

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.033; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.033.

付梦雨, 邱孟龙, 符绍武, 等. 土地利用强度与景观生态风险的时空演变及其耦合协调特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3):291-299.

Fu Mengyu, Qiu Menglong, Fu Shaowu, et al. Spatiotemporal evolution of land use intensity and landscape ecological risk and their coupling coordination characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):291-299.

# 土地利用强度与景观生态风险的时空演变及其耦合协调特征

付梦雨, 邱孟龙, 符绍武, 李逍遥

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** [目的] 土地利用强度是影响景观生态风险的重要因素, 厘清二者之间复杂的非线性关系, 可为土地资源可持续利用与区域生态安全提供科学依据。[方法] 以黄河流域陕西段为例, 分析土地利用强度与景观生态风险的时空分异特征, 并运用耦合协调度模型, 探究二者之间的耦合协调特征。[结果] (1) 2000—2020 年黄河流域陕西段土地利用强度呈逐年递增趋势, 年均增长率为 4.55%, 空间上由北向南呈递增趋势; (2) 景观生态风险总体处于中生态风险等级, 2000—2020 年生态风险指数由 0.19 下降到 0.17, 呈轻微下降趋势, 由北向南呈递减趋势, 平均 85.5% 的高生态风险区分布在北部的长城沿线风沙区和渭北黄土旱塬区; (3) 土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度由 2000 年的 0.40 上升到 2020 年的 0.46, 呈逐年上升趋势, 由北向南呈递增趋势; 当土地利用强度大于 0.13 时, 土地利用强度与景观生态风险之间的关系由相互抑制的低耦合协调转变为相互促进的高耦合协调。[结论] 黄河流域陕西段的土地利用强度、景观生态风险以及二者之间的耦合协调度均呈明显的时空异质性特征, 且耦合协调度随着土地利用强度的增加呈增加趋势。

**关键词:** 土地利用强度; 景观生态风险; 时空演变; 耦合协调; 黄河流域陕西段

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0291-09

## Spatiotemporal evolution of land use intensity and landscape ecological risk and their coupling coordination characteristics

Fu Mengyu, Qiu Menglong, Fu Shaowu, Li Xiaoyao

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** [Objective] Land use intensity is a critical factor affecting landscape ecological risk. Clarifying the complex nonlinear relationship between the two can provide a scientific basis for the sustainable utilization of land resources and regional ecological security. [Method] Taking the Shaanxi section of the Yellow River Basin as a case study, this research analyzed the spatiotemporal differentiation characteristics of land use intensity and landscape ecological risk. Additionally, a coupling coordination degree model was applied to explore the coupling coordination characteristics between the two. [Results] (1) From 2000 to 2020, land use intensity in the Shaanxi section of the Yellow River Basin showed an overall increasing trend, with an average annual growth rate of 4.55%. Spatially, the intensity increased from north to south. (2) The overall landscape ecological risk was at a medium level. The ecological risk index decreased slightly from 0.19 in 2000 to 0.17 in 2020, showing a declining trend from north to south. On average, 85.5% of the high ecological risk areas were distributed in the eolian sandy region along the Great Wall in the north and the Weibei loess plateau region. (3) The coupling coordination degree

收稿日期: 2024-08-17

修回日期: 2024-09-16

接受日期: 2024-10-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42471307, 41901262); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBQN-0300); 陕西省社科基金项目(2024R040); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(24ZYB017)

第一作者: 付梦雨(1999—), 女, 山东昌邑人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用及其生态效应。E-mail: fumyu99@163.com

通信作者: 邱孟龙(1988—), 男, 山东胶州人, 博士, 副研究员, 主要从事土地利用及其生态效应。E-mail: qml7886@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

between land use intensity and landscape ecological risk increased annually from 0.40 in 2000 to 0.46 in 2020, showing an annual upward trend and increasing spatially from north to south. When land use intensity exceeded 0.13, the relationship between the two shifted from low coupling coordination, characterized by mutual suppression, to high coupling coordination, characterized by mutual promotion. [Conclusion] The land use intensity, landscape ecological risk, and their coupling coordination degree in the Shaanxi section of the Yellow River Basin exhibit significant spatiotemporal heterogeneity. Moreover, the coupling coordination degree increases as land use intensity rises.

**Keywords:** land use intensity; landscape ecological risk; spatiotemporal variation; coupling coordination; Shaanxi section of the Yellow River Basin

当有限的土地资源难以支撑社会经济发展时,人类只有通过提高土地利用强度才能满足自身的生存与发展需求<sup>[1]</sup>。然而,土地利用强度变化直接影响生态系统的结构、功能和过程,进而导致区域景观生态风险的累积与升高<sup>[2]</sup>。因此,探究土地利用强度与景观生态风险之间的相互作用关系对土地资源可持续利用与景观生态风险管控具有重要意义。

目前,学术界对土地利用强度的定性和定量评估并未提出成熟的概念模型。常见的土地利用强度测度指标可以概括为3类:一是反映范围与频率的干扰强度类指标<sup>[3-5]</sup>,如区域种植面积比例、复种指数、割草频率等;二是投入强度类指标<sup>[6-8]</sup>,如单位面积化肥、劳动力、资本投入量等;三是产出效率类指标<sup>[9-10]</sup>,如粮食单产、地均经济效益等。此外,也有学者采用人口密度等指标,从人类活动强度的角度对土地利用强度进行间接量化<sup>[11]</sup>。总体来看,当前测度方法的构建大多基于农业土地系统分析,侧重于土地系统生产功能利用强度的测度<sup>[9]</sup>。然而,土地系统是一个具有生产、生活、生态等多种功能的复合体<sup>[12]</sup>,因此对于土地利用强度的测度需要从多功能角度进行衡量。

景观生态风险研究起源于20世纪90年代,更加强调风险的尺度效应和时空分异特征,聚焦于外界扰动对生态系统结构、功能和过程的影响极其不利生态效应<sup>[13-14]</sup>。近年来,景观生态风险研究逐渐成为国内研究热点,并形成了成熟的评价方法与体系<sup>[2,15]</sup>。景观指数法是应用最广泛的评价方法,该方法以格局与过程关联理论为基础,通过风险可能造成的损失与风险发生概率累乘对景观生态风险进行表征<sup>[16]</sup>。当前,相关学者围绕景观生态风险与土地利用类型变化之间的响应关系开展了大量研究<sup>[15-17]</sup>,也有少量研究对土地利用强度与景观格局之间的响应关系进行了探究<sup>[18]</sup>,但鲜有关于土地利用强度与景观生态风险间关系的定量分析。为了更加全面认识土地利用与景观生态风险之间复杂的非线性关系,实现土地

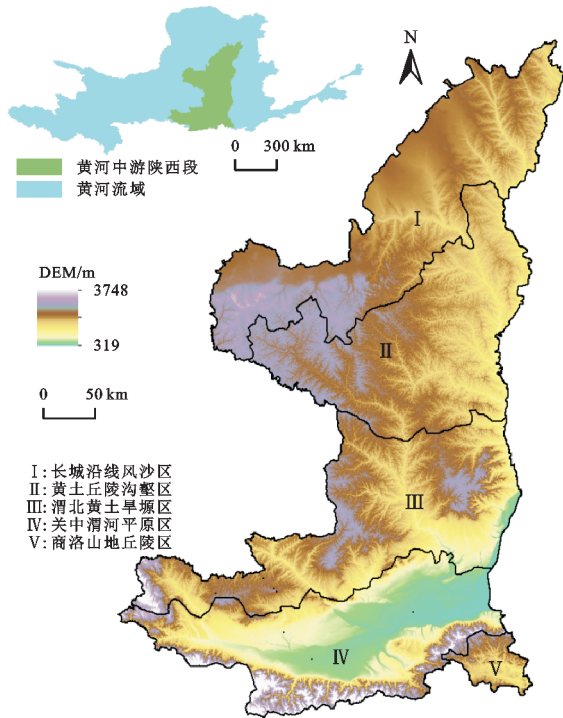
资源可持续利用,亟需对土地利用强度与景观生态风险之间的相互作用关系进行研究。

黄河流域陕西段生态环境脆弱,地形复杂,水土流失严重,极易受到外界干扰导致景观的破碎化与生态风险的累积<sup>[15]</sup>。此外,受退耕还林(草)、关中城市群建设等一系列国家重大战略实施影响,该区土地利用强度也发生了明显变化,进入剧烈变化时期。因此,本文以黄河流域陕西段为案例区,在分析区域土地利用强度和景观生态风险时空分异特征基础上,探究二者之间的耦合协调关系,以期对土地资源的可持续利用以及景观生态风险的防控提供科学依据和决策支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河流域陕西段位于106°26′—111°15′E,33°21′—39°35′N,国土面积14.3万km<sup>2</sup>(图1),干流全长719 km,占黄河干流长度的13.2%。该区位于陕西省中北部,是陕西省生态保护和经济社会发展的核心区域,截至2020年年底,常住人口3310万人,地区生产总值达2.2万亿元。2020年,黄河流域陕西段耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地面积分别为39475.1 km<sup>2</sup>,32601.4 km<sup>2</sup>,54777.8 km<sup>2</sup>,419.1 km<sup>2</sup>,4586.89 km<sup>2</sup>,172.1 km<sup>2</sup>。2000—2020年,耕地和未利用地分别大面积减少了6456.8 km<sup>2</sup>,2326.9 km<sup>2</sup>;林地、草地、建设用地和水域分别增加了4306.0 km<sup>2</sup>,1974.2 km<sup>2</sup>,2412.0 km<sup>2</sup>,91.5 km<sup>2</sup>。黄河流域陕西段属大陆性季风气候,年平均气温在7~15℃,年降水量316.55~886.60 mm;地势总体呈北高南低趋势,平均海拔高程1146 m,最低点为319 m,最高海拔为3748 m。根据气候和地形差异,黄河流域陕西段由北向南可分为5个生态区<sup>[19]</sup>:长城沿线风沙区、黄土丘陵沟壑区、渭北黄土旱塬区、关中渭河平原区和商洛山地丘陵区(图1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号的标准地图制作,底图未做修改。下图同。

图1 研究区区位与生态分区

Fig. 1 Location and ecological zoning of the study area

### 1.2 数据来源与预处理

空间分辨率为1 km的土地利用数据来源于Zenodo(<https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>),根据国家土地利用分类与研究区土地利用实际情况,将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地6类。空间分辨率为100 m的人口数据来源于World Pop人口分布数据集(<http://www.worldpop.org.uk>)。空间分辨率为1 km的NPP数据来源于美国NASA的MOD17A3数据集(<http://reverb.echo.nasa.gov>)。以上数据均为2000年、2005年、2010年、2015年、2020年五期截面数据。2000年、2005年、2010年、2015年、2019年五期GDP栅格数据来源于Scientific Data(<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.17004523.v1>),空间分辨率为1 km;2019年和2020年县域尺度的GDP数据来源于《陕西统计年鉴》。将2020年与2019年县域尺度GDP数据之比作为各县GDP校正系数,在ArcGIS 10.2中,利用2019年1 km分辨率的GDP栅格数据与各县GDP校正系数相乘得到2020年1 km分辨率的GDP栅格数据。利用ArcGIS 10.2中的重采样工具将所有数据转化为空间分辨率为1 km的栅格数据。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用强度测度

采用单位面积国内生产总值(GDP)、人口密度

(PD)和地表植被净初级生产力(NPP)构建土地利用强度测度方法体系。其中,GDP反映了土地生产利用的产出效率,同时也直接影响土地的生产投入强度<sup>[20]</sup>,故用于衡量土地生产功能的利用强度;PD是土地上所承载人口的数量,反映了人们对土地系统满足自身物质和空间需求能力的利用程度<sup>[21]</sup>,用于表征土地生活功能的利用强度;NPP是评价土地系统生态状况的重要指标<sup>[22]</sup>,用于表征土地系统生态功能的利用强度。本文构建的土地利用强度测度体系不仅综合考虑了前人提出的土地利用强度测度指标及土地系统多功能性,也避免了各指标之间存在的多重共线性影响。土地利用强度指数(LUI)计算公式如下:

$$LUI = \alpha G + \beta P + \gamma N \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为权重系数; $G$ 为GDP; $P$ 为PD; $N$ 为NPP。权重系数的确定采用熵权法,该方法是一种根据指标数值提供信息量的大小来确定其权重的客观赋权法<sup>[23]</sup>,经计算得到 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为0.368,0.397,0.235。

### 2.2 土地利用强度变化贡献率

本文通过构建土地利用强度变化贡献率模型,定量分析各评价指标对土地利用强度变化的贡献程度<sup>[24]</sup>,计算公式如下:

$$CR = \frac{\rho EI_{t+i} - \rho EI_t}{LUI_{t+i} - LUI_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中:CR为评价指标EI对 $t-t+i$ 年土地利用强度变化的贡献率,本文中EI包括GDP,PD和NPP; $\rho$ 为EI在LUI计算中的权重系数; $EI_{t+i}$ 和 $EI_t$ 分别为 $t+i$ 年和 $t$ 年区域EI的平均值; $LUI_{t+i}$ 和 $LUI_t$ 分别为 $t+i$ 年和 $t$ 年区域土地利用强度的平均值。

### 2.3 景观生态风险评价

借鉴前人相关研究<sup>[25]</sup>,本文利用景观干扰度指数和景观脆弱度指数构建黄河流域陕西段景观生态风险评价模型,计算公式如下:

$$ERI_k = \sum_{j=1}^n \frac{A_{kj}}{A_k} (D_j V_j) \quad (3)$$

式中: $ERI_k$ 为风险小区 $k$ 的景观生态风险指数; $n$ 为景观类型的数量; $A_{kj}$ 为风险小区 $k$ 中第 $j$ 类景观的面积; $A_k$ 为风险小区 $k$ 的总面积; $D_j$ 为第 $j$ 类景观的景观干扰度指数; $V_j$ 为第 $j$ 类景观的景观脆弱度指数。 $ERI_k$ 值越大,景观生态风险越高。

通过景观破碎度指数( $F_j$ )、景观分离度指数( $S_j$ )、景观分维数( $FD_j$ )来对 $D_j$ 进行表征<sup>[25]</sup>,计算公式如下:

$$D_i = aF_j + bS_j + cFD_j \quad (4)$$

$$F_j = \frac{n_j}{A_j} \quad (5)$$

$$S_j = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_j}{A}} \times \frac{A}{A_j} \quad (6)$$

$$FD_j = \frac{2 \ln\left(\frac{P_j}{4}\right)}{\ln A_j} \quad (7)$$

式中： $a, b, c$ 分别为各景观指数的权重，且三者之和为1，根据 Zhang 等<sup>[25]</sup>和郑雪慧等<sup>[23]</sup>的研究，分别赋值为0.5, 0.3, 0.2； $n_j$ 为景观类型  $j$  的斑块数量； $A_j$ 为景观类型  $j$  的面积； $A$ 为景观总面积； $P_j$ 为景观类型  $j$  的周长。

结合研究区特点与前人研究<sup>[2]</sup>，对不同景观类型的脆弱性进行赋值，未利用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地分别赋值为6, 5, 4, 3, 2, 1。将各景观类型的脆弱性值进行归一化处理得到  $V_j$ 。

为充分体现景观生态风险的空间异质性，本文从网格尺度展开研究。借鉴相关研究<sup>[26]</sup>，按照研究区平均斑块面积的2~5倍原则，将研究区划分为5 666个5 km×5 km的景观生态风险小区。利用Fragstats 4.2计算得到各风险小区景观生态风险指数后，将结果分配到风险小区的中心点，在ArcGIS 10.2中利用普通克里格法插值得到研究区景观生态风险空间分布图。

### 2.4 耦合协调度模型

通过耦合协调度模型的构建，分析土地利用强度与景观生态风险之间发展演变的交互作用关系。计算公式如下：

$$C = \left\{ \frac{(U_1 \times U_2)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2}\right)^2} \right\} \quad (8)$$

$$T = \epsilon U_1 + \theta U_2 \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中： $C$ 为耦合度，反映了子系统间的相互作用程度； $U_1, U_2$ 分别为土地利用强度和景观生态风险； $T$ 为协调度，反映了子系统间的良性互动程度； $\epsilon$ 和 $\theta$ 为权重系数，反映了两个子系统的相对重要程度，本文中土地利用强度和景观生态风险同等重要，即 $\epsilon = \theta = 0.5$ ； $D$ 为耦合协调度， $D$ 值高说明子系统间呈高水平的相互促进关系， $D$ 值低说明子系统间呈低水平的相互抑制关系。参考相关研究<sup>[27]</sup>，将土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度分为6种类型：重度失调( $0.00 \leq D \leq 0.20$ )、轻度失调( $0.20 < D \leq 0.40$ )、濒临失调( $0.40 < D \leq 0.50$ )、勉强协调( $0.50 < D \leq 0.60$ )、轻度协调( $0.60 < D \leq 0.80$ )和高度协调( $0.80 < D \leq 1.00$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用强度时空分异特征

2000—2020年黄河流域陕西段土地利用强度总体呈逐年上升趋势，全域平均土地利用强度指数由0.05增至0.09，平均年增长率为4.55%。从空间分布来看(图2)，土地利用强度在2000—2020年总体空间分布格局变化不大，在不同年份均呈由北向南递增的趋势，低强度主要分布在陕北的长城沿线风沙区和黄土丘陵沟壑区，二者土地利用强度指数的五年均值分别为0.04, 0.06；高强度则主要分布在南部的关中渭河平原区和商洛山地丘陵区，二者土地利用强度指数的五年均值均为0.10。

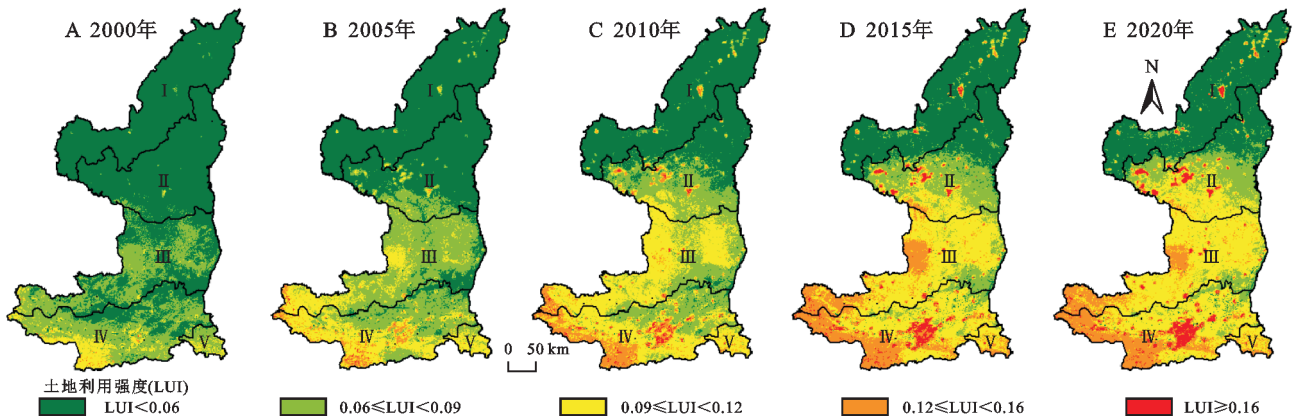


图2 2000—2020年黄河流域陕西段土地利用强度时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of land-use intensity in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020

从时间变化来看(表1)，不同时段土地利用强度平均年增长率呈下降趋势，由2000—2005年的6.41%下降到2015—2020年的0.75%。从空间上来看，2000—2020年不同生态区土地利用强度平均年变化率总体呈由北向南逐渐减小趋势(表1)，依次为黄土丘陵沟壑区>长城沿线风沙区>渭北黄土旱塬区>关中渭河平原区>商洛山地丘陵区；然而，各生

态区的土地利用强度增长率均随时间呈下降趋势(表1)，在2000—2005年的平均年增长率最大，2015—2020年的年均增长率最低。

从各评价指标对土地利用强度增长的贡献率来看(表2)，对黄河流域陕西段土地利用强度增长贡献最大的指标为NPP(86.52%)，其次分别为单位面积GDP(13.40%)和人口密度(0.08%)。这主要是由于

单位面积GDP和人口密度变化较大的区域主要集中在面积较小且人类经济和社会生活强度较大的城镇建设用地上,而在面积广大的耕地、林地、草地等地类上的变化较小,尤其是人口密度。由土地利用数据可知,2000—2020年黄河流域陕西段建设用地占区域总面积比例的平均值仅为2.56%。从不同区域

来看(表2),NPP对各生态区土地利用强度增长的贡献率均明显高于其他指标,尤其是商洛山地丘陵区与渭北黄土旱塬区,NPP贡献率均超过95.00%;单位面积GDP贡献率较高的生态区主要为关中渭河平原区、长城沿线风沙区和黄土丘陵沟壑区;人口密度贡献率最大的生态区为关中渭河平原区。

表1 黄河流域陕西段不同时期土地利用强度年均变化率

Table 1 Average annual change rate of land-use intensity in the Shaanxi section of the Yellow River Basin for different periods

区域	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年	2000—2020年
黄河流域陕西段	6.41	4.70	2.58	0.75	4.55
长城沿线风沙区	7.66	6.85	1.42	1.34	5.61
黄土丘陵沟壑区	9.71	8.05	2.63	2.14	8.05
渭北黄土旱塬区	6.18	3.95	2.87	0.14	4.03
关中渭河平原区	4.95	2.94	2.82	0.25	3.27
商洛山地丘陵区	3.21	2.02	2.36	-0.24	2.06

表2 2000—2020年各评价指标对黄河流域陕西段土地利用强度增长的贡献率

Table 2 Contribution rate of each evaluation index to the growth of land-use intensity in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020

区域	NPP	单位面积GDP	人口密度
黄河流域陕西段	86.52	13.40	0.08
长城沿线风沙区	84.68	15.32	0.00
黄土丘陵沟壑区	86.85	13.13	0.02
渭北黄土旱塬区	95.32	4.66	0.02
关中渭河平原区	76.53	23.20	0.27
商洛山地丘陵区	98.23	1.77	0.00

3.2 景观生态风险时空分异特征

基于自然断点法将黄河流域陕西段的景观生态风险分为5级:低生态风险区( $ERI \leq 0.12$ )、中低生态风险区( $0.12 < ERI \leq 0.16$ )、中生态风险区( $0.16 < ERI \leq 0.20$ )、中高生态风险区( $0.20 < ERI \leq 0.24$ )、高生态风险区( $ERI > 0.24$ )。2000—2020年黄河流域陕西段景观生态风险整体上均处于中生态风险等级,但是其景观生态风险指数呈轻微下降趋势,由2000年的0.19下降到2020年的0.17(图3)。从不同风险等级面积占比来看(图3),2000—2020年高生态风险区和中高生态风险区面积呈持续下降趋势,中生态风险区、中低生态风险区和低生态风险区则均呈持续增加趋势,其中高风险区下降程度最大,降低了92.2%,中生态风险区增加程度最大,增加了80.1%。

2000—2020年黄河流域陕西段景观生态风险时空分布如图4所示。总体来看,除商洛山地丘陵区外,黄河流域陕西段景观生态风险在不同年份均呈由北向南逐渐降低趋势。其中,2000—2020年平均85.5%的

高生态风险区分布在长城沿线风沙区和渭北黄土旱塬区,平均90.8%的中高生态风险区分布在陕北的长城沿线风沙区、黄土丘陵沟壑区和渭北黄土旱塬区,平均65.9%的中生态风险区分布在长城沿线风沙区和黄土丘陵沟壑区,平均81.8%的中低生态风险区和平均97.3%的低生态风险区则均主要分布在渭北黄土旱塬区和关中渭河平原区。从时空分异特征来看,2000—2020年高生态风险区变化最大的区域为商洛山地丘陵区 and 长城沿线风沙区,分别下降了99.1%和97.2%;中高生态风险变化最大的区域为长城沿线风沙区,下降了85.0%;中生态风险区变化最大的区域也是长城沿线风沙区,增加了216.2%;中低生态风险区变化最大的区域为黄土丘陵沟壑区,增加了280.6%;低生态风险区变化最大的区域为关中渭河平原区和渭北黄土旱塬区,分别增加了44.4%和39.7%。

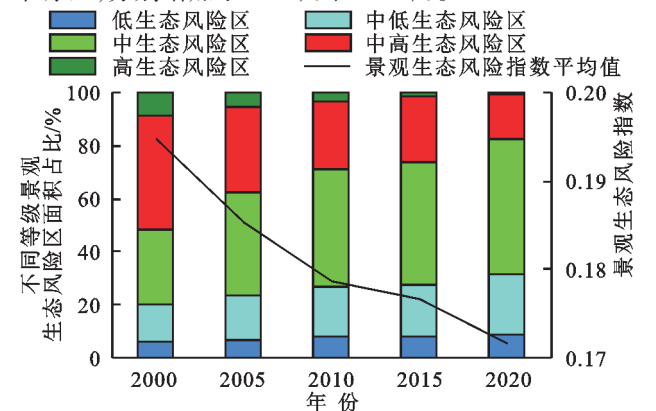


图3 2000—2020年黄河流域陕西段景观生态风险指数变化及不同景观生态风险等级面积占比

Fig. 3 Changes in landscape ecological risks index and area proportion of different landscape ecological risk levels in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020

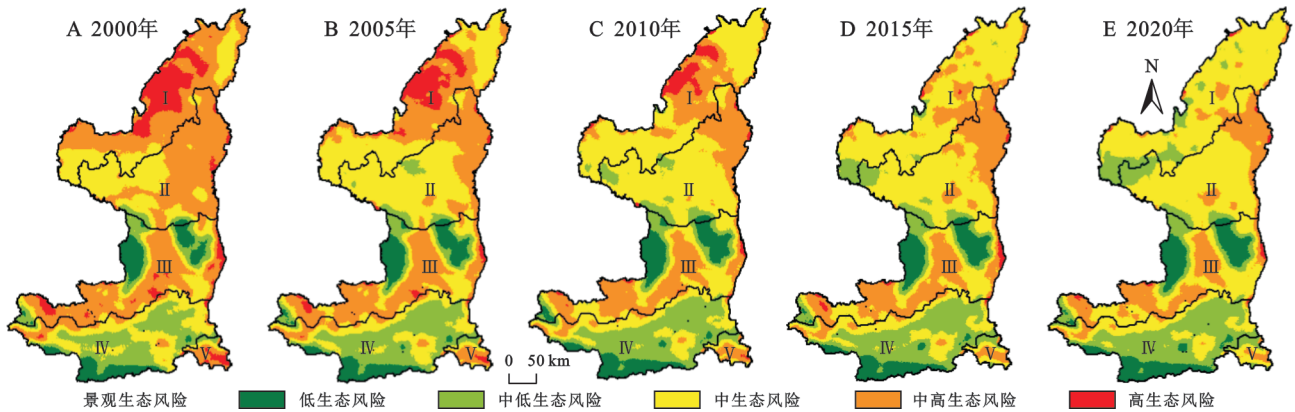


图 4 2000—2020 年黄河流域陕西段景观生态风险时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of landscape ecological risk in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020

### 3.3 土地利用强度与景观生态风险耦合协调特征

2000—2020 年黄河流域陕西段土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度均处于濒临失调水平,但其耦合协调度指数呈升高趋势,由 2000 年的 0.40 上升到 2020 年的 0.46。2000—2020 年土地利用强度与景观生态风险耦合协调度时空变化如图 5 所示。从不同等级面积占比来看,研究区土地利用强度与景观生态风险耦合协调度主要分布在轻度失调、濒临失调和勉强协调等级,三者占区域总面积的比例在 2000—2020 均超过 98.8%。2000—2020 年不同等级面积变化呈现高耦合协调度等级区面积占比的增加和低耦合协调度等级区面积占比的减少。从空间

分布来看,研究区的耦合协调度在 2000—2020 年均呈由北向南增加的趋势。其中,轻度失调区主要分布在长城沿线风沙区和渭北黄土旱塬区,濒临失调区在黄土丘陵沟壑区、关中渭河平原区和渭北黄土旱塬区均有较大分布,轻度协调区则主要分布在渭北黄土旱塬区和商洛山地丘陵区。从各生态区耦合协调度等级面积变化来看,北部的长城沿线风沙区和黄土丘陵沟壑区主要表现为轻度失调区的减少和濒临失调区的增加,中部渭北黄土旱塬区和关中渭河平原区主要表现为濒临失调区的减少和勉强协调区的增加,而南部的商洛山地丘陵区各耦合协调度等级面积则均呈轻微波动趋势。

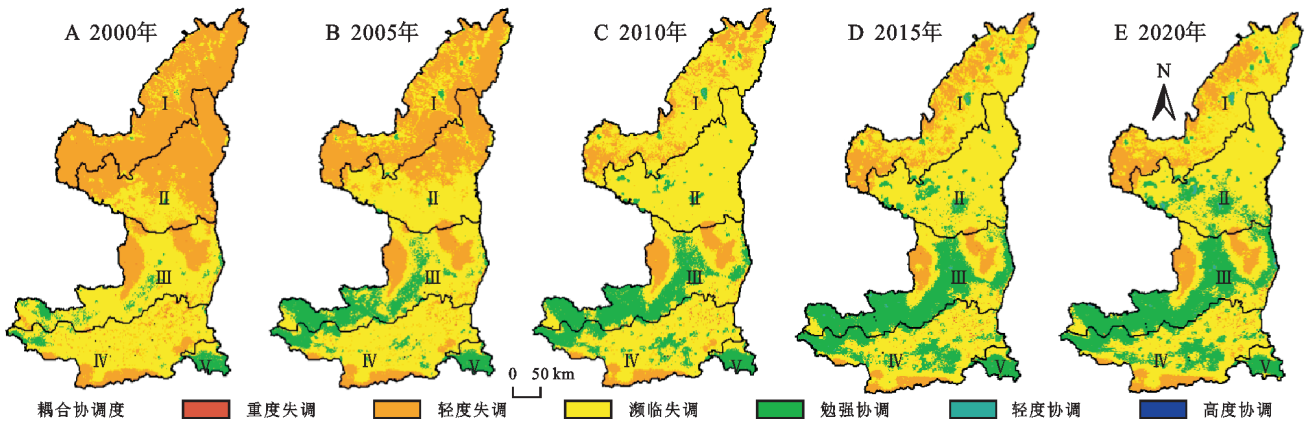


图 5 2000—2020 年土地利用强度和景观生态风险耦合协调度时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of the coupling coordination degree between land-use intensity and landscape ecological risk from 2000 to 2020

利用 20 周期移动平均法生成黄河流域陕西段土地利用强度、景观生态风险及二者耦合协调度移动平均趋势线(图 6)。总体来看,土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度随土地利用强度的增加呈明显的上升趋势。基于土地利用强度变化可将图 6 划分为 2 个阶段:(1) 土地利用强度  $\leq 0.13$ , 该阶段耦合协调度水平相对较低,随土地利用强度增加,景观生态风险指数呈轻微下降趋势;(2) 土地利用强度  $>$

0.13, 该阶段耦合协调度水平相对较高,随着土地利用强度的增加,景观生态风险呈迅速上升趋势。以上结果表明,当土地利用强度  $\leq 0.13$  时,可以适当增加土地利用强度而不增加区域景观生态风险;而当土地利用强度  $> 0.13$  时,土地利用强度与景观生态风险之间会由相互抑制转变为相互促进,因此在继续提升土地利用强度过程中需要严格管控景观生态风险,以实现土地资源的可持续利用。

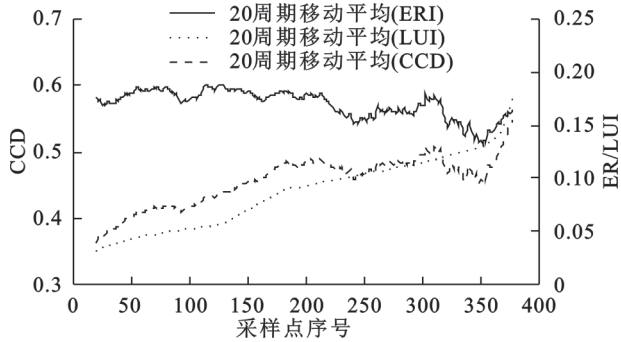


图6 黄河流域陕西段土地利用强度与景观生态风险及其耦合协调度移动平均趋势线

Fig. 6 Moving average trend line of land-use intensity, landscape ecological risk, and their coupling coordination degree in the Shaanxi section of the Yellow River Basin

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

4.1.1 土地利用强度与景观生态风险的时空分异特征 2000—2020年黄河流域陕西段土地利用强度呈逐年上升趋势,这一方面是由于退耕还林还草工程、天然林保护工程等一系列国家重大生态工程的实施加大了流域土地的生态利用强度,另一方面由于西部大开发战略、关中平原城市群规划等的实施导致了流域土地生产、生活利用强度的增大。对黄河流域陕西段土地利用强度增长贡献最大的指标为NPP, GDP和人口密度的贡献相对较小。这主要是由于GDP和人口密度对土地利用强度增长贡献较大的区域主要集中在面积占比较小的建设用地上导致的。张佰发等<sup>[28]</sup>研究指出,黄河流域生态用地和耕地占比的多年均值高达97.7%,而建设用地面积占比仅2.32%,且主要分布在城市群地区。研究区土地利用强度平均年变化率由北向南呈逐渐降低趋势,这主要是由于土地利用强度变化主要受到NPP影响,而对NPP影响较大的退耕还林还草、天然林保护工程等重大生态工程主要位于陕北地区<sup>[29]</sup>。

2000—2020年黄河流域陕西段景观生态风险呈轻微下降趋势,尤其是主要分布于陕北长城沿线风沙区、黄土丘陵沟壑区和渭北黄土旱塬区的高生态风险区和中高生态风险区。这可能主要是由于国家退耕还林还草、天然林保护等生态工程的大规模实施造成的,说明植被恢复能够降低区域景观生态风险<sup>[13]</sup>。关中渭河平原区的景观生态风险虽然总体呈下降趋势,但在各生态区中的下降程度最低。这主要是由于作为国家主体功能区中的优先发展区<sup>[30]</sup>,关中渭河平原区工业化和城镇化发展迅速,城镇的迅速扩张和人类活动的加剧导致景观生态风险的增大<sup>[25]</sup>,在一定程度上抵消了植被恢复对景观生态风

险的降低。以上结果表明,植被恢复对景观生态风险的影响大于城镇化,这与傅微等<sup>[13]</sup>在陕北的研究结果一致。

4.1.2 土地利用强度与景观生态风险的空间关联与耦合协调特征 2000—2020年土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度总体上呈升高趋势,且主要分布在轻度失调、濒临失调和勉强协调等级。由耦合协调度与土地利用强度的时空分布图(图5与图2)对比可知,二者由北向南均呈增加趋势,说明随着人类土地利用强度的增加,耦合协调度呈增加趋势。这与图6结果一致,当土地利用强度 $\leq 0.13$ 时,随着土地利用强度的提高,景观生态风险呈轻微下降趋势,说明二者主要呈相互抑制的低耦合协调关系;当土地利用强度 $> 0.13$ 时,二者之间逐渐转变为相互促进的高耦合协调关系,随着土地利用强度的提高景观生态风险也呈明显升高趋势。综合考虑研究区土地利用强度变化以NPP驱动型为主可知,在土地利用强度较低的地区( $LUI \leq 0.13$ ),通过增加区域NPP来适度提高土地利用强度不仅不会增加景观生态风险,还会使景观生态风险呈轻微下降趋势;但在土地利用强度较高的地区( $LUI > 0.13$ ),进一步提高其土地利用强度会导致景观生态风险的升高。

### 4.2 结论

本文以黄河流域陕西段为案例区,在分析2000—2020年区域土地利用强度与景观生态风险时空分异特征的基础上,利用双变量空间自相关分析、耦合协调度模型,进一步探究了二者之间的空间关联与耦合协调特征。得出以下结论:

(1) 2000—2020年黄河流域陕西段土地利用强度呈逐年上升趋势,空间上由北向南呈递增趋势。不同指标对土地利用强度变化的贡献率依次为 $NPP >$ 单位面积GDP $>$ 人口密度。

(2) 景观生态风险总体上处于中生态风险等级,2000—2020年呈轻微下降趋势,主要表现为高生态风险区和中高生态风险区面积持续下降,中生态风险区和中低生态风险区持续增加;空间上,由北向南呈递减趋势。

(3) 土地利用强度与景观生态风险的耦合协调度总体上处于濒临失调水平,2000—2020年呈升高趋势。研究区耦合协调度等级主要处于轻度失调、濒临失调和勉强协调3个水平。空间上,由北向南总体上呈递增趋势,2000—2020年耦合协调度由北向南呈递减趋势。在低土地利用强度地区( $LUI \leq 0.13$ ),土地利用强度与景观生态风险之间呈相互抑制的低耦合协调关系;在高土地利用强度地区( $LUI > 0.13$ ),土地

利用强度与景观生态风险之间呈相互促进的高耦合协调关系。

#### 参考文献(References)(References):

- [1] Tilman D, Balze C, Hill J, et al. From the cover: global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 220-225.
- [2] 方林, 方斌, 刘艳晓, 等. 长三角地区景观生态风险与人类活动强度的响应及其时空关联[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 210-219.  
Fang L, Fang B, Liu Y X, et al. Scale response and spatiotemporal correlations between landscape ecological risk and human activity intensity in the Yangtze River Delta Region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22): 210-219.
- [3] 刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 21世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1130-1143.  
Liu F, Yan H M, Liu J Y, et al. Spatial pattern of land use intensity in China in 2000 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1130-1143.
- [4] Shen F X, Yang L, Zhang L, et al. Quantifying the direct effects of long-term dynamic land use intensity on vegetation change and its interacted effects with economic development and climate change in Jiangsu, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325(Pt B): 116562.
- [5] Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, et al. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(45): 28140-28149.
- [6] 陈瑜琦, 李秀彬. 1980年以来中国耕地利用集约度的结构特征[J]. *地理学报*, 2009, 64(4): 469-478.  
Chen Y Q, Li X B. Structural change of agricultural land use intensity and its regional disparity in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 469-478.
- [7] 宋恒飞, 辛良杰. 中国耕地利用强度分化特征及影响因素研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 212-222.  
Song H F, Xin L J. Differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land use intensity in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(16): 212-222.
- [8] Ye S J, Song C Q, Shen S, et al. Spatial pattern of arable land-use intensity in China [J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104845.
- [9] 孙菲菲, 张增祥, 左丽君, 等. 土地利用强度研究进展、瓶颈问题与前景展望[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1259-1271.  
Sun F F, Zhang Z X, Zuo L J, et al. Current bottlenecks and prospects of the land use intensity [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1259-1271.
- [10] Zhang P Y, Yang D, Qin M Z, et al. Spatial heterogeneity analysis and driving forces exploring of built-up land development intensity in Chinese prefecture-level cities and implications for future Urban Land intensive use [J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104958.
- [11] Xia C Y, Dong Z, Wu P, et al. How urban land-use intensity affected CO<sub>2</sub> emissions at the county level: Influence and prediction [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109601.
- [12] 陈艳红, 于婧, 聂艳, 等. 土地利用水平与景观生态风险的空间耦合: 以十堰市为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 285-91.  
Chen Y H, Yu J, Nie Y, et al. Spatial coupling between land use level and landscape ecological risk: taking Shiyan City as an example [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 285-91+2.
- [13] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 等. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 290-299.  
Fu W, Lü Y H, Fu B J, et al. Landscape ecological risk assessment under the influence of typical human activities in Loess Plateau, northern Shaanxi [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 290-299.
- [14] 刘强, 尉飞鸿, 夏雪, 等. 1980—2020年窟野河流域土地利用景观格局演变及其驱动力[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 335-341.  
Liu Q, Yu F H, Xia X, et al. Landscape pattern evolution and driving forces of land use in kuye river basin from 1980 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 335-341.
- [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(4): 265-274.  
Liu X Z, Li X S, Jiang D M. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(4): 265-274.
- [16] 张师赫, 李宝银, 林玉英, 等. 基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究: 以福建省为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 174-182.  
Zhang S H, Li B Y, Lin Y Y, et al. Research on landscape ecological risk assessment and driving factors based on ecosystem services: a case study of Fujian Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 174-182.
- [17] 尉芳, 刘京, 夏利恒, 等. 基于LUCC的陕西渭北旱塬区景观生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1963-1974.

- Wei F F, Liu J, Xia L H, et al. Landscape ecological risk assessment in Weibei dryland region of Shaanxi Province based on LUCC[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4):1963-1974.
- [18] 刘亚香,李阳兵,易兴松,等. 贵州典型坝子土地利用强度空间演变及景观格局响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11):3691-3702.
- Liu Y X, Li Y B, Yi X S, et al. Spatial evolution of land use intensity and landscape pattern response of the typical basins in Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11):3691-3702.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农用地质量分等规程: GB/T 28407—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Regulation for Gradation on Agriculture Land Quality: GB/T 28407—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [20] 肖红波,王道龙,王济民,等. 从世界工业化、城镇化和农业现代化发展规律探讨中国“三化同步”的标准及发展路径[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(2):133-138.
- Xiao H B, Wang D L, Wang J M, et al. A study on standards and development paths of China's three synchronization from development law of industrialization, urbanization and agricultural modernization of world[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34(2): 133-138.
- [21] 王艳飞,张定祥,李婷婷. 京津冀建设用地人口密度变化格局及影响机制[J]. *资源科学*, 2023, 45(4):872-883.
- Wang Y F, Zhang D X, Li T T. Spatial pattern and mechanism of population density change in the built-up areas of the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Resources Science*, 2023, 45(4):872-883.
- [22] 徐勇,黄海艳,戴强玉,等. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(5):2704-2714.
- Xu Y, Huang H Y, Dai Q Y, et al. Spatial-temporal variation in net primary productivity in terrestrial vegetation ecosystems and its driving forces in southwest China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5):2704-2714.
- [23] 杜书栋,关亚楠,李欣,等. 基于熵权法改进的综合污染指数的水质评价:以白云湖为例[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1):205-212.
- Du S D, Guan Y N, Li X, et al. Water quality evaluation with improved comprehensive pollution index based on entropy weight method: A case study of Baiyun Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 205-212.
- [24] 杨清可,段学军,王磊,等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(1):97-106.
- Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River Delta [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(1):97-106.
- [25] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change[J]. *Applied Geography*, 2020, 117:102174.
- [26] 杜军,赵胜朝,邱士可,等. 2000—2015年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1):279-284, 291.
- Du J, Zhao S C, Qiu S K, et al. Land use change and landscape ecological risk assessment in Loess Hilly Region of western Henan Province from 2000 to 2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1):279-284, 291.
- [27] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(1):105-112.
- Liu Y B, Li R D, Song X F. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 105-112.
- [28] 张佰发,苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. *资源科学*, 2020, 42(3):460-73.
- Zhang B F, Miao C H. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3):460-73.
- [29] Qian C, Shao L Q, Hou X H, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend across distinct local landscapes under China's Grain to Green Program: A case study in Shaanxi Province[J]. *Catena*, 2019, 183:104182.
- [30] 王亚飞,樊杰. 基于中国主体功能区划的国家与省级点-轴结构解析[J]. *地理研究*, 2019, 38(7):1651-1663.
- Wang Y F, Fan J. Spatial analysis of national-provincial pole-axis structure based on major function zoning in China [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(7): 1651-1663.