doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.012

新疆绿洲覆膜滴灌棉田碳通量特征研究*

王　进[1,2]　白　洁[3]　陈　曦[3]　罗格平[3]　王绍明[1]

(1.石河子大学新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,石河子 832003;
2.乌兰乌苏农业气象试验站,石河子 832003;
3.中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011)

摘要:基于涡度相关技术,对新疆典型绿洲棉田进行了连续 4 年的碳通量观测,并探讨覆膜滴灌棉田生育期内碳通量的构成和特征。结果表明:生长盛期(6—9 月),棉田的总初级生产力(GPP)和净生态系统碳交换(NEE)日变化明显,峰值约出现在 14:00。生态系统呼吸(R_{es})日变化稳定,与膜下土壤温度日变化稳定有关。日间 GPP 随太阳净辐射(R_{net})增加而增大,可用直角双曲线方程描述;且最大光合速率的峰值出现在 7 月。各碳通量的季节变化不同:GPP 和 NEE 与 LAI 的季节变化一致,峰值出现在 7 月;而 R_{es}的峰值出现在 6 月。月累积 GPP 在 6—9 月间主要分配给 NEE;而其余月份则分配给 R_{es}。整个生育期内(5—10 月),总 GPP 平均为 816.2 gC/m^2,其中 NEE 占 58.6%,这表明生育期内覆膜滴灌棉田表现为碳汇。

关键词:覆膜滴灌　棉田　涡度相关　净生态系统碳交换　总初级生产力

中图分类号:S161　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)02-0070-09

Carbon Fluxes in Cotton Field with Plastic Mulched Drip Irrigation in Xinjiang Oasis

Wang Jin[1,2]　Bai Jie[3]　Chen Xi[3]　Luo Geping[3]　Wang Shaoming[1]

(1. *Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture*, *Xinjiang Production and Construction Groups*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station of Xinjiang*, *Shihezi* 832003, *China*　3. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *China*)

Abstract: Carbon and water fluxes of cotton field with plastic mulched drip irrigation were measured using an eddy covariance (EC) technique in 2009, 2010, 2012 and 2013 at Wulanwusu experimental station, which was a representatively agricultural oasis in northern Xinjiang. The diurnal pattern of mean monthly gross primary production (GPP) and net ecosystem exchange (NEE) showed an obviously sinusoidal dynamic from June to September, whilst that of ecosystem respiration (R_{es}) stayed low and stable between daytime and nighttime. The response of daytime hourly GPP to net solar radiation (R_{net}) could be expressed by a rectangular hyperbolic function. The variations of maximal assimilation rate (A) were followed changes in LAI, and the peak value occurred in July. The seasonal variations of GPP and NEE were close to the cotton phenology, and they almost reached the peak value in July. However, seasonal variations of R_{es} didn't follow that of LAI, and the maximum value occurred nearly one month earlier than that of LAI. Seasonal NEE showed a carbon sink from squaring to harvest period, whilst it indicated a carbon source before the squaring time as well as after the harvest time. The cumulative GPP averaged 816.2 gC/m^2 during the growing season (from April to October), and more than half of GPP was partitioned into NEE (meanly −478.6 gC/m^2).

Key words: Plastic mulching and drip irrigation　Cotton field　Eddy covariance　Net ecosystem exchange　Gross primary production

收稿日期:2014-07-18　修回日期:2014-11-06

*中国科学院"西部之光"人才培养计划资助项目(XBBS201110)和国家自然科学基金青年基金资助项目(41101101)

作者简介:王进,博士生,乌兰乌苏农业气象试验站工程师,主要从事农业生态研究,E-mail:apple6405@sohu.com

通讯作者:白洁,助理研究员,博士,主要从事农业生态研究,E-mail:baijie@ms.xjb.ac.cn

引言

干旱/半干旱区覆盖全球约 30% 的土地面积[1]，是全球陆地生态系统的重要组成部分[2]。位于干旱区的绿洲农田，相比荒漠植被，除受自然因素影响外，还与人类活动密切相关（如：灌溉、施肥、耕作等管理措施），是干旱区碳源/汇转换中较为活跃的部分，因此受到国内外学者的广泛关注[3-5]。

新疆地处中国西北内陆，是我国面积最大的干旱区。其绿洲农田约占不到 5% 的土地面积，却消耗了近 95% 以上的水资源，同时也贡献了 90% 以上的地上生物量[6-7]。近 50 年，新疆大面积的荒漠被开垦为农田，地表植被功能类型的转变必然导致该区域的碳收支发生变化[5]。棉花是新疆三大农作物之一，其种植面积从 1949 年的 3.34×10^4 hm^2 增加到 2011 年的 1.6×10^6 hm^2[8-9]。目前，新疆已成为全国最大的产棉基地，全区 90% 以上的棉田均采用覆膜滴灌技术[10]。研究表明该项技术可以节水 40% ~50%，增产 20% ~30%[11-12]，是一种省水节能、增产高效的绿洲农田管理技术。近年来，有关新疆覆膜滴灌棉田生态效应方面的研究主要集中在作物光合特性和产量形成[13-15]、耗水和水分利用效率[16-17]以及土壤 CO_2 排放[18-19]等方面，对有关碳通量长期变化特征的研究不多。目前，这部分的研究主要集中在华北平原[20-21]、黄土高原[22]和黑河流域[23]等。鉴于气候变化和人类活动影响背景下，这一研究对估算干旱区生态系统碳收支的重要意义，本文选取北疆典型绿洲棉田代表——乌兰乌苏站（Wulanwusu station）棉田为研究对象，利用近 4 年的涡度相关观测数据，分析覆膜滴灌棉田的碳通量昼夜、季节和年际变化特征，探讨其与气象因子的响应关系。

1　试验和方法

1.1　站点概况

试验站点位于中国气象局乌兰乌苏农业气象试验站内（44°17′N，85°49′E，海拔高度 469 m）。该站处于天山北麓中段，准噶尔盆地南缘的玛纳斯河绿洲冲积扇平原石河子绿洲区内。农业气候条件属温带干旱大陆性气候，夏季炎热，冬季寒冷。位于乌兰乌苏站东 5 km 的石河子气象站的多年平均温度约为 7℃，月平均最高温度（26.9℃）和最低温度（-2.4℃）分别出现在 7 月和 1 月。此外，石河子多年平均降水量仅为 210 mm，而蒸发量却高达 1 600 mm。可见仅依靠降水很难满足绿洲农作物的生长需要。乌兰乌苏站的棉花种植经历了 3 个主要阶段：无覆膜 + 沟灌时期（1993 年以前），覆膜 + 沟灌时期（1994—2004 年），覆膜 + 滴灌时期（2005 年至今）。

1.2　试验方法

1.2.1　涡度相关系统观测

在乌兰乌苏站进行 4 年（2009、2010、2012 和 2013 年）涡度相关（Eddy covariance，EC）系统定位观测。涡度相关系统位于本站的综合观测试验场内。试验区与周围棉田相连，构成均一的下垫面，基本可以满足涡度相关系统对盛行风向上风浪区长度的要求。

涡度相关系统安装高度为 4 m，可代表 4 km × 4 km 范围的通量。主要包括三维超声风速仪（CSAT3，Campbell Scientific Inc.，Logan，UT，USA）和开路式红外气体分析仪（Li-COR，Inc.，Lincoln，NE，USA）。采样频率为 10 Hz，数据存贮在 CR3000 型数据采集器中（Campbell Scientific Inc.，Logan，UT，USA）。

HMP45D 温湿度传感器（Vaisala，Helsinki，Finland）安装在距地面 2 m 高度处，用于观测周围环境的温度和湿度。四分量净辐射仪（Kipp & Zonen，Delft，Netherlands）安装在距地面 3 m 高度处，用于观测太阳辐射的各分量（向下和向上的长、短波辐射）。土壤热电偶（Campbell Scientific Inc.，Logan，UT，USA）埋于地下 20 和 60 mm 处，用于观测土壤的温度。土壤热通量板（Hukseflux，Delft，Netherlands）埋于地下80 mm处，用于观测土壤热通量。棉花生育期的土壤湿度为从播种到成熟期的每旬第 8 天利用土钻法取土并用干燥法测定。降水量用直径为 20 cm 的标准人工雨量筒测定。

1.2.2　LAI 和地上生物量的观测

棉田的农气观测主要依据《农业气象观测规范》[24]，选取棉花具有代表性的 6 个时期（五真叶、现蕾、开花、开花盛期、裂铃和吐絮期）进行叶面积指数（LAI）和地上生物量的观测。观测样地距离观测场 3 km，观测面积为 0.3 km × 0.3 km。在样地四角不对称选取 4 个采样点。随机选取 4 个采样点内具有代表性的棉花各 10 株，以子叶节为界，收获地上部分。分别采集每一株棉花的大、中、小叶各 1 片，测量采样叶片的最大长度和高度，并利用叶面积校正系数（0.75）计算单株的叶面积指数（LAI）。随后，将鲜棉株在 100 ~105℃下杀青 30 min，70 ~80℃下干燥 8 ~10 h 至恒质量，称量并求平均值。此外，在棉花开花期和吐絮期，分别在 4 个采样点内沿垂直条田的方向，测量 1m 长度内棉花的株数，重复4 次，取平均值为该采样点的植株密度。最后，依

据棉花田间密度,将单株棉花的叶面积(m^2/株)和地上生物量干质量(g/株)分别换算到单位土地面积上的 LAI(m^2/m^2)和地上生物量干质量(g/m^2)。

1.2.3 田间管理

乌兰乌苏站 4 年试验期间种植的棉花品种均为"陆地棉",栽培方式均为宽膜点播平作。种植密度分别为 26.57、28.94、22.64 和 19.74 株/m^2。整个生育期的灌溉次数为 7 ~ 8 次,总灌溉量分别为 330、410、615 和 525 mm。化肥的施用量也有所不同,2009、2010 和 2012 年随滴灌施用的尿素量分别为 285、375 和 75 kg/hm^2。

1.3 涡度相关数据处理

涡度相关数据处理包括 3 个步骤:异常值剔除、数据插补和净生态系统碳交换(NEE)拆分。本研究以 7 d 为窗口,通过定义连续点与滑动窗口内平均值和标准差的差异来判断异常值[25]。具体方法为

$$|X_i - X_{\text{mean}}| \geqslant aX_{sdi} \tag{1}$$

式中 X_i——第 i 个时间点的碳通量

X_{mean}——窗口内的平均值

X_{sdi}——窗口内的标准差

a——异常值识别的敏感性值,取值一般在 3 ~ 6 之间,本研究取值为 3

将 0.5 h 的通量数据逐点进行检查,如果某点 X_i 与滑动窗口内 X_{mean} 差值的绝对值大于 3 倍的 X_{sdi} 时,判断其为异常值并进行标注,否则判断为正常值。

利用德国马普生物地球化学研究所下属的地球化学模型数据集成部门提供的涡度相关数据在线处理软件进行数据插补和 NEE 拆分处理。首先,对待插补数据进行标准化处理,以便获得完整、连续的数据。缺失和异常值均利用相似气象条件下的平均值替代[26]。由于夜间的生态系统总初级生产力(GPP)可认为等于零,生态系统呼吸(R_{es})与 NEE 等同。该软件的基本算法是利用夜间的 NEE 通量数据(通常定义为向下太阳辐射小于 20 W/m^2),建立 R_{es} 与温度的函数关系,用于外推从夜间到白天的 R_{es}[26]。这种计算 R_{es} 的方法可以避免农作物的物候和土壤湿度对温度响应函数的干扰。

$$R_{es}(T) = R_{es,ref}\exp\left(E_0\left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0}\right)\right) \tag{2}$$

式中 R_{es}——生态系统呼吸

$R_{es,ref}$——参考温度(T_{ref} = 10℃)下的呼吸,即 $R_{es,ref} = R_{es,10}$

E_0——活化能的参数

T_{ref}——参考温度,取值 10℃[25]

T——大气或土壤温度

T_0——常数,取值 -46.02℃[25]

1.4 NEE 拆分

利用观测的 NEE 通量拆分出 R_{es} 并得到 GPP,即 GPP 为实际观测获得的 NEE 与式(2)计算得到的 R_{es} 的差值。NEE 为负值($GPP > R_{es}$)代表该生态系统为碳汇,NEE 为正值($GPP < R_{es}$)则代表该生态系统为碳源。

1.5 光响应曲线计算公式

根据 Michaelis - Menten 动力学,GPP 与太阳净辐射的响应关系可以用直角双曲线方程表示[27]

$$GPP = \frac{AR_{net}}{B + R_{net}} \tag{3}$$

式中 R_{net}——太阳净辐射

A——趋向无穷大时的最大光合速率

B——Michaelis - Menten 常数

A/B 即初始光能利用效率(α)。

1.6 净初级生产力(NPP)计算公式

利用作物收获部分的含水率和收获系数(Harvest index,HI),将乌兰乌苏站农作物生育状况观测记录年报表中观测场地的棉花籽粒产量转换为植被 NPP(gC/m^2)。其计算式为[28-29]

$$NPP = \frac{(1 - M_C)YC}{HIf_{AC}} \tag{4}$$

式中 M_C——作物籽粒收获后存储期的含水率(0.11)[28]

Y——单位面积的棉花实际产量

C——作物碳的转化系数,取值 0.45[28]

f_{AC}——根冠比,取值 0.06[29]

HI——棉花收获系数(无覆膜 + 沟灌、覆膜 + 沟灌和覆膜 + 滴灌 3 个种植时期的多年平均值为 0.41、0.46 和 0.51)

2 结果分析

2.1 气象要素分析

图 1 为 2009、2010、2012 和 2013 年温度(T_a)、水汽压差(VPD)、太阳净辐射(R_{net})、降水量(P)、灌溉量(I)、土壤体积含水率(SWC,0 ~ 50 cm)的季节变化特征。4 年棉田生育期内(4—10 月)的平均温度分别为 18.7、18.5、19.9 和 18.7℃。其中,2009、2010 和 2013 年的平均温度接近多年平均值(18.5℃,1950—2008 年);而 2012 年的平均温度较多年平均值高 1.4℃。最高温度出现在 7 月,最低温度出现在 1 月。2012 年 4—10 月的平均 VPD 值(1.4 kPa)高于其余 3 个年份(1.1 ~ 1.2 kPa)。月平均 VPD 在 6 月份达到最大,2012 和 2010 年 6 月

的 VPD 最高，分别为 1.9 和 1.8 kPa。2012 和 2013 年的 R_{net}（168 和 167 W/m^2）低于 2009 和 2010 年（178 和 181 W/m^2）。最大 R_{net} 出现在 6—7 月。2012 年 4—10 月的降水量仅为 62.5 mm，比多年平均降水量少 58.3%（150 mm，1958—2008 年）。其余 3 年的降水量分别为 163.2、190.5 和 157.5 mm，比多年平均降水量高 8.8%、27% 和 5%。降水主要分布在 4—7 月，8—9 月的降水量较少。SWC 保持在稳定水平，分别为（0.21 ± 0.01）、（0.20 ± 0.04）、（0.25 ± 0.03）和（0.23 ± 0.04）m^3/m^3。绿洲农田的灌溉可以有效弥补棉花生育期内降水分布的不均衡，减少棉花受到干旱胁迫的限制，保持田间土壤湿度。特别是在极端干旱的年份，例如，2012 年 6—8 月的月平均降水量仅为 7、14 和 8 mm，SWC（0.24、0.26 和 0.29 m^3/m^3）却均高于平均值（0.22 m^3/m^3）。

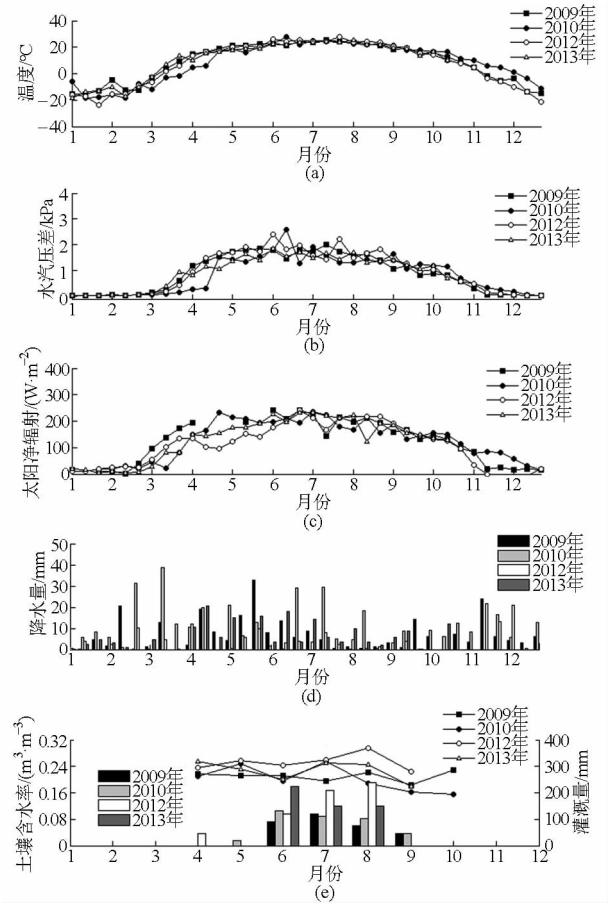

图 1　乌兰乌苏站 10 d 平均气象数据以及月平均土壤体积含水率（0 ~ 50 cm）和月累计灌溉量

Fig. 1　Ten-day average climate data, monthly average soil water content (0 ~ 50 cm) and monthly total irrigation depth at Wulanwusu station

2.2　棉花生长和田间管理概况

乌兰乌苏站的棉花集中于 4 月中下旬播种，之后大概 10 ~ 15 d 出苗，45 ~ 50 d 后进入蕾期，并于 9 月底—10 月初停止生长，整个生育期长度为149 ~ 188 d（表 1）。2010 年由于春季（3—5 月）平均温度异常低（7.6℃），比其余 3 年降低 64.4%，该年度的棉花播种推迟了近 10 ~ 20 d。2013 年春季的高温（12.9℃）和多降水（71.7 mm），导致棉花播种提前至 4 月初；但是棉花受到霜冻影响，未达到吐絮期就提前停止生长，造成严重减产（表 1）。除受气象因素影响外，管理措施（如：机械采棉、脱叶剂和催熟剂的使用）也是导致棉花生育期长度变化的重要因素。例如：2009 年乌兰乌苏站的棉花为人工采摘，没有喷洒脱叶剂和催熟剂，因此生育周期较长（188 d）。而 2012 年 8 月下旬就开始进行棉田大面积的脱叶剂和催熟剂的喷施，致使棉花裂铃和吐絮期提前，棉花生育期缩短到 149 d（表 1）。

表 1　乌兰乌苏站覆膜棉花的生育期和产量

Tab. 1　Cotton development and yield details at Wulanwusu station

参数	2009 年	2010 年	2012 年	2013 年
播种日期	04 - 12	04 - 28	04 - 17	04 - 08
出苗日期	04 - 26	05 - 08	04 - 28	04 - 26
五真叶日期	05 - 30	06 - 04	05 - 26	05 - 22
现蕾日期	06 - 02	06 - 12	06 - 02	05 - 26
开花日期	07 - 08	07 - 12	06 - 28	06 - 30
裂铃日期	09 - 12	09 - 22	08 - 26	09 - 22
吐絮日期	09 - 16	09 - 24	08 - 30	—
停止生长日期	10 - 16	10 - 04	09 - 23	09 - 23
生育期/d	188	160	149	169
皮棉产量/(t·hm^{-2})	2.30	2.10	1.64	1.55

图 2 为棉花叶面积指数（LAI）的变化过程：蕾期（5 月底—6 月初），LAI 较低（小于 1 m^2/m^2）；随后 LAI 快速增加至开花期（6 月底—7 月中）并达到最大值 5 ~ 8 m^2/m^2；之后 LAI 减少直至停止生长（9 月底—10 月初）。棉花地上生物量从蕾期开始（0.04 ~ 0.09 kg/m^2）随 LAI 的增大而迅速增加，至吐絮期（8 月底—9 月中）达到最大值（1.8 ~ 2.9 kg/m^2）（图 2b）。该站棉花地上生物量 4 年平均值为（1.24 ± 0.23）kg/m^2。其中，2013 年平均地上生物量最小，为（0.91 ± 0.73）kg/m^2，而 2009 年平均地上生物量最大，为（1.49 ± 1.08）kg/m^2，这与皮棉产量的年际变化一致。

2.3　覆膜滴灌棉田碳通量日变化特征及与太阳辐射的响应关系

2.3.1　覆膜滴灌棉田碳通量日变化特征

将 2009、2010、2012 和 2013 年棉花生育期（5—10 月）每天各时段的碳通量进行平均，得到 GPP，NEE 和 R_{es} 的日变化过程（图 3）。整个生育期内，GPP 和 NEE 均具有明显的规律性日变化特征，在 1 d内表现为单峰型曲线。日出后（8:00 ~ 10:00），

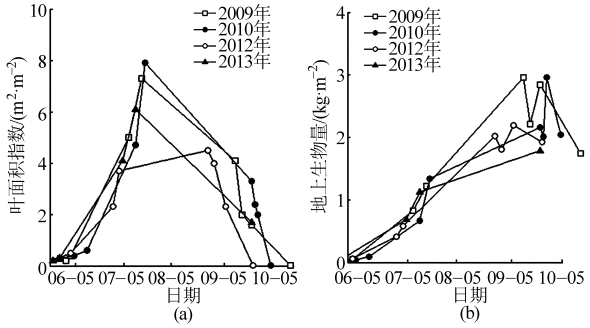

图 2 乌兰乌苏站叶面积指数和地上生物量变化

Fig. 2 Evolution of LAI and above-ground biomass at Wulanwusu station

GPP 和 NEE 的绝对值随着太阳辐射的增加而逐渐增加,且 GPP 为正值,NEE 为负值,这标志着生态系统为碳汇。这两个变量的绝对值在中午 14:00 左右达到 1 d 内的最大值,即此时生态系统从大气吸收的 CO_2 最多。此后,随太阳辐射的逐渐降低,光合作用减弱,GPP 和 NEE 的绝对值不断减小。在日落(20:00 ~ 22:00)以后,GPP 接近于零,而 NEE 值也由负值转为正值,这表明该生态系统转为以呼吸为主的碳源。生长季棉田 GPP 和 NEE 的日峰值从 5 月开始逐渐增加至 7 月达到最大值,其值分别为 21.6 μmol/(m²·s)和 -18.6 μmol/(m²·s);之后减小直至停止生长。日峰值的季节变化与 LAI 的变化较为一致。R_{es} 日变化过程相对较稳定,变化范围在 0.6 ~ 3.5 μmol/(m²·s)之间。白天和夜间的 R_{es} 相差不大,变化范围在 1 μmol/(m²·s)左右。白天和夜间 R_{es} 变化与土壤温度变化过程较一致(图 4)。可见,在棉花生育期内,地膜覆盖保持了膜下土壤温度,使得 R_{es} 保持相对稳定的变化过程。

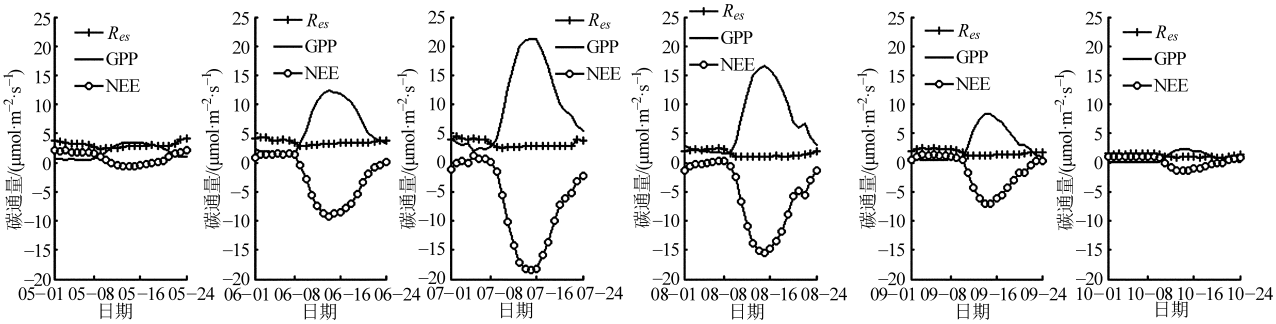

图 3 乌兰乌苏站 5—10 月平均总初级生产力(GPP)、净生态系统碳交换(NEE)和生态系统呼吸(R_{es})日变化

Fig. 3 Mean diurnal variations of gross primary production (GPP), net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (R_{es}) from May to October at Wulanwusu station

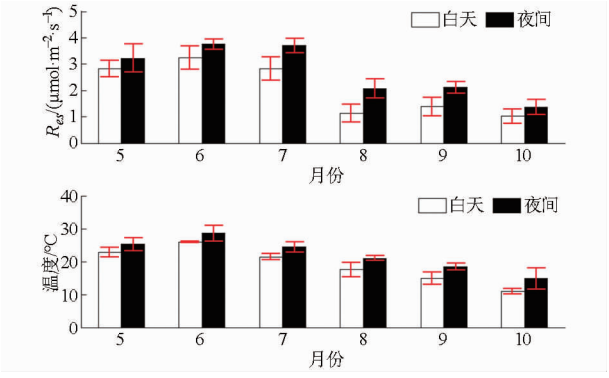

图 4 乌兰乌苏站 5—10 月生态系统呼吸(R_{es})和土壤温度的昼夜平均值

Fig. 4 Average daytime and nighttime value of ecosystem respiration (R_{es}) and soil temperature from May to October at Wulanwusu station

2.3.2 GPP 与 R_{net} 的响应关系

图 5 为 GPP 与 R_{net} 变化的季节性响应关系(5—10 月)。由图可见,随 R_{net} 的增加,GPP 呈增加的趋势。由于 GPP 还受其他环境要素的影响(如温度、水汽压差、土壤湿度等),GPP 对 R_{net} 的响应较散。生长季每月的拟合参数和决定系数(R^2)见表 2。其中,直角双曲线模拟结果较好的月份是 7 月,即最大光合速率(A)最大的月份(A = 30.58 μmol/(m²·s),R^2 = 0.60)(表 2 和图 5)。A 表示作物光合作用能力的大小。其月平均值增加和减少的过程也反映了作物生长和衰老的过程,这与 LAI 的变化过程一致。播种-蕾期,由于 LAI 较小(小于 1 m²/m²),导致作物仅能吸收较少的太阳散射光,光合作用的强度不大(图 5a),初始光能利用效率(α)仅为 0.05。蕾期-开花期(即 6—7 月份,图 5b、5c),作物的冠层高度和 LAI 均快速增加至峰值,适宜的冠层结构可以吸收来自各个方向的太阳散射光。此时,棉花的光合作用最大,α 达到峰值为 0.1。随着棉花逐渐成熟(8—10 月,图 5d ~ 5f),LAI 逐渐减小,棉花吸收太阳散射光的能力降低,α 也随之降低为 0.01。

2.4 覆膜滴灌棉田碳通量季节变化特征

图 6 显示乌兰乌苏站棉田 GPP、R_{es}、NEE 以及 NEE 累积值的季节变化过程。逐日的 NEE 表示 GPP 和 R_{es} 在生态系统碳动态变化过程中各自的重要性(图 6a);而 NEE 累积用来判断生态系统的碳汇或者碳源(图 6b)[30]。NEE 累积曲线的负斜率表

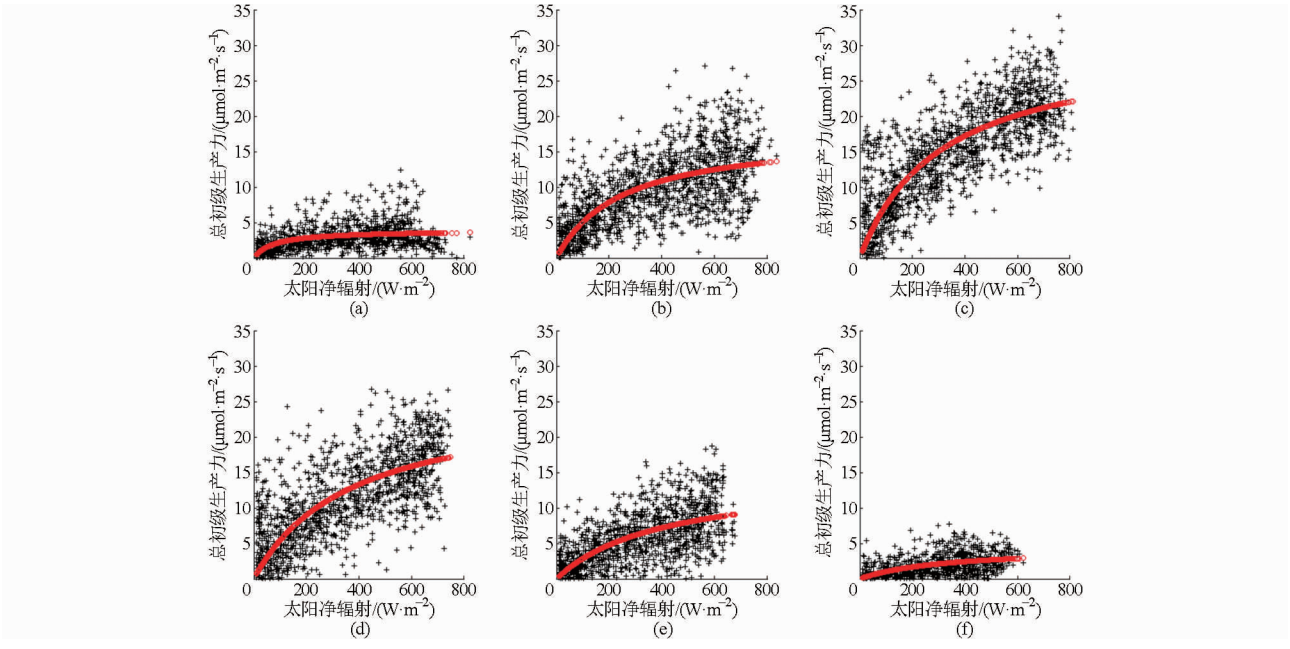

图 5　乌兰乌苏站生育期内总初级生产力(GPP)与太阳净辐射(R_{net})的响应关系(5—10 月)

Fig. 5　Responses of hourly values of GPP to net solar radiation from May to October at Wulanwusu station

(a) 5 月　(b) 6 月　(c) 7 月　(d) 8 月　(e) 9 月　(f) 10 月

表 2　乌兰乌苏站总初级生产力(GPP)与太阳净辐射(R_{net})响应曲线的季节参数

Tab. 2　Estimated parameters in functional responses of gross primary production (GPP) to net solar radiation (R_{net}) at Wulanwusu station

参数	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
A/(μmol·m²·s⁻¹)	3.91	7.65	30.58	25.76	14.58	4.46
B/(μmol·m²·s⁻¹)	77.15	249.92	311.39	375.13	409.73	333.17
A/B	0.05	0.03	0.10	0.07	0.04	0.01
R^2	0.14	0.44	0.60	0.45	0.40	0.12

示生态系统为碳汇(GPP > R_{es});相反正斜率则表示生态系统为碳源(GPP < R_{es})。整个生育期内,GPP 和 NEE 均呈现显著的季节变化,并与 LAI 的变化过程一致(图 6)。播种-蕾期,GPP 缓慢增加(1.1 ~ 2.3 gC/(m²·d));而 R_{es}(2.2 ~ 2.9 gC/(m²·d))相对较高。因此,NEE 为正值(0.1 ~ 0.5 gC/(m²·d)),且 NEE 累积的斜率为正值,覆膜棉田在这个生长阶段表现为碳源。蕾期之后,GPP 快速增加至开花期(7 月左右)达到最大值(11 ~ 15.7 gC/(m²·d)),这与 LAI 增加并达到峰值的过程一致。开花期后,GPP 随 LAI 的减小而减小直至停止生长。日 R_{es}的峰值范围为 4.3 ~ 5.0 gC/(m²·d),比 GPP 的峰值到达时间提前了近 1 个月。蕾期之后,日 R_{es}均值较 GPP 均值低,且 NEE 累积的斜率为负值,覆膜棉田表现为碳汇。日 NEE 的峰值为 -9 ~ -11.7 gC/(m²·d),出现的时间与 GPP 的峰值一致。停止生长之后,GPP 接近零,而 R_{es}大于零,且 NEE 累积的斜率为正,表明此时覆膜棉田又转化为碳源。从全年来看,覆膜棉田生态系统呈现出 2 个碳源期:第一个是从播种到蕾期,为(45.7 ± 15.6) gC/m²,另一个是从停止生长到年末,为(43.8 ± 8.6) gC/m²。

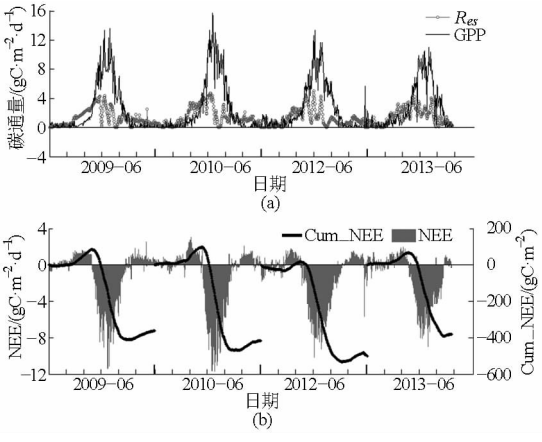

图 6　乌兰乌苏站逐日总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R_{es})、净生态系统碳交换(NEE)以及净生态系统碳交换累积(Cum_NEE)

Fig. 6　Daily totals of gross primary production (GPP), ecosystem respiration (R_{es}), net ecosystem exchange (NEE) and cumulative NEE (Cum_NEE) at Wulanwusu station

图 7 显示乌兰乌苏站棉田 GPP 和 R_{es}月累积量,以及比值(R_{es}/GPP)。月累积 GPP 和 R_{es}最大值分别在 7 月(252.84 ~ 346.69 gC/(m²·month))和 6 月(79.08 ~ 104.89 gC/(m²·month))。可见,月累积 GPP 的峰值与 LAI 峰值出现的时间一致,但月累积 R_{es}峰值比 LAI 峰值提前 1 个月。在生育盛期(6—9 月),R_{es}/GPP 均小于 1,最小值基本出现在 8 月

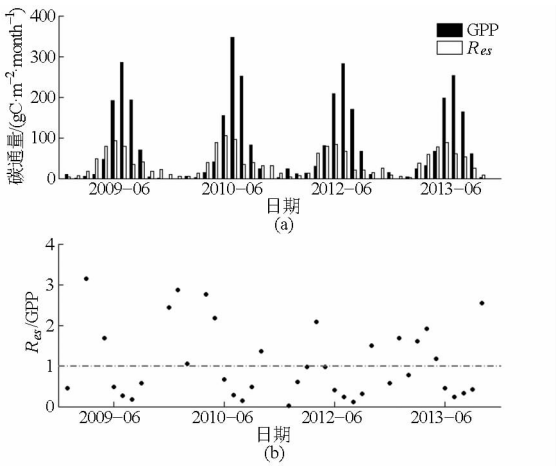

图 7 乌兰乌苏站总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(R_{es})及碳分配(R_{es}/GPP)的月平均变化

Fig. 7 Monthly totals of gross primary production (GPP), ecosystem respiration (R_{es}) and ratios of R_{es} to GPP at Wulanwusu station

(0.12 ~ 0.33)。仅 2013 年 1 年出现在 7 月(0.24),这是由于该年的棉花受到霜冻的影响,导致提前停止生长,因此 R_{es}/GPP 值也较低。在生育盛期,GPP 主要分配给 NEE。由图 7a 可见,5 月份为棉花的普遍出苗期,LAI 均小于 0.5 m^2/m^2,R_{es}/GPP 接近于 1,R_{es}在 GPP 中所占比例较大。从 10 月到次年 3 月,即从棉花停止生长至来年播种前,月累计 GPP 和 R_{es}均较低,此时的生态系统仍以 R_{es}为主。但受人类活动干扰较大(如秸秆还田、焚烧秸秆、冬灌、播种前耕地、平地、施肥等),R_{es}/GPP 的波动较大。

4 年棉花的总 GPP 为 747.9 ~ 900.1 gC/m^2,总 R_{es}为 288.1 ~ 395.8 gC/m^2,总 NEE 为 -428.2 ~ -504.3 gC/m^2,呈现碳汇趋势,且年际变化较大。2010 年的总 GPP 最大(900.1 gC/m^2),而 2013 年的总 GPP 最小(747.9 gC/m^2)(表 3)。2010 和 2009 年的 R_{net}普遍较 2012 和 2013 年高(图 1c),导致这 2 年的 LAI 和总 GPP 较高。受到恶劣天气的影响(开春低温和霜冻灾害),2013 年的棉花提前停止生长,产量减少,总 GPP 最小,吸收的 CO_2也最低。此外,农田管理措施也是导致棉田年际碳通量变化的主要原因。2012 年 8 月下旬开始喷洒脱叶剂和催熟剂,导致该年棉田总 R_{es}最低(288.12 gC/m^2)。2010 年较高的化肥施用量是导致总 GPP 较大的原因之一。此外,滴灌覆膜保持了田间水分,棉田的 GPP 或者 NEE 不受土壤水分胁迫的限制作用,与降水量变化的关系不显著。

表 3 乌兰乌苏 4 个生长季内 GPP、R_{es}、NEE 以及气候要素

Tab. 3 Sums of gross primary production (GPP), net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (R_{es}) and meteorological elements during growing seasons

参数	2009 年	2010 年	2012 年	2013 年
总初级生产力/($gC\cdot m^{-2}$)	796.7	900.1	820.0	747.9
生态系统呼吸/($gC\cdot m^{-2}$)	346.7	395.8	288.1	319.7
净生态系统碳交换/($gC\cdot m^{-2}$)	-450.0	-504.3	-531.9	-428.2
太阳净辐射/($W\cdot m^{-2}$)	178.5	181.0	168.3	167.8
平均温度/℃	18.7	18.5	19.9	18.7
降水量/mm	163.2	190.8	62.5	157.5
水汽压差/kPa	1.2	1.5	1.6	1.2

3 讨论

大量站点试验研究发现:覆膜可以改变土壤微生物环境(土壤温度、湿度、地表反照率、能量分配等)[31-32],促进植物根系的生长[33],有效地促进干旱/半干旱地区农作物的光合作用和产量[34-35]。Bennett 等证实了地膜可以减少土壤蒸发和增加土壤温度,有助于提高棉花的产量[36]。在黄河流域,有研究表明覆膜可以增加棉花 6.8% 的光合速率,以及 9.9% 的生物量[37]。在本研究中,乌兰乌苏站 1980—2013 年长期的农业气象观测资料也显示,覆膜滴灌时期棉田的趋势 NPP(即从实际 NPP 中分离气候要素对 NPP 的影响作用)有显著的提高,该时期的棉花 NPP 分别较无覆膜 + 沟灌和覆膜 + 沟灌时期提高了近 35.6% 和 16.6%(图 8)。此外,这 3 个时期的趋势 NPP 的提高也与品种改良、施肥、药控以及农业政策等因素有一定的关系。

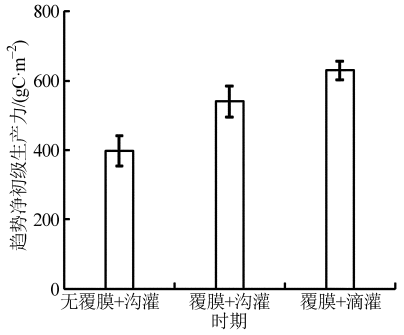

图 8 乌兰乌苏站 3 个时期的棉花生育期内趋势净初级生产力

Fig. 8 Total NPP during three periods at Wulanwusu station

由于地膜改变了土壤环境,对生态系统的土壤呼吸和碳通量也有不同程度的影响。在中国科学院新疆阜康荒漠生态站,李志国等利用静态箱方法测量覆膜和不覆膜处理下的棉田土壤异氧呼吸分别为 214 和 317 gC/m^2,其结果表明覆膜可减少 89 gC/m^2 土壤异氧呼吸[19]。由于本研究中的 R_{es}包含植物呼吸和土壤呼吸,因此结果(337.6 gC/m^2)比李志国

等测量的土壤呼吸略高。本研究中，平均年累积 GPP 为 816.2 gC/m^2。其中，大约有 41.4% 的 GPP 分配给了 R_{es}，约为 337.6 gC/m^2，而 58.6% 的 GPP 分配给了 NEE，约为 −478.6 gC/m^2。相比没有覆膜的玉米和冬小麦，覆膜棉田生育期内 R_{es} 占 GPP 的比例不到一半（表 4）。而作为和棉花同属 C3 作物类型的冬小麦，在中国华北平原的位山站和黄土高原的长武站，R_{es} 占 GPP 的比例分别为 63.0% 和 55.8%（表 4）。而属于 C4 作物的玉米，无覆膜管理下，R_{es} 占 GPP 的比例范围为 60.0% ~80.0%。

表 4　“覆膜”和“不覆膜”管理方式下，不同农作物 GPP、R_{es}、NEE 及 NEE/GPP 和 R_{es}/GPP 的比较

Tab.4　Comparisons of sum gross primary production (GPP), net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (R_{es}), ratios of NEE to GPP and R_{es} to GPP between mulched and non-mulched crops during growing season

作物类型	站点	GPP /(gC·m^{-2})	NEE /(gC·m^{-2})	R_{es} /(gC·m^{-2})	NEE/GPP /%	R_{es}/GPP /%	是否覆膜	研究时期	数据来源
棉花	乌兰乌苏，中国	816.2	−478.6	337.6	58.6	41.4	是	4—10，2009—2010	本研究
冬小麦	位山，中国	956.0	−354.0	602.0	37.0	63.0	否	11—7，2005—2009	文献[20]
冬小麦	长武，中国	544.8	−241.1	303.8	44.2	55.8	否	11—7，2008—2010	文献[22]
冬小麦	Lonzée，比利时	1 630.0	−680.0	950.0	41.7	58.3	否	11—8，2004—2007	文献[38]
冬小麦	Ponca，美国	2 853.0	−1 001.0	1 852.0	35.1	64.9	否	2006	文献[39]
玉米	位山，中国	876.0	−222.0	654.0	25.3	74.7	否	7—10，2007—2008	文献[20]
玉米	盈科，中国	1567.0	−626.0	941.0	40.0	60.0	否	2008—2009	文献[23]
玉米	Nebraska，美国	1744.0	−590.0	1 154.0	33.8	66.2	否	5—10，2002	文献[38]
玉米	Klingenberg，德国	1000.0	−200.0	800.0	20.0	80.0	否	2007	文献[40]
玉米	Langerak，荷兰	1400.0	−350.0	1 050.0	25.0	75.0	否	2005	文献[40]

4　结束语

覆膜滴灌棉田生育期内（5—10 月）GPP 和 NEE 的昼夜变化都呈现显著的正弦曲线变化特征，这与 R_{net} 的昼夜变化有关。而 R_{es} 的昼夜变化不显著，这与膜下土壤温度昼夜变化不显著有关。在生育期内，覆膜滴灌棉田每月白天 GPP 和 NEE 的峰值均出现在 14:00 左右，且最大峰值出现在 7 月，分别为 21.6 和 −18.6 μmol/(m^2·s)。生育期内白天 GPP 与 R_{net} 的直角双曲线拟合显示，拟合较好的月份是 7 月，最大光合速率为 30.58 μmol/(m^2·s)，最大的光利用效率为 0.1。在 4 个生长季内，GPP 和 NEE 的季节变化与 LAI 变化较为一致，最大值都出现在 6 月底—7 月初；而 R_{es} 的季节变化与 LAI 不一致，最大值的出现提前 1 个月（5 月底—6 月初）。最大的日 GPP 为 11.0 ~15.7 gC/(m^2·d)，而最大的日 R_{es} 仅为 4.3 ~5.0 gC/(m^2·d)。在全年内，覆膜滴灌棉田有 2 个时期表现为碳源，分别为播种−蕾期和停止生长期−年末，1 个时期呈现为碳汇，即蕾期−停止生长期。整个生育期内，总 GPP 为 816.2 gC/m^2，其中约 58.6% 分配给了 NEE（总 NEE 为 −478.6 gC/m^2），表现为强碳汇。

参　考　文　献

1　Asner G P, Archer S, Hughes R F, et al. Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas drylands [J]. Global Change Biology, 2003, 9(3): 316 −335.

2　Li L H, Chen X, Tol C V C, et al. Growing season net ecosystem CO_2 exchange of two desert ecosystems with alkaline soils in Kazakhstan[J]. Ecology and Evolution, 2013, 4(1): 14 −26.

3　许文强，陈曦，罗格平，等. 干旱区三工河流域土壤有机碳储量及空间分布特征[J]. 自然资源学报，2009，24(10)：1740 −1747.
Xu Wenqiang, Chen Xi, Luo Geping, et al. Soil organic carbon storage and its spatial distribution characteristic in the Sangong river watershed of arid region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(10): 1740 −1747. (in Chinese)

4　Bai J, Chen X, Li L, et al. Quantifying the contributions of agricultural oasis expansion, management practices and climate change to net primary production and evapotranspiration in croplands in arid northwest China[J]. Journal of Arid Environments, 2014, 100 −101: 31 −41.

5　王渊刚，罗格平，赵树斌，等. 新疆耕地变化对区域碳平衡的影响[J]. 地理学报，2014，69(1)：110 −120.
Wang Yuangang, Luo Geping, Zhao Shubin, et al. Effects of arable land change on regional carbon balance in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 110 −120. (in Chinese)

6　Jia B Q, Zhang Z Q, Ci L J. Oasis land-use dynamics and its influence on the oasis environment in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 56(1): 11 −26.

7 邓铭江. 新疆水资源战略问题探析[J]. 中国水利,2009(17):23 - 27.
Deng Mingjiang. Studies on water resources strategy in Xinjiang[J]. China Water Resources, 2009(17): 23 - 27. (in Chinese)
8 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆五十年[M]. 北京:中国统计出版社,2005.
9 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2011.
10 李雪源,郑巨云,王俊铎,等. 中国棉业科技进步 30 年—新疆篇[J]. 中国棉花,2009,36(增刊):24 - 29.
Li Xueyuan, Zheng Juyun, Wang Junze, et al. The progress of cotton science and technology in China in 30 years-Xinjiang[J]. China Cotton, 2009, 36(Supp.): 24 - 29. (in Chinese)
11 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2008,24(8):15 - 19.
Zhang Wei, Lü Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15 - 19. (in Chinese)
12 李毅,王文焰,王全九. 论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用[J]. 灌溉排水,2001,20(2):42 - 46.
Li Yi, Wang Wenyan, Wang Quanjiu. A breakthrough thought for water saving and salinity control in arid and semi-arid area under-film trickle irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 42 - 46. (in Chinese)
13 张旺锋,王振林,余松烈,等. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响[J]. 中国农业科学,2002,35(6):632 - 637.
Zhang Wangfeng, Wang Zhenlin, Yu Songlie, et al. Effect of under-mulch-drip irrigation on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 632 - 637. (in Chinese)
14 郭仁松,刘盼,张巨松,等. 南疆超高产棉花光合物质生产与分配关系的研究[J]. 棉花学报,2010,22(5):471 - 478.
Guo Rensong, Liu Pan, Zhang Jusong, et al. Study on relations on photosynthetic production and its distribution of super high-yield cotton in south Xinjiang[J]. Cotton Science, 2010, 22(5): 471 - 478. (in Chinese)
15 韩秀锋,王冀川,高山,等. 膜下滴灌对新疆杂交棉群体光合性能、冠层结构和产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2011,16(3):28 - 35.
Han Xiufeng, Wang Jichuan, Gao Shan, et al. Effect of under-mulch-drip irrigation on canopy photosynthesis, canopy structure and yield of hybrid cotton in Xinjiang[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(3): 28 - 35. (in Chinese)
16 Zhou S Q, Wang J, Liu J X, et al. Evapotranspiration of a drip-irrigated, film-mulched cotton field in northern Xinjiang, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1169 - 1178.
17 王兴繁,胡顺军,田长彦,等. 塔里木灌区棉田蒸散与棵间蒸发变化规律[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):74 - 78.
Wang Xingfan, Hu Shunjun, Tian Changyan, et al. The changing law of the diurnal evapotranspiration and soil evaporation in cotton field of Tarim irrigation area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(6): 74 - 78. (in Chinese)
18 曹兴,陈荣毅,季枫,等. 干旱区绿洲棉田土壤 CO_2 通量变化特征及温湿度影响分析[J]. 中国农学通报,2012,28(8):199 - 207.
Cao Xing, Chen Rongyi, Ji Feng, et al. Studies of soil CO_2 flux and influencing factors in oasis cotton field of the arid area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(8): 199 - 207. (in Chinese)
19 李志国,张润花,赖冬梅,等. 膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和 CO_2 净交换通量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(4):1018 - 1024.
Li Zhiguo, Zhang Runhua, Lai Dongmei, et al. Effects of drip irrigation with plastic mulching on the net primary productivity, soil heterotrophic respiration, and net CO_2 exchange flux of cotton field ecosystem in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1018 - 1024. (in Chinese)
20 Lei H M, Yang D W. Seasonal and inter-annual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China plain[J]. Global Change Biology, 2010, 16(11): 2944 - 2957.
21 张永强,沈彦俊,刘昌明,等. 华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定[J]. 地理学报,2002,57(3):333 - 342.
Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, et al. Measurement and analysis of water, heat and CO_2 flux from a farmland in the North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 333 - 342. (in Chinese)
22 Wang W, Liao Y C, Guo Q. Seasonal and annual variations of CO_2 fluxes in rain-fed winter wheat agro-ecosystem of Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(1): 147 - 158.
23 Wang X F, Ma M G, Huang G H, et al. Vegetation primary production estimation at maize and alpine meadow over the Heihe River Basin, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 94 - 101.
24 中国气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1993.
25 Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3): 512 - 526.
26 Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm[J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1424 - 1439.
27 Li Jun, Yu Qiang, Sun Xiaomin, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(Supp.2): 226 - 240.

(下转第 136 页)

Geochimica, 2004, 33(6): 619 – 626. (in Chinese)

7 Gu B, Chapman A D, Schelske C L. Factors controlling seasonal variations in stable isotope composition of particulate organic matter in a soft water eutrophic lake[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(6): 2837 – 2848.

8 Gu Binhe, Schelske C L, Waters M N. Patterns and controls of seasonal variability of carbon stable isotopes of particulate organic matter in lakes[J]. Oecologia, 2011, 165(4):1083 – 1094.

9 Del Giorgio P A, France R L. Ecosystem-specific patterns in the relationship between zooplankton and POM or microplankotn $\delta^{13}C$[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(2): 359 – 365.

10 于宇,宋金明,李学刚,等. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J]. 生态学报,2012,32(5):1623 – 1632.
Yu Yu, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1623 – 1632. (in Chinese)

11 曾庆飞,孔繁翔,毛志刚,等. 稳定性氮同位素技术研究太湖梅梁湾区域营养盐差异[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):813 – 818.
Zeng Qingfei, Kong Fanxiang, Mao Zhigang, et al. Evaluation of nitrogen isotopes as indicators of spatial nutrient difference in Meiliangwan bay, Tai Lake, China [J]. Agricultural Environmental Science, 2012, 31(4): 813 – 818. (in Chinese)

12 刘辉. 溪流河水库颗粒有机物碳氮稳定同位素时空变化[D]. 广州:暨南大学,2006.
Liu Hui. Temporal and spatial variation in carbon and nitrogen stable isotope of particulate organic matter in Liuxihe reservoir [D]. Guangzhou: Jinan University, 2006. (in Chinese)

13 Gondwe M J, Guildford S J, Hecky R E. Planktonic nitrogen fixation in Lake Malawi/Nyasa[J]. Hydrobiologia, 2008, 596(1): 251 – 267.

14 Carpenter S R, Cole J J, Pace M L, et al. Ecosystem subsidies: terrestrial support of aquatic food webs from ^{13}C addition to contrasting lakes[J]. Ecology, 2005, 86(10): 2737 – 2750.

15 Grey J, Jones R L, Sleep D. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness as indicated by stable isotope analysis[J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(3): 505 – 513.

16 袁瑞强,宋献方,王鹏,等. 白洋淀渗漏对周边地下水的影响[J]. 水科学进展,2012,23(6): 751 – 756.
Yuan Ruiqiang, Song Xianfang, Wang Peng, et al. Impacts of percolation in Baiyangdian Lake on groundwater[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 751 – 756. (in Chinese)

(上接第 78 页)

28 Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982—1998[J]. Global Change Biology, 2002, 8(1): 1 – 15.

29 Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999 [J]. Ecological Applications, 2007, 17(3): 692 – 701.

30 Béziat P, Ceschia E, Dedieu G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(10): 1628 – 1645.

31 Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2 – 3): 115 – 125.

32 Ham J M, Kluitenberg G J. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 71(3 – 4): 403 – 424.

33 Niu J Y, Gan Y T, Huang G B. Dynamics of root growth in spring wheat mulched with plastic film[J]. Crop Science, 2004, 44(5): 1682 – 1688.

34 Mu L, Liang Y L, Zhang C W, et al. Soil respiration of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) under different mulching practices in a greenhouse, including controlling factors in China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil & Plant Science, 2014, 64(1): 85 – 95.

35 Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79 – 86.

36 Bennett O L, Ashley D A, Doss B D. Cotton response to black plastic mulch and irrigation[J]. Agronomy Journal, 1966, 58(1): 57 – 60.

37 Dong H Z, Li W J, Tang W, et al. Early plastic mulching increases stand establishment and lint yield of cotton in saline fields [J]. Field Crops Research, 2009, 111(3): 269 – 275.

38 Aubinet M, Moureaux C, Bodson B, et al. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3 – 4): 407 – 418.

39 Gilmanov T G, Verma S B, Sims P L, et al. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO_2-flux tower measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1 – 16.

40 Li L, Vuichard N, Viovy N, et al. Importance of crop varieties and management practices: evaluation of a process-based model for simulating CO_2 and H_2O fluxes at five European maize (*Zea mays* L.) sites[J]. Biogeosciences, 2011, 8(6): 1721 – 1736.