吴修远,蒋跃林,熊晓辉,等. 2016. 不同的酸雨处理对冬小麦净光合速率的影响[J]. 气象与减灾研究,39(2):125-130.
Wu Xiuyuan, Jiang Yuelin, Xiong Xiaohui, et al. 2016. The influence of acid rain on net photosynthetic rate of winter wheat [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 39(2): 125-130.

不同的酸雨处理对冬小麦净光合速率的影响

吴修远，蒋跃林，熊晓辉，弓珍珍，莫若男

安徽农业大学 资源与环境学院，安徽 合肥 230036

摘 要：以冬小麦（皖麦68）为研究对象，采用大田及盆栽的培育方式，按照不同浓度将酸雨分为CK（pH5.6）、T1（pH4.0）、T2（pH2.5）三组，探究酸雨对小麦不同生育期净光合速率的影响。结果表明，随着模拟酸雨pH值的减小，小麦净光合速率受到抑制加强。整个小麦生长周期中T2处理下小麦净光合速率较CK处理降幅均显著，其中开花期的降幅达到极显著，而T1处理较CK处理净光合速率虽然有所降低，但不显著。小麦生长期间，中午时段会出现“光合午休”现象，此时会有效抑制小麦的净光合速率。

关键词：酸雨，小麦，净光合速率，生育期。
中图分类号：X517 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-9033(2016)02-0125-06
doi：10.12013/qxyjzyj2016-016

The Influence of Acid Rain on Net Photosynthetic Rate of Winter Wheat

Wu Xiuyuan , Jiang Yuelin , Xiong Xiaohui , Gong Zhenzhen , Mo Ruonan

College of Resource and Environment , Anhui Agricultural University , Hefei 230036 , *China*

Abstract: Based on the field trial and pot cultivation methods, the influence of acid rain at different pH levers on the net photosynthetic rate of winter wheat (HS0168) in different stages is studied. Acid rain is divided into three different concentrations including pH5.6 (CK), pH4.0 (T1) and pH2.5 (T2). The results show that: 1) With the decrease of pH, the inhibition of net photosynthetic rate of wheat was enhanced. 2) In the whole growth period of wheat, the net photosynthetic rate of T2 was significantly lower than that of CK, especially in the flowering stage. The net photosynthetic rate of T1 was lower than that of CK, but it was not significant. 3) During the growth period of wheat, photosynthetic depression appeared at noon, and it would effectively inhibit the net photosynthetic rate of wheat.

Key words: acid rain, wheat, net photosynthetic rate, growth stages.

0 引 言

近年来，酸雨污染日渐严重（吴建明等，2012）。我国是一个农业大国，农业生产在我国受重视程度较高，酸雨对农作物生长的生态环境具有严重影响，会抑制种子萌发（Duan et al，2007），导致

收稿日期：2016-05-18；**修订日期**：2016-06-10.
基金项目：2013年安徽省气象局预报员专项项目（编号：KY201305）.
作者简介：吴修远，硕士生，研究方向：农业气象，E-mail：wuxiuyuan@foxmail.com.
蒋跃林（通讯作者），教授，研究方向：农业气象、气象灾害，E-mail：jiangyuelin239@163.com.

产量下降(郝立生等,2007),并带来巨大经济损失(曹洪法等,1991;冯宗炜,2000;王代长等,2003)。Wood等(1974)发现酸雨对植物株高有一定的抑制作用,且浓度小于pH3.0时这种抑制开始明显。宋莉英等(2013)研究了酸雨胁迫下的3种菊科植物的光合特性的变化,发现随着pH值降低。飞机草和薇甘菊的净光合速率受到明显抑制,并且酸雨浓度越高受到抑制越强。鲁美娟等(2009)研究发现,在pH4.0以下,山核桃的净光合速率较对照受到显著抑制作用。梁婵娟等(2011)研究了酸雨对大豆幼苗光和影响的时间效应,发现当酸雨浓度升高,大豆幼苗的净光合速率呈显著下降趋势。小麦是我国第二大粮食作物,产量占粮食总产量的22.5%,消费量占粮食总消费量的四分之一,在农业生产及国民经济中占据着十分重要的地位(田展等,2006;王志强等,2008)。查建生等(1987)研究发现,模拟酸雨在pH2.0时小麦叶片出现漂白灼伤斑。陈景龙等(2006)发现,模拟酸雨对小麦叶片产生灼伤斑的临界值为pH3.0。倪寿清等(2006)通过对北方小麦的研究发现,酸雨使叶片生长明显受到抑制,叶面积变小,小麦植株含水量受酸雨影响变化不大,叶绿素含量减少。文中对不同的酸雨对小麦净光合速率的影响进行了研究,力图为采取有效的调控措施提供基础资料和依据,进而探索减少酸雨对农业生产的影响措施。

1 材料与方法

试验作物品种为皖麦68(代号HS0168)。试验地为安徽省合肥市。试验的土壤为黄褐土,pH值为6.3,有机质含量为2.36%,全氮含量为1.65%,速效氮含量为120.1 mg/kg,速效磷含量为8.4 mg/kg,速效钾含量为185.9 mg/kg。

1.1 模拟酸雨的配置

我国的酸雨以硫酸型酸雨为主,根据合肥地区酸雨成分,本试验将硫酸和硝酸按照6:1的比例配置成酸雨母液,再用蒸馏水稀释至pH值分别为5.6、4.0、2.5的模拟酸雨,pH值的校准使用PHS-25B型酸度计(上海精密科学仪器有限公司)。

1.2 试验设计

一方面,选取成熟饱满的皖麦68种子播种在内径22 cm、深26 cm的花盆中,每个花盆装15 kg取自同一块田并混合均匀的土壤,播种时施复合肥5 g作为底肥;另一方面,在相同的土壤条件下的大田中种植同一种小麦作为预备,同样施以等量底肥。花盆放置在钢架大棚中,大棚顶设有人工塑料顶棚,透光性良好,四面设有网,保证透风性的同时有效阻止禽类、畜类对小麦的伤害。

2月中旬,小麦出苗之后、拔节之前开始进行模拟酸雨处理,处理分为3组,分别为CK、T1和T2。其中,将CK作为对照组,将小麦随机分组,每组10盆,每盆定苗3株,分行放置,盆与盆间距为30 cm。将CK、T1和T2三组分别使用pH5.6、pH4.0、pH2.5的模拟酸雨溶液,使用小型喷雾器对小麦叶片、根茎、土壤进行喷施。根据合肥当地多年平均降水量确定喷淋量,每3 d喷淋一次,每次约500 mL/盆,相当于10 mm的酸雨喷淋量,喷淋强度为20 mm/h。模拟酸雨的处理持续至试验结束。

1.3 测定方法

使用便携式光合仪(雅欣1102)在小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期分别测定小麦的净光合速率,在晴天08—17时,随机选择各组小麦倒二叶片,每整点测定一次净光合速率,每次重复3次,取平均值作为测定结果。

1.4 数据分析

使用Origin和SPSS软件将实验数据分类整理和计算,用LSD法对差异性进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的酸雨对小麦拔节期净光合速率的影响

图1给出了小麦拔节期3个不同处理净光合速率的日变化。分析发现,小麦在一天中随着时间的变化净光合速率先升高,至12时出现一天中最高

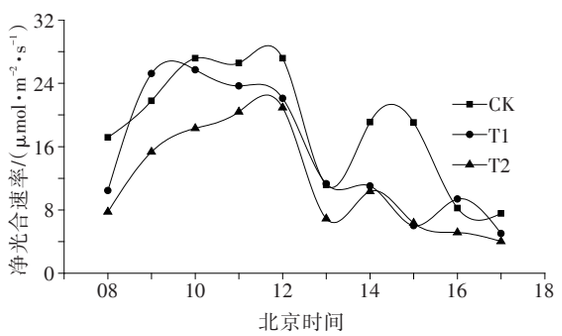


图1 不同浓度酸雨胁迫下小麦拔节期净光合速率日变化

Fig. 1 The diurnal variation of net photosynthetic rate of wheat under different concentrations of acid rain in jointing stage

值，随后大幅下降。在12—14时出现了“光合午休”的现象，其中在13时出现极小值，随后净光合速率逐渐升高，随着光照变弱，净光合速率整体下降。“光合午休”的现象发生的主要原因是中午温度较高，光强较强，导致植物缺水，叶片气孔关闭，过高的温度和光强抑制了植物的光合作用。此外小麦一天中净光合速率最强的时间段出现在10—12时，上午时段的净光合速率要比下午的强，可见小麦上午活性强于下午。“光合午休”现象过后，CK净光合速率回升较快。整体上CK处理的净光合速率高于T1处理，T1处理高于T2处理。

表1给出了3组pH值处理条件下小麦拔节期叶片日平均净光合速率的多重比较。分析发现，与CK处理相比，T1处理的日平均净光合速率降低，降低了18.88%，但并未通过差异显著性检验（$P<0.05$，下同）。T2处理与T1处理相比，小麦拔节期日平均净光合速率降低了22.99%，未通过显著性检验（$P<0.05$）。与CK处理相比，T2处理的净光合速率下降十分明显，通过了显著性检验，但并未通过差异极显著性检验（$P<0.01$，下同）。

表1　不同pH值酸雨水平下小麦拔节期叶片净光合速率的多重比较

Table 1　The multiple comparisons of net photosynthetic rate of wheat at different pH acid rain in jointing stage

处理组	平均值±标准差	相对值/%	P=0.05	P=0.01
CK（pH5.6）	18.49±7.51	100	a	A
T1（pH4.0）	15.00±8.21	81.12	ab	A
T2（pH2.5）	11.55±6.57	62.47	b	A

注：表中小、大写字母分别表示P=0.05（a，b，c，……）和P=0.01（A，B，C，……）水平上的差异显著性，含有相同字母表示差异不显著，无相同字母表示差异显著。

与CK处理相比，随着模拟酸雨pH值的下降，酸雨对小麦拔节期叶片的净光合速率抑制作用逐渐加强，并在pH2.5时酸雨对小麦拔节期的净光合速率抑制作用通过了显著性水平检验。此外，与CK处理相比，T1与T2两组酸雨处理均未达到极显著的差异显著性水平。说明在小麦拔节期，酸雨对小麦净光合速率的影响明显，但未达到极其明显的程度。

2.2　不同浓度的酸雨胁迫对小麦抽穗期净光合速率的影响

图2给出了不同处理下小麦抽穗期叶片净光合速率的日变化。分析发现，小麦叶片的净光合速率随着时间总体上呈现出先增加、后减少、再增加、最后减少的趋势，整体上呈现出“双峰型”的变化趋势。此外，小麦抽穗期净光合速率在一天中的08—10时相对最高。由于小麦抽穗期较拔节期昼变长，气温升高，“光合午休”现象开始时间提前，结束时间延后，所以小麦一天中最大净光合速率的时间段变为08—10时。10时以后，小麦叶片净光合速率开始下降，11时净光合速率进一步下降，12—14时出现“光合午休”现象，净光合速率的极小值出现在13—14时。

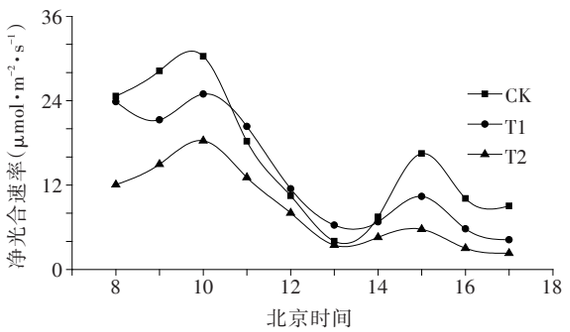


图2　不同浓度酸雨胁迫下小麦抽穗期净光合速率日变化

Fig. 2　The diurnal variation of net photosynthetic rate of wheat under different concentrations of acid rain in heading stage

“光合午休”前，CK处理下小麦叶片净光合速率较T1和T2处理降幅较大，10时之后净光合速率开始下降，至14点“光合午休”结束之前，T1处理的小麦叶片净光合速率甚至一直比CK处理要高。分析原因可能是此时温度较高，光强较强，小麦叶片气孔逐渐关闭，而T1处理的小麦叶片中的部分酶活性受酸雨刺激活性升高，导致“光合午休”期间净光合速率受抑制作用相对变小。

表2给出了不同pH值酸雨水平下小麦抽穗期叶片净光合速率的多重比较。分析发现，小麦抽穗期叶片的日平均净光合速率随着pH值的下降，受抑制作用越加明显。与CK处理相比较，T1处理小麦抽穗期的日平均净光合速率下降了14.91%，但并未通过差异显著性检验；T2处理的小麦日平均净光合速率下降46.23%，通过了差异显著性检验，但未通过差异极显著性检验T2处理较T1处理小麦净光合速率降低了36.81%，但未达到差异显著水平。

结合图2和表2分析可知，与小麦拔节期相比，CK处理小麦抽穗期的日最大净光合速率变大，这是由于抽穗期的日照更为充足，气温也更高。但小麦抽穗期的日平均净光合速率低于拔节期，这是由

表2 不同pH值酸雨水平下小麦抽穗期叶片净光合速率的多重比较

Table 2 The multiple comparisons of net photosynthetic rate of wheat at different pH acid rain in heading stage

处理组	平均值±标准差	相对值/%	P=0.05	P=0.01
CK(pH5.6)	15.90±9.21	100	a	A
T1(pH4.0)	13.53±8.17	85.09	ab	A
T2(pH2.5)	8.55±5.66	53.77	b	A

注:同表1。

表3 不同pH值酸雨水平下小麦开花期叶片净光合速率的多重比较

Table 3 The multiple comparisons of net photosynthetic rate of wheat at different pH acid rain in flowering stage

处理组	平均值±标准差	相对值/%	P=0.05	P=0.01
CK(pH5.6)	27.80±12.22	100	a	A
T1(pH4.0)	22.78±6.86	81.94	a	AB
T2(pH2.5)	13.38±6.36	48.12	b	A

注:同表1。

于小麦抽穗期中午的气温更高,光照更强,“光合午休”现象更明显。此外到了抽穗期,T1处理较CK处理日平均净光合速率降幅变小,这是由于T1处理的受“光合午休”现象的影响较小。而T2处理较CK处理日平均净光合速率降幅变大,说明随着酸雨的影响持续,小麦的净光合速率受抑制作用加深。

2.3 不同浓度的酸雨胁迫对小麦开花期净光合速率的影响

图3给出了不同酸雨胁迫下小麦在开花期的净光合速率日变化。分析发现,小麦在开花期净光合速率在10—11时达到最高,并且上午的净光合速率普遍高于下午。CK处理和T1处理的小麦在中午有明显的“光合午休”现象,其中CK处理下的小麦叶片的净光合速率降幅更大,“光合午休”现象更明显,而T2处理无明显的“光合午休”现象。CK处理与T1处理的小麦净光合速率日变化仍显示为“双峰型”,在“光合午休”后净光合速率有所回升,随后下降。T2处理的小麦净光合速率在12时开始逐渐降低。表3给出了不同pH值酸雨水平下小麦开花期日平均净光合速率的多重比较。分析发现,与CK处理相比较,T1处理的小麦叶片的日平均净光合速率下降了18.06%,T2处理降低了51.88%。T1处理较CK处理的差异未通过显著性检验,这说明T1处理下小麦净光合速率下降不明显。而T2处理较CK处理通过了差异极显著性检验,说明小麦净光合速率经T2酸雨处理后受抑制作用极为显著。T2与T1两组处理相比较同样通过了差异显著性检验,但未达到差异极显著水平,降幅达到41.26%,说明不同pH值的酸雨对小麦净光合速率的影响也产生显著性差异。分析还发现,CK处理下小麦净光合速率的日变化比较大,T1处理次之,T2处理变化最小。

与小麦抽穗期相比,在开花期光照强度进一步加强,温度也随之升高。此时,小麦最大净光合速率进一步升高,但“光合午休”现象对小麦净光合速率的抑制作用有所降低,同时处理的日平均净光合速率均升高。

2.4 不同浓度的酸雨胁迫对小麦灌浆期净光合速率的影响

图4给出了不同浓度酸雨胁迫下小麦灌浆期净光合速率日变化。分析发现,小麦在灌浆期叶片的净光合速率上午普遍高于下午,最大值出现在10—11时,此生育期小麦的净光合速率。CK处理的小麦在中午有较弱的“光合午休”现象,T1和T2两组处理的小麦无明显午休现象。“光合午休”发生时,CK处理的净光合速率的极小值出现在13时。小麦“光合午休”期间,T1处理的小麦净光合速率略大于

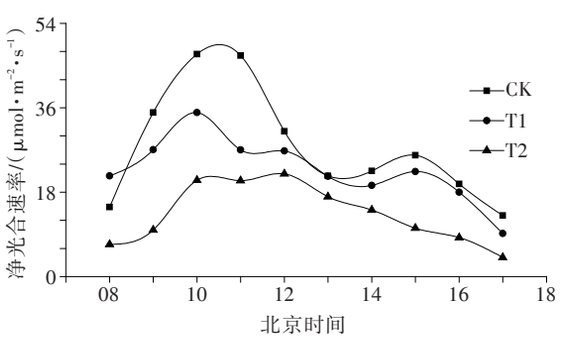


图3 不同浓度酸雨胁迫下小麦开花期净光合速率日变化

Fig. 3 The diurnal variation of net photosynthetic rate of wheat under different concentrations of acid rain in flowering stage

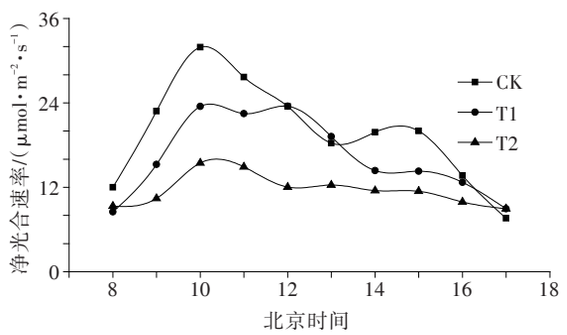


图4 不同浓度酸雨胁迫下小麦灌浆期净光合速率日变化

Fig. 4 The diurnal variation of net photosynthetic rate of wheat under different concentrations of acid rain in filling stage

CK处理；T2处理的小麦净光合速率变化比较平缓。

表4给出了不同pH值酸雨水平下小麦灌浆期叶片净光合速率的多重比较。分析发现，T1处理较CK处理，小麦灌浆期叶片的日平均净光合速率下降了17.49%；T2处理较CK处理，小麦日平均净光合速率下降了41.05%，T2处理较T1处理，小麦日平均净光合速率下降28.56%。T1处理较CK处理，小麦日平均净光合速率虽然有所下降，但并未通过差异显著性检验。T2处理较CK处理，小麦日平均净光合速率下降显著，通过了差异显著性检验，但并未通过差异极显著性检验。T2与T1处理相比，小麦净光合速率有所下降，但不明显，即未达到差异显著性水平。三组处理组的小麦净光合速率的日变化为CK处理 > T2处理 > T1处理。

表4　不同pH值酸雨水平下小麦灌浆期叶片净光合速率的多重比较

Table 4　TThe multiple comparisons of net photosynthetic rate of wheat at different pH acid rain in filling stage

处理组	平均值±标准差	相对值/%	P=0.05	P=0.01
CK(pH5.6)	19.73±7.31	100	a	A
T1(pH4.0)	16.28±5.65	82.51	ab	A
T2(pH2.5)	11.63±2.18	58.95	b	A

注：同表1。

与开花期相比，小麦灌浆期的日平均净光合速率下降，最大净光合速率同样下降，“光合午休”现象进一步减弱，其对小麦叶片的净光合速率抑制作用随之减小。由于小麦生长至后期叶片活性降低，净光合速率的日变化有变小的趋势，尤其是T2处理的小麦，受到酸雨胁迫影响较大，叶片活性进一步降低，对温度及光照强度不敏感，导致净光合速率日变化非常小，有趋于平稳的趋势。

3　结论与讨论

1）通过研究酸雨对小麦各生育期叶片净光合速率的影响发现，随着小麦的生长，叶片的净光合速率在不同生育期表现出先升高、再降低的趋势，开花期的小麦叶片净光合速率整体上高于其他生育期。

2）各生育期小麦叶片的净光合速率均表现为上午高于下午，且均具有“光合午休”现象，这一现象使得小麦叶片在中午的净光合速率迅速降低，其中以各生育期的酸雨浓度为pH5.6的最为明显。“光合午休”现象对小麦叶片净光合速率的抑制以小麦抽穗期最强，随后抑制逐渐减弱，到灌浆期T1和T2处理的小麦叶片无明显“光合午休”现象发生。

3）在试验的4个小麦生育期，T1处理较CK处理小麦叶片净光合速率均有所下降，降幅为14%—19%，说明pH4.0的酸雨对小麦的净光合速率有一定的抑制作用，但均未通过差异显著性检验。而pH2.5的较CK小麦净光合速率的下降均通过了差异显著性检验，其中开花期通过了极显著性检验，说明T2处理酸雨对小麦净光合速率的抑制十分显著，对开花期影响更大。在开花期pH4.0与pH2.5的酸雨处理的小麦净光合速率也通过了差异显著性检验，说明不同浓度的酸雨对小麦开花期净光合速率的影响也很明显。

本次试验仅进行了小麦的一个生长周期，没有长期重复；资料样本以及处理分组较少，有些结论和猜想还需进一步验证；模拟酸雨，仅模拟自然酸雨中的酸配比，矿物质等其他化学组成均没有加入模拟，所以酸雨配置还需进一步完善；试验条件的控制也有待改进，使之与自然生长过程趋近一致。

参考文献(References)

曹洪法，舒俭民，刘燕云，等. 1991. 酸雨对两广地区农作物的经济损失研究[J]. 环境科学研究，4(2)：1-6.　Cao Hongfa, Shu Jianmin, Liu Yanyun, et al. 1991. The economic loss of acid on the crops in Guangdong and Guangxi[J]. Research of Environmental Sciences, 4(2): 1-6.(in Chinese)

陈景龙，杨国栋. 2006. 模拟酸雨对小麦生长和形态的影响[J]. 科学之友(学术版)，27(9)：64，76.　Chen Jinlong, Yang Guodong. 2006. Influence of simulated acid rain on the growth and form of wheat [J]. Friend of Science Amateurs, 27(9): 64, 76.(in Chinese)

Duan P, Ding F, Wang F, et al. 2007. Priming of seeds with nitric oxide donor sodium nitroprusside (SNP) alleviates the inhibition on wheat seed germination by salt stress[J]. J Plant Physiol Mol Biol, 33(3): 244-250.

冯宗炜. 2000. 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，2(9)：5-11，28.　Feng Zongwei. 2000. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China[J]. Engineering Science, 2(9): 5-11, 28.(in Chinese)

郝立生，吴雁，王荣英. 2007. 海河低平原春季气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 气象与减灾研究，30(4)：20-24.　Hao Lisheng, Wu Yan, Wang Rongying. 2007. Impact of

spring climate change on wheat yield in lower Haihe plain [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 30 (4):20-24.(in Chinese)

梁婵娟,葛玉晴,吕霞,等. 2011. 酸雨与稀土镧对大豆幼苗光合反应复合影响的时间效应研究[J]. 农业环境科学学报,30(11):2174-2177. Liang Chanjuan, Ge Yuqing, Lyu Xia, et al. 2011. Time-effects of combined treatments of simulated acid rain and lanthanum on photosynthesis of soybean seedlings[J]. Journal of Agro-Environment Science, 30(11):2174-2177.(in Chinese)

鲁美娟,江洪,余树全,等. 2009. 模拟酸雨对山核桃和杨梅光合生理特征的影响[J]. 生态学杂志,28(8):1476-1481. Lu Meijuan, Jiang Hong, Yu Shuquan, et al. 2009. Effects of simulated acid rain on photosynthetic physiology of carya cathayensis and myricarubra[J]. Chinese Journal of Ecology, 28(8):1476-1481.(in Chinese)

倪寿清,赵大传,崔清洁,等. 2006. 模拟酸雨对北方小麦生长规律影响的研究[J]. 山东大学学报(理学版),41(6):109-113. Ni Shouqing, Zhao Dachuan, Cui Qingjie, et al. 2006. Effects of simulated acid rain on the growing rules of northern wheat[J]. Journal of Shandong University, 41(6):109-113.(in Chinese)

宋莉英,柯展鸿,孙兰兰,等. 2013. 模拟酸雨对3种菊科入侵植物光合特性的影响[J]. 植物学报,48(2):160-167. Song Liying, Ke Zhanhong, Sun Lanlan, et al. 2013. Effect of simulated acid rain on gas exchanges of three compositae invasive plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 48(2):160-167.(in Chinese)

田展,徐新良,史军. 2006. 气候变化对甘肃定西、安徽合肥小麦生产影响研究[J]. 地理科学进展,25(4):88-95. Tian Zhan, Xu Xinliang, Shi Jun. 2006. Assessing the impact of climate change on wheat production in Dingxi (Gansu province) and Hefei (Anhui province)[J]. Progress in Geography, 25(4):88-95.(in Chinese)

王代长,蒋新,卞永荣,等. 2003. 酸沉降对生态环境的影响[J].中国生态农业学报,11(1):107-109. Wang Daichang, Jiang Xin, Bian Yongrong, et al. 2003. The impacts of acidic deposition on ecoenvironment [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 11(1):107-109.(in Chinese)

王志强,方伟华,何飞,等. 2008. 中国北方气候变化对小麦产量的影响—基于EPIC模型的模拟研究[J]. 自然灾害学报,17(1):109-114. Wang Zhiqiang, Fang Weihua, He Fei, et al. 2008. Effect of climate change on wheat yield in northern China: A research based on EPIC model [J]. Journal of Natural Disasters, 17(1):109-114.(in Chinese)

Wood T, Bormann F H. 1974. The effects of an artificial acid mist upon the growth of betula alleghaniensis[J]. Environ Pollut, 7(4):259-268.

吴建明,邹海波,贺志明. 2012. 江西省酸雨变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与减灾研究,35(2):45-50. Wu Jianming, Zou Haibo, He Zhiming. 2012. Variation characteristics of acid rain in Jiangxi and its relationship with meteorological condition[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 35(2):45-50.(in Chinese)

查建生,袁大伟. 1987. 模拟酸雨对小麦生长的影响[J]. 上海环境科学,6(5):13-15. Zha Jiansheng, Yuan Dawei. 1987. Influence of simulated acid rain on the growth of wheat[J]. Shanghai Environmental Sciences, 6(5):13-15.(in Chinese)