

# 青藏高原冻土区过去10年间显著的土壤碳积累<sup>1</sup>



丁金枝<sup>1,2</sup>, 陈蕾伊<sup>1</sup>, 吉成均<sup>3</sup>, Gustaf Hugelius<sup>4</sup>, 李英年<sup>5</sup>, 刘莉<sup>1,2</sup>, 秦书棋<sup>1,2</sup>, 张蓓蓓<sup>1,2</sup>, 杨贵彪<sup>1,2</sup>, 李飞<sup>1,2</sup>, 房凯<sup>1,2</sup>, 陈永亮<sup>1</sup>, 彭云峰<sup>1</sup>, 赵霞<sup>3</sup>, 何洪林<sup>6</sup>, Pete Smith<sup>7</sup>, 方精云<sup>3</sup>, 杨元合<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室 2. 中国科学院大学 3. 北京大学城市与环境学院  
4. Department of Physical Geography, Stockholm University, Sweden 5. 中国科学院西北高原生物研究所高原生物适应与进化重点实验室  
6. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室  
7. Institute of Biological and Environmental Sciences, University of Aberdeen, UK

\* 通讯作者 E-mail: [yhyang@ibcas.ac.cn](mailto:yhyang@ibcas.ac.cn)



## 研究背景

- 冻土中储存着大量有机碳，约占全球土壤有机碳储量的一半以上，是陆地生态系统中最大的碳库。因而，冻土碳库的微小变化就有可能对大气 CO<sub>2</sub> 浓度产生显著影响，进而在很大程度上决定了土壤碳库对气候变化反馈的方向和强度<sup>2</sup>。
- 土壤碳动态是植被碳输入和微生物分解输出的动态平衡过程。近几十年来冻土分布区显著的增温（增温速率是全球平均速率的两倍还多<sup>2</sup>）不仅会通过加速微生物分解导致土壤碳的损失，同时也会通过增强植被生产增加土壤碳库。
- 迄今为止，我们对于区域尺度上冻土有机碳动态的认识主要来自模型模拟，但模型的模拟结果存在很大的变异<sup>3</sup>。因此，为了更为准确的评估冻土土壤碳动态并预测冻土碳库与气候变化之间的反馈关系，非常有必要加强冻土碳动态的大尺度观测研究。

## 科学问题

- 近 10 年来青藏高原冻土分布区活动层土壤有机碳库发生了怎样的变化？
- 土壤有机碳库的变化是否依赖于植被类型？
- 不同深度土壤有机碳库的变化是否呈现一致的规律？
- 土壤有机碳含量与土壤容重的变化对于土壤有机碳密度变化的贡献如何？

## 研究方法

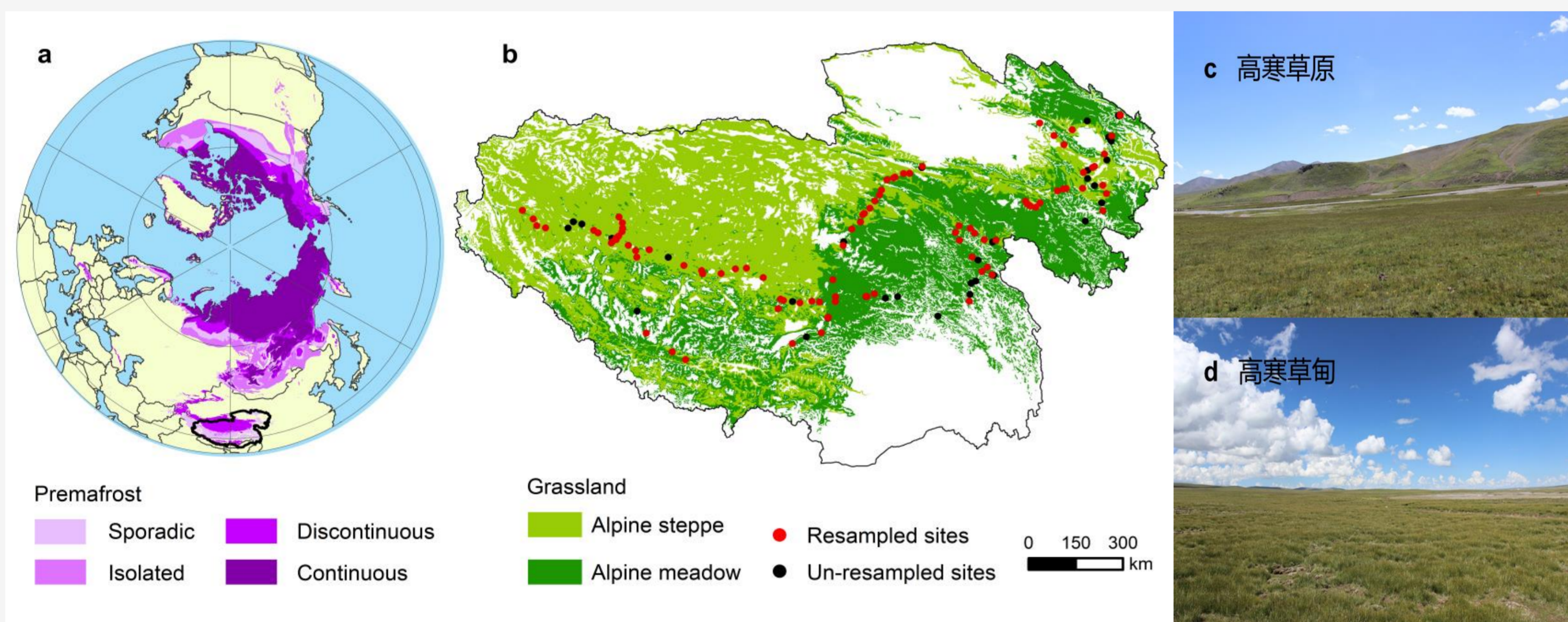


图 1 (a) 冻土分布图, (b) 青藏高原重采样点及主要草地类型的空间分布和 (c, d) 样地照片。

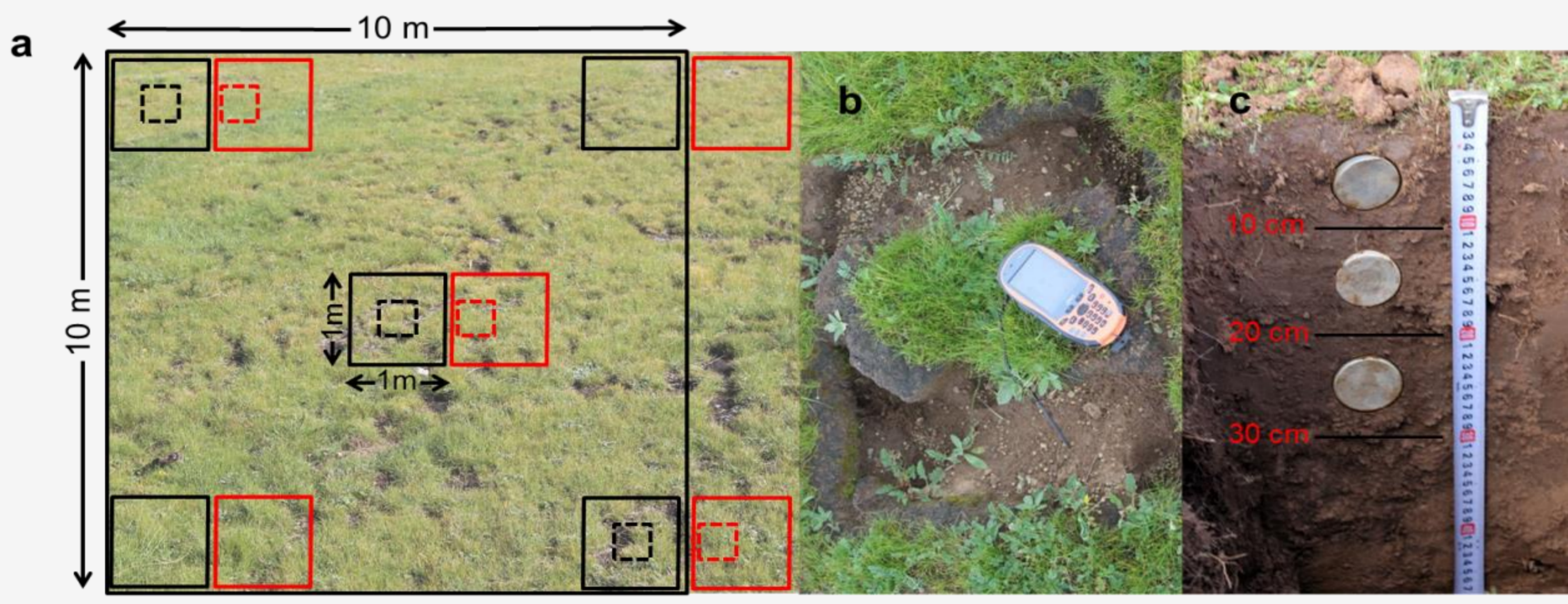


图 2 (a) 两次采样的样地设计, (b) 2000s 和 (c) 2010s 的土壤剖面照片。图 a 中 □ 和 □ 分别代表 2000s 和 2010s 每个 10×10 m<sup>2</sup> 的大样方中心和四角位置的小样方; □ 和 □ 分别代表 2000s 和 2010s 的土壤剖面。重采的土壤剖面紧邻原始剖面。

- 于 2013-2014 年 (2010s) 对 2001-2004 (2000s) 年间的 135 处样点进行重采样，重采率为 76%；
- 2010s 重采的土壤剖面紧邻 2000s 的原始土壤剖面；
- 两个时期样品的采集方法和测试方法相同；
- 重采样数据库由 103 个配对样点 (每个样点 3 个重复)、不同层次 (0-10, 10-20 和 20-30 cm) 的土壤有机碳含量 (SOCC)、容重 (BD) 以及土壤有机碳密度 (SOCD) 组成；
- 利用线性混合模型分析不同植被类型、不同层次的 SOCD、SOCC 及 BD 在过去 10 年间的变化速率及显著性。

## 结果与讨论

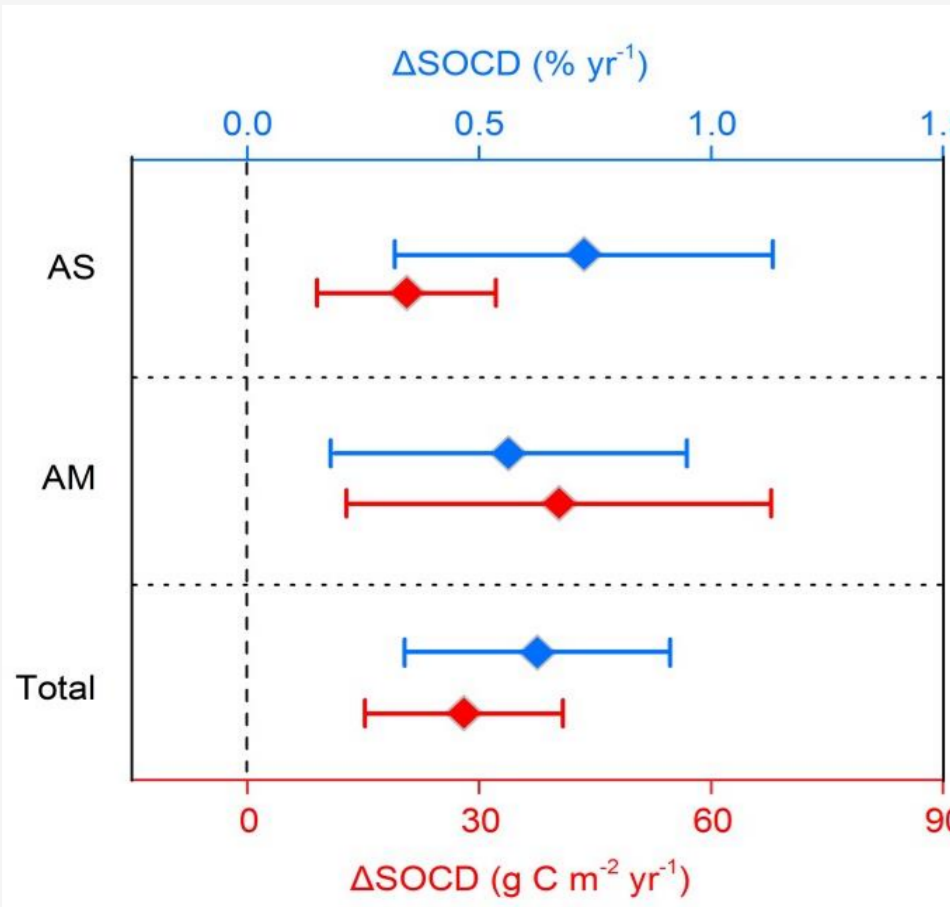


图 3 过去 10 年间青藏高原冻土区表层 30 cm 土壤有机碳密度 (SOCD) 的绝对和相对改变速率。AS、AM 分别代表高寒草原和高寒草甸。误差线代表 95% 的置信区间。

- 青藏高原活动层 30 cm 土壤有机碳库过去 10 年间呈现显著的增加趋势 ( $P < 0.001$ )，并且这种增加的趋势在高寒草原 ( $n = 64$ ) 和高寒草甸 ( $n = 39$ ) 中都存在；
- 高寒草地 SOCD 平均增速为  $28.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，相对增速 (相对于研究期的平均 SOCD) 为 0.6%；
- 将 SOCD 的增速乘以高寒草地的总面积得到该区域有机碳库的增速为  $32.0 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 。

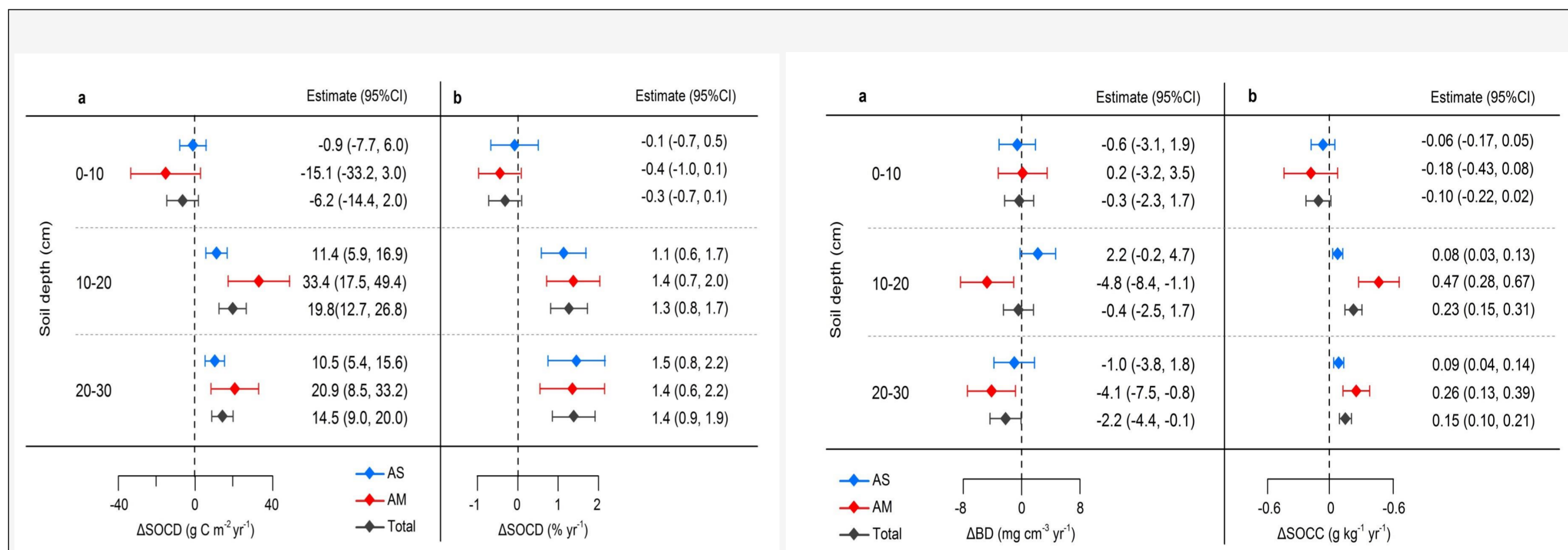


图 4 过去 10 年间青藏高原冻土区不同深度土壤有机碳密度 (SOCD) 的绝对和相对改变速率。AS 和 AM 分别代表高寒草原和高寒草甸。误差线代表 95% 的置信区间。

图 5 过去 10 年间青藏高原冻土区不同深度土壤容重 (BD) 有机碳含量 (SOCC) 的变化速率。AS 和 AM 分别代表高寒草原和高寒草甸。误差线代表 95% 的置信区间。

- 土壤碳库的显著增加只发生在下层土壤 (10-20 和 20-30 cm)，而表层 (0-10 cm) 碳库并未呈现显著变化；
- 表层碳库不变，下层显著增加的现象在两种草地类型中都存在。

- 土壤容重保持相对稳定；
- 表层土壤 (0-10 cm) 有机碳含量未发生显著变化，但下层 (10-20 和 20-30 cm) 土壤有机碳含量在显著增加。

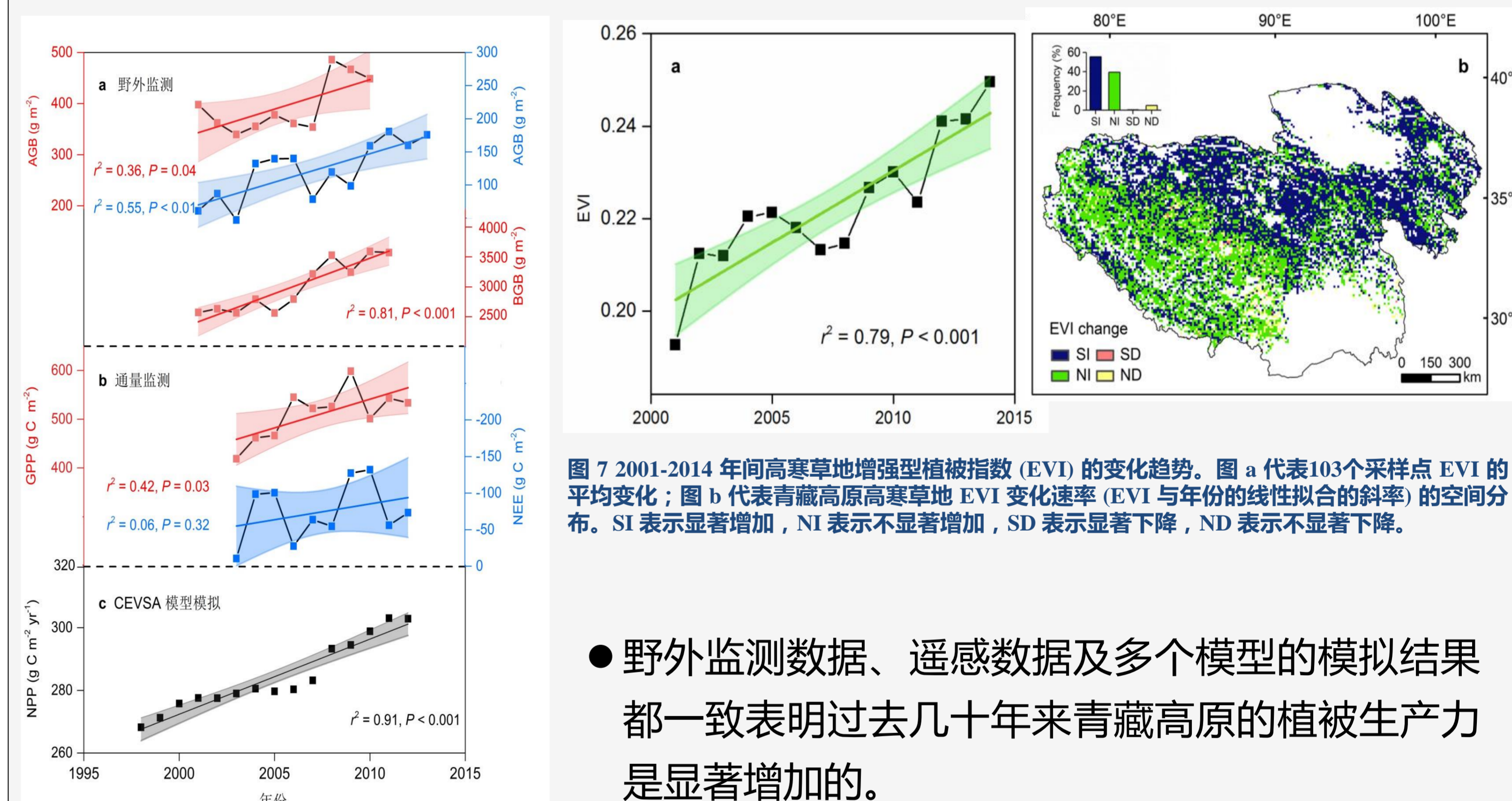


图 6 (a) 长期监测的生物量 (AGB, BGB), (b) 通量观测的总初级生产力 (GPP) 和生态系统净交换 (NEE) 以及 (c) 模型模拟的生态系统净初级生产力 (NPP) 的年度动态。

图 7 2001-2014 年间高寒草地增强型植被指数 (EVI) 的变化趋势。图 a 代表 103 个采样点 EVI 的平均变化；图 b 代表青藏高原高寒草地 EVI 变化速率 (EVI 与年份的线性拟合的斜率) 的空间分布。SI 表示显著增加, NI 表示不显著增加, SD 表示显著下降, ND 表示不显著下降。

表 1 过去几十年高寒草地植被碳输入与土壤异氧呼吸 (碳输出) 变化速率的比较 (单位: % yr<sup>-1</sup>)

	样点	区域
碳输入	3.4	1.0
碳输出	0.3	0.4

注: 样点尺度数据来自青海省海北高寒草甸生态系统监测站

- 野外监测数据、遥感数据及多个模型的模拟结果都一致表明过去几十年来青藏高原的植被生产力是显著增加的。
- 植被生产的显著增强进一步导致了土壤碳输入的持续增加。
- 研究区显著的环境变化 (增温增湿) 也造成了土壤有机碳的加速分解。
- 来自样点和区域两个尺度的证据都表明植被碳输入的增加大于土壤碳损失，从而导致该区域土壤有机碳的积累。

## 结论

- 青藏高原持续增加的植被碳输入导致该区域活动层 30 cm 土壤在过去 10 年间发挥着显著的“碳汇”功能；
- 土壤碳库的动态变化特征与土壤深度有关，下层土壤是该区域土壤“碳汇”的主要贡献者，而表层土壤碳库无显著变化。

## 参考文献

1. Ding JZ *et al.* (2017) Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO2945 (accepted).
2. Schuur EAG *et al.* (2015) Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520, 171-179.
3. McGuire AD *et al.* (2016) Variability in the sensitivity among model simulations of permafrost and carbon dynamics in the permafrost region between 1960 and 2009. *Global Biogeochemical Cycles*. 30, 2016GB005405.