

DOI: 10.5846/stxb202003230649

张潇, 陆林, 张晓瑶, 李冬花. 切尔诺贝利核事故对区域景观格局及生境质量的影响. 生态学报, 2021, 41(4): 1303-1313.

Zhang X, Lu L, Zhang X Y, Li D H. Impact of Chernobyl nuclear accident on regional landscape pattern and habitat quality. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1303-1313.

切尔诺贝利核事故对区域景观格局及生境质量的影响

张 潇, 陆 林*, 张晓瑶, 李冬花

安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002

摘要: 灾难地景观格局及生境质量演化特征研究对于评估灾难破坏力及其滞后性, 揭示人类活动对自然环境的影响机制具有重要意义。基于 Landsat 系列遥感影像提取切尔诺贝利隔离区景观类型结构, 借助景观指数和 InVEST 模型刻画研究区近 49 年来的景观格局和生境质量演化轨迹, 使用 CA-Markov 模型模拟核事故对区域生态景观的影响。研究表明: (1) 切尔诺贝利核事故改变了隔离区原有的景观结构, 导致耕地、建设用地等人为景观数量大幅缩减, 土地利用程度显著下降, 但核事故未对隔离区当前的景观结构造成实质性负面影响; (2) 切尔诺贝利核事故致使隔离区人为干扰减少, 植被连通性和集聚度提升, 景观格局总体向好发展; (3) 隔离区的设立扭转了区内生境质量恶化趋势, 由耕地形成的低生境质量区域迅速转变为草地、林地等高生境质量区域, 区内生境质量极大改善; (4) 切尔诺贝利核事故使得区内高生境质量区域占比提升 34%, 改变了原有以耕地、建设用地不断扩张为主线的景观演化轨迹和生境质量不断退化的发展趋势。

关键词: 生境质量; 景观格局; 灾难地; 核事故; 切尔诺贝利

Impact of Chernobyl nuclear accident on regional landscape pattern and habitat quality

ZHANG Xiao, LU Lin*, ZHANG Xiaoyao, LI Donghua

School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China

Abstract: The study of the landscape pattern and the evolution characteristics of habitat quality in disaster areas is of great significance for assessing the destructive power of the disaster and its hysteresis, and revealing the impact mechanism of human activities on the natural environment. Extraction of landscape type structure of the Chernobyl Exclusion Zone based on Landsat series of remote sensing image. Using landscape index and InVEST model to describe the landscape pattern and habitat quality changes in the study area in the past 49 years. Using CA-Markov model to simulate the impact of nuclear accident on regional landscape and ecological environment. The results showed that: (1) the Chernobyl nuclear accident changed the original landscape structure in the exclusion zone, resulting in a significant reduction in the number of artificial landscapes such as cultivated land and construction land. The intensity of land use has declined significantly, but the nuclear accident did not cause a substantial negative impact on the current landscape structure of the exclusion zone. (2) The Chernobyl nuclear accident resulted in the reduction of human interference in the exclusion zone, the increase of vegetation connectivity and concentration, and the overall development of the landscape pattern. (3) The establishment of the exclusion zone has reversed the deterioration of the habitat quality in the area. The low habitat quality area formed by the cultivated land has rapidly transformed into high habitat quality areas such as grassland and woodland, and the habitat quality in the area has been greatly improved. (4) The Chernobyl nuclear accident increased the proportion of high habitat

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930644)

收稿日期: 2020-03-23; 网络出版日期: 2020-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llin@263.net

quality areas in the region by 34% , changing the original landscape evolution trajectory based on the continuous expansion of cultivated land and construction land and the trend of habitat quality degradation.

Key Words: habitat quality; landscape pattern; disaster areas; nuclear accident; Chernobyl

景观格局和生境质量是区域生态状况及其服务水平的重要表征^[1-2]。不同时空尺度上的内外多因素共同驱动着区域景观格局不断演化,而生境质量揭示的生态系统服务水平和生物多样性亦随之不断变化^[3-4]。灾难作为一种突发性外部干扰形式,直接影响着区域景观格局和生境质量的演化过程^[5]。灾难发生地不仅会产生惨重人员伤亡和巨大经济损失,造成社会公众心理创伤和公共秩序紊乱,还会对区域自然环境产生重大影响,导致生态系统结构与功能改变^[6]。灾难地特殊、复杂的生态系统演化轨迹受到了多领域学者们的广泛关注,不少学者从景观格局视角探讨了地震^[7]、火灾^[8]、极端气候^[9]和海平面上升^[9-11]等自然灾害对土地利用/土地覆被的损害程度及恢复过程,亦有学者分析了诸如大坝溃坝等“天灾人祸”共同作用下的土地覆被空间变化特征^[12]。在生境质量方面,多数研究也从地震、火灾等自然灾害着手,系统评估灾难地生境质量变化^[13-14]。灾难引致的景观格局变化会重构已有的资源禀赋分布格局,进而对生境质量产生深刻影响^[2],但绝大多数灾难地研究往往将两者割裂进行单独分析,忽略了景观格局和生境质量间的相互作用关系。此外,相比自然灾害,单纯由人为因素引致的重大灾难往往发生于城市等人口集聚区域,而且持续时间和影响范围有限,受限于灾难地选择问题,较少有文章探讨人为灾难对区域景观格局及生境质量的影响,更鲜见灾难地景观格局和生境质量恢复过程的研究成果。

切尔诺贝利核事故作为人类和平利用核能历史中最严重的技术灾难之一,其爆炸产生的放射性污染烟尘致使核电站附近 30km 内的居民点与耕地被废弃,数万人背井离乡,区域生态环境发生重大改变^[15-16]。在 30 多年的辐射暴露下,该区域反而出现了丰富的哺乳动物群落,失去人为干扰的隔离区麋鹿、狍子、野马和野猪的数量显著上升,狼的丰度是以前 7 倍以上^[17],生境质量有所改善。基于此认识,本文以切尔诺贝利隔离区为研究区域,借助遥感影像、景观指数以及 InVEST 模型等技术手段,从景观格局和生境质量两个视角阐释了隔离区 1970—2019 年的生态系统演化过程及特征,结合 CA-Markov 模型模拟结果评估核事故对该区域景观格局及生境质量的影响程度,以期为灾难地生态损失评价及构建和谐人地关系提供借鉴启示。

1 研究区域概况

切尔诺贝利核电站(Chernobyl NPP)位于乌克兰境内西北部的普里皮亚季镇,1986 年 4 月 26 日,机组工作人员在 4 号反应堆进行涡轮发电机组惰转供电试验时引发反应堆爆炸^[18]。事故发生后,当地政府将核电站方圆 30km 内地区划为切尔诺贝利隔离区(Chernobyl Exclusion Zone, CEZ, 下简称隔离区)^[19]。隔离区位于 29°15′05″—30°33′24″E, 51°05′17″—51°31′56″N 之间(图 1),属于温带大陆性气候,1 月平均气温 -6℃,7 月平均气温 17℃,年均降水量 700mm,地形以平原为主。隔离区总面积 2600km²,包含切尔诺贝利和普里皮亚季 2 处城镇以及 78 个村庄,两座城镇一度被视为苏联先进生产力的代表^[20]。事故发生前,该区域是乌克兰重要的集约型农业区和林业区^[16],主要树种有苏格兰松(*Pinus sylvestris*)、挪威云杉(*Picea abies*)、银桦(*Betula pendula*)、欧洲山杨(*Populus tremula*)等^[15,20]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

遥感数据来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),以事故发生前 11a 及 1a(1975 年、1985 年)和后 1a、5a、15a 及 33a(1987 年、1991 年、2001 年、2019 年)的 6 期 Landsat 系列遥感影像为基础数据,其中 1975 年遥感影像轨道号为 196/24,1985—2019 年为 182/24。所有影像时相为 6—9 月,研究区云量小于

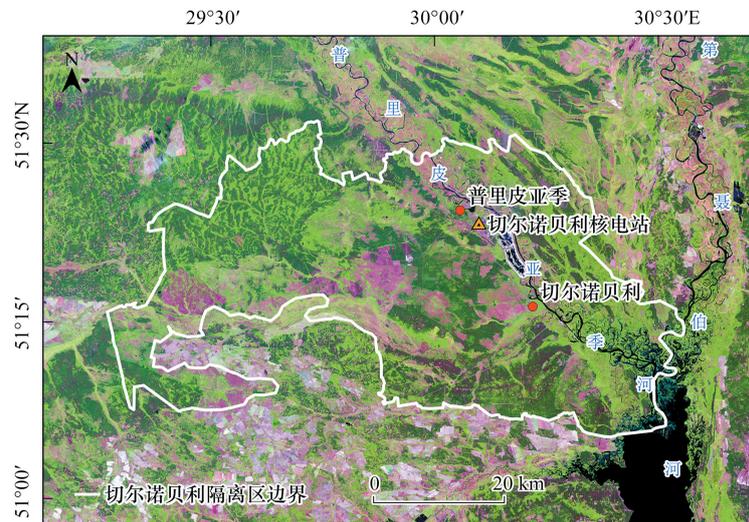


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1%。此外,由于缺乏轨道号为196/24的1980年遥感影像,故选用两期轨道号为195/24和197/24的1980年遥感影像和一期轨道号为196/24的1981年影像作为景观格局预测的辅助数据。研究区边界数据和辐射剂量率数据来源于乌克兰国家隔离区管理局(<http://dazv.gov.ua/>),辐射剂量率获取环境为2019年8月2日15点20分,12.3℃,西北风。生境质量分析所需的威胁因子来源于景观解译数据,道路交通数据来源于Google Earth。

2.2 景观分类与景观格局指数

利用ENVI 5.3对所有遥感影像进行几何校正、图像裁剪、图像增强等预处理工作。采用支持向量机法对研究区1985—2019年的遥感图像进行监督分类,将景观类型分为针叶林、阔叶林、草地、耕地、沙地/裸地、建设用地、水体7种,在此基础上进行目视解译修正。1975—1980年的MSS遥感影像质量较差,故直接对照1985年影像和历史资料进行目视解译分类。借助Google Earth、街景和Photo Sphere进行混淆矩阵精度验证,7期影像解译精度均在84%以上,Kappa系数均大于0.81,满足研究需求。

参考相关研究^[21-24]并根据研究需要,选取斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)4种景观水平指数来反映隔离区景观破碎化、复杂性以及多样性等特征,各指数主要运用Fragstats 4.2计算。

2.3 生境质量评估

借助InVEST模型定量评估隔离区生境质量演化状况,该模型主要通过土地利用和生物多样性威胁因子数据绘制生境质量地图,所需数据在全球范围内均可获得,不受研究区的不可进入性限制,极其适合切尔诺贝利地区生境质量评估^[25]。

参考相关研究^[25-27]并结合研究区实际情况,将耕地、城镇用地和交通用地设为威胁源,将林地、草地、耕地和水域等设为提供生境的景观类型,各威胁源的最大影响距离和权重见表1,各生境的适宜度及对威胁因子的敏感度见表2,半饱和参数设置为最高退化栅格值一半。模型计算方法与意义参考相关文献,参考相关研究,利用ArcGIS将计算结果分为高(0.8—1)、中(0.4—0.8)、低(0—0.4)3个等级^[25,28]。

2.4 元胞自动机—马尔科夫(CA-Markov)模型

借助CA-Markov模型模拟未发生核事故下的隔离区景观格局演化过程^[29-30]。利用1975—1980年的转移面积矩阵和转移概率矩阵预测隔离区1985年景观类型分布,其修正Lee-Sallee形状指数值为0.61,表明CA-

Markov 模型模拟精度较高。以 1985 年为起始年,滤波参数设为 5×5 摩尔邻域,迭代次数分别设为 10 和 30,模拟未发生核事故的隔离区 1995 年和 2015 年景观类型分布状况,进而借助 InVEST 模型模拟同年生境质量状况。

表 1 威胁源最大影响距离、权重和衰减类型

Table 1 Maximum distances, weights and decay types of threats

威胁源 Threats	最大影响距离/km Maximum distance of influence	权重 Weight	衰减类型 Decay type
耕地 Cultivated land	1	0.2	线性
城镇用地 Town land	8	1	指数
交通用地 Transportation land	3	0.4	线性

表 2 各生境适宜度及其对威胁源的敏感度

Table 2 Sensitivity of land cover types to each threat

生境类型 Habitat type	生境适宜度 Habitat suitability	耕地 Cultivated land	城镇用地 Town land	交通用地 Transportation land
针叶林 Coniferous forest	1	0.7	0.8	0.65
阔叶林 Broad-leaved forest	1	0.6	0.7	0.6
草地 Grassland	0.9	0.5	0.6	0.35
耕地 Cultivated land	0.3	0.3	0.5	0.3
沙地/裸地 Bare ground	0	0	0	0
建设用地 Construction land	0	0	0	0
水体 Water	0.9	0.65	0.75	0.6

3 结果分析

3.1 景观类型影响分析

将事故发生前的 1975—1985 年定义为 T1 阶段,事故发生时的 1985—1987 年定义为 T2 阶段,事故发生后的 1987—2019 年定义为 T3 阶段。如图 2 所示,T1 阶段隔离区主要景观类型为针叶林、耕地以及阔叶林,3 种景观类型占比接近 80%,表明该区域林业与农业较为发达。T2 阶段隔离区初步划定,区内景观格局发生重大改变,大部分耕地被撂荒,草地占比急剧提升;当地政府为了控制放射性物质扩散,清除了部分辐射严重地带的表层土壤^[31],致使裸地占比上升;隔离区主要景观类型由针叶林、耕地以及阔叶林占主导变为针叶林、阔叶林和草地占主导。T3 阶段隔离区稳定保持了以针叶林、阔叶林和草地为主导的景观类型结构;由于居民的撤离,区内建筑物完全荒废,建设用地占比逐步减少;沙地/裸地占比变动幅度较为随机,而水体占比逐渐下降,一定程度上反映出区内气候干旱化的趋势。3 个阶段的景观类型结构变化在一定程度上体现了人为干扰对区域景观格局的塑造作用以及自然生态系统的强劲可恢复性:即便暴露在强辐射中,隔离区覆被仍能恢复到以林地为主的景观格局。

利用 ENVI 的 Change Detection 模块计算 T1、T2、T3 阶段的景观类型转移矩阵(表 3),以反映隔离区各阶段景观类型的变化方向。隔离区 T1 阶段的景观类型转化特征受其发达的林业和农业影响,主要景观类型转化围绕林地和耕地产生;景观类型减量最多的为草地(308.55km²),转换集中发生在隔离区东部经济活跃地带,阔叶林(103.54km²)和耕地(103.41km²)是其转出类型;针叶林减量仅次于草地,达 220.71km²,主要转出类型为阔叶林(135.11km²)。T2 阶段耕地成为减量最多的用地类型,转出面积达 592.44km²,主要转出类型为草地(406.05km²)和阔叶林(139.96km²),该阶段的耕地向草地转化是研究期内规模最大、最为显著的一组景观类型变化。T3 阶段的景观类型转换集中于隔离区三大优势景观类型之间,主要表现为草地转阔叶林(128.43km²)、阔叶林转草地(118.00km²)、草地转针叶林(108.15km²)和阔叶林转针叶林(102.73km²),但

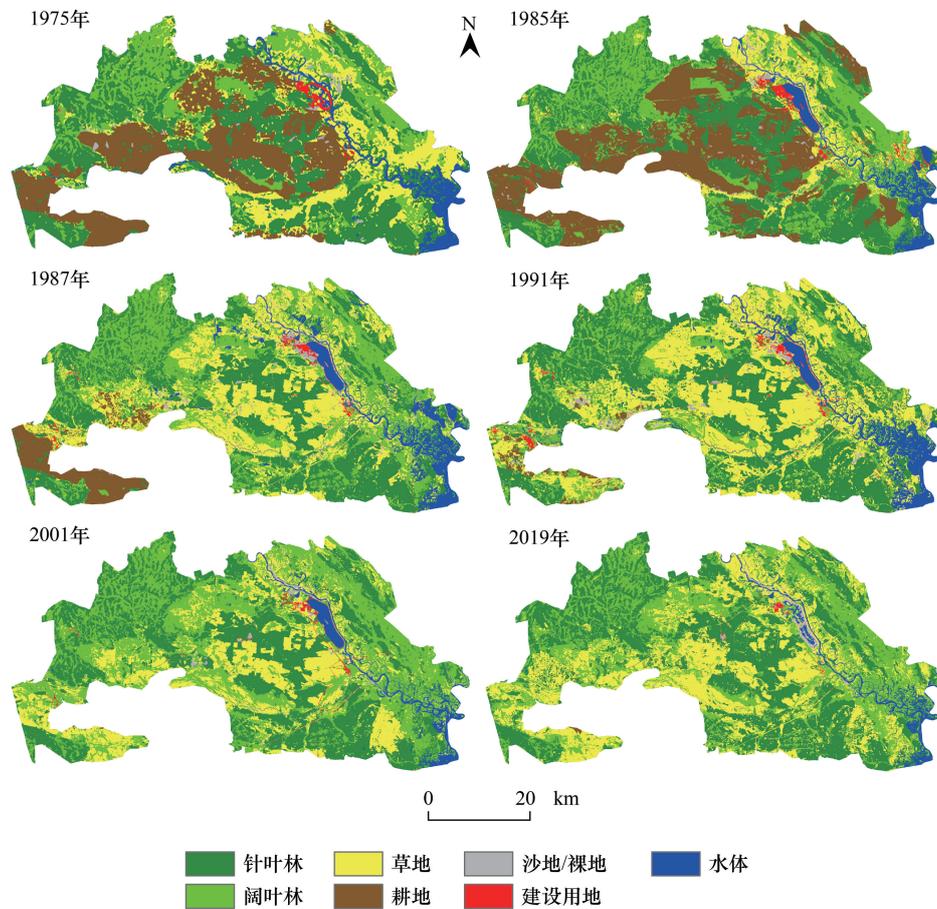


图2 隔离区景观类型

Fig. 2 Map of landscape types in CEZ

CEZ: 隔离区 Chernobyl exclusion zone

上述转换未改变针叶林、阔叶林和草地在隔离区内的优势地位,说明隔离区内形成了稳定、均衡的景观类型结构。

土地利用动态度刻画了隔离区景观类型的变化幅度及速度,一般可分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度^[32-33]。如表4所示,T1阶段草地动态度为-4.79,缩减最为严重;建设用地动态度达到了9.13,是该阶段增长速度最快的景观类型,表明隔离区在该阶段生产力发达,城市建设速度快,经济较为活跃。T2阶段的土地利用动态度发生剧烈变动,综合土地利用动态度由T1阶段的1.64提升至8.85;草地面积急剧扩张,动态度由正转负,暴增至91.04;沙地/裸地动态度提升幅度仅次于草地,由T1阶段的1.32提升至27.81;耕地缩减最为严重,动态度为-40.61,建设用地缩减仅次于耕地,动态度为-20.76,切尔诺贝利事故致使隔离区内的人为景观类型大幅衰减。T3阶段综合土地利用动态度仅为0.54,说明该阶段景观类型变化幅度很小,景观结构较为稳定;该阶段耕地变化相对显著,动态度为-3.10,缩减幅度最大;建设用地动态度为-2.31,缩减幅度仅次于耕地。

土地利用程度指数定量表达了人类活动对隔离区景观类型变化的影响水平^[33-34]。林地、草地等自然景观向耕地和建设用地转化是造成土地利用程度指数提高的核心因素^[32]。1975年隔离区的初始土地利用程度指数为224.49,伴随着核电站和普里皮亚季的规划建设,隔离区工农业发展迅速,现代化水平极大提高,导致T1阶段土地利用程度指数提升4.95(表4)。由于核事故发生后隔离区大面积耕地和建筑被荒废,T2阶段土地利用程度指数大幅下降24.27,T3阶段进一步下降5.45,致使2019年土地利用程度指数跌至200以下。

这表明切尔诺贝利核事故大幅降低了人类活动对土地利用方式的影响,使得区内土地利用程度显著衰退。

表3 隔离区各阶段景观类型转移矩阵

Table 3 Landscape types transfer matrix of CEZ in different periods

		1985						
	类型 Type	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broad- leaved forest	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	沙地/裸地 Bare ground	建设用地 Construction land	水体 Water
1975	针叶林	640.32	135.11	29.46	37.5	1.22	3.62	13.8
	阔叶林	31.54	370.59	37.66	57.48	4.05	0.53	1.86
	草地	70.91	103.54	116.28	103.41	4.98	8.32	17.39
	耕地	30.9	39.26	21.84	507.38	9.23	9.26	2.45
	沙地/裸地	4.14	2.17	6.46	5.91	1.41	1.38	0.55
	建设用地	0.92	0.73	1.84	0.99	0.75	6.71	4.41
	水体	6.55	11.54	7.47	6.06	3.45	1.23	84.68
		1987						
	类型	针叶林	阔叶林	草地	耕地	沙地/裸地	建设用地	水体
1985	针叶林	713.99	33.49	25.92	0.87	2.52	2.06	6.69
	阔叶林	71.07	539.51	29.85	5.59	0.82	0.78	15.67
	草地	8.03	51.63	142.81	0.14	6.37	1.15	10.92
	耕地	18.37	139.96	406.05	126.52	13.43	1.65	12.98
	沙地/裸地	0.17	0.38	10.89	1.35	9.64	0.89	1.77
	建设用地	3.03	1.31	6.47	0.37	5.46	11.25	3.15
	水体	3.8	2.1	1.56	0.15	0.79	0.39	116.41
		2019						
	类型	针叶林	阔叶林	草地	耕地	沙地/裸地	建设用地	水体
1987	针叶林	687.53	41.64	86.78	0	0.78	0.41	1.39
	阔叶林	102.73	545.81	118	0	0.7	0.04	1.15
	草地	108.15	128.43	381.04	0	3.5	0.53	1.96
	耕地	10.6	40.5	82.49	1.24	0.12	0.06	0.01
	沙地/裸地	8.7	3.64	22.24	0.12	2.7	0.78	0.84
	建设用地	4.74	3.51	5.85	0	0.36	3.01	0.69
	水体	24.96	38.18	28.65	0	8.88	0.05	66.87

CEZ: 隔离区 Chernobyl exclusion zone

表4 隔离区各阶段土地利用动态度及土地利用程度

Table 4 Dynamic degree and intensity index of land use at different periods in CEZ

指数类型 Index type	景观类型 Landscape type	时段 Period		
		1975—1985	1985—1987	1987—2019
单一土地利用动态度/% Single dynamic degree of land use	针叶林	-0.88	2.10	0.49
	阔叶林	3.17	7.92	0.14
	草地	-4.79	91.04	0.51
	耕地	1.56	-40.61	-3.10
	沙地/裸地	1.32	27.81	-1.75
	建设用地	9.13	-20.76	-2.31
	水体	-0.14	16.93	-1.77
综合土地利用动态度/% Comprehensive dynamic degree of land use		1.64	8.85	0.54
土地利用程度变化量 Change of land use intensity index		4.95	-24.27	-5.45

为了进一步评估核辐射对区域景观格局的影响,利用 ArcGIS 将 56 个监测站的辐射剂量率数据进行克里金插值,得到隔离区辐射剂量率空间分布,使用自然断裂点法将隔离区辐射状况分为 6 个等级,分别统计各等级 2019 年景观类型结构分布。从辐射状况的空间分布来看(图 3),核电站中心为辐射最严重地区,隔离区辐射剂量率总体形成了北高南低的分布格局,但南北景观格局不存在显著差异。从不同辐射等级区域下的景观类型分布来看(图 4),各等级景观类型均以针叶林、阔叶林和草地为主,不同等级的景观类型结构虽有差异,但随着辐射等级增强,各景观类型占比变化不存在显著性规律。使用 ArcGIS 计算隔离区 2019 年景观类型与辐射剂量率分布的协方差矩阵和相关矩阵进一步发现,两者协方差为 0.0019,相关系数为 0.0012,两者不存在相关性。综上所述,切尔诺贝利核事故泄漏辐射未从景观层面对隔离区当前的生态环境造成实质性影响。

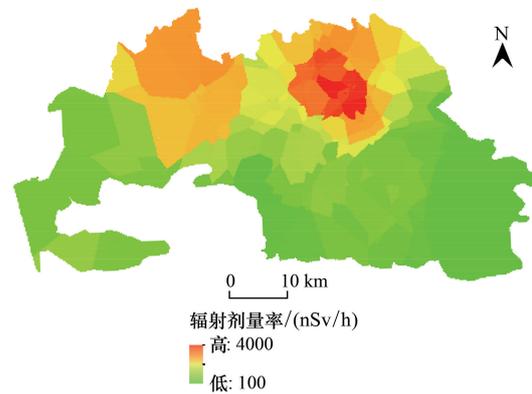


图 3 隔离区辐射剂量率分布

Fig. 3 Radiation dose rate distribution in CEZ

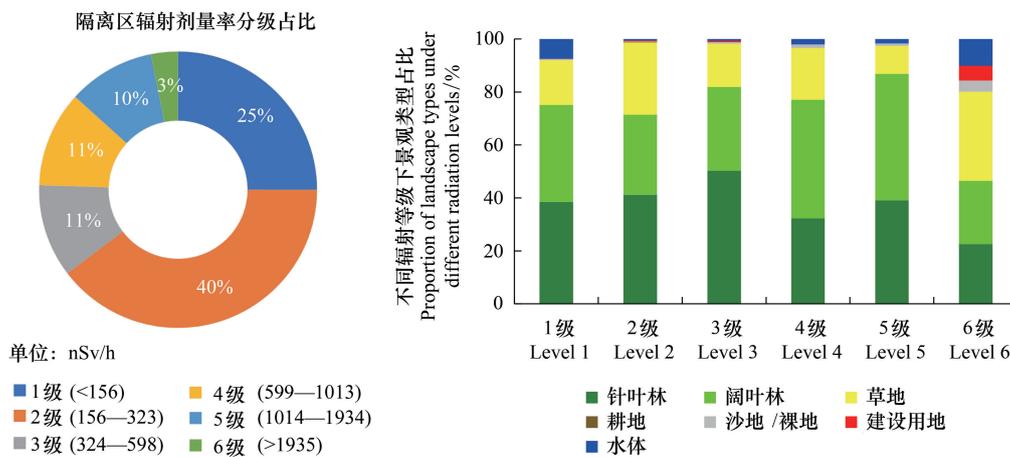


图 4 隔离区辐射剂量率等级及其景观类型分布

Fig. 4 Radiation dose rate level and its landscape types distribution in CEZ

3.2 景观格局影响分析

T1 阶段景观指数主要表现为 PD、ED、CONTAG 显著上升,而 SHDI 呈下降趋势(表 5);PD、ED 的上升表明隔离区景观破碎格局加剧,斑块形态趋于复杂化;结合表 3 可知,CONTAG 上升与阔叶林、耕地等景观扩张有关;SHDI 在该阶段呈现的下降趋势表明快速扩张的耕地和林地使得隔离区景观异质性降低,景观组分趋于不均衡发展;T1 阶段的景观格局变化反映出人类活动对隔离区景观格局产生了一定干扰,快速发展的农林业给隔离区自然环境带来了负面影响。

T2 阶段 PD、ED 继续上升,但这种上升更多是由于核事故致使隔离区耕地荒废所致;隔离区原为苏联规模化的现代农业区,耕地集中连片,斑块较大,边缘相对规则,但核事故致使耕地向草地等自然景观斑块转化,因此导致隔离区景观破碎化和复杂化加剧;SHDI 和 CONTAG 降低一定程度上反映出撂荒等措施引发区内景观异质性和连通性降低。T2 阶段的景观格局演化特征说明核事故重构了隔离区的自然与人为景观结构占比,导致隔离区内的人为景观类型受到严重损害而衰减,而自然景观获得更多的生存空间,区内景观异质性降低。

T3 阶段 PD、ED 和 CONTAG 总体呈上升趋势,而 SHDI 呈持续下降趋势;PD、ED 的上升主要由于撂荒耕地出现了部分阔叶林、针叶林斑块所致;CONTAG、SHDI 变化反映出隔离区的设立使得区内人为干扰活动大大降低,植被分布更加连片,建设用地、耕地面积减少致使景观异质性降低,景观格局总体向好发展。

3 个阶段的景观格局演化特征说明切尔诺贝利核事故未加剧区内景观格局恶化趋势,反而由于隔离区的设立降低了人类活动对自然景观的干扰,使得区内景观格局向好发展。

表 5 隔离区景观格局指数变化
Table 5 Changes in landscape pattern index in CEZ

景观指数 Landscape index	1975	1985	1987	1991	2001	2019
PD/(个/hm ²)	0.87	3.41	4.31	5.16	3.92	4.85
ED/(m/hm ²)	13.92	28.84	35.20	36.41	32.67	37.87
SHDI	1.55	1.52	1.50	1.38	1.26	1.24
CONTAG/%	51.12	55.12	54.46	57.20	58.47	57.95

PD:斑块密度 Patch Density;ED:边缘密度 Edge Density;SHDI:香农多样性指数 Shannon's diversity index;CONTAG:蔓延度 Contagion

3.3 生境质量影响分析

切尔诺贝利核事故引致的隔离区景观格局变化会改变、建立或中断生境斑块之间已有的能量和物质流动过程,进而导致隔离区整体生境格局和功能产生重构,最终引发地区生境质量产生重大变化。因此,探讨切尔诺贝利核事故对隔离区生境质量影响具有重要意义。

如图 5 所示,T1 阶段的低生境质量区域主要为平原地区的耕地和建设用地,高生境质量区域主要分布在东南部低洼沼泽区和西北部低山丘陵区,生境质量空间分异显著;从变化趋势来看,T1 阶段低生境质量区域扩张明显,主要由于东北部和东南部地区林地、草地转为耕地所致。T2 阶段生境质量分布格局发生重大转变,由于耕地撂荒转变为草地,致使生境质量迅速由低升高,隔离区生境质量分布格局由 T1 阶段高低相对平分转为了 T2 阶段以高占绝对主导。伴随着隔离区边界进一步明晰,管控逐步加强,T3 阶段高生境质量区域进一步扩张,整体占比超过 90%,部分由村庄和裸地形成的低生境质量斑块消失,低生境质量区域仅存于隔离区东部的切尔诺贝利核电站和切尔诺贝利城镇附近。隔离区内的生境质量演化过程再次表明,切尔诺贝利地区前期的工农业快速发展使区内生境质量退化迅速,但隔离区的设立使得区内生境质量迅速由低水平转为高水平,反映出生态系统极强的恢复力和稳定性。

3.4 景观格局与生境质量模拟分析

若按照正常发展趋势演进(图 6),隔离区到 1995 年将会形成以阔叶林(30.10%)、耕地(26.54%)和针叶林(26.23%)为主导的景观结构,建设用地占比将提升至 1.67%,各景观类型达到均衡状态并稳定发展。到 2015 年,隔离区耕地和建设用地占比将进一步提升,但总体景观结构与 1995 年差异不大。通过对比隔离区同期景观格局可以发现(图 2),2019 年隔离区景观类型以针叶林、阔叶林和草地为主导,三者共计占比 96.26%,处于绝对优势地位。切尔诺贝利核事故致使隔离区内草地面积扩大超 2 倍,针叶林和阔叶林面积亦小幅度提升,而耕地几乎消失,建设用地缩小 89%,水体与沙地/裸地面积亦有不同程度缩小。这说明切尔诺贝利核事故完全中断了隔离区工农业发展进程,彻底改变了原有景观演化轨迹。

从生境质量模拟结果来看(图 7),1995 年生境质量空间分布格局与 T1 阶段基本一致,主要变化在于隔离区中部耕地包围林地形成的“高生境质量孤岛”面积缩减,转变为了中等生境质量区域。2015 年模拟结果较 1995 年而言,其变化主要体现在高等生境质量区域退化为中低等生境质量区域,其中由高等生境质量区域转化为低等生境质量区域的面积最大,达 21.02km²,尤其是普里皮亚季和切尔诺贝利城镇附近生境质量由高向低退化较为显著;生境质量由中向低转化规模仅次于由高向低转化规模,转换面积为 17.93km²。相比 2015 年模拟结果,2019 年实际低生境质量区域占比下降 30%,中等生境质量区域下降 4%,而高生境质量区域占比提升 34%。生境质量的模拟结果说明:若未发生核事故,切尔诺贝利地区原有的工农业进程会对地区生境

质量产生一定损害,致使高等级生境质量向低等级转变,而切尔诺贝利核事故中断了这一恶化趋势,使区内生境质量持续向好发展。

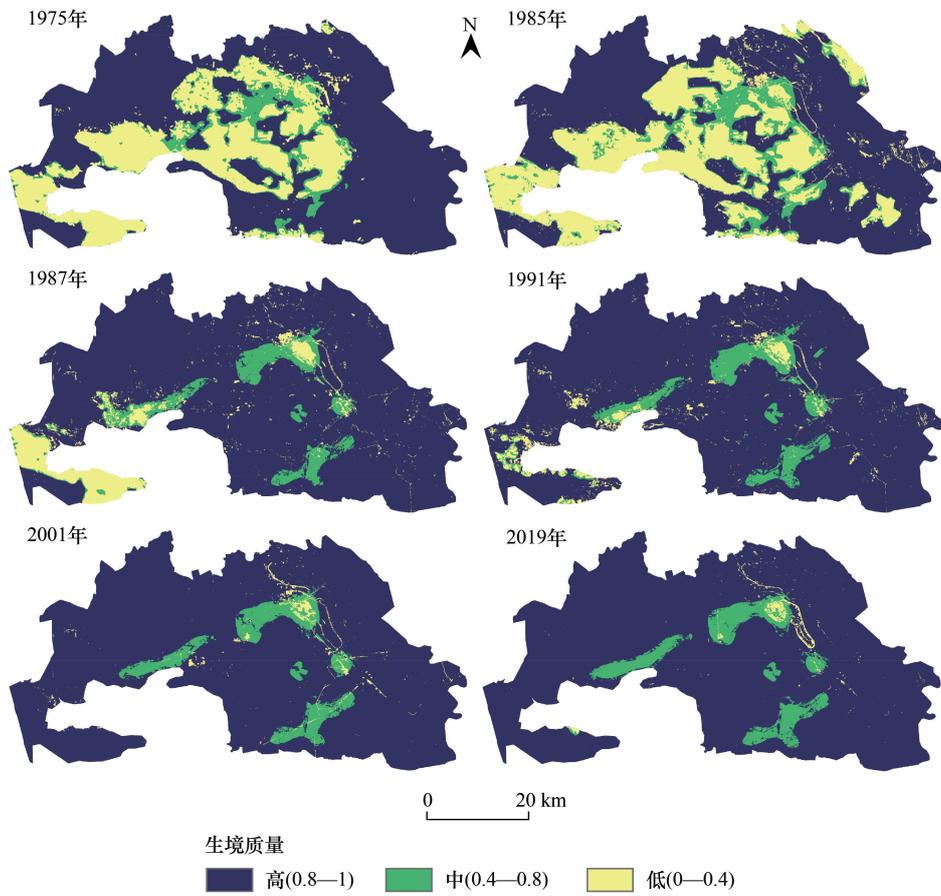


图5 隔离区生境质量变化
Fig.5 Changes of habitat quality in CEZ

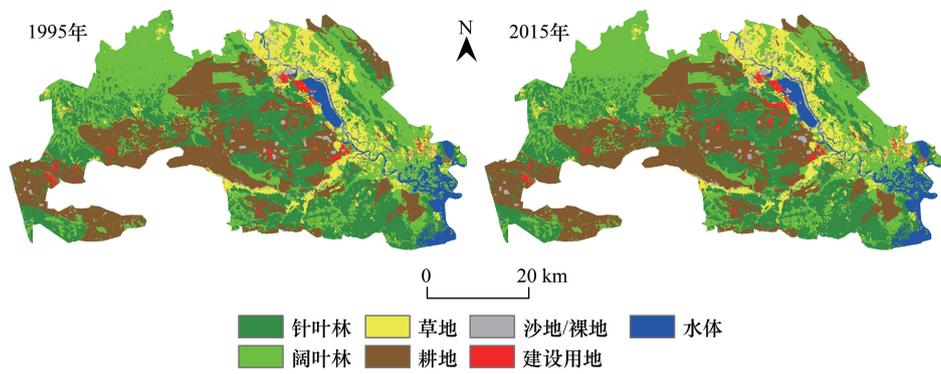


图6 隔离区景观格局模拟
Fig.6 Landscape pattern simulated diagram of CEZ

4 结论

(1) 切尔诺贝利核事故致使区内景观结构产生剧烈变动,土地利用程度显著衰退,景观类型由针叶林、耕

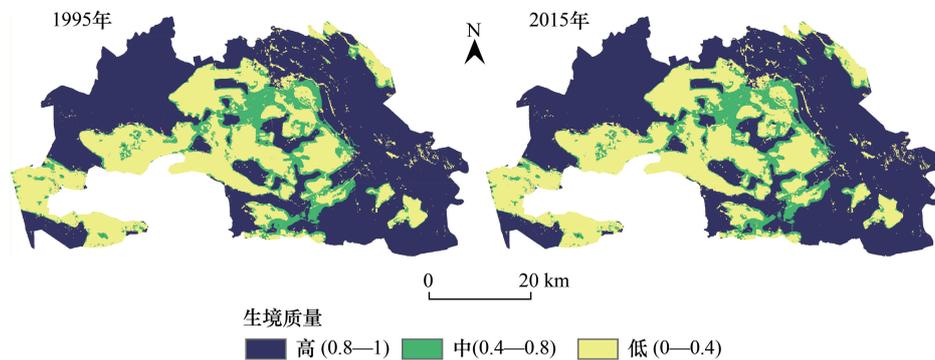


图7 隔离区生境质量模拟

Fig. 7 Habitat quality simulated diagram of CEZ

地以及阔叶林占主导转变为针叶林、阔叶林和草地占主导,但核事故所泄漏的辐射未从景观层面对隔离区当前的生态环境造成实质性负面影响。

(2)隔离区内景观破碎化和复杂性提升,景观多样性和异质性降低,所受人为干扰减少,植被覆盖更加连片集中,切尔诺贝利核事故未加剧区内景观格局恶化趋势,反而由于隔离区的设立降低了人为干扰,使区内景观格局向好发展。

(3)隔离区的设立扭转了区内生境质量恶化趋势,由耕地等人为景观形成的低生境质量区域迅速转变为草地、林地等高生境质量区域,区内高生境质量区域占比超90%,展现出了自然生态系统极强的恢复力和稳定性。

(4)切尔诺贝利核事故完全中断了隔离区的工农业发展进程,使得区内草地面积扩大2倍,高生境质量区域占比提升34%,彻底改变了原有以耕地、建设用地不断扩张为主线的景观演化轨迹和生境质量不断退化的发展趋势。

参考文献 (References):

- [1] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1-10.
- [2] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 白天骄. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化. 生态学报, 2020, 40(6): 1910-1922.
- [3] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. 地理科学, 2003, 23(3): 264-270.
- [4] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1): 173-182.
- [5] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. 生态学报, 2000, 20(4): 581-586.
- [6] 徐新良, 江东, 庄大方, 邱冬生. 汶川地震灾害核心区生态环境影响评估. 生态学报, 2008, 28(12): 5899-5908.
- [7] 李京忠, 曹明明, 邱海军, 薛冰, 胡胜, 崔鹏. 汶川地震区灾后植被恢复时空过程及特征——以都江堰龙溪河流域为例. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3479-3486.
- [8] Modugno S, Balzter H, Cole B, Borrelli P. Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. Journal of Environmental Management, 2016, 172: 112-126.
- [9] Assal T J, Anderson P J, Sibold J. Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. Forest Ecology and Management, 2016, 365(7): 137-151.
- [10] Senf C, Seidl R. Natural disturbances are spatially diverse but temporally synchronized across temperate forest landscapes in Europe. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1201-1211.
- [11] 王慧贇, 张英洁, 靳英华, 许嘉巍, 陶岩, 贺红土, 高翔, 白云玉, 胡睿, 韩莹莹. 长白山寒温带风灾区植被受损与灾后变化程度及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1580-1588.
- [12] de Oliveira Silveira E M, Júnior F W A, de Mello J M, Bueno I T. Object-based change detection using semivariogram indices derived from NDVI images: the environmental disaster in Mariana, Brazil. Ciência e Agrotecnologia, 2017, 41(5): 554-564.

- [13] 徐佩, 王玉宽, 杨金凤, 彭怡. 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析. *生态学报*, 2013, 33(3): 718-725.
- [14] 宋利臣, 何平平, 崔晓阳. 大兴安岭重度火烧林地土壤生境质量综合评价. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2353-2361.
- [15] Davydchuk V. Ecosystem remediation in radioactively polluted areas: the Chernobyl experience. *Ecological Engineering*, 1997, 8(4): 325-336.
- [16] Anspaugh L R, Catlin R J, Goldman M. The global impact of the Chernobyl reactor accident. *Science*, 1988, 242(4885): 1513-1519.
- [17] Deryabina T G, Kuchmel S V, Nagorskaya L L, Hinton T G, Beasley J C, Lerebours A, Smith J T. Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Current Biology*, 2015, 25(19): R824-R826.
- [18] Grishanin E I. The role of chemical reactions in the Chernobyl accident. *Physics of Atomic Nuclei*, 2010, 73(14): 2296-2300.
- [19] 胡遵素. 切尔诺贝利事故及其影响与教训. *辐射防护*, 1994, 14(5): 321-335.
- [20] 陈煦斌. 禁足之境: 演进的自然遗产与衰败的灾难遗迹. *景观设计学*, 2017, 5(5): 133-143.
- [21] Peng J, Wang Y L, Zhang Y, Wu J S, Li W F, Li Y. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 217-223.
- [22] 程琳琳, 刘华, 刘焱序. 半干旱区县域景观格局变化轨迹识别——以宁夏盐池县为例. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1066-1078.
- [23] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 赵清贺, 汤茜, 孔令华. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析. *生态学报*, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [24] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力. *生态学报*, 2015, 35(13): 4357-4366.
- [25] Sallustio L, De Toni A, Strollo A, Di Febbraro M, Gissi E, Casella L, Geneletti D, Munafò M, Vizzarri M, Marchetti M. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 129-137.
- [26] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [27] He J H, Huang J L, Li C. The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: a joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model. *Ecological Modelling*, 2017, 366: 58-67.
- [28] 李骞国, 王录仓, 严翠霞, 刘海洋. 基于生境质量的绿洲城镇空间扩展模拟研究——以黑河中游地区为例. *生态学报*, 2020, 35(9): 2920-2931.
- [29] 廖芳均, 赵东升. 南岭国家级自然保护区森林景观格局变化与动态模拟. *地理科学*, 2014, 34(9): 1099-1107.
- [30] 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 郭建军, 徐晓锋. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测. *生态学报*, 2019, 39(6): 1993-2003.
- [31] Baker R J, Hamilton M J, van den Bussche R A, Wiggins L E, Sugg D W, Smith M H, Lomakin M D, Gaschak S P, Bundova E G, Rudenskaya G A, Chesser R K. Small mammals from the most radioactive sites near the Chernobyl nuclear power plant. *Journal of Mammalogy*, 1996, 77(1): 155-170.
- [32] 李秀芬, 刘利民, 齐鑫, 张金鑫, 肇同斌, 王一, 刘雪峰, 周永斌. 晋西北生态脆弱区土地利用动态变化及驱动力. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2959-2967.
- [33] 任志远, 张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 243-249.
- [34] 张冉, 王义民, 畅建霞, 黎云云. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 274-287.