

DOI: 10.5846/stxb201711202070

李玉洁, 赵娜, 曹月娥, 杨建军. 露天煤矿煤粉沉降对矿区周边主要植物的生理影响. 生态学报, 2018, 38(22): - .

Li Y J, Zhao N, Cao Y E, Yang J J. Effects of coal dust deposition on the physiological properties of plants in an open-pit coal mine. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

露天煤矿煤粉沉降对矿区周边主要植物的生理影响

李玉洁^{1,2}, 赵娜^{1,2}, 曹月娥¹, 杨建军^{1,2,*}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:随着新疆准东煤田开采的日益加剧,露天开采及运输造成的煤粉尘不仅影响区域大气环境,同时在一定程度上影响周边植物的生理生长。为探讨煤粉尘对周边植物的生理影响,以准东露天煤矿周边人工绿化树种白榆、乡土植物梭梭和怪柳为研究对象,通过野外控制实验,探究覆尘、无尘条件下 3 种植物的光合生理特性的变化。结果表明:煤粉沉降对 3 种植物的光合生理均产生了明显影响,覆尘叶片在不同光照强度下净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均降低,净光合速率怪柳(18.6%)<梭梭(28.3%)<白榆(30.7%),气孔导度梭梭(24.1%)<怪柳(30.9%)<白榆(33.2%),蒸腾速率梭梭(16.7%)<白榆(18%)<怪柳(39.1%);煤尘对白榆、梭梭的影响主要为非气孔因素,对怪柳的影响有待继续研究。因此露天煤矿开采造成的粉尘会在一定程度上影响周边植物的光合生理过程,抑制其生长,长期排放可能会导致植被覆盖度降低。

关键词:煤粉尘;植物;生理影响;露天煤矿;干旱区

Effects of coal dust deposition on the physiological properties of plants in an open-pit coal mine

LI Yujie^{1,2}, ZHAO Na^{1,2}, CAO Yue'e¹, YANG Jianjun^{1,2,*}

1 School of Resources and Environment sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

Abstract: Open pit coal mining is the current source of substantial low-cost energy in China, but it has also caused major ecological and environmental issues. In the arid area of the East Junggar basin in Xinjiang, coal dust produced by open-pit mining not only affects the regional atmosphere, but also affects the physiological growth of nearby plants, to some extent. To determine the physiological effects of coal dust on surrounding plants, the Li-6400XT Portable Photosynthesis System was used to measure the photosynthetic parameters of *Ulmus pumila* L., *Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey.) Bunge, and *Tamarix chinensis* Lour. under dust and dust-free conditions during the 2017 growing season. A field control trials was used to obtain light response curves for the three species in the vicinity of the coal mine. Plant samples were analyzed by scanning electron microscopy. Our major results were as follows: (1) Coal dust cover had an obvious effect on the three species. (2) Net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of the coal-dust groups under different illumination intensities were reduced. Net photosynthetic rate in the coal-dust groups decreased from *T. chinensis* (18.6%) < *H. ammodendron* (28.3%) < *U. pumila* (30.7%). Stomatal conductance rates in the coal-dust groups decreased from *H. ammodendron* (24.1%) < *T. chinensis* (30.9%) < *U. pumila* (33.2%). Transpiration rates in the coal-dust groups decreased from *H. ammodendron* (16.7%) < *U. pumila* (18%) < *T. chinensis* (39.1%). (3) The influence of coal dust on *U. pumila* was mainly attributed to non-stomatal limitation, and the effects on *H. ammodendron* and *T. chinensis* should be

基金项目:国家自然科学基金(41461056,41661057,41601572)

收稿日期:2017-11-20; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjjdfly@sina.com

examined further. Therefore, dust produced by open-pit coal mining affects the photosynthetic physiological processes of neighboring plants to some extent, thereby inhibiting plant growth, and long-term discharge may lead to a decrease in vegetation coverage.

Key Words: coal dust; plants; physiological effect; open-pit coal mine; arid area

露天煤矿是我国煤矿资源的重要来源且是一种较为经济的开采方式,但是在露天开采过程中由于物料与空气的相对运动以及道路运输,或者静止的堆煤场、排土场由于风力作用产生大量无组织扬尘^[1]。在生态环境本就极为脆弱的西北干旱区,露天开采所产生的扬尘无疑对当地的人类以及动、植物产生严重的影响,使矿区的生态环境遭到严重破坏^[2-3]。矿区植被是维系当地生态环境的重要屏障,因此探究扬尘对这些植被的生理生态影响具有重要的实际意义,为指导矿区生态环境修复提供科学依据。

粉尘对植物的影响主要是叶片覆尘引起光合速率降低,其中主要是两种因素造成,一种是气孔因素,即气孔关闭、气孔导度降低引起的 CO_2 供应不足^[4-6]。如:Krajickova 和 Mejstrik 用实验证实了粉尘对植物气孔的阻塞作用^[7],杨慧玲等的研究表明煤粉沉降会使植物叶片气孔阻塞,气孔扩散阻力增大,散热减慢,导致蒸腾速率降低^[8];另一种为非气孔因素,如光合放氧速率的降低^[9-10]、叶肉细胞光合活性降低^[11]。有研究表明,尘污染能降低叶片的总叶绿素含量^[12-13]。对于这两种因素的判断,Farquhar 等研究表明,只有当胞间 CO_2 浓度降低和气孔限制值增大时,才可以得出光合速率降低主要是由气孔限制值增加所引起的结论^[4],许大全认为判断叶片光合速率降低的标准是胞间 CO_2 浓度和气孔限制值的变化方向^[14]。目前有关扬尘对植物影响的研究多集中在室内实验或可控制的小环境中展开,关于煤矿开采及运输对于干旱区自然环境下植物的影响研究较少。本文以新疆准东北山露天煤矿为研究区,探讨煤矿绿化树种白榆(*Ulmus pumila* L.),乡土植物梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey.) Bunge)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)在有煤尘、无煤尘条件下,叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、最大净光合速率($P_{n_{\max}}$)、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、暗呼吸速率(R_d)等因子之间的差异,根据上述指标判断矿区周围植物在覆尘条件下叶片是否能正常进行光合作用,并且分析煤粉沉降对植物的影响。通过上述研究以期对于干旱区露天煤矿等采矿活动产生的煤尘对周边植物影响进行初步研究,进而为煤尘污染区的生态环境保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以准东煤田北山煤矿为研究区域。北山煤矿位于新疆奇台县,古尔班通古特沙漠北端(图1),属典型的极端干旱大陆性气候,四季多风,全年主导风向为西北风,多年平均风速在 2.7—3.7 m/s。多年平均降水量 183.5 mm,平均蒸发量 2042.3 mm, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温为 2500—3400 $^\circ\text{C}$,无霜期平均 170 d,日照总时数 2800—3100 h,多年平均气温 7 $^\circ\text{C}$,全年平均相对湿度为 49%。矿区土壤类型为灰漠土、盐化土、风沙土。该地区自然环境恶劣,植物主要是由超旱生、旱生的半乔木、灌木、小半灌木以及旱生的一年生草本、多年生草本和中生的短命植物等荒漠植物组成,梭梭、盐生假木贼(*Anabasis salsa* (C.A.Mey.) Benth. ex Volkens)、琵琶柴(*Reaumuria songrica* (Pall.) Maxim.)等是当地的建群种。局部地区由于地下水位较高,使得旱生灌木怪柳也在该地区发育。

1.2 实验材料与设置

以矿区周边人工绿化树种白榆、乡土植物梭梭和怪柳为本次实验研究对象。野外实验时间为 2017 年 8—9 月,实验点布设于矿区进出口运输唯一道路旁,白榆为人工种植(距离道路 5 m 处),怪柳、梭梭位于距离道路 6 m 处。在多度占比最大的树龄中分别选取健康、长势良好且无病虫害的 3 种植种,每棵在朝阳部位中部各选长势相同的两根枝条,3 种植物均有一定的积尘,将一枝洗尘,一枝不作处理,标记洗尘组与煤尘组。

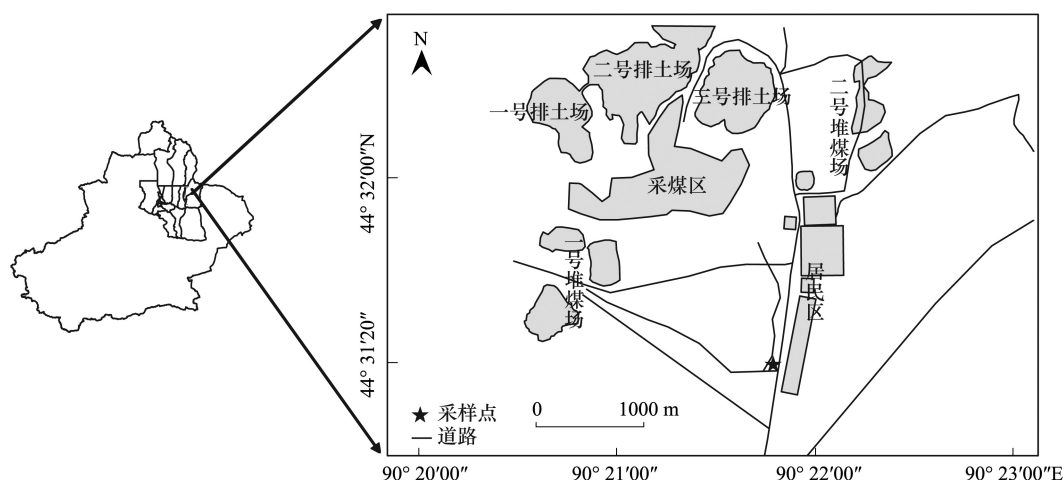


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

为防止煤粉污染,采取实验套袋处理,上部为透明带孔聚乙烯薄膜,下部为无纺布。

1.3 光合指标的测定

于晴天北京时间 10:00—13:30 使用 Li-6400XT 便携式光合仪(LED2×3, Li-COR 公司, 美国) 分别对 3 种植物进行连续 5 天光响应曲线及相关参数的测定。并设置 Li-6400 的流速为 $500 \mu\text{mol s}^{-1}$ 、LED 红蓝光源光合有效辐射的梯度, 依次在 $2000, 1500, 1200, 1000, 750, 500, 250, 150, 100, 60, 20, 0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下测定叶片的净光合速率($P_n, \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s, \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度($C_i, \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$)、蒸腾速率($Tr, \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)等指标(由于荒漠植物梭梭、柽柳饱和光强较高, 最大光强设置为 $2200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。每次测定前根据外界光强进行 20—30 min 的光诱导, 待胞间 CO_2 浓度(C_i)稳定后进行测量。根据光响应曲线得出光补偿点(light compensation point, LCP)、光饱和点(light saturation point, LSP)、表观暗呼吸速率(apparent dark respiration rate, R_d)、最大净光合速率(maximum net photosynthetic rate, $P_{n_{\max}}$)、表观量子效率(apparent quantum yield, AQE)等指标。实验过程中使用三脚架固定分析器, 保证叶片在原位。根据测定结果分析 3 组叶片光合参数的差异。白榆叶片较大可以填满整个叶室, 梭梭和柽柳叶片比较特殊, 无法充满整个叶室, 测量中避免叶片相互遮挡, 将叶室内所有叶片叶面积总和视为光合有效面积, 对叶室内的叶片进行取样放入冰箱, 于室内进行叶面积扫描。

1.4 电镜扫描

将采集的植物叶片样本压于标本夹中自然风干, 待风干后随机取植物叶片, 切取中部约 5 mm 长的小段, 粘于样品台上喷金镀膜后, 使用 LEO-1430VP 型扫描电子显微镜(SEM, 德国 LEO 公司)观察。

1.5 数据分析

采用非直角双曲线模型^[15-16]对光响应曲线进行拟合, 对离体叶片采用扫描仪获取叶片的数字图像, 利用 ImageJ 软件, 重新计算叶面积。采用相关分析比较植物净光合速率与叶片光合生理指标的相关关系。数据分析采用 SPSS19.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 完成。

2 结果

2.1 煤粉沉降对白榆光合特性的影响

2.1.1 白榆有尘、无尘光响应曲线对比

有效光辐射为 $0—500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时, 白榆的洗尘组 P_n 与煤尘组 P_n 均随着有效光辐射的增加而急速上升, 弱光阶段两者 P_n 差异不大, 接近饱和光强时差距明显($\text{photo} > 500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); 洗尘组 G_s 与煤尘组 G_s

均先随着有效光辐射的增加而增加后趋于平缓;随着有效光辐射增高,植物叶片光合作用增强,二者 C_i 均降低。有效光辐射为 $1000\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时,洗尘处理后 P_n 比煤尘组高 30.7%;覆尘状态下白榆的 G_s 、 Tr 都有所降低,分别低 33.2% 和 18%,洗尘组的 C_i 低于煤尘组 5%。当有效光辐射高于 $1000\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时,白榆会产生一定的光抑制现象,致使 P_n 下降(图 2)。

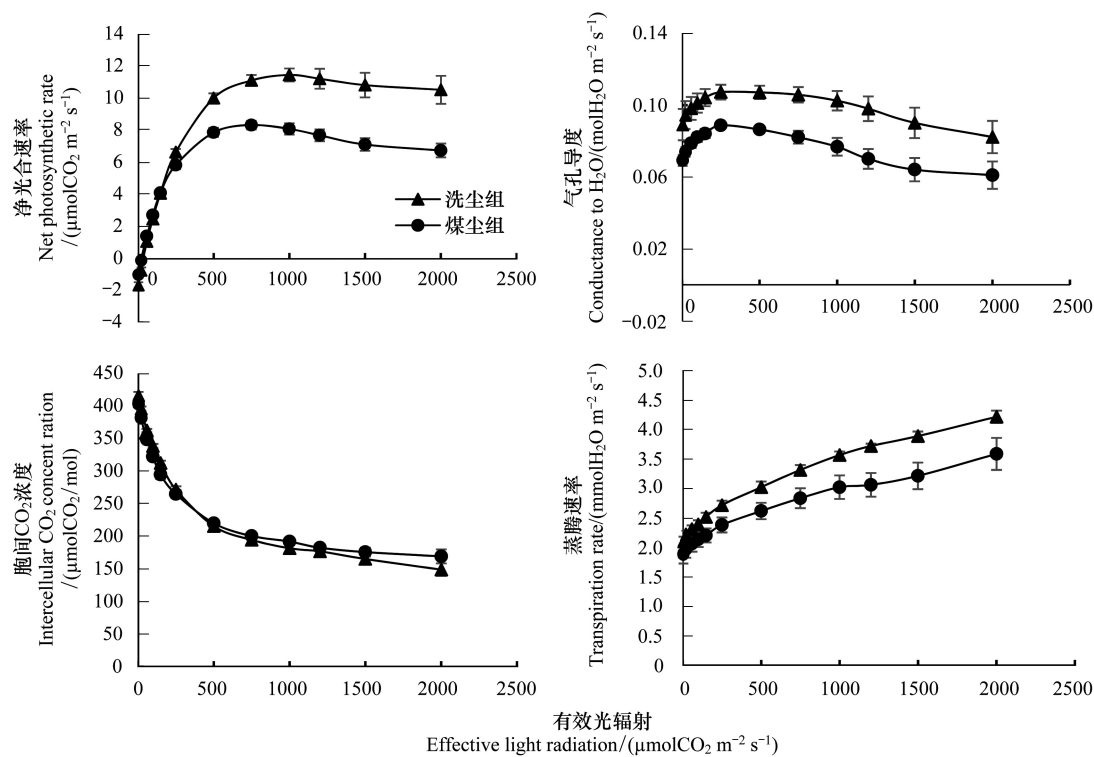


图 2 洗尘、煤尘组白榆净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (Tr) 随有效光辐射变化的比较

Fig.2 Comparison of P_n , G_s , C_i and Tr under the dust-washing and coal-dust groups with the effective light radiation changes in *U. pumila*

2.1.2 白榆有尘、无尘光合特征参数对比

对白榆洗尘组与煤尘组的光响应曲线进行拟合,可得其光合特征参数(表 1)。由表 1 可得,煤尘组的白榆叶片 LSP 、 LCP 、 R_d 及 $P_{n_{max}}$ 等光合特征参数均比洗尘组的低,且分别降低了 22.9%、34.3%、33.7%、28.8%;煤尘组与洗尘组的 AQE 变化较为微弱。表明煤尘覆尘使白榆叶片的最大光合能力降低,但弱光利用率差异不大,且煤尘组白榆叶片利用外界光强的能力比洗尘组低。

表 1 白榆洗尘、煤尘组光合特征参数比较

Table 1 Comparison of photosynthetic characteristic parameters of <i>U. pumila</i> under the dust-washing and coal-dust groups						
处理 Treatments	$LSP/$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$LCP/$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$P_{n_{max}}/$ ($\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$AQE/$ ($\mu\text{mol CO}_2\ \mu\text{mol}^{-1}$)	模型拟合 R^2 值 R^2 of Model fitting
洗尘组 Dust-washing group	1134	35.66	1.89	11.47	0.058	0.9981
煤尘组 Coal-dust group	874	23.43	1.25	8.17	0.059	0.9959

LSP :光饱和点,light saturation point; LCP :光补偿点,light compensation point; R_d :表观暗呼吸速率,apparent dark respiration rate; $P_{n_{max}}$:最大净光合速率,maximum net photosynthetic rate; AQE :表观量子效率,apparent quantum yield

2.2 煤粉沉降对梭梭光合特性的影响

2.2.1 梭梭有尘、无尘光响应曲线对比

有效光辐射为 $0\text{—}1500\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时,梭梭的洗尘组 P_n 与煤尘组 P_n 均随着有效光辐射的增加而增加,

从弱光阶段洗尘、煤尘组就有一定差异,随着光合有效辐射的增加,两者差距增大,在有效光辐射达到 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以后二者差距基本稳定;洗尘组 G_s 与煤尘组 G_s 均先随着有效光辐射的增加而增加后趋于平缓,有效光辐射为 $0-500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,增加较为迅速;随着有效光辐射增高,二者 C_i 均降低。有效光辐射为 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,洗尘组 P_n 比煤尘组高 28.3%;覆尘状态下梭梭的 G_s 、 Tr 比洗尘状态下分别低 24.1%、16.7%;对于 C_i 两者相差不大,洗尘组的 C_i 低于煤尘组 5%。随着有效光辐射增大,梭梭没有表现出明显的光抑制现象,且光饱和点较高(图 3)

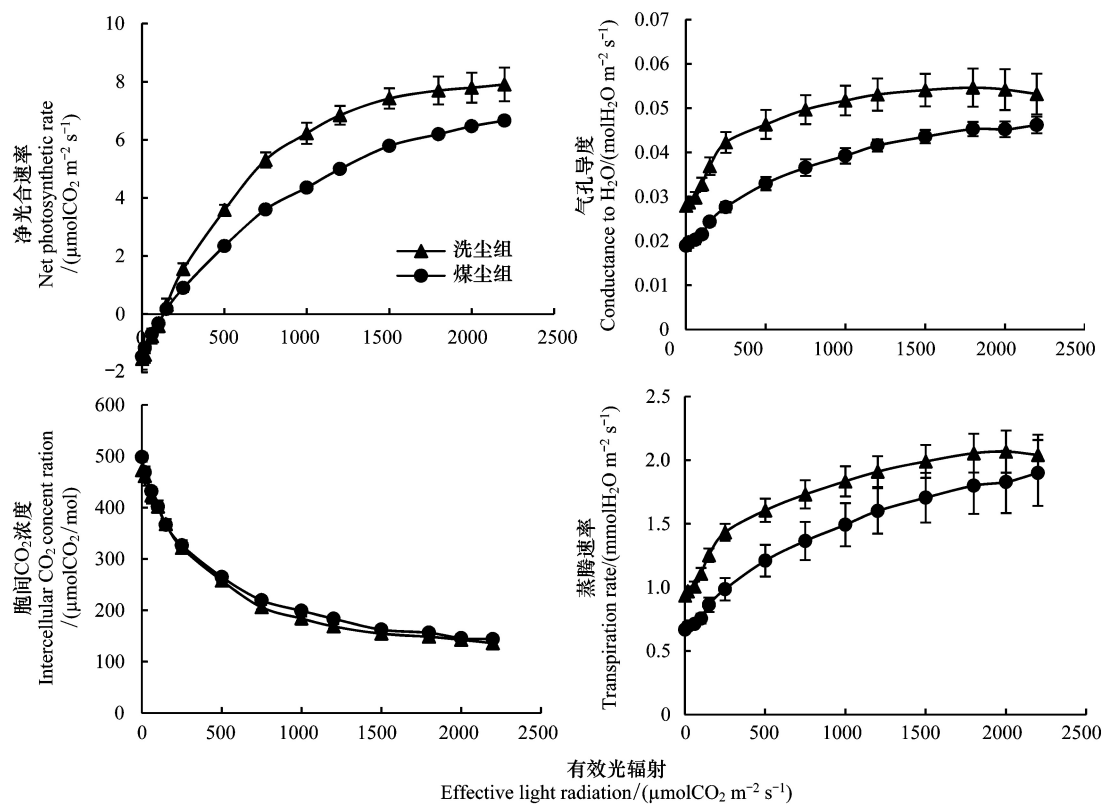


图3 洗尘、煤尘组梭梭净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(Tr)随有效光辐射变化的比较

Fig.3 Comparison of P_n , G_s , C_i and Tr under the dust-washing and coal-dust groups with the effective light radiation changes in *H. ammodendron*

2.2.2 梭梭光合特征参数

由表 2 可得,梭梭的饱和光强较高,其中洗尘组 LSP 为 $1680 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、煤尘组为 $2270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,结合图 3 可知,梭梭饱和光强约为 $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;煤尘组梭梭的光合特征参数 R_d 、 $P_{n_{\max}}$ 、AQE 比洗尘组都有所降低,分别降低了 8.5%、26.1%、27.5%。说明煤粉沉降对梭梭叶片最大光合能力和弱光利用率都有抑制作用。

表 2 梭梭洗尘、煤尘组光合特征参数比较

Table 2 Comparison of photosynthetic characteristic parameters of <i>H. ammodendron</i> under the dust-washing and coal-dust groups						
处理 Treatments	LSP/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	R_d / ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$P_{n_{\max}}$ / ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	AQE/ ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)	模型拟合 R^2 值 R^2 of model fitting
洗尘组 Dust-washing group	1680	108.33	1.51	9.27	0.015	0.9991
煤尘组 Coal-dust group	2270	140.78	1.38	6.85	0.011	0.9988

2.3 煤粉沉降对柽柳光合特性的影响

2.3.1 桤柳有尘、无尘光响应曲线对比

与梭梭相同,有效光辐射为 0—1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,桤柳的洗尘组 Pn 与煤尘组 Pn 均随着有效光辐射的增加而增加,且在有效光辐射达到 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以后二者差距基本稳定;洗尘组 Gs 与煤尘组 Gs 均先随着有效光辐射的增加而增加后趋于平缓,有效光辐射为 0—500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,增加较为迅速;随着有效光辐射增高,二者 Ci 均降低。有效光辐射为 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,洗尘组 Pn 比煤尘组高 18.6%;覆尘状态下梭梭的 Gs、Tr 比洗尘状态下分别低 30.9%、39.1%;洗尘组的 Ci 低于煤尘组 5%。随着有效光辐射增大,桤柳没有表现出光抑制现象,且光饱和点较高(图 3)

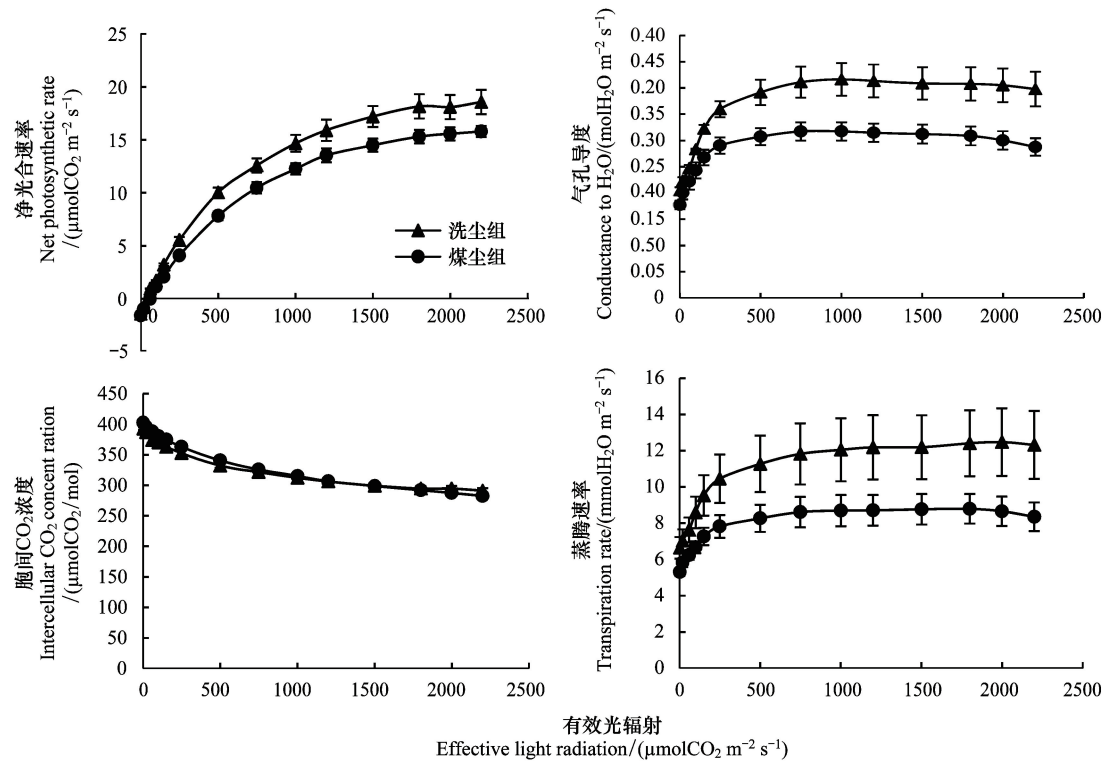


图 4 洗尘、煤尘组桤柳净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)随有效光辐射变化的比较

Fig.4 Comparison of Pn, Gs, Ci and Tr under the dust-washing and coal-dust groups with the effective light radiation changes in *T. chinensis*

2.3.2 桤柳光合特征参数

由表 3 可得,桤柳饱和光强较高,结合图 4 约为 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;煤尘组桤柳与洗尘组桤柳相比,其光合特征参数参数 R_d 、 Pn_{max} 、AQE 均降低,且分别下降了 23.1%、2.5%、21.3%。由此可见,煤尘覆盖会抑制桤柳的光合作用及呼吸作用,使其最大光合能力和弱光利用率降低。

表 3 桤柳洗尘、煤尘组光合特征参数比较

Table 3 Comparison of photosynthetic characteristic parameters of <i>T. chinensis</i> under the dust-washing and coal-dust groups						
处理 Treatments	LSP/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	R_d / ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Pn_{max} / ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	AQE/ ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)	模型拟合 R^2 值 R^2 of model fitting
洗尘组 Dust-washing group	1800	42.78	1.61	21.20	0.039	0.9996
煤尘组 Coal-dust group	2182	46.93	1.24	20.66	0.031	0.9990

2.4 露天煤矿煤粉沉降对周边植物产生的影响分析

2.4.1 气孔限制值

判断叶片光合速率降低的主要原因是胞间 CO₂ 浓度(Ci)和气孔限制值(Ls)的变化方向: Ci 降低和 Ls 升

高表明气孔导度降低是主要原因;而 C_i 增高和 L_s 降低则表明主要原因是非气孔因素。在低的有效光辐射 (达到饱和光强前) 条件下,不管是煤尘组还是洗尘组,3 种植物表现相似的趋势,随着有效光辐射的降低,净光合速率下降时,伴随着 C_i 升高和 L_s 的下降(图 5),表明此阶段光合速率降低的主要原因是非气孔因素。因此在弱光条件,影响光合作用的主要因素是能量的供应,而不是 CO_2 的供应。在有效光辐射达到饱和时, L_s 、 C_i 变幅减小,基本恒定,说明这时光合作用的主要限制因素已经从能量供应转变为 CO_2 供应。

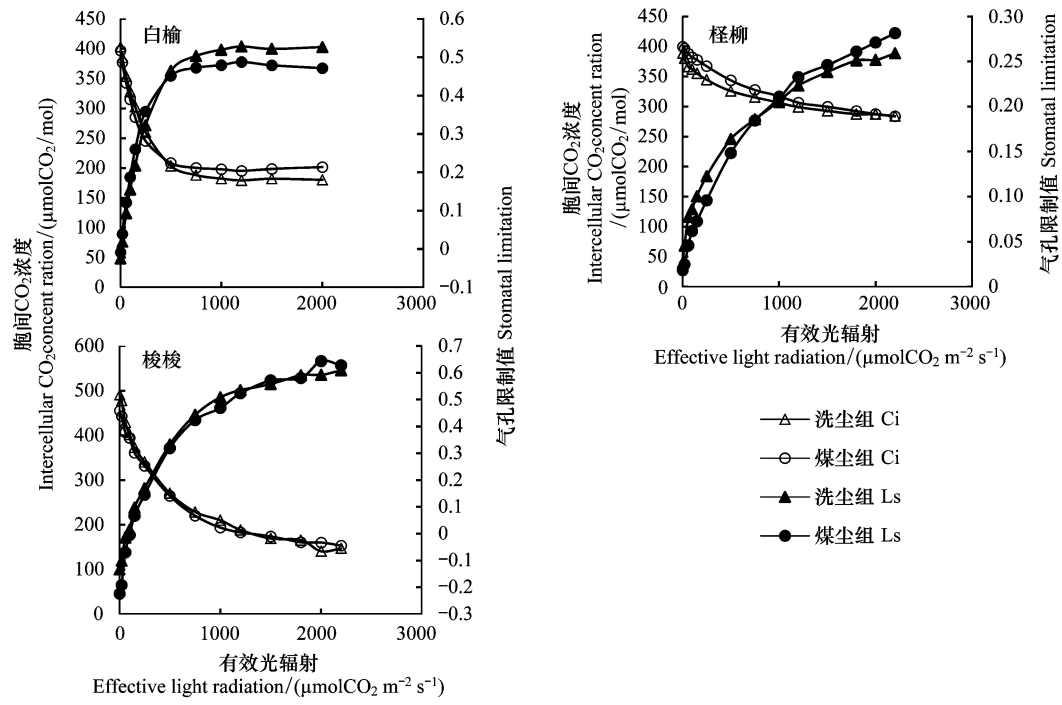


图 5 3 种植物洗尘、煤尘组气孔限制值 (L_s) 与是胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随有效光辐射变化的比较

Fig.5 Comparison of L_s and C_i under the dust-washing and coal-dust groups with the effective light radiation changes

洗尘组与煤尘组相比,煤尘沉降会导致植物净光合速率的降低。以饱和光强处为比较点(排除能量供应不足),白榆、梭梭比较结果为:煤尘组 P_n <洗尘组 P_n ,煤尘组 C_i >洗尘组 C_i ,煤尘组 L_s <洗尘组 L_s ,说明白榆和梭梭达到光饱和点后净光合速率降低的主要原因为非气孔因素;桤柳比较结果为:煤尘组 P_n <洗尘组 P_n ,煤尘组 L_s >洗尘组 L_s ,达到饱和光强后煤尘组 C_i 略低于洗尘组 C_i ,但变化并不明显,说明煤尘沉降使桤柳达到光饱和点后净光合速率降低有一定的气孔因素影响,但无法确定其主导因素(图 5)。

表 4 白榆、梭梭、桤柳光合生理指标的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of photosynthetic factors of *U. pumila*, *H. ammodendron*, *T. chinensis*

处理 Treatments	光合生理指标 Photosynthetic factors			
	PAR	Gs	C_i	Tr
白榆洗尘(Dust-washing group of <i>U. pumila</i>) P_n	0.818 **	0.141	-0.999 **	0.855 **
白榆煤尘(Coal-dust group of <i>U. pumila</i>) P_n	0.718 **	0.050	-0.995 **	0.770 **
梭梭洗尘(Dust-washing group of <i>H. ammodendron</i>) P_n	0.949 **	0.982 **	-0.992 **	0.991 **
梭梭煤尘(Coal-dust group of <i>H. ammodendron</i>) P_n	0.958 **	0.979 **	-0.989 **	0.986 **
桤柳洗尘(Dust-washing group of <i>T. chinensis</i>) P_n	0.941 **	0.937 **	-0.997 **	0.964 **
桤柳煤尘(Coal-dust group of <i>T. chinensis</i>) P_n	0.937 **	0.702 **	-0.996 **	0.853 **

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。PAR:光合有效辐射

随着 Par 、 C_i 、 Tr 的增加,各处理下植物叶片 P_n 均显著增加,其中相关性最高的是 C_i ,且两者呈显著负相关($P<0.01$)(表 4),白榆的 G_s 与 P_n 不相关。3 种植物两种处理中的煤尘组的 4 个因子 Par 、 G_s 、 C_i 、 Tr 与 P_n

的相关系数均比洗尘组低,说明煤尘覆尘的植物叶片对光合有效辐射的敏感性降低了,进而随着光合有效辐射的变化植物叶片 G_s 、 C_i 、 Tr 的敏感性也降低。

2.4.2 白榆、梭梭和怪柳的电镜扫描图

图 6 为白榆、梭梭和怪柳的电镜扫描图。其中白色颗粒状物质即为粉尘颗粒。经电镜扫描观察白榆气孔分布在叶片背部,气孔较多,堵塞率约为 30%,白榆气孔为放大 8000 倍状态下白榆叶片上一个堵塞的气孔,可见白榆气孔中粉尘粒径约为 1—4 μm 。煤粉尘主要沉降在叶片腹部,一部分煤粉尘进入叶片背部气孔造成一定程度的堵塞(图 6)。

梭梭及怪柳叶片的气孔数目较白榆少,由梭梭低倍图像及怪柳低倍图像可见其叶片表面附有大量煤粉尘(图 6),会对光产生一定的阻碍作用,使叶片无法正常吸收光,进而阻碍植物叶片进行光合作用。图 6 电镜下可以看出梭梭同化枝表面覆尘量较大,煤尘覆盖阻挡了植物叶片对光的利用,导致覆尘状态下 LCP 的升高(表 2)。

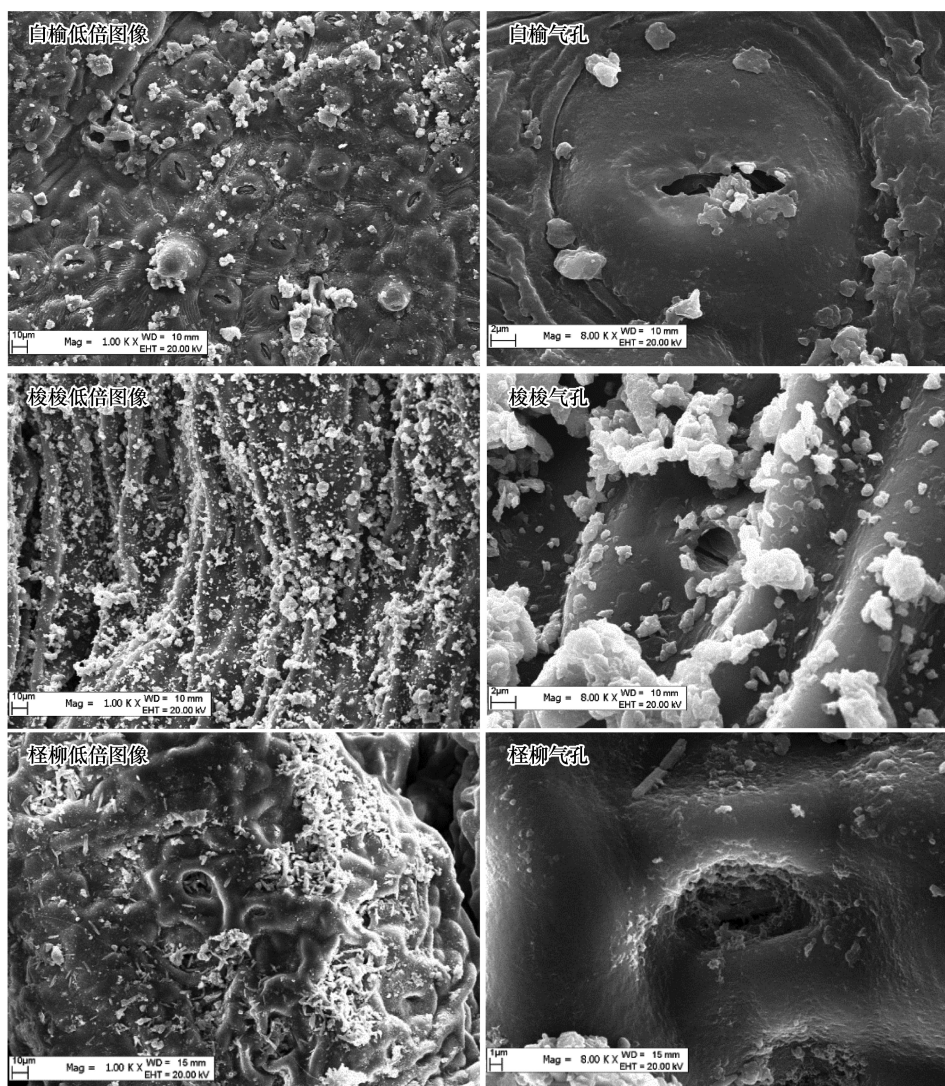


图 6 白榆、梭梭和怪柳的电镜扫描图

Fig.6 Scanning electron micrographs of *U. pumila*, *H. ammodendron*, *T. chinensis*

3 讨论

3.1 露天煤矿煤粉沉降对周边植物光合特性的影响

研究粉尘对植物光合作用的影响是一个各环境参数敏感的复杂生理过程^[17],煤粉沉降对 3 种植物都产

生了显著的影响,覆尘叶片在不同光照强度下 P_n 、 G_s 、 Tr 均降低,表明煤粉沉降使植物光合能力降低,不利于有机物质的合成,因而抑制植物的生长发育^[18-19],这与李巧云等研究结果一致^[20]。也有研究表明,粉尘可促进植物叶片蒸腾作用^[21],这主要由于粉尘对植物的影响取决于叶面空气流动状况及粉尘覆盖厚度,本研究位于露天煤矿污染严重区域,叶片积尘量较大,遮蔽作用导致叶片对红光吸收的减弱,红光是促进叶片气孔开放的主要因素,因而抑制气孔的开放^[22-23]。

怪柳、梭梭 LSP 和 LCP 均高于白榆,这是由于怪柳和梭梭对光强适应范围更广,对环境适应能力较强,可在高温、干旱等恶劣的环境中仍然保持较高的光合利用效率,提高抗逆境胁迫和生存的能力。梭梭、怪柳煤尘组 LSP 高于洗尘组 LSP,这可能是煤尘覆盖对光产生了遮蔽作用^[22]。3 种植物煤尘组的 R_d 及 $P_{n_{max}}$ 较洗尘组均明显降低,一定环境条件下,叶片 $P_{n_{max}}$ 代表了其最大光合能力^[24],研究结果表明煤粉沉降使白榆、梭梭、怪柳叶片的最大光合能力均降低。 R_d 降低可能是植物应对光合作用降低的机制,而较低的 R_d 可以降低呼吸作用对光合产物的消耗,有利于干物质的累积^[25],这与李力等研究玉米光合特性时结果相同^[26]。

3.2 露天煤矿煤粉沉降影响周边植物光合作用原因分析

煤粉沉降使白榆、梭梭、怪柳叶片 P_n 、 G_s 、 Tr 明显降低, C_i 改变不大,说明两种处理下,作为光合作用重要原料之一的 CO_2 交换量相差不大,即 CO_2 量不是限制 3 种植物光合作用的主要因子。但 Naidoo 和 Chirkoot 研究表明煤粉沉降致使植物叶片 CO_2 交换量减少,从而影响植物叶片光合速率^[27],这主要由于本研究中煤粉沉降使白榆和梭梭的光合速率下降的主要原因为非气孔因素,煤粉会在一定程度上降低白榆叶片叶肉细胞的光合活性。Prusty 等研究发现 6 种常见路边植物自然暴露于灰尘下 24h 后,几乎所有植物叶绿素含量均明显下降^[13];另外,煤粉尘的遮蔽作用,会导致光合作用过程中一系列生理生化指标的改变,如抗氧化酶活性的变化,进而导致新陈代谢速率降低。本文的结论与上述研究结果是一致的。梭梭气孔数目较白榆少,电镜下可见同化枝表面附有大量煤粉尘(图 6),会对光产生一定的阻碍作用,影响梭梭光合作用,因此,初步研究推测主要原因为煤尘覆盖导致梭梭光合速率下降。研究结果中无法从怪柳 C_i 、 L_s 的变化方向进行判断是气孔因素还是非气孔因素,经电镜观察怪柳表面滞尘量也较大(图 6),这是叶片无法正常吸收光进行光合作用的重要原因。

煤粉沉降严重影响了植物叶片的光合作用,阻碍植物的正常生长,长期煤粉尘沉降可能会改变矿区及运输线路旁植物物种多样性和生态服务功能。粉尘污染是通过物理、化学及环境因子等多方面因素对植物的光合作用产生抑制影响,主要的原因有遮蔽作用^[22],阻塞气孔^[28],促进附生物种的生长,损伤植物叶片组织,叶温改变^[29]等,使植物光合作用降低,对植物群落造成不可估量的破坏^[30]。

4 结论

本文通过研究煤粉沉降对白榆、梭梭、怪柳 3 种植物的光合特性的影响,且对光合作用减弱原因进行了初步分析得出:煤粉沉降到 3 种植物叶片,使其 P_n 降低 18.6%—30.7%、 G_s 降低 24.1%—33.2%、 Tr 降低 16.7%—39.1,3 种植物叶片的光合作用均受到抑制;煤粉沉降使植物叶片对光合有效辐射的敏感性降低,且随着光合有效辐射的变化植物叶片 G_s 、 C_i 、 Tr 的敏感性也降低;煤粉沉降会降低白榆叶片叶肉细胞的光合活性、阻碍梭梭同化枝对光的利用,对二者的限制主要为非气孔因素导致;煤粉沉降对怪柳叶片光合作用的主要限制因素仍需进一步研究。

本研究仅探究了露天矿区煤粉沉降对周边 3 种植物的光合作用的影响分析,因此,为提高煤粉沉降对周边植物影响的全面认识,未来研究需关注煤粉尘成分对植物生长及土壤特性、微生物等的影响,以及煤粉沉降对周边植被整个生活史阶段的影响。

参考文献 (References):

- [1] 郭二果,张树礼,蔡煜,李静,闫文慧,杨力鹏,张波,李永胜. 干旱半干旱地区露天煤矿无组织扬尘排放特征. 中国煤炭, 2012, 38

- (1): 117-121.
- [2] 高雅, 陆兆华, 魏振宽, 付晓, 吴钢. 露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例. 生态学报, 2014, 34(11): 2844-2854.
- [3] 卢洁, 雷少刚. 露天煤矿粉尘环境影响及其扩散规律研究综述. 煤矿安全, 2017, 48(8): 231-234.
- [4] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [5] Brestic M, Freyer M J, Baker N R, Cornic G. Does photorespiration protect the photosynthetic apparatus in French bean leaves from photoinhibition during drought stress? Planta, 1995, 196(3): 450-457.
- [6] Ehleringer J R. Variation in gas exchange characteristics among desert plants. Ecological Studies: Analysis and Synthesis. 1994, 100: 361-392.
- [7] Krajčůvková A, Mejstřík V. The effect of fly ash particles on the plugging of stomata. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1984, 36(1): 83-93.
- [8] 杨慧玲, 魏玲玲, 叶学华, 刘国方, 杨学军, 黄振英. 煤粉尘沉降对鄂尔多斯高原优势植物羊柴幼苗生长的影响. 生态学报, 2016, 36(10): 2858-2865.
- [9] Baker N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. Physiologia Plantarum, 1991, 81(4): 563-570.
- [10] Gimenez C, Mitchell V J, Lawlor D W. Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress. Plant Physiology, 1992, 98(2): 516-524.
- [11] Tezara W, Lawlor D W. Effects of Water Stress on the Biochemistry and Physiology of Photosynthesis in Sunflower. Hague: Kluwer Academy Publishers, 1995: 625-628.
- [12] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 刘东伟. 艾比湖流域盐碱尘沉降对棉花叶片的危害. 生态学杂志, 2015, 34(4): 982-990.
- [13] Prusty B A K, Mishra P C, Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(2): 228-235.
- [14] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- [15] Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [16] Thornley J H M. Dynamic model of leaf photosynthesis with acclimation to light and nitrogen. Annals of Botany, 1998, 81(3): 421-430.
- [17] 赵华军, 王立, 赵明, 杨自辉, 王强强. 沙尘暴粉尘对不同作物气体交换特征的影响. 水土保持学报, 2011, 25(3): 202-206.
- [18] Sharifi M R, Gibson A C, Rundel P W. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave desert shrubs. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(4): 837-846.
- [19] 莫治新, 张娟, 王家强, 柳维扬, 王冀萍. 降尘对塔里木盆地香梨叶片光合特性及叶绿素含量的影响. 湖北农业科学, 2013, 52(16): 3845-3848.
- [20] 李巧云, 关振寰, 殷芙蓉, 黄河仙, 廖柏寒. 浮尘对冬小麦叶片光合作用及细胞膜透性的影响. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1387-1391.
- [21] Hirano T, Kiyota M, Aiga I. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. Environmental Pollution, 1995, 89(3): 255-261.
- [22] Thompson J R, Mueller P W, Flückiger W, Rutter A J. The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1984, 34(2): 171-190.
- [23] Krishnamurthy K V, Rajachidambaram C. Factors associated with reduction in photosynthetic oxygen evolution in cement dust coated leaves. Photosynthetica, 1986, 20(2): 164-168.
- [24] 陆佩玲, 罗毅, 刘建栋, 于强. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数. 应用气象学报, 2000, 11(2): 236-241.
- [25] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 王强, 卢从明, 白克智, 匡廷云, 魏其克, 李振声. 12 个不同基因型冬小麦的光合能力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 532-536.
- [26] 李力, 张祥星, 郑睿, 郭建青. 夏玉米光合特性及光响应曲线拟合. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1310-1318.
- [27] Naidoo G, Chirkoot D. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. Environmental Pollution, 2004, 127(3): 359-366.
- [28] Ricks G R, Williams R J H. Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland part 2: effects of particulate matter upon stomatal diffusion resistance in leaves of *Quercus petraea*, (Mattuschka) leibl. Environmental Pollution(1970), 1974, 6(2): 87-109.
- [29] Eller B M. Road dust induced increase of leaf temperature. Environmental Pollution, 1977, 13(2): 99-107.
- [30] 王宏伟, 曹琼辉, 黄峰, 袁琳. 尘污染对植物的生理和生态特性影响. 广西植物, 2009, 29(5): 621-626.