

Analysis of Micrometeorological Characteristics of Inhomogeneous Underlying Surface in the Bohai Coastal Region of Liaoning Province in Summer

Ting Zhao^{1,2}, Xiaohang Wen^{1*}

¹Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang Liaoning
Email: HSW0322@126.com, *wenzerg@126.com

Received: Jun. 22nd, 2019; accepted: Jul. 1st, 2019; published: Jul. 8th, 2019

Abstract

In this paper, the micrometeorological characteristics on different underlying surfaces are analyzed in Bohai coastal region from August 1 to 31, 2015. The observation data of field corn in Jinzhou and wetland in Panjin flux sites are used to analyze. The main conclusions are as follows: the regional microclimate difference is obvious between Jinzhou and Panjin. The temperature difference value between day and night in Jinzhou dryland underlying surface is higher and the relative humidity is lower than Panjin wetland. The soil moisture in Panjin Wetland in summer is almost saturation. The monthly averaged values of soil moisture of 5 cm and 10 cm in Jinzhou dryland are 0.18 m³/m³ and 0.20 m³/m³ respectively. The soil temperature pattern of each layer is like quasi-sinusoidal at flux stations. Because of irrigation, there has large heat capacity and low soil temperature value at the Panjin wetland. The dominant wind direction is from the south in both sites, and there is obvious sea-land breeze change of wind direction in this area. In summer, the latent heat flux transfer is dominated in the two regions. In this study, there is still the problem of energy nonclosure. The energy closure rate of the Jinzhou dryland flux station is 0.76.

Keywords

Bohai Coastal Region of Liaoning Province, Inhomogeneous Underlying Surface, Micrometeorological Characteristics

辽宁环渤海地区非均匀下垫面夏季近地层微气象特征分析

*通讯作者。

赵婷^{1,2}, 文小航^{1*}

¹成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都

²中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳

Email: HSW0322@126.com, *wenzerg@126.com

收稿日期: 2019年6月22日; 录用日期: 2019年7月1日; 发布日期: 2019年7月8日

摘要

本文利用锦州农田玉米地、盘锦芦苇湿地通量观测站2015年8月1日至2015年8月31日的观测数据, 分析了辽宁环渤海地区不同下垫面的微气象特征。主要得到以下结论: 两地区局地小气候差异明显, 锦州玉米旱地昼夜温差较大且相对湿度较低, 盘锦芦苇湿地夏季土壤湿度接近饱和状态, 锦州玉米旱地5 cm和10 cm土壤湿度月均值分别为 $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。两通量站各层土壤温度均呈准正弦变化, 盘锦芦苇湿地由于地表有水体灌溉, 热容量较大, 土壤温度较低。两站点均以偏南风为主导风, 风向日变化呈明显的海陆风变化特征; 夏季时, 两地区地表和大气之间的能量输送均以潜热输送为主。本研究依旧存在能量不闭合的问题, 锦州玉米旱地通量站的能量闭合度为0.76。

关键词

辽宁环渤海地区, 非均匀下垫面, 微气象特征

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

上世纪八十年代中后期, 越来越多的气象学者们认识到了陆面过程及陆气相互作用的重要性, 并且将其逐步发展成为大气科学中的一个重要的科学研究领域。在世界气候研究计划(WCRP)和国际地球生物圈计划(IGBP)的推动下, 在全球范围内的各种典型气候/生态区域进行了一系列的陆面过程观测试验。由于地表反照率、土壤湿度、植被覆盖度以及下垫面利用类型等地表特征的不同, 使得不同属性的地表间陆气相互作用过程特征存在着很大的差异。近些年, 在不同下垫面(如草地、旱地和荒漠等)、不同时空尺度下的陆气相互作用过程受到了气象学者们的广泛关注。黄荣辉[1]等(2013)对“NWC-ALIEX”观测试验的数据分析表明, 中国西北干旱区在春季及夏季感热通量较高, 并指出了其对我国东部地区夏季气候异常变化的重要影响; 胡隐樵和王介民[2] [3] [4] [5] [6]等通过分析“HEIFE”试验数据, 揭示了绿洲和沙漠间的“冷岛效应”及逆湿现象, 两地区之间的温度差使其间的平流场发生了改变, 进而形成了明显的局地小气候特征; 刘辉志[7] [8] [9]等通过对比研究发现, 在生长季中, 吉林通榆农田下垫面和退化草地下垫面上的能量输送中感热通量和潜热通量占比均衡; 在非生长季, 则主要表现为感热输送, 占地表能量的70%。

辽宁环渤海地区从气候带特征来看处于半干旱和半湿润地区, 从生产生活方式来看属于农牧相交区, 从植被显域性来看草原和森林植被交错区, 地形地貌多样, 下垫面类型较为复杂[10]。近年来, 辽宁环渤海地区因其地表特征的特殊性, 逐渐引起了学者们的关注。贾庆宇等[11]采用小气候梯度观测法分析了

2015年辽河三角洲盘锦芦苇湿地和锦州玉米旱地的年平均气候特征。研究表明: 盘锦芦苇湿地年平均气温为 9.91°C , 比锦州玉米旱地年平均气温低 0.58°C , 其日平均气温振幅较小; 盘锦芦苇湿地年平均相对湿度为 64.58% , 是锦州玉米旱地年平均相对湿度的两倍左右。由于下垫面特征差异, 使得位于同纬度的两测站局地小气候特征存在明显差异。

目前国内关于辽宁环渤海地区非均匀下垫面的研究内容较少, 故本章以锦州农田旱地通量站(41.15°N , 121.17°E), 盘锦芦苇湿地/水稻田用通量站(41.13°N , 121.9°E)为研究对象, 分别代表辽宁环渤海区域内同纬度的半干旱农田下垫面和半湿润湿地下垫面, 对以上两个通量站2015年8月1日0时00分~8月31日23时30分(北京时间)观测数据进行分析, 初步探究辽宁环渤海地区不同下垫面的地表和近地层微气象要素的时间特征。

2. 观测站点及数据介绍

本文以锦州玉米旱地、盘锦芦苇湿地/水稻田下垫面为研究对象, 利用国气象局沈阳大气环境研究所提供的锦州玉米旱地(41.15°N , 121.17°E)、盘锦芦苇湿地/水稻田(41.13°N , 121.9°E)通量站2015年8月1日0时00分~8月31日23时30分(北京时间)每日的地表和近地层要素的观测数据, 分析辽宁环渤海地区不同下垫面的近地层2 m气温、2 m相对湿度、风向和风速、5 cm土壤温度和土壤湿度、10 cm土壤温度和湿度、降水量、地表辐射、地表能量通量等陆面过程参数的时间(日、月)变化特征。观测站点周围地形平摊开阔, 无大型建筑遮挡, 站点周围环境和下垫面情况如图1所示。

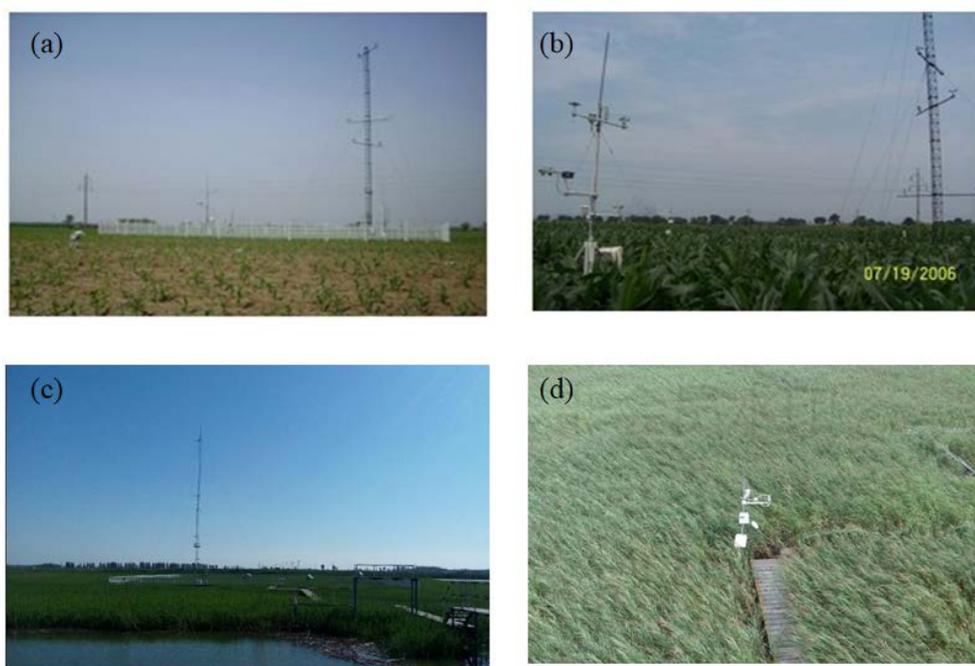


Figure 1. Flux site maps (a, b Jinzhou Flux Station, c, d Panjin Flux Station)

图1. 通量站点图(a、b为锦州通量站站点周围环境图, c、d为盘锦通量站站点周围环境图)

锦州农田生态系统野外观测站站区和通量塔下主要植被为玉米农田植被, 属半干旱下垫面, 土壤类型为棕壤, 土壤有机质含量较低。气候类型为温带季风气候, 年平均气温 9.5°C , 年无霜期为144~180天, 年平均降水量约 565 mm , 夏季降水集中约占全年降水量的 60% [12]。

盘锦通量观测研究站位于中国气象局沈阳大气环境研究所盘锦湿地生态系统野外观测站, 地貌类型

以冲积平原和潮滩为主, 站年均气温为 8.6℃, 全年无霜期平均为 170 天, 年均降水量为约 600 mm, 年日照时间为 2700 h, 主导风向夏季为偏南风, 冬季为偏北风。

测站仪器均经过统一标定和维护, 观测数据经过远程监控和定期检查两种方法进行数据质量控制, 输出的数据准确。部分所用仪器及参数如表 1 所示。

Table 1. The types, manufacturers and observation accuracy of instruments

表 1. 观测仪器及其型号、制造商和观测精度

仪器名称	型号	制造商	观测量和观测精度
数据采集器	CR3000	美国 Campbell	/
温湿度传感器	HMP155A	芬兰 Vaisala	气温: $\pm 0.10^\circ\text{C}$ 相对湿度: $\pm 1.0\%$
土壤温度传感器	109	美国 Campbell	土壤温度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ($0^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$) $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (-50°C)
土壤水分传感器	CS616	美国 Campbell	土壤含水量: $\pm 2.5\%\text{VWC}$
土壤热平衡传感器	TCAV	美国 Campbell	土壤表层温度: $\pm 0.3^\circ\text{C}$
三维超声风速仪	CSAT3	美国 Campbell	水平风速: $\pm 1\text{ m/s}$ 垂直风速: $\pm 0.5\text{ m/s}$
红外气体分析仪	Li-7500	美国 Li-cor	CO_2 浓度: $\pm 1\%$ CO_2 浓度: $\pm 1\%$

3. 结果分析

3.1. 局地气象要素特征分析

图 2(a)~(c)为 2015 年 8 月锦州农田旱地近地层 2 m 气温、相对湿度月变化和日变化情况; 图 2(d)~(f)为盘锦芦苇湿地近地层 2 m 气温、相对湿度月变化和日变化情况。锦州玉米旱地 8 月近地层 2m 气温平均值为 24.2℃, 日平均最高气温为 34.8℃, 最低气温为 15.5℃, 最大日较差可达 15.5℃左右; 同纬度的盘锦芦苇湿地 8 月近地层 2 m 气温平均值为 25℃, 日平均最高气温为 28.7℃, 最低气温为 21.6℃, 最大日较差为 7.1℃。可见, 盘锦芦苇湿地日平均最高气温与锦州农田旱地相差较大。芦苇湿地由于地表有水层灌溉, 水体的比热容较大, 因此湿地的气温调节能力较强, 在高温时具有降温作用。相比之下, 玉米旱地土壤热容量较小。因此, 在辐射条件相同的条件下, 玉米旱地在白天的升温速率和夜间的降温速率均大于芦苇湿地。由于仪器及观测问题, 盘锦芦苇湿地通量站 8 月 2 m 相对湿度的观测数据不连续, 且观测误差较大。本文选择通量站临近的大洼气象站点的 2 m 相对湿度观测值进行分析。锦州玉米旱地 8 月近地层 2 m 相对湿度平均值为 74.8%, 日平均最低值为 25%; 盘锦芦苇湿地区 8 月近地层 2 m 相对湿度平均值为 78.9%, 日平均最低值为 40%。可以看出, 由于水文和植被蒸腾作用的差异, 8 月盘锦芦苇湿地近地层 2 m 相对湿度整体高于锦州玉米旱地。

选取 2015 年 8 月 10~11 日为代表, 分析两站的 2 m 气温和相对湿度日变化情况, 所选时间段内两站均为晴天, 无降水过程。图 2(c)、图 2(f)分别为两地区 2 m 气温/相对湿度日变化图。可以看出, 两地的日 2m 气温和相对湿度均呈单峰型变化, 两地区的 2 m 气温日最低气温均出现在 04:00 前后, 之后开始逐渐上升, 最高气温大约出现在 12:00~14:00。相对湿度的变化趋势与气温的变化趋势相反, 这是因为气温升高使得空气中的水气压和饱和水汽压同时增大, 但是由于饱和水汽压的增量更大, 相对湿度反而减小。2 m 相对湿度最大值一般在日出前, 约在 06:00 时, 之后逐渐减小, 于 14:00 左右达到最小值, 之后逐渐增大。

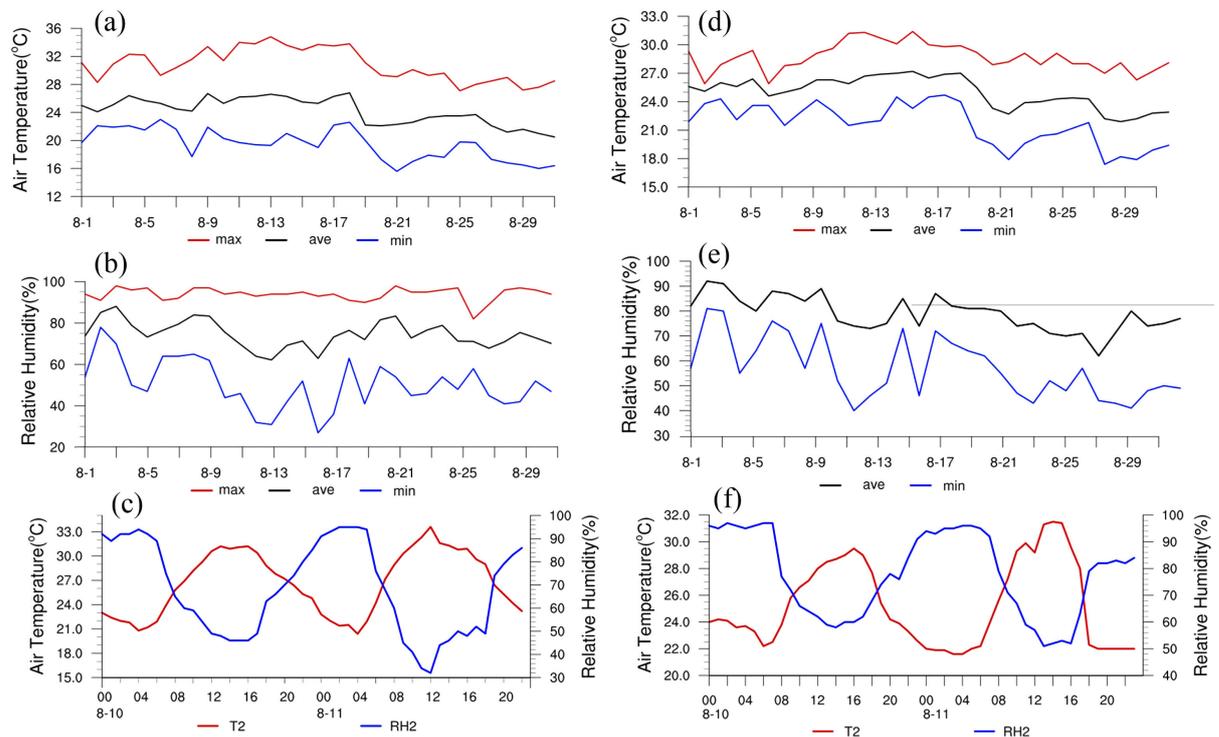


Figure 2. Variation of temperature and relative humidity ((a), (b), (c) are the monthly and diurnal variations of temperature and relative humidity in the near-surface layer of Jinzhou Dryland Flux Station in August 2015; (d), (e), (f) are the monthly and diurnal variations of temperature and relative humidity in the near-surface layer of Panjin Reed Wetland Flux Station in August 2015)

图 2. 2 m 气温相对湿度变化(图(a)、(b)、(c)为 2015 年 8 月锦州农田旱地近地层 2 m 气温、相对湿度月变化和日变化情况; 图(d)、(e)、(f)为 2015 年 8 月盘锦芦苇湿地近地层 2 m 气温、相对湿度月变化和日变化情况)

辽宁环渤海地区地处欧亚大陆东岸, 属典型的季风气候, 受海陆热力性质差异的影响, 该地区在夏季以偏南风为主导风向。图 3(a)为 2015 年 8 月锦州玉米旱地日平均风速风向玫瑰图。该图表明锦州玉米旱地 8 月以偏南风为主导风, 月平均风速为 1.6 m/s。通过图 3(b)可以看出, 锦州站风速风向日变化呈明显的海陆风的日变化特征。白天时该地区风向为偏南风, 夜间气温逐渐降低, 近地层湍流交换作用减弱, 加之地面摩擦的消耗作用, 使得近地层风速几乎为零。日出以后, 边界层湍流作用加强, 风速逐渐增大。盘锦芦苇湿地通量站由于地处沿海地区, 风速较大, 月平均风速为 2.6 m/s。该地区风向风速日变化同样符合海陆风日变化规律, 白天以偏南风为主, 夜间以偏北风为主; 受近地层湍流交换作用的影响, 日间风速逐渐增大, 夜间风速逐渐降低。

降水是影响土壤湿度变化的主要因子, 因此本文将降水与土壤湿度共同分析。受降水补给的影响, 锦州夏季土壤湿度很快升高, 土壤湿度极大值一般出现在 8 月中旬。2015 年 8 月锦州玉米旱地 2 层土壤湿度相差不大, 5 cm 土壤湿度的变化范围为: $0.27\sim 0.34\text{ m}^3/\text{m}^3$, 其平均值为 $0.18\text{ m}^3/\text{m}^3$; 10 cm 土壤湿度变化范围为: $0.26\sim 0.33\text{ m}^3/\text{m}^3$, 其平均值为 $0.20\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由图 4(a)可以看出, 土壤湿度的变化与降水相对应, 降水发生后, 浅层土壤湿度对降水响应迅速, 而在较深层, 受渗透作用影响, 土壤湿度变化有一定的滞后性; 在天气持续晴好条件下, 受蒸散过程的影响, 浅层土壤水分蒸发, 5 cm 土壤湿度持续减小, 10 cm 土壤湿度变化不如 5 cm 土壤强烈, 土壤湿度减小速率较小; 在阴天或相对湿度较高的天气条件下, 土壤湿度日变化不大。由于盘锦湿地生态系统野外观测站从地表往下每 10 cm 采集一次土壤湿度数据, 故本文只对 2015 年 8 月盘锦芦苇湿地 10 cm 土壤湿度月变化特征进行分析。8 月盘锦芦苇湿地的土壤湿

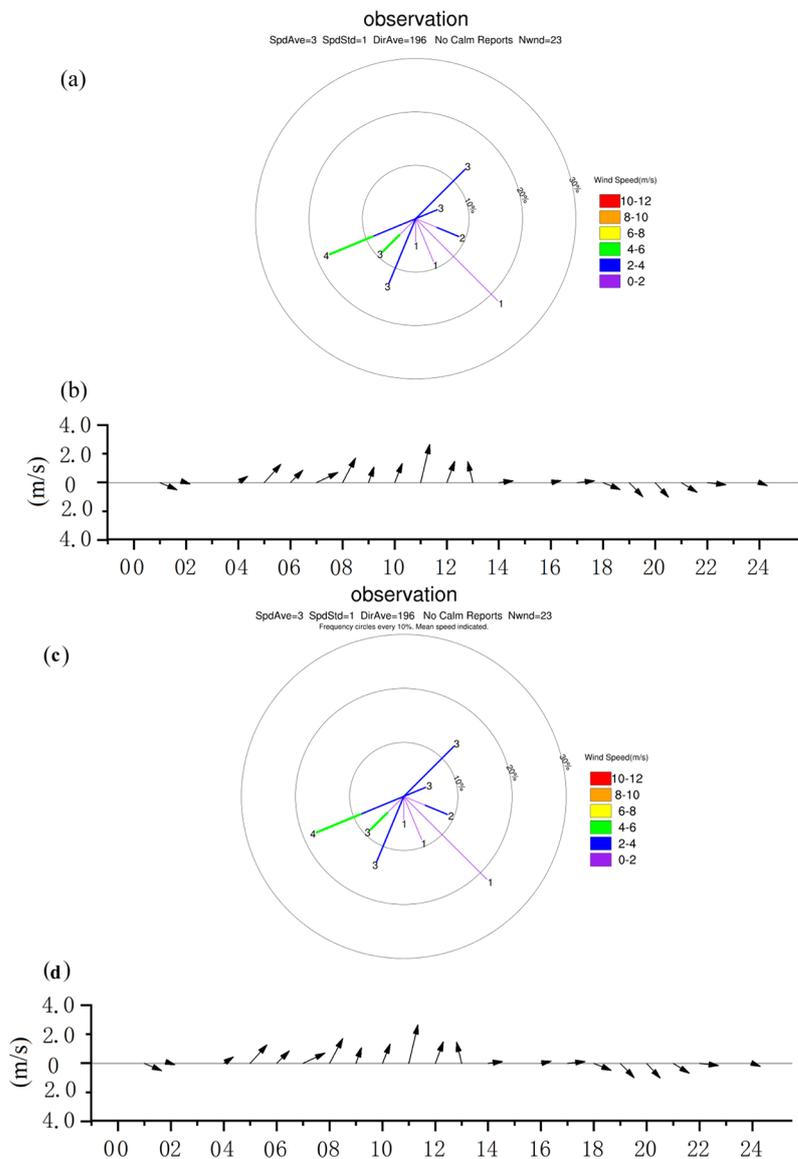
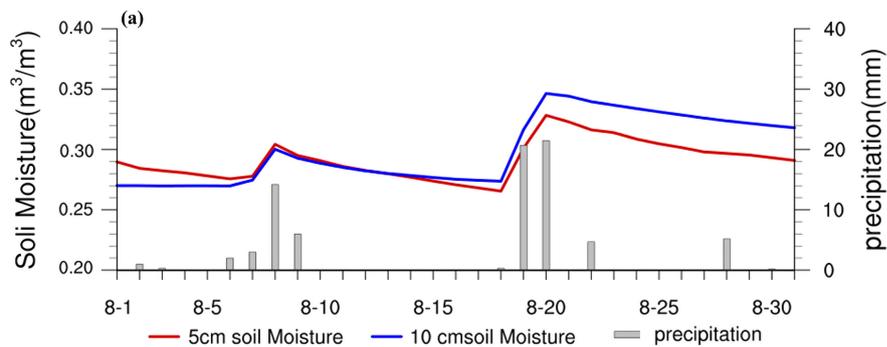


Figure 3. Wind direction and wind speed change ((a) Wind rose diagram of Jinzhou Dryland Flux Station; (b) Wind diurnal change diagram of Jinzhou Dryland Flux Station; (c) Wind rose diagram of Panjin Reed Wetland Flux Station; (d) Wind diurnal change diagram of Panjin Reed Wetland Flux Station)

图 3. 风向风速变化(图(a)锦州站风玫瑰图; 图(b)锦州站风向风速日变化时序图; 图(c)盘锦站风玫瑰图; 图(d)盘锦站风向风速日变化时序图)



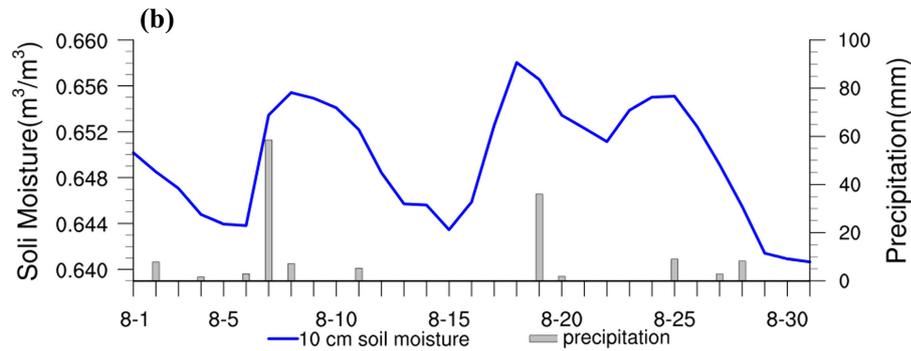


Figure 4. Diurnal variation of soil moisture ((a) Diurnal variation of soil moisture at each layer of Jinzhou Dryland Flux Station. (b) 10 cm diurnal variation of soil moisture at Panjin Reed Wetland Flux Station)

图 4. 土壤湿度日变化(图(a)锦州站各层土壤湿度日变化、图(b)盘锦站 10 cm 土壤湿度日变化)

度均大于 $0.64 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 接近饱和状态。此时, 盘锦芦苇水稻田正处于生长季蓄水期, 受季节性淹水的影响, 土壤湿度整体较大, 处于一年中较高水平。降水发生时, 10 cm 土壤湿度同样迅速增大, 但是由于土壤湿度接近饱和, 增量较小。土壤湿度降低的原因与锦州玉米旱地相同, 主要为蒸散损失。

土壤温度是陆气相互作用中的一个重要参量, 它能直接或间接的制约地表长波辐射, 净辐射, 以及土壤与大气的感热通量等能量交换过程。图 5(a)、图 5(b)为 2015 年 8 月锦州农田旱地土壤温度月变化和日变化情况; 图 5(c)、图 5(d)为盘锦芦苇湿地土壤温度月变化和日变化情况。锦州玉米旱地由于土壤热容量较大, 加之夏季长时间的热量积累, 5 cm 土壤温度与 10 cm 土壤温度相差不大, 其 8 月土壤温度平均值分别为 25.4°C 和 25.5°C ; 盘锦芦苇湿地由于地表有水体灌溉, 热容量较大, 土壤温度较低, 5 cm 土壤温度月平均值为 23.9°C , 10 cm 土壤温度月均值为 23.6°C 。受太阳辐射的影响, 土壤温度日变化趋势与太阳短波辐射的变化趋势相同, 呈准正弦特征。白天时, 土壤吸向下的太阳短波辐射, 温度不断上升, 浅层土壤(5 cm)于 14 时左右到达峰值; 夜间由于蒸散作用和湍流运动等的影响, 土壤将白天吸收

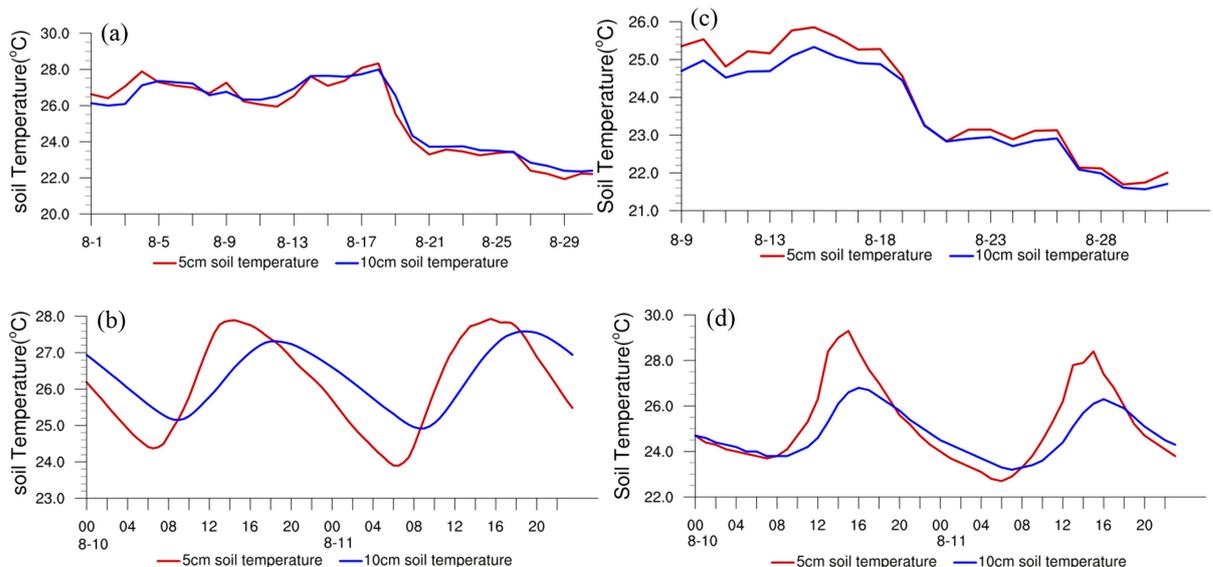


Figure 5. Soil temperature changes ((a), (b) Monthly and daily variations of soil temperature at different layers of Jinzhou Dryland Flux Station in August 2015; (c), (d) monthly and daily variations of soil temperature at different layers of Panjin Reed Wetland Flux Station in August 2015)

图 5. 土壤温度变化(图(a)、(b)为 2015 年 8 月锦州农田旱地通量站各层土壤温度月变化和日变化情况; 图(c)、(d)为 2015 年 8 月盘锦芦苇湿地通量站各层土壤温度月变化和日变化情况)

的热量传射给大气, 土壤温度逐渐减小, 于 06 时左右到达谷值。较深层土壤温度变化振幅小于浅层土壤, 相位滞后 2~3 小时。在降水发生后, 由于蒸发潜热较强, 土壤温度明显下降, 但是降温过程存在一定的滞后性。结合图 4 可以看出, 8 月 19~20 日锦州、盘锦地均发生了一次较大的降水过程, 此后土壤温度明显降低。

3.2. 地表辐射特征分析

地表辐射和能量平衡是近地层陆面与大气进行物质和能量交换的驱动力。地表吸收的辐射主要来自太阳短波辐射和大气长波辐射。由于盘锦站在观测过程中对地表辐射分量数据缺失, 故本文仅对锦州玉米旱地通量站的地表辐射和地表能量特征进行分析。

向下短波的最大值一般出现在夏季, 锦州和盘锦通量站近乎位于同一纬度, 海拔高度也几近相同, 因此两地的向下短波差异主要受云和降水等因素的影响。选取 8 月 10 日~8 月 13 日为个例分析锦州玉米旱地地表辐射特征(图 6), 其中 8 月 10 日~8 月 11 日存在一次降水过程, 8 月 12 日~8 月 13 日为晴天。夜间时, 无向下短波辐射, 日出后其逐渐增大, 一般在 13:00~14:00 时达到峰值, 随后逐渐减小。在晴天条件下, 向下短波辐射呈现完美的弧形, 锦州站向下短波辐射日变化峰值在 1000 W/m^2 左右。由于受对流云系的影响, 向下短波辐射有明显的突然降低现象。锦州站向上短波辐射日变化情况与向下短波辐射基本一致, 但辐射强度较低, 其日变化峰值在 170 W/m^2 左右。向上长波辐射日变化峰值在 520 W/m^2 左右, 向下长波辐射日变化峰值在 420 W/m^2 左右, 与向上长波辐射相比, 向下长波辐射日变化振幅较小。受太阳辐射影响, 日出后, 地表吸收太阳辐射而升温, 向上长波辐射逐渐增大, 在 12:00~14:00 左右达到峰值, 向下长波辐射的日变化特征与向上长波辐射的日变化特征趋势基本一致, 但是稍有稍滞。

2015 年 8 月锦州农田旱地下垫面净辐射月平均值为 122.2 W/m^2 , 其变化范围为: $-87.9 \text{ W/m}^2 \sim 746.3 \text{ W/m}^2$ 。地表净辐射峰值无明显的增大或减小趋势时, 说明此时天气气候条件较为稳定。净辐射日变化呈

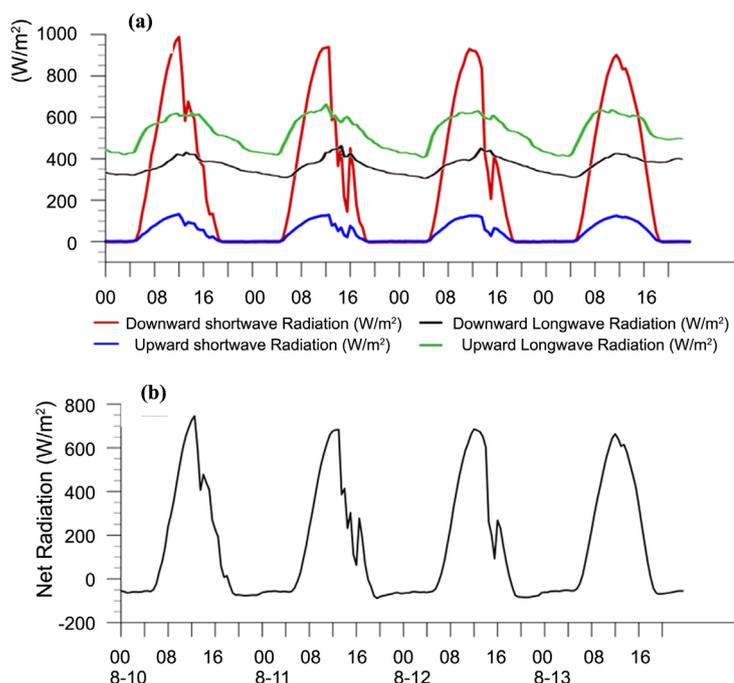


Figure 6. Four components of surface radiation and change of net radiation at Jinzhou Flux Station from 10 to 13 August 2015 ((a) Four components of surface radiation, (b) Net radiation)

图 6. 2015 年 8 月 10~13 日锦州通量站地表辐射四分量及净辐射变化(图(a)地表辐射四分量, 图(b)净辐射)

典型的单峰型, 其峰值在 760 W/m^2 左右, 显略小于锡林郭勒、吉林榆中、内蒙古、锡林浩特、内蒙古站等半干旱地区的观测结果。净辐射的日变化特征与向下短波辐射的日变化特征基本相同。夜间时, 净辐射通量为负值, 说明此时地表向大气传输能量, 夜间净辐射平均值为 -72.2 W/m^2 。

地表反照率是地表能量平衡中的关键参数之一, 它决定了地表吸收太阳辐射的能力。地表在接受太阳辐射的同时也会以一定的比率向上反射太阳辐射。地表反照率一般可表示为太阳总辐射与反射太阳辐射之比。下垫面类型、太阳高度角及天气情况都会对地表反照率产生影响。2015年8月, 不计算夜间数据的锦州玉米旱地反照率月平均值为 0.15。图 7 为锦州玉米旱地地表反照率的日变化特征, 其中图 7(a) 为晴天个例的反照率变化特征; 图 7(b) 为存在降水过程时反照率的变化特征。图 7(a) 中反照率呈明显的“U”型变化, 日出时反照率较大, 之后逐渐减小, 傍晚又逐渐增大。出现这种变化特征的原因是: 清晨时, 太阳高度角较小, 地表反照率较大, 加之此时锦州通量站的昼夜温差较大且夜间风速接近于零, 这种气象条件容易使水汽在植被叶面上凝结形成露珠。由于水的反射更强, 也会致使日出时反照率增大, 日出后太阳高度角不断增大、水汽逐渐蒸发, 反照率有所降低。图 7(b) 为阴雨天时地表反照率的变化情况, 可以看出阴天时地表反照率变化较小, 且呈不规律变化。

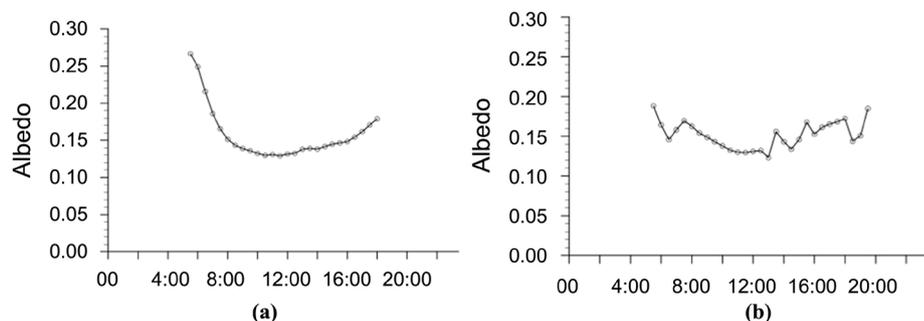


Figure 7. Change of surface albedo of maize in Jinzhou Dryland Flux Station ((a) Diurnal variation of surface albedo in clear days, (b) Diurnal variation of surface albedo in cloudy and rainy days)

图 7. 锦州玉米旱地地表反照率变化(图(a)晴天时地表反照率日变化、图(b)阴雨天时地表反照率日变化)

3.3. 地表能量特征分析

在陆面过程中, 地表和大气之间的能量交换过程是影响气候变化和大气环流的重要因子。向下的太阳短波辐射和大气长波辐射是地表能量的主要来源。地表能量交换过程主要包括地表辐射平衡和地表热量平衡。由于地理位置, 地表特征(土壤性质, 植被覆盖)等因素的不同, 不同地区的地表能量交换特征也不尽相同。

在气象学中, 一般认为潜热通量是下垫面与大气之间水分的热交换, 是大气中水发生相变时引起的能量交换。锦州农田下垫面潜热通量月平均值为 70 W/m^2 , 夜间潜热通量平均值为 -42 W/m^2 ; 盘锦站潜热通量日均值变化范围为 $406.6 \text{ W/m}^2 \sim -251.4 \text{ W/m}^2$, 月平均值为 96.6 W/m^2 , 夜间感热通量平均值为 -35.8 W/m^2 。夏季时, 两通量站周围的农作物都处于生长季, 较为茂盛。因此, 叶面潜热不是导致两地感热通量存在差异的主要原因。此时的地表潜热通量主要以土壤蒸发潜热为主, 由于盘锦站此时处于水稻蓄水期, 蒸发量较大, 使得该地区潜热通量较大。此外, 降水也是引起潜热通量变化的原因, 降水时, 潜热通量增大。

感热是近地层中因温度变化致使大气和下垫面之间产生湍流运动, 进而引起的地表和大气之间的能量交换过程。夏季感热通量最大值显著大于其他季节。晴天时地表能量通量以感热为主, 阴天或存在降水过程时, 感热降低。夜间时, 由于地表温度低于近地层空气温度, 空气将能量传到地表, 此时的感热

通量为负值, 锦州玉米旱地夜间感热通量平均值为 -42.4 W/m^2 , 最大值为 -411.9 W/m^2 , 盘锦芦苇湿地夜间感热通量平均值为 -43.4 W/m^2 , 最大值为 -161.1 W/m^2 , 此时能量由大气向地表向下传递。夏季锦州农田旱地感热通量平均值为 26.2 W/m^2 ; 盘锦芦苇湿地感热通量平均值为 13.4 W/m^2 。两地区感热通量显著小于潜热通量, 这说明辽宁环渤海地区夏季地表和大气之间的能量传输以潜热输送为主, 与文小航[13]等对于东北地区夏季辐射特征的研究结果相符。

观测试验都会存在能量不闭合的问题, 本文采用能量闭合比率 EBR 法(energy balance ratio)及最小二乘法来对锦州玉米旱地农田通量站地表能量闭合度进行分析。地表能量平衡方程可以用式 1 表示

$$H + LE = Rn - G - S - Q \quad (1)$$

其中 G 为地表热通量, S 为植被冠层间储量的热量, Q 为其他形式的热源(汇)。锦州通量站下垫面植被类型为玉米作物, 植被冠层较低, S 和 Q 可忽略不计。由于土壤热通量板放置时距离地表有一定的埋深, 地表热通量很难直接测量, 因此可以由式 2 通过 5 cm 土壤热通量计算出地表热通量

$$G = G_z + \int_0^z C_s \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (2)$$

G_z 为深度为 z 处的土壤热通量; T 为深度为 z 处的土壤温度; C_s 为土壤体积热容量, 本文所用的深度为 5 cm 。 C_s 可由以下公式计算得

$$C_s = (1 - \eta_s) \rho_s C_s + \eta_w \rho_w C_w \quad (3)$$

土壤体积热容量为单位干土壤体积热容量与单位体积土壤中所含液态水热容量之和。 $(1 - \eta_s) \rho_s C_s$ 为干土壤体积热容量, 锦州农田下垫面土壤类型为棕壤, 查表得其对应的 C_s 为 $2400 \text{ KJ/(m}^3 \cdot \text{K)}$, η_w 为 5 cm 处单位体积土壤含水量, ρ_w 为液态水的密度, C_w 为液态水的比热容。经计算, 锦州玉米旱地通量站地表热通量月均值为 6.4 W/m^2 。

地表能量闭合比率 BER 可以表示为

$$\text{EBR} = \frac{\sum(H + LE)}{\sum(Rn - G)} \quad (4)$$

即湍流通量和有效能量的比值。经计算, 在考虑夜间时次、忽略冠层及土壤热量储存的情况下, 锦州通量站的能量闭合率为 0.76 。图 8 为考虑夜间时次, 锦州玉米旱地通量站 2015 年 8 月全天的能量闭合度分析。

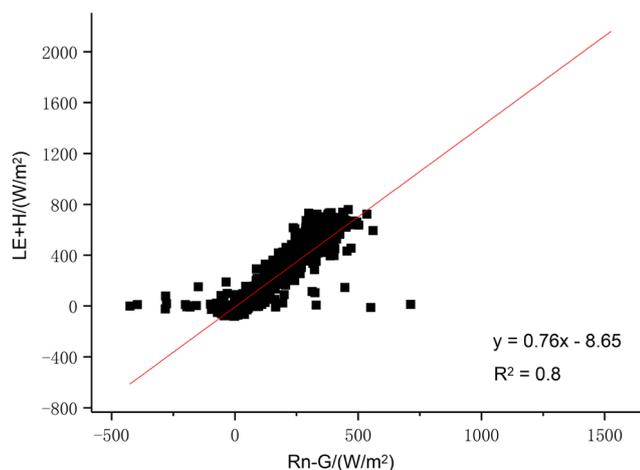


Figure 8. Surface energy closure rate
图 8. 地表能量闭合率

地表能量不闭合问题是地表能量观测系统的通病, 国内外的几乎所有的观测试验都存在能量不闭合的问题。造成地表能量不平衡的因素诸多, 比如辐射分量观测误差, 涡度观测系统不满足理想的假设条件, 植被冠层及土壤中的热存储量误差, 下垫面的平流误差及中尺度对流误差, 仪器误差等。

4. 结论

通过对 2015 年夏季辽宁环渤海地区近地层及地表气象要素、地表辐射四分量 and 地表能量各分量观测资料的分析, 本章主要得出以下结论:

1) 两观测站点近地层气温与相对湿度具有明显的昼夜变化特征, 锦州站和盘锦站的 2 m 气温月平均值分别为 24.2℃和 25℃, 锦州玉米旱地昼夜温差较大, 最大日较差可达 15.5℃; 2 m 相对湿度月平均值为 74.8%和 78.9%; 由于东北夏季降水主要受东北冷涡影响, 降水日数较多, 降水较为分散, 降水发生后浅层土壤湿度快速增大, 较深层土壤稍滞后。锦州玉米旱地 5 cm 和 10 cm 土壤湿度月均值分别为 0.18 m³/m³和 0.20 m³/m³。研究期间, 盘锦芦苇湿地为蓄水期, 土壤湿度接近饱和状态, 10 cm 土壤湿度均大于 0.64 m³/m³; 土壤温度呈准正弦变化, 较深层土壤升温相比浅层土壤滞后, 锦州站 5 cm 和 10 cm 土壤温度分别为 25.4℃和 25.5℃, 盘锦站 5 cm 和 10 cm 土壤温度分别为 23.9℃和 23.6℃。锦州玉米旱地 8 月平均风速为 1.6 m/s, 盘锦芦苇湿地的平均风速为 2.6 m/s, 受海陆热力差异的影响, 两地区以偏南风为主导风, 风速风向呈明显的海陆风变化特征。

2) 锦州农田旱地晴天下短波辐射月平均为 271.8 W/m², 其变化范围为 73.4W/m²~303.1 W/m², 晴天时向下短波最大值为 988 W/m²; 向上短波辐射月平均值为 33.3 W/m², 其变化范围为 43.5W/m²~13.6 W/m², 日最大值为 128.7 W/m², 锦州站向下长波辐射在 338.0~465.7 W/m² 之间变化, 平均值为 438.6 W/m²; 锦州农田旱地下垫面净辐射通量平均值为 146.1 W/m², 净辐射日变化呈典型的单峰型变化, 峰值可达 45 W/m²左右, 夜间净辐射平均值为-72.2 W/m²。辽宁环渤海地区夏季地表和大气之间的能量传输以潜热输送为主, 锦州农田下垫面感热通量平均值为 26.2 W/m², 潜热通量平均值为 70 W/m²; 盘锦芦苇湿地下垫面感热通量平均值为 13.4 W/m², 潜热通量平均值为 96.6 W/m²。夜间感热通量和潜热通量均为负值, 此时大气向地表输送能量。2015 年 8 月, 不计算夜间数据的锦州玉米旱地反照率月平均值为 0.15, 反照率呈明显的“U”型变化。与其他野外观测试验相同, 本研究也存在能量不闭合的问题。经计算, 在考虑夜间时次、忽略冠层及土壤热量储存的情况下, 锦州通量站的能量闭合率为 0.76。

致 谢

感谢中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金资助项目(项目编号: 2016SYIAE16)。

参考文献

- [1] 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 189-210.
- [2] Wang, J.M., Liu, X.H. and Ma, Y.M. (1992) Turbulence Structure and Transfer Characteristics in the Surface Layer of HEIFE Gobi Area. *Journal of the Meteorological Research*, 6, 92-104.
- [3] Wang, J.M. and Mitsuta, Y. (1992) Evaporation from the Desert: Some Preliminary Results of HEIFE. *Boundary Layer Meteorology*, 59, 413-418. <https://doi.org/10.1007/BF02215461>
- [4] “黑河试验”核心小组. 黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)[J]. 地球科学进展, 1991, 6(4): 34-38.
- [5] 胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 30-34.
- [6] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 225-236.
- [7] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 石立庆. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 378-389

- [8] 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 符淙斌, 石立庆. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 108-118.
- [9] 姜纪峰, 延晓冬, 黄耀, 郭维栋, 刘辉志, 王淑瑜. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 413-424.
- [10] 赵哈林, 张铜会, 崔建垣, 等. 近 40 年我国北方农牧交错区气候变化及其与土地沙漠化的关系[J]. 中国沙漠, 2000, 20(s2): 1-6.
- [11] 贾庆宇, 于文颖, 谢艳兵, 梁成华, 吕国红, 王笑影, 温日红, 刘晶淼. 芦苇湿地与玉米旱地近地层小气候特征对比[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 148-154.
- [12] 张兵兵, 李荣平, 史奎桥, 李得勤, 刘景利, 刘志刚, 刘辉, 杨扬, 黄岩, 梁涛. 日光温室气温变化及其影响因子分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(8): 200-205.
- [13] 文小航, 董文杰, 廖小罕. WRF 模式对东北半干旱区夏季辐射收支与能量平衡的模拟研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2196-2203.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org