

祁连山高海拔雨养农业区油菜、 小麦光合特性比较研究

蒋菊芳^{1,2}, 魏育国², 王润元¹, 王鹤龄¹

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室 中国气象局干旱气候变化与减灾开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省武威市气象局农业气象试验站, 甘肃 武威 733000)

摘要: 在作物生长旺盛期, 采用 LI-6400 便携式光合仪测定了祁连山高海拔雨养农业区环境因子和油菜、小麦叶片光合生理指标, 比较了油菜、小麦及低海拔地区作物光合参数的差异性。结果表明: 光合有效辐射和空气温度均呈单峰型日变化曲线, 而空气湿度呈“S”型日变化曲线, 大气 CO₂ 浓度为早晚较低, 下午高。油菜和小麦的叶片净光合速率日变化均呈双峰型曲线, 存在“午休”现象, 且上午光合速率高于下午。油菜的蒸腾速率日变化呈双峰型曲线, 小麦的蒸腾速率却呈单峰型曲线。气孔导度日变化大体呈“S”型曲线。光合有效辐射是影响叶片净光合速率和蒸腾速率的主要环境因子之一, 空气湿度是气孔导度的主要影响因子。大气 CO₂ 浓度与小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度呈显著正相关关系。

关键词: 光合特性; 油菜; 小麦; 祁连山高海拔雨养农业区

中图分类号: S512.101; S565.401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)04-0120-05

随着气候变化和农业生产结构调整, 小麦、油菜的种植界限在逐渐发生着变化。生长在海拔地区的作物对气候变化的响应和生理适应方式成为近年来研究的热点之一^[1-2]。大量研究结果表明高海拔地区的作物由于长期受低温、高海拔、强辐射和低气压的影响, 形成了特殊的形态解剖和生理适应方式。并且生长在逆境中的作物生理指标及产量表现具有不稳定性, 它们的光合作用与低海拔地区也不同^[2-20]。同时, 作物的光合作用是易受环境影响的重要生理过程, 不同生态环境中的植物光合特性因生态条件而异。对于干旱胁迫、不同土壤水分条件下、不同坡位对作物光合作用的影响等方面, 前人做了大量工作^[3-17]。因此, 了解作物对逆境的响应, 是对作物进行合理调控、实现农业高产节水的前提。目前对生长于祁连山高海拔雨养农业区的小麦和油菜光合生理特性的系统研究尚不多见。本文通过分析祁连山高海拔雨养农业区环境因子及对小麦、油菜光合生理指标进行对比分析, 以探索高海拔农业区作物光合作用规律和对气候变化的响应, 同时为作物结构调整决策和保障粮油生产安全提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

祁连山高海拔雨养农业区位于中纬度北温带,

深居内陆, 远离海洋, 冬季长而寒冷干燥、夏季短而温凉湿润。以乌鞘岭为代表, 乌鞘岭东西长约 17 km, 南北宽约 10 km, 素以山势峻拔、地势险要而驰名于世, 自古以来, 乌鞘岭为河西走廊的门户和咽喉, 是北部内陆河和南部外流河的分水岭, 也是季风区和非季风区的分界线, 本区域属寒冷高原性气候。试验地位于祁连山乌鞘岭北坡的雨养农业区(甘肃省武威市天祝县安远镇柳树沟村), 地处 102°51'E, 37°14'N, 海拔高度 2 747 m, 年平均气温 0.2℃, 年降水量在 410 mm 左右, 主要集中在 5~9 月, 年均日照时数 2 584.2 h, 光照充足, 年平均无霜期 90 d 左右, 雨热同期, 5~10 月为作物生长季。

1.2 供试材料

供试品种: 甘蓝型春油菜和春小麦陇春 8 号。春油菜 4 月下旬播种, 9 月底收获, 8 月上~中旬处于开花盛期; 春小麦从 4 月中旬播种, 9 月中旬收获, 8 月上~中旬处于开花~乳熟期。试验小区随机排列, 小区面积 120 m²。

1.3 观测项目和方法

田间试验于 2009—2010 年进行了两年, 2009 年降水较多, 气候条件相对湿润, 2010 年降水较少, 气候条件相对干旱。光合试验于 2009—2010 年每年的 8 月上~中旬(晴天), 采用美国 LI-COR 公司生

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家科技部气象行业专项“农田水分利用效率对气候变化的响应与适应技术”(GYHY201106029); 国家科技部气象行业专项“西北旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究”(GY-HY200806021)

作者简介: 蒋菊芳(1979—), 女, 甘肃武威人, 工程师, 主要从事农业气象与荒漠生态业务和科研工作。E-mail: wwqxjif@163.com。

产 LI-6400 便携式光合仪,测定油菜和小麦活体旗叶叶片的光合特性,每种作物选择生长健壮、长势和光照基本一致的同部位叶片测定光合日进程,从早 8:00~20:00 时每 2 小时测定一次,每种作物选择 4 个点次,每次取 3 个重复。测定叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i) 和光合有效辐射 (PAR) 等生理指标,空气湿度 (RH)、空气温度 (T_a) 和大气 CO_2 浓度 (C_a) 等环境要素。叶片水分利用率 (WUE , $\mu mol CO_2 / mmol H_2O$),该值用 P_n / T_r 表示。本文是对两年观测结果的平均值进行分析研究。

数据采用 EXCEL 和 SPSS11.5 统计软件对试验数据进行相关分析处理。

2 结果与分析

2.1 高海拔雨养农业区环境因子日变化特征

如图 1 所示,祁连山高海拔雨养农业区光合有效辐射呈单峰型日变化曲线,即早晚小,中午 12:00 时达峰值 $1518.87 \mu mol / (m^2 \cdot s)$ 。而空气湿度呈“S”型日变化曲线,早晨空气湿度随着气温升高、辐射增强而下降,至中午 12:00 时达谷值,下午又缓慢上升

至 16:00 时达峰值 40%,而后缓慢下降。空气温度呈单峰型日变化曲线,早晚低、中午高,14:00 时达到一天中最高值 $31^\circ C$,且日温差大。大气 CO_2 浓度早晚较低,下午 16:00 时达最高。光合有效辐射与空气湿度存在较弱的负相关,而与空气温度、大气 CO_2 浓度、叶面水汽压差呈正相关,相关系数在 $0.580 \sim 0.708$ 。空气温度与大气 CO_2 浓度存在不显著正相关,与叶面水汽压差存在极显著正相关,相关系数达 0.903 ,与空气湿度呈负相关。

2.2 油菜、小麦光合参数日变化特征

油菜和小麦叶片净光合速率日变化呈典型的双峰型曲线(图 2),存在“午休”现象,且上午的光合速率高于下午,波形相似。早晨随着光合有效辐射增强、气温升高和湿度下降,光合速率增大,当气温达到最高时,出现午休现象;下午随着气温下降、湿度增大,光合速率慢慢增大至次高峰,之后逐渐降低。光合速率最高峰值出现在 12:00 时,次高峰值出现在 16:00 时。但是油菜的光合速率明显高于小麦,油菜光合速率最高为 $6.87 \mu mol / (m^2 \cdot s)$,最低为 $1.91 \mu mol / (m^2 \cdot s)$;小麦光合速率最高为 $4.59 \mu mol / (m^2 \cdot s)$,最低为 $0.77 \mu mol / (m^2 \cdot s)$ 。

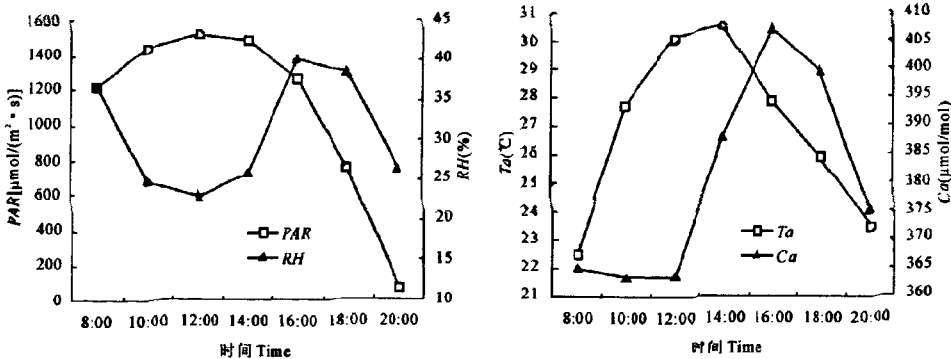


图 1 环境因子(光合有效辐射(PAR)、空气湿度(RH)、空气温度(T_a)和大气 CO_2 浓度(C_a))的日变化
Fig. 1 Diurnal changes of environmental factors (photosynthetic active radiation, air humidity, temperature and CO_2 concentration in air)

油菜蒸腾速率日变化呈双峰型曲线,12:00 时和 16:00 时出现两个峰值 $2.57 mmol / (m^2 \cdot s)$ 和 $2.59 mmol / (m^2 \cdot s)$;说明高海拔地区油菜蒸腾速率随着太阳辐射的增强而增大,中午由于气孔部分关闭,蒸腾速率出现一个低谷。但是小麦蒸腾速率日变化却呈单峰型曲线,蒸腾速率随着气温升高而增大、气温下降而减小,14:00 时气温达到最高时蒸腾速率也达到峰值 $2.40 mmol / (m^2 \cdot s)$,说明气温对小麦蒸腾速率的影响较气孔导度大。油菜蒸腾速率整体高于小

麦。

两种作物气孔导度日变化大体呈“S”型曲线,早晨气孔导度较大,随着气温升高、辐射增强和湿度减小,气孔导度减小;之后当气温下降、湿度增大和辐射不太强烈,外界环境条件适宜时气孔导度达到最大;然后又逐渐减小。油菜的气孔导度整体大于小麦,这也是油菜光合速率和蒸腾速率高于小麦的原因之一。

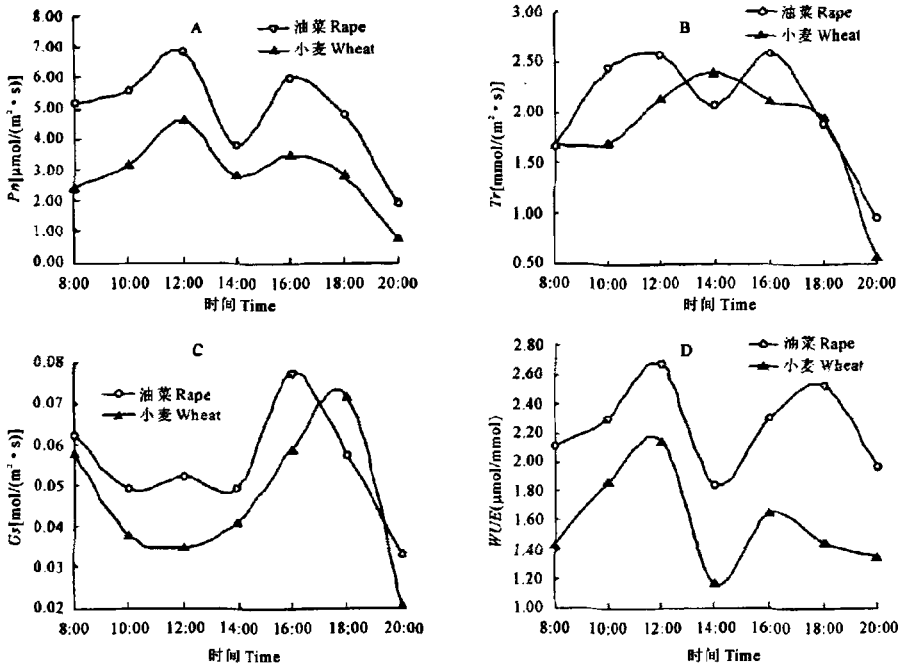


图 2 油菜、小麦叶片净光合速率(P_n)(A)、蒸腾速率(Tr)(B)、
气孔导度(G_s)(C)、水分利用效率(WUE)(D)日变化

Fig.2 Diurnal changes of rape and wheat leaves' net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency

叶片水分利用效率日变化呈双峰型,与净光合速率变化趋势相似。随着气温升高,光合有效辐射增强,水分利用效率缓慢增大,油菜、小麦 12:00 时达第一高峰值 2.67 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 和 2.15 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$; 午后 14:00 时降到谷值 1.84 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 和 1.17 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 下午又慢慢增大至次高,之后又减小。油菜叶片水分利用效率也明显高于小麦。

2.3 油菜、小麦光合参数与环境因子的相关性分析

从表 1 可见,油菜、小麦的光合参数与光合有效辐射总体呈正相关关系。光合有效辐射对叶片净光合速率和蒸腾速率的影响最显著,且对蒸腾速率的影响大于净光合速率,特别是油菜相关系数达 0.819 ~ 0.857 ($P < 0.05$)。光合有效辐射对油菜叶片净光合速率和蒸腾速率的影响大于小麦,对小麦叶片水分利用效率的影响大于油菜。光合有效辐射对气孔导度的影响却不显著。所以光合有效辐射是影响叶片净光合速率和蒸腾速率的主要环境因子。叶片气孔导度和净光合速率随着空气湿度的增加而增大,与气孔导度呈显著正相关关系,相关系数达 0.770 ~ 0.776。在高海拔雨养农业区空气湿度越大气孔导度越大,越有利于光合作用的进行,空气湿度是气孔

导度的主要影响因子,对油菜的影响大于小麦。中午空气湿度最小、大气干旱,气孔导度最小,导致气孔部分关闭,净光合速率减小,出现“午休”现象。叶片的蒸腾速率随着空气温度的升高而增大,两者呈显著正相关关系,空气温度越高蒸腾速率越大。叶片净光合速率随着气温升高而增大,到气温最高时由于气孔部分关闭而减小,两者间的相关性不显著。叶片气孔导度随着气温升高而减小,有弱的负相关关系。空气温度是蒸腾速率的主要影响因子。大气 CO_2 浓度与小麦叶片蒸腾速率呈极显著正相关关系,与净光合速率和气孔导度呈显著正相关关系,说明大气 CO_2 浓度越大,小麦叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度就越大,大气 CO_2 浓度增加能使作物光合效率提高。

2.4 油菜、小麦光合参数回归方程

作物的光合作用是对生理生态因子敏感而复杂的过程。如表 2 所示,建立了各光合生理指标与环境因子间的回归关系式,各回归方程的复相关系数 R^2 都达到了显著水平。但不同的环境因子对生理指标的影响程度不一,有的因子对生理指标的影响达不到显著水平,应从回归方程中剔除,其回归结果

表明,油菜和小麦叶片的光响应曲线,净光合速率与光合有效辐射呈显著正相关,光合速率在一定范围内,随着光照强度的增加而增大。油菜相关系数 $R^2 = 0.6916$ 大于小麦 $R^2 = 0.6242$,表现出油菜比小麦具有更强的光合能力和光能利用潜力。随着瞬时光合有效辐射的增强,两种作物的蒸腾速率随之增大,呈显著正相关关系,小麦 $R^2 = 0.7550$ 大于油菜 $R^2 = 0.7133$,小麦的蒸腾速率较高。除光合有效辐射外,光合参数还受气温、相对湿度和大气 CO_2 浓度的显著影响。

表 1 油菜、小麦光合参数与环境因子的相关系数

Table 1 The correlative coefficients between rape and wheat's photosynthetic parameters and environmental factors

环境因子 Environmental factors	油菜 Rape				小麦 Wheat			
	P_n	T_r	G_s	WUE	P_n	T_r	G_s	WUE
PAR	0.819 *	0.857 *	0.520	0.322	0.661	0.700	0.221	0.686
RH	0.366	0.122	0.776 *	0.162	0.459	-0.071	0.770 *	-0.143
Ta	0.431	0.776 *	-0.078	-0.452	0.008	0.775 *	-0.108	0.301
Ca	-0.222	0.113	0.299	-0.582	0.786 *	0.880 * *	0.773 *	0.266

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。 Note: * means $P < 0.05$, and * * means $P < 0.01$.

表 2 油菜、小麦光合参数与环境因子的回归方程

Table 2 The regression equations of rape and wheat's photosynthetic parameters and environmental factors

	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
油菜 Rape	$y_{P_n} = 1.4264 \ln(x_{PAR}) - 4.7835$	0.6916 *	$y_{T_r} = 0.5218 \ln(x_{PAR}) - 1.5061$	0.7133 *
	$y_{G_s} = 0.0495 \ln(x_{RH}) - 0.1160$	0.5503 *	$y_{P_n} = 3.9611 \ln(x_{Ta}) - 10.981$	0.5611 *
	$y_{P_n} = -2E - 06x_{PAR}^2 + 0.0059x_{PAR} + 1.4776$ (光响应多项式回归)			0.6901 *
小麦 Wheat	$y_{P_n} = 0.6876 \ln(x_{PAR}) - 1.6492$	0.6242 *	$y_{T_r} = 0.3882 \ln(x_{PAR}) - 0.7580$	0.7550 *
	$y_{P_n} = 3.4077 \ln(x_{Ca}) - 17.0180$	0.6313 *	$y_{T_r} = 3.6352 \ln(x_{Ta}) - 10.1590$	0.6202 *
	$y_{G_s} = 0.0381 \ln(x_{RH}) - 0.0813$	0.5302 *	$y_{P_n} = 1.9646 \ln(x_{Ca}) - 9.6723$	0.7963 *
	$y_{G_s} = 0.0477 \ln(x_{Ca}) - 0.2323$	0.5469 *		
	$y_{P_n} = -3E - 06x_{PAR}^2 + 0.0061x_{PAR} + 0.2519$ (光响应多项式回归)			0.7249 *

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。 Note: * means $P < 0.05$, and * * means $P < 0.01$.

3 讨 论

本试验地海拔约高于青海省中国科学院西北高原生物研究所实验苗圃地^[4]447 m,具有与低海拔地区不同的环境因子日变化特征。空气湿度呈“S”型日变化曲线,这与宋庆安等研究^[7]低海拔地区的“L”型曲线不同。大气 CO_2 浓度早晚较低、下午高,与低海拔地区^[3,6]大气 CO_2 浓度早晚高、中午低也有所不同。光合有效辐射和空气温度均呈单峰型日变化曲线与相关研究一致。研究区油菜和小麦叶片净光合速率和水分利用效率日变化呈双峰型曲线,净光合速率存在“午休”现象,这与高原作物无明显“光合午休”现象不一致。油菜蒸腾速率日变化呈双峰型曲线,而小麦却呈单峰型曲线,说明油菜和小麦在生理生化方面存在不同之处。气孔导度呈“S”型曲线也不同于平原地区^[3,6]。油菜气孔导度整体高

于小麦,这也是油菜的光合速率和蒸腾速率高于小麦的原因之一,而且油菜的其它光合生理指标多高于小麦。从相关系数看,光合有效辐射是蒸腾速率和净光合速率的主要影响因子,空气湿度是气孔导度的主要影响因子,大气 CO_2 浓度与小麦的叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均呈显著正相关关系。由于研究区域和作物不同,结论与相关研究^[4-7,10]存在差异。

植物光合作用是极其复杂的生物物理和化学过程,受到许多环境因素的制约。受研究手段的限制,本试验进行时间、周期短,还需在作物全生育期、不同海拔高度进行连续定点观测研究。且本研究限于植物叶片水平,只能揭示叶片尺度植物个体的光合生理特征,是可控的理想试验尺度,也是植物光合作用的最基本尺度,属于微观的机理研究,为今后宏观尺度植物光合固碳研究提供了必要的理论支持。

参考文献:

- [1] 邓振镛, 张强, 徐金芳, 等. 西北地区农林牧业生产及农业结构调整对全球气候变暖响应的研究进展[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 835-842.
- [2] 卢春福, 贾桂英. 高海拔地区植物的光合特性[J]. 植物学通报, 1995, 12(2): 38-42.
- [3] 张璐, 张纪林, 敏忠意, 等. 不同光照条件下3种冬青属植物的光合特征日变化研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 490-495.
- [4] 师生波, 李惠梅, 王学英, 等. 青藏高原几种典型高山植物的光合特性比较[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 40-46.
- [5] 赵思金, 韩烈保, 张咏新, 等. 不同坡位胡枝子光合特征及其影响因子研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(2): 342-347.
- [6] 李林峰. 4种湿地植物光合作用特性的比较研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(10): 2094-2102.
- [7] 宋庆安, 董方平, 易雪琴, 等. 臭椿光合生理生态特性日变化研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 148-153.
- [8] 马兴祥, 王润元, 杨永龙, 等. 高海拔地区旱地春小麦光合日变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 36-41.
- [9] 郭天财, 王之杰, 王永华. 不同穗型小麦品种旗叶光合作用日变化的研究[J]. 西北植物学报, 2002, 27(5): 633-639.
- [10] 王润元, 杨兴国, 赵鸿, 等. 半干旱雨养区小麦叶片光合生理生态特征及其对环境的响应[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1161-1166.
- [11] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 不同品种青贮玉米光合作用与光合特性比较[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 536-540.
- [12] 李育花, 任坚毅, 林羽, 等. 独叶草的光合生理生态特性[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1038-1042.
- [13] 王润佳, 张绪成, 高世铭, 等. 大气CO₂浓度增高和施氮量对抽穗期春小麦光合参数及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 29(5): 32-37.
- [14] 苏占胜, 王连喜, 李福生, 等. 紫外线-B增加对内夏春小麦光合作用日变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 82-86.
- [15] 田玉强, 高琼, 张智才, 等. 青藏高原高寒草地植物光合与土壤呼吸研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 711-721.
- [16] 李文华, 朱清科, 赖亚飞, 等. 陕北黄土高原丘陵沟壑区沙棘的光合特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 135-139.
- [17] 吕金印, 山仑, 高俊凤, 等. 干旱对小麦灌浆期旗叶光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 77-81.
- [18] Deng XP, Shan L, Shinobu I. Effect of drought environments on the photosynthesis of spring wheat in the semi-arid area of Loess Plateau [C]//Lafren JM, Tian JL, Huang CH. Soil Erosion and Dryland Farming. New York: CRC Press, 2000: 15-24.
- [19] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annu. Rev. Plant physiol, 1982, 33: 317-345.
- [20] Todd GW. Photosynthesis and respiration of vegetative and reproductive parts of wheat and barley plants in response to increasing temperature [J]. proc. Oklahoma Acad. Sci. 1982, 62: 57-62.

Comparative study on the photosynthetic characteristics of rape and wheat in rain-fed agricultural region with high altitude in Qilian

JIANG Ju-fang^{1,2}, WEI Yu-guo², WANG Run-yuan¹, WANG He-ling¹

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reducing of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. Agricultural Experiment Station, Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: The environmental factors, rape and wheat's photosynthetic parameters were measured by LI-6400 portable photosynthesis system in crop vigorous growing period. The difference of photosynthesis was compared between rape and wheat plants in the low altitude region. The results showed that the diurnal change of photosynthetic active radiation and temperature presented a signal pattern. The air humidity presented an "S" pattern. The CO₂ concentration in air presented low in the morning and night, but high in the afternoon. The diurnal change of rape and wheat leaves' net photosynthetic rate presented a bimodal pattern, and had a depression at midday, and the net photosynthetic rate was also higher in the morning than that in the afternoon. The rape's transpiration rate presented a bimodal pattern. But wheat's transpiration rate presented a signal pattern. The stomatal conductance presented an "S" pattern in all. The net photosynthetic rate was a main environmental factor which affected net photosynthetic rate and transpiration rate. Air humidity was a main affecting factor of stomatal conductance. There was a marked positive correlation between CO₂ concentration in air and wheat leaves' net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance.

Keywords: photosynthetic characteristics; rape; wheat; rain-fed agricultural region with high altitude in Qilian