

DOI: 10.5846/stxb201507131484

杨帆, 邵全琴, 李愈哲, 樊江文, 包玉海. 北方典型农牧交错带草地开垦对地表辐射收支与水热平衡的影响. 生态学报, 2016, 36(17): - .
Yang F, Shao Q Q, Li Y Z, Fan J W, Bao Y H. Impacts of grassland reclamation on land surface radiation and water-heat fluxes in the farming-pastoral ecotone of northern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

北方典型农牧交错带草地开垦对地表辐射收支与水热平衡的影响

杨 帆^{1,2} 邵全琴^{1,*} 李愈哲¹ 樊江文¹ 包玉海²

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022

摘要:以北方典型农牧交错带草原和农田生态系统的涡度相关数据为基础, 对比分析了生长季两种不同土地利用类型的辐射和水热通量之异同, 揭示了草地开垦影响地表辐射收支与水热平衡的机制。结果表明: 在植被生长季(5月—9月), 草地开垦引起太阳总辐射增加了 10.74%, 短波反射辐射减少了 14.20%, 净辐射增加了 35.16%; 在水热通量方面, 草地开垦引起潜热通量日积分平均值增加了 0.20 MJ/m², 同时显热通量减少了 0.09 MJ/m²; 生长季内地表反照率减小, 表征地表吸收太阳辐射增加, 有升高气温的趋势; 非生长季内地表反照率增加, 有降低气温趋势, 此外地表反照率与土壤湿度存在负指数关系; 波文比在植被生长早期和末期增加, 生长旺期减小, 说明草地开垦与影响着近地表大气状态, 从而改变了区域气候。

关键词:农牧交错带; 草地开垦; 生长季; 涡度相关

Impacts of grassland reclamation on land surface radiation and water-heat fluxes in the farming-pastoral ecotone of northern China

YANG Fan^{1,2}, SHAO Quanqin^{1,*}, LI Yuzhe¹, FAN Jiangwen¹, BAO Yuhai²

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

Abstract: We compared land surface radiation and water-heat flux of two different land use types using eddy covariance flux data of typical grassland and cropland ecosystems in a farming-pastoral ecotone of northern China. The comparisons revealed that the biophysical mechanisms of grassland reclamation affected the surface radiation flux budget and the water-heat flux balance. The results further showed that, during the growing season (May-September), grassland reclamation increased the solar radiation by 10.74%, reduced the shortwave reflected radiation by 14.20%, and increased the net radiation by 35.16%. As for the water-heat flux, grassland reclamation increased the latent heat flux 0.20 MJ/m², whereas the sensible heat flux was reduced by 0.09 MJ/m². The surface albedo decreased during the growing season, which was illustrated by the surface that absorbed more solar radiation and had a tendency to rise in the temperature. In contrast, the albedo increased during non-growing season, which was illustrated by a decrease in the temperature; in addition, a negative exponential relationship between surface albedo and soil moisture was observed. The Bowen ratio in the early and late vegetation growth period increased and decreased dramatically during these growing stages. Finally, the grassland reclamation affected the near-surface atmospheric conditions, which consequently changed the regional climate.

基金项目:

收稿日期: 2015-07-13; 修订日期: 2016-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

Key Words: farming-pastoral ecotone; grassland reclamation; growing season; eddy covariance

干旱、半干旱区主要分布在中国北方地区^[1-2],其水热交换具有显著的局地性特色^[3-4]。而北方农牧交错带是我国湿润季风区和内陆干旱区的过渡区,与其他地区相比对气候变化响应更为敏感^[5],其水热状况对植被分布具有决定性作用^[6-7],但该区域内植被条件差,土地利用变化剧烈,生态环境十分脆弱,自然灾害频发^[8]。因此,在该区域内开展长期陆面过程观测实验,对于研究陆气相互作用特征,全球陆地能量和水循环以及全球变化具有十分重要的实际意义。

我国在陆面过程观测实验已取得了许多进展,在西北干旱区^[9-11]、黄土高原区^[12-14]、青藏高原区^[15-16]等均获得了重要成果,一方面说明了我国不同生态系统陆气能量转换特征,另一方面改进了不同区域陆面过程参数化方案。然而,仅单一对某个土地类型进行通量观测实验不足以全面反映各区域陆气相互作用关系。因此,不同土地利用类型的陆面过程模式成为近年学界研究热点。李新等^[17]通过在中游绿洲荒漠区非均匀下垫面的地表蒸散发观测实验,取得了矩阵式通量观测数据,这为进一步探讨土地利用变化如何影响陆气相互作用提供了可能。

许多研究表明,人类活动引起的土地利用和土地覆被变化通过生物地球物理过程对地表能量平衡和气候的影响可能比碳循环的影响还要大,而开垦是除放牧以外影响草地生态系统的最大人类活动之一^[18]。这表明,土地利用变化是影响地表辐射与水热平衡从而导致气候变化的一个关键因素。而在北方农牧交错带,开垦是影响草原生态系统最剧烈的人类活动因素。刘纪远等^[19]经过对 2000—2010 年和 1980 年代末—2000 年土地利用变化数据的对比分析,发现华北、黄土高原农牧交错带前十年以草地开垦为农田为主,内蒙古中东部较为集中,其次为农田转为林草地。

本文通过设计并建设了不同土地利用类型辐射和水热通量观测网络,主要用于开垦与退耕对生态系统辐射、水热交换影响的研究,并试图从土地利用变化角度说明草地开垦是如何影响地表辐射与水热分配格局和能量平衡,探究其影响区域气候变化的机理和效应。利用涡度相关系统,选择典型草原、农田两种不同土地利用类型的观测资料,评价了数据的质量,分析了生长季内地表辐射及水热通量的变化规律,揭示了草地开垦对辐射和水热通量重新分配的过程及影响机理,为准确评估草地开垦影响陆气间能量交换提供科学依据,并期望对生态保护及建设工程起到决策支持作用。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北方农牧交错带是指以草地和农田大面积交错出现的以典型景观为特征的自然群落与人工群落相互镶嵌的生态复合体,是区分半干旱区和半湿润区的一条非常重要的生态过渡带^[20]。北方农牧交错带属于中温带半湿润到半干旱气候区,地形以山地、山间谷地或盆地和丘陵为主,土壤类型以栗钙土为主。本研究选取的 2 个涡动相关仪观测站点分别位于锡盟典型草原(43°32′24″N, 116°33′43″E)、农田样地(43°35′20″N, 116°45′43″E)的中心地带,地形相对平缓。研究区属温带半干旱气候区,年平均气压 850—950hPa,年平均气温 0—3℃,年平均相对湿度 50%—60%,年降水量 200—350mm,全年盛行西南风,年平均风速 4—5m/s。其中,典型草原区的主要植被类型为大针茅,农田区以旱作小麦为主,两个观测站点直线距离约 20km(图 1)。

1.2 实验观测数据

1.2.1 观测方案

观测系统从美国 Campbell 公司直接购置,系统每隔一定时间会进行重新定标,由地上部分和地下部分组成,地上部分包括 1 个 CR3000 型数据采集器、1 个 CSAT3 超声风速仪、1 个 EC150 CO₂/H₂O 分析仪、NR01 四分量净辐射传感器、HMP155a 温湿度传感器;地下部分包括 CS616 土壤水分传感器、HFP01 土壤热通量传感器。地表温度的测量采用手持式红外温度计(MX4)测量,经过组装加挂到通量观测系统支架之上,设备由不

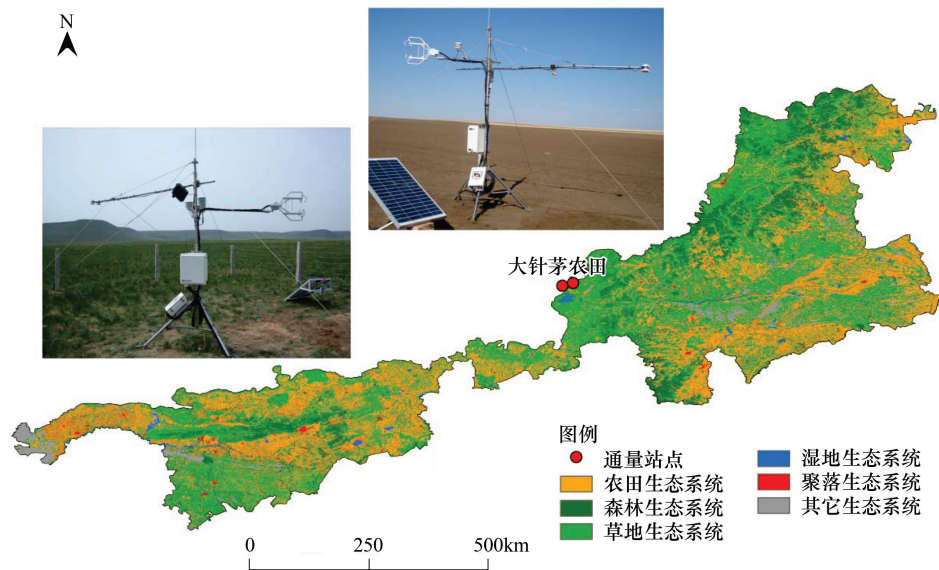


图 1 内蒙古农牧交错带生态系统类型及通量站点布设示意图

Fig.1 The ecosystem type and flux station in the typical farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia

锈钢支架固定,根据观测的下垫面特征均架高 2m。

同时,农田观测站记录小麦各个关键生育期(播种、出苗、分蘖、抽穗、成熟)(表 1)。对草原观测站而言,为排除积雪对地表反照率的影响而选择 5—9 月时段数据,其中,5—6 月草地植被进入返青期,7—8 月进入生长旺盛期,9 月代表草地植被枯黄期。

表 1 小麦不同生育期观测时间

Table 1 Observation time in different growth stages of wheat

观测时间(月-日)	天数	小麦生育期	观测时间(月-日)	天数	小麦生育期
Observation time	Day	Growth stages of wheat	Observation time	Day	Growth stages of wheat
5-1—5-15	15	播种-出苗期 Snowing-Emergency(SE)	7-26—8-10	16	抽穗-成熟期 Heading-Maturity(HM)
5-16—6-15	31	出苗-分蘖期 Emergency-Tillering(ET)	8-11—8-22	12	成熟-收割期 Maturity-Harvesting(MH)
6-16—7-25	40	分蘖-抽穗期 Tillering-Heading(TH)			

1.2.2 涡度相关数据的处理

分别对两个通量观测站采集的 0.1s 原始湍流数据采用 EdiRe 软件进行再处理,包括剔除野点、旋转变换坐标轴及 WPL 修正,得到 30min 的通量观测数据,在此基础上根据农牧交错带气候特征,对输出数据进一步筛选:净辐射(−200,800),潜热(−100,500),显热(−100,400),土壤热通量(−100,100)。最后,对剔除的数据采用线性插补,确保观测数据的完整性,以此输出校正后的 30min 通量观测数据^[21–22]。之后,运用 Wilson 等^[23]的 OLS 方法分别计算出草原、农田观测站的能量闭合度为 82.3%和 81.6%,这与其他学者观测实验结果相近^[24–26],表明了通量观测数据的整体质量比较好。

考虑到输出 30min 的观测数据均为通量密度瞬时值(单位:W/m²),故对输出数据运用面积积分公式积分得到以日为尺度的积分值(单位:MJ/m²)。

研究上述观测站辐射与水热通量特征的相关方程为:

$$R_n = \text{DSR} - \text{USR} + \text{DLR} - \text{ULR} \tag{1}$$

$$R_n = H + LE + G \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{USR}{DSR} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (4)$$

式中: R_n 为净辐射; DSR 为太阳总辐射; USR 为短波反射辐射; DLR 为大气向下长波辐射; ULR 为地表向上长波辐射; H 为显热通量; LE 为潜热通量; G 为土壤热通量; α 为地表反照率; β 为波文比。上述(1)、(2)式中参数的单位均为 W/m^2 , (3)、(4)式中 α 、 β 为无量纲。

1.3 遥感数据产品

地表反照率数据采用时间分辨率 8 天, 空间分辨率 1km 的 MODIS 地表反照率产品 MCD43B3, 数据格式为 HDF-EOS。该数据精度已在全球范围内得到许多学者广泛的验证^[27-29]。根据全球通量站点的验证结果表明, 其总体偏差为 -0.008 ^[30]。本文选取了卫星轨道号为 h26v4 数据集中宽波段白空波段来进行两个通量站的地表反照率分析。

潜热通量数据采用时间分辨率 8 天, 空间分辨率 1km 的 MODIS 蒸散发产品 MOD16A2, 数据格式为 HDF-EOS。贺添等^[31]通过将我国站点观测数据与 MODIS16A2 数据验证表明该产品与站点观测值匹配程度较好。MOD16 产品包含蒸散发、潜在蒸散发、潜热通量和潜在潜热通量, 本文选取了卫星轨道号为 h26v4 数据集中潜热通量部分进行分析。

2 结果分析

2.1 农田辐射与水热通量特征

2.1.1 不同物候期辐射通量对比

太阳总辐射 (DSR) 是太阳直接辐射与散射辐射总和, 其大小与当地经纬度、海拔高度、日照时数、天空云量和气溶胶等因素有关。在小麦不同生育期内, 变化规律基本一致 (图 2), 但日变化数值不同, 在成熟-收割期最小, 平均日积分为 $21.02 MJ/m^2$, 日最大值为 $804.35 W/m^2$; 在小麦出苗-分蘖期达到最大, 平均日积分为 $25.09 MJ/m^2$, 日最大值为 $823.79 W/m^2$ 。

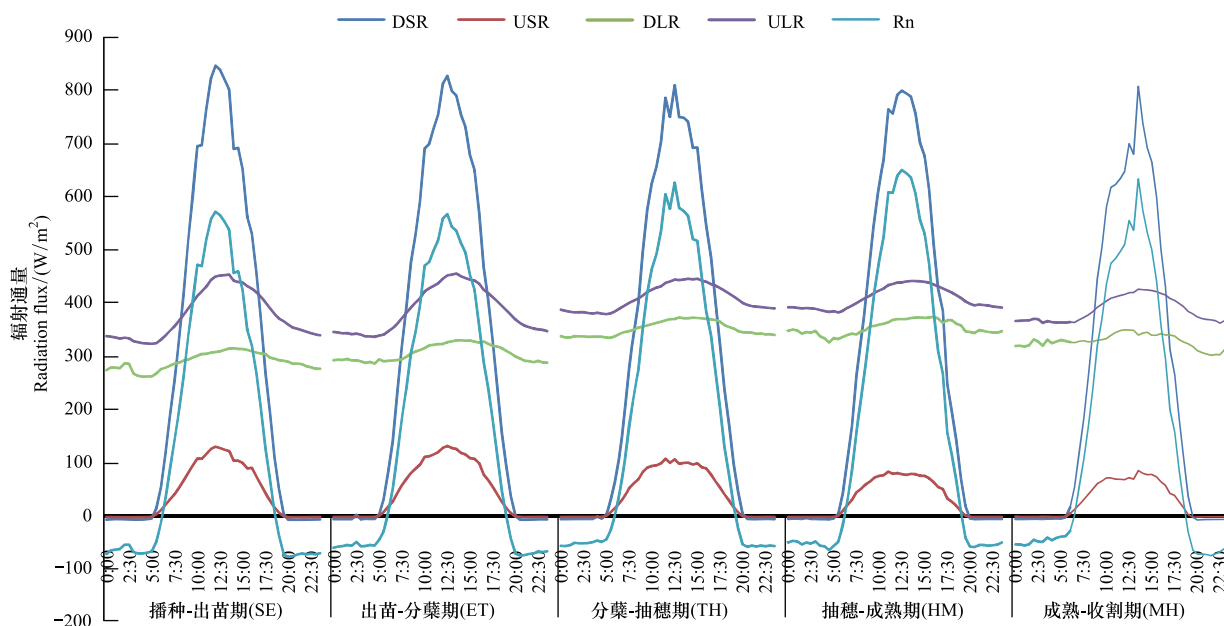


图 2 农田生长季日平均辐射通量

Fig.2 The average day radiation flux of cropland during the growing season

短波反射辐射在小麦整个生育期内呈逐渐减小趋势。在出苗-分蘖期内,由于地面植被覆盖较小,使得在该生育期内短波反射辐射明显大于小麦生长旺盛期阶段,日最大值为 133.51 W/m^2 ,日积分值达到 4.26 MJ/m^2 ;在成熟-收割期内,地面植被盖度达到最大值,此时农田短波反射辐射较小,仅为 2.68 MJ/m^2 ,日最大值为 81.30 W/m^2 。

大气向下长波辐射与地表向上长波辐射变化较为相似,在小麦生育阶段内呈现先增大后减小趋势。在播种-出苗期内为最小值,日积值分别为 24.65 MJ/m^2 和 31.96 MJ/m^2 ;在抽穗-成熟期内达到最大值,分别为 29.93 MJ/m^2 和 34.64 MJ/m^2 。

2.1.2 不同物候期水热通量对比

小麦在不同生育期,地表水热通量收支不同。随着小麦生长日趋旺盛,植被覆盖度增大,地表反照率呈波动性减小(图3),净辐射也随之增加,潜热通量在小麦成熟-收割期内,随着太阳高度角的减小,地表净辐射也略有减小。另一方面,随着小麦需水量增大,植被蒸腾作用增大,潜热通量在不断增大,显热通量在不断减小,土壤热通量的变化在各生育期内基本稳定,变化范围一般在 $0.51\text{--}0.97 \text{ MJ/m}^2$ 之间。

在小麦播种-出苗期,此时地表反照率较大,净辐射值最小,平均日积分值为 12.71 MJ/m^2 ,日最大值为 570.10 W/m^2 ,显著低于抽穗-成熟期($P<0.05$),但与其他各阶段差异不显著($P>0.05$)(图4)。同时显热通量大于潜热通量,日积分值为 4.24 MJ/m^2 ,占净辐射值 33.36% ,显著高于分蘖-抽穗期和抽穗-成熟期($P<0.05$)。土壤热通量最小,低于净辐射值的 8% ,但与各阶段差异不显著($P>0.05$),这种变化趋势与杨启国等研究的甘肃中部旱作物土壤热通量的研究结果一致^[32]。

在小麦出苗-成熟期,太阳高度角增加以及地表反照率逐阶段变小,导致净辐射值也在不断增大。小麦耗水量增加,并伴随着农牧交错带雨季来临,降水增多,土壤湿润程度明显增加,使得潜热通量占净辐射的比例也在不断增大,显热通量变化趋势与潜热通量相反,土壤热通量变化趋势较小。其中在小麦抽穗-成熟期,净辐射日积分值达到最大值 15.83 MJ/m^2 ,显著高于播种-出苗期($P<0.05$);潜热通量日积分值达到最小值 1.07 MJ/m^2 ,显著高于播种-出苗期和出苗-分蘖期($P<0.05$),仅占净辐射值 6.76% ;显热通量日积分值达到最大值 7.70 MJ/m^2 ,占净辐射值 48.64% ,显著低于播种-出苗期和出苗-分蘖期($P<0.05$)。

在小麦成熟-收割期,伴随着太阳高度角变小,雨季退去,土壤湿度有所减小,作物耗水量也逐渐减小,净辐射值减少至 13.39 MJ/m^2 ,与各阶段差异不显著($P>0.05$)。潜热通量增加至 2.33 MJ/m^2 ,显著高于播种-出苗期和出苗-分蘖期($P<0.05$)。显热通量减少至 6.98 MJ/m^2 ,但仍显著高于分蘖-成熟期($P<0.05$)。

2.2 典型草原辐射与水热通量特征

2.2.1 不同月份典型草原辐射通量对比

农牧交错带典型草原生长季地表辐射通量有显著的日变化特征(图5)。5—9月总辐射日平均最大值依次为 799.48 、 653.48 、 679.64 、 740.50 W/m^2 和 624.68 W/m^2 ;日积分值最大值出现在5月,为 24.00 MJ/m^2 ,最小值出现在9月,仅为 15.96 MJ/m^2 。这表明,农牧交错带典型草原区5—8月份是一年光热条件最佳时段。

短波反射辐射日变化与总辐射一致,5—9月日平均短波反射辐射最大值依次为 173.83 、 119.86 、 110.43 、 123.08 W/m^2 和 106.34 W/m^2 ;日积分值最大出现在5月,达到 5.56 MJ/m^2 ,这是因为5月草原植被刚进入返青期,植被覆盖度较小,地表反照率也较大,达到 0.23 ,这与岳平等^[33]研究的锡林浩特草原生长期地表反照率的结果一致。随后短波反射辐射值在不断减小,到9月仅为 3.02 MJ/m^2 。

大气向下长波辐射相比短波辐射变化较为平缓,在5—7月呈增长趋势,在7—9月呈下降趋势,在7月份日积分值达到 30.49 MJ/m^2 ,最小积分值出现在5月,为 24.90 MJ/m^2 。地表向上长波辐射与大气向下长波辐射变化类似,在整个生长季呈先增加后下降趋势,在7月份日积分值达到 36.36 MJ/m^2 ,在9月份日积分值为最小 31.70 MJ/m^2 。

2.2.2 不同月份典型草原水热通量对比

净辐射作为外部能量来源,以显热和潜热的形式加热大气,仅有一小部分能量转化为土壤热通量。典型

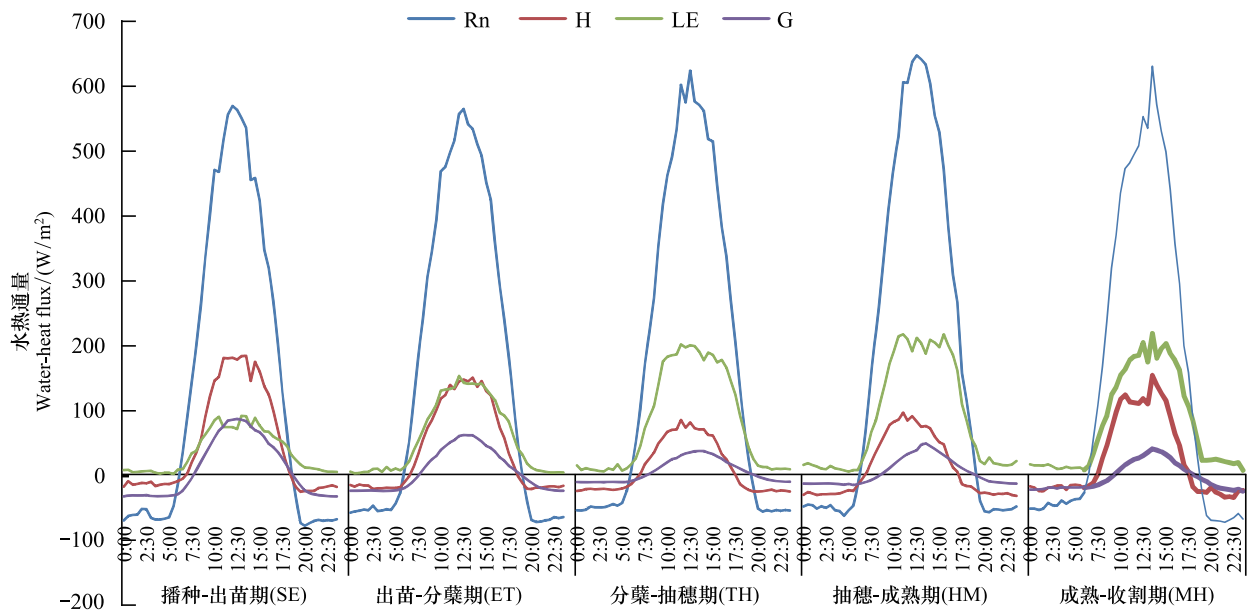


图3 农田生长季日平均水热通量

Fig.3 The average day water-heat flux of cropland during the growing season

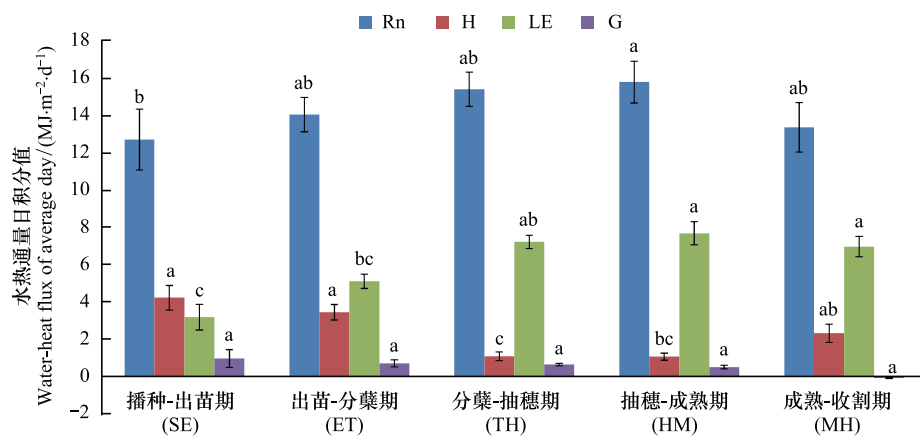


图4 不同物候期农田水热通量差异

Fig.4 The average day water-heat flux of cropland in different growth stage

同颜色柱标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 同颜色柱标有相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

草原净辐射日积分值在5—8月不断增加(图6),由5月份的 9.91 MJ/m^2 增加到了8月份的 11.43 MJ/m^2 ,5月份净辐射值显著低于8月份($P < 0.05$)(图7)。土壤热通量日积分值在整个生长季不断减小,从5月份 0.64 MJ/m^2 减少至8月份 0.21 MJ/m^2 ,占净辐射的比重也在逐月减小,但各月份间差异不显著($P > 0.05$)。

5月份典型草原地表裸露,太阳辐射加热作用使地表迅速增温,此时显热通量大于潜热通量,显热日积分值达到 4.41 MJ/m^2 ,显著高于植被生长旺期8月和枯黄期9月($P < 0.05$);6月份,植被进入返青期,显热通量开始迅速降低至 2.74 MJ/m^2 ,但仍显著高于生长旺期8月($P < 0.05$),而潜热通量由 3.66 MJ/m^2 迅速上升至 5.62 MJ/m^2 ,但仍显著低于生长旺期8月($P < 0.05$);7—8月草原植被进入全年生长旺盛期,植被蒸腾及降水作用使得潜热通量进一步上升,而显热通量不断减少,8月份潜热通量大于感热通量,此时潜热通量日积分值达到最高点 7.12 MJ/m^2 ,显著高于植被返青期的5至6月和植被枯黄期9月($P < 0.05$),显热通量仅有 1.08 MJ/m^2 ,显著低于5月至7月($P < 0.05$);9月份草原植被逐渐进入枯黄期,植被蒸腾作用也开始减弱,潜热通量明

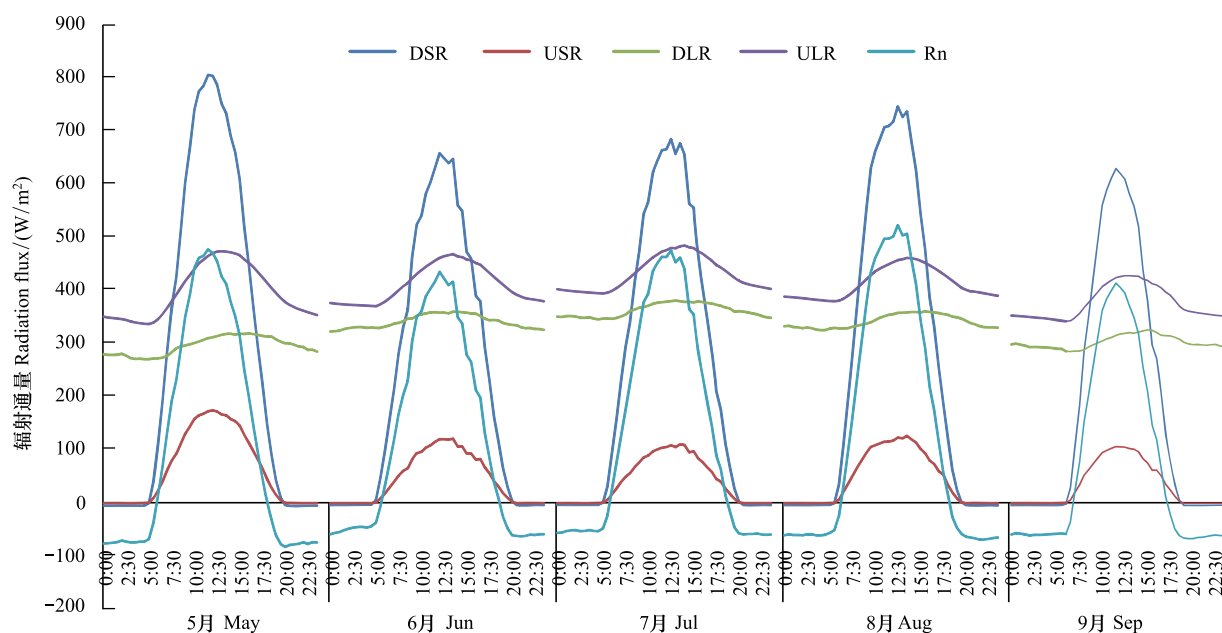


图 5 典型草原生长季日平均辐射通量

Fig.5 The average day radiation flux of typical grassland during the growing season

显开始下降,为 $4.43\text{MJ}/\text{m}^2$,显著低于植被旺盛期 7 至 8 月 ($P<0.05$),而显热通量上升至 $1.70\text{MJ}/\text{m}^2$,但仍显著低于植被返青期 5 至 6 月 ($P<0.05$)。

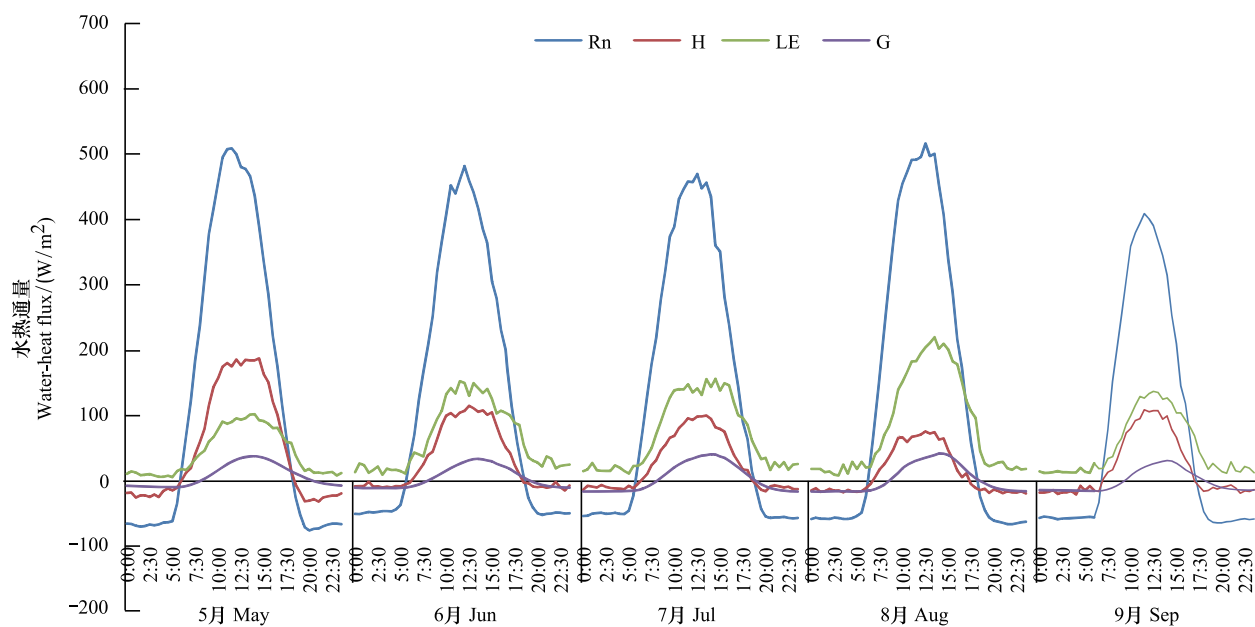


图 6 典型草原生长季日平均水热通量

Fig.6 The average day water-heat flux of typical grassland during the growing season

2.3 草地开垦对地表辐射与水热通量的影响

2.3.1 对地表辐射通量的影响

农牧交错带草地开垦后,地表总辐射增加趋势明显,在小麦分蘖-抽穗期内,总辐射变化幅度达到最大,日积分值增加了 $2.87\text{MJ}/\text{m}^2$,在小麦抽穗-成熟期内,总辐射变化幅度最小,日积分值增加了 $1.09\text{MJ}/\text{m}^2$;短波反射辐射减少趋势明显,在小麦播种-出苗期,草地开垦使得短波反射辐射减少了 $1.31\text{MJ}/\text{m}^2$,而在小麦分蘖-抽

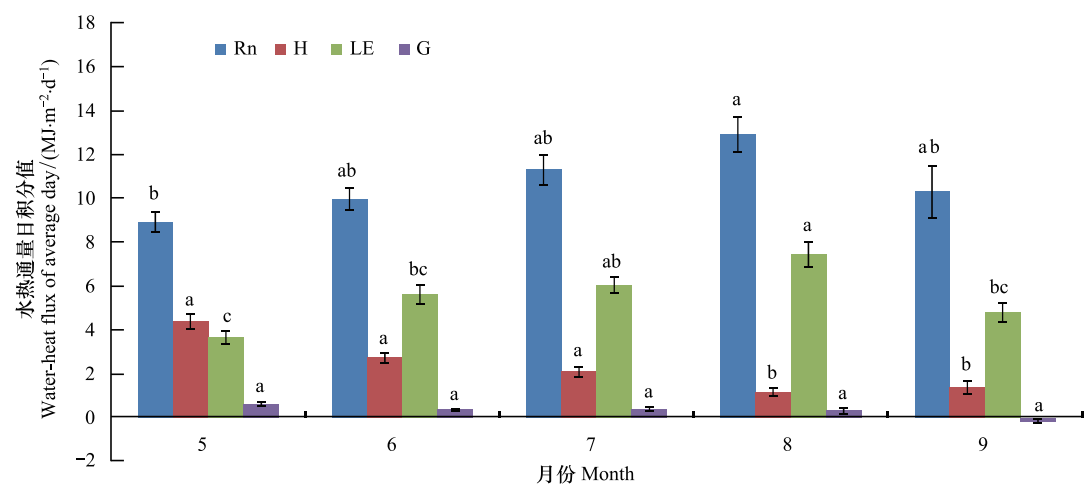


图 7 不同月份典型草原水热通量差异

Fig.7 The average day water-heat flux of typical grassland in different month

同颜色柱标有不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 同颜色柱标有相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)

穗期,开垦前后短波反射辐射基本持平(表 2)。

大气向下与地表向上长波辐射在草地开垦后的变化规律与短波反射辐射类似,也呈减小趋势。其中,大气向下长波辐射在小麦分蘖-抽穗期减少幅度最大,为 $0.50\text{MJ}/\text{m}^2$,在抽穗-成熟期内减小幅度最小为 $0.08\text{MJ}/\text{m}^2$;地表向上长波辐射在小麦分蘖-抽穗期减少幅度最大,为 $1.72\text{MJ}/\text{m}^2$,在播种-出苗期减小幅度最小为 $0.67\text{MJ}/\text{m}^2$ 。通过计算净辐射与总辐射比值来刻画草地开垦后净辐射相对值的差别,可以发现, R_n/DSR 随着生育期进程不断增大,在成熟-收割期内又略有减小;草地开垦后,变化范围从 $0.41\text{—}0.58$ 增加至 $0.53\text{—}0.68$ 。

表 2 小麦不同生育期农田与典型草原辐射通量积分值 (MJ/m^2)

Table 2 The radiation flux of cropland and typical grassland in different growth stages of wheat

生育期 Growth stage	土地利用类型 Land use type	总辐射 Downward shortwave radiation	短波反射辐射 Upward shortwave radiation	大气向下长波辐射 Downward longwave radiation	地表向上长波辐射 Upward longwave radiation	净辐射/总辐射 Net radiation/ Downward shortwave radiation
播种-出苗期 SE	农田	23.89	3.85	24.65	31.96	0.53
	草地	21.94	5.16	24.79	32.63	0.41
出苗-分蘖期 ET	农田	25.09	4.26	25.94	32.70	0.56
	草地	22.49	4.96	26.19	33.73	0.44
分蘖-抽穗期 TH	农田	23.99	3.74	29.79	34.61	0.64
	草地	21.12	3.77	30.29	36.33	0.54
抽穗-成熟期 HM	农田	23.43	2.90	29.93	34.64	0.68
	草地	22.34	3.89	30.01	35.54	0.58
成熟-收割期 MH	农田	21.02	2.68	27.82	32.77	0.64
	草地	19.18	3.58	28.24	33.52	0.54

地表反照率表征地表反射太阳辐射的能力,是影响地表辐射通量收支的一个非常重要的参数,其大小由短波反射辐射与总辐射比值表示^[34-35]。在生长季内,草地开垦使得地表反照率减小(图 8),变化范围从 $0.16\text{—}0.26$ 减小至 $0.10\text{—}0.21$;且在每次降雨发生后,地表反照率均有明显地下降。在 7—8 月植被生长旺期,两种不同地表类型的反照率差异较小,这与刘辉志等^[36]研究的半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征的结果一致。

地表反照率随着土壤湿度的增加呈指数衰减趋势,且农田的曲线拟合结果要好于草地(图 9)。土壤湿度

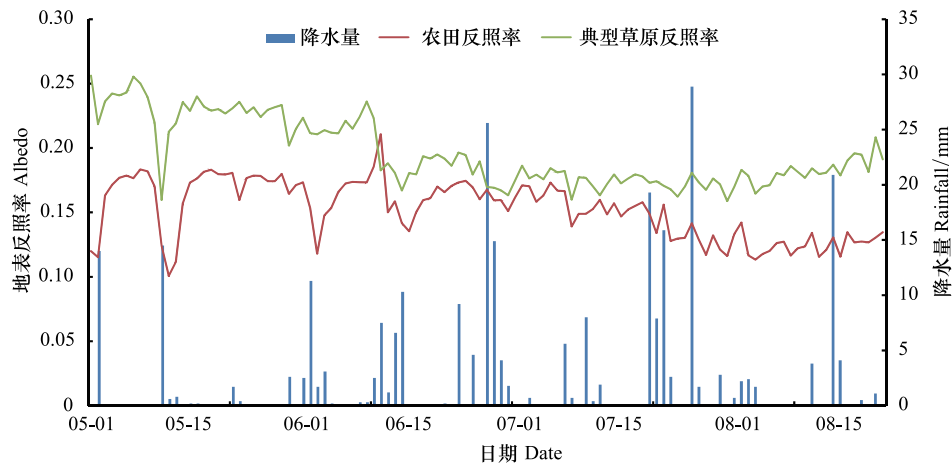


图8 生长季农田和典型草原日平均地表反照率

Fig.8 The average surface albedo of cropland and typical grassland during the growing season

增加改变了土壤热性能,从而影响了地表反照率,进而使地表水热交换发生改变^[37]。而地表反照率随着土壤湿度增加而降低,可能原因是因为土壤水分越大其吸收的太阳短波辐射越大,进而导致地表反照率减小。在农牧交错带生长季内,农田下垫面土壤含水量要显著高于草地,所以在此生长阶段若发生草地开垦,地表反照率会减小。

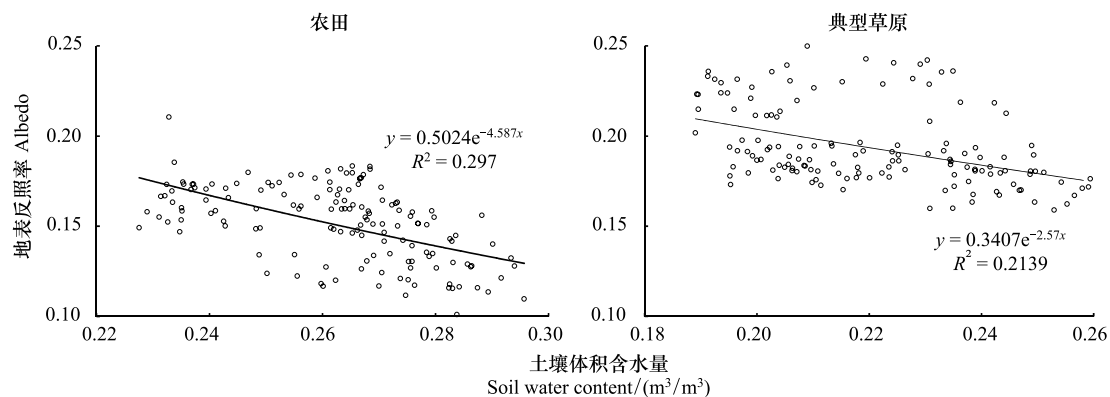


图9 生长季农田和典型草原土壤湿度与 albedo 关系

Fig.9 The relationship between soil moisture and albedo of cropland and grassland during the growing season

2.3.2 对地表水热通量的影响

农牧交错带草地开垦后,地表净辐射增加趋势明显(表3),在小麦分蘖-抽穗期内,净辐射变化幅度达到最大,日积分值增加了 4.12 MJ/m^2 ;土壤热通量变化与净辐射变化相似,也呈增加趋势,在小麦出苗-分蘖期达到最大,此时日积分值增加 0.34 MJ/m^2 。

在小麦播种-出苗期内,草地与农田地表状况相似,此时草地开垦前后显热与潜热通量基本不变;而在小麦出苗-分蘖期内,草原植被进入返青期,草地开垦使得地表显热通量增大,日积分值增加 0.72 MJ/m^2 ,潜热通量减小了 0.50 MJ/m^2 ;在小麦分蘖-成熟期内,小麦生长进入全年最旺盛期,蒸腾作用要大于草原植被,故此时草地开垦使得潜热通量增加,日积分值增加了 0.91 MJ/m^2 ,显热通量减少 0.75 MJ/m^2 ;在小麦成熟-收割期内,农田盖度逐渐减小,蒸腾作用也减弱,而此时草原植被仍在生长旺期,故草地开垦使得显热通量增加,日积分值增加了 0.96 MJ/m^2 ,而潜热通量减少了 0.49 MJ/m^2 。

波文比代表可以表征气候干湿程度,波文比大说明气候干燥,反之说明气候湿润。在小麦播种-分蘖期

内,草地开垦使得波文比变大,气候变得干燥;在小麦分蘖-成熟期,草地开垦引起潜热通量上升,显热下降,波文比变小;最后在小麦成熟-收割期内,草地开垦继续导致波文比迅速上升,气候又逐渐变干燥。

表 3 小麦不同生育期农田与典型草原水热通量积分值 (MJ/m²)

Table 3 The water-heat flux of cropland and typical grassland in different growth stages of wheat (MJ/m²)

生育期 Growth stage	土地利用类型 Land use type	净辐射 Net radiation	显热通量 Sensible heat flux	潜热通量 Latent heat flux	土壤热通量 Soil heat flux	波文比 Bowen ratio
播种-出苗期 SE	农田	12.73	4.24	3.19	0.97	1.33
	草地	8.94	4.41	3.66	0.64	1.20
出苗-分蘖期 ET	农田	14.07	3.46	5.12	0.71	0.68
	草地	9.99	2.74	5.62	0.37	0.49
分蘖-抽穗期 TH	农田	15.43	1.09	7.23	0.65	0.15
	草地	11.31	2.10	6.05	0.39	0.35
抽穗-成熟期 HM	农田	15.82	1.07	7.70	0.51	0.14
	草地	12.92	1.17	7.46	0.32	0.16
成熟-收割期 MH	农田	13.39	2.33	6.98	-0.08	0.33
	草地	10.32	1.37	7.47	-0.15	0.18

3 结论与讨论

农牧交错带植被对水热通量有重要影响,在植被长势较差的月份,地表能量的转换以显热为主,在植被长势较好的月份,则以潜热为主。潜热通量生长季变化也呈单峰型变化规律,最大值出现在 7 月份,最小值则出现在生长季初期和末期。显热通量变化与潜热通量变化正好相反。

在整个生长季内,农田和典型草原辐射与水热通量日变化都呈单峰型特征,辐射与水热通量最大值均出现在中午 12 时至 13 时之间,前者日平均总辐射高于后者,净辐射值高于后者,潜热通量也高于后者,显热通量则低于后者。农田和典型草原总辐射日积分平均值分别为 23.88MJ/m² 和 21.57MJ/m²,净辐射通量的日积分平均值分别占总辐射值的 60.89%和 49.88%,这与顾润源等^[38]在 2010 年内蒙古半干旱草原测得的辐射通量观测资料相一致。潜热通量的日积分平均值分别占净辐射值的 42.37%和 55.48%,显热通量的日积分平均值分别占净辐射值的 15.68%和 22.03%。

生长季内北方农牧交错带草地开垦影响了地表辐射与水热通量,具体表现在:净辐射日积分平均值增加了 35.16%,其中太阳总辐射日积分平均值增加了 10.74%,短波反射辐射日积分平均值减少了 14.20%,大气向下和地表向上长波辐射日积分平均值分别减少了 1.13%和 3.39%,由此可见在植被生长季地表向上长波辐射受到下垫面变化状况影响较大^[38];潜热通量日积分平均值增加了 3.32%,同时显热通量减少了 3.96%;土地覆被变化导致辐射强迫,伴随着草地向农田的转变,地表反照率减小,表征地表吸收太阳辐射增加,有升高气温的趋势^[39];草地开垦使得波文比大小发生变化,波文比在植被生长初期增大,在生长旺期减小,在生长末期又开始增大,这表明草地开垦不仅改变了地表物理结构,还影响着近地表大气状态,从而改变了区域气候。

由于站点非生长季内数据有缺失,无法完整揭示全年地表辐射与水热状况,所以通过 MODIS 地表反照率和蒸散发产品分别提取了两个站点地表反照率和潜热通量,以此来反映年内变化趋势(图 10)。相关研究表明,基于 MODIS 资料反演的地表反照率同野外观测值具有高度显著的相关关系,尤其在植被生长季,两套资料的全部有效数据相关系数达 0.78,达到 99.9%的置信水平^[40]。地表反照率在年初和年末受到雪盖影响,从影像上提取的值偏大,属于明显异常值,故年初和年末的值有缺失,但仍可以很好反映年内变化趋势:在 3 月到 5 月初,农田和典型草原地表反照率基本相似;在植被生长季内(5—9 月),典型草原地表反照率大于农田,这与本文站点观测的数据变化趋势一致;在农田作物收割后(9—11 月),土壤被翻耕,地表多为裸土,此时农田地表反照率大于典型草原。农田和典型草原年内前期(1—5 月)潜热通量差异不大,但到植被生长季农田

潜热通量显著大于典型草原,这与站点观测数据反映的趋势相一致。作物被收割后,地表大量裸露使得农田潜热通量大幅度下降,此时典型草原潜热通量大于农田。

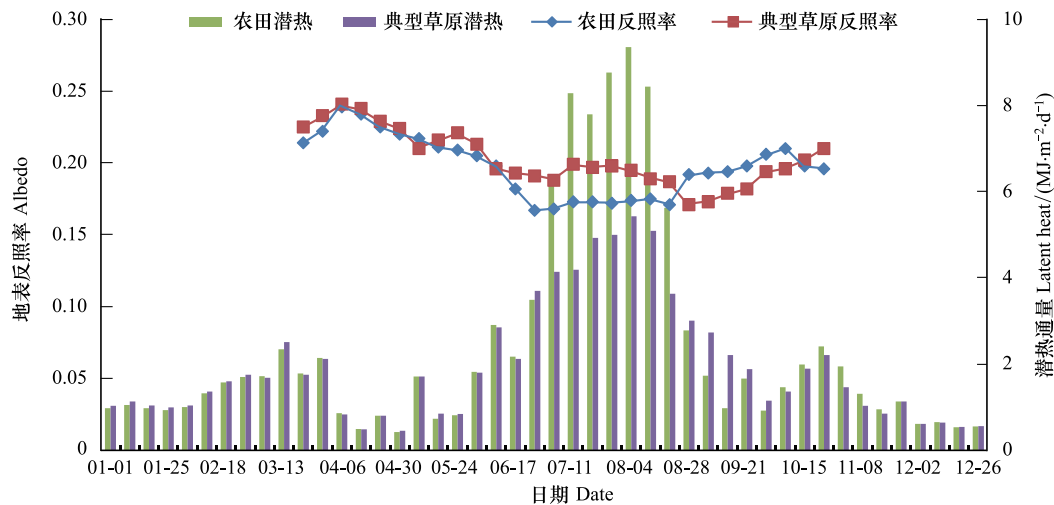


图 10 农田和典型草原地表反照率和潜热通量年变化

Fig.10 The annual variation of albedo and latent heat flux of cropland and typical grassland

需要指出,不同型号仪器以及不同数据处理方式会使数据结果存在一定的不确定性,因此,未来会开展更为综合全面的观测来深入理解农牧交错带草地开垦对辐射与水热平衡的影响机制。另外,本文所用的通量台站观测数据时间序列较短,仅对比了植被生长季内农田与典型草原两种不同土地利用类型的辐射和水热通量,缺乏不同季节及年际间的能量分配研究,这也是以后工作的重点。

参考文献 (References):

- [1] 张雪芹, 孙杨, 郑度, 毛炜峰. 中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应. 地理学报, 2011, 66(9): 1166-1178.
- [2] 黄建平, 李明霞, 刘玉芝, 张镭, 龚道溢. 干旱半干旱区气候变化研究综述. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14.
- [3] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 孙占东, 李宇安. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140.
- [4] Oliphant A, Zawar-reza P, Azizi G, Dehghanpour A, Harrison J. Surface energy and water vapor fluxes observed in a desert plantation in central Iran. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10): 926-935.
- [5] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. Global Change Biology, 2011, 17(1): 377-389.
- [6] 李夏子, 韩国栋, 郭春燕. 气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4146-4155.
- [7] 陈效述, 王恒. 1982-2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.
- [8] 杜华明, 延军平, 王鹏涛. 北方农牧交错带干旱灾害及其对暖干气候的响应. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 124-128.
- [9] Li X, Li X W, Li Z Y, Ma M G, Wang J, Xiao Q, Liu Q, Che T, Chen E X, Yan G J, Hu Z Y, Zhang L X, Chu R Z, Su P X, Liu Q H, Liu S M, Wang J D, Niu Z, Chen Y, Jin R, Wang W Z, Ran Y H, Xin X Z, Ren H Z. Watershed allied telemetry experimental research. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D22): D22103, doi: 10.1029/2008JD011590.
- [10] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, Jia Z Z, Zhu M J, Bai J, Wang J M. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(4): 1291-1306.
- [11] 王慧, 胡泽勇, 马伟强, 李栋梁. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析. 大气科学, 2008, 32(6): 1458-1470.
- [12] Wang G Y, Huang J P, Guo W D, Zuo J Q, Wang J M, Bi J R, Huang Z W, Shi J S. Observation analysis of land-atmosphere interactions over the Loess Plateau of north west China. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D7): D00K17, doi: 10.1029/2009JD013372.
- [13] Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, Zhang W, Bi J R, Wang G Y, Li W J, Fu P J. Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 679-691.
- [14] Ling X L, Guo W D, Fu C B. Composite analysis of impacts of dust aerosols on surface atmospheric variables and energy budgets in a semiarid region of China. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(6): 3107-3123.

- [15] Ma Y M, Wang Y Q, Wu R S, Hu Z Y, Yang K, Li M, Ma W, Zhong L, Sun F, Chen X L, Zhu Z K, Wang S Z, Ishikawa H. Recent advances on the study of atmosphere-land interaction observations on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1103-1111.
- [16] Ma N, Zhang Y S, Szilagyi J, Guo Y H, Zhai J Q, Gao H F. Evaluating the complementary relationship of evapotranspiration in the alpine steppe of the Tibetan Plateau. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 1069-1083.
- [17] Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu Q H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L, Xu Z W. Heihe watershed allied telemetry experimental research (Hiwater): scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(8): 1145-1160.
- [18] Pielke R A, Marland G, Betts R A, Chase T N, Eastman J L, Niles J O, Niyogi D D S, Running S W. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 360(1797): 1705-1719.
- [19] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [20] 战金艳, 邓祥征, 岳天祥, 包玉海, 赵涛, 马胜男. 内蒙古农牧交错带土地利用变化及其环境效应. *资源科学*, 2004, 26(5): 80-88.
- [21] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 王介民. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 372-382.
- [22] 张智慧, 王维真, 马明国, 徐自为, 吴月茹, 黄广辉, 谭俊磊. 黑河综合遥感联合试验涡动相关通量数据处理及产品分析. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 788-796.
- [23] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [24] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 张雷明, 任传友, 伏玉玲. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(S2): 46-56.
- [25] Miao H X, Chen S P, Chen J Q, Zhang W L, Zhang P, Wei L, Han X G, Lin G H. Cultivation and grazing altered evapotranspiration and dynamics in Inner Mongolia steppes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1810-1819.
- [26] Chen S P, Chen J Q, Lin G H, Zhang W L, Miao H X, Wei L, Huang J H, Han X G. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1800-1809.
- [27] Liang S L, Shuey C J, Russ A L, Fang H L, Chen M Z, Walthall C L, Daughtry C S T, Hunt Jr R. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(1): 25-41.
- [28] Sumner D M, Wu Q L, Pathak C S. Variability of albedo and utility of the MODIS albedo product in forested wetlands. *Wetlands*, 2011, 31(2): 229-237.
- [29] Wang K C, Liu J M, Zhou X J, Sparrow M, Ma M, Sun Z A, Jiang W H. Validation of the MODIS global land surface albedo product using ground measurements in a semidesert region on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2004, 109(D5): D05107.
- [30] Wang K C, Liu S L, Schaaf C L, Strahler A H. Evaluation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer land surface visible and shortwave albedo products at FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115(D17): D17107.
- [31] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988.
- [32] 杨启国, 杨兴国, 张旭东. 甘肃中部旱作农田地表能量收支特征分析. *干旱气象*, 2004, 22(2): 38-44.
- [33] 岳平, 张强, 邓振镛, 杨金虎, 孙旭映. 草原生长期地表辐射和能量通量月平均日变化特征. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 941-947.
- [34] Betts A K, Ball J H. Albedo over the boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28901-28909.
- [35] McCaughey J H, Lafleur P M, Joiner D W, Bartlett P A, Costello A M, Jelinski D E, Ryan M G. Magnitudes and seasonal patterns of energy, water and carbon exchanges at a boreal young jack pine forest in the BOREAS northern study area. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28997-29007.
- [36] 刘辉志, 涂钢, 董文杰. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征. *科学通报*, 2008, 53(10): 1220-1227.
- [37] Guan X D, Huang J P, Guo N, Bi J R, Wang G Y. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 692-700.
- [38] 顾润源, 武荣盛, 吴菊秀, 孙小龙, 马耀明, 杨铁刚. 内蒙古半干旱草原下垫面地表辐射特征. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 854-864.
- [39] 翟俊, 刘荣高, 刘纪远, 赵国松. 1990-2010 年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫. *地理学报*, 2013, 68(7): 875-885.
- [40] 张学珍. 锡林郭勒草原地表反照率对气候变化的响应. *地理研究*, 2012, 31(2): 299-310.