

模拟酸雨对油菜 (*Brassica napus* L.) 生长、 产量及品质的影响

梁 骏, 麦博儒, 郑有飞*, 李 璐, 唐信英, 吴荣军

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要:以油菜为供试材料,通过田间试验方法研究了酸雨对农作物生长、产量及品质的胁迫效应。研究表明,模拟酸雨胁迫对油菜的生长发育有较大的影响,具体表现为株高、叶面积生长受抑,叶单面鲜重明显降低,且在 pH3.1 时开始出现外观上的可见伤害;产量的分析结果表明,pH4.1 可作为酸雨对油菜产量的影响阈值;品质特征指标分析结果表明,酸雨胁迫会导致油菜粗脂肪含量降低,使可溶性糖含量减少,而且随着酸度增强,粗脂肪与可溶性糖降低幅度越大;酸雨胁迫对可溶性蛋白质的影响阈值在 pH5.1 与 pH4.1 之间,对游离氨基酸总量的影响阈值在 pH4.1 与 pH3.1 之间,而对还原性糖、总酸度的影响阈值则在 pH3.1 与 pH1.5 之间,但以上各指标的确切阈值及酸雨对其影响的具体机理还有待进一步研究。

关键词:模拟酸雨;油菜;品质;阈值

文章编号:1000-0933(2008)01-0274-10 中图分类号:Q142,Q945,Q948,X171 文献标识码:A

Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape

LIANG Jun, MAI Bo-Ru, ZHENG You-Fei*, LI Lu, TANG Xin-Ying, WU Rong-Jun

College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0274 ~ 0283.

Abstract: Acid rain is one of the most serious environmental problems worldwide. The effects of simulated acid rain on the physiology and biochemistry of plants have been studied intensively at home and abroad, but few reports have focus on the quality of crops, which plays a significant role in the agricultural ecosystem. Purpose of this study is to elucidate the influence of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape as the subject crop (*Brassica napus* L.) through field experiment, so as to provide scientific basis for preventing and controlling the damage to crops from acid rain. According to acid deposition level in Nanjing area and referring to the related data from the Environmental Protection Agency, we obtained the simulated acid rain at pH 5.6 as the control index (CK), by means of H₂SO₄ and HNO₃ at the ratio of 5 to 1 as the concentration for the rain at the levels of pH 1.5, 3.1, 4.1, 5.1 and 5.6 measured by the PHS-25B acidometer (the Shanghai Precision Instruments Ltd. Co.). Referring to LU Xian-kai et al. about their similar design, we set up 15 small plots (4 m × 5 m) in complete accordance with random group design principle, and all these plots were to the north of the NUIST, cultivated in mid September, 2005, with ~0.6 m spacing as a buffer zone, in order to prevent interference. The 15 plots were divided into 5 treatment groups, i. e., (1) CK (pH5.6), (2) extreme AR (pH 1.5),

基金项目:国家留学回国人员科研资金资助项目;江苏省“333 工程”资助项目;江苏省六大人才高峰资助项目

收稿日期:2006-10-30; **修订日期:**2007-02-01

作者简介:梁骏(1957~),男,广西北海市人,博士生,副教授,主要从事环境生态学与工程学研究. E-mail:mbr4@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the scientific research foundation for the returned overseas Chinese scholars, state education ministry; “333 project” of Jiangsu Province; “six adults only then peak” research foundation of Jiangsu Province

Received date:2006-10-30; **Accepted date:**2007-02-01

Biography: LIANG Jun, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in ecosystem and environmental engineering. E-mail:mbr4@163.com

(3) strong AR (pH 3.1), (4) moderate AR (pH 4.1), (5) weak AR (pH 5.1), each repeated in spraying three times. The seeds were well-grown of Qinyou 7 rape, disinfected for 10 min in HgCl_2 solution at 1.0g/L concentration, followed by their repeated cleaning in deionized water. And they were sowed in an open field on 21 August, 2005 and interplanted into the plots on 16 September. Starting from the 3-leaf stage, small-size sprayers were used to water the plants at a 10-day interval, separately, with above 5 acid rains as natural precipitation. In each operation the spraying was stopped when water began dropping from leaves, in order to avoid the change in soil pH value. During the growth fertilizer was applied in time and also chemicals were sprayed according to crop disease and pests. In the experimental period, the rape growth and development were recorded and during flowering stage, measurement was made of plant height, leaf area, weight of 1 cm^2 fresh leaves and injured area in percentage etc. and also of the yield and quality during harvest. Results show that (1) simulated acid rain stress has considerable effect on the rape growth/development in such a way that the growth of the plant height and leaf area are suppressed and weight of fresh leaf per unite area is greatly declined with visible injury when pH 3.1 operation is conducted; (2) yield analysis indicates that pH 4.1 concentration can be taken as the threshold value of the effect on rape yield; (3) study of quality indexes shows that acid rain stress can reduce the content of crude fat and of soluble sugar in the seeds, and with increased acidity their drop ranges will be enlarged. The stress influences the soluble protein at pH 5.1—4.1, total free amino acid content at pH 4.1—3.1, as well as reduced sugar, and total acidity at pH 3.1—1.5. The specific values of above indexes as well as the mechanisms for their effect on acid rain concentration remain to be further explored.

Key Words: simulated acid rain; rape; quality; threshold

当前,酸雨问题已经引起了人们的广泛关注。酸雨伤害植物的研究国内外已有大量报道^[1],目前普遍认为酸雨对植物的伤害一方面在于酸雨淋溶对植物地上部分的直接伤害,另一方面在于酸雨在导致土壤酸化过程中对植物的间接影响。许多学者分别从这两方面对其具体机理作了较深入研究^①。Wood^[2]、Farenbaugh^[3]等研究发现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。Lee 等对 35 种作物可见伤害研究指出 pH5.6~3.5 酸雨对叶片没有产生直接伤害,而 pH3.5 及其以下酸雨则普遍导致叶子受害,而且双子叶植物较单子叶植物易受酸雨的影响^[4]。Devpura 等对豆类作物的研究表明,酸雨胁迫不利于豆类作物的种子萌发,pH3.5 时会引起叶片伤害,pH2.1 时叶片会产生较大的枯斑甚至导致叶片死亡^[5~7]。童贯和等采用盆栽方法研究了模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗体内可溶性糖和含 N 量的影响,结果发现小麦幼苗体内的可溶性糖含量,含 N 量迅速下降,某些生理活动降低,pH<3.0 的高强度酸雨以及由其产生的酸化土壤对小麦幼苗的碳素代谢和氮素代谢具有明显的抑制作用^[8]。严重玲等对小麦研究指出,酸雨胁迫下 SOD、POD、CAT 活性随酸雨 pH 值的降低先升后降呈单峰曲线型变化^[9]。酸雨还能引起土壤盐基流失及某些毒性元素的释出和活化,伤害植物根系,其中铝毒是非常重要的影响因素^[10,11]。Samuels 等研究表明 Al 很容易在植物根尖富集,抑制根的生长^[12]。Minocha 等研究表明 Al 能抑制 DNA 合成有关的酶活性,从而抑制 DNA 的合成与复制,也可以与 RNA 结合而影响其结构和功能^[13]。以 Ulrich 为代表的学者们提出了酸雨对森林影响的铝毒假说,并认为当土壤中 Al/Ca 值大于 5 时将植物产生危害,影响植物的养分营养代谢^[14]。由此可见,以上报道主要集中在酸雨对植物的生理、生化影响方面,对作物品质的影响研究极少。本文以油菜为供试物种,通过田间试验方法系统研究了酸雨胁迫对其生长、产量及品质的影响,以期防治酸雨对农作物的危害提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为油菜(*Brassica napus* L.)种子,品种为秦优七号,由陕西省杂交油菜研究中心研发,为当地农

① 西南农业大学资源环境学院. 酸雨对植物影响的研究进展. 重庆市重点研究项目(2000-76),2004

民广泛栽种品种。

1.2 方法

1.2.1 模拟酸雨配制

根据南京市酸沉降水平,同时参考环保局提供的酸雨资料,通过 H_2SO_4 和 HNO_3 溶液(浓度比 5:1)调配,最后用 PHS-25B(上海精密科学仪器有限公司)型酸度计校准。pH 值分别为 1.5、3.1、4.1、5.1、5.6,其中以 pH5.6 的模拟酸雨为对照(CK)。各离子成分见表 1。

表 1 模拟酸雨离子成分
Table 1 The composition of simulated acid rain

组分 Component	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
含量 Content (mg/L)	0.209	0.528	0.038	0.036	1.093	0.019	0.708	1.183	5.946

1.2.2 样地设计和处理

参照鲁显楷^[15]等的类似实验研究设计,于 2005 年 9 月中旬在南京信息工程大学北门外 200m 实验田中按照完全随机区组设计原则建立 15 个小区(4m × 5m),小区之间留有 0.6m 左右的缓冲区,以防止相互干扰。15 个小区分属 5 个处理组,分别为对照(Control: pH5.6),极强酸性酸雨(Extreme AR: pH1.5),强酸雨(Strong AR: pH3.1),较强酸雨(Moderate strong AR: pH4.1),弱酸性酸雨(Weak AR: pH5.1),每个处理组分成 3 个重复。从 3 叶期起,用小型喷雾器按自然降水规律按重复每隔 10d 分别喷淋 5 种酸雨,每次以叶片滴液为限(避免改变土壤 pH 值),在油菜生长阶段适时施肥,根据作物的病虫害情况喷洒相应的农药。试验期间对油菜生长发育状况进行调查,在开花期测定株高、叶面积、叶单面鲜重、叶受害百分率等,在收获期测定其产量及种子品质指标。

1.2.3 测定方法

(1)株高(H)测定方法 从基部到生长点直接测量。

(2)叶面积(LA)测定方法 用 Area Meter AM300(ADC Bio-Scientific Limited, UK)叶面积测定仪测定。

(3)叶单面鲜重(WFL)测定方法 多株随机采 50 片鲜叶,每叶用 1cm^2 打孔器钻取 10 小片圆叶、称重。取平均值。

(4)叶受害百分率(LIR)测定方法 参考张耀民^[16]的测定方法,即第一次喷洒酸雨后即观察作物叶片的受害反应,以后每天至少观察一次,3 ~ 4d 后记载受害症状特征。以后每喷一次酸雨,均连续观察症状的产生、发展与变化过程。叶片伤害用目测测定受害叶面积的百分数来表示。

(5)单株产量(P_0)测定方法 在收获期每小区随机取 10 株植株,用常规方法测定其种子鲜重,取平均值。

(6)经济产量(P)计算方法 经济产量按以下公式计算:

$$P = P_0 \times N$$

式中, P_0 单株产量, N 为每平方米植株数, P 为经济产量。

(7)植株生物量测定方法 将植株根、茎、叶用水洗净,在 80°C 烘箱中烘至恒重、称重;果荚称风干重;二项合记为植株生物量。

(8)千粒重 随机取 1000 粒去荚油菜籽粒直接测量其干重。

(9)可溶性蛋白质含量的测定 按考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[17]。

(10)游离氨基酸总量的测定 按茚三酮溶液显色法测定^[18]。

(11)粗脂肪含量的测定 按索氏提取法测定^[19]。

(12)可溶性糖含量的测定 按苯酚法测定^[20]。

(13)还原性糖含量的测定 按斐林试剂比色法测定^[21]。

(14)总酸度测定 氢氧化钠滴定法测定^[22]。

1.3 数据分析

将观测到的重复数据进行统计分析,求出方差、平均值及标准误差,对同一测定指标在不同处理间的差异进行方差分析,并用 LSD 法检验各处理与对照组的差异显著性。使用 Excel 和 SPSS 软件进行统计处理分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对油菜生长的影响

由表 2 可以看出,随着模拟酸雨 pH 的降低,除株高外油菜叶面积、叶单面鲜重呈逐步下降趋势,且均与 pH 呈显著正相关(相关系数 $r=0.8979^*$, $r=0.9745^{**}$),说明酸雨对油菜生长具有明显的影响。与对照相比,pH4.1、pH5.1 模拟酸雨处理下的油菜株高分别比 CK 高出 3.61% 和 4.53%,经方差分析在 pH5.1 时差异显著,说明弱酸性条件对油菜株高生长有一定的促进作用;用 pH3.1、pH1.5 酸雨处理时株高比 CK 下降了 4.19% 和 9.45%,且经方差分析和与 CK 的多重比较,差异均达到显著和极显著水平。上述结果可以认为,pH3.1 以下的酸雨胁迫会抑制油菜的株高生长。各浓度梯度酸雨胁迫对油菜叶面积的影响也有相似的结果。从表 2 可知,当酸雨 pH 大于 3.1 时作物叶面积与对照相比没有差异,但当 pH < 3.1 后,酸性降水则开始抑制作物叶面积生长,方差分析和与 CK 的多重比较表明,这种差异在 pH3.1 以下开始显著,在 pH1.5 时差异达极显著水平,说明 pH < 3.1 时酸雨会抑制油菜叶面积的增长幅度。叶单面鲜重是指单位平方厘米的叶片鲜重。从表 2 可以看出,油菜叶单面鲜重随着酸雨 pH 值的降低而呈下降趋势,其中 pH5.1、pH4.1、pH3.1、pH1.5 酸雨处理值是 CK 的 97.30%、91.89%、69.83%、38.38%,经方差分析和与 CK 的多重比较,在 pH4.1 时差异显著,pH3.1、pH1.5 时差异均极显著,说明 pH ≤ 4.1 酸雨胁迫会抑制油菜叶单面鲜重增加。

叶面积受害百分率通常被看作是叶片可见伤害阈值的量度(一般为 5%)^[16,23,24]。由表 2 可知,叶受害百分率与酸雨 pH 之间存在明显的负相关,相关系数 $r = -0.8782^*$ 。在 pH5.1、pH4.1 时叶片均未出现可见伤害,当酸度上升至 pH3.1 时叶受害百分率超过 5%,叶片外观开始微黄,有少量黄白色小斑点出现,且以新生叶片居多。当 pH 下降到 pH1.5 时叶面积受害百分率高达 25.23%,原先的黄白色小斑点变成黄褐色斑点并有所扩大、相互连成片状,部分叶组织解体,出现枯斑穿孔,一些叶片开始枯萎,说明极强性模拟酸雨严重灼伤了油菜叶表面。

表 2 模拟酸雨对油菜生长的影响

Table 2 The effects of simulated acid rain on the growth of rape

pH 处理 pH treatment	株高 <i>H</i> (cm)	相对值 <i>H/CK</i> (%)	叶面积 <i>LA</i> (cm ²)	相对值 <i>LA/CK</i> (%)	叶单面鲜重 <i>WFL</i> (g/FWcm ²)	相对值 <i>WFL/CK</i> (%)	叶受害百分率 <i>LIR</i> (%)
5.6(CK)	175.840 ± 0.552	100.00	34.060 ± 0.118	100.00	0.037 ± 0.005	100.00	3.00
5.1	185.820 ± 0.907 *	104.53	33.678 ± 0.077	98.90	0.036 ± 0.002	97.30	4.00
4.1	182.180 ± 0.576	103.61	33.110 ± 0.197	97.21	0.034 ± 0.002 *	91.89	4.60
3.1	168.480 ± 0.904 *	95.81	32.395 ± 0.290 *	95.11	0.026 ± 0.005 **	69.83	6.33
1.5	159.228 ± 0.858 **	90.55	25.118 ± 0.094 **	73.75	0.014 ± 0.001 **	38.38	25.23

表中数据均是平均数 ± 标准误,方差分析并用 LSD 法作多重比较,显著性水平: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ Significance of difference was tested by ANOVA and LSD, Level of significance: * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$

2.2 模拟酸雨对油菜产量的影响

酸雨对农作物各项指标的影响评价或影响阈值通常采用“相对指标法”,即把各处理的测定指标与对照组作比较,若增加或降低 ≥ 10% 时,表明酸雨的影响明显,若增加或降低 < 10% 时,表明酸雨的影响不明显或没有影响,但如果指标值表现为有规律的增加或减少,则说明有增加或减少的“趋势”^[16]。

由表 3 可知,随着酸雨酸度的增强,油菜产量先增加而后减少。与对照相比,pH5.1 酸雨处理的油菜增产量最大,并且各增幅均超过 10%,影响显著;pH4.1 时,除生物量略有下降外,其它均有不同程度的增加,但均

未超过 10%,影响不显著,说明酸度在 pH4.1 附近,模拟酸雨对作物产量的影响不明显。当酸度大于 pH4.1 时,作物产量迅速减少。在 pH3.1 时,除千粒重外,油菜单株产量、经济产量比对照降幅均超过 10%,生物量下降 22.7%,影响显著。在 pH1.5 时经济产量最大降幅为 51.8%,属极显著性差异。

表 3 模拟酸雨对油菜产量的影响
Table 3 The effects of simulated acid rain on the yield of rape

指标 Index		pH 处理 pH treatment				
		5.6(CK)	5.1	4.1	3.1	1.5
生物量(g/DW plant)	平均值 Mean	39.315	46.640	36.602	30.291	22.250
Biomass	与对照比值 Ratios with CK	1.000	1.186	0.931	0.773	0.566
千粒重(g/DW plant)	平均值 Mean	3.175	3.537	3.264	3.273	3.114
1000seeds weight	与对照比值 Ratios with CK	1.000	1.114	1.028	1.031	0.980
单株产量(g/FW plant)	平均值 Mean	25.234	30.584	25.814	22.055	14.131
Yield per plant	与对照比值 Ratios with CK	1.000	1.212	1.023	0.874	0.560
经济产量(g/FW m ²)	平均值 Mean	353.131	401.161	356.660	298.750	170.210
Economic yield	与对照比值 Ratios with CK	1.000	1.164	1.010	0.846	0.482

2.3 模拟酸雨对油菜籽品质的影响

2.3.1 模拟酸雨对油菜籽蛋白质含量的影响

蛋白质的含量是衡量作物品质的重要指标。试验结果(图 1)表明,随着酸雨酸度的增强,油菜籽可溶性蛋白质的含量呈现出先上升(pH5.1)而后下降的变化趋势。与对照相比,pH5.1 的酸雨处理使蛋白质含量上升了 4.35%,差异显著($P < 0.05$),说明轻度酸雨胁迫有助于作物蛋白质的合成。当 $pH < 5.1$ 时蛋白质的含量迅速下降,pH4.1、pH3.1、pH1.5 处理时其含量比对照分别降低了 16.10%、26.61% 和 29.66%,差异均显著($P < 0.05$),表明酸度大于 pH4.1 时,蛋白质的合成受到抑制,且酸度越大,抑制作用越强。

2.3.2 模拟酸雨对油菜籽游离氨基酸总量的影响

氨基酸含量也是衡量作物品质的一个重要指标。由图 2 可以看出,油菜籽游离氨基酸总含量随着模拟酸雨 pH 的降低呈现出先增加而后下降的单峰型变化趋势。其中与对照相比,pH5.1 酸雨处理下游离氨基酸总含量升幅最大,达 35.36%,pH4.1 时氨基酸总含量升幅则下降到 31.57%,两个处理均与对照差异显著($P <$

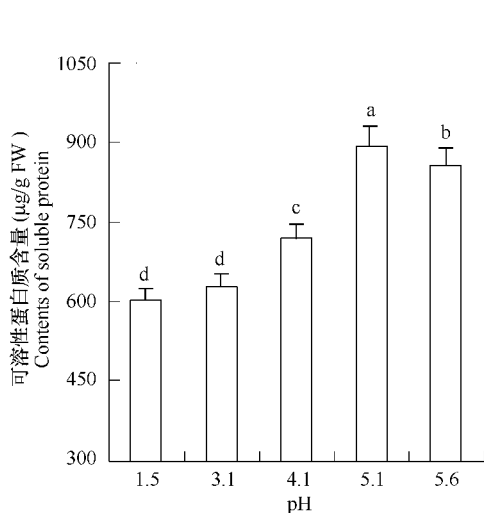


图 1 模拟酸雨对油菜籽可溶性蛋白质的影响

Fig. 1 The effects of simulated acid rain on soluble protein of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

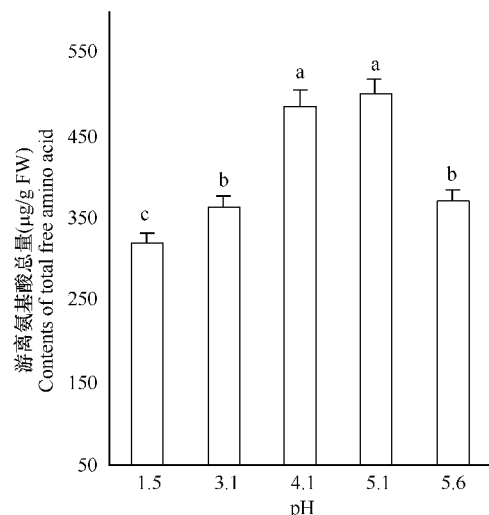


图 2 模拟酸雨油菜籽游离氨基酸总量的影响

Fig. 2 The effects of simulated acid rain on total free amino acid of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

0.05)。之后随着酸雨酸度的进一步增强,氨基酸总含量增幅迅速下降,当酸度为 pH3.1 时,其含量比对照下降了 1.80%,pH1.5 时比对照下降达 13.48%,差异显著($P < 0.05$)。试验结果表明,pH ≥ 4.1 的中、轻度酸雨胁迫有助于作物氨基酸的合成,且在 pH5.1 时合成作用最强;当酸雨为强酸性(pH < 3.1)时则会抑制作物氨基酸的合成。

2.3.3 模拟酸雨对油菜籽粗脂肪含量的影响

酸雨对油菜粗脂肪含量有一定的影响,田间试验结果(见图 3)表明,作物粗脂肪的含量随着酸雨酸度的增强而降低,且酸度越强降低的幅度越大,粗脂肪含量与酸雨 pH 呈极显著正相关,相关系数 $r = 0.9762^{**}$ 。5 个处理中 CK 的粗脂肪含量最高(46.86%)。与对照相比,pH ≤ 5.1 时粗脂肪含量逐步下降,其中 pH5.1 处理使其含量下降了 3.13%,但差异不明显,pH4.1、pH3.1、pH1.5 处理则分别下降了 7.09%、13.21% 和 31.92%,差异均达到显著水平($P < 0.05$),说明酸雨处理会抑制作物粗脂肪的合成,当酸雨 pH < 4.1 抑制作用较强,且酸度越大,抑制作用越大。

2.3.4 模拟酸雨对油菜籽还原糖含量的影响

含有醛基和酮基的可溶性糖称为还原糖,如葡萄糖、果糖等,它们在作物体内普遍存在,因此也是评价作物品质的重要指标。由图 4 可知,随着酸雨酸度的增强,作物还原糖含量先升高而后降低呈单峰型曲线变化。与对照相比,在 pH5.1~3.1 范围内,3 个处理的还原性糖含量分别增加了 9.75%、19.86%、1.83%,其中 pH3.1 酸雨处理与对照差异不明显,pH4.1、pH5.1 处理与对照差异显著($P < 0.05$)。pH1.5 处理时还原糖含量比对照减少了 7.32%,但差异显著($P < 0.05$)。表明 pH ≥ 3.1 酸雨处理对油菜还原性糖合成产生促进作用。pH < 1.5 时还原性糖合成受抑,具体表现为其含量出现负增长。

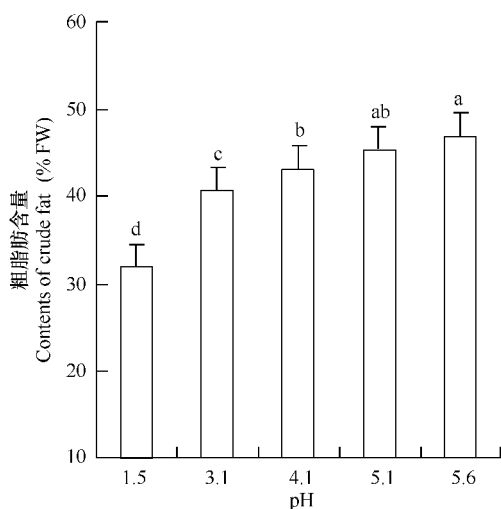


图3 模拟酸雨对油菜籽粗脂肪的影响

Fig. 3 The effects of simulated acid rain on crude fat of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

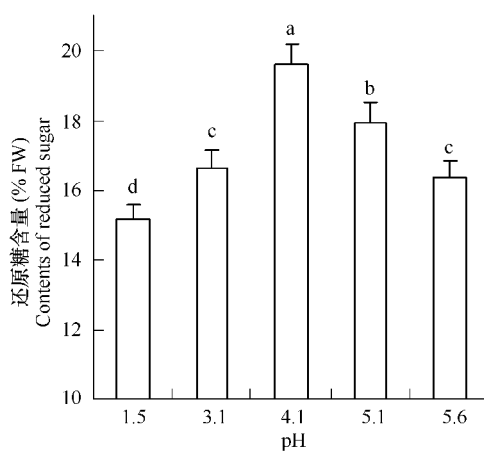


图4 模拟酸雨对油菜籽还原糖的影响

Fig. 4 The effects of simulated acid rain on reduced sugar of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

2.3.5 模拟酸雨对油菜籽可溶性糖含量的影响

由图 5 可以看出,酸雨胁迫明显影响作物可溶性糖含量,可溶性糖含量与酸雨 pH 之间存在显著正相关,相关系数 $r = 0.8146^*$ 。5 种酸雨处理下可溶性糖含量随酸度的增强而降低,其中 CK 含量最高(9.13%)。与对照相比,pH4.1、pH3.1、pH1.5 三种酸雨处理下作物可溶性糖含量分别下降了 20.97%、21.73% 和 29.79%,差异均达到显著水平($P < 0.05$)。pH5.1 处理比对照仍然减少 19.82%,差异显著($P < 0.05$)。说明酸雨胁迫会降低油菜中可溶性糖含量。

2.3.6 模拟酸雨对油菜籽总酸度的影响

由图 6 可以知道,农作物总酸度随着模拟酸雨酸度的增强先增加而后降低,最高值在 pH4.1 处。pH5.1、

pH4.1、pH3.1 模拟酸雨处理时作物总酸度比对照分别升高了 3.17%、5.0%、4.17%，pH1.5 处理时则降低了 14.29%，差异显著 ($P < 0.05$)，说明 $\text{pH} \geq 3.1$ 模拟酸雨胁迫对农作物总酸度的合成有促进作用，但相互差异不明显；当 $\text{pH} < 3.1$ 时对作物总酸度的合成会产生抑制，且酸度越大，这种抑制作用越强，到 pH1.5 时差异明显。

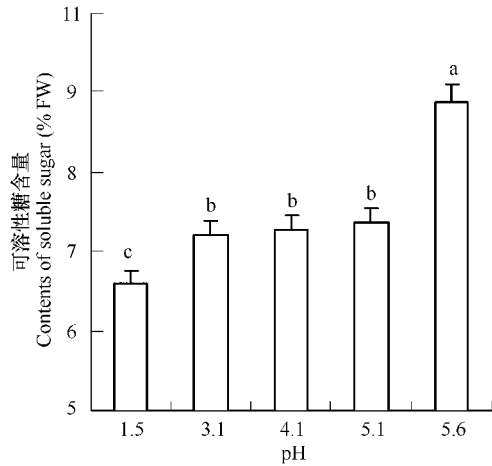


图5 模拟酸雨对油菜籽可溶性糖的影响

Fig. 5 The effects of simulated acid rain on soluble sugar of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

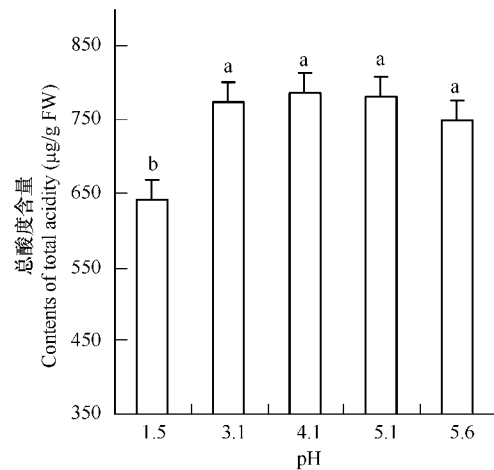


图6 模拟酸雨对油菜籽总酸度的影响

Fig. 6 The effects of simulated acid rain on total acidity of rape
误差线表示标准误 Error bars show standard errors

3 讨论

农作物在生长过程中，其生长发育的物质和能量均来源于光合作用及根系对营养元素的吸收与同化。在酸雨胁迫下，其地上部分器官会直接受到影响。酸雨中过多 H^+ 与叶表面角质及其内部的阳离子进行交换而侵蚀破坏叶组织结构与细胞结构^[25]，使细胞死亡，外观出现黄褐色斑点，导致叶片生长受抑，叶绿素含量减小，光合能力下降^[26~28]，引起植物体内可溶性糖积累速度降低^[8]。硝酸还原酶(NR)是植物体内硝酸盐同化过程的限速酶，在植物氮代谢中处于关键位置^[29]。植物的氮同化主要通过谷氨酰胺合成酶(GS)/谷氨酸合成酶(GOGAT)途径进行，在这个氮同化途径中，谷氨酸合成酶(GOGAT)是限速酶^[30]，是植物体内氮同化的关键酶^[31]。所以，植物体内的 NR 和 GOGAT 的活性大小，直接影响植物的氮素代谢，影响植物的含 N 量^[8]，进而影响植物氨基酸与蛋白质的合成。低强度酸雨中的 NO_3^- 和 NH_4^+ 对 NR 和 GOGAT 活性有促进作用^[31,32]，因而也会促进氨基酸和蛋白质的合成。研究表明，pH4.5 酸雨胁迫时 NR 和 GOGAT 活性上升^[8]，作物游离氨基酸与可溶性蛋白质总含量也增加且在 pH5.1 处达到最大值，这和 Khan 等^[33] 对菜豆的研究结果相似。当酸强度过高时会降低植物根系中 NR 和 GOGAT 等酶的活性^[33]，影响根系对氮素营养的吸收和同化，使植株利用氮素能力下降^[34~36]，降低氮源积累速度。碳源、氮源积累速度的降低，最终使植物生长发育、产量和品质也会受到影响。本研究表明，模拟酸雨胁迫对油菜的生长发育有较大的影响，具体表现为株高、叶面积生长受抑，叶单面鲜重明显降低，且在 pH3.1 时开始出现外观上的可见伤害，这和 Evans^[37]、张耀民^[16]、陈玉谷^[38] 等人的观测结果基本一致。由于上述特征指标的下降，油菜产量也必然受到影响。本试验结果表明，pH4.1 可作为酸雨对油菜产量的影响阈值， $\text{pH} > 4.1$ 模拟酸雨对作物产量的影响不明显，或促进其产量增加， $\text{pH} \leq 4.1$ 时则使作物产量迅速降低。这与陈玉谷等^[38] 认为的模拟酸雨 $\text{pH} < 4.5$ 时油菜产量减少明显和 Singh^[24]、张福珠等^[39] 的研究结果基本一致。酸雨胁迫还会影响油菜籽品质，导致油菜粗脂肪含量降低，使可溶性糖含量减少，这与童贯和^[8] 对小麦幼苗的研究结果一致；蛋白质、氨基酸、还原性糖、总酸度随着酸雨酸度的增强，其含量表现为比对照增大，但当酸雨酸度超过某一程度时，又比对照呈减少的趋势，且酸度越强，减少的程度愈大，说明酸雨胁迫对以上 4 个特征指标存在一个影响阈值。本研究表明，模拟酸雨对油菜可溶性

蛋白质的影响阈限在 pH5.1 与 pH4.1 之间,对游离氨基酸总量的影响阈限在 pH4.1 与 pH3.1 之间,而对还原性糖、总酸度的影响阈限则在 pH3.1 与 pH1.5 之间,但以上各指标的确切阈值及酸雨对其影响的具体机理还有待一步研究。

我国已成为全球三大酸雨重灾区之一,且降水酸度最强,面积最大。近年来,其酸度还在呈不断增强的趋势。如何遏制酸雨的进一步发展,减轻酸雨对农业生态系统的危害将成为今后我国政府、科学家的重要研究内容。

References:

- [1] Zeng Q L, Huang X H, Zhou Q. Effect of acid rain on seed germination of rice, wheat and rape. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 181—184.
- [2] Wood T, Bormann F H. The effects of an artificial acid mist upon the growth of *Betula alleghaniensis*. *Britt. Environmental Pollution*, 1974, 7(4): 259—268.
- [3] Ferenbaugh R W. Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L. . *Am. J. Bot*, 1976, 63(3): 283—288.
- [4] Lee J J, Weber D E. The effects of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. *Forest Science*, 1979, 25(3): 393—398.
- [5] Devpura S, Khan T I. Effect of simulated acid rain exposure on growth and biochemical parameters of *Phaseolus aureus* Var. RMG-62, in a pot experiment. *J. Current Bio-Sciences*, 2003, 1(1): 35—44.
- [6] Devpura S, Khan T I. Effect of simulated acid rain on germination and seedlings of *Phaseolus aureus* Var. RMG-62. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2003, 2(3): 337—339.
- [7] Solomon D M, Devpura S, Khan T I. Effect of simulated acid rain on germination and seedlings of *Arachis hypogea* L Var. M-13. *J. Curr. Sci.*, 2003, 3(1): 137—140.
- [8] Tong G H, Liang H L. Effects of simulated acid rain and its acidified soil on soluble sugar and nitrogen contents of wheat seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1487—1492.
- [9] Yan C L, Hong Y T, Wang S J, *et al.* Effect of rare earth elements on the response of the activated oxygen scavenging system in leaves of wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 504—507.
- [10] Tong G H, Liu T J, Huang W. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on lipid peroxidation of wheat seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1509—1516.
- [11] Liu J X. Effect of aluminum toxicity on forests under acid deposition. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 8(3): 269—274.
- [12] Samuels T D, Kucukakyuz K, Magaly R Z. Al partitioning patterns and root growth as related to Al sensitivity and Al tolerance in wheat. *Plant Physiology*, 1997, 113(2): 527—534.
- [13] Minocha R, Minocha S C, Long S L. Effects of aluminum on DNA synthesis, cellular polyamines, polyamine biosynthetic enzymes and inorganic ions in cell suspension cultures of a woody plant, *Catharanthus roseus*. *Plant Physiology*, 1992, 85(2): 417—424.
- [14] Ulrich B. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe. *Soil Science*, 1980, 130(1): 193—199.
- [15] Lu X K, Mo J M, Peng S L, *et al.* Effects of simulated N deposition on free amino acids and soluble protein of three dominant under story species in a monsoon evergreen broad-leaved forest of subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 743—753.
- [16] Zhang Y M, Wu L Y. Effects of acid rain on leaf injury and physiological characteristics of crops. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(5): 197—208, 227.
- [17] Li H S. Measurement of soluble protein in plant organization. In: Li H S ed. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 184—225.
- [18] Li H S. Measurement of free amino acids in plant organization. In: Li H S ed. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 192—194.
- [19] Li H S. Measurement of crude fat in seeds. In: Li H S ed. *Principle and techniques of plant physiological biochemical experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 225—227.

- [20] Li H S. Measurement of soluble sugar by phenol. In: Li H S ed. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000. 199 — 200.
- [21] Li H S. Measurement of reduced sugar by fehling reagent colorimetry. In: Li H S ed. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000. 201 — 202.
- [22] Mu H R, Yu S P. Measurement of acidity. In: Mu H R, Yu S P ed. food analysis. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 47 — 48.
- [23] Cao H F, *et al.* Effects of sulphur dioxide and acid deposition on chinese crops. In: Agrawal S B and Agrawal M eds. Environmental pollution and plant responses. New York: Lewis Publishers, 2000. 295 — 305.
- [24] Singh B, Agrawal M. Impact of simulated acid rain on growth and yield of two cultivars of wheat. Water, Air & Soil Pollution, 2004, 152(1-4): 71 — 80.
- [25] Shan Y F, Feng Z W, Chen C Y. Effects of simulate Acid rain on the biomasses of seven forest species. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(3): 274 — 276.
- [26] Qiu D L, Liu X H. Effects of simulated Acid rain on chloroplast activity in *Dimorcarpus longana* Lour. cv. *wulongling* leaves. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1559 — 1562.
- [27] Qiu D L, Liu X H, Guo S Z. Regulation function of calcium on photosynthesis of *Dimorcarpus longana* Lour. cv. *wulongling* under simulated acid rains tress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1072 — 1076.
- [28] Yan C L, Li R Z, Zhong Z C. Effect of simulated acid rain on ecophysiological characteristics of mung bean and maize. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(supp.): 124 — 131.
- [29] Solomonson L P, Spehar A M. Model for regulation of nitrate assimilation. Nature, 1977, (265): 373 — 379.
- [30] Zheng C F, Lin Z W. Rapid determination of glutamate synthase activity. Plant Physiol Commun, 1985, (4): 43 — 46.
- [31] Zheng C F. Glutamate synthase in plants. Plant Physiol Commun, 1986, (3): 5 — 12.
- [32] Tang P S, Wu H Y. Adaptive formation of nitrate reductase in rice seedlings. Nature, 1957, 179: 1355 — 1356.
- [33] Khan T I, Devpura S. Physiological and biochemical effects of simulated acid rain on *phaseolus vulgaris* Var. HUR-15. The Environmentalist, 2004, 24(4): 223 — 226.
- [34] Qi Z M, Zhong Z C, Deng J. The effects of simulated acid rain on nitrogen metabolism of *Eucommia ulmoides* leaves. Acta Phytoecol Sin, 2001, 25(5): 544 — 548.
- [35] Gao J X, Chao H F, Shu J M. The effects of acid rain on plant metabolism. Res Environ Sci, 1996, 9(4): 41 — 45.
- [36] Liang Y C, Shen Q R, Zhang A G, *et al.* Effect of calcium and silicon on growth of and nutrient up take by wheat exposed to simulate acid rain. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 589 — 592.
- [37] Evans L S, Curry T M. Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. Amer. J. Botany, 1979, 66(8): 953 — 962.
- [38] Chen Y G, He Z Y. Study on effect of simulated acid rain on the yield of main crops and vegetables. In: Chen Z Y ed. Chinese acid rain research. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1997. 224 — 234.
- [39] Zhang F Z, Tang H S, Yang X F. Acid rain and its harms to the sensitivities of main crops on the southwest. In: State Environmental Protection Administration of China ed. Air pollution prevention technology research. Beijing: Beijing Science Press, 1993. 827 — 834.

参考文献:

- [1] 曾庆玲, 黄晓华, 周青. 酸雨对水稻、小麦和油菜种子萌发的影响. 环境科学, 2005, 26(1): 181 ~ 184.
- [8] 童贯和, 梁惠玲. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗体内可溶性糖和含氮量的影响. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1487 ~ 1492.
- [9] 严重玲, 洪业汤, 王世杰, 等. 稀土元素对酸雨胁迫小麦活性氧清除系统响应的作用. 作物学报, 1999, 25(4): 504 ~ 507.
- [10] 童贯和, 刘天骄, 黄伟. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗膜脂过氧化水平的影响. 生态学报, 2005, 25(6): 1509 ~ 1516.
- [11] 刘菊秀. 酸沉降下铅毒对森林的影响. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 269 ~ 274.
- [15] 鲁显楷, 莫江明, 彭少麟, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林下层3种优势树种游离氨基酸和蛋白质对模拟氮沉降的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 743 ~ 753.
- [16] 张耀民, 吴丽英. 酸雨对农作物叶片伤害及生理特性的影响. 农业环境保护, 1996, 15(5): 197 ~ 208, 227.

- [17] 李合生. 植物组织中可溶性蛋白质含量的测定. 见:李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 184 ~ 225.
- [18] 李合生. 植物组织中游离氨基酸总量的测定. 见:李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 192 ~ 194.
- [19] 李合生. 种子粗脂肪含量的测定. 见:李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 225 ~ 227.
- [20] 李合生. 苯酚法测定可溶性糖. 见:李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 199 ~ 200.
- [21] 李合生. 菲林试剂比色法测定还原糖. 见:李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000. 201 ~ 202.
- [22] 穆华荣, 于淑萍. 酸度的测定. 见:穆华荣, 于淑萍主编. 食品分析. 北京:化学工业出版社, 2004. 47 ~ 48.
- [25] 单运锋, 冯宗炜, 陈楚莹. 模拟酸雨对七种森林树种生物量的影响. 生态学报, 1989, 9(3): 274 ~ 276.
- [26] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶绿体活性的影响. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1559 ~ 1562.
- [27] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨胁迫下钙对龙眼光合调节作用. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1072 ~ 1076.
- [28] 严重灵, 李瑞智, 钟章成. 模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特性的影响. 应用生态学报, 1995, 6 (supp.): 124 ~ 131.
- [30] 郑朝峰, 林振武. 谷氨酸合成酶活力的快速测定. 植物生理学通讯, 1985, (4): 43 ~ 46.
- [31] 郑朝峰. 植物的谷氨酸合成酶. 植物生理学通讯, 1986, (3): 5 ~ 12.
- [34] 齐泽民, 钟章成, 邓君. 模拟酸雨对杜仲叶氮代谢的影响. 植物生态学报, 2001, 25(5): 544 ~ 548.
- [35] 高吉喜, 曹洪法, 舒俭民. 酸雨对植物新陈代谢的影响. 环境科学研究, 1996, 9(4): 41 ~ 45.
- [36] 梁永超, 沈其荣, 张爱国, 等. 钙、硅对酸雨胁迫下小麦生长和养分吸收的影响. 应用生态学报, 1999, 10(5): 589 ~ 592.
- [38] 陈玉谷, 何宗英. 模拟酸雨对主要农作物蔬菜产量影响研究. 见:陈志远主编. 中国酸雨研究. 北京:中国环境科学出版社, 1997. 224 ~ 234.
- [39] 张福珠, 唐鸿寿, 杨晓峰. 西南地区主要农作物对酸雨敏感性和危害状况. 见:中国国家环境保护局编. 大气污染防治技术研究. 北京:北京科学出版社, 1993. 827 ~ 834.