

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020286
引用格式: 杨雯娜,周亮,孙东琪. 基于分区 - 集成的黄河流域生态脆弱性评价[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):211 - 218.
(Yang W N,Zhou L,Sun D Q. Ecological vulnerability assessment of the Yellow River basin based on partition - integration concept [J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(3):211 - 218.)

基于分区 - 集成的黄河流域生态脆弱性评价

杨雯娜^{1,2}, 周 亮^{1,3,4}, 孙东琪³

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,兰州 730070; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; 4. 甘肃省地理国情监测工程实验室,兰州 730070)

摘要:黄河流域是中国重要的生态安全屏障、资源能源集聚地区、生产活动高度密集地区,其生态环境变化直接关系到流域生态与经济可持续发展。研究基于“分区 - 集成”的评价方法,选取水资源、气候、土壤、植被及人类活动等指标建立评价体系,引入乘法模型,对黄河流域的生态脆弱性进行了量化评价与空间异质性分析。结果表明:流域整体生态环境呈中度脆弱,中度脆弱地区占流域面积的 42. 46%,脆弱性较为严重的地区主要为流域上游沿黄城市经济带;2000—2018 年流域生态脆弱水平先降低后升高,其中 2000 年生态问题最为突出,2015 年脆弱程度最低,其综合脆弱指数分别为 2. 28 和 2. 00;流域范围内生态脆弱性分布与趋势演变空间差异明显,流域上游高原地区生态脆弱程度明显升高,沿黄城市带脆弱性等级无明显变化,中下游地区生态环境改善趋势显著。

关键词:分区 - 集成;生态脆弱性;空间差异;可持续发展;黄河流域

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 - 034X(2021)03 - 0211 - 04

0 引言

生态可持续发展是一切可持续发展的环境基础,人类在满足自身需求的同时应保护赖以生存的全球生命支持系统。流域是生态系统的重要组成部分,其丰富的水资源对人类生活、农田灌溉、环境净化及航运沟通具有重要意义^[1]。然而,受全球气候变化与频繁的人类活动的影响,流域自净能力下降、生态功能退化等环境问题日趋凸显^[2-3]。生态脆弱性作为生态系统对外界环境干扰表现出的敏感程度和恢复能力的评价指标,可直观反映流域生态系统健康水平,开展流域生态脆弱性定量评价,研究生态环境整体脆弱程度与演变规律,对流域环境改善和未来发展具有重要参考价值^[4-5]。

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道,是中国主要经济地带之一,“资源丰富、水患制约、生态脆弱”概括了流域机遇与挑战并存的现状^[6]。2019 年习总书记提出“黄河流域生态

保护和高质量发展”重大战略,旨在强化流域生态修复治理、提高环境承载能力^[7],中国学者也已对流域典型生态问题开展了多项研究^[6]。以往研究基于流域内地貌结构、气候背景及生态系统的丰富性与差异性,探索人类活动影响下的流域水文演变规律和不同尺度的水资源承载能力^[6,8],为确定居民用水及农业用水阈值等提供重要参考;探析不同气候条件、地貌类型对植被、水土及生态系统的作用机制^[9-12],有助于维持流域生态系统稳定,保护水资源、土地、植被和其他自然资源的可持续性^[5]。已有的研究为流域综合治理、环境改善及经济发展等提供了定量与定性的参考^[7,13],但仍有些许不足,主要体现在:①研究区缺乏空间连贯性,湿地^[11]、河口三角洲^[10,12]以及水土保持重点地区^[9,14]等研究目标分布零散,难以反映流域整体的生态现状;②部分大尺度研究未考虑流域自然环境的空间差异,难以保证研究可靠性。

本文为确保研究的整体性及准确性,综合考虑黄河流域环境的空间异质性及人类活动影响,对流

收稿日期: 2020 - 09 - 10; 修订日期: 2020 - 12 - 14
基金项目: 国家自然科学基金项目“干旱区城镇扩张对绿洲耕地多尺度影响与情景模拟”(编号: 41961027)、甘肃省重点人才项目“西部贫困山区交通减贫与乡村振兴创新人才培养项目”(编号: 2021RCXM073)及兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”共同资助。
第一作者: 杨雯娜(1997 -),女,硕士,主要研究方向为流域生态遥感。Email: yangwennaleo10@ 163. com。
通信作者: 周亮(1983 -),男,教授,主要研究方向为城市遥感、区域可持续发展等。Email: zhougeo@ 126. com。

域整体生态脆弱程度进行评估。研究使用多源遥感数据及社会经济数据,引入“分区-集成”的评价手段解决流域自然环境差异较大的难题,运用熵权法建立客观的脆弱性评价体系,并对 2000—2018 年的生态脆弱性进行综合评价,以流域生态脆弱性整体格局及演化趋势为基础,分析导致生态脆弱性格局变化的因素,为流域生态可持续发展规划提供理论支撑。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

黄河发源于青海省巴颜喀拉山脉,全长约 5 464 km。黄河流域地跨中国东西两部,地域上承东启西,地貌类型复杂,地形起伏较大,高程最大落差达 4 480 m。气候类型多样,降水由东向西逐步递减,年均降水量为 200 ~ 700 mm,年蒸发量为 850 ~ 1 600 mm,且 70% 的降水集中于 6—9 月份^[15]。流域上游天然草地生态功能退化率为 60% ~ 90%,土地沙化问题突出、水土流失问题严重^[7]。近年来,流域范围中黄土高原已治理超过总面积 60% 的水土问题^[16],流域生态环境呈整体改善态势,但局部生态破坏依然严重,生态保护格局亟须优化。图 1 为黄河流域区位图。

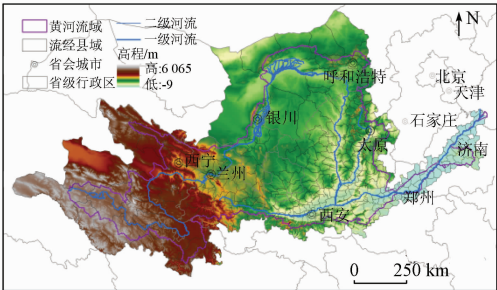


图 1 黄河流域区位图

Fig. 1 Location of Yellow River Basin

1.2 数据源

本文研究数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年共 5 期的气候、水资源、土壤、植被及人类活动数据。气候数据来源中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>),包括气温、降水及日照时数。水资源数据来自各省水利部门官方网站发布的统计年鉴。湿润指数、NPP 数据以及植被覆盖数据为美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官网(<https://www.nasa.gov/>)发布的 MODIS 系列数据。土壤数据来自北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn/>),由 1:100 万土壤类型

图和第二次土壤普查获取到的土壤剖面数据编制而成。生物多样性数据、DEM 数据、人口数据、GDP 密度数据和土地利用数据均从中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)下载,空间分辨率均为 1 km × 1 km。

2 黄河流域生态脆弱性评价体系

2.1 黄河流域生态分区

黄河流域横跨 3 大阶梯,空间分异特征显著,为因地制宜地对黄河流域进行脆弱性评价,引入“分区-集成”的评价手段,基于气候、地形、植被、土壤等因子进行生态分区。该研究充分考虑到流域存在的主要生态环境问题(水土流失、土地盐碱化等),利用 ISODATA 算法^[17]并结合前人研究经验,将流域分为高原寒区(I 区)^[18]、干旱过渡区(II 区)^[19]及季风气候区(III 区)^[20]3 个生态区(图 2)。

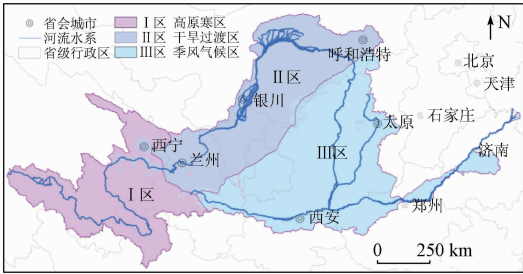


图 2 黄河流域分区方案

Fig. 2 Zoning plan for the Yellow River Basin

2.2 黄河流域生态脆弱性评价体系构建

基于流域显著的自然本底特征空间异质性格局,借鉴以往专家对其开展的不同地区和不同尺度的生态研究,结合区域生态特点及评价指标的合理性、可获取性^[18,21-22],以生态分区为研究单元选取水资源、气候、植被、土壤及人类活动 5 类一级指标、18 种二级指标,使用熵权法^[23]确定流域脆弱性评价体系如表 1 所示。

表 1 黄河流域生态脆弱性评价体系

Tab. 1 Ecological vulnerability assessment system of the Yellow River Basin

一级指标	二级指标	权重/%		
		I 区	II 区	III 区
水	年降水量	1.30	3.30	2.98
	水资源总量	2.23	8.50	7.32
	河网密度	0.16	0.38	0.60
	水流速率* ^①	1.20	5.16	8.10
气候	年积温(≥10℃)	7.47	0.34	0.92
	湿润指数	2.40	5.15	4.97
	日照时数	1.36	2.53	1.50
	极端降水*	5.22	13.92	8.48

(续表)

一级指标	二级指标	权重/%		
		I 区	II 区	III 区
土壤	黏土含量	0.14	0.45	0.39
	砂土含量 *	0.10	0.54	0.37
	富水能力	2.38	3.65	4.52
植被	生物多样性指数	0.27	0.44	1.32
	森林覆盖度	3.28	8.27	10.03
	草地覆盖度	0.19	0.20	0.90
人类活动	人口密度 *	19.49	14.48	14.01
	GDP 密度 *	34.97	21.83	15.05
	路网密度 *	3.83	1.73	2.79
	建设用地强度 *	14.00	9.14	15.74

①：带 * 的指标为负向指标。

2.3 脆弱性指数与生态脆弱性等级划分

加权线性组合法是生态学中常用的方法之一，其作用是将多个指标综合为一个指标，更为直观地反映生态系统现状^[18]。根据黄河流域各生态分区脆弱性评价体系，采用加权线性组合法计算流域各分区脆弱性指数，公式为：

$$EVI = \sum_{j=1}^n w_j I_j / \sum_{j=1}^n w_j \quad (1)$$

式中：EVI 为生态脆弱性指数计算结果；w_j为因子 j 的权重；I_j标准化后的因子 j。

由于各生态分区评价体系存在差异，难以进行直接对比。因此，文章参照国内生态脆弱性研究成果并选用 NPP 作为辅助参数，协助进行生态脆弱性等级阈值的确定与生态脆弱等级划分^[21]，具体步骤如下：通过自然断点法将各生态分区 NPP 分为 4 类并提取分类 NPP 阈值；使用相同的方法将生态脆弱性评价结果分 4 个等级；随后，使用分类 NPP 阈值进行脆弱性阈值的修正，确定生态脆弱性等级；最后，将分类结果从低至高依次定义为轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱（表 2）。其中，轻度脆弱地区生态环境较为良好，环境健康水平较为稳定；中度脆弱区域生态健康水平较轻度脆弱地区偏低，不宜进行高强度的生态开发；重度脆弱和极度脆弱地区环境问题颇为严峻，应当尽快采取合理措施改善环境状况。

表 2 黄河流域各分区生态脆弱性阈值
Tab.2 Ecological vulnerability threshold of each ecological zone in the Yellow River Basin

脆弱性等级	脆弱性阈值		
	高原寒区	干旱过渡区	季风气候区
轻度脆弱	(0,0.14]	(0,0.24]	(0,0.30]
中度脆弱	(0.14,0.20]	(0.24,0.31]	(0.30,0.40]
重度脆弱	(0.20,0.31]	(0.31,0.40]	(0.40,0.51]
极度脆弱	(0.31,1]	(0.40,1]	(0.51,1]

2.4 演化趋势与影响因子分析

乘法模型常用于对长期变化趋势进行分析的统

计方法，可反映数据在时间序列上的水平及演化趋势^[24]。为更加直观地对各年份黄河流域整体的生态脆弱性进行度量及比较分析，引入综合脆弱指数定量反映流域整体脆弱性程度，即

$$V = \sum_{j=1}^5 P_j \frac{A_j}{S} \quad (2)$$

式中：V 为综合脆弱指数；P_j为等级 j 的脆弱性赋值（轻度、中度、重度和极度脆弱分别赋值为 1,2,3,4）；A_j为等级 j 的脆弱性面积；S 为流域总面积。

皮尔森相关系数是两个随机变量之间相关性的量度，也是应用最广泛的关系量度之一^[25]。为分析不同因子对黄河流域生态脆弱性的影响程度，利用该系数对流域生态脆弱程度与各因子进行双变量分析，得到变量与评价结果间的相关系数，为生态保护策略制定提供参考。

3 研究结果

黄河流域地域广阔、地形多样，为具体分析其环境状况，本文从二级流域、生态分区以及流域整体 3 个尺度对黄河流域生态脆弱性空间分布、变化趋势进行分析；并将 2000 年与 2018 年流域生态脆弱程度进行对比，探究流域生态环境变化状况，简要分析流域生态脆弱程度影响机制，为流域高质量发展提供参考。

3.1 二级流域生态脆弱性时空异质性特征

黄河流域涵盖的 8 个二级流域中（图 3），兰河（兰州至河口镇）区间综合脆弱指数为 2.82，脆弱程度最高，三花（三门峡至花园口）区间脆弱程度最低，其综合脆弱指数仅为 2.37。不同二级流域脆弱等级分布亦存在差异，兰河区间极度脆弱所占比例为二级流域中最高，为 14.56%；重度脆弱地区集中于兰河、花以下（花园口以下）区间及内流区，分别占其面积的 61.26%，47.38% 和 45.61%；中度脆弱地区分布最广，除兰河、三花区间仅占其面积的

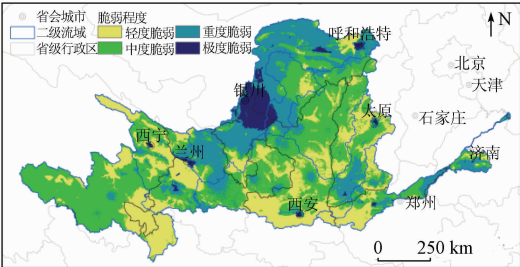


图 3 黄河流域生态脆弱性分布
Fig.3 Distribution of ecological vulnerability in the Yellow River Basin

16.21% 和 27.97% 外,其他区间均不低于 37%; 龙兰(龙羊峡至兰州)区间轻度脆弱所占面积比例最高为 46.23%,兰河区间所占比例最低为 7.98%。

2000—2018 年间,龙以上(龙羊峡以上)、龙兰区间环境大规模恶化,恶化面积分别为其面积的 66.85% 和 41.76%; 兰河区间和内流区部分区域生态环境得到改善,大部分地区生态环境维持原状,但

个别区域仍有恶化趋势; 河龙(河口镇至龙门)、龙三(龙门至三门峡)、三花和花以下区间无明显恶化现象,并且得益于生态可持续发展战略的推进,生态状况得到明显改善,改善面积分别为 52.17%, 54.96%, 58.68% 和 76.99%。黄河流域各年份生态脆弱评价结果见图 4。

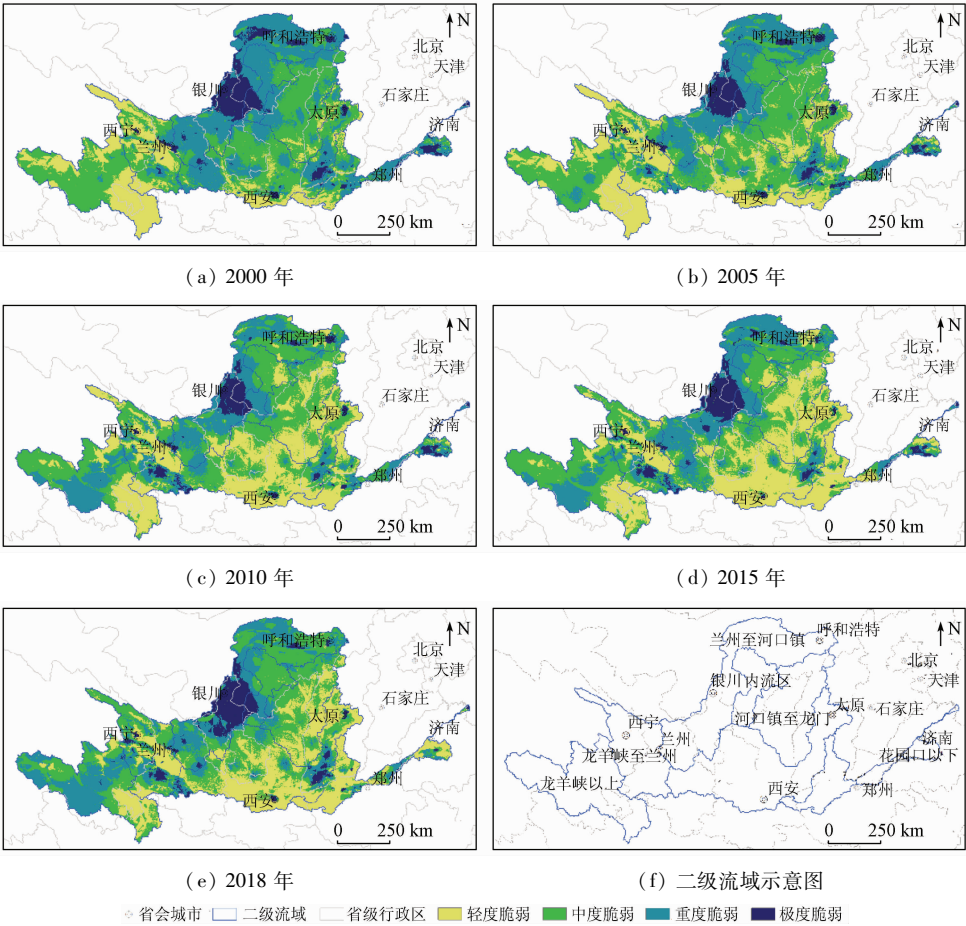


图 4 黄河流域各年份生态脆弱性评价结果

Fig.4 Ecological vulnerability assessment results of the Yellow River Basin of each year

3.2 生态分区脆弱性时空分异规律

本研究根据水、气候、植被及土壤因素将流域分为高原寒区、干旱过渡区和季风气候区 3 个分区。其中,高原寒区及季风气候区综合脆弱指数分别为 1.71 和 1.77,均属于中度脆弱,干旱过渡区则高达 2.59,生态环境呈重度脆弱。流域中度脆弱区域集中分布于高原寒区和季风气候区,分别占其面积的 58.10% 和 48.96%,轻度脆弱比例分别为 35.50% 和 37.33%,重度脆弱地区分别是分区面积的 5.96% 和 13.34%,极度脆弱所占面积极少;脆弱程度较高的干旱过渡区重度脆弱和极度脆弱分别为 52.50% 和 10.92%,轻度脆弱、中度脆弱仅为其面积的 15.82% 和 20.75%。

2000—2018 年间,高原寒区有 62.50% 的地区

生态有所恶化,整体生态健康水平下降(图 5),如何兼顾生态安全与经济发展是该分区的紧要问题;季风气候区生态系统较为稳定,其环境改善区域面积达

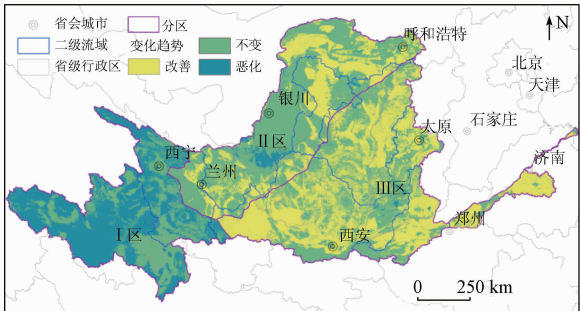


图 5 黄河流域生态脆弱性等级变化(2000—2018 年)

Fig.5 Changes in the ecological vulnerability of the Yellow River Basin (2000—2018)

64.50%,恶化面积仅为0.77%,生态问题得到一定解决,但复杂的人地关系仍值得关注;干旱过渡区33.12%的地区生态健康水平有所提高,但受人类活动、地形地貌等因素影响,该生态分区仍存在大规模极度脆弱地区,环境问题依旧严峻。

3.3 黄河流域生态脆弱性空间演化

根据二级流域与生态分区的生态脆弱性分析结果(图6),对黄河流域进一步分析可得:流域整体综合脆弱指数为2.01,呈中度脆弱。重度脆弱地区主要分布于黄土高原北部、西北部地区,零星分布于黄河流域中下游地区,占流域面积的23.83%。极度脆弱区多位于黄河上游宁蒙交界处与部分城市经济圈,属干旱过渡区,面积仅占流域面积的3.75%,但仍是生态治理的重点区域。流域轻度脆弱、中度脆弱区域分别占总面积的29.96%和42.46%,分布较为广泛。

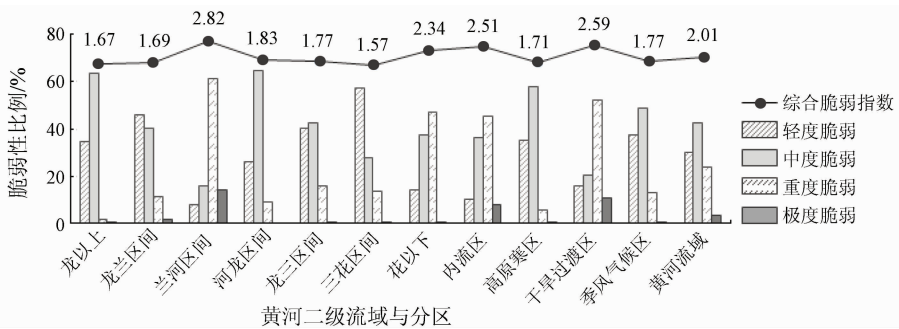


图7 黄河流域各生态分区生态脆弱性等级比例

Fig.7 Proportion of ecological vulnerability grades in each ecological zone of the Yellow River Basin

比例由2000年的19.28%增至2018年的30.25%,重度脆弱面积占比由32.98%下降至24.22%;重度脆弱比例下降8.76%,极度脆弱比例变化微弱(下降0.12%)。流域整体生态状况虽有所改善(改善面积为流域面积的10.97%),中下游地区生态健康水平有所提升,但流域上游生态环境仍存在恶化趋势,无法满足流域生态保护和高质量发展要求。

3.4 黄河流域生态脆弱性成因分析

为分析黄河流域生态脆弱性空间分布与演化趋势影响因素,对生态脆弱程度与各指标进行双变量分析,得到其皮尔森相关系数(表3)。由分析结果可知,流域生态脆弱水平与水、气候、植被与人类活动密切相关,人类活动对生态环境的影响最为剧烈,受土壤成分影响最小。水资源总量、生物多样性指数、人口密度、GDP密度、路网密度、建设用地强度、湿润指数、极端降水等指标对流域生态脆弱程度影响最为显著,其中水资源总量(-0.345)、生物多样性指数(-0.300)和湿润指数(-0.528)为良性指标,有助于维护生态系统的稳定。人口密度、GDP密度、路网密度、建设用地强度和极端降水对流域生

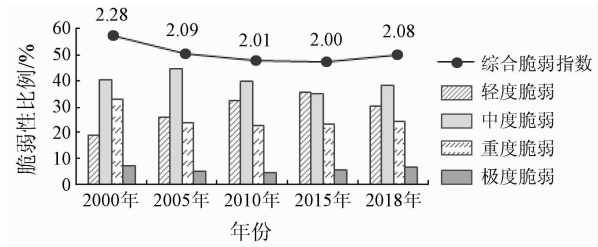


图6 黄河流域各年份生态脆弱性等级分布比例

Fig.6 Proportion of ecological vulnerability grades in the Yellow River Basin in each year

利用综合脆弱指数对流域各年份脆弱性评价结果进行量化(图7),得到其综合脆弱指数分别为2.28,2.09,2.01,2.00和2.08;其中2000年脆弱程度最高,2015年生态环境最优。2000—2018年间,流域整体生态环境有所改善;轻度脆弱及重度脆弱所占面积存在一定波动,两者变化趋势分别为“先增加后减少”和“先减少后增加”,轻度脆弱地区

态具有负面影响,其系数分别为0.427,0.381,0.444,0.479和0.455,即气候灾害频发与人类活动日益频繁加剧了流域生态脆弱程度。

表3 生态脆弱性与评价指标间的皮尔森系数

Tab.3 Pearson coefficient between ecological vulnerability and evaluation index

一级指标	二级指标	Avg ^①	Sd	PPMC
水	年降水量	0.328	0.148	-0.153
	水资源总量	0.210	0.157	-0.345
	河网密度	0.564	0.117	0.026
	水流速率	0.901	0.993	0.137
气候	年积温(≥10℃)	0.557	0.282	-0.242
	湿润指数	0.264	0.149	-0.528
	日照时数	0.473	0.155	0.072
	极端降水	0.182	0.169	0.455
土壤	黏土含量	0.351	0.121	-0.110
	砂土含量	0.522	0.137	0.096
	富水能力	0.321	0.224	-0.085
植被	生物多样性指数	0.487	0.216	-0.300
	森林覆盖度	0.058	0.111	-0.159
	草地覆盖度	0.254	0.102	-0.016
人类活动	人口密度	0.016	0.028	0.427
	GDP密度	0.009	0.022	0.381
	路网密度	0.351	0.207	0.444
	建设用地强度	0.043	0.058	0.479

①表中,Avg为平均数,Sd为标准差,PPMC为皮尔森相关系数。

4 结 论

黄河流域是中国人口、资源与环境矛盾最集中的区域之一,本文基于“分区-集成”的评价手段对流域进行生态脆弱性评价,对流域生态保护与高质量发展具有一定参考价值。

1)黄河流域整体呈中度脆弱,轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱比例分别为 29.96%,42.46%,23.83%和 3.75%,脆弱性较高的地区主要为宁蒙交界处及上游沿黄城市带,青藏高原及中下游地区生态环境相对良好。

2)2000—2018 年间,流域生态脆弱水平“先降低后升高”,整体趋于改善。其中,中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱所占比例均有所下降,轻度脆弱区域比例上升 10.97%,中下游地区生态环境明显改善,上游部分地区环境仍有恶化趋势。

3)流域生态脆弱水平与水、气候、植被及人类活动密切相关。二级指标中,湿润指数、建设用地强度和极端降雨与生态脆弱程度相关性最高,其相关系数分别为 0.528,0.479 和 0.455,对生态环境具有显著影响。

本文使用“分区-集成”的评价手段对黄河流域整体进行生态脆弱性评价,解决了以往流域研究中可能存在的研究范围较小和环境空间异质性考虑不全面的问题,使评价结果更为可靠。此外,分区方案及生态脆弱性评价体系的改进将是未来研究的主要方向。

参考文献(References):

[1] 罗跃初,周忠轩,孙 轶,等.流域生态系统健康评价方法[J].生态学报,2003,23(8):1606-1614.
Luo Y C,Zhou Z X,Sun Y,et al. Assessment methods of watershed ecosystem health[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(8):1606-1614.

[2] Zhang F,Liu X P,Zhang J Q,et al. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin,China[J]. Ecological Modelling,2017,349(7):41-50.

[3] Zhou L,Xu J G,Sun D Q. Zoning assessment of water environmental supporting capacity of socioeconomic development in the Huaihe River Basin,China[J]. Journal of Geographical Sciences,2015,25(10):1199-1217.

[4] Beroya-Eitner M A. Ecological vulnerability indicators[J]. Ecological Indicators,2016,60(1):329-334.

[5] Ahn S R,Kim S J. Assessment of integrated watershed health based on the natural environment,hydrology,water quality, and aquatic ecology[J]. Hydrology and Earth System Science,2017,21(11):5583-5602.

[6] 周祖昊.流域二元信息的采集与加工[M]//王浩.黄河流域水

资源及其演变规律研究.北京:科学出版社,2010:61-66.

Zhou Z H. Collection and processing of binary information of Yellow River Basin[M]//Wang H. Research on water resources and its evolution law of the Yellow River Basin. Beijing: Science Press,2010:61-66.

[7] 陈 耀,张可云,陈晓东,等.黄河流域生态保护和高质量发展[J].区域经济评论,2020(1):8-22.
Chen Y,Zhang K Y,Chen X D,et al. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Regional Economic Review,2020(1):8-22.

[8] 秦大庸,于福亮,裴源生.宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟[J].资源科学,2003(6):19-24.
Qin D Y,Yu F L,Pei Y S. Water demand and water balancing simulation for Yellow River irrigated areas[J]. Resources Science,2003(6):19-24.

[9] 周日平.黄土高原典型区土壤保持服务效应研究[J].国土资源遥感,2019,31(2):131-139. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 19.
Zhou R P. Assessing the soil erosion control service in the typical area of Loess Plateau[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(2):131-139. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 19.

[10] 吴春生,黄 翀,刘高焕,等.基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J].生态学报,2018,38(13):4584-4595.
Wu C S,Huang C,Liu G H,et al. Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delta using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(13):4584-4595.

[11] 孙 波,孙永军,田 堃.黄淮海流域湿地遥感调查[J].国土资源遥感,2010(s1):144-147. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. s1. 30.
Sun B,Sun Y J,Tian L. A remote sensing investigation of waterlands in Yellow River Basin[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2010(s1):144-147. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. s1. 30.

[12] 陈继伟,曾琪明,焦 健,等. Sentinel-1A 卫星 TOPS 模式数据的 SBAS 时序分析方法——以黄河三角洲地区为例[J]. 国土资源遥感,2017,29(4):82-87. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 04. 13.
Chen J W,Zeng Q M,Jiao J,et al. SBAS time series analysis technique based on Sentinel-1A TOPS SAR images: A case study of Yellow River Delta[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017,29(4):82-87. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 04. 13

[13] 陆大道,孙东琪.黄河流域的综合治理与可持续发展[J].地理学报,2019,74(12):2431-2436.
Lu D D,Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(12):2431-2436.

[14] 李晓琴,田 堃,余珍凤.黄河流域水土流失遥感监测[J].国土资源遥感,2009(4):57-61,67. doi:10.6046/gtzyyg. 2009. 04. 12.
Li X Q,Tian L,Yu Z F. Remote sensing monitoring of soil erosion in the Yellow River Basin[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2009(4):57-61,67. doi:10.6046/gtzyyg. 2009. 04. 12.

[15] Wang G Q,Zhang J Y,Jin J L,et al. Impacts of climate change on water resources in the Yellow River basin and identification of global adaptation strategies[J]. Mitigation and Adaptation Strate-

gies for Global Change,2017(22):67-83.

[16] 李 敏,张长印,王海燕. 黄土高原水土保持治理阶段研究[J]. 中国水土保持,2019(2):1-4.

Li M,Zhang C Y,Wang H Y. Research on the stages of soil and water conservation management in the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China,2019(2):1-4.

[17] 陈 军,杜培军,谭 琨. 一种改进的全极化 SAR 图像 MCSM - Wishart 非监督分类方法[J]. 国土资源遥感,2015,27(2):15-21.

Chen J,Du P J,Tan K. An improved unsupervised classification scheme for polarimetric SAR image with MCSM - Wishart[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2015,27(2):15-21.

[18] Guo B,Fan Y W,Yang F,et al. Quantitative assessment model of ecological vulnerability of the Silk Road Economic Belt,China,utilizing remote sensing based on the partition - integration concept [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019(10):1346-1366.

[19] 彭少明,郑小康,王 煜,等. 黄河典型河段水量水质一体化调配模型[J]. 水科学进展,2016,27(2):196-205.

Peng S M,Zheng X K,Wang Y,et al. Study on integrated allocation and dispatch model of water quality and quantity for the Yellow River[J]. Advances in Water Science,2016,27(2):196-205.

[20] 郝志新,郑景云,葛全胜,等. 黄河中下游与江淮流域的降水量和入渗深度关系分析[J]. 自然科学进展,2008(6):662-667.

Hao Z X,Zheng J Y,Ge Q S,et al. Analysis of the relationship between precipitation and infiltration depth in the middle and lower reaches of the Yellow River and the Jianghuai Basin[J]. Progress in Natural Science,2008(6):662-667.

[21] Guo B,Zhou Y,Zhu J F,et al. Spatial patterns of ecosystem vulnerability changes during 2001-2011 in the three - river source region of the Qinghai - Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Arid Land,2015,8(1):23-35.

[22] 王 帅,傅伯杰,武旭同,等. 黄土高原社会 - 生态系统变化及其可持续性[J]. 资源科学,2020,42(1):96-103.

Wang S,Fu B J,Wu X T,et al. Dynamics and sustainability of social - ecological systems in the Loess Plateau[J]. Resources Science,2020,42(1):96-103.

[23] 王 琼,卢 聪,范志平,等. 基于主成分分析和熵权法的河流生境质量评价方法——以清河为例[J]. 生态科学,2017,36(4):185-193.

Wang Q,Lu C,Fan Z P,et al. River habitat quality assessment based on principal component analysis and entropy weight in Qinghe River as a case[J]. Ecological Science,2017,36(4):185-193.

[24] 邵秋芳,彭培好,黄 洁,等. 长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测[J]. 国土资源遥感,2016,28(2):175-181. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 27.

Shao Q F,Peng P H,Huang J,et al. Monitoring ecoenvironmental vulnerability in Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River using remote sensing techniques[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2016,28(2):175-181. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 27.

[25] Zhou H,Deng Z,Xia Y,et al. A new sampling method in particle filter based on Pearson correlation coefficient [J]. Neurocomputing,2016:208-215.

Ecological vulnerability assessment of the Yellow River basin based on partition - integration concept

YANG Wenna^{1,2}, ZHOU Liang^{1,3,4}, SUN Dongqi³

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National - Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research/State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Beijing 100101, China; 4. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Yellow River basin is an important ecological safety barrier, an agglomeration area of resource and energy, and an area with highly intensive production activities in China. Therefore, its ecological change directly affects the sustainable development of the ecological environment and economy in the basin. This paper aims to quantitatively assess the ecological vulnerability and analyze the spatial heterogeneity in the Yellow River basin. To this end, an evaluation system was established using the partition - integration assessment method by selecting indicators such as water resources, climate, soil, vegetation, and human activities. Meanwhile, a multiplication model was introduced. The assessment results are as follows. The overall ecological environment in the basin is moderately vulnerable, with moderately vulnerable areas accounting for 42.37% of the total area of the basin. Meanwhile, the areas with a highly vulnerable ecological environment in the basin are mainly distributed in the urban economic belt along the upper mainstream of the Yellow River. From 2000 to 2018, the ecological vulnerability of the basin first decreased and then increased. During this period, ecological problems were the most notable in 2000 and ecological vulnerability was the lowest in 2015, with the Comprehensive Vulnerability Index

(CVI) of 2.28 and 2.00 , respectively in 2000 and 2015. The ecological vulnerability and its evolution trend in the basin significantly varied in space. In detail, the ecological vulnerability notably increased in the plateau areas in the upper reaches, slightly changed in the urban belt along the river, and significantly decreased in the middle and lower reaches.

Keywords: partition – integration; ecological vulnerability; spatial difference; sustainable development; Yellow River basin

(责任编辑: 李 瑜)