

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0318

蒋胜竞, 冯天骄, 刘国华, 贺金生. 草地生态修复技术应用的文献计量分析. 草业科学, 2020, 37(4): 685-702.

JIANG S J, FENG T J, LIU G H, HE J S. A bibliometric analysis of the application of grassland ecological restoration technology. Pratacultural Science, 2020, 37(4): 685-702.

草地生态修复技术应用的文献计量分析

蒋胜竞¹, 冯天骄², 刘国华³, 贺金生^{1,2}

(1. 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室 / 兰州大学农业农村部草业创新重点实验室 / 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 草地生态系统的退化严重影响全球生态安全, 因此探索便捷有效的草地生态恢复技术刻不容缓。本文以 Web of Science 核心数据库和 CNKI 数据库中 2000–2018 年有关草地生态修复的文献为数据源, 对国内外草地恢复技术的研究现状和发展趋势进行了整理分析, 同时整理分析了不同生态恢复技术在我国实施效果。结果表明, 我国在草地生态恢复方面的研究呈不断上升趋势, 论文数量已跃居世界第二。我国的草地生态恢复技术共有 20 种, 主要为免耕补播、草地翻耕和减畜。相较于国外, 我国利用围栏封育发表的文章相对较多, 而利用火烧、刈割和控制杂草发表的文章相对较少。此外, 我国缺少在干草覆盖和草皮移植技术方面的研究报道, 而草方格沙障和草地灭鼠是我国特有的草地生态恢复技术。从实施效果来看, 不同生态恢复技术对退化草地均具有积极的恢复效果, 但对不同生态恢复目标产生的结果存在较大差异。本文通过分析, 对我国退化草地的恢复研究提出了合理建议, 为我国未来退化草地的恢复研究提供了参考。

关键词: 退化草地; 生态恢复; 文献计量; 趋势分析; 实施效果

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)04-0685-18

A bibliometric analysis of the application of grassland ecological restoration technology

JIANG Shengjing¹, FENG Tianjiao², LIU Guohua³, HE Jinsheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystems / Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation / Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China;

2. Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The degradation of grassland ecosystems seriously affects global ecological security, and it is therefore imperative to explore convenient and effective ecological restoration techniques. By utilizing the literature in the Web of Science core database and CNKI(China National Knowledge Infrastructure) from 2000 to 2018, this paper compared the research status and development trends of grassland restoration technology in China and abroad, and analyzed the implementation effects of different ecological restoration techniques in China. The results showed that research on grassland ecological restoration in China has an increasing trend, with the number of published papers ranking second in the world. At present, there are 20 different kinds of grassland ecological restoration techniques used in China, the main ones including resowing, ploughing,

收稿日期: 2019-06-24 接受日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0507700); 兰州大学“双一流”引导专项队伍建设经费 (561119209); 国家自然科学基金青年项目 (31901115); 中国博士后科学基金资助项目 (2019M653789); 中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2019-pd01)

第一作者: 蒋胜竞 (1988-), 男, 山东平邑人, 博士, 主要从事草地生态学研究。E-mail: jiangsj@lzu.edu.cn

通信作者: 贺金生 (1965-), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 主要从事草地生态学研究。E-mail: jshe@pku.edu.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

and reasonable grazing. In China, more articles have been published on using fencing than in other countries, but fewer on using fire, mowing, and weed control. In addition, there is a lack of studies on techniques using hay spreading and turf transfer, while the straw checkerboard barriers and grassland deratization are unique to China. In terms of implementation effect, all the ecological restoration technologies showed positive recovery effects on degraded grassland, but the results vary between different ecological restoration targets. This paper puts forward reasonable suggestions for further research on the restoration of degraded grassland in China, aiming to provide scientific direction for future grassland restoration in China.

Keywords: grassland degeneration; ecological restoration; bibliometric; trend analysis; implementation effects

Corresponding author: HE Jinsheng E-mail: jshe@pku.edu.cn

草地是陆地生态系统的重要组成部分,我国草地面积约为400万 km^2 ,占国土面积的41.67%^[1]。丰富的草地资源在畜牧业生产中具有重要作用,同时也是我国重要的生态屏障。由于全球气候变化及过度放牧等人为因素的干扰,1982–2010年我国有1/5以上的草地呈现不同程度的退化^[2]。草地退化主要表现为草地生产力下降、牧草质量降低、土壤沙化、水土流失、生物多样性下降等,严重威胁了我国草地生态经济的可持续发展^[3]。因此,探索便捷有效的生态恢复技术是我国草地可持续发展的当务之急。国家高度重视草地的恢复治理工作,从第十个五年计划开始,我国已逐渐发展和形成了100多项生态恢复技术体系^[4]。在“十三五”期间,国家进一步提出了“北方草甸退化草地治理技术与示范”、“三江源区退化高寒生态系统恢复技术及示范”、“西藏退化高寒生态系统恢复与重建技术及示范”等一系列重点研发计划项目,针对我国不同草地生态系统所面临的具体问题,从生态文明的战略需求出发,着重开展草地生态系统修复技术的研究^[5]。

我国草地面积广阔、类型丰富,相应具有多种多样的恢复技术,包括围栏封育、免耕补播、施肥、灌溉等^[6]。目前,虽然我国利用这些生态恢复技术在退化草地恢复方面取得了可观的研究成果,但对草地生态恢复技术的研究大多具有地域局限性,缺乏国家整体水平上系统性的整理和分析,同时缺乏对不同生态恢复技术实施效果的整体评估。此外,我国仍缺少与国外退化草地恢复技术的比较研究^[7]。退化草地的恢复研究最初始于国外,如今在美国、澳大利亚等畜牧业发达的国家已初步建立起以科学技术为支撑的现代化草地恢复体系^[8]。通过国内外草地生态恢复技术的对比

和分析,将有助于我们探究和制定高效合理的草地生态恢复技术,加快我国退化草地的生态恢复进程。

本文基于CNKI数据库和Web of Science核心数据库,对国内外草地生态修复研究论文的文献计量分析,在整理和比较国内外草地生态恢复技术研究现状及发展趋势的基础上,综合分析国内草地生态恢复技术的实施效果,以期为我国未来的草地生态恢复研究提供科学导向和技术支撑。

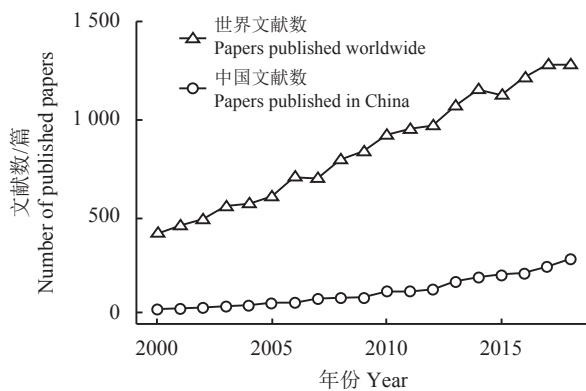
1 文献获取及数据分析方法

本研究在Web of Science核心数据库中,以“TS=(grassland OR steppe OR meadow OR pasture OR rangeland) AND (restor * OR rehabilitat * OR regenerat * OR establish *)”为检索式,检索2000–2018年相关的文献(文献类型精炼为研究性论文“Article”)。对收录的相关文献进行发表年份、发表数量、发表期刊、发表国家、高引指数、总被引频次、平均引用次数等基本信息的统计分析,综合分析国内外在草地生态恢复方面论文的数量和学术影响力。以不同生态恢复技术为关键词分别对上述文献进行二级检索,统计国内外在使用不同生态恢复技术方面的年发文量及年发文比例。此外,本研究选取了国际上主要的草地畜牧业国家,对这些国家利用不同生态恢复技术的发文情况分别进行了统计分析。

本研究同时补充了CNKI数据库中我国相关的退化草地生态修复文章,以期对我国目前草地生态恢复技术的实施效果进行全面的评估。CNKI数据库中以期刊为检索大类,文献检索时间同样为2000–2018年,检索主题为“(‘草地’+‘草原’)*(‘恢复’+‘治理’)”。对CNKI数据库中检索到的2716篇文献和Web of Science数据库中1650篇国

内文献进行了进一步地筛选、整理和分析。文献的筛选标准: 研究案例为野外探究性实验、地理位置信息和恢复措施明确、具有可量化的恢复目标。通过上述筛选标准, 最终共确定获取了440篇文章中的496个研究案例, 本研究对所有的研究案例进行了研究地点和实施效果分析。在实施效果的评价中, 选择了12种可量化的重要草地生态恢复目标作为评价指标, 分别为草地生产力、植被盖度、植物多样性、草地动物、土壤氮库、土壤碳库、土壤含水量、土壤结构、土壤酶活、土壤养分、土壤微生物及土壤种子库。

本研究利用 Excel 2010 对上述数据进行统计分



析, 使用 R 3.5.2 软件作图。

2 结果与分析

2.1 全球发文趋势及国家分析

自 2000 年至 2018 年, Web of Science 核心数据库收录的草地生态恢复研究论文共有 16 095 篇。世界范围内探究草地生态恢复的研究性论文数量整体呈上升态势, 特别是在 2010 年以后有着较快的提升(图 1)。我国草地生态恢复领域的研究在 2000 年后也进入到快速发展阶段, 发表的文献比例迅速上升, 在 2018 年发表的文献数已占当年世界全部文献数的 20% 以上。

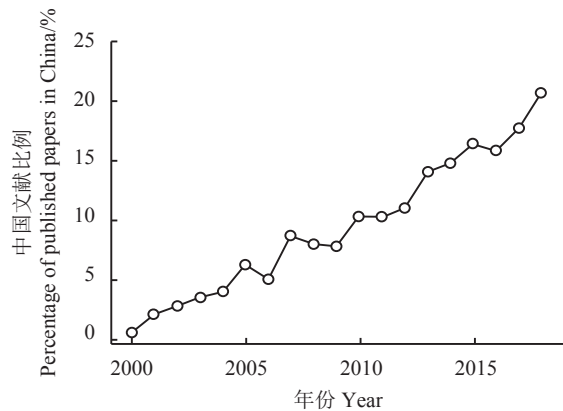


图 1 2000–2018 年世界和中国草地生态修复研究论文年代分布及中国发文量占总发文量的比例

Figure 1 The number of papers published on grassland restoration worldwide and in China and the percentage of papers published in China from 2000 to 2018

表 1 分别列出了世界和我国草地生态恢复研究论文数量排名前 10 的期刊。其中刊载我国草地生态恢复研究论文的期刊主要为 Ecological Engineering、PLoS One 和 Catena, 分别占总文献数量的 4.27%、3.29% 和 3.18%。世界草地生态修复领域的文章则主要发表在 Restoration Ecology, Forest Ecology and Management 和 Agriculture Ecosystems & Environment 这 3 个期刊上, 分别占总文献数量的 2.91%、1.92% 和 1.91%。

在研究国家分布方面, 发表草地生态修复文献的国家共涉及 165 个。其中, 美国以 4 967 篇的发文量位居世界之首, 占全世界发文量的 30.86%(表 2)。发文量前 10 的国家还包括中国 (11.34%)、澳大利亚 (8.69%)、德国 (8.46%)、巴西 (5.96%)、英国 (5.83%)、西班牙 (4.24%)、加拿大 (4.16%)、法国

(4.13%)、荷兰 (3.24%), 这 10 个国家的总发文量占世界发文量的 86.91%。在文章引用方面, 美国的高引指数和总被引频次均远高于其他国家, 说明美国在草地恢复研究领域已占据主导地位。荷兰的发文量在前 10 个国家中最少, 但文献的平均引用次数最高, 达到了 33.79。我国虽然在文献发表数量上排名世界第二, 但我国的高引指数和总被引频次排名第五、平均引用次数在前 10 个国家中仅高于巴西, 说明我国虽然在文献数量上具有一定优势, 但论文的质量和影响力与其他发达国家尚有一定的差距。

2.2 国内外草地恢复技术的应用现状及趋势分析

退化草地的生态修复技术种类繁多, 本文共整理归纳出 22 种主要的草地生态恢复技术, 以不同草地生态恢复技术为关键词对上述 16 095 篇文献

表1 国内外刊载草地生态恢复研究发文量居前10名的期刊
Table 1 Top 10 journals that published papers on grassland restoration worldwide and in China

排名 Rank	国际上研究文献 Papers published worldwide			国内研究文献 Papers published in China		
	期刊 Journal	影响因子 Impact factor	文献数量 Number of papers	期刊 Journal	影响因子 Impact factor	文献数量 Number of papers
1	Restoration Ecology	2.54	469	Ecological Engineering	3.02	78
2	Forest Ecology and Management	3.02	309	PLoS One	2.77	60
3	Agriculture Ecosystems & Environment	3.54	308	Catena	3.26	58
4	Rangeland Ecology & Management	1.97	266	Land Degradation & Development	7.27	53
5	Plant Ecology	1.76	262	Plant and Soil	3.31	45
6	Applied Vegetation Science	2.33	243	Science of the Total Environment	4.61	40
7	Biological Conservation	4.66	243	Journal of Arid Land	1.44	36
8	PLoS One	2.77	240	Journal of Arid Environments	1.99	34
9	Journal of Arid Environments	1.99	238	Environmental Earth Sciences	1.44	27
10	Journal of Applied Ecology	15.74	227	Scientific Reports	4.54	27

表2 2000–2018年发表草地生态恢复研究论文数量前10的国家
Table 2 Top 10 countries that published papers on grassland restoration from 2000 to 2018

排名 Rank	国家 Country	文献数量 Number of papers	文献占比 Percentage of papers/%	高引指数 H-index	总被引频次 Total citation	平均引用次数 Average citation
1	美国 USA	4 967	30.86	125	105 272	23.78
2	中国 China	1 825	11.34	67	24 372	15.45
3	澳大利亚 Australia	1 399	8.69	63	24 830	18.99
4	德国 Germany	1 362	8.46	77	29 973	23.64
5	巴西 Brazil	960	5.96	53	12 710	14.16
6	英国 UK	939	5.83	78	26 526	29.28
7	西班牙 Spain	683	4.24	62	16 943	25.80
8	加拿大 Canada	670	4.16	52	12 915	19.89
9	法国 France	664	4.13	57	14 874	23.10
10	荷兰 The Netherlands	521	3.24	71	17 000	33.79

进行二级检索，其国内外发文数量的结果如表3所列。

在22种常见的草地生态恢复技术中，国外所使用的有20种，而我国也有20种(表3)。相较于国外，我国缺少在干草覆盖和草皮移植技术方面的研究报道，而草方格沙障和草地灭鼠是我国特有的草地生态恢复技术。在发文数量上，免耕补播、减畜、火烧、退耕还草和刘割是国外使用前

五的草地生态恢复技术，而我国的则是免耕补播、减畜、栽培草地、围栏封育和草地翻耕。在发文比例上，我国在火烧、刘割、杂草去除、表土去除方面的发文比例远小于国外，不到国外发文比例的1/3；但我国在围栏封育方面的发文比例要高于国外，接近国外发文比例的3倍(图2)。

美国、中国、澳大利亚、俄罗斯和蒙古是世界上主要的畜牧业国家，对这5个国家利用不同生态

表 3 2000–2018 年间不同草地生态恢复技术发文情况
 Table 3 The number of papers published on different restoration techniques for grassland restoration from 2000 to 2018

恢复技术 Restoration technique	检索词 Search word	国外发文数量 Number of papers abroad	我国发文数量 Number of papers in China
免耕补播 Resowing	(seed * OR sow * OR plant *) NOT (till * OR plough * OR cultivat *)	8 218	859
减畜 Reasonable grazing	graz * NOT(exclus * OR prohibit * OR ban * OR forbid *)	2 553	205
火烧 Fire	fire OR burn *	1 788	43
退耕还草 Abandoned farming	abandon *	1 253	112
刈割 Mowing	mow * OR cut *	1 202	48
施肥 Fertilization	fertiliz *	1 006	120
栽培草地 Artificial grassland	(seed * OR sow * OR plant *) AND (till * OR plough * OR cultivat *)	971	128
控制杂草 Weed control	herbicide OR weed (remov * OR control OR suppress *)	803	14
清除树木 Tree clearing	(tree OR shrub) AND (remov * OR clear *)	739	36
草地翻耕 Grassland ploughing	(till * OR plough * OR cultivat *) NOT (seed * OR sow * OR plant *)	563	93
灌溉 Irrigation	irrigat *	327	59
围栏封育 Fencing	fenc * OR enclos *	319	105
微生物接种 Microbial inoculation	inoculat *	153	17
表土去除 Topsoil removal	topsoil removal	98	2
凋落物移除 Litter removal	litter removal	136	6
干草覆盖 Hay covering	hay transfer *	58	0
切根改良 Root cutting	root cutt *	48	5
草皮移植 Turf transplanting	(turf OR sod OR sward) transplant *	31	0
划破草皮 Sod cutting	sod cut *	27	1
草地牧鸡 Grazing chickens in grassland	chicken farm *	10	3
草方格沙障 Straw checkerboard barrier	straw checkerboard	0	5
草地灭鼠 Deratization in grassland	deratizat *	0	1

恢复技术的发文情况进行统计分析发现, 美国所研究使用的草地生态恢复技术最多, 有 21 种, 其次是中国和澳大利亚, 均为 20 种, 俄罗斯和蒙古所研究使用的生态恢复技术相对较少, 分别为 11 种和 9 种。免耕补播、减畜、火烧、退耕还草、刈割、清除树木和灌溉是 5 个国家均使用过的生态恢复技术。除免耕补播在这 5 个国家使用的发文比例 (40 % 左右) 相当, 其他草地生态恢复技术

的发文比例在不同国家均有不同, 如蒙古和澳大利亚使用减畜的发文比例要高于其他 3 个国家, 而俄罗斯在清除树木方面的发文比例远小于其他 4 个国家 (表 4)。

通过对研究前沿的趋势分析, 可以更好地掌握相关学科的最新研究动态。对世界范围内利用主要草地生态恢复技术 (发文比例在 2% 以上) 2000 至 2018 年间的发文情况分别进行了统计分析, 结

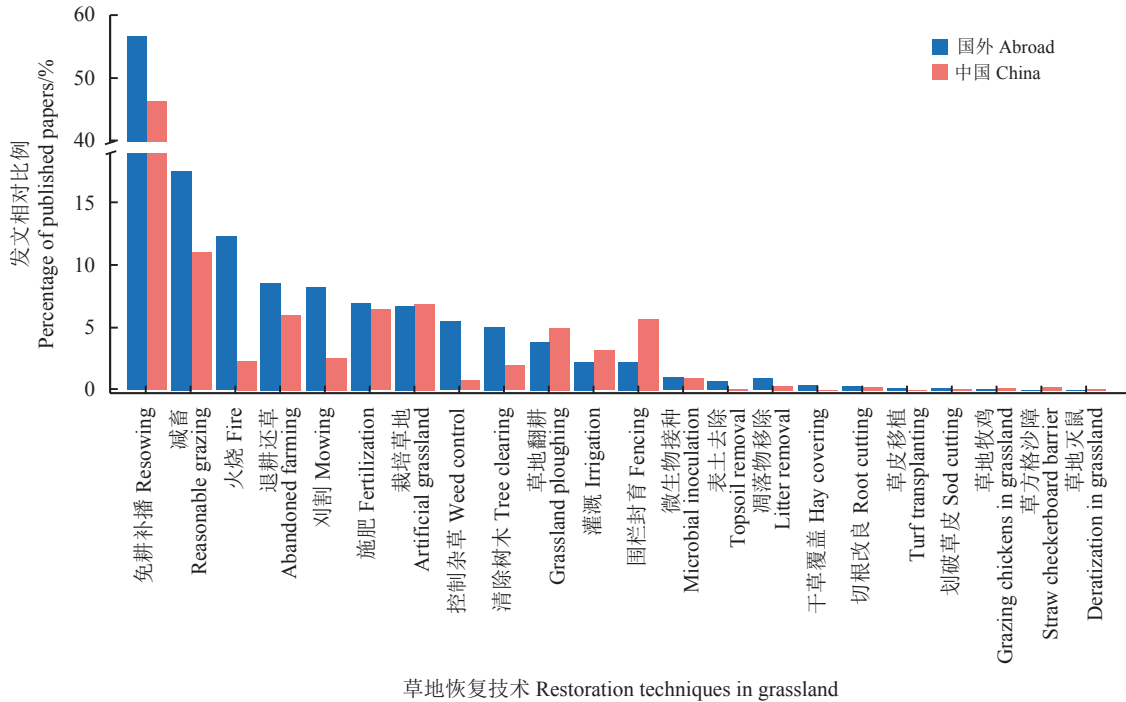


图 2 国内外使用不同草地生态恢复技术的发文相对比例
 Figure 2 The percentage of papers published on different restoration techniques for grassland restoration in China and abroad

果表明利用这 12 种草地生态恢复技术发表的文献数均随年份呈现不同程度的上升趋势。升幅在前五的生态恢复技术(按拟合直线的斜率评定)分别为免耕补播、退耕还草、栽培草地、施肥和刈割,说明这 5 种草地生态恢复技术在未来世界范围内的草地恢复研究中具有较快发展态势。

为对比国内外在不同草地生态恢复技术方面的应用差异,对国内外利用上述 12 种生态恢复技术的发文比例进行了统计(图 3),发现国内外在不同生态恢复技术的应用趋势上存在差别。我国在免耕补播、退耕还草、施肥和围栏封育方面的应用呈上升趋势,在减畜、栽培草地、控制杂草、灌溉方面的使用呈下降趋势,在其他方面的使用没有明显变化。国外在火烧方面的使用比例有轻微上升趋势,对退耕还草、灌溉的使用比例无明显变化,而其他的技术使用比例均具有不同程度的下降。

2.3 我国草地恢复技术的实施效果

本研究所精炼筛选的研究文献中共涉及 18 种草地生态恢复技术,占调查案例中草地生态恢复技术总数的 90%。其中,围栏封育是案例调查中研究和使用的最多的草地生态恢复技术(234 次),其次

为退耕还草(130 次)和栽培草地(117 次)。在研究地点方面,全国范围内的草地生态恢复研究主要集中于蒙宁区(194 个)、中原区(166 个)及青藏高原区(147 个)。在使用的草地生态恢复技术种类上,青藏高原区所使用的草地生态恢复技术最多,有 12 种;其次为蒙宁区和中原区,分别为 11 种和 8 种;东南区所使用的草地生态恢复技术种类相对较少,仅有 4 种。此外,对不同牧业分区的分析表明,我国在使用和研究草地生态恢复技术时具有明显的地域性特征(图 4)。以 3 种主要的草地生态恢复技术为例,围栏封育的研究和应用主要集中于蒙宁区(96 次)、青藏高原区(70 次)和西北区(23 次),在这 3 个区的使用比例也大致在 50% 作用,而东南区则没有围栏封育的应用。退耕还草的研究应用主要分布于以陕西省、宁夏回族自治区和甘肃省为主的中原区(81 次),使用比例占全国范围内的 60% 以上。栽培草地在不同 7 个牧业分区都有研究和应用,以东北区的使用比例最高(35.29%),其次为中原区(27.71%),在蒙宁区的使用比例最低,为 11.34%。

对 12 种不同草地恢复目标的统计结果表明,草地生产力是所有研究案例中关注最多的恢复目

表4 主要畜牧业国家使用不同草地生态恢复技术的发文相对比例
 Table 4 The percentage of papers published on different restoration techniques for grassland restoration in five major countries

恢复技术Restoration technique	美国USA	中国China	澳大利亚Australia	俄罗斯Russia	蒙古Mongolia
免耕补播 Resowing	41.59	45.94	39.80	42.86	38.10
减畜 Reasonable grazing	9.96	10.86	17.98	6.80	19.05
火烧 Fire	14.47	2.30	8.79	7.48	7.94
退耕还草 Abandoned farming	4.46	6.04	2.43	9.52	4.76
刈割 Mowing	3.54	2.57	3.30	8.16	4.76
施肥 Fertilization	4.59	6.52	3.74	4.08	0
栽培草地 Artificial grassland	4.33	6.84	5.20	7.48	0
控制杂草 Weed control	6.01	0.75	5.83	0.68	0
清除树木 Tree clearing	3.79	2.09	4.37	1.36	19.05
草地翻耕 Grassland ploughing	2.26	4.97	1.94	8.16	0
灌溉 Irrigation	1.61	3.32	2.77	3.40	1.59
围栏封育 Fencing	1.51	5.61	2.09	0	3.17
微生物接种 Microbial inoculation	0.60	0.91	0.63	0	0
表土去除 Topsoil removal	0.18	0.11	0.24	0	0
凋落物移除 Litter removal	0.75	0.37	0.34	0	1.59
干草覆盖 Hay covering	0.03	0	0.10	0	0
切根改良 Root cutting	0.18	0.27	0.19	0	0
草皮移植 Turf transplanting	0.03	0	0.15	0	0
划破草皮 Sod cutting	0.04	0.05	0.05	0	0
草地牧鸡 Grazing chickens in grassland	0.03	0.16	0.05	0	0
草方格沙障 Straw checkerboard barrier	0.03	0.27	0	0	0
草地灭鼠 Deratization in grassland	0	0.05	0	0	0

标 (235 次), 其次为土壤碳库 (164 次) 和植被盖度 (154 次); 对草地动物、土壤结构和土壤酶活的关注相对较少, 研究案例数都在 20 次左右。按恢复效果, 本研究将不同生态恢复技术的实施效果分为促进作用、抑制作用、没有影响 3 种。分析结果表明, 不同生态恢复技术对植被盖度、土壤结构和土壤酶活的恢复效果相对较好, 促进效果均在 90% 以上; 而植物多样性的恢复效果相对较差, 促

进效果仅有 54.2%。总体来说, 不同生态恢复技术的实施效果良好, 对各种恢复目标共产生有 857 例促进效果, 占总研究案例数的 77.3%, 但同一种草地生态恢复技术对不同的生态恢复目标却可以产生较大差异的实施效果。如围栏封育可显著提高草地的生产力 (促进效果为 87.5%), 但对植物多样性却仅有 52.7% 的促进效果; 又如栽培草地和施肥都可以有效地促进草地生产力的恢复, 但都有

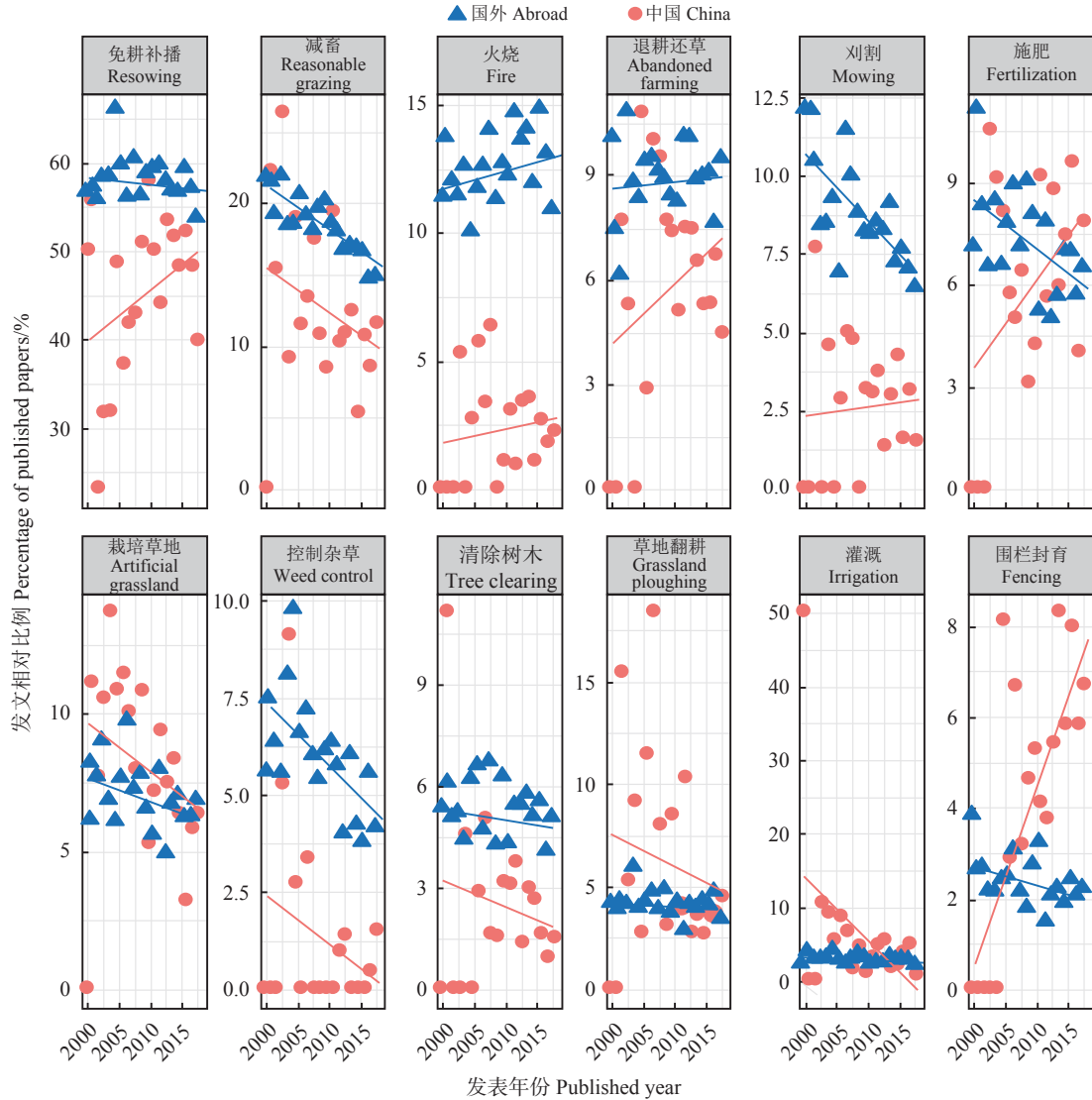


图 3 2000–2018 年国内外使用主要草地生态修复技术占其发文量的相对比例
 Figure 3 The relative percentage of papers published on major restoration techniques in China and abroad from 2000 to 2018

50% 的案列导致了植物多样性的显著下降(表 5)。

3 讨论

近年来，随着我国生态文明建设的不断努力，退化草地生态修复技术的研究在我国受到越来越高的重视。如今，我国已在退化草地生态修复研究中占据重要位置，以草地生态修复为中心的热点领域正吸引着更多研究者的关注。通过对比国内外草地生态修复技术的使用发现，国内外在不同草地生态恢复技术的使用上存在一定差别。

首先，国内外在一些草地生态修复技术的使用上具有相似之处，这些草地生态恢复技术包括免

耕补播、减畜、栽培草地、草地翻耕、退耕还草和施肥。具体来讲，免耕补播可在短时间内借助机械(如飞机播种)快速恢复退化草地植物物种多样性，目前已成为国内外最主要的草地生态恢复技术^[9]。国外对免耕补播技术的研究时间相对较早，虽然在近些年的应用有轻微下降趋势，但发文比例仍维持在 50% 以上。我国近些年在免耕补播技术方面的研究发展迅速，目前免耕补播技术已在如青藏高原“黑土滩”等退化严重的草地被大面积推广应用^[10-11]，在国内的发文比例也有望在未来赶超国外。过度放牧是造成草地退化的主要因素，因此，探索科学合理的放牧技术一直是国内

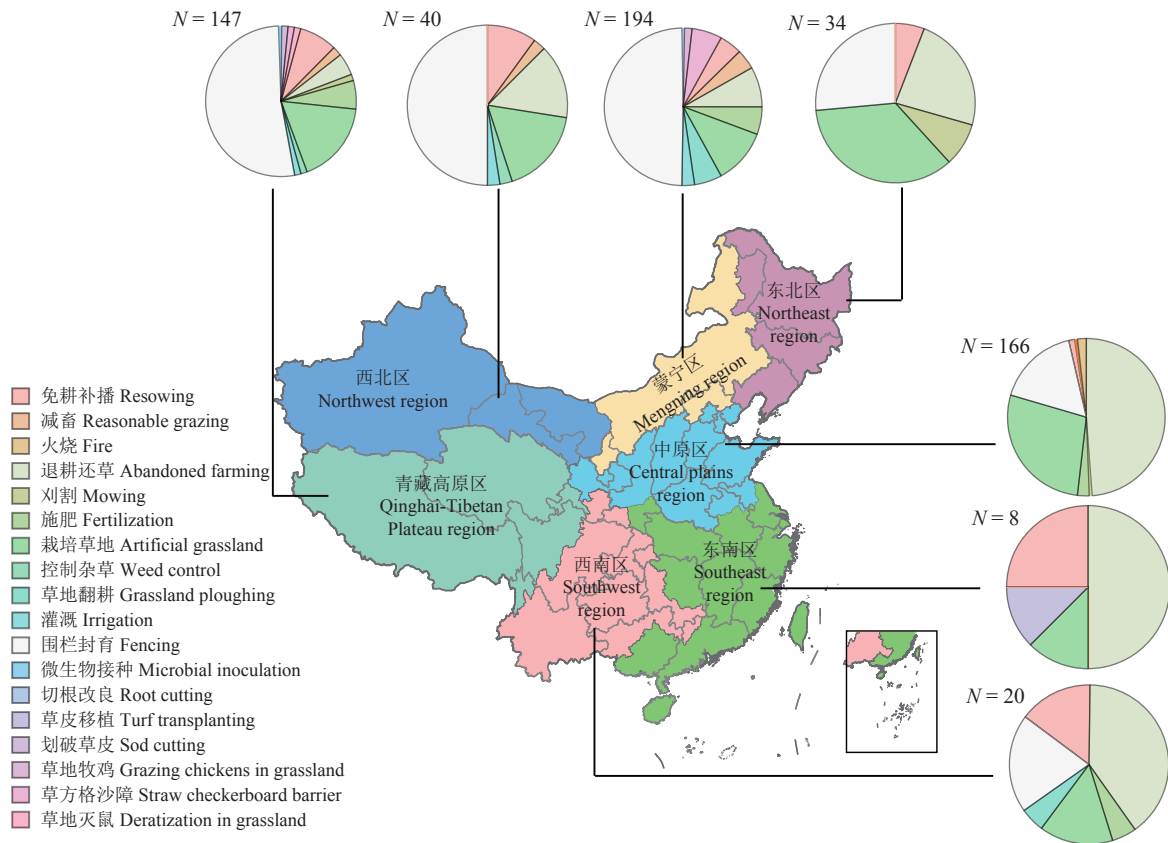


图 4 我国草地生态修复研究的研究地区分布及恢复方法

Figure 4 Distribution of restoration techniques in grassland ecological restoration research in China

N 为使用不同生态恢复技术研究的案例个数。

N represents the number of cases studied using different ecological restoration technologies.

外科研工作者的研究重点^[12]。目前，虽然减畜在国内外的使用比例呈现轻微下降趋势，但其年发文量仍要高于除免耕补播外的其他生态技术。草地翻耕可通过降低土壤容重、增加土壤孔隙度和水分渗透速度来提高土壤质量以恢复退化草地^[13]，在世界范围内的发文量呈现显著增加趋势。但另一方面，草地翻耕仅适用于退化程度较轻的草地恢复，无法在退化严重草地的生态恢复中开展。因此，在草地退化问题日益严峻的今天，草地翻耕技术在国内外的发文比率均呈现相同的下降趋势。退耕还草作为世界范围内发文量上升较快的草地生态恢复技术之一，目前在国外的发文比例保持平稳，但在我国却呈现上升的结果。20 世纪 50 年代以来，在“以粮为纲”等政策的激励下，我国围绕粮食生产这一核心，不断将天然草地开垦为耕地^[14]。随着我国生态环境问题的日趋严重，我国政府及时推出了以退耕还草为主体的草地生态

工程恢复策略，对弃耕的研究也相应逐年增加。与退耕还草相似，施肥在国外的发文比例呈下降趋势，而在我国却呈现上升趋势。我国草地面积广阔、类型多样，施肥的种类、时间及剂量在不同草地类型间还存在较大争议，因此国内对施肥恢复退化草地的研究仍不断增加^[15]。

其次，我国在一些草地生态修复技术的使用上与国外存在显著差异，如我国利用围栏封育发表的文章相对比例要高于国外；而利用火烧、刈割和控制杂草发表的文章相对比例要低于国外。这是由我国的具体国情国策所导向的：第一，过度放牧现象在我国草地生态系统普遍存在，这就引导了我国必须在围栏封育方面做出更多的研究^[16]。目前，我国利用围栏封育的发文量位居世界第一，且在国内的发文比例仍在大幅上升。第二，我国大力倡导草地生态文明建设、杜绝草原火灾的发生，所以火烧修复技术和以使用化学试

表 5 不同草地生态恢复技术对恢复目标实施效果的案例数量
Table 5 Implementation effects of different grassland ecological restoration techniques on restoration targets

恢复目标 Restoration target	实施效果 Implementation effect	生态恢复技术 Restoration technique																		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
草地生产力 Grassland productivity	-	1	1		2	3		3			1	13		1			1		1	
	↑	21	4	1	13	1	17	27	2	6	6	98	1			2	2	2	1	
	↓		2								1	1								
植被盖度 Vegetation coverage	-	1					1					5			1					
	↑	14	4		7		6	16	1	2	2	83	1		1	1	2	3	1	
	↓							1				1								
植物多样性 Plant diversity	-	1	5			2	4	1		3		27							1	
	↑	5	5	1	15		1	2		2	3	38		1		2		3		
	↓	2			2		5	3		2		7							1	
草地动物 Grassland animals	-				2			3				2								
	↑				3			5				5								
	↓																			
土壤氮库 Soil nitrogen pool	-			1	4		3	4		1		12								
	↑	2			19			15				30								
	↓				3			3												
土壤含水量 Soil moisture	-				2															
	↑	1			7	1		4		1		2								
	↓								1			3							1	
土壤结构 Soil structure	-							1												
	↑				9			4				7								
	↓																			
土壤酶活 Soil enzyme activity	-				1															
	↑	1			7	1		4				6							1	
	↓																			
土壤碳库 Soil carbon pool	-			1	15		3	6		1		17								
	↑	3			36	2		25				41								
	↓		1		5			7				1								
土壤微生物 Soil microbes	-	2			2		2	2				4								
	↑	2		1	11			11		1		19							5	
	↓				2															
土壤性质 Soil property	-				3			3				11								
	↑	3	3	1	25		2	28	1	1	2	47				2		5		
	↓	1	1					1				1								
土壤种子库 Soil seed bank	-				1							2								
	↑	1			3			5				10								
	↓				1			1												

-: 没有影响; ↑: 促进作用; ↓: 抑制作用; A: 免耕补播; B: 减畜; C: 火烧; D: 退耕还草; E: 刈割; F: 施肥; G: 栽培草地; H: 控制杂草; I: 草地翻耕; J: 灌溉; K: 围栏封育; L: 微生物接种; M: 切根改良; N: 草皮移植; O: 划破草皮; P: 草地牧鸡; Q: 草方格沙障; R: 草地灭鼠。

-: No effect; ↑: Positive effect; ↓: Negative effect; A: Resowing; B: Reasonable grazing; C: Fire; D: Abandoned farming; E: Mowing; F: Fertilization; G: Artificial grassland; H: Weed control; I: Grassland ploughing; J: Irrigation; K: Fencing; L: Microbial inoculation; M: Root cutting; N: Turf transplanting; O: Sod cutting; P: Grazing chicken in grasslands; Q: Straw checkboard barrier; R: Deratization in grasslands.

剂为主的控制杂草技术在我国不能得到广泛应用。目前我国对火烧技术的研究主要还是对自然条件下火灾的探究^[17-18], 对控制杂草的研究也仅限于小面积范围。第三, 我国对刈割的研究起步较晚, 所以利用刈割的发文比例也要显著低于国外。但随着我国经济的快速发展和机械化器械的广泛使用, 刈割在国内的发文比例已呈轻微上升趋势。

最后, 相较于国外, 我国缺少在干草覆盖和草皮移植技术方面的研究报道。干草材料中富含大量植物种子, 它的覆盖具有增加土壤有机碳输入、保持土壤水分、稳固种子等作用, 目前在法国、德国等国家有着较为广泛的应用^[19-20]。然而, 我国由于相对较大的放牧压力, 这种草地生态恢复技术尚未得到研究。草皮移植在国外退化严重的草地具有良好的修复效果^[21], 但这种方法具有较强的地域性和针对性, 花费也相对昂贵, 所以在国内也没有得到广泛关注。另一方面, 草方格沙障和草地灭鼠是我国特有的草地生态恢复技术。草方格沙障的设置可以通过改变上风向的风速廓线、增加凝结水的产量, 有效地阻止沙丘前移^[22-23], 这种方法的研究最初起始于对包兰铁路的保护, 目前已成功推广成为国内沙化草地治理的主要方法。造成我国草原退化的另一因素就是鼠兔和鼢鼠种群的大面积扩增^[24], 特别是在青藏高原地区, 鼠害爆发频繁。因此, 探究合理有效的草地灭鼠技术也是我国退化草地面临的重点和难点问题。

综上所述, 草地生态恢复技术是当前国内外退化草地研究领域的重点, 国内外的相关研究既有共性, 同时也各有侧重。我国退化草地恢复工作任务重道远, 在国外先进技术的借鉴上应结合我国具体国情国策而有所取舍。此外, 我国退化草地生态恢复技术的应用具有明显的地域性特征, 恢复效果也没有统一性规律。在草地生态恢复技术的选择上应结合当地的现实情况及具体的退化原因, 充分考虑地上及地下等多种恢复指标。

另一方面, 本文的分析是基于文献数据库的文献计量分析, 不能真实地反映不同草地生态恢复技术的实际使用范围及规模, 未来的研究还应加强对国内外草地生态恢复技术使用频率及效果的评估。而且, 退化草地的修复工作同时需要国家

宏观政策的有力调控, 以后的研究也应对不同国家在退化草地修复的相关政策进行整理分析, 便于为我国如生态补偿等政策提供建议。

4 我国退化草地生态恢复的项目支持及建议

我国在生态恢复方面发文量的快速上升离不开国家各类研究计划的实施。其中, 国家重点研发计划是针对国计民生的重大社会公益性研究, 可以反映国家的重大现实问题和学科发展前沿。“十三五”以来, 国务院共批准启动了65个国家重点研发专项, 其中有39项与草地生态保护与修复相关(表6)。这些国家重点研发专项由国内25所高校、科研院所及企业牵头负责, 研究方式涉及基础理论研究和应用技术研究的多个方面, 为国内草地生态恢复研究奠定了坚实基础。

基于上述对国内外草地恢复技术的发展现状分析, 本文对我国退化草地的恢复提出以下建议。

4.1 科学指引, 合理应用草地生态恢复技术

退化草地的修复仍应以植被综合修复为主, 但应科学合理应用相关技术。如免耕补播方面, 我国目前用于免耕补播的植物物种数目相对单一, 少数高产量牧草播种后虽然可在生产力方面使草地得到快速恢复, 但所构建的人工植物群落结构不稳定, 容易造成再次退化。因此在后期免耕补播恢复中, 应充分考虑多植物物种、乡土草种的综合配比^[25]。其次, 围栏封育和施肥都是快速增加草地生产力的恢复方法, 且操作也简单易行, 但这两种方法都容易导致植物物种多样性的丧失^[26-27], 因此在未来围栏封育过程中应考虑适当放牧的应用^[28-29]、对施肥的研究也应着重探索不同草地类型的最适施肥种类及施肥量。

4.2 全面兼顾, 加强对退化草地生态系统地下组份的修复

退化草地土壤的修复对草地的可持续发展至关重要, 但目前在国内的研究报道相对较少。草地土壤的生态恢复时间相对较长, 未来可适当引入微生物菌剂以加快土壤的定向培育^[30]。如菌根真菌等微生物的接种已被证明可加速退化草地的恢复^[31-32]。丛枝菌根真菌是一类广泛分布于土壤中的植物根系共生菌, 可以促进植物对矿质元素的吸

表6 “十三五”期间有关草地生态保护与修复技术的国家重点研发项目
Table 6 National Key Research and Development Program of China for grassland conservation and restoration technology since “the 13th Five-Year-Plan” stage

序号 Number	地域 Region	项目编号 Program number	项目名称 Program name	项目牵头承担单位 Leading organization for the program
1		2016YFC0500500	荒漠化退化草地治理技术及示范 Technology and demonstration of desertification and degraded grassland	内蒙古大学 Inner Mongolia University
2		2016YFC0501000	内蒙古干旱荒漠区沙化土地治理与沙产业技术研发与示范 Desertification of land in the arid areas of Inner Mongolia, Governance, and sand industry technology development and demonstration	内蒙古农业大学 Inner Mongolia Agricultural University
3		2016YFC0500900	中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治关键技术与示范 Key techniques and demonstration of desertification control in the semiarid areas in north China	中国科学院西北生态环境资源研究院 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences
4		2016YFC0501400	新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究及集成示范 Research on key technologies and integrated demonstration of the ecological management of the saline alkali land in the arid areas of Xinjiang	中国科学院新疆生态与地理研究所 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences
5		2017YFC0504500	鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术 Ecological comprehensive control technology in the Pisha area of the Ordos Plateau	黄河水利科学研究院 Yellow River Institute of Hydraulic Research
6	北方草地 Northern grassland	2016YFC0500600	北方草甸退化草地治理技术与示范 North meadow degraded grassland treatment technology and demonstration	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences
7		2016YFC0500700	北方农牧交错带草地退化机理及生态修复技术集成示范 Integrated demonstration of grassland degradation mechanisms and ecological restoration technology in the agro-pastoral ecotone of northern China	中国科学院植物研究所 Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences
8		2016YFC0501300	河套平原盐碱地生态治理关键技术与集成示范 Research and demonstration of the key and integrated technologies of ecological management of the saline-alkali land in Hetao Plain	中国科学院南京土壤研究所 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences
9		2016YFC0501600	黄土高原区域生态系统演变规律和维持机制研究 Research on the mechanisms of regional ecosystems change and sustainability in the Loess Plateau region	中国科学院生态环境研究中心 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
10		2016YFC0501700	黄土高原水土流失综合治理技术及示范 Techniques and demonstration of water and soil loss comprehensive harnessing on the Loess Plateau	西北农林科技大学 Northwest A&F University

<http://cykx.lzu.edu.cn>

续表 6

Table 6 (Continued)

序号 Number	地域 Region	项目编号 Program number	项目名称 Program name	项目牵头承担单位 Leading organization for the program
11		2017YFC0504600	黄土高原人工生态系统结构改善和功能提升技术 Technology about structural and functional improvement of artificial ecosystems on the Loess Plateau	西北农林科技大学 Northwest A&F University
12		2017YFC0504700	黄土丘陵沟壑区沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术与示范 Eco-security technology and demonstration of the gully land consolidation and slope treatment project on the Loess Plateau	中国科学院地理科学与资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences
13		2017YFC0506700	沙区生态产业技术推广模式及政策研究 Research on the mode and policy of eco-industrial technology promotion in sandy areas	内蒙古大学 Inner Mongolia University
14		2016YFC0500800	京津冀风沙源区沙化土地治理关键技术研究及示范 Research and demonstration of pivotal technology on desertified land restoration in the Beijing-Tianjing-Hebei sandstorm source zone	中国林业科学研究院 Chinese Academy of Forestry
15		2016YFC0501100	东部草原区大型煤电基地生态修复与综合整治技术及示范 Technology and demonstration of ecological restoration and comprehensive control of coal-power bases on the eastern steppes of China	国家能源投资集团有限公司 China Energy Investment Corporation Limited
16		2017YFC0504300	西北荒漠-绿洲区稳定性维持与生态系统综合管理技术研发与示范 Research and demonstration of technologies of stability maintenance and ecological comprehensive control in the northwest desert-oasis area	中国科学院西北生态环境资源研究院 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences
17		2017YFC0504400	西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术 Eco-security technology for coal mining bases in the northwestern arid desert regions in China	北京林业大学 Beijing Forestry University
18	东北草地 Northeast grassland	2016YFC0501200	东北苏打盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范 Research and integrated demonstration of ecological amelioration techniques of the saline-sodic land in northeast China	中国科学院东北地理与农业生态研究所 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences
19		2017YFC0504200	东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范 Research and integrated demonstration of ecological restoration techniques of eroded ditches in the black soil area of northeast China	中国科学院东北地理与农业生态研究所 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences

续表 6

Table 6 (Continued)

序号 Number	地域 Region	项目编号 Program number	项目名称 Program name	项目牵头承担单位 Leading organization for the program
20		2018YFC0507000	东北黑土区坡面水土 流失综合治理技术 Comprehensive control technology for soil erosion on slopes in the black soil area of northeast China	北京师范大学 Beijing Normal University
21		2016YFC0501800	典型高寒生态系统演变规律及机制 Evolutionary laws and mechanisms of typical alpine ecosystems	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences
22		2016YFC0501900	三江源区退化高寒生态系统恢复 技术及示范 Recovery techniques and demonstration of degraded alpine ecosystems in the Source Region of Three Rivers	青海大学 Qinghai University
23	高寒草地 Alpine grassland	2016YFC0502000	西藏退化高寒生态系统 恢复与重建技术及示范 Ecological restoration and reconstruction technology for degraded alpine grasslands in Tibet	中国科学院地理科学与 资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences
24		2017YFC0504800	川西北和甘南退化高寒 生态系统综合整治 Comprehensive remediation of degraded alpine ecosystems in Northwestern Sichuan and Gannan	兰州大学 Lanzhou University
25		2016YFC0502100	西南生态安全格局形成机制 及演变机理 Formation and evolution mechanism of the ecological security pattern in southwest China	中国科学院生态环境 研究中心 Research Center for Eco- Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
26		2017YFC0504900	西南高山亚高山区工程创面 退化生态系统恢复重建技术 Restoration and reconstruction technology for the degraded ecosystem of engineering surfaces in the high and subhigh mountain areas of southwest China	四川大学 Sichuan University
27	南方草地 Southern grassland	2017YFC0505100	西南干旱河谷区生态综合治理 及生态产业发展技术研发 Research of technology for ecological comprehensive management and ecological industry development in the arid valley of southwest China	中国科学院成都生物研究所 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences
28		2017YFC0505200	西南高山峡谷地区生物多样性 保护与恢复技术 Biodiversity conservation and restoration technology in the southwest alpine canyon area	中国科学院昆明植物研究所 Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences
29		2017YFC0505400	南方红壤低山丘陵区 水土流失综合治理 Soil conservation in the hilly red soil region of southern China	华中农业大学 Huazhong Agricultural University

续表6

Table 6 (Continued)

序号 Number	地域 Region	项目编号 Program number	项目名称 Program name	项目牵头承担单位 Leading organization for the program
30		2017YFC0505600	南方丘陵山地屏障带生态系统服务提升技术与示范 Research and demonstration of ecosystem service-improving technology in the hilly terrain barrier zone of southern China	中国林业科学研究院林业研究所 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry
31		2017YFC0503800	中国陆地生态系统生态质量综合监测技术与规范研究 Technologies and guidelines for monitoring the ecological quality of terrestrial ecosystems in China	中国科学院地理科学与资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences
32		2017YFC0506500	重大生态工程生态效益监测与评估 Monitoring and assessment of the ecological benefits of key ecological engineering in China	中国科学院地理科学与资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences
33		2017YFC0506400	国家重要生态保护地生态功能协同提升与综合管控技术与示范 Research and demonstration of ecological function synergistic improvement and comprehensive management technology in nationally important ecological protection areas	中国科学院地理科学与资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences
34	其他 Others	2017YFC0506600	区域生态安全评估与预警技术 Security assessment and early warning technology for regional ecology	环境保护部南京环境科学研究所 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection
35		2018YFC0507200	生物多样性保护目标的设计与评估技术 Design and assessment techniques for biodiversity conservation objectives	环境保护部南京环境科学研究所 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection
36		2016YFC0503400	生态资产、生态补偿及生态文明科技贡献核算理论、技术体系与应用示范 Accounting theories and technologies for ecological assets, ecological compensation and scientific and technological contribution to ecological civilization	中国科学院生态环境研究中心 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
37		2016YFC0503600	生态环境损害鉴定评估业务化技术研究 Research on technology for the identification and assessment of eco-environmental damage	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences

续表 6

Table 6 (Continued)

序号 Number	地域 Region	项目编号 Program number	项目名称 Program name	项目牵头承担单位 Leading organization for the program
38		2016YFC0503700	生态技术评价方法、指标体系及全球生态治理技术评价 The methodology and indicator system for assessing ecological restoration technologies and the evaluation of global ecosystem rehabilitation technologies	中国科学院地理科学与资源研究所 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences
39		2018YFC0507100	基于低覆盖度理论的防沙治沙新材料、新装备、新技术研究 Research on new materials, equipment, and technologies for sand prevention and control based on the low coverage theory	中国林业科学研究院 Chinese Academy of Forestry

收、提高植物对逆境的抗性，其分泌的球囊霉素也可促进土壤团聚体的形成与稳定。这类真菌在未来的研究中应该进一步加以深入探讨，使之早日可以大规模地在草地生态恢复中得以应用。

4.3 因地制宜，选择和使用高效的生态恢复技术

明确我国退化草地的分布，掌握草地生态系统退化的时空格局与演变规律，以便制定相应的生态治理技术。一般而言，在中、轻度退化草地可通过降低人为干扰、适量引入施肥、翻耕等技术，以促进退化草地的自我修复。而在退化程度较为严重的草地，则可以通过草地翻耕结合免耕

补播的方法加快退化草地的人工恢复。针对风沙化严重的草地恢复，可在设置草方格沙障的基础上，尝试定植如柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿等耐旱沙生植物^[33-34]，以促进沙化草地的恢复演替。

4.4 立足长远，加强草地的监管与监控

我国草地面积广阔，退化类型多样，草地恢复工作任重道远。未来，应首先建立有效的草地退化预警机制，防患于未然。其次，在退化草地的恢复中必须以草地的可持续发展为目标，综合考虑地上植被及地下土壤的整体恢复。最后，在大数据背景下，我国还应借助遥感等技术的应用，在区域尺度上检测和评估生态修复效果。

参考文献 References:

- [1] REN J Z, HU Z Z, ZHAO J, ZHANG D G, HOU F J, LIN H L, MU X D. A grassland classification system and its application in China. *The Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 199-209.
- [2] ZHOU W, YANG H, HUANG L, CHEN C, LIN X S, HU Z J, LI J L. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 303-313.
- [3] UNKOVICH M, NAN Z B. Problems and prospects of grassland agroecosystems in western China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 124(1/2): 1-2.
- [4] 傅伯杰, 刘国华, 欧阳志云. 中国生态区划研究. 北京: 科学出版社, 2013.
FU B J, LIU G H, OUYANG Z Y. Study of Ecological Regionalization of China. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] 唐华俊, 辛晓平, 李凌浩, 王德利, 闫玉春, 周延林, 王明玖, 周道玮, 崔国文, 李向林, 闫瑞瑞, 陈宝瑞, 徐丽君, 王旭. 北方草甸退化草地治理技术与示范. *生态学报*, 2016, 36(22): 7034-7039.
TANG H J, XIN X P, LI L H, WANG D L, YAN Y C, ZHOU Y L, WANG M J, ZHOU D W, CUI G W, LI X L, YAN R R, CHEN B R, XU L J, WANG X. North meadow degraded grassland treatment technology and demonstration. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7034-7039.

- [6] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
PAN Q M, XUE J G, TAO J, XU M Y, ZHANG W H. Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [7] 尚占环, 董世魁, 周华坤, 董全民, 龙瑞军. 退化草地生态恢复研究案例综合分析: 年限、效果和方法. 生态学报, 2017, 37(24): 8148-8160.
SHANG Z H, DONG S K, ZHOU H K, DONG Q M, LONG R J. Synthesis-review for research cases of grassland ecological restoration: Years, effect and method. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8148-8160.
- [8] 任继周, 侯扶江, 胥刚. 放牧管理的现代化转型: 我国亟待补上的一课. 草业科学, 2011, 28(10): 1745-1754.
REN J Z, HOU F J, XU G. Transformation of grazing system: The urgent task of China. Pratacultural Science, 2011, 28(10): 1745-1754.
- [9] HEDBERG P, KOTOWSKI W. New nature by sowing? The current state of species introduction in grassland restoration, and the road ahead. Journal for Nature Conservation, 2010, 18(4): 304-308.
- [10] XU L H, YAO B Q, WANG W Y, WANG F P, ZHOU H K, SHI J J, ZHAO X Q. Effects of plant species richness on ^{13}C assimilate partitioning in artificial grasslands of different established ages. Scientific Reports, 2017, 7(1): 40307.
- [11] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展: 兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21.
SHANG Z H, DONG Q M, SHI J J, ZHOU H K, DONG S K, SHAO X Q, LI S X, WANG Y L, MA Y S, DING L M, CAO G M, LONG R J. Research progress in recent ten years of ecological restoration for “black soil land” degraded grassland on Tibetan Plateau: Concurrently discuss of ecological restoration in Sanjiangyuan Region. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1): 1-21.
- [12] WANG L, DELGADO-BAQUERIZO M, WANG D L, ISBELL FT, LIU J, FENG C, LIU J S, ZHONG Z W, ZHU H, YUAN X, CHANG Q, LIU C. Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2019, 116(13): 6187-6192.
- [13] 高志成, 田佳妮, 霍艳双, 舒锴, 宝音陶格涛. 切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响. 生态学报, 2017, 37(11): 3824-3829.
GAO Z C, TIAN J N, HUO Y S, SHU X, Baoyintaogetao. Effects of root pruning and shallow plowing on soil properties and plant communities in deteriorated steppe. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3824-3829.
- [14] 李守德. 我国草业发展的成就、任务与对策. 中国草地, 1997, 4: 1-4.
LI S D. China Prataculture: Achieuements, tasks and countermeasures. Grassland of China, 1997, 4: 1-4.
- [15] KLAUS V H, SCHÄFER D, PRATI D, BUSCH V, HAMER U, HOEVER C J, KLEINEBECKER T, MERTENS D, FISCHER M, HÖLZEL N. Effects of mowing, grazing and fertilization on soil seed banks in temperate grasslands in Central Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 256: 211-217.
- [16] WANG L, GAN Y T, WIESMEIER M, ZHAO G Q, ZHANG R Y, HAN G D, SIDDIQUE K H M, HOU F J. Grazing exclusion: An effective approach for naturally restoring degraded grasslands in northern China. Land Degradation & Development, 2018, 29(12): 4439-4456.
- [17] LIU M F, ZHAO J J, GUO X Y, ZHANG Z X, TAN G, YANG J H. Study on climate and grassland fire in HulunBuir, Inner Mongolia Autonomous Region, China. Sensors, 2017, 17(3): 616.
- [18] LIU J, QIU L P, WANG X, WEI X R, GAO H L, ZHANG Y J, CHENG J M. Effects of wildfire and topography on soil nutrients in a semiarid restored grassland. Plant and Soil, 2018, 428(1/2): 123-136.
- [19] EICHBERG C, STORM C, STROH M, SCHWABE A. Is the combination of topsoil replacement and inoculation with plant material an effective tool for the restoration of threatened sandy grassland? Applied Vegetation Science, 2010, 13(4): 425-438.
- [20] FOSTER B L, KINDSCHER K, HOUSEMAN G R, MURPHY C A. Effects of hay management and native species sowing on

- grassland community structure, biomass, and restoration. *Ecological Applications*, 2009, 19(7): 1884-1896.
- [21] SKRINDO A B, PEDERSEN P A. Natural revegetation of indigenous roadside vegetation by propagules from topsoil. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2004, 3(1): 29-37.
- [22] LI X R, XIAO H L, HE M Z, ZHANG J G. Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions. *Ecological Engineering*, 2006, 28(2): 149-157.
- [23] CAO C Y, ZHANG Y, CUI Z B, FENG S W, WANG T T, REN Q. Soil bacterial community responses to revegetation of moving sand dune in semi-arid grassland. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(15): 6217-6228.
- [24] ZHOU H K, ZHAO X Q, TANG Y H, GU S, ZHOU L. Alpine grassland degradation and its control in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers, China. *Grassland Science*, 2005, 51(3): 191-203.
- [25] MIJNSBRUGGE K V, BISCHOFF A, SMITH B. A question of origin: Where and how to collect seed for ecological restoration. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(4): 300-311.
- [26] WANG X, SONG N P, YANG X G, WANG L, CHEN L. Grazing exclusion-induced shifts, the relative importance of environmental filtering, biotic interactions and dispersal limitation in shaping desert steppe communities, northern China. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(3): 402-415.
- [27] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [28] WU G L, DU G Z, LIU Z H, THIRGOOD S. Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2008, 319(1-2): 115-126.
- [29] SUN G, BARKER X Z, CHEN D M, LIU L, ZHANG N N, SHI C G, HE L P, LEI Y B. Responses of root exudation and nutrient cycling to grazing intensities and recovery practices in an alpine meadow: An implication for pasture management. *Plant and Soil*, 2017, 416(1-2): 515-525.
- [30] HARRIS J. Soil microbial communities and restoration ecology: Facilitators or followers? *Science*, 2009, 325: 573-574.
- [31] ZHANG T, SUN Y, SHI Z Y, FENG G. Arbuscular mycorrhizal fungi can accelerate the restoration of degraded spring grassland in central Asia. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(4): 426-432.
- [32] KOZIOL L, BEVER J D. The missing link in grassland restoration: Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation increases plant diversity and accelerates succession. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(5): 1301-1309.
- [33] ZENG Q C, LAI R, CHEN Y N, AN S S. Soil, leaf and root ecological stoichiometry of *Caragana korshinskii* on the Loess Plateau of China in relation to plantation age. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0168890.
- [34] LI Y Q, CHEN Y P, WANG X Y, NIU Y Y, LIAN J. Improvements in soil carbon and nitrogen capacities after shrub planting to stabilize sand dunes in China's Horqin Sandy Land. *Sustainability*, 2017, 9(4): 662.

(责任编辑 苟燕妮)