

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.54113

长期秸秆还田与深松通过改善土壤环境与棉花光合特性提高滨海盐碱地棉花产量

赵佳雪¹ 周龙昊¹ 郭岂源¹ 尚伦霄¹ 王 涵¹ 刘志涛¹ 陈 曦²
张晓佩¹ 宋宪亮¹ Ahmedov Miraziz Baltaevich¹ 毛丽丽^{1,*}

¹ 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; ² 滨州职业学院, 山东滨州 256603

摘 要: 秸秆还田和深松是盐碱地改良的重要措施, 光合作用是作物产量形成的基础。在长期秸秆还田与深松措施下, 滨海盐碱棉田土壤肥力得到改善, 棉花生长发育和产量得到促进和提高, 但是盐碱地棉花生长发育改善和产量提高的机制有待进一步研究。本研究以滨海盐碱棉田为研究对象, 基于长期秸秆还田和深松试验设常规耕作(CK)、深松(S)、秸秆还田(R)和秸秆还田+深松(RS)共 4 个处理, 从棉田理化性质、棉花光合特性与光能利用、干物质积累和养分利用、产量形成等方面进行了研究。结果表明, 与 CK 相比, RS 处理土壤 pH 显著降低 6.6%~7.7% ($P < 0.01$), 土壤含盐量显著降低 21.2%~26.1% ($P < 0.01$); 棉花盛花结铃期的净光合速率、气孔导度和叶绿素相对含量 2 年平均分别提高 15.9%、42.9%和 12.7% ($P < 0.05$); 吐絮期的光合有效辐射、干物质质量和棉株氮素积累量 2 年平均分别增加 11.8%、59.8%和 72.0% ($P < 0.05$); 皮棉产量 2 年平均增加 56.2% ($P < 0.01$)。产量与蒸腾速率、气孔导度及光合有效辐射密切相关($r > 0.5$, $P < 0.05$)。综上, 长期秸秆还田+深松可通过改善盐碱地土壤环境, 增强棉花光合能力, 从而促进棉花生长, 提高产量, 是改良盐碱地和提高棉花产量的有效措施。

关键词: 盐碱地; 棉花; 秸秆还田; 深松; 光合特性; 冠层光合有效辐射; 皮棉产量

Long-term stubble return and subsoiling enhance cotton yields in coastal saline-alkali soils by improving soil conditions and photosynthetic characteristics

Zhao Jia-Xue¹, Zhou Long-Hao¹, Guo Qi-Yuan¹, Shang Lun-Xiao¹, Wang Han¹, Liu Zhi-Tao¹, Chen Xi², Zhang Xiao-Pei¹, Song Xian-Liang¹, Ahmedov Miraziz Baltaevich¹, and Mao Li-Li^{1,*}

¹ Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; ² Binzhou Polytechnic College, Binzhou 256603, Shandong, China

Abstract: Stubble returning and subsoiling are agronomic practices used to ameliorate saline-alkali soils, while photosynthesis is a fundamental physiological process underpinning crop yield formation. Long-term implementation of stubble returning and subsoiling can improve soil fertility in coastal saline-alkali cotton fields, thereby promoting cotton growth and yield. However, the photosynthetic response of cotton to long-term conservation tillage under saline-alkali conditions remains insufficiently understood. To investigate the effects of long-term conservation tillage on soil physicochemical properties, cotton photosynthetic performance, dry matter accumulation, nutrient uptake, and lint yield in coastal saline-alkali fields, four treatments were established: conventional tillage (CK), subsoiling (S), stubble returning (R), and the combination of stubble returning and subsoiling (RS). The results showed that, compared with CK, the RS treatment significantly reduced soil pH by 6.6%–7.7% and soil salt content by 21.2%–26.1% ($P < 0.01$). At full bloom and boll-setting stages, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and relative chlorophyll content (SPAD value) increased by 15.9%, 42.9%, and 12.7%, respectively ($P < 0.05$). During the boll-opening

本研究由山东省棉花产业技术体系(SDARS-03-04/06)和山东省重点研发计划项目(农业良种工程)(2023LZGC007)资助。

This study was supported by the Shandong Cotton Industry Technology System (SDARS-03-04/06) and the Shandong Provincial Key R&D Program (Agricultural Seed Improvement Project) (2023LZGC007).

* 通信作者(Corresponding author): 毛丽丽, E-mail: maolili6666@163.com

第一作者联系方式: E-mail: 19862530626@163.com

Received (收稿日期): 2025-09-23; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-03.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260203.0937.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

period, canopy photosynthetically active radiation (PAR), dry matter accumulation, and nitrogen uptake increased by 11.8%, 59.8%, and 72.0%, respectively ($P < 0.05$). Moreover, lint yield increased by 56.2% ($P < 0.01$). Lint yield was significantly positively correlated with transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and PAR ($r > 0.5$, $P < 0.05$). In conclusion, long-term stubble returning and subsoiling effectively improve the soil environment in saline-alkali fields, enhance cotton photosynthetic capacity, and significantly increase lint yield. This integrated conservation tillage strategy offers a practical and effective approach to promoting cotton growth and improving productivity in coastal saline-alkali regions.

Keywords: saline-alkali soils; cotton; stubble returning; subsoiling; photosynthetic properties; canopy photosynthetically active radiation; lint yield

棉花作为中国第一大经济作物和纺织工业的核心原料,是保障民生与产业安全的重要战略物资^[1]。近年来,我国种植业结构调整,国际粮棉等贸易争端加剧^[2],棉花价格波动增大,增加了棉花种植的不确定性。促进棉花增产稳产,对于增加农民收入、带动上下游产业发展、应对自然灾害和市场波动,以及实现农业可持续发展等方面均具有极其重要的意义。滨海盐碱地是我国重要的后备耕地资源,总面积约有667万公顷^[3],棉花作为耐盐碱作物,在盐碱地种植中具有重要经济价值^[4]。然而,盐碱化土壤因其高盐分、高pH、土壤物理结构不良等特性,造成作物生长发育不良和产量降低。因此,探索有效的盐碱地改良措施以提升棉花产量,对于充分利用滨海盐碱地资源、保障棉花生产稳定具有重要现实意义。

秸秆还田和深松作为改良滨海盐碱地的有效措施^[5],秸秆还田过程中释放的有机质可以增加土壤肥力、改善团粒结构、降低盐分聚集,间接缓解盐碱胁迫对作物的抑制作用^[6-7]。深松通过打破犁底层,增强土壤通透性,促进根系向深层土壤延伸,从而提高作物对土壤养分的利用效率^[8]。前人研究表明,长期秸秆还田和深松增加了土壤有机碳及其组分,改善了微生物群落的结构和功能,进而增强了滨海盐碱土壤有机碳的固持^[9-11]。耕作措施与滨海盐碱棉田改良关系密切,目前,关于秸秆还田及深松对盐碱地棉田土壤改良影响已有较多的研究,但滨海盐碱地棉田长期秸秆还田与深松对棉花生长发育和产量形成的影响过程尚不明确。

光合作用是作物干物质积累和产量形成的基础。光合特性作为衡量作物光能利用效率的核心指标,通过优化库-源关系及干物质积累的强度与分配方向,从而促进产量的提升^[12]。研究表明,土壤盐渍化严重制约了包括棉花在内的作物的叶绿素含量和气孔导度,最终引起光合速率下降和生物量积累的减少^[13-15],产量相应减少。小麦秸秆还田可以提高穗位叶的净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)、气孔导度

(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)^[16]。秸秆还田通过改善土壤养分,提高土壤碳氮比,促进玉米根茎叶的生长,进而提高叶面积指数^[17]。光合有效辐射是植物光合作用的能量来源,其增加会影响光反应速率,促进 P_n 的升高^[18]。马君等^[19]研究表明,深松 40 cm 明显改善棉花花铃期冠层结构和光合性能,提高棉花产量。秸秆还田和深松均可提高土壤碳氮含量,有利于根系吸收养分,同时促进叶片气孔开放,为水气交换提供良好环境,为光合作用和氮素吸收创造条件^[20]。本研究预测,秸秆还田与深松可通过改善滨海盐碱地土壤理化性质(降低 pH 与含盐量、提升有机碳与全氮含量),来促进棉花根系发育与养分吸收,进而增强叶片光合能力与冠层光能利用效率,最终通过增加干物质含量来提高棉花产量。因此,解析光合特性与光能利用之间的协同机制,对于开发利用滨海盐碱地及该区棉花产量品质的提升具有重要理论与实践意义。

综上,秸秆还田和深松对滨海盐碱土壤具有重要的改良效应,但是秸秆还田和深松对棉花光合特性的协同效应及其对棉花产量的影响尚不清楚。因此,本研究通过田间试验,系统分析长期秸秆还田与深松对滨海盐碱地的土壤理化性质、棉花光合特性、棉花冠层光合有效辐射以及干物质质量、氮素积累量的影响,并揭示棉花光合特性与产量形成的关系,旨在为滨海盐碱地棉花高产稳产栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在山东省滨州市滨城区(37°26'N, 118°09'E)进行,该区属温带季风气候,年均降水量 570 mm,年均气温 14.4℃。试验地土壤为滨海盐碱土,自 2012 年起每年进行秸秆还田(全量还田),每 3 年进行深松处理(38 cm)。棉花种植方式为多年连作,一年一熟。每年 4 月中下旬机械播种,地膜覆盖。2012 年的基础地力见表 1。

表 1 2012 年土壤基础地力
Table 1 Soil base fertility in 2012

年份 Year	土层 Soil layer (cm)	pH	含盐量 Salt content (g kg ⁻¹)	有机碳 Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	有效磷 Available phosphorous (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)
2012	0–20	8.48	4.15	5.11	0.65	1.42	18.50	146.90
	20–40	8.16	4.01	2.89	0.34	1.54	5.89	70.11

1.2 试验设计

2023 年和 2024 年在定位试验基础上进行研究, 棉花品种为“鲁棉研 37 号”, 设常规耕作(CK, 旋耕 20 cm)、深松(S, 播前每 3 年进行一次深松处理)、秸秆还田(R, 每年秋收后将棉花秸秆粉碎至 3~5 cm, 均匀撒施并旋耕入土, 旋耕 20 cm)、秸秆还田+深松(RS, 每年秸秆还田+3 年一次深松) 4 个处理, 随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 270 m² (30 m×9 m)。棉花于 4 月中下旬采取宽窄行种植(宽行 1 m, 窄行 0.5 m), 株距 0.25 m, 密度 51,300 株 hm⁻², 氮、磷、钾肥施用量分别为 N 120 kg hm⁻²、P₂O₅ 132 kg hm⁻² 和 K₂O 36 kg hm⁻², 其他田间管理同当地常规措施。

1.3 土壤理化性质测定

于 2023 年和 2024 年吐絮期采集土壤样品, 用土钻分别在每小区棉花宽行、窄行和株间取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土样, 各土层样品分别混合均匀, 自然风干后过 100 目筛, 测定相关指标。利用电导率法测定含盐量(g kg⁻¹); 利用 PHSJ-6L pH 计(土壤: 水=1: 2.5)测定 pH; 利用凯氏定氮法测定土壤全氮含量(g kg⁻¹); 通过水合热-重铬酸钾比色法测定土壤有机碳含量(g kg⁻¹)。利用 NaHCO₃ 浸提, 硫酸钼锑抗比色法测定土壤有效磷(mg kg⁻¹); 利用 NH₄OAc 浸提, 火焰光度法测定土壤速效钾(mg kg⁻¹); 利用 KCl 浸提, AA3 流动分析仪(SEAL, 德国)测定土壤硝态氮和铵态氮, 作为土壤速效氮含量(mg kg⁻¹)。

1.4 干物质量及氮素积累量的测定

在棉花蕾期、盛花结铃期和吐絮期分别取样, 每个小区选取连续棉株 3 株, 分器官放入 105℃ 烘箱杀青 30 min, 再以 80℃ 烘干至恒重后称取干重(dry matter content, DMA, g plant⁻¹)。

将烘干植株粉碎后用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解定容, 用全自动凯氏定氮仪(K1160)测定植株全氮含量, 由地上部干物质量×氮含量计算得出氮素积累量(nitrogen accumulation, NAA, kg hm⁻²)。

1.5 棉花光合特性的测定

1.5.1 光合参数的测定 选择晴朗天气, 在蕾期(播后 70 d)、盛花结铃期(播后 110 d)和吐絮期(播后 150 d)选取长势均匀一致且无病虫害的棉花, 以功能叶作为统一取样部位(生育前期功能叶为棉株倒 4 叶, 打顶后为棉株倒 3 叶), 使用 LI-6800 便携式光合仪(LI-6800 Portable Photosynthesis System, LI-COR, 美国)在晴天上午 10:00 至 11:30 之间测定棉花净光合速率(net photosynthetic rate, P_n , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、气孔导度(stomatal conductance, G_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)和胞间 CO₂ 浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$)。仪器设置: 光照强度控制为 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CO₂ 浓度维持在 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 叶室温度控制为 (28±2)℃, 相对湿度控制为 (60±5)%。每个处理连续测定 10 株并取其平均值。

1.5.2 光合有效辐射和光截获率的测定 每个小区选择标准化采样点以代表整个区域的棉花生长状况, 于晴朗天气的 11:00 至 13:00, 采用冠层分析仪 Sunscan, 分别在棉花 3 个关键生育期测定光合有效辐射量(photosynthetically active radiation, PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)和光截获率(light interception, PARin, %) [16]。最初, 在棉花冠层顶部 30 cm 处测定, 记为冠层上方光合有效辐射(PARt); 随后将探头向下水平翻转, 测量棉花冠层宽行和窄行反射的光合有效辐射, 取二者平均值, 记为冠层反射光合有效辐射(PARr); 最后位于棉花基部上方 20 cm 处水平向上测定, 将冠层宽行和窄行光合有效辐射的平均值作为冠层下方的光合有效辐射(PARb)。并通过下列公式计算:

$$\text{PAR} = \text{PARt} - \text{PARb} \tag{1}$$

$$\text{PARin} = (\text{PARt} - \text{PARr} - \text{PARb}) / \text{PARt} \tag{2}$$

1.5.3 叶绿素相对含量(SPAD 值)的测定 利用 Minolta SPAD-502 仪器, 测定棉花蕾期、盛花结铃期和吐絮期的 SPAD 值, 测定时每小区选取连续且长势均匀的 10 株棉花, 以功能叶作为统一取样部位

(生育前期功能叶为棉株倒4叶,打顶后为棉株倒3叶),测定棉花叶片的5个裂片,取平均值作为该株棉花的SPAD值。

1.5.4 叶面积指数的测定 采用 LAI-2200c 冠层分析仪(LI-COR, 美国)分别于棉花蕾期、盛花结铃期和吐絮期测定叶面积指数(leaf area index, LAI)。

1.6 产量及其构成因素的测定

在棉花收获前,从每个小区选取10株有代表性的棉株,统计收获的棉铃总数,计算平均单铃重、衣分和产量。

1.7 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 对数据进行处理, SPSS 22.0 软件进行数据分析,其中不同处理间差异显著性采用 Duncan 检验进行单因素方差分析,显著性水平设定为 $P < 0.05$;使用 Origin 2021 软件和 Chplot 网站(<https://www.chplot.online/>)绘图。

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田与深松对土壤化学性质的影响

由表2可知,2年内秸秆还田和深松措施显著降

低了土壤 pH 和含盐量,有机碳、全氮及速效养分含量显著增加。0~20 cm 土层中,与 CK 相比, S、R、RS 的 pH 值2年内显著降低 2.9%~7.7%;含盐量显著降低 7.2%~21.4%;有机碳含量显著增加 19.8%~78.2%;全氮含量显著增加 13.7%~61.2%;速效钾含量显著增加 21.0%~70.3%,速效氮含量在 R 与 RS 处理间无显著差异,RS 处理速效氮较 CK 2 年平均显著增加 31.5%,RS 处理有效磷较 CK 两年平均显著增加 37.5%。

在 20~40 cm 土层中,与 CK、S、R 相比,RS 的 pH 值2年内显著降低 3.3%~6.6%,含盐量显著降低 9.0%~26.1%;处理间有机碳和全氮的变化趋势一致,RS 的有机碳含量较 CK、S、R 显著增加 40.2%~85.7%,全氮含量显著增加 14.3%~60.0%;S、R 间速效钾含量差异不显著,S 与 RS 相比2年平均显著降低 26.3%,与 CK 相比显著增加 66.2%;S 处理有效磷较 R 有所增加,2 年增幅平均为 17.3%;RS 处理的速效氮含量较 CK 显著提高 16.8%。

2.2 长期秸秆还田与深松对棉花干物质质量(DMA)与氮素积累量(NAA)的影响

滨海盐碱地不同耕作措施下棉花干物质质量变化

表2 不同耕作措施对滨海盐碱棉花土壤 pH、含盐量、有机碳、全氮和速效养分含量的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on soil pH, salt content, organic carbon, total nitrogen and available nutrient in coastal saline-alkali cotton fields

年份 Year	土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	pH	含盐量 Salt content (g kg ⁻¹)	有机碳 Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorous (mg kg ⁻¹)
2023	0~20	CK	8.39 a	4.16 a	4.59 d	0.51 d	32.42 c	127.08 d	13.07 b
		S	8.15 b	3.86 b	5.50 c	0.58 c	37.03 b	160.10 c	14.46 b
		R	7.99 c	3.65 c	7.58 b	0.72 b	41.08 a	190.61 b	16.23 a
		RS	7.78 d	3.28 d	8.18 a	0.81 a	42.48 a	215.65 a	17.43 a
	20~40	CK	8.37 a	4.37 a	2.39 c	0.31 d	32.91 b	45.86 c	3.95 d
		S	8.15 b	3.75 b	3.08 b	0.39 c	34.86 b	77.67 b	5.00 b
		R	8.10 b	3.56 b	3.16 b	0.42 b	37.68 a	76.14 b	4.35 c
		RS	7.82 c	3.24 c	4.43 a	0.49 a	38.86 a	106.15 a	6.13 a
2024	0~20	CK	8.40 a	4.16 a	4.57 d	0.49 d	31.32 b	131.22 d	12.96 d
		S	8.15 b	3.82 b	5.50 c	0.57 c	38.44 a	158.73 c	15.15 c
		R	7.93 c	3.60 c	7.56 b	0.72 b	41.46 a	197.13 b	16.76 b
		RS	7.75 d	3.27 d	8.14 a	0.79 a	41.31 a	223.42 a	18.35 a
	20~40	CK	8.36 a	4.37 a	2.38 c	0.30 c	33.96 c	45.93 c	3.28 d
		S	8.17 b	3.79 b	3.06 b	0.36 bc	36.78 b	74.88 b	5.34 b
		R	8.08 b	3.55 c	3.13 b	0.42 ab	37.48 b	79.99 b	4.46 c
		RS	7.81 c	3.23 d	4.42 a	0.48 a	39.24 a	100.79 a	6.53 a

CK 表示常规耕作, S 表示深松耕作, R 表示秸秆还田, RS 表示深松且秸秆还田。不同小写字母表示相同年份相同土层处理间在 5% 水平上差异显著。

CK represents conventional tillage, S represents subsoiling, R represents stubble return, and RS represents the combination of subsoiling and stubble return. Different lowercase letters within the same year and the same soil layer indicate significant differences among treatments at the 5% level.

与植株氮素积累量变化如图 1 所示。不同时期不同耕作措施下棉花各器官的分配比例不同, 蕾期为叶>茎>根>生殖器官, 盛花结铃期为生殖器官>叶>茎>根, 吐絮期为生殖器官>茎>叶>根。2 年内干物质质量变化趋势一致(图 1-A), 2023 年棉株干物质质量在蕾期、盛花结铃期及吐絮期, 与 CK 相比, S、R、RS 分别提高 40.7%~91.5%、21.9%~49.8%、25.9%~42.9% ($P < 0.05$)。2024 年蕾期、盛花结铃期 RS 较 CK、S 和 R 干物质质量分别增加 24.6%~190.5%、24.6%~60.0% ($P < 0.01$), 吐絮期 S、R 和 RS 较 CK 分别增加 45.7%、64.3%和 76.6% ($P < 0.05$)。

秸秆还田与深松措施增加了氮素积累量(图 1-B), 2023 年蕾期叶中氮素积累量 RS 显著高于 CK、S、R (120.1%、30.3%、32.3%, $P < 0.05$), 生殖器官中

RS 处理氮素积累量在盛花结铃期显示出同样的优势, S 和 R 处理无显著差异。2024 年不同时期 S、R 和 RS 处理较 CK 处理氮素积累量增加 33.4%~281.5% ($P < 0.05$)。此外, 盛花结铃期 S 处理根部氮素积累量最高($P < 0.05$), RS 处理在茎、叶及生殖器官中氮素积累量均显著高于 CK 处理(55.2%~277.3%, $P < 0.05$), 表现出绝对优势。

2.3 长期秸秆还田与深松对棉花光合特性的影响

2.3.1 叶片光合特性参数

由图 2 可知, 2 年内光合参数变化趋势一致。2 年内盛花结铃期 P_n 值较蕾期和吐絮期高, 吐絮期最低(图 2-A)。在盛花结铃期, 与 CK 相比, 2023 年 RS 的 P_n 值显著提高 13.6% ($P < 0.05$), 2024 年 S 和 RS 的 P_n 值分别提高 9.1%和 18.6% ($P < 0.05$)。 T_r 随生长时期延长呈低-高-低变化趋势,

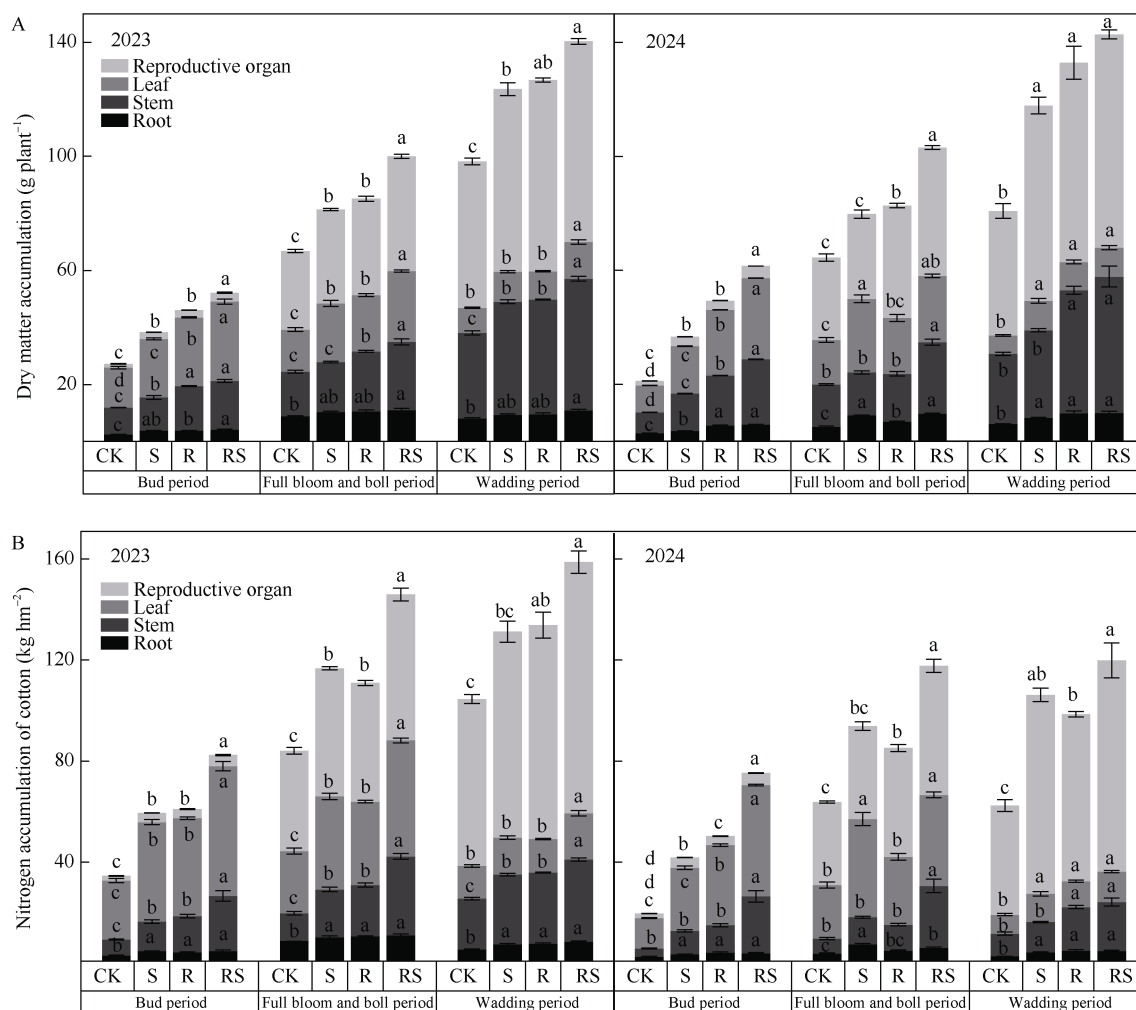


图 1 不同耕作措施下棉花干物质质量与氮素积累量的变化

Fig. 1 Changes in dry matter content and nitrogen accumulation in cotton under different tillage practices

处理同表 2。不同小写字母表示相同年份棉株同一器官相同时期处理间在 5% 水平上差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters within the same year indicate significant differences at the 5% level among treatments of the same organ at the same growth stages.

在盛花结铃期最高, 此时期植株代谢旺、需水量大(图 2-B); 2023 年 RS 与 CK、S 和 R 相比, T_r 值增幅分别为 23.6%、12.3%和 15.2% ($P < 0.05$); 2024 年 R 的 T_r 值与 CK 相比, 显著提高 13.5% ($P < 0.05$)。 G_s 在盛花结铃期达峰值, 气孔开放程度高, 利于 CO_2 进入及光合作用(图 2-C)。2 年间盛花结铃期 S、R 和 RS 的 G_s 值显著高于 CK ($P < 0.05$), 增幅分别为 22.7%~43.8%、26.2%~37.9%、35.0%~50.7%; 2024

年吐絮期 RS 处理 G_s 值最高($P < 0.05$), 较 CK、S 和 R 分别显著高 41.6%、31.3%和 34.6%。 C_i 随生长时期延长呈高-低-高的变化趋势, 在盛花结铃期最低(图 2-D)。2 年间蕾期 C_i 值与 CK 相比, RS 分别显著提高 15.0%和 14.5% ($P < 0.05$); 盛花结铃期因棉花光合作用增强、对 CO_2 消耗大, C_i 值降低; 吐絮期植株衰老, 光合下降, C_i 值又有所回升。4 个处理在盛花结铃期和吐絮期差异不显著($P > 0.05$)。

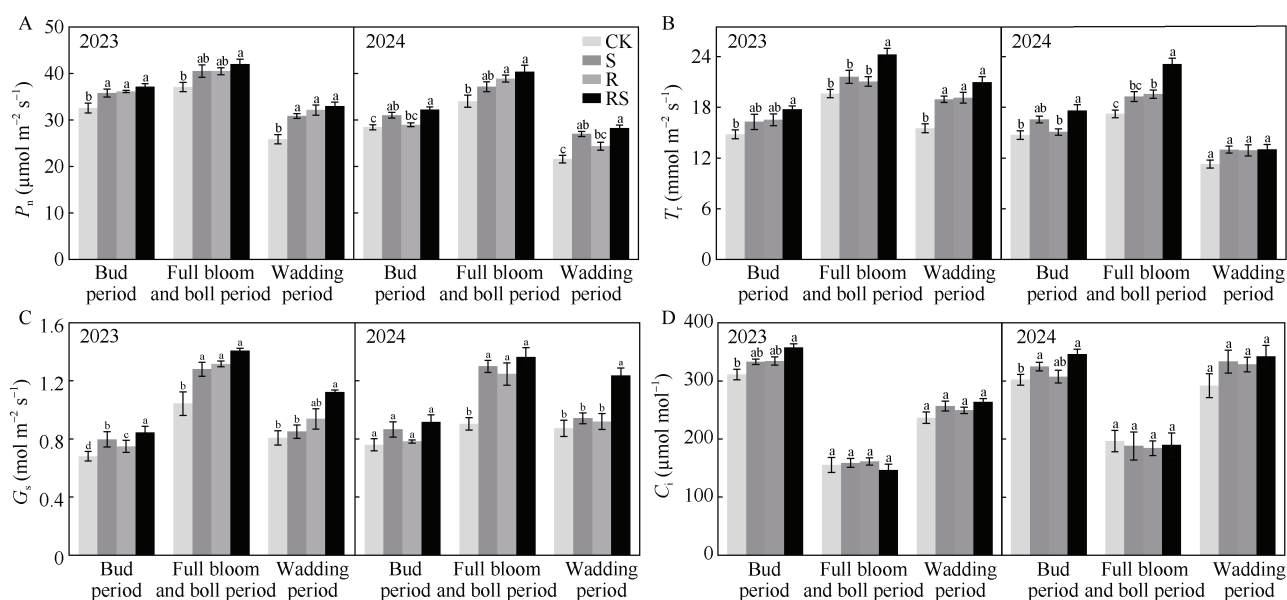


图2 不同耕作措施下净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化

Fig. 2 Changes in net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and intercellular CO_2 concentration (C_i) under different tillage practices

处理同表 2。不同小写字母表示相同年份相同时期处理间在 5% 水平上差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters within the same year and the same growth stage indicate significant differences at the 5% level among treatments.

2.3.2 光合有效辐射(PAR)和光截获率(PARin) 由图 3 可知, 光合有效辐射(PAR)和光截获率(PARin)在 2023 年与 2024 年变化趋势一致。各处理 PAR 在蕾期处于最低水平, 在盛花结铃期达到峰值(图 3-A), 4 个处理中, S、R、RS 的 PAR 均高于常规耕作(CK)。与 CK 相比, 2023 年蕾期 S、R、RS 的 PAR 分别显著提高 6.8%、7.5%、9.1% ($P < 0.05$), 盛花结铃期和吐絮期 RS 的 PAR 较 CK 分别增加 9.4%和 11.4% ($P < 0.05$), R 较 CK 分别增加 5.5%和 8.5% ($P < 0.05$); 2024 年蕾期和吐絮期 RS 的 PAR 较 CK 显著提高 8.9%和 12.3% ($P < 0.05$), 盛花结铃期 R 的 PAR 显著提高 8.8% ($P < 0.05$)。

PARin 随生育期变化呈低-高-低趋势, 2023 年的 PARin 较 2024 年整体偏高, 且在 3 个生育期间变化幅度较平缓(图 3-B)。在蕾期和吐絮期, 与 CK 相比,

2023 年 S、R、RS 的 PARin 分别提高 5.4%~7.5%、4.1%~6.1% ($P < 0.05$)。在盛花结铃期 RS 的 PARin 较 CK、S、R 处理增加 1.6%~4.5% ($P < 0.05$), S 和 R 的 PARin 较 CK 分别提高 2.9%和 2.8% ($P < 0.05$), S 与 R 间差异不显著($P > 0.05$)。与 CK 相比, 2024 年蕾期 S 的 PARin 显著提高 6.8% ($P < 0.05$), 盛花结铃期 R 的 PARin 显著提高 5.8% ($P < 0.05$), 吐絮期 RS 的 PARin 显著增加 17.0% ($P < 0.05$)。

2.3.3 叶面积指数(LAI)和叶绿素相对含量(SPAD 值) 由图 4 可知, 棉花 LAI 和 SPAD 值在 2 年中变化趋势相同。LAI 呈低-高-低趋势, 3 个生育期内 RS 的 LAI 表现出明显优势(图 4-A)。在 2 年内 3 个生育期, RS 的 LAI 较 CK、S、R 分别显著增加 25.8%~58.7%、7.3%~28.7%和 8.7%~17.1% ($P < 0.05$)。SPAD 值随生育期变化呈上升趋势(图 4-B)。

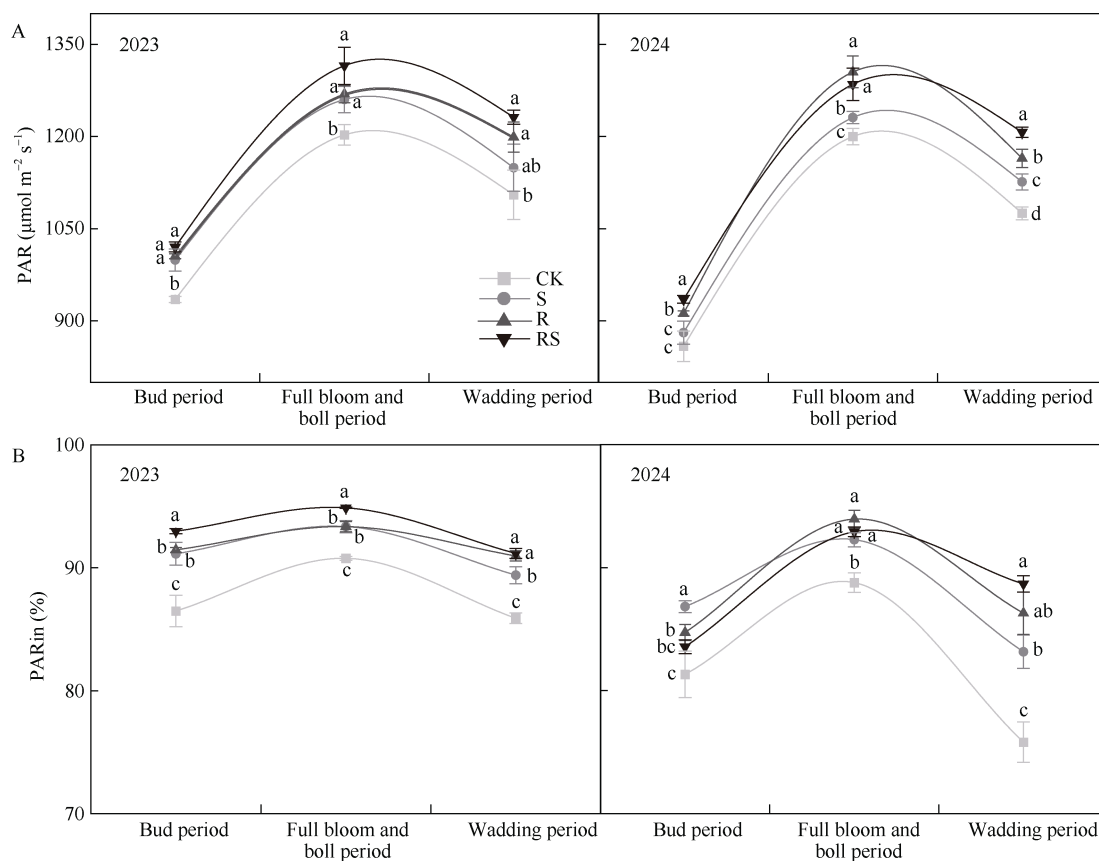


图 3 不同耕作措施对棉花光合有效辐射(PAR)和光截获率(PARin)的影响

Fig. 3 Effects of different tillage practices on photosynthetically active radiation (PAR) and light interception (PARin) in cotton

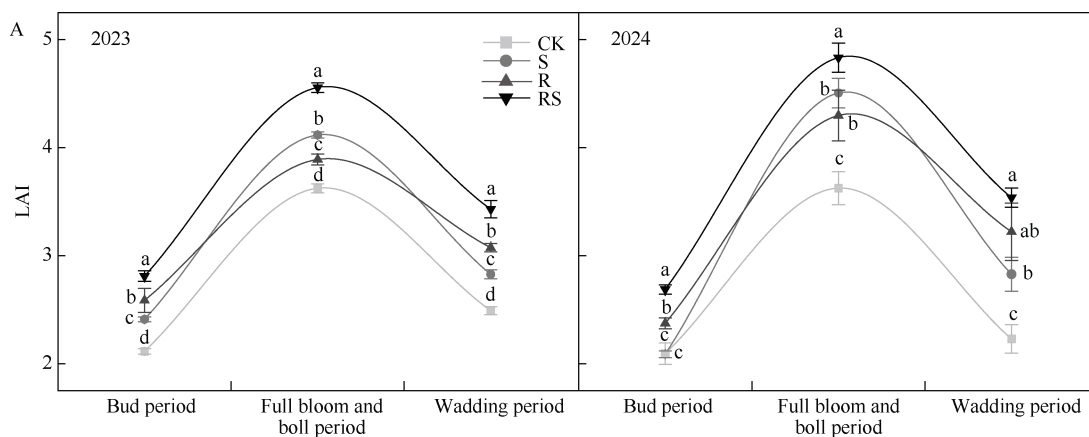
处理同表 2。不同小写字母表示相同年份相同时期处理间在 5% 水平上差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters within the same year and the same growth stage indicate significant differences at the 5% level among treatments.

在蕾期、盛花结铃期及吐絮期, RS 的 SPAD 值始终高于其他 3 个处理($P < 0.05$), 2023 年盛花结铃期 R、S 和 RS 的 SPAD 值与 CK 相比分别显著增加 8.0%、9.3%、13.2% ($P < 0.05$); 2024 年盛花结铃期 RS 的 SPAD 值较 CK、S 和 R 分别增加 12.3%、9.2% 和 9.5% ($P < 0.05$)。

2.4 长期秸秆还田与深松对棉花产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 长期秸秆还田与深松对 2 年皮棉产量的影响不一致, 2023 年 S、R、RS 显著高于 CK (17.1%、37.7%、64.5%, $P < 0.05$); 2024 年秸秆还田 (R、RS) 显著高于 CK (22.4%、47.9%, $P < 0.05$), S 与



(图 4)

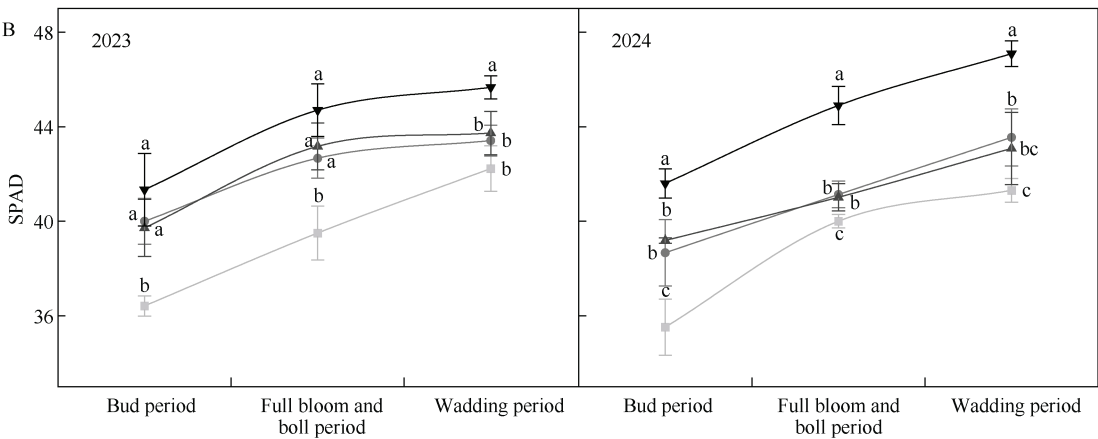


图 4 不同耕作措施下棉花叶面积指数(LAI)和叶绿素相对含量(SPAD)的变化
Fig. 4 Changes in leaf area index (LAI) and relative chlorophyll content (SPAD) in cotton under different tillage practices
处理同表 2。不同小写字母表示相同年份相同时期处理间在 5%水平上差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters within the same year and the same growth stage indicate sig-
nificant differences at the 5% level among treatments.

表 3 不同耕作措施对棉花产量及其构成因素的影响
Table 3 Effects of different tillage practices on cotton yield and yield components

年份 Year	处理 Treatment	群体结铃数 Boll density ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	单铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	皮棉产量 Lint yield (kg hm^{-2})
2023	CK	60.1 c	4.3 c	39.5 a	1010 d
	S	62.9 c	4.7 b	40.4 a	1183 c
	R	74.6 b	4.6 b	40.8 a	1391 b
	RS	84.3 a	4.9 a	40.5 a	1661 a
2024	CK	65.0 c	4.6 a	39.2 c	1163 c
	S	76.8 ab	4.7 a	37.9 d	1353 bc
	R	74.3 bc	4.7 a	40.7 b	1424 b
	RS	86.3 a	4.7 a	42.5 a	1720 a

处理同表 2。相同年份不同小写字母表示不同处理在 5%水平上差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters within the same year indicate significant differences at the 5% level.

RS 相比显著降低 21.3% ($P < 0.05$), 且与 CK 差异不显著。从产量构成来看, 2023 年秸秆还田(R、RS)群体结铃数和单铃重较 CK 处理分别增加 24.1%和 40.3%、7.0%和 14.0% ($P < 0.05$), 4 个处理间衣分无显著差异($P > 0.05$)。2024 年 S、R、RS 较 CK 增加棉花群体结铃数(14.3%~32.8%, $P < 0.05$), S 处理衣分最低, 较 RS 显著减少 10.8% ($P < 0.05$), 4 个处理的单铃重无显著差异($P > 0.05$)。

2.5 产量(Yield)与光合特性、干物质(DMA)、氮素积累量(NAA)的相关关系

为比较长期秸秆还田与深松条件下光合特性、冠层有效辐射以及它们与产量、干物质、植株氮素积累量间的相关关系, 绘制了网状热图(图 5)。Mantel 检验与 Pearson 相关性分析结果显示, Yield 与 T_r ($r = 0.58$, $P < 0.01$)、SPAD ($r = 0.51$, $P < 0.01$)、

G_s ($r = 0.49$, $P < 0.01$)、PAR ($r = 0.33$, $P < 0.05$)、LAI ($r = 0.34$, $P < 0.01$)均呈正相关; DMA 与 T_r ($r = 0.60$, $P < 0.01$)、 G_s ($r = 0.56$, $P < 0.01$)、LAI ($r = 0.62$, $P < 0.01$)、SPAD ($r = 0.53$, $P < 0.01$)的相关性最高; 与 NAA 有相关性的光合指标由大到小分别是 T_r ($r = 0.57$, $P < 0.01$)、 G_s ($r = 0.65$, $P < 0.01$)、LAI ($r = 0.53$, $P < 0.01$)、SPAD ($r = 0.54$, $P < 0.01$)、PARin ($r = 0.39$, $P < 0.05$)。C_i 与其他指标相关性不显著($P > 0.05$)。

此外, T_r 与 G_s ($r = 0.64$, $P < 0.05$)、LAI ($r = 0.78$, $P < 0.05$)、SPAD ($r = 0.76$, $P < 0.05$)均呈正相关, G_s 与 PAR ($r = 0.73$, $P < 0.01$)、PARin ($r = 0.74$, $P < 0.01$)、LAI ($r = 0.76$, $P < 0.01$)、SPAD ($r = 0.70$, $P < 0.01$)呈极显著正相关, PAR 与 PARin ($r = 0.78$, $P < 0.01$)呈极显著正相关, LAI 与 PARin ($r = 0.81$, $P < 0.01$)呈显著正相关。

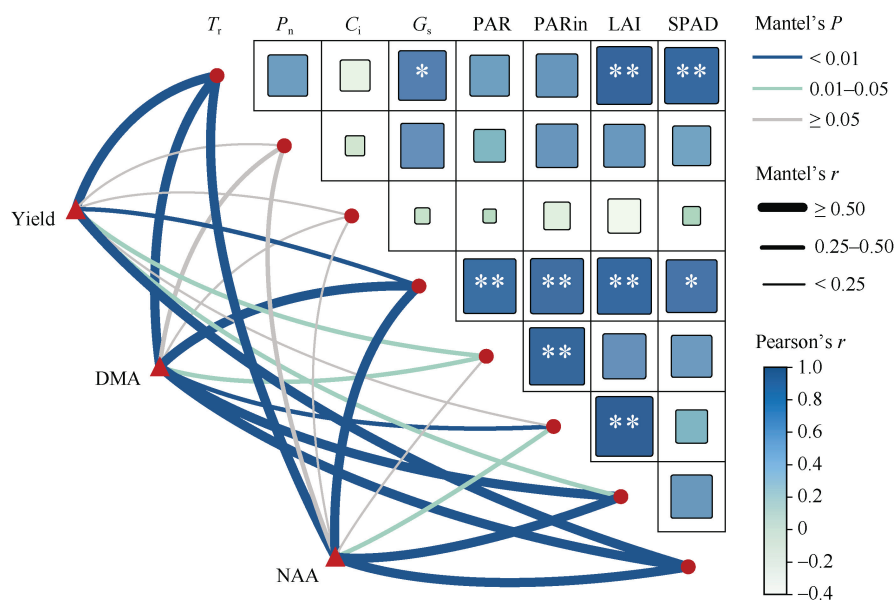


图 5 不同耕作措施下棉花光合特性与产量(Yield)、干物质质量(DMA)、氮素积累量(NAA)的相关网状热图

Fig. 5 Matrix heat map showing correlations between cotton photosynthetic traits and yield (Yield), dry matter accumulation (DMA), and nitrogen accumulation (NAA) under different tillage practices

T_r 表示蒸腾速率, P_n 表示净光合速率, C_i 表示胞间 CO_2 浓度, G_s 表示气孔导度, PAR 表示棉花光合有效辐射, PARin 表示棉花光截获率, LAI 表示棉花叶面积指数, SPAD 表示叶绿素相对含量, DMA 表示棉花干物质质量, NAA 表示氮素积累量。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著。

T_r indicates transpiration rate, P_n indicates net photosynthetic rate, C_i indicates intercellular CO_2 concentration, G_s indicates stomatal conductance, PAR indicates photosynthetically active radiation, PARin indicates light interception rate, LAI indicates leaf area index for cotton, SPAD indicates relative chlorophyll content, DMA indicates dry matter content for cotton, and NAA indicates nitrogen accumulation for cotton. * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

3.1 长期秸秆还田与深松改良滨海盐碱棉田土壤化学性质

滨海盐碱土对作物生长的核心限制因素包括高含盐量、高 pH、低有机质含量等^[21]。本研究证实, 长期秸秆还田与深松及协同处理均能显著改善滨海盐碱地的土壤化学性质, 且 RS 处理(秸秆还田+深松)的改良效应最优。二者协作下, 0~40 cm 土层 pH 较 CK 处理降低 7.1%, 含盐量降低 23.8%, 土壤有机碳含量增幅达 82.0%, 土壤全氮含量提高 60.6%, 土壤速效养分提高 59.7% (表 2)。这与前人关于盐碱地耕作改良的研究结论一致^[9,11]。从改良机制来看, 长期秸秆还田后, 秸秆腐解过程中产生的有机酸可降低土壤 pH, 同时形成的腐殖质胶体吸附钠离子, 进而降低土壤含盐量^[22]。棉花秸秆含大量营养元素^[23], 经微生物分解逐步释放为硝态氮、速效钾、有效磷等速效形态, 进而补充土壤养分库^[24]。深松则可以增强土壤透气性和水分渗透能力, 加快洗盐效率, 降低盐分在地表的聚集^[25], 同时促进根系下扎, 利于棉花根系向深层土壤获取更多水分和养分^[8]。

此外, pH 与含盐量的降低, 可进一步优化土壤

微环境、改善养分转化条件, 协同提升土壤有机碳、全氮含量及速效养分有效性, 形成养分间的良性循环。适宜盐碱环境使秸秆腐解产生的腐殖质与土壤矿质颗粒结合, 形成稳定态碳, 促进土壤中有机碳的积累^[26]; 同时, 低 pH 及含盐量可提升土壤酶活性, 从而加速氮的转化, 利于全氮在土壤中的稳定^[5,27]; 高 pH 条件下, 土壤中钙、镁离子易与磷钾养分结合形成难溶性化合物, 降低土壤中速效养分含量, 影响植株对养分的吸收^[28]。

3.2 长期秸秆还田与深松促进棉花高效光合生产

长期秸秆还田与深松通过协同优化棉花光合特性、光能利用效率及养分与干物质积累, 为产量提升奠定基础。本研究中, 与常规耕作相比, 秸秆还田与深松措施使棉花净光合速率(P_n)显著增加 15.9%, 蒸腾速率(T_r)增加 28.9%, 气孔导度(G_s)提高 42.9%, 叶绿素相对含量(SPAD)提高 12.8% (图 2 和图 4)。这得益于秸秆还田与深松优化冠层结构, 改善通风条件, 叶片表面气流交换加快, 水分蒸发提高, 促进 T_r 增加^[29]。该措施下土壤养分改善、容重降低促进了棉花地上部叶片生长, 叶片光合作用对 CO_2 的需求增加, 进而提高了 G_s ^[30], SPAD 值增强了光捕获

能力,二者共同推动 P_n 升高^[31]。胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化趋势与 P_n 、 T_r 及 G_s 相反,且在盛花结铃期显著低于常规耕作(图 2-D),这可能是由于土壤盐碱含量降低提升了棉花叶片光合酶活性^[32],细胞同化 CO_2 的能力上升,继而引发 C_i 下降^[33]。

本研究中棉花冠层吸收光合有效辐射(PAR)的范围在 $858.62\sim 1305.13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间,光截获率(PARin)的范围在 75%~93%之间(图 3-A, B),与前人研究结果相符^[35]。深松措施可促进棉花叶片生长及植株增高^[8],棉花秸秆全量还田同样具有增加棉花株高的效应^[36],二者为高效光合作用创造有利条件。本研究中 PAR 提升 7.1%~12.3%, PARin 提高 2.8%~17.0%,这与冠层叶面积指数(LAI)的合理提升密切相关(图 4)。蕾期棉花开始进入生长旺盛阶段,群体 LAI 持续增大,光合速率随之增强,使得冠层吸收 PAR 与 PARin 维持在较高水平,吐絮期部分叶片衰老脱落,冠层叶面积指数(LAI)降低,漏光增加,群体 PARin 随之降低^[34]。且该措施能避免过高叶面积引发冠层内光合有效辐射分布不均的问题,维持冠层结构处于适宜状态^[36]。此外, G_s 与 PAR、LAI 与 PARin 均呈显著正相关关系($r > 0.7, P < 0.05$),表明光合参数优化与冠层结构改善相互促进,共同提升棉花光合生产。

RS 处理下,棉花吐絮期干物质和氮素积累量较 CK 分别增加 59.8%和 72.1% (图 1),这是土壤养分改善及棉株光合能力作用的结果。秸秆还田可通过秸秆腐解持续释放氮素^[37],配合深松措施扩大盐碱地棉花根系的吸收面积^[9],使棉株各器官氮素积累量显著增加,尤其是茎、叶及生殖器官的氮素积累量优势明显(图 1-B)。叶片氮素的积累可为叶绿素合成及光合酶活性的维持提供保障,进而驱动棉株光合作用的高效进行^[32],利于干物质质量积累与分配。蕾期干物质及氮素积累量分配比例为叶>茎>根,而吐絮期干物质分配比例为生殖器官>茎>叶(图 1),这反映了秸秆还田与深松下棉花生长中心的转移,为吐絮期棉铃发育及产量形成奠定坚实基础^[38]。

3.3 长期秸秆还田与深松通过改善土壤环境和生长特性提高棉花产量

本研究表明,棉花产量的形成是多方协同作用的结果。棉株以光能利用为起点,通过氮素供给支撑光合过程,再以光合作用驱动干物质积累;并通过优化干物质分配,将能量和物质高效转化为棉花产量。盐碱地秸秆还田和深松能有效增加棉花的生

产潜力^[39]。本试验中,二者协同作用下棉花皮棉产量较常规耕作增加 47.9%~64.5% (表 3),且产量的增加取决于群体结铃数的增加(32.8%~40.3%),这与干物质和氮素向生殖器官的高效分配密切相关。吐絮期 RS 处理的生殖器官干物质质量显著高于其他处理,秸秆还田及深松措施通过降低土壤 pH、增强团聚体稳定性^[40]、提升土壤碳氮含量来改善土壤肥力,进而间接增强植株光合性能^[23,41];而光合效率的提升可以为棉铃发育积累更多有机物,最终促成群体结铃数增加与单铃重提升^[42-43]。

相关分析揭示了各关键因子的关联(图 5),产量与蒸腾速率、气孔导度、光合有效辐射及叶面积指数均呈显著正相关($P < 0.05$)。这表明通过优化土壤带来的光合特性及光合有效辐射利用率的提升,进而转化为产量优势。此外, T_r 与 LAI、SPAD、 G_s 与 PAR、LAI 与 PARin 均呈显著正相关关系($r > 0.7, P < 0.05$)。这是由于在一定范围内,叶面积指数增大可使冠层叶片总量增加,进而带动蒸腾作用增强^[44];而叶片叶绿素相对含量较高意味着光捕获能力更强,光合速率也随之提升,此时为满足光合作用对 CO_2 的需求,气孔开放度往往会增大,蒸腾速率也因此偏高^[45]。棉花根系借助蒸腾作用产生的拉力,吸收土壤中的水分及氮、磷、钾等矿质营养元素,以满足棉花各器官生长发育及棉铃膨大成熟的需求,从而支撑较高的产量^[46]。这也解释了本研究中棉花产量与 T_r 呈显著正相关的结果。

因此,长期秸秆还田和深松提高滨海盐碱地棉花产量,其核心路径为:秸秆还田+深松措施,降低土壤 pH 和含盐量、提升土壤碳氮含量及速效养分含量,优化棉花光合特性(提高 P_n 、 G_s 、SPAD 值)和冠层结构(增加 LAI、PAR、PARin),促进干物质和氮素向生殖器官分配,增加群体结铃数和单铃重,最终实现皮棉产量提升(图 6)。

4 结论

在滨海盐碱棉田中,长期秸秆还田与深松较常规耕作显著降低土壤含盐量,提高土壤碳氮及速效养分含量;深松、秸秆还田及二者协同处理均能不同程度提升棉花光合能力与冠层光能利用效率,并促进干物质与氮素向生殖器官分配,最终提高皮棉产量。因此,长期秸秆还田与深松能够通过改善土壤环境条件和棉花光合特性提高产量,是滨海盐碱地棉花高产稳产的有效耕作措施。

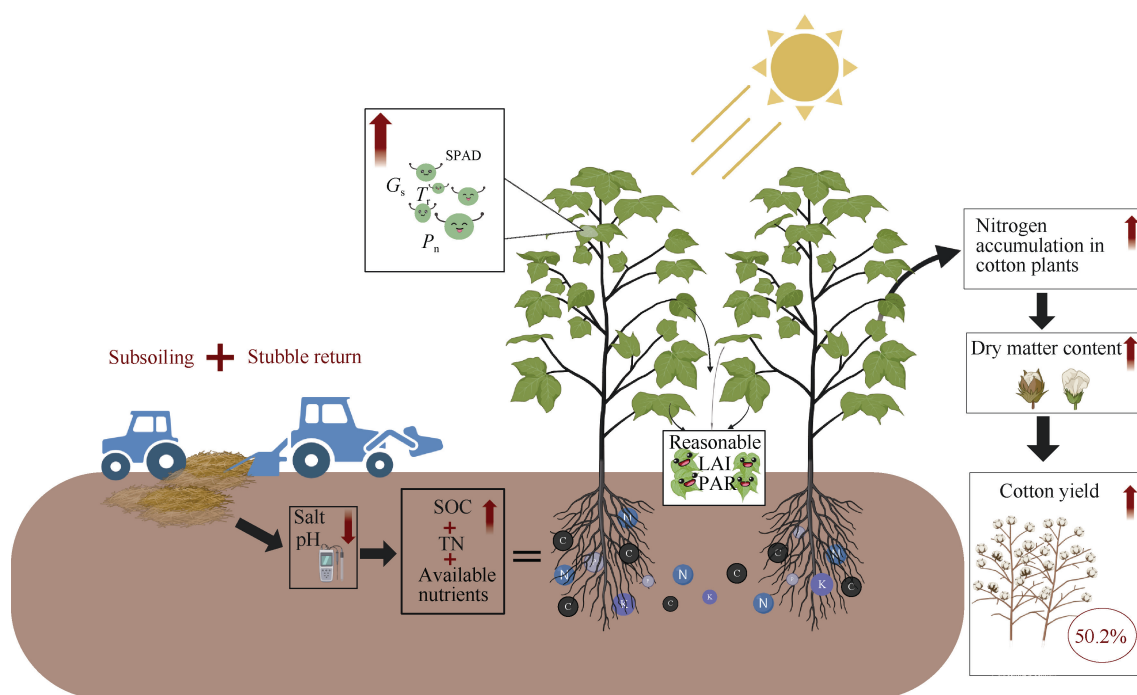


图 6 秸秆还田与深松措施下产量形成总结图

Fig. 6 Summary diagram of yield formation under straw returning and deep loosening measures

缩写同图 5。SOC: 有机碳含量; TN: 全氮含量。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 5. SOC: soil organic carbon content; TN: total nitrogen content.

References

- [1] Setobayashi M. Globalisation and the development of Chinese cotton industry in early 20th century. *Asia Pac Econ Hist Rev*, 2025, 65: 249–272.
- [2] Feng L, Dai J L, Tian L W, et al. Review of the technology for high-yielding and efficient cotton cultivation in the northwest inland cotton-growing region of China. *Field Crops Res*, 2017, 208: 18–26.
- [3] Qi P, Li B, Zhang D Q, et al. Supply and demand of agricultural water resources under future saline-alkali land improvement. *Agric Water Manag*, 2025, 314: 109503.
- [4] Han M G, Cui R F, Wang D L, et al. Combined transcriptomic and metabolomic analyses elucidate key salt-responsive biomarkers to regulate salt tolerance in cotton. *BMC Plant Biol*, 2023, 23: 245.
- [5] Yu C X, Liu H W, Dong S D, et al. Subsoiling with straw return promotes soil nitrogen supply and increase maize yield in saline-alkaline farmland of the Yellow River Delta. *Soil Use Manag*, 2024, 40: e13165.
- [6] Huang T T, Yang N, Lu C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods. *Soil Tillage Res*, 2021, 214: 105171.
- [7] Liu L, Liu D M, Ding X D, et al. Straw incorporation and nitrogen fertilization enhance soil carbon sequestration by altering soil aggregate and microbial community composition in saline-alkali soil. *Plant Soil*, 2024, 498: 341–356.
- [8] Li P C, Wang S L, Feng W N, et al. Soil inversion with subsoiling increases cotton yield through improving soil properties and root growth. *Agronomy*, 2025, 15: 4.
- [9] Zhang L, Su X Y, Meng H, et al. Cotton stubble return and subsoiling alter soil microbial community, carbon and nitrogen in coastal saline cotton fields. *Soil Tillage Res*, 2023, 226: 105585.
- [10] Su X Y, Zhang L, Meng H, et al. Long-term conservation tillage increase cotton rhizosphere sequestration of soil organic carbon by changing specific microbial CO₂ fixation pathways in coastal saline soil. *J Environ Manag*, 2024, 358: 120743.
- [11] Zhang L, Su X Y, Meng H, et al. Long-term cotton stubble return and subsoiling improve soil organic carbon by changing the stability and organic carbon of soil aggregates in coastal saline fields. *Soil Tillage Res*, 2024, 241: 106127.
- [12] Pan Y H, Cao Y W, Chai Y X, et al. Identification of photosynthetic parameters for superior yield of two super hybrid rice varieties: a cross-scale study from leaf to canopy. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1110257.
- [13] Zhang L, Yan K, Shao H. Photosynthetic characterization of three dominant plant species in the saline-alkaline soil of the Yellow River Delta, China. *Plant Biosyst Int J Deal Aspects Plant Biol*, 2014, 148: 1247–1254.
- [14] 冯国艺, 张谦, 王树林, 等. 秸秆还田对滨海盐碱地棉苗光合特性及生长的影响. *棉花学报*, 2015, 27: 248–253.
Feng G Y, Zhang Q, Wang S L, et al. Effects of returning straw on the photosynthetic characteristics and growth of cotton seedlings in a saline coastal area. *Cotton Sci*, 2015, 27: 248–253 (in Chinese with English abstract).
- [15] 戴良香, 姜常松, 袁光, 等. 盐碱地花生棉花等幅间作对花生光合特性及产量效益的影响. *中国油料作物学报*, 2024, 46: 524–535.

- Dai L X, Jiang C S, Yuan G, et al. Effects of peanut/cotton intercropping with constant width on photosynthetic characteristics, yield, and benefits of peanut in saline-alkali soil. *Chin J Oil Crop Sci*, 2024, 46: 524–535 (in Chinese with English abstract).
- [16] Adak S, Bandyopadhyay K K, Sahoo R N, et al. Prediction of wheat yield using spectral reflectance indices under different tillage, residue and nitrogen management practices. *Curr Sci*, 2021, 121: 402–413.
- [17] Guo Y, Fan H, Li P, et al. Photosynthetic physiological basis of no tillage with wheat straw returning to improve maize yield with plastic film mulching in arid irrigated areas. *Plants*, 2023, 12: 1358.
- [18] Zhai M H, Wei X W, Pan Z L, et al. Optimizing plant density and canopy structure to improve light use efficiency and cotton productivity: two years of field evidence from two locations. *Ind Crops Prod*, 2024, 222: 119946.
- [19] 马君, 王静, 李春艳, 等. 深松深度对棉花冠层光合特征及产量的影响. *新疆农业科学*, 2023, 60: 2878–2884.
- Ma J, Wang J, Li C Y, et al. Effect of subsoiling depth on canopy photosynthetic characteristics and yield of cotton. *Xinjiang Agric Sci*, 2023, 60: 2878–2884 (in Chinese with English abstract).
- [20] Kong F X, Jiu A M, Kan Z R, et al. Deep tillage combined with straw biochar return increases rice yield by improving nitrogen availability and root distribution in the subsoil. *Field Crops Res*, 2024, 315: 109481.
- [21] Feng G Y, Zhang Q, Wang Y, et al. Seasonal water-heat-salt dynamics in coastal salinized fields: impacts on cotton photosynthesis and yield. *Front Plant Sci*, 2025, 16: 1600293.
- [22] Chen M N, Yang Z G, Yang N, et al. Wheat yield, N use efficiency, soil properties, and soil bacterial community as affected by long-term straw incorporation and manure under wheat-summer maize cropping system in southern Shanxi province, China. *Plants*, 2025, 14: 1795.
- [23] Zhang L, Mao L L, Yan X Y, et al. Long-term cotton stubble return and subsoiling increases cotton yield through improving root growth and properties of coastal saline soil. *Ind Crops Prod*, 2022, 177: 114472.
- [24] 可艳军, 张雨萌, 郭艳杰, 等. 生物有机肥配合深松对农田土壤肥力和作物产量的影响. *中国农业科技导报*, 2023, 25(4): 157–166.
- Ke Y J, Zhang Y M, Guo Y J, et al. Effects of bio-organic fertilizer combined with subsoiling on farmland soil fertility and crop yield. *J Agric Sci Technol*, 2023, 25(4): 157–166 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王本龙, 周春生, 海珍, 等. 深松耕作与覆膜对西辽河苏打盐碱地土壤理化性质及玉米产量的影响. *江苏农业科学*, 2024, 52(19): 252–258.
- Wang B L, Zhou C S, Hai Z, et al. Effects of subsoiling and film mulching on soil physical and chemical properties and corn yield in soda saline alkali land of the West Liaohe River. *Jiangsu Agric Sci*, 2024, 52(19): 252–258 (in Chinese).
- [26] Wang S H, Ren X Q, Zhou T R, et al. Amendment of saline-alkali soils promotes the formation and stability of iron-bound organic carbon. *iScience*, 2026, 29: 114314.
- [27] Lu Y, Kong L T, Li S H, et al. Salinity mediates tamarix chinensis litter decomposition to enhance soil enzyme activity in coastal saline-alkali soils. *Plants*, 2025, 14: 2674–2674.
- [28] Chen X D, Opoku-Kwanowaa Y, Li J M, et al. Application of organic wastes to primary saline-alkali soil in northeast China: effects on soil available nutrients and salt ions. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2020, 51: 1238–1252.
- [29] 齐文婷, 薛皓文, 王政钧, 等. 花铃期不同灌溉处理对棉花光合特性和产量的影响. *棉花学报*, 2024, 36: 340–352.
- Qi W T, Xue H W, Wang Z J, et al. Effects of different irrigation treatments at flowering and boll setting stage on photosynthetic characteristics and yield of cotton. *Cotton Sci*, 2024, 36: 340–352 (in Chinese with English abstract).
- [30] Wedegaertner K, Shekoofa A, Purdom S, et al. Cotton stomatal closure under varying temperature and vapor pressure deficit, correlation with the hydraulic conductance trait. *J Cotton Res*, 2022, 5: 20.
- [31] Fan Y F, He X Y, Liu J, et al. Impact of straw return and nitrogen fertilizer on photosynthesis and yield of red kidney beans. *Sci Rep*, 2025, 15: 28621.
- [32] Li X, Zhao Y H, Gao C, et al. Integrated analysis of physiological responses and transcriptome of cotton seedlings under drought stress. *Int J Mol Sci*, 2025, 26: 7824.
- [33] 李雪婷, 任昊, 王洪章, 等. 盐胁迫对不同耐盐型玉米品种叶片光合性能和干物质积累与分配的影响. *作物学报*, 2025, 51: 1091–1101.
- Li X T, Ren H, Wang H Z, et al. Effects of salt stress on photosynthetic performance and dry matter accumulation and distribution in leaves of different salt-tolerant maize varieties. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 1091–1101 (in Chinese with English abstract).
- [34] 姚青青, 孙绘健, 罗静, 等. 减施氮肥运筹对棉花冠层光合有效辐射及产量的影响. *新疆农业科学*, 2020, 57: 1404–1410.
- Yao Q Q, Sun H J, Luo J, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction regulation on cotton canopy photosynthetic effective radiation and yield. *Xinjiang Agric Sci*, 2020, 57: 1404–1410 (in Chinese).
- [35] 房佰涵, 李钥瑶, 杨茂琪, 等. 干旱区棉秆不同还田量对土壤理化性质及棉花生长的影响. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 230–237.
- Fang B H, Li Y Y, Yang M Q, et al. Effects of different cotton straw returning rates on soil physicochemical properties and cotton growth. *J Soil Water Conserv*, 2025, 39(2): 230–237 (in Chinese with English abstract).
- [36] Duan M, Han C Y, Zhang X T, et al. Spatial and temporal dynamics of photosynthetically active radiation in crops: effects of canopy structure on yield. *Agronomy*, 2025, 15: 940.
- [37] 闫晓宇, 郭文君, 秦都林, 等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响. *作物学报*, 2022, 48: 1235–1247.
- Yan X Y, Guo W J, Qin D L, et al. Effects of cotton stubble return and subsoiling on dry matter accumulation, nutrient uptake, and yield of cotton in coastal saline-alkali soil. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1235–1247 (in Chinese with English abstract).
- [38] Khan N, Xing F F, Feng L, et al. Comparative yield, fiber quality and dry matter production of cotton planted at various densities under equidistant row arrangement. *Agronomy*, 2020, 10: 232.
- [39] 秦都林, 王双磊, 刘艳慧, 等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤

- 理化性质及棉花产量的影响. 作物学报, 2017, 43: 1030–1042.
- Qin D L, Wang S L, Liu Y H, et al. Effects of cotton stalk returning on soil physical and chemical properties and cotton yield in coastal saline-alkali soil. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 1030–1042 (in Chinese with English abstract).
- [40] 房佰涵, 刘晶晶, 郭晓雯, 等. 等碳量秸秆和秸秆炭还田对棉田土壤理化性质及酶活性的影响. 中国农学通报, 2025, 41(2): 69–82.
- Fang B H, Liu J J, Guo X W, et al. Effects of equal carbon amounts of straw and straw charcoal incorporation on soil physical and chemical properties and enzyme activity in cotton fields. *Chin Agric Sci Bull*, 2025, 41(2): 69–82 (in Chinese with English abstract).
- [41] Zhang Z, Ahmed S, Chattha M S, et al. Managing plant density and nitrogen fertilizer to reduce nitrogen input without yield reduction of late-sown cotton after wheat by improving light interception and sink nitrogen partitioning in a double cropping system. *Field Crops Res*, 2023, 295: 108875.
- [42] Liu Y, Wen M, Li M, et al. Effects of reduced nitrogen application rate on drip-irrigated cotton dry matter accumulation and yield under different phosphorus and potassium managements. *Agron J*, 2021, 113: 2524–2533.
- [43] Wang Z, Wang Z, Ma L J, et al. Straw returning coupled with nitrogen fertilization increases canopy photosynthetic capacity, yield and nitrogen use efficiency in cotton. *Eur J Agron*, 2021, 126: 126267.
- [44] Li X L, Wang S, Zhu L X, et al. Leaf hydraulic decline coordinates stomatal and photosynthetic limitations through anatomical adjustments under drought stress in cotton. *Front Plant Sci*, 2025, 16: 1622308.
- [45] Amutenya A, Kwembeya E, Shikangalah R, et al. Photosynthesis, chlorophyll content and water potential of a mistletoe-host pair in a semi-arid savanna. *S Afr N J Bot*, 2023, 163: 311–315.
- [46] Li Y G, Wang Z H, Zhang J Z, et al. Effect of liquid mulch on the transpiration rate and water use efficiency of drip-irrigated cotton. *Int J U E Serv Sci Technol*, 2016, 9: 109–116.