

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.051.

李文栋, 姜悦, 李博, 等. 人类活动对河龙区间潜在自然植被的干预强度[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 283-293.

LI Wendong, JIANG Yue, LI Bo, et al. Intervention Intensity of Human Activity on Potential Natural Vegetation in the Hekouzhen-Longmen Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 283-293.

人类活动对河龙区间潜在自然植被的干预强度

李文栋, 姜悦, 李博, 田璇, 黄艳平, 付金霞, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究黄河中游河龙区间潜在自然植被(PNV)的时空变化规律, 查明人类活动对该区域PNV的干预程度, 可为区域生态系统恢复、重建和可持续发展提供理论参考。[方法] 基于河龙区间1960—2017年气象数据和1990—2018年4期土地利用数据, 利用GIS技术和综合顺序分类系统(CSCS)模拟并分析了河龙区间1960—2017年PNV的时空变化特征, 并探讨1990年以来人类活动对PNV的干预强度。[结果] 河龙区间稳定的PNV类型按面积由大到小排序为: 暖温带半干旱典型草原类、暖温带湿润森林草原类、微温带湿润草甸草原类、微温带半干旱典型草原类。不同年代各PNV类型重心发生不同程度的迁移。土地利用类型以草地、耕地和林地为主。草地、林地、建设用地面积呈增长趋势, 而耕地和其他地类呈减少趋势。各地类重心也在不断发生变化。受人类活动影响, 草原类PNV的30.9%~36.2%和11.4%~18.5%面积分别转变为耕地和林地, 森林草原类PNV的19.0%~32.6%面积转变为耕地, 潜在草地区转变为林地的面积比例逐年增加。[结论] 人类活动对PNV的干扰动态变化度在1990—2000年和2010—2018年较大, 尤其是2010—2018年, 且现有林地是否持续存活需要多关注。

关键词: 潜在自然植被; 干预强度; 综合顺序分类系统; 河龙区间; 人类活动

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0283-11

Intervention Intensity of Human Activity on Potential Natural Vegetation in the Hekouzhen-Longmen Region

LI Wendong, JIANG Yue, LI Bo, TIAN Xuan, HUANG Yanping, FU Jinxia, LI Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Exploring the temporal and spatial changes of Potential Natural Vegetation (PNV) and identifying the intervention intensity of human activity on PNV in the Hekouzhen-Longmen Region of the middle reaches of the Yellow River can provide a theoretical reference for regional ecosystem restoration, reconstruction and sustainable development. [Methods] Based on meteorological data from 1960 to 2017 and land use data from 1990 to 2018 in the Hekouzhen-Longmen Region, we used GIS technology and Comprehensive and Sequential Classification System (CSCS) model to simulate and analyze the temporal and spatial variation characteristics of PNV in the Hekouzhen-Longmen Region from 1960 to 2017, and explored the intervention intensity of human activity on PNV since 1990. [Results] The stable PNV types in the Hekouzhen-Longmen Region were sorted in descending order of area as follows: Warm temperate-semiarid warm temperate typical steppe, Warm temperate-subhumid forest steppe, Cool temperate-subhumid meadow steppe, Cool temperate-semiarid temperate typical steppe. Different degrees of centroids of PNV types had shifted in different ages. The center of gravity of PNV types had migrated in different degrees in different ages. The land use types were mainly grassland, cultivated land and forestland. The areas of grassland,

收稿日期: 2022-07-14

修回日期: 2022-10-14

资助项目: 国家自然科学基金(41807070; U2243210)

第一作者: 李文栋(1998—), 男, 山东沂水人, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: lwd19980908@163.com

通信作者: 付金霞(1978—), 女, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化、土地利用覆被变化与土壤侵蚀研究。E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

forestland and construction land showed an increasing trend, while the areas of cultivated land and other land types showed a decreasing trend. The center of gravity of each land use type was also changing. Affected by human activity, 30.9%~36.2% and 11.4%~18.5% of steppe PNV were transformed into cultivated land and forest land respectively, and 19.0%~32.6% of forest-steppe PNV was transformed into cultivated land. The proportion of potential grassland area converted to forestland was increasing year by year, [Conclusion] The dynamic change degree of human activity' interference to PNV was larger in 1990—2000 and 2010—2018, especially in 2010—2018, and more attention should be paid to whether the existing forestland can survive continuously.

Keywords: potential natural vegetation; intervention intensity; comprehensive and sequential classification system; Hekouzhen-Longmen Region; human activity

随着社会经济的不断发展,人类活动对自然生态系统的影响越来越显著,其中土地利用/覆被变化(Land use/cover change)是人类活动对下垫面影响最显著的一个方向^[1-2]。人类活动引起的林地砍伐、草地退化、城镇化加剧等现象,使得区域下垫面发生显著变化,原有自然植被的结构、时空格局被打破,进而引发一系列生态环境问题,给区域生态环境修复带来了巨大的压力^[3-4]。人类活动引起的土地利用/覆被变化是原有自然植被发生变化的主要驱动力。区域生态环境修复和重建工作必须以自然环境条件为背景和基础^[5]。潜在自然植被(Potential Natural Vegetation, PNV)是无人活动干扰状态下,植被在立地环境中发育演替形成的最稳定、最成熟的顶级自然植被类型,能够反映特定时期区域植被发展的总体趋势^[6-7]。已有研究表明,PNV不仅是气候变化与生态系统功能研究的关键^[8-9],也是区域植被恢复和重建的重要参照依据^[10-13]。因此,在强烈人类扰动的土地利用变化区,定量分析人类活动即土地利用变化对PNV的干预强度,可为土地利用模式或植被模式的调整与区域生态环境的恢复提供理论参考。

黄河中游河龙区间(河口镇至龙门镇)是黄河流域水土流失最严重的地区,这里既是气候变化敏感区和生态环境脆弱带,也是黄河流域水土保持生态建设重点区域^[14-15]。黄河中游气候变化、经济建设和水土保持生态建设等人类活动已导致区间植被结构、覆盖度、生产力和时空分布发生显著变化^[16]。人为引起的土地利用模式对PNV的影响程度如何?与PNV重叠程度如何?现有土地利用模式或植被模式是否能适应不断波动的气候变化?这些问题的深入认识,将有助于纠正土地利用或植被规划中不合适的植被模式,增强对气候变化的适应能力。当前Peng、张静、修丽娜等对PNV及其与人类活动的关系做了大量研究工作^[11,17-18],但仍缺乏针对河龙区间高分辨率、长历时序列PNV的模拟及其时空变化分析,缺

少人为引起的土地利用模式对PNV干扰程度的量化研究,从而导致无法明晰现有土地利用模式或植被模式与PNV的匹配程度,无法准确评估现有土地利用模式或植被模式能否适应不断波动的气候变化及其自然可持续性,也使得未来土地利用或植被模式的调整和规划缺乏自然可持续性方面的科学依据。

综合顺序分类系统(Comprehensive and Sequential Classification System, CSCS)因其简单有效、空间精度高、严谨的植被发生学理论和完善的分类体系等优势^[19-20],被广泛用于植被分类^[21-22]、计算净初级生产力^[23-24]、评估气候变化对植被的影响^[7,25-26]和植被演替等^[27-28]方面。任正超等^[26]基于CSCS与国际上通用的PNV划分模型进行详细对比,并进一步明确PNV概念的界限,揭示气候变化对PNV演替的作用机理;Sun等^[19]基于改进的CSCS对华南草原植被类型进行分类和评价初级净生产量。CSCS的提出和发展是基于中国区域气候与植被分布特征的,模型应用具有较强的区域针对性^[29],气候变化条件下植被分布所需的水热条件发生改变,则PNV类型就会发生演替,PNV空间格局就会发生变化^[28-29],且因气候的时空变化,不同立地PNV类型存在不同时间尺度(多年、十几年、几十年甚至更长时间)的时空变化^[30-31]。

因此,本研究选择空间精度高、有完善植被分类体系且被国内常用的综合顺序分类系统模拟并分析河龙区间1960—2017年PNV的时空变化特征,并将模拟的多期PNV与不同时期土地利用进行对比,借助PNV类型向土地利用类型转变的面积比例以及面积变化速率来量化1990年以来人类活动对PNV的干预强度。在此基础上,遴选出不符合自然演变的植被恢复区域,进一步探讨PNV反映的水热状况对土地利用模式或植被模式可持续性的影响。研究结果可为黄河流域生态环境脆弱区可持续土地利用或植被管理规划提供指导。

1 研究区概况

河龙区间位于黄河中游河口镇到龙门镇之间的区域(35°40′—40°34′ N, 108°02′—112°44′ E), 面积约为 11.3 万 km²。海拔 370~2 806 m, 地势中间低、四周高且北高南低(图 1), 地形复杂破碎。主要的地貌类型为黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、高原土石山区和风沙区^[32]。气候属温带大陆性季风气候, 年均气温 2.2~15℃, 年降水量为 310~610 mm^[33], 降水分布不均衡, 由东南向西北递减, 东南部湿润地区多年平均降水量可达 590 mm, 而西北部地区降水量仅为 300 mm 左右^[34], 水热条件变化剧烈, 气候敏感性程度高。河龙区间植被以草原为主, 从东南森林草原向西北荒漠草原过渡^[35], 自然植被带自东南向西北依次为暖温带落叶阔叶林带与温带草原带的森林草原、干草原和荒漠草原 3 个亚带^[36]。草地、耕地和林地是主要的土地利用类型。

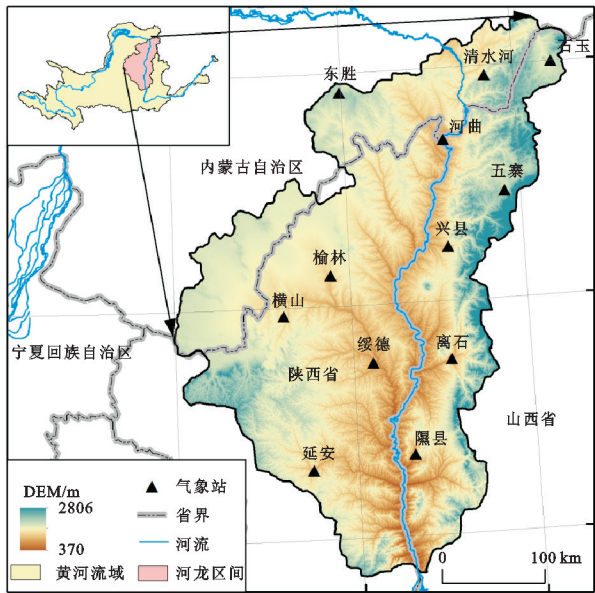


图 1 河龙区间在黄河流域的位置示意图

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究数据源包括气象数据、土地利用数据、数字高程模型(Digital Elevation Model)和中国 100 万植被类型及植被区划空间分布数据。河龙区间 12 个国家级气象站日均温、降水量数据均来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 经过了严格的质量控制。河龙区间 1990 年、2000 年、2010 年、2018 年 4 期土地利用数据是 Landsat 遥感影像的解译产品, 来源于地理国情检测云平台(<http://www.dsac.cn/>), 空间分辨率 30 m×30 m。30 m 空间分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>), 用以校正气象数据的空间插值。中国 100 万植被类型及植被区划空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 用以验证 PNV 模拟结果的准确性。

2.2 研究方法

2.2.1 综合顺序分类系统 基于 1960—2017 年河龙区间 12 个国家级气象站日气温数据计算各站点 >0℃ 的年积温, 基于气象站点年积温和日降水量数据利用“任一胡湿润度模型”^[22,37] 计算各站点年平均湿润度, 通过 Kriging 插值并经 DEM 校正后得到研究区不同时期热量(>0℃ 的年积温)、湿润度的空间分布图, 再根据 CSCS 检索图(图 2)中热量、湿润度组合来确定植被类型。本研究中经 DEM 数据校正 >0℃ 年积温数据的空间插值结果, 即考虑了不同海拔对气温的影响以及进而对 PNV 的影响。CSCS 较中国植被分类系统^[38]而言, 在考虑热量、植被型的基础上增加了水分因素。本研究将温带草原类、暖温带落叶阔叶林类进行详细划分, 植被类型名称及代码详见文献^[39]。

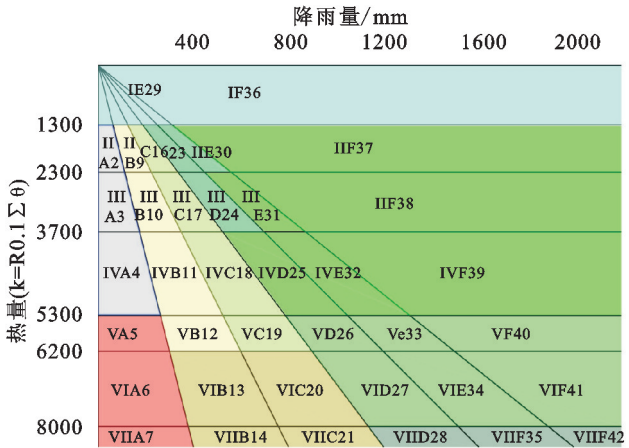


图 2 CSCS 分类检索图

任一胡湿润度模型计算公式如下:

$$K=R/(0.1\times \sum \theta) \tag{1}$$

式中:K 为湿润度;R 为年降水量;Σ 为 >0℃ 的年积温;0.1 为模型的调整系数。

2.2.2 转移矩阵模型 转移矩阵模型可以定量表示目标类型中不同地类的变化情况, 对不同目标类型的时空变化有更加清晰的揭示作用。利用 ArcGIS 软件对多期模拟的 PNV 模式和土地利用图进行处理, 得到研究区 PNV 和土地利用类型的转移矩阵。转移矩阵公式如下^[40]:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:S 代表土地利用或 PNV 面积(km²);S_{ij} 表示

$n \times n$ 矩阵;其中 n 为土地利用类型数或 PNV 类型数; S_i 代表研究初期土地利用类型或 PNV 面积; S_j 表示研究末期土地利用类型或 PNV 面积。

2.2.3 重心模型 重心分布及其迁移可反映地理要素或地理现象的空间格局及动态演变。本研究基于 ArcGIS 的空间统计、计算几何等工具对 PNV 和土地利用的重心分布及其迁移进行分析。重心模型计算公式如下^[7]:

$$X = \sum_{e=1}^n (m_{ef} \cdot x_e) / \sum_{e=1}^n (m_{ef}) \quad (3)$$

$$Y = \sum_{e=1}^n (m_{ef} \cdot y_e) / \sum_{e=1}^n (m_{ef}) \quad (4)$$

式中: X, Y 分别为第 f 年重心的横坐标与纵坐标; m_{ef} 为第 f 年 PNV 或土地利用的面积; x_e 与 y_e 分别为第 e 个评价单元的重心坐标,则第 f 年的重心坐标为 (X, Y) 。

重心移动计算公式如下:

$$\theta = \left[\frac{k \cdot \pi}{2} + \arctan\left(\frac{Y_{t2} - Y_{t1}}{X_{t2} - X_{t1}}\right) \right] \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5)$$

式中: θ 为重心偏移的角度,范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$; (X_{t1}, Y_{t1}) 代表研究初期的重心坐标; (X_{t2}, Y_{t2}) 代表研究末期的重心坐标; k 为调整系数,调整值为 0,1,2。

重心移动距离公式如下:

$$D = \sqrt{(X_{t1} - X_{t2})^2 + (Y_{t1} - Y_{t2})^2} \quad (6)$$

式中: D 为研究期间重心移动的距离(km); (X_{t1}, Y_{t1}) 代表研究初期的重心坐标; (X_{t2}, Y_{t2}) 代表研究末期的重心坐标。

2.2.4 动态变化度 为了更好地分析人类活动对 PNV 的干预程度并揭示其速率和强度,选择单一动态度和综合动态度分析研究区 PNV 受人类活动干扰的变化程度。将模拟的多期 PNV 与不同时期土地利用进行对比,借助 PNV 类型向土地利用转变的面积比例以及面积变化速率(动态变化度)来量化 1990 年以来人类活动对 PNV 的干预强度。

单一动态度模型表达式为^[41]:

$$K = \frac{S_j - S_i}{S_i \cdot T} \times 100\% \quad (7)$$

式中: K 为单一动态度(%); S_i 代表研究初期 PNV 类型的保留自然区或人类改变区面积; S_j 表示研究末期 PNV 类型的保留自然区或人类改变区面积; T 为研究时长。

综合动态度模型为^[42]:

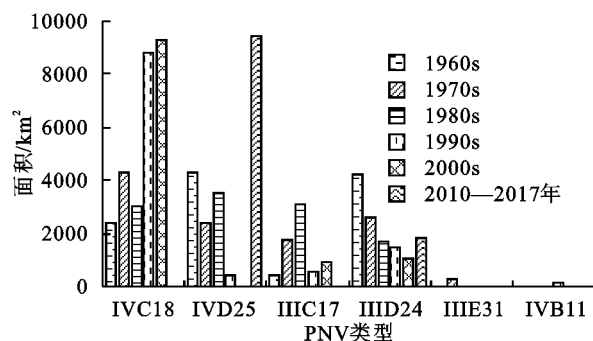
$$LC = \left(\sum_{i=1}^n \Delta S_{i-j} / 2 \sum_{i=1}^n S_i \right) / T \times 100\% \quad (8)$$

式中: LC 为综合动态度(%); n 为研究区 PNV 类型总数; ΔS_{i-j} 是符合 PNV 的自然区或人类改变区转换面积的绝对值。

3 结果与分析

3.1 河龙区间潜在自然植被时空变化

3.1.1 潜在自然植被结构及其面积变化 1960—2017 年河龙区间 PNV 主要有 4 种类型:暖温带干温带典型草原类(IVC18)、暖温带湿润森林草原类(IVD25)、微温带干温带典型草原类(IIIC17)和微温带湿润草甸草原类(IIID24)。其中 IVC18 面积介于 23 855.74~93 092.71 km²,面积占比 21.1%~82.2%;IVD25 面积介于 146.23~94 680.60 km²,面积占比 0.1%~83.6%;IIIC17 面积介于 4 425.98~31 289.11 km²,面积占比 3.9%~27.6%;IIID24 面积介于 10 900.00~42 119.09 km²,面积占比 9.6%~37.2%(图 3)。1960s, 1970s 出现少量微温带湿润森林草原、落叶阔叶林类(IIIE31),1990s 短期出现少量暖温带干旱暖温带半荒漠类(IVB11),面积占比均不超过 3%。



注:IVC18 代表暖温带干温带典型草原类;IVD25 代表暖温带湿润森林草原类;IIIC17 代表微温带干温带典型草原类;IIID24 代表微温带湿润草甸草原类;IIIE31 代表微温带湿润森林草原、落叶阔叶林类;IVB11 代表暖温带干旱暖温带半荒漠类。

图3 PNV类型面积变化

1960s, IVD25, IIID24, IVC18 和 IIIC17 面积分别为 42 629.00 km²(37.7%), 42 119.09 km²(37.2%), 23 855.74 km²(21.1%)和 4 425.98 km²(3.9%)。与 1960s 相比,1970s IVD25 和 IIID24 面积分别减少 44.2%和 38.0%, IVC18 和 IIIC17 面积分别增加 80.4%和 300.5%, IVD25, IIID24 减少区分别转变为 IVC18 和 IIIC17。与 1970s 相比,1980s IVC18 和 IIID24 面积分别减少 30.4%和 35.7%, IIIC17 和 IVD25 面积分别增加 47.8%和 76.5%, IVC18 减少区主要转变为 IVD25 和 IIIC17, IIID24 减少区主要转变为 IIIC17, IIIE31 区全部转变为 IIID24。与 1980s 相比,1990s IVD25, IIIC17 和 IIID24 面积分别减少 88.9%, 82.9%和 13.1%, IVC18 面积增加 193.9% (58 104.08 km²), IVD25 和 IIIC17 减少区主要转变为 IVC18。与 1990s 相比,2000s IVD25 和 IIID24 面积分别减少 96.3%和 25.4%, IIIC17 和 IVC18 面积分别

增加 69.3%和 5.7%,ⅣD25 和ⅣB11 减少区主要转变为ⅣC18。与 2000s 相比,2010—2017 年 PNV 类型面积变化剧烈,ⅣC18 和ⅢC17 消失,分别转变为ⅣD25 和ⅢD24;ⅣD25 和ⅢD24 面积分别增加 94 534.37 km²(64 648.5%)和 7 626.60 km²(70.0%),ⅣD25 在该时期面积占比最大(83.6%)。

整个研究期内,河龙区间年平均气温呈显著上升趋势,特别是 1998 年后上升明显;年降水量在 1960—2000 年呈缓慢下降、2000 年后持续升高的趋势。因气温持续上升、2000 年后降水显著增加,ⅣD25 增加较多。

3.1.2 潜在自然植被空间分布及重心迁移 受不同时期气温、降水空间分布及其变化的影响,河龙区间各 PNV 类型的空间分布存在变异性(图 4)。ⅣC18 主要分布在研究区中部和南部,气温持续升高使其向外扩张。ⅣD25 围绕ⅣC18 分布在其东部和南部,降水的增多易使ⅣC18 转变为ⅣD25。ⅢC17 对水热要求较低,主要分布在研究区西北部,但随着气温升高、降水增多,ⅢC17 逐步转变为ⅣC18 和ⅢD24。ⅢD24 主要分布在研究区北部和海拔较高处。短期出现且面积很小的ⅢE31、ⅣB11 分别分布在研究区东北部和中西部毛乌素沙地。

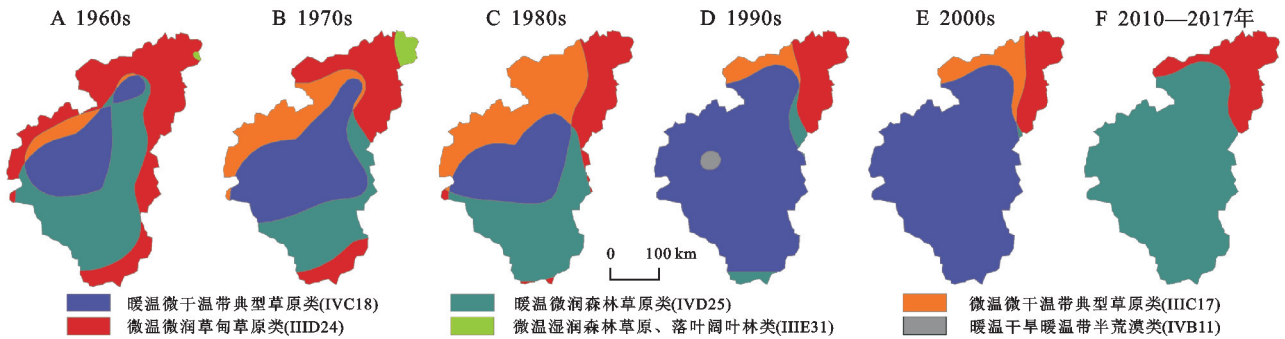


图 4 PNV 类型空间分布

1960—2017 年,ⅢC17 和ⅢD24 重心迁移幅度较大,ⅣD25 重心迁移轨迹最为曲折,ⅣC18 和ⅢE31 重心迁移幅度较小,ⅣB11 未迁移(图 5)。ⅢC17 重心迁移方向始终较为稳定,总体向东北方向迁移 183.45 km。ⅢD24 重心在 1960—2009 年持续向东北方向迁移、

2000—2017 年向西北方向迁移,总体向东北方向迁移 124.88 km。ⅣD25 不同时期重心依次向东南、西南、东北、西南方向迁移,总体向西北方向迁移 46.75 km。ⅣC18 重心向东南方向迁移 56.70 km,ⅢE31 重心向西北方向迁移 19.14 km。

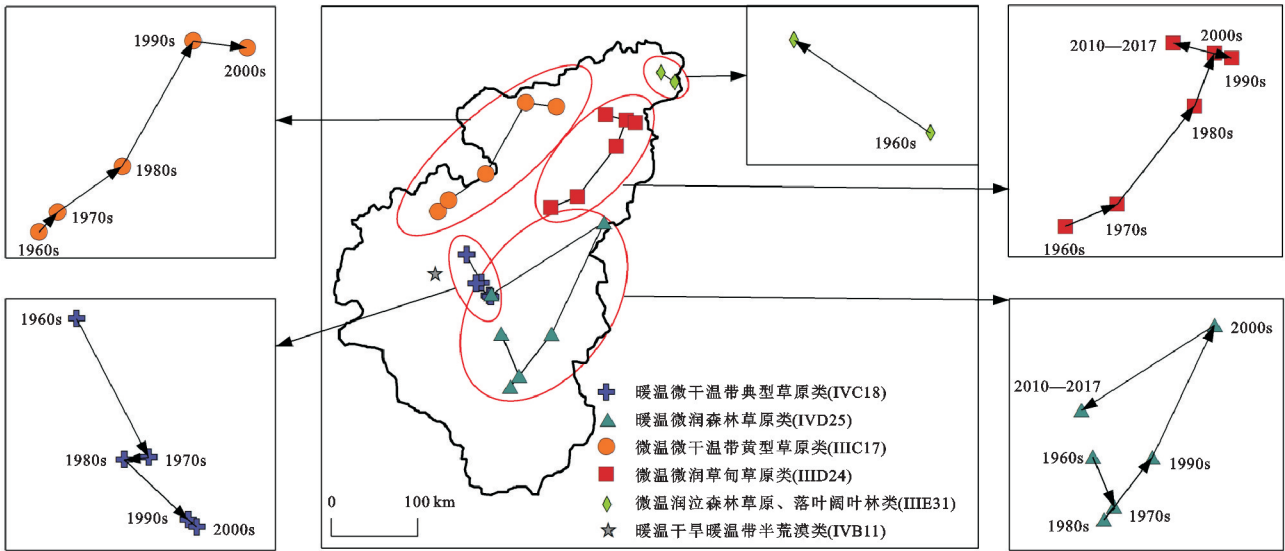


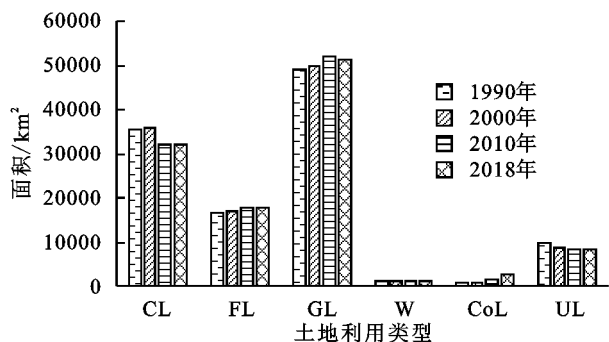
图 5 PNV 重心迁移轨迹

3.2 河龙区间土地利用时空变化

3.2.1 面积变化及转移轨迹 1990—2018 年,草地、耕地和林地是河龙区间主要土地利用类型,其中草地面积介于 49 134.35~52 196.48 km²,面积占比 43.4%~46.1%;耕地面积介于 32 126.00~35 723.18 km²,面

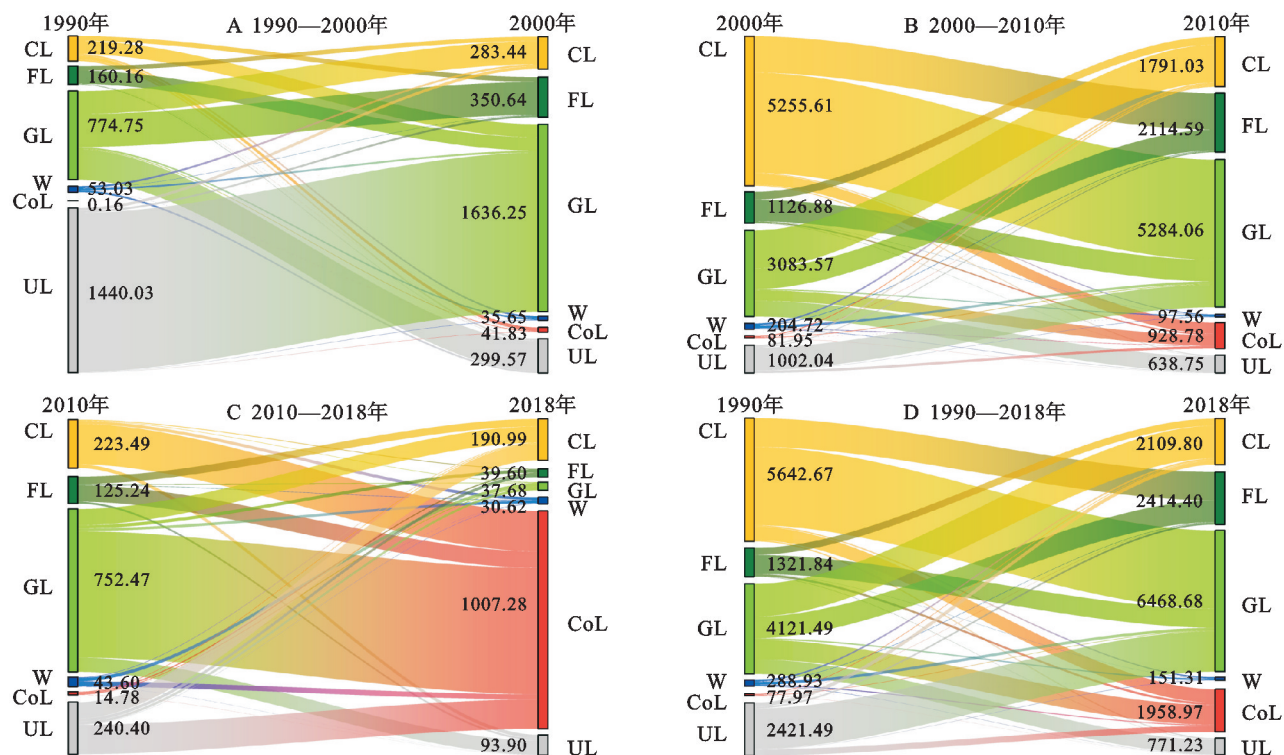
积占比 28.4%~31.6%;林地面积介于 16 694.62~17 872.85 km²,面积占比 14.8%~15.8%。水域、建设用地面积占比分别小于 1.1%和 2.2%,未利用地面积占比 7.2%~8.7%(图 6)。研究期内,草地、林地、建设用地面积呈增长趋势,而耕地、水域、未利用地面

积呈减少趋势。特别在 2000—2010 年期间,耕地面积减少明显,而草地、林地面积增长明显,这与“退耕还林还草”工程、区域生态环境建设有关。



注:CL代表耕地;FL代表林地;GL代表草地;W代表水域;CoL代表建设用地;UL代表未利用地。

图6 土地利用类型面积变化



注:从左向右表示各阶段发生转移的面积中不同土地利用类型的转出与转入面积的流向情况。

图7 土地利用数量变化轨迹(单位:km²)

1990—2018 年整个研究期,河龙区间发生转变的土地利用类型面积达到 13 874.39 km²,占河龙区间总面积的 12.3%。耕地、未利用地和水域面积分别减少 3 532.69 km² (9.9%), 1 651.04 km² (16.9%) 和 137.61 km² (11.2%), 而林地、草地和建设用地面积分别增加 1 092.62 km² (6.5%), 2 347.43 km² (4.8%) 和 1 881.02 km² (284.3%)。总体而言,耕地是 1990—2018 年土地利用类型转化的主要贡献者,其转出面积占总转出面积的 40.7%。6 种土地利用类型中,面积扩张最大的是草地,虽然其转出面积较高(4 121.49 km²),但它的转入面积达到了 6 468.68 km²,远高于其他 5

1990—2018 年土地利用数量变化轨迹(图 7)表明: 1990—2000 年,耕地、林地、草地和水域面积变化不大(均不超过 2.0%),建设用地面积增加 6.3%,未利用地面积减少 11.6%;未利用地是土地利用类型转化的主要贡献者,其中 1 440.03 km² (54.4%) 的面积转化为草地。2000—2010 年,耕地、水域和未利用地面积分别减少 10.0%, 8.9% 和 4.2%, 而林地、草地和建设用地面积分别增加 5.9%, 4.4% 和 120.4%;耕地是土地利用类型转化的主要贡献者,其转出面积占总转出面积的 49.3%;草地是主要转入区,转入草地的面积占总转入面积的 48.7%。2010—2018 年,除建设用地面积增加 64.0% 外,其余地类均呈微弱减少趋势,减幅均不超过 2.0%;各地类主要向建设用地转化。

种土地利用类型;其中,耕地和未利用地是草地最主要的转入源,10.1% 的耕地、19.0% 的未利用地转为了草地。

3.2.2 空间分布及重心迁移 耕地、草地基本呈均匀分布,但耕地在研究区中部较为集中;林地以条带状集中分布在研究区东部及东南部高地;未利用地主要分布在研究区西部的毛乌素沙漠;建设用地则零散分布在研究区内(图 8)。1990—2018 年草地、耕地和水域的重心迁移幅度较小,迁移距离不超过 5.00 km;建设用地、未利用地和林地的重心迁移幅度较大,分别向西南方向迁移 34.38 km, 10.64 km 和 7.29 km(图 9)。不同时期,耕

地重心分别向东南、东北和西南方向迁移,其中 2000—2010 年向东北方向迁移较明显,重心总体向东北方向迁移。草地重心在 1990—2000 年、2000—2018 年分别向西北、东南方向迁移,总体向东南方向迁移。建设用地重心在 1990—2010 年、2010—2018 年分别向西南、

西北方向迁移,其中 2000—2010 年向西南方向迁移幅度最大。林地重心在 1990—2010 年、2010—2018 年分别向西南、东南方向迁移,其中 1990—2010 年向西南方向迁移幅度大。人类活动对土地利用空间格局变化的影响程度在增强。

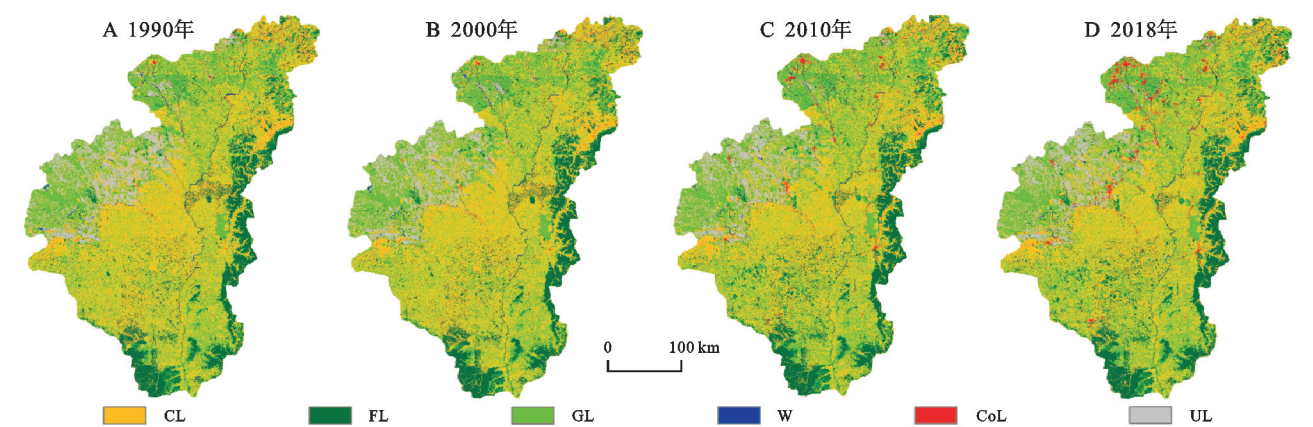


图 8 土地利用类型空间分布

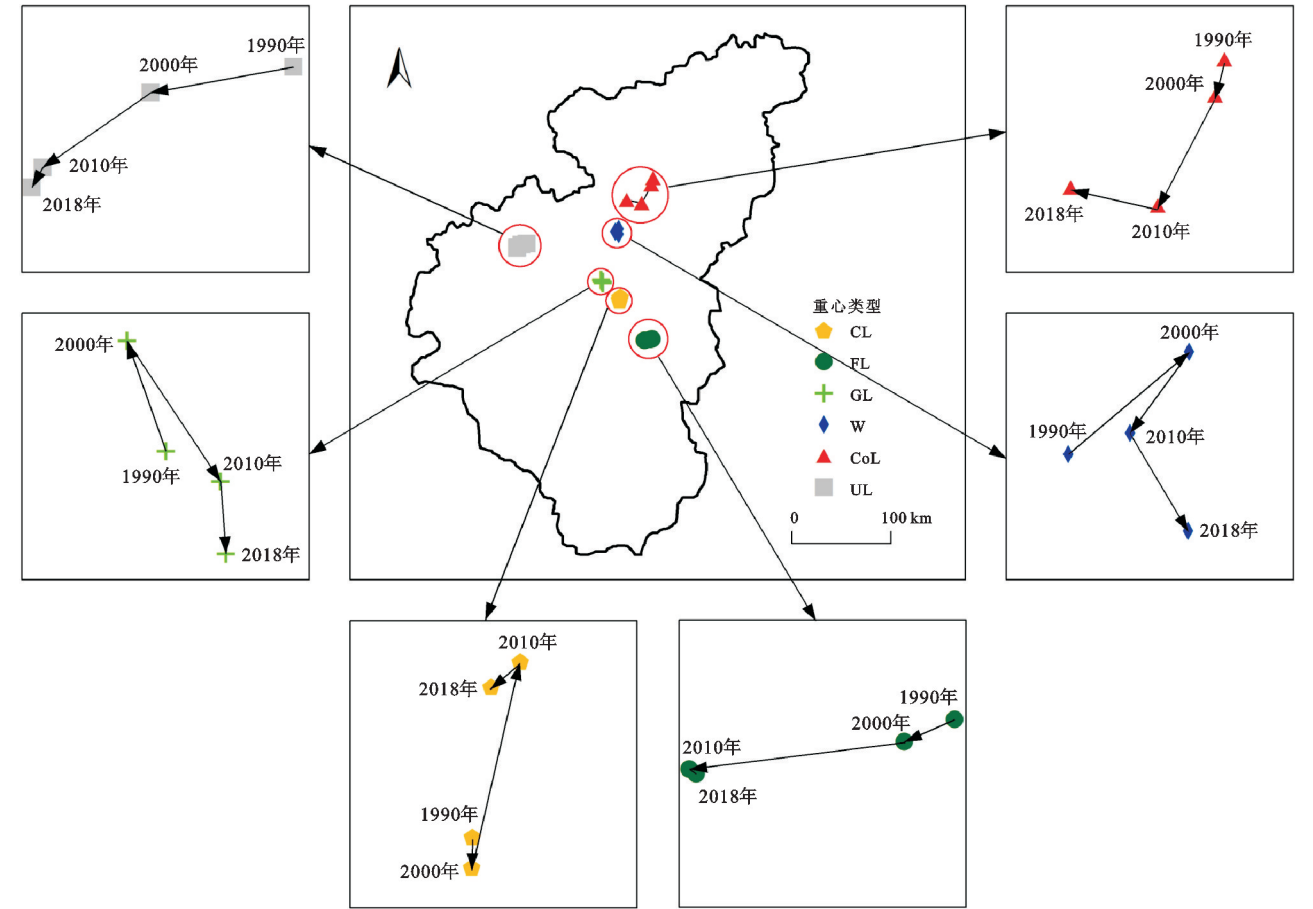


图 9 土地利用类型重心迁移轨迹

3.3 人类活动对潜在自然植被的干预强度

3.3.1 结构及其面积变化 基于气候特征模拟的潜在自然植被区未考虑天然水域、沙漠区等的存在。另外,在一定时期内,水域和沙漠等未利用地属于人类活动较少干扰区。为明晰人类活动对不同时期 PNV 的干预强度,首先,基于 1990 年、2000 年、2010 年、

2018 年 4 期土地利用图,分别对 1980s, 1990s, 2000s, 2010—2017 年 4 期 PNV 图进行校正,即在 PNV 图中存留同期土地利用图中的水域和未利用地区;然后,对比分析在人类活动干预下 1990 年以来 PNV 向土地利用转变的情况(图 10)。

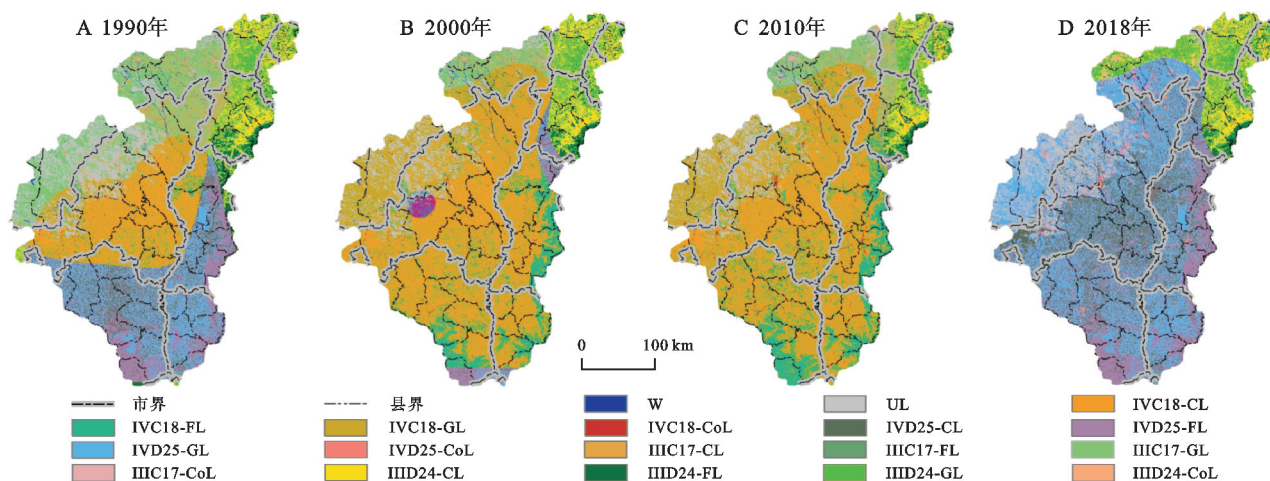


图10 PNV向土地利用类型转换

1980s PNV 在人为土地利用活动干预下, IVC18 面积的 49.4%, 7.2% 和 0.3% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIIC17 面积的 21.2%, 4.7% 和 1.1% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIID24 面积的 36.1%, 27.8% 和 1.5% 分别转变为耕地、林地和建设用地, 森林草原类 IVD25 面积的 32.6% 和 0.2% 分别转变为耕地和建设用地(图10, 图11)。1990s PNV 中, IVC18 面积的 35.3%, 14.3% 和 0.4% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIIC17 面积的 19.3%, 5.3% 和 2.3% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIID24 面积的 38.4%, 21.7% 和 1.9% 分别转变为耕地、林地和建设用地, 森林草原类 IVD25 面积的 20.0% 和 0.1% 分别转变为耕地和建设用地。2000s PNV 中, IVC18 面积的 31.2%, 16.9% 和 1.0% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIIC17 面积的 23.8%, 7.8% 和 5.0% 分别转变为耕地、林地和建设用地, IIID24 面积的 35.5%, 26.0% 和 2.4% 分别转变为耕地、林地和建设用地, 森林草原类 IVD25 面积的 19.0% 和 0.6% 分别转变为耕地和建设用地。2010—2017 年 PNV 中, 唯一的草原类 IIID24 面积的 30.9% (5 536.60 km²), 18.5% (3 316.09 km²) 和 5.0% (889.66 km²) 分别转变为耕地、林地和建设用地。森林草原类 IVD25 面积的 31.0% (26 533.67 km²) 和 1.9% (1 647.98 km²) 分别转变为耕地和建设用地。

1990—2018 年, 受人类活动影响, 草原类 PNV 的 45.6%~51.6% 面积仍然为草地区, 30.9%~36.2%, 11.4%~18.5% 和 0.7%~5.0% 的面积分别转变为耕地、林地和建设用地; 森林草原类 PNV 的 67.1%~80.4% 面积仍然为林地或草地区, 19.0%~32.6% 和 0.1%~1.9% 的面积分别转变为耕地和建设用地。人类对草原类 PNV 的干扰主要发生在研究区中部榆林市的佳县、米脂县、绥德县、子洲县、靖边县、吴堡县、横山区和榆阳区, 东部吕梁市的兴县和临县, 东北

部呼和浩特市和林格尔县, 朔州市的右玉县和平鲁区, 忻州市的偏关县、河曲县、神池县、五寨县和岢岚县; 对森林草原类 PNV 干扰主要发生在南部延安市的延川县、延长县、宜川县、安塞区和宝塔区, 临汾市的永和县、隰县、大宁县、蒲县和乡宁县。

整个研究期, 潜在草地区在人类活动干预下转变为林地的面积不断增多, 1990 年、2000 年、2010 年、2018 年转变为林地的面积比例分别为 11.4%, 14.9%, 17.1% 和 18.5%。林地存活需要较高水热条件, 该区域林地的可持续性生长面临挑战, 因此现有林地是否持续存活需要持续关注。

3.3.2 干扰动态变化度 在人为土地利用活动干预下, 1990—2017 年河龙区间 PNV 发生显著面积变化。进一步利用动态变化度分析不同时期人类活动对 PNV 干扰的强度和速率。1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2018 年, 人类活动对草原类 PNV 区的干扰动态变化度分别为 5.3%, 0.3% 和 -8.1%, 对森林草原类 PNV 区的干扰动态变化度分别为 -9.3%, -9.6% 和 9 948.2% (表 1)。

潜在草地区的动态变化呈缩减趋势, 保留自然区和人类改变区的动态变化度分别达到了 -7.6% 和 -7.0%。潜在森林草地区的动态变化呈扩增趋势, 保留自然区和人类改变区的动态变化度分别达到了 14.5% 和 14.6%。就综合动态度而言, 1990—2018 年综合动态度为 2.8%, 总体呈先减少后增加的趋势, 2010—2018 年的变化幅度最为激烈, 达到了 4.5%, 这与 IVD25 面积的大幅增加有关。PNV 保留自然区和人类改变区的动态变化影响因素众多。1999 年以来开展的退耕还林还草工程对草地、耕地、林地的面积及空间分布影响较大, 而社会经济发展使得建设用地面积及空间分布出现很大变化, 不同时期影响因素强度的不同导致了动态变化度的差异。

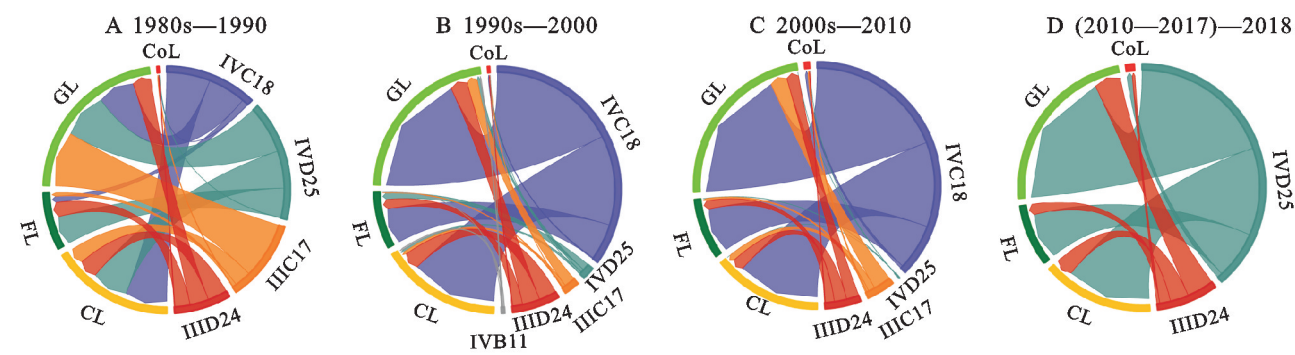


图 11 PNV 向土地利用类型变化轨迹

时期	潜在草地区		潜在森林草地区		综合 PNV 区
	保留	人类	保留	人类	
	自然区	改变区	自然区	改变区	
1990—2000	4.1	5.3	-8.7	-9.3	2.8
2000—2010	0.7	0.3	-9.6	-9.6	0.7
2010—2018	-8.4	-8.1	4941.8	9948.2	4.5
总期	-7.6	-7.0	14.5	14.6	2.8

表 1 PNV 变化动态度

%

存在明显差异。

4 讨论

气候变化显著影响河龙区间 PNV 空间分布格局。为验证 PNV 模拟结果的准确性,本研究通过与中国 100 万植被类型图及植被区划图对比(图 12),发现西北部毛乌素沙地和南部低中山区因人类干扰少,模拟的 PNV 类型与传统植被区划植被类型的分布基本吻合;西北部 PNV 草原类、东南部 PNV 森林草原类分别与传统植被区划的温带草原、暖温带落叶阔叶林区域分布基本吻合。研究区中部因受人类活动的强烈影响,现实植被以栽培植被为主,与自然植被差异明显,因而模拟的 PNV 类型与现实植被分布

气象数据的高精度、丰富性以及模型的可靠性对 PNV 模拟至关重要。本研究利用 CSCS 对河龙区间 PNV 进行模拟,该方法自提出以来已被广泛应用^[7,43-44]。CSCS 模型基于热量和降水组合因素来确定 PNV 类型,因此气象数据的精度和丰富度会影响到 PNV 的空间模拟精度,而对依据气象数据计算得到的湿润度采取不同空间插值方式时,也可能引起植被边界模拟的误差。已有研究也表明:基于不同时间尺度(日尺度、月尺度)气象数据计算得到的年积温数据有差异,月尺度数据适用于大区域 PNV 的模拟和预测^[25,43,45-46],而小区域或流域尺度宜选用日尺度数据^[44]。本研究基于日平均气温计算河龙区间各气象站点的年积温,气象数据空间插值结果又利用 DEM 进行校正,一定程度上提高了 PNV 的模拟精度。通过 1960—2017 年不同年代 PNV 的模拟,深入明确了河龙区间草原、森林草原亚类的空间分布格局和动态演变。本研究的植被类型空间分布格局与任正超等^[26]和李飞等^[27]对全国模拟结果中同时期河龙区间的结论基本吻合。

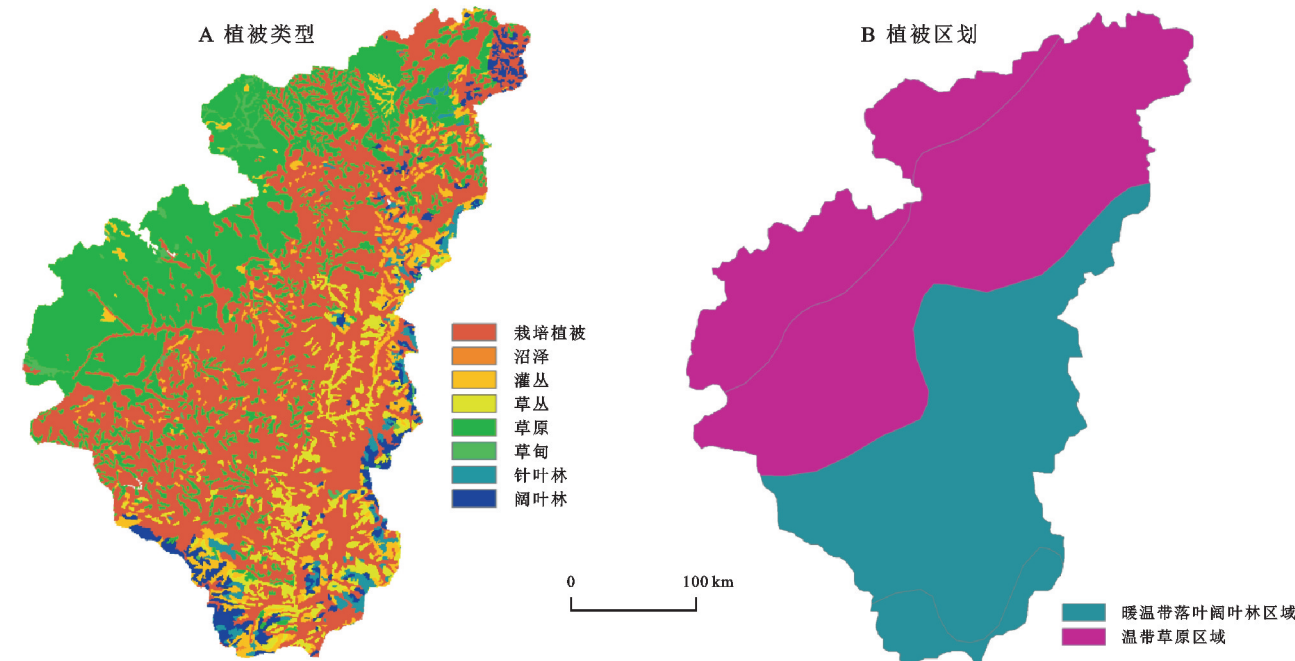


图 12 河龙区间植被类型及植被区划图

近40年来人类活动对河龙区间下垫面的影响程度不断增强。本研究通过对同时期PNV与土地利用图进行对比,量化了人类活动对自然植被的干预强度。受人类活动影响,草原类PNV的30.9%~36.2%和11.4%~18.5%面积分别转变为耕地和林地,森林草原类PNV的19.0%~32.6%面积转变为耕地。人类活动对PNV的干扰动态变化度在2010—2018年最大。以PNV作为评价当前土地利用模式或植被模式合理性的参照^[17,20,47],发现45.6%~51.6%的草原类PNV仍为草地区、67.1%~80.4%的森林草原类PNV仍为林地或草地区,即土地利用模式与自然环境匹配程度较高。但是,也有11.4%~18.5%的草原类PNV转变为林地区,且面积比例不断增多。林地存活需要较高水热条件,而这些区域水热条件供给不足,将会影响到林地的可持续性生长以及植被恢复计划的可持续发展,因此现有林地是否持续存活需要更多关注。本研究结果可为不合适土地利用模式或植被模式的调整和恢复提供理论参考。未来将进一步加强气候变化下的植被措施适应性评价,以此调整现有生态环境脆弱区的林草分布格局^[11,13,48]。

5 结论

本研究基于GIS和CSCS模拟出的河龙区间PNV空间分布,量化了人类活动主导的土地利用变化对PNV的干扰强度,遴选出不符合自然演变的植被恢复区域,为生态环境脆弱的植被重建区生态修复提供了理论指导。研究表明:

研究区稳定的PNV类型及面积大小:暖温微干温带典型草原类>暖温微润森林草原类>微温微润草甸草原类>微温微干温带典型草原类。2000年后研究区耕地面积显著减少,草地、林地和建设用地面积增加,人类活动强度持续增强。受人类活动影响,45.6%~51.6%的草原类PNV仍为草地区、67.1%~80.4%的森林草原类PNV仍为林地或草地区,但潜在草地区转变为林地的面积比例逐年增加。2010—2018年人类活动对研究区PNV干预强度最大,为4.5%。

在对河龙区间进行植被重建与生态修复时,要综合考虑气候变化与人类活动对植被持续存活性的影响;符合自然区注重自发恢复、草地转变林地区要调整植被恢复工程的实施计划;因地制宜实施还林还草工程。

参考文献:

[1] Chen X, Yu L, Du Z R, et al. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts[J].

Science of the Total Environment, 2022,825:153938.

- [2] 张颖,章超斌,王钊齐,等.气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究[J].草业学报,2017,26(5):1-14.
- [3] Reynolds K M, Hessburg P F. Decision support for integrated landscape evaluation and restoration planning [J]. Forest Ecology and Management, 2005,207(1/2):263-278.
- [4] Kaplan J O, Krumhardt K M, Zimmermann N. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe[J]. Quaternary Science Reviews, 2009,27/28:3016-3034.
- [5] 于贵瑞,谢高地,王秋凤,等.西部地区植被恢复重建中几个问题的思考[J].自然资源学报,2002,17(2):216-220.
- [6] Tüxen R. Die heutige potentielle natuerliche vegetation als Gegenst vegetation skartierung [J]. Angew, Pflanzensoziologie, 1956,13:5-42.
- [7] 杜怀玉,赵军,师银芳,等.气候变化下中国潜在植被演替及其敏感性[J].生态学杂志,2018,37(5):1459-1466.
- [8] Hickler T, Vohland K, Feehan J, et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model [J]. Global Ecology and Biogeography, 2012,21(1):50-63.
- [9] Wolf A, Callaghan T V, Larson K. Future changes in vegetation and ecosystem function of the Barents Region [J]. Climatic Change, 2008,87(1):51-73.
- [10] Somodi I, Molnár Z, Czúcz B, et al. Implementation and application of multiple potential natural vegetation models: A case study of Hungary[J]. Journal of Vegetation Science, 2017,28(6):1260-1269.
- [11] Peng S Z, Li Z. Potential land use adjustment for future climate change adaptation in revegetated regions [J]. Science of the Total Environment, 2018,639:476-484.
- [12] 赵传燕,冯兆东,南忠仁,等.黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究[J].地理学报,2007,62(1):52-61.
- [13] 韩庆功,彭守璋.黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性[J].水土保持学报,2021,35(5):188-193.
- [14] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. Journal of Arid Environments, 2000,45(1):9-20.
- [15] 韩鹏,王艺璇,李岱峰.黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):505-521.
- [16] Yuan Q Z, Wu S H, Dai E, et al. NPP vulnerability of the potential vegetation of China to climate change in the past and future [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(2):131-142.
- [17] 张静,张丽,韩瑞丹,等.中东干旱区土地覆盖变化和人类占用强度变化特征[J].草业科学,2017,34(5):975-987.

- [18] 修丽娜.基于 CSCS 模型的中国潜在自然植被时空分布特征研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- [19] Sun Z G, Sun C M, Wei Z, et al. Classification and net primary productivity of the Southern China's grasslands ecosystem based on improved comprehensive and sequential classification system(CSCS)approach [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014,13(4):893-903.
- [20] 林慧龙,范迪,冯琦胜,等.草地综合顺序分类法研究新热点:2008—2020 年回顾与展望[J].*草业学报*,2021,30(10):201-213.
- [21] Zhao J, Du H Y, Shi Y F, et al. A GIS simulation of potential vegetation in China under different climate scenarios at the end of the 21 st century [J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2017,10(3):315-325.
- [22] 任继周,胡自治,牟新待,等.草原的综合顺序分类法及其草原发生学意义[J].*中国草原*,1980(1):12-24.
- [23] Lin H L, Zhao J, Liang T G, et al. A classification indices-based model for net primary productivity(NPP) and potential productivity of vegetation in China[J]. *International Journal of Biomathematics*, 2012,5(3):1260009.
- [24] 张美玲,陈全功,蒋文兰.不同草地类型净初级生产力(NPP)模拟及其敏感性分析[J].*干旱区地理*,2021,44(2):369-378.
- [25] Liu X N, Zhang B S, Henry B, et al. Assessing the impact of historical and future climate change on potential natural vegetation types and net primary productivity in Australian grazing lands [J]. *the Rangeland Journal*, 2017,39(4):387-400.
- [26] 任正超,朱华忠,史华,等.最后间冰期至未来 2070s 中国潜在自然植被时空分布格局及其对气候变化的响应[J].*自然资源学报*,2020,35(6):1484-1498.
- [27] 李飞,赵军,赵传燕,等.中国潜在植被空间分布格局[J].*生态学报*,2008,28(11):5347-5355.
- [28] 赵军,马小平,魏伟.近 50 年黑河流域潜在植被的演替及生态环境变化研究[J].*草业学报*,2014,23(5):61-68.
- [29] 李飞,赵军,赵传燕,等.中国西北干旱区潜在植被模拟与动态变化分析[J].*草业学报*,2011,20(4):42-50.
- [30] 刘华民,吴绍洪,郑度,等.潜在自然植被研究与展望[J].*地理科学进展*,2004,23(1):62-70.
- [31] Han Q G, Ding Y X, Peng S Z. Sustainable and cost-effective vegetation restoration framework under climate change [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021,496:119436.
- [32] 张萍,蔡强国,郑明国,等.黄河河口—龙门区间降雨时空分布特征及其与流域产沙的关系[J].*水土保持通报*,2020,40(4):25-31.
- [33] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄河河龙区间输沙变化特征及归因分析[J].*水土保持研究*,2022,29(3):38-42.
- [34] 付金霞,张鹏,郑粉莉,等.河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J].*农业机械学报*,2016,47(2):185-192.
- [35] 黄萱,丁继辉,邹钰文,等.黄河中游河龙区间侵蚀产沙对景观特征的非线性响应[J].*水土保持学报*,2021,35(6):88-94.
- [36] 董亚维,吴永红,马卫星,等.基于遥感监测的河龙区间水土保持效果分析[J].*水资源与水工程学报*,2012,23(1):157-160.
- [37] 胡自治,高彩霞.草原综合顺序分类法的新改进I类的划分指标及其分类检索图[J].*草业学报*,1995,4(3):1-7.
- [38] 郭柯,方精云,王国宏,等.中国植被分类系统修订方案[J].*植物生态学报*,2020,44(2):111-127.
- [39] 任继周.分类、聚类与草原类型[J].*草地学报*,2008,16(1):4-10.
- [40] 蒋好雨,陈荣蓉,杨朝现,等.西部平原区生态用地时空动态特征及环境效应[J].*水土保持研究*,2021,28(2):203-209.
- [41] 杨爱民,朱磊,陈署晃,等.1975—2015 年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析[J].*应用生态学报*,2019,30(11):3863-3874.
- [42] 危小建,赵莉,程朋根,等.中国土地利用与生态服务价值空间动态研究:以地级及以上城市为例[J].*水土保持研究*,2022,29(4):370-376.
- [43] Liang T G, Feng Q S, Cao J J, et al. Changes in global potential vegetation distributions from 1911 to 2000 as simulated by the Comprehensive Sequential Classification System approach [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012,57(11):1298-1310.
- [44] 邹德富,冯琦胜,王莺,等.基于 GIS 的甘南地区草原综合顺序分类研究[J].*草业科学*,2011,28(1):27-32.
- [45] Shi Y F, Zhao J, Grace P, et al. Uncertainties on the GIS based potential natural vegetation simulation using Comprehensive and Sequential Classification System [J]. *Geografiska Annaler; Series A, Physical Geography*, 2020,103(2):186-198.
- [46] 车彦军,赵军,师银芳,等.基于 CSCS 和 RegCM3 模型的 21 世纪末中国潜在植被[J].*生态学杂志*,2014,33(2):447-454.
- [47] 修丽娜,冯琦胜,梁天刚.基于 CSCS 方法的甘南自然植被 NDVI 时空分布特征研究[J].*草业学报*,2013,22(4):239-246.
- [48] Peng S Z, Yu K L, Li Z, et al. Integrating potential natural vegetation and habitat suitability into revegetation programs for sustainable ecosystems under future climate change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,269:270-284.