doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23116

锌锰硼配施对雪茄烟叶光合特性、碳氮代谢及品质的影响

袁华恩[1]，管庆林[1,5]，吴永兵[1]，朴晟源[1]，李佳轶[2]，雷云康[2]，秦艳青[3]，
柴志顺[4]，王　俊[2*]，赵铭钦[1*]

（1. 河南农业大学烟草学院 / 国家烟草栽培生理生化研究基地，河南　郑州　450002；2. 四川省烟草公司德阳市公司，四川　德阳　618400；3. 中国烟草总公司四川省公司，四川　成都　610041；4. 烟草行业雪茄烟技术创新中心，四川　成都　610000；5. 浙江中烟工业有限责任公司技术中心，浙江　杭州　310024　）

摘　要：为探究配施不同比例锌锰硼元素对雪茄烟叶光合特性、碳氮代谢和品质的影响，以‘德雪 1 号’为试材，对雪茄烟生育期质体色素含量、净光合速率、碳氮代谢酶活及发酵后烟叶化学成分、锌锰硼元素含量进行分析。结果表明：（1）配施不同比例的锌锰硼元素均能提高雪茄烟烟叶质体色素含量、净光合速率以及烟叶淀粉酶、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性和碳氮代谢产物含量，碳氮代谢更为协调；（2）处理间比较，T2 处理（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）较 CK（Zn∶Mn∶B=0∶0∶0）发酵后烟叶总糖、还原糖含量分别增加 51.39%、66.67%，烟碱、总氮含量分别降低 12.08%、20.22%，Zn、Mn、B 含量分别提高 0.17、1.98、0.65 倍，钾氯比、氮碱比协调性较好，符合优质雪茄烟叶生产要求。综上可得，四川省什邡雪茄烟产区宜采用 T2 处理（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）的锌、锰、硼元素配施比例，T3 处理（Zn∶Mn∶B=2∶3∶2）次之，可显著增强雪茄烟叶的光合特性、碳氮代谢强度，改善烟叶品质。

关键词：叶面喷肥；锌锰硼元素；雪茄烟叶；光合特性；碳氮代谢；品质

锌、锰、硼均为烟草生长发育过程中不可或缺的微量元素，烟草对它们的耐受程度分别为较低[1]、高[2]、中等[3]。锌元素在烟草生长发育中具有重要的作用，参与多种酶的合成、激活、代谢并参与叶绿素、生长素的合成[4]，提高烟株对钾素的吸收，显著改善烟叶吃味、香气质与香气量[1]。锰元素直接参与植株光合放氧过程，对碳氮代谢影响较大，缺乏时植物表现为硝酸盐的积累，叶片内组织结构紧密，碳水化合物的含量显著降低[2]。硼元素含量影响着植物幼嫩组织的生长和烟叶内质体色素含量，施加硼肥能提高烟株氮代谢水平、蛋白质与核酸含量，间接影响质体色素含量[3]。

叶片是植物除根以外最重要的营养吸收器官，其通过叶表面的气孔和亲水小孔进行水分、养分的吸收[5]。在缺乏微量元素的土壤中对植物进行叶面喷肥，能显著提高有机物的积累[6]，且混合施用适宜浓度的微量元素显著优于单一元素施用[7]。

近年来，随着国内雪茄烟市场的迅速增加，雪茄工业企业对雪茄烟叶需求量加大，而国产雪茄烟叶原料供应不足、质量低，成为制约雪茄烟发展的主要因素[8]。雪茄烟叶品质优劣与碳氮代谢的强度及协调性有关[9]，碳氮代谢始终贯穿于烟株的生育期，碳代谢提供碳源、能量等物质，氮代谢提供酶、蛋白质、核酸等物质[9]，淀粉酶（AL）、硝酸还原酶（NR）、谷氨酰胺合成酶（GS）活性影响其代谢强度水平，碳氮代谢化合物的合成与分解影响其代谢的协调性[10]。

微量元素在不同地区土壤中含量分布不同，四川省地域降水量丰富，土壤微量元素经雨水长期淋溶后流失较为严重[11]，导致土壤矿质养分亏缺、烟株营养失衡现象频发，并成为近年来影响四川省什邡雪茄烟叶产量和质量下降的关键原因。近年来，雪茄烟施肥研究大多集中在基施肥料[12-13]，而叶面喷肥研究较少。因此，本试验通过叶面喷施不同比例锌锰硼元素，探究锌锰硼元素对雪茄烟光合特性、碳氮代谢关键酶活性及代谢产物含量、发

收稿日期：2023-02-24；**录用日期：**2023-03-13

基金项目：中国烟草总公司四川省公司重点科技项目（SCYC201913）。

作者简介：袁华恩（1998-），在读硕士研究生，研究方向为烟草栽培与生理生化。E-mail：yuanhuaen1@126.com。

通讯作者：王俊，E-mail：599187325@qq.com；赵铭钦，E-mail：zhaomingqin@126.com。

酵后化学成分及相关元素含量的影响，旨在提供一种适宜四川省什邡雪茄烟区锌锰硼元素施肥比例，为提高四川省雪茄烟叶品质提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　试验地点及材料

试验于2021年在四川省什邡市师古镇洛阳村进行，该地温湿度适宜、地势平坦、肥力均匀，土壤为水稻土。有机质含量31.24 g/kg，水解氮120.42 mg/kg，有效磷38.14 mg/kg，速效钾89.14 mg/kg，有效硼0.49 mg/kg、有效锌0.63 mg/kg、有效锰3.95 mg/kg。试验品种为‘德雪1号’，试剂硼砂、$ZnSO_4$和$MnSO_4$购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2　试验设计及方法

试验设5个处理，采用随机区组设计，重复3次，小区面积66.7 m^2，行距120 cm，株距40 cm。具体试验设计见表1。将不同微肥配制为0.1% $MnSO_4$、0.2%硼砂和$ZnSO_4$水溶液后混合喷施。于移栽后30、40、50 d分次喷施。每个处理小区均施纯氮165 kg/hm^2，N∶P_2O_5∶K_2O约为1∶0.8∶2。采用条施方法施用基肥，基肥施用234 kg/hm^2的硝酸钾（N∶P_2O_5∶K_2O=13∶0∶46）、450 kg/hm^2烟草专用复合肥（N∶P_2O_5∶K_2O=10∶20∶20）和1500 kg/hm^2油菜饼肥（N∶P_2O_5∶K_2O=3.5∶2.5∶1.5），移栽后35 d再追施156 kg/hm^2硝酸钾。其他田间农事操作与调制管理均按当地优质雪茄烟叶生产技术规范统一进行。

表1　试验设计及描述

处理	配施比例	用量
CK	Zn∶Mn∶B=0∶0∶0	喷清水
T1	Zn∶Mn∶B=3∶4∶3	7.5 g $ZnSO_4$+10 g $MnSO_4$+7.5 g 硼砂
T2	Zn∶Mn∶B=4∶4∶3	10 g $ZnSO_4$+10 g $MnSO_4$+7.5 g 硼砂
T3	Zn∶Mn∶B=2∶3∶2	10 g $ZnSO_4$+15 g $MnSO_4$+10 g 硼砂
T4	Zn∶Mn∶B=3∶3∶2	15 g $ZnSO_4$+15 g $MnSO_4$+10 g 硼砂

移栽后40 d开始取样，隔10 d取一次样，共取4次，选取各小区内具有代表性的中部叶10片（10～12叶位），一部分杀青烘干，磨碎后过0.25 mm孔径筛，用于测定质体色素与化学成分；另一部分均匀打孔后用锡箔纸包裹后放入液氮保存，用于测定碳氮关键酶活性。另取发酵后具有代表性的中部叶10片，60℃烘干，磨碎后过0.25 mm孔径筛，用于测定发酵后烟叶化学成分及矿质含量。

1.3　测定项目与方法

质体色素的测定：按照YC/T 382—2010[14]测定叶绿素和类胡萝卜素含量。

叶片光合特性的测定：德国WALZ公司GFS-3000便携式光合测量仪测定净光合速率（Pn），测量位置为中部固定叶片，光源采用自然光源，测定环境为开放式气路。

碳氮代谢关键酶活性：活体法[15]测定NR活性，试剂盒法（北京索莱宝生物技术有限公司）测定AL和GS活性。

化学成分：流动分析法[16]测定杀青样和发酵后中部烟叶总糖、还原糖、总氮、烟碱、钾和氯含量。

矿质元素含量：干灰化法[17]进行锌、锰和硼含量的测定，所用仪器为ICP-OES分析仪（美国，VISTA-MPX）。

1.4　数据分析

采用Excel 2016和SPSS 21.0进行数据整理及分析，Origin pro 2021作图。

2　结果与分析

2.1　不同处理对雪茄烟叶光合特性的影响

2.1.1　不同处理对雪茄烟叶质体色素含量的影响

由表2可知，随移栽后天数的增加，各处理叶绿素含量先上升后缓慢下降，T1、T2、T3、T4处理均高于CK，表明配施锌锰硼元素能提高叶绿素含量。叶绿素含量在移栽后50 d到达峰值，此时处理间为T2>T3>T1>T4>CK，T2与T1、T4、CK处理差异显著。移栽后40 d，各处理均显著高于CK，以T2最高；移栽后50～70 d，处理间叶绿素含量为T2>T3>T1>T4>CK，T2处理显著高于T4、T1、CK处理。结果表明，配施适当比例的锌锰硼元素能促进叶绿素的合成，有利于叶片内碳水物质的积累。

随生育期的推进，类胡萝卜素含量变化与叶绿素基本一致，即先增后降。移栽后40和70 d，除T4处理外，各处理类胡萝卜素含量均显著高于CK，以T2最高，分别为0.69、0.72 mg/g；移栽后50 d，T2、T3、T1处理分别较CK显著增加32.41%、24.94%、15.05%；移栽后60 d，除T3处理，T2处理类胡萝卜素显著高于其他处理。移栽后70 d相对于50 d，各处理类胡萝卜素含量降幅分

别为 15.08%、24.86%、37.87%、31.35%、18.47%。结果表明，配施锌锰硼元素能提高烟株生长前、中期烟叶内质体色素含量，并在后期促进质体色素降解，有利于提高烟叶香气物质的生成，提高烟叶品质，以 T2 处理效果最佳，T3 处理次之。

表 2　各处理对雪茄烟叶质体色素含量的影响

（mg/g）

指标	处理	移栽后天数			
		40 d	50 d	60 d	70 d
叶绿素含量	CK	2.77 ± 0.03d	3.21 ± 0.06d	2.34 ± 0.14c	1.72 ± 0.07c
	T1	3.10 ± 0.09bc	3.84 ± 0.08b	2.57 ± 0.12bc	2.00 ± 0.08b
	T2	3.45 ± 0.08a	4.04 ± 0.08a	2.95 ± 0.14a	2.36 ± 0.10a
	T3	3.32 ± 0.14ab	3.95 ± 0.07ab	2.78 ± 0.16ab	2.23 ± 0.04a
	T4	3.06 ± 0.17c	3.55 ± 0.07c	2.46 ± 0.11c	1.84 ± 0.06bc
类胡萝卜素含量	CK	0.49 ± 0.01c	0.78 ± 0.01d	0.73 ± 0.01d	0.67 ± 0.01c
	T1	0.56 ± 0.02b	0.92 ± 0.06bc	0.81 ± 0.06bc	0.69 ± 0.01b
	T2	0.69 ± 0.04a	1.16 ± 0.07a	0.89 ± 0.02a	0.72 ± 0.00a
	T3	0.64 ± 0.04a	1.05 ± 0.08ab	0.84 ± 0.01ab	0.72 ± 0.01a
	T4	0.54 ± 0.02bc	0.82 ± 0.01cd	0.76 ± 0.01cd	0.67 ± 0.01c

注：不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

2.1.2　不同处理对雪茄烟叶净光合速率的影响

由表 3 可知，各处理烟叶净光合速率变化趋势均为先增后降，移栽后 60 d 达到峰值。移栽后 40 d，除 T4 处理与 CK 间差异不显著外，其余配施处理烟叶净光合速率均显著高于 CK，以 T2 处理最高；移栽后 50 和 70 d，净光合速率以 T2 最高，T3 处理次之，两者存在显著性差异，且均显著高于 CK；移栽后 60 d，各处理净光合速率较 CK 分别显著增加 1.44、1.07、0.62、0.43［μmol/（m^2 · s）］。结果说明，配施中等比例锌锰硼元素，烟叶净光合速率效果最好，既保证烟株正常生命活动又能提高叶片有机物的积累量，有利于碳氮代谢间的协同转化，以 T2 处理的效果最好。

表 3　不同处理对雪茄烟叶净光合速率的影响

［μmol/（m^2 · s）］

处理	移栽后天数			
	40 d	50 d	60 d	70 d
CK	24.39 ± 0.06c	25.66 ± 0.32d	27.25 ± 0.05c	26.47 ± 0.18c
T1	24.96 ± 0.13b	26.48 ± 0.40bc	27.87 ± 0.29b	26.92 ± 0.26c
T2	25.83 ± 0.19a	27.93 ± 0.27a	28.69 ± 0.16a	28.35 ± 0.14a
T3	25.08 ± 0.20b	27.06 ± 0.17b	28.32 ± 0.15a	27.84 ± 0.19b
T4	24.47 ± 0.12c	26.05 ± 0.34cd	27.68 ± 0.13b	26.55 ± 0.23c

2.2　不同处理对雪茄烟叶碳氮代谢的影响

2.2.1　不同处理对雪茄烟叶碳氮代谢关键酶活性的影响

AL 活性影响整个光合碳固定的强度，将烟叶内前期光合作用产生积累的淀粉等大分子物质水解为单糖，为氮代谢和烟叶生长提供能量[18]。由图 1A 可知，AL 活性随生育期的进行，呈先升后降趋势，在移栽后 60 d 达到峰值，表明烟叶内的碳代谢强度前期较弱，中后期活跃，保证了后期烟叶内糖类的积累与转化。移栽后 40 d 和移栽后 60 d，各处理 AL 活性均显著高于 CK，AL 活性为 T2>T3>T1>T4>CK，T2、T3 处理较 CK 分别显著增加 1.21、1.17 倍和 1.34、1.22 倍；移栽后 50 和 60 d 的 AL 活性相对于 40 d 分别增加 29.99%、33.72%、37.71%、35.63%、33.14% 和 43.98%、45.70%、49.17%、46.10%、45.77%；移栽后 70 d，各处理 AL 活性下降，但各处理 AL 活性均显著高于 CK。表明配施中等比例锌锰硼元素能显著提高雪茄烟 AL 活性，提高碳代谢强度，这既保证烟株正常生长发育，又使碳氮代谢更加协调、稳定，改善烟叶品质。

NR 和 GS 是植物氮代谢过程中关键的调节酶和限速酶，其活性与烟叶氮代谢水平密切相关[19]。从图 1B、C 可知，各处理烟叶 NR 和 GS 活性随移栽天数的增加呈先上升后下降趋势，说明烟株生长前期对氮素的需求量较大，在烟叶定长后氮代谢酶活性下降，碳代谢强度提高，进行烟叶内糖分的降解与代谢。移栽后 40 d，以 T2 和 T3 处理 NR 活性最高，二者间无显著差异。移栽后 50 d 烟叶 NR 和 GS 活性达到最高值，各处理均以 T2 最高，分别较 CK 显著增加 84.44%、147.23%。移栽后 50 ~ 70 d，T2 处理烟叶 NR 活性显著高于其余处理，分别为 17.59、15.49、13.61 μmol/（h · g）。与 NR 活性相比，烟叶 GS 活性在移栽后 40 ~ 60 d 均以 T2 处理最高，且与其他处理存在显著差异，分别较 CK 显著增加 5.00、10.43、6.93 μmol/（h · g）。说明配施锌锰硼元素有利于提高烟叶氮代谢关键酶活性，中等比例锌锰硼元素能提高烟株前期对于氮素的吸收量，增强氮代谢水平，促进烟叶生长发育，以 T2 和 T3 处理效果最好。

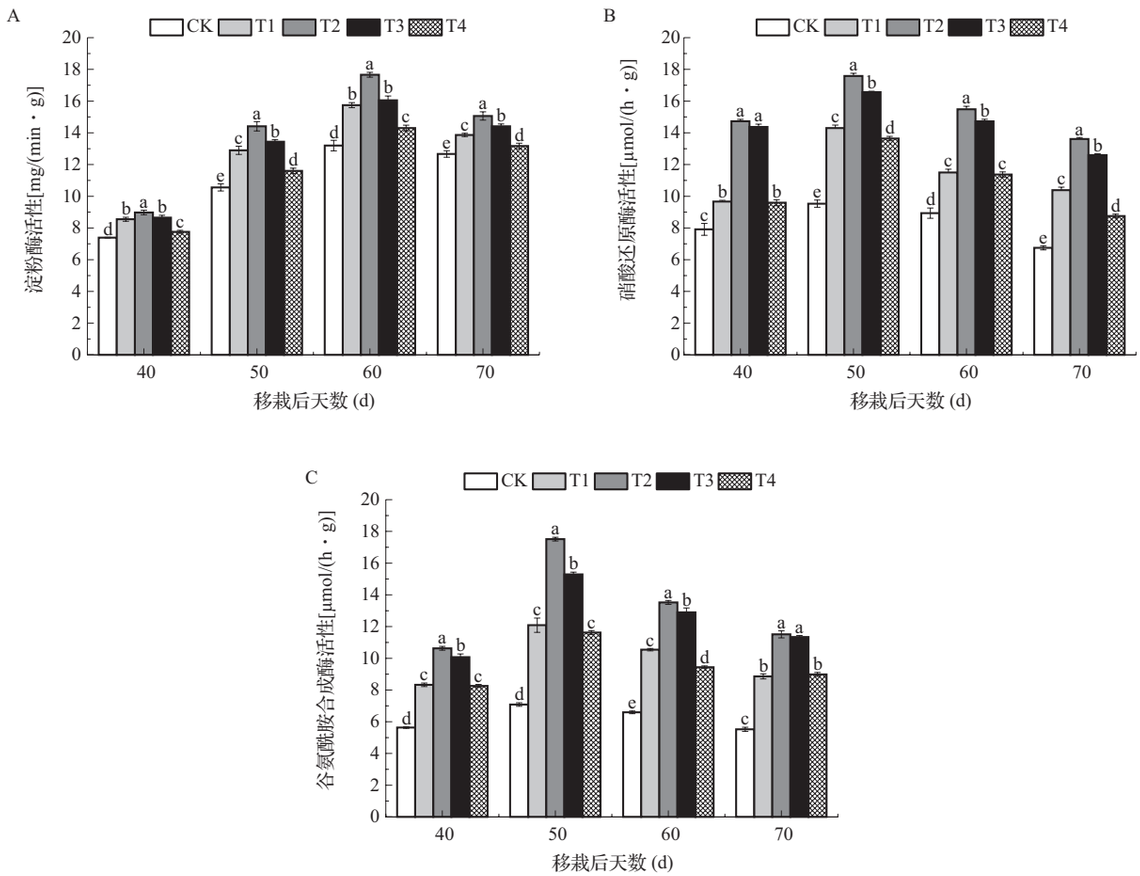

图 1　各处理对雪茄烟叶淀粉酶、硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性的影响

注：不同小写字母表示相同天数不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

2.2.2　不同处理对雪茄烟叶碳氮化合物含量的影响

从图 2A、B 可知，随烟株生育期的进行，各处理叶片中总糖含量呈先升后降变化，于移栽后 60 d 达到峰值，同一时期各处理烟叶总糖含量均高于 CK。在移栽后 40 d，以 T2 处理含量最高，与 T3、T4 处理无显著差异；在移栽后 50 ~ 70 d，T2 处理总糖含量均显著高于各处理，较 CK 分别显著增加 2.23%、1.95%、1.97%。还原糖含量变化与总糖含量变化一致，即移栽后 40 ~ 60 d，还原糖含量呈上升趋势，说明随着移栽后天数的增加，烟株内碳代谢水平逐渐提高，使还原糖在烟叶生长过程中逐渐积累，并于移栽后 60 d 达到最高。移栽后 70 d 烟叶定长时还原糖含量开始下降，T1、T2、T3 处理均显著高于 CK，但各处理间无显著差异。结果说明，配施锌锰硼元素能促进糖的合成与积累代谢进程，以 T2 和 T3 处理效果最为明显。

烟叶烟碱和总氮含量变化与烟株氮代谢密切相关。由图 2C 可知，移栽后 40 ~ 50 d，各处理烟叶中烟碱含量缓慢上升，至移栽后 60 ~ 70 d 迅速增加，这是由于打顶引起烟株的源库关系发生变化，促进烟株根部对生物碱类物质的合成和运输。移栽后 40 、60 、70 d，T2 与各处理均有显著差异，这说明中等比例的锌锰硼元素，使烟株生育期内烟碱含量的降低程度有所下降。移栽后 70 d 烟碱含量最高，与移栽后 40 d 相比，分别增加 11.75、12.56、15.56、11.25、10.63 倍。从图 2D 可知，各处理烟叶总氮含量随生育期的进行呈下降趋势。同一时期各处理烟叶总氮含量均低于 CK，说明配施锌锰硼元素能加速烟叶内氮素的转化和运输，降低含氮化合物的积累，促进烟株的生长发育。移栽后 40 ~ 70 d，T2、T3 处理的总氮含量显著低于 CK，在移栽后 50 和 60 d，各处理总氮含量均显著低于 CK，T2 处理总氮含量显著低于 T3 处理，烟叶成熟（移栽后 70 d）与移栽后 40 d 相比，各处理总氮含量降幅分别为 26.87%、27.02%、34.02%、27.80%、26.58%。

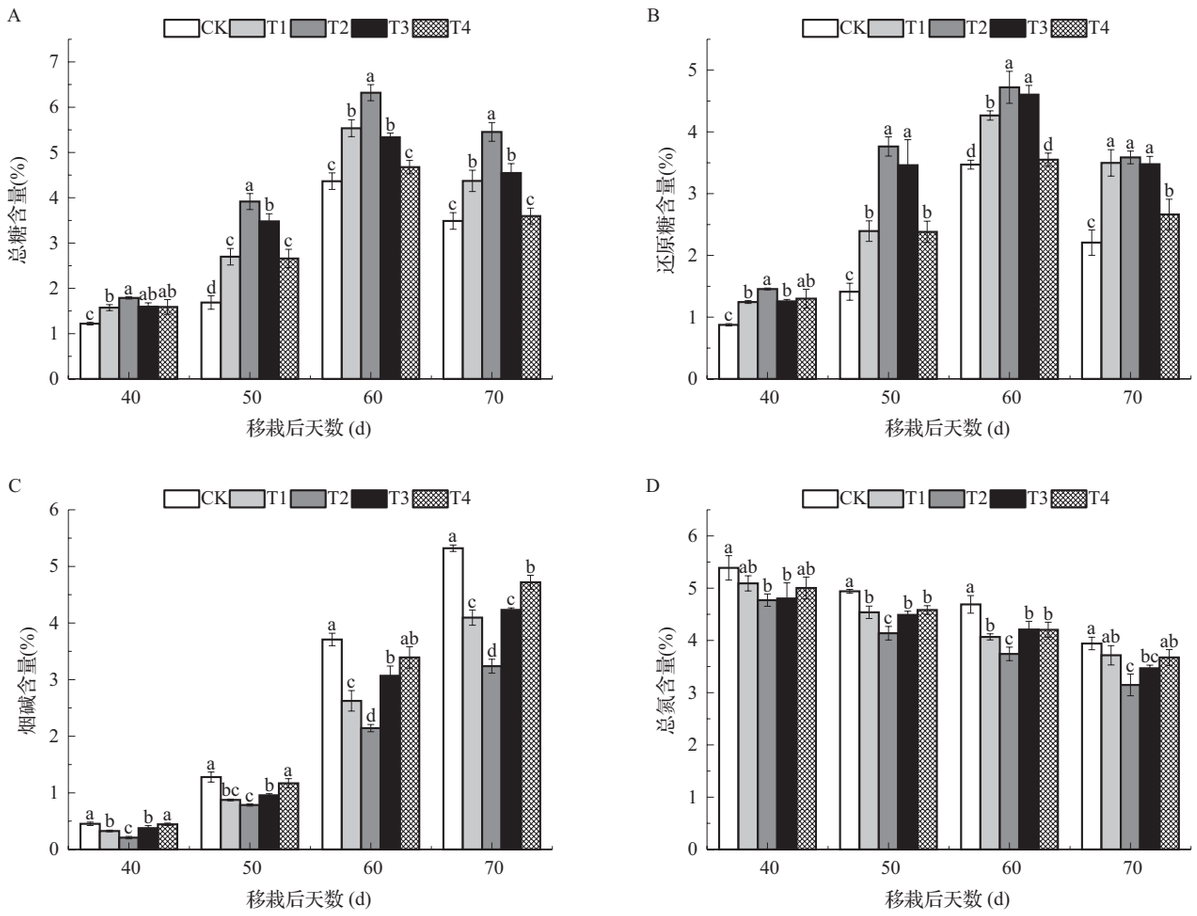

图 2　各处理对雪茄烟叶总糖、还原糖、烟碱和总氮含量的影响

2.3　不同处理对发酵后雪茄烟叶品质的影响

2.3.1　不同处理对发酵后雪茄烟叶常规化学成分含量的影响

由表 4 可知，配施锌锰硼元素对发酵后雪茄烟叶常规化学成分含量有显著影响。烟叶总糖、还原糖含量均高于 CK，除 T4 处理，其余处理总糖含量均显著高于 CK，以 T2 处理最高；还原糖含量 CK 显著低于各处理，以 T2 含量最高、T3 次之；T1、T2、T3 处理烟碱含量分别较 CK 显著降低 10.94%、12.08%、11.70%。T2 和 T3 处理总氮含量均显著低于其他处理，分别为 2.84%、2.73%；烟叶氯含量为 T2>T3>T1>CK>T4；钾含量以 T2 和 T3 处理最高，且显著高于 CK；各处理钾氯比均大于 4，符合优质雪茄烟烟叶生产要求；各处理烟叶氮碱比均大于 1，CK、T1、T2 和 T4 处理间无显著差异。表明配施锌锰硼元素能降低氮碱比，协调发酵后烟叶内含氮化合物内部之间的平衡关系，显著提高烟叶总糖、烟碱、钾和氯水平，降低总氮水平，烟叶氮碱比、钾氯比较为适宜，综合可得，T2 处理各成分含量最为适宜且比值最为协调。

表 4　各处理对发酵后雪茄烟叶化学成分含量的影响

处理	总糖（%）	还原糖（%）	烟碱（%）	总氮（%）	氯（%）	钾（%）	钾氯比	氮碱比
CK	0.35 ± 0.03d	0.17 ± 0.01e	2.65 ± 0.06a	3.56 ± 0.06a	0.28 ± 0.01c	2.15 ± 0.06c	7.81 ± 0.29b	1.34 ± 0.01a
T1	0.53 ± 0.02c	0.36 ± 0.02c	2.36 ± 0.08b	3.11 ± 0.07b	0.37 ± 0.03b	2.51 ± 0.04b	6.88 ± 0.57c	1.32 ± 0.04a
T2	0.72 ± 0.02a	0.51 ± 0.03a	2.33 ± 0.13b	2.84 ± 0.12c	0.52 ± 0.02a	2.69 ± 0.03a	5.19 ± 0.18d	1.22 ± 0.02ab
T3	0.66 ± 0.02b	0.43 ± 0.02b	2.34 ± 0.14b	2.73 ± 0.16c	0.49 ± 0.03a	2.64 ± 0.07ab	5.45 ± 0.41d	1.17 ± 0.12b
T4	0.36 ± 0.03d	0.23 ± 0.02d	2.49 ± 0.03ab	3.30 ± 0.05b	0.24 ± 0.01c	2.26 ± 0.11c	9.61 ± 0.47a	1.32 ± 0.03a

2.3.2　不同处理对发酵后雪茄烟叶锌锰硼元素含量的影响

由表 5 可知，各处理发酵后烟叶锌锰硼含量与 CK 有差异。锌含量以 T2 最高，T3 处理次之，分别为 56.31、52.77 mg/kg；锰含量为 T2>T3>T4>T1>CK，分别较 CK 显著提高 1.98、1.77、1.63、1.60 倍；T2 和 T3 处理间硼含量无显著差异，与其他处理均存在显著差异，分别较 CK 增加 17.08%、14.86%。结果表明，配施锌锰硼元素可显著提高发酵后雪茄烟叶矿质元素含量，以 T2 处理效果最佳，T3 处理次之。

表 5　各处理对发酵后雪茄烟叶矿质元素含量的影响

（mg/kg）

处理	锌	锰	硼
CK	34.08 ± 1.42d	92.08 ± 1.71c	54.09 ± 1.40c
T1	48.88 ± 4.70bc	147.25 ± 16.35b	58.27 ± 1.19b
T2	56.31 ± 2.28a	182.70 ± 11.86a	63.33 ± 1.11a
T3	52.77 ± 3.04ab	162.85 ± 10.53ab	62.13 ± 1.96a
T4	42.72 ± 1.82c	149.74 ± 17.57b	55.48 ± 1.43bc

3　讨论

3.1　锌锰硼配施对雪茄烟叶光合特性的影响

质体色素对植物的光合特性能产生重要影响，其主要由叶绿素和类胡萝卜素组成，为生长发育期的烟株提供碳氮代谢基础，并在后期调制过程中通过分解产生重要的香气物质[20-21]。结果表明，质体色素含量和净光合速率随移栽天数的增加呈先升高后降低趋势，各处理质体色素含量与净光合速率均显著高于 CK，表明配施适量比例锌锰硼元素能提高叶片内叶绿素含量，增强净光合速率，这可能是由于配施适量比例的锌锰硼元素提高光合作用相关酶的活性，并能提高烟株体内光合产物的运输效率，这与白羽祥等[22]和景延秋等[23]对烟草质体色素的研究一致。但锌锰硼元素施用量过高会对烟株的净光合速率产生抑制作用，这可能是因为过量的锌锰硼元素在烟株生长过程中产生胁迫作用，加速叶绿素的分解、降低光合相关蛋白的活性，使烟株的光合速率下降[24]。

3.2　锌锰硼配施对雪茄烟叶碳氮代谢的影响

烟叶内的碳代谢包括无机碳的固定、碳水物质的转化运输、积累和分解过程，是形成烟株所需物质能量和保证烟叶品质的基本代谢途径，与香气物质的合成、含量密切相关[25]。AL 活性能反应出烟叶的碳代谢强度，是碳代谢过程中的关键酶[26]。随移栽期的推进，AL 活性与总糖和还原糖含量变化趋势相同，呈先增加后降低的趋势，说明碳代谢是烟叶后期生长发育的主要代谢活动，使淀粉等碳水物质大量降解为糖类，同时进行碳的转运，以满足烟株的生命活动和氮循环所需的还原力、碳源和能量，这与冯圭如等[27]对中微量元素中两糖积累的研究结果一致。各处理的 AL 活性、总糖和还原糖含量均大于 CK，表明配施不同比例锌锰硼元素不仅可提高烟株的碳代谢活动，还能增强烟株后期对碳水物质的分解能力。以 T2 处理效果最佳，可能是由于 T2 处理配施锌锰硼比例较为适宜、均衡，并且锌锰硼元素作为光合、代谢等途径中部分酶的组分或活化剂，使碳代谢相关酶的活性及数量得到了有效的提高，进而影响了糖的运输和代谢效率，在一定程度上改善碳代谢强度与碳氮协调程度。这与多个相关研究结果一致[18, 28]。

烟叶内氮代谢由氮的初同化与再同化构成，并以初同化为主，其中 NR 和 GS 是氮同化过程中的关键限速酶，NR 可将 NO_3^- 还原为 NO_2^-，控制硝态氮向铵态氮的转化，GS 可将铵态氮转化为有机氮，均直接影响烟株氮代谢强度[29]。氮代谢途径使高氧化态的无机氮转变为还原态的有机氮，产生的有机酸、烟碱、游离氨基酸、蛋白质等物质可为碳代谢提供酶蛋白和光合色素并直接影响烟叶的感官品质[30]。结果表明，烟叶内 NR 和 GS 的活性随着生育期的进行呈先升高后降低的趋势，在移栽后 50 d 达到最高，说明在烟叶生育期前期即叶片功能盛期主要是氮代谢，进行氨基酸、蛋白质的合成和叶片组织的构建，与杨志晓等[31]的研究结果有所提前，可能是由于雪茄烟生育期相对烤烟较短及打顶较早所致。随生育期的进行，总氮含量呈下降趋势，而烟碱含量则逐步升高，说明烟株在前期氮代谢旺盛，对氮素吸收利用率较高，而打顶进一步促进烟株根部对烟碱的合成，增加烟叶内烟碱积累量。各处理 NR、GS 活性以 T2 处理最高，T3 处理次之，表明配施锌锰硼元素能提高氮代谢相关酶的活性，加快烟株含氮化合物的积累，保证后期碳代谢的稳定。

3.3　锌锰硼配施对发酵后雪茄烟叶品质及锌锰硼元素含量的影响

微量元素在烟株内的含量低、适应范围较窄，但对烟株的生长作用是不可替代的[32]，前人研究表明[28, 33]，增施少量微肥即能显著促进烟株生长

发育，改善烟叶品质，过量则不利于烟株生长。锌锰硼元素均能调控光合产物的合成、代谢与运输，从而影响烟株在生长过程中的物质分配与积累，进而影响到烟叶品质[34]。王林等[35]对不同植烟地区烟叶中微量元素含量与品质分析发现，烟叶内缺乏中微量元素是造成烟叶成熟度不足的因素之一，增加中微量元素可改善烟叶调制后的品质。配施锌锰硼元素对发酵后雪茄烟烟叶化学成分、锌锰硼元素含量均有显著影响，以T2处理效果最佳，能有效改善发酵后烟叶内总糖、还原糖、钾含量，降低烟碱、总氮含量，这可能是由于中等比例的锌锰硼元素含量平衡适宜，改善烟株生育期的碳氮代谢水平，使碳氮化合物含量更加协调，同时，锌锰硼元素和酶、微生物相结合，改善并最终提高烟叶的品质[36]。配施锌锰硼元素有效提高发酵后烟叶内相关元素含量，与杨波等[37]在烤烟上的研究结果相同。总糖、还原糖含量的适当增加能中和雪茄燃烧产生的碱性烟气，减轻烟气的刺激性，提高烟气的甜润度和吃味，使烟叶更符合“中式雪茄”的风格特点，易被国内消费人群接受[38]。

4　结论

综上所述，不同锌锰硼元素配施处理对雪茄烟叶光合特性、碳氮代谢相关酶活性和各种化学成分、矿质元素含量均有显著影响。随移栽天数的推移，各处理净光合速率，质体色素，AL、NR、GS活性，总糖，还原糖含量均先升后降，烟碱含量呈上升趋势，总氮含量呈下降趋势；T2（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）处理烟叶质体色素、净光合速率最高，碳氮代谢酶活性以及总糖、还原糖含量最高，烟碱和总氮含量适宜，碳氮代谢转化合适；且发酵后烟叶总体化学成分协调，矿质元素含量最高。因此，在四川省什邡烟区宜采用T2（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）处理锌锰硼元素配施比例，T3（Zn∶Mn∶B=2∶3∶2）处理次之。本研究可为四川省优质雪茄烟叶微量元素专用肥开发提供理论依据。

参考文献：

[1] 方秀，范艺宽，许自成，等. 烟草锌素营养研究进展[J]. 中国农学通报，2017，33（19）：46-51.

[2] 曾睿，张果，何忠俊，等. 土壤锰素营养及锰在烟草上的应用研究进展[J]. 江西农业学报，2009，21（9）：105-109.

[3] 穆童，许自成，李渊博，等. 硼对烟草生理特性及品质影响的研究进展[J]. 土壤通报，2017，48（3）：757-761.

[4] Broadley M R，White P J，Hammond J P，et al. Zinc in plants[J]. New Phytologist，2007，173（4）：677-702.

[5] 李燕婷，李秀英，肖艳，等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学，2009，42（1）：162-172.

[6] 曹玉贤，田霄鸿，杨习文，等. 土施和喷施锌肥对冬小麦子粒锌含量及生物有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16（6）：1394-1401.

[7] 许亚芳，王云，任帅帅，等. 微量元素喷施对冬小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 中国农学通报，2021，37（12）：10-17.

[8] 闫新甫，王以慧，雷金山，等. 国产雪茄分类探讨及其实际应用分析[J]. 中国烟草学报，2021，27（5）：100-109.

[9] 张嘉雯，卢绍浩，赵铭钦，等. 植烟密度对雪茄烟叶碳氮代谢及品质的影响[J]. 中国烟草科学，2020，41（4）：95-100.

[10] 金明珂，陈泳纬，吴永兵，等. 采收时间对雪茄烟叶主要碳水化合物变化及品质的影响[J]. 山东农业科学，2022，54（6）：48-54.

[11] Angelique I，Zhang D，Ye T H，et al. Trace elements loss characteristics in runoff discharge from tobacco-growing red soil in Sichuan province of China[J]. Journal of Agricultural Chemistry and Environment，2022（3）：163-183.

[12] 吴创，施友志，潘勇，等. 麦饭石肥料施用量对来凤雪茄烟叶品质的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（5）：116-123.

[13] 张嘉雯，卢绍浩，赵铭钦，等. 施氮量对四川雪茄烟叶碳氮代谢及品质的影响[J]. 作物杂志，2021（4）：159-165.

[14] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品质体色素的测定：YC/T 382—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[15] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京：中国农业出版社，1995.

[16] 程传玲，唐琦，汪文良，等. 烤烟常规化学成分与感官质量的典型相关分析[J]. 贵州农业科学，2011，39（1）：59-61.

[17] 王瑞新，韩富根，杨素勤，等. 烟草化学品质分析法[M]. 郑州：河南科学技术出版社，1990.

[18] 管庆林，朴晟源，张思唯，等. 中微量元素配施对雪茄烟叶光合特性、碳氮代谢及产质量的影响[J]. 作物杂志，2023（5）：187-196.

[19] Claussen W，Lenz F. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis，growth，and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry，raspberry and strawberry[J]. Plant and Soil，1999，208（1）：95-102.

[20] 赵铭钦，刘金霞，黄永成，等. 烟草质体色素与烟叶品质的关系综述[J]. 中国农学通报，2007（7）：135-138.

[21] 刘彩云，常爱霞，魏跃伟. 质体色素及其香气物质在两种不同叶色烟草中的差异性[J]. 西北农业学报，2012，21（10）：128-131.

[22] 白羽祥，杨焕文，徐照丽，等. 不同锌肥水平对烤烟光合特性和产量及质量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2017（2）：102-106.

［23］ 景延秋，张红立，席飞虎，等. 低磷低硼条件下叶面喷施磷硼对烤烟叶片中质体色素及其降解产物的影响［J］. 中国烟草学报，2013，19（2）：67–71.

［24］ Chen M，Mishra S，Scott A H，et al. Proteomic analysis of Arabidopsis thaliana leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis，carbohydrate metabolism，and protein synthesis［J］. Journal of Plant Physiology，2014，171：235–242.

［25］ 黄树永，陈良存. 烟草碳氮代谢研究进展［J］. 河南农业科学，2005（4）：8–11.

［26］ 刘国顺，彭智良，黄元炯，等. N、P互作对烤烟碳氮代谢关键酶活性的影响［J］. 中国烟草学报，2009，15（5）：33–37.

［27］ 冯圭如，季泽顺，张转勇，等. 不同中微量元素配施对烤烟农艺性状、两糖积累及品质的影响［J］. 山东农业科学，2019，51（2）：81–86.

［28］ 尼金玉，胡蓉花，王俊，等. 增施中、微量元素对烤烟品质及主要经济性状的影响［J］. 江苏农业科学，2021，49（11）：65–71.

［29］ 韦悦，张翠平，郭双，等. 两种形态氮素及其配比对颠茄生长和氮代谢的影响［J］. 草业科学，2017，34（8）：1669–1676.

［30］ 史宏志，韩锦峰. 烤烟碳氮代谢几个问题的探讨［J］. 烟草科技，1998（2）：34–36.

［31］ 杨志晓，史跃伟，林世峰，等. 烤烟碳氮代谢关键酶活性动态及其与类胡萝卜素关系研究［J］. 中国烟草科学，2014，35（2）：59–63.

［32］ 胡国松，郑伟，王震东，等. 烤烟营养原理［M］. 北京：科学出版社，2000.

［33］ 胡蓉花，王俊，沈雪婷，等. 增施锌肥对烤烟品质的影响［J］. 江苏农业科学，2022，50（11）：76–82.

［34］ 刘崇盛，张丽娜，许利平，等. 微量元素对烟叶品质的影响研究进展［J］. 农产品加工，2020（11）：72–74.

［35］ 王林，周红审，王昊，等. 烟叶中微量元素差异及其与外观品质关联分析［J］. 烟草科技，2021，54（3）：9–16.

［36］ 张晓娟. 雪茄外包皮烟人工发酵工艺及叶表微生物区系研究［D］. 郑州：河南农业大学，2006.

［37］ 杨波，祖朝龙，李斌，等. 锌、硼对烟草生长发育及其他矿质元素积累的影响［J］. 中国农学通报，2014，30（10）：218–222.

［38］ 韦祖松. 析释“中式雪茄”的特点和发展现状［J］. 广东经济，2020（11）：82–89.

Effects of combined application of zinc，manganese and boron on photosynthetic characteristics，carbon and nitrogen metabolism and quality of cigar leaves

YUAN Hua-en[1]，GUAN Qing-lin[1，5]，WU Yong-bing[1]，PIAO Sheng-yuan[1]，LI Jia-yi[2]，LEI Yun-kang[2]，QIN Yan-qing[3]，CHAI Zhi-shun[4]，WANG Jun[2*]，ZHAO Ming-qin[1*]（1. National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center，College of Tobacco Science，Henan Agricultural University，Zhengzhou Henan 450002；2. Deyang Branch of Sichuan Tobacco Company，Deyang Sichuan 618400；3. Sichuan Company of China Tobacco Company，Chengdu Sichuan 610041；4. Cigar Tobacco Technology Innovation Center of Tobacco Industry，Chengdu Sichuan 610000；5. Technology Center of China Tobacco Zhejiang Industrial Co.，Ltd.，Hangzhou Zhejiang 310024）

Abstract：To investigate the effects of different ratios of zinc（Zn），manganese（Mn）and boron（B）elements on photosynthetic characteristics，carbon and nitrogen metabolism，and quality of cigar tobacco leaves，the variety of ‘Dexue 1’ was selected as the experimental material，and the stromal pigment content，net photosynthetic rate，carbon，nitrogen metabolism enzyme activity，the chemical composition of fermented tobacco leaves and Zn，Mn and B element contents of the tobacco were analyzed. The results showed that：（1）The application of Zn，Mn and B at different ratios increased the stromal pigment content，net photosynthetic rate and the Zn，Mn and B contents of cigar tobacco leaves，improved the activities of amylase（AL），nitrate reductase（NR），glutamine synthetase（GS）and carbon and nitrogen metabolites，and coordinated the carbon and nitrogen metabolism of tobacco plants.（2）Compared with CK（Zn∶Mn∶B=0∶0∶0），the content of total sugar and reducing sugar in T2 treatment（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）increased by 51.39% and 66.67%，respectively，the content of nicotine and total nitrogen decreased by 12.08% and 20.22%，respectively，the content of Zn，Mn，and B increased by 0.17，1.98 and 0.65 times，respectively，the ratio of potassium to chlorine and the ratio of nitrogen to alkali was better，which met the production requirements of high-quality cigar leaves. In conclusion，it could be concluded that the Zn，Mn and B ratio of the T2 treatment（Zn∶Mn∶B=4∶4∶3）and T3 treatment（Zn∶Mn∶B=2∶3∶2）was suitable for the production of cigar tobacco in Shifang city，Sichuan province，which could significantly enhance the photosynthetic characteristics，carbon and nitrogen metabolism intensity and improve the quality of cigar tobacco，and provide theoretical basis and technical guidance for the production of high-quality cigar tobacco in Shifang city，Sichuan province.

Key words：foliar fertilizer；zinc，manganese and boron；cigar tobacco leaves；photosynthetic characteristics；carbon and nitrogen metabolism；guality