

土地复垦区生态系统服务与景观格局

耦合协调关系研究

——以徐州潘安湖复垦区为例

赵华¹ 徐嘉兴^{2,3} 裴基龙¹ 陈晨¹¹

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 矿山互联网应用技术国家地方

联合工程实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

【摘要】: 为揭示土地复垦区生态系统服务与景观格局的耦合协调关系, 以潘安湖复垦区为例, 利用景观格局指数、生态系统服务和耦合协调度模型等, 分析了复垦前后生态系统服务与景观格局演变及其耦合协调发展状况。结果表明: (1) 2008—2017 年, 潘安湖复垦区生态系统服务价值显著上升, 增幅达 90.05%, 生态总体状况良好。(2) 景观格局变化明显, 复杂性和聚集性增加, 由中心向四周扩散。(3) 二者耦合协调关系由中度协调—生态服务滞后变为高度协调—景观格局滞后, 耦合协调发展持续转好, 但景观格局发展滞后于生态系统服务, 仍需进一步优化景观格局, 提升二者耦合协调度。研究结果对土地复垦区景观格局优化及生态系统服务协调发展具有重要的指导作用。

【关键词】: 生态系统服务 景观格局 耦合协调 土地复垦 矿区

【中图分类号】: X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)10-221-07

资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化是制约我国当前社会经济可持续发展的主要问题^[1]。为扭转生态环境恶化趋势, 中国提出“大力推进生态文明建设”的战略决策并践行“绿水青山就是金山银山”的重要理念, 积极推进山水林田湖草一体化治理及其协调可持续发展研究成为学术界的共识^[2]。东部采煤塌陷区是“矿地矛盾”较为突出的区域, 提出的“耕地再造、塌陷区复垦、生态修复和景观建设”综合整治新思路是国家推动“山水林田湖草一体化治理”的重要举措, 经过近 20 年的采煤塌陷

作者简介: 赵华, 博士, 讲师, 研究方向为土地复垦、矿山生态修复。E-mail:zhhcumt@163.com;徐嘉兴, 博士, 副教授, 研究方向为遥感、GIS 与矿山生态环境监测。E-mail:xujx@cumt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(课题)“复垦农用地跟踪监测评价技术规范研究”(2017YFF0206802)

区修复治理,已取得较好的成效^[3,4]。

景观格局是自然环境和人类活动共同作用下景观斑块的空间配置,是生态过程的载体^[5,6]。人为的开发利用活动不断改变区域的景观格局,对生态系统服务的影响具有时间和空间上的累积作用,既有正面效应,也有负面效应^[7]。土地复垦通过各类复垦措施的实施,改变了矿区生态系统中土壤、植被、水文等环境要素^[8],进而引起景观类型和格局的调整,导致区域生态过程的改变,最终影响到生态系统服务的提供,并对周围环境产生影响,实现矿区生态环境治理的目的^[9]。生态系统服务作为景观格局和生态过程互馈作用的产物,是矿区生态恢复的最终体现^[10]。通过景观格局变化趋势分析,可对复垦区生态系统服务的情景进行分析,并预测生态系统服务可能存在的脆弱性;反之,通过对生态系统服务在时空尺度上的变化过程进行分析,也可以作为复垦区景观优化配置的依据^[11]。因此,研究生态系统服务与景观格局的耦合协调关系,有助于复垦矿区景观生态管理与景观生态规划,也可以最大限度地发挥景观的生态服务功能。

随着生态系统服务为人类福祉的贡献被普遍认可,国内外学者开展了大量的研究,主要集中在探讨生态系统服务的功能^[12]、量化评估^[13,14]、时空演变^[15]、权衡协同关系^[16]和生态服务流等方面^[17],并从全球、区域、城市、农田、林地等不同景观尺度对生态系统服务进行研究^[18],探讨城市化、退耕还林还草工程等过程的资源与生态环境效应对生态系统服务的影响机制^[18,19]。然而,针对矿区土地复垦后景观格局变化分析及其对生态系统服务价值的影响,以及二者之间耦合协调作用机制和定量研究较少。

本文以徐州市潘安湖复垦区为例,对生态系统服务功能价值与景观格局指数进行核算与分析,构建耦合协调度模型探讨生态系统服务功能与景观格局的耦合协调发展状况,评估复垦区生态恢复效益,探讨生态系统服务与景观格局之间的耦合协调机制,以期对矿区生态系统管理和土地资源合理有效配置提供辅助决策。

1 研究区概况

潘安湖复垦区位于徐州市贾汪区西南部,是权台煤矿和旗山煤矿采煤形成的沉陷湖。由于受到资源枯竭、采煤沉陷、生态恶化等影响,潘安湖复垦区所在地的经济发展水平低于徐州主城区,是区域经济发展的洼地。2010年起,贾汪区对该采煤塌陷区实施土地复垦与生态修复^[4],建成全国首个4A级塌陷区生态修复的湿地公园,建立了集“基本农田整理、采煤塌陷地复垦、生态环境修复、湿地景观开发”四位一体的模式。研究区位置见图1。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

研究数据应用复垦前2008年和复垦后2017年的QuickBird高分辨率影像(多光谱,2.8m),1:1万地形图、2017年土地利用现状图。首先,在ERDAS9.2软件环境下对两期遥感影像精确配准;采用随机森林(randomforest,RF)分类与目视解译相结合的方法^[20],获取研究区复垦前后耕地、林地、草地、交通用地、自然水体(包括河流、坑塘)、塌陷水体和城乡、工矿建设用等地等7类土地利用数据,分类结果的Kappa系数均在0.95以上。

2.2 研究方法

(1) 生态系统服务功能评估模型。

采用Costanza

等^[21]提出的生态系统服务价值评估模型,并在谢高地等^[22]建立的中国陆地生态系统服务价值当量的基础上,以2008年和

2017 年徐州市粮食平均产量及平均价格为基准，修正生态系统服务价值系数，估算研究区生态系统服务价值^[23]，计算模型为：

$$ESV_f = \sum_{i=1}^k A_i \cdot VC_{if} \quad (1)$$

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (2)$$

式中：ESV_f为生态系统第 f 项服务功能价值(元)，A_i为第 i 类土地利用类型面积(hm²)，VC_{if}为土地利用类型 i 的第 f 项服务功能价值系数，k 为土地利用类型的数量。E_a为单位农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元/hm²)；p_i为第 i 类粮食作物的平均价格(元/kg)，q_i为第 i 种粮食作物的单位面积产量(kg/hm²)；m_i为第 i 种粮食作物面积(hm²)，M 为 n 种粮食作物总播种面积(hm²)。

(2) 景观格局指数。

土地复垦必然引起土地利用景观斑块、廊道和生态功能的显著变化。结合潘安湖复垦区特点，从景观斑块、形状、蔓延度、多样性和集聚度等景观格局指数来分析土地复垦前后景观格局变化。景观格局指数利用 Fragstats4.2 专业软件计算^[24, 25]，各指标的公式与生态学意义^[26, 27, 28, 29, 30]。

(3) 耦合协调度模型。

考虑景观格局指标原始数据量纲不同，采用归一化方法对各指标进行标准化处理^[18]，即正向指标： $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij \min}}{x_{ij \max} - x_{ij \min}}$ ，逆向指标： $x'_{ij} = \frac{x_{ij \max} - x_{ij}}{x_{ij \max} - x_{ij \min}}$ ，其中： x_{ij} 为指标原始值， x'_{ij} 为标准化值， $x_{ij \max}$ 、 $x_{ij \min}$ 为 x_{ij} 的最大值与最小值。标准化后的数据根据熵权法求取权重，计算生态系统服务和景观格局综合指数^[31]。熵权法公式如下：

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij} + 1}{\sum_{i=1}^m (x'_{ij} + 1)} \quad (3)$$

$$E_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}, \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (5)$$

式中：P_{ij}是第 j 项指标占总样本的比重，E_j为评价指标的熵值，w_j为评价指标的熵权。

耦合协调度模型是研究多个系统耦合协调关系的模型^[32]，广泛应用于不同尺度、不同区域生态环境与经济发展^[33]、生态环境与旅游产业^[34]、人口与经济发展^[35]、城市化与生态系统服务^[19]等系统间的耦合协调关系分析。本文通过构建生态系统服务功能与景观格局耦合协调度模型表征二者之间的耦合协调发展状况，计算公式为：

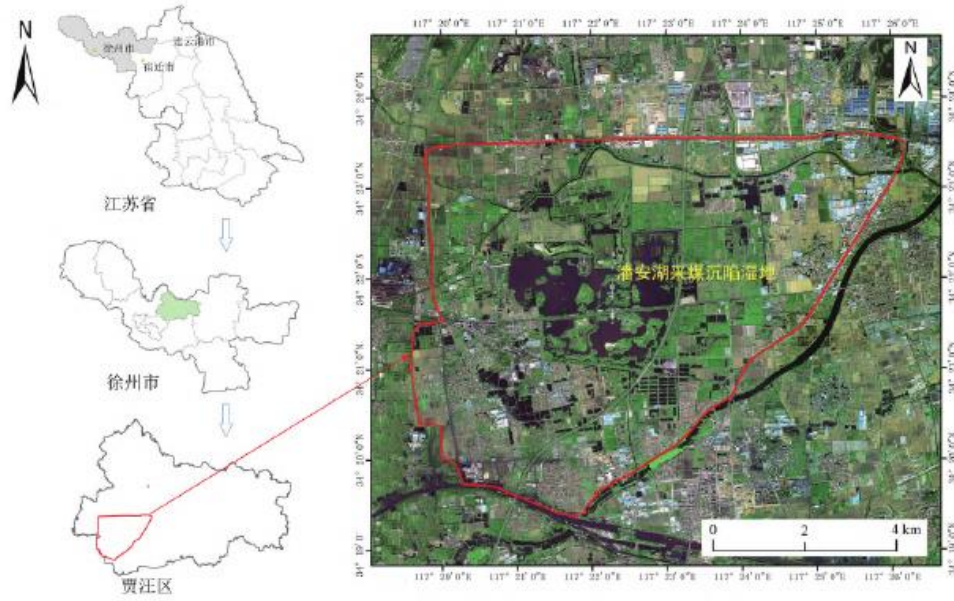


图 1 研究区地理位置图

$$C = 2 \cdot \frac{\sqrt{(U_1 \cdot U_2)}}{(U_1 + U_2)^2} \quad (6)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (7)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (8)$$

$$K = U_1 / U_2 \quad (9)$$

式中：C 为耦合度， $C \in [0, 1]$ ，C 越大说明系统间耦合状态越好，反之则说明系统间耦合状态不好。根据已有的研究^[18]，当 $C=0$ 时，表明系统间无耦合；当 $C \in (0, 0.3]$ 时，表明系统间为低度耦合；当 $C \in (0.3, 0.8]$ 时，表明系统间为中度耦合；当 $C \in (0.8, 1]$ 时，表明系统间为高度耦合。 U_1 、 U_2 分别表示生态系统服务总价值和景观格局指数；T 为系统间的综合协调指数； α 、 β 为待定系数，本文认为生态系统服务功能与景观格局同等重要，取 $\alpha = \beta = 0.5$ ；D 为耦合协调度， $D \in [0, 1]$ ，D 越大表明两个系统之间的协调程度越高，反之则说明两个系统之间协调程度低。K 为相对发展度，用于反映区域生态系统服务功能相对于景观格局发展是超前还是滞后。结合耦合协调度及相对发展度的结果，参考现有文献等级划分成果^[32]，总结出生态系统服务功能与景观格局耦合协调发展类型及划分标准(表 1)。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能特征分析

塌陷水体作为采煤塌陷区的特殊地表水，其使区域从原本单一的农田陆地生态系统演变为湿地/水生生态系统，既具有一般水体的生态系统服务功能，又容易受附近采矿工业“三废”、生活污水等排入而受到污染，缺少土壤形成与保护、娱乐文化等功能，参考 Bian 等^[29]对塌陷水体生态系统服务价值当量计算方法测算单位面积的生态系统服务价值。同时，根据中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表，对研究区各类土地利用类型的生态系统服务功能价值进行当量换算，其中耕地、林地、草地和自然水体(河流、湖泊)分别对应农田、森林、草地和水体，工矿建设用和交通用地赋值为 0。以徐州市贾汪区 2008 年和 2017 年两年的粮食平均产量(5638.69 kg/hm^2)以及平均价格(1.85 元/kg)为基准单产和价值基准，得出研究区单位面积生态系统服务

价值当量为 1490.23 元/hm²，并根据修正系数计算得到研究区生态系统服务功能价值当量，如表 2 所示。

潘安湖复垦区治理前后生态系统服务功能价值量如表 3 所示。土地复垦实施后，生态系统服务价值由 2008 年的 6331.95 万元增加到 2017 年的 12033.84 万元，增幅达 90.05%。单项生态系统服务功能中，水源涵养、娱乐、废物处理、生物多样性保护等功能增加较快，主要原因是采煤塌陷地复垦为大面积的人工湿地、林地和草地等；土地利用景观类型呈现出多样化、均匀化发展，景观多样性得到一定程度的提高，导致其生态系统服务价值增大；食物生产功能下降，主要原因是耕地面积减少。整体来看，2008—2017 年，研究区生态系统服务功能稳定增长，对改善生态环境、保护生态安全具有重要作用。

表 1 生态系统服务功能与景观格局耦合协调发展类型与划分标准

耦合协调度 D	相对发展度 K	耦合协调类型	耦合协调发展特征
0<D≤0.2	0<K≤1	严重失调	严重失调—生态服务滞后
	K>1		严重失调—景观格局滞后
0.2<D≤0.4	0<K≤1	中度失调	中度失调—生态服务滞后
	K>1		中度失调—景观格局滞后
0.4<D≤0.6	0<K≤1	基本协调	基本协调—生态服务滞后
	K>1		基本协调—景观格局滞后
0.6<D≤0.8	0<K≤1	中度协调	中度协调—生态服务滞后
	K>1		中度协调—景观格局滞后
0.8<D≤1	0<K≤1	高度协调	高度协调—生态服务滞后
	K>1		高度协调—景观格局滞后

表 2 研究区生态系统服务功能价值当量表 单位：元/hm²

服务功能	耕地	林地	草地	自然水体	塌陷水体
气体交换	745.12	5215.81	3203.99	0	0
气候调节	1326.3	4023.62	2682.41	685.51	685.51
水源涵养	894.14	4768.74	2980.46	30370.89	7592.72
土壤形成与保护	2175.74	5811.9	4358.92	14.9	0
废物处理	2443.98	1952.2	1952.2	27092.38	0
生物多样性保护	1058.06	4858.15	3241.25	3710.67	928.41
食物生产	1490.23	149.02	298.05	149.02	0

原材料	149.02	3874.6	1974.55	14.9	14.9
娱乐文化	14.9	1907.49	983.55	6467.6	1616.9

表 3 研究区 2008—2017 年生态系统服务功能价值量

生态系统服务功能	2008 年		2017 年		2008—2017 年变化量	
	功能价值量/万元	比例/%	功能价值量/万元	比例/%	变化量/万元	变化率/%
气体交换	276.29	4.36	549.75	4.57	273.47	4.80
气候调节	498.24	7.87	664.74	5.52	166.50	2.92
水源涵养	1780.23	28.12	3804.20	31.61	2023.97	35.50
土壤形成与保护	711.25	11.23	934.02	7.76	222.77	3.91
废物处理	1656.99	26.17	3598.01	29.90	1941.02	34.04
生物多样性保护	545.92	8.62	998.41	8.30	452.49	7.94
食物生产	444.35	7.02	348.23	2.89	-96.12	-1.69
原材料	83.32	1.32	305.43	2.54	222.11	3.90
娱乐文化	335.37	5.30	831.05	6.91	495.68	8.69
合计	6331.95	100	12033.84	100	5701.89	100

3.2 景观格局变化分析

潘安湖复垦区复垦前后的景观格局变化如图 2 所示。从复垦前后景观类型变化可以看出,研究区有 7 种土地利用类型,其中耕地是土地利用结构的重要组成部分,2008 年占总面积的一半以上,随着潘安湖复垦区生态环境治理,耕地由原来的 54.98% 减少到 39.27%。其次,林地和草地由原来的 0.63%、2.43% 增加到 8.47%、9.39%;塌陷水体经过生态修复全部转变为湖泊湿地,水域面积增加了 152.15hm²,占比增加了 16.55%。随着煤矿关闭和工矿废弃地逐步退出,建设用地占比减少了 12.14%。从景观格局变化空间集聚特征来看,景观变化方向由中心向四周扩散,主要集中在塌陷水体治理上。

表 4 研究区复垦前后景观水平景观格局指数

年份	NP	PD	LPI	CONTAG	SHDI	SHEI	AI
2008	2178	41.0235	3.4004	59.5188	1.3224	0.6796	94.9301
2017	2032	38.2736	3.7139	50.0998	1.5159	0.8460	95.1050

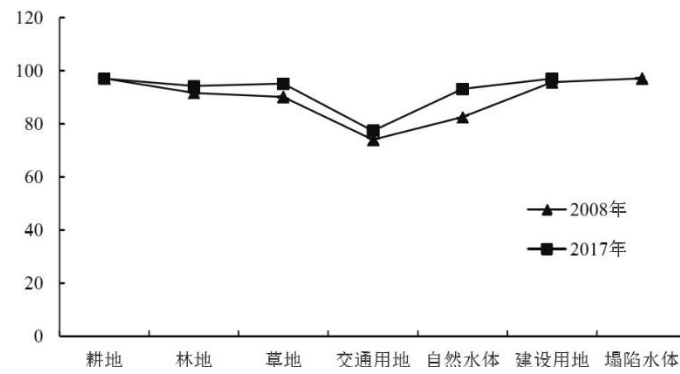
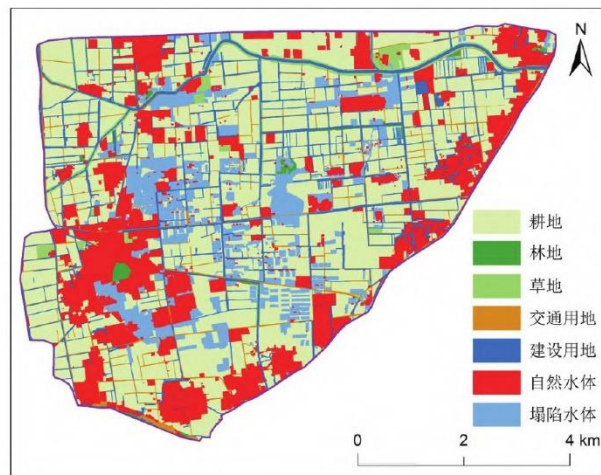
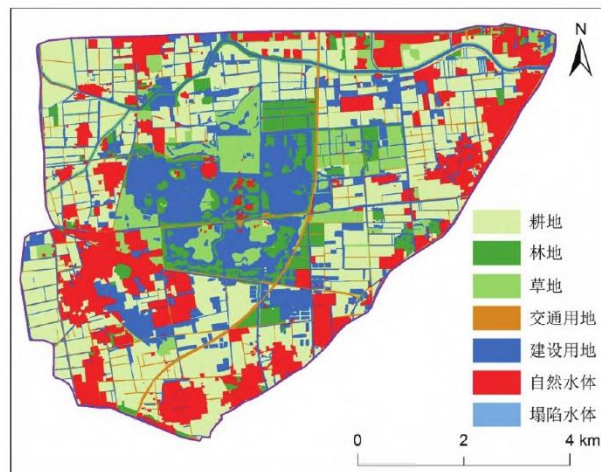


图 3 2008—2017 年研究区年斑块类型聚集度指数 (AI)



a. 2008 年



b. 2017 年

图 2 潘安湖采煤塌陷区土地复垦前后的景观类型分布

由景观水平上景观格局指数计算结果(表 4)可以看出, 2008—2017 年潘安湖复垦区的景观斑块数量(NP)和斑块密度(PD)逐

渐减少,最大斑块指数呈增加趋势,表明景观中原有破碎斑块逐渐减少。经过实施土地复垦工程,蔓延度指数下降,改变原有单一的土地利用类型,景观类型趋于多样化。景观多样性指数(SHDI)和景观均匀度指数(SHEI)整体呈增加趋势,表明土地复垦后土地利用景观丰富度和复杂度不断上升,景观类型趋于均匀化分布。研究区聚集度(AI)总体呈增加趋势(图3),表明各类景观呈现出一定的聚集分布特征。总体来看,随着复垦工程的实施,土地利用景观类型呈现出多样化、均匀化发展,表明土地复垦与修复使景观多样性得到一定程度的提高,同时景观类型呈现复杂性和聚集性特征。由于将零星塌陷水体复垦为大面积人工湿地,水域面积增加,占用了耕地和其他类型,对景观多样性起到一定的抑制作用。

3.3 景观格局与生态系统服务功能耦合协调度分析

研究结果表明,土地复垦直接影响了景观格局演变,土地利用变化是导致生态系统服务功能和价值变化的重要原因。为进一步阐明二者之间的关系,利用耦合协调模型进行测度,并揭示其协调发展程度。首先对2008年和2017年的生态系统服务总价值进行归一化处理得到研究区生态系统服务价值综合指数(U_1),再对景观格局指数进行归一化,利用熵值法测算2008年和2017年景观格局综合指数(U_2),代入耦合协调度模型和相对发展度模型,得出耦合协调发展结果及变化情况(表5)。

从表5中耦合度评价结果来看,两个阶段的生态系统服务功能与景观格局的耦合程度均为高度耦合,表明二者存在较高的相关性。潘安湖复垦区耦合协调度从2008年的中度协调到2017年的高度协调,表明研究区整体耦合协调度呈上升态势,生态系统服务功能与景观格局之间正逐渐形成良性互动关系。从相对发展度来看,2008年耦合协调发展类型为中度协调—生态服务滞后,表明生态系统服务功能水平较低,相比景观格局分布,该区域生态系统服务功能存在较大的改进空间。2017年耦合协调发展类型为高度协调—景观格局滞后,表明近10年间潘安湖复垦区经过土地复垦治理,生态环境改善,生态系统服务功能逐步提高;虽然土地利用景观格局的发展也在逐步提高,但其发展速度低于生态系统服务功能,二者并未同步发展,应注重调整景观格局分布,促进二者更加协调发展。

表5 研究区2008—2017年生态系统服务功能与景观格局耦合协调度

年份	U_1	U_2	C	T	D	K	耦合特征	耦合协调特征
2008	0.4657	0.6696	0.9837	0.5676	0.7474	0.6954	高度耦合	中度协调—生态服务滞后
2017	0.8890	0.7411	0.9959	0.8150	0.9009	1.1996	高度耦合	高度协调—景观格局滞后

4 讨论

在践行“绿水青山就是金山银山”理念的今天,作为东部重要的煤粮复合区,开展采煤塌陷区土地复垦与生态修复对区域生态安全和粮食安全具有重要意义。贾汪矿区曾是百年煤城,累计生产原煤3.6亿吨,煤炭开采造成大量耕地损毁、地面塌陷积水、土壤和水质污染,对生态环境造成负面影响,2011年被列为国家第三批资源枯竭城市。作为徐州老工业基地振兴的重要举措,2010年开始实施潘安湖采煤塌陷区综合整治项目,通过基本农田整理、采煤塌陷地复垦、生态环境修复、湿地景观开发等模式,提升了耕地质量,改善了生态环境,对区域生态文明建设起到了一定的成效。本文采用生态系统服务价值评估模型与景观格局指数方法分析了潘安湖复垦区土地复垦前后景观格局与生态系统服务变化,结果表明大气调节、水源涵养、文化娱乐、废物处理、生物多样性保护等生态系统服务功能呈显著上升趋势,生态系统服务总价值由2008年的6331.95万元增加到2017年的12033.84万元,增幅达90.05%。同时,景观类型呈现出多样化、均匀化发展,景观聚集度和多样性得到提高。研究结果与实际情况基本吻合,表明潘安湖复垦区治理取得较好成效。

生态系统服务与景观格局演变之间存在着密切联系^[36],人类活动通过不同的土地利用策略改变了土地利用景观格局,进而

改变生态过程,最终影响生态系统服务功能的提供^[37]。耦合协调度研究结果表明,潘安湖复垦区的生态系统服务功能与景观格局存在高度耦合关系和较好的耦合协调度水平。土地复垦前,耦合协调度为中度耦合—生态服务滞后,主要原因是煤炭开采造成大量耕地损毁、塌陷积水、土壤和水质污染,造成生态系统服务功能减弱,亟须优化和提升。土地复垦工程实施后,水域、林地、草地显著增加,水源涵养、文化娱乐、废物处理、生物多样性保护等生态系统服务功能显著提升。因此,相比生态系统服务功能,景观格局相对滞后,二者并未同步发展。在今后生态建设过程中,应结合土地利用进程,进一步优化景观格局,提高二者耦合协调度,使二者更为协调发展。研究结果对东部煤矿复垦区景观格局优化及生态系统服务协调发展具有重要的指导作用。

5 结论

文章从生态系统服务功能估算和景观格局分析的角度出发,对潘安湖复垦区土地复垦前后生态系统服务功能与景观格局进行评估和分析;通过构建耦合协调度模型评估了生态系统服务功能与景观格局的耦合协调发展情况。主要结论如下:

(1)2008—2017年,潘安湖复垦区生态系统服务功能显著增长,水源涵养、娱乐、废物处理、生物多样性保护等功能增加较快,生态系统服务总价值提升90.05%,治理后生态系统积极向正向发展,总体状态良好。

(2)2008—2017年,潘安湖复垦区景观格局时空变化显著,景观变化方向由中心向四周扩散,主要集中在水体治理方面。土地复垦后,水体、林地、草地增加,耕地与建设用地减少,土地利用景观类型呈多样化、均匀化发展,景观格局复杂性和聚集性增加,景观多样性得到提高。

(3)2008—2017年,潘安湖复垦区生态系统服务功能与景观格局存在高度耦合,耦合协调发展类型由中度协调—生态服务滞后变为高度协调—景观格局滞后,说明实施土地复垦工程后,生态系统服务功能与景观格局的耦合协调度正在向更好的方向转变,但景观格局发展滞后于生态系统服务功能的生长,仍需进一步优化景观格局,使二者更为协调发展。

参考文献:

- [1]王军,钟莉娜.生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J].生态学报,2019(23):8702-8708.
- [2]尚洪磊,韩永伟,蔡譔,等.高寒内流河源区山水林田湖草生态保护与修复实践——以青海省祁连山疏勒河—哈拉湖汇水区为例[J].环境工程技术学报,2021(2):234-240.
- [3]胡振琪,陈洋,刘曙光,等.2020年土地科学研究重点进展评述及2021年展望——土地工程与信息技术分报告[J].中国土地科学,2021(2):113-122.
- [4]徐嘉兴,李钢,陈国良,等.土地复垦矿区的景观生态质量变化[J].农业工程学报,2013(1):232-239.
- [5]张建,雷刚,漆良华,等.2003—2018年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J].生态学报,2021(4):1280-1290.
- [6]王军,钟莉娜,应凌霄.土地整治对生态系统服务影响研究综述[J].生态与农村环境学报,2018(9):803-812.
- [7]裴厦,谢高地,鲁春霞,等.水利工程梯级开发对河流生态系统服务累积影响浅析——以猫跳河为例[J].资源科学,2011(8):1469-1474.

-
- [8]Karl D M,Church M J.Ecosystem structure and dynamics in the North Pacific Subtropical Gyre:New views of an old ocean[J].Ecosystems,2017,20(3):433-457.
- [9]刘春芳,薛淑艳,乌亚汗.土地整治的生态环境效应:作用机制及应用路径[J].应用生态学报,2019(2):685-693.
- [10]Jin D,Bian Z F.Quantifying the emission's impact of coal mining activities on the environment and human health in process[J].Journal of Coal Science and Engineering (China),2013,19(3):421-426.
- [11]傅伯杰.生态系统服务与生态安全[M].北京,高等教育出版社,2013.
- [12]傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J].生态学报,2017(2):341-348.
- [13]李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J].生态学报,2013(3):726-736.
- [14]Pennekamp F,Pontarp M,Tabi A,et al.Biodiversity increases and decreases ecosystem stability[J].Nature,2018,563:109-112.
- [15]Tilman D,Isbell F,Cowles J M.Biodiversity and ecosystem functioning[J].Annual Review of Ecology,Evolution, and Systematics,2014,45:471-493.
- [16]李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013(8):1379-1390.
- [17]刘慧敏,范玉龙,丁圣彦.生态系统服务流研究进展[J].应用生态学报,2016(7):2161-2171.
- [18]李慧杰,牛香,王兵,等.生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究——以武陵山区退耕还林工程为例[J].生态学报,2020(13):4316-4326.
- [19]姚小微,曾杰,李旺君.武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J].农业工程学报,2015(9):249-256.
- [20]马玥,姜琦刚,孟治国,等.基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J].农业机械学报,2016(1):297-303.
- [21]Costanza R,D' Arge R,de Groot R D,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [22]谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001(1):47-53.
- [23]Bian Z F,Lu Q Q.Ecological effects analysis of land use change in coal mining area based on ecosystem service valuing:A case study in Jiawang[J].Environmental Earth Sciences,2013,68(6):1619-1630.
- [24]王戈,于强,刘晓希,杨澜,等.包头市景观格局时空演变研究[J].农业机械学报,2019(8):192-199.

-
- [25]吴志丰,李月辉,布仁仓,等.呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价[J].生态学报,2013(15):4799-4807.
- [26]郭建国.景观生态学,格局、过程、尺度与等级(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [27]徐嘉兴,李钢,余嘉琦,等.煤炭开采对矿区土地利用景观格局变化的影响[J].农业工程学报,2017(23):252-258.
- [28]Šímová P,Gdulová K.Landscape indices behavior:A review of scale effects[J].Applied Geography,2012,34(5):385-394.
- [29]胡芳文,胡希军,罗紫薇,等.上杭县城区公园绿地景观格局动态分析[J].生态科学,2021(2):133-141.
- [30]李保杰,顾和和,纪亚洲.矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J].农业工程学报,2012(3):251-256.
- [31]戴靓,姚新春,周生路,等.长三角经济发达区金坛市土地生态状况评价[J].农业工程学报,2013(8):249-257,2.
- [32]韩增林,赵玉青,闫晓露,等.生态系统生产总值与区域经济耦合协调机制及协同发展——以大连市为例[J].经济地理,2020(10):1-10.
- [33]魏伟,石培基,魏晓旭,等.中国陆地经济与生态环境协调发展的空间演变[J].生态学报,2018(8):2636-2648.
- [34]周成,冯学钢,唐睿.区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测——以长江经济带沿线各省市为例[J].经济地理,2016(3):186-193.
- [35]吴连霞,赵媛,马定国,等.江西省人口与经济发展时空耦合研究[J].地理科学,2015(6):742-748.
- [36]王航,秦奋,朱筠,等.土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2017(4):1286-1296.
- [37]张琨,吕一河,傅伯杰.生态恢复中生态系统服务的演变:趋势、过程与评估[J].生态学报,2016(20):6337-6344.