

李游,张晨禹,黄叶清,等.遮荫对茶树水溶性氟积累的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(6):135-144.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.014

遮荫对茶树水溶性氟积累的影响

李游¹,张晨禹²,黄叶清¹,王铭涵¹,周怡志¹,沈程文¹

1.湖南农业大学茶学教育部重点实验室,长沙 410128;

2.中国农业科学院茶叶研究所/茶树种质创新与资源利用全国重点实验室,杭州 310008

摘要 为探究不同遮荫强度与持续时间对夏秋季茶树水溶性氟(water-soluble fluoride, Ws-F)积累的影响,以茶树品种‘槠叶齐’为材料,设置0%、50%、75%和80% 4种遮荫水平,并分别在处理后第10、20、30和40天采集茶园土壤及茶树各组织(叶、茎、根)样品,测定Ws-F含量。结果显示:遮荫显著促进了成品茶中Ws-F的积累。与未遮荫相比,随着遮荫强度的增加,茶树叶片中的Ws-F含量显著升高,当遮荫强度达到80%时,茶树体内氟平衡被打破。进一步分析发现,随着遮荫时间的增长,可能出现了嫩叶向老叶的氟转运。研究表明,遮荫显著提高了夏秋茶Ws-F含量的积累,其强度与持续时间存在复杂的交互作用。

关键词 茶饮;氟富集;遮荫处理;水溶性氟;转运机制

中图分类号 S571.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0135-10

饮茶是人体摄入氟的重要途径之一。适量饮用正常氟浓度的茶水有益于强健骨骼和预防龋齿^[1]。然而,若长期大量饮用由老叶制成的成品茶,则可能导致氟斑牙^[2]和氟骨症^[3]。已有研究表明,过量氟摄入对人体多个器官(肝脏、肾脏、心脏、肺部)和系统(免疫系统、神经系统)发育和生育能力均具有潜在毒性^[4-7]。此外,氟含量过高还会影响茶叶的滋味和香气品质^[8-9]。

大多数植物体内的氟含量通常低于10 mg/kg,当牧草中氟含量超过30 mg/kg时便会出现毒害症状^[10]。然而,茶树(*Camellia sinensis*)体内富集较高浓度的氟后仍能正常生长。叶片是茶树主要的氟储存器官,其氟积累量与成熟度呈显著正相关,老叶的氟积累量可达嫩叶的数倍^[11]。郜红建等^[12]对安徽宣城茶园进行调查时发现,即便茶树成熟叶中氟含量高达1 150 mg/kg,茶树仍未出现氟中毒现象。研究表明,茶树体内富集的氟约80%来源于土壤环境^[13],水溶性氟(water-soluble fluoride, Ws-F)是其主要的吸收形式,其中铝-氟络合物(如AlF²⁺、AlF₂⁺和AlF₄⁻)的形成对茶树的氟吸收具有重要影响^[14]。茶树根系可通过主动吸收与被动吸收摄取这些络合

物,经由木质部蒸腾流运输至地上部。这些络合物在叶片中解离,释放出Ws-F,从而导致茶树叶片中氟的显著积累。Zhang等^[15]研究进一步表明,氟可能通过阳离子和阴离子通道进入茶树体内。综上,茶树可能通过其独特的吸收、转运和富集机制,实现了对高浓度氟的积累与耐受。

茶树体内的氟含量还表现出明显的季节性差异。Wen等^[1]研究发现,茶树老叶在夏季的氟积累量显著低于春季,但夏秋茶常受高温影响,利用率较低。遮荫作为一种重要的茶园管理措施,能够调节次生代谢物的积累^[16]、提高芽叶嫩度^[12]、改善茶叶品质,并已在生产实践中得到广泛应用,尤其在夏秋茶和抹茶生产中被普遍采用^[17]。Ge等^[18]在对比不同遮荫处理对夏季茶树的影响后发现,短期遮荫(14 d)可降低茶园温度、提高氨基酸含量并改善茶叶品质,但高强度遮荫(遮光率99%)则显著抑制了茶树光合作用并导致鲜叶产量下降。Sano等^[19]研究进一步指出,长期遮荫后突然出现的强光可能会诱发茶树氧化应激,进而影响其生长与生理状态。然而,不同遮荫强度与持续时间对茶树氟富集特性的影响仍有待系统研究。本研究以多年生茶树“槠叶齐”为材

收稿日期:2025-08-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1600801);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202410537114);郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(2022SFQ48);湖南省现代农业产业技术体系建设专项(HARS-10)

李游,E-mail:Ly998901@stu.hunau.edu.cn

通信作者:沈程文,E-mail:shencw@hunau.edu.cn

料,对其进行多程度、多时长遮荫,同时对茶树不同部位以及土壤Ws-F含量进行分析,以期明确茶树在不同遮荫条件下Ws-F的吸收和转运规律,探究遮荫对茶树水溶性氟积累的影响,旨在为茶园管理中氟积累的调控以及夏秋茶安全生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究分为2个试验部分。试验一以湖南省长沙市($28^{\circ}45'N$, $112^{\circ}69'E$)种植的多年生茶树品种‘槠叶齐’为材料,树龄10 a以上,树高80~100 cm,冠幅120~150 cm。设置80%遮荫处理组与不遮荫对照组,处理70 d后于2023年6月采摘一芽二叶鲜叶,分别加工成工夫红茶(经萎凋、揉捻、发酵、干燥^[20])与传统白茶(萎凋70 h后干燥),每个处理进行3次重复,并测定成品茶中水溶性氟(Ws-F)含量。

试验二在湖南省益阳市($28^{\circ}49'N$, $111^{\circ}47'E$)一茶园进行,该地土壤总氟平均含量为1 084.5 mg/kg。供试材料为当地主栽品种‘槠叶齐’,树龄10 a以上,株行距0.8 m×1.5 m,树高80~100 cm,冠幅120~150 cm。于2023年8月茶树生长旺盛期设置4个遮荫梯度:CK(0%)、50%、75%与80%,使用黑色遮阳网覆盖(20 m×2 m),每组处理进行3次生物学重复。遮荫处理为期40 d,取样时间点设于处理后的第10、20、30和40天。采集叶片、茎、根及主根附近土壤。叶片分为3组:嫩叶(第1~3叶)、成熟叶(第4~5叶)和老叶(第6~7叶)。叶片样本在100 °C下蒸青5 min,然后在80 °C的烘箱(天津泰达仪器有限公司)中干燥5 d至足干。茎部和根系样品直接在80 °C的烘箱中干燥1周。样本干燥后采用GB/T 8303—2013《茶磨碎试样的制备及其干物质含量测定》方法进行粉碎。土壤样品在阳光下自然干燥,然后过孔径为0.15 mm的筛,混匀后备用。

1.2 水溶性氟含量测定

水溶性氟含量测定参照Wang等^[21]的方法,将0.2 g样品(精确至0.1 mg)放入50 mL三角烧瓶中,随后加入40 mL水,并将烧瓶置于沸水浴中,15 min后取出并冷却至室温。用移液枪将10 mL样品溶液移入50 mL塑料烧杯中,然后向溶液中加入10 mL总离子强度调节缓冲液以调节离子强度。使用氟离子计(雷磁PXSJ-227L)测定平衡电位(mV)。通过标准曲线法计算样品中水溶性氟含量。总离子强度调节缓冲液:准确称取58 g NaCl、120 g二水柠檬酸三

钠和57 mL冰醋酸,将其溶解于700 mL水中。通过加入10 mol/L氢氧化钠溶液将pH值调节到5.0~5.5,最后用纯水将缓冲液定容到1 L。

1.3 氟转运系数和生物富集系数分析

植物-土壤系统氟迁移特征参照Zhang等^[22]的方法,采用转运系数(translocation factor, TF)和生物富集系数(bioaccumulation factor, BCF)双指标体系进行系统评估。TF值通过公式 $T_F = F_{\text{叶片}}/F_{\text{根系}}$ 计算,表征氟离子在根-叶片的迁移效率;BCF值依据公式 $B_{CF} = F_{\text{叶片}}/F_{\text{土壤}}$ 推导,反映茶树对土壤水溶性氟的生物富集能力。所有数据均为3次生物学重复测定值的平均值。

1.4 叶色值(SPAD)分析

叶色值(SPAD)测定参照Shao等^[23]的方法,使用PAM-2500便携式叶绿素荧光仪(Heinz Walz GmbH,德国)测量茶树顶芽下第二片叶的SPAD值。每个处理的SPAD值取10片叶的平均值。

1.5 数据统计与分析

试验数据采用Excel 2016软件进行统计分析,GraphPad Prism 8.0.1进行数据分析,通过单因素方差分析(ANOVA)结合Duncan's多重比较检验进行组间差异显著性判定, $P < 0.05$ 被认为差异有统计学意义。所有数据均以3个独立生物学重复的均值±标准误(mean±SE)表示。

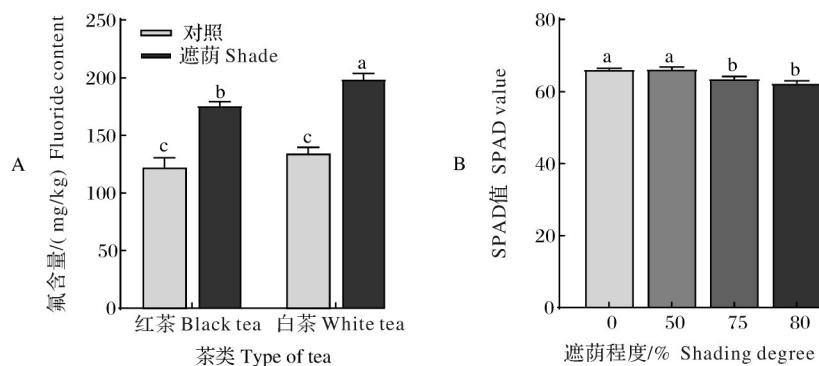
2 结果与分析

2.1 遮荫对成品茶水溶性氟含量的影响

比较未遮荫(对照组)与遮荫处理茶树原料制成的成品茶中Ws-F含量,发现遮荫显著促进了成品茶Ws-F的积累(图1A)。由遮荫原料加工所得的红茶与白茶Ws-F含量较对照分别上升了44.0%和48.3%。此外,无论是对照还是遮荫处理下,白茶的Ws-F含量均高于红茶,分别高出9.9%和13.2%。以上结果表明,遮荫处理显著增强了茶叶中Ws-F的富集能力,而白茶相较于红茶积累更高浓度Ws-F,可能与二者不同的加工工艺导致的氟形态变化有关。

2.2 不同遮荫程度对茶树叶片水溶性氟含量的影响

为探究遮荫强度对茶树叶绿素含量的影响,在遮荫40 d后测定了茶树顶芽下第二片叶的SPAD值(图1B)。结果显示,75%和80%遮荫处理组的SPAD值较对照(CK)分别降低3.9%和5.7%($P <$



A: 遮荫与对照鲜叶制成的成茶 Ws-F 含量 Ws-F content in processed tea manufactured from shaded and control tea leaves; B: 不同程度遮荫处理 40 d 后的 SPAD 值 SPAD values after 40 days of treatment with different shading levels. 不同小写字母表示不同处理间存在显著差异, $P < 0.05$, 下同。 Different lowercase letters represent significant differences between different durations at $P < 0.05$. The same as below.

图 1 成品茶 Ws-F 含量及不同处理下叶片 SPAD 值

Fig.1 Ws-F content of finished tea and SPAD values of leaves under different treatments

0.05), 表明遮荫强度与叶绿素含量呈负相关; 而 50% 遮荫与对照组之间差异不显著。长期高强度遮荫显著抑制了叶绿素的积累, 这可能与弱光条件下光合效率受限有关。

对不同遮荫处理下各成熟度叶片的 Ws-F 富集特征进行分析, 如图 2 所示, 结果表明, 嫩叶与成熟叶中 Ws-F 含量均随遮荫强度增加而升高, 呈现遮荫 80% > 遮荫 75% > 遮荫 50% 的规律 ($P < 0.05$)。其中, 80% 遮荫处理显著提升了老叶的 Ws-F 富集能力。相反, 50% 遮荫对 Ws-F 的积累表现出一定的抑制作用, 在第 10、30 和 40 天时老叶 Ws-F 含量较对照分别降低 30.45%、40.57% 和 47.84% (图 2I、K、L)。在中高遮荫处理(75%、80%)下, 成熟叶 Ws-F 在第 10 天出现显著增加, 增幅分别为 83.08%、89.52% (图 2E); 嫩叶 Ws-F 在第 20 天出现显著增加, 分别为对照组的 2.51 倍与 2.32 倍 (图 2B); 老叶在第 30 天出现显著增加, 增幅分别为 67.64% 和 57.99% (图 2K)。至第 40 天时, 80% 遮荫处理下成熟叶与老叶 Ws-F 含量仍显著高于对照 ($P < 0.05$), 但嫩叶中的 Ws-F 含量已回归至对照水平。综上所述, 中高强度遮荫对茶树叶片 Ws-F 的积累存在显著的促进效应, 但其存在明显的时间差异, 嫩叶中的 Ws-F 增加后, 在第 40 天时降低, 推测茶树体内的氟平衡机制可能依托于 Ws-F 由嫩叶向更成熟叶的转运。

2.3 不同遮荫程度对茶树茎部、根系及土壤中水溶性氟含量的影响

如图 3, 与对照相比, 茎部 Ws-F 含量没有显著变化 (图 3A~D, $P > 0.05$)。遮荫强度与根系 Ws-F 积累呈非线性响应关系; 在 80% 遮荫条件下, 根系 Ws-F 含量在处理第 10 天达到最大值 (29.12 mg/kg), 显

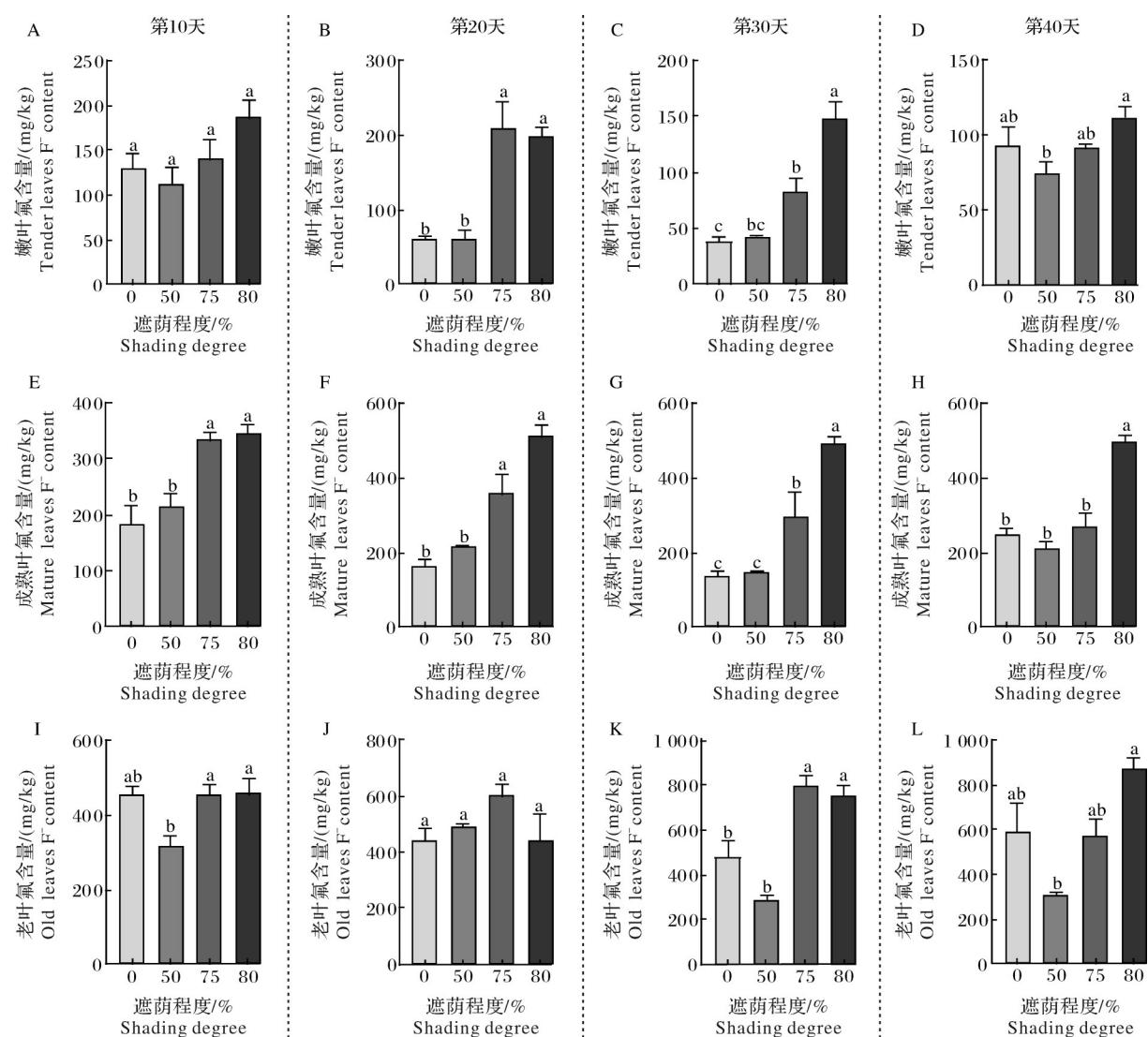
著高于 50% 遮荫组 (14.46 mg/kg, $P < 0.05$), 随后持续降低。而 50% 遮荫处理在整个处理周期中根系 Ws-F 含量均低于同期对照组 (降低 18.3%~24.6%)。试验期间土壤 Ws-F 含量维持在 5.17~10.70 mg/kg。各遮荫处理组在 40 d 后土壤 Ws-F 含量均高于对照。上述结果表明, 较低遮荫强度下, 根系对 Ws-F 的吸收能力可能受到抑制, 并且其含量变化可能并非源于土壤氟含量的改变。

2.4 不同遮荫时间对茶树叶片水溶性氟富集的影响

如图 4 所示, 茶树叶片 Ws-F 含量表现出老叶 > 成熟叶 > 嫩叶的富集规律。对照组与 50% 遮荫处理组叶片中 Ws-F 含量随时间变化均呈现“先下降后上升”的趋势。而中高度遮荫处理(75%、80%)下, 叶片 Ws-F 含量差异显著, 茶树叶片中的 Ws-F 积累规律被改变。在此条件下, 嫩叶 Ws-F 含量总体呈现降低趋势, 而老叶呈上升趋势, 表明该处理下可能存在 Ws-F 从嫩叶向老叶的转运。此外, 50% 和 75% 遮荫处理下, 老叶 Ws-F 含量分别在处理第 20 天 (+32.36%) 和第 30 天 (+56.89%) 出现显著上升, 随后下降, 而 80% 遮荫处理组自第 20 天后持续上升。这一结果表明, 在中低遮荫度下茶树能够维持 Ws-F 稳态, 而高遮荫度下茶树 Ws-F 稳态可能被破坏。

2.5 不同遮荫时间对茶树茎部、根系及土壤中水溶性氟含量的影响

如图 5 所示, 不同遮荫处理下茶园土壤的 Ws-F 含量随时间无显著变化。对照及中低程度遮荫 (50%、75%) 处理下, 茎部与根系的 Ws-F 含量呈现“先上升后下降”的趋势, 均在处理后第 20 天时达到最大值后逐渐下降, 体现了茶树自身维持 Ws-F 平衡



A~D: 分别为处理 10、20、30、40 d 嫩叶 Ws-F 含量 Ws-F content in young leaves at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively; E~H: 分别为处理 10、20、30、40 d 成熟叶 Ws-F 含量 Ws-F content in mature leaves at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively; I~L: 分别为处理 10、20、30、40 d 老叶 Ws-F 含量 Ws-F content in old leaves at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively.

图2 不同遮荫程度处理下叶片 Ws-F 含量

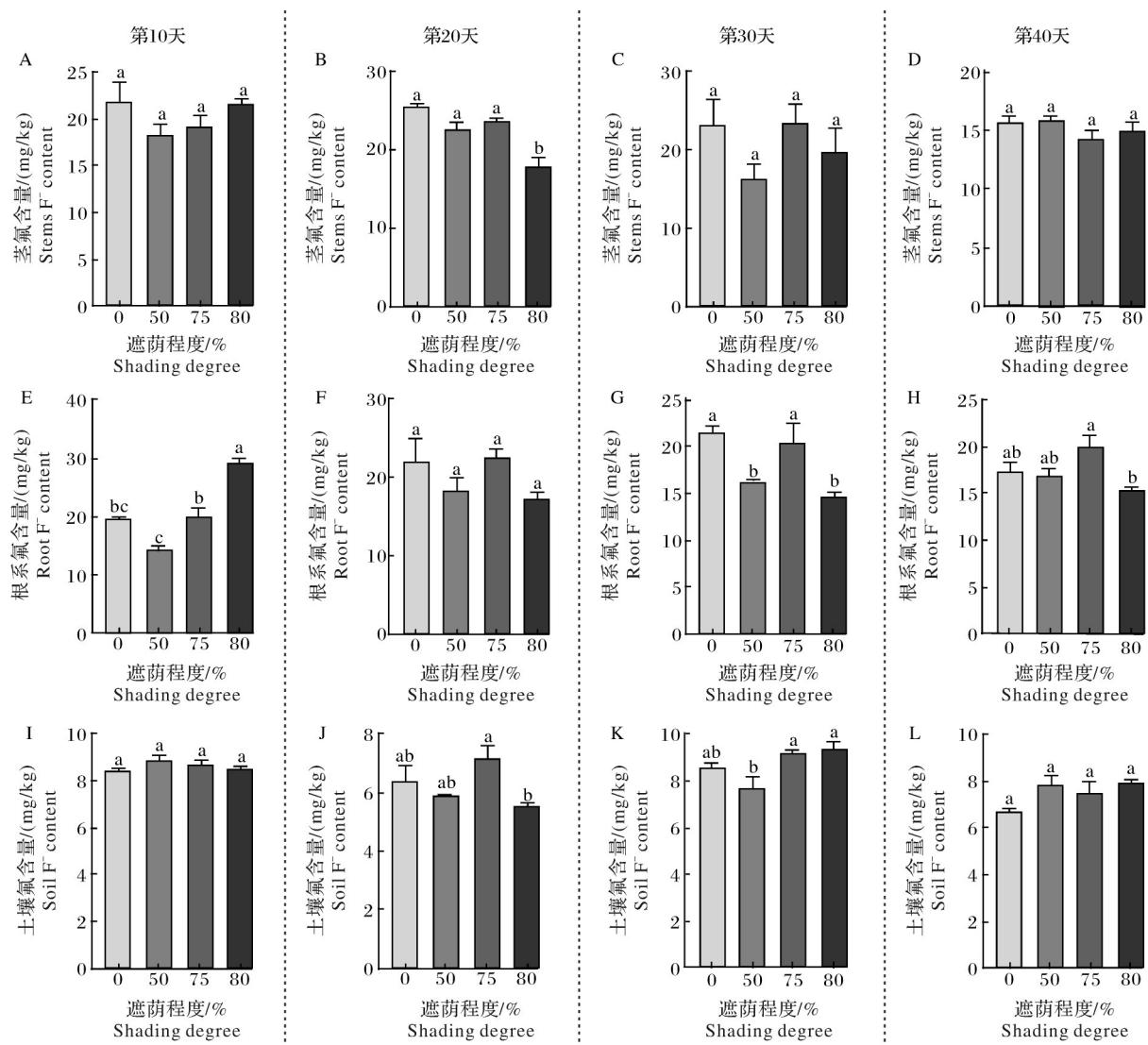
Fig.2 Leaves Ws-F content under each shade intensity treatments

的调节能力。然而,在 80% 遮荫条件下,根茎表现出 Ws-F 稳态失衡,即茎部与根系 Ws-F 含量在处理第 10 天分别达到最大值(21.57 和 29.13 mg/kg)后急剧下降,至第 40 天时较峰值期分别降低 29.9% 和 47.14%($P<0.05$)。

2.6 遮荫下的茶树水溶性氟转运与生物富集效率

本研究运用转运系数(TF)与生物富集系数(BCF)双指标体系,分析不同遮荫处理下茶树各叶位对 Ws-F 的富集和转运能力(表 1)。双因素方差分析表明,遮荫时长与强度对 TF、BCF 值均呈现极显著交互效应($P<0.0001$)。叶片中的 TF 与 BCF 值均 >1 ($T_{F\min}=1.82$, $B_{CF\min}=4.90$),表明茶树具备极

强的氟富集与转运能力。在处理初期(第 10 天),仅 75% 遮荫处理的成熟叶 TF 值(19.34 mg/kg)显著高于 CK(9.30 mg/kg)($P<0.05$),而嫩叶与老叶各处理间无显著差异($P>0.05$)。到处理第 20 天,80% 遮荫处理下叶片 TF/BCF 达到最大值,相较 CK 显著提升了 78.1%~300%($P<0.05$)。随遮荫强度增大,TF 和 BCF 值显著提高,表明 80% 遮荫处理可能通过改变茶园微环境增强茶树 Ws-F 积累能力。遮荫中期(第 30 天)是茶树体内 Ws-F 再分配阶段,嫩叶与成熟叶 TF/BCF 值均呈下降态势,而中高遮荫度(75%、80%)的老叶 Ws-F 富集能力则显著提高,体现了此阶段茶树不同成熟度叶片之间的 Ws-F 转运。



A~D: 分别为处理10、20、30、40 d茎部Ws-F含量Ws-F content in stems at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively; E~H: 分别为处理10、20、30、40 d根系Ws-F含量Ws-F content in roots at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively; I~L: 分别为处理10、20、30、40 d土壤Ws-F含量Ws-F content in soil at 10, 20, 30, and 40 days after treatment, respectively.

图3 不同遮荫程度处理下茎部、根系及土壤Ws-F含量

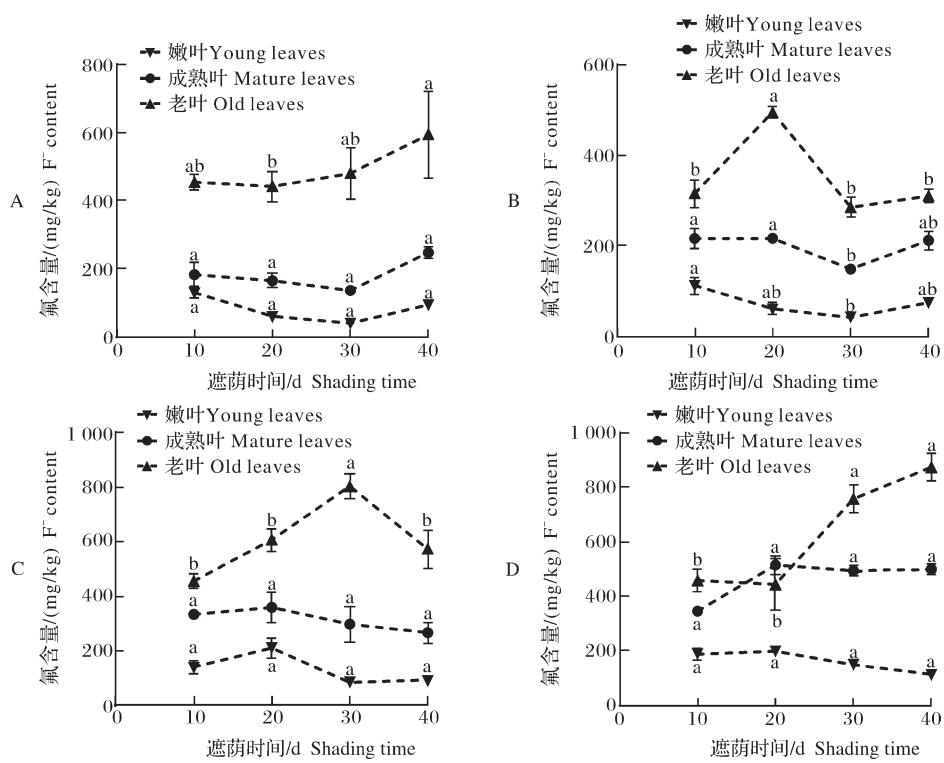
Fig.3 Stem, root and soil Ws-F content under each shade intensity treatment

在遮荫后期(第40天),80%遮荫处理下成熟叶BCF值与老叶TF值仍显著高于其他处理($P<0.05$),表明长期高强度遮荫对茶树成熟叶与老叶的Ws-F积累具有持续促进作用。

3 讨论

茶树作为氟超富集植物,其地上部氟含量通常远大于地下部^[13],且叶片中氟含量随成熟度的增加而提升,本研究与之一致。在中高程度遮荫处理(75%和80%)下,茶树叶片的SPAD值下降,可能与遮阳网和茶树冠层之间生长空间不足有关,此结果与Ge等^[18]一致。在此条件下,茶树光合效率降低,

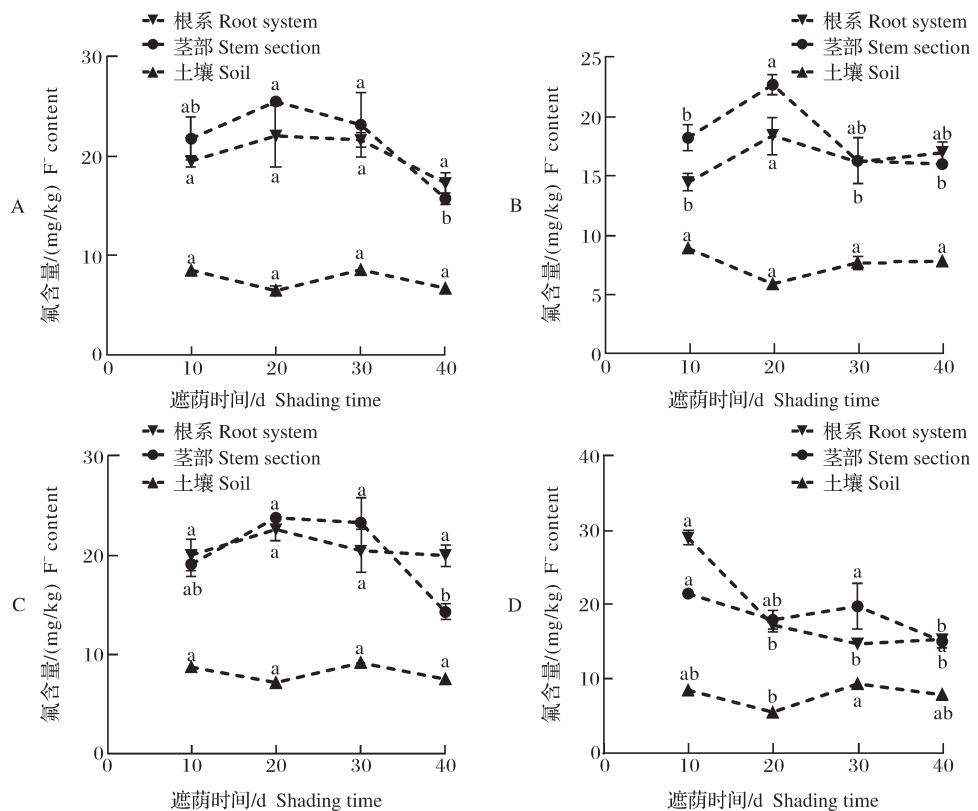
新梢萌发受到抑制,导致叶片生物量下降。但不同遮荫处理对茶树根系及根际土壤Ws-F含量均未产生显著影响,表明茶树对Ws-F的吸收保持相对稳定。在相似的生长环境下,茶树的氟含量是其他植物的10~100倍^[24]。茶树体内的区域化间隔形成了茶树独特的耐氟机制。绝大部分氟在茶树体内选择性地积累于叶片中,其中又以老叶为主要储存部位。在叶片细胞水平上,氟离子集中分布于细胞壁和液泡2个区域^[25]。此外,茶树是一种富铝植物,铝和氟极易结合形成稳定的氟铝复合物,大大降低了单一氟离子的生物毒性^[26]。值得注意的是,茶树体内氟的转运主要依赖于木质部途径。Teng等^[28]通过研



A:0% 遮荫 Shading 0% (control); B:50% 遮荫 Shading 50%; C:75% 遮荫 Shading 75%; D:80% 遮荫 Shading 80%.

图4 不同遮荫时间处理下叶片Ws-F含量

Fig.4 Leaves Ws-F content under each shade time treatment



A:0% 遮荫 Shading 0% (control); B:50% 遮荫 Shading 50%; C:75% 遮荫 Shading 75%; D:80% 遮荫 Shading 80%.

图5 不同遮荫时间处理下茎部、根系及土壤Ws-F含量

Fig.5 Stem, root and soil Ws-F content under each shade time treatment

表1 不同遮荫模式下茶园土壤-茶树Ws-F的转运系数和富集系数

Table 1 Transfer and enrichment coefficients of soil-tea tree Ws-F in tea plantations under different shading patterns

遮荫程度/% Shading degree	叶位 Leaves age	遮荫第10天 The 10th day of shading		遮荫第20天 The 20th day of shading		遮荫第30天 The 30th day of shading		遮荫第40天 The 40th day of shading	
		TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF
0	YL	6.61± 0.91Aa	16.37± 2.47ABA	2.83± 0.07Bab	8.94± 0.10Bab	1.83± 0.21Bb	4.60± 0.41Bb	5.46± 0.63Aa	13.91± 1.54Aa
		9.30± 1.79Bab	21.88± 3.10Aa	8.04± 0.46Cab	25.37± 1.071Ba	6.224± 0.6120Cb	15.76± 1.34Ba	14.58± 0.72Ba	37.28± 1.48Ba
	OL	23.22± 1.09Aab	55.09± 2.68Aab	18.78± 0.46Bab	59.47± 1.98Bab	17.31± 3.06Cb	43.43± 6.75Bb	33.42± 5.49Ba	85.28± 17.63Aa
		5.55± 0.26Aa	13.08± 2.45Ba	3.65± 0.75Ba	12.52± 2.14Ba	2.58± 0.12Ba	5.71± 0.49Ba	4.37± 0.38Aa	11.36± 1.62Aa
	ML	13.06± 1.32ABA	19.13± 3.11Aa	10.13± 0.48BCa	37.35± 1.105Ba	9.121± 0.21BCa	20.28± 1.74Ba	12.75± 1.43Ba	28.74± 6.01Ba
		21.81± 1.85Aa	36.32± 4.21Ab	25.15± 1.07ABA	88.33± 1.02ABA	17.48± 1.34Ca	39.00± 4.25Bb	22.99± 2.88Ba	55.95± 12.87Aab
50	YL	8.75± 0.45Aa	15.98± 2.46ABb	7.770± 1.51Aab	28.86± 1.61Aa	4.062± 0.43Bc	9.01± 1.41ABb	4.70± 0.39Abc	12.68± 1.23Ab
		19.38± 0.83Aa	37.99± 0.97Aa	16.66± 3.39Ba	50.60± 7.09ABA	13.82± 2.00Ba	32.35± 7.22ABA	13.06± 1.38Ba	34.66± 3.24Ba
	OL	23.82± 3.02Aa	52.71± 2.34Aa	22.01± 0.68ABA	72.26± 5.78ABA	31.05± 1.93Ba	71.14± 10.76ABA	32.03± 3.774Ba	85.34± 9.68Aa
		6.39± 0.52Ac	22.07± 2.02Ab	11.34± 0.72Aa	33.08± 2.05Aa	10.18± 1.31Aab	16.15± 1.81Ac	7.347± 0.55Abc	14.84± 0.99 Ac
	ML	11.84± 0.52ABb	47.57± 5.38Aa	30.61± 2.96Aa	89.40± 8.15Aa	33.70± 2.11Aa	53.92± 3.37Aa	33.65± 0.51Aa	80.41± 14.78Aa
		23.82± 1.15Ac	54.17± 4.20Ab	22.01± 2.11Ab	105.9± 6.19Aa	31.05± 3.97Aa	83.15± 7.85Aab	32.03± 5.56Aa	105.1± 0.12Aa

注: YL: 嫩叶 Young leaves; ML: 成熟叶 Mature leaves; OL: 老叶 Old leaves; TF: 转运系数 Translocation factor; BCF: 生物富集系数 Bioconcentration factor; 不同大写字母表示不同遮荫程度间存在显著差异, 不同小写字母表示不同处理时长间存在显著差异, $P < 0.05$ 。 Different uppercase letters represent significant differences between different shadeing degrees and different lowercase letters represent significant differences between different durations at $P < 0.05$ 。

究发现, 遮荫处理会显著抑制茶树木质素的生物合成, 而木质素作为木质部细胞壁的重要组分, 其含量下降可能导致木质部运输 Ws-F 的能力减弱。这一机制可能是本试验中第 40 天时茎部氟含量显著下降的重要原因。茶园土壤中 Ws-F 随时间的变化, 可能与不同时期茶园的气候变化有关。总体而言, 遮荫虽然已经被证实具有增加茶树中氨基酸、类黄酮等次生代谢产物, 提升茶叶品质的作用, 但过度遮荫可能引起产量下降、叶片氟含量上升等问题, 因此, 夏秋季茶树遮光率应保持在 50% 左右, 避免重度遮荫。

土壤中的 Ws-F 是茶树吸收氟的主要形式^[28], 茶树根系对氟进行吸收^[29], 经过茎部的转运, 储存在叶片中。当老叶中的氟储存到一定限度时, 也可以向新梢和根系转移, 形成茶树体内的动态平

衡^[4,30-31]。本研究结果表明, 在持续遮荫处理 30 d 后, 75% 和 80% 遮荫处理下的茶树嫩叶与成熟叶中 Ws-F 含量呈显著下降趋势, 而老叶中的 Ws-F 含量则明显上升。对生物富集系数和转运系数进行分析发现, 随遮荫时间的延长, 嫩叶和成熟叶的氟富集能力显著降低, 而老叶的氟转运能力明显增强, 此机制可能是导致老叶氟积累的主要原因。李丽霞等^[10]通过对水培茶苗中的氟含量进行检测, 发现了氟由茶树老叶与成熟叶向当年新梢转移的现象。在萝卜和菠菜上也发现了类似现象^[30-33], 表明 Ws-F 具有很强的转移和再分配性, 以维持茶树体内的氟稳态, 揭示在长期遮荫胁迫下, 茶树体内可能出现了氟的再分配, 即氟由嫩叶和成熟叶向老叶进行定向转运。

饮茶是人体摄取氟的重要途径, 成品茶中

40%~90%的氟化物可以溶于茶汤中^[34]。长时间饮用高氟茶叶可能对人体健康构成潜在风险。GB 19965—2005《砖茶含氟量》规定,成品茶中氟含量应≤300 mg/kg。在本研究中,遮荫处理显著提高成品茶中的Ws-F含量($P<0.05$),但成品茶中的氟浓度仍处于安全范围内。夏秋茶通常酚氨比较高,苦涩味较重,利用率较低。而茶多酚是红茶品质形成的关键物质^[35],通过适当的加工工艺将夏秋茶的特点转化为红茶风味的优点,有利于提高夏秋茶的利用率。传统观点认为,经过发酵工艺加工的红茶通常氟含量较高。但在本研究中,仅经过萎凋工序制成的白茶氟含量显著高于红茶($P<0.05$),这一结果与Cai等^[36]的研究结论一致。茶叶中氟化物的差异通常被认为高度依赖于茶树鲜叶,而非加工过程。而在本研究中,相同原料制成的白茶比成品红茶氟含量增加13.16%,表明不同的加工工艺可能通过改变茶叶中的氟形态,从而造成Ws-F含量变化,为夏秋季茶叶生产提供参考。

参考文献 References

- [1] WEN X J, WANG Y C, WANG S T, et al. Fluorine accumulation characteristics of 85 tea tree (*Camellia sinensis*) varieties and its potential risk assessment [J/OL]. Ecotoxicology and environmental safety, 2024, 283: 116785 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116915>.
- [2] SHU W S, ZHANG Z Q, LAN C Y, et al. Fluoride and aluminium concentrations of tea plants and tea products from Sichuan Province, PR China [J]. Chemosphere, 2003, 52(9) : 1475-1482.
- [3] MANDINIC Z, CURCIC M, ANTONIJEVIC B, et al. Fluoride in drinking water and dental fluorosis [J]. Science of the total environment, 2010, 408(17): 3507-3512.
- [4] MCDONAGH M S, WHITING P F, WILSON P M, et al. Systematic review of water fluoridation [J/OL]. BMJ, 2000, 321(7265) : 855-859 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.1136/bmj.321.7265.855>.
- [5] FORDYCE F M, VRANA K, ZHOVINSKY E, et al. A health risk assessment for fluoride in Central Europe [J]. Environmental geochemistry and health, 2007, 29(2): 83-102.
- [6] ZHANG S, ZHANG X F, LIU H L, et al. Modifying effect of COMT gene polymorphism and a predictive role for proteomics analysis in children's intelligence in endemic fluorosis area in Tianjin, China [J]. Toxicological sciences, 2015, 144 (2): 238-245.
- [7] ZHAO L, YU Y, DENG C. Expression of sonic hedgehog signaling pathway and its inhibition by cyclopamine in rat liver with chronic fluorosis [J]. Chinese journal of pathology, 2015, 43: 814-819.
- [8] DE LA FUENTE B, VÁZQUEZ M, ROCHA R A, et al. Effects of sodium fluoride on immune response in murine macrophages [J]. Toxicology *in vitro*, 2016, 34: 81-87.
- [9] MELILA M, RAJARAM R, GANESHKUMAR A, et al. Assessment of renal and hepatic dysfunction by co-exposure to toxic metals (Cd, Pb) and fluoride in people living nearby an industrial zone [J]. Journal of trace elements in medicine and biology, 2022, 69: 126890 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126891>.
- [10] 李丽霞,杜晓,何春雷.水培茶苗对氟的吸收累积特性[J].四川农业大学学报,2008,26(1):59-63.LI L X, DU X, HE C L. Absorption and accumulation characteristics of fluorine in nutrient liquid cultured tea plant [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2008, 26 (1) : 59-63 (in Chinese with English abstract).
- [11] 高绪评,王萍,王之让,等.环境氟迁移与茶叶氟富集的关系 [J].植物资源与环境,1997,6(2):43-47.GAO X P, WANG P, WANG Z R, et al. Correlation of fluorine removement in environment with fluorine richness in *Camellia sinensis* leaves [J]. Journal of plant resources and environment, 1997, 6(2) : 43-47.
- [12] 邹红建,刘腾腾,张显晨,等.安徽茶园土壤氟在茶树体内的富集与转运特征 [J].环境化学,2011, 30(8) : 1462-1467. GAO H J, LIU T T, ZHANG X C, et al. Bioaccumulation and translocation of fluoride from soils to different parts of tea plants in Anhui Province [J]. Environmental chemistry, 2011, 30(8):1462-1467 (in Chinese with English abstract).
- [13] PENG C Y, XU X F, REN Y F, et al. Fluoride absorption, transportation and tolerance mechanism in *Camellia sinensis*, and its bioavailability and health risk assessment: a systematic review [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2021, 101(2):379-387.
- [14] YANG Y, LIU Y, HUANG C F, et al. Aluminium alleviates fluoride toxicity in tea (*Camellia sinensis*) [J]. Plant and soil, 2016, 402(1):179-190.
- [15] ZHANG L, LI Q, MA L F, et al. Characterization of fluoride uptake by roots of tea plants (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) [J]. Plant and soil, 2013, 366(1):659-669.
- [16] KU K M, CHOI J N, KIM J, et al. Metabolomics analysis reveals the compositional differences of shade grown tea (*Camellia sinensis* L.) [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2010, 58(1):418-426.
- [17] CHEN X, YE K, XU Y, et al. Effect of shading on the morphological, physiological, and biochemical characteristics as well as the transcriptome of matcha green tea [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2022, 23(22): 14169 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.3390/ijms232214169>.

- [18] GE S B, WANG Y M, SHEN K Y, et al. Effects of differential shading on summer tea quality and tea garden microenvironment [J/OL]. Plants, 2024, 13(2): 202 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.3390/plants13020202>.
- [19] SANO S, TAKEMOTO T, OGIHARA A, et al. Stress responses of shade-treated tea leaves to high light exposure after removal of shading [J/OL]. Plants, 2020, 9(3): 302 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.3390/plants9030302>.
- [20] 曹诗雨, 吴转容, 廖凯丽, 等. 日光萎凋对不同鲜叶嫩度与茶树品种加工红茶品质的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(6): 270-281. CAO S Y, WU Z R, LIAO K L, et al. Effects of sunlight withering on quality of processed black tea with different fresh leaf tenderness and tea plant varieties [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43 (6) : 270-281 (in Chinese with English abstract).
- [21] WANG H Y, HU T, WANG M H, et al. Biochar addition to tea garden soils: effects on tea fluoride uptake and accumulation [J/OL]. Biochar, 2023, 5(1) : 37 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00220-2>.
- [22] ZHANG Y H, XIE S B, WANG X T, et al. Concentrations and bioconcentration factors of leaf microelements in response to environmental gradients in drylands of China [J/OL]. Frontiers in plant science, 2023, 14: 1143442 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143442>.
- [23] SHAO C Y, JIAO H Z, CHEN J H, et al. Carbon and nitrogen metabolism are jointly regulated during shading in roots and leaves of *Camellia sinensis* [J/OL]. Frontiers in plant science, 2022, 13: 894840 [2025-08-23]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.894840>.
- [24] 贾培凝, 薛志慧, 陈志丹, 等. 茶树的氟特性及控氟降氟技术研究进展 [J]. 茶叶通讯, 2020, 47(4) : 553-558. JIA P N, XUE Z H, CHEN Z D, et al. Research progress on fluorine characteristics of tea plant and its control and defluorination technologies [J]. Journal of tea communication, 2020, 47 (4) : 553-558 (in Chinese with English abstract).
- [25] 刘思怡, 朱晓静, 房峰祥, 等. 茶树叶片氟亚细胞分布及其与细胞壁结合特性的研究 [J]. 茶叶科学, 2018, 38(3): 305-312. LIU S Y, ZHU X J, FANG F X, et al. Fluorine subcellular distribution and its combining characteristics with cell wall in tea leaves (*Camellia sinensis*) [J]. Journal of tea science, 2018, 38 (3):305-312 (in Chinese with English abstract).
- [26] GAO H J, ZHAO Q, ZHANG X C, et al. Localization of fluoride and aluminum in subcellular fractions of tea leaves and roots [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2014, 62 (10):2313-2319.
- [27] TENG R M, WANG Y X, LI H, et al. Effects of shading on lignin biosynthesis in the leaf of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) [J]. Molecular genetics and genomics, 2021, 296(1):165-177.
- [28] SUN H, WEN B, WU Z C, et al. The performance of water-soluble fluoride transformation in soil - tea - tea infusion chain system and the potential health risk assessment [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2022, 102(7):2893-2902.
- [29] 邢安琪, 武子辰, 徐晓寒, 等. 茶树富集氟的特点及其机制的研究进展 [J]. 茶叶科学, 2022, 42(3) : 301-315. XING A Q, WU Z C, XU X H, et al. Research advances of fluoride accumulation mechanisms in tea plants (*Camellia sinensis*) [J]. Journal of tea science, 2022, 42(3) : 301-315 (in Chinese with English abstract).
- [30] ARNESEN A K M. Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils [J]. Plant and soil, 1997, 191(1) : 13-25.
- [31] ZHANG X C, GAO H J, WU H H, et al. Ca²⁺ and CaM are involved in Al³⁺ pretreatment-promoted fluoride accumulation in tea plants (*Camellia sinensis* L.) [J]. Plant physiology and biochemistry, 2015, 96:288-295.
- [32] CHEN Y Z, WANG S L, NAN Z R, et al. Effect of fluoride and cadmium stress on the uptake and translocation of fluoride and cadmium and other mineral nutrition elements in radish in single element or co-contaminated sierozem [J]. Environmental and experimental botany, 2017, 134:54-61.
- [33] JHA S K, NAYAK A K, SHARMA Y K. Response of spinach (*Spinacea oleracea*) to the added fluoride in an alkaline soil [J]. Food and chemical toxicology, 2008, 46 (9) : 2968-2971.
- [34] JANISZEWSKA J, BALCERZAK M. Analytical problems with the evaluation of human exposure to fluorides from tea products [J]. Food analytical methods, 2013, 6(4):1090-1098.
- [35] 孙洪, 王新宇, 刘成玉, 等. 红茶健康功效及其作用机制研究进展 [J]. 中国茶叶, 2025, 47(6):1-16. SUN H, WANG X Y, LIU C Y, et al. Research progress on the health benefits and mechanisms of black tea [J]. China tea, 2025, 47 (6) : 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [36] CAI H M, ZHU X H, PENG C Y, et al. Critical factors determining fluoride concentration in tea leaves produced from Anhui Province, China [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2016, 131:14-21.

Effects of artificial shading on accumulation of water-soluble fluoride in tea plants (*Camellia sinensis*)

LI You¹, ZHANG Chenyu², HUANG Yeqing¹, WANG Minghan¹, ZHOU Yizhi¹, SHEN Chengwen¹

1. Ministry of Education Key Laboratory of Tea Sciences, Hunan Agricultural University,
Changsha 410128, China;

2. Institute of Tea, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Laboratory of Tea Plants
Germplasm Innovation and Resource Utilization, Hangzhou 310008, China

Abstract The tea plant (*Camellia sinensis*) cultivar ‘Zhuyeqi’ was subjected to four levels of artificial shading including 0%, 50%, 75%, and 80% to study the effects of different intensities and durations of artificial shading on the accumulation of water-soluble fluoride in tea plants during the summer and autumn seasons. Samples of soil in tea garden and various tissues including leaves, stems, roots of tea plants were collected on the 10th, 20th, 30th, and 40th day after treatment to determine the content of Ws-F. The results showed that artificial shading significantly promoted the accumulation of Ws-F in processed tea. The content of Ws-F in tea leaves with artificial shading increased significantly with the increase of the intensity of artificial shading compared with that in tea leaves without artificial shading. The balance of fluoride within the tea plants was disrupted when the intensity of artificial shading reached 80%. It was found from further analyses that the prolonged artificial shading may induce the transport of fluoride from young leaves to older leaves. It is indicated that artificial shading significantly increases the accumulation of Ws-F in summer-autumn tea, and there are complex interactions between the intensity and duration of artificial shading. It will provide valuable insights for the safe production of tea during the summer and autumn seasons.

Keywords tea beverage; fluorine enrichment; shade treatment; water-soluble fluorine; transport mechanism

(责任编辑:陆文昌)