

DOI: 10.5846/stxb201906201310

俄有浩, 霍治国, 赵花荣, 马玉平. 华北平原农田 CO₂ 浓度变化特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6613-6620.

E Y H, Huo Z G, Zhao H R, Ma Y P. Variation characteristics of atmospheric CO₂ concentration in farmland of North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6613-6620.

华北平原农田 CO₂ 浓度变化特征

俄有浩¹, 霍治国^{1,*}, 赵花荣^{1,2}, 马玉平¹

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 中国气象局固城生态与农业气象试验站, 保定 072650

摘要: 旨在了解农田 CO₂ 浓度长期动态变化特征、趋势、浓度增量分布模式等, 收集了 2007—2018 年中国气象局固城生态与农业气象试验站开路式涡相关 CO₂ 浓度观测数据。研究了华北平原农田 CO₂ 浓度的年际、年内、昼夜和 CO₂ 通量等动态变化特征, 对比分析了华北平原农田 CO₂ 浓度与城市站和大气本底站 CO₂ 浓度变化趋势及差异。结果表明, 近十多年来华北平原农田 CO₂ 年平均浓度显著升高 31.0 μmol/mol ($r=0.263$, $P<0.01$), 年均增幅 (2.58 μmol/mol) 与全球和瓦里关本底站大气 CO₂ 浓度增幅接近, 但农田 CO₂ 浓度年际和年内季节变化波动巨大, 日平均浓度和逐时平均浓度标准差分别为 33.7、33.5 μmol/mol。夜间 CO₂ 平均浓度 395.8 μmol/mol, 比白天高 36.2 μmol/mol (10.1%), 8 月最高差值达到 74.4 μmol/mol (20.6%)。在作物生长季节, 5 月和 8—9 月白天 CO₂ 浓度出现的两个谷值准确地对应了 CO₂ 通量动态变化的两个峰值, 表明 4—9 月昼间 CO₂ 浓度和通量动态变化很好地反映了华北平原冬小麦和夏玉米生长过程、农事活动和农田碳交换的关系。农田 CO₂ 浓度动态变化与城市、湿地和大气本底站的变化特征不同, 表明其动态变化的形成机制有差异。农田 CO₂ 浓度昼夜及季节变化特征为研究和评估 CO₂ 浓度升高影响作物生长和产量提供指导依据。

关键词: 华北平原; 农田; CO₂ 浓度; 变化特征

Variation characteristics of atmospheric CO₂ concentration in farmland of North China Plain

E Youhao¹, HUO Zhiguo^{1,*}, ZHAO Huarong^{1,2}, MA Yuping¹

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

² Gucheng Ecological and Agrometeorological Experimental Station, China Meteorological Administration, Baoding 072650, China

Abstract: The atmospheric carbon dioxide (CO₂) is the most important greenhouse gas in the global warming. Many researches concerning the CO₂ concentration enrichments impact on crop growth and product had been carried out based on the change of CO₂ concentration which observed from background station instead of from farmland station, yet the crop grew in farmland near to the village and town. In addition, few study paid attention to the variation of atmospheric CO₂ concentration over the farmland despite many researches focused on carbon cycle and carbon exchange. In order to know the long-term dynamics, trends and increment distributions of CO₂ concentration in farmland, we collected the data of CO₂ concentration observation of open pass eddy covariance system during 2007—2018 over the farmland in Gucheng Ecological and Agrometeorological Experimental Station of China Meteorological Administration. After data quality control and statistical analysis, we studied the dynamic characteristics of CO₂ concentration in farmland of North China Plain, such as inter-annual, intra-annual, diurnal and CO₂ flux, and compared the differences of CO₂ concentration and the trends in farmland of North China Plain with those in urban station and atmospheric background station. The results showed that the

基金项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费项目 (2020Z005); 国家自然科学基金项目 (41275115)

收稿日期: 2019-06-20; **网络出版日期:** 2020-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huozg@cma.gov.cn

annual average concentration of CO₂ in the farmland of North China Plain had increased significantly from 361 to 392 μmol/mol in past twelve years ($r=0.263$, $P < 0.01$), with the average annual increment of 2.58 μmol/mol of CO₂ concentration, which close to that in global and Waliguan background station of China. However, the inter-annual and intra-annual variations of CO₂ concentration in the farmland fluctuated greatly with the standard deviation (SD) of 33.7 and 33.5 μmol/mol respectively. The average concentration of CO₂ in the night was 395.8 μmol/mol, higher 36.2 μmol/mol (10.1%) than that in the day in all the months, with the highest difference of 74.4 μmol/mol (20.6%) in August. In crop growth season, the two valley values of diurnal CO₂ concentration accurately matched the two peaks of the dynamic change of the CO₂ flux in May and August to September, which indicate that the dynamic changes of daily average CO₂ concentration and flux in day and night from April-September well reflected the relationships between the growth processes of winter wheat and summer maize, agricultural activities and carbon exchanges of farmland in the North China Plain. The dynamic change of CO₂ concentration in farmland was different from that in cities, wetlands and atmospheric background stations, suggesting the different formation mechanisms of CO₂ dynamic change. The characteristics of diurnal and night and seasonal variation of CO₂ concentration in farmland can provide guidance for studying and evaluating the effects of elevated CO₂ concentration on crop growth and yield.

Key Words: North China Plain; farmland; CO₂ concentration; characteristics of variations

农田 CO₂ 浓度是影响农田生态系统碳循环和碳交换的主要决定因素。农田 CO₂ 浓度不仅决定农作物光合生产力^[1], 对作物呼吸等生理过程和土壤呼吸等碳排放过程也有重要影响作用^[2-5]。由于农田更接近村庄和城市, 农田 CO₂ 浓度更大程度地受到人为活动和气候变化等因素共同影响。因此, 研究农田 CO₂ 浓度动态变化有助于更好地了解和研究气候变化影响农作物生产以及农田生态系统碳循环和碳交换机理和过程。虽然, 我国气象部门从 20 世纪 90 年代已加入世界气象组织全球大气观测计划, 并有瓦里关等 4 个大气本底站进入网络化观测序列, 持续开展了大气 CO₂ 等温室气体浓度观测^[6-8]。有学者也开展了城市、湿地、沙漠、高寒草地等不同下垫面条件的碳循环、碳交换和 CO₂ 浓度及通量等大量研究^[9-31]。然而, 由于大气本底站都布设在草地或森林生态系统中, 其大气 CO₂ 浓度变化受人为活动等影响可能较小, 直接利用大气本底站 CO₂ 浓度观测数据研究农田生态系统 CO₂ 浓度变化对农作物的影响可能存在一定差异。而对处在人口和工业密集区域且生态系统极其复杂的农田 CO₂ 浓度长期以来缺乏动态监测和变化研究。未来全球气候变暖情势下, 农田 CO₂ 浓度在年际、年内和昼夜的增量分布模式不清楚。

为了解农田 CO₂ 浓度长期动态变化特征、趋势、浓度增量分布模式等, 本文以中国气象局固城生态与农业气象试验站多年大气 CO₂ 浓度测定数据为依据, 分析农田 CO₂ 浓度的年际、年内、昼夜等动态变化特征, 明确大气 CO₂ 浓度增量在昼和夜、作物生长季和非生长季的分布模式, 并比较农田 CO₂ 浓度与大气本底和城市 CO₂ 浓度变化特征及差异, 为精确评估 CO₂ 浓度升高影响作物生长发育研究和产量评估提供科学依据。

1 数据来源及数据处理

1.1 数据来源及区域代表性

数据采集于中国气象局固城生态与农业气象试验站的涡动观测系统 (Gill 超声风速仪和 Li-7500 CO₂/H₂O 分析仪)。固城生态与农业气象试验站位于河北省保定市定兴县固城镇 (39.15°N, 115.74°E, 海拔 24.0 m), 距北京市中心直线距离 100 km, 是典型的华北平原冬小麦与夏玉米连作高产区。下垫面主要以冬小麦 (10 月至来年 6 月)、夏玉米 (6—10 月) 等农田和少量行道树及经济林为主, 距离试验站周围 1—2 km 有村庄分布。根据 2016 年卫星监测中国陆地区域大气 CO₂ 年均浓度分布状况^[6], 固城站基本能够代表华北北部 (除京津) 农田大气 CO₂ 浓度空间分布。

1.2 数据与处理

固城站涡动观测系统平台高度 4.0 m。涡动系统输出数据包括 CO₂ 浓度 (mg/m³)、CO₂ 通量 (mg m⁻² s⁻¹)、水汽浓度 (g/m³)、风速 (m/s)、风向、温度、湿度、大气压力梯度等。系统观测采样频率为 10 Hz。数据采集器为 CR5000 (Campbell)。系统输出 30 min 平均浓度和通量数据,时间序列为 2007 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日。同时,从世界温室气体数据中心 (WDCGG) 网站下载了青海瓦里关大气本底站 1994—2016 年 CO₂ 浓度日值数据。

利用固城站 30 min 平均 CO₂ 浓度和通量数据,参照相关文献中涡动系统通量数据的质量控制处理方法^[32-35],通过气候极值阈值判断、野点剔除、随机脉动剔除等步骤进行了数据质量控制。其中,CO₂ 浓度气候极值阈值 1000 mg/m³,野点剔除采用方差检验法,相邻点之差大于 5 倍序列标准差视为野点。

通过数据控制处理,剔除无效数据和缺失数据,2007—2018 年 30 min 平均 CO₂ 浓度的有效数据百分率在 38.1%—95.4% 之间 (表 1)。2008、2014、2016 年缺测和无效数据较多。

表 1 数据处理后 30 分钟平均 CO₂ 浓度和通量的有效数据百分率

Table 1 The percent of valid data of CO₂ concentration and flux after process

年份 Year	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	95.4	38.1	82.1	89.9	73.7	88.4	88.0	75.5	87.0	65.1	93.9	87.9

系统输出 CO₂ 浓度数据单位为质量体积浓度 (mg/m³),为了将质量体积浓度换算为摩尔浓度 (μmol/mol),根据系统内置换算公式,将质量密度数据换算成摩尔浓度数据。公式为: $C_f = C_m \times R \times (T_g + 273.15) / 44 \times P_g$, 式中, C_f 为摩尔浓度, C_m 为质量体积浓度, R 为摩尔气体常数 8.314, T_g 为探测器温度, P_g 为气压。单位换算后,将 30 min 数据统计为 1 小时、昼、夜和 1 日数据,进行结果分析。由于每个数据是前 30 min 内取样数据的平均值,为确定昼间数据开始和结束时间点,规定日出时刻延后 30 min 为昼间开始数据,日落时刻为昼间结束数据,并对昼间开始和结束时刻作整点和半点调整。定兴县最早日出时间 4:50,最迟日出时间 7:36,年平均日出时间 6:13。最迟日落时间 19:47,最早日落时间 16:54,年平均日落时间 18:21。根据确定的规则,定兴县昼间数据开始时间为 6:30,结束时间 18:30。

2 结果分析

2.1 农田 CO₂ 浓度逐日年际变化

统计 2007—2018 年逐日平均 CO₂ 浓度表明,固城站农田 CO₂ 多年平均浓度为 377.8 μmol/mol,但年内和年际波动较大。日最小浓度为 312.0 μmol/mol,日最大浓度 477.8 μmol/mol,数据序列标准差为 33.7 μmol/mol,振幅达到 150 μmol/mol (图 1)。2007—2018 年农田 CO₂ 浓度呈现显著性升高趋势 ($r = 0.263$, $P < 0.01$),从 2007 年平均 361 增加到 2018 年平均 392 μmol/mol,平均年增幅 2.58 μmol/mol。该增幅与全球和瓦里关本底站大气 CO₂ 浓度增幅 (2.08 μmol/mol 和 2.06 μmol/mol) 接近。

2.2 农田 CO₂ 浓度年内动态

统计 2007—2018 年逐时多年平均 CO₂ 浓度表明,固城站 CO₂ 逐时平均浓度在年内呈现多峰多谷动态特征 (图 2)。1—4 月逐时平均 CO₂ 浓度逐渐下降,5 月 1 日前后达到最低值,此期间数据标准差为 33.5 μmol/mol。5—7 月逐时平均浓度逐渐升高,在 7 月 1 日前后,日最低和日最高 CO₂ 浓度达到次高峰,该期间数据标准差为 37.6 μmol/mol。7 月上旬至 10 月中旬期间,CO₂ 日最低浓度最小值出现在 8 月中旬,而日最高浓度最大值也在此时间达到最高峰,该期间 CO₂ 平均浓度标准差为 45.2 μmol/mol。10 月中旬至 12 月底,逐时平均浓度逐渐下降,达到 1 月浓度状态。全年逐时平均浓度标准差为 33.5 μmol/mol。

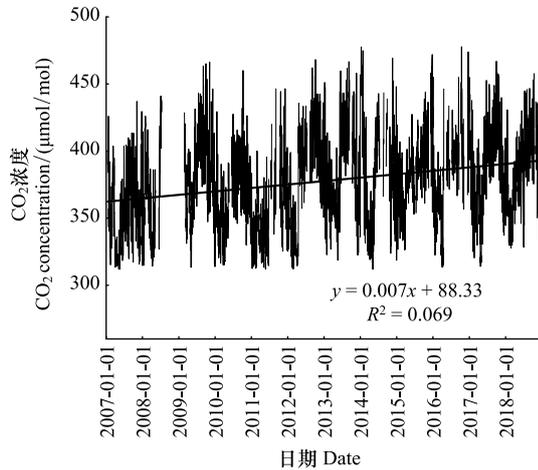


图1 固城站 2007—2018 年 CO₂ 逐日平均浓度年际变化

Fig.1 The interannual variation of daily average carbon dioxide concentration from 2007 to 2018

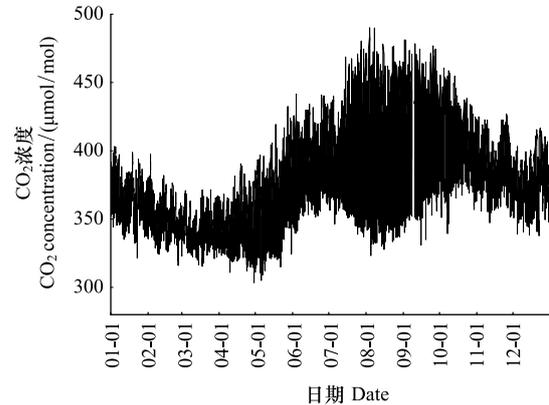


图2 固城站 CO₂ 逐时多年平均浓度年内动态

Fig.2 The intra-annual variation of hour to hour average CO₂ concentration in Gucheng station

2.3 日变化动态

统计 2007—2018 年逐时平均 CO₂ 浓度, 得到平均 CO₂ 浓度日变化动态(图 3)。平均而言, 白天 CO₂ 浓度较低, 平均为 360 μmol/mol, 其中, 15—16 时 CO₂ 浓度最低, 为 346 μmol/mol (标准差 SD 为 20 μmol/mol)。夜间 CO₂ 浓度较高, 平均为 394 μmol/mol (标准差 SD 为 37 μmol/mol)。午间比日出前 CO₂ 浓度低 12%。全天 24 h 平均 CO₂ 浓度呈“U”型分布, 标准差 SD 在 20—37 μmol/mol 之间, 相同时间点在不同季节 CO₂ 浓度振幅达到 101—163 μmol/mol。

图 4 为 1—12 月 CO₂ 平均浓度逐时变化动态, 表明不同月份之间 CO₂ 浓度差异较大。夜间 CO₂ 浓度 8 月最高, 2 月最低(2 月 < 3 月 < 4 月 < 1 月 < 12 月 < 5 月 < 11 月 < 6 月 < 10 月 < 7 月 < 9 月 < 8 月), 最大相差近 100 μmol/mol; 白天 CO₂ 浓度 10 月最高, 4 月最低(4 月 < 5 月 < 3 月 < 2 月 < 1 月 < 8 月 < 7 月 < 6 月 < 12 月 < 9 月 < 11 月 < 10 月), 最大相差 60 μmol/mol。

农田大气 CO₂ 浓度变化是作物光合和呼吸、土壤呼吸、人为活动碳排放和天气状况变化等多因素共同影响的结果。白天 CO₂ 浓度主要受作物光合同化、土壤呼吸和人为活动碳排放影响。4 月冬小麦处于拔节至孕穗生长较旺盛期, 光合同化消耗较多的 CO₂, 但地温相对较低, 土壤呼吸碳排放量相对较少, CO₂ 吸收较多排放较少, 导致白天 CO₂ 浓度最低。5 月和 8 月分别是冬小麦和夏玉米生长最旺盛期, 光合同化消耗 CO₂ 最多, 但此期间土壤呼吸碳排放量比 4 月更多, 因此, 平衡的结果是 5 月和 8 月昼间 CO₂ 浓度比 4 月的高。10 月夏玉米收割冬小麦初种, 光合作用相对较低, 土壤温度较高导致土壤碳排放较多, 所以 10 月农田 CO₂ 浓度最高。冬季的 11 月—1 月虽然光合同化和土壤呼吸都较小, 但采暖等人为活动可能增加了农田大气 CO₂ 浓度。夜间主要受作物和土壤呼吸及人为活动碳排放影响。2 月地温和气温较低, 夜间作物和土壤呼吸作用较弱, 采暖等人为碳排放活动较冬季减轻, 所以 2 月夜间 CO₂ 浓度最低。8 月是夏玉米生长旺盛期, 夜间呼吸作用较强,

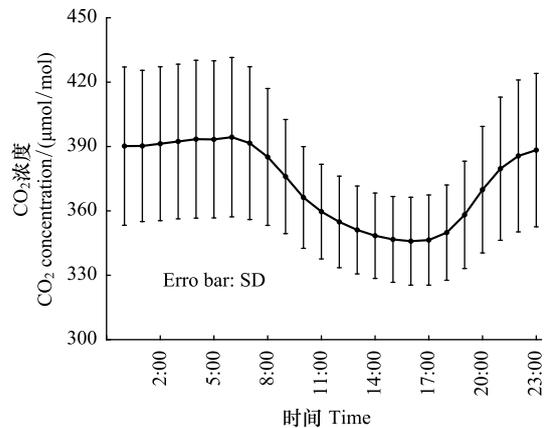
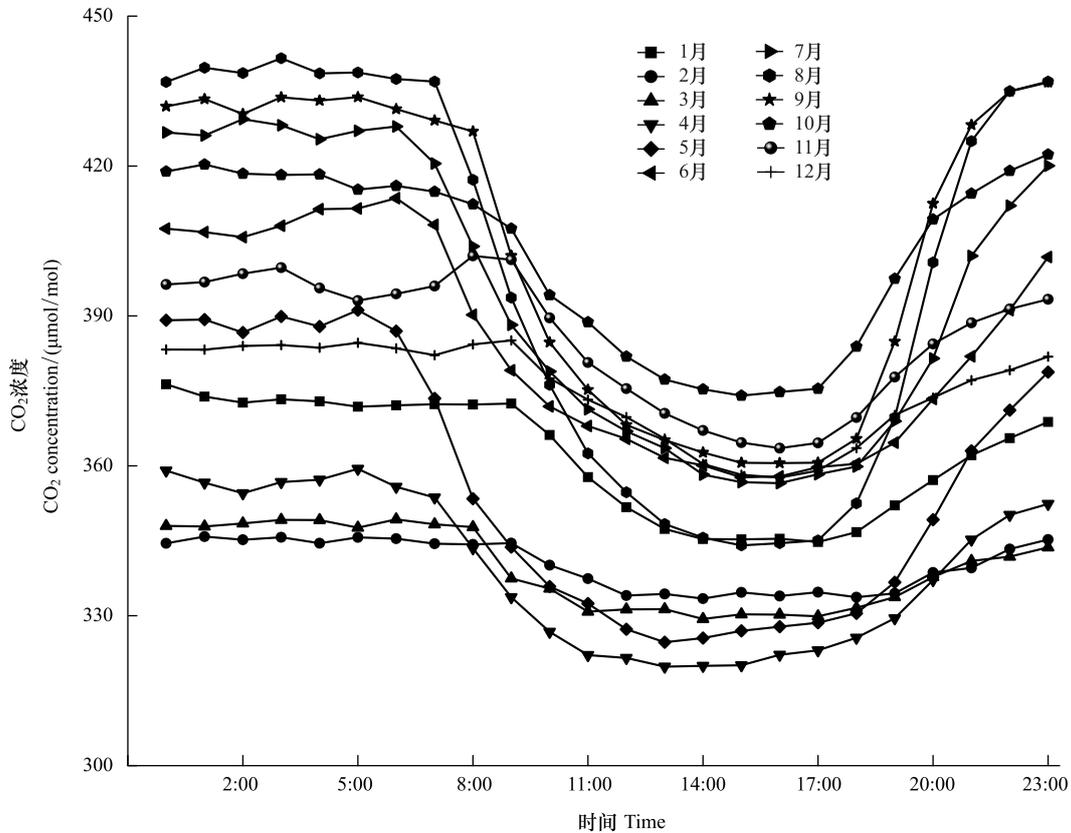


图3 固城站 2007—2018 年 CO₂ 逐时平均浓度日变化动态

Fig.3 The daily variation of average hourly CO₂ concentration from 2007 to 2018 in Gucheng station

图 4 固城站 1—12 月 CO₂ 逐时平均浓度日变化动态Fig.4 The daily variation of average hourly CO₂ concentration from JAN to DEC in Gucheng station

更重要的是 8 月夜间高温高湿增大了土壤碳排放^[4,11], 导致夜间农田 CO₂ 浓度最高。另外, 对比昼夜 CO₂ 浓度变化看出, 8 月和 5 月 CO₂ 浓度从清晨到午间波动最大, 分别从最高 440、392 μmol/mol 下降到最低的 344、325 μmol/mol, 降幅分别达到 22% 和 17%, 表明在夏玉米和冬小麦生长旺盛期, 白天强烈的光合作用对 CO₂ 需求旺盛, 明显降低了田间 CO₂ 浓度。

2.4 昼夜变化特征

图 5 为 2007—2018 年逐日昼、夜 CO₂ 平均浓度年内动态。昼间 CO₂ 浓度呈现多峰多谷动态, 其中, 5 月上旬最低, 为 320 μmol/mol, 10 月中旬最高, 超过 380 μmol/mol。夜间 CO₂ 浓度在 8—10 月下旬最高, 平均 440 μmol/mol, 2 月最低, 约 350 μmol/mol 左右。多夜间平均 CO₂ 浓度为 395.8 μmol/mol, 白天平均 359.6 μmol/mol, 夜间 CO₂ 浓度明显高于白天, 平均昼夜差 36.2 μmol/mol (10.1%), 尤其在 8 月, 夜间平均 CO₂ 浓度比白天高 74.4 μmol/mol (20.6%)。

2.5 CO₂ 通量变化特征

2007—2018 年多年逐时 CO₂ 通量年内动态表明(图 6), 从 11 月至 3 月中旬, CO₂ 通量基本维持在 0.1 mg m⁻² s⁻¹ 之间。3 月底开始, 随着冬小麦快速生长, CO₂ 吸收通量显著增加, 至 5 月上旬到达最大值 1.0 mg m⁻² s⁻¹, 之后开始减小, 到 6 月底 CO₂ 吸收接近零。7 月上旬开始, 夏玉米开始播种生长, CO₂ 吸收通量又显著快速增加, 至 8 月达到最大值 1.5 mg m⁻² s⁻¹, 之后开始减小, 到 10 月中旬 CO₂ 吸收接近 0.1 mg m⁻² s⁻¹。全年的 CO₂ 吸收通量变化特征与华北平原冬小麦和夏玉米生长过程和农事活动完全吻合。与 CO₂ 吸收通量的显著变化不同, CO₂ 释放通量的变化幅度很小, 从 4 月的 0.2 mg m⁻² s⁻¹ 左右增加到 8 月最高 0.67 mg m⁻² s⁻¹, 再到 10 月底的 0.2 mg m⁻² s⁻¹ 左右。作物整个生长期 CO₂ 释放通量仅有吸收通量的 20%—30%。

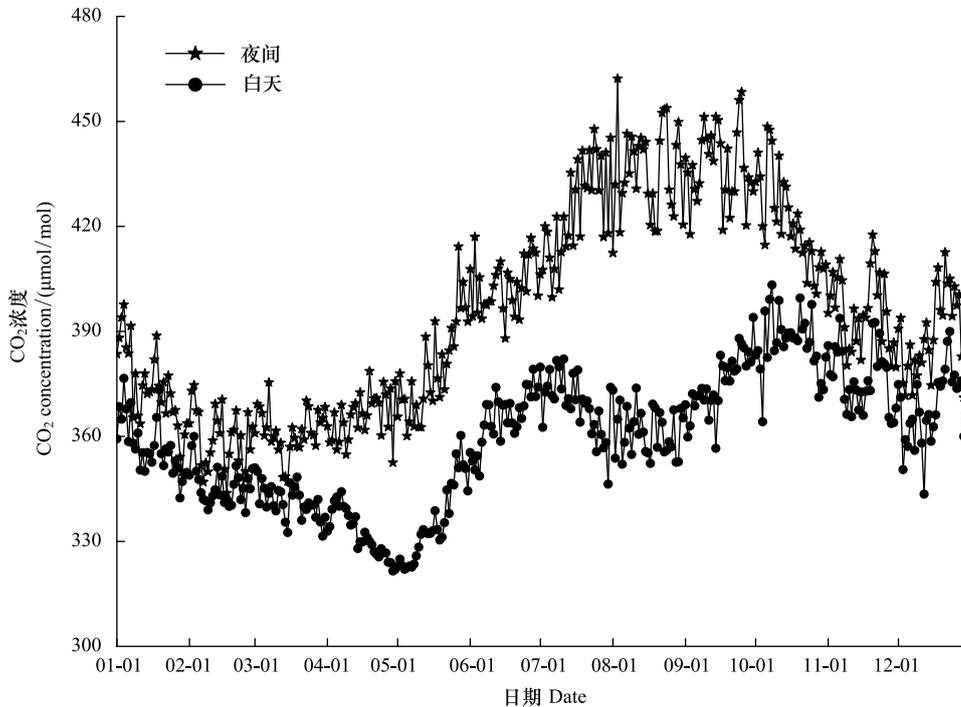


图5 固城站 2007—2018 年 CO₂ 昼夜平均浓度年内动态

Fig.5 The intra-annual variation of day and night average CO₂ concentration

2.6 农田与大气本底站 CO₂ 浓度变化比较

比较固城站农田和瓦里关大气本底站 CO₂ 日平均浓度表明,农田 CO₂ 浓度与瓦里关大气 CO₂ 浓度年内动态有较大差异(图 7)。大气本底站 CO₂ 浓度具有更小的波动性,而农田 CO₂ 浓度年内波动巨大,标准差达到 23.4 μmol/mol,是大气本底站 CO₂ 浓度标准差的近 7 倍,而且,1—5 月农田 CO₂ 浓度显著低于大气本底浓度。另外,农田 CO₂ 浓度与城市^[32] 和江河口湿地^[26] CO₂ 浓度的“U 型”变化特征也不尽相同,表明其动态变化的形成机制有差异。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2007—2018 年固城站多年平均 CO₂ 浓度 377.8 μmol/mol,最低平均浓度 312.0 μmol/mol,最高平均浓度 477.8 μmol/mol,标准差 33.7 μmol/mol,振幅达到 150 μmol/mol。12 年农田 CO₂ 年平均浓度显著性升高了 31.0 μmol/mol ($r=0.263$, $P<0.01$),平均每年升高 2.58 μmol/mol,与全球和瓦里关大气本底站 CO₂ 浓度年均增幅接近。

(2) 农田 CO₂ 浓度日变化和季节变化波动巨大,昼间 14—15 时 CO₂ 浓度最低,夜间 22 时至次日 6 时 CO₂ 浓度最高。昼间 CO₂ 平均浓度比夜间 CO₂ 平均浓度低 36.2 μmol/mol (10.1%),尤其 8 月份,昼夜 CO₂ 浓度平均相差 74.4 μmol/mol (20.6%)。白天 CO₂ 浓度波动曲线中 5 月和 8 月的两个谷值很好地对应了 4—5 月华北

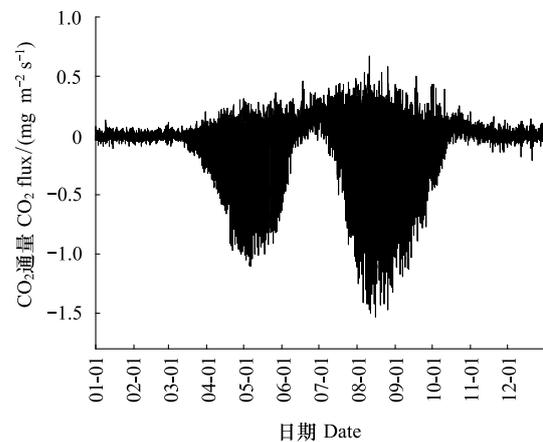


图6 固城站多年逐时平均 CO₂ 通量年内动态

Fig.6 The intra-annual variation of hourly average CO₂ flux in Gucheng

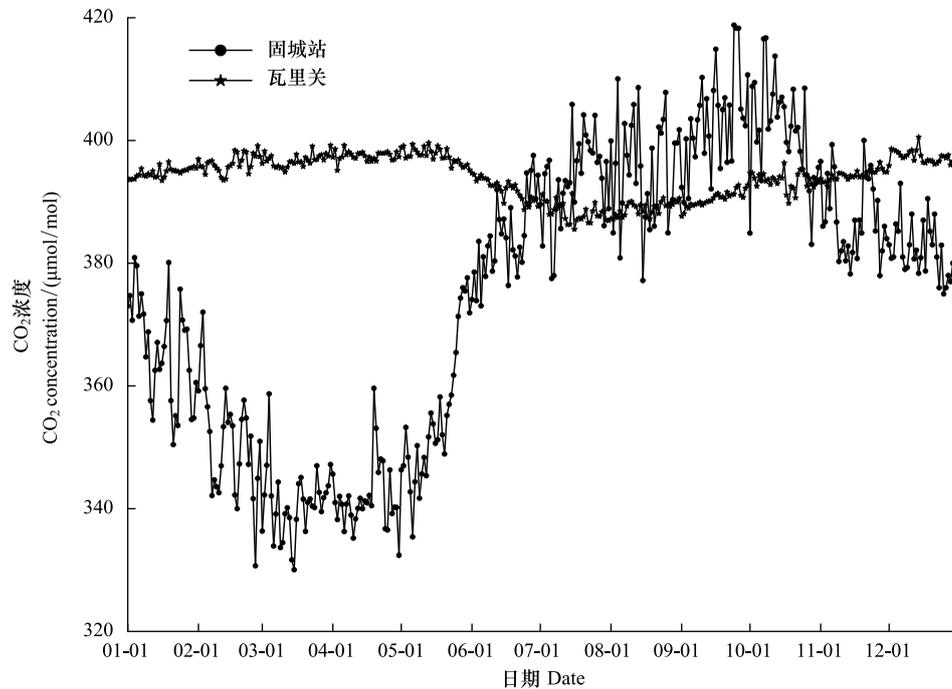


图7 固城站和瓦里关 CO₂ 日平均浓度年内动态比较

Fig.7 The intra-annual variation of daily average CO₂ concentration of Gucheng and Waliguan stations

平原北部冬小麦开花灌浆期和8—9月夏玉米抽雄开花至灌浆期作物生长旺盛期光合作用对农田 CO₂ 浓度的影响过程,7月1日前后昼间 CO₂ 浓度高值也正好对应了冬小麦收割后夏玉米幼苗期的土壤裸露期,表明4—9月昼间 CO₂ 浓度和通量动态变化很好地反映了华北平原冬小麦和夏玉米生长过程、农事活动和农田碳交换的关系。

(3)与大气本底站相比,农田 CO₂ 浓度年内变化具有更大的波动性,标准差达到 23.4 μmol/mol,是大气本底站 CO₂ 浓度标准差的近7倍。农田 CO₂ 浓度与城市和江河口湿地 CO₂ 浓度的“U型”变化特征也不尽相同,表明其各自动态变化的形成机制有差异。

3.2 讨论

(1)农田 CO₂ 浓度变化与农事活动和碳交换之间关系

华北平原主要农业种植模式为冬小麦与夏玉米两熟连作,其中,4月下旬至5月中旬和7月下旬至8月分别是冬小麦和夏玉米生长旺盛期。从图5看出,固城站昼间 CO₂ 浓度年内动态特征与冬小麦返青-拔节-孕穗-抽穗开花-灌浆-成熟收割和夏玉米播种-拔节-孕穗-抽雄吐丝-开花-灌浆-成熟等生长发育进程高度吻合。同时,农田 CO₂ 吸收通量(图6)的两个峰值也与冬小麦和夏玉米生长及干物质积累过程完全一致,表明白天农田 CO₂ 浓度动态变化与作物光合作用、农事活动和碳吸收等密切相关,作物生长发育进程影响农田 CO₂ 浓度变化,反过来,农田 CO₂ 浓度高低也一定程度上影响作物的光合同化速率。夜间 CO₂ 浓度从4月到9月持续升高,是该时期高温高湿和秸秆还田条件下土壤有机碳释放的结果^[36-39]。

(2)利用农田 CO₂ 浓度变化特征提高作物产量的农业生产技术和管理措施

农作物光合同化吸收 CO₂,降低田间 CO₂ 浓度,导致农田 CO₂ 浓度午间比日出前下降约10%—20%。当前大气 CO₂ 浓度大大超过作物补偿点而远离饱和点 CO₂ 浓度,因此,适当增加田间 CO₂ 浓度能够有效提高作物产量,尤其对提高设施农业作物产量有很大作用^[40]。在生产上,一般作物生长旺盛期的昼间通过增施有机肥和人工增施 CO₂ 的方式弥补田间 CO₂ 浓度亏缺,提高作物产量。

在当前全球变暖为主流研究背景下,一方面需要关注提高 CO₂ 浓度与作物产量的关系,提出不同时段采用相应的农业生产技术和措施。另一方面,更需要关注农田 CO₂ 浓度变化的昼夜、生长季与非生长季的增量及其模式,为全球变暖和大气 CO₂ 浓度升高影响农作物生长和产量评估提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 张理, 江永和, 马秀玲, 钟阳, 段若溪. 北京地区高产麦田内 CO₂ 浓度的分析. 北京农业大学学报, 1982, 8(2): 37-43.
- [2] 叶子飘, 于强. 冬小麦旗叶光合速率对光强度和 CO₂ 浓度的响应. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(3): 33-37.
- [3] 寇太记, 苗艳芳, 庞静, 朱建国, 谢祖彬. 农田土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应. 生态环境, 2008, 17(4): 1667-1673.
- [4] 刘建栋, 王吉顺, 于强, 毕建杰. 作物夜间呼吸作用与温度、二氧化碳浓度的关系. 中国农业气象, 2002, 23(1): 1-3, 8-8.
- [5] 谭凯炎, 周广胜, 任三学. 冬小麦叶片暗呼吸对 CO₂ 浓度和温度协同作用的响应. 科学通报, 2013, 58(12): 1158-1163.
- [6] 中国气象局气候变化中心. 中国温室气体公报, 2017 年 11 月, 第 6 期: 1-5. (2017-11). <http://www.doc88.com/p-8909151146178.html>. (2019-6).
- [7] 温玉璞, 汤洁, 邵志清, 张晓春, 赵玉成. 瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究. 应用气象学报, 1997, 8(2): 129-136.
- [8] 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根. 北京上甸子站大气 CO₂ 及 δ¹³C(CO₂) 本底变化. 环境科学, 2016, 37(4): 1248-1255.
- [9] 李岩, 干珠扎布, 胡国铮, 万运帆, 李玉娥, 旦久罗布, 白玛玉珍, 高清竹. 增温对青藏高原高寒草原生态系统碳交换的影响. 生态学报, 2019, 39(6): 2004-2012.
- [10] 王伟, 方青青, 王国强, 李瑞敏, 薛宝林, 王红旗. 呼伦贝尔草原区 CO₂ 源、汇及时空分布模拟研究. 生态学报, 2018, 38(20): 7288-7299.
- [11] 游桂莹, 张志渊, 张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性. 生态学报, 2018, 38(23): 8392-8399.
- [12] Dong W X, Hu C S, Chen S Y, Zhang Y M. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat-corn double-cropping system. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(1): 27-37.
- [13] Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, Ren C Y, Wang J, Liu E M, Zhu Z L, Yu G R. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China plain. Science in China series D: Earth Sciences, 2006, 49(2): 226-240.
- [14] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 赵亮, 于贵瑞, 孙晓敏, 曹广民. 青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量日和月变化特征. 科学通报, 2005, 50(5): 481-485.
- [15] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展. 生态学报, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [16] 何学敏, 吕光辉, 秦璐, 李岩, 杨晓东, 杨建军, 于恩涛. 荒漠杜加依林冠层水热变化及 CO₂ 交换特征. 生态学报, 2019, 39(3): 1052-1062.
- [17] 娄珊宁, 陈先江, 侯扶江. 草地农业生态系统的碳平衡分析方法. 生态学报, 2017, 37(2): 557-565.
- [18] 美尔汗·黑扎特, 郝兴明. 塔里木河下游胡杨群落 CO₂ 通量特征与水分利用效率. 生态学报, 2018, 38(6): 2048-2055.
- [19] 刘树华, 麻益民. 农田近地面层 CO₂ 和湍流通量特征研究. 气象学报, 1997, 55(2): 187-199.
- [20] 胡莹洁, 孔祥斌, 姚静韬. 北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征. 生态学报, 2019, 39(2): 561-570.
- [21] 徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素. 生态学报, 2015, 35(20): 6655-6665.
- [22] 窦军霞, 刘伟东, 苗世光, 李炬. 北京城郊地区二氧化碳通量特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5228-5238.
- [23] 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 汪瑛, 湛志刚. 长江下游农业生态区 CO₂ 通量的观测试验. 应用气象学报, 2005, 16(6): 828-834.
- [24] 李英年, 徐世晓, 赵亮, 张法伟, 赵新全. 青海海北高寒湿地近地层大气 CO₂ 浓度的变化特征. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 108-113.
- [25] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO₂ 浓度及通量特征. 大气科学, 2007, 31(4): 695-707.
- [26] 张林海, 全川, 曾从盛. 河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化. 环境科学, 2014, 35(3): 879-884.
- [27] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, Nösberger J, Ort D R. Food for thought; lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. Science, 2006, 312(5782): 1918-1921.
- [28] Meza F J, Silva D. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. Climatic Change, 2009, 94(1): 143-156.
- [29] Amthor J S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield; review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. Field Crops Research, 2001, 73(1): 1-34.
- [30] Teskey R O. A field study of the effects of elevated CO₂ on carbon assimilation, Stomatal conductance and leaf and branch growth of *Pinus taeda* trees. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(5): 565-573.
- [31] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3): 512-526.
- [32] 王跃思, 王长科, 郭雪清, 刘广仁, 黄耀. 北京大气 CO₂ 浓度日变化、季变化及长期趋势. 科学通报, 2002, 47(14): 1108-1112.
- [33] 刘晓曼, 程雪玲, 胡非. 北京城区二氧化碳浓度和通量的梯度变化特征——I 浓度与虚温. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1502-1512.
- [34] 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可. 移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布. 环境科学, 2014, 35(5): 1671-1679.
- [35] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 王介民, 李小文. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370.
- [36] 张宇, 张海林, 陈继康, 韩宾, 陈阜. 华北平原冬小麦季秸秆还田对农田土壤呼吸的影响//中国农作制度研究进展 2008. 沈阳: 中国农学会耕作制度分会, 2008: 980-988.
- [37] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 王晓凤. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO₂ 排放的影响. 土壤肥料, 2006, (1): 14-16, 65-65.
- [38] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 李贵春, 张庆忠. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO₂、N₂O 排放的影响. 生态学报, 2017, 37(20): 6700-6711.
- [39] 雷莉萍, 钟惠, 贺忠华, 蔡博峰, 杨绍源, 吴长江, 曾招城, 刘良云, 张兵. 人为排放所引起大气 CO₂ 浓度变化的卫星遥感观测评估. 科学通报, 2017, 62(25): 2941-2950.
- [40] 魏珉, 邢禹贤, 王秀峰, 马红. 日光温室 CO₂ 浓度变化规律研究. 应用生态学报, 2003, 14(3): 354-358.