

DOI: 10.5846/stxb201712282341

刘英, 雷少刚, 宫传刚, 卞正富. 采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应的影响. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Liu Y, Lei S G, Gong C G, Bian Z F. Effects of soil water content change on the chlorophyll fluorescence response of *Caragana korshinskii* leaves under the influence of coal mining subsidence cracks. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应的影响

刘 英, 雷少刚*, 宫传刚, 卞正富

中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 采煤塌陷引起的土壤环境因子的变化对矿区植物生长的影响越来越受到人们的关注, 快速叶绿素荧光诱导动力学分析技术被称为植物受胁迫状态的有效探针, 能够快速获取胁迫下光系统 II 光化学活性和电子传递的信息。研究采煤塌陷裂缝区植物叶片叶绿素荧光的变化是揭示煤炭开采塌陷胁迫对植物个体生长影响的关键环节, 能为大尺度下采煤沉陷区植物损伤机理研究提供基础。对于黄土高原半干旱矿区, 土壤水分无疑是植物生长最重要的限制因素, 而植物叶片叶绿素荧光变化采煤塌陷影响下土壤含水量变化的响应如何尚不清楚。为了弄清采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应的影响, 选取神东煤田大柳塔矿区 52302 工作面为实验场地, 在分析了采煤塌陷裂缝对土壤含水量的影响的基础上, 以生态修复物种柠条为研究对象, 对采煤塌陷裂缝区不同土壤含水量下柠条叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线进行监测。结果显示: (1) 由于煤炭井工开采在地表形成大量裂缝, 破坏了土体结构, 增加了土壤水分的蒸发面, 加速了土壤水的散失。土壤水分含量随着与裂缝之间距离的增加而增加, 从距离裂缝 0 cm 到 300 cm, 土壤平均含水量从 5.63% 增加到 15.07%; (2) 裂缝区土壤水分降低, 柠条受到干旱胁迫程度加重, 叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线由 O—J—I—P 变形为 O—K—J—I—P 曲线。干旱胁迫通过干扰柠条叶片 PSII 电子供体侧、受体侧以及电子传递链的功能, 严重的损害了柠条叶片光合机构的正常功能。

关键词: 叶绿素荧光; 半干旱区; 采煤沉陷; 植物扰动; 光合生理

Effects of soil water content change on the chlorophyll fluorescence response of *Caragana korshinskii* leaves under the influence of coal mining subsidence cracks

LIUYing, LEI Shaogang*, GONG Chuangang, BIAN Zhengfu

School of Environment Science and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Increased attention has been given to the influence of changes in environmental factors caused by coal mining subsidence on plant physiology. Rapid chlorophyll fluorescence-induced kinetic analysis is known as an effective probe to examine the stress state of plants, using which the information of photochemical activity and electron transfer of light System II under stress can be quickly obtained. Studying the change of chlorophyll fluorescence in plant leaves from a coal mining fractured area is a key link for revealing the effects of subsidence stress on individual plant growth, and it can provide the basis for studying the damage mechanism in plants from a mining subsidence area. Soil moisture is undoubtedly the most important limiting factor on plant growth, and the response of chlorophyll fluorescence variation in plant leaves to soil water content under the influence of coal mining subsidence is not clear. In order to ascertain the effects of soil water content on the chlorophyll fluorescence response of *Caragana korshinskii* under the influence of mining subsidence crack, the 52302

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501107); 国家重点基础研究发展计划 (973) 课题 (2013CB227904); 国家自然科学基金重点项目 (U1361214)

收稿日期: 2017-12-28; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lsgang@126.com

working face of the Daliuta mining area was selected as the experimental site with *C. korshinskii* as the research target. Based on an analysis of the influence of mining subsidence cracks on soil water content, the fast chlorophyll fluorescence induction kinetics curve of *C. korshinskii* leaves at different soil moisture contents from the coal mining subsidence fractured area was monitored. The effect of soil water content change on the chlorophyll fluorescence response of *C. korshinskii* leaves under the influence of coal mining subsidence cracks was studied. The results showed that (1) since coal mining destroys the soil structure, a large number of cracks formed on the surface, which increased the evaporation of surface soil moisture, accelerating the loss of soil water. The soil moisture content increased when the distance between two cracks was from 0 cm to 300 cm, and the average water content increased from 5.63% to 15.07%, respectively. (2) The soil moisture in the fractured area further decreased, and *C. korshinskii* faced drought stress. The rapid chlorophyll fluorescence induced kinetic curve of the leaves was deformed by O—J—I—P to O—K—J—I—P curves. Drought stress seriously interfered with the normal function of the photosynthetic organs in *C. korshinskii* leaves by interfering with the functions of the PSII electron donor side, receptor side, and the electron transport chain.

Key Words: Chlorophyll fluorescence; semi-arid; coal mining subsidence; plant disturbance; photosynthetic physiology

煤炭是我国重要的能源来源,在一次性能源消费结构中所占比例一直是 70%左右^[1]。煤炭的井工开采导致了矿区大面积塌陷下沉^[2],对生态环境造成严重破坏。近年来,煤炭开采的重心西移,使得处于半干旱矿区本就脆弱的生态环境日趋恶化^[3]。土壤含水量的变化直接影响植物叶片的光合作用,土壤水分胁迫导致植物光合速率的变化,进而影响植物的生物量和生产力。而采煤塌陷对表土含水量有重要影响,一方面,煤炭高强度开采在地表形成地裂缝,增加了土壤蒸发面,同时采煤塌陷破坏了土体结构,不利于土壤水分保持,地表水流失进一步加重;另一方面,由于地下部分被抽空,潜水位埋深降低,影响地下水对地表水的补给,最终导致裂缝区土壤含水量要明显低于非裂缝区。

近年来,采煤塌陷对植被的影响引起不少学者的广泛关注。有研究指出煤炭高强度开采破坏了植物生长的立地条件,对地表植被产生了极大的负面影响,导致植被覆盖度^[4]降低,生物多样性^[5]与生物量^[6]减少等。实际上采煤塌陷区植被退化的重要原因在于塌陷破坏植物生长的立地条件,影响植物光合生理活动,进而影响植物的生长,但是对微观尺度上开采沉陷对植物个体生长的影响程度及机理研究较少。此外,植物对采煤塌陷扰动的响应反映在从微观到宏观的不同尺度、不同层次上,植物个体叶片叶绿素荧光变化反映了宏观响应所隐含的微观生物学机制。而快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP 曲线)被称为植物受胁迫状态的有效探针,能够快速获取光系统 II 光化学活性和电子传递的信息^[7-8]。目前,快速叶绿素荧光诱导动力学曲线分析技术(JIP-test)已经成为研究逆境胁迫对植物光合机构影响的有力工具^[9]。例如,Rudzani 等利用该技术对干旱胁迫对干豆产量的影响进行了研究^[10]。Alexander 等利用叶片叶绿素荧光参数对草本和本木植物受到的温度胁迫情况进行了评价^[11]。Cambridge^[12]、Guirao^[13-14]和 Koch^[15]等通过叶绿素荧光技术分析了高盐度对植物生长以及光合特性的影响。

基于此,本文通过对矿区内采煤塌陷地进行植物调查研究,选择矿区典型生态修复植物柠条(*Caragana korshinskii*)为研究对象,根据塌陷裂缝区土壤含水量的差异以及柠条叶片叶绿素荧光变化特征,探知采煤沉陷影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应影响,为该地区生态治理提供植被保护的理论依据。

1 研究区概况

本文选取大柳塔矿区 52302 工作面(图 1a)为研究区域,地理坐标为 110°05'00"—110°20'00" E, 39°27'00"—39°15'00" N。该区地处晋、陕、蒙三省接壤处,位于黄土高原丘陵区 and 毛乌素沙地过渡地带(图 1)。气候干燥少雨,年平均降雨量 413.5 mm,集中在夏季,年平均蒸发量 2111.2 mm,属于典型的干旱、半干旱的高原大陆性气候。年平均日照 2875.9 h,多年平均气温 7.3℃,年极端最高气温 38.9℃,年极端最低气温 -28.1℃,

年平均湿度 56%,年平均风速 2.3 m/s,最大风速 28.0 m/s。研究区域植被类型主要有干旱草原型、落叶阔叶灌木丛型和沙生类型,以油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana korshinski*)、小叶杨(*Populus simonii Carr*)为主要代表。近年来,矿区大规模的煤炭开采对地表环境造成了明显的影响,如:地表塌陷产生地裂缝群、水土流失、耕地退化、生产力降低等,而这些采煤活动势必会直接或者间接的对矿区地表植物的生长造成影响。

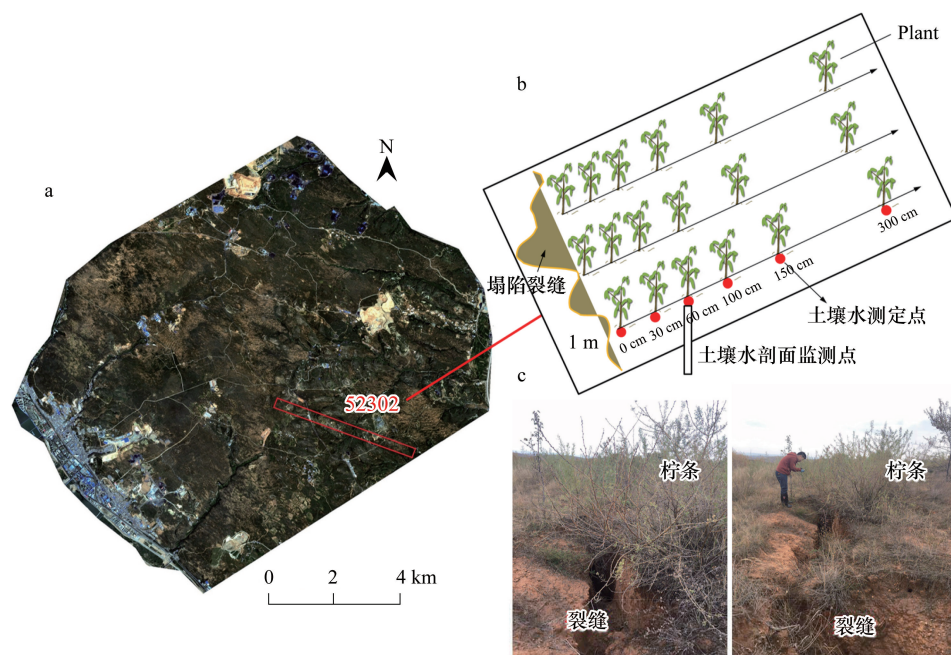


图1 研究区域位置图

Fig.1 The locations of the study region

a 52302 工作面的位置;b 实验设计示意图;c 裂缝区植物

2 材料与方法

2.1 地面沉降信息调查

根据开采沉陷水平移动与变形理论,局部矿体被采出后,在岩体内部形成一个空洞,其周围原有应力平衡状态受到破坏,引起应力的重新分布,直至达到新的平衡。随着采矿工作面的不断推进,收采动影响的岩层范围不断扩大,当开采范围足够大时,岩层移动发展到地表,在地表形成一个比采空区大得多的下沉盆地。52302 工作面(4484×300 m)地面高程 1162.4—1255.3 m,标高 985.13—1020.99 m,最大裂缝宽度 42 cm,最大下沉值 2833 mm,表土平均厚度 30 m,水平移动系数 0.26,沉降系数 0.76,开采速率 12 m/d,煤层开采厚度 7 m。通过对走向观测站的监测结果来判定测点位置的地表沉陷情况,对于观测站的监测结果如图 2 所示,测点位置在 3 月 26 号之前就已经受到开采影响而开始下沉,4 月 5 号还未达到最大下沉值,之后处于下沉活跃期,到 4 月 26 号已经处于相对稳沉状态。

2.2 样地与植物选择

以大柳塔矿区 52302 工作面为研究区,选择 3 条宽度在 39—42 cm 的裂缝,3 个裂缝区地貌植被基本一致,海拔在 1256.32—1254.52 m 之间,坡向为东南坡,坡度 1°—3°。柠条是大柳塔矿区主要的生态修复植物物种,研究其在煤炭开采条件下气孔导度与环境因子的响应特征具有重要意义;通过现场调查发现,柠条在采煤塌陷区具有明显的数量优势,种群密度较其他植物大且在硬梁地和风沙区皆有分布,因此本文选取柠条作为研究对象。通过对所选植物根部土壤进行取样,测得样地土壤养分含量以及颗粒组成信息(表 1)。

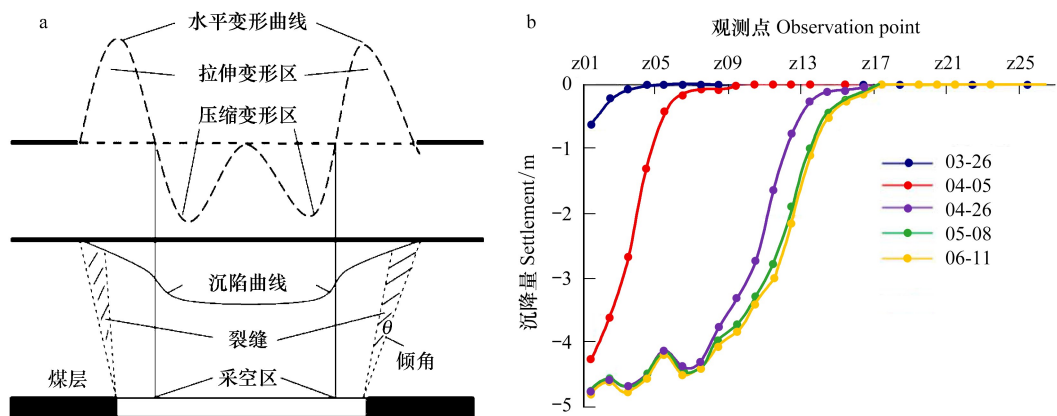


图2 开采沉陷的水平移动与变形理论与走向观测站沉降量监测结果

Fig.2 The horizontal movement and deformation theory of mining subsidence and the subsidence result of monitoring station

表1 样地土壤养分含量以及颗粒组成信息 (n=9)

Table 1 Soil nutrient content and grain composition information (n=9)

项目 Project/cm	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/kg)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	砂粒 Sand/%	粉粒、粘粒 Silt and clay/%
0	3.44	0.27	0.25	1.84	1.53	73.54	26.46
30	4.21	0.22	0.34	1.94	1.60	75.34	24.66
60	3.51	0.24	0.19	1.95	1.65	72.91	27.09
100	3.75	0.26	0.33	1.75	1.65	76.88	23.12
150	3.83	0.30	0.29	1.84	1.62	71.53	28.47
300	2.54	0.24	0.31	1.91	1.64	74.66	25.34

2.3 数据采集

2015 年 6 月中旬,在每条裂缝的一侧沿垂直于裂缝的方向按距离裂缝 0、30、60、100、150、300 cm 选取树龄 5—6 年、株高 1 m 左右的柠条 6 株(图 1b),沿植株顶部向下 0—30 cm 处的成熟叶片进行叶绿素荧光诱导曲线测定,每株柠条做 3 个重复,结果取平均。利用 OSP330+便携式叶绿素荧光仪测定选定的植物叶片的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线,并进行 JIP-test 分析,计算光系统 II(PSII)反应中心参数。测定时间为上午 9:00—11:00,测定前先将标记的叶片用叶夹暗适应 20 min,然后将分析探头置于叶夹上的测试孔,确保探头与暗适应夹紧密接触,无光线进入,按紧探头与叶夹,打开叶夹遮光板后,在 10⁻⁶—1 s 之间的高分辨率间隔荧光信号,仪器自动进行测定并记录保存,测定时叶面温度 19.8—25.4℃,周围环境温度 18.9—25.6℃,实验期间无降雨。根据苏晓琼^[8]等的方法计算相对可变荧光: $V_t = (F_t - F_o) / (F_m - F_o)$, $\Delta V_t = V_{t\text{处理}} - V_{t\text{对照}}$; ΔK —band、 ΔJ —band 和 ΔI —band 分别为 0.0003 s、0.002 s、0.03 s 处测定的 ΔV_t 。

在测取叶片叶绿素荧光诱导曲线后,采集选定柠条叶片存放在已知质量的铝盒中,用保鲜膜密封迅速带回实验室,采用烘干法获取植物叶片相对含水量。利用 ML3X 土壤水分速测仪(Delta-T Inc., UK)同步测定距离裂缝 0、30、60、100、150、300 cm 表层土壤 0—30 cm 体积含水量,土壤水分速测仪在测定前用烘干法标定,测定时间为 9:00—11:00。利用英国 PR2(Profile Probe type PR2)土壤剖面水分速测仪对植物根系土壤含水量进行连续监测,每 30 分钟监测一次,可以分别监测到 10、20、30、40、60、100 cm 处土壤体积含水量的变化;监测时间区间为 4 月 7 号到 6 月 3 号,即监测点受地下开采影响前至沉陷相对稳定后一段时间,获得了监测点在受到地下开采影响前后 0—100 cm 不同深度土壤含水量的数据。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 对数据进行统计;采用 Origin 9.1 软件进行数据整理和制图。

3 实验结果

3.1 采煤塌陷裂缝区土壤含水量与柠条叶片相对含水量的变化特征

通过对裂缝一侧距离裂缝 0—300 cm 的表层 0—30 cm 土壤体积含水量进行统计得到(表 2):塌陷裂缝区土壤体积含水量整体较低,平均值仅为 10.78%,最大值 15.40%,最小值 5.40%。距离塌陷裂缝 0 cm 处土壤体积含水量最低,平均值为 5.63%,最大值 6.00%,最小值 5.40。距离塌陷裂缝 300 cm 处土壤体积含水量最大,平均值为 15.07%,最大值 15.40%,最小值 14.60%。在 0—300 cm 范围内,随着距裂缝距离的增加,土壤体积含水量呈增加的趋势,在距裂缝 0—150 cm 范围内,土壤体积含水量增加幅度相对较大,在距裂缝 150—300 cm 范围时,土壤体积含水量有小幅上升。从图 3 土壤剖面水分速测仪对植物根系(距离裂缝 60 cm)土壤含水量进行连续监测结果可以看出,除表层 0—10 cm 土壤含水量低于塌陷稳定期外,其他土壤层采煤沉陷后含水量均低于沉陷初期,在此期间,4 月 25 日和 5 月 9 日降雨量分别为 13.8 mm 和 12.0 mm,土壤含水量有小幅升高,但是从整体来看,受采煤塌陷影响土壤含水量呈降低趋势。通过叶片相对含水量统计结果得到:裂缝一侧距离裂缝 0—300 cm 柠条叶片相对含水量在 39.76%—61.40%之间。距离塌陷裂缝 0 cm 处叶片相对含水量最低,平均值 43.02%,最大值,46.72%,最小值 39.76%。距离塌陷裂缝 300 cm 处叶片相对含水量最高,最大值 61.40%,平均值 53.30%。在 0—300 cm 范围内,柠条叶片相对含水量随着距裂缝距离的增加而增加。

表 2 距离裂缝 0—300cm 的表层 0—30cm 土壤体积含水量与叶片相对含水量统计(n=9)

Table 2 The Changes in the volumetric water content of 0—30 cm in topsoil and Leaf relative water content with different distance from cracks (n=9)

距裂缝距离 Distance from the crack/cm	土壤体积含水量 Soil volumetric water content/%				叶片相对含水量 Leaf relative water content/%			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Ave.	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Ave.	标准差 SD
0	5.40	6.00	5.63	0.32	39.76	46.72	43.02	1.78
30	7.90	8.30	8.10	0.20	41.77	48.40	45.03	1.93
60	9.70	10.10	9.90	0.20	42.83	49.86	45.89	1.93
100	11.40	12.50	11.83	0.59	43.70	51.95	46.95	2.04
150	13.80	14.50	14.17	0.35	45.50	54.20	48.60	1.60
300	14.60	15.40	15.07	0.42	47.70	61.40	53.30	1.80

3.2 裂缝导致土壤含水量变化对植物叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响

快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O—J—I—P 曲线)能够提供关于 PS II 的光化学信息,准确地反映光反应中 PS II 供体侧、受体侧及 PS II 反应中心电子氧化还原状态。通过对裂缝一侧不同土壤体积含水量处柠条叶片进行检测,得到快速叶绿素荧光诱导动力学曲线与差异曲线(图 4)。从图 4a 可以看出,随着土壤含水量的降低叶绿素荧光诱导动力学曲线发生明显变形,土壤体积含水量越低,曲线变形幅度越大。与 15.07%土壤体积含水量下叶绿素荧光诱导动力学曲线对比,其他曲线 K—J—I 段相对荧光值有不同程度的升高,当土壤体积含水量在 9.90%时,O—J—I—P 曲线变形为 O—K—I—P 曲线,即在曲线中开始出现拐点 K(300μs)。当土壤体积含水量在 5.63%时,O—J—I—P 曲线变形幅

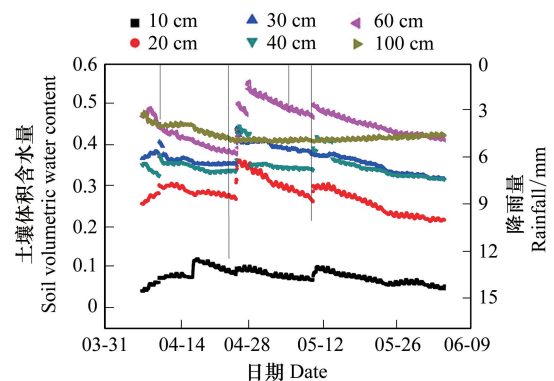


图 3 采煤塌陷过程土壤含水量的变化
Fig.3 Changes of water content in different soil layers during coal mining subsidence

度最大。以 15.07% 土壤体积含水量为标准, 对其他土壤水条件下叶绿素荧光诱导动力学曲线进行标准化并计算各曲线的差异值, 得到叶绿素荧光诱导动力学差异曲线 (图 4b)。随着土壤含水量的降低, ΔK 、 ΔJ 、 ΔI 值依次升高, 当土壤体积含水量为 8.10% 和 5.63% 时, ΔK 、 ΔJ 、 ΔI 值均发生了较大幅度的升高。这可能与土壤干旱胁迫加剧, 柠条叶片光合机构破坏与电子传递受抑制有关。

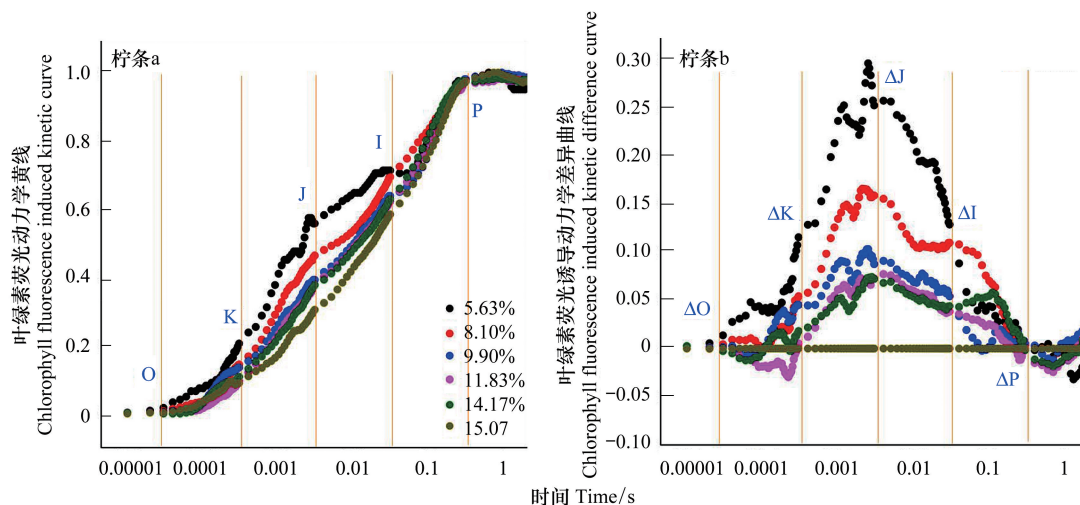


图 4 土壤水分的变化对柠条叶片叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响

Fig. 4 The effect of soil moisture changes on the chlorophyll fluorescence induced kinetic curve of *C. korshinski* leaves

快速叶绿素荧光诱导动力学曲线又称 O—J—I—P 曲线; O、K、J、I、P 分别表示在 0.00002、0.0003、0.002、0.03、0.3s 处叶绿素荧光值; ΔO 、 ΔK 、 ΔJ 、 ΔI 、 ΔP 分别表示在 0.00002、0.0003、0.002、0.03、0.3s 处叶绿素荧光差异值

3.3 裂缝导致土壤含水量变化对植物叶片 JIP-test 参数的变化

本文对土壤含水量在 5.63%、8.10%、9.90%、11.83%、14.17%、15.07% 等情况下的 JIP-test 参数进行统计 (图 5), 可以得到:

(1) PSII 反应中心的变化

随着干旱胁迫程度的加剧 (土壤含水量从 15.07% 到 5.63%), 单位反应中心吸收的光能 (ABS/RC) 分别增加了 0.49%、0.80%、14.69%、14.21% 和 17.34%; 捕获的光能 (TR_0/RC) 分别增加了 7.33%、3.07%、18.46%、60.29% 和 64.48%; 热耗散的能量 (DI_0/CS) 分别增加了 3.11%、27.23%、20.13%、75.77% 和 87.54%; 电子传递的能量 (ET_0/RC) 分别降低了 6.07%、18.93%、24.11%、33.44% 和 38.30%。这说明干旱胁迫影响了植物叶片 PSII 光能吸收与电子的传递。

(2) PSII 受体侧的变化

随着土壤含水量的降低, 柠条叶片电子传递到电子传递链中 Q_A^- 下游的电子受体的概率 (ET_0/TR_0) 分别降低了 10.43%、4.42%、8.67%、22.24% 和 34.35%; 用于电子传递的量子产额 (ET_0/ABS) 分别降低了 10.62%、17.11%、28.42%、23.56% 和 24.52%; PSII 最大量子效率 (TR_0/ABS) 分别降低了 8.27%、15.23%、14.11%、28.96% 和 21.89%; 热耗散的量子比率 (F_0/F_M) 分别降低了 4.34%、20.07%、26.09%、28.43% 和 29.89%。说明随着土壤含水量的降低, 电子传递逐渐受到抑制, 光反应活性逐渐降低, 导致过剩的光能积累。

(3) 叶片性能指数的变化

土壤含水量在 15.07% 时最大光化学效率 (F_V/F_M) 为 0.812, 随着土壤含水量的降低 F_V/F_M 分别降低了 2.22%、8.62%、14.04%、17.73% 和 18.60%; 叶片性能指数 (PI) 显著降低, 分别降低了 23.41%、8.59%、29.48%、49.51% 和 59.20%。说明随着干旱程度的加剧, 柠条叶片性能指数降低, 受到光抑制, 对柠条生长造成胁迫。

4 讨论

根据实验结果, 土壤水分状况对柠条叶片叶绿素荧光特性产生明显影响。特别是对于黄土高原半干旱

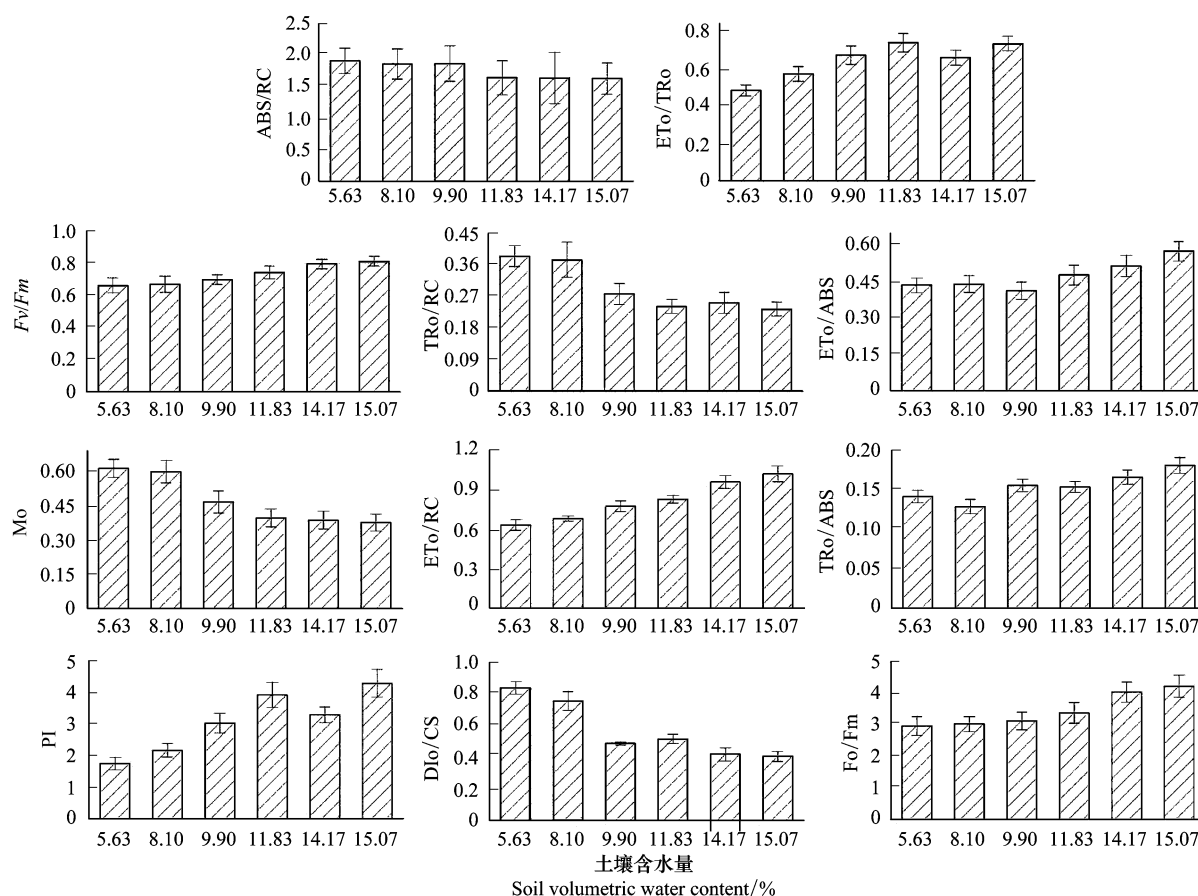


图5 不同水分条件下柠条叶片 JIP-test 参数的变化

Fig.5 Changes in JIP-test parameters of *C. korshinskii* leaves under different water conditions

ET₀/RC: 电子传递的能量; TR₀/RC: 捕获的光能; DI₀/CS: 热耗散的能量; ABS/RC: 单位反应中心吸收的光能; ET₀/TR₀: 电子传递到电子传递链中 Q^{A-}下游的电子受体的概率; ET₀/ABS: 用于电子传递的量子产额; TR₀/ABS: PSII 最大量子效率; F₀/F_M: 热耗散的量子比率; F_v/F_M: 最大光化学效率; PI: 叶片性能指数

区,土壤水分无疑是植物生长最重要的限制因素^[16],井工开采矿区,地底煤炭开采一方面引起地表塌陷,在地表形成大量裂缝,增加了土壤水分的蒸发面,加速了土壤水的散失^[17],距离蒸发面距离越近土壤水散失越快,同时采煤塌陷破坏了土体结构,不利于土壤水分保持,地表水流失进一步加重;另一方面,由于地下部分被抽空,潜水位埋深降低,影响地下水对地表水的补给^[18],此外,根据王力等利用稳定同位素分馏原理,对神东矿区植物水分来源进行研究,结果表明该区域植物水分的主要来源是地下水和土壤水,而基本没有直接利用湖水、水库水以及夏季降水^[19-20]。此外,在垂直于裂缝方向上,在 0—300cm 范围内,随着与裂缝之间距离的增加土壤水分含量呈增大的趋势,这与赵宏宇对神东矿区距塌陷裂缝不同距离土壤含水量变化的研究结果一致^[21]。

土壤紧实度与入渗特性是土壤含水量的重要影响因素。本文对距离裂缝不同距离土壤紧实度与入渗特征差异进行统计(图 6)得到:距离裂缝越近,土壤紧实度越低,初始入渗速率与稳定入渗率越高。根据郑秀清^[22]对土壤入渗能力与土壤含水量关系的研究,土壤入渗速率越快,持水能力越差。对于黄砂土而言,土壤紧实度越低,入渗速率越快。由此可知,受采煤塌陷影响,裂缝区土壤原始结构破坏,紧实度降低,入渗速率升高,导致土壤持水能力变差,这也是裂缝区土壤含水量降低的重要原因,而距离裂缝越近,这种影响越明显。

比较相对可变荧光强度的差异可以分析植物放氧复合体和 PSII 复合物单元对环境胁迫的响应^[8]。ΔK 可以作为 PSII 供体侧放氧复合体 OEC 受伤害的特殊标记,通过 K 点荧光强度的变化差异,可以得出放氧复

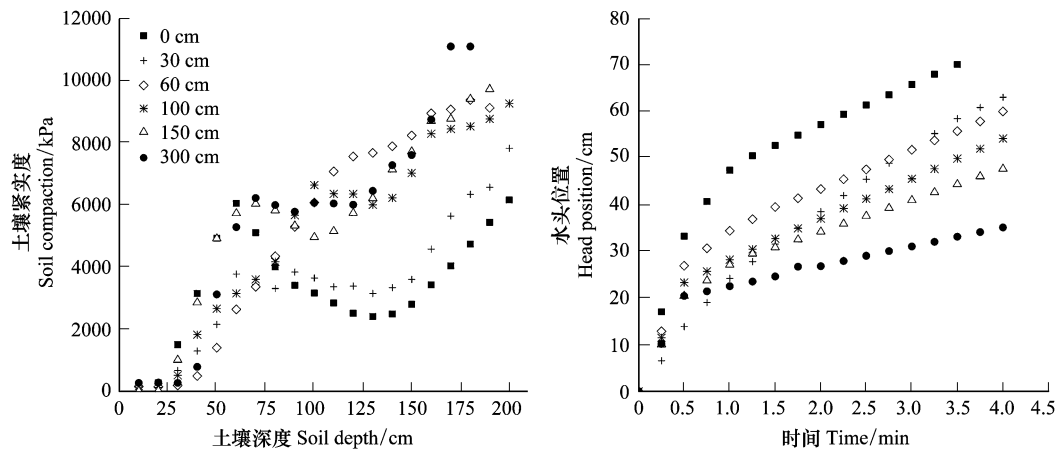


图6 距离裂缝不同距离土壤紧实度与入渗特征差异

Fig.6 Differences of soil compaction and infiltration characteristics at different distances from cracks

合体 OEC 受破坏的程度^[23]; ΔJ 反映的是在 J 点被还原初级醌受体 Q_A^- 到次级醌受体 Q_B 的电子传递受抑制, 导致 Q_A^- 明显累积^[24]; 而 ΔI 的出现主要与 PSI 铁氧还蛋白-NADP+氧化还原酶(FNR)失活有关^[25]。王振兴等^[26]研究发现, 植物在受到干旱胁迫会导致叶绿素荧光诱导动力学曲线中 K 相的出现。Christen^[27]、Oukarroum 等^[28]指出 K 相的出现与否能够评价植物叶片的活性与耐旱性。本研究中, 越靠近塌陷裂缝, 土壤含水量越低, 最低仅为 5.63%。裂缝边柠条受到干旱胁迫, 柠条叶片 O-J-I-P 曲线变形为 O-K-J-I-P 曲线(图 4), 说明柠条叶片 PSII 电子供体侧放氧复合体(OEC)受到伤害, 并且随着干旱程度的加剧, OEC 受到的伤害程度也越来越严重。而相对可变荧光值在 J 和 I 点也随着干旱胁迫的加剧明显升高, 说明柠条叶片光合机构中电子传递受到抑制, 使得电子传递过程中初级醌受体 Q_A^- 大量累积, 最终导致过剩光能累积及活性氧浓度升高, 对柠条叶片光合机构和细胞膜系统与高分子的正常功能^[29]。

PSII 反应中心的变化得到, 随着干旱胁迫的加重, 单位反应中心吸收的光能(ABS/RC)、捕获的光能(TRo/RC)、热耗散的能量(DI_o/CS)增加; 而电子传递的能量(ET_o/RC)反而降低。这说明干旱胁迫影响了植物叶片 PSII 增加了光能吸收, 但是光合电子的传递受阻, 导致柠条叶片中过剩的光能累积, 通过增加热耗散来缓解过剩光能带来的压力。这是柠条对于干旱胁迫的一种响应机制, 同时也是在长期逆境下经过驯化以及适应而形成的一种自我调节机制。随着土壤含水量的降低, 柠条叶片电子传递到电子传递链中 Q_A^- 下游的电子受体的概率(ET_o/TRo)、用于电子传递的量子产额(ET_o/ABS)、PSII 最大量子效率(TR_o/ABS)均明显降低, 进一步说明了光合电子传递受阻, 导致过剩光能的积累。OJIP 曲线的初始斜率(M_o)反映了初级醌受体 Q_A^- 在 O-J 阶段的被还原速率^[24], 本文中随着干旱加剧 M_o 显著增加, 说明 Q_A^- 还原速度加快 Q_A^- 累积, 同样说明电子传递受抑制。

根据 Johnson^[30]、Demmig 等^[31]的研究指出, 正常情况下最大光化学效率(F_v/F_m)暗适应后大于 0.8, 然而, 当 F_v/F_m 值均小于 0.8, 表明植物受到环境胁迫, 导致光抑制。本研究中, 当土壤含水量在 15.07% 时, F_v/F_m 为 0.812, 随着土壤含水量的降低, F_v/F_m 依次降低且小于 0.8。说明随着干旱加重, 柠条受到干旱胁迫导致光抑制。但是也有很多研究指出, F_v/F_m 并不能有效的监测评价植物受到的干旱胁迫情况^[25, 27]。PI 是一种基于光能吸收的性能指标, 能准确反映植物光合器官的整体状况, Oukarroum 等^[27]认为 PI 对逆境胁迫的敏感程度远高于 F_v/F_m 。为此, 本文对柠条叶片性能指数(PI)进行统计, 叶片性能指数(PI)显著降低, 当土壤含水量为 5.63% 时降低了 59.20%。说明随着干旱程度的加剧, 柠条叶片性能指数降低, 受到光抑制, 对柠条生长造成胁迫。以上分析得出: 井工煤炭开采在地表形成大量裂缝, 破坏了土体结构, 导致裂缝区土壤含水量进一步降低, 在此条件下, 柠条生长受到干旱胁迫, 影响光合作用的正常进行。在矿区植被保护过程中应该注意塌陷裂缝的修复, 对塌陷裂缝进行填充以减少土壤水分的蒸发面, 减少水分散失。另外 JIP-test 技术能有效地识

别采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应的影响,最大光化学效率(F_v/F_m)与光能吸收的性能指标(PI)可以作为柠条叶片受到光抑制的有效指标。

5 结论

(1)通过对采煤塌陷裂缝一侧土壤含水量进行监测得到:随着与裂缝之间距离的增加土壤含水量呈增大的趋势;通过采煤沉陷过程植物根系土壤剖面 0—100cm 水分速测仪连续监测结果得到:采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量均低于沉陷初期。土壤含水量的降低原因:煤炭井工开采在地表形成大量裂缝,增加了土壤水分的蒸发面,加速了土壤水的散失,随着与裂缝之间距离的增加,土壤水分散失减少,土壤含水量升高;采煤塌陷破坏了土体结构,不利于土壤水分保持,地表水流失进一步加重;地下部分被抽空,潜水位埋深降低,影响地下水对地表水的补给。

(2)随着距离塌陷裂缝越近,土壤含水量逐渐降低,柠条受到干旱胁迫,叶片 O—J—I—P 曲线变形为 O—K—J—I—P 曲线,干旱胁迫通过干扰柠条叶片 PSII 电子供体侧、受体侧以及电子传递链的功能,严重的损害了柠条叶片光合机构的正常功能。通过 JIP-test 技术能有效地识别采煤沉陷裂缝影响下土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光响应的影响,为该地区植被保护的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究. 资源·产业, 2005, 7(2): 18-24.
- [2] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛, 杨会峰, 宋亚欣. 采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 67-70.
- [3] 雷少刚, 卞正富. 西部干旱区煤炭开采环境影响研究. 生态学报, 2014, 34(11): 2837-2843.
- [4] 吴立新, 马保东, 刘善军. 基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1217-1222.
- [5] 邱汉周. 淮南潘集煤矿区植被恢复模式及其土壤修复效应研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 191-191.
- [6] 钱者东, 秦卫华, 沈明霞, 杨昉婧. 毛乌素沙地煤矿开采对植被景观的影响. 水土保持通报, 2014, 34(5): 299-303.
- [7] Brestic M, Zivcak M, Kalaji H M, Carpentier R, Allakhverdiev S I. Photosystem II thermostability *in situ*: environmentally induced acclimation and genotype-specific reactions in *Triticum aestivum* L. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 57: 93-105.
- [8] 苏晓琼, 王美月, 束胜, 孙锦, 郭世荣. 外源亚精胺对高温胁迫下番茄幼苗快速叶绿素荧光诱导动力学特性的影响. 园艺学报, 2013, 40(12): 2409-2418.
- [9] Jedmowski C, Brüggemann W. Imaging of fast chlorophyll fluorescence induction curve (OJIP) parameters, applied in a screening study with wild barley (*Hordeum spontaneum*) genotypes under heat stress. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2015, 151: 153-160.
- [10] Mathobo R, Marais D, Steyn J M. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Agricultural Water Management, 2017, 180: 118-125.
- [11] Lukatkin A S, Tyutyayev E V, Sharkaeva E S, Lukatkin A A, da Silva J A T. Mild abiotic stresses have different effects on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of young woody and herbaceous invasive plants. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(1): 20.
- [12] Cambridge M L, Zavala-Perez A, Cawthray G R, Mondon J, Kendrick G A. Effects of high salinity from desalination brine on growth, photosynthesis, water relations and osmolyte concentrations of seagrass *Posidonia australis*. Marine Pollution Bulletin, 2017, 115(1/2): 252-260.
- [13] Marín-Guirao L, Sandoval-Gil J M, Bernardeau-Esteller J, Rufz J M, Sánchez-Lizaso J L. Responses of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* to hypersaline stress duration and recovery. Marine Environmental Research, 2013, 84: 60-75.
- [14] Marín-Guirao L, Sandoval-Gil J M, Rufz J M, Sánchez-Lizaso J L. Photosynthesis, growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* in response to simulated salinity increases in a laboratory mesocosm system. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 92(2): 286-296.
- [15] Koch M S, Schopmeyer S A, Kyhn-Hansen C, Madden C J, Peters J S. Tropical seagrass species tolerance to hypersalinity stress. Aquatic Botany, 2007, 86(1): 14-24.
- [16] Bian Z F, Lei S G, Inyang H I, Chang L Q, Zhang R C, Zhou C J, He X. Integrated method of RS and GPR for monitoring the changes in the soil moisture and groundwater environment due to underground coal mining. Environmental Geology, 2009, 57(1): 131-142.
- [17] 邹慧. 神东风积沙区煤炭开采对土壤水分运移规律的影响[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [18] 李王成. 石羊河流域中游土壤水分运动规律试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [19] 王力, 卫三平, 张青峰, 王全九, 李世清. 榆神府矿区土壤-植被-大气系统中水分的稳定性同位素特征. 煤炭学报, 2010, 35(8):

1347-1353.

- [20] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤田开采对地下水和植被的影响. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1408-1414.
- [21] 赵宏宇. 采煤塌陷对沙质土壤水分特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [22] 郑秀清, 樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究. 农业工程学报, 2000, 16(6): 52-55.
- [23] Bussotti F. Assessment of stress conditions in *Quercus ilex* L. leaves by O-J-I-P chlorophyll *a* fluorescence analysis. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, 2004, 138(2): 101-109.
- [24] Strasser R J, Srivastava A. Polyphasic chlorophyll *a* fluorescence transient in plants and cyanobacteria. Photochemistry and Photobiology, 1995, 61(1): 32-42.
- [25] Schansker G, Srivastava A, Govindjee, Strasser R J. Characterization of the 820-nm transmission signal paralleling the chlorophyll *a* fluorescence rise (OJIP) in pea leaves. Functional Plant Biology, 2003, 30(7): 785-796.
- [26] 王振兴, 陈丽, 艾军, 刘迎雪, 何伟, 许培磊, 秦红艳, 赵滢. 不同干旱胁迫对山葡萄的光合作用和光系统 II 活性的影响. 植物生理学报, 2014, 50(8): 1171-1176.
- [27] Christen D, Schönmann S, Jermini M, Strasser R J, Défago G. Characterization and early detection of grapevine (*Vitis vinifera*) stress responses to esca disease by in situ chlorophyll fluorescence and comparison with drought stress. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(3): 504-514.
- [28] Oukarroum A, El Madidi S, Schansker G, Strasser R J. Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll *a* fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(3): 438-446.
- [29] Foyer C H, Noctor G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-valuation of the concept of oxidative stress in a physiological context. Plant, Cell & Environment, 2005, 28(8): 1056-1071.
- [30] Johnson G N, Young A J, Scholes J D, Horton P. The dissipation of excess excitation energy in British plant species. Plant, Cell & Environment, 1993, 16(6): 673-679.
- [31] Demmig B, Björkman O. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution in leaves of higher plants. Planta, 1987, 171(2): 171-184.