

结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展

侯文娟^{1,2}, 高江波^{1*}, 彭 韬^{3,4}, 吴绍洪¹, 戴尔阜¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室,
贵阳 550002; 4. 普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100)

摘要:特殊的地质背景与生态环境叠加强烈的人类活动,导致中国西南喀斯特地区生态系统呈现显著的脆弱性特征。从生态系统敏感性和适应性角度出发,喀斯特生态系统结构、功能和生境对外界扰动响应的脆弱性特征研究已取得一定进展,尤其是借助物种多样性、生态系统生产力、土壤水分/养分等指标揭示了喀斯特生态系统对土地利用/覆被变化、石漠化等过程的敏感性等方面,但综合野外试验、数值模拟、数理统计等手段的生态系统敏感性量化研究仍较薄弱。在生态系统适应性方面,虽然具有喜钙、耐旱以及石生等特性的植物种群通过形态结构和生理功能的自我调节能够呈现出对岩溶环境的适应性,但喀斯特生态系统对人类干扰和气候变化等环境胁迫响应的适应机制仍缺乏长期的生物及理化过程研究。今后,应针对生态系统结构、功能、生境间的正反馈机制,增强系统组分的耦合分析,加强喀斯特生态系统脆弱性驱动机制研究与定量评估,突出系统脆弱性在石漠化遏制和生态恢复重建中的关键地位。

关键词:喀斯特生态系统;脆弱性;石漠化;结构—功能—生境;研究进展

1 引言

随着全球变化研究的兴起,脆弱性已成为全球环境变化及可持续发展科学领域关注的热点问题之一(Turner et al, 2003)。脆弱性是一种易受到不利影响的特性,主要包括对外界干扰的敏感性和适应性的缺乏等内容(IPCC, 2014)。近年来,社会经济飞速发展所带来的气候变化、生物多样性锐减、环境污染、土地荒漠化等问题,导致生态系统敏感性增强,抗干扰与适应能力减弱,受损后难以恢复,呈

现出脆弱性特征(Li et al, 2010; Zhou et al, 2013)。喀斯特地区是世界主要生态脆弱带之一,其生态环境问题是当今国际地学研究的热点(袁道先, 2001; 陈洪松等, 2013)。中国西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中区(欧洲地中海沿岸、美国东部、东南亚)中连片裸露碳酸盐岩面积最大的地区(Sweeting, 1995),其自身独特的地质背景、二元水文结构导致地表土被薄且不连续,地上地下连通性好、水文过程变化迅速,水、土资源空间分布不匹配,水热因子高度时空异质性,氮、磷、钾极度缺乏的高钙/镁

收稿日期:2015-04;修订日期:2015-08。

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452702);国家自然科学基金项目(41301089);国家科技支撑计划项目(2012BAC19B10, 2013BAC04B02) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2015CB452702; National Natural Science Foundation of China, No.41301089; National Science and Technology Support Program of China, No.2012BAC19B10, No.2013BAC04B02]。

作者简介:侯文娟(1989-),女,山东莱芜人,博士研究生,主要从事喀斯特生态系统脆弱性及地表水热过程等方面研究,
E-mail: houwj_13b@igsnr.ac.cn。

通讯作者:高江波(1984-),男,山东临沂人,副研究员,主要从事喀斯特地区土地利用—地表过程—资源环境效应等方面研究,
E-mail: gaojiangbo@igsnr.ac.cn。

引用格式:侯文娟,高江波,彭韬,等. 2016. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 35(3): 320-330. [Hou W J, Gao J B, Peng T, et al. 2016. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework[J]. Progress in Geography, 35(3): 320-330.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.03.006

土壤环境,生态系统可恢复性难等;加之该区贫困人口相对集中,人地矛盾非常突出,在资源开发和经济发展过程中存在不合理开发和破坏生态平衡的行为(Wang et al, 2004; 王世杰等, 2007)。因此,在岩溶干旱环境下,中国西南喀斯特石漠化现象严重,生态系统趋于逆向演替,脆弱程度日益加剧(Ferlan et al, 2011; Wen et al, 2011)。

近年来,针对中国西南喀斯特地区生态系统脆弱性开展了一系列研究,涉及生态系统脆弱性的评价与管理方面;而脆弱性评价作为管理的基础(刘燕华等, 2001),已成为生态系统脆弱性研究工作的重中之重,这也是本文侧重综述的方面。具体来说,主要内容包括基于生态系统物理、化学和生物过程剖析喀斯特生态系统脆弱性的内涵和本质(李阳兵, 王世杰等, 2006; Chen et al, 2012; 汪明冲等, 2014; Jiang et al, 2015),以及基于空间和区域视角的喀斯特生态系统脆弱性的定量评估(Huang et al, 2006; 魏兴萍等, 2014);评估的方法手段涵盖针对微观过程的定点观测、野外和室内试验、数值模拟,针对区域生态系统脆弱性评价的多源数据融合、综合评估指标体系构建、数理统计方法、地理信息系统等(Wang Y X et al, 2007; Butscher et al, 2009; Jiang et al, 2009; 贺祥, 2014);相关研究从不同尺度水文过程、土壤流失、植被退化等角度刻画了喀斯特生态系统的脆弱性,且结果大多表明人类的不合理土地利用活动是该区生态系统脆弱性加剧的主导因素(Yang et al, 2011; Zhao et al, 2012; 刘春等, 2014)。

结构和功能是生态系统重要特征,任何生态系统须凭借一定的结构实现其功能并影响其效果,同时生境条件又是生态系统正常运作的基础。一般来说,生态系统结构越复杂、功能越强大、生境条件越优越,则其抵御干扰能力就越强,稳定性越高,脆弱性程度越低(李双成等, 2005; 伍光和等, 2008)。因此,生态系统生境条件、结构、功能作为表征生态系统健康状况的重要组分,其优劣程度可系统反映出生态系统脆弱性的状况及其形成机制。然而,目前喀斯特生态系统脆弱性研究大多集中在该区特殊的生态系统各组分脆弱性的外在表现上(苑涛等, 2011),通过多要素综合揭示喀斯特生态系统脆弱性机制的研究尚显薄弱。为此,本文在剖析喀斯特生态系统脆弱性特征的基础上,从喀斯特生态系统结构、功能与生境的角度出发,综合考虑系统敏

感性与适应性,归纳总结喀斯特生态系统脆弱性研究现状与既有进展,提出其中存在的科学问题,进而展望未来重点研究方向,以期为喀斯特地区石漠化遏制及生态恢复重建提供科学依据。

2 西南喀斯特生态系统的脆弱性特征

针对中国西南喀斯特地区特殊的地质背景、典型的二元水文结构、特有的植物群落,该区生态系统脆弱性特征可以归纳为:以岩石—土壤系统为本底特征,其中的关键驱动机制是地表—地下二元水文结构,而生态系统脆弱特征直接表现在岩溶植被的结构与类型方面。

(1) 脆弱本底:岩石—土壤系统

喀斯特坡地土壤和下伏碳酸盐岩之间为土—石直接突变接触,岩层孔隙和空洞发育(张信宝等, 2010)。岩溶区碳酸盐岩中极低的酸不溶物含量使成土速率低,每形成1 cm厚的风化土层需要4000余年,慢者需要8500年,较非岩溶山区慢10%~80%,且厚度分配不均、异质性强、土地贫瘠(王巨等, 2011)。此外,显著的差异性风化使风化前缘或基岩面强烈起伏,形成大量的岩溶洼地、裂隙等,导致分布于各种地貌中的土壤异质性强;而且这种地质地貌结构易使土壤塌陷、积聚至地下空间,导致碳酸盐岩地区表层土壤大量丢失(孙承兴等, 2002),这是导致喀斯特石漠化和生态系统脆弱的地质背景。

(2) 关键驱动:二元水文结构

碳酸盐岩地区化学溶蚀作用强烈,组成坡地的碳酸盐岩岩层孔隙和孔洞发育成熟,坡地地表径流易于入渗转化为地下径流(彭韬等, 2008),且壤中流极易通过“筛孔”渗入表层岩溶带,最终都进入地下暗河系统,形成岩溶地区独特的地表—地下的二元水文地质结构。“地高水低、雨多地漏、石多土少和土薄易旱”是其真实写照,致使雨量充沛的西南岩溶山区成为特殊干旱缺水(李阳兵, 邵景安等, 2006)。这种水文格局一方面易使地表干旱缺水;另一方面,由于各地段地下管网的通畅性差异很大,一遇强降雨又很容易在低洼处堵塞造成局部涝灾,这实质上也是喀斯特山区环境承灾的阈值弹性小和生态环境脆弱的反映(王世杰等, 2003)。

(3) 直观表现:岩溶植被

在岩溶山区基岩裸露、土体浅薄、水分下渗严

重等环境背景下,经过严格的自然选择,具有喜钙、耐旱以及石生等特性的植物种群生存下来(曹建华等, 2005)。由于植物无法获得充足的水分,植被的生长发育受到限制,因此喀斯特生态系统的树木胸径、树高的生长具有速率慢、绝对生长量小,种间、个体间生长过程差异较大,以及生物多样性较低等特点(朱守谦, 1997)。有研究表明,根据西南地区森林普查资料的估算和分析结果得出喀斯特森林的生物量低于非喀斯特森林(于维莲等, 2010);在相同的生物气候条件下,喀斯特土层浅薄和水分下渗限制了植物的生长,因此植被群落一旦破坏就有可能难以恢复,进而导致生态系统功能紊乱,脆弱性增强。

3 西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展

近年来,人口的迅速增长与有限的耕地资源形成了尖锐的人地矛盾,导致毁林开荒、陡坡耕作、过度放牧等现象加剧(Lucrezi et al, 2014),原有的生态平衡遭到破坏,生态系统脆弱性特征明显,近年频发的地质灾害和石漠化现象就是该区生态脆弱性的具体体现。归根结底,上述现象产生的原因是由于人类不合理的开发利用导致原本脆弱的生态系统结构和功能的破坏以及生境的恶化。本文将基于喀斯特生态系统结构—功能—生境研究框架,从系统敏感性(即系统受外界扰动的影响程度)与适应能力(即外界扰动的自我调节能力)角度,阐述喀斯特地区生态系统脆弱性研究现状与进展。

3.1 基于结构指标的生态系统脆弱性研究

生物多样性作为表征生态系统结构的一项重要指标,与物理环境相结合共同构成生命支持系统和人类社会经济发展的物质基础。一般来说生态系统的生物种类越多,营养结构越复杂,对外界干扰的抵御能力越强,稳定程度越高(Loreau et al, 2013);反之脆弱程度就愈大。对喀斯特地区生物多样性特征、重建机制的研究显示,喀斯特地区每个群落的植物种类都不多(2~4种),物种多样性水平不高(韦锋, 2010; Li C et al, 2013),尤其在一些为治理石漠化而植树造林的人工种植林区,植被的物种多样性水平特别低(Tang et al, 2010);且随着石漠化程度的加剧,植被的物种组成呈递减趋势,物种多样性下降(杜有新, 2011; 盛茂银等, 2015)。喀斯特地区石灰岩植物区系岩溶特征种(岩溶专有种+

岩溶适宜种或广义专有种)占区系总种数的20%~30%,如此高比例的岩溶专有种显示了石灰岩植物区系和生物多样性极其特殊,若生境遭破坏,这些岩溶专有种会首先丧失,生态系统将受到严重威胁(朱华, 2007)。例如喀斯特地区的石生性植物(斜叶榕 *Ficus tinctoria*, 假苹婆 *Sterculia lanceolata* 等)是经过长期的适应过程在石缝中生长起来,一旦毁坏很难通过人工造林等方式恢复(任海等, 2002)。此外,关键种在生物群落内也起着重要作用,对贵州茂兰喀斯特森林样地主要关键种的结构和格局分析表明,主要关键种在高度异质资源位上的分化有助于促进森林的多物种共存和群落的稳定性(张忠华, 2010),但其微小变化可能导致群落或生态系统过程发生较大变化(Paine, 1969; Sanford, 1999)。

喀斯特生态系统的动物群落同样担负着物质循环和能量流动的使命,其中,土壤动物对生态系统的稳定与恢复发挥着重要作用。在贵州喀斯特高原,可改善土壤理化性质的腐蚀性土壤动物寡毛纲线蚓,它只在无石漠化样地出现且数量稀少(王仙攀等, 2012);而且伴随着干扰强度的加大,石漠化程度的加剧,环境不断恶化,喀斯特区土壤动物的物种数和个体数呈现减少趋势(熊康宁等, 2012)。尤其是土壤中的一些优势类群,其数量随着喀斯特植被的退化明显减少,其中还有些常见类群和稀有类群是生态幅小的狭适类群,对生态环境反应特别敏感(樊云龙等, 2010)。此外,在西南气候干旱化趋势加重的影响下,土壤动物的年度变化波动较大,土壤动物个体总数的水平和垂直分布明显下降,多样性、均匀性、优势度和丰富度指数急剧降低(赵志成等, 2011)。

在喀斯特特殊的生境条件下,植物为承受岩溶干旱和土壤高钙的双重胁迫,在生存过程中改变了自身的结构以及生理生化过程,通过复杂多样的响应机制(交叉适应)获得抗逆性以适应环境(Levitt, 1980)。例如,喀斯特地区的植物为适应特殊的环境,其叶片结构具有一系列的旱生特点:表皮细胞旱化(上表皮具凹槽结构,下表皮具茂密表皮毛)、叶肉分化明显(李强, 2007);植物的根系在宽裂隙维持较高密度,窄小裂隙迫使其发展为二态根垫(Schwinnig, 2010),尤其是乔灌木具有发达而强壮的根系,能攀附岩石、穿透裂隙,吸收储存在岩石空隙、裂隙中的水分和养分(Stothoff et al, 1999; Perrin et al, 2003)。

3.2 基于关键功能的生态系统脆弱性研究

生态系统具有物质循环、能量流动、信息传递等基本功能,三者相互联系、紧密结合使生态系统得以存在和发展,其中能量流动和信息传递主要以物质循环为承载(伍光和等,2008)。当前,针对喀斯特生态系统能量流动及信息传递的研究仍付之阙如,即使有些关于能量流动的结果,也多归属于物质循环研究,因此这里阐述的生态系统功能主要是针对生态系统有机物质的生产以及营养元素的循环。

净第一生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)是体现植物活动状况的重要变量,也是表征生态系统生产功能和固碳功能的主要指标。结合野外定位观测和模拟试验方法,发现喀斯特地区不同植被覆被类型生产力整体水平与非喀斯特地区相比,均较低(Liu et al, 2013)、对外界扰动的敏感度更高(黄晓云等,2013);土地利用/覆被变化对有机生产力价值(OPV)的影响研究表明,随石漠化加剧,生态系统生产功能显著降低(Zhang et al, 2010; 李森等,2010);不同气候因子的影响程度有明显差异,其中NEP对于气温的敏感度高于降水(马建勇等,2013),若未来气候继续朝暖干化发展,碳汇能力可能会进一步减弱(庞瑞等,2012)。

在营养元素的生物化学循环方面,已有研究利用元素循环系数、吸收系数及利用系数等来表征生态系统养分循环的特征,循环系数越大,周转期越短,说明元素归还快,利用效率越高(张希彪等,2006)。研究表明,喀斯特区马尾松群落的各营养元素的循环系数(0.19~0.45)要显著低于鼎湖山马尾松群落(0.68~0.83)(李茜等,2008);而且随着喀斯特生态系统不断退化,N和P元素的吸收率和分解率呈现明显下降趋势(杜有新等,2010),此外,土壤中营养矿物元素易受外界环境的变化而发生迁移,S、Cl、Na、Ca、Mg、Si等元素易发生外迁迁移或向下淋溶,并且随着外界水分和热量变化的增强,其中物质的迁移越来越强烈,加重了浅层耕作土中这些矿物质营养元素的贫化(陈武等,2010)。

经过长期的自然和人为选择,喀斯特生态系统中部分植物通过自身生理生化过程与功能调节逐渐适应特殊的生态环境。例如,有研究表明:适当浓度的钙、水胁迫下忍冬属植物能够通过增加体内叶绿素含量、增加渗透压、提高抗氧化能力来避免干旱造成的伤害(李强,2007),且具有气孔排钙,腺体、表皮毛、胞间及细胞壁储钙等多种方式适应富

钙环境(吴耿,2011)。此外,由于不同类型植被的光合速率、水分利用效率等对环境变化响应的灵敏度具有差异性(邓彭艳等,2010),因此基于不同植被类型(森林、灌木、草地等)代表性样地,深入分析植被对环境胁迫的适应机制,可进行植被恢复与生态重建的适用性评估(Liu et al, 2012)。例如中国科学院西双版纳植物园通过对喀斯特地区植物生理生态适应性的研究,正在推广一种适宜石漠化山地生态重建的珍贵油料作物——星油藤(*Plukenetia volubilis*)(曹坤芳等,2014)。由于植被群落对石漠化治理初期意义重大,目前关于生态系统适应性的研究多针对植物群落,而较少关注其他组分的适应机制。

3.3 基于土壤生境特征的生态系统脆弱性研究

生境是指(Grinnell, 1917)生物出现的环境空间范围,一般指生物生活的生态地理环境,主要包括气候、地形、土壤等环境因子。其中,在喀斯特地区土地利用与石漠化过程中,变化最为显著的是土壤的理化性质。岩溶石山区水文地质的独特性在于其空间介质具有地表和地下双层结构,地表、地下水关系密切,水源容易流失于地下,因而作为重要生境条件的土壤水分成为喀斯特生态系统退化的重要方面和恢复重建的限制因子。通过野外采样和室内实验,对喀斯特地区土壤水分变异的研究表明,受土地利用方式、人为活动等诸多因素的影响,土壤稳定入渗率、近饱和导水率及土壤水分的变异程度整体处于中度及以上水平(Chen et al, 2012),而且随石漠化程度的加剧,土壤表层含水量逐渐下降(张继光等,2008;周炼川,2009;Chen et al, 2010);在极端事件影响方面,贵州高原区特大少水年的持续干旱使得次生林20~40 cm土层含水量一度达到极低值(杜雪莲等,2008)。此外,石漠化程度的加剧也导致了土壤机械组成的变化,最明显的是砂粒含量的下降,不利于土壤团粒结构形成;表层土壤的团聚体稳定性劣化,抗水蚀能力降低,进而影响植物的生长发育(杨新强,2011;马菁,2012;张磊等,2015)。

基于喀斯特的地质水文背景和土壤母岩特性,土壤养分状况易受到自然环境的影响而发生变化,再叠加人为干扰,其土壤养分及微生物生物量碳、氮、磷等都呈现极显著的退化(魏亚伟等,2010;黄金国等,2012)。研究表明,喀斯特地区不同土壤和植被组合类型下土壤有机质中稳定碳同位素的变化范围差距大(Zhu et al, 2008);而且随着喀斯特地

区石漠化程度加剧,土壤活性有机碳以及氮磷钾等养分呈显著下降趋势(卢红梅等, 2009; 李孝良等, 2010);同时土壤pH值也逐渐变小,本为富钙偏碱性的土壤酸性增强(杨新强等, 2011; 张承琴等, 2014);而且,土地利用变化对土壤理化性质的影响明显大于其他地区,土壤受到干扰后要恢复到干扰前土壤养分水平需要更长时间(蒋勇军等, 2005)。

此外,针对土壤理化性质对外界胁迫的非线性响应问题,有研究结果显示,喀斯特石漠化过程中的土壤理化性质并非不断退化,而是表现出先退化后稳定的过程。究其原因,应该与石漠化环境裸露岩石的聚集效应有关,即裸露的岩石将大气沉降的养分及其岩溶产物汇聚到周围的土壤中(盛茂银等, 2013)。

3.4 西南喀斯特生态系统脆弱性研究总结与不足

中国西南喀斯特地区独特的自然地理环境,以及频繁的人类活动,导致喀斯特生态系统的极端复杂性,生态系统脆弱性定量评估及其形成机制研究异常困难。鉴于此,本文基于生态系统结构—功能—生境框架,借助目前已有研究中多采用的多项关键指标(表1),归纳总结了喀斯特生态系统响应外界扰动的脆弱性研究进展:喀斯特生态系统脆弱性长期以来受到广泛关注,但相关研究大多聚焦于生态系统敏感性特征,借助野外试验、机理模型和数理统计进行敏感程度的定量化研究仍然薄弱;对于生态系统适应性而言,尽管已有研究揭示了植物可通过结构调整、生化调节等途径适应特殊的岩溶环境,但对于包括人类扰动、气候变化在内的环境胁迫

迫下的生物物理/化学适应机制研究仍非常欠缺,难以支撑石漠化地区生态恢复重建工作。

梳理已有相关研究,可发现生态系统结构、功能与生境之间存在密切关联与相互作用(图1),尤其是生境作为生态系统正常运行的基础,处于三者相互作用关系的核心位置。如在喀斯特地区,土壤养分各指标、pH值等的大小显著影响物种的多样性以及丰富度(Li S et al, 2013),土壤水分和碳酸钙含量也是决定植被群落结构的重要因素(Yue et al, 2010);同时,植物的物种多样性可以有效维持较高的土壤养分状况,促进生态系统净第一生产力增加,提升生态系统的稳定性(Wang Z H et al, 2007),在石漠化地区优化植被覆盖状况,可改善土壤微生物量碳、呼吸状况等,创造更好的土壤环境条件,最终也有利于植被恢复和生态重建(Wei et al, 2011)。

4 西南喀斯特生态系统脆弱性研究趋势展望

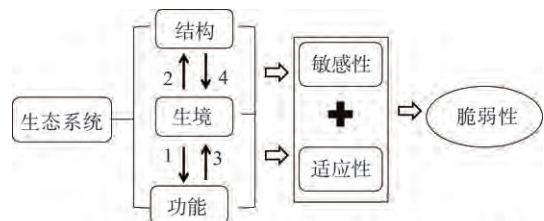
(1) 重视基于多要素相互作用的喀斯特生态系统脆弱性研究

尽管生态系统结构、功能、生境间存在相互影响,但以往对于喀斯特生态系统脆弱性的研究,多是基于单方面、单要素,尚缺乏多要素耦合的系统研究。今后应针对西南喀斯特独特的地质背景和二元水文结构,将喀斯特生态系统结构(物种多样性、植被覆盖度等)、功能(物质循环、能量流动等)、生境(气候环境、土壤理化条件等)纳入生态系统脆

表1 喀斯特生态系统脆弱性已有研究中采用的关键指标

Tab.1 Key indicators in previous research of karst ecosystem vulnerability

整体框架		关键指标
生态系统脆弱性	生态系统形态结构	生物多样性 关键种 群落结构 植物形态结构
	生态系统关键功能	净第一性生产力(NPP) 净生态系统生产力(NEP) 营养元素循环 生理生化过程
	生态系统土壤生境	土壤机械组成 土壤水力学性质 土壤养分状况



注: 1和2表示土壤环境等生境条件影响生态系统功能(如营养元素循环和植物生产力),进而对于生态系统结构优化具有显著效应; 3和4表示生态系统功能稳定、结构优化同样可改善生境条件,以形成生态系统结构、功能、生境间的正反馈相互作用。进而从生态系统结构、功能、生境角度揭示敏感性及适应性,最终综合集成以体现生态系统的脆弱性。

图1 基于生态系统结构—功能—生境的生态系统脆弱性研究

Fig.1 Ecosystem vulnerability study based on the structure-function-habitat framework

弱性研究的统一框架下,结合人与环境相互作用的影响进行综合研究。例如,人类的滥砍滥伐使得植被覆盖度发生变化,土壤孔隙度、导水性能也发生改变,最终会影响土壤含水量;植被覆盖度的变化也会使得地表反照率变化,影响热量循环,从而会引起生境的变化。

(2) 推进西南喀斯特生态系统脆弱性的过程与机制研究

在喀斯特地区生态系统脆弱性研究中,关于外界环境干扰下生态系统的物种多样性、植被覆盖度、生物量以及土壤环境条件等的变化已有诸多探讨,但定量评估脆弱性方面的研究仍需加强,尤其要重视借助野外观测、室内实验和数理模型等手段,对西南喀斯特生态系统水分、热量、养分循环及其权衡与协同过程的深入研究,以揭示生态系统脆弱性形成和驱动过程与机制。特别需要指出的是,在喀斯特生态系统各组分响应环境胁迫的适应性机制方面,由于生物及理化过程观测和试验时间尺度较短,仅能在一定程度上说明喀斯特生态系统如何适应岩溶环境,今后应加强阐释在长期的人类干扰和气候变化影响下,喀斯特生态系统的适应机制研究。

(3) 增强石漠化演替过程中的脆弱性研究,推动喀斯特生态系统恢复重建

西南喀斯特石漠化本质上是生态系统退化,其发生、发展过程是人类活动破坏生态平衡所导致的系统脆弱性增强,包括结构退化(如覆盖度和多样性降低)、功能衰退(如生产力下降)、生境变劣(如土壤理化性质恶化)。已有关于喀斯特生态系统响应石漠化的脆弱性研究,大多基于“空间代时间”的思路,根据不同样点间的特征差异揭示系统响应的脆弱性,但此类方法难以揭示石漠化连续演变过程,应加强针对不同石漠化演替阶段的生态系统脆弱性研究。由于退化生态系统的恢复重建力求实现生境逐步改善、物种逐步协调与多样、功能逐步优化,因此,加强石漠化胁迫下生态系统脆弱性研究,揭示不同石漠化程度下的生态系统结构、功能与生境特征与变异机制,有助于推动喀斯特石漠化地区生态系统的恢复重建。

参考文献(References)

曹建华,袁道先,裴建国,等. 2005. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京:地质出版社. [Cao J H,

Yuan D X, Pei J G, et al. 2005. Karst ecosystem of Southwest China constrained by geological setting[M]. Beijing, China: Geology Press.]

曹坤芳,付培立,陈亚军,等. 2014. 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示[J]. 中国科学:生命科学, 44(3): 238-247. [Cao K F, Fu P L, Chen Y J, et al. 2014. Implications of the ecophysiological adaptation of plants on tropical karst habitats for the ecological restoration of desertified rocky lands in southern China[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 44(3): 238-247.]

陈洪松,聂云鹏,王克林. 2013. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J]. 生态学报, 33(2): 317-326. [Chen H S, Nie Y P, Wang K L. 2013. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(2): 317-326.]

陈武,任明强,芦正艳,等. 2010. 贵州典型喀斯特区土壤地球化学特征研究[J]. 中国岩溶, 29(3): 246-252. [Chen W, Ren M Q, Lu Z Y, et al. 2010. Research on the property of soil geochemistry in typical karst area in Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 29(3): 246-252.]

邓彭艳,陈洪松,聂云鹏,等. 2010. 桂西北喀斯特地区菜豆树和红背山麻杆旱、雨季光合特性比较[J]. 生态学杂志, 29(8): 1498-1504. [Deng P Y, Chen H S, Nie Y P, et al. 2010. Photosynthetic characteristics of *Radermachera sinica* and *Alchornea trewioides* in karst regions of north-west Guangxi, China in dry and rainy seasons[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 29(8): 1498-1504.]

杜雪莲,王世杰. 2008. 喀斯特高原区土壤水分的时空变异分析:以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 36(3): 193-201. [Du X L, Wang S J. 2008. Space-time distribution of soil water in a karst area: A case study of the Wangjiazhai catchment, Qingzhen, Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 36(3): 193-201.]

杜有新. 2011. 退化喀斯特生态系统植被群落特征及氮磷养分有效性:以贵州省普定县为例[D]. 南京:南京农业大学. [Du Y X. 2011. Characteristics of vegetation communities and nitrogen and phosphorus availability in degraded ecosystems in karst region in Guizhou, China: A case study with different ecosystems under vegetation decline from Puding, Guizhou[D]. Nanjing, China: Nanjing Agricultural University.]

杜有新,潘根兴,李恋卿,等. 2010. 黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与N、P分布格局及其循环特征[J]. 生态学报, 30(23): 6338-6347. [Du Y X, Pan G X, Li L Q, et al. 2010. Partitioning of vegetation biomass, nutrient storage and cycling of degraded ecosystems from

- mountainous karst region, central Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6338-6347.]
- 樊云龙, 熊康宁, 苏孝良, 等. 2010. 喀斯特高原不同植被演替阶段土壤动物群落特征[J]. *山地学报*, 28(2): 226-233. [Fan Y L, Xiong K N, Su X L, et al. 2010. Research on soil fauna community characteristics at different vegetation successions in the karst plateau of Guizhou Province[J]. *Journal of Mountain Science*, 28(2): 226-233.]
- 贺祥. 2014. 基于熵权灰色关联法的贵州岩溶山区人地耦合系统脆弱性分析[J]. *水土保持研究*, 21(1): 283-289. [He X. 2014. Analysis on the vulnerability of coupled human-natural systems in karst mountain areas of Guizhou Province based on the entropy and gray correlation method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(1): 283-289.]
- 黄金国, 李森, 魏兴琥, 等. 2012. 粤北岩溶山区石漠化过程中土壤养分变化研究[J]. *中国沙漠*, 32(1): 163-167. [Huang J G, Li S, Wei X H, et al. 2012. Change of soil nutrient in process of rocky desertification in karst mountainous area of north Guangdong[J]. *Journal of Desert Research*, 32(1): 163-167.]
- 黄晓云, 林德根, 王静爱, 等. 2013. 气候变化背景下中国南方喀斯特地区NPP时空变化[J]. *林业科学*, 49(5): 10-16. [Huang X Y, Lin D G, Wang J A, et al. 2013. Temporal and spatial NPP variation in the karst region in south China under the background of climate change[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(5): 10-16.]
- 蒋勇军, 袁道先, 章程, 等. 2005. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响: 以云南小江流域为例[J]. *地理学报*, 60(5): 751-760. [Jiang Y J, Yuan D X, Zhang C, et al. 2005. Impact of land use change on soil properties in a typical karst agricultural region: A case study of Xiaojiang watershed, Yunnan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 60(5): 751-760.]
- 李茜, 杨胜天, 盛浩然, 等. 2008. 典型喀斯特地区马尾松纯林及马尾松—阔叶树混交林营元素生物循环研究: 以贵州龙里为例[J]. *中国岩溶*, 27(4): 321-328. [Li Q, Yang S T, Sheng H R, et al. 2008. Biological cycling of nutrients in *Pinus* forest and *Pinus-Hardwood* mixed forest in karst area: A case study in Longli, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 27(4): 321-328.]
- 李强. 2007. 忍冬属植物对岩溶环境的适应性研究[D]. 武汉: 华中科技大学. [Li Q. 2007. Studies on the ecology adaptation of *Flosloniceræ* in the karst environment[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology.]
- 李森, 魏兴琥, 张素红, 等. 2010. 典型岩溶山区土地石漠化过程: 以粤北岩溶山区为例[J]. *生态学报*, 30(3): 674-684. [Li S, Wei X H, Zhang S H, et al. 2010. The processes of land rocky desertification in typical karst mountain area: A case study in the karst mountain area of north Guangdong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(3): 674-684.]
- 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 2005. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价[J]. *生态学报*, 25(3): 621-626. [Li S C, Wu S H, Dai E F. 2005. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25(3): 621-626.]
- 李孝良, 陈孝民, 周炼川, 等. 2010. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[J]. *山地学报*, 28(1): 56-62. [Li X L, Chen X M, Zhou L C, et al. 2010. Study on soil organic carbon fractions and their influential factors in rocky desertification process in Southwest of China[J]. *Journal of Mountain Science*, 28(1): 56-62.]
- 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等. 2006. 岩溶生态系统脆弱性研究[J]. *地理科学进展*, 25(5): 1-9. [Li Y B, Shao J A, Wang S J, et al. 2006. A conceptual analysis of karst ecosystem fragility[J]. *Progress in Geography*, 25(5): 1-9.]
- 李阳兵, 王世杰, 王济. 2006. 岩溶生态系统的土壤特性及其今后研究方向[J]. *中国岩溶*, 25(4): 285-289. [Li Y B, Wang S J, Wang J. 2006. Soil properties in karst ecosystem and further study[J]. *Carsologica Sinica*, 25(4): 285-289.]
- 刘春, 吕殿青, 陈洪松, 等. 2014. 中国西南岩溶地区生态环境脆弱性及成因分析[J]. *地质灾害与环境*, 25(2): 49-53. [Liu C, Lv D Q, Chen H S, et al. 2014. Causes for the eco-environmental vulnerability of the karst areas in Southwest China[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 25(2): 49-53.]
- 刘燕华, 李秀彬. 2001. 脆弱生态环境与可持续发展[M]. 北京: 商务印刷馆. [Liu Y H, Li X B. 2001. *Cuiruo shengtai huanjing yu kechixu fazhan*[M]. Beijing, China: Commercial Printing House.]
- 卢红梅, 王世杰. 2009. 喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响[J]. *水土保持通报*, 29(1): 12-17. [Lu H M, Wang S J. 2009. Effects of active soil organic carbon on the processes of karst rocky desertification[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(1): 12-17.]
- 马建勇, 谷小平, 黄玫, 等. 2013. 近50年贵州净生态系统生产力时空分布特征[J]. *生态环境学报*, 22(9): 1462-1470. [Ma J Y, Gu X P, Huang M, et al. 2013. Temporal-spatial distribution of net ecosystem productivity in Guizhou during the recent 50 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(9): 1462-1470.]
- 马菁. 2012. 喀斯特石漠化空间格局及土壤侵蚀特征研究: 以兴文县小流域为例[D]. 雅安: 四川农业大学. [Ma J. 2012. Study on spatial pattern of karst rocky desertifica-

- tion and soil erosion characteristics in a small watershed in Xingwen County[D]. Ya'an, China: Sichuan Agricultural University.]
- 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 等. 2012. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态[J]. 生态学报, 32(24): 7844-7856. [Pang R, Gu F X, Zhang Y D, et al. 2012. Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of Southwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(24): 7844-7856.]
- 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 2008. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 36(2): 125-129. [Peng T, Wang S J, Zhang X B, et al. 2008. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 36(2): 125-129.]
- 任海, 彭少麟. 2002. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社. [Ren H, Peng S L. 2002. *Huifu shengtaixue daolun* [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 2013. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 33(19): 6303-6313. [Sheng M Y, Liu Y, Xiong K N. 2013. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in south China karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(19): 6303-6313.]
- 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 2015. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 35(2): 434-448. [Sheng M Y, Xiong K N, Cui G Y, et al. 2015. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(2): 434-448.]
- 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 2002. 碳酸盐岩差异性风化成土特征及其对石漠化形成的影响[J]. 矿物学报, 22(4): 308-314. [Sun C X, Wang S J, Zhou D Q, et al. 2002. Differential weathering and pedogenetic characteristics of carbonate rocks and their effect on the development of rock desertification in karst regions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(4): 308-314.]
- 汪明冲, 王兮之, 梁钊雄, 等. 2014. 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析: 以广西壮族自治区河池市为例[J]. 生态学报, 34(12): 3435-3443. [Wang M C, Wang X Z, Liang Z X, et al. 2014. Landscape pattern analysis on change of fractional vegetation cover between karst and no-karst areas: A case study in Hechi District, Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(12): 3435-3443.]
- 王巨, 谢世友, 戴国富. 2011. 西南岩溶区土壤生态系统退化研究[J]. 中国农学通报, 27(32): 181-185. [Wang J, Xie S Y, Dai G F. 2011. The study of soil ecosystem degradation in Southwestern karst region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(32): 181-185.]
- 王世杰, 李阳兵. 2007. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 22(6): 573-582. [Wang S J, Li Y B. 2007. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification[J]. *Advances in Earth Science*, 22(6): 573-582.]
- 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 2003. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 23(6): 657-666. [Wang S J, Li Y B, Li R L. 2003. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 23(6): 657-666.]
- 王仙攀, 熊康宁, 陈浒, 等. 2012. 贵州喀斯特高原峡谷石漠化地区土壤动物功能类群研究[J]. 中国农学通报, 28(5): 252-257. [Wang X P, Xiong K N, Chen H, et al. 2012. The study on functional groups of soil animals of rocky desertification in Guizhou karst plateau valley[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(5): 252-257.]
- 韦锋. 2010. 桂林会仙喀斯特湿地生物多样性及保护研究[D]. 桂林: 广西师范大学. [Wei F. 2010. Study on biodiversity and protection of karst wetland in Huixian, Guilin[D]. Guilin, China: Guangxi Normal University.]
- 魏兴萍, 蒲俊兵, 赵纯勇. 2014. 基于修正RISKE模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价[J]. 生态学报, 34(3): 589-596. [Wei X P, Pu J B, Zhao C Y. 2014. Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(3): 589-596.]
- 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 2010. 桂西北喀斯特土壤对生态系统退化的响应[J]. 应用生态学报, 21(5): 1308-1314. [Wei Y W, Su Y R, Chen X B, et al. 2010. Responses of soil properties to ecosystem degradation in karst region of northwest Guangxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(5): 1308-1314.]
- 吴耿. 2011. 西南岩溶地区典型植物适应岩溶高钙环境的机制[D]. 武汉: 华中科技大学. [Wu G. 2011. The mechanism of typical plants adaptative to calcium rich environment in karst area of Southwest China[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology.]
- 伍光和王, 王乃昂, 胡双熙, 等. 2008. 自然地理学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社. [Wu G H, Wang N A, Hu S X, et al. 2008. *Ziran dilixue*[M]. 4th ed. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 熊康宁, 陈浒, 王仙攀, 等. 2012. 喀斯特石漠化治理区土壤动物的时空格局与生态功能研究[J]. 中国农学通报, 28(23): 259-265. [Xiong K N, Chen H, Wang X P, et al. 2012. Soil fauna's distribution and ecological functions of rocky desertification management areas[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(23): 259-265.]

- 杨新强. 2011. 西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤黏土矿物组成及其影响因素研究[D]. 南京: 南京农业大学. [Yang X Q. 2011. Study on the variation of soil clay minerals and influence factors in karst regions under different rocky desertification, Southwest China[D]. Nanjing, China: Nanjing Agricultural University.]
- 杨新强, 陈效民, 李孝良, 等. 2011. 西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤黏土矿物组成及其含量变异研究[J]. 地球科学与环境学报, 33(4): 416-420. [Yang X Q, Chen X M, Li X L, et al. 2011. Study on composition and content variation of clay mineral of soil under different stages of rock desertification in karst region, Southwest China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 33(4): 416-420.]
- 于维莲, 董丹, 倪健. 2010. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较[J]. 亚热带资源与环境学报, 5(2): 25-30. [Yu W L, Dong D, Ni J. 2010. Comparisons of biomass and net primary productivity of karst and non-karst forests in mountainous areas, Southwestern China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 5(2): 25-30.]
- 袁道先. 2001. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 16(4): 461-466. [Yuan D X. 2001. World correlation of karst ecosystem: Objectives and implementation plan[J]. Advances in Earth Science, 16(4): 461-466.]
- 苑涛, 贾亚男. 2011. 中国西南岩溶生态系统脆弱性研究进展[J]. 中国农学通报, 27(32): 175-180. [Yuan T, Jia Y N. 2011. Research progresses on vulnerability of karst ecological system in Southwest China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 27(32): 175-180.]
- 张承琴, 王普昶, 龙翠玲, 等. 2014. 贵州喀斯特峰丛洼地不同石漠化等级土壤化学性质特征[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 32(2): 25-28. [Zhang C Q, Wang P C, Long C L, et al. 2014. Soil chemical properties of different grade rocky desertification in karst peak-cluster depression area of Guizhou[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 32(2): 25-28.]
- 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 2008. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J]. 生态学报, 28(12): 6334-6343. [Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. 2008. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of karst hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(12): 6334-6343.]
- 张磊, 王嘉学, 刘保强, 等. 2015. 喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律[J]. 山地学报, 33(1): 8-15. [Zhang L, Wang J X, Liu B Q, et al. 2015. The variation of surface soil aggregates in the degradation process of mountain red earth zone karst[J]. Mountain Research, 33(1): 8-15.]
- 张希彪, 上官周平. 2006. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 生态学报, 26(2): 373-382. [Zhang X B, Shangguan Z P. 2006. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in hilly loess regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(2): 373-382.]
- 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 2010. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 29(3): 274-279. [Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. 2010. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 29(3): 274-279.]
- 张忠华. 2010. 喀斯特森林植被种群生态学与群落稳定性分析[D]. 上海: 华东师范大学. [Zhang Z H. 2010. Ecological research on population and community stability in karst forest vegetation[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 赵志成, 熊康宁, 陈浒, 等. 2011. 干旱对贵州喀斯特石漠化生态治理区土壤动物的影响[J]. 西南农业学报, 24(3): 1167-1172. [Zhao Z C, Xiong K N, Chen H, et al. 2011. Effect of drought on soil animal in karst rocky desertification ecological rehabilitation areas in Guizhou[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 24(3): 1167-1172.]
- 周炼川. 2009. 西南喀斯特地区不同石漠化程度土壤性状及生态效应研究[D]. 南京: 南京农业大学. [Zhou L C. 2009. Study on the soil characteristics and ecological effects in karst regions under rocky desertification, Southwest China[D]. Nanjing, China: Nanjing Agricultural University.]
- 朱华. 2007. 中国南方石灰岩(喀斯特)生态系统及生物多样性特征[J]. 热带林业, 35(S1): 44-47. [Zhu H. 2007. The karst ecosystem of southern China and its biodiversity[J]. Tropical Forestry, 35(S1): 44-47.]
- 朱守谦. 1997. 喀斯特森林生态研究(II)[M]. 贵阳: 贵州科技出版社. [Zhu S Q. 1997. Ecological research on karst forest(II)[M]. Guiyang, China: Guizhou Scientific and Technical Press.]
- Butscher C, Huggenberger P. 2009. Enhanced vulnerability assessment in karst areas by combining mapping with modeling approaches[J]. Science of the Total Environment, 407(3): 1153-1163.
- Chen H S, Liu J, Zhang W, et al. 2012. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 66(1): 371-379.

- Chen H S, Wei Z, Wang K L, et al. 2010. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in north-west Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 61(1): 1105-1111.
- Ferlan M, Alberti G, Eler K, et al. 2011. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1-2): 199-207.
- Grinnell J. 1917. The niche-relationships of the California thrasher[J]. *The Auk*, 34(4): 427-433.
- Huang Q H, Cai Y L. 2006. Assessment of karst rocky desertification using the radial basis function network model and GIS technique: A case study of Guizhou Province, China[J]. *Environmental Geology*, 49(8): 1173-1179.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jiang G H, Guo F, Polk J S, et al. 2015. Delineating vulnerability of karst aquifers using hydrochemical tracers in Southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 1015-1027.
- Jiang Y J, Wu Y X, Groves C, et al. 2009. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunnan, China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 109(1-4): 49-61.
- Levitt J. 1980. *Response of plants to environmental stress. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses*[M]. Pittsburgh, PA: Academic Press.
- Li C, Xiong K N, Wu G M. 2013. Process of biodiversity research of karst areas in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(4): 192-200.
- Li S, Ren H D, Xue L, et al. 2013. The relationship between soil characteristics and community structure in different vegetation restoration in Guangxi karst region[J]. *Advanced Materials Research*, 726-731: 4172-4176.
- Li Y R, Long H L, Liu Y S. 2010. Industrial development and land use/cover change and their effects on local environment: A case study of Changshu in eastern coastal China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 4(4): 438-448.
- Liu C C, Liu Y G, Fan D Y, et al. 2012. Plant drought tolerance assessment for re-vegetation in heterogeneous karst landscapes of Southwestern China[J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 207(1): 30-38.
- Liu Y G, Liu C C, Wang S J, et al. 2013. Organic carbon storage in four ecosystem types in the karst region of Southwestern China[J]. *PLoS ONE*, 8(2): e56443.
- Loreau L, de Mazancourt C. 2013. Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms[J]. *Ecology Letters*, 16(S1): 106-115.
- Lucrezi S, Saayman M, van der Merwe P. 2014. Influence of infrastructure development on the vegetation community structure of coastal dunes: Jeffreys Bay, South Africa[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 18(3): 193-211.
- Paine R T. 1969. A note on trophic complexity and community stability[J]. *The American Naturalist*, 103: 91-93.
- Perrin J, Jeannin P-Y, Zwahlen F. 2003. Epikarst storage in a karst aquifer: A conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, 279(1-4): 106-124.
- Sanford E. 1999. Regulation of keystone predation by small changes in ocean temperature[J]. *Science*, 283: 2095-2097.
- Schwinning S. 2010. The ecohydrology of roots in rocks[J]. *Ecohydrology*, 3(2): 238-245.
- Stothoff S A, Or D, Groeneveld D P, et al. 1999. The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock[J]. *Journal of Hydrology*, 218(3-4): 169-190.
- Sweeting M M. 1995. *Karst in China: Its geomorphology and environment*[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Tang C Q, Li Y H, Zhang Z Y. 2010. Species diversity patterns in natural secondary plant communities and man-made forests in a subtropical mountainous karst area, Yunnan, SW China[J]. *Mountain Research and Development*, 30(3): 244-251.
- Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8074-8079.
- Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. 2004. Karst rocky desertification in Southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation & Development*, 15(2): 115-121.
- Wang Y X, Merkel B J, Li Y L, et al. 2007. Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: A case study in Wuhan City, China[J]. *Environmental Geology*, 53(3): 479-484.
- Wang Z H, Yang C B, Yang L M, et al. 2007. Relationship and its ecological significance between plant species diversity and ecosystem function of soil conservation in semi-humid evergreen forests, Yunnan Province, China[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2(1): 18-27.
- Wei Y, Yu L F, Zhang J C, et al. 2011. Relationship between vegetation restoration and soil microbial characteristics in degraded karst regions: A case study[J]. *Pedosphere*, 21

- (1): 132-138.
- Wen Y G, Sun D J, Zhu H G, et al. 2011. Changes in above-ground biomass and diversity between different stages of secondary succession of a karst vegetation in Guangxi, China[C]//Hu J. *Advances in biomedical engineering*. Newark, NJ: Information Engineering Research Inst.
- Yang Q Q, Wang K L, Zhang C H, et al. 2011. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in karst areas of northwestern Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 64(2): 383-393.
- Yue Y M, Wang K L, Zhang B, et al. 2010. Exploring the relationship between vegetation spectra and eco-geo-environmental conditions in karst region, Southwest China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160(1- 4): 157-168.
- Zhang M Y, Wang K L, Chen H S, et al. 2010. Impacts of land use and land cover changes upon organic productivity values in karst ecosystems: A case study of northwest Guangxi, China[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 4(1): 3-13.
- Zhao H J, Ma F S, Guo J. 2012. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in Southern China in the first half of 2010[J]. *Natural Hazards*, 60(3): 1037-1054.
- Zhou N Q, Zhao S. 2013. Urbanization process and induced environmental geological hazards in China[J]. *Natural Hazards*, 67(2): 797-810.
- Zhu S F, Liu C Q. 2008. Stable carbon isotopic composition of soil organic matter in the karst areas of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27(2): 171-177.

Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure–function–habitat framework

HOU Wenjuan^{1,2}, GAO Jiangbo^{1*}, PENG Tao^{3,4}, WU Shaohong¹, DAI Erfu¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China; 4. Puding Karst Ecosystem Research Station, Puding 562100, Guizhou, China)

Abstract: During the past decades, due to the intensified human disturbance and its special geological background and ecological environment, karst ecosystem in the southwestern part of China exhibited significant vulnerability, which hinders the sustainable development of the social-economic-ecological system of the region. Based on system sensitivity and adaptability, a large number of studies have investigated the vulnerability of karst ecosystem structure, function, and habitat to external disturbance. Especially, indicators of ecosystem diversity, key species, productivity, and soil physical/chemical properties were applied to reveal ecosystem sensitivity to land use/cover change and rocky desertification. However, research on quantification of ecosystem sensitivity by field experiment, mechanism models, and mathematical statistics, is less advanced. Although some karst-suitable plants present adaptability to karst drought environment by self-regulation of morphological structure and physiological function, the ecosystem adaption mechanism or biophysical/biochemical processes in response to environmental threat (e.g. human disturbance and climate change) remain unclear. Due to the close interaction of ecosystem structure, function, and habitat, future research should examine the response of coupled ecosystem components to promote the study of driving mechanism and quantitative assessment of karst ecosystem vulnerability. Furthermore, research on ecosystem vulnerability at different succession stages of karst rocky desertification needs to be strengthened to advance rocky desertification control and ecological restoration and reconstruction.

Key words: karst ecosystem; vulnerability; desertification; structure-function-habitat; progress and prospect