

史新杰, 李 卓, 庄文化, 等. 土壤中水分和镉浓度对油菜生长发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 71-78.

SHI Xin-jie, LI Zhuo, ZHUANG Wen-hua, et al. Effects of soil moisture and cadmium concentration on the growth of rape[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 71-78.

土壤中水分和镉浓度对油菜生长发育的影响

史新杰², 李 卓^{1,3*}, 庄文化^{2,3}, 刘 超²

(1. 四川省农业科学院作物研究所, 成都 610066; 2. 四川大学水利水电学院, 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 南方丘陵区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066)

摘 要:为探求不同土壤水分和镉浓度对油菜生长生理特性及产量的影响, 设置3个土壤水分处理组(相对含水量70%~80%、60%~70%和50%~60%), 每个水分处理下分别设置6个镉处理浓度(0、5、10、15、20、30 mg·kg⁻¹), 共18个处理。测定不同水分及镉处理对油菜生长、生物量、光合参数及产量的影响。结果表明: 土壤水分的增加, 对油菜株高、生物量、光合作用和产量有明显的促进作用; 在供试镉浓度处理下, 油菜生长生理及产量指标并无显著性差异, 表明油菜对镉具有较好的耐受性。

关键词:土壤水分; 镉; 油菜; 生长发育; 光合生理; 产量

中图分类号: S565; X503.231 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2019)01-0071-08 doi: 10.13254/j.jare.2018.0002

Effects of soil moisture and cadmium concentration on the growth of rape

SHI Xin-jie², LI Zhuo^{1,3*}, ZHUANG Wen-hua^{2,3}, LIU Chao²

(1. Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Key Laboratory of Water Saving Agriculture in Hill Areas in Southern China of Sichuan Province, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: In this paper, the rape (*Brassica junica*) was used as test materials, and two factors including water content and cadmium stress were tested, comprising three water treatments (70%~80%, 60%~70% and 50%~60% of relative moisture content) and six cadmium treatments (0, 5, 10, 15, 20, 30 mg·kg⁻¹), to find out the effects of different soil moisture and cadmium concentrations on physiological characteristics and yield of rape. The results showed that with the increase of soil water content, the plant height, biomass, photosynthesis and yield of rape were significantly promoted; Under the tested Cd concentrations, there were no significant difference in rape growth physiology and yield index, which indicating that rape had a certain resistance to cadmium in cadmium contaminated soil.

Keywords: soil moisture; cadmium; oilseed rape; growth; photosynthetic characteristics; yield

近年来, 工业的矿产开发与冶炼, 农业的污水灌溉和化肥、农药的施用, 导致重金属污染日益严重^[1-3]。其中, 镉(Cd)污染是最常见的重金属污染之一, 镉污染除了具备重金属污染的一般特点(隐蔽性、不可逆

性和长期性)外, 还具有移动性强、毒性高和难降解等自身特点, 因此镉易被植物吸收, 并通过食物链, 危害动物和人体健康^[4]。20世纪60年代, 日本富山县出现的骨痛病, 就是由重金属镉引起的^[5]。

收稿日期: 2018-01-02 录用日期: 2018-03-08

作者简介: 史新杰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土研究。E-mail: 414680396@qq.com

*通信作者: 李 卓 E-mail: lizhuo_2000@sina.com

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014NZ0008); 四川省财政创新能力提升工程项目(2016GYSH-007); 国家科技支撑计划项目(2014BAD11B00)

Project supported: Science and Technology of Sichuan Province, China (2014NZ0008); Financial Innovation Capacity Improvement of Sichuan Province, China (2016GYSH-007); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAD11B00)

植物修复技术是近几年发展起来的利用绿色植物清除土壤中重金属的一种环境友好型技术。现已报道筛选出较好的镉超积累植物主要有遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)^[6]、印度芥菜(*Brassica junica*)^[7]和甘蓝型油菜(*Brassica junica*)^[8]等。油菜是我国主要的油料作物,其种植面积和总产量均居世界首位,其生物量较大,有较强的吸镉能力,且镉不溶于油脂,不影响菜籽油食用安全。关于镉污染对油菜生长的影响,前人已经做了一些研究。当镉浓度小于 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,能够促进油菜生长,对株高和生物量都有一定的促进作用;当镉浓度大于 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,阻碍油菜生长,抑制株高,叶片失绿,生物量降低^[9-12],且随着浓度的增加,抑制作用增强。研究表明,水分亏缺会导致作物叶片气孔关闭、光合速率下降,使叶片光合能力快速减弱,并影响碳同化物转运,使其生长受到抑制,进而降低作物产量^[13-14];当亏水度加剧时,作物叶水势与叶面积均呈减小趋势,并抑制新生梢生长,且亏水时间越长影响越显著^[15]。

目前,关于镉对油菜影响的研究主要涉及种子、幼苗期的生长变化,关于镉对油菜全生育生长生理及产量的影响鲜有报道。为此,本文通过在不同镉含量土壤上的油菜全生育期试验,并设置不同土壤水分,模拟不同土壤水分情况下镉对油菜生长特性的影响,深入研究不同土壤镉浓度在不同的水分条件下对油菜生长、生理及产量的影响,为油菜修复镉污染土壤以及镉污染农田土壤安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验在四川省农业科学院新都试验园区内的移动式防雨棚开展,供试土样取自紫色土农田的0~20 cm表层壤土,pH 6.14,基本化学性质如表1所示,土壤经自然风干后,过5 mm筛,室温保存备用。

供试作物:在对成都平原地区各个油菜品种富集Cd含量的调查基础上,供试油菜品种选择四川省广泛种植的品种川油36(*Brassica napus* L.),属甘蓝型中熟两系杂交种,全生育期约223 d左右。

1.2 试验方法

盆栽试验于2015年9月—2016年5月开展,使用直径35 cm、高28 cm,下底自带托盘的塑料盆,每盆盛过筛风干土10 kg。氮肥使用尿素,磷肥使用磷酸二氢钾,各种肥料在油菜移栽前一次性施加,后期不再追肥。施加量分别为 $\text{N } 0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P } 0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机肥 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与供试土壤充分混匀。以 CdSO_4 (无结晶水,分析纯)作为污染试剂,用去离子水配成母液,再逐级稀释,设置土壤Cd含量水平为0、5、10、15、20、30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记为CK、C1、C2、C3、C4、C5,喷洒到盆栽实验的土壤中,边喷边搅拌,保证Cd的均匀分布,在温室中稳定7 d。

2015年9月中下旬播种,油菜长出3片真叶时定苗,于2015年10月15号移入大小、性状、长势一致的幼苗。盆栽定苗1株·盆⁻¹,每个处理3次重复。移入后,为保证油菜生长,充分灌水,苗期不做任何处理。2015年12月18日起,对油菜进行水分处理,分别设置高水(HW)、中水(MW)、低水(LW)3个处理,各个处理的水分控制标准依次为田间持水量的70%~80%、60%~70%和50%~60%,其中,田间持水量采用室内环刀法测定,值为22.37%。试验过程中采用称重法控制土壤水分,即使用精度为1 g的电子台秤称重,以土壤水分占干土质量的田间持水量的百分数表示。各水分处理均以土壤含水率降至试验设计的灌水下限开始灌水,达到试验设计灌水上限时停止灌水,用量筒精确量取所需水量,并记录每次各个处理的灌水量。补水间隔为1~2 d,视天气、植株、土壤水分状况而定。

1.3 分析方法

1.3.1 指标与测定方法

(1)株高:采用精度为1 mm的卷尺测量植株根茎处至主茎顶端处的长度,cm;

(2)生物量:油菜成熟后,收获植株,用蒸馏水洗净整个植株,晾干,将油菜各个器官(根、茎、叶、角果壳、籽粒)分开,70 ℃烘干至恒重,用电子天平称取各部分干质量,g。

(3)叶绿素含量测定:在主茎上选择倒数第三片

表1 供试土壤基本化学性质($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Soil chemical properties($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

全磷 Total phosphorus	有效磷 Effective phosphorus	全钾 Total potassium	有效钾 Effective potassium	全氮 Total nitrogen	有效氮 Effective nitrogen	有机质 Organic matter	全镉 Total cadmium	有效镉 Effective cadmium
4.2	2.8	132	96.5	73.4	42.9	8000	0.13	0.037

绿叶,每叶选10个均匀分布的点取平均值,采用SPAD-502叶绿素测量仪进行测定,以SPAD值表示。

(4)光合特性测定:采用LI-6400光合测定仪选择风小的晴天于2016年1月25日(苗期)、3月10日(薹期)对油菜叶片生理性质进行监测。每个处理选择相对位置相同的4片叶片进行测量,测量时间为每日9:00—11:00。测定指标包括光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)以及气孔导度(G_s)。

(5)单株有效角果数:统计全株含有1粒以上饱满或略欠饱满种子的角果数,个;

(6)单株产量:采用电子天平称量每株自然烘干纯净的种子重量,g。

1.3.2 数据处理

采用SPSS 17.0和Microsoft Excel软件进行主要统计数据的相关性及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同水分和镉处理对油菜生长指标的影响

2.1.1 株高

株高生长速率是衡量油菜生长发育的一个重要指标,油菜不同生育阶段株高日增长量大小直接反映其营养生长与生殖生长的协调程度,适宜的株高有利于株型改善,使冠层分布更为合理。对不同土壤水分和镉浓度处理下油菜不同生育期的株高分析,得到株高过程曲线(图1)。从图中可以看出,在油菜生育期内,不同土壤水分和镉浓度处理的株高持续增加,基本呈现出“慢-快-慢”变化趋势,其过程可明显的分为3个阶段:苗后期(2月21日—2月26日)油菜株高增长比较缓慢;薹期(2月26日—3月14日)油菜株

高基本呈直线增长;开花期(3月14日—3月25日)株高增长放缓;3月25日之后,油菜进入角果期,此后,油菜营养生长基本完成,株高不再发生变化。

对不同土壤水分和镉浓度处理下的株高进一步分析(图1)可知,土壤水分的增加对油菜株高影响明显,各镉浓度处理下,与HW处理相比,MW和LW处理下的油菜株高降幅分别为9.1%~24.8%、35.8%~59.8%;各土壤水分处理下(HW、MW、LW),C5处理油菜最终的株高皆低于对照组和其他处理,表明高浓度的镉对油菜株高产生了一定的抑制作用,与CK相比,油菜株高分别降低了11.56%、5.7%和43.72%。

表2表明,不同土壤水分对油菜株高影响显著,而在供试镉浓度下,对油菜最终株高影响并不显著,说明在一定土壤镉浓度下,适当提高土壤水分有利于油菜的生长。

2.1.2 生物量

分析不同土壤水分和镉浓度对油菜生物量的影响(图2)可以看出,随着土壤水分的增加,油菜生物量明显增加。CK和C5处理下,各土壤水分处理存在

表2 水分和镉浓度对株高和生物量的影响效应检验(P值)

Table 2 Inter-subject effect test for height and biomass of rape(P values)

处理 Treatments	株高 Height	总生物量 Biomass
水分	<0.001	<0.001
镉浓度	0.032	0.119
水分×镉浓度	0.711	0.212

注: $P < 0.05$ 表明统计上显著, $P > 0.05$ 表明统计上不显著。下同。

Note: $P < 0.05$ shows statistically significant, $P > 0.05$ shows statistically insignificant. The same below.

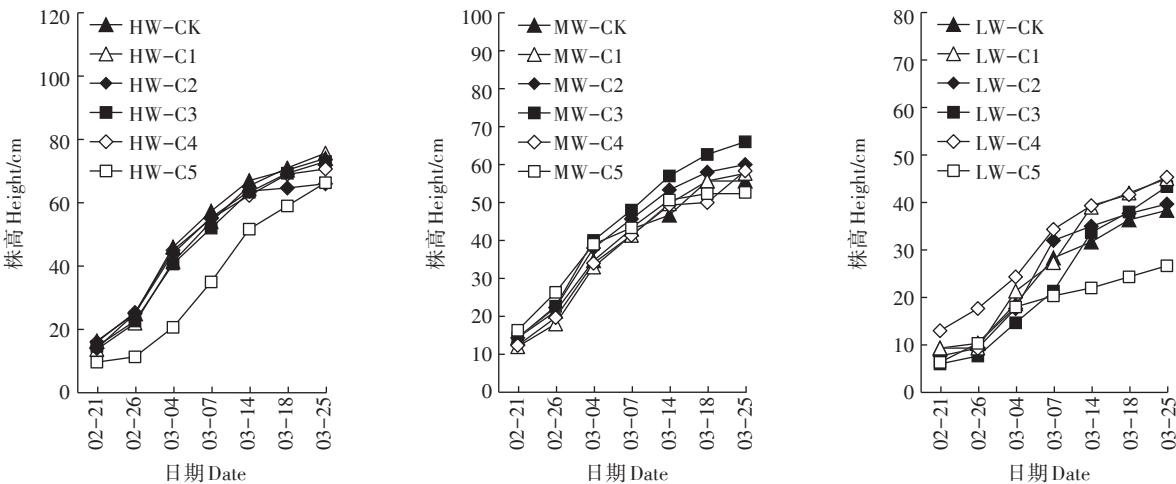


图1 水分和镉浓度对油菜不同生育期株高的影响

Figure 1 Effects of water and cadmium concentration on plant height in different growth stages of rape

显著性差异,与LW处理相比,HW和MW处理的生物量分别增加140.45%、69.20%和103.54%、45.38%;相同土壤水分条件下,各镉浓度处理生物量无显著性差异。

由表2可以看出,土壤水分对油菜生物量有显著影响,土壤镉浓度对油菜生物量无显著性影响,且土壤水分和镉浓度之间不存在耦合效应。

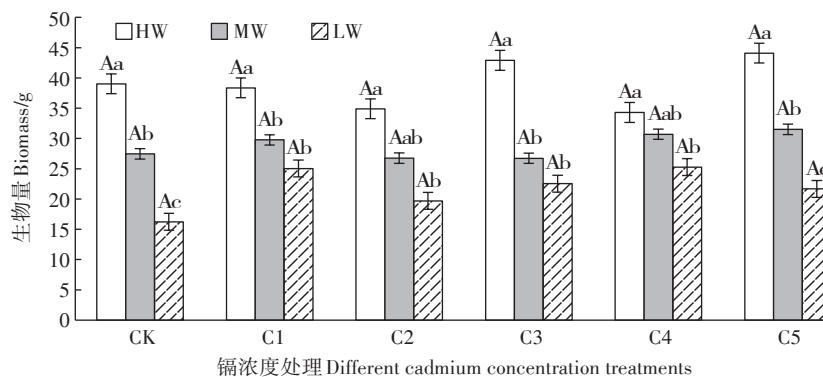
分析水分和镉浓度对油菜不同器官生物量的影响(表3)可知,不同土壤水分条件下,各镉浓度处理下的根生物量、茎生物量和叶生物量差异不显著,表明油菜在试验的镉浓度下可顺利生长,生物量可自然积累。各镉浓度处理下的根系生物量基本呈现出随土壤水分的降低而减少的趋势,各水分处理间差异不

显著。随着土壤水分的增加,CK、C1和C5处理的茎生物量显著增加,与LW相比,HW和MW分别增加了213.33%和78.10%、137.61%和65.22%、261.36%和147.73%。

2.2 不同水分和镉处理对油菜生理指标的影响

2.2.1 叶绿素(叶片SPAD值)

叶绿素是光合作用最重要的物质之一,叶绿素含量的高低可反映出作物体内能量的传递转化和生物量的积累能力。由表4可知,不同水分和镉处理下油菜蕾薹期的叶片SPAD值明显大于苗期,而同一生育期的不同镉处理对油菜叶片SPAD值并无显著性差异。进一步分析不同水分和镉处理对油菜不同生育期叶片SPAD值的影响可知,油菜处于苗期时,C1与



不同大写字母代表同一水分下不同镉浓度处理的显著性差异,不同小写字母代表同一镉浓度下不同水分处理的显著性差异($P<0.05$)。下同
Different capital letters represent significant differences in cadmium concentrations under the same moisture, and different lowercase letters represent significant differences in water content at the same cadmium concentration ($P<0.05$). The same below

图2 水分和镉浓度对油菜生物量的影响

Figure 2 Effects of water and cadmium concentration on rape biomass

表3 水分和镉浓度对油菜不同器官生物量的影响(g)

Table 3 Effects of water and cadmium concentration on the biomass of different organs in rape (g)

器官 Organs	水分 Water content	镉浓度 Cadmium concentration					
		CK	C1	C2	C3	C4	C5
根 root	HW	6.67±0.52Aa	5.80±0.40Aa	5.13±0.81Aa	7.27±0.32Aa	6.10±0.90Aa	7.60±0.70Aa
	MW	4.83±0.32Aa	5.23±0.54Aa	4.40±0.36Aa	5.20±1.27Aab	5.13±0.81Aa	5.97±1.25Aa
	LW	5.53±0.90Aa	5.00±0.42Aa	3.97±0.29Aa	3.87±0.32Ab	4.87±0.09Aa	4.60±0.61Aa
茎 stem	HW	10.97±0.84Aa	10.93±0.59Aa	9.17±0.54Aa	11.30±1.03Aa	8.63±2.67Aa	10.60±0.72Aa
	MW	6.23±0.03Ab	7.60±1.10Ab	6.90±0.81Aa	6.10±1.76Ab	7.13±1.04Aa	7.27±0.20Ab
	LW	3.50±0.26Ac	4.60±0.31Ac	4.10±0.45Ab	4.23±0.63Ab	5.57±0.09Aa	2.93±1.24Ac
叶 leaf	HW	12.90±0.51Ba	13.27±1.38Ba	13.10±2.00Ba	15.93±2.12Ba	12.07±1.03Ba	21.73±1.02Aa
	MW	11.53±0.24Aa	12.23±0.96Aa	10.67±1.89Aa	9.73±1.49Aab	13.43±0.35Aa	13.53±1.24Ab
	LW	8.50±2.30Aa	12.60±1.60Aa	10.40±0.35Aa	13.13±1.67Ab	11.97±1.73Aa	13.33±0.93Ab

注:不同大写字母代表同一水分下不同镉浓度处理的显著性差异,不同小写字母代表同一镉浓度下不同水分处理的显著性差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different capital letters represent significant differences in cadmium concentrations under the same moisture, and different lowercase letters represent significant differences in water content at the same cadmium concentration ($P<0.05$). The same below.

C3条件下,LW处理的叶片SPAD值显著低于HW,与LW相比,HW处理的叶片SPAD值分别增加了38.8%与33.9%;而油菜处于蕾薹期时,不同水分和镉处理下的叶片SPAD值变化范围为97.47~147.97,但各处理之间并无显著性差异。

2.2.2 光合指标

分析不同土壤水分和镉浓度对油菜不同生育期光合指标的影响(表5)可知,不同水分和镉处理下,油菜蕾薹期各项光合指标明显高于苗期,原因为油菜蕾薹期生理活动旺盛,光合作用强烈。油菜处于苗期时,生长活动不旺盛,对不同水分和镉处理的响应并不明显,各项光合指标也未能呈现出一定的规律性。而油菜生长到蕾薹期时,土壤水分对油菜光合作用影响明显,随着土壤水分的降低,不同镉浓度处理的油菜的光合速率、蒸腾速率以及气孔导度整体上呈现出下降的趋势,其中,C5条件下LW处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度皆为最小值,分别为 $1.26\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.48\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.01\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相同土壤水

分条件下,不同镉浓度处理的油菜各项光合指标并无显著性差异,表明在供试土壤镉浓度下,油菜具备一定的耐受性。

表6检验结果表明,无论在苗期还是在蕾薹期,土壤水分对油菜的光合速率、蒸腾速率以及气孔导度影响显著,而镉浓度对其无显著影响,说明在供试土壤镉浓度下,土壤水分是影响油菜光合作用的主导因素。

2.3 不同水分和镉处理对油菜产量的影响

2.3.1 单株有效角果数

从表7可知,角果数随着土壤水分的增加而增加,因镉浓度处理的不同而呈现出一定的差异性,C3处理下,土壤水分的增加对油菜角果数增加效果显著,与LW相比,HW和MW处理下的油菜角果数分别增加245.67%和120.66%,其他镉浓度下不同土壤水处理的角果数差异不显著。相同土壤水分下,不同镉浓度处理下油菜角果数无显著性差异。表明在供试的镉浓度条件下,土壤水分对油菜单株有效角果数起主导作用。

表4 水分和镉浓度对油菜叶片SPAD值的影响

Table 4 Effects of water and cadmium concentration on chlorophyll in rape

镉浓度 Cadmium concentration	苗期 Seedling stage			蕾薹期 Buds stage		
	HW	MW	LW	HW	MW	LW
CK	37.77±5.32Aa	34.70±2.85Ba	38.77±6.53Aa	97.47±5.05Aa	124.43±14.03Aa	126.73±9.69Aa
C1	36.87±4.85Aa	33.83±3.20Ba	26.57±3.81Ab	114.27±16.39Aa	121.80±6.73Aa	141.50±11.67Aa
C2	46.67±6.98Aa	36.03±1.64Ba	29.70±7.03Aa	102.80±11.99Aa	124.37±7.96Aa	111.03±7.82Aa
C3	43.53±1.98Aa	32.30±2.75Bb	32.50±2.73Ab	103.80±6.14Aa	106.40±16.77Aa	136.63±13.55Aa
C4	39.17±6.54Aa	33.30±3.76Ba	31.43±4.67Aa	112.60±9.65Aa	116.30±1.57Aa	147.97±4.36Aa
C5	56.10±12.00Aa	63.13±13.93Aa	45.60±14.24Aa	119.03±15.37Aa	110.03±8.28Aa	131.07±12.12Aa

表5 水分和镉浓度对油菜光合指标的影响

Table 4 Effects of water and cadmium concentration on photosynthetic index of rape

生育期 Growth period	镉浓度 Cadmium concentration	光合速率 Pn/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			蒸腾速率 Tr/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			气孔导度 Gs/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		
		HW	MW	LW	HW	MW	LW	HW	MW	LW
苗期 Seedling stage	CK	2.40±0.21Aa	3.72±1.06Aa	3.21±1.60Aa	0.13±0.06Aa	0.56±0.14Aa	0.29±0.08Aa	0.05±0.00Aa	0.07±0.04Aa	0.03±0.02Aa
	C1	4.95±1.14Aa	5.39±0.61Aa	2.19±0.27Aa	0.18±0.15Aa	0.39±0.06Aa	0.19±0.07Aa	0	0.04±0.02Aa	0.02±0.02Ab
	C2	3.35±0.52Ab	7.30±1.26Aa	2.04±0.08Ab	0.20±0.07Ab	0.65±0.13Aa	0.04±0.01Ab	0.03±0.01Ab	0.09±0.04Aa	0.01±0.00Ab
	C3	5.03±1.24Aa	4.57±0.70Aa	2.02±0.27Aa	0.21±0.14Aa	0.22±0.08Aa	0.06±0.04Aa	0.03±0.05Aa	0.02±0.01Aa	0.01±0.01Aa
	C4	6.34±0.26Aa	3.58±0.16Ab	3.01±0.23Ab	0.51±0.01Aa	0.19±0.04Ab	0.14±0.04Ab	0.05±0.01Aa	0.02±0.01Ab	0.01±0.01Ab
	C5	4.51±1.39Aa	7.60±1.16Aa	3.03±0.56Aa	0.63±0.14Aa	0.32±0.09Ab	0.11±0.06Ab	0.07±0.03Aa	0.04±0.03Aa	0.01±0.01Aa
蕾薹期 Buds stage	CK	7.27±1.61Aa	5.26±0.68Aa	3.09±0.27Aa	1.12±0.22Aa	1.36±0.19Aa	1.06±0.12Aa	0.09±0.03Aa	0.05±0.02Ab	0.03±0.01Ab
	C1	8.08±0.63Aa	4.92±0.80Ab	3.00±0.65Ab	1.68±0.10Aa	0.83±0.14Ab	1.11±0.18Ab	0.12±0.04Aa	0.02±0.01Ab	0.03±0.01Ab
	C2	7.51±2.30Aa	4.63±0.88Aa	1.91±0.66Aa	1.42±0.44Aa	1.42±0.16Aa	0.66±0.19Aa	0.07±0.05Aa	0.05±0.01Aa	0.02±0.01Aa
	C3	6.31±1.11Aa	7.24±0.97Aa	2.18±0.36Ab	1.46±0.30Ab	1.71±0.17Aa	0.75±0.14Ab	0.06±0.03Aa	0.06±0.02Aa	0.02±0.01Aa
	C4	7.82±0.65Aa	3.41±1.05Ab	2.26±0.49Ab	1.80±0.12Aa	0.75±0.38Ab	0.70±0.10Ab	0.07±0.02Aa	0.03±0.02Ab	0.02±0.01Ab
	C5	6.16±1.56Aa	3.23±1.43Aa	1.26±0.19Aa	1.40±0.30Aa	1.14±0.37Aa	0.48±0.06Aa	0.05±0.03Aa	0.04±0.03Aa	0.01±0.00Aa

表6 水分和镉浓度对光合生理指标的影响效应检验(P 值)Table 6 Inter-subject effect test for photosynthetic characteristics(P values)

处理 Treatments	SPAD 值		光合速率 P_n		蒸腾速率 Tr		气孔导度 G_s	
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Buds stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Buds stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Buds stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Buds stage
水分	0.083	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
镉浓度	0.005	0.578	0.189	0.299	0.064	0.694	0.066	0.193
水分×镉浓度	0.899	0.570	0.014	0.594	<0.001	0.054	0.010	0.050

表7 水分和镉浓度对油菜产量的影响

Table 7 Effects of water and cadmium concentration on rape yield

镉浓度 Cadmium concentration	角果数 Pods numbers			产量 Yield/g·株 ⁻¹		
	HW	MW	LW	HW	MW	LW
CK	170.33±9.53Aa	136.00±19.31Aa	66.50±4.50Ab	13.77±0.12Aa	11.27±0.73Ab	6.30±0.40Ac
C1	183.33±18.56Aa	141.33±12.67Aa	78.67±11.62Ab	12.70±0.76Aa	10.87±0.70Aa	7.17±0.29Ab
C2	179.67±9.91Aa	141.67±15.90Aa	43.00±6.66Ab	13.43±0.62Aa	9.17±1.32Ab	5.50±0.49Ac
C3	212.00±11.27Aa	135.33±5.21Ab	61.33±4.63Ac	13.03±0.83Aa	11.50±1.00Aa	5.85±1.15Ab
C4	184.33±19.55Aa	151.33±13.91Aa	96.00±28.15Ab	12.93±0.49Aa	9.87±1.64Aab	6.97±0.91Ab
C5	149.33±4.48Aa	143.00±9.29Aa	39.33±16.13Ab	6.60±0.71Bb	10.40±0.85Aa	5.50±0.00Ab

2.3.2 单株有效产量

由表7可知,土壤水分的增加,对油菜有明显的增产效应。CK和C2条件下,各水分处理差异显著,与LW相比,HW和MW处理下油菜产量分别增加了118.52%和78.84%、144.24%和66.67%。不同水分条件下,各镉浓度处理的油菜产量差异不明显。HW条件下,与CK相比,C5处理下的油菜产量降低了52.07%,可能因为水分充足条件下,油菜根系对土壤镉吸收量较多,而植物体内高浓度的镉(30 mg·kg⁻¹)对油菜产生了毒害作用,进而影响到油菜产量。

表8检验结果表明,土壤水分对油菜的角果数及产量有显著影响,镉浓度对油菜产量影响显著,土壤和水分之间不存在耦合效应,说明提高土壤水分及降低土壤镉浓度,有益于油菜产量的提高。

3 讨论

植物生长、生物量在重金属污染土壤植物修复过程中具有重要意义,不仅影响修复效率,而且是对其

所处环境的综合表征^[16]。本试验研究发现土壤水分的降低抑制油菜株高的生长和生物量的积累,因为土壤水分的降低,会造成根系吸水困难,使植物细胞缺水,从而使其分裂,生长受到抑制^[17];而在供试土壤镉浓度下,镉对油菜的株高和生物量影响并不一致,在镉浓度为30 mg·kg⁻¹时,对油菜株高抑制作用明显,而在此镉浓度下,对油菜的生物量起到了促进作用,具体原因还有待进一步研究。

光合作用是植物叶片对光能吸收、传递和利用的过程,是植物生产有机物的基础,也是植物生产力构成的最主要因素,而土壤水分是影响光合作用的最重要的因子之一^[18]。当土壤水分降低时,会导致植物叶片气孔关闭、蒸腾速率降低,致使叶片净光合速率下降^[19-20]。充足的叶绿素和完整的叶绿体结构是光合作用顺利进行的基础。土壤水分的缺失可以破坏叶绿体超微结构^[21]、影响合成叶绿素几种酶的活性,阻止叶绿素合成^[22],进而影响植物的光合作用。镉胁迫使叶绿体酶活性失调,导致叶绿素分解加快,含量下降;同时,由于镉局部积累过多,与叶绿体中蛋白质上的-SH结合或取代其中的Fe²⁺、Zn²⁺和Mg²⁺等,致使叶绿素蛋白质中心离子组成发生变化而失活^[11, 24-26]。此外,Baryla等^[27]研究结果表明,Cd胁迫显著降低了油菜叶表皮气孔密度和气孔导度,以致降低叶绿体中二氧化碳的可用性,进而抑制油菜的光合作用。本试验

表8 水分和镉浓度对角果数和产量的影响效应检验(P 值)Table 8 Inter-subject effect test for pods and yield(P values)

处理 Treatments	角果数 Pod numbers	产量 Yield
水分	<0.001	<0.001
镉浓度	0.066	0.001
水分×镉浓度	0.392	0.030

研究表明,油菜蕾薹期的叶绿素含量及各项光合指标(光合速率、蒸腾速率、气孔导度)明显高于苗期,在蕾薹期时 MW 和 LW 处理的叶绿素含量反而高于 HW 处理,可能因为水分胁迫与土壤镉复合影响下,油菜发生了一系列复杂的变化,但具体原因还有待进一步研究。在 C5 条件下 LW 处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度皆为最小值,分别为 $1.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.48 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.01 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明低水高镉复合作用对油菜光合作用产生了毒害效应。

水分胁迫影响植物的生理指标和形态结构,进而影响其生长状况和产量^[28-29]。重金属镉通过影响植株体内的碳水化合物代谢过程来影响其生长发育^[30]。本试验研究表明,随着土壤水分的增加,油菜有效角果数和产量增加效果明显,而同一水分条件下的不同镉浓度处理油菜有效角果数和产量并无显著性差异,可能因为油菜对水分比较敏感,而在供试镉浓度下,油菜具有一定的抗受性,有效角果数和产量未受到影响。

综上所述,油菜对镉具有较强的耐受能力,在 $30 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉浓度下也可顺利生长,株高、生物量、光合作用及产量几乎不受影响。

4 结论

(1)油菜在 $30 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉浓度下,株高、生物量、光合作用及产量几乎不受影响,是镉污染农田理想的修复植物。

(2)土壤水分对油菜株高和生物量影响明显,随着土壤水分的增加,油菜株高、生物量明显增加,在供试镉浓度下,镉对株高、生物量的影响弱于土壤水分,当镉浓度达到 $30 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对油菜株高抑制作用明显。

(3)水分和镉处理对不同生育期油菜光合作用的影响程度为蕾薹期>苗期。土壤水分的增加对油菜蕾薹期光合速率、蒸腾速率、气孔导度有促进作用。

(4)随着土壤水分的增加,油菜增产效应明显,而在供试镉浓度下,有效角果数和产量并无显著性差异。

参考文献:

- [1] Ganesh K S, Sundaramoorthy P, Nagarajan M. Organic soil amendments: Potential source for heavy metal accumulation[J]. *World Scientific News*, 2015, 10:28-39.
- [2] 辛艳卫,梁成华,杜立宇,等.不同玉米品种对镉的富集和转运特性[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5):839-846.
- [3] 田小琴,李卓,刘永红.成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(3):496-506.
- [4] Nakadaira H, Nishi S. Effects of low-dose cadmium exposure on biological examinations[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 308:49-62.
- [5] Hart J J, Welch R M, Norvell W A. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. *New Phytologist*, 2006, 172(2):261-271.
- [6] 沈振国,刘友良,陈怀满.螯合剂对重金属超量积累植物 *Thlaspi caerulescens* 的锌、铜、锰和铁吸收的影响[J]. *植物生理学报*, 1998, 24(4):340-346.
- [7] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(4):1427-1433.
- [8] 王激清,茹淑华,苏德纯.用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(1):67-70.
- [9] 徐素琴,程旺大.油菜、芥菜萌芽与幼苗生长的耐镉性差异[J]. *浙江农业科学*, 2005, 1(6):436-438.
- [10] 金美芳,林明凤,施翔.镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J]. *种子*, 2011, 30(10):70-73.
- [11] 江海东,周琴,李娜,等. Cd 对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(1):39-43.
- [12] 王兴明,徐俊芳,李晶,等.镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1):102-106.
- [13] TIAN Xiao-qin, LI Zhuo, LIU Yong-hong. Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):496-506.
- [14] SHEN Zhen-guo, LIU You-liang, CHEN Huai-man. Effects of chelators EDTA and DTPA on the uptake of zinc, copper, manganese and iron by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1998, 24(4):340-346.
- [15] WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Selection of a hyperaccumulator for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1):67-70.
- [16] XU Su-qin, CHENG Wang-da. Differences in response to Cd stress between rape seed and mustard during periods of germination and seedling growth[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2005, 1(6):436-438.
- [17] JIN Mei-fang, LIN Ming-feng, SHI Xiang. Effects of Cd stress on seed germination and root growth of *Brassica Napus*[J]. *Seed*, 2011, 30(10):70-73.
- [18] JIANG Hai-dong, ZHOU Qin, LI Na, et al. Effect of Cd on the growth and physiological characteristics of rape seedlings[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1):39-43.
- [19] WANG Xing-ming, TU Jun-fang, LI Jing, et al. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1):102-106.
- [20] XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):839-846.

- [13] Xue Q W, Zhu Z X, Musick J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. *J Plant Physiol*, 2006, 163: 154-164.
- [14] Davies W J, Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42: 55-76.
- [15] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1973, 24: 519-570.
- [16] Evangelou M W H, Robinson B H, Günthardt-Goerg M S, et al. Metal uptake and allocation in trees grown on contaminated land: Implication for biomass production[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, 15(1): 77-90.
- [17] Jing M, Gao F L, Wang G B, et al. The effects of soil water stress on growth and biomass allocation of *Ginkgo biloba*[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences)*, 2005, 29(3): 168-173.
- [18] Li S H, Xu X, He J, et al. Study on photosynthetic physiology characteristic of *Cynanchum komarovii* under water stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(1): 100-104.
- [19] 朱万泽, 薛建辉, 王金锡. 台湾桫欏木种源对水分胁迫的光合响应及其抗寒性[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 170-181.
ZHU Wan-ze, Xue Jian-hui, WANG Jin-xi. Effects of water stress on net photosynthesis of *Alnus Formosana* provenances and its drought tolerance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 170-181.
- [20] 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1386-1396.
PEI Bin, ZHANG Guang-can, ZHANG Shu-yong, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [21] 帕提古力·麦麦提, 巴特尔·巴克, 海利力·库尔班. 沙尘胁迫对阿月浑子光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6450-6459.
Patigul MAMAT, Batur BAKE, Halil KURBAN. Influence of dust stress on the photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pistacia vera* L.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6450-6459.
- [22] 王振夏, 魏 虹, 吕 茜, 等. 枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化光合及叶绿素荧光的响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 888-897.
WANG Zhen-xia, WEI Hong, LÜ Qian, et al. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings to submergence and drought alternation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 888-897.
- [23] Padmaja K, Parsad D D K, Parsad A R K. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate[J]. *Photosynthetica*, 1990(24): 399-404.
- [24] 孙 新, 杨志敏, 徐朗莱. 镉诱导油菜叶片氧化胁迫及硫化物的络合作用[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1506-1511.
SUN Xin, YANG Zhi-min, XU Lang-lai. Cadmium-induced peroxidation and production of sulfur-related complex in the leaf of oilseed rape[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(9): 1506-1511.
- [25] 孙 新, 杨志敏, 徐朗莱. 缺硫条件下油菜对镉毒害的敏感性[J]. *南京农业大学学报*, 2003, 26(4): 56-59.
SUN Xin, YANG Zhi-min, XU Lang-lai. Sensitivity of oilseed rape to cadmium under the sulfur deficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2003, 26(4): 56-59.
- [26] 徐秋曼, 陈 宏, 程景胜, 等. 镉对油菜叶细胞膜的损伤及细胞自身保护机制初探[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(4): 235-237.
XU Qiu-man, CHEN Hong, CHENG Jing-sheng, et al. Injure of cadmium on cell membrane of rape leaf and its protection mechanism[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 235-237.
- [27] Baryl A, Carrier P, Franck F, et al. Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil: Causes and consequences for photosynthesis and growth[J]. *Planta*, 2001(5/6), 696-709.
- [28] 申孝军, 孙景生, 刘祖贵, 等. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 26(12): 58-65.
SHEN Xiao-jun, SUN Jing-sheng, LIU Zu-gui, et al. Effects of low irrigation limits on yield and grain quality of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 26(12): 58-65.
- [29] 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 150-160.
SHEN Xiao-jun, SUN Jing-sheng, ZHANG Ji-yang, et al. Effects of different water treatment on yield and water use of transplanted cotton following wheat harvest[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 150-160.
- [30] 鲁先文, 丁时和. Cd、Pd污染对油菜种子萌发及幼苗生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(6): 124-127.
LU Xian-wen, DING Shi-he. Effect of cadmium, lead pollution on seed germination and biomass of rape[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(6): 124-127.