DOI: 10.5846/stxb201412192528
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.
Yang H L, Wei L L, Ye X H, Liu G F, Yang X J, Huang Z Y.Effects of coal dust deposition on seedling growth of *Hedysarum laeve* Maxim., a dominant plant species on Ordos Plateau.Acta Ecologica Sinica,2016,36(10):2858-2865.

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

杨慧玲[1,2],魏玲玲[2],叶学华[1],刘国方[1],杨学军[1],黄振英[1,*]
1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093
2 河南农业大学生命科学学院,郑州 450002

摘要: 随着鄂尔多斯煤矿开采的日益加剧,开采和运输过程中产生的煤粉尘沉降已成为影响当地植物生长的一个重要影响因子。通过近自然生境条件下的控制实验,以鄂尔多斯高原优势植物羊柴(*Hedysarum laeve*)为研究对象,探究不同梯度煤粉尘沉降量(0—3.5 mg/cm^2)对其幼苗的光合生理特性和生长的影响。研究结果表明,随着煤粉尘沉降量的增加,羊柴叶片的气孔导度(*Gs*)、胞间二氧化碳浓度(*Ci*)、叶片水分饱和水汽压亏缺(Vpdl)等因子发生了不同程度的改变,导致净光合速率(*Pn*)和蒸腾速率(*Tr*)降低,使得幼苗的植株高度、叶片数、地上和地下生物量降低。因而,积累到一定程度的煤粉尘颗粒通过影响叶片气孔的水汽交换过程和降低叶片表面的光照强度,影响了叶片的光合生理过程,从而抑制了羊柴幼苗的生长。

关键词: 生物量;煤粉尘沉降;羊柴;净光合速率;鄂尔多斯高原;蒸腾速率

Effects of coal dust deposition on seedling growth of *Hedysarum laeve* Maxim., a dominant plant species on Ordos Plateau

YANG Huiling[1,2], WEI Lingling[2], YE Xuehua[1], LIU Guofang[1], YANG Xuejun[1], HUANG Zhenying[1,*]
1 *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100093, *China*
2 *Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*

Abstract: With the increase in coal mining on Ordos Plateau, North China, pollution due to coal dust deposition has become an important factor that affects the growth and survival of local plant species. *Hedysarum laeve* Maxim. (Fabaceae), a dominant plant species on Ordos Plateau, was used to examine the effects of coal dust deposition on some photosynthetic and other physiological parameters during seedling growth. By conducting near-natural controlled experiments, we investigated the photosynthetic characteristics and seedling growth of *H. laeve* in response to different coal dust concentrations (0, 0.7, 1.6, 2.3, and 3.5 mg/cm^2). The Li-6400XT Portable Photosynthesis System was used to measure the photosynthetic parameters of *H. laeve* leaves at different dates during the growing season of 2013. Simple correlation analyses were used to understand the relationships between coal dust concentration, photosynthetic parameters, and seedling growth characteristics of *H. laeve*. The results showed that: (1) stomatal conductance, internal CO_2 concentration, and leaf-to-air vapor presser deficit were significantly affected by increasing concentrations of coal dust, resulting in the decrease of net photosynthetic rate and transpiration rate, and (2) height, number of leaves, number of branches, and biomass of *H. leave*seedlings were negatively affected. Our study indicated that coal dust deposition negatively influences the seedling

基金项目:国家"十二五"科技支撑计划课题(2012BAD16B03)
收稿日期:2014-12-19; 网络出版日期:2015-09-28
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenying@ibcas.ac.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

growth of *H. laeve* by blocking stomata and adversely affecting water and gas exchange processes and reducing light intensity on the surface of leaves, because of which the rate of photosynthesis in the leaves and physiological growth processes are reduced.

Key Words: biomass; coal dust; *Hedysarum laeve*; net photosynthetic rate; Ordos Plateau; transpiration rate

粉尘污染是大气污染的一种重要形式,它不仅会破坏环境,影响人体健康[1-4],还会对植物个体的新陈代谢和生长发育,乃至于整个植被系统造成不可估量的影响或破坏[5]。植物叶面覆尘后往往造成叶片部分气孔被阻塞,从而使 CO_2 气体交换受阻,蒸腾作用和散热作用减慢。如: Krajickova 和 Mejstrik 用实验证实了粉尘对植物气孔的阻塞作用[6];黄峰对高速路尘的研究发现绝大多数植物的覆尘叶片气孔导度降低[7];而王宏炜等研究表明,灰尘连续处理 40d 后,大多数种类植物的气孔导度明显下降,抑制程度接近 50%[8]。光合作用是植物代谢过程中非常重要的部分,它对周围环境的变化十分敏感,环境条件的微小改变会引起植物叶片净光合速率的变化。粉尘在水分存在(雾或小雨)时,易在植株叶片、枝条和花朵上形成外壳,在阻碍光合作用所需的光线的同时,也限制了叶片外界层的气体交换,能够降低覆尘叶片的净光合速率和蒸腾速率[7],从而使植物的光合能力下降[9-10]。Darley 等研究发现水泥粉尘能够在植物叶片上形成一层水泥结壳,影响植物的光合作用[11]。香梨(*Pyrus bretschneuderi*)受降尘影响后,各个生育期的净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度都出现了降低[12]。刘俊岭等研究证明了水泥粉尘沉降能够导致水稻和油菜产量下降[13]。叶面粉尘沉积的越多对植物的生理生态影响越大[14]。有研究表明,过量 Mg^{2+} 与镁粉尘对玉米幼苗生长发育有显著影响,极大地降低了叶片中的叶绿素含量[15]。

内蒙古自治区鄂尔多斯市地处黄土高原西北部,是一个生态脆弱区,植被恢复困难,环境生态恶劣,是我国生态修复与生态退化的难点和重点区域[16-17]。同时鄂尔多斯煤炭资源极其丰富,近年成为我国煤炭重点开发区。全市 8.7 万 km^2 的土地上,含煤面积约占 70%,现已探明储量为 1496 亿 t[18]。全市除了卓子山煤田、东胜煤田、准格尔煤田三大主要煤矿,其它小煤矿在 1998 年有 1900 多座,在 2004—2010 年陆续关掉一些小煤矿后截至 2011 年年底,全市仍有生产和在建的煤矿 321 座[19]。煤矿开采的影响主要包括采矿沉陷及其退化的修复漏失、占用和破坏大面积土地(特别是露天开采)、污染地表水和地下水,以及在煤炭开采和运输过程中产生的煤粉尘污染[20]。尤为值得注意的是煤粉尘污染,它属大气粉尘污染的一种类型,影响巨大且难以控制[21]。煤粉尘污染可归因于采矿(特别是露天采矿)和路面运输[22]。由于我国目前还没有强制对煤炭进行密封运输,路面运输产生的煤粉尘污染非常严重。有研究表明,路面行车扬尘是煤矿最大的粉尘污染源,扬尘量占全矿总产尘量的 70%—90%;而在运输过程中,由于路基、道岔等设施造成的颠簸及风力作用,表面的煤颗粒洒落到路面,再经过后续车辆的碾压,形成粒径更小密度更高的二次扬尘[23]。在距运输干线路边 5 m 处,空气含尘浓度高达 750—800 mg/m^3,超过国家卫生标准 400 倍左右,空气污染相当严重[23]。

与一般大气粉尘污染相比较,煤粉尘污染具有以下特点: 1) 煤粉尘污染以矿区、堆煤场和运输干线为中心,呈点-网状分布,污染源明确且常年不间断产生污染[20-21]; 2) 煤粉尘扩散距离相对较短,且受风力和风向的影响明显[24-25],意味着煤粉尘的沉降相对集中; 3) 大部分煤粉尘是粒度大于 10 μm 的颗粒,很容易在大气中自然沉降,造成植物叶片表面的煤粉尘大量聚集[26]; 4) 煤粉尘呈黑色,对植物叶片的获取光的能力影响显著。煤粉尘易沉降、不易扩散、污染时间持续和遮光能力强等特点,使其对植物的光合能力等生理生态特性产生重要影响,最终影响植物的生长和存活。

羊柴(*Hedysarum laeve*)是内蒙古鄂尔多斯高原广泛分布的优势种半灌木,主要生长在典型草原和荒漠草原区及丘陵沙地草场[27],常与沙柳(*Salix psammophila*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)等植物种组成稳定的复合群落,是我国北方旱区的优良牧草和防风固沙植物。本文以鄂尔多斯高原优势植物种羊柴为研究对象,研究煤粉尘沉降对

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

羊柴生长的影响，旨在探讨煤粉尘沉降对植物光合生理特性和生长的影响机理，为矿区的生态修复和干旱半干旱区植被保护提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验地生境概况

本实验在内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站(OSES，39°29.147′ N，110°08.761′ E；1296 m a.s.l.)开展。当地年均气温 6—9 ℃；年均降水 345 mm，降水分布不均，80%的降水主要集中在 5—9 月(基于 1959—2009 的气象数据)；年平均日照时间为 3011 h，太阳辐射 140.7×4.18 J/cm^2；全年≥10℃积温 2754 ℃；无霜期 137—154 d。该站位于鄂尔多斯高原毛乌素沙地的东北部，属于干旱和半干旱的过渡地带。地形地貌比较复杂，梁地、块状沙地与低湿滩地相间，以沙地为主，有流动沙丘、固定及半固定沙丘。油蒿、羊柴、沙柳和沙地柏(*Sabina vulgaris*)是固定沙丘上的优势种，白沙蒿、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)和绳虫实(*Corispermum declinatum*)是流动沙丘上的优势种[16]。

实验站四周分布有煤矿数十座，包括乌兰煤炭集团、武家梁煤矿、赛蒙特尔煤矿、淖尔壕煤矿、特拉不拉煤矿、朝阳煤矿等；实验站东边的包府路和南边的阿新线均是当地煤炭运输的主干线。公路两边植物和土壤因受煤粉尘沉降影响，明显地被蒙上一层很厚的黑色煤粉尘层，煤粉尘严重污染了植物的生长及其生境。

1.2 实验材料

实验材料为羊柴(*Hedysarum laeve*)，又称塔落岩黄芪，为豆科多年生落叶根茎半灌木。实验包括野外调查和控制实验两个部分。野外调查对象为自然生境中生长的羊柴，调查其单位叶面积的煤粉尘沉降量，为后面的室内控制实验处理提供依据；室内控制实验的实验材料为羊柴幼苗，研究不同程度煤粉尘沉降对羊柴幼苗光合能力及生长的影响。为保证实验植被的整齐性，于 2013 年 6 月 18 日将羊柴种子置于培养皿中在 25 ℃的光照培养箱，待大量萌发后，将苗龄一致的幼苗移栽到装有沙质生境土的盆钵(高 20 cm，直径为 12 cm)内；而为了避免降水对煤粉尘处理的冲洗干扰，控制实验在鄂尔多斯生态站的透明遮雨棚内进行，保持棚内的温度和光照与外界的自然生境相同；同时为保证幼苗正常生长，每隔 3—5 天施加 1 次水分，保证植物生长不受水分的限制。

1.3 野外调查羊柴单位叶面积煤粉尘沉降量

选择包府路 55 km 处路边(距离马路 5 m)的羊柴植物自然群落进行煤粉尘沉降量调查。随机选择 10 株羊柴植株，在每株植株靠近路面和背对路面的两个方向各从植株上部到下部摘取完整、成熟的羊柴叶片 5 片，分别装入自封袋中备测，共采集羊柴叶片 100 片。将叶片带回实验室用蒸馏水进行浸泡 2 h，除去叶片上黏附的煤粉尘附着物，浸洗液用已称重(W_1)的滤纸过滤，滤后将滤纸置于 60 ℃烘箱中烘 12 h，再次称重(W_2)，2 次重量差(W_2-W_1)即为采集样品上所附着的降尘重量。新鲜叶片晾干附着在表面的水分后用 Li-3000c 便携式叶面积仪(Li-COR 公司，美国)测定叶片面积(S)，单位叶面积滞尘量(mg/cm^2) = (W_2-W_1) /S。

1.4 室内控制实验模拟不同程度煤粉尘沉降

本实验用不同浓度的煤粉尘悬浮液来模拟自然条件下不同程度大气粉尘的煤粉尘沉降量。将煤颗粒用研钵磨碎过 100 目筛后备用。分别称取 30，60，120 g 和 180 g 过筛后的煤粉分别与固定容量 300 mL 的纯净水搅拌均匀制备成煤粉尘悬浮液，浓度分别为 0.1、0.2、0.4、0.6 g/mL，同时以纯净水作为对照。实验共 5 个处理，每个处理 12 个重复，共 60 盆。其中 6 个重复用于光合特性的测定，而另外 6 个重复用于生长相关指标的测定。

2013 年 8 月 7 日，羊柴幼苗生长至 10 叶期，对羊柴幼苗进行涂煤粉尘液处理：先将煤粉尘液搅匀，用毛笔蘸上不同浓度的煤粉尘液，在羊柴每个叶片上均匀地涂一层，待其自然晾干。

1.5 叶片光合指标的测定

分别于 8 月 18 日、9 月 15 日和 10 月 5 日(选择晴朗无风的天气)对每种浓度的煤粉尘液处理其中的 6 盆

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

羊柴幼苗进行了光合指标测定: 对每株幼苗,挑选 1 片健康、向阳、节位一致的叶片,于 12: 00 使用 Li-6400 便携式光合仪(标准叶室 2×3 cm,Li-COR 公司,美国) 测定其光合速率及相关参数的测定。测量的指标主要包括叶片净光合速率(*Pn*, μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}) 、蒸腾速率(*Tr*, mmol m^{-2} s^{-1}) 、气孔导度(*Gs*, mmol m^{-2} s^{-1}) 、胞间 CO_2浓度(*Ci*, μmol/mol) 、叶片饱和水汽压亏缺(Vpdl, kPa) 等光合生理指标。每次读取记录 3 次瞬时值取平均值。

测定后将被测叶片剪下,装入之前备好的自封袋中,带回实验室通过 Li-3000c 便携式叶面积仪(Li-COR 公司,美国) 测定其叶面积。

1.6　羊柴幼苗生长指标的测定

室内模拟实验结束于 2013 年 10 月 6 日,对不同煤粉尘液处理的 6 个重复盆羊柴幼苗进行了收获。测量并记录植株高度、叶片数和分枝数; 收获后在 75 ℃的烘箱中烘 48 h 后,用万分之一天平称量地上生物量和地下生物量并计算根冠比(地下生物量/地上生物量) 。

1.7　数据分析

采用单因素方差分析比较各处理之间地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比的差异(5%水平) 以及采用 LSD 方法进行多重比较。对茎生物量、根生物量和总生物量进行了对数转换以保证方差齐性。采用相关分析比较煤粉尘沉降与叶片光合生理指标的相关关系。所有数据分析采用统计软件 SPSS13.0(SPSS Inc., Chicago, USA) 进行。

2　结果

2.1　野外煤粉尘沉降量

野外羊柴叶片单位叶面积的煤粉尘沉降量范围为 0.7—2.3 mg/cm^2。根据煤粉尘沉降量,制备相应的不同浓度煤粉尘悬浮液用于室内模拟实验(表 1) 。其中 0.4 g/mL 浓度对应于野外测定的最大沉降量 2.3 mg/cm^2。考虑到野外煤粉尘沉降量受污染时间、风、雨水等因素的影响,室内模拟实验设定了 0.6 g/mL 浓度对应于 3.5 mg/cm^2,超出野外测定的最大沉降量,以研究野外可能发生的更强的煤灰尘沉降量对植物生长的影响。

表 1　自然生境下羊柴叶片单位叶面积的煤粉尘沉降量及相应的煤粉尘悬浮液不同浓度

Table 1　Different coal dust water concentration and associated with its corresponding coal dust deposition

测定指标 Index for measurement	叶片样品序号 No. of leaf samples				
	1	2	3	4	5
煤粉尘溶液浓度/(g/mL) Coal dust water concentrations	0	0.1	0.2	0.4	0.6
煤粉尘实际沉降量/(mg/cm^2) Amount of coal dust deposition	0	0. 7	1.6	2.3*	3.5

* 表示野外实测煤粉尘最大沉降量($n=100$)

2.2　煤粉尘对羊柴幼苗光合生理指标的影响

随着煤粉尘液浓度的增加,羊柴幼苗叶片的净光合速率(*Pn*) 、蒸腾速率(*Tr*) 、气孔导度(*Gs*) 降低,而胞间 CO_2浓度(*Ci*) 、饱和水汽压亏缺(Vpdl) 增加(表 2) 。叶温(*Tl*) 对煤粉尘液浓度的响应不一致,9 月中旬前表现出负相关关系,而生长季后期,呈正相关关系(表 2) 。10 月 5 日煤粉尘沉降与羊柴幼苗光合生理指标相关性不显著(表 2) ,这可能是因为 10 月份已是接近生长季末,植物各项生理机能逐渐下降,煤粉尘沉降不再是影响植物生理生态的关键因素。

随着 *Tl*、*Gs*、*Tr*、Vpdl 增加,叶片 *Pn* 显著增加(表 3) ,而 *Ci* 是主要影响因素,与 *Pn* 呈显著地负相关($R^2=0.55$, $P<0.01$) ; 随着 *Gs*、*Tl*、Vpdl 增加,*Tr* 显著增加,其中 *Gs* 是影响叶片 *Tr* 的主要因子($R^2=0.76$, $P<0.01$) 。Vpdl 通过影响 *Tl* 而间接影响 *Tr*(表 3) 。这意味着煤粉尘沉降通过影响 *Ci* 和 *Gs*,从而改变叶片的 *Pn* 和 *Tr*,对植物生长产生影响。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 煤粉尘沉降与羊柴幼苗光合生理的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between coal dust water concentration and leaves´ photosynthetic factors of *H. laeve* seedling

日期 Date	光合生理指标 Photosynthetic factors					
	Pn	*Tr*	*Gs*	*Tl*	*Ci*	Vpdl
08-18	−0.952**	−0.676**	−0.633**	−0.838**	0.912**	−0.364*
08-30	−0.744**	−0.611**	−0.638**	0.196	0.732**	0.499**
09-15	−0.683**	−0.297*	−0.262	−0.534**	0.732**	0.499**
09-25	−0.565**	−0.205	−0.249	0.427**	0.375*	0.639**
09-30	−0.602**	0.270	0.078	0.901**	0.636**	0.844**
10\105	0.002	0.284	0.017	0.928**	−0.064	0.935**
全部 Total	−0.578**	−0.185**	−0.289**	0.099	0.433**	0.167**

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; *Pn*: 净光合速率 net photosynthetic rate; *Tr*: 蒸腾速率 transpiration rate; *Gs*: 气孔导度 stomatal conductance; *Tl*: 叶温 leaf temperature; *Ci*: 胞间 CO_2浓度 intercellular CO_2 concentration; Vpdl: 叶片饱和水汽压亏缺 vapor pressure deficit of leaf

表 3 羊柴幼苗光合生理指标的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of photosynthetic factors of *H. laeve* seedling

	光合生理指标 Photosynthetic factors				
	Pn	*Tr*	*Gs*	*Tl*	*Ci*
Tr	0.502**				
Gs	0.479**	0.873**			
Tl	0.262**	0.681**	0.360**		
Ci	−0.740**	−0.293**	−0.227**	−0.157**	
Vpdl	0.288**	0.446**	0.102	0.551**	−0.270**

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

2.3 煤粉尘对羊柴生长特性的影响

煤粉尘对羊柴的生长特性有显著影响。随着煤粉尘浓度的增加,羊柴幼苗植株高度和叶片数均显著降低(图 1)。和对照相比,0.6 g/mL 煤粉尘浓度处理显著降低了植株高度($P=0.025$)和叶片数($P=0.011$),而其他处理之间没有显著差异(图 1)。其中对照的叶片数是 0.6 g/mL 煤粉尘浓度处理的 2.5 倍。羊柴分枝数在对照条件下高于各浓度煤粉尘处理的分枝数多,但差异不显著($P>0.05$)。

和对照相比,羊柴总生物量随着煤粉尘液浓度的增加而逐渐减少,对照的生物量为(0.82±0.26) g,而 0.6 g/mL 处理的生物量仅为(0.20±0.02) g(图 2)。羊柴植株的地上生物量随着煤粉尘浓度增加而降低,对照和 0.1 g/mL 处理都与 0.6 g/mL 处理差异显著,其他处理间差异不显著。煤粉尘处理降低了羊柴地下生物量,0.6 g/mL处理条件下的地下生物量显著低于对照。羊柴植株的根冠比在对照植株与各煤粉尘浓度处理的植株间差异不显著(图 2)。

3 讨论与结论

植物叶片蒙尘对光合作用的影响是一个对各环境参数敏感的复杂生理过程[28-29]。生态因子不仅直接影响光合作用而且还通过影响植物的生理因子进而影响光合作用,各因子之间有着错综复杂的关系[30]。

在自然环境下,植物被认为是可以通过不间断地感应外界环境和调节气孔至合适的开度以维持光合作用与水分散失之间的平衡[31]。粉尘污染对植物生长造成的影响主要是对光能的遮蔽作用[32]、对气孔的阻塞作用[33]、叶表温度的改变[34],从而降低植物的光合作用[22],进而影响植物生长以及生物量的累积[35]。随着叶面粉尘的沉积,堵塞气孔,导致叶片气孔导度下降;叶片通过饱和水汽压差来调整气孔的闭合,进而影响叶片胞间 CO_2浓度。Naidoo 和 Chirkoot 表明,被煤炭粉尘覆盖的叶子,二氧化碳交换量减少,而 CO_2是光合作用的重要原料之一,其浓度会显著影响植物叶片的光合速率[36]。这与本实验结果一致。对毛乌素沙地羊柴进行煤粉尘液处理的结果表明,煤粉尘沉降改变了与光合生理密切相关的指标如胞间 CO_2浓度,从而降低了叶片

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

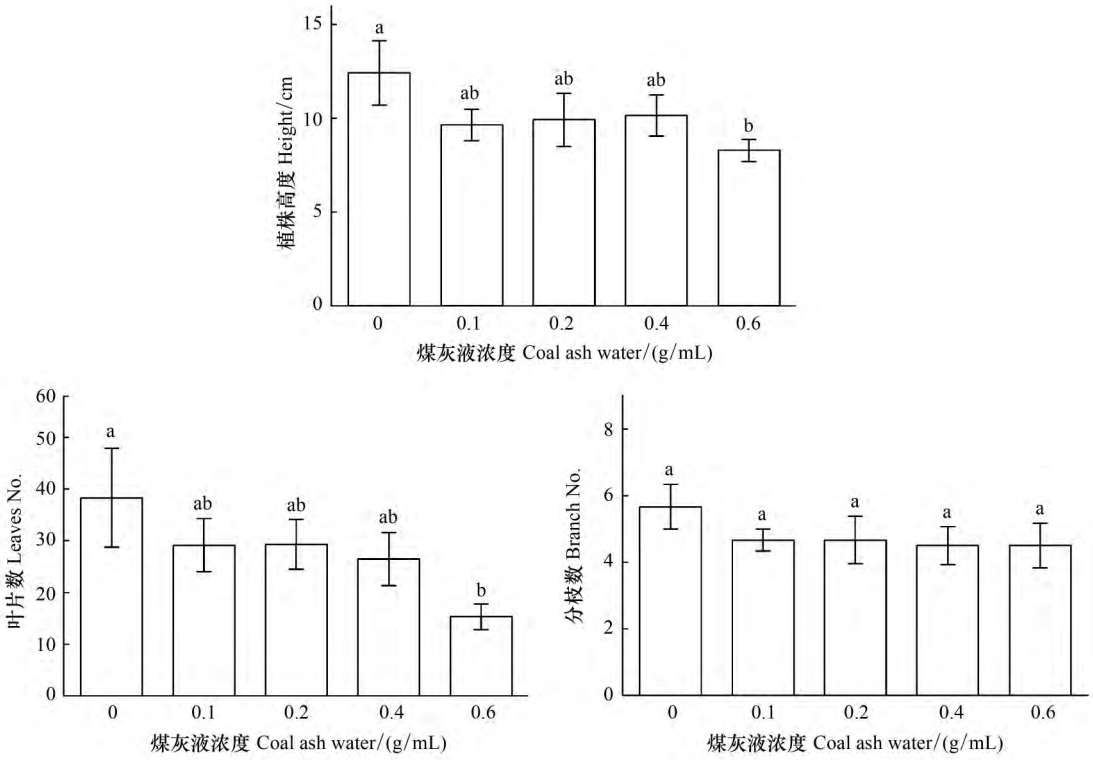

图 1　不同煤粉尘液处理对羊柴植株高度、叶片数和分枝数的影响(平均值±标准误差)

Fig.1　Effect of coal ash water treatment on plant morphological characteristics including plant height, leaves number, and branch number (mean±SE)

不同字母表示不同煤粉尘液浓度处理间差异显著($P<0.05$)

的净光合速率。

叶面覆尘后,叶片气孔被阻塞,气孔扩散阻力增大,散热作用减慢,导致蒸腾速率降低。相关分析表明,*Gs* 和 *Tl* 对蒸腾速率影响较大,解释度分别为 76%和 46%。气孔对外来刺激有很强的敏感性,植物叶面尘经过长期积累,阻塞植物叶片气孔,影响气体交换,而 H_2O 的气孔扩散速率是 CO_2 的 1.56 倍[37],因此气孔导度的变化对 *Tr* 的影响比 *Pn* 大。研究结果表明,煤粉尘沉降降低了羊柴叶片的气孔导度,从而降低了叶片蒸腾速率。

植物的光合能力和蒸腾速率等光合生理指标的改变,最终会影响植物生理过程,减缓植物生长[38]。对城市绿化树种对粉尘污染响应的研究发现,植物生理生化指标发生明显改变,光合效率受到抑制、总叶绿素、蛋白质含量下降、脯氨酸、丙二醛、可溶性糖含量和相对电导率上升[39]。这主要是由于煤粉尘沉降改变了植物叶片的微环境,影响叶绿素合成等各种生理生化指标,从而使得植物光合作用积累受影响,形态、生长状况和生理生态响应发生明显异常。在实验中,煤粉尘对羊柴植株的生长产生了显著的影响,使羊柴植株高度降低,叶片数和分枝数减少,并进一步影响到了羊柴地上和地下的生物量,使其生物量显著降低。

毛乌素沙地是我国典型的荒漠化地区,生态环境非常脆弱,而羊柴能够较好地适应沙地环境,是当地防风固沙的优良物种之一,在维持毛乌素沙地植被稳定性方面发挥着重要的作用。煤粉尘沉降会对羊柴的生长和存活产生显著影响,进而影响到当地固沙植被的稳定性。本文仅研究了煤粉尘沉降对羊柴幼苗阶段的光合生理以及生长的影响,而没有考虑其它的生活史阶段,进一步研究需要关注煤粉尘沉降对羊柴整个生活史阶段(比如繁殖阶段)的影响,从而全面认识植物个体对煤粉尘沉降的响应方式及其机制。此外,煤粉尘沉降对植物生长和存活的影响是多方面的,还有待于进一步研究煤粉尘中重金属含量对植物生长的影响以及煤粉尘重金属对土壤特性和土壤微生物的影响等。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

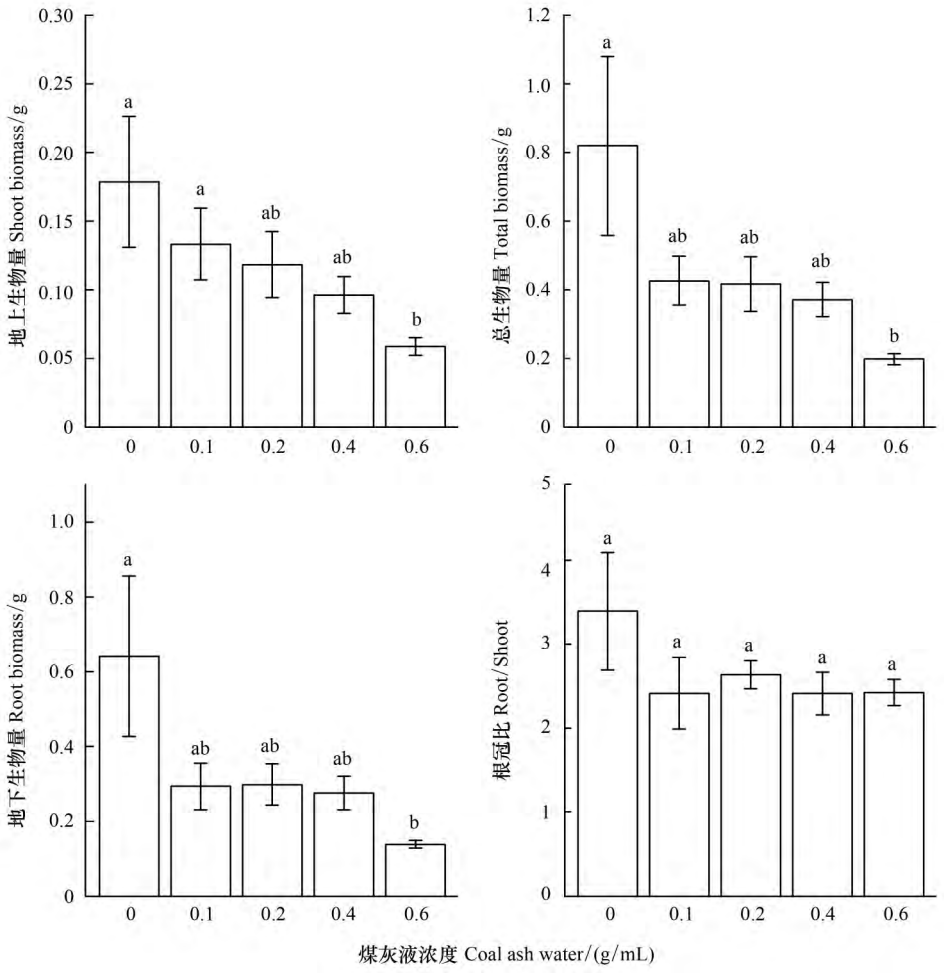

图 2 不同煤粉尘液处理对羊柴地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比的影响(平均值±标准误差)

Fig.2 Effect of coal ash water treatment on aboveground biomass, root biomass, total biomass and ratio of root to shoot masses (mean±SE)

不同字母表示不同浓度煤粉尘液处理下差异显著($P<0.05$)

致谢:感谢中国科学院植物研究所高瑞如、杨帆、何青山同学在实验中提供的帮助。

参考文献(References):

[1] Wichmann H E, Spix C, Tuch T, Wölke G, Peters A, Heinrich J, Kreyling W G, Heyder J. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part 1: role of particle number and particle mass. Health Effects Institute, 2000, (98): 5-86.

[2] Schwartz J, Zanobetti A, Bateson T F. Revised analyses of time-series studies of air pollution and health. // Revised Analyses of Time-series Studies of Air Pollution and Health. Boston: Health Effects Institute Mass, 2003, 25-58.

[3] Anderson H R, Atkinson R W, Peacock J L, Marston L, Konstantinou K. Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter (PM) and ozone (O_3) // World Health Organization. Denmark: Copenhagen, 2004.

[4] 谢昱姝. 大气颗粒物对人体健康影响研究进展. 铁道劳动安全卫生与环保, 2006, 33(4): 205-208.

[5] 彭珂珊. 沙尘暴对西部发展的危害研究. 贵州工业大学学报: 社会科学版, 2002, 4(2): 56-60.

[6] Krajíčková A, Mejstřik V. The effect of fly ash particles on the plugging of stomata. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1984, 36(1): 83-93.

[7] 黄峰. 高速公路尘污染对植物叶片光合作用的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 4-10.

[8] 王宏炜, 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.

[9] 黄慧娟, 袁玉欣, 杜炳新, 李国栋. 保定 5 种主要绿化树种叶片滞尘对气体交换特征的影响. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 50-53.

[10] Singh S N, Rao D N. Certain responses of wheat plants to cement dust pollution. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological,

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1981, 24(1): 75-81.

[11] Darley E F, Drugger W M, Mudd J B, Ordin L, Taylor O C, Stephens E R. Plant damage by pollution derived from auto mobiles. Archives of Environmental Health: An International Journal, 1963, 6(6): 761-770.

[12] 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.

[13] 刘俊岭, 杜梅, 张克云, 陈树元, 徐和宝, 谢明云. 水泥粉尘污染对水稻、油菜和土壤环境的影响. 植物资源与环境, 1997, 6(3): 42-47.

[14] 黄慧娟. 保定常见绿化植物滞尘效应及尘污染对其光合特征的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2008: 5-9.

[15] 刘元, 牛明芬, 李微, 刘桂臣. 矿区粉尘污染对玉米幼苗生理特性的影响. 安徽农业科学, 2011, 39(16): 9544-9545.

[16] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.

[17] 马建军. 黄土高原丘陵沟壑区露天煤矿生态修复及其生态效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007: 1-7.

[18] 傅尧. 黄土高原露天煤矿生态修复效果研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2010: 3-4.

[19] 郝胜利, 杨利平, 刘宗耀. 浅谈鄂尔多斯煤炭资源整合及意义. 西部资源, 2012, (4): 100-100.

[20] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 周忠轩, 吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. 生态学报, 2003, 23(10): 2144-2152.

[21] 宋志宏, 周鹏. 煤炭运输和堆存的损耗及其环境污染. 煤矿环境保护, 1993, 7(4): 52-55.

[22] Farmer A M. The effects of dust on vegetation-a review. Environmental Pollution, 1993, 79(1): 63-75.

[23] 李杰, 王亚娥, 王志盈. 散煤在铁路运输过程中的扬尘控制研究. 铁道劳动安全卫生与环保, 2005, 32(1): 45-57.

[24] 王曰鑫, 吕晋晓. 煤粉尘扩散及 As 积累对土壤和作物的影响. 水土保持学报, 2012, 26(3): 30-33, 38-38.

[25] 刘平, 张强, 杜文波, 白光洁, 李丽君, 丁玉川. 焦化厂煤粉尘的沉降规律及其对玉米抗氧化系统的影响. 中国农学通报, 2011, 27(7): 249-252.

[26] 高宏樟, 张强. 太原市煤粉尘降落量监测及其对土壤肥力的影响. 山西农业科学, 2008, 36(3): 55-60.

[27] 马毓泉, 富象乾, 陈山. 内蒙古植物志(第二版) 第四卷. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1992: 1-339.

[28] 丁启夏, 雷虎兰. 煤烟降尘对果类蔬菜作物生物量的影响. 甘肃环境研究与监测, 1991, 16(4): 5-8.

[29] 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.

[30] 金则新, 柯世省. 云锦杜鹃叶片光合作用日变化特征. 植物研究, 2002, 24(4): 447-452.

[31] 温达志, 朱剑云, 曹洪麟, 张德强, 叶永昌, 刘颂颂, 李果惠. 三种相思植物对短期大气污染的响应. 生态科学, 2002, 21(4): 306-309.

[32] 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(1): 171-190.

[33] Riscks 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 petraes* (Mattuschka) Leibl. Environmental Pollution, 1974, 6(2): 87-109.

[34] Eller B M. Road dust induced increase of leaf temperature. Environmental Pollution, 1977, 13(2): 99-107.

[35] Borka G. The effect of cement dust pollution on growth and metabolism of *Helianthus annuus*. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1980, 22(1): 75-79.

[36] Naidoo G, Chirkoot D. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicenna marina* in Richards Bay, South Africa. Environmental Pollution, 2004, 127(3): 359-366.

[37] Nobel P S. An Introduction to Biophysical Plant Physiology. San Francisco: W H Freeman & Co, 1974.

[38] 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.

[39] 姚俊. 粉尘污染对城市典型绿化树种的生理生态影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 4-10.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net