

DOI: 10.5846/stxb202002150260

张云芝, 胡云锋, 韩月琪, 战胜. 全球主要生态退化区和研究热点区的空间分布与演变. 生态学报, 2021, 41(19): 7599-7613.

Zhang Y Z, Hu Y F, Han Y Q, Zhan S. Spatial distributions and evolutions of global major ecological degradation regions and research hotspot regions. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7599-7613.

全球主要生态退化区和研究热点区的空间分布与演变

张云芝^{1,2}, 胡云锋^{1,2,*}, 韩月琪^{1,2}, 战胜^{1,3}

1 资源与环境信息系统国家重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 聊城大学, 聊城 252000

摘要:掌握生态退化区和研究热点区的空间分布、退化区生态系统的演变态势是认识生态问题、开展生态治理的基础,但目前缺乏全球主要生态退化区空间分布图等基础数据和相关知识。应用多源数据集成融合、长时序卫星遥感分析、互联网文献大数据建模分析等方法,对以荒漠化、水土流失、石漠化为代表的全球主要生态退化类型区的空间分布、演变态势、研究关注热度等进行了研究。结果表明:(1)全球荒漠化区面积约 $15.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 水土流失区面积约 $14.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 石漠化区面积约 $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$; 这些生态退化区主要分布在非洲撒哈拉沙漠南北边缘, 欧洲西部、地中海沿岸、东欧平原南部, 南亚印度河流域, 中国西北地区、云贵高原, 北美洲落基山脉以及南美洲阿根廷等地区。(2)2000 年以来, 上述退化区中约有 3.9% 的面积处于退化加重态势, 73.3% 的面积处于脆弱平衡状态, 22.8% 的区域出现好转趋势。(3)全球生态退化研究热点区的分布与全球生态退化区的分布总体呈现一致性。但在沙特阿拉伯中部、哈萨克斯坦北部, 巴西大部, 安哥拉、南非等生态退化区, 存在生态系统继续恶化、缺乏研究界足够关注的情况。研究成果深化了对全球主要生态退化区分布格局的认识, 对于防范全球发展和建设中出现加重的生态退化等具有参考价值。

关键词:生态退化; 研究热点; 分布规律; 演变趋势; 卫星遥感; 互联网大数据

Spatial distributions and evolutions of global major ecological degradation regions and research hotspot regions

ZHANG Yunzhi^{1,2}, HU Yunfeng^{1,2,*}, HAN Yueqi^{1,2}, ZHAN Sheng^{1,3}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Liaocheng University, College of Environment and Planning, Liaocheng 252000, China

Abstract: Knowing the spatial distribution of ecological degradation regions and research hotspot regions, as well as the evolution of ecosystems in the degradation regions are the basis for understanding ecological problems and ecological environment management. However, there is a lack of basic data and relevant knowledge research in the world. In this paper, multi-source data integration, long-term satellite remote sensing analysis, and the Internet literature big data modeling analysis are applied to study the spatial distribution, evolution trend and the research hotspots of global major ecological degradation, i.e. land desertification, soil erosion and karst rocky desertification. The results show that: (1) the global desertification area is about $15.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, the soil erosion area is about $14.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, and the karst rocky desertification area is about $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$. The global major ecological degradation regions are mainly distributed in northern

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41977421); 科技部重点研发项目(2016YFC0503701, 2016YFB0501502)

收稿日期: 2020-02-15; 网络出版日期: 2021-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huyf@reis.ac.cn

and southern margin of the Sahara in Africa, the Mediterranean coast in Western Europe and southern plain of the Eastern European, the Indus River Basin in South Asia, the Northwestern China and the Yunnan-Guizhou Plateau of China, the Rocky Mountains in North America and Argentina in South America. (2) Since 2000, about 3.9% of the above degraded areas have been deteriorating, 73.3% of them were still in a fragile dynamic balance state, and 22.8% of them have been improved. In terms of spatial distribution, the attention of global researchers is generally consistent with that of typical ecological degradation regions. However, there are still some areas where the ecosystems continue to deteriorate, but at the same time they lack sufficiently scientific research attention, on the central Saudi Arabia and Northern Kazakhstan in Asia, Brazil in South America, Angola and South Africa in southern Africa, etc. The research results deepen people's understanding of the distribution pattern of global major ecological degradation regions, and have reference value for preventing the aggravated ecological degradation in the developments and engineering construction worldwide.

Key Words: ecological degradation; research hotspot; distribution pattern; evolution tendency; satellite remote sensing; Internet big data

工业革命以来,全球气候变暖、淡水资源短缺、环境污染、生物多样性锐减、土地荒漠化等问题日益突出,不仅影响了全球经济和社会的可持续发展,而且威胁着人类的生存。生态退化已经成为全球面临的重大问题之一。生态退化是指由于人类对自然资源过度以及不合理利用而造成的生态系统结构破坏、功能衰退、生物多样性减少、生物生产力下降以及土地生产潜力衰退、土地资源丧失等一系列生态环境恶化的现象^[1];生态退化主要包括荒漠化、水土流失、石漠化、森林破坏、湿地萎缩等多种退化类型,其中又以荒漠化、水土流失和石漠化三种生态退化过程最为普遍、最受公众所关注^[2]。

荒漠化从本质上说是一种土地退化,土地退化带来了不同程度的荒漠化问题^[3]。1991年,全球人为土壤退化评价(Global Assessment of Human-induced Soil Degradation, GLASOD)项目基于各国科学家的经验知识,发布了全球第一份土壤退化评估报告^[4]。GLASOD是在联合国环境署(United Nations Environment Programme, UNEP)资助和领导下,由各国科学家在统一准则指导下研制的全球尺度土地退化数据集。鉴于其权威性、专业性和全球尺度的特点,GLASOD数据集自发布以来,一直广受科学界和国际组织的广泛重视和使用^[5-7]。近年来,随着遥感技术的快速发展,卫星遥感技术已成为荒漠化监测评价的主要手段。第一版的《全球荒漠化地图集》对全球荒漠化状况的描述直接引用了GLASOD土壤退化评估结果^[8],第三版的《全球荒漠化地图集》则基于卫星影像数据评估了全球土地退化状况^[9]。需要特别指出的是:荒漠化作为一个动态过程,荒漠化区与荒漠、沙漠并不能混为一谈^[10]。

广义的“水土流失”是地表土壤及母质、岩石受到各种破坏和移动、堆积过程以及水本身损失的自然现象,但狭义的“水土流失”则是特指水力侵蚀过程^[11]。这种“水土流失”导致土地贫瘠、岩石裸露、植被破坏、生态恶化,影响到人类和其他动植物的生存,是另一种广泛发生的生态退化过程。在水土流失评价方面,美国学者 Wischmeier 最早提出了著名的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)^[12];Chang 和 Bayes 则将修正通用水土流失方程(Revised USLE, RUSLE)与 GIS 结合起来,分析了美国俄亥俄州查尔斯米尔湖流域最易遭受侵蚀的区域^[13]。在中国,学者们开发了适用于我国的水土流失遥感定量快速监测方法(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)^[14];应用遥感技术,绘制了中国土壤侵蚀的空间分布图^[15]。

相比于水土流失,石漠化是一特殊的、发生在亚热带喀斯特环境中的土壤侵蚀过程^[16]。当前,基于卫星遥感影像的地表类型解译、时序变化检测是提取石漠化空间分布、分析其动态演化过程的主要技术手段。在中国,姚永慧等利用 SPOT5/ALOS、高分一号/资源三号数据等,结合地面调查、解译方法分析了贵州省关岭县石漠化分布与时空演化过程^[17];刘鹏等在县域尺度上绘制了云南省石漠化分布区划图^[18];齐向坤等比较了高度非均匀喀斯特地貌下石漠化遥感监测提取方法的适用性^[19]。在欧洲,Daly 等提出了喀斯特-地下水-脆弱性评价和制图的“欧洲方法”^[20];Bartolomé Andreo 等采用该方法在西班牙南部开展了喀斯特石漠化脆弱

性、危害和风险性制图^[21]。

虽然研究人员针对荒漠化、水土流失、石漠化等主要生态退化过程开展了不同地域、不同空间尺度、不同主题方向的研究,但总的来看,目前还缺乏一个对全球生态退化空间分布格局总体的和全局性的认识和研究框架。绘制全球主要生态退化类型的空间分布地图,掌握 21 世纪以来各个重点退化区内生态变化的基本态势,这不仅是当前生态地理学研究的重要主题,同时也是各国开展工程建设生态影响评估的重要基础。在绘制生态退化空间分布地图的基础上,进一步探讨生态退化与生态退化研究、生态退化与生态治理的时空耦合关系,这是改进和完善全球生态退化治理的前提条件。然而,既有的研究在上述两方面所取得的进展并不十分令人满意。

首先,在主要生态退化过程的时空分布格局及其演变态势的认识方面,各国科学家应用卫星遥感方法,在区域尺度上、针对单一的生态退化过程的研究已经取得了很好的进展^[22-26]。然而,在全球尺度上,过去 20 年来全球科学家对于生态退化的空间制图研究并没有取得实质性进步。来自土壤学、风沙学、水土保持科学、岩溶学、农业等多种学科的科研人员分别绘制了本专业的土地退化图^[4, 27-30],但是很少有综合多种学科,特别是将土地退化与植被退化结合起来、针对生态单元变化态势的综合制图研究。在应用多学科专业知识集成与制图方面,其难点和突破点在于一张图的综合集成、多退化类型的重叠判别;结合长时序卫星遥感产品分析,如何将植被态势、土地变化向生态退化类型转变也仍有待探究。

其次,在生态退化区域与科学研究关注区、生态退化重点治理区的空间匹配和相互关系研究领域,目前生态学界的相关研究总体上是偏少的、甚至可以说是缺乏的。已有的研究中,绝大多数是针对生态退化及其影响的刻画和描述^[28],少量是针对生态退化治理工程的成效分析^[31]。虽然所有的生态学研究都会对生态研究的前沿方向进行综述^[32],对于热点地区进行快速的追踪分析^[23-24];但对于生态退化研究热点的分析是描述性的、非空间化的。对于生态退化现状与相关科学研究关注热点的空间匹配,以及退化态势与研究关注及治理的综合联系,目前绝大多数研究者都没有注意到,或者是缺乏相应的技术手段开展这种耦合匹配分析。在互联网大数据技术研究地理生态学领域,已经有研究人员提出应用互联网爬虫技术开展生态监测与评估的设想^[33]。考虑到在科学研究中,众多知识库平台已经继承了海量的科技期刊论文。从这些科技论文中提取特定主题的地理空间信息,从而分析特定自然和生态过程的空间分布规律、时间演化特征并最终形成制图成果,这是将大数据技术与专业研究相结合的重要研究方向。在这方面,胡云锋、韩月琪等利用中国期刊网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)、Web of Sciences(WOS)等知识引擎,研制了中国和全球尺度的石漠化、荒漠化研究热点地图^[34-36]。在互联网大数据生态监测评估和制图研究领域,一个研究难点是需要解决各种地名信息的自动化提取和空间匹配、基于位置的自然地理和生态环境问题建模分析,以及针对时空分析结果的知识凝练和实际应用。

针对上述问题,特别是考虑到当前全球生态退化研究中基础数据丰富、互联网大数据方法日益突出的现实,本文作者聚焦于荒漠化、水土流失、石漠化等主要生态退化类型,依据国际权威和主流的多源、多尺度的生态退化基础数据集成果,结合 21 世纪以来的长时序卫星遥感影像、陆地生态系统地表关键参数数据集,主要应用多源数据整合与融合、互联网文献大数据采集和建模分析方法,开展了全球尺度的生态退化空间分布、变化态势和研究热点研究。通过研究,作者试图回答以下 3 个科学问题:

- (1) 荒漠化、水土流失和石漠化等主要生态退化类型有着怎样的全球空间分布规律?
- (2) 21 世纪以来,全球主要生态退化类型区有着怎样的变化态势?
- (3) 世界各国的科研人员对哪些生态退化区比较重视? 又对哪些生态退化区有所忽视?

1 数据与方法

1.1 基础数据

全球土地退化程度数据集(Land Degradation Severity Map)来自于 1991 年联合国 GLASOD(Global

Assessment of Human-Induced Soil Degradation)项目发布的全球第一份土壤退化评估报告。该数据集是以世界各国科学家在统一的准则指导下,参考卫星遥感所得的 NDVI 指标,主要根据专家自身经验和知识,对各种地理单元的属性(退化类型、范围、程度、比率和主要原因等)进行判别,并最终形成全球制图成果^[37]。全球喀斯特岩溶地图(World Karst Aquifer Map)是由 Hartmann 和 Moosdorf^[27]研制的全球数字岩性图为依据,在世界水文地质制图和评估方案(World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme, WHYMAP)框架下编制的。

中国土壤侵蚀空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,该数据集是依据中华人民共和国行业标准 SL190-96《土壤侵蚀分类分级标准》的总体要求编制而成。中国沙漠、戈壁和绿洲分布来自于《中国自然地理图集(第三版)》。岩溶地区石漠化土地状况分布来自于国家林业局,是全国岩溶地区第二次石漠化监测工作成果。

用于提取全球生态退化研究热点区信息的数据源自 Web of Science(WOS)互联网大数据平台。WOS 是全球领先的跨学科引文数据库,它收录了 11000 多种世界权威的、高影响力的学术期刊及全球 110,000 多个国际学术会议录,内容涵盖自然科学、工程技术、生物医学、社会科学、艺术与人文等领域,WOS 的论文文献最早可以回溯至 1900 年。

用于开展全球生态退化区生态系统时序变化监测的基础数据是 MODIS NDVI 产品(MOD13A3),该数据集来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)。MODIS NDVI 植被指数产品由大气校正后的双向地表反射率反演得到,该产品有效地描述了全球范围内的植被状态和过程^[38]。研究中,作者使用了 2000—2017 年、空间分辨率为 1 km 的 MOD13A3 月产品,通过应用年内最大值合成方法得到年度 NDVI 产品。

1.2 研究方法

1.2.1 总体技术路线

本研究首先开展了多源、多尺度数据集成与数据融合,即将不同来源的土地退化图、土壤侵蚀图、DEM 地图等开展空间叠加,通过一系列复杂的地图综合操作,实现多源数据在主题、属性、等级、尺度、维度上的整合和融合,由此形成了全球生态退化区空间分布地图。在此基础上,进一步应用 21 世纪以来的长时序年际 NDVI 变化斜率分析方法,判别全球各生态退化区的演变态势。而后,作者运用互联网文献大数据方法,提取国际学术界生态退化研究相关论文中的地名信息,构建生态退化研究热度指数,并形成其空间化的表达。最后,作者综合上述 3 方面成果,对全球生态退化空间分布、退化区变化态势、生态退化与生态研究的空间耦合关系等开展深入的讨论。

论文整体技术路线如下图所示(图 1)。

1.2.2 多源数据集成

为了生成全球尺度生态退化区的空间分布图,需要开展多源、多尺度数据集成分析,即将不同来源、不同尺度的土地退化图、土壤侵蚀图、DEM 地图等开展空间叠加,通过一系列地图综合操作,实现多源数据在主题、属性、等级、尺度、维度上的整合和融合。具体做法是:

首先,基于 GLASOD 数据集的退化类别属性,获得荒漠化和水土流失区的斑块,同时继承这些斑块的生态退化严重程度评价分值;而后,将其中的水土流失斑块与全球喀斯特地貌图集进行叠加,将位于喀斯特地区的水土流失斑块确定为石漠化区域。将以上成果数据进一步与全球 NDVI 数据叠加,并使用 $NDVI < 0.8$ 作为阈值开展掩膜处理、剔除高覆盖植被区域,由此得到一个较粗分辨率的全球尺度生态退化区空间分布数据集。

考虑到中国区域生态退化数据集的丰富程度以及数据集本身的精细和准确程度,在上述粗分辨率数据基础上,作者进一步将中国政府或其它权威部门发布的生态退化空间数据集融合进来。具体做法是:首先,考虑到荒漠化区的定义,需要从全球土地退化地图中剔除沙漠、戈壁等自然地理单元;而后,基于国家林业局发布的《岩溶地区石漠化土地状况分布》,可以获得全国石漠化地区空间分布数据;根据水利部和中国科学院联合

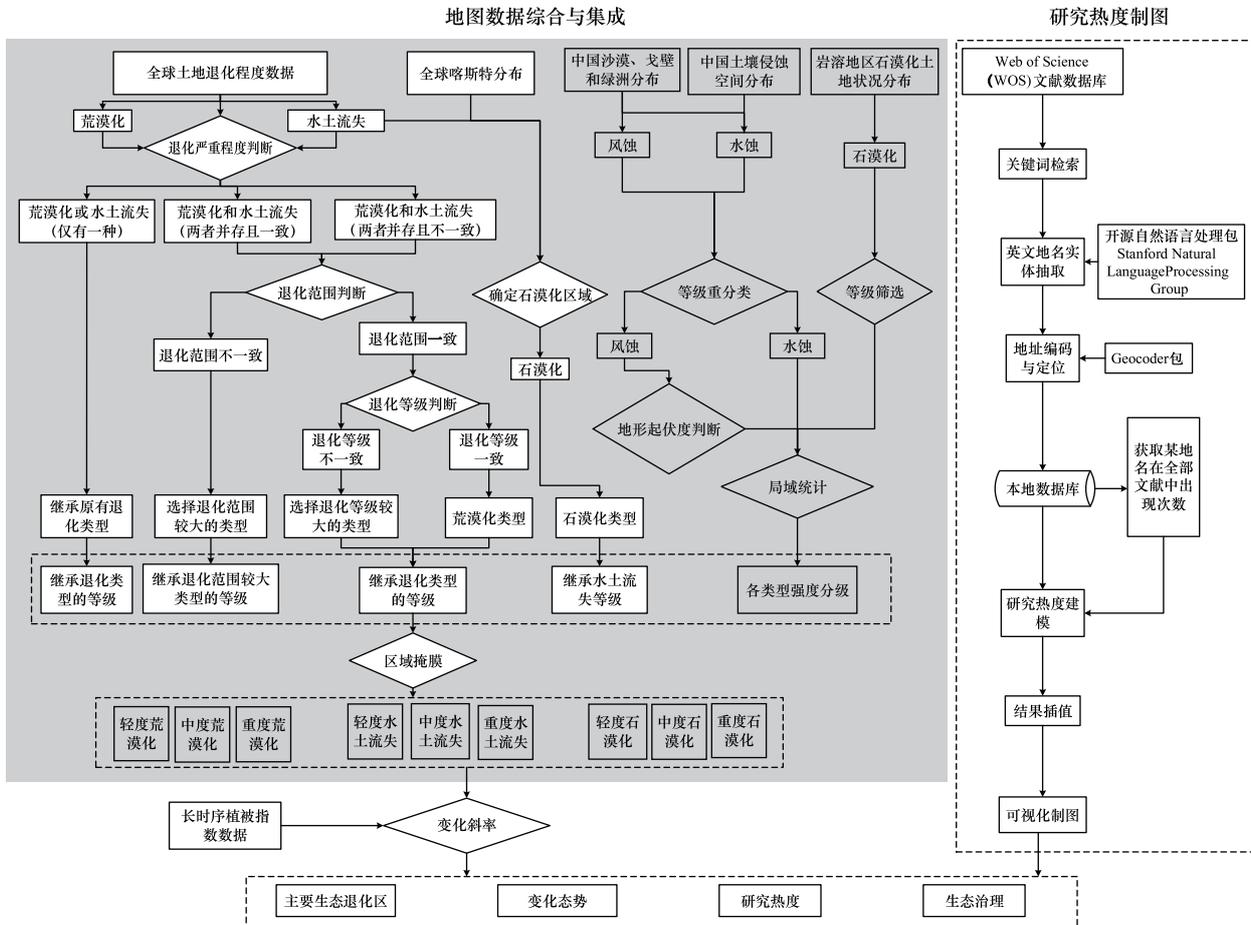


图 1 总体技术路线图

Fig.1 General technical flowchart

研制并发布的中国土壤侵蚀空间分布图,可以获得全国水土流失空间分布数据。将中国境内的高精度数据集替代全球尺度上的相关图斑,同时开展地图接边检查、地图属性一致性检查、升尺度融合操作,最终得到全球主要生态退化区的空间分布图。

1.2.3 变化趋势分析

趋势分析是定量测度生态系统变化方向和变化程度的基本方法,本研究选取长时序(2000—2017年)MODIS NDVI产品作为评价陆表生态系统变化的基础指标。与简单对比两个时间断面上NDVI差异的方法相比,趋势分析方法可以消除特定年份的个体效应,更客观地反映陆表植被覆盖状况长期演化的方向和趋势。趋势分析中斜率可以通过如下公式计算:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中,Slope为变化斜率;Slope为正,意味着NDVI上升、植被盖度提高,陆地生态系统状况处于改善过程中;Slope为负,意味着NDVI下降、植被盖度减小,陆地生态系统状况处于退化过程中。 Y_i 表示第*i*年的NDVI值; n 为监测时段的年数($n=18$)。为了保障趋势分析结果的有效性,还对结果进行了*P*值($P<0.05$)统计显著性检验。

1.2.4 研究热度分析

作者应用Python语言开发了一个互联网文献大数据搜索和分析系统。该系统首先调用Web of Science

提供的搜索接口以及 Python 内置的网络搜索工具,分别以“Desertification”、“Soil Erosion”、“Karst”为关键词开展检索。应用程序完成搜索后,自动下载结果文献的题目、摘要、关键词、作者姓名及其单位等信息,并保存到本地的 SQLite 数据库中。针对上述英文文献信息,利用 Stanford NLP 提供的 NER (Named Entity Recognition) 模块,提取文献中涉及的地名实体名词。而后,应用 Python 地理处理工具包 Geopy 中 Geocoders 模块,实现从地名实体到地址编码(经纬度信息)的转换。最后,在 ArcGIS 环境中,对不同位置上的研究论文数量进行统计,将论文频次数据进行空间化,得到论文研究的热力图。

在全球尺度上,由于各个国家、地区之间的经济社会发展水平、科学技术研究力量差异巨大,不同地区之间会出现由于技术发展差异导致的“信息鸿沟”。因此,一个地区的研究热度不能仅仅通过这个地区出现的生态退化研究论文的多少(即绝对热度)来确定,而是要综合考虑这个地区生态退化研究论文数量与全部研究论文数量的比值(即相对热度)来确定的^[34-36]。相对热度的计算公式如下:

$$Q = \frac{N_{spe}}{N_{all}} \tag{2}$$

$$Q^* = \frac{Q - \min(Q)}{\max(Q) - \min(Q)} \tag{3}$$

式中, Q 为相对研究热度指数; N_{spe} 为某一地点在以荒漠化、水土流失或石漠化为主题检索得到的文献出现的总频次; N_{all} 为某一地点在全部研究文献中出现的总频次。对 Q 进行归一化处理,得到标准相对研究热度指数 Q^* 。其中, $\max(Q)$ 是 Q 的最大值, $\min(Q)$ 是 Q 的最小值。在研究热度空间制图过程中,参考自然断点法给出的分级阈值方案,将研究热度分为极高、高、中、较低、低五级。

2 结果分析

2.1 生态退化区空间分布

根据全球主要生态退化区空间分布图(图 2),可以发现:荒漠化区主要分布在亚洲中部的蒙古高原、中国西北部,南亚次大陆西部,西亚的阿拉伯半岛和伊朗高原,欧洲东南部,非洲撒哈拉沙漠北缘及南缘,北美洲的中部大平原,南美洲的巴塔哥尼亚高原等地区。水土流失区主要分布在位于亚洲东部的中国黄土高原和东南亚的中南半岛,印度次大陆,欧洲地中海沿岸地区、东欧平原,非洲的撒哈拉沙漠南缘、非洲东部和南部,北美

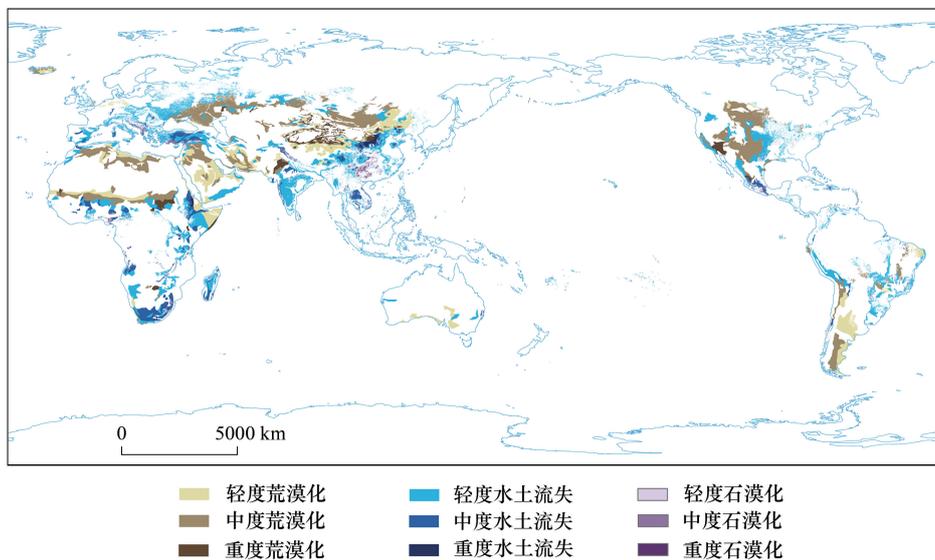


图 2 全球主要生态退化类型区的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of global major ecological degradation regions

洲的密西西比河流域、南美洲的亚马逊河流域南部。石漠化区主要分布在中国西南部地区、欧洲地中海沿岸地区以及北美洲墨西哥高原南部地区。

针对不同类型、不同等级的生态退化区进行统计,结果表明(表 1):在全球尺度上,荒漠化区域面积最大(15.4×10⁶ km²);水土流失区的面积与荒漠化的面积大致相当(14.3×10⁶ km²),而石漠化区域的面积最小,其总面积(1.1×10⁶ km²)不到荒漠化区或者水土流失区总面积的 8%。在退化程度上,有一半以上荒漠化区为中度退化,而全球的水土流失与石漠化主要以轻度退化为主(77.9%、64.2%)。

表 1 全球主要生态退化类型的面积统计

Table 1 Area statistics of global major ecological degradation zones

退化类型 Degradation types	退化程度 Degree of degeneration	退化面积 Degradation area (1×10 ⁶ km ²)	占全球该类退化类型总面积比例/% Percentage of degraded type area in the global degraded area
荒漠化 Desertification	重度	1.3	8.3
	中度	8.5	55.2
	轻度	5.6	36.5
	总计	15.4	100
水土流失 Soil erosion	重度	0.16	1.1
	中度	3.0	21.0
	轻度	11.2	77.9
	总计	14.3	100
石漠化 Rocky desertification	重度	0.04	3.8
	中度	0.38	33.8
	轻度	0.70	62.4
	总计	1.1	100

针对不同生态退化类型在全球各大洲的空间分布进行统计,结果表明(图 3):亚洲 3 种主要生态退化区的面积最大(12.0×10⁶ km²),占全球生态退化总面积的 39.0%。在上述 6 个大洲中,亚洲、北美洲、南美洲、大洋洲的生态退化类型以荒漠化为主、水土流失次之,石漠化最小;而非洲、欧洲则是以水土流失为主,荒漠化、石漠化次之。

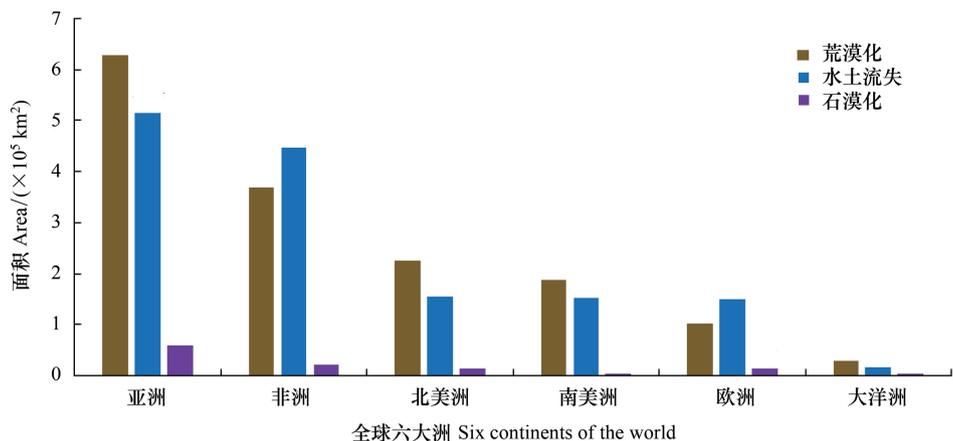


图 3 各大洲主要生态退化类型面积统计

Fig.3 Area statistics of global major ecological degradation regions

2.2 生态退化区变化态势

对全球时序(2000—2017 年)NDVI 变化态势制图(图 4),结果表明:2000—2017 年,全球植被总体趋势有

所改善,生态系统状况处于转好态势。全球 NDVI 上升区域(75.6%)明显大于下降区域(24.4%)。其中,NDVI 呈上显著升趋势区域(23.6%)主要分布在中国大部,俄罗斯远东地区、印度次大陆、欧洲东南部,非洲北部、澳大利亚北东部和南部的沿海地区,加拿大东北部等地区。已有的研究表明,植被覆盖度上升主要受全球气温上升、人类对土地的可持续利用、管理及保护活动能力的提升有关^[29]。NDVI 呈显著下降趋势区域(2.5%)主要分布在俄罗斯中部,沙特阿拉伯中部,非洲中、东部,南美洲东部等地区。相关研究表明,这些地区植被覆盖度的下降受气候干旱以及快速的城市化等人类负向干扰等影响显著^[39-41]。除上述显著变化地区之外,全球另有 74.0%的区域,其陆地植被虽然呈现变化,但是不具有统计显著性。

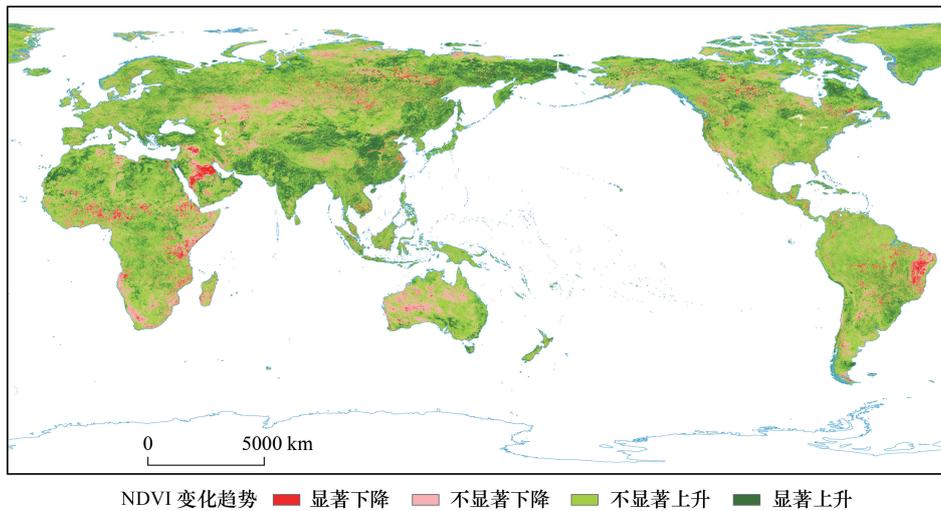


图 4 2000—2017 年全球陆表植被年内最大 NDVI 的变化趋势

Fig.4 Evolution tendency of annual maximum NDVIs of global terrestrial vegetation during 2000—2017

结合全球主要生态退化区空间分布图,对各个生态退化区的植被变化态势开展叠加分析,可以显示 21 世纪以来各个生态退化区的最新生态变化(图 5、表 2)。结果显示:2000 年以来,大约有 3.9%的生态退化区处

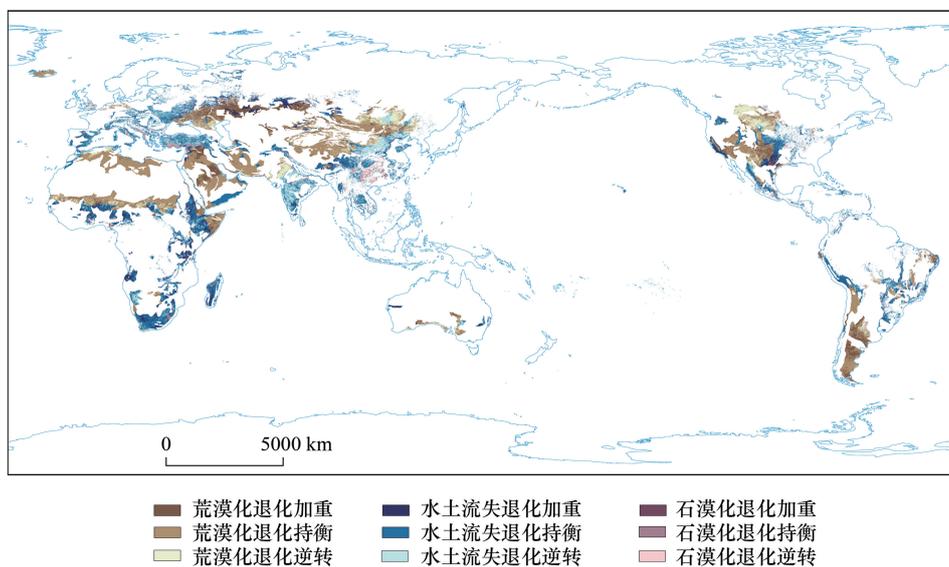


图 5 2000—2017 年全球主要生态退化区植被生态变化的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of global terrestrial vegetation ecosystem evolution in different ecological degradation regions

于退化加重态势。其中:荒漠化退化加重区主要分布在阿拉伯半岛中部;水土流失加重区主要分布在非洲中东部、安哥拉中部以及亚丁湾沿岸;石漠化退化加重区零星分布于小亚细亚半岛南部及中国云贵高原。大约有 22.8% 的生态退化区处于退化逆转,即生态改善的态势。其中:荒漠化退化逆转区主要分布在加拿大南部、印度半岛北部、伊朗南部、非洲北部以及中国西北部分地区;水土流失退化逆转区主要分布在欧洲地中海沿岸、小亚细亚半岛、印度半岛中部及中国黄土高原等地;石漠化退化逆转主要分布在中国西南部云贵高原等地。全球其它生态退化区(占全部生态退化区总面积的 73.3%)的植被变化呈现持衡趋势。

表 2 全球主要生态退化区内不同植被变化趋势区域的面积统计

Table 2 Area statistics of different evolution tendencies in global major ecological degradation regions

退化类型 Degradation types	统计类型 Statistical type	退化加重 Degradation aggravating	退化持衡 Balance of degradation	退化逆转 Degradation reversal
荒漠化 Desertification	面积($\times 10^6$ km ²)	0.57	11.7	3.1
	占荒漠化面积比例/%	3.7	76.0	20.3
水土流失 Soil erosion	面积($\times 10^6$ km ²)	0.59	10.3	3.5
	占水土流失面积比例/%	4.1	71.5	24.4
石漠化 Rocky desertification	面积($\times 10^6$ km ²)	0.03	0.67	0.41
	占石漠化面积比例/%	2.9	60.0	37.1
合计 Total	面积($\times 10^6$ km ²)	1.2	22.6	7.0
	占全部生态退化面积比例/%	3.9	73.3	22.8

2.3 生态退化研究热点区及其演变

根据全球英文 SCI 文献检索和自然语言理解、分词、空间制图的结果,可以得到 1970 年代以来全球生态退化研究热点区的空间分布图(图 6)。结果表明:在亚洲,阿拉伯半岛西部及伊朗高原西部呈现为较高比例的荒漠化研究;中国北部主要为荒漠化研究,中部为水土流失研究;在欧洲大部,水土流失研究占据绝对优势,其中巴尔干半岛地区还伴有较高热度的石漠化研究;在非洲的维多利亚湖沿岸表现出较多的水土流失研究;在北美洲,美国西海岸及东部平原地区均以水土流失研究为主;在南美洲西南部,出现了水土流失研究的集聚区;在大洋洲,澳大利亚东部主要为水土流失研究。

就单一的生态退化研究来说,仅体现为石漠化高研究热度的区域范围小、且集中分布于欧洲亚得里亚海东岸,如:波斯尼亚和黑塞哥维那、黑山以及塞尔维亚等国家。对水土流失的研究关注区域分布在除南极洲以外的其他所有大洲,其中以西欧和地中海沿岸研究热度最高,如:西班牙、法国、瑞士、意大利、德国以及英国等地区;此外,东亚黄土高原地区、南澳大利亚科西阿斯科山附近、东非维多利亚湖周围、北美阿巴拉契亚山脉附近均出现不同程度的水土流失研究关注热度。荒漠化的研究热度区域集中分布在亚洲、非洲以及北美洲等地,其中以东亚蒙古高原、黄土高原以及云贵高原为高热度区域。此外,在南亚印度河流域、西亚伊朗高原、东非撒哈拉沙漠、埃塞俄比亚高原以及北美墨西哥高原等地也有中等热度的荒漠化研究。

此外,就复合生态的研究热点区来说,研究者对荒漠化与水土流失同时关注的区域为中国东部和南部、伊朗西部、以色列、意大利南部、摩洛哥北部以及墨西哥南部等地区,其中以中国东部及南部研究热度最高,其他区域研究热度基本持平。对石漠化与水土流失同时关注的区域为欧洲亚得里亚海东岸,例如:奥地利、斯洛文尼亚克罗地亚等国家。对荒漠化、水土流失与石漠化研究相对共同关注的区域较小,仅集中在欧洲地中海沿岸包括希腊及意大利南部等。

全球荒漠化研究热点区域范围呈扩张趋势(图 7)。1990 年以前,荒漠化研究主要集中在美国西南部的科迪勒拉山系南段、印度西南部的塔尔沙漠、亚洲地中海沿岸部分区域、非洲乍得盆地和东非高原及德拉肯斯山脉等地区。1991—2000 年,研究热点逐渐开始向全球扩张,非洲及美国依旧是热点区域,同时研究热点的范围进一步扩大。在欧洲西南部和东南部地区、亚洲蒙古国西部和东南部区域以及中国北方地区、南美洲秘鲁境内的安第斯山脉等地区,都有比较明显的荒漠化研究热点出现。进入 21 世纪后,研究热点进一步扩张,

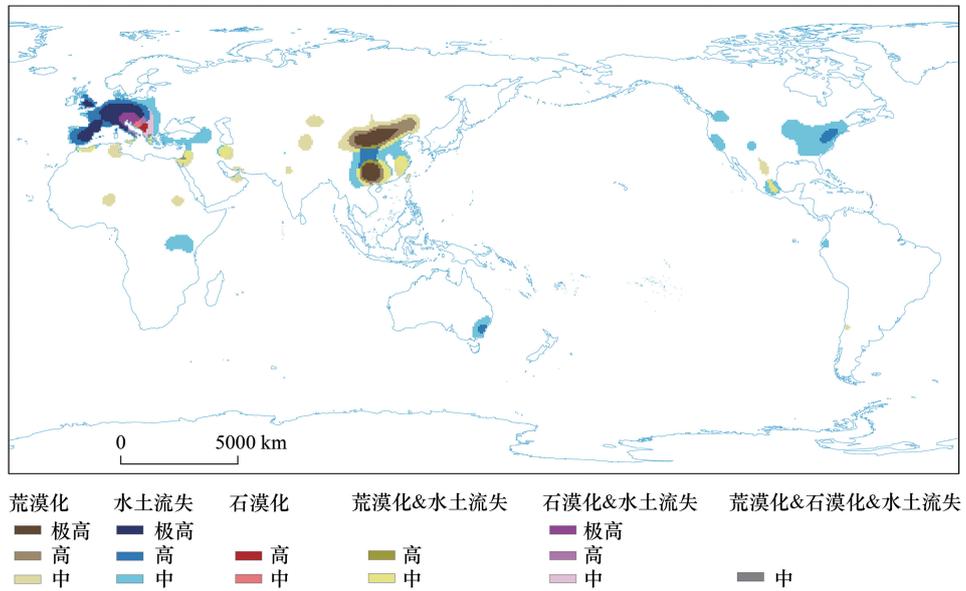


图 6 全球主要生态退化研究热点区的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the global major ecological degradation research hotspot regions

非洲、美国及欧洲南部仍旧是热点区域。亚洲荒漠化研究扩张明显,研究热点范围进一步扩大,其中中国和蒙古国扩张最为明显,印度半岛、阿拉伯半岛、伊朗高原等地区也有明显的荒漠化研究热点。

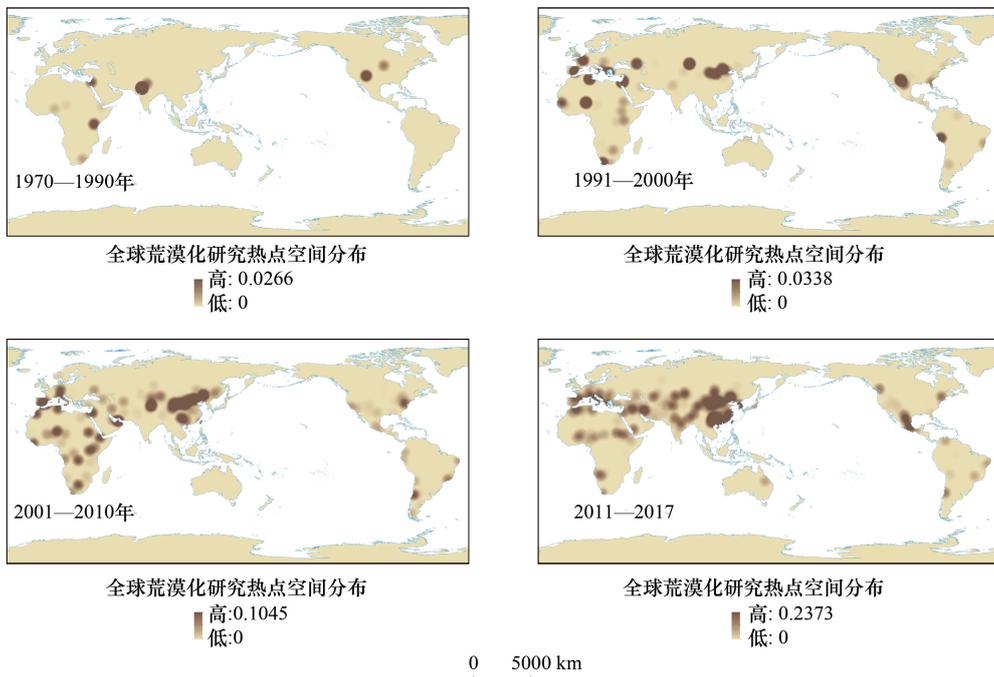


图 7 1970—2017 年全球荒漠化研究热点空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of global desertification research hotspots from 1970 to 2017

全球水土流失研究热点在东亚地区大体呈现持续扩张趋势,但在其他大洲呈现先扩张、后收缩的变化态势(图 8)。1990 年以前,水土流失研究主要集中在非洲埃及部分区域以及埃塞俄比亚高原、亚洲印度西北部、北美洲美国西部等地区。1991—2000 年,研究热点逐渐开始向全球扩张,欧洲以及美国成为热点区域;欧

洲波罗的海沿岸、地中海沿岸、阿拉伯半岛红海沿岸以及波斯湾沿岸,都有比较明显的热点出现;中国和俄罗斯以及非洲南部地区也开始出现水土流失相关研究。进入 21 世纪后,研究热点进一步扩张,除美国和西欧仍旧是水土流失的研究热点,东亚地区出现水土流失研究明显增多之外,南美洲西海岸、非洲东部的亚丁湾和维多利亚湖周边以及南部的德拉肯斯山脉、澳大利亚东南部、东南亚大部以及南亚西部,水土流失研究热度都有不同程度下降。

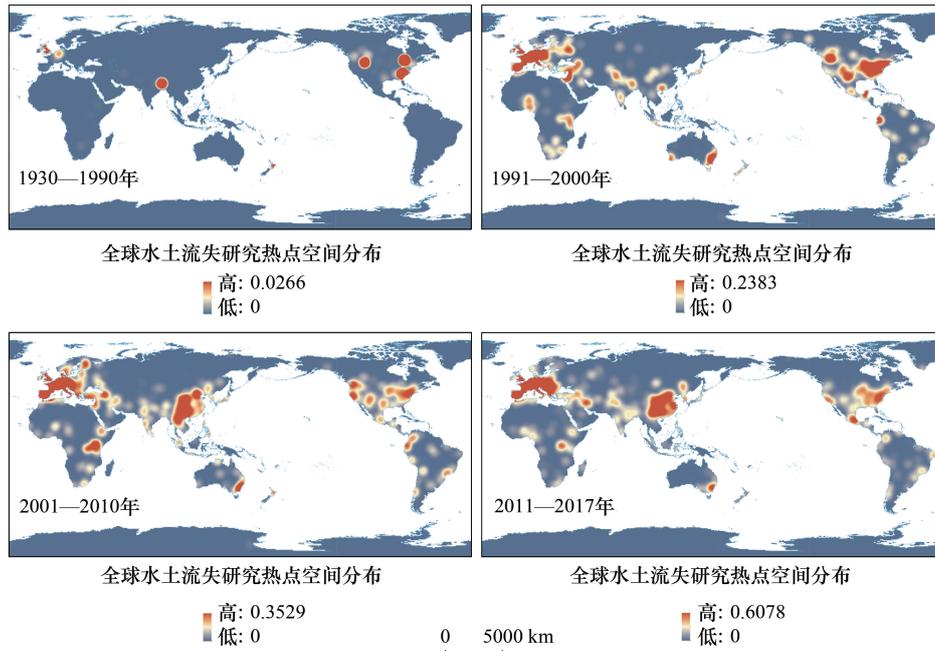


图 8 1930—2017 年全球水土流失研究热点空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of global soil erosion research hotspots from 1930 to 2017

全球喀斯特/石漠化研究热点区域范围大体呈现先扩张后收缩的变化趋势(图 9)。1990 年以前,石漠化研究主要集中在欧洲西部,如斯洛文尼亚、克罗地亚、瑞士、比利时以及德国西部、法国东北部、英国南部、瑞典南部等地区;北美洲中部,如加拿大地盾、美国密西西比河流域以及落基山脉等地区;南美洲北部圭亚那高原,如委内瑞拉等地区。1991—2000 年,研究热点逐渐开始向全球扩张,欧洲以及美洲等地区依旧是热点区域,但是热点研究区域范围逐渐扩大;此外,欧洲波罗的海沿岸、地中海沿岸,如西班牙、意大利、土耳其等国家;非洲直布罗陀海峡沿岸、索马里半岛,如摩洛哥以及埃塞俄比亚等地区;印度半岛、中南半岛、以及中国东部及西南部,澳大利亚东南部、墨西哥东部等地区,都有比较明显的热点出现,成为石漠化研究的热点区域。进入 21 世纪后,研究热点出现一定程度收缩,除西欧地中海、波罗的海沿岸以及北美洲阿巴拉契亚山脉仍然保持石漠化研究热点区域以外,东亚云贵高原研究热度有一定范围的扩大;而此前研究热点区域,例如非洲埃塞俄比亚高原、南美洲圭亚那高原以及澳大利亚大分水岭等地区,其研究热度有明显下降。

3 讨论

3.1 退化区与研究热点区

对比全球主要生态退化区空间分布图(图 2)与全球生态退化研究热点区空间分布图(图 6),可以发现:全球主要生态退化区与生态退化研究热点在空间上总体呈现出一致性。具体地,就荒漠化而言,全球的研究者对于荒漠化重视较多,研究地域覆盖较为全面。例如:在中国西北部、中亚、非洲撒哈拉沙漠的南部与北部等地区,荒漠化问题都得到足够的重视;就水土流失而言,例如:在中国黄土高原、欧洲地中海沿岸、美国东部等地区,均有较高的研究热度。这体现了全球科学家对各个生态退化区近年来生态演变态势的准确判断,也

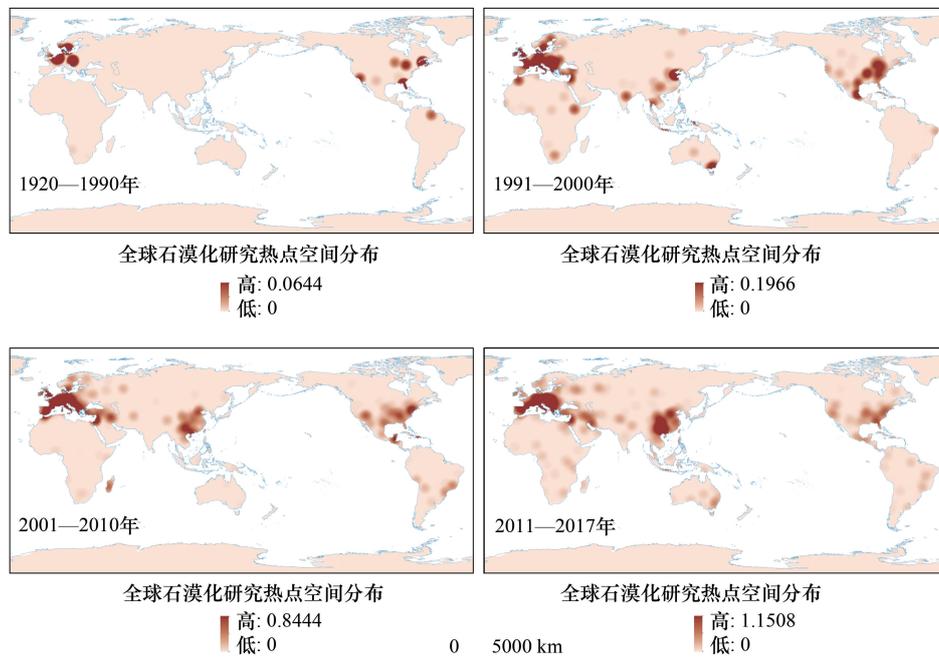


图9 1920—2017年全球石漠化研究热点空间分布

Fig.9 Spatial distribution of global karst rocky desertification research hotspots from 1920 to 2017

是全球各国政府精准投入科学资源的一种体现。

但是,在全球一些地区也存在“较高的生态退化却对应着较低的研究热度”的错位现象、或者是“较轻的生态退化却对应着较高的研究热度”的错位现象。例如:在南美洲北部、南部的荒漠化地区则缺少足够的科研关注;在非洲中部、南部,印度次大陆等地区,针对当地水土流失的研究显然不够充分。另一方面,则是如欧洲地中海北岸地区的西班牙、法国、德国、奥地利、罗马尼亚地区,整体的水土流失强度为轻,但研究热度却极其高。毫无疑问,这里出现的生态退化严重程度与生态退化研究热门程度在空间上的脱节,其原因与这些地区的经济社会发展水平、科研力量以及研究历史有着密切关系^[42-44]。

此外,根据全球生态退化研究热点区空间分布图(图6)可以发现:中国西南部(即云贵高原喀斯特地貌区)呈现出较高的荒漠化研究热度,而不是学者们一般认为的“石漠化”、“水土流失”研究热点区。这主要是学者们在论文中通常习惯于将石漠化进一步解释为石质荒漠化过程的原因^[45-46]。因此,对于中国西南部的严重的石漠化问题,中国的学者们仍然给予了极高的重视。

3.2 生态退化与生态治理

根据全球生态退化区植被生态变化态势图(图5),可以发现:全球各国政府针对主要生态退化区通过一系列的工程治理,全球尺度上有22.8%的生态退化区内实现了生态系统的好转。例如:中国政府长期以来实施“三北”防护林工程、天然林保护工程、退耕还林还草工程,这些生态工程基本建成后,使得中国西北部荒漠化区、黄土高原水土流失区、西南喀斯特石漠化区的植被盖度有了明显提升,区域生态系统的宏观结构、植被生长质量以及区域生态系统服务功能等都有了显著的提升^[47-50]。在国际上,一些国家根据其自身的生态特点,选择了合适的生态退化治理措施,也取得了明显成效。例如:土耳其开展人工造林种草^[51]、伊朗推广实施社区-牧民联合管理^[52]、肯尼亚发展人工牧草饲料种植^[53]、印度开展水资源高效利用技术推广^[54]等,这些举措对于地中海、波斯湾沿岸地区以及印度次大陆、非洲北部地区的生态好转功不可没。

尽管全球生态退化治理取得了明显呈现,但是根据我们的研究,全球目前仍然有3.9%的生态退化区出现退化加重现象,另外73.3%的生态退化区的生态系统仍然保持在脆弱的平衡状态。对于这些生态治理尚未得

到明显改善的、同时又缺乏科学界关注的生态退化区(例如沙特阿拉伯中部、哈萨克斯坦北部、巴西大部、安哥拉、南非等地区)亟需引起全球各国政府与科学界关注。在上述地区,生态之所以未能得到改善,一方面是因全球气候变化背景下的局地效应,另一方面也是当地经济社会发展水平较差,政府投入有限所致,同时也有科研能力薄弱,未能根据生态退化的关键因子,实施针对性的治理措施所致。因此,未来各国政府和科学家应当考虑,在联合国和有关国际机构的组织框架下,通过国际合作、南北合作、南南合作等方式,实现对一些严重恶化的生态退化区开展生态治理。同时,在具体的生态治理过程中,要深入分析生态退化驱动因素的作用机理,综合考虑区域的经济和社会和技术条件,考虑区域居民的生计和可持续发展,科学有效地选择和应用生态治理技术。

4 结论

本文应用多源数据集成融合方法、长时序卫星遥感参数产品分析、互联网文献大数据采集和建模分析方法等,开展了针对全球生态退化区、生态退化研究热点区的空间分布格局及其演变特征的研究。研究不仅实现了从单一退化过程分析到综合生态退化类型时空动态集成研究的转换;同时还实现了生态退化分布—生态变化态势—生态退化研究的贯通研究,为全球生态退化研究、生态退化治理等研究提供了可资参考的基础底图和研究范式。

论文编制了全球主要生态退化区的空间分布图、全球生态退化区变化态势图以及全球生态退化研究热点图等重要图件;刻画了荒漠化、水土流失、石漠化等主要生态退化类型在全球的空间分布格局,定量统计了洲际尺度上各类型生态退化的面积特征;分析了 21 世纪以来全球生态系统的演变规律,深入探讨了上述三种生态退化区内生态系统的变化态势,指出全球生态退化区内生态恶化的巨大风险;此外,还分析了全球研究学者的重点关注区域的空间分布格局和三种主要生态退化研究热点区空间分布格局的演变轨迹,探讨了研究热点区域与生态退化区的空间匹配程度,说明了两者间存在的空间差异所表征的生态退化与生态治理之间的矛盾性问题。

总结起来,本文的研究成果深化了人们对全球主要生态退化区域的分布格局的整体认识,对于防范全球各个区域经济社会发展和工程项目建设中出现加重的生态退化也具有参考价值。同时,需要指出的是:本文在编制全球主要生态退化区空间分布图时,采用的技术路线是多源、权威数据集成和融合的方法。包括 GLASOD 等数据集在内的各种基础数据都可能存在表征年代偏旧、时空基准不匹配、专业规范不协调等问题,目前所得到的全球主要生态退化区空间分布图总体上是非常粗糙的,同时还有其它多种的生态退化类型(如湿地萎缩、森林退化等)尚未得到反映。

参考文献(References):

- [1] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,郭旭东. 中国生态退化的主要类型、特征及分布. 生态学报, 2000, 20(1): 13-19.
- [2] 甄霖,胡云锋,魏云洁,罗琦,韩月琪. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析. 资源科学, 2019, 41(1): 63-74.
- [3] 王涛,朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题——1. 沙漠化的概念及其内涵. 中国沙漠, 2003, 23(3): 209-214.
- [4] Bridges E M, Oldeman L R. Global assessment of human-induced soil degradation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999, 13(4): 319-325.
- [5] Boardman J, Evans R. The measurement, estimation and monitoring of soil erosion by runoff at the field scale: challenges and possibilities with particular reference to Britain. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2020, 44(1): 31-49.
- [6] Mohamed E S, Belal A, Saleh A. Assessment of land degradation east of the Nile Delta, Egypt using remote sensing and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(8): 2843-2853.
- [7] Sonneveld B G J S, Dent D L. How good is GLASOD?. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 274-283.
- [8] Barrow C J. World atlas of desertification (United nations environment programme), edited by N. Middleton and D. S. G. Thomas. Edward Arnold, London, 1992. ISBN 0 340 55512 2, £ 89.50 (hardback), ix+69 pp. *Land Degradation & Development*, 1992, 3(4): 249-249.
- [9] Spinoni J, Carrao H, Naumann G, Antofie T, Barbosa P, Vogt J. A global drought climatology for the 3rd edition of the World Atlas of Desertification (WAD)//EGU General Assembly 2013. Vienna, Austria; EGU, 2013.

- [10] Hu Y F, Han Y Q, Zhang Y Z. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan. *Journal of Arid Environments*, 2020, 180: 104203.
- [11] 孙鸿烈. 我国水土流失问题与防治对策. *中国水利*, 2011, (6): 16-16.
- [12] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1): 131-137.
- [13] Chang T J, Bayes T D. Development of erosion hotspots for a watershed. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(12): 1011-1017.
- [14] 方天纵, 秦朋遥, 王黎明, 李晓松. 高时空分辨率植被覆盖获取方法及其在土壤侵蚀监测中的应用. *生态学报*, 2019, 39(15): 5679-5689.
- [15] 许峰, 郭索彦, 张增祥. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征. *地理学报*, 2003, 58(1): 139-146.
- [16] Tang J, Tang X X, Qin Y M, He Q S, Yi Y, Ji Z L. Karst rocky desertification progress: soil calcium as a possible driving force. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1250-1259.
- [17] 姚永慧, 索南东主, 张俊瑶, 胡宇凡, 寇志翔. 2010—2015 年贵州省关岭县石漠化时空演变及人类活动影响因素. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1759-1769.
- [18] 刘鹏, 王妍, 刘宗滨, 郭玉静, 张紫霞, 李乡旺, 杨波. 云南省县域尺度的石漠化分布与区划. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(5): 965-973.
- [19] Qi X K, Zhang C H, Wang K L. Comparing remote sensing methods for monitoring Karst rocky desertification at sub-pixel scales in a highly heterogeneous Karst region. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 13368.
- [20] Daly D, Dassargues A, Drew D, Dunne S, Goldscheider N, Neale S, Popescu I, Zwahlen F. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(2): 340-345.
- [21] Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, Vías J M, Neukum C, Sinreich M, Jiménez P, Brechenmacher J, Carrasco F, Hötzl H, Perles M J, Zwahlen F. Karst groundwater protection: first application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 2006, 357(1/3): 54-73.
- [22] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 RS 和 GIS 的区域水土流失快速定量评价方法. *水土保持通报*, 2000, 20(6): 42-44.
- [23] 吴林霖, 官云兰, 李嘉伟, 袁晨鑫, 李睿. 基于 MODIS 影像喀斯特石漠化状况研究——以贵州省为例. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 235-242.
- [24] 索安宁, 赵文喆, 王天明, 袁飞, 熊颖, 葛剑平. 近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 90-97.
- [25] 刘英, 李遥, 鲁杨, 岳辉. 2000—2016 年黄土高原地区荒漠化遥感分析. *遥感信息*, 2019, 34(2): 30-35.
- [26] 陈文倩, 丁建丽, 谭娇, 张钧泳, 刘博华. 基于 DPM-SPOT 的 2000-2015 年中亚荒漠化变化分析. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 119-126.
- [27] Hartmann J, Moosdorf N. The new global lithological map database GLiM: a representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(12): Q12004.
- [28] 牛铮, 李加洪, 高志海, 宫阿都, 张松梅, 张景, 刘爽, 欧阳晓莹, 张瑞. 《全球生态环境遥感监测年度报告》进展与展望. *遥感学报*, 2018, 22(4): 672-685.
- [29] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [30] de Jong R, de Bruin S, Schaepman M, Dent D. Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(21): 6823-6853.
- [31] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. *地理学报*, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [32] 陈苗新, 张金池. 近 10 年全球水土保持研究热点问题述评. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(3): 167-174.
- [33] Galaz V, Crona B, Daw T, Bodin Ö, Nyström M, Olsson P. Can web crawlers revolutionize ecological monitoring?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, 8(2): 99-104.
- [34] 胡云锋, 韩月琪, 曹巍, 张云芝. 中国水土流失研究热点区的空间分布制图. *生态学报*, 2019, 39(16): 5829-5835.
- [35] Hu Y F, Han Y Q, Zhang Y Z. Information extraction and spatial distribution of research hot regions on rocky desertification in China. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2075.
- [36] Hu Y F, Han Y Q, Zhang Y Z, Zhuang Y. Extraction and dynamic spatial-temporal changes of grassland deterioration research hot regions in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(4): 352-358.
- [37] Oldeman L R. Global Extent of Soil Degradation. Budapest: ISRIC, 1992: 19-36.
- [38] Houborg R, Soegaard H, Boegh E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 39-58.

- [39] Kalisa W, Igbawua T, Henchiri M, Ali S, Zhang S, Bai Y, Zhang J H. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16865.
- [40] Igorova L V, Gibbs J P, Mountrakis G, Bastille-Rousseau G, Paltsyn M Y, Ayatkhan A, Baylagasov L V, Robertus Y V, Chelyshev A V. Rangeland vegetation dynamics in the Altai mountain region of Mongolia, Russia, Kazakhstan and China: effects of climate, topography, and socio-political context for livestock herding practices. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 104017.
- [41] 李嘉译, 匡鸿海, 谭超, 王佩佩. 长江经济带城市扩张的时空特征与生态响应. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10): 2153-2161.
- [42] 甄霖, 王继军, 姜志德, 刘孝盈, 张长印, 马建霞, 肖玉, 谢永生, 谢高地. 生态技术评价方法及全球生态治理技术研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7152-7157.
- [43] Khan I, Zhao M J, Khan S U. Ecological degradation of an inland river basin and an evaluation of the spatial and distance effect on willingness to pay for its improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 31474-31485.
- [44] Chen Y, Jayaprakash C, Irwin E. Threshold management in a coupled economic-ecological system. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2012, 64(3): 442-455.
- [45] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 1-5.
- [46] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 石漠化的概念及其内涵. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(6): 87-90.
- [47] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [48] 王雅舒, 李小雁, 石芳忠, 张树磊, 吴秀臣. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发. *科学通报*, 2019, 64(5/6): 588-599.
- [49] Batunacun, Nendel C, Hu Y F, Lakes T. Land-use change and land degradation on the Mongolian Plateau from 1975 to 2015—a case study from Xilingol, China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1595-1606.
- [50] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 裴亮. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析. *地理学报*, 2012, 67(5): 589-598.
- [51] Kara O, Babur E, Altun L, Seyis M. Effects of afforestation on microbial biomass C and respiration in eroded soils of Turkey. *Journal of Sustainable Forestry*, 2016, 35(6): 385-396.
- [52] Amiraslani F, Dragovich D. Combating desertification in Iran over the last 50 years: an overview of changing approaches. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 1-13.
- [53] Lukuyu B, Franzel S, Ongadi P M, Duncan A J. Livestock feed resources: current production and management practices in central and northern rift valley provinces of Kenya. *Livestock Research for Rural Development*, 2011, 23(5): 112.
- [54] Fishman R, Devineni N, Raman S. Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater?. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 084022.