



基于层次分析法的黑土地风蚀沙化危险性分析 ——以黑龙江省富裕县为例

西广越, 詹泽东, 邵兴坤, 任柄璋, 侯红星, 时凌峰, 杨朝阳, 孔春雨

中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000

摘要: 黑土地风蚀沙化危险性分析对黑土地沙化趋势具有一定预测意义, 可以服务下一步沙化灾害预防工作。通过结合前人所作的风险危险性评价和土地沙化敏感性评价因子, 结合富裕县实际, 选出适合其风蚀沙化危险性评价的因子, 采用层次分析法计算各因子所占权重, 依托地表基质调查项目所得调查点位实验数据, 利用 GIS 平台计算功能, 得出富裕县风蚀沙化危险性的空间分布规律。评价结果表明, 富裕县以危险型区和轻险型区为主, 总计占比达 82.99%, 强险型区占比不到 0.1%, 说明区内存在不同程度的风蚀沙化情况, 危险级别从东北向西南上升, 其治理紧迫性和难易程度从东北向西南升高。本研究界定了风蚀沙化危险级别的界限, 可为土地沙化防治提供借鉴。

关键词: 黑土地; 风蚀沙化; 危险性评价; 层次分析法; 黑龙江省

RISK ANALYSIS OF WIND EROSION AND DESERTIFICATION IN BLACK LAND BASED ON ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A Case Study of Fuyu County, Heilongjiang Province

XI Guang-yue, ZHAN Ze-dong, SHAO Xing-kun, REN Bing-zhang, HOU Hong-xing, SHI Ling-feng, YANG Zhao-yang, KONG Chun-yu

Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: The risk analysis of wind erosion and desertification in black land is significant for the prediction of desertification trend of black land and prevention of desertification disaster. Based on the previous wind erosion risk assessment and land desertification sensitivity assessment factors as well as the practice in Fuyu County, the study selects the factors suitable for the risk assessment and calculate the weights of each factor with analytic hierarchy process(AHP) method. Adopting the experimental data from the ground substrate survey project, the spatial distribution regularity of wind erosion and desertification risk in Fuyu County is obtained through the calculation function of GIS. The assessment results show that Fuyu County is dominated by risk area and light risk area, accounting for 82.99% of the total, and the high risk area less than 0.1%, indicating that there are varying degrees of wind erosion and desertification in the area, with the risk level rising from northeast to southwest, and the governance urgency and difficulty increasing from northeast to southwest. The study defines the risk level limits of wind erosion and desertification, which can provide references for desertification control and prevention.

Key words: black land; wind erosion; desertification; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); Heilongjiang Province

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-11-15. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松嫩平原齐齐哈尔地区黑土地表基质调查”(ZD20220107).

作者简介: 西广越(1997—), 男, 工程师, 从事地质矿产资源调查及研究, 通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//xiguangyue2499@163.com

通信作者: 詹泽东(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事地质矿产资源调查及研究, 通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//923296221@qq.com

0 引言

黑土有机质含量丰富,土壤养分高,是十分稀缺的、优质的、极其珍贵的土地资源,同时也是不可再生的自然资源,是国家的宝贵战略资源^[1-2].中国境内黑土地主要集中于东北地区,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部地区^[3],其中黑龙江省黑土地开垦利用超过60年,带动地区经济发展的同时其自身也产生了表层侵蚀、养分降低、土壤酸化等问题^[2].而由风蚀所导致的土地沙化在松嫩平原嫩江段最为明显,其表层土壤物质在风力作用下发生位移,其结构被破坏,地表土壤机械组成变粗,土层呈沙质状^[4],在全国沙漠区划上属于中国北部沙漠治理区东北平原西部沙漠化区,被称为嫩江沙地^[5].嫩江沙地形成的历史演变和在此过程中的环境变化以及各时期发育的特征前人已有一定研究^[6-9],但对该区沙化程度和趋势等级的划分研究还不多见.在“松嫩平原齐齐哈尔地区黑土地地表基质调查”项目的野外调查工作中,发现该地区的耕地在冬春时期基本为裸露状态,该季节干旱少雨多风,部分地表粗化,土壤风蚀沙化问题较明显.

据前人研究,土壤风蚀受多种因素影响^[10-11],其中包括土地利用类型、植被覆盖度、土壤有机质含量、土壤类型^[12],此外还有土壤粒度、土壤水分、地表粗糙度等,同时地表有作物覆盖也将影响风蚀的发生^[4].于国茂等考虑到指标选取的系统性、代表性、简明性以及数据的可获得性以后选择了风场强度、气候干燥度、土地利用类型、植被覆盖度、地形起伏度5项指标^[13];吴芳芳等在准东地区的研究也加入了地形因子^[14];孙传龙等则分别从地形特征、土壤性质、地表覆盖中细选了共12项因子对风蚀危险性空间分布进行分析^[15].总的来说可以归纳为3类:1)侵蚀因子,即为风蚀提供动力的气候因子;2)可蚀性因子,主要由土壤的固有性质决定;3)干扰因子,最突出的是植被和人类活动^[16].此外土壤厚度因子在土地荒漠化研究中也是一项内容^[17].他们各自选择的风蚀影响因子都针对研究区尺度、特征以及不同影响因子获取难易程度而做了相应的调整^[8,13].本研究结合富裕县地形地貌等特征,选取相应因子,对其风蚀沙化危险性等级进行分析,以期在黑土地沙化等级划分和预测及防治提供依据.

1 研究区概况

富裕县隶属于黑龙江省齐齐哈尔市,位于黑龙江省西部,嫩江中游左岸,松嫩平原北部,地处东经124°0′24″、北纬47°18′24″.地形总趋势是北高南低,东高西低,海拔高度在146~224 m之间,起伏不明显.地貌类型为冲积(扇)平原,东北部可见平缓漫岗,上覆第四系上更新统亚黏土,30 m以下为新近系上新统孙吴组砂.嫩江东岸和乌裕尔河两岸的河谷河漫滩区沉积很厚的第四系全新统砂,南部沉积砂砾石层,上覆淤泥质亚黏土.区内植被主要为人工林地、自然草原以及农田作物.气候类型为温带大陆性季风气候,年平均气温2℃左右,年平均降水量427 mm,冬寒夏暖,四季变化明显.富裕县境内土地利用类型以耕地、草地、林地为主,分别占比62.72%、10.62%、6.96%,总计达80.3%.土壤类型主要为黑钙土类、沙土类、草甸土类及盐碱土类,占全域总面积92%以上,其中沙土类占17.4%.沙化耕地占耕地总面积10.22%,沙化草地占草地总面积7.93%,沙化林地占林地总面积10.32%.

2 研究方法

本文运用层次分析法进行富裕县黑土地风蚀沙化危险性研究.层次分析法是把复杂问题的各因素按照隶属关系排成从高到低的若干层次,再将各因子两两比较,定性和定量相结合进行分析,确定各因子在方案中重要性程度的权重^[15].制图采用地理信息系统软件ArcGIS,将各指标对应的数据统一转换为栅格格式,运用GIS空间分析功能的加权叠加模块进行计算得到研究区的风蚀沙化危险性等级图.

需要说明的是,本次研究针对的是黑土层风蚀沙化危险性,因而调查点所取实验数据为黑土中的平均含量,而研究区多处可见表层已不存在黑土,已经发生明显的沙化现象,故这样的点位本底因子数据取值均为0.研究区布设调查点点位如图1,点位部署遵循黑土地地表基质调查技术要求.

2.1 分析因子选择

关于土地沙化危险性的研究,刘光磊结合研究区生态环境的特征,综合考虑多方面的致灾因子以后选择了气温、降雨量、风速、土壤类型、地貌类型、土地利用类型、植被郁闭度、人口密度等8个细分因子^[18];沈亚楠等人在更大的研究区域上选择了风速、干燥度指

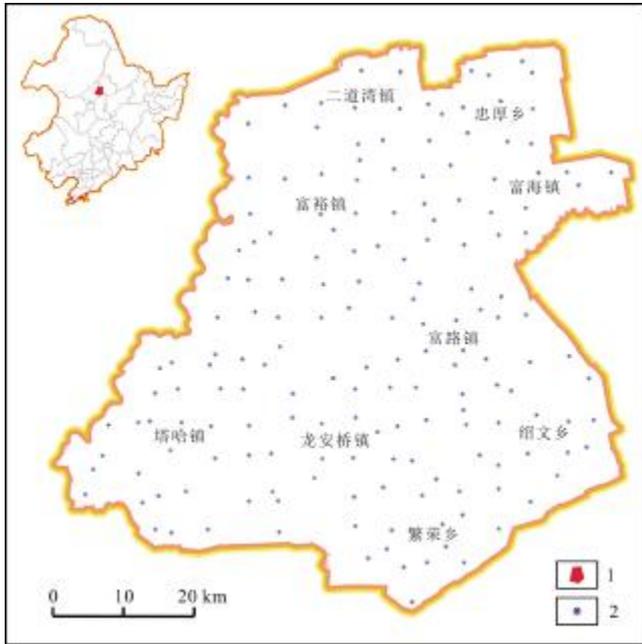


图1 富裕县黑土层风蚀沙化采样点分布图

Fig. 1 Sampling point distribution map of wind erosion and desertification in black land of Fuyu County

1—研究区位置 (study area); 2—调查点位 (survey point)

数、土地覆盖、植被指数、土壤属性等5项因子^[19]。此外多位学者对宏观区域土地沙化敏感性也有一定研究^[20-23]。参照国家环境保护部和国家发展改革委发布的《生态保护红线划定指南》，主要选择指标为干燥度指数、起沙风天数、土壤质地、植被覆盖。

参考众多学者的研究成果，借鉴相关领域专家建议，针对本次研究主体（黑土），结合研究区尺度小、地貌类型较为单一的特点，依据综合性、主导性、实用性、地带性、层次性^[16]原则，选择本底因子为土壤机械组成当中的黏粒含量、黑土厚度、土壤有机质含量、土壤含水率，以及外界因子植被覆盖度，共计5项因子。

1) 土壤黏粒含量：按土壤中黏粒、粉粒、砂粒的质量分数可将其分为砂土类、壤土类、黏土类三大类^[11]。同等外界条件下，黏土等细质地土壤较砂土更不易被风蚀，因为细颗粒易聚集形成团聚体。而在土地风蚀沙化中，表层黏粒大量损失，黏粒降低以后，土壤内聚力减小，质地疏松，结构变得松散，风蚀更易发生^[24-25]。

2) 黑土厚度：前人研究表明，土壤物理指标中土壤层厚度与土地荒漠化有极显著的相关性^[17]。厚度越大荒漠化程度越轻，土壤抗风蚀能力随之增强，那么风蚀沙化危险性越低。

3) 土壤含水率：土壤含水率作为影响土壤风蚀作用的重要因子，其主要通过影响土壤颗粒的启动风速和颗粒之间的团聚作用，从而影响风蚀作用产生的土壤沙化程度。土壤含水率小，土壤干燥，土壤颗粒启动风速小，土壤抗风蚀能力弱，易被风吹失^[26]；土壤含水率高时，土壤颗粒能通过增加自身的黏滞性和颗粒间的内聚力，改变土壤颗粒脱离地表启动风速，增加土壤抗风蚀性^[11, 27]。

4) 有机碳含量：土地沙化导致其物理化学性质发生变化。根据前人研究，土壤中有有机质、全N、全P、全K等物理化学性质的诸多因子互相关联，做研究时选取其中一种即可^[13]。有机质是土壤水稳性结构的胶结剂，含有机质丰富的土壤可形成较多良好结构，增强土壤抗风蚀能力^[27]。而在相同条件下，有机碳和有机质之间存在一定的转换关系^[28]，故本研究依据项目调查结果，使用有机碳含量作为风蚀沙化评价因子之一。

5) 归一化植被指数 (NDVI)：植被覆盖主要对风蚀沙化起抑制作用，植物体本身能够阻挡和削弱风力，降低土壤受到的风力，保护土壤表面；植被根部通过聚集其附近的土壤颗粒，降低风蚀发生的可能性^[11]。研究区每年植被覆盖度最低时期基本在1—5月，此时处于低温、干旱、多风状态，因此风蚀沙化作用相对更强。NDVI能较好反映地表植被覆盖程度，其值越大说明植被生长越茂盛，覆盖率越高。本文采用NDVI代替植被覆盖度，并且采用1—5月NDVI平均值用以分析。

2.2 评价指标权重

黑土地风蚀沙化危险性分析指标体系中上述指标的重要性各不相同，需要对其重要性进行判断。层次分析法确定因子权重的方式可表述为：构造矩阵通过对比得到各因子相对重要性，计算矩阵特征向量得到评价因子权重，最后检验一致性指标 (CR)，当 $CR < 0.1$ 时，则说明判断矩阵的构造是科学合理的^[29]。根据前人研究和野外调查，本研究构造的风蚀沙化危险性影响因子的权重矩阵见表1，其一致性指标 $CR = 0.0009$ ，表明选用的因子权重合理。

2.3 建立分析模型

根据上述所选评价因子及确定的因子权重，采取指标权重加法计算，得到风蚀沙化危险性的评价模型：

$$R = \sum_{i=1}^n C_i W_{ci}$$

表 1 风蚀沙化危险性影响因子权重判断矩阵

Table 1 Judgment matrix of impact factor weight for wind erosion and desertification risk

权重因子	黏粒含量	黑土层厚度	含水率	有机碳含量	NDVI	权重值
黏粒含量	1	1.5	2	3.56	2	0.3371
黑土层厚度	0.67	1	1.5	2.5	1.5	0.2382
含水率	0.5	0.67	1	1.75	1	0.1641
有机碳含量	0.28	0.4	0.57	1	0.5	0.092
NDVI	0.5	0.67	1	2	1	0.1687

式中: R 为风蚀沙化危险性值; C_i 为各指标归一化之后的值; W_{ci} 为各指标权重值. 由于各参评指标之间的意义和量纲差别较大, 如果不加处理地直接利用原始数据开展计算和评价, 其结果更容易被数量级大的指标所控制, 而那些数量级较低、但重要程度很高的指标将无法体现其影响, 因此需要对各项指标进行归一化处理. 归一化公式可表示为^[15, 28]:

$$X_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_i}$$

而本研究所选取的指标与风蚀危险性呈负相关, 其处理方法为:

$$X_i = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_i}$$

式中: X_i 为每个指标标准化后的值; x_i 为每个指标的真实值; x_{max} 、 x_{min} 分别为每个指标的最大和最小值. 最终形成的风蚀沙化危险性影响因子的空间分布格局如图 2 所示. 可以看出, 各项指标经过负相关的归一化后, 区内黑土黏粒含量整体自东北向西南升高; 含水率

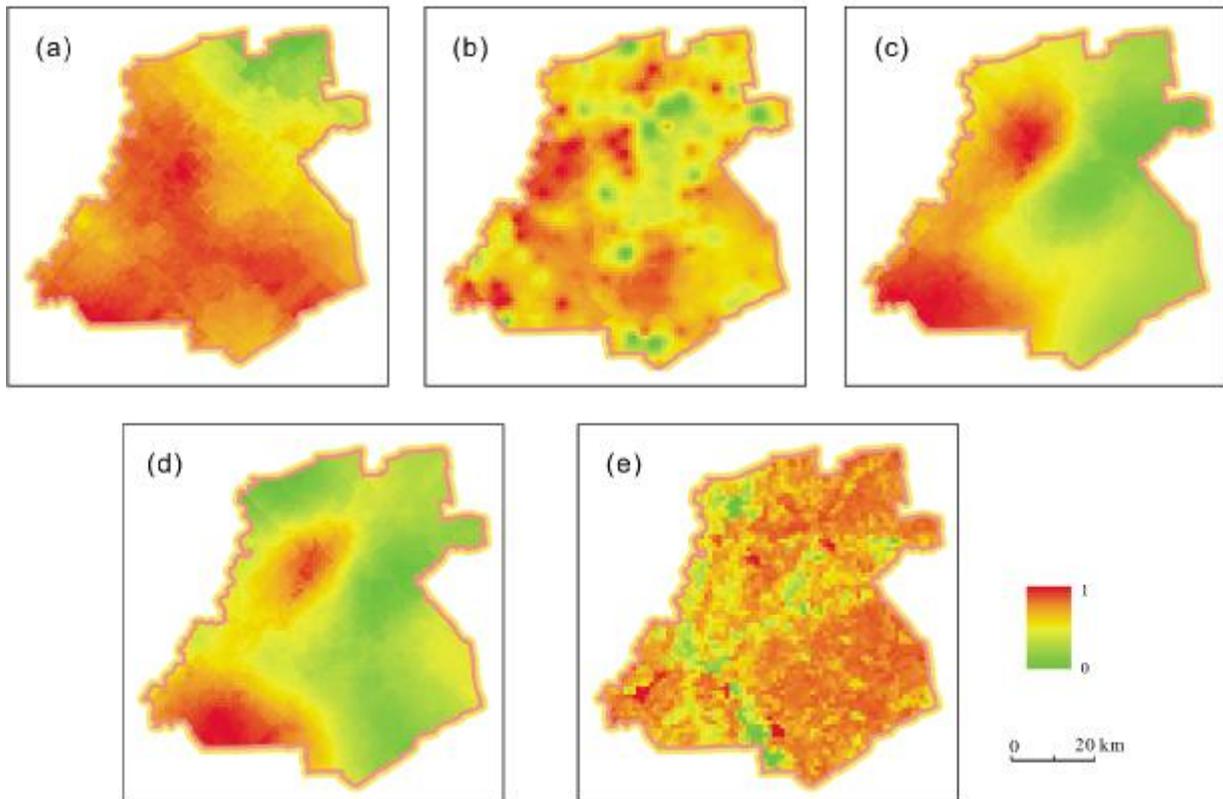


图 2 风蚀沙化危险性影响因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of impact factors for wind erosion and desertification risk

a—黏粒含量(clay content); b—黑土层厚度(thickness of black soil); c—含水率(moisture); d—有机碳含量(organic carbon content); e—归一化植被指数(NDVI)

和有机碳含量分布较为相似,整体为东低西高,高值区普遍在区内西南部;黑土厚度分布无规律;NDVI在区内整体数值偏高,说明研究选择的时段区内整体植被覆盖较差。

3 结果与分析

基于上述分析模型,通过 ArcGIS 10.7 的相关功能,输入前面所得到的黏粒含量、黑土层厚度、含水率、有机碳含量和 NDVI 等评价因子的空间数据,得到风蚀沙化危险性数据频率的空间分布。通过对其进行分析,同时结合前人研究情况和野外调查结果,对风蚀沙化危险性值 R 进行重分类(标准见表 2),可以将研究区的风险沙化危险性分为无险型、轻险型、危险型、强险型 4 个等级,最终得出研究区风蚀沙化危险性的空间分布(如图 3)。

表 2 富裕县风蚀沙化危险等级划分
Table 2 Degrees of wind erosion and desertification risk in Fuyu County

危险型	无险型	轻险型	危险型	强险型
危险性指数	$R < 0.5$	$0.5 \leq R < 0.7$	$0.7 \leq R < 0.9$	$R \geq 0.9$

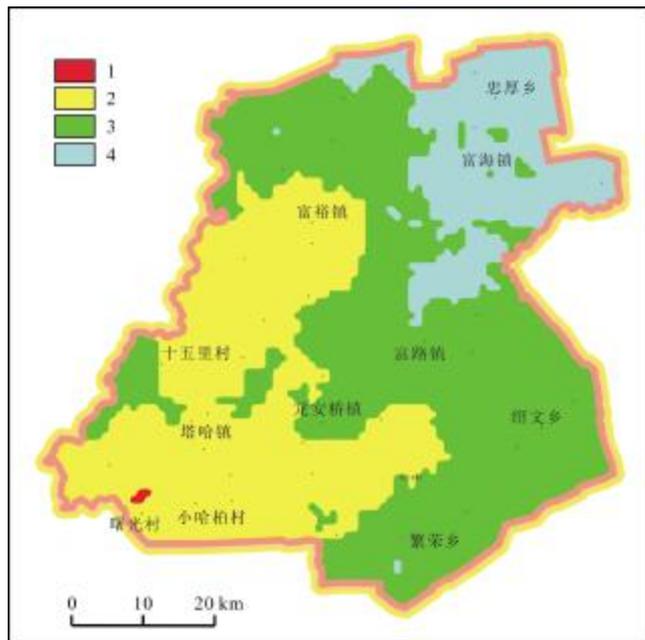


图 3 富裕县风蚀沙化危险性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of wind erosion and desertification risk in Fuyu County

1—强险型(high risk); 2—危险型(risk); 3—轻险型(light risk); 4—无险型(risk-free)

1)强险型区:根据富裕县风蚀沙化危险性等级分区图,可以看出,强险型区在研究区只分布很小一块,位于富裕县西南角曙光村附近,面积约 3.86 km^2 ,占比 0.09% 。两块图斑覆盖处为居民区和工厂区,人类对土地的高强度利用和开发,加之植被覆盖很低造成了黑土发生沙化,土质变差。因此,在生活发展的同时应注意土地和植被的保护,否则这样的强险型区可能会在其他人类高度开发和利用的地区发生扩散。

2)危险型区:主要分布于富裕县西南部,分布面积达 1440.48 km^2 ,占比 34.37% 。区内交通发达,高速公路、国道、省道均有分布,村镇分布相对较密,耕地大面积分布。植被覆盖最高区位于该区,但仅呈条状分布,整体土壤植被覆盖低,林地呈散点状分布,土壤沙化严重,土质疏松。南部小哈柏村以南存在几处盐碱地,自然杂草覆盖为主。从调查点看,区内共计有 15 处调查点表层不存在黑土而是沙土,这种特殊的土地利用方式分布格局和松散的农地土壤结构更容易发生风蚀沙化。从本底因子分布情况看,该区域有机碳、含水率、黏粒等土壤本底因子含量均为低值,符合危险区特征,也是该区沙化结果的表现,证明了因子选取和权重赋值的合理性。塔哈镇以西靠近嫩江中游,相对而言危险性降低为轻险型,主要原因是含水率较高,黑土厚度较大。整体受本底因子分布影响,而 1—5 月区内基本处于裸露状态,植被覆盖情况差别实际很小,更没有山区那种成片的原始森林,因而区内的沙化危险性分布与植被覆盖关联性不是很明显。

3)轻险型区:主要分布于富裕县西北至东南,十五里村以东分布少许,分布面积 2038.11 km^2 ,占比 48.62% 。区内主要为居民区和农田,乌裕尔河穿过中心,植被覆盖较差,林地零星分布,土壤呈砂质状。从本底因子看,土壤的含水率、有机碳含量较高,但黑土层的厚度与平均黏粒含量的增加有效地削弱了沙化的严重程度。因此黑土层厚度的保护是防止区域进一步沙化的第一步,加大黑土地保护很有意义。

4)无险型区:分布于研究区东北角,分布面积 709.21 km^2 ,占比 16.92% 。该区土地利用方式以农田为主,村落分布相对稀疏,土质未见沙化情况,黑土完整性较好,土壤物理化学性质表现良好,本底因子均为高值。该区土地使用方法及耕地施肥情况值得深入调研,也许能够为黑土地保护提供一定依据。

笔者在因子选择过程中参考了众多学者的研究,同时为验证指标体系的因子选择及权重赋值的科学性和合理性而对富裕县的邻县拜泉县的风蚀沙化危险性进行了分布验证,结果发现拜泉县内为无险型和轻险型,符合野外观测实际情况,证明了在小尺度研究领域内本研究选取指标体系的合理性.本文各项影响因子的权重和计算结果分级虽然存在一定主观性,可能会对评价结果的客观程度造成一定影响,但笔者在项目实施过程中对研究区进行了足够多的野外验证,确保了分级的合理性.从宏观尺度看,富裕县西南方向邻近的齐齐哈尔市区和泰来县,均为嫩江沙地北部主要地区,土地沙化情况较富裕县更严重,能够推测危险型和强险型区域将会占主要部分.

4 结论

通过调研分析,建立了包括土壤黏粒含量、土壤含水率、土壤有机碳含量、黑土层厚度、NDVI等因子在内的黑龙江省富裕县黑土层风蚀沙化危险性评价的指标体系;运用GIS平台形成上述本底因子的空间分布数据;利用层次分析法构建了土地沙化危险性评价模型,得到了研究区的沙化危险性空间分布.研究得出以下结论:

- 1)研究区黑土地沙化危险性整体呈现出从东北向西南增强的趋势.
- 2)基于层次分析法的黑土沙化危险性评价的指标体系选取合理.
- 3)研究所得黑土地沙化危险性空间分布符合客观实际.

致谢:感谢中国地质调查局项目“松嫩平原齐齐哈尔地区黑土地地表基质调查(ZD20220107)”资助;感谢中国科学院资源环境科学与数据中心(resdc.cn)提供NDVI栅格数据;感谢各位专家同事在文章编写过程提出的修改建议.

参考文献(References):

- [1]李丹丹,陈明.“耕地中的大熊猫”——寒地黑土[N].中国矿业报,2021-05-28(04).
Li D D, Chen M. Black soil in cold region[N]. China Mining News, 2021-05-28(04). (in Chinese)

- [2]马超.黑龙江省黑土地保护性耕作实施基本情况及问题研究[J].中国农学通报,2022,38(17):143-147.
Ma C. Basic situation and problems of conservation tillage in black soil in Heilongjiang Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(17): 143-147.
- [3]侯红星,葛良胜,孙肖,等.地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J].自然资源学报,2022,37(9):2264-2276.
Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. A study on the application of ground substrate in the survey and evaluation of China's black soil resources: Based on ground substrate survey in Baoqing, Heilongjiang Province [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2264-2276.
- [4]侯淑艳,朱金兆,刘建新,等.黑龙江省西部风蚀荒漠化特性与防治技术[J].水土保持研究,2011,18(2):6-9.
Hou S Y, Zhu J Z, Liu X J, et al. The characteristics and control techniques of wind-induced desertification in the west of Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 6-9.
- [5]韩丽芳,刘玲.黑龙江省西部土地沙化的危害及防治措施[J].黑龙江科技信息,2011(7):70.
Han L F, Liu L. The harm and prevention measures of land desertification in the west of Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(7): 70. (in Chinese)
- [6]李取生.松嫩沙地历史演变的初步研究[J].科学通报,1990,35(11):854-856.
Li Q S. A primary study on the historical change of Songnen sandy land[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(6): 487-489.
- [7]李宜垠,吕金福.松嫩沙地晚更新世以来的孢粉记录及古植被古气候[J].中国沙漠,1996,16(4):339-344.
Li Y G, Lv J F. The sporo-pollen records and vegetation and climate history in Songnen sandy land since Epipleistocene[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(4): 339-344.
- [8]李宝林.松嫩沙地沙漠化的气候因素与沙地发育特征[J].中国沙漠,1996,16(3):250-257.
Li B L. The climatic factors of desertification and the developed characteristic of Songnen sandy land[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(3): 250-257.
- [9]介冬梅,吕金福.松嫩沙地末次冰期以来降水量和干燥度的时空变化[J].地理科学,1995,15(4):337-343.
Jie D M, Lv J F. The time-space change of precipitation and aridity degree of Songnen sand land since last glacial age [J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(4): 337-343.
- [10]海春兴,赵焯,马礼.中国北方农牧交错区夏季土壤风蚀研究——以河北丰宁县大滩乡二道河为例[J].干旱区资源与环境,2002,16(2):6-9.
Hai C X, Zhao Y, Ma L. Studies on the wind erosion on farming-pastoral zone of northern China in summer[J]. Journal of Arid Land

- Resources and Environment, 2002, 16(2): 6-9.
- [11]何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔中地区土壤风蚀的影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 502-508.
He Q, Yang X H, Ali M, et al. Impact factors of soil wind erosion in Tazhong area[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 502-508.
- [12]贾丹, 赵永军, 黄军荣, 等. 北京市大兴区风蚀危险度评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 144-147.
Jia D, Zhao Y J, Huang J R, et al. Risk degree assessment of soil erosion by wind in Daxing District of Beijing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6): 144-147.
- [13]于国茂, 刘越, 艳燕, 等. 2000~2008年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1493-1499.
Yu G M, Liu Y, Yan Y, et al. Soil wind erosion risk assessment in the middle part of Inner Mongolia Plateau during 2000 to 2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(12): 1493-1499.
- [14]吴芳芳, 曹月娥, 卢刚, 等. 准东地区土壤风蚀影响因子分析与风蚀量估算[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 56-60, 66.
Wu F F, Cao Y E, Lu G, et al. Impact factors of soil wind erosion and estimation of soil loss in Zhundong, Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 56-60, 66.
- [15]孙传龙, 张卓栋, 邱倩倩, 等. 基于层次分析法的锡林郭勒草地景观系统风蚀危险性分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(05): 1036-1042.
Sun C L, Zhang Z D, Qiu Q Q, et al. AHP based wind erosion risk analysis of the Xilinguole grassland landscape system[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(5): 1036-1042.
- [16]师华定, 梁海超, 齐永清, 等. 风蚀危险性评价研究综述[J]. 资源与产业, 2010, 12(5): 43-49.
Shi H D, Liang H C, Qi Y Q, et al. Study review of wind erosion hazard assessment[J]. Resources & Industries, 2010, 12(5): 43-49.
- [17]范建容, 刘淑珍, 钟祥浩, 等. 金沙江干热河谷土地荒漠化评价方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 243-248.
Fan J R, Liu S Z, Zhong X H, et al. Evaluation method of land degradation/desertification[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(2): 243-248.
- [18]刘光磊. 晋北地区土地沙化致灾孕育因子时空特征及危险性评价[D]. 太原: 山西大学, 2014.
Liu G L. Spatio-temporal patterns and risk assessment of desertification disaster-pregnant factors in the northern Shanxi[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.
- [19]沈亚楠, 仇梦梦, 岳耀杰. 中国北方土地沙漠化灾害危险性评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 174-184.
Shen Y N, Qiu M M, Yue Y J. Sandy desertification hazard assessment in North China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 174-184.
- [20]王梅梅, 朱志玲, 吴咏梅. 宁夏中部干旱带土地沙漠化评价[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 320-324.
Wang M M, Zhu Z L, Wu Y M. Assessment on the sensitivity to aeolian desertification and importance of controlling aeolian desertification in the middle arid region of Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 320-324.
- [21]刘建宇, 聂洪峰, 宋保芳, 等. 内蒙古阴山北麓的风蚀沙化作用及其生态地质效应[J]. 中国地质, 2024, 51(3): 1020-1033.
Liu J Y, Nie H F, Song B F, et al. Wind erosion, land desertification and ecogeological effects in the northern piedmont of Yinshan Mountain in Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2024, 51(3): 1020-1033.
- [22]周利军, 张淑花. 黑龙江省西南部土地沙漠化敏感性评价[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 324-327.
Zhou L J, Zhang S H. Study on land desertification sensitivity evaluation in south-west Heilongjiang Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(21): 324-327.
- [23]任利广, 马维伟, 李广, 等. 基于GIS的甘肃省农牧交错带土地沙化敏感性时空分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 149-156.
Ren L G, Ma W W, Li G, et al. Temporal and spatial distribution pattern of land desertification sensitivity in agro pastoral ecotone of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 149-156.
- [24]刘朝霞, 李钢铁, 李玉灵. 用聚类分析法进行毛乌素风蚀荒漠化强度分级——以乌审旗为例[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1996, 18(1): 27-33.
Liu Z X, Li G T, Li Y L. Intensity grading of blow desertification with cluster analyse in the Mao Wu Shu: An example as Wu Sheng County[J]. Journal of Neimenggu Forestry College, 1996, 18(1): 27-33.
- [25]赵举. 阴山北麓农牧交错带风蚀荒漠化治理的保持耕作模式研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
Zhao J. Study on conservative tillage models for controlling wind erosion at transition zone between agriculture and pasture areas in the north foot region of Yinshan Mountain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002.
- [26]王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 322-327.
Wang T, Chen G T, Qian Z A, et al. Situation of sand-dust storms and countermeasures in North China[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 322-327.
- [27]戴全厚, 喻理飞, 刘明义, 等. 吉林省西部沙地土壤风蚀机理分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 81-84, 96.
Dai Q H, Yu L F, Liu M Y, et al. Mechanism of soil erosion by wind on sandy land in West Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 81-84, 96.

- titanium magnetite deposit in middle Qilian Mountains[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(4): 492-499. doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.005.
- [31]张浩. 西昆仑区域成矿地质背景和成矿规律[J]. *世界有色金属*, 2020(6): 138-139.
Zhang H. Metallogenic geological background and metallogenic law of West Kunlun[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(6): 138-139.
- [32]秦丹鹤, 侯红星, 邵兴坤. 青海曲旁浪斜地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *地质与资源*, 2023, 32(4): 418-426, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.04.005.
Qin D H, Hou H X, Shao X K. Geochemistry of stream sediments and exploration prospects in Qupanglangxie area, Qinghai Province [J]. *Geology and Resources*, 2023, 32(4): 418-426, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.04.005.
- [33]刘劲松, 邹先武, 汤朝阳, 等. 大巴山地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 249-260.
Liu J S, Zou X W, Tang C Y, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and ore-prospecting orientation in Daba Mountain area[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 249-260.
- [34]戴慧敏, 代雅键, 马振东, 等. 大兴安岭查巴奇地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 1043-1050.
Dai H M, Dai Y J, Ma Z D, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in the Chabaqi area of Da Hingan Mts[J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 1043-1050.
- [35]王磊, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山炭山子-黄草泉一带水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *现代地质*, 2016, 30(6): 1276-1284.
Wang L, Yang J G, Wang X H, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in the Tanshanzi-Huangcaoquan area of Beishan, Gansu Province [J]. *Geoscience*, 2016, 30(6): 1276-1284.
- [36]王磊, 胡兆国, 李向民, 等. 甘肃省党河南山乌兰达坂沟-扎子沟地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景预测[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 516-527.
Wang L, Hu Z G, Li X M, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prediction of mining prospects in the Wulandaban-Zhazigou area, Danghe South Mountain, Gansu Province [J]. *Geology in China*, 47(2): 516-527.
- [37]张伟, 安茂国, 王志鹏, 等. 青海省那陵格勒河中游地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *现代地质*, 2023, 37(3): 690-707.
Zhang W, An M G, Wang Z P, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting in the middle reach of the Nalinggele River, Qinghai Province [J]. *Geoscience*, 2023, 37(3): 690-707.
- [38]韩荣文, 高洪生, 马英, 等. R型聚类分析和因子分析在青海阿拉克湖-冬给措纳湖地区水系沉积物测量中的应用[J]. *西部资源*, 2016(3): 81-83.
Han R W, Gao H S, Ma Y, et al. Application of R-type cluster and factor analysis in the stream sediment survey in Alag Lake-Donggi Cona Lake, Qinghai [J]. *Western Resources*, 2016(3): 81-83. (in Chinese)

(上接第 828 页/Continued from Page 828)

- [28]田耀武, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵流域森林土壤有机碳、有机质与容重间的回归模型[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(1): 89-95.
Tian Y W, Huang Z L, Xiao W F, et al. Organic carbon, organic matter and bulk density regression models for forest soils in Lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37(1): 89-95.
- [29]梁海超, 师华定, 白中科, 等. 中国北方典型农牧交错区的土壤风蚀危险度研究[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(4): 510-516
Liang H C, Shi H D, Bai Z K, et al. Assessment of wind erosion hazard degree in typical farming-pastoral ecotone of northern China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, 12(4): 510-516.