

地球界限概念框架及其研究进展

张军泽¹, 王 帅¹, 赵文武¹, 刘焱序¹, 傅伯杰^{1,2*}

(1. 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要:“地球界限(Planetary Boundaries)”是指用于界定“安全运行空间(safe operating space)”的边界值,是 Johan Rockström 等近年来提出的旨在保障人类生存和发展的重要概念框架。该框架一经提出就引起了广泛关注,一方面质疑者对这一概念框架的科学意义以及评估方法提出批评;另一方面支持者则对其评估方法、研究内容和研究尺度进行了完善和扩展,并取得了重要的成果。为了促进国内学者对该领域的了解和应用,论文在回顾相关文献的基础上,首先介绍了“地球界限”的概念内涵,并将其与中国学者所熟知的环境承载力等概念进行了比较分析;随后总结了该概念框架的争议观点,同时也对其近期的发展状况进行了评述;最后结合中国目前的发展状况,分析了“地球界限”概念框架对中国可持续发展的借鉴意义,并对未来的研究提出了展望,包括① 进一步了解不同地球系统过程的相互作用机制,完善“地球界限”的指标评估体系;② 明确“地球界限”与生态系统服务以及人类福祉三者之间的内在联系;③ 结合“地球界限”的评估结果,加强变革式环境治理的研究。

关键词:地球界限;安全运行空间;安全公正空间;可持续发展

自工业革命以来,由于人口增长、经济发展和人们生活方式的变化,全球范围内的自然资源消耗迅速增加,致使生态环境问题愈来愈严重(Rockström et al, 2009a; Steffen et al, 2015)。近几十年来,科学家们已经提出了许多阈值性概念以期促进环境保护与可持续发展,例如“临界负荷(critical loads)”、“环境承载力(carrying capacity)”、“增长的极限(limits to growth)”以及“气候护栏(climate guardrails)”等(Bruckner et al, 2003; Biermann, 2012; Häyhä et al, 2016)。其中以“气候护栏”的概念来限制全球范围内气候变化的容忍界限得到了广泛的认可,即全球最高温度升高不能超过 2 °C (Bruckner et al, 2003; Biermann, 2012)。

2009 年,由斯德哥尔摩大学 Johan Rockström 领导包括诺贝尔化学奖得主 Paul Curtzen 在内的 28

位世界顶尖的科学家团队,共同提出了调节地球系统稳定性和恢复力的 9 个过程,并量化了部分过程的“地球界限”(Rockström et al, 2009a, 2009b)。研究指出在这个界限内,人类及其子孙后代可以继续繁荣发展,若跨越这些界限则会增加突发性或不可逆的环境变化风险。提出该概念的第一篇科学论文于 2009 年在 *Ecology and Society* 期刊上发表,同年在 *Nature* 上发表了另一篇名为“A safe operating space for humanity”的专题论文,随后“地球界限”这一概念便引起了国际科学界的高度关注。

在 2012 年联合国于巴西里约热内卢召开的地球峰会(Rio+20)中,一致决议以可持续发展目标(SDGs)接替 8 项千年发展目标(MDGs),而地球界限的概念则在制定 SDGs 中给予了考虑,例如生物多样性保护、海洋资源的使用以及陆地生态系统的可

收稿日期:2018-08-24;修订日期:2019-01-06。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0604701);中央高校基本科研业务费专项资金资助。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFA0604701; The Fundamental Research Funds for the Central Universities.]

第一作者简介:张军泽(1993—),男,黑龙江七台河人,博士生,主要从事人地关系耦合与可持续发展研究。

E-mail: zhangjunze427@126.com

*通信作者简介:傅伯杰(1958—),男,中国科学院院士,研究员,博导,主要从事地理学综合研究。E-mail: bfu@rcees.ac.cn

引用格式:张军泽,王帅,赵文武,等. 2019. 地球界限概念框架及其研究进展 [J]. 地理科学进展, 38(4): 465-476. [Zhang J Z, Wang S, Zhao W, et al. 2019. Review on the conceptual framework of planetary boundaries and the development of its research. Progress in Geography, 38(4): 465-476.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.04.001

持续利用等(SDSN, 2013; Häyhä et al, 2016)。同年,世界可持续发展工商理事会,也利用了地球界限框架制定其2020行动战略(Baron, 2013)。自从地球界限的概念提出以来,世界各地的科学家、决策者以及不同行业的人员一直在努力发展并完善这一概念,然而国内对此方面内容的研究报道相对较少。方恺(2014)曾将 Planetary Boundaries 译为行星边界,并将生态足迹与行星边界相结合对全球主要国家的可持续性进行了评价,其研究指出生态足迹可作为资源利用的现值,而行星边界则是安全边界。然而将 Planetary Boundaries 译为行星边界则容易与 Planetary Boundary Layer(行星边界层或大气边界层)的概念相混淆,因此本文倾向于将其译为“地球界限”以便于与其他概念区分。

近年来,这一概念框架又取得了较多进展,同时也有不少学者对其提出了质疑。为了促进国内学者对该概念框架的了解和应用,本文通过总结国际上关于“地球界限”研究的最新进展,介绍“地球界限”概念框架的内涵并与传统的环境承载力方面的概念进行比较,同时也对该概念框架的争议观点和近期发展进行评述,最后展望其对中国可持续发展的借鉴意义,以期为中国相关研究及规划管理提供参考。

1 “地球界限”的概念框架

“地球界限”是用于界定“安全运行空间”的边界值,而“安全运行空间”则是指人类活动的合理范

围或程度(Rockström et al, 2009b)。该概念框架旨在避免全球范围内剧烈的人为环境变化,降低人类活动超出地球系统生态阈值的风险,从而维持地球当前与全新世环境条件相近的状态,以保障人类的生存(Rockström et al, 2009b; Steffen et al, 2015)。“地球界限”是基于预防性原则提出的,并以某种地球系统过程的生态阈值为参考。然而,由于当前已有的知识无法详细描述自然过程的复杂性,或者是控制变量和响应变量之间相互作用的反馈机制,使得评估到的生态阈值具有一定的不确定性,因此常以生态阈值不确定性范围内的最小值来设定地球界限(Rockström et al, 2009b; Steffen et al, 2015);但是,对于不具有区域或全球性阈值效应的地球系统过程来说,其地球界限的界定则可以以某一时期的环境特征为参考(例如全新世),并且结合人们的发展需求和对环境风险的感知来设定(Rockström et al, 2009b)。由此可以看出,无论是生态阈值,还是人们对环境风险的感知,两者不确定性的范围均对“地球界限”的界定有重要的影响。由图1所示,在“地球界限”左侧的绿色范围即表征某种过程或控制变量的“安全运行空间”,超过边界值以后会进入一段潜在的高风险区,一旦进入红色范围就意味着超过了生态阈值,并将引发不可逆的环境退化的现象。

Rockström 等(2009a)曾评估了9种关键的地球系统过程,包括气候变化(climate change)、海洋酸化(ocean acidification)、平流层臭氧消耗(stratospheric ozone depletion)、氮磷循环(nitrogen、phosphorus cycle)、全球淡水使用(global freshwater use)、土地利用

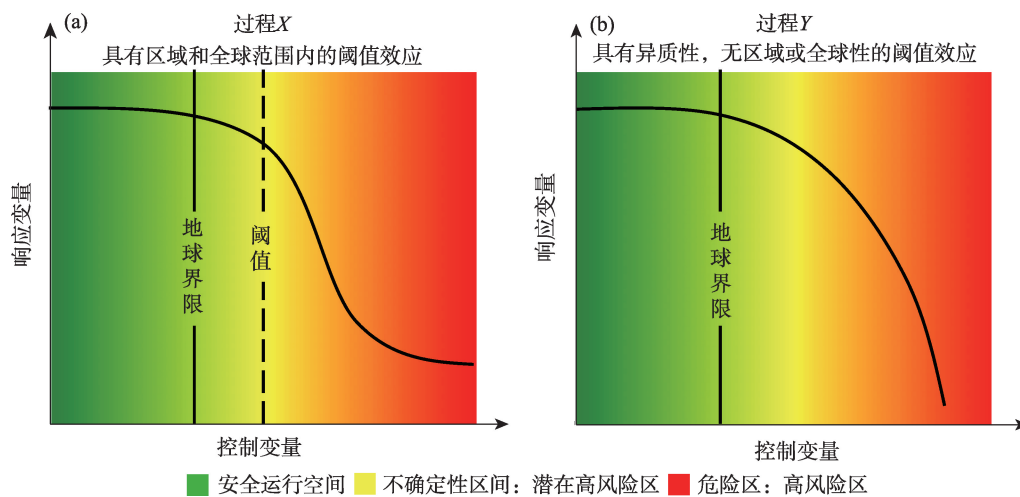


图1 地球界限的概念框架(Rockström et al, 2009b; Steffen et al, 2015)

Fig.1 Conceptual framework for the planetary boundary (Rockström et al, 2009b; Steffen et al, 2015)

变化(change in land use)、生物多样性损失(biodiversity loss)、大气气溶胶负载(atmospheric aerosol loading)和化学污染(chemical pollution)。其研究表明,气候变化、生物多样性损失和氮循环已经超过了地球界限,同时也指出由于受到数据资料的限制,并未量化化学污染和大气气溶胶负载的变化状况(图2a)(Rockström et al, 2009a)。

2015年,Steffen等(2015)在*Science*上更新了地球界限的研究结果,并且将生物多样性损失改为生物圈完整性(biosphere integrity),并细分为基因多样性(genetic diversity)、功能多样性(functional diversity);另外,将化学污染改为新物质的导入(introduction of novel entities),例如化学或工程上的新物质生产,如氯氟烃(chlorofluorocarbons)会对臭氧层造成严重影响(表1)。与2009年的结果相比,除了基因多样性、氮循环仍然处于高风险区之外,磷循环和土地利用变化也进入了高风险区。此外,2015年大气中CO₂浓度约为 400×10^{-6} ,尽管跨越了地球界限,尚在可接受的不确定范围内。唯一值得庆幸的是,平流层臭氧的消耗得到了大幅改善(图2b)(Steffen et al, 2015)。

“地球界限”的提出是以恢复力(resilience)理论为基础的(Rockström et al, 2009b)。生态系统恢复力是指生态系统在受到扰动或者冲击时,可以在无人力介入下使其结构和功能恢复到原有状态的能力(闫海明等, 2012)。Rockström等(2009b)指出,在工业革命到来以前,尽管地球系统过程也同时遭受人类活动和自然过程波动(气温和降水)的双重影响,但是地球的恢复力可以使这些过程只在较狭窄的范围内波动,并不会超过其生态阈值。而自工业

革命以来(人类世的出现),人类活动已经对许多关键的地球系统过程造成重要影响,甚至在自然状态下已无法自我恢复(例如土地利用变化)。因此,地球界限研究团队依据全新世的气候环境条件和当前不同地球系统过程阈值效应的研究结果,量化了不同过程的“地球界限”。

“地球界限”框架的提出也受到环境承载力概念的影响,但两者在量化过程中却存在一定的差异(Rockström et al, 2009b)。环境承载力被认为是环境的一种属性,是指某一时空条件下环境可以承受的人类活动的上限阈值,例如人口增长、经济发展以及污染排放等(封志明等, 2018),若超过这一阈值则会导致不可逆的环境退化现象发生(Andersen et al, 2009)。对于环境承载力及其隐含的阈值而言,可以通过结合长期的监测数据和统计手段得到一个较为准确的数值或范围。然而,对于不具阈值效应特征的地球系统过程来说,地球界限的设定更多地由人类发展需求和对环境风险的感知来界定,会受到主观因素的影响,因此容易引起一些争议。此外,环境承载力注重资源的供应能力,而与其相比,“地球界限”是基于预防性原则而提出的,其关键在于界定了影响地球自我调节能力的关键系统过程的最低安全标准。更重要的是,“地球界限”概念框架试图寻求一种实现可持续发展的新途径,即有限的运行空间中,通过制度变迁和技术革新来促进资源的可持续利用。因此,这一框架可以被看作是传统承载力研究的扩展延伸,并对全球可持续发展的实现有较大的促进作用。

尽管地球界限与环境承载力在量化过程中存在一些差异,但其与中国管理部门强调的生态红线

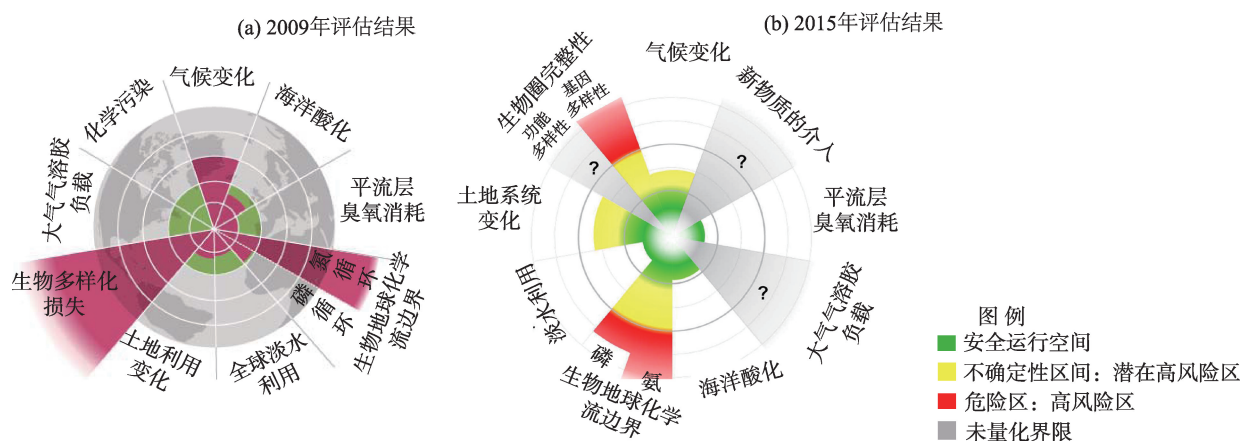


图2 9种地球系统过程的地球界限(Rockström et al, 2009a; Steffen et al, 2015)

Fig.2 Planetary boundaries for nine Earth-system processes (Rockström et al, 2009a; Steffen et al, 2015)

一词则有一定的相似之处。生态红线(也称生态保护红线)是为了加强中国生态保护和促进可持续发展而提出的重要理念。多数学者将其定义为为了维护国家和区域生态安全及社会经济可持续发展,并保障生态产品和服务持续供给而必须严格保护的最小空间范围或质量控制范围(郑华等, 2014)。例如,到 2020 年,中国湿地面积不少于 8 亿亩($1\text{ hm}^2=15\text{ 亩}$),海洋生态红线区内海水水质达标率不低于 80%等。通过比较地球界限和生态红线的概念可以看出,两者均强调将人类活动限制在一定的控制范围,但是两者也存在些许差别。首先生态红线主要涉及空间范围边界线或管理控制线,例如耕地、湿地以及森林的最小保留面积,具有生态阈值的含义(唐海萍等, 2015),而“地球界限”则注重在某一空间尺度上不同过程的合理变化程度,例如氮、磷污染以及生物多样性变化等;其次,目前关于生

态红线的研究多是定性的讨论,但是有关不同“地球界限”的量化研究已取得了一定的成果。考虑到目前生态红线的定义尚不统一,所以明确区分生态红线与“地球界限”的异同有一定的困难。因此,在未来的研究中,根据不同的研究目的与需求,有效地结合生态红线与“地球界限”对于促进环境可持续管理具有一定的参考价值。

2 “地球界限”的争议观点

尽管“地球界限”自提出以来得到了广泛的认可,但也有部分学者对它的合理性提出了质疑和批评。Lewis(2012)在 *Nature* 上发表评论文章,认为“地球界限”框架存在 2 个缺陷,其中一个为并不是所有的环境过程都具有阈值效应,而只存在一个资源的总量;另一个缺陷则是该框架应用到不同的尺

表1 9种地球系统过程的控制变量、地球界限(不确定性区间)以及当前值(Steffen et al, 2015)
Tab.1 Control variables and their current values, along with the proposed boundaries and zones of uncertainty, for all nine planetary boundaries (Steffen et al, 2015)

地球系统过程	控制变量	地球界限(不确定性区间)	当前值	
气候变化	大气 CO ₂ 浓度	350×10 ⁶ (350×10 ⁶ ~450×10 ⁶)	389.5×10 ⁶	
	大气顶层能量不平衡	1.0 W·m ⁻² (1.0~1.5 W·m ⁻²)	2.3 W·m ⁻² (1.1~3.3 W·m ⁻²)	
生物圈完整性	基因多样性(灭绝率)	<10 E/MSY(10~100 E/MSY) E/MSY 为每年每 100 万物种灭绝数量	100~1000 E/MSY	
	功能多样性(生物多样性完整性指数 BII)	维持 BII 在 90%(90%~30%)	84% (适用于南非地区)	
平流层臭氧消耗	平流层臭氧浓度(DU)	<275.5 DU(261~275.5 DU)	约 200 DU	
海洋酸化	碳酸盐饱和度(Ω, 主要指文石饱和度和 Ω _{arag})	大于工业革命前海水碳酸盐浓度的 80% (80%~70%)	84%	
生物地球化学循环(N、P)	全球 P 流动:从淡水系统流入海洋	11 Tg·a ⁻¹ (11~100 Tg·a ⁻¹)	22 Tg·a ⁻¹	
	区域 P 流动:从肥料流入易受侵蚀的土壤	6.2 Tg·a ⁻¹ (6.2~11.2 Tg·a ⁻¹)	14 Tg·a ⁻¹	
	全球 N 流动:工业和人工生物固氮	62 Tg·a ⁻¹ (62~82 Tg·a ⁻¹)	150 Tg·a ⁻¹	
土地利用变化	全球:林地占原有林地的比例	75%(75%~54%) 该值为三种独立生物区系的加权平均值	62%	
	生物区系:林地占潜在林地面积的比例	热带:85%(85%~60%) 温带:50%(50%~30%) 北方气候带:85%(85%~60%)		
		淡水利用	全球:最大蓝水消耗量(km ³ ·a ⁻¹)	约 2600 km ³ ·a ⁻¹
	流域:蓝水利用占月河川径流量的比例	低流量月份:25%(25%~55%) 中流量月份:30%(30%~60%) 高流量月份:55%(55%~85%)		
		全球:气溶胶光学厚度(AOD)	尚无确切界限	无
		区域:季节性平均 AOD	以南亚季风区为例: 0.25 AOD(0.25~0.50 AOD)	0.30 AOD
新物质的介入 (原化学污染)	尚无明确控制变量	尚无确切界限	无	

度会得到不同的结果,因此可能会引发政治纷争(Lewis, 2012)。Nordhaus等(2012)指出包括土地利用变化、生物圈完整性、氮循环、淡水利用、大气气溶胶负载和化学污染在内的6个地球系统过程在全球尺度上并无生物物理阈值,但是气候变化、海洋酸化、大气臭氧消减和磷循环在全球尺度上存在阈值效应。并且认为对无阈值效应的过程设定界限是一种武断的行为,甚至可能会加剧生态系统的退化。Montoya等(2018)针对生物多样性的“地球界限”提出了更加尖锐的评论,认为该框架无助于生物多样性和生态系统功能的保护,并指出若设定所谓的“安全运行空间”可能会加速珍稀物种的消失速率。综合来看,众多质疑的观点主要体现在以下5个方面:

(1) 从全球的尺度设定各种过程的“地球界限”可能会对地区性的政策制定造成误导。质疑者认为对于在全球尺度上无生物物理阈值的环境过程来说,无法通过科学评估的手段设定合理的地球界限(Nordhaus et al, 2012; Brook et al, 2013; Montoya et al, 2018)。这些系统过程的变化对人类福祉造成的积极或消极的影响需要经过政治和经济方面的权衡,然而这些影响往往都体现在区域内而非全球范围内。例如合成肥料的使用,人工添加氮素到土壤中可以促进粮食生产,但如果过度使用可能会污染地下水和造成淡水水体或者沿海海域出现“死亡区(Dead Zones)”。部分地区的氮素使用严重超标,因此有必要减少氮素的使用量。但同时也有其他地区,特别是非洲的许多地区,增加农田中氮肥的使用可以显著提高当地的粮食产量。此外,限制非洲地区氮素的使用并不会缓解其他过量使用氮素地区所造成的负面影响。因此,对于那些未充分利用氮肥的地区和过量使用氮肥的地区政策制定者而言,全球界限的设置并无实际意义。

(2) 除气候条件以外,无证据表明全新世的其他环境特征有助于人类福祉的提高。当前“地球界限”的评估是以全新世环境特征为参考的,然而,虽然全新世时期稳定的气候条件是人类生存和发展的基础,但无法证明当时的土地利用结构、氮含量、生物多样性水平以及其他环境特征可以维持当前人类的发展(Nordhaus et al, 2012)。持质疑态度的学者认为,当前的人口数量和福利水平从根本上取决于人类对全新世资源环境的利用和改造,因此,尽管全新世的环境特征是人类生存的理想环境,但

是以此为基础来设置“地球界限”可能会限制人们对自然资源或生态系统服务的获取,从而降低人类福祉(Defries et al, 2012)。

(3) 从全球尺度来看,生态变化与人类福祉之间的关系并不明确。“地球界限”框架建立在环境变量与人类福利密切相关的假设之上,即生态系统服务或自然资本的丧失意味着人类福祉的下降(Rockström et al, 2009b)。然而,质疑者认为这一假设过于片面。《千年生态系统评估》将人类福祉概括为以下5种要素,包括维持人类高质量生活的基本物质条件、自然环境方面的健康条件、良好的社会关系、应对自然和人为灾害的安全条件以及个人选择与行动的自由(MA, 2005)。质疑者指出尽管当前普遍认为生态系统退化会威胁人类福祉,但是纵观人类发展历史,全球大部分地区人类福祉的提高均是以消耗自然资源、破坏原始生态环境为代价的(Castree, 2016)。例如通过扩大农田面积、施用化肥农药来提高粮食产量的同时往往会造成生物多样性降低和水体富营养化等生态问题。此外,同一类型的生态系统变化可能会对一个地区的人类福祉带来净收益,而对另一个地区造成净损失,这通常取决于当地的自然条件、社会经济条件以及其他人文因素。因此,质疑者们认为若基于人类福祉的提高来设定全球尺度的地球界限可能会取得与预期相反的结果,即“地球界限”可能会诱导人们在“安全运行空间”继续破坏自然生态系统来满足人类需求(Castree, 2016; Montoya et al, 2018)。

(4) 生态系统服务权衡要比“地球界限”更好地表达人类福祉与生态系统之间的关系。生态系统服务权衡是指一种服务的增加而造成另外一种服务减少的相互作用关系,是近年来生态系统服务研究的热点话题(TEEB, 2010)。通过比较2种服务的成本效益以及人类的需求,可以有效地反映人与自然系统的动态关系,对相关决策的制定有较高的参考价值。Nordhaus等(2012)指出当前并没有关于生态系统功能方面或者环境变化与人类福祉之间关系的证据可以支撑“地球界限”框架,例如Rockström等(2009a)给出的淡水利用的“地球界限”仅是通过全球的水库库容量和河川径流量估算出来的,并没有考虑其他生态过程。此外,Defries等(2012)也指出人类活动对环境产生的影响存在着不同的成本与效益,但是如何权衡这些成本效益实质上是政治问题而非科学本身能够解决的,因此,“地球界

限”被认为是对人类活动“不可协商(non-negotiable)”的限制,即不会考虑由政治和社会经济因素的不同而造成的人们的偏好或价值观的差异,也就无法反映人类福祉与生态系统之间的关系。

(5) 尽管有学者认可“地球界限”的科学意义以及当前设定的值,但对不同地球系统过程是否超过了“地球界限”也存在不同的看法。Steffen等(2015)的评估结果显示,当前全球每年的淡水利用量约为 2600 km^3 ,远低于“地球界限”值($4000\text{ km}^3\cdot\text{a}^{-1}$),但Jaramillo等(2015)指出Steffen等(2015)的评估中仅考虑了灌溉农业用水量而未考虑非灌溉农业用水量,同时也认为其水库表面蒸发量的估值偏低,未考虑水库对其邻近区域(100 km 左右的距离)的水文影响。据此,Jaramillo等(2015)的评估结果认为目前全球每年的淡水利用量约为 $4664\text{ km}^3\cdot\text{a}^{-1}$,已经超过了“地球界限”。

针对关于“地球界限”的批评和质疑,Rockström的研究团队也作出了相应的回应。Galaz(2012)指出,尽管当前没有足够的数据来比较评估从区域尺度到全球尺度上9种地球系统过程的关键阈值,但是由于不同过程之间存在相互作用,例如氮磷的污染往往是由全球贸易决定的,因此不能将其与气候变化和区域的土地利用变化脱离关系;此外,氮磷污染也会破坏淡水和海洋生态系统的恢复力,从而降低其吸收 CO_2 的能力,最终影响气候变化。因此,从全球的尺度上设定不同过程的“地球界限”有助于综合管理。Barnosky等(2012)和Cardinale等(2012)的综述性论文均指出生物多样性无论是在区域尺度还是在全球尺度均存在阈值。Barnosky等(2012)认为若持续破坏生物多样性将会增加人类生存的风险。Cardinale等(2012)则对生物多样性与人类福祉的关系,以及失去生物多样性所造成的风险作了具体的总结。

Gerten等(2015)指出不同学者对同一个地球系统过程的评估结果存在差异的主要原因是对于同一概念的理解存在差异。例如Jaramillo等人的评估结果中考虑了植物的蒸腾耗水量,但是这部分水属于绿水的范畴,而Steffen等(2015)则强调以蓝水为主。Rockström等(2018)也进一步强调指出,地球界限框架的初衷并不是为了政策的调整与制定,而仅限于分析哪些环境过程决定着地球系统的稳定性,以及这些过程具有什么样的界限位置;并且这些界限的确定更多地取决于社会选择,即人们对风险的

感知,需要充分考虑不同利益相关者的参与。因此,“地球界限”概念框架的最终目的是希望能够综合当前的研究手段和方法而不是取代它们,例如生态足迹、生态系统服务或环境承载力等等,从而可以得出一个更全面合理的评估结果。一旦“地球界限”被确定和接受,其自然可以为决策提供依据(Rockström et al, 2018)。

3 “地球界限”的研究进展

3.1 不同地球系统过程“地球界限”的评估

尽管“地球界限”概念框架存在些许不足,但是也有许多学者以某一过程为研究对象,完善了“地球界限”的评估方法,并取得了很多有意义的成果。Sverdrup等(2011)应用系统动力模型评估了当前人类社会对磷利用效率的“地球界限”,研究结果指出在当前的利用效率下,磷资源还可以维持 100 a 左右的时间,而后将会变成非常稀缺且昂贵的资源。Gerten等(2013)依“自下而上”的原则,重新评估了淡水利用的“地球界限”,结果显示当前全年淡水利用的界限为 $2800\text{ km}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (不确定性范围为 $1100\sim 4500\text{ km}^3\cdot\text{a}^{-1}$),明显低于Rockström等(2009a)的评估结果。de Vries等(2013)认为Rockström等(2009a)给出的固氮“地球界限”偏低,并指出该界限应考虑活性氮的效益、危害及其空间变异性。该研究通过评估活性氮在粮食生产中的需求和对水资源、温室气体和土壤等造成的不利影响,得出当前每年固氮的界限应在 $60\sim 100\text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,与Steffen等(2015)的研究结果较为接近。

3.2 “地球界限”概念框架的扩展

虽然“地球界限”这一概念框架对于自然资源的可持续利用有着重要的指导作用,但是仅仅关注环境保护可能会忽视极端贫困以及其他社会不公平的现象(Raworth, 2012)。正如可持续发展所强调的人类对自然资源的利用既要避免对地球系统的关键过程造成压力,也要确保所有人能够获得所需的资源(Barbier et al, 2017)。因此,这意味着除了考虑自然过程的界限外,也需要将社会基础纳入“地球界限”的制定过程中(Raworth, 2012)。在Rio+20峰会中,各国政府强调了11项关键的“社会剥夺(social deprivation)”,即阻碍或减少个体与社会其他人之间在文化层次上的交流或互动的影响因素,包括粮食安全、人均收入、水资源及卫生、医疗保健、教

育、能源、性别平等、社会公平、发言权、就业和恢复力等社会基础指标(表2)(Raworth, 2012)。Raworth (2012)同时考虑了9种地球系统过程以及11种社会基础指标,构建了被称为“圆环(doughnut)”的概念框架,旨在为创造一个“安全公正空间(safe and just space)”提供决策依据,从而真正实现可持续发展(图3)。

由图3所示,在这个“安全公正空间”的框架中包含了2个界限,分别是环境界限和社会界限。其中环境界限与Rockström等(2009a)提出的“地球界限”内涵相同,其构成了“圆环”的外部界限,表示各种关键的地球系统过程或者环境变量是否超过了

设定的界限;而社会界限则是指各项社会基础指标必须要达到的临界值,表征各种权利是否得到保障。在2种界限之间则是人类生存的安全公正空间,在这个范围内既可以使自然资源可持续利用,又可以保障人类福祉(Raworth, 2012)。“安全公正空间”的理念进一步明确了实现可持续发展需要完成的目标,但是由于社会生态系统的复杂性,如何完成这些目标可能存在不同的路径,这主要受到社会价值观、风险意识以及不同社会群体之间权力和利益分配的影响(图3)。

有效地结合社会和环境界限,需要找到两者之间内在的关联性或相似性。总体来看,跨越任何一

表2 基于Rio+20峰会的社会基础解释性指标及其评估结果(Raworth, 2012)

Tab.2 Illustrative indicators and assessment results of social foundation based on Rio+20 (Raworth, 2012)

社会基础	解释性指标	临界值	时段或年份
粮食安全	营养不良人口比例	13%	2006—2008
收入	人均每天生活费低于1.25美元的人口比例	21%	2005
水资源及卫生	无法获得安全饮用水的人口比例	13%	2008
	无法获得健康的卫生设备的人口比例	39%	2008
医疗服务	无法获得基本药物的人口比例	30%	2004
教育	未接受小学教育的儿童比例	10%	2009
	15~24岁的文盲比例	11%	2009
能源	无电人口比例	19%	2009
	无卫生厨具人口比例	39%	2009
性别平等	男性和女性从事有薪酬工作的比例差距	34%	2009
	国家议会中,男女代表的比例差距	77%	2011
社会公平	在基尼系数大于0.35的国家,收入低于中位数的人口比例	33%	1995—2009
发言权	通过调查显示,认为自己没有言论自由的人口比例	待定	无
就业	未受雇于体面工作的劳动力人口比例	待定	无
恢复力	面临多维度贫困的人口比例	待定	无

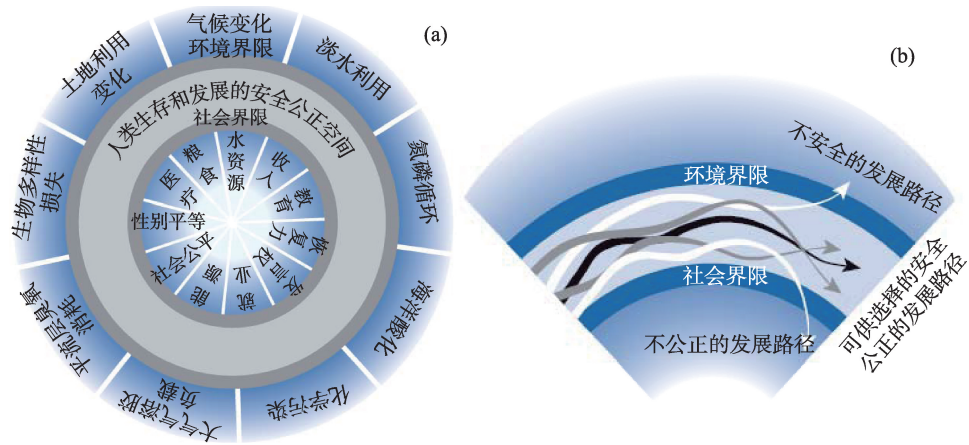


图3 人类生存和发展的安全公正空间的概念框架(a)及其潜在的发展路径(b)(Raworth, 2012; Leach et al, 2013)

Fig.3 Conceptual framework of safe and just space for humanity (a) and its potential development pathways (b) (Raworth, 2012; Leach et al, 2013)

个界限都可能引发社会和生态危机,只有同时实现消除贫困和保障资源的可持续性,才能有效实现可持续发展(Raworth, 2012; Leach et al, 2013)。同时,无论是社会界限还是环境界限的设定都属于规范性的,即由权威的组织或机构对其内涵负责解释(Leach et al, 2013)。例如是否构成社会剥夺也是由广泛认可的社会规范决定的。同样地,即使科学也可以较准确地描述地球生物物理过程的实际情况,但对于自然资源利用界限的设定也是属于规范性的,并且取决于人们对风险的感知以及是否希望生活在全新世环境条件中的意愿。尽管2种界限存在着以上的相似性,但也存在着一个明显的差异。在人类发展到工业革命之前,地球系统过程一直处于安全空间,因此当前的目标就是要使部分过程控制回安全空间内;而相比之下,非公平和非正义的现象始终存在人类社会,因此当前的目标则是努力使各项社会基础指标达到临界值(Leach et al, 2013)。

3.3 不同尺度“地球界限”的评估研究

Rockström等(2009b)在提出“地球界限”时表明该框架适用于全球尺度,但是许多学者指出全球尺度上的评估无法对不同国家和地区的环境政策起到有效的指示作用(Brown, 2017)。因此,近年来在城市、流域和国家等不同尺度的环境界限和社会界限的研究开始增多。Dearing等(2014)以中国2个农村地区为研究对象,结合长时间的环境监测和古生态学数据,以及社会调查数据,界定了区域上的环境界限和社会界限,并发现2个地区的水质恶化均已超过环境界限,而任何一项社会基础指标均没有达到社会界限。该研究认为将地球界限框架应用到区域尺度有助于提高政策效用。在结合早期关于生态系统恢复力和不同地球系统过程之间相互作用研究的基础上,Scheffer等(2015)将地球界限框架应用到了世界文化遗产保护中,并指出与全球尺度的评估相比,区域性评估可以更有效地降低气候变化和其他因素引发的环境退化风险。O'Neill等(2018)评估了150个国家的“安全公正空间”并进行了比较。研究表明,在全球资源可持续利用的基础上,没有国家可以满足全体公民的所有基本需求,而部分生理需求包括维持营养、获得电力、卫生设施甚至消除贫困是可以在不跨越任何“地球界限”的情况下得到满足。同时,O'Neill等(2018)指出若想全面实现社会公平,至少需要将当前资源利用率

提高2~6倍。

综合来看,与全球尺度上的地球界限评估相比,区域尺度有以下3点优势:①区域性的保护行动通常是自发的、单方面的,可以有效避免全球尺度上不同国家之间投机取巧的行为;②有助于促进区域上不同利益相关者的参与,使人们了解环境保护和政策制定的复杂性;③更重要的是,区域性的评估结果具有更小的不确定性,有利于研究方案的实施。然而,尽管如此,也不能忽视在全球尺度评估的重要意义,其不仅可以为区域尺度的评估提供方法上的借鉴,它的评估结果也可以作为不同国家“地球界限”评估的重要参考。

4 “地球界限”的启示与未来展望

4.1 “地球界限”对中国可持续发展的启示

中国作为世界上人口最多的国家,如何有效地协调经济发展与环境保护之间的关系是实现可持续发展的关键。改革开放以来,中国在资源环境可持续利用方面已取得了举世瞩目的成就,但也面临着其自身发展的局限性(Bryan et al, 2018)。例如,即使大规模的植树造林工程显著提高了中国的森林面积,但是对于生物多样性降低的现象并没有起到有效的遏制作用(Bryan et al, 2018)。同时,由于城镇化建设而被占用的高质量耕地往往只会用低质量的耕地来补偿,这也会对区域的粮食安全造成负面的影响(Wang et al, 2012)。

目前已有学者提出了适应中国国情的可持续发展评价指标体系,但是各项指标之间可能存在协同或者权衡效应,并且当前对各个指标之间相互作用关系的认识还不够全面,这也限制了不同部门之间的协同管理和政策一致性的实现(王军等, 2017)。更为关键的是,当前中国的可持续发展评价指标体系中并没有明确指出各项指标达到什么样的水平才算是实现可持续发展,而“地球界限”的概念框架以及后续发展的“圆环”框架则对解决这一问题提供了重要的参考。

此外,尽管生态红线近年来备受国内学者关注,并且有关环境质量底线和资源利用上限等术语也逐渐成为环境保护政策的参考标准(石海佳等, 2018; 刘耀林等, 2018),但是当前的相关研究仍面临着许多关键的问题。以生态红线为例,其评估方法和评估指标仍未统一,并且生态红线的划定与主

体功能区划等政策之间存在着空间不匹配的现象,这会导致相邻省份对环境问题的共同管理存在阻碍(Xu et al, 2018; 刘耀林等, 2018)。同时,与“地球界限”类似,中国提出的“生态红线”也并未考虑社会界限的实现,正如缩小贫富差距和实现男女平等也是可持续发展目标的重要组成部分。因此,以“地球界限”和“圆环”框架为参考,结合中国发展现状和发展需求合理地完善生态红线的评估框架,并鼓励不同地区设定合理的环境界限和社会界限,对促进中国可持续发展目标的执行、监测和评估具有重要的意义。

4.2 “地球界限”研究的未来展望

“地球界限”框架及其发展是地球系统管理研究的重要组成部分。将社会界限的实现引入到地球界限框架中进一步保障了资源可持续利用前提下的社会公平。无论是环境界限还是社会界限的评估都会受到客观和主观因素的影响,但最终的界限设定与否则是由政策决定的。然而评估和决策的关键均需要明确不同环境过程的相互关系及其尺度效应,以及不同利益相关者的需求,同时也需要注重资源利用对人类影响所造成的滞后效应。因此,为了进一步推动中国相关研究的发展,并弥补这一领域存在的不足,在未来的研究中可以从以下3个方面展开:

(1) 结合中国可持续发展目标评价体系,进一步了解不同地球系统过程的相互作用机制,完善“地球界限”的指标评估体系。正如批评者所指出的那样,许多环境过程中存在内部的相互影响,以至于无法确定合理的界限;同时,考虑到当前“地球界限”中的功能多样性、新物质的介入(化学污染)以及大气气溶胶负载等过程在全球尺度的界限仍未进行量化,这些均限制了“地球界限”概念框架的进一步发展和应用。因此,只有在明确内部关系的基础上,才能构建合理的评估指标体系,并且在区域尺度上的研究和相关政策实施同样具有全球性的效益。

(2) 明确“地球界限”与生态系统服务以及人类福祉三者之间的内在联系。一种生态系统服务可能需要不同生态系统过程支撑,而同一个生态系统过程可能影响多种生态系统服务(Fu et al, 2013)。而当某一种过程超过或接近“地球界限”的时候,如何对不同的生态系统服务进行取舍则与人类福祉息息相关。地球科学的重要性在于为环境问题的

管理提供参考,包括阐明引发不同环境问题的原因,分析环境变化对人类福祉产生的正面和负面的影响,以及通过权衡提出不同的解决方案。因此以生态系统服务为媒介,分别从供给和需求的角度对资源的供给潜力和人们的需求数量进行评估,可以进一步明确合理的“安全公正空间”,包括环境界限的评估以及社会界限的实现。

(3) 结合“地球界限”的评估结果,加强变革式环境治理的研究。与传统的适应性环境治理不同,变革式环境治理不在于维持当前社会-生态系统的性质或完整性,而是通过利益相关者和制度的变化来重组社会-生态系统的基础调控机制,从而从根本上构建一个新型的系统或稳态体制(Chaffin et al, 2016),以保证社会响应能与不断变化的生态系统相匹配,同时也可以进一步促进社会公平。由于当前部分关键的地球系统过程已经超过了“地球界限”,因此如何在保证经济发展和社会公平的情况下,将其调控回安全界限之内是人类面临的首要问题。而这离不开技术革新和制度变迁,只有主动改善退化的生态系统、探寻新的发展路径、转变发展模式才能减轻对生态系统造成的压力。

参考文献(References)

- 方恺. 2014. 基于足迹家族和行星边界的主要国家环境可持续性多维评价 [J]. 生态环境学报, 23(11): 1868-1875. [Fang K. 2014. Multidimensional assessment of national environmental sustainability based on footprint family and planetary boundaries. Ecology and Environmental Sciences, 23(11): 1868-1875.]
- 封志明, 李鹏. 2018. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论 [J]. 自然资源学报, 33(9): 1475-1489. [Feng Z M, Li P. 2018. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment. Journal of Natural Resources, 33(9): 1475-1489.]
- 刘耀林, 张扬, 张琰, 等. 2018. 特大城市“三线冲突”空间格局及影响因素 [J]. 地理科学进展, 37 (12): 1672-1681. [Liu Y L, Zhang Y, Zhang Y, et al. 2018. Conflicts between three land management red lines in Wuhan City: Spatial patterns and driving factors. Progress in Geography, 37 (12): 1672-1681.]
- 石海佳, 许乃中, 张玉环, 等. 2018. 基于“生态保护红线、环境质量底线和资源利用上线”的区域环境管控体系构建思路: 以珠三角地区为例 [J]. 环境影响评价, 40(5): 23-

29. [Shi H J, Xu N Z, Zhang Y H, et al. 2018. Regional environmental management and control system based on "Three Lines": Taking the Pearl River Delta as an example. *Environmental Impact Assessment*, 40(5): 23-29.]
- 唐海萍, 陈姣, 薛海丽. 2015. 生态阈值: 概念、方法与研究展望 [J]. *植物生态学报*, 39(9): 932-940. [Tang H P, Chen J, Xue H L. 2015. Ecological thresholds: Concept, methods and research outlooks. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39(9): 932-940.]
- 王军, 张焕波, 刘向东, 等. 2017. 中国经济分析与展望 (2016—2017): 中国可持续发展评价指标体系: 框架、验证及其分析 [M]. 北京: 社会科学文献出版社. [Wang J, Zhang H B, Liu X D, et al. 2017. China's economic analysis and outlook (2016—2017): Evaluation index system of sustainable development in China: Framework, verification and analysis. Beijing, China: Social Sciences Academic Press.]
- 闫海明, 战金艳, 张韬. 2012. 生态系统恢复力研究进展综述 [J]. *地理科学进展*, 31(3): 303-314. [Yan H M, Zhan J Y, Zhang T. 2012. Review of ecosystem resilience research progress. *Progress in Geography*, 31(3): 303-314.]
- 郑华, 欧阳志云. 2014. 生态红线的实践与思考 [J]. *中国科学院院刊*, 29(4): 457-461. [Zheng H, Ouyang Z Y. 2014. Practice and consideration for ecological redlining. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 29(4): 457-461.]
- Andersen T, Carstensen J, Hernández-García E, et al. 2009. Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(1): 49-57.
- Barbier E B, Burgess J C. 2017. Natural resource economics, planetary boundaries and strong sustainability [J]. *Sustainability*, 9(10): 1858. doi: 10.3390/su9101858.
- Barnosky A D, Hadly E A, Bascompte J, et al. 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere [J]. *Nature*, 486: 52-58.
- Baron R. 2013. The round table on sustainable development gratefully acknowledges financial support provided by the world business council on sustainable development [R]. The 29th round table on sustainable development to be held at OECD Headquarters, Paris.
- Biermann F. 2012. Planetary boundaries and earth system governance: Exploring the links [J]. *Ecological Economics*, 81: 4-9.
- Brook B W, Ellis E C, Perring M P, et al. 2013. Does the terrestrial biosphere have planetary tipping points? [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(7): 396-401.
- Brown K. 2017. Global environmental change II: Planetary boundaries: A safe operating space for human geographers? [J]. *Progress in Human Geography*, 41(1): 118-130.
- Bruckner T, Petschel-Held G, Leimbach M, et al. 2003. Methodological aspects of the tolerable windows approach [J]. *Climatic Change*, 56(1-2): 73-89.
- Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. 2018. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 559: 193-204.
- Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, et al. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity [J]. *Nature*, 486: 59-67.
- Castree N. 2016. Anthropocene and planetary boundaries [M]// Richardson D, Castree N, Goodchild M F, et al. The international encyclopedia of geography: People, the earth, environment, and technology (161-174). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Chaffin B C, Garmestani A S, Gunderson L H, et al. 2016. Transformative environmental governance [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1): 399-423.
- de Vries W, Kros J, Kroeze C, et al. 2013. Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5: 392-402.
- Dearing J A, Wang R, Zhang K, et al. 2014. Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems [J]. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions*, 28: 227-238.
- Defries R S, Ellis E C, Chapin F S, et al. 2012. Planetary opportunities: A social contract for global change science to contribute to a sustainable future [J]. *BioScience*, 62(6): 603-606.
- Fu B J, Wang S, Su C, et al. 2013. Linking ecosystem processes and ecosystem services [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(1): 4-10.
- Galaz V. 2012. Planetary boundaries concept is valuable [J]. *Nature*, 486: 191.
- Gerten D, Hoff H, Rockström J, et al. 2013. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: Role of environmental flow requirements [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6): 551-558.
- Gerten D, Rockström J, Heinke J, et al. 2015. Response to Comment on "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet" [J]. *Science*, 348: 1217-d. doi: 10.1126/science.aab0031.

- Häyhä T, Lucas P L, van Vuuren D P, et al. 2016. From Planetary Boundaries to national fair shares of the global safe operating space: How can the scales be bridged? [J]. *Global Environmental Change*, 40: 60-72.
- Jaramillo F, Destouni G. 2015. Comment on "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet" [J]. *Science*, 348: 1217-c. doi: 10.1126/science.aaa9629.
- Leach M, Raworth K, Rockström J. 2013. Between social and planetary boundaries: Navigating pathways in the safe and just space for humanity [M]// International Social Science Council and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *World social science report 2013: Changing global environments*. OECD Publishing and UNESCO Publishing, Paris: 84-89.
- Lewis S L. 2012. We must set planetary boundaries wisely [J]. *Nature*, 485: 417.
- MA. 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis* [M]. Washington DC: Island Press.
- Montoya J M, Donohue I, Pimm S L. 2018. Planetary boundaries for biodiversity: Implausible science, pernicious policies [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 33(2): 71-73.
- Nordhaus T, Shellenberger M, Blomqvist L. 2012. The planetary boundaries hypothesis: A review of the evidence [R]. Breakthrough Institute, Oakland.
- O'Neill D W, Fanning A L, Lamb W F, et al. 2018. A good life for all within planetary boundaries [J]. *Nature Sustainability*, 1(2): 88-95.
- Raworth K. 2012. A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut? [E/OL]. www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/dp-a-safe-and-just-space-for-humanity-130212-en.pdf.
- Rockström J, Richardson K, Steffen W, et al. 2018. Planetary boundaries: Separating fact from fiction: A Response to Montoya et al [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 33(4): 232-233.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. 2009a. A safe operating space for humanity [J]. *Nature*, 461: 472-475.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. 2009b. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity [J]. *Ecology and Society*, 14(2): 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.
- Scheffer B M, Barrett S, Carpenter S R, et al. 2015. Creating a safe operating space for iconic ecosystems [J]. *Science*, 347: 1317-1319.
- SDSN. 2013. *An action agenda for sustainable development: Report for the UN Secretary-General* [R]. Rio de Janeiro: Sustainable Development Solutions Network.
- Steffen W, Richardson K, Rockstrom J, et al. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet [J]. *Science*, 347: 1259855. doi: 10.1126/science.1259855.
- Sverdrup H U, Ragnarsdottir K V. 2011. Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model [J]. *Applied Geochemistry*, 26: S307-S310.
- TEEB. 2010. *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations* [M]. London and Washington DC: Earthscan.
- Wang J, Chen Y, Shao X, et al. 2012. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future [J]. *Land Use Policy*, 29: 737-749.
- Xu X, Tan Y, Yang G, et al. 2018. China's ambitious ecological red lines [J]. *Land Use Policy*, 79: 447-451.

Review on the conceptual framework of planetary boundaries and the development of its research

ZHANG Junze¹, WANG Shuai¹, ZHAO Wenwu¹, LIU Yanxu¹, FU Bojie^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: Planetary boundaries is a conceptual framework proposed by Johan Rockström in recent years, which is aimed to build a safe operating space for safeguarding humans' survival and development. Since this framework was put forward, it has attracted widespread attention. The skeptics criticized the scientific significance and evaluation methods of the conceptual framework. However, the proponents have gradually improved its evaluation methods and research contents, and explored the downscaling results. In order to promote the understanding and application of this concept and framework, after reviewing the relevant literature we first introduced the conceptual connotation of planetary boundaries and its evaluation results, and then compared them with concepts such as environmental carrying capacity that have been well known to Chinese scholars. We also summarized the controversial views of the conceptual framework, and reviewed its recent development status. Finally, combined with China's current development situation, we analyzed the implications of the conceptual framework of planetary boundaries for China's sustainable development research, and put forward the prospect of future research, including: 1) improving the assessment system of planetary boundaries through making further exploration on the interrelationship between different Earth system processes; 2) defining the links between planetary boundaries, ecosystem services, and human well-being; 3) strengthening research on transformative environmental governance in conjunction with the assessment of planetary boundaries.

Keywords: planetary boundaries; safe operating space; safe and just space; sustainable development