

多维复合空间视角下的黄河生态带构建 ——以黄河流域内蒙古段为例

奚雪松¹, 高俊刚², 郝媛媛², 郭 恺³, 贾 宪⁴, 梁诗繁¹, 路 畅¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古小草数字生态产业有限公司,

呼和浩特 010070; 3. 蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 呼和浩特 010070;

4. 深圳奥雅设计股份有限公司北京分公司, 北京 100024)

摘要: 黄河生态带建设是各地落实国家黄河战略开展的重要行动。本文以正面临林地、草地、湿地衰退, 沙漠化、水土流失、盐碱化、生物栖息受影响等七大复合性生态问题的黄河流域内蒙古段为例, 从整体性、系统性、独特性三方面提出了多维复合空间视角下黄河生态带构建的理论框架和实现途径。在流域层面, 将林地、草地、湿地三类生态空间的环境质量评价结果和沙漠化、水土流失、盐碱化、生物四种生态过程的安全性评价结果叠加, 构建低、中、高安全水平的流域综合生态安全格局。在河流层面, 研判出黄河干流大堤外 10 km 和一级支流两侧 2 km 岸边带内低安全水平区域面积占比最高, 由此判别出黄河生态带的构成和空间范围。进一步结合不同地域景观特征划定其保护修复与治理区划。

关键词: 黄河生态带; 构建途径; 生态环境质量评价; 生态安全格局; 黄河流域

《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中明确了打造“以黄河干流和主要河湖为骨架, 连通青藏高原、黄土高原、北方防沙带和黄河口海岸带的沿黄河生态带”的“一带五区多点”战略布局^[1]。黄河沿线的内蒙古、河南和山东诸省陆续开展了黄河生态带的建设行动^[2-4]。黄河生态带的建设对象是包括非永久被水淹没的河床及其周围洪泛平原在内的河岸带区域, 该区域是河流生态系统和陆地生态系统之间的重要过渡区, 是生态系统最脆弱和流域生物多样性最容易丧失的地区^[5], 也是河流与景观环境耦合的核心部位^[6]。因此, 黄河生态带建设对增加动植物物种种类、数量与分布以提高生态系统生产力、治理水土污染、保护和稳定河岸、调节微气候和美化环境、开展旅游活动等均有重要的现实意义和潜在价值^[7]。

当前与生态带相关的研究主要面向城市和河湖区域。城市生态带研究方法主要有生态敏感性和景观格局评价^[8]、绿色基础设施评价^[9]、生态承载力及足迹计算^[10,11]等。研究目标多指向为城市构建一个连接城市建成区与外部自然生态空间, 以生态服务和控制功能为主的城市生态基础设施。河流生态带研究多侧重于: (1) 从植被群落的生境状况^[12]、生态适应性^[13]、多样性^[14,15]、时空分布格局^[16,17]等角度开展的河岸带结构与功能研究; (2) 基于经验值法、简单数学模型法、复杂机理模型法等进行的边界划定研究^[18,19]; (3) 针对水文^[20]、地貌^[21]等自然过程和人为干扰过程^[22,23]开展的特征和影响因素研究; (4) 包括水文调控、水环境质量、植被重建和种群结构恢复四个方面的生态修复技术研究^[7,24,25];

收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979275)

作者简介: 奚雪松 (1978-), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 研究方向为城乡规划与风景园林。

E-mail: xixuesong@cau.edu.cn

(5) 河岸带系统设计、优化和管理研究^[6,26,27]。可见,从流域和景观综合尺度上开展的集成性研究^[7]以及能够系统性地指导河流生态带整体构建的研究均相对较少。属于同类相关概念的河流生态廊道研究也大多侧重于:(1)在识别重要生态源斑块和用InVEST模型评价其生境质量的基础上,通过最小累积阻力模型(MCR)找到最小成本路径构建生态廊道^[13,14],进而明确其连通度、宽度、生态节点和断裂点等,确定区域内廊道的网络体系^[15,16]或区域生态安全格局^[14,17]。(2)基于电路理论综合识别具有宽度信息的生态廊道和关键性的生态节点^[19,20],以解决生态廊道的连接度、重要性和宽度的不确定性等问题^[21]。相对范式的研究过程多考虑景观类型和人类活动的干扰,将生态廊道构建视为区域生态网络或格局构建的过程而非最终目标,较少将其视为一个独立整体进行构建。

综上所述,具有综合性和系统性视角的河流生态带构建理论和方法相对缺失,难以指导干支流主体明晰、线路长、流域面积广、地域特征丰富多样,生态问题复杂多元的黄河生态带构建。因此,本文以黄河流域内蒙古段为例,针对其在空间关系上“自上而下”多尺度、“纵横联系”多向度的“多维性”特征,在空间格局上所呈现的复杂多样性和关联耦合性等“复合性”特征,探讨了多维复合空间视角下黄河生态带构建的理论框架与实现途径,对于各地正在开展的黄河生态带建设需求有着重要的理论意义与应用价值。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段地处黄河中上游,位于阴山南麓与鄂尔多斯高原之间,黄河干流全长约843 km,涉及6盟市21旗县约950余万人口,流域面积约31.3万km²。研究区域以黄河主干流和大黑河等一级支流为主体,除去了窟野河、无定河等非内蒙古段入黄的一级支流(图1)。该区域属于跨越干旱区与湿润区的农牧交错带,拥有丰富的林地、草原、湖泊、湿地、沙漠等自然资源,在5400余km的黄河全段内是景观异质性特征最鲜明、生态问题最多样和突出的区段。作为中国北方防沙带和黄土高原生态屏障两大国家重点生态功能区的重要组成部分^[28],在气候变化和人类活动影响下,正面临林地、草地、湿地衰退,沙漠化、盐碱化、水土流失加剧,生物多样性降低等七大生态问题^[29,30]。

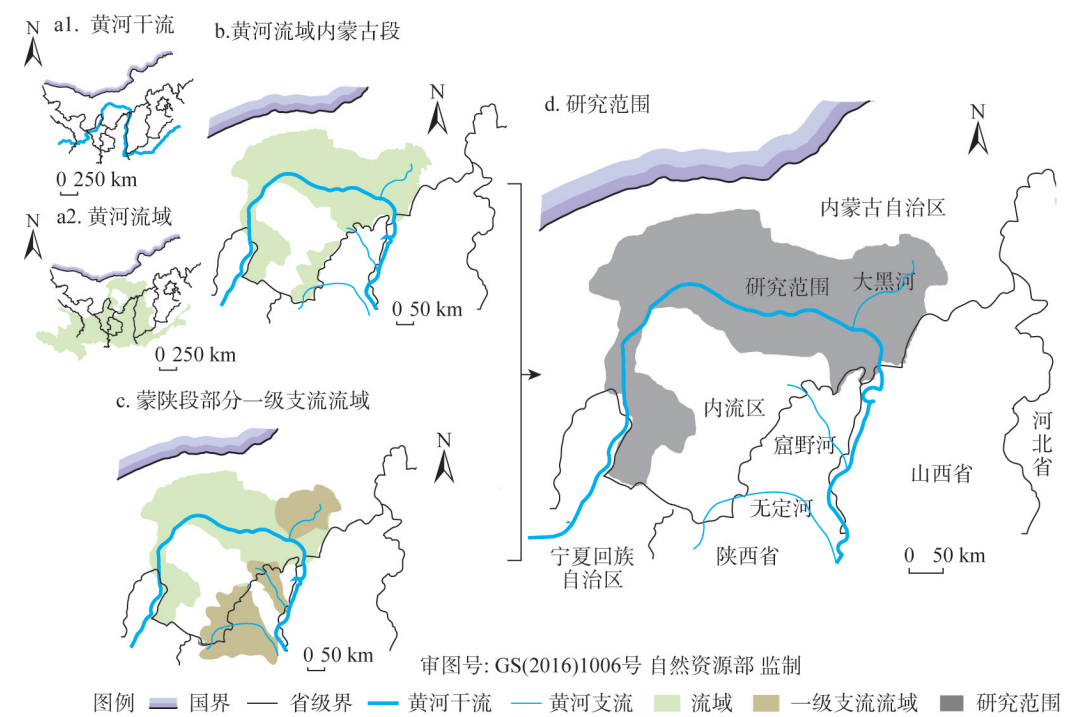
1.2 研究思路

从整体性、系统性和独特性三个方面提出黄河生态带构建的理论框架(图2):

(1) 多维复合空间的整体性。在流域层面,面向具有复杂性、多样性且呈耦合镶嵌特征的生态空间建立整体性的格局构架。在河流层面,从“自上而下”的多个尺度和“纵横联系”的多个向度整体确定黄河生态带的构成、范围和特征,“多维+复合”的空间相互关联并且互为依托,形成维护区域整体生态系统服务功能的基础。

(2) 流域生态安全的系统性。在流域层面系统性地开展面向不同生态空间的环境质量评价和不同生态过程敏感性区域的安全性评价,综合叠加构建流域生态安全格局,再按流域层面结论在河流层面判别出黄河生态带,实现“山水林田湖草沙湿”系统治理,保障沿黄区域生态安全。

(3) 地域景观风貌的独特性。面对复杂的生态问题和多样的自然地理特征,提出因地制宜的保护、修复或治理区划,以塑造和展现黄河生态带内不同区段独特的景观风貌



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图1 研究对象与范围
Fig. 1 Research objects and areas

特征。

技术路线为（图3）：（1）在流域层面，开展面向林地、草地和湿地生态空间的环境质量评价，针对沙漠化、水土流失、盐碱化、生物栖息与迁徙四个生态过程进行安全性评价，叠合构建流域综合生态安全格局；（2）在河流层面，基于不同等级安全格局的空间分布特征判别出黄河生态带的构成与空间范围，明确其功能与结构特征；（3）基于流域层面的研究结论判别出“流域—河流”各生态空间单元的保护修复与治理区划，结合不同地域自然地理特征塑造不同区段景观风貌。

1.3 研究方法

1.3.1 面向不同生态空间的环境质量评价

生态环境质量评价主要面向流域范围内的现状林地、草地和湿地三类生态空间展开，通过评价指标体系和模型分析找到生态环境质量低、中、高的三类生态空间单元。

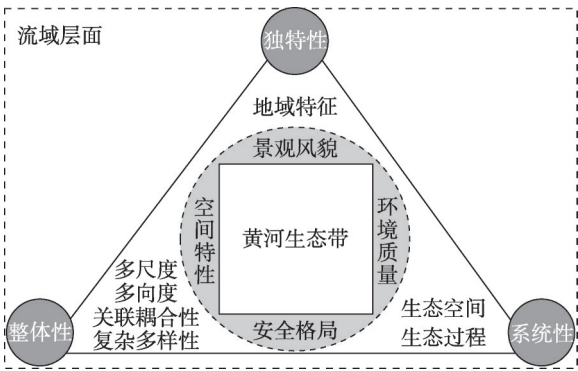


图2 理论框架
Fig. 2 Theoretical framework

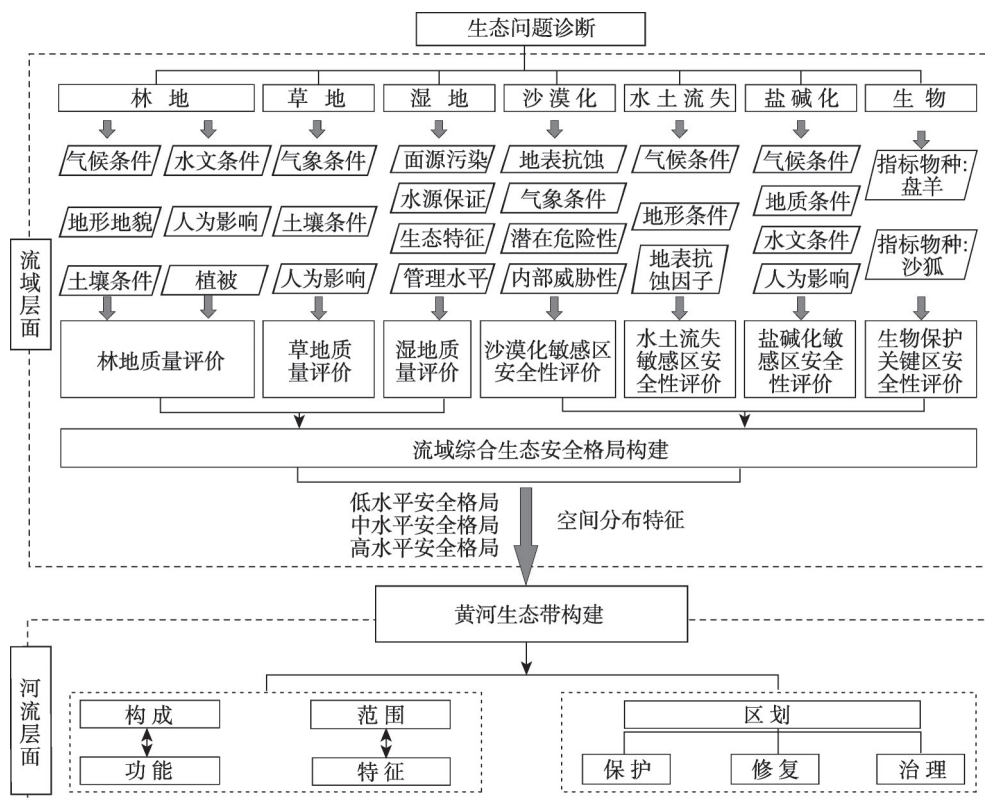


图3 技术路线

Fig. 3 Technical route

(1) 评价指评体系

对林地、草地和湿地质量评价的研究成果进行综述，找出针对各自生态环境质量评价的指标因子和权重。在与黄河流域内蒙古段实际情况结合后初步拟定的基础上，应用德尔菲法对20余位生态和规划方向专家进行咨询并用层次分析法对其意见进行统计分析，最终确定出不同生态空间的环境质量评价指标因子和权重值。

(2) 评价模型

采用综合指数模型法作为林地、草地和湿地质量的评价模型，结合评价指评体系对三调数据中提供的林地、草地和湿地数据进行综合分值计算，分值越高，质量越好。模型如下：

$$Q_j = \sum_{i=1}^n w_i p_{ij} \quad (1)$$

式中： Q_j 是第 j 个评价单元的综合分值； w_i 是第 i 个评价指标权重值； p_{ij} 为第 j 个评价单元第 i 个评价指标的标准化值； n 为标评指标总数（个）。

1.3.2 兼顾不同生态过程的流域综合生态安全格局构建

主要针对流域范围内沙漠化、水土流失、盐碱化、生物栖息和迁徙四个生态过程，运用景观安全格局的理论方法^[31,32]，对维护各自生态过程安全与健康具有关键意义的景观要素、空间位置和空间联系进行评价，判别出基于各自生态过程的不同等级安全水平区域。

(1) 针对沙漠化、水土流失和盐碱化的评价指标体系和评价模型

对沙漠化、水土流失和盐碱化相关研究成果进行综述,找出针对各自生态敏感性评价的指标因子和权重。采用和前文生态空间环境质量评价体系构建中相同的德尔斐法和层次分析法,最终确定出各自生态敏感性评价的指标因子和权重值。

采用综合指数模型法作为沙漠化、水土流失和盐碱化敏感性的评价模型,对整个研究范围进行综合评分,分数越高表明敏感性越低。模型如下:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n w_i p_{ij} \quad (2)$$

(2) 不同等级安全水平区域判别

面向沙漠化、水土流失和盐碱化的敏感性区域判别出低、中、高三个安全等级的关键区域。对这些关键区域的生态治理对于沙漠化、水土流失和盐碱化程度将起到重要的抑制作用。

(3) 针对生物栖息和迁徙过程的评价指标体系和评价模型

选择盘羊 (*Ovis ammon*)、沙狐 (*Vulpes corsac*) 作为林地、草地、沙地和湿地生境的指标性物种,对其相关研究成果进行综述,采用和前文评价体系构建中相同的德尔菲法对 20 余位生态和规划方向专家进行咨询并对其意见进行层次分析法分析,构建出生境适宜性评价体系。

采用最小累积阻力模型的方法,运用 GIS 计算物种在源之间迁徙的路径,并通过密度分析判断具有重要意义的通道。构建阻力面的模型如下:

$$MCR = f \times \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

式中: MCR 表示从源 j 在空间中扩散至某点的最小累积阻力值; f 为 MCR 与变量间乘积的函数; D_{ij} 表示从源 j 到源 i 所经过的距离; R_i 为 i 在空间某方向的扩散阻力系数。

(4) 生物迁徙通道和生物保护安全水平区域判别

对单个指示物种栖息地的生境进行适宜性评价,模拟物种迁徙过程确定其生物迁徙通道,判别出对生物保护具有重要意义的不同等级安全水平区域,再将各个指示物种的评价结果叠加,综合判别出不同等级的生物保护安全水平区域。

(5) 流域综合生态安全格局构建

将面向三类生态空间的环境质量等级评价结果和针对四种生态过程的安全等级评价结果进行叠加,构建流域综合生态安全格局。按保护级别分为低、中、高三种安全水平,其中低水平安全格局为“底线格局”,是保护修复和治理的最低限度;中水平安全格局范围较前者大,级别次之;高水平安全格局范围最大,安全程度最高或受威胁程度最低。考虑各种生态系统服务之间的不可替代性,不同安全水平区域和不同质量等级区域的叠加过程中采取了等权叠加方法;叠加方法采用栅格单元最小值统计方法进行计算,即只要任一生态过程在某区域为低安全水平或环境质量较差,则最终流域综合生态安全格局结果在该区域就是低水平安全格局(保护的底线格局),需要进行高级别的保护。以此类推,公式如下:

$$ISP = \text{Max}(SP_i), i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (4)$$

式中: ISP (Integrated Security Pattern) 为综合安全格局结果; SP_i 为针对三类生态空间

和四种生态过程的评价结果,分低、中、高三级,分别赋值3、2、1。

1.3.3 基于流域综合生态安全格局的黄河生态带判别与区划

基于流域综合生态安全格局构建结果,分析不同等级安全水平区域沿黄河干支流分布的空间特征,找到反映出黄河干支流沿线生态问题最突出、需要优先开展保护、修复和治理的“底线”区域,将该空间范围确定为黄河生态带的空间范围。同时,在流域层面划定生态保护、修复和治理区划。针对林地、草地、湿地生态环境质量评价结论,将高质量的林地、草地、湿地区域划定为保护区,将质量一般或较差区域划定为修复区;根据沙漠化、盐碱化、水土流失敏感性区域的安全性评价结果,将低安全水平区域划定为治理区。再将流域层面的区划与黄河生态带空间范围叠合,最终确定黄河生态带的保护、修复和治理区划。

1.4 数据来源

土地利用数据来自第三次国土资源调查数据;HWSD土壤数据、NDVI来源于联合国粮食及农业组织(<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software>);行政边界、铁路交通、地貌、土壤盐碱化数据来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>);水质、水土流失、沙漠化等数据来自中华人民共和国水利部统计公报(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dycqgslpcgb>);气候数据、自然资源数据、自然保护区空间分布数据、高程数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

2 结果分析

2.1 面向不同生态空间的环境质量评价

2.1.1 林地质量评价

研究范围内林地总面积约22.99万 hm^2 。受自然地形、降水、黄河水系变迁等条件影响,面临林地质量不高、生态系统脆弱、抵御自然灾害能力弱等问题^[33,34]。综合林地质量评价研究成果^[35,36]和专家意见,从气候、地貌、土壤、水文、人为影响、植被六个方面共11个指标构建评价指标体系(表1)。结果表明:整体质量优良的林地占总林地面积的19%,多分布在大青山山脉;质量一般的占50%,分布在黄土高原丘陵地区;质量较差的占31%,分布在库布齐沙漠及乌兰布和沙漠周边(图4a)。

2.1.2 草地质量评价

研究范围内草地总面积约38.85万 hm^2 。受降雨量、温湿度、土壤等自然影响和过度放牧等人为影响,草原退化、沙化、盐渍化的现象较为严重^[29,30]。综合草地质量评价研究成果^[37,38]和专家意见,选取气候、地貌、土壤、草地情况和人为影响五个方面共14个指标构建评价指标体系(表2)。结果表明:草地整体状况较差、需优先修复的面积占总体草地面积的15%,分布在库布齐沙漠、乌兰布和沙漠周边;质量一般的占38%,分布在阴山北部、乌拉山南部和鄂托克旗;质量优良的占46%,分布在大青山北部和达拉特旗南部(图4b)。

2.1.3 湿地质量评价

研究范围内有湿地面积9.62万 hm^2 。目前部分湿地存在因水源补给不足、破碎化程度高、周边农田面源污染、人为干扰等影响出现退化甚至消失的现象^[29,30]。综合湿地质量

表1 林地质量评价指标体系

Table 1 Forest land quality evaluation index system

指标类型	评价因子	因子等级（赋值）				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
气候(0.284)	年降水量/mm	> 500	(400, 500]	[300, 400]	< 300	0.178
	年平均气温/mm	> 9	(7, 9]	[5, 7]	< 5	0.062
地形(0.141)	坡度/(°)	< 15	[15, 25)	[25, 35]	> 35	0.085
	坡向	南、西南、东南	东、西	西北坡、东北坡	无坡向、北坡	0.046
土壤(0.33)	有机质含量/%	> 5	(3.5, 5]	[2, 3.5]	< 2	0.142
	土壤类型	黑钙土	灰褐土、栗褐土、 草甸土	钙栗土、新积土、 黄绵土	风沙土、漠土、 盐碱土、沼泽 土、湖泊、城区	0.035
	盐碱化程度	轻微或无	轻度	中度	重度	0.054
	土壤侵蚀程度	轻度	中度	强度	极强	0.073
	黄河摆动影响程度	黄河大坝外	—	—	黄河大坝内	0.132
水文(0.141)	保护区	国家级	省级	县级	无	0.035
植被(0.141)	植被覆盖度	> 80	(60, 80]	[40, 60]	< 40	0.138

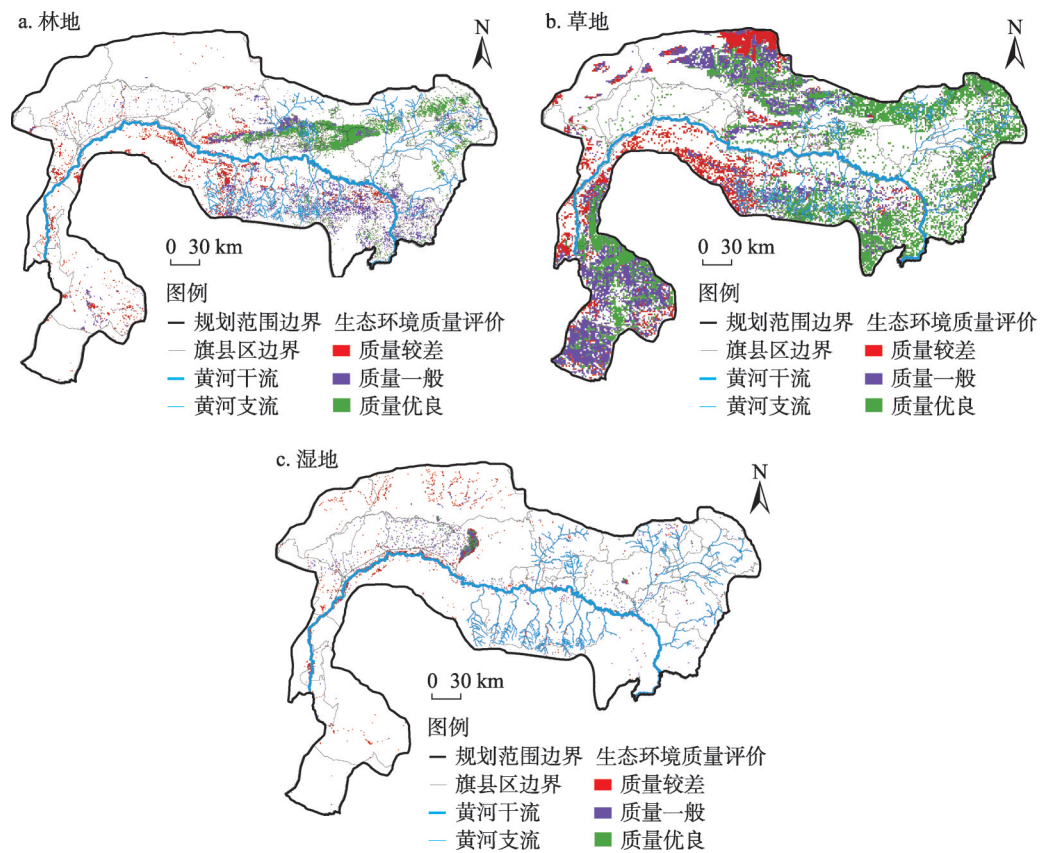


图4 生态环境质量评价结果

Fig. 4 Ecological environment quality assessment results

评价研究成果^[39-41]和专家意见,选取了生态特征、功能整合特征、社会环境特征三个方面共9项指标构建评价指标体系(表3)。结果表明:湿地整体状况较差、需优先修复的面积占总体湿地面积的47%,分布在黄河干流以及阴山南部;质量一般的占40%,分布在大黑河附近;质量优良的占13%,分布在乌梁素海周围(图4c)。

2.2 针对不同生态过程的安全性评价

2.2.1 沙漠化敏感性区域的安全性评价

研究范围内沙漠化面积约为67.5万hm²。受干旱少雨、风沙频繁等自然条件影响,沙漠生态系统仍处于脆弱和不稳定状态^[29,30]。综合沙漠化评价的研究成果^[42,43]、FAO制定的评价指标体系^[44]和专家意见,选取了外在威胁性、内部危险性和对外危险性三个方面共9项指标构建评价指标体系(表4),判别出低、中、高三个安全等级的沙漠化敏感性

表2 草地质量评价指标体系
Table 2 Grassland quality evaluation index system

准则层及其权重	评价因子	因子等级(赋值)				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
气候(0.29)	多年平均降雨量/mm	> 600	(500, 600]	[400, 500]	< 400	0.13
	湿度/%	> 60	(50, 60]	[40, 50]	< 40	0.08
	年平均气温	> 12	(8, 12]	[5, 8]	< 5	0.08
地形地貌(0.073)	坡度/(°)	< 8	[8, 25]	[25, 35]	> 35	0.049
	坡向	阳坡、半阳坡	半阴坡	阴坡	平地	0.024
土壤(0.273)	有机质含量/%	> 5	(3.5, 5]	[2, 3.5]	< 2	0.125
	土壤粘粉粒含量/%	> 50	(40, 50]	[30, 40]	< 30	0.059
	土壤侵蚀程度	轻度	中度	强度	极强	0.056
	盐碱化程度	轻微或无	轻度	中度	重度	0.033
草地情况(0.232)	NDVI变化率	< 1	[1, 5]	[5, 10]	> 10	0.092
	植被覆盖度/%	> 80	(60, 80]	[40, 60]	< 40	0.14
人为影响(0.132)	保护区	国家级	省级	县级	无	0.041
	载畜量	< 0.014	[0.014, 0.017)	[0.017, 0.022]	> 0.022	0.069
	面源污染强度	受影响较小	受影响一般	受影响较强	受建影响严重	0.022

表3 湿地质量评价指标体系
Table 3 Wetland quality evaluation index system

准则层及其权重	评价因子	因子等级(赋值)				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
生态特征指标 (0.311)	多年平均降雨量	> 600	(500, 600)	[400, 500]	< 400	0.079
	湿度/%	> 60	(50, 60)	[40, 50]	< 40	0.052
	有机质含量/%	> 5	(3.5, 5)	[2, 3.5]	< 2	0.11
	侵蚀情况	轻度	中度	强度	极强	0.041
	水质	I 或 II	III	IV	V 或劣 V	0.029
功能整合指标 (0.493)	NDVI变化率	< 1	[1, 5]	[5, 10]	> 10	0.165
	植被覆盖度/%	> 80	(60, 80)	[40, 60]	< 40	0.328
社会环境指标 (0.196)	湿地保护区	国家级	省级	县级	无	0.131
	受面源污染影响强度	受影响较小	受影响一般	受影响较强	受影响严重	0.065

关键区域。结果表明：安全水平低、需优先修复的面积占研究范围的9%，分布在库布齐沙漠和乌兰布和沙漠周围；安全水平中等的区域占5%；安全水平高的区域占4%。对这些关键区域和空间位置的生态治理对于防止沙漠化扩散将起到重要的屏障作用（图5a）。

2.2.2 水土流失敏感性区域的安全性评价

研究范围内易发生水土流失的面积约598万hm²。水土流失导致黄河沿线出现土壤退化、土地生产能力降低、生物多样性减少、自然灾害加剧，影响农业生产和食物安全等问题^[29,30]。综合水土流失评价的研究成果^[45-47]和专家意见，选取了侵蚀因子和地表抗蚀因子两个方面共7个指标构建评价指标体系（表5），判别出低、中、高三个安全等级的水土流失敏感性关键区域。结果表明：安全水平低，需马上进行治理的区域占总面积的22%，分布在黄土高原丘陵地区、库布齐沙漠周边以及大青山北部；安全水平中等的区域占40%，分布在达拉特旗；安全水平高的区域占20%。对这些关键区域和空间位置的生态治理对于防止水土流失将起到重要的维护作用（图5b）。

2.2.3 盐碱化敏感性区域的安全性评价

研究范围内盐碱化土地约128.3万hm²。盐碱化导致适宜耕种的土地不断减少，严重

表4 沙漠化敏感性评价指标体系
Table 4 Desertification risk assessment index

准则层及其权重	评价因子	因子等级（赋值）				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
外在威胁性 (0.311)	多年平均降雨量/mm	> 400	(200, 400]	[100, 200]	< 100	0.102
	多年平均风速/(m/s)	< 3	[3, 4)	[4, 5]	> 5	0.112
	湿度/%	> 60	(50, 60]	[40, 50]	< 40	0.097
内在危险性 (0.493)	植被盖度/%	> 40	(40, 25	[15, 25]	< 15	0.193
	土地利用类型	河流湿地、城镇、林地	草地	农田	裸地、沙漠	0.096
	土壤类型	淋溶土、水成土、人为土、城区等	半淋溶土	石灰土、粗骨土、钙层土、黄绵土	风沙土、漠土、干旱土、盐碱土	0.136
	土壤侵蚀程度	轻度	中度	强度	极强	0.068
对外危险性 (0.196)	距黄河干流距离/km	> 15	[10, 15]	[5, 10]	≤5	0.131
	距黄河支流距离/km	> 15	[10, 15]	[5, 10]	≤5	0.065

表5 水土流失敏感性评价指标体系
Table 5 Soil erosion risk assessment index

准则层及其权重	评价因子	因子等级（赋值）				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
侵蚀因子 (0.4)	多年平均降雨量/mm	< 300	[300, 600)	[600, 1000]	> 1000	0.165
	多年平均风速/(m/s)	< 3	[3, 4)	[4, 5]	> 5	0.104
	坡度/(°)	< 3	[3, 9)	[9, 17]	> 17	0.131
地表抗蚀因子 (0.6)	土地利用类型	—	—	6~15°度坡耕地	> 15°坡耕地、矿坑	0.193
	砾石含量	> 25	(15, 25]	[5, 15]	< 5	0.09
	土壤类型	河流湖泊、建成区、沼泽土	新积土、草甸土、潮土	钙层土、灰褐土	风沙土、漠境土、盐土、粗骨土	0.187
	植被覆盖度/%	> 85	(60, 85]	[40, 60]	< 60	0.13

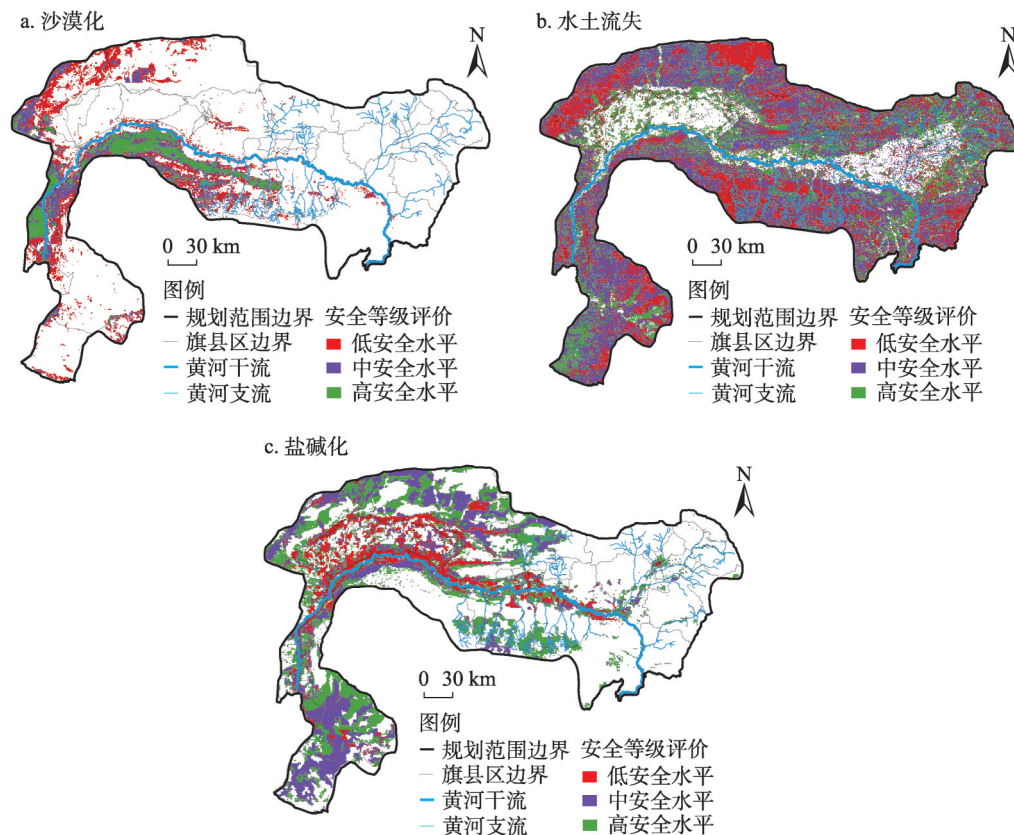


图5 生态过程安全性评价结果

Fig. 5 Ecological process safety evaluation results

影响地区农业生产及发展^[29,30]。综合土壤盐碱化评价的研究成果^[48-50]和专家意见,选取“气候—地貌”“水土—环境”和“植被—人类活动”影响三个方面共8个指标构建评价指标体系(表6),判别出低、中、高三个安全等级的盐碱化敏感性关键区域。结果表明:安全水平低、需马上进行防治的区域占总面积的2.4%,集中在黄河大坝两侧、河套土默川平原部分地区;安全水平中等的区域占6%,集中在鄂托克旗西部平原区及阴山北部;安全水平高的区域占3.8%,集中在呼和浩特及鄂托克旗部分地区。对这些关键区域和空间位置的生态治理对土壤盐碱化加剧将起到重要的抑制作用(图5c)。

2.2.4 生境适宜性评价与生物保护关键区域的安全性评价

黄河流域内蒙段多样化的自然环境孕育了丰富的生境和动植物资源。由于人类影响以及自然条件的变化,生物栖息地面临着面积减少和破碎化程度加强等问题,造成了生物多样性的降低。研究选择了盘羊、沙狐作为林地、草地、沙地和湿地生境的指标物种,综合生物多样性保护安全格局构建方面的研究成果^[31,51,52],构建了生境适宜性评价体系(表7)。通过对指示物种核心栖息地的生境适宜性评价(图6a、图6b)和对其迁徙过程的最小阻力值模拟,判别出核心栖息地和低、中、高三个安全等级的生物迁徙关键区域。结果表明,在黄河流域内蒙古段可形成两条重要的生物迁徙通道(图6c):从阴山山脉出发,经乌梁素海湿地至黄河干流之间会形成一条以“草地—湿地”为特征的生物迁徙通道;从磴口附近穿越沙漠会形成另一条以“草地—沙漠”为特征的生物迁徙通道。

表6 盐碱化敏感性评价指标体系

Table 6 Soil salinization risk assessment index

准则层及其权重	评价因子	因子等级（赋值）				权重
		I (100)	II (80)	III (60)	IV (40)	
“气候—地貌”影响(0.26)	de Martonne干燥度(蒸降比)	< 2	[2, 3)	[3, 4]	> 4	0.185
	地貌	山地、丘陵	—	—	平原、洼地	0.093
“水土—环境”影响(0.412)	土壤质地	砂土、砂质壤土	粉砂质壤土、砂质粘壤土	粉砂质粘壤土	黏土、壤质黏土、粉砂质黏土	0.14
	盐碱化程度	轻微或无	轻度	中度	重度	0.178
	黄河大坝影响	无	轻微	中等	严重	0.144
“植被—人类活动”影响(0.328)	植被覆盖度/%	> 80	(60, 80]	[40, 60]	< 40	0.155
	土地利用类型	河流湖泊、沙地、建成区	坡耕地、林地	草地、农田	盐荒地	0.041
	引黄灌溉	灌溉区	—	—	非灌溉区	0.064

核心栖息地与廊道外宽度 100 m 缓冲区范围构成生物迁徙通道的“底限”区域，以此向外扩展 600 m 和 1200 m 缓冲区距离分别是生物迁移通道的中、高安全水平区域（图 6d）。

2.3 流域综合生态安全格局构建

流域综合生态安全格局由林地、草地、湿地三类生态空间的环境质量等级评价结果和沙漠化、水土流失、盐碱化和生物四种生态过程的安全等级评价结果叠加确定（表 8）。结果表明：低安全水平区域占总面积的 35%，是沙漠化扩散影响程度、水土流失程度和盐碱化程度高的区域以及生物栖息地和迁徙通道的核心区，是维护流域生态过程完整性最关键的生态区域，属于需优先保护修复和治理的“生态底线”区域。中安全水平区域占总面积的 50%，是沙漠化扩散影响程度、水土流失程度和盐碱化程度一般的区域以及生物栖息地和迁徙通道的缓冲区，是生态问题较突出和维护生物迁徙过程的缓冲区域。高安全水平区域占总面积的 15%，是沙漠化扩散影响程度、水土流失程度和盐碱化程度较低的区域，是维护生物迁徙过程的外围区域，也

表7 指示物种生境适宜性评价指标体系

Table 7 Indicator species habitat suitability index system

指示物种	指标	权重	指标分级	阻力值
盘羊 沙狐	距水体距离 /km	0.2	≤2	0
			[2, 4]	50
			[4, 6]	100
			> 6	300
	土地覆盖类型	0.25	林地	20
			湿地	10
			草地	10
			耕地	100
			城乡、工矿、居民用地	500
	距铁路和道路 距离/km	0.2	沙地、裸岩、戈壁	30
			≤2	500
			[2, 5]	200
			> 5	0
	距建成区距离 /km	0.2	≤2	500
			[2, 5)	300
			5	0
	坡度/(°)	0.15	0~5	0
			5~10	20
			10~15	40
			15~20	60
			20~25	80
			> 25	200

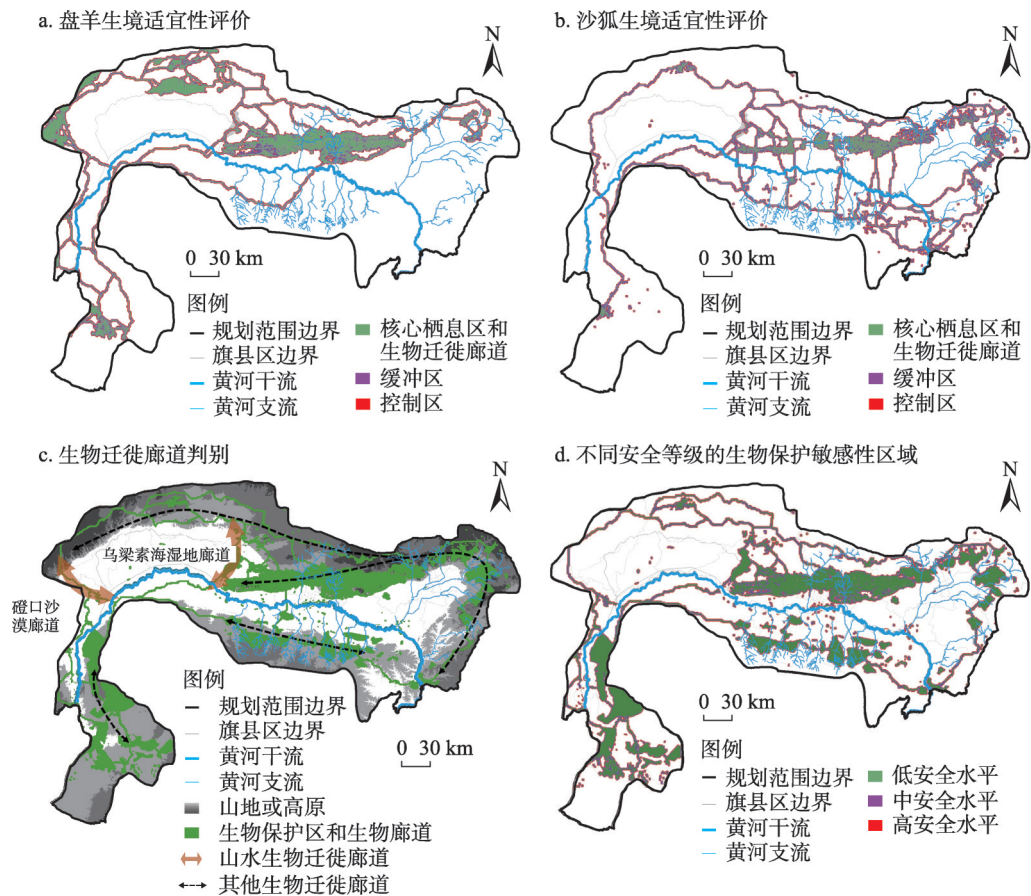


图6 生境适宜性评价与不同等级的生物保护安全区域

Fig. 6 Habitat suitability assessment and biodiversity conservation areas with different security levels

表8 流域综合生态安全格局评价结果

环境质 量等级		林地		草地		湿地		安全水平 等级	沙漠化		水土流失		盐碱化		合计	
		面积/ 万 hm ²	百分 比/%	面积/ 万 hm ²	百分 比/%	面积/ 万 hm ²	百分 比/%		面积/ 万 hm ²	百分 比/%	面积/ 万 hm ²	百分 比/%	面积/ 万 hm ²	百分 比/%	面积/ 万 hm ²	百分 比/%
质量 较差		18.10	20	57.13	35	12.99	47	低安全 水平	118.26	72	148.73	26	66.99	51	281.02	35
质量 一般		40.03	44	53.40	34	11.11	40	中安全 水平	41.04	25	335.92	55	37.71	29	415.45	50
质量 优良		32.59	36	48.72	31	3.59	13	高安全 水平	5.22	3	115.06	19	23.63	20	125.45	15

是维护流域长远生态安全的最大空间范围（图7）。

2.4 基于流域生态安全格局的黄河生态带构建

2.4.1 黄河生态带的构成与空间范围

流域综合生态安全格局中的低安全水平区域范围基本上呈现沿黄河干流分布的空间特征。黄河干流大堤外 10 km 岸边带内低安全水平区域面积在总面积中占比最高，为

54%, 自 10 km 范围逐步向外呈现衰减趋势 (图 8a); 一级支流两侧 2 km 岸边带内低安全水平区域面积在总面积中占比最高, 为 44.5%, 自 2 km 范围逐步向外呈现衰减趋势 (图 8b)。反映出黄河流域中生态问题最突出、需要优先开展保护、修复和治理的“底线”区域正是沿黄河干流大堤外 10 km 岸边带, 一级支流两侧 2 km 岸边带的空间范围区域。

基于上述研究判别出黄河生态带的构成和空间范围。黄河生态带是以黄河干支流为主体的河流廊道、两条

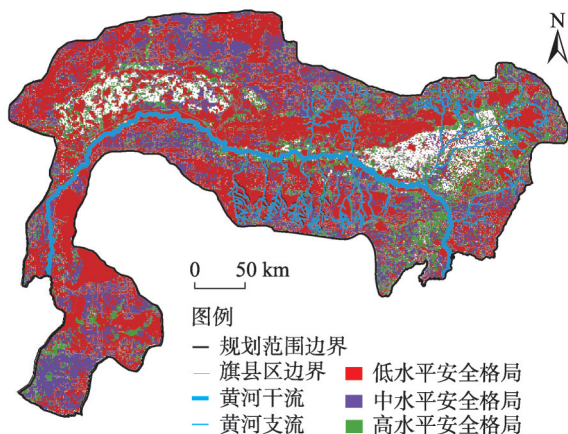


图7 流域综合生态安全格局

Fig. 7 Comprehensive ecological security pattern

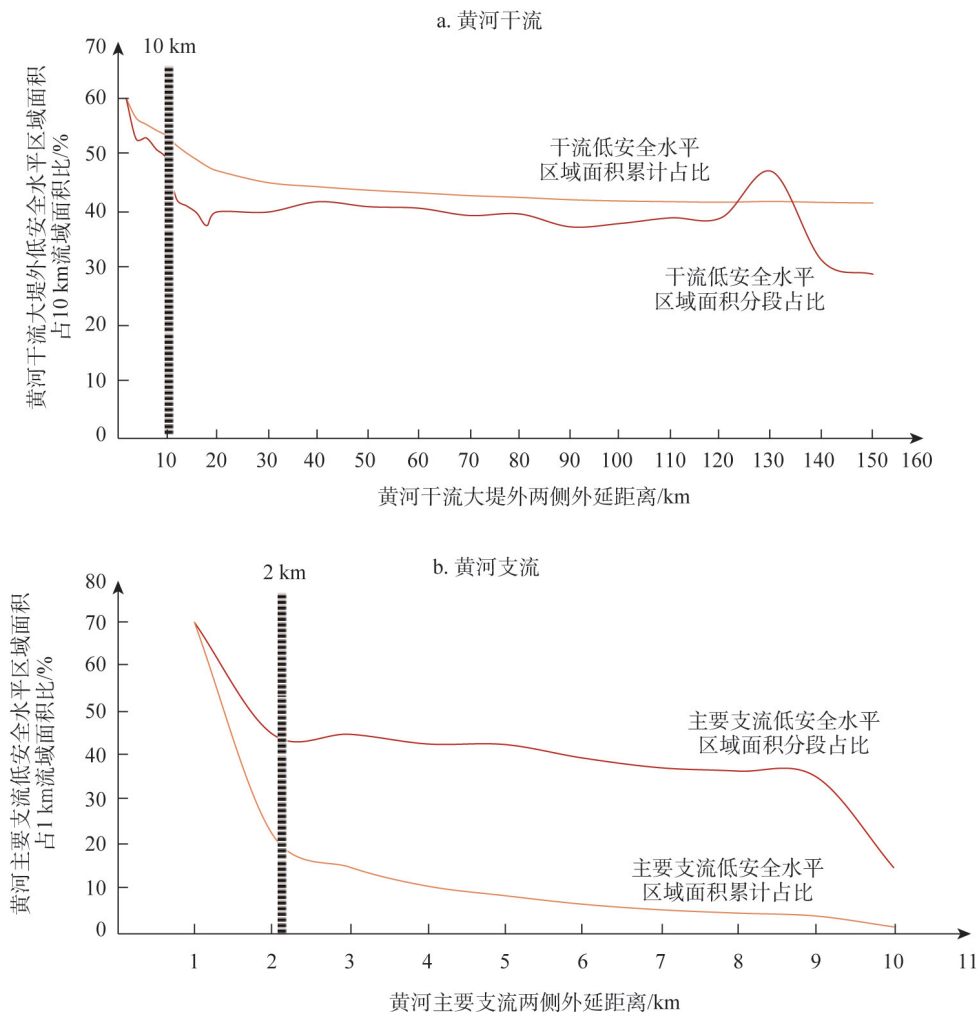
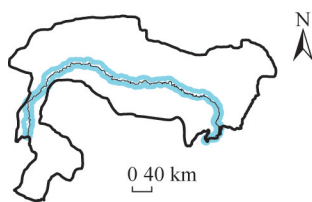


图8 低安全水平区域面积与岸边带距离关系

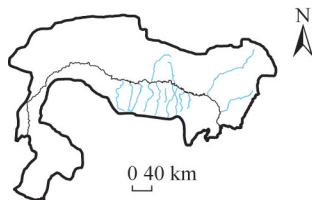
Fig. 8 Distance relationship between the area of low safety level and shore belt

山水之间的生物迁徙通道以及诸多的关键性区域和重要节点构成的绿色生态带。黄河干流大堤外 10 km, 十大孔兑、大黑河等一级支流两侧各 2 km 是黄河生态带的空间范围, 0.1~1.2 km 是生物迁徙通道的空间范围 (图 9)。生态带将黄河沿线保护修复的林地、草原、湿地、自然保护区以及经生态治理的沙地、坡地、盐碱地等生态空间镶嵌组合在一起, 形成了一个整体连续、开放稳定且具有自我维持能力的绿色景观体系, “山水林田湖草沙湿” 系统治理, 对保障沿黄区域生态安全起到重要作用。

a. 黄河干流大堤外 10 km 岸边带



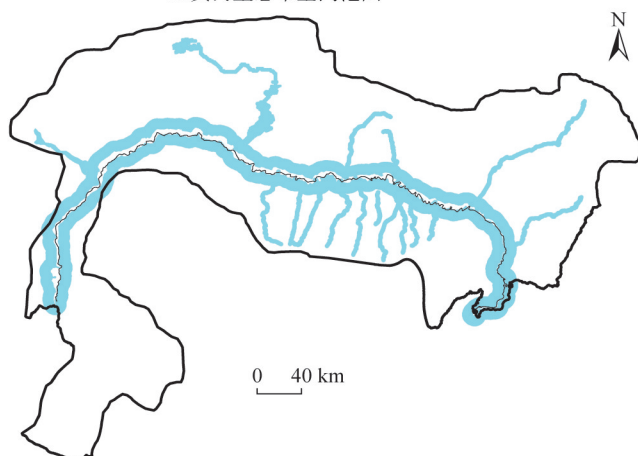
b. 一级支流两侧 2 km 岸边带



c. 生物迁徙通道



d. 黄河生态带空间范围



图例 — 规划范围边界 — 黄河干流 ■ 黄河生态带范围

图 9 黄河生态带的构成与空间范围

Fig. 9 Composition and spatial scope of the Yellow River Ecological Belt

2.4.2 黄河生态带的功能与结构特征

(1) 横向结构特征

黄河生态带的横向结构由河道、河漫滩和高地过渡带三个部分组成。河道是廊道内平水期的黄河干支流; 河漫滩是黄河大堤以里、河道两侧允许不同重现期洪水淹没的区域, 具有洪水调蓄、沉积物控制、河流侵蚀淤积过程调节和生物栖息地提供等重要生态功能; 高地过渡带由黄河大堤、边坡和高地三部分组成, 平均宽度为干流大堤外 10 km、一级支流两侧各 2 km, 是生态带保护修复与建设的主要区域。高地植被带对于控制水土流失、阻止来自侧向流域的沉积物和污染物直接进入河流、提供生物栖息地、帮助生物觅食和迁徙等生态功能有着重要意义。由于黄河内蒙古段面对复杂的生态问题和多样的地域特征, 因此黄河生态带在横向结构上呈现出了明显的连续性和异质性共存的特征。

(2) 纵向结构特征

黄河生态带所涉及范围属于乌兰布和沙漠区、桌子山中山—洪积平原区、河套冲积平

原区、库布齐沙漠区、黄土丘陵区、大青山南坡洪积—冲积平原区等六个自然地理区^[53], 以及贺兰山植物州、东阿拉善植物州、鄂尔多斯高原植物州、阴山山地植物州、阴南黄土丘陵植物州等五个植物地理区^[54]。流域层面的自然地理区域与河流层面黄河生态带内的各类生态空间单元之间形成了关联耦合的“垂直嵌套”关系, 各类生态空间单元相互之间又形成了连续延展的“水平嵌套”关系。从纵向结构上看, 黄河生态带的空间区域内呈现“空间镶嵌体”的复合性特征。

2.4.3 黄河生态带的保护修复与治理区划

基于流域生态安全格局研究结论, 在流域层面针对林地、草地、湿地空间划定三类生态保护和修复区域, 保护区域面积为191.5万 hm^2 , 占流域面积的19%; 修复区域面积为132.8万 hm^2 , 占流域面积的13%。针对沙漠化、水土流失和盐碱化生态过程的低安全水平区域, 划定六类综合治理区, 治理区域面积为449.2万 hm^2 , 占流域面积的46% (图10a)^①。

黄河生态带保护修复与治理区划基于流域层面区划结果划定。保护区划面积为22.6万 hm^2 , 占生态带面积的13%; 修复区划面积为14.5万 hm^2 , 占生态带面积的9%; 治理区划面积为117.9万 hm^2 , 占生态带面积的70%。从黄河干支流由内到外呈现出“治理—修复—保护”三个区域空间镶嵌的复合型特征; 磴口县以南地区以及库布齐沙漠区以沙漠生态治理为主, 中部河套土默川平原区则以盐碱地治理为主, 而南部包括托克托以南地区以水土流失治理为主 (图10b)。

不同的保护修复与治理分区属于六个自然地理区与五个植物地理区。因此, 同一类型的生态空间单元会因所处地域的不同而采用不同的模式。基于黄河生态带呈现出的“空间镶嵌体”的纵向结构特征, 保护修复与治理分区可结合生态带内各岸段不同的自然地理和植物地理区域特征、生态空间单元特性制定有针对性的空间模式与形态引导, 以塑造生态带不同区段独特的景观风貌特征 (图10c)。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 研究从整体性、系统性和独特性三个方面提出了多维复合空间视角下黄河生态带构建的理论框架。从整体性上, 注重空间关系上特有的“自上而下”多尺度、“纵横联系”多向度的“多维性”特征, 空间格局上呈现的复杂多样性和关联耦合性等“复合性”特征。从系统性上, 在流域层面对现状林地、草地、湿地进行生态环境质量评价, 针对沙漠化、盐碱化、水土流失、生物四个生态过程的敏感性区域进行安全性评价, 叠合构建流域综合生态安全格局; 在河流层面基于流域层面的研究结论判别黄河生态带的构成和空间范围。从独特性上, 将“流域—河流”各生态空间单元的保护修复与治理区划和不同地域的景观风貌特征紧密结合。

(2) 在流域层面, 低安全水平区域占总面积的35%, 是整个流域中问题最突出、需要优先开展保护修复和治理的“生态底线”区域。黄河干流大堤外10 km岸边带内低安

^① 生物多样性保护核心区大多为林地、草地和湿地中生态环境质量评价为高的区域, 属保护区域。但呈线性的生物迁徙通道往往穿越沙漠、盐碱地或水土流失等各类生态单元, 涉及各级安全水平区域。考虑会重复计算故未列入统计。

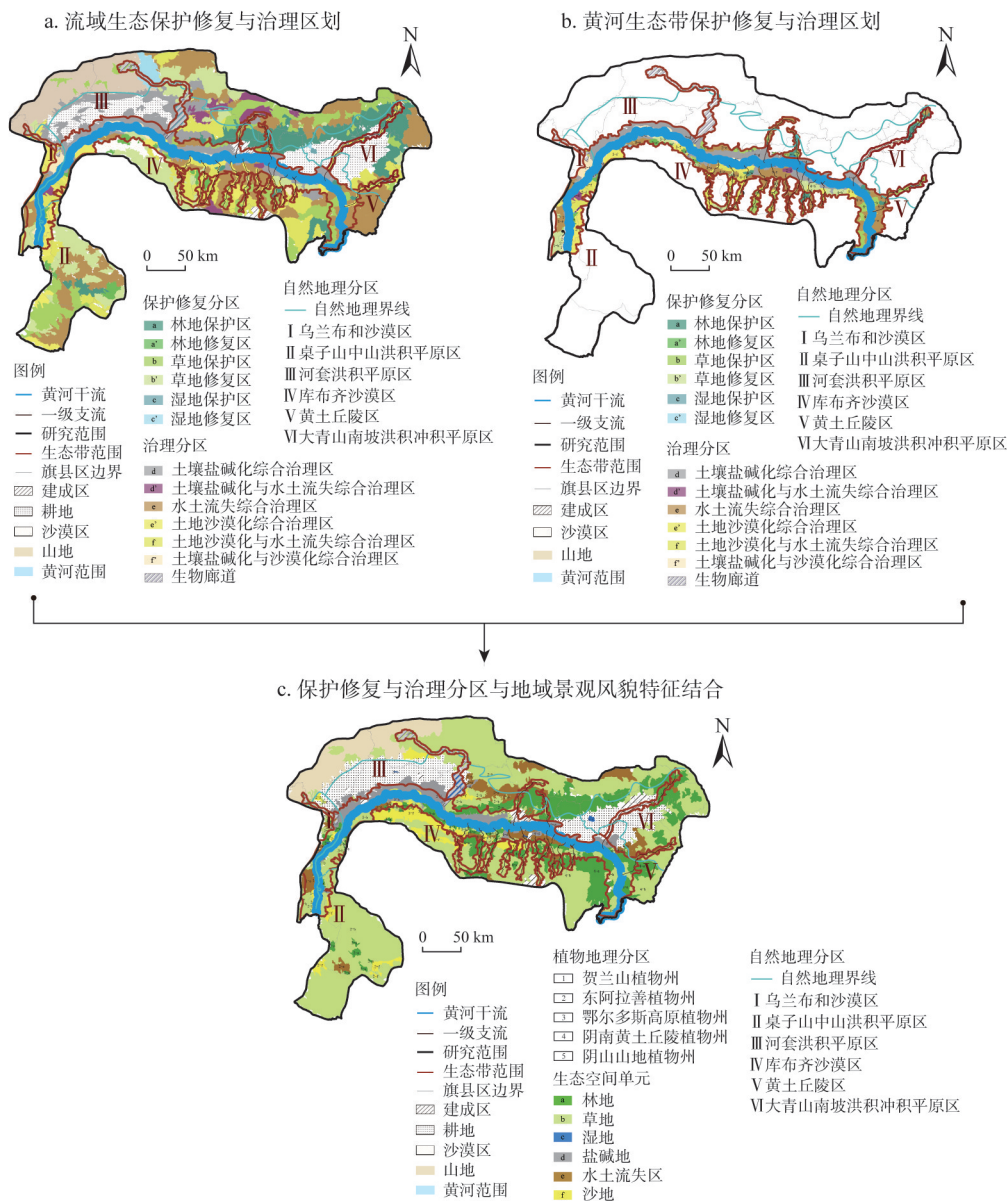


图10 黄河生态带的保护修复与治理区划

Fig. 10 Protection, restoration and treatment zoning of the Yellow River Ecological Belt

全水平区域面积在总面积中占比最高，自 10 km 范围逐步向外衰减；一级支流两侧 2 km 岸边带内低安全水平区域面积在总面积中占比最高，自 2 km 范围逐步向外衰减。反映出黄河流域中生态问题最突出、需要优先开展保护、修复和治理的“底线”区域正是沿黄河干流大堤外 10 km，一级支流两侧 2 km 的河流岸边带区域。由此在河流层面判别出黄河生态带的空间范围。黄河生态带划分为“保护—修复—治理”三类区划，不同的保护修复与治理分区根据所属的六个自然地理区与五个植物地理区制定空间模式与形态引导，塑造独特的景观风貌特征。

(3) 内蒙古段黄河生态带是以黄河干支流为主体的河流廊道、两条山水之间的生物

迁徙通道以及诸多的关键性生态区域和节点构成的绿色生态带。将黄河沿线的林地、草原、湿地、自然保护区以及经生态修复的沙地、坡地、盐碱地等空间镶嵌组合在一起,形成了一个整体连续、开放稳定且具有自我维持能力的绿色景观体系。“山水林田湖草沙湿”系统治理,对保障沿黄区域生态安全起到重要作用。

3.2 讨论

本文提出的理论框架与实现途径丰富了黄河生态带构建的理论体系,可以对其他同样呈现生态问题复杂多样、生态空间关联耦合特征的河流生态带建设提供有益的借鉴,但研究并未从协同性^[55]的角度展开探索。在使用人群层面,应充分认识到沿线区域“生态—生产—生活”共融的实际情况,探索建立“自下而上”的生态空间涉益主体利益共享机制,让沿线居民感受到林地、草原、湿地生态补偿机制和产业化生态修复模式带来的切实收益。在实施层面,省市县各相关部门需在实施过程中探索全面协同的合作机制,从以政府为主“自上而下”的科层治理模式走向多元主体参与的多层级、多主体治理体系^[56],从而推进黄河生态带的治理能力现代化。

参考文献(References):

- [1] 中共中央国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要. 北京: 人民出版社, 2021: 12-21. [The State Council of the People's Republic of China. Outline of Ecological Protection and High-quality Development Planning in the Yellow River Basin. Beijing: People's Publishing House, 2021: 12-21.]
- [2] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年(2021—2025)规划和二〇三五年远景目标纲要, 2021. [People's Government of Inner Mongolia Autonomous Region. The 14th five-year (2021-2025) plan for the national economic and social development of the Inner Mongolia Autonomous Region and the outline of the vision for 2035, 2021.]
- [3] 河南省人民政府. 河南省国民经济和社会发展第十四个五年(2021—2025)规划和二〇三五年远景目标纲要, 2021. [Henan Provincial People's Government. The 14th five-year (2021-2025) plan for the national economic and social development of Henan province and the outline of the 2035 vision, 2021.]
- [4] 山东省人民政府. 山东省国民经济和社会发展第十四个五年(2021—2025)规划和二〇三五年远景目标纲要, 2021. [Shandong Provincial People's Government. The 14th five-year (2021-2025) plan for the national economic and social development of Shandong province and the outline of the 2035 vision, 2021.]
- [5] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1830-1837. [GUO E H, SUN R H, CHEN L D. Research status and prospect of main ecological service functions in riverbank vegetation buffer zone. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(8): 1830-1837.]
- [6] 袁兴中, 向羚丰, 扈玉兴, 等. 跨越界面的生态设计: 重庆市三峡库区澎溪河河/库岸带生态系统修复. 景观设计学, 2021, 9(3): 12-27. [YUAN X Z, XIANG L F, HU Y X, et al. Ecological design across interface: Ecosystem restoration of Pengxi River/Bank Zone in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing. Landscape Architecture, 2021, 9(3): 12-27.]
- [7] 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究进展与展望. 生态环境学报, 2013, 22(5): 879-886. [HAN L, WANG H Z, YU J. Research progress and prospect of riparian ecology. Journal of Eco-environment, 2013, 22(5): 879-886.]
- [8] 钱颖, 杨建军. 基于生态敏感性和景观格局的城市生态带规划探究. 中国园林, 2014, 30(6): 107-111. [QIAN Y, YANG J J. Urban ecological belt planning based on ecological sensitivity and landscape pattern. Chinese Landscape Architecture, 2014, 30(6): 107-111.]
- [9] 李咏华, 马淇蔚, 范雪怡. 基于绿色基础设施评价的城市生态带划定: 以杭州市为例. 地理研究, 2017, 36(3): 583-591. [LI Y H, MA Q W, FAN X Y. Urban ecological zone demarcation based on green infrastructure evaluation: A case study of Hangzhou city. Geographical Research, 2017, 36(3): 583-591.]
- [10] 王纪武, 李王鸣. 基于生态安全的城市生态功能区规划研究: 以杭州西北部生态带为例. 城市规划, 2009, 33(3): 25-31. [WANG J W, LI W M. Urban ecological zone based on ecological security: A case study of ecological belt in North-

- west Hangzhou. *City Planning Review*, 2009, 33(3): 25-31.]
- [11] 王振波, 张蕾, 张晓瑞, 等. 基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定. *地理研究*, 2013, 32(12): 2302-2311. [WANG Z B, ZHANG Q, ZHANG X R, et al. Urban growth boundary delimitation of Hefei city based on the resources and environment carrying capability. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2302-2311.]
- [12] 陈影, 陈苏, 马鸿岳, 等. 河流河岸带自然生境恢复评价研究进展. *生态科学*, 2021, 40(4): 223-228. [CHEN Y, CHEN S, MA H Y, et al. Research progress of natural habitat restoration assessment in riparian zones of rivers. *Ecological science*, 2021, 40(4): 223-228.]
- [13] 孙金伟, 许文盛. 河岸植被缓冲带生态功能及其过滤机理的研究进展. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 40-44. [SUN J W, XU W S. Research progress on ecological function and filtration mechanism of riparian vegetation buffer zone. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 40-44.]
- [14] UOWOLO A L, BINKLEY D, ADAIR E C. Plant diversity in riparian forests in Northwest Colorado: Effects of time and river regulation. *Forest Ecology and Management*, 2005, 218: 107-114.
- [15] 王阳, 沈守云, 廖秋林. 湘江长沙城区段河岸带植物群落多样性研究. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(2): 85-90. [WANG Y, SHEN S Y, LIAO Q L. Study on plant community diversity in riparian zone of Changsha urban section of Xiangjiang River. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2017, 37(2): 85-90.]
- [16] 赵鸣飞, 刘全儒, 康慕谊, 等. 东江干流河岸带植物群落类型分布格局研究. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1547-1556. [ZHAO M F, LIU Q R, KANG M Y, et al. Study on the distribution pattern of plant community types in riparian zone of the main stream of Dongjiang River. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1547-1556.]
- [17] 赵清贺, 刘倩, 马丽娇, 等. 黄河中下游典型河岸缓冲带植被格局时空动态. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2127-2137. [ZHAO Q H, LIU Q, MA L J, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation patterns in typical riparian buffer zones of the Middle and Lower Yellow River. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8): 2127-2137.]
- [18] 侯利军, 彭钰皓, 陈达, 等. 下游段长江岸线保护范围界定探索. *河海大学学报: 自然科学版*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20220316.1733.006.html>. [HOU L J, PENG Y H, CHEN D, et al. Downstream Duan Changjiang shoreline protection scope exploration. *Journal of Hohai University: Natural Science Edition*: 1-9, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20220316.1733.006.html>.]
- [19] 周丽丽, 殷钰培, 耿润哲, 等. 河岸缓冲带划定及影响因素研究进展. *环境污染与防治*, 2020, 42(8): 1044-1048. [ZHOU L L, YIN P H, GENG R Z, et al. Research progress on delineation of riparian buffer zone and its influencing factors. *Environmental Pollution and Prevention*, 2020, 42(8): 1044-1048.]
- [20] 张军, 娄和震, 杨胜天, 等. 河道流量对疏勒河中下游河岸带植被变化的影响评价. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(2): 123-129. [ZHANG J, LOU H Z, YANG S T, et al. Effects of channel discharge on riparian vegetation change in the middle and lower reaches of Shule River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(2): 123-129.]
- [21] 郭二辉, 云菲, 冯志培, 等. 河岸带不同植被格局对表层土壤养分分布和迁移特征的影响. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 164-11172. [GUO E H, YUN F, FENG Z P, et al. Effects of different vegetation patterns on soil nutrient distribution and migration characteristics in riparian zone. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 164-11172.]
- [22] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176. [JIA J H, CHEN J Y, LONG X J, et al. Effect assessment and spatial-temporal variation of hydropower development on river ecosystem services: A case study of Wujiang River trunk stream. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176.]
- [23] 常玉旸, 张凤荣, 张天柱, 等. 典型江南山地丘陵区河岸带土地利用时空变化特征及其政策响应. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(8): 76-87. [CHANG Y Y, ZHANG F R, ZHANG T Z, et al. Spatial-temporal change of land use and its policy response in the riparian zone of typical hilly area in Southern China. *China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(8): 76-87.]
- [24] 赵广琦, 崔心红, 张群, 等. 河岸带植被重建的生态修复技术及应用. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 252-258. [ZHAO G Q, CUI X H, ZHANG Q, et al. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 252-258.]
- [25] 胡海波, 邓文斌, 王霞. 长江流域河岸植被缓冲带生态功能及构建技术研究进展. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 214-222. [HU H B, DENG W B, WANG X. Research progress on ecological function and construction technology of riparian vegetation buffer zone in Yangtze River Basin. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(1): 214-222.]

- [26] 郭怀成, 黄凯, 刘永, 等. 河岸带生态系统管理研究概念框架及其关键问题. 地理研究, 2007, 26(4): 789-798. [GUO H C, HUANG K, LIU Y, et al. Conceptual framework and key issues of riparian ecosystem management research. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 789-798.]
- [27] 黄新雨, 张太平. 广州城市河岸带环境及最佳管理措施 BMPs 应用初探. 生态科学, 2014, 33(5): 858-864. [HUANG X Y, ZHANG T P. Guangzhou urban riparian zone environment and the best management measures BMPs application study. *Ecological Science*, 2014, 33(5): 858-864.]
- [28] 国家发展改革委, 自然资源部. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划 (2021—2035), 2020. [National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Master plan of major projects for the protection and restoration of important national ecosystems (2021-2035), 2020.]
- [29] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区构筑我国北方重要生态安全屏障规划 (2021—2035), 2021. [People's Government of Inner Mongolia Autonomous Region. Inner Mongolia Autonomous Region plan for constructing an important ecological security barrier in the north of China (2021-2035), 2021.]
- [30] 内蒙古自治区林业和草原局. 内蒙古自治区“十四五”林业和草原发展规划 (征求意见稿), 2021. [Inner Mongolia Autonomous Region Forestry and Grassland Bureau. Inner Mongolia Autonomous Region "14th five-year" forestry and grassland development plan (draft for comment), 2021.]
- [31] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175. [YU K J, LI H L, LI D H et al. National scale ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5163-5175.]
- [32] 俞孔坚, 李迪华, 李海龙, 等. 国土生态安全格局: 再造秀美山川的空间战略. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 16-79. [YU K J, LI D H, LI H L, et al. *Ecological Security Pattern of Homeland: Spatial Strategy to Recreate Beautiful Mountains and Rivers*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 16-79.]
- [33] 新华网, 习近平主持召开深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话, <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2021/10/23/ARTI1634978833594104.shtml> (2021-10-22). [Xinhuanet. XI Jinping presided over a symposium to promote the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin (2021-10-22), <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2021/10/23/ARTI1634978833594104.shtml>(2021-10-22).]
- [34] 汪芳, 苗长虹, 刘峰贵, 等. 黄河流域人居环境的地方性与适应性: 挑战和机遇. 自然资源学报, 2021, 36(1): 1-26. [WANG F, MIAO C H, LIU F G, et al. The locality and adaptability of human settlements in the Yellow River Basin: Challenges and opportunities. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 1-26.]
- [35] 熊昌盛, 谭荣. 基于 GIS 和 LSA 的林地质量评价与保护分区. 自然资源学报, 2016, 31(3): 457-467. [XIONG C S, TAN R. Forest land quality evaluation and conservation zone based on GIS and LSA. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3): 457-467.]
- [36] 刘献伦, 刘传利, 杨志军. 山东省林地质量等级体系评价. 山东林业科技, 2012, 42(2): 105-106. [LIU X L, LIU C L, YANG Z J. Evaluation and graduation system for forest land quality in Shandong province. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2012, 42(2): 105-106.]
- [37] 白卫国, 李增元. 中国西部草地生态系统可持续发展多尺度评价指标体系建立的研究. 中国草地, 2004, (5): 44-49. [BAI W G, LI Z Y. A study on the establishment of a multi-scale evaluation index system for the sustainable development of grassland ecosystems in Western China. *Chinese Meadows*, 2004, (5): 44-49.]
- [38] 韩满都拉. 内蒙古高原温带草地畜牧业可持续发展评价. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 190-194. [HAN M D. Evaluation of sustainable development of animal husbandry in temperate grasslands on the Inner Mongolia Plateau. *Agricultural Resources and Regionalization in China*, 2019, 40(1): 190-194.]
- [39] 王薇, 陈为峰, 李其光, 等. 黄河三角洲湿地生态系统健康评价指标体系. 水资源保护, 2012, 28(1): 13-16. [WANG W, CHEN W F, LI Q G, et al. Index system for ecosystem health evaluation of wetlands in the Yellow River Delta. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 13-16.]
- [40] 王瑞玲, 连煜, 黄锦辉, 等. 黄河重要湿地生态功能评价及优先保护次序研究. 水利水电技术, 2013, 44(11): 14-19. [WANG R L, LIAN Y, HUANG J H, et al. Evaluation of ecological functions of important wetlands in the Yellow River and priority protection order. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2013, 44(11): 14-19.]
- [41] 陈颖, 张明祥. 中国湿地退化状况评价指标体系研究. 林业资源管理, 2012, (2): 116-120. [CHEN Y, ZHANG M X. Study on the evaluation index system of wetland degradation in China. *Forestry Resource Management*, 2012, (2): 116-

- 120.]
- [42] 王梅梅, 朱志玲, 吴咏梅. 宁夏中部干旱带土地沙漠化评价. 中国沙漠, 2013, 33(2): 320-324. [WANG M M, ZHU Z L, WU Y M. Desertification evaluation of land in the arid zone of Central Ningxia. Desert of China, 2013, 33(2): 320-324.]
- [43] 王耀庭, 王桥, 王艳姣, 等. 基于GIS西北干旱区荒漠化危险度的研究. 干旱区地理, 2005, (3): 392-397. [WANG Y T, WANG Q, WANG Y J, et al. Based on GIS, a study on the risk of desertification in the arid region of Northwest China. Geography of arid areas, 2005, (3): 392-397.]
- [44] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Global Environmental Monitoring System. Provisional methodology for assessment and mapping of desertification. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1983.
- [45] 张恩伟, 彭双云, 冯华梅. 基于GIS和RUSLE的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变. 水土保持学报, 2020, 34(2): 115-122. [ZHANG E W, PANG S Y, FENG H M. Evaluation of soil erosion sensitivity and spatial pattern evolution of Dianchi Lake Basin based on GIS and RUSLE. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 115-122.]
- [46] 冉涛, 邓伟. 北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异. 水土保持研究, 2017, 24(4): 182-186, 190. [RAN T, DENG W. Spatial differentiation of soil erosion sensitivity in ecologically fragile areas of Northern China. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 182-186, 190.]
- [47] 武翠翠, 王世杰. 黄河流域兰州段土壤侵蚀敏感性评价. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12390-12397. [WU C C, WANG S J. Evaluation of soil erosion sensitivity in Lanzhou section of the Yellow River Basin. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12390-12397.]
- [48] 谷洪彪, 姜纪沂. 土壤盐碱化的灾害学定义及其风险评价体系. 灾害学, 2013, 28(1): 23-27. [GU H B, JIANG J Y. Catastrophic definition of soil salinization and its risk assessment system. Journal of Catastrophology, 2013, 28(1): 23-27.]
- [49] 杨厚翔, 雷国平, 徐秋, 等. 基于危险度与风险格局的土地盐碱化监测区优先级评价. 农业工程学报, 2019, 35(7): 238-246. [YANG H X, LEI G P, XU Q, et al. Priority evaluation of land salinization monitoring area based on hazard degree and risk pattern. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 238-246.]
- [50] 刘子金, 徐存东, 朱兴林, 等. 干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析. 中国环境科学, 2022, 42(1): 367-379. [LIU Z J, XU C D, ZHU X L, et al. Comprehensive assessment and evolution analysis of soil salinization risk in artificial oasis in arid desert area. Chinese Environmental Science, 2022, 42(1): 367-379.]
- [51] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控: 基于空间形态学—最小累积阻力模型. 生态学报, 2022, 42(5): 1968-1980. [WANG X R, WAN R R, PAN P P. Construction and regulation of ecological security pattern in Taihu Lake Basin: Based on spatial morphology-minimal cumulative resistance model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1968-1980.]
- [52] 李静, 张莹莹, 朱永明. 基于景观安全格局的北戴河新区生物多样性保护研究. 水土保持研究, 2017, 24(1): 305-310, 316. [LI J, ZHANG Y Y, ZHU Y M. Study on biodiversity conservation in Beidaihe New Area based on landscape safety pattern. Soil and Water Conservation Research, 2017, 24(1): 305-310, 316.]
- [53] 刘明光. 中国自然地理图集. 北京: 中国地图出版社, 2010: 179-188. [LIU M G. China Physical Geography Atlas. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2010: 179-188.]
- [54] 赵一之. 内蒙古植物志: 共六卷. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2020: 69-199. [ZHAO Y Z. Flora of Inner Mongolia. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 2020: 69-199.]
- [55] 汪芳, 苗长虹. 系统性、整体性与协同性: 黄河流域高质量发展的思维与策略: 写在专辑刊发之后的话. 自然资源学报, 2021, 36(1): 270-272. [WANG F, MIAO C H. Systematic, holistic and synergistic: Thinking and strategies for high-quality development of the Yellow River Basin: Words written after the publication of the album. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 270-272.]
- [56] 郭晗, 任保平. 黄河流域高质量发展的空间治理: 机理诠释与现实策略. 改革, 2020, 4(4): 74-85. [GUO H, REN B P. Spatial governance of high-quality development in the Yellow River Basin: Mechanism interpretation and practical strategies. Reform, 2020, 4(4): 74-85.]

The construction of the Yellow River Ecological Belt from a multi-dimensional composite spatial perspective: A case study of Yellow River Basin within Inner Mongolia

XI Xue-song¹, GAO Jun-gang², HAO Yuan-yuan², GUO Kai³, JIA Xian⁴,
LIANG Shi-fan¹, LU Chang¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia Xiaocao Digital Ecological Industry Co., Ltd., Hohhot 010070, China;

3. M-Grass Ecology and Environment (Group) Co., Ltd., Hohhot 010070, China;

4. Shenzhen L&A Design Holding Limited Beijing Branch, Beijing 100024, China)

Abstract: The construction of ecological belt along the Yellow River is an important action to implement the national Yellow River development strategy. This study takes the Yellow River section in Inner Mongolia as an example, which is facing seven complex ecological problems, including the degradation of forest land, grassland and wetland, desertification, salinization, soil erosion, and obstruction of biological habitat and migration processes. We propose the theoretical framework and implementation paths for the construction of the ecological belt along the Yellow River from three aspects as integrity, systematicity and uniqueness of multidimensional composite space. At the watershed level, the environmental quality assessment of forest land, grassland and wetland and the safety assessment results of desertification, soil erosion, salinization and biological processes were superimposed to construct a comprehensive ecological security pattern of the Yellow River Basin with low, medium and high safety levels. At the river level, it was found that the area of low security pattern of the main stream of the Yellow River had the largest proportion within 10 km outside the dam and 2 km on both sides of the first tributaries, so that we can identify the composition and spatial scope of the ecological belt along the Yellow River. Finally, conservation, restoration and remediation zones are defined according to landscape characteristics of different regions.

Keywords: Yellow River Ecological Belt; construction approach; ecological environment quality assessment; ecological security pattern; Yellow River Basin