

利用冠层和叶片水平的反射光谱研究 模拟酸雨对小麦的影响

薛忠财, 高辉远*, 刘 鹏, 柳 洁

(山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271000)

摘 要:通过光谱分析技术,研究了模拟酸雨($\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^{-}=5:1$)对小麦产量和生理特性的影响。结果表明,模拟酸雨伤害了小麦叶片的结构和功能,降低了叶绿素含量和光合速率,从而显著降低了小麦的产量,经过 pH 为 2 的酸雨处理后的小麦产量降幅达 19.1%。通过对植被指数的分析可以看出,小麦冠层叶绿素含量在开花期以后逐渐降低,而旗叶的叶绿素含量则在灌浆期以后开始下降,两者的下降幅度都随着酸雨 pH 的下降而增大。光合速率表现出与叶绿素含量相同的变化。另外,对小麦产量与不同生育期冠层和叶片水平的植被指数的相关分析表明,灌浆期的小麦冠层水平的 NDVI 、 $m\text{ND}_{705}$ 和 WI 与酸雨处理后小麦的产量显著相关。总之,利用光谱分析技术可以快速、无损地监测不同酸雨处理对小麦的生长和营养状况的影响。

关键词:小麦;模拟酸雨;反射光谱;植被指数;产量

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)02-0228-08

Study on the Effects of Simulated Acid Rain on Wheat Using the Spectral Reflectance at Canopy and Leaf Level

XUE Zhong-cai, GAO Hui-yuan*, LIU Peng, LIU Jie

(State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: Acid rain has been considered as one of the most serious environment problems. The traditional monitor methods are expensive and time consume. Recently, the spectral reflectance technical has been developed and used to reflect the effects of the environment on plants rapidly and non-invasively. However, relationship between spectral reflectance and effects of acid rain on wheat is still limited. In this paper the effects of simulated acid rain($\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^{-}=5:1$) on the grain yield and physiological characteristics of wheat were studied using spectral reflectance. The results showed that the simulated acid rain decreased the grain yield due to damaged leaf internal structure and function, decreased chlorophyll content and photosynthesis. The grain yield was also reduced by 19.1% in the wheat treated with simulated acid rain of pH 2. The net photosynthetic rate and the pigment content decreased after flowing at the canopy level but it decreased after filling at the leaf level. The decrease extent at both canopy and leaf levels was enhanced by the decreasing of pH in the simulated acid rain. In order to make the best use the spectral reflectance to reflect the effects of the acid rain on wheat, the correlation between the grain yield and the different vegetation indexes [water index(WI), the modified simple ratio($m\text{SR}705$), photochemical reflectance index(PRI), normalized difference vegetation index(NDVI)] from the spectral reflectance of canopy or leaf level at different development stage was analyzed. The results showed that a significant correlation was observed between grain yield and NDVI , $m\text{ND}_{705}$ and WI both at canopy and leaf level at the filling stages. In conclusion, the technique of spectral reflectance can be used to reflect the growth, nutrition condition and grain yield of the wheat under the influence of acid rain.

Keywords: wheat; simulated acid rain; spectral reflectance; vegetation index; grain yield

酸雨是指 pH 低于 5.6 的大气降水,被喻为“空中

死神”,是当今三大环境问题之一。随着现代工业化的发展,我国继欧洲和北美之后成为第三大酸雨区,酸雨成为制约农业生产和经济发展的重要因素之一^[1]。

国内外研究者主要从生态、生理、生化等不同层面揭示了酸雨伤害植物的机理,酸雨能够使植物叶片出现可见伤害,影响植物宏观及微观结构和叶绿素含

收稿日期:2010-09-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118505);国家自然科学基金项目(30671451,30571125)

作者简介:薛忠财(1985—),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事环境生态学研究。E-mail:zhongcaix2008@163.com

* 通讯作者:高辉远 E-mail:gaohy@sdau.edu.cn

量,并对植物代谢、抗氧化系统、生长发育和生物量造成影响^[2-5]。目前的酸雨伤害监测技术主要包括:植物叶片表观伤害监测和生理生化伤害监测^[6],表观伤害监测技术具有直观性强,诊断方法简单,但监测的灵敏性及定量的指标不尽人意;而后者主要指标包括植物光合速率、气孔导度、细胞质膜透性、叶绿素含量、细胞 pH 变化、活性氧防御系统的应激反应等^[7],这些指标虽然能从生理生化水平反映酸雨对植物细胞的伤害,但是它们的测定都是对单个叶片和植株水平进行的,同时需要破坏性取样。对于群体的测定,则工作量巨大。

近年来,光谱分析技术在植物生理生态研究中得到广泛的应用。因为植物的反射光谱主要由叶片的内部结构和叶片中各种叶绿素、水分含量和其他生物化学成分对光的反射而形成的。所以,当植物受到外界生物或非生物的胁迫时,植物叶片结构或生化组成发生了变化,从而导致植物的光谱特征也会发生明显的变化,这为我们利用光谱反射技术进行酸雨对作物影响的研究提供了理论基础和依据。通过对植物反射光谱的分析,能够实时、快速、精确、无损测定植物的叶绿素含量、营养状况、水分含量等,并且可以从叶片水平、冠层水平以及生态系统等多个层面研究植物在各种条件下的生理生态变化^[8-12]。

然而,关于利用光谱分析技术研究酸雨胁迫下小麦叶片和冠层的反射光谱变化以及对小麦产量和生理影响的研究较少,所以,本文通过一系列田间实验,通过对酸雨胁迫下小麦冠层和叶片水平的反射光谱和产量的测定,分别从叶片水平和冠层水平上,研究酸雨对小麦长势和营养状况的影响,为利用反射光谱技术快速、无损伤监测酸雨对小麦的影响提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验设计和处理方法

实验于 2008—2009 年,在山东农业大学黄淮海玉米中心进行,小麦于 2008 年 10 月 15 播种,小区面积为 $3\text{ m}\times 4\text{ m}=12\text{ m}^2$ 。

酸雨按照天然酸雨中硫酸根和硝酸根的摩尔比配制,其中 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^- = 5:1$ 分别配成 pH=5、3.5、2.0 三个梯度,以自来水作对照。小麦返青后开始进行处理,于早上 7:00—8:00 时,用喷雾器进行模拟人工降雨,以叶片有水珠滴下为宜,每隔 6 d 处理 1 次,共计 5 次。分别在小麦挑旗期、开花期、灌浆期、成熟期进行

各项指标的测定。

1.2 测定项目与方法

选择晴朗无云无风的天气,于上午 10:00—12:00 时,使用 Unispec-SC 光谱分析仪 (PP SYSTEMS, 美国)测定小麦的冠层光谱反射率。其测定波长范围为 310~1 130 nm,间隔为 3.3 nm。测量时,探头垂直向下,距冠层高度约 2 m,扫描面积为 0.39 m^2 。每个小区重复 20 次,以其平均值作为该小区的光谱反射率值。在测量过程,随时用标准白板进行反射校正。

Unispec-SC 光谱分析仪内置一个卤素灯,测定叶片光谱反射时,将一个分支光纤(直径为 2.3 mm)的一端连接到卤素灯的输出端口,另一端连接到检测器的输入端口,光纤的探头端固定在一个标准叶夹中,与叶片呈 60° 角,测定时使用仪器配备的白色标准板进行仪器的校正和参比扫描,每一次扫描的反射光谱为 10 次测定的平均值。每个处理小区选 10 株小麦,测定小麦的旗叶,每个叶片重复 5 次,取最终平均值作为该小区的结果。

小麦成熟期,分别在测反射光谱的区域选取 3 个 1 m^2 的样点普查每平方米的穗数,并进行人工收割脱粒测得实际产量。同时,从每小区取 20 个单茎作室内考种,考查穗粒数和千粒重。

1.3 数据处理

选择被广泛应用和证明的植被指数^[13-16](表 1),用于监测酸雨胁迫后小麦生长和营养状况的变化。为了检验不同的植被指数在评估酸雨对小麦产量影响中的有效性,将植被指数和产量进行相关分析。

用 Excel2003 对数据进行处理,SPSS16.0 进行 LSD 多重比较,Sigma Plot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对小麦形态特征的影响

不同 pH 的模拟酸雨处理使小麦的株高随着 pH 值的减小呈降低趋势,而 pH 为 2 的酸雨处理后小麦株高明显降低,与对照相比降低 10% 左右(表 2)。在经过 pH 2 的模拟酸雨处理后,小麦叶片上出现伤害症状,表现为枯死的黄色斑点,均匀的分布在叶片上,但在其他处理的小区叶片上,没有观测到明显的伤害症状。

2.2 模拟酸雨对小麦产量的影响

经过不同 pH 值酸雨处理后,小麦的产量、千粒重、有效穗数都随着 pH 的降低而逐渐降低(表 3),只有穗粒数在各处理之间没有显著性差异,并且 pH 值

表 1 本文使用的植被指数计算公式
Table 1 The algorithm of vegetation indexes

植被指数 Vegetation index	植被指数的计算公式 Algorithm of vegetation index
归一化植被指数 ^[13] Normalized difference vegetation index, <i>NDVI</i>	$NDVI = (R_{810} - R_{680}) / (R_{810} + R_{680})$
光化学植被指数 ^[14] Photochemical reflectance index, <i>PRI</i>	$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
修改比值植被指数 ^[15] The modified simple ratio, <i>mSR</i> ₇₀₅	$mSR_{705} = (R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$
水分指数 ^[16] Water index, <i>WI</i>	$WI = R_{900} / R_{970}$

注: *R_x* 为对应 *X* 波长处的反射率。
Note: *R_x* is the spectral reflectance at wavelength *x*.

表 2 模拟酸雨对不同生育期小麦相对株高的影响(%)
Table 2 Effects of simulated acid rain on relative height of wheat at different stages(%)

处理	挑旗期 Flagging	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Harvesting
CK	100.00a	100.00a	100.00a	100.00a
pH5	99.07a	99.10a	99.97a	97.84a
pH3.5	96.86a	100.35a	99.89a	98.87a
pH2	90.00b	92.89b	91.65b	90.81b

注:以对照植株的高度为 100%,其他处理的小麦植株的高度换算成对照的百分数。同列数字后不同的小写字母之间表示相同生育期不同 pH 酸雨处理之间达显著性差异, *P*<5%; 相同的小写字母之间表示不同 pH 酸雨处理之间未达显著性差异。

Note: The height of the control wheat was taken as 100%, while those treated with different acid rain were taken as the percentage of the control. Different letters at the same column indicate significant difference between simulated acid rain treatments with different pH at the same stage, *P*<5%; The same letters at the same column indicate no difference between simulated acid rain treatments with different pH at the same stage.

为 2 的模拟酸雨处理使小麦产量降低了 19.1%。

2.3 模拟酸雨对小麦冠层和叶片水平反射光谱的影响

经过不同 pH 模拟酸雨处理后,小麦冠层和叶片反射光谱与对照相比表现出明显差异。在冠层水平,随着酸度的增加小麦在近红外区的反射率降低,而在可见光区的反射率增加。在叶片水平上,轻微的酸雨使小麦在挑旗期的可见光区的反射率降低,而在

挑旗期以后,可见光区的反射率随着酸雨酸度的增加逐渐变大;在近红外区的反射率在整个实验过程中都随着酸度的增加而增加(图 1)。为了能够更为清楚的看出不同酸雨处理后小麦冠层和叶片光谱的变化,分析了处理前后小麦冠层和叶片差值光谱的变化(图 2)。从图 2 可以直观地看出小麦冠层和叶片水平光谱的变化,在红光和近红外区反射光谱变化最为明显。

2.4 模拟酸雨对小麦冠层和叶片水平的植被指数的影响

植被指数是由多个波段反射光谱的数据经过分析运算所得,它们构成了能够反映植物长势和营养状况的参数。在本实验中,从图 3 可以看出, *NDVI* 在冠层和叶片水平上的表现基本一致,在后期不同处理之间差异越来越明显;但是 *mSR*₇₀₅ 和 *PRI* 在叶片和冠层水平上的表现有明显的区别,在冠层水平, *mSR*₇₀₅ 和 *PRI* 在开花期以后开始降低,而在叶片水平上,灌浆期以后才有明显的下降,其下降幅度随着处理酸雨 pH 的下降而增加。而无论叶片水平和冠层水平上,不同处理间的 *WI* 都明显差异,并且随着处理酸雨 pH 的下降而更为明显。

2.5 不同生育期冠层和叶片反射光谱的植被指数与产量的相关性

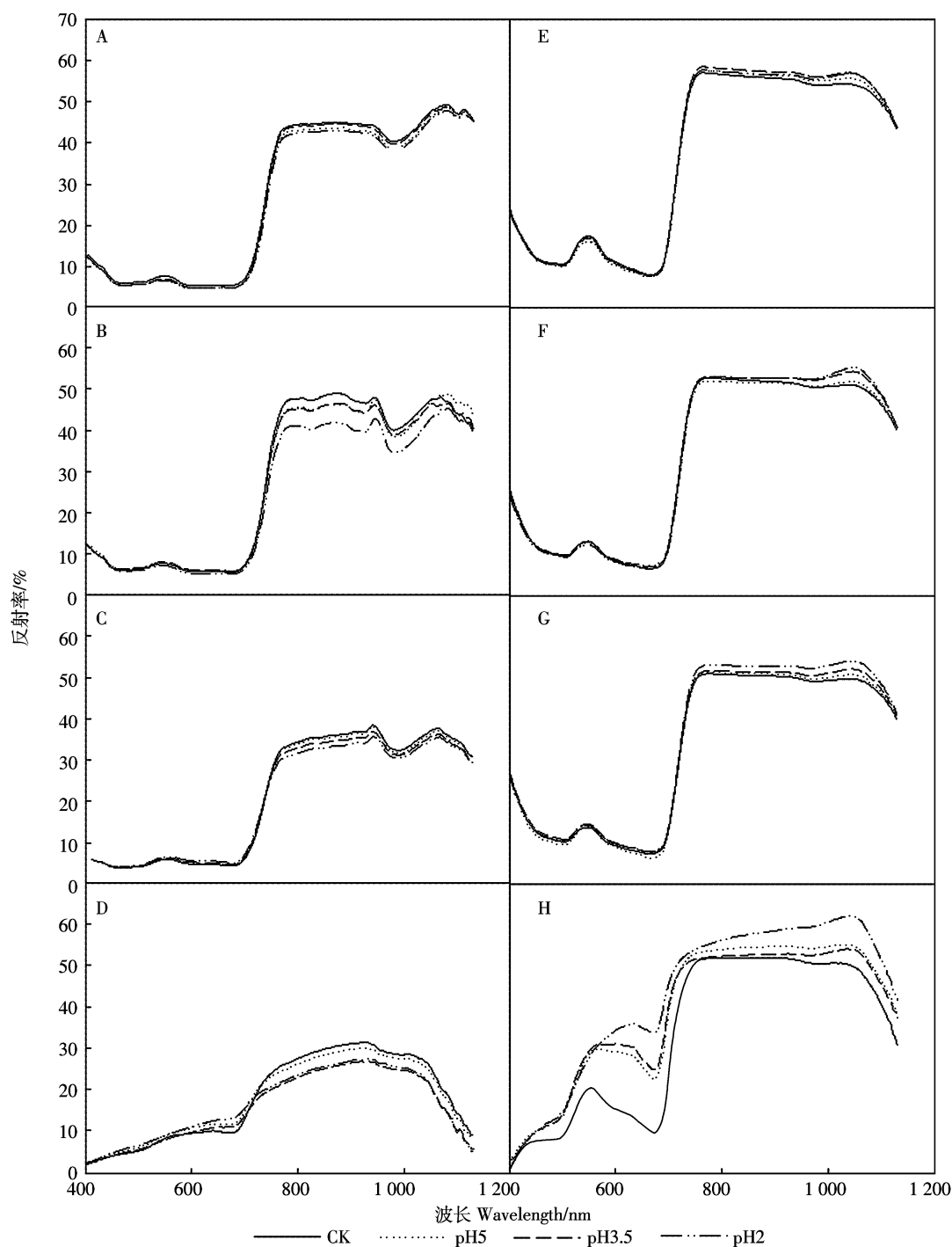
对不同生育期冠层和叶片植被指数与产量的相

表 3 模拟酸雨对小麦产量和产量三要素的影响
Table 3 Effects of simulated acid rain on grain yield and its component of wheat

处理 Treatments	产量 Yield /kg·hm ⁻²	千粒重 1000-seed weight/g	穗粒数 Spike grains number/spike	有效穗数 Spike number/spike·m ⁻²
CK	7 817.5±70 a	49.9±3 a	49.28±8 a	430±12 a
pH 5	7 777.7±42 ab	49.4±2 a	49.75±4 a	427±7 a
pH 3.5	7 518.4±70 bc	47.5±2 b	48.85±3 a	411±14 b
pH 2	6 263.4±200 d	44.15±1.5 c	47.14±7 a	357.5±13 c

注:同一列指标不同的小写字母之间表示不同 pH 酸雨处理之间达显著性差异, *P*<5%;相同的小写字母表示不同 pH 酸雨处理之间未达显著性差异。

Note: Different small letters at the same column indicate significant difference between simulated acid rain treatments with different pH, *P*<5%; The same letters at the same column indicate no difference between simulated acid rain treatments with different pH.



A、B、C、D 和 E、F、G、H 分别为冠层和叶片水平的小麦挑旗期、开花期、灌浆期、成熟期的反射光谱

A, B, C, D and E, F, G, H were the spectral reflectance of the wheat at flagging, flowering, filling and harvesting stages at canopy and leaf level, respectively.

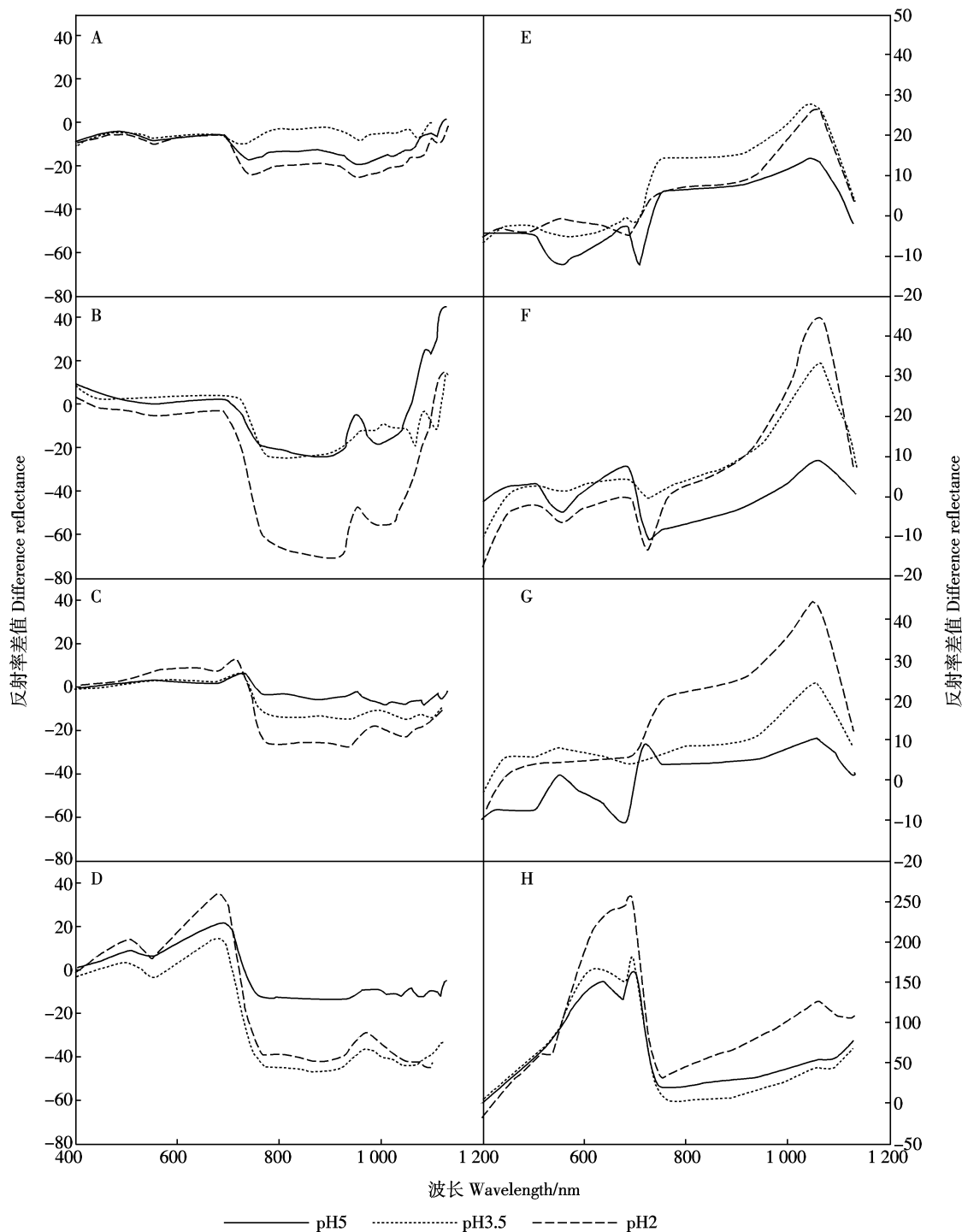
图1 不同酸雨处理对不同生育期小麦冠层和叶片反射光谱的影响

Figure 1 Effect of different acid rain treatments on spectral reflectance of the wheat at canopy and leaf level at different development stages

关分析表明,在冠层水平上, $NDVI$ 、 mSR_{705} 和 WI 在灌浆期与小麦产量呈显著的相关,并且 WI 达到了极显著水平;而挑旗期的 PRI 与小麦产量呈显著相关(表4)。但是在叶片水平上,只有 WI 和 PRI 在小麦灌浆期和成熟期与小麦产量呈显著相关(表5)。

3 讨论

酸雨对小麦的形态和产量都有很大的影响,pH 为 2 的模拟酸雨导致小麦叶片出现明显的伤害斑点,并且显著降低了小麦产量。曹洪法等^[17]认为,不同作



A、B、C、D 和 E、F、G、H 分别为冠层和叶片水平的小麦在挑旗期、开花期、灌浆期和成熟期的差值光谱

A, B, C, D and E, F, G, H were the difference reflectance of the wheat at flagging, flowering, filling and harvesting stages at canopy and leaf level, respectively.

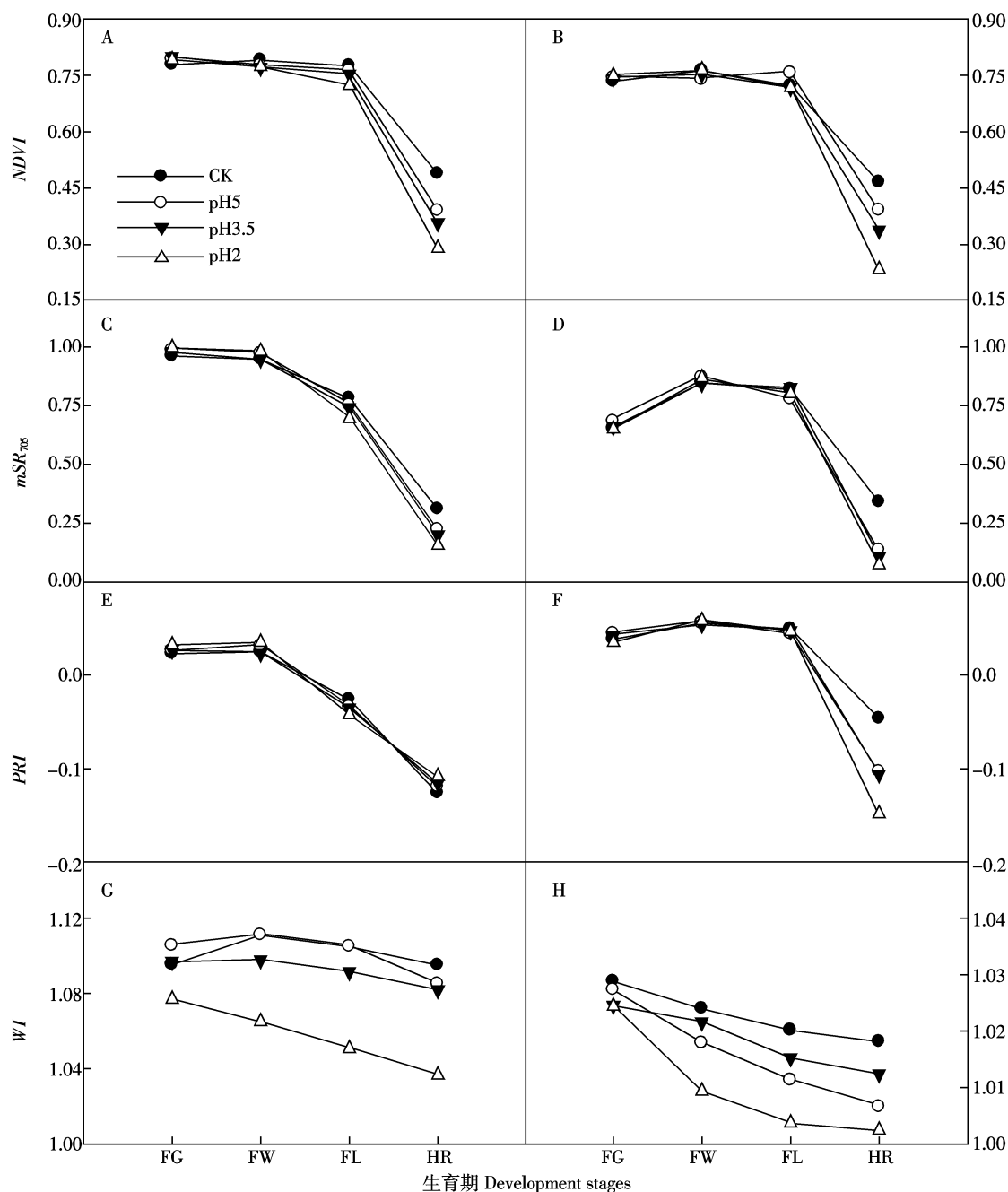
图 2 不同酸雨处理对不同生育期小麦冠层和叶片差值光谱的影响

Figure 2 Effect of different acid rain treatments on difference reflectance of the wheat at canopy and leaf level at different development stages

物抗酸雨能力有较大差异,小麦产生可见伤害的 pH 值为 3.0,张耀民等^[8]指出,模拟酸雨对小麦产量的影响阈值为 pH 2.5。在本实验中,除了 pH 2 的酸雨对小麦叶片和植株的生长产生明显的伤害和抑制作用外,

其他 pH 的酸雨处理中没有对小麦叶片和植株的生长产生明显的伤害和抑制作用(表 2)。

在冠层水平上,近红外波段的反射率主要取决于生物量和叶面积指数,而可见光波段的反射率则主要



A、C、E、G 和 B、D、F、H 分别为小麦冠层和叶片水平的植被指数($NDVI$ 、 mSR_{ms} 、 PRI 、 WI)。图中 FG:挑旗期;FW:开花期;FL:灌浆期;HR:收获期。

A, C, E, G and B, D, F, H were the vegetation indexes of the wheat at canopy and leaf level, respectively.

FG: Flagging stage; FW: Flowering stage; FL: Filling stage; HR: Harvesting stage.

图3 不同酸雨处理后,小麦冠层和叶片水平的不同植被指数随生育期的变化

Figure 3 The change of the vegetation indexes of wheat at canopy and leaf level with different acid rain treatments

取决于冠层光合色素的含量和盖度。在叶片水平上,可见光波段的低谷主要由光合色素强烈吸收引起,550 nm 附近是光合色素的强反射峰。植物叶片对于近红外光的反射是由于植物叶片内部组织结构多次反射、散射的结果^[21-22]。由多个波段反射光谱的数据经

过分析运算构成的植被指数,可以反映植物长势和营养状况。其中, $NDVI$ 被广泛地用来衡量各种环境胁迫对植物个体、群体和生态系统的影响,与叶面积、生物量、净光合产物等具有很好的关系; WI 可以监测植物的水分状况, WI 值越高,叶片的含水量越高,并且可

表4 不同生育期冠层反射植被指数与产量的相关性($n=4$)Table 4 Correlation coefficients between grain yield and vegetation indexes at canopy level at different development stages($n=4$)

植被指数 Vegetation index	挑旗期 Flagging	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Harvesting
<i>NDVI</i>	-0.08	0.23	0.87*	0.68
<i>mSR</i> ₇₀₅	-0.64	-0.59	0.83*	0.61
<i>PRI</i>	-0.85*	-0.64	-0.71	-0.79
<i>WI</i>	-0.52	0.27	0.96**	0.79

注:“*”表示 $P<5\%$ 水平显著相关;“**”表示 $P<1\%$ 水平显著相关。下同。

Note: “*” indicates significant difference at 5% level, “**” indicates significant difference at 1% level. The same below.

表5 不同生育期叶片反射植被指数与产量的相关性($n=4$)Table 5 Correlation coefficients between grain yield and vegetation indexes at leaf level at different development stages($n=4$)

植被指数 Vegetation index	挑旗期 Flagging	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Harvesting
<i>NDVI</i>	-0.81	-0.54	0.44	0.72
<i>mSR</i> ₇₀₅	0.45	-0.45	0.04	0.60
<i>PRI</i>	0.74	0.80	-0.03	0.82*
<i>WI</i>	0.77	0.79	0.83*	0.92**

以较为灵敏地反映叶片水分相对含量、叶片水势、气孔导度和细胞壁弹性;*mSR*₇₀₅ 由于消除了叶片结构对反射的影响,用于多种植物叶绿素含量的估算;而 *PRI* 则被证明与植物群体和叶片的光合速率有很好的相关性,因此被广泛地用于反映植物冠层和叶片的光合速率^[11,14]。

从图3可以看出,随着生育期的发展,*PRI* 所反映的小麦群体的光合速率在开花期以后开始下降,而旗叶的光合速率则在灌浆期以后才开始下降。作为叶绿体捕获光能的重要色素,叶绿素在维持光合作用上起重要的作用,严重的酸雨处理加速叶绿素的降解(*mSR*₇₀₅ 下降),进而加速了光合速率的下降。开花期以后群体下层叶片开始衰老,光合能力下降,甚至成为消耗器官,因而从整个冠层水平来看,群体的叶绿素含量和光合速率都在开花期以后便开始下降。相对整个群体来说,冠层顶端旗叶的叶绿素含量和光合速率的下降要明显延迟,它们均在灌浆期以后才开始降解。旗叶光合速率是产量形成的关键,酸雨处理后,随着酸度的增加,旗叶的叶绿素含量和光合速率在灌浆以后下降程度加大,这显然是酸雨的低 pH 值对小麦造成的主要不良影响。酸雨处理后,小麦冠层和叶片的含水量(*WI*)都受到了酸雨严重的影响,在 pH 2

的酸雨处理后,叶片和冠层的水分状况随着生育期不断降低。*NDVI* 与群体的叶面积、生物量、植物的长势和营养状况等密切相关。经酸雨处理后,冠层水平的 *NDVI* 在开花期后开始下降,而且随着酸雨 pH 的下降其下降幅度加大,而旗叶的 *NDVI* 则在灌浆以后开始随着 pH 的降低而下降。这个变化趋势与反映小麦光合速率的指标 *PRI* 的变化趋势相同。这个结果表明,从整个冠层角度来说,花期以后群体的营养器官就开始衰老,导致营养生长和光合速率都下降,酸雨的低 pH 加剧了这一过程。因为小麦的旗叶在植株所有叶位的叶片中维持最长的功能期,所以旗叶 *NDVI* 的下降要延迟到灌浆以后才开始。但是酸雨的低 pH 也加剧了旗叶 *NDVI* 的下降。所以,在不同 pH 的酸雨处理下,灌浆期小麦冠层水平的 *NDVI*, *mND*₇₀₅ 和 *WI* 与小麦产量的显著相关这一事实表明,可以利用光谱反射技术对酸雨处理对小麦产量的影响进行有效预测。

4 结论

总之,在低 pH 值酸雨胁迫条件下,小麦冠层和叶片水平的光合作用、叶绿素含量、群体和叶片结构均受到影响,酸雨的低 pH 值加剧了小麦后期营养器官和光合能力的衰退,最终导致产量下降。这些结果还为利用光谱分析技术监测酸雨对小麦的影响提供了依据。但是,关于光谱反射指标变化和产量变化的具体定量关系,需要通过进一步研究来建立。

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.
FENG Zong-wei. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(9):5-11.
- [2] YU Jing-Quan, YE Su-Feng, HUANG Li-Feng. Effect of simulated acid precipitation on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzymes in *Cucumis sativus* L. [J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(3):331-335.
- [3] 麦博儒, 郑有飞, 梁 骏, 等. 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2227-2233.
MAI Bo-ru, ZHENG You-fei, LIANG Jun, et al. Effects of simulated acid rain on leaf photosynthetic, growth, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2227-2233.
- [4] 周 琴, 张 佩, 曹春信, 等. 外源抗坏血酸对酸雨胁迫油菜幼苗的缓解效应[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1437-1442.
ZHOU Qin, ZHANG Pei, CAO Chun-xin, et al. Alleviative effects of exogenous ASA on acid rain stress oilrape seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1437-1442.

- [5] 童贯和, 程 滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(9):1207-1214.
TONG Guan-he, CHENG Bin, HU Yun-hu. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of wheat seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(9):1207-1214.
- [6] 杨志敏, 华 筠, 王 萍. 模拟酸雨对若干种蔬菜生长和生理特性影响的研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(5):213-216.
YANG Zhi-min, HUA Jun, WANG Ping. Influence of simulated acid rain on the growth and physiological characteristics of several species of vegetable seedlings[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(5):213-216.
- [7] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
ZHAO Shi-jie, SHI Guo-an, DONG Xin-chun. Techniques of plant physiological experiment[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [8] 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特征的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊):40-46.
ZHOU Qi-fa, WANG Ren-chao. A preliminary study on the relationship between the nitrogen levels and the spectral characteristics of early rice leaves[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture University*, 1993, 19(sup.):40-46.
- [9] 朱 艳, 李映雪, 周冬琴, 等. 稻麦叶片氮含量与冠层发射光谱的定量关系[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3463-3469.
ZHU Yan, LI Ying-xue, ZHOU Dong-qin, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3463-3469.
- [10] 冯 伟, 朱 艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量[J]. 生态学报, 2008, 28(1), 23-32.
FENG Wei, ZHU Yan, TIAN Yong-chao, et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1), 23-32.
- [11] 彭 涛, 姚 广, 高辉远, 等. 植物叶片和冠层光化学反射指数与叶黄素循环的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1987-1993.
PENG Tao, YAO Guang, GAO Hui-yuan, et al. Relationship between xanthophylls cycle and photochemical reflectance index measured at leaf or canopy level in two field-grown plant species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):1987-1993.
- [12] 彭 涛, 李鹏民, 贾裕娇, 等. 介绍两种无损测定植物活体叶片色素含量的方法[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42:83-86.
PENG Tao, LI Peng-min, JIA Yu-jiao, et al. Two noninvasive methods for determining pigment content in plant leaves[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42:83-86.
- [13] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]//Stanley C F, Enrico P M, Margaret A B. Proceedings of third earth resources technology satellite-1 symposium; technical presentations, SP-351. Washington D C: NASA, 1974: 310-317.
- [14] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index; an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels[J]. *Oecologia*, 1997, 112:492-501.
- [15] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81:337-354.
- [16] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R_{900}/R_{700})[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13):2869-2875.
- [17] 曹洪法, 高映新, 舒俭民, 等. 模拟酸雨对农作物生长和产量影响的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(1):49-65.
CAO Hong-fa, GAO Ying-xin, SHU Jian-min, et al. Study on simulated acid precipitation effects on growth and yield of agricultural crops[J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1989, 13(1):49-65.
- [18] 张耀民, 吴丽英, 王晓霞, 等. 酸雨对农作物叶片的伤害及生理特征的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(5):197-208, 227.
ZHANG Yao-min, WU Li-ying, WANG Xiao-xia, et al. Effects of acid rain on growth, seeding, yield and quality of crops [J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(5):197-208, 227.
- [19] Lee J J, Weber D E. The effects of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species[J]. *Forest Science*, 1979, 25(3):393-398.
- [20] Shelburne V B, Reardon J C, Paynter V A. The effects of acid rain and ozone on biomass and leaf area parameters of shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) [J]. *Tree Physiology*, 1993, 12:163-172.
- [21] Davids C, Tyler A N. Detecting contamination-induced tree stress within the chernobyl exclusion zone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85:30-38.
- [22] Slaton M R, Hunt E R, Smith W K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics[J]. *American Journal of Botany*, 2001, 88:278-284.