



基于人地耦合协调的山水林田湖草一体化修复分区研究 ——以吉林省梨树县为例

王唯宇, 刘兆顺, 李 想, 李莹雪, 金欣悦

吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061

摘 要: 吉林省梨树县地处东北黑土平原腹地, 是黑土地保护的示范区域, 发挥着多种生态系统功能。基于土地利用类型、遥感影像等数据, 形成以小流域为基本单元的生态功能重要性、人类活动强度与生态系统服务价值耦合度等的聚类分析结果。根据分析结果, 将该区域分为 6 个生态修复单元, 分别为: 东辽河流域中游农田保护修复区; 南部生态保护修复区; 东南部水源涵养保护区; 西部防风固沙、人地协调保护修复区; 中西部水土保持、人地协调修复区; 中东部水源涵养修复区。在明确各分区主导生态环境问题的基础上分区施策, 提出水环境生态修复、增加水源涵养林等措施, 保证区域粮食安全, 为类似的生态修复研究提供参考。

关键词: 生态修复; 耦合协调度; 生态系统功能; 生态系统服务价值; 吉林省

INTEGRATED RESTORATION ZONING OF MOUNTAIN-RIVER-FOREST- FARMLAND-LAKE-GRASSLAND BASED ON MAN-LAND COUPLING COORDINATION: A Case Study of Lishu County in Jilin Province

WANG Wei-yu, LIU Zhao-shun, LI Xiang, LI Ying-xue, JIN Xin-yue

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: Lishu County of Jilin Province, located in the hinterland of Northeast China black soil plain, is a demonstration area for black land protection and plays multiple ecosystem functions. The cluster analysis results of ecological function importance, coupling degree of human activity intensity and ecosystem service value with small watershed as the basic unit are formed on the basis of data such as land use types and remote sensing images. According to the analysis results, the study area is divided into 6 ecological restoration units, including farmland protection and restoration area in the middle reaches of East Liaohe River Basin, ecological protection and restoration area in the south, water conservation area in the southeast, wind prevention and sand fixation and human-land coordinated protection restoration area in the west, soil water conservation and human-land coordinated restoration area in the central and western region, and water conservation restoration area in the central and eastern region. On the basis of clarifying the leading ecological and environmental problems in each unit, measures such as water environment ecological restoration and increasing water conservation forests are put forward to ensure the regional food security and provide references for similar ecological restoration study.

Key words: ecological restoration; coupling coordination degree; ecosystem function; ecosystem service value; Jilin Province

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-12-21. 编辑: 黄欣.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目“松嫩平原苏打盐碱化草地土壤有机碳对生物炭的响应机制”(20210101395JC).

作者简介: 王唯宇(1999—), 男, 硕士研究生, 土地经济与管理研究方向, 通信地址 吉林省长春市南关区博学路 3588 号, E-mail/wangweiyu512@163.com

通信作者: 刘兆顺(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土地生态经济研究, 通信地址 吉林省长春市二道区和顺街 46 号, E-mail/zhaoshun@jlu.edu.cn

0 引言

1940 年代以来,中国北部地区的植被由于气候变迁和长期大量的人类活动遭到严重破坏,为遏止该趋势,相关机构在水土保持等领域进行了大量实践,形成了一套治理水土流失的科学体系,并在此之上开展大规模的生态修复工作,取得了较好的效果,针对某一地区某一生态环境问题形成了较为完善且具借鉴意义的生态修复办法^[1]。生态修复分区就是以不同生态环境问题为依据,对目标区进行划分与合并,形成生态环境问题相对一致的几个分区,并根据该分区的生态环境问题制定相应的生态修复工程。早期的生态修复分区只注重单一地类的生态环境问题,比如对耕地质量进行分类然后制定相应的修复工程,缺少人文因素方面指标数据^[2]。随着“山水林田湖草生命共同体”等创新理念的引入,要求生态修复需要在生态环境方面统筹兼顾,充分考虑自然生态及人类生产生活等各种因素,对山水林田湖草生命共同体进行整体性保护、系统性修复和综合治理^[3-4]。这意味着前人以流域自然特征、生态系统各项指标为依据的生态修复分区方案可以被进一步优化^[5]。本次研究以小流域为研究的基本单元^[6],将人类活动强度与生态系统服务价值的耦合协调度作为人文因素纳入指标体系^[7],并在此基础上以梨树县域内具体生态问题为依据,构建更科学合理的生态修复分区方法,以期提供更科学的山水林田湖草生态系统一体化治理方案。

1 研究区概况

梨树县($43^{\circ}15'—43^{\circ}43'N$, $123^{\circ}45'—124^{\circ}53'E$)隶属于吉林省四平市,全县总面积 $3\,232\text{ km}^2$,总人口 72.16 万,其中城镇人口 18.93 万人,经济总量 158.1 亿元,是一个以农牧业为基础的农业县。县域内有东辽河、招苏台河、条子河等主要河流,流经县内总长 142.4 km ,其中东辽河环绕县境东、北、西北 3 面,流域面积 $2\,435\text{ km}^2$ 。梨树县人均水资源量 499.8 m^3 ,约为吉林省平均水平的 34.4%,是吉林省缺水县之一。梨树县地处松辽平原的低海拔地区,整体呈现出东南高、西北低的特征,东南边多低山丘陵,中部发育一片宽阔的河谷,北边沿东辽河发育冲积平原。梨树县土壤类型主要有两种,其中分布在南部的主要为黑土,分布在北部的为淡黑钙土、砂碱土。根据第三次全国国土调查的

数据,梨树县的生态系统类型可分为 6 类(图 1):聚落生态系统,占总面积的 6.43%;湿地生态系统,占总面积的 1.59%;森林生态系统,占总面积的 7.27%;草地生态系统,占总面积的 0.19%;农田生态系统,占总面积的 84.32%;其他生态系统,占总面积的 0.20%。

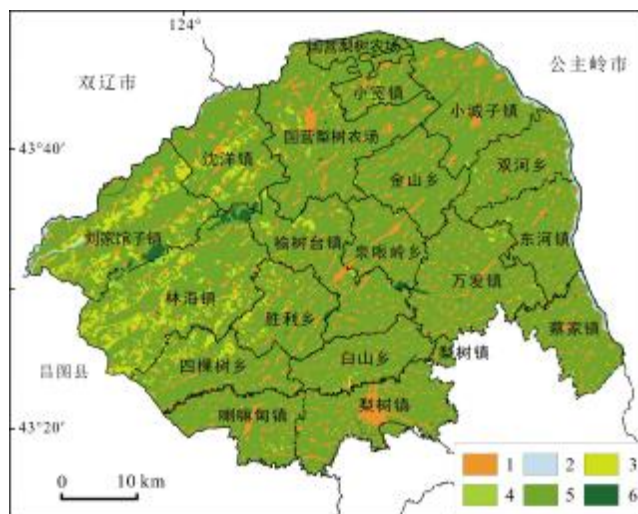


图 1 梨树县生态系统分布图

Fig. 1 Distribution map of ecosystem in Lishu County

1—聚落生态系统 (settlement ecosystem); 2—湿地生态系统 (wetland ecosystem); 3—森林生态系统 (forest ecosystem); 4—草地生态系统 (grassland ecosystem); 5—农田生态系统 (farmland ecosystem); 6—其他生态系统 (other ecosystem)

2 数据来源

本文使用的遥感数据包括 Landsat 8 遥感影像数据、数字高程模型 (DEM) 遥感影像数据,均来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/search>),空间分辨率为 30 m ;植被净初级生产力 (NPP) 数据来源于美国航天局网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率为 1 km ;气候气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),包括研究区及周边气象站点的降水量、气温、风速、太阳辐射度等;土地利用数据来自梨树县自然资源局第三次全国国土调查矢量数据 (2019) 和 2021 年末变更数据库;土壤数据包括土壤质地、土壤类型,来自中国 $1:100\text{ 万}$ 土壤数据库及世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.2);其他数据均来自梨树县 2019—2021 年统计年鉴。

3 研究方法

3.1 小流域划分

基于 DEM 数据,采用 ArcGIS 10.8 软件提取地形特征划分小流域. 首先对研究区的 DEM 数据进行填洼处理,然后计算河流流向、流量,生成集水面积和河网水系,最后通过河流链接和分水岭的确定得到小流域的栅格图,将栅格数据用自然断点法划分为 15 个级别,作为小流域的划分结果. 以上操作均在 ArcGIS 软件中的水文分析模块中完成^[8].

3.2 生态系统功能重要性评价

生态系统功能重要性是确定生态修复目的的基本依据,反映出当地生态环境的本底状况^[9-10]. 本文按照研究区的主体功能区划、市级生态功能区划结果以及

当地实际,选取水源涵养功能重要性、水土保持功能重要性、生物多样性保护功能重要性和防风固沙功能重要性 4 项指标对生态功能重要性进行分析,以充分反映区域生态功能空间分异状况.

3.2.1 水源涵养功能重要性

水源涵养是指生态系统通过其特有的结构与水相互作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控^[11]. 计算公式如下:

$$WR=NNP_{mean}\times F_{sic}\times F_{pre}\times (1-F_{slo}) \tag{1}$$

式中:WR 为生态系统水源涵养服务能力指数;NNP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值;F_{sic} 为土壤渗流因子,来源于土壤栅格数据;F_{pre} 为多年平均降雨量因子;F_{slo} 为坡度因子(如图 2 所示).

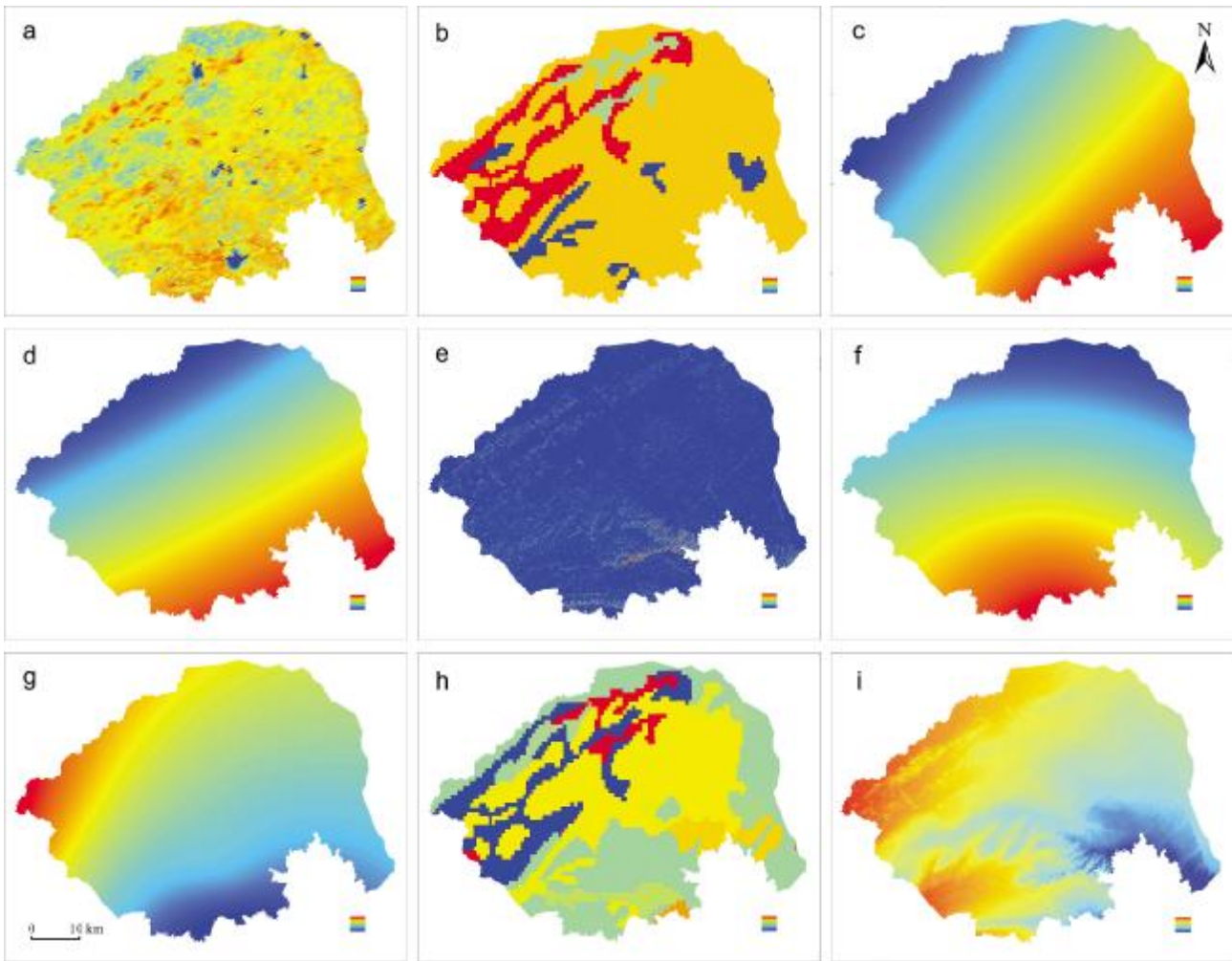


图 2 生态系统功能重要性评价因子量化结果

Fig. 2 Quantitative results of ecosystem function importance evaluation factors

a—多年植被净初级生产力平均值(average of multiyear vegetation net primary productivity); b—土壤渗流因子(soil seepage factor); c—多年平均降水量(multiyear average precipitation); d—降水侵蚀力(precipitation erosivity); e—地表粗糙度(surface roughness); f—年均气温(average annual temperature); g—气候侵蚀度(climate erosion degree); h—土壤侵蚀因子(soil erosion factors); i—海拔因子(altitude factor)

3.2.2 水土保持功能重要性

水土保持是生态系统通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用,是生态系统提供的重要调节服务之一.水土保持功能主要与气候、土壤、地形和植被有关.计算方法如下^[12]:

$$S_{pro} = NNP_{mean} \times (1-K) \times (1-F_{slo}) \quad (2)$$

式中: S_{pro} 为水土保持服务能力指数; K 为土壤可蚀性因子, K 值的计算方式参考了 Williams 于 1995 年在 EPIC 模型中的设计思路^[13].

3.2.3 生物多样性保护功能重要性

生态系统的维持多样性功能,指的是生态系统在基因保持以及生态多样性维护等领域中发挥的作用.其计算方法如下^[14]:

$$S_{bio} = NNP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1-F_{alt}) \quad (3)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数, F_{tem} 为多年平均气温, F_{alt} 为海拔因子.

3.2.4 防风固沙功能重要性

防风固沙指的是森林或草地等一系列生态系统利用自身结构以及方式来避免土壤受到风蚀的不良影响^[15].计算方法如下:

$$S_{ws} = NNP_{mean} \times K \times F_q \times D \quad (4)$$

式中: S_{ws} 为防风固沙服务能力指数; F_q 为多年平均气候侵蚀力因子^[16]; D 为地表粗糙度因子,其计算方法是在 ArcGIS 栅格计算器中对坡度(θ)进行计算,计算公式为 $D = 1/\cos(\frac{\theta\pi}{180})$.

3.3 生态系统服务价值与人类活动强度耦合协调度

在当前生态保护的大背景下,如何找到土地利用和生态保护的平衡点成为了重点及难点.在以往山水林田湖草生态保护修复分区研究中,一般都采用生态系统功能重要性等生态指标作为划分依据^[17].若想更科学地对山水林田湖草进行分区规划就必须将人文因素纳入到考量范围内.人类活动与生态系统两者耦合协调度体现了土地利用和生态保护之间的协调关系,将其纳入到修复分区的研究中显得十分必要.

3.3.1 生态系统服务价值

生态系统服务价值(ESV)是量化生态系统服务的最常用指标,是生态系统对人类价值的直观体现,可采用当量法对其进行测算.已有研究表明,单位生态系统服务价值当量因子的经济价值为当年平均粮食单产

市场价值的 $1/7$ ^[18].结合研究区粮食种植面积、产量和市场平均价格,计算公式如下:

$$G = \frac{1}{7} \times GY \times UP \quad (5)$$

式中: G 为单位当量因子的价值; GY 表示研究区粮食平均产量,梨树县粮食平均产量为 $1\,492\,267\text{ kg/hm}^2$; UP 表示粮食平均价格,梨树县粮食价格为 2.76 元/kg .

每个小流域生态系统服务价值都为不同生态系统的 ESV 进行求和计算而得的,具体公式如下.

$$ESV_m = \sum VC \times A_n \times G \quad (6)$$

$$ESV = \sum ESV_m \quad (7)$$

式中: ESV_m 是每一项的生态系统服务价值, VC 是生态系统服务的单位面积价值系数(表 1), A_n 是每类用地的面积, ESV 是生态系统服务的总价值.

3.3.2 人类活动强度

人类活动在生态系统的变化中发挥着重要作用,驱动着自然生态系统不断向半自然或人工生态系统演化. Yan 等^[19]基于人类活动对生态系统的干扰程度,提出了人类活动强度量的化方法,得到了广泛的认可及应用.因此,本研究采用该方法计算梨树县人类活动强度.计算公式为:

$$HAI = \sum CY_n \times P_n \times 100 \quad (8)$$

式中: HAI 为人类活动强度,值越大,表明人类活动强度越高,即人类活动对生态系统的干扰强度也就越强,反之则越弱; CY_n 为 n 类用地的人为干扰等级,根据自然环境中人为干扰的程度,将土地利用类型划分为 4 个等级^[20-21],即 1 级(未利用地)、2 级(林地、草地、水域和湿地)、3 级(耕地)、4 级(建设用地); P_n 为 n 类用地的面积比例.

3.3.3 耦合协调度模型

耦合是两个或多个系统相互作用的物理概念,耦合分析是衡量一个系统对另一个系统的依赖程度^[21],比如应用于研究土地利用方式与生态环境或城市化与生态系统服务之间的关系^[22].在本研究中,应用耦合分析来探索梨树县生态系统服务价值与人类活动之间的相互作用及联系的程度.简化后的计算公式为:

$$C = \frac{2\sqrt{ESV \times HAI}}{ESV + HAI} \quad (9)$$

表 1 生态系统服务的单位面积价值系数表

Table 1 Unit area value coefficients of ecosystem service

服务功能 生态系统	一级分类	耕地		森林			草地	水域
	二级分类	旱地	水田	乔木林地	灌木林地	其他林地	其他草地	水系
供给服务	食物生产	0.85	1.36	0.29	0.19	0.31	0.38	0.66
	原料生产	0.4	0.09	0.66	0.43	0.71	0.56	0.37
	水资源供给	0.02	-2.63	0.34	0.22	0.37	0.31	5.44
调解服务	气体调节	0.67	1.11	2.17	1.41	2.35	1.97	1.34
	气候调节	0.36	0.57	6.5	4.23	7.03	5.21	2.95
	净化环境	0.1	0.17	1.93	1.28	1.99	1.72	4.58
	水文调节	0.27	2.27	4.74	3.35	3.51	3.82	63.23
支持服务	土壤保持	1.03	0.01	2.65	1.72	2.86	2.4	1.62
	维持养分循环	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.12
	生物多样性	0.13	0.21	2.41	1.57	2.6	2.18	5.21
文化服务	美学景观	0.06	0.09	1.06	0.69	1.14	0.96	3.31

式中： C 为生态系统服务价值与人类活动强度之间的耦合度，取值在 0~1 之间，值越大表明两者之间相互作用的程度越高。采用最小-最大标准化方法^[23]对生态系统服务价值和人类活动强度进行标准化。由于耦合分析并不能充分反映生态系统服务与人类活动在发展过程中是否协调，引入耦合协调度作为衡量生态系统服务与人类活动协调程度的量化指标。公式如下：

$$E=\sqrt{C\times T}$$
 (10)

$$T=\alpha ESV+\beta HAI$$
 (11)

式中： E 为生态系统服务价值与人类活动强度之间的耦合协调度，取值在 0~1 之间，值越大表明两者越趋于协调发展； T 为两者综合评价指数； α 、 β 分别表示生态系统服务价值与人类活动强度的重要程度，结合已有研究，确定两者同等重要，即 $\alpha=\beta=0.5$ 。参考前人研究成果^[24]将耦合协调度划分为 10 种类型(表 2)。

3.4 生态修复分区划定

K-means 聚类分析法是基于划分的聚类算法中较为经典的一种数据处理方式^[25]。生态保护修复分区要考虑自然生态系统的一致性和整体性，从而确保生态保护修复工程实施的可操作性。基于小流域从属关系、生态功能重要性、耦合等级等 3 类 7 个指标进行聚类分析(表 3)，采用 SPSSPRO 平台进行聚类分析^[26]。

表 2 耦合协调度等级分类及类型

Table 2 Classification and types of coupling coordination degree

协调程度	耦合协调度	耦合协调类型
失调衰退	0~0.1	极度失调
	0.10~0.20	严重失调
濒临失调	0.20~0.30	中度失调
	0.30~0.40	轻度失调
勉强协调	0.40~0.50	濒临失调
	0.50~0.60	勉强协调
基本协调	0.60~0.70	初级协调
	0.70~0.80	中级协调
高度协调	0.80~0.90	良好协调
	0.90~1.00	高度协调

K-means 算法的具体步骤如下：1)在样本集中随机选取 n 个样本作为 n 个簇的初始中心；2)计算各个样本点到各聚类中心的距离，并将其归于距离最近的簇；3)更新各个簇的中心向量；4)判断各个簇心是否变化，如变化则转到步骤 2，否则停止算法并输出聚类中心。

表 3 聚类分析指标体系表
Table 3 Index system of cluster analysis

指标类型	指标
小流域从属	东辽河流域
	招苏台河流域
生态功能重要性	防风固沙
	生物多样性保护
	水源涵养
	水土保持
耦合协调度	耦合协调类型

4 结果与分析

4.1 小流域单元分布

在进行生态修复分区时,为了保护地形特征的完整性,以及自然与社会特征的协同性和层次性^[27],通过 DEM 提取地形特征划分小流域生态功能分区单元,最终获得 15 个小流域单元(表4、图 3)。

表 4 流域划分结果表
Table 4 Results of watershed division

流域 编号	流域面积/ km ²	流域 编号	流域面积/ km ²	流域 编号	流域面积/ km ²
①	554.0358	⑥	45.7846	⑪	100.2569
②	81.4292	⑦	844.2557	⑫	68.1513
③	22.1093	⑧	180.9415	⑬	68.6457
④	36.6328	⑨	507.8951	⑭	124.3544
⑤	249.0919	⑩	38.6121	⑮	46.0331

4.2 生态系统功能重要性评价

在划分生态功能分区单元的基础上,进一步对研究区水源涵养、水土保持、生物多样性和防风固沙 4 种生态系统功能重要性进行定量评估,分为极重要、重要、一般重要 3 个等级(表 5)。

防风固沙重要性方面,从栅格数据来看,梨树县临近科尔沁沙地全域防风固沙重要性几乎都处在一般重要等级(图 4a),面积为 2 723.22 km²,占整个县域面积的 91.8%,由此可见梨树县防风固沙功能整体较好。对照地类图斑及其占整体面积的比重可知,大多数盐碱地防风固沙重要性都处在极重要等级,说明对于吉林省西部而言,治理盐碱地是生态修复的重中之重。

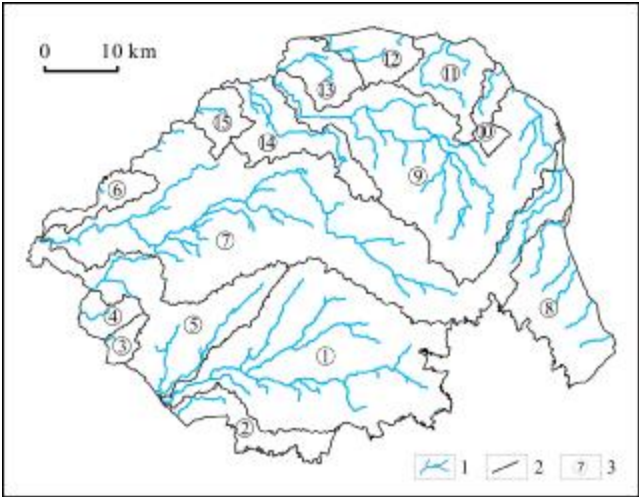


图 3 梨树县小流域空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution map of small watersheds in Lishu County

1—河网(river network); 2—小流域边界(boundary of small watershed);
3—小流域编号(number of small watershed)

生物多样性保护功能重要性方面,梨树县以一般重要为主(图 4b),面积 1 492.59 km²,占整个县域面积的 50.37%。生物多样性保护极重要地区主要分布在梨树县南侧,招苏台河流域范围内,这个区域生物多样性维护显得尤为重要,原因是人类活动相对较为密集,使得生物多样性有所降低。

水土保持功能重要性方面,梨树县 3 个等级所占面积相当,但是呈现出中间低四周高的布局(图 4c),对照梨树县水系图可知,在水系相对密集的梨树县周缘,土壤侵蚀能力较强,主要原因在于农业开发密度较大,人类活动相对密集。

水源涵养功能重要性方面,极重要区域面积为 1 252.89 km²,占总面积的 42.38%,主要分布在梨树县的东南部(图 4d)。此区域内人类活动频繁,水量较高,而建设用地表面硬化,渗水率低;而在西北侧乔木林地覆盖率相对较高,对地表径流的截留作用强,所以水源涵养相对较好。

4.3 ESV 与人类活动强度耦合

4.3.1 生态系统服务价值

根据梨树县的生态系统构成、基础当量表和标准当量生态服务价值($G=5880.5999$ 元),计算出 2020 年梨树县内 15 个小流域各生态系统的 ESV,计算结果如表 6 所示。

表 5 梨树县生态功能重要性分级及面积统计表

Table 5 Classification and area statistics of ecological function importance in Lishu County

重要性分级	水源涵养/km ² (占比)	水土保持/km ² (占比)	防风固沙/km ² (占比)	生物多样性/km ² (占比)
极重要	937.0584 (31.70%)	838.449 (28.36%)	2723.2182 (92.11%)	620.6103 (20.99%)
重要	766.4426 (25.92%)	1109.2176 (37.52%)	113.6646 (3.85%)	849.8745 (28.75%)
一般重要	1252.8936 (42.38%)	1020.6937 (34.52)	129.5118 (4.38%)	1492.5888 (50.49%)

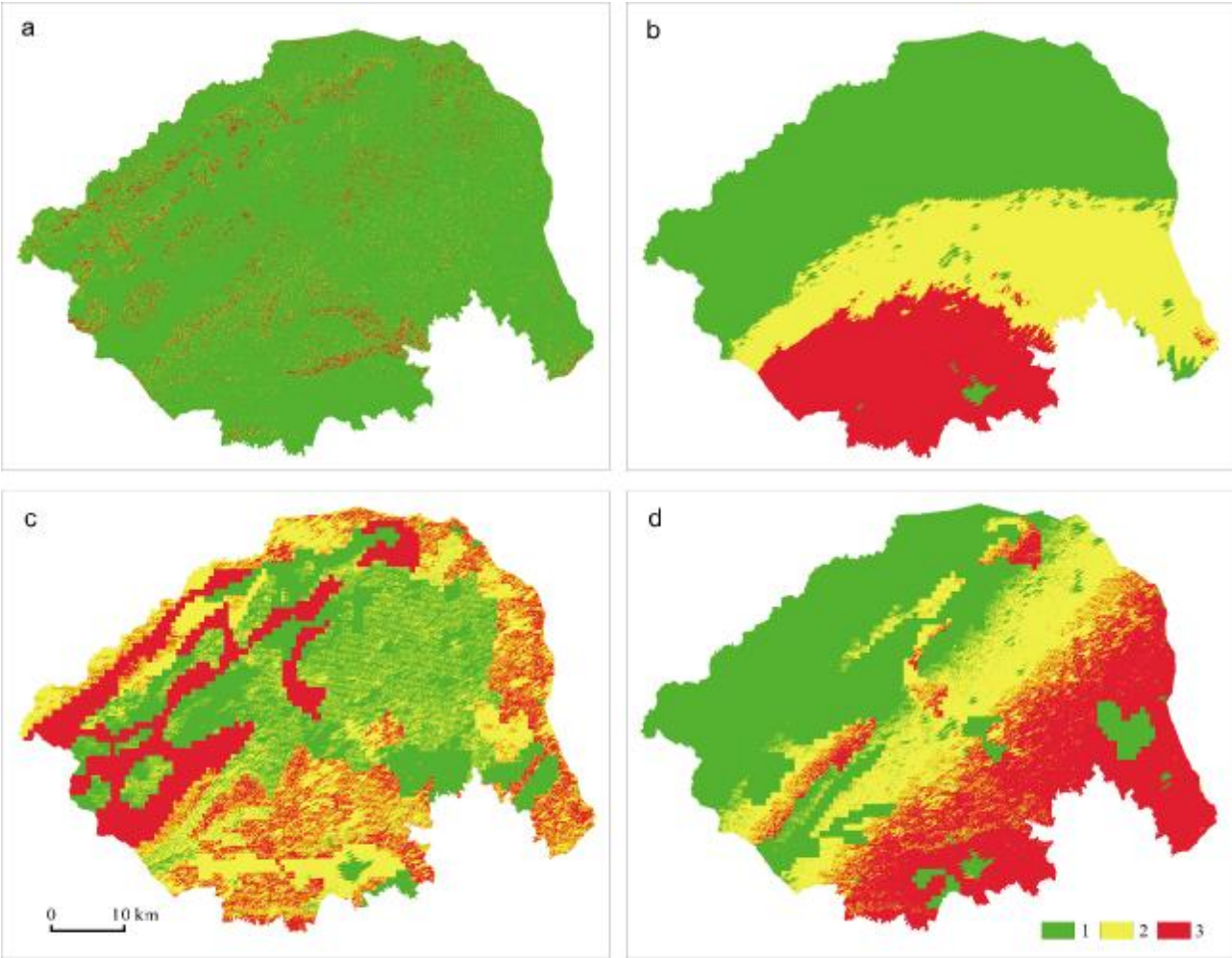


图 4 生态系统功能重要性评价等级分布图

Fig. 4 Distribution of importance level by ecosystem function evaluation

a—防风固沙功能(wind prevention and sand fixation); b—生物多样性保护功能(biodiversity conservation); c—水土保持功能(soil and water conservation); d—水源涵养功能(water conservation); 1—一般重要(generally important); 2—重要(important); 3—极重要(very important)

4.3.2 人类活动强度

通过计算得到人类活动强度(HAI),如表 7 所示,可见各个小流域内相差并不多:活动强度最大的是小流

域①,强度为 256.54,人类对其影响程度最为明显;最小的是流域④,强度为 245.31,人类对其影响是最小的.

表 6 梨树县各小流域生态系统 ESV 统计表

Table 6 ESV statistics of small watershed ecosystems in Lishu County

小流域编号	供给服务	调解服务	支持服务	文化服务	合计
①	2.1406	20.3729	2.3234	0.9391	25.7759
②	0.3238	3.0819	0.3519	0.1421	3.8997
③	0.0735	0.7069	0.0918	0.0337	0.9059
④	0.1211	1.1668	0.1520	0.0558	1.4957
⑤	0.8925	8.5555	1.0499	0.4020	10.8999
⑥	0.1578	1.5329	0.1855	0.0718	1.9480
⑦	3.2560	31.2414	3.6592	1.4503	39.6069
⑧	0.7347	6.9956	0.7884	0.3215	8.8401
⑨	2.0304	19.5390	2.2156	0.8997	24.6851
⑩	0.1561	1.4856	0.1677	0.0683	1.8777
⑪	0.3949	3.8092	0.4286	0.1750	4.8078
⑫	0.2516	2.6617	0.2877	0.1214	3.3224
⑬	0.2423	2.6756	0.2858	0.1218	3.3255
⑭	0.4642	4.7729	0.5309	0.2191	5.9871
⑮	0.1729	1.6743	0.1956	0.0777	2.1205

单位:亿元.

表 7 梨树县各小流域人类活动强度统计表

Table 7 Statistics of human activity intensity in small watersheds of Lishu County

流域编号	人类活动强度	流域编号	人类活动强度	流域编号	人类活动强度
①	256.5438	⑥	250.069	⑪	255.0949
②	255.2882	⑦	251.3688	⑫	253.5761
③	245.7917	⑧	254.344	⑬	253.8434
④	245.3053	⑨	253.6553	⑭	252.4991
⑤	249.4269	⑩	254.1903	⑮	251.5656

4.3.3 耦合结果

由于研究区域以及保护流域形态结构的限制,在计算耦合协调度的时候,小流域的面积大小可能会对计算结果产生一些影响^[28].为了消除这部分影响,计算出每个小流域每平方米平均生态系统服务价值进行耦合度计算(表 8),可以有效消除流域面积大小对结果的影响^[29].根据耦合协调度的计算可以得到每个小

流域的耦合协调程度(图 5),可见梨树县整体协调度等级从西至东逐渐变高,协调度高的地区生态系统服务与人类活动强度的发展水平较高,形成了较好的空间协同作用,促进了系统的良性发展^[30].但是在小流域③④等区域耦合协调度并不高,说明区内生态系统服务价值较低,但人类活动强度高,反映其对生态系统服务形成了较强的胁迫效应.

表 8 梨树县各小流域耦合协调程度统计表

Table 8 Statistics of coupling and coordination degree of small watersheds in Lishu County

流域编号	协调等级	耦合协调程度	流域编号	协调等级	耦合协调程度	流域编号	协调等级	耦合协调程度
①	10	优质协调	⑥	6	勉强失调	⑪	10	优质协调
②	10	优质协调	⑦	8	中级协调	⑫	10	优质协调
③	2	严重失调	⑧	10	优质协调	⑬	10	优质协调
④	2	严重失调	⑨	10	优质协调	⑭	9	良好协调
⑤	7	初级协调	⑩	10	优质协调	⑮	8	中级协调

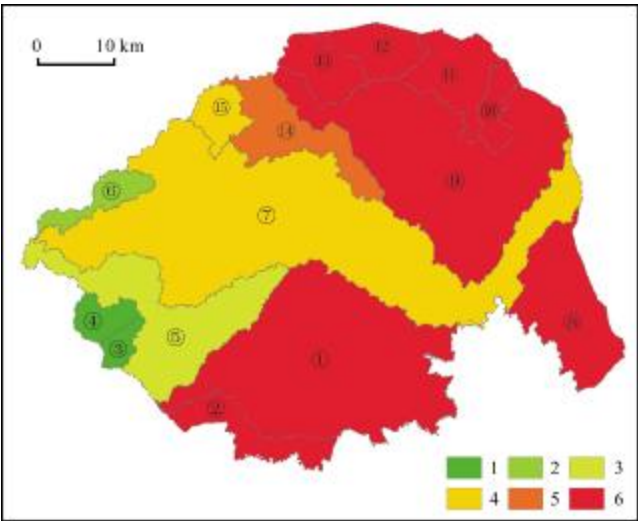


图 5 梨树县各小流域耦合协调等级分布图

Fig. 5 Distribution map of coupling coordination level of small watersheds in Lishu County

1—严重失调 (serious imbalance); 2—勉强失调 (bare imbalance); 3—初级协调 (primary coordination); 4—中级协调 (intermediate coordination); 5—良好协调 (good coordination); 6—优质协调 (high quality coordination)

4.4 聚类分析结果图

按照 K-means 的聚类分区方法,通过所有样本到类别中心距离的平方和(误差平方和)可知,当聚类数

为5时聚类分析的效果最佳,因此将15个小流域分为5个聚类(图6):聚类i包括⑨⑩⑪⑫⑬这5个小流域,位于梨树县的东北部,该区域耦合协调度高,防风固沙、水源涵养、水土保持、生物多样性重要性都较低;聚类ii包括小流域③④,该区域耦合协调度极低,水土保持重要性极重要;聚类iii包括小流域①②⑧,位于梨树县南部,该区域耦合协调度高,水源涵养重要性极重要,生物多样性保护重要性极重要;聚类iv包括小流域⑤⑥,该区域耦合协调度低,水土保持重要性极重要;聚类v包括小流域⑦⑭⑮,耦合协调度中等,水土保持重要性极重要。

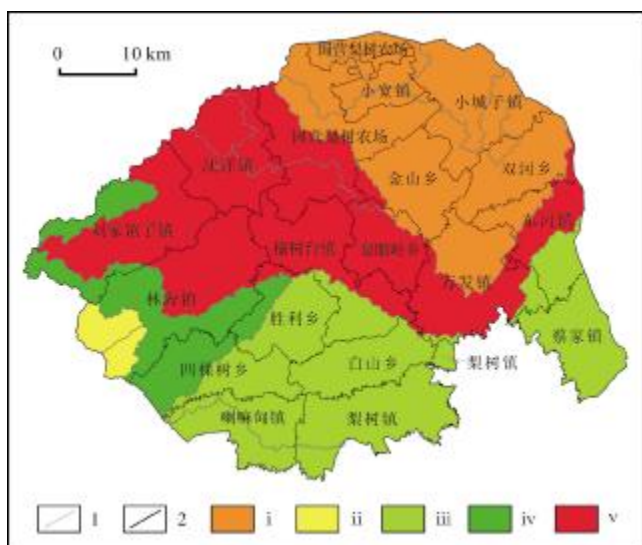


图6 流域聚类结果与行政区划关系图

Fig. 6 Relationship between watershed clustering result and administrative division

1—小流域边界(boundary of small watershed); 2—乡镇界(boundary of town); i、ii、iii、iv、v—聚类编号(cluster number)

4.5 生态保护修复单元划分

研究区属于东辽河和招苏台河两个流域,划分的15个小流域跨越多个行政区,因此在生态保护修复分区时,要以整体性、系统性为原则^[5],将行政区边界考虑到修复分区中以便于修复工程的实施.将上述聚类结果与行政区套合得到生态修复区划分结果(图7)。

根据对各个分区指标的评价,在进行山水林田湖草生态保护修复的过程中,秉持“找准核心问题,进行综合整治”的原则^[31],充分研究区考虑生态系统资源特性,明确各区主导生态环境问题,在保持自身稳定性的同时采用基于自然的解决方案^[32],将治理目标定位

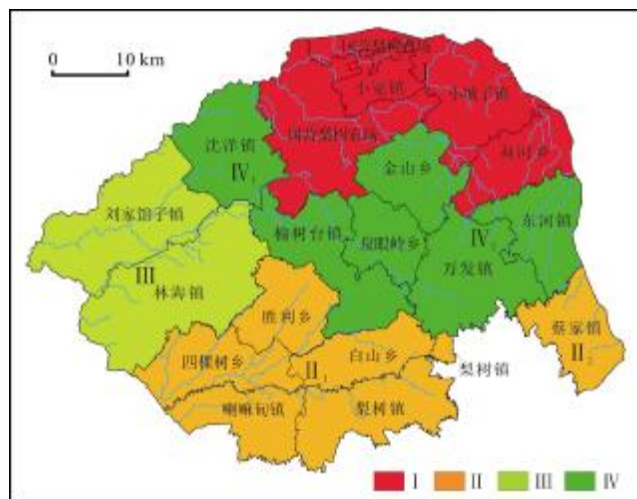


图7 梨树县生态保护分区图

Fig. 7 Zoning map of ecological protection in Lishu County
I、II、III、IV—修复单元编号(number of restoration unit)

为:优化水环境,治理土地沙化增强水土保持能力,减缓草原退化提升水源涵养能力,提高动植物栖息地质量,提高森林生态服务多元化,基本消除突出的生态问题.根据人地耦合协调度的不同,适当调整人类对土地的干预,使“社会-经济-生态”协同发展^[33],将4个生态修复分区细化为6个修复单元,有重点地分区施策(表9)。

单元I:该区位于梨树县北部,地势平坦以平原为主,土壤肥沃,河流沟渠众多,适宜耕作,土地利用类型以耕地和建设用地为主,梨树县大多数水田都在这一区域.该区域人地关系良好,生物多样性、水土保持、水源涵养、防风固沙能力都较优,可以作为大力发展农业的极佳区域,以黑土地为核心开展农田综合治理,大力推广“梨树模式”,加强农田基础设施建设,推进农机化.生态修复方面可加强东辽河流域水环境综合治理,实施农业面源阻隔带建设、人工湿地建设、生态护岸和垫层建设,以及现有河道内水工构筑物的生态化改造等水体整治和生态保护及生态景观提升,统筹推进水资源管理、水污染防治、地下水位恢复、河流生态补水,恢复河道生态功能,改善水生态环境。

单元II:该区位于梨树县南部,大部分在招苏台河流域内,主要土地利用类型为耕地和建设用地.招苏台河南部是梨树县主城区,城镇过度开发和周边生态用地减少导致生物多样性急剧下降,水资源污染,水源涵养能力欠佳.该区域应该加快城镇水环境生态修

表 9 梨树县生态保护分区结果

Table 9 Zoning results of ecological protection in Lishu County

修复分区编号	修复单元编号	单元名称	面积/km ²	占比/%	行政单元
I	I	东辽河流域中游农田保护修复区	812.2102	27.36	国营梨树农场、小宽镇、双河乡、金山镇、小城子镇
	II ₁	南部生态保护修复区	689.5535	23.22	胜利乡、四棵镇、喇嘛甸镇、梨树镇、白山镇
II	II ₂	东南部水源涵养保护区	120.2910	4.05	蔡家镇
	III	西部防风固沙、人地协调保护修复区	559.8334	18.84	刘家馆子镇、林海镇
III	IV ₁	中西部水土保持、人地协调修复区	451.9569	15.21	沈洋镇、榆树台镇
	IV ₂	中东部水源涵养修复区	334.4581	11.25	泉眼岭乡、万发镇、东河镇
IV					

复,提高水资源利用效率.以建成区为重点区域,以招苏台河两岸及公园绿地为核心,建设绿色基础设施网络,提升人居环境.适当增加生态空间,将生物多样性维护作为重点整治对象.合理使用农药、化肥、农用地膜等农业投入品,大力推动秸秆还田、有机肥增施、测土配方施肥,维护土壤地力,保障粮食产量的同时也可以缓解生物多样性减少的局面.

单元 II₂:该区位于梨树县东南部,位于东辽河中游,平均海拔较其他地区稍高,地势南高北低,以山前平原为主,土地利用类型主要为耕地.建议加强水源涵养林建设,防治水土流失.植树造林、优化种植业结构、加强城镇基础设施建设,建设形成以水土保持、水源涵养、用材为主的复合林,辅以生态经济兼用林和林下经济,全面保护和增加林草植被,提升生态系统水源涵养和水土保持能力.

单元 III:该区位于梨树县西部,是科尔沁沙地东边缘、东辽河上游,土地利用类型以耕地和林地为主,人类活动强度高但生态系统服务价值低,生态环境较为脆弱,土地盐碱化严重,防风固沙、水土保持迫在眉睫.该区域应该推进防风固沙林建设,加强生态屏障作用,阻止科尔沁沙地东移.此区域不宜大量开发建设用地,应以保护天然次生林、提高植被覆盖度为主,推广新型节水灌溉方式和节水技术,合理调配生活、生产和生态用水,提高水资源利用效率,加强盐碱地综合治理与改良.

单元 IV₁:该区位于梨树县中西部,处在科尔沁沙地影响的边缘,地形平坦,土地利用类型以耕地为主.该区应该推进农田综合整治,控制水土流失,开展农田

防护林、水土保持林建设,将水土流失严重区域的坡耕地退耕还林还草.因靠近盐碱地沙化区域,应加强土壤生态风险监测预警能力建设.

单元 IV₂:位于梨树县中西部,该区域应该提高农业用水效率,推进高效节约用水,优化水资源配置结构,保障水资源供需平衡.

5 结论与讨论

“山水林田湖草”生命共同体理念下的生态一体化修复是指在一定区域范围内,为提升生态系统自我恢复能力,增强生态系统稳定性,促进自然生态系统质量的整体改善和生态产品供应能力的全面增强,采用基于自然的解决方案,对受损、退化、服务下降的生态系统进行整体保护、系统修复、综合治理的过程和活动^[33].传统的生态修复是对单一国土空间要素进行治疗,没有考虑到整体保护以及系统修复,因此对构建山水林田湖草治理体系和治理能力的支撑力度不够.开展修复分区研究是山水林田湖草生态保护修复工程的前提^[34].我国对生态保护修复分区的研究起步较晚,但是发展十分迅速.在研究初期根据自然生态系统的差异性,将全国划分成不同的生态区,在此之后根据生态环境现状、生态功能重要性、生态系统敏感性等方面的定量评价对生态功能分区进行了完善^[35],但是对于生态环境中的人地关系研究还有不足之处,在生态保护修复分区的实践中必须考虑人文因素^[7].

本文以“山水林田湖草”一体化生态保护为基本原则,根据研究区的生态功能差异,基于自然地理区域的分布,明确各区主导生态环境问题,综合考虑梨树县区

域功能定位、社会发展情况以及行政区的完整性,开展生态修复分区研究。

1)根据地形和水系特征,统筹山水林田湖草各种要素,将梨树县分为15个小流域。

2)生态系统功能重要性评价结果:水土保持极重要等级分布在梨树县四周,呈现出中间低四周高的布局;生物多样性极重要等级分布在梨树县南部招苏台河流域,也是人类活动相对密集的区域;水源涵养极重要等级分布在梨树西南部;防风固沙重要性在梨树县整体等级都很高。

3)以小流域为基础的生态系统服务价值与人类活动强度协调度,从西到东呈现出从不协调到协调的趋势。

4)根据行政区区划对聚类分析结果进行调整,得到4个生态修复分区,再根据治理目标将梨树县分为6个修复单元,有重点地分区施策:东辽河流域中游为农田保护修复区,南部为生态保护修复区,东南部为水源涵养保护区,西部为防风固沙、人地协调保护修复区,中西部为水土保持、人地协调修复区,中东部为水源涵养修复区。

本研究的创新点在于将人地耦合协调度纳入到生态修复分区的指标体系之中,通过计算人地关系耦合协调度来表示人类活动强度对土地的影响,在修复分区时可以更好地看出人类活动对每个区域的影响程度,基于自然的解决方案更容易精准落位,使得分区结果更科学,为修复工程提供了理论基础。

本文的局限性是:1)没能考虑生态系统的时空演变规律,应该从地类变化的时空演变规律加以分析,这样可以得出更具针对性的分区结果^[6];2)虽然对山水林田湖草等地类进行了统筹考虑,对于梨树县生态修复分区有一定的实践意义,但没有考虑这些地类之间的交互影响机制,在未来的研究中应该更具针对性地对生态问题的重点难点进行探究;3)在论文数据搜集和计算过程中,大多采用了栅格数据,并没有精度检验,可能导致数据的精度不够高,在一定程度上可能会影响分区结果。在今后的研究当中,如何获取高精度数据或者通过计算提高栅格精度也是值得思考的问题。

参考文献(References):

[1]陈清清. 基于生态安全格局的国土空间生态修复策略研究——以滨

州市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

Chen Q Q. Research on territorial space ecological restoration strategies based on ecological security patterns: A case study of Binzhou City[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[2]曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10.

Cao Y, Wang J Y, Li G Y. Ecological restoration for territorial space: basic concepts and foundations[J]. China Land Science, 2019, 33(7): 1-10.

[3]彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.

Peng J, Lyu D N, Dong J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 3-13.

[4]付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区——以山西汾河上游为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(5): 1225-1239.

Fu Y J, Shi X Y. Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(5): 1225-1239.

[5]孙传淳, 王梓辰, 李景刚, 等. 基于生态系统多维特征的粤港澳大湾区国土空间生态保护修复分区研究[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 2061-2073.

Sun C Z, Wang Z C, Li J G, et al. Ecological protection and restoration zoning of territorial space in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on multidimensional ecosystem features [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2061-2073.

[6]王静雅. 若尔盖县山水林田湖草生态保护修复分区划定及对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

Wang J Y. Study on the zoning and countermeasures of ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasses in Zoige County[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.

[7]郭琛, 何贞铭, 刘华东. 黄河流域生态系统服务与人类活动强度耦合协调的时空动态及影响因素[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 82-89.

Guo C, He Z M, Liu H D. Spatial and temporal dynamics and influencing factors of the coupling coordination between ecosystem services and human activity intensity in the Yellow River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(4): 82-89.

[8]王福岭, 吴鹏, 郭子琦. 以小流域为单元的水土流失强度评估[J]. 中国水土保持, 2023(1): 44-47.

Wang F L, Wu P, Guo Z Q. Assessment of soil and water loss intensity based on the small watershed unit[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(1): 44-47.

- [9]吴英迪, 蒙古军. 中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 17-33.
- Wu Y D, Meng J J. Quantifying the spatial pattern for the importance of natural resource ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 17-33.
- [10]赵海乐, 徐艳, 周翼, 等. 生态空间定量识别及时空演变特征分析——以呼伦贝尔市为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(8): 2153-2168.
- Zhao H L, Xu Y, Zhou Y, et al. Quantitative identification and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of ecological space: A case study of Hulun Buir City [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(8): 2153-2168.
- [11]周雪彤, 孙文义, 穆兴民, 等. 1990—2020 年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9844-9855.
- Zhou X T, Sun W Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9844-9855.
- [12]Zhang M Y, Zhang L, He H L, et al. Improvement of ecosystem quality in National Key Ecological Function Zones in China during 2000—2015[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116406.
- [13]饶良懿, 徐也钦, 胡剑汝, 等. 砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4): 763-773.
- Rao L Y, Xu Y Q, Hu J R, et al. Study on soil erodibility factor K on soil cover area of Pisha sandstone region [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4): 763-773.
- [14]李月臣, 刘春霞, 闵婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 168-178.
- Li Y C, Liu C X, Min J, et al. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 168-178.
- [15]杨帆, 李纯斌, 吴静, 等. 基于生态系统服务功能重要性及生态敏感性分析的生态空间分布与保护方向研究[J]. 国土与自然资源研究, 2020(5): 19-25.
- Yang F, Li C B, Wu J, et al. Research on ecological spatial distribution and conservation direction based on the analysis of ecosystem service function importance and ecological sensitivity [J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(5): 19-25.
- [16]陈谢扬, 李同昇, 朱炳臣, 等. 基于自然地理区的生态调节功能重要性评价及主导因子识别——以陕西省为例[J]. 地理研究, 2023, 42(5): 1359-1377.
- Chen X Y, Li T S, Zhu B C, et al. Evaluation of the importance of ecological regulation function in Shaanxi Province based on physiographic regions and identification of dominant factors [J]. Geographical Research, 2023, 42(5): 1359-1377.
- [17]肖玖军, 吴凯, 张蓝月, 等. 云贵高原岩溶区生态系统服务功能重要性空间分异研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 332-342.
- Xiao J J, Wu K, Zhang L Y, et al. Spatial differentiation of importance of ecosystem services in Karst Area of Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 332-342.
- [18]谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [19]Yan H M, Liu F, Liu J Y, et al. Status of land use intensity in China and its impacts on land carrying capacity [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4): 387-402.
- [20]Sun Y X, Liu S L, Dong Y H, et al. Spatio-temporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem services with land use change in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 681: 211-225.
- [21]Liu N N, Liu C Z, Xia Y F, et al. Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses: A case study in China [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 1163-1175.
- [22]高志远, 程柳, 张小红. 黄河流域经济发展—生态环境—水资源耦合协调水平评价[J]. 统计与决策, 2022, 38(9): 123-127.
- Gao Z Y, Cheng L, Zhang X H. Evaluation of the economy-ecoenvironment-water resources coupling and coordination level of Yellow River Basin [J]. Statistics & Decision, 2022, 38(9): 123-127. (in Chinese)
- [23]赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 131-147.
- Zhao X Y, Du Y X, Li H, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 131-147.
- [24]吴隽宇, 朱榴奕. 生态系统环境—文化服务耦合视角下的珠江河口区生态功能分区[J]. 风景园林, 2023, 30(1): 85-93.
- Wu X Y, Zhu L L. Ecological function zoning of the Pearl River Estuary from the perspective of ecosystem environment cultural service coupling [J]. Landscape Architecture, 2023, 30(1): 85-93.
- [25]王莉萍, 王韞喆, 向欣, 等. 基于耿贝尔—线性矩和 K-means 算法的短时强降水等级划分研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(8): 3171-3184.
- Wang L P, Wang Y Z, Xiang X, et al. Research on classification of short-duration heavy rain based on Gumbel-linear moment and K means algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(8): 3171-3184.
- [26]刘泳昕. 基于 SPSS 分析的土地生态安全评价[J]. 农业与技术, 2022, 42(13): 131-136.

- Liu Y X. Evaluation of land ecological security based on SPSS analysis[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(13): 131–136. (in Chinese)
- [27] 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 等. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4333–4343.
- Sa N, Zhao J Y, Kou X Y, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: Framework, models and prospect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (11): 4333–4343.
- [28] 李依, 刘煜杰, 张强, 等. 基于山水林田湖草耦合视角的阿勒泰地区生态保护修复对策研究(英文)[J]. *资源与生态学报*, 2021, 12 (6): 791–800.
- Li Y, Liu Y J, Zhang Q, et al. Research on ecological protection and restoration measures in Altay region based on the coupling perspective of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 791–800.
- [29] 钟业喜, 邵海雁, 徐晨璐, 等. 基于文献计量分析的流域山水林田湖草生命共同体研究进展与展望[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1): 95–101.
- Zhong Y X, Shao H Y, Xu C L, et al. The research progress and prospect of life community of mountain, river, forest, farmland, lake and grassland in watershed based on bibliometric analysis[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2020, 44(1): 95–101.
- [30] 刘昌明. 加强水在自然资源要素耦合作用中的观测研究探究山水林田湖草生命共同体统一管理[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(2): 1–3, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.02.01.
- Liu C M. Enhancing the observational study of the coupling effect of water on natural resource elements and exploring the unified management of the life community of mountains, waters, forests, farmland, lakes and grassland[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(2): 1–3, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.02.01.
- [31] 李楠, 郝喆, 田亚光, 等. 基于流域尺度的水环境分区识别与评价——以辽河流域(浑太水系)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程为例[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(12): 5322–5331.
- Li N, Hao Z, Tian Y G, et al. Identification and evaluation of water environment zoning based on watershed scale: A case study of the integrated protection and restoration projects of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasses and sand in the Liaohe River Basin (Huntai river system) [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(12): 5322–5331.
- [32] 常江, 李灿坤, 冯姗姗, 等. 煤炭城市山水林田湖草生态保护修复分区及规划策略研究——以古交市为例[J]. *生态经济*, 2021, 37 (6): 222–229.
- Chang J, Li C K, Feng S S, et al. Research on zoning and planning strategy of ecological protection and restoration of mountain-water-forest-field-lake and grassland in coal city: Taking Gujiao City as an example[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(6): 222–229.
- [33] 李爽, 田野, 唐明方, 等. 景感生态学在流域生态系统保护与修复实践中的应用——以大凌河流域北票段为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5849–5856.
- Li S, Tian Y, Tang M F, et al. Landsense ecology theory application in ecological protection and restoration of watershed full-array ecosystems: A case study in Beipiao section, Daling River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5849–5856.
- [34] 于少康, 汪浩, 何蕾. 县域国土空间生态修复分区研究——以江西省湖口县为例[J]. *自然资源情报*, 2023(12): 68–74.
- Yu S K, Wang H, He L. Ecological restoration zoning of territorial space at county level: A case of Hukou County, Jiangxi[J]. *Natural Resources Information*, 2023(12): 68–74.
- [35] 包玉斌, 黄涛, 王耀宗, 等. 基于生态重要性与敏感性的六盘山区生态保护修复分区[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1778–1791.
- Bao Y B, Huang T, Wang Y Z, et al. Zoning for ecological conservation and restoration in Liupan Mountain area based on ecological importance and sensitivity evaluation [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(11): 1778–1791.

(上接第 201 页/Continued from Page 201)

- [25] 高琳, 林晓燕, 林昌华, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及风险评价[J]. *南方农业*, 2019, 13(29): 161–166.
- Gao L, Lin X Y, Lin C H, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soil based on GIS[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(29): 161–166. (in Chinese)
- [26] 王粟, 史风梅, 裴占江, 等. 松嫩平原农田土壤污染现状分析与评价——以黑龙江省绥化地区为例[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(5): 75–83.
- Wang S, Shi F M, Pei Z J, et al. Evaluation and analysis of farmland soils pollution status of Songnen Plain: For example Suihua area of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(5): 75–83.