

特别说明：本文主要内容摘录翻译自 Johan Rockström 等作者于 2023 年 5 月在 *Nature* 期刊上发表的“*Safe and just Earth system boundaries*”本文¹，如翻译内容有不一致，请以英文原版表述为准。

安全公正的地球系统边界

2023 年 7 月

¹原文网址：<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06083-8>

目 录

一、研究设置	1
(一) 研究背景	1
(二) 研究范围	1
(三) 研究方法	1
(四) 研究创新点	2
二、量化 ESBs	3
(一) 气候	3
(二) 生物圈	5
1、基本完整的自然生态系统区域	5
2、包括城市和农业生态系统在内的所有生态系统的功能完整性	5
(三) 水	6
1、地表水的流量变化	6
2、地下水的下降	6
(四) 营养物	7
1、研究设置和结论	7
2、富营养化可能的危害	7
(五) 气溶胶污染	8

图表目录

图表 1 : 安全与公正的 (NSH) ESBs.....	2
图表 2 : 在不同变暖程度下暴露于气候变化的重大危害	4
图表 3 : 气候领域中安全公正的地球系统边界	4
图表 4 : 生物圈领域中安全公正的地球系统边界	6
图表 5 : 淡水领域中安全公正的地球系统边界	7
图表 6 : 营养物领域中安全公正的地球系统边界	7
图表 7 : 气溶胶污染领域中安全公正的地球系统边界	8

地球系统的稳定性和复原力与人类福祉密不可分,但它们之间的相互依存关系目前尚未得到充分认识。本文基于已有的相关研究成果在全球和亚全球范围内,通过构建模型来量化评估气候、生物圈、水、营养物及气溶胶污染的安全与公正的地球系统边界,即 ESBs (Earth System Boundaries), 从而为人类保护地球提供一个定量基础。ESBs 用于维持地球系统的弹性和稳定性,并最大限度的减少地球系统变化可能给人类带来的重大伤害。

本文第二部分详细论述了气候、生物圈、水、营养物和空气污染五个维度的 ESBs。研究表明:(1)在气候和大气气溶胶负荷下,与安全相关因素相比,公正相关因素更能限制综合的 ESBs;(2)本文在全球范围内共设置了 8 个维度的安全与公正的 ESBs,在全球一半以上的土地面积中,7 个维度已经超过其对应安全与公正的 ESBs,同时至少 2 个维度在亚全球范围内已经超过其安全与公正的 ESBs。

一、研究设置

(一) 研究背景

以不可持续的资源开采和消费为基础的社会和经济制度,推动了地球系统的快速变化,同时也破坏了关键的生命支持系统,人类已经感受到这些变化带来的社会影响。这些变化可能导致地球系统触发临界点,不可逆转地破坏地球系统的稳定,因此需要建立一个边界,即 ESBs,以便在一个综合框架中量化地球系统的复原力和人类福祉。

(二) 研究范围

根据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 最新报告,本文将重大危害定义为地球系统变化对国家、社区和个人造成广泛的严重生存障碍或不可逆转的负面影响,如生命或收入损失、食物或水的缺乏、营养不良或慢性疾病等。这些负面影响跨越了地球系统的主要组成部分,同时受人类活动的影响,它们可能会影响地球系统的稳定性和全球未来的发展。基于以上负面影响,本文在全球和亚全球维度上为气候、生物圈、水、营养物质和空气污染构建了一套安全公正的地球系统边界(ESBs)。

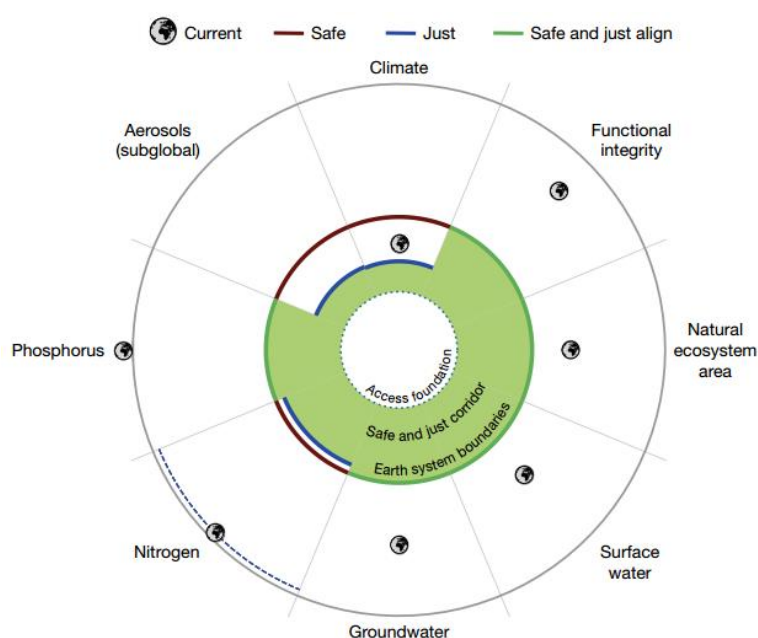
(三) 研究方法

- (1) 为维持和增强地球系统的稳定性和弹性,本文在亚全球和全球维度上确定了“安全”边界。通过对局部和区域临界点因素的临界点风险评估、研究地球系统功能下降的证据、历史变异性分析和专家判断等方法评估了这些 ESBs 的不确定性和置信度。
- (2) 使用三个标准来评估遵守安全的 ESBs 是否可以保护人们免受重大伤害:(a) 物种

间正义和地球系统稳定性；(b) 过去与现在、现在与未来几代人之间的“代际正义”；以及 (c) 国家、社区和个人之间的“代际正义”。

- (3) 结合公正标准与历史分析、国际卫生标准、地球系统建模和专家判断等方法量化安全公正的 ESBs，从而实现最大限度地减少人类暴露于地球系统变化的重大伤害，即无重大伤害状态(NSH, 即：No Significant Harm)。随着时间推移，通过构建一个基础：能够使所有人获得水、食物、能源和基础设施的最低途径，以及安全和公正的 (NSH) ESB 对生物物理领域的最大允许人类压力上限，可以构成一个安全和公正的“走廊”，如图表 1 所示。

图表 1：安全与公正的 (NSH) ESBs



资料来源：Safe and just Earth system boundaries

注：安全 ESB（深红色）、仅 (NSH) ESB（蓝色）、安全和公正 (NSH) 边界对齐的情况（绿色）和当前全局状态（地球图标）的可视化

（四）研究创新点

本文的研究创新点如下：

- (1) 定义了公正的 ESBs，以避免在相同领域使用与安全 ESBs 相同的单元。同时还阐明了一些社会政治概念，如地球系统正义，并将其含义转化为生物物理单位，以便更好地理解人类可以在其中发挥作用的空間；
- (2) 在大多数领域中定义了全局和子全局 ESBs；

- (3) 为地球系统状态设置了多重可能性水平的边界；
- (4) 气候、生物圈和其他地球系统领域的关键元素评估。

二、量化 ESBs

对于每个地球系统域，通过量化用于维持地球系统弹性的多个可能的安全边界水平，从而反映确切边界位置的不确定性和可变性。下文将从气候、生物圈、水、营养物、气溶胶污染五大维度分别量化 ESBs，介绍每个维度的研究设置及研究结论等。

（一）气候

（1）研究设置

气候相关的地球系统变化包括气候的临界点、超过间冰期的范围、生物圈的功能。

- ◆ **根据最小化触发气候引爆因素的可能性，确定了应对气候变暖的安全 ESBs。**一些气候临界点，如环流崩溃或亚马逊干涸，在其动力学和潜在变暖阈值方面具有很高的不确定性或低置信度，但补充的古气候和生物圈分析独立支持安全的气候 ESBs 评估。
- ◆ **维持冰冻圈的功能。**冰冻圈的功能包括维持北部高纬度地区的永久冻土、永久极地冰盖和山地冰川，以及尽量减少海冰的损失。
- ◆ **关注全球变暖。**研究发现，全球升温的幅度比工业化前水平高出 1.0°C 以上，就有中等可能性引发引爆因素，如格陵兰冰盖的崩塌或北方永久冻土的局部突然融化；升温幅度超过 1.5°C 或 2.0°C，触发临界点的可能性分别增加到高或非常高。

（2）研究结论

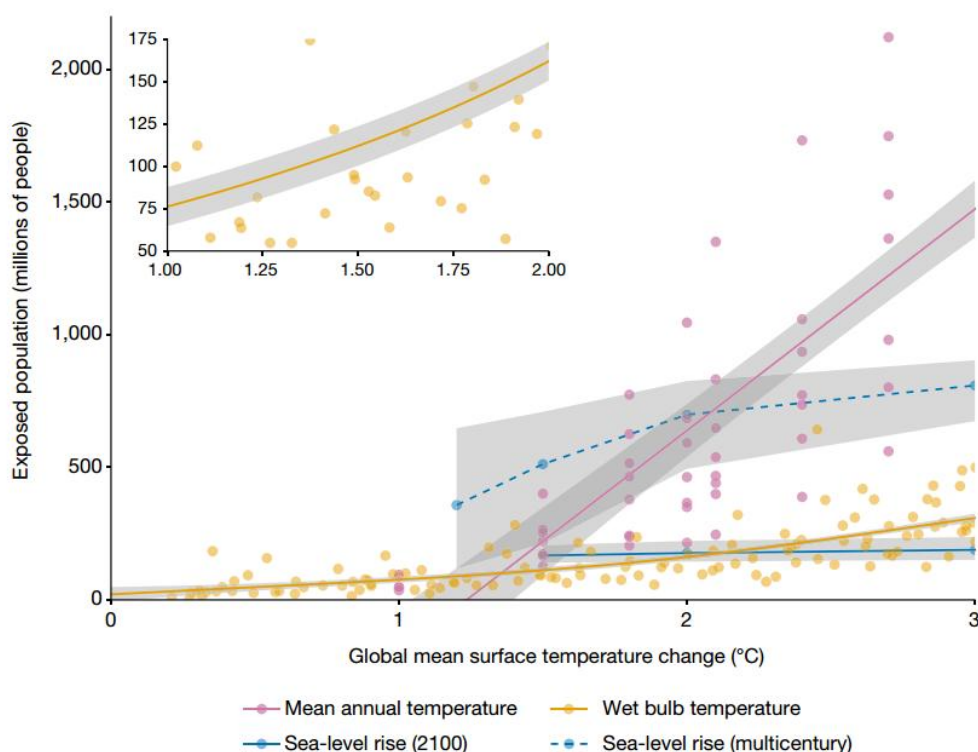
全球升温不超过 1.5°C 的安全 ESB 可以避免对人类和其他物种造成最严重的气候影响。

（3）气候变化造成的重大危害

- ◆ 在全球升温 1.0°C 时，数千万人暴露在极端湿球温度下，引起了人们对代际正义的关注。
- ◆ 在全球升温 1.5°C 时，超过 2 亿人尤其是已处于贫困和边缘化(国家内的不公正)的人们，可能将处于前所未有的年平均气温中，同时超过 5 亿人可能将面临海平面长期上升的情况。
- ◆ 温室气体排放已经造成了严重的危害，包括极端天气事件、北极土著社区的栖息地丧失、低洼国家的土地面积丧失、海平面上升或冰川融化系统变化导致的地下水补给减少。由

人为温室气体排放造成的冰冻圈和生物圈引爆因素的不可逆转影响，将在未来几十年发生，但将在数百年或数千年之后显现其危害，这些影响也会威胁到代际正义。

图表 2：在不同变暖程度下暴露于气候变化的重大危害



资料来源：Safe and just Earth system boundaries

注：2010 年全球人口暴露于年平均温度高于 29°C（紫色：线性拟合， $P < 0.01$ ），湿球温度为 35°C，平均每年至少 1 天（橙色：二次拟合， $P < 0.01$ ）和未来海平面上升（蓝色：线性插值）

如果要避免数千万人由于气候变化导致的重大伤害，则应将合理边界（NSH）设置在 1.0°C 或以下。由于在可预见的将来可能无法返回到这一边界内，因此必须进行相应的适应和补偿，从而降低气候危害给人类造成的伤害。

图表 3：气候领域中安全公正的地球系统边界

Domain: state variable	Relevant Earth system change	Safe ESB subglobal (local/regional)	Safe ESB globally aggregated	Just (NSH) ESB	Safe and just ESB	Current global state
Climate: global mean surface temperature change since pre-industrial (1850–1900)	Climate tipping points; exceed interglacial range; biosphere functioning	Global climate boundary set to avoid regional tipping points and biome degradation	Likelihood of passing tipping points: low, 0.5–1.0°C; moderate, >1.0°C; high, >1.5°C; very high, >2.0°C	Exposure to additional significant harm: moderate, 0.5–1°C; high, 1–1.5°C; very high, >1.5°C	1.0°C at high exposure to significant harm	1.2°C

资料来源：Safe and just Earth system boundaries

（二）生物圈

1、基本完整的自然生态系统区域

（1）研究设置

基本完整的自然生态系统区域相关的地球系统变化包括：气候、水以及生物多样性的丧失。维持基本完整的自然生态系统区域是确保所有人类、其他物种和地球系统稳定所依赖的地球系统功能的必要条件，包括碳、水和营养物质的储存量和流量，以及阻止物种灭绝，即地球系统通过地球系统功能对人类的贡献（NCP: Earth system nature's Contribution to People）。

（2）研究结论

- ◆ 基于气候、水和物种保护模型的结果，提出了全球陆地表面被基本完整的自然区域覆盖的安全 ESB 为 50-60%，以维持地球系统的 NCP。该范围的确定使用了当前自然土地覆盖面积作为最小值，同时指出需要恢复基本完整的自然区域。确切的安全边界在很大程度上取决于对特定生态功能的需求，以及基本完整的自然区域在生态系统中的空间分布。
- ◆ 海洋需要与 50-60%陆地生态系统相当的自然生态系统区域，以保持碳封存并最大限度地减少额外的海洋物种灭绝。生物群落尺度的界限可能更为严格，例如，为了保护热带森林生物群落，因为它们对气候稳定和水分循环有贡献。如果恢复工作的分配和协调不够理想，所需的最小面积将会更大；如果这些边界被越过，可能会触发涉及生物群落尺度功能完整性丧失和相关 NCP 的临界点，包括物种灭绝率的增加。

2、包括城市和农业生态系统在内的所有生态系统的功能完整性

（1）研究设置

功能完整性是指城市、农业或其他人为改造的生态系统为人类提供生态功能及其贡献的能力，是对大型完整自然生态系统区域所提供的地球系统 NCP 的补充。本文分析了维持当地陆地新生物杀灭剂供应所需的自然栖息地和半自然栖息地的最小数量、质量和距离，包括授粉、病虫害控制、水质调节、土壤保护、减轻自然灾害和娱乐。

（2）研究结论

在人类改造的土地上，每平方公里至少需要 20-25%的半自然栖息地，以支持包括本地物种在内的多个本地 NCP 的供应。所需的确切数量和质量因土地类型、气候和地形而异。

在一些易受自然灾害影响的土地中，如陡坡或极易侵蚀的土壤，比例可高达 50%。大约三分之二的人类主导的土地面积(约占总土地面积的 40%)功能完整性不足，大片地区正在表现出恢复力丧失的症状，需要采取再生措施来恢复当地和地球系统的功能。

图表 4：生物圈领域中安全公正的地球系统边界

Domain: state variable	Relevant Earth system change	Safe ESB subglobal (local/regional)	Safe ESB globally aggregated	Just (NSH) ESB	Safe and just ESB	Current global state
Biosphere: natural ecosystem area	Loss of climate, water, biodiversity NCP	Critical natural ecosystems need to be preserved or restored	>50–60% natural ecosystem area (depending on spatial distribution)	Align with safe boundary plus ensure distributional justice	>50–60% (upper end) depending on distribution	45–50% natural ecosystem area
Biosphere: functional integrity	Loss of multiple local NCP	>20–25% of each 1km ² under (semi-) natural vegetation; >50% in vulnerable landscapes; at <10%, few NCP remain	100% of land area satisfies local boundary	Align with safe boundary	>20–25% of each 1km ² under (semi-) natural vegetation	One third (31–36%) of human-dominated land area satisfies ESB

资料来源：Safe and just Earth system boundaries

（三）水

1、地表水的流量变化

河流流量变化是淡水生物多样性丧失的关键驱动因素之一，其导致的淡水生物多样性的下降速度超过陆地和海洋系统，以及数百万人赖以生存的沿海和内陆渔业等大规模 NCP。本文假定全球所有河流的月地表水流量变化比普遍的自然流量变化(增加或减少)20%作为亚全球安全 ESBs。研究结果表明，20%以内的流量变化支持本地鱼类物种的生存，超过这一水平的流量变化强烈影响生物多样性和生态系统的结构和功能。

2、地下水的下降

地下水含水层有助于许多河流系统的基流，并直接维持湿地和陆地植被。当地下水抽取量超过补给率时，就会出现不安全的地下水抽取水平，影响地下水依赖的生态系统，导致地面沉降和不可逆转的含水层损失。假定所有含水层的年地下水消耗的安全 ESBs 为平均年补给量，如果地下水消耗量小于补给量，则认为地下水是安全的。研究发现，47%盆地的地下水位目前正在下降，估计目前我们处于全球 ESB 之外。

图表 5：淡水领域中安全公正的地球系统边界

Domain: state variable	Relevant Earth system change	Safe ESB subglobal (local/regional)	Safe ESB globally aggregated	Just (NSH) ESB	Safe and just ESB	Current global state
Water: surface water flows	Collapse of freshwater ecosystems	<20% magnitude monthly surface flow alteration	100% of land area satisfies local boundary (sums to 7,630 km ³ per year global flow alteration budget)	Align with safe plus World Health Organization and United Nations Environment Programme quality standards	Regional and global safe ESBs	66% of global land area satisfies ESB annually (3,553 km ³ per year global alterations)
Water: groundwater levels	Collapse of groundwater-dependent ecosystems	Annual drawdown does not exceed average annual recharge	100% of land area satisfies local boundary (sums to 15,800 km ³ per year global drawdown)	Align with safe plus World Health Organization and United Nations Environment Programme quality standards	Safe ESB (and ensure recovery)	53% of global land area satisfies ESB (15,700 km ³ per year annual drawdown)
Green water ³⁸ (previous assessment)	Not assessed	Monthly root-zone soil moisture deviates from Holocene variability	<10% of ice-free land area exceeds boundary	Not assessed	Not assessed	18%

资料来源：Safe and just Earth system boundaries

（四）营养物

1、研究设置和结论

氮（N）相关的地球系统变化包括地表水与陆地生态系统富营养化，磷（P）相关的地球系统变化为地表水富营养化。本文为农业氮和磷盈余均设定了安全的 ESBs，以尽量减少径流导致的地表水和陆地生态系统的富营养化。基于现有的研究成果，本文建议安全的 ESBs 为农业氮盈余每年 61(35-84) TgN，农业土壤磷盈余每年 4.5-9.0 TgP。基于这些 ESBs 和已有的论文计算了亚全球和全球农业养分损失、过剩以及水和空气中氮和磷临界浓度，研究发现超过这些浓度，富营养化就会发生。

2、富营养化可能的危害

氮和磷浓度升高通过富营养化对生态系统造成危害，例如渔业崩溃、藻类繁殖释放的有毒化合物。同时，人类饮用硝酸盐浓度升高的地表水或地下水也会造成危害，考虑到地下水硝酸盐可能带来的危害，全球氮边界应尽可能收紧至 57 (34-74)Tg N /年。

图表 6：营养物领域中安全公正的地球系统边界

Domain: state variable	Relevant Earth system change	Safe ESB subglobal (local/regional)	Safe ESB globally aggregated	Just (NSH) ESB	Safe and just ESB	Current global state
Nutrient cycles: nitrogen	Surface water and terrestrial ecosystem eutrophication	<2.5 (1-4) mg N l ⁻¹ in surface water; <5-20 kg N ha ⁻¹ per year in terrestrial ecosystems (biome dependent)	Surplus, <61 (35-84) Tg N per year; total input, <143 (87-189) Tg N per year	Align with local safe plus drinking water (<11.3 (10-11.3) mg NO ₃ -N l ⁻¹ ; globally, <117 (111-117) Tg N per year) and any available air pollution (for example, NH ₃) standards	Local ESBs; and global surplus, 57 (34-74) Tg N per year	Surplus, 119 Tg N per year; total input, 232 Tg N per year
Nutrient cycles: phosphorus	Surface water eutrophication	<50-100 mg P per m ³	Surplus, <4.5-9 Tg P per year; mined input, <16 (8-17) Tg P per year	Align with local safe boundary to avoid eutrophication	Local and global safe ESBs	Surplus, ~10 Tg P per year; mined input, ~17 Tg P per year

资料来源：Safe and just Earth system boundaries

（五）气溶胶污染

由于南北半球差异的上升会触发区域临界点的引爆点，并对区域水循环造成重大不利影响，因此基于半球间气溶胶光学深度（AOD: Aerosol Optical Depth）差异，同时考虑到自然排放、人为排放和平流层气溶胶注入(太阳地球工程)引起的 AOD 差异及其潜在影响，本文提出了安全的 ESBs。基于过去火山爆发和气候模拟研究的观测结果发现：一个半球反射气溶胶浓度的增加会导致同一半球热带季风区降水减少，相反半球降水增加。研究发现，如果半球间 AOD 差异超过 0.15，由于空气污染或地球工程相关的气溶胶不对称，这些变化可能会变得具有破坏性。

图表 7：气溶胶污染领域中安全公正的地球系统边界

Domain: state variable	Relevant Earth system change	Safe ESB subglobal (local/regional)	Safe ESB globally aggregated	Just (NSH) ESB	Safe and just ESB	Current global state
Atmosphere: aerosol loading	Monsoon systems	<0.25–0.50 AOD	Annual mean interhemispheric AOD difference: <0.15	Align with safe plus <15 $\mu\text{g per m}^3$ mean annual $\text{PM}_{2.5}$; other levels of exposure to significant harm in Supplementary Table 11	<15 $\mu\text{g per m}^3 \text{PM}_{2.5}$ plus regional and global safe ESBs	0.05 annual mean interhemispheric AOD difference

资料来源：Safe and just Earth system boundaries

关于华证 ESG 评级

华证指数目前已获得 PwC 出具的针对国际证监会组织（简称 IOSCO）准则所做的独立鉴证报告，其中亦包含 ESG 领先等指数，指数业务已达到 IOSCO 的《金融基准原则》标准。

华证 ESG 评级以 ESG 核心内涵和发展特点为基础，在国际公认的 ESG 评价框架内，考虑中国特色及具体实践经验，自上而下构建评级指标体系。在 ESG 评级过程中，集成传统数据与另类数据，打造算法驱动的大数据引擎，系统测算 A 股、港股上市公司以及发债主体的 ESG 表现和风险水平，其中评级给予“AAA-C”的九档评级，风险给予“低风险、关注、警告和严重警告”的四档分类。

华证指数于 2022 年年初成为 UN PRI 签署方，是支付宝旗下蚂蚁财富绿色基金的独家基金 ESG 数据供应商。在指数方面，华证指数已推出一系列 ESG 指数，并已和银华基金合作发行了一只银华华证 ESG 领先公募基金产品，2021 年华证还联合国家电网旗下的国网英大长三角金融中心共同发布了我国资本市场上第一支碳中和指数。

免责声明

本文件所载数据资料均来自第三方公开资料，仅供参考，不构成任何证券、金融产品或其他投资工具或任何交易策略的依据或建议。上海华证指数信息服务有限公司不保证其准确性或完整性。对任何因直接或间接使用本文件或其中任何内容而造成的损失，本公司不承担任何法律责任。

本文件著作权归属于上海华证指数信息服务有限公司。未经本公司事先书面同意，任何人不得复制、转载、引用或将本文件的任何内容对外公布。