

第二届中国温室气体监测研讨会

# 中蒙俄经济走廊东段冻土时空变化模拟 及植被响应

汇报人：刘侦海 研究生

单位：中国地质大学（武汉）

导师：王绍强 教授





# 简介 | 数据和方法 | 结果 | 讨论 | 结论

---

1. 冻土退化威胁生态安全
2. BEPS模型无法较好地模拟土壤-植被-大气间的关系
3. 科学问题

# 简介

---

## 1) 冻土退化与碳排放

- 泛北极冻土地区包含1460-1600 Pg 土壤有机碳(SOC), 是大气中碳的两倍多。其中, 约800Pg SOC冻结在冻土中。
- 当土壤融化时土壤有机碳会暴露于空气并被微生物分解, 且富碳的冻土可能会通过生态系统呼吸 (Re) 向大气释放更多的CO<sub>2</sub>。
- 随着气候变暖, 冻土退化引起的冻土碳释放将在很大程度上抵消该地区的碳汇, 增加CO<sub>2</sub>或CH<sub>4</sub>的排放。泛北极冻土地区可能由净碳汇转为净碳源。
- 温室气体 → 温室气体源汇结果

# 简介

---

## 2) 冻土退化威胁生态安全

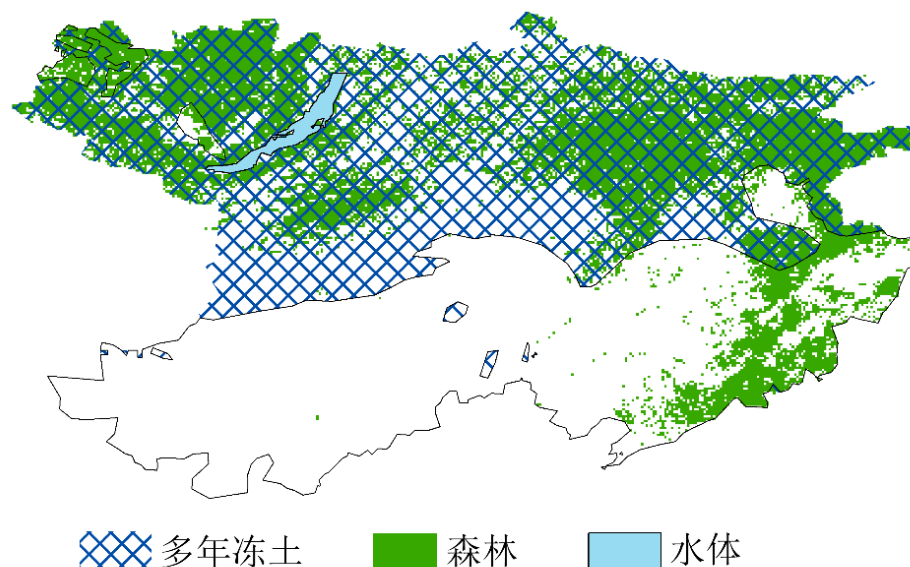
- **中蒙俄经济走廊东段**位于**欧亚大陆多年冻土区东南缘**。
- 研究区内广泛分布着多年冻土和季节冻土，属于全球气候变化的脆弱区和敏感区。
- 冻土变化不仅影响地气间水热交换过程，同时会**影响碳循环和区域气候变化**。



# 简介

## 2) 冻土退化威胁生态安全

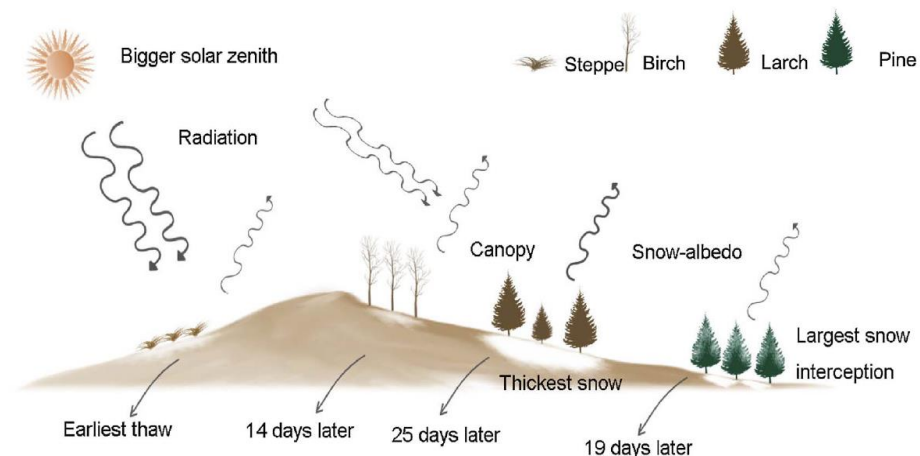
- 研究区位于欧亚大陆**森林线**与**永久冻土南界**接近区，植被生长对于冻土退化十分敏感。
- “一带一路”倡议下人类开发建设等经济活动（中蒙俄跨境铁路、公路和油气管道等）和气候转暖**两种因素叠加**将进一步促进冻土退化，威胁工程建设及**生态环境安全**。



# 简介

## 3) BEPS模型无法较好地模拟土壤-植被-大气间的关系

- **生态系统过程模型**可以模拟**土壤-植被-大气**之间的耦合关系。
- 在土壤剖面水热耦合模拟方面，过程模型解决了利用站点或遥感数据进行的研究无法兼顾水平及垂直尺度的问题，从而在研究冻土变化与植被生长的**相互调节**方面得到了广泛应用。
- **BEPS** (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 模型主要用于模拟植被光合作用、植被生产力和生态系统碳源汇的评估，但**对于土壤水热耦合过程模拟效果不佳**。



(Guo et al., 2018)

# 科学问题

- 基于**优化后的BEPS模型**进行的模拟，中蒙俄经济走廊东段地区**土壤冻融**将表现怎样的**时空分布规律**？
- 研究区内典型地区的**生态系统植被生长和碳释放如何响应土壤冻融变化**？

# 研究意义

- 为中蒙俄经济走廊东段生态环境脆弱区划定及碳源汇评估提供相关依据。

## 研究思路

基于站点数据及寒区特点对BEPS模型进行优化

站点尺度

2000–2015年间冻土的时空变化模拟

区域尺度

通过灰色关联分析法探究典型地区生态系统对土壤冻融变化的响应



简介 | **数据和方法** | 结果 | 讨论 | 结论

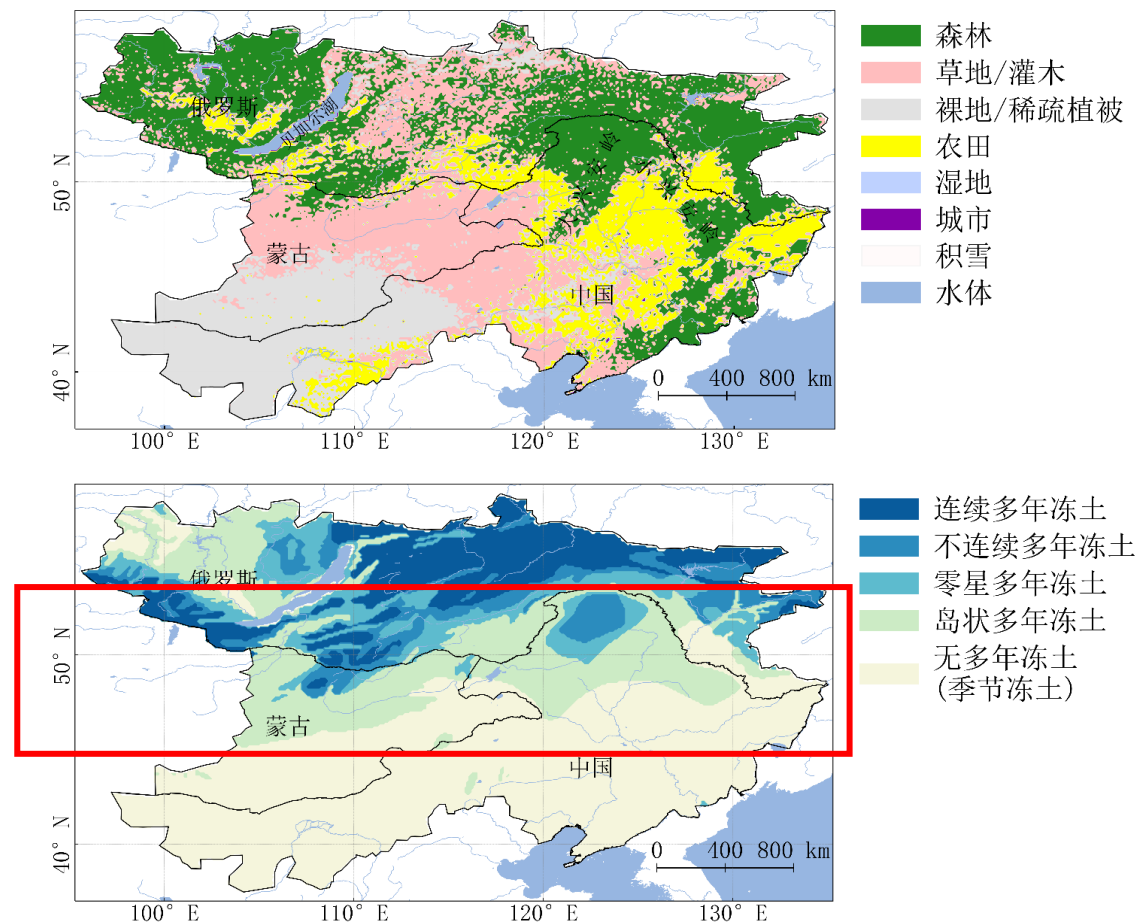
---

1. 研究区介绍
2. BEPS模型简介和参数化
3. 模型优化与检验
4. 模型结构及输入数据



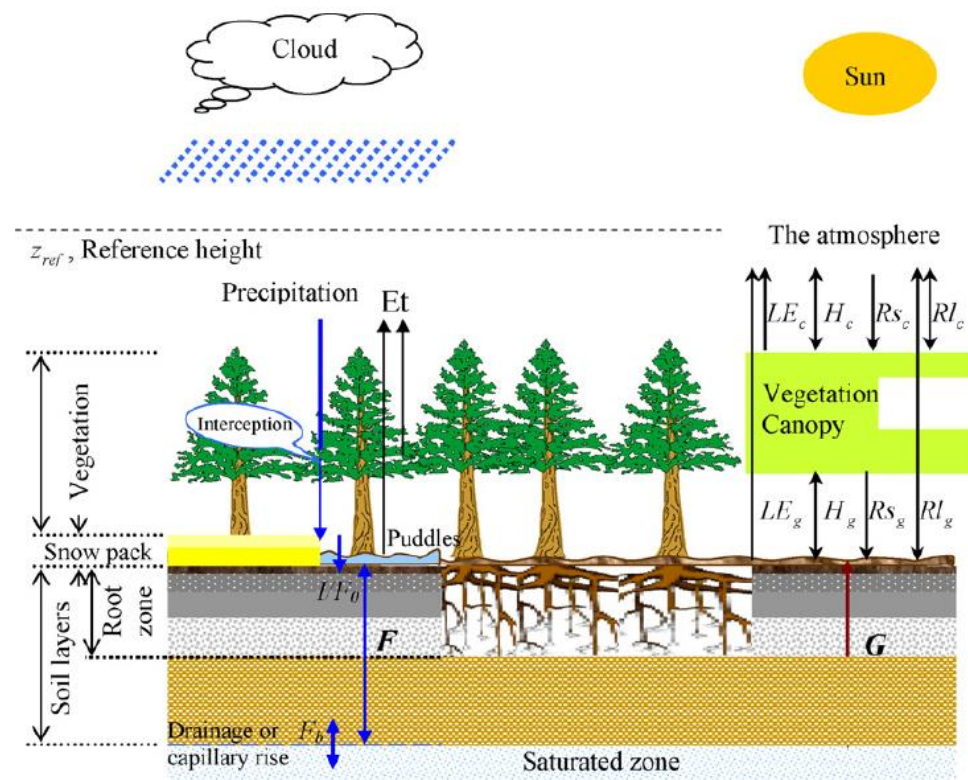
# 研究区介绍

- “中蒙俄经济走廊”是“一带一路”六大经济走廊之一。本研究选取的“中蒙俄经济走廊”东段地区位于**中国、蒙古、俄罗斯三国交界**。
- 研究区主要包含**森林、草地、裸地和农田**四类土地覆盖类型（面积占比分别为35.0%、28.6%、18.7%和16.3%）。
- 研究区内**多年冻土与季节冻土**（面积占比分别为53.3%、45.5%）广泛和交错分布。



# BEPS模型简介

- BEPS (Boreal Ecosystems Productivity Simulator) 模型作为遥感驱动的**过程机理模型**，广泛用于**陆地生态系统碳水通量的模拟**。
- 该模型主要包括植被光合模块、能量平衡和水文模块、土壤生物化学模块等。
- BEPS模型将植被上下冠层、积雪、地面、土壤等视作**不同的层**，热量分别在层内和层间进行传输。



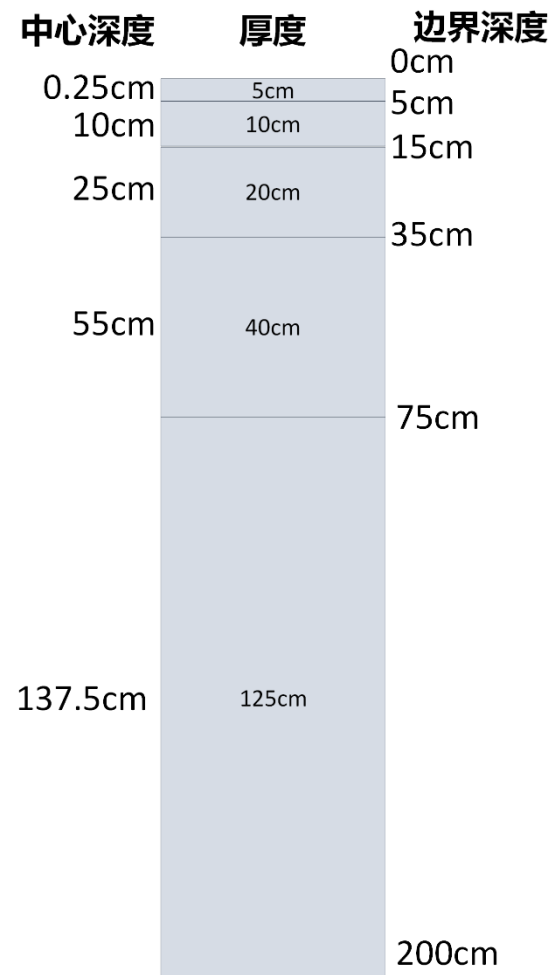
(Chen et al., 2007)

# BEPS模型参数化

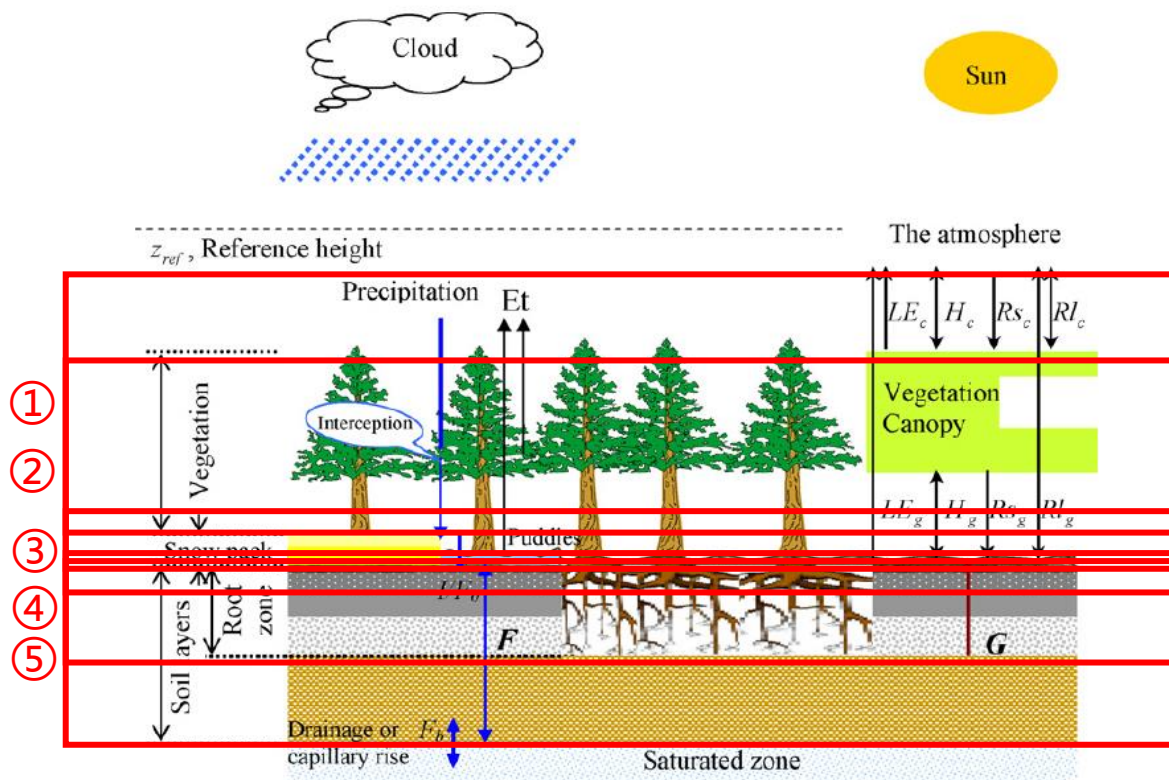
- BEPS 模型将土壤分为**5层**，该深度对于分析土壤冻融与地表植被之间的关系已经足够。
- **土壤热动力学**通过**一维垂向热扩散方程**来控制：

$$C_{s,l} \frac{\partial T_{s,l}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{t,l} \frac{\partial T_{s,l}}{\partial z} \right) + S_{s,l}$$

- 尽管由于土壤温度和水分会影响土壤的**碳氮循环过程**，在模型中得到了考虑。
- 但BEPS模型主要模拟了**土壤水分**对气孔的调节作用来实现生态系统**碳水循环耦合**，土壤温度的模拟精度并不高，尤其对于**寒区零下土壤温度**的模拟。



# BEPS模型优化



① 植被冠层对地表的保温效应

② 不同冠层结构对冬季积雪密度的差异化影响

③ 地表积水相态变化对地表热量传输的影响

④ 土壤表层有机质对土壤热量传递的阻滞效应

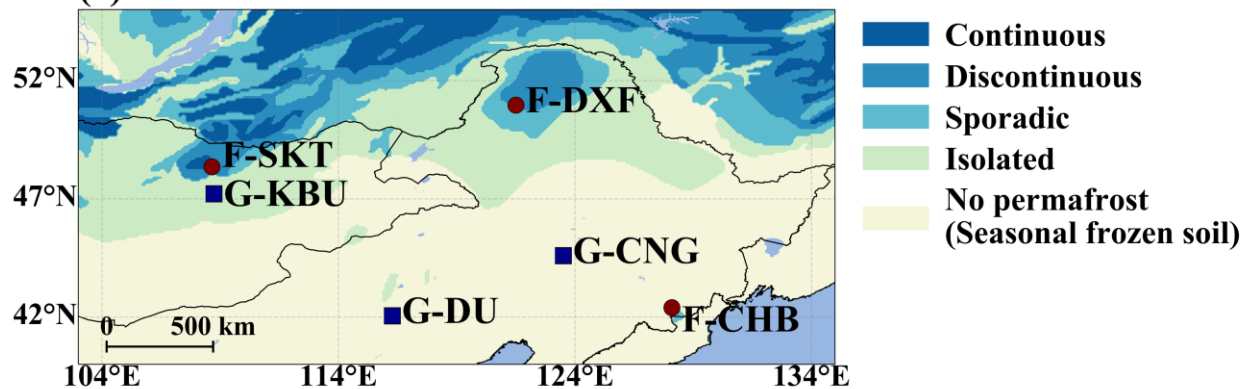
⑤ 土壤中冬季不冻结水对土壤水热耦合模拟的影响

$$\theta_{liq,max} = \theta_{sat} \left\{ \frac{10^3 L_f (T - T_{frz})}{gT\psi_{sat}} \right\}^{-\frac{1}{b}}$$

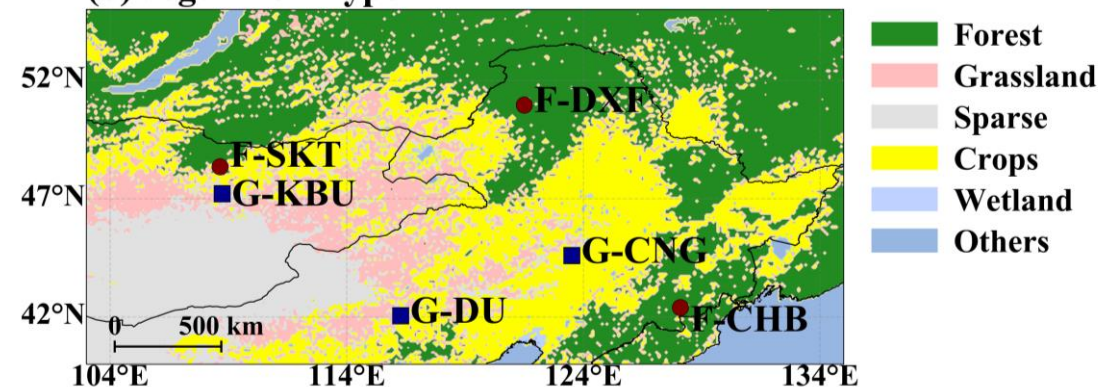
# 利用站点数据验证模型精度

Site ID	Period	Latitude, Longitude	Elevation (m asl)	Veg. type	Permafrost extent	Soil texture	Mean canopy height (m)
F-SKT	10/1/2003–9/20/2006	48.35°N, 108.65°E	1630	larch	discontinuous	sandy loam	20
F-CHB	1/1/2003–12/31/2005	42.40°N, 128.10°E	736	mixed forest	non-permafrost	loam	25
F-DXF	1/1/2013–12/31/2014	50.96°N, 121.51°E	832	larch	discontinuous	loam	27.5
G-KBU	1/1/2004–12/31/2005	47.21°N, 108.74°E	1235	steppe	isolated patches	clay loam	0.12
G-CNG	5/7/2007–10/16/2010	44.59°N, 123.51°E	171	meadow steppe	non-permafrost	silty clay	0.75
G-DU	7/20/2009–15/5/2010	42.06°N, 116.28°E	1380	meadow	non-permafrost	loam	0.25

(a) Permafrost Extent

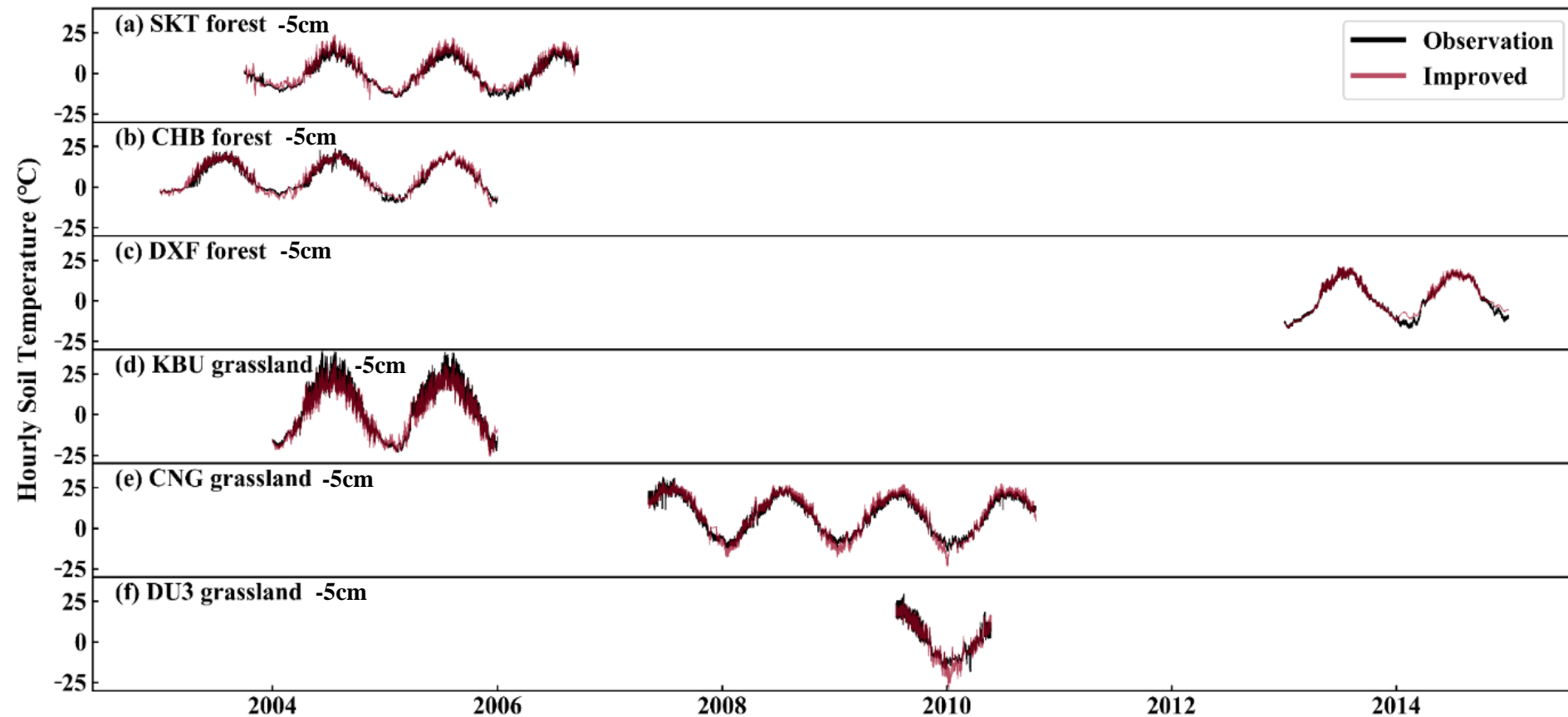


(b) Vegetation Type



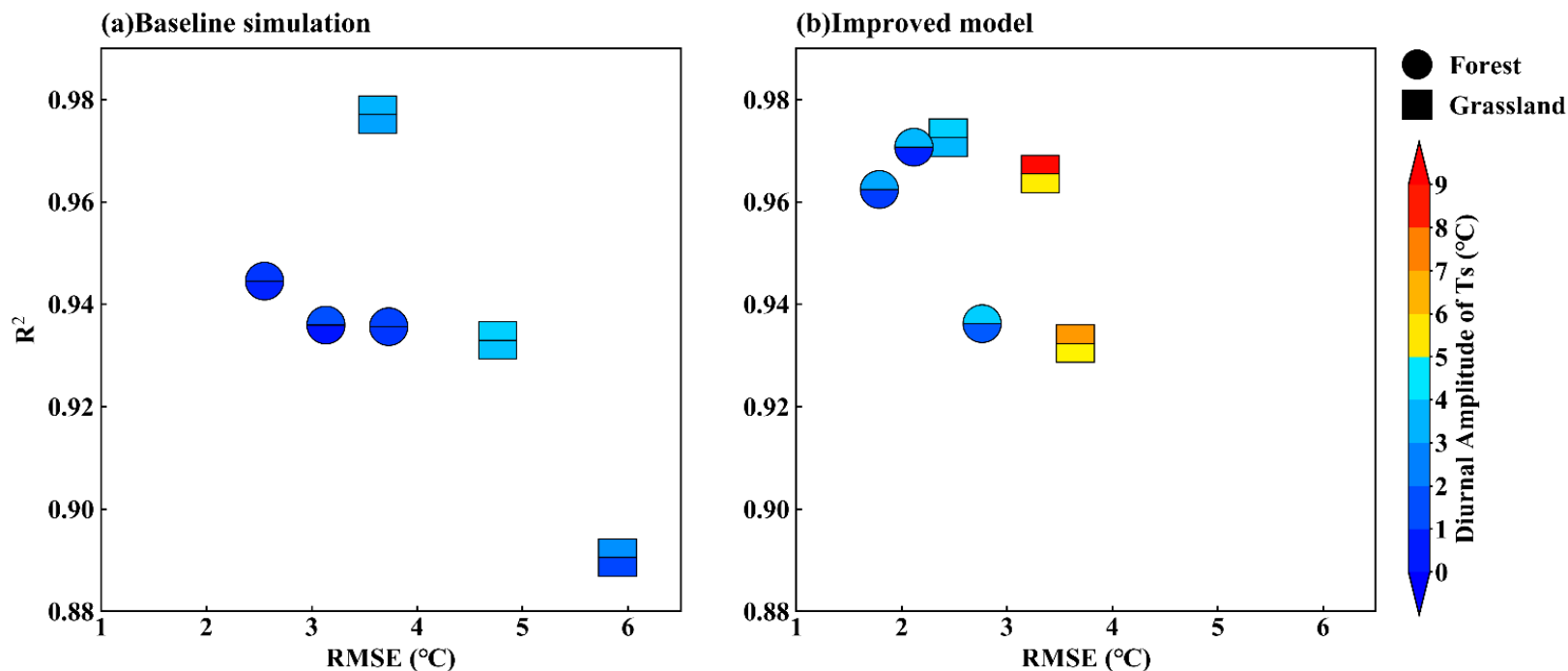


# 利用站点数据验证模型精度



优化后的BEPS模型模拟的土壤温度与站点观测数据具有较好的一致性。

# 利用站点数据验证模型精度

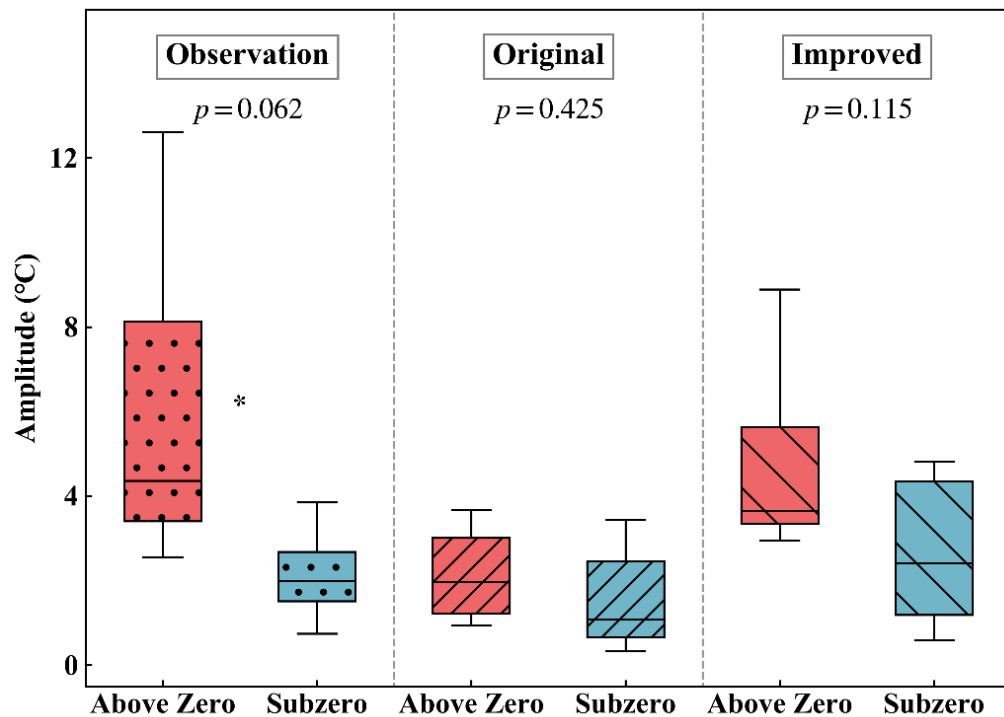


- 优化后的BEPS模型模拟的土壤温度相比优化前具有**更小的RMSE**和**更大的R方**。
- 优化后更能模拟出土壤温度日振幅。

Evaluation for simulation results of baseline parameterization scheme (a) and improved BEPS model (b) at observation sites. The X-axis and Y-axis respectively represent the RMSE and  $R^2$  of baseline simulation results relative to the observed data. The scatter is divided into circle and square, with the meaning of forest and grassland respectively.

圆形或方形的上半部分代表土壤日均温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以上的土壤温度日振幅，下半部分代表土壤日均温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下的土壤温度日振幅。

# 利用站点数据验证模型精度



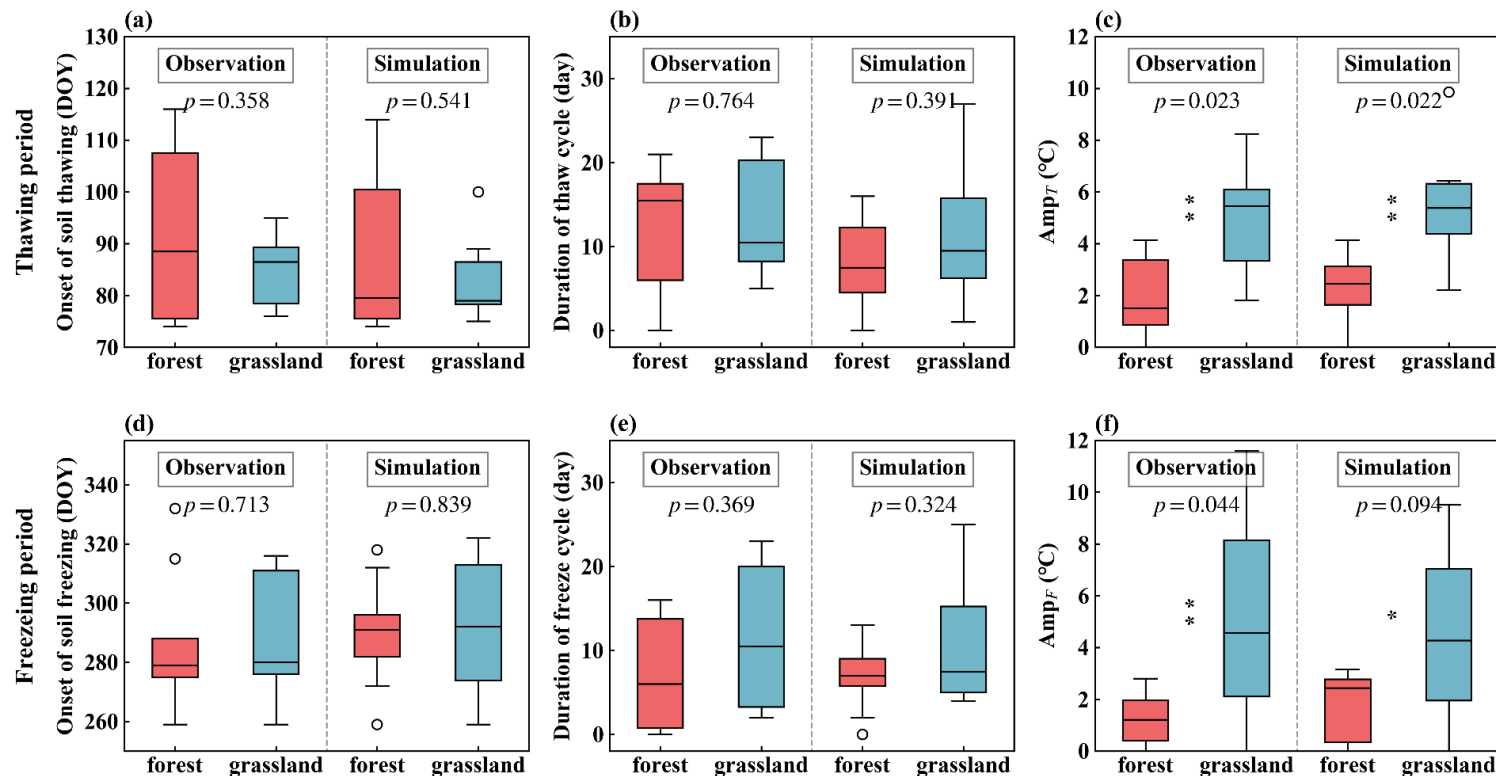
BEPS模型对于土壤温度日振幅的模拟效果

假设:

当单日内土壤温度最高温大于0°C, 而最低温小于0°C时, 说明土壤进入解冻 / 冻结期。



# 利用站点数据验证模型精度



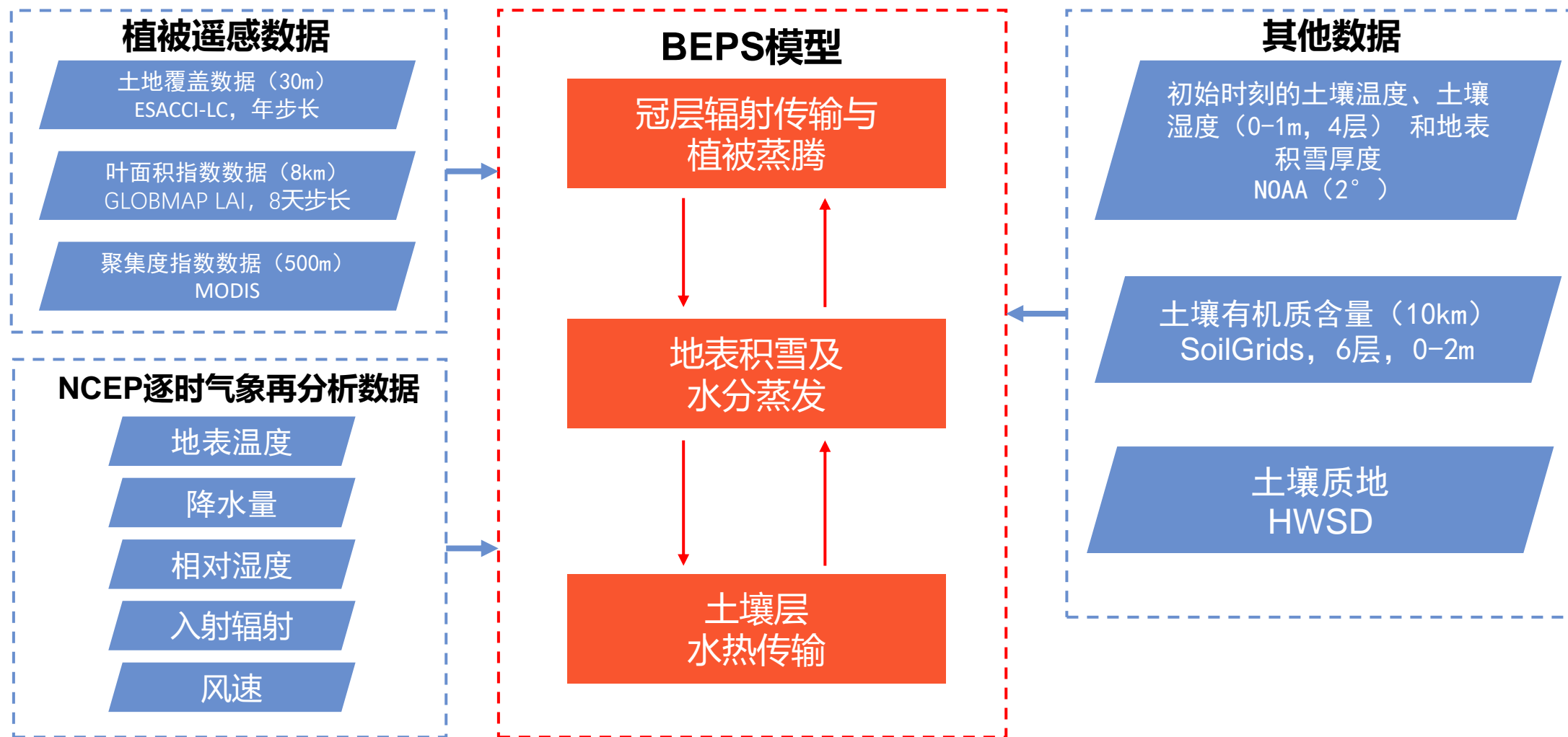
解冻/冻结期  
开始时间

解冻/冻结期  
持续时间

解冻/冻结期内  
土壤温度日振幅

森林和草地站点冻土  
冻融指标的模拟效果

# 模型结构及输入数据





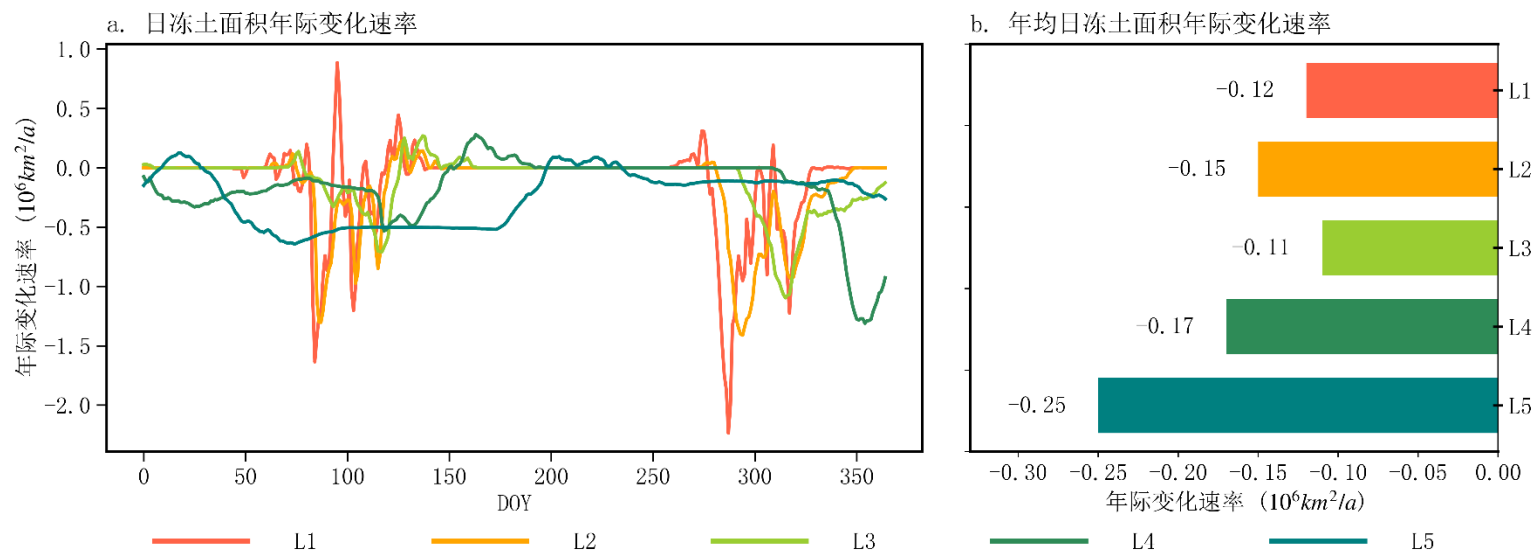
简介 | 数据和方法 | **结果** | 讨论 | 结论

---

1. 冻土面积的时间变化
2. 冻土指标的时空变化
3. 返青期及叶面积指数的时空变化
4. 冻土变化与植被生长状况的关联度分析

# 冻土面积的时间变化

- 将日均温小于 $0^{\circ}\text{C}$ 的区域定义为冻土区。
- 研究区内各土壤层的**年均日冻土面积减小发生时间段**主要分布在各土壤层的**解冻期和冻结期**。

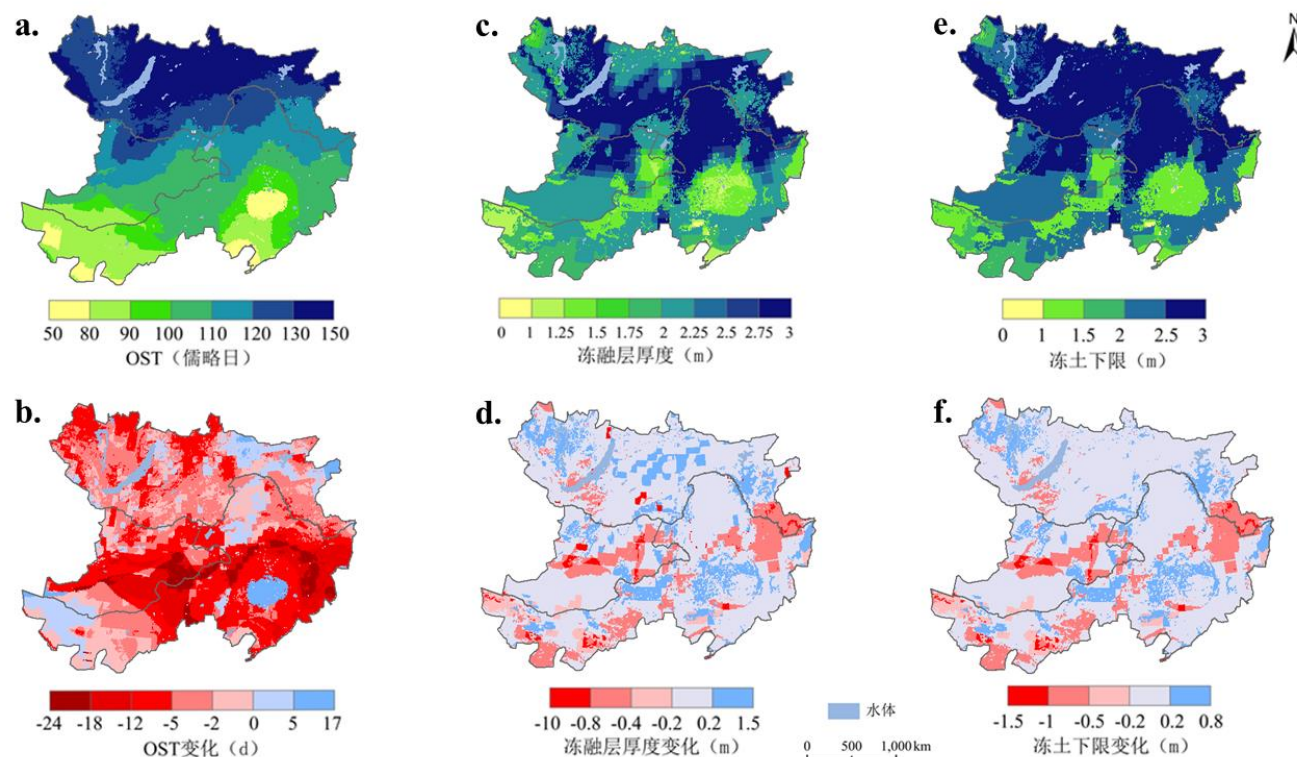


2000—2015年各层日冻土面积（包括多年冻土、季节冻土和短期冻土）平均年际变化速率  
(L1—L5及颜色变化表示第1至第5土壤层)

- **底层冻土面积减小速度大于表层。**

# 冻土指标的时空变化

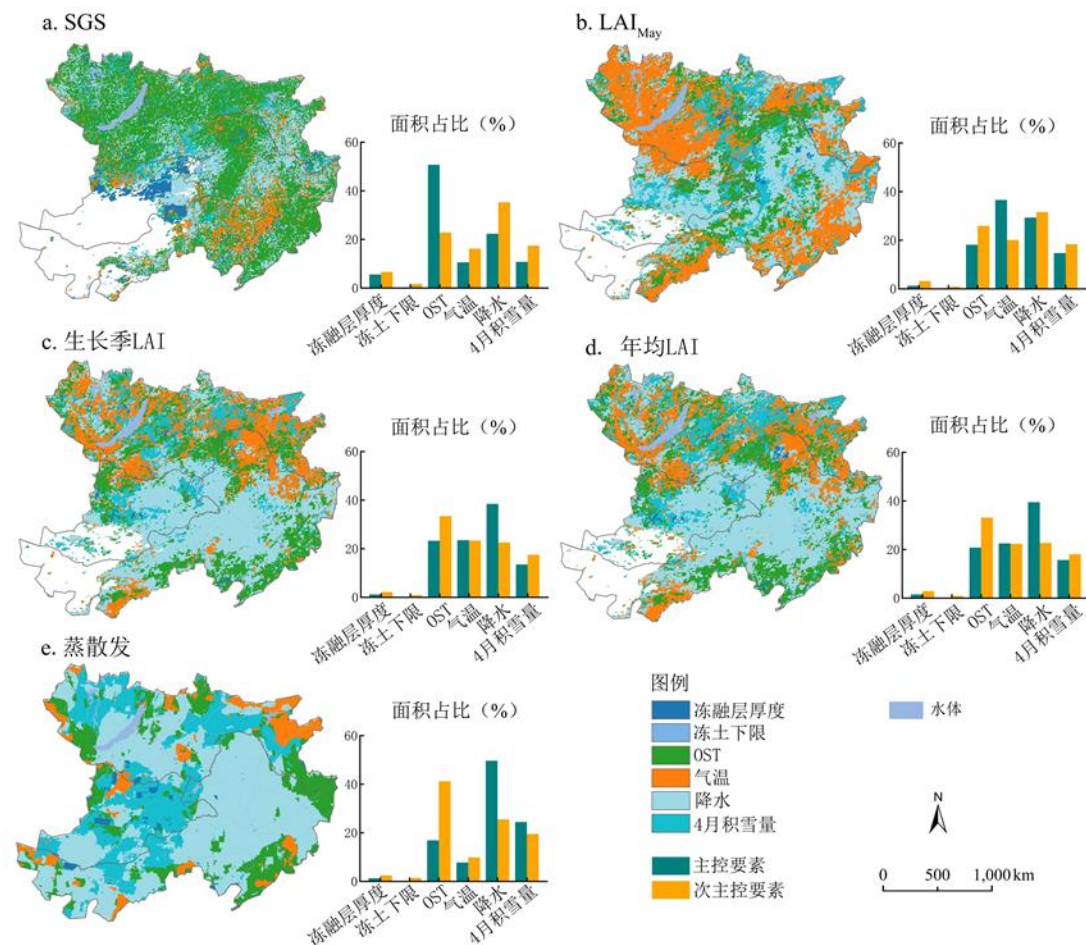
- **冻土下限**的变化主要表现为**多年冻土南缘邻近区域**的底层季节冻土退化为非冻土。
- **冻土解冻始日**及**冻融层厚度**发生变化地区主要分布在**多年冻土南缘与连续多年冻土南缘**，该区域分别易发生岛状多年冻土退化为季节冻土、连续多年冻土退化为不连续多年冻土。



中蒙俄经济走廊地区2000—2015年平均冻土解冻始日、冻融层厚度及冻土下限空间分布格局 (a、c、e) 及16年变化量 (b、d、f)

# 冻土变化与植被生长状况的关联度分析

- 基于**灰色关联度分析**证明了“降水及冻土解冻始日”与“植被返青期、蒸散发能量通量和生长季各阶段的LAI”均具有较大的关联度。

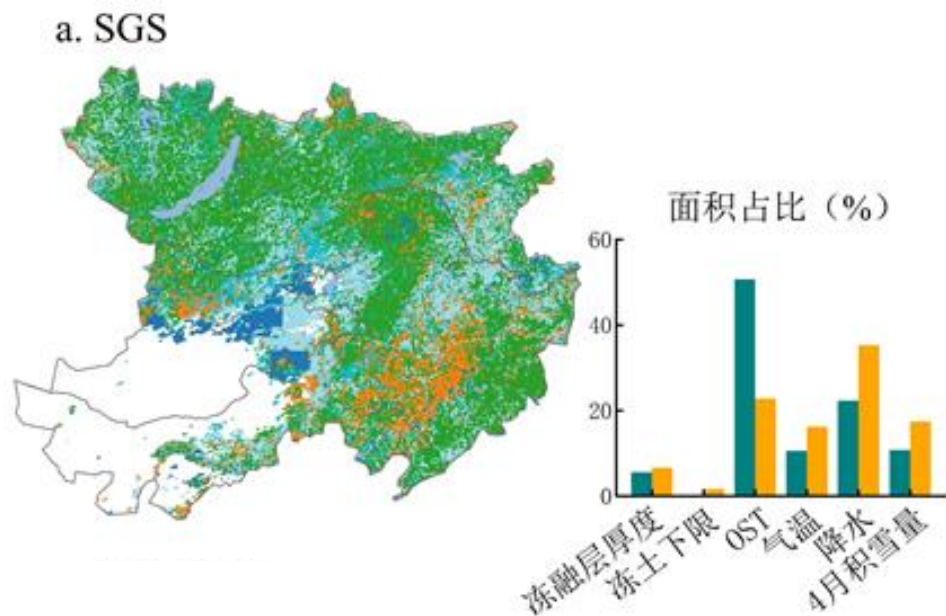


中蒙俄经济走廊地区各植被指标主控要素空间分布（条形图表示各目标变量的主控要素和次主控要素对应影响变量像元总面积占比）

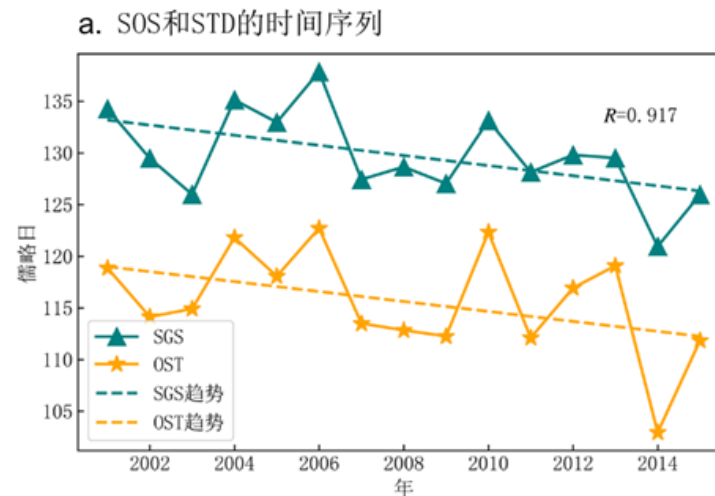


# 冻土变化与植被生长状况的关联度分析


- **森林地区**中冻土解冻始日对植被返青期贡献度最高，两者具有高度相关性。



中蒙俄经济走廊地区植被返青期主控要素空间分布（条形图表示各目标变量的主控要素和次主控要素对应影响变量像元总面积占比）



中蒙俄经济走廊SGS主控因子为OST的地区SGS和OST的时间序列



简介 | 数据和方法 | 结果 | **讨论** | 结论

---

1. 冻土解冻提前调节植被物候期
2. 兴安岭多年冻土与植被的相互调节



## 冻土解冻时间影响植被物候期 (多年冻土区)

---

- **林下泥炭地**的隔热效应将降低地表温度，推迟活动层解冻始日，减小季节融化的深度。进而**限制植被根的呼吸**，影响地表植被生长。
- 同时，饱水的泥炭地厌氧环境的碳排放主要以 $\text{CH}_4$ 的形式排放。

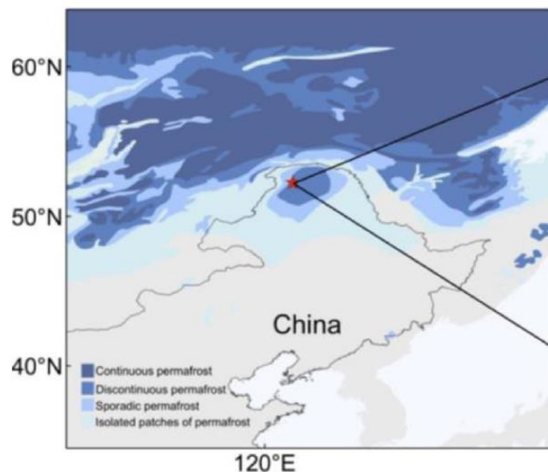
## 兴安岭多年冻土与植被的相互调节 (多年冻土南界)

---

- 兴安岭地区邻近多年冻土南界，在山区冬季逆温层及泥炭层热补偿等的叠加作用下，形成了典型的“**兴贝型多年冻土**”。
- 森林及林下泥炭地变为**农田**后，土壤水分减少，导热率增大，促进“兴贝型多年冻土”的退化。

# 兴安岭多年冻土与植被的相互调节 (多年冻土南界)

- 泥炭地的退化可能会使水饱和的厌氧环境转变为干燥的好氧环境，使CO<sub>2</sub>排放增加，CH<sub>4</sub>排放减少。
- 好氧条件下的碳排放及其对气候的影响要大于厌氧条件下的释放 (Song, 2020) 。



Geoderma 357 (2020) 113975



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Geoderma

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/geoderma](http://www.elsevier.com/locate/geoderma)



Soil moisture as a key factor in carbon release from thawing permafrost in a boreal forest




Xiaoyan Song<sup>a,b</sup>, Genxu Wang<sup>b,\*</sup>, Fei Ran<sup>b</sup>, Kewei Huang<sup>b,c</sup>, Juying Sun<sup>b,c</sup>, Chunlin Song<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

<sup>b</sup> Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

<sup>c</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



简介 | 数据和方法 | 结果 | 讨论 | **结论**

---

# 结论和展望

---

本文基于优化后的BEPS模型综合分析了中蒙俄经济走廊地区2000–2015年的冻土退化过程，并评估了冻土退化对区域植被生长状况、物候时间的影响。主要结论如下：

- I. 优化后的BEPS模型能很好地表现中蒙俄经济走廊东段土壤冻融过程及土壤温度的时空变化。
- II. 研究区内冻土退化的**主要表现**为：连续多年冻土退化为不连续多年冻土（**量变**），多年冻土退化为季节冻土（**质变**）。
- III. 未来多年冻土南界可能将转变为巨大的碳源。

## 展望：

- 随着冻土退化和植被类型演替，多年冻土南界的碳排放将呈现怎样的时空分布规律？
- “一带一路”建设的推进将会对区域温室气体排放产生什么影响？
- 气候变化对冻土生态系统碳排放的影响的时空模式亟需长时序、空间分布的实测数据的支持（碳监测联盟）。



# ● 谢谢

---

汇报人：刘侦海