

酸雨对土壤酸化和油菜中后期生长发育的影响

梁 骏^{1,2}, 郑有飞¹, 李 璐¹, 麦博儒¹

(1.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 2.广西大学农学院, 广西 南宁 530004)

摘 要:油菜中后期生长发育与产量品质的形成有密切的关系。通过大田栽培喷淋和土柱淋溶试验,研究油菜生长中后期间不同 pH 模拟酸雨对土壤酸化、植株生长、花果繁育及与产量品质形成有关的某些生理指标影响效应。结果表明,土壤酸化程度与酸雨 pH 值关系密切;土壤缓冲有减缓土壤酸化和油菜大田土壤生态环境恢复的作用。酸雨 pH<3.5,土壤 pH 受酸雨酸度控制,土壤缓冲性能减弱,酸化加强,K、Na、Ca、Mg 等盐基离子淋失严重,N 素吸收受阻。酸雨明显抑制了油菜地上部分生长:株高、叶面积、单叶面鲜重随酸雨酸度增加而下降;叶片表面灼伤并出现褐斑;叶绿素减少,光合速率降低;花受害百分率高达 68.22%,花序顶端萎缩,花瓣皱折,有效角果数减少,落花落果增加。酸雨胁迫下,油菜细胞质膜透性、丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)活性明显升高,过氧化氢酶(CAT)的活性出现明显波动,对产量品质形成产生不利的影响。

关键词:酸雨;油菜;土壤酸化;中后期

中图分类号:X517 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1043-08

Effects of Acid Rain upon Soil Acidization and Growth/Development of Rape Crop in Its Middle-late Stages

LIANG Jun^{1,2}, ZHENG You-fei¹, LI Lu¹, MAI Bo-ru¹

(College of Environmental Science and Technology, Nanjing University of Information technology, Nanjing 210044, China; Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: There is a close relationship between growth/development in its middle-late stages and yield/quality formation of rape. By spaying and soil columns leaching experiment with different pH values of AR, the impact of simulated acid rain on soil acidification, plant growth, flowers and pods breeding and some biochemical indexes which related to yield/quality formation were studied under the natural field ecological conditions in its middle-late stages of rape. The results showed that soil acidification greatly related to pH value of acid rain. Soil buffering played a dominant role in the soil acidization and the soil ecological environment recovering in rape field. pH<3.5 (AR) could restrain the pH value of soil, reduce the soil amortizing, boost the soil acidification, increase K, Na, Ca and Mg ions release from soil in amount, impede the plant absorbing nitrogen, and the aerial growth of rape was suppressed at the same time. With the acidity of acid rain elevating, the plant height, leaf areas and fresh weights diminished. Surface of leaf burned and some brown spots appeared. More chloroplast of rape was damaged, which resulted in photosynthetic rate reducing. The flower damage rate was up to 68.22%, the top of inflorescences occurred atrophying, some petals crinkledz, pods decreased, large amount of flower/fruitlet dropped off. Under the acid rain stress, the cell plasma membrane permeability, malonic aldehyde (MDA) contents and peroxidase (POD) activity would increase correspondingly. The fluctuation of catalase (CAT) activity occurred in lower pH value of acid rain. In conclusion, the acid rain had adverse influences on the yield/quality formation by impacting growth /development in its middle-late stages of rape.

Keywords: acid rain; rape; soil acidification; middle-late stages

酸雨(AR)对农作物产量和品质形成的影响已越来越受到人们的关注,研究重点也逐渐由前期转入中

后期^[1-4]。酸雨除直接致害作物发育器官和果实,降低农产品产量和品质外,还通过对农作物中后期生长发育过程的危害作用而间接影响到农产品产量和品质的形成。酸雨加速土壤酸化后,可促使土壤中盐基的淋失及某些毒性元素(铝、锰等)的释出和活化,从而伤害植物根系,阻碍植物对营养物质的输送和吸收^[5-7]。酸雨通过气孔和细胞间隙进入植物细胞体,可使细胞内基

收稿日期:2007-09-20

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403705;江苏省“333 工程”资助项目;江苏省六大人才高峰资助项目(2004)

作者简介:梁 骏(1957—),男,广西北海人,在读博士生,副教授,主要从事环境生态等方面的研究。E-mail:LJ@gxu.edu.cn

责任作者:郑有飞

质酸化,结构功能受损^[8]。酸雨可抑制作物生长,灼伤植物叶片,大量损伤叶绿体细胞,使电子传递、ATP和 NADH 生成和碳代谢受阻,从而引起光合效率的减低^[9]。酸雨可引起植株体内细胞膜脂的过氧化作用增强,质膜透性增加,各项生理指标也发生相应变化^[10]。

南京市江北工业区是南京市主要的酸雨分布区,酸雨频率和强度均高于其他区域,高密度、高强度酸沉降对该地区产生较大的影响作用^[11]。而该地区又是南京双低油菜的主要栽培区,该地的油菜产业和品种改良在长江流域的农业及国民经济发展中均占据重要的地位^[12]。由于双低油菜的品质受不同酸度的酸雨影响较大,因此探索酸雨区内酸沉降对双低油菜产量品质的作用一直是重要研究课题之一^[13]。不少学者曾分别单独研究了酸雨与土壤酸化和前期农作物生长发育的关系^[14、15],但对与产量和品质形成密切相关的中后期生长时段以及土壤-植物-大气系统综合作用分析较为少见。为此,本文以南京江北双低油菜栽培区为试验地点,通过模拟酸雨大田喷洒和土柱淋溶相结合进行试验,着重研究土壤酸化过程及其对中后期双低油菜生长发育的综合影响作用,以期为油菜的优质丰产栽培研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和作物

试验田位于南京江北区南京信息工程大学北门外(北纬 32°14′,东经 118°42′,海拔 21.9 m),供试土壤为水稻土,质地轻粘,结构基本均匀一致,其基本理化性状见表 1。

油菜品种为陕西省杂交油菜研究中心选育的双低杂交油菜新品种秦优七号(*Brassica napus* L.)。2005 年 9 月中旬播种,10 月下旬移栽。2 月 20 日至 3 月 18 日为蕾薹期,3 月 19 日至 4 月 18 日为开花期,4 月 19 日至 5 月 23 日为角果发育成熟期,全生育期 258 d。

1.2 模拟酸雨的配制

根据南京信息工程大学环境监测站 2004 年酸雨监测资料中硫酸根与硝酸根离子含量的摩尔比($\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-=4.73:1$),用 PHS-25B 型酸度计配成 pH 值为 1.5、2.5、3.5、4.5、5.6 的混合模拟酸雨,按监测站所测定的酸雨离子成分比例并参考檀满枝等人的研究结果^[16],在模拟酸雨中相应配入某些主要离子成分。混合后的模拟酸雨标号分别对应为:AR1、AR2、AR3、AR4、AR5,CK 用 pH6.8 的一次去离子水,用 ICS-2000(美国 DIONEX 公司)离子色谱仪测定酸雨中各离子成分见表 2。

1.3 大田喷淋试验

大田面积为 32 m×21 m,以 6 个处理、3 个重复,用裂区设计方法划分 18 个小区。小区面积 4 m×2.5 m。第一次喷淋模拟酸雨时间为 2006 年 3 月 10 日,每小区喷量 1 500 mL。以后每隔 5 d 与第一次同量进行重复喷淋,至油菜收获前 2 周(5 月 10 日)结束,共喷淋了 13 次。从抽薹至终花期间(3 月 10 日—4 月 25 日)每隔 5 d 连续测定油菜的株高、叶面积、叶单位面积鲜重。4 月 10 日—4 月 25 日测定叶绿素含量、光合速率和各项生理指标。在初花至终花期间(3 月 30 日—4 月 10 日)每隔 24 h 连续观察花受害情况,并计算花受害百分率;初花至成熟期间(3 月 30 日—5 月 10 日)每隔 5 d 连续记载单株有效角果数。其中,株高测定采

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soil													
pH (H ₂ O)	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷	交换性铝	交换性锰	阳离子交换量	交换性盐基/mmol·kg ⁻¹				
	g·kg ⁻¹					mg·kg ⁻¹		cmol·kg ⁻¹	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	总量
5.54	57.02	2.03	0.89	18.58	13.44	10.36	16.45	24.12	11.9	7.6	39.4	20.8	79.7

表 2 混合模拟酸雨的离子浓度(mmol·L⁻¹)

Table 2 Ion concentrations in mixture simulated acid rain(mmol·L ⁻¹)												
标号	pH	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
CK	6.8	0.198	0.035	0.033	0.033	0.113	0.017	0.597	0.944	0.048	0.161	
AR1	1.5	0.622	0.002	0.101	0.032	0.195	0.081	0.762	0.745	11.368	19.856	
AR2	2.5	0.470	0.005	0.087	0.034	0.178	0.055	0.714	0.735	5.625	10.853	
AR3	3.5	0.363	0.014	0.065	0.037	0.158	0.038	0.694	0.734	2.266	8.751	
AR4	4.6	0.314	0.015	0.048	0.038	0.148	0.026	0.661	0.791	1.635	5.583	
AR5	5.6	0.264	0.019	0.044	0.037	0.126	0.020	0.634	0.887	0.252	1.137	
监测站 2004 年测值	4.4	0.345	0.017	0.059	0.035	0.149	0.036	0.668	0.825	1.898	5.814	

用每小区对角线五分法选取 10 株有代表性植株,以测量其底部到顶端生长点的高度为植株高度;叶面积用 Area Meter AM300(ADC Bio-Scientific Limited,UK)叶面积测定仪测定,以每小区 50 片代表叶面积的平均值来表示;叶单位面积鲜重以每小区 50 片 1 cm²叶面上的鲜叶片重量平均值来表示;花受害百分率参考张耀民的测定方法^[8],以目测估计受害花瓣面积和花数目的百分率为量度;单株有效角果数以各试验小区的单株饱满结实无空秕的果荚数目来确定;光合速率和细胞质膜透性测定采用改良半叶法和电导法^[17],叶绿素、MDA、POD 测定参照李合生植物生理生化实验^[18]。CAT 动态变化测定(4 月 10 日)采用略加修改的梁禅娟试验方法^[19],以试验大田中同一区块长势基本相同的 18 株未受任何处理原株,3 株 1 组作好标记,分别进行不同酸雨喷淋处理,按 0、3、24、48、72、96 h 时间测定 CAT 活性变化。

1.4 淋溶试验

每 5 d 一次,从大田喷后 24 h 以对角线五分法取土样,按小区为单位,土壤自然发生层分 A、B 层取土,土样铺于牛皮纸上自然风干,捏碎并经 18 目筛,使土壤粒径<10 mm。然后装入内径 6.5 cm,高 80 cm 的圆形塑管,土柱高 60 cm,其中由上至下 0~30 cm 为 A 层土,30~60 cm 为 B 层土,土柱重约 1.5 kg。土柱底部封 2 层滤纸挟带 2 层细棉纱布,上部铺 1 层玻璃纤维防土粒溅出。酸雨淋溶量根据表 3 南京历年月平均降水量资料,按以下公式估算:

$$L=0.025 \pi D^2 R$$

式中:L 为酸雨淋溶量,mL;R 为月平均降水量,mm;D 为土柱内径,cm。

以油菜生长期(3 月—5 月)各月平均降雨量所对应的淋溶量体积,将模拟酸雨一次性滴加入土柱中,淋溶速率参照许中坚等人的土柱实验方案,控制在 15 mL·h⁻¹ 范围^[20]。24 h 后收集土壤淋滤液,标记好收集时间,用 PHS-25B(上海精密科学仪器有限公司)型酸度计直接测定滤液的 pH 值。K 和 Na 的测定采用彭瑞兴改进的火焰分光光度 FAAS 法^[21],另分取 25 mL 淋滤液样品于 25 mL 比色管中,加 0.5 mL 锶盐溶液,摇匀后,再用 GJ10-3510 型原子吸收分光光度计

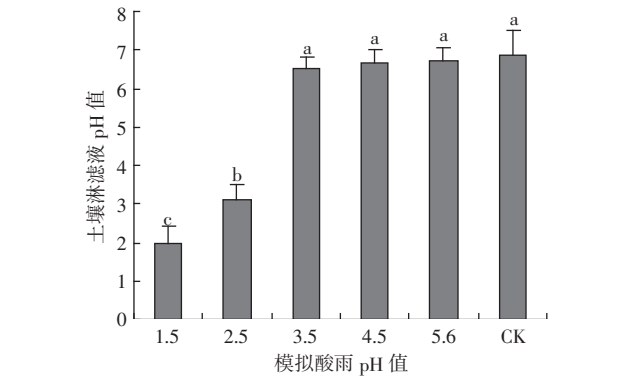
直接测定 Ca 和 Mg。每次淋溶试验前,均取过筛风干 A、B 层土样各 10 g,加入 1 mol·L⁻¹ KCl(pH 5.8)25 mL,振荡 30 min 并放置 30 min 后,用酸度计直接测定土壤 pH 值^[22]。

2 结果分析

2.1 模拟酸雨淋溶后土壤的酸化状况

由于土壤自身对酸雨具有较强的缓冲能力,因此经酸雨淋溶后的土柱淋滤液 pH 值随酸雨酸度的不同而各有不同。肖慈英等认为,酸雨酸度增强并超过土壤环境容量,则土壤缓冲性能减弱,变化向酸化发展。反之,酸雨的酸度减弱,土壤缓冲性能加强^[23]。由图 1 可知, pH<3.5 模拟酸雨淋溶后,24 h 土壤淋滤液 pH 值下降至 2.0~3.0 之间,表明此时土壤淋滤液受模拟酸雨的酸度控制,土壤出现明显酸化。随着酸雨 pH 升高,土壤淋滤液 pH 值迅速升高,当酸雨 pH>3.5 后,滤液 pH 值上升幅度迅速减缓并趋于稳定,可见此时应是土壤缓冲作用超过酸雨的胁迫作用而占主导地位,滤液 pH 呈高稳状态。因而在以较高 pH 值(pH>3.5)的模拟酸雨淋洗土壤时,阳离子交换反应是土壤缓冲的主要过程,由此产生的初级缓冲消耗大部分进入土壤的 H⁺,使淋滤液 pH 值高于酸雨 pH 值并保持相对稳定。酸雨的酸度较高时(pH≤3.5),大量的 H⁺进入土壤并破坏了初级缓冲体系,淋滤液的 pH 值也随之下降。此外,酸雨喷淋后的油菜大田土壤 pH 值总体均高于酸雨 pH 值(图 2),但由于土壤缓冲和盐基离子的交换作用,和喷前大田土壤本底值相比,在喷后 0~5 d 的初始时期,pH≥4.5 的土壤 pH 值迅速升高;pH 3.5~pH 4.5 的土壤 pH 在本底附近波动;pH<3.5 的土壤 pH 迅速下降;各 AR 处理土壤 pH 间的差异逐渐加大,并出现伴随酸雨 pH 降低而降低的规律。时间增至 5~15 d,各处理间土壤 pH 值逐渐聚集,差异逐渐缩小,AR3(pH 3.5)、AR4(pH 4.5)的土壤 pH 迅速上升,变化和 AR5(pH 5.6)初始时期一致,但位相落后约 10 d 左右。时间增至 15~35 d,各处理土壤 pH 合而为一并趋于同一土壤 pH 值变化,各处理间差异已不明显。

表 3 南京市历年月平均降水量和模拟酸雨的淋溶量体积(1951—2004)													
Table 3 Monthly mean precipitation in Nanjing and volume of simulated acid rain leaching(1951—2004)													
项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
降水量/mm	37	50	78	86	99	173	185	127	82	56	51	29	1 053
淋溶量/mL	122	164	260	284	327	573	615	423	274	186	171	97	3 495



注:以上误差线表示标准误,采用 LSD 进行多重比较方差分析,不同小写字母表示 5% 显著水平,下同。

Note:On above, error bars show standard errors. Significance of difference was tested by LSD. Different alphabet in each column indicates the significant level of 5%,the same as below

图 1 不同模拟酸雨 pH 下土柱淋滤液 pH 值

Figure 1 Filtrate pH values in soil columns with different acid rain pH values

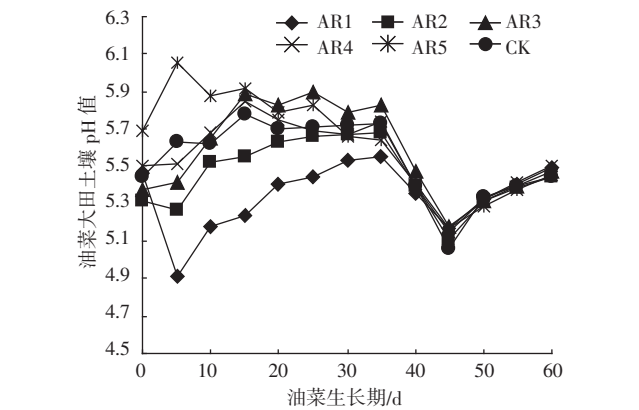


图 2 油菜大田土壤 pH 值随酸雨喷淋时间的变化

Figure 2 Changes ofn pH in rape plantation soil with times

2.2 不同 AR 处理下土壤盐基离子溶出量

土壤酸化通常和盐基离子的淋溶和消耗相联系。伴随酸雨 pH 值的下降和外源质子的进入,土壤盐基的淋溶量相应加大,结果导致植物根系中硝酸还原酶(NR)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性下降,硝酸盐同化过程和氨同化过程受阻,氮素营养吸收能力明显减弱。表 4 中,酸雨 pH<4.5 的 K、Na、Ca、Mg 盐基离子的溶出量随酸雨 pH 值的下降而迅速升高,其中在 AR1 处,各盐基离子相对值为 CK 的 118.7%~158.5%($P<0.01$),差异极端显著。pH3.5~4.5 范围是盐基溶出低值区,AR3 的 Ca、Mg 溶出相对值降至 65.0%和 81.4%($P<0.01$),K 降至 93.7%($P<0.05$),差异均达极显著和显著水平,分析弱酸性降水可能有利于土壤盐基离子的保持。酸雨 pH>4.5, K、Na、Ca、Mg 各盐基离子的溶出量虽略有上升,但与 CK 对照差异已不明显。

2.3 模拟酸雨对油菜中后期生长发育的影响

2.3.1 油菜植株高度、叶面积和外部形态的变化

由表 5 可见,AR4 处油菜株高受抑最小,其高度达 186.69 cm,与 CK 的 177.20 cm 相比,相对值为 105.4%($P<0.05$)。随着酸雨酸度的增加,油菜株高开始降低,至 AR1,株高降至 159.23 cm,相对值降至 89.7%($P<0.01$),这和 Wood,Farenbaugh 等认为酸雨会影响植物株高的正常生长,且酸度低于 pH3.0 时影响显著的结论一致^[24、25]。油菜叶面积也随酸雨 pH 降低而逐步缩小,酸雨 pH>3.5 时,对作物叶片不产生直接伤害作用,但 pH<3.5 的酸雨喷淋后,油菜叶面积相对值下降至 70.9%和 85.2%;叶鲜重下降 40.0%~82.9%,差异极端显著。此时油菜叶片均出现可见性伤斑,叶面颜色发黄,伴有少量黄白色小斑点,并以新生叶片居多。随着酸雨酸度的增强,叶表面灼伤面积加大,黄白色小斑变为黄褐色大斑点且相互连成片状,

表 4 不同 AR 处理下油菜土壤 K、Na、Ca、Mg 盐基离子溶出量									
Table 4 Dissolution of K Na Ca Mg from soil with different AR treatments									
处理	酸雨 pH	K		Na		Ca		Mg	
		溶出量/ mg·kg ⁻¹	相对值/%	溶出量/ mg·kg ⁻¹	相对值/%	溶出量/ mg·kg ⁻¹	相对值/%	溶出量/ mg·kg ⁻¹	相对值/%
CK	6.8	5.72±0.77	100.0	5.27±1.28	100.0	23.26±10.11	100.0	8.18±0.68	100.0
AR1	1.5	7.37±2.10**	128.9	6.25±0.29**	118.7	36.88±9.96**	158.5	10.24±1.16**	125.1
AR2	2.5	6.25±2.14*	109.3	5.94±0.30**	112.8	26.03±12.78**	111.9	8.07±0.39	98.6
AR3	3.5	5.36±0.59*	93.7	5.68±0.49*	107.9	15.11±7.62**	65.0	6.66±0.08**	81.4
AR4	4.5	5.76±0.65	100.7	5.62±0.57*	106.7	18.80±6.64**	80.8	7.53±0.05*	92.1
AR5	5.6	6.29±0.81**	110.1	5.87±0.50**	111.4	23.47±5.64	100.9	8.01±0.57	98.0

注:表中数据均是平均数±标准误,与 CK 进行差异显著性检验,显著性水平:* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$,下各表同。

Significance of difference was tested with CK, Level of significance: * means $P<0.05$,** means $P<0.01$,the same as below

表 5 不同 AR 处理下油菜株高、叶面积、叶鲜重的变化

Table 5 Change of plant height, leaf areas and fresh weight of rape with different AR treatments							
处理	酸雨 pH	株高		叶面积		叶单面鲜重	
		单株高/cm	相对值/%	单叶面/cm ²	相对值/%	单叶重/g·cm ⁻² FW	相对值/%
CK	6.8	177.20±1.63	100.0	35.43±0.36	100.0	0.035±0.003	100.0
AR1	1.5	159.23±1.86**	89.7	25.12±0.20**	70.9	0.014±0.001**	40.0
AR2	2.5	162.26±1.45*	91.6	30.19±0.37**	85.2	0.019±0.005**	54.3
AR3	3.5	173.93±1.61	98.2	32.77±0.23*	92.5	0.029±0.002**	82.9
AR4	4.5	186.69±2.04*	105.4	33.78±0.46	95.3	0.033±0.002*	94.3
AR5	5.6	175.84±1.55	99.2	33.88±0.39	95.6	0.037±0.005*	105.7

部分叶组织出现解体、枯斑穿孔和枯萎现象,受害症状更为突出。

2.3.2 油菜叶片叶绿素含量和光合速率

酸雨可使叶绿素分子的 Mg²⁺ 直接从叶绿素中脱去而形成脱镁叶绿素,从而导致叶绿素受损和光合效率的相应降低。表 6 可见,当酸雨 pH<3.5,油菜叶绿素总含量均<11.0 mg·g⁻¹FW,相对值<80%。其中 AR1、AR2 处光合速率 18.95 和 32.56 mg·dm⁻²·h⁻¹, 相对值 22.5%和 38.6%,与 CK 对照 P<0.01,可见降低非常明显。随着酸雨 pH 值升高,酸雨作用逐渐减轻,叶绿素总量相应抬升,影响缩减至最低值。

表 6 模拟酸雨对油菜叶绿素含量和光合速率的影响
Table 6 Effects of simulated acid rain on chlorophyll content and photosynthetic rate of rape

处理	酸雨 pH	叶绿素含量		光合作用	
		总叶绿素 /mg·g ⁻¹ FW	相对值 /%	光合速率 /mg·dm ⁻² ·h ⁻¹	相对值 /%
CK	6.8	13.28±0.16	100.0	84.36±0.83	100.0
AR1	1.5	7.12±0.10**	53.7	18.95±0.11**	22.5
AR2	2.5	10.56±0.27**	79.7	32.56±0.25**	38.6
AR3	3.5	12.26±0.33*	92.6	40.34±0.42**	47.8
AR4	4.5	12.34±0.26*	93.1	62.23±0.77*	73.8
AR5	5.6	13.99±0.39*	105.6	82.35±0.94	97.6

2.3.3 开花期花受害状况和有效角果数的变化

由表 7 可见, 酸雨 pH>3.5 未见出现显著可见性伤害,但当酸雨 pH≤3.5 后,发现花受害百分率急剧上升,在 AR2 处,花受害百分率达 57.10%,花序顶端出现萎缩,花瓣皱折,有效荚果数目均<400 个,相对值<85%。酸雨酸度升至 AR1 时,花受害百分率高达 68.22%,主花序顶端出现破皮流胶,花蕾整体枯褐。有效荚果平均只有 157.5 个,相对值降至 36.7%,最大降幅达 63.3%(p<0.01)。此时果荚外表大量褐斑出现,花果柄处乙烯和脱落酸(ABA) 的大量形成,纤维素酶的合成及果胶酶的活性增加,细胞壁果胶质的溶解过

程加剧,结果导致落花落果相应增加^[26]。随着危害时间的延长,受害果荚开始整体枯褐。无效果荚和秕果大量形成,产量和品质将受到严重的影响。

表 7 不同 AR 处理下花受害百分率和有效角果数
Table 7 Percentages of damaged flowers and valid pods with different AR treatments

处理	酸雨 pH	花受害百分率/%	有效果荚数目	
			单株有效角果数/n·p ⁻¹ FW	相对值/%
CK	6.8	2.26	429.2±3.3	100.0
AR1	1.5	68.22	157.5±1.9**	36.7
AR2	2.5	57.10	167.0±7.0**	38.9
AR3	3.5	52.37	357.1±9.1**	83.2
AR4	4.5	4.29	424.6±8.1	98.9
AR5	5.6	3.42	451.9±10.3*	105.2

2.4 模拟酸雨对油菜某些生理生化指标的影响

2.4.1 细胞质膜透性和丙二醛(MDA)含量

如图 3 所示,酸雨酸度增加,引起细胞质膜透性迅速升高,结果使细胞体内物质大量外渗,细胞功能代谢出现紊乱,特别是 pH<3.5 酸雨喷淋后,油菜体内过氧化作用增强,加速了膜系统损伤的程度。质膜透性的升高还促使了植株体内自由基的大量形成,促进了过氧化产物——丙二醛(MDA)的大量产生,由图 4 发现, 经 AR 处理后的 MDA 变化趋势与细胞质膜透性变化趋势较为一致,说明 MDA 与细胞质膜透性之间的相互关系较为密切。但 pH≤5.6 的酸雨对 MDA 已产生明显的影响,说明 MDA 对酸雨的敏感度略强于酸雨对膜透性的作用。随着酸雨酸度的增大,超强的膜脂过氧化和强酸胁迫,将进一步造成油菜植株体内酶系统和细胞膜系统更大的侵害,结果导致酶系统功能的失调和细胞膜系统完整性的破坏,油菜中后期生长发育将受到严重阻碍。

2.4.2 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化

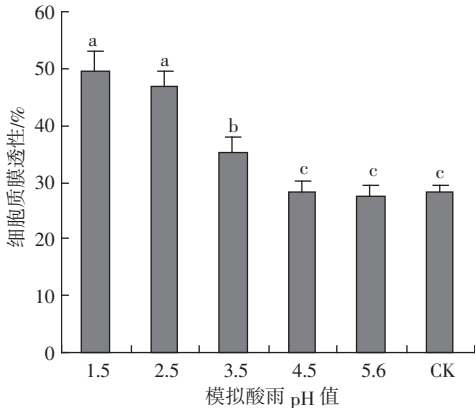


图 3 模拟酸雨对油菜细胞质膜透性的影响

Figure 3 Effects of simulated acid rain on cell plasma membrane permeability of rape

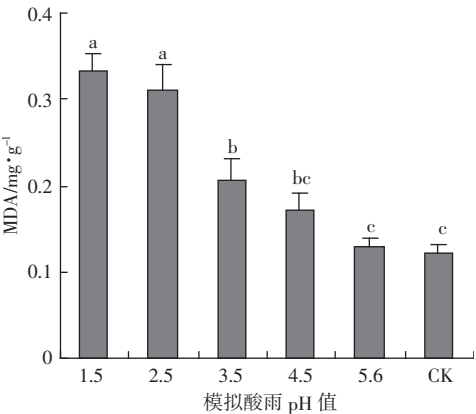


图 4 模拟酸雨对油菜 MDA 含量的影响

Figure 4 Effects of simulated acid rain on MDA content of rape

由表 8 可见，油菜植株体内 POD 酶活性随着酸雨 pH 值的降低有较大幅度的增加，特别是酸雨 pH≤3.5 后,POD 活性>10.0 U·g⁻¹·min⁻¹·FW,相对值>110%,差异均达极端显著水平(P<0.01)。过氧化氢酶(CAT)活性随时间的变化状况略为复杂,由图 5 可见，酸雨 pH>3.5 对 CAT 活性没有较大的影响作用,但 pH≤3.5 强酸处理,CAT 活性均呈现出持续升降式的波动变化,波幅随酸雨酸度的增加而增大,随观测时间的增加而减小。在前期,AR 处理后的 CAT 活性均出现先升后降的变化趋势,这与梁婵娟所获的实验结论基本一致^[9],但至中后期,先升后降变化持续重现,出现第二、第三次波峰,从而形成了波动变化状态。波动位相也随酸雨 pH 值的升高而滞后,AR1 在喷后 3 h 出现第一波峰,AR2 在喷后 24 h,AR3 在喷后 48 h,酸雨酸度每减弱 1 个 pH 值,CAT 活性的变化约滞后 24 h 左右。在排除了因试验误差所造成的影响外,初步认为 CAT 酶活性变化复杂的原因可能是植物体内

产生的抗氧化作用和过氧化作用相互平衡的结果。酸雨伤害产生的过氧化作用使植物体内自由基大量产生,诱导植物组织产生抗逆反应,功能酶含量升高。升高的功能酶能分解体内过多的自由基,抑制过氧化作用的进一步发展,结果使自由基含量迅速回落,功能酶含量减少,抵抗作用减弱,新的过氧化作用加剧,生物反应重新开始,如此不断反复,最终达至稳定平衡。

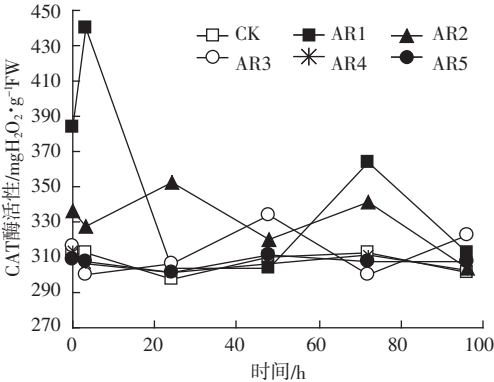


图 5 AR 胁迫下油菜 CAT 酶活性随时间的变化

Figure 5 The changes of CAT activity with times under AR Stress

表 8 模拟酸雨对油菜 POD 酶活性的影响

Table 8 Effects of simulated acid rain on the POD activity of rape

处理	酸雨 pH	POD酶	
		活性/U·g ⁻¹ FW·min ⁻¹	相对值/%
CK	6.8	8.64±1.12**	100.0
AR1	1.5	13.71±0.57**	158.7
AR2	2.5	12.82±0.78**	148.4
AR3	3.5	10.18±1.35**	117.8
AR4	4.5	9.35±1.08*	108.2
AR5	5.6	8.53±1.20	98.7

3 结论

(1)pH<3.5 模拟酸雨淋溶,酸雨胁迫起主要作用,土壤淋滤液 pH 值下降,随着酸雨 pH 升高,土壤缓冲占主导地位,滤液 pH 值处于高稳状态;酸雨喷淋初始时期,大田土壤受酸雨酸度控制,各处理间差异逐渐加大;至后期,土壤缓冲使各处理土壤 pH 逐渐合而为一并趋于同一土壤 pH 值变化,酸雨影响减小。

(2)油菜外部受酸雨伤害主要症状表现为:株高受抑,叶面积缩小,叶鲜重降低,叶绿素合成受损,光合速率下降,花受害百分率增大,有效角果减少,落花落果加剧。特别是酸雨 pH<3.5,酸雨对油菜生长发育的影响极端显著(P<0.01),可见 pH3.5 可作为酸雨对油菜植株直接伤害的主要指标。

(3) 酸雨酸度的增大可导致油菜细胞质膜透性、MDA 含量明显增加;POD 酶活性升高;CAT 酶活性随酸雨酸度和时间变化出现持续先升后降的波状变化,波动幅度随酸雨酸度而增大,随着时间推移而减小,波动位相随酸雨 pH 值升高而滞后。关于酸雨中的离子成分、土壤中的盐基以及其他因素(如有毒金属离子的释出和活化、在致酸条件下土壤微生物的活动性等)对油菜所造成伤害的贡献究竟有多大,目前尚难确定,其对油菜产量和品质的影响如何,还需要作进一步研究。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(9):5-11, 28.
FENG Zong-wei. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China [J]. *Engineering Science*, 2000, 2 (9):5-11,28.
- [2] 宁安荣, 张洪生, 张耀民, 等. 酸沉降对蔬菜吸收养分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):651-655.
NING An-rong, ZHANG Hong-sheng, ZHANG Yao-min, et al. Effects of acid deposition on uptake of nutrients by vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):651-655.
- [3] 武德传, 周广成, 赵振邦, 等. 模拟酸雨对小麦生育后期经济性状及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(5):688-689.
WU De-chuan, ZHOU Guang-cheng, ZHAO Zhen-bang, et al. Effect of simulated acid rain on biological and economic yield of late stage wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2001, 29(5):688-689.
- [4] 宋建国, 刘 伟, 尚庆昌. 酸胁迫条件下对番茄生长、产量和品质的影响[J]. 环境化学, 2005, 24(4):423-425.
SONG Jian-guo, LIU Wei, SHANG Qing-chang. Effect of acid stress on the growth, yield and quality of tomato [J]. *Environmental Chemisity*, 2005, 24(4):423-425.
- [5] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究 [J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1):23-28.
YI Jie-xiang, LU Liang-xue, LIU Guo-dao. Research on soil acidification and acidic soil's melioration [J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006, 12(1):23-28.
- [6] 廖柏寒, 蒋 青. 我国酸雨中盐基离子的重要性 [J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):254-256.
LIAO Bo-han, JIANG Qing. Importance of base cations of acid precipitation in China [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20 (4):254-256.
- [7] 童贯和. 人工模拟酸雨致酸土壤对茼蒿的硝酸还原酶活性和根系活力的影响[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2002, 8(1):74-75, 80.
TONG Guan-he. The Impact of the activity of the nitrate reductase of lettuce and the energy of root system by the acidified soil caused by simulating man-made acid rain [J]. *Journal of Anqing Teachers College (Natural Science)*, 2002, 8(1):74-80.
- [8] 张耀民, 吴丽英. 酸雨对农作物叶片伤害及生理特性的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(5):197-208, 227.
ZHANG Yao-min, WU Li-ying. Effects of acid rain on leaf injury and physiological characteristics of crops[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(5):197-208, 227.
- [9] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2006, 31(2):151-156.
QI Ze-min, ZHONG Zhang-cheng. Effect of simulated acid rain on photosynthesis and growth of *Eucommia ulmoides* oliv.[J].*Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2006, 31(2):151-156.
- [10] 吴杏春, 林文雄, 洪青培, 等. 模拟酸雨对草坪草若干生理指标的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(8):88-92.
WU Xing-chun, LIN Wen-xiong, HONG Qing-pe, et al. The influence of simulated acid-rain on some physiological indexes of turfgrass[J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(8):88-92.
- [11] 郑有飞, 唐信英, 徐建强, 等. 南京市江北工业区降水酸性及化学成分分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4):46-51.
ZHENG You-fei, TANG Xin-ying, XU Jian-qiang, et al. The analysis of precipitation acidity and chemical Composition in the industrial estate located on north bank of the Yangtze River, Nanjing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4):46-51.
- [12] 傅寿仲, 戚存扣, 浦惠明, 等. 江苏油菜产业和品种改良的回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(1):82-85.
FU Shou-zhong, QI Cun-kou, PU Hui-ming, et al. Retrospective and predicted analysis on rape production and variety improvement in Jiangsu province[J]. *Journal of China Oil Crops*, 2003, 25(1):82-85.
- [13] 戚存扣. 长江流域双低油菜产业发展需求与品种改良 [J]. 中国种业, 2004, 4:5-6.
QI Cun-kou. Production development and variety improvement of double-low rape in Yangtzi river[J]. *China Planting*, 2004, 4:5-6.
- [14] 王代长, 蒋 新, 卞永荣, 等. 酸沉降下加速土壤酸化的影响因素[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2):152-157.
WANG Dai-zhang, JIANG Xin, BIAN Yong-rong, et al. The factors of influence accelerating soil acidification under acidic deposition[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2):152-157.
- [15] 童贯和. 酸雨致酸土壤对小麦幼苗若干营养代谢的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(3):279-282.
TONG Guan-he. Effect of acid rain acidified soil on some nutrient metabolisms of wheat seedlings[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, 11 (3):279-282.
- [16] 檀满枝, 阎伍玖. 安徽省酸雨污染特征分析[J]. 环境科学研究, 2001, 14(5):13-16.
TAN Man-zhi, YAN Wu-jiu. Analysis of characteristics of acid rain pollution in Anhui province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, 14(5):13-16.
- [17] 侯福林. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 13-15, 90.
HOU Fu-lin. Course of Plant Physiological Experiment [M]. Beijing: Science Press, 2004. 13-15, 90.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 134-261.

LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological bio-chemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 134-261.

[19] 梁婵娟, 陶文沂, 李 操, 等. UV-B 与 AR 胁迫下油菜光合及 CAT 活性的恢复过程(Ⅱ)[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):890-894.

LIANG Chan-juan, TAO Wen-yi, LI Cao, et al. Restoration of defense enzyme and photosynthesis in rape seedling under combined stress of elevated ultraviolet-B radiation and acid rain (Ⅱ)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):890-894.

[20] 许中坚, 李方文, 刘广深, 等. 模拟酸雨对红壤中铬释放的影响研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2):9-12.

XU Zhong-jian, LI Fang-wen, LIU Guang-shen, et al. Study on release of chromium from red soils under the influence by simulated acid rain[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2):9-12.

[21] 彭瑞兴. FAAS 法测定大气降水中的 K、Na、Ca 和 Mg [J]. 福建分析测试, 2004, 13(1):1908-1909.

PENG Rui-xing. Determination of K⁺、Na⁺、Ca²⁺ and Mg²⁺ in rainfall by FAAS[J]. *Fujian Analysis and Testing*, 2004, 13(1):1908-1909.

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

BAO Shi-dan. Soil Agro-chemistry Analysis [M]. Beijing:China Agri-culture Press, 2000.

[23] 肖慈英, 阮宏生, 刘登义, 等. 杉木林土壤对模拟酸雨缓冲性能的研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2000, 23(4):365-367.

XIAO Ci-ying, RUAN Hong-Sheng, LIU Deng-yi, et al. Research on buffer capacity of the soil to simulated acid-rain in China fir forest[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2000, 23(4):365-367.

[24] Wood T, Bormann F H. The effects of an artificial acid mist upon the growth of *Betula alleghaniensis*[J]. *Britt Environmental Pollution*, 1974, 7(4):259-268.

[25] Ferenbaugh R W. Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris*[J]. *LAmJBot*, 1976, 63(3):283-288.

[26] 黄玉源, 黄益宗, 李秋霞, 等. 酸雨和 O₃ 复合污染对米兰的急性伤害及其生理指标的变化[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6):1470-1474.

HUANG Yu-yuan, HUANG Yi-zong, LI Qiu-xia, et al. Physiological and foliar symptom response of *aglaia odorata* to ozone and acid rain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1470-1474.