

不同土壤类型下重金属 Cd 对水稻剑叶 光合特性和产量构成的影响

范中亮¹, 杨 菲¹, 吴 琦¹, 季 辉¹, 张卫建^{1,2}

(1.南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095; 2.中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘 要:以杂交水稻(K 优 818)为材料, 设置不同 Cd 浓度水平, 采用盆栽试验, 研究了不同土壤类型下(潮土和水稻土)重金属 Cd 对剑叶光合特性和水稻产量及其构成的影响。结果显示, 在 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度水平下, 与对照相比, 两种土壤类型下 Cd 处理均提高了水稻剑叶净光合速率(P_n), 其中潮土条件下 P_n 提高了 6.4%; 而当 Cd 处理浓度达到 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 两种土壤条件下 P_n 均显著下降, 其中水稻土条件下 P_n 与对照相比下降了 13.8%。Cd 在低浓度水平($1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时, 两种土壤类型下水稻结实率和单穗重均略有下降; 但在高浓度水平($5 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)下, 水稻结实率和单穗重均显著下降($P < 0.05$)。不同土壤类型下, Cd 的毒害效应差异显著, 相同处理水平下水稻土 Cd 对水稻 P_n 和单穗重的抑制效应显著高于潮土。

关键词:水稻; Cd; 剑叶; 光合作用; 产量构成

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)06-1021-06

Effects of Soil Cd on Rice Photosynthetic Characteristics of Flag Leaf and Yield Components Under Two Soil Types

FAN Zhong-liang¹, YANG Fei¹, WU Qi¹, JI Hui¹, ZHANG Wei-jian^{1,2}

(1. Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Increasing attentions have been paid to the food safety along with people's living improvement. Cd is one of the most deadly heavy metal to human healthy. Due to unreasonable use and management, a considerable area of farmland soil has been contaminated by Cd. In order to understand the impacts of soil Cd on rice production, a pot culture experiment was conducted with one rice variety of hybrid *Indica* KU 818 under two soil types (alluvial soil and paddy soil) in 2008, Nanjing City. Five soil treatment levels ($0, 1, 3, 5, 7 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ soil}$) were selected with three replicates. The effects of soil Cd on flag leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and grain yield components were tested in this experiment. The results showed that below the Cd treatment level of $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the net photosynthesis rates (P_n) of rice flag leaf significantly increased in the two soil types, and the increment was 6.4% in the alluvial soil. Above the level of $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the values of P_n significantly decreased in the two soil types, and the reduction was 13.8% at the level of $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ compared to the CK in the paddy soil. Also, below the level of $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), the single spike weight and seed-setting rates of rice slightly reduced relative to the control, but the reduction was significant compared to the CK when the treatment level increased ($5 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). There were significant differences in the inhibitory effects of Cd on the P_n , SPAD values, and single panicle weight between soil types, significant higher inhibitory effects existed in the paddy soil. These results suggest that soil Cd may stimulate rice growth under low level, and the mechanism need to further study. Moreover, different practices should be executed for crop production with high quality and safety in different field condition due to the soil condition differences.

Keywords: rice; Cd; flag leaf; photosynthesis; yield components

收稿日期: 2009-11-23

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD02A15, 2007BAD89B12); 公益性行业(农业)科研专项(200803028)

作者简介: 范中亮(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向是土壤重金属污染和农产品安全。

通讯作者: 张卫建 E-mail: zhangweij@caas.net.cn

随着我国工业“三废”排放的增加和农药、化肥等大量使用,进入农业生态系统的重金属不断增加。重金属可以被作物吸收、富集,并可通过食物链进入人体,危害人体健康^[1]。镉(Cd)是一种常见的、毒性强烈的重金属,其可以抑制作物的光合作用,从而影响作物的生长和产量形成^[2-3]。前人研究表明,Cd 可以通过降低水稻叶片光合色素的含量和光系统 II(PSII)的活性或者影响叶片气孔开闭等途径降低光合作用^[4-10],从而抑制光合产物在水稻叶片中转化^[11],导致水稻产量下降^[12]。但是,目前有关重金属 Cd 对水稻光合作用的影响研究多集中在水培试验或单一土壤类型方面,对不同土壤类型下 Cd 对水稻光合和荧光特征及产量的影响等报道较少。另外,叶绿素荧光动力学技术在探测逆境对光合作用影响方面具有独特的作用,能够反映光合作用系统“内在性”的变化^[13-14]。为此,本文采用两种不同的土壤类型,研究 Cd 污染对水稻剑叶光合生理、荧光特性、叶绿素含量以及产量构成的影响,以揭示不同土壤类型下水稻光合生理和产量形成对土壤重金属 Cd 的响应差异。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为杂交籼稻 K 优 818 (品种来源于 K17A×R818,属于三系杂交籼稻),在长江中下游作中稻种植全生育期平均 137.5 d。供试土壤为江苏省两种典型稻田土壤:苏北地区的潮土和苏南地区的水稻土。两种土壤均取自稻田的耕层土壤(0~15 cm),风干后,过 5 mm 孔径筛,混匀备用。同时,另取部分土壤磨碎过 1.000 mm 和 0.149 mm 尼龙筛,供土壤基本性质测定,潮土和水稻土分别用 A 和 P 表示,其基本性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils in the pot experiment

土壤类型	pH	有机质/ g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	总 N/ g·kg ⁻¹	总 Cd/ mg·kg ⁻¹	交换态 Cd/ mg·kg ⁻¹
潮土 A	7.5	26.4	7.23	1.23	0.31	0.027
水稻土 P	5.9	30.6	8.53	1.52	0.31	0.032

1.2 试验设计

目前研究报道土壤 Cd 污染水平一般在 5 mg·kg⁻¹ 以下^[15-16],本研究采用土壤外加 Cd 的方法,将分析纯 CdCl₂·2.5H₂O 溶解于去离子水配制成溶液,水稻移栽

前加入土壤。设置 5 个浓度 Cd 水平:0、1、3、5、7 mg·kg⁻¹。试验采用直径 25 cm、高 30 cm 的塑料盆,进行盆栽试验。每盆装土 8.00 kg,施 1.72 g 尿素、1.42 g 过磷酸钙和 1.39 g 氯化钾,加水搅成匀浆,混匀之后放置 20 d,测定土壤 Cd 的有效态含量。潮土分别为 0.03、0.18、0.49、0.92、1.19 mg·kg⁻¹;水稻土分别为 0.03、0.46、1.07、1.47、3.03 mg·kg⁻¹。将购买的稻种浸种催芽,在沙培中生长,秧龄 30 d 时移植于盆钵中。每盆 4 棵基本苗,按大田栽培管理要求进行灌水和追肥,每个处理设 5 个重复。盆栽试验于 2008 年在南京农业大学牌楼试验基地进行,6 月 3 日移栽,9 月 20 日收获。

1.3 测定指标与方法

光合参数:在水稻抽穗期选取长势一致的完全展开的剑叶,用美国 Li-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪,选用红蓝光源在晴天的 9:00—11:00 测定水稻叶片气体交换参数。每个处理测定 3 盆,每盆重复 3~4 株。在 CO₂ 浓度为(385±5)μmol·mol⁻¹,光强为 1 000 μmol·(m²·s)⁻¹ 条件下测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和细胞间 CO₂ 浓度(C_i)等气体交换参数。同时,于同叶位利用 U-COR 公司生产的与 LI-6400 相配套的荧光叶室,测定叶绿素荧光。用叶绿素计(SPAD-502 型,日本)测定相对叶绿素含量,在测量时避开叶脉^[17]。水稻成熟收获后,单盆、单株进行拷种。

1.4 数据处理方法

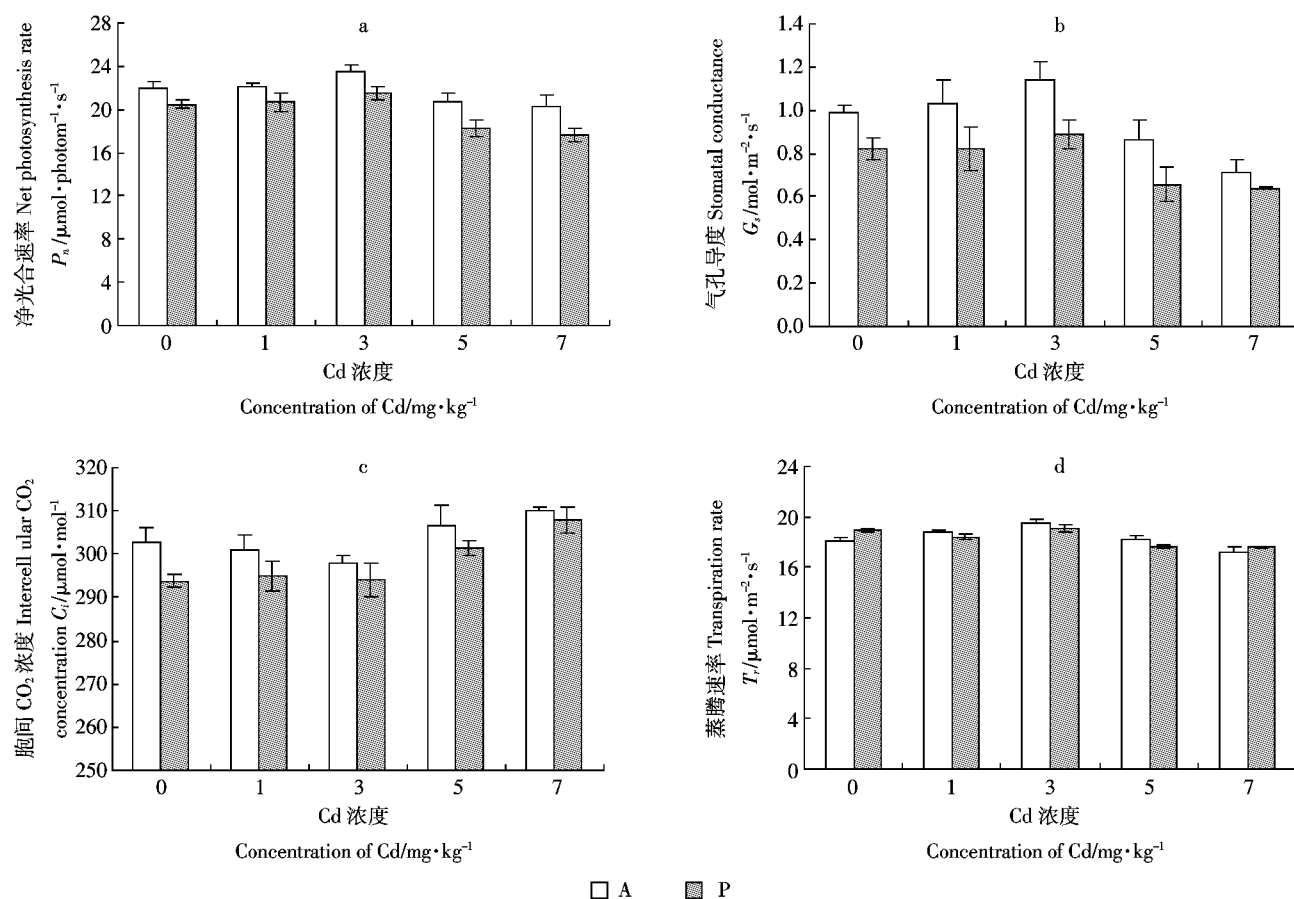
方差分析采用 SPSS 11.0 软件进行,用 LSD 法检测差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 剑叶净光合特征

图 1-a、b、d 显示,在不同土壤条件下,水稻抽穗期剑叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)变化趋势基本一致,随着 Cd 处理浓度的增大呈现出先升高后下降的趋势。在浓度为 3 mg·kg⁻¹ 时, P_n 、 G_s 、 T_r 达到最大值,在潮土上其分别比对照提高了 6.4%、15.2%和 8.8%,水稻土上分别提高 6.1%、8.1%和 1.1%;处理浓度达到 7 mg·kg⁻¹ 时, P_n 、 G_s 、 T_r 最低,潮土条件下分别比对照下降了 8.1%、27.7%和 4.4%,水稻土条件下分别下降了 13.8%、22.1%和 6.9%,而且 P_n 、 G_s 下降幅度达到显著水平($P<0.05$)。

图 1-c 显示,在不同土壤条件下,细胞间 CO₂ 浓度(C_i)随着土壤 Cd 处理浓度提高而呈现先降低后提高的趋势。其中,浓度为 3 mg·kg⁻¹ 时最低,潮土和水稻土下分别比对照下降了 1.4%和 0.8%;在浓度为 7



(a:净光合速率,b:气孔导度,c:胞间 CO_2 浓度,d:蒸腾速率)A:潮土,P:水稻土,图柱表示平均值 $\pm$ 标准误,下同。

(a: P_n , b: G_s , c: C_i , d: T_r). A: Alluvial soil, P: Paddy soil. Values are means $\pm$ SE, the same as below.

图1 不同浓度Cd处理对水稻剑叶光合生理特性的影响

Figure 1 Effects of different Cd levels on photosynthetic characteristics in rice flag leaf

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时最高,分别比对照提高2.4%和4.8%。

这说明低浓度Cd处理下,提高了叶片气孔导度和蒸腾速率,降低了细胞间 CO_2 浓度,从而提高了光合速率;而高浓度Cd处理下,则降低了水稻叶片气孔导度和蒸腾速率,增加了细胞间 CO_2 浓度,从而降低了光合速率。另外, P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 在不同土壤类型间有所差异。潮土下水稻的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 均高于水稻土,比如处理为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,潮土下 P_n 是水稻土的1.1倍。

2.2 剑叶荧光特性

从表2可以看出,不同土壤环境条件下,水稻剑叶实际光化学效率(Φ_{PSII})总体上随着Cd处理浓度的升高而降低,在浓度达到 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, Φ_{PSII} 显著下降,潮土和水稻土的 Φ_{PSII} 分别比对照下降了48%和27%($P<0.05$)。低浓度Cd($1\sim 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理条件下,水稻土下的光化学猝灭系数(qP)和对照差异不显著;高浓度Cd($5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理条件下,两种土壤水稻 qP 均显著下降,其中 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时下降最大,与对照

相比,潮土和水稻土的降幅分别达到13.5%和14.2%。非光化学猝灭系数(NPQ)在潮土环境下基本呈现随处理浓度增大而升高趋势,而在水稻土下则无明显趋势。两种土壤类型下,处理间叶绿素荧光参数PSII最大光化学效率(F_v/F_m)差异不显著,但都表现出随着处理水平的增大而降低的趋势。另外,由于 Φ_{PSII} 、 qP 下降程度不同,导致电子传递速率(ETR)也随着Cd浓度的增加而下降。同时, Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 等在土壤类型之间差异不显著。

2.3 相对叶绿素含量(SPAD值)

图2显示,在不同土壤条件下,随着重金属Cd处理浓度的升高,水稻剑叶中叶绿素相对含量(SPAD值)呈现出低浓度下($1\sim 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)先略有升高,而高浓度($5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)又下降的趋势:在 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时,SPAD值最大;在浓度为 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,SPAD值下降幅度最大。与对照相比,潮土和水稻土的分别下降了4.7%、6.2%。另外,SPAD值在土壤类型之间表现出

表 2 不同 Cd 处理水平对剑叶荧光参数的影响
Table 2 Effects of different Cd levels on fluorescence parameters in the rice flag leaf

土壤 Soil	Cd	Φ_{PSII}	qP	NPQ	ETR	F_v/F_m
A	0	0.51a	0.82a	0.59cd	82.30a	0.83a
	1	0.52a	0.73b	0.39d	82.90a	0.82a
	3	0.47ab	0.77ab	0.90c	74.70b	0.80a
	5	0.40b	0.80a	1.34b	63.90c	0.79a
	7	0.27c	0.71b	1.89a	54.20d	0.78a
P	0	0.49a	0.79a	1.13ab	78.36a	0.83a
	1	0.49a	0.84a	0.78c	78.30a	0.83a
	3	0.53a	0.81a	0.92bc	84.26a	0.83a
	5	0.39b	0.70b	1.27a	62.56b	0.82a
	7	0.36b	0.68b	0.85c	57.13bc	0.81a

注:同一列中,不同小写字母者表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。

Notes: Values followed by different lowercase letters within the same column mean significant differences at 95% level, the same as below.

明显的差异性,基本呈现在不同浓度 Cd 处理水平下,潮土环境下水稻 SPAD 值要略高于水稻土。

2.4 不同土壤类型下 Cd 对水稻形态特征及产量构成的影响

表 3 显示,在潮土条件下,水稻株高、单穗重总体上随着 Cd 浓度的增加而下降,在 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度水平下,水稻株高、单穗重分别比对照降低了 4.1% 和 4.2%。另外,株高、单穗重与 Cd 的浓度呈显著负相关($r=-0.92,-0.90$)。穗长和剑叶长度在 $1\sim3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理水平下略有升高,而在 $5\sim7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理水平下则

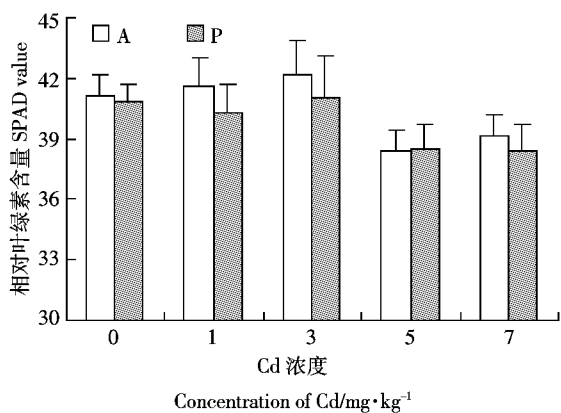


图 2 不同浓度水平 Cd 对水稻剑叶相对叶绿素(SPAD 值)含量的影响

Figure 2 Effects of different Cd levels on the relative chlorophyll content (SPAD value) in the rice flag leaf

略有下降,但差异均未达到显著水平。剑叶宽度和分蘖数变化不明显。结实率总体呈下降的趋势,在 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理水平下比对照下降了 7.0%。在水稻土下,剑叶长度、穗长、单穗重和结实率基本上随着重金属浓度的升高而降低,与对照相比,在 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理水平时,单穗重下降 28.4%。剑叶长度和单穗重与处理浓度之间呈显著负相关($P<0.05$)。而株高在 $1\sim3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下略有升高,在 $5\sim7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下则略有下降。与潮土类似,水稻土下剑叶宽度和分蘖数变化也不大。Cd 胁迫对产量构成的影响在土壤类型之间差异明显,比如,潮土环境下水稻的穗长、剑叶长宽度、分蘖数、单穗重略高于水稻土,而结实率则略低于水稻土。

表 3 不同土壤类型下 Cd 对水稻形态特征及产量构成的影响
Table 3 Effects of different Cd levels on morphological characteristics and yield components of rice in different soil types

土壤类型 Soil types	Cd 浓度 Concentration/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	株高 Plant height/cm	穗长 Panicle length/cm	剑叶长度 Flag leaf length/cm	剑叶宽度 Flag leaf width/cm	分蘖数 Tillers per plant (N)	单穗重 Single panicle weight/g	结实率 Seed-setting rate/%
A	0	115.09a	25.99a	41.21a	1.82a	4.35a	4.32a	80.58a
	1	116.35a	26.06a	41.92a	1.98a	3.60b	4.31a	77.57ab
	3	113.36ab	25.91a	41.56a	1.83a	3.65b	4.22a	76.52ab
	5	113.03ab	25.85a	40.52a	1.81a	3.90ab	4.09a	71.37c
	7	110.35b	25.82a	39.02a	1.72a	3.85ab	4.14a	74.93bc
	r	-0.92*	-0.87	-0.85	-0.41	-0.27	-0.90*	-0.78
P	0	114.96bc	25.36a	41.30a	1.78a	4.26a	4.40a	83.59a
	1	118.71ab	25.54a	40.73a	1.96a	3.65b	4.06ab	79.02ab
	3	121.45a	25.53a	40.84a	1.77a	3.60b	3.85ab	78.10b
	5	116.28ab	24.80ab	39.41b	1.81a	3.80ab	3.74b	78.60b
	7	110.05c	23.48b	36.27b	1.63a	3.75ab	3.15c	76.51b
	r	-0.52	-0.86	-0.90*	-0.67	-0.43	-0.96*	-0.81

注:“*”表示相关性在 0.05 水平之上显著。
Notes: “*” means: Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

3 讨论

低浓度 Cd 处理下 ($1\sim 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 水稻的 P_n 、 T_r 、 G_s 都略有上升, C_i 略有下降 (图 1), SPAD 值升高 (图 2), 说明此时的气孔导度在低浓度 Cd 下仍维持着正常的光合作用。这可能是由于在低浓度条件下 Cd 对水稻的光合系统没有造成伤害, 光合作用的各个阶段还未受到影响。低浓度 Cd 刺激气孔导度略有升高, 但同时进入胞内的 CO_2 被光合作用消耗^[10], 因此 C_i 又略呈下降趋势。目前研究表明, 引起 P_n 下降的原因主要分为两大类, 一类是气孔因素, 主要受气孔数量、气孔孔径、气孔开度等的影响^[18-19]; 另一类为非气孔因素, 主要受内部的酶活力和光合组分控制^[20]。本研究表明, 影响 P_n 下降主要原因可能是非气孔因素。因为, 高浓度 Cd 处理下 ($5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 水稻剑叶的长宽度、SPAD 值、 P_n 等都表现出下降的趋势, 说明高浓度 Cd 对 P_n 表现出了一定的抑制效应。在高浓度 Cd 处理后, 水稻叶片的 G_s 显著下降, C_i 升高 (图 1)。这说明, 此时水稻叶片光合作用的下降不是由于气孔导度降低所引起的 CO_2 供应减少所致, 而是非气孔因素 (如光化学活性限制^[21]、RuBP 羧化限制^[22] 和无机磷限制^[23]) 阻碍了 CO_2 的利用, 从而造成细胞间 CO_2 的积累。

光合作用由原初反应、电子传递、光合磷酸化及碳同化阶段组成。本研究表明, 高浓度 Cd 胁迫可能对上述几个方面都有伤害。首先, Cd 胁迫使叶片叶绿素含量降低 (图 2)。叶片叶绿素含量是反映作物衰老状况和光合作用能力的一个重要指标^[24]。SPAD 值与植物叶绿素含量密切相关^[17, 25]。本研究中水稻的 SPAD 值在高浓度 ($5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 处理下明显下降, 其中潮土环境的下降更为明显。伍泽堂等^[26] 的研究认为, Cd 在接近土壤环境质量标准设计的低浓度下, 过氧化物酶 (POD) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性与土壤重金属含量呈正相关, 有逐渐被激活的趋势; 而在高浓度 Cd 下, SOD 活性下降, 膜脂过氧化加强, 导致丙二醛 (MDA) 进一步积累, 从而对植株组织造成伤害。因此, 高浓度 Cd 胁迫是造成叶绿素含量下降、叶绿体结构破坏以及光合组分损伤等功能丧失的原因之一。进而使捕获和传递给 PSII 反应中心的光能减少 (表 2), 影响到原初反应。其次, 高浓度 Cd 处理下质体醌 (PQ) 还原程度受到了影响, 电子在传递的过程中还是受到了不同程度的干扰和破坏。在光合电子传递过程中, QA 的氧化依赖于光能推动的 PSII 电子流, qP 的减少表明 PSII 开放的反应中心比例和参与

CO_2 固定的电子减少。这种比例的减少必然会使光合电子传递能力减弱, 叶片暗反应受阻, 净光合速率下降^[27-28]。这与 Cd 胁迫下叶片最大光化学效率 F_v/F_m 、实际光化学效率 PSII 下降 (表 2)、电子传递速率 ETR 降低 (表 2) 相一致。因此 $5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度 Cd 处理下表现出剑叶的长宽度、SPAD 值、 P_n 、分蘖数、结实率下降, 导致光合产物积累量的下降, 从而降低了水稻的单穗重和产量。

Cd 对水稻光合生理及产量构成的影响在同一个处理水平下, 不同土壤类型之间差异较大。 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 、 Φ_{PSII} 、SPAD 值和单穗重基本呈现水稻土 < 潮土, 这可能与不同土壤类型下 Cd 对水稻胁迫程度不同有关。水稻土 pH 值呈弱酸性 (pH=5.94), 促进了碳酸盐的水解, 因此, 重金属 Cd 在土壤中的交换态增多, 从而增加了对水稻胁迫程度; 而潮土颗粒较小, 质地较为粘重, 而且土壤 pH 值呈中碱性 (pH=7.50), 导致其对重金属 Cd 的吸附和固定作用较强, 从而减少了对水稻的胁迫作用^[29-32]。因此, 在相同 Cd 浓度水平下, 偏酸性的水稻土 (pH=5.9) 较中碱性的潮土 (pH=7.5) 对水稻光合生理产生逆境胁迫要大。

4 结论

土壤 Cd 处理在 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度水平下, 潮土条件下水稻剑叶净光合速率 (P_n) 与对照相比增幅最高, 其增幅为 6.4%; 而在 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度水平下, 水稻土条件下 P_n 与对照相比降幅最低, 为 13.8%。Cd 处理对水稻剑叶光合生理参数的影响程度基本呈现水稻土条件下高于潮土的。水稻单穗重潮土略高于水稻土, 而结实率水稻土则高于潮土。在低浓度水平 ($1\sim 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 下, 如结实率等下降不显著, 而在高浓度水平 ($5\sim 7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 下, 则显著下降。因此, 相同的 Cd 浓度水平在偏酸性的水稻土上对水稻光合生理产生的逆境胁迫比在较中碱性的潮土上要大。

参考文献:

- [1] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xing, LI Pei-jun. Pollution ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] Foy C D, Chaney R L, White M C. The Physiology of metal toxicity in plants[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1978, 29: 511-566.
- [3] Kastori R, Petrovic M, Petrovic N. Effects of excess lead, cadmium, copper and zinc on water relations in sunflower[J]. *J Plant Nutrition*, 1992, 15: 2427-2439.
- [4] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 1996, 34: 833-841.

- [5] Baszynski T, Wajda L, Krol M, et al. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants[J]. *Physiol Plant*, 1980, 48:365-370.
- [6] Weigel H J. Inhibition of photosynthetic reactions of isolated intact chloroplasts by cadmium[J]. *J Plant Physiol*, 1985, 119:179-189.
- [7] Krupa Z O, Quist G, Huner N P. The effects of cadmium on photosynthesis of *phaseolus vulgaris* a fluorescence analysis[J]. *Physiol Plant*, 1993, 88:626-630.
- [8] Parad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Environ Exper Botanw*, 1996, 35(4):525-545.
- [9] 成颜君, 龚伟群, 李恋卿, 等. 2 种杂交水稻对 2 种不同土壤中 Cd 吸收与分配的比较[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1895-1900.
- CHENG Yan-jun, GONG Wei-qun, LI Lian-qing, et al. Comparison of Cd uptake and partitioning in plant tissues by two hybrid rice grown in two contrasting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1895-1900.
- [10] 徐红霞, 翁晓燕, 毛伟华, 等. 镉胁迫对水稻光合、叶绿素荧光特性和能量分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4):338-342.
- XU Hong-xia, WENG Xiao-yan, MAO Wei-hua, et al. Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice [J]. *Chinese J Rice Science*, 2005, 19(4):338-342.
- [11] 葛才林, 骆剑峰, 刘 冲, 等. 重金属对水稻光合作用和同化物输配的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(3):214-218.
- GE Cai-lin, LUO Jian-feng, LIU Chong, et al. Effect of heavy metals on the photosynthesis and photosynthates transformation in rice[J]. *Acm Agriculturae Nudmne Sinica*, 2005, 19(3):214-218.
- [12] 柯庆明, 林文雄, 梁康迳, 等. 水稻抗 Cd 胁迫的生理生化特性研究[J]. 中国农学通报, 2008, 4(4):374-378.
- KE Qing-ming, LIN Wen-xiong, LIANG Kang-jing, et al. Studies on rice genotypes tolerant to Cd contamination and their characters of physio-biochemistry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 4(4):374-378.
- [13] 林世青, 许春晖, 张其德, 等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. 植物学通报, 1992, 9(1):1-16.
- LIN Shi-qing, XU Chun-hui, ZHANG Qi-de, et al. Some application of chlorophyll fluorescence kinettes to plant stress physiology phytoecology and agricultural modernization[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9(1):1-16.
- [14] Dugan I. Chlorophyll a fluorescence induction[J]. *Biochim Biophysiol Acta*, 1999, 1412:1-28.
- [15] 何宗兰, 曹仁林, 霍文瑞, 等. 水稻土镉的临界浓度的研究 [J]. 农业环境保护, 1990, 9(4):10-12.
- HE Zong-lan, CAO Ren-lin, HUO Wen-rui, et al. Critical concentration of cadmium in paddy soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 1990, 9(4):10-12.
- [16] 李永涛, 刘科学, 张 池, 等. 广东大宝山区重金属污染水田土壤的 Cu Pb Zn Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6):1110-1114.
- LI Yong-tao, LIU Ke-xue, ZHANG Chi, et al. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1110-1114.
- [17] Markwell J, Osterman J C, Mitchell J L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter [J]. *Photosynth Res*, 1995, 46:467-472.
- [18] Cornic G, Briantaris J M. Partitioning of photosynthetic electron flow between CO₂ and O₂ reduction in a C₃ leaf (*Phaseolus vulgaris* L.) at different CO₂ concentrations and during drought stress[J]. *Planta*, 1991, 183:178-184.
- [19] Quick W P, Chaves M N, Wendler R, et al. The effect of water stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions[J]. *Plant Cell Environ*, 1992, 15:25-35.
- [20] Lai A M, Ku S B, Edwards G E. Analysis of inhibition of photosynthesis due to water stress in the C₃ species *Hordeum vulgare* and *Vicia faba*: Electron transport, CO₂ fixation and carboxylation capacity[J]. *Photosynth Res*, 1996, 49:57-69.
- [21] Voigt J, Nagel K, Wrann D. A cadmium tolerant *Chlamydomonas* mutant strain impaired in photosystem II activity[J]. *Plant Physical*, 1998, 153:566-573.
- [22] Pankovic D, Plesnicar M, et al. Effects of nitrogen nutrition on photosynthesis in Cd-treated sunflower plants[J]. *Ann Bot*, 2000, 86:841-847.
- [23] Sage R F. A model describing the regulation of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase, electron transport and triose phosphate use in response to light intensity and CO₂ in C₃ plants[J]. *Plant Physiol*, 1990, 94:1728-1734.
- [24] Oh S A, Park J H, Lee G I, et al. Identification of three genetic loci controlling leaf senescence in *Arabidopsis thaliana*[J]. *J Plant*, 1997, 12(3):527-533.
- [25] Kitao M, Utsugi H, Kuramoto S, et al. Light-dependent photosynthetic characteristics indicated by chlorophyll fluorescence in five mangrove species native to Pohnpei Island, Micronesia[J]. *Physiol Plant*, 2003, 117:376-382.
- [26] 伍泽堂, 张刚元. 脱落酸、细胞分裂素和丙二醛对超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 1990(4):30-33.
- WU Ze-tang, ZHANG Gang-yuan. Effects of abscisic acid, cytokinin and malonaldehyde on superoxide dismutase activity[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, 4:30-33.
- [27] Heidrum D, Helga W, Heike H, et al. Changes in D-protein turnover and recovery of photosystem II activity precede accumulation of chlorophyll in plants after release from mineral stress[J]. *Plant*, 1996, 199:34-42.
- [28] Sharkey T D, Badger M R, Caemmerer S, et al. Increased heat sensitivity of photosynthesis in tobacco plants with reduced rubisco activase [J]. *Photosynth Res*, 2001, 67:147-156.
- [29] Eriksson J, Oborn I, Jansson G, et al. Factors influencing Cd-content in crops: Results from Swedish field investigations[J]. *Swed J Agric Res*, 1996, 26(3):125-133.
- [30] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, et al. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers [J]. *J Environ Qual*, 1994, 23:1013-1018.
- [31] Mench M, Baize D, Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district Burgundy [J]. *France Environ Pollut*, 1997, 95:93-103.
- [32] 廖 敏, 陈雪花, 陈承利, 等. 土壤-青菜系统中铅污染对土壤微生物活性及多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):220-227.
- LIAO Ming, CHEN Xue-hua, CHEN Cheng-li, et al. The influence of lead contamination on soil-microbial activity and community structure diversity in a soil-green grocery system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):220-227.