

基于 GIS 的宁夏土壤侵蚀敏感性与景观生态风险评价

郑雪慧¹, 杨志², 任正龔², 魏小燕², 程金花¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.宁夏水土保持监测总站, 银川 750021)

摘要:为了探究宁夏土壤侵蚀的空间差异,识别土壤侵蚀敏感性区域,利用气象、植被、DEM、土壤、土地利用等数据,结合 GIS 技术和 Fragstats 4.2 软件,构建土壤侵蚀敏感性和景观生态风险的综合评价模型,对研究区进行了土壤侵蚀和景观的综合生态风险评价与分析。结果表明:(1) 在综合风险评价中,宁夏由低到高 5 个风险等级的面积占比依次为 34.97%,33.56%,15.03%,11.57%,4.88%。(2) 从县域尺度上看,高风险区集中分布在西吉、彭阳、隆德部分地区;较高风险区分布在南部山区及盐池最南部;中等风险区主要分布在海原、同心等地,较低等级以下风险区在各县(区)均有分布。(3) 宁夏耕地、草地面积占比最大,共计占比达 69.7%,在不同土地利用类型中,各风险等级占比不同。由此可知,宁夏土壤侵蚀敏感性空间分布差异显著,低、较低风险等级区域分布范围广泛。

关键词:宁夏; 土壤侵蚀; 景观; 风险评价

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0008-06

A GIS-based Soil Erosion Sensitivity and Landscape Ecological Risk Assessment in Ningxia, Northwestern China

ZHENG Xuehui¹, YANG Zhi², REN Zhengyan², WEI Xiaoyan², CHENG Jinhua¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Ningxia Hui Autonomous Region Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to explore the spatial differences of soil erosion in Ningxia, we identified soil erosion sensitive areas, and conducted a comprehensive ecological risk assessment and analysis of soil erosion and landscape in the study area. Meteorological, vegetation, DEM, soil, land use and other data, combined with GIS technology and Fragstats 4.2 software were mainly used to build a comprehensive evaluation model of soil erosion sensitivity and landscape ecological risk. The main results are as follows. (1) In the comprehensive risk assessment, the proportions of the five risk levels from low to high in Ningxia are 34.97%, 33.56%, 15.03%, 11.57%, 4.88%. (2) On the county scale, high-risk areas are concentrated in parts of Xiji, Pengyang, and Longde; higher-risk areas are located in the southern mountainous areas and the southernmost part of Yanchi; medium-risk areas are mainly located in Haiyuan, Tongxin, etc. The risk areas below the lower level are distributed in all counties (districts). (3) Cultivated land and grassland area accounted for the largest proportion in Ningxia, accounting for 69.7% in total. Different types of land use have different risk levels. It can be seen that the spatial distribution of soil erosion susceptibility in Ningxia is significantly different, and the areas with low risk levels are widely distributed.

Keywords: Ningxia; soil erosion; landscape; risk assessment

土壤侵蚀导致区域生态环境恶化与生态平衡失调,严重阻碍社会经济的可持续发展,一直是全球普遍关注的环境问题^[1-2]。近年来,随着“3S”技术的发展,使突破径流小区^[3]、坡面^[4]尺度开展更大尺度的土壤侵蚀评价研究成为热点,基于 USLE, RUSLE^[5]、

CSLE 等^[6]土壤侵蚀经验模型的土壤侵蚀敏感性评价应用广泛。

土壤侵蚀敏感性评价是以土壤侵蚀方程为基础来识别自然条件下容易形成土壤侵蚀的区域^[7]。国外学者 Terranova^[8], Nekhay^[9] 等借助 GIS 和 RS 技

收稿日期:2021-08-26

修回日期:2021-09-09

资助项目:宁夏自治区自主研发项目“宁夏水土流失潜在危险性评价研究”(SBZZ-J-2020-09)

第一作者:郑雪慧(1996—),女,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: xuehui_zheng001@163.com

通信作者:程金花(1979—),女,山东聊城人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀防治研究。E-mail: jinhua_cheng@126.com

术和通用土壤侵蚀方程分别在地中海区域和西班牙山区开展土壤侵蚀定量评价研究;国内学者龚雪梅^[10]、杨青林^[11]、张恩伟^[7]等也分别在岷江上游、川西北地区、滇池流域开展土壤侵蚀敏感性的研究。另一方面,随着景观生态学^[12]发展,景观格局指数逐渐应用到土壤侵蚀的研究中。景观生态风险^[13]是根据土地利用的空间格局探究人类社会因素所造成的生态环境风险。高艳丽等^[1]在汉江流域开展景观格局变化对土壤侵蚀影响的研究;王计平等^[14]在黄土丘陵区开展景观格局对土壤侵蚀过程影响的研究,发现流域景观格局和土壤侵蚀过程特征存在明显空间分异和相对差异;刘希朝等^[15]基于土地利用数据构建黄河流域生态风险评价模型,探究景观格局变化下的生态风险变化趋势。土壤侵蚀是过程,土地利用空间分布为格局,格局决定过程,同时过程也会促进格局的改变^[16]。目前,对于土壤侵蚀敏感性和景观生态风险的研究大多是独立展开的,无法识别自然和社会综合因素下的土壤侵蚀风险。因此,将两者结合构建土壤侵蚀和景观综合生态风险评价体系,开展区域土壤侵蚀及其景观生态风险研究,不仅能够综合反映自然与人为相互作用下对生态环境产生的不利影响,而且能够为区域精准化识别土壤侵蚀的敏感区和进行高质量的综合治理提供理论支撑。

宁夏全境位于黄河流域,是我国西北的绿色屏障,承担着维护西北乃至全国生态安全的重要使命。据《2019 宁夏回族自治区水土保持公报》显示,目前宁夏仍有土壤侵蚀面积 $1.59 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 23.93%。为了探究宁夏全区潜在土壤侵蚀区域的空间差异,识别土壤侵蚀敏感性区域,在宁夏开展土壤侵蚀敏感性和景观生态风险的综合研究,实现对宁夏全区土壤侵蚀情况的基础摸排,为推进流域精准治理提供科学支撑。同时,为宁夏水土保持规划、水土保持措施布设提供参考依据,对宁夏实现黄河流域生态保护与高质量发展先行区的目标有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区总面积 $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地处黄河上游及沙漠与黄土高原的交接地带,东、西、北三面被毛乌素、腾格里、乌兰布和三大沙漠包围,是我国西北重要的生态屏障区。地理位置介于 $35^\circ 14' - 39^\circ 23' \text{ N}$, $104^\circ 17' - 107^\circ 39' \text{ E}$, 地势从西南向东北逐渐倾斜,平均海拔 1 000 m 以上。地貌复杂,山地迭起,盆地错落,大体可分为:黄土高原、鄂尔多斯台地、洪积冲积平原和六盘山、罗山、贺兰山南北中三段山地。属温

带大陆性干旱半干旱气候,年均气温为 $6 \sim 10^\circ \text{C}$, 年均降水量南多北少,大都集中在夏季,年降雨量在 300 mm 左右,蒸发量却在 1 000 mm 以上。除黄河干流过境外,还有清水河、苦水河、葫芦河、泾河、祖厉河等主要河流。土壤类型主要为灰漠土、灌淤土、绵土、灰褐土、栗钙土等。全区草原综合植被盖度为 53.5%, 森林覆盖率为 15.2%。土地利用以草地、耕地为主,两者合计面积占比为 69.7%^[17]。

1.2 数据来源

气象数据源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 下载的中国地面累年值日值数据集;土壤质地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>); DEM 数据 (Digital elevation model, 数字高程数据) 为地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 提供的 30 m 分辨率原始高程数据;宁夏行政区划、土地利用、植被覆盖等基础数据由宁夏水土保持监测总站提供。其中,土地利用数据解译所需的遥感影像时间为 2019 年,空间分辨率 30 m;植被覆盖度所需的遥感影像数据为 2019 年 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 产品,时间分辨率为每半月 1 期,共 24 期,空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀敏感性评价 基于 RUSLE 通用土壤流失方程中降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度和植被覆盖度因子构建土壤侵蚀敏感性评价方程^[18] (公式 1), 经栅格计算获得评价结果。

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i} \quad (1)$$

式中: SS_i 为土壤侵蚀敏感性指数; R_i 为降雨侵蚀力; K_i 为土壤质地因子; LS_i 为地形起伏度; C_i 为植被覆盖度。各评价因子的获取方法以及具体分级标准^[19]见表 1—2。

1.3.2 景观生态风险评价 景观格局的变化是决定土壤侵蚀程度的关键因素^[15], 诊断宁夏景观格局及生态风险对促进黄河流域高质量发展具有重要意义。景观生态风险由外部的扰动强度和内部的脆弱性来衡量, 景观生态风险评价包括景观格局指数选取、生态风险小区划分、生态风险评价模型构建 3 个过程。首先, 在参照相关景观生态风险评价研究^[23-24]和综合考虑宁夏实际情况及各景观格局指数的生态学意义的基础上, 选取景观破碎度 (C_i)、景观分离度 (N_i)、景观分维数 (FD_i)、景观干扰度 (S_i)、景观脆弱度 (F_i)、景观损失度 (R_i) 共 6 种景观格局指数。各景观指数的数值可由预处理后的土地利用数据经 Fragstats 4.2 软件计算获得, 具体计算公式和参数含义见表 3。其次, 在充分考虑宁夏景观空间异质性、

斑块大小和面积的基础上,利用 ArcGIS 10.2 软件数据管理模块下的 Create Fishnet 功能,将研究区划分为 10 km×10 km 的网格单元,共划分风险小区 617 个。最终,根据景观干扰度指数和景观脆弱度指数构建评价模型,计算得到各小区景观生态风险指数 ERI_k (公式 2),并采用 ArcGIS 10.2 的 Geostatistical Analyst 模块下 Kriging 插值对小区样点的风险值进

行球状拟合,获得研究区的景观生态风险指数。

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i$$

(2)

式中: ERI_k 为评价单元 k 的生态风险指数; n 为景观类型的数量; A_{ki} 为景观生态风险评价单元 k 中第 i 类景观的面积(km^2); A_k 为景观生态风险评价单元 k 的面积(km^2); R_i 为景观损失度指数。

表 1 土壤侵蚀敏感性评价因子获取方法

序号	名称	计算方法
1	降雨侵蚀力因子(R_i)	运用 ArcGIS 10.2 中的 Geostatistical Analyst 模块,将宁夏全区 24 个气象站近 30 a 的平均降雨量数据进行克里金插值,获得宁夏年平均降雨量空间分布图。并采用章文波等 ^[20] 的多年平均年降雨量简易算法模型估算侵蚀力,具体算法如下: $R_i = 0.067r^{1.627}$ 。式中: R_i 为多年平均年降雨侵蚀力指标 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; r 为多年平均降雨量(mm)
2	土壤质地因子(K_i)	土壤质地可以替代土壤可蚀性因子 K 进行土壤侵蚀敏感性评价 ^[21] ,根据田浩等 ^[22] 的研究将不同质地的土壤根据抗侵蚀能力排序并分类赋值
3	地形起伏度因子(LS_i)	在大尺度的计算中地形起伏度因子更具有土壤侵蚀和地貌学意义,以 30 m 分辨率的 DEM 数据为基础,在 ArcGIS 10.2 的 Spatial Analyst 模块下选用 3 km×3 km 为窗口提取地形起伏度因子
4	植被覆盖度因子(C_i)	采用像元二分法模型计算植被覆盖度(FVC): $FVC = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}})/(\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}})$,式中:NDVI 为归一化植被指数;NDVI _{veg} 为高纯度植被像元;NDVI _{soil} 为裸地像元

表 2 土壤侵蚀敏感性评价因子分级标准

评价因子	不敏感	轻度敏感	中度敏感	敏感	极敏感
降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	<25	25~100	100~300	300~600	>600
土壤质地	沙、黏土(重)	黏土、砂质黏土、壤质砂土	粉质黏土、砂质壤土、壤土	砂质黏壤土、黏壤土、粉质黏壤土	粉砂壤土、粉砂
地形起伏度/m	0~20	20~50	50~100	100~300	>300
植被覆盖度/%	≥0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	≤0.2
分级赋值	1	3	5	7	9

表 3 景观格局指数计算方法

序号	名称	计算公式	参数含义
1	景观破碎度(C_i)	$C_i = n_i / A_i$	表示景观被分割的破碎程度,反映景观空间结构的复杂性,在一定程度上表示人类对景观的干扰程度
2	景观分离度(N_i)	$N_i = \frac{A}{2 A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$	表示某一景观类型中不同斑块数个体分布的分离度
3	景观分维数(FD_i)	$FD_i = \frac{2 \ln(P_i/4)}{\ln A_i}$	景观的优势度与多样性指数呈反比,对于景观类型数目相同的不同景观,多样性指数越大,其优势度越小
4	景观干扰度(S_i)	$S_i = a C_i + b N_i + c F D_i$	反映不同景观类型受到干扰后的损失程度,干扰度指数越大,生态风险也就越大
5	景观脆弱度(F_i)	参考前人研究结果和研究区的特点,将 6 种土地利用景观类型的景观脆弱度赋值(建设用地-1,林地-2,草地-3,耕地-4,水域-5,未利用地-6),并做归一化处理	进行归一化处理后得到各景观类型的脆弱度指数,表示不同景观类型抵御外部干扰能力的大小,抗外部干扰的能力越小,则脆弱度越大,生态风险越大
6	景观损失度(R_i)	$R_i = S_i \cdot F_i$	表示遭遇干扰时各景观类型所受到生态损失的差别,是某一景观类型干扰度和脆弱度指数的综合

注: n_i 为景观类型 i 的斑块数; A_i 为景观类型 i 的总面积; A 为景观总面积; P_i 为第 i 种景观的周长(km); $a=0.5, b=0.3, c=0.2$,为各指数对景观生态服务价值的影响程度,且 $a+b+c=1$ 。

1.3.3 土壤侵蚀景观综合生态风险评价

基于土壤侵蚀敏感性和景观生态风险评价结果构建区域综合

生态风险评价模型(SERI),即土壤侵蚀敏感性指数与景观损失度指数的关系特征函数式(公式 3)^[18]。运用 ArcGIS 10.2 中栅格计算器计算,并采用自然分界法划分为 5 个风险等级,获得宁夏综合生态风险评价结果。

$$SERI=SS_i \cdot ERI_k$$

(3)

式中:SERI 为土壤侵蚀的景观生态风险值;SS_i 和 ERI_k 同上。

2 结果与分析

2.1 宁夏风险评价结果的空间分布

总的来说,宁夏土壤侵蚀敏感性等级以无敏感和轻度敏感为主,二者共计面积占比在 60%以上;中度及以上敏感区随敏感性等级升高面积占比减小。其中,无敏感区面积 19 555 km²,面积占比为 29.45%;轻度敏感区面积 20 817.88 km²,面积占比为 31.35%;中度敏感区面积 13 371.70 km²,面积占比为 20.14%;高度敏感区面积 8 163.35 km²,面积占比为 12.29%;极敏感区面积 4 492.07 km²,面积占比为 6.77%。此外,从空间格局上看(图 1A),高度、极敏感区主要分布在宁夏南部山区;中度敏感区分布相对分散,主要分

布在盐池、海原、沙坡头以及大武口区等地;无敏感和轻度敏感区则主要分布在中部干旱带和北部的引黄灌区。

由图 1B 可知,宁夏景观生态风险评价空间差异显著,较低风险区面积占比最高,达 28.10%,主要分布在中部的盐池、利通等地;中等风险区面积占比次之,为 25.42%,主要分布在北部平罗周边、中部中宁海原等地;较高风险区面积占比第三,为 21.22%,分布在原州、同心以及金凤区周围;高风险和低风险面积占比较小且接近,分别为 12.64%,12.62%,其中低风险区在大武口、灵武、沙坡头西北部等地,高风险区则主要集中在彭阳、西吉。

整体看来(图 1C),土壤侵蚀与景观生态风险综合评价分区面积由高到低依次为:较低风险区、低风险区、中等风险区、较高风险区、高风险区,依次为 22 280.94,23 217.2,9 979.05,7 681.28,3 241.53 km²。其中,高风险区面积占比不足 5%,集中分布在西吉、彭阳、隆德部分地区;较高风险区面积占比为 11.57%,分布在南部山区及盐池最南部;中等风险区面积占比 15.03%,主要分布在海原、同心等地;低、较低风险分布范围广泛,共计占比为 68.52%。

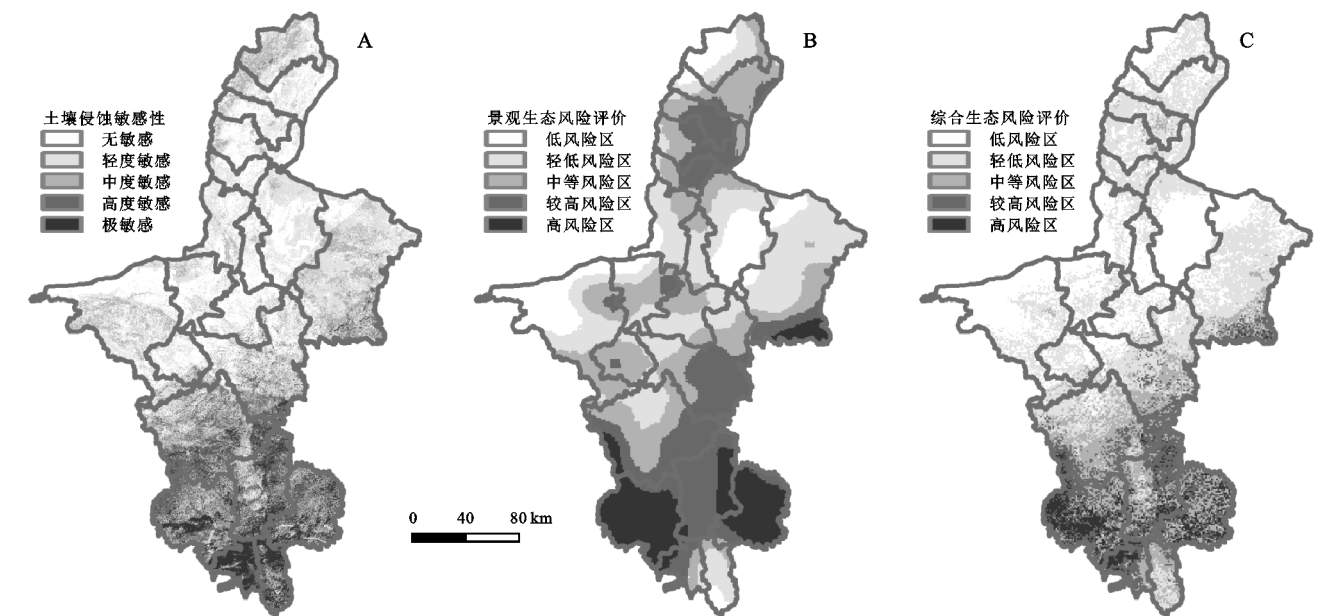


图 1 土壤侵蚀敏感、景观生态风险评价、综合生态风险评价空间分布

2.2 宁夏风险评价结果的空间差异

从县域尺度上看,土壤侵蚀敏感性等级在各县(区)分布差异较大(图 2)。无敏感区所占面积的比重大于 60%的地区有金凤区、兴庆区、利通区、红寺堡区,面积占比依次为 69.41%,62.78%,62.61%,61.30%;轻度敏感区面积占比最大的前 5 名依次为:盐池县、惠农区、灵武市、青铜峡市、永宁县,面积占比均在 40%以上;中度敏感区面积占比前 5 名为大武口区、彭阳县、西吉县、

海原县、原州区;高度敏感区面积占比前 5 名为原州区、西吉县、海原县、彭阳县、泾源县;存在极敏感区的县(区)有隆德县、泾源县、彭阳县、原州区、西吉县、海原县、同心县,其面积占比依次为 70.93%,48.21%,26.69%,21.57%,19.67%,6.34%,1.28%。

从图 3 各县(区)景观生态风险评价结果看,高风险区仅存在于西吉县、彭阳县、原州区、隆德县、盐池县、海原县地区,其中,西吉县面积占比为 88.39%,彭

阳县面积占比为 79.94%；较高风险区面积占比前 5 名为金凤区、原州区、兴庆区、贺兰县、永宁县，面积比重均达到 50%，其中，金凤区较高风险区面积比重为 96.89%；中等风险区面积占比前 5 名为平罗县、西夏区、中宁县、永宁县、海原县；低、较低风险区面积共计所占比重大于 70%的地区有大武口区、泾源县、灵武市、利通县、青铜峡市、沙坡头区，占比依次为 92.48%，80.13%，78.24%，77.81%，75.32%，70.75%。

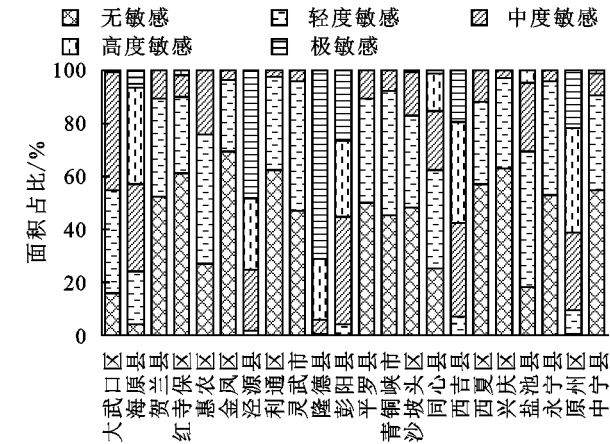


图 2 宁夏各县(区)土壤侵蚀敏感性等级分布

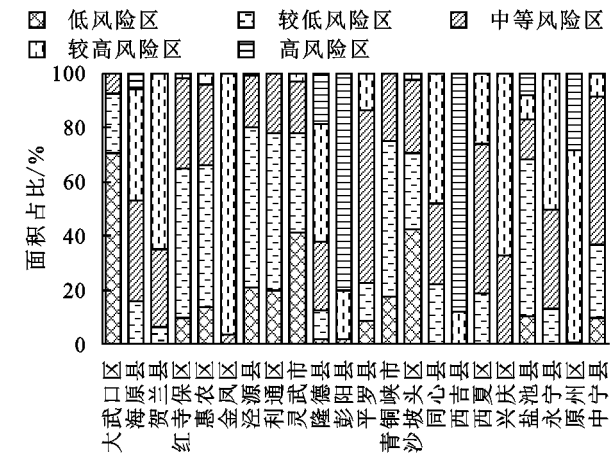


图 3 宁夏各县(区)景观生态风险评价等级分布

从图 4 综合评价结果来看，高风险区仅存在于西吉县、隆德县、彭阳县、原州区、海原县和盐池县，面积占比依次为 36.19%，27.10%，25.98%，12.31%，1.82%，0.72%。较高风险区面积占比大于 40%的地区有原州区、隆德县、西吉县。高、较高风险区共计面积占比达 60%以上的有西吉县、隆德县、彭阳县、原州区，占比依次为 76.68%，74.78%，63.89%，60.65%。中等风险区面积占比前 3 名为泾源县、海原县、彭阳县，面积占比分别为 45.35%，42.38%，35.48%。低、较低风险区面积占比达 90%的地区有大武口区、利通县、青铜峡市、灵武市、惠农区、平罗县、西夏区、沙坡头区、中宁县、红寺堡寺区、永宁县、兴庆区、金凤区。其中，利通区

和大武口区低、较低风险区面积共计占比为 100%，无更高风险等级；西吉县、彭阳县、隆德县、原州区则无低风险区，土壤侵蚀与景观综合生态风险较大。

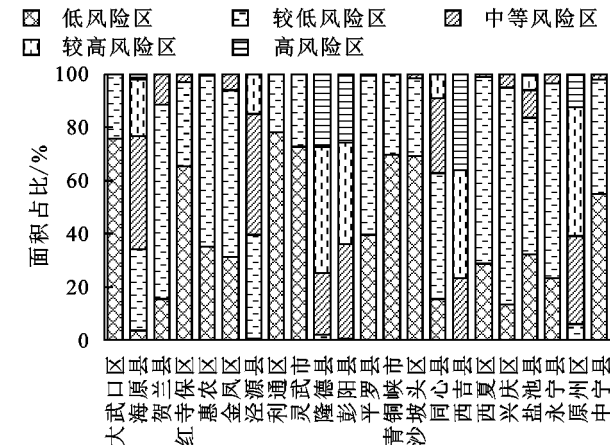


图 4 宁夏各县(区)土壤侵蚀与景观综合生态风险评价等级分布

2.3 土壤侵蚀景观综合生态风险与土地利用的关系

在耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地 6 个一级地类中，宁夏土地利用类型面积最大的为草地，面积为 26 834.99 km²，面积占比为 40.41%；面积第二大的是耕地，面积为 19 447.55 km²，占比为 29.29%；其次为林地，面积为 11 843.59 km²，占比为 17.84%；建设用地、水域、未利用土地面积共计占比为 12.46%，面积依次为 5 081.64，1 926.43，1 265.78 km²。

将 2019 年土地利用空间分布图和综合生态风险评价结果进行空间叠置分析，获得研究区不同土地利用类型的综合生态风险程度信息(图 5)。由图 5 可知，不同土地利用类型土壤侵蚀与景观的综合生态风险面积占比差异较大。耕地、草地、建设用地中各风险区随等级升高面积占比减小，并且主要以低、较低风险为主，面积占比在 50%以上。林地和水域这两种土地利用类型中除较低风险区面积占比最大外也符合上述规律，但是未利用土地与之相反，其面积占比最大的风险区为高风险区，占比达 63.16%。

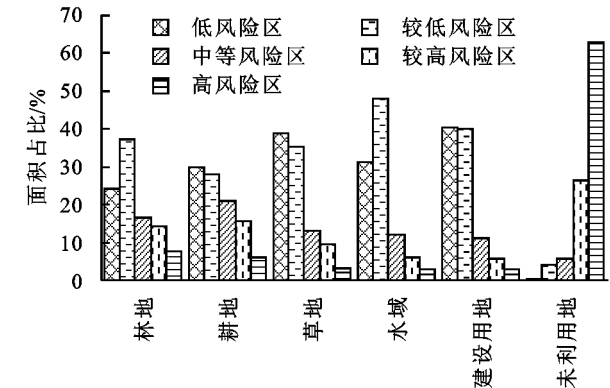


图 5 宁夏不同土地利用类型的综合生态风险分布

3 讨论

由人为干扰引起的土地利用变化往往造成严重的土壤侵蚀,分析不同土地利用类型与土壤侵蚀的关系意义重大^[10]。对宁夏而言,未利用土地地区土壤侵蚀综合评价的风险等级更高,这与何君等^[25]认为未利用地的土壤侵蚀敏感性最强结论一致。而邹琴英等^[12]的研究则认为土壤侵蚀主要发生在耕地、有林地、草地,这与不同研究区内各类土地利用类型的面积占比有关,耕地、林地、草地在研究区内面积占比大,发生土壤侵蚀的绝对面积大,但是对同一土地利用来说,耕地、林地、草地中未发生土壤侵蚀的面积更大。

前人的研究往往通过比较单因子与综合因子敏感性评价结果,来确定土壤侵蚀的主要的影响因子,但土壤侵蚀是个复杂的过程,不同地区差异显著。例如,张恩伟等^[7]在云南滇池流域和莫建飞等^[26]在广西岩溶区的研究中都认为降雨侵蚀力因子是影响土壤侵蚀敏感性的最关键因子;而冉涛等^[27]在北方生态脆弱区的研究中则认为土壤侵蚀力因子的敏感性被充分识别,降雨侵蚀力因子受站点数量和空间分布的影响作用被削弱。根据研究区自身特点建立不同的评价模型,成为今后研究趋势,莫建飞等^[26]在研究中增加石漠化等级变化为影响因子构建了岩溶区水土流失敏感性评价模型。杨青林等^[11]对川西北地区的土壤侵蚀敏感性评价研究时增加了沟壑密度为评价因子。结合宁夏干旱多风的特点增加“风”这一影响因子进行评价发现,增加风力因子后,无敏感、轻度、中度等级区面积分别减少 1 661.87,2 115.83,388.72 km²,高、极高敏感区面积增加 2 508.77,1 657.65 km²。目前的研究水力侵蚀与风力侵蚀是分开计算的,没有考虑水力侵蚀、风力侵蚀同时发生时的交互作用。宁夏存在大面积的水风蚀交错区,在今后研究中应对比总结风水交错的交互关系,同时增加研究的时间尺度,从而获得更加精准的结果,为水土流失的综合防治提供理论支撑。

4 结论

(1) 从数值上看,在宁夏土壤侵蚀与景观生态风险综合评价中,高风险区面积占比不足 5%,较高风险区面积占比为 11.57%,中等风险区面积占比 15.03%,低、较低风险分布范围广泛,共计占比为 68.52%。

(2) 从空间分布上看,高风险区集中分布在西吉、彭阳、隆德部分地区;较高风险区分布在南部山区及盐池最南部;中等风险区主要分布在海原、同心等地,较低等级以下风险区在各县(区)均有分布。

(3) 在不同的土地利用类型中,各风险等级占比不同。耕地、草地、建设用地中低风险区面积占比最大,林地、水域中较低风险区占比最大,未利用土地中高风险区占比最大。

参考文献:

- [1] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
- [2] Jan D, Tomas D, Rosemarie H, et al. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion; Case studies from Lower Austria and Central Bohemia [J]. Land Use Policy, 2019,82:674-685.
- [3] 汪水前.福建省长汀县不同土地利用方式下的坡地侵蚀特征[J].水土保持学报,2020,34(6):84-88.
- [4] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等.干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J].生态学报,2013,33(1):12-22.
- [5] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等.基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J].生态学报,2020,40(10):3473-3485.
- [6] 顾治家,谢云,李鹭,等.利用 CSLE 模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J].农业工程学报,2020,36(11):49-56.
- [7] 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[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.
- [8] Terranova O, Antronico L, Coscarelli R, et al. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy) [J]. Geomorphology, 2009,112(3):228-245.
- [9] Nekhay O, Arriaza M, Boerboom L. Evaluation of soil erosion risk using Analytic Network Process and GIS: A case study from Spanish mountain olive plantations[J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(10):3091-3140.
- [10] 龚雪梅,冯文兰,郑杰,等.岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):68-74.
- [11] 杨青林,丁鹏凯,仙巍,等.川西北地区土壤侵蚀敏感性评价[J].人民长江,2018,49(10):30-35.
- [12] 邹琴英,师学义,张臻.汾河上游土壤侵蚀时空变化及景观格局的影响[J].水土保持研究,2021,28(4):15-21.
- [13] 陈心怡,谢跟踪,张金萍.海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J].生态学报,2021,41(3):975-986.
- [14] 王计平,杨磊,卫伟,等.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响:景观水平与多尺度比较[J].生态学报,2011,31(19):5531-5541.
- [15] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(5):265-274.

- 研究[J].水土保持研究,2006,13(2):241-243.
- [17] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J].土壤,2014,46(2):204-211.
- [18] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- [19] 宗玉梅,俎瑞平,王睿,等.库布齐沙漠含水率对风沙运动影响的风洞模拟[J].水土保持学报,2016,30(6):61-66.
- [20] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018,10(4):534-547.
- [21] 荣姣凤,张海涛,毛宁.土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):149-153.
- [22] Li X L, Perry G L W, Brierley G, et al. Restoration prospects for Heitutan degraded grassland in the San-jiangyuan[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10: 687-698.
- [23] 韩立辉,尚占环,任国华,等.青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应[J].草业学报,2011,20(1):1-6.
- [24] 魏卫东,李希来.三江源区高寒草甸退化草地土壤侵蚀模型与模拟研究[J].环境科学与管理,2013,38(7):26-30.
- [25] 李国荣,李希来,陈文婷,等.降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):40-45.
- [26] 孙铁军,肖春利,滕文军.不同草地建植模式对荒坡地土壤风蚀及理化性质的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):44-48.
- [27] 王红兰,蒋舜媛,崔俊芳,等.不同形成时间鼢鼠鼠丘土壤水力学性质的对比[J].水土保持学报,2018,32(3): 180-184,190.
- [28] 马素洁,周建伟,王福成,等.高寒草甸区高原鼢鼠新生土丘水土流失特征[J].水土保持学报,2019,33(5):58-63.
- [29] 李国荣,李希来,李进芳,等.黄河源高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律[J].水土保持学报,2019,33(2):110-114,168.
- [30] 陆阿飞.三江源区河南县草地植被退化状况及解决措施[J].青海畜牧兽医杂志,2014,44(6):57-58.
- [31] 李国荣,李希来,陈文婷,等.黄河源区退化草地水土流失规律[J].水土保持学报,2017,31(5):51-55.
- [32] 田民,刘思峰,卜志坤.灰色关联度算法模型的研究综述[J].统计与决策,2008(1):24-27.
- [33] 张和平,解晓龙.基于灰色关联度的组合优化模型研究[J].统计与决策,2019,35(9):19-23.

~~~~~

(上接第13页)

- [16] Chen L D, Lu Y H, Fu B J, et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(3):663-670.
- [17] 宋小龙,米文宝,李陇堂,等.宁夏旅游经济与生态环境耦合协调过程与格局[J].中国沙漠,2021,41(5):1-10.
- [18] 谢余初,巩杰,赵彩霞.甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评价[J].生态学报,2014,33(3):702-708.
- [19] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [20] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003(1):35-41.
- [21] Chen T, Niu R Q, Li P X, et al. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: A case study in Miyun Watershed, North China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,63:533-541.
- [22] 田浩,刘琳,张正勇,等.天山北坡经济带关键性生态空间评价[J].生态学报,2021,41(1):401-414.
- [23] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报,2020,40(18):6472-6485.
- [24] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11): 3729-3740.
- [25] 何君,李月臣,朱康文,等.重庆市土壤侵蚀敏感性时空分异特征研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2016,33(6):45-53.
- [26] 莫建飞,陈燕丽,莫伟华.岩溶生态系统水土流失敏感性关键指标和评估模型比较[J].水土保持研究,2021,28(2):256-266.
- [27] 冉涛,邓伟.北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异[J].水土保持研究,2017,24(4):182-186,190.