

doi: 10.12029/gc20220415002

陈鹏, 张冰, 马荣, 石建省, 司乐天, 吴俊, 赵乐凡. 2024. 基于健康与恢复力的生态系统退化风险研究——以坝上高原察汗淖尔流域为例[J]. 中国地质, 51(3): 1034–1045.

Chen Peng, Zhang Bing, Ma Rong, Shi Jiansheng, Si Letian, Wu Jun, Zhao Lefan. 2024. Ecosystem degradation risk based on health and resilience: A case study of Chahannur Lake basin on Bashang Plateau[J]. Geology in China, 51(3): 1034–1045(in Chinese with English abstract).

基于健康与恢复力的生态系统退化风险研究 ——以坝上高原察汗淖尔流域为例

陈鹏^{1,2}, 张冰^{1,2}, 马荣^{1,2}, 石建省³, 司乐天^{1,4}, 吴俊⁵, 赵乐凡⁶

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 4. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 5. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 6. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:【研究目的】基于生态系统的健康状况与恢复力, 构建湖泊流域生态系统退化风险评估体系, 从流域尺度为生态环境保护及可持续发展提供科学依据。【研究方法】以坝上高原察汗淖尔流域为例, 创建生态系统健康与恢复力交互风险评估矩阵, 建立生态退化风险评估体系, 开展察汗淖尔流域生态系统退化风险评估。【研究结果】察汗淖尔流域内 91.10% 的区域生态健康状态处于良好, 6.66% 为优秀; 流域 22.76% 的区域生态恢复力等级为 1~2 级, 75.00% 处于 3~4 级。交互评估结果表明流域 27.51% 的区域为低生态退化风险状态, 70.25% 的区域处于中等状态。【结论】察汗淖尔流域生态系统总体较好, 但局部地区由于恢复力较差, 导致生态退化风险处于中等。本次研究所提出的评估方法可精准划分流域尺度生态退化风险等级, 为科学制定精准生态保护与退化控制措施提供决策依据。

关键词: 生态系统健康; 生态恢复力; 风险评估; 察汗淖尔流域; 水文地质调查工程; 坝上高原; 内蒙古

创新点: 基于生态系统健康与恢复力的评估框架, 提出流域尺度的生态退化风险评估方法, 对坝上高原察汗淖尔流域开展生态退化风险研究

中图分类号: P641.69; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-1034-12

Ecosystem degradation risk based on health and resilience: A case study of Chahannur Lake basin on Bashang Plateau

CHEN Peng^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}, MA Rong^{1,2}, SHI Jiansheng³, SI Letian^{1,4}, WU Jun⁵, ZHAO Lefan⁶

(1. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 4. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 5. Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 6. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2022-04-15; 改回日期: 2022-11-30

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221773)和中国地质科学院基本科研业务费(SK202327)联合资助。

作者简介: 陈鹏, 男, 1994 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事水资源调查与研究; E-mail: chenpeng789@foxmail.com。

通讯作者: 张冰, 男, 1983 年生, 硕士, 工程师, 主要从事水资源调查与研究; E-mail: zhangbing@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Based on the health status and resilience of the ecosystem, a risk assessment system of lake basin ecosystem degradation was constructed to provide a scientific basis for ecological environment protection and sustainable development at the basin scale.

[Methods] Taking the Chahannur Lake basin on Bashang Plateau as an example, the interactive risk assessment matrix of ecosystem health and resilience was created, the ecological degradation risk assessment system was established, and the risk assessment of ecosystem degradation in the Chahannur Lake basin was carried out. **[Results]** 91.10% of the region's ecological health was in a good state, and 6.66% was excellent. In the basin, 22.76% of the regional ecological resilience level is 1–2, and 75.00% is 3–4. The results of the interactive assessment showed that 27.51% of the basin was in a state of low risk of ecological degradation, and 70.25% of the basin was in a state of medium risk. **[Conclusions]** The ecosystem of the Chahannur Lake basin is generally good, but the risk of ecological degradation is moderate in local areas due to poor resilience. The assessment method proposed in this study can accurately classify the risk level of ecological degradation at the watershed scale and provide a basis for the scientific decision-making of precise ecological protection and degradation control measures.

Key words: ecosystem health; ecological resilience; risk assessment; Chahannur Lake basin; hydrogeological survey engineering; Bashang Plateau; Inner Mongolia

Highlights: Based on the assessment framework of ecosystem health and resilience, a watershed-scale ecological degradation risk assessment was proposed to study the ecological degradation risk in the Chahannur Lake basin of the Bashang Plateau.

About the first author: CHEN Peng, male, born in 1994, Ph.D., assistant researcher, mainly engaged in water resources investigation and research; E-mail: chenpeng789@foxmail.com.

About the corresponding author: ZHANG Bing, male, born in 1983, master, engineer, mainly engaged in water resources investigation and research; E-mail: zhangbing@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20221773) and Chinese Academy of Geological Sciences Basic Research Fund (No.SK202327).

1 引言

针对流域尺度的生态退化控制与保护, 目前已开展了大量研究 (Cheng et al., 2018; 李梅娜等, 2022)。土地利用与人类活动被视为生态系统退化的主要驱动因素, 造成重大的生态风险 (Das and Basu, 2020; 申豪勇等, 2022)。此外, 生态健康状态 (刘焱序等, 2015; Kang et al., 2018) 与生态恢复力 (于昊辰等, 2020; Jaiswal and Pandey, 2021) 亦常用于区域生态退化风险评估。生态环境部于 2013 年发布了《流域生态健康评估技术指南(试行)》, 将生态系统健康作为实现环境可持续发展的管理目标 (黄舟, 2017; 张颖睿, 2017), 被广泛应用于流域生态健康评估 (付正辉等, 2021; 熊芳园等, 2022)。恢复力是指生态系统在受到有限强度的扰动后, 恢复到平衡点、保持其状态和结构稳定的能力 (Sterk et al., 2013; 杨庚等, 2019), 被广泛应用于矿山环境恢复 (吴楠等, 2020; 吴秦豫等, 2021)。在上述研究中, 仅单独以生态健康或生态恢复力表征生态退化

风险。生态系统健康仅能代表现阶段生态系统所处的状态 (Tang et al., 2018; 郭珊珊, 2022), 并不能预测生态系统未来的发展趋势, 生态恢复力指数可以表征生态系统在受到扰动后的恢复能力 (Jaiswal and Pandey, 2021; 李鑫鹏等, 2022)。因此, 在区域生态退化风险评估中, 应综合考虑生态系统健康状态与恢复力。然而, 目前很少有研究建立基于生态系统健康与恢复力的生态退化风险评估框架。

本次研究的主要目的是提出流域尺度的生态退化风险评估方法, 以坝上高原察汗淖尔流域为例, 综合分析生态系统健康状态与恢复力, 创建风险交互矩阵。为便于生态风险管理措施的制定和实施, 以乡镇为评价单元, 判别生态退化风险等级, 为制定精准的生态保护与退化控制措施提供决策依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

坝上高原是北方农牧交错带的核心区域, 也是

首都的水源涵养功能区和生态屏障区(裴宏伟等, 2022),生态环境较为脆弱,以农业开垦为主的高强度人类活动对本地区生态环境造成了巨大的压力,导致一系列生态安全问题(王彦芳和裴宏伟, 2018; 卓昭君等, 2022)。湖泊流域生态系统是以人类为主要要素的典型复合型生态系统(尚博譔等, 2021; 杨丹等, 2021),其在自然、经济、社会等循环中扮演重要角色,随着人类活动的不断增强,诸如地下水开采、土地利用类型、种植模式等因素造成流域内不同程度生态系统退化(Wang et al., 2022; Zhu et al., 2022)。因此,选择坝上高原典型湖泊合适的方法开展流域开展生态系统退化风险评估,将对未来流域的可持续发展起到重要的指导作用,对坝上高原生态屏障的建设起到支撑作用。

察汗淖尔流域位于坝上高原西侧,流域总面积约 6757.6 km²,地势四周高中间低,切割较强烈,沟谷发育,中部为商都—张家口盆地(图 1)。流域属中温带大陆性季风气候,光照充足,昼夜温差大,干旱、多风、少水、无霜期短,多年平均气温 -0.3℃~3.7℃,多年平均降水量 361.61 mm,主要集中在 6—9 月,多年平均蒸发量为 1902.88 mm,为降水量的 5.26 倍,无霜期 100 d 左右。该地区土壤风蚀较为严重,主要地带性土壤为栗钙土,优势物种主要有碱蓬、盐爪爪、芨芨草与克氏针茅等。土地利用类型以耕地为主,主要种植作物为马铃薯、甜菜与莜麦等(Chen et al., 2022a)。

2.2 评估方法

生态系统的可持续发展既受到生态系统本身

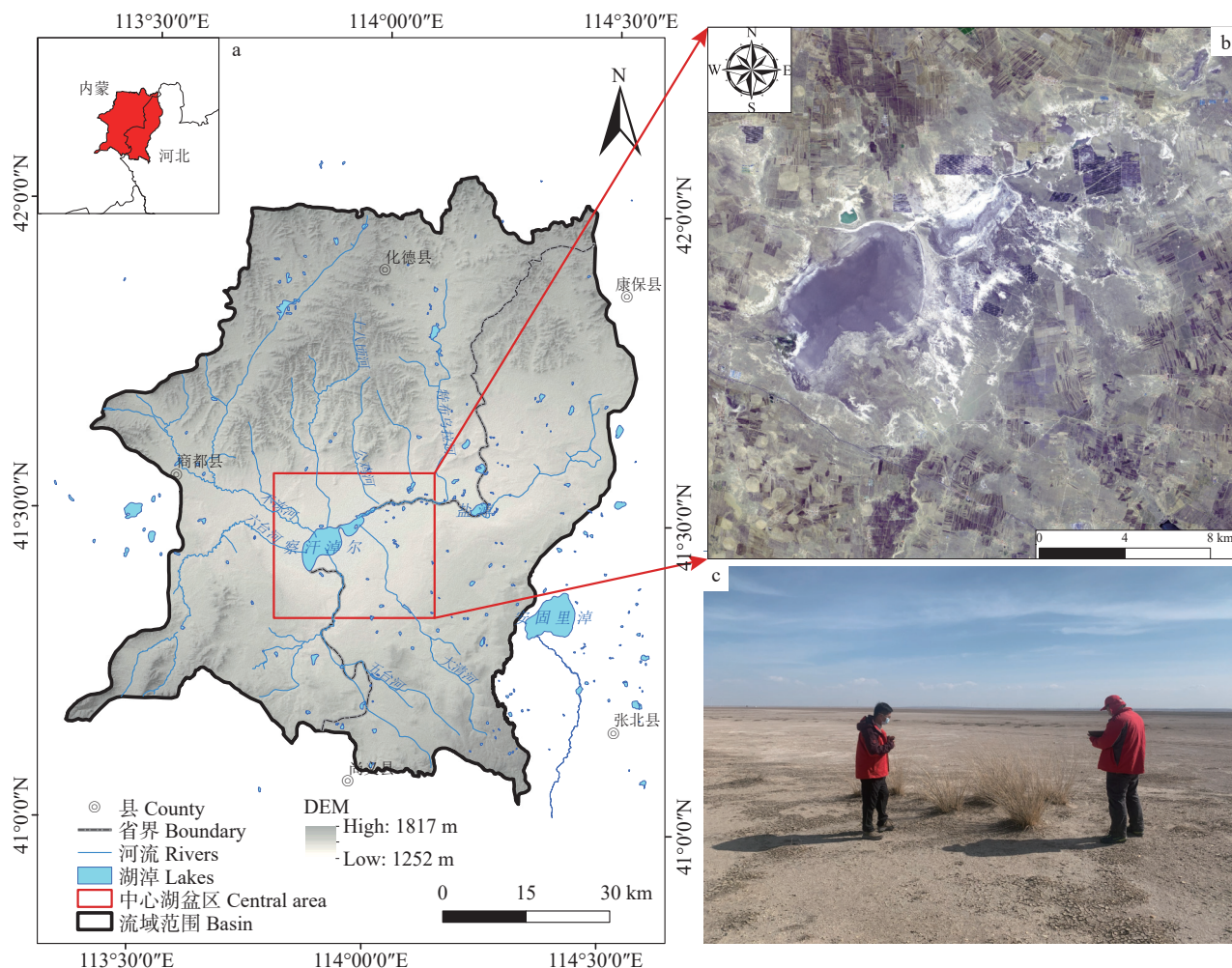


图 1 研究区地理位置(a)、高清遥感影像(b)及野外照片(c)

Fig.1 Geographical location of the study area (a), high-definition remote sensing image (b) and field photograph (c)

健康状态的影响,同时也取决于在受到外部扰动后的恢复能力(López et al., 2013; Yu et al., 2021)。因此,为了科学有效地对生态系统退化风险进行评估,本次研究综合分析生态系统健康状态与恢复力,创建二者间的交互矩阵,构建生态系统退化风险评价指标体系,开展流域生态系统退化风险评估。

2.2.1 生态健康评估方法

以生态环境部于 2013 年发布的《流域生态健康评估技术指南(试行)》(以下简称《指南》)为标准,结合察汗淖尔流域空间组分格局,水文过程和生态功能空间差异性,从生态系统格局、生态系统功能及生态系统压力三方面开展流域生态健康状态评价,生态系统格局主要包括林草覆盖率与景观完整度;生态系统功能包括植被类型、土壤保持指数与透水面积比例;生态压力包括人口与 GDP。各指标权重采用《指南》的推荐,具体见表 1。

各评价指标计算如下:

- ①林草覆盖率=林草面积/总面积×100%。
- ②景观完整度=1-(森林、草地等自然植被斑块数/总斑块数)×100%。
- ③植被类型——反映评价单元植被多样性及生态服务功能的综合指标,计算公式为:

$$X = 100 - \frac{90 \times M_1 + 70 \times M_2 + 50 \times M_3 + 30 \times M_4 + 10 \times M_5}{M} \quad (1)$$

式中: X—植被类型指数; M—总面积(km²); M₁—水域面积(km²); M₂—林地面积(km²); M₃—

草地面积(km²); M₄—农田面积(km²); M₅—其他面积(km²)。

④土壤保持功能指数=中度及以下程度土壤侵蚀面积/总面积×100%。

⑤透水面积比例=(总面积-建设用地面积)/总面积×100%。

⑥人口:将人口栅格数据进行归一化处理,利用 ArcGIS 分区统计功能取平均值计算各评价单元的人口强度。人口强度越大代表人类活动对生态系统的扰动越大,其值越小对流域生态系统的健康越有利。人口指数=(1-人口强度)×100%。

⑦GDP:与人口指数计算相同,GDP 指数=(1-GDP 强度)×100%。

采用层次分析法对各指标进行加权叠加计算。流域生态系统健康指数计算公式为:

$$WHI = \sum_{i=1}^n K_i \times W_i \quad (2)$$

式中: WHI—生态系统健康综合指数; K_i—第 i 个评价指标取值结果; W_i—第 i 个评价指标的权重。

根据《指南》,将生态健康评估综合指数(WHI)分为五级,分别为优秀、良好、一般、较差和差,具体指数分值和健康状况分级详见表 2。

2.2.2 生态恢复力评估方法

生态系统包括地形、大气、水文和植被等环境要素,这些要素决定了生态系统的功能、结构与恢复力。根据生态系统恢复力理论,结合察汗淖尔流域的实际情况,综合考虑生态系统多变量之间的相互控制关系,本次研究选取以下指标开展生态系统恢复力评价(表 3)。

目前在生态系统恢复力评价中,战金艳等(2012)主要采用组合赋权法来确定各指标权重,在本次研究中,考虑到各因子是相互影响,具有紧密联系的有机整体,采用协方差分析确定各影响因子权重(表 4)。

生态系统恢复力评价公式:

$$R = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (3)$$

表 1 流域生态系统健康评估指标体系

目标层	准则层	指标层	权重
生态系统健康指数	生态格局 (0.3)	林草覆盖率	0.6
		景观完整度	0.4
		植被类型	0.4
Watershed ecosystem Health Index (WHI)	生态功能 (0.3)	土壤保持指数	0.3
		透水面积比例	0.3
		生态压力 (0.4)	人口
GDP	0.5		

表 2 生态系统健康指数分级

健康状况	优秀	良好	一般	较差	差
生态健康综合指数 (WHI)	WHI ≥ 80	60 ≤ WHI < 80	40 ≤ WHI < 60	20 ≤ WHI < 40	WHI < 20

表 3 生态系统恢复力评价指标

Table 3 Evaluation indicators of watershed ecosystem resilience

因素	指标	指标含义
地形条件	坡度	决定水土流失程度, 影响生态系统在扰动后恢复的能力
大气条件	降水	直接影响植被的生长
	蒸发	决定区域水分循环能力的大小
水文条件	地下水埋深	水文条件是半干旱地区生态系统的制约因素
	土壤含水量	土壤水分条件对植被养分吸收具有显著影响
植被条件	NDVI	决定区域维持水分存储和养分循环能力的大小

表 4 协方差特征值分析

Table 4 Analysis of covariance eigenvalue

指标	特征值	方差百分比/%	累计/%	权重
降水量	0.040	42.31	42.31	0.42
坡度	0.017	18.03	60.34	0.18
地下水埋深	0.015	16.12	76.46	0.16
土壤含水率	0.010	10.82	87.28	0.11
NDVI	0.008	8.14	95.42	0.08
蒸发量	0.004	4.58	100.00	0.05

式中: R —生态系统恢复力指数; W_i —评价指标 i 的权重; X_i —评价指标 i 的归一化值。

2.2.3 生态退化风险评估方法

生态系统健康综合指数反映了流域内生态系统现状, 其指数较为全面的体现了生态系统的健康状况; 生态恢复力指数则体现了流域内生态系统在受到扰动之后的恢复力, 较好地体现了生态系统的

脆弱性与未来发展趋势。二者对生态系统的退化均有一定影响, 但又无法全面表征流域生态退化整体特征与趋势, 故综合考虑二者对生态系统的交互作用, 创建生态健康状态与生态系统恢复力交互评估矩阵, 综合考虑生态系统现阶段特征与未来发展趋势, 开展察汗淖尔流域生态系统退化风险评估, 具体见图 2 和表 5。

生态系统健康为优秀状态代表该流域现阶段并无明显的生态环境问题, 生态系统恢复力等级为 1 级, 代表该流域在外部环境发生改变时具有快速恢复的能力, 二者相结合代表流域目前处于安全的状态, 生态系统退化风险等级为低。

2.3 数据获取

气象数据来源于中国气象数据网, 通过 Kriging 插值方法对降水量数据进行空间栅格化。流域内 DEM(Digital Elevation Model)数据、土壤含水量数据来源于地理空间数据云, 流域矢量边界与地形坡度数据均是由 DEM 数据经过 ArcGIS 10.2(<http://www.esri.com/>)处理加工得到。归一化植被指数(NDVI)与土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境与数据中心, 其中土地利用数据经过实地调查验证。蒸发量数据来源于美国地质调查局(<https://www.usgs.gov/>)MOD16 全球蒸散数据集, 该数据集通过改进的 Penman-Monteith 公式计算得到(Mu et al., 2011)。地下水埋深数据通过野外水文地质调查

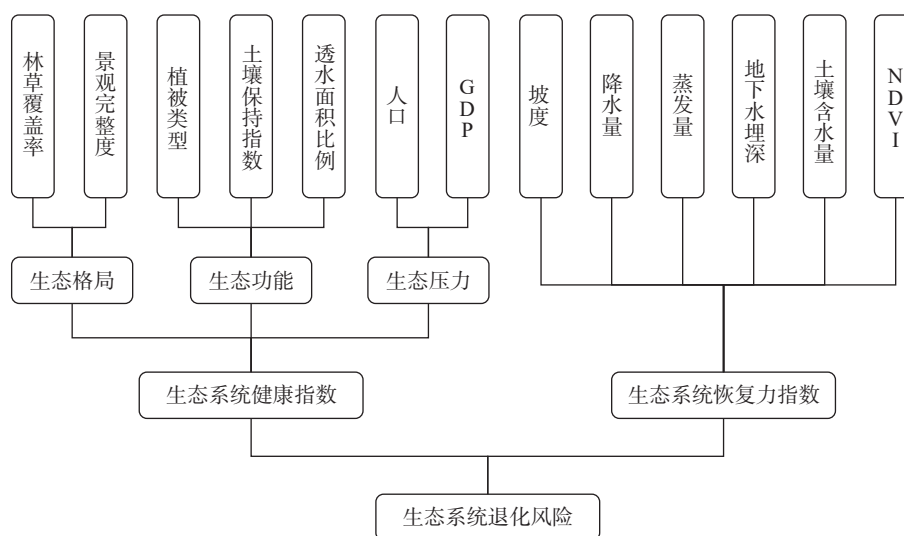


图 2 生态系统退化风险评估框架

Fig.2 Assessment framework of ecosystem degradation risk

表 5 生态退化风险等级评估交互矩阵

Table 5 Interaction matrix for assessment of risk levels of ecological degradation

生态系统健康状况	生态系统恢复力等级				
	1级	2级	3级	4级	5级
优秀	低	低	较低	中等	较高
良好	低	较低	中等	中等	较高
一般	较低	中等	较高	较高	高
较差	中等	中等	较高	高	高
差	较高	较高	高	高	高

获得, 2020 年 7 月在流域范围内共完成 429 个水位统测点调查。人口、GDP 数据来源于全球变化科学研究数据出版系统。研究所用数据类型及来源具

体见表 6。

3 结果与分析

3.1 流域生态健康评估

评价单元采用乡镇一级行政单元, 流域内河北部分主要乡镇有 17 个, 内蒙部分主要乡镇有 14 个, 共计 31 个评价单元。各乡镇评价指标取值见表 7, 察汗淖尔各乡镇生态系统健康状况如图 3 所示。

察汗淖尔流域内 31 个乡镇中有 29 个处于生态健康状况良好, 占流域面积的 91.10%, 玻璃忽镜乡与满井镇生态健康状况为优秀, 占流域面积的

表 6 研究所用数据类型及来源

Table 6 Data types and sources used in research

数据名称	数据类型	时间	数据来源
DEM	栅格(30 m)	2020	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
NDVI	栅格(30 m)		中国科学院资源环境与数据中心(http://www.resdc.cn)
降水量	站点	2020	中国国家气象信息中心(http://data.cma.cn)
蒸发量	栅格(500 m)	2020	陆地过程分布式活动档案中心(https://lpdaac.usgs.gov/)
地下水埋深	点(6个/10 km ²)	2020	野外调查
土壤含水	栅格(30 m)	2020	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
土地利用类型	栅格(30 m)	2020	中国科学院资源环境与数据中心(http://www.resdc.cn)
人口	栅格(1000 m)	2010	全球变化科学研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn/)
生产总值	栅格(1000 m)	2010	全球变化科学研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn/)

表 7 察汗淖尔流域生态系统各指标取值结果

Table 7 Value results of ecosystem indicators in the Chahannur Lake basin

序号	乡镇	林草	景观	植被	土壤保持	透水面积	人口	GDP
		覆盖率	完整度	类型	功能指数	比例/%	指数	指数
1	八道沟镇	50.01	54.04	57.56	100.00	93.98	98.23	95.54
2	白音特拉乡	48.05	48.75	54.50	99.67	96.54	99.22	96.17
3	玻璃忽镜乡	57.81	72.62	56.30	99.88	97.50	98.63	95.89
4	朝阳镇	54.71	60.19	49.89	99.47	96.93	99.00	95.29
5	处长地乡	28.36	53.68	63.65	99.98	95.87	98.74	96.79
6	大黑沙土镇	47.80	46.78	56.48	99.22	97.00	99.18	97.22
7	大库联乡	37.00	58.51	58.01	100.00	98.92	97.74	93.09
8	大青沟镇	41.52	49.93	60.07	100.00	92.86	97.40	92.15
9	大苏计乡	48.20	48.35	59.61	99.98	94.73	97.95	93.63
10	大西湾乡	55.37	47.27	57.14	100.00	96.64	98.53	94.59
11	大营盘乡	41.78	51.57	60.37	99.98	94.14	98.63	95.32
12	德包图乡	52.67	57.49	51.83	99.43	96.87	98.95	94.93
13	邓油坊镇	26.62	52.56	63.20	99.98	95.86	98.44	95.53
14	二号卜乡	26.23	52.63	63.86	99.99	95.97	98.75	96.69
15	公腊胡同乡	50.29	58.15	52.73	99.49	97.71	98.80	94.38
16	李家地镇	29.91	43.93	61.65	99.99	96.07	98.50	96.38
17	两面井乡	37.95	43.93	60.52	100.00	95.94	98.24	93.67
18	卢家营乡	36.07	48.29	61.16	99.96	96.42	98.92	96.87
19	满德堂乡	39.51	36.51	60.71	99.98	97.20	98.92	97.21
20	满井镇	70.23	60.53	53.52	100.00	95.54	97.79	94.15
21	七甲乡	36.72	55.93	60.45	100.00	92.87	97.88	93.81
22	七台镇	40.00	55.25	60.77	99.48	91.29	97.95	95.72
23	赛乌素镇	45.18	52.77	56.41	99.99	96.74	98.08	93.58
24	三工地镇	50.10	52.32	58.36	100.00	94.78	98.34	95.20
25	十八顷镇	58.19	43.65	55.39	98.89	96.44	98.92	96.61
26	石井乡	55.87	52.74	56.58	100.00	93.52	97.43	91.85
27	屯垦队镇	49.26	56.13	59.43	99.73	97.31	98.68	96.28
28	五股泉乡	55.92	51.83	54.48	100.00	97.12	99.03	96.03
29	小海子镇	38.99	58.10	58.18	98.90	96.23	98.81	96.44
30	长顺镇	57.68	61.47	50.80	99.53	93.11	97.29	92.76
31	忠义乡	29.88	55.33	62.12	99.98	94.63	98.45	96.31

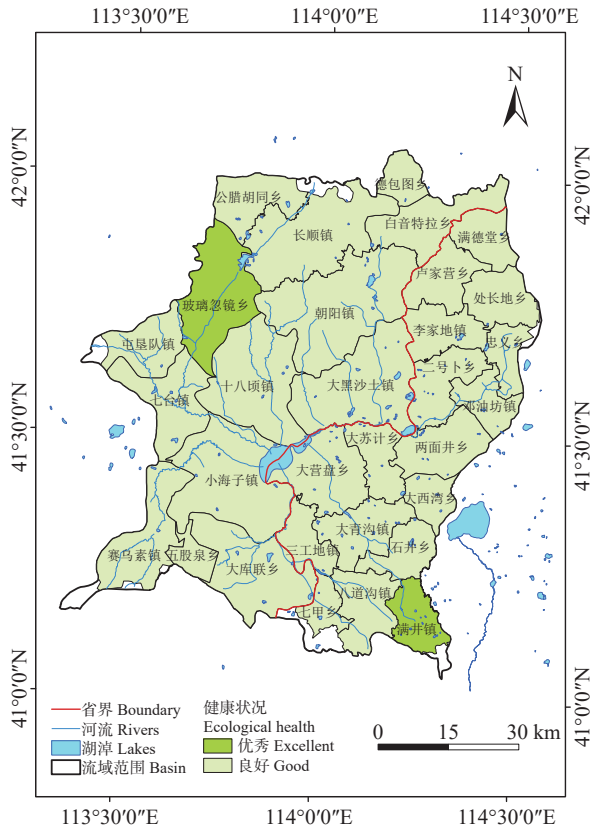


图3 察汗淖尔流域生态健康评估结果
Fig.3 Ecosystem health index assessment results of the Chahannur Lakebasin

6.66%，流域总体生态系统健康状况为良好。流域内土壤保持功能指数、透水面积比例、人口指数、GDP 指数得分较高，林草覆盖率、景观完整度、植被类型指数较低，可通过退耕还林还草、调整土地利用类型可以提高流域生态系统健康综合指数。

3.2 流域生态恢复力评估

利用公式计算的察汗淖尔流域内生态系统恢复力指数结果(图4)显示，察汗淖尔流域生态系统恢复力指数在 0.3~0.8，平均值为 0.55，大部分区域处于 0.4~0.6。利用 ArcGIS 分区统计功能取平均值计算各评价单元的生态恢复力指数，采用自然断点法将生态系统恢复力指数分为五级(表8)。察汗淖尔流域各乡镇生态恢复力等级见图5。

流域内有 8 个乡镇生态恢复力等级处于 1~2

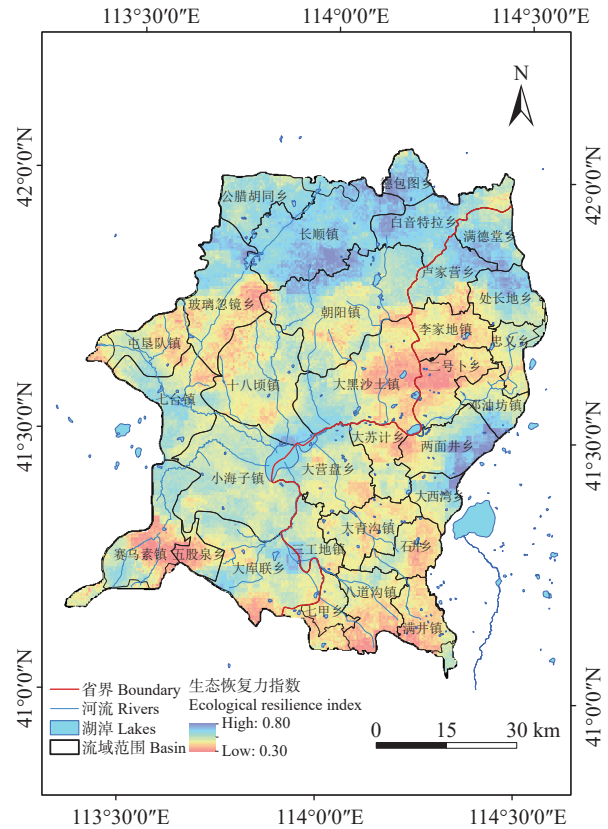


图4 生态恢复力指数
Fig.4 Ecological resilience index

级，占流域面积的 22.76%，23 个乡镇处于 3~4 级，占流域面积的 75.00%，由此可见，察汗淖尔流域生态恢复力较弱。降水是影响干旱和半干旱地区生态环境的主要因素(Ebrahimi Khusfi et al., 2020; Jin et al., 2020)，流域内降水量空间分布不均，北部山区干沟谷发育，有良好的水循环条件，降水量大于南部波状高原与冲洪积平原地区，导致流域内生态恢复力指数较高的区域主要分布在北部山区，其余区域恢复力较低。

3.3 流域生态系统退化风险评估

根据生态退化风险等级评估交互矩阵，对流域内 31 个乡镇开展生态退化风险评估，具体结果如图6。流域内有 9 个乡镇生态系统退化风险处于低与较低，占流域面积的 27.51%，22 个乡镇处于中等，占流域面积的 70.25%，由此可见，察汗淖尔流域

表8 生态恢复力指数分级

Table 8 Classification of ecological resilience index

分级	1级	2级	3级	4级	5级
生态恢复力指数 (R)	$R \geq 0.64$	$0.58 \leq R < 0.64$	$0.52 \leq R < 0.58$	$0.46 \leq R < 0.52$	$R < 0.46$

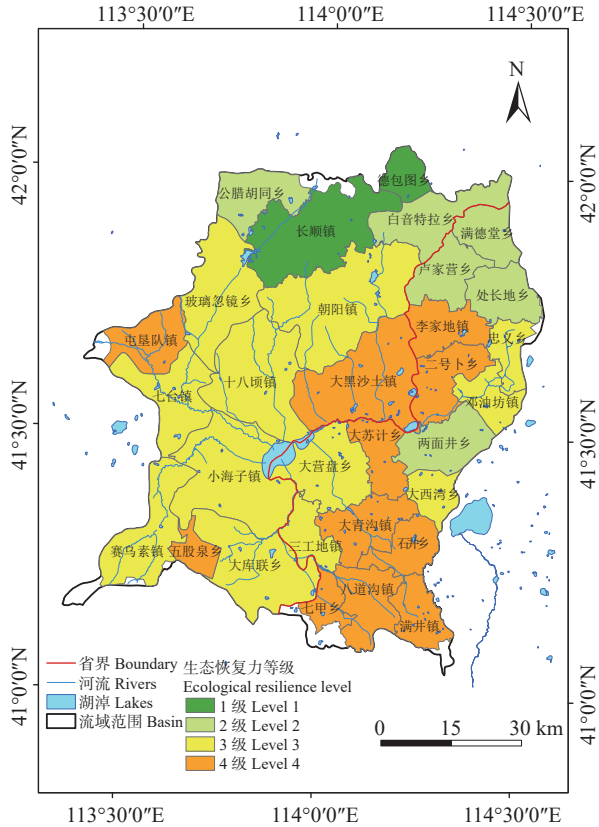


图 5 生态恢复力等级
Fig.5 Ecological resilience level

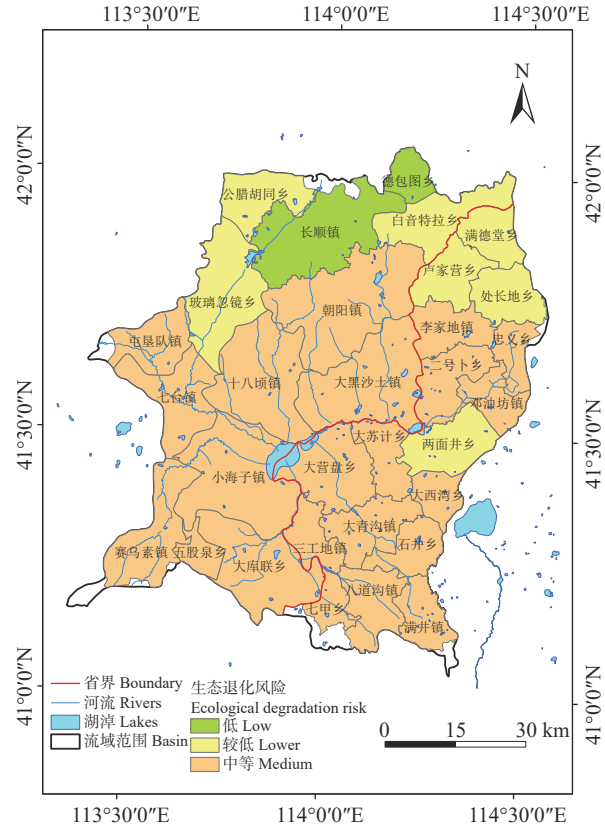


图 6 察汗淖尔流域生态系统退化风险评估结果
Fig.6 Risk assessment results of ecological degradation in the Chahannur Lake basin

整体生态系统退化风险处于中等。

4 讨论

4.1 影响生态系统退化的因素

生态系统退化是目前中国面临的重要环境问题之一(韩大宝等, 2021; Li et al., 2022; Zhang et al., 2022), 本文通过生态系统健康与恢复力的评估框架, 考虑了地形、降水、蒸发、土壤、地下水、土地利用类型与社会经济活动等自然或人为因素。水资源不仅是影响生态环境的关键要素, 也为区域的发展提供保障(郭晓东等, 2021; 宋博等, 2021)。流域内生态用水主要包括大气降水和地下水, 在年降水量不足 400 mm 的干旱半干旱农牧交错带(Li et al., 2019), 地下水为流域生态环境提供了重要支撑, 流域内灌溉扩张带来的地下水超采导致湿地退化、湖泊干涸等生态问题(Chen et al., 2022b), 使流域内生态系统健康变差, 在全球变化的背景下, 坝上地区气候朝暖干化的趋势发展(刘亚玲等, 2020), 降水量的减少将导致流域内生态恢复力的减弱, 进一步

导致流域生态退化风险的增大。在人为因素中, 土地利用类型是导致流域生态风险增大的主要因素(武爱彬赵艳霞, 2017; 郑艺文等, 2022; 杨涛等, 2023), 从 20 世纪 90 年代以来, 流域范围内开始发展错季蔬菜种植, 成为北京“菜篮子”(陈晓璐等, 2021), 不仅使流域内土地利用结构改变, 还导致流域内灌溉需水量增大(张文发等, 2021), 地下水位下降, 生态系统健康进一步变差。在众多学者的研究中, 各因素的交互叠加作用远强于单因子对于生态的影响, 且交互因子对生态的影响是非线性增强的, 而不是简单的叠加(Huo and Sun, 2021), 量化这些潜在因素对生态的贡献仍然是一项具有挑战性的任务(Zhu et al., 2020; Wang et al., 2021; 董佳秋等, 2023)。

4.2 生态退化风险评估的应用

生态系统退化风险的监测与评估已经有了一些研究和实践(王翠翠, 2015; 王京彬等, 2020)。目前的研究主要集中在生态退化风险的控制与保护

方面(荔琢等, 2020), 基于生态退化风险的评价结果, 识别生态恢复优先区(Jiang et al., 2017; 付梦娣等, 2021), 针对区域影响生态退化的关键因素, 提出具体的生态修复措施(Peng et al., 2017), 在空间上组合使用, 达到生态修复与保护的最终目的。根据研究区的生态环境状况, 结合生态退化风险评价结果, 以乡镇为评价单元, 对流域生态进行保护与控制(图 7)。生态退化风险低的区域划分为自然恢复为主, 主要包括长顺镇与德包图乡, 主要是由于该区域位于山间沟谷带, 降水量较大, 生态恢复力较强, 可以通过生态系统的自我恢复能力实现生态修复。生态退化风险较低的区域划分为自然恢复为主人工引导为辅, 主要包括两面井乡与处长地乡在内的 7 个乡镇, 主要是由于该区域植被覆盖较好, 生态健康状况良好, 但地下水埋深较深, 生态恢复力一般, 需要人工引导加以辅助, 可采用退耕还林、还草、减轻放牧等方式避免生态系统受到较大的扰动。生态退化风险中等的区域划分为人工引

导为主, 主要包括大营盘乡与小海子镇在内的 22 个乡镇, 在这些区域生态系统受到的扰动已经或将要超过其所能承受的阈值, 生态系统的恢复力部分或完全丧失, 生态系统的退化程度比较严重。可以加强物理手段进行干预, 注重地下水和植被这些关键要素的保护, 开展地下水压采、水改旱等, 通过划分地下水禁采区升高地下水位, 恢复湖泊湿地, 划分生态保护区减轻人类活动对生态系统产生的干扰。

5 结 论

(1)本文创建了生态系统健康与恢复力交互风险评估矩阵, 综合考虑二者对于生态系统刻画优点, 提出了一种全新的流域尺度的生态系统退化风险评估方法, 为北方干旱—半干旱区生态系统研究提供新的思路。

(2)以流域内乡镇为评价单元, 察汗淖尔流域内有 29 个乡镇生态健康处于良好, 占流域面积的 91.10%, 2 个乡镇处于优秀, 占流域面积的 6.66%; 8 个乡镇生态恢复力等级处于 1~2 级, 占流域面积的 22.76%, 23 个乡镇处于 3~4 级, 占流域面积的 75.00%。察汗淖尔流域生态健康整体较好, 但恢复力较差。

(3)通过综合考虑生态健康与恢复力, 对察汗淖尔流域生态系统退化风险进行评估, 结果显示: 流域内有 9 个乡镇生态系统退化风险处于低与较低, 占流域面积的 27.51%, 22 个乡镇处于中等, 占流域面积的 70.25%, 流域内无高与较高风险状态乡镇, 察汗淖尔流域整体生态系统退化风险处于中等。

References

Chen P, Ma R, Shi J, Si L. 2022a. Effects of groundwater depth and salt content on vegetation in dry lake basins: A case study of Chahan Lake, Northern China[J]. *Geofluids*, 2022: 1–14.

Chen X, Wang Y, Pei H, Guo Y, Zhang J, Shen Y. 2022b. Expansion of irrigation led to inland lake shrinking in semi-arid agro-pastoral region, China: A case study of Chahannur Lake[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41: 101086.

Chen Xiaolu, Wang Yanfang, Zhang Hongmei, Liu Fenggui, Shen Yanjun. 2021. Study on extraction method of irrigated farmland based on ESTARFM NDVI in Chahanur Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 29(6): 1105–1116 (in Chinese with English abstract).

Cheng X, Chen L, Sun R, Kong P. 2018. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem

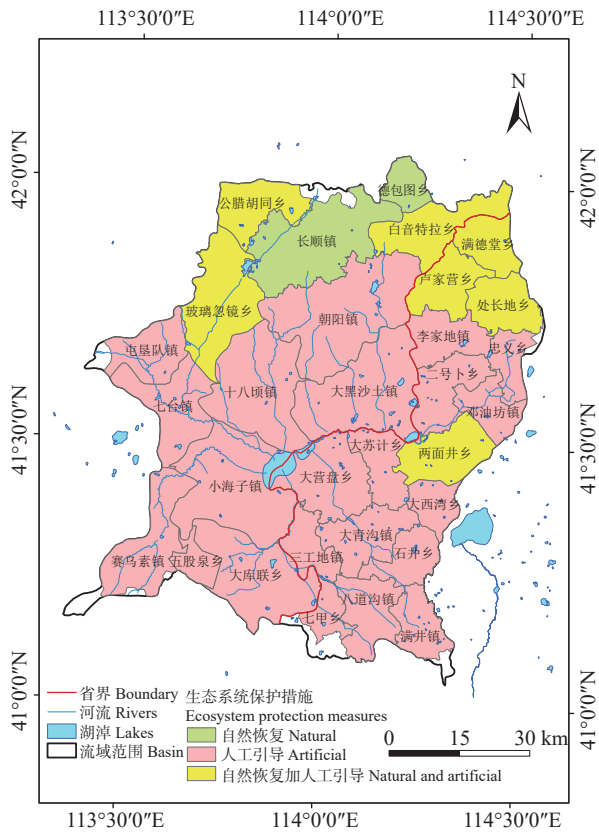


图 7 察汗淖尔流域生态系统保护措施
Fig.7 Ecosystem protection measures in the Chahannur Lake basin

- health in one of the largest basins in China[J]. *Science of the Total Environment*, 616–617: 376–385.
- Das A, Basu T. 2020. Assessment of peri-urban wetland ecological degradation through importance–performance analysis (IPA): A study on Chatra Wetland, India[J]. *Ecological Indicators*, 114: 106274.
- Dong Jiaqiu, Zhang Jun, Gu Xiaofan, GaoHaibo, Yang Bo, Yang Xiaodong, Zhao Chunguang, Zhang Tiegang, Yin Lihe, Wang Xiaoyong. 2023. Assessment of the degree of vegetation dependence on groundwater at basin scale in semi-arid region: A case study of Tuhe River Basin, Ordos Plateau [J/OL]. *Geology in China*: 1–19 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.1556.026.html>. (in Chinese with English abstract).
- Ebrahimi Khusfi Z, Khosroshahi M, Roustaei F, Mirakbari M. 2020. Spatial and seasonal variations of sand–dust events and their relation to atmospheric conditions and vegetation cover in semi-arid regions of central Iran[J]. *Geoderma*, 365: 114225.
- Fu Mengdi, Tang Wenjia, Liu Weiwei, He Yuejun, Zhu Yanpeng. 2021. Ecological risk assessment and spatial identification of ecological restoration based on the perspective of ecosystem services: A case study of the source region of the Yangtze River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(10): 3846–3855 (in Chinese with English abstract).
- Fu Zhenghui, Yang Yang, Jiang Xia, Guo Yunyan, Wang Shuhang. 2021. Risk assessment of human activities on ecological health in watersheds: A case study of Hulun Lake Basin[J]. *Environmental Science Research*, 34(4): 785–791 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shanshan. 2022. Research on the Coupling and Coordination of Ecosystem Health and Urbanisation in the Yellow River Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 1–227 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xiaodong, Wang Xiaoguang, Liu Qiang, Wang Changqi, Xiao Changlai, Cheng Xuxue. 2021. Groundwater resources and their ecological and environmental problems in the Songhua–Liaohe river basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1062–1074 (in Chinese with English abstract).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yu Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Status of groundwater resources and its ecological and environmental problems in the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1001–1019 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhou. 2017. Ecological Health Assessment of Nanxi River Basin Based on GIS and RS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1–84 (in Chinese with English abstract).
- Huo H, Sun C. 2021. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: A case study of the northwestern Yunnan Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 130: 108005.
- Jaiswal D, Pandey J. 2021. River ecosystem resilience risk index: A tool to quantitatively characterize resilience and critical transitions in human-impacted large rivers[J]. *Environmental Pollution*, 268: 115771.
- Jiang W, Lü J, Wang C, Chen Z, Liu Y. 2017. Marsh wetland degradation risk assessment and change analysis: A case study in the Zoige Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 82: 316–326.
- Jin K, Wang F, Zong Q, Qin P, Liu C. 2020. Impact of variations in vegetation on surface air temperature change over the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 716: 136967.
- Kang P, Chen W, Hou Y, Li Y. 2018. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J]. *Science of the Total Environment*, 636: 1442–1454.
- Li Meina, Yin Ping, Duan Xiaoyong, Dong Chao, Cao Ke, Yang Lei, Chen Xuanbo. 2022. Study on land use change and ecological environment effect in the typical coastal zone of Yangtze River Delta in the past 20 years[J]. *Geology in China*, 49(4): 1114–1126 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinpeng, Wang Chaoping, Zou Songbing, Yue Wei, Luo Shan, Wang Wenshu, Qin Yihao, San Jun, Qian Jikun, Wang Chunmiao. 2022. Evaluation of ecosystem resilience in the upper Yellow River water-holding area based on hierarchical analysis—A case study of Gannan and Linxia Prefectures[J/OL]. *Desert China*, (6): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Xie Z, Qin Y, Zheng Z. 2019. Estimating relations of vegetation, climate change, and human activity: A case study in the 400 mm annual precipitation fluctuation zone, China[J]. *Remote Sensing*, 11(10): 1159.
- Li Tuo, Jiang Weiguo, Wang Wenjie, Lü Jinxia, Chen Zheng. 2020. Wetland degradation risk assessment method and its application: A case study of Tianjin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 10(1): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- Li T, Zhang Q, Singh V P, Zhao J, Song J. 2022. Identification of degradation areas of ecological environment and degradation intensity assessment in the Yellow River Basin[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 922013.
- Liu Yaling, Xin Zhongbao, Li Zongshan, KeymuBaidang. 2020. Differences in radial growth response of poplar plantation forests to climate change in the Bashang area of Hebei in the last 40 years[J]. *Journal of Ecology*, 40(24): 9108–9119 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanxu, Peng Jian, Wang An, Xie Pan, Han Yinan. 2015. Progress in ecosystem health research[J]. *Journal of Ecology*, 35(18): 5920–5930 (in Chinese with English abstract).
- López D R, Brizuela M A, Willems P, Aguiar M R, Siffredi G, Bran D. 2013. Linking ecosystem resistance, resilience, and stability in steppes of North Patagonia[J]. *Ecological Indicators*, 24: 1–11.
- Mu Q, Zhao M, Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1781–1800.
- Peng Y, Wang Q, Fan M. 2017. Identification of the key ecological factors influencing vegetation degradation in semi-arid agro–pastoral ecotone considering spatial scales[J]. *Acta Oecologica*, 85: 62–68.
- Pei Hongwei, Liu Mengzhu, Li Yali, Zhang Hongjuan, Xiao Yuxiao, Yang Guoli. 2022. Study on the impacts of ecological restoration measures on ecosystem services in arid and semi-arid areas: A

- case study of the Bashang area in Hebei[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 29(2): 192–199, 205 (in Chinese with English abstract).
- Shang Boxuan, Xiao Chunlei, Zhao Dan, Zhu Zhenzhou, Zhang Gaqiang. 2021. Distribution characteristics of lakes in China and proposals for ecological protection and restoration of typical watersheds[J]. *China Geological Survey*, 8(6): 114–125 (in Chinese with English abstract).
- Shen Haoyong, Li Jia, Wang Zhiheng, Xie Hao, Liang Yongping, Xu Yongxin, Han Shuangbao, Ren Jianhui, Pan Yaoyun, Zhao Chunhong, Zhao Yi. 2022. Current status of water resources development and utilisation and ecological and environmental problems in the Fen River Basin, a tributary of the Yellow River[J]. *Geology in China*, 49(4): 1127–1138 (in Chinese with English abstract).
- Song Bo, Zhang Fawang, Yang Huifeng, Liu Chunlei, Meng Ruifang, Nan Tian. 2021. Evaluation of water resources carrying capacity by source based on ecological priority and its application: A case study of Baoding Plain, Hebei[J]. *Geology in China*, 48(4): 1156–1165 (in Chinese with English abstract).
- Sterk M, Gort G, Klimkowska A, Ruijven J, Teeffelen A J A, Wamelink G W W. 2013. Assess ecosystem resilience: Linking response and effect traits to environmental variability[J]. *Ecological Indicators*, 30: 21–27.
- Tang D, Liu X, Zou X. 2018. An improved method for integrated ecosystem health assessments based on the structure and function of coastal ecosystems: A case study of the Jiangsu coastal area, China[J]. *Ecological Indicators*, 84: 82–95.
- Wang Y, Shen Y, Guo Y, Li B, Chen X, Guo X, Yan H. 2022. Increasing shrinkage risk of endorheic lakes in the middle of farming–pastoral ecotone of Northern China[J]. *Ecological Indicators*, 135: 108523.
- Wang Y, Zhang Z, Chen X. 2021. Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes based on geodetector: A case study in the Poyang Lake Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 13(24): 5081.
- Wang Yanfang, Pei Hongwei. 2018. Evaluation of ecological environment status and countermeasures in the dam area of Hebei from 1980 to 2015[J]. *Ecological Economy*, 34(1): 186–190, 236 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cuicui. 2015. Risk Assessment of Degradation of Marshy Wetlands in Ruoergai Plateau and its Evolution Analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin, Wei Xiaofeng, Zhang Huijiong, Gan Fengwei. 2020. Ecological geological survey method based on geoconstruction: A case study of comprehensive geological survey in national ecological civilisation demonstration area of Chengde City, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1611–1624 (in Chinese with English abstract).
- Wu Nan, Chen Hongfeng, Kuang Pidong, Feng Chaoyang, Jiang Hongqiang, Wu Wenjun, Li Daiqing, Zhao Yangduan. 2020. Risk assessment of disturbance and degradation in ecological protection red line areas: A case study in Anhui Province[J]. *Journal of Ecology*, 40(16): 5571–5578 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qinyu, Zhang Shaoliang, Yang Yongjun, Hou Huping, Chen Dongxing. 2021. Spatial assessment of ecosystem degradation risk in semi–arid mining areas based on resilience[J]. *Journal of Coal*, 46(5): 1587–1598 (in Chinese with English abstract).
- Wu Aibin, Zhao Yanxia. 2017. Evolution of spatial and temporal pattern of ecological land use and analysis of ecosystem service value in the Bashang plateau[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 33(2): 283–290 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fangyuan, Lu Ying, Liu Han, Cheng Lin, Wu Xinghua, Chen Yushun, Wang Dianchang. 2022. Progress of water ecosystem health research in the source area of the Yangtze River[J]. *China Environmental Monitoring*, 38(1): 14–26 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dan, Wang Wenjie, Wu Xiqin, Jiang Weiguo, Zhang Huan. 2021. Steady state transition of the wetland ecosystem and response to climate change in the lakes and wetlands of Angulinao, 1985–2016[J]. *Environmental Science Research*, 34(12): 2954–2961 (in Chinese with English abstract).
- Yang Geng, Cao Yingui, Luo Gubai, Kuang Xinyu, Huang Yuhan, Wang Shufei. 2019. Progress in ecosystem resilience assessment[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 60(3): 508–513 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tao, Yan Xiaojuan, Zhao Hansen, Wang Peng, Zhu Tao, Cai Haojie, Zuo Xugang, Xi Rengang, Zhang Yulian, Wang Lishe, Wu Shuo. 2023. Conversion of land use types in the Weihe River Basin and its impact on ecological spatial pattern[J]. *Geology in China*, 50(5): 1460–1470 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haochen, Bian Zhengfu, Chen Fu, Mou Shouguo. 2020. Diagnosis of mine land ecosystem degradation and its regulation[J]. *Coal Science and Technology*, 48(12): 214–223 (in Chinese with English abstract).
- Yu L, Wu Z, Du Z, Zhang H, Liu Y. 2021. Insights on the roles of climate and human activities to vegetation degradation and restoration in Beijing–Tianjin sandstorm source region[J]. *Ecological Engineering*, 159: 106105.
- Zhan Jinyan, Yan Haiming, Deng Xiangzheng, Zhang Tao. 2012. Evaluation of forest ecosystem resilience: A case study of Lianhua County, Jiangxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 27(8): 1304–1315 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenfa, Su Tao, Lei Bo, Wang Lei, Sun Haoran, Xu Yueyue. 2021. Analysis of actual evapotranspiration during crop fertility in Chahannur Basin, Inner Mongolia based on multi–source data[J]. *Water Saving Irrigation*, (10): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yingrui. 2017. Ecological Health Assessment of Xiaoqing River Basin[D]. Jinan: Shandong University, 1–78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang G, Yuan R, Singh V P, Wu W, Wang D. 2022. Dynamic responses of ecological vulnerability to land cover shifts over the Yellow river Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 144: 109554.
- Zheng Yiwen, Li Fojie, Liu Xiaohuang, Chang Ming, Zhao Honghui, Lai Ming, Zhang Zifan. 2022. Spatial and temporal changes of

- natural resources and their ecological and environmental effects in Northeast China over the past 30 years under the background of industrialisation[J]. *Geology in China*, 49(5): 1361–1373 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L, Ke Y, Hong J, Zhang Y, Pan Y. 2022. Assessing degradation of lake wetlands in Bashang Plateau, China based on long-term time series Landsat images using wetland degradation index[J]. *Ecological Indicators*, 139: 108903.
- Zhu L J, Meng J, Zhu L K. 2020. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 117: 106545.
- Zhuo Zhaojun, Ke Yinghai, Hong Jianming, Zhu Lijuan, Zhang Yuhu. 2022. The value of ecosystem services and its changes in the Zhangjiakou Bashang Plateau since 2000[J]. *Wetland Science*, 20(2): 162–175 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈晓璐, 王彦芳, 张红梅, 刘峰贵, 沈彦俊. 2021. 基于 ESTARFM NDVI 的察汗淖尔流域灌溉耕地提取方法研究[J]. *中国生态农业学报* (中英文), 29(6): 1105–1116.
- 董佳秋, 张俊, 顾小凡, 高海波, 杨波, 杨晓东, 赵春光, 张铁钢, 尹立河, 王晓勇. 2023. 半干旱区流域尺度植被依赖地下水程度评价: 以鄂尔多斯高原海流兔河流域为例[J/OL]. *中国地质*: 1–19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.1556.026.html>.
- 付梦娣, 唐文家, 刘伟玮, 何跃君, 朱彦鹏. 2021. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例[J]. *生态学报*, 41(10): 3846–3855.
- 付正辉, 张扬, 姜霞, 郭云艳, 王书航. 2021. 人类活动对流域生态健康影响风险评估方法研究: 以呼伦湖流域为例[J]. *环境科学研究*, 34(4): 785–791.
- 郭珊珊. 2022. 黄河流域生态系统健康与城镇化耦合协调研究[D]. 北京: 中国矿业大学: 1–227.
- 郭晓东, 王晓光, 刘强, 王长琪, 肖长来, 程旭学. 2021. 松花江—辽河流域地下水资源及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1062–1074.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1001–1019.
- 黄舟. 2017. 基于 GIS 与 RS 的楠溪江流域生态健康评估[D]. 杭州: 浙江大学: 1–84.
- 李梅娜, 印萍, 段晓勇, 董超, 曹珂, 杨磊, 陈选博. 2022. 近 20 年来长江三角洲海岸带典型区土地利用变化与生态环境效应研究[J]. *中国地质*, 49(4): 1114–1126.
- 李鑫鹏, 王朝平, 邹松兵, 岳玮, 罗珊, 王文澍, 秦艺豪, 桑骏, 钱继坤, 王春苗. 2022. 基于层次分析法的黄河上游水源涵养区生态系统恢复力评价——以甘南州、临夏州为例[J/OL]. *中国沙漠*, (6): 1–9.
- 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 陈征. 2020. 湿地退化风险评估方法及其应用——以天津市为例[J]. *环境工程技术学报*, 10(1): 17–24.
- 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 克依木买尔当. 2020. 近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. *生态学报*, 40(24): 9108–9119.
- 刘焱序, 彭建, 汪安, 谢盼, 韩忆楠. 2015. 生态系统健康研究进展[J]. *生态学报*, 35(18): 5920–5930.
- 裴宏伟, 刘孟竹, 李雅丽, 张红娟, 肖雨霄, 杨国丽. 2022. 生态修复措施对于干旱半干旱地区生态系统服务影响研究——以河北坝上地区为例[J]. *水土保持研究*, 29(2): 192–199, 205.
- 尚博譞, 肖春蕾, 赵丹, 朱振洲, 张高强. 2021. 中国湖泊分布特征及典型流域生态保护修复建议[J]. *中国地质调查*, 8(6): 114–125.
- 申豪勇, 李佳, 王志恒, 谢浩, 梁永平, Xu Yongxin, 韩双宝, 任建会, 潘尧云, 赵春红, 赵一. 2022. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J]. *中国地质*, 49(4): 1127–1138.
- 宋博, 张发旺, 杨会峰, 刘春雷, 孟瑞芳, 南天. 2021. 基于生态优先的水资源承载力分源评价及应用——以河北保定平原为例[J]. *中国地质*, 48(4): 1156–1165.
- 王彦芳, 裴宏伟. 2018. 1980—2015 年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J]. *生态经济*, 34(1): 186–190, 236.
- 王翠翠. 2015. 若尔盖高原沼泽湿地退化风险评估及其演变分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–85.
- 王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 甘凤伟. 2020. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. *中国地质*, 47(6): 1611–1624.
- 吴楠, 陈红枫, 匡丕东, 冯朝阳, 蒋洪强, 吴文俊, 李岱青, 赵洋尘. 2020. 生态保护红线区干扰退化风险评价——以安徽省为例[J]. *生态学报*, 40(16): 5571–5578.
- 吴秦豫, 张绍良, 杨永均, 侯湖平, 陈东兴. 2021. 基于恢复力的半干旱矿区生态系统退化风险空间评估[J]. *煤炭学报*, 46(5): 1587–1598.
- 武爱彬, 赵艳霞. 2017. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析[J]. *农业工程学报*, 33(2): 283–290.
- 熊芳园, 陆颖, 刘晗, 程琳, 吴兴华, 陈宇顺, 王殿常. 2022. 长江源区水生态系统健康研究进展[J]. *中国环境监测*, 38(1): 14–26.
- 杨丹, 王文杰, 吴秀芹, 蒋卫国, 张欢. 2021. 1985—2016 年安固里淖湖泊湿地生态系统稳态转变及对气候变化的响应[J]. *环境科学研究*, 34(12): 2954–2961.
- 杨庚, 曹银贵, 罗古拜, 况欣宇, 黄雨晗, 王舒菲. 2019. 生态系统恢复力评价研究进展[J]. *浙江农业科学*, 60(3): 508–513.
- 杨涛, 阎晓娟, 赵寒森, 王鹏, 朱涛, 蔡浩杰, 左旭刚, 奚仁刚, 张雨莲, 王立社, 吴硕. 2023. 渭河流域土地利用类型转换及其对生态空间格局的影响[J]. *中国地质*, 50(5): 1460–1470.
- 于昊辰, 卞正富, 陈浮, 牟守国. 2020. 矿山土地生态系统退化诊断及其调控研究[J]. *煤炭科学技术*, 48(12): 214–223.
- 战金艳, 闫海明, 邓祥征, 张韬. 2012. 森林生态系统恢复力评价——以江西省莲花县为例[J]. *自然资源学报*, 27(8): 1304–1315.
- 张文发, 苏涛, 雷波, 王蕾, 孙浩然, 许越越. 2021. 基于多源数据的内蒙古察汗淖尔流域作物生育期实际蒸散发分析[J]. *节水灌溉*, (10): 1–6.
- 张颖睿. 2017. 小清河流域生态健康评估研究[D]. 济南: 山东大学: 1–78.
- 郑艺文, 李福杰, 刘晓煌, 常铭, 赵宏慧, 赖明, 张子凡. 2022. 工业化背景下 30 年来中国东北地区自然资源时空变化及其生态环境效应[J]. *中国地质*, 49(5): 1361–1373.
- 卓昭君, 柯樱海, 洪剑明, 朱丽娟, 张玉虎. 2022. 2000 年以来张家口坝上高原生态系统服务价值及其变化[J]. *湿地科学*, 20(2): 162–175.