential of sugarcane in Dehong region, Yunnan[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2007(1): 13-15. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 王雪丽, 钱慧慧, 陈雨琪, 等. 基于 GIS 的广西甘蔗生产潜力评价[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(19): 4614-4619.
- WANG Xueli, QIAN Huihui, CHEN Yuqi, et al. Evaluation of the potential productivity of sugarcane in Guangxi Zhuang Autonomous Region based on the GIS[J]. *Hubei Agricultural Sciences*. (in Chinese with English Abstract)
- [18] 阮红燕. 气候变化对广西甘蔗生产潜力影响的模拟研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- RUAN Hongyan. Climate Change Projects Impacts on Sugarcane Productivity in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi university, 2018. (in Chinese with English Abstract)
- [19] 李如丹, 毛钧, 刀静梅, 等. 中国主栽甘蔗品种生物学特性研究[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(7): 1347-1356.
- LI Rudan, MAO Jun, DAO Jingmei, et al. Biological characteristics of main sugarcane cultivars in china[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(7): 1347-1356. (in Chinese with English Abstract)
- [20] 高亮之. *农业模型学*[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 1-19.
- [21] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2731-2741.
- YANG Xiaoguang, LIU Zhijuan. Advances in research on crop yield gaps[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(14): 2731-2741. (in Chinese with English Abstract)
- [22] 刘志娟, 杨晓光, 吕硕, 等. 东北三省春玉米产量差时空分布特征[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1606-1616.
- LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang, LYU Shuo, et al. Spatial-temporal variations of yield gaps of spring maize in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(9): 1606-1616. (in Chinese with English Abstract)
- [23] 米娜, 蔡福, 张玉书, 等. 雨养作物产量差研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 140-147.
- MI Na, CAI Fu, ZHANG Yushu, et al. Advanced in research on rainfed crop yield gaps[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(6): 140-147. (in Chinese with English Abstract)
- [24] 范芳钰. 低纬高原甘蔗产业高糖技术创新应用支撑云南蔗糖分、出糖率创新高[Z/OL]. (2022-06-27)[2022-10-14]. http://yn.news.cn/nets/2022-06/27/c_1310634267.htm
- [25] 周一帆, 杨林生, 孟博, 等. 中国甘蔗主产区产量差及影响因素分析[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(11): 2377-238.
- ZHOU Yifan, YANG Linsheng, MENG Bo, et al. Analysis of yield gaps and limiting factors in china's main sugarcane production areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2377-238. (in Chinese with English Abstract)
- [26] 虎遵会, 杨良旺. 甘蔗新品种云蔗 05-51 在耿马引种成功平均亩产达 9.17 吨[DB/OL]. (2016-11-27)[2022-10-15]. https://www.sohu.com/a/120003466_114731.
- [27] 陈云芬, 邓蕊丹. 云南自育甘蔗品种“云蔗 08-1609”在富宁创平均亩产高产水平[Z/OL]. (2022-03-10) [2022-10-15]. <https://yn.yunnan.cn/system/2022/03/10/031963789.shtml>.
- [28] 陈云芬. 云南低纬高原甘蔗科技创新结硕果我省甘蔗蔗糖分和出糖率均居全国第一[Z/OL]. (2022-06-28) [2022-10-15]. https://www.sohu.com/a/561638738_115092
- [29] 刘少春, 张跃彬, 郭家文, 等. 地膜覆盖下节水灌溉对旱地甘蔗产量和糖分的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2014(6): 16-18.
- LIU Shaochun, ZHANG Yuebin, GUO Jiawen, et al. Effects of mulched drip irrigation on yield and sugar content of drought sugarcane[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(6): 16-18. (in Chinese with English Abstract)
- [30] 郭家文, 陈建国, 张跃彬, 等. 后期灌水对蔗田土壤水分及甘蔗产量、品质性状的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 57-66.
- GUO Jiawen, CHEN Jianguo, ZHANG Yuebin, et al. Influence to soil moisture yield and quality components of sugarcane by irrigation in maturing stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 57-66. (in Chinese with English Abstract)
- [31] 赵俊, 白亚东, 赵兴东, 等. 灌溉与干旱条件下甘蔗工农艺性状的相关性分析与品种抗旱性评价[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(6): 579-86.
- ZHAO Jun, BAI Yadong, ZHAO Xingdong, et al. Drought resistance evaluation and correlation analysis of agronomic and quality traits of sugarcane under irrigated and rainfed conditions[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*

- (Natural Sciences), 2016, 42(6): 579-586. (in Chinese with English Abstract)
- [32] 王鞠萱, 陈优强, 冯晓敏, 等. 气象因子对云南勐腊蔗区主栽甘蔗品种糖分性状的影响[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(6): 25-32.

WANG Juxuan, CHEN Youqiang, FENG Xiaomin, et al. Effects of meteorological factors on sugar traits of the main sugarcane cultivars in mengla county, Yunnan province[J]. Sugarcane And Canesugar, 2020, 49(6): 25-32. (in Chinese with English Abstract)

Simulating sugarcane yield potential in the low latitude plateau of China based on APSIM

ZHANG Yuebin^{1,2}, MAO Jun^{2,3*}, LI Rudan², DAO Jingmei², YU Lingxiang⁴, WANG Jing³

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan, 661699, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. Yunnan Climate Center, Kunming, 650034, China)

Abstract: Sugarcane is one of the major sugar crops in the dominant sugarcane areas of Yunnan Province of China, located in the traditional low latitude plateau with the most abundant ecological regions for sugarcane growing. In this study, the cane yield potential and yield gap matters were analyzed to greatly promote cane production on large scale. The meteorological data was collected from 1981 to 2010 across 17 locations under varying ecotypes, and then combined with data obtained from the field experiments and APSIM (agricultural production systems simulator) modeling. The simulation was performed on the cane yield and sugar content of dominant sugarcane cultivars under full irrigation and nature rain-fed conditions in different ecotypes regions. The results indicated that there were significant differences in the low-latitude plateau, while the large interannual varied greatly from the different levels of the cane yield potential and yield gaps. Furthermore, the yield potential was 123.1-134.6 t/hm² under the typical spring planting conditions, if as humid region, or 99.3-132.7 t/hm² if as a semi-humid region. Although the actual cane yield reached 72.0 t/hm², there were still 25.2% to 45.4% cane yield potential, 7.4% to 11.1% sugar content yield potential, and 25.5% to 49.7% sucrose yield potential were expected in the low latitude plateau. Three key elements were selected to enhance the yield potential of sugarcane, including the suitable ecological climate, the optimization of sowing date, water, and nitrogen management, as well as the promotion and planting of excellent sugarcane varieties. The humid region presented sufficient precipitation, indicating the small gap of cane yield potential between irrigation and rainfed condition in terms of ecological climate. By contrast, there was no significant between the irrigation and rainfed cane yield, leading to a decrease in the sugar content. Therefore, the natural rainfed was suitable as the main sugarcane planting strategy in a humid region, particularly on the higher and stabler cane yield. There was a significant yield increase by irrigation in the semi-humid region with insufficient precipitation, due to the larger irrigation-rainfed yield gap. It was more suitable for water-saving irrigation as the main sugarcane planting strategy, focusing on the higher sugar content and water-nitrogen use efficiency. In terms of sowing season and water-nitrogen management optimization, the spring cane presented moderate growing days (360 d), moderate water-nitrogen demand (N-fertilization 120 kg/hm², irrigation 656 mm in humid regions, and 970 mm in semi-humid region), which was far lower than that of the autumn cane demand (growing 480 d, N-fertilization 240 kg/hm², irrigation 964 mm in the humid region and 1 342 mm in the semi-humid region), meanwhile the spring cane still remained the relatively high cane yield (122-133 t/hm²). The spring cane dominated the planting mode and combined with the optimization of the sowing-date. The water-nitrogen management was widely accepted as effective cultivation to improve the sugarcane yield and water-nitrogen use efficiency in the low latitude plateau. In the promotion of excellent cultivars, the YZ0551 was recommended as the main cultivar in both humid and semi-humid regions for outstanding cane yield performance. GL05136 was also recommended as the main cultivar in the humid region for its outstanding sugar content performance. The finding can provide a basis for the sustainable development of the sugarcane industry in the low-latitude plateau cane area, especially water-saving and drought-resistant cultivation.

Keywords: crop; model; irrigation; climate; yield; sugar content