

引用格式:

殷寿延, 杨思林, 孙仕仙. 外源磷对镉和磺胺甲恶唑复合污染下的香根草生长和光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 51–61.

YIN S Y, YANG S L, SUN S X. Effects of exogenous phosphorus on photosynthetic characteristics of *Chrysopogon zizanioides*(L.) Roberty under combined cadmium and sulfamethoxazole pollution[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 51–61.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



外源磷对镉和磺胺甲恶唑复合污染下的香根草生长和光合特性的影响

殷寿延^{1,2}, 杨思林², 孙仕仙^{1,2*}

(1.云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 云南 昆明 650224; 2.西南林业大学生态与环境学院(湿地学院), 云南 昆明 650233)

摘要: 以温室盆栽模拟湿地环境种植香根草, 通过添加0.3 mg/kg的镉(Cd)和10 mg/kg的磺胺甲恶唑(SMX)形成复合污染湿地环境, 再以60、120、180、240、360 mg/kg的外源磷添加设置5个不同磷水平的Cd-SMX复合污染组(CS1、CS2、CS3、CS4、CS5), 以未添加污染物和磷的为对照组(CK), 试验持续42 d, 分别于试验1、2、3、5、7、14、28、42 d时测定香根草地上部和地下部鲜质量、叶绿素质量分数、光合作用参数及叶绿素荧光参数, 研究外源磷对Cd-SMX复合污染下的香根草生长和光合特性的影响。结果表明: 在试验前期(1~7 d时), 在外源磷添加和Cd-SMX复合污染下的香根草较CK的呈现一定“毒性兴奋效应”, 复合污染促进香根草净光合速率(Pn)和表观光能利用效率(LUE)的提高, 而后, 因Cd和SMX累积, 造成毒性作用, 在处理后期, 复合污染降低了香根草的光合作用能力, 在42 d时, 复合污染处理的香根草的PS II实际光化学效率、PS II最大光化学效率(F_v/F_m)、潜在光化学效率(F_v/F_o)、电子传递速率和光化学淬灭系数均显著低于CK的; 磷的“生长促进效应”能维持香根草光合作用稳态, 香根草叶的Pn、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、表观CO₂利用效率和LUE均能在42 d时恢复至1 d时水平, 其中, 42 d时CS4的香根草叶Pn为19.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 显著高于其他处理的, 同时CS4的香根草茎叶丙二醛含量在复合污染下也最低, 为0.93 nmol/g。综合来看, 在Cd-SMX复合污染的湿地环境下, Cd-SMX复合污染胁迫对香根草光合作用能力造成了一定程度的削弱, 而添加240 mg/kg的磷能促进香根草地上部茎叶的生长、增强其光合作用能力以抵抗Cd-SMX复合污染的双重胁迫作用。

关键词: 香根草; 外源磷; 镉; 磺胺甲恶唑; 复合污染; 富营养化; 污染修复; 光合特性

中图分类号: X173; Q945.11

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0051-11

Effects of exogenous phosphorus on photosynthetic characteristics of *Chrysopogon zizanioides*(L.) Roberty under combined cadmium and sulfamethoxazole pollution

YIN Shouyan^{1,2}, YANG Silin², SUN Shixian^{1,2*}

(1.Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Kunming, Yunnan 650224, China; 2.College of Ecology and Environment(College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650233, China)

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2024-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167057、41867027); 云南省科技计划项目(202201AS070028、202301AS070042、202001AT070117); 云南省“万人计划”青年拔尖人才专项(80201442)

作者简介: 殷寿延(1998—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究, m15061486233@163.com; *通信作者, 孙仕仙, 博士, 教授, 主要从事污染生态学、复合污染生态毒理学研究, shine1009@sina.com

Abstract: A greenhouse pot experiment simulated wetland conditions to study vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*(L.) Roberty) growth and photosynthetic responses under cadmium (Cd, 0.3 mg/kg) and sulfamethoxazole (SMX, 10 mg/kg) composite pollution. Five phosphorus levels (60, 120, 180, 240, and 360 mg/kg) were tested, alongside a control (CK) without pollutants and phosphorus. The experiment lasted 42 days, with measurements taken on days 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28, and 42, including the fresh biomass of the aboveground and belowground parts of vetiver grass, chlorophyll content, photosynthetic parameters, and chlorophyll fluorescence parameters. The objective was to investigate the effects of exogenous phosphorus on vetiver grass growth and photosynthetic characteristics under Cd-SMX composite pollution. Early stages (days 1-7) showed a “toxicity stimulation effect” with increased net photosynthetic rate (Pn) and apparent light use efficiency (LUE) under composite pollution. However, Cd and SMX accumulation later caused toxic effects and reduced photosynthetic capacity, with key parameters including the actual photochemical efficiency of PSII, maximum photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), potential photochemical efficiency (F_v/F_o), electron transport rate, and photochemical quenching coefficient, significantly lower than those in the CK on day 42. Phosphorus’s “growth-promoting effect” helped maintain the photosynthetic stability of vetiver grass, with Pn, F_v/F_m , F_v/F_o , apparent CO₂ utilization efficiency, and LUE recovering to levels comparable to day 1 by day 42. Notably, Pn in the CS4 treatment reached 19.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, significantly higher than in other treatments. Meanwhile, the MDA content in the stems and leaves of vetiver grass under the CS4 treatment was the lowest under composite pollution, measuring 0.93 nmol/g. In summary, Cd-SMX composite pollution weakened vetiver grass’s photosynthetic capacity, but 240 mg/kg phosphorus enhanced its growth of aboveground stems and leaves and photosynthetic resilience, improving tolerance to Cd-SMX stress.

Keywords: *Chrysopogon zizanioides*(L.) Roberty; exogenous phosphorus; cadmium; sulfamethoxazole; composite pollution; eutrophication; pollution remediation; photosynthetic characteristics

水体富营养化已成为国际社会共同关注的环境问题,其中,磷污染负荷的消减已成为滇池富营养化治理的关键,湿地植物修复在湿地富营养化水体治理中占重要地位^[1]。随着工农业发展,镉(Cd)在湿地环境中累积、迁移和转化,Cd污染已成为全球严重的环境问题^[2-3]。其中,湿地植物可通过直接吸收、吸附去除污水中的Cd,并促进污水中营养物质循环和再利用^[4-5]。抗生素也是湿地环境中典型的污染物,研究^[6-8]表明,Cd和磺胺类抗生素(SAs)单一污染均能抑制植物生物量增长、降低叶绿素含量及影响植物光合作用和根系活力,同时导致植物过氧化氢酶和过氧化物酶活性的增加。环境中Cd和SAs常常以复合污染形式存在,当Cd与抗生素在湿地水体中共同存在时,它们可能会形成两种共存的方式:一种是以有机物分子和Cd²⁺形态独立存在,互不影响;另一种是在不同pH影响下发生络合反应形成抗生素-金属离子络合物,带来全新的生态安全风险^[9-10]。在众多SAs中,磺胺甲恶唑(SMX)的环境检出率和浓度均位居前列,排放的SMX直接对环境中的非靶向生物造成损伤,同时也极大地增加了环境中耐药菌及抗性基因扩散的风

险^[11]。

香根草(*Chrysopogon zizanioides*(L.) Roberty)是多年生草本植物,生物量大、根系发达、气候适应性和抗逆性较强,被广泛应用于污染物生物修复领域^[12-13]。研究表明,香根草对Cd^[14]和SAs^[15]具有较强的耐受性和较高的富集能力。此外,香根草对铅、铜、锌和砷等重金属复合污染^[16-17]也有较强的生长耐性和生物富集能力,对废水中的氮、磷^[18]及有机污染物(如多环芳烃^[19]、扑草净^[20])也有较强的去除能力。但关于将香根草应用于修复富营养化且受重金属和抗生素复合污染的湿地生态的研究少有报道。本研究中,采用温室盆栽模拟试验,探讨磷对生长在镉-磺胺甲恶唑(Cd-SMX)复合污染湿地环境下的香根草的生长和光合作用的影响,以揭示香根草在具富营养化特征的重金属和抗生素复合污染湿地环境下的生态适应性,以期为香根草应用于湿地环境生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

于2023年3—7月在西南林业大学格林温室进行试验。供试土壤取自昆明阳宗海明湖湿地,采集

到的湿地土壤经自然阴干后,磨碎、过筛并去除大颗粒砾石等。供试香根草(分蘖苗)购自江西红壤研究所。选取植株健壮、大小一致的香根草分蘖苗,先用自来水浸泡 36 h 后用 0.2%高锰酸钾溶液消毒,再用自来水清洗,然后移栽到装有 5 kg 湿地土壤的塑料桶中。湿地植物驯化时,桶中添加淡水淹没湿地土壤,土面上水深 3 cm(约 4 L 淡水),采用画线法使土壤在整个试验过程中均处于饱和淹水状态,以模拟湿地环境。每桶种植 3 蔸香根草,先适应性培养 90 d。在试验开始前 1 天测得的供试土壤 pH 为 7.57 ± 0.23 ,有机质质量分数为 $(9.28 \pm 2.88)\%$,有效磷、全磷、有效钾、全钾、总镉的质量分数分别为 (29.82 ± 7.72) 、 $(2\ 402.26 \pm 317.66)$ 、 (39.93 ± 4.15) 、 $(5\ 879.67 \pm 38.60)$ 、 (0.03 ± 0.003) mg/kg。同时,测得水 pH 为 (7.45 ± 0.18) , PO_4^{3-} 、总磷、总钾、溶解氧、总溶解性物质质量浓度分别为 (1.72 ± 0.36) 、 (5.69 ± 1.47) 、 (0.54 ± 0.08) 、 (7.22 ± 0.14) 、 (282.96 ± 5.35) mg/L,电导率为 (338.93 ± 5.60) $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

1.2 试验设计

参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和 GB 8978—1996《污水综合排放标准》,在土壤中添加质量分数为 0.3 mg/kg 的 Cd;参考城市污水处理厂排放废水中 SMX 的浓度^[21],在土壤中添加质量分数为 10 mg/kg 的 SMX;参考滇池流域磷素空间分布特征^[22],在土壤中分别添加质量分数为 60、120、180、240、360 mg/kg 的磷(PO_4^{3-}),依次记为 CS1、CS2、CS3、CS4、CS5。以不添加 Cd、SMX、磷的处理为空白对照(CK)。各处理重复 3 次。

于 2023 年 6 月 8 日开始试验,分别于试验 1、2、3、5、7、14、28、42 d 时测定香根草地上地下部鲜质量及其叶片叶绿素质量分数、光合作用特征参数、叶绿素荧光参数、丙二醛含量。

1.3 指标测定方法

采用称量法测定香根草茎叶和根系的鲜质量并计算茎叶与根系鲜质量比。采用紫外分光光度计(Thermometer Evolution 300)测定叶绿素 a(Chla)和叶绿素 b(Chlb)质量分数,并计算总叶绿素(Chlt)质量分数^[23]。参照文献[20,24]的方法,选取植株健壮的香根草倒三叶片,于 09:00 运用 Li-6400xt 便携

式光合仪(Li-COR)测定净光合速率(P_n)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(E)等光合作用特征参数,并标记待测叶片,同时计算叶片瞬时水分利用效率(WUE)、气孔限制值(L_s)、表观 CO_2 利用效率(CUE)、表观光能利用效率(LUE)。参照文献[20]的方法,运用 Li-6400xt 便携式光合仪测定叶绿素荧光参数:于 14:00 在叶片进行充分光适应后测定实际光化学效率(Φ_{PSII}),于 20:00 在叶片充分暗适应后测定电子传递速率(ETR);直接读取 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和潜在光化学效率(F_v/F_o);通过系统自动拟合得出光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ)。参照文献[25-26]的方法,采集测定完光合作用参数和叶绿素荧光参数后的香根草倒三叶片和根系样品,使用液氮破碎植物样品后,采用酸性硫代巴比妥法运用紫外分光光度计测定并计算香根草的丙二醛(MDA)含量。

1.4 数据分析

运用 SPSS 23.0 对数据进行单因素方差分析,并选用 Duncan's 多重比较进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 Cd-SMX 复合污染下不同水平磷对香根草生物量的影响

从表 1 可知,处理组香根草茎叶鲜质量在处理 5 d 后均显著低于 CK 的;处理 2 d 后,同一处理时间的所有污染处理组中,CS4 的茎叶鲜质量均最大,42 d 时其茎叶鲜质量达到最大,为 (150.67 ± 2.28) g,显著高于其他处理组的,其他 4 组茎叶鲜质量间的差异则无统计学意义。除 42 d 时 CS5 和 CK 的香根草根系鲜质量间的差异无统计学意义外,处理组香根草根系鲜质量在处理 7 d 后均显著低于 CK 的;42 d 时 CS1、CS2 和 CS3 的香根草根系鲜质量间的差异无统计学意义且均较低,而 28 d 时则为 CS1、CS2 和 CS5 的香根草根系鲜质量间的差异无统计学意义且均较低,28、42 d 时 CS3 的均最低,CS4 的则较高。除 5 d 时的 CS3 和 42 d 时的 CS5 外,香根草地上部茎叶鲜质量大于地下部根系鲜质量。

表1 Cd-SMX复合污染下不同处理时间和磷水平的香根草的鲜质量与叶绿素和丙二醛含量

Table 1 Fresh weights, chlorophyll and malondialdehyde contents of vetiver grass under different treatment times and phosphorus levels with Cd-SMX co-contamination

时间/ d	处理	茎叶鲜质量/g	根系鲜质量/g	茎叶与根系 鲜质量比	叶绿素 a 质量 分数/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b 质量 分数/(mg·g ⁻¹)	总叶绿素质量 分数/(mg·g ⁻¹)	茎叶丙二醛 含量/(nmol·g ⁻¹)	根系丙二醛 含量/(nmol·g ⁻¹)
1	CK	(56.71±0.90)a	(45.27±0.66)b	(1.253±0.003)c	(25.10±0.25)ab	(7.42±0.06)c	(32.52±0.31)bc	(0.63±0.01)c	(0.72±0.01)c
	CS1	(55.45±0.13)a	(40.53±0.62)c	(1.368±0.018)b	(26.08±0.37)a	(8.24±0.20)b	(34.32±0.57)ab	(2.33±0.11)a	(2.15±0.10)b
	CS2	(55.81±0.16)a	(42.93±0.85)bc	(1.301±0.022)c	(27.22±0.67)a	(9.24±0.11)a	(36.46±0.78)a	(2.23±0.11)a	(2.90±0.15)a
	CS3	(55.66±0.80)a	(35.86±0.25)d	(1.552±0.013)a	(25.35±0.51)ab	(6.52±0.07)d	(31.87±0.58)bc	(2.24±0.08)a	(2.83±0.12)a
	CS4	(55.35±0.55)a	(52.55±0.79)a	(1.053±0.006)e	(21.49±0.27)c	(6.12±0.15)d	(27.61±0.43)d	(1.56±0.07)b	(3.06±0.12)a
2	CK	(66.11±1.22)b	(50.11±1.08)b	(1.320±0.008)c	(24.35±0.26)ab	(7.31±0.09)b	(31.66±0.20)ab	(0.64±0.01)b	(0.70±0.02)c
	CS1	(60.55±0.83)c	(42.48±0.24)d	(1.425±0.011)ab	(22.77±0.24)b	(6.86±0.15)bc	(29.63±0.38)bc	(2.20±0.11)a	(2.09±0.10)b
	CS2	(64.97±0.94)bc	(44.78±0.33)cd	(1.451±0.011)a	(25.33±0.65)a	(8.03±0.08)a	(33.36±0.72)a	(2.15±0.12)a	(2.41±0.11)b
	CS3	(65.30±1.24)bc	(45.45±0.53)c	(1.436±0.010)a	(22.82±0.47)b	(5.79±0.13)d	(28.61±0.60)cd	(1.93±0.08)a	(2.29±0.12)b
	CS4	(71.50±1.20)a	(51.57±0.45)b	(1.386±0.011)b	(22.90±0.58)b	(6.77±0.08)c	(29.67±0.65)bc	(1.84±0.09)a	(3.38±0.19)a
3	CK	(85.13±1.11)a	(53.91±0.90)b	(1.579±0.006)a	(24.62±0.34)a	(7.39±0.07)a	(32.01±0.37)a	(0.62±0.01)c	(0.71±0.01)c
	CS1	(72.05±0.99)b	(49.91±0.57)c	(1.444±0.003)c	(19.34±0.20)b	(5.51±0.09)c	(24.86±0.28)b	(2.07±0.11)a	(2.02±0.11)b
	CS2	(67.05±1.22)b	(62.28±0.39)a	(1.076±0.013)d	(23.60±0.42)a	(6.79±0.05)b	(30.39±0.47)a	(2.04±0.10)ab	(1.95±0.08)b
	CS3	(69.27±0.43)b	(45.38±0.19)d	(1.526±0.003)b	(20.52±0.19)b	(5.12±0.13)d	(25.64±0.32)b	(1.65±0.08)b	(1.74±0.08)b
	CS4	(83.46±1.57)a	(52.25±0.84)bc	(1.597±0.004)a	(24.78±0.48)a	(7.35±0.05)a	(32.13±0.53)a	(2.09±0.10)a	(3.72±0.17)a
5	CK	(110.35±2.00)a	(68.06±0.84)bc	(1.621±0.010)b	(24.75±0.19)a	(7.24±0.06)a	(31.99±0.25)a	(0.63±0.02)c	(0.69±0.01)c
	CS1	(75.74±0.55)c	(60.42±0.46)d	(1.254±0.005)c	(20.25±0.54)bc	(5.63±0.14)b	(25.88±0.67)bc	(1.86±0.09)b	(2.73±0.15)a
	CS2	(75.28±0.57)c	(66.18±0.27)c	(1.138±0.005)d	(17.85±0.25)d	(4.83±0.04)c	(22.68±0.29)d	(1.90±0.08)b	(1.92±0.09)b
	CS3	(75.81±0.55)c	(77.45±0.52)a	(0.979±0.003)f	(21.61±0.58)b	(5.84±0.08)b	(27.45±0.66)b	(1.81±0.08)b	(2.85±0.11)a
	CS4	(98.56±0.59)b	(51.73±0.39)e	(1.906±0.007)a	(24.42±0.56)a	(7.59±0.07)a	(32.01±0.63)a	(2.51±0.12)a	(2.51±0.13)a
7	CK	(123.59±2.59)a	(82.50±1.15)a	(1.498±0.016)a	(24.65±0.20)a	(7.41±0.04)a	(32.06±0.24)a	(0.60±0.01)d	(0.70±0.01)c
	CS1	(79.83±1.25)d	(61.64±0.49)d	(1.295±0.010)c	(19.01±0.20)c	(5.42±0.10)c	(24.43±0.30)c	(2.26±0.13)b	(2.77±0.11)a
	CS2	(75.98±0.31)d	(74.87±0.41)bc	(1.015±0.002)e	(13.83±0.12)d	(4.04±0.11)d	(17.87±0.23)d	(1.73±0.06)c	(1.20±0.06)b
	CS3	(86.02±1.06)c	(77.74±0.39)b	(1.106±0.008)d	(24.29±0.27)a	(7.15±0.16)a	(31.44±0.43)a	(1.69±0.08)c	(2.38±0.12)a
	CS4	(102.15±0.48)b	(72.50±1.16)c	(1.410±0.018)b	(22.18±0.61)b	(5.99±0.07)b	(28.17±0.68)b	(2.67±0.11)a	(2.62±0.12)a
14	CK	(146.15±2.83)a	(97.15±1.67)a	(1.504±0.012)a	(24.64±0.52)ab	(7.28±0.00)b	(31.92±0.52)a	(0.61±0.01)d	(0.68±0.01)d
	CS1	(94.77±1.50)c	(67.41±0.36)d	(1.406±0.015)b	(15.71±0.21)c	(4.54±0.04)d	(20.25±0.25)c	(2.32±0.12)a	(3.64±0.14)a
	CS2	(93.18±1.36)cd	(75.77±0.93)c	(1.230±0.007)d	(17.47±0.33)c	(4.39±0.04)d	(21.86±0.37)c	(1.37±0.05)c	(1.55±0.09)c
	CS3	(97.07±0.35)c	(78.42±0.34)c	(1.238±0.002)d	(25.28±0.59)a	(8.04±0.17)a	(33.32±0.77)a	(1.33±0.07)c	(2.34±0.11)b
	CS4	(111.81±1.31)b	(84.57±0.65)b	(1.322±0.009)c	(23.04±0.44)b	(6.17±0.15)c	(29.21±0.59)b	(1.68±0.07)bc	(2.34±0.11)b
28	CK	(168.53±2.82)a	(112.10±1.69)a	(1.503±0.007)b	(24.64±0.52)a	(7.39±0.05)a	(32.03±0.57)a	(0.58±0.01)d	(0.66±0.01)c
	CS1	(110.69±0.78)c	(93.33±0.64)c	(1.186±0.003)e	(18.52±0.16)b	(4.58±0.07)b	(23.10±0.22)b	(1.85±0.09)ab	(2.29±0.10)ab
	CS2	(115.73±1.34)c	(92.94±1.01)c	(1.245±0.001)d	(17.49±0.34)b	(4.38±0.09)bc	(21.87±0.43)b	(2.13±0.11)a	(2.36±0.10)a
	CS3	(126.06±1.38)b	(78.67±0.43)d	(1.602±0.009)a	(15.90±0.23)c	(4.14±0.05)c	(20.04±0.28)c	(1.72±0.09)b	(1.92±0.09)b
	CS4	(129.51±1.01)b	(102.18±0.94)b	(1.268±0.010)cd	(13.87±0.27)d	(3.46±0.03)d	(17.33±0.30)d	(1.20±0.06)c	(2.35±0.09)a
42	CK	(183.23±3.06)a	(136.44±2.95)a	(1.343±0.008)b	(24.66±0.45)a	(7.32±0.08)a	(31.98±0.48)a	(0.54±0.01)e	(0.64±0.01)d
	CS1	(124.67±0.81)c	(101.23±0.69)bc	(1.232±0.003)c	(15.76±0.39)b	(4.71±0.03)b	(20.47±0.42)b	(1.97±0.10)b	(2.42±0.13)ab
	CS2	(127.64±2.23)c	(95.10±1.06)c	(1.342±0.009)b	(15.97±0.37)b	(5.05±0.13)b	(21.02±0.50)b	(2.45±0.10)a	(2.72±0.12)a
	CS3	(127.37±1.15)c	(93.92±0.92)c	(1.356±0.002)b	(12.83±0.27)c	(3.43±0.07)c	(16.26±0.34)c	(1.57±0.06)c	(1.76±0.08)c
	CS4	(150.67±2.28)b	(103.32±0.86)b	(1.458±0.010)a	(7.34±0.09)d	(2.48±0.02)d	(9.82±0.11)d	(0.93±0.04)d	(1.94±0.09)c
	CS5	(122.83±0.97)c	(131.59±2.19)a	(0.934±0.008)d	(8.57±0.15)d	(2.68±0.03)d	(11.25±0.18)d	(1.79±0.08)bc	(2.18±0.09)bc

同列不同字母表示同一时间处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

7、14 d 时,各处理组的香根草茎叶与根系鲜质量比均小于 CK 的。42 d 时,CS4 的香根草茎叶与根系鲜质量比最大,为 1.458 ± 0.010 ,显著大于其他处理的;CS5 的香根草茎叶与根系鲜质量比最小,为 0.934 ± 0.008 ,显著小于其他处理的;CK、CS2 和 CS3 的香根草茎叶与根系鲜质量比间的差异无统计学意义。总体来看,5 个处理组中,CS4 的香根草生长较好,表明适当的外源磷添加在一定程度上缓解了 Cd-SMX 复合污染对香根草的毒性。

2.2 Cd-SMX 复合污染下不同水平磷对香根草叶绿素含量的影响

从表 1 可知,CS1 和 CS5 的香根草叶片 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数随处理时间的增加基本呈下降趋势(5、28 d 的 CS1 和 5、14 d 的 CS5 及 42 d 的 CS1 的 Chlb 除外);CS2 香根草叶片 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数随处理时间的增加先逐渐降低,于 7 d 时达到最低,随后又略有回升并趋于稳定;CS3 香根草叶片 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数随处理时间的增加先逐渐下降,5~14 d 则逐渐上升恢复至正常水平(略高于 CK 的),随后又下降,42 d 时最低;CS4 香根草叶片 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数随处理时间的增加先上升,Chla 和 Chlt 质量分数在 3 d 时达到最高,Chlb 质量分数则在 5 d 时达到最高,随后逐渐降低,14 d 时又有所升高,随后又急剧降低,42 d 时 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数分别为 (7.34 ± 0.09) 、 (2.48 ± 0.02) 、 (9.82 ± 0.11) mg/g,分别为 1 d 时的 34.16%、40.52%、35.57%,显著低于 42 d 时 CS1、CS2 和 CS3 的,与 CS5 的差异无统计学意义。42 d 时,处理组香根草叶 Chla、Chlb 和 Chlt 质量分数均显著低于 CK 的,其中 CS2 的较高,分别为 (15.97 ± 0.37) 、 (5.05 ± 0.13) 、 (21.02 ± 0.50) mg/g,为 CK 的 64.76%、68.99%、65.73%。

2.3 Cd-SMX 复合污染下不同水平磷对香根草丙二醛含量的影响

从表 1 可知,同一处理时间,香根草茎叶和根系的 MDA 含量均显著高于 CK 的,香根草根系 MDA 含量整体上高于茎叶 MDA 含量(1、2、3 d 的 CS1 和 3、7 d 的 CS2 与 7 d 的 CS4 除外)。CS4 香根草茎叶 MDA 含量随处理时间的增加先升高,7 d 时达到最高,为 (2.67 ± 0.12) nmol/g,随后逐渐降低;CS2 香根草茎叶 MDA 含量随处理时间的增加先降

低,14 d 时达到最低,为 (1.37 ± 0.05) nmol/g,随后逐渐增加;CS1、CS3 和 CS5 香根草茎叶 MDA 含量则随处理时间上下波动。与 1 d 时相比,42 d 时 CS1 根系 MDA 含量有所升高,其他处理的则均降低;整个试验过程中,CS4 处理 3 d 时的根系 MDA 含量最高,为 (3.72 ± 0.17) nmol/g,其次是 CS1 处理 14 d 时的根系 MDA 含量较高,为 (3.64 ± 0.14) nmol/g,而 CS2 处理 7 d 时的根系 MDA 含量则在 5 个处理组中最低,为 (1.20 ± 0.06) nmol/g。

1、2 d 时,除 CK 外,CS4 的香根草茎叶 MDA 含量均低于其他处理组的(1 d 时 CS4 的茎叶 MDA 显著低于其他处理组的),同时根系 MDA 含量均高于其他处理组的(2 d 时 CS4 的根系 MDA 显著高于其他处理组的)。42 d 时,CS4 香根草叶 MDA 含量显著高于 CK 的但显著低于其他处理组的,根系 MDA 含量高于 CK、CS3 的,但低于其他处理组的,表明 CS4 对香根草 MDA 含量的降低效果较好。

2.4 Cd-SMX 复合污染下不同水平磷对香根草光合参数的影响

2.4.1 香根草叶的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 E 对不同水平磷下 Cd-SMX 复合污染的响应

从表 2 可知,在 3~28 d 时,随处理时间的增加,香根草叶 P_n 均呈现先上升后降低的趋势(CS5 除外),CS4 的香根草叶 P_n 在 7 d 时达最高,为 (21.09 ± 0.45) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 1 d 时的提升了 122%;在 42 d 时,CS1、CS2 和 CS5 的香根草叶 P_n 均继续下降,而 CK、CS3 和 CS4 的香根草叶 P_n 则上升,说明适当的磷处理有利于香根草叶维持较高的 P_n 水平;42 d 时,CS4 香根草叶 P_n 显著高于其他处理的,为 (19.55 ± 0.44) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

CS1、CS2 和 CS5 的香根草 E 随处理时间的变化趋势与 P_n 的相似,先上升后降低(1~3 d 时 CS1 和 5 d 时 CS5 的除外),而 CK 和 CS3、CS4 的香根草 E 则在 5、28 d 时达较低水平后升高,整体呈波动上升趋势,在 42 d 时达到最高水平;42 d 时 CS4 的香根草 E 为 (4.05 ± 0.05) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,显著高于其他磷处理组的,2、3、14、28 d 时 CS5 的香根草 E 显著高于其他磷处理组的;CS2 的香根草 E 在 7 d 时达最高,为 (3.68 ± 0.04) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,显著高于 7 d 时其他处理组的。

表2 Cd-SMX复合污染下不同处理时间和磷水平的香根草的光合作用参数

Table 2		Photosynthetic parameters of vetiver grass under different treatment times and phosphorus levels with Cd-SMX co-contamination							
时间/ d	处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	细胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔限制值	表观光能 利用效率/%	表观 CO_2 利用效率/%	叶片瞬时水分 利用效率/%
1	CK	(14.21±0.16)b	(10.29±0.02)a	(175.29±2.38)d	(1.57±0.01)b	(0.58±0.01)c	(1.42±0.02)b	(8.11±0.20)c	(9.06±0.10)c
	CS1	(14.68±0.19)a	(8.75±0.12)b	(127.57±2.91)e	(1.57±0.02)b	(0.69±0.01)a	(1.47±0.02)a	(11.51±0.35)b	(9.35±0.10)b
	CS2	(14.67±0.08)a	(7.31±0.05)d	(73.87±3.06)f	(1.18±0.03)d	(0.82±0.01)b	(1.47±0.01)a	(19.90±0.94)a	(12.45±0.23)a
	CS3	(12.72±0.04)c	(10.03±0.18)a	(193.72±3.69)c	(1.61±0.02)a	(0.53±0.01)d	(1.29±0.01)c	(6.57±0.13)d	(7.90±0.11)d
	CS4	(9.50±0.11)e	(8.13±0.85)c	(210.21±16.72)b	(1.33±0.11)c	(0.49±0.04)e	(0.94±0.02)e	(4.54±0.30)f	(7.18±0.49)e
	CS5	(11.36±0.16)d	(10.29±0.02)a	(219.94±2.41)a	(1.57±0.01)b	(0.47±0.01)f	(1.14±0.02)d	(5.17±0.13)e	(7.24±0.10)e
2	CK	(14.91±1.06)a	(8.35±1.17)a	(115.45±27.47)cd	(1.95±0.26)a	(0.73±0.06)ab	(1.49±0.11)a	(13.66±3.39)b	(7.74±0.65)c
	CS1	(12.40±0.85)c	(6.82±0.40)c	(124.92±10.61)bc	(1.56±0.08)c	(0.71±0.02)bc	(1.24±0.08)c	(10.02±1.32)cd	(7.96±0.30)bc
	CS2	(13.25±0.37)b	(7.04±0.32)c	(112.71±6.75)cd	(1.59±0.07)c	(0.74±0.02)ab	(1.33±0.04)b	(11.79±0.56)bc	(8.32±0.15)ab
	CS3	(14.56±1.49)a	(7.65±0.95)b	(101.12±39.38)d	(1.73±0.18)b	(0.76±0.09)a	(1.46±0.15)a	(16.95±7.13)a	(8.50±0.92)a
	CS4	(12.16±0.44)c	(7.37±0.54)bc	(138.78±21.52)b	(1.61±0.12)bc	(0.67±0.05)c	(1.22±0.04)c	(8.99±1.56)de	(7.60±0.62)c
	CS5	(12.23±0.82)c	(8.50±1.01)a	(172.19±19.65)a	(1.98±0.22)a	(0.59±0.05)d	(1.22±0.08)c	(7.17±0.76)e	(6.21±0.45)d
3	CK	(15.81±0.82)c	(7.39±0.14)a	(118.80±15.88)a	(2.45±0.02)a	(0.76±0.03)e	(1.58±0.08)c	(13.60±2.29)b	(6.46±0.34)d
	CS1	(14.54±0.35)d	(3.82±0.13)d	—	(1.31±0.04)d	(1.38±0.06)a	(1.45±0.03)d	—	(11.12±0.58)a
	CS2	(16.56±0.47)b	(5.38±0.32)c	—	(1.78±0.09)c	(1.12±0.04)b	(1.66±0.05)b	—	(9.34±0.26)b
	CS3	(11.98±0.30)f	(5.29±0.09)c	(76.54±14.78)b	(1.78±0.04)c	(0.83±0.03)d	(1.20±0.03)f	(16.63±5.56)b	(6.72±0.31)d
	CS4	(13.75±0.71)e	(6.52±0.04)b	(115.67±17.79)a	(2.08±0.01)b	(0.76±0.04)e	(1.37±0.07)e	(12.32±3.01)b	(6.61±0.35)d
	CS5	(18.80±0.72)a	(7.43±0.12)a	(56.51±14.63)c	(2.45±0.02)a	(0.88±0.03)c	(1.88±0.07)a	(35.38±8.72)a	(7.69±0.30)c
5	CK	(16.77±0.70)d	(8.99±0.80)b	(102.45±17.72)a	(2.30±0.23)b	(0.76±0.04)e	(1.68±0.07)d	(16.80±2.63)ab	(7.35±0.53)e
	CS1	(16.53±0.42)d	(8.89±0.45)b	(100.11±8.82)a	(2.12±0.10)c	(0.76±0.02)e	(1.65±0.04)d	(16.63±1.47)ab	(7.81±0.23)d
	CS2	(20.54±0.15)a	(9.75±0.27)a	(55.95±7.39)c	(2.43±0.06)a	(0.87±0.02)c	(2.06±0.02)a	(37.35±5.14)a	(8.47±0.18)c
	CS3	(15.83±0.25)e	(5.76±0.46)c	—	(1.47±0.08)e	(1.11±0.07)b	(1.58±0.02)e	—	(10.77±0.42)b
	CS4	(17.76±0.34)b	(5.33±0.36)d	—	(1.35±0.09)d	(1.31±0.06)a	(1.77±0.03)b	—	(13.16±0.63)a
	CS5	(17.33±0.77)c	(8.67±0.88)b	(80.72±21.61)b	(2.22±0.26)bc	(0.81±0.05)d	(1.73±0.08)c	(23.12±6.57)ab	(7.89±0.70)d
7	CK	(17.99±0.33)e	(14.35±0.33)b	(259.59±7.27)b	(3.29±0.03)b	(0.47±0.01)e	(1.80±0.03)e	(6.94±0.31)e	(5.46±0.14)d
	CS1	(16.95±0.34)f	(10.17±0.20)e	(196.05±2.25)e	(2.35±0.01)e	(0.60±0.00)b	(1.69±0.03)f	(8.65±0.21)c	(7.22±0.12)b
	CS2	(18.53±0.89)d	(16.67±0.46)a	(283.89±6.03)a	(3.68±0.04)a	(0.42±0.01)f	(1.85±0.09)d	(6.54±0.44)f	(5.04±0.20)e
	CS3	(19.53±0.37)b	(12.22±0.32)c	(209.22±7.53)d	(2.73±0.03)c	(0.57±0.02)c	(1.95±0.04)b	(9.35±0.43)b	(7.16±0.16)b
	CS4	(21.09±0.45)a	(11.08±0.08)d	(157.90±4.99)f	(2.48±0.02)d	(0.68±0.01)a	(2.11±0.04)a	(13.38±0.69)a	(8.49±0.15)a
	CS5	(18.96±0.22)c	(14.32±0.29)b	(248.27±6.09)c	(3.28±0.02)b	(0.49±0.01)d	(1.90±0.02)c	(7.64±0.26)d	(5.78±0.09)c
14	CK	(18.32±0.47)b	(15.26±0.69)a	(216.32±13.64)b	(3.75±0.10)a	(0.50±0.03)e	(1.83±0.05)b	(8.51±0.74)c	(4.90±0.24)e
	CS1	(15.95±0.74)d	(12.04±0.54)c	(195.61±7.45)c	(2.78±0.13)c	(0.55±0.02)d	(1.60±0.07)d	(8.17±0.50)cd	(5.74±0.18)d
	CS2	(17.51±0.24)c	(11.42±0.29)d	(164.78±4.57)e	(2.63±0.10)d	(0.62±0.01)b	(1.75±0.02)c	(10.64±0.37)b	(6.66±0.23)b
	CS3	(17.48±0.77)c	(10.31±0.27)e	(138.71±16.34)f	(2.41±0.05)e	(0.68±0.04)a	(1.75±0.08)c	(12.87±2.38)a	(7.27±0.46)a
	CS4	(18.77±0.52)a	(12.80±0.31)b	(183.09±4.74)d	(3.09±0.07)b	(0.59±0.01)c	(1.88±0.05)a	(10.26±0.49)b	(6.07±0.08)c
	CS5	(17.29±0.18)c	(15.12±0.56)a	(225.41±8.88)a	(3.73±0.08)a	(0.48±0.02)f	(1.73±0.02)c	(7.68±0.38)d	(4.64±0.15)f
28	CK	(16.25±0.18)a	(17.04±0.27)a	(229.13±3.04)b	(3.69±0.05)a	(0.43±0.01)e	(1.63±0.02)a	(7.09±0.16)b	(4.41±0.08)d
	CS1	(12.31±0.10)c	(8.970±0.15)e	(172.96±4.36)e	(1.95±0.02)e	(0.58±0.01)a	(1.23±0.01)c	(7.12±0.22)b	(6.31±0.09)a
	CS2	(12.40±0.46)c	(11.70±0.36)b	(219.47±7.27)c	(2.48±0.08)b	(0.46±0.02)d	(1.24±0.05)c	(5.66±0.36)c	(5.00±0.21)c
	CS3	(13.49±0.67)b	(10.77±0.51)c	(188.38±5.25)d	(2.37±0.11)c	(0.54±0.01)c	(1.35±0.07)b	(7.17±0.49)b	(5.70±0.15)b
	CS4	(13.27±0.59)b	(10.16±0.10)d	(175.90±10.79)e	(2.29±0.01)d	(0.57±0.03)b	(1.33±0.06)b	(7.59±0.76)a	(5.79±0.25)b
	CS5	(13.39±0.18)b	(17.04±0.27)a	(256.32±2.69)a	(3.69±0.05)a	(0.36±0.01)f	(1.34±0.02)b	(5.23±0.11)d	(3.63±0.07)e
42	CK	(18.31±0.45)b	(17.79±0.20)a	(161.73±3.94)b	(4.05±0.05)a	(0.54±0.01)d	(1.83±0.05)b	(11.33±0.53)b	(4.52±0.07)e
	CS1	(9.57±0.12)e	(7.18±0.05)e	(121.12±2.96)d	(1.44±0.02)e	(0.65±0.01)b	(0.96±0.01)e	(7.91±0.29)c	(6.65±0.07)a
	CS2	(11.53±0.45)d	(8.28±0.23)d	(101.79±7.08)e	(2.01±0.02)d	(0.70±0.02)a	(1.15±0.04)d	(11.40±1.20)b	(5.74±0.19)b
	CS3	(14.66±0.12)c	(17.28±0.29)b	(190.64±2.34)a	(3.69±0.05)b	(0.45±0.01)e	(1.47±0.01)c	(7.69±0.13)c	(3.97±0.07)f
	CS4	(19.55±0.44)a	(17.79±0.20)a	(150.43±4.00)c	(4.05±0.05)a	(0.57±0.01)c	(1.96±0.04)a	(13.01±0.61)a	(4.83±0.07)d
	CS5	(11.61±0.61)d	(8.46±0.07)c	(106.00±11.84)e	(2.24±0.02)c	(0.69±0.03)a	(1.16±0.06)d	(11.14±1.67)b	(5.19±0.27)c

同列不同字母示同一时间处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

随处理时间的增加, CS1 和 CS5 的香根草叶 G_s 均表现为先降低后升高再降低的趋势; 而 CS3 和 CS4 的香根草叶 G_s 则呈先降低后升高再降低最后又升高的波动趋势, CS3 的在 3 d 时达最低, CS4 的在 5 d 时达最低; CK 的香根草叶 G_s 呈先降低后升高的趋势, 在 3 d 时达最低。28 d 时, CS5 的香根草叶 G_s 与 CK 的差异无统计学意义, 显著高于其他磷处理组的; 而 42 d 时, CS4 的香根草 G_s 与 CK 的差异无统计学意义, 显著高于其他磷处理组的。综合来看, CS4 处理表现为促进香根草叶片 G_s 水平逐步提高, 促进其叶片气孔打开, 增加叶气孔 CO_2 交换速率, 有利于维持其正常光合作用。

处理 3 d 时 CS1、CS2 和处理 5 d 时 CS3、CS4 的香根草叶 C_i 变化剧烈, 仪器无法读出结果, 这说明香根草经 Cd-SMX 胁迫产生了“毒性兴奋效应”及磷对香根草有生长促进作用, 表现为其因需维持正常光合作用, 但叶片气孔因污染物的氧化胁迫减少打开, 从而大量消耗叶细胞内 CO_2 导致细胞间 CO_2 亏缺, 因而 C_i 较低, 未检出结果。CK、CS1、CS2 和 CS3 的香根草叶 C_i 于 7 d 时达最高, 而 CS4 的则在 1 d 时最高, 14 d 时较高, CS5 则在 28 d 时最高。

2.4.2 香根草叶 L_s 、WUE、CUE、LUE 对不同水平磷下 Cd-SMX 复合污染的响应

从表 2 还可知, Cd-SMX 复合污染胁迫下, 随处理时间的增加, CS1 和 CS5 的香根草叶 L_s 呈先升高后降低再升高的趋势; CS1、CS2 和 CS5 的香根草叶 L_s 在 3 d 时达最高, 而 CS3 和 CS4 的则在 5 d 时达最高。这表明, 在 1~3 d 时, CS1、CS2 和 CS5 的香根草 P_n 的升高和降低由非气孔限制因素和气孔限制因素共同影响, 其中气孔限制因素为主导因素, 而在 5~42 d 时, 表现为非气孔限制因素决定; 在 1~5 d 时, CS3 和 CS4 的香根草 P_n 的升高和降低主要受气孔限制因素影响, 而在 7~28 d 时, 表现为非气孔限制因素影响, 在 42 d 时, 表现为气孔限制因素决定。

与 1 d 时相比, 42 d 时的香根草叶片 WUE 均下降; CS1 的香根草叶片 WUE 于处理 3 d 时达最高, CS3、CS4 和 CS5 的于处理 5 d 时达最高, CS2 的则处理 1 d 时的最高; 5 d 时, CS4 的香根草叶片 WUE 为 $(13.16 \pm 0.63)\%$, 显著高于其他处理组的, 而 42 d 时, CS4 的香根草叶片 WUE 仅高于 CK 和

CS3 的。

CS1 和 CS2 的香根草 CUE 均于处理 3 d 时缺少数据, 处理 5 d 时则达最高, 而 CS3 和 CS4 的香根草 CUE 于处理 3 d 时较高, 在处理 5 d 时缺少数据。其结果与香根草叶 C_i 在 3、5 d 时较低缺少数据无法计算有关, 同时与 P_n 、WUE、 L_s 在 3、5 d 时较高有关。

在 Cd-SMX 复合污染处理下, 随处理时间的增加, CS1 和 CS2 的香根草叶 LUE 呈现为先降后升再降低的趋势; CS4 的香根草叶 LUE 则呈现为先升后降再上升的趋势, 在 7 d 时达较高水平, 为 $(2.11 \pm 0.04)\%$, 在 42 d 时叶较高; CS1、CS2 和 CS5 的香根草叶 LUE 在处理 42 d 时均呈下降趋势。这说明适当的磷处理有利于香根草维持较高的 LUE 水平。

整体来看, 复合污染下不同水平磷处理均对香根草 WUE、CUE、LUE 影响显著, 虽然 WUE、CUE、LUE 均大致随处理时间的增加而降低, 但基本能维持在正常水平附近, 适当的外源磷添加(CS4)能基本维持香根草正常的光合作用过程, 缓解污染物的毒害作用。

2.5 Cd-SMX 复合污染下不同水平磷对香根草叶绿素荧光参数的影响

从表 3 可知, 与 CK 相比, Cd-SMX 复合污染下不同水平磷处理的香根草的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均显著下降; 在 42 d 时, CS3 和 CS4 的香根草叶 F_v/F_m 和 F_v/F_o 显著高于 CS2 和 CS5 的, 表明 180、240 mg/kg 磷处理对 Cd-SMX 复合污染具有一定的缓解效应。

随着处理时间的增加, CS1 的香根草 Φ_{PSII} 、ETR、qP(28 d 时 qP 除外)均表现为先升高再降低的趋势, 其中, Φ_{PSII} 和 ETR 在 5 d 时达最高, 为 $0.196 0 \pm 0.036 7$ 和 86.21 ± 16.16 , qP 则在 7 d 时达最高, 为 $0.415 2 \pm 0.005 7$; CS2 和 CS5 的 Φ_{PSII} 、ETR 和 qP 均在 14 d 时达较高水平, 在 42 d 时急剧下降至较低水平; CS3 的 Φ_{PSII} 、ETR 和 qP 均于 28 d 时达较高水平; CS4 的 Φ_{PSII} 和 ETR 在 3 d 时达较高水平, qP 则在 7 d 时达较高水平。

42 d 时, 除 CS3 的香根草 NPQ 显著低于 CK 的外, Cd-SMX 复合污染下不同水平磷处理的香根草 NPQ 与 CK 间的差异均无统计学意义; CS1 的香根草 NPQ 于处理 5 d 时达最低, 仅为 $1.282 6 \pm 0.104 3$, 为 1 d 时的 64.69%, CS2 的在 14 d 时达较低, 为

表3 Cd-SMX复合污染下不同处理时间和磷水平的香根草的叶绿素荧光参数

Table 3 Chlorophyll fluorescence parameters of vetiver grass under different treatment times and phosphorus levels with Cd-SMX

co-contamination							
时间/d	处理	实际光化学效率	最大光化学效率	潜在光化学效率	电子传递速率	光化学淬灭系数	非光化学淬灭系数
1	CK	(16.30±0.41)a	(78.30±0.24)a	(36.09±0.51)a	(71.34±1.81)a	(36.26±1.07)a	(185.34±0.32)bc
	CS1	(7.06±0.23)bcd	(75.58±0.24)b	(31.30±0.39)b	(30.83±1.04)bcd	(17.89±0.71)bc	(198.27±2.84)a
	CS2	(8.49±0.87)bc	(75.48±0.29)b	(31.13±0.49)bc	(37.18±3.80)bc	(21.90±2.40)b	(190.03±3.10)ab
	CS3	(5.27±0.17)d	(74.88±0.31)bc	(30.18±0.49)bc	(23.10±0.78)d	(13.56±0.54)c	(177.35±1.32)c
	CS4	(8.96±0.45)b	(75.98±0.32)b	(31.67±0.56)b	(39.20±1.99)b	(22.34±1.24)b	(179.67±0.34)bc
2	CK	(16.76±0.45)a	(78.13±0.23)a	(35.75±0.48)a	(73.37±1.96)a	(37.47±1.06)a	(185.92±0.32)bc
	CS1	(7.62±0.24)bcd	(76.19±0.21)b	(32.01±0.37)b	(33.29±1.07)bcd	(19.54±0.74)bc	(197.29±2.83)a
	CS2	(9.06±0.87)bc	(76.08±0.29)b	(31.83±0.50)b	(39.65±3.80)bc	(23.60±2.45)b	(189.16±3.09)ab
	CS3	(5.99±0.17)d	(75.52±0.30)bc	(30.88±0.49)bc	(26.26±0.77)d	(15.62±0.57)c	(176.28±1.31)cd
	CS4	(9.48±0.49)b	(75.78±0.32)bc	(31.31±0.56)bc	(41.51±2.15)b	(23.77±1.27)b	(178.86±0.33)bcd
3	CK	(16.82±0.46)a	(77.84±0.15)a	(35.13±0.30)a	(73.86±2.30)a	(35.26±1.21)a	(175.55±2.83)b
	CS1	(11.09±0.74)b	(75.29±0.35)b	(30.49±0.57)b	(48.78±3.36)b	(25.63±1.79)b	(151.95±1.27)e
	CS2	(9.33±0.18)b	(75.83±0.24)b	(31.38±0.40)b	(40.84±0.77)b	(21.98±0.45)bc	(167.27±1.28)bc
	CS3	(6.87±0.21)c	(75.43±0.36)b	(30.74±0.59)b	(30.10±0.90)c	(16.66±0.65)d	(162.64±1.68)cd
	CS4	(10.19±0.42)b	(75.78±0.35)b	(31.32±0.60)b	(44.77±2.03)b	(23.43±1.17)b	(157.24±2.96)de
5	CK	(15.10±0.37)ab	(77.93±0.27)a	(35.33±0.55)a	(66.13±1.59)ab	(33.28±0.94)ab	(182.39±2.73)a
	CS1	(19.60±3.67)a	(75.41±0.35)b	(30.69±0.57)b	(86.21±16.16)a	(40.08±6.77)a	(128.26±10.43)b
	CS2	(8.44±0.49)bc	(75.27±0.20)b	(30.45±0.33)b	(36.95±2.14)bc	(22.47±1.49)bc	(187.12±2.22)a
	CS3	(5.87±0.26)c	(76.22±0.25)b	(32.07±0.44)b	(25.75±1.19)c	(15.55±0.70)c	(184.35±2.76)a
	CS4	(6.37±0.48)c	(76.14±0.30)b	(31.93±0.52)b	(27.90±2.07)c	(16.05±1.33)c	(177.62±2.29)a
7	CK	(15.56±0.15)b	(78.48±0.33)a	(36.51±0.71)a	(68.05±0.66)b	(41.25±0.70)a	(206.10±4.37)a
	CS1	(17.21±0.20)a	(73.32±0.18)bc	(27.49±0.25)bc	(75.37±0.85)a	(41.52±0.57)a	(144.92±1.04)c
	CS2	(7.64±0.49)c	(73.80±0.23)b	(28.19±0.34)bc	(33.39±2.14)c	(23.16±1.47)bc	(186.62±3.85)ab
	CS3	(4.53±0.14)d	(73.46±0.19)bc	(27.69±0.26)bc	(19.81±0.63)d	(15.20±0.60)d	(184.35±2.76)ab
	CS4	(8.32±0.14)c	(72.68±0.17)c	(26.60±0.230)c	(36.38±0.59)c	(25.69±0.47)b	(169.48±4.17)bc
14	CK	(13.67±0.14)b	(78.14±0.24)a	(35.78±0.50)a	(59.75±0.61)b	(30.12±0.47)b	(187.78±2.67)a
	CS1	(12.26±0.55)c	(75.06±0.31)bc	(30.12±0.50)bc	(53.68±2.43)c	(28.96±1.34)b	(148.56±1.90)d
	CS2	(17.47±0.21)a	(75.16±0.20)bc	(30.27±0.31)bc	(76.41±0.96)a	(38.98±0.88)a	(134.86±2.82)e
	CS3	(12.70±0.22)bc	(74.59±0.28)b	(29.38±0.43)c	(55.59±0.93)bc	(29.55±0.69)b	(140.65±1.83)de
	CS4	(7.04±0.10)e	(76.06±0.28)b	(31.79±0.49)b	(30.79±0.44)e	(17.10±0.33)d	(162.76±2.82)c
28	CK	(13.82±0.36)a	(78.73±0.15)a	(37.02±0.33)a	(60.47±1.58)a	(34.02±0.92)a	(210.03±1.29)a
	CS1	(12.04±0.71)b	(75.97±0.31)b	(31.64±0.54)b	(52.47±3.05)b	(31.09±1.68)a	(189.94±0.56)b
	CS2	(6.93±0.18)d	(75.86±0.12)bc	(31.43±0.21)bc	(30.24±0.79)d	(18.39±0.77)bc	(192.78±7.89)b
	CS3	(15.12±0.12)a	(75.85±0.42)bc	(31.45±0.72)bc	(66.13±0.53)a	(34.59±0.18)a	(149.22±2.03)c
	CS4	(5.70±0.37)d	(74.82±0.25)bc	(29.72±0.38)bc	(24.95±1.61)d	(16.28±1.07)c	(193.65±1.29)b
42	CK	(15.51±0.23)a	(77.55±0.20)a	(34.55±0.40)a	(68.13±1.23)a	(33.60±0.80)a	(194.33±3.06)a
	CS1	(4.24±0.24)b	(75.29±0.27)cd	(30.48±0.44)cd	(18.66±1.12)b	(11.32±0.59)b	(196.95±2.12)a
	CS2	(3.14±0.30)cd	(74.97±0.24)d	(29.96±0.38)d	(14.01±1.43)cd	(7.99±0.80)c	(190.02±2.09)ab
	CS3	(4.23±0.16)b	(76.37±0.23)b	(32.33±0.41)b	(18.52±0.70)bc	(10.27±0.47)bc	(179.99±2.84)b
	CS4	(3.97±0.14)bc	(76.25±0.26)bc	(32.12±0.46)bc	(17.42±0.64)bc	(10.24±0.47)bc	(192.70±3.70)ab
	CS5	(2.65±0.20)d	(74.87±0.22)d	(29.81±0.34)d	(11.57±0.84)d	(7.48±0.62)c	(200.17±3.50)a

同列不同字母表示同一时间处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。香根草叶实际光化学效率、最大光化学效率、光化学淬灭系数和非光化学淬灭系数均以原数据 $\times 10^2$ 计,潜在光化学效率以原数据 $\times 10$ 计。

1.348 6±0.028 2, 为 1 d 时的 70.97%, CS3 的也在 14 d 时达较低水平, CS4 和 CS5 的则分别于处理 3、7 d 时达较低, 分别为 1.572 4±0.029 6 和 1.566 9±0.126 9, 很相近, 均高于 CS1、CS2 和 CS3 处理下的最低值。

3 结论与讨论

磷是植物体内许多重要化合物组分的成分, 对促进植物生长和增强抗逆性有重要作用。本研究中, 相比于较低水平磷的 CS1、CS2 和更高水平磷的 CS5, 在 CS3 和 CS4 处理下, 外源磷促进了香根草地上部茎叶的生长, 增强了其光合作用能力以抵抗污染物毒性作用。相似于 SMX-Cu²⁺复合污染对美人蕉(*Canna indica* L.)地下部生物量产生了明显抑制作用, 根系生长发育受限; CS1、CS2、CS3 和 CS4 处理下 Cd-SMX 复合污染同样对香根草根系生物量均产生明显的抑制作用, 而 42 d 时 CS5 处理下的根系鲜质量与 CK 的差异则无统计学意义, 与磷的“促进生长作用”和污染物的“毒性兴奋作用”有关^[27]。

Cd-SMX 复合污染及外源磷处理 42 d 时, 香根草叶绿素含量显著下降。叶绿素含量的变化不仅会影响植物叶色变化, 还会影响其叶绿体发育和光合效率^[28]。由于 Cd²⁺可以替代叶绿素分子中的 Mg²⁺, 形成脱镁叶绿素, 从而破坏叶绿素分子结构, 导致叶绿素降解, 香根草叶片叶绿素含量在复合污染下降低, 与 Cd²⁺对植物的毒性作用表现一致^[29-30], 也与 SMX 干扰香根草叶片叶绿素合成过程或对“获光复合物”合成的扰乱有关^[31]。香根草也展现出对 Cd 和 SMX 单一污染的抗性和耐受性^[15,32-33], 但复合污染条件下 Cd、SMX 的持久性增强。这可能与 SMX 与 Cd 会形成络合物, 而络合物具有较强的环境持久性有关^[34], Cd²⁺与 SMX 主要络合形态为 CdSMX⁺, 当 pH=5.0 时, 即有 CdSMX⁺开始形成, 随 pH 增大, 被络合的 SMX 占比逐步增大^[35]。较高水平磷虽在一定程度上缓解了部分 Cd-SMX 复合污染胁迫对香根草的毒害作用, 但复合污染还是造成了香根草叶绿素含量降低, 从而导致光合作用系统的损伤。

相较于 CK, 在 Cd-SMX 复合污染处理前期, 香根草呈现一定“毒性兴奋效应”, Cd 和 SMX 在一定程度上促进了香根草 Pn 和 LUE 的提高; 而后

因 Cd 和 SMX 累积造成的毒性作用, 在污染处理后期降低了香根草光合作用能力, 表现为 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、ETR 和 qP 均呈一定程度的下降; 磷的“生长促进效应”也起到了维持香根草光合作用的稳态作用, 表现为适当的磷处理使 Pn、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、CUE 和 LUE 均能恢复至较正常水平。同时, 香根草叶 Gs、Ci、E 则随环境中的不同磷水平和 Cd-SMX 复合污染的作用时间增加, 呈现波动变化, 其中 CS3 和 CS4 处理下整体呈上升趋势。

与磺胺(SN)和 Cd 对水鳖(*Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer)的联合毒性作用(低浓度复合污染时, SN-Cd²⁺表现为协同作用, 浓度升高则表现为拮抗作用)^[36]不同, 在此浓度下 SMX 与 Cd 产生拮抗效应, SMX 与 Cd 复合污染对香根草的毒性作用低于单一污染时的。添加适量的磷能显著增加镉胁迫下的黄瓜生物量和叶片中 Pn、Gs、Chla、Chlb 含量, 降低叶片的 Ci^[32], 磷也能够减少 Cd-SMX 复合污染中 Cd²⁺的毒害, 在提高叶绿素含量的同时, 提高了香根草叶片的 Pn、Gs、E, 说明磷能够通过提高香根草叶片叶绿素含量, 进而增强其对光能的吸收, Pn 随之升高, 而随污染处理时间的变化, 环境中的磷随香根草的吸收利用和土壤的固持而逐渐减少, 磷的生物促进效果也随之减弱。

Cd-SMX 复合污染中 SMX 对香根草光合系统的损伤, 因 SMX 于水中自敏化光解、水解以及被香根草生物降解而浓度降低时表现为毒性的降低, 同时也因 SMX 在环境中的毒性持久及在植物体内造成的生物合成过程干扰而持续性对香根草造成损伤^[31,37]。而 CS4 处理下磷对香根草的“生长促进作用”强于其他水平磷处理的, 较好地缓解了复合污染带来的茎叶损害, 对维持茎叶光合作用功能效果也较好。此外, 复合污染中的 Cd 和 SMX 在不同处理时间阶段扮演了不同角色, SMX 使香根草叶片 Gs 降低后, 通过影响叶片气孔开闭进而降低其叶片 Ci, 同时一定程度上影响 Pn 和 E, 但因 Cd 与 SMX 在低浓度的拮抗效应以及磷的缓解作用而并没有促使香根草 Pn 和 E 降低, 之后因 SMX 在一定程度的降解后, 拮抗效应降低, Cd²⁺的毒害作用增强, 磷的缓解作用降低而促使 Pn 和 E 在一定程度上降低^[32]。这与 Cd²⁺、SMX 及 PO₄³⁻ 在环境中发挥其效应的时间有关: SMX 的作用时间比 PO₄³⁻ 的短, 而

Cd^{2+} 毒性作用时间最持久, SMX 的持续毒性大于 PO_4^{3-} 的缓解作用, 但效应较弱, PO_4^{3-} 的缓解作用强但随时间而降低, 进而表现为在一定浓度磷水平下, 复合污染的香根草 G_s 、 C_i 、 E 、 WUE 、 CUE 出现先下降后升高再下降的变化。复合污染对香根草 P_n 和 LUE 的作用规律为前期 SMX 和 Cd 的拮抗效应、磷促生物生长效应显著, 后期 Cd^{2+} 毒害效应明显, 香根草对 Cd 和 SMX 复合污染具有较强的抗逆性和耐受性, P_n 、 E 、 CUE 、 LUE 均保持在正常水平附近, 而 WUE 略有降低。

CS1 处理下的香根草 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 变化趋势随处理时间先升高后降低, 而 CS2、CS3、CS4、CS5 处理下则随时间先升高后降低再升高最后又降低; 同时, 相较于 CK 处理, 污染处理的香根草 F_v/F_m 和 F_v/F 显著降低, 表明香根草光合系统因复合污染而受到了损害($F_v/F_m < 0.8$ 表明可能受损^[38]), 但在磷的“生长促进作用”和香根草的抗氧化系统作用下, 光反应中心损害可得到一定程度的修复^[32]。此外, CK 处理 $F_v/F_m < 0.8$ 与香根草长期受淹水胁迫有关^[39]。香根草 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 的变化可能与体内的 SMX、 Cd^{2+} 含量有关, qP 能在一定程度上反映 PS II 反应中心的开放程度, qP 与 PS II 的 ETR 有关, 受复合污染胁迫时 PS II 受到损害, qP 降低, ETR 受阻。CS1 处理下香根草 NPQ 先降低后升高, CS5 下呈先升高后降低再升高的趋势, 而 CS2、CS3、CS4 水平下 NPQ 随时间呈“W”形波动变化, 在 42 d 时恢复至较正常水平, 进一步表明香根草在复合污染胁迫前期, 其 PS II 受到损害的表现表现为 NPQ 波动变化, 而后在磷的作用下 NPQ 恢复至较正常水平, 表明香根草对 Cd 和 SMX 复合污染有较强的抗逆性和耐受性。

不同磷水平下, 香根草茎叶 MDA 含量整体上低于根系 MDA 含量, 相较于其他处理组, 在 42 d 时, CS4 的茎叶 MDA 含量较低, 较接近 CK 的, 这说明适当的磷增强了香根草对逆境的抗性能力。研究^[40]表明, 植物在受到重金属胁迫时, 会导致体内活性氧的大量积累, 损伤细胞膜系统, 致使膜脂过氧化产物的增加, 从而导致 MDA 含量上升。Cd-SMX 复合污染下, 香根草地上部茎叶 MDA 含量整体低于根系 MDA 含量, 可能与香根草在污染条件下根系积累了大量 Cd^{2+} 、SMX 及 CdSMX^+ 复

合物有关, 根系承担了更多的污染物胁迫压力, 表现为根系细胞膜系统受损, MDA 积累。本研究中, 不同水平磷的添加对香根草茎叶与根系 MDA 含量积累造成了影响, 这与磷能有效促进植物生长发育, 改善植物生理状况, 增强植物对逆境的抗性能力有关^[41]。较高磷水平(CS3、CS4、CS5)下, 茎叶和根系 MDA 含量显著下降, 其中 CS4 处理下最低, 为 (0.93 ± 0.04) nmol/g。

综上所述, 在 Cd-SMX 复合污染下的湿地环境中, 添加 240 mg/kg 的磷(CS4)有利于香根草通过“磷促生长作用”维持茎叶光合作用能力以抵御复合污染胁迫。

参考文献:

- [1] 崔键, 杜易, 丁程成, 等. 中国湖泊水体磷的赋存形态及污染治理措施进展[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 621-633.
- [2] HAIDER F U, CAI L Q, COULTER J A, et al. Cadmium toxicity in plants: impacts and remediation strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 211: 111887.
- [3] QIN G W, NIU Z D, YU J D, et al. Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology[J]. Chemosphere, 2021, 267: 129205.
- [4] 周晓声, 姜厦, RADNAEVA L D, 等. 植物对土壤重金属富集特性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 400-410.
- [5] 李峰平, 魏红阳, 马喆, 等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J]. 湿地科学, 2017, 15(6): 849-854.
- [6] 张婧妍. 4 种湿地挺水植物对磺胺甲恶唑胁迫响应的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [7] 王文姬. 湿地沉积物-植物体系中磺胺甲恶唑的归趋及效应[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- [8] AIBIBU N, LIU Y G, ZENG G M, et al. Cadmium accumulation in *Vetiveria zizanioides* and its effects on growth, physiological and biochemical characters[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(16): 6297-6303.
- [9] 徐舟影, 孟发科, 吕意超, 等. 抗生素与重金属复合污染废水处理的研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(11): 2686-2695.
- [10] 黄翔峰, 熊永娇, 彭开铭, 等. 金属离子络合对抗生素去除特性的影响研究进展[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 133-140.
- [11] 高荣, 尹笑宇, 侯森, 等. 磺胺甲恶唑降解与污染防治技术进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(11): 8-12.

- [12] AKHZARI D, PESSARAKLI M, MAHDAVI S, et al. Impact of drought, salinity, and heavy metal stress on growth, nutrient uptake, and physiological traits of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.)[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(14): 1841–1847.
- [13] GRAVAND F, RAHNAVARD A, POUR G M. Investigation of vetiver grass capability in phytoremediation of contaminated soils with heavy metals(Pb, Cd, Mn, and Ni)[J]. Soil and Sediment Contamination, 2021, 30(2): 163–186.
- [14] ZHANG X F, GAO B, XIA H P. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 102–108.
- [15] 荣渝虹, 张发明, 杨娟, 等. 香根草对磺胺类抗生素污染水体的修复潜力研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 795–801.
- [16] 宋清梅, 蔡信德, 吴颖欣, 等. 香根草对污染土壤水溶态重金属组分胁迫响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2715–2722.
- [17] DANH L T, TRUONG P, MAMMUCARI R, et al. Vetiver grass, *Vetiveria zizanioides*: a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes[J]. International Journal of Phytoremediation, 2009, 11(8): 664–691.
- [18] KIAMARSI Z, KAFI M, SOLEIMANI M, et al. Evaluating the bio-removal of crude oil by vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) in interaction with bacterial consortium exposed to contaminated artificial soils[J]. International Journal of Phytoremediation, 2022, 24(5): 483–492.
- [19] EFFENDI H, WIDYATMOKO, UTOMO B A, et al. Ammonia and orthophosphate removal of *Tilapia* cultivation wastewater with *Vetiveria zizanioides*[J]. Journal of King Saud University(Science), 2020, 32(1): 207–212.
- [20] 石傲傲, 郑毅, 张坤, 等. 香根草对扑草净胁迫的响应和去除效果[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(2): 170–177.
- [21] 刘婉. 五种微型绿藻及其组合对水体磺胺甲恶唑的去除研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [22] 杨浩瑜, 张敏, 邓洪, 等. 滇池流域大棚土壤磷素空间分布特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(1): 140–146.
- [23] 朱新广, 许大全. 光合作用研究技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021.
- [24] 刘昊华. 几种滨海盐碱地绿化植物耐盐特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [25] 杨升. 滨海耐盐树种筛选及评价标准研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [26] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [27] 杨玲丽, 马琳, 刘伟, 等. 铜和磺胺甲恶唑复合污染下人工湿地对禽畜养殖尾水的处理效果[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1484–1493.
- [28] 董书琦, 陈达, 秦巧平, 等. 高等植物叶绿素和类胡萝卜素代谢研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(5): 793–802.
- [29] 王树凤, 王松, 舒婉钦, 等. 基于光合色素含量和叶绿素荧光参数的杞柳叶片 Cd 积累能力预测[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(3): 65–74.
- [30] 赵弘益, 管珏镞, 张雪媛, 等. 土壤镉胁迫对橡木光合特性的影响[J]. 植物研究, 2021, 41(4): 506–513.
- [31] 李亚宁, 陈春, 李国东, 等. 磺胺甲恶唑对小麦叶片蛋白和叶绿素含量及 SOD 酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 543–548.
- [32] 刘伟, 樊文华, 刘奋武, 等. 施磷对镉胁迫下黄瓜苗期光合作用及抗氧化酶系统的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 596–604.
- [33] 张星雨, 叶志彪, 张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2021, 57(7): 1437–1450.
- [34] KHURANA P, PULICHARLA R, KAUR BRAR S. Antibiotic-metal complexes in wastewaters: fate and treatment trajectory[J]. Environment International, 2021, 157: 106863.
- [35] 汪晨. 水中典型药物与重金属的络合行为[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [36] 杨璐. 磺胺与镉对三种水生植物单一及联合效应探究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [37] 陈姗, 许凡, 张玮, 等. 磺胺类抗生素污染现状及其环境行为的研究进展[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1557–1569.
- [38] DAWSON S P, DENNISON W C. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five seagrass species[J]. Marine Biology, 1996, 125(4): 629–638.
- [39] 郭泉水, 洪明, 裴顺祥, 等. 香根草形态性状和光合特性对三峡库区消落带水陆生境变化的响应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(11): 2328–2335.
- [40] 林琳, 旦增卓嘎, 吴玲玲. 铅、镉单一及复合胁迫对生菜幼苗抗氧化酶及亚细胞结构的毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 337–348.
- [41] 白媛媛. 氮磷及其互作在蒿柳响应重金属镉胁迫中的作用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正