

基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价

刘孟竹¹, 王彦芳², 裴宏伟¹

(1. 河北建筑工程学院 市政与环境工程系, 河北 张家口 075000; 2. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

摘要: [目的] 对河北省坝上地区近40 a来的土地利用动态变化和生态风险进行分析评价并对未来趋势作出预测, 为该地区生态建设和治理、可持续发展提供科学依据。[方法] 基于坝上地区1980—2018年5期土地利用数据以及通过土地转移矩阵、空间相关性分析等方法揭示和预测该区1980—2026年的土地利用变化特征并评估该区生态风险水平。[结果] ①整个研究期间, 坝上地区土地利用类型以耕地为主, 所占比例近50%, 其中, 1980—2018年, 耕地、林地扩张面积均超过300 km², 草地减少近616.60 km², 水域面积缩减36.04%, 其中耕地、林地、草地之间的互相转移程度较为剧烈, 空间变化上表现为各地类的重心在2000—2010年明显迁移。②1980—2026年, 坝上地区6个时期内生态风险值全局空间自相关Moran's *I*指数均在0.500左右, 其空间分布表现出较高的趋同集聚性。③近40 a来, 坝上生态风险水平升为高风险级, 其区域增加了123.22 km², 较高风险区域分布在城镇地区, 据CA-Markov模型预测, 未来坝上地区中等及中等以上风险区域持续扩张, 丰宁县和围场县将分别出现小规模高风险区和较高风险区。[结论] ①近40 a来坝上地区草地退化严重, 水域面积显著减少, 原因系安固里淖干涸所致。②该区生态风险水平与土地格局分布具有较强相关性, 且在未来会继续升高。

关键词: 坝上地区; CA-Markov模型; 土地利用; 生态风险; 空间自相关

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2020)04-0303-09 **中图分类号:** X826, F301.2, X171.1

文献参数: 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 303-311. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.041; Liu Mengzhu, Wang Yanfang, Pei Hongwei. Landscape ecological risk assessment in Bashang area of Hebei Province based on land use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 303-311.

Landscape Ecological Risk Assessment in Bashang Area of Hebei Province Based on Land Use Change

Liu Mengzhu¹, Wang Yanfang², Pei Hongwei¹

(1. Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: [Objective] The land use change and ecological risk in recent four decades in Bashang area of Hebei Province were investigated to provide scientific basis for local ecological construction and management, as well as sustainable development in this region. [Methods] Land transfer matrix and the spatial autocorrelation analysis were used to reveal the land use change and evaluate the level of ecological risk of Bashang area, based on land-use data at five stages during 1980—2018. [Results] ① Cultivated land was the main type of land use, covering half of the study area. During the years of 1980—2018, cultivated land and forest land expanded by more than 300 km², while the area of grassland decreased by 616.60 km² and waterland narrowed roughly by 36.04%. Among them, cultivated land, forest land and grassland showed a relatively strong mutual transfer, and the spatial change showed that the center of gravity of each category was obviously transferred from 2000 to 2010. ② From 1980 to 2026, the value of Moran's *I* index all approached

收稿日期: 2020-04-24

修回日期: 2020-05-19

资助项目: 张家口市科技局人才专项“河北建筑工程学院院士工作站建设项目”(201903Y); 国家自然科学基金项目(41701017); 河北省科技厅重点研发计划项目(18397002D); 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJ2018027); 河北省科技厅高水平人才团队建设项目(199A4201H)。

第一作者: 刘孟竹(1994—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。Email: 378765098@qq.com。

通讯作者: 裴宏伟(1987—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事流域生态水文和城市生态学研究。Email: hwpei@sjziam.ac.cn。

nearly 0.500 in each stage, which indicated that the spatial distribution of ecological risk presented higher convergence and agglomeration. ③ In recent four decades, the ecological risk level of Bashang area had risen to high risk level, with an increase of 123.22 km² and higher risk region mainly distributed in urban areas. According to CA-Markov model, the medium and above risk areas in Bashang area would continue to expand and Fengning County and Weichang County would appear small-scale high-risk areas and higher-risk areas. [Conclusion] ① In the past 40 years, the grassland in Bashang area had degraded seriously and the main reason for the significant decrease of water area was the drying up of the Angulinao Lake. ② The level of ecological risk in Bashang area had a strong correlation with the distribution of land pattern, and would continue to rise in the future.

Keywords: Bashang area; CA-Markov model; land use; ecological risk; spatial autocorrelation

土地生态系统作为地区生态环境的载体,其长期的积累性变化是全球环境问题的一大诱因^[1],其中土地生态风险评价作为生态安全问题里的重点内容^[2],国内外学者就其已展开了广泛研究。目前,针对已有的研究成果分析,相关研究在空间尺度选择上多为市、区、县域甚至小型湖泊流域,时间跨度从以往几年到几百年不等。例如,高宾^[3]等基于景观尺度分析了锦州湾沿海经济开发区 15 a 来的生态风险水平,张学斌^[4]等以遥感影像为基础,构建了石羊河流域的景观生态风险评价机制。从国内学者广泛地应用该评价机制来看,通过景观指数构建的区域生态风险评价体系提供了一个区域生态评价的新视角,是切实可行并具有参考意义的,但同时该方法也无可避免地缺乏对具体生态过程的考量。此外,区域生态评价体系还可对区域内社会经济、水文气候、土地性质等多角度对生态胁迫因素进行定性选取^[5],通过主成分法、熵值法、层次分析法等确定各因素权重从而构建一套完整的评价模型^[6],应用较为广泛的包括 PSR, DPSIR, SSD 等模型。针对区域景观生态风险评价的研究,普遍是针对过去的生态风险变化进行分析,了解其变化趋势以及驱动机理仍不足以对风险进行预警和有效管控,尤其在生态敏感区,无论是坝上地区还是其所属的农牧交错带,这类地区往往存在地广人稀的人文特点,因而对全局的生态风险把控难以面面俱到。快速、精准地识别生态风险区域从而进行管理,可以通过基于土地变化视角的景观生态风险预警得以实现,CLUE-S, CA-Markov 等模型均为土地预测模型并且得到了国内外学者广泛的应用。因此,构建风险预测模型对研究区以及北方农牧交错带生态环境类似的区域,在生态建设、生态风险预警等均具有切实的指导意义。

河北省坝上地区作为北方农牧交错带典型的干旱半干旱过渡区,其生态环境极为脆弱,一旦被破坏其生态恢复与重建将难以逆转。多年来坝上地区土地沙漠化严重,土壤风蚀、水土流失、水域萎缩等生境

问题一再恶化^[7],同时该区极端天气频发,短历时暴雨频现。河北省坝上地区恶劣的气候环境条件,也破坏了该区土地生态环境。作为首都生态屏障,坝上地区肩负的涵养水源、防风固沙等生态功能与其现有的恶劣生境条件之间的矛盾非常尖锐^[8]。而目前关于坝上地区生态的研究较多关注其生态环境问题及其成因,时间也相对滞后,特定地针对当下坝上地区的生态风险评估以及预测的研究却不多见。基于此,本文以河北省坝上地区为研究对象,结合土地利用及景观生态学视角,对其近 40 a 来的土地利用动态变化和生态风险进行分析评价并对未来趋势作出预测,以期对坝上地区生态建设和治理、可持续发展提供一定科学依据,同时坝上地区处于北方农牧交错带中段,其气候条件以及农、牧业交错的土地格局,可以作为农牧交错带最典型的代表区,该地区的研究可适用于整个北方农牧交错带地区。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

坝上地区位于河北省西北部地带,接壤内蒙古高原南缘,地理位置介于 114°35′—116°45′E 和 41°00′—42°20′N 之间。其涵盖的行政区域包含沽源县、张北县、康保县的全区以及尚义县、围场县、丰宁县的部分区域,总面积约 1.90×10⁴ km²。坝上地区属大陆季风高原气候,终年以干冷、多风气候为主,年均气温在 1~2 ℃,多年平均降雨量在 400 mm 左右,70% 的雨量集中在 6—9 月,年均蒸发量高达 1 800 mm。该地区地貌以丘陵、平原居多研究区,整体海拔为 834~2 229 m。坝上地区因其显著的干旱多风等气候特点,加上全年少雨,地下水位下降、土地荒漠化、土壤风蚀沙化逐年加剧。该区年均蒸发量显著大于年降水量,地表水域现已大多萎缩甚至干涸^[9]。近 20 a 坝上地区在市场经济的驱动下农业转型开始大面积种植经济效益较高的错季蔬菜,对地下水消耗量巨大,加上外界过量地下水开采以及过度农业灌溉,导致其地下

水位近 40 a 来下降了 3~5 m^[10],生态承载功能不堪重负,曾经的华北第一大高原内陆湖安固里淖早已干涸。坝上处于生态敏感区,与其所处北方农牧交错带面临的生态问题类似,如今均水土流失、气候恶劣、土地沙漠化趋于剧烈,给该区的生态环境恢复与重建带来巨大挑战。

1.2 数据源及处理

本研究所用的土地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,其均由 Landsat 卫星影像目视解译制成,分辨率为 30 m。时间选取了 1980,1990,2000,2010 和 2018 年共计 5 期。该土地数据由专业人员通过随机选点后实地调查,数据精度在 85%以上,能满足本文研究需要。土地利用分类根据《土地利用现状分类》标准并参考坝上地区的实际情况将其分为 6 类:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。2026 年预测数据以上述数据为基础参数在 IDRISI 软件中模拟所得,所有数据均统一为 WGS 1984 坐标系,分辨率与原始数据保持一致。

1.3 方法

1.3.1 CA-Markov 模型预测模拟

元胞自动机 (cellular automaton, CA) 模型具有在时间、空间、状态呈离散分布的特性,是一种在空间上相互作用、时间上又具有因果关系的网格动力学模型,具有处理复杂空间系统的能力^[11]。Markov 模型基于 Markov 链的空间概率模型,因其较好的稳定性和无后效性,能够预测土地利用变化中各个时刻的变动过程^[12]。CA-Markov 模型综合了 Markov 模型的时序预测和 CA 模型的空间分布模拟,被广泛应用于土地变化的预测模拟中^[13]。对于 CA-Markov 模型多数研究常结合二元 Logistic 回归模型和 MCE 模型于构成耦合模型用于土地利用预测中。以分布适宜性概率和多准则约束作为模型预测模拟的转换规则,其模拟结果也较理想。然而在实际中其驱动因子数据来源不一,时效性差,空间量化不合理以及人为主观对各因子权重设置的标准不统一往往给预测结果带来更多不确定性。考虑到本文重点不在于预测,因此仅考虑未来的土地利用变化按照以往变化趋势发展的自然情景。具体方法是在 IDRISI 软件中通过 Markov 模型得到 2000—2010 年土地面积转移矩阵和转移概率矩阵作为 CA-Markov 模型模拟的初始参数进行坝上地区 2018 年土地利用的预测模拟,模拟结果与 2018 实际分类图进行叠置分析,利用像元正确预测个数占比与 Kappa 系数等指标验证模型可信度。在模型可信度良好的情况下进行坝上地区 2026 年土地预测。

1.3.2 土地利用时空变化分析

本研究采用综合单一土地利用动态度、土地利用转移矩阵以及重心模型等指标分别从土地利用变化的速率、数量和空间方向 3 个角度对坝上地区土地格局的变化进行整体分析,以揭示其多年来土地结构变化的特征以及未来变化的趋势。

1.3.3 土地利用动态度

土地利用动态度能定量反映出土地变化的速度,其中单一土地利用动态度侧重研究期内某种土地利用类型数量的年变化率,综合土地利用动态度则是对研究区内土地利用整体变化情况的刻画。为深入细化分析多年来坝上地区土地利用的变化情况,本文选择土地利用动态度这一指标,其计算公式^[14]为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为研究时段内某一土地利用类型动态度; U_a, U_b 分别为研究初期和研究末期某种土地利用类型的数量; T 为研究时长。

1.3.4 土地利用转移矩阵

土地转移矩阵反映了某一区域在研究初期和研究末期各类土地类型面积互相转化的动态信息,不仅可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率。转移矩阵表达式^[15]为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: S 为面积; n 为转移前后土地利用类型数; i, j ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$) 为转移前后的土地类型; S_{ij} 为转移前的 i 类土地转换成转移后 j 类土地类型的面积。

1.3.5 重心模型

土地格局的空间变化情况可以用各土地利用类型的重心转移变化来进行表达。各土地类型的重心坐标一般用影像或者地图的地理坐标来表示,计算公式^[16]为:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \cdot X_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad (3)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \cdot Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad (4)$$

式中: X_t, Y_t 为第 t 年某种土地利用类型分布重心的经纬度坐标; C_{ti} 为 t 年第 i 个区域土地利用类型面积; X_i, Y_i 为第 i 个区域重心地理坐标。

1.4 区域生态风险评价

本研究采用景观生态学角度构建坝上地区生态风险评价模型。利用 FRAGSTATS 软件计算出 1980—2026 年 6 期土地利用数据的各景观总面积 (CA)、各景观斑块数 (NP)、斑块密度 (PD) 以及景观分

维数(FRACT)4个指标作为初始参数。在 ArcMap 软件中对整个研究区进行风险小区划分,单元格大小根据平均斑块面积的 2~5 倍原则进行采样^[17],最终确定采样面积大小为 4 km×4 km,整个坝上地区被划分为 1 399 个风险小区。利用初始参数构建的生态风险评价模型对每一个风险小区进行赋值计算,得到风险指数作为每一个单元格内的参数值再经过克里金(Kriging)插值法实现整个研究区生态风险空间可视化。最后采用空间自相关分析和进行生态风险指数进行空间分析。

1.4.1 区域生态风险评价 景观生态风险评价体系中,景观指数法常以多尺度的土地利用数据为基础进行构建,因其依托遥感数据而具有了与之同步的高度时空性,在生态风险评价领域被广泛应用。其具体评价范式是将景观生态风险定义为风险概率与景观损失度的累乘^[18]。本文基于已有研究中理论与方法较为成熟的生态损失度(R_s)模型构建生态风险指数(ERI_m)。其具体表达式^[19]为:

$$ERI_m = \sum_{s=1}^m \frac{A_{ms}}{A_m} \times R_s \quad (5)$$

$$R_s = D \times Q_s \quad (6)$$

$$Q_s = aM_s + bN_s + cK_s \quad (7)$$

式中:ERI_m为第 m 个风险小区生态风险指数值; A_m 为第 m 个风险小区面积; A_{ms} 为 m 小区第 s 类景观面积; R_s 为第 s 类景观损失度; D 为景观脆弱度,由专家赋值并归一化处理所得; Q_s 为第 s 类景观干扰度; a, b, c 为权重(0.5, 0.3, 0.2); M_s, N_s, K_s 分别为第 s 类土地利用类型景观破碎度、景观分离度、景观分维数。

上述景观指数的具体内容和意义以及因子权重的分配在相关研究中已被准确地定义并广泛使用,此处不作赘述,具体可参考文献^[20]。

1.4.2 景观生态风险空间分析 区域景观生态风险指数作为一种空间变量常用地统计法对其空间分异

特征进行分析评估^[21]。本文采用空间自相关分析法对生态风险指数在分布上的集聚性进行分析并确定其与邻域空间变量的依赖性。全局空间自相关与局部空间自相关常用的指数分别为 Moran's I 指数与 LISA 指数。Moran's I 指数主要反映全部数据的某项属性值在空间中的相关性大小,其值范围为 -1~1,其绝对值越接近 1 代表全局空间自相关性越强,等于 0 时不相关^[21]。局部空间自相关 LISA 指数可以很好描述空间变量极值的局部空间聚集程度,其具体表现为:LL 型(低低聚集)、HH 型(高高聚集)、HL 型(低值包高值聚集)、LH 型(高值包低值聚集)4 种类型^[22]。其对于局部空间异常特征能有效识别。上述指标表达式^[23]为:

$$\text{Moran's } I = \frac{h \sum_v \sum_z f_{vz} (B_v - \bar{B})(B_z - \bar{B})}{(\sum_v \sum_z f_{vz})(\sum_v (B_v - \bar{B})^2)} \quad (8)$$

$$\text{LISA}_v = \frac{(B_v - \bar{B})}{\sum_v (B_v - \bar{B})^2 / h} \sum_z f_{vz} (B_z - \bar{B}) \quad (9)$$

式中: f_{vz} 为空间权重矩阵; B_v, B_z 分别为变量 B 在相邻配对单元空间属性值; \bar{B} 为空间变量属性值平均值; h 为风险小区个数。

2 结果与分析

2.1 坝上地区 2026 年土地模拟与验证

在 IDRISI 软件中通过 CA-Markov 模型对坝上地区土地利用进行预测模拟,结果如附图 4(见封 3)所示。其中,对 2018 年土地利用预测模拟精度验证的结果详见表 1。经混淆矩阵统计,2018 年两幅图像中,像元正确预测个数占比 88.74%,kappa 系数为 0.83,说明模拟精度良好,该期预测结果和实际状况一致性较高,模型具有可信度,可用于下一时期的模拟。坝上地区 2026 年土地利用预测结果如附图 4(见封 3)所示,经过上述精度验证,该期土地利用预测数据可作为本研究数据以作参考。

表 1 坝上地区 2018 年土地利用预测模拟混淆矩阵

| 土地利用类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | km ² |
|--------|------------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------------|
| 耕地 | 9 555 722 | 54 735 | 495 926 | 10 897 | 97 201 | 78 102 | |
| 林地 | 486 687 | 3 818 602 | 140 117 | 17 328 | 15 559 | 11 490 | |
| 草地 | 211 537 | 127 740 | 4 043 513 | 12 813 | 28 365 | 24 689 | |
| 水域 | 51 335 | 5 590 | 10 783 | 129 934 | 2 184 | 4 828 | |
| 建设用地 | 120 732 | 17 425 | 39 441 | 1 031 | 435 467 | 5 914 | |
| 未利用地 | 65 651 | 1 415 | 183 522 | 50 865 | 22 113 | 906 062 | |
| 总计 | 10 491 664 | 4 025 507 | 4 913 302 | 222 868 | 600 889 | 1 031 085 | |

注:每个像元大小为 30 m×30 m。

2.2 土地利用时空数量变化分析

经过 ArcMap 软件对坝上地区 1980—2026 年土地利用分类图统计分析得到 6 期各土地类型面积数据如表 2 所示。结合图 1 分析,整体上看,1980—2018 年坝上地区主要以耕地为主,其面积占比常年稳居在 50%左右,其在 2000—2010 年和 2010—2018 年有快速上升后下降的趋势。草地面积居其次,近 40 a 来浮动在 22.61%~26.18%,在 2000—2010 年有一个较为显著的下降,随后 8 a 间处于较小幅度上升。林地 在坝上地区覆盖度不如草地高,其变化主要表现在 2000—2018 年期间较急剧的扩张,在 2018 年覆盖度达到最高水平,占全区面积的近 19%。坝上地区水域在 2000—2010 年显著萎缩,究其原因是该期间内,位于张北县的华北第一内陆湖淖安固里淖全完干涸,造成了该区水域面积的断崖式下降。坝上 6 县居民住地、工矿用地、交通用地等面积在每一阶段稳步上升,2000—2018 年为显著增加阶段。由于改革开放以来人口数量的激增以及城镇化水平的不断提高,坝上地区总建设用地面积由 1980 年初 374.84 km² 持续

上升到 2018 年的 540.90 km²,近 40 a 增加了 44.30%。多年来土地荒漠化、土地沙化等一直侵扰着坝上地区土地生态安全,荒草地、盐碱地、沙地等未利用地在该区面积多达 900~1 000 km²,但是情况好在多年来呈现逐步下降趋势。根据模型结果,预计在 2026 年,坝上地区耕地、建设用地、未利用地均有较小上升趋势,未来时期除林地将有所下降外,其余地类变化不会太明显。

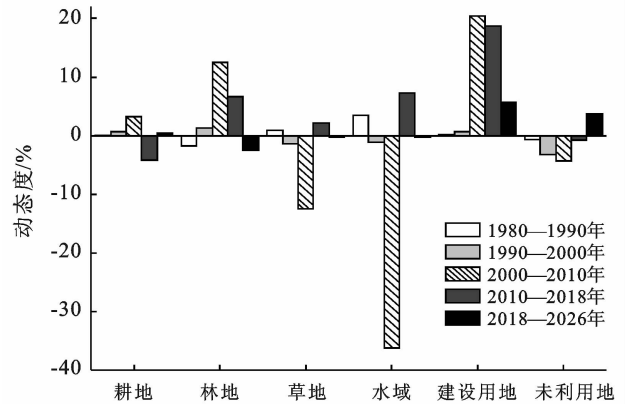


图 1 坝上地区 1980—2026 年土地利用动态度

表 2 坝上地区 1980—2026 年土地利用面积变化

| 土地利用类型 | 1980 年 | | 1990 年 | | 2000 年 | | 2010 年 | | 2018 年 | | 2026 年 | |
|--------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| | 面积/ km ² | 比例/ % | 面积/ km ² | 比例/ % | 面积/ km ² | 比例/ % | 面积/ km ² | 比例/ % | 面积/ km ² | 比例/ % | 面积/ km ² | 比例/ % |
| 耕地 | 9 486.83 | 49.47 | 9 488.40 | 49.47 | 9 549.21 | 49.79 | 9 857.90 | 51.40 | 9 448.77 | 49.27 | 9 491.07 | 49.49 |
| 林地 | 3 039.33 | 15.85 | 2 987.47 | 15.58 | 3 027.01 | 15.78 | 3 405.83 | 17.76 | 3 630.59 | 18.93 | 3 539.12 | 18.45 |
| 草地 | 4 973.63 | 25.93 | 5 020.18 | 26.18 | 4 952.33 | 25.82 | 4 335.73 | 22.61 | 4 428.75 | 23.09 | 4 413.60 | 23.01 |
| 水域 | 286.91 | 1.50 | 296.89 | 1.55 | 293.63 | 1.53 | 187.33 | 0.98 | 200.88 | 1.05 | 200.42 | 1.04 |
| 建设用地 | 374.84 | 1.95 | 375.56 | 1.96 | 378.25 | 1.97 | 455.59 | 2.38 | 540.90 | 2.82 | 571.48 | 2.98 |
| 未利用地 | 1 016.94 | 5.30 | 1 009.98 | 5.27 | 978.05 | 5.10 | 936.09 | 4.88 | 928.58 | 4.84 | 963.39 | 5.02 |

1980—2018 年期间,坝上地区耕地主要由草地转入而来,多达 350.55 km²,这与该区多年来毁草种粮的农业耕作方式密不可分。此外分别约有 100 km² 的建设用地和未利用地被用于开垦种植。同时期内,分别约有 448.32 和 204.17 km² 的耕地转出林草地和建设用地,说明该区近 40 a 来退耕还林还草政策取得实质性的成果同时也以牺牲耕地的代价加速着城镇化水平的进程。多年来林地的扩张主要由草地和耕地转入而来,在 2018 年林地覆盖度接近 19%,说明对该地区实行的绿化工程以及三北防护林工程已初见成效。坝上地区地表水域逐年萎缩,约 62.48 km² 的水域在近 40 a 间干涸继而演变成荒废地,其主要原因如上述所言与张北县安固里淖的干涸有直接关联。除水域外,草地的转入也是未利用地增加的一大因素,坝上地区恶劣的气候条件加速了土地荒漠化,水土流失、土壤风蚀、地表水资源急剧下降,加上人为地

对草地不合理垦殖后又废弃等种种原因造成该区大量可开发的土地演变成难以被利用的局面。预测在 2018—2026 年期间,耕地和草地的互相转化将会保持活跃,转移面积在 200~250 km² 不等。林地转入为耕地和草地的面积均超过 100 km²,建设用地的增长预计主要由耕地转入。由此观之,该区的未来的土地利用变化主要发在在农业用地之间互相的流转,除此以外的其他地类变化程度不会太大。总体来看,该区作为干旱半干旱区,水域的萎缩表明该区生态的水源涵养功能在下降,干旱的气候条件进一步加剧,对该区生态环境造成一定影响。同时耕地和草地的互相转换较为明显,但草地面积减少严重,追求地区经济增长而进行草地垦殖会显著减弱该区的水土保持、固碳等生态功能,更不利于该区荒漠化治理。同时,耕地大面积流入为林地,“退耕还林”等政策抑制该区生态环境恶化,将沙化严重或者生产能力低的耕地因

地制宜来植树造林,有效防患水土流失、洪涝干旱以及风沙等自然灾害。从草地、水域明显萎缩分析,尽

管林地有所增加,但该区生境质量总体是下降的,生态风险进而趋于不稳定(见表 3)。

表 3 坝上地区 1980—2026 年土地利用类型面积转移矩阵

km²

| 项目 | 土地利用类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|-------------------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
| 1980—2018 年 面积 | 耕地 | 8 793.53 | 54.52 | 350.55 | 24.33 | 115.67 | 110.17 |
| | 林地 | 255.45 | 2 760.86 | 552.04 | 30.14 | 2.26 | 29.84 |
| | 草地 | 192.88 | 201.21 | 3 854.15 | 19.93 | 20.58 | 140.00 |
| | 水域 | 18.38 | 2.91 | 15.59 | 146.68 | 1.09 | 16.24 |
| | 建设用地 | 204.17 | 17.68 | 67.32 | 3.35 | 226.08 | 22.30 |
| | 未利用地 | 22.43 | 2.16 | 133.98 | 62.48 | 9.17 | 698.38 |
| 2018—2026 年 面积 | 耕地 | 9 015.08 | 115.79 | 250.65 | 8.27 | 54.65 | 39.10 |
| | 林地 | 79.80 | 3 346.62 | 97.70 | 4.80 | 4.51 | 0.76 |
| | 草地 | 228.05 | 103.88 | 4 038.27 | 8.83 | 13.42 | 13.76 |
| | 水域 | 8.60 | 8.84 | 4.28 | 170.44 | 4.40 | 2.54 |
| | 建设用地 | 76.51 | 10.63 | 17.33 | 0.55 | 460.57 | 5.78 |
| | 未利用地 | 34.47 | 37.19 | 13.75 | 7.70 | 3.25 | 866.04 |

2.3 土地利用时空空间变化分析

通过 ArcMap 软件的重心工具对 1980—2026 年 6 个时期的坝上地区 6 种土地利用类型进行重心分析得到结果如图 2 所示。由图 2 可以观察到,6 种地类的重心在 2000—2010 年期间发生了显著转移变化。以 2000 年为界,耕地、草地、水域、建设用地 4 种类型土地重心在该年以前转移程度均较小。在 2010 年之后重心保持微小变动。耕地、未利用地在每一时期变动都较为明显。从重心转移方向上看,耕地和未利用地的重心转移轨迹为复杂无序,但耕地最终是向东北偏移,预计未来会向东南方向发展;未利用地的重心最终落脚点转向西南,接下来的 8 a 可能沿东北方向迁移。草地和水域的重心变化趋势非常一致,在 2000 年以前基本保持相对稳定,在 2000—2010 年 10 a 间两者重心均向东北方向变迁后,随之保持近似不变,预测结果显示到 2026 年重心位置变化程度将不太明显。林地重心的变化主要表现在 2000—2018 年向着西南方向转变,两阶段内转变方向基本相同,前一时期变动程度大于后一时期。建设用地的重心呈现两极分化,2000 年以前主要稳定在西北方小幅度变动,2000 年以后迁向东南方,未来有向东北方向发展的趋势。

2.4 生态风险指数空间自相关分析

2.4.1 全局空间自相关 利用 GeoDa 软件对 1980—2026 年 6 期坝上地区 1 399 个风险小区土地生态风险值的全局 Moran's *I* 指数进行计算,结果显示,1980—2026 年 6 个时期全局 Moran's *I* 指数值分别为 0.546, 0.544, 0.527, 0.495, 0.495, 0.505。且均通过了 $p = 0.05$ 水平的显著性检验。6 个时期

Moran's *I* 指数值均保持在 0.500 左右,表明坝上地区风险指数值在空间上保持较强的正相关,即高风险区域其领域风险值也高,低风险区域亦然,呈现高度的相似性。在 1980—2018 年,全局 Moran's *I* 指数持续下降,表明坝上地区生态风险值在空间上的趋同集聚性一直在减弱,预计到 2026 年,该趋势会发生逆转。

2.4.2 局部空间自相关 坝上地区 1980—2026 年 6 期的局部空间自相关 LISA 指数如图 3 所示。由图 3 可知,1980—2018 年坝上地区的局部的生态风险空间集聚性阶段性增强,“热点”(高值集聚区)和“冷点”(低值集聚区)由初期相对分散的集中状态逐步过渡到末期区域显著集中状态,“高一低”和“低—高”等局部“极值点”个数明显少于“高一高”区(H—H)和“低—低”区(L—L),分布较为分散,规律不明显。生态风险指数“高一高”区主要分布在张家口坝上 4 县城镇区域和未干涸的安固里淖以及丰宁县北部未利用地等区域。由于城镇区域相比郊区人口较为集中,建设用地占比较高,经济水平更发达,对自然生态环境的破坏的风险性高;在 2010 年前后,位于张北县的安固里淖随着其在 2000—2010 年期间的完全干涸该湖淖地区由高风险区转变为不显著区,说明水域具有较高生态风险性。生态风险“低—低”区较为显著地分布在尚义县南部、丰宁县东南部和围场县东部,该范围区域林草地覆盖度高,建设用地相对较少,人类活动干扰作用小,因此生态风险程度低。“热点”与“冷点”的分布与土地结构的土地格局分布具有很强的关联性。从风险区个数比例来看,“高一高”区和“低—低”区个数均有减小,且逐渐分散,表明坝上地

区局部生态风险值两极分化程度在减弱,局部风险急剧变化区域变小,表明该地区较研究初期风险地域性

更加鲜明。由图 3 可知,上述趋势预计在未来 2026 年会小幅度地持续下去。

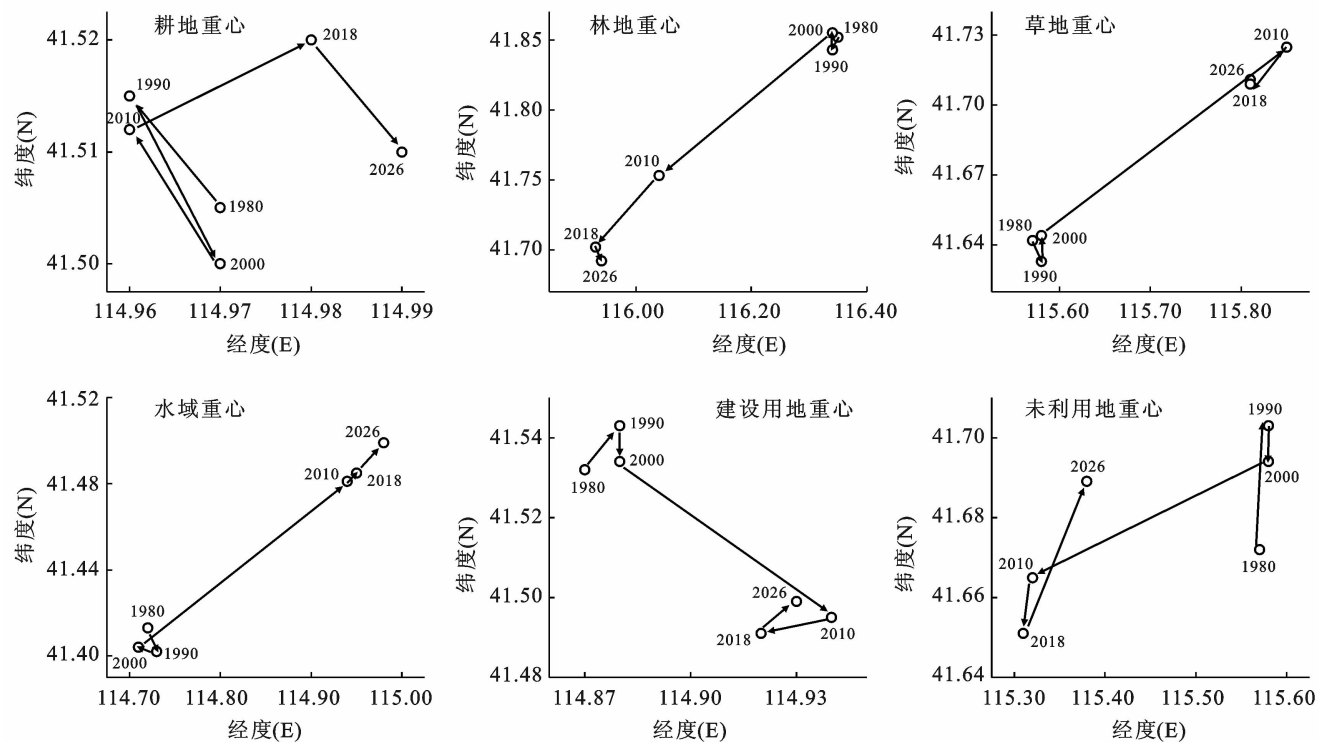


图 2 坝上地区 1980—2026 年各土地利用类型重心转移

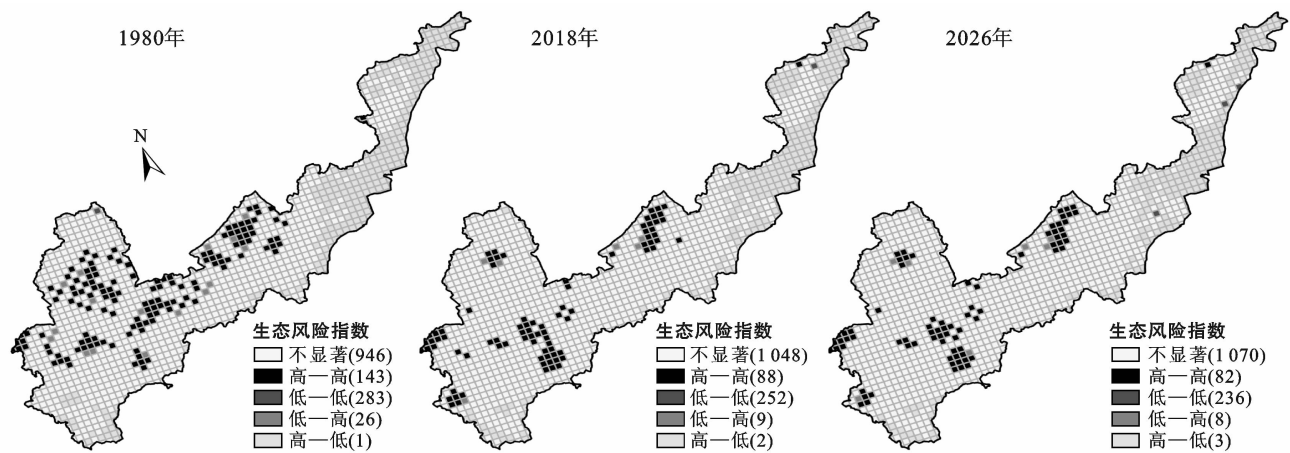


图 3 坝上地区 1980—2026 年生态风险值 LISA 指数分布

2.5 生态风险空间指数空间分布特征

近 40 a 来,随着坝上地区人口增多、城镇化进程加快、气候条件恶化,在综合因素影响下,该区生态风险值最高值由 1980 年的 0.34 升至 2018 年的 0.48,增加了 41.18%,多年来区域生态风险等级有明显上升,到 2026 年该值有可能上升至 0.55。在 ArcMap 软件中采用普通克里金(Ordinary Kriging)工具对坝上地区生态风险值进行空间插值,其中克里格半变异函数采用的球面模型,步长为 4 km,得到 1980—2026 年 3 期该区生态风险图,根据生态风险评价结果采用

等间隔分割法将本区内生态风险等级分为 5 级,即:低风险区($ERI \leq 0.10$)、较低风险区($0.10 < ERI \leq 0.20$)、中等风险区($0.20 < ERI \leq 0.30$)、较高风险区($0.30 < ERI \leq 0.40$)、高风险区($ERI > 0.40$),划分结果如封 3 附图 5 所示,经过对各等级面积统计分析得到结果如表 4。由封 3 附图 5 观察可知,生态风险值空间分布有着明显的地域特征,主要由张北、尚义、康保、沽源、丰宁、围场 6 县城镇区域为中心风险程度逐渐降低。1980—2018 年,坝上地区在研究初期无生态高风险区,研究末期出现的高风险区分布在张北县中心城区。近

40 a 来中等风险区主要分布在坝上地区的城镇、水域、未利用地等区域,具有明显扩张趋势。丰宁县和围场县以及尚义县南部等植被覆盖度较高的区域处于低风险或较低风险区,到 2018 年该区域临近部分区域风险等级升高为中等风险区。预计在 2018 年,坝上地区较低风险和低风险区出现较明显的萎缩趋势,中等及中等以上风险区域呈持续扩张趋势,丰宁、围场两县将分别出现不同程度面积的高风险区和较高风险区。

由表 4 可见,在 1980—2018 年,坝上地区低风险、较低风险区面积分别减少了 720.52 和 637.77 km²,占地比例分别减少了 3.75% 和 3.32%。中等风险区面积增加值最为显著,由研究初期的 906.15 km² 至末期的 1 834.49 km²,在原有基础上增加了 1.02 倍多。较高风险区面积近 40 a 间扩张了初期规模的近

14.75 倍,高风险区面积在研究期间由 0 增至 100 km² 多。预计在 2026 年,除低风险区面积有明显减少外,其余风险等级土地均有不同程度的增加,主要表现在中等风险区扩张。整体分析,坝上地区与其所属的农牧交错带地区的土地结构相似,均以耕地、林地、草地为主,其三者的变化决定了该区的景观生态风险水平。该区域内水土流失严重,干旱、荒漠化趋势加剧,草地退化、垦殖造成了草地大面积锐减,从生态的角度加大了该区生态风险,使得区域生境质量降低;从景观指数的角度来看,坝上地区土地利用变化使得该区景观破碎度加大,草地的脆弱度指数远低于其他大部分地类,而其大量的转换为脆弱度较高的未利用地和耕地,使得景观风险值在综合加权计算上升高,从而使得区域内的景观风险增高。

表 4 坝上地区 1980—2026 年生态风险等级面积及比例

| 年份 | 低风险区 | | 较低风险区 | | 中等风险区 | | 较高风险区 | | 高风险区 | |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|
| | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% |
| 1980 | 6 422.61 | 33.40 | 11 878.43 | 61.77 | 906.15 | 4.71 | 20.80 | 0.11 | 0.00 | 0.00 |
| 2018 | 5 702.09 | 29.65 | 11 240.66 | 58.45 | 1 834.49 | 9.54 | 327.54 | 1.70 | 123.22 | 0.64 |
| 2026 | 4 887.94 | 25.42 | 11 269.39 | 58.60 | 2 467.42 | 12.83 | 403.44 | 2.10 | 199.81 | 1.04 |

3 讨论与结论

3.1 讨论

对比北方农牧交错带坝上地区的早期已有的研究分析,其中宋素青等^[25]通过对张家口坝上 4 县的景观格局分析得到其研究区在退耕退林还草政策实施后耕地减少、林草地增加的结论,在本研究中 2010—2018 年时段的趋势对其得到了很好的印证,但实际情况中该趋势应在 2010 年以前已发生;文献^[26]中所述坝上 3 县 2000—2015 土地利用变化情况与本文 2000—2010 年时段趋势基本一致。此外,本研究重点关注的是近 40 a 来整个时段初末期的坝上地区基于景观生态角度的土地风险时空变化及预测,故未对更细化的时段进行分析。

北方农牧交错带坝上地区作为生态脆弱区,多年来土地格局发生了较大改变,处于相对不稳定态势,对其未来情况进行预测具有一定的必要性。一般而言,短期内社会政策因素往往对区域内土地的流转起着关键作用。本研究选用的 CA-Markov 模型对土地的预测是基于以前一时段的土地转移参数作为预测时期土地各地类对应像元的适宜性分布,因此仅考虑自然情景下的未来的土地生态风险变化的预估。未来会向着多情景模式下的预估进行更综合的评价。

区域的景观生态风险评价方法是基于土地利用变化的基础上建立的,土地的变化继而影响了景观指

数的变化,通过景观指数构建的景观生态风险值也随之改变。对于生态评价而言,该方法提供了一种便捷而高效的途径,从高宾等^[3]、张学斌等^[4]等国内学者广泛地使用该评价模型可以认为基于土地利用变化视角的景观生态风险评价体系是合理的、可适用的。但一般而言,生态评价中更多地应考虑生态过程,从影响区域生态环境的各角度进行综合评判,本研究该不足之处在未来研究中会加以改进。基于土地利用变化的景观生态风险评价对坝上地区甚至整个北方农牧交错带在生态评价中提供了一种手段,对于本区内的整体生态建设、特定区域生态风险管理具有较为实用的参考价值。

3.2 结论

(1) 1980—2018 年期间,河北省坝上地区土地面积大小按其利用类型排列为:耕地>草地>林地>未利用地>建设用地>水域,其中,耕地占据研究区面积近 1/2,林草地面积共计占比 41% 左右。未利用地面积基本控制在 900~1 000 km²,其余水域两者面积占比均为超过 3%,预计在 2026 年,各类土地利用变化仍然保持以往趋势变化。

(2) 1980—2018 年,坝上地区在最初 20 a 内土地利用变化不够明显,但 2000 年以后,土地格局发生显著变化,尤其表现在 2000—2010 年期间,土地更迭速度、各土地类型重心转移程度均处于最剧烈态势。2000—2018 年,耕地在前后阶段内发生明显上升后

下降的趋势,林地持续增加,草地表现为明显下降后不变的趋势,说明在该地区 2000 年后实施的退耕还林还草、三北防护林等相关政策取得了一定效果。水域在 2000—2010 年锐减的原因主要是华北地区第一大高原湖泊安固里淖该期间彻底干涸。未利用地多年来一直处于被开发中,其面积处于平稳下降趋势。预计在 2018—2026 年,坝上地区土地之间的流转与近 40 a 来的趋势基本相同,主要发生在耕地、林地和草地之间互相的转入转出。

(3) 1980—2026 年 6 个时期坝上地区生态风险值 Moran's I 指数均在 0.500 左右,空间单元生态风险指数值与邻域之间具有较强相关性。“热点”与“冷点”分布与土地利用格局具有较高关联性,其集聚性逐时期减弱,呈现“中心—分散”的趋势。近 40 a 来坝上地区生态风险等级升高,局部生态风险区集中化,高风险、较高风险区域具有较强地域性,主要分布在张北、康保、尚义、沽源以及丰宁县的城镇、水域,未利用地区域。预计未来 8 a 坝上地区较高风险区域继续保持扩张趋势,丰宁县和围场县将分别出现小范围的高风险区和较高风险区,研究区无论在目前阶段还是未来时期,生态风险性均较大。可以认为,北农交错带坝上地区生态风险值分布与其土地格局具有很强的相关性,土地利用变化与土地结构组成各异均会显著影响区域内的景观生态风险水平。

[参 考 文 献]

- [1] 刘荣霞,薛安,韩鹏,等. 土地利用结构优化方法述评[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(4):655-662.
- [2] Xu Xibiao, Yang Guishan, Tan Yan, et al. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020 [J]. Science of the Total Environment, 2016, 554/555:7-16.
- [3] 高宾,李小玉,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报,2011,31(12):3441-3450
- [4] 张学斌,石培基,罗君,等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [5] 虞燕娜,朱江,吴绍华,等. 多风险源驱动下的土地生态风险评价:以江苏省射阳县为例[J]. 自然资源学报,2016,31(8):1264-1274.
- [6] 任志远,孙艺杰,吴林筱. 1990—2012 年榆林市土地生态风险综合评价[J]. 中国生态农业学报,2017,25(5):656-664.
- [7] 李志祥,田明中,武法东,等. 河北省坝上地区生态环境评价[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(2):95-97.
- [8] 王彦芳,裴宏伟. 1980—2015 年河北省坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J]. 生态经济,2018,34(1):186-190,236.
- [9] 王强,康慕谊,邢开雄. 基于水资源约束的张家口坝上生态经济发展研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2011,47(6):618-624.
- [10] 辛博. 河北省张家口市安固里淖干涸原因探究[J]. 城市建设理论研究,2018,270(24):56-57.
- [11] 邱炳文,陈崇成. 基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用[J]. 地理学报,2008,63(2):165-174.
- [12] Michael R, Muller J M. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada [J]. Landscape Ecology, 1994, 9(2):151-157.
- [13] 冯丽媛,米文宝,马国庆. 基于 CA-Markov 模型的宁夏沿黄生态经济带土地利用变化及模拟研究[J]. 水土保持通报,2019,39(5):218-222,230.
- [14] 王磊,刘亭亭,谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究,2019,26(4):245-251.
- [15] 胡静,唐雪海,黄庆丰,等. 鹫落坪自然保护区土地利用动态格局研究[J]. 水土保持通报,2019,39(6):246-251,323.
- [16] 陈莹,胡梦可,方勇. 武汉市土地利用程度和经济发展的重心迁移及耦合协调性研究[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(8):1131-1140.
- [17] 田颖,李冰,王水. 江苏沿海地区景观格局的生态风险研究[J]. 水土保持研究,2015,22(1):241-245,251.
- [18] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J]. 地理学报,2018,73(5):843-855.
- [19] 李月月,黄义雄,杨阳,等. 基于景观结构的福建省沿海生态风险时空特征[J]. 水土保持通报,2018,38(4):241-24.
- [20] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.
- [21] 卢亚灵,许学工. 生态风险与生态安全的评价方法及前景[J]. 安全与环境学报,2010,10(1):132-137.
- [22] 邱炳文,王钦敏,陈崇成,等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. 自然资源学报,2007,22(2):311-320.
- [23] 晏王波,张晓祥,姚静,等. 基于 GIS 的盐城市区域发展时空特征研究[J]. 地理空间信息,2013,11(2):104-106,110.
- [24] 张月,张飞,王娟,等. 基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究[J]. 中国环境科学,2016,36(11):3465-3474.
- [25] 宋素青,王卫,袁晓芳. 张家口坝上地区景观格局分析[J]. 中国农业资源与区划,2005(3):36-39.
- [26] 刘晓,张学霞,徐新良,等. 河北省坝上土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 北京林业大学学报,2019,41(8):94-104.