

第六届区域气候变化监测与检测学术研讨会

# 黄河源土壤冻融过程中陆-气间的水热交换特征分析

武月月

成都信息工程大学

2021.10.22

# 目录

- 一、研究意义
- 二、研究区域与方法
- 三、结果分析
- 四、主要结论

---

—

# 研究意义

---

# 1.1 研究意义

黄河源区位于青藏高原东北部，是我国重要的水源涵养区，也是三江源国家自然保护区的重要组成部分。该区植被类型以高寒沼泽草甸、高寒草甸和高山草原化草甸为主（金会军等，2010；文军等，2011）。高寒草原对气候变化和水分循环过程较为敏感，而且高寒草原水热交换的季节变化特征显著（陈琼等，2010）。

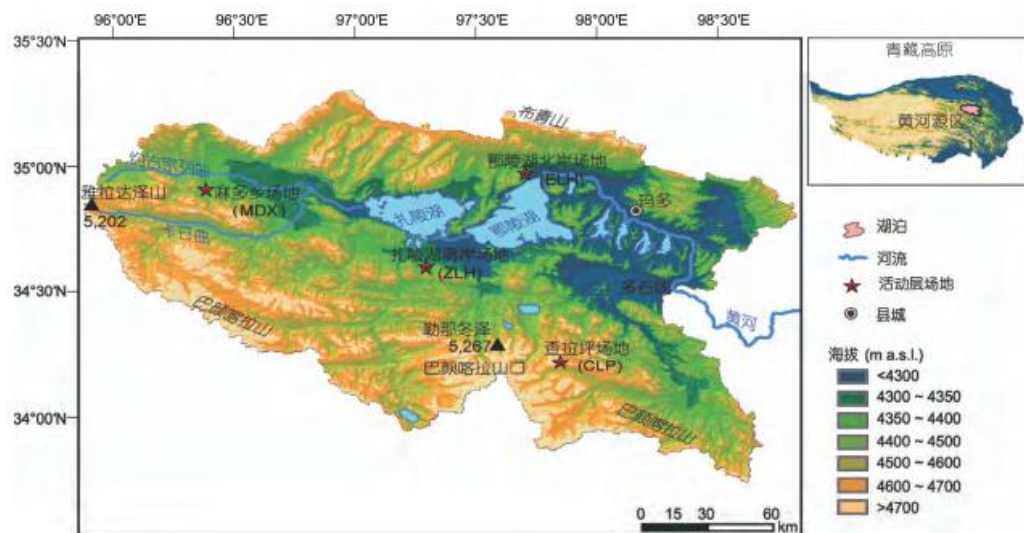


图1.1 黄河源区 (陈金雷等, 2017)

冻融过程是冻土环境过程的主要组成部分，其中水与冰的相变过程导致地表能量和水分的变化，对陆-气间水热过程产生重要作用（杨梅学等，2006；李述训等，2002；Zhang et al, 1998）。

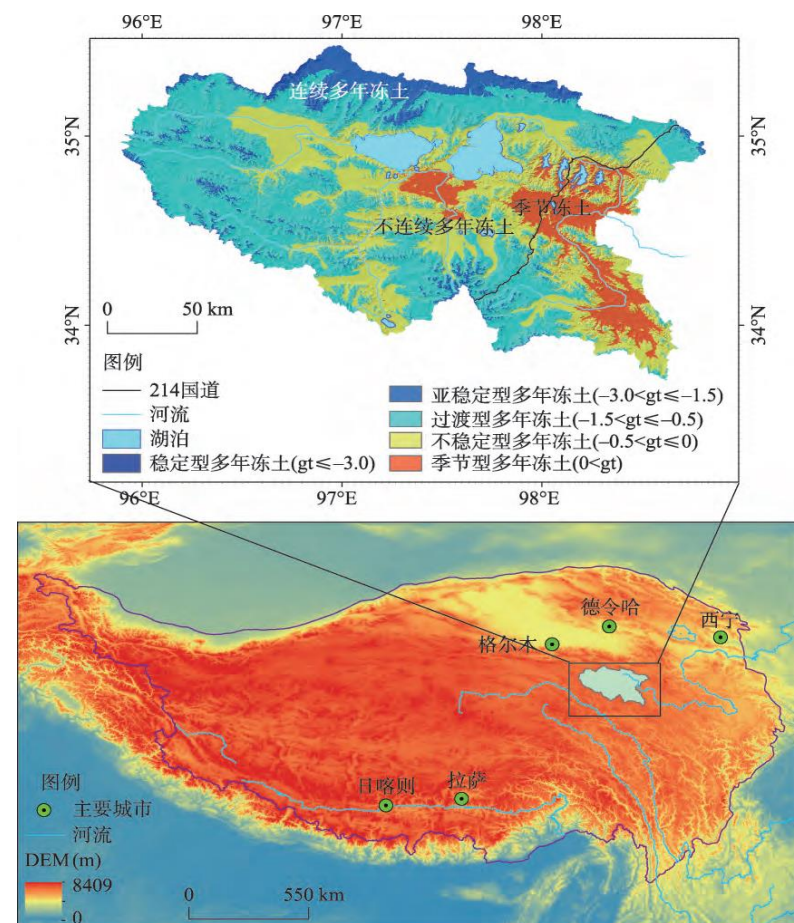


图1.2 黄河源区冻土现状分布图 (马帅等, 2017)

研究高寒草原冻融循环与陆-气间水热交换的变化特征，对研究其对气候变化的响应、生态环境的影响及冻土退化等方面都有重要意义。

## 1.2 研究现状

土壤温湿变化会极大地影响冻融过程。（杨梅学等，2006；王学佳等，2012；戴黎聪等，2020）



土壤冻融过程，各地表能量通量变化显著，对陆-气间水热交换有重要影响。（Guo et al, 2011；陈渤黎等，2014；李光伟等）



陆面模式能够较好地模拟出各层土壤的冻融变化趋势与水热交换，但相应的参数化方案有待改进。（夏坤等，2011；谢志鹏等，2017）

然而，由于黄河源区地形复杂，冻土所占面积较大，不同冻土分布疏散，目前对土壤冻融过程中，各水热交换通量的差异特征还需进一步探究，且利用模式模拟研究冻融过程，潜热及感热通量变化的也较少。

黄河源区的冻融情况如何？  
它与水热交换有什么关系？  
陆面模式模拟结果怎样？

---

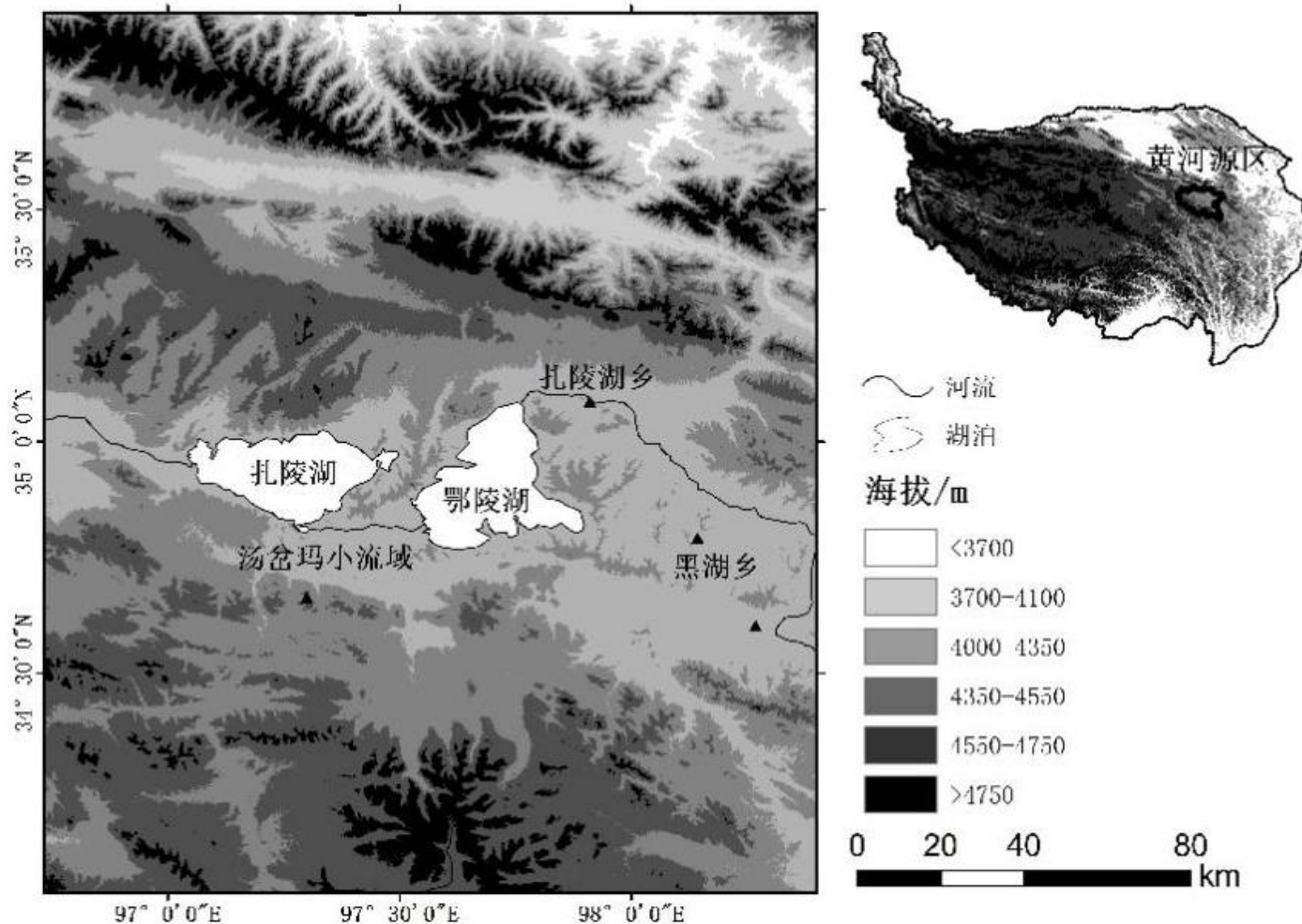
二

## 研究区域与方法

---

## 2.1 研究区域

黄河源区位于青藏高原多年冻土区边缘，其冻土基本特征为**厚度薄、地温高、热稳定性差**。汤岔玛小流域地处于黄河源头地区的扎陵湖和鄂陵湖附近的汤岔玛盆地边缘，植被覆盖度达到90%以上，盆地内**不连续和岛状多年冻土**交错分布。两湖位于黄河源头的玛多县境内，是源区最大的两个外流淡水湖（唐恬等，2013；李照国等，2012）。



## 2.2 数据介绍

表2.1 站点观测要素

观测项目	仪器	主要参数
感热通量	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O气体分析仪, CSAT3	Ux精度: 1.0mms <sup>-1</sup> , Uy精度: 1.0mm·s <sup>-1</sup> , Uz精度: 1.0mm·s <sup>-1</sup> (CSAT3)
潜热通量	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O气体分析仪, CSAT3	工作温度: -30 ~ 50°C, CO <sub>2</sub> 灵敏度: 0.2mg·m <sup>-3</sup> H <sub>2</sub> O灵敏度: 0.004g·m <sup>-3</sup> (气体分析仪)
土壤温度	109L, Campbell	量程: -50 ~ 70°C, 互换性误差: -10 ~ 70°C
土壤湿度	CS616, Campbell	精度: 2.5%VWC (Variable Water Content) ; 分辨率: 0.1%VWC
辐射	NR01, Hukseflux	精度: 10%; 工作温度: -40 ~ 80°C
土壤热通量	NR01, Hukseflux	精度: 10%; 工作温度: -40 ~ 80°C

数据：汤岔玛小流域2014年-2015年的涡动系统数据及气象观测资料  
模式中制作**大气强迫场**需要用到降水、风速、相对湿度、向下短波辐射、  
向下长波辐射、气压、气温



## 2.3 研究方法

### (1) 土壤冻融划分方法

基于Guo et al (2011b) 的方法（用日最高温和日最低温来划分土壤冻融的四个阶段）。

并且，由于相邻两个阶段时间内由温度确定所属的阶段有不确定性，Guo et al (2011b) 将连续三天满足下一阶段的温度条件时，将第一天视为下一阶段的起始日期。

表2.2 冻融划分判据

阶段	划分判据
完全融化	日最低温度 $>0.0^{\circ}\text{C}$
融冻阶段	日最高温度 $>0.0^{\circ}\text{C}$ ，日最低温度 $<0.0^{\circ}\text{C}$
完全冻结	日最高温度 $<0.0^{\circ}\text{C}$ 且含水量 $<0.1$
冻融阶段	日最高温度 $>0.0^{\circ}\text{C}$ ，日最低温度 $<0.0^{\circ}\text{C}$

## 2.3 研究方法

### (1) 土壤热通量

$$G_0 = G_{5cm} + \rho_s C_s \times (0.05 \times \frac{T_{av}(t+\Delta t) - T_{av}(t)}{\Delta t}) + \rho_w L_f \times (0.05 \times \frac{\theta_w(t+\Delta t) - \theta_w(t)}{\Delta t}),$$

当土壤处于完全融化阶段时:

$$\rho_s C_s = \rho_{dry} C_{dry} + \rho_w C_w \theta_{w5cm}$$

当土壤处于融冻、冻融和完全冻结阶段时:

$$\rho_s C_s = \rho_{dry} C_{dry} + \rho_w C_w \theta_{5cm} + \rho_i C_i \theta_{i5cm}$$

$G_{5cm}$ : 5.0cm热通量,  $\rho_s$ : 土壤密度 (单位:  $kg \cdot m^{-3}$ ),  $C_s$ : 土壤比热容 (单位:  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

### (2) 能量平衡方程

$$R - G = H + LE + Sp + Sa$$

$Sp$ : 光合作用热储存项, 同化  $1mgCO_2 m^{-2} \cdot s^{-1}$ , 所吸收的能量  $11.2W \cdot m^{-2}$  (Meyers et al, 2004)

$Sa$ : 空气热储存项, 主要是由气温变化和湿度变化引起

$$Sa = C_a \int_0^h \frac{\partial T_a}{\partial t} dz, \quad T_a: \text{气温 (单位: } K), \quad C_a: \text{湿空气的体积热容量, } h: \text{涡动相关系统安装高度}$$

## 2.3 研究方法

### (3) CLM模式

通用陆面模式 (Community Land model, CLM) 是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的新一代陆面模式, 为通用地球系统模式( Community Earth System Model ) 的陆面模块, 主要包括了生物物理过程、水文循环过程、生物地球化学过程和动态植被过程。相较于之前的CLM版本, CLM5.0更换了气孔导度模型 ( Medlyn et al, 2011) , 提高了土壤状态的模拟精度, CLM5.0对土壤温度的模拟优于CLM4.5(Lawrence et al, 2019; Melton et al, 2019)。

模式中感热、潜热的计算方法:

$$H = -\rho_{\text{atm}} C_p \frac{(\theta_{\text{atm}} - \theta_s)}{r_{\text{ah}}}$$

$$E = -\rho_{\text{atm}} \lambda \frac{(q_{\text{atm}} - q_s)}{r_{\text{aw}}}$$

$r_{\text{ah}}$ 是大气对热量输送的阻抗

$r_{\text{aw}}$ 是对水汽输送的阻抗

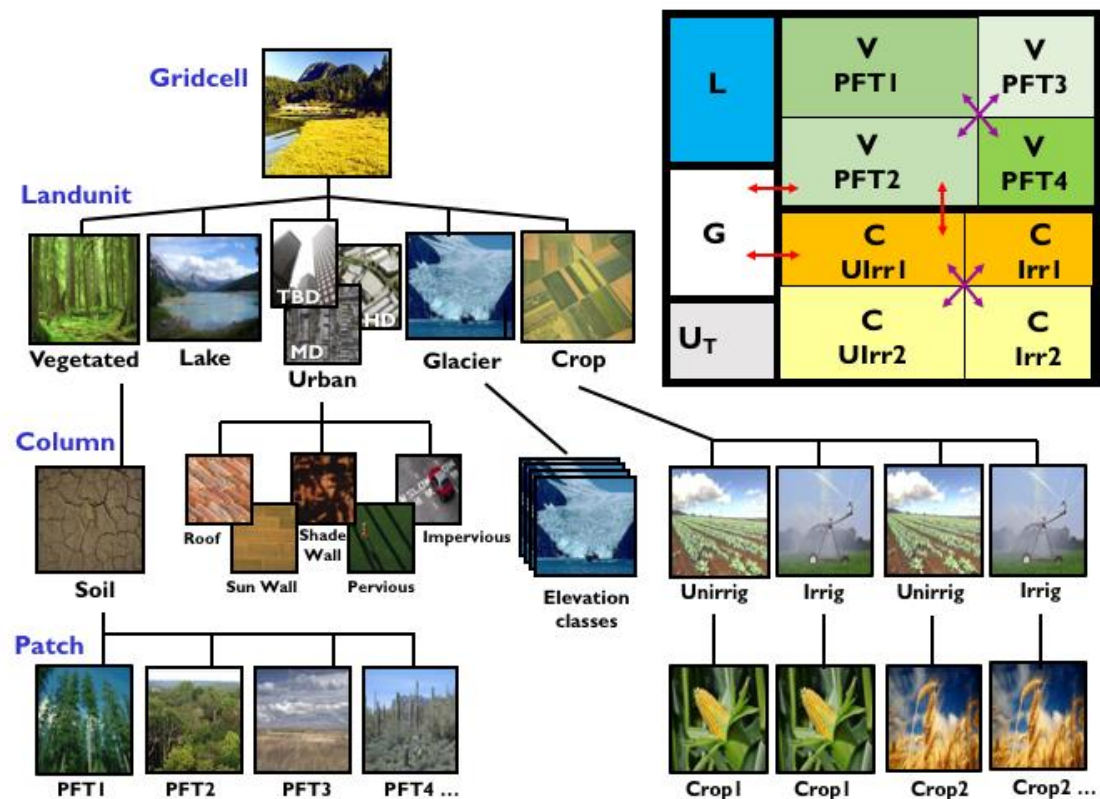


图2.2 配置CLM子网格层次结构(Lawrence et al, 2019)

---

三

# 结果分析

---

# 3.1 汤岔玛小流域冻融阶段划分

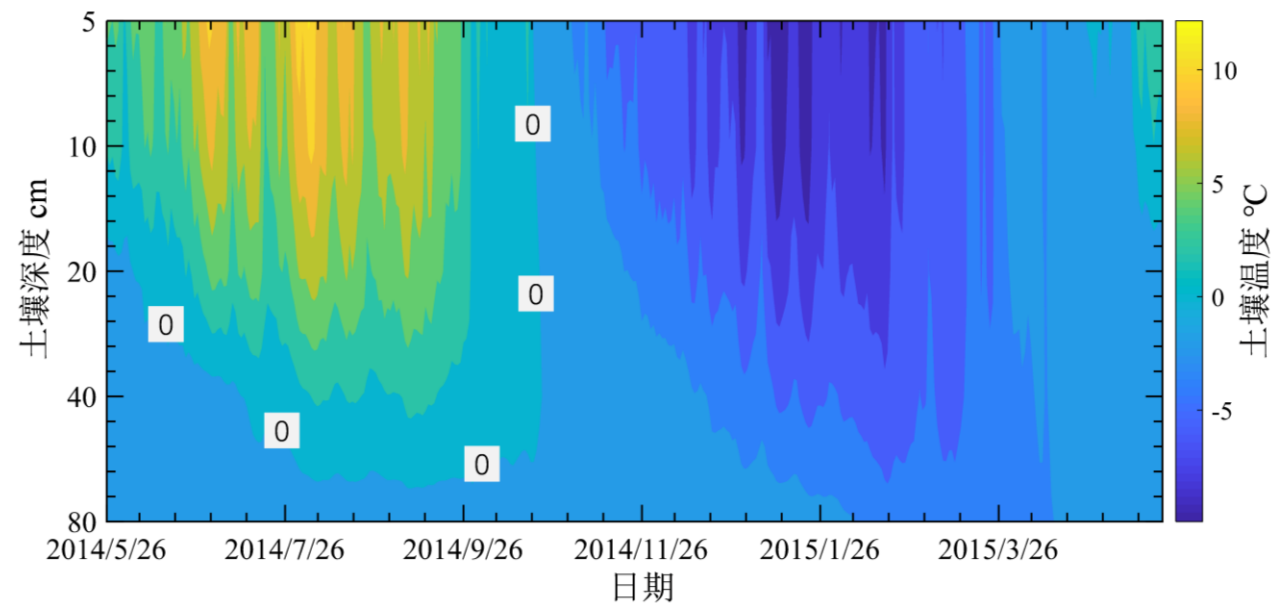


图3.1 土壤温度剖面图

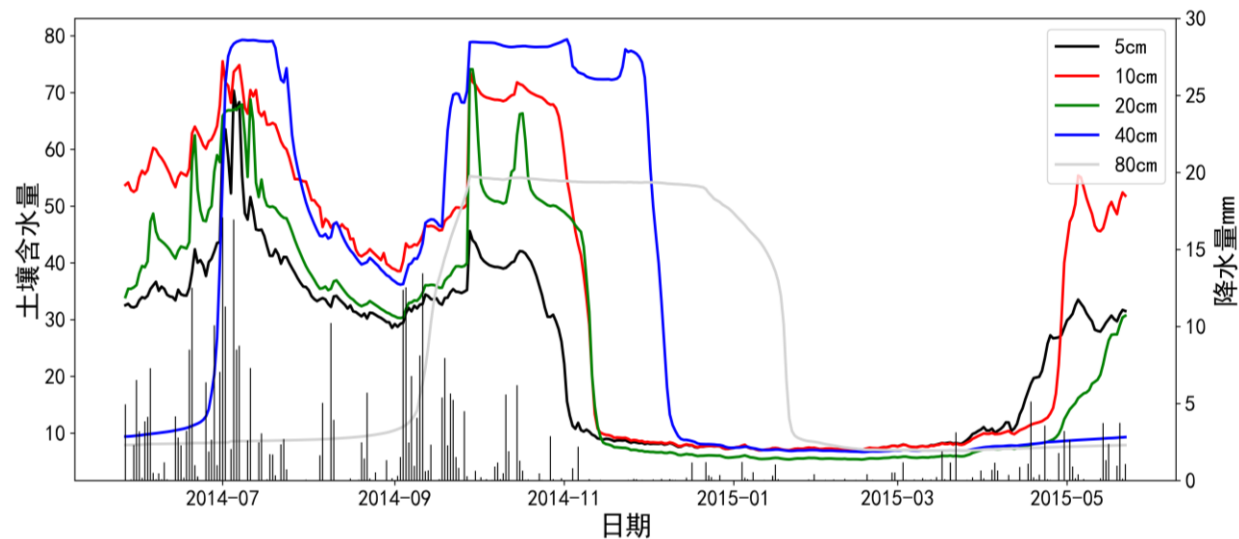


图3.2 土壤含水量与降水量剖面图

冻融过程  $\xrightarrow{\text{冻融变化快}}$  时间短

完全冻结  
融化阶段  $\xrightarrow{\text{开始早 结束晚}}$  跨度长

表3.1 各冻融阶段的划分

时间	天数 (d)	阶段
2014年5月26日-9月27日	125	完全融化
2014年9月28日-11月7日	41	融冻阶段
2014年11月8日-2015年4月12日	156	完全冻结
2015年4月13日-5月22日	40	冻融阶段

## 3.2 冻融过程中陆-气间水热交换通量的年变化

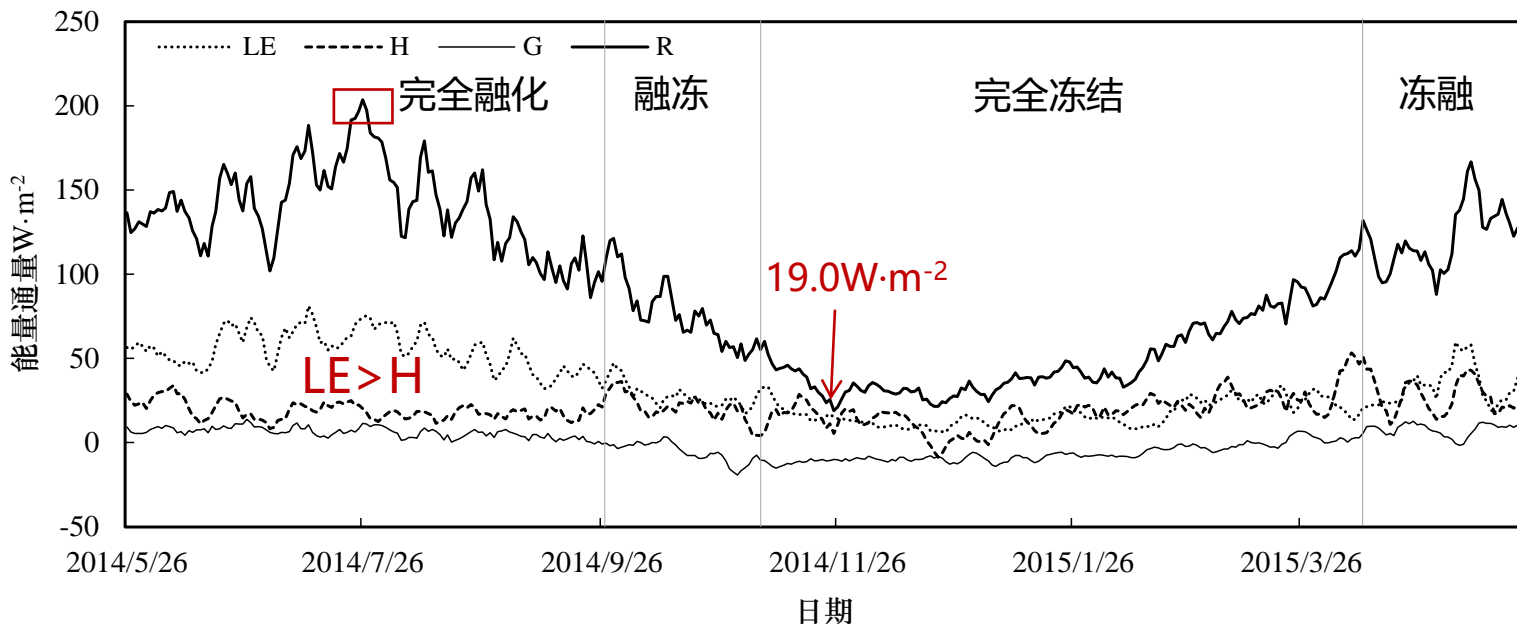


图3.3 水热交换通量的年变化

完全融化阶段，净辐射最大值达到了  $203.7 W \cdot m^{-2}$ ，有79天潜热通量日平均值超过了  $50.0 W \cdot m^{-2}$ ；最小值为  $19.0 W \cdot m^{-2}$ 。

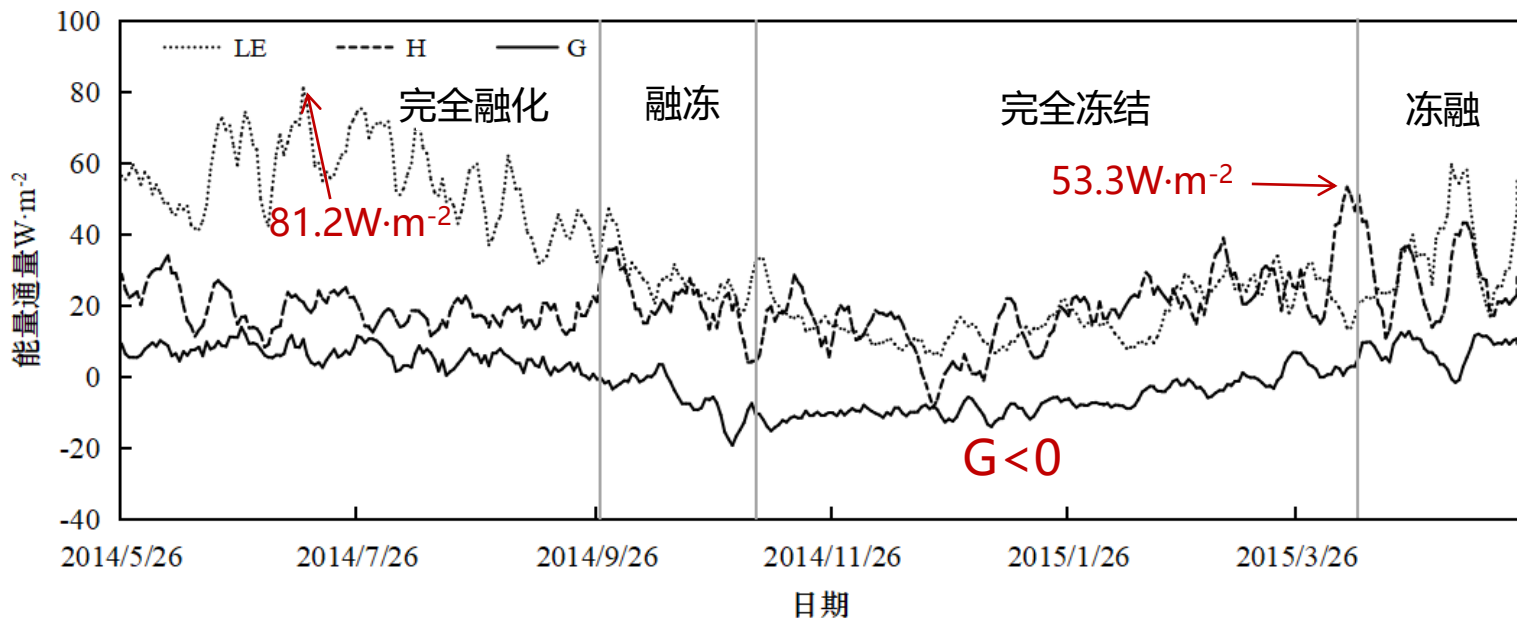
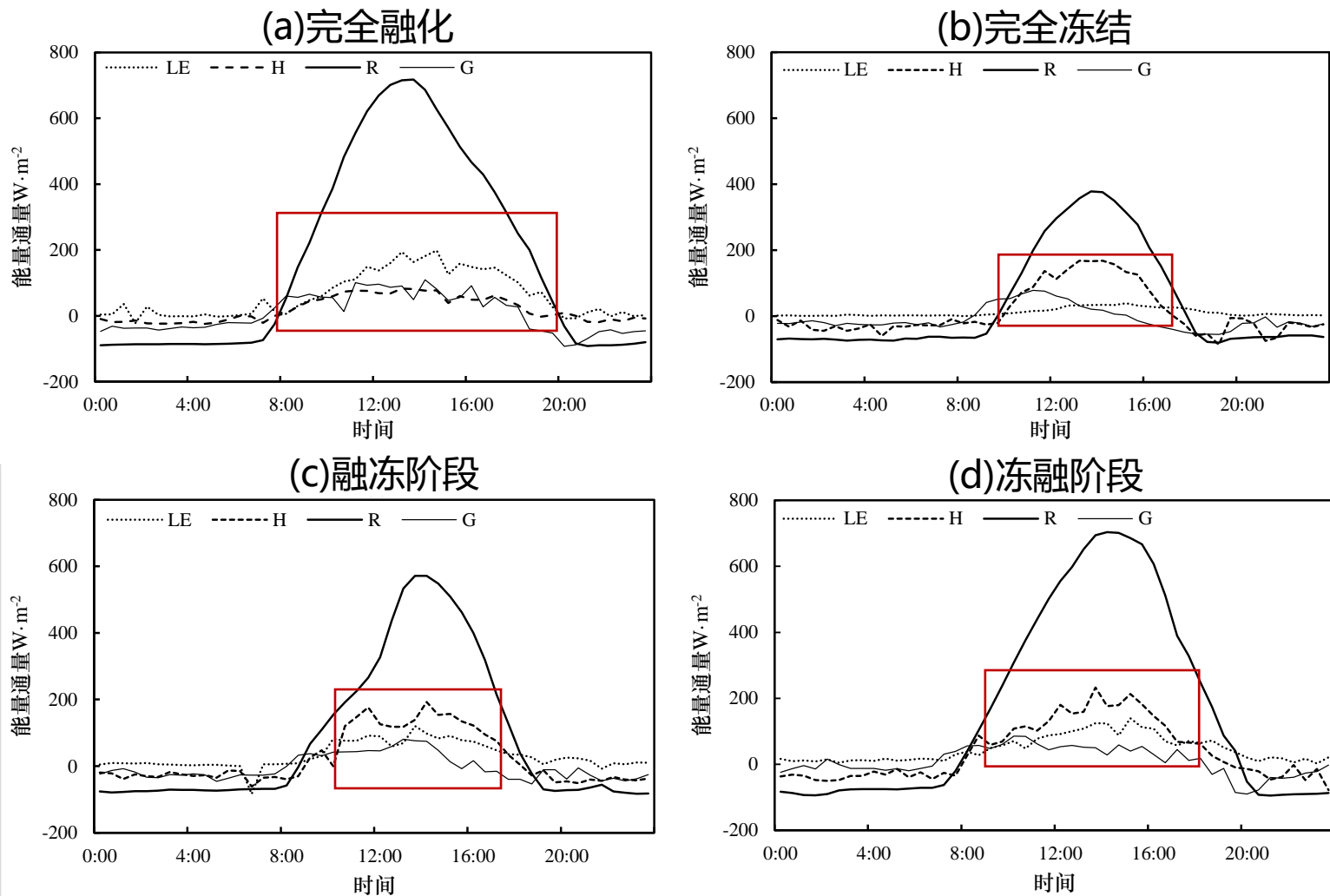


图3.4 水热交换通量的年变化

完全融化：潜热最大  $81.2 W \cdot m^{-2}$

完全冻结：感热最大  $53.3 W \cdot m^{-2}$

### 3.3 冻融过程中陆-气间水热交换通量的日变化



净辐射完全融化阶段最大，达到了  $717.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，完全冻结阶段最小，为  $378.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，融冻阶段和冻融阶段次之。

完全融化：潜热 > 感热

完全冻结：潜热 < 感热

冻融阶段在 13:30，潜热与感热差值达到  $108.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

融冻阶段在 14:00，潜热与感热差值达到  $94.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

图3.5 水热交换通量的日变化

(分别选取每个阶段相邻3天典型晴天日)

### 3.4 模拟后划分冻融阶段

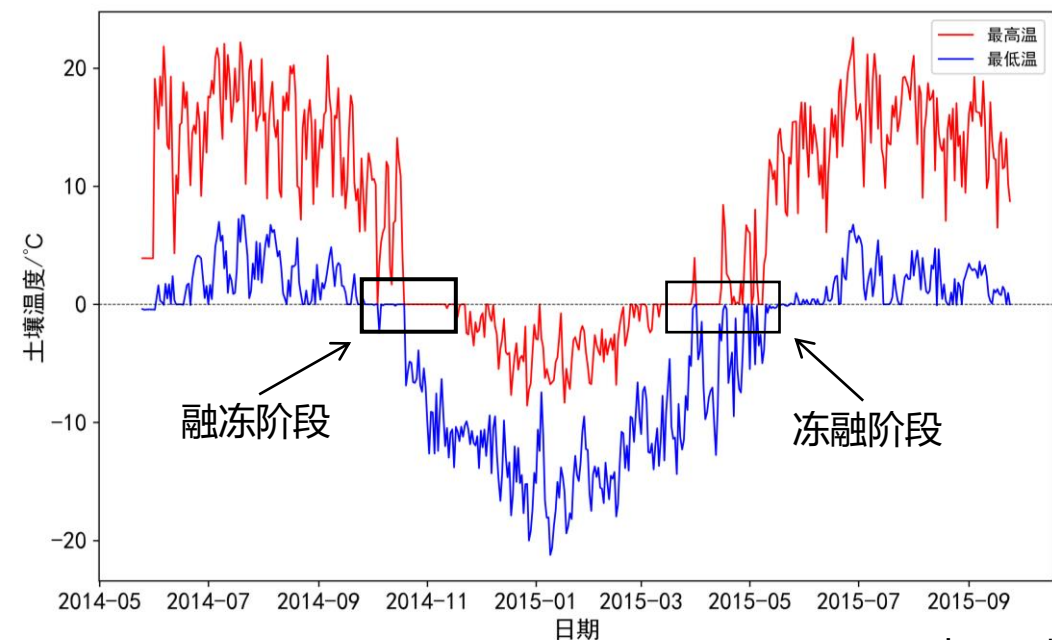


图3.6 土壤最  
值温度

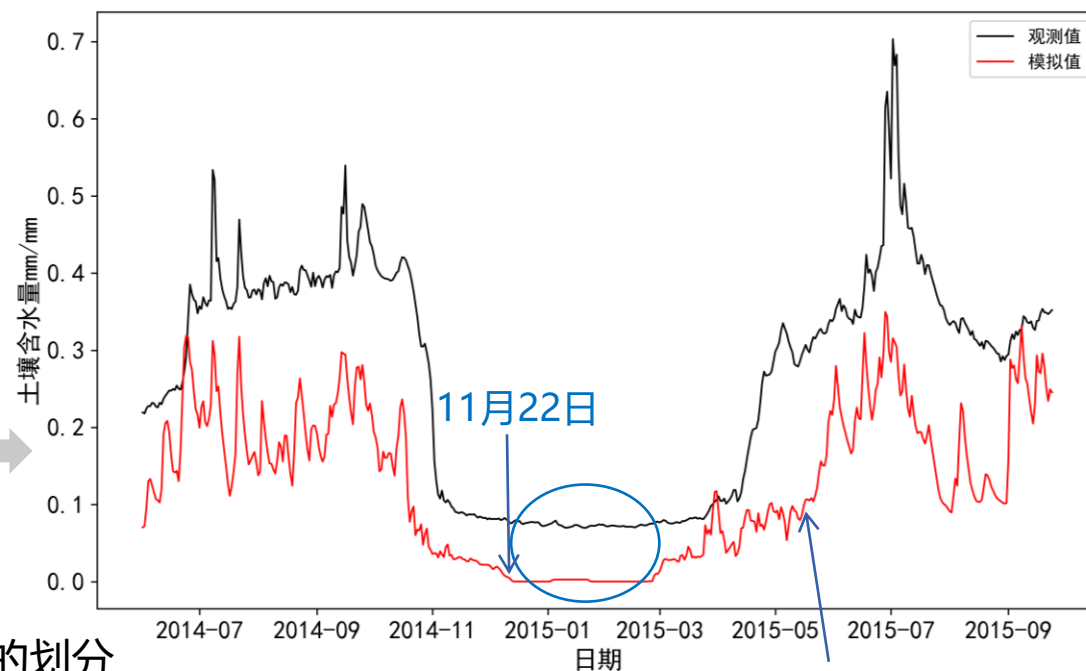


图3.7 土壤含  
水量比较

表3.2 模拟后各冻融阶段的划分

时间	天数 (d)	阶段
2014年5月26日-9月26日	126	完全融化
2014年9月27日-11月22日	57	融冻阶段
2014年11月23日-2015年3月11日	109 <span style="color: red;">47↓</span>	完全冻结
2015年3月12日-5月23日	<b>73</b> <span style="color: red;">33↑</span>	冻融阶段

5月23日



## 3.5 模拟值与观测值的相关性

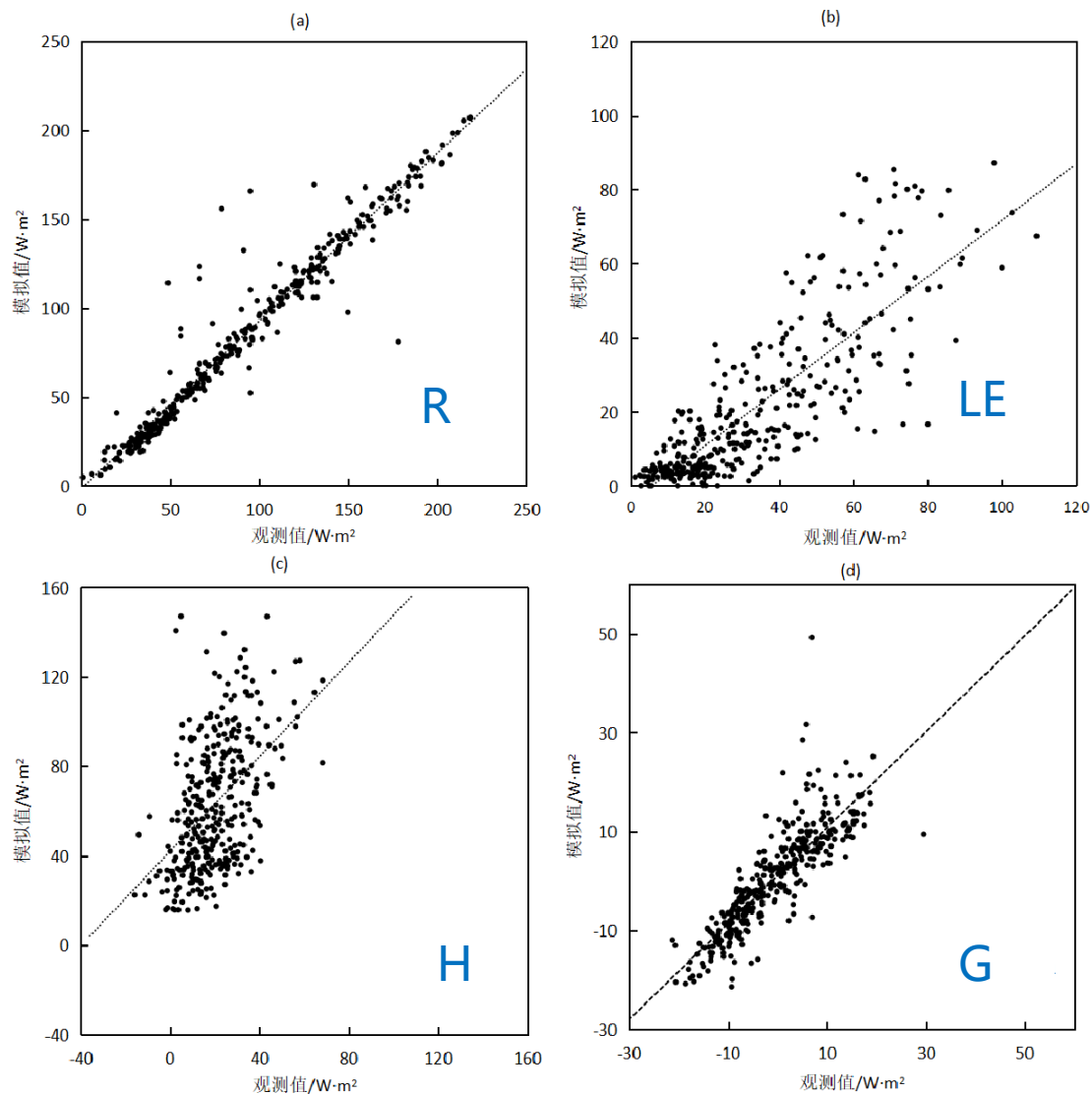
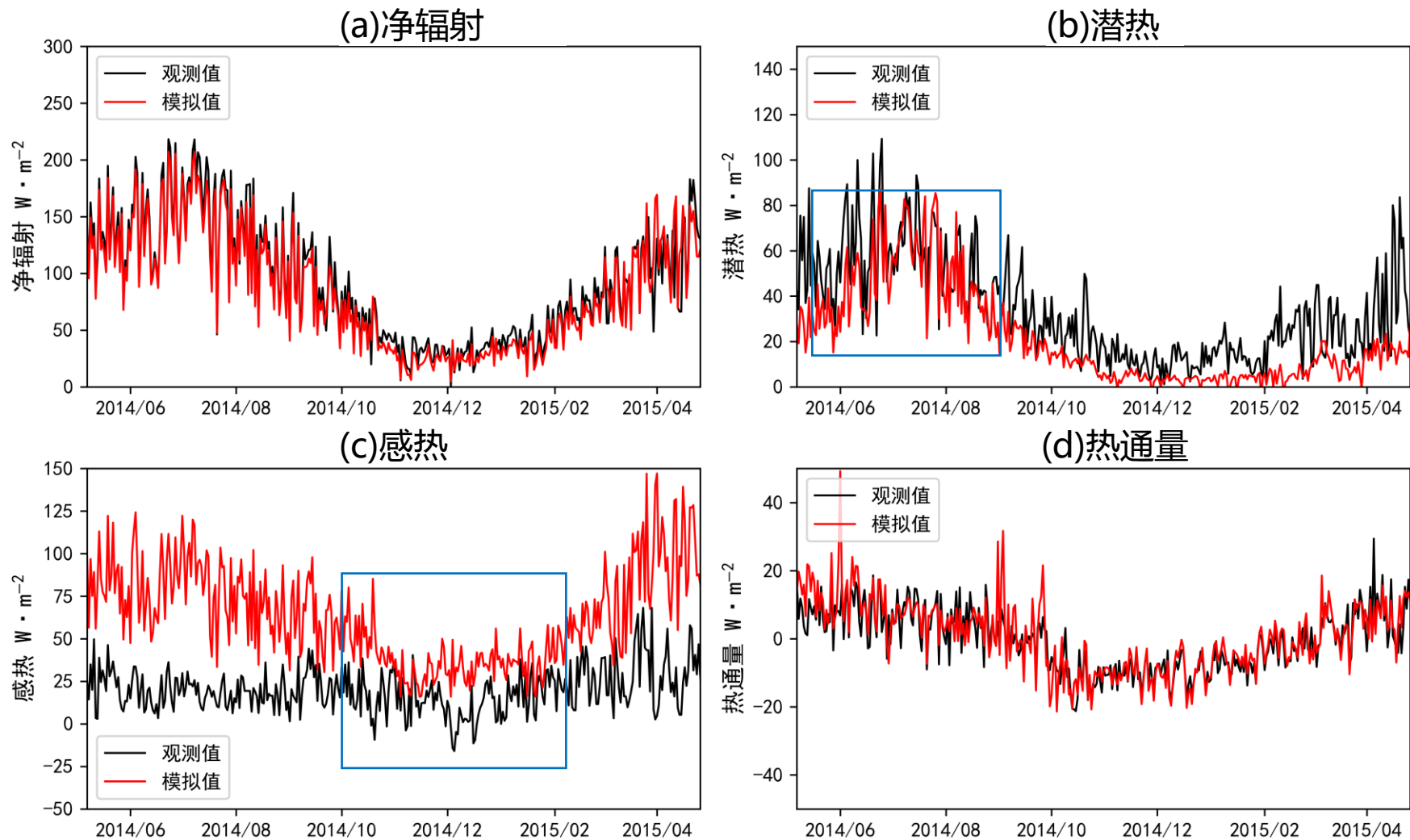


图3.8 水热通量的相关性

表3.3 表示相关性的计算值

	R	LE	H	G
Bias	-6.58	-12.41	43.25	1.16
相关系数r	0.97	0.82	0.49	0.85
均方根误差	14.44	17.99	49.94	5.57
RSR	0.27	0.79	3.72	0.61

## 3.6 水热通量年平均比较



潜热在完全融化的模拟效果好于完全冻结，感热则在完全冻结模拟效果好于完全融化。

图3.9 水热交换通量的年变化

## 3.7 水热通量日平均比较

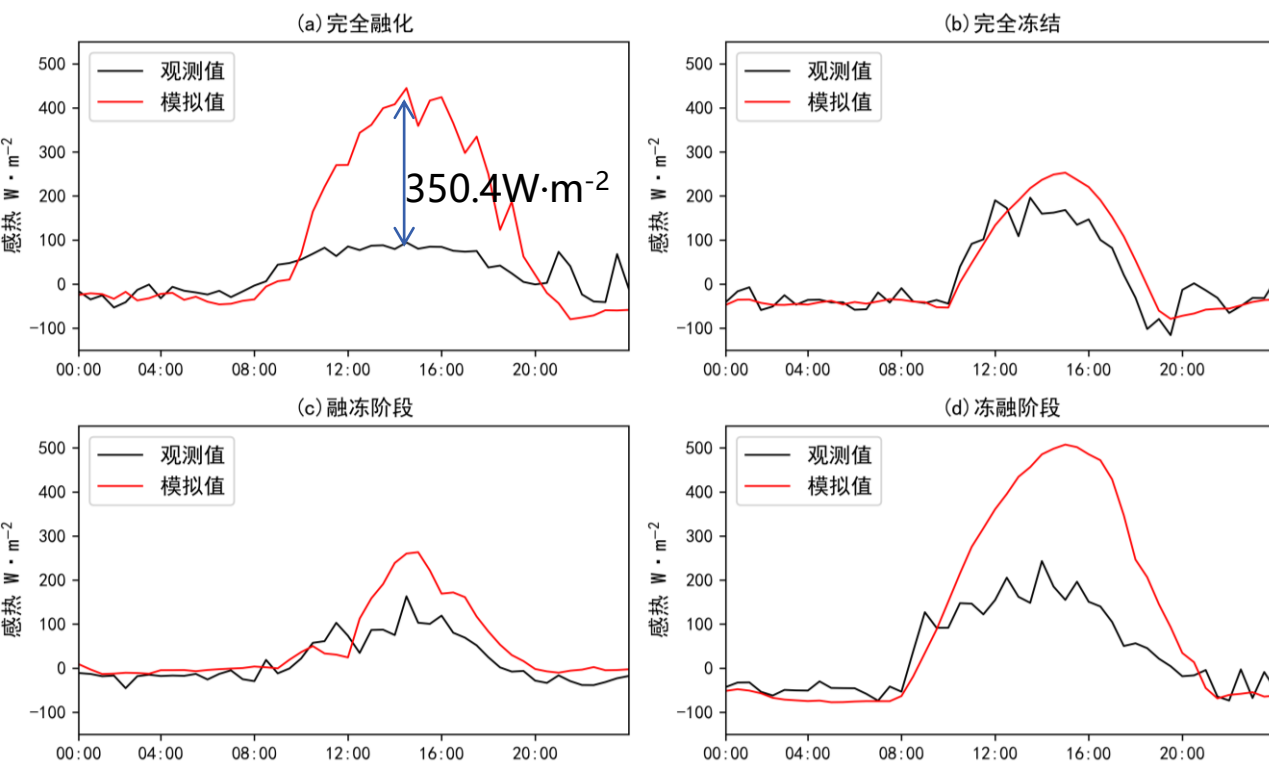


图3.10 感热在各阶段的差值比较

(选取每个阶段相邻2天典型晴天日, 下同)

白天, 感热模拟值 > 观测值

完全融化模拟效果差, 差值达到  $350.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

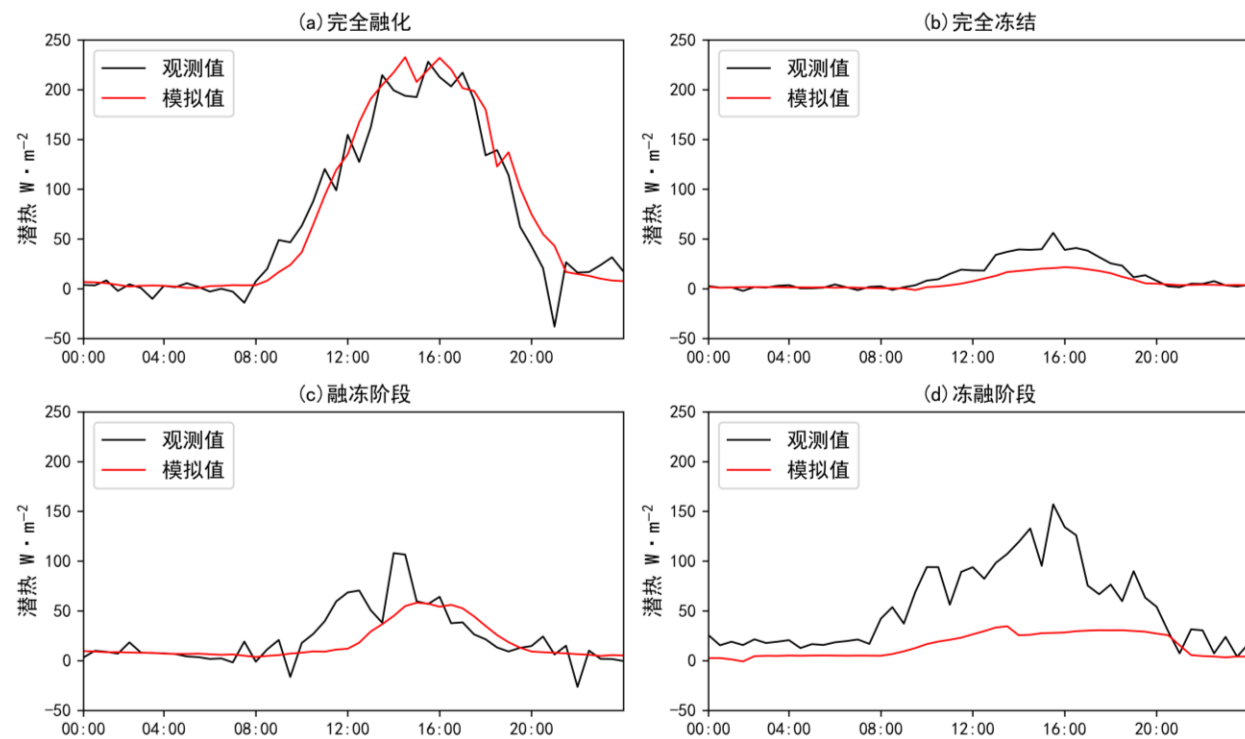


图3.11 潜热在各阶段的差值比较

潜热在完全融化模拟较好, 冻融阶段最差

除完全融化, 其他三阶段模拟值 < 观测值

## 3.7 水热通量日平均比较

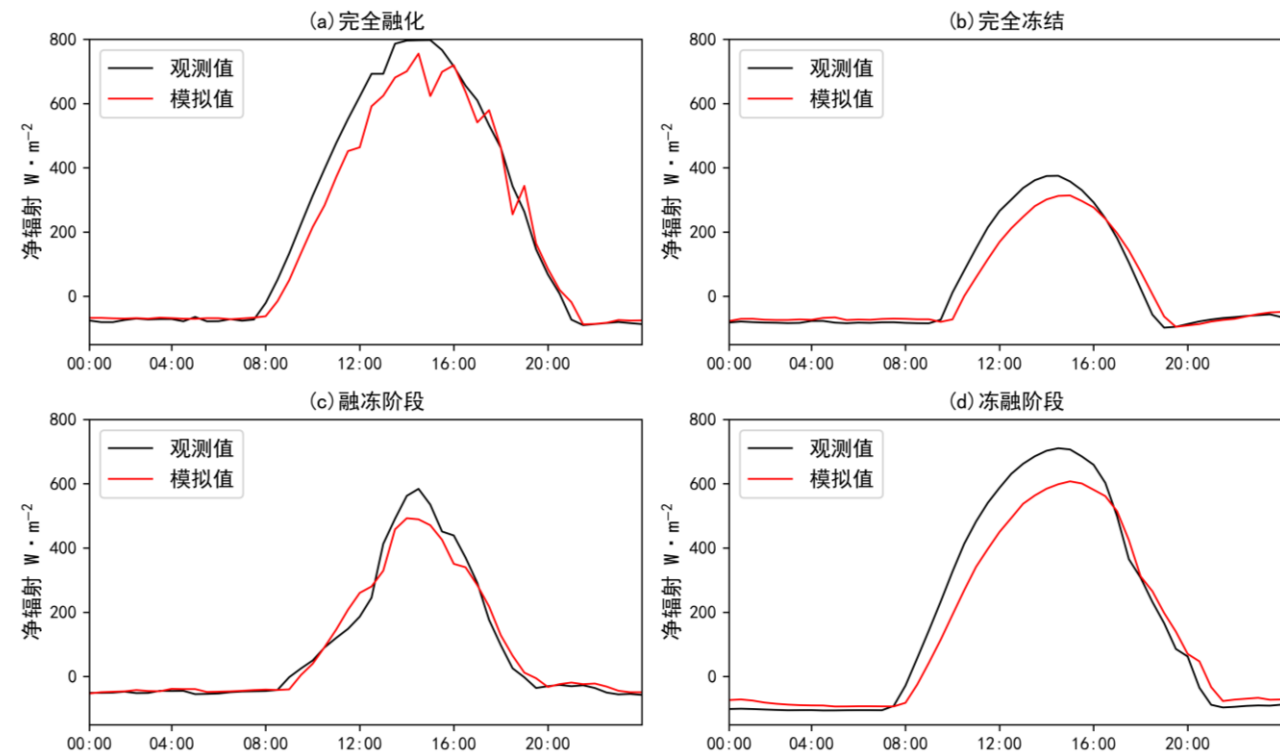


图3.12 净辐射在各阶段的差值比较

净辐射最大差值  $< 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

最小差值接近  $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

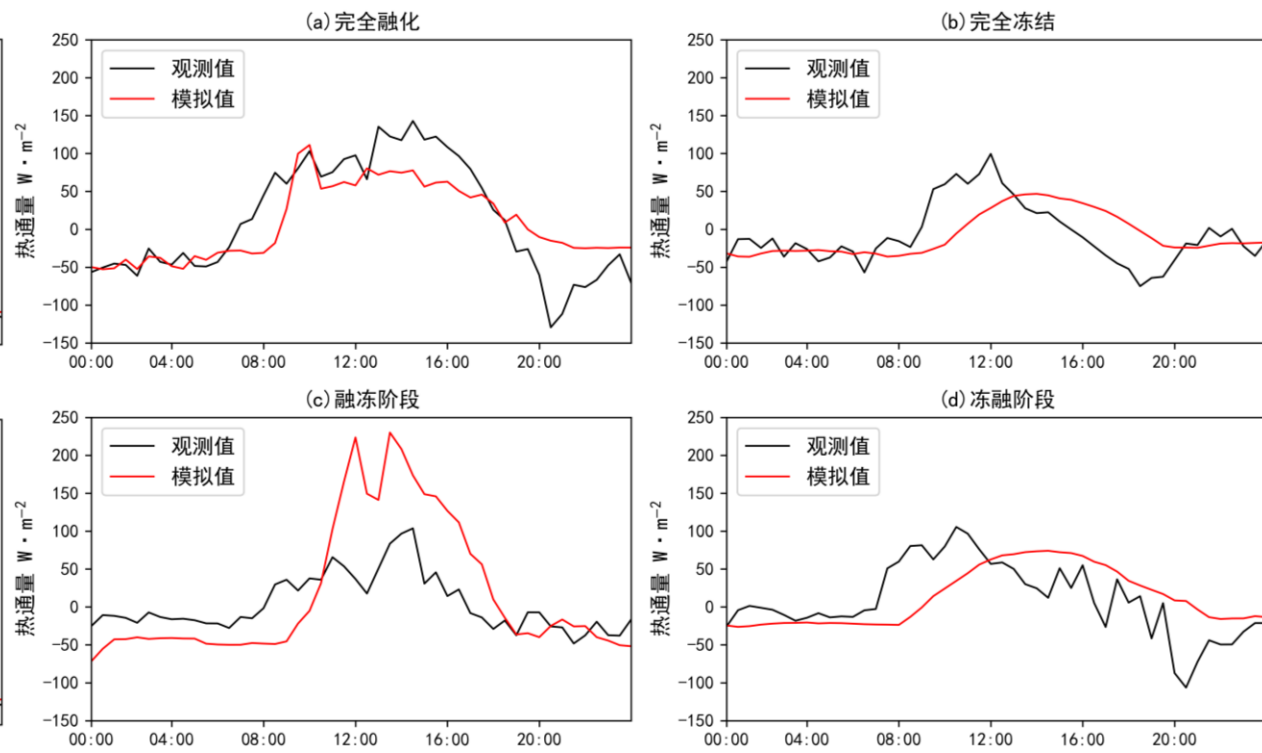


图3.13 热通量在各阶段的差值比较

热通量主要受土壤温度模拟偏低，  
积雪等的影响

---

四

主要结论

---

## 4 主要结论

(1) 净辐射通量在完全融化要普遍大于其他三个阶段，日变化最大值达到了 $717.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，完全冻结阶段最小。土壤热通量在完全融化（冻结）状态下为正（负），表明地表从大气吸收（释放）热量。

(2) 感热与潜热在完全融化和完全冻结值几乎相反。完全融化时，潜热通量日变化最大值为 $193.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而感热通量只有 $80.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。融冻阶段、冻融阶段与完全冻结时感热与潜热的日平均相差不大，潜热在三个阶段平均值为 $21.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，感热为 $20.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(5) 模拟后完全冻结阶段减少47天，冻融过程时间增加。净辐射模拟结果最好，相关系数达到0.97，潜热和土壤热通量次之，感热模拟结果最差，相关系数仅为0.49。

---

感谢聆听， 敬请指正！

---